

발 간 등 록 번 호

11-1613000-002860-01



제2종
철도차량운전면허 표준교재



운전 이론 일반



국토교통부



제2종
철도차량운전면허 표준교재



운전 이론 일반



국토교통부

발간사

근대화의 여명기에 출발한 한국 철도의 시작은 일제 강점기와 한국전쟁의 격변기를 거치면서도 꾸준히 발전하여 산업화 시대의 중추적 역할을 감당하여 왔습니다. 초창기 증기기관차로 시작한 동력기관차는 디젤기관차와 산업선의 전기기관차로 발전하여, 현재 고속철도의 대중화 시대로 접어들고 있습니다. 국가경제의 성장은 인구의 대도시 집중과 교통수요의 증가를 가져왔으며, 이에 새로운 대중교통 체계를 필요로 함에 따라, 1974년에 전기동차를 도입하여 우리나라 최초의 서울지하철 1호선과 인천과 수원을 연결하는 수도권 전철을 개통하게 되었습니다. 이후 수도권 지하철망의 확충과 더불어 지방광역도시인 부산, 인천, 대구, 광주, 대전에서도 지하철이 개통함에 따라 바야흐로 대중교통의 도시철도 시대가 도래하였으며, 현재는 지역별 경량 전철과의 연계 및 도로 교통과의 환승체계를 이용하여 세계에서 가장 우수한 도시교통 네트워크 시스템을 운영할 수 있게 되었습니다.

도시철도의 확대와 고속철도의 대중화 등으로 안전한 열차 운영을 필요로 하였기 때문에, 국토교통부에서는 2005년 철도안전법을 새롭게 제정하면서 안전운행에 가장 중요한 역할을 담당하는 기관사 면허를 국가자격으로 전환해 철도차량 운전면허제도를 시행하여 운전면허를 가진 사람만이 철도차량 운전 업무를 수행할 수 있도록 하였습니다. 철도차량 운전면허의 종류도 고속철도차량, 제1종 전기차량, 제2종 전기차량, 디젤차량, 철도장비 차량, 노면전차 6개 분야로 세분화하여 차량 종류별 전문 기관사를 양성하여 철도차량 안전운행을 위해 최선을 다하고 있습니다.

철도차량 운전면허 취득의 기회는 모든 국민에게 개방되어 있지만, 사전 준비과정이 필요합니다. 제2종 전기차량 운전면허는 국가로부터 지정된 철도차량 운전교육훈련 기관에서 철도안전법령에 규정된 교육을 받고 시험에 합격하면 취득할 수 있는 면허입니다. 제2종 전기차량 운전면허 교육의 모델은 수도권 광역철도인 한국철도공사 4호선의 운행구간과 전기동차를 기본으로 하고 있습니다. 지금까지는 대부분의 교육훈련기관이 한국철도공사와 서울교통공사 인재개발원의 교육 교재를 기본으로 각

교육훈련기관 자체로 집필된 교재를 사용하여 왔습니다만, 철도차량 운전을 위한 기본 소양과 기초지식을 강화하고 교육생들이 보다 쉽게 공부할 수 있는 교재의 발간 요구가 있어 국토교통부에서 제2종 전기차량 운전면허 교육과정에 필요한 표준교재를 개발 하였습니다. 표준교재는 철도관련법과 운전관련규정, 도시철도시스템, 전기동차의 구조 및 기능, 운전 이론, 비상시 조치, 기능 교육에 대한 내용으로 구성되어 있으며, 도시 철도 운전업무 종사자가 갖추어야 할 자질로서 기본적인 내용부터 전문적인 부분까지 학습할 수 있도록 구성되어 있습니다. 철도관련 교육훈련기관 및 학교는 물론 현업에서 제2종 철도차량 운전업무에 종사하고 있는 기관사분들도 이 교재를 활용함으로써 향후 철도인의 안전의식과 기술적 자질을 높일 수 있을 것으로 기대하고 있습니다.

도시의 교통망은 사회의 유기체적 조직과 같아 계속 변화되고 발전을 추구합니다. 이러한 변화와 발전에 도시철도는 대중교통의 핵심이며, 이미 포화상태에 이른 도로 교통의 해결점입니다. 철도운영기관에서의 근무를 희망하는 교육생 여러분께서 이 표준 교재를 열심히 공부하여 원하는 목표를 달성하시기 바라며, 우리나라의 도시철도를 포함한 모든 철도분야에 도움이 되어 한국 철도가 세계화로 나아가는 큰 발전을 이룰 수 있기를 희망합니다.

아울러 표준교재 제작에 참여하신 집필진과 검토진, 한국교통안전공단의 편찬진 여러분의 노고에 감사의 말씀을 드리며 국민에게 봉사하며 안전한 한국 철도의 위상이 더욱 확립 되도록 최선을 다하고 노력 하겠습니다.

2020년 12월

철도안전정책관 강 희 업

표준교재 이용 및 저작권 안내

표준교재의 저작권

이 표준교재는 「저작권법」 제24조의2에 따른 국토교통부의 공공저작물로서 별도의 이용 허락 없이 자유이용이 가능합니다.

다만, 이 표준교재는 “공공저작물 자유이용허락 표시 기준(공공누리, KOGL, www.kogl.or.kr) 제2유형  ”에 따라 공개하고 있으므로 다음 사항을 준수하여야 합니다.

1. 출처의 명시
2. 상업적 이용 금지

표준교재의 이용 및 주의사항

이 표준교재는 철도운전업무 종사자에게 필요한 기본적인 지식을 모아 제시한 것이며, 철도종사자를 양성하는 전문교육기관 등에서는 이 표준교재에 포함된 내용 이상을 해당 교육과정에 반영하여 활용할 수 있습니다.

또한, 이 표준교재는 「저작권법」 및 「공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률」에 따른 공공저작물 또는 공공데이터에 해당하므로 관련 규정에서 정한 범위에서 누구나 자유롭게 이용이 가능합니다.

그리고 「공공데이터의 제공 및 이용 활성화에 관한 법률」에 따라 이 표준교재를 발행한 국토교통부는 표준교재의 품질, 이용하는 사람 또는 제3자에게 발생한 손해에 대하여 민사상·형사상의 책임을 지지 아니합니다.

표준교재의 정정 신고

이 표준교재를 이용하면서 다음과 같은 수정이 필요한 사항이 발견된 경우에는 철도자격관리시스템(lic.kotsa.or.kr/rlm/)으로 신고하여 주시기 바랍니다.

- 철도안전법 등 관련 규정의 개정으로 내용 수정이 필요한 경우
- 기술된 내용이 보편 타당하지 않거나, 객관적인 사실과 다른 경우
- 오탈자 및 앞뒤 문맥이 맞지 않아 내용과 의미 전달이 곤란한 경우
- 관련 삽화 등이 누락되거나 추가적인 설명이 필요한 경우

※ 주의 : 표준교재 내용에는 오류, 누락 및 관련 규정 미반영 사항 등이 있을 수 있으므로
의심이 가는 부분은 반드시 정확성 여부를 확인하시기 바랍니다.

목차

CONTENTS

1장 개요 1-1

1.1 운전 이론의 정의	1-2
1.2 운전 이론의 용어정리	1-2
1.3 운전 이론의 기본 3요소	1-6
1.4 운전 이론의 응용	1-6

2장 기초 공학 이론 2-1

2.1 단위와 물리량	2-2
2.2 운동과 힘	2-14
2.3 일과 에너지	2-24
2.4 전기	2-32

3장 전기기기 3-1

3.1 철도차량 전기기기의 분류	3-2
3.2 변압기	3-8
3.3 유도전동기성	3-10

4장 운전 성능 4-1

4.1 점착력과 점착 계수	4-2
4.2 견인력	4-7
4.3 제동장치	4-13
4.4 제동력	4-25
4.5 제동 거리	4-29

5장 열차 저항 5-1

5.1 열차 저항의 분류	5-2
---------------	-----

6장	선로 공학	6-1
6.1	용어의 정의	6-2
6.2	최소 곡선 반지름	6-4
6.3	설정 캔트 및 부족 캔트	6-5
6.4	완화곡선	6-6
6.5	선로의 최대 기울기	6-7
6.6	종곡선 간 직선 선로의 최소 길이	6-8
6.7	슬랙	6-8
7장	소음과 진동	7-1
7.1	소음	7-2
7.2	진동	7-5
8장	운전 계획	8-1
8.1	운전 계획	8-2
8.2	열차 운행 도표	8-5
8.3	선로 용량의 산정	8-10
9장	디젤기관	9-1
9.1	마력	9-2
9.2	효율	9-3
9.3	연료 소비율	9-4
9.4	배기량	9-5
9.5	압축비	9-5
9.6	제동 압력	9-6
9.7	특성 견인력	9-9
9.8	차륜공전	9-9
9.9	특수 운전 취급법	9-10

1장

개요



- 1.1 운전 이론의 정의
- 1.2 운전 이론의 용어정리
- 1.3 운전 이론의 기본 3요소
- 1.4 운전 이론의 응용



1장 개요

학습목표

- ✓ 철도의 사명 및 운전 이론의 정의에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 운전 이론의 기본 3요소에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 운전 이론의 응용 및 운전 계획에 필요한 사항에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 견인력, 열차 저항, 제동력, 점착(마찰) 계수, 열차 운행 도표, 운전 계획, 무인 운전

1.1 운전 이론의 정의

철도의 사명은 여객과 화물을 약속한 시간 내 안전하게 목적지까지 수송하는 데 있다. 그러므로 운전 이론은 철도의 사명을 합리적이고 경제적으로 완수하기 위한 운전 기술의 기본이 된다.

1.2 운전 이론의 용어정리

- (1) 견인정수 : 운전 속도 종별에 따라 정한 소정의 속도 이상으로 안전하게 운행할 수 있는 동력차의 최대 견인(추진 운전 포함)능력을 말한다.
- (2) 고압 : 직류에 있어서는 1500[V], 교류에 있어서는 1000[V]를 초과하여, 7,000[V] 이하의 전압을 말한다.
- (3) 공차 중량(W_0) : 승객과 화물이 없는 차량의 중량으로서 주행에 필요한 추가 중량(물, 모래 등)은 제외된다.
- (4) 공칭전압 : 그 전선로를 대표하는 선간전압을 말한다.

- (5) 구동장치 : 주 전동기의 회전력을 차륜에 전달하는 장치이며, 주 전동기의 지지방식이나 구동력의 전달 방법 등에 따라 분류된다.
- (6) 구조체 : 차체를 구성하고 있는 차체 프레임, 측면 구조 틀, 지붕 구조 등 주요 구조부를 말한다.
- (7) 궤도회로 : 레일을 전기회로의 일부로 사용하여 레일상의 열차를 검지하거나 레일을 전송로로 하여 지상에서 차상에 정보를 전달하는 회로를 말한다.
- (8) 기초 제동장치 : 철도차량의 마찰 제동으로 제동 실린더에서 발생한 힘을 제륜자 및 디스크에 전달하는 장치 등의 기구를 말한다.
- (9) 답면 구배 : 열차의 곡선 통과 시 좌우 차륜의 회전 반경 차이를 가지게 하는 것으로서, 열차를 원활하게 곡선을 통과시켜 윤축에 중력 복원력을 가지게 할 목적으로 차륜 답면에 설치되는 원추 모양 또는 원호 모양의 경사를 말한다.
- (10) 대차 : 차체를 지지하고 선로 방향으로 주행 또는 제동할 수 있게 하는 주행 장치이다.
- (11) 도시철도차량 : 도시교통의 원활한 소통을 위하여 도시교통 권역에서 운영하는 철도차량을 말하며, 고무 차륜 차량 · 모노레일 · 노면전차 · 선형 유도전동기 · 자기부상열차 등 경전철 차량을 포함한다.
- (12) 동력차 : 동력에 의하여 선로를 이동하는 것을 목적으로 제작된 기관차 및 동차(제어차를 포함한다)를 말한다.
- (13) 만차 중량(W_2) : 주행이 가능한 정비 중량(W_1)에 승객이 모두 승차 또는 화물이 모두 적재된 상태이며, 휴식 공간 등을 점유한 승객은 제외한다.
- (14) 부수차(T, TC) : 원동기를 가지지 않은 차량을 말한다.
- (15) 신호 제어 설비 : 신호기 장치, 선로 전환기 장치, 궤도회로 장치, 폐색장치, 연동장치, 건널목 보안장치, 열차 자동 정지 장치(ATS), 열차 자동 제어장치(ATC), 열차 집중 제어장치(CTC), 신호 원격제어장치(RC), 열차 자동 방호 장치(ATP), 통신 기반 열차 제어 시스템(CBTC), 고속철도 신호 설비, 고속철도 안전 설비 등을 말하며, 열차 또는 차량의 안전 운행과 수송 능력 향상을 목적으로 설치한 종합적인 시설을 말한다.
- (16) 열차 : 선로를 운행할 목적으로 열차번호를 부여받은 철도차량을 말한다.
- (17) 운전 선도 : 평상시의 열차 운전에 있어서 동력차의 성능 및 운전 조건을 고려하여 실제 운전의 표준이 되도록 작성한 “거리-속도 곡선”, “거리-시간 곡선”, “거리-온도 상승 곡선”, “거리-연료(전력) 소비량 곡선” 등 열차의 운전 상태를 나타낸 선도를 말한다.
- (18) 운전 간격 : 선행 열차와 후속 열차 간의 운전을 위한 배차 시간 간격을 말하며, 운전 시격의

- 최소값을 최소 운전 간격이라 한다.
- (19) 유효장(有效長) : 선로에 열차 또는 차량을 수용함에 있어서 그 선로의 수용 가능 최대 길이를 말한다.
 - (20) 윤중(輪重) : 철도차량이 수평 상태에 있는 경우 1개의 차륜이 수직으로 궤도를 누르는 중량을 말한다.
 - (21) 윤중(輪重) 감소량 : 철도차량의 정차 상태에서 측정된 정지 윤중과 주행 중에 측정된 윤중치를 뺀 후 정지 윤중으로 나눈 값을 말한다.
 - (22) 일반 철도차량 : 선로를 200km/h 미만의 최고 운행 속도로 주행할 수 있는 철도차량을 말한다.
 - (23) 저압 : 직류에 있어서는 1500[V] 이하, 교류에 있어서는 1000[V] 이하의 전압을 말한다.
 - (24) 저크 : 가속도 또는 감속도의 시간 변화율이며, 위치의 시간에 의한 3차 미분치이다.
 - (25) 전기동차 전용선 : 도시교통 처리를 주목적으로 전기동차가 운행되는 선로로서, 디젤 기관 등에 따른 여객열차·화물열차 및 간선형 전기동차 운행에는 적합하지 않게 건설되는 선로를 말한다.
 - (26) 전기 차량 : 외부 전원을 동력으로 하여 선로를 이동할 목적으로 제작된 철도차량을 말한다.
 - (27) 점착력 : 차륜이 레일에서 미끄러지지 않고 회전을 계속할 수 있는 마찰력을 말한다.
 - (28) 정격전압 : 전기 사용 기계·기구·배선 기구 등에서 사용상 기준이 되는 전압을 말한다.
 - (29) 정비 중량(W_1) : 운행 준비 시의 차량 중량으로서, 공차 중량(W_0)에 승무원(기관사, 열차 승무원 등)이 모두 승차한 상태를 말한다.
 - (30) 주행저항 : 열차가 직선 평탄 구간을 달릴 때의 저항으로서, 차륜과 레일 사이의 구름 마찰저항, 차축상의 마찰저항, 차체의 공기저항이 주된 것이다.
 - (31) 집전장치 : 전차선과 접촉하여 전기차가 전기를 공급받을 수 있도록 하는 장치로, 집전 방식에 따라 일반적으로 궤도 상부에 있는 전차선에서 전기를 공급받는 팬터그래프(Pantograph)와 급전용 궤도인 제3궤조에서 전기를 공급받는 집전 슈(Collector shoe) 등이 있다.
 - (32) 차량 : 승객 또는 화물 등의 운송을 목적으로 열차를 구성하는 철도차량 1(량)칸을 말한다.
 - (33) 차량한계 : 차량의 안전을 확보하기 위하여 궤도 위에 정지된 상태에서 측정한 차량의 길이·너비 및 높이의 한계를 말한다.
 - (34) 차체 : 주행 장치(Bogie)에 의하여 지지되며 승객 및 운전자가 탑승하거나 화물 및 운전용 기기 등을 적재하는 철도차량 부분의 총칭을 말한다.
 - (35) 초과 중량(W_2) : 다른 열차가 고장 난 경우 고장 차량의 모든 승객을 탑승 또는 모든 화물을 적재한 최대 열차 중량을 말한다.

- (36) 최대 사용 전압 : 보통의 사용 상태에서 그 회로에 가하여지는 선간전압의 최대치를 말한다.
- (37) 축중(軸重) : 철도차량이 수평 상태에 있는 경우 1개의 차축에 연결된 모든 차륜의 윤중을 합한 것을 말한다.
- (38) 탈선계수 : 차륜의 횡압과 윤중과의 비율을 의미하며, 횡압이 증가하여 탈선계수가 증가하면 탈선의 우려가 있기 때문에 탈선에 대한 안전 척도로 사용된다.
- (39) 특성 견인력 : 동력을 가진 철도차량(이하 “동력차”라 한다)의 특성곡선에서 산출하여 운전 계획 수립 시에 적용하는 견인력을 말한다.
- (40) 특수차 : 특수 사용을 목적으로 제작된 사고 복구용 차 · 작업 차 · 시험 차 등으로서 동력차와 객차 및 화차에 속하지 아니하는 철도차량을 말한다.
- (41) 폐색구간 : 2칸 이상의 열차를 동시에 운전시키지 않기 위하여 정한 구간을 말하며, 자동 구간에서는 신호기 상호 간, 비자동 구간에서는 장내신호기와 인접 역 장내신호기 간을 말한다.
- (42) 표준 운전 시간 : 열차가 제1호의 견인정수를 연결하고 운전하는 경우 정거장 간을 운행하는데 소요되는 최소 시간을 말한다.
- (43) 활주 : 제동 시 제동력이 점착력보다 클 때에 발생하는 차륜과 레일 사이의 미끄럼을 말한다.
- (44) 회생제동 : 전기제동의 하나로 주 전동기를 발전기로 변환하여 제동력을 얻고, 발생하는 전력은 전차선을 거쳐서 반송하는 제동 형식을 말한다.
- (45) 횡압 : 정상적인 운행속도와 선로의 수직적 불규칙성 하에서의 철도차량이 레일에 미치는 가로 방향의 힘을 말한다.
- (46) 횡풍 : 열차의 측면에 부는 바람이다.
- (47) 운전 보안장치 : 열차의 안전 운행에 필요한 각종 장치로서, 다음 각 항목에 해당하는 장치를 말하며, 가 목부터 다 목까지를 통칭하여 “열차 제어장치”라 한다.
- 1) 열차 자동 정지 장치(ATS: Automatic Train Stop) : 열차가 지상에 설치된 신호기의 현시 속도를 초과하면 열차를 자동으로 정지시키는 장치를 말한다.
 - 2) 열차 자동 제어장치(ATC: Automatic Train Control) : 선행 열차의 위치와 선로 조건에 의한 운행 속도를 차상으로 전송하여 운전실 내 신호 현시창에 표시하며, 열차의 실제 운행 속도가 이를 초과하면 자동으로 감속시키는 장치를 말한다.
 - 3) 열차 자동 방호 장치(ATP: Automatic Train Protection) : 열차 운행에 필요한 각종 정보를 지상 장치를 통해 차량으로 전송하면, 차량의 신호 현시창에 표시하여 열차의 속도를 감시하여 일정 속도 이상을 초과하면 자동으로 감속 · 제어하는 장치를 말한다.

(48) 전기동차 : 전기를 동력원으로 견인전동기를 구동하며, 객실을 겸비하고 편성된 열차 전·후 방에서 운전과 제어가 가능한 차량을 말하며, 전기동차는 다음과 같이 구분한다.

- 1) 일반형 전기동차 : 도시 통근형 전기동차로, 제어 방식에 따라 저항제어 전기동차, 인버터 제어 전기동차로 구분한다.
- 2) 간선형 전기동차 : 도시와 도시 간 운행을 목적으로 위생 설비 등의 편의 설비를 갖추고, 시속 150킬로미터 이하로 주행하는 전기동차를 말한다.
- 3) 준고속형 전기동차 : 위생 설비 등의 편의 설비를 갖추고 시속 151킬로미터 이상 200킬로미터 미만으로 주행하는 전기동차를 말한다.

1.3 운전 이론의 기본 3요소

운전 기술의 기본 3요소에는 견인력 및 열차 저항, 그리고 제동력이 있다.

첫 번째, 견인력은 동력차가 끌어당기는 힘으로서 동력차의 경우 레일의 점착(마찰) 계수와 동력차의 구(기)동력, 주행저항의 영향을 받는다.

두 번째, 열차 저항은 동력차가 견인력을 발휘하여 선로 위를 주행 시 동력차의 진행 반대 방향으로 발생하는 힘을 말한다.

세 번째, 제동력은 열차 운전 속도를 제어하여 목표 지점에 정확하게 정지시킬 수 있는 힘을 말한다.

1.4 운전 이론의 응용

운전 이론의 기본 3요소를 기초로 하여 운전 계획을 수립하게 된다. 즉, 운전 계획을 수립하려면 정확한 수송 수요 조사 및 측정을 기초로 열차를 설정하고 편성 칸 수, 운행 간격 등을 결정한다. 이러한 절차에 의해서 수송 계획에 필요한 열차 운행 도표가 작성된다. 이렇게 작성된 열차 운행 도표를 기준으로 최근에 건설된 도시철도는 수송력 향상 및 경제성, 안전성을 만족하는 운전 보안 설비를 갖추고 있기 때문에 무인 운전 및 1인 운전이 가능하다.

열차 운행 도표 작성에 필요한 운전 계획의 범위는 다음과 같다.

(1) 열차 계획

열차 편성 칸 수, 수송량 및 수송력, 열차 속도, 운전 시간, 운행 간격에 대한 계획

(2) 차량 계획

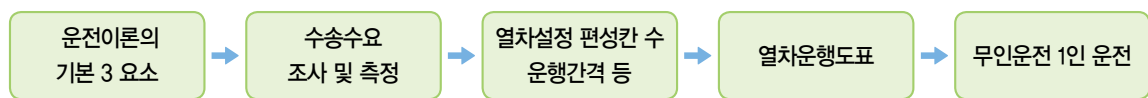
차량 기지, 차량 운용, 차량 검수, 차량 성능·제작·검사·보수 등에 대한 계획

(3) 인원 계획

인원의 수급, 교육 훈련에 대한 계획

(4) 설비 계획

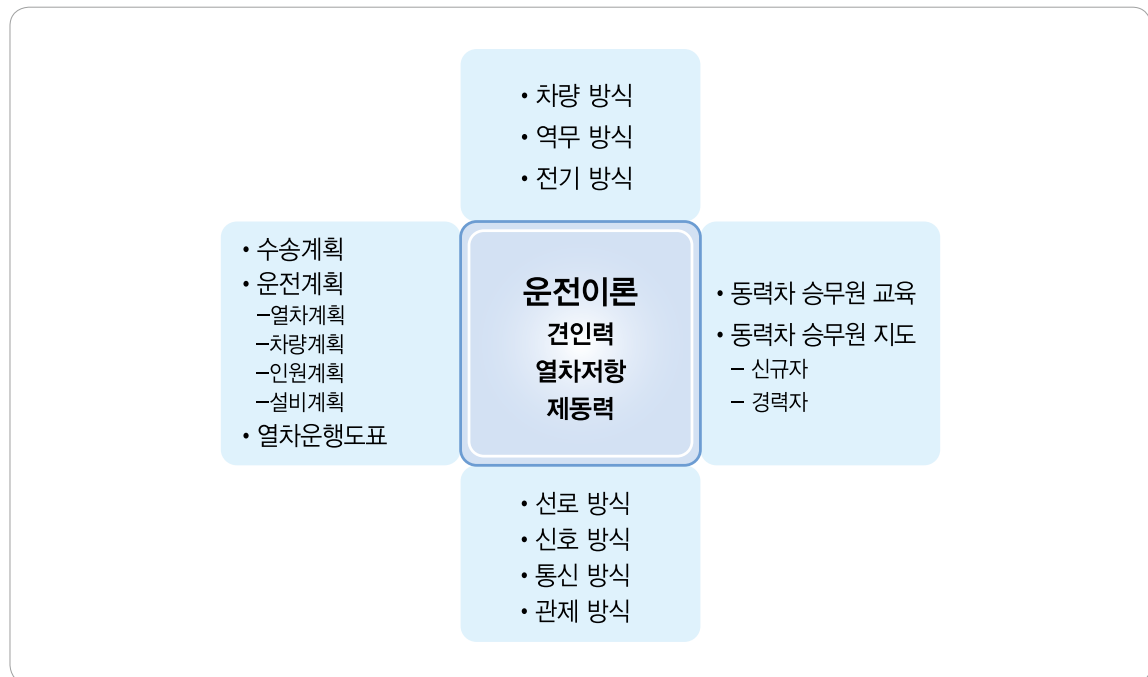
관제·통신·전기·신호, 선로, 운전 보안 설비 등에 대한 계획



[그림 1-1] 운전이론의 응용

운전 이론의 중요성을 그림으로 도시하면 다음과 같다.

가로축에 소프트적인 요소인 수송 계획, 운전 계획, 열차 운행 도표, 동력차 승무원 교육 및 지도를 놓고, 세로축에 하드적인 요소인 차량 방식 및 역무 방식, 전기 방식, 선로 방식, 신호방식, 통신 방식, 관제 방식을 놓았을 때 교차 부분이 운전 이론에 관한 영역이 된다.



[그림 1-2] 운전 이론의 업무 영역

 핵심정리



1. 운전 이론의 정의
2. 운전 이론의 기본 3요소
3. 운전 이론의 응용

2장

기초 공학 이론



2.1 단위와 물리량

2.2 운동과 힘

2.3 일과 에너지

2.4 전기



2장

기초 공학 이론

학습목표

- ✓ 단위의 개념을 이해하고 환산할 수 있다.
- ✓ 물리량의 개념을 이해하고 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 단위, 힘, 일(에너지, 전력량), 일률(공률, 전력), 운동, 전기, 옴의 법칙, 플레밍의 법칙 등

2.1 단위와 물리량

2.1.1 단위

기본 물리량의 단위를 기본단위라 하며, 기본단위의 조합으로 이루어지는 단위를 유도단위라 한다. 1970년대 이전까지 사용된 단위는 절대단위계와 공학 단위계를 주로 사용하였다. 1971년 제14차 국제 도량형 총회에서 국제단위계(SI단위 : System of International Units)로 공식적으로 채택하였다.

2.1.1.1 기본단위

국제단위계의 기본단위는 길이(m), 질량(kg), 시간(s), 온도(K), 광도(cd), 전류(A), 물질량(mol)이 있다. 여기서 7개 기본단위 중 MKS단위계는 길이(m), 질량(kg), 시간(s) CGS 단위계는 길이(cm), 질량(g), 시간(s)가 있다. 즉, SI단위는 MKS단위계 외 온도(K), 광도(cd), 전류(A), 물질량(mol)를 더욱 확장하여 사용하는 것이다. 그러므로 7개의 기본단위를 제외한 모든 단위를 SI 단위의 유도단위라 한다.

[표 2-1] 국제단위계의 기본단위

양	기호	명칭
길이	m	미터
질량	kg	킬로그램
시간	s	세컨드
전류	A	암페어
열역학적 온도	K	켈빈
물질의 양	mol	몰
광도(광원의 밝기)	cd	칸델라

[표 2-2] 단위계의 비교

단위계	단위		
SI단위계	m, kg, s, A, K, mol, cd		
MKS단위계	m	kg	s
CGS단위계	cm	g	s

2.1.1.2 공학(중력) 단위계

뉴턴의 운동 제2법칙에서 힘(F)은 질량(m)과 가속도(a)의 곱으로 정의한다. 또는 중력가속도(g)로 표기. 그러므로 힘 1(kgf)은 질량 1(kg)에 중력가속도 $9.8(\text{m/s}^2)$ 의 곱으로 나타낸다. 즉, 힘을 공학 단위로 표현하면 다음과 같다.

$$1\text{kgf} = 1\text{kg} \cdot 9.8\text{m/s}^2 = 9.8\text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 9.8N$$

$$1\text{gf} = 1\text{g} \cdot 9.8\text{m/s}^2 = 1\text{g} \cdot 980\text{cm/s}^2 = 980\text{dyne}$$

2.1.1.3 단위 환산

(1) 힘(무게)의 단위

[표 2-3] 힘의 단위 환산

	분류	환산
국제단위	dyne	$1\text{dyne} = 1\text{g} \cdot \text{cm/s}^2$
	N	$1N = \text{kg} \cdot \text{m/s}^2 = 10^5\text{g} \cdot \text{cm/s}^2 = 10^5\text{dyne}$
공학 단위	gf	$1\text{gf} = 980\text{dyne}$
	kgf	$1\text{kgf} = 9.8N = (9.8 \cdot 100,000) \text{ dyne}$

(2) 일(에너지, 전력량, 열량)의 단위

[표 2-4] 일의 단위 환산

	분 류	환 산
국제단위	erg	$\text{erg} = (\text{dyne}) \cdot \text{cm} = \text{g} \cdot \text{cm}^2/\text{s}^2$
	$J = N \cdot \text{m}$	$J = N \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot \text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m} = 10^7 \text{erg}$
공학단위	$\text{gf} \cdot \text{cm}$	$\text{gf} \cdot \text{cm} = \text{g} \cdot 9.8\text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{cm} = 980 \text{erg}$
	$\text{kgf} \cdot \text{m}$	$\text{kgf} \cdot \text{m} = \text{kg} \cdot 9.8\text{m}/\text{s}^2 \cdot \text{m} = 980 \cdot 10000 \text{dyne}$

(3) 일률(공률, 출력, (출)전력)의 단위

[표 2-5] 일률의 단위 환산

	분 류	환 산
국제단위	erg/s	$\text{erg/s} = \text{dyne} \cdot \text{cm/s}$
	$W = J/\text{s}$	$W = J/\text{s} = N \cdot \text{m/s} = 10^7 \text{erg/s}$
공학단위	$\text{gf} \cdot \text{cm/s}$	$\text{gf} \cdot \text{cm/s} = 980 \text{dyne} \cdot \text{cm/s} = 980 \text{erg/s}$
	$\text{kgf} \cdot \text{m/s}$	$1 \text{kgf} \cdot \text{m/s} = 9.8 \text{N} \cdot \text{m/s} = 9.8 \text{J/s}$

(4) 기본단위 값

- 1) $1\text{m} = 100\text{cm} = 1,000\text{mm}$
- 2) $1\text{km} = 1,000\text{m}$
- 3) $1\text{h} = 60\text{min} = 3,600\text{s}$
- 4) $1\text{L} = 1,000\text{mL}$
- 5) $1\text{ton} = 1,000\text{kg}$
- 6) $1\text{m}^2 = 1\text{m} \times 1\text{m} = 100\text{cm} \times 100\text{cm} = 10,000\text{cm}^2$
- 7) $1\text{m}^3 = 1,000,000\text{cm}^3$
- 8) $1\text{N} = 100,000\text{dyne}$
- 9) $1\text{kgf} = 9.8\text{N}$
- 10) $1\text{PS} = 75\text{kgf m/s} = 735.5\text{W}$
- 11) $1\text{Hp} = 76\text{kgf m/s} = 744.8\text{W}$
- 12) $1\text{bar} = 1.019\text{kgf/cm}^2$

$$13) 1\text{m/s} = 3.6\text{km/h}$$

$$14) 1\text{m/s/s} = 3.6\text{km/h/s} \quad (1\text{km/h/s} = 1/3.6\text{m/s/s})$$

(5) SI 10진 접두어

[표 2-6] SI 10진 접두어

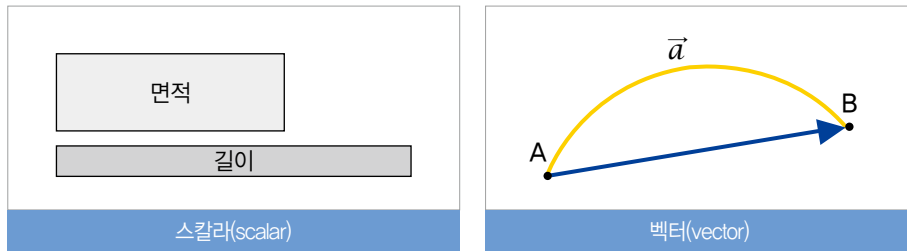
접두어	인자	기호	접두어	인자	기호
엑사(exa)	10^{18}	E	아토(atto)	10^{-18}	a
페타(peta)	10^{15}	P	펨토(femto)	10^{-15}	f
테라(tera)	10^{12}	T	피코(pico)	10^{-12}	p
기가(giga)	10^9	G	나노(nano)	10^{-9}	n
메가(mega)	10^6	M	마이크로(micro)	10^{-6}	μ
킬로(kilo)	10^3	k	밀리(milli)	10^{-3}	m
헥토(hecto)	10^2	h	센티(centi)	10^{-2}	c
데카(deca)	10^1	da	데시(dec)	10^{-1}	d

2.1.2 물리량

자연현상에서 측정할 수 있는 특성을 가진 거리, 변위, 속력, 속도, 가속도, 힘, 중력, 구심력, 원심력, 관성력, 마찰력, 충격량, 운동량, 탄성력, 토크, 일, 전류, 전력, 전력량, 비중, 면적, 체적, 질량, 중력가속도, 밀도, 비중량, 압력, 에너지, 온도, 열량 등 물리적인 현상을 양적으로 나타낸 것을 물리량이라 한다.

2.1.2.1 벡터와 스칼라

시간, 길이, 온도, 속력, 일, 에너지 등과 같이 그 양을 하나의 실수로 나타낼 수 있는 크기만 갖는 물리량을 스칼라(량)이라 하고, 변위, 속도, 가속도, 힘, 충격량, 운동량, 전기장 세기, 자기장 세기 등은 그 양을 크기 외에 방향까지 함께 나타내어야 한다. 이와 같이 크기와 방향을 갖는 물리량을 벡터(량)이라 한다.



[그림 2-1] 스칼라와 벡터

2.1.2.2 속력

전기동차 A와 B가 같은 시간 동안에 이동한 거리가 각각 100km와 50km일 때 전기동차 A는 전기동차 B보다 빠르다 할 수 있다. 즉, 물체의 빠른 정도를 나타내는 물리량을 속력(speed)이라고 한다. 속력은 걸린 시간에 대한 이동 거리로 나타내며, 크기(빠르기)만 나타내는 스칼라(량)이다. 여기서 거리는 항상 양(+)의 값을 갖는 물리량이다.

$$\text{속력} = \frac{\text{이동거리}}{\text{걸린시간}}$$

$$v = \frac{s}{t}, (\text{m/s}) \dots\dots 1-1\text{식}$$

- 1) 이동 거리 : 항상 양의 값을 갖는 물리량
- 2) 빠르기(크기)만 있는 스칼라(량)
- 3) 스칼라(량) : 속력, 질량, 온도, 시간, 부피, 일, 에너지, 비중, 밀도, 거리 등
- 4) 속력 = $\frac{\text{이동거리}}{\text{걸린시간}}$, (km/h, m/s)

(예1) A라는 사람이 2시간 동안 동쪽으로 5km 걸은 후, 다시 서쪽으로 3km 걸어 왔다. A의 속력을 구하시오.

$$\text{속력} = \text{이동 거리} / \text{걸린 시간} (\text{m/s}, \text{km/h})$$

$$v = \frac{s}{t} = \frac{8\text{km}}{2\text{h}} = 4\text{km/h} = \frac{4.0}{3.6} \text{ m/s}$$

(예2) 전기동차가 2km의 시험 선로를 40초 동안 주행하였다. 전기동차의 평균속력을 구하시오.

평균속력(v_a) = 총 이동 거리/총 걸린 시간

$$(v_a) = \frac{s}{t} = \frac{2000\text{m}}{40\text{s}} = 50\text{m/s} = 180\text{km/h}$$

(예3) 전기동차가 서울역에서 천안역까지 80km/h의 속력으로 갔다가 다시 천안역에서 서울역까지 40km/h의 속력으로 왕복하였다. 전기동차의 평균속력을 구하시오.

평균속력(v_a) = 총 이동 거리/총 걸린 시간

서울역에서 천안역까지 거리를 L 이라 하면, 서울역에서 천안역까지 걸린 시간은 $L/80$, 그리고 천안역에서 서울역까지 걸린 시간은 $L/40$ 이 된다.

총 이동 거리는 $2L$, 그러므로 총 걸린 시간은 $(L/80 + L/40)$ 이 된다.

$$v_a = \frac{\text{총 이동거리}}{\text{총 걸린시간}} = \frac{2L}{\frac{L}{80} + \frac{L}{40}} = \frac{2L}{\frac{3L}{80}} = \frac{160L}{3L} = 53.33\text{km/h}$$

2.1.2.3 속도

두 전기동차가 같은 속력으로 같은 시간을 이동했더라도 이동한 방향이 서로 다르다면 도착 결과는 다르게 나타나게 된다. 이를 보완하기 위하여 속도뿐만 아니라 이동한 방향까지 함께 고려한 물리량이 속도(velocity)이다. 속도는 걸린 시간에 대한 변위로 나타내며, 크기(빠르기)와 방향을 나타내는 벡터(량)이다. 여기서 변위는 물체가 움직인 시작점과 종착점을 잇는 직선거리로 나타내며, 항상 양의 값을 갖는 물리량은 아니다.

$$\text{속도} = \frac{\text{변위}}{\text{걸린시간}}$$

$$v = \frac{\vec{s}}{t}, (\text{m/s}) \dots\dots 2-2\text{식}$$

- 1) 변위 : 물체의 출발점과 종착점을 잇는 직선 거리
- 2) 빠르기(크기)와 방향이 있는 벡터(량)
- 3) 벡터(량) : 변위, 속도, 가속도, 힘, 충격량, 운동량, 자기장 등
- 4) 속도 = $\frac{\text{변위}}{\text{걸린시간}}$ (km/h, m/s)

(예1) 전기동차가 서울역을 출발해서 2시간 동안 180km를 이동 후, 다시 서울역 방향으로 178km 되돌아왔다. 이때 전기동차의 속도를 구하시오.

변위는 2km가 된다.

속도 = 변위 / 걸린 시간 (m/s, km/h)

$$v = \frac{1}{t} = \frac{(180-178)\text{km}}{2\text{h}} = \frac{2\text{km}}{2\text{h}} = 1\text{km/h} = \frac{1}{3.6} \text{ m/s}$$

2.1.2.4 표정속도

시간표 속도 또는 스케줄 속도라고도 한다. 열차의 이동 거리를 걸린 시간으로 나눈 물리량으로, 걸린 시간에는 운전 시간과 도중 정차한 시간도 포함된다. 즉, 표정속도를 v_s , 이동 거리를 s , 걸린 시간을 $t_t (= t_s(\text{정차시간}) + t_d(\text{운전시간}))$ 라 하면 표정속도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v_s = \frac{s_{(\text{이동거리})}}{t_t(\text{걸린시간})}$$

$$v_s = \frac{s_{(\text{이동거리})}}{t_s(\text{정차시간}) + t_d(\text{운전시간})}, (\text{km/h}) \dots\dots 2-3\text{식}$$

(예1) 전기동차는 오전 8시 정각 서울역을 출발하여 수원역에 8시27분에 도착하여 3분간 정차한 뒤 출발해 천안역에 9시 정각에 도착하였다. 이때 전기동차의 표정속도를 구하시오.(단, 서울역에서 천안역까지는 120km이다.)

$$\text{표정속도}(v_s) = \frac{\text{이동거리}}{\text{운전시간} + \text{정차시간}}, (\text{m/s}, \text{km/h})$$

$$v_s = \frac{S_{(\text{이동거리})}}{t_{t(\text{결련시간})}} = \frac{S_{(\text{이동거리})}}{t_s(\text{정차시간}) + t_d(\text{운전시간})} = \frac{120\text{km}}{3\text{분} + 57\text{분}} = \frac{120\text{km}}{1\text{h}} = 120\text{km/h}$$

(1) 표정속도 향상 방안

- 1) 운전 시간 및 정차 시간 단축
- 2) 정차 역 수 최소화
- 3) 고가속도 및 고감속도 운전
- 4) 최고 속도 향상

(2) 도중 정차 역이 적은 고속 열차의 경우 표정속도는 최고 속도의 70~80%이며, 역 간의 거리가 짧은 각 역 정차의 경우 표정속도는 최고 속도의 30~40% 정도로 낮아지게 된다. 즉, 역 간 거리가 짧은 경우는 최고 속도를 높여도 표정속도 향상 효과는 적다.

2.1.2.5 평균속력과 평균속도

전기동차가 서울역에서 광주역까지 300km의 거리를 두 시간 만에 주행하였다면 한 시간에 150km의 거리를 주행한 것이 된다. 그렇지만 전기동차가 한 시간마다 정확하게 150km씩 이동했다는 뜻은 아니다. 단지 일정한 빠르기로 주행했을 때 한 시간에 150km씩 주행한 것이 된다는 의미이다. 이처럼 전체 거리를 일정한 빠르기로 주행했다고 가정했을 때, 단위시간 동안 주행했는지를 나타내는 값을 평균속력이라 한다. 그리고 직선 선로 위를 주행하는 전기동차가 시간 t 동안 A 역에서 B 역까지 주행하였다면 이 동안 전기동차의 변위는 직선 선로 AB 구간이 된다. 그러므로 평균속도 v_a 는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{평균속도} = \frac{AB(\text{직선구간})}{\text{순수운전시간}}$$

$$v_a = \frac{\overrightarrow{AB}}{t}$$

여기서 평균속도의 방향은 $\overrightarrow{AB}$ 가 된다. 즉 열차의 이동 거리를 도중역의 정차 시간을 포함하지 않는 순수 운전 시간으로 나눈 값을 평균속도라고 한다.

2.1.2.6 제한속도

열차가 주행 시 운전 설비 또는 신호 조건에 따라 열차 운행 속도를 일시적으로 제한할 필요가 있을 때, 신호 현시 조건에 따른 제한, 내리막 선로의 운행 속도 제한, 곡선 선로의 반지름 크기에 따른 제한, 선로 분기기 종류에 따른 제한, 측선 선로의 운행 속도에 따른 제한 등이 있다.

2.1.2.7 상대속도

열차를 타고 가면서 같은 방향으로 달리는 열차를 보면 느리게 이동하는 것처럼 보이고, 반대 방향으로 달리는 열차를 보면 매우 빠르게 이동하는 것처럼 보인다. 이렇게 물체의 운동 상태는 관측자의 운동 상태에 따라 다르게 보이는데, 운동하고 있는 물체에서 관측자가 본 물체의 속도를 상대속도라 한다. 일반적으로 속도 v_a 로 운동하고 있는 관측자 A가 속도 v_b 로 운동하는 B를 보았을 때 느끼는 상대속도는 다음과 같이 정의한다.

$$v_{ab} = v_b - v_a, \text{ (m/s) } \dots\dots 2-4\text{식}$$

2.1.2.8 가속도

가속도는 속도의 변화량을 의미한다. 즉, 속도의 변화량을 시간으로 나눈 식으로 정의할 수 있다. 예를 들어 보면, 고속 기관차가 서울역을 통과할 때 속도가 v_1 이었는데, t 시간 후 용산역을 지날 때는 v_2 속도가 되었다면 가속도(a)는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{가속도}(a) = \frac{\text{나중속도} - \text{처음속도}}{\text{시간}}$$

$$(a) = \frac{v_2 - v_1}{t}, \text{ (m/s/s) } \dots\dots 2-5\text{식}$$

- 1) 속도 변화량 : 단위 시간에 대한 나중 속도에서 처음 속도를 뺀 값
- 2) 빠르기(크기)와 방향이 있는 벡터(량)
- 3) 벡터(량) : 변위, 속도, 가속도, 힘, 충격량, 운동량, 자기장 등
- 4) 가속도 = $\frac{\text{속도변화량}}{\text{걸린시간}}, \text{ (km/h/s)}$

(예1) 서울역을 지날 때 25m/s의 속도로 주행하던 전기동차가 10초 후에는 35m/s가 되었다. 전기동차의 가속도를 구하시오. (단, km/h/s)

$$\text{가속도} = \frac{\text{나중속도} - \text{처음속도}}{\text{시간}}$$

$$a = \frac{v_2 - v_1}{t} = \frac{35(\text{m/s}) - 25(\text{m/s})}{10(\text{s})} = \frac{10}{10} = 1\text{m/s/s} = 3.6\text{km/h/s}$$

단위 환산 : $1\text{m/s/s} = 3.6\text{km/h/s}$

2.1.2.9 진동 가속도

진동 가속도는 진동하는 물체의 속도가 시간에 대하여 변화하는 비율을 나타낸 것으로, 열차가 주행하고 있는 동안 승객에게는 열차의 진동으로 인하여 끊임없이 상하, 좌우 방향으로 가속도가 작용한다. 이때 열차의 진동으로 작용한 가속도를 지구의 중력가속도($g = 9.8\text{m/s}^2$) 단위로 환산해서 나타낸 물리량을 진동 가속도(g_b)라 한다.

따라서 $1g_b = 980\text{cm/s}^2$ 된다.

(예1) 주행하는 전기동차에 작용한 가속도가 $0.15g_b$ 일 때, 진동 가속도 크기를 구하시오.

$$1g_b = 980\text{cm/s}^2 \text{이므로}$$

$$0.15(g_b) = 0.15 \cdot (980\text{cm/s}^2) = 147\text{cm/s}^2$$

2.1.2.10 밀도

어떤 물질의 단위 부피당 질량을 그 물질의 밀도라 한다. 밀도는 물질을 구성하는 원자 및 분자가 얼마나 조밀하게 모여 있는가를 나타내는 물리량이다. 물질의 질량을 $m(\text{kg})$, 물질의 부피를 $V(\text{m}^3)$ 라 할 때, 밀도 p 는 다음과 같이 정의한다.

$$p = \frac{m}{V} (\text{kg/m}^3) \dots\dots 2-6\text{식}$$

(1) 두 물질의 부피가 같을 때는 질량이 큰 물질이 밀도가 크다.

(2) 두 물질의 질량이 같을 때는 부피가 작은 물질이 밀도가 크다.

2.1.2.11 비중

어떤 물질의 질량과, 이 물질과 같은 부피를 가진 4℃ 물의 질량과의 비율을 비중이라 한다. 그리고 비중은 단위가 없다. 수치로만 표시되며, 그 수치는 결국 밀도의 수치와 같기 때문에 다음과 같이 정의한다.

$$\text{비중} = \frac{\text{어떤 물질의 질량}}{4^\circ\text{C 순수한 물의 질량}} = \frac{\text{어떤 물질의 밀도}}{4^\circ\text{C 순수한 물의 밀도}} \dots\dots 2-7\text{식}$$

물의 비중이 1이기 때문에 어떤 물질의 비중이 1보다 크다면 물속에 가라앉게 되고 작다면 뜨게 된다.

2.1.2.12 압력

어떤 물체에 수직인 방향으로 힘을 가할 때 단위 면적당 가해진 힘을 압력이라 한다. 즉, 어떤 물체의 단면적에 수직으로 작용하는 힘의 크기를 단면적으로 나눈 물리량으로, 압력은 가해진 힘의 크기와 비례하고 힘을 가한 면적과 반비례한다. 여기서 가한 힘을 F , 단면적을 A 라 하면, 압력 P 는 다음과 같이 정의한다.

$$P = \frac{F}{A}, (N/m^2) \dots\dots 2-8\text{식}$$

$$1\text{bar} = 10^5 Pa = 10^5 N/m^2 = 1.019\text{kgf/cm}^2 = 1,000\text{mb(밀리bar)}$$

$$1\text{atm} = 1.0332\text{kgf/cm}^2 = 760\text{mmHg} = 1.01325\text{bar}$$

(1) 압력(p)의 단위

bar, ($1N/m^2 = 1Pa$), kgf/cm^2 , 등이 있으며 응력의 단위와 같이 사용한다.

(2) 철도차량에서 많이 사용되는 압력 단위는 bar, kgf/cm^2 가 있다.

(3) 절대압력

1) 절대압력 = 표준대기압 + 계기 압력

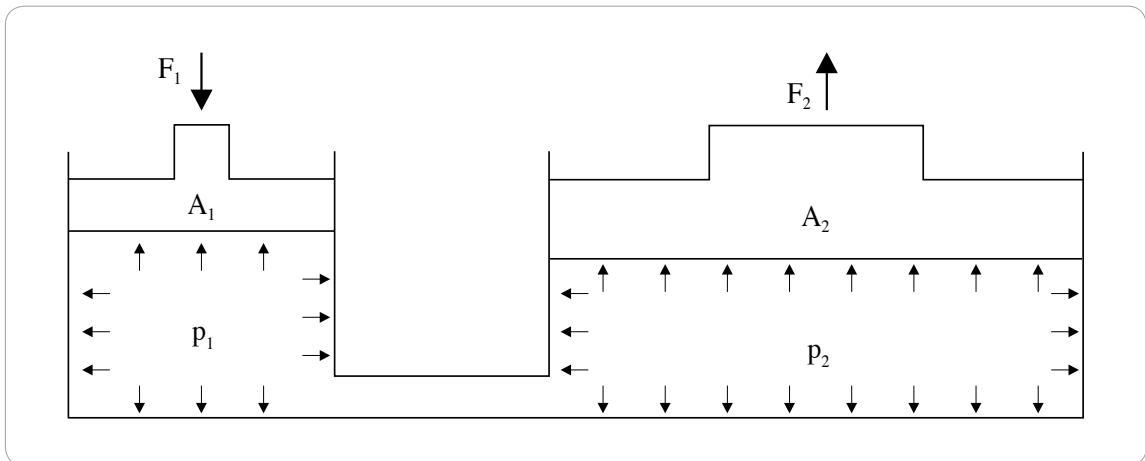
2) 절대압력 = 표준대기압 - 진공 압력

2.1.2.13 파스칼의 원리

액체는 압력을 가했을 때 그 부피는 줄지 않고 밀도가 그대로 유지되는 특성을 가지고 있다. 즉, 액체에 가해 준 압력은 그 크기가 변하지 않고 액체의 모든 부분에 같은 크기로 전달되는데, 이를 파스칼의 원리라 한다. 수압기의 원리를 보면 작은 피스톤 A_1 에 힘 F_1 을 가하면 수압기에는 압력 P 가 발생되는데, 이 압력은 파스칼의 원리에 의하여 큰 피스톤 A_2 에 그대로 전달된다. 이 압력에 의하여 힘 F_2 가 발생하는데, 다음과 같이 정의한다.

$$\frac{F_1}{A_1} = P = \frac{F_2}{A_2}, (N/m^2) \dots\dots 2-9식$$

$$F_2 = \frac{A_2}{A_1} F_1, (N)$$



[그림 2-2] 파스칼의 원리

2.2 운동과 힘

2.2.1 운동

물체가 운동할 때 얼마나 빠르게 이동하였는가를 나타내는 양으로 속력과 속도가 있다. 물체의 빠르기는 단위시간 동안에 이동한 거리를 비교하면 쉽게 알 수 있는데, 속력이 크면 클수록 물체가 더 빨리 이동하고 있음을 의미한다. 그러나 운동하고 있는 대부분의 물체들은 시간에 따라 속력이 변하는 운동을 한다. 즉 운동은 물체가 시간이 지남에 따라 위치를 바꾸어 나가는 현상이라고 하고, 시간이 지나더라도 그 위치가 변하지 않고 있다면 물체는 정지하고 있다고 한다.

2.2.1.1 등가속도 직선운동

물체의 속력과 운동 방향이 일정한 운동으로 등속 직선운동이라고도 한다. 이는 물체가 일정한 속력으로 운동하였으므로 이동 거리는 속력과 시간의 곱으로 나타낼 수 있다. 또한 물체가 이동하는 동안 운동 방향은 일정한 상태에서 속력이 시간에 따라 일정하게 증감하게 되는 경우는 등가속도 직선운동이라 하며, 속도의 변화, 즉 가속도가 일정한 운동이다. 이러한 등속도 운동을 하는 물체의 이동 거리를 s , 걸린 시간을 t , 처음 속도를 v_1 , 나중 속도를 v_2 , 가속도를 a 라 할 때 등가속도 직선 운동 방정식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(1) s = v_1 t + \frac{1}{2} a t^2 \cdots \cdots 2-10\text{식}$$

$$(2) 2as = (v_2)^2 - (v_1)^2 \cdots \cdots 2-11\text{식}$$

$$(3) v_2 = v_1 + at \cdots \cdots 2-12\text{식}$$

2.2.1.2 등속원운동(等速圓運動)

등속(等速)이란 속력이 일정하다는 뜻으로, 만일 속도가 일정하다면 직선운동을 하지 원운동은 하지 못한다. 그러므로 등속원운동을 하는 물체는 각속도가 일정하다. 각속도는 물체의 주기에 반비례하고 주기와 역수 관계인 진동수에 비례한다. 반지름의 크기가 r 인 원둘레를 물체가 일정한 속력으로 회전하는 운동으로, 속력의 크기는 변화가 없으나 방향이 항상 변하는 가속도운동이다.

즉, 등속원운동을 하는 물체가 점 P에서 점 Q로 이동하는 경우, 물체의 주기를 T , 진동수를 f , 각속도를 ω , 속력을 v 라고 할 때 등속원운동은 다음과 같이 정의할 수 있다.

- (1) 주기(T) : 물체가 반지름의 크기가 r 인 원둘레를 1 회전하는 데 걸린 시간으로 정의할 수 있으며, 단위는 시간(s)이 된다.

$$T = \frac{1}{f} = \frac{2\pi r}{v}, (s) \dots\dots 2-13\text{식}$$

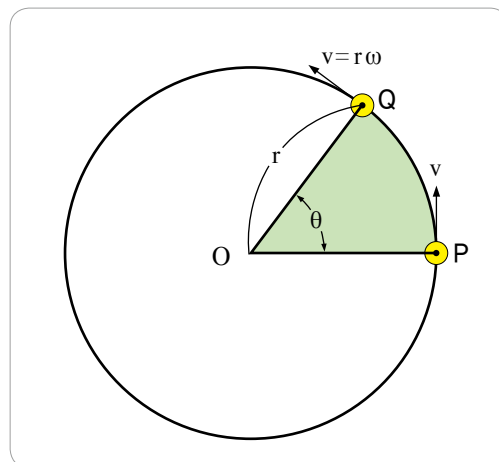
- (2) 진동수(f) : 단위시간 동안 물체가 반지름의 크기가 r 인 원둘레를 회전한 수로 정의할 수 있으며, 단위는 헤르츠(Hz)가 된다.

$$f = \frac{1}{T} = \frac{v}{2\pi r}, (Hz, \frac{1}{s}) \dots\dots 2-14\text{식}$$

- (3) 각속도(ω) : 단위시간 동안 물체가 회전한 각도로 정의할 수 있으며, 단위는 ($\frac{\text{rad}}{s}$)가 된다.

$$\omega = \frac{\Delta\theta}{\Delta T} = \frac{2\pi}{T}, (\text{rad/sec}), T = \frac{2\pi r}{v}, (2\pi \text{ rad} = 360^\circ)$$

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = \frac{v}{r}, (\text{rad/s}) \dots\dots 2-15\text{식}$$

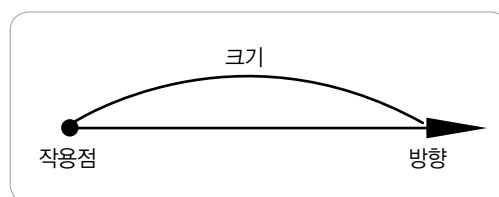


[그림 2-3] 등속원 운동

2.2.2 힘

물체에 힘을 가하면 그 물체는 운동 상태가 되거나 모양이 달라지며, 물체는 가한 힘의 방향으로 가속도가 발생한다. 물체에 작용하는 힘의 크기가 증가하면 이에 비례하여 가속도도 증가하게 된다. 힘의 특성은 관성을 파괴하며, 접촉 및 비접촉을 통해서 힘의 전달이 가능하다. 힘의 3요소에는 힘의 크기, 힘의 방향, 힘의 작용점이 있다.

힘을 F , 물체의 질량을 m , 물체에 작용하는 가속도를 a 라고 하면, 힘은 다음과 같이 정의한다.



[그림 2-4] 힘의 3요소

$$F = m \cdot a, \dots\dots 2-16\text{식}$$

힘의 단위에는 kgf, gf, N, dyne이 있다.

(1) 1N은 1kg의 질량을 1m/s² 만큼 가속시키는 데 필요한 힘으로 표현한다.

(2) 1dyne은 1g의 질량을 1cm/s² 만큼 가속시키는 데 필요한 힘으로 표현한다.

$$1\text{dyne} = 1\text{g} \cdot 1\text{cm/s}^2$$

$$1\text{N} = 1\text{kg} \cdot 1\text{m/s}^2$$

2.2.2.1 중력

만유인력(F)이라고도 하며, 물체가 서로 떨어져 있어도 작용하는 힘을 말한다. 중력(W)은 질량(m)과 중력가속도(g)와의 곱으로 정의할 수 있으며, 질량과 중력가속도 크기에 비례한다.

$$W = F = m \cdot g, (N) \dots\dots 2-17\text{식}$$

여기서 m 은 질량(kg), g 는 중력가속도(9.8m/s²)이다.

(1) 중력가속도

중력에 의하여 물체는 지구 중심부로 이동하며 운동을 한다. 이때 운동하는 물체가 가지는 가속도를 중력가속도(g)라 한다. 즉, 중력가속도는 중력(W)을 질량(m)으로 나눈 값으로 지구 중심에서 멀어질수록 감소하며, 적도 지역보다 극 지역에서 증가한다.

중력가속도는 다음과 같은 특징이 있다.

- 1) 중력가속도의 방향은 연직 아래 방향이다. 즉, 지구 중심을 향한다.
- 2) 중력가속도는 장소에 따라 약간씩 다르지만 평균적으로 9.8m/s²이다.
- 3) 지구 표면에서 모든 낙하운동은 등가속도운동이 된다.
- 4) 물체에 작용하는 무게(W)는 mg 가 된다.
- 5) 적도 지역 9.78m/s², 양 극 지역에서는 9.83m/s²의 크기를 갖는다.
- 6) 중력가속도는 고도가 높아질수록 작아진다.

$$g = \frac{W}{m}, (m/s^2) \dots\dots 2-18\text{식}$$

(2) 질량

중력은 천체의 질량 크기에 비례하므로 천체¹⁾에 따라 물체의 무게는 다르게 된다. 그러나 달라질 수 없는 물체 고유의 양을 질량이라 한다. 물체의 무게를 W , 중력가속도를 g 라고 하면 질량 m 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$m = \frac{W}{g}, (\text{kg}) \dots\dots 2-19\text{식}$$

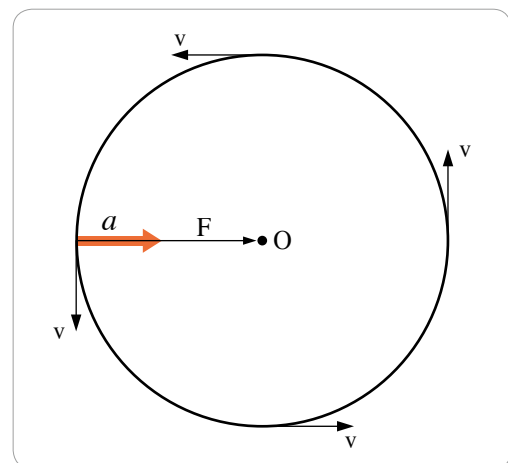
2.2.2.2 구심력

질량 m 인 물체가 일정한 속력으로 등속원운동을 할 때 원의 중심 방향으로 작용하는 힘을 구심력이라고 하며, 이때 힘의 방향으로 발생한 가속도가 구심가속도가 된다. 구심력과 구심가속도는 중심을 향한 같은 방향이 된다. 등속원운동에서 물체의 속도는 항상 변하지만 속력은 일정하다. 등속원운동을 하는 물체의 속도와 구심력은 직각이 된다. 예를 들어 곡선 반지름이 r 인 선로 위를 기관차가 탈선하지 않고 일정한 속력으로 주행하고 있다면, 기관차에 작용하는 구심력은 차륜과 레일에서 발생하는 마찰력이 된다. 따라서 물체의 질량 m , 선로의 곡선 반지름 r , 물체의 속도 v , 각속도 w 라 하면 구심력 F_g 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_g = m \frac{v^2}{r} = mrw^2 (N) \dots\dots 2-20\text{식}$$

따라서 구심력은 다음과 같이 정리할 수 있다.

- (1) 등속원운동 하는 물체의 질량에 비례한다.
- (2) 등속원운동 하는 물체의 속도 제곱에 비례한다.
- (3) 등속원운동 하는 원의 반지름에 반비례한다.
- (4) 등속원운동 하는 물체의 주기를 고려하면, 원의 반지름에 비례한다.
- (5) 등속원운동 하는 물체의 주기를 고려하면, 각속도 제곱에 비례한다.



[그림 2-5] 구심력과 구심가속도

1) 천체 : 우주에 존재하는 별, 달, 행성 등과 같이 뭉쳐 있는 물질 덩어리를 의미한다.

2.2.2.3 원심력

원심력은 원운동 하는 물체에서 나타나는 관성력을 말하며 가상의 힘이다. 구심력과 크기가 같으며, 방향은 반대가 된다. 따라서 원운동 하는 물체의 질량을 m , 선로의 곡선 반지름을 r , 물체의 속도를 v , 각속도를 w 라 할 때 원심력 F_c 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_c = (-)m \frac{v^2}{r} = (-)mrw^2, (N) \dots\dots 2-21\text{식}$$

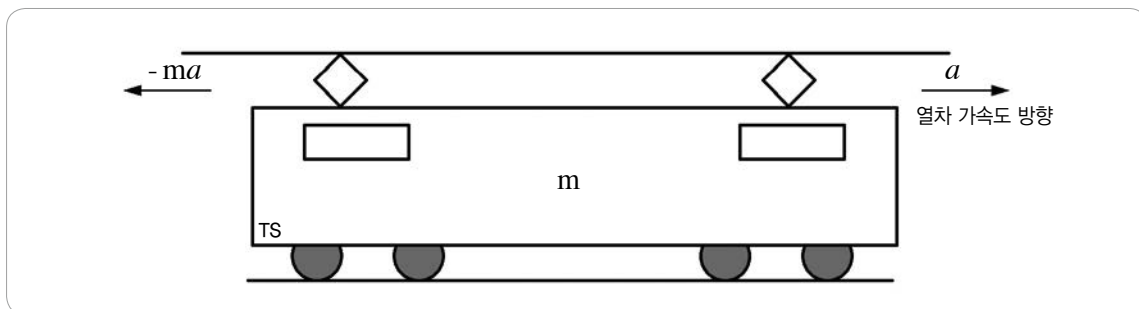
여기서 $(-)$ 는 방향을 나타내는 것이다.

2.2.2.4 관성력

정지해 있거나 등속도운동을 하던 시스템(계)이 가속도운동을 할 때 시스템 속에 있는 물체는 시스템의 운동 방향과 반대 방향으로 작용하는 힘을 받게 되는데, 이 힘을 관성력이라 하며 실제로 물체에는 작용하지 않는 가상의 힘이다. 예를 들어 보면 정지하고 있던 열차가 갑자기 출발하면 열차 안에 탄 승객은 열차 진행 방향과 반대 방향으로 쏠린다. 실제로는 승객에게 힘이 작용하지 않았는데도 열차가 가속도운동을 하기 때문에 열차 안 승객은 힘을 받은 것처럼 느낀다. 이렇게 승객에게 작용한 힘을 관성력이라 한다. 즉 물체의 운동 방향과 반대 방향으로 작용하는 힘을 말한다. 관성력은 실제로 작용하는 힘이 아니므로 반작용이 없다. 시스템 속에 있는 물체의 질량을 m , 시스템의 가속도를 a 라 하면 관성력을 F_i 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_i = (-)m \cdot a, (N) \dots\dots 2-22\text{식}$$

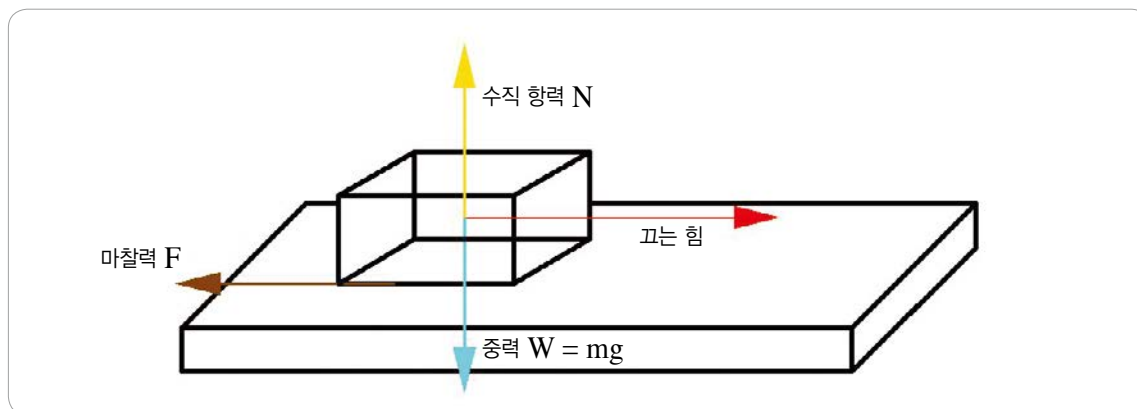
여기서 $(-)$ 는 물체의 운동 방향과 반대 방향을 뜻한다.



[그림 2-6] 관성력

2.2.2.5 마찰력

물체가 어떤 면과 접촉하여 운동할 때 물체의 접촉면을 따라서 끄는 힘과 반대 방향으로 물체의 운동을 방해하는 힘이 생기는데, 이 힘을 마찰력이라 하며 종류에는 정지마찰력, 최대정지마찰력, 그리고 운동마찰력이 있다. 또한 마찰력의 크기와 수직항력의 비례관계에서 비례상수를 마찰계수라 하며 μ 로 나타낸다. 면 사이의 마찰력은 접촉하는 물질의 종류와 면을 누르는 수직항력과 관계가 있다. 또한 마찰력은 정지마찰력과 최대정지마찰력, 그리고 운동마찰력으로 분류한다. 마찰계수에는 정지마찰계수와 운동마찰계수가 있으며, 운동마찰계수는 미끄럼마찰계수와 굴림마찰계수로 나뉜다. 즉, 마찰력은 수직항력과 마찰계수에 비례한다. 전기동차가 레일 위에서 미끄러지지 않고 진행할 수 있는 것은 레일과 차륜 사이에 마찰력이 작용하기 때문이며, 이 힘으로 전기동차는 앞으로 진행할 수 있다. 마찰계수에 대한 예를 들어보면, 고무와 콘크리트 사이의 마찰력은 강철과 강철 사이의 마찰력보다 크게 작용한다. 이러한 이유로 고속도로의 중앙분리대를 콘크리트로 바꾼 이유다. 자동차의 속력을 감소시키는 데는 자동차의 타이어와 콘크리트 사이에서 발생하는 마찰력이 자동차 차체와 강철로 된 분리대 사이의 마찰력보다 훨씬 충격력을 줄일 수 있다. 그러한 이유로 콘크리트 분리대 밑부분을 자세히 살펴보면 분리대 밑면을 넓게 제작해서 설치하였다. 즉, 자동차 차체가 분리대와 스치기 전에 타이어의 옆 부분이 먼저 스치게 되는 것이다.



[그림 2-7] 마찰력

(1) 수직항력

책상 위에 질량 m 인 물체를 올려 놓으면 질량 m 이 책상으로부터 받는 힘을 항력이라고 하며, 이 항력의 수직한 분력을 수직항력(N)이라고 한다. 이 경우에 수직항력은 중력과 크기는 같지만 방향은 반대이다.

(2) 정지마찰력

접촉면 위에 질량 m 인 물체를 놓으면 물체에 작용하는 힘은 중력 $W(=mg)$ 과 중력과 반대 방향으로 작용하는 수직항력 N 이 작용하므로 힘의 평형을 이루게 되어 물체는 정지하고 있다. 이때 물체에는 마찰력이 작용하지 않는다. 그러나 접촉면 위에 정지하고 있는 물체를 움직이게 하려고 힘을 가하는 순간부터 물체에는 마찰력이 작용하게 된다. 즉, 물체에 힘이 작용하여도 움직이지 않고 정지하고 있는 물체에 작용하는 마찰력을 정지마찰력이라 한다.

정지마찰력의 특징은 다음과 같다.

- 1) 접촉면에 대하여 물체를 움직이게 하려고 힘을 가할 때부터 작용한다.
- 2) 물체와 접촉면에 따라 다르게 작용한다.
- 3) 물체가 운동하려는 방향과 정반대 방향으로 물체에 작용한다.
- 4) 물체에 힘을 가했을 때 물체가 정지하고 있거나 등속도 운동을 하고 있다면 물체에 가한 힘과 마찰력의 크기는 같다.

(3) 최대정지마찰력

접촉면 위에 질량 m 인 물체를 놓고 움직이게 하려고 물체에 작은 힘을 가하면 처음에는 움직이지 않는다. 그러나 물체에 가하는 힘을 점점 증가시키면 정지마찰력도 함께 증가하게 되지만, 정지마찰력에는 한계가 있기 때문에 어떤 크기의 힘을 물체에 가하면 물체는 움직이기 시작한다. 이때 물체가 막 움직이는 순간에 작용한 마찰력이 정지마찰력 중에서 가장 크기 때문에 최대정지마찰력이라고 한다. 그러므로 최대정지마찰력을 F_m , 물체가 접촉면을 수직으로 누르는 힘(수직항력)을 N , 정지마찰계수를 μ_s 라 할 때 최대정지마찰력은 다음과 같은 특징을 가지고 있다.

$$F_m = \mu_s \cdot N, (N) \dots\dots 2-23\text{식}$$

- 1) 수직항력에 비례한다.
- 2) 정지마찰계수에 비례한다.
- 3) 접촉면의 넓이에는 관계없다.
- 4) 접촉면의 성질(매끄러운 정도)에 따라 달라진다.
- 5) 정지마찰력 중 가장 크고 정지마찰계수는 1보다 작다.

(4) 운동마찰력

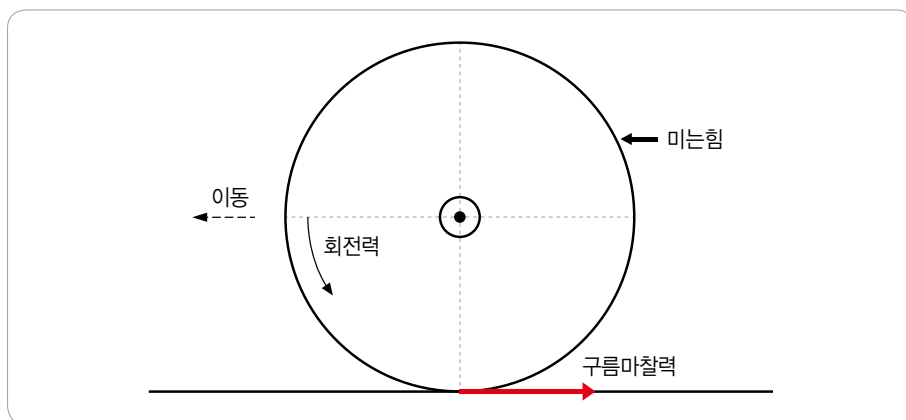
주행하던 전기동차에 비상제동을 체결하게 되면 바로 정차하지 않고 수십 미터 진행하다가 정지하게 되는데, 이것은 레일과 차륜 사이에 운동을 방해하는 마찰력이 작용했기 때문이다. 이와 같이 물체가 운동하고 있는 중에도 마찰력이 작용하고 있다. 이때의 마찰력을 운동마찰력 F_k 이라 하고, 두 물체 사이에 작용하는 마찰계수를 운동마찰계수 μ_k 라 하면 운동마찰력은 다음과 같은 특징이 있다.

$$F_k = \mu_k \cdot N, (N) \dots\dots 2-24식$$

- 1) 수직항력에 비례한다.
- 2) 운동마찰계수에 비례한다.
- 3) 접촉면의 성질에 따라 달라진다.
- 4) 물체의 이동 속도와는 관계없다.
- 5) 물체가 미끄러질 때의 마찰력인 미끄럼 마찰력과 둥근 물체가 구를 때의 마찰력인 굴림 마찰력이 있다.
- 6) 항상 운동 방향의 반대 방향이고, 가속도나 외력의 방향과는 관계없다.

(5) 구름(회전) 마찰력

운동마찰력에 속하는 마찰력으로, 둥근 원기둥이나 공이 면 위를 굴러갈 때 작용하는 마찰력을 구름 마찰력이라 한다. 미끄럼 마찰력보다도 작으며 철도차량에서는 축수와 차축 사이의 볼베어링은 이것을 이용한 것이다.



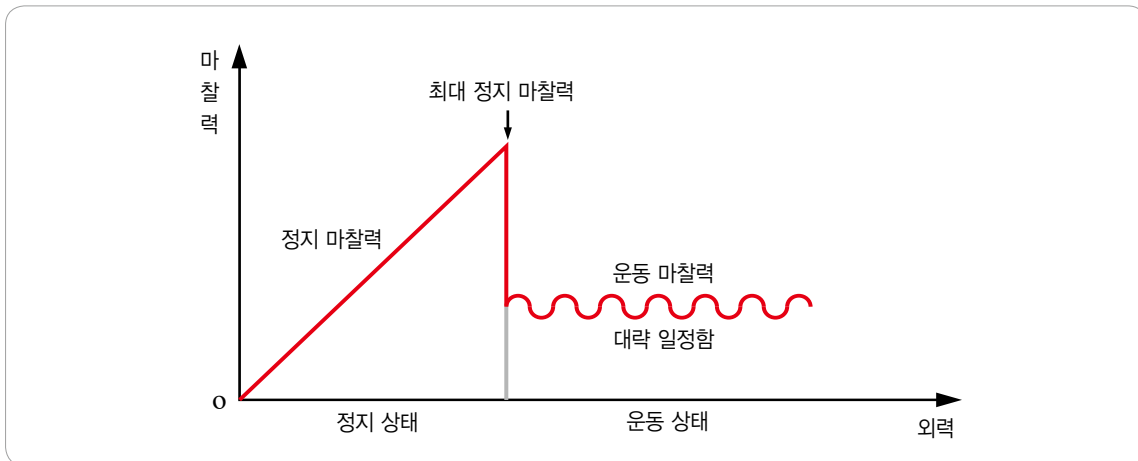
[그림 2-8] 구름 마찰력

(6) 미끄럼 마찰력

접촉하고 있는 두 고체면 사이에 상대적인 움직임이 있는 경우, 상대적인 움직임을 방해하는 힘이 작용하는 현상을 미끄럼 마찰력이라 한다.

(7) 마찰계수의 크기

- 1) 정지마찰계수 > 운동마찰계수
- 2) 운동마찰계수는 미끄럼마찰계수와 구름마찰계수로 분류할 수 있다.
- 3) 정지마찰계수 > 미끄럼마찰계수 > 구름마찰계수



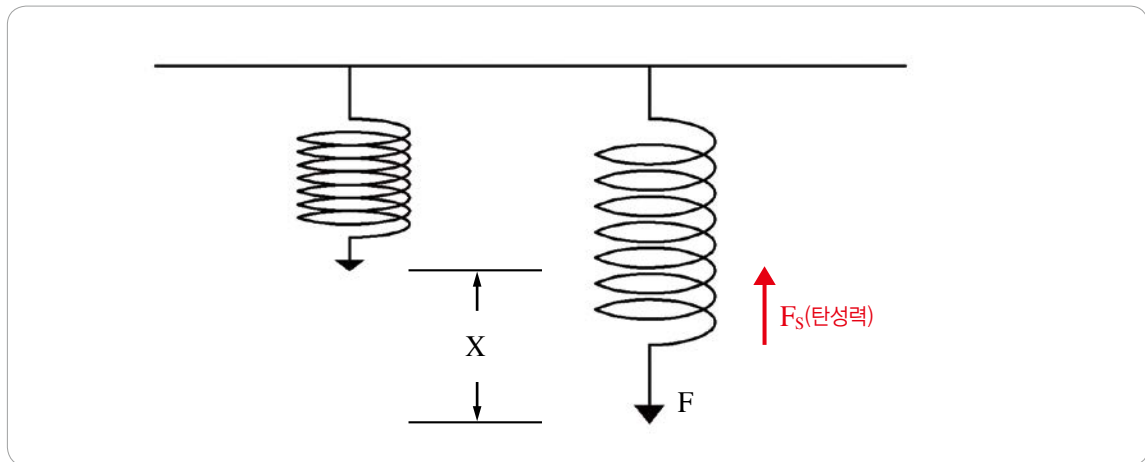
[그림 2-9] 마찰계수의 크기

[표 2-7] 물체 표면 특성에 따른 마찰계수의 크기

물 질	정지마찰계수	운동마찰계수
철판과 철판	0.74	0.57
눈과 얼음	0.10	0.03
기름 친 금속과 금속	0.15	0.06

2.2.2.6 탄성력

탄성체는 외력을 받으면 변형을 하게 되는데, 그때 한 일은 탄성에너지로 흡수하여 축적하고 외력을 제거하면 탄성 에너지를 방출하는 특성을 가지고 있다. 이와 같이 스프링은 탄성이 큰 재료를 특별한 모양 또는 만들어진 것으로, 외력이 가해지면 큰 변형을 일으켜서 에너지를 흡수하거나 축적하



[그림 2-10] 탄성력

고 외력을 제거하면 에너지를 방출하는 기계요소이다. 즉, 스프링은 탄성에너지를 이용하여 진동 방지, 충격 완화 등에 사용되고 있다.

(1) 훅의 법칙(Hooke's law)

자유 높이²⁾가 L , 스프링 상수가 k 인 스프링에 힘 F_s 를 가하면 스프링은 탄성한계 내에서 x 만큼 늘어나게 되는데, 이것을 훅의 법칙이라고 한다. 이때 스프링의 탄성력 F_s 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_s = (-)k \cdot x \text{ (N)}, \dots\dots 2-25\text{식}$$

여기서 k 는 스프링의 재질과 모양에 따라 결정되는 스프링 상수인데, 스프링에 작용한 힘과 탄성력은 서로 반대 방향이 되기 때문에 $(-)$ 가 된다. 스프링의 탄성력은 스프링 상수와 늘어난 길이에 비례한다.

(2) 탄성

금속재료에 외력을 가하면 약간의 변형이 일어나고 가해진 외력을 제거하면 원상태로 돌아오는데 이러한 성질을 탄성이라 한다. 또한 탄성이 일어나는 범위의 외력 가운데 최대 외력을 탄성한계라 한다.

2) 자유 높이 : 코일 스프링에 있어서는 코일의 양단간의 간격을 스프링의 높이라고 한다. 또한 무하중(無荷重)의 높이를 자유 높이라 한다.

(3) 소성

재료에 탄성한계 이상의 외력을 가하면 원상태로 돌아오지 않고 변형이 되는데 이 성질을 소성이
라 하며, 이러한 성질을 이용하여 재료를 변형시키는 가공을 소성가공이라 한다.

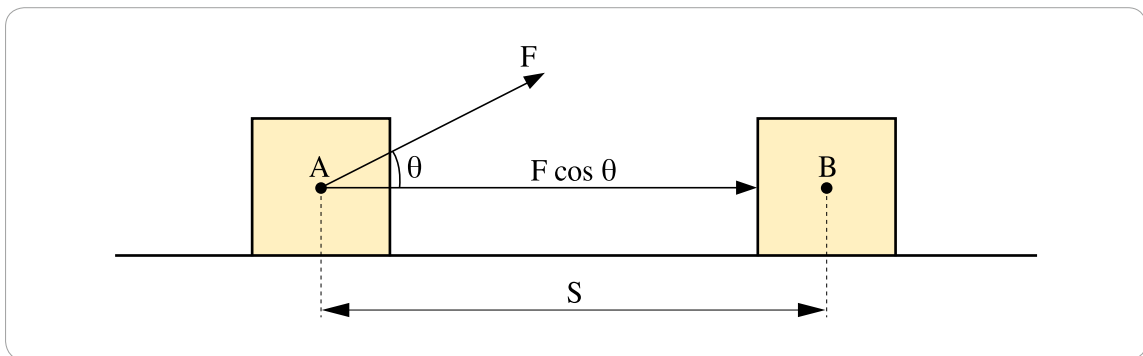
2.3 일과 에너지

2.3.1 일

힘에 의해 물체의 이동이 있을 때에 정의되는 개념으로, 힘이 들지 않는 일이란 존재할 수 없고 힘
은 들지만 이동이 없거나 이동이 된다 하더라도 힘의 방향과 이동 방향이 일치하지 않는다면 역시
일로 볼 수 없다. 즉, 어떤 힘 에 의해 물체가 힘의 방향으로 S만큼 이동하였다면 이때 행한 일(W)
은 다음과 정의할 수 있다.

$$W = F \cdot S, (N \cdot m), \dots\dots 2-26\text{식}$$

따라서 일의 단위는 $J(joule)$, $N \cdot m$, $kgf \cdot m$ 등이 된다.



[그림 2-11] 일

특히 일의 단위 중에 MKS단위계에서 $N \cdot m$ 를 J(줄)이라고 하며, CGS단위계로는 $dyne \cdot cm$ 가
있는데 erg(에르그)라고 한다. 1J이란 1N의 힘을 작용하여 물체를 힘의 방향으로 1m 이동하였을 때
행하여진 일의 값을 의미한다. 따라서 다음의 관계가 성립한다.

$$1J = 1N \cdot m = 1kg \cdot m/s^2 \cdot m = 1kg \cdot m^2/s^2$$

$$1erg = 1dyne \cdot cm = 1g \cdot cm/s^2 \cdot cm = 1g \cdot cm^2/s^2$$

$$1J = 10^7erg$$

2.3.2 운동량

움직이는 물체가 충돌할 때의 운동 효과를 비교하려면 물체의 질량과 속도를 고려해야만 한다. 물체의 운동량은 질량과 속도의 곱으로 나타낼 수 있는데, 이러한 물리량을 운동량이라고 한다. 따라서 운동량을 P , 물체의 질량을 m , 물체의 속도를 v 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P = m \cdot v \text{ (kg} \cdot \text{m/s)}, \dots\dots 2-27\text{식}$$

충격량은 운동량의 변화량이므로 운동량과 충격량의 단위는 같다.

$$I_{\text{(충격량)}} = \Delta P_{\text{(운동량의 변화량)}}$$

$$Ft = mv$$

$F_{\text{(충격력)}} \cdot t_{\text{(시간)}} = m_{\text{(질량)}} \cdot v_{\text{(속도)}}$ 에서 충격력은 다음과 같다.

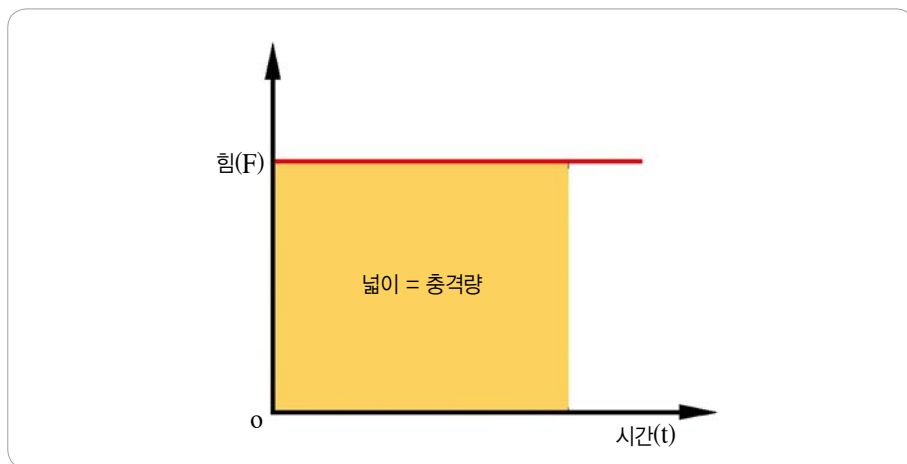
$$F_{\text{(충격력)}} = \frac{m_{\text{(질량)}} \cdot v_{\text{(속도)}}}{t_{\text{(시간)}}} \dots\dots 2-28\text{식}$$

충격력은 물체의 질량과 속도에 비례하고, 접촉 시간에 반비례한다. 고속철도차량(KTX)이 눈이 많이 내리는 겨울철에 운행할 때 객차 유리창이 깨지는 경우가 있다. 이는 내린 눈이 대차 부분에 얼음덩어리로 퇴적되어 있다가 기온이 상승하게 되면서 퇴적된 얼음덩어리가 녹아 선로에 떨어지게 되는데, 이때 얼음덩어리가 자갈에 충격력을 주게 되면 자갈이 튀어 올라 선로 변 물체에 부딪친 후 다시 객차 창문에 충격력을 주게 되므로 객차 유리창이 깨지는 것이다. 즉, 충격력은 물체의 속도와 비례하므로 유리창이 깨지는 것을 방지하기 위해서 관제사는 고속철도차량의 운행 속도를 내림차순으로 낮추어 운행하도록 지시한다.

2.3.3 충격량

물체에 어느 시간 동안 힘을 작용할 때 물체가 얻는 운동량의 변화량은 작용한 힘의 크기가 클수록, 작용한 시간이 길수록 크다. 이와 같이 운동량에 영향을 주는 물리량을 힘과 작용 시간의 곱으로 나타낸 것을 충격량이라 한다. 충격량을 I , 충격력을 F , 힘의 작용 시간을 t 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있으며, 충격량의 단위는 힘의 단위와 시간의 단위 곱으로 나타낸다.

$$I = F \cdot t, (N \cdot s) \cdots \cdots 2-29\text{식}$$



[그림 2-12] 충격량

2.3.4 각운동량

물체가 어느 특정한 축에 대하여 계속해서 회전하려는 경향에 대한 척도이다. 회전하는 물체에 외력을 가해 강제로 정지시키려 해도 물체는 계속 회전하려고 한다. 이것은 회전하는 물체가 회전 상태의 관성을 가지고 있기 때문이다. 즉, 모든 물체는 운동 상태의 관성(각운동량)을 가지고 있다. 따라서 물체의 회전 관성(관성모멘트)을 I_r , 각속도를 w 라 할 때 각운동량(P_r)은 다음과 같이 정의할 수 있다.

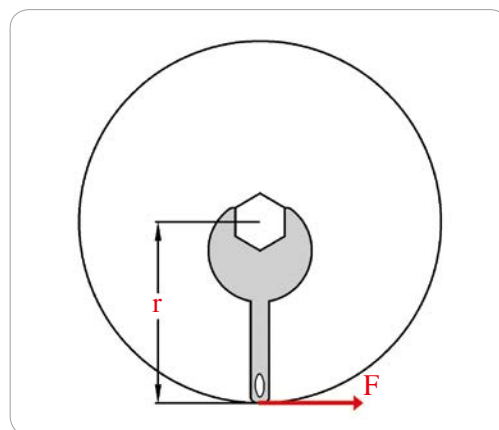
$$\text{각운동량} = \text{관성모멘트} \times \text{각속도}$$

$$P_r = I_r \times w \text{ (m} \cdot \text{rad/s)}, \cdots \cdots 2-30\text{식}$$

2.3.5 토크

길이 r 인 스패너 끝에 힘 F 를 가할 때 이 스패너가 원점을 회전축으로 하여 회전한다고 가정하면, 회전이 얼마나 크게 이루어지는가 하는 정도를 힘의 모멘트 또는 토크(torque)라 한다. 즉, 가하는 힘(스패너를 돌리려는 힘)을 F , 원점에서 힘점까지 거리를 r 이라 하면 토크 T 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$T = F \cdot r, (N \cdot m), \dots\dots 2-31식$$



[그림 2-13] 토크

토크가 커지려면 회전하는 스패너에 가해지는 힘이 크거나 스패너의 길이가 길어야 한다.

2.3.6 뉴턴의 운동 법칙

2.3.6.1 관성

만일 물체에 작용하는 모든 힘이 서로 상쇄되어 합력이 0이라면 물체의 운동 상태는 바뀌지 않는다. 정지해 있는 물체는 언제까지나 정지해 있고, 운동하던 물체는 같은 방향으로 계속 등속도 운동을 하게 된다. 즉, 물체는 운동을 계속 유지하려는 성질을 가지고 있는데, 이것을 관성이라 한다. 관성은 물체의 질량이 클수록 운동 상태를 유지하려는 성질이 크다.

2.3.6.2 뉴턴의 운동 제1법칙(관성의 법칙)

외부로부터 물체에 힘이 작용하지 않거나 작용하는 힘의 합이 0이면 정지하고 있는 물체는 계속 정지해 있고, 운동하던 물체는 등속도 운동을 한다. 즉, 관성의 크기는 물체의 질량에 비례한다는 법칙이다.

(1) 회전 관성

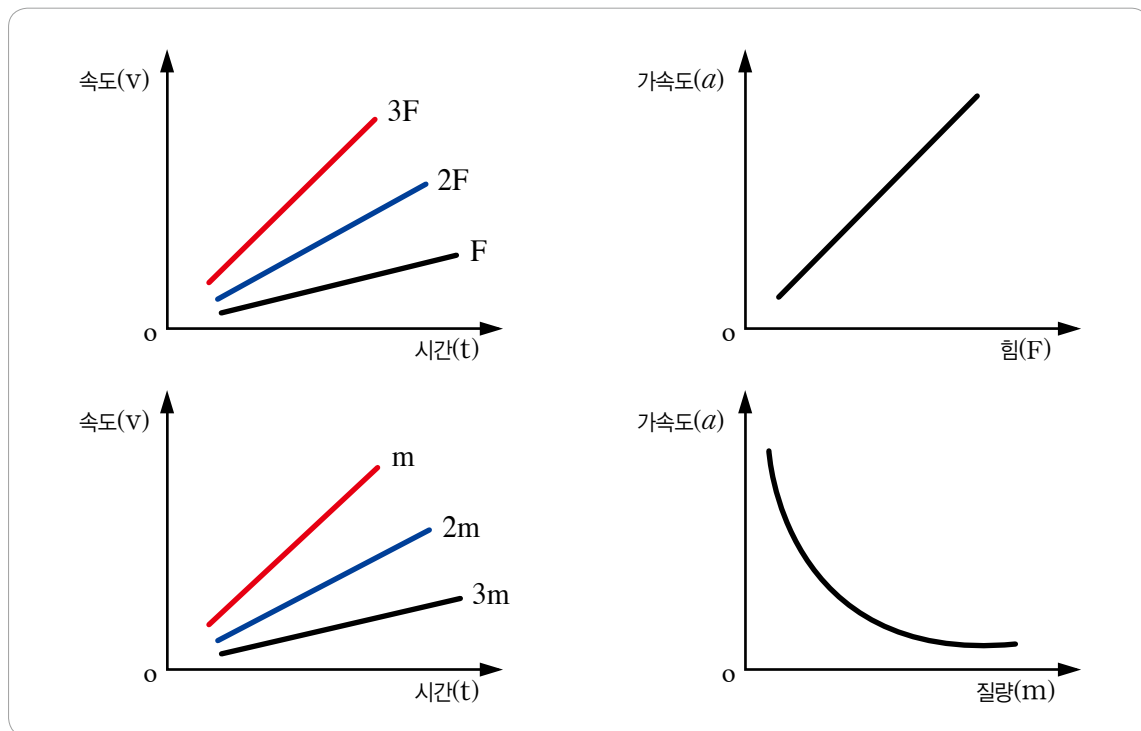
회전하고 있는 물체의 회전 상태가 변하는 것에 대하여 저항하려는 물체의 성질로, 물체 내의 질량이 회전축으로부터 먼 곳에 분포할 때 더욱 증가한다. 또한 관성처럼 물체의 질량에 비례한다. 그

리고 물체의 운동 상태를 변화시키려면 힘이 필요하듯이 물체의 회전 상태를 변화시키려면 토크(Torque)가 반드시 필요하다. 예를 들어 지름이 50cm이고, 길이가 100cm인 원통 모양의 중실축³⁾과 중공축⁴⁾을 경사면에서 동시에 굴러 내려오게 할 때 가속도가 더 큰 것은 중실축이다. 이것은 회전 관성이 더 큰 원통이 경사면을 내려오는데 더 많은 시간이 걸리기 때문이다.

2.3.6.3 뉴턴의 운동 제2법칙(힘과 가속도와 질량 관계 법칙)

물체에 힘을 가하면 힘의 크기와 가속도 크기는 서로 비례하고 힘이 작용하는 방향으로 가속도가 발생한다. 즉, 힘(F)은 힘을 받는 물체의 질량(m)과 그 힘으로 생긴 물체의 가속도(a) 곱으로 나타낸 것을 뉴턴의 운동 제2법칙이라 하며, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F = m \cdot a(N) \dots\dots 2-32\text{식}$$



[그림 2-14] 뉴턴의 운동법칙

3) 중실축 : 축의 단면의 중심부에 구멍이 뚫려 있지 않은 축이 팍 찬 축

4) 중공축 : 축의 자중을 가볍게 하기 위해 단면의 중심부에 구멍이 뚫려 있는 축

힘이 일정할 때 가속도와 질량은 반비례하며 질량이 클수록 가속도는 작아진다.

2.3.6.4 뉴턴의 운동 제3법칙(작용력 반작용력 법칙)

물체 A가 물체 B에 어떤 힘($\vec{F}_{ab}$)을 가하면 물체 B도 크기가 같고 방향이 반대인 힘($\vec{F}_{ba}$)을 물체 A에 작용하게 되는데, 이것을 작용력 반작용력이라 하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\vec{F}_{ab} = -\vec{F}_{ba}, \dots\dots 2-33\text{식}$$

철도차량이 레일 위를 주행할 수 있는 것은 차륜이 레일을 밀게(작용력) 되면, 레일이 차륜을 밀게(반작용력) 되어 철도차량은 레일 위를 주행하게 되는 것이다. 뉴턴의 운동 제3법칙의 특징은 다음과 같다.

- (1) 힘의 작용점이 두 개이므로 두 힘의 합력을 구할 수 없다.
- (2) 두 힘의 크기는 같다.
- (3) 두 힘의 작용 방향은 서로 반대가 된다.
- (4) 두 힘은 같은 작용선상에서 작용한다.
- (5) 두 힘이 서로 밀고 당길 때 발생하는 속도, 가속도는 물체 질량에 반비례한다.

[표 2-8] 두 힘의 평형 법칙과 작용력 반작용력법칙 비교

구분	두 힘의 평형 법칙	작용력 반작용력 법칙
공통점	1. 힘의 크기는 같다. 2. (두) 힘의 작용 방향은 서로 반대 3. 두 힘은 같은 작용선상에서 작용	1. 힘의 크기는 같다. 2. 두 힘의 작용 방향은 서로 반대 3. 두 힘은 같은 작용선상에서 작용
차이점	힘의 작용점이 한 개다.	힘의 작용점이 두 개다.

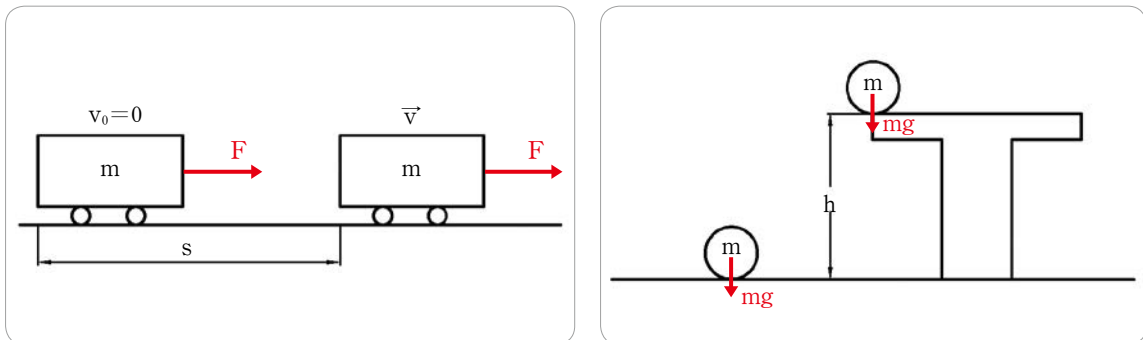
2.3.7 에너지

물체의 운동 방향과 같은 방향으로 힘을 가하여 물체를 더 빠른 속력으로 가속시키면 물체의 운동 에너지(E_k)는 증가한다. 반대로 물체의 운동 방향과 반대 방향으로 물체에 힘을 가하여 물체의 속력을 느리게 하면 물체의 운동에너지는 감소한다. 운동에너지의 변화 원인은 물체에 가해진 힘에 의해

서 에너지가 공급 또는 감소하는 것으로 물리량 중 일(work)로 설명할 수 있다.

(1) 운동에너지

정지하고 있는 물체에 일을 해 주면 물체의 운동 상태는 변하게 되는데 이때 에너지의 증가가 이루어진다. 여기서 물체에 해 준 일이 모두 에너지로 변하였다면 증가한 물체의 에너지는 물체에 해 준 일과 같다. 즉, 마찰이 없는 평평한 직선 선로 위에 질량 m 인 철도차량에 일정한 힘 F 를 작용하여 속력이 v 가 될 때까지, 이동한 거리가 s 일 때 철도차량은 일정한 힘 F 를 받는 동안 등가속도 직선운동을 했으므로, 다음과 같이 등가속도 직선운동의 식 $2as = (v)^2 - (v_0)^2$ 에 처음 속도(v_0) = 0을 대입하면 철도차량에 힘 F 를 주는 동안 철도차량의 가속도 a 의 크기는 $\frac{v^2}{2s}$ 가 된다. 그러므로 철도 차량에 가한 힘 F 는 $ma = \frac{mv^2}{2s}$ 이며 힘이 철도차량에 한 일은 다음과 같이 정의할 수 있다.



[그림 2-15] 운동에너지와 위치에너지

$$W = F \cdot s = \frac{mv^2}{2 \cdot s} \cdot s = \frac{1}{2} mv^2, (N \cdot m) \dots\dots 2-34\text{식}$$

위 식에서 알 수 있듯이 물체의 운동에너지는 물체의 질량과 속도 제곱에 비례한다.

$$(E_k) = \frac{1}{2} mv^2, (N \cdot m) \dots\dots 2-35\text{식}$$

(2) 위치에너지

지구 표면 가까이 있는 질량 m 인 물체는 항상 지구 중심 방향으로 중력($W = mg$)이 작용한다. 여기서 질량 m 인 물체를 중력의 반대 방향으로 $h[m]$ 만큼 들어 올렸다면 이때 한 일이 위치에너지(E_p)가 되며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$(E_p) = F \cdot s = mgh, (N \cdot m) \dots\dots 2-36\text{식}$$

2.3.8 일률(공률, 출력)

입환 기관차 A는 1시간에 3,600J의 일을 하였고, B는 2시간에 3,600J의 일을 한다고 하자. 이때 이 두 입환 기관차의 능력을 서로 비교하기 위해 단위 시간당 한 일을 각각 구하면 입환 기관차 A의 경우는 $\frac{3,600J}{1h} = \frac{3,600J}{3,600s} = 1(J/s) = 1W$ 이고 입환 기관차 B의 경우는 $\frac{3,600J}{2h} = \frac{3,600J}{7,200s} = 0.5(J/s) = 0.5W$ 이다. 따라서 1시간 동안 A 입환 기관차가 B 입환 기관차보다 일을 더 할 수 있는 능력을 갖고 있음을 알 수 있다. 이와 같이 능력은 행한 일을 일한 시간으로 나누어 보면 알 수 있게 되는데, 이것을 일률(P : 공률)이라 하며 단위 시간당 행한 일로 다음과 같이 정의된다.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{F \cdot s}{t} = F \cdot v = mav, (J/s = Watt) \dots\dots 2-37\text{식}$$

(s : 이동 거리, v : 이동 속도, m : 질량, a : 가속도, F : 힘, W : 일)

J/s 를 $Watt$ (와트)라고 하며 다음의 관계가 성립한다.

$$1Watt(W) = 1J/s = 1N \cdot m/s$$

$$(1) \text{ 영국식 마력 : } 1\text{마력(HP)} = 744.8Watt = 76kgf \cdot m/s$$

$$(2) \text{ 프랑스식 마력 : } 1\text{마력(PS)} = 735.5Watt = 75kgf \cdot m/s$$

$$(3) \text{ 일률의 단위 : } HP, PS, J/s, N \cdot m/s, Watt, kgf \cdot m/s \text{ 등}$$

2.4 전기

전기(電氣)란 영어로는 일렉트리시티(Electricity)라 표현되며, 호박이라는 보석에서 유래되었다. 기원전 600년경 탈레스가 호박(琥珀)을 문지르면 털이 달라붙는 현상에서 최초로 발견되었기 때문에 붙여진 이름이다. 우주에 존재하는 모든 것은 원자라는 아주 작은 입자들로 이루어져 있는데, 원자의 가운데는 원자핵이 있고 그 주위에 전자들이 구름처럼 퍼져 있다. 원자핵은 양성자와 중성자로 되어 있는데, 이 중 양성자와 전자는 서로 반대되는 성질을 가지고 있다. 전기력은 서로 다른 성질을 가진 양성자와 전자 사이에서 생긴다. 그런데 이 전기력은 원자핵에서 멀리 떨어져 있으면 약해진다. 전기력이 약한 전자들은 언제든지 외부의 충격이 있으면 원자 밖으로 빠져나와 무리를 지으면서 한쪽 방향으로 움직이게 되는데, 이러한 전자의 흐름으로 전기가 발생한다.

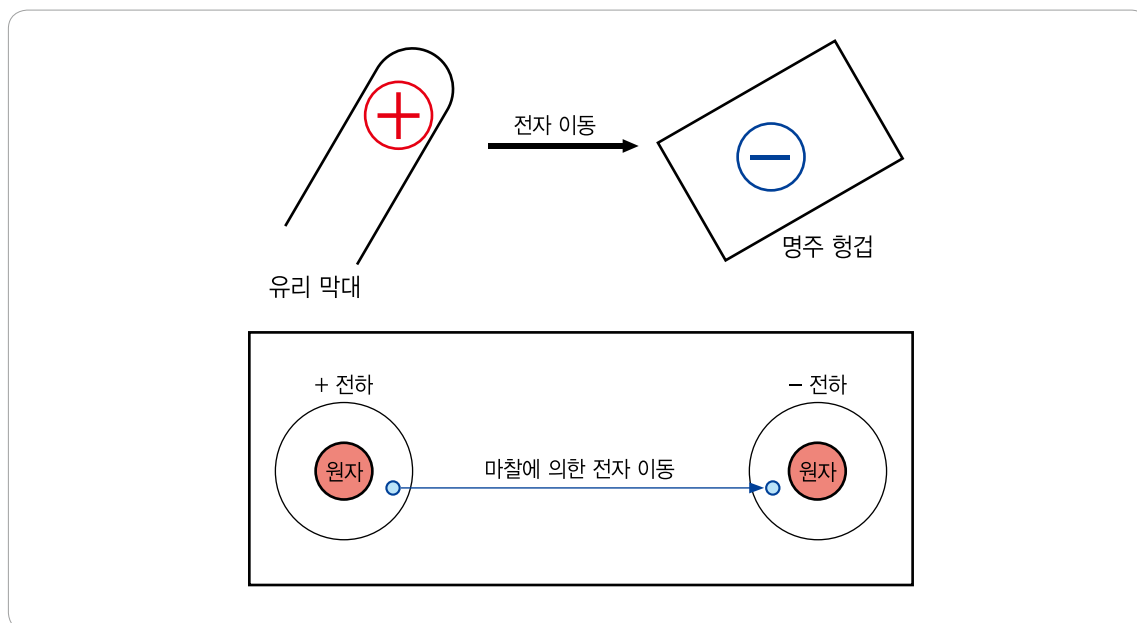
2.4.1 전하와 전류

2.4.1.1 전하

물체가 전기를 띠는 현상을 대전이라 하고, 전기를 띤 물체를 대전체라 한다. 이때 대전체 안에 있는 전기를 전하라고 하며 그 양을 전하량 또는 전기량이라 하는데 전하량의 단위는 쿨롱(c)이다. 전하에는 원자핵 속의 양성자가 띠고 있는 양전하(+전하)와 원자 속의 전자가 띠고 있는 음전하(-전하)가 있다. 한편 전하를 띤 두 대전체 사이에 작용하는 힘을 전기력이라고 하는데, 다른 종류의 전하 사이에는 인력, 같은 종류의 전하 사이에는 척력이 작용한다. 전하 간에 작용하는 인력과 척력은 두 전하량(q_1, q_2)의 곱에 비례하고, 전하 간 거리 r 의 제곱에 반비례한다. 이를 쿨롱의 법칙(F)이라고 하며 다음과 같다.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, (N), \dots\dots 2-38\text{식}$$

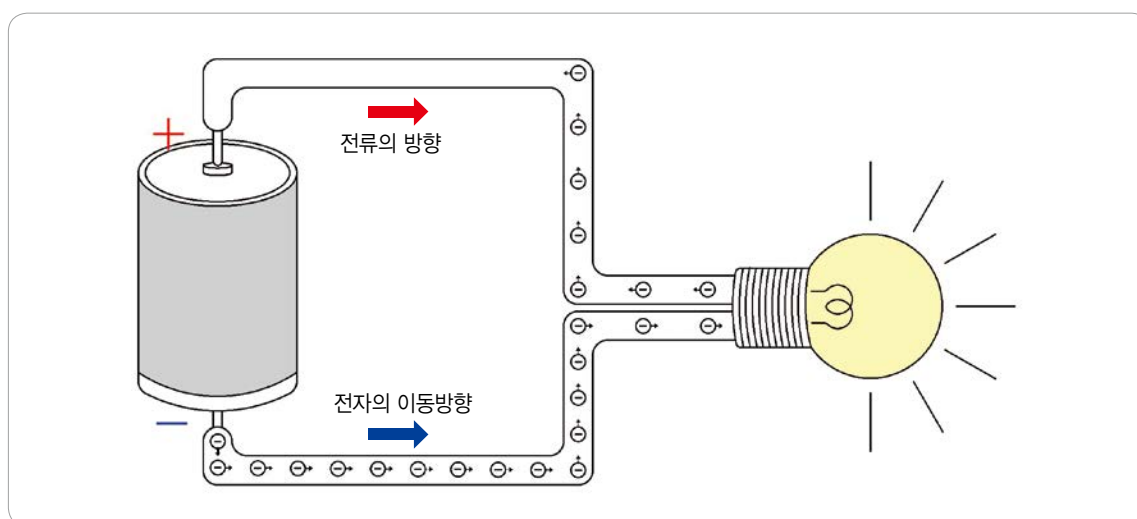
여기서 k 는 쿨롱 상수이며, 크기는 $9 \times 10^9 (Nm^2/C^2)$ 가 된다.



[그림 2-16] 전하의 흐름

2.4.1.2 전류

전기의 흐름은 전하의 이동을 의미하며, 이때 전하의 이동을 전류라고 한다. 양전하는 흐르지 못하는 반면, 음전하는 이동할 수 있으므로 전류는 음전하, 즉 전자의 흐름이라 볼 수 있다. 전류 I 는 단위 시간 t 에 흐르는 전하량으로, 도선의 단면을 시간 t 초 동안 Q 의 전하량이 통과하였을 때 다음



[그림 2-17] 전류

과 같이 나타낸다. 그리고 전류의 단위에는 암페어(A), (C/s)가 있다.

$$I = \frac{Q}{t}, (C/s), \dots\dots 2-39\text{식}$$

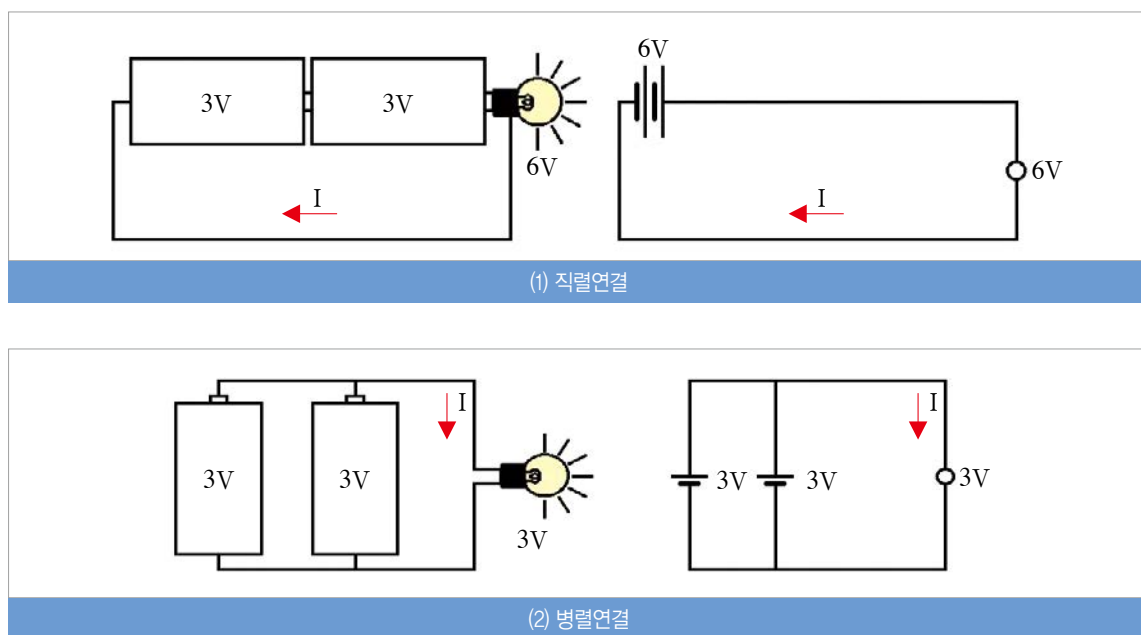
1A는 1초 동안에 도선의 단면을 통해서 1쿨롱(C)의 전하량이 흘러가는 것을 뜻한다. 따라서 1초 동안에 1C의 전하량이 도선의 단면을 흐르면 6.25×10^{18} 개의 전자가 이동하는 것이다.

2.4.2 전압

전압은 전류를 흐르게 하는 전기적인 압력으로서 전류가 흐를 때 발생하는 전위의 차이므로 그 차이가 클수록 전압은 높아진다. 따라서 전압이 높으면 전류의 세기가 커진다.

전압의 크기는 전지의 연결 방법에 따라 달라지는데, 다음 그림의 (1)에서와 같은 연결 방법을 직렬연결이라 하고 (2)에서와 같은 연결방법을 병렬연결이라 한다.

직렬연결은 병렬연결의 경우보다 전압이 커서 전류의 세기도 크며, 따라서 전지의 소모도 크다. 그러므로 전압이 낮더라도 전지를 오래 사용하고자 할 때에는 여러 개의 전지를 병렬로 연결하여 사용한다. 전압의 단위는 국제단위계 유도단위인 볼트(V)라는 단위를 사용하여 표시한다.



[그림 2-18] 전압

2.4.3 전기저항

도체를 따라 자유전자가 이동할 때에는 도체 내의 원자와 충돌하여 저항을 받게 된다. 이와 같이 도체에서 전류를 흐르기 어렵게 하는 물질의 작용을 그 도체의 전기저항이라고 한다. 전기저항은 도체의 길이가 길수록 크며 단면적이 클수록 작다. 따라서 도체의 길이를 L , 단면적을 A 라고 할 때 도체의 전기저항 R 은 다음과 같이 정의한다.

$$R = \frac{V_{\text{(전압)}}}{I_{\text{(전류)}}} = \rho_{\text{(비저항)}} \cdot \left(\frac{L_{\text{(도체길이)}}}{A_{\text{(도체단면적)}}} \right), (\Omega) \dots\dots 2-40\text{식}$$

여기서 ρ 는 도선의 재질에 관계하는 비저항이라고 한다. 비저항의 단위로는 $\Omega \cdot \text{m}$ 를 사용하는데, 여기에서 그리스 문자 Ω (오메가)를 옴이라고 하며 전기저항의 단위로 사용한다.

2.4.3.1 옴의 법칙

저항 R 인 도선에 흐르는 전류 I 와 전압 V 사이의 관계를 설명한 법칙으로, 전압을 V , 전류를 I , 저항을 R 라 할 때 다음과 같이 정의한다.

$$V = I \cdot R, I = \frac{V}{R}, R = \frac{V}{I} \dots\dots 2-41\text{식}$$

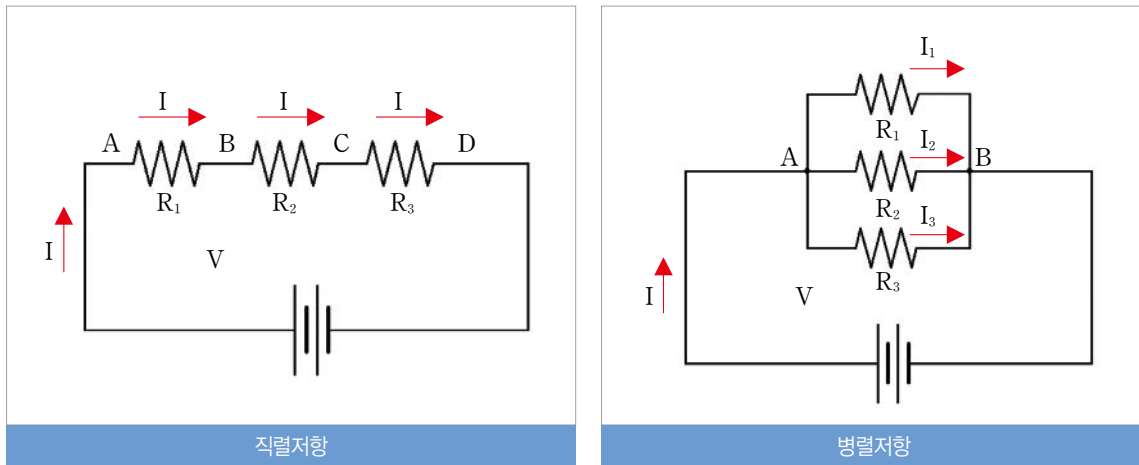
저항이 일정할 때 전압을 늘리면 전류의 세기도 그에 비례하여 증가하며, 전류를 일정하게 하기 위해서는 저항이 증가하는 것만큼 전압도 증가시켜야 한다는 것이다.

2.4.3.2 합성저항

전기회로에 여러 개의 저항이 있게 되면 연결 방법에 따라 합성저항의 값이 각각 다르게 나타난다. 전기회로에서는 전지의 연결에서와 같이 저항도 직렬 또는 병렬로 연결시켜 사용하게 되는데, 그 경우의 합성저항은 다음 그림 2-19에서와 같이 구할 수 있다.

직렬 저항의 경우 저항 R_1, R_2, R_3 가 직렬로 연결되어 있는데, 이때에는 각 저항에 흐르는 전류 값에 변화가 없다. 그러나 전압은 A에서 D로 각 저항을 지날 때마다 강해질 것이므로 AB 사이에서의 전압을 V_1 , BC 사이에서의 전압을 V_2 , CD 사이에서의 전압을 V_3 라고 하면,

$V = V_1 + V_2 + V_3 = IR_1 + IR_2 + IR_3 = I(R_1 + R_2 + R_3)$ 가 된다. 그런데 옴의 법칙에서 $V = I \cdot R$ 이므로 합성저항은 다음과 같이 된다.



[그림 2-19] 합성저항

$$R = R_1 + R_2 + R_3 \dots\dots 2-42\text{식}$$

병렬 저항의 경우 저항 R_1, R_2, R_3 가 병렬로 연결되어 있는데, 이때에는 전류 I 가 I_1, I_2, I_3 로 나누어진다. 그러나 AB에 걸리는 전압 V 는 일정하므로

$$I = I_1 + I_2 + I_3 = \frac{V}{R_1} + \frac{V}{R_2} + \frac{V}{R_3} = V\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}\right)\text{이 된다.}$$

그런데 옴의 법칙에서 $I = \frac{V}{R}$ 이므로 합성저항은 다음과 같이 된다.

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \dots\dots 2-43\text{식}$$

따라서 저항을 직렬로 연결하면 합성저항은 가장 큰 저항보다 커지고, 병렬로 연결하면 가장 작은 저항보다 더 작아진다. 이상을 정리하면, 다음과 같다.

(1) 도선의 길이를 L , 단면적을 A 라고 할 때 도선의 전기저항 R 은 다음과 같이 정의한다.

$$R = \rho \frac{L}{A}, (\rho: \text{비례상수}) \dots\dots 2-44\text{식}$$

(2) 옴의 법칙

$$V = I \cdot R, R = \frac{V}{I}, I = \frac{V}{R}, \dots\dots 2-45\text{식}$$

(3) 저항 R_1, R_2, R_3 가 직렬로 연결되었을 때에는 각 저항에 흐르는 전류 값에 변화가 없으므로 다음과 같이 정의한다.

$$V = V_1 + V_2 + V_3, R = R_1 + R_2 + R_3, \dots\dots 2-46\text{식}$$

(4) 저항 R_1, R_2, R_3 가 병렬로 연결되었을 때에는 각 저항에 흐르는 전압 값에 변화가 없으므로 다음과 같이 정의한다.

$$I = I_1 + I_2 + I_3, \frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3}, \dots\dots 2-47\text{식}$$

2.4.4 전기에너지(전력량)

전기동차의 전열 기구에 전류가 흐르면 저항에 의해 열이 발생한다. 즉, 전류가 흐르면 열에너지를 공급하게 되는데, 이때의 에너지를 전기에너지라고 한다. 전류가 회로에 흐를 경우에는 열로 전환되거나 모터를 돌리는 등의 일을 하게 된다. 즉, 전기에너지는 전압 V , 전류 I 와 시간 t 에 비례하므로 전력량(Wh : 전력×시간)은 다음과 같이 정의한다.

$$W \cdot h = V \cdot I \cdot t$$

$$W \cdot h = V \cdot I \cdot t = (IR) \cdot I \cdot t = \left(\frac{V}{R}\right) R \left(\frac{V}{R}\right) t = \frac{V^2}{R} t, \dots\dots 2-48\text{식}$$

2.4.5 줄의 법칙

도선 내 자유전자가 이동하면서 많은 원자들과 충돌하기 때문에 열이 발생하는데, 이것은 전기 에너지가 열에너지로 전환된 것이다. 이때 이 열을 줄(Joule)열 Q 라고 하고, 이에 대한 줄의 법칙(Joule's law)은 다음과 같다.

$$Q = VIt = I^2 R t = \frac{V^2}{R} t, (J), \dots\dots 2-49\text{식}$$

$$1\text{cal} = 4.186\text{J}, 1\text{J} = 0.239\text{cal}$$

2.4.6 전력과 전력량

2.4.6.1 전력

전력은 단위 시간에 공급되는 전기에너지를 말한다. 따라서 전력 $P = \frac{W}{t}$ 이며, 옴의 법칙에 의해 다음과 같이 정의한다.

$$P = \frac{W}{t} = \frac{VIt}{t} = VI = I^2 R = \frac{V^2}{R}, (W, kW) \dots\dots 2-50\text{식}$$

2.4.6.2 전력량

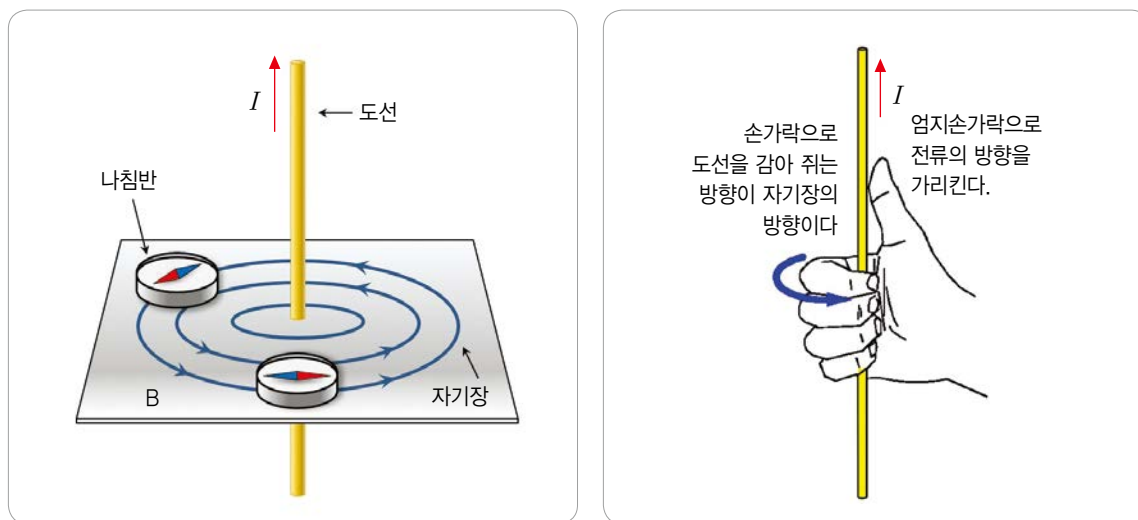
전력이 행한 일을 전력량이라 하는데, 일정 시간 동안 사용한 전기에너지의 총량을 말하며 다음과 같이 정의한다.

$$Pt = VIt = I^2 R t, (Wh, kWh), \dots\dots 2-51\text{식}$$

1kW의 전력으로 1시간 동안 행한 일(전력량)은 1kWh가 된다.

2.4.7 자기장(자계)

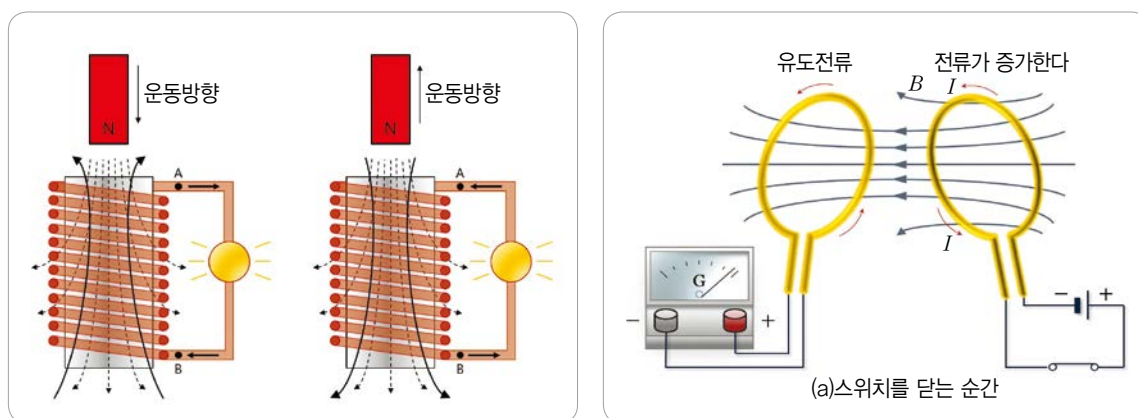
도체에 전류를 공급하면 도체 주위에는 보이지는 않지만 동심원 모양의 자기장이 발생 하는데, 여기서 앙페르의 오른손 법칙에 의해서 자기장의 방향도 알 수 있다. 또한 자석은 서로 다른 극끼리 달라붙기도 하지만, 쇠나 니켈 등도 끌어당기는데, 이렇게 끌어당기는 힘은 자석과 어느 정도 떨어져 있어도 작용하며, 이 힘을 자기력이라 하고, 자기력의 활동 공간을 자계 또는 자기장이라고도 한다.



[그림 2-20] 자기장

2.4.8 전자기유도 법칙

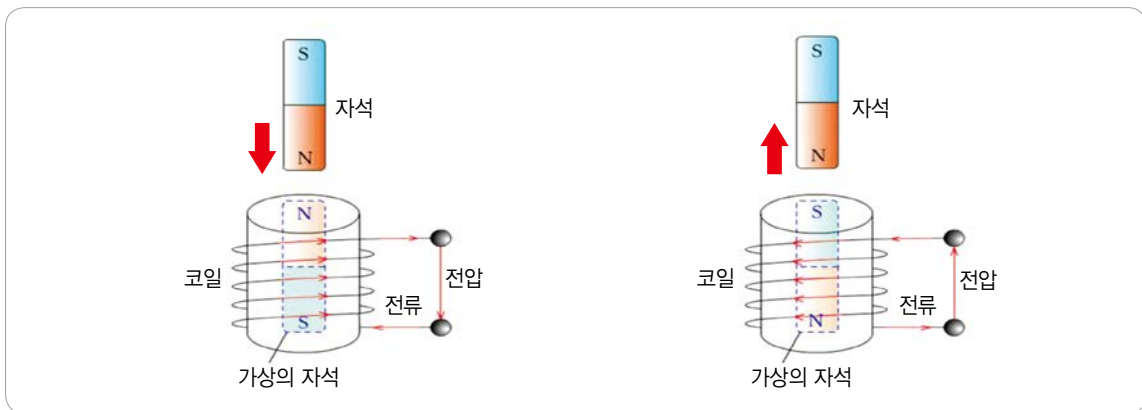
검류계로 자기장 내에서 도체(코일 등과 같이 전기가 통하는 물체)를 움직이면 검류계의 바늘이 움직이는데, 이것은 전류가 흐른다는 것으로 전류의 크기는 자석을 움직이는 속도가 빠를수록 크다. 그리고 전류의 방향은 자석의 N극이나 S극 또는 가까이 할 때나 멀리 할 때 반대가 된다. 이러한 현상은 자석을 그대로 둔 채 코일 쪽을 움직여도 마찬가지이다. 이와 같이, 자기장의 변화에 의해 도체에 기전력이 발생하는 현상을 전자기유도라고 한다. 이것은 영국의 패러데이가 발견해서 패러데이의 전자기유도 법칙이라고 한다. 이 법칙을 응용한 전기기기에는 발전기와 변압기 등이 있다.



[그림 2-21] 전자기유도 현상

2.4.9 렌츠의 법칙

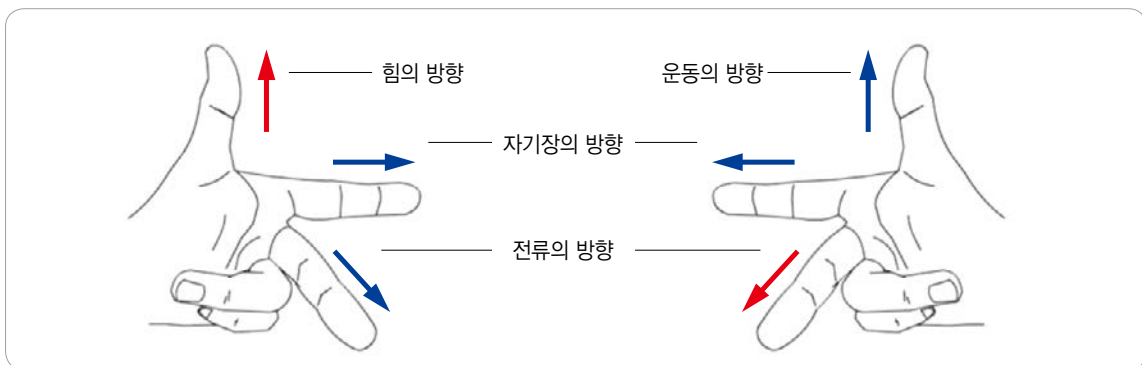
렌츠에 의하여 전자유도 작용으로 유도기전력의 방향을 알아낸 법칙으로, 1834년 렌츠는 유도기전력은 유도전류의 발생 원인이 되는 자기력선속의 변화를 방해하려는 방향으로 발생한다는 법칙을 밝혀냈다. 이것을 렌츠의 법칙이라고 한다. 이 법칙은 코일에 흐르는 유도전류의 방향을 알 수 있게 한다.



[그림 2-22] 렌츠의 법칙

2.4.10 플레밍의 오른손 법칙

엄지, 검지, 중지를 서로 직각이 되게 벌리고 엄지를 도체의 이동 방향으로, 검지를 자기장의 방향으로 향하게 하면 중지는 유도전압의 방향을 알 수 있는데, 이것을 플레밍의 오른손 법칙이라고 한다. 자속밀도를 $B(Wb/m^2)$, 전류를 $I(A)$, 도체의 길이를 $L(m)$, 회전자 속도 $V(m/s)$ 라 하면 유



[그림 2-23] 플레밍의 법칙

도된 기전력(E)은 다음과 같이 정의한다.

$$E = B \cdot L \cdot v, (V), \dots\dots 2-52\text{식}$$

2.4.11 플레밍의 왼손 법칙

세 손가락을 서로 직각으로 펼쳐서 왼손의 집게손가락을 자기장 방향, 가운데손가락을 전류 방향, 엄지손가락을 도체의 운동 방향으로 하면 전동기의 회전 방향과 전자력의 크기는 플레밍의 왼손 법칙으로 결정할 수 있다. 즉, N 극과 S 극으로 형성된 자기장 B 내에 도체를 놓고 도체에 직류전류 I 를 공급하면 도체는 전자력 F 라는 힘을 받기 때문에 도체의 이동 방향은 플레밍의 왼손 법칙으로 설명할 수 있다.

$$F = B \cdot I \cdot L, (N), \dots\dots 2-53\text{식}$$

☑ 핵심정리



1. 단위(기본단위)

양	기호	명칭
길이	m	미터
질량	kg	킬로그램
시간	s	세컨드
전류	A	암페어
열역학적 온도	K	켈빈
물질의 양	mol	몰
광도(광원의 밝기)	cd	칸델라

2. 단위와 물리량

- 1) 힘의 단위, 의 단위, 일률의 단위
- 2) 속력, 속도, 가속도, 표정속도, 진동 가속도, 압력, 파스칼의 원리. 등가속도 직선운동 힘, 등속원운동, 중력, 구심력, 원심력, 관성력, 마찰력, 충격량, 운동량, 탄성력, 토크, 뉴턴의 운동 법칙, 일

3. 일과 에너지

$$1J = 1N \cdot m = 1kg \cdot m/s^2 \cdot m = 1kg \cdot m^2/s^2$$

$$1erg = 1dyne \cdot cm = 1g \cdot cm/s^2 \cdot cm = 1g \cdot cm^2/s^2$$

4. 전기

전류, 옴의 법칙, 전력, 전력량, 렌츠 법칙, 플레밍 법칙, 전자기유도 현상 등

3장

전기기기



3.1 철도차량 전기기기의 분류

3.2 변압기

3.3 유도전동기성



3장

전기기기

학습목표

- ✓ 전기기기를 회전기와 정지기로 구분 할 수 있다.
- ✓ 직류전동기 및 변압기 그리고 유도전동기에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 전자기유도 현상 및 렌츠의 법칙에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 직류기, 직류전동기, 변압기, 유도전동기, 토크 등

3.1 철도차량 전기기기의 분류

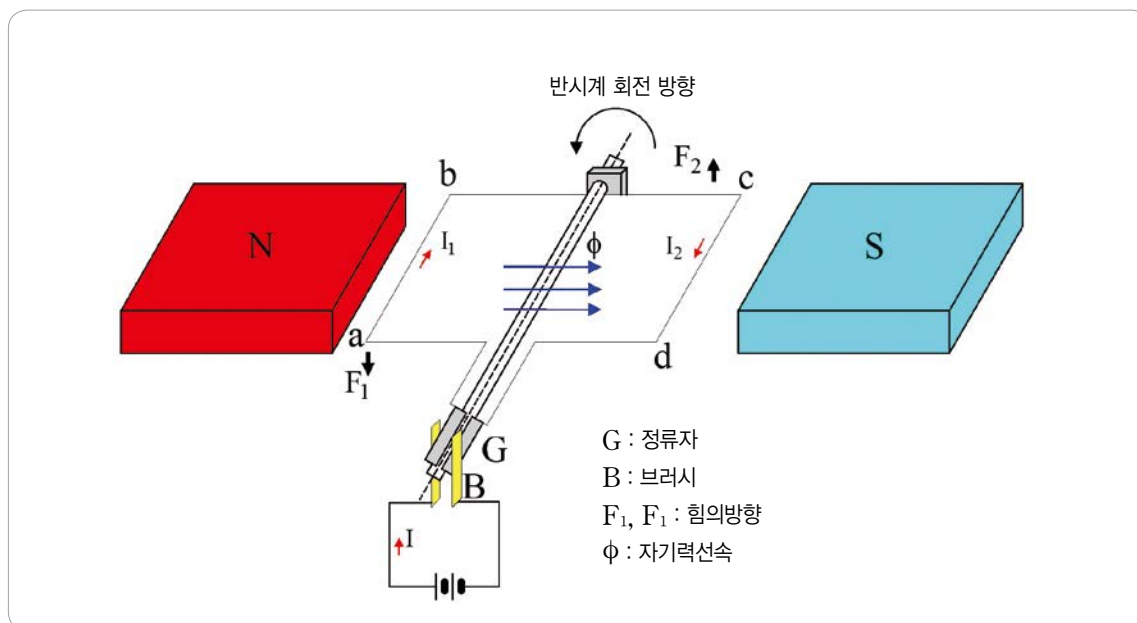
[표 3-1] 전기기기의 분류

전기기기	회전기	직류기	직류전동기
		교류기	유도전동기
	정지기	변압기	일반 변압기

직류 전기를 공급받아서 회전력을 얻는 직류전동기와 직류 전기를 발생하는 직류발전기를 총칭하여 직류기라고 한다. 특히, 직류전동기는 자기장 속에 있는 회전자에 전류를 공급하여 회전자에 전자기력이 만들어지는 원리를 이용한 장치이며, 직류발전기는 자기장 속에서 회전을 움직이면 전자기유도 현상에 의하여 전기가 발생하는 원리를 이용한 장치이다.

3.1.1 직류전동기

직류전동기는 직류 전기에너지를 이용하여 회전력을 얻는 기계로서, 전기에너지를 기계에너지로



[그림 3-1] 직류 전동기

변환시키는 시스템이다. 직류전동기는 속도 제어가 쉽고, 급격한 부하가 전동기에 작용하여도 큰 힘을 낼 수 있다. 또 회전 방향을 쉽게 제어할 수 있으며, 직선적인 시동 회전력을 얻을 수 있다. 직류 전동기의 역기전력은 단자전압보다 작다.

3.1.2 직류발전기

고정자 코일 속에서 회전자를 움직이면 회전자에는 자기장이 형성되고, 이렇게 형성된 자기장은 전자기유도 현상에 의하여 고정자 권선에 자기장을 형성하여 유도전압을 만든다. 이렇게 만든 전압은 교류이고, 직류발전기는 정류 과정을 통해서 코일에 발생된 교류전압을 직류전압으로 정류시키는 것이다. 즉, 직류발전기의 출력전압이 직류라고 하더라도 발전기 내의 코일에 발생된 전압은 교류전압이다. 직류발전기의 유도기전력은 단자전압⁵⁾ 보다 크다.

5) 단자전압 : 단자전압은 회로에 연결된 전지의 양쪽 단자에서 측정되는 전압의 세기이다. 전지의 내부저항 때문에 전지가 회로에 연결되었을 때 기전력보다 작은 단자전압이 측정된다. 단자전압을 $V_{(E)}$, 기전력을 $E_{(V)}$, 내부저항을 $R_{(R)}$ 이라 할 때, 다음과 같이 단자전압을 나타낼 수 있다.

$$V_{(E)} = E_{(V)} - R_{(R)}$$

3.1.3 직류전동기의 원리

자기장 속에서 회전자에 전류를 공급하면, 회전자는 자기장으로부터 힘을 받는다. 즉, 전류와 자기장 사이에 작용하는 힘을 전자력⁶⁾이라고 하는데, 플레밍의 왼손 법칙으로 설명할 수 있다. 왼손의 중지, 검지, 엄지를 서로 직각으로 벌리고 중지를 전류의 방향으로, 검지를 자기장의 방향으로 놓으면, 힘의 방향은 엄지가 가리키는 방향이 된다.

여기서 회전자에서 발생하는 힘을 F , 회전자 주위에서 나오는 자기장을 B , 전류를 I , 회전자에 감긴 도체의 유효 길이를 L 이라 할 때 다음과 같이 정의할 수가 있다.

$$F = B \cdot I \cdot L, (N), \dots\dots 3-1\text{식}$$

직류전동기의 회전자가 권선에 전압을 가하여 전류를 공급하면 전자력으로 인하여 회전자는 회전하여 직류전동기로 작용한다. 직류전동기가 회전하면 회전자는 고정자의 권선으로부터 나오는 자기력선속(자속)을 끊으므로 직류발전기와 같이 기전력을 만들게 된다. 여기서 만들어진 기전력은 직류전동기 회전자에 공급하는 단자전압 V_t 와 반대 방향이 되고 회전자 전류 I_r 를 방해하는 방향으로 작용하기 때문에 역기전력이라고 한다. 따라서 역기전력을 E_c , 회전자 저항을 R_r , 회전자 전류를 I_r , 단자전압을 V_t , 자극 수를 p , 한 극당 자기력선속(자속)을 Φ , 도체 수를 Z , 병렬회로 수를 a , 매 분당 회전수를 n , 기계 상수를 k , k_1 , k_t 라 하면 역기전력 E_c 은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$E_c = V_t - I_r R_r (V), \dots\dots 3-2\text{식}$$

$$E_c = V_t - I_r R_r = \frac{p Z \Phi n}{60a} = k_1 \cdot \Phi \cdot n (V), \dots\dots 3-3\text{식}$$

$$k = \frac{1}{k_1} = \frac{60a}{pZ}, k_1 = \frac{pZ}{60a}, k_t = \frac{pZ}{2a\pi}$$

위 식에서와 같이 역기전력은 회전속도에 비례하므로 직류전동기에 기계적 부하가 증가하게 되면 회전속도는 감소하게 된다. 그러므로 역기전력 또한 감소하게 된다.

6) 전자력 : 자기장 내 도선을 두고 전류를 공급하면 도선 주위에 발생하는 자기장으로 인하여 도선에 힘이 작용하는 것

직류전동기가 한쪽 방향으로 계속적인 회전력을 얻기 위해서는 회전자가 일정한 위치를 지날 때마다 전류의 방향을 바꾸어 주어야 한다. 이와 같이 전류의 방향을 바꾸어 한쪽 방향으로 흐르게 하는 것을 정류작용이라고 한다.

3.1.4 직류전동기의 구조

큰 기동 토크와 부하의 변동에 적응하는 직류직권전동기는 속도 제어와 회전 방향의 변환이 쉬운 우수한 특성을 가지고 있어 전기동차의 전동기로 활용하고 있는데 다음과 같은 구조를 가지고 있다.

3.1.4.1 계자(field magnet)

계자 철심, 계자권선, 자극 및 계철로 구성되어 N, S의 자극과 같이 자기력선속을 발생하는 부분이며, 계자 철심은 계자권선으로 자극을 만드는 부분이다. 대형 직류전동기의 공극은 6~8mm 정도 된다.

3.1.4.2 회전자(armature)

회전자 철심과 회전자 권선, 정류자 및 축으로 구성되어 있으며, 회전자에 전기를 공급해 주면 전자기력에 의해서 전동기가 되어 회전을 하게 된다.

3.1.4.3 정류자(commutator)

브러시와 접촉하며, 유도된 교류 기전력을 직류로 바꾸어 주는 부분으로 직류기의 가장 중요한 부분이다.

3.1.4.4 브러시(brush)

전동기의 내부 회로와 외부 회로를 전기적으로 연결시켜 주며, 기전력을 외부로 인출하는 부분이다. 종류에는 탄소브러시와 전기 흑연 브러시, 그리고 금속브러시가 있다. 일반적으로 양호한 정류를 하기 위하여 접촉 시 저항이 큰 탄소브러시를 사용한다.

3.1.5 직류전동기의 종류

직류전동기는 타(他)여자 전동기와 자(自)여자 전동기로 분류하며 특히, 자여자 전동기는 직권전동기, 분권전동기, 복권전동기로 나뉜다. 여기서 복권전동기는 가동복권전동기와 차동복권전동기

로 분류한다. 타여자 전동기는 계자권선과 회전자 권선이 각각 다른 전원에 연결된다. 직권전동기는 계자권선과 회전자 권선이 전원에 직렬로 연결되고, 분권전동기는 계자권선과 회전자 권선이 전원에 병렬로 연결된다.

- (1) 타여자 전동기
- (2) 자여자 전동기
 - 1) 직권전동기
 - 2) 분권전동기
 - 3) 복권전동기
 - ① 가동복권전동기
 - ② 차동복권전동기

3.1.6 직류전동기의 토크

자기장 속에 놓여 있는 회전자에 전압을 가하면 회전자에는 전류가 흐르게 되고, 회전자를 회전시키려는 토크(torque)가 발생한다. 여기서 회전력을 T , 한 극당 자기력선속을 Φ , 병렬회로수를 a , 도체수를 Z , 자극수를 p , 기계 상수를 $k_t (= \frac{pZ}{2a\pi})$, 회전자에 공급된 전류를 I_r 이라하면 다음과 같이 정의된다.

$$T = k_t \Phi I_r = \frac{p Z \Phi I_r}{2a\pi} \text{ (Nm)}, \dots\dots 3-4\text{식}$$

따라서 토크는 회전자에 공급되는 전류 크기와 한 극당 자기력선속에 비례한다.

특히 직권전동기의 토크는 회전자에 공급되는 전류가 작을 때 부하 전류, 계자 전류, 회전자 전류가 모두 같기 때문에 $T = k_t \Phi I_r$ 에서 Φ 는 $\propto I_r$ 이므로 $T = k_t I_r I_r = k_t (I_r)^2$ 가 된다.

3.1.7 직류전동기의 속도

직류전동기의 회전속도는 다음 식으로부터 유도하면 다음과 같다.

직류전동기 회전속도는 역기전력에 비례하며, 한 극당 자기력선속에 반비례한다.

$$k = \frac{1}{k_1}, k_1 = \frac{1}{k}, E_c = V_t - I_r R_r = k_1 \Phi n$$

$$n = \frac{V_t - I_r R_r}{k_1 \Phi} = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi}, \dots\dots 3-5식$$

3.1.8 직류직권전동기의 속도 특성

직류전동기가 정지 상태에서 운전 상태로 하는 것을 기동이라고 한다. 기동 시 직류전동기의 회전자 권선에 흐르는 전류의 크기는 가해 주는 전압, 권선의 저항, 그리고 권선에서 발생하는 역기전력에 의하여 달라진다. 직권전동기는 계자권선과 회전자 권선이 직렬로 연결되어 있으므로 공급되는 전류가 작을 때는 부하 전류와 회전자 전류, 계자 전류는 모두 같아서 자기력선속 Φ 이 부하 전류 I 에 비례한다. 회전자 저항을 R_r , 회전자 전류를 I_r , 단자전압을 V_t , 자극 수를 p , 한 극당 자기력선속(자속)을 Φ , 도체 수를 Z , 병렬회로 수를 a , 매 분당 회전수를 n , 기계 상수를 k, k_1, k_t 라 하면 전동기의 분당회전수 n 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$n = \frac{V_t - I_r R_r}{k_1 \Phi} = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi} \quad \text{에서 자기력선속은 부하 전류 } I \text{에 비례하므로 다음과 같이}$$

정의 할 수 있다.

$$n = \frac{V_t - I_r R_r}{k_1 \Phi} = k \frac{V_t - I_r R_r}{\Phi} = k \frac{V_t - R_r I_r}{I}$$

그리고 회전자 전류와 회전자 저항은 단자 전압에 비해 매우 작은 값이므로 직권전동기의 회전속도는 다음과 같이 정의한다.

$$n = k \frac{V_t}{I}, (\text{rpm}), \dots\dots 3-6식$$

직권전동기는 부하 전류가 감소하면 급격하게 속도가 상승하고, 부하 전류가 증가함에 따라서 속도는 감소하게 된다. 직권전동기는 무(無)부하 상태가 지속되면 속도가 높아져서 위험한 상황이 발생한다.

3.1.9 직류직권전동기 속도 제어

직류직권전동기의 속도를 제어하는 데는 전기자 저항, 자속, 단자전압을 변화시키는 방법이 있다.

[표 3-2] 직류직권전동기의 속도 제어 방식

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
직류직권전동기	전류(I)	전압(V), 계자(ϕ)
	$T = k_t \phi I_r$	$n = k \frac{V_t - I_r R_r}{\phi}$

3.1.9.1 저항제어 방식

회전자 권선의 저항을 변화시키는 방법으로 정 토크⁷⁾ 특성을 나타내지만, 속도 변동이 크고 효율이 좋지 않다. 주로 직권전동기에서 사용한다.

3.1.9.2 계자제어 방식

계자 전류의 크기를 변화시키면 자속이 변하게 되는데, 이와 같은 방법으로 속도를 제어하면 정 출력⁸⁾의 특성을 가지지만, 응답성이 좋지 않다. 주로 분권 및 복권전동기에서 사용한다.

3.1.9.3 전압 제어 방식

회전자에 가해 주는 전압을 변화시키는 방법으로 정 토크, 정 속도 특성을 가지고 있으며, 속응성(자동 조정 체계가 설정 값의 변동에 신속히 응답하는 성질)이 양호하다. 주로 타여자 직류전동기에 사용된다.

3.2 변압기

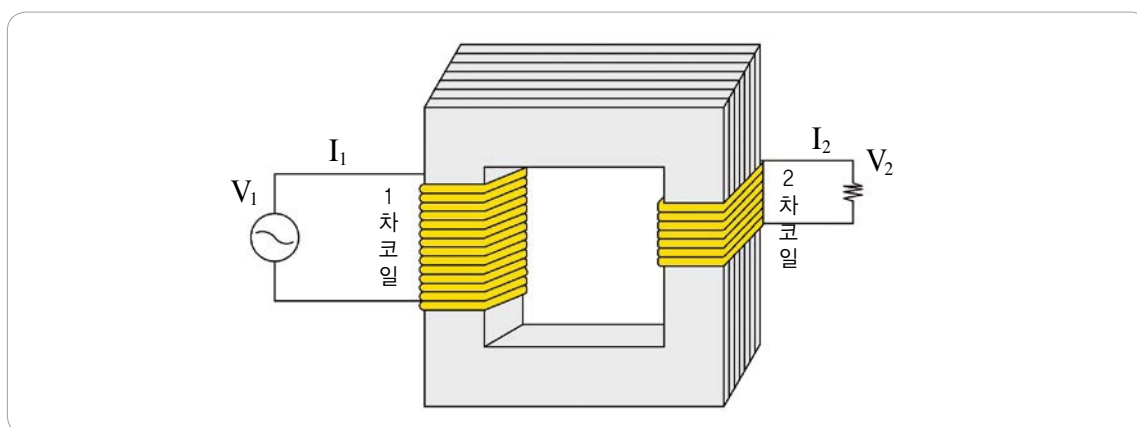
변압기는 렌츠의 법칙과 패러데이 전자기유도의 법칙으로 설명할 수 있다. 1차 권선과 2차 권선은

7) 정 토크 : 모든 속도에서 같은 크기의 토크가 발생하는 전동기

8) 정 출력 : 모든 속도에서 같은 크기의 출력이 발생하는 전동기

전기적으로 분리되어 있으나 자기적으로 결합되어 있다. 1차 권선에 교류전류를 공급하면 철심을 통과하는 자기력선속(자속)이 변화하여 전자기유도 작용에 의하여 2차 권선에 유도기전력이 발생한다. 이때 유도기전력의 크기는 자기회로를 통과하는 자기력선속의 변화 속도와 양쪽 권선에 감긴 코일의 권선 수에 따라 달라진다. 즉, 1차 측 주파수를 일정하게 하면 2차 측도 같은 크기의 주파수를 갖게 된다. 그리고 1차 권선 수가 2차 권선 수보다 많이 감게 되면 2차 전압이 1차 전압 보다 낮아진다. 반대로 1차 권선 수가 2차 권선 수보다 적으면 1차 전압보다 2차 전압이 커진다. 여기서 V_1 , V_2 를 각각 1차 전압, 2차 전압(V), N_1 , N_2 를 각각 1차 권선 수, 2차 권선 수(회), I_1 , I_2 를 각각 1차 전류, 2차 전류(A)라 하면 변압비, 권수비, 변류비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\frac{V_1}{V_2}(\text{변압비}) = \frac{N_1}{N_2}(\text{권수비}) = \frac{I_2}{I_1}(\text{변류비}), \dots\dots 3-8\text{식}$$



[그림 3-2] 변압기

3.2.1 변압기 구조

변압기의 구조는 자기회로를 구성하는 철심, 전기회로를 구성하는 권선, 절연을 위한 절연유, 본체를 이루는 외함과 커버 등으로 구성되어 있다.

3.2.1.1 철심

자기회로를 구성하여 1차 측에 인가된 전압을 2차 측에 다른 전압으로 나타나도록 하는 역할을 한다. 구조적으로 자기장 안에 철심이 있게 되므로 맴돌이전류에 의한 철 손실과 누설 자기력선속이

중요한 요소가 된다.

3.2.1.2 권선

1차 권선과 2차 권선을 나누어 감게 되면 1차 전류에 의해서 발생된 자기력선속이 2차 권선에 모두 도달하지 못하도록 누설 자기력선속이 생기게 된다. 그렇게 되면 변압기 효율이 나빠지게 되므로 대부분 변압기는 1차 권선과 2차 권선이 하나의 몸체가 되도록 한다.

3.2.2 변압기 정격

3.2.2.1 정격전압

변압기의 운전과 성능 특성을 나타낼 때의 기준전압으로 무부하 운전 시에 발생하는 전압을 말한다.

3.2.2.2 정격 용량

정격전압, 정격 주파수, 정격 역률에서 지정된 온도 상승 한도를 넘지 않고, 출력 단자 사이에서 얻어지는 값을 정격 용량이라 한다.

3.2.2.3 정격전류

정격전압과 정격 용량에서 산출되는 전류의 실효값으로, 정격 2차 전류는 정격 용량을 정격 2차 전압으로 나누면 된다.

3.3 유도전동기

유도전동기는 도체와 자기장 사이에서 발생하는 전자기유도 작용을 이용한 것으로, 플레밍의 오른손 법칙으로 기전력이 발전되는 원리와 왼손 법칙으로 전동력이 발생하는 원리로 설명할 수 있다. 기전력 발생 원리는 다음과 같이 설명할 수 있다. 일정한 자기장 안에 도체를 자기장과 직각 방향으로 놓고 도체를 운동시키면 플레밍의 오른손 법칙에 따라 기전력이 유도된다. 이것은 교류 기전력이고, 그 방향은 도체가 한 바퀴 회전할 때마다 반대로 유도된다. 즉, 코일이 완전히 한 바퀴 회전하면 1[Hz]의 기전력이 유도된다. 유도기전력의 순시 값을 E 라고 하면, 도체의 회전속도가 $v(m/s)$, 공간 자기력선속 밀도가 $B(Wb/m^2)$, 도체의 유효 길이가 $l(m)$ 일 때 유도기전력 E 의 크기는 다음과 같이 정의한다.

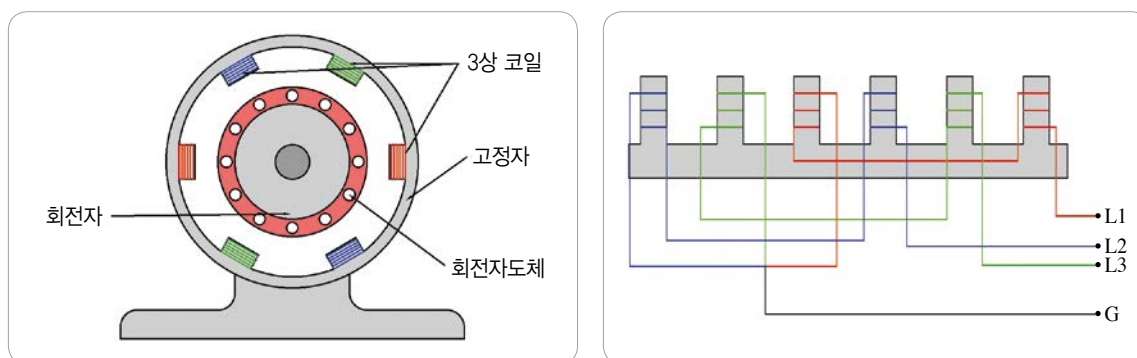
$$E = B \cdot l \cdot v, (V), \dots\dots 3-9식$$

플레밍의 왼손 법칙에 의하여 전동력이 발생하는 원리는 유도전동기 원리에서 설명한다.

3.3.1 유도전동기의 원리

고정자 철심에 권선 수, 선의 굵기, 선의 크기가 같은 ㉠코일, ㉡코일, ㉢코일을 120° 간격으로 배치하고 대칭인 3상 전류를 공급하면 고정자에 회전자기장이 발생된다. 고정자에서 만들어진 회전자기장으로 인하여 전자기유도 작용으로 회전자 권선에 유도전류가 만들어지므로 또 하나의 회전자기장이 만들어진다. 이렇게 두 개의 회전자기장이 형성하게 되면 토크가 발생하여 회전자는 회전을 한다. 회전자의 토크는 회전자 권선에 흐르는 전류와 자속의 곱에 비례한다.

무부하 상태에서 회전자 속도 $N(\text{rpm})$ 이 점점 증가해 고정자의 회전자기장의 속도인 동기속도 $N_s(\text{rpm})$ 에 가까워지면, 회전자를 관통하는 자기력선속 수는 줄어들게 된다. 자기력선속이 감소하면 회전자에 유도되는 전류가 줄고, 회전자 토크도 감소한다. 그러나 부하가 연결되면 회전자의 속도는 떨어져 동기속도와 속도 차가 증가한다. 그렇게 되면 회전자를 관통하는 자기력선속 수도 증가하여 회전자 권선에 발생하는 전류는 커지고 이것은 전동기의 토크를 크게 하여 속도는 다시 증가하게 된다. 즉, 전동기가 큰 토크로 부하를 돌려주기 위해서는 회전자 속도가 동기속도보다 느린 회전수를 가져야 한다.



[그림 3-3] 유도전동기의 구조

3.3.1.1 유도전동기의 구조

3상 유도전동기의 구조는 크게 고정자와 회전자로 구성되어 있으며, 회전자에는 권선형 회전자와 농형 회전자로 분류한다.

(1) 고정자 : 고정자 철심과 권선으로 구성되어 있다.

1) 고정자 철심 : 고정자 철심은 자기력선속이 통과하는 자기회로로서 규소강판을 수십 겹 성층하여 3상 코일을 감을 수 있도록 되어 있다. 공기보다 자기저항이 적은 자기력선속 통로가 있다.

2) 고정자 권선 : 회전자기장(회전자계)을 만드는 고정자의 권선이다.

(2) 회전자 : 회전자는 축과 철심, 그리고 권선 세 부분으로 구성되어 있으며 농형 회전자와 권선형 회전자로 분류한다.

1) 축 : 회전자 철심을 지지하고 회전의 중심이 된다.

2) 회전자 권선 : 2차 유도 전자기력을 만드는 회전자의 권선이다.

(3) 회전자 권선

3.3.1.2 유도전동기의 슬립

동력 운전 시 회전자의 회전속도는 고정자 회전 자속의 속도와 거의 비슷하나 완전하게는 일치하지 않는다. 이렇게 일치하지 않는 부분을 슬립이라고 한다. 동력 운전 시 회전자에 부하가 걸리면 회전자는 회전자계보다 약간 늦은 속도로 회전을 하게 되며, 반대로 회생제동 상태가 되면 회전자가 회전자계보다 약간 빠르게 회전을 한다. 여기서 회전자계의 회전수 N_n , 회전자계의 회전 주파수 f_{nr} , 극수 p , 회전자의 슬립 주파수를 f_{rs} , 회전자의 회전 주파수 f_{rr} , 슬립률 s , 회전수 N_r 라 하면 다음과 같이 정의한다.

$$f_{rs} = f_{nr} - f_{rr}, \dots\dots 3-9\text{식}$$

$$s = \frac{f_{nr} - f_{rr}}{f_{nr}} = 1 - \frac{f_{rr}}{f_{nr}}, \dots\dots 3-10\text{식}$$

$$s = \frac{N_n - N_r}{N_n} = 1 - \frac{N_r}{N_n}$$

또한 슬립의 범위는 다음과 같다.

$$1 > s > 0$$

즉, 슬립이 1일 때 회전자의 회전수는 0이 되므로 전동기는 정지 상태가 된다. 슬립이 0일 때 회전자의 회전수는 동기속도(회전자계)와 같으므로 무부하 상태와 같다.

전기동차의 동력 운전에서 회생제동으로, 또는 회생제동에서 동력 운전으로의 변경은 슬립을 양

(+), 또는 음(-)으로 전력 반도체소자의 게이트 제어에 의하여 이행되며, 전동기의 회전 방향 변경은 교류 전원 3상의 순서를 바꿔 자기력선속의 회전 방향을 변경함으로써 이루어진다. 여기서 회전자계의 회전주파수를 f_{nr} , 회전자의 슬립주파수를 f_{rs} , 회전자의 회전수 N_r 는 다음과 같이 정의한다.

$$N_r = \frac{120(1-s)f_{nr}}{p} = \frac{120(f_{nr} - f_{rs})}{p}, \dots\dots 3-11식$$

3.3.1.3 유도전동기 동기속도

견인전동기로 사용하는 경우는 회전자의 속도를 고정자 회전 자속의 회전속도보다 느린 속도로 회전하게 하고, 발전기로 사용하는 경우는 회전자를 고정자 회전 자속의 회전속도보다 빠른 속도로 회전하게 한다. 이러한 현상은 회전자와 고정자 회전 자속의 회전속도 간의 슬립 제어에 의해 발생한다. 일반적으로 유도전동기는 다음 식처럼 전원 주파수(인버터 주파수) f_{inv} 와 극수 p 에 의해 결정되는 동기속도 N_n 을 중심으로 회전하는 정속도(定速度) 특성을 갖는다. 현재 국내에서 과천선이나 분당선에서 사용되는 전동기의 극수는 4극을 사용하고 있다.

$$N_n = \frac{120f_{inv}}{p}, (\text{rpm}), \dots\dots 3-12식$$

기관사가 제동을 체결하여 회생제동 상태가 되면 회전자계의 회전 주파수 f_{nr} 가 회전자의 회전 주파수 f_r 보다 작기 때문에 슬립 주파수 f_{rs} 와 슬립률 s 는 0보다 작은 값을 갖는다. 그리고 회전자 속도 N_r 및 전원 주파수 f_{inv} 와 동기속도 N_n 와의 관계는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$N_r = N_n(1-s) = \frac{120(f_{nr} - f_{rs})}{p} (1-s), (\text{rpm}) \dots\dots 3-13식$$

3.3.1.4 유도전동기 회전수 제어

유도전동기의 회전수를 변화시키기 위해서는 전원 주파수(인버터 주파수)와 극 수, 그리고 슬립을 변경해 주면 되지만 설계 시부터 극 수는 고정되어 있어 곤란하다. 그래서 전원 주파수와 슬립을 조정하여 제어한다.

- (1) 주파수 제어 : 회전자의 속도를 높게 하려면 회전자계의 속도를 높여야 하고, 회전자계의 속도를 높이려면 회전자계의 회전 주파수를 높여야 한다. 여기서 회전 주파수 변화는 전원 주파수를 변화시키는 것이다.

- (2) 슬립 제어 : 슬립 주파수를 증가시켜 전동기의 출력을 일정하게 유지시키면서 제어하는 방법으로, 슬립이 양(+)일 때 동력 운전 상태가 되며, 슬립이 음(-)일 때 회생제동 상태가 된다.
- (3) 극 수 제어 : 전동기의 극 수와 회전자 회전수는 반비례하므로 극 수가 많을수록 속도는 낮아진다. 그리고 전기동차는 설계 시 전동기의 극 수가 이미 고정되어 있기 때문에 변경하기 어렵다.

[표 3-3] 유도전동기의 속도 제어 방식

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
유도전동기	주파수(F), 전압(V)	극 수(P), 주파수(F)
	$T = K_4 \cdot \left(\frac{V_m}{f_{ivn}}\right)^2 \cdot f_{rs}$	$N_r = N_n(1-s) = \frac{120(f_{nr} - f_{rs})}{p} (1-s)$

3.3.1.5 유도전동기 토크

유도전동기는 1차 측 고정자 권선에서 2차 측 회전자 권선으로 전자기유도 작용에 의해 전력을 전달하고, 이 전력을 동력으로 변환시킨다. 이 경우 회전자에 발생하는 토크 T 는 슬립 주파수가 작은 범위에서는 전동기의 자속 Φ_m 과 회전자 2차 전류에 의해 발생되는데, 기계 상수를 K_1 , 전동기의 자속을 Φ_m , 회전자 2차 전류를 I_r 이라 할 때 토크 T 는 다음과 같이 정의한다.

$$T = K_1 \cdot \Phi_m \cdot I_r = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{ivn}}\right)^2 \cdot f_s (N \cdot m), \dots\dots 3-14\text{식}$$

전동기의 자속은 인버터 출력전압(전동기 전압)에 비례하고, 인버터 주파수(전원 주파수)에 반비례하기 때문에 기계 상수를 K_2 , 인버터의 출력전압을 V_m , 인버터 주파수를 f_{ivn} 라 하면 전동기의 자속은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\Phi_m = \frac{K_2 \cdot V_m}{f_{ivn}}, (Wb/m^2), \dots\dots 3-15\text{식}$$

또한 회전자 2차 전류 I_r 은 자속과 슬립 주파수에 비례하기 때문에 회전자 전류는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$I_r = K_3 \cdot \Phi_m \cdot f_{rs}, \dots\dots 3-16\text{식}$$

위의 식으로부터 삼상 유도전동기의 토크는 다음과 같이 정의한다.

$$T = K_4 \cdot \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 \cdot f_{rs}, \dots\dots 3-17\text{식}$$

토크를 최적의 조건으로 제어하기 위해서는 전원 전압(인버터 출력전압)과 전원 주파수를 제어할 필요가 있다. 자속과 회전자 2차 전류는 전원 전압과 전원 주파수가 부여되면 결정된다. 전원 주파수만 변화시킨 경우의 토크 특성(전원 전압 일정)은 속도는 상승하지만 토크는 $\left(\frac{1}{f_{ivn}} \right)^2$ 에 비례하여 감소하고, 전원 전압만 변화시킨 경우의 토크 특성(전원 주파수 일정)은 V_m^2 에 비례해 증가하지만 속도가 상승하지 않기 때문에 전원 전압과 전원 주파수를 조합하여 제어하지 않으면 전기동차에는 적합하지 않게 된다.

3.3.2 인버터 전기동차의 운전 모드

VVVF 전기동차에서는 인버터 출력전압 제어, 인버터 주파수 제어, 슬립 주파수 제어를 사용하고 있으며, 직류직권전동기를 사용하는 전기동차와 동등한 차량 성능을 얻고 있다. 운전 모드별 특성은 다음과 같다.

3.3.2.1 정 토크 영역(저속)

[주파수와 전압의 일정 제어 영역, 전류 일정, 토크 일정]

슬립 주파수(f_{rs})를 일정하게 제어함과 동시에 전동기에 공급되는 전압(V_m)과 인버터 주파수(f_{ivn})의 비를 일정하게 유지하는(V_m/f_{ivn}) 일정 제어를 한다. 인버터 주파수를 상승시키면 전기동차가 가속한다. 이 영역에서 발생하는 토크는 다음과 같이 정의한다.

$$T = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 f_s, \dots\dots 3-18\text{식}$$

3.3.2.2 정 전력 제어(중속)

전동기에 공급되는 전압이 최대로 되면 정 토크 영역으로부터 정 전력 영역으로 되고, 인버터 주파수의 상승으로 발생하는 토크는 $\left(\frac{1}{f_{ivn}} \right)$ 에 비례해서 급격히 감소된다. 토크의 감소를 억제하는 방법이며,

전력을 일정하게 유지하도록 인버터 주파수에 비례해서 슬립주파수를 증대시키는 정 전력 영역이다. 이 영역에서 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T = K_3 \left(\frac{I_r V_m}{f_{ivn}} \right), \dots\dots 3-19\text{식}$$

$$I_r = K_3 \cdot \Phi_m \cdot f_{rs}, (I_m \cdot V_m) = \text{일정}, \dots\dots 3-20\text{식}$$

자속 Φ_m 은 $\frac{1}{f_{ivn}}$ 에 비례해서 감소하지만 f_{rs} 에 의해 전동기에 공급되는 전류는 일정하게 제어되고 있다. 여기서 f_{rs} 가 최대로 증가하면 일정 영역으로 이행된다.

3.3.2.3 일정 영역(고속)

전동기에 공급되는 전압과 슬립 주파수가 최대로 된 후 인버터 주파수만 높여서 속도를 올리는 영역이기 때문에 전동기에 공급되는 전압과 슬립 주파수는 일정하다.

따라서 자속($\Phi_m \propto \frac{V_m}{f_{ivn}}$)과 전류(I_r)는 동시에 감소하고 토크는 전원주파수(f_{ivn})의 제곱에 반비례하여 감소하며 전류의 감소로 출력 또한 떨어진다. 토크는 다음과 같다.

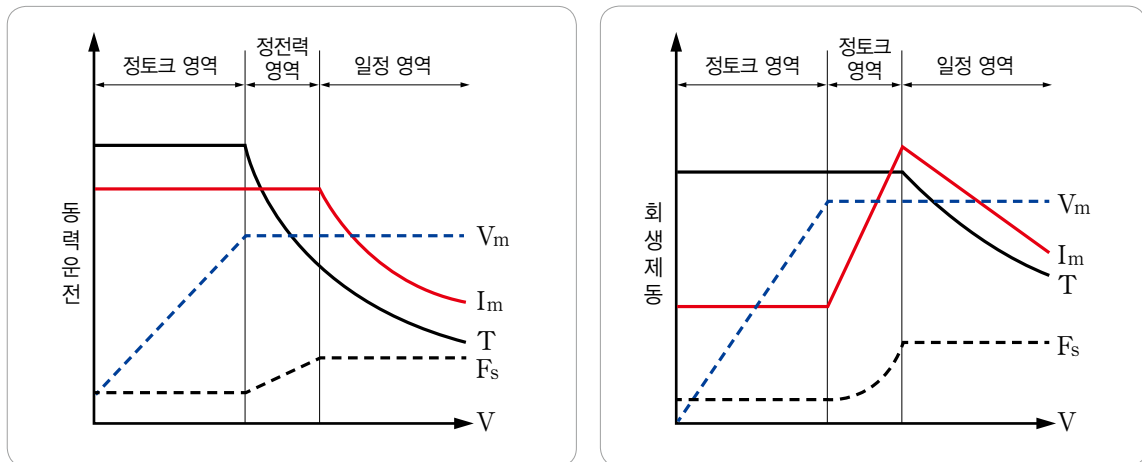
$$T = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 f_{rs}$$

$$(f_{rs} \cdot V_m) = \text{일정}$$

$$I_r = K_2 \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right) f_{rs}, \dots\dots 3-21\text{식}$$

3.3.2.4 회생제동 영역

지금까지 행한 제어를 역으로 이행시키는 영역으로, 슬립 주파수 f_{rs} 를 음(-)으로 하기 위하여 $f_{ivn} = f_{rr} - f_{rs}$ 로 계산한다. 이렇게 제어함으로 전동기를 발전기로 전환시켜 제동 토크를 발생한다.



[그림 3-4] 역행 및 회생제동 시 제어

3.3.3 유도전동기 분류

3.3.3.1 단상유도전동기

- (1) 분산 기동형
- (2) 콘덴서형
- (3) 셰이딩 코일형
- (4) 반발 기동형

3.3.3.2 3상 유도전동기

- (1) 농형
- (2) 권선형

핵심정리



1. 전기기기의 분류

- 직류전동기
- 유도전동기
- 일반 변압기

2. 직류전동기

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
직류직권전동기	전류(I)	전압(V), 계자(ϕ)
	$T = k_t \phi I_r$	$n = k \frac{V_t - I_r R_r}{\phi}$

3. 변압기

$$T = \frac{V_1}{V_2} = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

4. 유도전동기

전동기	회전력 제어(torque)	회전수 제어(revolutions per minute)
유도전동기	주파수(F), 전압(V)	극 수(P), 주파수(F)
	$T = K_4 \cdot \left(\frac{V_m}{f_{ivn}} \right)^2 \cdot f_{rs}$	$N_r = N_n(1-s) = \frac{120(f_{nr} - f_{rs})}{p} (1-s)$

4장

운전 성능



4.1 점착력과 점착 계수

4.2 견인력

4.3 제동장치

4.4 제동력

4.5 제동 거리



4장

운전 성능

학습목표

- ✓ 견인력 관련 요소들에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 제동력에 영향을 미치는 요소들에 대하여 이해를 하고 설명할 수 있다.
- ✓ 제동 거리 산출에 필요한 인자를 이해하고 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 점착(마찰) 계수, 견인력, 제동장치, 제동력, 제동률, 제동 배율, 공주 거리 제동 거리 등

철도차량 중 전기를 동력원으로 하는 동력 분산식(Electric Multiple Unit)에는 전기동차(Ec)가 대표적인데 1편성 중 동력을 가진 차를 M (motor car), M' (motor + PAN), 동력을 가지지 않은 차를 T (trailer), T_e 부수차라 칭한다. 전기동차의 성능이나 차량 중량 등에 의해 M 와 T 의 비가 결정되고 제어계를 유닛화하여 분할 및 합병이 원활하게 함으로써 운용 효율을 높일 수 있다. 국내 수도권을 비롯하여 운용되고 있는 전기동차는 모두 동력 분산식을 사용하고 있다. 이렇게 동력 분산식은 구동축이 많으므로 견인력을 크게 하는 것이 용이하여 높은 가속력을 얻을 수 있다. 따라서 역간 거리가 짧은 구간에서 표정속도 향상의 중요한 요소가 된다.

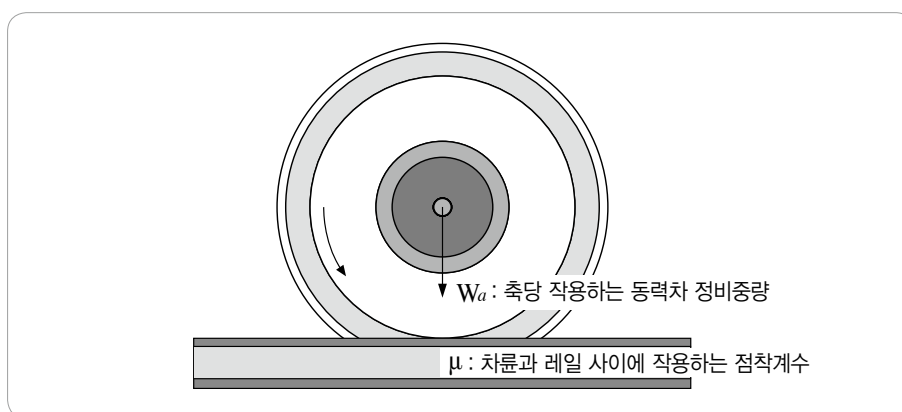
4.1 점착력과 점착 계수

4.1.1 점착력

전기동차가 레일 위를 부드럽게 주행하면서도 도중에 가속과 감속, 그리고 제동을 할 수 있는 것은 미끄러지지 않도록 전기동차의 차륜담면이 레일 표면에서 단단하고 완강하게 버티고 있기 때문이다. 이 버티는 힘 즉, 차륜담면과 레일의 접촉면과의 마찰력에 의한 항력을 철도에서는 점착력이라

한다. 이 점착력이 작은 경우라든지, 견인력과 제동력이 점착력보다 큰 경우는, 기동 시와 가속 시에 공전(Slip) 현상이 발생하기 쉽고, 제동 시에는 활주(Skid) 현상이 발생할 수가 있다. 철도의 경우 차륜과 레일 모두 금속이므로 그 마찰계수는 다른 육상 교통에서 사용하는 것에 비하여 매우 적다. 그러나 철도차량은 기동, 가속, 감속, 제동을 반복하는 조건에서 점착을 최대한 유효하게 사용할 수 있어야 한다. 주행 중일 때의 동륜과 레일과의 관계를 역학적으로 살펴보면, 전기동차의 동륜(M, M' : 전동기가 취부 된 차륜)이 레일을 누르는 힘을 점착 중량(W_a)이라 하고, 레일과 차륜 간의 점착 계수(μ)와 이 점착 중량(W_a)과의 곱을 점착력(F_a)이라 하며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_a = \mu \cdot W_a \text{ (N)}, \dots\dots 4-1\text{식}$$



[그림 4-1] 점착력

여기서 차륜과 레일 사이의 마찰계수를 점착 계수, 차륜과 제륜자 사이의 점착 계수를 마찰계수라고 한다. 즉, 마찰계수와 점착 계수는 같은 물리량으로 이 책에서는 이해를 돕기 위하여 분류를 한다. 만약 견인력 F 가 점착력($\mu \cdot W_a$)보다 클 경우 기동 시와 동력 운전 시에는 공전 상태가 되어 레일에 많은 손상을 주고, 제동 시에는 차륜이 정지한 채 활주 상태가 되어 마찰로 인한 차륜담면의 손상을 일으키는 플랫(Flat)이 발생한다.

4.1.1.1 점착력에 영향을 주는 요소

- (1) 차륜과 레일의 접촉면 상태
- (2) 열차의 속도 변화
- (3) 축 중량의 이동 시

- (4) 점착 계수의 크기
- (5) 곡선 선로 운행 시 횡 방향으로 작용하는 슬립

4.1.1.2 점착력 향상 방안

- (1) 철도차량에 활주 방지 장치의 설치
- (2) 동력제어기 취급 시 순차적으로 취급
- (3) 축 중량 이동 보상
- (4) 기준에 적합한 선로 보수
- (5) 전동기 제어의 세분화 등

4.1.2 점착 계수

점착력은 앞에서 언급한 것처럼 점착 계수 μ 와 차륜담면에 작용하는 축 중량 W_s 의 곱으로 결정되고 점착 계수는 접촉면의 상태, 즉 차륜담면과 레일의 표면에 부착된 물 또는 유지, 먼지, 녹 등에 의해 변화된 값을 갖는다. 예를 들면 건조하고 청명한 날씨로 선로 조건이 가장 양호한 상태일 때의 점착 계수가 0.2~0.3인 것과 비교하면 비와 서리가 있을 때는 약 1/2 정도, 기름기가 부착된 상태에서는 약 1/3 정도가 되는 것으로 해석한다. 이처럼 레일 면의 상태를 일괄적으로 적용하기에는 어려움이 있어 일반적인 레일의 특성에 따라 대표 값으로 정하기도 한다. 또한 운전 계획 등을 위해 수식으로 예측하여 사용되는 점착 계수를 계획 점착 계수라고 한다. 점착 계수는 철도차량의 속도 v 의 변화에 따라서도 영향을 받게 되는데, 일반적으로 전기동차의 점착 계수식은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\mu = 0.245 \frac{1+0.050v}{1+0.100v}, \dots\dots 4-2\text{식}$$

4.1.2.1 조건에 따른 점착 계수

[표 4-1] 레일 위 조건에 따른 점착 계수의 크기

레일 위 조건	일반적인 경우	레일 위 모래 분사한 경우
맑고, 건조	0.30 - 0.25	0.40 - 0.35
습(濕)	0.20 - 0.18	0.25 - 0.22
서리	0.18 - 0.15	0.22 - 0.20
기름기	0.10	0.15
낙엽	0.08	

4.1.2.2 점착 계수와 열차 저항

일반적으로 정지마찰계수에 비하여 운동마찰계수는 아주 작은 수치이다. 따라서 점착 상태를 정지마찰계수로 본다면 활주가 시작하자마자 운동마찰계수로 이행되어 활주하면 잘 멈추지 않게 된다. 또 열차 속도에 따라 점착 계수는 변화가 심하고 매우 복잡한 요소를 내포하고 있다. 점착력 향상의 방안으로 전동기 제어의 세분화, 축 중량 이동 보상 등의 연구가 진행되고 있다. 현재 사용하고 있는 모래를 사용하는 방법은 점착 계수를 일시적으로 증가시키지만 접촉면을 거칠게 하는 결점이 있으며, 열차 저항으로 작용하기도 한다.

4.1.3 견인정수

견인정수란 운전 속도 종별에 따라 소정의 속도 이상으로 안전하게 운행할 수 있는 동력차의 최대 견인(추진 운전 포함)능력을 말한다.

4.1.3.1 운전 속도 종별

- (1) 고속, 특급, 특을, 특별, 특정, 급급, 급을, 급병, 급정, 보급, 보을, 보병, 보정, 혼급, 혼을, 혼병, 혼정, 화급, 화을, 화병, 화정으로 한다.
- (2) “화1”속도 : 그 선의 전구간의 적용이 불가능하나 부분적으로 적용할 수 있는 속도
- (3) “화2” 속도 : 디젤전기기관차(전기기관차 포함)에만 적용할 수 있는 것으로 견인전동기의 단시간 정격범위 내에서 최대로 견인할 수 있는 가장 낮은속도

4.1.3.2 전기동차의 견인정수의 사정

견인정수의 사정은 견인력 성능 및 열차 저항을 기초로 하중 곡선 또는 가속력 곡선을 작성 후 제동 성능 및 기기 용량을 고려한 것이다.

4.1.3.3 견인정수의 사정 시 고려 사항

- (1) 전동 열차 및 기동열차(디젤동차 열차)에 있어서는 사정 구배에서 구배저항을 고려하여 가속력 곡선에 표시한 가속 가능한 수치로 한다. 다만, 시험을 행한 선로·운전 방법의 조건 등을 판단하여 열차 설정에 지장 없는 것을 확인하였을 경우에는 이에 준하지 아니할 수 있다.
- (2) 해당 동력차의 운전 구간의 구배 중에서 상용제동 또는 이에 준한 제동으로 속도를 억제·정차 및 정차 가능한 견인 중량 또는 편성으로 한다.

4.1.3.4 견인정수의 표시

- (1) 전동차 및 디젤동차의 견인정수는 차량 형식·편성 비율 및 편성량 수로 표시한다.
- (2) 전동차 또는 디젤동차로 견인하는 열차는 견인 차량의 형식·편성 비율·편성량 수 및 견인할 수 있는 차량의 환산량 수로 표시한다.

1) 편성 비율

전동차 또는 디젤동차에 있어서는 편성 비율이 동일한 경우에 한하여, 편성량 수에 대해 50% 이내로 증가 시에도 열차장(列車場) 220m를 초과하지 않는 경우에는 동일한 기준 운전 시·분으로 할 수 있다.

2) 표준 운전 시·분

표준 운전 시·분의 구분 단위는 30초로 한다. 다만 필요하다고 인정하는 경우에는 특급 이상의 열차 및 전동차에 한하여 15초 또는 10초 단위로 할 수 있다.

4.1.3.5 견인정수 산정법

견인정수법에는 실제 량(輛)수법, 실제 톤(ton)수법, 인장봉(draw-bar) 하중법, 수정 톤수법, 환산 량수법이 있으며 현재 사용하고 있는 견인정수법은 환산 량수법으로 차량의 환산 량수에 의하여 견인정수를 정한다.

(1) 환산 량수법

차량 중량을 W_v , 기준 중량을 W_b 로 나눠서 계산한다.

$$\text{환산량수}(x) = \frac{\text{차량중량}}{\text{기준중량}} = \frac{W_v}{W_b}, \dots\dots 4-3\text{식}$$

(2) 차량 중량 기준

- 1) 자중과 적재 중량을 합한 중량으로 동력차는 관성 중량을 포함한다.
- 2) 객차의 적재 중량은 승차 인원 1인당 중량 75kgf을 곱하여 계산한다.
- 3) 고속 열차(KTX)는 100% 승차율로 계산한다.
- 4) 좌석이 지정된 열차는 100% 승차율로 계산한다.
- 5) 전기동차는 150% 승차율로 계산한다.

(3) 철도차량별 관성 계수

[표 4-2] 열차의 종류에 따른 관성 계수의 크기

차종	관성 계수 값
전기동차	0.09
일반 열차	0.06
고속 열차	0.05

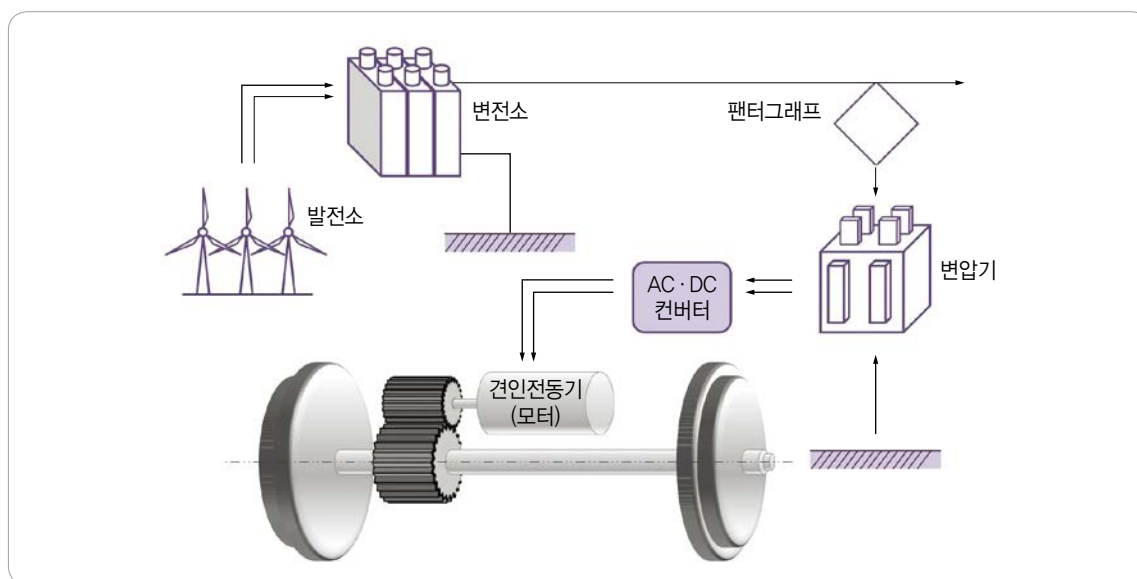
(4) 기준 중량

[표 4-3] 차량의 종류에 따른 기준 중량

차종	기준 중량(ton)
기관차(동력차는 관성 중량 포함)	30.0
동차 및 객차	40.0
화차	43.5

4.2 견인력

전기동차의 전동기에 전력이 공급됨으로써 전자기유도 작용에 의해 회전자에 발생하는 회전력이 차륜에 전달되어 차륜담면에서 발휘되는 힘을 견인력이라 한다. 즉, 피니언 기어(pinion gear : 전동기에



[그림 4-2] 견인력

취부 된 기어)의 반지름을 r_A , 종동 기어(차축에 취부 된 기어)의 반지름을 r_B , 동륜 지름을 D , 기어 주변에서 발생하는 힘을 f , 차륜과 레일 사이에서 발생하는 힘을 F , 감속비(치차비)를 G_r , 감속장치 내의 치차 및 축수의 전달 효율을 η^1 , 전동기 수를 N 이라고 하면 전인력 F 는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F = \frac{2 \cdot T \cdot G_r \cdot N \cdot \eta^1}{D} (N), \dots\dots 4-4\text{식}$$

4.2.1 감속장치

감속장치는 높은 전동기 회전수를 낮은 차축 회전수로 감속시키는 시스템으로 전동기에 취부 된 피니언 기어를 구동 기어, 차축 기어를 종동 기어라 한다. 구동 기어의 피치원 지름을 D_A , 반지름을 r_A , 매분 회전수를 N_A , 기어 수를 Z_A , 차축 기어(종동 기어)의 피치원 지름을 D_B , 반지름을 r_B , 매분 회전수를 N_B , 기어 수를 Z_B , 그리고 감속비(치차비)를 G_r 이라 할 때, 구동 기어와 종동 기어가 N 회전을 하게 되면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$2\pi r_A N_A = 2\pi r_B N_B$$

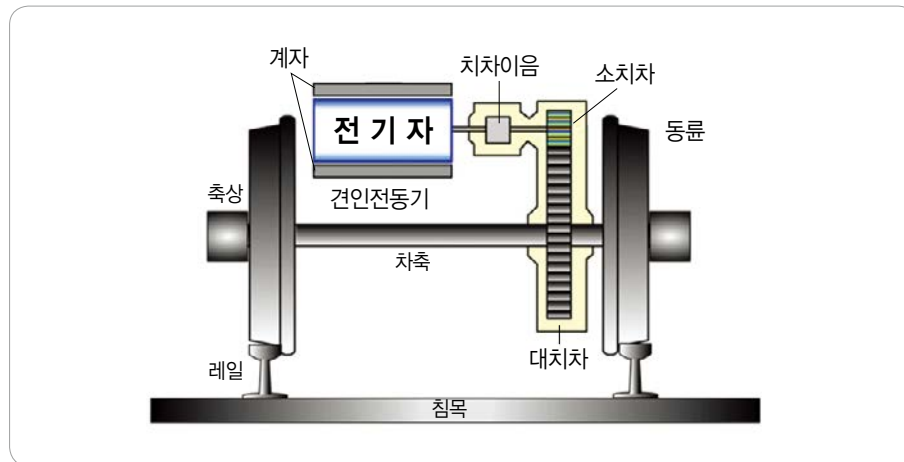
$$D_A N_A = D_B N_B = \frac{N_A}{N_B} = \frac{D_B}{D_A}$$

$$\text{원주피치}^{9)} = \frac{\pi D_A}{Z_A} = \frac{\pi D_B}{Z_B}$$

위 식으로부터 감속비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$G_r = \frac{N_A}{N_B} = \frac{D_B}{D_A} = \frac{Z_B}{Z_A} = \frac{r_B}{r_A} = \frac{\text{종동 기어 수}}{\text{피니언 기어 수}} = \frac{\text{대치차 기어 수}}{\text{소치차 기어 수}}, \dots\dots 4-5\text{식}$$

9) 원주피치(P) : 피치원 둘레를 잇 수로 나눈 값



[그림 4-3] 감속장치

4.2.1.1 감속장치 내 피니언 기어의 회전력

$$T_A = r_A \cdot f, \dots\dots 4-6\text{식}$$

4.2.1.2 감속장치 내 종동 기어의 회전력

$$T_B = r_B \cdot f = F \cdot \frac{D}{2}, \dots\dots 4-7\text{식}$$

4.2.1.3 감속장치의 전달력

$$F = r_B \cdot f \cdot \frac{2}{D}$$

$$F_1 = r_B \cdot f \cdot \frac{2}{D} \cdot \left(\frac{r_B}{r_A} \right)$$

$$F = (r_A \cdot f) \cdot \left(\frac{r_B}{r_A} \right) \cdot \frac{2}{D} \left[T = r_A \cdot f, G_r = \frac{r_B}{r_A} \right]$$

$$F = T \cdot G_r \cdot \frac{2}{D} (N)$$

$$F = \frac{2 \cdot T \cdot G_r \cdot N}{D} \eta^1 (N), \dots\dots 4-8\text{식}$$

4.2.2 견인력의 분류

견인력은 지시견인력(F_1), 동륜주견인력(F_2), 유효견인력(F_3), 점착견인력(F_4), 정격견인력으로 분류한다. 회전력을 T , 감속비를 G_r , 견인전동기 수를 N , 동륜지름을 D 라하면 견인력은 다음과 같이 정의한다.

4.2.2.1 지시 견인력

감속장치 내의 치차의 전달 손실, 축과 베어링의 마찰손실 등을 고려하지 않은 전기동차 구조에 따른 견인력이다. 에너지 전달 효율이 100%인 이상적인 견인력으로 차축 기어의 회전력 산식에 전달 효율 100%를 적용하여 다음과 같이 정의할 수 있다. 견인력 중 가장 큰 값을 가지며, 실제 존재할 수 없는 견인력이다.

$$F_1 = \frac{2 \cdot T \cdot G_r \cdot N}{D} (N), \dots\dots 4-9\text{식}$$

4.2.2.2 동륜주(動輪周) 견인력

감속장치 내의 치차 및 축수의 전달 효율을 η^1 을 고려한 차륜담면에서 발휘되는 견인력이다. 지시 견인력에서 시스템 내부에서 발생하는 손실과 기계부 마찰을 뺀 견인력으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_2 = \frac{2 \cdot T \cdot G_r \cdot N}{D} \eta^1 (N), \dots\dots 4-10\text{식}$$

동륜주 견인력은 차륜 지름에 반비례하며, 전동기의 회전력과 감속비, 치차 전달 효율과 전동기 수에 비례한다.

그리고 전기적인 측면에서 동륜주 견인력을 산출하면 다음과 같다.

전기동차의 속도를 $v(\text{km/h})$, 전동기에 공급되는 단자전압을 $E_1(V)$, 전동기에 공급되는 전류를 $I(A)$, 전동기 효율을 η_1 , 감속장치 치차의 전달 효율을 η_2 , 전동기의 수를 N_m 이라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

(1) 전기동차가 1시간 동안 한 일의 양을 P_1 이라 하면

$$P_1 = F_2 \cdot v = \frac{1,000}{3,600} F_2 \cdot v, (\text{kgf} \cdot \text{m/s}), \dots\dots 4-11\text{식}$$

(2) 전기동차에서 발휘되는 전체 출력의 양을 P_2 라 하면

$$P_2 = E_1 \cdot I \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_m \cdot 0.102, (\text{kgf} \cdot \text{m/s}), \dots\dots 4-12\text{식}$$

$$(3) P_1 = P_2$$

$$\frac{1}{3.6} F_2 \cdot v = 0.102 E_1 \cdot I \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_m (\text{kgf} \cdot \text{m/s}), \dots\dots 4-13\text{식}$$

$$F_2 = 0.3672 \frac{E_1 \cdot I \cdot \eta_1 \cdot \eta_2 \cdot N_m}{v}, (\text{kgf}), \dots\dots 4-14\text{식}$$

즉, 동률티 견인력은 전기동차의 속도에 반비례한다.

4.2.2.3 유효 견인력

전기동차 자체 및 전기동차가 견인하는 부수 객차를 동시에 가속시키는 데 유효하게 작용하는 견인력이다. 즉, 전기동차의 동률티 견인력 F_2 에서 전기동차의 톤당 주행저항 R_r 과 전기동차 정비 중량¹⁰⁾ W_E 의 곱을 감산한 견인력으로, 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_3 = F_2 - (R_r \cdot W_E) (N)$$

$$F_3 = \frac{2 \cdot T \cdot G_r \cdot N}{D} \eta^1 - (R_r \cdot W_E)(N), \dots\dots 4-15\text{식}$$

4.2.2.4 점착 견인력

전기동차의 운전 장비 중량 W_E 와 점착 계수 μ 와의 곱을 점착력이라 하며, 동력 전달률을 포함하지 않으므로 동률티 답면에서 발생하는 견인력으로 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F_4 = \mu \cdot W_E, \dots\dots 4-16\text{식}$$

10) 정비 중량 : 운행 준비 시의 차량 중량으로서, 공차 중량(WO)에 승무원(기관사, 열차 승무원 등)이 모두 승차한 상태를 말한다.

4.2.2.5 정격 견인력

전동기의 정격전압 및 정격전류에 대한 지시 견인력으로 연속 또는 1시간 정격의 지시 견인력을 말하며, 전동기의 용량을 kW로 표시한다.

(1) 정격출력

전동기 정격출력 × 전동기 수

(2) 정격 견인력

전동기 견인력 × 전동기 수

4.2.2.6 견인력과 점착력 관계

열차가 견인력을 발휘하는 데는 항상 점착력이 문제가 되며 점착력은 레일과 차륜과의 점착 계수를 유효하게 이용하는 것이 중요하다. 점착 계수는 동륜이 레일 면을 미끄러지지 않고 힘을 전달할 수 있는 한계의 동륜주 인장력 F_2 와 동륜상의 중량 W_E 비로 나타낸다.

$$\mu = \frac{F_2}{W_E}, \dots\dots 4-17\text{식}$$

철도차량은 다음 조건을 만족시키지 않으면 공전을 하게 되어 더 이상 진행을 할 수 없게 된다.

$$F_{a(\text{점착력})} \geq F_{w(\text{동륜주견인력})}, \dots\dots 4-18\text{식}$$

제동의 경우에도 점착력이 제동력보다 커야 하며, 작게 되는 경우에는 차륜이 활주하게 되어 소정의 제동력 효과를 발휘할 수 없게 된다.

$$F_{a(\text{점착력})} \geq B_f(\text{제동력}), \dots\dots 4-19\text{식}$$

차륜답면에 작용하는 견인력을 F , 제동력을 B_f , 차륜답면이 레일과 접하는 점에 수직 방향으로 작용하는 축 중량을 W_s , 차륜답면과 레일 간의 점착 계수가 μ 일 때 견인력과 제동력은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$F \leq \mu \cdot W_s, B_f \leq \mu \cdot W_s, \dots\dots 4-20\text{식}$$

4.2.3 운전 속도

운전속도 $v(\text{km/h})$, 전동기회전수 $n(\text{rpm})$, 동륜지름 $D(\text{m})$, 감속비는 G_r 라 하면, 전동기가 1회전 하는 사이에 동륜은 $\frac{1}{G_r}$ 회전하므로 1시간 동안 동륜의 회전수는 $\frac{60 \cdot n}{G_r}$ 가 된다. 그리고 동륜이 1회전 하는 동안 $2\pi r (= \pi D)$ 만큼 진행하므로 1시간에 진행하는 거리는 $\frac{\pi \cdot D \cdot 60 \cdot n}{G_r}$ 가 된다. 따라서 운전속도가 v 이면 1시간에는 $v \times 1000(\text{m})$ 운행하므로, $v \times 1000(\text{m}) = \frac{\pi \cdot D \cdot 60 \cdot n}{G_r}$ 가 된다.

따라서 $G_r = \frac{Z_{B(\text{대차차 치수})}}{Z_{A(\text{소차차 치수})}}$ 일 때, 전기동차의 운전 속도는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$v = 0.1885 \frac{D \cdot n}{G_r}, (\text{km/h}) \text{에서 } G_r = \frac{Z_B}{Z_A} \dots\dots 4-21\text{식}$$

$$v = 0.1885 \frac{D \cdot n \cdot Z_A}{Z_B}, (\text{km/h})$$

4.3 제동장치

철도차량은 시간표에 의한 계획된 속도에 따라 운영해야 하므로 상황에 따라 그 속도를 억제 또는 감소시킬 필요가 있으며, 정해진 위치 또는 비상시에 신속하게 완전한 정지를 할 수 있어야 한다. 이러한 목적을 달성하기 위해 설치된 시스템이 제동장치이다. 이 제동장치는 열차가 주행 중에 갖는 운동에너지를 다른 형태의 에너지로 변환시켜 제동의 목적을 달성하게 한다. 일반적으로 열차 제동에는 운동에너지를 마찰열로 변환하는 마찰 제동 방식을 널리 사용하고 있으나, 열차의 고속화에 따라 마찰 부분을 최소화하고 안전한 제동을 위해 전기제동 방식을 겸용하는 것이 세계적인 추세이다.

4.3.1 제동장치의 분류

4.3.1.1 동력원에 의한 분류

(1) 수용 제동

사람의 조작에 의한 제동 방식으로 치차, 스크류, 유압, 체인 또는 지렛대 등을 이용한다.

정지되어 있는 차량이 자연히 구르거나 굴러 움직이는 것을 방지하며 저속으로 주행하는 차량을 정지시킬 목적으로 사용한다.

(2) 진공 제동

진공펌프를 설치하여 제동통 피스톤 한쪽에서 공기를 빼내어 진공으로 만들고 피스톤 반대쪽에 대기압의 공기압력을 작용하여 제동 작용을 하게 하는 방식으로, 구조가 복잡하면서도 제동력이 약하여 거의 사용하지 않고 있다.

(3) 증기 제동

제동 원력으로 증기를 사용하는 방식이다.

(4) 공기제동

공기제동은 압력공기를 사용하여 제동력을 발휘하도록 만든 제동장치로써 직통공기제동, 전자직통제동, 자동공기제동, 전자자동공기제동장치로 구분된다.

4.3.1.2 마찰 제동력의 분류

제륜자를 차륜 또는 차축에 설치된 디스크에 압착하여 이의 마찰력을 이용함으로써 제동력을 얻는 방식이다. 제동력의 크기는 차륜과 레일 간의 마찰계수에 의해 제한이 된다. 마찰 제동의 종류는 아래와 같은 것들이 있다.

(1) 답면 제동

일반적으로 많이 사용하는 제동 방식으로 단식과 복식이 있으며, 차륜답면에서 직접 마찰 작용이 일어나므로 차륜 마모가 크다는 단점이 있다.

(2) 디스크 제동

답면 제동의 차륜 마모가 큰 단점을 보완한 것으로, 차축에 디스크를 설치하고 제동 패드를 디스크에 압착하여 제동 작용을 하는 방식이다.

(3) 드럼 제동

차축에 고정되어 있는 제동 드럼을 내측 또는 외측에서 브레이크 라이닝을 확장하거나 조임으로써 제동 작용을 하는 방식이다.

(4) 레일 제동

트랙 브레이크라고도 말하는 이 제동 방식은 브레이크슈를 직접 레일에 밀어붙임으로써 레일과 브레이크슈 간의 마찰력을 이용하여 제동을 하는 방식이다.

4.3.1.3 비(非)마찰 제동력의 분류

(1) 발전 제동

제동 시에 견인전동기를 발전기와 같은 역할을 하도록 하는 것으로, 전기자의 역토크를 이용하여 제동력을 얻는 방식이다. 발전된 전기를 저항기 열로 발산하는 방식으로, 넓은 의미로는 회생제동도 이 범주에 포함되지만 일반적으로 저항 제동 방식을 말한다.

(2) 회생제동

제동 시 전동기가 폐회로 상태가 되었을 때의 관성력을 이용하여 회전자를 돌려 전동기를 발전기 기능으로 작동하게 한다. 이때 발생하는 전기에너지를 가공 전차선을 통해 변전소 또는 다른 차량에 회귀시키는 제동 방식을 말한다.

(3) 와류 제동

차축에 전자석을 수반한 금속제 디스크를 설치하거나 레일 가까이 전자석을 설치하여 제동 시 전자석으로부터 회전자기장을 발생시켜 와전류와 자기장이 작용해 제동력을 얻는 방법이다.

4.3.1.4 제동장치의 구비 조건

(1) 신뢰성의 확보

열차에는 많은 여객과 화물을 수송하고 있으므로 어떠한 경우에도 제동 작용이 확실히 작동되어야 하며, 일부 고장의 경우에도 다른 제동 작용이 가능하도록 2중, 3중의 안전 대책이 요구된다.

(2) 신속성 확보

열차는 고속으로 주행하므로 제동 작용 속도가 느릴 경우 제동 작용 조치 후 상당 거리를 그대로

주행하게 되므로 가장 신속한 제동 작용이 되도록 해야 한다.

(3) 안전성의 확보

고속 주행 중 급정차를 할 경우 차륜의 스키드 현상이 발생되고, 또한 승객들에게 충격으로 인한 안전상의 문제가 생길 수 있으므로 안전성을 고려한 적절한 제동력을 확보해야 한다.

(4) 고효율 에너지 용량

마찰 제동의 경우 장시간 제동 작용을 하게 될 경우에는 제륜자의 마찰열이 매우 크게 되므로 내열성이 큰 재료의 사용이 필요하며 마찰열이 발생되었을 때 열 방산 능력도 커야 한다.

(5) 제어성 확보

제동 작용은 기관사 또는 ATS/ATC/ATO의 지령에 따라 전 차량에 제동 제어가 가능하여야 한다.

4.3.1.5 제동의 기초 이론

열차의 제동력은 될 수 있으면 큰 것이 바람직하지만 이것에는 한도가 있다. 즉, 제동력은 차륜과 레일 간의 점착력보다 크지 않아야 한다. 만일 제동력이 점착력보다 크게 되면 차륜은 레일과 접촉 부에서 활주하게 되어 회전을 정지한 채 레일 면 위를 미끄러진다. 차륜이 활주하기 시작했을 때의 제동력은 차륜과 레일 간의 미끄럼 마찰력에 의한 것으로 되지만, 이것은 활주하기 직전의 차륜과 레일 간의 점착력에 비하여 작고 더욱이 차륜의 레일과 닿는 부분에서는 마찰에 의하여 온도가 급격하게 상승되어 마찰계수가 감소하므로 제동력이 약해진다. 이 때문에 제동 거리는 현저하게 증대되고 차륜담면에 찰상을 일으키게 된다. 따라서 제동력을 B_f , 점착력을 A_f 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$B_f < A_f, \dots\dots 4-22\text{식}$$

4.3.1.6 자동 제동 조작 시스템

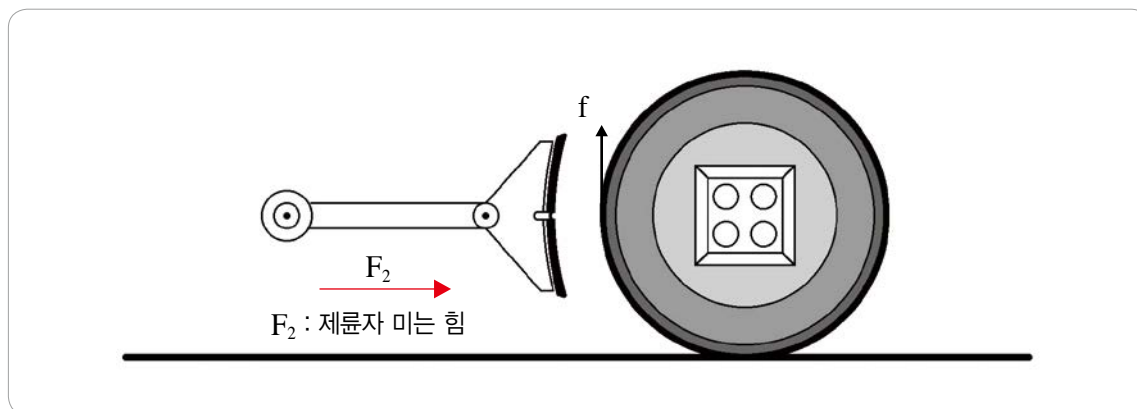
제동 조작은 열차 운전에 있어서 아주 중요한 것이며, 정차하는 경우에는 충격이 없고 또한 승객에게 불쾌감을 주지 않는 범위 내에서 최소의 시간으로 소정의 위치에 정차시켜야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 자동 공기제동장치에서는 일단 제동과 단계적인 완해가 제동 조작의 기본으로 되어 있으며 이것의 장점은 다음과 같다.

- (1) 열차속도가 높을 때는 제동관 압력을 많이 감압시키고(제륜자와 차륜 사이의 마찰계수가 작기 때문), 점차적으로 열차 속도가 낮아졌을 때는 제동관 압력을 적게 감압시킴(제륜자와 차륜 사이의 마찰계수가 점차 증가)으로써 열차가 일정한 감속도를 갖도록 한다.
- (2) 마찰계수는 열차 속도가 25km/h 전후에서 급히 증대하기 시작하므로, 경우에 따라서는 활주할 위험이 있고 정지하기 직전에는 더욱 커져서 충격을 일으키기 쉽다. 이런 시기에 제동통 압력을 저하시키면 유효하게 충격을 방지시킬 수 있어 승차감을 해치지 않게 된다.
- (3) 정지 위치를 맞추기 위한 제동의 조절이 용이하게 된다.

4.3.2 제동력 산출에 필요한 기초 이론

제동력은 제동통 피스톤 로드에서 나오는 제동원력을 지렛대 원리를 이용, 증대된 힘(제륜자에 가하는 힘)과 마찰계수(차륜과 제륜자 사이의 계수)의 곱으로 나타낸다. 즉, 제동력을 B_f , 제륜자 미는 힘을 F_2 , 제륜자와 차륜 사이 간 마찰계수를 f 라 하면 다음과 같이 제동력을 정의할 수 있다.

$$B_f = F_2 \cdot f (N), \dots\dots 4-23\text{식}$$



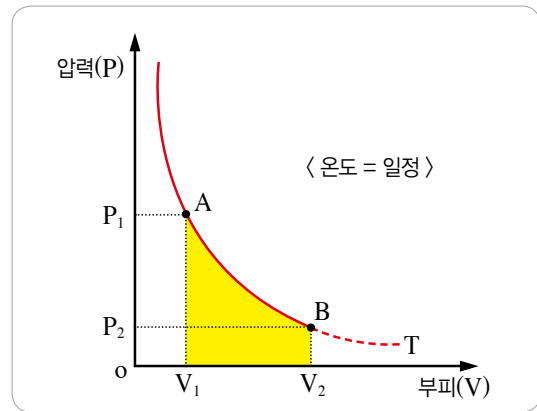
[그림 4-4] 제동력

4.3.2.1 보일의 법칙

기체는 고체나 액체와는 달리 분자운동이 매우 활발하여 넓게 퍼져 나가려는 성질을 가지고 있다. 따라서 밀폐된 용기 속에 넣어 둔 기체 분자는 용기의 벽과 충돌하여 압력을 만들게 되는데, 이 압력은 용기의 벽에 수직하고 용기 내의 어느 곳에서나 그 크기가 같다. 그러므로 용기 내의 밀폐된 기체

는 외부로부터 힘을 받게 되면 기체의 부피는 줄고 압력은 반대로 증가하게 된다. 즉, 온도가 일정할 때 기체의 부피와 압력은 반비례한다. 이 관계를 보일의 법칙이라 하며, 처음 압력과 체적을 P_1, V_1 , 나중 압력을 P_2, V_2 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

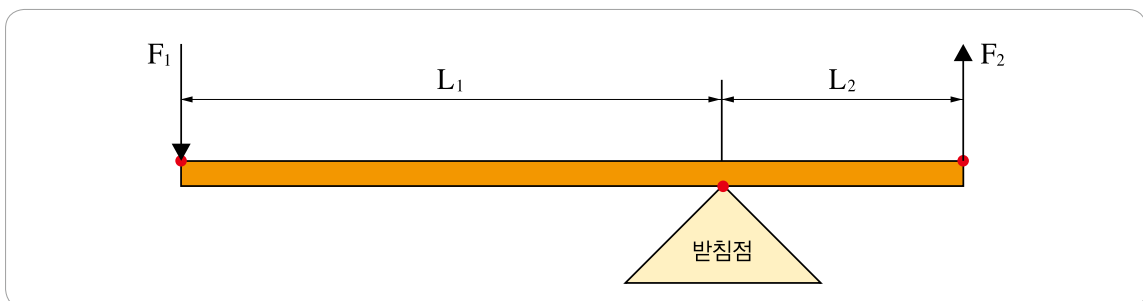
$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = C(\text{일정}), \dots\dots 4-24\text{식}$$



[그림 4-5] 보일의 법칙

4.3.2.2 지렛대 원리

철도차량의 제동장치는 작은 힘으로부터 큰 힘을 얻게 되는 지렛대의 원리를 적용한 것이다. 제동통으로부터 나오는 제동 원력과 제륜자를 미는 힘과의 관계가 지렛대의 원리를 이용한 것으로 제동 원력(작용점)을 F_1 , 제동 원력으로부터 받침점까지 거리를 L_1 , 제륜자 미는 힘(힘점)을 F_2 , 제륜자 미는 힘으로부터 받침점까지 거리를 L_2 라 할 때 다음과 같이 정리할 수 있다.



[그림 4-6] 지렛대의 원리

$$F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2, \dots\dots 4-25\text{식}$$

즉, 힘의 크기는 $F_1 \cdot L_1 = F_2 \cdot L_2$ 에서 $L_1 > L_2$ 일 때 작은 힘(작용점)을 가하여 큰 힘(힘점)을 얻는 조건이 된다.

4.3.2.3 마찰계수의 특성

제륜자의 온도가 높을 때 마찰계수가 작아지는 이유는 열에너지로 인하여 접촉면이 고온으로 되기

때문이며 용융 상태와 가깝기 때문이다. 즉, 제륜자를 누르는 힘이 과대하면 접촉면의 온도가 상승하기 때문에 마찰계수는 작아지는 것이다.

제륜자를 얇게 하면 열의 방산이 나빠지기 때문에 제륜자 마모도 빨라지고 마찰계수 값은 작아진다. 제륜자의 접촉 면적이 넓어지면 제륜자에 가하는 힘을 크게 하여도 마찰계수는 높아지지 않는다. 또한 고속 시에는 저속 시보다 마찰계수가 작아진다.

(1) 마찰계수의 특성

[표 4-4] 마찰계수의 특성

항목	내 용
재료	• 주철, 특수 주철, 합성계 재료가 주로 사용 • 합성계 재료의 마찰계수가 높음
면적	• 제륜자와 차륜의 일부 접촉 시 제동력 저하 • 접촉 면적이 작게 되면 접촉 부분만 온도가 상승하고 마찰계수는 저하
밀착력	• 제륜자 미는 힘이 클수록 온도 상승이 높아져 마찰계수가 저하 • 밀착력을 증가하여도 제동력은 비례적으로 증가하지 않음
온도	• 제동력을 오랜 시간 사용 시 온도가 상승하여 마찰계수를 저하 • 외부 온도가 낮을 경우에도 마찰계수는 저하
기후	• 겨울철 제륜자와 차륜 사이에 눈이 퇴적되면 마찰계수를 저하
속도	• 저속 시 제륜자와 차륜 간의 접촉이 비교적 완전하여 마찰계수가 높음 • 고속 시 제륜자와 차륜 간의 구름 마찰로 마찰계수가 낮음

4.3.2.4 제동통 유효 압력(P_e)

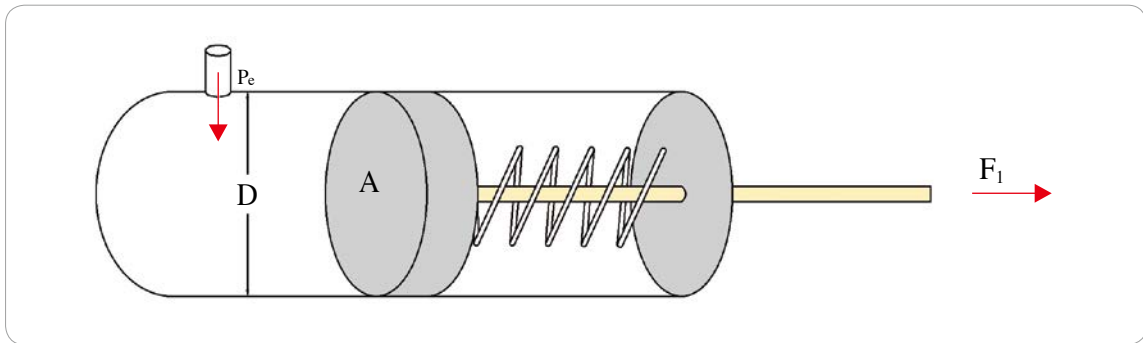
보조 공기통으로부터 제동통에 들어온 공기압력이 제동통 피스톤에 압력으로 작용하면 피스톤은 움직이려고 한다. 그러나 제동통 리턴 스프링의 탄성력과 제동통 피스톤 로드와 마찰력이 저항을 하게 되므로 제동통에 공급된 공기압력은 리턴 스프링의 탄성력과 로드와 마찰력보다 큰 공기압력이 공급되어야만 제동 작용을 하게 되는 것이다. 여기서 제동 작용이 이루어지기 위한 가장 낮은 압력을 제동통 유효 압력(P_e)이라고 한다. 즉, 리턴 스프링의 탄성력을 압력 단위로 환산하면 0.35kgf/cm^2 , 제동통과 피스톤 로드와의 마찰력을 압력 단위로 환산하면 0.05kgf/cm^2 이 된다. 그러므로 제동통에 공급된 압력 P_s 는 0.4kgf/cm^2 이상 공급되어야 한다.

$$P_e = P_s - 0.4(\text{kgf/cm}^2), \dots\dots 4-26\text{식}$$

4.3.2.5 제동 원력(F_1)

제동 원력은 제동통으로부터 첫 번째 발생되는 힘으로 제동통 피스톤 단면적 $A(\pi r^2 = \frac{\pi d^2}{4})$ 와 제동통 피스톤에 작용하는 제동통 유효 압력 P_e 의 곱으로 나타내는 힘 F_1 이다. 즉, 제동통 피스톤의 안지름을 d 라 하면 제동 원력은 다음과 같이 정의한다.

$$F_1 = P_e \cdot A = P_e \cdot \frac{\pi d^2}{4} (N), \dots\dots 4-27\text{식}$$



[그림 4-7] 제동 원력

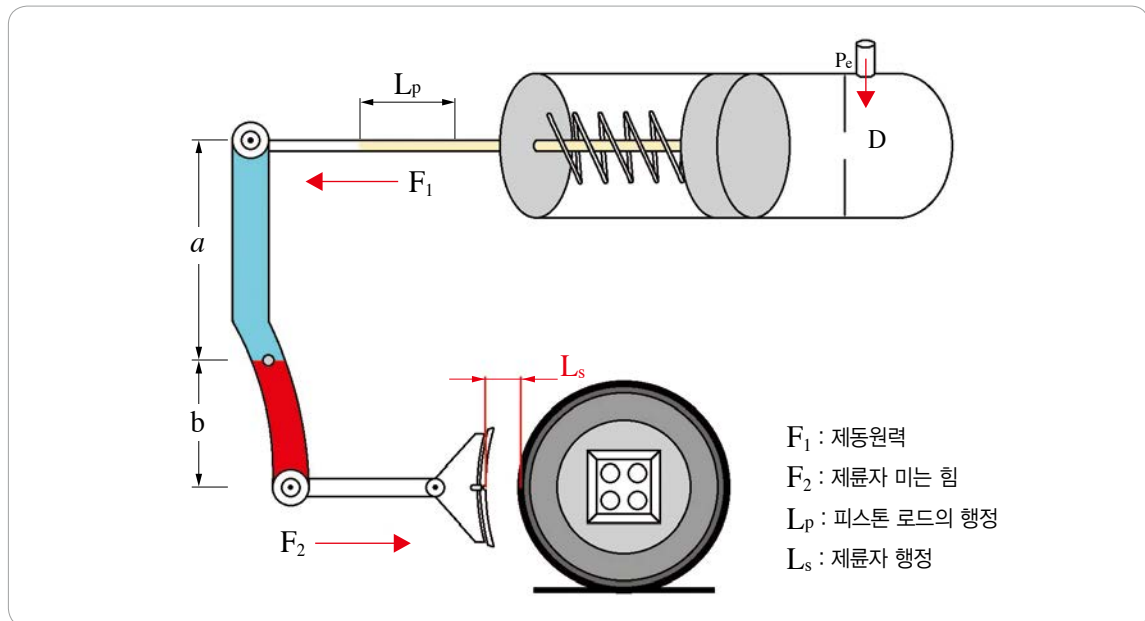
4.3.2.6 제동 배율(B_m)

기초 제동장치의 제동통 피스톤 로드에서 발생된 힘과 제륜자에 작용하는 전체 힘과의 비로 나타내며, 기초 제동장치 자체의 마찰손실, 복귀 스프링의 저항력은 고려하지 않은 값이다.

제동 배율은 지렛대의 원리에 의하여 제륜자를 미는 힘이 제동 원력보다 제동 배율만큼 크다. 그리고 제륜자 이동 거리는 제동배율의 크기에 반비례하여 이동한다. 즉, 제동 배율은 제륜자를 미는 힘 F_2 를 제동 원력 F_1 과의 비로 나타내기도 한다. 그리고 제동통 피스톤 로드에서 한 일과 제륜자가 한 일은 같기 때문에 제동통 피스톤 로드의 이동 거리 L_p 와 제륜자 이동 거리 L_s 의 비로 나타낼 수도 있다.

$$B_m = \frac{F_2}{F_1} = \frac{L_p}{L_s} \dots\dots 4-28\text{식}$$

$$B_m = \frac{\text{전(全) 제륜자가 차륜을 미는 힘}}{\text{제동원력}} = \frac{\text{제동통 피스톤 로드 이동거리}}{\text{제륜자 이동거리}}$$



[그림 4-8] 제동 배율

[표 4-5] 제동장치 형식과 차량 위치에 따른 제동 배율의 크기

차량 종류	제동장치 형식	제동 배율	
		위치	값
전기동차	저항제어(SELD) (Straight Electro Magnetic Load Dynamic)	2, 3, 4위	2.13
		1위	3.20
		M차	3.66
	인버터 제어(HRDA) (High Response Digital Analog)	T차	3.20
		M차	4.47

- (1) 전기동차 인버터 제어 시 T차의 제동 배율이 [3.20]이라면 제륜자에 작용하는 힘은 제동통 피스톤에서 나오는 힘의 [3.20]배가 되고, 제륜자 이동 거리는 제동통 피스톤 로드 이동 거리의 $\frac{1}{3.20}$ 배만큼 이동했다는 뜻이다.

4.3.2.7 전달 효율

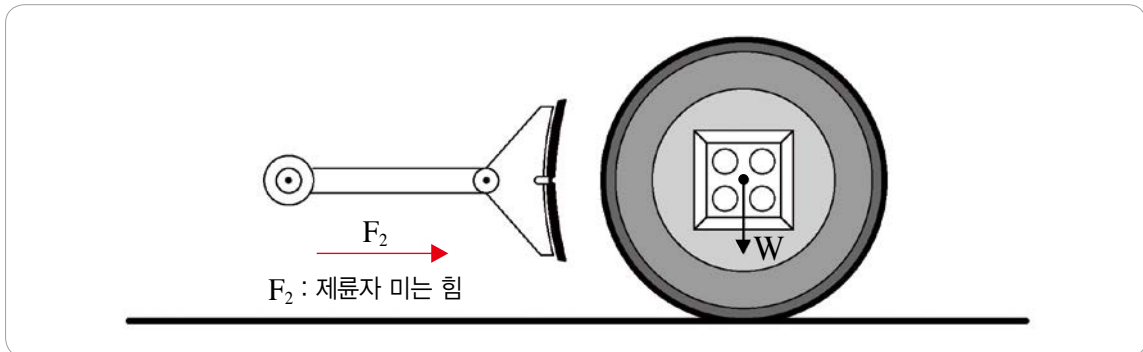
기초 제동장치를 통하여 힘을 전달하는 경우 기구 각 부의 마찰, 제동통 피스톤 완해 스프링, 대차에 붙여진 리턴 스프링(Return Spring) 등의 저항력 때문에 제동통에서 발생된 힘의 일부가 감쇠된

다. 그리고 제륵자가 차륵의 중심을 벗어나서 접촉할 경우에는 법선 이외의 분력이 생겨 제륵자를 누르는 힘이 감소된다. 따라서 제동통의 피스톤 로드에서 나오는 힘과 실제로 제륵자가 차륵을 누르는 힘과의 비를 기초 제동장치의 전달 효율이라 한다. 이 전달 효율은 제동통에 공급되는 압력과 제동 시의 차량 속도 등에 따라 변화하며 일반적으로 90%로 간주하고 있다.

4.3.2.8 제동률(B_r)

제동 체결 시 너무 과대한 힘으로 제륵자를 누르게 되면 차륵은 레일 위에서 회전하지 못하고 활주하게 된다. 즉, 제륵자를 누르는 힘은 활주하지 않은 범위 내에서 제한할 필요가 있는데 이것을 제동률이라고 한다. 전차(全車) 제동률(B_r)은 전(全) 차륵의 축 중량(W)과 전(全) 제륵자의 미는 힘(F_2)과의 비로 나타내며 축 제동률은 차륵의 축 중량과 제륵자의 미는 힘과의 비로 나타내는데 제동률은 축 제동률이며 전달 효율은 100%로 계산한다.

$$B_r = \left(\frac{F_2}{W} \right) \cdot 100(\%)$$



[그림 4-9] 제동률

(1) 축 제동률

마찰제동 시 하나의 차축에 작용하는 제륵자 압력과 축에 걸리는 중량과의 비율을 축제동률이라고 한다.

$$\text{축 제동률} = \frac{\text{축당 제륵자 미는 힘}}{\text{축 중량}} \times 100(\%), \dots\dots 4-29\text{식}$$

$$\text{전차(全車) 제동률} = \frac{\text{전차(全車) 제륵자 미는 힘}}{\text{전차(全車) 축 중량}} \times 100(\%), \dots\dots 4-30\text{식}$$

(2) 제동률 크기에 영향을 미치는 요소

- 1) 제동통에 들어온 공기압력의 크기
- 2) 제동통 안지름 크기
- 3) 제동 배율 크기
- 4) 제동 효율
- 5) 제동통 수

4.3.2.9 제동통 피스톤 행정을 변화시키는 요소

(1) 제륜자의 마모

초기에 제륜자와 차륜 간격을 조정해 놓아도 제동 사용 빈도에 비례하여 제륜자 마모가 진행되므로 차륜과 제륜자 사이 틈새가 증가하여 피스톤 행정은 늘어난다.

(2) 하중의 변화

하중이 증가하면 공기 및 축 스프링은 압축이 된다. 즉, 답면 제륜자의 경우 제륜자 위치가 내려가므로 차륜과 제륜자 간 틈새가 증대하여 피스톤 행정의 변화를 가져온다.

(3) 제동통 압력의 대소

동일 조건의 차량에서도 비상제동과 상용제동의 크기에 의하여 제동통 압력이 변화하는 만큼 피스톤 행정은 늘어난다.

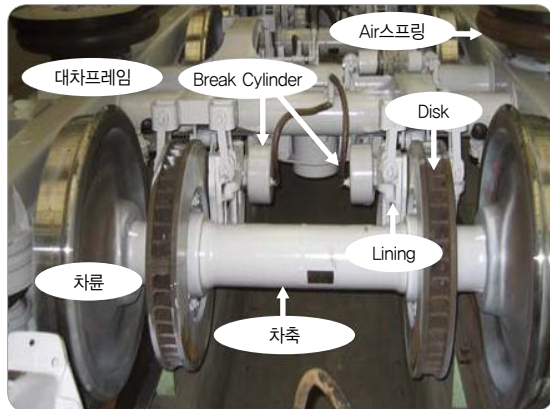
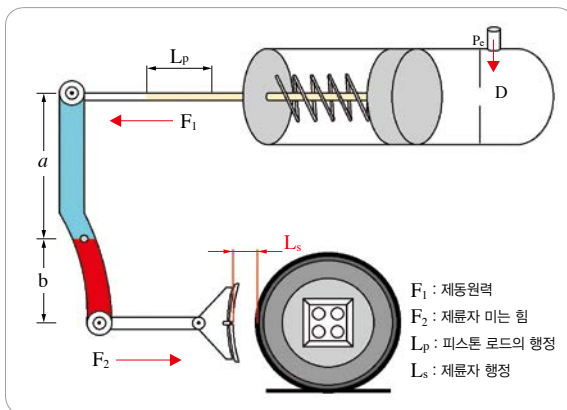
(4) 제동 초속도

제동 작용 시(제동초속도) 열차속도가 높을수록 큰 제동력을 필요로 한다. 즉, 큰 제동력이 필요하다는 것은 제동통 피스톤 행정이 증가한다는 것이다.

4.3.2.10 기초 제동장치

공기압력을 사용하는 제동장치의 경우, 제동력 발휘에 필요한 에너지가 제동 원력의 힘을 제어하는 제동통에서부터 차륜의 제륜자까지 이동하도록 해 주는 모든 구성품을 기초 제동장치라 한다. 그리고 기초 제동장치의 구성 요소에는 제동통, 제동통 피스톤, 완해 스프링, 제동 레버, 제동 행거, 제동 로드, 제륜자 헤드, 브레이크 슈, 자동 간격 조정 장치 등이 있다. 그리고 구비 조건은 다음과 같다.

- (1) 부품 교환과 보수가 쉬워야 한다.
- (2) 항상 일정한 제동력을 얻을 수 있어야 한다.
- (3) 무게와 형상이 작고 안전도가 높아야 한다.
- (4) 축중물에 대하여 활주하지 않는 범위에서 최대의 제동력을 발휘해야 한다.
- (5) 힘의 전달에 대하여 최대의 효율을 가져야 한다.



[그림 4-10] 기초 제동장치

4.3.2.11 활주 방지 장치

제동 작용 시 차륜이 레일 면에 대하여 미끄러짐을 일으키기 시작했을 때 활주 차륜의 회전 각도, 감속도 또는 활주가 발생한 차륜과 비활주 차륜의 속도 차이가 허용 값 이상 되면 차륜의 활주라 판단한다. 이때는 제동력을 신속히 낮추고 차륜담면의 플랫(flat) 발생을 방지하며, 차륜과 레일의 재점착을 진행한다. 재점착 이후에는 제동력을 회복시켜 점착력을 효과적으로 작용시키는 시스템을 활주 방지 장치라 한다.

활주 제어는 차륜과 레일 사이의 점착력을 최대로 활용하는 것으로, 필요 이상으로 제동력을 감소시키지 않고 필요 이상으로 오랜 시간 제동력을 완화하지 않으므로 제동 거리는 늘어나지 않게 하는 것이다.

(1) 활주 검지

주행 중인 철도차량 한 칸 4개의 차축 중에서 가장 속도가 높은 차축 V_1 과 다른 3개의 차축 속도 V_n 와의 속도 차($V_1 - V_n$), 차륜의 미끄럼률($V_1 - V_n$)/ V_n , 차륜 감속도(B)를 연산하여 하나(L_1, L_2, L_3)의 조건이라도 만족시키면 시스템은 활주라고 판정하며 조건은 다음과 같다.

$$1) L_1(\text{속도차 한계값}) \leq V_1 - V_n, \dots\dots 4-31\text{식}$$

$$2) L_2(\text{미끄럼 한계값}) \leq \frac{V_1 - V_n}{V_n}, \dots\dots 4-32\text{식}$$

$$3) L_3(\text{감속도 한계값}) < B, \dots\dots 4-33\text{식}$$

또한, 차륜 감속도(B)가 L_3 (감속도 한계값)보다 적음을 만족시키면 시스템은 활주 현상이 없다고 판단하여 토출 전자 변을 무여자 시켜 제동력을 유지시킨다. 그리고 $(V_1 - V_n) \leq L_1$ (속도차 한계값)을 만족하게 되면 차륜과 레일은 재점착했다고 연산하여 공급 전자 변을 무여자 시켜 활주 시작점까지 복귀시킨다.

4.3.2.12 제동력과 점착력

제동력과 점착력관계에서 제동력은 점착력보다 작아야 한다. 여기서 제동력을 B_f , 점착력을 A_f , 점착 계수를 μ , 마찰계수를 f , 제륜자 미는 힘을 F , 축당 중량을 W 라 하면 차륜이 활주하지 않기 위한 조건은 다음과 같이 정의한다.

$$A_f \geq B_f$$

$\mu W \geq fF$, 그러므로 활주하지 않으며 최대의 제동력을 얻을 수 있는 식은 다음과 같다.

$$\frac{\mu}{f} \geq \frac{F}{W}, \dots\dots 4-34\text{식}$$

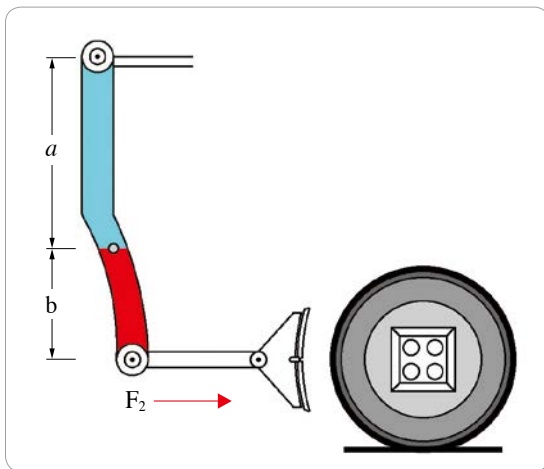
4.4 제동력

제동력은 철도차량에 대하여 운동을 정지하는 제동 효과를 나타내는 힘을 말하며, 답면 공기 제동력은 제륜자를 차륜에 밀어붙여 제륜자와 차륜 사이의 마찰계수를 이용하여 제동력을 발생시킨다. 이것은 철도차량의 운동에너지를 제륜자와 차륜 사이에서 열에너지로 소비하는 것이다. 디스크 제동력은 제동통 피스톤을 공기압력으로 누르면 링크 구조물을 통하여 패드에 전달하여 디스크와 패드의 마찰력에 의하여 제동력을 발휘하는 장치이다. 여기서 답면 제동력을 B_s , 제륜자에 가하는 힘을 F_2 , 제동통 안지름을 d , 마찰계수를 f , 제동통 수를 n , 제동 원력을 F_1 , 제동 배율을 B_m , 제동 효율을 η , 차륜 반지름을 R , 제동 디스크 반지름을 r , 유효제동통 압력을 P_e 라 할 때 답면 제동력 B_s 과 디스크 제동력 B_d 은 다음과 같이 정의한다.

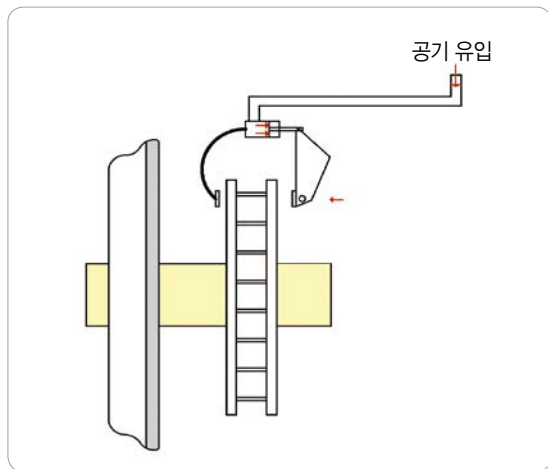
4.4.1 답면 제동력

$$B_s = F_2 \cdot f \cdots \cdots 4-35\text{식}$$

$$B_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P_e \cdot f \cdot n \cdot B_m \cdot \eta, \left(F_1 = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P_e \right)$$



[그림 4-11] 답면 제동장치



[그림 4-12] 디스크 제동장치

4.4.2 디스크 제동력

$$B_d = F_2 \cdot f \cdot \left(\frac{r}{R} \right), \cdots \cdots 4-36\text{식}$$

$$B_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P_e \cdot f \cdot n \cdot B_m \cdot \eta \cdot \left(\frac{r}{R} \right)$$

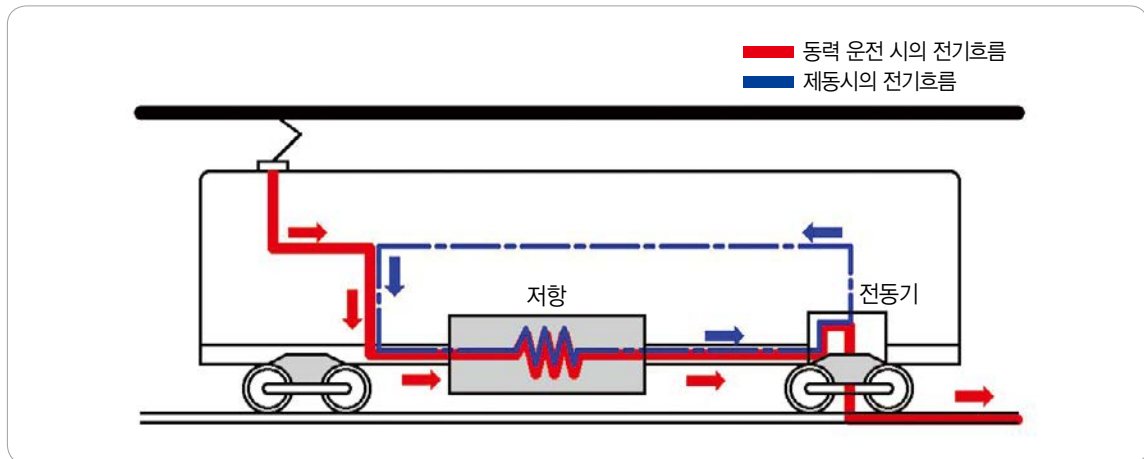
4.4.3 발전 제동력

관성에 의하여 운행 중인 전기동차의 전동기가 발전기로 동작하기 위해서는 전동기에 잔류 자계가 있는 상태에서 전동기에 전원 공급을 중단한다. 그러면 이때 전동기의 회전자는 관성에 의하여 고정자 속에서 계속 회전하므로 회전자에는 자기장이 발생된다. 이렇게 발생된 자기장은 전자기유도 법칙에 의하여 고정자에 자기장을 만든다. 이렇게 자기장이 두 개가 존재하면 토크를 발생시키는데, 이때 토크의 회전 방향은 동력 운전 할 때와 반대로 작용하여 제동력으로 작용하고 이것이 발전 제

동력이 되는 것이다. 동력 운전 시 전동기에서 발생하는 기계손실, 철 손실 등은 제동력으로 작용하기 때문에 견인력과 제동력을 비교해 보면 제동력이 15-30% 크다. 전동기 1대당 발전 전압 및 전류를 E_1 , I_1 , 전동기 1대당 발생하는 철 손실 및 기계 손실의 합을 M , 열차 속도를 v , 동력 전달 효율을 η , 전동기 수를 N , 전체 발전제동력을 B_t , 전동기 1대의 발전 제동력 B_d 는 다음과 같이 정의한다.

$$B_d = (E_1 I_1 + M) \cdot \frac{0.3672}{v \cdot \eta}$$

$$B_t = B_d \cdot N, \dots\dots 4-37\text{식}$$



[그림 4-13] 발전 제동력

4.4.3.1 발전 제동의 장점

- (1) 제동장치의 이완이나 차륜의 찰상 등의 현상이 없다.
- (2) 균일한 제동력을 얻을 수 있다.
- (3) 공주시간이 단축된다.
- (4) 환경오염 유발을 억제할 수 있다.
- (5) 연속된 내리막 선로에서 속도 제어가 쉽다.

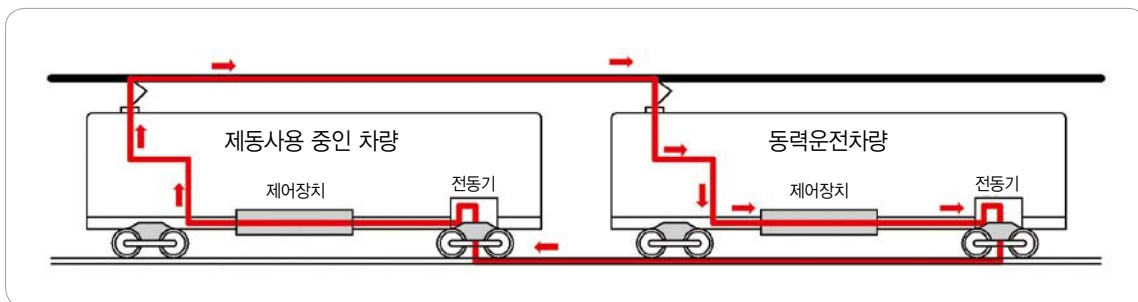
4.4.3.2 발전 제동의 단점

- (1) 공기제동장치가 필요하다.
- (2) 발전 제동에 필요한 저항기가 필요하다.

- (3) 전기회로가 복잡하다.
- (4) 높은 속도와 낮은 속도에서는 발전 제동력이 약하다.

4.4.4 회생 제동력

발전 제동과 동일한 전기적 제동 방식의 일종으로서 발전 제동보다 진보된 것이다. 발전 제동은 발전 제동에서 발생한 전력의 일부를 저항기의 열로 소비시키는 방식이고, 이 에너지를 어떠한 방법으로 회생시켜 유효하게 사용할 수 있도록 하는 방식이 회생제동(Regenerative Braking)이다. 이 방식은 발전 전압을 전차선(Catenary)으로 되돌려 보내 동력 운전 중인 다른 열차에 공급하거나, 변전소에 반송시킬 수 있기 때문에 전력 소비의 절약, 변전소 설비 용량의 감소 등의 이점이 있다.



[그림 4-14] 회생 제동력

4.4.4.1 회생제동의 특성

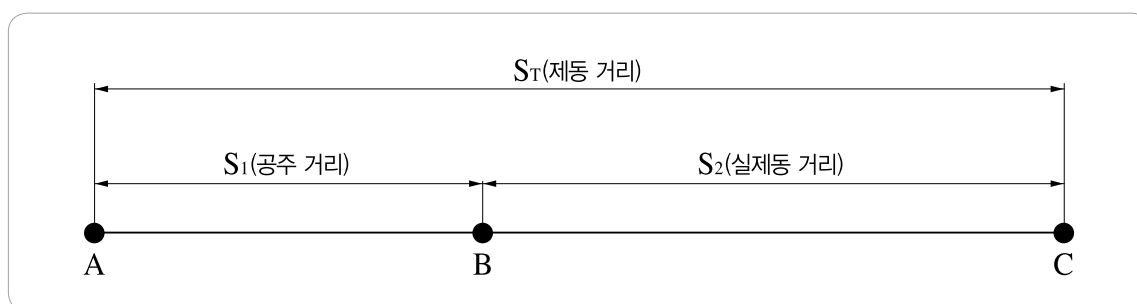
- (1) 발전기의 단자전압은 전차선 전압에 의하여 결정된다.
- (2) 고속 주행 중 제동 체결 시에는 계자를 약하게 하여야 하며 제동력 부족분은 공기 제동력으로 충당한다.
- (3) 속도가 저하될 때 계자를 강하게 하지 않으면 전차선 전압보다 높은 발전 전압이 유지되지 않으므로 부득이 계자를 강하게 하여야 한다.

4.4.4.2 회생제동의 문제점

- (1) 견인전동기의 계자 제어 범위 확대 필요
- (2) 제어장치가 복잡

4.5 제동 거리

전기동차가 등가속도 직선운동을 하며 레일 면과 차륜답면에서 발생하는 마찰 손실은 고려하지 않는 조건에서, 제동 거리란 제동 변을 제동 위치에 이동시킨 때부터 열차가 정지할 때까지 이동한 거리를 말한다. 제동 거리는 공주(空走) 거리와 실(實)제동 거리의 합으로 나타내며 운행 중인 열차를 정지시키기 위하여 제동력을 작동시켰을 때 열차의 운동에너지와 열차를 정지시키기 위한 일 양은 같으므로 다음과 같이 정의한다.



[그림 4-15] 제동 거리

4.5.1 공주 거리

제동 변을 제동 위치로 이동하였을 때 제동력이 유효하게 작용하기 직전까지의 시간을 공주시간이라 하고, 이 시간 동안에 이동한 거리를 공주 거리라 한다. 즉, 공기 제동장치는 제동 변을 제동 위치에 이동시켜도 공기의 이동 속도와 기초 제동장치의 작동 시간으로 인하여 제동 작용이 이루어지지 않는데, 이 상태로 열차가 이동한 시간 및 거리를 공주시간, 공주 거리라 한다. 여기서 공주 거리를 s_1 , 공주시간을 t_1 , 제동 초속도를 v 라 하면 공주 거리는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$s_1 = v \cdot t_1 = \frac{v \cdot t_1}{3.6}, (\text{m}), \dots\dots 4-38\text{식}$$

제동 초속도는 km/h의 값을 대입하여 구한다.

$$\text{즉, } v = \frac{s_1}{t_1}, (\text{m/s}) \text{에서 } 1\text{km} = 1000\text{m}, 1\text{h} = 3600\text{s}, \frac{1\text{km}}{1\text{h}} = \frac{1000\text{m}}{3600\text{s}} = \frac{1}{3.6} (\text{m/s})$$

[표 4-6] 공기 제동장치의 제동 체결 시 공주시간

차종	연결 간 수	비상제동 시	상용제동 시
전기동차	10	1.3(초)	3.5(초)

4.5.1.1 공주 거리 발생 원인

- (1) 제동 작용에 사용되는 공기의 이동 시간이 필요
- (2) 기초 제동장치의 순차적 작동 시간이 필요

4.5.2 실제동거리

전기동차의 제동력 작용은 B 지점에서 시작되어 C 지점에서 끝나게 되는데, 전기동차가 가지고 있는 운동에너지 E_t 는 제동력 B_F 와 실제동 거리 s_2 의 곱과 같다.

$$E_t = (B_F \cdot s_2)$$

$E_t = \frac{1}{2} m v^2$ 에서 전기동차의 관성 계수 값 0.09를 고려한 운동에너지는 다음과 같다.

$E_t = \frac{1}{2} m v^2(1+0.09)$ 여기서 v 의 단위는 km/h를 대입한다.

$E_t = \frac{1}{2} \frac{W}{g} v^2(1.09)$ 여기서 열차 중량을 $W(\text{ton})$, 열차 질량을 m , ($W = m \cdot g$)

$E_t = \frac{1.09Wv^2}{19.6}$ 에서 속도의 단위를 m/s, 무게의 단위를 kg으로 환산하면 다음과 같다.

$$E_t = \frac{1.09W \cdot 1000}{19.6} \cdot \left(\frac{v}{3.6}\right)^2 = \frac{1090W}{19.6} \cdot \frac{v^2}{12.96}$$

$$E_t = \frac{1090Wv^2}{254} = 4.29Wv^2$$

$E_t = (B_F \cdot s_2)$ 에서 열차 저항 T_R 도 제동력으로 작용하므로 고려해야 한다.

$E_t = (B_F + T_R)s_2$ 에서 실제동 거리 s_2 를 유도하면 다음과 같다. 여기서 RR 은 총 주행저항, CR 은 총 곡선저항, GR 은 총 구배저항, TR 은 총 터널저항이다.

$$S_2 = \frac{4.29Wv^2}{(B_F) + (T_R)} = \frac{4.29Wv^2}{(F_2 \cdot f) + (RR+CR \pm GR+TR)} \quad \text{에서 분모 분자를 } W \text{로 나눠 주면}$$

다음과 같다.

$$S_2 = \frac{4.29v^2}{\left(\frac{F_2}{W}\right)f + (rr+cr \pm gr+tr)} \quad \text{에서 } rr = \frac{RR}{W}, cr = \frac{CR}{W}, gr = \frac{GR}{W}, tr = \frac{TR}{W} \text{은 } \dots\dots 4-39\text{식}$$

톤당 열차 저항 값으로 환산한 것이다.

4.5.3 제동 거리의 산출

제동 거리 s_b 는 공주 거리 s_1 과 실제제동 거리 s_2 의 합으로 나타낸다.

$$s_b = s_1 + s_2, \dots\dots 4-40\text{식}$$

$$s_s = \frac{vt_1}{3.6} + \frac{4.29v^2}{\left(\frac{F_2}{W}\right)f + (rr+cr \pm gr+tr)}, \dots\dots 4-41\text{식}$$

4.5.3.1 제동 거리의 특징

- (1) 열차 중량 W 에 비례한다.
- (2) 제동 초속도 v^2 제곱에 비례한다.
- (3) 톤당 작용하는 열차 저항($rr+cr+tr \pm gr$)에 반비례한다.
- (4) 제동률 $\frac{F_2}{W}$ 에 반비례한다.

4.5.3.2 기울기가 없는 직선 선로에서 사용하는 제동 거리 식

$$s_b = s_1 + s_2$$

$$s_1 = v \cdot t = \frac{v \cdot t}{3.6}, (m)$$

$$s_2 = v \cdot t, (m), [v = \frac{v_2 - v_1}{2}, t = \frac{v_2 - v_1}{a}]$$

$$s_2 = \frac{(v_2)^2 - (v_1)^2}{2a}, (m)$$

$$s_2 = \frac{(v_2)^2 - (v_1)^2}{2a} \cdot \frac{1}{3.6} = \frac{(v_2)^2 - (v_1)^2}{7.2a}, (m)$$

$$s_b = s_1 + s_2$$

$$s_b = \frac{vt}{3.6} + \frac{v^2}{7.2a}, (m) \dots\dots 4-42\text{식}$$

여기서 s_b 는 제동 거리, t 는 전기동차의 공주시간, v 는 전동차 속도(km/h), a 는 감속도(km/h/s)이다.

[표 4-7] 기율기에 따른 제동 감속도

열차 종별 \ 기율기	-10(‰)	0(‰)	비고
전기동차	2,50km/h/s	3,00km/h/s	

[표 4-8] 전기동차의 비상 제동거리

구분	속도(km/h)	제동 거리(m)	비고
전기동차	180	1,400	부하(負荷) 기준
	160	1,000	부하(負荷) 기준
	110	600	부하(負荷) 기준

※ 철도차량 기술 기준(도시철도차량)

4.5.4 제동 시간

제동 시간은 제동을 개시한 때로부터 열차가 정지할 때까지의 시간으로 공주시간을 t_1 , 제동 시간을 t_2 라 하면 정지 시간 t 는 다음과 같이 정의한다.

$$t = t_1 + t_2, (sec) \dots\dots 4-43\text{식}$$

제동이 작용한 때로부터 정지할 때까지의 제동력과 열차 저항을 합한 전(全) 제동을 F_t 라 하면

$$F_t = m \cdot (a) \dots\dots 4-44\text{식}$$

$$F_t = m \cdot \left(\frac{v}{t_2}\right)$$

$$F_t = \frac{1000W}{9.8} \cdot \left(\frac{1}{3.6} \cdot \frac{v}{t_2}\right)$$

열차의 중량 W 에 대하여 회전 부분의 관성 계수를 고려하면 다음과 같이 정의된다.

$$F_t = \frac{28.35W(1+x)v}{t_2}$$

전기동차의 관성 계수 $x = 0.09$ 이므로

$$F_t = \frac{28.35 \cdot 1.09W \cdot v}{t_2} = \frac{30.9Wv}{t_2}$$

$$t_2 = \frac{30.9Wv}{F_t}, \text{ 여기서 } F_t \text{를 제동력 } B \text{와 열차 저항}(RR+CR \pm GR+TR) \text{으로 치환을 하면}$$

제동 시간은 다음과 같다.

$$t_2 = \frac{30.9Wv}{B + (RR+CR \pm GR+TR)W}, \text{ 여기서 분모 분자를 } W \text{로 나눠 주면 다음과 같다.}$$

$$t_2 = \frac{30.9v}{\left(\frac{B}{W}\right) + (rr+cr \pm gr+tr)}, \text{ (rr+cr \pm gr+tr)은 톤당 열차저항이다.}$$

따라서 제동 시간 t 는 다음과 같이 정의된다.

$$t = t_1 + t_2 \dots\dots 4-45\text{식}$$

$$t = t_1 + \frac{30.9v}{\left(\frac{B}{W}\right) + (rr+cr \pm gr+tr)}$$

4.5.4.1 제동 시간의 특징

- (1) 제동 시간은 제동 초속도에 비례한다.
- (2) 제동 시간은 열차 저항에 반비례한다.

✓ 핵심정리

**1. 점착력**

차륜의 답면과 레일의 접촉면과의 마찰력에 의한 항력

2. 견인력

전기동차의 전동기에 전력이 공급됨으로써 전자기유도 작용에 의해 회전자에 발생하는 회전력이 차륜에 전달되어 차륜답면에서 발휘되는 힘

$$F = \frac{2 \cdot T \cdot G_r \cdot N}{D} (N),$$

3. 속도

$$v = 0.1885 \frac{D \cdot n}{G_r} = 0.1885 \frac{D \cdot n \cdot Z_A}{Z_B}, \text{ (km/h)}$$

4. 제동력

$$B_s = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P_e \cdot f \cdot n \cdot B_m \cdot \eta$$

$$B_d = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot P_e \cdot f \cdot n \cdot B_m \cdot \eta \cdot \left(\frac{r}{R}\right)$$

5. 제동 거리

$$s_s = \frac{vt_1}{3.6} + \frac{4.29v^2}{\left(\frac{F_2}{W}\right)f + (rr+cr \pm gr+tr)}$$

6. 제동 시간

$$t = t_1 + \frac{30.9v}{\left(\frac{B}{W}\right) + (rr+cr \pm gr+tr)}$$

5장

열차 저항



5.1 열차 저항의 분류



5장

열차 저항

학습목표

- ✓ 열차 저항의 정의에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 열차 저항의 분류 및 특징에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 열차 저항, 출발 저항, 주행저항, 곡선저항, 기울기 저항, 터널 저항, 가속도 저항 등

열차가 주행하는 경우 차륜과 레일 간의 마찰저항, 차축과 축수 간의 마찰저항, 열차 전체에 작용하는 공기저항 이외에도 오르막 기울기 선로나 곡선 선로에서도 저항을 받는다. 이들 저항을 총칭해서 열차 저항이라고 한다.

5.1 열차 저항의 분류

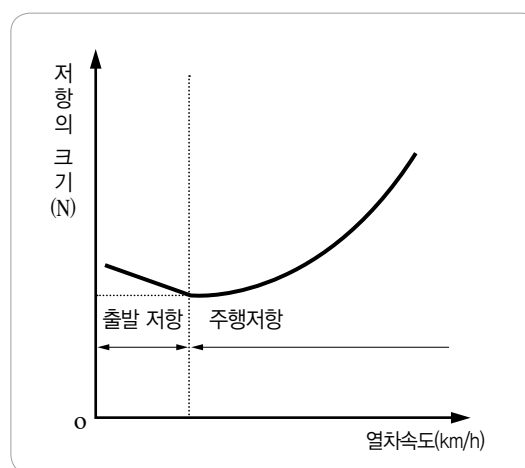
저항의 분류	발 생 원 인
출발 저항 주행저항	• 정차 중인 열차가 출발할 때 • 주행 중인 차량 자체나 차량 상호 간에 발생
기울기 저항 곡선저항 터널 저항	• 지상 설비에 기울기 등이 있는 경우 열차가 그 구간을 주행할 때마다 일시적으로 주행을 방해받게 됨으로 발생하는 저항
가속도 저항	• 가속도 저항 : 모든 저항(출발,주행,곡선,구배저항)이 견인력과 동일하면 등속운동이 되나 등속운동 중 속도를 가속하려면 여분의 견인력을 필요로 한다. 이 여분의 견인력을 저항으로 취급하여 가속도 저항이라 한다. 가속에 필요한 힘은 차량의 직진부분의 가속과 회전부분의 가속에 필요한 힘이다.

[표 5-1] 저항의 발생 원인에 따른 저항의 표시 기호

단위	발생 원인	차량으로 인한 저항		지상 설비로 인한 저항		
		출 발	주 행	곡 선	기울기	터 널
열차 전체 저항(N)		SR	RR	CR	GR	TR
톤당 저항(N/ton)		sr	rr	cr	gr	tr

5.1.1 출발 저항

전기동차가 평탄 선로에서 출발하려고 할 경우 발생하는 마찰력을 출발 저항이라고 한다. 출발 저항은 열차에 대한 관성력과 차축과 축수, 치차와 치차의 금속과 금속이 접촉하기 때문에 발생하는 마찰력에 의하여 발생한다. 출발 시에는 순간적으로 큰 마찰력이 발생하지만 일단 차축이 회전하기 시작하면 급격히 작아지며 운전 이론에서는 0~3km/h까지를 출발 저항이라고, 이후 주행저항으로 해석한다.



[그림 5-1] 출발 저항

출발 저항의 크기는 축수의 구조, 접촉면의 상태, 윤활유의 종류와 윤활 상태, 기온, 정차 시간, 차량 간의 연결기 압축 상태 등의 영향을 받는다. 물러 축수를 가진 열차 전체에 작용하는 출발 저항의 크기는 30N/ton 정도이다.

열차의 출발 저항은 출발 시 차량 간 연결기 유간과 연결기 완충 스프링의 압축 상태에 따라 달라지며, 정차 시 제동 취급이나 차량마다의 제동력, 하중, 선로의 기울기에 따라서도 달라진다. 정차 시에 열차 앞부분의 제동력 등 저항이 큰 상태에서 각 차량의 사이가 압축 상태가 되면 출발 시 저항이 작아진다. 단위 중량당 출발 저항을 sr , 열차 중량을 W 라 하면 열차 전체의 출발 저항 SR 은 다음과 같이 정의한다.

$$SR = sr \cdot W, (N) \cdots \cdots 5-1식$$

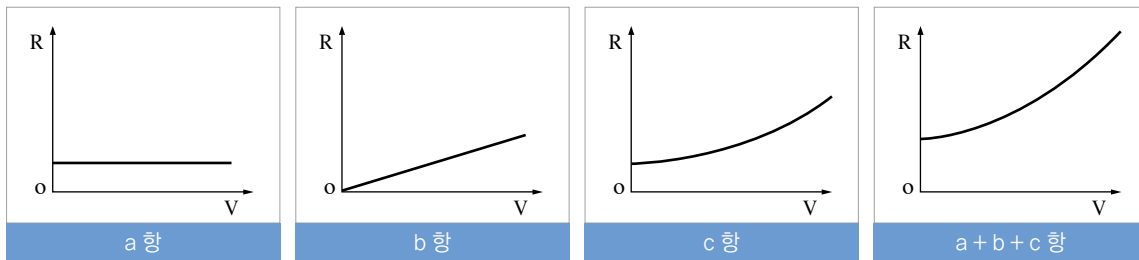
여기서 sr 은 속도 0km/h에서 단위 중량당 출발 저항 값(N/ton)

5.1.2 주행저항

기울기가 없는 직선 선로에서 공기저항 및 차륜의 구름 저항과 회전체의 마찰력을 모두 합하여 주행저항이라 하며, 열차의 속도가 증가함에 따라 저항 값은 커진다. 특히, 철도차량의 맨 앞쪽 형상에 따라 영향을 많이 받는 저항이다. 전체 주행저항을 $RR(N)$, 톤당 주행저항을 $rr(N/ton)$, 열차 중량을 $W(ton)$, 열차 속도를 $v(km/h)$, 상수를 a, b, c 라 할 때 주행저항 식은 다음과 같이 속도의 이차방정식으로 정의한다.

$$RR = aW + bvW + cv^2 = (a + bv)W + cv^2, (N)$$

$$rr = a + bv + (cv^2/W), (N/ton) \dots\dots 5-2식$$



[그림 5-2] 주행저항

[표 5-2] 주행저항에 영향을 주는 요소들의 특성

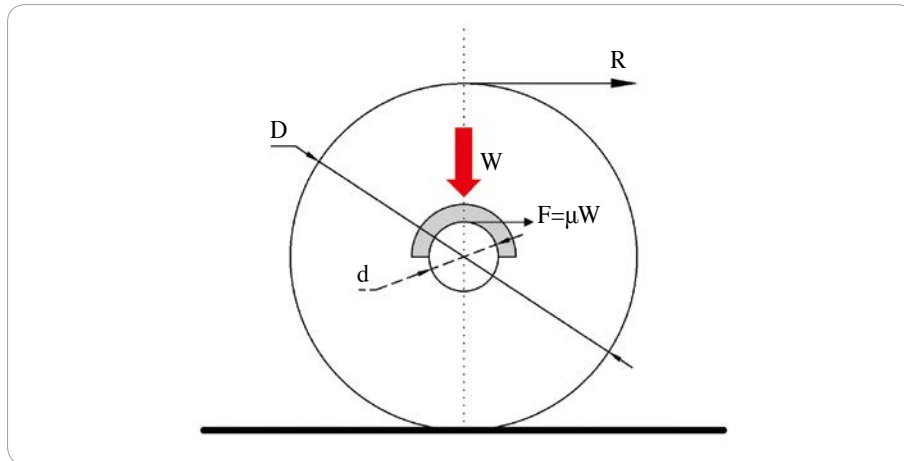
구분	영향을 주는 요소	주행저항	
		크다	작다
철도차량 조건	편성 칸 수	많음	적음
	편성 중량	무거움	가벼움
	열차 속도	높음	낮음
	앞쪽 형상	평면 구조	유선형 구조
지상 조건	기온	낮음	높음
	터널 단면 형상	단선 터널	복선 터널

5.1.2.1 주행저항으로 작용하는 요소

- (1) 차축과 축수 사이의 마찰저항
- (2) 차륜담면과 레일 간의 점착 저항
- (3) 공기저항
 - 1) 열차의 맨 앞쪽에 작용하는 공기저항(전면부 압축)
 - 2) 차체와 차체 사이에서 작용하는 공기저항(와류 현상)
 - 3) 차체 측면과 상하면에서 작용하는 공기저항(측면, 상하면과 공기 마찰)
 - 4) 열차의 맨 뒤에 작용하는 공기저항(압력 공기의 부족으로 차체 뒤로 당김)

5.1.2.2 차축과 축수 사이의 마찰저항

주행저항은 차륜담면에서 작용하는 힘으로 나타나기 때문에 차축과 축수 간의 마찰저항을 F , 차축과 축수 간의 마찰계수를 μ , 차축에 작용하는 중량을 W , 차륜 지름을 D , 차축 지름을 d 라 할 때 차륜과 차축 간의 마찰저항 R 은 다음과 같이 정의한다.



[그림 5-3] 차축과 축수 사이의 마찰저항

$$F = \mu \cdot W$$

$$R = F \cdot \frac{d}{D} = \mu \cdot W \cdot \frac{d}{D}, (N) \dots\dots 5-3\text{식}$$

위 식에서 차륜과 차축 간의 마찰력은 차축과 축수 간의 마찰계수, 차축에 작용하는 중량, 차축 지

름에 비례하며, 차륜 지름과는 반비례한다. 즉, 차축에 작용하는 중량 W , 차륜 지름 D , 차축 지름 d 는 차량 설계 시 정해지는 값으로 차륜과 차축 간의 마찰저항은 차축과 축수 간의 마찰계수 μ 에 영향을 받게 된다.

(1) 차축과 축수 간의 마찰계수에 영향을 주는 요소

- 1) 윤활유의 점도
- 2) 기온
- 3) 축과 축수 간의 접촉면 압력

차축에 작용하는 중량 W 가 커지면 축과 축수 간의 마찰계수 $\mu(= \frac{F}{W})$ 는 감소한다. 또한 톤당 주행저항은 공차 상태가 열차 상태보다 크다. 동일한 조건에서 계절별 차이도 발생하는데 겨울철이 여름철보다 더 크다.

5.1.2.3 차륜담면과 레일 간의 점착 저항

차륜이 레일 위를 주행하는 경우 차륜에 작용하는 중량은 레일에 집중하중으로 작용하기 때문에 레일에는 굽힘 현상이 발생한다. 즉, 열차는 이와 같은 현상에도 차륜은 레일 위를 계속해서 진행하기 때문에 레일과 접촉하는 면에는 열차의 진행을 방해하는 구름 마찰저항을 받는다. 여기서 구름 마찰저항은 미끄럼 마찰저항보다 훨씬 작다. 다만, 차륜담면과 레일 간의 마찰저항은 위의 차축과 축수 간의 마찰저항과 비교하면 그 크기가 매우 작다.

5.1.2.4 공기저항

열차의 맨 앞, 열차의 맨 뒤, 차체와 차체 사이에 작용하는 공기저항은 속도 제곱에 비례하고, 차체 측면에서 작용하는 공기저항은 속도에 비례한다. 또한 주행하는 열차의 중량은 공기저항에 영향을 미치지 않는다.

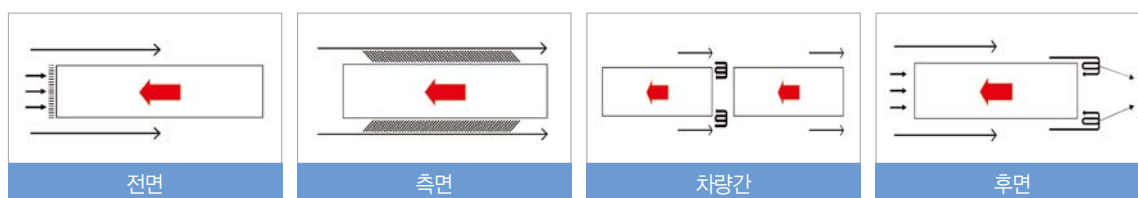
(1) 공기저항에 영향을 미치는 요소

- 1) 차체의 형상
- 2) 차체의 단면적
- 3) 연결 칸 수 등

공기저항은 속도의 제곱에 비례해 증가하기 때문에 저속 영역에서는 주행저항에서 차지하는 비율이 작다. 그러나 고속 영역이 될수록 급격하게 증가하여 주행저항 전체를 크게 만든다. 따라서 속도 영역에 따라 중간 차량의 공기저항을 1로 하면 전면저항은 약 10배, 후부 저항은 약 2.5배 정도가 된다.

(2) 속도 영역에 따른 공기저항 크기(중간 차량 : 1)

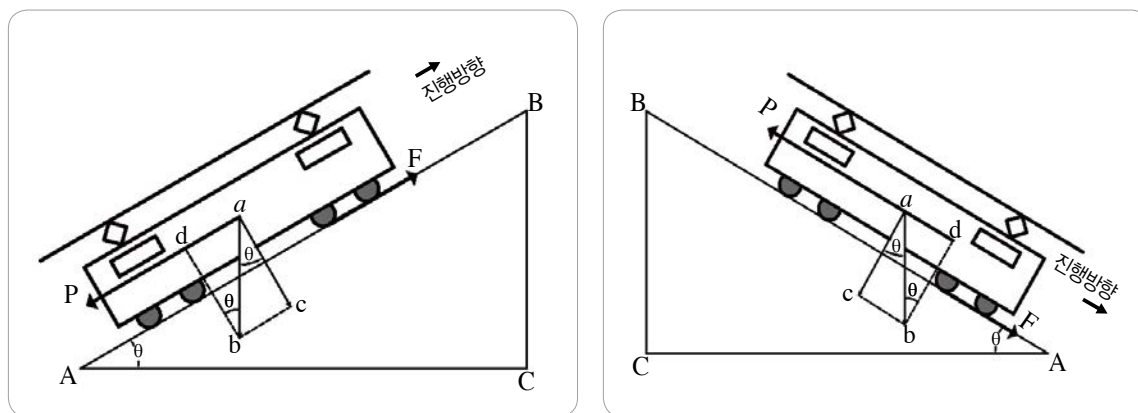
- 1) 맨 앞쪽 : 10
- 2) 맨 뒤쪽 : 2.5



[그림 5-4] 공기저항

5.1.3 기울기 저항

오르막 선로에서 열차의 주행을 방해하는 힘 GR 는 오르막 선로를 오르는 열차에 대해서는 감속력으로 작용하고, 구배를 내려오는 열차에 대해서는 가속력으로 작용한다. 기울기 저항은 오르는 경우는 기울기 양을 +로, 내려오는 경우는 -로 표시하나 보통 오르막 선로의 경우는 표기를 하지 않는다.



[그림 5-5] 기울기 저항

5.1.3.1 열차가 하나의 기울기만 있는 구간을 주행하는 경우

경사면 AB 면을 따라 W 톤의 전기동차를 주행시키는 경우 W 는 AB 에 평행한 분력 bc 와 AB 에 직각인 bd 로 나누어진다. 이 경우 bd 는 레일에 대한 수직 압력 N 으로, bc 는 AB 를 따라 내려가려는 기울기 저항 GR 이 된다. $\triangle ABC$ 와 $\triangle abc$ 는 닮은꼴이므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{bc}{BC} = \frac{ab}{AB}, \text{ 따라서}$$

$$bc = \frac{BC}{AB} \cdot ab = W \cdot \sin\theta$$

선로의 기울기를 표현하는데 실제 기울기의 θ 값이 크지 않기 때문에 $\sin\theta \approx \tan\theta$ 를 사용하면 밑변에 대한 높이(BC/AC)를 사용한다.

그러므로 기울기 저항 GR 은 열차 중량이 W 라면 다음과 같이 정의한다.

$$GR = W \cdot \tan\theta, (\text{ton})$$

철도에서는 기울기를 천분율(‰)로 나타낸다. 즉 밑변의 길이 1000(m)에 대한 수직 높이(높이 차) i (m)일 때 열차 중량 W 에 대한 기울기 저항식은 다음과 같이 정의한다.

$$GR = 9.8 \cdot 1000 \cdot W \cdot \frac{i}{1000}$$

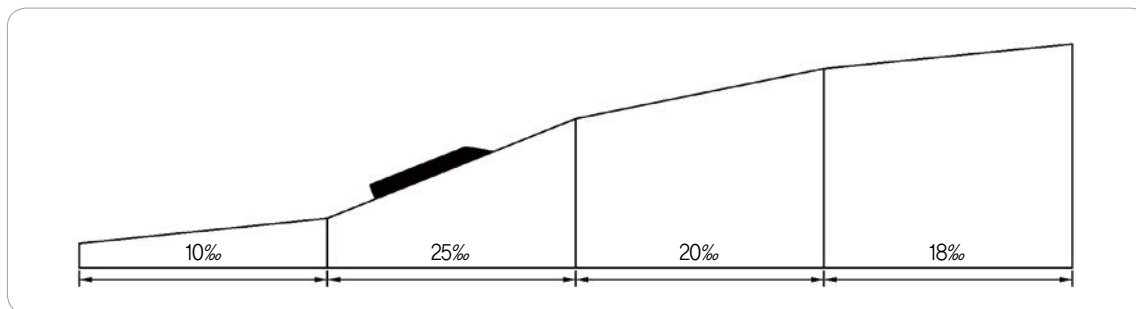
$$GR = 9.8 \cdot W \cdot i, (N)$$

따라서 톤당 작용하는 기울기 저항($GR/W = \text{gr}$)을 나타내는 식은 다음과 같다.

$$\text{gr} = \frac{9.8 \cdot W \cdot i}{W}$$

$$\text{gr} = 9.8 \cdot i, (N/\text{ton}) \dots\dots 5-4\text{식}$$

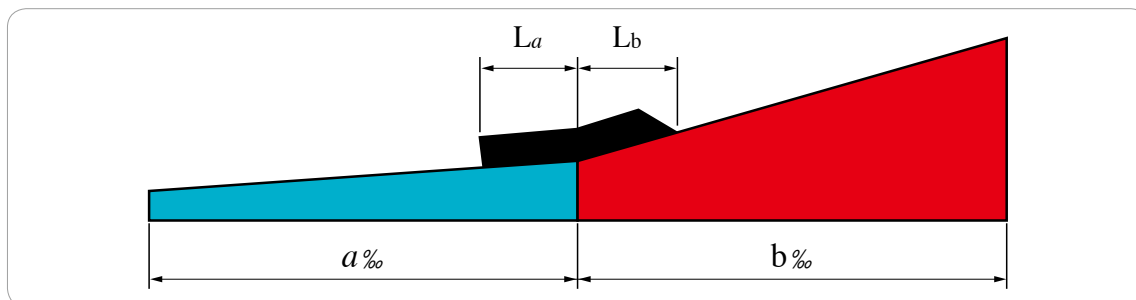
위 식에서 의미하는 것은 톤당 기울기 저항은 천분율(‰)로 표시한 기울기의 9.8배 크기가 된다는



[그림 5-6] 하나의 기울기 구간 운행 시 기울기 저항

것이다. 즉, 선로의 기울기가 10‰인 경우에는 98N/ton 의 감속력으로 작용하고, -10% 인 경우에는 98N/ton 의 가속력으로 작용하게 된다. 또한 기울기 저항을 kgf/ton 으로 표시한 경우에는 10‰에서는 10kgf/ton 의 감속력이 작용하고, -10% 에서는 10kgf/ton 의 가속력으로 작용한다.

5.1.3.2 열차가 여러 가지 기울기가 있는 구간을 주행하는 경우



[그림 7-] 여러 개의 기울기 구간 운행 시 기울기 저항

L_a : $a\%$ 구간의 열차 길이(m), L_b : $b\%$ 구간의 열차 길이(m), w : 열차 1m당 평균 중량(ton), W : 열차 중량(ton), a : $a\%$ 기울기에서 톤당 기울기 저항(N/ton), b : $b\%$ 기울기에서의 톤당 기울기 저항(N/ton)일 때 각각의 기울기 저항은 다음과 같다.

$$a\% \text{에서 기울기 저항, } GR_a = a w L_a (\text{kgf/cm}^2)$$

$$b\% \text{에서 기울기 저항, } GR_b = b w L_b (\text{kgf/cm}^2)$$

그러므로 전기동차 전체 기울기 저항 GR_t 은 다음과 같이 정의한다.

$$GR_t = 9.8 \cdot (a \cdot w \cdot L_a + b \cdot w \cdot L_b), (N)$$

위 식에서 톤당 작용하는 전체 기울기 저항 gr_t 는 다음과 같다.

$$\frac{GR_t}{W} = gr_t \dots\dots 5-5\text{식}$$

$$gr_t = \frac{9.8 \cdot w \cdot (a \cdot L_a + b \cdot L_b)}{W}, (N/ton)$$

5.1.4 곡선저항

열차가 곡선 선로를 주행하는 경우 차륜과 레일 간의 마찰저항은 직선 선로 구간보다 크다. 즉, 곡선 선로 구간에서 마찰저항이 커지는 원인은 다음과 같은 원인이 있다.

5.1.4.1 외측 레일과 차륜의 플랜지 간 마찰저항

차량은 곡선 선로의 접선 방향으로 직진하려고 하기 때문에 외측 레일의 내측과 외측 차륜의 플랜지 간에 마찰저항이 발생한다.

5.1.4.2 내측 외측 레일의 길이 차이

외측 레일은 내측 레일보다 길기 때문에 좌우 같은 형태로 같은 축에 고정되어 있는 차륜이 회전하면서 곡선 선로를 진행하다 보면 내외 어느 쪽 차륜이든지 조금씩 활주하는 경우가 있다. 이러한 미끄럼을 방지하기 위해 차륜담면에 기울기가 있으나 완전하게 활주를 방지하는 것은 불가능하다. 이 때문에 마찰저항이 발생한다.

5.1.4.3 대차의 미끄러짐

동일 대차의 전방 차륜은 곡선 선로의 내측으로 미끄러지고, 후방 차륜은 외측으로 미끄러지기 때문에 마찰저항이 발생한다.

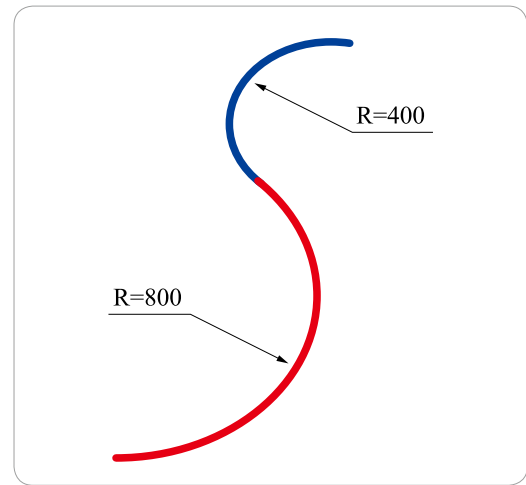
곡선저항은 레일 간격, 곡선 반지름, 캔트(cant), 슬랙(slack), 고정 축간거리, 열차 속도 등의 영향을 받는다. 차륜과 레일 간의 점착 계수를 μ , 레일 간격을 G , 고정 축간거리를 L_w , 곡선 선로 반지름을 R 이라 할 때, 모리슨(Morrison)이 정리한 톤당 곡선저항은 다음과 같이 정의한다.

$$cr = 9.8 \cdot \frac{1000 \cdot \mu \cdot (G + L_w)}{2R}$$

$$cr = 4,900 \cdot \frac{\mu \cdot (G + L_w)}{R}, \text{ 모리슨식에서 레}$$

일 간격 및 점착 계수 등을 고려하여 산출한 곡선 저항식은 다음과 같이 정의한다.

$$cr = \frac{700}{R} (\text{kgf/ton}) \dots\dots 5-6\text{식}$$



[그림 5-8] 곡선저항

5.1.5 보정 기울기 저항

기울기가 있는 선로 구간 내 곡선 선로가 있는 경우, 곡선 선로에서 발생한 저항의 크기를 기울기 저항으로 환산한 것을 환산기울기 저항이라고 한다. 따라서 환산기울기 저항(곡선저항)과 기울기 저항(실제 기울기)의 합을 보정 기울기 저항 이라 한다. 즉, 톤당 기울기 저항을 i , 톤당 곡선저항을 cr , 곡선 선로 반지름을 $r, r_1, r_2, \dots, r_n$, 곡선 선로 길이를 $L, L_1, \dots, L_n$ 이라 하면 보정기울기 저항 eg 는 다음과 같이 정의한다.

(1) 오르막 기울기 구간 내 곡선 선로가 있는 경우

$$eg = i + \frac{700}{r} (\text{kgf/ton}) \dots\dots 5-7\text{식}$$

(2) 내리막 기울기 구간 내 곡선 선로가 있는 경우

$$eg = (-)i + \frac{700}{r} (\text{kgf/ton}) \dots\dots 5-8\text{식}$$

(3) 오르막 기울기 구간 내 여러 종류의 곡선 선로가 있는 경우

$$eg = i + \frac{700}{r} \left(\frac{L_1}{r_1} + \frac{L_2}{r_2} + \frac{L_3}{r_3} + \frac{L_n}{r_n} \right) (\text{kgf/ton}) \dots\dots 5-9\text{식}$$

여기서 i 를 실제 구배라고도 한다.

- (4) 오르막 기울기가 30(%)인 곳에 곡선 반지름 700m인 선로를 만들 경우, 곡선 선로로 인한 열차 저항이 발생하기 때문에 열차는 정시 운전을 할 수가 없다. 그러므로 곡선저항만큼 기울기를 낮추어야 한다. 기울기 크기는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{곡선저항} = \frac{700}{\text{곡선반지름}}, (\text{kgf/t}), \dots\dots 5-10\%$$

$$cr = \frac{700}{700} = 1(\text{kgf/t}) \text{ 이므로 } 1\% \text{이 된다.}$$

기울기 크기는 $30 - 1 = 29(\%)$ 가 되어야 정시 운전을 할 수 있다.

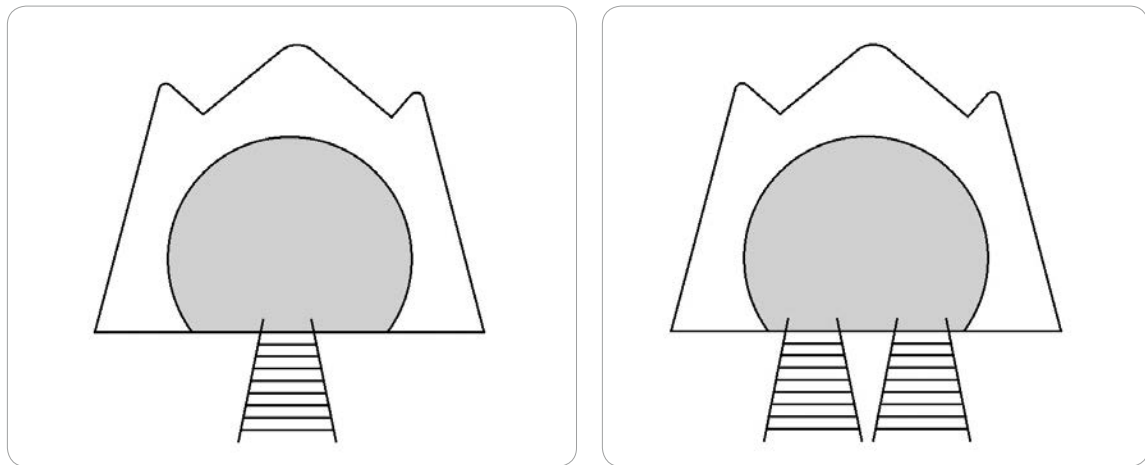
5.1.6 터널 저항

열차가 터널 진입 시부터 터널 출구까지 주행하는 동안 발생하는 압력은 빠져나갈 곳이 없기 때문에 터널 안의 공기압력은 증대되어 열차 주행을 방해하는 힘으로 작용한다. 이 공기압력을 터널 저항이라고 한다. 터널 저항의 증가 요인으로는 터널의 단면 형상(단선 터널/복선 터널), 터널의 길이, 차량 형상, 열차의 속도, 대향 열차의 유무 등에 의해 복잡하게 변하기 때문에 정량적인 파악이 어렵다. 터널 외부와 비교한 단선 터널 내에서 측정한 터널 저항은 100km/h 전후에 70N/ton(7% 상당), 160km/h에서는 150N/ton(15% 상당)이 증가한다고 한다.¹¹⁾ 특히, 열차가 고속으로 터널에 진입하면 차체가 공기를 밀고 나가 압축함으로써 압축파가 형성된다. 이 압축파는 열차 내부 기압에 영향을 미쳐 승객들이 귀 울림(이명) 현상을 느끼는 등 불쾌감을 일으키고 터널 출구에서 충격성 소음으로 소리와 함께 터져 나가는데 이것을 미기압파라고 한다. 미기압파는 폭발음과 함께 주변 환경에 진동 현상까지 일으킨다.

5.1.6.1 터널 저항의 증가 요인

- (1) 터널의 단면 형상(단선 터널, 복선 터널)
- (2) 터널의 길이
- (3) 차량의 형상(유선형, 비유선형 등)

11) 일본 철도 운전 이론 : 3.4.3 터널 저항



[그림 5-9] 터널 저항

(4) 열차의 속도

(5) 대향 열차의 유무(터널 안에서 동시 운행)

[표 5-3] 터널 저항의 크기

단선 터널(N/t)	복선 터널(N/t)
19.6	9.8

5.1.7 가속도 저항

열차가 가속 또는 감속하는 경우 차체 등 직진 부분은 물론이고, 차륜과 치차 등 회전 부분도 가속 또는 감속하지 않으면 안 된다. 즉, 동력차의 유효 견인력 일부는 회전 부분의 회전력으로 작용한다. 운전 이론에서는 직진 운동에 대한 손실로 보아 열차 저항의 일부로 취급한다. 가속도 저항은 정하중(靜荷重)에 대한 회전 부분의 관성 중량의 비율로 표시해 정하중의 5~10%로 인정하고 있다. 차량별로는 전기기관차에서는 13~19%, 전기동차는 9%정도, 디젤동차 및 기관차 견인 열차는 6%로 인정하고 있다.

5.1.7.1 가속도 저항식

뉴턴의 운동 제2법칙(힘과 가속도 그리고 질량과의 관계 법칙)에서 물체에 힘을 작용하면 힘의 작용 방향으로 힘의 크기에 비례하고 물체의 질량에 반비례하는 가속도가 발생한다. 질량 m 의 물체에

힘 F 를 작용시켜 가속도 a 가 발생하면 다음과 같이 정의한다.

$F \propto m \cdot a$, 이 식에서 비례정수를 k 로 하여 정리하면 다음과 같다.

$F = k \cdot m \cdot a$ 여기서, 질량 1kg 의 물체를 매초 1m 의 비율로 가속시키는 데에 필요한 힘을 1N 이라고 하면 k 는 1로 되어 다음과 같이 정의한다.

$$F = m \cdot a, (\text{kg m/s}^2), \dots\dots 5-11\text{식}$$

물체에 작용하는 지구의 인력은 질량의 대소와 관계없이 9.8m/s^2 의 가속도가 작용하기 때문에 질량 m 에 작용하는 지구의 인력은 $9.8(\text{kg} \cdot \text{m/s}^2)$ 이 된다. 그러므로 질량 1kg 의 물체에 작용하는 지구의 인력은 9.8N 이 된다.

일반적으로 열차의 질량은 중량으로 표시된다. 중량은 $W(\text{ton}) = 1000 \times W(\text{kg})$ 으로 표시되기 때문에 중량 $W(\text{ton})$ 의 열차를 가속도 $a\text{m/s}^2$ 로 가속하기 위해 필요한 힘 F 는 다음과 같이 정의한다.

$$F = 1000 \cdot W \cdot a, (N) \dots\dots 5-12\text{식}$$

위의 식에서 열차 중량 1ton 당 작용하는 힘 $F_t(N/\text{ton})$ 로 하면 다음과 같다.

$$F_t = \frac{F}{W} \dots\dots 5-14\text{식}$$

$$F_t = \frac{1000 \cdot W \cdot a}{W}$$

$$F_t = 1000 \cdot a$$

결국 힘 F_t 는 열차의 직진성과 관계되는 식으로 편성된 열차의 각 차량에는 차륜, 차축, 감속장치, 회전자, 추진축 등의 회전 부분이 있으며, 이들 회전 부분도 마찬가지로 가속시키지 않으면 안 된다. 이들 회전하는 부분을 가속시키기 위해서 필요한 힘은 직진하는 부분의 가속에 필요한 힘에 비례하지만, 회전하는 부분의 중량 및 회전 반지름 등의 영향에 의해 바뀐다. 회전하는 부분에 필요한 힘은 열차 전체의 가속력을 사용하기 때문에 유효 가속력의 손실로 취급하며, 관성 계수로 표시된다.

관성 계수는 열차 전체에서 차지하는 회전 부분의 중량으로 표시되며 일반적으로 $5 \sim 10(\%)$ 정도의 중량이다. 관성 계수를 고려한 가속력 $F_i(N/\text{ton})$ 은 다음과 같다.

5.1.7.2 관성 계수를 고려한 전기동차의 가속력 F_i

$$F_i = 1000 \cdot a \cdot (1+0.09) = 1090 \cdot a$$

위 식에서 a 가속도의 단위 (m/s^2)를 A 의 단위 km/h/s 로 바꾸면 다음과 같다.

$$a = \frac{1000 \cdot A}{60 \cdot 60} = \frac{1}{3.6} A$$

$$F_i = 302.8 \cdot A, (N/\text{ton}), \dots\dots 5-13\text{식}$$

(1) 관성 중량

크기와 모양 그리고 중량이 같은 두 물체 A, B 가 있다. 두 물체 A, B 에 같은 힘 F 를 주었다. 물체 A 는 직선운동을 하고, 물체 B 는 직선운동과 회전운동을 함께 한다면 물체 A 는 B 보다 더 멀리 진행을 할 것이다. 물체 B 의 회전운동은 직선운동을 방해하는 힘(회전 관성)으로 작용했기 때문이다. 두 물체 A, B 가 같은 거리를 진행하기 위해서는 물체 B 에 더 큰 여분의 힘을 가해야 한다. 여기서 물체 B 에 가해 준 여분의 힘을 관성 중량, 등가 중량이라고 한다.

(2) 속도와 거리, 그리고 가속력의 관계

등가속도 $A \text{ km/h/s}$ 에서 속도 $v_1(\text{km/h})$ 에서 $v_2(\text{km/h})$ 로 가속할 경우의 거리 $s(\text{m})$ 와의 관계는 다음과 같이 정의한다.

$$A = \frac{(v_2)^2 - (v_1)^2}{7.2 \cdot s}$$

위 식에 가속력 $F(N/\text{ton})$ 와 가속도 $A(\text{km/h/s})$, 그리고 $a(\text{m/s/s}) = \frac{1}{3.6} A$ 를 대입하면

관성 계수를 고려한 전기동차의 가속력 F 에 대한 식은 다음과 같이 정의한다.

$$F = \frac{42.1 \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{s}, \dots\dots 5-14\text{식}$$

위 식으로부터 이동 거리는 다음과 같이 정의한다.

$$s = \frac{42.1 \cdot (v_2^2 - v_1^2)}{F}, \dots\dots 5-15\text{식}$$

또한, 위 식을 kgf/ton 단위로 정리하면 다음과 같다.

$$s = \frac{4.29(v_2^2 - v_1^2)}{F}, \dots\dots 5-16\text{식}$$

☑ 핵심정리



1. 열차 저항

열차가 주행하는 경우 차륜과 레일 간의 마찰저항, 차축과 축수 간의 마찰저항, 열차전체에 작용하는 공기 저항 이외에도 오르막 기울기 선로나 곡선 선로에서도 저항을 받는다. 이들 저항을 총칭해서 열차 저항이라고 한다.

2. 열차 저항의 분류

저항의 분류	발 생 원 인
출발 저항 주행저항	- 정차 중인 열차가 출발할 때 - 주행 중인 차량 자체나 차량 상호 간에 발생
기울기 저항 곡선저항 터널 저항	지상 설비에 기울기 등이 있는 경우 열차가 그 구간을 주행할 때마다 일시적으로 주행을 방해받게 됨으로 발생하는 저항
가속도 저항	열차는 차체 직진부와 차륜 회전부로 구성되어 있기 때문에 가속을 위해서는 회전부도 가속시켜야 한다. 전체 직진 운동에서 보면 이 회전부는 손실에 해당하기 때문에 열차 저항으로 취급

3. 열차 전체의 출발 저항

$$SR = sr \cdot W, (N)$$

4. 차륜과 차축 간의 마찰력은

$$R = F \cdot \frac{d}{D} = \mu \cdot W \cdot \frac{d}{D}, (N)$$

5. 기울기 저항

$$gr = 9.8 \cdot i$$

7. 환산 기울기 저항

$$eg = i + \frac{700}{r}, (kgf/ton)$$

6. 곡선저항

$$cr = \frac{700}{r}, (N/ton)$$

8. 가속도 저항

$$F_i = 302.8 \cdot A, (N/ton)$$

6장

선로 공학



- 6.1 용어의 정의
- 6.2 최소 곡선 반지름
- 6.3 설정 캔트 및 부족 캔트
- 6.4 완화곡선
- 6.5 선로의 최대 기울기
- 6.6 종곡선 간 직선 선로의 최소 길이
- 6.7 슬랙



6장

선로 공학

학습목표

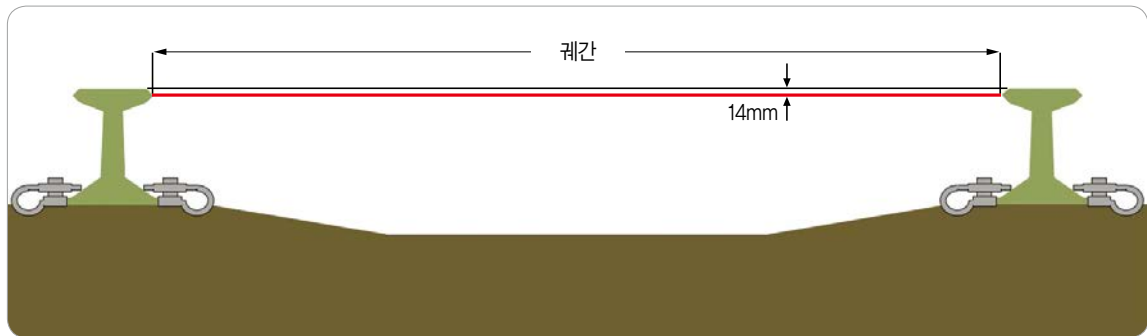
- ✓ 선로에 관련된 용어에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 선로 역학과 관련된 산출식에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

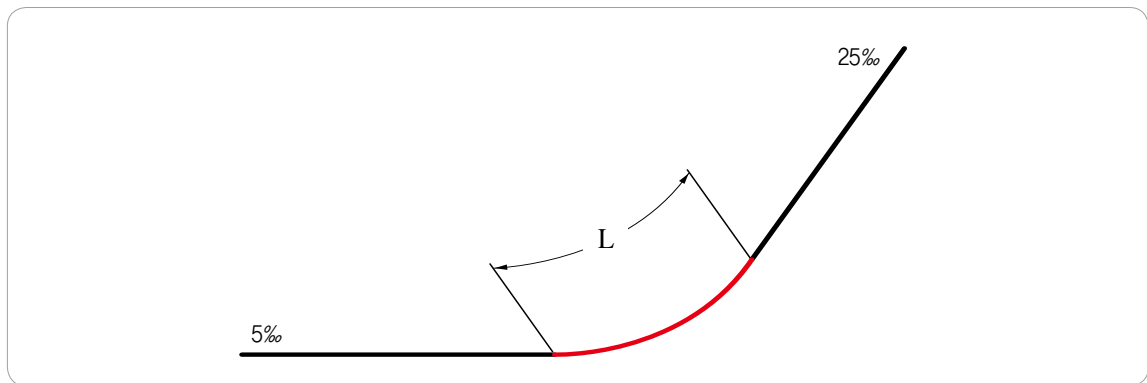
- 최소 곡선 반지름, 캔트, 완화곡선, 슬랙, 선로의 최대 기울기, 종곡선 등

6.1 용어의 정의

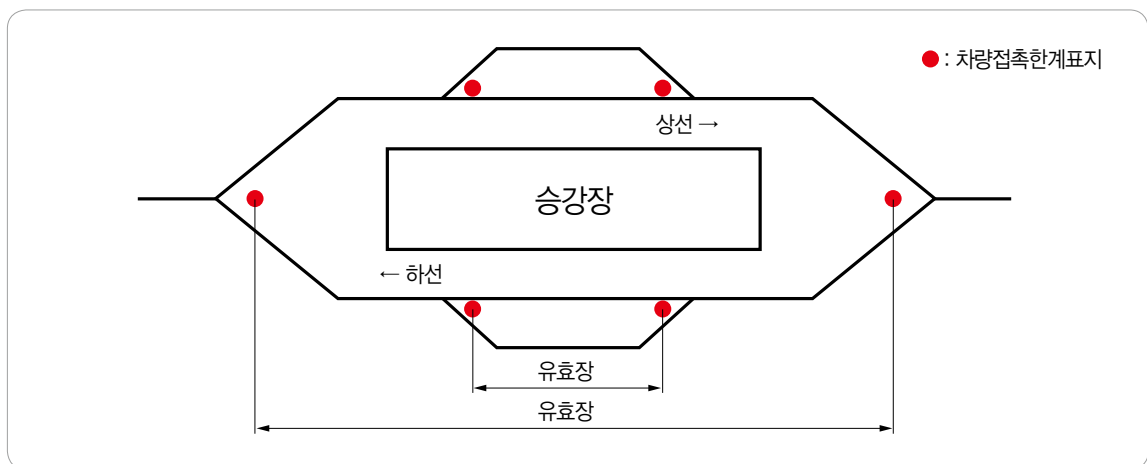
- (1) 표준궤간의 표준 치수는 1435mm로 한다.
- (2) 궤간이란 양쪽 레일 안쪽 간의 거리 중 가장 짧은 거리를 말하며, 레일의 윗면으로부터 14mm 아래 지점을 기준으로 한다.
- (3) 슬랙이란 차량이 곡선 구간의 선로를 원활하게 통과하도록 바깥쪽 레일을 기준으로 안쪽 레일을 조정하여 궤간을 넓히는 것을 말한다.
- (4) 캔트란 차량이 곡선 구간을 원활하게 운행할 수 있도록 안쪽 레일을 기준으로 바깥쪽 레일을 높게 부설하는 것을 말한다.
- (5) 종곡선이란 차량이 선로 기울기의 변경 지점을 원활하게 운행할 수 있도록 종단면에 두는 곡선을 말한다.
- (6) 설계속도란 해당 선로를 설계할 때 기준이 되는 상한 속도를 말한다.
- (7) 배차 간격이란 선행 열차와 후속 열차 간의 운전을 위한 배차 시간 간격을 말하며, 배차 간격의 최소값을 최소 배차 간격이라 한다.
- (8) 전기동차 전용선이란 도시교통 처리를 주목적으로 전기동차가 운행되는 선로로서, 디젤기관 등에 따른 여객열차와 화물열차는 운행되지 아니하는 선로를 말한다.



[그림 6-1] 궤간



[그림 6-2] 종곡선



[그림 6-3] 유효장

- (9) 유효장이란 인접 선로의 열차 및 차량 출입에 지장을 주지 아니하고 열차를 수용할 수 있는 해당 선로의 최대 길이를 말한다.

6.2 최소 곡선 반지름

설계속도를 $V(\text{km/h})$, 최대 설정 캔트를 C_1 , 최대 부족 캔트를 C_2 라 할 때, 설계속도에 따른 최소 곡선 반지름 크기는 다음과 같이 정의한다.

$$R \geq 11.8 \frac{V^2}{C_1 + C_2}, \dots\dots 6-1\text{식}$$

본선 선로의 설계속도에 따른 최소 곡선 반지름은 다음 표의 값 이상으로 해야 한다.

[표 6-1] 본선 선로의 설계속도에 따른 최소 곡선 반지름의 크기

설계속도 $V(\text{km/h})$	최소 곡선 반지름(m)	
	자갈 도상 궤도	콘크리트 도상 궤도
200	1,900	1,600
150	1,100	900
120	700	600
$V \leq 70$	400	400

다음과 같은 경우에는 최소 곡선 반지름 크기를 축소할 수 있다.

(1) 정거장의 전·후 구간 등 부득이한 경우

[표 6-2] 본선 선로의 설계속도에 따른 최소 곡선 반지름의 크기(부득이한 경우)

설계속도 $V(\text{km/h})$	최소 곡선 반지름(m)
$150 < V \leq 200$	600
$120 < V \leq 150$	400
$70 < V \leq 120$	300
$V \leq 70$	250

(2) 전기동차 전용선의 경우, 설계속도와 관계없이 250m가 된다.

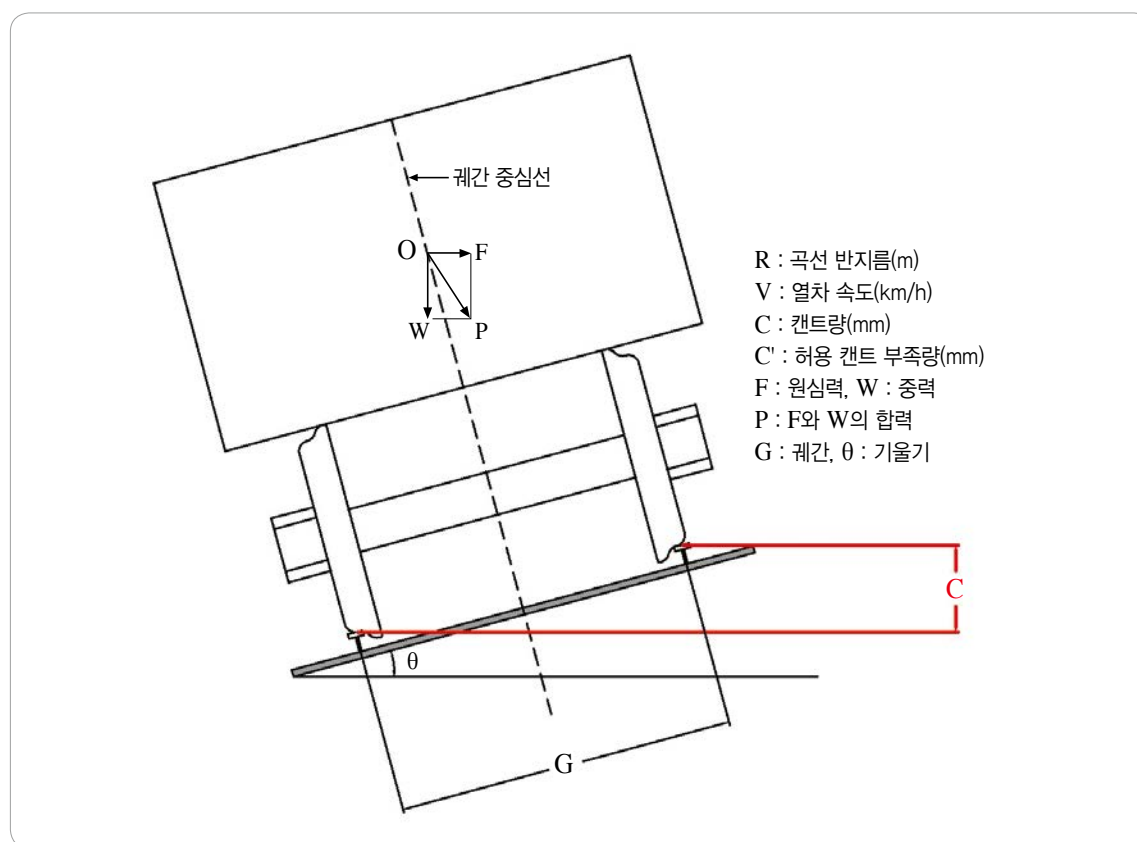
(3) 부(副)본선, 측선 및 분기기(分岐器)에 연속되는 경우에는 곡선 반지름을 200m까지 축소할 수 있다.

6.3 설정 캔트 및 부족 캔트

설정 캔트 및 부족 캔트는 곡선 구간의 궤도에 열차의 운행 안정성 및 승차감을 확보하고, 궤도에 주는 압력을 균등하게 하기 위하여 필요하다. 설정 캔트를 $C_1(\text{mm})$, 설계속도를 $V(\text{km/h})$, 곡선 반지름을 $r(\text{m})$, 부족 캔트를 $C_2(\text{mm})$ 라고 할 때, 설정 캔트는 아래와 같이 정의하고 아래 표에서 정리한 값 이하로 하여야 한다.

[표 6-3] 궤도의 종류와 설계속도에 따른 캔트의 크기

설계속도 $V(\text{km/h})$	자갈 도상 궤도		콘크리트 도상 궤도	
	최대 설정 캔트	최대 부족 캔트	최대 설정 캔트	최대 부족 캔트
$200 < V \leq 350$	160	80	180	130
$V \leq 200$	160	100	180	130



[그림 6-4] 캔트

$$(1) \text{ 설정 캔트 : } C_1 = 11.8 \cdot \frac{V^2}{r} - C_2 (\text{부족 캔트량}) \text{ (mm)}, \dots\dots 6-2\text{식}$$

$$(2) \text{ 부족 캔트 : } C_2 = 11.8 \cdot \frac{V^2}{r} - C_1 (\text{설정 캔트량}) \text{ (mm)}, \dots\dots 6-3\text{식}$$

6.4 완화곡선

곡선 반지름을 가진 곡선 선로와 직선 선로가 접속하는 곳에는 완화곡선을 두어야 하는데, 분기기에 연속되는 경우이거나 기존 선로를 고속 선로로 변경하는 구간에서는 부족 캔트 변화량 한계값¹²⁾을 적용할 수 있다. 그리고 본선의 경우, 설계속도에 따라 다음 표의 값 미만의 완화곡선을 두어야 한다.

[표 6-4] 본선 선로의 설계속도에 따른 완화곡선의 최소 크기

설계속도 $V(\text{km/h})$	곡선 반지름(m)
200	12,000
150	5,000
120	2,500
100	1,500
$V \leq 70$	600

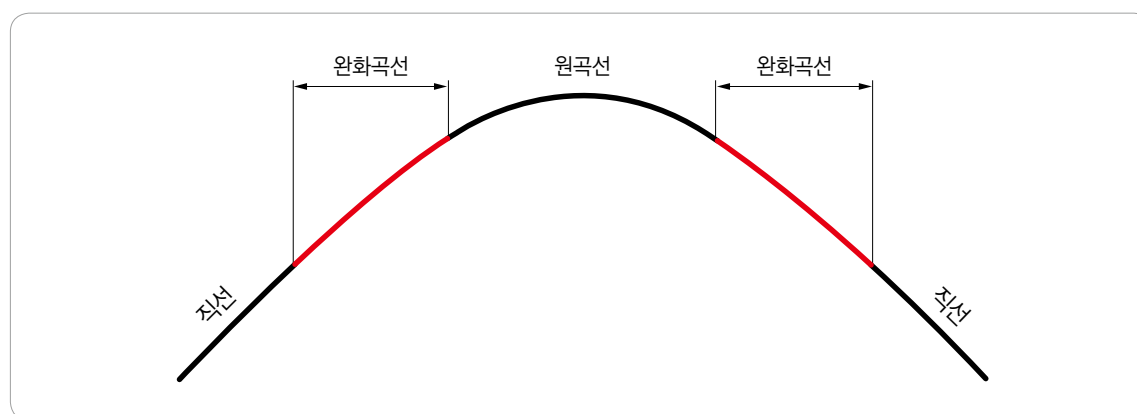
완화곡선 반지름을 $R(\text{m})$, 설계속도를 $V(\text{km/h})$, 부족 캔트 변화량 한계값을 ΔC_1 이라 할 때, 완화곡선 반지름 $R(\text{m})$ 은 다음과 같이 정의한다. 그리고 부족 캔트 변화량 한계값은 다음 표와 같다.

$$R = \frac{11.8 V^2}{\Delta C_1}, (\text{mm}), \dots\dots 6-4\text{식}$$

12) 부족 캔트 변화량 한계값 : 인접한 선형 간 균형 캔트 차이

[표 6-5] 본선 선로의 설계속도에 따른 부족 캔트 변화량 한계값의 크기

설계속도 $V(\text{km/h})$	부족 캔트 변화량 한계값(mm)
200	40
150	57
120	69
100	83
≤ 70	100



[그림 6-5] 완화곡선

6.5 선로의 최대 기울기

전기동차 전용선 선로의 최대 기울기는 다음 조건과 표의 값 이하로 하여야 한다.

- (1) 연속한 선로 10km에 대해 평균 기울기는 1000분의 25 이하여야 한다.
- (2) 기울기가 1000분의 35인 구간은 연속하여 6km를 초과할 수 없다.
- (3) 기울기 중에 곡선이 있을 경우에는, 최대 기울기에서 곡선저항 $cr(= \frac{700}{r})$ 의 값을 뺀 기울기여야 한다.

[표 6-6] 전기동차 전용선 선로의 최대 기울기

설계속도 $V(\text{km/h})$	최대 기울기(%)
전기동차 전용선	35

6.6 종곡선 간 직선 선로의 최소 길이

종곡선과 종곡선 사이에 부설하는 직선 선로의 최소 길이는 설계속도에 따라 다음 값 이상으로 하여야 한다. 여기서 설계속도를 $V(\text{km/h})$, 종곡선 간 직선 선로의 최소 길이를 $L(\text{mm})$ 이라 할 때, 다음과 같이 정의한다.

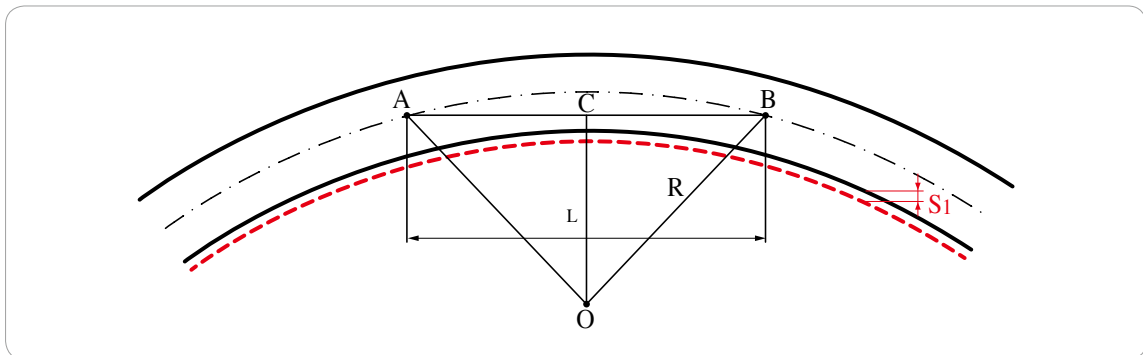
$$L = 1.5\left(\frac{V}{3.6}\right), (\text{m}), \dots\dots 6-5\text{식}$$

종곡선은 직선 선로 또는 원의 중심이 1개인 곡선 선로 구간에 부설해야 한다. 다만 부득이한 경우에는 콘크리트 도상 궤도에 한하여, 완화곡선 또는 직선 선로에서부터 완화곡선과 원의 중심이 1개인 곡선 선로 구간까지 걸쳐서 둘 수 있다.

6.7 슬랙

철도차량이 곡선 선로위를 원활하게 통과할 수 있도록 바깥쪽 레일을 기준으로 안쪽 레일을 확대한 것으로 곡선 반지름 300m 이하인 곡선 구간의 궤도에는 30mm이하의 슬랙을 두어야 한다, 여기서 슬랙을 S , 곡선 선로 반지름을 R , 조정값을 S' 라하면 슬랙 계산식은 다음과 같이 정의 한다.

$$S = \frac{2400}{r} - S'[\text{mm}], \text{ 조정값 } S' = 0 \sim 15[\text{mm}]$$



[그림 6-6] 슬랙

☑ 핵심정리



1. 용어의 정의

- (1) 표준궤간
- (2) 궤간
- (3) 슬랙
- (4) 캔트
- (5) 종곡선
- (6) 설계속도
- (7) 배차 간격
- (8) 전기동차 전용선
- (9) 유효장

2. 설계속도에 따른 최소 곡선 반지름

$$R \geq 11.8 \frac{V^2}{C_1 + C_2}$$

3. 캔트 및 슬랙

- (1) 설정 캔트 : $C_1 = 11.8 \cdot \frac{V^2}{r} - C_2$ (부족 캔트량) (mm)
- (2) 부족 캔트 : $C_2 = 11.8 \cdot \frac{V^2}{r} - C_1$ (설정 캔트량) (mm)

4. 종곡선 간 직선 선로의 최소 길이

$$L = 1.5 \left(\frac{V}{3.6} \right), (\text{m})$$

7장

소음과 진동



7.1 소음

7.2 진동



7장

소음과 진동

학습목표

- ✓ 소음의 원인 및 저감 대책에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 진동 발생의 원인 및 최소화 방안에 대하여 설명할 수 있다
- ✓ 탈선의 원인에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

- 소음, 전동 소음, 집전계(current collection system) 소음, 진동, 사행동(蛇行動), 탈선, 탈선계수 등

7.1 소음

철도차량이 주행할 때는 여러 가지 소리가 발생하는데, 이 소리는 차체의 구조, 대차의 구조, 궤도의 상태, 주위의 반향 물체의 유무, 기후 등에 의해 지배되는 복잡한 복합음으로 구성되어 있다. 이러한 소음은 차량 실내로 전달되어 승객들의 불쾌감을 유발시킬 뿐만 아니라, 선로 변의 환경 파괴와 같은 해를 입히고 있다. 철도차량의 주요 소음 발생 원인을 그 발생 위치에 따라 분류하면, 전동 소음, 차체 공력 소음, 집전계 소음, 그리고 하부 구조물에 의한 소음 등으로 나눌 수 있다.

7.1.1 전동 소음

전동 소음은 차륜과 레일의 마찰에 의해 발생하는 소음으로, 차륜의 굽힘 상태, 비틀림, 차륜 반지름 방향의 팽창 상태 및 차륜과 레일의 표면 거칠기 등에 의해 영향을 받으며, 특히 곡선 궤도 주행 시 차륜담면과 레일 사이의 미끄럼 접촉에 의해 발생하는 소음도 이에 포함된다. 전동 소음은 열차의 속도에 비례한다.

7.1.2 차체 공력 소음

바람이 객차 문틀에 부딪쳐 나는 소리, 사이렌 소리, 가스가 조그만 구멍으로부터 새어 나오는 소리 등 순수한 공기역학적인 요인으로 인해서 나오는 소리를 통칭해서 공력음이라고 부른다. 철도차량의 경우는 주로 열차의 앞부분 및 뒷부분 형상, 차체 외부의 불일치 구조 부분과 차체 하부 구조물 등에서 발생하는 소음으로, 소음원이 차체 전체에 퍼져 있다. 공력음은 특히 차량이 고속 주행을 할 경우에 주요 소음원이 된다. 공력 소음의 가장 큰 요인에 속하는 대차 부근의 소리를 억제하는 방법으로는 스프링 하(下)질량을 경감시키는 것이 유효하다. 차음 효과를 크게 하기 위해서는 문 사이의 틈을 없애고 이중창 구조를 선택하는 방법이 있으며, 진동의 전달을 방지하는 것은 차체 진동에 의한 소리를 작게 하는 결과를 가져오므로 공기스프링을 장착하는 것이 좋은 효과를 얻는다.

7.1.3 집전계 소음

집전계에서 일어나는 소음으로, 팬터그래프에서 발생하는 공력 소음, 이선(離線, contact break) 시에 발생하는 아크(Arc)에 의한 소음, 전차선과 팬터그래프의 마찰음 등이 있다. 이러한 소음들은 그 소음원의 높이가 높아서 방음벽으로도 차단이 곤란하다.

7.1.4 하부 구조물 전달 소음

차륜과 레일의 진동은 궤도 구조물을 통하여 노반으로 전달된다. 이때 발생하는 소음은 300Hz 이하의 저주파 성분으로, 소음 레벨에는 크게 기여하지 않으나 지반을 통하여 멀리 전달되므로 소음 및 진동의 차단이 어렵다. 기타 소음 발생원으로는 추진 장치 및 보조 기기 소음, 터널 미기압파(micro pressure wave)에 의한 소음 등이 있다.

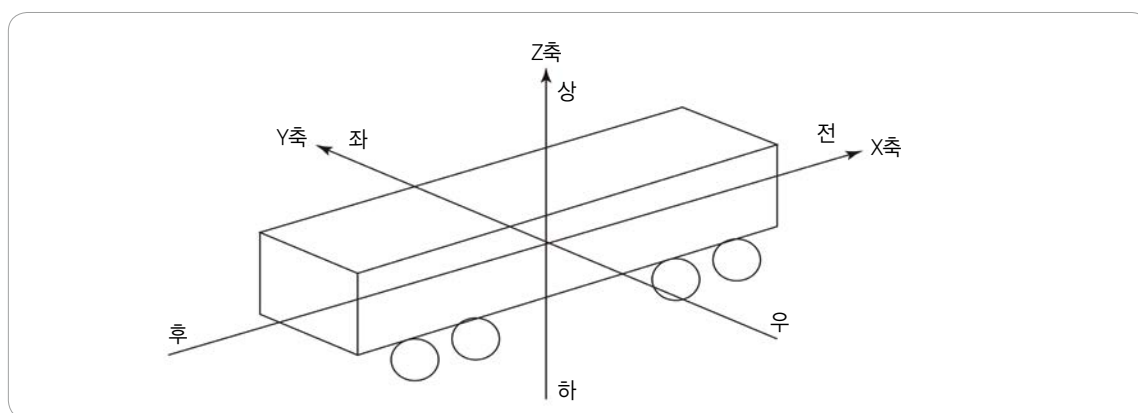
7.1.5 소음 저감 대책

소음 종류	소음원	대책
전동 소음	차량	• 차량 방음 • 차체 스커트로 구조 개선 • 차량 정밀 삭정(turning)
	궤도	• 진동 흡수 레일 • 궤도 구조 개선(체결 구조, 강성, 질량 등) • 흡음 효과 개선(자갈 도상) • 레일 연마
	차음/흡음 대책	• 수직형 방음벽 • ㄱ자형 방음벽 • 궤도 표면의 흡음 처리
공력 소음	• 차량 공력학적(공기역학적) 설계 및 차량 연결 부위 개선 • 공기저항이 적은 팬터그래프 설계 • 팬터그래프 덮개를 이용한 팬터그래프 주위의 공기 유동 개선 • 공력 소음을 고려한 방음벽 설계	
집전계 소음	이선 시 아크 소음	• 전차선 개선(균일한 Compliance) • 팬터그래프의 동특성 개선
	집전 마찰음	• 팬터그래프 집전 재료 개선
구조물 소음	강철 빔	• 거더(girder) 하부에 차음판 설치
	콘크리트 구조물	• 구조 형태 개선
추진 장치 및 보조 기기 소음	• 견인전동기, 냉각 팬, 전장품(電裝品) 등의 소음 제어 설계 • 압축기, 공조 기기 등의 소음 제어 설계	
터널 미기압파	• 입구와 출구의 완충 부위 설계 • 경사 터널 설계 • 터널 내부 흡음 처리	

7.2 진동

철도차량은 차체, 대차, 윤축의 3부분으로 구성되어 있다. 차체는 대차의 프레임과 축 스프링에 의해 차축 위에 현가되어 있어, 다양한 원인에 따라 철도차량은 진동이 발생할 수 있다. 철도차량 진동의 주요 원인으로는 레일 면 위를 운행할 때 발생하는 선로에 의한 진동과 충격, 차체 탄성과 차륜담면의 테이퍼(taper)나 운행 중 발생하는 공기의 흐름에 의한 진동, 그리고 주행 중 차량 중심선과 선로 중심선의 불일치 등으로 발생하는 차량 특성에 의한 진동이 있다.

이러한 철도차량의 진동은 그 정도가 심할 때 열차 탈선이 발생할 수 있기에, 고속철도에서는 대차 불안정 센서를 대차에 부착하여 대차 프레임의 횡진동이 검지될 때 고속철도 운전자에게 알람을 전달해 속도를 줄이도록 경고하기도 한다. 즉, 철도차량의 진동은 궤도에서 받는 외란(外亂)으로 인한 진동이나 충격이 주요 원인이지만, 사행동과 같은 차량의 기본 특성에서 발생하는 진동이나 충격의 영향도 크게 작용한다. 차체 운동은 x, y, z 3축 방향의 병렬 운동과 θ_x , θ_y , θ_z 3축 방향의 회전운동으로 분류하여 해석한다.



[그림 7-1] 진동

[표 7-1] 차체운동

방향	기호	설명
전 · 후	x	차량 운행 방향
좌 · 우	y	차량 운행 방향에 수직이고 궤도 평면에 평행한 방향
수직	z	궤도 평면에 수직인 방향
롤링	θ_x	전 · 후 방향 축에 회전
피칭	θ_y	좌 · 우 방향 축에 회전
요잉	θ_z	수직 방향 축에 회전

7.2.1 철도차량 진동의 종류

그림 7-2 에서 철도차량은 x축 방향으로 진행하고 있다.

철도차량의 상·하계 진동에는 상·하 진동, 피칭과 롤링이 있으며, 좌·우계 진동에는 좌·우 진동과 요잉이 포함된다.

7.2.1.1 병렬 운동에 따른 진동

- (1) x축 방향의 전·후 진동
- (2) y축 방향의 좌·우 진동
- (3) z축 방향의 상·하 진동

7.2.1.2 회전운동에 따른 진동

- (1) x축을 중심으로 회전운동을 하는 롤링(rolling)
- (2) y축을 중심으로 회전운동을 하는 피칭(pitching)
- (3) z축을 중심으로 회전운동을 하는 요잉(yawing)

7.2.1.3 선로에 의한 충격과 진동

- (1) 레일 면의 불연속성 원인 : 레일 이음매, 분기기, 레일의 파상 마모 등
- (2) 궤도 틀림 : 고·저 틀림, 좌·우 틀림, 면 틀림, 궤간 틀림 등
- (3) 궤도 곡률 변화 : 캔트의 과대, 캔트의 부족, 완화곡선, 분기부 곡선 등

7.2.1.4 차량의 특성에 의한 진동

- (1) 차륜 또는 대차의 사행동으로 인한 자려진동
- (2) 차량에 설치된 기기에 의한 진동
- (3) 차량의 연결, 기동 및 제동 시 충격으로 인한 진동
- (4) 차체의 상·하 휨이나 비틀림 현상에 의한 진동

7.2.2 철도차량 진동 경감 방안

7.2.2.1 전·후 진동

대차의 피칭은 전·후 진동으로 전이되며, 전·후 진동이나 충격의 대부분은 연결기나 가·감속도의 변동에 의하여 발생하고 있다.

7.2.2.2 좌·우 진동

레일의 줄 틀림이 주요 원인이지만, 차량 자체의 사행동도 큰 원인으로 작용하고 있다. 그러므로 레일의 줄 틀림이나 레일의 고·저 틀림을 일정한 한도 내로 보수를 해야 한다.

7.2.2.3 상·하 진동

레일 면의 불연속이나 고·저 틀림이 차량의 상·하 진동이나 충격의 주요 원인이 되고 있다. 레일의 정비 기준 한도를 높일 필요성은 있으나, 일단 한도 내에서 발생하는 진동이나 충격을 흡수하기 위하여 윤축에 장착된 1차 스프링계와 대차에 장착한 2차 스프링계를 활용하고 있다. 여기에 사용되는 스프링에는 코일스프링, 판스프링, 또는 공기스프링이 있다. 방진고무나 오일댐퍼를 병용하는 경우가 대부분이다. 그 외 차체의 경량화에 따라 굽힘 강성이 저하하여 상·하 진동이 발생하는 경우도 있다.

7.2.2.4 롤링

레일면으로부터 높은 곳에서 발생하는 롤링은 승차감을 좋지 않게 하기 때문에 대차에 안티롤 장치, 또는 오일댐퍼를 침목방향으로 설치하여 사용한다.

7.2.2.5 피칭

주로 힘의 작용 위치와 전달 위치의 높이 차이가 대차의 피칭이나 차체의 피칭을 발생시키는 경우가 많기 때문에 힘의 전달 위치를 레일에 근접하게 할 수 있다면 그것이 가장 좋은 방법이기도 하다. 또한 차륜이나 제동 디스크의 언밸런스 회전이 원인이 되기 때문에 회전운동 밸런스를 조정하고 있다.

7.2.2.6 요잉

차 간의 댐퍼는 요잉 방지가 주목적이지만 현저한 효과는 없고, 최근에는 차간에 오일댐퍼를 레일 방향에 장착한 차간 오일댐퍼 장치를 사용한다.

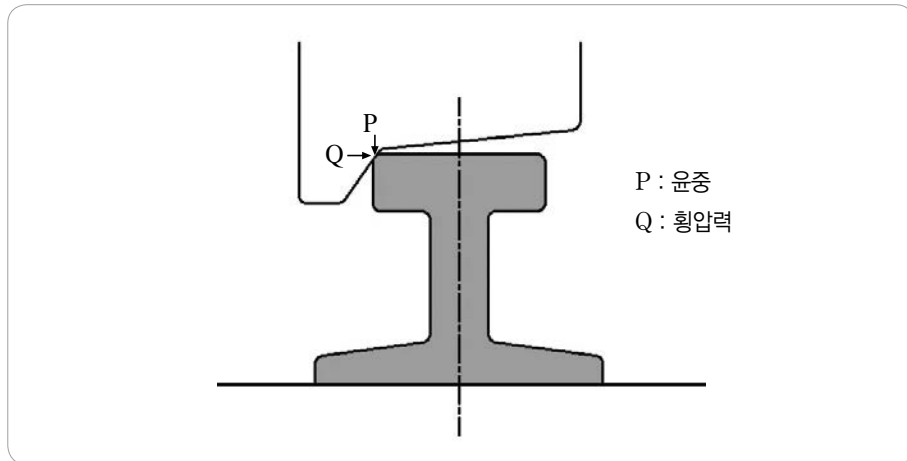
7.2.3 차량과 궤도 사이의 작용력

궤도에 작용하는 힘은 차륜에서 직접 레일에 전달하는 외력뿐만 아니라, 기온의 변화에 따라 레일 자체에서 발생하는 온도 응력도 포함된다. 레일에 수직 방향으로 작용하는 수직력, 레일 방향에 직각으로 작용하는 횡압력, 그리고 레일에 평행한 축 방향력, 이렇게 3종류로 나눌 수 있다.

7.2.3.1 수직력

차륜 통과 시 레일에 작용하는 수직력을 윤중(Normal Force)이라고 한다. 정지 시 윤중은 차륜의 중량과 축 배치에 따라 정해지며, 차량에 따라 다르고, 공칭 윤중보다 20% 가까운 차이가 있는 경우도 있다. 한 윤의 중량은 축 중량의 1/2이다. 열차 주행 시에는 각종 원인에 의하여 부가적인 윤중의 증감이 다른데, 이러한 윤중의 증감 원인은 다음과 같다.

(1) 곡선 선로 통과 시 전향 횡압력¹³⁾에 따른 윤중 증감



[그림 7-2] 윤중의 증감

(2) 곡선 선로 통과 시 불평형 원심력에 따른 윤중 증감

곡선 통과 속도가 설정 캔트 속도와 다른 경우, 원심력의 과부족에 의해 차량에 회전 모멘트가 작

13) 전향 횡압력 : 횡압력에 대한 반작용으로 작용하는 횡압력이 윤중 중심에 발생하여, 윤중의 증감으로 작용하는 압력

용하여 좌·우 차륜에 윤중의 증감을 발생시킨다. 이 경우에 정지 시의 중량보다 약 50~60% 정도 증가하는 경우도 있다.

(3) 차량 동요 관성력의 수직 성분

차량의 동요 및 사행동에 따른 관성력의 수직 성분은 경우에 따라서 정지 차량의 약 20% 정도에 이른다.

(4) 레일 면 또는 차륜담면이 일정하지 아니함으로 인하여 충격력이 발생한다.

7.2.3.2 횡압력

차륜으로부터 레일에 작용하는 횡 방향의 힘을 횡압력(Lateral Force)이라 부른다. 횡압력은 차륜담면이 원추형으로 되어 있어 정지 시에도 작용하나 실질적으로는 무시할 정도이며, 아래와 같은 차량의 주행 조건에 따라 발생한다.

(1) 곡선 전향의 횡압력

2축 이상의 고정축을 가진 차량이 곡선을 통과할 때 레일과 차륜 간의 활동으로 횡압력이 발생한다.

(2) 곡선 통과 시 불평형 원심력의 좌·우 방향 성분

차량의 곡선 통과 속도가 캔트 설정 속도 이하인 경우, 원심력의 과부족으로 인해 곡선 안쪽으로 횡압력이 작용하며, 차량이 캔트 설정 속도 이상으로 주행할 때는 곡선 바깥쪽으로 횡압력이 작용한다.

(3) 차량 동요에 따른 횡압력

차체의 동요 및 차량의 사행동(Hunting)에 따른 관성력에 의해, 좌·우 방향으로 성분에 따라 횡압력이 발생한다.

(4) 분기기(Turn out) 및 신축 이음매 등 궤도의 특수 개소에 있어서 작용하는 충격력

분기기의 입사각(入射角) 부분, 크로싱부(crossing part) 신축 이음매의 연결 부분 등 주로 차량 스프링 아랫부분의 관성력에 의해 충격 횡압력이 작용한다. 이런 것들의 합계는 통상 윤중의 50% 이하이지만 최대 80%에도 달한다.

7.2.3.3 축 방향력

레일의 길이 방향으로 작용하는 힘을 축 방향력(Pararell Force, Axial Force)이라 부르며, 다음과 같은 것들이 있다.

(1) 레일의 온도 변화에 의한 축력

레일의 온도 변화에 따라 레일의 자유로운 신축이 구속되었을 때 생기는 것을 레일 축력이라고 하며, 축력 중에서 가장 크다.

(2) 제동 및 시동 시 하중

차량 제동 및 시동 시, 가·감 속력의 반력이 차륜을 통해서 작용한다.

(3) 기울기가 있는 선로에서 차량의 무게에 의한 축력

기울기 구간에서 차량의 무게가 점착력을 통해 전·후로 작용한다.

7.2.4 탈선

철도차량의 차륜이 레일 위의 정상적인 위치에서 궤간 내외로 떨어지는 것을 탈선(脫線)이라고 한다. 궤도와 차륜 간의 접촉 현상은 단순하지 않고 복잡한 역학적 운동이 지배하는 관계로, 차량 부품 및 구조의 차이나 사용에 수반되는 상태의 변화, 궤도의 틀림, 레일의 형상, 운전 조건 등이 복합적으로 작용하여 탈선 사고를 유발하므로, 주행 안정성 측면에서 탈선은 매우 중요한 요소이다.

탈선이 시작될 때의 조건을 보면, 차륜의 전진 방향과 레일 방향과의 각도 차이인 공격각(angle of attack)의 크기에 따라 변한다. 즉, 진행 방향에 대하여 좌측의 차륜을 기준으로 하면, 차륜이 레일에 부딪치는 방향일 때 + 부호, 레일에서 떨어질 때 - 부호를 기준으로 한다. 탈선은 주행 탈선과 뛰어오르기 탈선, 좌굴 탈선으로 분류한다. 그리고, 주행 탈선은 타 오르기 탈선과 미끄러져 오르기 탈선으로 분류한다.

7.2.4.1 주행 탈선

주행 탈선은 타 오르기 탈선과 미끄러져 오르기 탈선으로 분류한다.

(1) 타 오르기 탈선

공격각이 +인 경우, 차륜 플랜지(flange)가 레일 두부 정면의 견부(肩部)를 굴러 올라 탈선이 되며, 실제 발생하는 대부분의 탈선은 타 오르기 탈선이다.

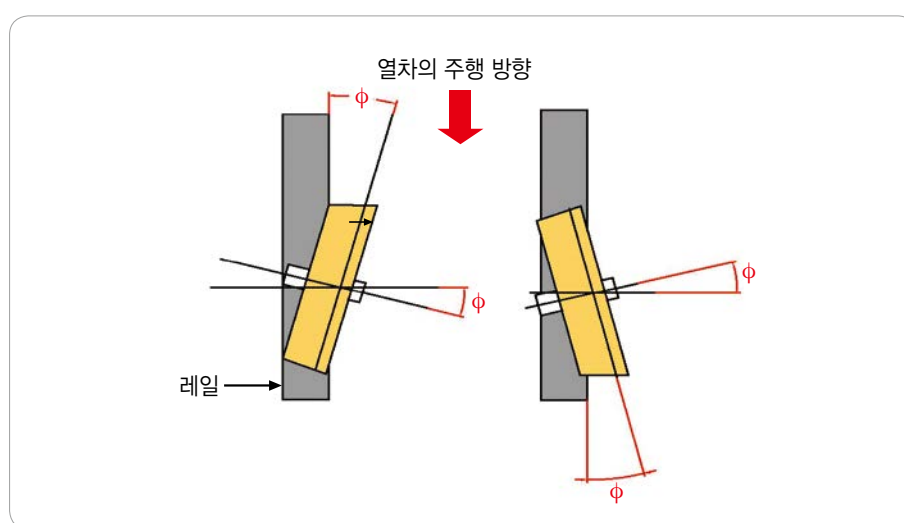
차륜 플랜지가 회전하면서 레일에 접촉되어 타 오르는 탈선이 되며, 주로 곡선 선로 구간에서 많이 발생하고 저속에서도 일어난다. 공격각이 +(인) 상태로 발생하는 탈선이다.

(2) 미끄러져 오르기 탈선

차륜 플랜지가 회전하면서 레일에 접촉되어 미끄러져 올라가서 탈선이 되며, 곡선 선로 구간과 저속에서도 일어나고, 공격각이 -일 때 발생한다. 일반적으로 타 오르기 탈선에 비하여 발생하기 힘들다.

7.2.4.2 뛰어오르기 탈선

윤축이 레일에 대한 횡 방향의 운동 속도가 커지면 차륜이 레일에 충돌하여 뛰어 올라 레일을 넘어서 탈선하는 경우가 있는데, 이를 뛰어오르기 탈선이라고 한다. 주로 고속에서 발생한다. 횡압력과 윤증이 단시간에 충격적으로 작용할 때 발생한다. 또한 차륜이 곡선 선로나 분기기를 통과할 때 직선 부분에서 좌우 진동과 사행동 진동이 심하면 차륜은 레일에 대하여 어떤 각을 취하게 된다. 이 경우, 차륜이 좌우 방향으로 속도가 커지면 차륜의 플랜지가 레일의 견부(肩部)와 충돌하고, 그 충돌한 힘으로 차륜은 레일 위를 뛰어올라서 탈선이 된다.



[그림 7-3] 탈선

7.2.4.3 좌굴 탈선

열차의 좌굴 탈선은 궤도의 기울기가 심한 내리막 선로에서 제동 작용 시 주로 발생하는 탈선이다. 열차의 전후 방향에 압축 하중이 작용할 때, 편성된 차량이 좌·우로 압축되거나 상·하로 올라타서 탈선하는 것이다. 우리나라 철도차량의 압축 하중 규정 값은 120톤을 초과할 수 없다. 특히 오르막 선로 운전 시에는 뒤에서 보조 기관차 또는 구원열차를 운전할 때 주의를 해야 한다.

7.2.4.4 분야별 탈선 유발 원인

(1) 운전 분야

- 1) 곡선 선로 및 분기점에서 과속
- 2) 내리막 선로 운전 시 비상제동 체결

(2) 차량 분야

- 1) 전·후와 좌·우 중심의 편기¹⁴⁾
- 2) 전·후와 좌·우 차륜 지름의 차이가 심한 경우
- 3) 센터 플레이트의 윤활 부족
- 4) 차륜 플랜지의 수직 마모

(3) 궤도 분야

- 1) 궤도 틀림의 과대(궤간, 면, 수평 등)
- 2) 종곡선 반지름의 부적합
- 3) 완화곡선의 과소
- 4) 레일의 침하량 과대

7.2.4.5 윤중 감소 원인

- (1) 곡선 선로에서 캔트의 과대 및 과소
- (2) 원심력 및 풍압
- (3) 상·하 진동 발생 시
- (4) 좌·우 진동 및 주로 롤링(rolling)이 큰 경우
- (5) 전·후와 좌·우 차륜의 지름 차이가 큰 경우

14) 편기 : 길이가 긴 차량이 반지름이 적은 곡선 선로를 통과할 때, 궤도 중심과 차량 중심선이 일치되지 않아, 차체의 중앙부가 곡선 선로 안쪽으로, 차량의 양쪽 끝은 곡선 선로 바깥쪽으로 벗어나는 현상

7.2.4.6 횡압력 증대의 원인

- (1) 좌·우 진동, 특히 사행동 발생
- (2) 고정축 간의 거리가 큰 경우
- (3) 곡선 반지름이 작을 때
- (4) 차륜담면 기울기가 클 때

7.2.5 탈선계수(D_e)

정상적인 선로조건에서 철도차량은 언제나 안정된 주행이 가능해야 한다. 열차의 탈선기준이 되는 탈선계수는 곡선선로의 반지름이 250m 이상인 구간에서는 0.8까지 허용한다. 여기서 횡압력을 Q , 윤증을 P 라고 하면, 탈선계수식은 다음과 같이 정의한다.

$$D_e = \frac{Q}{P}, \dots\dots 7-1\text{식}$$

- 1) 탈선이 발생하지 않는 조건의 탈선계수 범위 : $\frac{Q}{P} < 0.8$
- 2) 횡압이 작용하는 시간은 0.05초 이상

철도차량은 레일과 선로의 구조적 안전을 위협하는 횡압력 발생을 최소화하도록 설계되어야 한다. 이 경우에 축 중량을 P 라 하면 한 축 당 작용하는 횡압력 Q 는 다음의 기준을 초과하여서는 안 된다.

$$Q = \left(\frac{P}{3} + 10\right) \cdot \alpha, (\text{kN}), \dots\dots 7-2\text{식}$$

여기서 객차의 α 값은 1이다.

7.2.6 사행동

좌측 방향의 곡선 선로에서 윤축이 좌측으로 쏠리는 경우, 그림 7-4에서와 같이 좌측 차륜은 적색 담면이 레일과 접촉하고, 우측 차륜은 녹색 담면이 레일과 접촉하면서 진행하게 된다. 이렇게 되면 지름이 큰 좌측 차륜은 윤축을 우측으로 밀게 되어 우측 차륜은 적색 담면이, 좌측 차륜은 녹색 담면이 접촉하게 된다. 즉, 차륜담면 기울기로 인하여 이와 같은 현상이 반복되는데, 이것을 위에서 내

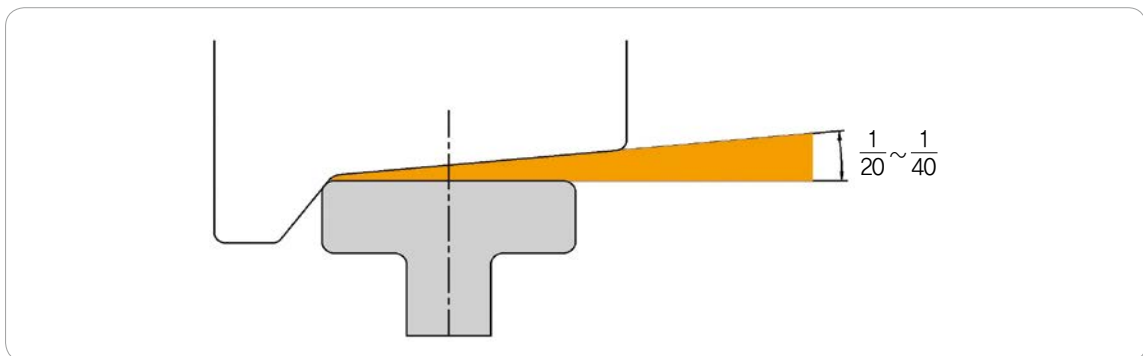


[그림 7-4] 사행동

려다보면 뱀이 이동하는 모습과 같다 하여 사행동이라 한다.

7.2.6.1 차륜답면 기울기

윤축은 좌·우 한 쌍의 차륜답면으로 구성되어 있는데, 차륜답면은 기울기를 가진 모양으로 제작되어 레일 위를 구르게 된다. 즉, 차륜답면 기울기를 기준으로 고속 열차에서는 기울기가 작은 것(1/40)을, 일반 열차 및 화물 열차에서는 기울기가 큰 것(1/20)을 주로 사용한다. 즉, 차륜답면 기울기가 크다는 것은 곡선 반지름이 작은 선로를 주행하는 데 용이하며, 차륜답면 기울기는 철도차량의 무게 중심을 레일 중심 쪽으로 이동시켜 주는 복원력의 역할을 하기도 한다.



[그림 7-5] 차륜답면 기울기

7.2.6.2 한 축 사행동

1조의 윤축이 좌·우 진동하는 것과 무게 중심 주위에 좌·우의 차륜이 교대로 전·후 진동하는 것을 한 축 사행동이라 한다. 전기동차의 한 축 사행동 파장 크기는 다음과 같이 정의한다.

- (1) 레일 간격 크기에 비례한다.
- (2) 차륜 지름 크기에 비례한다.
- (3) 차륜담면 기울기 크기에 비례한다.
- (4) 14m의 파장을 갖는다.

7.2.6.3 대차 사행동

두 축을 고정한 대차의 경우에도 일정한 속도 이상에서 불안정해지는데, 안정 한계 속도는 대차 사행동 파장과, 대차와 차체 간 대차와 차체 사이의 2차 현가장치 스프링 정수와, 대차의 질량 및 선회관성모멘트와, 고유 진동수로 결정되는 것을 차 사행동이라 한다.

- (1) 윤축의 1축 파장 크기에 비례한다.
- (2) 고정축 간의 거리 크기에 비례한다.
- (3) 레일 간격 크기에 반비례한다.
- (4) 30m의 파장을 갖는다.

7.2.6.4 사행동 발생의 최소화 조건

철도차량에서 사행동이 발생해 승차감을 저하시켜 불안정 영역에 들어가면 탈선의 위험성이 생기기 때문에, 한 축 사행동이나 대차 사행동의 안전 한계 속도는 운전 최고 속도보다 높도록 설계되고 있다.

그래서 사행동의 최소화를 목적으로 사행동 파장을 크게 하기 위한 기본 조건은 다음과 같다.

- (1) 차륜의 지름을 크게 한다.
- (2) 고정축 간의 거리를 크게 한다.
- (3) 차륜담면 기울기를 작게 한다.
- (4) 축상의 전·후와 좌·우의 지지 강성을 크게 한다.
- (5) 대차의 선회 저항을 크게 한다.

7.2.7 곡선 선로 부드럽게 운행하기 위한 조건

차량이 곡선 선로를 부드럽게 선회하기 위해서는 외측 차륜이 내측 차륜보다 레일 길이만큼 충분히 진행하여 윤축의 선회각(angle of traverse)이 0이 되도록 함으로 차륜이 곡선 선로의 접선 방향으로 향하는 것이 좋기 때문에, 다음과 같은 조건들이 필요하다.

- (1) 차륜담면을 크게 하여 차륜 반지름과 레일의 길이 비가 같도록 제작한다.
- (2) 윤축과 대차가 곡선을 선회하기 쉽도록 윤축과 대차의 결합을 약하게 한다.
- (3) 윤축과 대차가 곡선을 선회하기 쉽도록 차체와 대차의 결합을 약하게 한다.

☑ 핵심정리



1. 철도차량의 주요 소음 발생원 및 발생 위치

2. 차체 운동

방향	기호	설명
전 · 후 방향	x	차량 운행 방향
좌 · 우 방향	y	차량 운행 방향에 수직이고 궤도 평면에 평행한 방향
수직 방향	z	궤도 평면에 수직인 방향
롤링 방향	θ_x	전 · 후 방향 축에 회전
피칭 방향	θ_y	좌 · 우 방향 축에 회전
요잉 방향	θ_z	수직 방향 축에 회전

3. 탈선의 정의 및 분류

4. 차륜담면 기울기

5. 곡선 선로 부드럽게 운행하기 위한 조건

- 1) 차륜담면을 크게 하여 차륜 반지름과 레일의 길이 비가 같도록 제작한다.
- 2) 윤축과 대차가 곡선을 선회하기 쉽도록 윤축과 대차의 결합을 약하게 한다.
- 3) 윤축과 대차가 곡선을 선회하기 쉽도록 차체와 대차의 결합을 약하게 한다.

8장

운전 계획



8.1 운전 계획

8.2 열차 운행 도표

8.3 선로 용량의 산정



8장

운전 계획

학습목표

- ✓ 운전 계획을 이해하고 설명할 수 있다.
- ✓ 열차 운행 도표에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 선로 용량에 대하여 이해하고 선로 용량을 구할 수 있다.

[핵심 용어]

• 운전 계획, 수송량, 열차 운행 도표, 편성 칸 수, 선로 용량, 최소 안전 간격 시간 등

8.1 운전 계획

운전 계획에는 열차 계획, 차량 계획, 설비 계획, 요원 계획 등이 있다. 즉, 차종, 설비, 요원 등을 검토하고 계획하고 실행하는 것이 넓은 범위의 운전 계획이다. 운전 계획 수립은 철도 관련 운송 사업 분야에서는 가장 중요한 업무의 일부분으로, 철도 이용 고객에게 만족을 주어 많이 이용할 수 있도록 수립되어야 한다.

철도 수송은 그 객체에 따라 여객 수송과 화물 수송으로 나누어지며, 일반적인 교통기관의 여객 수송량을 측정하는 기준은 인구권, 역세권으로 결정되고, 화물 수송량을 측정하는 기준은 산업의 형태, 화물 발생 인자 등을 기준으로 결정된다. 열차 계획은 수송량에 대응하는 열차 횟수를 추정하여 수립한다.

수송량의 단위는 여객 수송일 경우에 승차 인원으로, 화물 수송일 경우에 수송 톤수, 발송 톤수로 표시하는 것이 상식이다. 여기에 더 정확하게 표시하려면 여객 수송에는 승차 km, 화물 수송에는 수송 km를 곱한 숫자인 연인원 km(승차 인원×승차 km) 및 연톤(年ton) km(수송 톤수×수송 km)를 사용한다. 즉, 10km 안에 2인이 승차한 것은 20km 안에 1인이 승차한 것과 같은 수송 부담을 의미한다.

수송력을 표시하는 단위로는 일반적으로 열차 또는 차량의 주행거리를 표시하는 열차 km, 또는 차량 km를 쓴다. 열차 계획은 소요 수송량에 대응한 열차 횟수의 산정이므로 요원·차량·운용·동력비 등을 감안하여 합리적으로 검토되어야 한다.

8.1.1 수송량과 열차 횟수

수송량과 열차 횟수의 관계에 대하여 결정적인 관계식은 없다. 즉 이용자 측이 요구하는 열차 횟수에 대해서 철도 경영상 각종 제약을 받는 경우가 있기도 하는 등 상호 상반되는 조건일 수도 있기 때문이다.

8.1.2 수송량(수송 인원 또는 톤수)과 열차 횟수의 관계

- (1) 수송량이 일정하면 한 열차의 승차 인원에 의해 열차 횟수는 정해진다.
 - 1) 한 열차 당 승차 인원 = 편성 칸 수 × 한 차당 승차 인원 × 승차 효율
 - 2) 열차 횟수 = 수송량 ÷ 한 열차당 승차 인원
- (2) 편성 칸 수와 승차 효율이 일정하면 수송량의 증가와 열차 횟수의 증가는 비례한다.
 - 1) (수송량 + 수송량 증가분) ∝ (열차 횟수 + 열차 횟수 증가분)
- (3) 여객열차의 어느 선구에 있어서 최저 열차 횟수는 그 선구의 교통 필요성으로, 최저 2회(1왕복)이다. 화물 열차의 최저 횟수는 0이다.
- (4) 편성 칸 수와 승차 효율을 결정하기는 매우 어렵다.

이상과 같은 관계로 인해 어느 선구에 여객 및 화물별 수송량에 적합한 열차 횟수를 결정하는 경우에는, 각각의 선구에 대한 수송 실적과 수송 설비, 선로 용량, 타 수송 기관과의 관계 등을 고려하여 이용자 측의 요망과 철도 경영상의 경제성 등의 균형에 의해 결정할 필요가 있다.

수송량에서 열차 횟수 산정 방법을 보면, 여객열차일 경우에는 먼저 여객열차 승차 효율을 구하여 한 차 평균 수송 인원을 산출한다.

$$\text{평균 승차 효율} = \frac{\text{평균 승차 인원}}{\text{객실 정원}}, \dots\dots 8-1\text{식}$$

다음에 여객 추정 수송량(연인원 km)을 1일 평균치로 하여, 그것을 한 차 평균 수송 인원으로 나누면 1일당 차량 km를 얻게 된다.

$$\text{1일 당 차량 km} = \frac{\text{여객 수송량(연인원km)}}{365} \div \text{한 차 평균 수송인원}, \dots\dots 8-2\text{식}$$

다음에 한 열차 평균의 편성 칸 수를 가정하여 먼저 구한 차량 km를 편성 량 수로 나누면 열차 km를 얻게 된다.

$$\text{차량 km} \div \text{편성 칸수} = \text{열차 km}$$

또 차량 km를 객차 1칸당 평균 주행 km로 나누면 차량 수를 얻는다.

$$\text{차량 km} \div \text{1차당 평균 주행 km} = \text{차량 수}$$

화물열차의 경우도 같은 방법으로 추정 수송량(연톤 km)을 한 열차 평균 수송 톤수로 나누면 열차 km를 얻는다.

$$\text{열차 km} = \text{연톤 km} \div \text{한 열차 평균 수송 톤수}, \dots\dots 8-2 \text{ 식}$$

이상과 같이 얻어진 열차 km를 한 열차의 평균 주행 km로 나누면 열차 횟수를 구할 수 있다.

$$\text{열차 횟수} = \text{열차 km} \div \text{한 열차 평균 주행 km}, \dots\dots 8-3 \text{ 식}$$

8.1.1.4 열차 횟수와 편성 칸 수

어느 선로 구간의 열차 횟수를 산정할 때는 수송량에 적합해야 하고, 이와 더불어 편성 칸 수, 즉 수송 단위를 적합하게 정해야 한다.

편성 칸 수란 한 개 열차의 수송 단위로서 열차 횟수 및 승차 효율과 상대적 관계이므로, 일정한 수송량에 대하여 수송 단위를 감소하면 열차 횟수가 증가하고, 열차 횟수를 감소시키면 수송 단위를 증대시킬 필요가 있다.

편성 칸 수의 상한은 동력차의 견인정수, 선로의 유효장(有效長), 승강장의 길이, 차량 기지 설비 등의 제한을 받는다. 한편 여객 서비스 면에서는 편성 칸 수를 적게 하여 열차 횟수를 증가시키는 것이 바람직하고, 요원, 정비, 선로 용량을 유효하게 이용하는 면에서는 열차 횟수를 감소시키는 것이 바람직하다.

그러므로 일반적으로는 일정 시간에 집산하는 통근 열차와 장거리 열차는 적합한 시간대를 선정하여 대량 수송을 시행하고, 화물열차 이외의 기타 열차는 수송 단위를 적게 하여 운용함이 보통이다. 수요 차량 수를 N , 예비율을 a , 차량 연결 수를 n_1, n_2, n_3 , 차량 1회 왕복하는 시간을 T_1, T_2, T_3 , 열차 운전 간격을 D_1, D_2, D_3 라 할 때, 수요 차량 수는 다음과 같다. 또한 t_1 : 하행 열차의 표정(表定) 시간, t_2 : 상행 열차의 표정 시간, t_3 : 하행 종단역의 반복 시간, t_4 : 상행 종단역의 반복 시간 이고, n, T, D 의 밑 수 1, 2, 3은 각각 운전계통을 구분한 것이다.

$$N = n_1 \frac{T_1}{D_1} + n_2 \frac{T_2}{D_2} + n_3 \frac{T_3}{D_3} + \dots (1 + \alpha), \dots\dots 8-4\text{식}$$

여기서, $T = t_1 + t_2 + t_3 + t_4$

그러므로 소요 열차 수를 나타내는 식은 $\frac{T}{D}$ 가 된다. 또한 다음과 같이 나타내기도 한다.

$$\text{운행 편성 수} = \frac{\text{왕복운전 시간} + \text{도착지 반복 시간}}{\text{운전간격}}, \dots\dots 8-5\text{식}$$

1일의 운용 차량 수(정기 열차, 부정기 열차, 임시 열차를 포함)의 총 보유 차량에 대한 비율은 차량 검수 상태를 알 수 있는 가장 간단한 표준치므로, 이것을 운용률 또는 출고율이라 한다. 현재는 통상 70~90% 정도가 통례이다.

그리고 화물 수송의 경우, 계획 수송 톤수를 1칸 평균 적재 톤수로 나누면 소요 차량 수가 결정되고, 여기에 공차 수를 가산하면 전체 운용 회차 수가 된다.

8.2 열차 운행 도표



[그림 8-1] 열차 운행 도표 작성 순서

열차 운행 도표는 가로축에 시간을, 세로축에 거리를 표시한 거리-시간 곡선으로, 시간적 변화에 따른 열차 운행 선도를 도시한 것이다.

8.2.1 열차 운행 도표의 개요

열차 운행 도표는 열차 상호 간의 관계를 한눈에 알아볼 수 있도록 표시한 선도이므로, 열차 운전 계획과 운전 정리 취급상에 가장 편리한 것이다. 열차의 운전계통, 열차 종별, 운전 구간, 정차 역, 유효 시간대, 열차 배열, 견인정수, 편성 내용 등에 의해 결정되며, 기준 운전 시간을 계산하여 열차 운행 도표를 작성한다. 이때 선로와 역 설비 조건, 단선과 복선, 폐색 방식, 역의 착·발선 수와 유효장, 차량이나 승무원 배치, 지선 열차와의 접속 등 여러 가지 조건이 관계된다. 필요시 설비 개량, 차량의 신조, 직원의 확보가 선행되는 경우도 있다.

열차 출발역에서 도착역까지의 소요 시간은 각 역 간 기준 운전 시간의 합계와 정차 역에서의 정차 시간을 합계한 총계로서 최소 운전 시간으로 이루어진다. 정차 시간은 정차 이유, 목적에 따라 여객 승·하차의 소요 시간, 접속 대기 시간, 운전상 정차 시간(열차 교행, 선행 열차의 출발을 기다림, 신호기 취급 시간) 등 여러 가지를 조합하여 이루어진다.

이 같은 운전 시간은 특급 이상의 열차일 때, 단선 구간에서는 3~5%, 복선 구간에서는 2~4% 정도 여유 시간을 가지도록 함이 보통이다. 특히, 지연을 고려하여 주요 역이나 도착역 가까이에 여유 시간을 줌으로써 정식 운전을 할 수 있도록 배려한다. 이와 같이 각종 조건에 적합하도록 복선에서는 저속 열차가 고속 열차로부터 대피해야 하며, 단선에서는 교행 또는 대피의 관계를 고려하면서 열차 운행 도표를 작성한다.

8.2.2 열차 운행 도표의 분류

열차 운행 도표는 그 용도와 시각의 눈금에 따라 1시간 목 운행 도표, 10분 목 운행 도표, 2분 목 운행 도표, 1분 목 운행 도표로 분류된다.

8.2.2.1 눈금에 의한 분류

(1) 1시간 목(目) 운행 도표

가로축 시각의 눈금 간격을 1시간으로 취한 운행 도표로서 1시간을 통상 20mm로, 경우에 따라서는 30mm로 한다. 사용 목적에 따라 주로 장기적인 열차 계획, 시각 개정, 차량 운용 계획 등에 사

용된다. 이 운행 도표에는 각 역의 시각은 정확하게 기입하지 않으므로 열차의 운행 순서를 정확하게 기입하여야 한다.

(2) 10분 목 운행 도표

열차 운행 횟수가 많은 선로 구간에서 1시간 목 운행 도표를 대신하여 같은 목적에 사용한다.

(3) 2분 목 운행 도표

시각의 눈금 간격을 2분으로 한 운행 도표로서 열차 계획의 기본이 되며, 시각 개정 작업이나 임시 열차 계획 등 정확한 운행 시간을 기입할 필요가 있을 때 사용한다. 또한 통상 열차 계획 업무와 운전 정리에 사용되며, 열차 운행 밀도가 높은 경우에는 30초 단위를 기호화하여 기입하기도 한다.

(4) 1분 목 운행 도표

2분 목 운행 도표와 같은 용도로 사용되며, 특히 열차 밀도가 높은 수도권 운행 열차의 운행 도표로 이용되고, 시각은 15초, 30초, 45초의 단위를 기호화하여 기입한다.

이상의 4종류의 열차 운행 도표는 구성 모양에 의한 분류이다. 다음으로 열차 운행 도표의 특수한 설정 방법에 의한 분류를 보면, 수송량의 증대는 열차 횟수의 증대를 가져오고 열차 횟수는 선로 용량의 제한을 받게 된다.

선로 용량, 즉 열차 횟수의 한도를 최고도로 활용하고, 수많은 열차를 설정함에는 특수한 열차 운행 도표를 채용한 경우가 있다. 즉, 넷(net) 운행 도표, 평행 운행 도표, 규격 운행 도표가 그 예이다.

8.2.2.2 특수 운행 도표의 분류

(1) 넷(net) 운행 도표

완전한 네트워크 눈금으로 운행 도표를 구성하여 열차를 설정한 것이다.

(2) 평행 운행 도표

복선 구간의 선로 용량을 최대한 활용할 수 있는 수단의 운행 도표이다. 일반적으로 여객열차는 고속이기 때문에 화물열차를 대피시킬 필요가 생기면, 대피에 의한 선로 용량 감소, 운행 도표 설정상의 곤란을 제거하기 위하여 복선 구간에 있어서 여객열차와 화물열차의 속도를 동일하게 하여 열차 운행 도표상 열차선을 평행하게 구성하는 방법이다.

(3) 규격 운행 도표

선로 용량이 한계에 도달한 선구에 속도가 상이한 다수의 열차를 운전하려 할 때, 선로 용량을 효율적으로 사용할 수 있도록 일정한 표준 규격을 정해 놓고 이 규격을 기준으로 하여 열차를 설정한 것이다.

8.2.2.3 열차 운행 도표 작성 시 고려 사항

열차 운행 도표를 작성하려면 특히, 다음의 여러 가지 사항을 고려해야 한다.

(1) 열차 상호 간에 지장이 없고 선로 용량 범위 내에 있을 것

열차 상호 간에 지장이 없어야 한다는 것은 1폐색 구간에 2 이상의 열차 시각을 설정해서는 안 된다는 것이다. 자동폐색 방식 시행 구간에 열차를 설정하는 경우, 열차 상호 간격은 신호 현시 방식에 따라 3현시는 2폐색 구간 이상, 4현시는 3폐색 구간 이상, 5현시는 4폐색 구간을 확보하는 것을 원칙으로 하고 있다.

(2) 수송 요청(수요)에 적합할 것

수송 요청(수요)에는 시간적, 시기적(계절적)인 파동이 있으며, 운행 도표를 작성함에 있어서 이 점을 충분히 고려해야 한다. 통근 수송을 러시아워(rush hour) 또는 구간별 수송차, 요인별 수송의 상위 등에 만족시킬 필요가 있다.

수송력과 수송량의 관계는 항상 동일한 비율이어야 하며, 즉 1:1의 관계가 이상적이다. 또, 원거리 열차의 설정은 그 열차의 사명을 고려하여 수송 요청에 적합한 유효 시간대를 계획할 필요가 있고, 이는 운행 도표 작성의 첫째 요소이다.

(3) 한 열차 지연에는 탄력성이 있을 것

운행 도표에는 시간적 여유가 있어야 한다. 이 여유를 운행 도표의 탄력성이라 하며, 이것은 운행 도표 작성의 둘째 요소이다. 최소 간격 한도의 값으로 운행 도표를 설정하게 되면 운행 도표의 혼란이 발생한다. 그러므로 될 수 있는 한, 여유를 가진 탄력성이 있는 운행 도표를 계획해야 한다. 예를 들면, 운행 도표상에 그려진 큰 불안 요소는 정차 시간이다. 정해진 바 정차 시간 30초인 역에 50초를 정차하였다고 하면, 계획과 대비해 20초가 초과된다. 즉 운행 도표의 탄력성이 없는 경우에는 이것만큼 다음 열차의 지연을 초래한다.

(4) 열차 운행 도표 표기 사항

- 1) 열차선
- 2) 열차번호
- 3) 정거장명 및 정거장의 종류
- 4) 하행 열차에 대한 표준 오르막 기울기 또는 내리막 기울기
- 5) 정거장 간의 거리
- 6) 각 정거장의 기점부터의 거리
- 7) 폐색 방식의 종류
- 8) 정거장 구내 본선의 유효장
- 9) 대피 또는 교행 가능 여부

8.2.2.4 열차 운행 도표 설정

(1) 운전 시간

운전 시간(표준 운전 시간 + 탄력 시간) 및 도달 시간(운전 시간 + 정차 시간 = 표정 시간)에 탄력 시간을 설정하는 이유는 열차가 서행하거나 여객 및 화물 취급 등에 다소 지연이 생기는 경우, 정상 회복을 위한 운전 시간의 여유를 주기 위함이다. 특급열차는 복선 구간 2%, 단선 구간 3%를 표준으로 하고 있다. 그러나 열차의 설정 거리, 도중 운행 도표 구성상 6% 이상의 탄력 시간을 가지는 경우도 있다.

정차 시간은 여객 및 화물 취급, 입환(shunting), 기관차 교체, 분할, 합병, 승무원 교대 등에 따라 표준 정차 시간이 정해지지만, 교행, 대피 등 운행 도표 구성 관계로 표준 정차 시간을 상회하여 정차 시간이 설정되는 경우도 있다. 그러나 이 탄력 시간은 열차 설정 구간에, 특히 지연이 예상되는 구간, 또는 큰 역 및 종착역 가까운 구간에 두어서 열차 지연에 대처하는 것이 원칙으로 되어 있다.

- 1) 운전 시간 = 표준 운전 시간 + 탄력 시간
- 2) 도달 시간 = 운전 시간 + 정차 시간 = 표정 시간

(2) 착발 시간

운전 시간, 정차 시간이 결정되면 유효 시간대를 감안하여 열차의 시발 시각에서 운행 도표를 구성해 나간다. 그러면 도중 역의 착발 시간이나 종착역의 도착 시간이 정해진다. 이 경우에 특급열차 이상의 타 열차에 우선하여 설정하게 된다.

(3) 열차의 접속

여객이 환승 없이 목적지까지 여행할 수 있는 것은 여객 서비스의 제1의 조건 의무로, 이를 위하여 1개 열차를 도중에서 분할, 또는 합병하게 되는 경우가 있다.

열차의 분할, 합병은 선구 상호 간 수송량의 차이, 설비 조건의 제약, 행선지별 열차 운행 빈도 등의 조건을 고려해야 한다.

이상의 분할, 합병은 도중 역의 접속 방법 중 하나이지만, 간선과 지선 상호 간에 설정된 여객열차의 연락 접속을 충분히 고려해야 한다.

8.3 선로 용량의 산정

8.3.1 철도 수송 능력과 선로 용량

철도 수송 능력(railway transit capacity)은 이용 고객 서비스 차원에서 매우 중요한 요소이다. 동일 선로에서 동일 방향으로 시간당 수송할 수 있는 편도 최대 승객 수로 정의된다. 또한 철도 수송 능력은 선로 용량과 열차 용량으로 구성되며, 다시 열차 용량은 열차당 객차 수와 객차당 승객 수로 결정되고, 선로 용량은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{선로 용량} = \frac{\text{용량계산 시간}}{\text{운행간격}}, \dots\dots 8-6\text{식}$$

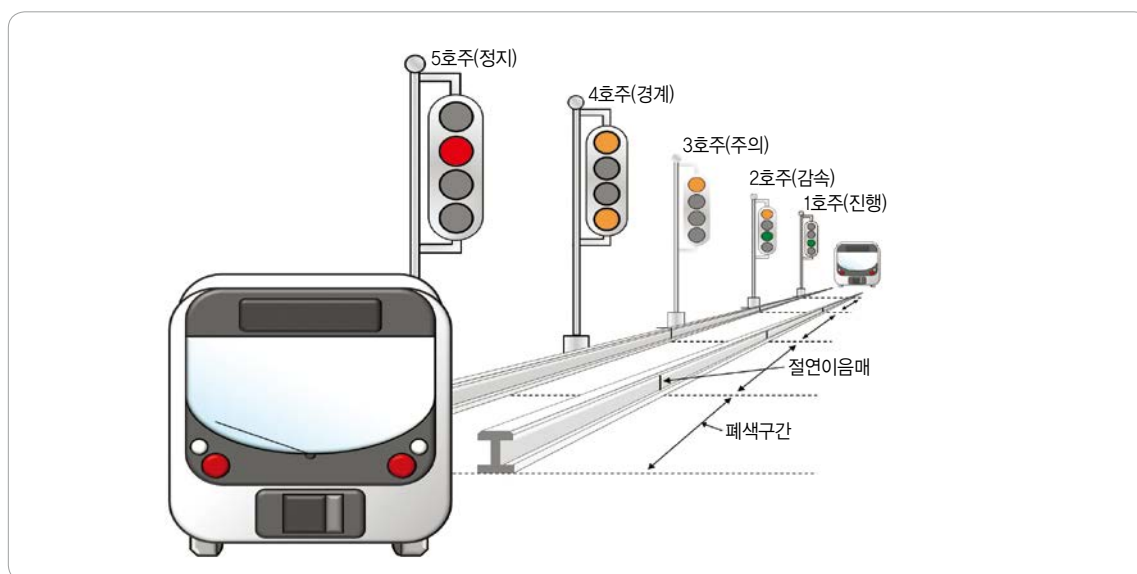
$$\text{용량계산 시간} = \text{선로 용량} \times (\text{안전간격시간} + \text{정차시간} + \text{운영여유시간}), \dots\dots 8-7\text{식}$$

8.3.2 최소 운행 간격

최소 운행 간격은 안전을 확보할 수 있는 열차와 열차의 운행간격으로 어느 지점을 열차가 통과한 후에 다음 열차가 안전거리를 확보하여 통과하기 까지의 최소 시간을 최소 운행 간격이라 한다. 즉, 선행 열차(T_1)와 바로 다음 열차(T_2) 간의 운행 시간 간격을 나타낸 것으로 선로 전체 구간에 걸쳐 적용하고, 그중 시간 간격을 최소 운행 간격이라 한다.

많은 승객을 신속하고 안전하게 수송하기 위해서는 선로 용량은 증대시켜야 하며, 정해진 선로상에서 용량을 늘릴 때는 최소 운행 간격이 매우 큰 변수로 작용한다. 즉, 선로 용량의 최대화는 최소

운행 간격 및 정차 시간의 최소화를 의미하는 것이며, 최소 운행 간격은 어떠한 경우라도 열차의 최소 제동 거리보다 작아질 수는 없을 것이다. 특히 통근 열차의 경우, 열차 운행이 상당히 규칙적이며 정차 시간(dwell time)이 중요한 요인으로 작용하게 된다. 이때 정차 시간은 크게 승객의 승·하차 시간, 승·하차 전후 출입문 조작 시간, 출발 대기 시간으로 구성된다.



[그림 8-2] 최소 운행 간격

8.3.3 용량의 분류

8.3.3.1 한계 용량

임의의 선로 구간의 운전 가능한 최대 열차 횟수, 즉 물리적인 한계 용량을 의미하는 것으로, 현실적인 선로 용량을 계산하는 과정에 필요하다.

8.3.3.2 실용 용량

열차의 유효 시간대, 시설 보수 시간, 운전 취급 등을 고려하여 구한 용량으로, 일반적으로 선로 용량이란 이 실용 용량을 의미한다.

8.3.3.3 경제 용량

열차 운전을 원활히 하여 최저의 수송 원가를 갖는 1일 최대 열차 횟수를 말한다.

8.3.3.4 선로 용량을 고려한 열차 설정의 원칙

- (1) 폐색구간에는 동시에 2개 이상의 열차에 대한 운전 시각을 설정할 수 없다. 다만, 운행 일을 달리하는 열차일 때는 예외로 할 수 있다.
- (2) 자동폐색 방식 시행 구간에 열차를 설정하는 경우, 열차 상호 간의 간격은 신호 현시 방식에 따라 3현시 구간은 2 이상의 폐색구간, 4현시 및 5현시 구간은 4 이상의 폐색구간 여유를 두고 열차를 설정하여야 한다. 다만, 자동폐색 방식 시행 구간으로서 대피 또는 서행 등의 경우에는 이에 따르지 않을 수 있다.
- (3) 운전 간격은 선행 열차와 후속 열차의 최소 운전 시간 간격으로, 시간당 최대 열차 운행 횟수를 결정할 수 있다.
- (4) 교행 또는 대피의 경우에는 열차 상호 간에 원활히 운행할 수 있도록 설정하여야 한다.

☑ 핵심정리



1. 운전 계획

$$2. \text{운행 편성 수} = \frac{\text{왕복운전 시간} + \text{도착지 반복 시간}}{\text{운전간격}}$$

3. 열차 운행 도표의 분류

4. 열차 운행 도표 표기 사항

- 1) 열차선
- 2) 열차번호
- 3) 정거장명 및 정거장의 종류
- 4) 하행 열차에 대한 표준 오르막 기울기 또는 내리막 기울기
- 5) 정거장 간의 거리
- 6) 각 정거장의 기점부터의 거리
- 7) 폐색 방식의 종류
- 8) 정거장 구내 본선의 유효장
- 9) 대피 또는 교행 가능 여부

$$5. \text{선로 용량} = \frac{\text{용량계산 시간}}{\text{운행간격}}$$

$$\text{용량계산 시간} = \text{선로 용량} \times (\text{안전간격 시간} + \text{정차시간} + \text{운영여유시간})$$

9장

디젤기관



- 9.1 마력
- 9.2 효율
- 9.3 연료 소비율
- 9.4 배기량
- 9.5 압축비
- 9.6 제동 압력
- 9.7 특성 건인력
- 9.8 차륜공전
- 9.9 특수 운전 취급법



9장

디젤기관

학습목표

- ✓ 디젤기관의 마력 및 효율 산출에 필요한 요소들에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 디젤기관의 배기량 및 압축비 산출에 필요한 요소들에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 디젤기관의 제동 압력 산출에 필요한 요소들에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 특성 견인력과 차륜 공전에 대하여 설명할 수 있다.
- ✓ 특수 운전 취급법에 대하여 설명할 수 있다.

[핵심 용어]

• 마력, 효율, 연료 소비율, 배기량, 압축비, 제동압력, 특성 견인력, 차륜 공전 등

9.1 마력

9.1.1 지시마력

실린더 내에서 연료가 연소하여 실제 발생한 마력으로, 힘을 지압계로 측정하여 지압 선도로 나타내어 계산하며, 도시마력이라고도 한다. 지시 평균유효압력을 P_{mi} , 실린더 면적 A , 행정 거리 L , 배기량 V_s , 기관 회전수 N , 기관 실린더 수 Z 라 할 때, 지시마력을 iHP 는 다음과 같이 정의한다.

$$iHP = \frac{P_{mi} \cdot A \cdot L \cdot N \cdot Z}{75 \cdot 60} = \frac{P_{mi} \cdot V_s \cdot N \cdot Z}{4,500} \text{ (ps)}$$

9.1.2 제동마력

축마력, 또는 정미마력이라고도 하며, 지시마력에서 기계 손실을 뺀 마력이다. 회전력을 T , 회전

수를 N , 기계효율을 η_m , 마찰마력을 fHP 라 하면 제동마력은 다음과 같이 나타낸다.

$$bHP = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot N}{75 \cdot 60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot T \cdot N}{4,500} = \frac{T \cdot N}{716}, (\text{ps})$$

$$T = 716 \cdot \frac{bHP}{N} (\text{kgf} \cdot \text{m})$$

$$bHP = iHP - fHP, (\text{ps})$$

9.2 효율

9.2.1 기계효율

실린더 내에서 실제 발생한 지시마력과 기관의 운전 중 손실에 의해 발생한 정미마력과의 관계를 나타낸 것이다. 정미마력 eHP 는 여러 가지 기계 손실 때문에 도시마력 iHP 보다 작다. 따라서 도시마력과 정미마력과의 차이를 기계 손실 마력이라 한다. 또한 도시마력이 얼마큼 정미마력으로 이용되었는지의 비율을 기계효율 η_m 이라 한다.

$$\text{기계효율} = \frac{\text{정미마력}}{\text{도시마력}} \times 100$$

$$\eta_m = \frac{eHP}{iHP} \times 100$$

9.2.2 체적 효율

실린더 내로 들어갈 수 있는 공기량과 실제 실린더 내로 들어간 공기량의 비를 체적 효율 η_v 이라 한다. 또한 중량비로 나타낼 수도 있다.

$$\text{체적효율} = \frac{\text{실제 흡입한 공기량}}{\text{실린더 체적이 차지할 수 있는 공기량}} \times 100, \dots\dots 9-2\text{식}$$

$$\text{체적효율} = \frac{\text{흡기량}}{\text{실린더 배기량}} \times 100$$

9.2.3 정미 열효율

각종 손실에 의해서, 실제 기관의 열효율은 이론적 열효율보다 작아진다. 열효율을 고려할 때, 보통 정미마력을 열량으로 환산한 값과 단위시간에 소비한 총열량과의 비를 정미 열효율이라 한다. 정미 열효율은 기관의 성능을 나타내는 중요한 값이 된다.

$$\text{정미 열효율} = \frac{\text{정미마력을 열량으로 환산한 값}}{\text{단위 시간에 소비한 연료의 전체 열량}} \times 100, (\%), \dots\dots 9-3\text{식}$$

여기서 1시간당 연료 소비량을 eL , 연료 1kg의 정미 발열량(저위발열량)을 eH , 1시간에 소비한 연료의 전체 열량을 $eL \cdot eH$, 그리고 열의 일당량을 $J = 427(\text{kgf m/kcal})$ 라 하면, 정미 열효율 η_e 은 다음과 같이 나타낸다.

$$\text{정미 열효율} = \frac{632 \cdot (\text{정미마력})}{(1\text{시간당 연료 소비율}) \cdot (\text{저위 발열량})} \times 100, \dots\dots 9-4\text{식}$$

$$\eta_e = \frac{632 \cdot bHP}{eL \cdot eH} \times 100, \dots\dots 9-5\text{식}$$

9.3 연료 소비율

기관의 출력 1마력(PS)을 1시간 발생시키기 위해 소비되는 연료의 중량(g)을 연료 소비율이라 하며, 단위는 $\text{g/PS} \cdot \text{h}$ 로 나타낸다. 연료 소비율을 $eB(\text{kg/h})$, 정미마력을 eHP 라 하면, 연료 소비율은 다음과 같이 정의한다.

$$\text{연료 소비율} = \frac{632,000}{\eta_e \cdot eH}, \dots\dots 9-6\text{식}$$

$$eB = \frac{632,000}{\eta_e \cdot eH}, (g/PS \cdot h), \dots\dots 9-7식$$

9.4 배기량

645계 기관은 미국 G.M.C에서 제작된 것과 우리나라의 현대 차량에서 제작된 기관으로, 기관 실린더 지름이 9와 16분의 1인치, 행정이 10인치로서 배기 용량이 645inch³이다. 이것은 1실린더당의 배기 용량이며, 실린더 지름을 d , 피스톤 행정을 L 이라 하면 1실린더당 1행정 시 배기량(V)은 다음과 같이 정의한다.

배기량 = 실린더 단면적 $\times$ 피스톤 행정

$$V = A \cdot L = \frac{\pi}{4} d^2 L, (\text{inch}^3) \dots\dots 9-8식$$

총 배기량 = 배기량 $\times$ 실린더 수

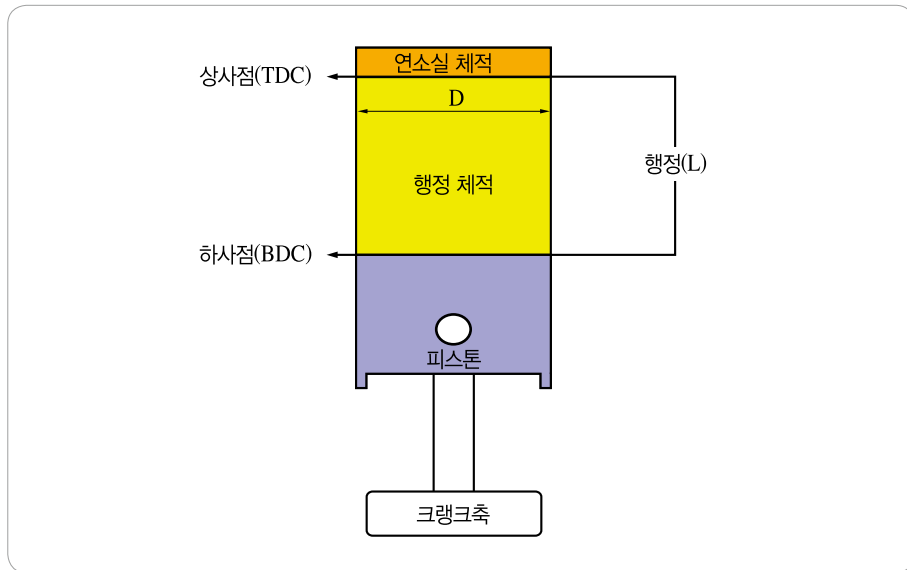
$$V_t = V \cdot L = \left(\frac{\pi}{4} d^2 L\right) \cdot N \dots\dots 9-9식$$

9.5 압축비

실린더 총체적과 연소실 체적의 비는 기관 성능에 큰 영향을 미치며, 피스톤이 실린더 하사점에 있을 때의 실린더 총체적과 피스톤이 상사점에 있을 때의 간극 체적(연소실체적)과의 비를 압축비라 한다. 여기서 행정체적을 V_s , 실린더 총체적 V_t , 연소실 체적을 V_c 라 하면, 압축비 ϵ 는 다음과 같이 정의한다.

$$\text{압축비} = \frac{\text{실린더 총 체적}}{\text{배기량}} = \frac{\text{행정체적} + \text{연소실 체적}}{\text{연소실 체적}}, \dots\dots 9-10식$$

$$\epsilon = \frac{V_t}{V_s} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c}, \dots\dots 9-11식$$



[그림 9-1] 압축비

9.6 제동 압력

9.6.1 기관차 제동통 압력

디젤전기기관차의 공기제동장치 분배관의 압력실과 작용실, 그리고 기관차 제동통 체적을 기준으로 보일의 법칙을 적용하여 기관차 제동통 압력을 산출한다.

여기서 기관사가 제동관 공기압력을 감압한 양을 $B_p(\text{kgf/cm}^2)$, 작용실 체적을 1cm^3 , 압력실 체적을 2.5cm^3 라 할 때, 기관차 제동통에 들어온 압력을 C_p 라 하면 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_p \times 1(\text{cm}^3) = B_p \cdot 2.5(\text{cm}^3)$$

$$C_p = 2.5 \cdot B_p, (\text{kgf/cm}^2), \dots\dots 9-12\text{식}$$

9.6.2 객·화차 제동통 압력

객·화차의 삼동변 작용 원리와 절대압력과의 관계를 응용하여 객·화차 제동통 압력을 산출한다. 여기서 대기 압력의 크기는 1kgf/cm^2 로 한다. 기관사가 제동관 공기압력을 $B_p(\text{kgf/cm}^2)$ 만큼 감

압하게 되면 보조 공기통의 공기압력은 객·화차 제동통으로 들어가 제동 작용이 이루어지게 된다. 이때 객·화차 제동통에 들어온 압력을 C_p , 그리고 객·화차 제동통 체적을 1이라 하면, 보조 공기통 체적은 객·화차 제동통 체적의 3.25배가 되므로 다음과 같이 정의한다.

$$C_p \times 1(\text{cm}^3) = B_p \cdot 3.25(\text{cm}^3)$$

$$C_p = 3.25 \cdot B_p, (\text{kgf/cm}^2), \dots\dots 9-13\text{식}$$

여기서 $3.25B_p$ 압력은 절대압력으로, 계기 압력을 산출하려면 대기 압력을 빼 주어야 한다.

$$C_p = 3.25B_p - 1, (\text{kgf/cm}^2)$$

(1) 절대압력 = 대기 압력 + 계기 압력, $\dots\dots 9-14\text{식}$

(2) 절대압력 = 대기 압력 - 진공 압력, $\dots\dots 9-15\text{식}$

(3) 계기 압력 = 절대압력 - 대기 압력, $\dots\dots 9-16\text{식}$

9.6.3 최소 유효 제동통 압력

보조 공기통으로부터 제동통에 들어온 공기압력이 제동통 피스톤에 압력으로 작용하면 피스톤은 움직이려고 하지만, 제동통 리턴 스프링의 탄성력과 제동통 피스톤로드의 마찰력이 저항을 하게 된다. 그러므로 제동통에 공급된 공기압력은 리턴 스프링의 탄성력과 피스톤로드의 마찰력보다 큰 공기압력이어야만 제동 작용을 하게 되는 것이다.

여기서 제동 작용이 이루어지기 위한 가장 작은 압력을 유효 제동통 압력이라고도 한다. 그리고 리턴스프링의 탄성력을 압력 단위로 환산하면 0.35kgf/cm^2 , 제동통과 피스톤 로드와의 마찰력을 압력 단위로 환산하면 0.05kgf/cm^2 이 된다. 그러므로 제동통에 공급된 압력은 0.4kgf/cm^2 이상이어야 한다.

9.6.4 최소 유효 감압량

제동통에서 제동 작용이 이루어질 수 있는 가장 작은 공기압력을 최소 유효 감압량이라 한다.

- (1) 기관차의 최소 유효 감압량

$$2.5B_p > 0.4$$

$$B_p > 0.16\text{kgf/cm}^2, \dots\dots 9-17\text{식}$$

- (2) 객·화차 최소 유효 감압량

$$3.25B_p - 1 > 0.4$$

$$B_p > 0.43\text{kgf/cm}^2, \dots\dots 9-18\text{식}$$

9.6.5 최대 유효 감압량

제동 작용 시 보조 공기통 압력과 제동통 압력이 균형을 이루게 되면 더 이상 제동관 공기압력을 감압하더라도 제동 작용에는 영향을 주지 않는 상태가 되는데, 이것을 최대 유효 감압량이라 한다.

최대 유효 감압량은 제동관 압력에 따라 달라진다.

- (1) 제동관 압력이 5kgf/cm^2 일 때, 기관차 최대 유효 감압량

$$5 - r = 2.5r$$

$$r = 1.43\text{kgf/cm}^2, \dots\dots 9-19\text{식}$$

- (2) 제동관 압력이 6kgf/cm^2 일 때, 기관차 최대 유효 감압량

$$6 - r = 2.5r$$

$$r = 1.71\text{kgf/cm}^2, \dots\dots 9-20\text{식}$$

- (3) 제동관 압력이 5kgf/cm^2 일 때, 객·화차 최대 유효 감압량

$$5 - r = 3.25r - 1$$

$$r = 1.41\text{kgf/cm}^2, \dots\dots 9-21\text{식}$$

- (4) 제동관 압력이 6kgf/cm^2 일 때, 객·화차 최대 유효 감압량

$$6 - r = 3.25r - 1$$

$$r = 1.65\text{kgf/cm}^2, \dots\dots 9-22\text{식}$$

9.7 특성 견인력

견인전동기의 성능이 직접적으로 영향을 미치는 영역으로, 동력차의 특성곡선에서 산출하여 운전 계획을 세울 때 사용하는 견인력이다.

9.7.1 기울기가 없는 평탄 선로에서 기동 시

- (1) 여객열차는 1시간 정격전류의 120% 이내로 한다.
- (2) 화물열차는 1시간 정격전류의 100% 이내로 한다.

9.7.2 기울기가 있는 선로에서 기동 시

1시간 정격전류의 160% 이내로 한다.

9.7.3 디젤동차의 특성 견인력

- (1) 기울기가 없는 평탄 선로에서 기동 시 점착 견인력에 대응한 견인력의 95% 이하로 한다.
- (2) 기울기가 있는 선로에서 기동 시 점착 견인력에 대응한 견인력으로 산정한다.

9.8 차륜공전

가속 시 차륜의 회전속도가 레일과 접촉면 사이의 순수 구름 접촉 속도보다 빠를 경우에 접촉면에서 차륜만 회전하는 현상으로, 견인력이 점착력보다 클 때 나타난다.

9.8.1 역학적 원인

- (1) 점착 견인력이 동륜주(wheel rim) 견인력보다 작을 때 발생한다.
- (2) 급격한 속도 변화가 있을 때 발생한다.
- (3) 레일 위 점착 계수가 작을 때(눈, 비, 서리, 습기, 기름기, 낙엽, 신설 선 등에 의해) 발생한다.

- (4) 신설 선 및 교환한 레일 위를 운행할 때 발생한다.
- (5) 전·후 진동과 상·하 진동이 있을 때 발생한다.
- (6) 축중 이동이 있을 때 발생한다.

9.8.2 차륜공전 발생의 최소화 방법

- (1) 점착 견인력 향상을 위해 살사(撒沙 : 모래를 흩어 뿌림)를 한다. 점착력 향상을 위해 가장 좋은 방법이지만, 긴 오르막 선로에서 살사를 하면 오히려 주행저항으로 작용한다.
- (2) 점착 견인력 향상을 위해 선로의 보수 기준 한도를 높여서 최적의 상태가 되도록 한다.
- (3) 점착 견인력 향상을 위해 동력차의 보수 상태를 최적화한다.
- (4) 평탄 직선 선로 위를 운행할 때는 운행 속도를 높이고, 곡선 선로 및 기울기가 심한 선로에서는 가·감 간을 적절하게(1-2단 내림) 조절하여 동륜주 견인력을 감소시켜 공전 발생을 최소화한다.

9.9 특수 운전 취급법

오르막 선로 위 정차 시 인출 방법에는 자연 인출과 압축 인출, 그리고 후퇴 인출이 있다.

9.9.1 자연 인출 방법

기울기가 없는 선로에서 출발할 때와 같은 인출 방법이다. 다음과 같은 순서로 한다.

- (1) 제동을 완해한다.
- (2) 가·감 간을 서서히 상승시켜 동력 운전을 한다.
- (3) 객·화차를 많이 연결하였을 경우, 기동 불능의 우려가 있다.

9.9.2 압축 인출 방법

다른 인출 방법보다 인출이 용이하여 가장 많이 사용하는 인출 방법으로, 열차의 출발 저항을 이용하여 기동하는 방법이다. 순서는 다음과 같다.

- (1) 오르막 선로 위에서 정차할 때는 자동 제동변으로 제동을 작동시킨다.
- (2) 자동 제동변을 사용하여 기관차와 객·화차의 제동을 완해한다.
 - 1) 자동 제동변 : 조성된 기관차와 객·화차 전체를 동시에 제동 및 완해 작용을 할 수 있는 제동변
 - 2) 단독 제동변 : 조성된 기관차와 객·화차 전체를 동시에 제동 및 완해 작용을 할 수 없는 제동변으로, 기관차만 제동 및 완해 작용을 할 수 있는 제동변
- (3) 제동이 완해가 되기 전에 가·감 간을 상승시킨다.
- (4) 살사장치를 작동시킨다.
- (5) 단독 제동변으로 제동, 완해, 제동, 완해 작용을 하면 순간적으로 발생하는 공전을 예방하는데 효과적이다.
- (6) 압축 인출 시 주의할 점
 - 1) 오르막 선로에 정차할 때 단독 제동변으로 제동을 작동하면 인출이 불가능하다.
 - 2) 자동 제동변을 완해 위치로 하여 후부 객·화차의 제동이 완전히 완해가 된 후 가·감 간을 취급하면 인출이 불가능하다.
 - 3) 2번 항과 같이 제동변을 취급하면, 기관차와 객·화차가 뒤로 밀리면서 역전 접촉기를 손상시킬 우려가 있다.

9.9.3 후퇴 인출 방법

선로의 기울기가 완만하고 편성된 열차 길이가 비교적 짧은 경우에, 정차 위치에서 뒤의 방향으로 물러났다가 인출하는 방법이다.

☑ 핵심정리



1. 총 배기량

배기량 = 실린더 단면적 × 피스톤 행정

$$V = A \cdot L = \frac{\pi}{4} d^2 L, (\text{inch}^3)$$

총 배기량(V_t) = 배기량 × 실린더 수

2. 압축비 산출식

$$\text{압축비} = \frac{\text{실린더 총 체적}}{\text{배기량}} = \frac{\text{행정체적} + \text{연소실 체적}}{\text{연소실 체적}}$$

$$\epsilon = \frac{V_t}{V_s} = \frac{V_s + V_c}{V_c} = 1 + \frac{V_s}{V_c}$$

3. 기관차 제동통 압력

4. 특성 견인력

5. 오르막 선로 위 정차 시 인출 방법

집필위원

김병수(가톨릭상지대학교), 안승호(한국교통대학교)

검토위원

전준표(서울시메트로9호선)

기획 및 관리

국토교통부

강희업(철도안전정책관), 임종일(철도안전정책과장), 류윤희(철도안전정책과),
심정찬(철도안전정책과), 박재흥(철도안전정책과)

한국교통안전공단

엄득중(철도안전실실장), 이지웅(철도안전처처장), 김재학(철도안전처팀장),
김재성(철도안전처)

편집 및 디자인

도서출판 성진문화

주소 | 서울특별시 영등포구 당산로41길 11 당산 SK V1 Center W동 430호

TEL | 02-2272-4641 FAX | 02-2272-4643

출판등록 | 2007년 9월 20일 제 2015-000120호

ISBN 978-89-85682-58-9 15530

제2종 철도차량운전면허 표준교재 **운전 이론 일반**

발행일 | 2020년 12월 7일

발행처 | 국토교통부 철도안전정책과



제2종 철도차량운전면허 표준교재

운전 이론 일반



국토교통부



ISBN 978-89-85682-58-9 (PDF)