

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), Te 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

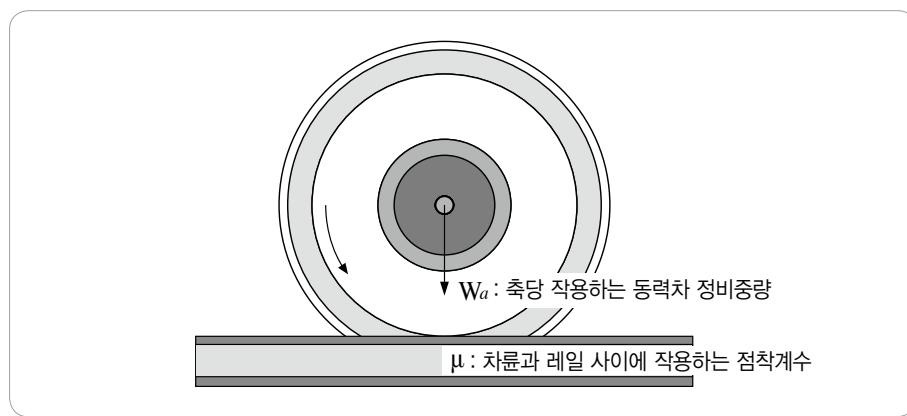
4.1.1 점착력

전기동차가 레일 위를 부드럽게 주행하면서도 도중에 가속과 감속, 그리고 제동을 할 수 있는 것은 미끄러지지 않도록 전기동차의 차륜답면이 레일 표면에서 단단하고 완강하게 베티고 있기 때문이다. 이 베티는 힘 즉, 차륜답면과 레일의 접촉면과의 최대 마찰력에 대한 항력을 철도에서는 점착력



이라 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.

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



[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 돋기 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 차륜답면의 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 횆 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 차륜답면에 작용하는 축 중량 W_s 의 곱으로 결정되고 점착 계수는 접촉면의 상태, 즉 차륜답면과 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.

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

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, 특갑, 특을, 특병, 특정, 급갑, 급을, 급병, 급정, 보갑, 보을, 보병, 보정, 혼갑, 혼을, 혼병, 혼정, 화갑의 18종으로 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, 편성 량 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 인원에 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

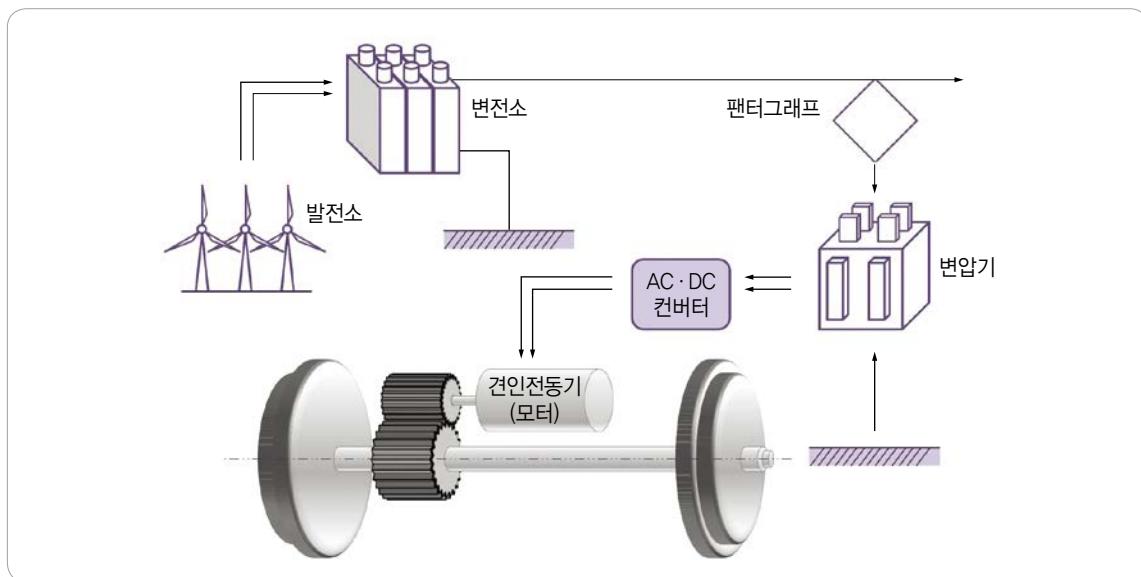
(4) 기준 중량

[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 차륜답면에서 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 발생되는 힘을 F , 감속비(치차비)를 G_r , 감속장치 내의 치차 및 축수의 전달 효율을 η^1 , 전동기 수를 N 이라고 하면 견인력 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.

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

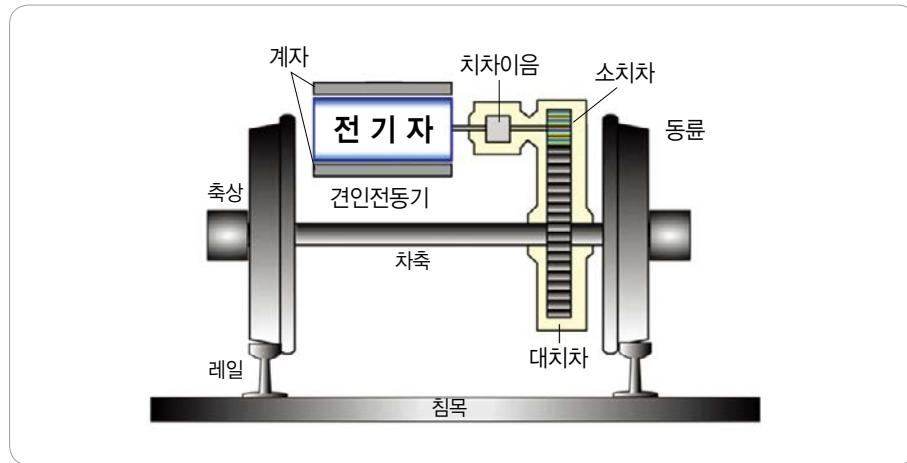
$$D_A N_A = D_B N_B, \frac{N_A}{N_B} = \frac{D_B}{D_A}$$

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

위 식으로부터 감속비는 다음과 같이 정의할 수 있다.

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

9) 원주피치(P) : 피치원 둘레를 잇 수로 나눈 값



[그림 4-3] 감속장치

4.2.1.1 감속장치 내 피니언 기어의 회전력

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

4.2.1.2 감속장치 내 종동 기어의 회전력

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

4.2.1.3 감속장치의 전달력

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

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

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

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

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

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 정의 한다.

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 차륜답면에서 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 $v(\text{km}/\text{h})$, 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

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

(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, 동륜주 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 동륜주 견인력 F_2 에서 전기동차의 톤당 주행저항 R_r 과 전기동차 정비 중량¹⁰⁾ W_E 의 곱을 감안한 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 정비 중량 W_E 와 점착 계수 μ 와의 곱을 점착력이라 하며, 동력 전달률을 포함하지 않으므로 동륜 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(W0)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 정격 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 $G_r = \frac{Z_{B(\text{대치차 치수})}}{Z_{A(\text{소치차 치수})}}$ 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 굴려 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 발생되는 전기에너지를 가공 전차선을 통해 변전소 또는 다른 차량에 회귀시키는 제동 방식을 말한다.

(3) 와류 제동

차축에 전자석을 수반한 금속제 디스크를 설치하거나 레일 가까이에 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) 고흡수 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 접착력보다 크지 않아야 한다. 만일 제동력이 접착력보다 크게 되면 차륜은 레일과 접촉부에서 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 접착력에 비하여 작고 더욱이 차륜의 레일과 닿는 부분에서는 마찰에 의하여 온도가 급격하게 상승되어 마찰계수가 감소하므로 제동력이 약해진다. 이 때문에 제동 거리는 현저하게 증대되고 차륜답면에 칠상을 일으키게 된다. 따라서 제동력을 B_f , 접착력을 A_f 라 하면 다음과 같이 정의 할 수 있다.

$$B_f \leq A_f, \dots \dots 4-22식$$

4.3.1.6 자동 제동 조작 시스템

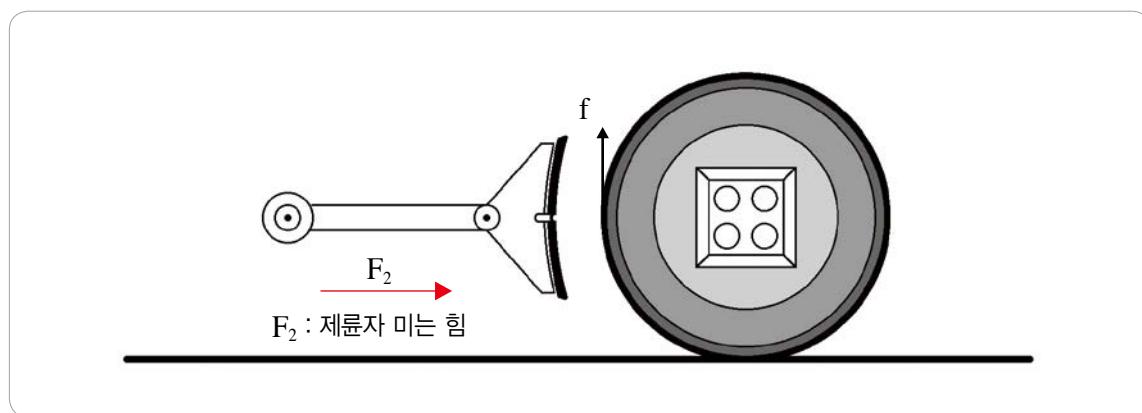
제동 조작은 열차 운전에 있어서 아주 중요한 것이며, 정차하는 경우에는 충격이 없고 또한 승객에게 불쾌감을 주지 않는 범위 내에서 최소의 시간으로 소정의 위치에 정차시켜야 한다. 이러한 조건을 만족시키기 위하여 자동 공기제동장치에서는 일단 제동과 단계적인 완해가 제동 조작의 기본으로 되어 있으며 이것의 장점은 다음과 같다.

- (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 활주 할 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.

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



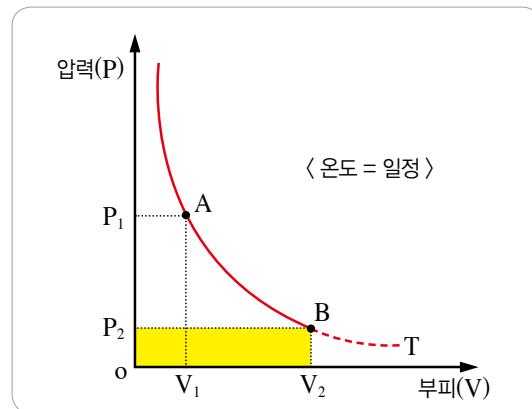
[그림 4-4] 제동력

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.

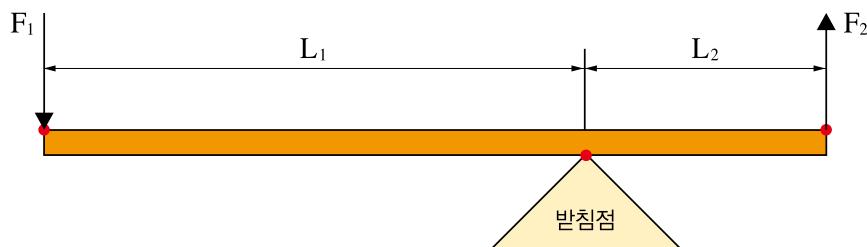
$$P_1 V_1 = P_2 V_2 = C(\text{일정}), \dots \dots 4-24\text{식}$$



[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(힘점)을 가하여 큰 힘(작용점)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 낮아지지 않는다. 또한 고속 시에는 저속 시보다 마찰계수가 작아진다.

(1) 마찰계수의 특성

[표 4-4] 마찰계수의 특성

항목	내용
재료	<ul style="list-style-type: none"> 주철, 특수 주철, 합성계 재료가 주로 사용 합성계 재료의 마찰계수가 높음
면적	<ul style="list-style-type: none"> 제륜자와 차륜의 일부 접촉 시 제동력 저하 접촉 면적이 작게 되면 접촉 부분만 온도가 상승하고 마찰계수는 저하
밀착력	<ul style="list-style-type: none"> 제륜자 미는 힘이 클수록 온도 상승이 높아져 마찰계수가 저하 밀착력을 증가하여도 제동력은 비례적으로 증가하지 않음
온도	<ul style="list-style-type: none"> 제동력을 오랜 시간 사용 시 온도가 상승하여 마찰계수를 저하 외부 온도가 낮을 경우에도 마찰계수는 저하
기후	<ul style="list-style-type: none"> 겨울철 제륜자와 차륜 사이에 눈이 퇴적되면 마찰계수를 저하
속도	<ul style="list-style-type: none"> 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)

제동통에 들어온 공기압력이 제동통 피스톤에 압력으로 작용하면 피스톤은 움직이려고 한다. 그러나 제동통 리턴 스프링의 탄성력과 제동통 피스톤 로드의 마찰력이 저항을 하게 되므로 제동통에 공급된 공기압력은 리턴 스프링의 탄성력과 로드의 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 $0.35\text{kgf}/\text{cm}^2$, 제동통과 피스톤 로드와의 마찰력을 압력 단위로 환산하면 $0.05\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이 된다. 그러므로 제동통에 공급된 압력 P_s 는 $0.4\text{kgf}/\text{cm}^2$ 이상 공급되어야 한다.

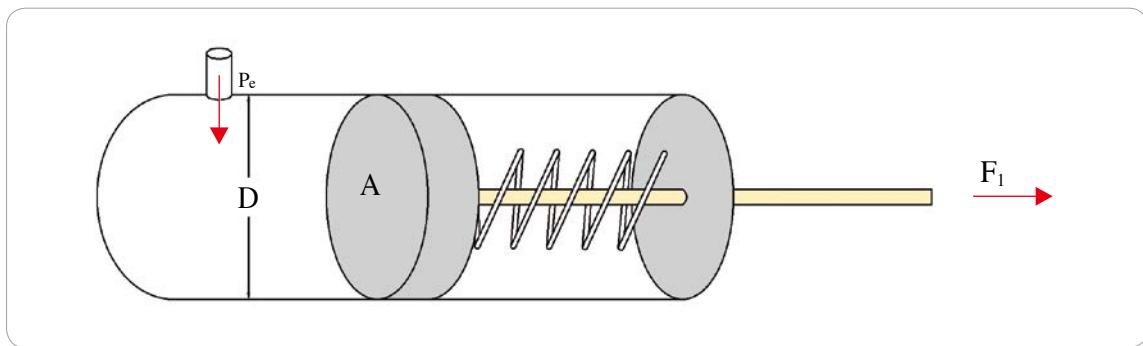
$$P_e = P_s - 0.4(\text{kgf}/\text{cm}^2), \dots \quad 4-26\text{식}$$

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
반지름을 d 라 하면 제동 원력은 다음과 같이 정의한다.

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



[그림 4-7] 제동 원력

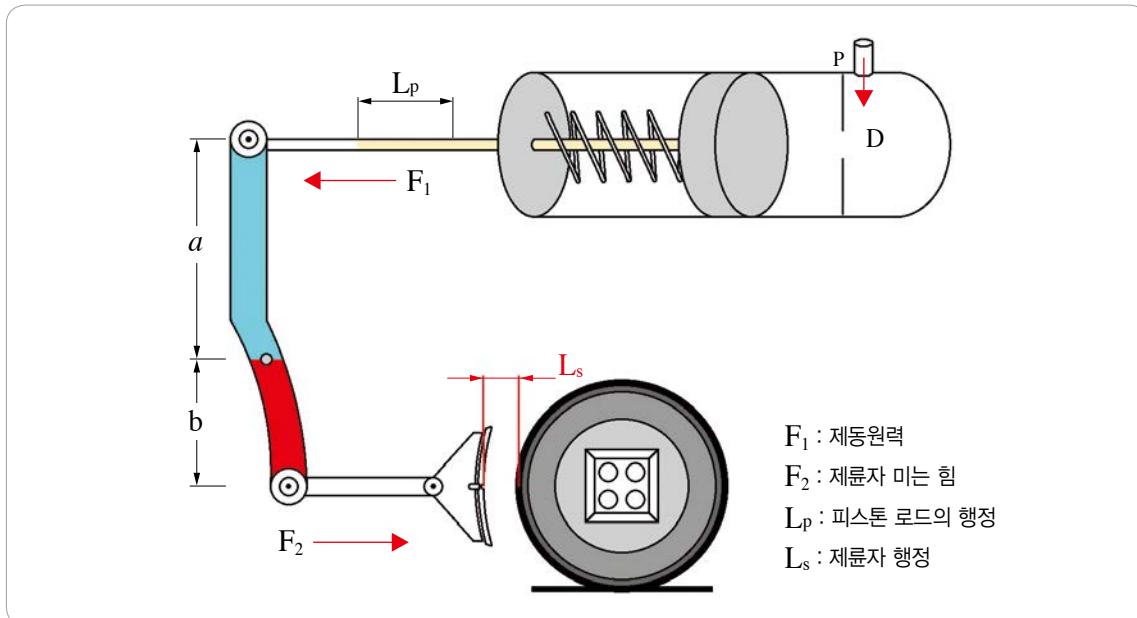
4.3.2.6 제동 배율(B_m)

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.

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

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



[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

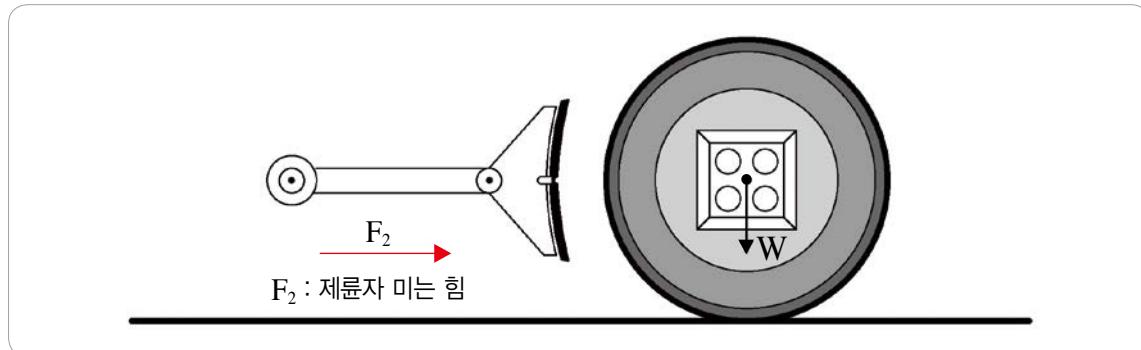
기초 제동장치를 통하여 힘을 전달하는 경우 기구 각 부의 마찰, 제동통 피스톤 완해 스프링, 대차에 붙여진 리턴 스프링(Return Spring) 등의 저항력 때문에 제동통에서 발생된 힘의 일부가 감쇠된

다. 그리고 제륜자가 차륜의 중심을 벗어나서 접촉할 경우에는 법선 이외의 분력이 생겨 제륜자를 누르는 힘이 감소된다. 따라서 제동통의 피스톤 로드에서 나오는 힘에 제동배율을 곱한 값과 실제로 제륜자가 차륜을 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 제륜자를 누르게 되면 차륜은 레일 위에서 회전하지 못하고 활주하게 된다. 즉, 제륜자를 누르는 힘은 활주하지 않은 범위 내에서 제한할 필요가 있는데 이것을 제동률이라고 한다. 전차(全車) 제동률(B_r)은 전(全) 차륜의 축 중량(W)과 전(全) 제륜자의 미는 힘(F_2)과의 비로 나타내며 축 제동률은 차륜의 축 중량과 제륜자의 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 제륜자 압력과 축에 걸리는 중량과의 비율을 축제동률이라 한다.

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

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

(2) 제동률 크기에 영향을 미치는 요소

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

4.3.2.9 제동통 피스톤 행정을 변화시키는 요소

(1) 제륜자의 마모

초기애 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.

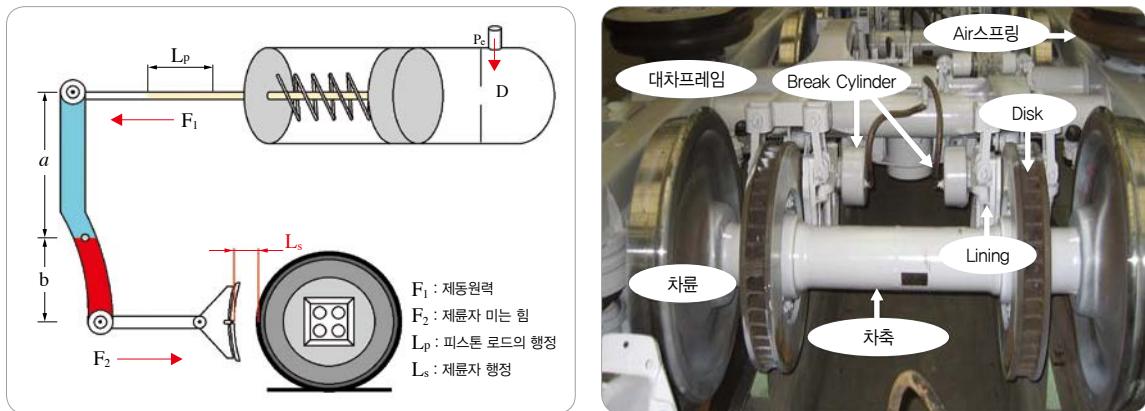
(4) 제동 초속도

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 해드, 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) 축중률에 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 활주를 판단한다. 이때는 제동력을 신속히 낮추고 차륜답면의 플랫(flat) 발생을 방지하며, 차륜과 레일의 재접착을 진행한다. 재접착 이후에는 제동력을 회복시켜 접착력을 효과적으로 작용시키는 시스템을 활주 방지 장치라 한다.

활주 제어는 차륜과 레일 사이의 접착력을 최대로 활용하는 것으로, 필요 이상으로 제동력을 감소시키지 않고 필요 이상으로 오랜 시간 제동력을 완해하지 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.

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

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

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

또한, 차륜 감속도(B)가 $L_3(\text{감속도 한계값})$ 보다 적음을 만족시키면 시스템은 활주 현상이 없다고 판단하여 토출 전자 변을 무여자 시켜 제동력을 유지시킨다. 그리고 $(V_1 - V_n) \leq L_1(\text{속도차 한계값})$ 을 만족하게 되면 차륜과 레일은 재점착했다고 연산하여 유지 전자 변을 무여자 시켜 활주 시작 점까지 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 않으면 최대의 제동력을 얻을 수 있는 식은 다음과 같다.

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

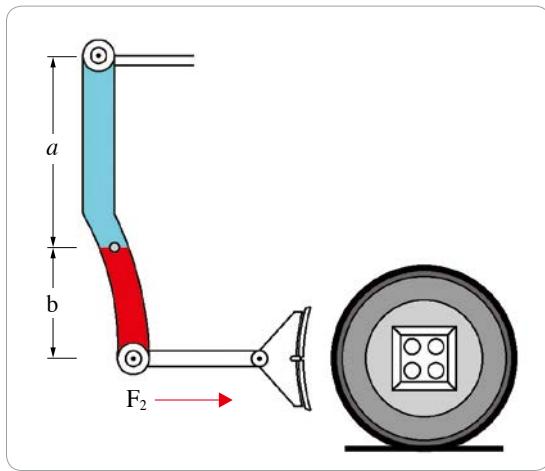
4.4 제동력

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.

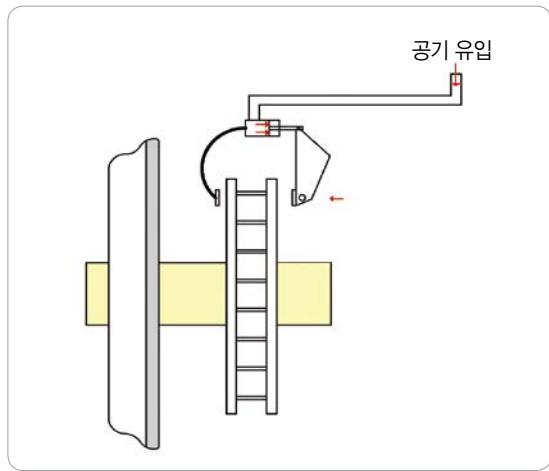
4.4.1 답면 제동력

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

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



[그림 4-11] 답면 제동장치



[그림 4-12] 디스크 제동장치

4.4.2 디스크 제동력

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

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

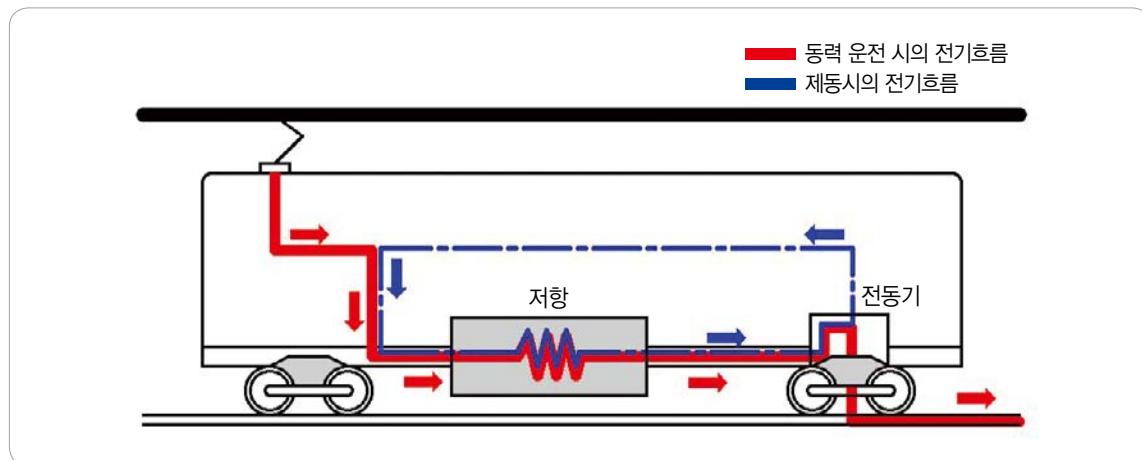
4.4.3 발전 제동력

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 발생되는 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 발생되는 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.

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

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



[그림 4-13] 발전 제동력

4.4.3.1 발전 제동의 장점

- (1) 제동장치의 이완이나 차륜의 칠상 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.

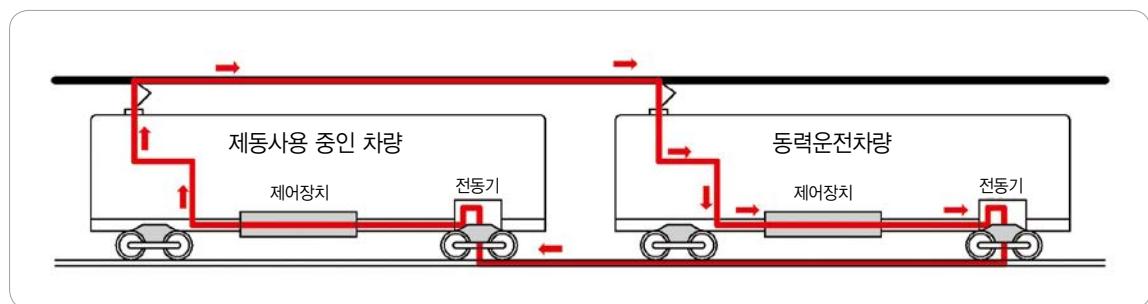
4.4.3.2 발전 제동의 단점

- (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.

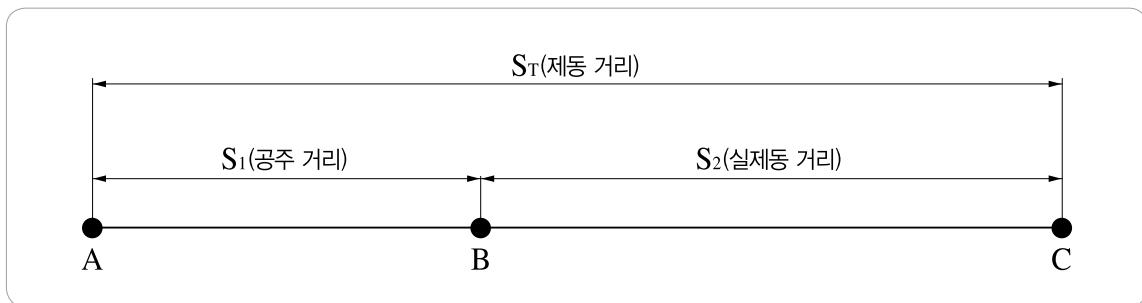
4.4.4.2 회생제동의 문제점

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



4.5 제동 거리

전기동차가 등가속도 직선운동을 하며 레일 면과 차륜답면에서 발생되는 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 칸 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.

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

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

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

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

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

$E_t = (B_F \cdot s_2)$ 에서 열차 저항 T_R 도 감속력으로 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.

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

다음과 같다.

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

톤당 열차 저항 값으로 환산한 것이다.

4.5.3 제동 거리의 산출

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

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

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

4.5.3.1 제동 거리의 특징

- (1) 열차 중량 W 에 비례한다.
- (2) 제동 초속도 (v) 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

$$s_b = s_1 + s_2$$

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

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

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

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

$$s_b = s_1 + s_2$$

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

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] 기울기에 따른 제동 감속도

열차 종별	기울기	-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.

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

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

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

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

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

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

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

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

제동 시간은 다음과 같다.

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

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

따라서 제동 시간 t 는 다음과 같이 정의된다.

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

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

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 힘

2. 견인력

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

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

3. 속도

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

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

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