

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

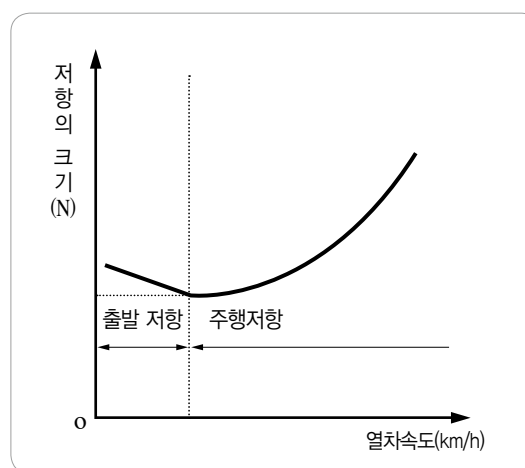
저항의 분류	발 생 원 인
출발 저항 주행저항	• 정차 중인 열차가 출발할 때 • 주행 중인 차량 자체나 차량 상호 간에 발생
기울기 저항 곡선저항 터널 저항	• 지상 설비에 기울기 등이 있는 경우 열차가 그 구간을 주행할 때마다 일시적으로 주행을 방해받게 됨으로 발생하는 저항
가속도 저항	• 가속도 저항 : 모든 저항(출발,주행,곡선,구배저항)이 견인력과 동일하면 등속운동이 되나 등속운동 중 속도를 가속하려면 여분의 견인력을 필요로 한다. 이 여분의 견인력을 저항으로 취급하여 가속도 저항이라 한다. 가속에 필요한 힘은 차량의 직진부분의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

[표 5-1] 저항의 발생 원인에 따른 저항의 표시 기호

발생 원인 단위	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 기울기가 없는 직선 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.

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

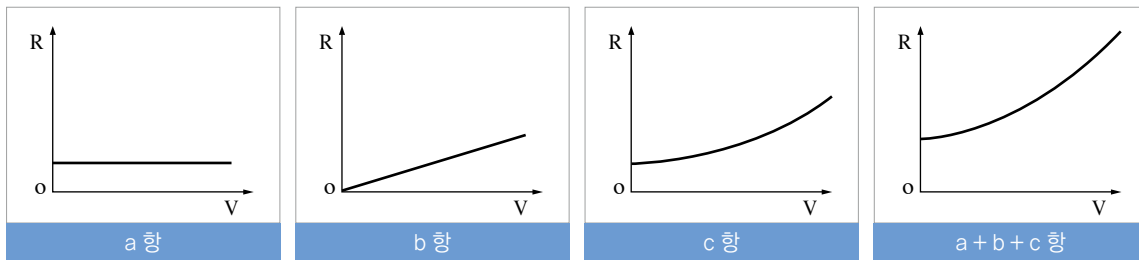
여기서 sr 은 속도 0km/h에서 단위 중량당 출발 저항 값(N/ton)

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, 공기저항은 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

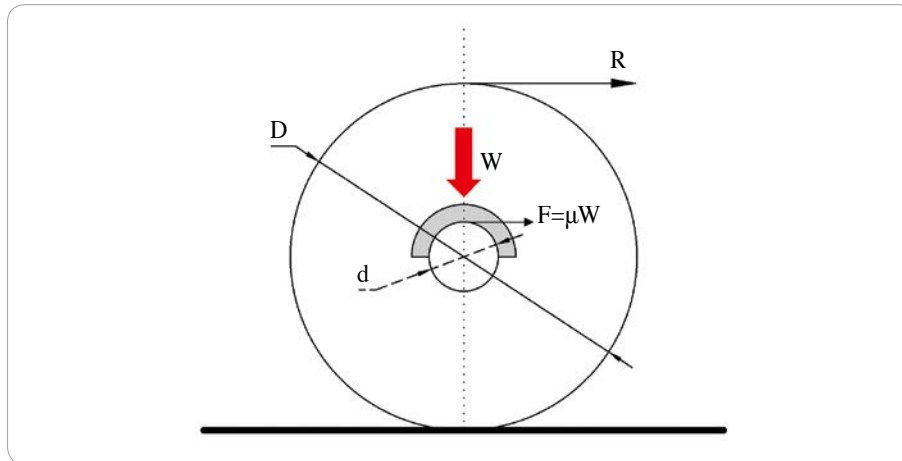
구분	영향을 주는 요소	주행저항	
		크다	작다
철도차량 조건	편성 칸 수	많음	적음
	편성 중량	무거움	가벼움
	열차 속도	높음	낮음
	앞쪽 형상	평면 구조	유선형 구조
지상 조건	기온	낮음	높음
	터널 단면 형상	단선 터널	복선 터널

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 마찰력을 F , 차축과 축수 간의 마찰계수를 μ , 차축에 작용하는 중량을 W , 차륜 지름을 D , 차축 지름을 d 라 할 때 차륜과 축수 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.

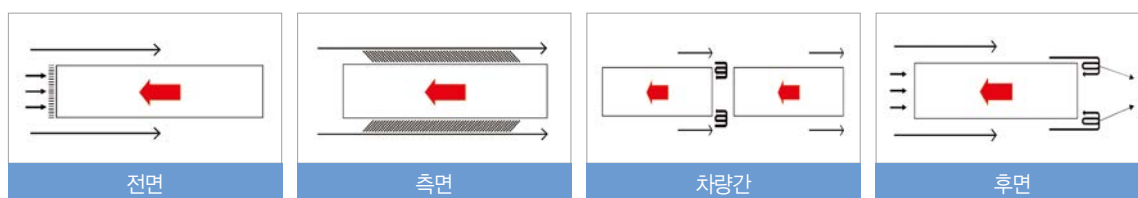
(1) 공기저항에 영향을 미치는 요소

- 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)

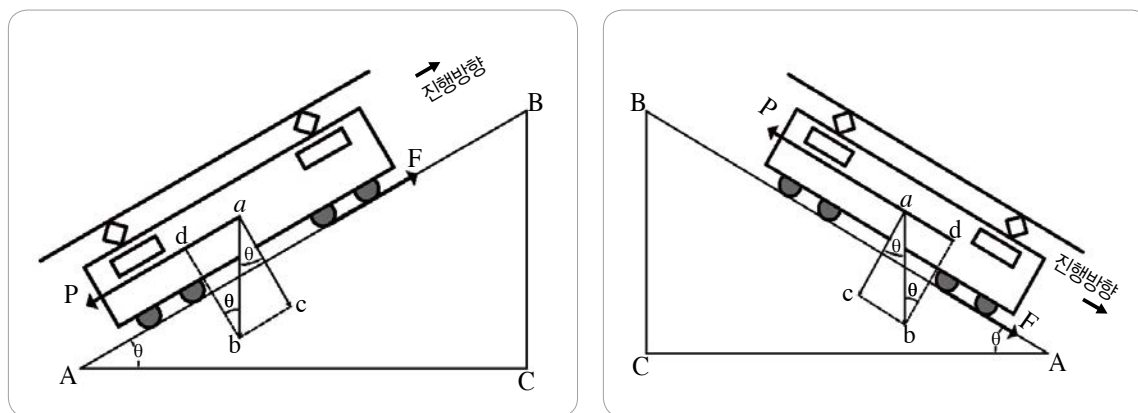
- 1) 맨 앞쪽 : 10
- 2) 맨 뒤쪽 : 2.5



[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.

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

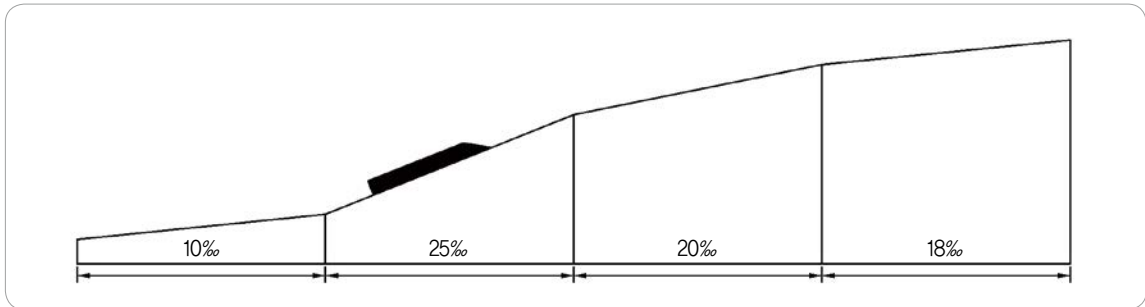
$$GR = 9.8 \cdot W \cdot i, (N)$$

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

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

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

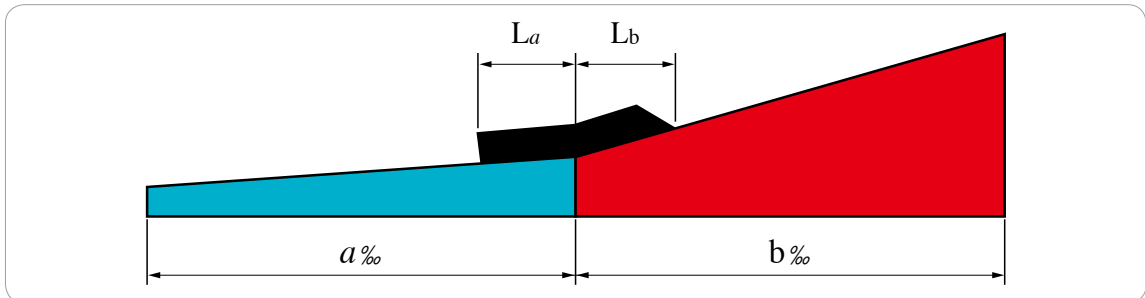
위 식에서 의미하는 것은 톤당 기울기 저항은 천분율(‰)로 표시한 기울기의 9.8배 크기가 된다는



[그림 5-6] 하나의 기울기 구간 운행 시 기울기 저항

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

5.1.3.2 열차가 여러 가지 기울기가 있는 구간을 주행하는 경우



[그림 7-기] 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(kgf/ton), b : $b\%$ 기울기에서의 톤당
 기울기 저항(kgf/ton), 일 때 각각의 기울기 저항은 다음과 같다.

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

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

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.

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

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

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.

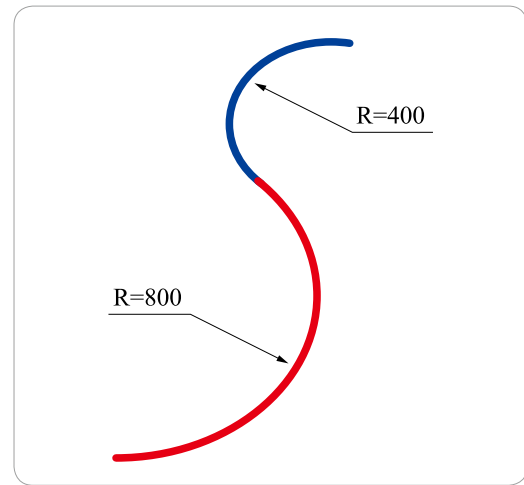
곡선저항은 레일 간격, 곡선 반지름, 캔트(cant), 슬랙(slack), 고정 축간거리, 열차 속도 등의 영향을 받는다. 차륜과 레일 간의 점착 계수를 μ , 레일 간격을 G , 고정 축간거리를 L_w , 곡선 선로 반지름을 R 이라 할 때, 모리슨(Morrison)이 정리한 톤당 곡선저항은 다음과 같이 정의한다.

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

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

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

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

L : 기울기 전체 길이, $L_1, L_2, L_3, \dots, L_n$: $r, r_1, r_2, r_3, \dots, r_n$ 의 곡선 길이

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.

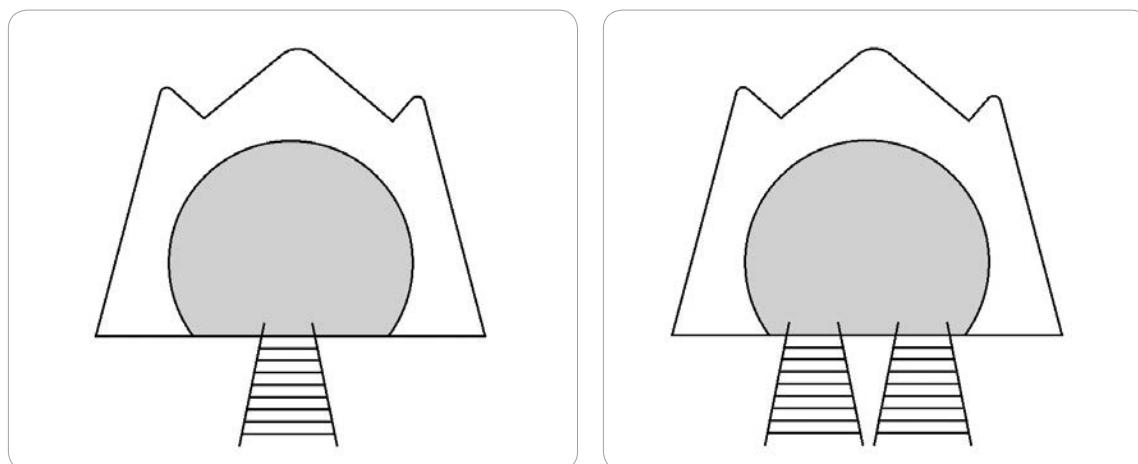
5.1.6 터널 저항

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	발생 원인
출발 저항 주행저항	<ul style="list-style-type: none"> 정차 중인 열차가 출발할 때 주행 중인 차량 자체나 차량 상호 간에 발생
기울기 저항 곡선저항 터널 저항	<ul style="list-style-type: none"> 지상 설비에 기울기 등이 있는 경우 열차가 그 구간을 주행할 때마다 일시적으로 주행을 방해받게 됨으로 발생하는 저항
가속도 저항	<ul style="list-style-type: none"> 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 마찰저항은

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

5. 기울기 저항

$$gr = 9.8 \cdot i, (N/\text{ton})$$

7. 보정 기울기 저항

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

6. 곡선저항

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

8. 가속도 저항

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