

KR E-03060

Rev.4, 06. March 2014

전철주의 공간

2014. 03. 06



한국철도시설공단

목 차

1. 전철주의 경간	1
해설 1. 전철주 최대경간길이 계산이론	2
1. 개요	2
2. 최대 경간길이 계산식	3
3. UIC 계산식의 각 변수 분석	7
3.1 선로 분야	7
3.2 차량 및 팬티그래프 분야	11
3.3 전차선로 분야	15
4. 바람에 의한 전차선 횡변위 계산 알고리즘	18
4.1 풍압을 받는 전차선의 형상(곡선)에 대한 기본방정식	18
4.2 양단 편위가 같은 경우의 전차선 곡선 및 횡변위량	20
4.3 양단 편위가 다른 경우를 포함하는 전차선 횡변위 관계식	21
4.4 전차선 횡변위 관계식에 대한 고찰	24
5. 전차선에 발생하는 기울기의 요소와 계산 실예	25
5.1 집전장치 유효 폭	25
5.2 풍압에 의한 전차선 기울기	26
RECORD HISTORY	31

경 과 조 치

이 철도설계지침 및 편람(KR CODE) 이전에 이미 시행중에 있는 설계용역이나 건설공사에 대하여는 발주기관의 장이 인정하는 경우 종전에 적용하고 있는 우리공단 “철도설계지침 및 편람”을 그대로 사용할 수 있습니다.

일 러 두 기

- 사용자의 이용 편의를 위하여 책 단위로 구성된 “철도설계지침” 및 “편람”을 국제적인 방식에 맞게 체계를 각 코드별로 변경하였습니다.
또한, 모든 항목에 대한 해설 및 목차역할을 하는 KR CODE 2012, 각 코드별로 기준 변경사항을 파악할 수 있도록 Review Chart 및 Record History를 제정하였습니다.
- 이번 개정된 “철도설계지침 및 편람(KR CODE)”은 개정 소요가 발생할 때마다 각 코드별로 수정되어 공단 EPMS, CPMS에 게시되며 설계적용시 최신판을 확인 바랍니다.
- “철도설계지침 및 편람(KR CODE)”에서 지침에 해당하는 본문은 설계시 준수해야 하는 부분이고, 해설(편람) 부분은 설계용역 업무수행에 편의를 제공하기 위해 작성한 참고용 기술도서입니다. 여기서, 각 코드의 제목부분에서 해설은 편람을 총칭하는 것입니다.

1. 전철주의 경간

(1) 전차선로 전주경간은 전차선로 속도등급 300킬로급 이상은 최대 65m이하(터널 50m)로 하고 250킬로급 이하는 다음 각 호에 의하여 시설한다.

① 커티너리식 가공전차선로 지지물의 최대경간은 다음 표에 의하고 인접하는 경간의 차는 10[m] 이하로 한다. 다만, 부득이 한 경우는 20[m] 이하로 할 수 있다.

곡선반경[m]	최대경간[m]
곡선반경 2,000초과	60
곡선반경 1,000 초과 ~ 2,000까지	50
곡선반경 700 초과~1,000까지	45
곡선반경 500 초과~700까지	40
곡선반경 400 초과~500까지	35
곡선반경 300 초과~400까지	30
곡선반경 200 이상~300까지	20

② 터널브래킷의 경간은 20[m](강체가선방식의 경우는 10[m]) 이하를 원칙으로 한다. 다만, 선로조건이나 가선방식 등을 고려하여 조정할 수 있다.

③ 터널구간 C-찬반 등에 설치되는 하수관의 경우 터널공사 라이닝폼 시공법 및 KR E-03130에서 정하는 표준가고 등을 고려하여 경간배치를 정하여야 한다.

(2) 곡선로의 교량등 특수개소의 전주경간은 기준편위를 확보가능한 범위 내에서 교각의 위치에 따라 조정할 수 있다.

(3) 경간을 정할 때 기준점은 분기개소의 중심지점의 전주위치와 구름다리 또는 터널입구 가장자리의 전주위치, 교량의 전주위치, 건널선의 중앙 전주의 위치, 변전소 앞 등의 전주위치를 고정점으로 하여 다른 전주경간을 정하도록 하여야 한다.

(4) 상하선의 전주위치는 가급적 서로 대향하여 일치하도록 하여야 한다. 다만 절연구분 장치개소등 특수한 개소는 그러하지 아니하다.

(5) 축소 경간이 필요할 때에는 완화곡선개소나 장애물이 있는 지역에서 조정, 설정하여야 한다.

(6) 장력조정장치와 흐름방지장치주는 건축물 하부나 건널선 안에 설치하지 말아야 한다.

(7) 교량 위의 전주기초는 가급적 교각에 가까운 곳에 설치하도록 하고 교량상판의 연결 개소는 피해야 한다.

(8) 구름다리 및 짧은 교량은 가급적 경간 중앙에 오도록 전주경간을 정하여야 한다.



해설 1. 전철주 최대경간길이 계산이론

1. 개요

전기철도차량은 선로를 따라 가설된 전차선로부터 전력을 공급받아 움직이게 된다. 그러기 위해서는 전기차에는 팬터그래프(Pantograph)라고 하는 집전(Current Collection) 장치가 달려있으며, 이 팬터그래프의 집전판(Contact Strip)이 전차선과 접촉하여서 전력을 공급받게 된다.

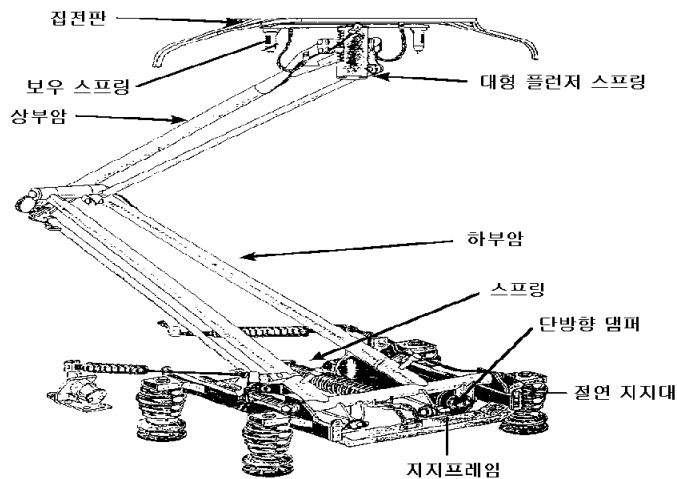


그림 1. 경부고속철도 차량의 팬터그래프[GPU 25kV 타입]

그런데, 열차는 주행한다. 열차가 주행 중일 때 팬터그래프의 집전판은 선로조건, 차량 특성, 기후상태 및 열차속도 등에 따라 좌우방향으로 여러 위치에 존재할 수 있다. 또한, 열차는 선로에서 정지해 있을 수도 있다. 열차가 정지해 있을 때 팬터그래프는 주행할 때와 다른 위치에 있게 된다.

한편, 전차선로(Catenary)에는 편위라는 것을 주는데, 편위를 주는 목적은 전차선이 팬터그래프 집전판과 접촉할 때 동일한 위치에 계속 접촉하면 집전판과 전차선사이에 발생하는 마찰열이 냉각되지 못하여 급격히 온도상승하고 결국 전차선과 집전판을 열적으로 손상시키므로 이를 방지함과 아울러, 집전판이 고르게 마모되도록 하기 위함이다. 또한 전차선로는 바람에 날리므로 풍속 조건에 따라 선로 횡방향으로 다양한 위치로 움직여 질 수 있으며, 유지보수 상태에 따라서도 위치가 달라진다.

그러나 어떠한 경우든 열차가 집전하기 위해서는 팬터그래프 집전판이 전차선을 벗어나서는 안 된다. 따라서, 전차선과 팬터그래프 집전판 사이에 측면위치(Lateral Position)

에 대한 기술적합성(Compatibility)이 확보되어야 하며, 이를 확보하도록 전차선 설계에 반영하는 것이 무엇보다도 중요하다.

전차선 설계 과정을 보면, 전차선 편위는 기준 데이터(Design Criteria)로 분류하여 미리 확정해 놓게 된다. 이제 전차선과 팬터그래프 집전판 사이의 횡적 위치의 적합성(Compatibility)을 확보하기 위해서는 전차선로 경간을 조정(제한)하는 수밖에 없다. 고속철도의 전차선로 상세설계(실시설계) 과정에는 Pegging Plan(전차선로 평면도 작성)이라는 단계가 있는 이는 전차선로 루트를 놓고 전주 위치를 결정하는 작업을 말하는데 이때 최대 경간길이 계산(최대 경간길이 결정기법)이 사용되며, 최대경간길이 결정기법에 따라 경간을 배치하면 횡적 위치의 적합성이 확보됨과 동시에 최대한 경간길이를 늘릴 수 있어 전철화 공사의 경제성과 효율성을 높일 수 있을 것이다.

다시 말하여, 최대 경간길이 계산(최대 경간길이 결정기법)이란 어떤 선로의 곡선반경, 캔트와 같은 궤도 조건, 바람과 같은 환경 조건, 차량의 유동 특성, 팬터그래프 특성, 전차선로의 편위기준, 유지보수 기준, 설치오차와 같은 여러 설계기준(Design Criteria)들이 이미 결정된 상태에서, 최악 조건하에서 전차선과 팬터그래프의 상대적인 좌우 측면 위치를 수치적으로 검토하는 것을 말한다. 따라서, 최대 경간길이 계산에는 전차선로와 인터페이스가 되는 분야의 모든 제한요소가 반영되어야 하며 계산식에는 이러한 파라미터들이 포함된다.

최대 경간길이를 계산하는 기법은 UIC 606-1 OR에 소개되어 있다. UIC 606-1은 차량과 팬터그래프 특성이 UIC 505-1을, 궤도(Track Bed) 조건이 UIC 505-4를 만족한다는 가정 하에 전차선로의 최대경간을 결정하는 방법에 대하여 기술하고 있다.

또한, 경부고속철도 공급자 제출자료에도 최대 경간길이 계산 기법이 나타나 있다. 이 자료는 위의 UIC 606-1을 기초로 하고 있으나, 풍압으로 인한 전차선 횡변위량(U_d')을 나타내는 수식에 있어서 전차선 편위와 곡선반경효과를 포함하는 수식을 도입하고 있는 점이 다르다.

2. 최대 경간길이 계산식

최대 경간길이 계산은 팬터그래프와 전차선의 횡적 수평위치의 상대적인 관계를 계산하는 것이다. 전차선에는 정상상태에서 편위가 주어진다.(Normal Stagger) 전차선로의 전선은 바람이 불면 날릴 것이며, 전주도 바람이 강하다면 미소하지만 조금 휘어질 것이다(Effect of Wind). 가동브래킷을 비롯하여 전차선로 가선을 지지하고 있는 각종 금구는 정확히 설계대로 설치되지 못하고 일정 오차를 가질 것이며, 유지보수 기간동안 조금씩 틀어질 수 있다(Support Deformation). 팬터그래프는 차량 지붕에 설치되어 있으므로 차량의 횡운동과 연관되어 있으며, 차량은 주행 상태에 따라 횡적 위치(Rolling)가 달라질 것이다(Vehicle Balancement). 따라서, 이런 관계를 검토하는 것이



최대 경간길이 결정 기법이며, 수식으로 표현한 것이 최대 경간길이 계산식이다. 아래 그림은 전차선과 팬터그래프의 상호 횡적 위치관계를 그림으로 설명한 것이다. Factor 중 N값, 즉 전차선로의 횡변위량은 경간길이에 의해 결정되며, 최대 경간길이는 N 값을 제한하는 것이다.

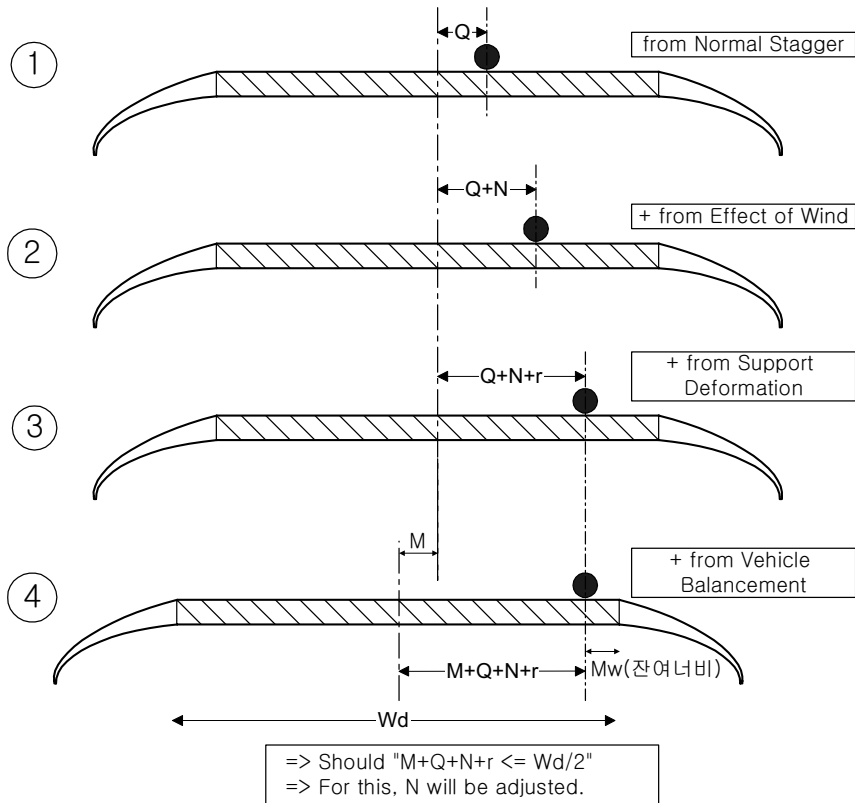


그림 2. 팬터그래프와 전차선의 횡적 위치 상호관계

위 그림에서, Wd 는 팬터그래프가 전기를 받아들일 수 있는 너비(폭, Width, Pantograph Working Zone)를 나타내는 것으로서 팬터그래프 보우(Bow)에 붙어있는 집전판의 길이 보다 큰 값이며, 팬터그래프 잔여부분(Mw)이 허용값보다 작지 않아야 한다.

따라서, 최대 경간길이 계산식은 팬터그래프 집전가능 범위(Pantograph Working Zone) 중 반폭(Half Width)의 잔여 부분(Mw)를 확인하는 방법으로 이루어진다. 반폭(HalfWidth)만 가지고 따지는 이유는 좌우 대칭관계가 성립하므로 계산을 용이하게 하기 위함이다. 최악조건에서 잔여너비(Mw)는 0이상이어야 하며, 이를 만족하는 최대 경간값을 구하는 것이 최대 경간길이 계산식이다. 열차운행시 가산할 수 있는 최악조건은 다음 3가지 경우로 분류될 수 있으며, 각각에 대하여 잔여너비(Mw)를 구하는 공식이 달라진다. 최종적으로 결정되는 최대 경간길이는 3가지 경우에 대하여 모두 잔여

너비(M_w) ≥ 0 이상 조건을 만족하는 경간길이 값 중 최대값이 된다.

(1) 열차가 캔트상에 정지해 있는 경우 M_w

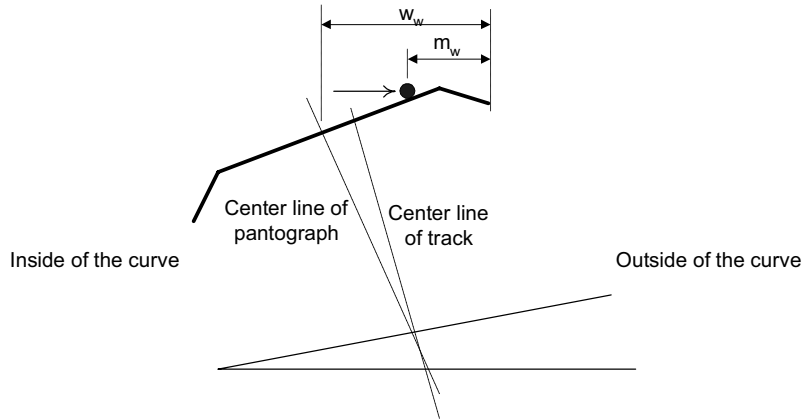


그림 3. 열차정지상태에서 전주 반대측에서의 M_w

잔여너비(M_w) 계산식 :

$$M_w = w_w - e_p - u_{N1} - \frac{l - l_n}{2} - \frac{2.5}{R} - u_{unbE} - \sqrt{T_1^2 + u_c^2 + u_0^2 + u_m^2 + u_i^2 + u_a^2} \quad (1)$$

(2) 최고속도로 열차주행상태에서 곡선 외측으로부터 최대풍압이 작용할 때의 M_w

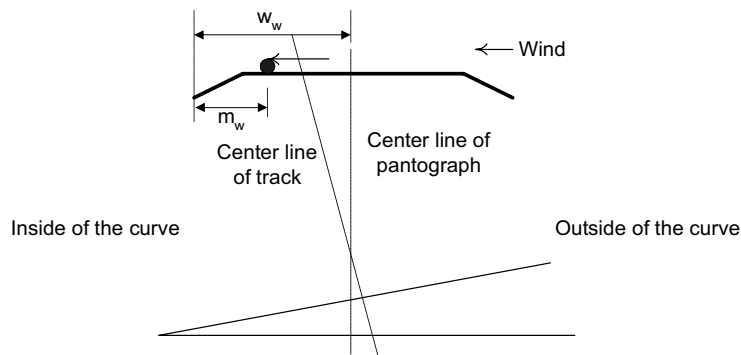


그림 4. 최고속도 열차주행, 곡선외측으로부터 최대풍압이 작용시 M_w

잔여너비(M_w) 계산식 :

$$M_w = w_w - e_p + u_N - \frac{C^2}{8R} - \frac{l - l_n}{2} - \frac{2.5}{R} - u_{unbI} - u_p - \sqrt{T_1^2 + u_c^2 + u_0^2 + u_m^2 + u_i^2 + u_a^2 + u_d'^2} \quad (2)$$



(3) 열차정지상태에서 곡선 내측으로부터 최대풍압이 작용할 때의 Mw

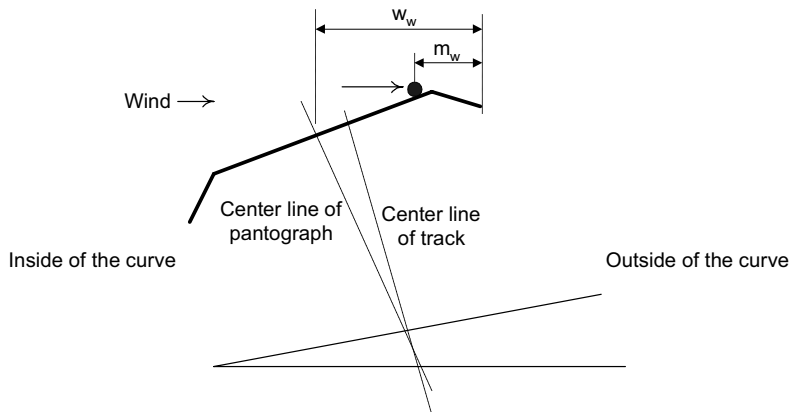


그림 5. 열차정지상태, 곡선내측으로부터 최대풍압이 작용시 Mw

잔여너비(Mw) 계산식 :

$$M_w = w_w - e_p - u_N + \frac{C^2}{8R} - \frac{l - l_n}{2} - \frac{2.5}{R} - u_{unbE} - u_p - \sqrt{T_1^2 + u_c^2 + u_0^2 + u_m^2 + u_t^2 + u_a^2 + u_d'^2} \quad (3)$$

여기서, Mw : 팬터그래프 유효 접촉 운전 Zone의 Half Width의 잔여 너비

ww : 팬터그래프 유효 접촉 운전 Zone의 반폭(Half Width)

ep : 차량특성에 따라 팬터그래프 Bow의 중심축이 궤도중심으로부터 이 탈량

uN : 전주에서 전차선의 편위 절대값(보정하지 않은 값)

uN1 : 2개의 연속 전주에서 1번 전주의 전차선 편위(보정하지 않은 값)

$C^2/8R$: 풍압으로 인한 전차선 횡변위량(전차선 편위와 곡선반경에 의한 복합 영향)

$(l - l_n)/2$: 궤간 허용오차가 주는 영향

$2.5/R$: UIC 505-1에서 규정한 팬터그래프 Bow의 최대 Geometrical Overthrow(팬터그래프가 설치된 기관차에 대하여, 곡선 선로에서 궤도중심과 차량중심의 Offset량이 팬터그래프 설치 위치(주로 Pivot 상부)에 미치는 영향(Offset))

uunbE : 캔트로 인한 전차선 높이에서의 영향

uunbI : 캔트 부족으로 인한 전차선 높이에서의 영향

up : 팬터그래프 압상력의 수평성분에 의한 전차선 이동량

T1 : 대단위 선로보수(Overhaul)가 이루어지기 전까지 궤도의 횡이동에 대한 허용량

uc : 양 레일면 높이(Track Cross Level)에 대한 허용오차가 주는 영향
 $u0$: 차량 회전운동 Rolling에 의한 영향
 um : 전주 횡방향 처짐(Deflection)에 의한 전차선 이동량
 ut : 시공허용오차에 의한 전차선 Offset
 ua : 온도변화로 인한 캔틸레버 회전에 따른 전차선의 횡변위 영향
 ud' : 풍압으로 인한 전차선 횡변위량(전차선 편위와 곡선반경에 의한 복합 영향)

3. UIC 계산식의 각 변수 분석

위의 계산식에 나타난 파라미터에 대해서 선로 분야, 차량 및 팬터그래프 분야, 전차선로 분야로 나누어, 각 변수의 의미 및 수식이 유도된 근거를 분석한다.

3.1 선로 분야

(1) 선로 곡선반경(Radius of the Track) { R }

최대경간을 계산하는 데에는 선로의 곡선반경이 기준 데이터가 되며, 선로곡선반경에 따라 그 구간에서의 최대 설계속도가 정해진다. 설계에서 선로곡선반경은 단계별로 범위를 나누어 관리되며 각 범위에 대해 최대 경간길이를 계산한다.
 경부고속철도의 경우는 다음과 같이 분류하여 설계기준으로 삼고 있다.

표 1. 곡선반경 기준

곡선반경 $R[m]$	설계최고속도(km/h)
∞	350
$\infty > R \geq 20000$	350
$20000 > R \geq 10000$	350
$10000 > R \geq 7000$	350
$7000 > R \geq 4000$	260
$4000 > R \geq 2000$	180
$2000 > R \geq 1000$	135
$1000 > R \geq 750$	115
$750 > R \geq 500$	100
$500 > R \geq 400$	90

(2) 공칭 궤간(Nominal Track Gauge) { ln }

두 레일사이의 거리로서, 보다 정확히는 레일 윗면에서 14mm 아래에서 측정된 레일 두부 내측간 거리이다. 우리나라 표준 궤간은 1.435m이다.



(3) 실제 궤간(Track Gauge) { 1 }

실제궤간은 「공칭 궤간 + 허용 오차」이다. 경부고속철도의 경우 직선선로에서 $l = l_n + 0.006m$, 곡선선로에서 $l = l_n + 0.01m$ 이다.

(4) 캔트/캔트부족(Superelevation/Unbalance)으로 인한 전차선 높이에서의 영향 { u_{unbE} / u_{unbI} }

열차가 곡선구간을 주행시는 열차의 곡선외부로 작용하는 힘과 곡선내부로 작용하는 힘이 평형을 이루도록 바깥측 레일의 높이를 높이는, 즉 궤도에 캔트를 주게 된다. 그러나 실제 선로에서는 계산으로 나온 캔트량보다 적은 캔트값으로 시공하게 되며 이를 캔트부족량(Cant Deficiency)이라 한다. 따라서 열차가 곡선구간에서 정지해 있을 때에는 캔트에 의해 팬터그래프가 안쪽으로 기울어지며 주행할 때에는 캔트부족량 및 열차속도에 따라 팬터그래프의 쓸림이 달라지게 된다. 이러한 캔트량 또는 캔트부족량에 의한 전차선 레벨에서의 팬터그래프의 횡변위 영향을 u_{unbE} , u_{unbI} 이라 한다.

UIC 505 Series에서 건축한계(Construction Gauges)와 차량한계(Kinematic Vehicle Gauges)에 대한 규정에서 이미 캔트부족량에 의한 영향을 고려하여 차체 존(Zone)과 팬터그래프 존(Zone)에서의 Reference Outline이 규정되어 있으며, 이 Reference Outline에서 고려된 기준 캔트/캔트부족량과 실제 사용하는 캔트/캔트부족량의 차이에 따른 영향을 전차선 레벨의 횡변위량으로 구하기 위한 식이 다음이 된다.

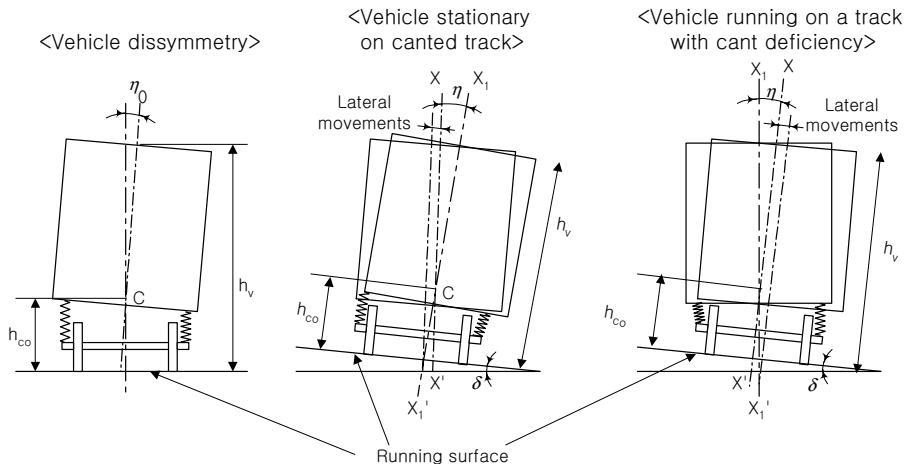


그림 6. 캔트/캔트부족량에 의한 영향

열차가 정지시 :

$$u_{unbE} = \frac{S_0'(h - h_{co})}{d_e} (E - E_0') \quad (4)$$

최고속도로 열차 주행시 :

$$u_{unbl} = \frac{S_0'(h - h_{co})}{d_e} (I - I_0') \quad (5)$$

여기서, E, I : 궤도의 캔트량(Superelevation), 캔트부족량(Unbalance, Cant Deficiency)

h : 접촉점(팬터그래프와 전차선의) 높이

de : 좌우 차륜중심점사이 거리 (UIC 606-1 OR로부터 표준값으로 de = 1.5 m)

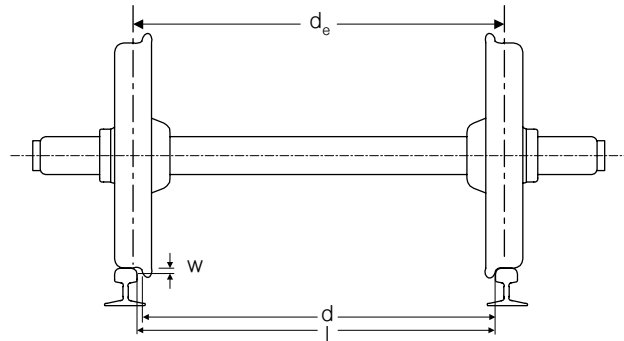


그림 7. 차륜 중심점사이 거리

hco : 기관차의 요동중심점(Roll Center of Locomotive)의 높이 (UIC 606-1 OR로부터 hco = 0.5 m)

S0' : 팬터그래프가 달린 기관차의 틸팅도 계수에 대한 전형값 (UIC 606-1 OR로부터 표준값으로 S0' = 0.225 (미터단위계))

E0', I0' : 팬터그래프 존에서의 Reference Outline에서 이미 고려된 기준 캔트/캔트부족량 (UIC 606-1 OR로부터 E0' 또는 I0' = 0.066 m)

uunbE 또는 uunbI는 0보다 작아서는 안된다. 따라서 캔트/캔트부족량이 기준값보다 작을 때에는 0로 두어야 한다. 즉,

$$uunbE = 0 \quad \text{if } E \leq 0.066 \text{ m}$$

$$uunbI = 0 \quad \text{if } I \leq 0.066 \text{ m}$$

(5) 캔트/캔트부족량(Superelevation/Unbalance) { E / I }

규정 캔트는 원심력과 중력과의 합력선이 궤간의 중앙부에 작용하게 되는 캔트량을 말하며, 실제로는 이보다 작은 캔트를 주게 되는데 그 차이를 캔트 부족량이라 한다. 경부고속철도에서 적용하는 캔트, 즉 실제 캔트에 대한 적용 공식은 다음과 같다.

$$C = 11.8 \frac{V^2}{R} - C_d \quad (6)$$



여기서, C : 캔트(mm)

V : 열차속도(km/h)

R : 곡선반경(m)

Cd : 캔트 부족(mm)

따라서 경부고속철도에서 실제 캔트(Cant, Superelevation) E / 캔트 부족량(Cant Deficiency, Unbalance) I 에 대한 기준은 다음 표와 같이 된다.

표 2. Seperelevation과 Unbalance 기준

곡선반경(m)	최대속도(km/h)	Superelevation E (mm)	Unbalance I (mm)
∞	350	0	0
20000	350	53	19
10000	350	106	39
7000	350	152	55
4000	260	180	19
2000	180	180	11
1000	135	180	35
750	115	180	28
500	100	180	56
400	90	180	59

(6) 양 레일면 높이(Track Cross Level)에 대한 허용오차가 주는 영향 { uc }

양쪽 레일의 높이는 직선구간에서 같은 높이이거나, 곡선구간에서 캔트값대로 설치되어 있어야 하나, 실제 시공이나 운영중에 설계값과 달라질 수 있으며 이런 범위를 허용오차(Tolerance)로 규정하고 있으므로 이 허용오차에 의한 전차선 레벨에서의 영향에 대한 값을 반영한다.

레일경사에 의한 차량측의 영향은 차륜중심간격을 기준으로 결정되며, 경사도에 의한 기관차의 틸팅 영향은 Roll Center로부터의 높이에 비례하므로 산출식은 다음과 같아진다.

$$u_c = \frac{t_2}{d_e} [h(1 + S_0') - S_0' h_{co}] \quad (7)$$

여기서, h : 접촉점 높이

d_e : 좌우 차륜중심점사이 거리 ($d_e = 1.5m$)

h_{co} : 기관차의 요동중심점(Roll Center of Locomotive)의 높이
($h_{co}=0.5m$)

t_2 : 궤도의 캔트 허용오차

S_0' : 팬터그래프가 달린 기관차의 틸팅도 계수에 대한 전형값

($S_0'=0.225$)

- (7) 대단위 선로보수(Overhaul)가 이루어지기 전까지 궤도의 횡이동에 대한 허용량 { T1 }
UIC 606-1 OR에 일반적인 값으로 T1 = 0.025 m가 제시되어 있다.

3.2 차량 및 팬터그래프 분야

- (1) 팬터그래프 유효 운전 존의 반폭(Half-width of Pantograph Working Zone) { ww }
팬터그래프 보우(Bow, 주체)는 세 부분으로 되어있다. 카본 또는 금속카본으로 만들어진 마모집전판(Wear Strips)과 금속 재질의 연결판(Connection Strips)과 절연성 재질의 가이드(Horn)으로 구성되어있다.

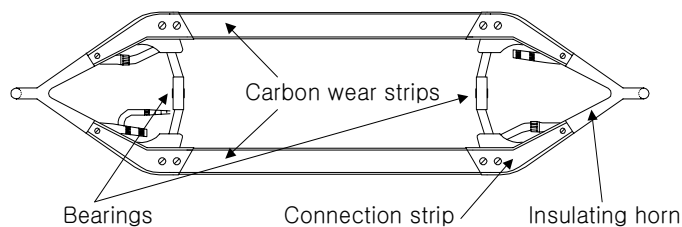


그림 8. 팬터그래프 Bow [GPU 25kV] (Top View)

마모집전판은 주로 탄소 재질로서 주기적 교체해 주는 부위로서 전차선과 접촉 습동하는 주 부위이며, 연결판은 전차선이 풍압에 의해 날릴 때나 3 Catenary가 설치되는 분기구간 등 특수구간에서 전차선과 접촉하며 이 때도 정상적으로 집전이 가능하다, 그러나 가이드(Horn) 부분은 절연체로서 팬터그래프가 전차선과 엉키지 않도록 하기 위한 목적으로 설치되어 있다.

따라서 팬터그래프 유효 운전 너비(Pantograph Working Zone)는 마모집전판과 연결집전판을 합친 너비에 해당한다.

경부고속차량인 KTX에 장착된 GPU타입 팬터그래프에 대한 제원은 <그림 9>와 같다.

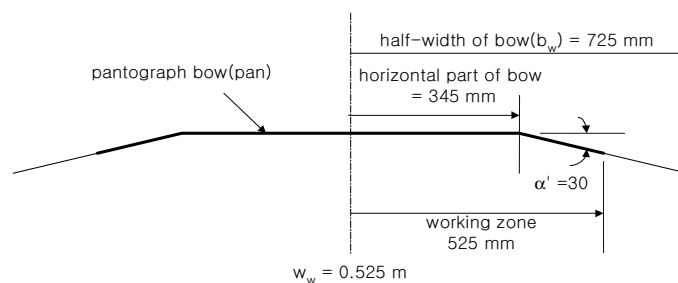


그림 9. Pantograph Working Zone



(2) 차량특성에 따라 팬터그래프 Bow의 중심축이 궤도중심으로부터 이탈량 (Off-center of the Pantograph Bow due to Vehicle Characteristics) { ep }

차량이 경사진(Cant가 있는) 선로위에 위치했을 때에는 중력이나 원심력에 의한 회전(Rolling)이 일어나기 전에 먼저 차량의 횡방향(Lateral) 이동이 일어나며, 아울러 팬터그래프에서도 조립부의 베어링 부위 등에서 횡변위가 발생한다(<그림 8> 참조). 이러한 차량 및 팬터그래프의 유동특성(Flexibility) 등에 따라 팬터그래프의 Bow 중심축이 궤도중심(Center Line of Track)으로부터 벗어나 이동하게 되는 양을 팬터그래프 잔류너비 계산에서도 반영해야 하며, UIC 505-4에 의해 하부검증높이와 상부검증높이에서의 팬터그래프 프로파일(Pantograph Reference Profile)이 규정되어 있으므로,

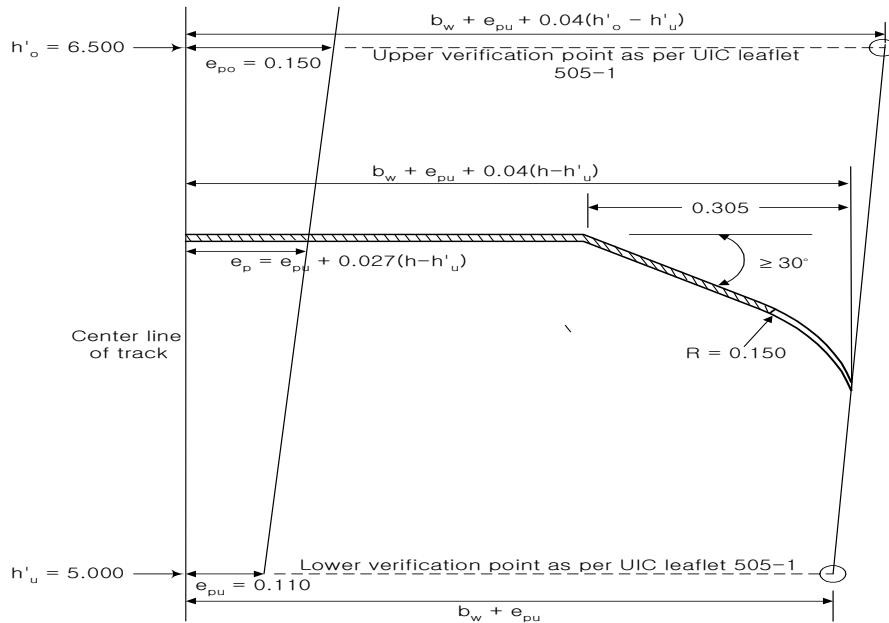


그림 10. Reference Outline for Pantograph

어떤 높이에서의 ep값은 <식 (8)>과 같이 높이에 따른 비례식으로 구하면 된다.

$$e_p = e_{pu} + \frac{(h - h'_u)}{(h'_o - h'_u)} (e_{po} - e_{pu}) \quad (8)$$

여기서, h : 접촉점 높이

h'u : 하부 Verification Point의 높이 (UIC 606-1 OR로부터 h'u = 5.0m)

h'o : 상부 Verification Point의 높이 (UIC 606-1 OR로부터 h'o = 6.5m)

epu : 하부 Verification Point의 ep (UIC 606-1 OR로부터 epu = 0.11m)

epo : 상부 Verification Point의 ep (UIC 606-1 OR로부터 epo = 0.15m)

<그림 10>에서 보면 상부검증높이에서의 팬터그래프 Reference Profile은 $e_{pu} + 0.04(h'_o - h'_u)$ 로부터 계산해 보면 0.170m이나 이것은 Bow의 Half-width(bw)에 대한 값이다. 그런데 epo는 유효 운전 존의 반폭(ww)에 대한 값을 요구하므로 비율만큼 줄어든 $e_{pu} + 0.027(h'_o - h'_u)$ 에 따라 계산해야 한다.

(3) 팬터그래프 압상력의 수평성분에 의한 전차선 이동량 { up }

팬터그래프 Bow는 30도 이내로 기울어진 경사진 부위(Sloping Part)를 갖는다. 이 경사진 부분에 전차선이 위치하게 되면 팬터그래프가 전차선을 수직으로 밀어올리는 힘, 즉 압상력 K중 일부의 힘 F가 전차선에 횡방향으로 작용한다. 이 힘이 전차선을 횡방향으로 밀어내게 되며 따라서 잔류너비가 줄어들게 된다. 이 압상력의 수평분력에 의한 전차선의 이동량을 up라 한다.

$$u_p = \frac{C \cdot F}{4 Z_{fd}} = \frac{C \cdot K \cdot \tan(\alpha'')}{4 Z_{fd}} \quad (9)$$

여기서, C : 경간 길이

F : 팬터그래프 압상력의 수평성분

Z_{fd} : 전차선 장력

K : 팬터그래프 압상력

α'' : 수평면에 대한 Sloping Part of Bow의 각도

<식 (9)>는 경간중앙에서 계산한 값 즉 최대값이며 전차선이 경사면에 걸림으로 인해 횡방향력이 반으로 줄어드는 것으로 보고 유도한 식이다. 한편, 수평면에 대한 Bow Sloping Part의 각도(α'')는 Cant를 고려하여 <그림 11, 12>와 같이 설명할 수 있다.

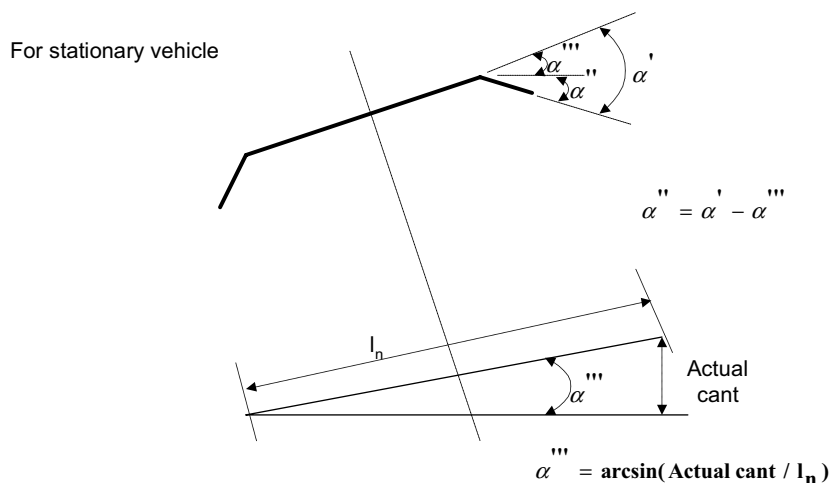


그림 11. 열차정지상태에서 Sloping part of bow의 각도에 대한 설명



For vehicle running at maximum speed

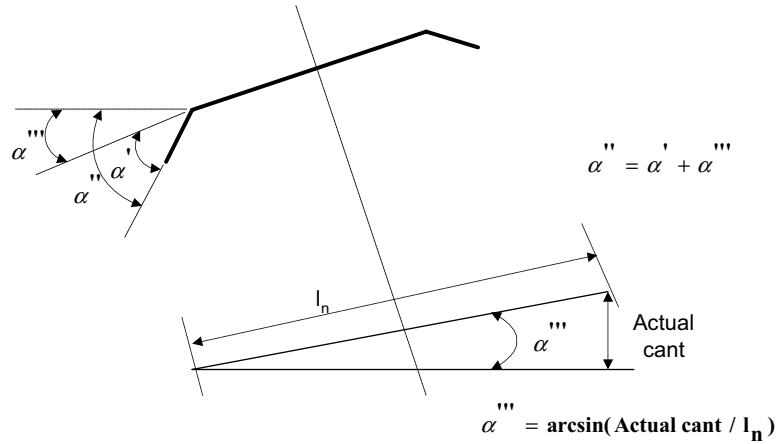


그림 12. 최고속도에서 Sloping Part of Bow의 각도

(4) 팬터그래프 압상력 { K }

팬터그래프가 전차선을 밀어올리는 수직 힘으로서, 경부고속철도에서 사용되는 GPU 팬터그래프의 압상력은 다음 공식으로 나타내 진다.

$$K = 70 + 17.28 \times 10^{-3} V^2 \quad (N), \quad V: \text{열차속도 (m/s)} \quad (10)$$

따라서, 300km/h의 최고속도에서 190[N]이고, 운전속도에 따라 압상력이 결정되며, 곡선반경이 작은 구간에서는 운전속도가 작으므로 압상력도 작아진다. <표 3>에서 곡선반경에 따른 압상력의 예를 보여준다.

표 3. 팬터그래프 압상력

곡선반경 (m)	운전최고속도 (km/h)	압상력 K (N)
4000	260	160
2000	180	114
1000	135	95
750	115	88
500	100	84
400	90	81
열차 정지상태	0	70

(6) 차량 회전운동 Rolling에 의한 영향 { uo }

차량은 주행 롤링진동(Rolling)을 하게 되며 이 운동은 대차의 스프링특성 등에 따라 차체가 중력중심점(Roll Center)을 중심으로 좌우 회전진동하게 되며 이에 의한 팬터그래프 접촉점 높이에서의 횡이동의 영향이 uo이다.

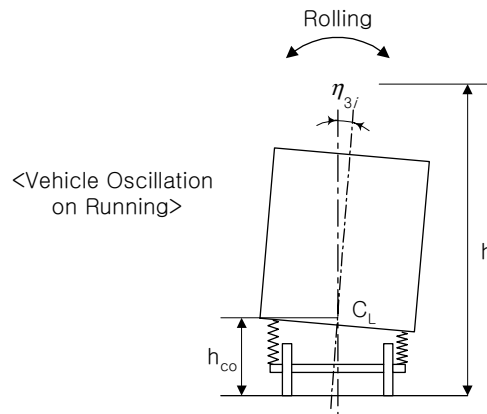


그림 13. 차량주행시 횡운동(Rolling)

$$u_o = (h - h_{co}) \tan(\eta_{3i}) \quad (11)$$

여기서, h : 접촉점 높이

h_{co} : 기관차의 Roll Center 높이 (h_{co} = 0.5m)

η_{3i} : 차량의 동요(Oscillation)의 각도 (UIC 505-4로부터 η_{3i} = 0.6°)

3.3 전차선로 분야

(1) 접촉점 높이 { h }

팬터그래프와 전차선이 접촉하는 높이를 레일면으로부터 계산한 높이로서, 열차가 정지상태에서는 정적압상력에 의한 영향을 무시하면 전차선 높이에 해당하나 열차가 주행시는 팬터그래프의 양력이 전차선을 밀어올리므로 접촉점 높이가 상승한다. 경부고속철도의 경우 정적 높이는 5.08 m이나, 300 km/h로 주행시 9~12 cm 정도 팬터그래프에 의하여 압상되고 바람의 영향 등을 고려하여 동적 높이는 정적높이보다 20cm 정도 높여 잡아 5.28m로 설계에 적용하고 있다.

철도청 기존선인 경부선이나 호남선의 경우는 속도가 낮으므로 다음의 기준을 적용함이 타당한 것으로 사료된다.

- 정지 및 저속에서 전차선 높이 : 5.20m
- 최고속도로 주행시 전차선 높이 : 5.25m

(2) 전주 움직임에 의한 전차선 이동량 { u_m }

UIC 606-1 OR에서 다음에 의한 전주의 횡방향 처짐(Deflection)을 고려에 넣도록 하고 있다.

- 기초의 이동
- 고정 지지물, 케이블, 와이어로 인해 작용하는 하중
- 정적



- 온도의 변화에 의한 하중의 변동
- 전선 등 부속품의 추가 또는 제거로 인한 하중의 변동
- 선로를 기준으로 각방향으로 부는 바람에 의한 영향

여기서 기초의 이동과 부속품의 추가 또는 제거로 인한 하중의 영향은 일반적으로 현장에서 Offset을 조정함으로써 보상함으로써 바람에 의한 영향과 지지물에 설치된 전선의 인장 응력의 변동에 의한 영향만이 고려될 필요가 있다. 경부고속철도의 경우 0.055m이내로 기준을 잡고 있다.

(3) 경간 중앙에서의 편위값 { u_N }

$$u_N = \frac{u_{N1} + u_{N2}}{2} \quad (12)$$

여기서, u_{N1} , u_{N2} : 양단 전주에서의 편위값. 곡선외측이 +값

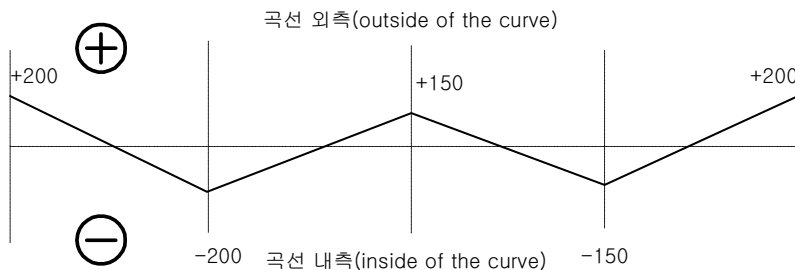


그림 14. 편위 부호 표기 원칙

(4) 경간길이 { C }

이 전차선로 경간 길이에는 설치오차가 포함된 값이다. 경부고속철도의 경우 설치오차는 $\pm 0.5m$ 를 고려해 주고 있다.

(5) 시공허용오차에 의한 전차선 Offset { u_t }

이 오차에는 설치시 부정확성뿐만 아니라, 어떤 부속품을 계속적으로 조정할 수 없는 관계로 인한 틀어짐도 고려해야 한다. 즉 캔티레버와 같이 정해진 주기로 조정하는 설비에 대해서 주기 조정이 이루어지기 전까지 변화 허용량에 대한 값도 고려에 넣어야 한다. 경부고속철도의 경우 0.02m이다.

(6) 온도변화로 인한 캔티레버 회전에 따른 전차선의 횡변위 영향 { u_a }

온도가 변하면 전선의 길이가 길어지거나 줄어들게 되고 이로 인해 캔티레버(Cantilever)가 회전하게 된다. 이것은 전차선의 횡방향 변위에 영향을 미쳐 횡방향 위치를 이동시킨다. 이 이동의 크기는 인류지점으로부터 해당 전주까지의 거리 및 온도 변화량에 좌우된다.

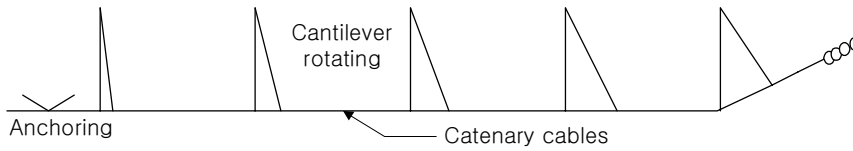


그림 15. 온도변화에 따른 캔티레버의 회전량 누증

전차선 횡변위에 대한 영향은 전선의 신축길이량이 비례하고 캔티레버의 길이에 반비례하므로 <식 (13)>으로 표현되며 캔티레버는 평균온도에서 캔티레버가 선로에 대해 수직임을 가정하였다. 아울러 지지점의 형태에 따라 캔티레버가 이동되는 경우에는 고려에 넣어야 한다. 또한 온도와 캔티레버 길이가 다른 터널구간은 일반구간과 구별하여 산출한다.

$$u_a = \frac{\left[17 \times 10^{-6} n_f \frac{\Delta t}{2} \right]^2}{2a_s} \quad (13)$$

여기서, Δt : 온도 범위

n_f : 흐름방지전주로부터 거리

a_s : 캔티레버의 공칭길이(전주면에서 전차선 중심축까지 거리)

온도범위(Δt)는 경부고속철도 설계의 경우 일반구간(외부지역)에서 $95^{\circ}\text{C}(-35^{\circ}\text{C} \sim 60^{\circ}\text{C})$, 터널에서 $\Delta t = 60^{\circ}\text{C}$ 로 기준을 정하고 있다.

(7) 풍압으로 인한 전차선 횡변위량 $\{u_d'\}$

바람이 Catenary에 작용할 때 전차선을 비롯한 Catenary 전선은 횡방향으로 날리며 이때 발생하는 전차선 변위에 대한 내용은 매우 복잡한 양상으로 나타난다.

UIC 606-1에는 바람에 의한 전차선 횡변위량이 <식 (14)>로 표현되어 있다.

$$u_d' = u_d + \frac{(u_{N1} + u_{N2})^2}{16 u_d} + \frac{(u_{N1} - u_{N2})}{2} \quad (14)$$

여기서, u_{N1}, u_{N2} : 경간 좌우편위. 곡선 외측일 때 -값

C : 경간 길이(m)

R : 선로 곡선반경(m)

u_d : 풍압에 의한 Catenary 처짐량(직선구간에서 편위를 고려하지 않은 상태). <식 (15)>로 표현된다.

$$u_d = \frac{q_w e A C^2}{8 Z_f} = \frac{\gamma \frac{v^2}{2g} e A C^2}{8 Z_f} \quad (15)$$

여기서, e : Catenary 전선의 Drag 계수 (UIC 606-1 OR로부터 $e = 1.25$)

A : Catenary 전선 직경(전차선 직경 + 조가선 직경)



Zf : Catenary 장력(전차선 장력 + 조가선 장력)

qw : Catenary 전선에 작용하는 동풍압. <식 (16)>으로 표현된다.

$$q_w = \gamma v^2 / 2g \quad (16)$$

v : 풍속

γ : 공기의 비중 (UIC 606-1 OR로부터 $\gamma = 11.5\text{N/m}^3$)

g : 중력가속도 (UIC 606-1 OR로부터 $g = 9.81\text{m/s}^2$)

한편, 경부고속철도 공급자 제출자료에는 바람에 의한 전차선 횡변위가 <식 (17)>로 표현되어있다.

$$u_d' = u_d + \frac{(u_{N1} - u_{N2})^2}{16 \left[u_d - \text{sgn} \left(\frac{C^2}{8R} \right) \right]} \quad \text{when } u_d \neq \text{sgn} \left(\frac{C^2}{8R} \right) \quad (17)$$

여기서, sgn : 바람이 곡선내측으로 불때 -1, 바람이 곡선외측으로 불때 +1

uN1, uN2 : 경간 좌우편위. 곡선외측일 때 +값

경부고속철도 공급자 제출자료와 UIC 606-1를 비교 검토 해보면, 우선 UIC 식에는 편위의 중심선 이동량 $((u_{N2} - u_{N1})/2)$ 과 곡선반경의 최대 Offset값 $(C^2/8R)$ 이 전차선 횡변위량에는 제외되어 있다. 그러나, 다른 항에 포함되어 있으므로 최종적인 계산 결과 값은 경부고속철도 공급자 제출자료에서와 동일할 것이다. 다음으로, 경부고속철도 공급자 제출자료에 나타나 수식에는 전차선 편위와 곡선반경 효과를 수식에 포함하고 있다는 점이 다르다. 즉, UIC 수식과 경부고속철도 공급자 제출자료 수식은 직선구간에서 대해서는 동일한 결과 값을 내지만 곡선구간에서는 달라질 것이다.

4. 바람에 의한 전차선 횡변위 계산 알고리즘

4.1 풍압을 받는 전차선의 형상(곡선)에 대한 기본방정식

양단이 고정되고 직선 형상으로 있는 전차선에 바람이 불어 전차선이 날리는 경우를 생각해 보자. 풍압을 받은 전차선은 양단이 고정되어 있으므로 가운데가 풍압을 받아 불룩해진다. 이 형상은 양단이 고정된 전선이 자중에 의하여 처지는 형상과 동일하므로 이 곡선은 쌍곡선 함수(Hyperbolic Function) 형태로 표현되는 Catenary 곡선이다. 이 곡선을 일반적으로 2차 포물선 방정식으로 근사화하여 표현할 수 있으므로, 풍압에 의해 처진 전차선 곡선을 <식 (18)>로 표현할 수 있다. 여기서 W는 전차선 자중 대신 전차선에 작용하는 수평하중으로 단위길이당 풍압[N/m]이 된다. T는 그대로 전차선 장력이다.

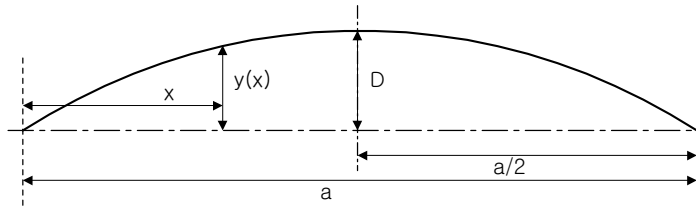


그림 16. 바람에 날리는 Catenary

$$y(x) = \frac{W}{2T} x(a-x) \quad (18)$$

이 식으로부터 중앙의 최대 처짐은 다음과 같다.

$$D = y\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{W}{2T} \frac{a}{2} \left(a - \frac{a}{2}\right) = \frac{Wa^2}{8T} \quad (19)$$

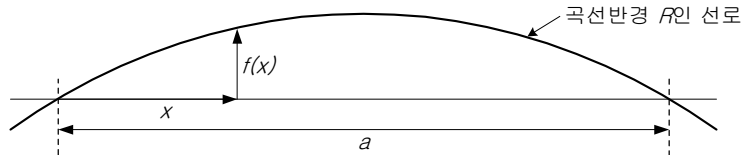


그림 17. 곡선반경 R인 선로

또한, <그림 19>와 같은 곡선반경 R을 가진 선로의 기하학적 위치관계에 대해서도 <식 (18)>과 같은 형태의 방정식의 적용이 가능하다.

$$f(x) = \frac{1}{2R} x(a-x) \quad (20)$$

<식(20)>을 증명하고 이 방정식에 개입된 오차 정도를 확인해 보자. 먼저 <식 (20)> 으로부터 중앙에서의 변위 값을 구해보자.

$$f\left(\frac{a}{2}\right) = \frac{1}{2R} \frac{a}{2} \left(a - \frac{a}{2}\right) = \frac{a^2}{8R} \quad (21)$$

한편 곡선선로에서의 기하학적 관계에 관한 <그림 18>으로부터

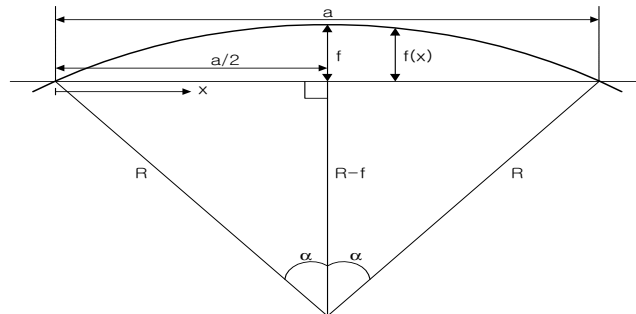


그림 18. 곡선선로에서의 기하학적 관계



$$\sin\alpha = \frac{a/2}{R}, \quad \cos\alpha = \frac{R-f}{R}$$

이를 $\cos^2\alpha + \sin^2\alpha = 1$ 에 대입

$$\left(\frac{R-f}{R}\right)^2 + \left(\frac{a/2}{R}\right)^2 = 1$$

$$\frac{2}{R}f = \frac{f^2}{R^2} + \frac{a^2}{4R^2}$$

따라서, $f \ll R$ 이어서 $\frac{f^2}{R^2} \approx 0$ 로 하면 $f = \frac{a^2}{8R}$ 이 된다. 그러므로 반경에 비해 Span 길이가 작은 경우에 오차는 거의 무시할 수 있다.

4.2 양단 편위가 같은 경우의 전차선 곡선 및 횡변위량

전차선로의 양쪽 전주에서의 편위가 같은 경우는 바람에 의한 최대처짐(변위)은 경간 중앙에서 발생하게 되며, 이 경우의 곡선반경과 편위 및 바람에 의한 변위사이의 관계를 유도해보자.

(1) 바람이 곡선의 내측 방향으로 부는 경우

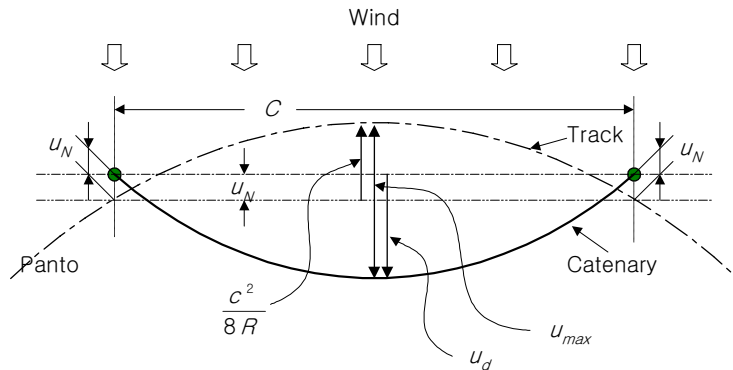


그림 19. 바람이 선로 내측으로 부는 경우 Catenary 변위

- u_N : 전주점에서의 전차선의 편위(Nominal Offset) [m]
- u_{max} : 경간내에서 선로중심으로부터 이탈되는 전차선 최대 처짐량 [m]
- Z_f : 커티너리의 기계적 장력 [N]
- C : 경간길이 [m]
- 바람에 의한 커티너리에서의 유효 작용력 [N]
- F_w : 즉, $F_w = \text{풍압}(q_w) \times \text{Drag계수}(e) \times \text{Catenary 전선의 유효직경}(A)$
- u_d : 바람에 의한 Catenary 최대 처짐(변위)량 [m]
- u_R : 일정경간의 곡선반경내 최대 변위 [m] ($u_R = c^2/8R$: <식 (21)> 참조)

풍압에 의한 Catenary 변위의 최대는 경간중앙에서 발생되며 <식 (19)>로부터

$$u_d = \frac{F_f C^2}{8Z_f} \quad (22)$$

<그림 19>로부터

$$u_{\max} = \frac{C^2}{8R} + u_d - u_N \quad (23)$$

위 식을 C에 관하여 정리하면 다음과 같다.

$$C = \sqrt{\frac{8RZ_f(u_N + u_{\max})}{F_w R + Z_f}} \quad (24)$$

위 식은 UIC 606-1 OR의 1.3.1절에서 Curve Radius, Off-set, Blow-off사이의 관계식으로 소개되어 있다.

(2) 바람이 곡선의 외측방향으로 부는 경우

아래 그림을 참조하여 같은 방법으로 유도하면 <식 (25)>을 얻을 수 있다.

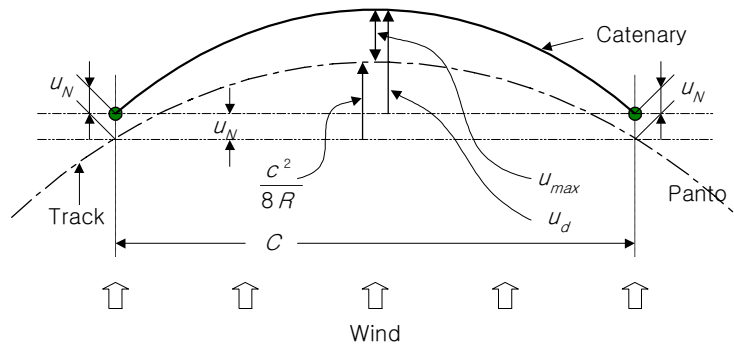


그림 20. 바람이 선로 외측으로 부는 경우 Catenary 변위

$$u_{\max} = u_d - \frac{C^2}{8R} + u_N \quad (25)$$

4.3 양단 편위가 다른 경우를 포함하는 전차선 횡변위 관계식

이제까지는 전차선로 경간의 좌우 편위가 같은 경우 대하여 다루었으나 실제로는 곡선선로에서 좌우 전주에서의 편위가 다르도록 주어지게 된다. 좌우 전주에서의 편위가 다르다면 Catenary는 회전 이동한 형상이 되고 따라서 최대변위가 발생하는 위치가 중앙이 아닌 다른 곳으로 이동하므로 복잡해진다. 그러나 이 경우에 대한 변위식이 일반식이 되므로 알아두어야 한다.

서로 다른 편위가 주어진 상태에서 최대처짐이 발생하는 지점의 위치와 전차선의 최대 Off-set를 구해보자.



(1) 바람이 곡선의 외측 방향으로 부는 경우

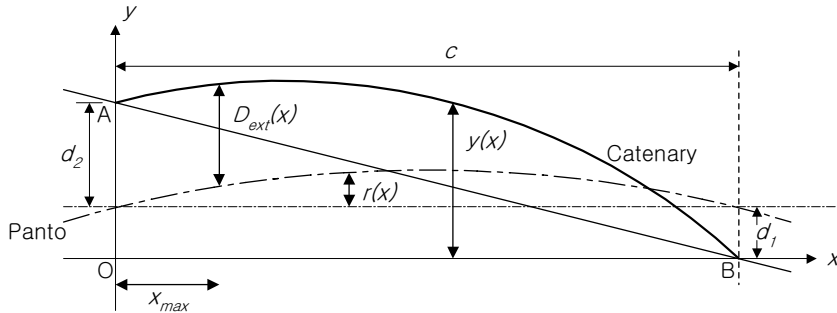


그림 21. 바람이 곡선 외측으로 부는 경우 Catenary 변위

A점과 B점사이 Catenary는 $(d_1+d_2)/C$ 만큼 기울어진 형상이 되고 x, y 좌표축의 영점 O를 <그림 21>과 같이 잡으면 Catenary 변위 $y(x)$ 는 <식 (18)>과 A-B기울기를 조합하여

$$y(x) = \frac{F_w}{2T}x(c-x) + \frac{d_1+d_2}{c}(c-x) \quad (26)$$

선로중심선의 변위 $r(x)$ 는 <식 (20)>로부터

$$r(x) = \frac{1}{2R}x(c-x) \quad (27)$$

팬터그래프는 궤도중심을 따라가므로 팬터그래프 중심축으로부터 Catenary가 벗어나는 값 $D_{ext}(x)$ 는

$$\begin{aligned} D_{ext}(x) &= y(x) - r(x) - d_1 \\ &= \frac{F_w}{2T}x(c-x) + \frac{d_1+d_2}{c}(c-x) - \frac{x(c-x)}{2R} - d_1 \end{aligned} \quad (28)$$

앞 절에서 u_d 와 u_R 를 다음과 같이 정의하였으므로

$$u_d = \frac{F_w c^2}{8T} \Rightarrow \frac{F_w}{2T} = \frac{4u_d}{c^2} \quad (29)$$

$$u_R = \frac{c^2}{8R} \Rightarrow \frac{1}{2R} = \frac{4u_R}{c^2}$$

<식 (28)> 의 계수를 u_d 와 u_R 에 관한 것으로 대치하고, $d_1+d_2=d$ 로 두면

$$D_{ext}(x) = \frac{4u_d}{c^2}x(c-x) + \frac{d}{c}(c-x) - \frac{4u_R}{c^2}x(c-x) - d_1 \quad (30)$$

최대가 되는 지점 x 를 구하기 위해 $D_{ext}(x)$ 를 미분하여 0으로 두면

$$D_{ext}'(x) = \frac{4u_d}{c^2}(c-2x) - \frac{d}{c} - \frac{4u_R}{c^2}(c-2x) = 0 \quad (31)$$

<식 (31)>로부터 구한 x 값을 x_{\max} 라 하면

$$x_{\max} = \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d - u_R)} \quad (32)$$

이 x_{\max} 값을 <식 (30)>에 대입하면 펜터그래프 중심축으로부터의 전차선의 최대 Off-set을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} D_{ext}(x_{\max}) = & \frac{4u_d}{c^2} \left[c \left\{ \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d - u_R)} \right\} - \left\{ \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d - u_R)} \right\}^2 \right] \\ & + \frac{d}{c} \left[c - \left\{ \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d - u_R)} \right\} \right] \\ & - \frac{4u_R}{c^2} \left[c \left\{ \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d - u_R)} \right\} - \left\{ \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d - u_R)} \right\}^2 \right] - d_1 \end{aligned} \quad (33)$$

<식 (33)>을 정리하면 다음 식을 얻는다.

$$D_{ext}(x_{\max}) = u_d + \frac{d_2 + d_1}{16(u_d - u_R)} + \frac{d_2 - d_1}{2} - u_R \quad (34)$$

<식 (34)>에서 첫 번째와 두 번째항은 방향을 가지는 벡터량으로서 경간길이 결정을 위한 Pantograph Working Zone의 잔여너비를 계산하는 식에서 Root 안으로 들어가는 항이 되고 세 번째와 네 번째항은 직접적으로 잔여너비에 영향을 미치는 Factor가 된다.

UIC 606-1 OR에 소개되어 있는 바람에 의한 Catenary Off-set 식

$$u_d' = u_d + \frac{(u_{N1} + u_{N2})^2}{16u_d} + \frac{(u_{N1} - u_{N2})}{2} \quad (35)$$

은 직선선로에 대한 것으로 선로의 곡선반경을 고려하지 않은 식이다.

(2) 바람이 곡선의 내측 방향으로 부는 경우

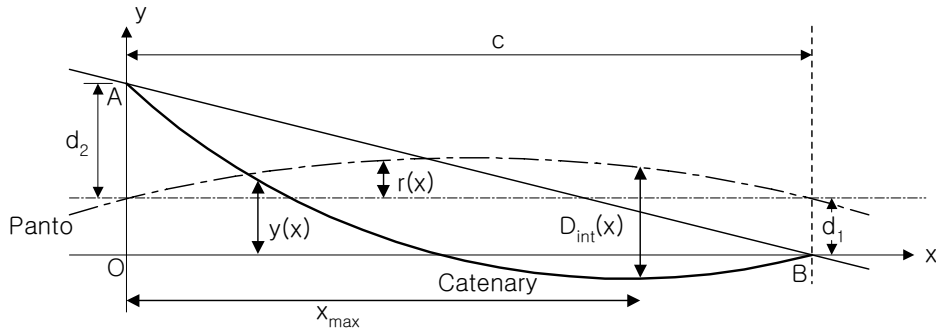


그림 22. 바람이 곡선 내측으로 부는 경우 Catenary 변위

x, y 좌표축의 영점 O를 <그림 22>과 같이 잡으면 A와 B사이 Catenary는

$$y(x) = -\frac{F_w}{2T} x(c-x) + \frac{d_1+d_2}{c}(c-x) \quad (36)$$

이 되고 팬티그래프 중심축(궤도중심)으로부터 Catenary가 벗어나는 값 $D_{int}(x)$ 는

$$D_{int}(x) = r(x) + d_1 - y(x) \quad (37)$$

$$= \frac{1}{2R}x(c-x) + d_1 + \frac{F_w}{2T}x(c-x) - \frac{d_1+d_2}{c}(c-x)$$

계수를 u_d 와 u_R 로 대치하고 $d_1+d_2=d$ 로 두고, $D_{int}'(x) = 0$ 하여 최대가 되는 지점 x_{max} 를 구하면

$$x_{max} = \frac{c}{2} + \frac{cd}{8(u_d+u_R)} \quad (38)$$

이 x 값을 <식 (37)>에 대입하여 팬티그래프 중심축으로부터 전차선 최대 Off-set을 구하면 다음 식이 된다.

$$D_{int}(x_{max}) = u_d + \frac{d_2+d_1}{16(u_d+u_R)} - \frac{d_2-d_1}{2} + u_R \quad (39)$$

4.4 전차선 횡변위 관계식에 대한 고찰

전차선 횡변위 관계식을 사용함에 있어서 중요한 제한 조건이 빠진 것을 눈치챌 수 있다. 즉, 전차선은 양단이 고정되어 있으므로, 유도한 횡변위 식은 경간 내에서만 유효하고 경간을 벗어난 지점에서는 유효하지 않다는 것이다. 이것은 전차선 횡변위 식이 최대 처짐이 발생하는 지점에 대한 변수(x_{max})를 대입하여 얻어지며, 이 x_{max} 에 관한 방정식은 u_d 와 u_R 을 포함하는 수식을 미분하여 얻어지므로 실제 상황에 맞지 않는 값이 개입될 수 있기 때문이다. 따라서 횡변위 식을 적용하기 전에 x_{max} 를 먼저 계산하여 확인해 보아야 하며, x_{max} 가 경간 범위를 벗어날 때는 양단 고정 지점에서의 횡변위량(=편위값)을 사용해야 한다는 것을 파악할 수 있다. 이를 수식으로 표현하면 다음과 같다.

(1) 바람이 곡선의 외측 방향으로 부는 경우

① $0 \leq x_1 \leq C$ 일 때

$$D_{ext}(x_1) = u_d + \frac{d_2+d_1}{16(u_d-u_R)} + \frac{d_2-d_1}{2} - u_R \quad (40)$$

② $x_1 < 0$ 또는 $x_1 > C$ 일 때 $D_{ext}(x_1) = d_2 \quad (d_2 \geq |d_1|)$

여기서, x_1 은 최대 변위(Maximum Offset)가 발생하는 지점의 x 축 상 거리(x_{max})

로서 다음 식으로 구한다. $x_1 = \frac{c}{2} - \frac{cd}{8(u_d-u_R)}$ (41)

(2) 바람이 곡선의 내측 방향으로 부는 경우

① $0 \leq x_2 \leq C$ 일 때

$$D_{int}(x_2) = u_d + \frac{d_2 + d_1}{16(u_d + u_R)} - \frac{d_2 - d_1}{2} + u_R \quad (42)$$

② $x_1 > C$ 일 때 $D_{int}(x_2) = -d_1$ ($d_2 \geq |d_1|$)

여기서, x_2 은 최대 변위(Maximum Offset)가 발생하는 지점까지의 거리로서 다음

$$\text{식으로 구한다. } x_2 = \frac{c}{2} + \frac{cd}{8(u_d + u_R)} \quad (43)$$

위와 같은 x 값에 대한 제한조건식이 포함됨으로서 알고리즘이 완성되는 것이며, 가공전차선로의 최대경간 계산을 위한 프로그램의 구성요건이 충족되는 것이다.

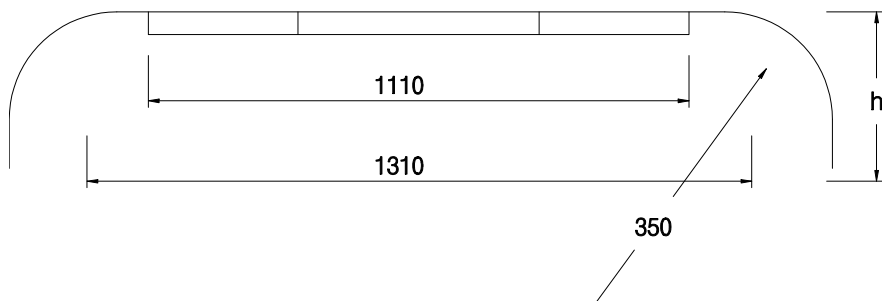
5. 전차선에 발생하는 기울기의 요소와 계산 실예

전차선의 편위는 각 기울기 총합의 값이 집전장치 유효 폭 내로 되어야 하므로 전차선의 최대 편위가 집전장치 유효 폭 보다 작게 되는 경우에는 지지경간이나 지지점의 편위를 조정하여야 하며 전차선에 발생하는 기울기의 요소는 다음과 같다.

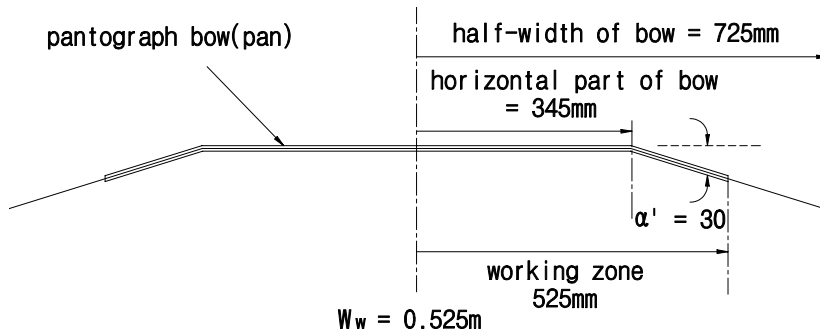
- (1) 풍압에 의한 기울기
- (2) 곡선로에 의한 기울기
- (3) 지지물의 변형에 의한 기울기
- (4) 차량동요에 의한 집전장치의 기울기
- (5) 온도변화에 의한 가동브래킷의 회전기울기

5.1 집전장치 유효 폭

(1) 전기동차 집전장치



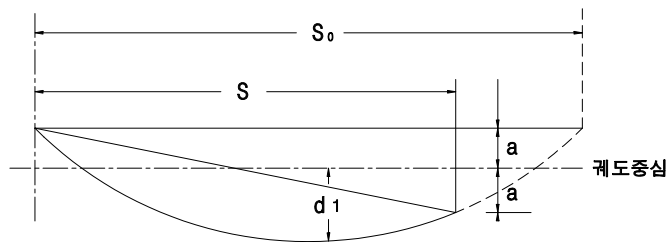
(2) 전기기관차 집전장치



5.2 풍압에 의한 전차선 기울기

바람이 불면 전차선에 기울기가 발생하기 때문에 열차의 안전운행을 위해서는 풍압에 의한 전차선의 기울기가 집전장치의 유효 폭보다 작게 되도록 경간이나 기울기를 제한하여야 한다.

(1) 직선구간의 지그재그 편위가 있는 경우



$$d_1 = \frac{S^2(W_m + W_t)}{8(T_m + T_t)} + \frac{2a^2(T_m + T_t)}{S^2(W_m + W_t)}$$

여기서, d_1 : 지그재그 기울기를 취했을 때의 풍압에 따른 전차선 기울기량[m]

S : 경간[m] 50[m]

a : 지지점의 설정 지그재그 편위량[m] 0.2[m]

S_0 : 풍압을 받았을 때의 등가경간

W_m : 조가선(Bz)의 풍압하중[kgf/m]

W_t : 전차선(Cu 110mm²)의 풍압하중[kgf/m]

T_m : 조가선(Bz)의 가선장력[kgf] 1200[kgf]

T_t : 전차선(Cu 110mm²)의 가선장력[kgf] 1200[kgf]

① 조가선의 풍압하중

$$W_m = 0.0105[m^2/m] \times 76[kgf/m^2] = 0.798[kgf/m]$$

② 전차선의 풍압하중

$$W_t = 0.01234[\text{m}^2/\text{m}] \times 76[\text{kgf}/\text{m}^2] = 0.937[\text{kgf}/\text{m}]$$

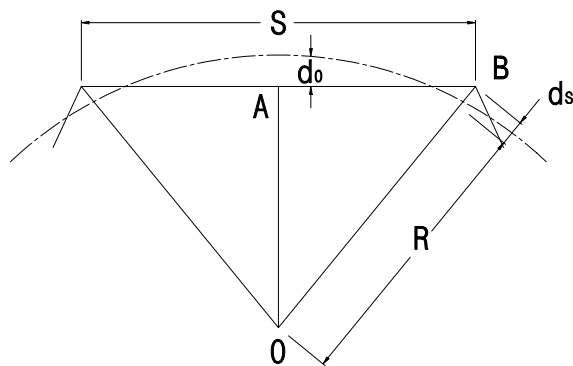
③ 전차선의 기울기

$$d_1 = \frac{50^2(0.798+0.9371)}{8(1200+1200)} + \frac{2 \times 0.2^2(1200+1200)}{50^2(0.798+0.937)}$$

$$= 0.225 + 0.044 = 0.269[\text{m}]$$

(2) 곡선로의 경우 전차선의 기울기

곡선로의 전차선은 지지점에서는 곡선의 외방에, 경간 중앙에서는 곡선내방 위치에 시설한다. 곡선로의 경우 전차선의 기울기는 각각의 곡선반지름에 대하여 구한다.



$$d_0 = \frac{S^2}{8R} - d_s$$

d_0 : 경간 중앙의 전차선 기울기량[m]

S : 전주 경간[m]

R : 곡선반지름[m]

d_s : 지지점의 전차선 편위[m] 0.2[m]

① 곡선반경 1,600[m]이상 경간 50[m]의 경우

$$d_{50} = \frac{50^2}{8 \times 1,600} - 0.2 = -0.0046[\text{m}]$$

② 곡선반경 1,000[m]까지 경간 45[m]의 경우

$$d_{45} = \frac{45^2}{8 \times 1,000} - 0.2 = 0.0531[\text{m}]$$

③ 곡선반경 700[m]까지 경간 40[m]의 경우

$$d_{40} = \frac{40^2}{8 \times 700} - 0.2 = 0.0857[\text{m}]$$



- ④ 곡선반경 500[m]까지 경간 35[m]의 경우

$$d_{35} = \frac{35^2}{8 \times 500} - 0.2 = 0.1062[\text{m}]$$

- ⑤ 곡선반경 400[m]까지 경간 30[m]의 경우

$$d_{30} = \frac{30^2}{8 \times 400} - 0.2 = 0.0812[\text{m}]$$

- ⑥ 곡선반경 300[m]까지 경간 20[m]의 경우

$$d_{20} = \frac{20^2}{8 \times 300} - 0.2 = -0.0333[\text{m}]$$

- ⑦ 풍압에 따른 전차선 기울기

$$d_2 = \frac{S^2(W_m + W_t)}{8(T_m + T_t)}$$

가. 경간 50[m]의 경우

$$d_{50} = \frac{50^2(0.798 + 0.937)}{8(1200 + 1200)} = 0.225[\text{m}]$$

- ⑧ 곡선경간별 기울기 : 단위[m]

전주경간	곡선반경	지지점편위	중간기울기	풍압기울기	기울기 계
50	1,600	0.2	-0.0046	0.225	0.2204
45	1,000	0.2	0.0531	0.182	0.2351
40	700	0.2	0.0857	0.144	0.2297
35	500	0.2	0.1062	0.110	0.2162
30	400	0.2	0.0812	0.081	0.1622
20	300	0.2	-0.0333	0.036	0.0027

- (3) 지지물의 굽힘에 따른 기울기

바람의 영향 또는 전선의 수평장력에 의하여 전주의 굽힘과 기초변형에 의한 전주 경사가 발생하므로 전차선 높이에 있어서의 전주의 휨을 50[mm], 기초경사에 대하여 50[mm]로 하여 지지물의 굽힘에 따른 기울기는 100[mm] 정도의 경사를 고려한다. $d_3 = 100[\text{mm}]$

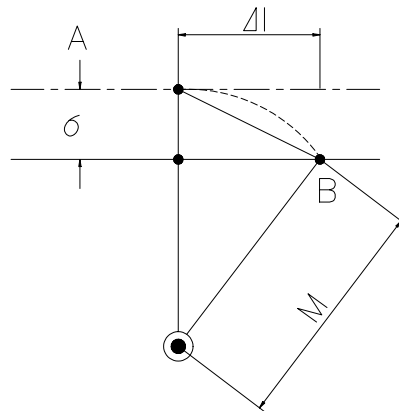
- (4) 차량동요에 따른 집전장치 기울기

궤도면상 585[mm]의 점을 중심으로 좌, 우 610[mm]의 수평점에 상, 하 각각 최대32[mm](차량동요 최대각도 3°)까지 이동이 되므로 전차선의 높이를 5,200[mm]로 하면

$$d_A = (5200 - 585) \times 32 / 610 \approx 242[\text{mm}]$$

(5) 온도변화에 따른 가동브래킷 회전 기울기

전차선은 온도변화와 장력변화에 따라서 이동하기 때문에 가동브래킷의 회전에 의하여 기울기가 발생될 수 있다. 가동브래킷의 회전에 따른 기울기는 각각의 전차선 인류길리와 가동브래킷 길이에 대해서 구하며 보통 전차선 마모의 영향이 없는 것으로 보고 온도 변화에 따른 전차선의 신축에 대해서만 구한다.



$$\sigma = M - \sqrt{M^2 - \Delta \ell^2}$$

σ : 가동브래킷 회전에 따른 전차선의 기울기[mm]

M : 가동브래킷의 게이지[mm]

$\Delta \ell$: 전차선의 이동량[mm]

① 가동브래킷의 게이지

- 가동브래킷의 건식게이지 3,000[mm]
- 전주폭 318[mm]
- 전차선 편위 200[mm]

$$M = 3,000 - 318/2 - 200 = 2,640[\text{mm}]$$

② 전차선의 이동량

$$\Delta \ell = \alpha(t - t_0)L \times 10^3$$

α : 전차선의 팽창계수 1.7×10^{-5}

t : 최고온도 40[℃]

t_0 : 표준온도 10[℃]

L : 전차선장력 조정길이 600[m]

$$\Delta \ell : 1.7 \times 10^{-5} (40 - 10) \times 600 \times 10^3 = 306[\text{mm}]$$



③ 가동브래킷 회전에 따른 기울기

$$\sigma = 2,640 - \sqrt{2,640^2 - 306^2} \approx 18[\text{mm}]$$

(6) 직선구간에서 전차선의 기울기 여유 : 단위[mm]

구 분	전기동차
집전장치 유효폭(D)	1310
지지물의 굽힘에 의한 기울기(D ₁)	100
차량동요에 따른 집전장치 기울기(D ₂)	242
가동브래킷 회전에 따른 기울기(D ₃)	18
D/2 - (D ₁ +D ₂ +D ₃)	295
전차선의 풍압에 의한 기울기	208
기울기의 여유	87

(7) 곡선구간에서 전차선의 기울기 여유 : 단위[mm]

구 분	전기동차			
집전장치 유효폭(D)	1310			
지지물의 굽힘에 의한 기울기(D ₁)	100			
차량동요에 따른 집전장치 기울기(D ₂)	242			
가동브래킷 회전에 따른 기울기(D ₃)	18			
D/2 - (D ₁ +D ₂ +D ₃)	295			
전차선의 풍압에 의한 기울기(곡선)	50m	40m	30m	20m
	220	229	162	2
기울기의 여유	75	57	133	293

실제 운행하는 선구의 집전장치의 사양에 따라 위의 여유 값은 다르므로 설계전에 운행계획 및 차량을 고려하여 검토하여야 한다.

RECORD HISTORY

Rev.3(12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.

Rev.4(14.03.06) 250km급 전차선로의 터널내 하수강 공간에 대하여 연구결과 45m로 된것을 터널라이닝 10m단위에 맞추어 설계할수 있도록 최대 50m간격으로 설계 할수 있도록 내용 반영(전철전력처-6881호, '13.10.28)

