

KR E-03130

Rev.7, 21. December 2023

합성전차선의 설계

2023. 12. 21.



국가철도공단



목 차

1. 합성전차선의 설계일반	1
2. 합성전차선의 가고	1
3. 가공전차선의 분리	1
4. 합성전차선에 사용하는 전선의 종류	1
5. 사전이도	2
6. 가공전차선 절연	2
7. 조가선 보호	2
8. 피복조가선의 시설	3
9. 드로퍼의 시설	3
10. 합성전차선의 경사	3
해설 1. 전차선로 가고의 적합성	4
1. 압상량	4
1.1 개요	4
1.2 동적 압상량	4
1.3 KTGV 차량의 동적 수직 운동	6
1.4 동적 압상량 평가	7
2. 팬터그래프 주행시 곡선당김금구와의 접촉관계	8
2.1 개요	8
2.2 곡선당김금구 및 팬터그래프 사양	8
2.3 팬터그래프 운동(Swing) 한계 범위	10
2.4 팬터그래프 압상시, 회전시 접촉관계	18
해설 2. 350km/h급 전차선로의 사전이도	22
1. 지지점 압상 허용량 제한	22
2. 사전이도 크기에 따른 집전성능 영향 예측	23
해설 3. 드로퍼의 길이계산	26
1. 드로퍼 길이	26
1.1 드로퍼 표준 길이	26
1.2 드로퍼 길이 계산 근거 식	27
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 충칭하는 것입니다.

1. 합성전차선의 설계일반

합성전차선의 설계의 일반사항은 다음과 같다

- (1) 전차선로는 가선범위를 확인하고 설계속도 및 노반조건에 따라 선정된 가선계를 적용하여 경제적으로 설계한다.
- (2) 전철변전소, 구분소를 중심으로 상별·상하선별·운전계통별로 전기적으로 구분하여 급전할 수 있도록 설계한다.
- (3) 전기적으로 인접한 구간에서 전차선로간의 다른 상(相) 또는 다른 전원의 접속 구간에는 절연구분장치로 설계한다.
- (4) 전차선로의 운영 및 유지보수를 위하여 필요시 전기적으로 구분이 필요한 개소에 동상구분장치로 설계한다.
- (5) 선로의 분기개소에는 건넘선장치를 설치한다.
- (6) 인류구간별 전차선의 연결은 에어조인트로 한다.
- (7) 동 설계로 선로에 따른 전차선의 선형, 높이, 편위값, 지지물의 종류와 위치, 각 구간별 인류길이와 전차선, 조가선의 조장 등을 결정한다.

2. 합성전차선의 가고

커티너리 가선 방식에서 합성전차선의 표준가고는 다음 표에 의한다, 다만 현장여건 및 가선시스템 특성에 따라 별도로 정하여 시설할 수 있다.

속도등급	표준가고[mm]	비 고 [mm]
70~200킬로급	960	터널구간 710
250킬로급	1,200	터널구간 850
300/350/400킬로급	1,400	

3. 가공전차선의 분리

급전계통 및 운전계통이 다른 가공전차선 상호간(정거장간의 특수한 경우 및 정거장 구내를 제외한다.)은 전기적 및 기계적으로 분리하여 시설한다.

4. 합성전차선에 사용하는 전선의 종류

합성전차선에 사용하는 전선의 종류는 다음 표에 의한다. 다만, 당해선구를 운행하는 전기차의 부하특성 등 운전조건에 따라 필요한 경우 따로 정할 수 있다.



구분	선 종[mm ²]
조가선	CdCu 70(카드뮴동연선) CdCu 80(카드뮴동연선) St 90(아연도강연선) St 135(아연도강연선) Bz 65(청동연선) Bz 65(청동연선, 피복) CuMg 65(마그네슘합금 연선) Bz 116(청동연선) Bz 116(청동연선, 피복) CuMg 116(마그네슘합금 연선) CWSR 65(강심동연선)
전차선	Cu 110(홈경동선) Cu 120(홈경동선) Cu 150(홈경동선-원형) Cu 150(홈경동선-이형) CuSn 150(홈경동선) CuMg 150(홈경동선) Cu 170(홈경동선)

5. 사전이도

커티너리 가선방식에서 열차운행속도 향상을 위하여 설계속도 및 차량제원에 따라 경간/1,000 또는 경간/2000, 경간/3000의 사전이도(Pre-Sag)를 줄 수 있으며, 설계속도가 향상된 새로운 전차선로 시스템의 경우 별도로 정할 수 있다

6. 가공전차선 절연

- (1) 구름다리 · 승강장 · 지붕 근접 등에 시설하는 조가선은 밀어 올림 등으로 접지될 우려가 있을 경우에는 애자 등을 삽입하여 무가압 조가선으로 하여야 한다.
- (2) 제1행에서 조가선을 무가압으로 하였을 때에는 순환전류에 의한 장애를 방지하기 위해 그 양단의 조가선과 전차선에 균압장치를 설치하고 무가압구간은 조가선과 동등 이상의 허용전류를 가진 동연선으로 연결한다.

7. 조가선 보호

- (1) 카드뮴동연선 · 강심동연선 및 청동연선을 사용한 조가선의 지지점에는 보호슬리브, 행거이어 개소에는 보호덮개, 소선이 손상될 우려가 있는 교차개소의 조가선은 접촉되지 않도록 설치하여 보호하여야 한다.
- (2) 아연도강연선을 사용한 조가선에는 다음 각 호에 의한 조가선 보호덮개를 설치하여야 한다.
 - ① 직선구간은 지지점에서 양방향으로 제1행거, 곡선구간은 제2행거까지

- ② 평행설비는 그 경간의 모든 행거까지
- (3) 카드뮴동연선·청동연선 및 강심동연선을 조가선으로 사용하고 행거이어를 설치할 경우 조가선 보호덮개를 전량 설치한다.

8. 피복조가선의 시설

- (1) 선상역사, 과선교 및 구름다리 하부 또는 터널입출구 등 조가선 소선 단선의 위험성이 있는 개소에는 낙하물 등에 의한 조가선 소선 및 단선의 방지를 위해 피복조가선을 설치하여야 한다. 다만 이물질이 던지거나 낙하시킬수 없는 밀폐형 구조의 선상역사, 보호망이나 안전벽이 설치된 터널 입·출구, 안전막이나 미세투시형 그물막이 설치된 과선교로서 조가선과 각부 시설물까지 1.2m이상 개소는 예외로 한다.
- (2) 이중에어섹션으로 구성된 절연구분장치는 팬터그래프 통과시 발생할 수 있는 아크열로 인한 소선 단선의 방지를 위해 피복조가선을 설치하여야 한다.

9. 드로퍼의 시설

- (1) 드로퍼의 설치 간격은 속도 등급에 따라 다음 표와 같이 설치할 수 있으며 전차선로의 가선시스템 및 특수경간에 따라 조정할 수 있다. 다만, 기존 산업선 전철구간(BT 방식)에 한하여 드로퍼 간격을 10[m]로 설치할 수 있다.

속도등급	설치간격[m]	비 고
300킬로급	4.5~6.75	350/400킬로급 : 4.5~6.5m
250킬로급	3~4.5~5	
150~200킬로급	2.5~5	
70~120킬로급	2.5~5	행어이어 사용 가능

- (2) 교차장치에서 본선과 교차되는선의 드로퍼(행어이어 포함)는 서로 접촉되지 않도록 설치한다.
- (3) 전차선로 오버랩구간의 무효부(인류구간)는 팬터그래프 집전이 되지 않는 구간으로 드로퍼 설치를 생략할 수 있다.

10. 합성전차선의 경사

전차선 지지점에서 조가선과 전차선이 만드는 면과 조가선 지지점에서 궤도면으로 내린 수직선과의 간격은 다음 표에 의한다.

속도등급	최대간격[mm]
250킬로급 이상	10
200킬로급 이하	50



해설 1. 전차선로 가고의 적합성

본 내용은 경부선 동대구-부산 일반철도의 전철화를 위하여 검토항 사항을 기술하고자 한다.

집전성능 확인의 확인 외에 가고의 적합성을 검토하기 위해서는

- 가고에 따른 동력학 특성 변화 파악
- 동력학 시뮬레이션을 통한 정상운행조건에서 동적 압상량 확인
- 동력학 시뮬레이션을 통한 최대 풍속에서 동적 압상량 확인
- 선로와 차량 조건에 따른 차량의 주행 중 동적 수직 움직임 파악
- 곡선당김금구 및 가동브래킷의 사양 확인
- 팬터그래프 게이지 확인
- 팬터그래프 최대 압상 시 곡선당김금구 및 암지지금구와의 위치관계 검토
- 최악조건에서 팬터그래프가 최대로 기울어지는 각도 계산
- 곡선당김금구 사양에 대한 팬터그래프와의 접촉관계 평가가 이루어 져야 한다.

여기서는 일반철도 경부선 구간의 검토내용을 기술하고자 한다.

1. 압상량

1.1 개요

제안된 전차선로의 가동브래킷(Cantilever)는 가고(System Height)가 960mm이며 여기에 취부되는 곡선당김금구에는 Stopper가 달려있어 압상이 100mm밖에 허용되지 않는 구조이다. 따라서 팬터그래프의 압상량(Uplift Amount)이 클 경우에는 곡선당김금구가 Stopper에 닿게 되고 동력학적으로 경점(Stick Spot)으로 작용하여 대이선이 발생할 가능성이 있게 된다. 따라서 동적 상태에서의 팬터그래프의 압상량을 검토하여 제안된 가동브래킷과 곡선당김금구의 기술적 적합성을 검토하여야 한다.

1.2 동적 압상량

1.2.1 정상운전조건에서의 압상량

동적 압상량은 전차선과 팬터그래프 사이의 동력학 시뮬레이션을 통하여 알 수 있다. 정상운전상태에서의 동적 압상량은 앞 장에서 실시한 시뮬레이션 데이터로부터 인용하면 다음과 같다.

표 1. 정상 운전조건에서의 동적 압상량

시뮬레이션 조건	곡선당김금구에서의 압상량[mm]	최대 압상량(경간 중앙)[mm]
팬터모델 1, 속도 160km/h	19	65
팬터모델 2, 속도 160km/h	18	67

1.2.2 최악운전조건에서의 압상량

최악 운전조건에서 곡선당김금구 허용 압상량에 따른 적합성 평가를 위하여 다음의 조건을 최악조건으로 설정한다.

철도운영자의 운전취급규정에 의하여 풍속 30m/s의 강풍이 불 때는 열차 운행을 중지하도록 되어있다. 그러나 부분적이고 순간적인 풍속은 모니터링도 쉽지 않고 또 즉각적으로 운전이 반영되기 어려우며, 또한 지형에 따라 풍속의 세기가 달라지므로 풍속 30m/s에서도 운전하여야 하는 경우가 생길 수 있다. 따라서 풍속 30m/s의 바람을 전면 방향에서 받으면서 팬터그래프가 160km/h로 주행하는 경우를 최악 조건으로 설정하기로 하고, 이 경우에 팬터그래프가 받는 공기역학적 양력은 열차 속도와 풍속의 합이 되므로

팬터그래프가 받는 공기의 흐름 = 열차 속도 + 풍속 = 160km/h + 108 km/h (30m/s는 108km/h에 해당) = 268km/h

결국 열차가 268km/h로 달리는 상태가 되므로 이 조건에서 시뮬레이션하여 동적 압상량 및 한 경간에서의 전차선변위를 구하면 다음과 같다.

표 2. 최악조건에서 동적 압상량

시뮬레이션 조건	곡선당김금구에서의 압상량 [mm]	최대 압상량(경간 중앙) [mm]
팬터모델 1, 속도 268km/h	67	121
팬터모델 2, 속도 268km/h	74	119

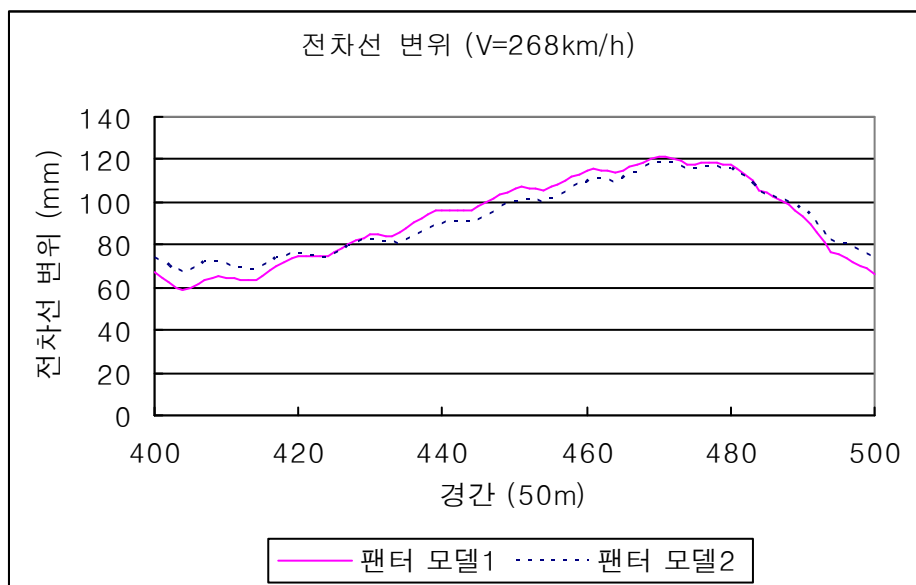


그림 1. 최악조건에서 동적 압상량 비교 그래프



1.3 KTGV 차량의 동적 수직 운동

전차선-팬터그래프 동력학 시뮬레이션은 팬터그래프 베이스 프레임이 고정되어 있는 것으로 간주하여 시뮬레이션 한다. 이것은 차량의 진동의 영향을 반영하지 못함을 의미한다. 그러나 실제로는 차량은 주행하면서 선로 조건에 따라 횡방향은 물론이고 수직방향으로도 운동을 하게 되고 이러한 차량의 동적 변위는 전차선에도 영향을 미친다. 그러나 차량의 동적 변위가 전차선의 압상량으로 그대로 전달되는 것은 아니다. 팬터그래프에는 몇 단의 현가장치(Suspension)와 댐퍼(Damper)가 있어 이를 일부 흡수하기 때문이다. 그러나 차량의 운동이 전차선까지 영향을 미치는 것은 확실하다.

따라서 전차선의 압상량을 검토하기 위하여 선로 조건과 차량조건에 따라서 차량이 주행하면서 일으키는 동적 수직 변위의 크기를 파악하는 것은 매우 중요하다. 여기서 한국고속철도건설공단에서 1998년도에 시행한 “기존선 이용에 따른 제반 기술 연구(철도연 수행)” 과제에서 동대구-부산간 선로조건에서 해석한 관련데이터가 있으므로 이를 활용하고자 한다.

위 과제에서의 해석 조건은 다음과 같다.

- (1) 동대구-부산간 궤도 모델링은 철도청 검측차에서 1996년도 상반기에 측정한 실제 데이터 사용
- (2) 차량은 KTGV 차량시스템을 모델로 P(동력차)+MT(동력객차)+3T(객차)+MT(동력객차)로 구성
- (3) 차량의 현가장치(동력차 및 객차), 차체간 연결장치 등 차량 특성은 KTGV 시스템 데이터를 사용
- (4) 차륜-레일 모델링은 KTGV 차륜 및 경부선 KS50 레일을 각각 모델로 함
- (5) 운전속도조건은 현행 새마을호 운전법도 상에 나타난 속도 프로파일을 적용함. 이는 실제 영업운전상의 속도로서 최저 75km/h에서 최대 140km/h까지의 범위에 있다.

해석은 영국 AEA에서 개발한 철도차량 동력학 전용 해석 프로그램인 VAMPIRE를 이용하였고, 압상량과 관련이 있는 차량의 동적 수직변위 결과만을 요약 인용하면 다음과 같다. 이 결과는 팬터그래프 집전높이(5.08m)에서 팬터그래프 중심점의 동적 수직변위로서 팬터그래프를 강체로 놓고 해석한 결과이다.

표 3. 기존선 구간 차량 운동에 의한 팬터그래프 수직변위 해석 결과

구간역명	동적 수직변위[mm]	구간역명	동적 수직변위[mm]
동대구→고모	40	부산진→사상	50
고모→경산	10	사상→구포	20
경산→삼성	20	구포→물금	20
삼성→남성현	17	물금→원동	10
남성현→청도	20	원동→삼랑진	20
청도→유천	17	삼랑진→밀양	20
유천→밀양	20	밀양→유천	10
밀양→삼랑진	13	유천→청도	19
삼랑진→원동	10	청도→남성현	30
원동→물금	10	남성현→삼성	22
물금→구포	20	삼성→경산	20
구포→사상	10	경산→고모	10
사상→부산진	30	고모→동대구	18

<표 3>의 해석결과를 보면 수직방향 변위는 대체로 10~30mm 범위에 있으며, 일부 구간에서 최대 50mm까지 나타나는 것을 알 수 있다.

1.4 동적 압상량 평가

정상적인 운전조건에서 전차선과 팬터그래프사이의 동력학에 의한 압상량은 곡선당김금구 지점에서 18~19mm로 나타났다. 여기에서 <표 3>에서 나타난 차량의 동적 수직 변위의 최대치 50mm를 그대로 더하더라도 68~69mm범위이다.

그런데 일본의 자료에 의하면 속도향상을 위한 집전계 기술검토사항 중의 하나로서 압상량에 대하여 보수여유 30mm를 고려해 주고 있다. 이 보수여유는 전차선이 마모에 의하여 가벼워지거나 장력이 제대로 작동하지 않을 때에 지지점이 부상하는 것에 대비하기 위한 목적으로 여유를 두는 값이다.

이 보수여유 값을 그대로 적용하면 정상운전 시 최대압상량이 98~99mm로서 곡선당김금구의 허용 압상량 100mm에 못미치므로 곡선당김금구 Stopper가 작동하지 않는 상태로 양호한 집전이 가능하다.

그러나 최악조건으로 설정한 30m/s의 바람이 불 때에는 지지점에서의 압상량이 67~74mm가 되고 여기에 <표 3>의 차량의 동적 움직임을 고려할 때 일부구간에서 곡선당김금구의 Stopper가 작동되어 경점으로 작용할 수 있음을 알 수 있다. 물론 앞에서도 설명한 바와 같이 팬터그래프에서 스프링 작용과 댐퍼의 작용 특히, 하방향 댐핑 계수가 큰 특성 등이 있음으로 인해 차량의 수직 움직임이 그대로 전달되지는 않지만



보수여유 등을 고려할 때 차량의 수직변위가 큰 구간에 대해서는 궤도 정비나 개량이 필요하리라 판단된다.

결론적으로 압상량에 대하여 종합적으로 평가할 때 Stopper는 바람이 병합되는 조건에서는 작동하는 것이 본래의 목적이므로 동대구-부산간 전차선로에 대하여 제안된 곡선당김금구 사양은 압상량 측면에서 KTGV 차량의 운행에 적합한 것으로 판단된다.

2. 팬터그래프 주행시 곡선당김금구와의 접촉관계

2.1 개요

동대구-부산 구간의 일반 노출선로(Open Track)에서 사용하고자 하는 곡선당김금구는 기존 전철화 선로에서 사용하고있는 것과 같은 것이다. 이 곡선당김금구는 압상 허용량이 100mm일뿐만 아니라 곡선당김금구의 길이도 900mm로 되어있다. 이 사양은 경부고속전철 신선에서 채용하고 있는 곡선당김금구의 사양 즉, 압상허용량 400mm, 길이 1200mm보다 작은 것이다. 따라서 어떤 상황에서도 KTGV 팬터그래프와 주행시 접촉이 일어나지 않는다는 것을 확인할 필요가 있다. 접촉이 일어나면 대형사고로 이어질 수 있기 때문이다.

따라서 팬터그래프 통과시 곡선당김금구와의 접촉관계를 KTGV 팬터그래프를 기준으로 하여 팬터그래프 게이지(Gauge) 및 팬터그래프 압상 시, 회전 시 접촉관계를 검토해보고자 한다. 아울러 고속철도에서 채용하고 있는 곡선당김금구와의 사양도 비교 검토해 보고자 한다.

2.2 곡선당김금구 및 팬터그래프 사양

2.2.1 곡선당김금구(Steady Arm / Registration Arm)

검토하고자 하는 대상은 이미 기존 전철화 선로에서 사용하고 있는 가고 960mm의 가동브래킷 및 곡선당김금구로서 I타입과 O타입이 있다.

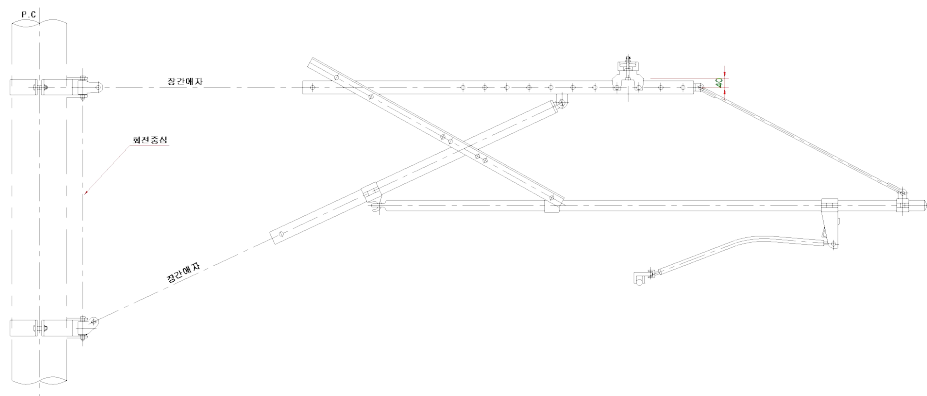


그림 2. 가고 960mm의 O타입 가동브래킷

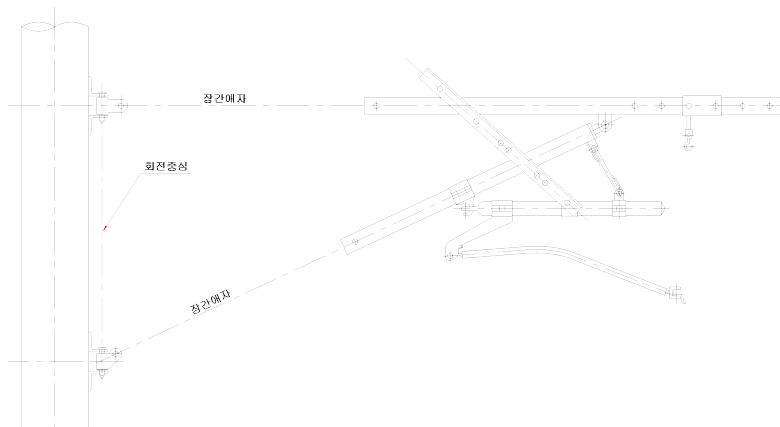


그림 3. 가고 960mm의 I타입 가동브래킷

이 곡선당김금구의 허용압상량은 +100mm이며, 이 이상은 물리적으로 압상이 되지 않도록 Stopper가 달려있다.

2.2.2 팬터그래프

경부고속철도 차량(KTGV)에 설치되는 팬터그래프는 Faively사 제품의 GPU 25kV 1450mm 타입이다.

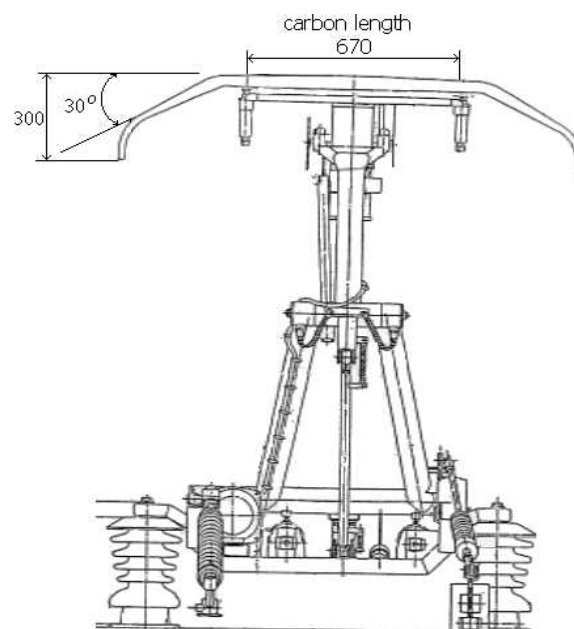


그림 4. GPU 25kV 팬터그래프 (Side View)

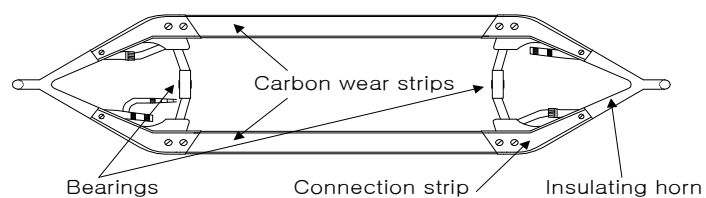


그림 5. GPU 25kV 팬터그래프 Bow (Top View)



팬터그래프 집전판 조립체(Bow)는 세 부분으로 되어있다. 카본 또는 금속카본으로 만들어진 마모 집전판(Wear Strips)과 금속 재질의 연결판(Connection Strips)과 절연성 재질의 가이드(Horn)으로 구성되어있다. 마모 집전판은 전차선과 접촉, 습동하는 주 부위이며, 연결판은 전차선이 풍압에 의해 날릴 때나 3 Catenary가 설치되는 분기구간 등 특수구간에서 전차선과 접촉한다. 그러나 가이드(Horn) 부분은 절연체로서 건넘선(Cross over)에서 팬터그래프가 전차선과 엉키지 않도록 하기 위한 목적으로 설치되어 있다. 따라서 팬터그래프의 집전 가능한 유효운전너비(Pantograph Working Zone)는 마모집전판과 연결집전판을 합친 너비에 해당한다. GPU 25kV 1450mm 팬터그래프에 대한 제원은 다음 그림과 같다.

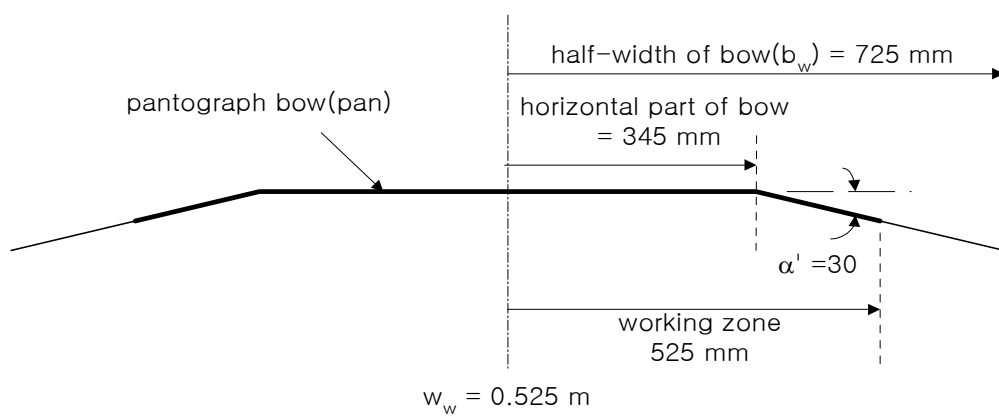


그림 6. 경부고속철도용 GPU 25kV 팬터그래프 집전판 제원

KTGV의 전차선-팬터그래프 인터페이스에 대한 설계개념을 보면, 곡선당김금구에는 Stopper가 설치되지 않기 때문에 갑작스런 돌풍으로 인하여 팬터그래프가 비 이상적으로 압상되어 사고가 유발될 가능성이 있으므로 이를 방지하기 위하여 팬터그래프 측면에서 프레임이 어느 일정 높이 이상 상승하지 못하도록 제한시키는 기능(Extension Limiting Mechanism)이 들어있다. KTV에서 이 제한치는 고속선로에서 20cm로 설정된다.

그러나 재래선을 주행할 때에는 전차선 높이가 다르기 때문에 이 기능을 정지시키게(Disable) 되어 있다. 그러나 마침 우리가 검토하고자 하는 곡선당김금구는 암지 지금구에 Stopper가 설치되어있는 타입이므로 팬터그래프 상승제한 기능이 작동하지 않더라도 안전을 보장할 수 있는 구조임을 확인할 수 있다.

2.3 팬터그래프 운동(Swing) 한계 범위

2.3.1 팬터그래프 운동 한계의 의미

곡선당김금구와 팬터그래프와의 접촉관계를 따져보기 위해서는 먼저 팬터그래프가 모든 선로조건, 운전조건에서 얼마만큼 좌우로 움직일 것인가를 알아야 한다. 이를

나타내는 것으로 팬터그래프 스윙(Swing) 범위 또는 팬터그래프 운동 한계가 있다. 팬터그래프 게이지(Gauge)는 팬터그래프 운동 한계에다가 여유를 더하여 설정하는데 단순히 차량한계의 연장선상으로 차량상부(팬터그래프가 위치하는 부분)의 한계를 나타내는 게이지에 해당한다. 팬터그래프 게이지 내로는 어떠한 고정시설물도 침범해서는 안 된다. 그러나 전차선로의 가압 시설물은 예외이다.

차량한계와 건축한계를 계산하는 데 있어서 우리나라와 UIC 규격은 매우 다른 개념을 사용한다. 우리나라는 고정된 게이지 개념을 사용하는데 반하여 UIC는 기준 프로파일로부터 차량의 특성에 따른 값을 빼거나 더하는("Reductions") 개념을 사용한다. UIC 505 Series에는 차량의 횡변위에 따른 게이지를 구하는 과정이 규정되어 있는데 이를 우리나라의 차량한계 개념과 유사한 것으로 보면 된다. 아울러 여기서 팬터그래프 운동 한계(Pantograph Swing Gauge)라고 말하는 것은 UIC 규격으로는 팬터그래프의 횡적 움직임에 대한 허용기준 게이지에 대한 값으로 UIC 505 Series와 UIC 606-1, 606-2, 608에서 "Reference Profile for Pantographs"에 해당하는 것이다.

팬터그래프 운동 한계는 팬터그래프 접전판의 반폭(Half Width of the Bow)으로부터 출발한다. 여기에 팬터그래프의 횡적 변위를 더하면 된다. 팬터그래프는 차량지붕에 견고히 고정되어 설치되므로 차량의 횡적움직임을 그대로 받게 되므로 차량의 유동특성(Flexibility)에 직접적인 영향을 받는다. 차량의 유동특성에 따른 팬터그래프 횡적 변위를 계산하는 방법은 UIC 505-1에 복잡한 수식으로 소개되어 있다. 그러나 이는 적용하기에 너무 복잡하므로 이를 실제 차량에 적용하는 경우에 대한 내용인 UIC 505-4를 따르는 것이 편리하다.

2.3.2 팬터그래프 운동 한계 수식

UIC기준에 따라 KTGV 차량에 대한 이론적인 팬터그래프 운동 한계는 다음과 같이 계산한다.

팬터그래프 운동 한계(Reference Profile for Pantographs) = 접전판 반폭 + 팬터그래프 기준 프로파일(Kinematic Reference Profile of the Pantograph Bow) + 곡선 반경에 의한 Projection + 궤간오차의 영향 + 궤간 보수 여유 + 캔트오차에 의한 영향 + 캔트 또는 캔트 부족의 영향(캔트/캔트부족이 0.066m 이상일 때만 반영)
이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

(1) 캔트(또는 캔트부족) ≤ 0.066m일 경우

$$G = Bw + [0.110 + 0.04(H-5)] + \frac{2.5}{R} + \frac{L-1.435}{2} \pm 0.025 + \frac{0.015H}{1.5} \quad (1)$$

(2) 캔트(또는 캔트부족) > 0.066m일 경우

$$G = Bw + [0.110 + 0.04(H-5)] + \frac{2.5}{R} + \frac{L-1.435}{2} \pm 0.025 + \frac{0.015H}{1.5} + \frac{0.225}{1.5} (I \text{ or } E - 0.066)(H-0.5) \quad (2)$$



여기서, G = 반쪽에 대한(1/2) 이론적인 팬터그래프 한계(Pantograph Swing Gauge)

B_w = 팬터그래프 집전판 반폭(Half Width of the Pantograph Bow)

H = 레일면상 높이

L = 실제 궤간(Gauge)

E or I = 캔트(Excess of Cant) 또는 캔트부족(Deficiency of Cant)

2.3.3 팬터그래프 운동 한계 수식 설명

수식 <식 (1)>과 <식 (2)>의 의미를 파악하기 위하여 각 항이 나오게 된 근거를 살펴보자.

(1) $[0.110 + 0.04(H - 5)]$

이 항은 팬터그래프 기준 프로파일(Kinematic Reference Profile of the Pantograph Bow)에 대한 것이다. 이 것은 UIC 505-4에 정의되어 있는 것으로, 높이 5.0m(하부 검증 높이)에서 0.110m, 높이 6.5m(상부 검증 높이)에서 0.170m 만큼의 횡변위에 해당하는 Profile로서 이를 수식으로 표현한 것으로서, 이 프로파일을 팬터그래프 횡변위(Swing) 계산의 기준으로 삼기 위하여 정해놓은 것이다.

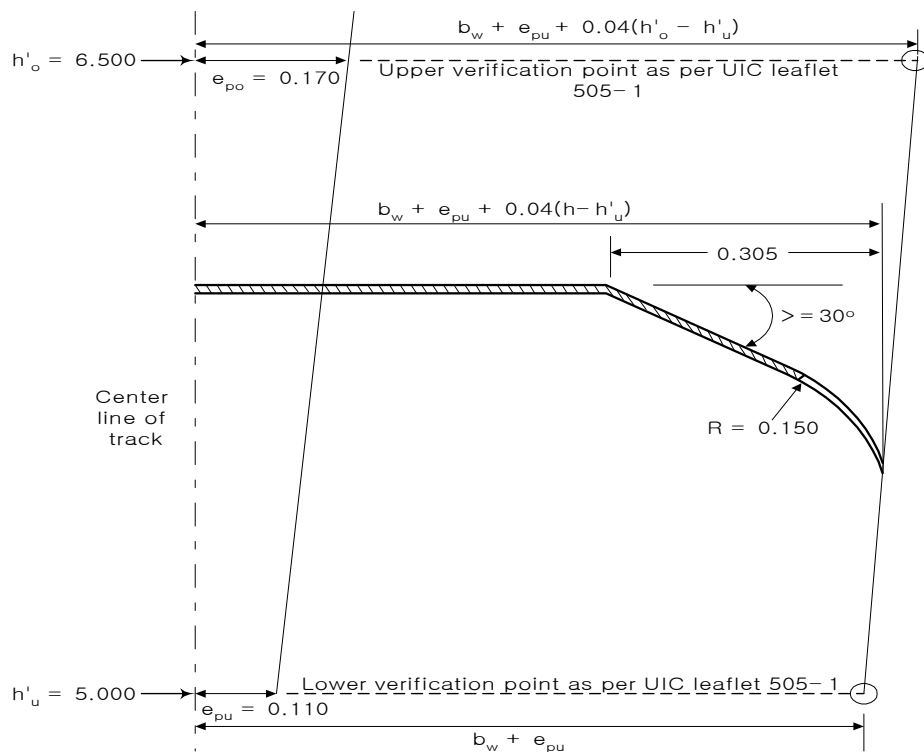


그림 7. Kinematic Reference Profile for the Pantograph Bow

이 프로파일 속에는 캔트(또는 캔트부족)이 0.066m를 초과하지 않는다면 캔트에 의한 횡변위 영향이 포함되어 있다. 또한 경사부에서 차량의 회전(Rolling)이 일어나기 전에 먼저 차량의 횡방향(Lateral) 이동이 일어나는 량과, 팬터그래프 조립부의 베어

링 부위 등에서 발생하는 횡변위 등이 고려되어 있다.

어떤 높이에서의 팬터그래프 Reference Profile 값은 아래 식과 같이 높이에 따른 비례식으로 구하면 된다.

$$e_p = e_{pu} + \frac{(h - h_u')}{(h_o' - h_u')} (e_{po} - e_{pu}) \quad (3)$$

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)

e_{pu} : 하부 Verification Point의 ep (UIC 606-1 OR로부터 e_{pu} = 0.11m)

e_{po} : 상부 Verification Point의 ep (UIC 606-1 OR로부터 e_{po} = 0.15m)

해당 계수를 <식 (3)>에 대입하면 어떤 높이에서의 팬터그래프 Reference Profile은 $0.110 + 0.04(H - 5.0)$ 이 된다.

(2) $\frac{2.5}{R}$

UIC 505-1에서 규정한 팬터그래프 접전판(Bow)에 대한 최대 Geometrical Overthrow. 즉 팬터그래프가 설치된 기관차에 대하여, 곡선 선로에서 궤도중심과 차량중심의 오프셋(Offset)량이 팬터그래프 설치 위치(주로 Pivot 상부)에 미치는 영향이다.

(3) $\frac{L - 1.435}{2}$

이것은 궤간 허용오차가 1/2궤도에 주는 영향에 대한 것으로, L은 실제 궤간을 말한다. 궤간이란 두 레일사이의 거리로서, 보다 정확히는 레일 윗면에서 14 mm 아래에서 측정된 레일 두부 내측간 거리이다. 1.435는 표준 궤간 1435mm에 대한 것으로 공칭 궤간(Nominal Track Gauge)이라 하며 실제 궤간(Track Gauge)은 공칭 궤간+허용 오차이다. 경부고속철도에서는 직선로에서 실제궤간=공칭궤간+0.006m, 곡선로에서 실제궤간=공칭궤간+0.01m로 두고 있다.

(4) ± 0.025

대단위 선로보수(Overhaul)가 이루어지기 전까지 궤도의 횡이동에 대한 허용량으로서 UIC 606-1 OR에 일반적인 값으로 0.025m가 제시되어 있다.

(5) $\frac{0.015H}{1.5}$

양쪽 레일의 높이는 직선구간에서 같은 높이이거나, 곡선구간에서 캔트 값대로 설치되어 있어야 하나, 실제 시공이나 운영 중에 설계 값과 달라질 수 있으며 이런 범위를 허용오차(Tolerance)로 규정하고 있으므로 이 허용오차에 의한 전차선 레벨에서의 영향에 대한 값을 반영한 것이다. 즉, 궤도 캔트 허용오차에 대한 전차선 높이에서의 영향이다.

레일경사에 의한 차량 측의 영향은 차량중심간격을 기준으로 결정되며, 경사도에 의



한 기관차의 틸팅 영향은 차체 중심으로부터의 높이에 비례하므로 산출 식은 다음과 같다.

$$\frac{t_2}{d_e} [H(1 + S_0') - S_0' h_{co}] \quad (4)$$

여기서, H : 전차선과 팬터그래프의 접촉점 높이

de : 좌우 차륜중심점사이 거리 (de = 1.5m)

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

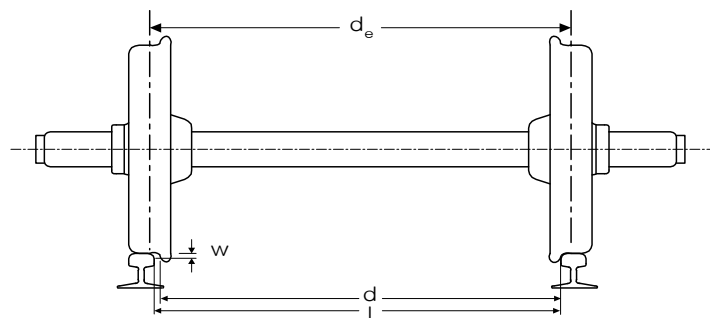


그림 8. 차륜 중심점사이 거리

hco : 기관차의 요동 중심점(Roll Center of Locomotive)의 높이
(hco=0.5m)

t2 : 궤도의 캔트 허용오차

S0' : 팬터그래프가 달린 기관차의 틸팅도 계수에 대한 전형값(S0'=0.225)

경부고속철도의 경우 캔트 허용오차(t2)는 0.009m 인데 이 값을 <식 (4)>에 넣어서 계산해보면(뒤의 항은 매우 작은 값이므로 무시하면) 0.011H/de 가 된다. 이것은 고속철도에 대한 값이므로 재래선까지를 고려해서 0.015H/de를 정한 것으로 판단된다. 한편 이 기준도 선로의 허용속도에 따라 다르게 적용하고 있다.

- 0.020H/1.5 : 80km/h이하일 경우
- 0.015H/1.5 : 80km/h이상일 경우

$$(6) \quad \frac{0.015H}{1.5} + \frac{0.225}{1.5} (I \text{ or } E - 0.066)(H - 0.5)$$

이 항은 캔트/캔트부족(Cant/Cant Deficiency)으로 인한 영향에 대한 값으로 캔트 또는 캔트부족이 0.066m 이하일 때는 앞의 (1)항에 이미 반영이 되어있으므로 0.066m를 초과하는 캔트/캔트 부족에 대한 영향을 반영한 값이다.

열차가 곡선구간을 주행시는 열차의 곡선외부로 작용하는 힘과 곡선내부로 작용하는 힘이 평형을 이루도록 바깥측 레일의 높이를 높이는, 즉 궤도에 캔트(Cant, Superelevation)를 주게 된다. 그러나 실제 선로에서는 계산으로 나온 캔트량보다 적은 캔트값으로 시공하게 되며 이를 캔트부족량(Cant Deficiency, Unbalance)이라 한

다. 따라서 열차가 곡선구간에서 정지해 있을 때에는 캔트에 의해 팬터그래프가 안쪽으로 기울어지며 주행할 때에는 캔트부족량 및 열차속도에 따라 팬터그래프의 솔림이 달라지게된다. 이러한 캔트량 또는 캔트부족량에 의한 전차선 레벨에서의 팬터그래프의 횡변위 영향을 u_{unbE} , u_{unbI} 이라 한다.

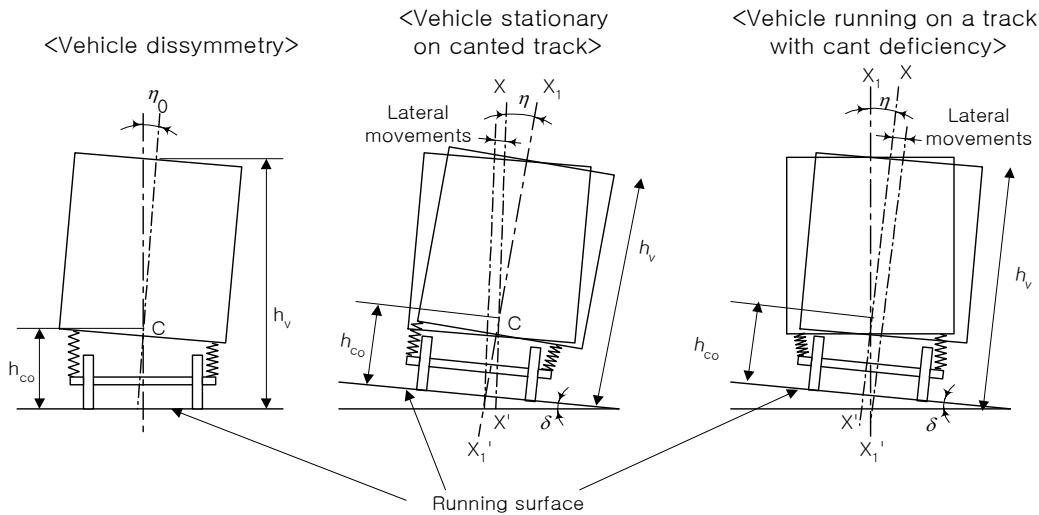


그림 9. 캔트/캔트부족량에 의한 영향

열차가 정지시 :

$$u_{unbE} = \frac{S_0'(h-h_{co})}{d_e} (E-E_0') \quad (5)$$

최고속도로 열차 주행시 :

$$u_{unbI} = \frac{S_0'(h-h_{co})}{d_e} (I-I_0') \quad (6)$$

여기서, E, I : 궤도의 캔트량, 캔트부족량

h : 접촉점(팬터그래프와 전차선의) 높이

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

h_{co} : 기관차의 요동 중심점의 높이 (UIC 606-1 OR로부터 $h_{co} = 0.5$ m)

S_0' : 팬터그래프가 달린 기관차의 틸팅도 계수에 대한 전형값 (UIC 606-1 OR로부터 표준값으로 $S_0' = 0.225$ (미터단위계))

E_0' , I_0' : 팬터그래프 존에서의 Reference Outline에서 이미 고려된 기준 캔트/캔트부족량 (UIC 606-1 OR로부터 E_0' 또는 $I_0' = 0.066$ m)

한편 우리나라에서 사용하고 있는 캔트의 양 계산공식은 다음과 같으며 이를 곡선 반경에 따라 구해보면 아래 <표 4>과 같다.

$$C = 11.8 \frac{V^2}{R} - C_d \quad (7)$$



여기서, C : 캔트[mm]
 V : 열차속도[km/h]
 R : 곡선반경[m]
 C_d : 캔트 부족[mm]

표 4. 캔트(Superelevation)와 캔트부족(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

2.3.4 팬터그래프 운동 한계 계산

<식 (1)>과 <식 (2)>를 적용하여 팬터그래프 운동 한계를 높이에 따라 구해보면 다음과 같다.

표 5. 높이에 따른 팬터그래프 운동 한계 계산

높이	집전판 반폭 넓이 [m]	Swing Gauge [m] 직선부 ($E < 0.066$)	Swing Gauge [m] 곡선부 ($E = 0.180$)
5	0.725	0.206	0.287
5.1	0.725	0.211	0.294
5.2	0.725	0.216	0.301
5.3	0.725	0.222	0.308
5.4	0.725	0.227	0.315
5.5	0.725	0.232	0.322
5.6	0.725	0.238	0.329
5.7	0.725	0.243	0.336
5.8	0.725	0.248	0.343

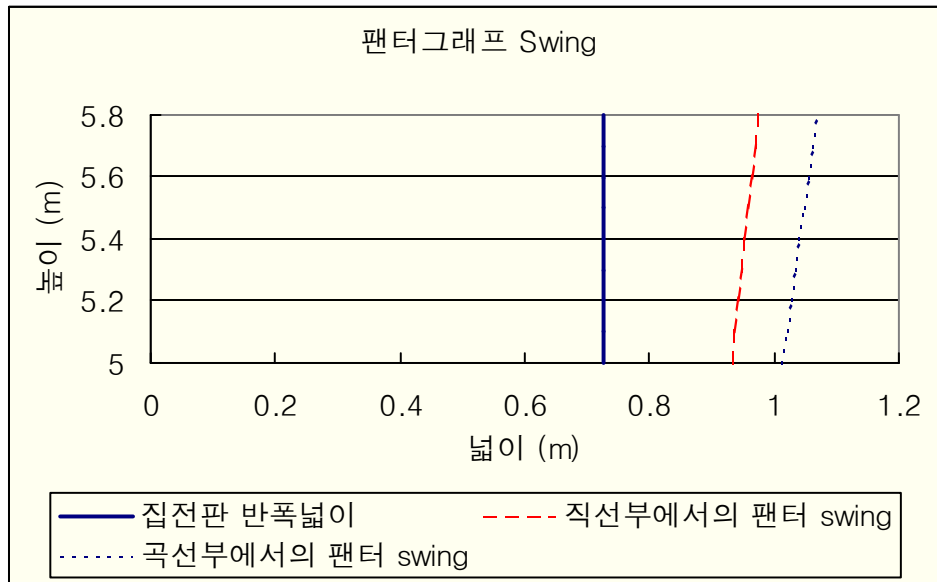


그림 10. Swing 한계를 그림으로 나타낸 것

참고로 프랑스 SNCF의 25kV선로에서 사용하고 있는 팬터그래프 부위의 건축 한계 (Space for Longitudinal Structure of Catenary)를 UIC 606-1로부터 인용하면 다음과 같다. 이 것은 1600mm 집전판을 25kV 팬터그래프가 운행되는 조건에서 설정된 것으로 이 한계 안으로는 어떠한 건축물도 침범하여서는 안되지만 전차선로의 전압이 걸려있는 부위는 예외이다. 아래 <그림 11(직선구간)>과 <그림 12(곡선구간)>에 나타난 점선이 건축 한계이며 팬터그래프는 1450mm GPU 팬터그래프의 실제 스케일이고, 곡선당김금구와 암지지금구는 동대구-부산 전차선로용 길이 900mm의 실제 스케일이다.

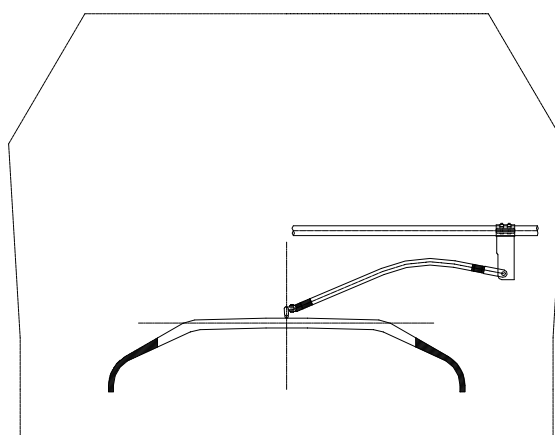


그림 11. SNCF 25kV 팬터그래프 부위 건축 한계(직선구간)

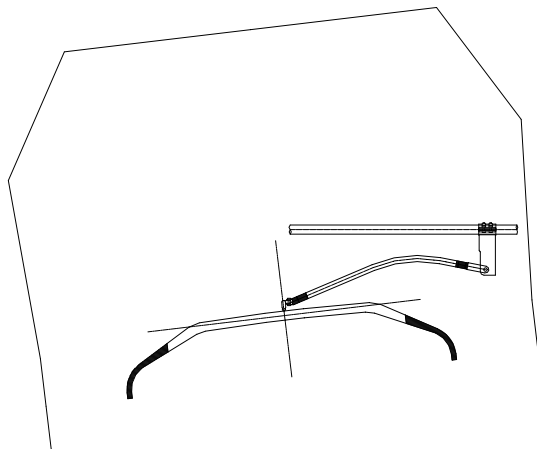


그림 12. SNCF 25kV 팬터그래프 부위 건축 한계(곡선구간)

2.4 팬터그래프 압상시, 회전시 접촉관계

2.4.1 팬터그래프 압상시 접촉관계

앞 2.2 절에서도 언급한 바와 같이 순간적인 돌풍이 불 때 팬터그래프가 비 정상적으로 압상될 수도 있다. 이 경우 스토퍼(Stopper)가 설치되어 있는 곡선당김금구는 스토퍼까지 압상될 것이다. 이 상황은 정상적 운전 조건에서 벗어난 예외적인 경우이기 때문에 스토퍼의 작동에 의한 동력학적인 경점의 작용에 대하여는 검토하지 않는 것으로 하며, 단지 팬터그래프가 곡선당김금구의 암지지금구에 접촉하는가만 검토하는 것으로 한다.

접촉관계를 검토하기 위하여 AutoCAD R.14 프로그램을 이용하여 곡선당김금구 및 암지지금구를 설계도면대로 그려놓고 실제 축척(Scale)에 맞추어 이동(압상)시키보는 방법을 사용하였다.

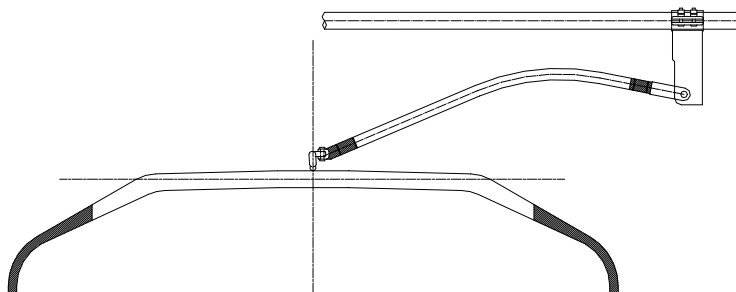


그림 13. 압상량이 없는 정적상태

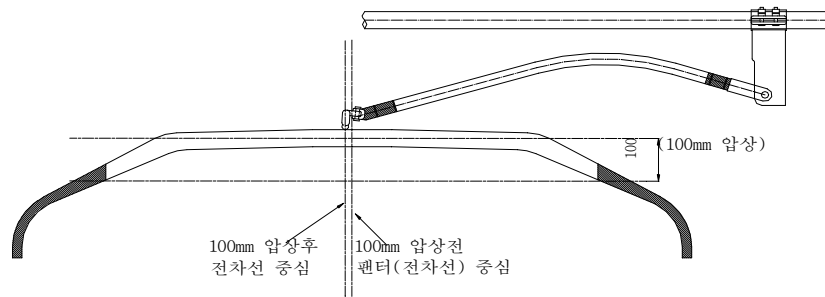


그림 14. Stopper까지(100mm) 압상되었을 때의 집전판의 위치

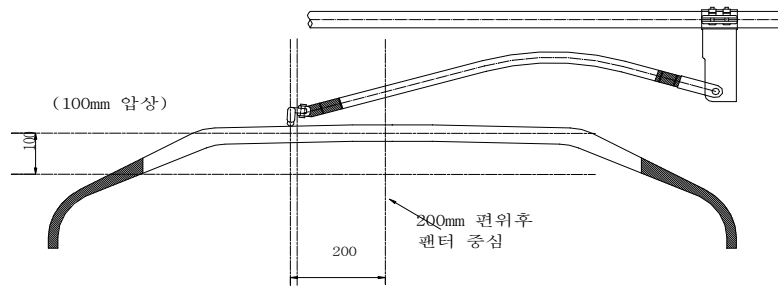


그림 15. 100mm 압상 후 옆으로 200mm 이동한 집전판의 위치

위 그림에서 보듯이 최대 압상(100mm)이 되었을 때에도 팬터그래프 집전판 상부는 암지지금구의 최하단보다 아래에 위치함을 알 수 있다. 또한 집전판 혼(Horns) 부위가 30°로 아래로 휘어져 있어 팬터그래프와 암지지금구와는 일정한 간격을 유지하므로 설사 집전판(Bow)이 탄성에 의하여 휘어지는 경우(접촉점을 중심으로 양쪽 끝이 위로 올라가는 경우)에도 안전함을 알 수 있다.

또한 팬터그래프가 직선구간에서의 커티너리 최대 편위(Stagger)인 200mm만큼 암지지금구 쪽으로 이동하더라도 접촉이 일어나지 않음을 <그림 15>에서 보여주고 있다.

2.4.2 팬터그래프 회전시 접촉관계 검토

팬터그래프는 차량 지붕에 견고하게 고정되어 설치된다. 따라서 차량의 운동에 의한 횡변위에 따라서 팬터그래프도 함께 움직일 것이다. 물론 팬터그래프에도 조립부가 있고 여기의 베어링 특성 등에 의하여 2차적인 횡방향 동적 작용이 발생하겠지만 이의 영향은 거의 무시하여도 무방하며 차량의 운동에 의한 변위가 지배적인



것으로 알려져 있다. 따라서 차량의 횡방향 변위에 대하여 팬터그래프는 차체의 일부분으로 강체 운동을 한다고 보고 계산하기로 한다.

팬터그래프가 횡방향으로 회전시 곡선당김금구와 접촉할 지를 검토한다는 것은 곡선당김금구의 궁형 암(Arm)의 설계각도와 비교하기 위한 목적이다. 이는 가동브레이크를 지지하는 전주는 수평 노반 위에 세워지는데 반하여 팬터그래프는 캔트 위에 있으므로 기울어지기 때문이다. 따라서 팬터그래프가 최대로 기울어질(회전) 각도를 알아내어 이 각도를 비교하면 된다.

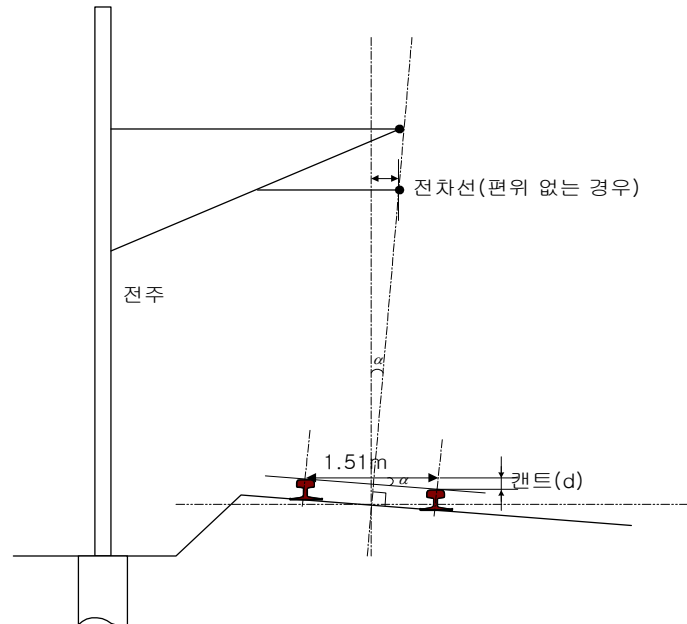


그림 16. 전주와 전차선 설치위치와의 관계

최대로 팬터그래프가 기울어질(회전할) 각도를 계산하기 위하여 최악조건을 다음과 같은 두 조건이 병합되었을 때로 설정하기로 한다.

- 1) 차량이 최대캔트 선로에서 정지할 때(준 정적 상태)
 - 2) 차량의 측면으로 30m/s의 강풍이 불어 차량이 기울어 질 때
- 먼저 차량이 최대 캔트에서 정지할 때에 대해서는 다음 식에 따라 계산하면 된다.

$$\theta = \delta + \eta = \delta + S\delta = (1 + S) \tan^{-1} \left(\frac{C}{1435} \right) \quad (8)$$

여기서, θ : 수평면에 대해 차량의 전체 기울어진 각

δ : 캔트각

η : 캔트가 있는 선로에서 현가장치 유연성으로 인해 기울어진 각

S : 차량의 유연성(Flexibility) 계수

C : 최대 캔트[mm]

KTGV에 대하여 계산하기 위하여, 차량의 유연성 계수는 UIC 606-1에서 소개된 팬터그래프가 달린 기관차 틸팅도 계수에 대한 전형 값을 사용하여 $S=0.225$ 로 하고,

최대 캔트는 경부고속철도 설계기준을 준용하여 C=180mm로 하여 계산하면 다음과 같다.

$$\theta = (1 + 0.225) \tan^{-1} \left(\frac{180}{1435} \right) = 8.8 \text{ (deg)} \quad (9)$$

다음으로 차량의 측면으로 30m/s의 강풍이 불 때의 팬터그래프 회전각을 구하기 위하여 차량동역학 해석 프로그램 VAMPIRE를 사용하였다. 해석조건은 KTGV차량을 기준으로 곡선구간에서 거의 정지 상태(준정적 상태)에 있을 때로 하였으며, 이 때의 최대 회전각은 “ $0.1560 \text{ (rad)} = 0.1560 \times 180 / \pi = 8.9 \text{ (deg)}$ ”가 해석되었다. VAMPIRE 해석 내용은 부록 2로 첨부하였다.

위의 두 경우의 각도를 합치면 17.7[deg]가 된다. 이 각도에는 캔트의 허용오차에 의한 영향 등이 반영되진 않았지만 이러한 영향은 미소하므로 곡선당김금구의 궁형형상의 각도 23.를 여유있게 만족함을 알 수 있다.

<그림 17>은 최대 회전각인 17.7도 만큼 팬터그래프를 회전시켰을 때의 AutoCad 도면이다. 전차선의 편위는 궤도중심선을 기준으로 설정되므로 회전의 중심은 팬터그래프 집전판의 중심을 기준으로 회전시켰다.

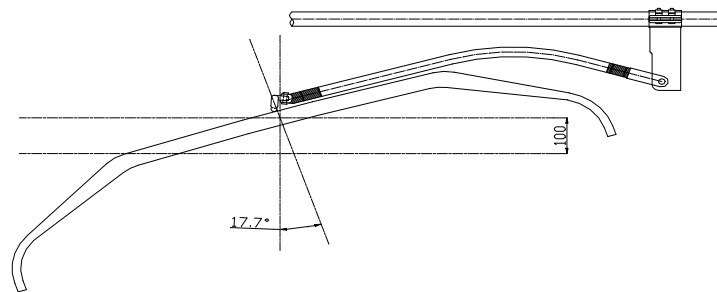


그림 17. 100mm 압상후 팬터그래프 중심을 기준으로 17.7도 회전한 때

<그림 18>은 팬터그래프를 암지지금구는 있는 쪽으로 100mm 이동 후 17.7도만큼 회전시킨 경우이다. 이 경우 팬터가 곡선당김금구에 접촉하게 된다. 따라서 이런 경우를 방지하기 위해서는 반드시 전차선에 편위를 주는 가동브래킷의 타입을 압축형/인장형(또는 O타입/I타입)을 목적에 맞게 제 위치대로 시설하여야 함을 의미한다.

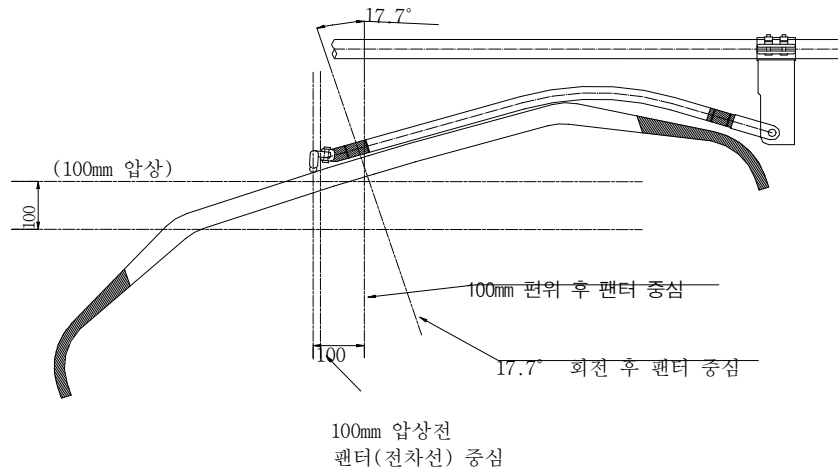


그림 18. 100mm 우측으로 편위 후 17.7도 회전한 경우

한편, 팬터그래프 회전시 접촉의 문제를 명확히 검증할 수 있는 방법으로 경부고속 철도에서 사용되는 곡선당김금구의 암 각도를 확인하는 방법이 있다. 도면을 가지고 선을 그어서 개략적으로 파악한 각도는 22°로서 기존선에서 사용하는 곡선당김 금구와 거의 유사함을 알 수 있었다.

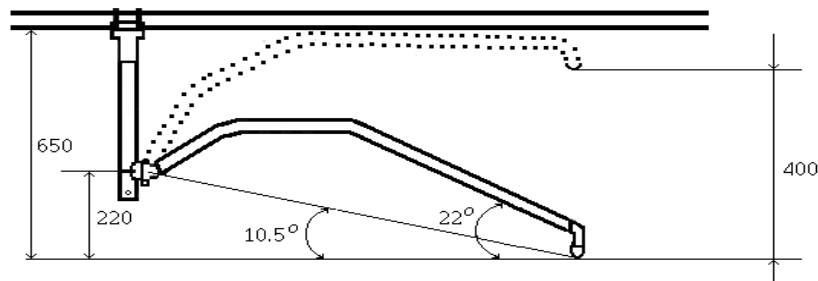


그림 19. 경부고속철도용 가동브래킷 및 곡선당김금구

해설 2. 350km/h급 전차선로의 사전이도

1. 지지점 압상 허용량 제한

시뮬레이션을 판단하는 기준은 집전성능 뿐만 아니라 아래와 같이 최대 접촉력 기준 과 지지점 압상량을 제한하였다.

- 최대 접촉력 기준 : 350N 이하(EN50119[3.2] 제시)
- 지지점 허용 압상량 : 240mm 이하
(UIC799[3.14] 및 EN50119)

압상 허용량(Permissible Uplift Amount)은 어떤 전차선로를 특징짓는 기본적인 핵심 파라미터 중의 하나이다. 호남선과 경부 기존선 구간을 비롯한 우리나라 기존선 전차

선로는 압상 허용량은 100mm로 제한하고 있고, 경부고속철도는 안전율 2를 적용하여 120mm로 관리하고 있다. 호남고속철도도 곡선당김금구 및 가동브래킷 등의 호환성 등과 아래와 같이 UIC 코드 등에서 제한하고 있는 설계시 압상량은 120mm(안전율 고려)로 결정하기로 한다.

표 6. UIC 799에 명시된 압상량 관련 규정

분류 및 번호	파라미터명(설계속도와 연관하여 설명 포함)	201~230 km/h	231~300 km/h	301km/h~
2.2 동적 특성 일련번호 7 (권고 사항)	팬터그래프 통과 시 지지점 에서 전차선 최대 압상 허 용량 (기후적 영향 제외)	120mm	120mm	120mm

2. 사전이도 크기에 따른 집전성능 영향 예측

본 절에서는 사전이도 크기에 대하여 연구를 수행하였다. 사전이도는 경간 안에서 탄성이 일정하지 않기 때문에 팬터그래프가 전주 지지점보다 경간중앙에서 전차선을 더 높이 압상시키므로 팬터그래프로 하여금 일정한 높이의 전차선에 집전할 수 있도록 한다는 것에 근거한다.

사전이도의 크기가 경부고속철도와 같은 $a/2,000$ 과 $a/3,000$ 을 고려하여 비교 시뮬레이션을 실시하였다. 사전이도가 없는 경우에 대해서는 호남고속철도 기본설계 해외자문 [2.1]에 고속에서 사전이도의 효과는 시뮬레이션도 중요하지만 실제 경험도 중요하기 때문에 사전이도를 적용하는 것을 권고한다는 자문의견으로 인하여 고려하였다.

다음은 두 가지 사전이도 크기 및 경간에 따라 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 팬터그래프 모델링은 앞 절의 차세대 고속열차용 팬터그래프를 사용하였다.

표 7. 집전성능 예측(Pre-sag: $a/2000$)

변수	기호	단위	경간에 따른 시뮬레이션 결과					
			65	60	55	50	45	40
평균 접촉력	Fm	[N]	182.0	181.6	181.8	181.4	179.9	179.4
최대 접촉력	Fmax	[N]	349.3	342.2	344.6	338.6	338.5	351.1
최소 접촉력	Fmin	[N]	14.8	21.0	19.0	24.3	21.4	7.8
접촉력 표준편차	σ	[N]	55.8	53.5	54.3	52.4	52.9	57.2
전주에서 압상량	Uplift @Mast	[mm]	71	65	62	56	52	45
이선율	NQ	[%]	0	0	0	0	0	0



표 8. 집전성능 예측(Pre-sag: $a/3000$)

변수	기호	단위	경간에 따른 시뮬레이션 결과					
			65	60	55	50	45	40
평균 접촉력	Fm	[N]	181.0	180.6	180.4	179.7	179.3	178.3
최대 접촉력	Fmax	[N]	331.2	324.1	327.1	323.1	322.5	323.2
최소 접촉력	Fmin	[N]	30.7	37.1	33.8	36.4	36.0	33.3
접촉력 표준편차	σ	[N]	50.1	47.8	48.9	47.8	47.7	48.3
전주에서 압상량	Uplift @Mast	[mm]	72.5	67.6	64.1	58.4	52.3	47.7
이선율	NQ	[%]	0	0	0	0	0	0

다음은 각각의 케이스에 대한 접촉력 및 팬터그래프 궤적 그래프이다.

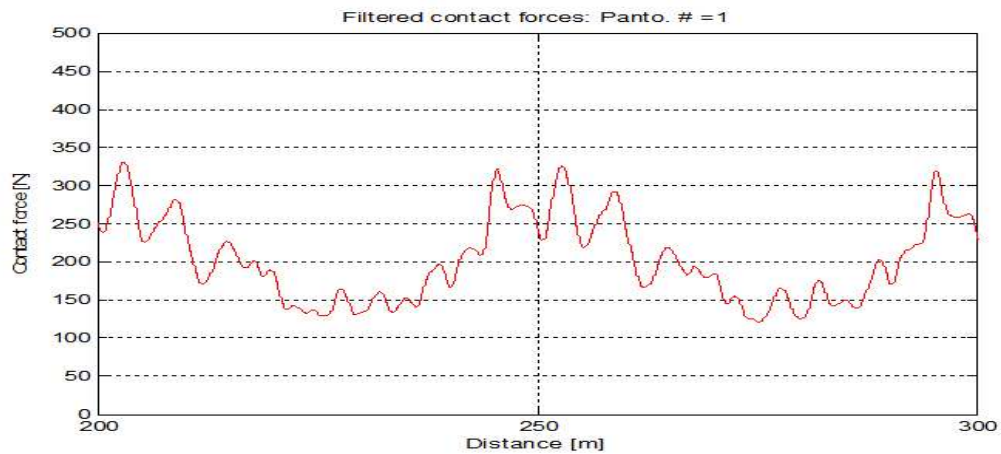


그림 20. 접촉력(경간 :50m, pre-sag : $a/2000$)

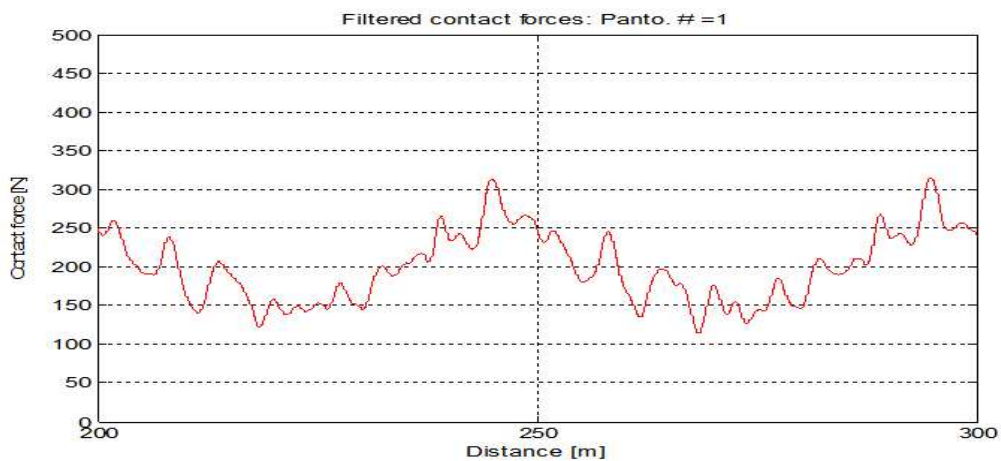


그림 21. 접촉력(경간 :50m, pre-sag : $a/3000$)

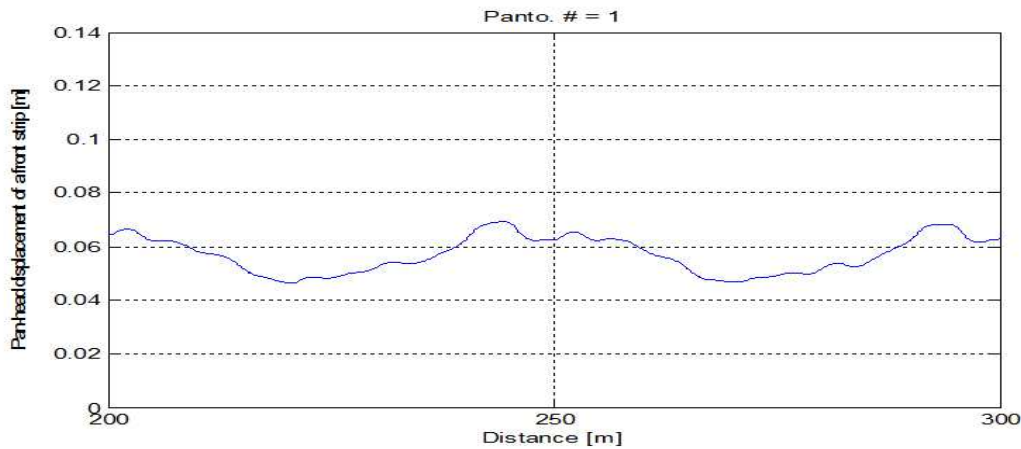


그림 22. 팬터그래프 궤적(경간 :50m, pre-sag : $a/2000$)

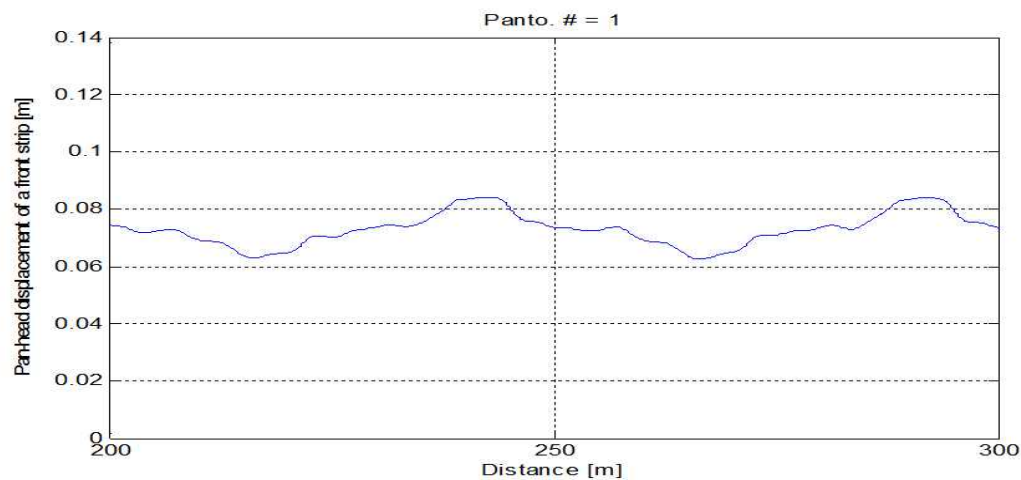
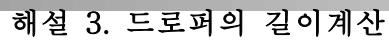


그림 23. 팬터그래프 궤적(경간 :50m, pre-sag : $a/3000$)

시뮬레이션 결과, 지지점의 압상량은 두 케이스 모두 문제가 없다. 그리고, 두 케이스 모두 집전성능은 양호하지만 최대 접촉력의 경우 $a/2,000$ 을 적용한 케이스에서 최대 접촉력이 350N 이상으로 계산되었다. 그리고, 사전이도를 $a/3,000$ 을 적용한 케이스가 접촉력 표준편차가 작아 접촉력 변동이 작게 계산되어 상대적으로 양호한 집전성능을 보이고 있다. 따라서, 본 연구에서는 사전이도 $a/3000$ 를 전차선로 시스템에 적용하기로 한다. 또한, 위와 같은 전차선로 조건을 해외 자문을 통하여 집전성능을 동일하게 예측한 결과 양호한 결과를 확인할 수 있었다. 해외 자문을 통한 집전성능 예측시에 사용한 차세대 고속철도 팬터그래프의 경우에서 정적 압상력과 공력계수가 조금 상이하다. 전차선로/팬터그래프간 동특성 프로그램간의 특성이 달라서 조정이 가능한 정력압상력과 공력계수를 일부 tuning하여 집전성능을 예측하였기 때문이다.



1.1 드로퍼 표준 길이

Diagram illustrating the cross-section of a bridge deck with a parabolic sag profile. The deck is divided into five segments labeled A, B, C, D, and E. The total width is 50.0m. The height of the deck is 0.96m. The segments have widths of 2.5m, 5.0m, 5.0m, 5.0m, 5.0m, and 2.5m respectively. The diagram also shows the 'Pre-sag' section (Pre-sag가 주어지는 구간) and the 'Sag' section (Sag가 주어지는 구간).

표 9. 드로퍼 길이 계산

경 간[m]	구분	A	B	C	D	E
50	드로퍼 길이[m]	0.872	0.748	0.655	0.593	0.562
	선의 길이[m]	0.81	0.68	0.59	0.53	0.50
40	드로퍼 길이[m]	0.890	0.802	0.743	0.714	
	선의 길이[m]	0.83	0.74	0.68	0.65	
30	드로퍼 길이[m]	0.908	0.855	0.829		
	선의 길이[m]	0.84	0.79	0.76		

$$\cdot \text{선의 길이} = \text{드로퍼 길이} - \text{크래프 길이(전선 압착부 제외)} = \text{드로퍼 길이} - 0.065\text{m}$$

1.2 드로퍼 길이 계산 근거 식

사전 이도(Pre-sag)가 주어지는 n 개의 드로퍼를 가진 일반적인 Catenary에 대한 드로퍼 길이계산 공식은 다음과 같다. 양단 전주에서의 가고 및 전차선 높이가 다른 경우에도 적용된다. 단, 여기서는 애자와 같은 집중질량의 설비가 설치되어 있지 않은 것으로 가정하며, 경간의 Configuration은 경간 중앙에 대하여 대칭이며, 양단 가고나 전차선의 높이차가 크지 않은 것으로 가정한 상태에서 적용되는 공식이다. 평행구간(Overlap section)에 대한 계산에도 적용되지 않는다.

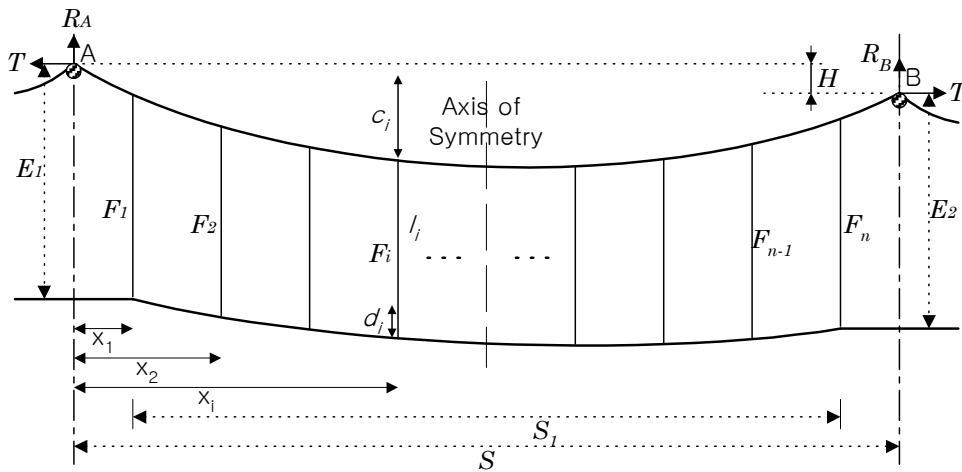


그림 25. 일반적인 경간에서 사용되는 Catenary

S : 경간 길이 [m]

n : 드로퍼 수

E_1, E_2 : 가고(Encumbrance 또는 System Height) [m]

w_m : 조가선 단위길이당 무게 [N]

w_c : 전차선 단위길이당 무게 [N]

T_m : 조가선 장력 [N]

T_c : 전차선 장력 [N]

H : 두 현수점 높이차(+/-) (좌측 높이 - 우측 높이)[m]

F_i : i 드로퍼의 지지 하중 [N]

x_i : i 드로퍼까지의 수평거리 [m]

c_i : i 드로퍼에서의 조가선 이도 [m]

d_i : i 드로퍼에서의 전차선 세그량(Pre-sag) [m]

l_i : i 드로퍼 길이 [m]

R_A : A 지지점에서의 반력 [N]

R_B : B 지지점에서의 반력 [N]



x_1 : 첫번째 드로퍼까지 거리(Pre-sag가 주어지지 않는 구간)[m]

dc : 경간 중앙의 전차선 세그, 즉 $S/2000$ 등 [m]

S_1 : 전차선 세그가 주어지는 구간만의 길이 [m]

먼저, 전차선 Sag는 사전 이도(Pre-sag) 값인데 대부분의 경우 Pre-sag는 첫번째 드로퍼와 마지막 드로퍼 사이에만 주어지므로 이 경우는

$$d_i = \frac{w_c}{2T} (x_i - x_1)(S_1 - (x_i - x_1)) \quad (10)$$

경간중앙의 최대세그, 즉 경간의 Pre-sag값 dc 에 관한 식으로 나타내면

$$d_i = \frac{4d_c}{S_1^2} (x_i - x_1)(S_1 - x_i + x_1) \quad (11)$$

다음으로, 드로퍼 지지하중을 구해야 하는데 이를 일반식으로 나타내면

(1) $i = 1$ 일 때 (첫번째 드로퍼)

$$F_1 = \left(x_1 + \frac{x_2 - x_1}{2} + \frac{T_c (d_2 - d_1)}{(x_2 - x_1) w_c} \right) w_c + w_d \quad (12)$$

(2) $2 \leq i \leq n-1$ 일 때

$$F_i = \left(\frac{x_{i+1} - x_{i-1}}{2} - \frac{T_c (d_i - d_{i-1})}{(x_i - x_{i-1}) w_c} + \frac{T_c (d_{i+1} - d_i)}{(x_{i+1} - x_i) w_c} \right) w_c + w_d \quad (13)$$

(3) $i = n$ 일 때 (마지막 드로퍼)

$$F_n = \left(\frac{x_n - x_{n-1}}{2} - \frac{T_c (d_n - d_{n-1})}{(x_n - x_{n-1}) w_c} + (S - x_n) \right) w_c + w_d \quad (14)$$

다음으로 Catenary 현수점에서의 반력을 구한다. A, B 두 개 지지점에서 받치고 있는 경간내 전체하중은 조가선 자중과 드로퍼를 통해 걸리는 하중 및 지지점의 높이차만큼의 장력에 의한 모멘트 작용하중이 된다. A지점의 반력은

$$R_A = \frac{w_m S}{2} + \sum_{k=1}^n F_k \frac{S - x_k}{S} + \frac{T_m H}{S} \quad (15)$$

따라서 B 지점의 반력은

$$R_B = w_m S + \sum_{k=1}^n F_k - R_A \quad (16)$$

드로퍼 지점에서의 조가선 이도(처짐량)를 구하기 위해 첫 번째 드로퍼 하중에 의한 A지지점에서의 모멘트 평형방정식을 세우면

$$c_1 T_m + w_m x_1 \frac{x_1}{2} = R_A x_1 \quad (17)$$

$$\text{따라서, } c_1 = \frac{1}{T_m} \left(R_A x_1 - \frac{w_m x_1^2}{2} \right) \quad (18)$$

마찬가지로 드로퍼 2에서의 모멘트 평형은 <식 (17)>를 참조하여

$$c_2 T_m + w_m x_2 \frac{x_2}{2} + F_1(x_2 - x_1) = R_A x_2$$

$$\text{따라서, } c_2 = \frac{1}{T_m} \left(R_A x_2 - F_1(x_2 - x_1) - \frac{w_m x_2^2}{2} \right) \quad (19)$$

이를 일반식으로 표현하면

$$c_i = \frac{1}{T_m} \left(R_A x_i - \frac{w_m x_i^2}{2} - \sum_{k=1}^{i-1} F_k(x_i - x_k) \right) \quad (20)$$

이제 드로퍼 길이에 필요한 요소를 모두 갖추었으므로, 『드로퍼 길이 = 가고 - 조건 이도(처짐량) + 전차선 사전이도 ($l_i = E_1 - c_i + d_i$)』를 적용하면 드로퍼 길이를 구하는 일반식을 얻을 수 있다.

$$l_i = E_1 - \frac{1}{T_m} \left(R_A x_i - \frac{w_m x_i^2}{2} - \sum_{k=1}^{i-1} F_k(x_i - x_k) \right) + \frac{4d_c(x_i - x_1)(S_1 - x_i + x_1)}{S_1^2}$$



RECORD HISTORY

- Rev.0(12.12.05) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.
- Rev.4(13.11.25) 고속철도 등 전차선로 시공기준 개선을 위한 기술검토결과를 반영하여 피복조가선 제외개소를 재정립하여 개정함.
기술본부(전철전력처) 개정의견 및 자문회의, 운영기관 합동회의(조류에 의한 급전장애 예방 고려)를 반영함
- Rev.5(15.12.30) 합성전차선의 가고 기준에 400km/h급 추가
- Rev.6(23.11.27) 관계 법령, 설계기준 등 인용 기준 최신화, 표현방식 변경, 오류사항 수정 등 단순사항 수정(기준심사처-4429호, 2023.11.27.)
- Rev.7(23.12.21) 남부내륙철도 등 전차선로 시공안전 및 품질향상 전문가 기술토론회 결과(전철처-6062호, 2023.08.08.)의 전차선로 오버랩구간 무효부(인류구간) 드로퍼 설치 생략 가능 내용 반영함(기준심사처-4846호, 2023.12.19.)