

KR E-03180

Rev.4, 30. December 2015

# 진동방지 및 곡선당김금구의 설계

2015. 12. 30



한국철도시설공단



# 목 차

1. 진동방지 및 곡선당김금구 등의 설계 .....	1
2. 진동가고 .....	1
해설 1. 곡선당김금구의 설치 각도 .....	2
1. 곡선당김장치금구가 이루는 각도 .....	2
해설 2. 곡선당김금구의 설계 실례 .....	7
1. 곡선당김금구 .....	7
1.1 곡선당김금구 형상 .....	7
1.2 곡선당김금구 구조 설계 및 해석 .....	8
1.3 공인 기관 시험 .....	9
2. 곡선당김금구(400km/h급).....	11
RECORD HISTORY .....	16

## 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. 진동방지 및 곡선당김금구 등의 설계

(1) 진동방지금구는 다음 각 호에 따라 설계한다.

- ① 진동방지금구는 전차선로에 작용하는 수평하중 값이 곡선에 의한 수평하중 보다 바람에 의한 수평하중 이 큰 구간에서 전차선의 횡진을 방지하기 위하여 설치한다.
- ② 진동방지금구를 빔하스펜션에 설치하는 경우는 이중금속의 접촉 등에 의한 부식 및 소선, 단선이 없도록 설치하고 동일 스펠션에 2조 이상 병설하는 경우는 순환전류에 의한 손상이 없도록 설비한다.

(2) 합성전차선의 가동브래킷 등 각 지지점에는 다음 각 호에 의한 곡선당김금구를 시설함을 원칙으로 한다.

- ① 속도등급 200킬로급 이하 가동브래킷 곡선당김금구의 설치 각도는 레일에 대하여 궁형은 11°, 직선형은 15°를 표준으로 하고 순간풍속 30[m/s] 이하에서 팬터그래프의 통과에 지장을 주지 않도록 시설한다.
- ② 궁형 곡선당김금구의 설치는 팬터그래프의 통과에 지장을 주지 않도록 설치한다.

(3) 가동브래킷을 사용하지 않고 애자 등으로 절연하여 합성전차선을 지지하는 곡선당김장치는 다음 각 호에 따라 설계한다.

- ① 분기기 부근 등에서 중간편위의 규정치 확보가 곤란한 지점에는 합성전차선 또는 조가선에 별도의 곡선당김장치를 시설한다. 합성전차선의 무효부분도 또한 같다.
- ② 곡선당김장치는 전기차의 주행 시 팬터그래프의 통과에 지장을 주지 않도록 설계한다.

(4) 곡선당김금구 등을 취부할 수 없는 경우는 직접 조가방식 등 적당한 방법으로 합성전차선을 지지할 수 있다.

(5) 자동장력조정장치를 설치한 구간(Section)에서 진동방지금구 및 곡선당김금구는 장력조정에 대한 억제저항이 증가하지 않도록 하여야 한다.

## 2. 진동가고

(1) 전차선과 가동브래킷의 수평파이프(진동방지파이프)의 수직 중심간격은 다음 표를 표준으로 한다. 다만, 빔하스펜션 개소의 전차선과 빔하스펜션과의 진동가고는 300[mm]를 표준으로 하고, 교차개소와 분기개소 등의 일부 특수개소에서는 예외로 한다.

속도등급	진동가고(표준)
200킬로급 이하	350[mm]
250킬로급	385[mm]
300킬로급 이상	600[mm]



## 해설 1. 곡선당김금구의 설치 각도

### 1. 곡선당김장치금구가 이루는 각도

곡선당김금구의 설치각도는 가선허성상으로 보면, 될 수 있는 한 작게 할 필요가 있으나, 너무 작게 하면 팬터그래프 및 풍압에 의한 전차선의 압상, 차체동요, 선로 캔트에 의한 팬터그래프의 경사 등에 의해 곡선당김금구에 지장을 준다. 또한 설치각도를 크게 하면 횡장력에 의해 전차선을 필요 이상으로 인상하여 제1행어에 헐거움이 생기고, 팬터그래프의 이선 및 조가선의 소선절단 현상의 원인이 되므로 제한을 두고 있다.

따라서 첫 번째 드로퍼가 부상하지 않는 범위에서 곡선당김장치 금구의 수평면에 대한 각도의 계산은 다음 식에 의한다.

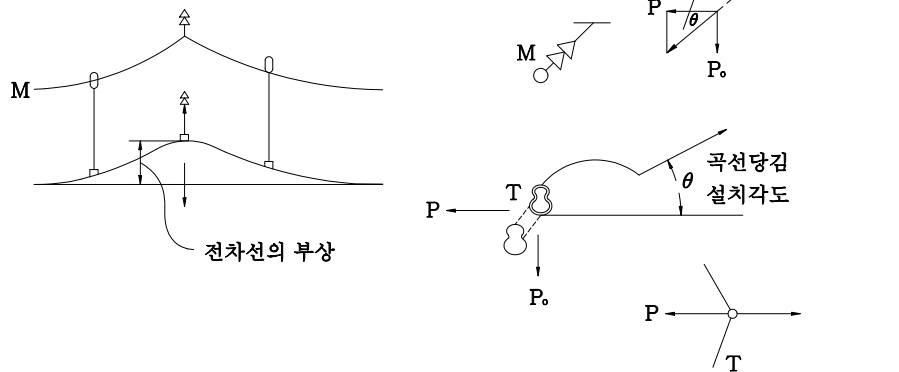
「정적상태」

$$\theta = \tan^{-1} \frac{P_0}{P} \rightarrow \tan \theta = \frac{P_0}{P} \text{ ----- (1)}$$

$\theta$  : 곡선당김 금구의 각도 [°]

$P$  : 곡선에서 전차선의 횡장력 [N]

$P_0$  : 곡선당김에 미치는 수직하중 [N]



그래서 그 부상의 허용한계를 제1행어가 부상치 않는 범위로 산출한 식이 다음에 나타난 계산식이다.

$$P_0 = w(2l_1 + l_2) + \frac{2w_1 \cdot l_1 \cdot T_t}{L \cdot T_m + (L - l_1 - l_2)T_t} \text{ ----- (2)}$$

$w$  : 전차선(드로퍼 포함)의 단위중량 [N/m]

$w_1$  : 곡선당김장치를 설치하지 안했을 때 첫 번째 드로퍼에 미치는 중량 [N]

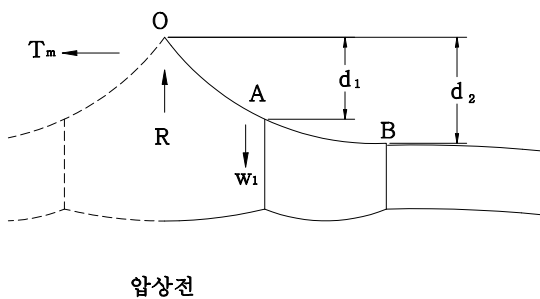
$T_1$  : 전차선 장력 [N]

$T_m$  : 조가선 장력 [N]

$l_1$  : 지지점에서 첫 번째 드로퍼까지의 거리 [m]

$l_2$  : 첫 번째 드로퍼와 두 번째 드로퍼와의 거리 [m]

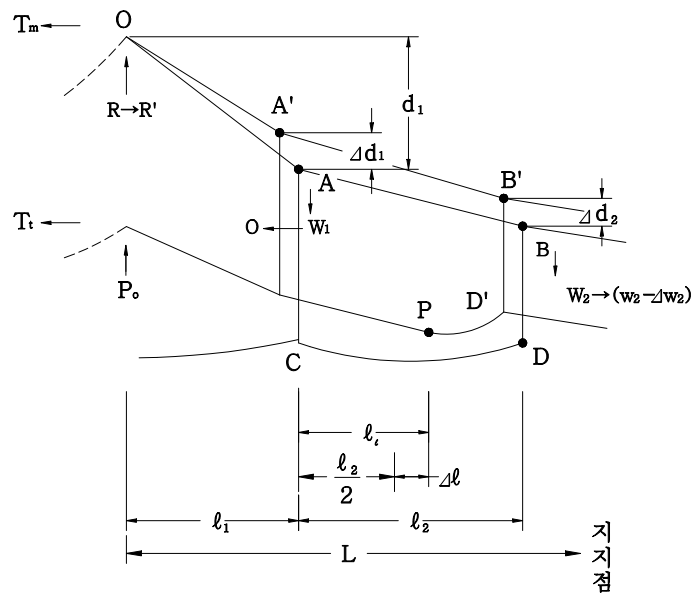
$L$  : 전주경간 [m]



우선  $P_0$ 의 크기는, 그 점이 곡선당김을 필요로 하는 곡선로 및 필요로 하지 않는 직선로라도 수평방향의 횡장력에는 무관한 수직방향의 힘이므로 횡장력을 제외하고 생각해도 좋다.

지금 어느 경간의 지지점하의 전차선을 어느 힘  $P_0$ 로 압상하여 그 힘을 순차적으로 크게 해 가면, 어느 점에서 조가선이 제1행어에서 받고 있던 수직하중  $w_1$ 의 부담에서 개방되고, 지지점에서 제2행어까지의 사이에서 자유스런 커티너 커브(포물선이라 생각해도 된다.)를 그릴 순간의  $P_0$ 의 값을 구하는 수직하중이라 생각한다.

<그림 2>에서, 지지점 O를 중심으로 좌우대칭인 우측에 대해서 생각하면, 구하는  $P_0$ 에 의해 A점은 압상A'로, 또 B점은 B'가 되어 그 압상량은 각각  $\Delta d_1$ ,  $\Delta d_2$ 가 된다. 이 경우 B점에서 우측은 연속 평이로 하고, 전차선은  $P_0$ 에 관계없이 안정되어 있는 것으로 한다.



$P_o$ 는, 이 때의 전차선 키브의 최저점 P(<그림 3>참조)에서 좌측 압상분의 전차선 중량이고 이것을  $P_o$ 중의 지지점에서의 우측분이라고 생각한다.

$$\text{즉, } \frac{P_o}{2} = W(\ell_1 + \ell_2) \quad \text{----- (3)}$$

이때 제2행어에 걸려 있던 하중의 감소분  $\Delta W_2$ 는

$$\Delta W_2 = W \cdot \Delta \ell = W(\ell_1 - \frac{\ell_2}{2}) \quad \text{----- (4)}$$

지금 힘의 평형을 이루고 있는 상태에서, 어떤 변화 후에 있어서도 평형 상태를 유지하기 위해서는, 그 변화분의 총합도 0이 되지 않으면 안되는 것에 착안한다.

우선 제1행어와 제2행어의  $P_o$ 에 의한 하중감소분을 지지점 O에서 반력 R이 부담하고 있는 분의 감소분  $R_{w1}$ ,  $R_{w2}$ 로 환산하면

$$\left. \begin{aligned} R_{w1} &= W_1 \times \frac{L - \ell_1}{L} \\ R_{w2} &= \Delta W_2 \times \frac{L - \ell_1 - \ell_2}{L} \end{aligned} \right\} \quad \text{----- (5)}$$

그래서 A점에 주목하여 그 좌측에 있는 힘의 모멘트에 대해 그 변화분은

$$T_m \Delta d_1 = (R_{w1} + R_{w2}) \ell_1$$

즉,

$$\Delta d_1 = \frac{\ell_1}{T_m} \left( W_1 \times \frac{L - \ell_2}{L} + \Delta W_2 \times \frac{L - \ell_1 - \ell_2}{L} \right) \quad \text{----- (6)}$$

마찬가지로 B점의 좌측 모멘트에 대해서는,



$$\Delta d_2 = \frac{\ell_1 + \ell_2}{T_m} \left( W_1 \times \frac{L - \ell_1}{L} + \Delta W_2 \times \frac{L - \ell_1 - \ell_2}{L} \right) - \frac{W_1 \ell_2}{T_m} \quad \text{----- (7)}$$

다음에 전차선의 커브에 대해 생각해 보면, 그 방정식은 포물선에서 <식 (5)> 참조

$$y = \frac{W}{2T_t} \times \chi(A + \chi) + B$$

A는 상수로

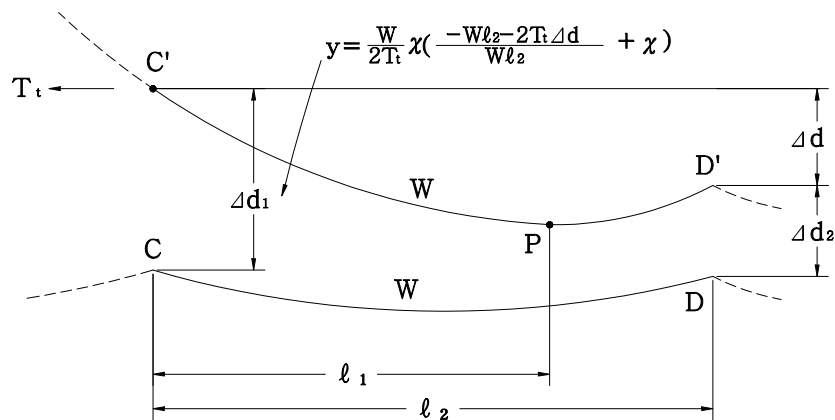
$\chi=0$ 일 때  $y=0$

$\chi=\ell_2$ 일 때  $y=(-\Delta d)$

을 대입하면

$B=0$

$$A = -\ell_2 - \frac{2T_t \Delta d}{W \ell_2}$$



$$y' = \frac{W}{2T_t} \left( 2\chi - \ell_2 - \frac{2T_t \Delta d}{W\ell_2} \right) \quad \text{여기에 조건 } (\chi = \ell_1 \text{ 일 때 } y' = 0)$$

을 대입하면  $\ell_1 = \frac{\ell_2}{2} + \frac{T_t \Delta d}{W\ell_2}$  가 되어 변형하면



$$\left(\ell_1 - \frac{\ell_2}{2}\right) \frac{W\ell_2}{T_t} = \frac{\ell_1}{T_m} \left\{ W_t \times \frac{L - \ell_1}{L} + W \left( \ell_\ell - \frac{\ell_2}{2} \right) \frac{L - \ell_1 - \ell_2}{L} - \right. \\ \left. \frac{\ell_1 + \ell_2}{T_m} \left[ W_1 \times \frac{L - \ell_1}{L} + W \left( \ell_2 - \frac{\ell_2}{2} \right) \frac{L - \ell_1 - \ell_2}{L} \right] + \frac{W_1 \ell_2}{T_m} \right\} \quad (10)$$

<식 (10)>을 정리하여  $\ell_\ell$ 에 대해 풀면

$$\ell_\ell = \frac{\ell_2}{2} + \frac{W_1 T_t \ell_1}{W \{ T_m L + T_t (L - \ell_1 - \ell_2) \}} \quad (11)$$

여기에 처음의 식(3)에  $\ell_\ell$ 를 대입하면

$$\frac{P_o}{2} = W \left( \ell_1 + \frac{\ell_2}{2} + \frac{W_1 T_t \ell_1}{W \{ T_m L + T_t (L - \ell_1 - \ell_2) \}} \right)$$

고로 구하는  $P_o$ 는

$$P_o = W(2\ell_1 + \ell_2) + \frac{2W_1 \ell_1 T_t}{L T_m + (L - \ell_1 - \ell_2) T_t} \quad (12)$$

## 해설 2. 곡선당김금구의 설계 실례

다음은 cako250전차선로 시스템의 개발에서 곡선당김금구의 설계 방법을 참고로 기술하였다.

### 1. 곡선당김금구

곡선당김금구의 역할은 팬터그래프의 집전판이 균일하게 마모되도록 하기 위하여 전차선에 적절한 편위를 주기 위함이다. 우리의 경우나 일본의 경우에는 스톱퍼(stopper)를 설치하여 곡선당김금구가 최대로 압상하여도 진동방지파이프와 곡선당김금구가 접촉하지 않도록 스톱퍼를 설치하여 전차선의 압상을 제한하고 있다. 한편, 경부고속철도 및 프랑스의 경우는 스톱퍼를 설치하지 않고, 충분한 여유의 압상량을 두어 진동방지파이프와의 접촉을 피하고 있다.

#### 1.1 곡선당김금구 형상

현재 기존선에 사용하는 곡선당김금구의 최대 압상량은 100mm이고, 경부고속철도에 사용하고 있는 곡선당김금구의 최대 허용압상량은 200mm이다. 곡선당김금구의 압상량의 경우, 앞 장의 시뮬레이션 결과 및 UIC 799에서 제시한 사양을 고려하여 환경조건을 배제한 팬터그래프의 최대 허용압상량을 130mm까지 허용하고 최대 압상량을 200mm를 확보할 수 있도록 고려하였다. 그리고, 팬터그래프가 최대 200mm까지 압상하여도 곡선당김금구와 간섭이 없도록 형상을 설계하여야 한다.

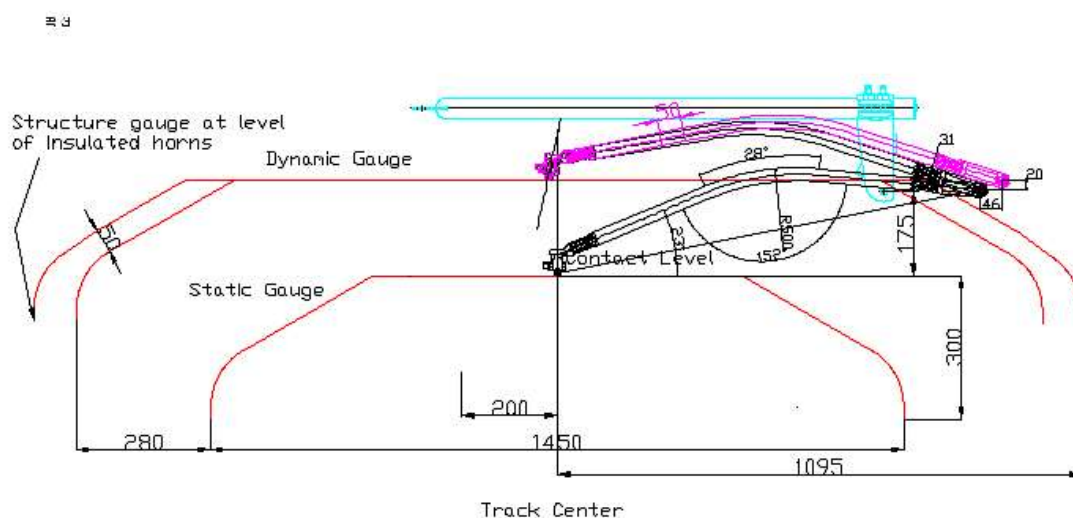


그림 5. 곡선당김금구 간섭(A00A19, 캔트>66mm 참조)

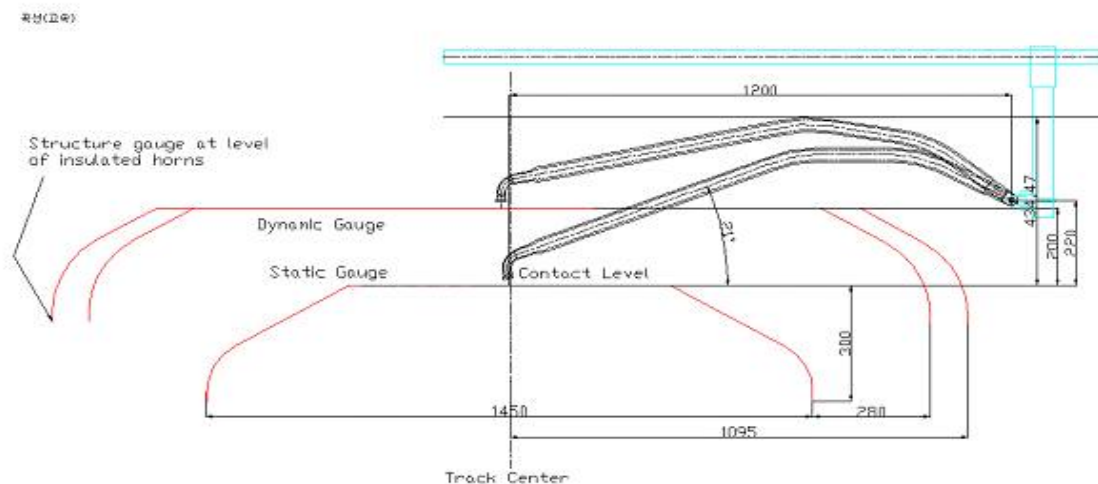


그림 6. 경부고속철도 형상 및 게이지 적용

따라서, 곡선당김금구가 200mm 압상시 Structure gauge를 고려하여 간섭이 일어나지 않도록 곡선당김금구의 형상을 변경하였다. 전차선과 암지지금구간 직선거리를 기존에 900mm에서 950mm로 늘리고, 전차선과 암지지금구간의 수직거리를 189mm로 상향 조정하여 설치되도록 하였다. 다음 그림은 개발 곡선당김금구를 gauge에 적용한 그림이다. 200mm 압상하였을 때 문제가 없음을 알 수 있다.

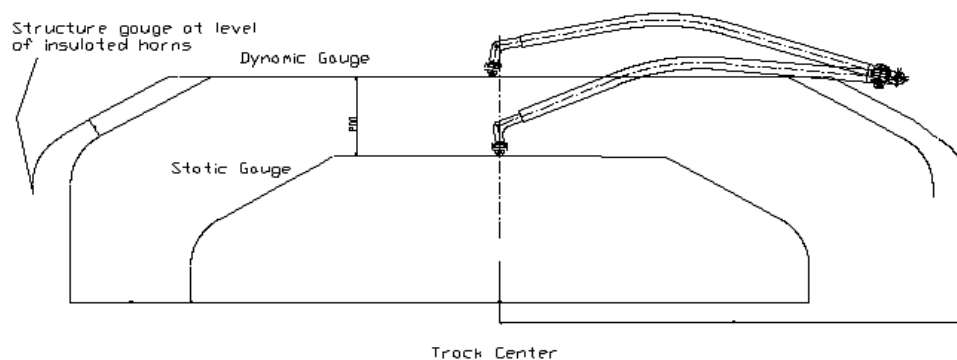


그림 7. 개발 곡선당김금구 게이지 적용결과

## 1.2 곡선당김금구 구조 설계 및 해석

길이가 늘어남에 따라 곡선당김금구의 파이프에 대한 안전성을 확보하기 위하여 상용 유한요소해석 툴인 ANSYS 11.0을 이용하여 응력 해석을 수행하였다. 해석시 빔요소 (beam element)를 이용하여 모델링 하였고, 하중조건 및 구속 조건은 아래와 같다.

- (1) 하중조건 : 전차선 위치에서 300N의 힘을 암지지금구와 평행하게 작용하였다. 한국 철도표준규격의 인장 내하중 조건을 참조하여 기존의 곡선당김금구와 동일한 조건에서 동일한 하중을 가하였을 때 기존 곡선당김금구의 최대응력 이하의 응력을 갖

는 직경 선택하였다.

(“한국철도표준규격 곡선당김금구 KRS PW 0311-06(2006. 5)”의 “인장 내하중조건”에서 곡선당김금구 파이프 지지 고리를 구속하고 전차선에 300kg의 하중을 가하였을 때 영구변형이 없어야 한다라고 규정함)

(2) 구속 조건은 파이프 지지고리에서 변위는 구속하고, 회전은 허용하였다.

기존의 곡선당김금구의 경우 파이프 중간부위에서 약 257MPa 정도의 최대 응력이 작용하였다.

제안한 형상에 기존의 곡선당김금구 파이프( $\phi=27$ ,  $t=4.5$ )를 사용하였을 때 최대 약 271MPa 정도의 응력이 작용하였다.

따라서, 파이프의 무게를 줄이면서 강도를 높게 하게 하기 위하여 파이프의 지름( $\phi$ )을 35mm로 올리고 두께( $t$ )를 3mm로 고려하여 응력해석을 수행한 결과, 아래 그림과 같이 최대 약 203MPa 정도의 응력이 작용하였다. 따라서, 기존의 곡선당김금구와 비교하여 개발 곡선당김금구의 파이프가 강도 측면에서 더 유리하게 설계하였다.

곡선당김금구의 무게를 줄이기 위하여 기존의 회전클립, 압착부 및 접속부에 대한 설계를 변경하였다. 경부고속철도에 사용하고 있는 곡선당김금구의 회전클립 및 접속부를 기초로 아래와 같이 형상을 설계하여 제작하였다. 또한, 전차선이 상하좌우로 이동할 수 있도록 아래 그림과 같이 곡선당김금구와 암지지금구간의 취부를 설계하였다. 무게는 기존의 곡선당김금구가 1610g인데 비해 개발된 곡선당김금구는 1430g으로 약 200g 경량화 하였다.

다음은 개발한 곡선당김금구의 최종 외형이다.

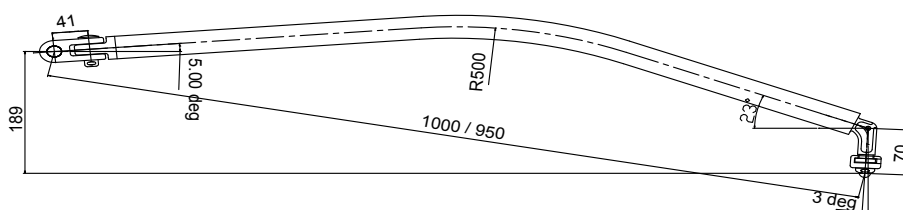


그림 8. 개발 곡선당김금구 형상

### 1.3 공인 기관 시험

제작된 곡선당김금구에 대하여 공인 기관(한국철도기술연구원 시험인증센터)에 다음과 같이 한국철도표준규격 “KRS PW 0311-06 곡선당김금구”에 따른 기계적 성능시험을 의뢰하여 수행하였으며, 시험 결과에서 보는 바와 같이 기계적 안전성에 대하여 성능이 보장됨을 확인하였다.



표 1. 곡선당김금구 성능시험

항목	하중점	시험기준	시험결과
인장하중	전차선과 곡선당김금구의 선단 구멍간	2,942N에서 3분간 유지후 이상유무	이상없음
압축내하중	전차선과 곡선당김금구의 선단 구멍간	1,961N에서 3분간 유지 후 이상유무	이상없음
이어의 비틀림 내하중		49Nm에서 3분간 유지후 이상유무	이상없음
이어의 미끄럼 내하중		981N에서 3분간 유지후 이상유무	이상없음
내진동 시험		2×106회 이상에서 이상유무	이상없음

인장하중, 압축내하중, 이어의 비틀림 내하중 및 미끄럼 내하중 시험을 수행하여 이상이 없었다. 그리고, 아래 그림과 같이 사용상태와 동일하게 횡하중이 작용하고 있는 상태로 가진기 옆에 곡선당김금구를 설치하고 진폭 +20mm - 0mm, 3Hz의 진동수로 2×106회 이상의 내진동 시험을 수행한 후 인장 내하중, 압축 내하중 및 미끄럼 내하중 시험을 수행한 결과도 이상이 없었다.

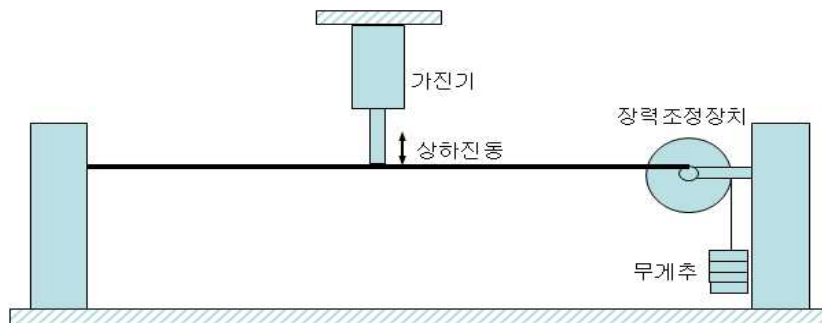


그림 9. 곡선당김금구 내진동 시험 조건

## 2. 곡선당김금구(400킬로급)

### (1) 곡선당김금구의 설계계산

표 1. 곡선당김금구의 하중케이스별 계산

(곡선로 R5000)

하중 케이스	앞경간 (m)	뒷경간 (m)	앞편위 (m)	현재편위 (m)	곡선반경 (m)	장력 (N)	풍압 (N/m)	지형 계수
Zone1, 일반개소	60	60	-0.05	0.20	5,000	34,000	19.13	1.0
Zone1, 노출개소	55	55	-0.05	0.20	5,000	34,000	19.13	1.3
Zone2, 일반개소	50	50	-0.05	0.20	5,000	34,000	29.15	1.0
Zone2, 노출개소	45	45	-0.05	0.20	5,000	34,000	29.15	1.3

하중 케이스	곡선반경으로 인한 횡장력 (N)	편위로 인한 횡장력 (N)	풍압으로 인한 횡장력 (N)	횡장력의 합 (N)	여유율 (15%) (N)	안전율 (2.5) (N)
Zone1, 일반개소	408	283.3	1,148	1,839	2,115	5,288
Zone1, 노출개소	374	309.1	1,368	2,051	2,359	5,896
Zone2, 일반개소	340	340.0	1,458	2,138	2,458	6,145
Zone2, 노출개소	306	377.8	1,705	2,389	2,747	6,869

(직선로)

하중 케이스	앞경간 (m)	뒷경간 (m)	앞편위 (m)	현재 편위 (m)	곡선 반경 (m)	장력 (N)	풍압 (N/m)	지형 계수
Zone1, 일반개소	65	65	-0.20	0.20	10,000,000	34,000	19.13	1.0
Zone1, 노출개소	60	60	-0.20	0.20	10,000,000	34,000	19.13	1.3
Zone2, 일반개소	55	55	-0.20	0.20	10,000,000	34,000	29.15	1.0
Zone2, 노출개소	50	50	-0.20	0.20	10,000,000	34,000	29.15	1.3

하중 케이스	곡선반경으로 인한 횡장력 (N)	편위로 인한 횡장력 (N)	풍압으로 인한 횡장력 (N)	횡장력의 합 (N)	여유율 (15%) (N)	안전율 (2.5) (N)
Zone1, 일반개소	0.0221	418.5	1,243	1,662	1,911	4,778
Zone1, 노출개소	0.0204	453.3	1,492	1,945	2,237	5,593
Zone2, 일반개소	0.0187	494.5	1,603	2,098	2,412	6,031
Zone2, 노출개소	0.0170	544.0	1,895	2,439	2,805	7,011



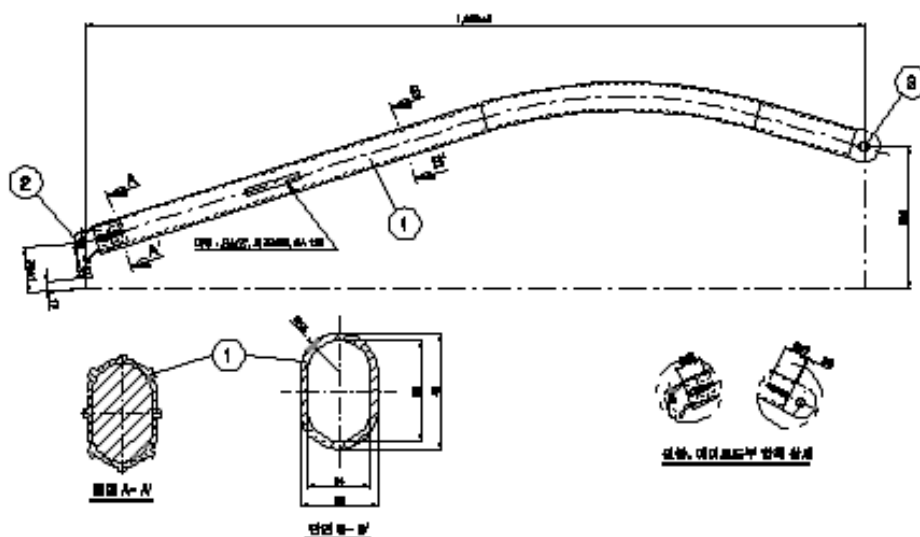
상기결과로 볼때 곡선당김금구는 풍압에 의한 영향을 가장 크게 받고 있으며, 전차선의 장력에 의한 하중의 변화는 크게 나타나지 않는 것으로 나타났다. 곡선당김금구의 횡장력이 가장 크게 미치는 조건은 Zone2, 노출개소 일 때 직선로에서 7,011 N으로 나타났으므로 설계기준 인장하중을 750 daN으로 하였다. 또한 속도가 증가함에 따라 더욱 민감한 부분이 전차선을 지지하는 곡선당김금구에 있어서 중량이므로 기존의 300, 350km/h급의 곡선당김금구에 비하여 경량화를 목적으로 다음과 같이 설계하였다.

몸체인 AL-TUBE는 트랙형으로서 횡장력에 유리한 구조로 설계하였으므로 경량화를 실천할 수 있었으며, 아이로드 및 핀볼의 재질은 고강도 AL합금인 A7075를 사용하여 단조하였고 열처리 후(인장강도 520 N/mm<sup>2</sup>) 하드 아노다이징(Anodizing)을 실시하여 표면경도를 기존의 철제품(약 HRC25)보다 높게(약 HRC40)하여 내마모 특성을 향상시킨 것도 특징이라 할 수 있다. 이와 같이 고강도에 내식성이 좋은 Al합금재질을 사용함으로써 경량화를 실천할 수 있게 되었다.

## (2) 곡선당김금구의 구조해석

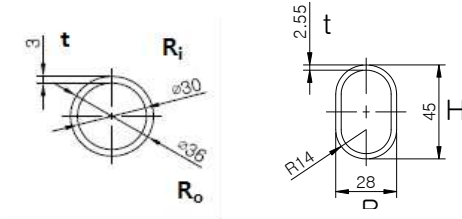
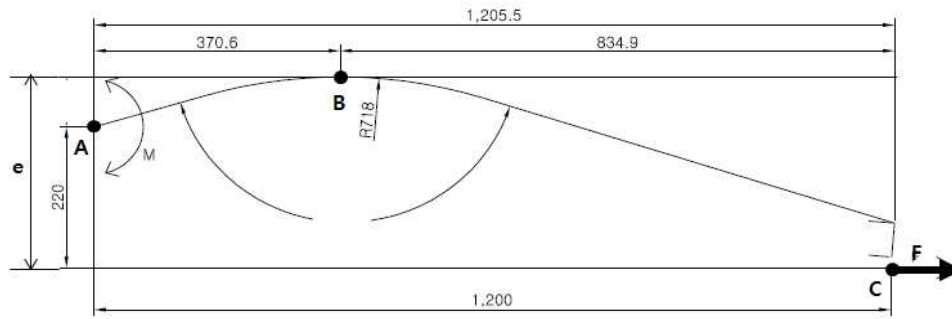
### - 해석모델

곡선당김금구 부재의 형태와 단면형상에 따른 하중조건을 아래 그림에 나타내었다.



(a) 곡선당김금구 제작도





소재의 재료특성은 다음 표와 같다.


곡선당김금구의 단면형상에 따른 변형량, 응력 및 안전율은 아래 표에 나타내었다.


해석결과 첫 번째 단면의 경우 2,300 N의 하중 작용 시 발생응력이 항복강도 이내 이므로 구조적으로 안전하다. 그리고 두 번째 단면의 경우도 2,810 N의 하중 작용 시 발생응력이 항복강도 이내 이므로 구조적으로 안전하다.



## ■ 이론적 분석

구조해석결과를 바탕으로 단면형상에 따른 이론적 연구변형하중을 산출하였다.

곡선당김금구는 편심하중을 받는 구조이므로 최대 수직응력은 B점에서 발생한다. B점에서의 수직응력( $\sigma_B$ )은 아래 식과 같다.

$$\sigma_B = \frac{F}{A} + \frac{M}{I}c = \frac{F}{A} + \frac{(Fe)}{I}c = F\left(\frac{1}{A} + \frac{ec}{I}\right)$$

여기서 편심거리  $e$ 는 곡선당김금구가 회전함에 따라 감소하게 된다. 곡선당김금구의 경우 초기 편심거리는 298 mm 이었으나, 곡선당김금구의 고정점에서 회전이 가능하므로 수평하중 작용 시 응력을 발생시키는 실제 편심거리는 그림 예서와 같이 각  $e'=233.2\text{ mm}$ 와  $e'=253.6\text{ mm}$ 가 된다. 따라서 곡선당김금구에 작용시킬 수 있는 영구변형하중( $F_y$ )은 아래 식을 통해 각각 산출할 수 있다.

$$F_y = \frac{\sigma_y}{\left(\frac{1}{A} + \frac{ec}{I}\right)}$$

위 식을 이용하여 변형을 고려한 단면형상별 연구변형하중을 산출하여 표에 나타내었다.

표 3. 파이프의 단면형상에 따른 곡선당김금구의 영구변형하중 (A5083 H32 TD)

No.	t	Ro	Ri	B	H	A	I	c	e'	Fy	$\sigma_y$
	mm	mm	mm	mm	mm	mm <sup>2</sup>	mm <sup>4</sup>	mm	mm	N	MPa
1	3	18	15	36	36	311.0	42687.2	18	<b>233.2</b>	<b>2314.1</b>	235
2	2.55	15	12.45	28	45	306.6	71625.3	22.5	<b>253.6</b>	<b>2833.4</b>	235

여기서 단면2차모멘트 I는 아래 식을 통해 계산된다.

$$\textcircled{1} I = \frac{\pi}{4}(R_o^4 - R_i^4)$$

$$\textcircled{2} I = I' + 2dQ + Ad^2 = 2\left\{\frac{\pi}{8}(R_o^4 - R_i^4) + 2\left(\frac{H-B}{2}\right)\frac{2}{3}(R_o^3 - R_i^3) + \frac{\pi}{2}(R_o^2 - R_i^2)\left(\frac{H-B}{2}\right)^2\right\} + \frac{(2t)(H-B)^3}{12}$$

주어진 하중 조건에서 곡선당김금구의 단면형상별 구조해석을 수행하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 두 번째 단면이 첫 번째 단면에 비해 강도상 유리한 것으로 나타났다.
- 구조해석결과 첫 번째 단면은 2,300 N(300km/h급의 소성변형하중)의 하중을, 두 번째 단면은 2,810 N(400km/h급의 소성변형하중)의 하중을 작용 시켰을 때는 모두 항복강도 이내로 연구변형이 발생하지 않는 것으로 나타났다.
- 해석결과 첫 번째 단면(350km/h급)에 400km/h급 변형하중 2,810N을 작용 시켰을 때는 응력이 초과하여 영구변형이 발생하게 된다.



## RECORD HISTORY

Rev.0(12.12.5) 철도설계기준 철도설계지침, 철도설계편람으로 나누어져 있는 기준 체계를 국제적인 방법인 항목별(코드별)체계로 개정하여 사용자가 손쉽게 이용하는데 목적을 둬.

Rev.4(15.12.30) 400km/h급 곡선당김금구 설계방법 추가(해설)