

강체전차선로(R-Bar) 구간에서 팬터그래프와 전차선 간의 아크발생에 대한 원인 분석

Cause Analysis on Arc between Pantograph and Trolley Wire in a Rigid Bar

오테엽*, 박종문*, 추성식*, 김효기*, 최정운*†

Taeyeob. Oh*, Jongmoon. Park*, Seongsik. Chu*, Hyoki. Kim*, Joungun. Choi**

Abstract Since the railway construction in today is mainly built underneath the ground, a demand on Overhead Conductor Rail has increased due to its capability to reduce costs by reducing area of the underground structure. Overhead Conductor Rail is categorized into T-Bar, majorly used in section with 1,500V DC where current capacity is high, and R-Bar used in the section with 25,000V AC where current capacity is low

The study proposes a solution for stable supply of electricity to the train through identifying locations where the arc breaks out between pantograph and trolley in R-Bar section and analysis of correlation between standard of R-Bar and expansion joint.

Keywords : Overhead Conductor Rail, R-Bar, Expansion Joint

초 록 최근 철도건설이 지하화 되면서 지하구조물의 단면적을 줄여 건설비를 줄이기 위해 가공 강체전차선로 방식의 수요가 증가하고 있다. 가공 강체전차선로 방식은 T-Bar 와 R-Bar 로 구분되며, 국내에서는 전류용량이 큰 DC 1,500V 구간에서 T-Bar 를 사용하고 있고, 전류용량이 적은 AC 25,000V 구간에서는 R-Bar 가 사용되고 있다.

본 논문에서는 강체전차선로 중 R-Bar 구간에서 발생하는 팬터그래프와 전차선 간의 아크 발생 지점을 확인하여, R-Bar 규격과 신축장치 형식에 따른 상관관계를 분석하고 대안을 제시하여, 전동차에 안정적인 전기를 공급하고자 한다.

주요어 : 강체전차선로, R-Bar, 신축장치

1. 서 론

강체전차선로 방식은 지하구간과 같이 협소한 장소에 하수강을 설치하고 가동브래킷으로 강체를 지지하는 방식으로, 장력장치, 곡선당김금구 등의 장치가 필요 없어 설비가 간단하고, 전차선에 장력이 작용하지 않아 단선의 위험이 없으며, 강체의 전기적 용량이 커서 대용량의 전력공급이 가능한 전차선로 방식이다. 그러나 커티너리 전차선로 방식에 비해 강체전차선로 방식은 유연성이 낮아 전차선의 마모가 많이 발생하고, 팬터그래프와 전차선간의 추종성이 좋지 않아 이선현상 및 아크 발생이 일어나는 경향이 있으며 전동차의 전자장비를 손상 시키는 경우도 있다.

† 교신저자 : 네오트랜스 주식회사 PM본부 PM/SE팀(joungun.choi@doosan.com)

* 네오트랜스 주식회사

일반적으로 강체전차선로 구간에서 발생하는 아크의 경우 주로 신축장치, 분기지점(시사스, 건넌선)에서 발생하며, 일반개소에서는 지지점 근처 또는 지지점과 지지점 중간지점에 연결금구가 설치되는 경우 아크가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

본 논문에서는 2016년 2월 개통 예정인 신분당선 2단계(정자~광교) 구간에 적용된 L=10m 규격의 R-Bar와 Ramp형 신축장치가 팬더그래프와 전차선 간에 발생하는 아크 경감의 원인을 분석하여 적정성을 확인하고자 한다.

2. 본 론

2.1 R-Bar 규격

2.1.1 R-Bar 구간 중 일반지지점에서의 아크발생

강체전차선로 구간에서는 운행속도 및 강체의 처짐을 감안하여 지지점 간격을 선정하기 때문에 일반적으로 아크 발생이 많지 않다. 그러나 R-Bar와 R-Bar를 연결하는 연결금구가 설치된 위치에 따라 아크 발생 빈도가 상이하며, 그 위치가 지지점근처 또는 지지점과 지지점 중앙부인 경우 아크 발생 빈도가 높은 것을 확인하였다.

R-Bar는 연결금구를 통해 볼트로 접속되어 있고, R-Bar의 볼트 구멍 (12mm)과 연결볼트 (M10)의 규격 차에 의한 공극이 있어, 연결금구 설치 지점에 작용하는 휨모멘트에 의한 약간의 변형이 생기는 것을 확인하였다.

2.1.2 R-Bar에 작용하는 휨모멘트

R-Bar에 작용하는 휨모멘트를 확인한 결과 Fig. 1와 같이 R-Bar의 위치에 따라 휨모멘트의 크기와 방향이 다르게 작용하는 것을 알수 있다.

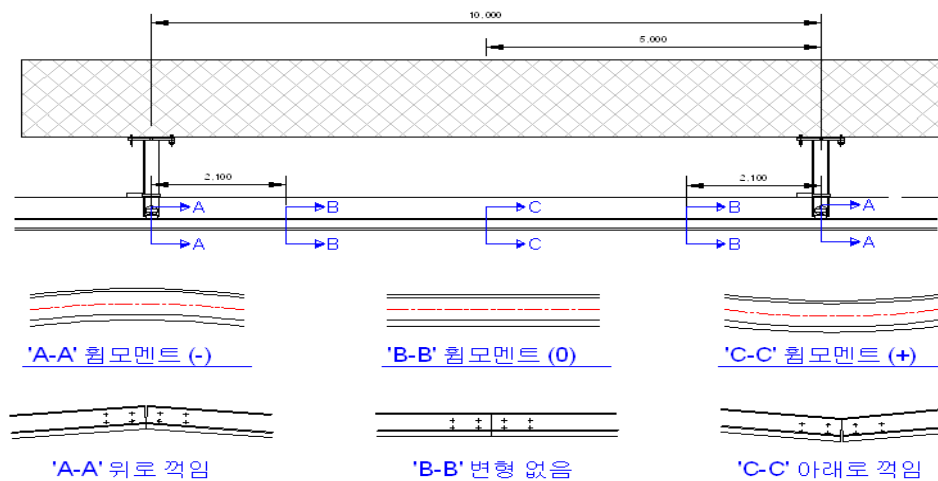


Fig.1 R-Bar 위치별 휨모멘트

R-Bar는 A-A(지지점) 부근에서 위로 휘어지는 모멘트(-)가 작용하고, C-C(지지점과 지지점 중간) 부근에서는 아래로 휘어지는 모멘트(+)가 작용한다.

Fig.1과 같이 -값이 작용하는 A-A 지점에 연결금구가 위치하게 되면 위로 꺾임이 발생할 수 있으며, +값이 작용하는 C-C지점에 연결금구가 위치하면 아래로 꺾임이 발생할 수 있다

따라서 A-A지점의 경우 Fig. 2와 같이 전동차의 팬티그래프가 전차선에 약간의 충격을 가하여 아크가 발생하고, C-C지점의 경우는 팬티그래프가 전차선에서 이선되면서 아크가 발생할 수 있다. 물론 속도가 빠른 경우 이러한 현상이 더욱 두드러지게 발생한다.

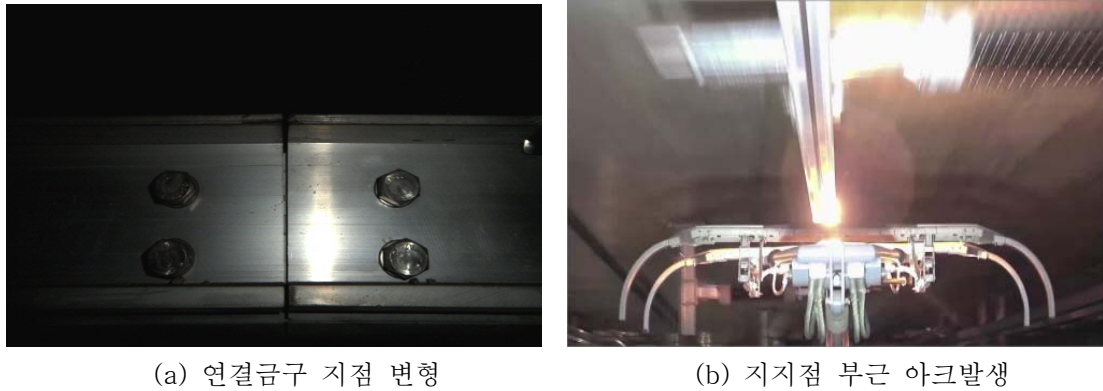


Fig.2 연결금구 지점 변형에 의한 아크발생

2.1.3 휨모멘트값이 0인 지점(B-B)의 위치

R-Bar에 작용하는 휨모멘트를 계산하기 위하여 강제전차선로의 지지물 형식을 검토해보면, R-Bar에는 R-Bar 자체 중량과 전차선의 중량이 등분포로 작용하고 있고, R-Bar는 지지점에서 가동브래킷의 행거크래프에 의해 볼트로 체결되어 있어 부정정구조물의 양단고정보로 볼 수 하였다. 부정정구조물 양단고정보에 등분포하중이 작용할 때 휨모멘트는 Fig. 3과 같이 포물선 형태로 표현된다

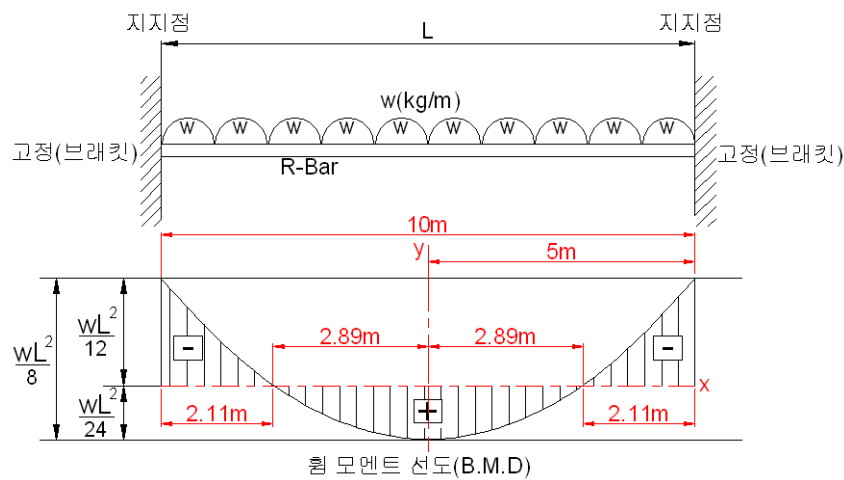


Fig. 3 양단고정보(등분포하중)에서 휨모멘트선도(B.M.D)

Fig. 3에서와 같이 지지점에서의 휨모멘트 값과 중심부에서의 휨모멘트 값을 포물선 기본 식 ‘식(1)’ 에 대입하여 ‘식(3)’ 을 구한다

$$y = ax^2 + b \quad (1)$$

$$x = 0 \text{ 이면 } -\frac{wL^2}{24} = a \cdot 0^2 + b, \quad b = -\frac{wL^2}{24}$$

$$y = ax^2 - \frac{wL^2}{24} \quad (2)$$

$$x = \frac{L}{2} \text{ 이면 } \frac{wL^2}{12} = a\left(\frac{L}{2}\right)^2 - \frac{wL^2}{24}, \quad a = \frac{w}{2}$$

$$y = \frac{w}{2}x^2 - \frac{wL^2}{24} \quad (3)$$

‘식(3)’ 을 이용하여 휨모멘트값이 0인 지점을 구하기 위해 $y = 0$ 을 대입하면

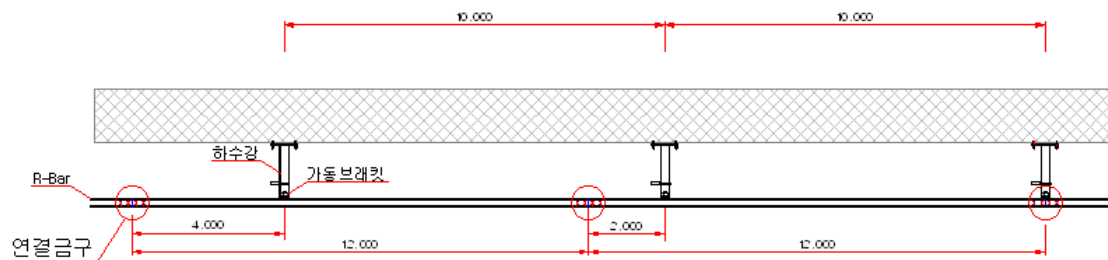
$$0 = \frac{w}{2}x^2 - \frac{wL^2}{24}, \quad \frac{w}{2}x^2 = \frac{wL^2}{24},$$

$$x = 0.2887L \quad (4)$$

‘식(4)’ 에 경간 10m를 대입하면 2.887m의 값이 나오고, 지지점 기준으로 2.11m 가 된다.

2.1.4 R-Bar 규격 선택

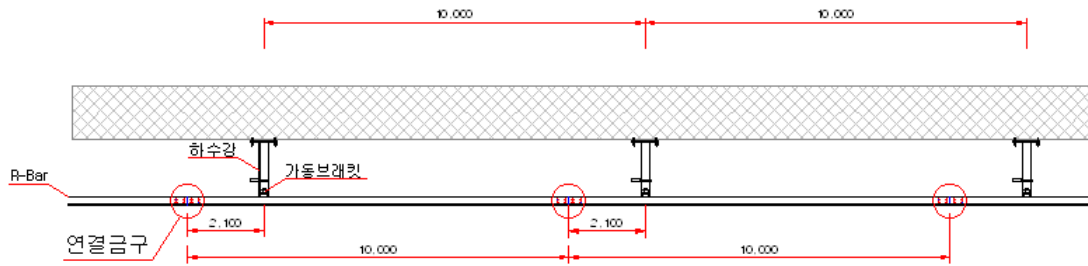
지지점 간격이 10m인 구간에 기존의 12m 규격의 R-Bar를 사용할 경우 Fig. 4와 같이 R-Bar의 연결금구 위치가 변화 되며, 연결금구가 지지점 또는 경간의 중심부에 위치한 경우 Fig. 2와 같은 변형에 의한 아크가 발생할 수 있다.



12M R-Bar 설치도

Fig. 4 L=12m 규격의 R-Bar 설치 시 연결금구 위치

따라서 R-Bar의 규격은 Fig. 5와 같이 지지점 경간과 같은 길이의 규격을 사용하고 연결금구의 위치를 휨모멘트 값이 0이 되는 위치에 설치할 때 가장 안정적인 형태를 유지하며 아크 발생을 최소화할 수 있다.



10M R-Bar 설치도

Fig.5 L=10m 규격의 R-Bar 설치 시 연결금구 위치

그러나 R-Bar의 규격 선택에는 Table 1과 같이 서로 장단점이 있으니 운행속도, 경제성 등

Table 1 R-Bar 규격 비교

구 분	L = 10m	L = 12m
장단점	-R-Bar 운반이 용이함 -10m 경간에 설치 시 아크 최소화 -연결금구 수량 증가(비용증가) -연결작업 20% 증가	-R-Bar 연결지점이 적어 작업 용이 -연결금구 수량이 적음(비용절감) -10m 경간에 설치시 아크 발생 우려
설치사례	-신분당선 2단계 (정자~광교) -해외 (터키, 독일 등)	-분당선, 과천선, 공항철도, -신분당선 1단계

충분한 검토가 필요한 것으로 판단된다.

2.2 신축장치



2.2.1 신축장치 (Expansion Joint)

강체설비는 알루미늄바 형태로 제작되어 열팽창계수($2.4 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}$)값 만큼 온도변화에 따라 신축이 발생한다. 400m를 1섹션으로 설계 시 1°C 온도변화에 9.6mm의 신축이 발생하며, 터널 구간 설계 기준온도(-5 ~ 30 도)를 감안하면 최고 336mm까지 신축이 발생한다.

따라서 신축장치는 강체전차선로 방식에서 가장 중요한 설비이며 주요 점검개소이다. 철도 건설공사 전문시방서에 따르면 운행속도 100km/h를 초과하는 구간은 일체형, 운행속도 100km/h 이하의 구간은 2개의 램프(Ramp) 평행구간으로 구성되는 신축장치를 사용하도록 되어 있다.

2.2.2 일체형 신축장치와 Ramp형 신축장치 비교

Table 2 신축장치 비교

구 분	일체형 (Furrer+Frey사)	Ramp형
형 태		
장단점	<ul style="list-style-type: none"> -고속운행에 적합 -자재비가 고가임 -곡선구간에서 수평조정이 어려움 -자체무게에 의해 처짐 발생 	<ul style="list-style-type: none"> -설치비가 상대적으로 저렴 -시공 및 유지보수가 용이함 -곡선구간에서 수평조정 가능
적용사례	<ul style="list-style-type: none"> -분당선, 과천선, 공항철도, -신분당선 1단계 	<ul style="list-style-type: none"> -국내 설치 사례 없음 -신분당선 2단계 시공완료

신축장치는 형식에 따라 Table 2와 같이 장단점을 비교할 수 있다.

2.2.3 곡선 구간에서 일체형과 Ramp형 신축장치 비교

신분당선 2단계(정자~광고) 구간은 타 노선에 비해 많은 곡선 구간으로 설계되어 있다. 최고 R=250m에 캔트값 120mm 구간이 6개소이며, R=300m, 350m 구간도 다수 있다.

당초 전차선로 설계 시에 신축장치 설치 위치를 곡선구간을 배제하여 설계할 수 있으면 관계 없으나, 신분당선 2단계의 경우 R=350m 이하의 곡선개소가 연속적으로 산재되어 있어, 곡선구간에 신축장치가 설치되지 않게 하기 위해서는 1섹션의 길이가 짧게는 200m에서 길게는 600m까지 상이하게 설치되어야 해 시공 및 유지보수에 어려움이 예상되었다.

본 논문에서는 R=250m 곡선지점에서 신축장치가 설치되었을 경우 일체형과 Ramp형에서 팬터 그래프와 전차선의 습동을 시뮬레이션으로 비교하였다.

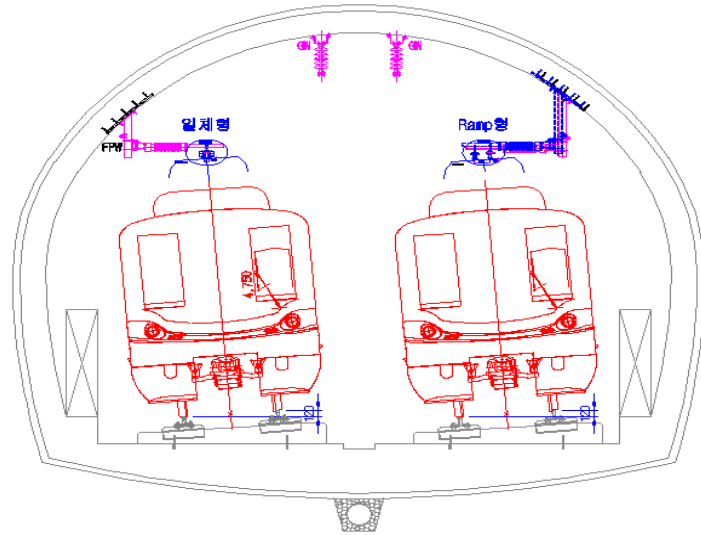
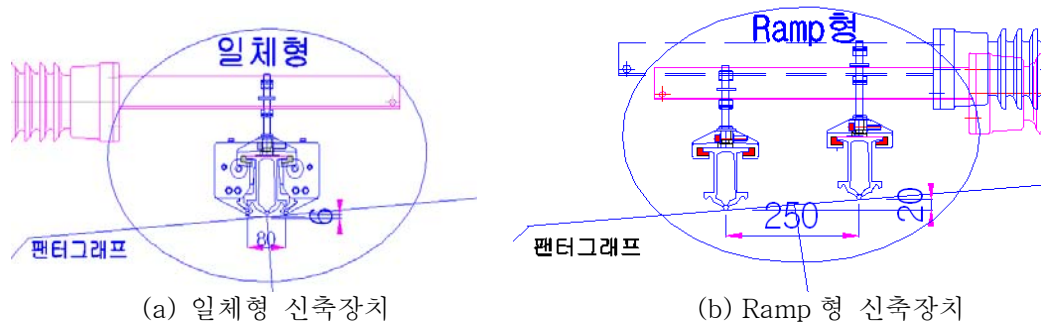


Fig.6 곡선지점에서 터널 단면도



(a) 일체형 신축장치

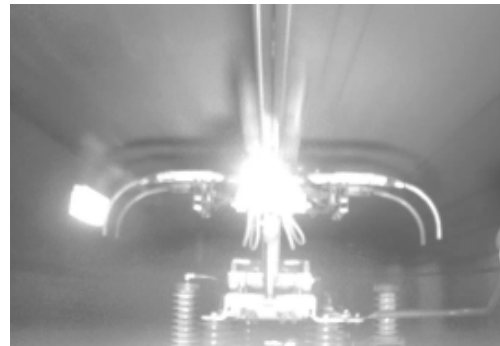
(b) Ramp형 신축장치

Fig.7 곡선구간에서 신축장치

Fig. 6와 같이 $R=250m$, 캔트 120mm 지점에서 열차와 팬터그래프는 같은 기울기로 기울어진다. 따라서 Fig.7 (a)와 같이 일체형 신축장치를 설치 시 보조 전차선간의 높이 차이는 약 6mm정도 발생한다. 그러나 국내에 설치되는 가동브래킷은 수평조정이 불가능한 구조로 되어 있어



(a) 일체형 신축장치 편마모 현상



(b) 신축장치 지점 아크발생

Fig.8 일체형 신축장치 지점 아크

전동차의 진입 시 Fig. 8과 같이 팬터그래프에 충격이 가해지며 아크가 발생할 수 있다.

그러나 Fig.7 (b)와 같이 Ramp형 신축장치를 R-Bar중심간격 250mm로 설치할 경우 20mm의 높이 차이가 발생하나, 위 그림과 같이 R-Bar를 개별로 지지하고 있어 높이 조정이 가능하다. 그러므로 R-Bar의 고저차를 설계기준인 1,000분의 1이하가 되도록 자유롭게 설치가 가능하여 전동차의 진입 시 팬터그래프에 충격을 줄일 수 있다

3. 결 론

강체전차선로(R-Bar) 구간에서의 아크 발생 원인을 분석한 결과 R-Bar의 규격은 지지물의 간격과 동일하게 설치하고, 휨모멘트가 0인 지점에 연결금구를 설치하는 것이 가장 안정적인 지지방법임을 확인하였다. 그러나 R-Bar 규격이 짧아지면 연결금구의 수량이 늘어나고, 곡선구간에서는 연결금구 설치 위치가 상하선이 조금씩 반대로 이동하여 R-Bar의 가공이 필요해 인건비 및 자재비가 추가로 발생한다. 따라서 R-Bar의 규격 선택 시 직선 또는 곡선구간, 운행속도, 경제성 등을 종합적으로 검토하여 선정할 필요가 있다 .

그리고 신축장치의 경우 철도건설공사 전문시방서에 명시된 것처럼 100km/h 이하로 운행하고 곡선이 많은 구간에서는 Ramp형 신축장치로 설치하는 것이 설치비용 및 유지보수 편의성, 집전성능 등 모든 부분에서 우수한 것으로 보이고, 직선구간이며 고속으로 운행하는 경우 일체형 신축장치를 사용하되 선로특성에 적합한 형태의 것을 선정할 필요가 있다.

최근 철도건설이 지하화로 추진되는 경향이 있어 강체전차선로방식의 건설이 많을 것으로 예상된다. 따라서 R-Bar의 설계시 곡선반경, 속도에 따른 지지점과 R-Bar길이, 신축장치 1개 섹션의 적정 길이 선정을 위해 추가적인 연구가 필요하다.

또한 신분당선 2단계에 적용된 L=10m R-Bar와 Ramp형 신축장치는 장기적인 관찰과 분석을 통한 추가적인 검증이 필요하다.

참고문헌

- [1] Rigid Catenary (K.L.K, Spain)
- [2] Overhead Conductor Rail System (Balfour Beatty Rail, Germany).
- [3] Method Statement for Installation of Rigid Catenary in BC1 Tunnels (Marmaray Link, Turkey).
- [4] Railway Design Guide and Manual 10 (Electrification) (Korea Rail Network Authority)
- [5] Railway Construction Special Specifications (Electrification) (Korea Rail Network Authority)