

250km/h급 강체전차선 시스템 개발을 위한 R-BAR 특성 고찰  
**The Study on R-BAR (Rigid Conductor) Characteristics  
for Developing High-speed Rigid Overhead Catenary System up to 250km/h**

배상준\*<sup>†</sup>, 장광동\*

Sangjoon Bae\*<sup>†</sup>, Kwang Dong Jang\*

**Abstract** The rigid catenary system is mainly applied to the subway and recently studies on the rigid catenary system have been conducted for applications such as tunnels of high-speed line and speed improvement of a convention lines. Especially in overseas, a high-speed rigid catenary system had been developed for maximum speed up to 250km/h and was applied to a commercial high-speed line.

Power feeding performance which is most important in a rigid catenary system can be measured by contact force and characteristics of this contact force are related to the shape and material of the R-BAR. In this paper, we analyze the measurements of contact force of a rigid catenary system which was developed in Korea and tested with a single arm pantograph after that we compare static characteristics of home and abroad R-BAR's which have various shapes and materials. Moreover, we also propose the development direction of high-speed R-BAR which is applicable to high-speed line up to 250km/h.

**Keywords** : Rigid catenary, R-BAR, Rigid conductor, 250km/h, High-speed

**초 록** 강체전차선 시스템은 지하철에 주로 적용되었으며, 최근 열차속도의 향상과 고속 구간의 터널 적용을 위한 연구가 국내외에서 진행되어 왔다. 특히 해외에서는 최고속도 250 km/h 구간에 적용 가능한 고속용 R-BAR 시스템이 개발되어 일부 고속 구간에 적용되었다.

강체전차선 시스템의 가장 중요한 특성인 급전성능은 접촉력으로 측정이 가능하며, 이러한 접촉력 특성은 R-BAR의 형상 및 재질에 따른 정적특성과도 상관관계가 있다. 본 논문에서는 국내에서 개발된 R-BAR의 정적 특성 및 현장설치 검증을 위해 싱글 암 팬터그래프에서 측정된 접촉력 측정 결과를 분석하고, 국내외에서 개발된 R-BAR의 형상에 따른 정적 특성 및 적용 알루미늄 합금 재료의 특성에 대해 3D 형상설계 툴을 이용하여 고찰한 결과로 250km/h급 R-BAR 개발 방향을 제시하고자 한다.

**주요어** : 강체전차선, R-BAR, 강체, 250km/h, 고속

† 교신저자: LS전선(주) 제품기술연구소 (sjbae@lscns.com)

\* LS전선(주) 제품기술 연구소

## 1. 서론

강체전차선 시스템은 터널 단면적을 줄일 수 있고, 유지보수에 장점이 있어서 도시철도 등 터널 구간에 주로 사용되고 있다. 국내에서 사용되는 강체전차선 시스템은 스페인, 스위스, 프랑스 등의 해외 제조사에서 전량 수입되어 사용되었으나, 최근 국산화 개발에 성공하여 대불공단선 대불터널의 일부 구간에 설치되어 집전성능 시험을 완료하였다.

해외에서는 강체전차선(이하 R-BAR)의 형상과 지지 방식의 변경을 통해 고속 구간에 적용하려는 연구가 진행되어 왔으며, 최근 개발된 제품은 설계속도 250km/h 에도 적용 가능한 제품으로 알려져 있다.

본 논문에서는 국산화 개발된 R-BAR 의 집전성능 분석과 최근 개발된 해외 R-BAR 와 국산 R-BAR 의 형상 및 재질을 상호 비교 분석함으로써, 향후 250km/h 급의 고속선에도 적용 가능한 R-BAR의 개발 방향에 대해서 고찰해 보았다.

## 2. 본론

### 2.1 국산화 개발 강체전차선 시스템의 집전 성능 분석

#### 2.1.1 집전성능 측정 개요

집전성능 측정은 전차선과 팬터그래프간의 접촉력을 측정하는 방법과 이선 아크량을 측정하는 방법이 있으며, 접촉력을 측정하는 방법은 팬터그래프에 힘 센서 및 가속도 센서를 부착하여 운행 중 팬터그래프와 전차선간의 접촉력을 측정하는 방식이다.

국산화 개발된 강체전차선 시스템의 집전성능 평가를 위해 접촉력을 측정하였으며, 싱글암 팬터그래프를 사용하는 시험 전동차를 70km/h, 90km/h 로 운행하면서 접촉력을 측정하였고, 추가로 80km/h 로 운행하며 집전 전압 및 전류를 측정하였다.

#### 2.1.1 접촉력 측정 절차

국산화 개발 강체전차선이 설치된 대불선의 현황은 다음과 같으며, 전체 터널구간 중 200m 구간에 국산화 개발된 강체전차선이 포설되었다.

- 대불선 총연장 : 12km
- 전차선 공급전압 : AC 25kV
- 교량구간 : 7개소 3,783m
- 터널구간 : 1개소 2,462m(단선)
- 선로 최고속도 : 90km/h

시험 전동차의 정상 팬터그래프 공기압 조건(60N)에서 속도를 올려가며 접촉력과 차량의 집전 전압/전류를 측정하였다. 접촉력은 시험 전동차의 속도가 70km/h 와 90km/h 에서 측정하였으며, 집전 전압/전류는 80km/h 에서 측정하였다.

#### 2.1.2 측정 결과

시험 전동차를 국산화 개발 강체전차선로가 설치된 구간에서 80km/h로 주행할 수 있도록 열차의 출발 위치를 정하여 열차의 집전 전압 및 전류를 측정하였다. Fig.1 은 집전 전압과 전류를 측정된 파형으로 열차가 운행할 때 팬터그래프를 통하여 정상적으로 전압과 전류가 집전되는 것을 확인하였다.

EN50119에 따른 통계적 최소 접촉력은  $F_m - 3\sigma$  ( $F_m$  : 평균 접촉력,  $\sigma$  : 접촉력 표준편차)으로 표현될 수 있으며, 시험 전동차의 속도를 70km/h 와 90km/h 로 정속주행할 때의 접촉력 측정결과 및 최소 접촉력은 Table 1 과 같다. 통계적 최소 접촉력은 이선과 관련이 있으며, 속도가 증가할수록 작아지나, 모두 양의 값을 나타내고 있어서 속도90km/h 에서 이선은 발생되지 않는 것을 확인할 수 있다. 통계적 최소 접촉력은 접촉력의 변화와 관련된 값으로, 시험 구간이 터널 입구부에 위치하고 있고, 터널 또한 단선 터널로 터널 단면적이 상대적으로 작아 전동차 주변 공기 와류에 의한 영향을 민감하게 받은 것으로 판단된다.

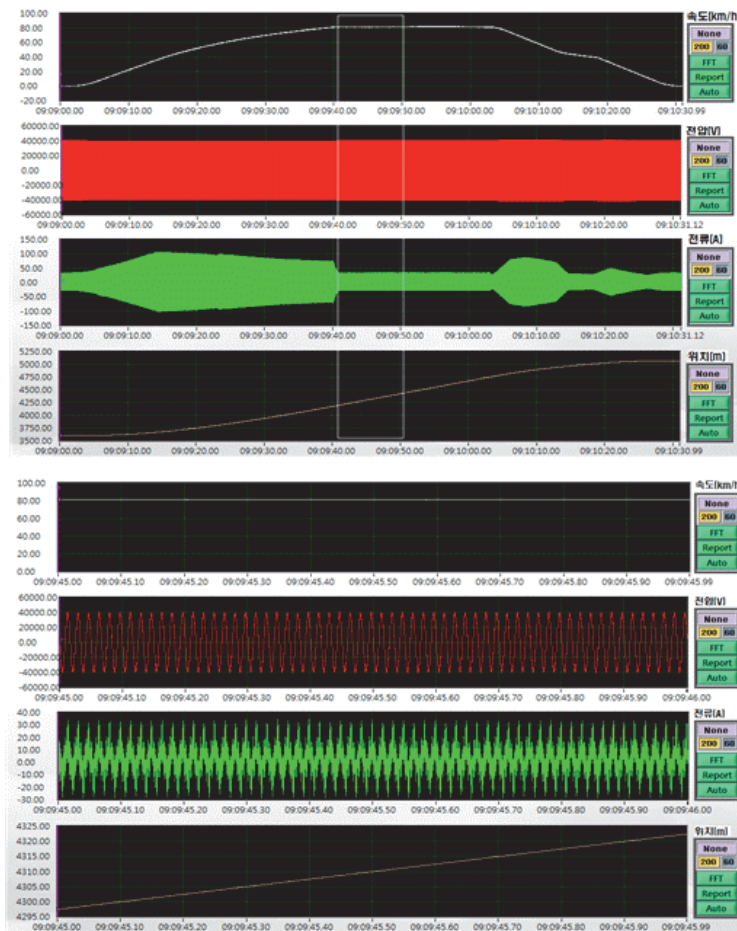


Fig. 1 Voltage and current wave at 80 km/h

Table 1 Contact force

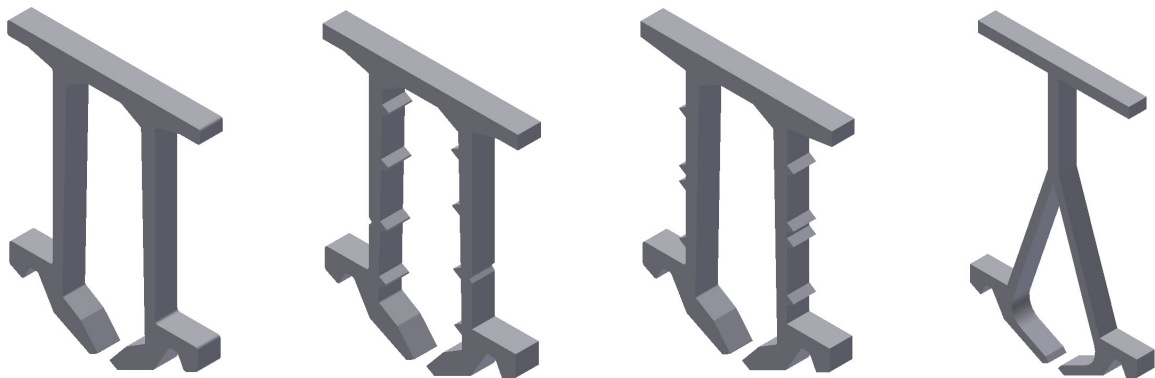
Average speed [km/h]	$F_m$ [N]	$3\sigma$ [N]	$F_m - 3\sigma$ [N]
68.9	75.1	62.2	12.9
70.3	73.3	64.2	9.2

89.4	79.0	75.9	3.1
89.0	78.2	70.5	7.8

## 2.2 국산화 개발 R-BAR 와 최근 해외 개발 R-BAR 상호 비교

### 2.2.1 형상 특성

국내외에서 사용되는 대표적인 R-BAR 형상을 입수하여 치수를 측정한 후 3D 형상설계 틀을 활용하여 모델링 한 결과는 Fig. 2 와 같다. 특히 (b) 와 (c) 는 각각 설계속도 250km/h 와 200km/h 에서 사용 가능한 제품으로 알려져 있다. R-BAR 형상은 재료의 탄성계수와 더불어 강성(rigidity)과 밀접한 관련이 있는 2차 단면 모멘트를 결정하며, 강성이 커질수록 자중에 의한 처짐량도 작아져 일반적으로 차량 운행 속도에 영향을 미친다. Fig. 2 의 형상에 대한 2차 단면 모멘트는 Table 2 와 같으며, 국산화 개발된 R-BAR 의 2차 단면 모멘트와 250km/h 급 고속용 R-BAR 의 2차 단면 모멘트의 차이는 1.2% 정도로 처짐량 감소에 의한 속도 향상은 미미할 것으로 판단된다. 2차 단면 모멘트는 현재 스페인 마드리드에서 사용 중인 (c) 구조가 가장 크다.



(a) Domestic (~120km/h)

(b) Swiss (~250km/h)

(c) Germany (~200km/h)

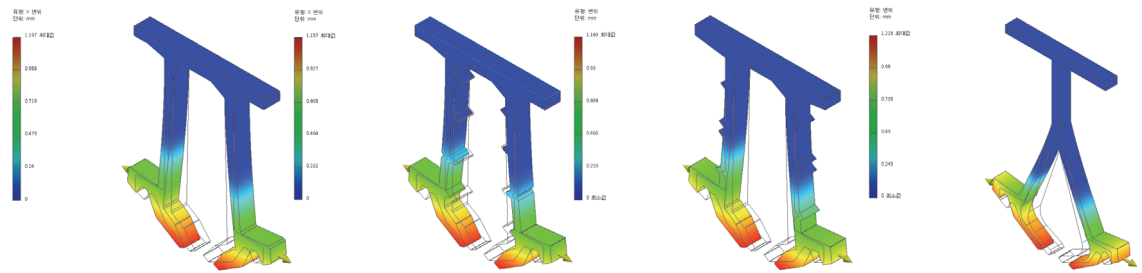
(d) Spain (~140km/h)

Fig. 2 R-Bar shape in various countries

Table 2 Shape properties

Property	Domestic (~120km/h)	Swiss (~250km/h)	Germany (~200km/h)	Spain (~140km/h)
Height [mm]	110	110	110	150
Area [mm <sup>2</sup> ]	2222	2281	2298	2280
Vertical moment of area I <sub>VER</sub> [mm <sup>4</sup> ]	116 x10 <sup>4</sup>	117 x10 <sup>4</sup>	121 x10 <sup>4</sup>	115 x10 <sup>4</sup>
Horizontal moment of area I <sub>HOR</sub> [mm <sup>4</sup> ]	334 x10 <sup>4</sup>	338 x10 <sup>4</sup>	340 x10 <sup>4</sup>	635 x10 <sup>4</sup>

동일한 재료(A6063)를 적용하고, 상단부를 고정시킨 후 전차선을 끼우기 위해 양쪽으로 균일하게 50N 의 힘을 작용했을 때 부리 간격이 벌어지는 결과는 Fig.3 과 같다



(a) Max. gap :  $\Delta=2.4\text{mm}$  (b) Max. gap :  $\Delta=2.3\text{mm}$  (c) Max. gap :  $\Delta=2.3\text{mm}$  (d) Max. gap :  $\Delta=2.4\text{mm}$   
**Fig. 3** R-Bar shape in various countries

형상이 다른 모든 R-BAR의 부리 간격 벌어짐은 2.3mm ~2.4mm 수준으로 유사하며, 전차선을 잡고 있는 그림력 또한 유사할 것으로 판단된다.

### 2.2.2 재질 특성

국내외 사용하는 R-BAR 는 열처리를 통해 강도를 확보할 수 있고, 내식성도 보유하고 있는 Al-Mg-Si계 합금 (A6000계열 알루미늄)을 주로 사용하고 있다. 현재 국내외에서 사용되고 있는 R-BAR 합금 종류 및 주요 특성은 Table 3 과 같다.

**Table 3** Aluminum alloy properties

Property	A6063-T6	A6005-T5	A6060-T6	A6106-T6	A6101-T6
Tensile strength [MPa]	205	260	170	235	221
Tensile yield strength [MPa]	170	215	140	210	193
Modulus of elasticity [GPa]	69	69	66	69	69
Electrical resistivity [ohm-cm]	0.0000033	0.0000035	0.0000031	0.0000035	0.0000030

Reference : www.matweb.com , KS D 6759, etc.

정적 및 동적 특성에 영향을 미치는 탄성계수의 경우, 대부분 동일하며, 소성 변형과 관련된 인장강도 및 항복강도는 재질 및 열처리 조건에 따라 차이가 있다. 알루미늄에 섞여 있는 불순물에 따라 합금 특성 및 전기저항 특성이 결정되므로, 전기저항은 합금별로 상이한 것을 확인할 수 있다.

## 3. 결론

국산 개발된 강체전차선 시스템의 통계적 최소 접촉력은 90km/h 에서도 양의 값을 가지고 있으며, 이를 통해 이선 발생이 없는 것을 확인하였다. 속도 증가에 따른 최소 접촉력의 감소는 강체전차선 시스템에 의한 영향과 시험 전동차 주변 공기 유동에 의한 영향이 복합적으로 작용한 것으로 판단되며, 입출구에서의 공력에 의한 영향도를 감소시키기 위해 터널의 중간 지점에서 속도에 따른 최소 접촉력의 평가가 필요할 것으로 사료된다.

강체전차선 시스템을 구성하는 R-BAR 형상에 대한 특성을 고찰해 보았을 때, 형상만으로 고속용과 저속용을 분리하는 것은 큰 의미가 없어 보이며, R-BAR 형상은 다른 시스템과의 조립성 및 R-BAR 상호 연결 시 발생할 수 있는 오차를 감소 시킬 수 있는 방향으로

개발이 필요할 것으로 사료된다. 또한 R-BAR 에 사용했던 기존 재질들을 검토해 보았을 때, 도전을 및 기계적 특성이 좋은 A6101 과 A6063 이 가장 적절한 것으로 보이며, 정밀한 압출 형상 구현이 필요할 경우, 압출성이 가장 좋은 A6063 이 가장 적절할 것으로 사료된다. 향후 250km/h급에 사용될 R-BAR 형상에 따라 A6101 과 A6063 을 선택적으로 적용하여 비교해 볼 필요가 있을 것으로 사료되며, 필요 시 A6101 과 A6063 의 중간적 특징을 갖는 비규격 합금의 개발도 검토해 볼 필요가 있다.

## 후 기

본 논문은 2014년 국토교통부 철도기술연구사업, 철도 핵심 부품/장치 기술개발 2단계 연구단 과제의 제2세부 과제인 250km/h급 강체전차선로 개발의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사로 드립니다.

## 참고문헌

- [1] C. Vera, J. Paulin, B. Suarez, P. Rodriguez (2005) Improved design of an overhead rail current conductor for application in underground lines, 8<sup>th</sup> International Conference on Maintenance & Renewal of Permanent Way; Power & Signaling; Structures & Earthworks, London, U.K., pp. 29-30.
- [2] Mak, Man Kit (2012) Adoption of Overhead Rigid Conductor Rail System in MTR Extensions, *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2(4), pp. 463-466.
- [3] J. Paulin, J.D.Sanz, A.Garcia, C.Vera, Development of New High-Performance Overhead Conductor Rail Using Simulation Models, and their Validation through Field Testing.
- [4] C.Vera, B.Suarez, J.Paulin, P. Rodriguez (2006) Simulation model for the study of overhead rail current collector systems dynamics, focused on the design of new conductor rail, *Vehicle System Dynamics*, 44, pp. 595-614
- [5] BS EN50119: 2009, Railway application – Fixed installations – Electric traction overhead contact lines