

250 km/h급 고속용 강체전차선 및 이행장치 I : 구조설계

김봉석^{a*}, 원용희^a, 박설희^a, 배상준^a, 장광동^a**Overhead Rigid Conductor and Transition Structure for High-Speed (Over 250 km/h) I : Structural Design**Bong-Suk Kim^{a*}, Yong-Hee Won^a, Seol-Hee Park^a, Sang-Joon Bae^a, Kwang-Dong Jang^a^a Research and Development Center, LS Cable & System,
27, Gongdan-ro 140 beon-gil, Gunpo, Gyeonggi-do, 15845, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	7	January	2016
Revised	12	January	2016
Accepted	26	January	2016

Keywords:

Overhead rigid conductor
Transition structure
Flexibility
Natural frequency isolation
Contact force

ABSTRACT

With the increasing running speed of trains, new railway lines in metropolitan areas, and the rising demand for green transportations, the number of underground and tunnel sections are constantly becoming larger, and installations of overhead rigid conductor systems are becoming wider. However, domestic commercial products for overhead rigid conductors are limited to 120 km/h train speeds. In this study, to develop a high-speed (250 km/h) overhead rigid conductor, R-Bar (Rigid Bar), the electrical and mechanical stability was enhanced through the improvement of the cross sectional shape of the R-Bar; the transition structure was also designed for flexibility and natural frequency isolation. In addition, the evaluation of contact forces between a pantograph and the overhead rigid conductor system for 250 km/h train speeds was performed using dynamic analysis.

1. 서론

대중 교통수단 중 하나인 철도는 대량 수송성, 고속성, 편리성, 안전성, 정시성 등의 장점과 도시 광역화로 인하여 전 세계 교통 시스템이 자동차에서 철도 중심으로 전환되고 있다. 또한, 환경오염으로 인한 기후변화가 인간의 중요한 생존 문제로 대두되면서 지구 온난화에 큰 영향을 미치는 이산화탄소 배출을 규제하기 위하여 UN 기후변화협약(UNFCCC: United Nations Framework Convention on Climate Change, 1992), 교토 의정서(Kyoto Protocol, 1997) 등과 같은 제도적 장치가 강화되고 있다^[1]. 2010년 철도와 도로 수송의 에너지

소비 원단위를 비교해 보면, 여객부문에서 철도는 도로의 1/6, 화물부문에서 1/10 수준이고, 온실가스 배출 원단위는 여객부문에서 철도는 도로의 1/4, 화물부문에서 1/10 수준으로 에너지 소비량과 온실가스 배출량 모두 철도의 우위성을 확인할 수 있다^[2].

철도기술이 발달하면서 고속화되고 도시철도 신규 노선이 지속적으로 추가되면서 지하구간과 터널이 많아져 여러 전차선 시스템 중 강체전차선(overhead rigid conductor system) 방식의 적용이 점차 증가되고 있다. 기존 방식인 가공전차선(overhead catenary system)와 대비하여 강체전차선 방식은 터널 단면을 줄일 수 있어 토목시공 비용이 절감되고, 무장력으

* Corresponding author. Tel.: +82-31-450-8299

Fax: +82-31-450-8331

E-mail address: bongskim@lscns.com (Bong-Suk Kim).

로 단선 사고를 줄여 높은 안전성을 확보할 수 있으며, 사고 발생 시 응급복구나 전차선 교체주기 등 유지보수 비용이 적게 들어 경제적 이점이 있다. 또한, 전차선이 강제전차선에 일체화되기 때문에 대형화, 고속화되는 철도차량의 높은 급전용량에 유리하다^[3-5]. 하지만, 강제전차선로는 커티너리 가공전차선로에 비해 판토프래프(pantograph) 추종 특성이 좋지 않아 운행속도의 한계와 높은 시공 정밀도로 고속화 적용에 제한이 있었다. 이러한 한계를 극복하기 위하여 강제전차선(overhead rigid conductor) 형상의 강성 증가, 재료 특성 개선, 집전 성능 향상, 시공 정밀도 증가, 지지 구조물의 절연성능 향상, 지지간격 개선 등에 대한 지속적인 연구가 진행되어, 최근 해외 업체에서는 고속철도 상용 노선에 적용한 실증시험이 완료된 것으로 알려져 있다^[4,5].

50여년의 역사를 가진 강제전차선로는 지금까지 높은 기술장벽을 바탕으로 스위스, 프랑스, 스페인 등 유럽 업체들이 시장을 주도해 왔으며, 일본에서 T형 강제전차선을 독자적으로 개발하여 적용해 왔다^[6,8]. 국내 강제전차선로 시장은 지난 25년간 유럽 업체들이 시장을 과점해 오다가 2013년 LS전선에서 중저속용 120 km/h급 강제전차선 R-Bar (rigid bar)를 비롯하여 이행장치(transition structure), 신축이음장치, 연결금구 등 관련 부속자재를 개발 완료하였고, 철도시설 성능검증을 통해 해외 선진사 수준의 기술력을 인정받았다^[8]. 하지만, KTX 및 GTX 신규 노선 건설 증대, 지하 장대 터널의 증가로 고속용 강제전차선로 수요가 커지고 있으나 아직까지 국내에서는 250 km/h급 이상의 강제전차선로가 개발되지 못하여 고가의 외국산 제품을 그대로 수입하고 있는 실정이다. 고속용 강제전차선로 개발을 위해서는 통전 성능, 집전 성능, 정적 및 동적 특성 안정성이 기존 중저속용과 대비하여 향상되어야만 한다^[6,7]. 특히, 강제전차선로를 구성하는 주요 핵심 구성요소 중 하나인 이행장치는 지상구간과 지하구간 또는 터널 내부와 외부 상호간에서 커티너리 가공전차선이 강제전차선으로 바뀌는 전이 부분(transition section)에 설치되는 장치를 말하는데, 커티너리 가공전차선과 강제전차선 사이의 강성 또는 탄성을 점진적으로 변화시켜 전차선에 가해지는 응력을 완화시키는 역할을 하여, 열차 진출입시 속도를 유지시켜 주는 설계구조를 가져야 한다. 그러나, 이러한 이행장치에 대한 연구들은 현재까지 거의 알려져 있지 않은 실정이다.

본 연구에서는 고속용 강제전차선 R-Bar와 이행장치를 개발하기 위하여 중저속용 R-Bar의 형상 구조 및 이행장치의 단면 구조를 최적화하였고, 250 km/h 조건에서 고속용 R-Bar와 이행장치 시스템에 대한 동역학 해석을 통해 판토프래프와의 상호 접촉력을 평가하여 집전성능을 검증하였다.

2. 중저속용 강제전차선로

2.1 강제전차선 R-Bar

국내에 도입된 강제전차선은 DC 구간에 적용된 T-Bar와 AC 구간에 적용된 R-Bar가 대표적이다. 일본에서 개발된 T-Bar는 T자형 알루미늄 합금 압출체로, 국내에는 1974년에 개통한 서울시 1호선에 도입되어 이후 직류 1,500 V 급전방식에 표준 가선방식이 되었다. II 형태의 R-Bar는 rigid bar, conductor rail, conductor bar 등 다양한 용어로 사용되고 있으며, 프랑스에서 개발되어 1990년 과천선, 분당선 지하구간에 적용된 후 세계 최초 AC 25 kV 상업 운전에 성공적으로 사용하고 있다. 이 방식은 터널 천장이나 측벽면의 지지부에 연결된 브래킷을 통해 R-Bar를 지지한다. 강제전차선 R-Bar는 직류와 교류 모두에 사용 가능하며, T-Bar 보다 가격, 성능, 전차선 포설 성이 우수하여 향후 시장성이 더욱 높을 것으로 예측된다. Table 1은 강제전차선 R-Bar와 T-Bar 특성을 비교한 것이다^[4,6,7].

한국철도시설공단의 표준규격(KRSA-3072-R0) “강제전차선(R-BAR) 시스템”에 적용하는 설계속도는 120 km/h 이하(중저속용)이며, 설계 특성은 Table 2와 같다^[9].

2.2 이행장치

강제전차선과 커티너리가 상호 전이되는 부분에 설치되는 이행장치는 기본적으로 강제전차선 R-Bar와 동일한 수직 단면 형상을 가지지만 강제전차선과 커티너리 상호간 강성이나 탄성 변화를 점진적으로 주기 위하여 R-Bar 질량을 일부 제거하여 제작하는 방법

Table 1 Comparison between R-Bar and T-Bar


	R-Bar	T-Bar
Shape		
	Simple	Complex
Area	2,214 mm ²	2,642 mm ²
Installation/Maintenance	Easy	Hard
Contact wire gripping	Clamping arm of R-Bar	Using long ear
Support length	10 m	5 m
Connection	12 m, Bolting	10 m, Welding
1 Section length	400~800 m	Max. 250 m
Allowable speed	150 km/h	90 km/h
Cost	80%	100%
Expectation	High	-

Table 2 Properties of rigid-bar to 120 km/h-grade

Property	Criteria
Unit length	12 m (Standard)
Material	A6063 S-T6, A6005AS, A6060S (KS D 6759)
Tensile strength	205 MPa ↑
Yield strength	170 MPa ↑
Young's modulus	69,000 MPa ↑
Elongation	10% ↑
Conductivity	51%IACS ↑ (20°C)
Deflection	Deflection at center between supporting length < 1/1000 of supporting length



Fig. 1 Transition structure to 120 km/h-grade

이 현재 널리 통용되고 있다. 이행장치는 포설시 자연 처짐량이 크지 않아야 하고 터널 입출구에서 열차 진출입시 속도 변화 없이 집전 성능을 유지시켜 주는 것이 설계의 핵심이며, 전차선의 그립력(gripping force)을 보완해 주는 고정 볼트부와 강체전차선 R-Bar와의 연결 금구부를 고려해야 한다. 이행장치는 Fig. 1과 같은 형상으로 5 m(일반) 또는 10 m 단위 길이를 가지며 재료, 인장강도, 항복강도, 탄성계수, 연신율, 도전율은 R-Bar와 동일하고, 별도의 성능에 대한 기준은 없다⁹⁾.

3. 고속용 강체전차선로 개발

3.1 고속용 강체전차선 R-Bar

강체전차선 R-Bar를 설계속도 250 km/h 이상의 고속열차에 적용하기 위한 주요 인자중 하나인 통전 성능을 높이기 위해서는 기존 R-Bar보다 도전율을 높이고 단면적을 증가시켜야 하지만, 단면적의 증가는 질량 증가, 시공 및 조립 효율성 저하, 운송 등의 비용이 증가하게 되고 관련 부속자재의 설계 변경이 요구된다. 고속화에 따라 통전 성능 향상을 위해서 단면적 증가가 필수적인 부분이지만 본 논문에서는 기존 중저속용 R-Bar 질량의 최대 15% 증가로 제한하였고, 재료의 도전율은 중저속용과 동일한 것으로 가정하였다.

R-Bar 형상은 기본적으로 II 형태인데, 고정 지지를 위한 연결부인 상부 수평바, 하부 수직바, 하부 수직바 하단에 전차선을 잡아주는 클램핑 암(clamping arm)으로 구성되어 있다. 고속용 R-Bar 형상에 대하여 다양한 아이디어를 수집하였고, 유한요소해석 평가

Table 3 Comparison of 120 km/h and 250 km/h-grade rigid-bar

	for 120 km/h-grade	for 250 km/h-grade
Shape		
Stress at gripping	 97.7 MPa	 70.2 MPa
Deformation at gripping	 2.9 mm	 1.8 mm
Deflection of 10 m length	 8.4 mm	 8.5 mm
Mass	6.2 kg	6.8 kg
Area	2,270 mm ²	2,525 mm ²
Moment of inertia	342 cm ⁴	367 cm ⁴

와 양산 난이도를 반영하여 최종적으로 선정된 구조는 Table 3과 같이 II 기본 형태를 유지하되, 전차선 그립력을 향상시키고, 그립시 R-Bar의 최대 응력과 변형량을 저감하며, 포설 시 자기 정렬(self-alignment)이 가능하도록 하부 수직바를 경사지게 하여 이중 텐션(double tension)이 작용하도록 하였다¹⁰⁾. 클램핑 암은 전차선을 가선장치를 통해 자동적으로 설치, 고정되는 점을 고려하여 변경하지 않는 것으로 하였다.

국내에 상용화된 120 km/h급 중저속용 R-Bar에 대한 전차선 그립력 평가를 위하여 R-Bar 상단부를 고정시키고 하단부에 100 N 하중을 적용하여 해석한 결과, 최대 응력은 97.7 MPa, 변형량은 2.9 mm이며, 양단 고정, 지지간격 길이 10 m 조건 시 자중에 의한 처짐량을 해석한 결과는 8.4 mm이다. 유한요소해석 평가는 상용 프로그램 ABAQUS Version 6.11로 수행하였다. 철도시설공단 설계 규격에 따르면 지지 간격 사이에서의 중앙 처짐이 지지 간격 거리의 1/1,000이어야 하는데 중저속용 R-Bar는 0.84/1,000로 이를 만족한다.

중저속용 R-Bar와 동일한 조건에서의 고속용 R-Bar 해석결과 최대응력은 70.2 MPa로 중저속용 대비 28% 개선되었고, 변형량은 1.8 mm로 중저속용 대비 38% 개선 효과가 확인되었다. 10

m 지지간격에서 자중에 의한 처짐량을 해석한 결과, 8.5 mm로 철도시설공단 설계 기준인 1/1,000에 대해 고속용 R-Bar는 0.85/1,000로 이를 만족한다. 질량은 중저속용 R-Bar 대비 11%가 증가되었지만 처짐량은 중저속용과 유사한 수준으로 설계되었다. Table 3은 중저속용과 고속용 R-Bar 형상, 해석 결과, 특성을 비교한 것이다.

강체전차선 R-Bar의 동적 성능을 평가하기 위해서, 강체전차선으로 전달되는 판토크래프 상하(수직방향) 진동주파수에 대해 R-Bar 공진주파수가 얼마만큼 절연되어 있는지 검토하였다. R-Bar에 작용하는 판토크래프 상하 진동주파수 f (Hz)는 다음과 같은 식으로 표현할 수 있다⁵⁾.

$$f = V/3.6L \text{ [Hz]} \quad (1)$$

여기서, L (m)는 지지점 간격, V (km/h)는 열차속도를 나타낸다.

중저속용 120 km/h와 고속용 250 km/h 속도에서의 판토크래프 상하 진동주파수는 각각 3.3 Hz와 6.9 Hz이며, 중저속용 강체전차선 진동해석 결과 굽힘모드(bending mode)로 3.9 Hz(수평방향), 6.2 Hz(수직방향), 10.4 Hz(수평방향)이었으며, 고속용은 3.8 Hz(수평방향), 6.1Hz(수직방향), 10.3 Hz(수평방향)이었다. 해석 시 지지점 간격은 중저속용 강체전차선 지지 간격인 10 m, 양 끝단은 고정 조건으로 고려하였다. 강체전차선 R-Bar는 중저속용과 고속용 모두 유사한 동적 특성을 가지며 큰 차이가 없고, 판토크래프 상하 진동주파수에 충분히 절연되어 있다.

3.2 고속용 이행장치

이행장치에 대하여 해외 선진사들은 유연도(flexibility) 시험과 일정 주파수에서의 진동 내구시험으로 성능을 평가한다고 알려져 있다. 본 연구에서는 5 m 캔틸레버(cantilever) 조건으로 이행장치의 정적 성능 평가 방안은 유연도 0.3 mm/N 이상, 동적 성능 평가 방안은 판토크래프 상하 진동주파수에 대한 이행장치의 공진주파수 절연 성능으로 선정하였다. 고속용 이행장치 설계 기준은 유연도 0.4 mm/N 이상, 공진주파수 절연을 15% 이상으로 선정하였고 Fig. 2에서처럼 폭과 높이에 대한 영향도 분석을 통해 이행장치 설계 구조를 최적화하였다. 중저속용 이행장치는 동일 치수의 폭과 높이가 변화되는 구조인 반면 고속용 이행장치는 폭과 높이를 변화

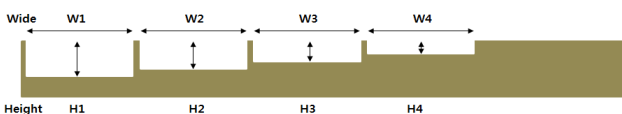


Fig. 2 Design parameter for transition structure to 250 km/h-grade

시켜 성능을 향상시켰다.

중저속용 이행장치의 캔틸레버 조건, 길이 5 m, 작용하중 100 N에 대한 해석 평가 결과는 처짐량 61.9 mm로 유연도 0.6 mm/N이며, 자중에 의한 자연 처짐량은 21.9 mm이다. 진동해석 결과 굽힘모드 공진주파수 2.9 Hz(수평방향), 4.4 Hz(수직방향), 11.3 Hz(수평방향), 14.3 Hz(수직방향), 23.5 Hz(수평방향)이었다. 반면, 최종 선정된고속용 이행장치는 동일 조건에서의 유연도 0.47 mm/N로 중저속용보다 낮기는 하지만 설계 목표 기준을 충분히 만족하고 자중에 의한 자연 처짐량은 20.1 mm이다. 진동해석 결과는 굽힘모드 공진주파수 2.3 Hz(수평방향), 4.5 Hz(수직방향), 9.2 Hz(수평방향), 16.3 Hz(수직방향), 20.3 Hz(수평방향)로 중저속용과 비교하여 공진주파수 이동(shift)이 발생하였음을 알 수 있다. Table 4는 중저속용과 고속용 이행장치 형상, 해석 결과, 특성을 비교한 것이다.

이행장치의 동적 성능을 평가하기 위해서, 식 (1)의 판토크래프 상하 진동주파수에 대하여 이행장치의 공진주파수가 얼마만큼 절연되어 있는지 검토하였다. 이행장치와 판토크래프 상호간의 동적 작용에 대한 연구가 거의 없어 판토크래프와 이행장치 모두의 동적 특성을 고려한 기준을 적용할 수 없었다. 중저속용 120 km/h와 고속용 250 km/h 속도에서의 판토크래프 상하 진동주파수는 각각 6.7 Hz와 13.9 Hz이며 진동해석 결과와 비교하여 Table 5에 나타내었다.

중저속용 이행장치는 열차속도 120 km/h에 공진주파수 절연을 34%이며 속도 250 km/h에 대해서는 3%로 판토크래프 상하 진동주파수가 이행장치의 공진주파수에 근접하여 구조적 불안정성과 장기간 노출 시 공진에 의한 구조 파괴가 예상된다. 고속용 이행장치는 열차속도 120 km/h에서 공진주파수 절연을 33%이며 속도 250 km/h에서는 17%로 설계 기준을 만족한다. 이행장치의 강성은 판토크래프의 압상력(lift force)을 계의 처짐량으로 나누어 준

Table 4 Comparison of transition structure for 120 km/h and 250 km/h-grade

	120 km/h-grade	250 km/h-grade
Shape		
Flexibility	0.6 mm/N	0.47 mm/N
1st Natural frequency (vertical)	4.4 Hz	4.5 Hz
2nd Natural frequency (vertical)	14.3 Hz	16.3 Hz
Mass	22.3 kg	24.8 kg

Table 5 Natural frequency isolation of transition structure for 120 km/h and 250 km/h-grade

Train speed	Passing frequency of pantograph (vertical)	for 120 km/h-grade		for 250 km/h-grade	
		Natural frequency	Isolation rate	Natural frequency	Isolation rate
120 km/h	6.7 Hz	4.4 Hz	34%	4.5 Hz	33%
250 km/h	13.9 Hz	14.3 Hz	3%	16.3 Hz	17%

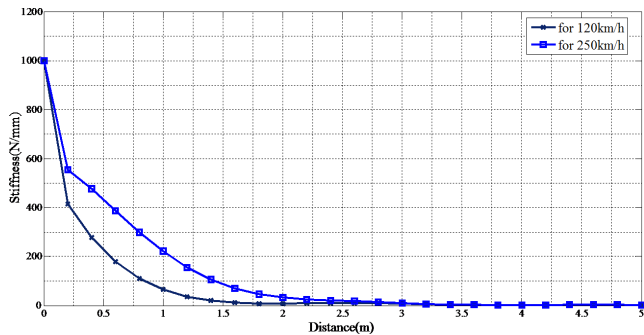


Fig. 3 Stiffness of transition structure for 120 km/h and 250 km/h-grade

값으로 하였다. 중저속용과 고속용 이행장치의 5 m 캔틸레버 조건에서 자연 처짐량과 압상력을 고려하여 이행장치의 강성을 Fig. 3에 나타내었다. 단, 강제전차선 R-Bar와 연결되는 이행장치의 강성은 1,000 N/mm으로 고정하였다. 고속용 이행장치는 기존 중저속용보다 강성의 변화가 점진적임을 알 수 있고, 열차 진출입시 구조적 안정성이 높아 집전성능에 유리한 설계 구조임을 알 수 있다.

3.3 고속용 강제전차선로 동적 성능 해석 평가

고속용 강제전차선로의 동적 성능을 중저속용과 비교하였다. 강제전차선 R-Bar와 이행장치의 안정성은 판토틀레프와의 동적 상호 작용에 의해 결정되는데 자중에 의한 처짐량이 위치에 따라 다르고 판토틀레프의 주행으로 인하여 강성이 변화된다. 강제전차선과 판토틀레프의 동적 상호 작용에 의한 운동방정식은 시간과 공간에 따라 변화되어야 한다. 커티너리 가공전차선에서는 판토틀레프 주행에 의하여 횡방향 진동을 고려해야 하나 강제전차선의 경우 별도의 장력이 없기 때문에 횡방향 진동에 의한 파동은 무시할 수 있는 수준으로 고려하지 않는 것이 일반적이다³⁾.

판토틀레프의 모델링은 연구에 따라 1, 2, 3, 4 자유도계로 수행될 수 있는데 본 연구에서는 Fig. 4와 같이 2자유도계로 선정하였다. 판토틀레프의 제원은 도시철도에 적용하는 상부의 질량 7 kg, 강성계수(stiffness) 16,099 N/m, 감쇠계수(damping) 10 Ns/m이고 하부의 질량 11.8 kg, 감쇠계수 60 Ns/m로 하였다²⁾. 정적 압상력 P_s 는 질량 m^2 에 60 N을 인가하였다. 중저속용과 고속용 판토틀레프의 제원이 다르기는 하지만 그 특성 값들이 기술 자료마다 차

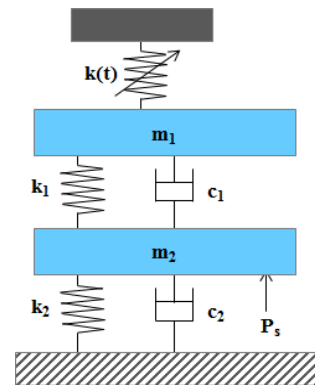


Fig. 4 2 Degree of freedom of pantograph

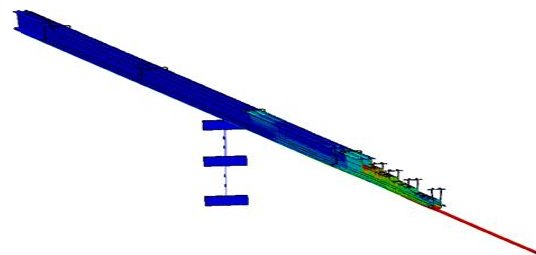


Fig. 5 Dynamic analysis model of overhead rigid conductor system

이가 있어 본 연구에서는 동일한 값으로 동적 거동을 비교하였다.

중저속용과 고속용 강제전차선 R-Bar와 이행장치의 판토틀레프와의 동적 거동은 상용 동역학 해석 프로그램인 LS-DYNA Version 971로 평가하였다. Fig. 5는 속도 250 km/h에서 고속용 강제전차선 R-Bar와 이행장치에 대한 동역학 모델이고 R-Bar와 이행장치 20 m, 커티너리 5 m로 총 길이 25 m로 하였다. 판토틀레프는 터널 내부에서 외부로 열차가 진출하는 조건으로 가정하였으며, R-Bar는 등가 굽힘강성을 갖는 shell 모델로 적용하였다. 강제전차선과 이행장치 연결부 경계조건은 포설 조건과 동일하게 5 m, 고정조건으로 하였다. 강제전차선과 커티너리의 전이구간인 이행장치 끝단은 커티너리 장력을 조절하여 이행장치 끝단에서 판토틀레프가 이탈되지 않도록 조정하였다.

강제전차선 R-Bar와 이행장치의 동적 성능은 열차의 집전성능을 나타내는 대표적인 기준인 판토틀레프와 상호간 접촉력으로 판단하였다. 접촉력은 강제전차선과 판토틀레프 사이의 진동 특성과 속도에 따른 동적 특성이 결합되어 나타난다. 철도 규격 UIC 794-1의 접촉력 기준은 식 (2)이고, IEC 62486 기준은 식 (3)과 같다^{11,12)}.

$$F_m - 3\sigma > 0 \tag{2}$$

$$0.3F_m > \sigma \tag{3}$$

여기서, F_m 은 평균 접촉력, σ 는 접촉력의 표준편차이다.

Fig. 6은 중저속용과 고속용 강제전차선 R-Bar 및 이행장치 각

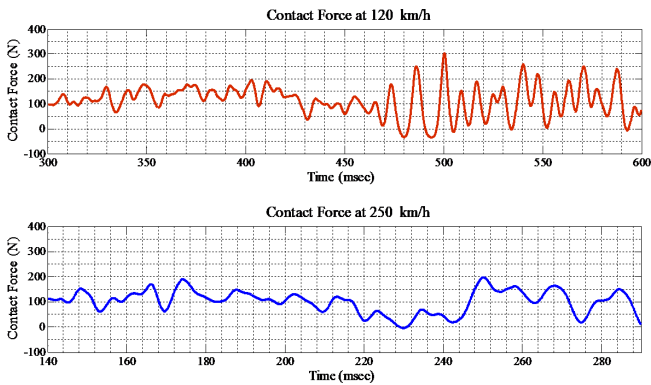


Fig. 6 Contact force at 120 km/h and 250 km/h

각의 판토티그래프 상호간 접촉 시 접촉력을 나타낸 것이다. 120 km/h 중저속용 모델 해석 결과는 초기 판토티그래프와 강제전차선의 강제 접촉에 따라 과도한 접촉력이 발생하는 부분과 이행장치를 지난 이후 구간을 제외하고 관심 구간인 R-Bar와 이행장치 연결구간 10 m, 즉 0.3~0.6 sec 구간을 나타내었다. 0.45 sec에서는 강제전차선에서 이행장치로 판토티그래프가 이동되면서 접촉력이 커져 불안정하게 되는 것을 알 수 있다. 접촉력의 통계적 분석 결과, 평균 접촉력은 131.4 N, 최대 접촉력은 178.1 N, 최소 접촉력은 65.2 N, 표준편차는 26.7 N이며, UIC 794-1 식에 따라 계산된 결과 51.4 N, IEC 62486 식에 따른 결과 12.7 N으로 두 기준을 모두 만족하여 주행시 집전성능을 확인하였다.

250 km/h 고속용 모델 해석 결과도 중저속용과 마찬가지로 관심 구간인 R-Bar와 이행장치 연결구간 10 m, 즉 0.14~0.29 sec 구간을 나타내었다. 접촉력의 통계적 분석 결과, 평균 접촉력은 120.7 N, 최대 접촉력은 189.9 N, 최소 접촉력은 61.3 N, 표준편차는 28.1 N이며, UIC 794-1 식에 따라 계산된 결과 36.4 N, IEC 62486 식에 따른 결과 8.1N으로 두 기준을 모두 만족하여 고속주행시 집전성능을 확인하였다. 고속 250 km/h에서는 판토티그래프가 이행장치로 이동되는 시점인 0.22 sec를 지나면서 접촉력이 오히려 떨어져 중저속용과 다른 경향을 나타내었지만, 크기가 중저속용처럼 커지지 않아 불안정하지 않은 결과를 얻었다.

4. 결론

본 논문에서는 열차의 고속화, 노선의 지하화, 터널 구간의 증대로 강제전차선로 적용이 확대됨에 따라, 현재 국내 기술로 상용화되어 있는 120 km/h급 중저속용 강제전차선로를 설계속도 250 km/h급으로 확대 적용하기 위하여 고속용 강제전차선로를 개발하였다.

고속용 강제전차선 R-Bar는 전차선 그림 시 최대 응력, 변형량,

10 m 자중 처짐량을 설계 기준으로 하여 다중 인장 구조의 형상 최적화를 수행하여 중저속용 R-Bar 대비 전차선 그림 시 최대응력 28%, 변형량 38%가 개선되었고 처짐량은 단면적의 증가에도 유사한 수준이었다. 강제전차선과 커티너리 가공전차선 전이 구간에 설치되는 이행장치는 중저속용 대비 자중에 의한 처짐량이 8% 개선되었고, 탄성도 0.47 mm/N이며, 250 km/h 판토티그래프 상하 진동주파수에 대한 공진주파수 절연율은 17%로 고속 주행 시 안정성을 확보하였다. 또한, 고속용 이행장치의 강성 변화가 중저속용보다 점진적인 특성을 나타냄을 비교하였다.

중저속용과 고속용 강제전차선 R-Bar와 이행장치에 대한 동역학 해석 평가를 통해 철도차량의 집전성능을 나타내는 접촉력을 비교해 본 결과, 평균 접촉력 120.7 N, 표준편차 28.1 N이었고, UIC 794-1과 IEC 62486 접촉력 기준에 따라 계산한 결과 각각 36.4 N, 8.1 N으로 두 기준 모두를 만족하여 집전성능 안정성을 확보하였다.

향후에는 본 연구에서 개발된 고속용 강제전차선 R-Bar와 이행장치 설계안에 대한 시제품을 제작하여 통전성능, 유연도, 진동 시험, 진동 내구 시험을 수행할 계획이며, 250 km/h 고속용 강제전차선로에 대한 실증시험을 통해 설계안이 최종 확정되면 이를 규격화하여 국내 고속철도 산업에 기여하고자 한다.

후 기

본 연구는 2014년 국토교통부 철도기술연구사업, 철도 핵심 부품/장치 기술개발 2단계 연구단 과제의 제2세부 과제인 250 km/h 급 강제전차선로 개발의 일환으로 수행된 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

References

- [1] Seo, Y. B., Im, J. M., Shin, K. B., 2014, Development of a Turbine Based Flywheel Energy Storage System Using Traveling, Wind Power of an Urban Train, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 23:5 443-449.
- [2] Kim, B. K., Cho, Y. M., Kim, H. G., Oh, Y. S., 2013, A Study on the Effect and Strategies for Inducing More Riderships of Trains to Relieve Global Climate Change, Proceeding of the Autumn Conference & Annual Meeting of the Korean Society for Railway, 1019-1026.
- [3] Kim, K. K., 2002, A Study on the Dynamic Interaction for a Pantograph and Rigid Contact Wire System, A Thesis for a Master, Seoul National University of Technology, Republic of Korea.
- [4] Jo, H. B., 2011, A Study on the Improvement of Overhead Rigid

- Conductor Line of Electric Railway for Speed-up, A Thesis for a Master, Seoul National University of Science & Technology, Republic of Korea.
- [5] Ahn, Y. H., Song, J. H., Kim, S. G., 2011, Study for Application of High Speed R-bar System in Metro Express Railway Tunnel, Proceeding of the Spring Conference of the Korean Society for Railway, 409-412.
- [6] Tak, K. H., 2013, A Study on the Improvement of the Current Collection Performance for Speed-up in the Overhead Conductor Rail, A Thesis for a Master, Woosong University, Republic of Korea.
- [7] Bae, S. J., Jang, K. D., Lee K. W., Park, Y. C., 2015, A Study on Characteristics of Overhead Rigid Conductor System for Developing the High-speed System up to 250km/h, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 64:3 492-497.
- [8] Jang, K. D., Bae, S. J., Park, D. H., 2013, Development of Overhead Conductor Rail (Rigid BAR) System, Proceeding of the Summer Conference on The Korean Institute of Electrical Engineers, 1900-1901.
- [9] KRSA, 2014, Rigid Catenary R-Bar System, KRSA-3072-R0.
- [10] Kim, B. S., Won, Y. H., Bae, S. J., Park, S. H., Jang, K. D., 2015, Double-tension Rigid Bar and Connecting Structure of the Same, KR Patent: P2015-0162797.
- [11] UIC, 2001, Pantograph/Overhead Line Interaction for DC - Electrified Railway Lines, UIC 794-1.
- [12] IEC, 2010, Railway Applications-current Collection Systems - Technical Criteria for the Interaction between Pantograph and Overhead Line, IEC 62486.