

전기철도 강체전차선로의 정적 상태 검출 기술 연구

나경민^{1,2}, 이기원², 박 영³ 

¹ 과학기술연합대학교대학원 교통시스템공학과

² 한국철도기술연구원 스마트전기신호본부

³ 한밭대학교 전기시스템공학과

A Study on Technologies for Measuring Static Condition of Rigid Conductor System in Railway Electrification

Kyung Min Na^{1,2}, Kiwon Lee², and Young Park³

¹ Department of Transportation Engineering, University of Science & Technology, Daejeon 34113, Korea

² Division of Smart Electrification & Signaling, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 16105, Korea

³ Department of Electric System Engineering, Hanbat National University, Daejeon 34158, Korea

(Received September 5, 2019; Revised October 12, 2019; Accepted October 17, 2019)

Abstract: The purpose of an electric railway system contact wire is to supply electric energy to trains through a contacted pantograph. This energy is then converted into mechanical energy. Recent developments in overhead contact lines include the increase in the tension force up to 34 kN according to train speeds that reach up to 400 km/h with a verified safety. Rigid conductor catenary (R-Bar) for high speeds of up to 250 km/h have been developed in tunnels to save on construction costs. This is significant because minor defects in R-bars in aspects, such as height and stagger affect installation conditions. In this study, we propose the use of a detector that measures the static characteristics to reduce the R-bar installation errors. This detector has been developed to measure the height and stagger of the contact wire using video images.

Keywords: Rigid bar, Electric railway, Condition monitoring, Contact wire

1. 서론

전기철도시스템의 전차선로는 팬터그래프와 기계적으로 접촉하여 철도차량에 전기에너지를 전달하는 설비이며 최근 400 km/h급 전차선로가 개발되어 국내에 적용된 것으로 보고되고 있다 [1]. 가공전차선로는 5 m 이상의 높이에 설치되며 팬터그래프는 최저 300 mm부

터 최고 2,250 mm까지 전차선과 접촉하여 안정적인 집전성능을 유지한다 [2]. 특히 전차선로의 장력은 집전성능을 향상시키며 철도차량의 운행속도로부터 결정된다 [3]. 400 km/h급 전차선로는 26 kN의 350 km/h급 장력보다 높은 34 kN이며 팬터그래프 접촉에 의한 전차선의 수직변위인 압상량은 100 mm 이내로 보고되고 있다 [3,4]. 전차선로의 운행속도는 장력증가에 따라 안정적인 집전성능이 가능해지며 일반적으로 파동전파속도의 70% 이내에서 안정적인 운전성능이 가능하므로 가공 전차선로가 현재 사용되고 있다 [5]. 터널의 단면적과 공사비용을 줄일 있는 강체전차선로는 110 km/h급으로 운행되고 있으나 최근 250 km/h급 강체전차선로

✉ Young Park; ypark@hanbat.ac.kr

를 개발하여 고속선 적용사례가 보고되고 있다 [6,7]. 고속용 강체전차선로는 설치 이후 높이와 편위의 변화로부터 팬터그래프 간의 이선아크가 발생되어 집전성능에 영향을 줄 수 있다 [8]. 강체전차선로의 집전성능은 높이 차이, 작은 결함에도 가공전차선로에 비해 큰 이선아크가 발생될 수 있다 [9]. 따라서 강체전차선로는 터널에 설치 시 시공오차를 최소화하며 설치 이후에도 설계 높이와의 오차를 정확하게 판단할 필요가 있다. 가공 전차선의 특성 검출은 설치 이후에 높이와 편위를 검출하여 시공오차를 판단하고 있으나 강체전차선로는 지지부와 전차선이 결합되므로 레이저와 라인카메라를 사용하여 전차선로의 높이와 편위 검출을 하는 데 어려움이 있다. 본 논문에서는 강체전차선로 시공 이후 설치오차를 검출하기 위한 강체전차선의 정적 특성검출기를 제안하였다. 제안된 검출기는 카메라를 이용하여 강체전차선로의 전차선만을 검출하도록 구현하였다.

2. 실험 방법

2.1 강체전차선로 정적 특성 검출 시스템 구현

그림 1에 강체전차선의 구조를 나타내었다. 강체전차선로는 지지물과 전차선을 일체형으로 사용되므로 설치 위치 검측 시 지지부와 전차선을 구분하는 것은 어렵다. 현재 전차선의 높이와 편위 검출장치는 레이저와 라인카메라로 구성되어 전차선의 반사점에 삼각 측량법을 적용하고 있다 [8]. 강체전차선로에 적용할 경우 전차선과 지지부의 구분을 위한 시스템 개발이 필요하며 레이저 스캔 방식이 주로 이용되고 있는 것으로 보고된 바 있다 [10,11].

그림 2에 강체전차선로 정적 특성 검출기의 구성도를 나타내었다. 그림 2와 같이 강체전차선의 높이와 편위를 검출하기 위해 2,000 mm의 거리를 두고 32°의 각도로 설치하여 480×720의 해상도로 이미지를 검출할 수 있도록 구성하였다. 이미지 획득을 위해 카메라의 앞부분에는 줌렌즈를 이용하여 높이 변화에 대응하도록 구성하였으며 이때 최소 초점거리는 18 mm로 설정하였다. 카메라는 IEEE 802.3af (PoE) 방식으로 검출장치에 실시간 저장되며 검출속도는 25 Hz로 설정하였다. 본 논문에서 사용한 카메라는 CMOS 타입으로 최고 50.7 Hz, 12 bit로 동작되며 설치환경에서의 안정적인 운영을 위해 동작온도는 -30°C에서 +70°C까

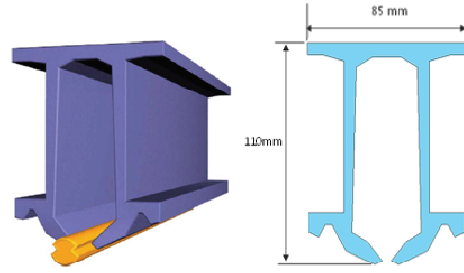


Fig. 1. Structure of rigid conductor [6].

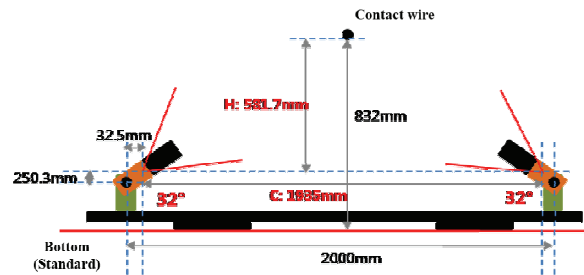


Fig. 2. Configuration of static characteristic detector of rigid conductor system.

지 고려하였다. 본 논문은 250 km/h급 강체전차선로의 설치오차를 판단하기 위해 전철유지보수차량의 상부에 카메라 설치를 고려하여 강체전차선과 카메라 간의 간격을 1,000 mm 이내로 구성하였다. 강체전차선로의 높이와 편위 검출을 위해 카메라와 강체전차선 간의 거리는 시공 높이에 따라 변화하므로 가동 범위에 맞추어 넓은 화각이 필요하다. 화각은 카메라 이미지 센서의 크기와 초점거리가 사용되며 식 (1)에 따라 823 mm의 최소 검출 높이를 획득하였다.

$$\text{화각} = 2 \times \arctan\left(\frac{\text{센서 대각 길이}}{2 \times \text{초점거리}}\right) \quad (1)$$

250 km/h급 강체전차선로는 설치 이후에 정적 상태를 검출하기 위해 개발되었으며 일정한 속도로 운영되는 차량에 설치하여 높이와 편위를 검출하게 되며 이때 설치 차량의 진동과 기울기의 변화를 보정하는 것이 필요하다. 표 1에 검출기 설치차량의 진동과 기울기 보정을 위한 IMU (inertial measurement unit) 센서의 사양을 나타내었다. VectorNav사의 VN-300 IMU센서를 사용하여 랩뷰기반 데이터 수집 모듈에 영상 수집과 분석 소프트웨어를 내재하였다. 모듈 프로그램을 이용하여 초당 25프레임으로 맞추어 속도, 각속

Table 1. Specification of imu sensor.

	Specification	VN-300
Navigation	Static accuracy (Heading)	0.3° RMS
	Static accuracy (Pitch/Roll)	0.5° RMS
	Dynamic accuracy (Heading)	0.3° RMS
	Dynamic accuracy (Pitch/Roll)	0.1° RMS
	Angular resolution	<0.05°
Gyroscope	Output rate (IMU Data)	800 Hz
	Range	±2,000°/s
	In-run bias stability	<10°/hr
	Linearity	<0.1% FS
	Noise sensity	0.0035°/s
	Resolution	<0.02°/s
Accelerometer	Range	±16g
	In-run bias stability	<0.04 mg
	Linearity	<0.5° FS

도, 방위각 등을 동시에 측정하도록 구현하였다. 진동, 충격 등 발생되면 순간 가속도를 적분하여 3축 방향 이동 속도와 움직이는 거리 등을 계산, 보정할 수 있다. 설치 위치는 지그의 중앙에 부착하여 데이터를 수집할 수 있다.

2.2 강체전차선로 정적 특성 검출 프로그램 구현

그림 3에 강체전차선로의 정적 상태 모니터링 프로그램의 화면을 나타내었다. 프로그램은 강체전차선로의 높이와 편위 정보를 수집을 위해 각 카메라의 이미지를 획득하고 저장할 수 있도록 구성하였다. 검출 프로그램은

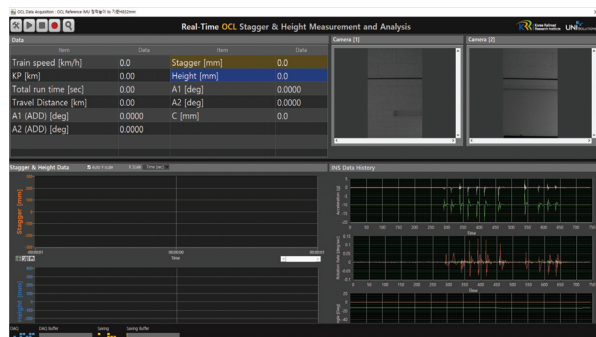


Fig. 3. Program of static condition monitoring in rigid conductor catenary.

랩뷰 기반으로 구현하였으며 저장된 데이터는 매트랩 기반 이미지 처리 알고리즘을 적용하여 후처리가 가능하도록 구성하였다. 그림 3의 검출 프로그램은 25프레임 또는 50프레임의 속도로 영상, 속도 등 데이터의 수집과 저장이 가능하며 운영자가 시스템 설치구조 관련 상수, 카메라의 노출값, 해상도, IMU센서, 통신 등 설정이 가능하도록 구성하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 가공전차선의 높이 및 편위 검출 모의시험 결과

본 논문은 강체전차선로의 설치 이후 높이와 편위를 검출하기 위해 CMOS 타입의 비전 카메라를 이용하였다. 비전 카메라는 선로의 구조의 따라 검출범위가 전차선에서 구조물로 바뀌면서 강체의 지지물과 전차선으로 구분할 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안한 시스템의 정밀도를 검출하기 위해 동적 상태에서 강체전차선의 높이와 편위를 검출해야 한다. 그림 4와 같이 모의장치를 이용하여 검출기의 정밀도를 측정하였다. 제안된 시스템은 그림 4와 같이 하단에서 지지하고 모의 전차선이 좌우 방향으로 움직일 수 있도록 모션 시스템을 구성하였다. 실내 전차선 모의 장치 프로그램을 통해 사용자가 최대 1 μm 정확도로 전차선을 모사하는 원형 막대를 Y축의 높이 방향, X축의 편위 방향으로 움직이며 측정하였다. 모의 전차선의 이동조건을 고려하여 높이는 검출카메라의 중앙부와 전차선까지의



Fig. 4. Configuration of simulated contact line detector included imu sensor.

거리를 581.7 mm로 하였으며 편위는 지그의 중심 부분을 0 mm를 기준점으로 구성하였다. 모의 전차선의 높이는 ±200 mm, 편위는 ±200 mm로 작동하도록 구성하였다. 시험 중 검출기에 임의의 충격을 가하여 지그 중앙부의 IMU 센서로부터 출력되는 순간 가속도, 각속도, 방위각 등을 검출하였다.

모의시험을 위한 전차선의 이동조건은 표 2와 같이 나타내었으며 기준점 높이는 581.7 mm, 편위는 0 mm 위치에서 높이를 ±200 mm, 편위를 ±100 mm 동시에 이동시켰다. 전차선의 높이 및 편위 검출 모의

Table 2. Simulation case of height and stagger in contact line.

Item	Step 1	Step 2	Step 3	Step 4
Hight	581.7 mm	781.7 mm	381.7 mm	581.7 mm
Stagger	0 mm	100 mm	-100 mm	0 mm

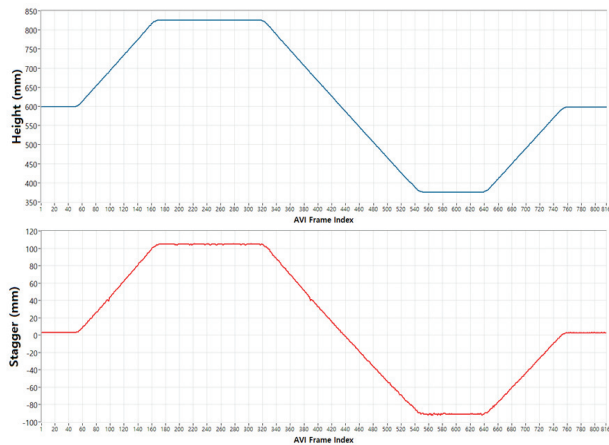


Fig. 5. Test result of height and stagger on simulated contact line.

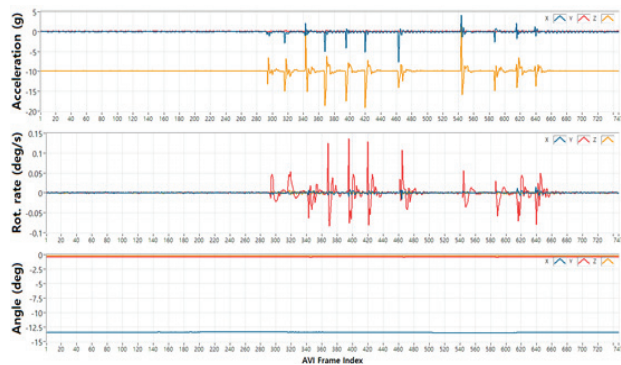


Fig. 6. Test result of imu sensor according to height and stagger in simulated contact wire.

시험 결과는 그림 5와 같이 시험조건에 따른 움직임이 나타냈다. IMU 센서의 진동 결과는 그림 6과 같이 나타냈으며 모의 전차선이 움직이는 동안 지그를 가진하였다. 가속도, 각속도의 변화에 따라 진동을 확인하였으며 그림 5의 전차선 이동조건의 따른 검출결과에서 높이 차이를 나타냈다. 조건값과 검출값의 높이는 최소 약 +20 mm에서 최대 약 +45 mm까지의 차이를 나타냈으며 검출지그의 기울기 변화에 따른 차이로 사료된다.

그림 6은 임의의 가진 시 IMU 센서의 변화값을 나타내었다. 그림 6과 같이 가속도(acceleration), 각속도(rotation), 방위각(angle)에 대해 충격 전후의 결과를 나타내었으며 현장시험에서 모니터링 시스템이 설치된 철도차량의 진동과 기울기 측정이 가능할 것으로 사료된다.

4. 결론

250 km/h급 강체전차선로가 개발되면서 설치오차로부터 팬터그래프 간의 집전성능에 가공전차선로보다 큰 영향을 줄 수 있다. 본 논문은 강체전차선로의 설치 이후 높이와 편위를 검출하기 위해 480×720의 해상도의 이미지를 검출하도록 구성하였다. 검출 결과는 실시간으로 IEEE 802.3af 방식을 통해 검출장치에 저장되도록 하였으며 검출속도는 25 Hz로 설정하였다. 모의 전차선의 조건값과 비교한 결과는 높이에서 최대 +45 mm의 차이를 나타냈다. 검출기의 현장설치를 고려한 임의의 충격에 따른 진동은 미세하게 나타내었다. 본 논문에서 제안한 강체전차선로 정적 검출기는 향후 고속 강체전차선의 설치에 따른 설치위치 검증과 유지보수에 활용될 것으로 기대된다.

ORCID

Young Park

<https://orcid.org/0000-0002-9825-0424>

감사의 글

이 논문은 2019년도 한밭대학교 교내학술연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Y. H. Cho, Y. Park, and H. J. Jung, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **64**, 1256 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.8.1256>]
- [2] H. B. Ryoo, S. G. Jeong, I. D. Yang, and Y. C. Park, *Proc. Fall Conference of the Korean Society for Railway* (The Korean Society For Railway, Korea, 2016) p. 1275.
- [3] Y. Park, K. W. Lee, C. M. Park, and S. Y. Kwon, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **62**, 886 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.6.886>]
- [4] K. Lee, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **62**, 1820 (2013). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2013.62.12.1820>]
- [5] S. J. Bae, K. D. Jang, K. W. Lee, and Y. C. Park, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **64**, 492 (2015). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2015.64.3.492>]
- [6] K. Lee and Y. H. Cho, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **66**, 740 (2017). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2017.66.4.740>]
- [7] Y. Park, S. Y. Kwon, and J. M. Kim, *Trans. Korean. Inst. Elect. Eng.*, **61**, 1216 (2012). [DOI: <https://doi.org/10.5370/KIEE.2012.61.8.1216>]
- [8] S. S. Song, T. H. Lee, J. Y. Song, and S. M. Park, *J. Korean Soci. Rail*, **11**, 569 (2008).
- [9] K. Lee, et al., A parameter study and evaluation for detail design of Overhead Rigid Conductor System (Infrastructure R&D Report, Korea Railroad Research Institute, Korea, 2018), p. 125.
- [10] S. G. Kim, H. C. Kim, J. G. Park, J. W. Sim, K. Y. Jang, and W. Y. Kim, *Journal of KSPE*, **23**, 10 (2006).
- [11] S. Kusumi, K. Nezu, and H. Nagasawa, *Q. Rep. RTRI*, **41**, 169 (2000). [DOI: <https://doi.org/10.2219/rtriqr.41.169>]