Regular Paper
J. KIEEME
Vol. 23, No. 8, pp. 632-637, August 2010
DOI: 10.4313/JKEM.2010.23.8.632

고속카메라를 이용한 전차선 마모 검측 영상처리 알고리즘 개발

박 영[1], 조용현[1], 조철진[2], 김원하[3,a]
[1] 한국철도기술연구원 전철전력연구실
[2] 고려대학교 전기전자전파공학부
[3] 경희대학교 전자정보학부

Development of a Technique for Detection of Contact Wire Wear using High-Speed Camera

Young Park[1], Yong Hyeon Cho[1], Chuljin Cho[2], and Wonha Kim[3,a]
[1] Electric Power Supply Research Division, Korea Railroad Research Institute, Uiwang 437-757, Korea
[2] School of Electrical Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea
[3] College Electronics & Information, Kyung Hee University, Seoul 130-701, Korea

(Received May 6, 2010; Revised July 1, 2010; Accepted July 23, 2010)

Abstract: The measurement of contact wire wear in electric railways is one of the key test parameters to increase speed and maintain safety in electric railways. Wear caused by continuous interaction between pantographs and contact wires has a negative effect on current collection quality and severely damaged contact wires might cause hazardous accidents. This paper introduces a non-contact optical-based contact wire wear measuring system that will replace conventional wear detecting methods conducted by maintenance vehicles or workers. The system is implemented by high-speed cameras that can collect images of contact wires during vehicle operation, a laser used to create images profile of the contact wire surface, and a computer used to process the collected images. The proposed system is designed to assist maintenance of overhead contact lines by creating geometrically plotted images of contact wires to detect contact wire wear during operation on conventional lines or high-speed lines.

Keywords: Catenary, Electric railway, Contact wire wear

1. 서 론

전차선은 전기차량 집전장치와 직접 접촉하여 전원을 공급하는 전기철도의 핵심설비로 전철노선 증가['00년 전철화율 21.2%에서 '10년 60%로 증가] 이후와 사고에 대한 파급효과로 시스템의 중요성 증가와 차량의 고속화로 기계적, 전기적 요인이 크대 증대되고 있다 [1,2]. 현재 전차선로 검측 시스템 개발에 대한 연구진행은 자동화된 검측 시스템을 이용 높이, 편위, 마모, 이선율 측정시스템 개발, 통합화 진행 중에 있다 [3,4]. 또한 전차선로 시스템은 각 나라에 따라 전차선의 두께, 높이, 구조가 다르므로 각 나라의 철도 시스템에 적합하게 기술을 개발하고 전차선 선종 및 시스템에 대한 검측시스템을 체계적으로 개발하여 독자적이고 독립적인 원천기술을 개발하여 객관적인 검증을 실시하여야 한다 [5,9]. 특히 팬터그래프와 전차선간 지속적인 마찰을 통해 발생하는 전차선의 마모는 집전성능에 막대한 영향을 미치므로 이를 효과적으로 검측할 수 있는 기술을 개발이 필요하다 [6]. 또한 국내 전차선로 검측의 경우 일본, 프랑스, 독일 등에서 도입된 전차선의 형태가 다양하므로 마모 검측을 위한

a. Corresponding author; wonha@khu.ac.kr

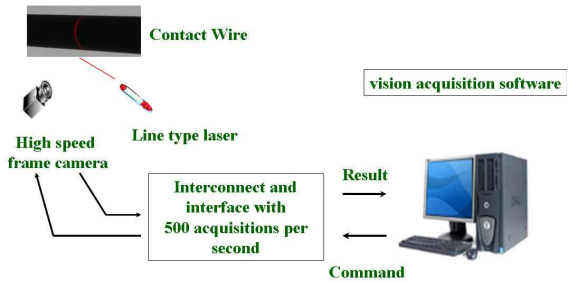

Fig. 1. Scheme of contact wire wear detection system.

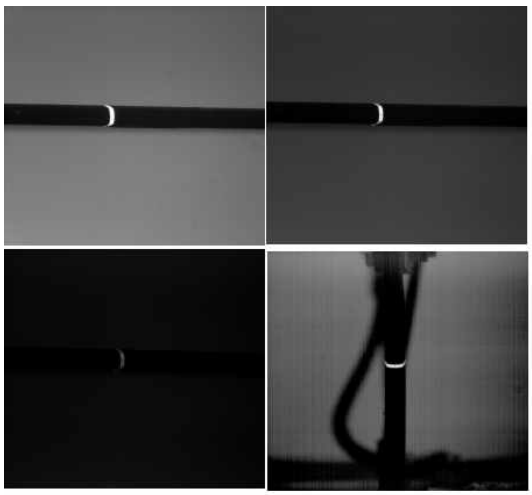

Fig. 2. Image of contact wire acquired from high-speed camera.

국외 특정 측정 시스템을 적용이 어려우므로 실용적인 유지보수를 위해 시스템 개발이 요구된다 [7,8,10].

본 논문에서는 해상도 1280×1024 픽셀, 프레임 속도는 최대 485 Fps, full frame shutter, FPGA에 의한 실시간 이미지 프로세싱 환경, 프로그램에 의한 이미지 구획 설정 가능 (ROI), CMOS 센서, exposure time 조절 : 2 μs~1 s 기능을 가지고 있는 CMOS 카메라를 이용하였으며 레이저를 이용하여 전차선의 영상을 촬영하고 레이저 영상만을 축출하는 기술을 연구하였다. 또한 획득한 영상에서 전차선에 대한 정보를 처리할 수 있는 프로필 (profile)을 생성하여 정상적인 전차선의 모델과 비교 분석하여 필요한 데이터를 얻을 수 있는 알고리즘을 제시하였다.

2. 실험 방법

본 논문의 목적은 전기차 운행에 따라 발생하는 마모

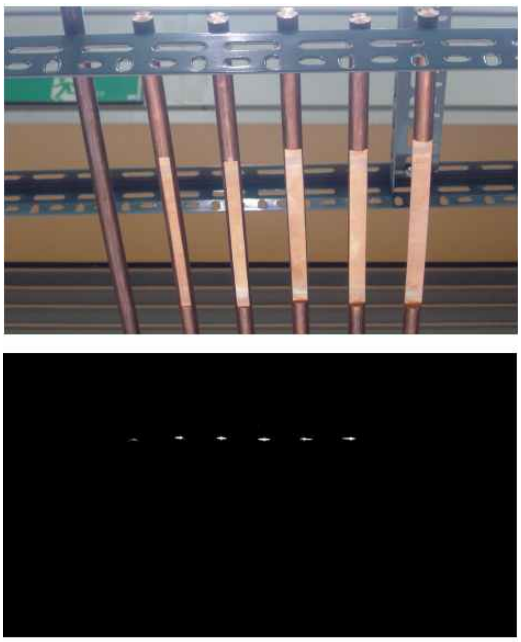

Fig. 3. Model of contact wire of catenary.

를 영상처리 기법을 이용하여 검측 하는 기술을 개발하는 것이다. 그러므로 운행 중인 전차선로에서 이미지를 받아 마모를 측정하기 위해서는 고속카메라와 레이저를 연동하여 고속으로 저장하는 알고리즘이 필요하다.

그림 1에 전차선로 검측을 위한 화상시스템 계략도를 나타내었다. 전차선 측정은 전차선 Cu 150과 Cu 170을 이용하였으며 화상 모니터링 및 저장장치는 라인 형태의 레이저를 전차선 아래에서 조사하고 초당 500개의 영상을 취득할 수 있는 초고속카메라를 이용하여 구현하였다. 획득한 데이터는 초당 약 500장의 영상신호를 획득하기 위하여 고속 이미지 획득을 위한 인터페이스를 이용하여 PC와 통신하였으며 영상획득 및 저장을 위해 화상 저장 및 획득 프로그램을 개발 하였다. 전차선로 화상시스템 장치의 영상획득은 초당 500개의 영상 신호를 RAM에 일시 저장 후 이를 하드웨어에 영구저장 하였다 [7]. 또한 영상신호를 입력은 고속 이미지 획득 인터페이스를 이용하여 영상처리용 컴퓨터와 통신하고 화상 획득 및 저장은 LabVIEW image processing tool을 이용하여 별도의 프로그램을 개발하였다.

그림 2에 고속카메라를 이용한 초당 영상 획득 수 (프레임율)에 따른 전차선로 이미지를 나타내었다. 왼쪽 상단부터 프레임율을 60 fps, 100 fps, 500 fps, 500 fps

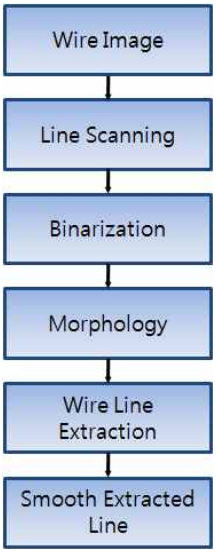

Fig. 4. Process of detecting contact wire wear.

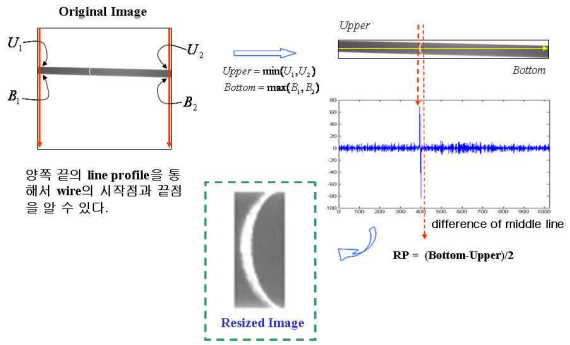

Fig. 5. Acquisition of contact wire image.

(명도 조절)로 변화시키면서 촬영한 전차선을 나타냈다. 그림에서 나타낸 바와 같이 프레임율이 증가할수록 이미지의 명암비가 떨어짐을 알 수 있다. 그러나 획득된 이미지는 명암 비에 따라 바이너리 타입으로 영상처리가 가능 하고 이를 이미지 프로세싱 함으로서 보다 완벽한 전차선로 정보를 얻을 수 있으리라 사료된다.

고속카메라를 이용한 전차선 마모 측정 알고리즘이 실제로 운행되는 열차에서 올바르게 동작하는지 검증하기 위해서 전차선 모형을 통한 실험을 수행하였다. 그림 3에 제작된 전차선의 모형을 아래에서 촬영한 모습을 나타냈다. 왼쪽부터 0 mm, 1 mm, 2 mm, 3.5 mm, 4.5 mm, 6.9 mm로 마모시킨 원형 전차선을 장착했다. 하단의 그림은 전차선 모형에 레이저를 조사하고 카메라를 통해 획득한 영상이다.

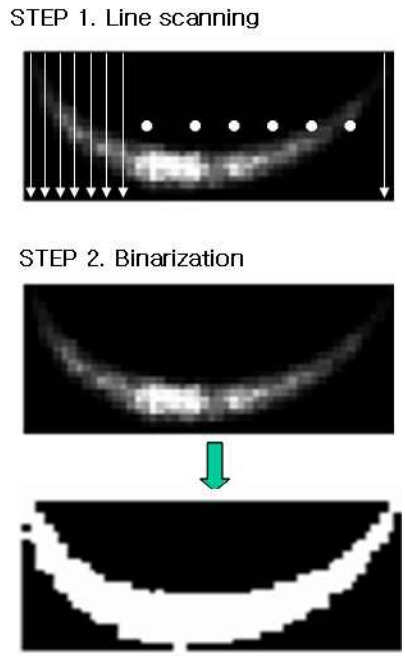

Fig. 6. Line scanning and binarization.

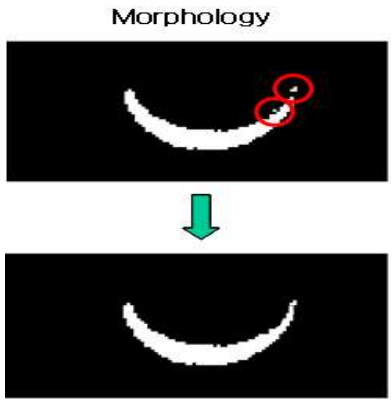

Fig. 7. Surface created by morphology.

그림 4에 고속카메라를 활용한 전차선 마모 측정 알고리즘의 전반적인 과정을 순서도로 나타내었다. 그림 5의 영상에서와 같이 영상의 열에 따라 픽셀들의 밝기 변화를 검사한다. 레이저를 조사한 부분에서 픽셀들의 밝기가 급격히 증가하므로 밝기가 증가하는 시작지점과 끝 지점을 경계로 하여 레이저가 조사된 부분을 추출한다. 이렇게 획득한 영상을 그림 6과 같이 영상의 각 행 별로 검사하여 픽셀 명도 값의 평균값의 70%를 임계치로 하여 70% 이상이 되는 픽셀을 1,

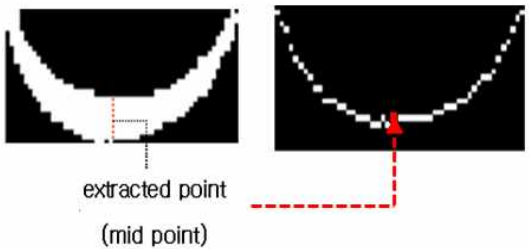

Fig. 8. Calculating contact wire surface considering laser scattering.

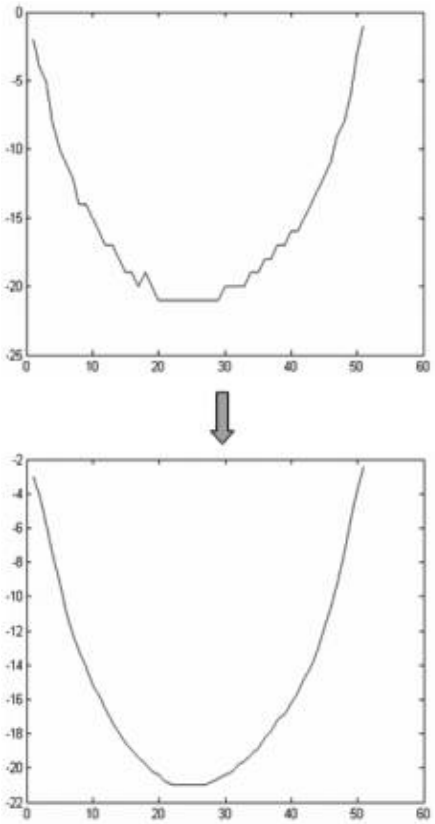

Fig 9. Stablization of detected contact wire profile.

70% 이하인 픽셀은 0으로 하여 이진화 시킨다. 여기서 1이란 값은 레이저가 조사된 픽셀을 의미 한다. 이진화 과정만으로는 검측의 정확성을 보장할 수 없기 때문에 더욱 많은 처리가 필요하다. 이에 대한 첫 단계로 그림 7과 같이 이진화 된 영상을 형태론(Morphology)에 따라 전차선 표면만 분리 한다. 이렇게 구성된 레이저 영상은 레이저의 산란 현상 때문에 전차선의 프로필을 구성하지 못한다. 따라서 산란된

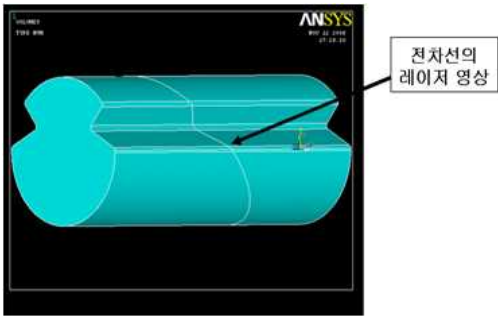

Fig. 10. Model of circular wire.

전차선의 영상에서 전차선의 프로필을 검출하기 위해서 산란된 전차선 영상의 중심을 전차선 프로필로 결정한다. 그림 8은 전차선 프로필을 검출하는 과정을 보여준다. 이렇게 검출된 전차선 프로필은 인위적이고 전체적인 추세를 나타내지 못한다. 따라서 검출된 전차선의 프로필을 안정화하기 위하여 5차원 평균 필터를 적용한다. 검출된 프로필을 2차원의 원형 영상을 식 (1)과 식 (2)를 통해 극좌표의 영상 영역으로 변환하여 평균 필터에 적용한다. 그림 9에 검출된 전차선 프로필을 안정화 시키는 과정을 나타냈다.

$$(m,n) = \begin{cases} (r-|n|,|n|) & : \ 0^o \le \theta < 90^o \\ (-r+|n|,|n|) & : \ 90^o \le \theta < 180^o \\ (-r+|n|,-|n|) & : \ 180^o \le \theta < 270^o \\ (r-|n|,-|n|) & : \ 270^o \le \theta < 360^o \end{cases} \quad (1)$$

$$|n| = \underset{0 \le |n| \le r}{\arg min} \left\{ \left| \frac{|n|}{r-|n|} - |\tan\theta| \right| \right\} = \partial\left(\frac{r \bullet |\tan\theta|}{1+|\tan\theta|} \right) \quad (2)$$

3. 결과 및 고찰

전차선 마모 검측은 3차원의 이미지를 고속카메라로 축출하여 이를 선형화 하는 것이므로 실제 전차선의 규격을 모델링 하여 이를 2차원화 하기 위한 형상 모델을 축출 하였다. 그림 10에 구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용한 전차선 Cu150의 3D 모델을 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 전차선에 레이저를 조사하여 그 형상을 분석하면 전차선의 마모에 대한 정보를 얻는 것이 가능하다.

그림 11에 원형 전차선 모델과 마모가 0.8 mm 진행된 전차선 모델을 비교하였다. 일반적인 경우 그림 11과 같이 전차선 마모는 팬터그래프에 의해 하단을

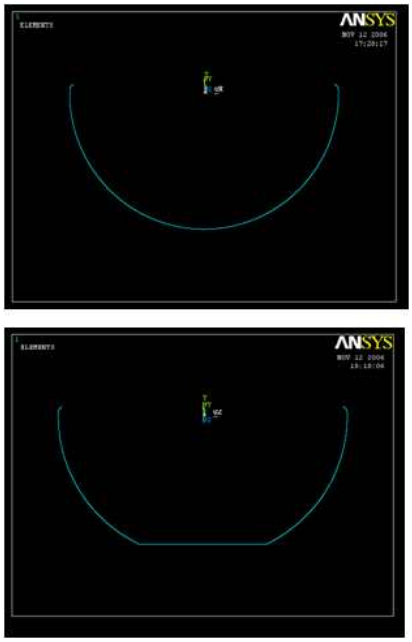

Fig 11. Contact wire with 0.8 mm wear.

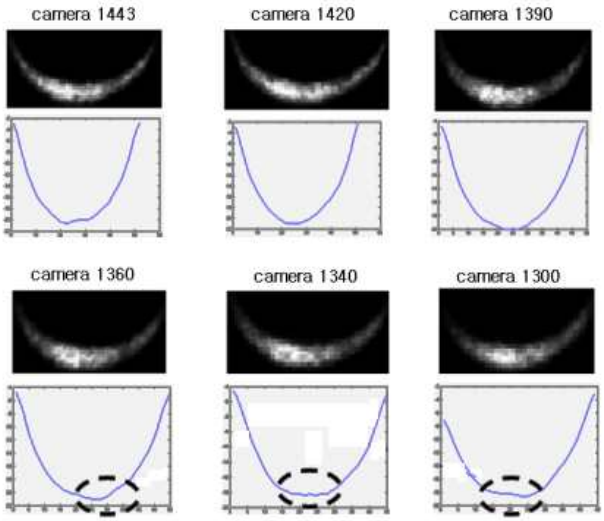

Fig 12. Permitted distance between contact wire and camera.

평면으로 깎으면서 진행이 된다. 그러므로 위 실험 과정으로 취득한 전차선의 프로필을 ANSYS 모델과 비교하면 전차선 마모의 진행을 파악할 수 있다.

전차선 마모를 정확하게 검측하기 위해서는 검측의 주체가 되는 카메라와 레이저의 위치에 대한 기준과

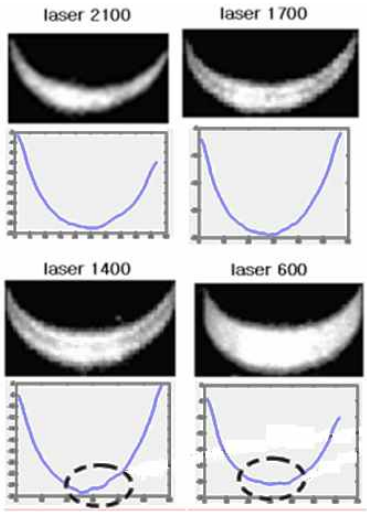

Fig 13. Permitted distance between contact wire and laser.

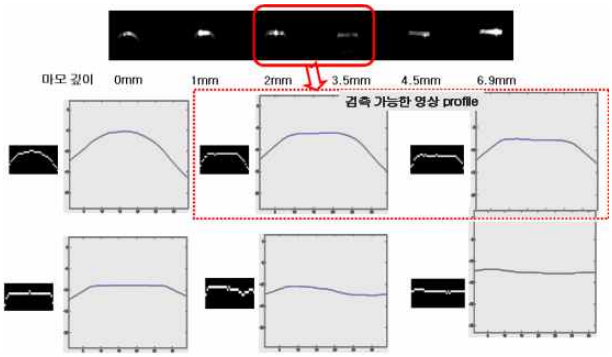

Fig 14. Contact wire profile considering laser angle.

레이저의 편향각에 대한 기준을 수립하는 것이 필요하다. 그림 12와 13에 제안한 방법으로 수행한 전차선 영상 처리 알고리즘을 각각 카메라와 전차선의 거리와 레이저와 전차선의 거리에 변화를 준 결과를 나타냈다.

카메라의 허용거리를 구하기 위해서 레이저와 전차선 거리를 1,400 mm로 하고 카메라와 전차선의 거리를 1,300 mm에서 1,443 mm까지 변화를 주었다. 그림 12에서 검은색 점선으로 표시한 부분은 왜곡이 나타난 부분이며 1,300 mm, 1,340 mm, 1,360 mm에서 왜곡이 나타났음을 알 수 있다. 그러므로 카메라의 허용거리는 1,390 mm에서 1,443 mm라고 할 수 있다. 마찬가지로 그림 13에서 레이저의 허용거리를 카메라와 전차선의 거리를 1,390 mm로 하고 레이저와 전차선의 거리를 600 mm에서 2,100 mm까지 변화를 준

결과를 나타냈다. 레이저의 허용거리는 1,700 mm에서 2,100 mm로 관측되었다. 그림 14에 편향각이 전차선 검측에 미치는 영향을 나타냈다. 전차선 모형 중앙에 위치한 마모가 2 mm 진행된 전차선과 3.5 mm 진행된 전차선은 전차선 프로필의 형상이 좌우 대칭인 반면에 0 mm, 1 mm, 4.5 mm, 6.9 mm 전차선들은 좌우 비대칭임을 알 수 있다. 정확한 전차선 형상의 마모 지점을 알아내기 위해서는 영상의 원형이 대칭이 되어야 하므로 레이저의 편향각도 고려해야함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 카메라로 획득한 전차선 영상에서 전차선의 프로필을 구하는 변화식을 유도하였으며, 전차선 프로필을 모델링하여 실제 검측 된 프로필과 비교하여 분석하였다. 또한 전차선 모형을 제작하여 모의실험을 실행 하였으며 모의실험에서 획득한 카메라 영상에서 전차선 프로필을 검출하는 기법을 제안하였다. 본 연구에서 제안한 기법은 전차선 프로필에 알맞은 극좌표 domain에서 처리하도록 이산 극좌표를 실현하는 수학을 유도하였다. 영상 처리는 5 단계로 나누어 전차선 프로필을 검출하는 기법을 제안 하였다. 특히, 제안된 전차선 프로필 검출 기법으로 모의실험에서 획득한 실제 영상에서 카메라와 전차선의 거리에 따라서, 레이저와 전차선의 거리에 따라서 프로필을 검출하는 실험을 수행하였다. 또한, 제안한 기법으로 카메라와 전차선 사이의 허용 거리와 레이저와 전차선 사이의 허용 거리를 결정하였다.

향후 연구 방향으로는 검출된 전차선의 프로필의 정확도를 분석하여서 실제 제안 기법의 안정성을 확보하여, 움직이는 전차선에서도 실시간으로 전차선로를 추적하는 기술이다. 또한, 실시간 처리를 위해 제안된 기법을 최적화한다면 고속선에서도 개발된 기술을 활용할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부 틸팅열차 시험선 전차선로 성능평가연구 연구비지원에 의해 수행되었습니다.

REFERENCES

[1] B. S. Han, *Rail Webzine* **56**, (2005).
[2] H.-K. Na, Y. Park, Y.-H. Cho, K.-W. Lee, H.-J. Park, S.-Y. Oh, and J.-T. Song, *J. KIEEME* **20**, 281 (2007).
[3] S. Makino and T Satoh, *ICDMTS 1998 Conf. IEEE* (IEEE, London, UK, 1998) p. 310.
[4] S. Borromeo and J. L. Aparicio, *IECON 02 Conf. IEEE* (2002) p. 2700.
[5] Y. Park, Y. H. Cho, H. Jung, K. Lee, H. Kim, S.-Y. Kwon, H. Park, and W. Kim, *J. KIEEME* **21**, 868 (2008).
[6] H. J. Kim, Y. Park, Y. H. Cho, C. Cho, and I.-C. Kim, *J. KIEEME* **22**, 1084 (2009).
[7] I. K, Kang, *Contact Lines for Electric Railways* (Sungandang, Paju, Korea, 2006) p. 5.
[8] S. Borromeo and J. L. Aparicio, *IECON 02 Conf. IEEE* (2003) p. 2700.
[9] S. I. Seo, C. S. Park, C. S. Park, J. Y. Mok, and B. B. Kang, *Proc. Kor. Soc. Railway* (2003) p. 574.
[10] R. Muller, *WCRR'97* (1997).