

고속 하이비전 카메라 기술을 이용한 철도차량 차륜형상 측정에 관한 연구

A study on Profile Measurement for Railway Wheels using High Speed Camera and Vision Technology

원시태 · 권석진 · 허성범*

Si-Tae Won · Seok-Jin Kwon · Sung-Bum Huh

Abstract Maintenance and repair devices used for the inspection of the main parts of domestic railway vehicles have been imported from abroad. Especially, one of the representative domestic devices, the 'Wheel Profile Inspector System (WPIS)', was made by benchmarking foreign devices; this vehicle has been operated in the field. However, problems such as the reliability and performance of the WPIS in operation have appeared. In this study, in order to improve the precision and reliability of the WPIS for maintenance and inspection of railway vehicle wheels, the researchers improved the railway vehicle's WPIS by applying high-speed vision camera technology and an optimized image algorithm. The test results show that the reliability of the developed WPIS improved by approximately 10.4% compared to that of the conventional system.

Keywords : High speed CCD Camera, Wheel Profile, Wheel Maintenance, Vision algorithm

초 록 현재 국내 철도차량에 사용되고 있는 주요 부품의 유지와 보수를 위한 검사장비는 대부분 외국으로부터 수입하여 사용하고 있다. 특히 차륜형상 측정장비 등과 같은 일부 검사장비는 외국의 장비를 벤치 마킹하여 제작한 국산화 장비를 설치하여 사용하고 있으나, 이들 국산화 장비는 신뢰성과 성능에 많은 문제점이 발생하고 있는 실정이다. 따라서 본 연구는 철도차량 차륜의 유지 및 보수를 위한 차륜형상 측정장치의 정밀도와 신뢰도 향상을 위하여 최신의 고속 하이비전 카메라 기술과 최적화된 영상처리 알고리즘을 적용하여 차륜형상 측정시스템을 개발하였다. 신뢰성 평가 실험결과 개발된 차륜형상 측정시스템의 신뢰도는 기존 시스템에 비하여 약 10.4%의 신뢰도 향상 효과가 있음을 확인하였다.

주요어 : 하이비전 카메라, 차륜형상, 차륜관리, 비전알고리즘

1. 서 론

국내 철도 운영기관에서는 차량 검수의 효율성 증대 목적으로 일상점검이 자동화된 비접촉식 검사장치를 도입하여 운영하고 있다. 초창기에는 이들 검사장치를 해외 수입에 의존하여 설치 운영되고 있으나, 장비의 노후화와 유지보수의 어려움, 신뢰성의 확보 등의 문제가 발생하고 있다.

기존의 차륜형상 측정장치는 레이저광과 화상처리를 이용해 차륜 각부를 자동적으로 측정하며, 필요에 따라 과거로부터 최신데이터를 뽑아 화상표시, 출력, 마모경과 표시등의 각종 데이터처리를 수행하는 시스템으로 구성되어 있다.

차륜의 내면부와 외면부에 각각에 세밀한 대역의 레이저광을 투사하고 차륜표면에서의 분사광 화상을 담면용 카메라와 내면용 카메라로 촬영하여 차륜단면의 형상을 측정한다.

Fig. 1과 같이 촬영한 화상에 대해서 필터처리, 세션화처리를 행하고 차륜각부의 치수를 산출한다. 광원과 카메라는 좌우의 차륜용으로 2대를 설치하고 양자의 측정결과에서 백게이지를 산출한다[1-3].

국내의 차륜형상 측정장비 개발업체는 외국의 선진기술에 대한 벤치마킹을 통하여 국산화를 진행하여 설치하고 있으나 장치의 신뢰성과 성능이 떨어지는 문제점이 발생되어 최신의 기술을 이용한 시스템 개발이 필요하게 되었다.

본 연구에서는 차량의 주행에 중요한 역할을 하는 차륜의 형상을 고속 하이비전 카메라기술 적용과 차륜형상 측정시스템의 최적화된 알고리즘 개발을 통하여 차륜형상 측정기술 향상에 대한 연구를 수행하였다.

*Corresponding author. Tel.: +82-43-820-4261, E-mail : sbhur@wjis.co.kr.

© 2015 The Korean Society for Railway. All rights reserved.

<http://dx.doi.org/10.7782/JKSR.2015.18.1.1>

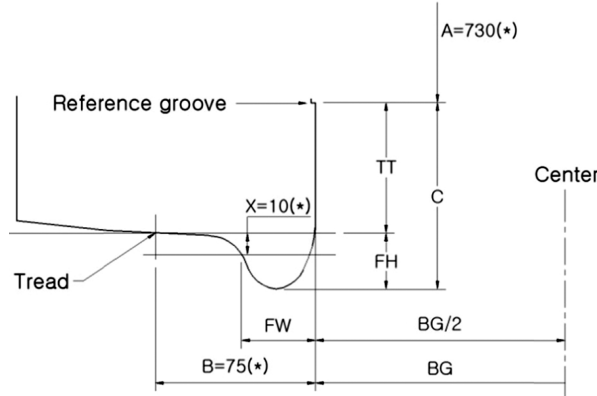


Fig. 1. Geometry and dimension by measurement of the vision camera.

2. 고속 하이비전 카메라를 이용한 차륜측정 기술 개발

2.1 시스템 구축

본 연구는 Table 1에서 보는 바와 같이 기존 차륜형상 측정장치에 비해 차륜프로파일의 정확도를 2배 향상시키고 측정 신뢰성을 90%에서 95%로 향상을 목표로 하였다.

또한 기 설치된 장비 중 일부는 차륜검지센서가 근접센서 방식으로 차륜마모에 의한 플랜지 높이의 다양성에 의해 센서의 파손 및 검지 오류가 발생하여, 본 연구에서는 적외선 광전센서를 적용하여 차륜의 통과 유무를 정확히 판단할 수 있게 하였다.

한편 본 시스템이 설치되는 철도차량사업소 구내의 차량 최대속도는 25km/h로 제한되어 있기 때문에, 이동 하는 물체의 측정에 중요한 기능인 카메라의 셔터 스피드는 허용오차를 감안할 경우 열차의 최대속도(25km/h)를 허용오차(0.5mm)로 나누면 1/13,900sec보다 작은 값이 도출되고, 해상도는 차륜의 폭(140mm)보다 영상이 커야 하므로, 200mm로 정하고, 허용오차를 적용하여 픽셀의 크기를 계산하면 400픽셀이지만 정밀도를 최대한 상승시키기 위해 2000픽셀(4메가)급 이상의 카메라를 적용하였다.

카메라와 레이저의 배치 최적화를 위해 Table 2와, Fig. 2와 같이 차륜의 측정위치를 기준으로 레이저는 차륜에 수직이 되도록 조사하고 그 형상을 카메라로 영상 취득이 가능하도록 구조적인 배치를 하였다. 고속 하이비전 카메라와 레이저, 카메라 트리거 타이밍 신호 발생용 적외선 광화이버 센서를 각각 1SET씩 좌/우측 레일 근방에 설치하여 구성하였다.

Table 3은 카메라, 레이저, 적외선 광화이버 센서의 주요 사양이다.

차륜의 프로파일을 측정할 수 있는 고속 하이비전 카메라와 레이저는 옥외에 설치되어 눈과 비 등의 환경적인 영향을 받으며, 차량 주행속도 25km/h 이하에서 차륜의 프로파일을 측정할 수 있도록 궤도 하부에 설치하여 차량 운행에 간섭이 발생되지 않도록 배치되었다. 고속 하이비전 카메라, 레이저와 센서는 Fig. 3의 (a)와 같은 구조이며 차륜의 측정위치를 기준으로 레이저는 차륜에 수직이 되도록 조사하고 그 프로파일의 영상은 Fig. 3의 (b)와 같다.

Table 1. Goal of measurement positions and accuracy of the systems.

Measurement positions	Conventional system		New developed system	
	Tolerance	Accuracy	Tolerance	Accuracy
Tread thickness	±1.0mm	90%	±0.5mm	95%
Flange height	±1.0mm		±0.5mm	
Flange thickness	±1.0mm		±0.5mm	

Table 2. Angles of the camera and laser.

Azimuth	Tread camera	Tread laser	Side camera	Side laser
X-Y	7°	12°	45°	95°
X-Z	18°	51°	30°	90°
Y-Z	76°	76°	15°	21°

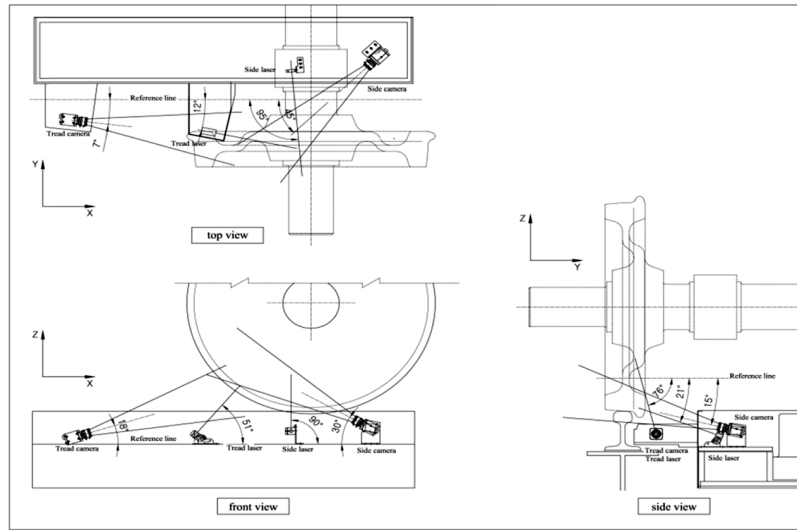
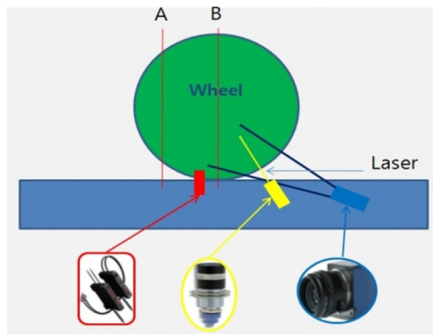


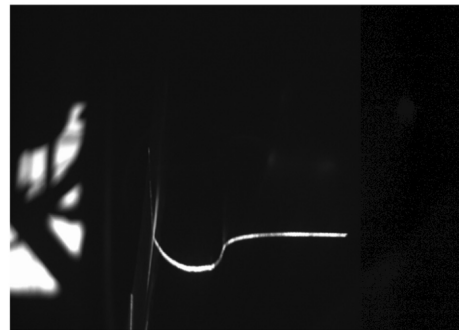
Fig. 2. Optimized installation of the camera.

Table 3 Specifications of the main components.

Components	Specifications
Camera	1/2" progressive scan, 2,448(H)×2,048(V), 1μs speed
Laser	Line laser, 95mW power, 655nm wavelength
Sensor	Photoelectric type, 300mm range, 0.2ms speed



(a) Configuration drawings



(b) Laser profile of wheel tread

Fig. 3. Measurement image of wheel profile.

2.2 프로그램 구성

차륜형상 측정장치의 차륜관리 프로그램의 처리 시퀀스는 Fig. 4와 같다. 차륜관리 프로그램을 구동한 후 차량진입 센서로부터 차량의 진입 상태에 대한 정보를 받아 모든 차륜에 대하여 차륜 답면, 측면의 프로파일을 촬영하고, 취득 영상데이터 필터처리, 분석, 이미지 프로세싱을 통하여 차륜의 각부의 치수(차륜두께, 플렌지 두께, 플렌지 넓이)를 산출한다.

2.3 차륜측정을 위한 수치해석 알고리즘

차륜 프로파일 이미지 프로세싱 처리 알고리즘 흐름도는 Fig. 5와 같다. 기하학적으로 변환하여 노이즈 필터를 통해 차륜 에지를 추출하고 데이터를 처리한다[4].

2.3.1 기하학적 변환 수행

차륜 형상의 원본 이미지를 1차적으로 기하학적 변환을 수행하였다. 본 연구에서는 차륜의 좌측과 우측을 구분하여 영상

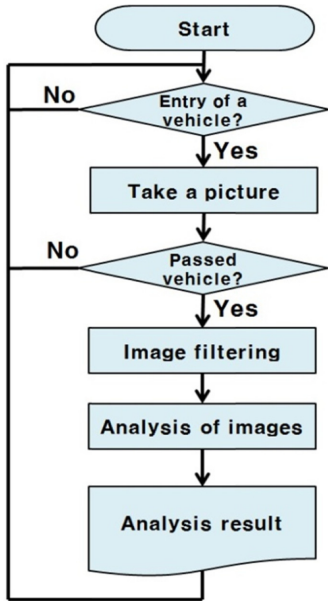


Fig. 4. Flowchart of wheel inspection.

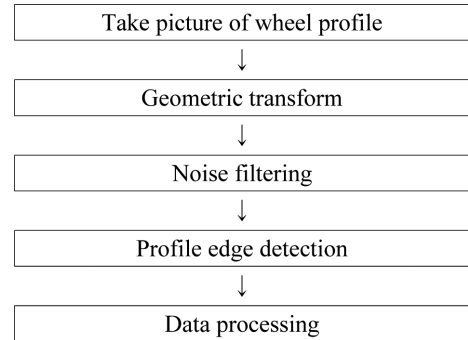


Fig. 5. Flowchart of wheel profile image.

을 취득하는데 동일한 영상처리를 위해 기하학적 변환(Geometric transform)을 이용하여 동일한 방향으로 변환하기 위해 영상반전(Image reflection)을 이용하여 y축을 기준으로 대칭되는 위치를 바꾸는 기법을 적용하였다. y축 기준의 반전은 식 (1)과 같이 표현할 수 있다[5].

$$\begin{Bmatrix} x' \\ y' \\ 1 \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{Bmatrix} x \\ y \\ 1 \end{Bmatrix} \tag{1}$$

2.3.2 스래시홀딩 기법 적용

이와 같은 과정으로 좌측과 우측의 차륜 이미지를 동일화할 수 있다. 차륜의 원본 이미지에서는 밝기 레벨이 여러 단수에 나누어져 있어 프로파일의 경계를 정확하게 구분할 수 없는 경우가 발생한다. 피사체의 경계를 정확히 인식하기 위해 컬러나 그레이 영상을 0과 1의 값으로 변환하는 스래시홀딩(Thresholding)기법인 영상 이진화방법을 사용하였다. 픽셀값이 임의로 정해진 임계치(Threshold)보다 작을 경우 흑색으로, 임계치보다 클 경우 백색으로 변환한다. 레이저 프로파일의 경우는 비교적 단순한 영상으로 식 (2)와 같이 분리가 가능하다.

$$G(x, y) = \begin{cases} 1 & \text{if } f(x, y) \geq Th \\ 0 & \text{else} \end{cases} \tag{2}$$

2.3.3 평균 필터링 기법 적용

이미지 영역 및 샘플링을 하기 위한 소프트웨어 코딩작업 후 시험결과 Fig. 6의 우측과 같이 많은 노이즈가 발생한다. 이러한 노이즈를 제거하기 위해 평균 필터링(Mean filtering)기법을 사용하여 노이즈를 최소화하였다. 이 기법은 식 (3)과 같이 기준 픽셀(x,y)을 중심으로 이웃하는 픽셀들의 평균값을 구해 기준 픽셀의 값을 변경하는 방법을 사용하였다[6].

$$G(x, y) = \frac{1}{9} \sum_{i=-1}^1 \sum_{j=-1}^1 f(x+i, y+j) \tag{3}$$

이진화 영상을 노이즈 필터링을 통해 Fig. 7의 우측과 같은 영상이 출력된다. 육안으로도 좌측과 우측을 비교하면 노이즈 성분이 감소된 것을 식별할 수 있다.

2.3.4 유사연산 에지 검출 기법 적용

이러한 과정으로 실제 차륜의 크기를 구하기 위해 레이저라인을 검출해야 한다. 이러한 경계선을 검출하기 위해 사용된

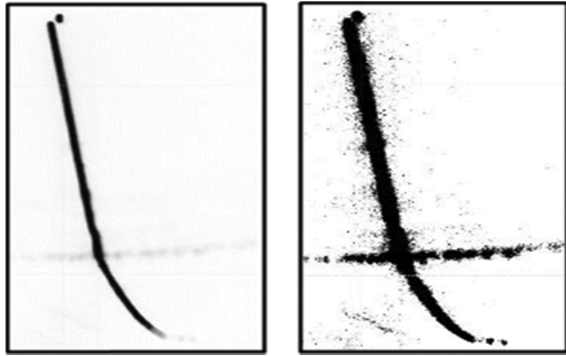


Fig. 6. Original image (left) and threshold image (right).

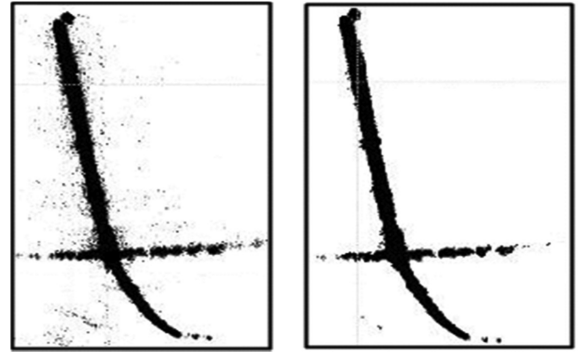


Fig. 7. Binary image (left) and filtered image (right).

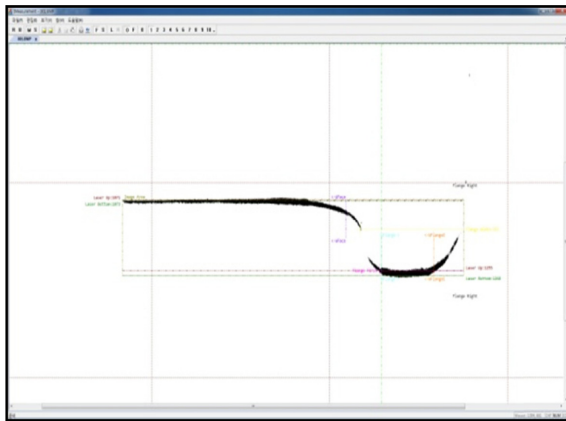


Fig. 8. Analysis image of wheel tread.

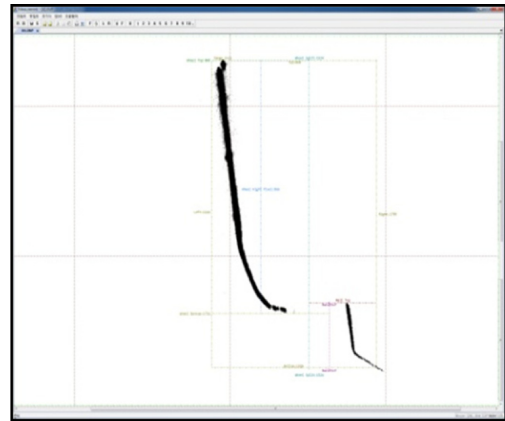


Fig. 9. Analysis image of wheel side.

유사연산(Homogeneity operator)에지 검출 기법은 해당 픽셀을 기준으로 이웃하는 3×3영역 내의 8개 픽셀들을 각각 감산해서 계산하고 이들 중 가장 큰 값을 선택한다. Fig. 8과 Fig. 9는 검출된 경계선을 이용하여 촬영된 이미지를 연산하는 과정이다.

Fig. 8과 Fig. 9와 같은 이미지로 레이저 프로파일까지 검출이 된 상태에서 실제 차륜의 값으로 환산하기 위해 보정(Calibration)을 통해 영상을 정면에서 보는 것과 같은 보정과 원근변환 작업이 완료되면 실제 차륜의 크기를 도출할 수 있다.

3. 시험결과 및 고찰

신뢰성 평가를 위해 측정 환경이 가능한 한국철도공사 시흥차량사업소 내에 설치된 차륜형상 측정장치에 고속 하이비전 카메라 시스템과 측정 알고리즘을 적용하였고, 차량의 측정 데이터를 수집하고 실측 또한 동일 전동차를 측정 차륜을 기

Table 4. Comparison of accuracy results of the conventional system and new developed system.

Item	Division	Conventional system		New developed system	
		±0.5mm below	±0.5mm excess	±0.5mm below	±0.5mm excess
Tread thickness	Quantity 32point	27	5	31	3
	Percentage	84.4%	15.6%	96.9%	3.1%
Flange height	Quantity 32point	28	4	31	1
	Percentage	87.5%	12.5%	96.9%	3.1%
Flange thickness	Quantity 32point	28	4	31	1
	Percentage	87.5%	12.5%	96.9%	3.1%
Total	Quantity 96point	83	13	93	3
	Percentage	86.5%	13.5%	96.9%	3.1%

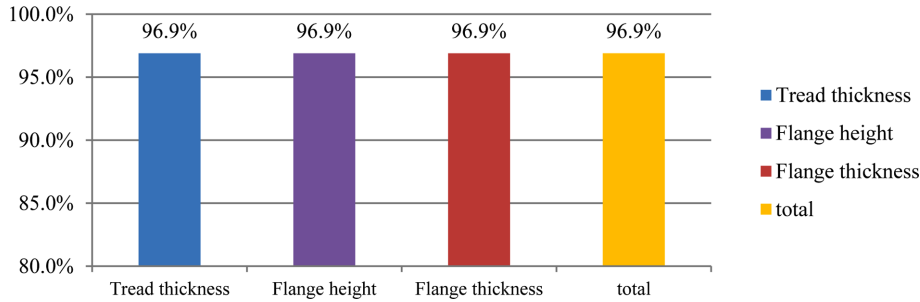


Fig. 10. Accuracy results of wheel profile measurement.

준으로 정밀도 확인 작업을 수행하였다.

장치의 신뢰도를 확인하기 위하여 차륜의 측정치와 실측치를 비교하였다. 이때 차륜의 실측공구는 기존 “C”형 게이지의 눈금방식을 사용하였으나, 실측 작업자의 주관성, 주변 환경에 따라 오차가 발생할 가능성이 높아 본 연구는 디지털 차륜 측정 게이지를 사용하였다. 그리고 차륜의 위치나 실측자 부주의로 인한 오차발생 가능성이 있어 3회 실측 후 평균값을 적용하였다. Table 4는 4량에 대한 실측 비교 결과로 불확도와 정밀도 비율을 분석하여 신뢰성을 집계한 결과를 나타낸 것으로, 고속 하이비전 카메라와 측정 알고리즘 적용 이전에는 차륜 각부의 측정치가 불규칙적인 오차 발생으로 인하여 신뢰성이 저하되는 현상이 나타났으나, 본 연구의 고속 하이비전 카메라 기술과 영상처리 알고리즘 적용에 의한 측정 정밀도 비율을 분석하여 신뢰성을 평가한 결과는 Fig. 10과 같이 $\pm 0.5\text{mm}$ 내의 오차범위에 분포하는 결과로 96.9% 수준으로 기존 시스템에 비해 10.4%의 신뢰도 향상 효과가 있음을 확인하였다.

4. 결 론

차륜형상 프로파일 영상의 정밀도 향상을 위해 기하학적인 변환을 수행하여 좌측과 우측의 이미지를 동일화하고 노이즈 필터링을 위해 이미지 이원화를 수행하였다. 이원화된 이미지의 노이즈를 필터링하고 프로파일 에지를 추출하여 데이터처리를 수행하였다.

1. 최신 기술의 고속 하이비전 카메라와 관련 영상처리 모듈을 계측환경에 적용하였다.

서로 다른 이미지를 동일한 로직으로 처리하면서 분산되는 이미지의 오류를 감소시키기 위해 기하학적 영상변환을 수행하여 고해상도의 영상을 빠른 시간에 처리하였다.

2. 영상에서 피사체의 경계선을 효과적으로 인식하기 위해 컬러나 흑백영상을 0과 1의 값으로 변환하는 영상 이원화 기법을 적용하였다.

3. 기준 픽셀(x, y)을 중심으로 이웃하는 픽셀들의 평균값을 구해 기준 픽셀의 값을 변경하는 방법으로 평균 필터링(mean filtering)법을 적용해 노이즈 필터링을 수행하였다.

4. 데이터를 연산하기 위해 샘플링된 이미지의 기준값과 가장 유사한 작업 버퍼를 기준으로 선정하여 여러 모듈의 필터를 거치면서 연산을 위한 영상 이미지를 취득하였다.

5. 최신 사양의 고속 하이비전 카메라 기술 적용과 영상처리 알고리즘 적용으로 차륜형상 측정 정밀도 비율을 분석하여 신뢰성을 평가한 결과 $\pm 0.5\text{mm}$ 내의 오차범위에 분포하는 결과로 96.9% 수준으로 신뢰도 향상 효과가 있었다.

후 기

본 논문은 서울과학기술대학교 학술연구비의 지원에 의해서 수행된 연구로 이에 감사드립니다.

References

[1] Y.G. Kim, S.J. Kwon, S.T. Won, H.S. Lee (2010) A study on the wearing phenomenon analysis of pantograph slider for the subway cars, *Journal of the Korean Society for Railway*, 13(4), pp. 389-395.

[2] H.M. Hur, W.H. You (2005) A study on the wear characteristics of wheel profile for high speed rolling-stock, *Journal of the Korean Society for Railway*, 8(5), pp. 477-482.

[3] H.M. Hur, J.H. Park, W.H. You, T.W. Park, et al. (2009) An Analysis on the influence of wheel flange wear on the vibration of EMU, *Jour-*

nal of the Korean Society for Railway, 12(2), pp. 230-235.

- [4] S.G. Lee, D.W. Lee, G.D. Kim (2009) A study on the elimination method of noise image caused by rainfall using machine vision, *Journal of the Korean Society for Railway*, 12(3), pp. 364-369.
- [5] H.G. Lee (2007) *Digital Image Processing*, SciTech Media, 848, Janghang 2- dong Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea, pp. 36-128.
- [6] Richard Neapolitan (2004) *Foundation of Algorithms using C++ Pseudocode*, SciTech Media, 848, Janghang 2- dong Ilsandong-gu, Goyang-si, Gyeonggi-do, Korea, pp. 56-79.

【 Received 15 July 2014; Revised 31 December 2014; Accepted 9 January 2015 】

Si-Tae Won: stwon370@seoultech.ac.kr

Department of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology University,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea

Seok-Jin Kwon: sjkwon@krii.re.kr

Korea Railroad Research Institute, 176, Cheoldobangmulgwan-ro, Uiwang-si, Gyeonggi-do, Korea

Sung-Bum Huh: sbhur@wjis.co.kr

Graduate School of Railroad of Mechanical Engineering system, Seoul National University of Science and Technology University,
232, Gongneung-ro, Nowon-gu, Seoul, Korea