

고해상도 레일 마모도 측정을 위한 영상 평가

Image Quality Evaluation for the Railway Abrasion Measurement with a High Resolution

안성혁[†] · 김만철*

Sung-hyuk Ahn · Man-Cheol Kim

Abstract There is no standard rule for the test of the railway abrasion measurement system composed of the line laser and the camera. This paper is proposed of the method to estimate the performance of the railway abrasion measurement system. The performance estimation is achieved by the quantitative analysis parameters such as MTF, NPS and DQE.

Keywords : Railway abrasion, Slip-stick phenomena, Clip, MTF, NPS, DQE

요 지 라인 레이저와 고속카메라를 이용한 고해상도 레일 마모도 측정 시스템에 대한 최적의 측정 정밀도를 확보하기 위하여 영상 평가지표를 기반으로 촬영 영상에 대한 영상평가를 수행하고 레일 마모도 측정 시스템의 성능을 정량적으로 분석함으로써 시스템 구성과 설치에 따른 레일 마모도 측정 시스템의 성능을 정량적 평가지표(MTF, NPS, DQE)로 추정할 수 있는 방안을 제시하였다.

주 요 어 : 레일 마모, 스틱-슬립 현상, 크립, MTF, NPS, DQE

1. 서 론

1.1 연구의 배경 및 목적

일반적인 레일의 마모도 측정 방식은 자주식 검측차를 이용한 방식과 고속검측설비를 이용한 방식으로 구분된다. 자주식 검측차는 궤도의 보다 정밀한 기하학적 상태를 파악하고 유지보수 작업계획을 수립하기 위하여 사용되며 궤도의 선형검측, 레일의 단면 및 표면결함 측정, 파상마모 측정, 등을 수행한다. 또한, 160km/h 이상의 검측속도에서도 검측이 가능하기 때문에 가속도계와 카메라를 이용한 관성식 또는 광학식 비접촉 측정방식을 도입하여 검측 정밀도를 향상시키고 있으나 300km/h의 고속철도에서는 검측이 완전하지 못하여 레일 마모현상을 정확히 분석할 수 없으며 편마모가 심하거나 침체된 레일의 경우와 같이 탐측차가 레일 두부의 중심을 벗어나 진행하게 되는 경우에

에러가 발생하여 정밀 탐상이 불가능한 단점을 가진다. 고속검측설비의 경우 차상 및 대차의 진동가속도를 측정하는 설비가 사용되며 열차가 고속 주행하는 경우 차량의 진동으로 인해 발생하는 궤도의 틀림을 추정하고 있으나 진동에 의한 측정은 정밀도가 낮고, 측정값의 오차가 발생하는 단점을 가진다. 특히, 자주식 검측차에 적용되는 레이저-카메라 시스템은 운행중인 열차에서 실시간으로 레일의 마모도와 궤도틀림을 측정할 수 있는 능력을 가지며 측정 중 주행속도 및 측정 정밀도를 향상시키기 위하여 인공지능(Neural Network)을 적용한 영상처리방식을 적용하여 성능을 개선하거나[1], 위치센서(Displacement Sensor)와 가속도센서(Accelerometer)와 결합된 형태의 시스템을 구성하여 중앙 중거법(Mid Chord Offset Method)을 적용하는 방법[2], 등을 통하여 최대 300km/h의 검측속도에서 레이저와 카메라를 이용하여 고속, 정밀 측정을 수행하기 위한 다양한 연구가 수행되고 있다.

라인 레이저와 카메라를 이용한 고해상도 레일 마모도 측정 시스템은 정밀한 마모도 측정을 위하여 레일에 조사된 레이저 영역을 왜곡 없이 획득하고 이를 레일 단면 템플

[†] 책임저자 : (주)상상돔 무선AV시스템연구소
E-mail : requiem70@sangsangdom.com
TEL : (042)484-9747 FAX : (042)487-9747

* 정회원, 한국철도기술연구원

릿과 정밀하게 일치시키는 과정이 필수적으로 요구되며 카메라를 통하여 획득되는 원시영상(레일에 조사된 라인 레이저 촬영영상)의 화질(Image Quality)과 라인 레이저의 미세한 초점 조정은 레일 마모도 측정 시스템의 정밀도에 직접적인 영향을 주는 가장 중요한 요소이다. 그러나 라인 레이저와 카메라를 이용한 기존의 레일 마모도 측정 시스템은 라인 레이저와 카메라의 기하적인 상대 위치와 주변 온도의 변화에 민감하게 반응하는 레이저 특성에 의하여 측정 오차가 발생할 수 있으며 빗물, 등 레일 위에 이물질이 존재하거나 특히 외부에서 유입되는 태양광, 등과 같이 레일에 조사된 레이저와 유사한 파장을 가지는 빛의 간섭에 의하여 레일에 조사된 레이저 영역 추출의 한계를 가짐에도 불구하고 원시영상의 화질을 평가하여 레일 마모도 측정 시스템의 성능을 정량적으로 분석할 수 있는 평가 지표와 체계적인 평가 방식을 확보하고 있지 못함에 따라 외부 환경의 변화 및 시스템 구성의 차이에 대한 능동적인 대처와 처리의 한계성을 가진다.

본 논문에서는 MTF(Modulation Transfer Function) 및 NPS(Noise Power Spectrum), DQE(Detective Quantum Efficiency)와 같은 정량적 평가지표를 이용하여 원시영상에 대한 영상 평가를 수행하고 결과 평가지표를 통하여 레일 마모도 측정 시스템을 구성하는 라인 레이저와 카메라, 광학 시스템을 최적화함으로써 라인 레이저와 카메라를 이용한 고해상도 레일 마모도 측정 시스템이 최적의 정밀도를 확보할 수 있도록 정량적 평가지표에 따른 체계적인 평가 방식을 제안하고자 한다.

1.2 시험장치 구성 및 절차

영상평가를 위한 원시영상 획득 및 영상 평가를 수행하기 위하여 Fig. 1과 같은 실험 장치를 구성하였다.



Fig. 1. Experimental Setup for the raw image acquisition

또한, 라인 레이저와 광학 장치를 포함하는 카메라 시스템에 대한 정량적 영상평가는 Fig. 2에 정리한 프로세스에 따라 카메라 시스템과 라인 레이저로 구분하여 단계적으로 진행하였다.

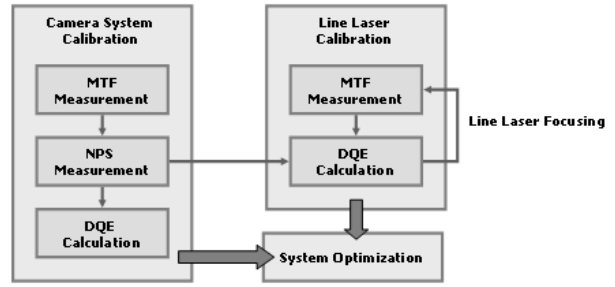


Fig. 2. Overview of the test procedure

카메라 시스템에 대한 영상 평가에서 MTF 측정은 절단된 면이 수직인 금속의 단면을 촬영한 샘플 영상으로부터 ESF(Edge Spread Function)를 획득하여 사용하였고 레이저 시스템에 대한 영상 평가에서 MTF 측정은 라인 레이저의 조사에 의하여 얻어진 LSF(Line Spread Function)를 이용하였다. 특히, 반복적으로 라인 레이저의 초점을 조절하고 MTF 및 DQE를 측정하여 영상평가를 수행함으로써 레일 마모도 측정 시스템의 측정 정밀도를 최적화하였다.

2. 영상평가를 위한 정량적 평가지표

2.1 MTF(Modulation Transfer Function)

선형 시스템 이론의 주요한 요소인 MTF 분석은 영상분석에 있어서 영상 전체에 대한 공간 해상도를 평가하는 중요한 지표로서 활용된다. MTF 측정 방법은 일반적으로 Chart Method 및 Sit Method, Edge Method로 구분되며 Chart Method와 Sit Method는 정현파의 공간주파수를 가지는 시험체를 이용하여 측정하는 방식을 가진다.

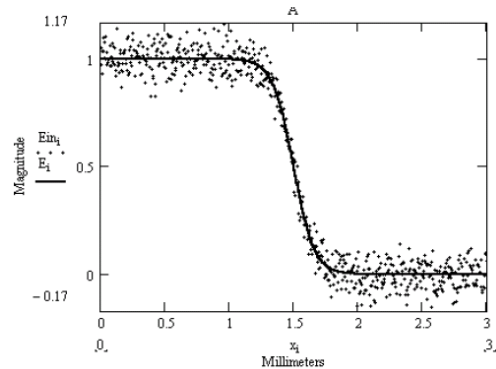


Fig. 3. Edge Spread Function (ESF)

이에 반하여 Edge Method는 절단된 면이 수직인 금속의 단면을 촬영하여 Fig. 3과 같이 측정된 단면의 외곽선(Outline)에 대한 광농도분포로 표현되는 에지분포함수(Edge Spread Function, ESF)를 기반으로 MTF를 획득할 수 있기 때문에 레일에 조사된 라인 레이저를 촬영한 영상

을 이용하여 MTF를 획득할 수 있는 장점을 가지며 최적화된 실시간 고속 연산 알고리즘의 구현이 가능한 특징을 가지므로 본 논문에서는 Edge Method를 적용하였다. 또한, Edge Method를 이용하여 획득한 ESF를 미분하여 라인분포함수(Line Spread Function, LSF)를 계산한 후 계산된 LSF에 푸리에 변환(Fourier Transform)을 적용하여 공간주파수 영역에서의 MTF에 대한 응답함수를 획득하였다[3].

즉, MTF를 구하기 위하여 피사체의 에지영역을 촬영한 영상으로부터 ESF(x)를 구하고 식 (1)의 관계에 따라 ESF(x)로부터 LSF(x)를 획득한다.

$$LSF(x) = \frac{d}{dx} ESF(x) \quad (1)$$

이와 같은 방식을 Fig. 1과 같이 구성된 라인레이저와 카메라 시스템으로부터 촬영한 2차원 영상에 적용할 경우 에지영역에 대한 2차원의 점 분포 함수(Point Spread Function, PSF(x,y))를 얻을 수 있다(이때, x는 촬영된 피사체의 에지와 수직방향이 되는 2차원 영상의 횡방향(Column) 좌표를 의미하며 y는 에지와 수평방향이 되는 2차원 영상의 종방향(row) 좌표를 의미한다).

또한, 각 y축에 대한 평균 ESF(x)를 계산하고 이를 미분하여 LSF(x)를 획득한 후 식 2와 같이 푸리에 변환을 적용함으로써 LSF(x)로부터 공간주파수 영역에 대한 MTF(ω)를 얻게 된다.

$$MTF(\omega) = FFT\{LSF(x)\} \quad (2)$$

$$|MTF(\omega)| = \sqrt{(Re(\omega))^2 + (Im(\omega))^2} \quad (3)$$

2.2 NPS(Noise Power Spectrum)

NPS는 특정 Fluence와 Quality를 가지는 균일한 광량을 조사하여 획득한 영상에 대하여 관측된 진폭(Noise Amplitude)과 결(Texture)에 대한 세밀한 정보를 포함하는 특징을 가진다. 즉, 영상에 포함되는 잡음의 변화(Noise Variance)를 공간주파수 관점으로 표현한 것이다. NPS는 슬릿 구조(Slit Aperture)를 가진 스캐닝 농도계(Scanning Densitometer)를 이용하여 획득한 스캐닝 영상으로부터 잡음의 진폭과 상관관계를 가지는 일차원 파워 스펙트럼(Power Spectrum)으로 계산하며 특히, 영상시스템으로부터 획득한 디지털 영상의 경우에는 공간 주파수를 이용한 푸리에 변환을 통하여 모든 방위에서 잡음(Noise)의 상관관계를 묘사한 이차원 NPS를 계산하여 획득하게 된다.

이차원 NPS는 디지털 영상 시스템의 노이즈 특성을 잘 표현하며 영상의 결점(Artifact)를 정의 하는데 사용되고 다양한 주파수 성분으로 나누어진 영상 잡음에 대한 분산으

로 생각할 수 있어 주어진 공간주파수의 성분으로 표현하게 된다. 연속적인 변수의 경우에 식 (4)와 같이 표현되며 I는 영상을 구성하는 픽셀 값(Image Intensity)가 되고 \bar{I} 는 평균 배경을 구성하는 픽셀 값(Background Intensity)이며 $\langle \rangle$ 는 전체적인 평균(Ensemble Average)을 의미한다[4].

$$NPS(u,v) = \lim_{X,Y \rightarrow \infty} \frac{1}{XY} \langle \left| \int_{-X}^X \int_{-Y}^Y [I(x,y) - \bar{I}] e^{-2\pi i(ux+vy)} dx dy \right|^2 \rangle \quad (4)$$

본 논문에서는 1차원 NPS를 구하기 위하여 일정한 광량을 조사하고 영상을 획득한 후 저주파 영역에 대한 평균을 취하는 방식을 2차원 NPS를 구하였으며 2차원 NPS는 푸리에 변환을 수행한 후 일부 영역에 대한 신호 강도를 이용하여 정규화하는 방식을 취하기 때문에 정규화된 NPS(Normalized NPS)라 볼 수 있고 이는 식 (5)와 같이 정의된다[4].

$$2D NPS(\omega,\nu) = \frac{p^2}{N} \sum_{n=1}^N (\bar{I}_n/I_0) FT_n^2[\delta_n](\omega,\nu) \quad (5)$$

이때, N은 관심영역(Region of Interest, ROI) 내의 독립적인 2차원 샘플(ROI(I_n))의 수이고 \bar{I}_n 는 샘플 I_n 의 평균 강도, I_0 는 전체 샘플에 대한 평균 강도, δ_n 는 데이터 셋을 나타내며, I_n 은 평면조정(Planar Fit)을 의미하는 I_{nfit} 을 이용한 $(I_n - I_{nfit})/\bar{I}_n$ 의 비율을 또한, p는 영상의 전체 사이드를 의미한다. 그리고 FT는 푸리에 변환(Fourier Transform)에 대한 오퍼레이터의 적용을 의미한다.

2.3 DQE(Detective Quantum Efficiency)

DQE는 영상시스템에 대한 물리적 성능 평가를 위한 가장 적합한 평가지표로서 영상을 획득하기 위하여 조사된 광원의 유한한 광자(Photon)의 수에 의하여 획득할 수 있는 최대 신호 대 잡음비(Signal to Noise Ratio, SNR)를 이용하여 영상시스템의 효율성을 평가하게 된다. 즉, DQE는 식 6과 같이 입사된 광원에 대하여 대조도, 잡음, 해상도를 기반으로 영상시스템의 성능을 나타내는 복합적인 정보를 제공한다.

$$DQE = \frac{SNR^2}{SNR_{ideal}^2} = \frac{MTF^2}{SNR_{ideal}^2 \times NPS} \quad (6)$$

따라서 DQE는 계산된 MTF와 NPS를 이용하여 식 (7)과 같이 광원으로부터의 조사량(γ)와 주파수(f)의 상관관계로 나타낼 수 있다[5].

$$DQE(\omega) = \frac{\gamma^2 MTF(\omega)^2}{NPS(\omega) \cdot SNR_{in}^2} \quad (7)$$

이때, γ 는 시스템 이득을 의미하며 측정 영역의 평균 강도의 제곱으로 나타낼 수 있고 SNR_{in} 은 입사되는 광원의 스펙트럼을 이용하여 식 (8)과 같이 계산하여 적용하였다.

$$SNR_{in} = \frac{(\int q(E) E dE)^2}{q(E) E^2 dE} \quad (8)$$

이때, $q(E)$ 는 촬영 시 영상을 생성하는 주변 광량에 대한 분광분포(Spectral Distribution)를 의미한다.

3. Camera System

3.1 MTF 측정

카메라 시스템의 MTF 측정을 위하여 절단된 면이 수직인 금속의 단면을 촬영하고 Fig. 4(a)와 같이 원시영상을 획득하였다. 원시 영상으로부터 ESF를 획득하기 위하여 Fig. 4(b)와 같이 횡방향(Column)에 대한 프로파일 데이터를 추출하고 프로파일 데이터로부터 중심선을 기준으로 우측의 에지영역에 대한 ESF를 Fig. 5와 같이 구하였다.

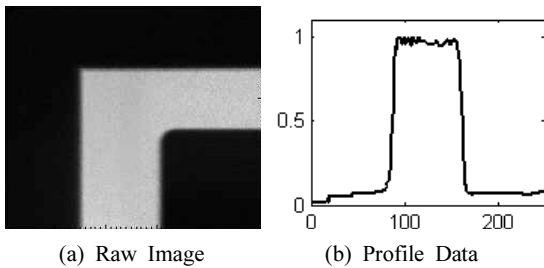


Fig. 4. Extraction of the profile data from a raw image

이때, 각각의 결과 데이터는 픽셀 수를 가로축으로 하고 정규화한 영상의 픽셀 값을 세로축으로 사용하였다.

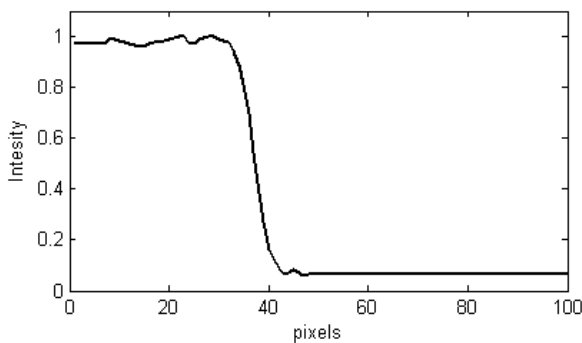


Fig. 5. Extraction of the ESF from a profile data

원시영상으로부터 획득한 ESF를 미분하여 얻은 LSF는 Fig. 6와 같으며 LSF에 푸리에 변환(FFT)를 적용함으로써 공간주파수에 대한 $MTF(\omega)$ 를 획득하고 $MTF(\omega)$ 에 대한 크기(Magnitude)를 계산함으로써 카메라 시스템에 대하여 최종적인 MTF를 계산하였고 그 결과는 Fig. 7과 같다.

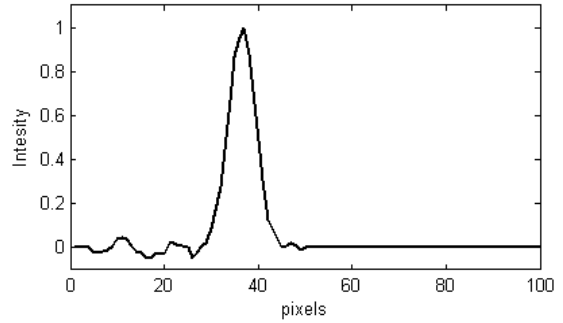


Fig. 6. LSF of the camera system

Fig. 7의 MTF 계산에서 보는 바와 같이 카메라 시스템의 공간주파수는 2.0lp/mm로서 0.25mm의 해상도(Resolution)를 가짐을 알 수 있다. 이때, lp/mm는 Line-pair/mm를 의미하고 1mm 내에 몇 개의 라인을 그어 구분하고 나눌 수 있는지를 나타낸다.

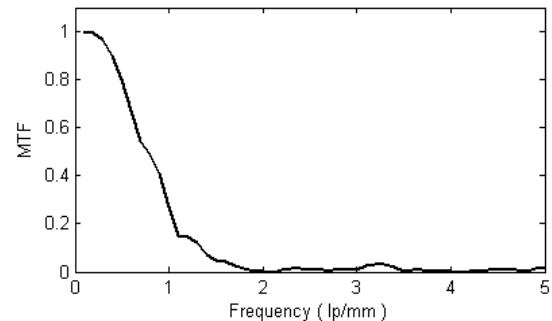


Fig. 7. MTF of the camera system

3.2 NPS 측정

원시영상은 1024×1280 픽셀의 사이즈를 가지므로 NPS 측정의 편의성을 위하여 I_n 즉, ROI(Region of interest)의 사이즈를 100×100 픽셀로 하고 100개의 I_n 영역을 설정함으로써 샘플 개수, N=100을 가지도록 하였다. 또한, 각 샘플에 대하여 1차 평면모델을 적용함으로써 I_{nfit} 를 구하였고 이를 기반으로 δ_n 을 구하였다. I_{nfit} 를 이용한 연산은 카메라 시스템의 구성 요소들이 가지는 비균일성(Non-uniformity)에 대하여 영상 내의 저주파 영역에 대한 영향을 최소화하는 효과를 가진다. 따라서 1차원 NPS는 2차원 NPS의 2차원 주파수 성분인 ω 와 ν 축을 따라 중심으로부터 ± 5 개에

해당하는 주파수 성분의 평균을 구하여 계산하였다. 계산된 카메라 시스템의 NPS는 Fig. 8과 같으며 5.0lp/mm의 공간주파수에 해당하는 저주파 영역에서 1.13e-004부터 6.63e-006까지의 범위를 가짐을 알 수 있으며 계산된 NPS는 같은 카메라 시스템을 사용하는 라인 레이저의 DQE 계산에서도 활용할 수 있게 된다.

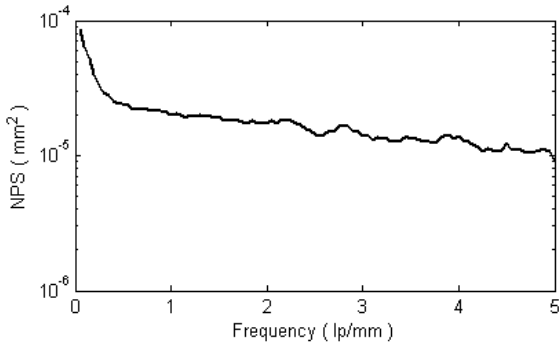


Fig. 8. NPS of the camera system

3.3 DQE 측정

DQE 측정을 위하여 시스템 이득을 나타내는 γ 는 1로 설정하였으며 영상을 획득하기 위한 광원의 특성을 나타내는 SNR_{in} 는 입사 광선이 전 방향으로 균일하게 조사된다고 가정하여 식 7을 이용하여 카메라 시스템의 DQE를 계산하였고 그 결과는 Fig. 9과 같다.

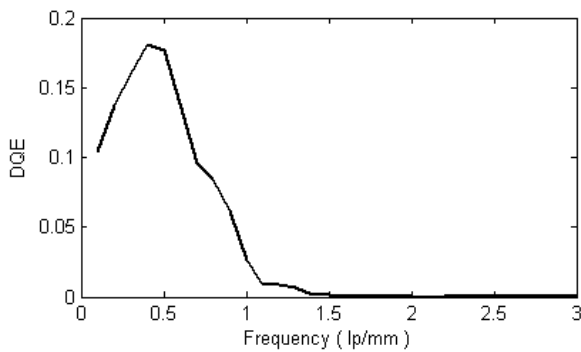


Fig. 9. DQE of the camera system

4. Line Laser

4.1 MTF 측정

실험에 사용된 라인 레이저는 외부 광원에 대한 효과를 최소화하기 위하여 적외선 영역의 파장을 가지는 레이저를 사용하였다. 따라서 적용된 라인 레이저에 대한 원시영상은 Fig. 10과 같으며 적외선 밴드패스 필터를 장착한 카메라 시스템을 이용하여 획득하였다.

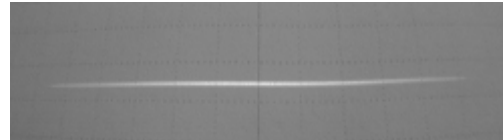


Fig. 10. Raw image of the line laser

라인 레이저는 매우 좁고 일정한 빔 폭을 가지기 때문에 ESF를 구하지 않고 원시영상의 횡단면에 대한 프로파일을 구함으로써 Fig. 11과 같이 라인 레이저에 대한 LSF를 획득할 수 있다.

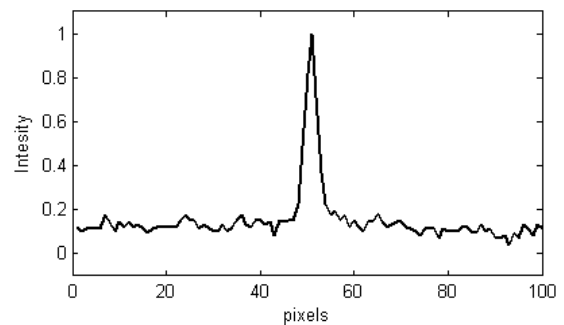


Fig. 11. LSF of the line laser

LSF로부터 계산된 MTF는 Fig. 12와 같으며 결과에서 보는 바와 같이 시스템에 적용된 라인 레이저에 의한 공간주파수는 3.0lp/mm로서 0.16mm의 해상도를 가짐을 알 수 있다.

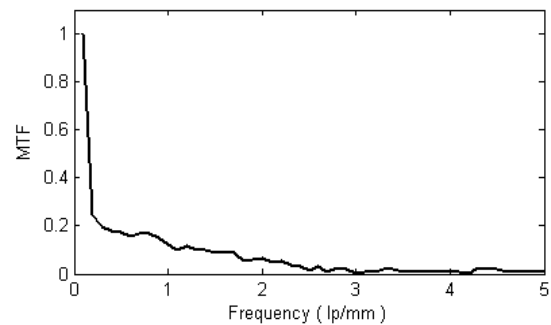


Fig. 12. MTF of the line laser

4.2 DQE 측정

라인 레이저에 대한 DQE 계산 결과는 Fig. 13과 같으며 계산을 위하여 적용된 NPS는 같은 카메라 시스템을 사용하기 때문에 3.2절에서 획득한 카메라 시스템의 NPS를 동일하게 적용하였다. 또한, 카메라 시스템에 대한 DQE 측정과 같이 시스템 이득을 나타내는 γ 는 1(Unity Gain)로 설정하였으며 영상을 획득하기 위한 광원의 특성을 나타내는 SNR_{in} 는 입사 광선이 전 방향으로 균일하게 조사된다고 가정하여 계산하였고 NPS는 카메라 시스템과 같기 때문에 이전에 획득한 카메라 시스템의 NPS를 사용하였다.

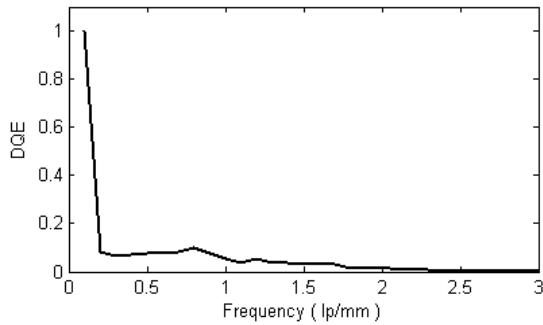


Fig. 13. DQE of the line laser

5. 실험 결과 정리

5.1 영상 평가 지표 분석

라인 레이저와 카메라를 이용한 고해상도 레일 마모도 측정 시스템에 대한 최적의 측정 정밀도를 확보하기 위하여 카메라 시스템과 라인 레이저에 대한 MTF 및 NPS, DQE 측정을 수행하였다. 카메라는 고속 촬영을 위하여 초당 최대 485 프레임을 촬영할 수 있는 ADS사의 CMC-1300을 사용하였으며 렌즈는 FL 8mm M. Focus의 사양을 가지는 표준 렌즈를 사용하였다. 또한, 라인 레이저는 808±2nm의 파장을 가지고 650mW의 출력을 가지는 적외선 레이저를 사용하였으며 중심 파장이 808nm인 적외선 밴드 패스 필터를 사용하였다.

5.1.1 MTF 분석

카메라 시스템에 대하여 측정한 MTF는 카메라 시스템이 표현할 수 있는 대상체의 선명성(Sharpness)과 직접적인 관계를 가지며 영향을 받게 된다. Fig. 14는 카메라 시스템과 라인 레이저에 대한 MTF 결과를 도시한 것이다.

Fig. 14에서 보는 바와 같이 동일한 카메라 시스템으로 촬영한 영상을 기반으로 계산된 MTF이지만 상대적으로 선명성이 떨어지는 에지 영상에 대한 MTF가 라인 레이저에 대한 MTF보다 낮음을 알 수 있다.

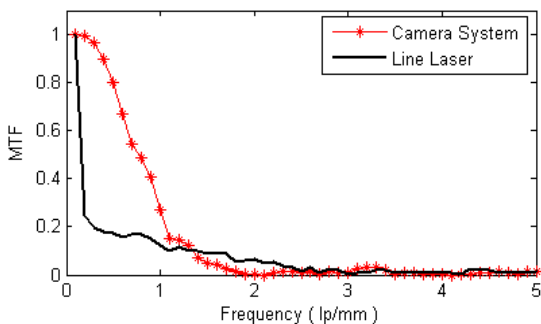


Fig. 14. MTF (Camera System vs. Line Laser)

이때 라인 레이저의 빔 폭(Line Width) 조절 및 카메라 시스템과 라인 레이저의 기하적인 상대 위치에 따라 동일한 카메라 시스템을 사용하더라도 라인 레이저에 대한 MTF 측정 결과가 카메라 시스템보다 저하되는 현상이 발생할 수 있다. 따라서 카메라 시스템에 대한 최적의 MTF를 획득한 후 라인 레이저에 대한 MTF를 측정함으로써 MTF를 기반으로 라인 레이저에 대한 최적의 빔 폭 및 카메라 시스템과 라인 레이저의 기하학적인 상대 위치에 대한 최적화된 값을 찾을 수 있게 된다.

5.1.2 DQE 분석

Fig. 15는 영상시스템의 성능에 대한 복합적인 정보를 제공하는 DQE에 대한 카메라 시스템과 라인 레이저의 계산 결과를 비교한 것이다. 기술한 바와 같이 선명성이 저하되는 에지 영상을 이용한 카메라 시스템의 경우 0.5lp/mm의 저주파 영역에서 영상 신호의 왜곡이 나타날 수 있는 결과를 보여주고 있으며 라인 레이저의 경우 빔 폭이 줄어 DQE가 현저하게 개선되었음을 보여 주고 있다.

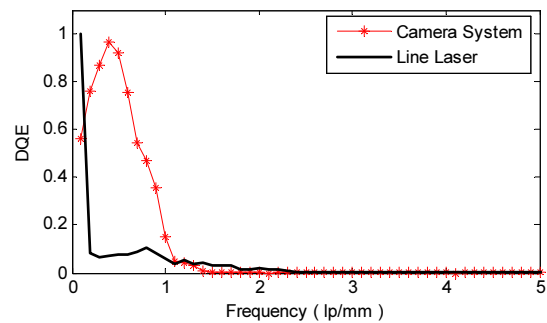


Fig. 15. DQE (Camera System vs. Line Laser)

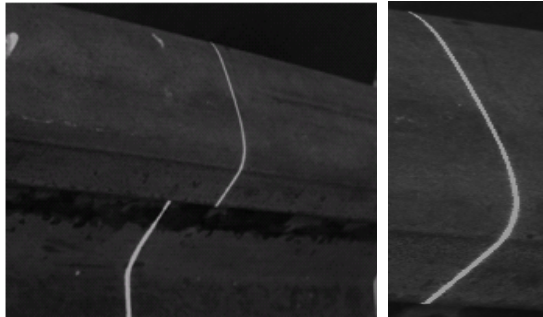
또한 상기와 같은 결과는 레이저의 빔폭 조절과 카메라 시스템과 라인 레이저의 기하학적인 상대 위치 조정이 잘못될 경우 라인 레이저에 대한 DQE도 저주파 영역에서 왜곡 현상이 발생할 수 있음을 의미하며 이는 측정시스템의 측정 정밀도가 저하될 수 있음을 의미한다.

5.2 레일 측정 영상 분석

5.2.1 MTF 분석

실험을 통하여 획득한 측정 방법 및 분석 결과를 실제 레일 측정에 적용하기 위하여 동일한 라인 레이저와 카메라 시스템으로 구성된 레일 마모도 측정 시스템과 샘플 레일을 설치하고 원시영상을 Fig. 16(a)와 같이 획득하였다. 또한, 원시 영상으로부터 라인 레이저가 조사된 영역을 분리하여 생성한 ROI 영상을 Fig. 16(b)와 같이 추출하여 Fig. 17과 같이 라인레이저가 조사된 영역에 대한 2차원 프로파

일을 획득 하였다. 이때 기술한 바와 같이 획득한 2차원 프로파일은 라인 레이저 영역을 구성하는 각 픽셀의 중심점으로부터 법선 방향으로의 LSF를 찾아 전체 영역에 대한 2차원 LSF를 획득한 것과 같은 의미를 가지게 된다. 즉, Fig. 17은 Fig. 16(b)로부터 획득한 2차원 LSF를 나타낸다.



(a) Raw Image (b) ROI Image
Fig. 16. Railway Image

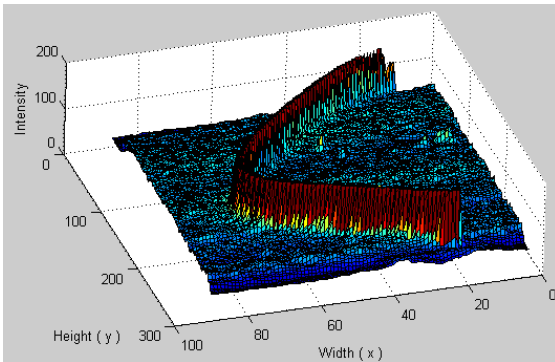


Fig. 17. 2D LSF for the railway image

p이때 2차원 LSF에 대하여 피크 지점을 따라 진행하는 라인 레이저의 궤적을 구성하는 각 중심점으로부터 법선방향으로 각각의 1차원 LSF를 획득할 수 있으며 획득한 각각

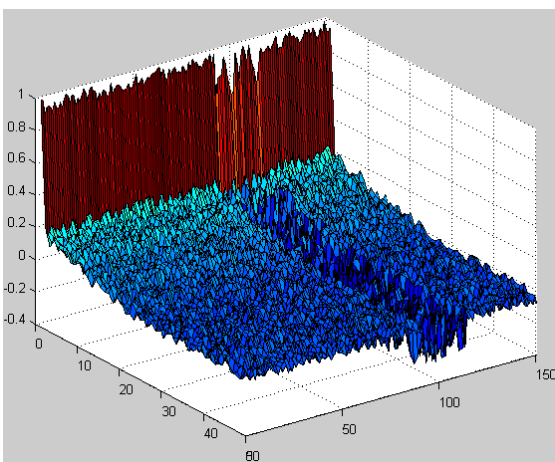


Fig. 18. 2D MTF for the railway image

의 1차원 LSF를 이용하여 Fig. 18과 같이 전체 라인 레이저의 궤적에 대한 2차원 MTF를 계산할 수 있게 된다. 이때 0~50의 범위를 가지는 x축은 MTF의 공간 주파수를 나타내며 0~150까지의 범위를 가지는 y축은 라인 레이저의 궤적에 따른 각 1차원 LSF의 인덱스를 의미한다.

Fig. 18에서 보는 바와 같이 라인 레이저의 궤적에 따른 1차원 LSF의 인덱스가 100이 되는 위치를 기준으로 하여 전, 후 방향으로 MTF가 급격히 저하되는 현상을 볼 수 있다. 이는 라인 레이저가 레일에 조사될 때 레일 상부(두부)에서 측면으로 이어지는 곡면 영역에서 직선 부분과 달리 라인 레이저의 빔 퍼짐이 증가함으로 나타나는 것이다. 그러나 1차원 LSF의 인덱스 범위가 80~115인 곡면 영역에서 MTF 계산 결과에 따른 평균 해상도는 2.5lp/mm(0.19mm)를 보였고 해당 영역을 제외한 나머지 영역에서 평균 해상도는 2.8lp/mm(0.17mm)를 보임에 따라 구분된 두 영역에 대한 MTF 계산 결과가 큰 차이를 가지지 않음을 확인할 수 있으며 결과로부터 곡면 영역에서의 레이저 빔 퍼짐으로 발생한 MTF의 일시적인 저하가 MTF 계산 결과에 따른 전체적인 측정 해상도에 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

또한, 이는 곡면 영역에서 라인 레이저의 빔 퍼짐으로 인하여 MTF 계산 결과에 따른 측정 해상도가 일시적인 저하되는 현상이 발생하는 것처럼 측정 과정에서 라인 레이저와 카메라 시스템의 위치가 레일 마모도 측정시스템의 측정 정밀도에 직접적인 영향을 줄 수 있음을 확인할 수 있으며 이를 통하여 라인 레이저와 카메라 시스템의 기하적인 상대 위치 선정이 매우 중요함을 확인할 수 있었다.

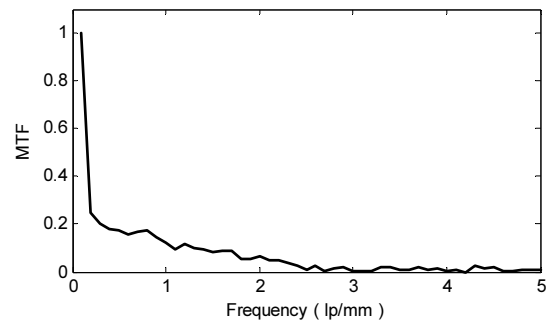


Fig. 19. Average MTF for the railway image

Fig. 19는 Fig.18의 라인 레이저 전체 궤적에 대한 평균 MTF를 구한 것으로 2.65lp/mm로서 0.18mm의 해상도를 가짐을 알 수 있다. 비록 라인 레이저만을 측정할 경우에 비하여 레일에 조사된 라인 레이저에 대한 해상도가 저하되어 나타났지만 MTF의 패턴이 라인 레이저만을 측정할 경우와 레일에 조사된 경우가 거의 같게 나온 것을 통하여

라인 레이저의 특성이 라인 레이저와 카메라를 이용한 레일 마모도 측정 시스템의 성능에 직접적인 영향을 주는 요소임을 확인할 수 있다.

6. 결 론

라인 레이저와 카메라를 이용한 레일 마모도 측정 시스템은 0.1mm 이하의 정밀성이 요구되지만 측정 정밀도는 렌즈 및 카메라로 구성된 광학 및 영상 시스템, 레이저의 빔 폭과 광학장치가 결합된 카메라 시스템과 라인 레이저의 기하적인 위치에 의하여 결정되는 특성을 가진다.

본 논문에서 제안된 MTF, NPS, DQE와 같은 영상 평가 지표를 이용하여 라인 레이저와 카메라를 이용한 레일 마모도 측정 시스템의 성능을 정량적으로 분석하고 평가함으로써 요구되는 측정 정밀도를 확보할 수 있도록 시스템을 구성할 수 있으며 현장 설치 시 기하적인 위치의 변경에 따라 측정을 반복적으로 수행함으로써 체계적인 시스템 성능 평가를 수행할 수 있음을 확인하였다. 또한, 실험 결과를 바탕으로 이중의 레일 마모도 측정 시스템에 대한 비교 성능 평가를 수행할 수 있는 기반으로서 활용 가능할 것으로 예상된다.

정량적 평가 지표를 이용한 레일 마모도 측정 시스템의 성능 평가가 실제 현장에서 적용될 경우 주변 환경에 의한 광량과 빛의 분포 상태에 따라 NPS가 변화될 수 있으며 차량의 떨림, 등에 의한 진동 및 레일 표면의 비균질한 매질 분포와 이물질로 인한 레이저 빔 퍼짐의 증가로 MTF에 대한 저하가 발생함으로써 레일 마모도 측정 결과에 대한 신뢰성을 뒷받침할 수 있는 지표로서 사용될 수 있을 것으로 예상된다. 따라서 실제 현장 적용 시 구간에 대한 NPS 및 MTF를 측정하고 측정 패턴을 분석함으로써 해상도 저하

에 따른 측정 오차 발생의 원인이 주변 환경에 의한 광량과 빛의 분포 상태에 의한 것인지 레일의 부분적인 손상에 의한 것인지를 유추할 수 있는 자료로서의 역할과 사용 중인 레일 마모도 측정 시스템의 상태를 파악하여 보정 및 수리의 시기를 결정하는 기준으로 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

후 기

본 연구는 2008년도 철도기술연구원 일반위탁연구용역비에 의하여 지원되었습니다. 도와주신 관계자에게 감사함을 표시합니다.

참 고 문 헌

1. C. Alippi, E. Casagrande, F. Scotti, V. Piuri(2000), "Composite Real-time image processing for railways track profile measurement," IEEE Trans. on International and Measurement, Vol. 49, pp.559-564
2. Kunio Takeshita(1997), "Track Irregularity Method by Commercial Railway Vehicles," QT of RTRI, Vol. 38, pp.6-12
3. S. Chawla, H Roehrig, J Fan, and K Gandhi(2003), "Real-time MTF evaluation of displays in the clinical arena," Proc SPIE 5029, pp.734-745
4. J. Beutel, Harold. L. Kundel, and Richard L. Van Metter(2000), "Handbook of Medical Imaging : Vol.1 Physics and Psychophysics, SPIE PRESS, pp.117-121
5. A. Peterzol, R. Padovani, E. Quai, E. Vano, C. Prieto, and P. Aviles(2003), "Image Quality evaluation of a digital angiographic system," Associazione Italiana di Fisica in Medicina III Congresso Nazionale, pp.31-34

접수일(2009년 7월 14일), 수정일(2009년 8월 21일),
게재확정일(2009년 12월 14일)