

동일 변위센서를 사용한 레일표면 음향조도의 측정방법

정우태^{1*}, 장승호², 고효인³

^{1,2,3}한국철도기술연구원 교통환경연구팀

Measuring Technique For Acoustic Roughness of Rail Surface With Homogeneous Displacement Sensors

Wootae Jeong^{1*}, Seungho Jang², Hyo-In Kho³

^{1,2,3}Transportation Environmental Research Team, Korea Railroad Research Institute

요약 열차 운행시에 발생하는 전동소음은 열차 차륜과 레일 표면조도의 불균일성에 의하여 가진된 진동에 의해 발생된다. 따라서 열차 전동소음의 전달, 예측 및 분석을 위해서는 차륜과 레일표면의 음향조도(acoustic roughness)의 정확한 측정과 분석이 필요하다. 그러나 현재의 레일표면의 조도측정을 위한 장치와 방법은 작업자의 수작업에 의존한 트롤리 장치를 사용함으로써, 불일정한 측정속도와 흔들림과 같은 불안정한 인터페이스를 야기하여 측정값의 오차와 외란을 증대시키는 단점을 지닌다. 본 논문은 철도궤도의 레일상에서 자율 정속 주행하면서 레일표면의 음향조도를 측정하는 자동화 측정장치 및 플랫폼을 개발함으로써, 측정정밀도를 향상시키고 측정값의 불균일성을 감소시켰다. 또한 측정값의 신뢰도와 정확도 향상을 위해 동일한 복수의 변위센서 적용법을 제안하였으며 표준레일구간의 현장측정을 통해 동일 변위센서로부터 융합된 데이터의 정확성을 검증하였다.

Abstract Rolling noises during train operation are caused by vibration excited from irregularities of surface roughness between wheel and rail. Therefore, a proper measurement and analysis techniques of acoustic roughness between wheel and rail surface are required for transmission, prediction, and analysis of the train rolling noise. However, since current measuring devices and methods use trolley-based manual handling devices, the measurements induce unstable measuring speed and vibrational interface that increases errors and disturbances. In this paper, a new automatic rail surface exploring platform with a speed controller has been developed for improving measurement accuracy and reducing inconsistency of measurements. In addition, we propose a data integration method of the rail surface roughness with multiple homogeneous displacement sensors and verified the accuracy of the integrated data through standard test-bed railway track investigation.

Keywords : Acoustic roughness, Data Integration, Railway track, Rolling noise, Roughness measurement, Surface roughness

1. 서론

열차 운행시에 발생하는 소음은 주로 차륜과 레일 표면의 불균일성에 의하여 가진된 진동에 의한 전동소음(rolling noise)이 주요한 크기를 차지한다. 특히 차륜과 레일표면의 불균일성 중에서 소음과 관련된 파장범위의

값을 음향조도(acoustic roughness)라고 하며 철도 선로 변의 소음예측, 측정과 분석을 위해서는 차륜과 레일의 음향조도를 정확하게 측정하고 분석할 필요가 있다.

음향조도의 레벨은 파장의 함수로 표현되며, 각 파장은 속도와 관련한 소음 발생 주파수와 관련이 있다. 차량의 통과속도가 커질수록 전동 소음과 관련된 음향 조도

본 논문은 국토교통부 철도기술연구사업의 연구과제로 수행되었음.

*Corresponding Author : Wootae Jeong (Korea Railroad Research Institute)

Tel: +82-2-460-5817 email: wjeong@krii.re.kr

Received september 18, 2015

Revised (1st October 15, 2015, 2nd October 20, 2015)

Accepted November 6, 2015

Published November 30, 2015

의 파장은 길어지게 되는데($\lambda = V/3.6f$, λ :파장(m), f :주파수(Hz), V :속도(km/h), 전동소음에 주요한 영향을 미치는 차량의 속도는 50 - 120km/h이며 이때의 주파수 대역은 500 - 2000Hz가 되며 이때의 파장은 7 - 70mm에 해당하고 레일의 음향조도(acoustic roughness)의 크기는 약 0.1 - 100 μ m가 된다[1]. 이러한 값은 궤도현장의 측정치와 일치하는 결과를 가지며, 국내 현장측정과 해석의 결과값에서 나타나는 철도 전동 소음원의 주요 주파수 대역도 약 500 - 4000Hz를 나타내는 것으로 확인되었으며 파장대역으로 볼 때 주요한 음향 조도의 파장은 5 - 250mm범위에 분포되어 있었다. 이에 따라 유럽을 포함한 국제규격도 전동소음의 측정과 분석에 사용되는 파장범위를 3.15-630mm (EN ISO 3095), 3.15 - 250mm (EN 15610), 10 - 1000mm (EN 13231-3)과 같이 정의하여 사용하고 있다.

철도차량의 운행속도별 가진 주파수와 레일표면의 주파수의 관계는 Table 1과 같으며, 회색으로 표시된 주파수가 일반적인 도시철도의 전동소음과 관련된 주파수영역이다.

Table 1. Relation between irregularity wavelength (m) and excitation frequency (Hz) [2]

	40km/h	80km/h	160km/h	300km/h
4Hz	2.8	5.6	11	21
8Hz	1.4	2.8	5.6	10
16Hz	0.69	1.4	2.8	5.2
31.5Hz	0.35	0.70	1.4	2.6
63Hz	0.18	0.35	0.71	1.3
125Hz	0.089	0.18	0.36	0.67
250Hz	0.044	0.089	0.18	0.33

일반적으로 철도선로 현장의 레일표면 음향조도 측정을 위해서는 트롤리(Trolley)형식의 측정장치를 레일위에 위치시키고 이를 작업자가 끌거나 밀어서 측정하는 방식이 주로 사용되는데, 수동측정방식으로 안전사고의 위험과 더불어 불일정한 측정속도와 장치의 진동에 의한 측정값의 불균일성이 빈번하게 발생하게 된다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 철도 궤도의 레일상에서 측정자의 추가적인 조작없이 정속 자율 주행하면서 높은 정확도의 데이터를 확보할 수 있는 레일표면조도 자동 측정장치의 개발과 측정된 데이터의 오류를 줄이고 정확도를 증가시키기 위해 복수의 동일

변위센서로부터 얻은 측정값의 융합방법을 제시하고 데이터의 정확성을 검증하고자 한다.

2. 전동소음의 모델링과 측정방법

2.1 전동소음(Rolling noise) 모델

전동소음의 이론적인 모델링은 TWINS [3,4] 모델을 기초로 측정과 해석에 사용되고 있으며, 관련된 연구는 유럽을 중심으로 활발하게 연구되어오고 있다. Fig. 1에서 도식화 되어 있는 것처럼 TWINS 모델의 전동소음은 크게 차륜, 레일, 침목의 전달경로를 가지고 전파되며, 일반적으로 전동소음에 미치는 영향은 주파수대역 250Hz이하에서는 침목의 영향이 지배적이며, 2000Hz이상에서는 차륜의 영향이 지배적이고, 중간의 500Hz - 1600Hz 영역의 주파수 대역에서는 레일에 의한 소음영향이 지배적이다[1]. 따라서, 도시철도와 같이 50-80km/h의 주행속도를 가지는 일반 전동차의 전동소음의 측정과 저감대책 수립을 위해서는 차륜과 침목보다 레일표면의 음향조도 측정이 우선되어야 한다. 또한 전동소음의 음향 조도는 차륜과 레일의 음향조도 주파수 응답인 스펙트럼 에너지의 합으로 계산될 수 있으므로 철도 전동소음 저감을 위해서는 차륜과 레일의 총합 조도에 대한 측정과 해석 또한 필수적이다. 차륜과 레일의 조도 측정의 원리는 비슷하다고 할 수 있으나, 기하학적인 형상의 차이로 인하여 각각 다른 측정 장치를 필요로 하게 되며, 레일조도의 측정을 위해서는 레일위에 바퀴와 측정센서를 가진 트롤리형식의 장치가 주로 사용된다.

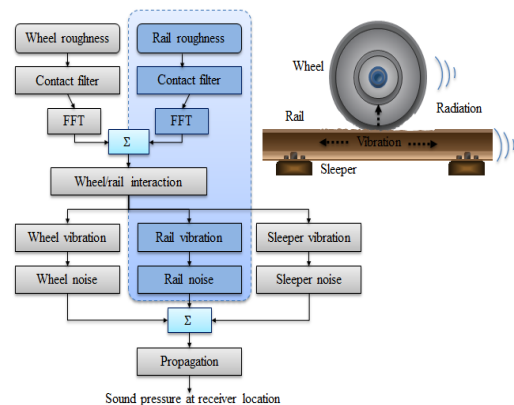


Fig. 1. TWINS calculation Model for rolling noise generation [3,4]

전동 소음의 경우 음향조도 레벨에 따라서 선형적으로 변화된다는 것이 알려져 있으며, 전동 소음원 강도의 계산식에서도 이러한 선형성이 반영되어진다. 이러한 전동 소음의 계산을 바탕으로 소음 예측에 있어서도 예측 대상의 음향조도와 기준 음향조도의 차이에 해당하는 값을 소음원 파워에 보정하여야 한다.

2.2 측정장치 및 방법

기존의 철도레일 표면의 음향조도 측정 방식은 크게 두 가지로 나눌 수 있다. 첫째는 수동식으로 이동하는 트롤리에 가속도 센서나 변위센서를 장착하고 레일표면과의 접촉에 의한 값을 읽고 상대적으로 긴 궤도레일을 연속적으로 측정하는 방식이 있다. 또 다른 방식인 비접촉식으로, 약 1미터 이내의 측정장치를 레일의 특정 위치에 고정하고 비접촉 레이저 센서를 이용하여 레일의 표면조도를 측정하는 방식이다. 두 가지의 방식은 장단점을 가지고 있으나, 전자는 긴 거리에서 주로 사용되고, 후자는 고정식으로 레일의 특정지점의 표면조도 측정에 사용된다.

레일표면의 음향조도 측정장치는 영국의 RailMeasurement사 [5,6], 벨기에의 APT사 [7], 독일의 Müller-BBM사 [8]에 의해 주도적으로 개발 및 개량되어 오고 있으며, 최근에는 RailMeasurement사의 CAT3 (Corrugation Analysis Trolley 3)와 APT사의 RSA(Rail Surface Analyser)에 의해 시장이 편중되어 있었던 시장이 독일의 Muller BBM사의 m/rail trolley와 같이 다양한 장치가 출시되어 시장이 확대되고 있다.

트롤리형식의 접촉식 방식을 사용하고 있는 대표적인 3개사의 장치별 특징 비교는 Table 2와 같으며 모두 전동소음과 관련된 레일표면의 음향조도 측정기준인 EN ISO 3095, EN 15610, EN 13231-3의 기준을 준수하고 있다. 또한 현재 사용되고 있는 측정장치들의 공통적인 특징은 측정자가 직접 수동으로 구동하며 측정하는 방식을 사용함으로써 레일 표면 조도측정에 많은 인력과 시간이 소모되며 수작업에 의한 측정방식으로 안전에 대한 대비와 측정시에 지속적인 감시와 주의가 필요하다. 그럼에도 불구하고 유럽을 중심으로 개발된 이러한 장치는 오랜기간의 검증과 개발기간을 통해 이룩한 측정기술의 경험을 적극 활용하여 신뢰도를 높이고 있으며, 해석과 분석을 위한 소프트웨어의 질적 완성도가 높다는 장점을 지니고 있다.

Table 2. Summary of exiting measurement trolleys

	RSA APT	CAT Railmeasurement	m/rail trolley Müller-BBM
Sensor	Displacement	Acceleration	Displacement
Number of Sensors	3	1	1
Sensor Precision	0.1um	0.01 um	0.1um
Method	Continuous	Continuous	Continuous
Measuring speed	<1 m/s	0.5 or 1 m/s	<0.5m/s
Sampling	1 mm	1 or 2 mm	1 mm
Power		via USB port	via USB port
Weight	<20kg	8kg	21kg

2.3 자동 레일조도 측정장치의 설계

본 연구에서 설계 및 제작된 레일표면 음향조도 자동 측정장치는 유럽에서 사용되고 있는 트롤리(Trolley)형식의 측정장치의 단점인 수동형 측정방식을 실시간 속도 제어를 탑재하여 지정거리를 일정속도로 자율 왕복 운행 및 측정이 가능하도록 설계하고 측정데이터의 융합과 레일표면의 3라인의 동시측정을 위해 3개의 동일 변위센서를 설치하였다.

특히, Fig. 2에서 보이는 바와 같이 1개의 주행모터를 사용하고 구동휠의 미끄러짐에 대한 부정확한 주행거리의 보안을 위해 별도의 거리측정용 로터리엔코더를 추가하였으며, 레일표면조도 측정값의 정확도와 정밀도를 향상시키기 위해 직병렬 조합이 가능한 3개의 변위센서를 장착하여 측정이 가능하도록 설계하였다. 또한 제작편의성과 장비의 휴대성을 고려하여 본체 프레임, 제어기, 센서부, 데이터송수신부등의 장치거치를 거치부와 보조 주행가이드부로 나누어 분리와 조합이 용이하도록 설계되었으며, 본체 프레임에는 핵심부품을 구동부 모듈, 측면 고정부 및 가이드 모듈, 엔코더 모듈 및 센서부 모듈로 모듈화하였다. 알루미늄 프레임을 포함한 본체의 무게는 약 8kg이며, 치수는 170 x 120 x 635 mm이다.

일반적인 물체의 표면 조도측정을 위해서는 촉침을 가진 변위센서(LVDT 또는 Linear Scale)가 사용되지만, 측정거리가 상대적으로 길고 센서의 움직임이 지속적으로 발생하는 경우에는 끝단에 롤러를 장착한 변위센서를 사용하거나 가속도센서를 이용하여 측정된 값을 이중 적분을 통하여 변위로 치환하여 비교하는 방식을 사용할 수가 있다.

본 연구에서는 0.1um이하의 높은 정밀도를 가진 3개의 LVDT 센서를 직렬 또는 병렬배치가 가능하도록 설

계하여 장착하고 일정간격으로 병렬로 위치시켜 사용할 경우 1회의 주행시에 3개 측정선의 동시측정이 가능하도록 하였다. 즉, Fig. 2의 아래쪽 그림과 같이 직렬로 위치시켜 사용할 경우 동일 측정선상에서 중복측정이 가능하게 하였다. 이러한 중복측정의 경우 제시된 융합로직을 사용하여 측정 정밀도의 향상과 오류성 데이터의 필터링과 보정의 부가적인 데이터 후처리가 가능하다.

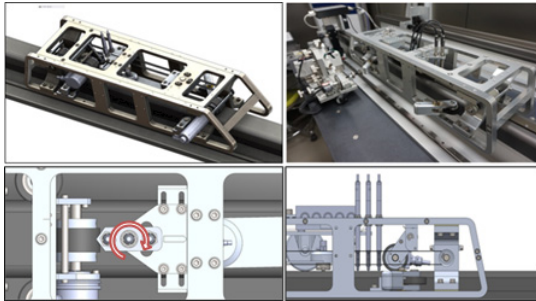


Fig. 2. Rail surface roughness measuring platform (up) and multiple displacement sensors (down)

특히, 레일표면 음향조도 자동측정장치의 설계에 있어서 레일의 표면조도, 주행속도, 파장은 앞서 설명한 바와 같이 서로 함수적인 연관성을 가지기 때문에 설계시에 구동바퀴간의 축간거리와 측정주파수 및 파장범위, 정속주행의 안정성, 본체 프레임과의 측정 센싱부의 진동분리(Vibration Isolation)에 대한 고려가 반영되어야 하며, 이를 위해 본체 프레임의 모드해석과 흡진패드를 부착하여 진동전달을 감소시켰다.

2.4 복수 변위센서를 이용한 표면조도측정

측정분야에서 측정 정밀도를 높이거나 신뢰도를 높이는 방법은 여러 가지가 있을 수 있으나, 일반적으로 하나의 센서를 사용한 시스템에서의 측정정밀도는 반복정밀도(repeatability) 향상을 통해 측정정밀도를 향상하거나 교정(calibration)작업을 통해 신뢰도를 확보하는 방법이 있다. 그러나 측정환경에서 외란에 의한 잡음(noise)신호가 많거나, 단위센서값의 물리량의 값의 변동이 심한 경우, 장시간 노출로 인한 센서의 물리적 손상이나 오류 발생이 높을 경우등에 있어서는 하나의 센서를 통한 측정 정확도는 한계를 가지게 되고, 다수의 센서를 사용한 융합과 보정이 필요하게 된다. 동일한 측정환경에서 같은 물리량을 다중센서를 사용하여 측정하는 대표적인 방법은 다른 종류의 센서(heterogeneous sensors)를 사용하여

같은 물리량을 측정하여 간접비교방식으로 검증하거나, 동일한 센서(homogeneous sensors)를 여러개 중복하여 사용하여 상호 비교와 융합하는 방법으로 나눌 수 있는데, 본 연구에서는 장치의 설계에서 설명한 바와 같이 (Fig. 2) 레일표면 환경에서 유효한 동일한 센서 세 개를 설치하여 측정에 사용하였다[9].

동일한 센서를 사용하여 데이터를 융합하고 측정정밀도를 향상시키는 로직은 Fig. 3에 도식화하여 나타내었다. 먼저 동종의 세 개의 센서(A,B,C)의 측정값을 각각 a , b , c 라하고 각 센서의 오차범위를 α 라고 할 때 각 센서의 측정값은 $a \pm \alpha$, $b \pm \alpha$, $c \pm \alpha$ 로 나타낼 수 있다(Fig. 3(b)). 이렇게 측정한 데이터의 통합(Integration)은 Fig. 3(c)와 같이 세 개의 경우로 나누어 계산될 수 있다. 첫 번째 경우(Case I)는 세 개의 측정값이 오차범위내에 존재할 경우이며, 두 번째 경우(Case II)는 하나의 측정값이 다른 두 값의 오차범위를 벗어나는 경우이며, 세 번째 경우(Case III)는 세 개의 측정값이 서로 오차범위 바깥에 존재할 경우의 데이터 통합방법을 설명해 주고 있다.

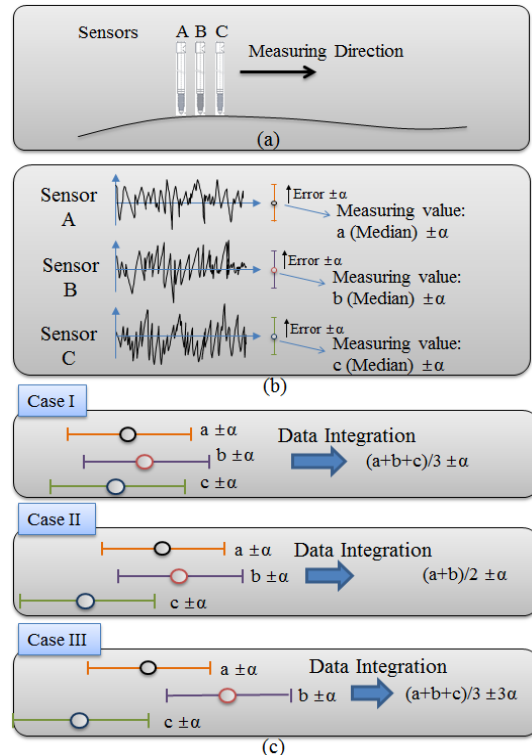


Fig. 3. Multiple sensor integration diagram:

- (a) Measurement with three sensors,
- (b) Sensory data and errors,
- (c) Integration methods with three cases

이러한 데이터 통합법을 적용하게 되면, 외란이나 노이즈에 의해 이상 최종값의 정밀도가 향상되는 결과를 얻게 되고, Case II와 같이 센서 자체의 결함이나 데이터의 신뢰도가 의심되는 센서를 찾아 낼 수 있는 장점을 가지게 된다. 또한 이러한 접근방법은 3개 이상의 다수개의 센서를 가진 시스템에서도 확장하여 활용이 가능하다. 그러나 다수의 센서가 모두 동일하다는 가정을 가지고 있다는 점을 고려하여, 서로다른 오차범위를 가지거나 이종의 센서를 설치하여 적용할 수는 없다.

이러한 데이터 통합은 데이터를 측정된 후에 후처리(Post processing) 방식으로 적용이 가능하며, 필요에 따라서는 쉽게 실시간 연산이 가능하도록 변경할 수 있다는 장점을 지닌다.

3. 결과 및 고찰

3.1 일반철도 음향조도 측정결과

현재 사용되고 있는 국내 일반철도의 몇 지점에서 해외의 R사 Trolley형식의 음향조도 측정장치를 이용하여 측정된 레일표면조도 값을 파장별로 나타내면 Fig. 4와 같다. 결과값을 분석해 보면 표면조도의 측정값은 붉은색 점선으로 나타낸 ISO 3095 기준한계(붉은색 점선)를 상회하는 파장대역이 존재한다는 것을 알 수 있다. 그러나 일반적으로 측정측정 데이터의 크기 폭은 ISO 3095 기준값에서 대략 -15에서 +10 dB의 범위안에 있음을 확인할 수 있었다.

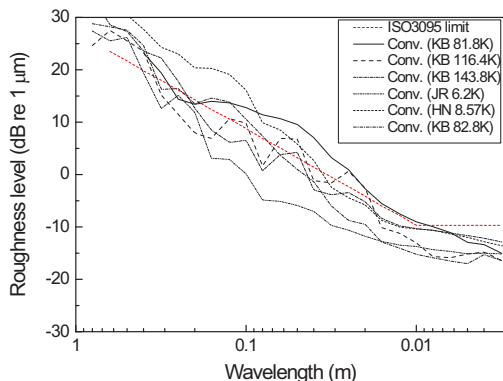


Fig. 4. Rail surface roughness of domestic railway vehicles

Fig.4의 측정값을 바탕으로 개발된 자동 표면조도 측

정장치는 이러한 국내 궤도의 특징을 고려하여 약 25 dB의 측정폭을 충분히 커버할 수 있도록 설계되었다 [10].

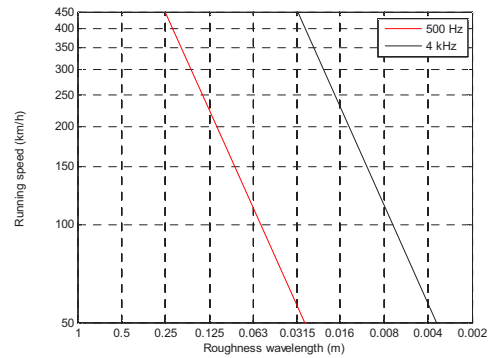


Fig. 5. Acoustic roughness wavelength range for rolling noise and vehicle running speed

또한, Fig. 5에서 나타낸 바와 같이 전동 소음원의 주요한 주파수 대역인 약 500 Hz ~ 4 kHz를 기준으로 차량 통과속도와 레일표면 조도의 파장과의 관계를 도식화하였다. 그래프에서 표시된 바와 같이 차량의 통과 속도가 높을수록 전동 소음과 연관된 주요 음향 조도의 파장도 길어진다. 이러한 상관관계는 소음강도의 저감계획의 수립에 있어서, 전동소음이 주요한 주파수 대역과 연관이 있는 음향조도의 파장 대역에 대해서 음향조도의 레벨을 비교하여 반영하는 것이 필요하다는 것을 나타내 준다.

고속철도의 경우 국내 철도 차량의 최고운행 속도는 현재 최고 영업운전속도인 300 km/h이며, 향후 차세대 동력분산형 고속철도는 상용화후 영업운전속도 370 km/h를 목표로 하고 있다. 약 60 km/h 이하의 속도 대역에서는 전동 소음 성분이 동력 소음 성분보다 작아지는 영역이다. 따라서 속도별로 차이는 있으나 Fig. 5에서 주요한 음향 조도의 파장 대역은 0.005 - 0.25 m 범위 내에 존재함을 알 수 있다.

3.2 표준구간 측정결과

설계 및 제작된 자동 음향조도 측정장치 및 센서의 신뢰성을 검증하기 위해서, 시험용 레일을 사용하여 측정 시험을 수행하였다. 시험용 레일에는 일정한 거칠기를 가지는 표면을 가지도록 1.5m의 레일을 설치하고, 제작된 음향조도 측정장치를 이용하여 교정(Calibration)작업

을 수행한 후에 현장에 설치된 10m의 표준레일 구간을 설정하고 반복 측정작업을 진행하였다.

측정장치에 사용된 센서는 0.1 μ m의 측정 정밀도를 가지는 3개의 동일 LVDT(Linear Variable Differential Transformer) 변위 센서를 사용하였다. 측정시험은 Fig. 6에 보이는 것과 같이 실제 레일에 10미터의 표준구간을 정하고 제작된 음향조도 자동측정장치를 사용하여 현장측정을 수행하였다. 측정속도는 대략 1m/s이하로 설정하여 정속주행이 가능하도록 하였으며, 측정시의 샘플링간격은 0.3mm(거리기준)으로 지정하였다. 샘플링과는 별개로 데이터저장은 장거리측정에 따른 데이터량을 줄이기 위해 해석에 필요한 1mm간격의 유효데이터로 저장하였다.



Fig. 6. Rail surface roughness measurement with automatic running platform

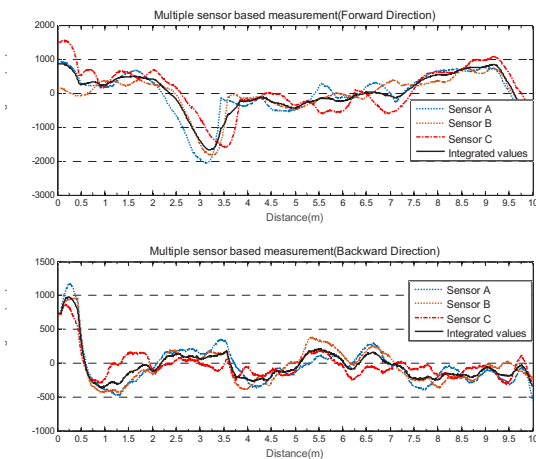


Fig. 7. Results of rail roughness measurement with multiple sensors and integration

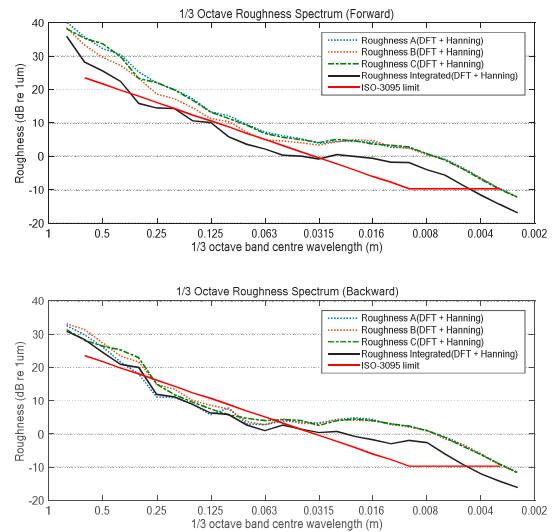


Fig. 8. 1/3 octave roughness spectrum with multiple sensors and integration

측정결과는 Fig. 7과 Fig.8에 나타내었으며, Fig. 7은 10미터의 표준구간의 레일에서 거리에 따른 레일표면의 음향조도 데이터를 나타낸다. 측정값의 그래프에서 동일한 3개의 센서에서 측정한 데이터 값은 서로 차이를 보여주고 있으며, 데이터 통합방식에 의한 최종 값은 검정색의 실선으로 표시하였다. Fig. 8은 레일표면 측정값의 1/3 옥타브 스펙트럼 데이터이다. 각각의 결과 그래프의 상부그래프는 전진방향의 데이터 값을 나타내고 하단부의 그래프는 후진방향으로 진행하며 측정한 값을 나타낸다. 진행방향과 측정점의 변동에 의해 측정값은 차이가 있음을 보여주고 있다.

Fig. 7과 Fig. 8의 데이터는 동일한 측정치를 바탕으로 나타낸 그래프이며 검정색 실선으로 표시된 그래프는 Fig. 3에서 제시한 데이터 통합법이 적용된 그래프이다. 이는 3개의 동일 센서값을 통합 보정한 값(검정색 실선)이 개별 센서 상호간의 데이터 값의 차이에도 불구하고 일정한 값을 유지하고 있음을 보여주고 있다.

Fig. 8에서 붉은색으로 표시된 직선은 국제규격인 ISO-3095에서 레일표면조도 관리를 위한 한계선으로 라인의 거칠기 값을 가지는 레일은 해당과장대에서 유지보수나 관리가 필요함을 나타내 주고 있다. 특히 Fig. 8 상부의 결과 그래프에서 검정색 실선으로 나타낸 통합값은 일부 과장대에서 ISO-3095한계의 아래쪽에 위치할 수 있음을 보여주고 있으며, 동일한 결과가 Fig. 8 하단부의 그래프에서도 일정하게 나타남을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 논문에서는 철도차량의 운행에서 발생하는 전동소음을 유발하는 레일표면의 불균일성인 레일표면 음향조도를 효과적으로 측정하기 위하여 새로운 자율 정속주행 측정장치를 개발하였으며, 측정값의 안정화와 반복측정에 대한 정밀도를 향상시키기 위해서 복수변위센서를 적용하는 방법을 제안하였다. 기존 장치를 통한 측정시에는 플랫폼의 진동에 따른 불규칙한 측정값의 후처리를 위하여 특정 필터를 적용하여야 하거나(ISO 3095기준) 표면의 피츠(pits)의 신호부분을 제거하는 등의 복잡한 과정을 거쳐야 할 필요가 있었으나, 본 논문에서 제시한 데이터 통합방식을 적용할 경우 측정 결과값에서 나타나 있는 것과 같이 일정한 값을 유지하여 측정값의 신뢰성이 높일 수 있었으며, 데이터 후처리 속도를 단순하고 빠르게 할 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 시험결과값은 후처리 데이터를 바탕으로 하고 있으나, 실시간 측정시에도 동일한 방법의 적용이 가능할 것으로 기대된다.

References

- [1] T. Kitagawa, "The Influence of Wheel and Track Parameters on Rolling Noise", QR of RTRI, Vol. 50, No. 1, pp. 32-38, 2009.
DOI: <http://dx.doi.org/10.2219/rtriqr.50.32>
- [2] D. J. Thompson, "Railway noise and vibration - Mechanisms, modelling and means of control, 518pp, Elsevier, 2009.
- [3] C. J. C. Jones and D. J. Thompson, "A review of the modelling of wheel/rail noise generation," Journal of Sound and Vibration, Vol. 231, No. 3, pp. 519-536, 2000.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1999.2542>
- [4] D. J. Thompson, "On the relationship between wheel and rail surface roughness and rolling noise," Journal of Sound and Vibration, Vol. 193, No. 1, pp. 149-160, 1996.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1996.0254>
- [5] S. L. Grassie, "Rail Irregularities, corrugation and acoustic roughness: characteristics, significance and effects of reprofiling," Journal of Rail and Rapid Transit, 226(5), pp. 542-557, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1177/0954409712443492>
- [6] S. L. Grassie, M. J. Saxon and J. D. Smith, "Measurement of Longitudinal Rail Irregularities and Criteria for Acceptable Grinding," 227(5), pp. 949-964, 1999.

- [7] G. Desanghere and T. Vanhonacker, "Development and Validation of a rail surface analyse for accurate quantification and evaluation of rail corrugation and track work acceptance after acoustic grinding," Inter-Noise 2007, Istanbul, Turkey, August, 2007
- [8] R. J. Diehl and P. Holm, "Roughness Measurement - Have the necessities changed?," Journal of Sound and Vibration, 293, pp. 777-783, 2006.
DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.046>
- [9] W. Jeong, S. Jeon, S. Jang, and H. Koh, "Accuracy Improvement in measuring rail surface roughness with multiple displacement sensors," Proc. of Conference on Institute of Control, Robotics and Systems, Spring, 2015.
- [10] S. Jang, W. Jeong, H. Koh, and J. Hong, "Study on the acoustic roughness of rail for controlling railway noise," Proc. of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering Conference, Spring, 2014.

정 우 태(Wootae Jeong)

[정회원]



- 2000년 2월 : 연세대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2006년 8월 : Purdue University, IE, USA(공학박사)
- 2006년 ~ 2007년 9월 : PRISM Center, USA, Associate Researcher
- 2007년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

자동화 및 지능형 로봇, 계측제어, 멀티센서융합

장 승 호(Seungho Jang)

[정회원]



- 1995년 2월 : KAIST 기계공학과 학사
- 1997년 2월 : KAIST 기계공학과 석사
- 2002년 2월 : KAIST 기계공학과 박사
- 2003년 4월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 선임연구원

<관심분야>

소음진동, 동역학

고 효 인(Hyo-In Kho)

[정회원]



- 2004년 7월 : Technical University Berlin (음향공학박사)
- 2004년 9월 ~ 현재 : 한국철도기술연구원 책임연구원

<관심분야>

음향공학, 철도소음