

# 비포장 시험로의 노면 굴곡 측정 및 가혹도 분석을 위한 노면굴곡측정장비 개발

양진생\*, 이상호#, 구상화\*, 배철훈\*

## Development of Profilometer for Profile Measurement and Severity Analysis of Unpaved Test Courses

Jin Saeng Yang\*, Sang Ho Lee#, Sang Hwa Goo\* and Cheol Hoon Bae\*

### ABSTRACT

The vibration environment essentially companied by vehicle operation on the ground is determined by the shape of road surface, which is called profile. This paper focuses on development of a profile and severity measurement system for unpaved test courses. In general, the profile and severity of unpaved road is an important issue in the reliability of endurance test. In order to measure unpaved road profile and severity, it is necessary to develop a profilometer system. The developed profilometer system is composed of data processing computer, power unit, air compressor and sensors(encoder, vertical gyro and laser displacement) This paper presents the measuring system configuration, measurement principle of road profile and analysis method of road characteristics used at CPG(Changwon Proving Ground) for this purpose.

**Key Words** : Profile(노면굴곡), Severity(가혹도), Profilometer(노면굴곡측정장비), Power Spectral Density(전력 밀도함수), Spatial Frequency(공간주파수), Endurance Test(내구도시험), Reliability(신뢰도)

### 1. 서론

기동장비의 개발에 있어 수명주기시험(life cycle test)이라고도 하는 내구도(durability) 시험평가는 장비의 신뢰도(reliability)를 평가하기 위해 필수적으로 수행되는 시험이다. 이는 수명주기 동안에 예상되는 차량 및 중요 구성품의 결함을 평가하고 예측하는 것으로, 비용 대 효과도 분석을 통하여 차량의 내구수명을 결정하는 중요한 판단자료가 된다.

차량의 내구도시험에 있어 중요한 시험인자 중에 하나는 차량 주행 시에 필연적으로 수반되는 시험 노면에 의한 진동 환경으로, 주행조건에 따른 진동 환경은 차량 및 구성품의 피로수명에 의한 신뢰도에 큰 영향을 미친다. 따라서 시험로의 노면 굴곡(profile) 측정 및 노면특성의 평가는 신뢰성 있는 내구도시험을 위해 필수적인 요소가 된다.<sup>1,3</sup>

시험로의 노면굴곡을 측정하고, 가혹도를 분석하여 내구도시험에 반영하려는 노력은 신뢰도 평가

접수일: 2006년 2월 20일; 게재승인일: 2006년 11월 24일

\* 국방과학연구소 기동시험장

# 교신저자: 국방과학연구소 기동시험장

E-mail ppowertrain@paran.com Tel. (055) 250-3233

분야에서 오랫동안 연구되고 있다. 종래의 노면굴곡 측정 및 가속도 분석에는 경험과 주관적인 측정 방법이 사용되어 왔으며, 보다 객관화된 결과를 얻기 위해 다양한 측정기술이 발전되어 왔다.

1970년대에 미 국방성(Department of Defense) 산하의 APG(Aberdeen Proving Ground) 시험장은 자이로(gyro)와 포텐쇼미터(potentiometer)를 이용한 토우암(tow arm) 방식의 측정장비를 개발하여 운용하였으나, 노면굴곡 측정 가능 주파수가 20~2m/cycle로서 고주파수 특성에 대한 반영이 효과적이지 못했다. 이후, 자이로와 초음파센서를 이용한 트레일러형의 장비를 개발하여 현재까지 운용 중에 있으며, 분석 주파수는 20~0.3m/cycle로 알려져 있다.<sup>4</sup> 또한, 일본에서는 궤도 및 장륜차량 현가장치의 성능평가 및 노면 데이터 확보, 진동시험장치의 가진용 입력 데이터 확보를 위해 방위청 소속 기술연구본부(Technical Research and Development Institute)에서 1992년에 자이로를 근간으로 하는 지형형상측정장비를 개발하였다.<sup>5</sup> 지형형상측정장비는 측정 주파수의 범위가 20~0.5m/cycle로서 측정 범위는 대체로 만족스러우나, 많은 측정시간을 요구하며, 측정 노폭이 0.3m로 지나치게 좁다는 단점이 있다.

일반적으로 노면의 굴곡측정 및 가속도 분석을 위해 연구되는 개념은 다음과 같이 두 가지 방식으로 구분된다. 첫 번째는 차량응답(vehicle response measurement)을 측정하는 방식으로, 노면 굴곡에 의한 차량의 응답특성으로 노면의 가속도를 판정하는 것으로 현수장치에 스트레인 게이지나 가속도센서(accelerometer) 등을 설치하여, 이를 이용하여 가속도 데이터를 획득하는 것이다.<sup>6</sup> 두 번째는 노면굴곡을 직접적인 방법으로 측정하는 것이다. 즉, 노면의 기하학적 형태를 직접 측정하기 위해 자이로, 수직거리 변위센서(displacement sensor) 등을 주행차량에 설치하여 노면굴곡을 재현하고 이를 분석함으로써 노면가속도 데이터를 획득한다.<sup>4,5,7</sup>

이상의 방식들은 각각 장단점을 가지고 있는데, 전자의 방식은 측정차량에 따라 가속도가 다르게 평가될 수 있기 때문에, 궤도형 및 차륜형 차량에 가해지는 가속도 정보를 일관되게 적용할 수 없다는 단점을 가진다. 또한, 후자의 경우에는 노면의

기하학적 형태를 측정하고 분석하여 가속도를 평가함으로써 차량의 종류에 관계없이 일관성 있는 적용이 가능하다. 따라서 시험로의 노면 가속도를 측정하여 일정하게 유지시키려는 관점에서는 노면의 기하학적 형태를 직접 측정하는 후자의 방법이 효과적이라고 판단된다.

본 연구에서는 기존 시스템의 단점을 보완하여 버티컬 자이로와 레이저 변위센서를 이용한 20~0.3m/cycle의 비교적 고주파수의 측정범위를 가지며, 시험차량의 좌·우측 바퀴가 주행하는 경로상의 노면굴곡을 반영할 수 있도록 1.2m 노폭의 2개 경로에 대한 노면굴곡측정이 가능한 장비를 개발하였다. 본 논문에서는 자체 개발한 노면굴곡측정장비의 구성과 계측시스템, 운용 프로그램 등을 나타내고, ISO 8608 표준에 따라 수행된 노면 분석용 데이터처리 프로그램 등을 기술한다. 또한 국방과학연구소 산하 기동시험장 내구시험로 뿐만 아니라, 국내 여러 지역의 비포장 기동로와의 노면 가속도 비교 및 ISO 8608 표준에 따른 노면등급으로 분류하였다.

## 2. 노면굴곡측정장비

### 2.1 시스템 개요

개발한 노면굴곡측정장비는 노면을 추종하면서 탑재된 센서를 이용하여 계측하는 트레일러(trailer)와 트레일러를 견인하기 위한 견인차량으로 구성된다. Fig. 1은 노면굴곡측정장비의 운용을 나타낸 것이며, 트레일러에 설치된 센서 구성은 Fig. 2에 보인다.

### 2.2 하드웨어 구성

#### 2.2.1 트레일러

트레일러는 20~0.3m/cycle의 굴곡 주파수 범위를 측정 목표로 하여 이론적 모델링 및 해석을 통하여 아래와 같이 주요제원을 결정하였다.<sup>8,9</sup>

개발된 트레일러의 전장 및 윤거, 축거, 차륜반경은 각각 3.1m와 1.2m, 1.8m, 28.7cm로 Fig.2와 같이 4개의 바퀴와 2개의 차축을 가진다. 또한, 차축과 트레일러의 프레임 사이에는 어떠한 현수장치도

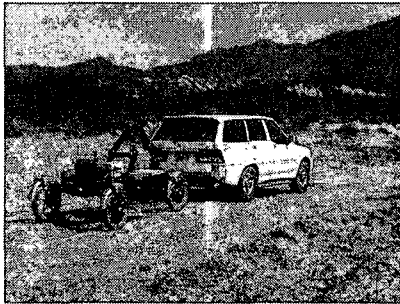


Fig. 1 Profilometer

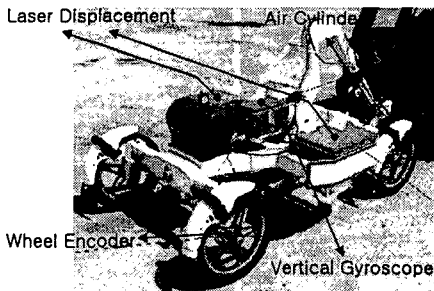


Fig. 2 Configuration of Profilometer trailer

없으며, 프레임은 앞차축의 회전(yaw) 운동과 뒷차축의 좌우 경사방향(roll) 운동에 의한 2자유도의 기구학적 운동을 한다.

견인을 위한 차량과 트레일러의 연결부는 견인 차량의 운동이 트레일러에 영향을 미치지 못하도록 설계되었으며, 계측 트레일러의 바퀴가 측정 중에 노면으로부터 이격되는 상황이 발생하지 못하도록 공압 실린더를 이용하여 일정하게 지면방향으로 누르도록 하였다.

트레일러에 설치된 센서는 Fig. 2와 같으며, 트레일러 프레임의 전후방향 경사각(pitch angle)과 좌우방향 경사각(roll angle)을 측정하기 위해 버티컬 자이로를 트레일러의 무게중심에 위치시켰다. 또한, 프레임과 노면 사이의 수직거리를 측정하기 위해 프레임의 좌우에 레이저를 이용한 변위센서를 각각 설치하였다. 우측의 뒷바퀴에는 휠 엔코더가 설치되어 측정거리를 계측하는데, 휠 엔코더는 바퀴축과 3:1의 기어비를 갖는 기어와 체인으로 연결되어 바퀴 한 회전(1.8m)당 300개의 펄스가 출력되

어 펄스당 6mm의 분해능을 갖는다. 따라서 16개의 펄스에 해당되는 9.6cm를 샘플링율(sampling rate)로 설정하여 운용한다.

Table 1에 적용된 센서의 주요 사양을 나타낸다.

Table 1 Specification of applied sensor

	Maker	Model	Specification
Vertical Gyro	Humphrey	VG24-0636-1	range : $\pm 45^\circ$ accuracy : $\pm 0.5\%$ of ture vertical resolution : $\pm 45^\circ / \pm 12V$
Laser	Onosokki	LD-1300L-200	range : 0.3~0.7m light source : semiconductor laser resolution : 0.4m/ $\pm 5V$
Wheel Encoder	Lucas	HD20	frequency range : 0~100kHz resolution : 100~2500ppr

### 2.2.2 견인차량

견인차량은 4륜형 무쏘 차량을 개조하여 구성하였으며, 공압용 압축기와 데이터 획득(DAQ) 시스템, 신호조정기, 전원공급장치 등이 탑재되어 있다.

공압용 압축기는 계측 트레일러의 안정된 노면 추종을 유도하기 위해 트레일러에 설치된 공압 실린더에 일정한 공압을 공급하기 위한 것으로, 그 압력은 목표로 하는 측정속도 5km/h에서 다양한 압력설정에 대한 시행착오(trial and error) 과정을 거쳐 가장 안정되게 노면을 추정하는  $7\text{kg/cm}^2$ 로 설정하였다.

그리고 트레일러에 설치된 센서들로부터 신호를 획득하기 위한 데이터 획득 시스템은 PC기반 계측시스템의 형태로 구성되어 있으며, 계측 환경을 고려하여 DAQ 보드가 내장된 산업용 PC를 적용하였다. Fig. 3에 센서 및 계측시스템의 구성도를 보인다.

전원공급장치는 트레일러에 장착된 센서 및 견인차량 내부에 위치하는 DAQ 시스템과 레이저 변위센서 신호조정기 등의 각종 장비에 전원을 공급하는 것이다. Fig. 4에 전원공급장치의 구성도를 보이며, 24VDC 입력으로 DC/DC 컨버터를 통해

28VDC와 ±12VDC, ±15VDC, 5VDC로 변환되도록 하였다.

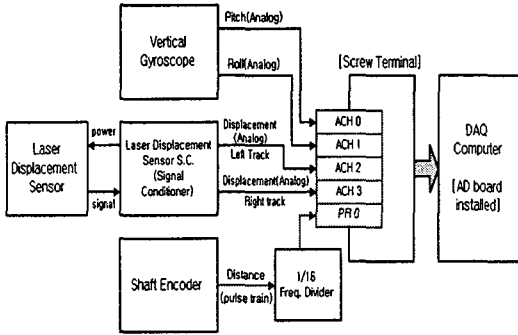


Fig. 3 Configuration of Instrumentation System

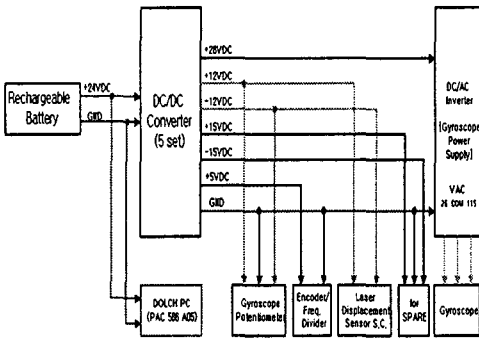


Fig. 4 Configuration of Power System

## 2.3 소프트웨어 구성

### 2.3.1 노면굴곡 생성 알고리즘

노면굴곡은 설정된 샘플링율에 따라 계측 트레일러가 노면을 추종하면서 얻어진 피치각과 롤각, 좌우 프레임과 노면까지의 수직거리를 이용하여 실제 노면을 재현할 수 있도록 생성시키는 것이다.

Fig. 5는 계측 중인 트레일러의 측면도를 보이는 것으로, 피치각( $\theta$ )을 이용하여 트레일러 중심점의 이동궤적을 결정하기 위해 식(1)을 적용한다. 여기서,  $X_{mp}$ 와  $Y_{mp}$ 는 각각 트레일러 진행방향과 노면 수직방향에 대한 중심점 궤적이다.

$$X_{mp}(i+1) = \sum_{i=0}^N \cos\theta_i \, dl \quad (1)$$

$$Y_{mp}(i+1) = \sum_{i=0}^N \sin\theta_i \, dl$$

또한, 프레임의 롤링에 의해 발생하는 좌우측 레이저센서의 위치 좌표를 얻기 위해 롤각( $\phi$ )을 이용한 식(2)가 적용된다. 여기서,  $\frac{W}{2}$ 는 중심점으로부터 각 레이저 센서까지의 거리를 나타내는 것으로 0.6m이다.

$$Y_{lasl}(i) = Y_{mp}(i) - \frac{W}{2} \sin\phi(i) \quad (2)$$

$$Y_{lasr}(i) = Y_{mp}(i) + \frac{W}{2} \sin\phi(i)$$

Fig. 6은 지면에 대한 레이저 변위센서의 이동궤적을 나타내는 것으로, 레이저 변위센서에서 얻어진 지면까지의 수직 높이와 롤링에 의한 레이저 센서의 위치와의 상관관계에 의해 식(3)과 같이 좌우측에 대한 노면굴곡을 얻을 수 있다. 여기서  $LAS_l$ 과  $LAS_r$ 은 측정된 좌우측 수직변위를 나타내며,  $YL$ 과  $YR$ 은 트레일러의 좌우측에 대한 노면굴곡을 의미한다.

$$YL(i) = Y_{lasl}(i) + LAS_l(i) \quad (3)$$

$$YR(i) = Y_{lasr}(i) + LAS_r(i)$$

그러나 이상의 수식에서는 레이저 변위센서가 항상 지면에 수직방향이라는 가정이 포함된 것으로 트레일러의 피치와 롤에 의한 레이저 변위센서의 보정이 필요하다. 따라서 보정된 좌우측 트랙의 노면굴곡은 식(4)와 같다.

$$YL(i) = Y_{lasl}(i) + \frac{LAS_l(i)}{\cos|\theta(i)|\cos|\phi(i)|} \quad (4)$$

$$YR(i) = Y_{lasr}(i) + \frac{LAS_r(i)}{\cos|\theta(N)|\cos|\phi(N)|}$$

위와 같은 절차에 따라 좌우측 궤적에 대한 노면굴곡의 형상은 얻을 수 있으나, 노면 진행방향에 대한 수평방향의 샘플링 간격이 일정하지는 않다. 따라서 식(5)와 같이 선형 보간식을 적용하여 수평방향에 대한 균일 샘플링 간격으로 노면굴곡을 변

환할 필요가 있다.

$$YL_m(i) = YL(i) + [x_r(i) - x(i)] \cdot \tan[\theta(i)] \quad (5)$$

$$YR_m(i) = YR(i) + [x_r(i) - x(i)] \cdot \tan[\theta(i)]$$

여기서,  $YL_m(i)$ 와  $YR_m(i)$ 는 선형 보간된 최종의 노면굴곡을 나타내며,  $x_r(i)$ 는 수평방향  $i$ 번째의 균일 샘플링 간격을 의미한다.

이상의 절차를 살펴보면, 근사치에 의한 오차가 다소 포함되어 있으나, 샘플링 간격이 적을수록 이러한 오차는 감소된다. 적용된 9.6cm의 샘플링율은 비포장 시험로의 노면굴곡 특성과 비교하면 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

### 2.3.2 노면 가속도 분석 알고리즘

노면굴곡 생성 알고리즘에 의해 획득된 노면 프로파일은 생성 자체에도 의미가 있으나, 가속도(severity)의 형태를 갖는 것이 무엇보다 중요하다. 가속도를 평가하기 위한 전체적인 알고리즘은 노면의 가속정도를 측정하고 분석하며, 그 결과에 따라 등급으로 분류하는 ISO 8608 표준과 일치시켰다.<sup>7</sup>

식(5)에 의해 최종 획득된 노면프로파일은 주로 차량의 현수와 구조에 영향을 미치는 관심대역의 주파수 성분만을 추출하기 위해 대역통과 필터링(band pass filtering) 절차를 거친다. ISO 8608 표준에서는 에어리어싱(aliasing)을 극복하기 위한 차단 주파수로 대략 샘플링율의 1/3을 요구하고 있으며, 트렌드 제거(detrending)를 위해 0.05cycle/m를 권고하고 있다. 이는 노면굴곡측정장비의 샘플링율이 9.6cm임을 고려하면, 공간 주파수(spatial frequency)

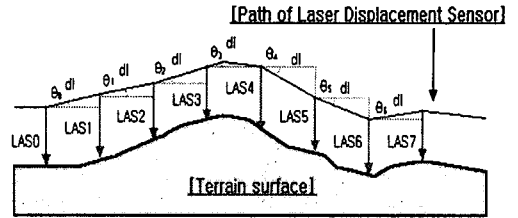


Fig. 6 Trace of laser displacement sensor

관점에서 개략적으로 0.05~3.46cycle/m에 해당된다. 이는 개발 장비의 관심대역으로 0.3~20m/cycle을 의미하게 된다. 5차 버터워스(butterworth)에 의해 대역 통과된 데이터는 노면 가속도를 평가하는 실질적인 데이터가 되기 위해 공간 주파수축 상의 전력 스펙트럼 밀도(Power Spectral Density)라는 평가 변수를 이용하여 가속도의 형태로 나타낸다. 주파수 분석에 있어 일반적인 랜덤 신호의 분석에 사용하는 해닝 윈도우(Hanning Window)를 적용하였고, FFT 블록 사이즈(block size)는 1024개로 설정하였다. 또한 ISO 8608의 권고에 따라 고주파 영역에서의 PSD 요동(fluctuation)을 감소시키기 PSD smoothing 기법을 적용하였다.<sup>7,10</sup>

### 2.3.3 운용 프로그램

노면 프로파일 획득을 위한 노면굴곡측정장비의 운용 프로그램은 LabVIEW(ver.5.0)로 개발하였다. 운용 프로그램은 크게 계측 정보부와 데이터 획득부, 결과 확인부로 구성되어 있으며, 계측정보부는 계측 일시나 측정 노면, 주행 방향 등의 계측 정보를 기록하여 저장한다. 그리고 데이터 획득부는 실제 데이터 획득을 제어하고 계측 데이터를 모니터링 및 저장하며, 결과 확인부에서는 계측 결과의 정상성(normality)을 확인한다.

Fig. 7은 데이터 획득부의 실행 화면을 보이는 것으로, 이를 통하여 계측자는 계측 중 4개의 차트를 통해 데이터 획득 상황을 실시간으로 모니터링할 수 있다. 또한 주행거리 및 누적 데이터 개수 등을 확인할 수 있으며, 센서에서 이상 신호가 감지될 경우에는 OFR(out of range) 경고등이 점등되도록 구성하였다.

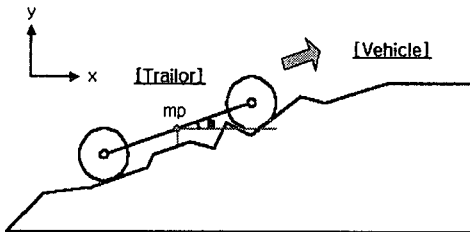


Fig. 5 Side view of trailer

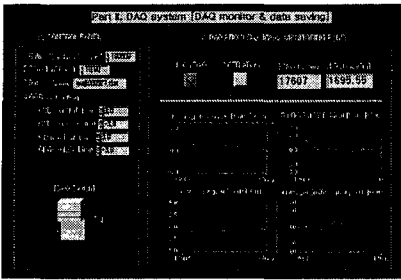


Fig. 7 The picture of operating for data acquisition

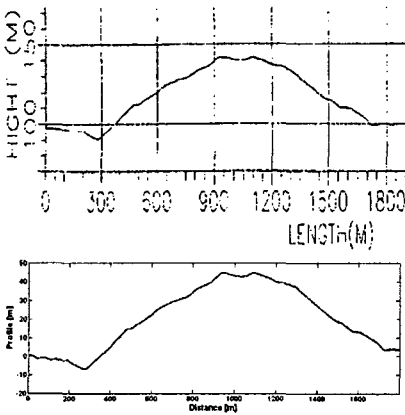


Fig. 8 Comparison of result of measurement

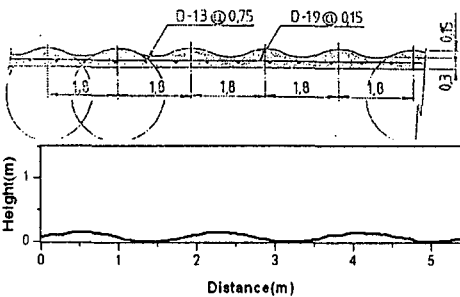


Fig. 9 Comparison of result of 6" washboard course

## 2.4 시스템 입증

개발한 노면굴곡측정장비의 성능을 확인하기 위하여 노면굴곡의 특성을 알고 있는 기지의 노면에 대한 측정을 수행하였다. Fig. 8은 기동시험장

1.8km의 비포장시험로를 측정하여 전체적인 노면 형태를 정확히 측정하는지를 확인한 것으로, 상부 그림은 시험장 건설시 토목현장에서 사용하는 종단 측량법(rod and level survey)으로 측정한 결과이고, 하부 그림은 개발한 장비로 측정한 것인데, 두 경우의 결과가 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 9는 고주파수의 특성을 정확히 측정하는지 확인하기 위한 것으로, 시험장의 6인치 파형로를 측정한 결과인데, 측정결과인 하부 그림은 시험로 설계도면 상부 그림과 잘 일치함을 알 수 있다.

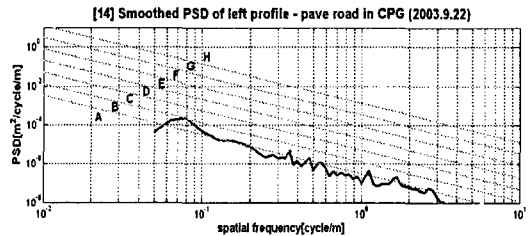


Fig. 10 PSD of left profile for concrete road in CPG

## 3. 노면 굴곡 측정 및 가속도 분석

개발한 노면굴곡측정장비를 사용하여 국내 여러 지역의 비포장 기동로에 대한 노면특성을 측정하여 그 결과를 ISO 8608 표준에서 제시한 노면 등급에 따라 분류하였다.

### 3.1 ISO 8608 노면분류와 포장로 분석결과

ISO 8608 표준에서는 공간주파수와 PSD값에 대한 옥타브 밴드(octave band)를 이용하여 Table 2와 같이 8개 등급의 노면 가속도를 분류하고 있다.<sup>7</sup> 즉, 0.0078~4cycles/m까지 10개의 공간주파수의 옥타브 밴드를 설정하고, 공간주파수의 옥타브 밴드별로 PSD값의 크기에 대한 옥타브 밴드를 8개로 구분한 것이다. 이것을 이용하여 노면굴곡의 공간주파수별 PSD값을 적용함으로써, 노면의 가속 정도라고 할 수 있는 A class에서 H class까지 8개의 등급으로 구분되는 것이다.

ISO 8608 표준에서도 class별로 노면의 형태를 정의하는 것은 불가능하여, 아스팔트 포장로가 대

Table 2 Geometric mean and limits of the displacement PSD for different classes of roads as a function of the octave bands

Road Class	$G_d(n_c)$ $\frac{m^3}{10^6 m}$	Octave centre spatial frequency, $n_c$ (cycle/m)									
		0.0078	0.0156	0.0312	0.0625	0.125	0.25	0.5	1	2	4
A	Mean	2621	655	164	41.0	10.2	2.56	0.64	0.16	0.04	0.01
	Upper	5243	1311	328	81.9	20.5	5.12	1.28	0.32	0.08	0.02
B	Lower	5243	1311	328	81.9	20.5	5.12	1.28	0.32	0.08	0.02
	Mean	10486	2621	655	163.8	41.0	10.24	2.56	0.64	0.16	0.04
	Upper	20972	5243	1311	327.7	81.9	20.48	5.12	1.28	0.32	0.08
C	Lower	20972	5243	1311	327.7	81.9	20.48	5.12	1.28	0.32	0.08
	Mean	41943	10486	2621	655.4	163.8	40.96	10.24	2.56	0.64	0.16
	Upper	83886	20972	5243	1310.7	327.7	81.92	20.48	5.12	1.28	0.32
D	Lower	83886	20972	5243	1310.7	327.7	81.92	20.48	5.12	1.28	0.32
	Mean	167772	41943	10486	2621.4	655.4	163.84	40.96	10.24	2.56	0.64
	Upper	335544	83886	20972	5242.9	1310.7	327.68	81.92	20.48	5.12	1.28
E	Lower	335544	83886	20972	5242.9	1310.7	327.68	81.92	20.48	5.12	1.28
	Mean	671089	167772	41943	10485.8	2621.4	655.36	163.84	40.96	10.24	2.56
	Upper	1342177	335544	83886	20971.5	5242.9	1310.72	327.68	81.92	20.48	5.12
F	Lower	1342177	335544	83886	20971.5	5242.9	1310.72	327.68	81.92	20.48	5.12
	Mean	2684354	671089	167772	41943.0	10485.8	2621.44	655.36	163.84	40.96	10.24
	Upper	5368709	1342177	335544	83886.1	20971.5	5242.88	1310.72	327.68	81.92	20.48
G	Lower	5368709	1342177	335544	83886.1	20971.5	5242.88	1310.72	327.68	81.92	20.48
	Mean	10737417	2684354	671089	167772.1	41943.0	10485.76	2621.44	655.36	163.84	40.96
	Upper	21474834	5368709	1342177	335544.3	83886.1	20971.52	5242.88	1310.72	327.68	81.92
H	Lower	21474834	5368709	1342177	335544.3	83886.1	20971.52	5242.88	1310.72	327.68	81.92
	Mean	42949668	10737417	2684354	671088.6	167772.1	41943.04	10485.76	2621.44	655.36	163.84

략 A class 수준이라고만 표현하고 있다. 일본의 방위청 기술연구본부에서 개발한 지형형상측정장비를 이용하여 콘크리트 포장로에서 측정한 결과에서도 이를 확인할 수 있다.<sup>4,5</sup>

Fig. 10은 개발한 노면굴곡측정장비를 이용하여 기동시험장에 있는 콘크리트 포장 노면의 굴곡을 측정하고 가속도를 분석한 결과를 보이는 것으로, 좌측 트랙의 PSD 결과만을 보인다. 그림에서 7개의 사선은 Table 2의 ISO 8608의 노면분류에 대한 수치를 적용하여 나타낸 것으로, PSD값이 A class에 속함을 확인할 수 있었다.

### 3.2 노면 특성의 분석 절차

기동시험장의 야지시험로에 대해 노면 굴곡 측정 및 가속도 분석에 대한 일련의 과정을 다음의 그림에서 순차적으로 나타낸다.

Fig. 11은 버티컬 자이로에 의해 측정된 트레일러의 피치와 롤을 나타내며, Fig. 12는 좌우측 레이저 변위센서에 의한 노면과의 거리를 측정하는 것이다. 이상의 획득 데이터를 기초로 Fig. 13과 같이 실제 트레일러가 지나간 노면 프로파일을 생성하

게 된다. Fig. 14에서는 0.05~3.46cycle/m의 관심대역 주파수 성분만을 추출하기 위해 대역통과 필터링을 한 결과이며, 이를 통해 최종 획득된 PSD 결과가 Fig. 15와 같다. Fig. 15를 살펴보면, 상대적으로 저주파수 영역에 해당하는 0.04~0.3cycle/m에서는 ISO 8608 노면분류의 F와 G class에 해당되며 중주파수 영역인 0.3~1cycle/m에서는 F class, 1~3.46cycle/m에 해당하는 고주파수 영역에서도 E와 F class에 포함되는 것을 확인하였다.

이와 같이 비포장 노면의 가속도를 상대적으로 비교하고 평가하기 위한 ISO 8608의 노면분류는 유효한 수단이 될 수 있음을 확인할 수 있었다.

### 3.3 국내 비포장 기동로의 노면 분석 결과

3.2절과 동일한 방법으로 2003년에 국내의 23개 비포장 기동로에 대해서 노면특성을 분석하였다. 본 논문에서는 대표적이라고 판단되는 4개 기동로에 대한 분석 결과만을 나타내었다. Fig. 14는 M지역에 위치하는 3기동로에 대한 노면 가속도 특성을 나타낸 것으로, 기동로 길이는 약 2.2km 정도에 해당한다. ISO 8608의 노면분류에 의해 구분하면, 저

주파수와 중주파수 영역에서는 F와 G class, 고주파수 영역에서는 E와 F class 정도에 해당한다.

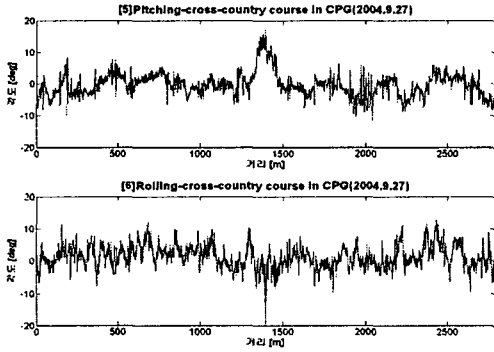


Fig. 11 Data of pitching and rolling

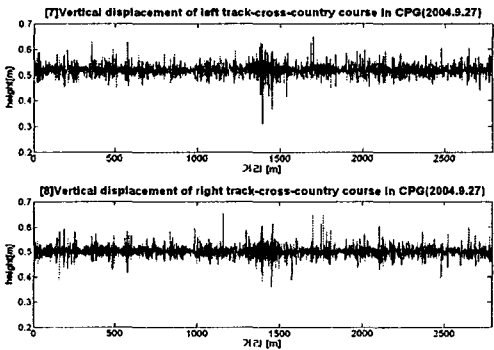


Fig. 12 Data of left and right displacement

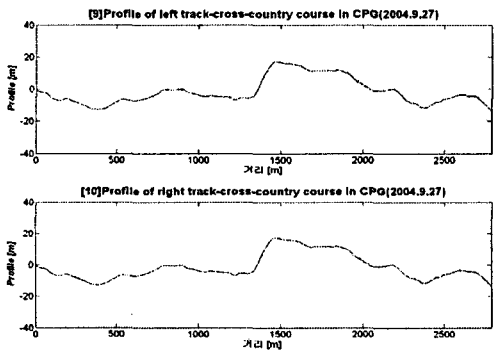


Fig. 13 Profile data for left and right track

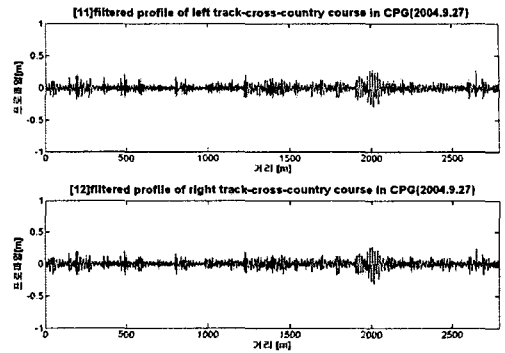


Fig. 14 Filtered data of left and right profile

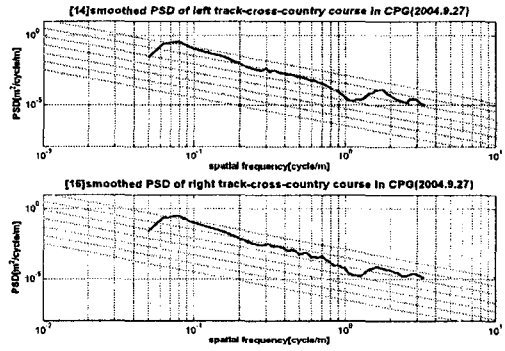


Fig. 15 PSD of left and right profile

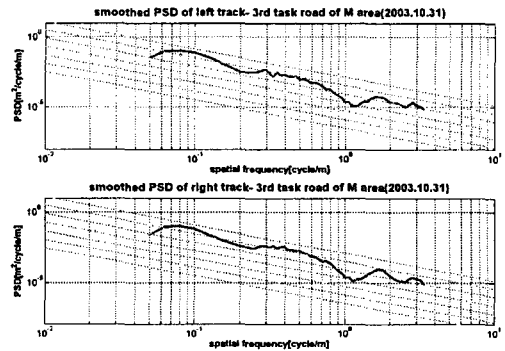


Fig. 16 PSD of 3rd task road for M area



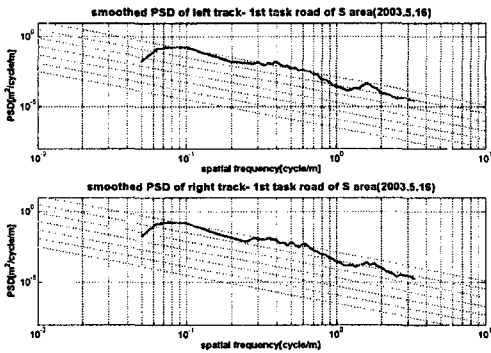


Fig. 17 PSD of 1st task road for S area

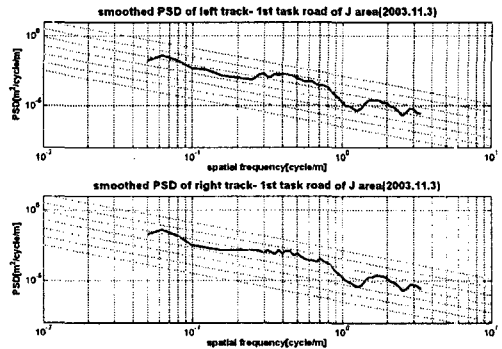


Fig. 19 PSD of 1st task road for J area

주파수 대역에 상관없이 기동시험장의 야지시험로와 가장 유사한 노면 굴곡의 특성을 가진다.

Fig. 16은 S지역의 1.3km 길이의 1기동로에 대한 것으로, 저주파수와 고주파수 영역에서는 F와 G class의 노면특성을 가지며, 중주파수에서는 더욱 가혹한 H와 H class로 분류되었다. 이것은 저주파수 영역을 제외하고는 모든 주파수 영역에서 기동시험장 야지시험로의 가혹도를 넘어서는 것이다.

Fig. 18은 Y지역의 D기동로에 대한 것으로 기동로 길이는 0.85km 정도이다. 주로 자연석이 많이 돌출되어 있는 특성을 지니며, 저주파수와 중주파수 영역에서는 G class에 해당된다. 고주파수에서는 F와 G class로 분류되어 모든 주파수 영역에서 기동시험장 야지시험로의 가혹도를 상회했다.

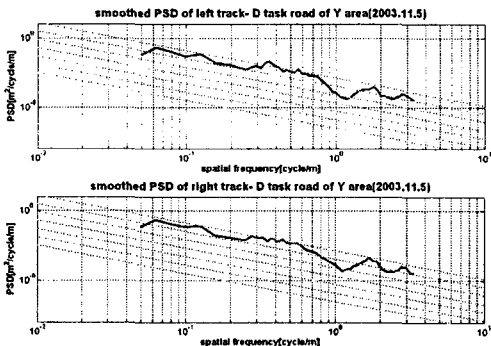


Fig. 18 PSD of D task road for Y area

Table 3 Comparison of road severity

task road	low freq.	med. freq.	high freq.
cross-country	F G	F	E F
M-3rd area	F G	F G	E F
S-1st area	F G	G H	F G
Y-D area	G	G	F G
J-1st area	E F	E F	D E

Fig. 19는 J지역의 1기동로로 1.3km의 기동로 길이를 가진다. 저주파수와 중주파수 영역에서는 E와 F class로 분류되며, 고주파수 영역에서는 D와 E class로 구분되어 모든 주파수 영역에서 기동시험장 야지시험로의 가혹도보다 낮은 것으로 분석되어진다.

### 3.4 노면 가혹도 비교

이상과 같이 기동시험장의 야지시험로와 국내 여러 지역의 대표적인 기동로와의 가혹도를 Table 3에 요약하여 정리하였다.

저주파수 영역에서는 대부분의 기동로가 야지시험로의 굴곡 특성을 비슷하게 지니고 있는 편이며, 중주파수와 고주파수 영역은 J지역의 1기동로를 제외하고는 대부분 야지시험로보다 가혹도가 높은 것으로 분석되었다.

#### 4. 결론

기동시험장에서는 내구도시험의 신뢰성을 향상시키기 위해 시험로의 표준화 및 가혹도의 유지관리 분야에 대한 연구를 수행하고 있다.

이를 위해 본 논문에서는 국내 최초로 노면굴곡을 직접 측정하는 방식의 트레일러형 노면굴곡측정 장비와 데이터 획득 프로그램을 개발하였다.

또한, ISO 8608 표준에 따라 데이터 처리 및 분석을 수행하였으며, 기동시험장의 야지시험로와 전방 군운용지역 기동로에 대한 노면 굴곡 특성을 측정하였다.

이를 통해 비포장 노면의 가혹도를 정량화하여 분석하였으며, ISO 8608 표준에서 제시하는 노면 등급에 의해 기동시험장의 비포장 내구시험로는 물론, 국내 여러 지역의 비포장 기동로에 대해서도 노면 가혹도를 분류하여 비교하였다.

#### 참고문헌

1. Connon, W. H., "Determining Vehicle Sensitivity to Changes in Test - Course Roughness," IEST 46th Annual Technical Meeting and Exposition, pp. 30-37, 2000.
2. Dodds, C. J. and Robson, J. D., "The description of the road profile roughness," Journal of Sound and Vibration, Vol. 31, pp. 175-183, 1973.
3. Min, B. H. and Jeong, W. U., "Design Method of Test Road Profile for Vehicle Accelerated Durability Test," Journal of KSAE, Vol. 2, No. 1, pp. 128-141, 1994.
4. Castaldo, P. D., Allred, J. A. and Reil, M. J., "Terrain Profilometer," Technical Report, Aberdeen Proving Ground of US Army, 2000.
5. Mori, T., Nowada, S, Kanagawa, K., Inoue, Y., Yoshioka, K., Matsushita, Y. and Shimura, A., "Study on the characteristics of terrain profiles to develop the tracked vehicle suspension," Technical Report, Technical Research and Development Institute in Japan Defense Agency, 1992.
6. La Barre, R. P., Forbes, R. T. and Andrew, S., "The Measurement and Analysis of Road Surface Roughness," Technical Report, Motor Industry and Research Association, 1969.
7. ISO, "Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data," ISO 8608:1995(E), 1995.
8. Kim, H. Y., "The Study of measurement and analysis for Road Profiles of Test Courses," Technical Report, Agency for Defense Development, ADD-00-1937, 1992.
9. Kim, H. Y. and Lee, H. J., "A Study on the Steering characteristics in Road-Profile Measuring Tractor," Proceeding of the KSAE Fall Annual Meetings, pp. 295-303, 1993.
10. Xu, D. M., Mohamed, A. M. O., Yong, R. N. and Caporuscio, F., "Development of a Criterion for Road Surface Roughness Based on Power Spectral Density Function," Journal of Terramechanics, Vol. 29, pp. 477-486, 1992.