

비포장 노면의 가혹도 관리에 관한 연구

양진생*, 이상호#, 구상화*, 이정환*, 강도경*

A Study on the Severity Control of Unpaved Test Courses

Jin Saeng Yang*, Sang Ho Lee#, Sang Hwa Goo*, Jeong Hwan Lee* and Do Kyoung Kang*

ABSTRACT

The vibration environment essentially companied by vehicle operation on the road is determined by the shape of road surface, which is called profile. In general, the profile and severity of unpaved road is an important issue in the reliability of durability test for vehicles. In order to maintain severity of unpaved road, it is necessary to develop profilometer system. We developed profilometer system which is composed of data processing computer, power unit, air compressor and sensors. This paper focuses on the severity management of unpaved test courses using neural networks. This paper presents the maintenance range for cross-country course in CPG(Chang-won Proving Ground) and the evaluation of similarity degree between unpaved roads.

Key Words : Profilometer(노면굴곡측정장비), Severity(가혹도), Power Spectral Density(전력밀도함수), Spatial Frequency(공간주파수), Similarity Index(유사계수), Neural Networks(신경망)

1. 서론

기동장비의 신뢰도(reliability)를 평가하기 위한 내구도(durability) 시험은 수명주기(life cycle) 동안에 예상되는 차량 및 중요 구성품의 결함을 평가하고 예측하는 것으로, 차량의 내구수명을 판단하는 중요한 자료가 된다. 그러나 차량 및 구성품의 내구수명에 대한 신뢰도에 영향을 미치는 인자들 중에 하나는 차량 주행 시에 필연적으로 수반되는 노면에 의한 진동 환경이다.¹⁻³

이러한 진동 환경에 대한 신뢰성을 향상시키기 위하여 시험 노면을 측정하고, 분석하여 가혹도를

일정하게 유지시킬 필요성은 비포장 노면에서의 내구도시험을 담당하는 국내외 대다수의 시험장들이 공감하는 분야 중에 하나이다. 미 국방성 산하의 APG(Aberdeen Proving Ground) 시험장과 일본 방위청 소속의 기술연구본부(TRDI, Technical Research and Development Institute)에서는 비포장 노면의 굴곡 특성을 측정하고 분석하기 위한 장비 개발 및 연구는 각각 독립적으로 수행하였으나, 노면 가혹도 관리 측면으로는 발전하지 못했다.^{4,7}

1957년에 설립되어 현재에 이르고 있는 미국의 NATC(Nevada Automotive Test Center)는 민간 시험장으로 현재 약 3,000마일의 자체 주행 시험로를

접수일: 2006년 2월 20일, 게재승인일: 2006년 12월 5일

* 국방과학연구소 기동시험장

교신저자: 국방과학연구소 기동시험장

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

보유하고 있다. NATC는 내구도 단축화 분야에 있어서 가장 앞선 기술을 보유하고 있으며, 자체적으로 개발한 DFMV(Dynamic Force Measurement Vehicle)라는 장비를 이용하여 시험 노면의 굴곡을 측정하고, 가속도 기준을 설정하여 $\pm 3\text{dB}$ 개념 적용에 의해 주기적으로 비포장 노면의 가속도를 관리하고 있다.⁸

국방과학연구소에서도 비포장 시험 노면의 기하학적 형태를 측정하기 위해 Fig. 1과 같이 노면굴곡측정장비(profilometer)를 개발하여 운용 중에 있다. 개발한 장비는 자이로(gyro)와 레이저 변위센서(laser displacement sensor), 엔코더(encoder) 등을 측정 차량에 설치하여 노면굴곡을 측정하고, 재현 및 분석함으로써 노면 가속도 데이터를 획득한다.

본 논문에서는 자체 개발한 노면굴곡측정장비를 이용하여 기동시험장의 내구시험로 중에 하나인 야지(cross-country) 시험로에 대하여 3년간에 걸쳐 노면 굴곡 특성을 측정하고, 이를 분석한 가속도 데이터를 바탕으로 가속도 평균을 획득하였다. 또한, 야지시험로의 노면 특성 및 가속도 수준이 실제 기동장비가 운용되어질 기동로와 비교하여 시험로로서의 적절성 및 타당성을 결정하기 위하여, 국내 여러 지역의 기동로와의 유사도를 평가하였다.

그리고, 야지시험로의 노면 특성에 대한 유사도 평가를 통하여 공간 주파수(spatial frequency)별로 가속도 수준을 유지시킬 관리 구간을 설정함으로써 야지시험로의 표준화를 이루었다. 또한 시험로의 가속도가 관리 구간 내에서 항상 일정하게 유지되도록 하기 위하여 학습 능력과 분산 기억에 의한 강인성 등으로 인해 패턴 인식이나 시스템 동조



Fig. 1 Profilometer

(identification), 제어, 보간 등에 응용되는 신경망(neural networks)을 기반으로 한 노면 가속도 관리 프로그램을 개발하였다.

2. 가속도 관리구간 및 노면 유사도 평가

2.1 야지시험로 가속도 관리구간 설정

미국의 NATC에서는 DFMV라는 장비를 이용하여 노면의 프로파일(profile)을 측정하고, PSD(Power Spectrum Density)의 형태로 가속도를 분석하고 있다. 또한, 가속도 관리를 위한 방법으로 대상 노면에 대한 기준 PSD를 획득하고, 기준 PSD에 대한 $\pm 3\text{dB}$ 를 허용 구간으로 설정하여 이를 가속도 관리구간으로 설정하고 있다. 즉, 측정된 대상 노면의 PSD가 $\pm 3\text{dB}$ 의 허용 구간이 반영된 관리구간을 벗어나는 부분에 대하여 관리구간 내로 PSD를 수렴시키는 방법이다.

국방과학연구소의 기동시험장에서도 NATC와 거의 동일한 방법의 관리구간을 설정하였다.⁸ 즉, 노면굴곡측정장비를 이용하여 '01년부터 '03년에 걸쳐 야지시험로의 노면 PSD 데이터를 획득하여, 이에 대한 평균 PSD 값을 구한다. 그리고 각 평균 PSD 값의 $\pm 3\text{dB}$ 를 야지시험로 관리구간으로 설정하였다. Fig. 2는 설정된 야지시험로 관리구간을 나타낸 것으로, 이러한 방법은 야지시험로의 관리구간에 대해 현재 측정된 PSD 이탈량만을 관리하도록 구성한 것으로 전반적인 노면 특성은 향후에도 계속 유지시킬 수 있는 장점을 가진다.

그리고, 노면 굴곡 특성의 관리를 위해 기동시험장에서 분석하고 있는 공간주파수는 Table 1과 같이 총 52개로서, $0.0496\text{cycle/m}(20.16\text{m/cycle})$ 에서 $3.3635\text{cycle/m}(0.3\text{m/cycle})$ 까지 이다.

2.2 노면 유사도 평가

노면 특성을 나타내는 PSD 데이터는 노면을 구성하는 굴곡 주파수별 구성 비율과 가속 정도를 포함한다. 따라서, 노면 유사도 평가는 야지시험로의 PSD와 실제 기동장비가 배치될 여러 지역의 기동로에 대한 PSD를 비교하여 유사정도를 평가하는 것이며, 평가 목적은 야지시험로가 가지는 굴곡특

성 및 가혹도에 시험로로서의 객관성을 부여하고, 시험결과에 신뢰성을 향상시킬 수 있도록 하기 위한 것이다.

노면 유사도 평가를 위하여 PSD 형태와 관련된 패턴 유사성의 상관계수와 야지시험로의 52개 공간주파수별 관리구간 내에 포함되는 비교 기동로의 주파수별 PSD 개수의 비율을 이용한 관리구간 포함계수를 이용하여 유사계수를 획득한다.

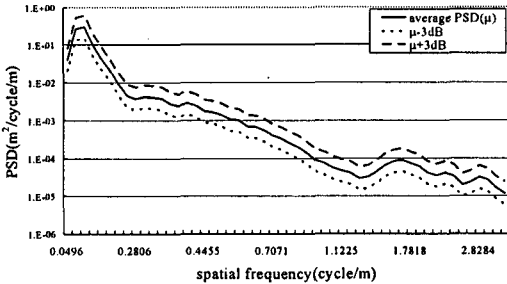


Fig. 2 Severity management section for cross-country

Table 1 Spatial frequency

f_i	cycle/m	f_i	cycle/m	f_i	cycle/m	f_i	cycle/m
f_1	0.0496	f_{14}	0.3746	f_{27}	0.7937	f_{40}	1.6818
f_2	0.0625	f_{15}	0.3969	f_{28}	0.8409	f_{41}	1.7818
f_3	0.0788	f_{16}	0.4205	f_{29}	0.8909	f_{42}	1.8878
f_4	0.0992	f_{17}	0.4455	f_{30}	0.9439	f_{43}	2.0000
f_5	0.1250	f_{18}	0.4720	f_{31}	1.0000	f_{44}	2.1189
f_6	0.1575	f_{19}	0.5000	f_{32}	1.0595	f_{45}	2.2449
f_7	0.1984	f_{20}	0.5298	f_{33}	1.1225	f_{46}	2.3784
f_8	0.2500	f_{21}	0.5613	f_{34}	1.1893	f_{47}	2.5198
f_9	0.2806	f_{22}	0.5946	f_{35}	1.2599	f_{48}	2.6697
f_{10}	0.2973	f_{23}	0.6299	f_{36}	1.3348	f_{49}	2.8284
f_{11}	0.3150	f_{24}	0.6674	f_{37}	1.4143	f_{50}	2.9966
f_{12}	0.3337	f_{25}	0.7071	f_{38}	1.4983	f_{51}	3.1748
f_{13}	0.3536	f_{26}	0.7491	f_{39}	1.5874	f_{52}	3.3635

2.2.1 PSD 패턴 상관계수(Correlation Index)

두 함수나 데이터 사이의 관계를 파악할 수 있도록 하는 것으로, 상관계수가 1이면 완전히 동일한 속성을 나타낸다. 또한, 0이면 완전히 별개의 속성을 의미하며, -1이면 정반대의 속성을 보인다.

식(1)과 같이 x 와 y 의 두 데이터 집합이 존재하면, 두 데이터 집합사이의 상관계수 $\rho_{x,y}$ 를 구하기 위한 수식은 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} x &= \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_n\} \\ y &= \{y_1, y_2, y_3, \dots, y_n\} \end{aligned} \quad (1)$$

μ_x 와 σ_x , μ_y 와 σ_y 는 x 와 y 데이터 집합에 대한 각각의 평균과 표준편차를 나타낸다.

$$\rho_{x,y} = \frac{Cov(X, Y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y} \quad (2)$$

여기서, $-1 \leq \rho_{x,y} \leq 1$ 이고,

$$Cov(X, Y) = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n (x_j - \mu_x)(y_j - \mu_y)$$

이러한 상관계수 $\rho_{x,y}$ 는 두 노면 PSD 데이터 사이의 값의 크기와는 무관하며, 각 노면이 갖는 공간주파수 상의 굴곡 특성의 비율에 해당한다고 할 수 있는 패턴 또는 속성과 밀접한 관계를 갖는다.

2.2.2 관리구간 포함계수(Inclusion Index)

기동시험장의 야지시험로 관리구간과 여러 지역에 산재해 있는 임의의 기동로 사이의 상관계수가 1이라고 해서, 야지시험로의 관리구간에 임의의 기동로가 갖는 주파수별 PSD 값이 모두 포함된다고 할 수 없다. 따라서, 공간주파수별로 PSD 수준에 대한 유사도를 평가하기 위해서 관리구간 포함계수를 설정한다. 관리구간 포함계수($\gamma_{x,y}$)는 식(3)과 같이 52개 공간주파수 영역에 설정된 야지시험로 관리구간에 임의의 기동로에 대한 PSD 값이 해당 주파수별로 포함되는 개수를 비율로 나타낸 것이다.

$$\gamma_{x,y} = \frac{n_{x,y}}{52} \quad (3)$$

단, $n_{x,y}$ 는 야지시험로(x) 관리구간에 y 기동로의 PSD값 포함 개수를 나타낸다.

Fig. 3은 '03년 3/4분기에 측정된 야지시험로 PSD 결과를 대상으로 관리구간 포함계수를 계산하기 위한 것으로, ■ 표시가 있는 1.0과 1.0595, 1.1225, 2.8784cycle/m에 해당하는 4개의 공간주파

수에서 관리구간을 이탈한 것으로 보인다. 즉, '03년 3/4분기 야지시험로 측정결과에 대한 관리구간 포함계수 $\gamma_{x,y}$ 는 0.9985이다.

2.2.3 유사계수(Similarity Index)

두개의 비교 노면의 유사도를 평가하기 위해서, 노면 속성에 해당하는 공간주파수별 PSD 형태의 유사도는 PSD 패턴 상관계수($\rho_{x,y}$)에서 정량화하고, 공간주파수별 가속도 정도라고 할 수 있는 노면 PSD 절대치에 대해서는 관리구간 포함계수($\gamma_{x,y}$)를 통해 수치화한다.

유사계수($\delta_{x,y}$)는 식(4)와 같이 두 가지 계수에 의해 최종 생성되며, 이를 통해 노면특성의 유사도를 최종 결정한다.

$$\delta_{x,y} = \alpha \times \rho_{x,y} + (1 - \alpha) \times \gamma_{x,y} \quad (4)$$

여기서, α 는 주관적인 판단에 의해 결정되어진 가중치로 0.3을 적용하였으며, 이는 PSD 형태에 대한 상관계수보다는 관리구간에 포함되는 계수에 더 의미를 둔 결과이다.

2.2.4 유사도 평가 결과

Fig. 4는 야지시험로 관리구간에 대한 M지역의 1기동로와 3기동로의 PSD 결과이다. 1기동로의 경우, $\rho_{x,y}$ 는 0.961이었으며, 가속도 관리구간을 이탈한 공간주파수가 전혀 없어 $\gamma_{x,y}$ 는 1.0이었다. 따라서 유사계수 $\delta_{x,y}$ 는 0.988로, 노면굴곡 구성비를 포함하여 가속도 크기에 대해서도 야지시험로와 가장 유사한 노면임을 확인하였다.

그리고 3기동로의 경우, $\rho_{x,y}$ 는 0.971로 야지시험로와 가장 유사한 형태의 노면굴곡 구성 비율을 가졌으며, 5개의 공간주파수가 관리구간을 이탈하여 $\gamma_{x,y}$ 는 0.904이었으며, 유사계수 $\delta_{x,y}$ 는 0.924이다.

Fig. 5는 S지역의 1기동로와 Y지역의 D기동로에 대한 결과이다. 대체로 관리구간과 유사한 노면 굴곡 구성비를 가지기는 하나, 높은 가속도를 나타내었다. 따라서 유사계수는 각각 0.509와 0.378 정도로 야지시험로의 관리구간과의 많은 차이를 보였

다. Fig. 6은 J지역의 1기동로와 D지역의 2기동로에 대한 결과를 보이는 것이다.

Table 2는 여러 지역의 기동로에 대한 상관계수와 포함계수, 유사계수를 나타낸 것으로, 각 기동로에서 산출된 계수를 단순 평균을 위한 유사계수 평균값은 0.748이었다. 그러나 공간주파수별로 각 기동로의 PSD 크기를 평균하여 이를 야지시험로 관리구간과 비교한 경우에 있어서는 대략 0.826의 유사계수를 가졌다. 이상과 같이 두 경우의 노면 유사도가 각각 74.8%와 82.6%로 야지시험로의 관리구간이 기동장비가 실제 운용되어질 노면의 특성과 유사함을 확인하였다.

3. 신경망 가속도 관리 프로그램 개발

야지시험로에 대한 3년간의 노면측정 결과를 기초로 야지시험로 관리구간을 설정하였으며, 국내 여러 지역의 기동로에 대한 노면특성과의 비교를 통해 관리구간의 유효성을 검증하였다.

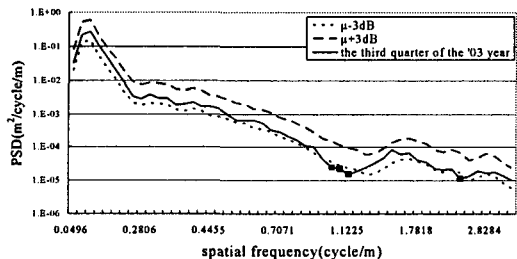


Fig. 3 Comparison of the third quarter of the '03 year for Cross-country course

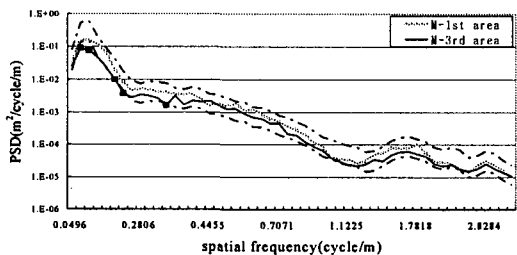


Fig. 4 Similarity grade for M-1st and M-3rd area

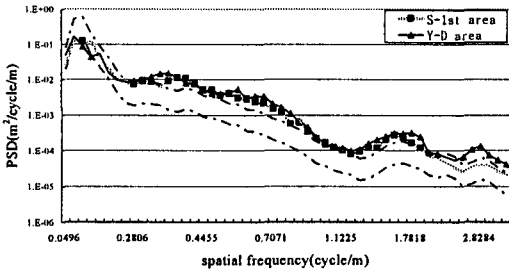


Fig. 5 Similarity grade for S-1st and Y-D area

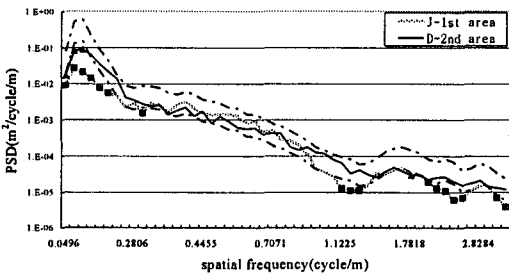


Fig. 6 Similarity grade for J-1st and D-2nd area

Table 2 Similarity Index

Task Road Name	Correlation Index($\rho_{x,y}$)	Inclusion Index($\gamma_{x,y}$)	Similarity Index($\delta_{x,y}$)
M-1st area	0.961	1.000	0.988
M-3rd area	0.971	0.904	0.924
S-1st area	0.935	0.327	0.509
Y-D area	0.902	0.154	0.378
J-1st area	0.942	0.673	0.754
D-2nd area	0.956	0.923	0.933
average	0.945	0.664	0.748
average PSD's	0.960	0.769	0.826

이상과 같이 가혹도를 유지시키기 위한 기준에 해당하는 관리구간이 효과적으로 설정되었다고 할 지라도 노면관리를 위한 기술의 체계화가 필요하다. 즉, 기존에는 시험로 관리자의 경험에 의해 노면 가혹도를 관리하는 실정이었으며, 노면 관리에

대한 기술화 및 문서화가 어려웠다. 따라서 효율적인 노면 가혹도 관리를 위해 관리구간을 벗어나는 공간주파수에 대해 PSD 이탈량 만큼을 자동적으로 제어하는 신경망 가혹도 관리 프로그램의 개발 필요성이 요구되었다.

3.1 PSD 영향 평가

다양한 주기와 진폭, 개수의 노면파형에 따라 실제 PSD에 미치는 영향을 파악하는 것이 아주 중요한 문제이지만, 이를 위해 기동로에 실제 다양한 주기와 진폭, 개수의 노면굴곡을 재현하여 PSD 변화량과 추세 등을 평가하는 것은 한계가 있다.

따라서 시뮬레이션을 통한 PSD 영향 평가를 수행하기 위하여 MATLAB을 이용하여 노면생성 프로그램을 개발하였다. 노면생성 프로그램은 노면굴곡측정장비에 의해 측정된 야지시험로의 노면 길이와 동일한 가상의 시험로에 완전한 평탄성을 부여하여, 측정장비에서 수행하는 샘플링율에 따라 필요한 노면파형을 필요한 위치에 생성시킨다. 이후에는 실제 노면굴곡측정에 사용되는 데이터처리 및 분석절차와 동일한 방법으로 수행된다.

이상과 같이 정현파형의 노면에 대해 주기별 및 진폭별, 개수별로 PSD 영향평가를 수행하였으며, 이를 바탕으로 신경망 가혹도 관리 프로그램의 학습 데이터로 구성된다.

실제 52개의 주기와 3가지의 진폭, 3가지의 개수를 각각 달리하여 PSD 영향 평가를 수행하여 총 468개의 데이터를 노면생성 프로그램의 입력으로 사용함으로써 PSD 변화량과 추세 등의 데이터를 획득하였다.

Fig. 7은 주기 1.06m/cycle, 진폭 0.15m, 개수 6개의 정현파에 대한 PSD 영향 평가의 예를 보인다.

3.2 프로그램 개발

신경망 가혹도 관리 프로그램은 야지시험로의 현재 시점에 대한 가혹도를 분석하여 관리구간과의 비교를 통해 PSD 이탈이 이루어진 공간주파수와 이탈량을 개발된 프로그램에 입력하면, 필요한 노면의 주파수 파형에 대한 진폭 및 개수 등의 인자들이 출력되도록 하는 것이다.

프로그램은 Microsoft Visual C++(version 6.0)에 의해 개발되었다.

3.2.1 구조

일반적으로 신경망에서는 은닉층의 뉴런 개수를 체계적으로 결정하기 위한 많은 연구가 있었으나, 일반적으로 시행 착오적으로 최적의 수를 결정하고 있다.¹⁰

개발된 신경망 가속도 제어 프로그램은 Fig. 8과 같이 가장 기본적인 형태로 입력층(input layer)과 은닉층(hidden layer), 출력층(output layer)으로 구성된 3계층 전방향 신경망 구조이다. 활성화 함수(activation function)로는 일반적으로 아날로그 출력의 장점이 있는 시그모이드(sigmoid) 함수를 채택하였다. 또한 은닉층의 뉴런(neuron) 개수는 일반적으로 시행착오적으로 결정하고 있지만, 본 연구에서는 대략 300개로 선정하였다.

개발된 프로그램의 입력 뉴런은 총 53개로 설정하였는데, 이것은 2장의 Table 1에서 보인 바와 같이 52개 공간주파수에 대한 각각의 PSD 관리구간 이탈량($Dpsd_f_i$, $1 \leq i \leq 52$)이 Table 3의 최대값 및 최소값에 의해 단극성(unipolar) 시그모이드 함수로 정규화(normalizing)되어 입력되도록 하였다. 또한, 입력 요소는 아니지만 사람의 편견과 같은 역할을 하는 1개의 바이어스(bias)를 두었다.

출력은 52개 공간주파수의 진폭과 개수를 각각 포함되도록 구성하여 총 104개의 뉴런을 가지는데, Table 4에 의해 정규화 되도록 하였다.

3.2.2 학습 알고리즘

본 연구에서 적용된 학습 알고리즘은 학습시간 단축과 지역 최소점에 빠질 가능성을 고려하여 모멘텀 역전파(Momentum Back-propagation) 알고리즘을 적용하였다. 일반적으로, 역전파 알고리즘에서의 연결강도의 변화량은 학습률(learning rate, α)과 각 층의 에러 값에 의해서만 결정된다. 그러나 학습률이 너무 크면 빠른 학습 결과를 얻을 수 있지만, 경우에 따라서는 최소 에러 범위에 수렴하지 못하여 학습이 원활하지 못하는 상황도 발생할 수 있다. 또한 학습률이 너무 작으면 연결강도 변화량

이 미세하여 최소 에러 범위에 수렴은 할 수 있으나 학습에 필요한 시간이 지나치게 길어진다는 단점이 있다. 따라서 학습률은 일반적으로 0.001에서 10사이의 값을 취하는 것으로 알려져 있다.

모멘텀 상수(β)는 학습 단계에서 연결강도를 변화시킬 때 이전 학습 단계의 연결강도 변화량을 부가적으로 적용하기 위한 것이다. 일반적으로 모멘텀 상수도 0에서 0.8사이의 값을 설정하는 것으로 알려져 있다.

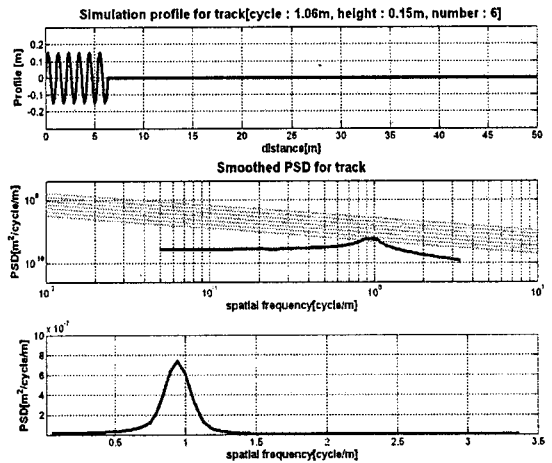


Fig. 7 Case in generation for road profile

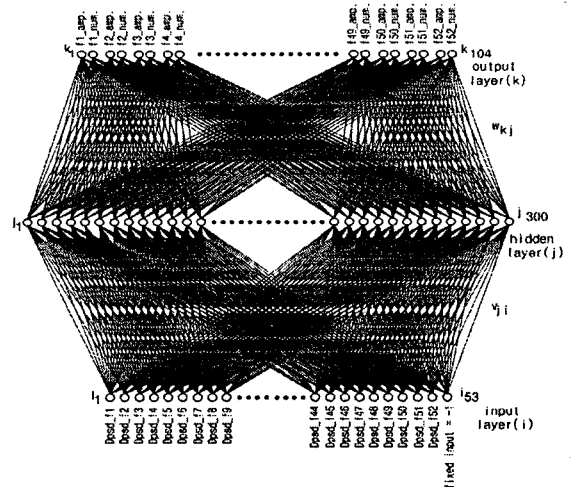


Fig. 8 Architecture of developed program

Table 3 Input data for normalizing

$Dpsd_{f_i}$	minimum	maximum	$Dpsd_{f_i}$	minimum	maximum	$Dpsd_{f_i}$	minimum	maximum	$Dpsd_{f_i}$	minimum	maximum
f_1	E-2	3E-1	f_{14}	E-5	8E-4	f_{27}	5E-8	5E-5	f_{40}	E-8	E-6
f_2	E-2	3E-1	f_{15}	E-6	2E-4	f_{28}	5E-8	3E-5	f_{41}	E-8	E-6
f_3	E-2	3E-1	f_{16}	E-6	2E-5	f_{29}	5E-8	E-5	f_{42}	E-8	E-6
f_4	E-3	5E-2	f_{17}	E-6	8E-5	f_{30}	5E-8	E-5	f_{43}	E-8	E-6
f_5	E-3	5E-2	f_{18}	E-6	4E-5	f_{31}	5E-8	6E-6	f_{44}	E-8	E-6
f_6	E-3	3E-2	f_{19}	E-6	4E-5	f_{32}	5E-8	5E-6	f_{45}	E-8	E-6
f_7	E-5	2E-3	f_{20}	E-6	3E-4	f_{33}	E-8	E-6	f_{46}	E-8	E-6
f_8	5E-5	3E-3	f_{21}	E-6	2E-4	f_{34}	E-8	E-6	f_{47}	E-8	E-6
f_9	5E-5	2E-3	f_{22}	E-7	E-4	f_{35}	E-8	E-6	f_{48}	E-8	E-6
f_{10}	5E-5	E-3	f_{23}	E-7	6E-5	f_{36}	E-8	E-6	f_{49}	E-8	E-6
f_{11}	E-5	8E-4	f_{24}	E-7	5E-5	f_{37}	E-8	E-6	f_{50}	E-8	E-6
f_{12}	E-5	8E-4	f_{25}	5E-8	4E-5	f_{38}	E-8	E-6	f_{51}	E-8	E-6
f_{13}	E-5	8E-4	f_{26}	5E-8	5E-5	f_{39}	E-8	E-6	f_{52}	E-8	E-6

Table 4 Output data for normalizing

$f_{i_{imp}}$	minimum	maximum	$f_{i_{num}}$	minimum	maximum	$f_{i_{imp}}$	minimum	maximum	$f_{i_{imp}}$	minimum	maximum
f_1	0.50	5.00	f_1	0	3	f_{27}	0.05	0.32	f_{27}	0	10
f_2	0.30	3.00	f_2	0	3	f_{28}	0.04	0.30	f_{28}	0	10
f_3	0.30	3.00	f_3	0	3	f_{29}	0.04	0.25	f_{29}	0	10
f_4	0.25	2.30	f_4	0	3	f_{30}	0.03	0.25	f_{30}	0	10
f_5	0.20	1.80	f_5	0	3	f_{31}	0.02	0.25	f_{31}	0	15
f_6	0.16	1.44	f_6	0	5	f_{32}	0.02	0.25	f_{32}	0	15
f_7	0.12	1.08	f_7	0	5	f_{33}	0.02	0.23	f_{33}	0	15
f_8	0.10	1.00	f_8	0	5	f_{34}	0.02	0.21	f_{34}	0	15
f_9	0.09	0.81	f_9	0	5	f_{35}	0.02	0.20	f_{35}	0	15
f_{10}	0.08	0.81	f_{10}	0	5	f_{36}	0.02	0.20	f_{36}	0	15
f_{11}	0.08	0.80	f_{11}	0	5	f_{37}	0.02	0.18	f_{37}	0	15
f_{12}	0.07	0.80	f_{12}	0	5	f_{38}	0.02	0.17	f_{38}	0	15
f_{13}	0.07	0.80	f_{13}	0	5	f_{39}	0.02	0.16	f_{39}	0	15
f_{14}	0.07	0.80	f_{14}	0	5	f_{40}	0.02	0.15	f_{40}	0	15
f_{15}	0.07	0.70	f_{15}	0	5	f_{41}	0.02	0.14	f_{41}	0	20
f_{16}	0.07	0.60	f_{16}	0	5	f_{42}	0.02	0.13	f_{42}	0	20
f_{17}	0.06	0.55	f_{17}	0	5	f_{43}	0.02	0.13	f_{43}	0	20
f_{18}	0.06	0.55	f_{18}	0	5	f_{44}	0.02	0.12	f_{44}	0	20
f_{19}	0.06	0.50	f_{19}	0	5	f_{45}	0.02	0.12	f_{45}	0	20
f_{20}	0.06	0.50	f_{20}	0	10	f_{46}	0.02	0.11	f_{46}	0	20
f_{21}	0.06	0.45	f_{21}	0	10	f_{47}	0.02	0.15	f_{47}	0	20
f_{22}	0.06	0.45	f_{22}	0	10	f_{48}	0.02	0.12	f_{48}	0	20
f_{23}	0.05	0.40	f_{23}	0	10	f_{49}	0.02	0.12	f_{49}	0	20
f_{24}	0.05	0.40	f_{24}	0	10	f_{50}	0.02	0.12	f_{50}	0	20
f_{25}	0.05	0.35	f_{25}	0	10	f_{51}	0.02	0.12	f_{51}	0	20
f_{26}	0.05	0.35	f_{26}	0	10	f_{52}	0.02	0.20	f_{52}	0	20

신경망 노면 가혹도 관리 프로그램에서 적용된 학습률과 모멘텀 상수는 시행착오적인 방법을 사용하였으며, 각각 0.7과 0.5로 선정하였다. 또한 학습 완료조건은 학습 횟수가 200,000번에 도달하거나 정규화된 평균 에러(E_{max})가 0.3 이하이면 학습이 완료되도록 하였다.

이는 기동시험장의 내구도시험에 대한 요구를 고려하여 분기별로 수행하는 내구도 가혹도 관리를 지나치게 다양한 공간주파수에서 빈번하게 유지시킬 필요성을 감소시키기 위하여 평균 에러율이 다소 커더라도 상대적으로 넓은 대역폭의 관리구간이 흡수할 수 있도록 하였다.

학습에 대한 과정은 다음과 같다.

<step 1> 각 층의 연결강도(v, w)와 에러 E 를 0으로 초기화한다. 그리고 각 층의 초기 연결강도는 -0.5~0.5의 값으로 랜덤하게 발생시킨다.

<step 2> 학습 데이터 z 를 입력한 후, 각 층의 출력을 계산하며 계산식은 식(5)와 같다. 단극성 시그모이드 함수의 경사도(λ)를 1로 하여 적용하였으며, k 는 학습 데이터 수로서 PSD 영향평가를 통한 468개 데이터 중에서 208개를 학습 데이터로 확정하여 적용하였다.

<step 3> 학습 데이터의 목표값(d_k)과 출력값(o_k)을 기초로 식(6)과 같이 에러 E 를 계산한다.

<step 4> 단극성 시그모이드 함수를 이용한 출력층(δ_o)과 은닉층(δ_y)의 출력에 대한 에러 값을 식(7)과 식(8)에 의해 계산한다.

<step 5> 변화량 Δw^k 를 식(9)와 같이 저장하여, 출력층의 연결강도를 조정한다.

<step 6> 변화량 Δv^k 를 식(10)과 같이 저장하여, 은닉층의 연결강도를 조정한다.

<step 7> 트레이닝 셋에서 계속된 학습 데이터가 있는가를 확인한다. 있으면 <step 2>로 가서 $k \leftarrow k + 1$ 로 가서 위의 과정을 반복하고, 없으면 다음 단계를 수행한다.

<step 8> 에러 E 와 설정된 최대 에러 범위 E_{max} 를 비교하여, $E < E_{max}$ 이면 학습을 중단하고, 그렇지 않으면 <step 2>로 가서 E 를 0로 초기화하여 계속 수행한다.

$$NET_y = z_k v_k^T$$

$$y = f(NET_y) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda NET_y)}$$

$$NET_o = y_k w_k^T$$

$$o = f(NET_o) = \frac{1}{1 + \exp(-\lambda NET_o)}$$

$$E \leftarrow E + \frac{1}{2} (d_k - o_k)^2$$

$$\delta_{ok} = (d_k - o_k) f'(NET_y)$$

$$= o_k (d_k - o_k) (1 - o_k)$$

$$* f'(NET_y) = o_k (1 - o_k)$$

$$\delta_{yj} = w_j^t \delta_{ok} f'(NET_y)$$

$$= y_j (1 - y_j) \sum_{k=1}^K \delta_{ok} w_{kj}$$

$$* f'(NET_y) = y_j (1 - y_j)$$

$$w^{k+1} = w^k + \Delta w^k$$

$$= w^k + \alpha \delta_o y^k + \beta \Delta w^{k-1}$$

$$v^{k+1} = v^k + \Delta v^k$$

$$= v^k + \alpha \delta_y z^k + \beta \Delta v^{k-1}$$

3.2.3 학습

이상의 방법에 의해 208개의 학습 데이터에 대한 학습을 수행하였으며, 대략 136,000번 정도의 학습에서 평균 에러율이 0.3이하로 감소되어 학습이 종료되었으며, Fig. 9와 같은 평균 에러율 추세를 확인할 수 있었다.

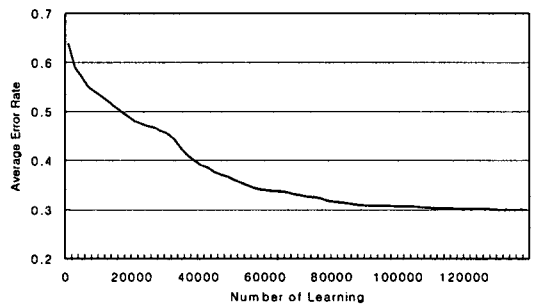


Fig. 9 Trend of average error rate

3.3 실험 및 결과

이상과 같이 시뮬레이션에 의한 PSD 영향평가를 통해 208개의 학습 데이터를 구축하였으며, 이를 신경망 노면 가혹도 관리 프로그램에 학습시켰다. 개발된 프로그램의 유효성을 검증하기 위하여 비포장 시험로의 약 300m 구간에 굴삭기를 이용하여 개략적인 노면 정지 작업을 수행하였다.

정지 작업이 완료된 비포장 노면에 대하여 노면 굴곡측정장비를 이용하여 초기 조건에 해당될 수 있는 노면을 측정하여 Fig. 10과 같이 노면 프로파일과 가혹도 데이터를 획득하였다.

Fig 11은 Fig. 10의 초기 노면 조건에서 의도적으로 저주파수의 공간주파수에 대한 PSD량을 증가시키기 위한 신경망의 출력값과 실제 노면을 재현하여 측정된 값을 비교한 실험을 한 경우이다. 즉 6.4m/cycle(0.1563cycle/m)의 공간주파수에 대해 0.05 m³/cycle만큼의 PSD 값을 증가시키는 것으로 신경망 노면 가혹도 관리 프로그램은 0.32m의 정현파 진폭을 3개 생성하도록 출력하였으며, 이때의 PSD 증가량은 시뮬레이션을 통해 0.04m³/cycle 정도임을 확인하였다.

그러나 실제 굴삭기를 이용하여 재현된 노면은 진폭이 0.5m에 가까우며, 이는 실제 재현상의 어려움이 반영된 것이다. 재현된 실제 노면을 측정하여 획득된 공간주파수별 PSD 값은 Table 5와 같으며, PSD 피크값 기준으로 실제 요구 PSD값보다는 4.8 배 정도 더 가혹한 노면을 구성된 예이다.

Fig. 12는 초기 노면 조건에서 중주파수 영역에 해당하는 예로서, 2.5m/cycle의 공간주파수에 대해 0.001m³/cycle만큼 PSD 값을 증가시키기 위한 것이다. 신경망은 0.18m 진폭에 2개의 파형을 생성시킬 것을 출력하였으며, 대체로 만족스러운 결과를 나타내었다.

그러나 이 경우에도 Fig. 12와 같이 진폭이 0.3m 정도로 재현되었으며, Table 6과 같이 실제 작업된 노면의 가혹도는 목표치 보다 약 3배 이상으로 측정되었다.

Fig. 13은 고주파수에 대한 경우로서, 0.4m/cycle의 공간주파수에 대해 0.00003m³/cycle만큼 PSD 값을 증가시키는 경우이다. 이 경우에도 신경망 출력

은 만족스러운 결과를 나타내었으나, 실제 노면은 4배 가량의 가혹도가 심한 것으로 재현되었다.

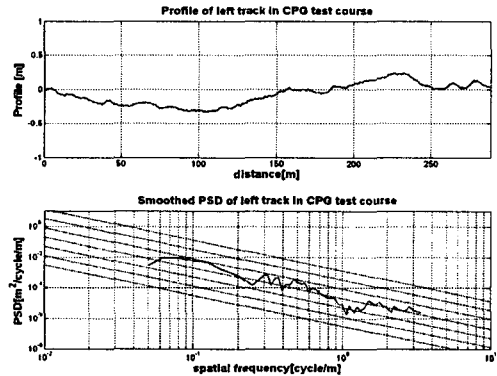


Fig. 10 Profile and PSD data of initial condition

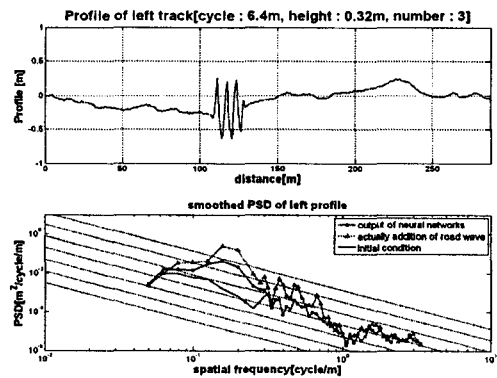


Fig. 11 Profile and PSD data of low frequency

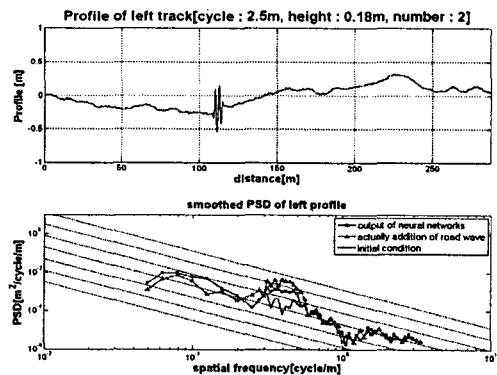


Fig. 12 Profile and PSD data of medium frequency

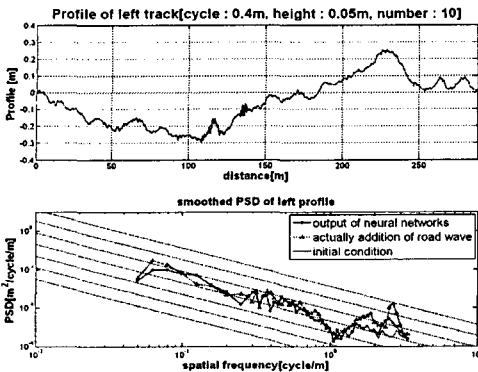


Fig. 13 Profile and PSD data of high frequency



Fig. 14 Generation for road profile

Table 5 Comparison of PSD for low frequency

Spatial frequency (m/cycle)	Object value (m ³ /cycle)	Neural output (m ³ /cycle)	Measuring value (m ³ /cycle)
0.1250		0.03	0.04
0.1563	0.05		
0.1575		0.04	0.24
0.1984		0.02	0.15

Table 6 Comparison of PSD for medium frequency

Spatial frequency (m/cycle)	Object value (m ³ /cycle)	Neural output (m ³ /cycle)	Measuring value (m ³ /cycle)
0.3969		0.001	0.004
0.4000	0.001		
0.4205		0.001	0.003
0.4455		0.001	0.003

Table 7 Comparison of PSD value for high frequency

Spatial frequency (m/cycle)	Object value (m ³ /cycle)	Neural output (m ³ /cycle)	Measuring value (m ³ /cycle)
2.3784		0.00002	0.00001
2.5000	0.00003		
2.5198		0.00003	0.00011
2.6697		0.00002	0.00017

이상과 같은 실험을 통해 노면 가속도 관리 프로그램의 알고리즘에 대한 유효성과 학습의 적절성은 검증하였으나, 이를 실제로 노면에 반영하여 재현하는 기술에 대해서는 많은 어려움이 있는 것으로 판명되었다.

4. 결론

본 논문은 기동시험장에서 수행하는 내구도시험의 신뢰성을 향상시키기 위해 시험로의 표준화 및 가속도의 유지관리에 대한 연구를 나타낸 것이다.

그 결과, 국내 최초로 노면굴곡을 직접 측정하는 방식의 트레일러형 노면굴곡측정장비를 개발하였으며, 시험로의 가속도 기준에 해당하는 관리구간을 설정하여 실제 개발된 장비가 운용되어질 지역의 기동로와 비교하여 노면 특성에 대한 유사계수를 적용함으로써 유사도를 평가하였다.

또한, 설정된 시험로 관리구간에 가속도를 유지시키기 위하여 신경망 가속도 관리 프로그램을 개발하여 관리구간에서 벗어나는 공간주파수의 PSD 량에 대한 실제 노면의 정량적인 프로파일을 자동적으로 생성하도록 하였다.

향후에는 생성된 프로파일을 보다 유사하게 실제 노면에 적용시키기 위해 노면 관리 작업에 대한 기능적인 숙련이 필요하다.

참고문헌

1. Cannon, W. H., "Determining Vehicle Sensitivity to Changes in Test - Course Roughness," IEST 46th Annual Technical Meeting and Exposition, pp30-37, 2000.

2. Dodds, C. J. and Robson, J. D., "The description of the road profile roughness," *Journal of Sound and Vibration*, Vol.31, pp175-183, 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., 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. Ashmore, S. C. and Hodges H. C., "Dynamic Force Measurement Vehicle(DFMV) and Its Application to Measuring and Monitoring Road Roughness," *Vehicle, Tire, Pavement Interface*, ASTM STP 1164 American Society for Testing and Materials, pp.69-96, 1992.
9. 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.
10. Mitra, S. and Pal, S. K., "Self-Organizing Neural Network As A Fuzzy Classifier," *IEEE Trans. on Sys., Man. and Cybern.*, Vol.24, No.3, pp.385-398, 1994.