

3차원 노면굴곡 측정을 통한 운용지역 비포장 기동로의 가혹도 DB 구축

이정환^{*1)} · 이상호¹⁾ · 조진우²⁾ · 강이석³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

²⁾ 국방과학연구소 연구계획부

³⁾ 충남대학교 기계설계공학과

The Severity DB Construction for Unpaved Road Through Measuring 3D Road Profile

Jeonghwan Lee^{*1)} · Sangho Lee¹⁾ · Jinwoo Cho²⁾ · Esok Kang³⁾

¹⁾ The 5th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

²⁾ The Research and Development Programming Directorate, Agency for Defense Development, Korea

³⁾ Department of Mechanical Design Engineering, Chungnam National University, Korea

(Received 23 September 2016 / Revised 7 March 2017 / Accepted 24 March 2017)

ABSTRACT

The profile of unpaved road is an important issue in the reliability of endurance test. Efforts on measuring 2D road profile and analyzing the severity have been continued in the study of performing reliable endurance test evaluations through reflecting the results of such measurement and analysis. However, 2D road profile has limitation in measuring the profile in the road width direction because data is obtained along the trailer wheel track. Therefore, in order to measure 3-dimensional shape of road surface and construct severity DB of 3D road profile, Changwon Proving Ground(CPG) of Agency for Defense Development(ADD) developed 3D profilometer which is composed of laser scanner, IMU, GPS, encoder and so on. This paper focuses on the analysis of unpaved road severity using 3D road profile for army operation roads. This results will be used to manage test courses severity of CPG.

Key Words : 3D Profilometer(3차원 노면굴곡측정장비), Road Severity(노면 가혹도), Army Operation Road(군 기동로)

1. 서론

군용 기동장비의 내구도 주행시험 신뢰성에 중요한 영향을 미치는 인자 중 하나는 차량 주행시 노면굴곡(Road Profile)에 의한 진동 환경으로, 이는 차량, 부품 및 탑재물 등의 피로 손상도(Fatigue Damage)에 큰 영

* Corresponding author, E-mail: jhlee74@add.re.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

향을 미친다^[1,2]. 그러므로 주행 노면의 측정, 정량적 평가 및 노면 특성 분석기술 등은 신뢰성 있는 내구도 주행시험을 위해 필수적인 기술이다.

민수 완성차 업체의 경우, 벨지언(Belgian) 노면 등과 같은 정형화된 가속 내구시험도들을 조합하여 고객 사용조건 및 부하를 등가화하여 가속 내구시험을 수행하는데 반해, 군용 기동장비의 내구도 시험은 운용환경이 험지임을 고려하여, 비포장으로 조성된 내구시험로에서 시험을 수행하고 있다.

따라서 비포장 시험로의 노면굴곡을 측정하고, 가속도를 분석하여 내구도 주행시험에 반영하려는 노력은 전세계적으로 오랫동안 연구되어 왔다. 미국의 군 시험장인 ATC(Aberdeen Test Center)는 1970년대부터 노면굴곡측정장비를 개발하여, 현재에는 트레일러형 장비를 개발하여 운용하고 있다^[3]. 그리고 미국의 민간 시험장인 NATC(Nevada Automotive Test Center)는 DFMV(Dynamic Force Measurement Vehicle) 장비를 개발하여 노면굴곡 측정과 가속도 분석을 수행하고 있고^[4], 일본 방위청 소속의 TRDI(Technical Research and Development Institute)는 1990년대 노면굴곡측정장비를 개발하여 측정과 분석을 수행하고 있다^[5]. 또한, 국방과학연구소 창원시험장(Changwon Proving Ground)에서도 Fig. 1과 같이 자체적으로 노면굴곡측정장비를 개발하여 노면굴곡 측정, 가속도 분석 및 내구시험로 유지/관리를 수행하고 있다^[6].

상기의 노면굴곡측정장비는 모두 주행거리에 대한 수직방향 변위를 계측하는 2차원 측정장비이다. 즉, 측정센서가 설치된 트레일러 차륜의 1개 혹은 2개 라인에 대한 수직방향 굴곡만 측정하므로, 분석된 노면의 가속도는 트레일러 차륜의 주행궤적에 의존한다. 이는 일반적으로 횡방향 노면굴곡의 큰 변화가 없어 측정 주행궤적이 노면 가속도에 큰 영향을 미치지 않는 포장로나 횡방향의 노면굴곡을 알고 있어, 측정한 데이터로 횡방향 굴곡을 추정할 수 있는 가진로, 파형로 등과 같은 인공 노면과는 달리, 자연스럽게 형성된 비포장 노면의 경우는 노폭에 대한 노면굴곡이 상이한 경우가 많아, 1개 혹은 2개의 노면굴곡 측정만으로 노폭 전체를 대표하기는 어렵기 때문에 3차원 노면굴곡의 측정이 반드시 필요하다. 그리고 최근 창원시험장의 가상시험(Virtual Test) 환경 구축과 관련하여 추진 중인 디지털 노면 구성을 위해서도 비포장 노면을 3차원으로 모델링하여 구성하는 것이 해석(Simulation) 결과의 정밀도 향상을 위해서도 필수적이다.



Fig. 1. 2D road profile measuring system of CPG

또한, 3차원 노면굴곡 기반의 가속도 분석 기술의 경우, 민수 분야에서의 연구 자료는 컴퓨터 시뮬레이션을 위한 가상노면 생성, 포장 노면의 유지 관리 등으로 제한되어 있고, 군수 분야에서 미국 ATC 등에서 연구를 하고 있으나, 보안의 이유로 공개가 되지 않는 실정이다.

그러므로 본 논문에서는 국방과학연구소 창원시험장에서 3차원 노면굴곡의 가속도 분석 및 가상시험환경구축의 목적으로 개발한 3차원 노면굴곡측정장비를 이용하여, 전방 군 운용지역 비포장 기동로에 대한 3차원 노면굴곡을 측정하고 운용지역 노면 특성 분석 및 노면 가속도 데이터베이스를 구축한 결과를 나타내었다.

2. 3차원 노면굴곡측정장비 구성

본 논문에서는 창원시험장에서 개발한 비포장 노면굴곡 측정을 위한 3차원 노면굴곡측정장비를 이용하여 군 운용지역 비포장 기동로에 대한 노면굴곡을 측정하였는데, 이는 다음과 같이 측정 하드웨어와 운용 소프트웨어로 구성된다.

2.1 측정 하드웨어 구성

3차원 노면굴곡 측정장비는 4.6 m의 비포장 노폭을 5 cm 간격으로 측정하기 위하여, 차량 전방에 2대의 레이저 스캐너(Laser Scanner)가 설치되어 있으며, 측정시 전방 노면 환경과 하방의 노면 프로파일에 대한 영상을 동시에 획득하기 위한 CCD 카메라가 설치되었다. 그리고 주행거리 측정장치는 5 cm × 5 cm 간격으로 데이터 획득을 위한 기준점(Trigger) 제공과 실제 주행거리를 측정하며, 관성항법장치(GPS/INS)는 DGPS를 이용하여 차량의 정밀위치를 구하고, 측정 차량의 움직임에 대한 데이터를 획득하여 차체 거동에 의한 노면굴곡 측정오차를 보정하기 위해 설치하였고, 데이

터 획득장치는 3차원 노면굴곡, 주행거리, 정밀위치/차량자세 등과 영상획득을 위해 2대를 설치하였다. 이는 Fig. 2와 같다.



Fig. 2. 3D road profilometer of CPG

2.2 운용 소프트웨어

운용 소프트웨어는 각 하드웨어로부터의 데이터를 동기화하여 실시간으로 획득하기 위한 모드로, 데이터 획득을 위한 채널 설정기능, 데이터 획득 기능, 실시간 모니터링 기능, 데이터 저장기능, 데이터 재생기능 및 출력(Export) 기능 등이 있다.

분석/보상 소프트웨어는 NI(National Instrument)사의 랩뷰(LabView) 프로그램을 활용하여 3차원 노면굴곡을 도시하고, 차량의 거동에 의한 레이저 스캐너의 기울임 각을 보정하도록 구성되어 있다. 주요 기능은 이상 신호 제거, 차량자세가 보정된 수직거리와 노폭 및 주행거리를 3차원 메쉬(Mesh)형태로 표시하고 결과를 확인하는 기능 등이 있다.

3. 운용지역 3차원 노면굴곡 측정 및 가혹도 DB 구축

3.1 3차원 노면굴곡 측정

전방 군 운용지역 주요 기동로의 노면 가혹도를 비교 및 분석하기 위하여, 서부 1개 지역, 중부 2개 지역, 동부 1개 지역의 총 4개 지역, 주요 8개 비포장 기동로에 대한 3차원 노면굴곡을 측정하였다.

세부 측정지역과 기동로는 Table 1과 같으며, Fig. 3 ~ Fig. 6은 각각 ‘○○’지역의 ‘a’기동로, ‘□□’지역의 ‘b’기동로, ‘△△’지역의 ‘d’기동로, ‘XX’지역의 ‘f’기동로에 대한 3차원 노면 프로파일 측정 결과 중 일부를

나타내었다. 이는 4.6 m 노폭에 대한 3차원 노면굴곡 데이터 중 운용지역에서 가장 많이 활용되는 소형전술차량의 폭이 2.6 m임을 감안하여 좌측 끝단에서 1 m 지점에 해당하는 데이터에 대해, 기동장비 주행 시 노면 진동 환경에 직접적인 영향을 받는 0.3 ~ 20 m/cycle 주기의 성분만을 추출하기 위하여 대역통과 필터링을 수행한 결과이다⁷⁾.

‘a’기동로의 경우, 약 2 km 거리에 대해 서쪽방향으로 측정되었고, 시작점과 종료점의 고도차가 약 -15 m로 전체적으로 약간의 내리막 형태를 보이고, ‘b’기동로는 약 0.7 km 거리에 대해 남쪽방향으로 측정되었고, 시작점과 종료점의 고도차는 약 4 m로 전체적으로 약간의 오르막을 지나 큰 편차는 없는 것을 알 수 있다.

Table 1. Measuring region for army operation area

측정지역	기동로
‘○○’지역	‘a’ 기동로
‘□□’지역	‘b’ 기동로
	‘c’ 기동로
‘△△’지역	‘d’ 기동로
	‘e’ 기동로
‘XX’지역	‘f’ 기동로
	‘g’ 기동로
	‘h’ 기동로

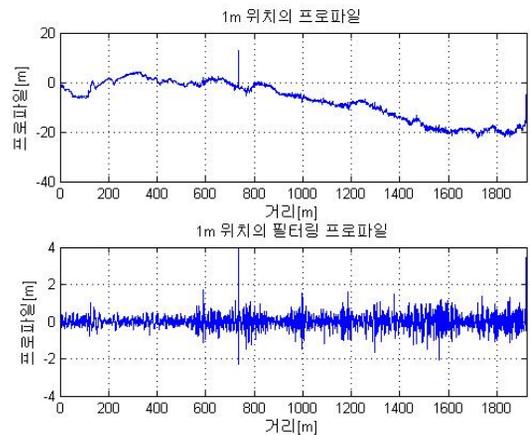


Fig. 3. 3D road profile of ‘a’ maneuvering road

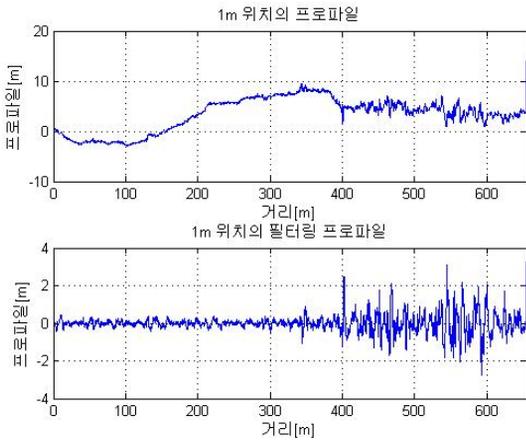


Fig. 4. 3D road profile of 'b' maneuvering road

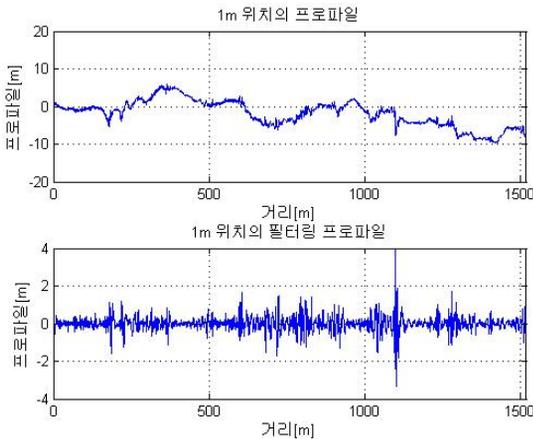


Fig. 5. 3D road profile of 'd' maneuvering road

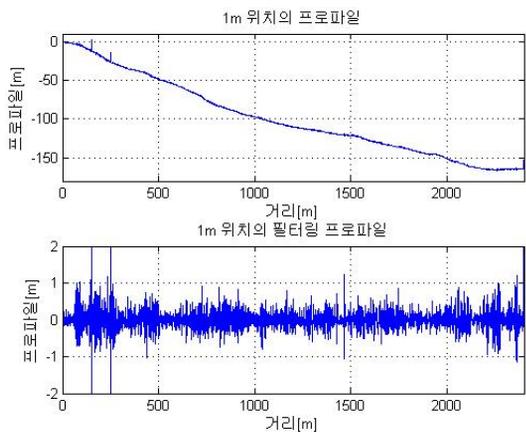


Fig. 6. 3D road profile of 'f' maneuvering road

그리고 'd'기동로는 약 1.5 km 거리에 대해 북동방향으로 측정되었고, 시작점과 종료점의 고도차가 약 -7 m로 전반적인 평지와 약간의 내리막 형태를 보이고 있으며, 'f'기동로는 약 2.4 km 거리에 대해 남동방향으로 측정되었고, 시작점과 종료점의 고도차가 약 160 m로 전체적으로 내리막의 형태를 보이는 것을 알 수 있다.

3.2 3차원 노면 가속도 분석

이와 같이 0.3 ~ 20 m/cycle 주기에 대해 대역 통과된 노면굴곡 데이터는 노면 가속도를 평가하는 실질적인 데이터로 사용되며, 이를 이용하여 RMS(Root Mean Square) 및 공간 주파수축 상의 전력 밀도 스펙트럼(PSD, Power Spectral Density)이라는 평가 변수로 변환된다. 즉, RMS 및 PSD가 노면의 가속 정도를 나타내게 되는데, 특히 RMS에 의한 노면 가속도의 표시는 공간 주파수의 변동이 거의 없는 정형화된 가진로에서 주로 사용되어지나, PSD는 공간주파수별 가속도를 나타낼 수 있기 때문에 비포장 노면에서 가속도 평가 데이터로 활용되어 진다.

3.2.1 PSD 분석

3차원 노면굴곡 측정결과를 이용하여 4.6 m의 노폭 즉, 5 cm 간격의 93개 프로파일에 대한 PSD를 분석하였다. 주파수 분석을 위해 측정된 프로파일 데이터를 랜덤 신호의 분석시 일반적으로 사용되는 해닝 윈도우(Hanning Window)를 적용하였다. 또한, 관심 공간주파수 대역만을 강하게 추출하기 위하여 고차인 5차 버터워스(Butterworth) 대역 통과 필터로 관심 대역을 추출하였으며, FFT 블록 사이즈는 1024로 설정하였다. 그리고 PSD를 계산하였을 때, 고주파수에서 스펙트럼 요동(Fluctuation of PSD)을 줄이기 위하여 ISO 8608 표준의 권고에 따라 식 (1)에 의한 평균화 과정(Averaging Process) 즉, PSD Smoothing기법을 적용하였다^[8].

Smoothed PSD는 다음 식에 의해 계산된다.

$$G_s(i) = \frac{[(n_L + 0.5) \cdot B_e - n_l(i)]}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{\sum_{j=n_L+1}^{n_H-1} G(j) \cdot B_e}{n_h(i) - n_l(i)} + \frac{[n_h(i) - (n_H - 0.5) \cdot B_e] \cdot G(n_H)}{n_h(i) - n_l(i)} \quad (1)$$

where

$$n_H = INT\left(\frac{n_h(i)}{B_e} + 0.5\right), \quad n_L = INT\left(\frac{n_l(i)}{B_e} + 0.5\right)$$

여기서 B_e 는 주파수 해상도 대역폭(Frequency Resolution Bandwidth)으로 0.0101 cycle/m의 값을 가지며, n_k 및 n_f 는 ISO 8608 표준에 표로 제시되어 있다.

Fig. 7과 Fig. 8은 측정 기동로와 운용지역에 대해 각 측정 노면의 93개 프로파일 PSD 분석 결과를 나타낸 것이다. 저주파수(0.0442 ~ 0.3 cycle/m)에서는 'a'기동로가 가혹도가 높은 편이고, 중주파수(0.3 ~ 1.0 cycle/m)에서는 'c'기동로, 고주파수(1.0 ~ 3.2678 cycle/m)에서는 'h'기동로의 가혹도가 높게 나타났다. 그리고 이를 운용지역 측면에서 분석하면, 저주파수와 중주파수에서는 'OO'지역 > '□□'지역 > '△△'지역 > 'XX'지역, 고주파수에서는 'OO'지역 > '□□'지역 > 'XX'지역 > '△△'지역 순으로 분석되었고, 이는 Table 2와 Table 3과 같다.

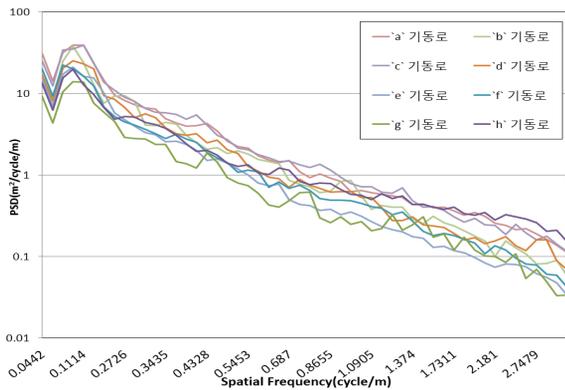


Fig. 7. PSD analysis for maneuvering roads

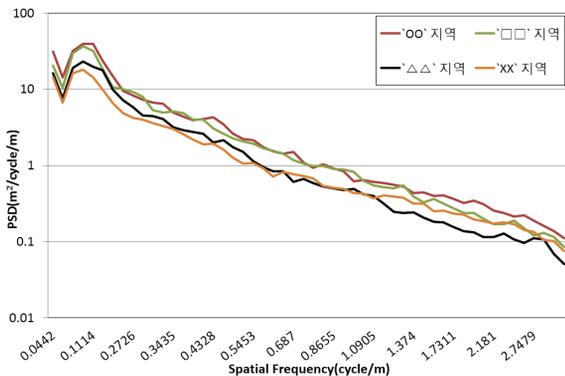


Fig. 8. PSD analysis for army operation area

Table 2. PSD results for army operation area

Severity	Low freq.	Middle freq.	High freq.
↑	'OO' region	'OO' region	'OO' region
	'□□' region	'□□' region	'□□' region
	'△△' region	'△△' region	'XX' region
↓	'XX' region	'XX' region	'△△' region

Table 3. PSD results for maneuvering roads

Severity	Low freq.	Middle freq.	High freq.
↑	'a' road	'c' road	'h' road
	'c' road	'a' road	'c' road
	'b' road	'd' road	'a' road
	'd' road	'b' road	'b' road
	'f' road	'h' road	'd' road
	'e' road	'f' road	'f' road
↓	'h' road	'e' road	'e' road
	'g' road	'g' road	'g' road

3.2.2 RMS 분석

PSD 분석결과와의 비교를 위하여 93개 프로파일에 대한 RMS 값의 평균과 표준편차를 활용하여 분석하였다. Fig. 9와 Fig. 10은 각각 'OO'지역의 'a'기동로와 '□□'지역의 'b'기동로에 대해 측정 라인의 RMS 값 평균을 도시한 것이다. Fig. 9의 경우, RMS 값이 상호 대칭성을 가지는데, 기동장비의 휠이 지나다니는 정도와 관련이 있는 것으로 판단되고, Fig. 10의 경우, 궤도차량의 정지간 사격을 위해 제자리 회전이 빈번하여 노면 파임이 심한 곳으로, 대칭성의 특성이 약하고, 또한 이동간 사격으로 횡방향으로 상이한 프로파일 특성을 가지는 것을 알 수 있다.

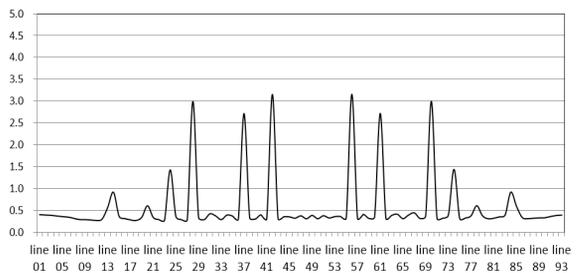


Fig. 9. RMS analysis for 'a' maneuvering road

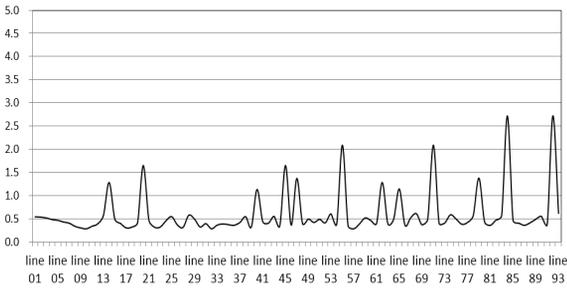


Fig. 10. RMS analysis for 'b' maneuvering road

3.2.2.1 RMS 값의 통계적 분석

3차원 노면굴곡 93개 프로파일에 대하여 각 기동로와 운용지역의 RMS 값의 평균, 표준편차 등 통계적 분석결과를 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 'g'기동로의 가혹도가 가장 낮았고, 'c'기동로가 가장 높았다. 그리고 운용지역의 가혹도 수준은 '□□'지역 > '○○'지역 > '△△'지역 > 'XX'지역 순으로 나타났다.

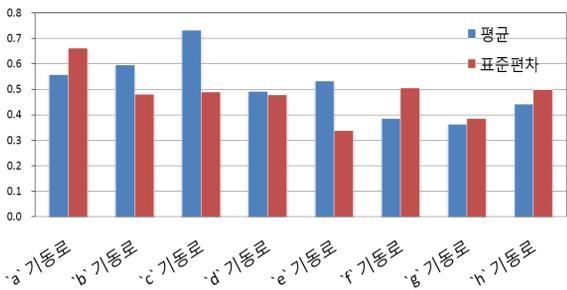


Fig. 11. RMS analysis for maneuvering roads

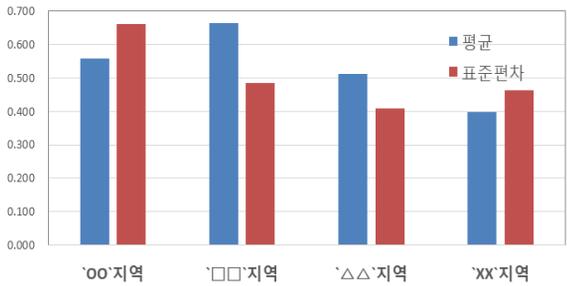


Fig. 12. RMS analysis for army operation area

3.2.2.2 RMS 값의 누적 카운팅 분석

Fig. 13과 Fig. 14는 각 기동로와 운용지역에 대해 측정 라인에 대한 RMS 값의 평균을 0.1 m 단위로 누적 카운팅을 한 것이다. 이는 노면 가혹도 측면보다

노면굴곡에 대한 진폭의 다양성을 분석하는 것으로, 진폭 다양성이 가장 넓은 기동로는 'c'기동로이고, 가장 좁은 기동로는 'a'기동로로 분석되었다. 또한, 운용 지역에서는 '□□'지역이 가장 다양성이 넓고, '○○'지역이 다양성이 좁은 것으로 나타났다. 이는 RMS 값으로 노면 가혹도 분석시 노면굴곡 진폭의 크기도 중요하지만, 진폭의 다양성이 다양한 주파수를 가진 시키므로 노면 특성 분석시 동시에 고려해야 함을 알 수 있다.

즉, 일부 기동로를 제외하면, 정형화된 가진로의 노면 가혹도 분석에 사용하는 RMS 값을 이용한 노면 분석법이 다양한 공간 주파수를 갖는 비포장 노면에 PSD에 의한 가혹도 평가를 대신하여 현장에서 사용하는 데는 큰 무리가 없으나, 상대적으로 횡방향 노면 굴곡의 변화가 큰 균운용지역 비포장 기동로의 경우, 3차원 프로파일에 대한 PSD 분석이 필수적이라 판단 된다.

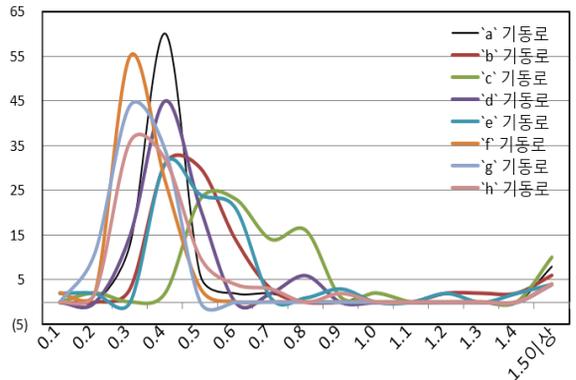


Fig. 13. RMS counting for maneuvering roads

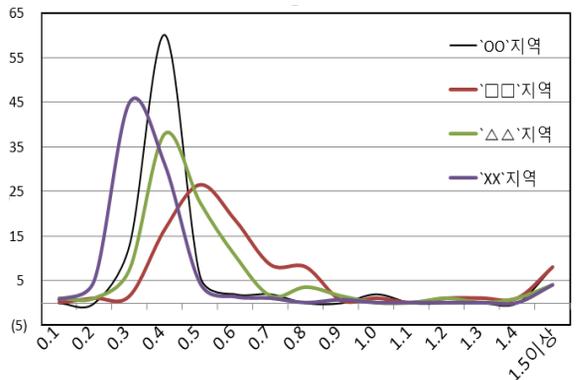


Fig. 14. RMS counting for army operation area

4. 결론

군용 기동장비의 내구시험은 횡방향 노면굴곡이 일정하지 않은 비포장으로 조성된 내구시험로에서 수행되고 있기 때문에 이를 고려한 3차원 노면굴곡에 대한 가혹도 분석이 반드시 필요하다. 본 논문은 신뢰성 있는 군용 기동장비 내구도 주행시험 및 가상 시험환경 구축 등을 위해 개발된 3차원 노면굴곡측정장비를 이용하여 진방 군운용지역 기동로에 대한 실제 3차원 노면 프로파일을 측정하고 국제표준 절차에 의한 가혹도 분석을 통하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- (1) 획득된 3차원 노면굴곡 데이터는 0.3 ~ 20 m/cycle (0.0442 ~ 3.2678 cycle/m)의 대역통과 필터링을 거친 후, 필터링된 노면굴곡 데이터를 이용하여 PSD와 RMS라는 가혹도 평가 변수로 변환하여 기동로별 가혹 정도를 분석하였다.
- (2) 주파수의 변동이 크지 않은 정형화된 가진로의 가혹도를 표현하는 RMS 값에 대한 누적 카운팅을 평가 변수로 설정하여 군운용지역 기동로를 평가하여 가혹 정도 및 진폭 다양성을 평가하였으며, 이는 측정 현장에서 짧은 시간내에 노면 가혹도를 평가하는 방법으로 적용될 수 있음을 확인하였다.
- (3) 광폭의 고정밀도 3차원 프로파일에 대한 노면별 가혹도 비교 분석이 가능하도록 정량적 분석 기술을 개발하여 적용하였으며, 군운용지역 기동로의 노면 특성에 대해 데이터베이스를 구축하였다.
- (4) 향후 기동장비의 내구시험 DB를 통한 주행궤적의 확률/통계적 분석을 기반으로, 차량이 많이 주행하는 횡방향에 대한 가중치를 주는 주행궤적 가중치 함수(Weighting Function)를 개발하여 실 기동장비에 영향을 미치는 실질적인 노면 특성과 좀 더 정량적인 가혹도 분석 기술을 개발할 계획이다. 또한, 이는 기동장비의 국방 가속 내구시험모드 개발을 위한 비포장 가속시험로 설계에 활용될 계획이다.

References

- [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] Castaldo, P. D., Allred, J. A., Reil, M. J., "Terrain Profilometer," Technical Report, Aberdeen Proving Ground of US Army, 2000.
- [4] 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, Philadelphia, pp. 69-96, 1992.
- [5] Tomoaki Mori, Seikichi Nowada, Kiichi Kanagawa, Yukio Inoue, Kazuo Yoshioka, Yoshinobu Matsushita, Akihiko Shimura, "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] Jin Saeng Yang, Sang Ho Lee, Sang Hwa Goo, Jeong Hwan Lee and Do Kyoung Kang, "Study on the Severity Control of Unpaved Test Courses," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 47-57, 2007
- [7] Sang Ho Lee, Do Kyung Kang, Choul Hoon Bae, Yong Ki Yoo, "The Technical Report for the Profile Analysis for the Endurance Test Course of CPG (Road Profile Analysis)," GSDC-519-010100, 2001.
- [8] ISO, "Mechanical Vibration - Road Surface Profiles - Reporting of Measured Data," ISO 8608:1995(E), 1995.