

군용차량의 주행모드에 따른 상대 노면 가혹도 분석

서 권 희¹⁾ · 송 부 근¹⁾ · 윤 희 석^{*2)}

기아자동차 특수개발팀¹⁾ · 전남대학교 기계공학과²⁾

Relative Road Damage Analysis with Driving Modes of a Military Vehicle

Kwonhee Suh¹⁾ · Bugeun Song¹⁾ · Hiseak Yoon^{*2)}

¹⁾Military Vehicle Development Team, Kia Motors Corporation, 277 Hwaun-ro, Seo-gu, Gwangju 61909, Korea

²⁾School of Mechanical Systems Engineering, Chonnam National University, Gwangju 61186, Korea

(Received 25 September 2015 / Revised 3 December 2015 / Accepted 7 December 2015)

Abstract : A military vehicle is driven at different usage modes with the army application and servicing conditions. For practical durability validation, DT(Development Test) on a new military vehicle should be run up to the durability target kilometers on test courses in the specified proving ground. Driving velocities with test courses at the endurance mode of DT are established definitely. However, OT(Operational Test) and initial endurance test of production car can't be performed only in the DT courses due to the development period limit. Therefore, this paper focuses on the method to analyze the relative road damages between the endurance test in DT and other endurance test. Road load acquisition tests on KLTV(Korean Light Tactical Vehicle) were implemented at 15 driving modes in off-road and cross-country courses of two tests. Wheel accelerations were processed through band-pass filter, and then the main frequency and maximum power of the signals were computed by PSD analysis. Finally, using the proving ground optimization based on RDS(Relative Damage Spectrum) characterization, the damage factors between off-roads of test courses were determined.

Key words : Road damage(노면 가혹도), Endurance mode(내구 모드), Relative damage(상대 가혹도), Proving ground optimization(테스트코스 최적화), Damage factor(가혹도 인자)

1. 서 론

구형 전술차량 대비 기동성과 생존성 측면에서 대폭 향상된 성능을 갖춘 소형전술차량은 기아자동차 주도로 개발되고 있으며, 차량 개발단계상 개발 시험(Development Test, 이후 DT로 표기)과 운용시험(Operational Test, 이후 OT로 표기)을 거쳐 양산을 준비하는 단계에 와 있다. DT에서는 시제차량의 기술적 성능을 계측하고 설계 문제점을 분석하여 기술적 완성도를 확인하며 개발 요구 성능의 충족 여부를 평가하게 된다. OT에서는 소요군이 여러 작전

환경 또는 동등 수준의 환경에서 작전 운용성능의 충족 여부를 평가하고, 해당차량의 운용에 필요한 기본적인 교리나 편성, 교육훈련 및 종합 군수지원 요소 등에 대한 적합성을 평가하게 된다.

소형전술차량과 같은 신차 개발시 중요한 시험평가 항목 중 하나는 내구도 평가이며, 이를 위해 목표주행거리와 주행모드를 고려한 실차 내구시험을 수행하게 된다. 전술차량의 내구도 시험기준은 OMS-MP(Operational Mode Summary-Mission Profile)를 기초로 선행 연구 단계부터 검토되어 최종적으로 TEMP(Test and Evaluation Master Plan)에 반영되는데, 내구도 기준을 과도하게 높여 추진하면 개발비

*Corresponding author, E-mail: hsyoon@jnu.ac.kr

상승 및 시험평가 기간의 장기화를 초래하므로 적정수준으로 결정하는 게 필요하다.¹⁾ 군 전술차량의 DT 항목 중 하나인 내구도 평가는 창원 기동시험장에서 총 32,000 km를 주행하면서 차량의 주요 구조물에서의 문제점 발생여부를 확인하는 정부 인증 성격의 시험이다. 반면 OT 주행시험이나 초도양산 내구시험은 창원 기동시험장이 아닌 전방 산악 기동로 또는 비교적 노면조건이 좋지 않은 악로에서 운용 가능한 속도로 목표 주행거리까지 주행하면서 차량의 주요 구조물의 파손여부를 검증하는 시험이다. 이런 전방 산악 기동로나 기타 악로에서의 주행 환경은 창원 기동시험장 대비 열악할 뿐만 아니라 비교적 길지 않은 기간 동안 내구성을 검증해야 하므로 실차 내구도 평가에 앞서 자체적으로 검증해야 할 필요가 있다.^{2,4)} 그러므로 소형전술차량의 경우 시제차량 제작 후 남양 벨지안로에서의 가속내구시험을 추진하여 DT/OT에 앞서 내구 문제점들에 대한 설계 개선방안들을 도출하였다. 일반적으로 DT 내구도 평가와 현대기아차 벨지안 내구시험은 명확한 시험 기준 하에 수행되므로 노면간 가속도 비교가 가능할 것으로 판단된다. 그러나 총 주행거리만 정해진 OT 주행시험과 초도양산 내구시험은 노면상태, 운전자의 운전습관 및 의도에 따라 세 가지 시험간 상관성을 유지하기 어려울 수 있기 때문에 창원 기동시험장 노면 가속도를 기준으로 나머지 두 내구시험의 내구 주행속도를 설정하는 게 무엇보다 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 상대 가속도 스펙트럼(relative damage spectrum)에 기초한 시험 최적화 기법을 이용하여 창원 기동시험장 내구로가 아닌 사용자 선정 내구로에서의 내구 주행속도를 결정하고 내구 시험간 노면 가속도를 상대 비교하는 방법을 제안하고자 한다. 먼저 소형전술차량 중 장축형 정비차량을 대상으로 창원 기동시험장과 전방 산악 기동로에서 주행모드별 노면하중 계측시험을 진행하였다. 다음으로 주행모드별 4개의 휠 가속도를 기초로 nCode사의 가속도 분석 프로그램인 Glyph-Works를 이용하여 노면 주파수 특성을 분석하고 주행모드간 상대 가속도 스펙트럼을 계산한 후, 최적화 기법을 이용해 창원 기동시험장 내구 가속도에

상응하는 사용자 선정 내구시험 반복 횟수와 가속도 인자(damage factor)를 산출하였다. 결론적으로 이런 일련의 분석 과정들을 적용하면 향후 소형전술차량의 사용자 선정 내구 시험시 주행모드에 대한 가이드를 제시할 수 있으리라 판단된다.

2. 노면하중 계측시험

내구 주행모드별 노면 가속도 분석을 위해서는 먼저 실 주행노면으로부터 각 휠에 전달되는 하중 이력을 계측하기 위한 노면하중 계측시험이 필요하다. 본 연구에서는 소형전술차량의 TEMP에 근거하여 목표 노면으로는 창원 기동시험장 내구로, 그리고 사용자 선정 노면으로는 전방 산악 기동로를 선정하였다. 그 후, 실차 내구도 평가 시험기준으로부터 Table 1과 같은 15가지 시험모드들을 설정하여 노면하중 계측시험을 진행하였다.

시험대상 차량은 소형전술차량 중 장축형 정비차량(총중량 7톤, 전후방 축중비 27 : 73)이며, Fig. 1에 보이는 것처럼 각 시험모드에 따라 3회씩 계측시험을 수행하였다. Table 1에서 시험명의 C는 창원 기동시험장, D는 전방 산악 기동로, U는 비포장로, X는 야지로를 의미한다. 크게 패인 웅덩이들이 산재한 전방 산악 기동로 구간에서 진행되는 D_U1~U4, D_X1~X2, D_X6 시험의 경우 정속 주행이 불가능

Table 1 Road load acquisition test modes

Test name	Road	Speed (km/h)	Distance (km)	Note
C_U1	Off-road	30	1.8	Constant
C_X1	Cross-country	20	3.0	Constant
D_U1	Off-road	Max. 37	4.2	General
D_U2	Off-road	Max. 44	3.2	High
D_U3	Off-road	Max. 45	2.0	General
D_U4	Off-road	Max. 59	2.0	High
D_U5	Off-road	25	2.0	Constant
D_U6	Off-road	30	2.0	Constant
D_U7	Off-road	35	2.0	Constant
D_X1	Cross-country	Max. 21	0.4	General
D_X2	Cross-country	Max. 31	0.4	High
D_X3	Cross-country	15	0.4	Constant
D_X4	Cross-country	20	0.4	Constant
D_X5	Cross-country	15	0.5	Constant
D_X6	Cross-country	Max. 34	0.5	High



Fig. 1 Road load acquisition test (at frontier driving road)

하므로 이런 시험모드들의 차속은 최대 차속으로 표현하였으며, 기타 시험모드들의 차속은 평균 차속을 의미한다. 비고란에서 constant는 해당 노면에서 정속 주행이 가능한 모드를, general은 일반 운전자가 해당 노면에서 운전할 수 있는 속도로 주행하는 모드를, high는 운전자 입장에서 해당 노면조건 고려시 다소 무리할 것으로 판단되는 최대 속도로 주행하는 모드를 의미한다. 본 계측시험에서는 주 관심 대상 부위인 휠 4개소, 캐빈 1개소, 벤마디 1개소에 3축 가속도 센서를, 캐빈 측면에 속도 센서를 부착하였으며, 이와 같은 총 19채널의 신호를 시험 전 구간에 걸쳐 SoMAT사의 e-DAQ을 통해 취득하였다.

노면하중 계측시험으로부터 얻어지는 여러 가속도 신호들 중 노면 가속도를 계산하는 데 필요한 신

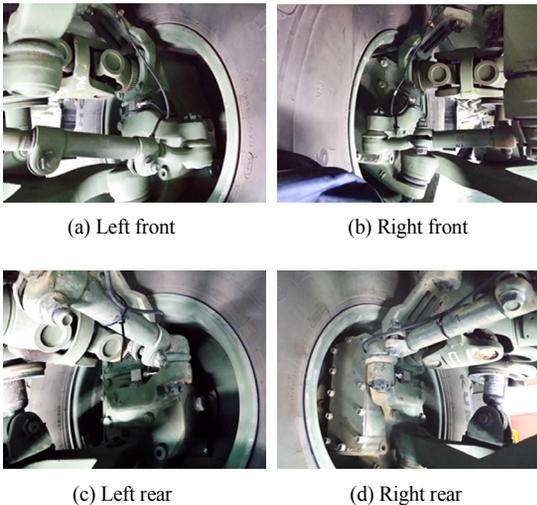


Fig. 2 Attachment locations of wheel accelerators

호는 휠 가속도 신호인데, 실제 샤시 레이아웃 상 휠 센터에 직접적인 센서 부착이 어려우므로 Fig. 2에 나타난 것과 같이 휠 센터 근방에 가속도 센서를 부착하였다.

3. 상대 노면 가속도 분석

3.1 노면 가진 주파수 특성

창원 기동시험장과 전방 산악 기동로의 비포장로와 야지로간 노면 가진 특성의 상관성을 검토하기 위해 주행모드별 휠 가속도 신호들에 대한 신호분석을 수행하였다. 특히 동등 속도 하에서 유사 노면 주행시 진동특성 비교를 위해 15가지 시험모드들 중 비포장로 30 km/h와 야지로 20 km/h 주행모드를 선정하였으며, 비포장 및 야지 주행시 상하방향 휠 PSD 응답 특성을 분석한 결과는 각각 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. 비포장로와 야지로 주행시 휠의 PSD 특성 분석결과, 전반적으로 창원 기동시험장과 전방 산악 기동로의 주파수 스펙트럼은 유사한 패

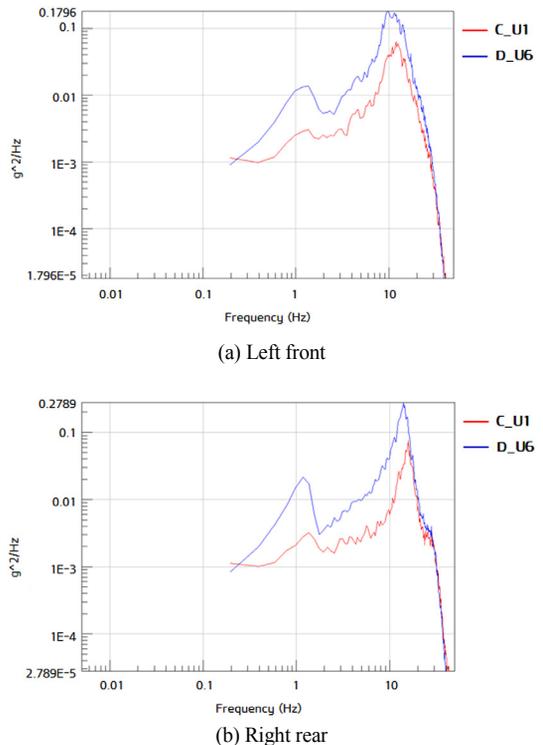


Fig. 3 PSD responses at wheels during off-road driving (30 km/h)

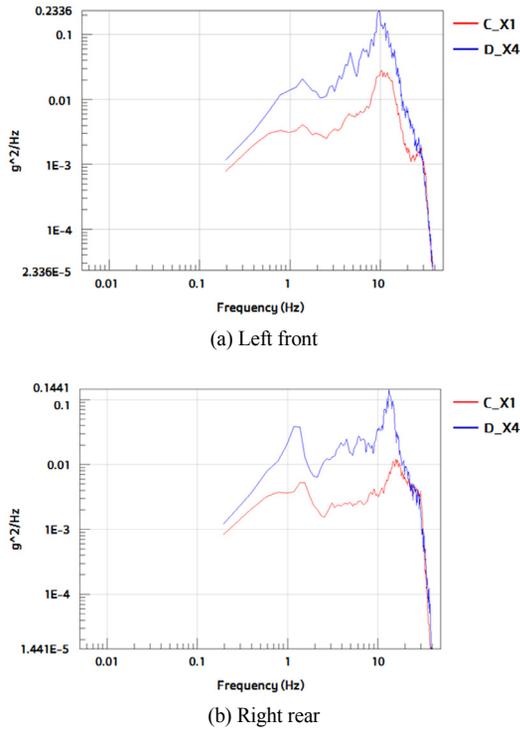


Fig. 4 PSD responses at wheels during cross-country driving (20 km/h)

턴을 나타내었다. 한편, 전륜과 후륜의 주요 가진 주파수를 살펴보면, 창원 비포장로와 야지로 사이에는 1 Hz 이상 차이가 존재하지만 전방 비포장로와 야지로 사이에는 주파수 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 전방 산악지역의 경우 창원 기동시험장과는 달리 비포장로와 야지로가 곳곳에 혼재되어 있음에 기인한다.

3.2 노면 가속도 비교

창원 기동시험장과 전방 산악 기동로의 노면 가진 특성이 유사한 것으로 판단됨에 따라 다음으로 창원 내구 주행모드 대비 전방 내구 주행모드의 가속도를 비교하기 위해 휠 가속도 성분별로 상대 가속도 분석을 수행하였다. 다채널 신호간 상대 가속도를 평가하기 위해 응력-수명 선도를 이용하여 주행 모드간 상대 가속도를 계산하였으며, 여러 휠 가속도 성분들 중 내구에 가장 큰 영향을 주는 상하방향 신호의 1 km 당 가속도는 Table 2와 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다.

Table 2 Damage per 1 km at every endurance mode

Test name	Left front	Right front	Left rear	Right rear	Average
C_U1	2.91E-08	2.14E-08	5.56E-09	6.41E-09	1.56E-08
C_X1	6.01E-08	9.54E-08	2.12E-08	2.34E-08	5.00E-08
D_U1	1.34E-07	2.15E-07	7.03E-08	8.05E-08	1.25E-07
D_U2	5.35E-07	3.60E-07	5.83E-07	2.56E-07	4.34E-07
D_U3	3.38E-07	1.72E-07	2.48E-07	1.29E-07	2.22E-07
D_U4	1.09E-06	1.05E-06	1.56E-06	2.02E-06	1.43E-06
D_U5	9.42E-08	1.56E-07	3.37E-08	4.25E-08	8.17E-08
D_U6	3.31E-07	4.39E-07	1.75E-07	2.53E-07	3.00E-07
D_U7	7.23E-07	4.90E-07	7.33E-07	1.36E-06	8.26E-07
D_X1	4.83E-08	4.98E-08	1.27E-07	5.79E-08	7.08E-08
D_X2	5.48E-07	6.13E-07	4.85E-07	2.99E-07	4.86E-07
D_X3	2.30E-08	3.98E-08	2.19E-08	2.74E-08	2.80E-08
D_X4	4.10E-07	3.47E-07	1.67E-07	1.06E-07	2.57E-07
D_X5	4.49E-08	2.42E-07	6.44E-08	1.02E-07	1.13E-07
D_X6	1.49E-06	4.58E-06	6.08E-07	1.04E-06	1.93E-06

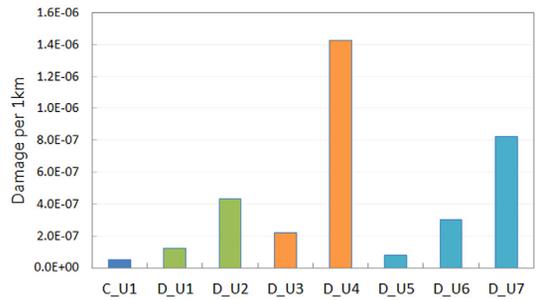


Fig. 5 Comparison of damage per 1 km at off-road modes

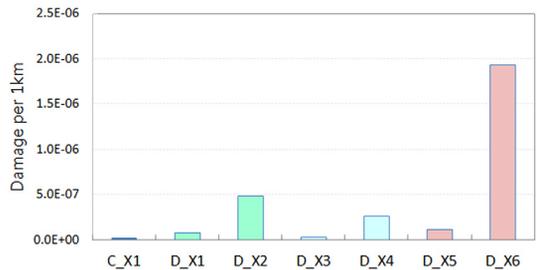


Fig. 6 Comparison of damage per 1 km at cross-country modes

전반적으로 비포장로와 야지로 주행시 전방 산악 기동로의 가속도가 창원 기동시험장의 가속도에 비해 상당히 큰 경향을 보였다. 전방 비포장로 25 km/h 주행시(D_U5) 가속도는 창원 비포장로 30 km/h 주행시(C_U1) 가속도 대비 1.6배, 전방 야지로 15 km/h 주

행시(D_X3) 가속도는 창원 야지로 20 km/h 주행시(C_X1) 가속도 대비 1.8배 정도 큰 것으로 나타났다. 또한 전방 비포장로 30 km/h 이상 정속 주행시(D_U6, D_U7) 가속도는 창원 비포장로 30 km/h 주행시(C_U1) 가속도 대비 최대 16.5배, 전방 야지로 20 km/h 이상 주행시(D_X2, D_X4, D_X6) 가속도는 창원 야지로 20 km/h 주행시(C_X1) 가속도 대비 최대 123.5배 큰 경향을 보임에 따라 전방 산악 기동로 내구도 평가시 적정 주행속도 기준이 마련되어야 함을 알 수 있다. 본 시험결과를 기초로 창원 기동시험장 내구도 평가의 가속도와 동등 수준이 되도록 전방 산악 기동로 내구도 평가의 주행속도 기준을 설정해 보면, 비포장로에서는 25 km/h 미만, 야지로에서는 15 km/h 미만의 속도가 적정할 것으로 판단된다.

3.3 가속도 인자 계산

창원 기동시험장과 전방 산악 기동로의 진동 특성과 상대 노면 가속도 분석에 이어 마지막으로 창원 내구 주행모드 대비 전방 내구 주행모드의 가속도 인자를 결정하기 위해 가속도 분석 프로그램인 GlyphWorks에서 제공하는 상대 가속도 스펙트럼 분석과 시험 노면 최적화(optimized test) 기법을 이용하였으며, 구체적인 절차는 Fig. 7에 나타내었다.⁵⁻¹⁰⁾

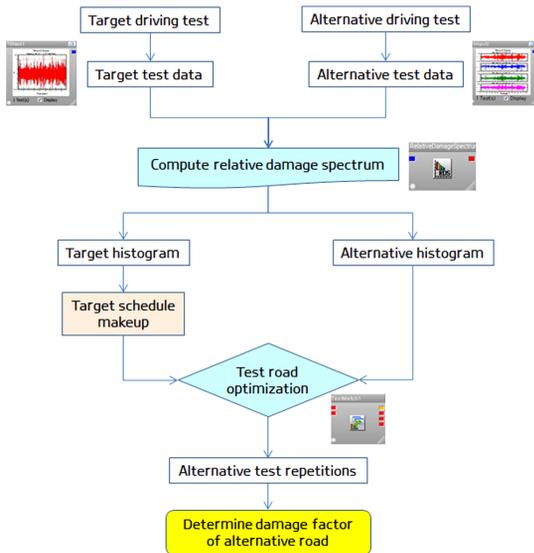


Fig. 7 Procedure to compute damage factor

Fig. 7에서 상대 가속도 스펙트럼 분석은 저주파 노면 기인 진동 분석에 효율적인 접근법으로서, 단지 5~6개의 히스토그램만을 이용해 노면 기인 가속도를 특성화시킬 수 있다. 상대 가속도 스펙트럼의 계산을 위해서는 이중 적분을 통해 가속도 이력을 변위 이력으로 변환한 후 1 Hz~2 Hz, 2 Hz~4 Hz, 4 Hz~8 Hz, 8 Hz~18 Hz, 16 Hz~32 Hz로 정의된 대역통과 필터(band-pass filter)를 통과시켜 필터링된 신호들을 얻어야 한다. 다음으로 전통적인 응력-수명 접근법과 빗방울 사이클 친수 알고리즘(rainflow cycle counting algorithm)을 이용하여 필터링된 변위 신호들의 가속도 정보를 계산하게 되며, 결과적으로 원하는 주파수 범위까지 가속도-주파수 선도를 출력하게 된다.

일단 내구 주행모드별 휠 가속도 이력을 기초로 상대 가속도 스펙트럼을 계산하면 가속도 이력 데이터로부터 주파수와 가속도 정보를 갖는 히스토그램 데이터가 생성되며, 이런 히스토그램 데이터는 시험 노면 최적화 기법에 입력 데이터로 사용된다. 이 때 목표 히스토그램을 기반으로 내구거리를 고려한 목표 스케줄을 구성해야 하므로, 장축형 정비 차량의 창원 비포장로와 야지로의 내구도 거리들을 기준으로 실 계측 거리의 반복 수를 반영하여 목표 스케줄 과일을 구성하였다.

다음으로 시험 노면 최적화 기법은 상대 가속도 스펙트럼 계산시 얻어진 특성화 데이터인 히스토그램을 기초로 목표 노면에 등가화된 비교 시험노면들의 최적 조합을 결정해주는 역할을 한다. GlyphWorks에서는 시험 노면 최적화 기법을 위해 최적합(best fit)과 최소 반복(minimized repeats) 전략을 제공하는 데 본 연구에서는 목표 노면과 비교 노면이 정해진 관계로 최소 반복 전략을 적용하였다.

이와 같은 시험 노면 최적화 기법을 창원 기동시험장과 전방 산악 기동로의 총 15가지 내구 주행모드에 적용하여 창원 기동시험장 대비 전방 산악 기동로 주행모드의 가속도 인자들을 계산하였는데, 비포장로와 야지로 주행시 가속도 인자 결과는 각각 Table 3과 Table 4에 나타내었다.

Table 3에서 보면 D_U1~D_U4 비포장로 모드의 결과로부터 일반 주행 대비 고속 주행을 하는 경우 가속도 인자가 2배 증가하며 이에 따라 총 주행거리

Table 3 Damage factor of D-test compared with C-test at off-road modes

Test name	Damage factor
D_U1	1.4
D_U2	2.9
D_U3	1.7
D_U4	3.4
D_U5	1.3
D_U6	2.0
D_U7	2.7

Table 4 Damage factor of D-test compared with C-test at cross-country modes

Test name	Damage factor
D_X1	5.8
D_X2	11.8
D_X3	4.3
D_X4	6.4
D_X5	6.2
D_X6	6.6

는 1/2로 감소하게 됨을 알 수 있다. 또한 D_U5 ~ D_U7 시험모드의 결과에서는 주행속도 증가에 따라 가속도 인자 역시 증가하는 전형적인 추세를 나타내었다. 특히 D_U1과 D_U5 결과를 살펴보면 창원 비포장로와 유사한 수준의 가속도 수준을 나타내는 전방 비포장로 주행속도는 25 km/h 미만일 것으로 판단된다.

다음으로 D_X1 ~ D_X2 야지로 모드의 분석결과를 살펴보면, 일반 주행 대비 고속 주행을 하는 경우 비포장로 모드 결과에서와 마찬가지로 가속도 인자는 2배 증가하고 총 주행거리는 절반으로 감소하는 경향이 나타났다. D_X3 ~ D_X6 시험모드의 결과를 살펴보면 주행속도 증가에 따라 가속도 인자가 증가하는 전형적인 양상을 보였다. 특히 D_X3, D_X5 결과로부터 15 km/h 주행시 4.3배와 6.2배의 가속도 인자를 가지므로 창원 야지로 모드와 동등수준의 가속도를 가지기 위해서는 본 연구에서는 시험하지 못하였지만 훨씬 낮은 주행속도로 주행하여야 한다.

4. 결 론

소형전술차량을 대상으로 상대 가속도 스펙트럼 분석과 시험 노면 최적화 기법을 적용하여 창원 기

동시험장과 전방 산악 기동로의 내구 주행모드별 가속도 인자를 계산하는 프로세스 정립과정에서 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 소형전술차량의 TEMP에 기술되어 있는 내구도 평가 기준과 전방 산악 기동로의 주행 상황을 고려하여 15가지 내구 주행모드들을 설정하였으며, 이에 근거한 노면하중 계측시험을 통해 내구 주행모드에 따른 상대 가속도 비교용 데이터를 취득하였다.
- 2) 휠 진동 특성 측면에서 전반적으로 창원 기동시험장과 전방 산악 기동로가 유사한 주파수 스펙트럼 패턴을 나타내었다. 또한 창원 비포장로와 야지로는 1 Hz 이상 다른 노면 가진 주파수특성을 보였으나, 전방 비포장로와 야지로 사이에는 노면 가진 주파수상 별 차이가 없어서 전방 산악 기동로 내구 주행시에는 비포장로와 야지로의 구분은 큰 의미를 갖지 않은 것으로 판단된다.
- 3) 상대 가속도 비교결과, 비포장로 30 km/h 주행시 전방 가속도는 창원 가속도 대비 2.0배 이상, 야지로 20 km/h 주행시 전방 가속도는 창원 가속도 대비 6.4배 이상 큰 것으로 나타나 전방 내구도 평가시 적정 주행속도 기준이 마련되어야 함을 알 수 있다.
- 4) 시험 노면 최적화의 결과인 창원 기동시험장과 전방 산악 기동로의 노면간 가속도 인자를 기준으로 창원 가속도와 동등 수준을 나타낼 것으로 보이는 전방 산악 기동로의 적정 주행속도는 비포장로의 경우 25 km/h 미만, 야지로의 경우 15 km/h 미만일 것으로 판단된다.

References

- 1) D. Eom, "A Study on the Improvement of the Endurance Testing Standard for Combat Vehicles," Journal of the Korean Association of Defense Industry Studies, Vol.20, No.2, pp.63-77, 2013.
- 2) G. Choi and S. Heo, "Classification of the Korean Road Roughness," Transactions of KSAE, Vol.14, No.5, pp.115-120, 2006.
- 3) L. H. Zhao, S. L. Zheng, J. Z. Feng, H. F. Zhou and Y. F. Xing, "Fatigue Assessment of Rear Axle Under Service Loading Histories consid-

- ring the Strengthening and Damaging Effects of Loads Below Fatigue Limit,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.15, No.5, pp.843-852, 2014.
- 4) J. S. Nam, H. W. Shin and G. J. Choi, “Durability Prediction for Automobile Aluminum Front Subframe Using Nonlinear Models in Virtual Test Simulations,” *Int. J. Automotive Technology*, Vol.15, No.4, pp.593-601, 2014.
 - 5) K. Sim, W. Cho, J. Lee and G. Choi, “A Study on the Accelerated Durability Test of Vehicle Using the Limited Usage,” *KSAE Annual Conference Proceedings*, pp.1766-1772, 2010.
 - 6) A. Halfpenny and M. Pompetzki, “Proving Ground Optimization and Damage Correlation with Customer Usage,” *SAE Int. J. Mater. Manuf.*, Vol.4, Issue 1, pp.620-631, 2011.
 - 7) S. Sivashankar, S. Sudarsanam and N. Saravanan, “Durability Test Sequence and Target Generation for Variants among Commercial Vehicles,” *SAE 2013-01-2377*, 2013.
 - 8) A. Halfpenny, S. Hussain, S. McDougall and M. Pompetzki, “Investigation of the Durability Transfer Concept for Vehicle Prognostic Applications,” *NDIAs Ground Vehicle Systems Engineering and Technology Symposium (GVSETS)*, 2009.
 - 9) A. Rupp, A. Masieri and T. Dornbusch, “Durability Transfer Concept for the Monitoring of the Load and Stress Conditions on Vehicles,” *Innovative Automotive Technology*, 2005.
 - 10) *Glyph Reference Guide*, HBM United Kingdom Limited, 2013.