

군용 기동장비 내구 신뢰성 향상을 위한 동력장치 내구시험로 설계

이정환^{*1)} · 이상호¹⁾ · 조진우²⁾ · 강이석³⁾

¹⁾ 국방과학연구소 제5기술연구본부

²⁾ 국방과학연구소 연구계획부

³⁾ 충남대학교 기계설계공학과

The Design of New Cross Country Test Courses for Powertrain System of Military Vehicle

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 3 February 2017 / Revised 2 May 2017 / Accepted 26 May 2017)

ABSTRACT

The endurance test is important to evaluate and predict defects of the vehicles. In particular, in order to improve the reliability of the endurance test for the powertrain system of military vehicles, the driving load is measured and analyzed at test courses and maneuvering roads. As a result, new test courses for powertrain system is additionally needed to improve test reliability. In this paper, it shows that new test courses for powertrain system is designed and constructed using the measuring and analyzing result between CPG test courses and army maneuvering roads.

Key Words : Powertrain system(동력장치), Driving Load(주행부하), Test Course(시험로), Maneuvering Road(기동로)

1. 서론

기동장비의 내구도 주행시험(Endurance Test)은 수명 주기 동안에 예상되는 차량 및 중요 구성품의 결함을

평가하고 예측하는 시험으로, 내구 수명을 결정하는 중요한 판단 자료가 된다.

일반적으로 기동장비의 강인한 기동력을 확보하기 위해서는 기동장비의 주요 장치인 동체/현가(현수)장치와 동력장치(Power Pack)의 내구 성능 향상이 필수적이다. 동체/현가장치는 노면의 진동 환경에 의해 직접적인 영향을 받으며, 특히 20~0.3 m/cycle 주기의 다

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

양한 굴곡 특성과 밀접한 관련이 있고^[1], 동력장치는 노면의 경사와 경사 빈도, 경사 지속도, 조향 특성 등과 밀접한 관련이 있다^[2].

동체/현가장치의 경우, 국방과학연구소 창원시험장(Changwon Proving Ground, CPG)의 비포장 시험로는 물론이고, 전방의 주요 기동로에 대한 굴곡 특성을 측정하고 가혹도를 분석하였다. 그 결과 창원시험장의 내구시험로는 운용지역 기동로에 대하여 가혹도 수준이나 노면 특성 등에 있어서 충분한 대표성을 가지고 있는 것으로 나타났다^[3-5]. 그리고 동력장치의 경우, 창원시험장 시험로와 운용지역 주요 기동로의 주행부하(Driving Load)를 측정하고 정량적으로 비교 및 분석하였다^[6,7]. 그러나 분석 결과 창원시험장 비포장 시험로의 동력장치에 대한 가혹도 수준이 운용지역 주요 기동로에 비해 다소 부족한 결과를 나타내었다.

민수 자동차 분야에서의 실차 동력장치 내구시험의 경우, 고객 사용조건에 대한 주행부하주기(Duty Cycle)를 개발하여 차대동력계(Chassis Dynamometer)를 이용한 실험실 기반의 내구시험을 수행하는데 반해, 국방 분야에서는 기동장비의 수명주기에 해당하는 주행거리를 실제 주행하는 시험로 기반의 내구도 주행시험을 수행하기 때문에, 창원시험장 시험로에서 확보하지 못한 부하 특성을 반영할 수 있는 신규 노면의 건설이 필요하다.

그러므로 본 논문에서는 전방 군 운용지역 주요 기동로와 창원시험장 내구시험로의 동력장치에 대한 가혹도 수준, 조향 특성 및 경사 프로파일 등의 비교/분석을 통하여 동력장치 내구시험로를 설계 및 건설하여 운용지역의 부하 특성을 반영한 결과를 도출하였다.

2. 동력장치에 대한 노면 특성 비교/분석

2.1 주행부하 측정/분석

창원시험장의 내구시험로인 직선 포장로, 비포장자갈길, 야지시험로 및 전방 주요 지역의 기동로에 대해 주행부하를 측정하였다. 계측시스템은 Fig. 1과 같이 자동변속기가 탑재된 4륜 구동 차량에 좌우측 구동축 토크, 엔진회전수, 차량속도를 포함한 GPS 신호 등을 측정하였다^[6].

그리고 각 노면의 측정데이터를 이용하여 회전하고 있는 구동계 토크와 같은 물리량의 손상도 분석에 활용하는 회전수 집계(Revolution Counting) 방법을 변속

기 입력 토크와 엔진회전수에 적용하고, 응력-수명(S-N) 방법을 회전체에 도입하기 위해 토크-수명(T-N)으로 수정하였다. 즉, Fig. 2와 같이 입력 토크와 회전수명에 대한 토크-수명 선도와 마이너 룰(Miner's Rule)로부터 식 (1) ~ 식 (4)와 같이 상대 피로 손상도(QD, Quantified Damage)를 정량화 하였다^[6].

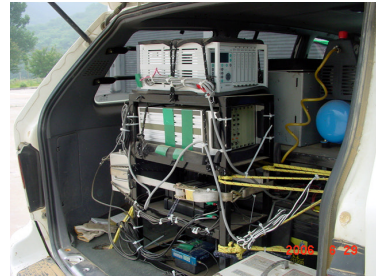


Fig. 1. Configuration of instrumentation system

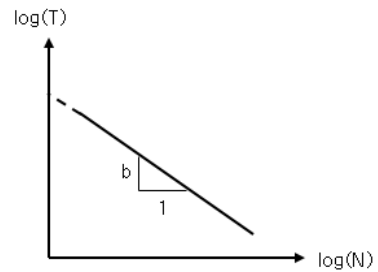


Fig. 2. Steering radius calculation

$$\text{Log}(T) - \text{Log}(C) = b \cdot \text{Log}(N) \quad (1)$$

$$N = \left[\frac{C}{T} \right]^{-1/b} \quad (2)$$

$$D = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{N_i} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i}{\left[\frac{C}{T} \right]^{-1/b}} = \sum_{i=1}^n \frac{n_i \cdot T_i^{-1/b}}{C^{-1/b}} \quad (3)$$

$$QD = \sum_{i=1}^n n_i \cdot T_i^m, \quad m = -\frac{1}{b} \quad (4)$$

여기서, T_i 와 n_i 는 각각 회전수 집계된 변속기 입력 토크와 회전수를 나타내며, b 는 토크-수명 선도의 기울기이고, m 은 그 역수이다. 또한, m 은 물성치로서 Table 1과 같이 군용 트럭 동력장치 주요 부품에 해당

하는 값을 적용하였다.

Table 1. M value for quantified damage

m	value
Bearing	3.3
Ring Gear Bending	6.3
T/M Gear Bending	8.389
T/M Gear Surface	17.857

이와 같은 방법으로 창원시험장 직선 포장로, 비포장자갈길 및 야지시험로와 전방 주요 7개 지역의 18개 기동로의 주행부하를 측정하고, 식 (4)와 Table 1을 이용하여 동력장치 주요 부품별 각 노면의 상대 피로 손상도를 도출하였다. 또한, 시험로와 기동로의 상호 비교를 수행하기 위하여 노면을 1 km 길이로 정규화하고(Normalization), 창원시험장 비포장자갈길의 가속도를 1로 하였을 때의 각 *m*값에 따른 상대 피로 손상도를 Table 2와 Fig. 3에 나타내었다.

Table 2의 결과에서 고강성 재질인 변속기 기어 케이스의 경우 순간적인 토크 피크(Peak) 값에 의해 가속도가 크게 좌우되므로(B지역 3기동로), 이를 제외하고, 직선 포장로를 포함한 가속도를 비교하면 창원시험장의 내구시험로가 주요 운용지역 기동로보다 전반적으로 가속한 것으로 보인다. 그러나 창원시험장의 직선 포장로는 평지로 이루어져 주행 시의 가속도는 주행속도에 영향을 많이 받으므로, 비포장 노면만의 상대 피로 손상도를 비교하면 창원시험장의 내구시험로가 운용지역 기동로에 비해 다소 낮아, 동력장치 내구도 주행시험을 위한 추가 시험로가 필요하다는 것을 알 수 있다.

Table 2. Average result of quantified damage

Region		m=3.3	6.3	8.389	17.857
Including Paved Road	Operation Region	1.4	1.83	2.78	1,192.44
	CPG	2.35	4.19	4.60	1.01
Excluding Paved Road	Operation Region	1.23	1.57	2.67	1,341.44
	CPG	0.81	0.61	0.54	0.50

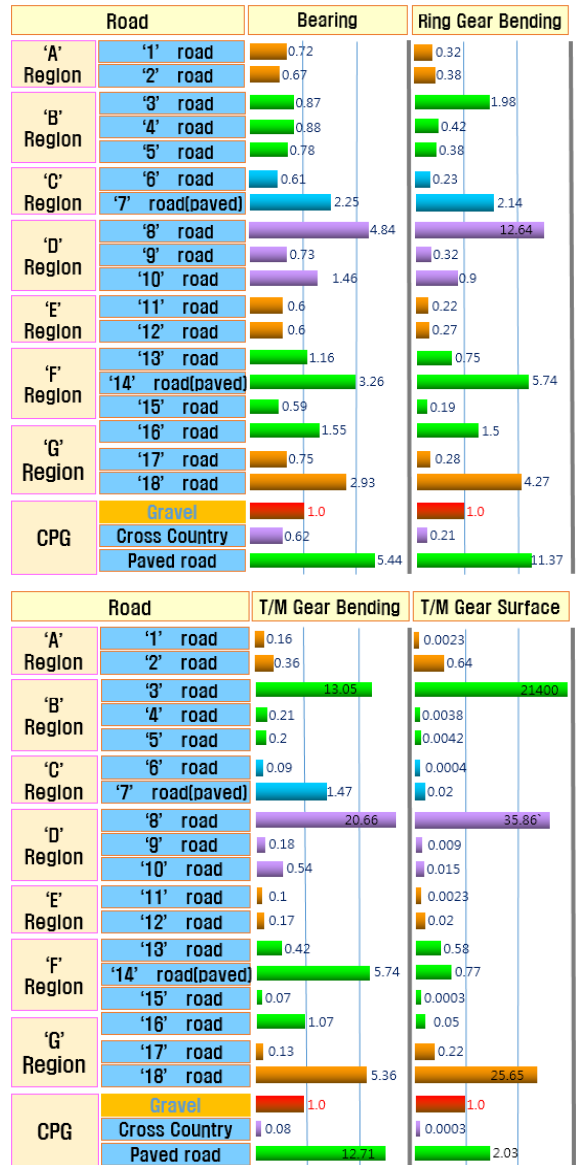


Fig. 3. Quantified damage comparison of CPG test courses with army maneuvering roads

2.2 조향 특성 비교 및 분석

궤도차량의 경우, 노면의 조향 빈도 및 조향반경 등의 조향 특성은 엔진에서 발생한 동력 중 조향에 필요한 동력을 인출시키는 조향 부하를 발생시키므로 동력장치 부하에 중요한 역할을 한다. 따라서 시험로와 기동로의 조향 특성을 분석하기 위하여 조향반경의 비율을 도출하여 상호 비교하는 방식을 취하였다.

따라서 위도, 경도, 고도 등 GPS 신호의 3차원 궤적을 이용하여 시험로와 기동로에 대해 100 m 이하에 해당하는 조향 반경을 산출하여 데이터베이스를 구축하였다. Fig. 4는 창원시험장의 시험로와 운용지역의 기동로에 대한 조향 반경 산출 결과 일부이고, 이와 같은 결과를 바탕으로 창원시험장의 비포장 시험로와 운용지역 기동로의 조향 특성을 1 km 길이로 정규화하여 Fig. 5에 나타내었다. 비포장 시험로의 조향 반경은 30.1~60.0 m에서 약 60 %의 비율을 가지고, 운용지역 기동의 조향 반경은 60.1~100.0 m에서 약 56 %의 비율을 나타내었다. 즉, 조향 반경이 상대적으로 작은 구간에서 시험로의 비율이 높음으로 판단할 때, 조향 부하가 운용지역에 비해 부족하지는 않은 것으로 판단된다.

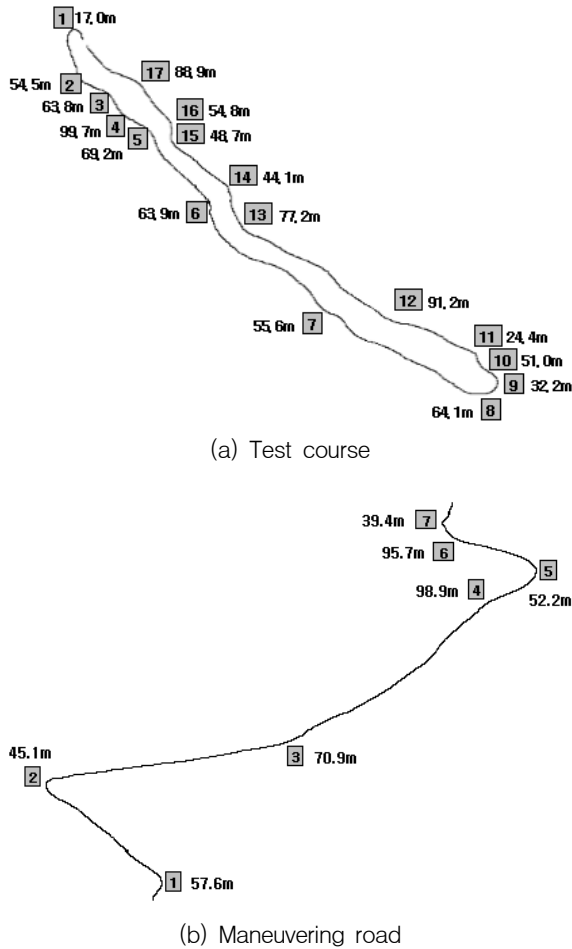


Fig. 4. Steering radius calculation

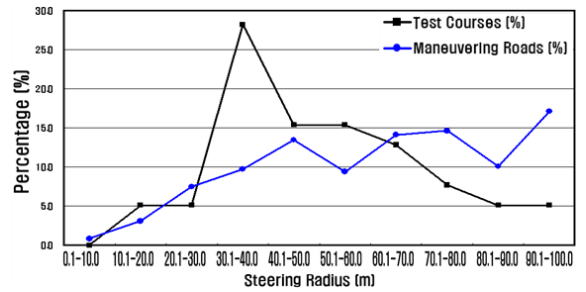


Fig. 5. Comparison of steering characteristic

2.3 경사 프로파일 비교 및 분석

경사 프로파일은 주행거리에 대한 고도데이터를 사용하여 경사도와 경사 길이 등을 산출하였다. 경사도는 5~30 %까지 5 % 간격으로 총 6개 그룹으로 분류하였고, 경사 길이는 0~400 m까지 20 m 간격으로 총 20개 그룹으로 분류하였다.

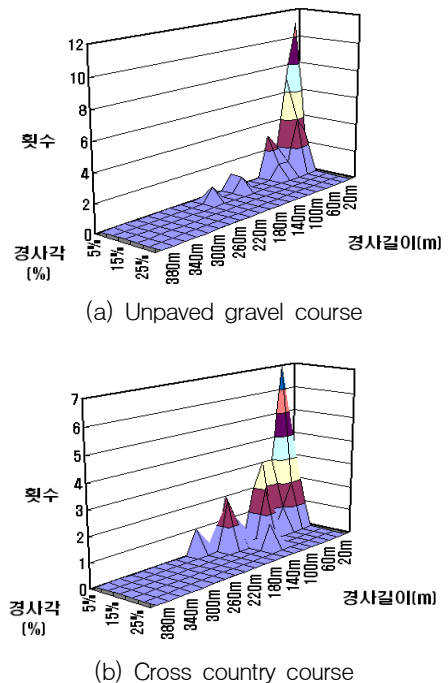
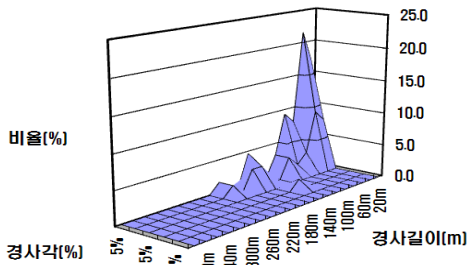


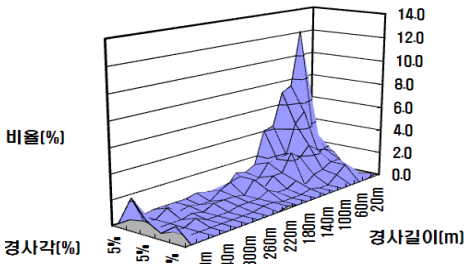
Fig. 6. Slope characteristics of cpg

이상의 방법으로 시험로와 기동로에 대해 경사도별 경사 길이를 분류하여 데이터베이스를 구축하였다. Fig. 6 (a)와 (b)는 창원시험장의 비포장자갈길과 야지 시험로에 대한 경사도별 경사길이 분류 결과를 나타

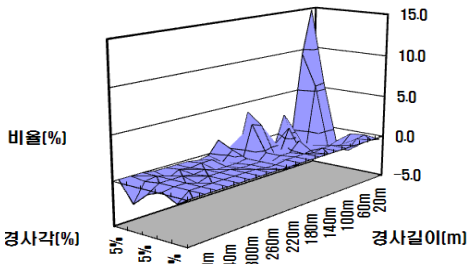
낸 것이다. 비포장자갈길의 경우, 경사도 5~10 %가 100 % 이었으며, 20 m 이하와 20~40 m의 경사 길이가 전체의 40 %와 31.4 %를 각각 차지하였다. 반면 야지시험로의 경우는 경사도의 분포는 유사하였으나, 경사 길이에 있어 상대적으로 긴 특성을 나타내었다. Fig. 7 (a), (b) 및 (c)는 창원시험장 시험로와 운용지역 기동로 및 이들의 편차의 분류 결과를 나타낸 것으로 운용지역도 5~10 %의 경사도가 가장 많으나 창원시험장에 비해 경사도 30 %까지 전체적으로 분포함을 알 수 있으며, 경사 길이에 있어서도 긴 길이의 영역은 차이가 나는 것을 알 수 있다.



(a) Test courses



(b) Maneuvering roads



(c) Difference of slope characteristic

Fig. 7. Slope characteristic of test courses and maneuvering roads

3. 동력장치 시험로 설계조건 도출 및 적용

3.1 동력장치 시험로 설계조건 도출

이상의 분석 결과를 바탕으로 동력장치 시험로의 초기 설계조건을 다음과 같이 도출하였다. 즉, 전방의 기동 환경을 고려한 다양한 경사 노면을 반영하기 위

Table 3. Difference of slope characteristic

Section	5%	10%	15%	20%	25%	30%
20 m	7	3	-1	0	0	0
40 m	5	3	-1	-1	0	0
60 m	0	-1	-1	-1	-1	0
80 m	1	-1	-1	0	0	0
100 m	0	1	-1	0	0	0
120 m	-2	-1	-1	0	0	0
140 m	0	-1	0	0	0	0
160 m	2	1	0	0	0	0
180 m	0	1	0	0	0	0
200 m	0	-1	-1	0	0	0

Table 4. Initial design condition of new test course

Slope(%)	Length(m)	Number	Sum of Length(m)
5	120	2	240
	60	1	60
10	80	1	80
	120	1	120
	140	1	140
	200	1	200
	400	1	400
15	20	1	20
	40	1	40
	60	1	60
	80	1	80
	100	1	100
	120	1	120
	200	1	200
20	40	1	40
	60	1	60
25	60	1	60

하여, Table 3에 나타냈듯이 창원시험장의 비포장 시험로와 운용지역 기동로의 노면 길이로 정규화된 경사도별 경사길이 분류 결과의 편차를 바탕으로, 창원 시험장에서 부족한 경사도와 노면 길이 등의 초기 설계조건을 Table 4와 같이 도출하였다. 그리고 기존의 내구시험로와의 시험 연계성을 위하여, 초기 설계조건을 바탕으로 산악 지형에 형성되어 있는 기존 시험로 인근에 Fig. 8과 같이 부지를 선정하였다. 또한, 선정된 부지에 대한 측량 조사, 토목공사 가능 여부, 예산 및 인허가와 관련된 그린벨트 훼손면적 등을 고려하여 Table 4의 초기 설계조건을 바탕으로 Table 5의 최종 설계조건을 도출하였다.

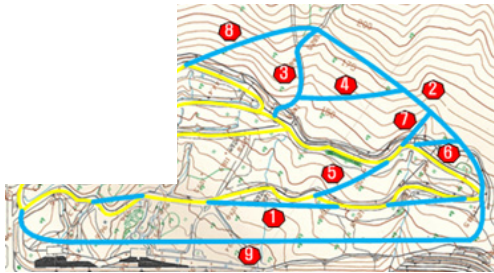


Fig. 8. Construction place of new test course

Table 5. Final design guide of test course

Course No.	Slope(%)	Length of Course(m)
①	6.4	360
②	10.2	405
③	25.9	135
④	15.9	157
⑤	21.0	95
⑥	23.0	60
⑦	28.0	54
⑧	16.3	203
⑨	3.8	878

3.2 동력장치 시험로 건설 및 결과

Table 5의 동력장치 시험로 최종 설계조건으로 시험로를 건설하였고, 추가 건설된 시험로와 기존 비포장 시험로의 총 3.8 km 비포장 노면을 연결하여 Fig. 9와 같은 4개의 동력장치 시험로 코스를 개발하였다.

G1 시험로는 기존 비포장자갈길과 유사하나 조향이

많은 비포장자갈길 구간을 직선로로 만들어 고속 및 고단 변속이 가능한 표준로이다. G2 시험로는 주로 케도차량에 대하여 중 부하를, G3 시험로는 주로 차륜차량에 대한 중/고 부하를, G4 시험로는 주로 케도차량에 대한 고 부하를 가하도록 개발한 코스이다.

이와 같은 4개 시험로에 대한 동력장치의 가속도를 평가하기 위하여 동일한 시험차량 및 측정시스템으로 부하를 측정하였다. 이를 앞에서 언급하였던 방법으로 분석하여 Fig. 10과 Table 6에 나타내었다. Table 6에 나타나 있듯이, 직선 포장로를 제외한 상대 피로 손상도 비교에서 고강성 재질($m = 17.867$)인 변속기 기어 케이스를 제외하면 창원시험장의 시험로가 주요 운용지역 기동로보다 동력장치 측면에서 전반적으로 가속한 것으로 나타났다. 이는 동력장치 내구시험로가 성공적으로 설계 및 건설이 되었고, 향후 내구도 주행시험의 신뢰성을 향상시키는데 기여할 것으로 판단된다.

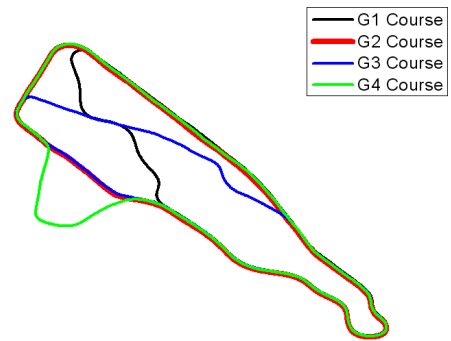


Fig. 9. New test courses for powertrain system

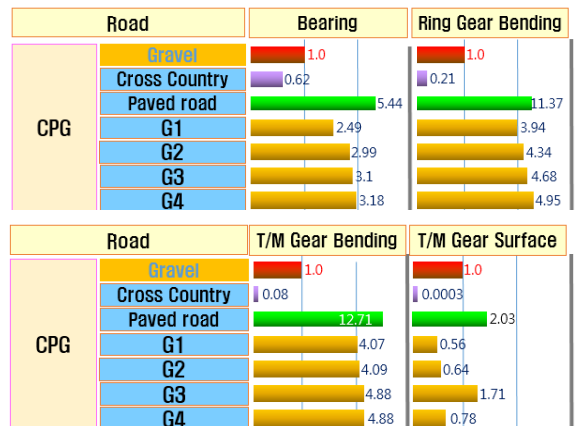


Fig. 10. Quantified damage comparison of CPG including new test courses

Table 6. Average result of quantified damage

Region		m=3.3	6.3	8.389	17.857
Including Paved Road	Operation Region	1.4	1.83	2.78	1,192.44
	CPG	2.69	4.36	4.53	0.96
Excluding Paved Road	Operation Region	1.23	1.57	2.67	1,341.44
	CPG	2.23	3.19	3.17	0.78

4. 결론

본 논문은 전방 7개 군 운용지역의 18개 기동로에 대한 조향 특성, 경사 특성 및 상대 피로 손상도를 분석하고, 국방과학연구소 창원시험장 내구시험로와 비교한 결과를 토대로 동력장치 내구시험로의 정량적인 설계안을 도출하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 창원시험장 비포장 내구시험로의 동력장치 측면에서의 상대 피로 손상도는 전방 주요 군 운용지역 기동로보다 다소 낮은 수준을 나타내었다(직선 포장로 제외).
- (2) 시험로와 기동로에 대해 조향 특성과 경사 특성을 분석하였고, 조향 특성의 경우 운용지역에 비해 조향 부하가 동등 이상임을 확인하였고, 경사 특성의 경우 운용지역은 내구시험로에 비해 5~30 %의 경사도가 전체적으로 넓게 분포되어 있었다.
- (3) 시험로와 기동로의 경사 특성 분석결과를 바탕으로 동력장치 내구시험로 설계안을 도출하였으며, 추가 건설된 시험로와 기존 비포장자갈길을 연결하여 4개의 동력장치 시험로 코스를 설정하였으며, 이로써 부족한 가혹도 부분이 보완된 것으로 평가되었다.
- (4) 이는 향후 군용 기동장비가 전방 군 운용지역의 동력장치에 대한 대표성 있는 하중을 추출하여, 최적의 내구시험 조건을 개발하는데 활용될 것이다.

References

- [1] 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.
- [2] Jeong Hwan Lee, Sang Ho Lee, Do Kyung Kang, and Sang Hwa Goo, "The Technical Report for the Evaluation of Test Courses Through Quantification of Relative Damage for Powertrain System," GSDC-519-070491, 2007.
- [3] Jin Saeng Yang, Sang Ho Lee, Sang Hwa Goo, and Choul Hoon Bae, "Development of Profilometer for Profile Measurement and Severity Analysis of Unpaved Test Courses," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 1, pp. 37-46, 2007.
- [4] Jin Saeng Yang, Sang Ho Lee, Sang Hwa Goo, Jeong Hwan Lee and Do Kyung 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.
- [5] Do-Kyung Kang, Sang-Ho Lee and Sang-Hwa Goo, "Development of Standardization and Management System for the Severity of Unpaved Test Courses," Sensors 2007, 7, 2004-2027.
- [6] Sang Ho Lee, Jeong Hwan Lee, Do Kyung Kang, and Sang Hwa Goo, "A Study on the Evaluation Technique of Quantified Damage for Powertrain System on Traveled Courses," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 24, No. 12, pp. 74-81, 2007.
- [7] Sang Ho Lee, Jeong Hwan Lee, Sang Hwa Goo, Yong Cheol Cho, and Ho Young Cho, "An Evaluation of Relative Damage to the Powertrain System in Tracked Vehicles," Sensors 2009, 9, 1845-1859.