Technical Paper

시험평가 부문

다목적 최적화 기법을 이용한 동력장치의 실차 내구시험모드 생성에 관한 연구

이정환^{*,1)} · 성영화¹⁾ · 이병용¹⁾

1) 국방과학연구소 제5기술연구본부

A Study on Endurance Test Mode Generation of Powertrain System Using Multi-Objective Optimization

Jeonghwan Lee*,1) · Younghwa Sung1) · Byoungyong Lee1)

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

(Received 19 January 2018 / Revised 18 July 2018 / Accepted 7 September 2018)

ABSTRACT

Based on army operating road profile, the endurance test of military vehicle aims to reproduce the similar loading conditions with mixture of proving ground tracks. It is so called as endurance test mode and its optimal generation is important to meet high reliability of endurance test. In this paper, proving ground optimization is proposed to achieve a close match to the target profile. Several performance measures such as torque-revolution counts or transmission ratio for the powertrain system can be considered as one of the objective functions. However, the one-side optimal endurance test mode may give the poor solution in the whole system point of view. To incorporate several goals simultaneously, this paper employs multi-objective optimization technique to generate endurance test mode. One of the most widely used method, weighted-sum method is applied here and the case study is discussed.

Key Words : Endurance Test Mode(내구시험모드), Multi-Objective Optimization(다목적 최적화), Weighted Sum Method (가중치법)

1. 서 론

군용 기동장비 내구도 주행시험의 목적은 장비가 운 용 중에 받는 하중 및 부하 조건을 내구시험로에서 동

* Corresponding author, E-mail: jhlee74@add.re.kr Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology 등한 수준으로 재현하여 평가하는 것이다. 최대한 실제 운용조건과 가깝게 내구시험로를 조합하는 것을 내구시험모드(Endurance Test Mode) 설정이라 하며, 이는 기동장비 시험평가 분야에서 가장 핵심적인 기술 중하나이다.

현재 비포장 시험로(Unpaved Test Courses)를 기반으로 수행하는 군용 기동장비 동력장치의 내구시험 신뢰

성 향상을 위해서는 전방 군운용지역 기동로에서의 부하 조건이 국방과학연구소(Agency for Defense Development) 창원시험장(Changwon Proving Ground)의 내구시험로에서 반영이 되도록 시험로를 최적으로 조합하는 내구시험모드 생성기술 연구가 필수적이라 할수 있다.

민수분야에서는 완성차 업체를 위주로 동력장치 (Powertrain System)의 내구시험을 대부분 차대동력계 (Chassis Dynamometer)를 활용하여 시험실에서 모사하여 수행하기 때문에, 실 시험로 기반의 내구시험모드생성 기술보다는 고객 사용조건에 기반한 차대동력계의 입력 프로파일을 개발하는 연구를 주로 수행하고 있으나 보안을 이유로 자세한 내용을 공개하지 않고 있는 실정이다[1-3].

군수분야의 경우, 동력장치 측면에서 전방 기동로와 창원시험장 시험로에 대한 부하특성 및 가혹도 (Damage) 평가 등에 대한 연구를 주로 수행하였고^[46], 동력장치에 대한 실차 내구시험모드 생성기술 개발을 위한 기초 연구로는 창원시험장 시험로와 실제 운용기동로의 주행부하(Driving Load)를 측정하고, 이를 바탕으로 토크-회전수 집계(Torque-Revolution Counting) 방법과 상대 피로 손상도(Relative Damage) 이론 등의 적용으로 기동로의 부하 조건과 유사한 수준을 가지도록 단일 목적함수를 활용한 시험로 최적 조합 연구를 수행한 바가 있다^[7,8].

그러나 기존에 수행한 연구와 같이 엔진토크에 의한 부하 하나의 목적함수만을 가지고 최적화를 수행하게 되면 시스템 전체로 볼 때 특정 설계변수(Design Parameter) 한쪽으로 과도하게 치우치거나 다른 조건을 전혀 고려하지 못하는 경우가 발생할 수 있다. 특히 기동장비 동력장치의 경우, 엔진토크에 의한 부하만을 고려하고 변속단의 운용분포를 고려하지 않으면실제 변속기에 작용하는 부하를 고려하지 못하게 되므로, 각 서브시스템(Subsystem)에 가해지는 운용 조건을 적절히 모사하기 위해서는 여러 목적함수를 고려해야 하며, 내구시험모드 설정을 위한 다목적 최적설계가 필수적으로 요구된다.

그러므로 본 연구에서는 다목적 최적화 방법 중, 가장 널리 쓰이고 간편한 가중치법(WS: Weighted Sum method)을 적용하였다. 이는 각각의 단일 목적함수에 각각 가중치를 곱한 다음, 모두 더해서 하나의 목적함수로 나타낸 후, 단일 목적함수를 가지는 여러 개의 최적설계 방법으로 바꾸어 푸는 방법이다^[9-11]. 본 방법

을 이용하면 다양한 형태의 목적함수를 통합하여 최적 화가 수행 가능하다. 즉, 다목적 최적화 기법을 이용한 내구시험모드 생성기술은 전방 군 운용지역 기동 조건 을 전 시스템적으로 모사할 뿐만 아니라 이후 내구시 험 단축화 기술에 기여할 기반 기술이 될 것이다.

2. 동력장치 내구시험모드 설정 및 접근법

2.1 설계변수 선정 및 부하 측정/분석

군용 기동장비 주행 중 동력장치에 발생하는 토크 는 엔진에서 발생하여 전달되므로 가장 기본적인 부 하 평가의 잣대라고 할 수 있고, 유럽 표준하중 공동 연구협의회(CARLOS)에서도 자동변속기의 경우 변속 기 입력 토크, 수동변속기의 경우 엔진 토크를 가장 기본적으로 사용하고 있다^[12]. 이러한 구동계에서 발 생하는 토크와 같은 물리량은 구조/현가장치 등에서 발생하는 하중과는 달리 작용 시간과 회전수에 따라 일정 진폭의 손상도를 발생시킨다^[13]. 따라서 레인플 로우 집계(Rainflow Counting) 방법과 같이 하중의 진 폭과 범위만이 포함되고 시간이 제외된 방법으로 손 상도를 평가하기는 쉽지 않으므로, 동력장치에 작용하 는 부하를 평가하기 위해서 일정 토크와 회전속도의 지속시간을 계산하는 토크-회전수 집계 방법이 사용 되어질 수 있다^[12]. 토크-회전수 집계 방법은 Fig. 1과 같이 엔진토크와 엔진 회전속도(rpm) 데이터에서 특정 토크 간격(Bin)에서의 회전수(Revolution)는 엔진 회전 속도 신호가 머무른 시간을 각각 곱하여 더해서 집계 하는 방법이다.

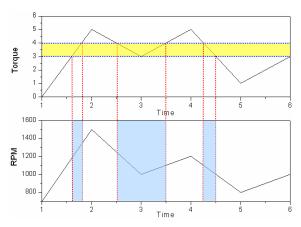


Fig. 1. The example of torque-revolution counting

그리고 동력장치의 경우 엔진에서 발생하는 토크에 의한 부하만을 고려한다면, 동력장치에서 발생하는 총 량적인 부하는 고려될 수 있으나, 변속기에 작용하는 부하는 고려되지 않으므로 토크에 의한 부하 외 변속단 운용분포(유지시간)를 추가하여 고려한다면 엔진과 변속기에 가해지는 운용 부하를 적절하게 모사함과 동시에 실제와 가까운 내구시험모드 생성이 가능하다고 할 수 있다.

이상과 같이 동력장치의 부하를 평가하고 내구시험 모드 개발을 위한 설계변수를 생성하기 위해서는 엔 진토크와 엔진 회전속도, 변속단수 등의 데이터가 필 요함을 도출하였다. 엔진토크의 경우, 직접 측정하는 것이 바람직하나 고온의 측정위치, 부족한 설치공간 등으로 계측이 용이하지 않아, 식 (1)과 식 (2)를 활용 하여 구동축 토크로부터 선형적으로 계산을 하였고, 변속단수는 식 (3)과 식 (4)를 활용하여 차량속도와 타 이어 직경, 종감속 기어비, 엔진 회전속도로부터 계산 하였다. 즉, 측정 항목으로 좌/우측 구동축 토크, 엔진 회전속도, 차량속도를 포함한 GPS 신호 등을 선정하 여 계측하였다. 여기서, LH Torque, RH Torque는 각각 좌우측 구동축 토크, Pshaft Torque와 FD는 각각 추진 축 토크와 종감속 기어비를 나타내고, Pshaft rpm은 추진축 회전속도, D는 타이어 직경, Transmission Step 은 변속단수를 나타낸다.

$$Pshaft\ Torque = \frac{(LH\ Torque + RH\ Torque)}{FD} \tag{1}$$

$$E/G Torque = \frac{Pshaft Torque}{T/M Gear Ratio}$$
 (2)

$$Pshaft rpm = \frac{\frac{vehicle \ speed(kph)}{3.6}}{\pi \times D} \times 60 \times FD \qquad (3)$$

$$Transmission step = \frac{Pshaft rpm}{Engine rpm}$$
 (4)

본 연구에서 사용된 시험차량은 시험의 용이성을 위하여 민수 상용차량을 이용하였다. 그리고 동력장치 는 운전자의 습관이나 환경조건에 민감하게 영향을 받으므로, 타이어 공기압이나 중량과 같은 차량 상태 와 운전자 및 환경조건 등도 유사하게 고려하였다. 내 구시험로에서의 차량속도는 과거 창원시험장에서 수 행한 시험차량의 평균 속도로 설정하였고, 운용지역 기동로는 해당 부대에서의 운용 속도를 기준으로 설 정하였다.

Fig. 2에 식 (1) ~ 식 (4)를 이용하여 창원시험장 비포장로에 대한 계측데이터로 계산한 변속단수, 엔진토크 등의 데이터 일부를 나타내었고, Fig. 3에 창원시험장 내구시험로와 운용지역 기동로에 대한 토크-회전수집계 결과를 나타내었다. 여기서 Pave는 창원시험장의 포장로, UG는 비포장자갈길, XC는 야지시험로를 나타내고, B는 전방 운용지역 기동로를 의미한다.

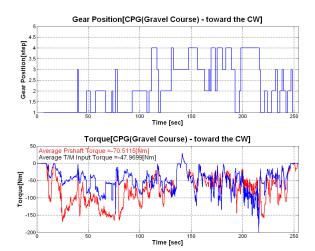


Fig. 2. Calculated data using measuring signal

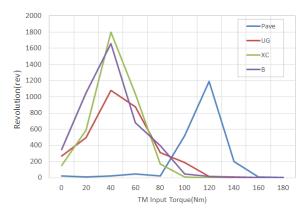


Fig. 3. Torque-revolution counting result of test courses and maneuvering road

2.2 동력장치 내구시험모드 생성을 위한 접근법 앞서 언급하였듯이, 기동장비 동력장치와 같이 회전 하고 있는 구동계 부품의 가장 기본적인 평가 방법인 각 노면에 대한 토크-회전수 집계 결과를 단일 목적 함수로 하여 생성하는 방법으로 접근하였다. 이는 전 방 군 운용지역 기동로에 대한 토크-회전수 부하 조 건이 반영되도록 창원시험장 내구시험로를 최적으로 조합하는 접근법이다.

운용지역 기동로의 부하 조건에 대한 시험로를 최적으로 조합하기 위하여, 창원시험장 포장로의 주행 거리를 x_1 , 비포장로의 주행 거리를 x_2 , 야지의 주행 거리를 x_3 라고 한다면, 이는 식 (5)와 같이 나타낼 수있다.

여기서, PR는 포장로의 토크-회전수 부하, UG는 비포장로의 토크-회전수 부하, XC는 야지의 토크-회전수 부하, Target는 운용지역 기동로의 토크-회전수 부하를 나타낸다. 그리고 식 (5)의 해를 풀기 위하여 최소자숭법(Least Mean Square)을 적용하였고, 이는 식 (6)과 같은 목적함수와 식 (7)과 같은 구속조건을 만들 수 있다.

$$Min. J(x) = || [PG] \cdot [x] - [Target] ||$$
 (6)

Constraint
$$[x_i] \ge 0$$
 (7)

여기서 PG는 시험로의 토크-회전수 부하, x_j 은 해 (시험로 주행 거리), Target은 운용지역 기동로의 토 크-회전수 부하를 나타낸다.

2.3 단일 목적함수에 의한 시험로 최적설계 결과 식 (6)과 식 (7)을 이용하여, 전방 B 지역의 기동로에 대한 토크-회전수(Torque-Revolution, T-R) 집계 결과만을 고려한 최적화를 수행하여 Table 1에 나타내었다. 이는 B 지역 기동로 1 km 주행에 대해서는 창원시험장의 비포장로 약 0.6 km, 야지시험로 약 0.6 km를 주행하면 유사한 부하를 나타낸다는 의미이다. 여기서 포장로는 0의 결과가 나타나는데, 이는 B지역기동로가 비포장 노면이고 운용속도가 낮아 부하 분포가 포장로와 상이하기 때문으로 판단된다.

앞서 언급하였듯이, 엔진에서 발생하는 토크에 의한

부하 외 동력전달장치인 변속기에 작용하는 부하에 해당하는 변속단(Transmission, T/M) 운용분포도 중요하기 때문에 이를 단일 목적함수로 하여 최적 해를 도출하여 보았다. 즉, 식 (6)과 식 (7)에서 토크-회전수집계 결과 대신 변속단수 유지시간(운용분포)의 차이를 최소화하는 최적화를 수행한 결과를 Table 2에 나타내었다. 이는 B 지역 기동로 1 km 주행에 대해서는 창원시험장의 직선 포장로 약 0.1 km, 야지시험로 약 1.0 km를 주행하면 유사한 변속단수 분포를 나타낸다는 의미이다.

Table 1과 Table 2는 대립되는 결과를 보이고 있는데, 토크-회전수 집계 결과를 최적화하는 해는 포장도로를 전혀 주행하지 않아야 하며, 변속단수 유지 시간을 최적화 하는 해는 비포장로를 전혀 주행하지 않아야 한다는 결과가 산출되었음을 알 수 있다.

Fig 4와 Fig. 5에는 Table 1과 Table 2의 해에 대한 토크-회전수 집계 결과와 변속단 운용분포를 나타내었다. 측정 시험로의 개수, 같은 시험로에 대한 다양한 속도에서의 측정 부족 등 시험데이터의 한계로 그결과가 좀 더 명확하게 드러나지 않은 측면이 있지만 Fig. 4에서 손상도에 크게 영향을 미치는 고토크 영역에서 차이가 큰 것으로 볼 때 Table 1의 결과가 나은 것으로 판단되고, Fig. 5에서는 측정데이터의 Table 2의 결과가 상대적으로 나은 것으로 판단된다.

그러므로 시스템 전반을 함께 최적으로 모사하려면 복수의 목적함수를 한 번에 고려해야 하며 이 둘의 적절한 조정을 통해 전체 시스템의 부하 및 하중을 최적화할 수 있는 해를 찾아내야 한다.

Table 1. T-R optimization result for test courses

CPG	B Road
Paved Course(x_1)	0
Unpaved Gravel Course(x2)	0.6
Cross Country Course(x ₃)	0.6

Table 2. T/M optimization result for test courses

CPG	B Road
Paved Course(x1)	0.1
Unpaved Gravel Course(x2)	0
Cross Country Course(x3)	1.0

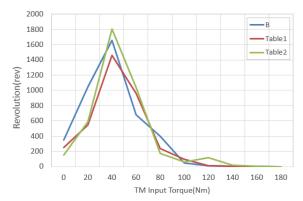


Fig. 4. Comparison of Table 1 and Table 2(T-R)



Fig. 5. Comparison of Table 1 and Table 2(T/M)

본 연구에서는 다목적 최적화 기법을 도입하여 복 수의 목적함수를 고려하여 내구시험모드를 생성하는 방법(절차)을 제안한다.

동력장치 내구시험모드 생성을 위한 다목적 최 적설계

3.1 다목적 최적설계

다목적 최적설계(Multi-Objective Optimization)의 일 반적인 식은 식 (8)과 식 (9)와 같이 주어진다.

Minimize
$$J(x,p)$$
 (8)

$$g(x,p) \leq 0, \quad h(x,p) = 0$$
 Constraint
$$x_{i,L} \leq x_i \leq x_{i,U}$$

$$x \in S$$
 (9)

where,
$$J = [J_1(x),...,J_m(x)]^T$$
, $x = [x_1,...x_n]^T$,
$$q = [g_1(x),...,g_l(x)]^T$$
, $h = [h_1(x),...,g_m(x)]^T$

여기서, x는 n개의 설계변수 벡터를 의미하며, p는 고정된 변수 벡터이다. J는 k개의 목적함수로 구성된 벡터이며, g와 h는 각각 l개의 부등호 제한 조건과 m개의 등호 제한 조건들로 구성된 벡터이며, S는 설계변수 가용영역(Feasible Region)을 의미하며 설계변수의 상한과 하한은 각각 x_I , x_{IJ} 벡터로 정의된다.

다목적 최적설계 시 가장 많이 사용되는 방법은 가중치법(Weighted Sum Method)으로 이는 각각의 단일 목적함수에 각각 가중치를 곱한 다음, 모두 더해서 하나의 목적함수로 나타낸 후, 단일 목적함수를 가지는 여러 개의 최적설계 방법으로 바꾸어 푸는 방법이다. 이 가중치를 조금씩 변화시키면서 얻어진 단일 목적 함수 최적 설계 문제의 해를 목적함수 공간에 배열하면 파레토 최적해를 얻을 수 있다^[14]. 가중치법을 수식화 하면 다음과 같다.

Minimize
$$J_{WS}(J(x,p))$$
 (10)

where,
$$J_{WS} = \sum_{i=1}^k w_i \bigg(\frac{J_i}{SF_i}\bigg) \quad with \ w = [w_1,...,w_k]^T$$
 and $w_i \geq 0$ for all $i, \sum_{i=1}^k w_i = 1$

여기서, SF_i 는 각 목적함수 J_i 를 재규격화하는 스케일 변수(Scaling Factor)이다. 스케일 변수에 따라 최적화 결과가 판이하게 달라지므로 적절한 스케일 변수 값을 설정하는 일은 매우 중요하다.

3.2 동력장치 내구시험모드 생성을 위한 다목적 최 적설계

본 연구에서는 토크-회전수 집계 결과, 변속단수 유지시간(운용분포)을 목적함수로 설정하였다. 또한, 각목적함수에 대해 동일하게 스케일 변수를 적용하였다. 가중치법에 의한 내구시험모드 최적설계 수식은 다음과 같다.

Minimize
$$J_{WS}(x) = wJ_1(x) + (1-w)J_2(x)$$
 (11)

Constraint
$$x_i \ge 0, i = 1,...,n$$
 (12)

where,
$$J_1(x) = \| [PG]_{TR} \cdot [x] - [Target]_{TR} \|$$

 $J_2(x) = \| [PG]_{TM} \cdot [x] - [Target]_{TM} \|$
 $x > 0$

여기서, $[PG]_{TR}$, $[PG]_{TM}$ 은 각각 창원시험장 시험로에서 측정된 토크-회전수 집계 결과 및 각 변속단수의 유지시간이고, $[Target]_{TR}$, $[Target]_{TM}$ 는 운용지역기동로의 토크 회전수 집계 결과 및 변속단수 유지시간이다.

토크-회전수 집계 결과의 경우 m개의 구간으로 나누어 데이터를 처리하였고, 변속단수는 1단부터 4단까지 각각 유지하는 시간으로 정의하였으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[PG]_{TR} = \begin{bmatrix} PR_1 & UG_1 & XC_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ PR_m & UG_m & XC_m \end{bmatrix}_{TR}$$
(13)

$$[PG]_{TM} = \begin{bmatrix} PR_1 & UG_1 & XC_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots \\ PR_4 & UG_4 & XC_4 \end{bmatrix}_{TM}$$
(14)

$$[Target]_{TR} = \begin{pmatrix} Target_1 \\ \vdots \\ Target_m \end{pmatrix}_{TP}$$
(15)

$$[Target]_{TM} = \begin{pmatrix} Target_1 \\ \vdots \\ Target_4 \end{pmatrix}_{TN}$$
(16)

즉, 설계변수는 창원시험장의 직선 포장로, 비포장자갈길, 야지시험로 주행거리이며, 이 값이 양의 값이가지도록 제한하였으며, 사용된 각 노면은 1 km 길이로 정규화 하였다. 그리고 목적함수는 창원시험장 주행으로 발생하는 부하 데이터(토크-회전수 집계 결과, 변속단수 유지시간)와 전방 운용지역 기동로에서 발생하는 부하 데이터와의 차이를 최소화하는 것이다.

본 문제는 기존 단일 목적함수 최적화에 활용가능한 다양한 알고리즘이 적용 가능하고, 본 연구에서는 순차적 이차 계획법(Sequential Quadratic Programming)을 적용하였으며 최적화 코드 구현은 MATLAB을 이용하였다.

먼저 다양한 시험로 주행 거리에 대해서 목적함수 값을 계산하였다. 본 연구에서 사용된 설계변수 x_1 , x_2 , x_3 에 대해 실험계획법(DOE, Design of Experiments)을 실시하였다. 완전요인 배치법(Full Factorial Design)을 적용하여($\triangle x_1 = \triangle x_2 = \triangle x_3 = 0.025, x_1, x_2, x_3 \in [0,1])$ 41×41×41 격자, 총 68,921개의 설계점들이 생성되었다. 각 설계점과 그에 매칭되는 목적함수 값들은

Fig. 6에 나타내었다. 빨간점의 경우, [x_1 , x_2 , x_3] = [0.25, 0, 1]가 [J_1 , J_2] = [736.42, 39.02]로 매핑되는 것을 나타낸 것이다.

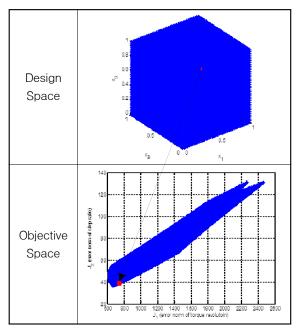


Fig. 6. Mapping from design space to objective space

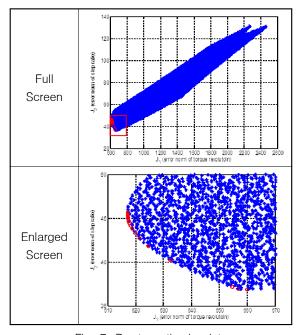


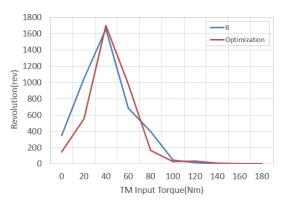
Fig. 7. Pareto optimal points

가중치를 0.05 씩 늘려나가면서 21번의 실험을 수행하고($\triangle w = 0.05$, $w \in [0, 1]$), 그 최적화 결과(빨간색동그라미)를 실험계획법 결과와 함께 Fig. 7에 나타내었다. 가중치법을 이용하여 목적함수 J_1 , J_2 를 최소화하는 파레토 최적해 표면(Pareto front)을 잘 찾아가는 것을 볼 수 있다.

한편, 가중치에 따라 주행 거리가 0으로 수렴하는 해가 발생한다. 가중치 21개 값 중 17 경우는 $x_1 = 0$ 일 때가 최적 해이며, 2 경우는 $x_2 = 0$ 일 때 최적해

Table 3. Optimal solution for weighting value

	w = 0.10	w = 0.15
x_1	0.0307	0.0100
<i>x</i> ₂	0.0132	0.2152
<i>x</i> ₃	0.9358	0.7928



(a) Result of T-R Optimization

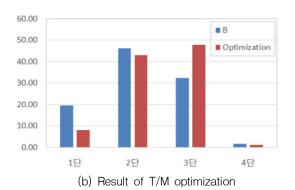
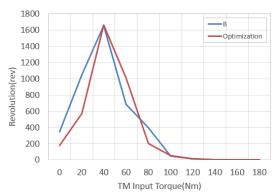


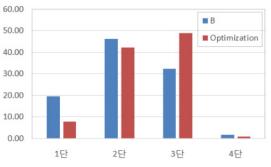
Fig. 8. Solution for weighting value 0.10

가 도출된다. 세 가지 설계변수가 모두 0이 아닌 2가지 결과가 도출되었는데, Table 3과 같이 가중치가 w = [0.10, 0.15] 일 때이다.

이상과 같이, 창원시험장 시험로와 운용지역 기동로의 토크-회전수 집계 결과 및 변속단수 유지시간에 대한 다목적 최적설계를 수행하여 2가지 결과를 도출하였고, 각각의 도출 결과에 대해 토크-회전수 집계 결과와 변속단 운용분포를 Fig. 8과 Fig. 9에 나타내었고, B는 전방 운용지역 기동로, Optimization은 다목적최적설계를 수행하여 도출된 결과를 의미한다. 그림에서 볼 수 있듯이, 2개의 도출 결과는 서로 거의 유사한 결과를 보여주었고 주어진 조건에서 최적의 값을 도출하였나, 비포장로의 조향/경사 특성 및 야지의 노면굴곡 특성 등 다양한 시험로 부하 특성을 반영하기위해서는 가중치 0.15인 경우의 결과가 좀 더 현실적이라고 판단된다. 또한, 내구시험로에서의 측정을 속도별, 코스별로 다양하게 하면 오차는 상당부분 줄어들 것으로 판단된다.



(a) Result of T-R optimization



(b) Result of T/M optimization

Fig. 9. Solution for weighting value 0.15

4. 결 론

본 논문에서는 군용 기동장비의 동력장치 측면에서 내구도 주행시험 신뢰성을 향상시키기 위하여 시험로 기반 내구시험모드의 생성에 대한 접근법을 제시하였고, 이를 바탕으로 한가지 목적함수만 고려하였던 접근법을 다목적 최적설계 문제로 확장하여 최적해를 도출하여 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- (1) 군용 기동장비의 동력장치에 대한 실 시험로 기반 실차 내구시험모드를 토크-회전수 집계 결과를 이 용하여 최적 생성하는 접근법을 제시하였고 유효 성을 검증하였다.
- (2) 동력장치의 내구도 주행시험의 경우, 토크에 의한 부하 외 변속단 운용분포도 중요한 시험조건이므로, 토크-회전수 집계 결과의 한 가지 목적함수에 대한 최적해만으로는 변속단수 운용분포를 만족시 키지 못함을 분석하였고, 이를 시스템 전반을 함 께 최적으로 모사하려면 복수의 목적함수를 한 번 에 고려하는 다목적 최적화 기법을 제안하였다.
- (3) 제안한 다목적 목적함수를 적용하여 운용지역 기 동로에 대하여 창원시험장 내구시험로를 최적설계 한 결과를 2가지 도출하였고, 이의 유효성을 검증 하였다.
- (4) 향후 내구시험모드의 신뢰성을 향상시키기 위하여 동력장치를 대표하는 추가 설계인자(목적함수)를 도출하고, 다양한 속도 및 노면의 데이터를 확보 함과 동시에 알고리즘 개선을 통해 목적함수 공간 에서 균등한 해를 얻도록 하여, 시스템 전반을 한 번에 최적화하는 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] Kim, J. C., Cheong, S. Y., and Cheong, Y. C., "Prediction of Cumulative Damage by Analysis of Automatic Transmission Endurance Test Mode," SAE 2000, 2000-05-0084.
- [2] Shin, B. K. and Jang, J. D., "Development of an Evaluation Program of Critical Durability for the Automatic Transmission's Driveline," Proceeding on KSAE, pp. 1094-1099, 2001.
- [3] A. Vertua, F. Kihm, A. Halfpenny, "Proving Ground

- Optimisation based on Fatigue Damage Spectra," 2011.
- [4] Sang Ho Lee, Jeong Hwan Lee, Do Kyoung 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.
- [5] 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.
- [6] 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, Vol. 9, No. 1, pp. 1845-1859, 2009.
- [7] Jeong Hwan Lee, Sang Ho Lee, Do Kyung Kang, Jae Hong Park, and Byoung Yong Lee, "Test Mode Analysis for Powertrain System of Test Courses and Operation Roads," The Korea Institute of Military Science and Technology, Conference, pp. 1668-1671, 2012.
- [8] Jeong Hwan Lee, Sang Ho Lee, Young Hwa Sung, Do Kyung Kang, and Jae Hong Park, "Test Mode Analysis of Powertrain System of Tracked Vehicle," Ground System Development Conference, pp. 1-5, 2012.
- [9] L. Zadeh, "Optimality and Non-Scalar Valued Performance Criteria," IEEE Trans. Automatic Controls, AC-8, 59, 1963.
- [10] W. Stadler, "A Survey of Multicriteria Optimization, or the Vector Maximum Problem," Journal of Optimization Theory and Applications, Vol. 29, pp. 1-51, 1979.
- [11] J. Koski, "Multicriteria Truss Optimization," in Multicriteria Optimization in Engineering and in the Sciences, W. Stadler, ed., New York, Plenum Press, 1988.
- [12] "The Development of Standardized Load for Powertrain and Suspension Component of European Car," Korea Automotive Technology Institute, 2005.

- [13] Gong, H. S., Kwon, J. H., Lee, K. Y., Oh, C. S., Jung, S. B., Sul, I. H., and Kim, T. J., "Application of Data Classification for Damage Evaluation of Rotational Component under Fatigue Loading," Proceeding on KSAE, pp. 3-8, 2000.
- [14] Il Yong Kim, Oliver de Weck, "Adaptive Weighted Sum Method for Bi-objective Optimization," Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 21, No. 9, pp. 149-157, 2004.