

# 정유압 기계식 변속기 에뮬레이터의 설계 및 제작

## A Design and Fabrication of Hydromechanical Transmission Emulator

방호균,<sup>o</sup>이병선, 김두근  
 통일중공업(주) 중앙연구소

### 요 약 문

기계적 구동장치와 연계된 메카트로닉스 시스템에 대한 개발 시험은 비용, 공간 및 시간 등의 측면에서 제약을 받는다. 이러한 제약은 에뮬레이터를 이용한 개발 과정을 통해서 개선의 효과를 얻을 수 있다. 본 연구에서 설계 제작된 에뮬레이터는 전자 제어식 변속기에 적용된 장치로서 기계적 메카니즘 없이 전자 제어 메카니즘을 완전하게 에뮬레이션할 수 있는 가능성을 보여준 것이다. 이러한 에뮬레이터를 이용하여 전자 제어 장치의 개발 기간을 단축 시키고 문제점을 빠르게 찾아낼 수 있다. 에뮬레이터의 개발은 수학적 모델링에 의해서, 장치에 대한 검증은 실차 시험을 통해 얻을 결과와 비교하여 수행된다.

### 1. 서 론

차량의 원활한 구동을 위해서는 엔진으로부터 얻은 동력원을 운전자가 원하는 적절한 속도로 가변을 시켜줄 수 있는 장치가 필요하다. 이러한 역할을 수행하는 장치를 흔히 변속기라 하며, 수동식과 자동식으로 구분된다.

무단 변속기는 구성 원리에 따라 벨트 구동 방식, 트랙션 구동 방식, 정유압 방식으로 나뉘는데, 본 연구에서는 정유압 방식 중 정유압 기계식 변속기(HST)의 기계 장치에 대한 에뮬레이션을 시도한 것이다. 유압 기계식 변속기는 유압식과 기계식의 장점을 조합한 것으로 유압펌프 모터 및 유성치차 클러치 등으로 구성되어 있다. 정유압 기계식 변속기는 차량의 출발시나 등판 등의 고출력을 요구하는 경우 정유압 장치를 통해 동력을 전달하며, 일정 속도 이상에서는 유성 치차와 클러치의 동작에 의해 기계식 동력 전달 장치를 통해 출력한다. 이러한 구동 방식은 고출력 고효율의 측면에서 장점을 가지게 된다[1~4].

본 연구에서 적용된 변속기는 600HP 급 정유압 기계식 변속기로 궤도 차량에 이미 적용되고 있는 기종으로 작동 원리를 이해하고 수학적 모델링을 통해 얻은 결과와 실차 상태에서 얻어진 결과를 비교하여 상사 장치의 신뢰도를 입증한다. 모델링은 치차열과 정유압 펌프의 스트로크에 따른 유량으로 구한다[4~6]. 에뮬레이터는 실차 상태에서는 행하기 어려운

시험에 대한 적용 및 제어장치의 개발에서 큰 효과를 얻을 수 있다[7][8].

### 2. 유압기계식 변속장치의 해석 및 구성

#### a. 정유압 시스템의 동적 모델

Radial Ball Piston 형의 Pump와 Motor는 정유압 기계식 변속기를 구성하는 핵심 부품으로, 가변 펌프-고정 모터형이 적용된다. 시스템의 구조는 그림 1에 보는데

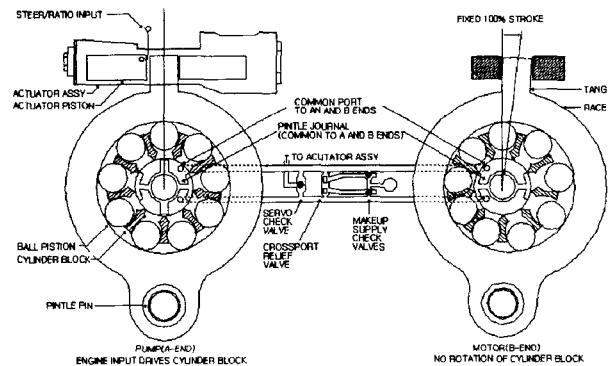


그림 1. Radial Ball Piston 형의 Pump와 Motor.

와 같이 9개의 볼로 구성되어 있으며, 모터는 항상 최대 스트로크 각으로 고정되어 있다[5][9]. 그림 1의 경우 중립상태로, 전진일 경우 펌프 측의 Actuator

Piston 이 왼쪽, 후진일 경우 오른쪽으로 운동하여 유로의 방향 및 유량의 변화를 발생시킨다.

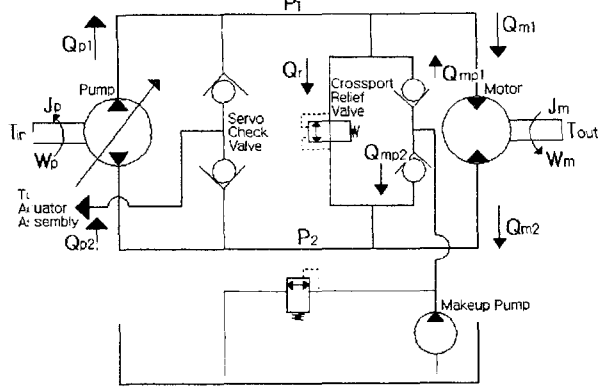


그림 2. HST 유압 회로도.

그림 2.는 그림 1.에 대한 유압 회로로 토크( $T_{in}$ ,  $T_{out}$ ), 유량( $Q_p$ ,  $Q_m$ ), 압력( $P_1$ ,  $P_2$ )등 펌프 가변 용량형 시스템의 특성을 명확하게 보여준다[6][10].

이러한 유압 회로에서 펌프와 모터 축의 운동 방정식을 구하면

$$J_p \ddot{\theta}_p + B_p \dot{\theta}_p = (T_{in} - T_p) \quad (1)$$

$$J_m \ddot{\theta}_m + B_m \dot{\theta}_m = \left( T_m - T_{out} \frac{\omega_m}{|\omega_m|} \right) \quad (2)$$

와 같은 식을 얻을 수 있다. 여기서  $\theta_p, \theta_m$ 은 펌프와 모터의 회전 각도이고  $J_p, J_m$  및  $B_p, B_m$ 은 각각 펌프와 모터의 관성 모멘트 및 마찰 계수이다. 또  $\omega_m$ 은 모터의 회전 각속도이다.

#### b. 유압 기계식 변속장치의 구성

본 연구에 적용된 변속기는 클러치, 베벨 기어, 스피어 기어, 5개의 유성기어, 축 등의 기계적 요소와 정유압 장치로 구성되며 브레이크와 클러치를 적절히 조합함으로써 1, 2, 3 속의 3 가지 동력 전달 방식을 갖는다.

#### ■ 1속 및 후진

1 속 및 후진에서의 동력은 1 단 브레이크의 작동으로 2속, 3 속 유성 기어를 구속하여 정유압 장치에 의해 전달되며 엔진 속도( $E$ )에 대하여 출력 속도( $N_{out}$ )는

$$N_{out} = E \times H_1 \quad (3)$$

$$H_1 = 0.211 \times P_s \quad (4)$$

가 된다. 여기서  $P_s$ 는 Pump Stoke 이고,

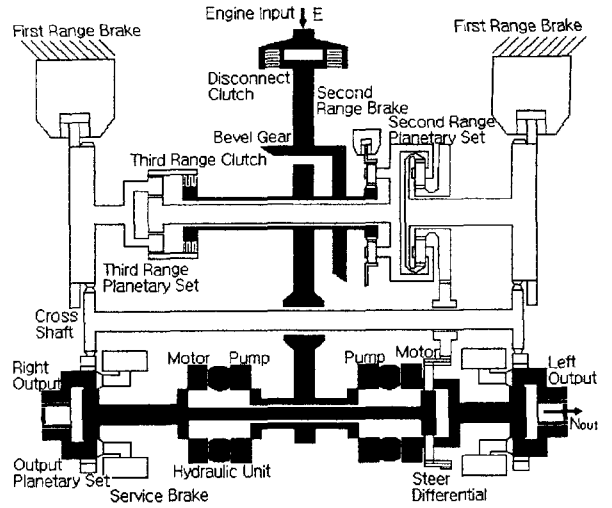


그림 3. 1속 및 후진에서의 동력 전달 경로.

그림 3.과 같이 검게 칠해진 실선이 동력 전달 경로이며, (4)식에서 0.211은 기어비에 의해 산출된다.

#### ■ 2속

2속에서의 동력은 2속 브레이크가 작동되어 2속 유성 기어계와 차동 기어계를 통한 기계적인 동력과 정유압 장치에 의한 유압 동력으로 전달되며 출력 속도 방정식은

$$N_{out} = E \times H_2 + E \times M_2 \quad (5)$$

가 된다. 여기서  $H_2, M_2$ 은 정유압과 기계적인 동력으로  $H_2 = -0.27325 \times P_s$ ,  $M_2 = 0.38532$ 가 된다.  $H_2$ 는 1속과 동일한 동력 전달 경로를 가지나, 2속 기어에 의한 동력 전달로 1속의 정유압 동력에 비해 증가된 값을 갖는다.

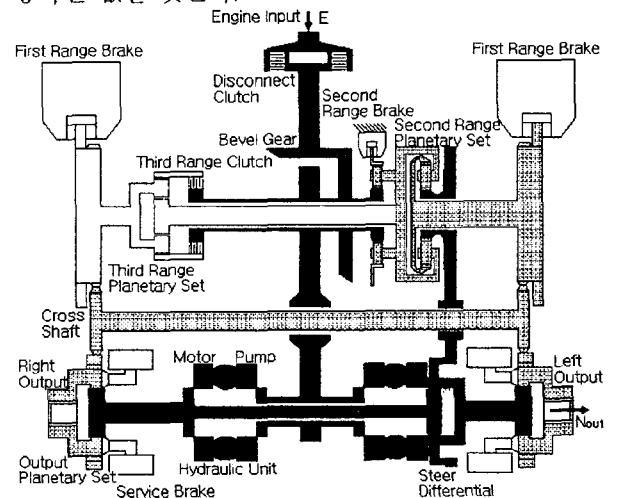


그림 4. 2속에서의 동력 전달 경로.

### 3 속

3속에서 동력은 1,2속 Brake가 해지되고 3단 클러치가 작동되어 2속 동력 전달 방식에 3속 유성치차에 의한 동력을 부가한 기계적인 동력과 정유압에 의한 동력으로 전달되며 출력 속도 방정식은

$$N_{out} = E \times H_3 + E \times M_3 \quad (5)$$

이다. 여기서  $H_3 = 0.37664 \times P_s, M_3 = 0.92472$  이다.

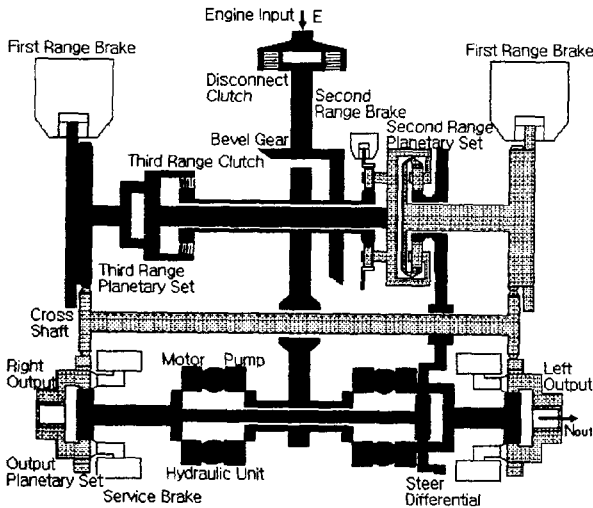


그림 5. 3속에서의 동력 전달 경로.

### 3. 전자제어장치 동작 원리 및 Emulator 구성

#### a. 전자 제어 장치의 동작 원리

본 연구에 적용된 시스템은 전자 제어식 변속기로 전자제어장치(TEC)는 크게 EA(Electronic Assembly), IA(Interface Assembly), S/T(Shift Tower)와 D.B.(Distribution) Box 로 구성되어 있다.

EA는 변속기의 제어장치로 변속기의 동작에 필요한 모든 신호를 받아들여 변속기를 최적의 상태로 운영하고 이상 유무를 검출하는 기능을 수행한다. IA는 변속기의 기계적 요소와 전자적 요소를 결합하며, 스테핑 모터와 솔레노이드 밸브 등의 구동기와 속도, 위치 및 온도 센서를 내장하고 있다. 여기서 스테핑 모터는 스트로크를 변화시키며, 솔레노이드 밸브는 단속(Range) 및 조향 감도를 조정한다. S/T는 운전자가 원하는 단속을 설정해주는 역할을 한다. D.B. Box는 TEC에 전원과 엔진 시작 신호를 EA에 공급한다. 또한 Parking Brake 신호를 통해 운전자의 실수에 의한 오동작을 방지한다. 또한

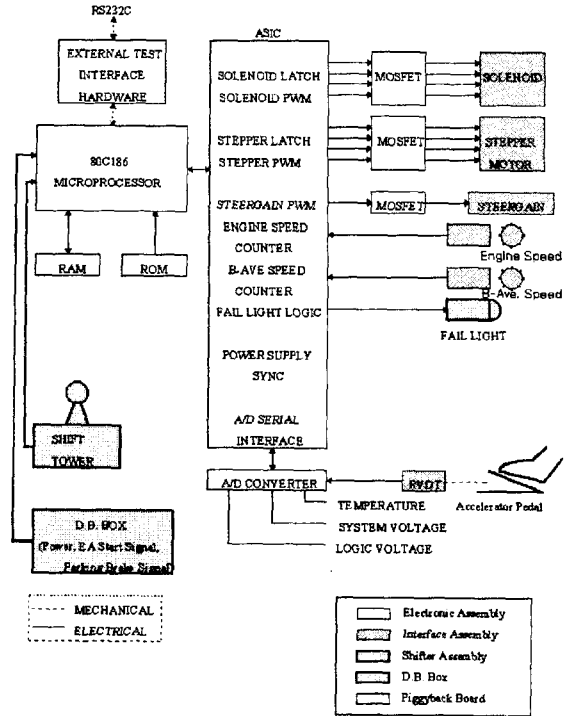


그림 6. 전자 제어 장치(TEC) 구성도.

그림 6.과 같이 E/G Speed, B-Ave. Speed를 홀센서에 의해 계측한다. 여기서 B-Ave. Speed는 유압 Motor의 회전 속도로 출력속도 및 단속과 밀접한 관계를 갖는다. 그리고 TEC은 EA에 부가 장치를 이용하여 EA의 상태를 모니터링할 수 있도록 설계되어 있으며, 본 시험에서는 이러한 부가 장비를 통해 실차 운영 조건을 획득하는 방법을 이용하였다.

#### b. Emulator 구성

본 논문에서 개발된 Emulator는 변속기 조건에 따른 엔진 및 출력속도 프로파일을 생성해주는 장치로, 속도 프로파일을 구하기 위해서는 현재 엔진 입력과 단속, 스트로크 및 드로틀에 관한 정보가 필수적이다. Emulator는

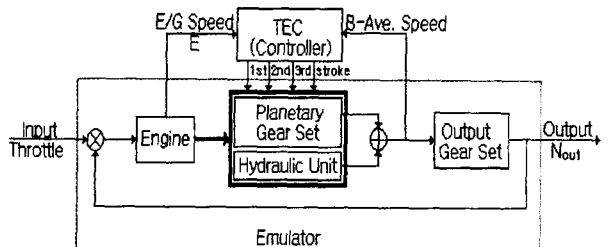


그림 7. Emulator 제어 흐름도.

그림 7.과 같은 제어 흐름을 가지며, 전자적인 요소를 제외한 기계적인 요소를 Emulation 해주게 된다. 여기서 Emulation 이 필요한 부분은 크게 엔진속도와 변속기의 정유압 및 기어 셋으로 구성된 동력 전달 계통이다. 엔진 속도( $E$ )에 대한 Emulation 은 현재의 출력 속도와 드로틀 각도에 의해 구해지며, 시험에 적용된 엔진에 대한 스케줄 곡선을 기본으로 드로틀 각도를 10% 단위로 등분해서 대표 값을 보간하는 방법을 적용한다. 구해진 엔진속도를 2.b.절에서 구해진 출력속도 방정식을 각 단 속 및 스트로크 조건에 맞게 적용하면 출력속도( $N_{out}$ )를 얻을 수 있다. 또한 B-Ave. Speed는 유압 모터에 달린 기어열의 회전 속도로 펌프의 스트로크 및 단 속에 의해 결정되며 정유압 구동축의 평균 출력속도이다.

TEC의 상태를 받아들이기 위해서는 적절한 하드웨어의 설계가 필요한데, 이러한 정보를 받아들이기 위한 Interface Circuit 은

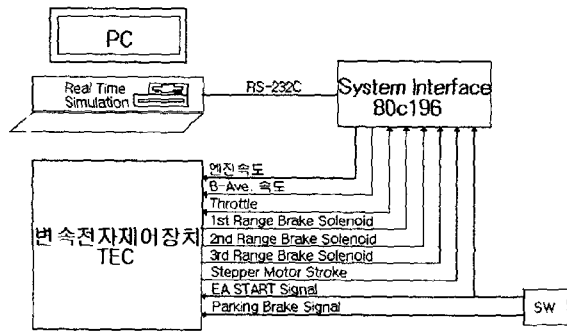


그림 8. 전자 제어 장치와 에뮬레이션 PC의 신호 연결도.

그림 8.의 연결도와 같이 80C196KC를 이용하여 구성한다. Interface Circuit에서 TEC과의 간섭을 줄이기 위하여 Photo Coupler를 이용하였으며, System Interface Board는 TEC의 상태를 RS-232C 방식을 이용하여 PC로 전송하면, PC에서 계산된 값을 재전송하여 80C196KC의 HSO(High Speed Output) 모드를 이용하여 엔진 및 B-Ave. 파형을 출력한다[11].

#### 4. 시험 방법 및 결과

##### a. 시험 방법

시험은 실차 시험과 에뮬레이터로 시행한다. 실차 시험은 EA에 Piggyback 보드를 장착하여 차량에 관한 정보 획득을 하게 된다. 에뮬레이터의 시험은

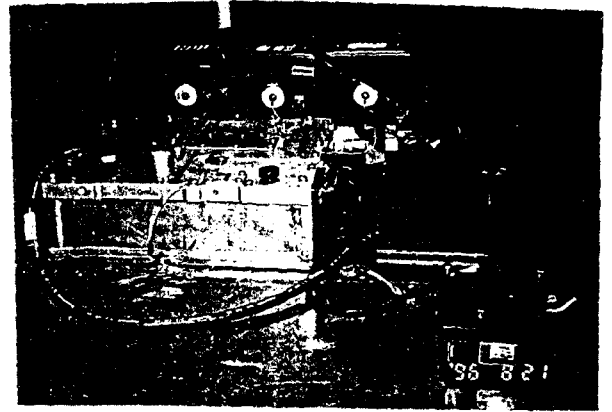


그림 9. 에뮬레이터를 위한 기계 장치 구성도. (중앙: IA, 우측:EA, 우측하단:S/T)

그림 9.와 같이 제어 장치를 이루는 IA, EA, S/T 만을 분리하여 진행하며, 에뮬레이터는 변속기의 주행 조건에 따라 엔진( $E$ ), 정유압 구동축(B-Ave.), 출력 속도( $N_{out}$ )를 생성한다.

차량 시험은 크게 최대속도, 저속, 후진, 회전 모드로 나뉘어 진행되었다. 시험은 4 차에 걸쳐 진행되었으며 모드별 시험 횟수는

표 1. 주행 모드별 시험 횟수

주행 모드	시험 횟수	
저속 모드	4	
최대 속도	6	
후진 모드	4	
회전 모드	좌	3
	우	3

시행되었다. 이러한 차량 시험은 주행 시험로에서 행해졌다.

이러한 실차 시험을 통해 얻은 결과와 에뮬레이터를 통해 얻어진 결과를 비교하여 에뮬레이터의 신뢰도와 변속기 성능을 판단한다.

##### b. 시험 결과 비교

에뮬레이터는 엔진 속도, 출력 속도와 정유압 구동축 속도를 생성해준다. 이렇게 생성된 속도들이 신뢰도를 갖기 위해서는 실차에서 얻어진 속도와 비교할 필요성이 있다. 본 실험에서는 실차 시험 데이터와 에뮬레이터에서 발생하는 속도 비교를 위하여 드로틀, 펌프 스트로크, 단 속을 실차와 동일한 조건으로 실시하였다.

우선 대표적으로 실차 조건은 차량의 운행 상태에

관한 모든 정보가 포함된 최대 속도 시험을 이용하여 비교한다. 에뮬레이터와 실차 운행에 의한 시험 결과는

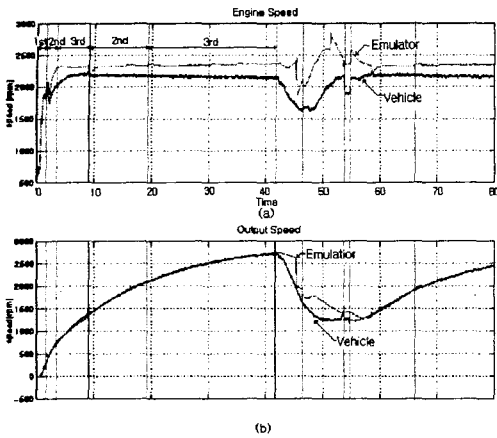


그림 10. 최대 속도 시험 결과,  
(a) E/G Speed, (b) Output Speed.

그림 10.과 같다. 여기서 Emulator 로 표시된 부분이 에뮬레이터에 의한 적용 결과이며, Vehicle 이 실차 운행에 의한 결과이다. 그래프 중간의 가는 세로 선은 변속 시점으로 정유압 구동축(B-Ave.) 속도를 기준으로 표기한 것이다.

우선 그림 9. (a)의 엔진속도를 보면 초기 1 단 부분은 비교적 실차 조건과 유사한 결과 보여준다. 하지만 5~40 초 구간에서 실차 조건에 비해 약 100 rpm 정도 높은 값을 보여 주고 있다. 또한 40~60 초 사이의 감속 구간에서는 불완전한 추정 값을 보여주고 있다. 그리고 다시 60~80 초 사이에서는 5~40 초 사이에서와 비슷한 특성을 보여주고 있다.

출력속도는 엔진속도에 비해 유사한 특성 곡선을 보여주고 있다. 하지만 40~60 초 사이의 감속 구간에서는 엔진속도에서와 같이 불완전한 특성을 보여준다.

이러한 특성은 차량의 관성 및 제동력에 대한 특성을 반영하지 못함때 따른 것으로, 특히 감속시와 변속이 잦은 곳에서 문제를 보여준다.

## 5. 결 론

기계적인 구조물에 대한 개발과 시험은 비용과 시간 등의 많은 제약을 받는다. 이러한 문제에 대한 해결 방안의 일부로 에뮬레이터에 대한 개발에 많은 투자가 되고 있다. 본 연구에서는 변속기용 에뮬레이터를 개발하고, 개발된 시스템을 실차 운영 조건과

비교하여 에뮬레이터의 기능 확인에 목적이 있다.

에뮬레이터와 실차 조건의 비교 결과 엔진 속도는 실차 조건에 비해 비교적 높은 값과 감속시 불완전한 상태를 보여주었으며, 차량 속도의 경우 실차 조건과 매우 근사한 결과를 보여주었다. 또한 차량 속도는 엔진속도에서와 같이 감속시 약간의 문제를 보여주었다. 이러한 문제는 차량의 관성 및 제동력 등의 특성을 고려하지 못함때 따른 것으로 에뮬레이터의 기능에 큰 영향을 미치지 않으며, 이러한 시험을 통해 에뮬레이터를 통한 개발 시험 가능성을 충분히 보여주었다. 또한 변속이 잦은 시점에서 불안한 특성을 보여주고 있는데 제동 함수를 이용한 개선 가능성을 모색 중이다.

## < 참 고 문 헌 >

1. H.Muller, "Hydrostatic Transmission and Controls for Wheeled Vehicles," SAE841099.
2. R.W.Henke, "Hydrostatic Transmissions," Part1~4, Hydraulics and Parameters, 1982.
3. W.Wilson, C.D.Lemme, "Hydrostatic Transmissions," Hydraulic and Pneumatics, pp109~125, Mar., 1970.
4. 황적철, 정순배, 김영덕, "정유압과 동유압 변속기 구동효율의 실험적 비교 분석," 제 1 회 전투차량 개발 기술 학술대회, 국방과학연구소, pp405~483, Oct., 1990.
5. "Lockheed Martin Defense Systems Hydromechanical Power Transmission Briefing," Tech. Report of Lockheed Martin, June, 1995.
6. 정오진, 1996, "유압 기계식 무단 변속장치의 동특성 해석 및 제어에 관한 연구," 서울대학교 기계설계학과 박사학위 논문.
7. 이장무, 박영일, 김영흡, 임원식, "차량용 변속장치의 동적 해석," 제 1 회 전투차량 개발 기술 학술 대회, 국방과학연구소, pp458~466, Oct., 1990.
8. "무단변속조향시스템의 특성분석 및 제어에 관한 연구(2 차년도)," 국방과학연구소 결과보고서, Feb., 1995.
9. D.McCandlish, R.E.Dorey, "The Mathematical Modeling of Hydrostatic Pumps and Motors," Proc. Inst. Mech. Eng., Vol.198B, No10, pp165~174, 1984.
10. 정순배, 강서익, "정유압기계식 변속기 탑재구동계의 성능해석," 제 1 회 전투차량 개발 기술 학술대회, 국방과학연구소, pp484~492, Oct., 1990.
11. "Hydrostatic Mechanical Power Transmission 신호 분석 및 Emulator 개발 완료 보고서," 통일중공업 기술 보고서, Sep., 1996.