

## 자동변속기의 변속특성시뮬레이션을 위한 HILS시스템 개발

### A Development of Hardware-in-the-Loop Simulation System of Automatic Transmission for the Simulation of Shifting Characteristics

정규홍\*, 이교일\*\*  
GyuHong Jung, Kyoll Lee

#### ABSTRACT

During the past several years, the major interests of car manufacturers in development of automatic transmission were in durability and shift quality. However, a large number of researches for improving shift quality that are based on dynamic characteristics of shifting mechanism have been rarely adopted in the developing process because it is quite difficult to predict the shifting performance from the dynamics simulation. One of the important reasons for the difference between simulation results and experiments arises from the automatic transmission hydraulic system that consists of many valves with high order model and shows a lot different dynamics to temperature variation. In this work, hardware-in-the-loop simulation system for automatic transmission was developed for improving the accuracy of simulated result by combining the real-time simulation model with the real hydraulic system. The real-time simulation for automatic transmission model excluding hydraulic system is executed with TI's TMS320C31 DSP and the interfacing board which includes 12bit A/D, PWM signal generator and driver, serial driver ,etc is designed for acquiring the simulation data and signal interface with hydraulic system. We verified the proper operation and correctness of shifting result by comparing the off-line simulation result with that of HILS and experimental result which was performed on transmission dynamometer driven by electric motor.

주요기술용어 : HILS(하드웨어 인터루프 시뮬레이션), Automatic transmission(자동변속기), DSP(디지털신호 연산기), Shifting characteristics(변속특성)

#### 1. 서론

현재 승용차용 자동변속기의 연구에서 핵심적인 관심분야는 변속시 발생하는 충격을 저감시킬 수 있도록 하는 변속제어기 및 알고리즘의 개발이며, 국내 각 자동차회사에서는 고유 모델

의 자동변속기를 개발하여 양산차에 적용하려는 노력을 경주하여 왔음에도 불구하고 아직까지는 그 결과가 미흡한 실정이다. 우수한 성능을 갖는 변속제어기의 개발을 위해서는 동력전달계의 변속특성에 대한 심도있는 분석과 이해를 바탕으로 변속 제어알고리즘의 설계와 변속실험을 통한 검증의 과정이 반복적으로 수행되어야 하나, 실제 자동차회사의 개발과정에서 이룬

\* 회원, 대전대학교 기계설계공학과

\*\* 회원, 서울대학교 기계항공공학부

적으로 연구된 결과<sup>1,2)</sup>가 적용되는 경우는 극히 일부에 불과하며, 대부분은 다이나모 또는 실차 변속실험을 통하여 변속제어기의 데이터를 조정(tuning)하여 개발하고 있다. 이러한 개발과정의 주요 원인으로는 자동변속기의 변속조건이 매우 다양할 뿐만 아니라 여러 부품에 대한 자동변속기의 단순화된 동특성 모델의 오차와 엄격한 파악이 곤란한 미지의 데이터로 인하여 이론적인 시뮬레이션 결과가 변속특성의 경향 분석에는 효과적이지만 실제의 변속특성을 만족스럽게 예측하는 데에는 한계가 있기 때문이다. 그러나, 전술된 바와 같이 변속제어기의 개발에 있어서 변속동특성의 분석은 필수적으로 선행되어야 할 연구분야이며, 실제의 실험결과에 근접한 신뢰성있는 시뮬레이션의 결과를 얻을 수 있다면 보다 효율적인 연구개발이 이루어질 수 있을 것이다.

자동변속기의 구성요소는 크게 토크컨버터(torque converter), 유성치차계로 구성되는 기어열(gear train), 자동변속기 내부의 클러치/브레이크를 작동시키는 유압제어시스템, 변속시점의 결정 및 변속제어의 기능을 담당하는 TCU(Transmission Control Unit)로 나뉘어 질 수 있으며 자동변속기의 변속특성 시뮬레이션을 위해서는 전술된 모든 구성요소에 대한 수학적 모델이 요구된다. 토크컨버터와 기어열에 대한 수학적 모델의 상태변수 개수(변속상태에 따라 다르지만 7개 내지 9개의 상태변수) 및 물성치에 대한 오차는 유압제어 시스템에 비하여 매우 작으므로 시뮬레이션 결과와 실험결과는 비교적 잘 일치하는 특성을 갖는다. 이에 비하여 유압제어 시스템은 수많은 밸브로 구성되어 수학적 모델의 차수가 높을 뿐만 아니라 유온에 따른 동특성의 변화가 매우 크므로 변속제어특성을 결정짓는 압력의 변화를 정확하게 예측하는 연구는 많은 노력을 기울여도 만족스러운 결과를 도출해내기가 어렵다. 따라서, 변속특성 시뮬레이션시 엄밀한 특성파악이 곤란한 유압제어시스템은 실제의 하드웨어를 사용하고 나머지의 구

성요소에 대하여 유도된 수학적 모델은 실시간 시뮬레이션으로 구현하여 두 모듈을 결합하는 HILS(Hardware-In-the-Loop Simulation)시스템을 적용한다면 실제에 근접한 변속특성결과의 도출이 가능할 것으로 판단된다. 이 경우에 소프트웨어 모듈은 변속제어특성을 결정짓는 클러치 및 브레이크의 압력신호만을 실제의 유압제어시스템으로부터 획득하여 실시간으로 동특성 모델의 시뮬레이션을 수행하게 된다. HILS 시스템은 동일한 조건에서 반복적인 실험이 요구되는 제어시스템의 개발과 간단하게 구성된 실험장치를 이용하여 제어시스템을 개발하거나 전기적으로 구동되는 액추에이터의 개발 등에 활용될 수 있으므로 주로 ABS, 차량간격 제어시스템의 성능평가, 차량 동역학 제어시스템 등에 적용되고 있으나 아직까지 자동변속기에 대하여 연구된 결과는 알려지지 않고 있다.<sup>3-8)</sup>

Fig. 1은 본 연구에서 수행된 자동변속기 실시간 변속시뮬레이션의 개념도를 나타낸다. 유압제어시스템이 제외된 자동변속기 내부의 구성요소와 변속조건을 변화시키는 엔진 및 주행부하모델 및 TCU의 변속제어 알고리즘을 대상으로 실시간 시뮬레이션을 수행하고 자동변속기 내부의 실제 유압제어시스템에서 발생하는 압력을 획득하여 실시간 변속시뮬레이션의 입력으로 활용하게 된다. 즉, 실제의 변속기는 유압제어시스템의 동력발생을 위하여 일정한 속도

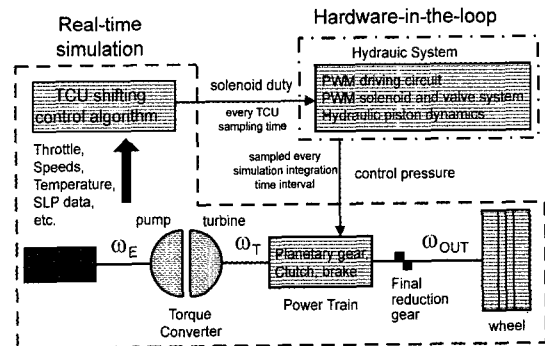


Fig. 1 Hardware-in-the-loop simulation concept for automatic transmission

로 회전하는 모터에 의하여 구동되고 실시간 시물레이션으로 수행되는 변속제어알고리즘에서 출력되는 PWM 듀티율 신호로부터 각 클러치 및 브레이크에 발생하는 압력의 동특성을 실제의 유압제어시스템에 해당되는 부품으로 모사하는 기능을 갖는다. 이와 같은 자동변속기의 변속특성 시물레이션 기법은 엄밀한 예측이 곤란한 모델을 실제의 시스템으로 대체하였으므로 보다 실험결과에 근접한 시물레이션의 결과를 얻을 수 있을 뿐만 아니라 실시간으로 수행되므로 신속하게 변속특성에 대한 분석이 이루어지는 장점이 있게 된다. 기존에 연구된 HILS시스템이 실시간 시물레이션을 Matlab이나 MatrixX 등으로 설계된 시물레이션 프로그램과 상용화된 장비로 구현하는 것에 비하여 본 연구에서 개발된 HILS시스템은 실수연산이 가능한 DSP를 이용하여 하드웨어를 구성하고 동특성 모델의 수치적분 프로그램을 선정된 DSP에서 수행되는 언어로 설계하였다. 이러한 개발방식은 신호처리시스템과 프로그램개발에 많은 노력이 소요되나 개발비용이 매우 낮으며, 설계변경의 자유도가 높은 장점을 갖는다.

## 2. 자동변속기의 수학적 모델

Fig. 2는 두 개의 단순 유성치자계(simple planetary gear set) 결합으로 구성된 연구대상 자동변속기의 기어열(gear train) 구조를 나타낸다. 본 연구에는 1↔2 변속만을 대상으로 HILS 모델을 구성하였으며, 1→2 상향변속의 경우에는 UD/C가 결합된 상태에서 LR/B의 해방과 동시에 2ND/B의 결합을 제어함으로써 변속이 진행되는 클러치 대 클러치변속(clutch to clutch shift)이다. 연구대상 자동변속기의 1↔2 변속시 HILS에 적용되는 수학적 모델은 다음과 같다.

1) 엔진(상태변수 1)

$$I_E \alpha_E = T_E - T_{OP} - T_P$$

$T_E$  : 엔진 동특성으로부터 계산되는 구동토크

$T_{OP}$  : 오일펌프의 반력토크

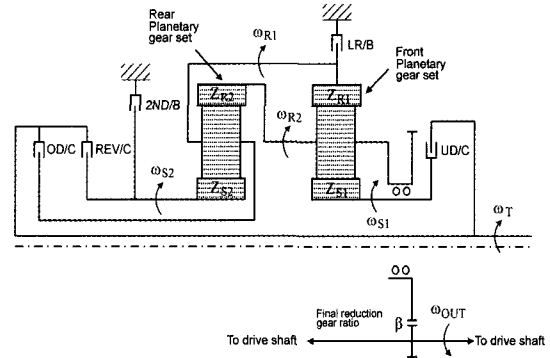


Fig. 2 Stick diagram of gear train

$T_P$  : 토크컨버터 펌프축의 반력토크

2) 기어열(상태변수 2)

: 1st gear and torque phase

$$\alpha_T = A_{12a} T_T + A_{12b} (T_{B2})_{max} + A_{12c} T_{load}$$

: Inertia phase

$$\alpha_T = B_{12a} T_T + B_{12b} (T_{B2})_{max}$$

$$+ B_{12c} (T_{BL})_{max} + B_{12d} T_{load}$$

$$\alpha_{R1} = B_{12e} T_T + B_{12f} (T_{B2})_{max}$$

$$+ B_{12g} (T_{BL})_{max} + B_{12h} T_{load}$$

: 2nd gear and torque phase

$$\alpha_T = C_{12a} T_T + C_{12b} (T_{BL})_{max} + C_{12c} T_{load}$$

$$A_{12a}, \dots, A_{12c}, B_{12a}, \dots, B_{12h}, C_{12a}, \dots, C_{12c}$$

: 동역학식의 상수

$T_T$  : 터빈축 입력토크

$(T_{BL})_{max}, (T_{B2})_{max}$  : LR/B와 2ND/B에 작용

하는 압력에 의하여 결정되는 구속토크

$T_{load}$  : 차량부하

3) 토크컨버터 및 동력전달축(상태변수 6)

$$\begin{bmatrix} I_p & 0 & \rho S_p & 0 \\ 0 & I_t & \rho S_t & 0 \\ \rho S_p & \rho S_t & \rho L_F/A & \rho S_s \\ 0 & 0 & \rho S_s & I_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_p \\ \alpha_t \\ \dot{Q} \\ \alpha_s \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} f_1 \\ f_2 \\ f_3 \\ f_4 \end{bmatrix}$$

$f_1, f_2, f_3, f_4$  : 토크컨버터의 작동상태에 의하여 결정되는 비선형 대수식

$$T_P = K_{Eq} \Delta \theta_E + C_{Eq} (\omega_E - \omega_p)$$

$$T_T = K_{Teg} \Delta \theta_T + C_{Teg} (\omega_t - \omega_T)$$

$$\frac{d\Delta\theta_E}{dt} = \omega_E - \omega_p$$

$$\frac{d\Delta\theta_T}{dt} = \omega_t - \omega_T$$

## 4) 주행부하

$$T_{load} = r_t(R_a + R_r + R_g)$$

$R_a$  : 공기저항

$R_r$  : 구름저항

$R_g$  : 경사저항

$r_t$  : 타이어 반경

## 5) 클러치 및 브레이크 모델

$$(T)_{max} = 2\mu n R_m F_n$$

$\mu$  : 마찰계수

$n$  : 디스크의 수

$R_m$  : 평균유효반경

$F_n$  : 제어압에 의하여 작용되는 수직력

이상과 같은 자동변속기의 변속모델에서 기어열은 클러치(또는 브레이크)에서 미끄럼이 발생되지 않는 상태, 즉 1속 또는 2속의 경우에는 터빈과 출력축의 변속비가 고정되므로 1개의 상태변수를 가지며, 토크 컨버터의 경우에도 스테이터의 회전이 구속되는 컨버터 상태에서는 3개의 상태변수로서 동특성이 기술된다. 따라서, 1↔2 변속 시뮬레이션 모델의 상태변수는 유압제어시스템의 동특성 모델이 배제되는 경우에 최소 7개, 최대 9개로서 매우 간단한 운동방정식으로 기술될 뿐만 아니라 유압제어시스템의 동특성에 비하여 상대적으로 응답속도가 낮은 시스템으로 구성되므로 비교적 큰 적분시간이 적용되는 경우에도 양호한 실시간 시뮬레이션의 결과를 얻을 수 있게 된다.

## 3. HILS시스템 구성

승용차용 자동변속기의 유압제어시스템을 결합하여 변속특성 시뮬레이션을 수행하는 HILS 시스템에서는 비선형 미분방정식으로 기술되는 변속 동특성모델의 해를 실시간으로 구하기

위한 수치적분의 연산에 고속연산이 가능한 DSP (digital signal processor)를 이용하였으며, 하드웨어 및 실시간 시뮬레이션 프로그램의 세부적인 설계내용은 다음과 같다.

## 3.1 하드웨어

TI(Texas Instrument)社에서 개발된 DSP칩인 TMS320C31-50MHz가 적용된 DSK(DSP Starter Kit) evaluation board를 사용하여 DSK 어셈블리로 자동변속기의 동특성모델을 프로그래밍하였다. TMS320C31은 32bit의 부동소수점 연산이 40ns 내에 이루어지므로 실시간 시뮬레이션에 적합하나 DSK evaluation board에는 프로그램 개발용으로 2K word의 내부메모리만이 지원되고 음성신호의 입출력용으로 직렬통신방식의 A/D 및 D/A 컨버터가 설계되어 있으나 변환속도가 느리며, 1채널뿐이므로 HILS시스템을 구현하기 위하여 다음과 같은 기능을 갖는 주변회로를 설계하였다.

1) 32K word의 메모리 - 4개의 AS7C256(32K x8bit)을 이용하여 구성하였으며, 비선형 시뮬레이션 프로그램과 변속제어와 관련된 데이터의 저장용으로 사용된다.

2) 12bit A/D converter - 1↔2 변속 시뮬레이션에서는 LR/B와 2ND/B 입력만을 A/D 변환하나 전 변속단에 대한 HILS시스템의 확장을 고려하여 4개의 A/D 채널이 내장된 AD7874 2개를 이용하여 구성하였다. AD7874는 4채널의 A/D 신호변환에 34μs가 소요되며, 본 연구에서는 1ms 주기로 입력신호를 A/D 변환하여 변속시뮬레이션을 수행한다.

3) 6채널의 PWM 신호발생기 - DSP는 고속연산을 위하여 개발된 프로세서이므로 일반적인 마이크로 컨트롤러와는 달리 주변 하드웨어를 제어하기 위하여 내장된 기능이 거의 없으므로 PWM 솔레노이드 밸브를 구동하기 위한 펄스폭 변조신호의 발생기능은 Altera社에서 개발된 EPM7128SLC-7 CPLD를 이용하여 설계하였다. 본 연구에서 설계된 CPLD에서는 63.58Hz의 반

송주파수를 갖는 8비트 분해능의 PWM 신호를 독립적으로 6개 발생시킬 수 있는 기능을 갖는다.

4) 직렬통신 드라이버 - HILS시스템에서는 실시간 시뮬레이션의 결과를 TMSC31에 내장된 직렬통신 포트를 이용하여 PC로 전송하도록 설계하였으며, DSK evaluation board에는 직렬통신 드라이버가 설계되어 있지 않으므로 MAX232를 이용하여 직렬통신 포트를 구성하였다.

5) 디지털 신호 입출력 - LCD 모듈에 시뮬레이션의 결과를 나타내고 HILS시스템의 운영과 관련된 디지털 신호의 입출력을 위하여 8255PPI를 이용하여 설계하였다.

6) LCD 모듈 - 정보표시모드에 따라 각종 시뮬레이션의 결과를 나타낼 수 있도록 4행×16열의 LCD를 이용하여 설계하였다.

7) 6개의 솔레노이드밸브 드라이버 - PWM 신호로부터 솔레노이드 밸브를 구동하기 위한 회로이며 IRF530 트랜지스터 이용하여 설계하였다.

이상과 같이 설계된 HILS시스템에서 수행되는 실시간 시뮬레이션의 결과는 10ms 주기로 직렬통신 포트를 통하여 PC로 전송되며, PC에서의 데이터 모니터링 및 획득은 HP-VEE를 이용하여 설계하였다. Fig. 3과 Photo 1은 본 연구에서 설계된 HILS시스템의 구성도와 외형을 나타낸다.

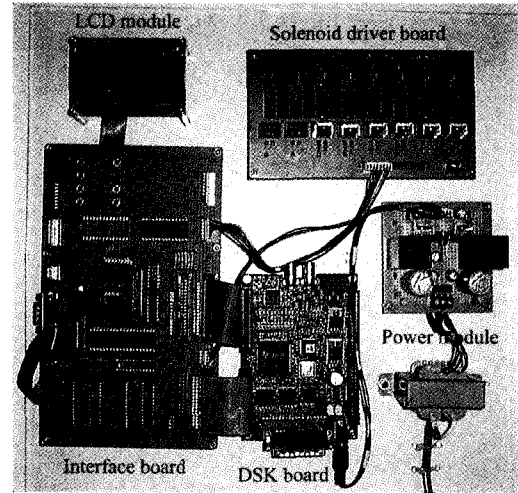


Photo. 1 HILS system hardware

### 3.2 실시간 시뮬레이션 프로그램

HILS 실시간 시뮬레이션 프로그램에서는 내부의 변속제어 알고리즘에 의하여 해당되는 클러치 및 브레이크에 인가되는 듀티율을 연산하고 출력된 PWM 신호에 의하여 발생하는 유압 제어시스템의 제어압을 A/D 변환하여 동특성모델의 수치적분을 수행하는 foreground task 기능 이외에 LCD 모듈에 데이터를 표시하고 시뮬레이션과 직렬통신의 개시와 종료신호를 인식하여 처리하는 기능을 background task로 구현하였다. 실시간 시뮬레이션의 수치적분법으로는 Euler 방법을 이용하였으며, 1ms의 타이머 인터럽트 서비스루틴에서 각 클러치 및 브레이크의 제어압을 A/D 변환한 후 지정된 적분시간간격으로 수치적분을 반복적으로 수행하도록 설계하였다. Table 1은 50MHz의 TMSC31 DSP를 이용하여 수치적분연산 시 각 동특성 모델의 평균적인 수행시간을 나타내며 1회의 수치적분에 소요되는 평균적인 연산시간은 약 50μs임을 확인하였다. 여기서, 엔진의 경우에는 동특성 모델의 수치적분 외에 엔진회전수와 드로틀 개도에 따른 정특성 토크맵(map)으로부터 출력토크를 보간하는 연산이 추가되며, 작동상태에 따라 보간연산에 소요되는 시간이 다르게 된다. 따라서, 본

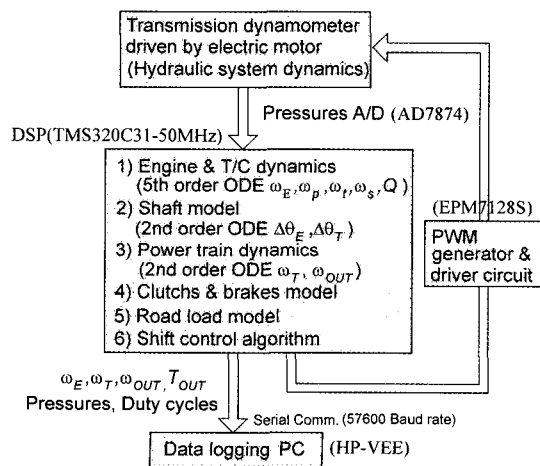


Fig. 3 HILS system configuration

Table 1 HILS computing time for each simulation module

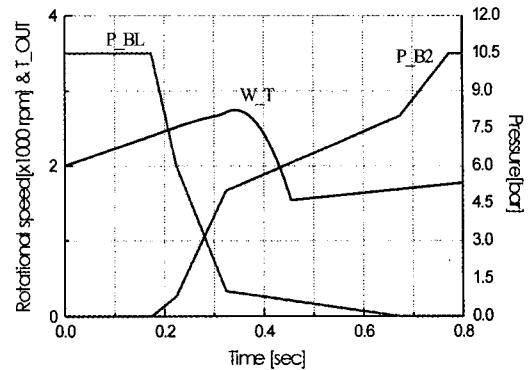
Simulation module	Computing time ( $\mu$ S unit)
Engine dynamics	0.5
Engine torque interpolation	10(maximum)
Gear train	14
Torque converter	19
Transmission shaft	2.8
Road load	3.76
Total	50.06

연구에서는 실시간 시뮬레이션을 수행하는 방법으로 타이머 인터럽트가 발생하는 1ms 동안에 0.1ms의 적분시간간격으로 10회의 반복적인 수치적분을 수행하도록 설계하였으며, 1ms 내의 시뮬레이션이 종료된 여유 시간동안에 background task를 수행할 수 있도록 하였다.

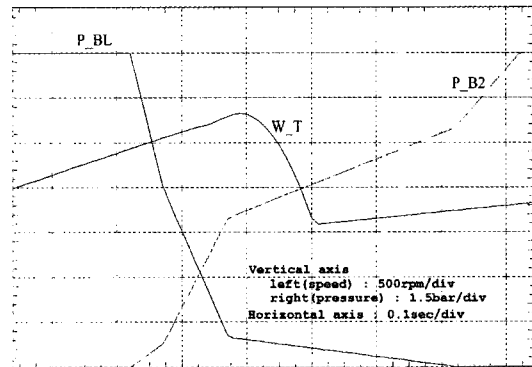
#### 4. HILS시스템의 결과검증

설계된 HILS시스템의 성능을 검증하기 위하여 동일한 변속조건에 대하여 PC에서 비실시간으로 수행된 시뮬레이션의 결과와 실시간으로 수행된 HILS의 결과를 비교하였다. HILS에 적용된 수치적분방법과 선정된 수치적분시간간격의 타당성을 검증하기 위하여 PC에서 수행된 변속 시뮬레이션에는 0.01ms의 적분시간간격과 4차 Runge-Kutta 방법을 이용하였으며, HILS의 경우에는 언급된 바와 같이 Euler의 수치적분 방법으로 0.1ms의 적분시간간격을 적용하여 시뮬레이션을 수행하였다.

변속조건은 1→2 상향변속이며 변속이 개시되면 LR/B와 2ND/B에 작용하는 압력은 내부적으로 설계된 변속제어압의 궤적을 따라 작용함으로써 변속이 진행되도록 하여 결과를 비교하였다. Fig. 4는 일정한 터빈 및 부하토크가 작용하는 상태에서 자동변속기의 기어열만을 대상으로 하여 가상적으로 설계된 제어압을 인가하



(a) PC simulation result



(b) HILS result

Fig. 4 Verification of HILS for gear train dynamics

는 경우에 나타나는 변속특성이며, Fig. 5는 토크 컨버터만을 대상으로 가정된 입력 및 반력토크의 조건하에서 정상상태에 도달하였을 때 작용하는 반력토크가 순간적으로 감소되는 상황에서의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 두 경우에서 모두 동일한 시뮬레이션 결과를 나타내었으므로 HILS에 적용된 수치적분법과 수치적분시간의 타당성을 입증할 수 있었다. Fig. 6은 다이내믹에서 실시된 변속실험의 결과로부터 변속시 작용하는 제어압의 궤적을 측정 한 후 이를 입력으로 하여 유압제어시스템이 배제된 자동변속기의 모든 동특성을 고려하는 경우에 HILS의 결과를 나타낸다.

시뮬레이션이 시작되면 불안정한 초기조건으로부터 동적인 평형상태에 도달하는 동안에 출력축 토크에 다소 큰 맥동이 순간적으로 발생

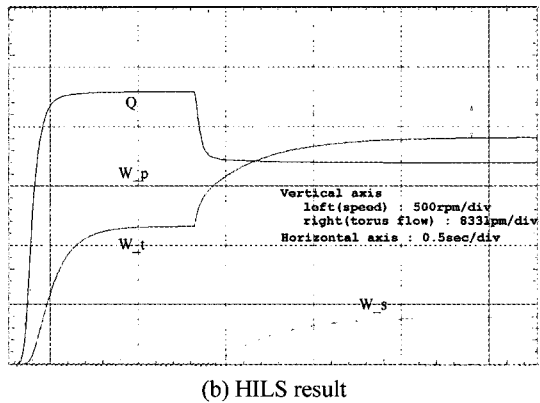
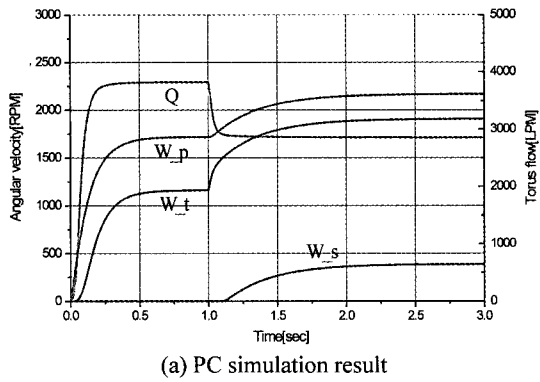
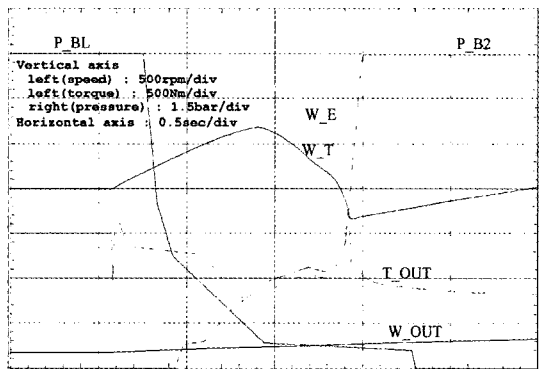


Fig. 5 Verification of HILS for torque converter dynamics



하나 곧 안정된 상태로 수렴하여 엔진과 터빈이 가속되는 상태에서 변속이 개시되게 된다. 실제의 TCU 변속제어알고리즘에서는 터빈속도를 피드백하면서 변속이 진행되므로 관성영역으로부터 변속이 종료되는 시점에서 안정된 출력

축 토크의 형상이 나타나게 되나, HILS에서는 측정된 압력의 궤적을 개루프방식으로 인가하였으므로 변속이 종료되는 시점에서 토크가 크게 증가하여 실제의 실험결과와 다소 차이를 나타내었다. 그러나, 구성된 전체 변속 동특성 모델의 시물레이션결과는 제어압의 변화에 따른 변속특성의 차이를 반영하므로 본 연구에서 제안된 HILS시스템을 이용하여 변속특성의 분석이 가능함을 확인하였다.

### 5. 실험

본 연구에서 제안된 자동변속기의 변속특성 분석을 위한 HILS시스템의 제반성능을 확인하고 시물레이션 결과의 타당성을 검증하기 위하여 전기모터로 구동되는 변속기 다이내모와 DSP로 구성된 실시간 변속시물레이션 모듈을 결합하여 변속실험을 실시하였다. 실시간 변속시물레이션 내에서 수행되는 변속제어 알고리즘은 페루프 제어가 적용되는 실제 TCU의 변속제어 기법을 모사하기가 곤란하여 변속이 개시되는 시점에서 미리 설계된 듀티율의 궤적을 각 슬레노이드에 인가하는 개루프 제어방식을 적용하였다. Photo 2는 본 실험에 사용된 전기모터에 의하여 일정한 속도로 구동되는 변속기 다이내모를 나타내며, LR/B와 2ND/B 슬레노이드에 인가되는 PWM 신호에 의하여 발생하는 제어압은 압력변환기와 동적스트레인 증폭기를 통하여

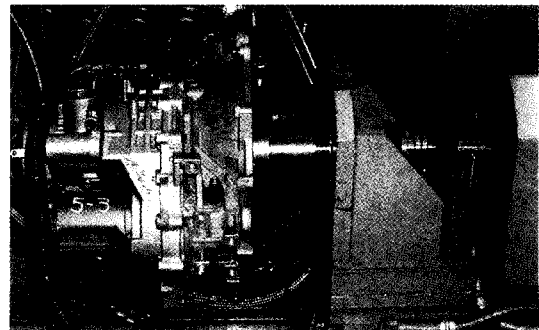


Photo. 2 Transmission dynamometer driven by electric motor

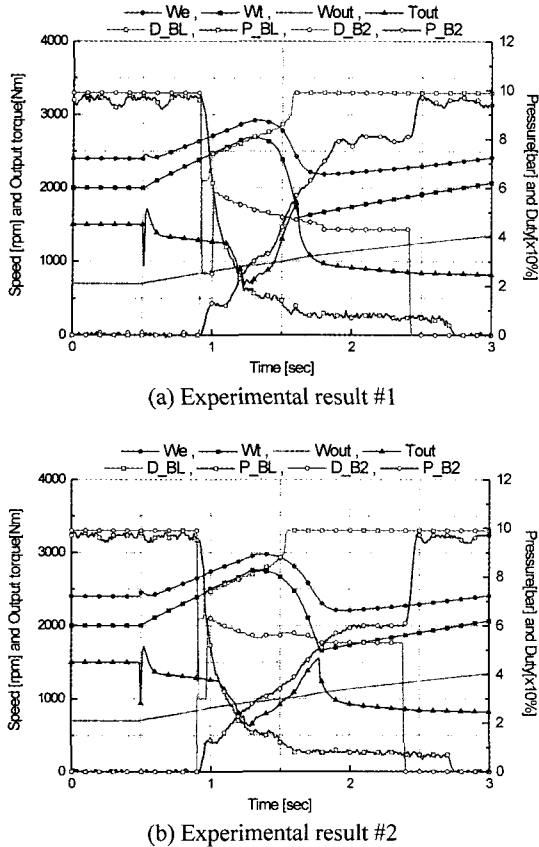


Fig. 7 1→2 upshift experiment performed on transmission dynamometer

검출되어 A/D 변환된다.

Fig. 7은 1→2 상향변속에 대한 HILS시스템의 결과를 나타낸다. 연구대상 변속기에 적용되는 솔레노이드 밸브는 상시고압(normally high)으로서 0%의 듀티율에서 최대압력이 발생하는 특성을 갖는다. 따라서, 1→2 상향변속은 LR/B의 듀티율을 증가시키고(즉, LR/B 제어압을 해제하고) 2ND/B의 듀티율은 감소시키면서 변속이 진행된다. Fig. 7(a)에서는 LR/B 압력의 강하와 더불어 상승되는 2ND/B 압력이 토크영역이 종료되는 시점에서 다소 높은 상태를 유지하므로 관성영역에서 터빈속도의 기울기가 급격하게 변화되므로 변속이 완료되는 순간에 상당히 높은 크기의 출력축 토크가 발생됨을 알 수 있다. 또한 변속개시와 더불어 발생하는 2ND/B의

제어압은 어큐플레이터의 충전유량과 클러치 피스톤의 이동에 의하여 약 100 ms 가량의 충전시간이 나타남을 확인할 수 있다. 이와 같은 클러치 압력의 동특성은 매우 복잡한 동역학적 모델로 기술되는 운동방정식의 해로 나타날 뿐만 아니라 동특성의 파악이 어려운 솔레노이드 밸브를 통하여 발생되므로 단순히 시뮬레이션 모델만을 이용하는 경우에는 솔레노이드에 인가되는 듀티율로부터 실험결과에 근접한 제어압의 특성을 얻어내는 것이 곤란한 반면에 HILS시스템의 경우에는 실제의 변속기 하드웨어를 적용하였으므로 실제의 변속상황에서와 동일한 압력특성 파악이 가능하게 된다. Fig. 7(b)는 토크영역이 종료되는 시점에서의 2ND/B 제어압이 다소 낮게 발생되도록 듀티율의 궤적을 변화시켜 실시된 실험결과를 나타낸다. 개루프 변속 제어에 의한 변속실험이므로 만족스러운 변속 특성은 얻지 못하였으나 이전 실험의 경우보다 터빈속도변화의 기울기가 다소 작아지면서 관성영역에서 출력축 토크의 최대 값도 작아지는 특성을 나타내었다. 이와 같은 실험결과로부터 변속제어시 각 솔레노이드에 인가되는 듀티율의 변화는 변속기 다이내모에서 작동되는 유압 제어시스템에 의하여 제어압의 변화로 나타나며, 이는 실시간 시뮬레이션 모듈의 입력신호에 반영되어 전체적인 변속특성이 변화됨을 확인하였다.

## 6. 결론

본 연구에서는 승용차용 자동변속기의 변속 제어특성 시뮬레이션을 보다 실제의 실험결과에 근사하게 수행하기 위하여 수학적인 모델의 차수가 높고 물성치 변화에 따라 응답특성의 차이가 큰 유압제어시스템을 전기모터로 구동되는 실제의 변속기 다이내모로 대체하고 나머지 변속특성모델에 대하여 실시간 시뮬레이션을 수행하는 HILS시스템을 개발하였다. 실시간 시뮬레이션용 프로세서로는 TMS320C31의 DSP를



사용하였고, CPLD를 이용하여 솔레노이드의 구동에 필요한 PWM 신호의 발생기능을 구현하고 12비트 A/D 변환기를 통하여 제어압의 신호를 입력받아 실시간 변속 시물레이션을 수행하였으며, 직렬통신을 이용하여 실시간 변속 시물레이션의 데이터를 확보하였다.

개발된 HILS시스템의 시물레이션 성능은 동일한 변속조건에서의 변속특성 시물레이션을 대상으로 PC에서 비실시간으로 수행되는 프로그램의 결과와 HILS의 결과를 변속기의 주요 모듈별로 비교하였으며, 이를 통하여 선정된 적분시간과 개발된 시스템의 활용 가능성을 확인하였다. 전기모터로 구동되는 변속기 다이내모와 실시간 변속 시물레이션을 결합하여 수행된 실험에서는 솔레노이드에 인가되는 듀티율의 변화에 따른 제어압의 특성변화를 확인하였으며, 이러한 압력의 변화가 실시간 변속 시물레이션 모듈의 변속특성에 미치는 영향을 분석하였다. 비록, 실제 TCU의 페루프 변속제어 알고리즘을 시물레이션 모델에 포함시키는 것이 곤란하여 개루프 제어의 듀티율 궤적변화를 통하여 변속특성의 변화를 살펴보았으나 본 연구에서 제안된 HILS시스템을 이용하는 경우에는 상당히 개선된 변속특성 시물레이션의 결과를 얻을 수 있음을 확인하였다. 특히, ILS시스템에서 변속제어 알고리즘이 수행되는 TCU를 실제의 하드웨어로 대체하고 실시간 변속시물레이션의 결과를 TCU에서 인식할 수 있도록 신호처리를 담당하는 인터페이스 회로를 구축하는 경우에는 HILS시스템을 이용하여 변속특성의 분석뿐만 아니라 TCU 변속제어 알고리즘의 개발에 필수적인 시물레이터(또는, 기존에 개발된 TCU의 변속제어 알고리즘 분석용)로도 활용 가능하게 될 수 있을 것으로 예상된다.

## 후 기

본 연구는 (주)현대자동차의 지원을 받아 수행되었으며, 이에 관계자에게 감사드린다.

## 참 고 문 헌

- 1) 이진수, 오종선, "3WAY PWM 솔레노이드 밸브를 적용한 독립제어형 유압시스템 개발," 한국자동차공학회 추계학술대회 논문집, Vol. II, 2000.
- 2) T. W. Megli, M. Haghgoie, D. S. Colvin, "Shift Characteristics of a 4-Speed Automatic Transmission," SAE 1999-01-1060, 1999.
- 3) William P. Amato, Mark A. Bennett, "Verification of Heavy Truck EBS and ABS Using MatrixX Hardware in the Loop Tools," SAE 1999-01-3713, 1999.
- 4) M. W. Suh et al., "Hardware-in-the-Loop Simulation for ABS," SAE 980244, 1998.
- 5) F. Svaricek, "Automatic Validation and Verification of ABS Controllers by Using a Hardware-in-The-Loop Simulation," SAE 980241, 1998.
- 6) M. Walker R. Ford, "Hardware-in-the-Loop, Dynamometer Based Driver and Vehicle Simulator," SAE 2000-1-0289, 2000.
- 7) 송철기, 김성하, 이경수, "차간거리 경보시스템의 HILS 구현," 한국자동차공학회논문집, 제6권 제5호, pp.222-227, 1998.
- 8) 백창현, 윤원석, 장광수, "파워트레인 HILS를 이용한 차량간격 제어장치의 실험기법 개발에 관한 연구," 한국자동차공학회논문집, 제7권 제6호, pp.165-173, 1999.
- 9) Texas Instrument, "TMS320C3x User's Guide," 1997.
- 10) Texas Instrument, "TMS320C3x DSP Starter Kit User's Guide," 1996.
- 11) 차영배, "Micro-Controller 80196," 다다미디어, 1997.
- 12) 윤덕용, "TMS320C31 마스터," Ohm사, 1998.
- 13) 이승호, 이경은, 임만직, "ALTERA MAX + PLUS II를 사용한 디지털 시스템 설계," 북두출판사, 1999.
- 14) 서울대학교 정밀기계설계공동연구소, "비례제어 솔레노이드밸브를 이용한 자동변속기 유압제어시스템 개발," 연구보고서, 1997.
- 15) K. Usuki, K. Fujita, K. Hatta, "The INVECS-II Electronically Controlled Automatic Trans-axles for FWD Passenger Cars," SAE 960429, 1996.