

# 자동변속기용 임베디드 시스템 성능 시험을 위한 Hardware-in-the-Loop 시뮬레이터 구축

## Development of Hardware-in-the-Loop Simulator for Testing Embedded System of Automatic Transmission

장인규, 서인근, 전재욱, 황성호\*  
(In-Gyu Jang, Inkeun Seo, Jaewook Jeon, and Sung-Ho Hwang)

**Abstract :** Drivers are becoming more fatigued and uncomfortable with increase in traffic density, and this condition can lead to slower reaction time. Consequently, they may face the danger of traffic accidents due to their inability to cope with frequent gear shifting. To reduce this risk, some drivers prefer automatic transmission (AT) over manual transmission (MT). The AT offers more superior drivability and less shifting shock than the MT; therefore, the AT market share has been increasing. The AT is controlled by an electronic control unit (ECU), which provides better shifting performance. The transmission control unit (TCU) is a higher-value-added product, so the companies that have advanced technologies end to evade technology transfer. With more cars gradually using the ECU, the TCU is expected to be faster and more efficient for organic communication and arithmetic processing between the control systems than the 16-bit controller. In this paper, the model of an automatic transmission vehicle using MATLAB/Simulink is developed for the Hardware in-the-Loop (HIL) simulation with a 32-bit embedded system, and also the AT control logic for shifting is developed by using MATLAB/Simulink. The developed AT control logic, transformed automatically by real time workshop toolbox, is loaded to a 32-bit embedded system platform based on Freescale's MPC565. With both vehicle model and 32-bit embedded system platform, we make the HIL simulation system and HIL simulation of AT based on real time operating system (RTOS) is performed. According to the simulation results, the developed HIL simulator will be used for the performance test of embedded system for AT with low cost and effort.

**Keywords :** HIL(Hardware-in-the-Loop) simulation, AT(Automatic Transmission), TCU(Transmission Control Unit), embedded system, ECU(Electronic Control Unit)

### I. 서론

승용차용 자동변속기는 운전의 편의성과 변속 시 발생되는 충격이 수동변속기에 비하여 우수하기 때문에 구입비용 및 연비 측면에서 다소 불리함에도 불구하고 승용차 시장에서의 장착비율이 증가되는 추세에 있다.

자동변속기(Automatic Transmission: AT)는 자동차의 구동계(drivetrain)를 이루는 핵심적인 요소로서 자동차 내의 여러 기계 장치 중 가장 고도의 설계기술이 요구되는 분야 중 하나이다. 자동변속기는 1930년대 초부터 미국에서 개발되기 시작하였으며 초기에는 2속으로 출발하여 3속을 거쳐 현재에는 4속이 주류를 이루고 있으며, 중·대형 차량에는 5속 변속기를 채택하고 있다. 점차 다양해지는 변속기 모델들에 대해서 가장 좋은 주행성능과 승차감을 얻기 위해서 종래에는 차량 변속기의 기계적 시스템 개발 및 개선에 역점을 두었으나, 최근에는 전자 기술의 발전에 힘입어 변속기 전자제어 시스템(Transmission Control Unit: TCU)의 역할이 더욱 중요시되고 있다.

변속기 전자제어 시스템의 개발 단계를 크게 세 가지로 나누면, 마이크로 컨트롤러(micro-controller)를 이용한 제어기 플랫폼의 개발 단계, 변속기의 특성을 고려한 변속기용 제어 로직 개발 단계, 그리고 개발된 변속기 제어 로직을 제어기 플

랫폼에 탑재하여 검증하는 단계이다.

과거 이러한 차량 전자제어 시스템 개발 시에는 시제품 개발 후 시작 차량에 탑재하여 수많은 실차 시험을 통하여 시스템을 평가하고 제어 로직을 보완하는 방법을 사용해 왔다. 그러나 이러한 실차 시험은 경제적으로나 시간적으로 그 비용이 많이 들 뿐만 아니라, 실차 시험의 경우 입력조건(주행 모드, 노면조건 등)을 동일하게 유지하는 것은 거의 불가능하여 시험의 반복성 확보가 어려웠다. 또한 전자제어 시스템 상에 발생할 수 있는 문제점은 실차 시험시 위험한 상황을 초래할 수 있어 시험의 한계성도 존재한다. 이와 같은 문제점을 해결하고 개발한 차량의 전자제어 시스템을 효과적으로 평가할 수 있으며, 제어 로직을 보완하기 위한 실시간 차량평가 시스템이 요구되어 왔다.

이러한 이유로 개발 단계에서부터 시뮬레이션을 통해 여러 문제점들을 개선하여 왔다. 박진호 [1]등은 변속기의 알고리즘의 검증을 위해서 실시간 시뮬레이션 프로그램을 개발하고 변속제어기의 인터페이스 개발에 관해 연구하였고, 이영송 [2]등은 자동차의 기계적인 연결을 전기적인 신호로 대체하는 X-by-wire를 위한 HILS 시스템의 개발에 대해 연구하였다.

본 논문에서는 단순 시뮬레이션에서의 실제 상황과의 괴리와 실차 실험에서의 한계성을 극복하기 위한 HIL(Hardware-in-the-Loop) 시뮬레이션 기법을 이용하여 자동변속기용 임베디드 시스템 개발 검증을 수행하고자 한다. Matlab/Simulink를 이용하여 자동변속기 차량을 모델링하고, 변속 로직을 임베디드 시스템에 탑재한 후 실시간 시뮬레이션 기법

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2007. 10. 4., 채택확정 : 2008. 1. 8.

장인규, 서인근, 황성호 : 성균관대학교 기계공학부

(neoera78@naver.com/kubony@skku.edu/hsh@me.skku.ac.kr)

전재욱 : 성균관대학교 정보통신공학부(jwjeon@ece.skku.ac.kr)

을 바탕으로 한 HIL simulator를 구축하였다. 이를 통하여 자동변속기용 임베디드 시스템의 제어 성능을 검증하고 개발 시간과 비용을 크게 단축시킬 수 있을 것이다.

II. 32 비트 임베디드 시스템

자동차용 전자 제어 장치(Electronic Control Unit: ECU)의 기능과 성능은 전자 기술의 발전으로 인해 빠르고 지속적으로 향상되고 있다. 자동차용 ECU는 고성능, 고신뢰성, 저비용, 작은 크기 등의 제약 조건을 만족시켜야만 하는 대표적인 자동차용 임베디드 시스템이다[3,4]. 세계의 주요 자동차 회사들의 엔지니어들은 급변하는 ECU의 개발에 대처하기 위해 시스템의 모델링과 시뮬레이션에서부터 시제품(prototype) 및 상용품 개발 과정에 있어서 컴퓨터 개발 툴(CACSD tool)을 사용하고 있다[5]. 이와 더불어, 현재의 자동차 전자 시스템의 개발에 있어서 자동차 시스템의 제어 모델을 개발하고 이를 하드웨어 플랫폼에 탑재하여 검증절차까지 거치는 모델 기반 개발 과정(Model-Based Development Process: MBDP) 방법이 선진 자동차 업체를 중심으로 연구 적용되고 있다.

본 논문에서 사용된 임베디드 시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 Freescale 사의 MPC565 MCU(Micro Control Unit)을 이용하여 개발되었다. MPC565는 32bit의 자동차 제어용 프로세서이며, 특히 파워트레인(powertrain) 제어에 적합하도록 설계되었다. 개발된 임베디드 시스템에는 MC33394 전압 레귤레이터가 사용되었으며, MPC5xx 계열의 power-on-reset의 신호에 이상적인 신호를 생성하여 시스템이 안정적으로 reset할 수 있도록 도와준다. 또한 내부에 CAN 트랜시버를 내장하고 있으며 자동차 시스템의 시동 신호에 반응하여 ECU 시스템의 On-Off를 담당한다[6].

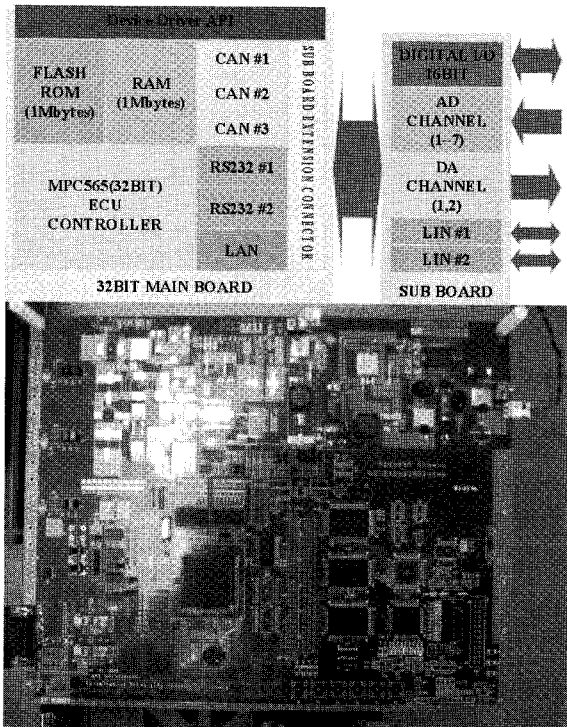


그림 1. MPC565 기반의 32비트 임베디드 시스템.  
Fig. 1. 32-Bit embedded platform on the basis of MPC565.

III. 모델링

1. 엔진 모델

엔진은 연료 인젝션 타입, 점화 시간 그리고 행정 과정 등의 많은 요소들로 인해 복잡한 특성을 갖는다. 그러나 본 논문에서는 차량의 주행 특성 검증에 중점을 두고 엔진은 정상 상태 곡선 모델로 근사화 시켜서 사용하였으며, 그림 2는 엔진의 성능 곡선을 나타내며 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

엔진의 동특성은 1차 시스템으로 단순화시켰으며, 엔진과 토크 컨버터의 손실, 엔진의 관성을 고려하여 (2)와 같이 모델링하였다.

$$T_e = f(\omega_e, TVO) \tag{1}$$

$$J_e \dot{\omega}_e = T_e(\omega_e, TVO) - T_{loss} - T_{T/C} \tag{2}$$

$J_e$ 는 엔진의 회전 관성을 나타내며,  $\omega_e$ 는 엔진의 회전 각속도,  $TVO$ 는 스로틀밸브 개도각을 나타낸다.  $T_e, T_{T/C}, T_{loss}$ 는 각각 엔진토크, 토크 컨버터 입력 토크, 엔진의 토크 손실을 나타낸다.

2. 토크 컨버터 모델

유체식 토크 컨버터는 엔진의 동력을 받는 펌프, 트랜스미션으로 동력을 전달하는 터빈, 그리고 원웨이 클러치에 의해 토크 컨버터 하우징 내에서 한 방향으로 회전하여 토크를 증배하는 스테이터로 구성되어 있으며, 그림 3과 같다.

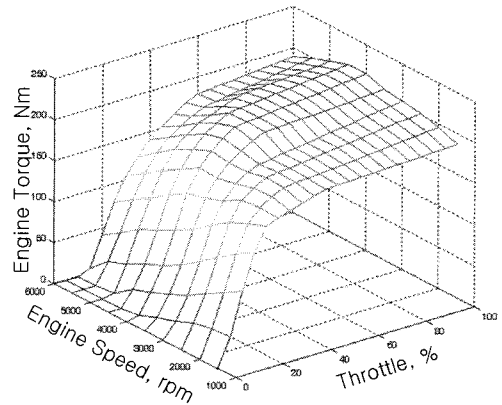


그림 2. 엔진 특성 곡선.  
Fig. 2. Engine performance curve.

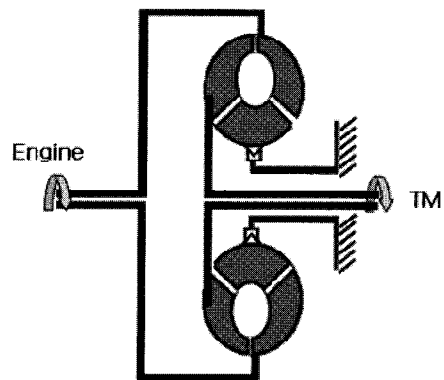


그림 3. 토크 컨버터의 구조도.  
Fig. 3. The structure of torque converter.

본 논문에서는 유체의 유동을 고려한 복잡한 유체역학적 모델 보다는 일반적으로 많이 사용되는 토크 컨버터의 성능 곡선을 적용하였다. 그림 4(a)는 토크 컨버터의 용량계수를 나타내며, (b)는 토크 컨버터의 입/출력 토크비를 나타낸다. 토크 컨버터의 토크비( $TR$ ), 속도비( $SR$ ), 용량계수( $C$ )는 다음과 같은 관계식을 갖는다.

$$T_{pump} = C \times \omega_{pump}^2 \quad (3)$$

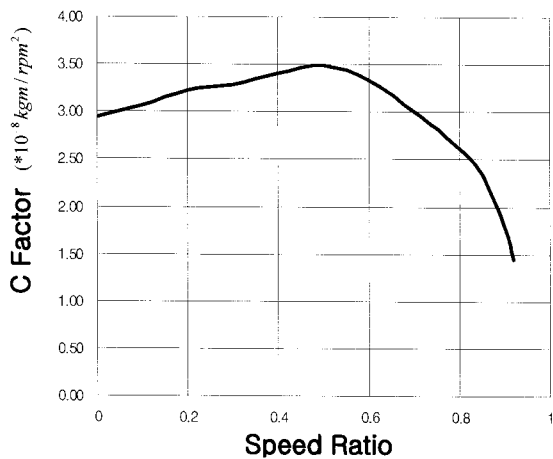
$$T_{turbine} = TR \times T_{pump} \quad (4)$$

$$SR = \omega_{turbine} / \omega_{pump} \quad (5)$$

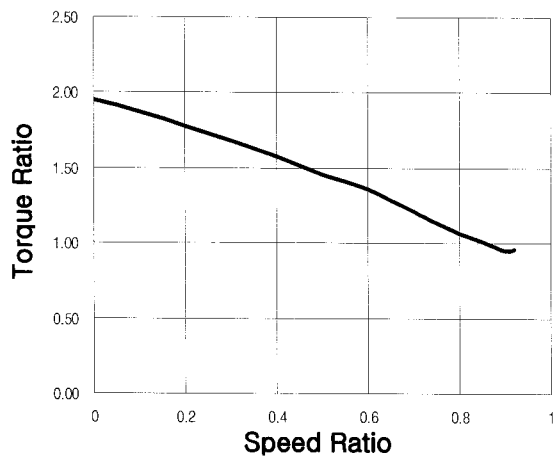
표 1. 자동변속기의 기어비.

Table 1. Gear ratio of automatic transmission.

	Gear ratio	Equivalent inertia (kg.m <sup>2</sup> )
1st	2.842	0.066
2nd	1.529	
3rd	1	
4th	0.712	



(a) 토크 컨버터의 용량 계수



(b) 토크 컨버터의 입출력 토크비

그림 4. 토크 컨버터의 성능 곡선.

Fig. 4. Torque converter performance curve.

3. 자동변속기 모델

자동변속기는 유성기어 세트와 이를 제어하기 위한 클러치, 브레이크의 조합, 그리고 전체적으로 유압을 제어하기 위한 솔레노이드 밸브로 구성되어 있다. 자동변속기의 모델은 특정 단계에 따라 변속 동역학이 다르며, 상향 변속(up shift)시와 하향 변속(down shift)시 다른 동적 특성을 나타낸다. 따라서 자동변속기 구성요소의 상세한 모델을 포함하는 복잡한 동적 모델이 필요하다. 그러나 본 논문에서는 임베디드 시스템의 제어기로서의 거동을 보기 위해서 자동변속기를 등가 회전 관성 모멘트를 갖고 각 단계에 따른 기어비를 갖도록 단순화하여 모델링하였다. 각 단계의 기어비는 표 1과 같다.

4. PWM 솔레노이드 밸브

실제 자동차에서 변속이 이루어지는 동안에 PWM 솔레노이드 밸브의 출력 압력은 입력 듀티율에 따라 변화한다. 따라서, 변속시의 PWM 솔레노이드 밸브의 동적 거동을 보기 위하여 기계적인 듀티율과 출력 압력간의 전달함수를 구하였다. 이는 듀티율에 따른 압력 실험 데이터로부터 시스템 식별 (system identification)을 통하여 (6)과 같이 전달함수를 구하였다.

$$G(s) = \frac{-0.1s + 279.1}{s^2 + 102s + 3910.25} \quad (6)$$

PWM 솔레노이드 밸브의 정상상태 특성을 반영하기 위해 실험 데이터로부터 근사화(curve fitting) 작업을 거쳐 전기적인 듀티율과 기계적인 듀티율간의 관계를 찾는 다항식을 구하였다. (7)은 구한 근사식을 나타낸다[8].

$$R_M = -46.6127 + 3.2350R_E - 0.0434R_E^2 + 0.003R_E^3 \quad (7)$$

여기서,  $R_M$ ,  $R_E$ 는 각각 기계적 듀티율과 전기적 듀티율을 나타낸다.

그림 5는 전기적 듀티율과 기계적 듀티율간의 관계를 실험 결과값과 근사화시킨 시뮬레이션 결과값을 나타내며, 근사식(7)을 이용하여 얻은 시뮬레이션 결과가 실험 결과 데이터와 잘 일치되고 있음을 보여준다.

그림 6은 전달함수와 근사화 기법을 이용하여 얻은 듀티율에 따른 압력 변화를 보여준다. 실제로 압력은 20~90%의 듀티율에서 제어가 되고 있으며, 시뮬레이션 오차는 전 영역에서 최대 0.6bar 이내의 오차를 보여주고 있다. 따라서 본 논문에서는 실시간 시뮬레이션을 위하여 복잡한 유압 솔레

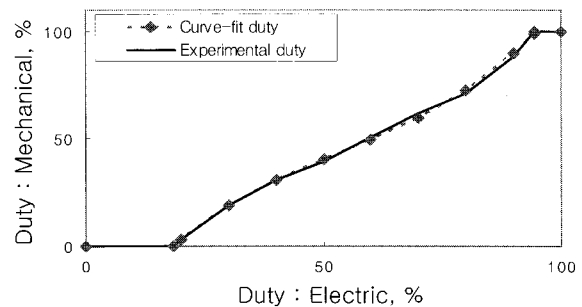


그림 5. PWM 솔레노이드 밸브의 기계적 듀티율의 근사화.

Fig. 5. PWM solenoid valve mechanical duty ratio curve-fitting.

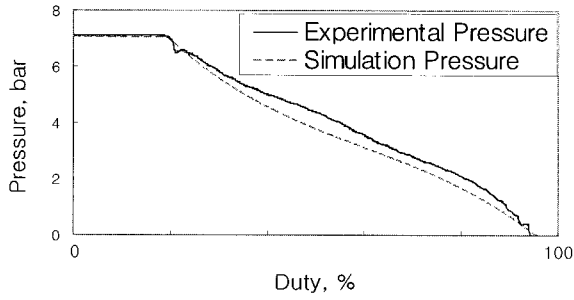


그림 6. PWM 솔레노이드 밸브의 성능 특성.  
Fig. 6. PWM solenoid valve performance characteristics.

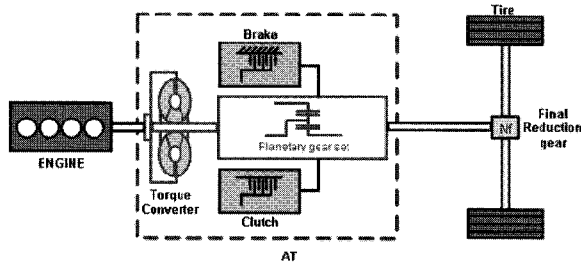


그림 7. 자동변속기 차량의 구조도.  
Fig. 7. Structure of a vehicle with automatic transmission.

노이드 밸브 모델 대신 (6)의 전달함수와 (7)의 근사화 함수를 이용하였다.

5. 차량 동역학 모델

그림 7은 4속 자동변속기 차량의 구조를 보여준다.

엔진의 파워는 토크 컨버터, 자동변속기와 구동계를 거쳐 타이어로 전달된다. 이와 같은 차량 동역학 모델은 다음 (8)과 같이 표현된다[9].

$$\frac{dV}{dt} = \frac{\frac{N_f N_t}{R_t} T_{T/Cout} - F_{load} - F_b}{M + \frac{2J_w + (J_e + J_{T/C})N_t^2 N_f^2 + J_t N_f^2}{R_t^2}} \quad (8)$$

여기서,  $J_{T/C}$ 는 토크 컨버터의 회전 관성을,  $J_t$ 는 자동변속기의 회전 관성을 나타낸다.  $N_t$ ,  $N_f$ 는 자동변속기의 기어비와 종감속 기어의 기어비를 나타내며,  $T_{T/Cout}$ 은 토크 컨버터의 출력토크,  $F_{load}$ ,  $F_b$ 는 주행저항력과 브레이크력을 나타낸다.

IV. HILS 시스템

1. 제어 로직

자동변속기의 변속은 변속 맵을 통해서 이루어 지게 구성하였다. 변속맵은 크게 상향변속과 하향변속맵으로 구분되며, 차속과 스로틀 개도량에 의해서 현재의 변속단이 결정된다. 그림 8은 자동변속기의 변속맵을 보여주며, 그림 9는 변속 제어기로 사용된 임베디드 시스템의 입력과 출력을 보여준다.

변속단이 결정되면 변속비 제어용 솔레노이드 밸브 A, B에 의해서 변속이 이루어 진다. 이 논문에서는 변속맵을 통해서 변속단이 결정되면 솔레노이드 밸브의 동작 명령을 출력하

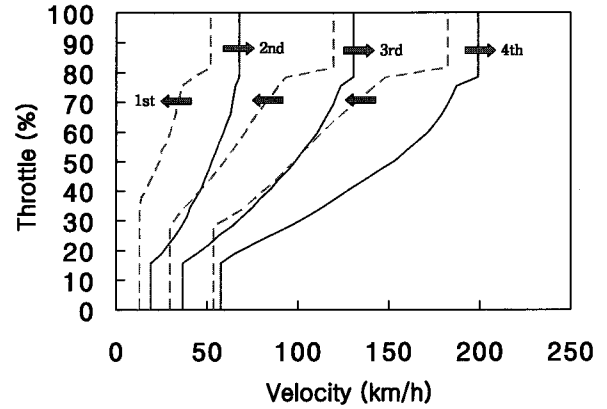


그림 8. 변속맵.  
Fig. 8. Shift map.

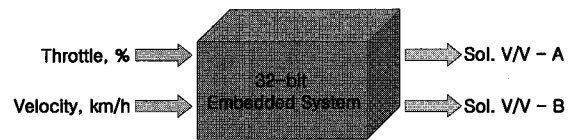


그림 9. 32비트 임베디드 시스템의 입/출력신호.  
Fig. 9. Input/output signal of 32-bit embedded system.

표 2. 자동변속기의 변속비.

Table 2. Gear ratio of automatic transmission.

	Gear ratio	Sol. V/V - 1	Sol. V/V - 2
1st	2.842	OFF	ON
2nd	1.529	ON	ON
3rd	1	ON	OFF
4th	0.712	OFF	OFF

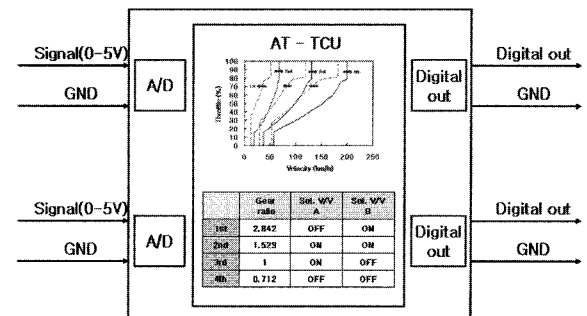
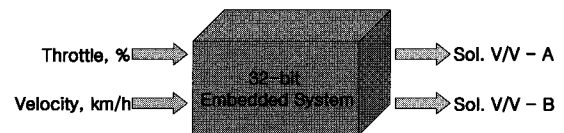
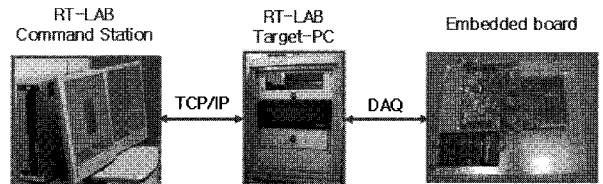


그림 10. HILS 시스템의 구성도.  
Fig. 10. Configuration of HILS system.

도록 MATLAB/Simulink로 구성하여 32-bit 임베디드 시스템에 탑재하였다. 임베디드 시스템에서 실제 솔레노이드 동작 신호를 내보내는 것은 아니며, 현재 단계에 따른 솔레노이드 밸브의 상태를 표 2에 따라 출력하도록 하였다. 임베디드 시스템의 입력 신호도 변속에 필요한 신호만 고려하였다. 표 2는 변속단에 따른 솔레노이드 밸브의 상태를 보여준다.

2. HILS 시스템 구성

그림 10은 구축된 HILS 시스템의 하드웨어 구성을 보여준다. OPAL-RT사의 RT-LAB을 이용하여 실시간 시스템을 구축하였으며, 사용자 환경 기반의 RT-LAB command station은 Windows XP를 기반으로 한 Pentium-4 3.0G 프로세서, 램 1G의 PC이며, RT-LAB target은 QNX 6.0기반의 Pentium 3.0G 램 1G의 산업용 PC를 사용하였다. 임베디드 시스템과의 데이터 입출력 (data acquisition)은 NI-6024E 보드를 사용하였다[10].

V. 시뮬레이션 결과

개발된 32-bit 임베디드 시스템을 이용하여 4속 자동변속기를 탑재한 2.5L엔진 차량을 대상으로 하여, JAPAN 10-15 주행모드를 적용하여 주행 시뮬레이션을 수행하였다. 자동변속기 제어용 임베디드 시스템과 target-PC의 시뮬레이션 스텝 시간 (step time)은 동일하게 0.002초로 하였으며, 적분해는 4차 Runge-Kutta 방법을 사용하였다.

그림 11은 JAPAN 10-15 주행모드를 주행하였을 때의 시뮬레이션 결과값을 보여준다. 그림 11의 위에서부터 JAPAN 10-15 모드의 차량 속도 추종, 차량의 속도에 따른 변속기의 기어비, 변속기의 기어비에 따른 솔레노이드 밸브 1과 2의 On/Off 상태를 나타낸다. 맨 위 그래프에서 차량의 속도가 JAPAN 10-15 주행모드를 잘 추종하고 있으며, 그림 11의 하단의 2개 그래프는 시뮬레이션에 사용된 32-bit 임베디드 시스템에서 출력되는 솔레노이드 밸브 1과 2의 구동명령 신호를 나타낸 값으로 속도의 변화에 따라 임베디드 시스템에 탑재된 변속맵과 변속단에 따른 솔레노이드 밸브 On/Off 조합에 따라 각 변속단에 따른 솔레노이드 밸브 1과 2의 구동명령을 출력하는 것을 볼 수 있다. 중간 그래프는 출력된 솔레노이드 밸브의 조합에 의해 결정된 기어비의 변화를 보여준다. 시뮬레이션 결과 그래프를 볼 때, JAPAN 10-15 주행모드를 거의 완벽하게 추종하고 있다. 개발된 32-bit 임베디드 시스템에 탑재된 변속 로직은 가속시와 감속시에 미리 스케줄링 된 랩에 따라 완벽하게 변속이 이루어지는 것을 볼 수 있으며, 임베디드 시스템 또한 변속 로직에 따른 제어를 잘 수행하고 있음을 보여준다. 이는 개발된 시뮬레이션 시스템이 실시간 시뮬레이션이 가능하며, HILS 수행이 가능함을 보여주며, 임베디드 시스템이 변속 로직 연산을 하는데 충분한 성능을 갖는다는 것을 보여준다. 따라서, 변속제어기를 개발할 때 간편하게 사용할 수 있을 것이다.

VI. 결론

본 논문에서는 개발된 32-bit 임베디드 시스템을 자동변속기 전자 제어 시스템으로 이용하여 주행 시뮬레이션을 통해 임베디드 시스템의 성능을 평가 하였다. 이를 위해 차량을 모델링 하였으며, 변속 제어 로직을 개발하여 임베디드 시스템에 탑재하였다. HIL simulation 환경을 구축하고 시뮬레이션

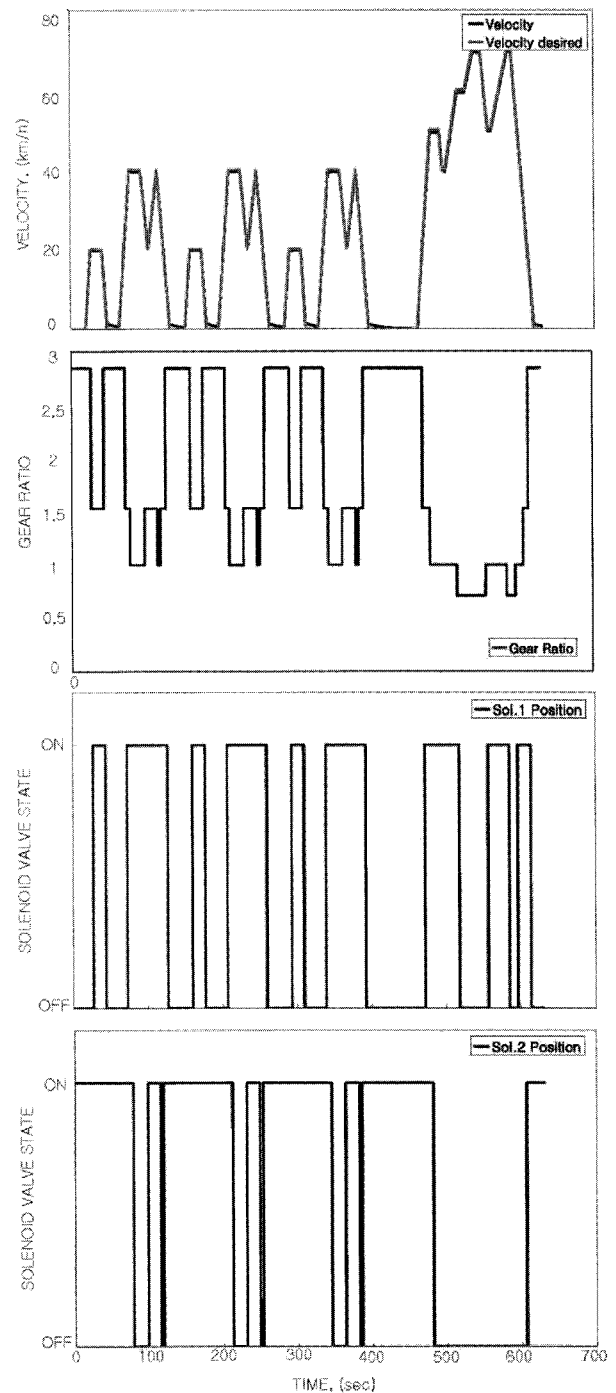


그림 11. 시뮬레이션 결과(JAPAN 10-15 모드).  
Fig. 11. Simulation results(JAPAN 10-15 mode).

을 한 결과, 주행모드를 잘 추종하였으며, 차량의 속도에 따른 변속비를 잘 추종하는 것을 확인하였다. 따라서 개발된 32-bit 임베디드 시스템은 내구도 및 신뢰성 평가를 하진 않았지만, 연산 수행 능력면에서는 자동변속기 차량의 전자제어 장치로 충분히 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서 개발한 임베디드 시스템 HIL 시뮬레이터와 시뮬레이션 기법은 자동차용 임베디드 시스템의 개발과 제어 로직 개발에 있어서 성능을 검증하는데 시간과 비용을 크게 단축시킬 수 있을 것으로 본다.

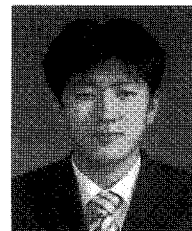
## 참고문헌

- [1] 박진호 외, “변속 알고리즘의 검증을 위한 실시간 시뮬레이션 프로그램과 변속제어기 인터페이스 개발,” 한국자동차공학회논문집 제 7 권 제 3 호, pp. 136-144, 1999.
- [2] 이영송 외, “Brake-by-wire hardware-in-the-loop 시뮬레이션 시스템의 개발,” 한국자동차공학회 춘계학술대회논문집, pp. 1024-1028, 2006.
- [3] T. J. Erkkinen and A. Arbor, “Embedded control system implementation and modeling issues,” *American Control Conference*, vol. 1, pp. 734-738, 1999.
- [4] J. Lemieux, *Programming in the OSEK/VDX Environment*, CMP Books, 2001.
- [5] D. Lamberson, N. P. Teske, and J. K. Hedrick, “A model-based approach to the implementation of automotive embedded control systems,” *Intelligent Transportation Systems*, vol. 1, pp. 655-659, 2003.
- [6] K. W. Han, W. S. Ryu, I. G. Jang, J. W. Jeon, H. S. Kim, and S. H. Hwang, “Experimental study on the shift control characteristics of CVT using embedded system,” *SICE-ICASE, International Joint Conference*, pp. 3652-3657, 2006.
- [7] A. Haj-Fraj and F. Pfeiffer, “Optimization of gear shift operations in automatic transmission,” *Advanced Motion Control 6th International Workshop*, pp. 469-473, 2000.
- [8] B. H. Cho, G. H. Jung, and K. I. Lee, “Experimental modeling of pulse width modulation solenoid valve for automatic transmission,” *KSME*, vol. A, pp. 677-682, 1997.
- [9] Thomas D. Gillespie, “Fundamentals of vehicle dynamics,” Society of Automotive Engineers, Inc.
- [10] RT-LAB User's Guide, Opal-RT Technologies Inc. Canada, 2003.



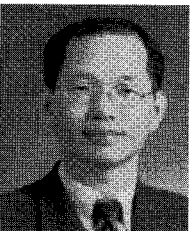
장 인 규

2004년 성균관대학교 기계공학부 졸업.  
2006년~현재 성균관대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 변속기 제어용 임베디드 시스템.



서 인 근

2005년 성균관대학교 기계공학부 졸업.  
2006년~현재 성균관대학교 대학원 기계공학과 석사과정 재학중. 관심분야는 자동변속기 TCU 분석.



전 제 욱

1984년 서울대학교 졸업. 1986년 동 대학원 석사. 1990년 퍼듀대학 박사. 1990년~1994년 삼성전자 선임연구원. 1994년~현재 성균관대학교 정보통신공학부 교수. 관심분야는 산업로봇 시스템, 모션 제어, 비전 시스템, 임베디드 시스템.



황 성 호

1988년 서울대학교 기계설계학과 졸업. 1990년 동 대학원 석사. 1997년 동 대학원 박사. 1992년~2002년 한국생산기술연구원 선임연구원. 2002년~현재 성균관대학교 기계공학부 부교수. 관심분야는 자동차 메카트로닉스 하이브리드 전기 자동차, 유공압 제어시스템.