

임베디드 시스템을 이용한 CVT 유압시스템 제어

A Control of CVT Hydraulic System using Embedded System

한기원 · 류완식 · 장인규 · 전재욱 · 김현수 · 황성호

K. W. Han, W. S. Ryu, I. G. Jang, J. W. Jeon, H. S. Kim and S. H. Hwang

Key Words : CVT(무단변속기), Embedded System(임베디드 시스템), Electronic Control Unit(전자제어장치; ECU), Test Rig(리그시험기)

Abstract: The continuously variable transmission (CVT) of which speed ratio can change continuously in a fixed range has the benefits of low fuel consumption and exhaust gas because it enables the engine of a vehicle to operate in a high efficiency range regardless of vehicle speed. The speed ratio of belt type CVT is controlled by adjusting line pressure. The one of the line pressure control methods, mechanical-hydraulic control is usually adopting VDT's control method, in which the secondary solenoid valve has two functions both a regulator and a line pressure controller. However, this control method could not show the high performance of CVT with optimal driving capability because of the limitation of simple control algorithm, and it could not gain market share sufficiently in spite of the advantage of CVT with low fuel consumption. On the other hand, the electro-hydraulic control method gives the enhancement of power performance and low fuel consumption by implementing various driving mode using the proportional control or PWM control. The key of CVT technique is to develop a control algorithm of the electro-hydraulic solenoid valve in order to implement the speed ratio efficiently. In this paper, the line pressure control algorithm is proposed and the hydraulic system is controlled using metal belt type CVT test rig and the embedded ECU platform.

1. 서 론

무단변속기(continuously variable transmission : CVT)는 일정 변속비내에서 무한대의 변속비를 구현할 수 있어서 엔진의 속도를 차량의 속도와 관계없이 고효율 영역에서 운전시키는 것이 가능하여 연비향상 및 저배기의 특성을 가지고 있다. 이와 같은 CVT의 특성은 갈수록 엄격해지는 세계 각국의 연비규제를 만족시키기 위한 필수적인 요소로 부각되고 있다. 또한 CVT는 연속적인 변속비의 변화로 변속충격이 없을 뿐 아니라 기존 수동변속기(manual transmission : MT)나 자동변속기(automatic transmission : AT) 보다 연비 및 주행성능 면에서 뛰어난 것으로 보고되고

있다.¹⁾

이미 개발된 CVT 방식으로는 벨트(belt)식, 토로이달(toroidal)식, 체인(chain)식이 있으나 현재까지는 벨트식 CVT가 차량에 가장 많이 적용되고 있다. 벨트식 CVT는 축방향으로 움직이는 폴리에 벨트를 걸어 폴리의 이동에 따라 구동축 폴리의 벨트반경과 종동축 폴리의 벨트 반경을 연속적으로 변화시키는 방식으로 네덜란드 Van Doorne Transmission(VDT)사의 금속 V-벨트가 주로 사용되고 있다. 체인식이나 토로이달식과 비교하여 전달 토크 용량이 작은 것이 단점으로 지적되어 왔으나 벨트의 전달토크 용량은 점차적으로 증가 추세에 있으며, 최근에는 3.5L급의 대용량 엔진에 대응하는 전달토크 350Nm급의 금속 벨트식 CVT²⁾가 개발되기도 하였다.

벨트식 CVT의 제어는 크게 라인압력 제어와 변속비 제어로 나누어지며 각각의 제어방식은 다시 기계 유압식 제어방식과 전자제어방식으로 나누어진다.

라인압력 제어는 구동 및 종동축 액추에이터의 축력(thrust)을 적절히 제어함으로써 벨트-폴리의 미끄

접수일: 2007년 1월 20일

황성호(책임저자) : 성균관대학교 기계공학부

E-mail : hsh@me.skku.ac.kr, Tel : 031-290-7464

한기원, 장인규 : 성균관대학교 대학원 기계공학과

류완식 : 현대파워텍

전재욱 : 성균관대학교 정보통신공학부

김현수 : 성균관대학교 기계공학부

럼을 방지하는 최적의 라인압력을 구현한다. 그러나 필요이상의 축력은 금속벨트를 구속하는 밴드에 과도한 장력을 발생시켜 벨트 수명을 단축시킬 뿐만 아니라 유압손실의 원인이 된다. 또한 미흡한 축력은 벨트와 풀리사이의 미끄럼을 일으켜 토크 전달기능 상실과 더불어 벨트 손상의 원인이 된다. 라인압력제어의 기계 유압식 제어방식은 거의 VDT방식을 채택하고 있는데, VDT방식은 2차측(secondary) 벨브가 레귤레이터 역할과 라인압력 제어역할을 수행한다. 하지만 이 방식은 단순한 제어 알고리즘의 한계로 인하여 최적인전 가능이라는 CVT의 특성을 충분히 발휘하지 못하고 있으며 운전자의 의지를 반영하는데 미흡하여 무단변속, 연비향상이라는 CVT의 장점에도 불구하고 시장을 충분히 확보하지 못하였다. 전자제어방식은 비례제어 또는 PWM 솔레노이드 벨브를 사용하여 TCU(transmission control unit)의 신호에 의해 라인압력을 제어하는 방식으로 기계 유압식 CVT에서 구현하지 못하였던 다양한 운전모드를 구현하여 운전자의 의지충족, 연비 및 동력성능 향상 면에서 기계 유압식 CVT에 비하여 유리한 장점을 가지고 있다.

본 논문에서는 전자제어방식 라인압력 제어를 구현하고자 METAL belt type CVT test rig를 이용, 자체 개발한 Embedded ECU에 제어 알고리즘을 탑재하여 CVT의 유압시스템 제어 실험을 수행 검증하고자 한다.

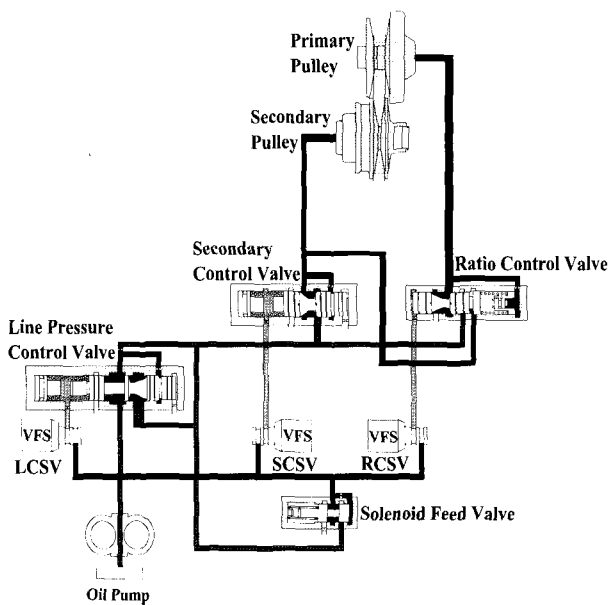


Fig. 1 CVT Hydraulic System

2. CVT용 임베디드 시스템 개발

2.1 ECU 개발 과정

자동차의 전자화가 급속히 발전함에 따라 빠른 시간 내에 높은 성능을 갖는 자동차용 ECU 개발에 대한 필요성이 크게 요구되고 있다. 자동차용 ECU는 그동안 여러 방법을 통해 개발되어 왔다. 최근 들어서는 자동차 시스템의 제어 모델을 개발하고 이를 하드웨어 플랫폼에 탑재하여 검증절차를 거치는 MBDP (Model-Based Development Process) 방법이 선진 자동차 업체를 중심으로 연구되고 있다.^{3~5)}

2.2 ECU 개발용 플랫폼

자동차용 제어 알고리즘에 있어서 많은 연구자들이 현재 CACSD (Computer Aided Control System Design) 툴이라 할 수 있는 MATLAB/ Simulink를 사용하고 있으며, MATLAB/ Simulink와 연동되는 PC 기반의 툴을 RCP (Rapid Control Prototyping) 환경으로 사용하고 있다.⁶⁾ MATLAB의 Real-Time Workshop은 Embedded Target Coder와 연동하여 Infineon사의 C166, Freescale사의 HC12, MPC500 계열의 자동차용 마이크로프로세서의 C 코드 생성을 지원한다. 설계된 제어 모델의 입력과 출력을 MATLAB/Simulink 라이브러리의 Embedded Target for MPC500이나 HC12 블록에 연결하여 사용할 수 있으며, 이렇게 설계된 모델은 MPC500 또는 HC12용 C 코드로 변환할 수 있다.⁷⁾ 이러한 툴은 실제 ECU가 아닌 NI나 dSPACE사의 제품이 대부분이다. RCP 툴은 PC 기반이기 때문에 메모리나 성능, 처리 속도가 ECU 보다 훨씬 앞선다. 따라서 개발된 알고리즘을 실제 자동차의 ECU에 적용했을 때 성능은 PC를 이용했을 때에 비해 떨어질 수 있다. 본 논문에서 개발하고자 하는 ECU 개발용 플랫폼은 이러한 툴과 달리 실제 ECU와 유사한 환경에서 HIL 시뮬레이션을 실행할 수 있다는 특징을 갖는다.

2.3 MPC565 기반 32bit 플랫폼

CVT용 ECU 개발 시 사용되는 임베디드 시스템 플랫폼은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 Freescale사의 MPC565를 이용하여 개발하였다. MPC565는 32bit의 자동차 제어용 프로세서이며, 특히 파워트레인 (Powertrain) 제어에 적합하도록 설계되었다. 전압 레귤레이터인 MC33394는 MPC500 계열의 Power-On-reset의 신호에 이상적인 신호를 생성하여 MPC565가 안정적으로 Reset할 수 있도록 도와준다.

FLASH ROM (1Mbytes)	RAM (1Mbytes)	CAN #1	SERIAL BOARD EXTENSION CONNECTOR
		CAN #2	
		CAN #3	
MPC565(32BIT)	RS232 #1		
	RS232 #2		
	LAN		

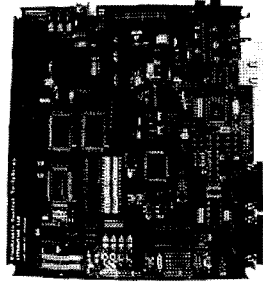


Fig. 2 32 bit platform

MC33394는 내부에 CAN 트랜시버를 내장하고 있으며 자동차 시스템의 시동 신호에 반응하여 ECU 시스템의 Power On과 Power Off를 담당한다. Power Off 일 경우, 자동차 시스템의 배터리로부터 ECU의 모든 전원을 차단하고 Keep Alive Memory에만 전원을 전달할 수 있도록 되어 있다.

2.4 OSEK/VDX 포팅

OSEK/VDX는 ECU를 위한 RTOS(Real Time Operating System)이며, "Open System and Corresponding interfaces for automotive electronics"를 의미한다. OSEK/VDX는 독일의 자동차 관련 기업이 표준을 정한 것이며, RTOS 회사는 OSEK/VDX를 오픈 소스 형태로 생산하여 공급한다. OSEK의 표준에는 운영체제의 특징을 정의하는 OS, 통신 계층을 정의하는 COM, 네트워크 매니지먼트를 정의하는 NM, OSEK Implementation Language를 정의하는 OIL, OSEK을 효과적으로 디버깅할 수 있도록 OSEK Runtime Interface를 정의하는 ORTI, Time Triggered Operating System을 정의하는 OSEKtime, Fault Tolerant Communication을 정의하는 FTCOM이 있다. 이 표준 중에서 핵심적인 것은 OS, COM, OIL이다.⁸⁾

Fig. 3은 32bit 플랫폼에서 적용할 Metrowerks사의 OSEKturbo의 OIL을 생성하는 그림이다. OIL을 생성했다면 Startup 코드가 플랫폼에 적절한지 점검해야 한다. Startup 코드에서 유의해야 할 점은 인터럽트 모드가 OSEK의 OIL에서 설정한 값과 같아야 하고 OSEK의 System Timer로 사용되는 인터럽트 레벨은 다른 ISR의 인터럽트 레벨과 중복될 수 없다는 것이다. 또한 MPC565의 인터럽트 모드 중 Enhanced 모드를 사용할 경우 인터럽트 벡터 코드가 0xFFFFF000에 위치하도록

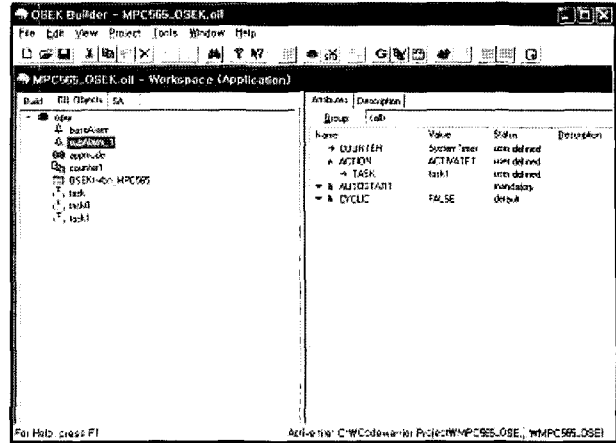


Fig. 3 OSEK Builder of OSEKturbo

3. CVT용 Test rig

Fig. 4는 변속비 제어 특성 평가를 위한 CVT Test rig를 도시한 그림이다. Test rig는 구동 시스템, 유압공급 시스템 CVT 밸브바디 그리고 센서 및 제어 시스템으로 구성되어 있다.

3.1 구동 시스템

구동용 모터는 15kW급 스핀들 모터를 사용하였다. 모터의 속도는 인버터에 의해 주파수 변환방식으로 제어된다. 모터로 부터의 동력은 multi-wedge V-belt를 통하여 CVT의 구동 풀리에 전달되며, multi-wedge V-belt의 인장력을 조절하기 위하여 모터와 CVT 구동축 사이에 텐서너를 설치하였다. 또한 방진 및 절연 패드를 모터와 T-홈 베사이에 설치하여 모터 구동시 발생하는 진동과 잡음(noise)에 의한 영향을 최소화하였다. Fig. 5는 CVT 시스템의 사진이다.

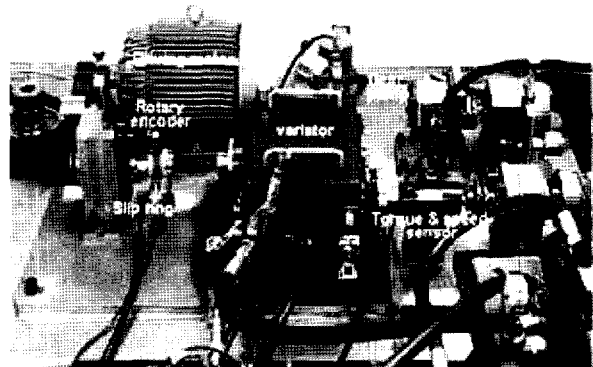


Fig. 4 Test rig for CVT

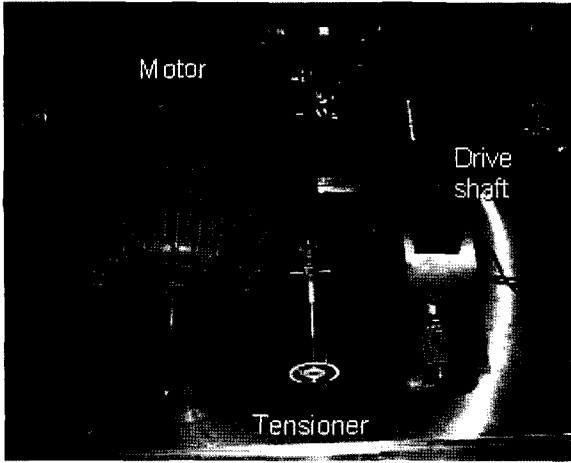


Fig. 5 CVT system

3.2 유압공급 시스템

밸브바디에 유압을 공급하기 위하여 오일펌프, 모터, 수냉식 열교환기 그리고 기계식 릴리프 밸브(relief valve)로 구성되는 유압공급 장치가 장착되어 있다. 오일펌프의 변위는 14.3 cc/rev 이며 펌프 구동 모터에 의해 CVT의 구동축 회전속도와 동일한 속도로 작동된다. 오일펌프를 작동시키기 위한 모터는 5.5 kW급 스핀들 모터이며 인버터에 의해 주파수 변환 방식으로 속도가 제어된다. 오일펌프에서 공급되는 압력의 맥동을 완화시켜주기 위하여 어큐뮬레이터(accumulator)를 설치하였으며, 릴리프 밸브(relief valve)를 장착하여 과유압을 방지하였다. Fig. 6은 유압공급 장치의 사진이다.

3.3 CVT 밸브바디 모듈

밸브바디와 유압과워유닛 및 CVT와의 연결을 위하여 밸브바디 지그(zig)가 사용되었다. Fig. 7은 밸브바디 지그의 사진이다. 밸브바디의 상단에 윤활 및 냉각유량 조절을 위하여 콕(cock) 밸브가 있으며, 지그에서 유압 공급시스템 탱크로의 오일의 순환을 위하여 펌프를 장착하고, 이의 제어를 위하여 오일레벨 게이지(oil level gage)가 장착되어 있다.

CVT 밸브바디 모듈은 밸브바디와 VFS (variable force solenoid) 제어기로 구성된다. CVT 밸브바디의 라인레귤레이터밸브(LRV)와 변속비제어밸브(RCV)는 VFS로 제어된다. VFS 제어기의 구동을 위한 입력으로 1kHz의 톱니파와 12V의 전압이 인가되어야 하므로 이를 위하여 함수발생기와 직류전원 공급기가 사용되었다. VFS 구동은 함수발생기의 톱니파와 비교되는 0~5V 범위의 제어전압에 의해 발생하는 PWM 신호로 이루어지며 제어전압은 D/A 컨버터를

통해 인가된다. Fig. 8은 VFS 제어기의 사진이다.

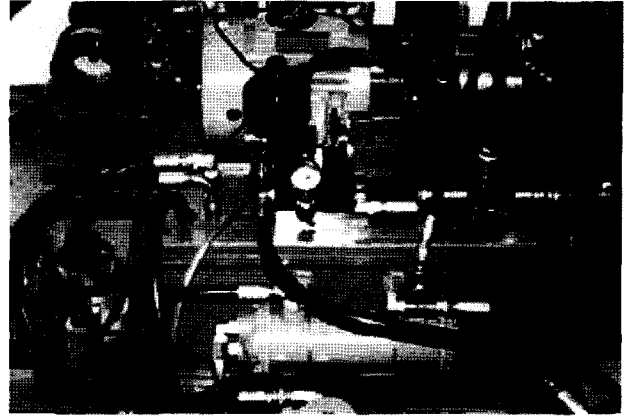


Fig. 6 Hydraulic power unit

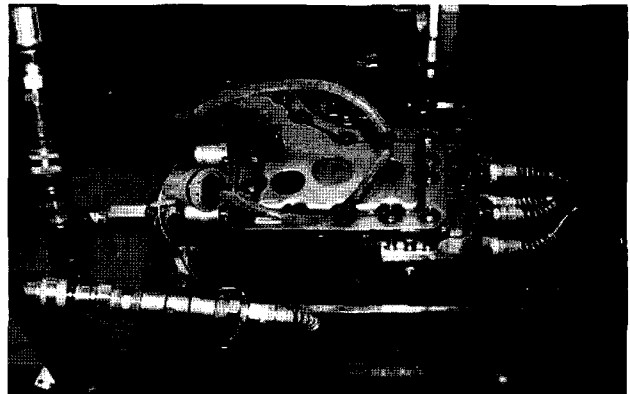


Fig. 7 Valve body zig



Fig. 8 VFS Controller

4. CVT Test rig 제어 시스템

CVT Test rig의 제어 시스템은 라인압력, 구동축 압력, 종동축 압력, 구동축 속도, 종동축 속도 등의 데이터를 획득하기 위한 센서 및 데이터 획득 장치, 운전자의 의지에 의하여 라인 압력을 제어하여 변속을 하기 위한 제어장치로 구성되어 있다.

4.1 센서 시스템

Fig. 9는 CVT의 제어를 위한 임베디드 시스템의 센서 시스템 모듈을 도시한 것이다.

CVT의 성능시험을 위하여 구동 및 종동측 유압 액추에이터의 축력 및 구동 및 종동측 폴리의 회전 속도, 입·출력 토크, 오일펌프의 회전속도와 공급압력의 신호를 검출한다.

4.2 운용 시스템

압력제어방식 CVT 성능시험을 위하여 구성된 운용 시스템 모듈은 MPC565기반의 32bit platform board Embedded system이며 각종 센서의 display의 편의를 위해 NI사의 LabVIEW를 이용하였다. Embedded system ECU는 Test rig의 각종 센서신호를 A/D로 변환으로 입력받고 Test rig VFS를 구동하기 위한 제어전압은 D/A로 변환하여 출력한다. 이러한 시스템 환경은 실차 TCU 환경을 고려하여 10ms의 주기를 가지도록 하였다. Fig. 10은 운용 시스템인 Embedded system을 보여주고 있다.

4.3 CVT 종동측압력/변속비 제어기

CVT의 제어대상은 종동측압력, 변속비 및 발진요소로 나누어진다. 종동측압력 제어는 차량운전 중 엔진이나 차량의 바퀴에서 발생하는 토크를 원활히 전달하기 위한 최적의 벨트 클램핑력(clamping force) 즉, 축력을 구현하는 것이며 CVT 변속비 제어는 운전자의 의지와 주행환경에 대한 최저연비, 또는 최대동력성능을 구현하거나 운전자의 운전패턴에 대응하는 적절한 차량거동을 얻기 위하여 요구된다.

Fig. 11은 종동측압력 제어 블록선도와 CVT 변속비 제어 블록선도를 도시한 것이다. 압력 제어는 크게 상위제어기(high level controller)와 하위제어기(low level controller)로 구성되어진다.



Fig. 10 Embedded control system

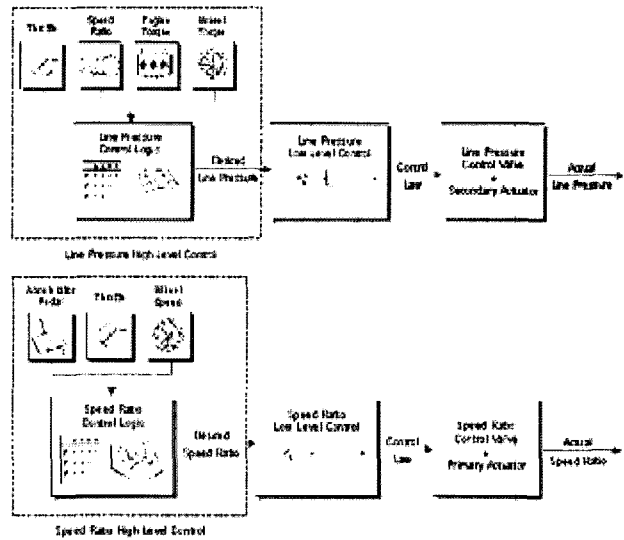


Fig. 11 Block diagram of pressure control

상위제어기는 CVT 변속비, 엔진토크 등 여러 환경 조건을 입력받아 이에 상응하는 최적의 압력 목표 값을 계산하는 부분이며 하위제어기는 상위제어기에서 출력된 최적의 압력을 구현하기 위하여 압력 제어밸브를 제어하는 부분으로 구조가 간단하면서도 우수한 성능을 기대할 수 있는 PID 제어로직을 이용하였다.

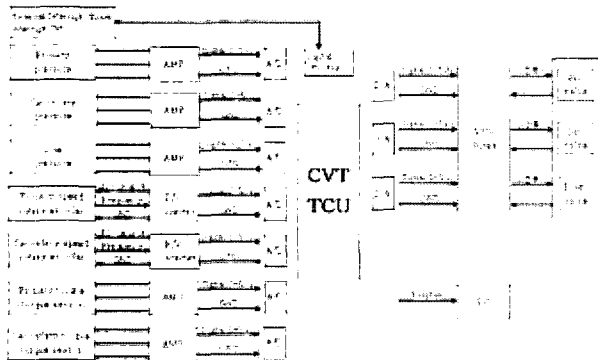


Fig. 9 Sensor and operating system

5. 임베디드 시스템을 이용한 유압시스템 제어 시험

제어 시험을 위한 초기 조건으로 발진시의 모터 속도는 800rpm으로 하여 실험하였다. 전체 라인압력은 30bar로 설정하였고 종동측 압력은 현재 변속비와 입력 토크에 의해 목표 압력값이 결정된다. 변속비 제어 압력은 수동적으로 목표 변속비(0.428~2.457)를 입력하여 실험을 수행하였다. 종동측 압력과 변속비 제어

압력은 PID 제어로직을 이용하여 제어하도록 하였으며 데이터의 수집은 하이퍼 터미널(hyperterminal)과 LabVIEW 프로그램을 통해 이루어졌다.

Fig. 12는 목표 변속비 $i=2.457$ 에서 $i=1.0$ 으로 변속하였을 때의 실험결과 그래프이다. (a)는 목표 변속비, 현재 변속비, 구동축 속도, 종동축 속도를 나타내고 있으며 (b)는 라인압력(based pressure), 종동축 압력, 변속비 제어 압력의 결과를 보여주고 있다. 여기서 Line pressure는 CVT를 작동시키기 위한 Base pressure, Secondary pressure는 라인압 제어에 의해 결정되는 종동축압력, 그리고 Primary pressure는 변속비 제어에 의해 결정되는 구동축의 압력을 의미한다. (a)의 결과 그래프에서 목표 변속비인 $i=1.0$ 을 잘 추종하고 있는 것을 확인할 수 있으며 변속비에 따른 종동축 속도 역시 구동축 속도(800rpm)와 같은 속도를 갖는 것을 볼 수 있다. (b) 결과 그래프에서의 모든 압력값들은 변속이 시작되는 시점에서 압력의 변화가 발생함을 알 수 있고 변속이 끝난 뒤에는 안정적인 압력값을 가지는 것을 확인할 수 있다. 상향변속이 이루어질 때 Line pressure가 낮아지는 것은 RCV에서 비어있던 체적을 채우기 위하여 발생한 유량손실에 의한 것이다. Fig. 13은 목표 변속비 $i=1.0$ 에서 $i=0.428$ 로 변속하였을 때의 실험결과 그래프이다. Fig. 12와 마찬가지로 목표 변속비인 $i=0.428$ 을 잘 추종하고 일정하게 유지하는 것을 알 수 있으며 종동축 속도 역시 변속비에 알맞은 속도를 유지함을 확인할 수 있다.

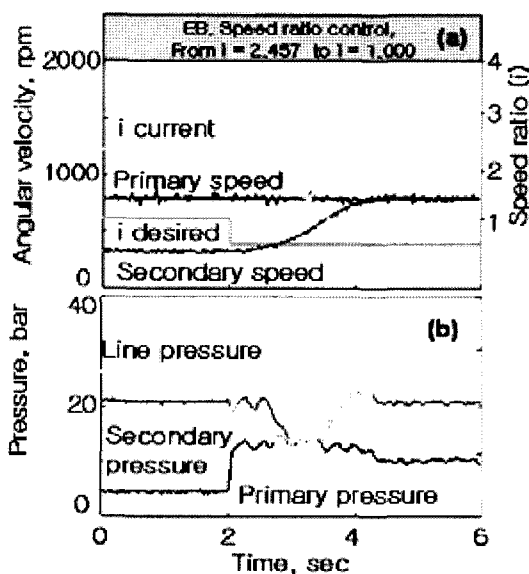


Fig. 12 Experimental results of ratio control using embedded system (from $i=2.457$ to $i=1.0$)

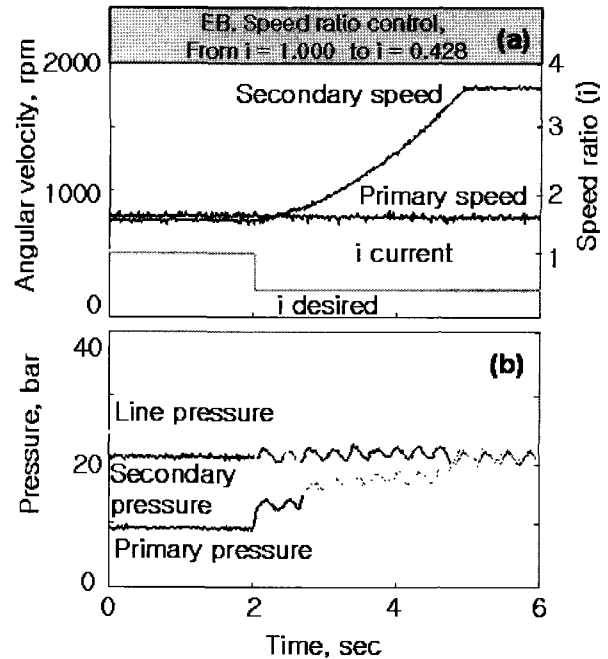


Fig. 13 Experimental results of ratio control using embedded system (from $i=1.0$ to $i=0.428$)

6. 결 론

본 논문에서는 CVT용 test rig를 구성하였으며, 유압시스템 제어를 위한 임베디드 시스템을 개발하였다. 이를 통해 CVT의 유압시스템의 제어 시험을 수행하였으며 시험 결과 원하는 목표 변속비를 잘 추종하고 일정하게 유지하는 것을 확인하였다. 또한 개발된 임베디드 시스템이 CVT 차량의 전자제어장치로 활용될 수 있음을 검증하였다.

참 고 문 헌

- 1) D. Kraxner, P. Baur, J. Pertersmann, and W. Seidel, "CVT in Sports cars : An Application With Potential for High Dynamic Control," Proc. of Int. Congress on Continuously Variable Power Transmission, pp. 21~26, 1999.
- 2) K. Abo, K. Sugano, T. Shibayama, and K. Hayasaki, "Development of New-Generation Belt CVT's With High Torque Capacity for Front-Drive Cars," SAE Technical Paper Series, No. 2003-01-0593, 2003.
- 3) T. J. Erkkinen and A. Arbor "Embedded Control System Implementation and Modeling Issues," American Control Conference, 1999.

- 4) R. Isermann, "Automotive Mechatronics Systems," International Conference on Control, Automation and Systems, 2005.
- 5) D. Lamberson, N. P. Teske, and J. K. Hedrick, "A Model-Base Approach to the Implementation of Automotive Embedded Control Systems," IEEE Intelligent Transportation Systems, 2003.
- 6) The Mathworks Official Webpage about Automotive Industry, <http://www.mathworks.com/industries/auto/>.
- 7) J. Lemieux, "Programing in the OSEK/VDX Environment," CMP Books, 2001.
- 8) The Embedded System Newsletter Community, <http://www.embedded.com>.