

TCU 제어로직 평가를 위한 AMT 모델 개발

Development of Automated Mechanical Transmission Model to Evaluate TCU Control Logic

오주영^{1,✉}, 송창섭²
Joo Young Oh^{1,✉} and Chang Sub Song²

¹ 한양대학교 기계설계·메카트로닉스공학과 (Department of Mechanical design & Mechatronics Engineering, Hanyang Univ.)
² 한양대학교 기계공학부 (Department of Mechanical Engineering, Hanyang Univ.)
✉ Corresponding author: oiy831@hanyang.ac.kr, Tel: 02-2220-0433

Manuscript received: 2009.8.19 / Accepted: 2010.1.25

The automated mechanical transmission(AMT) is composed of electronic control management (ECM) and automatic shift gear(ASG). The AMT has advantages which are high efficiency of manual transmissions(MT) and offer operation convenience similar to automatic transmissions (AT). However, it has defects that are the torque gap during gear shift transients and shift time is long. To reduce such defects, it is necessary practically to evaluate error and characteristics as developing simulation model before the control algorithm is applied. In this paper, models are composed of vehicle model and AMT shift control model. Particularly AMT shift control model consists of main clutch management model (MCM) and shift control management model(SCM). The developed models were verified by comparing the simulated and experimental results under the same operational conditions. It can also be used to evaluate shift algorithm.

Key Words: Automated Mechanical Transmission (자동화 수동변속기), Clutch Control Actuator (클러치 제어 액추에이터), Shift Control Actuator (시프트 제어 액추에이터), Select Control Actuator (선택 제어 액추에이터), Main Clutch (메인 클러치)

기호설명

F = Vertical force
 F_{act} = Force of the clutch actuator
 F_{clp} = Force of the clamp
 F_{rel} = Force of the release fork
 k_{CLR} = Ratio of the clamp and release bearing
 k_{FLR} = Ratio of the fork lever
 n = Number of the plate
 R_o = Outer radius of the clutch plate
 R_i = Inner radius of the clutch plate
 T_c = Torque capacity

x_{rel} = Displacement of the release fork
 x_{act} = Displacement of the clutch actuator
 x_{clp} = Displacement of the clamp
 μ_c = Friction coefficient

1. 서론

자동화 수동변속기(AMT)는 수동변속기(M/T)의 높은 동력 전달 효율과 자동 변속기(A/T)의 변속 조작 자동화의 이점을 갖고 있는 변속기이다. 이러한 AMT 기술은 메인 클러치 제어 기술(ECM: electronic control management)과 변속 조작을 제어하는 기술

(ASG : automatic shifting gear)로 나눌 수 있는데, 특히 클러치 제어 방법에 의해 변속품질(Shift quality)이 결정된다. 그러나 AMT 의 클러치 제어 기술은 변속 시간이 다소 길고 변속감이 좋지 못한 단점을 갖고 있는데, 이러한 단점을 개선하기 위하여 변속 조작 시 신속한 시프트 및 실렉트 조작 수행과 주어진 차량 운전 조건 하에서 최적화된 클러치 조작을 실시하여 변속 품질을 향상시킬 수 있는 제어 알고리즘 기술이 요구된다. 이와 같은 제어 알고리즘을 실제 차량에 적용하기 이전에 가상의 평가 모델에 적용하여 오류 및 특성의 검증이 필요하다. 이러한 모델 기반 설계(Model base design)는 Volkswagen, Bentz 등의 선진 업체에서 이미 시행 중에 있으나 국내에서는 그 기술이 미비한 실정이다.^{1,2}

본 연구는 변속 알고리즘을 평가할 수 있는 시뮬레이션 모델 개발에 초점을 두었으며, 차량 모델 및 AMT 변속제어시스템을 모사하는 모델을 개발하였다. 여기서, AMT 변속제어시스템은 클러치 제어 모델과 변속 조작 제어 모델로 각각 개발하였으며, 구성된 모델을 기반으로 변속 제어 알고리즘을 적용하여 시스템의 특성을 분석하여 실제 변속 데이터와 비교 및 고찰함으로써 모델 및 변속 제어 시스템의 타당성을 검증하였다.

2. AMT 변속 제어 시스템 및 차량 모델

개발된 모델은 AMT 변속 제어 시스템과 차량 모델로 구분하여 구성하였으며 특히, 변속 제어 시스템 및 차량 모델은 상용 소프트웨어인 MSC.EASY5 를 활용하여 구성하였다. 클러치 및 시프트, 실렉트 제어 신호는 MATLAB/Simulink 를 이용한 TCU 에서 각 요소를 제어하도록 하였으며, Fig. 1 에 개발된 모델의 개략도를 나타내었다.

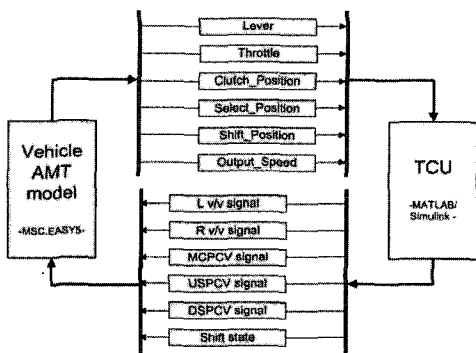


Fig. 1 Block diagram of AMT model

2.1 AMT 변속 제어 시스템 모델

2.1.1 AMT 유압 회로 및 변속 조작 메커니즘

AMT 의 유압시스템은 클러치, 시프트 그리고 실렉트를 제어하며, 각 요소의 작동은 유압 액추에이터에 의해 동작한다. Fig. 2 와 같이 중립을 기준으로 좌,우로 이동하여 1, 2 단 3, 4 단 그리고 5, R 단의 변속 위치를 결정하는 것이 실렉트이며, 1, 3, 5 단 및 2, 4, R 단의 변속단을 결정하는 것이 시프트이다.

클러치 및 시프트는 비례 제어 밸브로 제어되며, 실렉트는 빠른 응답 특성이 요구되므로 ON/OFF 밸브가 적용된다. 유압 시스템의 회로는 Fig. 3 에 도시하였으며, 유압 시스템에 관련된 변수는 Table 1 에 명시하였다. AMT 변속 제어를 수행하기 위해서는 변속 제어 알고리즘에 의해서 변속을 수행한다. 우선, TCU 의 변속 명령에 따라 클러치 해제 신호가 MCPCV(Main clutch proportional control valve)에 인가되어 클러치가 해제되면, Rv/v (Right select valve) 및 Lv/v(Left select valve)에 의해 실렉트 위치가 결정된다.

클러치가 적절한 해제 위치에 도달하면 USPCV(Up shift proportional control valve) 및 DSPCV

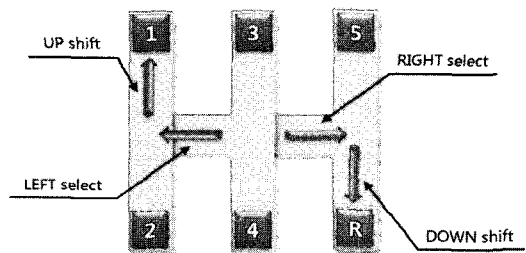


Fig. 2 Shift mechanism of AMT

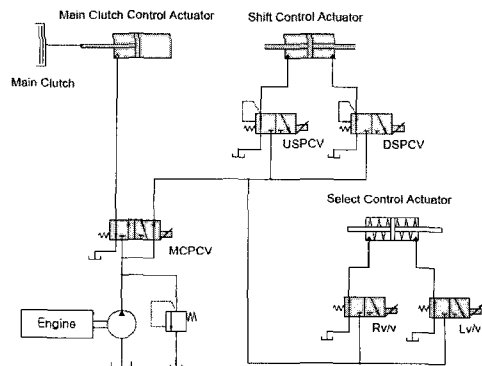


Fig. 3 Hydraulic circuit for AMT

Table 1 Parameter of hydraulic system

Parameter	Value
System pressure	35 bar
Select spring stiffness	190 N/cm
Clutch actuator diameter	20 mm
Shift actuator diameter	20 mm
Select actuator diameter	15 mm
Current range of the PCV	0~0.7 A
Natural frequency of the PCV	625 rad/sec
Damping ratio of the PCV	0.72

(Down shift proportional control valve)에 의해서 시프트 변속을 수행한다. 시프트 액추에이터의 변위를 계측하여 적절한 위치가 판단되면 메인 클러치를 반클러치 특성이 적용된 알고리즘에 의해서 접속시켜 변속을 완료한다.

2.1.2 클러치 및 클러치 유압 액추에이터 모델

클러치(clutch)모델은 운전자의 페달 조작을 유압 액추에이터로 대신하여 작동하도록 구성되며, 클러치 액추에이터의 변위를 계측하여 클러치의 위치를 제어한다. 클러치는 엔진의 동력을 전달 및 해제시키며, 토크 구간(Torque phase) 및 관성 구간(Inertia phase)을 적절히 제어하여 변속 품질을 결정하는 중요한 제어 요소이다.

클러치 모델은 클러치 어셈블리, 릴리즈 베어링, 릴리즈 포크, 클러치 유압 액추에이터 그리고 비례 제어 밸브로 구성된다. 클러치 어셈블리는 클러치 커버(Clutch cover), 디스크(Disk), 다이어프램 스프링(Diaphragm spring) 등으로 이루어져 있다.³ 유압 펌프에 의해 공급된 유량은 MCPCV 를 통해 클러치 유압 액추에이터로 공급되어 클러치 수직력이 결정된다. 이때, 클러치의 변위는 액추에이터의 변위에 비례하여 결정되며, 식(1)~(4)는 액추에이터의 변위 조건에 따른 클러치 수직력의 상관 관계를 나타낸 것이다. 릴리즈 베어링 및 클램프(clamp) 부하 특성은 시험결과를 적용하였으며 Fig. 4 에 부하 특성 곡선을 도시하였다.

만약 차량이 변경되는 경우, 이러한 시험 결과 및 파라미터 변경만으로 시스템의 특성을 확인할 수 있는 범용성을 갖는 것이 본 모델의 특징이라 할 수 있다.

$$x_{rel} = k_{FLR} \cdot x_{act} \tag{1}$$

$$F_{act} = k_{FLR} \cdot F_{rel}(x_{rel}) \tag{2}$$

$$x_{clp} = k_{CLR} \cdot x_{rel} \tag{3}$$

$$F = F_{clp}(x_{rel}) \tag{4}$$

클러치를 접속 시키는 수직력은 클러치의 전달 토크를 결정하며, 마찰 계수, 유효 접촉 면수 그리고 디스크 유효 반경으로 식(5)와 같이 나타낼 수 있다.⁴

$$T_c = \frac{\mu F n}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \int_{R_i}^{R_o} \int_0^{2\pi} R^2 dr d\theta$$

$$= \mu_c \cdot n \cdot F \cdot \frac{2(R_o^3 - R_i^3)}{3(R_o^2 - R_i^2)} \tag{5}$$

클러치의 접속 및 해제는 TCU 모델로 제어되며 액추에이터의 변위를 계측하여 적절한 변속 제어 신호를 인가하여 폐회로로 피드백 제어를 수행한다.

Fig. 5 및 Fig. 6 은 클러치 및 클러치 액추에이터의 구성 모델과 3D 모델을 각각 나타낸 것이다.

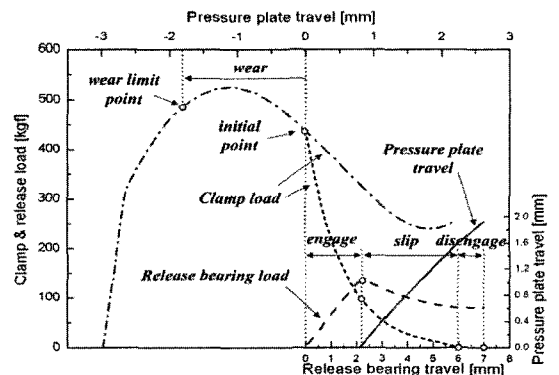


Fig. 4 Characteristic of release bearing load and clamp load

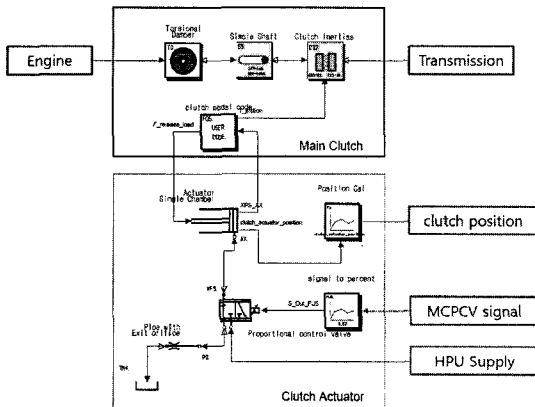


Fig. 5 Models of the clutch and clutch actuator

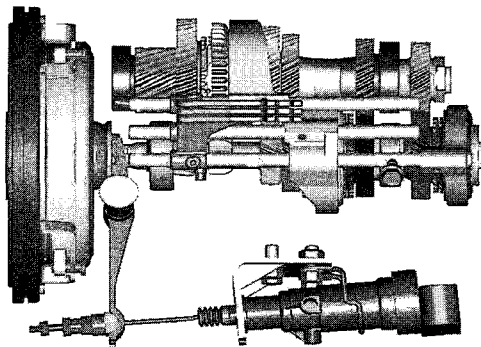


Fig. 6 3D model of the clutch and clutch actuator

2.1.3 변속 조작 기구 모델

변속 조작 기구의 제어 모델은 실렉트와 시프트로 구분하여 구성하였으며 클러치와 마찬가지로 유압 액추에이터에 의해서 제어되며 Table 2 와 같은 밸브 작동 순서에 의하여 변속단을 선택한다.

시프트 액추에이터는 변속기어의 싱크로나이징 제어를 위하여 USPCV 및 DSPCV 에 의해서 제어가 이루어지며, 시프트 액추에이터의 위치를 계측하여 정밀한 폐회로 제어를 수행한다.

실렉트 액추에이터는 변속 레버의 위치를 결정하는 역할을 수행하며 시프트 액추에이터와 마찬가지로 액추에이터의 변위를 계측하여 변속 조작을 수행한다. 다만 실렉트 조작은 정밀한 위치 제어가 요구되지 않으므로 On/Off 밸브를 적용하여 빠른 응답성을 얻도록 하였다.

Fig. 7 및 Fig. 8 은 각각 시프트 및 실렉트 유압 제어 모델과 변속 조작 기구의 3D 모델을 도시한 것이다.

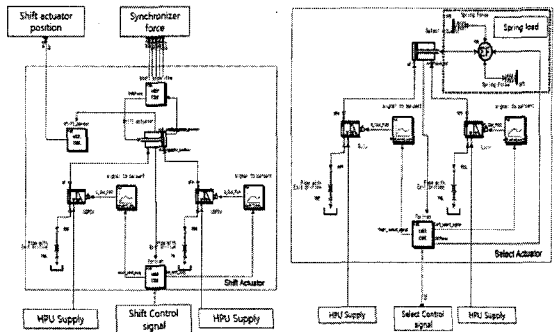


Fig. 7 Models of the shift & select actuator

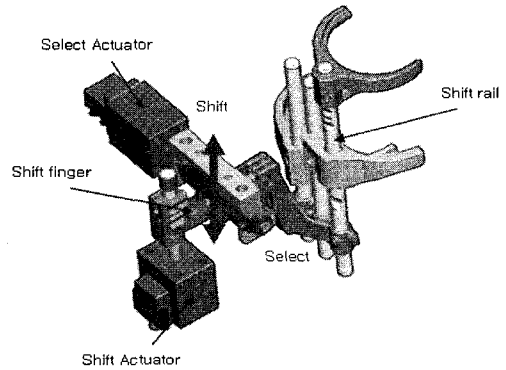


Fig. 8 3D model of the select and shift

Table 2 Valve status at each shift stage

Shift stage \ valve	Lv/v	Rv/v	USPCV	DSPCV
1	ON	OFF	ON	OFF
2	ON	OFF	OFF	ON
3	OFF	OFF	ON	OFF
4	OFF	OFF	OFF	ON
5	OFF	ON	ON	OFF
Rev.	OFF	ON	OFF	ON

2.1.4 변속 제어기 모델

AMT 변속 제어를 수행하기 위해서는 적절한 알고리즘에 의해서 각 액추에이터의 작동을 수행하여야 한다. 변속 제어기는 MATLAB/Simulink 를 이용하여 모델을 구성하였으며, Fig. 9 에 그 모델을 나타내었다. 변속 제어기의 입력은 드라이브 모드 (Drive mode), 파킹모드(Parking mode) 및 중립 모드 (Neutral mode)를 선택할 수 있는 변속레버와 스로틀(throttle) 개도, 차량 속도, 클러치/시프트/실렉트 액추에이터 위치를 각각 계측하여 변속을 판단하

게 되며 변속 제어기의 출력은 클러치 및 시프트의 비례 제어 밸브 작동 신호와 실렉트 ON/OFF 밸브의 신호이다. 또한, Shift status 변수가 출력되어 변속 결과에 따른 현재의 변속단을 확인할 수 있다.⁵

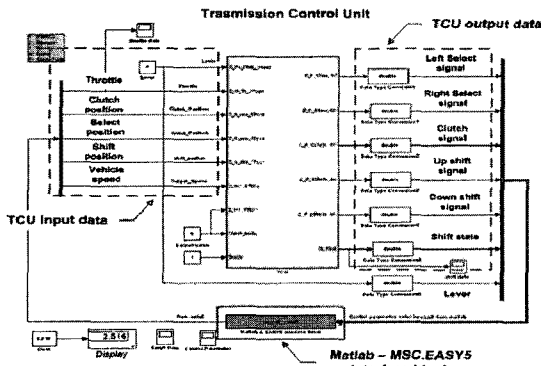


Fig. 9 Transmission Control Unit model using MATLAB/Simulink

2.2 차량의 동력전달계 모델

구성된 AMT 유압 제어 모델을 적용하고 그 성능을 분석하기 위해서 차량의 동력전달계 모델을 개발하였으며, 엔진, 메인클러치, 변속기, 종감속기, 타이어 그리고 차량의 부하 모델로 구성되며 Fig. 10 에 그 모델을 나타내었다.⁶

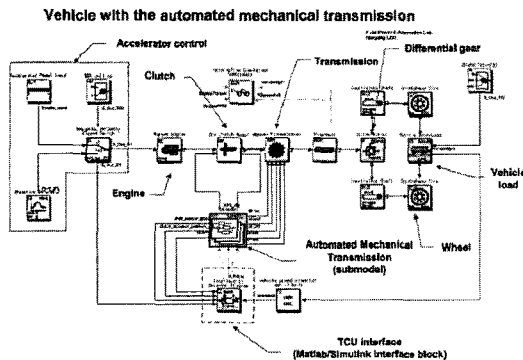


Fig. 10 Vehicle model with AMT using MSC.EASY5

엔진은 토크맵(Torque map)을 이용하여 스로틀 개도와 엔진 속도에 의해서 토크가 출력되도록 1 차 시스템으로 구성되었으며, 토크맵을 Fig. 11 에 나타내었다. 변속기는 각 단의 기어 접촉에 의해 기어비가 결정되도록 구성하였으며 기어단 변속시에 싱크로나이저의 부하 특성을 적용하여 변속이 이루어지도록 Fig. 12 와 같은 모델을 구축하였다.

Table 3 Vehicle specifications

Parameter	Value
Engine idle speed	900 rpm
Engine rated speed	2500 rpm
Engine inertia	0.015 kg.m ²
Engine max. torque	13.5kg.m / 3200 rpm
Engine max. power	100 HP / 5800 rpm
Transmission gear ratio	3.61/1.95/1.28/1.03/0.82/3.25
Differential gear ratio	3.65
Tire size	185/60 R14
Vehicle mass	990 kg
Vehicle size	3801 x 1665 x 1495

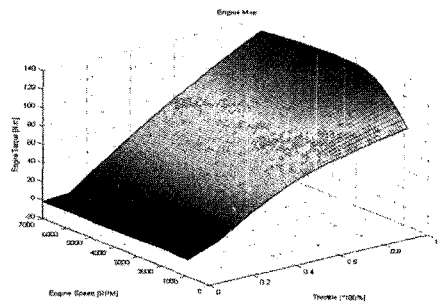


Fig. 11 Torque map

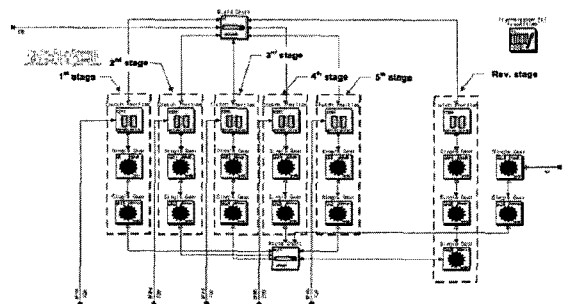


Fig. 12 Transmission model using MSC.EASY5

3. 시뮬레이션 및 시험 결과

3.1 시험 장치 구성

4 기통, 1500cc 의 수동변속기 차량에 AMT 시스템을 장착하여 실차 시험을 수행하였으며, ETAS 사의 INCA 와 ES580 장비를 이용하여 CAN 통신으로 스로틀 개도, 클러치, 시프트 및 실렉트 액추

에이터 변위, 엔진속도 및 차속을 각각 계측하였다.⁷ 특히 계측된 스로틀 개도는 시뮬레이션에 적용하여 시험 결과와 동일한 입력 조건하에서 시뮬레이션이 수행되도록 하였다.

Fig. 13 은 실차에 장착된 AMT 시스템을 보여 준다.

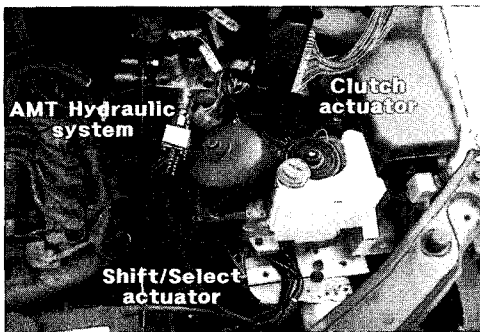


Fig. 13 Test equipment of the AMT system

3.2 시프트 및 실렉트 변속 결과 비교

시프트와 실렉트 변속의 시뮬레이션 및 시험 결과를 Fig. 14 와 같이 비교하였다. 시프트는 시뮬레이션과 시험 결과와 비교하여 약 3~5%의 오차가 발생되었으며, 실렉트의 변속 결과는 중립에서 6%의 오차가 발생되었다. 다만 실렉트 변속 시 1, 2 단 및 5, R 단의 장착 위치에서 오차가 상대적으로 크게 발생 되는데, 이것은 실제 차량에서는 mechanical stop 장치가 존재하지만 해석 모델에는 고려되지 않았기 때문이다. 이러한 오차는 해석 결과에 큰 영향을 미치지 않으므로 시프트 및 실렉트 모델은 타당함을 알 수 있다.

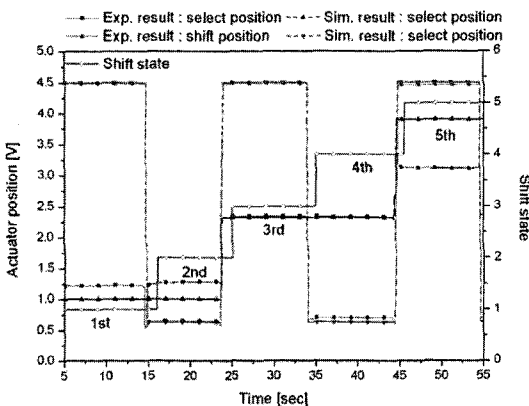


Fig. 14 Comparison between experimental and simulated results in shift and select

3.3 메인 클러치 변속 결과 비교

변속 시 클러치 액추에이터 변위의 시뮬레이션 및 시험 결과를 Fig. 15~18 에 도시하였으며, 4 개의 데이터(D₁~D₄)를 지정하여 비교한 변속 오차를 Table 4 에 명시하였다. 실제 차량에서의 클러치 액추에이터의 변위는 센서에서 전압으로 출력되며 클러치가 접속 상태(engage)에는 2.7V의 전압이 출력되며, 해제 상태(disengage)에서는 4.5V의 전압이 출력된다. 시뮬레이션 및 시험 비교 결과 최대오차는 1 단에서 2 단 변속 시에 9%의 오차를 갖는 것을 Fig. 15 의 결과로 확인할 수 있으며, 클러치 액추에이터의 변위에 대한 비교 오차가 10% 이내이므로 클러치 및 클러치 액추에이터 모델이 타당함을 알 수 있다.

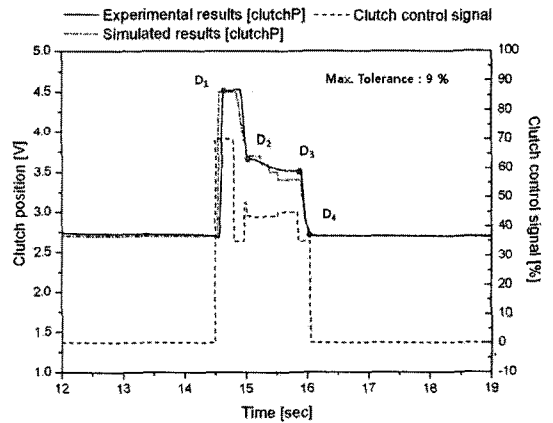


Fig. 15 Comparison between experimental and simulated result from 1st to 2nd

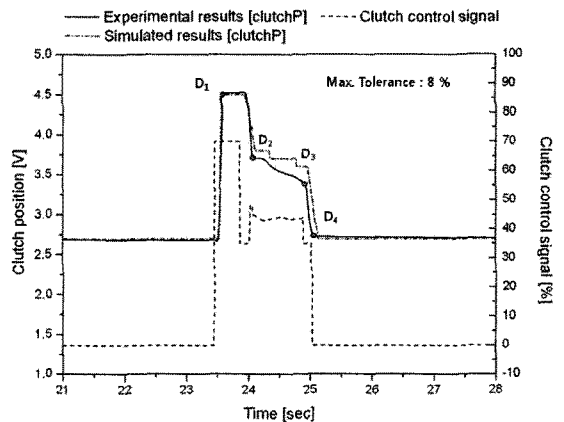


Fig. 16 Comparison between experimental and simulated result from 2nd to 3rd

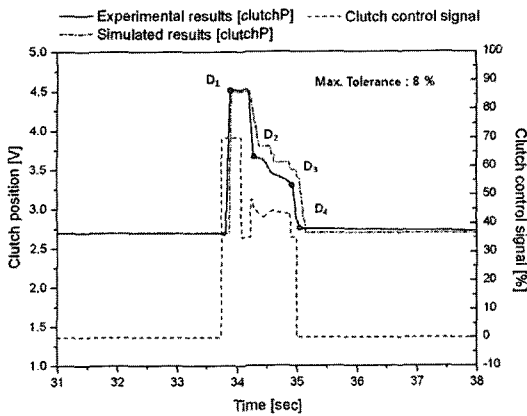


Fig. 17 Comparison between experimental and simulated result from 3rd to 4th

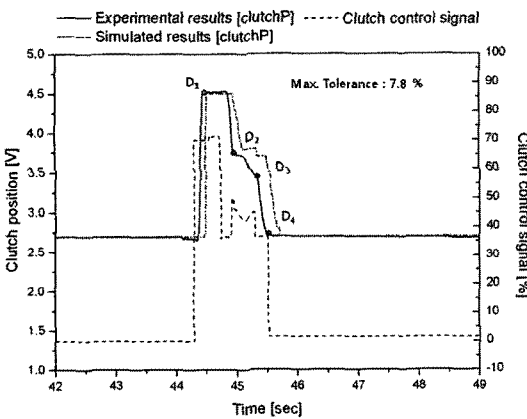


Fig. 18 Comparison between experimental and simulated result from 4th to 5th

Table 4 Comparison between experimental and simulated results

		D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
1→2	Exp. results	4.4	3.68	3.51	2.75
	Sim. results	4.5	3.67	3.47	2.5
	Tolerance	3%	1%	2%	9%
2→3	Exp. results	4.5	3.74	3.38	2.7
	Sim. results	4.5	3.79	3.61	2.5
	Tolerance	0%	1%	6%	8%
3→4	Exp. results	4.5	3.54	3.24	2.7
	Sim. results	4.5	3.76	3.49	2.5
	Tolerance	0%	6%	7.2%	8%
4→5	Exp. results	4.5	3.74	3.41	2.71
	Sim. results	4.5	3.8	3.68	2.5
	Tolerance	0%	2%	7.4%	7.8%

3.4 변속단 별 액추에이터 거동 결과

변속단에 따른 각 액추에이터의 거동에 대한 시뮬레이션 결과를 Fig. 19~22 에 나타내었다. 2.3 단 변속을 예로 들면, TCU 의 변속제어신호에 의해서 클러치 액추에이터가 클러치를 접속(2.7V) 위치에서 클러치 해제(4.5V) 위치로 이동 시킨 후에 시프트 액추에이터가 2 단 위치에서 중립으로 이동함과 동시에 변속 레버의 리턴 스프링에 의해 실렉트 액추에이터의 위치가 중립에 위치한 것을 알 수 있다. 변속 레버가 3.4 단의 중립 위치(0.7V)에 있는 것을 판단하면, 시프트 액추에이터를 3 단 위치(4.5V)에 고정시킨다. 이 때 변속단 고정은 기계적 고정장치(Mechanical stopper)에 의해서 수행되며, 다음 신호가 인가되기 전까지 3 단 위치를 고수한다. 변속 단이 결정된 후에 변속 충격을 저감하기 위하여 반 클러치가 적용되어 클러치가 접속되어 변속을 종료하게 된다.

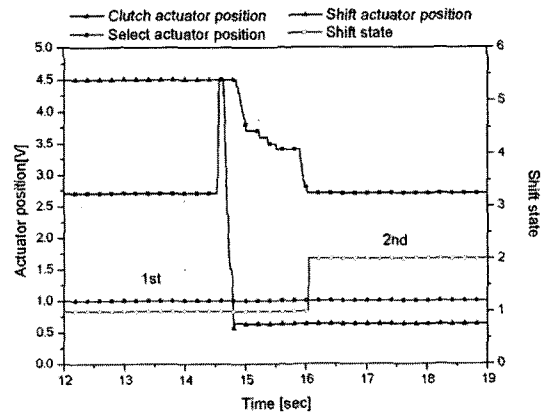


Fig. 19 Shifting simulated result from 1st to 2nd

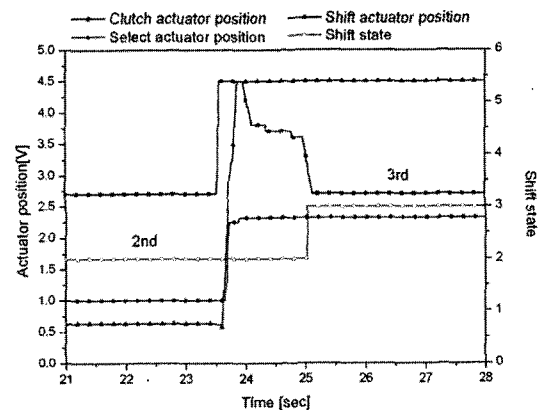


Fig. 20 Shifting simulated result from 2nd to 3rd

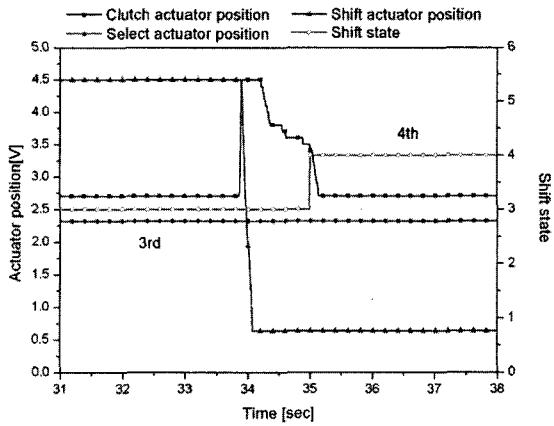


Fig. 21 Shifting simulated result from 3rd to 4th

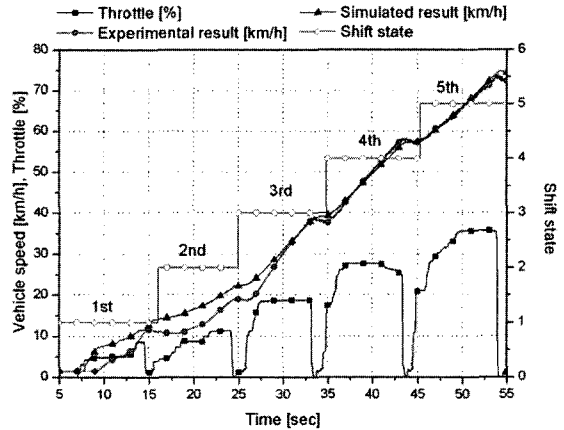


Fig. 23 Comparison between experimental and simulated result in accordance with vehicle speed

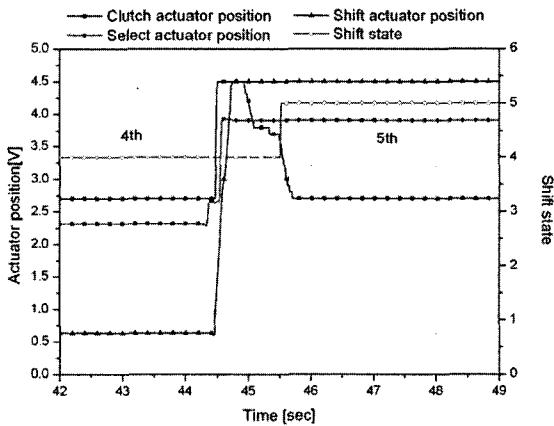


Fig. 22 Shifting simulated result from 4th to 5th

3.5 차량 시뮬레이션 및 시험 결과 비교

이상과 같이 구성된 AMT 변속 제어 시스템을 차량 모델에 적용하여 전진 1 단에서 5 단까지 변속을 수행하였다. 시험과 시뮬레이션에 동일한 스로틀 개도와 TCU의 변속 로직을 제어 입력 신호로 인가하여 모델과 시험이 동일한 조건 하에서 변속 제어가 수행되도록 하였으며, 그 결과를 Fig. 23에 나타내었다. 1 단과 2 단의 차량 속도의 비교 오차가 각각 12%, 14%의 오차를 가지며, 3, 4 단 및 5 단에서는 각각 5%, 1% 및 1%의 오차가 발생하였다. 1 단 및 2 단의 오차가 그 외의 단에 비해 상대적으로 큰 것은 엔진 토크맵의 특성에 좌우되는 것으로 판단되며 상세한 엔진 및 차량 관련 파라미터의 분석 및 적용 시에 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.

4 결론

AMT 변속 제어 시스템 및 차량 모델을 상용 소프트웨어인 MSC .EASY5를 활용하여 모델을 수립하였으며, 변속 제어 모델을 적용 후 시뮬레이션을 수행하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

- 1) AMT 변속 제어 시스템의 시뮬레이션 및 시험 결과를 비교하여 모델 타당성을 검증하였으며, 향후 TCU 로직 평가를 위한 모델로 활용됨을 기대할 수 있다.
- 2) 개발된 시뮬레이션 모델의 오차는 엔진 토크맵의 정특성에 대한 영향이 큰 것으로 판단되며, 모델의 정확성을 높이기 위해서는 보다 상세한 차량의 제원이 요구된다.
- 3) 개발된 모델을 이용하여 제어 로직을 실차에 적용하기 이전에 로직의 성능을 예측할 수 있으며 또한 로직 개발 기간 및 비용을 단축할 수 있음을 기대할 수 있다.

참고문헌

1. Kremmling, B. and Fischer, R., "The Automated Clutch-The New Luk ECM," 6th International Luk Symposium, pp. 85-106, 1998.
2. Tseng, C. H. and Hsieh, M. F., "Analysis and Optimization of Clutch Actuator on Automated Manual Transmission System," SAE 2005 World Congress, SP 2005-01-1782, 2005.
3. Song, C. S. and Lee, S. H., "A Study on the Design

- Parameter of a Hydraulic Shift Actuator of an AMT,”
J. of KSPE, Vol. 24, No. 10, pp. 75-82, 2007.
4. Oh, J. Y., Jung, W. J. and Song, C. S., “A Study on the Performance Analysis of Fluid Control Circuit for the AMT control,” Proc. of the KFPS Spring Conference, pp. 7-12, 2008.
 5. Oh, J. Y., Jung, W. J. and Song, C. S., “Analysis of the Main Clutch and Shift Control Characteristic for the AMT,” Proc. of the KFPS Fall Conference, pp. 101-106, 2008.
 6. MSC. Easy5, “Hydraulic library user guide,” MSC. Software, 2002.
 7. Lee, D. W., Ji, J. H., Song, S. I., Chun, D. P., Park, B. K. and Kwon, H. B., “Development of Automated Manual Transmission using Model-Based Design TCU,” KSAE Symposium, pp. 84-89, 2007.