〈논 문〉 SAE NO. 97370118

엔진-CVT 통합제어에 관한 연구(Ⅱ)-실험적 연구

Study on Engine-CVT Consolidated Control(Ⅱ)-Experimental Study

김 달 철*, 김 현 수**
D. C. Kim, H. S. Kim

ABSTRACT

In this paper, engine-CVT consolidated control performance were investigated experimentally. Engine-CVT consolidated control was composed of engine throttle control based on power difference and CVT ratio control based on CVT ratio map. Experimental results showed that engine optimal operation was obtained while satisfying the driver's desire, i. e., following the given drive mode by engine-CVT consolidated control. Also, it was found that engine performance is subjected to inertia of the powertrain where the magnitude of acceleration changes abruptyly. Comparing with the results of CVT only control, the results of engine-CVT consolidated control showed better performance. Therefore, in order to meet the driver's desire as well as keeping the engine optimal operation, the engine-CVT consolidated control could be suggested as an integral solution.

주요기술용어 : Engine-CVT Consolidated Control(엔진-CVT 통합제어), Metal Belt CVT(금속벨트식 CVT), OOL(최적운전곡선), Speed Ratio Map(변속비 선도)

1. 서 론

운전자의 의지를 만족시키기 위하여 차량속도를제어하면서 엔진최적운전을 동시에 이루기 위해서는 변속기의 변속비와 엔진의 드로틀 개도를 동시에 제어하는것이 필요하다. 특히 엔진최적운전, 즉 최소연비곡선상에서 엔진운전을 위해서는 차량속도와 엔진속도를 서로 독립적으로 유지시킬 수 있어야 하나, 기존의 몇 단계의 변속비만을 가진 MT(Manual Transmission)나 AT(Automatic Transmission)로는 최적운전곡선(Optimal Operation Line : OOL)상에서 엔진을 운전하는 것이 불가능하고 연속적인 변속비를 가진 CVT(Continuously Variable Transmission)를 통해서만 이의 구현이 가능하다.[1),2)]

기존의 연구[3)]에 의하면 엔진의 운전점이 OOL상에 있기위한 CVT 변속비 제어를 통해 엔진

*성균관대학교 대학원
**성균관대학교 기계공학과

속도를 제어하는 것은 어느 정도 가능하지만 엔진 토크를 동시에 제어하는 것은 어렵다고 보고되어 있다. 따라서 OOL상의 엔진 운전을 위해서는 엔진의 속도뿐만 아니라 엔진 토크가 동시에 제어되어야 하며 이를 위해서는 엔진의 드로틀 개도 제어가 동시에 이루어져야 한다. 즉 운전자의 의지를 만족시키면서 연비의 향상을 도모하기 위해서는 엔진의 드로틀 개도와 CVT의 변속비를 동시에 제어하는 엔진-CVT 통합 제어(Engien-CVT Consolidated Control)가 필요하다.

본 연구에서는 전 연구[4]에서 개발된 엔진-CVT 통합제어 알고리즘을 적용하여 엔진과 리그형 CVT의 통합제어 실험을 수행하고 통합제어 알고리즘의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 엔진-CVT 통합제어 알고리즘

전 연구[4]에서 제안된 엔진-CVT 통합제어 알고리즘의 제어 블럭선도가 Fig.1에 도시되어 있다. 주행모드에서 주어진 차량속도와 차량가속도에 의해 계산된 차량동력은 엔진동력으로 변환되어 동력 제어기에 레퍼런스로 입력된다. 동력제어기는 레퍼런스 동력과 실제 엔진동력과의 오차를 제거하기 위한 $P_{e)ctrl}$ 값을 계산한다. 계산된 $P_{e)ctrl}$는 ECU(Engine Control Unit)에 입력되며 ECU에 내장되어 있는 OOL, 등동력 및 등드로틀 개도 선도로 부터 요구되는 엔진동력을 만족시키기 위한 드로틀 개도가 계산된다. 엔진으로부터 측정된 실제 드로틀 개도는 TCU에 입력되고, CVT의 레퍼런스 변속비는 TCU의 CVT 변속비선도로 부터 계산되어 변속비 제어기에 입력된다. 변속비 제어기는 레퍼런스 변속비와 실제 변속비와의 오차를 제거하기 위한 신호를 출력시킨다. 차량으로 부터 측정된 실제 차속및 차량가속도는 실제 엔진동력으로 변환되어 동력제어기에 피드백 되어진다. Fig.1에서 알 수 있듯이 본 연구에서 적용한 엔진-CVT 통합제어 알고리즘은 엔진제어기로서 PID형 동력제어기를, CVT 제어기로서 PID형 변속제어기를 사용하였다.

3. 전자유압제어식 리그형 CVT 실험장치

엔진-리그형 CVT 통합제어 실험장치는 ① 금속벨트식 CVT 모듈, ② 엔진 시스템 모듈, ③ 유압 시스템 모듈, ④ 센서 시스템 모듈로 이루어져 있다.

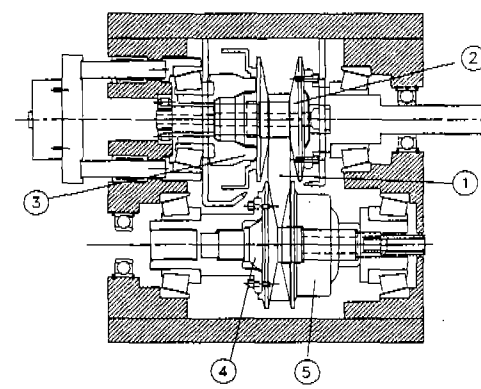

Fig.2 Schematic Diagram of Metal-Belt CVT

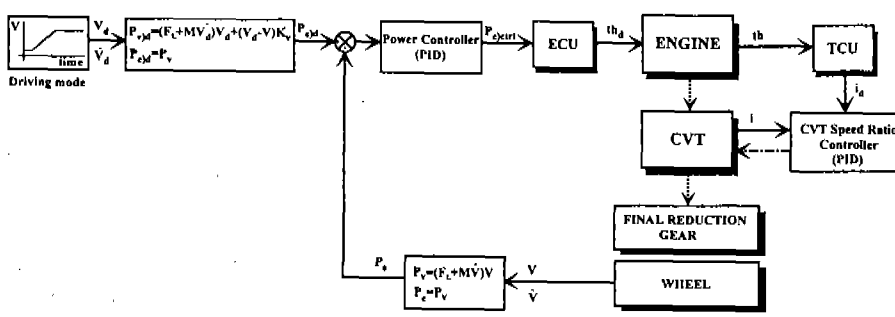

Fig.1 Block Diagram of Engine-CVT Consolidated Control

Fig.2는 본 연구에서 사용된 금속벨트식 CVT를 도시한 것이다. CVT는 네덜란드 Van Doorne사의 P811을 실험목적에 맞게 개조하여 사용하였다. 금속벨트식 CVT는 금속벨트(①)와 구동 풀리(②,③) 및 종동 풀리(④,⑤)로 구성되어 있다. 구동 풀리와 종동 풀리는 각각 고정 및 가변 플랜지로 구성되어 있고 가변 플랜지의 축방향 이동에 의해 금속벨트의 피치반경 변화가 연속적으로 발생하고 이 피치반경 차이에 의해 무단변속이 이루어진다. 구동 풀리의 가변플랜지(③)의 이동을 위한 액튜에이커로는 제어밸브의 유량을 고려하여 상용유압 실린더를 사용하였으며 종동 풀리의 이동은 가변플랜지(⑤)에 장착되어 있는 자체의 유압실린더를 사용하여 실제 시스템의 특성을 살리고자 하였다.

엔진은 1300cc급 12-valve 엔진을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 엔진은 피드백 캬뷰레이터(Feedback Carburetor)식 엔진으로 드로틀 개도에 따라서 엔진출력이 변화된다. 드로틀 개도는 스텝핑모터(Stepping Motor)로 제어된다. 드로틀 개도의 미세조정을 위하여 10 : 1 기어비를 가진 드로틀 개도 제어장치를 구성하였다.

CVT 유압 시스템은 축력제어용 유압 시스템과 부하제어용 유압 시스템으로 이루어진다. 부하제어용 유압 시스템은 차량 주행시 발생하는 외부부하를 구현하기 위한 시스템으로 본 연구에서는 유압식 다이나모미터를 이용하였다. 유압식 다이나모미터는 가변용량 펌프와 비례릴리프 밸브로 이루어지며 요구되는 주행부하는 릴리프 밸브의 전압을 제어하여 구현된다. 주행부하 제어기로는 PID 제어기를 사용하였다.

CVT 시스템으로부터 검출되는 신호는 구동 및 종동축 회전수, 토크, 압력 및 구동축 축력과 엔진 드로틀 개도로 모두 8개의 신호가 실시간으로 측정된다. Fig.3에 센서시스템 구성이 도시되어 있다.

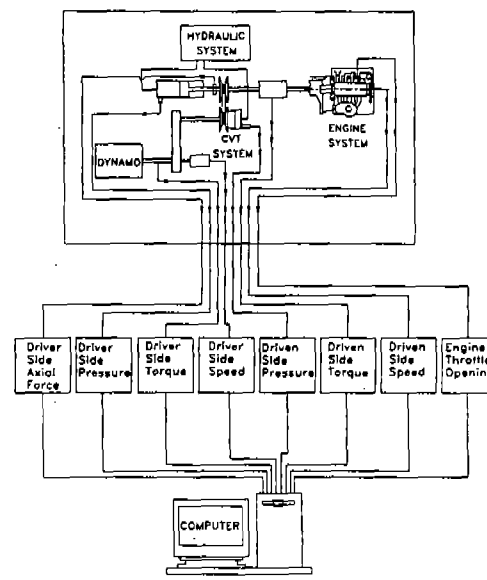

Fig.3 Schematic Diagram of Sensor System

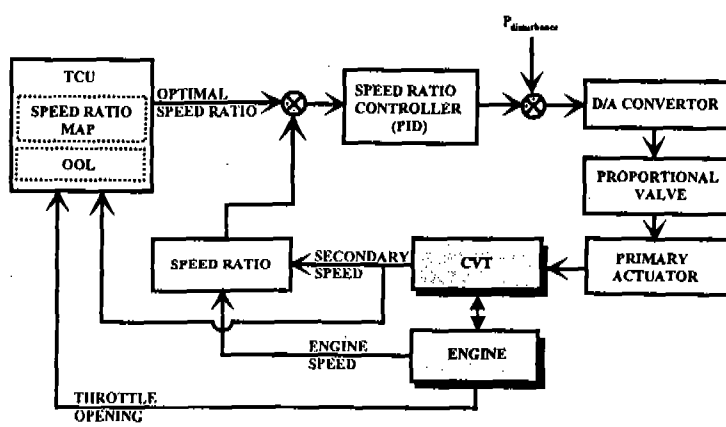

Fig.4 Block Diagram of CVT Speed Ratio Control

4. CVT 및 엔진성능 기본 실험

CVT 변속비 제어

CVT 변속비는 구동풀리에 연결된 유압 액튜에이터의 압력을 제어하여 구동풀리에 가해지는 축력을 변화시킴으로써 제어된다. Fig.4에 CVT 변속비 제어를 위한 블럭선도를 도시하였다. 엔진 드로틀 개도와 CVT 종동축 회전속도에 의해 TCU로 부터 계산된 최적 변속비가 변속비 제어기의 레퍼런스로 입력된다. 변속비 제어기의 출력은 D/A 변환기 및 비례감압밸브를 거쳐 구동축 액튜에이터의 압력을 변화시키고 구동축 액튜에이터의 압력변화는 구동풀리에 작용하는 축력을 변화시켜 CVT 변속비 제어가 이루어진다. 구동축 압력변화에 의한 종동축 압력변화는 CVT 변속비 제어기에 외란으로 작용하게 된다.

엔진 드로틀 개도 제어

엔진-CVT 통합제어시 엔진의 최적운전을 위해서는 엔진 드로틀 개도 제어가 필요하다. 특히 저드로틀 개도 부분에서는 드로틀 개도 변화에 따른 엔진 토크 변화가 커지므로 정숙한 엔진운전을 위해서는 응답특성이 좋은 엔진 드로틀 개도 제어기의 설계가 필요하다. 따라서 본 연구에서는 퍼지제어기와 미분제어기를 혼합하여 엔진 드로틀 개도제어를 실시하였다. 퍼지-미분 제어기로 부터 출력된 신호는 모터 드라이버와 스텝핑 모터를 통해 드로틀 개도를 변화시킨다. 드로틀 개도의 변화는 포텐셔미터를 통해 검출되어 엔진 드로틀 개도 제어기에 피드백된다.

엔진최적운전곡선과 CVT 변속비 선도

엔진-CVT 통합제어를 위해서는 엔진성능곡선과 OOL이 필요하다. 본 연구에서는 실험에 사용된 엔진의 성능곡선을 얻기 위하여 드로틀 개도를 10%에서 25%까지 5% 간격으로 증가시키며 각각의 드로틀 개도에 대하여 엔진회전수에 대한 엔진토크선도를 실험적으로 구하였다. 25% 이상의 드로틀 개도에 대한 엔진성능곡선은 실험장치 성능 제한에 의하여 도출하지 않았다. Fig.5에 드로틀 개도에 대한 엔진성능 실험결과가 도시되어 있다.

이코노미운전을 위한 OOL을 얻기 위해서는 BSFC 등고선이 필요하나 본 연구에 사용된 실험장치로 BSFC 등고선을 도출하는 것은 불가능하기 때문에 구하여진 엔진성능곡선상의 임의의 곡선을 이코노미 운전의 OOL로 가정하여 실험을 실시하였다. 본 연구에서는, 전 연구에서 개발된 엔진-CVT 통합제어 알고리즘에 의하여 임의의 OOL상에서 엔진 운전이 가능하다면 BSFC 등고선으로부터 결정된 실제 최소연비곡선상에서의 운전이 가능함을 보이고자 하였다. 실험을 위

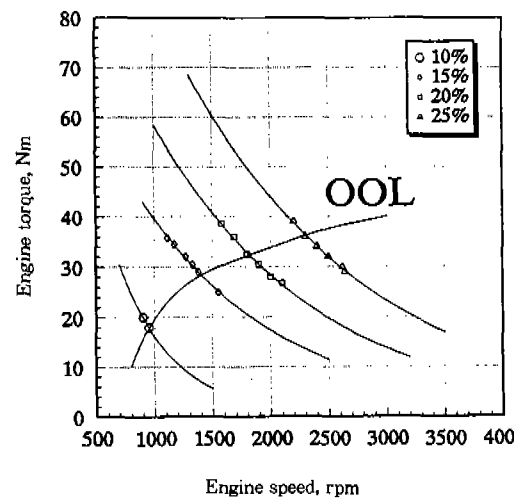

Fig.5 Engine Map and OOL

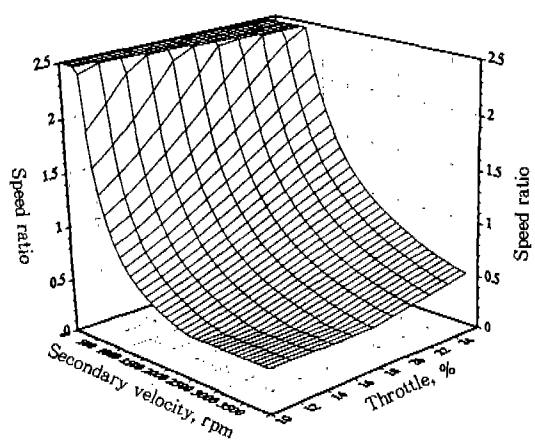

Fig.6 CVT Speed Ratio Map for Experiment

해 정의된 OOL을 Fig.5에 엔진성능곡선과 함께 도시하였다.

Fig.6은 주어진 엔진의 OOL과 드로틀 개도에 대한 CVT 최적변속비를 도시한 것이다. CVT 최적변속비선도는 전 연구[4]에서 도출된 것을 사용하였다. Fig.7의 CVT 변속비선도는 실험의 편의를 위하여 차량속도 대신 CVT 종동축 회전수로 표시하였다.

엔진-리그형 CVT 통합제어 블럭선도

Fig.7에 본 연구에서 사용된 실험장치에 대한 통합제어 블럭선도가 도시되어 있다. 설정된 주행모드로 부터 기준동력이 계산되고 실제로 측정된 엔진토크와 엔진회전속도로부터 엔진동력이 계산되어 동력제어기에 피드백되어 진다. ECU는 동력제어기로부터 출력된 값으로부터 최적운전을 위한 엔진 드로틀 개도를 계산하게 된다. 엔진 드로틀 개도 제어기에 의해 제어되는 실제 드로틀 개도는 CVT 종동축 회전속도와 더불어 TCU에서 최적변속비를 계산하는데 사용된다. 엔진 회전속도와 CVT 종동축 회전속도에서 계산된 변속비는 변속비 제어기에 피드백되어 변속비 제어가 이루어진다.

5. 엔진-CVT 통합제어 실험 결과 및 고찰

엔진-CVT 통합제어의 실험에 사용된 주행모드를 Fig.8에 도시하였다. 주행모드는 부하축의 회전속도(ω_v)가 400rpm 정속주행과 가속모드, 700rpm 정속주행구간으로 이루어져 있으며 7.85rad/s², 5.25rad/s², 12.57rad/s² 3가지 가속도로 가속하는 경우 각 주행보드 운전에 대한 통합제어 성능을 비교하였다.

Fig.9는 주행모드 A(가속도 7.85rad/s²)에 대한 실험결과를 도시한 것이다. Fig.9(a)는 통합제어에 의한 부하축 속도 즉 차량속도(ω_v)를 주행모드와 비교 도시한 것이다. 가속초기에는 실제차속이 주행모드보다 약간 낮은 값을 보이는데 이것은 정속으로 유지되던 동력전달계의 회전관성에 의한 영향으로 생각된다. 이후 가속구간에

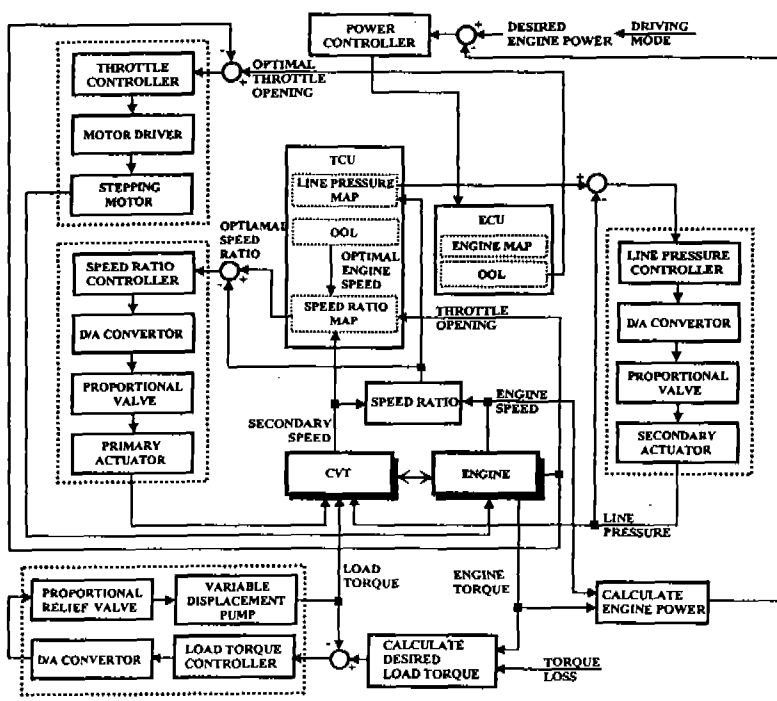

Fig.7 Block Diagram of Engine-CVT Consolidated Control

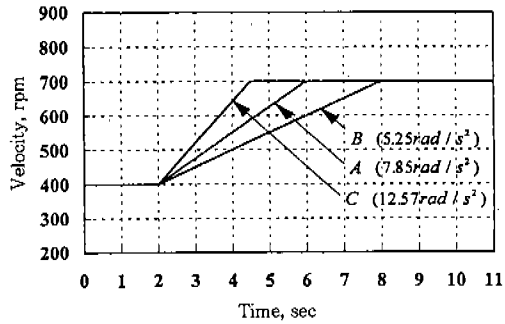

Fig.8 Driving Mode for Experiments

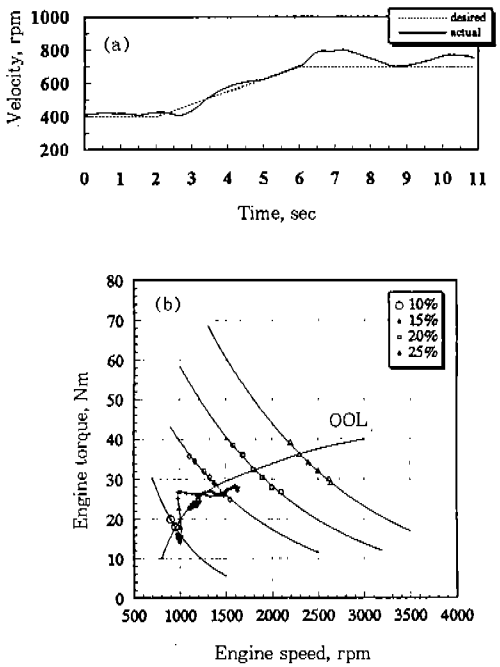

Fig.9 Experimental Result of (a) Velocity and (b) Engine Operation for Driving Mode A(Acceleration 7.85rad/s²)

서 부하축 속도는 주행모드를 잘 추종한다. 가속구간에서 정속구간으로 바뀌는 부분에서는 차속은 주행모드와 차이를 보이면서 약간의 진동을 하는데 이것은 회전관성에 의한 영향과 손실토크에 의한 것으로 생각된다.

Fig.9(b)는 실험시 엔진의 운전점을 엔진맵상에 도시한 것이다. 가속전 OOL 상에서 이루어지던 엔진운전은 가속직후 드로틀 개도 증가에 의

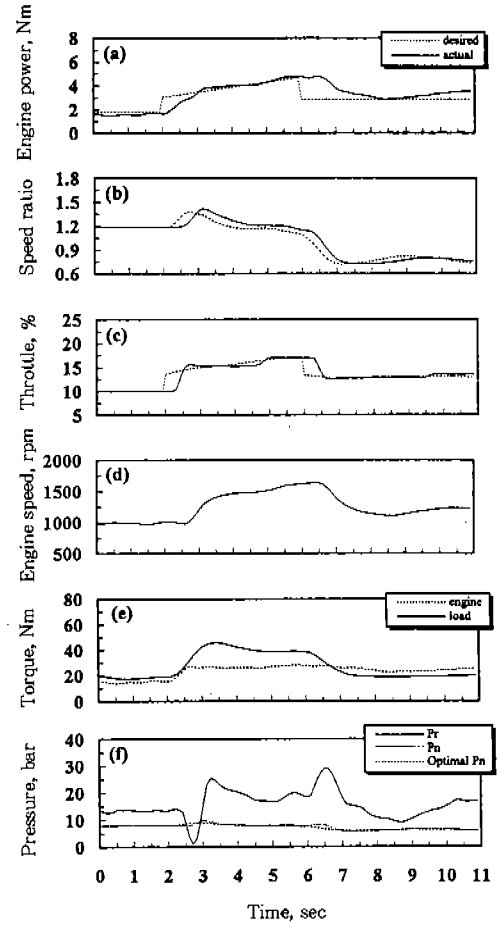

Fig.10 Experimental Results for Driving Mode A(Acceleration 7.85rad/s²)

한 토크의 증가로 OOL 상단에서 이루어지나 이 부분에서의 운전시간은 잠시동안이므로 통합제어 성능에는 큰 영향을 미치지 못한다. 이후의 가속구간과 정속구간에서 엔진운전은 OOL 근처에서 이루어지고 있다. 통합제어 실험결과 엔진의 운전은 OOL과 약간의 차이는 존재하지만 전체적으로 OOL 근처에서 이루어지고 있음을 알 수 있다. 주행모드 추종성능에 대한 실험결과와 엔진운전의 실험결과 엔진-CVT 통합제어가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

Fig.10은 통합제어 실험시 주요 파라미터들의 시간거동을 도시한 것이다. 엔진동력의 변화(a)를 살펴보면 동력제어기에 의하여 엔진동력이 기준동력을 추종하고 있지만 가속구간에서 정속구

간으로 바뀐 후 오차가 존재함을 알 수 있다. 이는 앞에서 설명한 바와 같이 동력전달계의 회전관성에 의한 영향과 손실토크에 의한 것으로 판단된다. CVT 변속비(b)는 약간의 지연을 가지고 기준변속비를 추종하고 있다. 가속초기에는 주행모드와 부하축 속도의 오차를 없애기 위해 변속비가 증가하였다가 점차 업시프트되고 있다. 실제변속비와 기준변속비 사이의 시간지연은 변속시스템의 변속비 변화율의 제한에 의한 것이다. 엔진 드로틀 개도(c)는 가속초기 부분과 가속종료 부근을 제외한 구간에서 기준 드로틀 개도를 잘 추종하고 있다. 엔진속도(d)와 엔진토크(e)는 가속구간에서 부하축 속도의 증가를 위하여 크게 증가하고 있다. 유압다이나모미터에 의해 발생된 부하토크(e)는 엔진토크와 동력전달계 손실토크 및 변속비로부터 계산되어 기준부하토크를 추종하도록 제어되고 있다. 구동축 액튜에이터 압력(P_t)(f)은 CVT 변속을 위하여 가속초기와 가속완료부분에서 크게 변화되고 있으며 종동축 액튜에이터 압력(P_n), 즉 라인압은 라인압력 제어기를 통해 기준라인압력을 잘 추종하고 있다.

Fig.11은 주행모드 B(가속도 5.25rad/s²)에 대한 실험결과이다. Fig.11(a)에 도시된 차량속도와 주행모드를 비교해 보면 가속도의 크기가 작아져서 이로 인한 엔진과 동력전달계의 회전관성 효과가 줄어들었기 때문에 가속도 7.85rad/s² 인 주행모드 A에 비하여 차량속도가 주행모드를 잘 추종하고 있다.

주행모드 B의 통합제어 실험시 엔진의 거동(Fig.11(b))을 살펴보면 가속도가 작아짐으로 인하여 요구되는 엔진동력의 크기가 감소하였기 때문에 엔진의 운전이 주행모드 A(가속도 7.85rad/s²)에 비하여 더 낮은 드로틀 개도 영역에서 이루어지고 있고 OOL을 보다 더 잘 추종하고 있다.

Fig.12은 주행모드 C(가속도 12.57rad/s²)에 대한 실험결과를 도시한 것이다. Fig.12(a)에 도

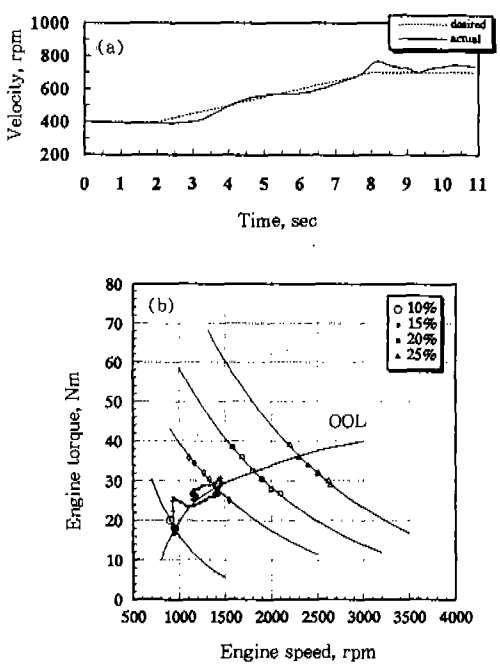

Fig.11 Experimental Result of (a) Velocity and (b) Engine Operation for Driving Mode B(Acceleration 5.25rad/s²)

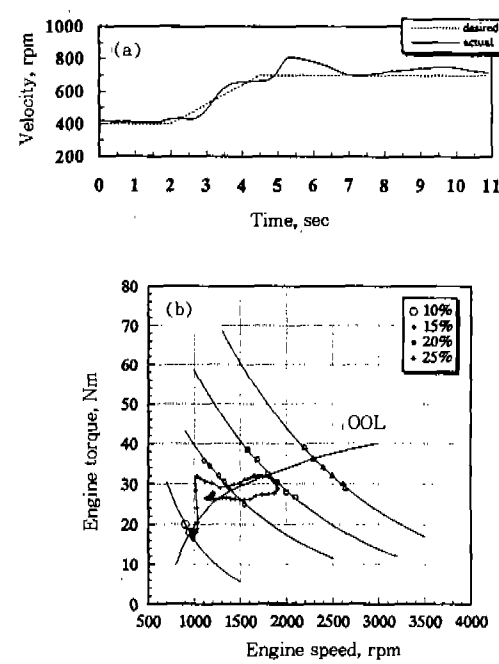

Fig.12 Experimental Result of (a) Velocity and (b) Engine Operation for Driving Mode C(Acceleration 12.57rad/s²)

시된 차량변화를 살펴보면 정속구간에서 가속구간으로 변하는 부분과 가속구간에서 정속구간으로 바뀌는 부분에서 주행모드를 잘 추종하지 못하고 있다. 이는 큰 가속도가 요구되는 경우 엔진과 동력전달계의 동특성으로 인하여 실제 엔진동력이 기준동력을 빠르게 추종하지 못하고, 또한 CVT 변속비와 드로틀 개도 역시 시스템이 가진 성능의 한계에 의하여 기준값들을 빠르게 추종하지 못하기 때문이다. 이때의 엔진거동(Fig.12(b))은 전체적으로 OOL에서 벗어나서 운전되고 있음을 알 수 있다.

엔진-CVT 통합제어 결과와 비교하기 위하여 CVT 단독제어만을 실시한 실험을 수행하였다. 실험은 가속도 7.85rad/s²의 주행모드 A에 대하여 CVT 제어기만을 사용하고 드로틀 개도는 운전자가 그래픽으로 실시간 처리되는 주행모드와 차속을 비교하면서 엔진 드로틀 개도를 직접 조작하였다.

Fig.13은 CVT 단독제어만을 실시한 경우의 실험결과이다. Fig.13(a)에 도시된 차속과 주행모드를 비교하여 보면 차속은 가속초기와 가속완료 후 주행모드와 큰 차이를 보이고 있으며 정상상태에서의 진동 또한 증가되었음을 알 수 있다. CVT 단독제어에 의한 엔진거동(Fig.13(b))은 OOL 근처에서 이루어지고 있으나 초기 정속주행상태를 제외한 모든 구간에서 통합제어 운전에 비해 OOL에서 벗어나 운전되고 있어 엔진최적운전이 잘 이루어지지 않고 있음을 알 수 있다.

Table 1에 주행모드 A, B, C에 대한 ITAE 및 CVT 단독제어에 의한 ITAE를 도시하였다. ITAE는 주행모드로 부터 결정되는 최적 엔진운전점과 실제 엔진운전점과의 차이로 다음과 같이 정의하였다.

$$ITAE=\int_0^{t_{last}}\sqrt{(T_{e)d}-T_e)^2+(\omega_{e)d}-\omega_e)^2}\,h\,dt \qquad (1)$$

여기서 $T_{e)d}$, $\omega_{e)d}$는 주행모드로부터 정해지는 기준동력에 대해 결정된 엔진최적운전점의 엔진토크와 엔진속도, T_e와 ω_e는 실제 엔진토크와 엔진속도이고 h는 실험을 위해 사용된 샘플링타임(Sampling Time)이다. Table 1에서 볼 수 있듯

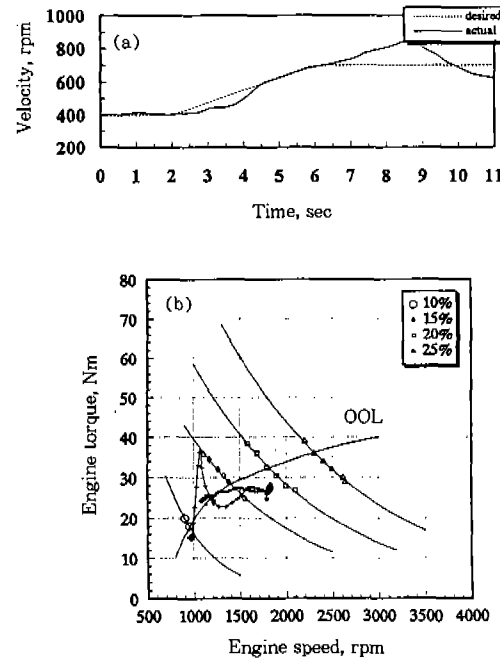

Fig.13 Experimental Result of (a) Velocity and (b) Engine Operationfor Driving Mode A by CVT Only Control

Table 1 Error Criterion for Consolidated Control and CVT Only Control

	ITAE
Consolidated control for driving mode A(acceleration 7.85rad/s²)	955
Consolidated control for driving mode B(acceleration 5.25rad/s²)	848
Consolidated control for driving mode C(acceleration 12.57rad/s²)	1771
CVT only control for driving mode A (acceleration 7.85rad/s²)	2447

이 가속구간의 가속도가 증가할수록 동력전달계의 회전관성 효과가 증가되어 통합제어 성능이 저하되었고 CVT 단독제어에 의한 ITAE는 통합제어 결과보다 훨씬 큰 값을 보이고 있어 엔진최적운전을 위하여는 통합제어가 필수적임을 알 수 있다.

6. 결 론

전 연구에서 개발된 엔진-CVT 통합제어 알고리즘을 이용하여 통합제어 성능에 대한 실험적 연구를 수행하였다. 통합제어기는 엔진동력, 엔진 드로틀 개도, CVT 변속비 제어로 구성된다. 실험결과 엔진-CVT 통합제어는 운전자의 의지와 엔진최적운전을 만족시킬 수 있음을 확인하였다. 가속도의 크기가 갑자기 바뀌는 구간에서는 동력전달계의 관성에 의하여 통합제어에 의한 차속이 주행모드와 다소 차이를 보이며 추후 이를 고려한 제어알고리즘의 개선이 필요하다.

후 기

이 연구는 통상산업부에서 시행한 G7과제(차세대자동차기술) 개발사업의 기술개발 결과의 일부입니다.

참 고 문 헌

1. Y. Sakai, "The'ECVT' Electro Continuously Variable Transmission", SAE 880481, 1988.
2. D. Hahne, "A Continuously Variable Automatic Transmission for Small Front Wheel Drive Cars", c2/84, Imech, 1984.
3. 김현수, 송한림, 김종준, "PWM 솔레노이드 전자제어 리그형 CVT의 변속 제어 특성 연구", 성균관대학교 과학기술연구소, 1995.
4. 김달철, 김현수, "엔진-CVT 통합제어 알고리즘 개발", 대한기계학회 춘계학술대회, 1996.
5. 김종준, "PWM 전자 유압제어 CVT의 전달함수 도출과 변속비 LQG/LTR 제어", 성균관대학교 석사학위 논문, 1995.