

CVT 시스템 효율을 고려한 변속 제어

류완식·김현수*

성균관대학교 기계공학부

Ratio Control of CVT by Considering the CVT System Efficiency

Wansik Ryu · Hyunsoo Kim*

School of Mechanical Engineering, Sungkyunkwan University, Gyeonggi 440-746, Korea

(Received 6 January 2006 / Accepted 13 March 2006)

Abstract : A modified ratio control algorithm is proposed for the improvement of the fuel economy for a metal belt CVT. In the modified ratio control algorithm, the CVT ratio is controlled to operate the engine on the optimal operation region which provides the best efficiency from the view point of the overall efficiency of the engine-CVT system. In order to construct the modified ratio map, the CVT system loss model is used by assuming that the all the loss is attributed to the torque loss. It is found from the simulation results that the fuel economy by the modified ratio control algorithm is improved by 5.5 percents compared with the existing ratio control.

Key words : CVT(무단변속기), Ratio control(변속비 제어), Efficiency(효율), Torque loss(토크손실)

1. 서론

무단변속기(continuously variable transmission)는 4~5단의 변속단을 가지는 자동변속기와는 달리 변속비를 연속적으로 변화시킴으로써 차량의 속도와 관계없이 엔진의 운전점을 효율이 우수한 영역에 유지할 수 있어 자동변속기에 비하여 연비를 10~15% 개선할 수 있다. 또한 무단변속에 의한 변속충격이 없어 승차감을 개선할 수 있다는 장점이 있다. 이와같은 CVT의 장점은 CVT 특성에 적합한 내연기관의 설계 및 엔진과 CVT의 통합제어를 통하여 추가적인 연비향상을 이룰 수 있다.¹⁾

그러나, CVT에 의한 엔진의 최적운전은 동력전달계의 손실과 응답지연 등으로 인하여 이상적인 운전곡선상에서 벗어나게 된다. CVT차량의 엔진 최적운전을 위하여 플라이휠을 이용하여 변속과

도상에서의 토크를 어시스트(assist) 하는 방법²⁾과 라인압력제어를 통하여 변속속도를 극대화하는 방법³⁾, 엔진-CVT 통합제어를 통하여 엔진의 운전점을 제어하거나⁴⁾ 연료 공연비 제어,⁵⁾ 드로틀 개도량 보상방법,⁶⁾ 엔진 토크 보상 방법⁷⁾ 등이 제안되었으며, 2005년 이회라 등은 엔진과 CVT의 응답지연 시간을 판단하여 CVT를 제어함으로써 엔진운전점을 최적인전점에 근접하여 운전시키는 방법을 발표하였다.⁸⁾ 그러나, 기존의 방법은 CVT의 동력손실은 고려하지 않고 단지 엔진만을 가장 효율이 좋은 영역에서 운전시키기 위한 것이었다. 기존에 발표된 결과에 의하면 CVT의 효율은 액츄에이터 압력, 차속, 입력토크 등에 따라 달라지며, 운전 조건에 따라 약 60%~97%의 효율 변화가 있다. 따라서, 엔진을 최적 운전점에서 운전시키더라도 CVT의 동력 전달 효율이 낮은 곳에서 운전된다면 시스템 전체의 효율관점에서 최적의 운전점이라 볼 수 없다.

*Corresponding author, E-mail: hskim@me.skku.ac.kr

본 연구에서는 CVT 손실 모델을 이용하여 CVT 손실토크가 고려된 CVT 변속맵을 제시하고 엔진-CVT 효율이 고려된 최적 변속비 제어 알고리즘을 제안하였다.

2. CVT 토크 손실 모델

CVT 손실은 토크 손실과 속도 손실로 나누어지는데, CVT의 속도손실은 결국 토크손실에 포함되어 동력손실로 나타난다고 보고 토크손실 만을 고려하여 벨트 손실을 다음과 같이 모델링 할 수 있다.⁹⁾

$$T_p = h_p \dot{\omega}_p + \frac{1}{i} \dot{h}_s + \frac{1}{i} T_s + R \quad (1)$$

$$R = \alpha(i)(R_1 + \frac{1}{i} R_2) \quad (2)$$

여기서 T_p , T_s 는 구동 및 종동축 토크, h_p, h_s 는 구동 및 종동축 각운동량, R 은 정상상태 손실, R_1, R_2 는 구동 및 종동축 손실, i 는 변속비이며 $\alpha(i)$ 는 변속비에 따른 토크 손실을 고려한 가중함수이다.

구동 및 종동풀리에서 손실이 발생하는 가장 대표적인 원인은 구동 및 종동축 드러스트 및 벨트장력에 의존하는 쿨롱마찰(coulomb friction)과 회전속도에 의한 점성 마찰이라고 할 수 있다. 구동 및 종동축 드러스트는 구동 및 종동축 압력과 입력토크에 의존하기 때문에 손실 R_1, R_2 를 각각 압력과 토크의 대수식으로 가정하고 점성 마찰에 의한 손실도 대수식으로 가정하면 구동 및 종동축 손실 R_1, R_2 은 다음과 같이 모델링할 수 있다.

$$R_j = a_j \cdot (P_j + b_j \cdot \omega_j^2) + c_j \cdot \omega_j + d_j \cdot T_j \quad (3)$$

$j = 1$: 구동축, $j = 2$: 종동축

여기서 a_j, b_j, c_j, d_j 는 계수로서 실험을 통하여 결정되며, P_j 는 액츄에이터 압력, T_j 는 부하토크, $b_j \cdot \omega_j^2$ 는 원심력에 의한 토크손실이다. 한편 식 (1)에서 과도상태 토크는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{h}_p + \frac{1}{i} \dot{h}_s &= J_p \dot{\omega}_p + \frac{1}{i} J_s \dot{\omega}_s \\ &= (J_p + \frac{1}{i^2} J_s) \dot{\omega}_p + \frac{1}{i} J_s (-\frac{di}{dt} \frac{\omega_s^2}{\omega_p}) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 변속과도 상태의 토크는 CVT의 회전관성과 구동 및 종동축 회전속도, 변속속도 di/dt 에 의존함을 알 수 있다. 따라서 구동축에서 본 손실토크 T_{loss} 는 정상상태 손실 R (식 (2))과 회전관성에 의한 과도상태토크(식 (4))의 합으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{loss} = R + (J_p + \frac{1}{i^2} J_s) \dot{\omega}_p + \frac{1}{i} J_s (-\frac{di}{dt} \frac{\omega_s^2}{\omega_p}) \quad (5)$$

정상상태의 CVT 손실은 식 (5)에서 과도상태항을 0으로 하면 아래와 같이 표시된다.

$$T_{loss} = R ; \text{ 정상상태} \quad (6)$$

3. CVT 효율을 고려한 엔진-CVT 운전점

본 연구에서는 식 (6)의 정상상태 CVT 토크 손실 모델을 이용하여 엔진-CVT 시스템 전체 효율을 고려한 변속비 제어 방법을 제안하였다.

3.1 CVT에 의한 엔진 운전점

CVT의 가장 큰 장점은 CVT 변속 범위내에서 엔진을 원하는 점에 운전시킬 수 있다는 것이다. Fig. 1은 CVT 입력축과 출력축의 운전점을 나타낸 것이다. 여기서 CVT 차량의 클러치는 직결되어 있어서 CVT 입력축 운전점과 엔진 운전점은 동일하다고 가정하였다. Fig. 1(a)에서와 같이 동일 동력 선상에서 2개의 CVT 입력 운전점 P_1, P_2 에 대하여 CVT의 변속비 제어로 출력점(P_{output})을 동일하게 할 수 있다. 그러나 이는 CVT 시스템의 효율이 100%인 경우이다. CVT의 효율은 운전조건에 따라 다르게 나타나므로 Fig. 1(b)에서와 같이 동일한 출력동력 P_{output} 에 대하여 변속비 i_1 인 경우 토크손실이 T_{loss1} 이라면 엔진의 운전점 P_1 이 되고 변속비 i_2 , 토크손실 T_{loss2} 인 경우 엔진의 운전점은 P_2 가 되어 각각 입력동력이 다르게 될 수 있다. 따라서, 앞절에서의 토크 손실 모델을 이용하면 각각의 변속비에 대한 입력 동력을 알 수 있으며 각각의 입력동력에서의 연료소비량을 비교하여 연료소비량이 가장 적은 입력동력에서 엔진이 운전되도록 변속비를 제어하면 엔진-CVT의 효율을 고려한 변속비 제어가 가능하게 된다.

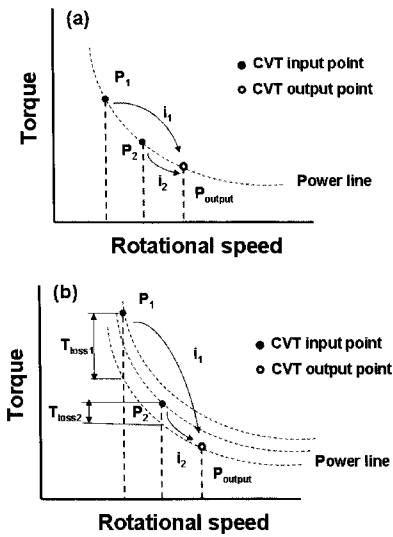


Fig. 1 Engine-CVT operating point

3.2 CVT 손실을 고려한 변속비 맵

위와 같은 방법으로 임의의 출력동력과 출력속도에 대하여 연료 소비량이 가장 작은 하나의 변속비를 구할 수 있으며 CVT 손실이 고려된 출력동력-출력속도-변속비의 3차원 변속비 맵을 도출할 수 있다. CVT 손실이 고려된 변속비 맵은 다음 순서에 따라 도출할 수 있다.

Step. 1 : 구동축 속도 결정

CVT 손실을 고려한 변속비 맵을 도출하기 위하여 먼저 임의의 출력동력과 변속비, 종동축 속도에 대한 구동축 속도를 구한다(Fig. 2).

구동 속도가 결정되면 CVT 정상상태 토크손실 모델(식 (6))을 이용하여 토크 손실을 계산하고 입력 토크를 결정하여야 한다. 그러나 CVT 정상상태 토크손실은 액츄에이터 압력, 속도, 변속비, 토크의 합

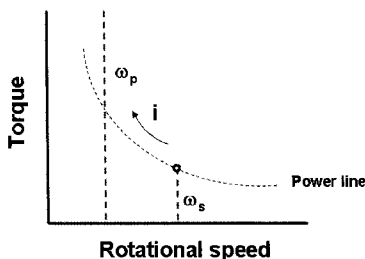


Fig. 2 Determination of ω_p

수이므로 토크손실을 구하기 위하여는 구동 및 종동축 압력이 결정되어야 한다.

Step. 2 : 구동 및 종동축 압력 결정

Fig. 3은 구동 및 종동축 압력을 결정하기 위한 순서도이다. 변속비와 입력토크가 주어지면 라인압력 맵에 의하여 라인압력 P_s 를 구할 수 있다. 또한 변속비와 토크비를 결정하면 변속비-토크비(T_{ratio})-드러스트비(F_p/F_s) 관계⁽¹⁰⁾에 따라 드러스트비를 알 수 있다.

드러스트 비는 다음과 같이 정의된다.

$$F_p / F_s = \frac{A_p \cdot P_p^* + F_{CP}}{A_s \cdot P_s^* + F_{CS} + F_{SP}} \tag{7}$$

여기서 P_p^* 는 정상상태 구동축 압력, P_s^* 는 정상상태 라인압력, A_p 는 구동축 실린더 단면적, A_s 는 종동축 실린더 단면적이다. F_{cp} , F_{cs} 는 구동 및 종동축 실린더내에서 발생하는 유체 원심력에 의한 드러스트를 나타내며 다음과 같다.

$$F_{cp,cs} = \int P_{cp,cs} \cdot dA_{p,s} = \int \frac{1}{2} \rho r^2 \omega_{p,s}^2 dA_{p,s} \tag{8}$$

여기서, 하첨자 p,s 는 각각 구동축과 종동축을 나타내며, $P_{cp,cs}$ 는 구동축과 종동축에서의 원심력에 의한 압력, ρ 는 유체밀도, r 는 유체 회전 반경, A 는 액츄에이터 내의 유압 작용면적, ω 는 폴리 회전속도이다.

F_{sp} 는 연구대상 CVT 배리에이터의 종동축 폴리에 장착되어 있는 스프링에 의한 드러스트이다.

드러스트비를 구하기 위한 토크비 T_{ratio} 는 다음과 같이 정의 된다.

$$T_{ratio} = \frac{T_{in}}{T_{max}} \tag{9}$$

여기서 T_{in} 은 CVT 입력토크이고 T_{max} 는 현재의 라인압력에서 전달할 수 있는 최대 토크이다.

라인압력맵에 의하여 라인압력이 결정되고 변속비-토크비-드러스트비 맵에 의하여 드러스트 비가 결정되면 드러스트비 관계식에서 구동축 압력 P_p 를 구할 수 있다.

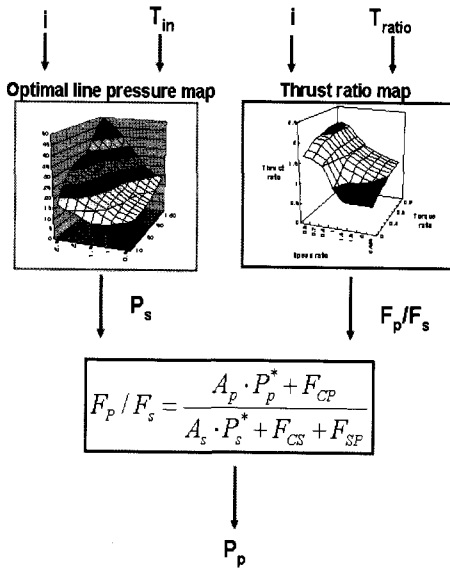


Fig. 3 Flowchart for obtaining Ps, Pp

Step. 3 : CVT 손실을 고려한 엔진토크 계산

다음으로 CVT 토크손실 계산을 위하여는 입력토크를 결정하여야 한다. Fig. 3에서 볼 수 있듯이 Ps와 Pp는 입력토크 Tin에 따라 결정된다. 따라서 입력토크를 0Nm에서 순차적으로 증가시켜가며 Step.2의 구동 및 중동축 압력을 계산하고 식 (6)에서 손실토크를 계산한다. 손실토크 Tloss를 구하면 Fig. 4에서와 같이 입력토크(Tin)와 손실토크(Tloss)의 차이가 순수 전달 토크(Tnet)이므로 순수 전달 토크와 회전속도(ωp)의 곱 즉, 순수 입력동력이 출력동력과 같아지는 점의 입력토크 Tin이 CVT 손실토크 Tloss를 고려한 엔진의 토크가 된다.

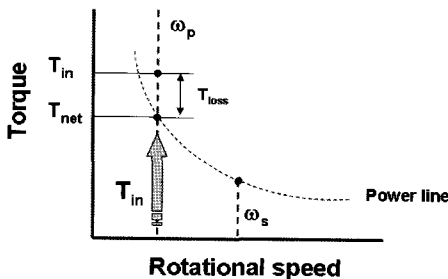


Fig. 4 Determination of Tin

Step. 4 : 변속비 맵

CVT 변속비를 변화시키며 Step. 1 ~ Step. 3을 반복하면 임의의 동력, 임의의 출력속도에 대하여 변속비 변화에 따른 엔진속도와 엔진토크, 즉 엔진 운전점을 구할 수 있다. 이 엔진 운전점의 연료소비량을 비교하여 임의의 동력과 출력속도에 대하여 연료소비량이 최소가 되는 변속비를 결정할 수 있다.

Fig. 5에 이와 같은 방법으로 도출한 변속비 맵을 도시하였다.

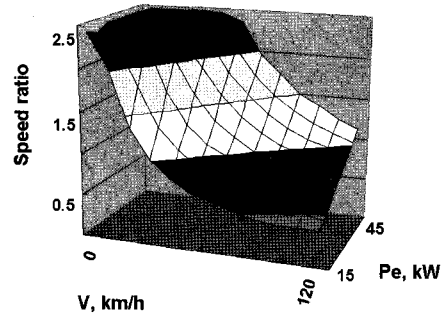


Fig. 5 Modified speed ratio map

4. CVT 손실을 고려한 목표 변속비 도출 방법

기존의 CVT 목표 변속비 도출 방법은 목표변속비 $i_{desired}$ 를 다음 식과 같이 정의하고 Fig. 6에서와 같이 엔진 최적인전 곡선(OOL)과 가속페달량에 따른 드로틀 개도량($Th_{desired}$)이 만나는 점을 $\omega_{e_desired}$ 로 하여 목표 변속비를 도출하였다.

$$i_{desired} = \frac{\omega_{e_desired}}{\omega_s} \tag{11}$$

Fig. 5에서의 수정된 변속선도를 이용하여 목표 변속비를 도출하기 위하여는 출력동력과 차속을 알아야 한다. 여기서 출력 동력은 Fig. 7에서와 같이 요구동력으로 대응될 수 있다. Fig. 7에서 운전자가 가속페달을 밟으면 현재 엔진 속도와 목표 드로틀 ($Th_{desired}$) 라인이 교차하는 점이 목표 운전점이 되며 이때의 동력을 요구 동력이라 할 수 있다. 이 요구동력은 곧 출력 동력이 되며 변속비 맵에서 현재의 차속과 요구동력에 대응되는 변속비를 목표 변속비로 구할 수 있다(Fig. 8).

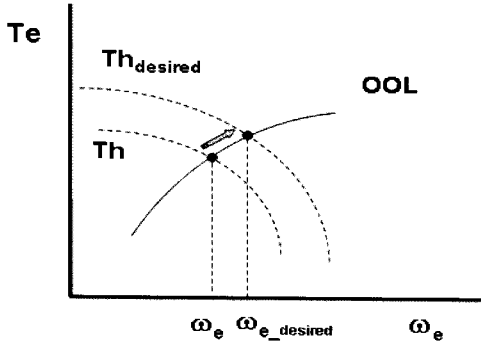


Fig. 6 Desired speed ratio using the OOL

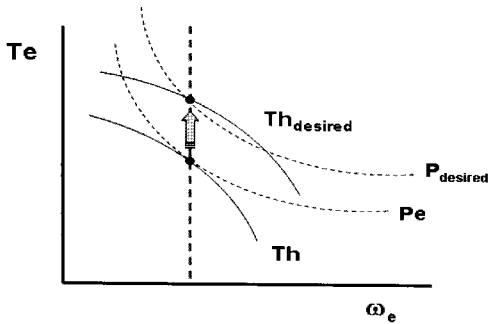


Fig. 7 Desired power

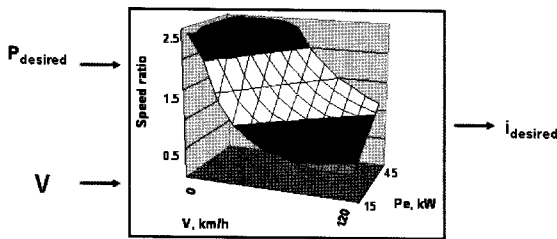


Fig. 8 Desired speed ratio using the optimal speed ratio map

5. CVT 시스템 손실을 고려한 변속 제어 성능 시뮬레이션

Fig. 8의 CVT 손실을 고려하여 수정된 변속비 맵을 이용한 제어 성능과 기존의 엔진 최적운전 곡선을 이용한 변속제어 성능을 시뮬레이션을 통하여 고찰하였다.

Fig. 9는 수정 변속비 맵을 이용한 방법과 기존 제어 방법에 대한 FUDS(federal urban driving schedule) 운전모드 주행결과를 0~400sec까지 비교 도시한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 두 경우 모두 목표 차속을 잘 추종하고 있다. 그러나 변속비가 서로 다르

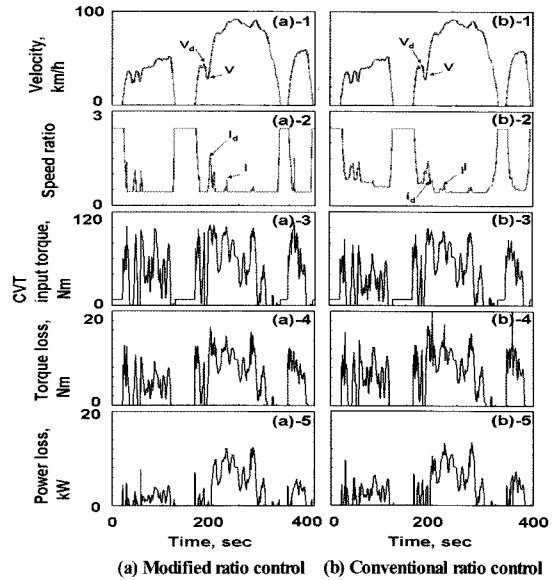


Fig. 9 Comparison of (a) modified ratio control and (b) conventional ratio control

게 제어되고 있음을 볼 수 있다. 처음 150sec까지의 결과를 비교해보면 수정된 변속비 맵을 이용한 제어(Fig. 9(a))의 경우 변속비는 빠르게 상향변속을 하여 최고 변속비 $i=0.428$ 을 유지한 반면 기존의 제어(Fig. 9(b))의 경우 $i=1.0$ 부근에서 제어되고 있음을 볼 수 있다. CVT 입력토크는 수정 변속비 맵을 이용한 제어가 기존의 제어보다 높은 토크로 운전된다. 토크손실과 동력손실을 비교해보면 수정 변속비 선도를 이용한 제어의 손실이 적은 것을 볼 수 있는데 이것은 수정된 변속비제어에 의하여 CVT 손실이 상대적으로 적은 영역에서 엔진이 운전되기 때문이다.

Fig. 10은 FUDS 운전모드 주행결과와 엔진 운전점을 최적운전 곡선(OOL)과 비교 도시한 것이다. 기존 변속비 제어의 경우(Fig. 10(b)) 최적운전 곡선을 잘 추종하지만 수정된 변속비 맵을 이용한 경우에는 엔진이 최적운전 곡선에서 벗어나서 저 회전고 토크 영역에서 운전됨을 볼 수 있다. 이는 CVT의 구동축 속도가 낮고 입력토크가 클수록 CVT 효율이 좋아지기 때문으로 엔진은 최적운전곡선에는 약간 벗어나 운전되지만 CVT 손실을 고려한 시스템 전체 효율이 좋은 영역에서 운전되기 때문이다.

Fig. 11은 기존제어 방법과 수정된 변속비 제어방

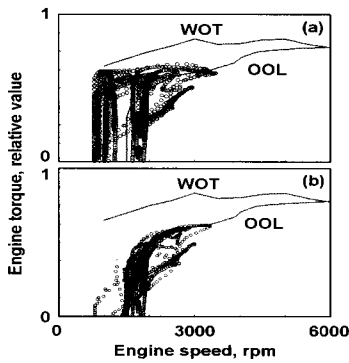


Fig. 10 Comparison of engine operation trajectory for (a) modified control and (b)conventional ratio control

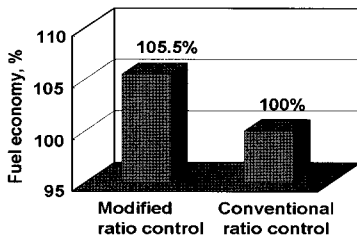


Fig. 11 Comparison of fuel economy for modified ratio control and conventional ratio control

법에 의한 FUDS 주행 연비를 비교한 것이다. Fig. 11에 도시한 것과 같이 CVT 시스템 효율을 고려한 수정된 변속비제어가 약 5.5%의 연비향상을 보인다.

6. 결론

- 1) 금속벨트 CVT 토크손실 모델을 이용하여 엔진-CVT 시스템 전체 효율을 고려한 수정된 변속비 맵을 제안하였다. 수정된 변속비 맵은 CVT의 입력토크, 구동축 속도, 변속비, 구동 및 종동축 액츄에이터의 압력에 의존하는 CVT의 정상상태 손실을 이용하여 차속-출력동력-변속비의 관계로 도출하였다. 수정된 변속비 맵에 의한 목표 변속비는 운전자의 의지, 즉 드로틀 개도량에 따라서 요구 동력이 결정되면 현재 차속에서 구할 수 있다.
- 2) 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어방법과 수정된 변속비 맵에 의한 제어방법의 연비성능을 비교하였다. 수정된 변속비 제어방법에 의한 엔진운전은 기존의 제어 방법보다 저속, 고토크 구간에서

서 운전되어 CVT 손실이 작다. 또한 엔진이 기존의 최적인진 곡선에서 벗어나서 운전됨에도 불구하고 엔진-CVT 시스템 효율이 더 좋은 영역에서 엔진을 운전시키므로 FUDS 모드에서 기존의 제어방법 보다 약 5.5%의 연비향상을 나타냈다.

후 기

본 논문은 2006년도 두뇌한국21 사업의 지원으로 이루어진 것으로서, 이에 감사드립니다.

References

- 1) S. Sakaguchi, E. Kimura and K. Yamamoto, "Development of an Engine-CVT Integrated Control System," SAE 1999-01-0754, 1999.
- 2) B. G. Vroemen, A. F. A. Serrarens and F. Veldpaus, "Hierarchical Control of the Zero Inertial Powertrain," JSAE Review, pp.519-526, 2001.
- 3) H. Lee and H. Kim, "Improvement of Fuel Economy by Shift Speed Control for a Metal Belt Continuously Variable Transmission," Proc. Instn. Mech. Engrs, Part D: Journal of Automobile Engineering, Vol.216, pp.741-749, 2002.
- 4) T. Takiyama and S. Morita, "Engine-CVT Consolidated Control Using LQI Control Theory," JSAE Review, pp.251-258, 1999.
- 5) T. Takiyama, "Engine-CVT-A/F Consolidated Control Using Decoupling Control Theory," JSAE Review, pp.9-14, 2001.
- 6) M. Yasuoka, M. Uchida, S. Katakura and T. Yoshino, "An Integrated Control Algorithm for an SI Engine and a CVT," SAE 1999-01-0752, 1999.
- 7) T. Kim and H. Kim, "Integrated Engine-CVT Control Considering Powertrain Response Lag in Acceleration," KSME International Journal, Vol.14, No.7, pp.764-772, 2000.
- 8) H. Lee and H. Kim, "Improvement in Fuel economy for a Parallel Hybrid Electric Vehicle by Continuously Variable Transmission Ratio Control," Proc. Instn. Mech. Engrs, Part D:

- Journal Automobile Engineering, Vol.219, pp.43-52, 2005.
- 9) W. Ryu, P. Kim and H. Kim, "Mechanical Loss Model for a Metal Belt CVT," Proc. International Pacific Conference on Automotive Engineering, pp.981-986, 2005.
- 10) H. Lee and H. Kim, "Analysis of Primary and Secondary Thrust for a Metal Belt CVT," SAE 2000-01-0841, 2000.