

무단변속장치의 제어방법에 관한 기초연구

김 동 현[○], 이 운 복, 유 용 재, 박 상 휘
대 전 기 계 창

Introductory Study of the Control Algorithms
for the Continuously Variable Transmissions

Dong Hyun Kim[○], Youn Bok Lee, Tai Young Ahn, Sang Hwi Park
Agency for Defense Development

Abstract

The continuously variable transmission (C.V.T.) has been introduced for many years, however, the application of C.V.T. system has been used rather restrictively because of the problems such as reliability, durability, efficiency and controllability. In this paper, some of the research trends about the control algorithms and the system design method involving C.V.T. is introduced. An engine is assumed in operation along the ideal operating line and it is also considered to be controlled independantly to the C.V.T. system. The control simulation has been carried out to confirm it and also the operation performance of the system is investigated.

1. 서 론

차량의 출현과 더불어 보다 높은 효율과 안정된 동작 성능을 가진 무단변속기(Continuously Variable Transmission : C.V.T.)의 개발의지는 꾸준히 고양되어 왔고, 그동안 무단변속장치가 빈번히 시도 되었었다. 신뢰성(Reliability)와 내구성(Durability)이 동력 전달장치의 중요 문제점이고, 최대 효율과 최적 동작상태를 얻기 위한 제어문제 역시 시스템의 안정화라는 과제와 함께 주요한 관심사가 되었다. 그리하여 동작과 독립되어 기어비가 선정된 엔진의 동력 전달장치가 신뢰성이라는 관점에서 대부분의 차량에 적용되어 왔다. 최근에 이르러는 무단변속장치의 제어성(Controllability) 차원에서 괄목할 만한 발전을 가져 왔으며, 엔진의 효율을 높인다는 관점에서 무단변속장치의 연구가 활발히 진행되고

있다. 특히 새로운 소재의 개발과 제어개념의 발달로 효율이 높고 내구성이 좋은 V-벨트형식의 무단변속장치 혹은 유압동력 전달장치(Hydro Static Transmission) 등이 고안 되었으며, 이와같은 장치들은 차량 구동시스템 제어에 대한 새로운 개념으로서 시도되고 있다. 이런 무단변속장치의 장점은 연료효율이 높고, 가속능력이 좋으며, 엔진의 운용과 구동장치의 동작이 유기적으로 연관되어 원활한 제어를 할 수 있으며, 한편 장치의 종량과 크기를 줄일 수 있어 제작비를 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

이러한 무단변속장치에 대한 연구로는 최근에 Ford 연구소의 R.R.Radtke를 중심으로 한 연구팀이 개발한 무단변속장치를 이용한 시스템의 최소 연료소비를 측정하는 제어방식 개발과 시뮬레이션 프로그램을 비롯하여 Gate 회사의 R.F.Stieg 등이 연구한 전륜구동형차를 위한 V-벨트방식의 제어방법등의 연구를 들 수 있다. 1982년에 Fiat Ritmo/Strada, Ford Fiesta 와 Renault 14 등 많은 소형 승용차에 무단변속장치가 응용되어 150,000Km 이상의 주행검사를 하여 성공적인 결과를 얻는 것으로 알려졌다, 큰 구동력이 요구되는 대형차량 시스템과 관련해서는 아직 발전이 미미한 단계이다. 본 연구에서는 미시간대학의 A.Frank 교수의 접근방식에 기초하여, 동력전달장치 제어방식을 실제의 대형 시스템을 대상으로 시뮬레이션을 하였다. 연료소비의 최소화와 장비의 경량화 등의 장점이 있으므로 대형장비의 개발에 있어서도 반드시 앞으로 더 연구발전 되어야 할 과제라고 생각된다.

2. 무단변속장치의 동적해석

무단변속형 차량에서는 동력비와 동력비의 변화율이 운동방정식에 고려되어야 하는데 그 이유는 무단변속장치는 항상 동력비와 그 변화율이 시스템 동작중에 변화하기 때문이다. 그림 1은 무단변속장치의 구동구조를 간단히 나타낸 것으로, 관성량(Inertia)이 연속변환

장치의 제요소에 연동(couple)되어 있기 때문에 동력비의 변화율은 대단히 중요한 의미를 갖는다. 무단변속장치의 운동방정식은 자동차의 가속도를 변화율과 토오크와 관련지어 구성되는데 이것을 설명하면 다음과 같다.

$$\text{토오크} : Te \cdot R - Tr1 - Tloss$$

$$\text{동력비의 변화율에 대한 모멘트} : -R \cdot Ie \cdot We$$

그리고 운동방정식은 다음과 같이 구성된다.

$$Wd[IeR^2 + Icd] = -RIeWe + TeR - Tr1 - Tloss$$

$$Wd = \frac{-RIeWe + TeR - Tr1 - Tloss}{IeR^2 + Icd}$$

R : 동력비 We : 엔진 각속도
 R : 동력비의 시간에 대한 변화율 Wd : 출력측 각속도
 Ie : 엔진 관성량 Tr1 : 도로에서 받은 역토크
 Icd : 출력측+CVT관성량 Tloss : 토오크손실
 Te : 엔진 토오크

한편 도면에서 받은 역 토크 Tr1 (Road Load Torque)는 Dorr의 실험식에 의하면 다음과 같다.

$$Tr1 = \left[5.1 + \frac{5.1 + 18 \frac{W}{1000}}{P} + \frac{(8.5 + 6 \frac{W}{1000}) (\frac{V}{1000})^2}{P} \right] \times 10^{-3}$$

단 P는 타이어의 압력, W는 차량의 중량이고 V는 차량의 속도이다.

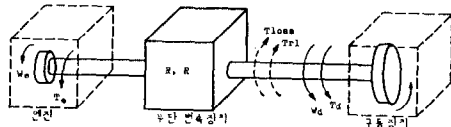


그림 1. 무단변속형 동력전달장치 모델

3. 엔진의 운용

엔진은 무단변속장치와는 독립적으로 운용되어지는데, 그림 2에서와 같은 이상성능곡선(Ideal Operating Line)을 따라 운용되어 진다. 엔진은 최소속도(idle Speed)이상이고 허용 최대속도이내에서 동작되며, (B.S.F.C : Brake Specific Fuel Consumption) 윤곽선(contour)은 같은 연료 소비율을 갖는 점을 연결한 선으로 이 선의 경계를 따라 이상성능곡선이 결정된다. 그림 3은 이 이상 성능곡선을 설명해 주는 그림으로, 엔진 속도와 출력 그리고 이에 따른 연료소비비를 표시해 주는 것으로, 그림에서 나타난 등고선 모양의 선이 B.S.F.C 윤곽선이다. 이 그림은 D2848M-E/G형을 모델로 하여 연료 소비율을 조사하여 작성한 것이며, 시스템이 전부하 상태에 있을때의 경우이다.

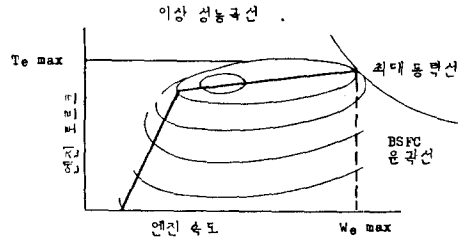


그림 2 엔진 이상성능곡선과 BSFC 윤곽선

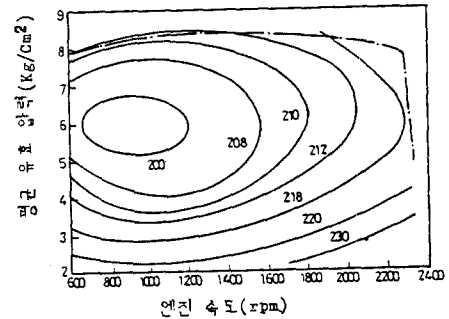


그림 3 D2848M-EG의 BSFC 윤곽선

4. 제어의 방식

본 연구에서 제어 시스템을 설계하는데 있어서의 주요 관심사항을 우선 정리하여 보면 다음과 같다.

- 연료효율을 향상시킨다.
- 최대 엔진속도의 상한치를 설정하여야 한다.
- 엔진의 공회전(Idle) 혹은 최소속도가 정해져야 한다.
- 동력비의 변화율은 모든 주행상태에서 발생할 수 있는 현상에 적용할 수 있도록 충분히 커야 한다.
- 안정화된 시스템 운용이 가능해야 한다.
- 내구성이 좋아야 한다.
- 자동차의 출발장치가 필요에 따라 선택될 수도 있다.

이상의 조건을 만족하는 시스템을 설계하기 위하여 무단변속장치의 운동비를 설정하였다. 무단변속장치의 운동비의 결정은 비교적 넓은 범위를 갖게끔 결정하게 되는데 여기서는 8:1로 한다. (엔진과 출력축과의 최소 최대 동력비는 각각 2:1과 15:1이다). 그림 4는 결정된 동력비 영역에 따른 제어영역에 관한 그림이다. 이 그림은 영역 (가), (나), (다), (라), (마)로 나뉘어지는데 영역 (가)는 출력축의 토오크가 많이 요구되는 영역이며 클러치 혹은 토오크 변환장치(Torque Converter)와 같은 장치가 요구되는 영역이다. 영역 (나)는 무단변속장치가 주요기능을 발휘하는 영역으로 동력비를 조절하여

액슬의 속도를 제어한다. 영역 (다)는 최대엔진속도 영역, (라)는 최소 엔진속도 즉 공회전 속도를 나타내며 영역 (마)는 최소 동력비를 나타내는데, 이것은 이 경계치 이상으로 시스템을 제어하여야 한다는 것을 의미한다. 그러면 이런 각각의 영역에 대한 특성 해석 및 사용될 수 있는 제어시스템 모델은 다음과 같다.

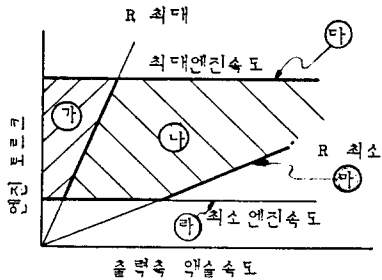


그림 4 제어 영역 구분

i) 영역 (가)

이 영역의 주된 제어목적은 최대 동력비로서 최대 토크를 얻는 것이다. 클러치를 이용하여 클러치 마찰면에 작용하는 압력을 조정하므로써 토크의 크기와 출력속 속도를 제어한다. 그림 5는 영역 (가)에서의 제어 시스템을 설명하는 그림으로 가속 명령이 주어지면 출력 액슬 토크를 측정하고 가속페달의 명령과 비교하여 클러치의 압력을 제어하게 된다. 이 클러치 압력은 클러치 기능을 통하여 최대 동력비를 갖춘 출력 토크로 변환한다. 엔진은 가속페달의 위치 신호로 엔진속도가 제어되며 이 제어방식은 출력속 토크의 제어방식과 독립적으로 작용한다.

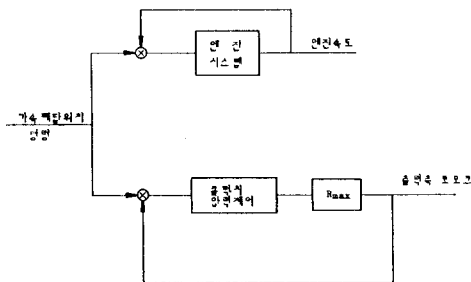


그림 5 최대 토크를 얻기 위한 시스템

ii) 영역 (나)

이 영역은 무단변속장치 영역으로, 앞서 설명된 무단변속장치의 운동방정식이 주된 제어시스템의 요소가

무단변속장치의 운동방정식이 주된 제어 시스템의 요소가 된다. 변수인 동력비 변화량(R)로서 제어하게 되는데, 무단변속장치가 R를 제어하면 이 R은 운동방정식을 거쳐서 최종 출력축의 각속도(Wd)로 표시하게 된다. 특히 자동차가 고속 주행시는 최대 엔진출력에 대하여 실질 토크 출력은 감소하게 되는데 이런 경우에는 페달의 기민한 제어에 의하여 효과적으로 시스템이 운용될 수 있다. 이런 페달의 제어는 그림 6에서와 같은 스위치로서 표현되어질 수 있겠다. 이는 경계치 각속도(Wc)를 정해두고 명령을 전달 또는 차단하는 것이다

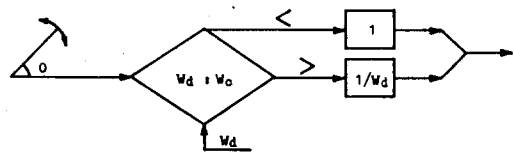


그림 6 고속 주행시 페달 제어도

iii) 영역 (다), (라), (마)

영역 (다)는 최대 엔진속도의 제한을 두는 영역으로 이 영역에서 엔진은 최대 출력을 내게 된다. 영역 (라)는 최소 엔진속도 즉 공회전속도($W_{e \min}$)를 지정하여 이 속도 이상으로 엔진이 운용되도록 제어한다. 영역(마)는 최대 동력비 축점을 맞추어 정하게 되는데 여기에서는 15:1로 한다. 그림 7은 엔진의 최대($W_{e \max}$) 최소($W_{e \min}$) 속도를 제어하는 시스템 구조를 설명하는 그림이다.

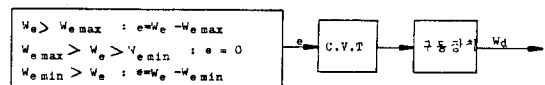


그림 7 최대 최소 엔진속도 제어

5. 시스템 분석

앞서 설명한 각 영역의 시스템 방식을 조합하여 종합 시스템을 구성하면 그림 8과 같은 시스템을 구성할 수 있다.

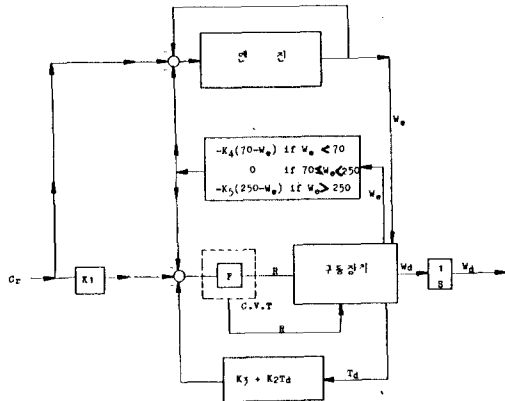


그림 8 무단변속장치와 구동장치

이 시스템의 게인값(K_1, K_2, \dots, K_5)을 결정하기 위하여 제어 이론을 사용하였다. 먼저 가장 이상적인 반응곡선을 생각하고 실제 시스템의 반응곡선과 비교하여 그때 발생하는 에러를 합산한 값을 최소화 하는 수치해석적인 방법(Pattern Search)을 사용하였다. 이와같은 과정에서 구한 최적 게인은 다음과 같다.

$$K_1, K_2, \dots, K_5 = 0.12, 1.37, 115, 0.02, 0.0001$$

이러한 최적 게인값을 사용하며 시뮬레이션하면 그림 9와 같은 결과를 얻을 수 있으며, 이 결과는 이 최적 시스템의 안정된 주행성능을 표시하여 준다. 그림 10은 최적 게인이 아닐 경우를 표시하는 것으로서 고속 주행시의 불안정한 반응곡선을 나타내어 주고 있다. 이 불안정한 시스템의 게인 값은 다음과 같다.

$$K_1, K_2, \dots, K_5 = 0.12, 1.55, 115, 0.02, 0.0001$$

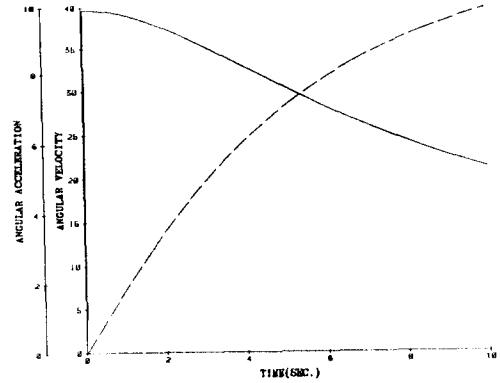


그림 9 최적 시스템의 반응곡선

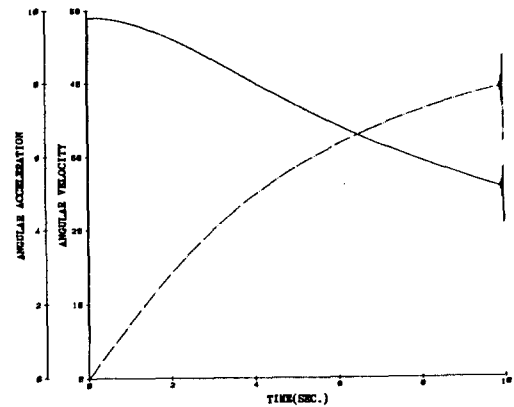


그림 10 불안정한 시스템의 반응곡선

6. 무단변속장치의 기계적 구성

그림 11은 앞에서 소개된 제어방법을 실제의 기계적인 유압 시스템으로 구성시킨 간단한 제어 시스템이다. 이 시스템의 기능은 먼저 가속 페달과 연결된 잼은 동력비의 변화를 가져오기 위하여 미끄럼 콘(Sliding Cone)의 위치를 변화시켜 준다. 변화된 콘의 반지름은 동력비의 변화를 반영하며 유압제어 시스템 요소를 즉 2개의 스톱 밸브, 기어펌프와 2개의 피스톤으로 되어 있다. 계측장치로는 페달위치 계측기(Pedal Position Sensor), 엔진속도와 주행속도 감지기와 콘의 이동위치를 감지하는 장치등이다. 이러한 계측장치에서 나오는 신호는 피스톤의 압력정도를 결정하여 주며 이 압력으로 동력비가 선택되어 진다.

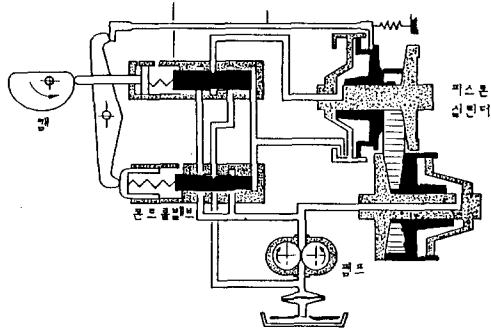


그림 11 무단변속유압 제어 시스템

7. 결 론

기본적인 무단변속기의 제어 이론에 대하여 연구하였다. 무단변속기의 동적 해석으로 변속기의 동력비가 포함된 운동방정식을 구성하였다. 엔진은 무단변속장치와 독립하여 이상적인 성능곡선에 따라 동작되며 엔진의 최대와 최소 속도를 제어하였다. 드로틀 밸브의 위치를 명령 신호로 엔진의 속도를 조절하고 변속비는 액슬 토크의 신호와 비교하여 결정지어 진다. 무단변속기의 제어방식은 엔진속도와 출력축 속도와 관련지어 4종류의 제어 영역으로 구분하고 그 각각의 영역은 특성있는 제어방식을 포함하게 된다. 이러한 제어방법을 사용한 전체 시스템이 특정 대형차량 시스템을 대상으로 설계되었고 최적 제어 이론에 의한 계인 값이 결정되었으며 시뮬레이션에 의하여 출력축의 속도와 가속도의 시간에 따른 변화가 제시되었다. 이러한 시뮬레이션 결과는 본 연구에서 제안된 최적 시스템의 안정된 주행성능을 보여주고 있다.

참 고 문 헌

1. R.R.Radtke, LE. Unnewehr, and Freedman, "Optimization of a Continuously Variable Transmission with Emission Constraints". Paper 810107 Presented of the SAE International Congress, Detroit, February 1981
2. R.F. Stieg and W.S. Warley, "A Rubber Belt CVT for Front-Wheel-Drive Cars". SAE 820746
3. D.Scotf, "Belt-drive CVT for '82 model year" Automotive Engineering, February 1980
4. C. Chan, D. Yang, T. Volt 2, D. Breitweiser, F.S. Jamzadeh and A. Frank, "System Design and Control Considerations of

Automotive continuously Variable Transmission". SAE 840048

5. Wilde and Beightler "Foundation of Optimization", Prentice-Hull, 1967, PP. 304-313
6. P. Baudoin, "Continuously-Variable Tr Transmissions for Cars with High Ratio Coverage", SAE Paper No. 790015 February, 1979
7. J.E. Auiler, J.D. Zbrozek and P.N. Blumberg, "Optimization of Automotive Engine Calibration for Better Fuel Economy Methods and Applications". SAE Paper #770076, 1977
8. F.G. Willis, W.F. Kaufman and G.A. Kern, "Mechanical Hybrid Vehicle Simulation". SAE Paper No. 790015, February, 1979
9. N.H. Beachley and A.A. Frank, "Principles and Definitions for Continuously Variable Transmission, with Emphasis on Automotive Applications", ASME 80-C2/DET-95
10. Rolt Isermann "Digital Control Systems" Springer-Verlay Berlin, 1977