

슬라이딩 모드 제어기법을 이용한 무단변속기의 슬립과 기어 비 동시 제어

김 광 희¹⁾ · 최 세 범¹⁾

한국과학기술원 자동차기술대학원¹⁾

Continuously Variable Transmission Slip and Gear Ratio Simultaneous Control Using Sliding Mode Control

Kwanghui Kim¹⁾ · Seibum Choi¹⁾

¹⁾Graduate School of Automobile Technology, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Guseong-dong, Yuseong-gu, Daejeon, 305-701, Korea

Abstract : A Continuously Variable Transmission(CVT) gives more outstanding performances in fuel efficiency and drivability than those of conventional stepped transmission. Furthermore, it guarantees driving comfort because there is no impact in shifting event. There are many kinds of CVTs having different characteristics but the V-belt CVTs are the most applicable in automotive practice.

In this paper, CVT is modeled in Simulink and gear ratio and belt slip are controlled through nonlinear control method at the same time.

Key words : Continuously Variable Transmission(CVT, 무단변속기), Vehicle driveline model(차량 구동계 모델), Wheel dynamics(휠 동력학)

Nomenclature

F : pulley clamping force
 F^* : steady-state pulley clamping force
 T : torque
 ω : angular velocity
 v : slip
 μ_b : pulley-belt friction coefficient
 μ_g : ground-tire friction coefficient
 J : rotating inertia
 R : pulley running radius
 r_s : speed ratio (ω_s/ω_p)
 r_g : gear ratio (R_p/R_s)
 i_f : final drive reduction ratio

r_{eff} : static ground-to-axle height of wheel
 R_{xr}, R_{xf} : tire rolling resistance

Subscripts

p, s : primary, secondary
 e : engine
 wf, wr : front wheel, rear wheel

1. 서론

* 김광희, E-mail: gsat-con@kaist.ac.kr

지구환경의 오염과 화석연료의 고갈로 인해 자동차 배기가스에 대한 규제는 점점 엄격해지고 현대의 차량은 소형화되고 있다. 이에 따라 각국 및 자동차 완성업체에서는 제한된 에너지를 높은 효율로 이용하면서 차량의 동력성능을 향상시킬 수 있는 차량을 개발하고 있다. 하이브리드 자동차, 자동변속기의 고단화, 무단변속기의 개발 등은 이에 대한 좋은 예가 될 것이다.

무단변속기는 연료효율과 동력성능 측면에서 기존의 변속기에 비하여 높은 성능을 보여준다. 또한 변속시 변속충격이 없다는 장점으로 운전자에게 안락함을 제공한다. 하지만, 현재의 무단변속기는 예상되어진 것만큼 높은 효율을 보여주지 못하고 있다. 벨트와 풀리 사이의 슬립을 제어하기 위해 풀리 양단에 과도한 축력을 가하고 있기 때문이다. 만약, 벨트와 풀리 사이의 슬립과 기어비를 최대의 토크 전달과 효율을 위해 정확히 제어한다면 무단변속기의 효율을 상당히 개선시킬 수 있을 것으로 예상된다.

본 연구에서는 Matlab(Simulink)를 통하여 무단변속기 장착된 차량의 driveline을 모델링하고 비선형 제어기법을 이용하여 제어하여 정확한 무단변속기 제어를 위한 기초적인 연구토대를 마련하였다.

2. Vehicle Model Equipped with CVT

무단변속기 장착 차량의 동력 전달계에 대한 모델은 다음과 같다.

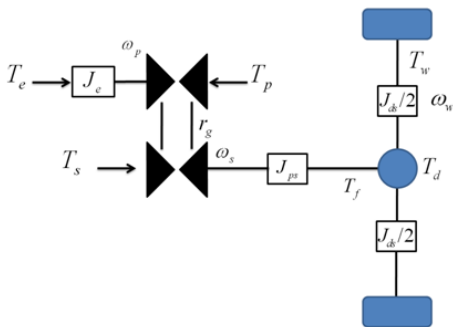


Fig. 1 Vehicle driveline model equipped with a CVT

엔진으로부터 생성된 동력은 변속기를 지나 final drive를 거쳐 wheel로 전달되어진다. 각각에 대한 운동

동방정식은 다음과 같다.

2.1 Wheel Dynamics

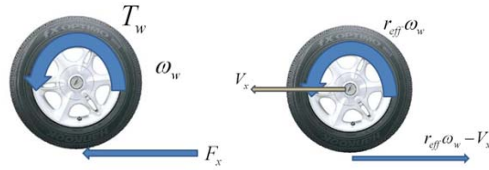


Fig. 2 Torque and force in driving wheel

일반적으로 노면의 조건에 따라 slip ratio와 타이어의 마찰계수와의 관계가 변화하지만 본 연구에서는 단순화하여 다음과 같은 관계가 있는 것으로 생각하였다.

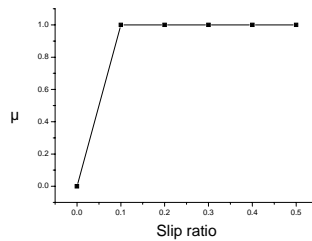


Fig. 3 Tire slip ratio, μ relation

Tire slip을 고려한 tire dynamic equation은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} J_{wr} \dot{\omega}_{wr} &= T_w - F_{xr} r_{eff} - R_{xr} \\ &= T_w - \frac{M}{4} \mu_g(\omega_w, V_x) r_{eff} - R_{xr} \end{aligned}$$

2.2 Longitudinal dynamics of the vehicle

공기저항을 무시한 차량의 longitudinal dynamics는 다음과 같다.

$$M \dot{V}_x = F_{xr} - F_{xf}$$

본 연구에 사용된 차량의 파라미터 값은 D.Cho¹⁾의 논문을 참조하였다.

2.3 CVT model

CVT dynamics에 기초한 CVT variator 모델은 다음과 같다.

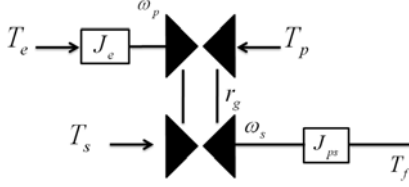


Fig. 4 CVT variator model (B. Bonsen¹⁰⁾)

$$\dot{\omega}_p = \frac{T_e - T_p}{J_e} = \frac{T_e \cos(\alpha) - 2\min(F_p, F_s)R_p\mu_b}{J_e \cos(\alpha)}$$

$$\dot{\omega}_s = \frac{T_s - T_f}{J_{ps}} = \frac{2\min(F_p, F_s)R_s\mu_b - T_f}{J_{ps} \cos(\alpha)}$$

3. Slip and gear ratio controller

3.1 Ratio controller

금속 벨트 방식 CVT의 변속동력학에 대한 연구는 T. Ide²⁾, G.Carbonne 등¹¹⁾에 의하여 실험 혹은 해석에 기초하여 많은 연구가 이루어졌다. 본 연구에서는 T.Ide²⁾의 변속 모델을 사용하였다. T.Ide의 모델은 다음과 같이 요약할 수 있다.

$$\dot{r}_g = \omega_p K_I (r_g) F_s \left(\frac{F_p}{F_s} - \frac{F_p^*}{F_s} \right)$$

즉, 기어비 변화의 기울기 값은 정상상태를 유지하는데 필요한 구동측 풀리(primary pulley)의 축력과 현재 입력된 축력 사이의 차이에 의하여 변속이 된다. 또한 기어비 변화는 구동측 풀리의 각속도에 의존한다.

본 연구에서는 sliding mode controller를 제어기로 사용하였다. Sliding mode controller의 기본적인 형태는 다음과 같다.

$$\dot{s} = k \operatorname{sgn}(s)$$

하지만, 본 연구에서는 빠른 과도응답과 sliding surface에서의 chattering의 최소화하기 위하여 다음과 같이 변형된 형태의 sliding controller를 설계하였다.

$$\dot{s} = -ks$$

기어비에 대하여 설계된 sliding controller는 다음과 같다.

$$s_1 = r_g - r_{gd}$$

$$\dot{s}_1 = \omega_p K_I F_s \left(\frac{F_p}{F_s} - \frac{F_p^*}{F_s} \right) - \dot{r}_{gd}$$

따라서 기어비 제어를 위한 축력은 다음과 같이 전개된다.

$$F_p = F_p^* + \frac{1}{\omega_p K_I} (-\lambda_1 (r_g - r_{gd}) + \dot{r}_{gd})$$

3.2 Slip controller

본 연구에 사용한 풀리와 벨트사이의 슬립의 정의는 다음과 같다.

$$v = 1 - \frac{r_s}{r_g}$$

일반적으로 기어비에 따라 풀리와 벨트사이의 slip과 traction coefficient와의 관계는 다음과 같다.

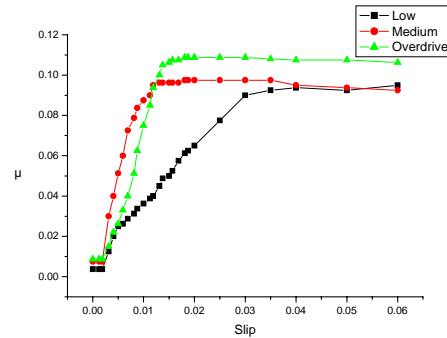


Fig. 5 Traction coefficient(μ) and slip relation at ratio low(0.4), medium(1.1), overdrive(2.26) (B.Bonsen⁹⁾)

슬립의 정의와 앞에서 정의한 variator, driveline의 관계식을 이용하여 slip dynamics를 유도하였다.

$$\dot{v} = -\frac{\dot{r}_s r_g - r_s \dot{r}_g}{r_g^2}$$

\dot{r}_g 은 T. Ide의 모델에 의하여 정의된다. 따라서 슬립 동력학은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{aligned} \dot{v} = & \left[\frac{R_p}{J_c \cos(\alpha)} \frac{2 \min(F_p, F_s) \mu_b}{\omega_p} - \frac{T_c}{J_c \omega_p} - \frac{\omega_p K_f F_s}{r_g} \left(\frac{F_p}{F_s} - \frac{F_p^*}{F_s} \right) \right] v \\ & + \frac{\omega_p K_f F_s}{r_g} \left(\frac{F_p}{F_s} - \frac{F_p^*}{F_s} \right) + \frac{T_c}{J_c \omega_p} - \frac{R_p}{J_c \cos(\alpha)} \frac{2 \min(F_p, F_s) \mu_b}{\omega_p} \\ & - \frac{i_f}{r_g \omega_p (J_{ps} i_f + \frac{(J_{ur} + J_{ds})}{i_f}) \cos(\alpha)} 2 \min(F_p, F_s) R_s \mu_b \\ & + \frac{F_{xr} r_{eff} + R_{xr}}{r_g \omega_p (J_{ps} i_f + \frac{(J_{ur} + J_{ds})}{i_f})} \end{aligned}$$

슬립제어를 위해 비선형제어기법(Sliding Mode Control)을 사용하였다.

$$\begin{aligned} s_2 &= v - v_d \\ \dot{v} &= \dot{v}_d - \lambda_2 (v - v_d) \end{aligned}$$

따라서 슬립제어를 위한 축력은 다음과 같이 전개된다.

$$\begin{aligned} J_a &\equiv \left(J_{ps} i_f + \frac{(J_{ur} + J_{ds})}{i_f} \right) \\ & \left[\frac{R_p}{J_c \cos(\alpha)} \frac{2 \mu_b}{\omega_p} (v - 1) - \frac{2 i_f}{J_c \cos(\alpha)} \frac{R_s \mu_b}{r_g \omega_p} \right] \min(F_p, F_s) \\ &= \dot{v}_d - \lambda_2 (v - v_d) + \left(\frac{T_c}{J_c \omega_p} + \frac{\omega_p K_f F_s}{r_g} (F_p - F_p^*) \right) (v - 1) \\ & \quad - \frac{F_{xr} r_{eff} + R_{xr}}{r_g \omega_p J_a} \end{aligned}$$

4. Simulink Simulation Model

Simulation을 위한 simulink model의 개략적인 그림은 다음과 같다.

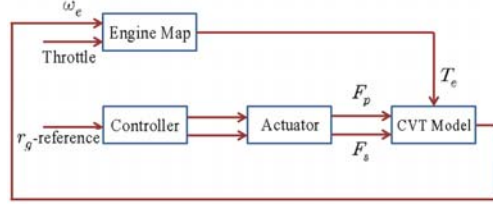


Fig. 6 Simulation model outline

Simulation은 다음과 같은 방법으로 진행되었다. Engine map 입력 throttle은 30deg로 고정시킨 다음 reference 기어비(r_g -desired)를 controller에 입력하여 CVT 모델의 출력기어비와 슬립이 동시에 제어되는지 확인하였다. Reference 슬립(slip-desired)은 각 기어비에서 최대 traction coefficient를 보여주는 값으로 설정하였다.

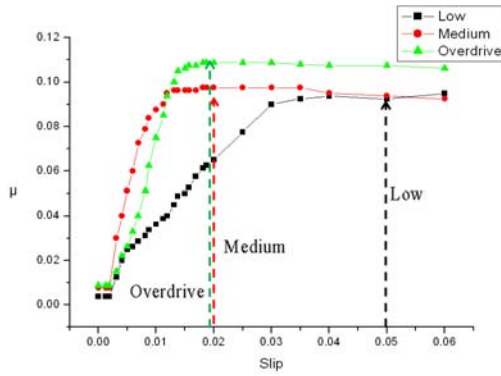


Fig.7 Slip-desired at each gear ratio

5. Simulation Results

여러 형태의 reference 기어비를 입력하였을 때 CVT 모델의 기어비와 슬립이 동시에 제어되는지 확인하였다. 슬립의 초기값은 0으로 가정하였고, 기어비의 초기값은 r_g 의 최소값 0.426에서 시작하여 Low를 거쳐 Overdrive까지 변화시켰다. Simulation 결과는 다음 그래프와 같다.

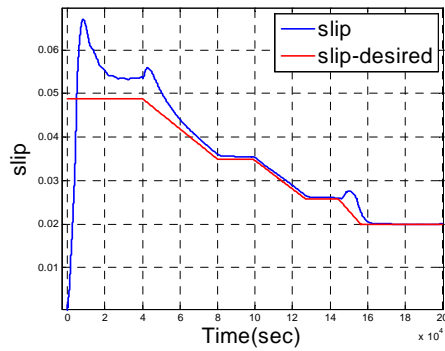
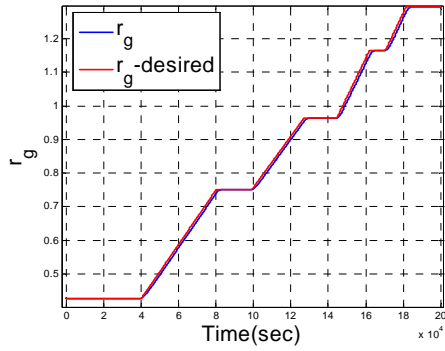


Fig. 8 r_g and slip simulation results

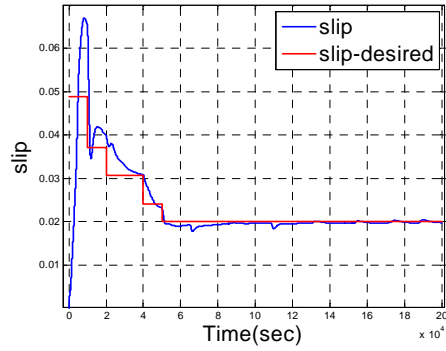
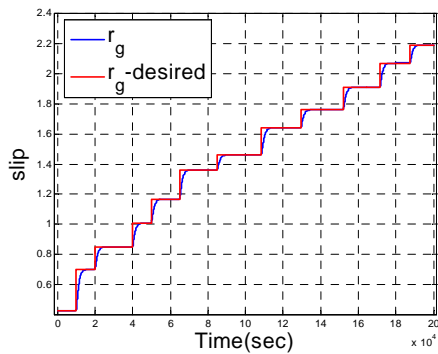


Fig. 9 r_g and slip simulation results

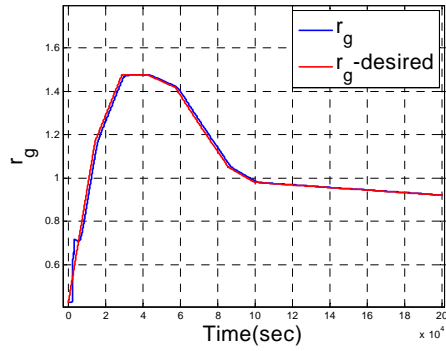
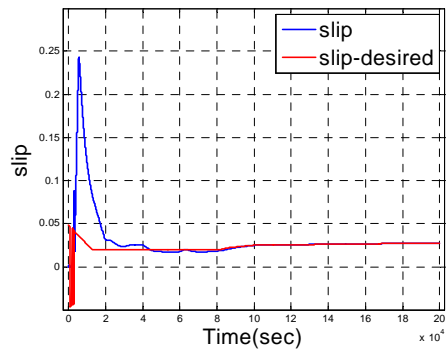


Fig.10 r_g and slip simulation results



4. 결론

본 연구에서는 Matlab(Simulink)을 이용하여 CVT 모델을 완성하고 비선형 제어기법을 이용하여 풀리와 벨트 사이의 슬립과 기어비를 동시 제어하였다. 기존의 변속기에 비하여 뛰어난 성능을 보여주는 CVT의 특성을 완벽히 실현하기 위해서는 정확한 제어가 선결

과제라고 할 수 있다. 이에 본 연구를 통하여 CVT 제어를 위한 기초토대를 마련하였다고 할 수 있을 것이다. 본 연구를 통하여 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 엔진, CVT, driveline, wheel dynamics를 하나의 통합된 simulink model로 구현하였다.
- 2) CVT slip dynamics와 gear ratio dynamics에 대한 통합된 dynamics에 기초하여 simulink model을 설계하였다.
- 3) Sliding mode controller를 설계하고 CVT model의 슬립과 기어비를 동시 제어하였고 simulation 결과를 통해 검증하였다.

References

- 1) D.Cho, J. K. Hedrick "Automotive Powertrain Modeling for Control"
- 2) Tohru IDE, Hirokazu UCHIYAMA, Ryuji KATAOKA "Experimental Investigation on Shift Speed Characteristics of a Metal V-Belt CVT"
- 3) Daisuke Kobayashi, Yutaka Mabuchi and Yoshiaki Katoh "A Study on the Torque Capacity of a Metal Pushing V-Belt for CVTs", SAE transactions, Vol. 107, pp. 1232~1240, 1998
- 4) G.Carbone, L.Mangialardi, G. Mantriota "Theoretical Model of Metal V-Belt Drives During Rapid Ratio Changing", Journal of Mechanical Design, ASME, Vol. 123, MARCH 2001
- 5) G.Carbone, L.Mangialardi, G. Mantriota "Influence of Clearance Between Plates in Metal Pushinf V-Belt Dynamics", Journal of Mechanical Design, ASME, Vol. 124, SEPTEMBER 2002
- 6) G.Carbone, L.Mangialardi, G. Mantriota "The Influence of Pulley Deformations on the Shifting Mechanism of Metal Belt CVT"Journal of Mechanical Design, ASME, Vol. 127, JANUARY 2005
- 7) D.H. Choi, H.S.Kim "Analysis of Ratio Changing Characteristics of a Metal V-Belt CVT Adopting Primary Pressure Regulation" Transactions of KSAE, Vol.9, No.5, pp.179~187, 2001
- 8) Sharon Liu, Brad Paden "A Survey of Today's CVT Controls"Proceedings of the 36th IEEE Conference on, 4738~4743, 1997
- 9) B.Bonsen, T.W.G.L. Klaassen, K.G.O. van de Meerakker, M.Steinbuch and P.A.Veenhuizen "Analysis of Slip in a Continuously Variable Transmission"Proceedings of IMECE'03 2003 ASME International Mechanical Engineering Congress
- 10) B.Bonsen, R.J.Pulles, S.W.H. Simons, M. Steinbuch and P.A. Veehuizen, "Implementation of a slip controlled CVT in a production vehicle"Proceedings of the 2005 IEEE Conference on control Application. Toronto, Canada, August 28~31, 2005
- 11) G.Carbone, L.Mangialardi, P.A. Veehuizen "Dynamics of CVTs : A Comparison between theory and experiments" 12th IFToMM World Congress, Besancon(France), June 18-21, 2007