

고무 벨트식 무단변속기 시스템의 성능분석

김성모*, 정춘화⁺, 임원식⁺⁺, 차석원⁺⁺⁺

(논문접수일 2011. 06. 21, 수정일 2011. 08. 04, 심사완료일 2011. 08. 09)

Performance Analysis of the Rubber Belt type CVT System

Sungmo Kim*, Chunhua Zheng⁺, Wonsik Lim⁺⁺, Suk-won Cha⁺⁺⁺

Abstract

CVT(Continuously Variable Transmission) is one of the most promising candidates for the future automobile transmission because of its continuously variable gear ratio and reduced shift shock. It is also possible to operate the power source at its high efficiency region with CVT. The CVT system consists of thrust plate, driving pulley, belt, driven pulley, and preload spring of output shaft. In this paper, the dynamic modeling of a CVT system is completed to obtain the static performances of CVT system. A simulator is implemented on Matlab(Simulink), which can analyse the static performances of a CVT system. The methods for improving the total efficiency of a motorcycle system are also proposed based on the simulation results. In this study we increase the capacity factor of CVT up to the three times of default specification.

Key Words : CVT(무단변속기), Dynamic modeling(동적 모델링), Static performance(정적 성능), Simulation(시뮬레이션), Torque capacity factor(용량계수)

1. 서론

자동차용 무단변속기는 주어진 변속 범위 내에서 연속적인 변속이 가능하여 차량의 동력원을 최적으로 운전시킬 수 있어 연료효율과 동력성능 측면에서 기존의 변속기에 비해 높은 성능을 보여준다. 또한 변속 시 변속충격이 없다는 장점으로 운전자에게 안락한 감을 제공한다^(1,2).

스틸벨트 CVT는 고용량이며 습식타입으로 자동차에 적용되고, 고무벨트 CVT는 저용량이며 건식타입으로 이륜자동차에 적용된다. 스틸벨트 CVT는 복잡한 유압시스템으로 되어있으며 벨트소음에 단점이 있고, 고무벨트 CVT는 전기모터기구를 사용하여 비교적 구조가 간단하며, 저용량인 단점이 있다.

본 연구에서는 이륜차에 장착된 가솔린 엔진 대신 전기구동 모터를 장착하고, 스틸벨트 대신 고무벨트를 적용한 이륜차용 CVT 시스템 개발을 목적으로 하였다. 기존 가솔린 엔진 대신 전기 모터를 적용하였을 때 성능 예측방법을 제안하고, 구동원에 걸리는 부하토크의 증대 방법을 제안하였고, 구동원에 걸리는 부하토크의 증대 방법을 제안하였으며, 고무벨트의 설계를 위한 상세한 성능 모델을 구축하였다. 오토바이용 고무벨트식 CVT에 대한 동적 모델링을 진행한 다음 그로부터 정적 모델링을 얻었고, Matlab(Simulink)를 사용하여 정적 성능을 분석할 수 있는 CVT 시뮬레이터를 개발하였으며, 시뮬레이션 결과로부터 전반적으로 이륜차 시스템의 효율을 높일 수 있는 방법을 제시하였다.

* 서울과학기술대학교 나노 IT 메카트로닉스과
+ 서울대학교 기계항공 공학부
++ 교신저자, 서울과학기술대학교 자동차공학과 (limws@snut.ac.kr)
주소:139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
+++ 서울대학교 기계항공 공학부

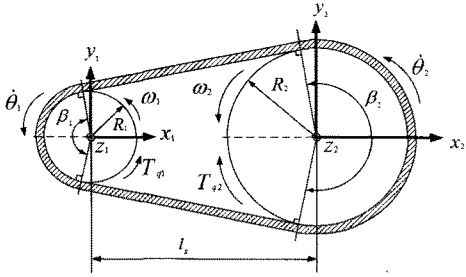


Fig. 1 Schematic diagram of the belt and pulley

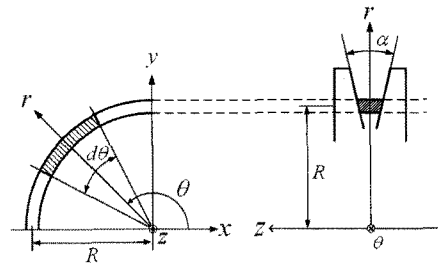


Fig. 3 Schematic diagram of the belt element

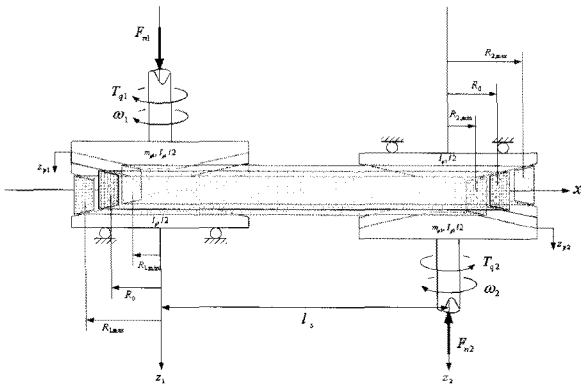


Fig. 2 Schematic diagram of the CVT system

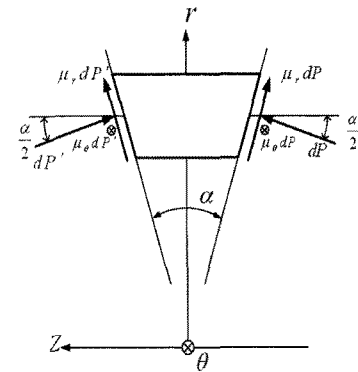


Fig. 4 Schematic diagram of the cross section

2. CVT 시스템의 동적 모델링

고무 벨트식 CVT 시스템은 기본적으로 스러스트 구동 풀리, 고무벨트, 종동 풀리, 출력축의 예하중 스프링 장치 등으로 이루어졌다^(3,4). 본 장에서는 이런 부분들에 대해 동적 모델링을 수행하여 정적 모델링을 할 수 있는 기초를 마련하였으며 CVT의 성능을 분석할 수 있도록 하였다. Fig. 1과 Fig. 2는 CVT의 전체 작동 상태를 보여주고 있으며 또한 성능 변수들 및 파라미터들을 정의하고 있다. 여기서, R은 반경, ω_1 은 구동풀리 회전속도, ω_2 는 종동풀리 회전속도, $\dot{\theta}_1$ 은 구동풀리의 벨트접촉부 속도, $\dot{\theta}_2$ 는 종동풀리의 벨트접촉부 속도, Fn은 추력을 나타낸다. 각 풀리의 플랜지중 하나는 축방향으로 움직이고, 벨트는 풀리의 플랜지에 작용하는 부하 조건 및 축력에 의존하고 있는 회전반경과 접선방향에 의해 영향을 받는다. 토크는 벨트와 풀리 사이의 마찰력에 의해 구동풀리에서 종동풀리로 전달된다.

2.1 벨트의 장력

우선 벨트의 장력에 관한 운동방정식을 유도하기 위하여 Fig. 3, Fig. 4, Fig. 5에서와 같이 벨트의 미소 질량 요소를 고려함으로써 얻을 수 있다. 벨트는 회전반경과 접선의 방향 양쪽으로 움직일 수 있다. 따라서 두 개의 마찰계수인 μ_r , μ_θ 는 두 개의 방향계수로 고려된다.

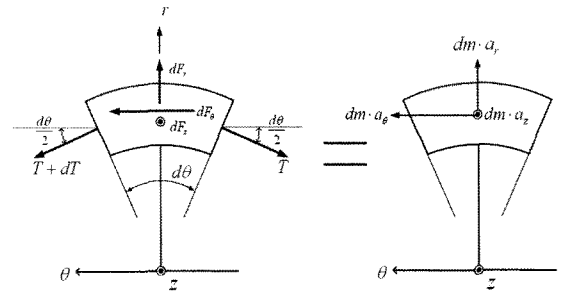


Fig. 5 Schematic diagram of the dynamic equation

두 개의 플랜지(flange)에서 벨트 미소질량의 2개 측면에 적용되는 힘은 각각 dp와 dp'로 표현된다. 그리고 두 개의 단면에 작용하는 장력은 각각 T와 T+dT로 표현된다.

위의 그림을 참조하여 미소 벨트 요소의 운동방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$dF_r = (dP + dP') \sin \frac{\alpha}{2} + \mu_r (dP + dP') \cos \frac{\alpha}{2} \quad (1)$$

$$dF_z = (dP - dP') \cos \frac{\alpha}{2} - \mu_r (dP - dP') \sin \frac{\alpha}{2} \quad (2)$$

$$dF_\theta = \mu_\theta (dP + dP') \quad (3)$$

벨트의 미소 질량은 다음과 같이 표현할 수 있으며, 고무 벨트 미소 질량의 세 방향 가속도와 질량은 아래와 같이 표현할 수 있다. 여기서, ρ 는 고무 벨트의 밀도, A_b 는 고무 벨트의 단면적을 나타낸다.

$$dm = \rho A_b R d\theta \quad (4)$$

$$\begin{aligned} a_r &= \ddot{R} - R\dot{\theta}^2 \\ a_\theta &= R\ddot{\theta} + 2\dot{R}\dot{\theta} \\ a_z &= \ddot{Z}_b \end{aligned} \quad (5)$$

식을 단순화 하기 위하여 두 개의 파라미터를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} C_s &= \sin \frac{\alpha}{2} + \mu_\gamma \cos \frac{\alpha}{2} \\ C_c &= \cos \frac{\alpha}{2} - \mu_\gamma \sin \frac{\alpha}{2} \end{aligned} \quad (6)$$

위의 식들을 이용하여 장력에 대한 식을 정리하면 다음과 같은 미분방정식을 얻을 수 있다.

$$\frac{dT}{d\theta} + \frac{\mu_\theta}{c_s} T = \left(a_\theta - \frac{\mu_\theta}{c_s} a_r \right) \rho A_b R \quad (7)$$

위 미분방정식이 적용되는 영역에서 C_s , μ_θ , μ_γ , a_θ , a_r , R 등이 상수라고 가정할 때 식 (7)의 해는 다음과 같다.

$$T = c_T e^{(-\mu_\theta/c_s)\theta} + \left(\frac{c_s}{\mu_\theta} a_\theta - a_r \right) \rho A_b R \quad (8)$$

2.2 구동 및 증동 풀리의 운동방정식

이 부분에서는 CVT 시스템의 구동과 증동 풀리에 대한 운동방정식을 구성하기로 한다. Fig. 6은 풀리와 벨트 사이에 작용하는 힘을 설명한 것이다. 여기서, 축방향과 회전하고 있는 두 개 풀리 사이의 운동방정식은 (9), (10), (11), (12)과 같이 얻을 수 있다. 여기서, 1과 2는 각각 입력축과 출력축을 나타낸다.

$$I_{p1}\dot{\omega}_1 = T_{q1} - \mu_{\theta 1} R_1 \int_{R_1} (dP + dP') \quad (9)$$

$$I_{p2}\dot{\omega}_2 = -T_{q2} - \mu_{\theta 2} R_2 \int_{R_2} (dP + dP') \quad (10)$$

$$m_{p1}\ddot{z}_{p1} = F_{n1} - \int_{R_1} \left(\cos \frac{\alpha}{2} - \mu_r \sin \frac{\alpha}{2} \right) dP \quad (11)$$

$$m_{p2}\ddot{z}_{p2} = -F_{n2} + \int_{R_2} \left(\cos \frac{\alpha}{2} - \mu_r \sin \frac{\alpha}{2} \right) dP' \quad (12)$$

다음으로는 두 풀리 시스템의 연결 상태에 대해 고려한다. Fig. 7에서 전체 벨트의 길이를 l_b 라고 할 때 아래와 같은 관계식들을 구할 수 있다. 여기서, I_p 는 풀리의 관성, T_q 는 축에 작용하는 토크, m_p 는 가동 플랜지의 질량, \ddot{Z}_b 는 축의 이동을 나타낸다.

$$l_b = R_1\beta_1 + R_2\beta_2 + 2l_s \cos \gamma \quad (13)$$

$$\beta_1 = \pi - 2\gamma \quad (14)$$

$$\beta_2 = \pi + 2\gamma \quad (15)$$

$$\sin \gamma = \frac{R_2 - R_1}{l_s} \quad (16)$$

위의 식들을 반경 R_1 , R_2 에 대해 정리하면 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$R_1 = \frac{1}{2\pi} \left(l_b - (2\gamma + \pi) l_s \sin \gamma - 2l_s \cos \gamma \right) \quad (17)$$

$$R_2 = \frac{1}{2\pi} \left(l_b - (2\gamma - \pi) l_s \sin \gamma - 2l_s \cos \gamma \right) \quad (18)$$

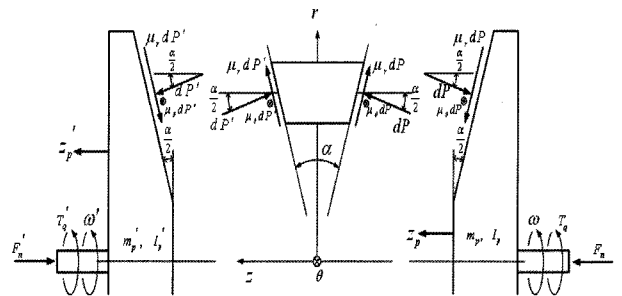


Fig. 6 Schematic diagram of forces between the belt and pulley

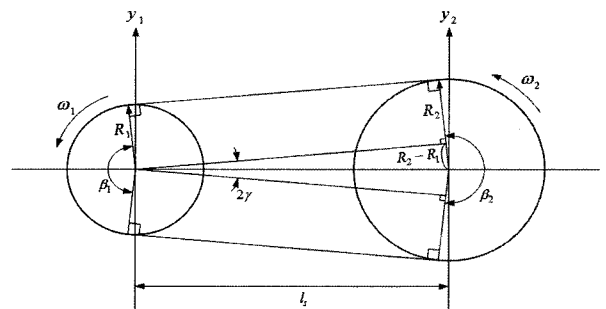


Fig. 7 Kinematic relation of the belt and pulley

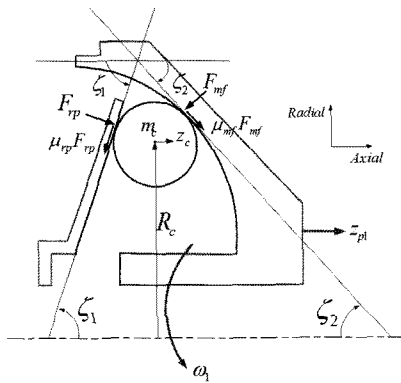


Fig. 8 Schematic diagram of thrust actuator of driver shaft

2.3 구동 풀리의 스러스트 하중

이 부분에서는 구동축 스러스트 하중에 대해서 고찰한다. Fig. 8에서와 같이 스러스트 액추에이터의 풀리의 운동은 Ramp plate와 Movable flange의 형상에 의해 구속된다. 기하학적 관계에 의해 다음과 같은 식이 성립된다.

$$z_{pi} = f(z_c, R_c) = f(z_c(R_c), R_c) = f(R_c) \quad (19)$$

구동축의 풀리를 축방향으로 미는 스러스트 하중은 다음과 같이 결정된다. Z_{roller} 는 풀리의 개수이다.

$$F_{n1} = Z_{roller} F_{mf} \sin \xi_2 \quad (20)$$

$$\xi_2 = f(z_c, R_c) = f(z_c(R_c), R_c) = f(R_c) \quad (21)$$

또한 종동축 스러스트는 예하중을 주는 스프링에 의해 결정된다.

$$F_{n2} = k_2 z_{p2} + c_2 \dot{z}_{p2} + F_{n2,preload} \quad (22)$$

풀리의 축방향과 반경방향의 운동이 등속일 때 풀리의 운동 방정식에서 F_{n1} 은 다음과 같이 정리된다.

$$F_{n1} = Z_{roller} F_{mf} \sin \xi_2 = Z_{roller} \frac{m_c R_c \omega_1^2}{\cot \xi_1 + \cot \xi_2} \quad (23)$$

3. Matlab(Simulink)를 이용한 CVT 정적 성능 분석 시뮬레이터 및 결과 분석

2장에서 고려한 CVT 시스템의 운동방정식을 등속 상태에 대해 정리한 다음 각 변수들과 파라미터들 사이의 관계에 의해 Matlab(Simulink)를 사용하여 CVT 시스템의 정적 성능 시뮬

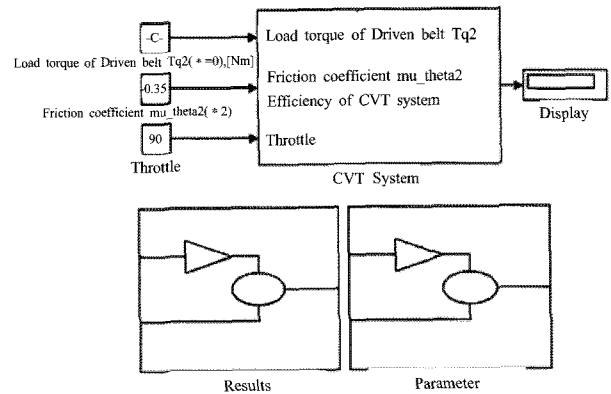


Fig. 9 Steady state performance simulator of CVT

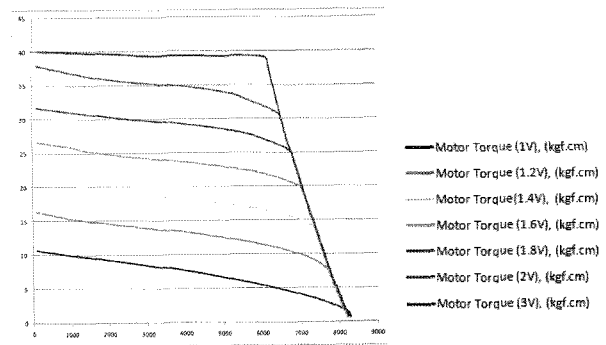


Fig. 10 Characteristics of power source

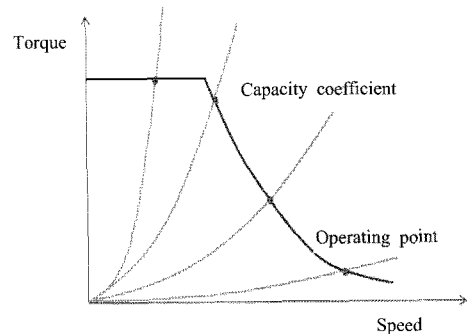


Fig. 11 Determination of the motor operating point

레이터를 개발하였다. Fig. 9는 개발된 시뮬레이터를 보여주고 있다. CVT 시스템의 정적효율을 얻기 위해 우리는 정속조건하에 앞 부분에 나타난 방정식들을 재고해야한다. 변수 $l_s, l_b, R_o, R_{1,min}, R_{1,max}, R_{2,min}, R_{2,max}, \alpha_1, \alpha_2, k_2, F_{n2,preload}, Z_{roller}, m_c, \xi_1$ 는 앞 부분에 나타난 운동방정식의 계수를 결정하기 위해 구체적인 CVT 시스템을 측정할 수 있다.

시뮬레이션에 사용된 동력원의 특성은 Fig. 10에서 보여주고 있다.

Fig. 11에서는 CVT의 용량계수에 의해 동력원의 작동점이 결정되는 원리를 보여주고 있다. CVT의 용량계수(입력토크

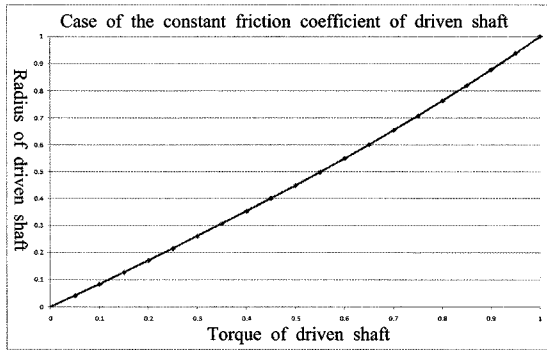


Fig. 12 Driven pulley radius versus driven pulley torque

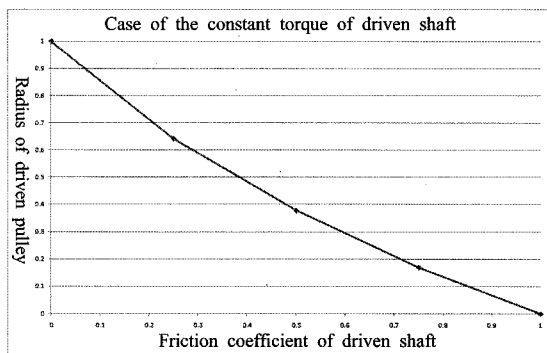


Fig. 13 Driven pulley radius versus friction coefficient between driven pulley and belt

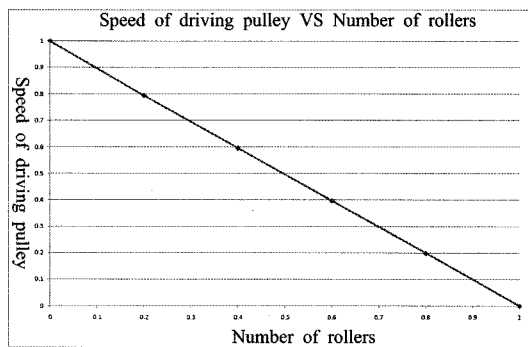


Fig. 14 Driving pulley speed versus the number of rollers

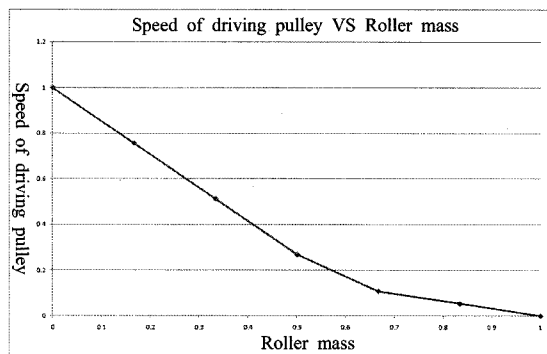


Fig. 15 Driving pulley speed versus the mass of roller

Nm/입력속도 rpm²)는 매우 중요한 개념으로 차량 시스템의 CVT와 동력원의 매칭에 있어서 매우 중요한 역할을 한다. 특히 차량 출발 시에는 큰 용량계수가 선정되게 하여 충분한 토크가 나올 수 있게 해야 한다. 본 연구에서는 전기모터 구동 시스템을 구현하기 위하여 용량계수를 3배로 올렸다.

개발된 시뮬레이터를 이용하여 CVT의 성능에 대해서 분석을 진행하였다. Fig. 12는 종동축 풀리와 벨트사이의 마찰계수가 일정할 때 종동축 토크와 종동 풀리 반경의 관계를 무차원화한 것이다. 그림에서 볼 수 있듯이 토크가 커질수록 반경도 따라서 커지는 추세를 보인다.

Fig. 13은 종동축 토크가 일정할 때 종동축 마찰계수와 종동 풀리 반경의 관계를 무차원화 한 것이다. 그림을 관찰해 보면 마찰계수가 커짐에 따라 반경은 작아지는 추세이다.

Fig. 14는 스러스트 구동 풀리의 롤러 개수와 구동 풀리의 속도사이의 관계를 보여주고 있다. x, y축은 모두 백분율을 나타낸다. 그림에서 볼 수 있듯이 롤러 개수가 많아짐에 따라 구동 풀리의 속도는 작아진다. Fig. 15는 스러스트 구동 풀리의 롤러 질량과 구동 풀리 속도사이의 관계를 보여준다. x, y축은 모두 백분율을 나타낸다. 롤러 질량이 증가할수록 구동축의 속도가 낮아지는 것을 확인할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 전기모터를 동력원으로 한 고무벨트 형식의 CVT 오토바이 차량에서 동력원과 CVT의 매칭효과를 극대화하여 전체 시스템의 효율을 높이기 위해 수행되었다. 우선 CVT 시스템의 동적 모델링을 수행하여 CVT의 정적 성능을 분석할 수 있는 기초를 마련하였으며 또한 Matlab을 사용하여 정적 성능을 분석할 수 있는 시뮬레이터를 개발하였다.

- (1) CVT의 구성 부분인 스러스트 구동 풀리, 벨트, 종동풀리와 출력축의 예하중 스프링 장치 등에 대한 동적 모델링을 수행하였으며 각 부분의 동적 상태방정식을 얻었다.
- (2) 동적 모델링을 기초로 하여 정적 상태를 분석하였으며 Matlab(Simulink)를 사용하여 정적 성능 분석 시뮬레이터를 개발하였다.
- (3) CVT 시스템의 용량계수는 동력원과 CVT의 매칭에 있어서 매우 중요한 개념으로서 부동한 용량계수에 의해 부동한 매칭 효과가 나타난다.
- (4) 정적 성능 시뮬레이터의 시뮬레이션 결과에 따르면 종동 풀리와 벨트사이의 마찰계수가 일정할 때 종동축 토크가 커질수록 종동 풀리 반경도 따라서 커지고 종동축 토크가 일정할 때 종동 풀리와 벨트사이의 마찰계수가 커짐에 따라 종동 풀리 반경은 작아지며 구동축 스러스트 풀리의 롤

러 개수가 많아지거나 롤러의 질량이 증가할수록 구동축의 속도는 낮아지는데 이는 용량계수가 커졌기 때문이다.

참 고 문 헌

- (1) Kim, K. H., and Choi, S. B., 2007, "Continuously Variable Transmission Slip and Gear Ratio Simultaneous Control Using Sliding Mode Control," *2007 Fall Conference Proceedings of the KSAE*, pp. 988~993.
- (2) Kim, H. S., Lee, H. R., Yoo, T. Y., Song, H. L., and Kim, H. S., 2000, "Analysis of Dry CVT System," *2000 Fall Conference Proceedings of the KSAE*, pp. 691~696.
- (3) Cho, Y. H., and Kim, Y. H., 1997, "A Study on the Optimal Operating Line of Continuously Variable Transmission," *1997 Spring Conference Proceedings of the KSAE*, pp. 473~478.
- (4) Srivastava, and Nilabh, 2005, "On the Transient Dynamics of a Metal Pushing V-belt CVT at High Speeds," *International Journal of Vehicle Design*, Vol. 37, No. 1, pp. 46~66.
- (5) Jeong, S. H., and Park, J. W., 2008, "Rotor Dynamics Analysis According to Positions of Components in High Speed Rotor," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference 2008*, pp. 381~386.
- (6) Hong, S. W., and Choi, S. H., 2006, "An Improved Dynamic Model for Multi-stepped Rotor System," No. 2, *Proceedings of the KSMTE Fall Conference 2006*, pp. 107~113.
- (7) Kim, k. k., Kim, J. S., and Kang, M. C., 2007, "Studies On Improvement in the Coefficient of Friction on Oil Seal Rubber by Ion Implantation," *Proceedings of the KSMTE Fall Conference 2007*, pp. 166~171.