

내구면 접촉식 무단변속장치 개발

이 형 우†

(원고접수일 : 2006년 10월 18일, 심사완료일 : 2006년 11월 23일)

Development of the Inner Spherical Traction Continuously Variable Transmission

Hyoung-Woo Lee†

Abstract : A new CVT, the inner spherical traction CVT (ISCVT) is introduced. Transmission of the most scooters is the self-controlled variable pulley-belt type of CVT having some disadvantages in the fuel consumption and the limitation of the transmittable power due to the slippage between the belt and pulley. Unlike this, ISCVT controlled directly by driver is more efficient and the contact mechanism having the same line of contact normal of the spherical rotors of different radii on common center causes that the power density and torque capacity are remarkably improved. The prototype with the specifications of 50cc scooter is designed and tested.

Key words : Traction(트랙션), CVT(무단변속기), ISCVT(내구면 무단변속기), Transmission(변속기), Herzian contact(헤르쯔 접촉), EHL(탄성유체윤활)

1. 서 론

‘스쿠터’는 한 사람 또는 두 사람을 태울 수 있는 두 개의 작은 바퀴가 달린 소형차량으로, 동력의 측면에서 자전거와 오토바이의 중간에 해당하는 간편한 교통수단이다. 90년대 이후 국내의 이륜차 수요는 지속적인 감소추세이나 전체 아시아지역에서의 스쿠터 수요는 매년 18% 증가하고 있으며 최근 중국의 수요증가는 연간 30%에 이른다. 도심의 인구밀집도가 유럽/미주에 비해 평균 3~5배 높은 대부분의 아시아 국가에서 스쿠터는 전체 차량의 절반이상의 비중을 차지하고 있다. 이러한 스쿠터의

변속장치로는 가변 풀리-벨트 방식의 CVT가 사용되고 있으나 상대적으로 변속비 범위가 좁고, 풀리와 벨트 사이의 슬립으로 큰 토크를 전달할 수 없는 구조적인 한계를 가지고 있어, 증대되는 고성능에 대한 운전자의 요구와 다양한 주행조건에서의 엔진 운전 최적화를 만족시키기 어렵다. 특히 스쿠터의 동력원으로 주로 사용되는 2행정 내연기관은 오염물질의 배출에 취약하여, 차세대 스쿠터는 친환경 기술이 적용된 엔진을 장착하거나 전동모터를 동력원으로 사용하고 있으며 동력 낭비를 최소화시킬 수 있는 고성능 변속기 기술을 필요로 한다. 변속장치에 대한 연구는 다음과 같다. Palmer^[1],

† 책임저자(부산대학교 기계기술연구소), E-mail: leehwoo@gmail.com, Tel: 051) 510-1475

Ferrando⁽²⁾는 고무 V-벨트식 무단 변속기구의 성능에 대한 실험적 연구를 수행하였다. Bents⁽³⁾는 고무 V-벨트식 무단 변속기에서 속도비, 회전속도, 부하의 크기에 따라 가변폴리에 작용하는 출력과 토크의 상호작용, 무단 변속기구 효율과의 관계를 실험적으로 연구하였다. Nuti⁽⁴⁾는 고무 V-벨트를 사용하고 원심력을 이용하여 가변 폴리의 회전반경을 제어하는 모터사이클용 무단 변속기를 개발하였다. Chen⁽⁵⁾은 모터사이클에 사용되는 V-벨트식 무단변속기에 대해 수학적 모델링과 실험적 연구를 수행하였고, 속도손실과 토크손실을 실험적으로 분석하였다. 그결과 속도손실과 효율은 외부의 부하량과 크기에 비례하고 토크손실은 부하량의 크기에 반비례하였다. Kim⁽⁶⁾은 V-벨트 방식 무단 변속기구에 대한 변속비-부하토크-축력특성에 제한 이론해석과 실험적 연구를 수행하였다. 금속벨트는 고무벨트의 6-7배 토크전달 능력이 크지만 3-4배 축력이 요구된다는 결과를 얻었다. Lee⁽⁷⁾는 이륜 자동차 무단변속기 성능향상에 관한 연구를 수행하였다. V-벨트식 무단변속기는 구조가 단순하고 소형 경량인 반면 자동변속에 대한 편의성 등의 장점 때문에 스쿠터에 사용되고 있으나, 상대적으로 변속비 범위가 좁고, 폴리와 벨트사이의 슬립으로 큰 토크를 전달할 수 없는 구조적인 한계를 가지고 있으며, 특히 변속이 단지 엔진속도 변화에 따라 이루어지므로 운전자가 원하는 토크 제어가 어렵다.

본 연구에서는 구체의 내면과 외면의 접촉을 통해 동력을 전달하는 트랙션방식의 내구면 무단변속기(ISCVT: Inner Spherical Continuously Variable Transmission)를 개발하여 스쿠터용 변속기에 적용하였다. 일반적인 트랙션 드라이브의 트라이블로지 특성을 기초로 한 모델로부터 설계 최적화 기법을 통하여 프로토타입을 제작하고 성능 해석과 벤치테스트를 수행하였고 실용화의 타당성을 검토 하였다.

2. 내구면 무단변속기 설계

2.1 구조와 작동원리

ISCVT는 Fig. 1에 구조가 나타난 바와 같이 동

력의 흐름에 따라 왼쪽부터 오른쪽으로 구동부 가압장치(Pressure Device), 구동로터(Driving Rotor), 4개의 카운터 로터(Counter Rotor)와 카운터 로터 프레임(Counter Rotor Frame), 변속비 조정장치(Ratio Changer), 종동로터(Driven Rotor), 종동부 가압장치(Pressure Device)로 구성되어 있다. 카운터 로터 프레임은 4개의 카운터 로터와 변속비 조정장치를 고정시킨 조립체로 변속기 케이스에 고정되어 있다. 따라서 카운터 로터의 위치는 고정되어 있고, 양 끝단의 가압장치에 의해 구동로터와 종동로터가 중앙의 카운터 로터에 밀착 된다.

여기서 구동로터와 종동로터의 형상은 온전한 구체이고 구름 접촉되는 일부분만 사용되고 있다. 4개의 카운터 로터도 구름 접촉으로 사용되는 부분만 가공되어 있고 양쪽 곡면을 연결하면 온전한 작은 구체가 된다.

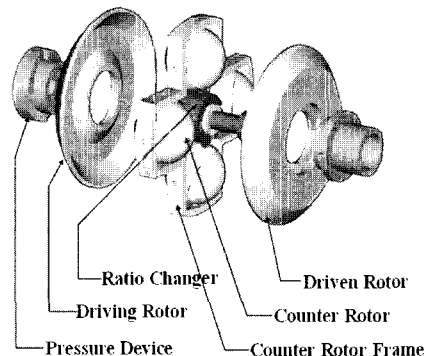


Fig. 1 Structure of ISCVT

구동로터로 입력되는 토크가 카운터 로터를 거쳐 종동로터로 전달되는 작동은 Fig. 2(a)에 나타나 있다. 구동로터로 입력된 동력은 4개의 카운터 로터에 의해 균등하게 나뉘어 종동로터로 전달된다. 이때 Fig. 2(b)와 같이 카운터 로터의 자세를 조정함에 따라 구름 접촉점에서의 회전반경이 변화하게 되어 변속이 이루어진다. 축 중심부의 변속비 조정장치와 4개의 카운터 로터는 축방향 캠-종동자(axial cam-follower)장치로 변속비 조정장치의 회전 각변위에 따라 4개의 카운터 로터의 자세가 동기되어 조정된다. 변속비 조정장치의 캠 트

력은 변속기의 사양에 따른 변속비 범위를 낼 수 있도록 설계된다. 스쿠터에 장착된 드라이브 라인은 Fig. 3에 나타나 있다. 스쿠터의 엔진으로부터 발생한 동력은 ISCVT를 통과하면서 변속이 되고 벨트를 통해 뒷바퀴 축으로 전달되어 최종 감속단을 거치게 된다. 이때, 외부로 통한 변속비 조정장치가 운전자의 조작으로 작동된다.

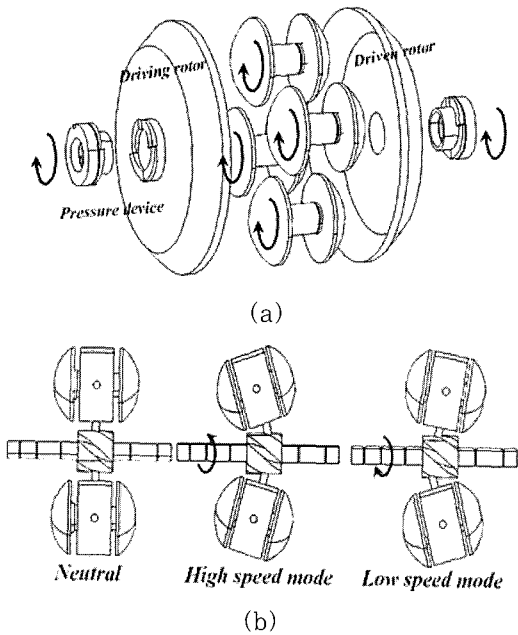


Fig. 2 Operating principle of ISCVT

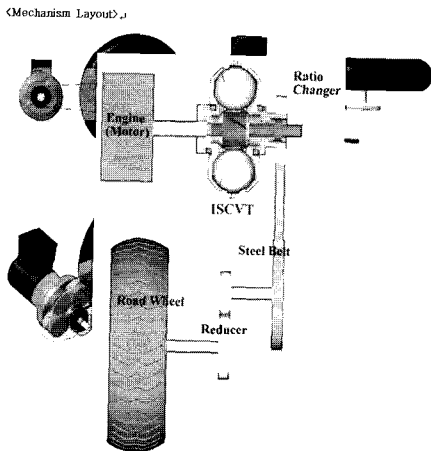


Fig. 3 Driver line Layout

2.2 변속비

ISCVT의 변속비를 결정하는 주요치수는 Fig. 4와 같다. 카운터 로터의 구체 중심은 O_ϕ , 구동로터, 종동로터의 구체중심은 각각 O_1, O_2 , 접촉점은 각각 Q_1, Q_2 이다. 배치와 형상은 좌우 대칭으로 구성되어 있고, 특히 구동로터와 종동로터의 구체반경 $\overline{O_1Q_1}, \overline{O_2Q_2}$ 의 교차점에 카운터 로터의 구체 중심 O_ϕ 가 고정되어 있다. 구동로터와 카운터 로터가 서로 구름 접촉을 하고 있는 동안 카운터 로터의 자세가 변화되면 접촉점 Q_1 에 대한 구동로터의 회전반경 h_1 은 고정인 반면에 동일 접촉점에 대한 카운터 로터의 회전반경 h_2 는 자세각 ϕ 에 따라 변화하게 되고 변속이 이루어진다. 이는 본 ISCVT의 특성으로 구동로터의 회전반경과 카운터 로터의 회전반경이 동시에 변화되는 여타의 트랙션 CVT에 비해 안정적인 변속성능을 얻을 수 있는 큰 잇점이 있다. 종동로터 축과의 접촉 Q_2 에서도 동일한 원리가 마찬가지로 적용된다. 카운터 로터의 자세가 ϕ 만큼 변화될 때 변속비 ρ 는

$$\rho = h_3 / h_2 \tag{1}$$

여기서, $h_2 = f_1(\phi), h_3 = f_2(\phi)$

로 쓸 수 있고, f_1, f_2 는 설계 치수와 슬립을 고려한 트라이볼로지 특성에 의해 결정된다.

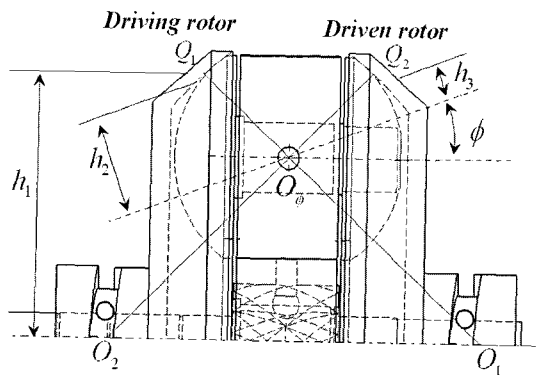


Fig. 4. Kinematical Layout of ISCVT

2.3 가압장치

트랙션 CVT의 접촉점에서 동력이 전달되기 위해서는 미끄럼이 일어나지 않고 전달되는 동력의 크기를 감당할 수직력이 필요하다. 본 ISCVT에 사용된 가압장치는 경사면을 구르는 강철구에 의한 토크캠에 의해서 수직력을 발생시킨다. 여기서는 4개의 강철구를 사용하였고, 구조는 Fig. 5에 나타나 있다. 입력 토크 T_1 에 따른 추력 F_{th} , 구동로터와 카운터 로터의 접촉점에서의 수직력 N_1 은 다음 식과 같이 쓸 수 있다.

$$F_t = \frac{T_1}{r_i} \tag{2}$$

$$F_{th} = \frac{F_t}{\tan \lambda} = \frac{T_1}{r_i \tan \lambda} \tag{3}$$

$$N_1 = \frac{F_{th}}{\cos \theta_1} = \frac{T_1}{r_i \cos \theta_1} \tag{4}$$

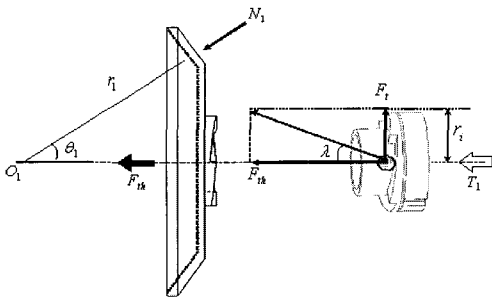


Fig. 5 Pressure device of ISCVT

본 연구의 ISCVT의 사양은 Table 1과 같다.

Table 1 Specification of the ISCVT

Engine, cc	50
Max. power, W	3,000
Max. torque, Nm	8.2
Rated torque, Nm	6
Max. speed, rpm	7,000
Rated speed, rpm	5,000
Speed ratio range	0.06 ~ 0.18
Gear reducer	9.625 : 1
Number of counter rotor	4

Material	AISI4140
Size, mm	Φ 127 64
Weight, kg	13
Traction Fluid	Santotrac50

즉, 구름 접촉점에서의 수직력 N_1 은 입력토크 T_1 에 비례하여 발생하게 되고, 경사면의 각 λ 는 이송과 관련한 설계변수로 결정되고 강철구는 추력 F_{th} 에 의해 선택된다.

3. 프로타입의 성능 특성

일반적인 트랙션 드라이브의 해석은 접촉에서의 EHL 거동과 메커니즘에 종속된 스핀효과, 트랙션 유체의 윤활 특성을 동시에 고려하여야 한다.⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾ 본 연구에서는 일반적인 트랙션 드라이브의 트라이볼로지 특성을 기초로 한 모델로부터 설계 최적화 기법을 통하여⁽⁸⁾, 50cc급 스쿠터용 내구면 트랙션 CVT의 해석의 효율 성능 특성과 접촉점에서의 최대 전단응력 분포를 구하였다.

3.1 동력전달 효율 분포

50cc 스쿠터의 최대 주행속도인 30km/h에 해당하는 엔진속도 3,500rpm에서 토크와 변속비에 따른 동력 전달 효율 분포의 해석결과가 Fig. 6에 나타나 있다. 대부분의 영역에서 90%이상의 동력 전달 효율 분포를 보여주고 있고, 특히 정격 토크인 6Nm 부근, 중속의 주행 변속비에서 최대 효율이 나타나게 설계한 요건을 잘 반영하고 있다. 단지, 저토크 구간에서 구름 접촉영역에 충분한 가압력이 생성되지 못하여 동력전달 효율이 떨어지는 경향을 보이는데, 비례 토크 방식의 가압장치와 더불어 저토크 영역에서의 기동을 위한 일정 토크 방식을 검토할 필요가 있다.

3.2 최대전단응력 분포와 수명

헤르쯔 접촉이론에 따르면 응력분포는 접촉점의 기하학적인 형상에 의해 영향을 받는데, ISCVT는 가장 효율적으로 응력을 지지하는 구체의 내구면과

외구면의 접촉을 채택하고 있다.

구동, 종동로터에서 작용되는 응력은 로터의 치수에 의해 영향을 받고, 로터의 치수는 ISCVT의 크기, 재료, 열처리등의 가공방법을 결정짓는다. 가장 취약한 응력은 트랙션 접촉점 바로 아래의 최대전단응력으로, 본 프로토타입의 정격 엔진속도 3,500rpm에서 토크와 변속비에 따른 구동로터와 종동로터에 작용하는 최대 전단응력의 분포를 Fig. 7에 나타내었다. Fig. 7에서 X축(아래쪽)은 입력축 3500rpm에서 토크변화를 나타내고, Y축은 변속비를 나타내고 있다. 최대전단응력은 토크에 따라 증가하는데, 이는 가압장치에서 발생하는 수직력이 토크에 비례하기 때문이다. Fig. 7(a)에서 토크가 8 Nm일 때 최대전단응력은 318.18 Mpa를 나타낸다. 토크는 또한 변속비에 반비례 하므로 저속영역에서 종동로터의 최대전단응력은 구동로터측보다 큰 분포를 갖고, 고속영역에서는 최대전단응력이 구동로터측보다 작은 경향을 보인다.

수명시간 예측 결과가 Fig. 8에 나타나있다. Lundberg-Palmgren의 수명계산식을 이용하였고, 최악 운전 조건에서 50,000시간 이상으로 나타났다. 입력 토크에 따른 변속비 조정장치를 조작하는데 드는 일(RC Work)이 Fig. 8에 같이 나타나 있다. 계산에 의하면 변속비 조정장치를 회전시키기 위한 토크는 3.101Nm이며 정격토크 부근까지 변속비 조정장치를 작동하기 위해 쓰이는 일은 5.0Joule이하이므로 사람의 힘으로 충분히 작동시킬 수 있다.

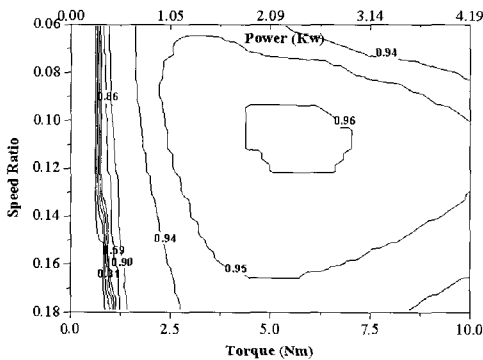
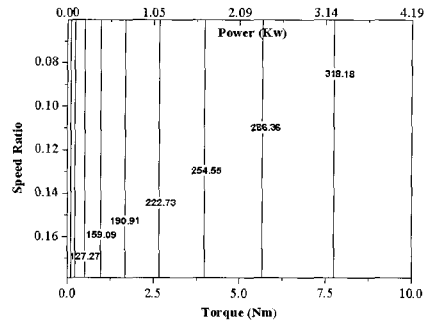
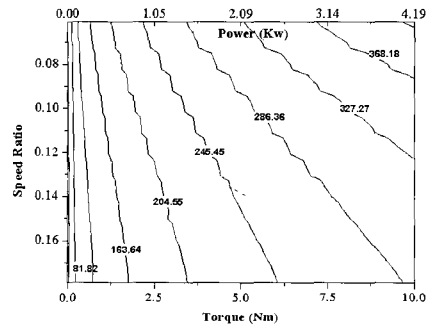


Fig. 6 Efficiency contour at the speed 3,500 rpm



(a) Driving rotor



(b) Driven rotor

Fig. 7 Maximum shear stress contour at the speed 3,500 rpm

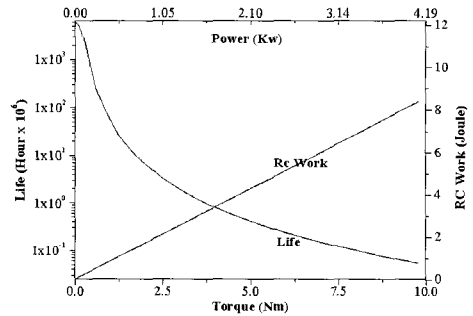


Fig. 8 Life time and RC work versus the input torque at the speed of 3,500rpm

4. 성능실험

프로토타입의 벤치테스트를 위한 실험장치는 Fig. 9에 나타나 있다. 변속기, 모터 등의 효율 및 각종 동력을 측정하는 일련의 동력계를 구성하였다. 좌로부터, 기지의 입력 동력제어를 위해 서보

모터를 구동원으로 장착하였고, 토크와 속도가 측정된 동력이 ISCVT를 지나게 되고 다이내모미터에서 부하와 출력동력으로 측정된다. 전달동력실험의 결과는 Fig. 10에 나타나 있다. 50cc 엔진의 정격 토크인 6Nm에서 입력속도에 따른 동력전달 효율을 계측하였고, 트랙션 유체로는 Santotrac 50을 사용하였다.

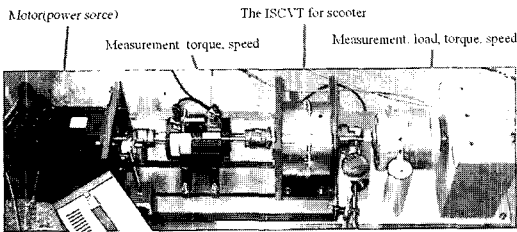


Fig. 9 Bench test of ISCVT

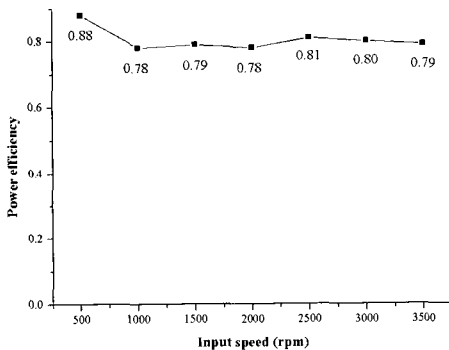


Fig. 10 Experimental result of power efficiency

5. 결 론

- 50cc급 3,000watt 스쿠터에 장착된 구체의 내면과 외면의 접촉을 통해 동력을 전달하는 새로운 개념의 무단변속장치를 제안하였다.
- 50cc 스쿠터의 최대 주행속도인 30km/h에 해당하는 엔진속도 3,500rpm에서 토크와 변속비에 따른 동력 전달 효율 분포의 해석결과가 대부분의 영역에서 90%이상의 동력전달 효율 분포를 보여주고 있고, 특히 정격 토크인 6Nm 부근, 중속의 주행 변속비에서 최대 효율이 나타나게 설계한 요건을 잘 반영하고 있다.
- 수명시간 예측 결과가 최악 운전 조건에서 50,000시간 이상으로 나타나서 안전하게 설계되었으므로 사료된다.
- 무단변속장치로 ISCVT를 설계하고 프로토타입을 제작하여 성능 시험을 위한 벤치테스트를 수행하였다. 예측된 성능에서는 대부분의 운전영역에서 90% 이상의 동력전달 효율을 보였으나 실험 결과 프로토타입의 동력전달 효율은 80%에 이르렀다. 이러한 다소간의 차이는 제작공차와 트랙션 유체의 물성이 온도에 민감하게 변화하는 것을 고려하지 않은 불확실성으로 사료된다.

참고문헌

- Palmer R. S. J. and Bear J. H. "Mechanical efficiency of a Variable-speed, Fixed-center, V-belt Drive". ASME Journal of Engineering for Industry, pp. 806-808, 1977.
- Ferrando F., Martin F. and Riba C.. "Axial Force Test and modeling of the V-belt Continuously Variable transmission for Moped". ASME Journal of Mechanical Design, Vol. 118, pp.266-273, 1996.
- David J. Bents, "Axial Force and Efficiency Tests of Fixed center Variable Speed Belt Drive". SAE 810103, 1981.
- Marco Nuti and Paolo Casalini, "Appraisal of Continuously Variable Transmission Efficiency of Lightweight Vehicle applications". SAE 951772, 1995.
- Chen T.F, Lee D.W and Sung C.K. "An Experimental Study on Transmission Efficiency of a Rubber V-belt CVT". Mech. Math. Theory, Vol. 33, No. 4, pp. 351-363, 1996.

- [6] 김현수, 김광원, "차량용 고무 및 금속 V-벨트 CVT의 변속비-부하 토크-축력특성과 성능 비교", 자동차공학회지, Vol. 121, No. 3, pp. 9-20, 1990.
- [7] 이우민, "이륜 자동차 무단변속기의 성능 향상에 대한 연구", 중앙대학교 대학원 박사학위논문, 2002.
- [8] S. H. Seong, J. H. Ryu and N. G. Park, "A Conceptual Design on Inner Spherical Continuously Variable Transmission for Bicycle Usage", International Journal of Automotive Technology, KSAE, 2004.
- [9] Jeonghyeon Ryu, Sanghun Seong, Nogill Park, "A Continuously Variable Transmission having a Four Bar Linkage and Spherical Rotors", Spring Conference Proceeding of the 2002 KSAE, Vol II, pp. 889-896, 2002.
- [10] Y.zhang, X.zhang and W.tobler, "A systematic model for the analysis of contact, side slip, and traction of toroidal drives", ASME, Journal of mechanical design, 2000.

저 자 소 개



이형우 (李炯佑)

1966년생, 1991년 부산대학교생산기계공학과 졸업, 1999년 부산대학교 대학원 생산기계공학과 졸업(공학박사)
2006년 부산대학교 기계기술연구소 전임연구원