

구체무단변속기의 개발 및 응용

김정윤* · 박영일** · 박종우*** · 이장무***

On the Development and Application of the Spherical CVT

Jungyun Kim, Yeongil Park, F. C. Park and Jangmoo Lee

Key Words : Spherical CVT(구체무단변속기), Semi-Spherical CVT(구면무단변속기), Shifting algorithm(변속 알고리즘), Spherical CVT application(구체무단변속기 응용).

Abstract

This article deals with the analytic results on the development and application of the Spherical CVT. The Spherical CVT is marked by its simple configuration, the infinite torque multiplication characteristic, and the smooth transitions between forward/neutral/reverse states of output speed. In this study, we describe the conceptual principles behind the Spherical CVT and some applications of it, which we developed recently. And, we propose the shifting algorithm based on the analytic consideration of CVT powertrain system. Contrary to conventional shifting algorithms using the OOL(optimal operating line) of the power source, the proposed shifting algorithm is represented as a 2nd order equation in an explicit form, and it reveals the possibility of theoretic design of an optimal controller. As an example, we present numerical results that demonstrate the energy saving possible and the proposed shifting algorithm from the use of the Spherical CVT over standard reduction gear unit, using an ideal dc motor model.

1. 서 론

무단변속기는 기존의 수동, 자동변속기인 유단변속기와는 달리 무한히 많은 변속비를 연속적으로 구현할 수 있는 기구적 특성을 가지고 있다. 따라서, 엔진과 같은 구동원을 운전자가 요구하는 차량성능에 따라 최적인 상태로 작동시킬 수 있어 동력전달계의 효율을 높일 수 있으며, 유단변속기에서 나타나는 변속과도 특성이 없다. 이러한 장점을 이용하여 최근 국내외의 자동차회사를 중심으로 차량의 고연비/저공해화를 위한 무단변속기의 개발이 활발히 이루어지고 있다[1].

지금까지 개발된 무단변속기는 동력전달과 변속 메커니즘에 따라 벨트식(Belt type), 트랙션 드

라이브(Traction drive), 하이드로-스태틱(Hydrostatic)방식으로 분류된다. 벨트식 무단변속기는 고무 또는 금속벨트와 가변지름을 가진 원뿔형태의 풀리를 이용하고 있으며, 대용량의 변속조작부로 인한 효율저감, 비교적 낮은 동력전달용량 등으로 소형차량을 중심으로 상용화되어 있다. 하이드로-스태틱방식의 무단변속기는 정유압 펌프와 가변용량 모터를 연결하여 무단변속을 구현하며, 소음과 효율문제로 인하여 중장비차량 이외의 적용이 어려운 형편이다. 그리고, 두개이상의 회전요소의 접촉반경을 조절하여 변속을 구현하는 트랙션 드라이브는 접촉점에 인가되는 전용오일(Traction fluid)의 개발과 변속제어가 난이하여 그 적용이 지연되었으나 최근 상용화가 임박하였음이 보고되고 있다[1]. 이렇듯 각 무단변속기의 개발에 여러 가지 문제점이 알려져 있지만, 그 중 공통된 것으로는 난이한 변속제어기의 설계와 변속조작부의 대용량화로 인한 무단변속기의 저효율 특성 등이

* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

** 서울산업대학교 기계설계학과

*** 서울대학교 기계항공공학부

있다[2].

우리는 이러한 무단변속기중 대용량의 동력전달이 가능하고, 기구적 구성이 비교적 간단하고 다양한 트랙션 드라이브에 주목하여 향후 트랙션 드라이브에 적용가능한 구체무단변속기(Spherical CVT)를 제안한 바 있다[3]. 제안한 무단변속기는 구체의 각운동량을 변화하여 무단변속을 구현하며, 별도의 클러치기구없이 출력축의 전진/후진/중립상태의 구현이 가능한 IVT(Infinitely Variable Transmission)기능을 가지며, 변속제어가 비교적 간단하고 고효율의 변속조작부를 설계할 수 있음을 특징으로 갖는다. 현재 구체무단변속기의 동력전달은 금속과 금속의 구름저항을 통하여 이루어지고 있으며, 향후 트랙션 드라이브에 적용되는 전용 트랙션오일을 이용하여 동력전달용량을 증가시킬 수 있다.

본 논문에서는 구체무단변속기의 개발과정에서 이루어진 변속 및 동력전달 메커니즘에 관한 해석 및 연구결과와 몇가지 적용예를 소개하고, 무단변속기를 장착한 동력전달계의 변속맵(Shifting map)을 작성할 수 있는 새로운 변속 알고리즘을 제시하고자 한다.

2. 구체무단변속기

2.1 구조

구체무단변속기는 기본적으로 각각 두개의 입력디스크와 출력디스크, 변속조작부인 베리에이터(Variator), 그리고 한 개의 구체로 이루어져 있다(Figure 1). 입력디스크는 엔진이나 전기모터등과 같은 구동원에 연결되며, 출력디스크는 구동축과 연결되어 있으며, 베리에이터는 변속제어기가 부착된 변속조작부로 연결되어 있다.

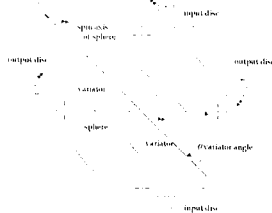


Fig. 1. Basic structure of S-CVT.

베리에이터는 입/출력디스크와 같이 구체에 접촉되어 있으며, 동력전달요소인 구체의 자전운동(Spinning motion)을 베리에이터의 회전방향에 접선방향으로 구속하게 되어 변속을 구현한다. 그림에서와 같이 구체무단변속기는 그 구조가 비교적

간단하며, 입/출력디스크 대신 플러를 이용하여 입/출력축의 위치와 자세를 임의로 지정할 수 있다. 동력전달을 위한 구름저항을 발생시키는 수직항력은 스프링 또는 유압액츄에이터를 이용한다.

또한, 비교적 자유로운 구조설계가 가능한 구체무단변속기의 장점을 이용하여, 이와 유사한 구조를 가지면서 그 변속비와 변속메카니즘이 다른 구면무단변속기(Semi-Spherical CVT)를 제안하였으며[4], 이의 구조도는 다음과 같다(Figure 2). 구면무단변속기는 트랙션 드라이브중 하나인 토릭 드라이브(Toric drive)와 유사한 구면형상을 가진 출력디스크를 사용하고, 입력축을 베리에이터에 베벨기어를 통하여 연결하고 있다. 구면무단변속기의 변속은 입력축과 중공축으로 연결된 베리에이터축을 회전하여 이루어진다. 본 연구에서는 이중구체무단변속기(S-CVT)에 관하여 논하고자 한다.

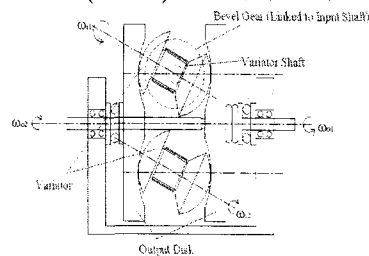


Fig. 2. Structure of SS-CVT.

2.2 작동원리

구동원과 연결된 입력축이 회전하게 되면 구체와 접촉되어 있는 입력디스크가 회전하면서 구체와의 접촉점에서 선속도가 발생한다. 이로써 구체가 자전축을 중심으로 회전하게 되며 마찬가지로 출력축과 연결된 출력디스크가 회전하여 동력을 전달하게 된다.

베리에이터의 회전중심위치를 변화시키면 구체 자전축의 자세(Orientation)가 변화하여 입력디스크와 출력디스크의 접촉점에서 구체의 회전축까지의 거리(R_i , R_o)가 변하고, 이로써 입/출력축의 속도비와 토크비가 무단으로 변화하게 된다. 이를 정회전/중립/역회전시로 구분하여 그림으로 표시하면 다음과 같다(Figure 3).

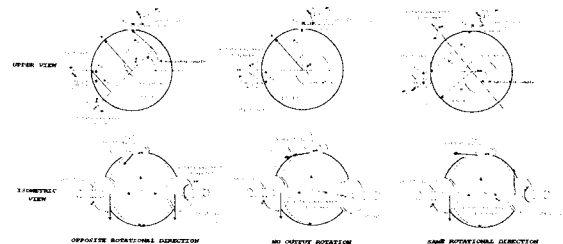


Fig. 3. Operating principles of S-CVT.

입/출력디스크와 구체가 접촉하고 있는 접촉점에서 미끄러짐이 없는 구름조건을 이용하여 이상적인 속도비와 토크비를 계산하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\omega_{out}}{\omega_{in}} = \frac{r_{in}}{r_{out}} \tan \theta, \quad \frac{T_{out}}{T_{in}} = \frac{r_{out}}{r_{in}} \cot \theta \quad (1)$$

여기서, ω_{out} , ω_{in} 은 출력축과 입력축의 각속도, T_{in} , T_{out} 은 입/출력축에 작용하는 토크, r_{in} , r_{out} 은 입/출력디스크와 구체의 접촉반경, θ 는 베리에이터 회전축위치의 각도변화량이다.

2.3 동력전달용량

이론적으로 구체무단변속기의 토크비는 속도비가 0인 점에서 무한대의 값을 나타내어, IVT의 기능을 구현할 수 있다. 하지만, 구체무단변속기의 동력전달이 현재 급속과 급속의 구름저항을 이용하고 있음을 고려하면, 실제로 전달할 수 있는 구동력은 구체와 각 디스크간의 최대정지마찰력이하의 값이 됨을 알 수 있다(Figure 4).

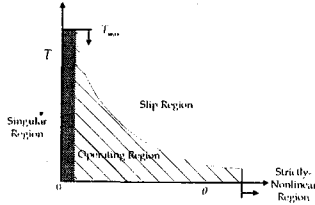


Fig. 4. Transmittable torque.

따라서, 동력전달용량을 최대정지마찰력으로 정의할 수 있으며, 각 디스크간의 접촉점에서 이보다 큰 힘이 작용하게 될 경우 미끄러질 것이다.

3. 변속메카니즘

3.1 베리에이터

앞서 언급한 바와 같이 구체무단변속기는 베리에이터의 회전중심의 위치변화로 인하여 변속이 이루어진다. 구체의 자전방향은 베리에이터와의 접촉점에서 발생하는 선속도성분으로 구속되므로, 베리에이터의 회전중심을 이동하면 구체의 각운동량이 변화하게 되어 출력디스크의 회전속도가 변화하게 된다(Figure 5).

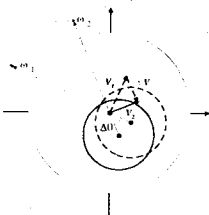


Fig. 5. Speed variation.

그림에서 나타난 두 상태사이의 속도차이인 ΔV 는 베리에이터 회전축에 법선방향으로 작용하고, 변속중 발생하는 속도손실로서 베리에이터의 회전축에 작용하는 변속력으로 작용하게 된다.

3.2 변속메카니즘

먼저, 구체에 중심을 지나고 고정좌표계(XYZ)와 회전좌표계(xyz)를 설정하고 각 디스크와의 접촉점에 작용하는 힘 성분을 표시하면 다음과 같다(Figure 6). 여기서, 구체의 중심방향으로 작용하는 힘들은 구체의 중심이 고정된다는 가정을 통하여 무시하였다.

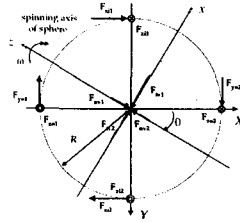


Fig. 6. Free-body diagram.

구체의 등방성(Geometric isotropy)을 고려하고, 구체의 강성을 무시하여 같은 크기의 힘 성분을 소거하면 다음 식과 같다. 여기서, F_i 는 입력디스크에서 전달되는 구동력, F_o 는 부하토크에서 전달되는 반력, D 는 구체의 자전축변화로 인해 발생하는 반력, F_t 는 변속력, F_n 은 베리에이터 회전축에 작용하는 반력이다.

$$\begin{aligned} F_{Zi1} = F_{Zi2} = F_t, \quad F_{Zo1} = F_{Zo2} = F_o \\ F_{ti1} = F_{ti2} = F_t, \quad F_{ni1} = F_{ni2} = F_n \\ F_{Xi1} = F_{Xi2} = F_{Yo1} = F_{Yo2} = D \end{aligned} \quad (2)$$

구체의 각운동량 보존식을 이용하여 구체의 운동방정식을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{2}{5} m R^2 \begin{Bmatrix} \dot{\theta} \omega \\ \dot{\theta} \\ \dot{\omega} \end{Bmatrix} = R \times \begin{bmatrix} -2F_t \sin \theta - 2F_o \cos \theta + 2F_n \\ 4D \\ 2F_o \cos \theta - 2F_t \sin \theta - 2F_i \end{bmatrix} \quad (3)$$

여기서, m 은 구체의 질량, R 은 구체의 반경, ω 는 구체의 자전 각속도 크기이다. 위 식에서 알 수 있듯이 변속에 필요한 변속력은 구체의 각운동량을 변화시킬 수 있는 크기이면 충분하다.

4. 변속 알고리즘

4.1 무단변속기를 장착한 동력전달계의 변속 알고리즘

유단변속기의 경우 단수에 따라 기어비가 고정되어 있어 각 기어비에서 차량의 거동이 운전자의

드로틀개도 조작량에 따라 결정되게 된다. 이와는 달리 무단변속기는 차량의 구동상태에 따라 상시적인 변속이 이루어지므로, 구동원의 상태는 운전자의 의지인 운전상태와 무단변속기의 변속비에 따라 결정된다. 따라서, 무단변속기를 장착한 동력전달계는 유단변속기와는 달리 2 개의 입력요소(운전자의 의지와 변속비)를 가지며, 설계자의 변속전략에 따라 각각의 입력요소를 적절하게 조합하여 제어할 수 있는 특징을 가지고 있다(식 (4)).

$$\frac{d\omega_{in}}{dt} = G.R. \times \frac{d\omega_{out}}{dt} + \frac{dG.R.}{dt} \times \omega_{out} \quad (4)$$

여기서, $G.R.$ 은 무단변속기의 기어비, ω_{out} , ω_{in} 은 각각 출력축의 회전속도와 구동원의 회전속도이다. 기존의 무단변속기 장착차량은 운전자의 의지인드로틀개도의 변화를 중심으로 엔진의 최적성능곡선(OOL: Optimal Operating Line)을 선정하고, 이를 추종하는 변속맵(Shifting map)을 설계/이용하고 있다.

본 연구에서 우리는 동력발생요소를 최적효율점에서 구동하고, 무단변속기의 변속비를 최대한 활용할 수 있는 변속알고리즘을 제안한다. 제안된 변속알고리즘을 간단한 동력전달계(Figure 7)를 이용하여 운동방정식으로 표시하면 다음과 같다.

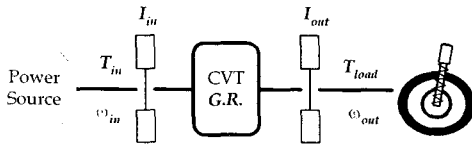


Fig. 7. Schematic of CVT powertrain.

$$\left[(G.R.)^2 I_m + I_{out} \right] \frac{d\omega_{out}}{dt} + I_m \times G.R. \times \frac{dG.R.}{dt} \times \omega_{out} = G.R. \times T_{in} - T_{load} \quad (5)$$

여기서, I_{out} , I_m 은 각각 출력축과 입력축의 회전 관성이고, T_{in} , T_{load} 는 구동토크, 부하토크이다. 일반적으로 구동토크는 드로틀개도와 같은 운전자의 의지와 입력축 속도등의 함수로, 부하토크는 출력축 속도의 함수로 표시할 수 있다.

식 (5)에서 무단변속기 기어비($G.R.$)의 시간변화율을 무시하고, 기어비의 이차방정식을 유도하여 해를 구하면 다음과 같이 출력축 회전속도의 시간 변화율과 구동토크, 부하토크로 이루어지는 무단변속기 기어비를 구할 수 있다.

$$G.R. = \frac{T_{in} \pm \sqrt{T_{in}^2 - 4(I_m \frac{d\omega_{out}}{dt})(I_{out} \frac{d\omega_{out}}{dt} + T_{load})}}{2 \times I_m \frac{d\omega_{out}}{dt}} \quad (6)$$

기존의 OOL 을 이용한 무단변속기 변속 알고리

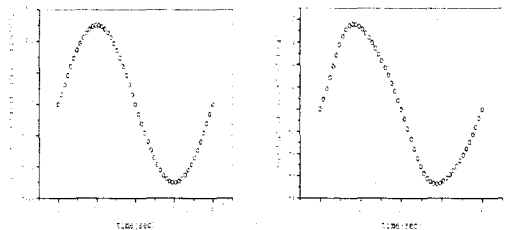
즘에 비하여 제안된 알고리즘은 식 (5), (6)과 같이 정형화가 가능하여 여러가지 최적화 알고리즘에의 적용이 용이하다. 또한, 기존의 방법이 여러 번의 시행착오를 거쳐 변속맵을 형성하는 데 반하여, 구동원과 무단변속기어비의 사용영역 제한을 구속 조건으로 인가하여 수식적으로 간단히 변속맵을 작성할 수 있는 특징을 가진다[5],[6].

4.2 직류모터를 구동원으로 사용하는 경우

자동차의 경우와 같이 엔진을 구동원으로 사용하는 경우, 드로틀개도에 따라 엔진의 구동토크 값이 다양하게 변화하여 적절한 변속전략과 엔진 운전전략의 결정이 선행되어야 하는 어려움이 있다. 본 절에서는 비교적 그 동적거동을 쉽게 예측할 수 있고, 모델링이 간단한 직류모터를 구동원으로 가지는 동력전달계를 사용하여 제안된 무단변속기 변속 알고리즘을 적용하였다.

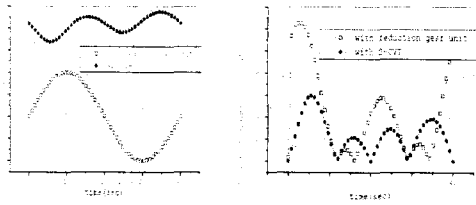
직류모터의 경우에도 구동원의 회전속도를 적절한 전류 또는 전압제어를 통하여 조절할 수 있지만, 여기서는 직류모터에 인가되는 전압을 일정하게 유지하면서 무단변속기의 기어비만을 변화하여 동력전달계의 거동을 시뮬레이션을 통하여 살펴보았다. 또한, 기존의 유단변속기와는 다른 구동원의 상태변화와 무단변속기를 이용한 에너지저감 가능성을 예측하기 위하여 감속비 4의 감속기어를 장착한 동력전달계와 그 결과를 비교하였다.

본 시뮬레이션에서 사용한 직류모터는 12 Volts, 60 Watts의 용량을 가지며, 부하토크와 출력축 관성값은 각각 0.07 Nm, 0.01 kgm²으로 하였다. 출력축은 40 초 동안 500 rpm의 속도로 사인파(Sine)형상을 따라 회전하도록 설정하였으며(Figure 8 (a)), 해석결과를 살펴보면 다음과 같다.



(a) Output speed. (b) Variator angle.

Fig. 8. Simulation result.



(a) Motor speed. (b) Consumed power.
Fig. 9. Comparison result.

그림 8 (b)는 알려진 직류모터의 회로관계식과 동역학식[7]을 통하여 구동력을 구하고, 식 (6)을 이용하여 무단변속기의 기어비를 계산, 이를 구체 무단변속기의 변속비와 연결된 베리에이터의 각도 변화량으로 표시한 것이다.

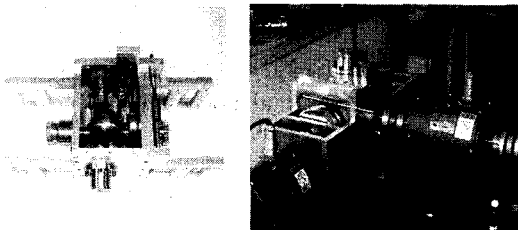
그림 9 (a)는 감속기어를 장착한 동력전달계와 비교한 시뮬레이션 결과를 나타낸 것으로, 그림에서와 같이 주어진 출력속 속도를 추종하기 위하여 감속기어를 장착한 경우 구동모터의 속도가 출력속의 속도와 같은 형상을 가지는 데 반하여, 구체 무단변속기를 장착한 경우는 출력속 속도와는 무관하게 베리에이터의 각도변화를 이용하여 제한된 속도영역(3000-5000 rpm)에서 구동모터가 회전하고 있으며, 구동모터의 이러한 운전영역은 고속도 영역이므로 일반적으로 그 효율이 높다.

그림 9 (b)를 통하여 각 동력전달계가 사용한 전력량을 계산해 본 결과 구체무단변속기를 장착한 경우가 감속기어를 사용한 경우에 비하여 약 46.3%의 에너지 저감 효과를 보인다.

5. 실험 및 응용

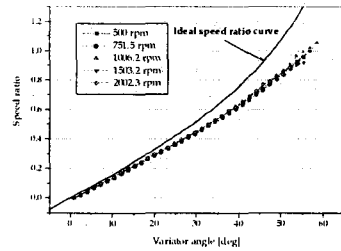
5.1 실험

앞에서 설명한 구체무단변속기의 작동원리와 그 성능을 시험하기 위하여 다음과 같이 구체무단변속기를 설계/제작하였으며, 이를 동력전달계 시험장치(Dynamometer)를 이용하여 실험을 수행하였다(Figure 10).

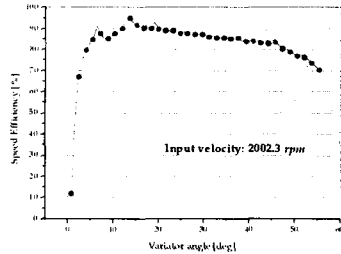


(a) Spherical CVT. (b) Dynamometer.
Fig. 10. Test equipment.

그림 10 (b)의 시험장치를 통하여 무부하 상태의 속도비와 속도효율 곡선을 추출하였다(Figure 11).



(a) Speed ratio.



(b) Speed efficiency.

Fig. 11. Experimental result.

실험결과를 살펴보면 베리에이터의 각도변화량이 커질수록 속도비가 이상적인 경우와 그 차이가 커짐을 알 수 있다. 이는 변속비가 증가할수록 베리에이터의 회전축에 작용하는 반력이 커져서 구체와 각 디스크간의 접촉점에서 미끄러짐이 발생하기 때문으로 판단된다. 현재 구성된 시험장치를 이용하여 토크비와 내구성능을 고찰하기 위한 시험을 수행 중에 있다.

5.2 응용

앞서 언급한 바와 같이 구체무단변속기는 현재 자동차와 같은 대용량의 동력전달장치에의 적용은 불가능하다. 따라서, 우리는 소용량의 동력을 전달 하면서, 구체무단변속기의 여러가지 장점을 활용할 수 있는 몇 가지 적용 예를 설계, 발표하였다.

먼저 구체무단변속기의 에너지 저감효과와 비교적 간단한 변속제어, 별도의 클러치 기구없이 가능한 전/후진, 중립상태의 구현성능을 이용하여 구체무단변속기를 장착한 이동로봇을 설계, 제작하였다(Figure 12). 개발된 이동로봇은 기존의 이동로봇과는 달리 한 개의 구동모터를 이용하여 전/후진, 정지, 피봇(Pivot)운동이 가능하다[8].

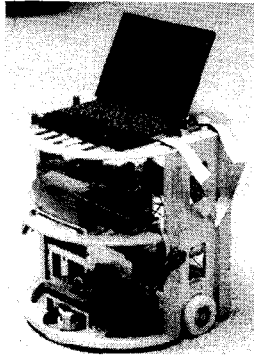


Fig. 12. CVT-based mobile robot.

또한, 구면무단변속기와 직류모터를 장착한 하이브리드 모형차량을 제작, 그 작동성을 확인하였다(Figure 13). 개발된 하이브리드 모형차량은 향후 무단변속기를 채용한 하이브리드 차량의 변속 제어 알고리즘의 개발에 이용될 예정이다[4].

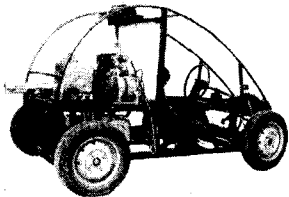


Fig. 13. Hybrid prototype vehicle.

이외에 무단변속기를 이용한 자전거, 세탁기등을 설계, 제작하였다(Figure 14).

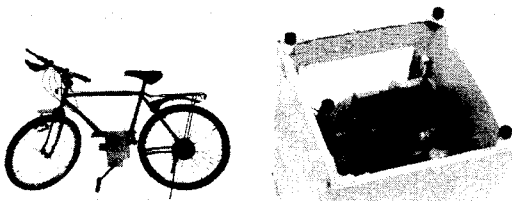


Fig. 14. Other applications.

6. 결론

본 연구를 통하여 얻은 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 구체의 각운동량을 변화시켜 무단변속을 구현하는 구체무단변속기를 설계하고, 그 작동원리, 변속 메커니즘, 동력전달용량등에 관하여 해석하였다.
2. 구체무단변속기는 간단한 기구구성과 비교적 간단한 변속제어, IVT 기능, 그리고 별도의 클러치 기구없이 전/후진, 중립상태의 구현을 특징으로

한다.

3. 구체무단변속기의 변속 메커니즘을 해석할 수 있는 동역학 모델링을 수행하였다.
4. 무단변속기를 장착한 동력전달계의 변속맵을 작성할 수 있는 새로운 변속 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 이차방정식의 형태로 정형화가 가능하여 여러가지 최적화 알고리즘의 적용이 용이하다.
5. 제안된 알고리즘을 이용하여 구체무단변속기의 작동원리와 에너지 저감을 일반적인 감속기어와 수치적으로 비교하였다.
6. 구체무단변속기의 성능을 시험하기 위한 동력 시험장치를 설계하여 현재 그 시험을 수행중이다.
7. 구체무단변속기의 장점을 활용할 수 있는 여러가지 응용 예를 설계, 제작하였다.

참고문헌

- (1) 1999 Tokyo Motor Show, Tokyo, Japan, 1999.
- (2) Report of U. S. Department of Energy, *Advanced Automotive Transmission Development Status and Research Needs*, DOE/CS/50286-1, April 1982.
- (3) Jungyun Kim, Y. I. Park, Mitsusida, "S-CVT: the New Type CVT with Sphere", *Proc. Autumnal Conf of the Korean Society of Precision Engineers*, Seoul, Korea, pp. 815-818, Nov. 1998.
- (4) Hyoungjun Cho, J. Kim, S. Jeon, J. Lee, J. Kim, Y. Park, "Development of a Hybrid Electric Vehicle equipped with Semi-Spherical CVT", *To appear in the Proc. Spring Conf. of the Korea Society of Automotive Engineers*, Seoul, Korea, April 2000.
- (5) Jungyun Kim, H. Yeom, F. C. Park, Y. I. Park, M. Kim, "On the Energy Efficiency of CVT-Based Mobile Robots", *To appear in the Proc. IEEE Inter. Conf. of Robotics and Automation*, San Francisco, April 2000.
- (6) Hanjun Yeom, *Minimum Energy Control of a CVT-Based Mobile Robot*, M. Sc. Thesis, Seoul National University.
- (7) W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Braunschweig, Germany, 2nd Ed., Springer, 1996.
- (8) Jungyun Kim, H. J. Yeom, F. C. Park, "MOSTS: A Mobile Robot with a Spherical Continuously Variable Transmission", *Proc. IEEE/RSJ Inter. Conf. on Intelligent Robots and Systems*, Vol. 3, pp. 1751-1756, Oct. 17-21, 1999.
- (9) Thomas R. Kane, P. W. Likins, D. A. Levinson, *Spacecraft Dynamics*, McGraw-Hill, 1983.
- (10) Donald T. Greenwood, *Classical Dynamics*, Prentice-Hall, 1977.