

휴먼 로봇을 위한 직선 치형을 갖는 로봇 감속기(RSR)의 설계 및 개발

Development and Design of Robot Speed Reducer(RSR) with Straight Line Teeth Profile for Human Robot

남원기* · 장인훈** · 오세훈* · 심귀보**

Won-Ki Nam, In-hun Jang, Se-Hoon Oh, and Kwee-Bo Sim

* 중앙대학교 기계공학부

** 중앙대학교 전자전기공학부

요 약

산업 현장에서는 많은 종류의 감속기들이 사용되고 있다. 그 중 로봇에서는 사이클로이드(cycloid) 치형 혹은 인벌루트(involute) 치형을 가진 고정밀도의 감속기를 사용한다. 그 이유는 로봇 시스템에서는 위치 제어를 하는데 있어서 고정밀도의 감속기를 사용하는 것이 필수적이기 때문이다. 본 논문에서는 기본적으로는 삼각형 치형을 가지고 있지만 새로운 직선 치형을 갖는 로봇 감속기(RSR)를 제안한다. 제안한 감속기는 유한요소 해석법을 이용한 강도, 응력, 강성 테스트에서 좋은 결과를 얻을 수 있었으며, 편심계수를 변화시켜 최적의 치형 운동을 얻을 수 있도록 설계하여 응력이 적게 걸리고 소음을 낮출 수 있도록 하였다.

Abstract

There are many types of reduction drives for industrial applications. In general, high precision speed reducer which has a cycloid or involute teeth profile, used to in robot. Because, it is essential to use precision reduction drives for accuracy of position control on robot system. In this paper, we propose a robot speed reducer(RSR) with straight line teeth profile, which has basically a triangle teeth profile. In new straight line teeth profile, we have a good result for strength, stress and stiffness by using finite element analysis and the results indicate that variation of eccentric coefficient affects the optimal tooth motion, and it can lower the stress and noise.

Key words : Human robot, Tooth, Speed reducer, Finite element analysis

1. 서 론

로봇용 정밀 감속기는 여러 종류가 있으나 주로 쓰이는 것은 내접 유성식 감속기와 주속식 감속기로 나눌 수 있다. 내접 유성식 감속기의 대표적인 제품으로는 cycloid 감속기(일명 RV 감속기)를 들 수 있으며[1], 주속식 감속기의 대표적인 제품으로는 harmonic 감속기를 들 수 있다[2, 8]. 현재 공장 자동화에 사용되는 대부분의 로봇 중 상단 2~3개의 관절에서는 harmonic 감속기가 사용되고 있고, 하단부의 감속기는 대부분 cycloid 감속기가 사용되고 있으며 대형 로봇의 경우 6개의 관절 모두에 RV 감속기를 적용하고 있다.

Harmonic 및 cycloid 감속기[3, 4]는 1단으로도 큰 감속비를 가질 수 있으며 치 물림율이 크므로 소형으로 큰 토크 전달이 가능하며 컴팩트한 구조, 높은 부하용량과 위치제어시의 고 정밀도가 요구되는 로봇 분야에 지배적으로 사용되고 있다[10, 13].

이들 감속기는 산업의 각 분야별 요구특성에 따라서 적절하게 사용되고 있으며 치형 가공 기술의 측정, 조립 기술 등

의 관련기술의 발전과 반도체 장비, 우주산업 등의 정밀 제어용 로봇 등 사용되는 분야의 고 기능화 요구에 의하여 진화 된 형태로 발전해 왔으며, 앞으로도 사용자의 요구에 적합한 형태로 개발될 전망이다. 본 연구에서는 지금까지 사용하지 않았던 직선 치형 개념을 도입하여 휴먼 로봇을 위한 로봇용 감속기를 설계하였으며 실제 제작 성능 검증을 치형 설계 프로그램과 시작품을 제작하여 성능을 확인하였다.

2. 직선 치형의 물림

2.1 감속기의 구조

본 연구에 사용된 감속기는 기본적으로 하우징 겸 치형인 내 기어, 편심 운동을 하는 외 치차 기어 및 감속된 회전을 출력하는 출력부로 구성된다. Cycloid 감속기는 크게 두 가지 종류로 구분되는 데 ‘일반형’과 ‘유성기어 일체형’이다. 그림 1은 유성기어 일체형의 cycloid 감속기의 구조이다.

일반형과 다르게 모터로 부터의 입력축이 유성기어를 회전시키게 되며, 이 유성기어와 편심축은 일체형 구조로 되어 있어 이 편심축에 의해서 cycloid 기어의 중심 위치가 이동하게 되며 이때 내 기어와 치 접촉을 행하여 cycloid 기어는

접수일자 : 2006년 4월 13일

완료일자 : 2006년 5월 26일

입력축 회전의 반대방향으로 자전하게 된다. 편으로 구성된 내 기어 즉 유성기어 일체형은 전체적인 감속기 시스템에서 2단 감속의 효과를 보이므로 입력 편심축에 의해 바로 cycloid기어를 병진 운동시켜 감속하게 되는 일반형보다는 같은 크기의 감속기에서 고 감속비를 얻을 수 있으므로 최근 들어서는 로봇에 이 형태의 감속기가 장착되는 것이 보편적인 추세이다[3].

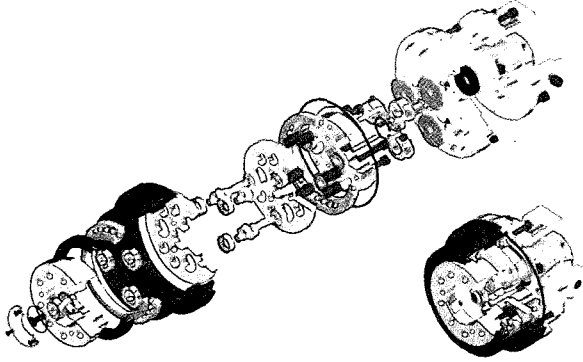


그림 1. 로봇용 감속기 드라이브의 분해도
Fig. 1. Disassembly view of a robot reduction drive

2.2 직선 치형의 정의

기어의 치형은 일반적으로 인볼류트 곡선이나 사이클로이드 치형을 갖고 있다. 그러나 본 연구에서는 기존에 사용하던 치형 곡선인 인볼류트나 사이클로이드 치형이 아닌 직선으로 구성된 치형을 사용하였다. 이런 직선 치형은 사이클로이드 운동을 하는 캠 기구를 갖는 곳에서 주로 사용되어 왔기 때문에 지금까지 어떠한 물림 현상이 일어나는지에 대한 연구가 전혀 없었다. 본 논문에서는 이러한 직선 치형이 어떠한 간섭과 물림 특성이 있는지를 분석하였다.

치형 물림에서 링 기어 치폭은 표준으로 둔 상태에서 외 치차 기어의 치폭을 조정하는 것으로 하였고, 직선 치형은 다음과 같이 정의하였다. 이 값에 모듈(module)을 곱하면 실제 치형의 크기가 된다. 인볼류트 치형에서는 치 높이는 표준 모듈 1을 사용하지만, 본 로봇 감속기에서는 저치인 모듈 0.5를 사용한다. 내 치차에서는 표준 거리인 1.57를 사용하고 사이클로이드 감속기에서 외 치차에 해당하는 사이클로이드 판의 치형은 표준거리보다 작은 $1.57 \times 0.97 = 1.52$ 를 사용하였다[그림 2].

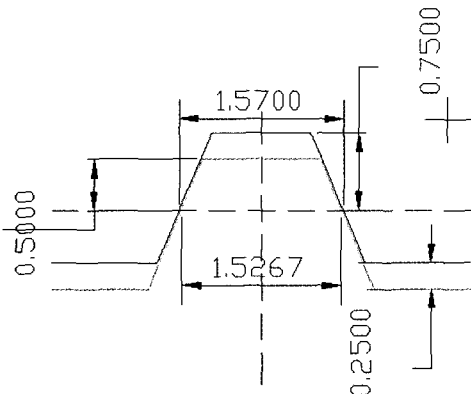


그림 2. 내치와 외치 기어에 대한 기본적인 모형
Fig. 2. Basic tooth profile for internal and external gears.

이상과 같이 정의함으로써 내 치차와 외 치차 사이에 물림에 필요한 공간을 확보할 수 있었다.

2.3 편위계수 정의

세진IGB에서 제작한 로봇 감속기의 입력 축은 편심 캠 운동을 하게 된다. 다음 식과 같이 편심량을 조절할 수 있는데 이 값에 따라 상당히 치형 운동을 다양하게 변화시킬 수 있다. 본 연구에서는 여러 가지를 시도해 본 결과 다음 그림 3과 같은 치형 운동을 얻을 수 있었다. (여기서 링 기어는 편위계수를 주지 않는 것으로 한다.)

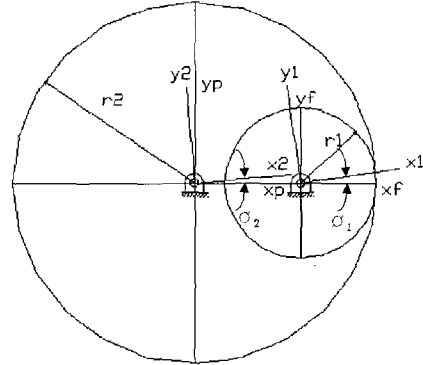


그림 3. 편 위적을 그린 운동 모델
Fig. 3. Kinematical modeling to draw pin trajectory

내 치차와 외 치차 피치원은 다음 식과 같이 정의된다.

$$r_1 = \frac{mZ_1}{2} \tag{1}$$

$$r_2 = \frac{mZ_2}{2} \tag{2}$$

여기서 m 은 치형 모듈로써 $[mm]$ 단위의 피치원 지름 D 를 잇수 Z 로 나눈 값을 말한다. Z_1, Z_2 는 각각 내 치차와 외 치차의 기어 잇수를 가리킨다.

큰 피치원이 회전하는 경우는 두 개의 피치원 모두가 동시에 같은 방향으로 회전하며, 서로 다른 일정한 각속도로 회전하는 경우와 동일하다고 바꾸어 생각할 수 있다[6, 7].

$$r_1\phi_1 = r_2\phi_2 \tag{3}$$

여기서 ϕ_1, ϕ_2 는 내 치차와 외 치차가 회전하는 경우의 각 변화량을 말한다. (3)식에서 ϕ_1 에 대해 나타내면 다음과 같다.

$$\phi_1 = \frac{r_2}{r_1}\phi_2 = \frac{Z_2}{Z_1}\phi_2 \tag{4}$$

한편 내 치차를 고정된 상태에서 외 치차가 자전과 공전을 할 때 절대 각속도는 다음과 같다.

$$\phi_1 - \phi_2 = \left(\frac{Z_2}{Z_1} - 1\right)\phi_2 = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_1}\phi_2 \tag{5}$$

내 치차의 위치를 내 치차에서 바라본 위치 좌표는 다음

식에 의해서 구할 수 있다.

$$\mathbf{r}_1 = M_{12}\mathbf{r}_2 \quad (6)$$

$$M_{12} = M_{1f}M_{fp}M_{p2} \quad (7)$$

$$\mathbf{r}_2 = [x_2 \ y_2 \ 0 \ 1]^T \quad (8)$$

$$M_{1f} = \begin{bmatrix} \cos\phi_1 & \sin\phi_1 & 0 & 0 \\ -\sin\phi_1 & \cos\phi_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$$M_{fp} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & -e \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$M_{p2} = \begin{bmatrix} \cos\phi_2 & -\sin\phi_2 & 0 & 0 \\ \sin\phi_2 & \cos\phi_2 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

위의 식에서 M_{1f} 는 ϕ_1 만큼의 회전 변화를 시키는 회전변환행렬, M_{fp} 는 $-e$ 만큼 이동하는 병진변환행렬, M_{p2} 는 ϕ_2 만큼의 회전변화를 시키는 회전변환행렬을 각각 나타낸다.

시뮬레이션 프로그램에서는 데이터 해석을 위해서 절대좌표계로 변환해야 하기 때문에 외 치차 r_1 과 내 치차 r_2 를 절대좌표계 \bar{r}_1, \bar{r}_2 로 변환하면 다음과 같이 된다.

$$\bar{\mathbf{r}}_1 = M_{pf}M_{fp}\mathbf{r}_1 = \begin{bmatrix} x_1 \cos\phi_1 - y_1 \sin\phi_1 + e \\ x_1 \sin\phi_1 + y_1 \cos\phi_1 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\bar{\mathbf{r}}_2 = M_{p2}\mathbf{r}_2 = \begin{bmatrix} x_2 \cos\phi_2 - y_2 \sin\phi_2 \\ x_2 \sin\phi_2 + y_2 \cos\phi_2 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (13)$$

한편 편위계수 λ 와 편심량 e 는 다음 관계가 있다.

$$\left(\lambda \frac{Z_2}{Z_1} - 1\right) \frac{mZ_1}{2} = e \quad (14)$$

만약 편위계수 λ 가 1이면 정위치 운동으로 치면 끝이 간섭을 받게 된다. 그러나 편위계수 λ 가 1이하이면 치 운동이 사이클로이드 운동을 일으키게 되어 치형 간섭이 더 커지게 된다. 또 λ 가 1보다 크게 되면 치 접촉이 치 운동방향과 반대가 되게 된다.

이렇게 절대좌표계로 변환함으로써 다음 절에서 운동계산의 식으로 이용할 수 있게 된다. 해석을 위한 시뮬레이션에서는 절대좌표로 변환한 데이터를 입력하여 시뮬레이션을 수행한다.

2.4 치형 운동 분석

2.3절에서 유도한 식 (12)과 (13)식을 이용하여 다음과 같은 치형 운동을 얻을 수 있다. 위에서 편위 계수를 1.002로 했을 때 치 궤적은 그림 4, 5와 같이 된다. 이 궤적의 특징은 치 접촉이 치 운동 방향과는 반대로 접촉이 이루어짐으로 치 접촉에서 오는 소음을 줄일 수 있다는 것을 나타낸다.

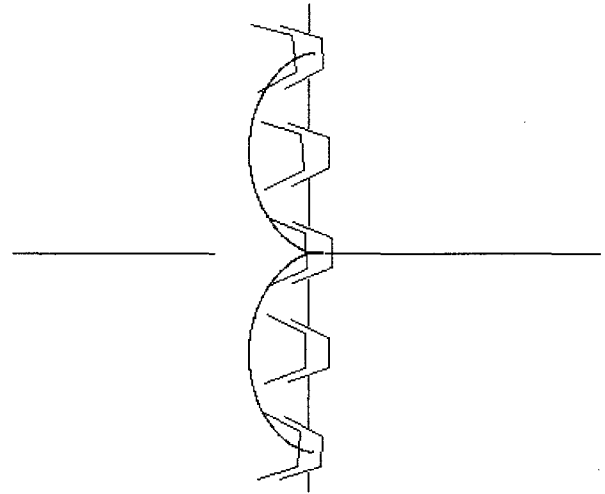


그림 4. 외 기어의 궤적.
Fig. 4 Trajectory of external gear.

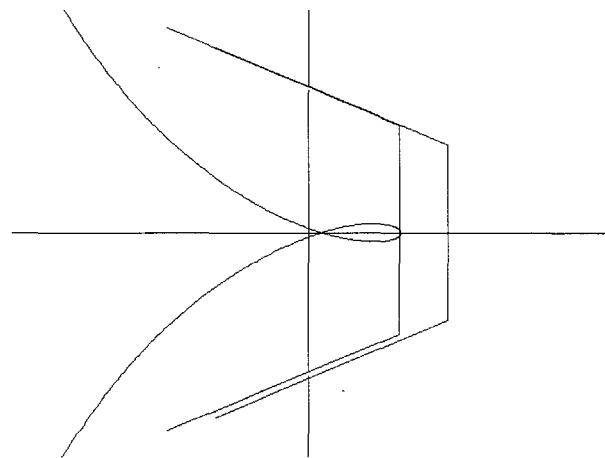


그림 5. 외 기어 하나의 중점에 대한 궤적.
Fig. 5 Trajectory of one external gear at the midpoint.

또한 FEM프로그램을 이용해서 치형 응력과 변형을 시뮬레이션 한 결과 그림 6과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 시뮬레이션을 통하여 최대 변형량이 $5\mu\text{m}$ 정도로 치형변형 간섭량 이내로 탄성변형을 하는 것을 확인하였다. 전체 치형은 30° 구간 내에서 접촉할 수 있음을 확인하였다.

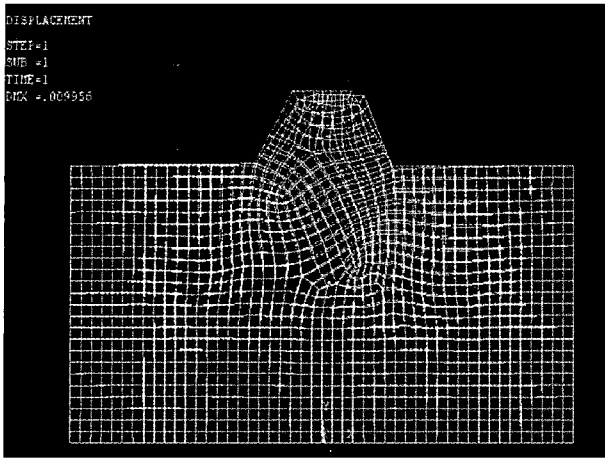


그림 6. 외 기어에 걸리는 스트레스와 변형정도.
Fig. 6. Stress and displacement of external gear.

3. 실험 결과

3.1 로봇 감속기 시제품

위절에서 해석한 결과를 토대로 그림 7과 같은 시제품을 제작하였다. 이 시제품을 테스트해 본 결과 다음과 같은 데이터를 얻을 수 있었다.

처짐 강성은 609[Nm/arcmin]이고, 처짐 하중 모멘트는 1131[Nm]으로 측정되었다. 최대 처짐 모멘트 하중은 2262[Nm]이고 작용점 치수는 83.71[mm]에서 -8.14[mm]으로 나타났다. 축방향 하중은 3408[N]이고 반경방향 하중은 12180[N]이다. 반경방향 기준거리는 50[mm]로 측정되었다. 정격 출력토크는 500[Nm], 정격 출력회전수는 15[rpm]이다. 허용 최대평균 출력토크는 700[Nm], 가감속 허용토크는 1250[Nm], 순간허용 최대토크는 2500[Nm]이다. 또한 최대 허용 출력회전수는 27[rpm]으로 나타나고 회전 정밀도는 1분 이하로 측정되었으며 비틀림 강성은 206[Nm/arcmin]이다



그림 7. 시제품
Fig. 7. Prototype

3.2 로스트 모션(lost motion)

본 연구에서 설계한 치형의 유효성을 확인하기 위해서 다음과 같은 제원으로 제작하였다. 제작 모델은 HDXD050S-B-148-S-S2(감속비 148:1)이고, 그림 8과 같은 로스트 모션을 측정하기 위한 실험 장치를 제작하여 설계된 치형을 측정해 본 결과 로스트 모션은 평균 0.12 arcmin으로 통상 로봇에서 쓰이는 1분 이하를 만족하였다.

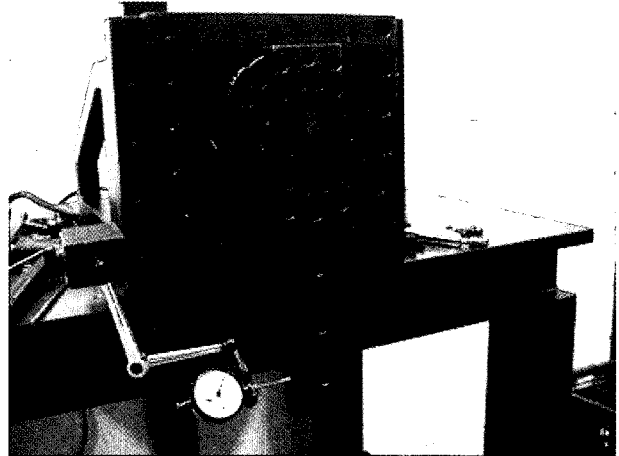


그림 8. 로스트 모션을 측정하기 위한 실험대.
Fig. 8. Test bed for lost motion.

3.3 모멘트 강성(moment stiffness)

로봇을 설계할 경우 모멘트 강성이 커야 하는데 그 이유는 강성이 작을 경우 고유 진동수 등이 낮아짐으로 해서 로봇의 정밀도를 저하시키고 가반 하중에 의한 로봇의 처짐 등이 발생하기 때문이다. 현재 시중에서 판매되고 있는 로봇의 강성치는 대략 600[Nm/arcmin] 정도이다.

그림 9와 같이 벤딩 모멘트를 측정하기 위해 실험대를 제작 시험한 결과 표 1에서 보듯이 직선형 치형을 갖는 로봇 감속기의 모멘트 강성이 보편적인 로봇의 강성치인 600[Nm/arcmin] 이상임을 확인할 수 있었다.

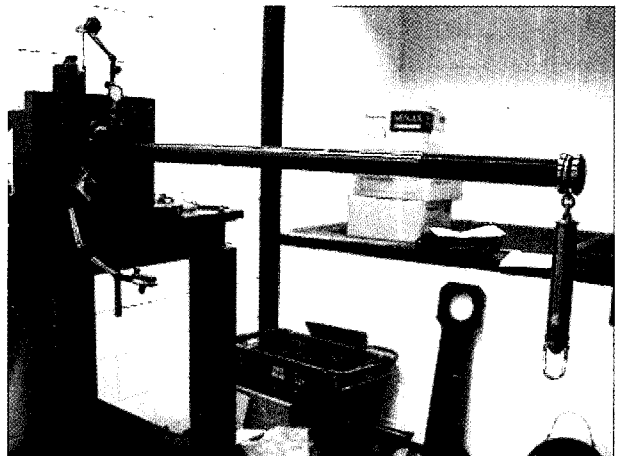


그림 9. 벤딩모멘트를 측정하기 위한 실험대
Fig. 9. Test bed for Bending moment

표 1. 벤딩 모멘트 테스트 결과
Table 1. The test of Bending moment

	변위 [mm]	힘 [kgf]	모멘트 강성 [Nm/arcmin]
1	0.096	50	480.21
	0.048	30	576.25
	0.013	15	1063.9
2	0.098	50	470.41
	0.045	30	614.67
	0.011	15	1257.28
3	0.094	50	490.43
	0.05	30	553.2
	0.018	15	768.33
평균			697.18

- 힘을 가한 지점까지 거리 : 1000m
- 측정 거리 : 300mm

3.4 소음 측정

표 2에서 보이는 소음 측정값은 감속기 단독 구동 시, Nyquist 제어 상태에서 감속기로부터 1m거리에서 측정한 값이다. 산업용으로 많이 쓰이는 로봇 감속기의 평균 소음이 85dB임을 감안하면 소음 면에서 상당히 유리함을 알 수 있다.

표 2. 소음 테스트 결과
Table 2. The test of noise

입력속도 [rpm]	소음 [dB]	
	정방향	역방향
1000	68	70
2000	73	74
3000	74	76

4. 결 론

로봇의 치형은 크게 3가지로 구분 될 수 있다. 사이크로이드 치형, 인벌류트 치형과 직선으로 구성된 삼각형을 기본으로 설계된 치형이라 할 수 있다. 본 연구에서는 직선으로 구성된 치형에 대하여 물림 특성과 응력 분포에 대하여 연구하였다. 그리고 실제 제작과 실험을 통하여 로봇에 응용 가능성을 확인하였다. 이 연구를 바탕으로 새로운 로봇 감속기 치형을 제안하게 되었으며 물림에 관한 여러 가지 개선책을 제시 할 수 있었다.

- 1) 편위계수를 적절히 활용할 경우 물림과 응력 그리고 강성이 크게 개선되는 것을 발견하였다.
- 2) 기존의 사이크로이드 치형과 강도 비교 평가를 통하여 새롭게 설계된 직선 치형이 굽힘 강도면에서 유리함을 알 수 있었다.
- 3) 기존의 로봇 감속기 보다 소음 특성을 크게 개선하였다.

참 고 문 헌

- [1] Teijin Seiki, *RV Series*. Catalog, 2001.
- [2] Harmonic Drive System, *Harmonic Drive*, Catalog, pp. 4-12, 2000.
- [3] Surnitomo Machinery Corp. of America, *SM-Servo-Match Precision Torque Multiplying Component*, Catalog, 2001.
- [4] 日高熙晃, 石田武, 松本和幸, 橋本正孝, "사이크로이드齒車を用いたK-H-V形遊星齒車裝置の回轉傳達誤差に關する研究(第1報)", 日本機械學會論文集(C編) 第570号, 1995.
- [5] www.teijinseiki.com
- [6] Faydor L.Litvin, "*Gear Geometry and Applied Theory*", Prentice-Hall, pp. 1-84, 382-411, 1994.
- [7] Darle W. Dudley, *Handbook of Practical Gear Design*, McGraw-Hill, pp. 2-153, 1984.
- [8] 오박관, "A Study on the Development of the Torque Driver for Multi functional Manipulators", KAIST, pp. 17-41, 44-54, 99-100, 1988.
- [9] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, *Numerical Methods for Engineers*, McGraw Hill, 125-170, 1995.
- [10] K. L. Johnson, *Contact Mechanics*, Cambridge University Press, pp. 84-104, 284-306, 1998.
- [11] Peter Lynwander, *Gear Driving Systems*, Marcel Dekker, Inc., 1983.
- [12] Geunho Lee, "*Modeling of Multi-Mesh Gear Dynamic Analysis based on Pseudo-Interference Stiffness Estimation*", Thesis of Ph.D., University of Connecticut, 1997.
- [13] L.M.Sung and Y.C.Tsai, "*A Study on the Mathematical Models and Contact Ratio of Extended Cycloid and Cycloid Bevel Gear Sets*", Mech. Mach. Theory Vol. 32. No 1. pp. 39-50, 1996.
- [14] 조한상, 임원식, 박영일, 이장무, "특성 방정식을 이용한 회전기계 동력전달계의 유효강성 결정법," 대한기계학회논문집 A권 2p22권 제12호, pp. 2231-2238, 1988.
- [15] 세진IGB, *Technical Report 2005*.

저 자 소개



남원기(Won-Ki Nam)

2006년 : 중앙대학교 기계공학부 공학사
2006년~현재 : 동대학원 석사과정

Phone : +82-2-820-5314
E-mail : saengee@hanmail.net



장인훈(In-Hun Jang)

1993년 : 중앙대학교 제어계측공학과
공학사
1999년 : 동대학원 제어계측공학과
공학석사
1999년 ~ 2000년 : (주)신도리코
기술연구소 연구원

2000년~현재 : (주)아로마솔루션 기술연구소 책임연구원
2004년~현재 : 중앙대학교대학원 전자전기공학부 박사과정

관심분야 : 지능로봇, 패턴인식, 지능형 홈 및 홈네트워킹
Phone : +82-2-820-5319
E-mail : inhun@wm.cau.ac.kr



심귀보(Kwee-Bo Sim)

1990년 : 일본 The University of Tokyo
전자공학과 공학박사
1991년 ~ 현재 : 중앙대학교
전자전기공학부 교수

[제16권 2호(2006년 4월호) 참조]

2006년 ~ 현재 : 한국퍼지 및 지능시스템학회 회장

E-mail : kbsim@cau.ac.kr
Homepage URL : <http://alife.cau.ac.kr>



오세훈(Se-Hoon Oh)

1981년 : 중앙대학교 기계공학과 공학사
1983년 : 서울대학교 기계공학과 공학석사
1990년 : 영국 IMPERIAL COLLEGE
기계공학과 공학박사
1985년 ~ 1992년 : 한국기계연구원
로봇공학실 실장
1993년 ~ 현재 : 중앙대학교 기계공학부
교수

Phone : +82-2-817-3134
E-mail : osh@cau.ac.kr