다물체 모델링을 이용한 외륜 고정형 Cycloid 감속기의 Offset에 의한 편반력 및 진동차이 분석

Multibody modeling and Analysis on Difference of Pin-reaction Force and Vibration caused by Offset in Fixed Outer Ring Type Cycloidal Speed Reducer

김 홍 기* · 이 기 복** · 유 흥 희†
Hong Ki Kim, Ki Bok Lee and Hong Hee Yoo

(Received June 1, 2012 ; Revised October 11, 2012 ; Accepted October 11, 2012)

Key Words : Cycloid(사이클로이드), Reducer(감속기), Contact Force(접촉력), Multibody Model(다물체 모델), Reduction Ratio(감속비)

ABSTRACT

A cycloid speed reducer is a type of the speed reducers. The cycloid speed reducer has a eccentric rotating motion and offset to avoid some problem of assembly, so it has a disadvantage for vibration. In this paper, a multi-body dynamic model is developed for a cycloid speed reducer and the dynamic behaviors of the reducer are investigated. The cycloid speed reducer consists of cycloidal plate gears, housing gear, input shaft, output pin and shaft, and eccentric bearings. Using a CAD program, each component of cycloid reducer is modeled based on the offset and multi-body simulations are performed using Recurdyn. As a result, the pin reaction force and the amplitude of bearing displacement are increased by the offset.

기 호 설 명

e : 편심량
 L_i : 모멘트 팔길이
 Z_w : 사이클로이드 기어수
 z_p : 편개수
 r_h : 하우징반경
 r_p : 편반경
 r_1 : 기어 피치원 반경

r_2 : 하우징 피치원 반경
 p_i : 편반력
 T : 토크

1. 서 론

감속기는 동력 전달 장치를 구성하는 기계요소로 각종 기계장치의 기계적 구성부품은 대부분 구동부 분이 모터와 감속장치로 구성이 되어 있으며 감속기의 입출력 특성이 시스템의 성능에 큰 영향을 미치

† Corresponding Author ; Member, School of Mechanical Engineering
Hanyang University
E-mail : hhyoo@hanyang.ac.kr
Tel : +82-2-2220-0446, Fax : +82-2-2293-5070

* Member, School of Mechanical Engineering Hanyang University

** School of Mechanical Engineering Hanyang University

A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Spring Conference

† Recommended by Editor Don Chool Lee

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

게 된다. 더욱이 정확한 위치제어가 요구되는 로봇, 자동화 장치에서는 이 부분의 정밀도와 진동특성이 장치의 정확도를 결정하기 때문에 감속기는 기계적 구성요소 중 가장 중요한 부품으로 취급되고 있다. 성능 요구조건을 충족시키기 위해서는 감속장치의 저백래시, 고감속비와 소형 경량화 특성이 요구되는데 이를 만족할 수 있는 정밀 감속기는 여러 종류가 있으나 그 중 주로 사용하는 것은 내접 유성식 감속기와 주속식 감속기로 나눌 수 있다. 내접 유성식 감속기의 대표적인 제품이 사이클로이드 감속기이다.

사이클로이드 감속기는 기본적으로 하우징 내경 부위에 장착된 핀으로 구성된 내 기어, 편심운동을 발생시키는 입력부, 편심운동과 회전운동을 하는 사이클로이드 기어, 그리고 감속된 회전을 출력하는 출력부로 구성된다. 사이클로이드 감속기의 감속비는 내기어와 사이클로이드 기어의 치수차에 의하여 결정되므로 큰 감속비를 용이하게 얻을 수 있고 작은 공간을 차지하며, 치간섭 없이 정확한 접촉에 의해 운동을 전달하므로 정밀한 회전운동의 전달이 가능하다. 그러나 사이클로이드 치형의 형상설계가 난해하고 외기어인 사이클로이드 기어가 편심운동을 하기 때문에 진동 및 소음성능이 좋지 못하다.

기존 연구로는 Litvin^(1,2)은 사이클로이드 감속기에 대한 간략한 소개와 내기어와 사이클로이드 기어의 편심량과 잇수간의 관계 및 형상 생성의 기초적인 관계를 제시하였으며 신중호 등⁽³⁾은 순간속도 중심과 좌표변환을 이용하는 형상 설계기법을 제시하였다. 이상엽 등⁽⁴⁾은 Hertz접촉이론을 이용하여 편접촉력과 사이클로이드 감속기의 비틀림강성을 해석하였다. 근래에 들어서는 사이클로이드 감속기의 진동 및 소음의 원인을 규명하고 개선하기 위한 연구가 이루어졌다^(5,6).

이 논문에서는 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 이론적인 사이클로이드 치형과 offset된 치형을 각각 모델링하고 해석을 수행하여 각 치형에 작용하는 힘과 회전운동에 의한 진동특성을 비교·분석하였다.

2. 사이클로이드 감속기 구성 및 제원

이 논문에서 다루는 사이클로이드 감속기는 감속

Fig. 1 Cycloid reducer

Table 1 Design parameter

Parameter	Value
Radius of housing(r_h)	24 mm
Radius of pin(r_p)	0.8 mm
Number of pin(z_p)	50
Number of teeth(z_o)	49
Radius of small pitch circle(r_1)	21.07 mm
Radius of large pitch circle(r_2)	21.5 mm
Eccentric value(e)	0.43 mm

비가 49이고 Fig. 1에서 보는 바와 같이 크게 고정부인 아우터 기어가 되는 하우징, 사이클로이드 기어, 편심베어링, 핀 셰프트, 출력부인 아웃풋 셰프트로 구성이 되어 있다. 사이클로이드 감속기의 제원은 Table 1에 나타내었다.

이론적으로 사이클로이드 기어는 기어 전 잇수에 걸쳐서 내치인 핀에 걸쳐서 접촉을 하지만 실 제품의 조립 및 제작의 어려움으로 이론적인 곡선보다 일정한 오프셋만큼 작게 만들어 치형을 제작한다. 이 논문에서는 오프셋에 의한 차이를 알아보기 위해 이론적인 치형과 0.04 mm, 0.1 mm, 0.2 mm로 적용된 사이클로이드 기어를 Fig. 2에서 보는 바와 같이 사용하였다.

3. 사이클로이드 감속기 모델링

사이클로이드 기어는 CAD프로그램을 이용하여 오프셋전과 후의 기어를 각각 설계하고 Recurdyn을 이용하여 각 부품들을 강체로 구성하였다. 해석시 오프셋이 적용되는 사이클로이드 기어를 제외한 부품은

Fig. 2 Cycloid gear offset

Body	Constraint	D.O.F
Outer Gear	Bushing	6
Inner & Outer Gear	Contact	-
Inner Gear & Pin Shaft	Contact	-
Inner Gear & Bearing	Revolute	1
Out Shaft & Outer Gear	Revolute	1
Output Shaft & Pin Shaft	Fixed	0
Bearing	Revolute	1

Fig. 3 Degree of freedom of cycloid reducer model

모두 동일한 모델을 사용하였다. 회전하는 부품인 사이클로이드 기어와 편심베어링, 아웃풋 셰프트는 모두 회전 조인트를 사용하여 구속하였고 아우터 기어는 부싱으로 구속하고 핀 셰프트는 아웃풋 셰프트와 고정하여 한 몸체처럼 움직이도록 구속조건을 부여하였다. 이너 기어인 사이클로이드 기어는 아우터 기어와 치접촉을 하면서 회전하기 때문에 치형간 solid contact조건을 부여하였다.

Solid contact에 사용되는 접촉력에 관한 수치모델은 식 (1)과 같다. 감속기 모델의 전체자유도는 24 이고 각 구속조건에 의한 최종 자유도는 Fig. 3과 같이 9이다.

$$f_n = k \delta^{m_1} + c \frac{\dot{\delta}}{|\dot{\delta}|} |\dot{\delta}|^{m_2} \delta^{m_3} \quad (1)$$

4. 평형 방정식

이론적으로 사이클로이드 기어는 중심선을 기준으로 회전방향의 한쪽에만 접촉력이 발생하고 모든

Fig. 4 Schematic view of a cycloid gear pin force

하중의 방향은 Fig. 4에서와 같이 순간중심점을 향한다. 각 핀에서 받는 하중을 p_i , 모멘트 팔의 길이를 L_i 라고 하면 사이클로이드 중심점에서의 회전 모멘트는 식 (2)와 같다.

$$T = \sum_{i=1}^{z_p/2} p_i L_i \quad (2)$$

순간 중심점에서 핀 중심점까지의 거리를 d_i , 하우징 중심과 핀 중심을 연결한 선이 수직선과 이루는 각을 θ_i 라 하면 L_i 는 식 (3)과 같다.

$$L_i = r_i \sin \beta_i = \frac{r_i r_h}{d_i} \sin \theta_i \quad \begin{cases} d_i = \sqrt{r_h^2 + r_2^2 - 2r_h r_2 \cos \theta_i} \\ \sin \beta_i = \frac{r_h}{d_i} \sin \theta_i \end{cases} \quad (3)$$

사이클로이드기어가 $\delta\theta$ 만큼 회전하였다고 가정하면 각 핀과의 접촉점에서의 변위량 δ_i 는 기하학적으로 다음의 조건을 만족시킨다.

$$\delta_i = L_i \delta\theta \quad (4)$$

핀의 강성을 k 라 하면 변위는 하중에 비례하게 된다.

$$p_i = k \delta_i \quad (5)$$

식 (4)를 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같고 식 (6)을

다시 식 (2)에 대입하여 $\delta\theta$ 에 대하여 정리하면 식 (7)과 같다.

$$p_i = kL_i\delta\theta \quad (6)$$

$$\delta\theta = \frac{T}{k\sum L_i^2} \quad (7)$$

식 (7)을 식 (6)에 대입하면 최종적으로 핀에 분배되는 하중이 계산된다^(4,7,8).

$$p_i = \frac{TL_i}{\sum L_i^2} \quad (8)$$

5. 해석 결과

5.1 핀 반력

출력토크를 1 N.m로 하여 정지된 상태에서의 각 핀에 작용하는 반력을 해석하고 이를 Matlab을 이용

하여 평형방정식에 의해 계산된 결과와 해 보면 Figs. 5~8에서 보는 바와 같다.

Fig. 5는 오프셋이 적용되지 않은 Recurdyn해석결과와 Matlab을 이용한 계산결과이다. 식 (8)에서의 핀 반력은 사이클로이드 기어의 미세회전에 의한 미소

Fig. 7 Pin force offset 0.1

Fig. 5 Pin force offset 0.0

Fig. 8 Pin force offset 0.2

Fig. 6 Pin force offset 0.04

Fig. 9 Bearing reaction force

변위량이 상쇄되어 포함되지 않지만 Recurdyn을 이용한 해석에서는 사이클로이드 기어의 미세회전에 의한 미소변위량이 고려되어 핀반력의 분포가 오른쪽으로 치우치는 경향이 발생한다. 하지만 반력의 분포가 전 핀에 걸쳐 고르게 분포하고 크기 또한 평형방정식에 의한 계산결과와 유사함을 확인 할 수가 있다.

Figs. 6~8에서 보듯이 읍셋이 커질수록 접촉하는 핀의 개수가 줄어들고 핀에 걸리는 반력의 크기가 점점 증가하여 계산결과와 많이 차이가 남을 알 수가 있다. 최대 하중을 담당하는 핀도 읍셋이 증가함에 따라 옮겨진다.

하중이 증가하면 핀의 응력이 커지게 되고 이는 사이클로이드 감속기의 내구수명을 떨어뜨리는 결과를 가져오게 된다.

5.2 베어링 반력

출력 토크를 0 N.m에서 8 N.m로 점차 증가시켜 가며 입력부인 베어링에 모터토크와 회전조건을 주어 감속기가 회전하고 있는 상태에서의 읍셋에 따른 베어링에 걸리는 반력을 Fig. 9에 도시했다. 부하로 작용하는 출력토크가 점점 증가 할수록 베어링에 걸리는 반력이 점차 증대되고 감속비에 의해 증폭된 모터토크와 출력 토크가 평형을 유지하게 되면 베어링의 반력도 일정한 값으로 수렴하며 읍셋이 증가할수록 베어링에 작용하는 반력의 값도 함께 증가함을 알 수가 있다.

5.3 베어링 변위

사이클로이드 기어의 회전시 베어링의 진동량을 알아보기 위해 Fig. 10과 같이 모터축에 해당하는 유한요소모델을 추가하여 해석을 수행하였다. 베어링과

Fig. 10 FEM model for shaft

pin도 실제로는 탄성체이지만 베어링과 같이 구속되어 회전하고 반력이 최종적으로 작용하는 부품이 모터축이므로 이 연구에서는 모터축만을 유한요소로 모델링하였다. 해석결과 0.5초까지 출력토크가 증가함에 따라 핀에 작용하는 반력의 크기가 커지고

Fig. 11 Displacement offset 0.0

Fig. 12 Displacement offset 0.04

Fig. 13 Displacement offset 0.1

Fig. 14 Displacement offset 0.2

Fig. 15 Reaction force & displacement of bearing

그에 따른 베어링에 작용하는 반력이 커지므로 베어링의 변위도 Figs. 11~14에서 보는 바와 같이 증가한다.

6. 결 론

이 연구에서는 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn을 사용하여 사이클로이드 감속기를 다물체 시스템으로 모델링하였고 부하가 작용할 시각 치형에 걸리는 반력을 구하여 평형 방정식으로 구한 값과 비교해 보았다. 그 결과 offset이 적용되지 않은 이론적인 사이클로이드 기어의 반력은 해석 결과와 계산된 결과가 유사함을 확인하였고 offset이 커질수록 하중을 담당하는 접촉핀의 개수가 줄어들고 하나의 치형이 담당하는 하중과 베어링에 걸리는 하중 및 변위도 Fig. 15에서와 같이 증대하는 것을 확인하였다.

이러한 하중의 증가와 접촉하는 핀개수의 감소는 기어치의 수명과 베어링의 수명을 감소시키는 역할을 하므로 적절한 offset을 고려하여 사이클로이드 기어의 설계 및 제작이 필요하다.

후 기

이 논문은 2012년도 2단계 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

이 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국 에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다(No. 2011T100200116).

참 고 문 헌

- (1) Litvin, F. L., 1994, Gear Geometry and Applied Theory, Prentice-Hall Inc.
- (2) Litvin, F. L. and Feng, P. H., 1995, Computerized Design and Generation of Cycloidal Gearing, ASME, Design Engineering Technical Conferences, Vol. 1, pp. 537~543.
- (3) Shin, J. H., Yoon, H. E. and Kang, D. W., 2001, Study on Shape Design Method of Cycloidal Plate Gear, Journal of the KSME(A), Vol. 25, No. 2, pp. 70~80.
- (4) Lee, S. Y., Park, J. S., Ahn, H. J., Han, D. C., 2005, Torsional Stiffness Analysis of a Cycloid Reducer using Hertz Contact Theory, Proceedings of the Korean Society of Precision Engineering Conference, pp. 816~821.
- (5) Kim, W. H. and Chung, J. T., 2004, A Study on the Noise and Vibration Diagnostic of the Industrial Robot Reducer, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 875~878.
- (6) Chung, J. T., Hong, I. H. and Yoon, A. S., 2007, An Experimental Study on the Noise Identification of a Planocentric Gear Reducer, Proceedings of the KSNVE Annual Autumn Conference, pp. 697~701.
- (7) Lee, S. C., Oh, P. K. and Kwon, O. K., 1987, A Study on the Design of Planocentric Torque Driver used in Industrial Robot, Journal of the KSLE, Vol. 3, No. 2, pp. 72~80.
- (8) Oh, P. K., Kim, C. H., Lee, S. C. and Han, H. D., 1987, A Study on the Development of the Torque

Driver for Multi-functional Manipulators, Ministry of Science and Technology.

(9) Recurdyn Solver Theoretical Manual 5th revision, 2005, Functionbay Inc.

(10) Recurdyn Solver Theoretical Manual 7th revision, 2011, Functionbay Inc.

Hong Hee Yoo received his B.S. and M.S. degrees in the Department of Mechanical Design in Seoul National University in 1980 and 1982. He received his Ph.D. degree in the Department of Mechanical Engineering and Applied

Mechanics in the University of Michigan at Ann Arbor in 1989. He is a professor in the Department of Mechanical Engineering at Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests include multi-body dynamics, structural vibration, and statistical uncertainty analysis in mechanics.

Hong Ki Kim received his B.S. degrees in the Department of Mechanical Engineering in Kyungpook National University, Daegu, Korea in 2006. He is working as a M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering in Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests include vibration and multi-body dynamics.

Ki Bok Lee received his B.S. degrees in the Department of Mechanical Engineering in Kookmin University, Seoul, Korea in 2012. He is working as a M.S. candidate in the Department of Mechanical Engineering in Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests include vibration and multi-body dynamics.