Transactions of the KSNVE, 23(3) : 234~239, 2013
http://dx.doi.org/10.5050/KSNVE.2013.23.3.234

한국소음진동공학회논문집 제 23 권 제 3 호, pp. 234~239, 2013
ISSN 1598-2785(Print), ISSN 2287-5476(Online)

# 다물체 모델링을 이용한 2단 유성식 외륜 고정형 사이클로이드 감속기의 진동특성분석

# Vibration Analysis of Planetary Fixed Outer-ring Type Cycloidal Speed Reducer by using Multi-body Modeling

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

(Received November 29, 2012 ; Revised February 25, 2013 ; Accepted February 25, 2013)

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

## ABSTRACT

There are many types of speed reducer for industrial uses. However the cycloid speed reducer is widely used in manipulators based on excellent performance of low backlash, high reduction ratio and compact size. It is essential to use precision speed reducer for accuracy of position controls on robot systems and electric vehicles. 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 eccentric. Multi-body simulations using Recurdyn and test using a rig tester are performed. As a result, the pin reaction force and the amplitude of housing displacement are increased by the larger offset and smaller eccentric value of cycloid reducer.

## 기 호 설 명

$e$ : 편심량
$L_i$ : 모멘트 팔길이
$p_i$ : 핀반력
$r_h$ : 하우징반경
$r_p$ : 핀반경
$r_1$ : 기어 피치원 반경
$r_2$ : 하우징 피치원 반경
$T$ : 토크
$z_w$ : 사이클로이드 기어수
$z_p$ : 핀개수

## 1. 서 론

감속기는 동력 전달 장치를 구성하는 기계요소로 각종 기계장치의 기계적 구성부품은 대부분 구동부

† 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
* School of Mechanical Engineering Hanyang University

# A part of this paper was presented at the KSNVE 2012 Annual Autumn Conference
‡ Recommended by Editor Don Chool Lee

ⓒ The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

분이 모터와 감속장치로 구성이 되어 있으며 감속기의 입출력 특성이 시스템의 성능에 큰 영향을 미치게 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. 오늘날 산업용 로봇이나 자동화기기 또는 고감속 및 정확한 위치제어를 위한 기계요소에서 동력전달 장치로 사용되는 감속기중 대표적인 제품이 사이클로이드 감속기이다.

최근 자동차분야에서도 친환경 및 전장화 추세에 따라 모터로 구동되는 부품이 많아지면서 사이클로이드 감속기의 사용추세는 점점 늘어나고 있다.

사이클로이드 감속기는 기본적으로 하우징 내경부위에 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 핀접촉력과 사이클로이드 감속기의 비틀림강성을 해석하였다. 근래에 들어서는 사이클로이드 감속기의 진동 및 소음의 원인을 규명하고 개선하기 위한 연구가 이루어졌다[5,6].

이 논문에서는 기존에 연구된 일반형 사이클로이드 감속기의 옵셋(offset)에 따른 핀반력 및 진동특성[7]에서 더나아가 유성기어가 적용된 2단 유성기어 사이클로이드 감속기를 편심량과 옵셋의 조합에 따른 총 세가지 사양의 사이클로이드 감속기를 모델링하여 해석하고 제품을 제작하여 시험기를 이용한 진동 및 소음레벨을 비교 분석하였다.

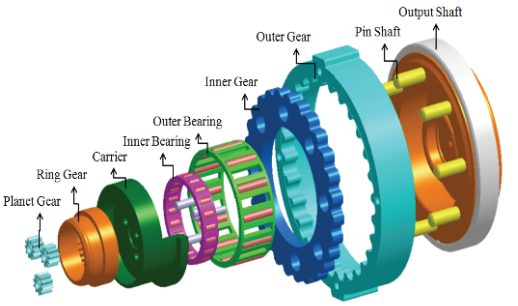


**Fig. 1** Cycloid reducer

**Table 1** Design parameter

| | Case1 | Case2 | Case3 |
|---|---|---|---|
| Radius of housing($r_h$) | 28.5 mm | 28.5 mm | 28.5 mm |
| Number of pin($Z_p$) | 28 | 28 | 28 |
| Number of teeth($Z_\omega$) | 27 | 27 | 27 |
| Small pitch circle($r_1$) | 24.3 mm | 18.9 mm | 18.9 mm |
| Large pitch circle($r_2$) | 25.2 mm | 19.6 mm | 19.6 mm |
| Eccentric value($e$) | 0.9 mm | 0.7 mm | 0.7 mm |
| Offset($o$) | 0.025 mm | 0.025 mm | 0.15 mm |

## 2. 사이클로이드 감속기 구성 및 제원

이 논문에서 다루는 유성기어 일체형 사이클로이드 감속기의 구성은 Fig. 1에서 보는 바와 같이 1단부는 유성기어와 링기어, 편심운동을 발생하기 위한 캐리어 및 축하중 지지용 베어링으로 구성되어 있으며 2단부는 고정부인 외부 기어(outer gear), 사이클로이드 기어, 핀 쉐프트(pin shaft), 출력부인 아웃풋 쉐프트(output shaft)로 구성이 되어 있다. 이 연구에서는 편심량과 옵셋(offset)별로 차이를 둔 3가지 사양의 감속기를 사용하여 연구를 수행하였으며 각 감속기의 제원은 Table 1과 같다. 1단 감속부인 유성기어의 감속비는 3.7로서 모두 동일하게 사용하였으며 2단 감속부인 사이클로이드 기어의 감속비는 27로서 총 감속비가 100인 감속기이다. Case1과 case2는 offset은 동일하게 유지하고 편심량 차이를 두어 설계를 하고 case2, case3은 편심량은 동일하

고 옵셋(offset)차이를 두어 설계를 하였다.

## 3. 사이클로이드 감속기 모델링 및 구속조건

컴퓨터 설계프로그램을 이용하여 각 사양별 사이클로이드 기어를 설계하고 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 각 부품을 다물체 시스템으로 모델링 하였다.

먼저 1단부인 유성감속기 부분에서 모터축과 연결되어 회전하는 부품인 태양기어(sun gear)는 회전(revolute) 조인트를 이용하여 구속하였으며 태양기어와 치간 접촉을 하면서 회전하는 유성기어는 태양기어와 각 유성기어 치를 접촉(contact)조건으로 치 접촉을 구현 하였으며 각 유성기어들은 캐리어에 연결되어 자전하므로 캐리어를 베이스 바디로 한 회전 조인트로 구속을 하였다. 링기어도 유성기어와 치접촉이 이루어지므로 동일한 접촉조건을 주었으며 유성기어와 달리 고정되는 부품이므로 고정(fixed) 조인트로 구속하였으며 캐리어는 회전운동을 위해 회전조인트로 구속하였다. 유성기어가 링기어의 원주상을 자전하면서 공전하게 되면 유성기어와 핀으로 연결된 캐리어도 회전하게 된다. 내부 베어링(inner bearing)과 외부 베어링(outer bearing)은 실제로는 베어링 롤러들과 다른 부품간 접촉을 하면서 회전하는 부품이지만 이 연구에서는 해석시간의 단축을 위해 회전 조인트로 구속을 하였다.

2단 감속기인 사이클로이드 감속기부에서 외치형인 사이클로이드 기어는 1단 감속부의 마지막 부품인 외부 베어링을 베이스 바디로 회전 조인트로 구속하였고 내치형을 구성하고 있는 아우터 기어와 접촉조건을 부여하였다. 사이클로이드 기어는 회전축을 중심으로 편심운동을 하면서 회전운동을 하게 된다. 편심운동을 배제한 순수한 회전운동만을 출력축으로 전달하기 위한 부품인 핀 축(shaft)은 사이클로이드 기어 내부에 구성되어 있는 홀 내경과 접촉을 하면서 핀 축과 고정되어 있는 출력축(output shaft)를 회전시킨다. 이를 위해 핀 축과 사이클로이드 내부 홀들은 모두 접촉조건으로 구속시켰으며 각각의 핀 축과 출력축은 고정조인트로 구속하였고 출력축은 회전조인트로 구속하여 회전을 가능하게 규제 하였다. 마지막으로 고정 되는 부품인 외부 기어는 사이클로이드와 접촉하여 반력을 지지하는 부품이며 반력에 의한 진동의 영향성을 알아보기 위해 빔하중(beam force)를 이용하여 구속하였다. 실제로는 사이클로이드 기어와 웜기어, 태양기어와 유성기어 링기어 모두 접촉력에 의한 마찰력이 존재하지만 이론적인 핀 반력에서와 같이 접촉부위는 보통 오일이나 그리스 등을 윤활상태로 있기 때문에 마찰력은 수직하중에 비해 작다고 가정하여 이 연구에서는 마찰력의 영향은 무시하였다. 최종적으로 다물체 모델링에 사용한 구속조건은 Table 2와 같다.

**Table 2** Constraints of cycloid reducer model

| Parts | Constraint |
|---|---|
| Sun gear | Revolute joint |
| Ring gear | Fixed joint |
| Inner bearing & ring gear | Revolute joint |
| Carrier & inner bearing | Revolute joint |
| Inner bearing & outer bearing | Revolute joint |
| Outer bearing & cycloid gear | Revolute joint |
| Cycloid gear & outer gear | Contact |
| Cycloid gear & pin shaft | Contact |
| Pin shaft & output shaft | Fixed joint |
| Output shaft | Revolute joint |
| Outer gear | Beam force |

## 4. 해석 결과

### 4.1 핀 반력

편심량과 옵셋에 차이를 둔 case1, case2, case3의 각각의 경우에 대한 핀 작용력을 알아보기 위해 출력토크를 20 N·m로 인가한 후 해석한 결과를 비교하였다(Figs. 2~4).

Fig. 2는 case1의 결과로 최대 핀작용력은 10번째 핀 부근에서 약 140 N의 힘이 작용하였고 Fig. 3의 case2결과는 동일한 10번째 핀 부근에서 190 N의 힘이 작용하는 것을 알 수가 있다. 이는 동일한 옵셋에서 편심량의 차이만을 둔 결과로 핀 작용력의 분포는 유사하지만 최대 작용력의 크기가 편심이 작을 경우 더 증가함을 보여주고 있다.

Fig. 4의 그래프는 case2와 동일한 편심량을 가지면서 옵셋차이를 둔 case3의 결과로, 6번째 핀 부근에서 270 N의 최대 힘이 작용하고 접촉하는 핀의

개수가 줄어든 것을 확인 할 수가 있다.

### 4.2 하우징 진동

Figs. 5~7은 동일한 출력토크 20 N·m를 인가하고 모터 입력을 1000 rad/s로 점차 증가 시켰을 때의 하우징의 진동을 나타낸 그래프이다.

2.5초까지는 출력토크가 작용하지 않고 모터의 회전만 작용하는 구간이며 2.5초와 3초 사이구간에서 출력토크를 0 N·m에서 20 N·m로 점차 증가시켰다. Case3의 경우 약 0.001 mm로 가장 큰 진동을 보였으며 case2는 0.0007 mm로 0.0006 mm인 case1과 큰 차이를 나타내지 않음을 확인 할 수가 있다.

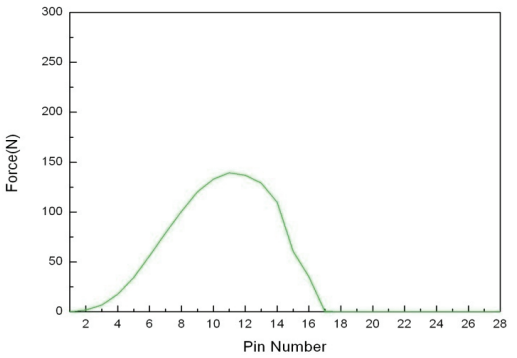


**Fig. 2** Pin reaction force case1

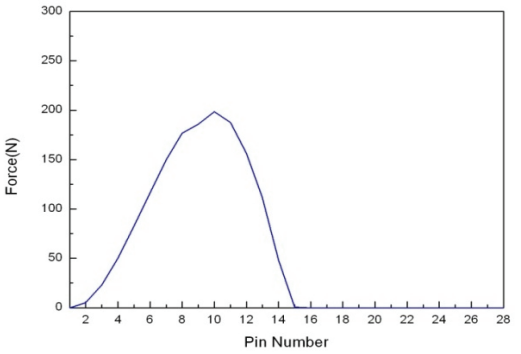


**Fig. 3** Pin reaction force case2

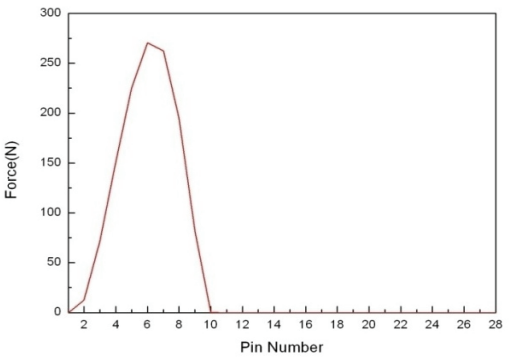


**Fig. 4** Pin reaction force case3

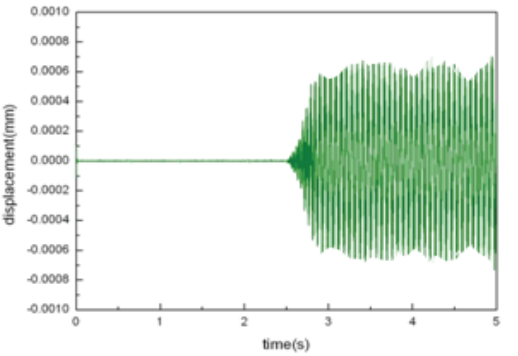


**Fig. 5** Housing displacement case1

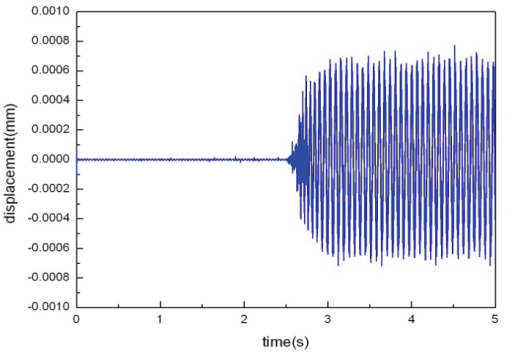


**Fig. 6** Housing displacement case2

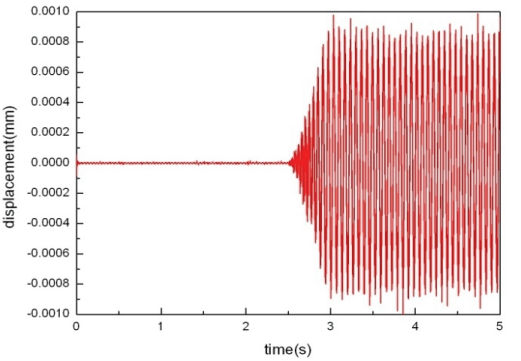


**Fig. 7** Housing displacement case3

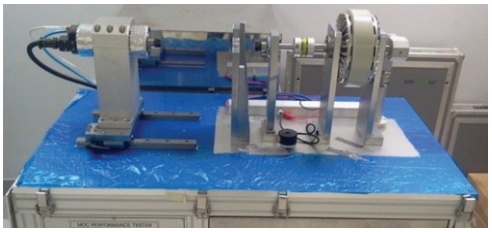

**Fig. 8** Test machine

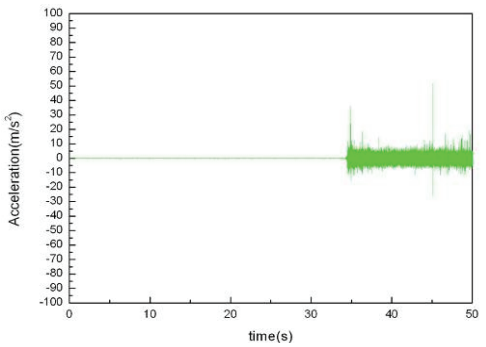


**Fig. 9** Housing acceleration case1

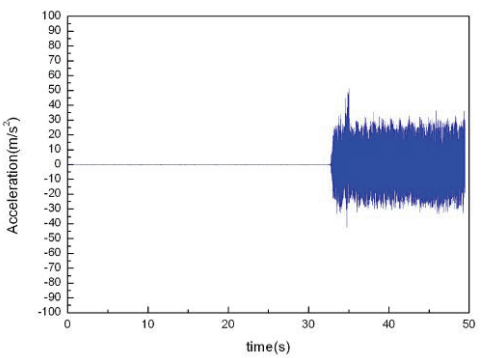


**Fig. 10** Housing acceleration case2

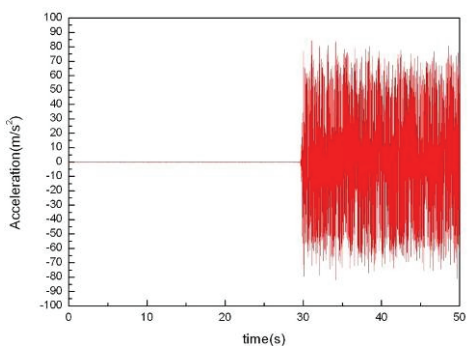


**Fig. 11** Housing acceleration case3

**Table 3** Sound pressure level

| | Case1 | Case2 | Case3 |
|---|---|---|---|
| Back ground noise(dB) | 35.3 | 35.9 | 35.5 |
| Operating noise(dB) | 40.2 | 42.7 | 43.4 |

## 5. 시험 결과

각 케이스별 실제품을 제작하고 간이 시험기를 만들어 하우징 진동과 작동 시 발생하는 소음을 측정하였다. 시험기는 Fig. 8과 같이 사이클로이드 감속기를 장착하여 회전속도를 인가 할 수 있는 입력 모터부와 사이클로이드 감속기의 출력토크를 조절할 수 있는 클러치로 구성되어 있는 간이 시험기이며 각 사양별 사이클로이드 기어는 탄소강을 이용하여 제작하였다. 하우징의 진동은 가속도 센서를 하우징 상단부에 부착하여 지면과 수직방향의 가속도를 측정하고 마이크로폰으로 작동시 발생하는 소음레벨을 측정하였다.

입력 회전속도로는 1600 RPM, 출력토크값은 2.5 N·m로 하여 작동중의 각 사양별 하우징의 가속도 결과를 도출하였다. Case1의 하우징 진동은 약 10 $m/s^2$으로 측정되었으며 case2는 30 $m/s^2$, case3은 70 $m/s^2$으로 case1의 경우 진동이 가장 작음을 확인하였다(Fig. 9~11).

작동중 소음레벨은 Table 3에 나타내었다. Case1의 값이 40.2 dB로 case2의 42.7 dB, case3의 43.4 dB 대비 가장 낮은 수준임을 알 수가 있다.

## 6. 결 론

이 연구에서는 일반적으로 알려져 있는 사이클로이드 기어의 설계변수인 편심량에 실제 제조시 사용되어지는 설계 변수인 옵셋을 추가하여 각각의 조합에 따른 사이클로이드 기어를 모델링하고 상용 다물체 동역학 해석 프로그램인 Recurdyn을 이용하여 각 사양의 핀 작용력 및 진동 특성을 분석하였다. 해석결과에서는 편심량만 차이가 날 경우 접촉하는 핀의 개수는 차이가 없었지만 편심량의 크기가 작을수록 최대 핀 작용력의 크기가 커짐을 확인하였고 하우징의 진동특성에 있어서도 편심량이 작은 경우가 큰 경우보다 진동량이 증가하는 것을 확인하였다. 편심량이 동일하고 옵셋의 차이만 날 경우 옵셋

이 증가할수록 핀 작용력이 커지고 하우징의 진동 또한 커짐을 확인하였다. 실제 사이클로이드 기어를 제작하여 실시한 시험결과에서도 비록 핀에 작용하는 힘은 측정 할 수 없었지만 하우징의 진동량 및 소음레벨을 측정한 결과 편심량 0.9 mm사양이 0.7 mm 사양대비 진동량은 20 m/s$^2$, 소음은 2.5 dB정도의 개선 효과를 보였으며 옵셋 0.025 mm사양이 0.15 mm 사양대비 진동량은 40 m/s$^2$, 소음은 0.7 dB 정도의 개선 효과를 보였다.

## 후 기

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

이 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지기술평가원(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, Transactions of the KSME(A), Vol. 25, No. 2, pp. 70~80.

(4) Lee, S. Y., Park, J. S., Ahn, H. J. and 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) Kim, H. K., Lee, K. B. and Yoo, H. H., 2012, Multibody Modeling and Analysis on Difference of Pin-reaction Force and Vibration Caused by Caused by Offset in Fixed Outer Ring Type Cycloidal Speed Reducer, Transactions of the Korean Society for Noise and Vibration Engineering, Vol. 22, No. 11, pp. 1057~1063.

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

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

**Hong Hee Yoo** received his BS and MS degrees in the Department of Mechanical Design in Seoul National University in 1980 and 1982. He received his PhD 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 BS degrees in the Department of Mechanical Engineering in Kyungpook National University, Daegu, Korea in 2006. He is working as a MS 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 BS degrees in the Department of Mechanical Engineering in Kookmin University, Seoul, Korea in 2012. He is working as a MS candidate in the Department of Mechanical Engineering in Hanyang University, Seoul, Korea. His research interests include vibration and multi-body dynamics.