

자기 포커싱 방법을 적용한 감속 장치의 자기력 특성에 관한 연구

정 광 석*

한국교통대학교 기계자동차항공공학부 기계공학전공

Magnetic force Characteristics of the Speed Reducer using Magnetic Focusing

Kwangsuk Jung*

Department of Mechanical Engineering, Korea National Univ. of Transportation 27469, Korea
(Received 2021. 10. 14. / Accepted 2021. 10. 28.)

Abstract : The magnetic gear, which amplifies the torque by filtering the magnetic field generated by the low-speed permanent magnet with a modulator, can exclude gear contact and can be effectively applied when there are environmental restrictions. In this paper, we discuss the magnetic force characteristics of a magnetic gear using a magnetic focusing array that replaces a general permanent magnet array magnetized in a radial direction along the circumferential direction. The torque increasing effect of the discussed array, known as an arrangement that increases the principal component by focusing a radial magnetic field, is compared with that of a general magnetic gear. In particular, in a magnetic gear using such an array, the sensitivity of torque according to variables is analyzed to see how various variables known as factors affecting torque have an effect.

Key words : Harmonic analysis(고조파 분석), Magnetic field analysis(자기장 분석), Magnetic focusing(자기 포커싱), Magnetic gear(마그네틱 기어), Parameter sensitivity(변수 민감도)

1. 서 론

반경방향으로 자화된 영구자석(이하 PM)에 의해 발생된 공극 자기장을 모듈레이터로 필터링하여 특정 성분만을 또 다른 PM 어레이와 자기 결합시켜 회전 속도를 감속 혹은 가속시키는 장치인 마그네틱 기어(Magnetic Gear; 이하 MG)는 기계적인 접촉을 배제할 수 있어 지속적인 유지보수가 어려운 사례에 적용이 가능하다^{1,2)}. 이러한 MG에 활용되는 PM 어레이는 일반적으로 부채꼴 형상을 하고 있으며 레디알 방식의 축형이나 선형 토폴로지³⁾도 발표된 사례가 있다. 특히, 이러한 MG에서 발생하는 토크는 전적으로 PM 어레이간의 인력, 척력에 의존하므로 PM의 자기강도

가 결국 전체 시스템의 토크 전달 밀도로 귀결되는 특징이 있어 불가피하게 높은 자화강도를 갖는 PM이 필요하다. 따라서 희토류 등에 크게 의존하는 네오뎀 계열 고자기장 PM의 불안정하고 높은 가격은 이러한 MG 응용 확대의 큰 걸림돌이 되고 있다. 따라서 MG에 소요되는 PM의 양을 최소화할 수 있는 다양한 토폴로지가 제안되어왔다⁴⁾.

본 논문에서는 기존 MG를 구성하는 부채꼴 형태의 PM 어레이 대신 반경 방향의 교번 자기장을 극대화할 수 있는 것으로 알려진 Halbach 어레이⁵⁾를 활용한 MG를 대상으로 MG의 여러 제변수 변화에 따른 토크 전달 밀도 특성을 분석하고 이를 토대로 Halbach 어레이의 토크 증대 효과와 함께 이를 이용한 MG의 민감도 해석 결과를 논의한다.

*Corresponding author, E-mail: ksjung@ut.ac.kr.

2. 마그네틱 기어의 작동 원리

일반적인 동심 MG를 구성하는 PM의 자화 패턴과 각 레이어 구성 요소를 Fig. 1에 나타내었다. MG는 원주 방향을 따라 배열된 PM에 의해 발생하는 공극 자기장을 강자성체 재질로 구성된 모듈레이터를 이용하여 자기적으로 필터링한다. 필터링된 자기장은 또 다른 PM 어레이에 의한 자기장과 자기 상호 작용을 하는데 감속 장치로 사용할 경우에는 Fig. 1에서와 같이 내측에 고속 로터가 그리고 외측에 저속 로터가 배치된다. 내측 PM 극쌍(pole pairs)의 수가 n_H 이고 모듈레이터의 극수가 n_M 인 경우 모듈레이터를 통과해 필터링된 자기장은 $n_M - n_H$ 와 같은데 여기에 동기시키기 위해 외측의 PM 극수 n_L 은 $n_M - n_H$ 이 되도록 한다. n_H 가 n_L 보다 클 때 MG는 감속기로 작용을 하는데 이 때 감속비 n 은

$$n = \frac{n_H}{n_L} = \frac{n_M - n_L}{n_L} = \frac{n_M}{n_L} - 1 \quad (1)$$

이 된다. 이러한 방법으로 MG는 가감속 작용을 하는데 실제 모델을 대상으로 공극 자기장 성분을 조사해보면 이러한 자기 필터링의 결과를 확인할 수 있다.

고속측 로터의 PM에 의해 공극 ‘L’과 모듈레이터의 외곽측 공극 ‘H’에서의 반경 방향 자기장을 구하면 Fig. 2와 같다. 해석에 사용된 PM의 경우 내경, 외

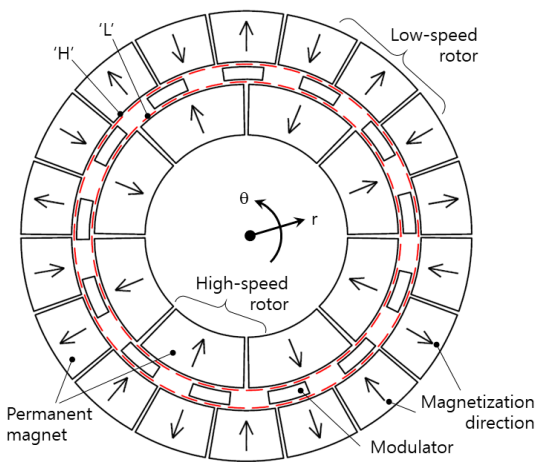
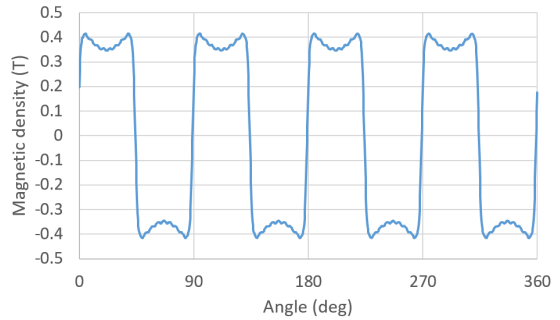
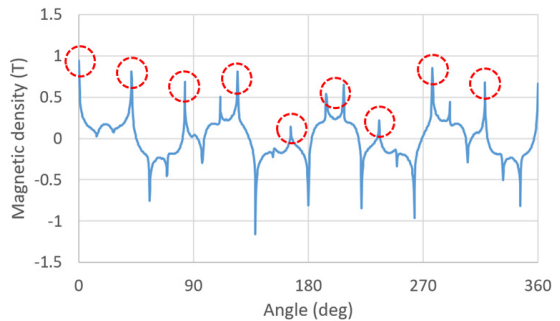


Fig. 1 Magnetization pattern of permanent magnets comprising the magnet gear



(a) Magnetic field density at air-gap ‘L’



(b) Magnetic field density at air-gap ‘H’

Fig. 2 Magnetic field density at each air-gap by permanent magnets of high-speed rotor

경이 40mm, 60mm이고 NdFeB35 계열 재질이며 모듈레이터는 전기강판인 Steel1008로 설정하였다. 이하 해석은 모두 ANSYS Maxwell v18.0을 활용한 유한요소해석 결과이다. 공극 자기장 해석 타입의 경우 Magnetostatic이며 고속측의 회전에 따른 토크 해석의 경우 Eddy current 방식을 통한 Band 설정을 활용하였다. 해석 결과는 모두 단위 길이당 결과인데 ‘L’에서는 PM의 극수를 통해 유추할 수 있듯이 4극쌍 성분이 지배적인 반면에 모듈레이터를 통과한 후에는 앞서 기술한 것과 같이 자기 필터링에 의해 특정 성분이 나타나는데 해당 성분은 모듈레이터 13극에서 고속측 PM의 4극을 뺀 9극 성분임을 알 수 있다.

자기 필터링 현상은 각 공극 자기장에 대한 고조파 해석을 통해 명확히 이해할 수 있다. Fig. 3은 모듈레이터의 내외측 공극의 자기장에 대한 공간 푸리에 분석 결과이다. 우선 ‘L’에서의 자기장에 대한 결과에서는 내측 PM 어레이의 4극 성분이 지배적으로 나타나는 것을 알 수 있는데 이와 함께 4극의 고조파 성분인 12극, 20극도 확인할 수 있다. 이에 반해 공극 ‘H’에서는

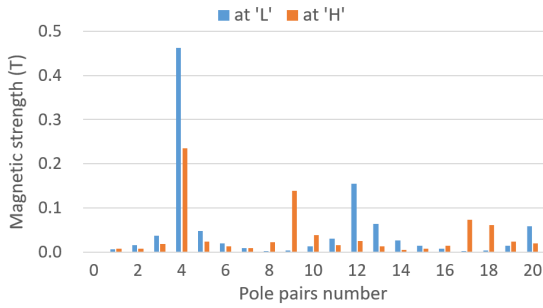


Fig. 3 Harmonic analysis result for magnetic field density at each air-gap

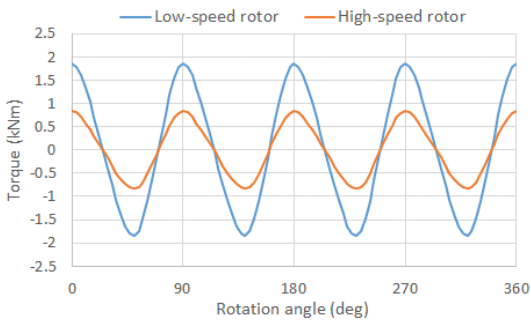


Fig. 4 Torque variation of high-speed rotor and low-speed rotor

4극 성분 외에 모듈레이터 13극과 PM 4극쌍과의 차에 해당하는 9극 성분이 현저하게 나타나는 것을 알 수 있는데 이 성분이 4극쌍 성분의 자기 필터 성분에 해당한다. 또한 4극과 13극의 합에 해당하는 17극도 확인할 수 있다. 이러한 9극 성분과 외측 PM 어레이의 9극 성분이 동기화되어 가감속 기능을 하는 것이다. 실제 감속 장치로 기능하는 Fig. 1 모델에 대한 토크 해석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 대략 0.8kNm의 진폭을 갖는 고속측 로터의 토크가 저속측 로터에서는 2.25배 증폭되어 1.8kNm에 달하는 것을 알 수 있다. 토크 비 혹은 감속비 2.25배는 앞서 기술한 것처럼 고속측 로터 4극쌍과 저속측 로터 9극쌍의 비에 해당한다.

3. Halbach 어레이를 이용한 마그네틱 기어

원주 방향을 따라 교번되어 자화된 PM 어레이 대신 Halbach 어레이를 적용한 MG의 단면도 예시를 Fig. 5에 나타내었다. 고속측 PM 어레이를 제외하면 나머지 구성 요소는 앞서 Fig. 1의 일반적인 동심 MG와 동

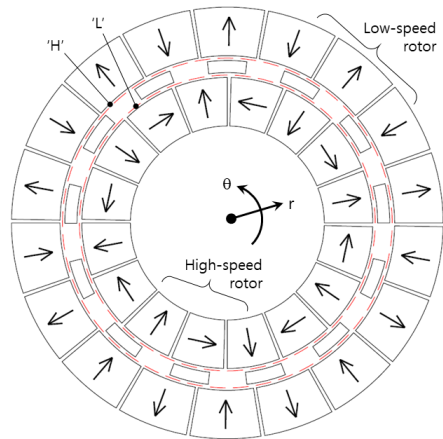
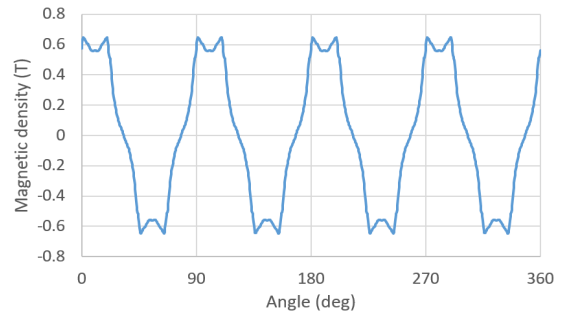
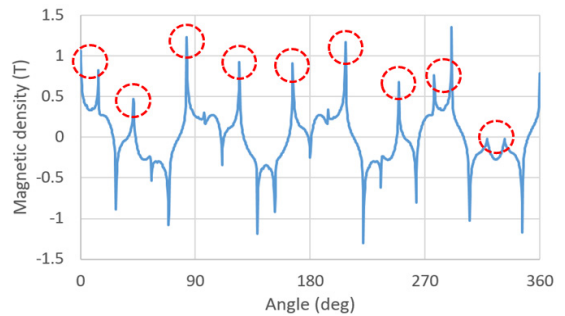


Fig. 5 Cross-sectional diagram of magnetic gear using the Halbach array



(a) Magnetic field density at air-gap 'L'



(b) Magnetic field density at air-gap 'H'

Fig. 6 Magnetic field density at each air-gap by Halbach array

일하다. 유일하게 다른 요소인 고속측 PM 어레이는 원주방향 전구간에 걸쳐 4번 반복되는 것을 알 수 있는데 반경 방향외에 원주 방향과 나란한 방향으로 자화된 PM이 중간에 섞여 있다. 이렇게 삽입된 PM이 반

경 방향 PM에 의해 발생된 자기장을 모아줘서 자기 강도를 높이는 역할을 한다. 실제 유한요소해석을 통해 Fig. 5에 점선으로 표시된 공극 'L'과 'H'에서의 자기장 성분을 구해보면 Fig. 6과 같다. 'L'에서의 자기장 패턴은 앞서 교번 자기장을 나타내는 Fig. 2의 상단 그림과 유사하나 그 크기를 비교해보면 Fig. 2의 0.4T 대비 약 50% 증가한 0.6T에 달하는 것을 확인할 수 있다. 또한 패턴 형상이 기존 모델에서와 같이 톱니바퀴 형태가 아닌, 사다리꼴에 유사한 형태를 갖는데 이러한 효과는 Halbach array를 통한 자기 포커싱 효과로 이해할 수 있다. 고속측 로터의 4극 성분이 명확하므로 모듈레이터를 통과하면 앞서 모델에서와 같이 자기 필터링이 될 것으로 유추할 수 있으며 Fig. 6의 하단 그림에서와 같이 모듈레이터 13극 성분과의 차에 해당하는 9극 성분이 생성된 것을 알 수 있다. 모듈레이터 내 외측 공극 자기장 성분의 자기 강도는 각 자기장에 대한 푸리에 분석을 통해 확인할 수 있는데 해석 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 그림의 결과는 동심 MG의 결과인 Fig. 3과 비교해서 이해할 필요가 있는데 우선 모듈

레이터 내측의 자기장 성분은 4극이 주성분인데 반해 앞서 동심 모델과는 달리 4극의 고조파 성분의 크기가 거의 없는 것을 알 수 있다. 즉, 4극쌍 PM의 주극 성분이 자기 포커싱되어 더욱 강화되었지만 이는 결국 고조파 성분을 줄이는 것에 의해 달성된 것임을 간접적으로 이해할 수 있다. 모듈레이터 외측에서 자기 필터링된 9극 성분은 대략 0.19T 정도인데 이는 동심 모델에서의 0.14T 대비 약 40% 증가한 크기이다. 내측 PM에 의한 자기장 강도와 필터링된 자기장 강도가 모두 상당 수준으로 증가되었으므로 이러한 어레이를 적용한 MG의 토크 전달 밀도 역시 대폭 증가될 것으로 예상할 수 있는데 그 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 저속측에서 감속, 증폭되어 나타난 출력 토크의 크기는 2.3kNm에 달하는데 이는 Fig. 4에 묘사된 동심 모델의 출력 토크 진폭 1.8kNm 대비 약 28% 정도 증가된 수치이다. 해당 결과를 통해 동일한 체적의 PM을 사용하여 자기 포커싱 방법만으로 전달 토크 밀도를 대폭 증가시킬 수 있다는 것을 확인할 수 있다. 이러한 특성으로 인해 동일한 전달 토크 밀도를 내기 위해 Halbach array를 채용한 MG에서는 PM의 크기를 줄일 수 있을

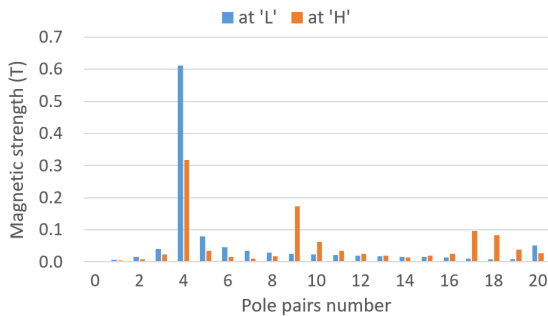


Fig. 7 Harmonic analysis result of magnetic field density by Halbach array

4. Halbach 어레이의 제변수 변화에 따른 자기력 변화 특성

MG의 예시로 든 두가지 모델인 Fig. 1과 Fig. 5에서 PM의 강도나 어레이 패턴외에도 MG의 출력 토크에 영향을 주는 다양한 인자가 있다. 앞서 동심 MG에 대한 설계 방법론에 관한 연구 결과에서 여러 설계 변수에 대한 출력 영향 특성을 분석한 결과를 제시하였으나⁶⁾ 이러한 설계 변수가 Halbach 어레이를 적용한 모델에는 어떠한 변화를 나타내는지 그 영향을 분석하였다. 이번 장에서 고려하는 설계 변수는 MG의 극수, 모듈레이터의 개방비, 모듈레이터의 두께 등이다. 이러한 변수는 정적 토크 크기에 가장 큰 영향을 주는 것으로 알려져 있으며 특히 극수의 경우 동심 모델에서 한계로 여겨지는 10극 내에서의 영향을 분석하였다. 각 설계 변수에 대한 토크 크기를 비교하여 각각 Fig. 9, Fig. 10, Fig. 11에 나타내었다.

우선, 고속측 로터와 저속측 로터 PM 어레이간의 극수비에 따라 결정되는 감속비에 따른 토크 변화 특성을 Fig. 9에 나타내었는데 고속측 로터의 경우 4극

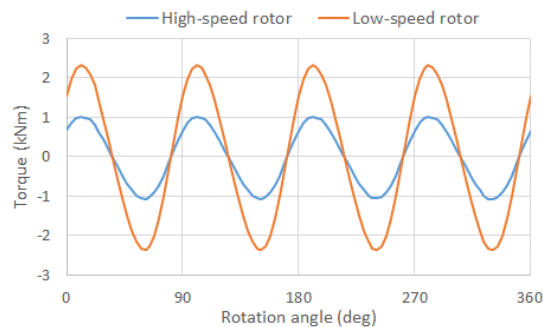


Fig. 8 Torque variation of magnetic gear using Halbach array

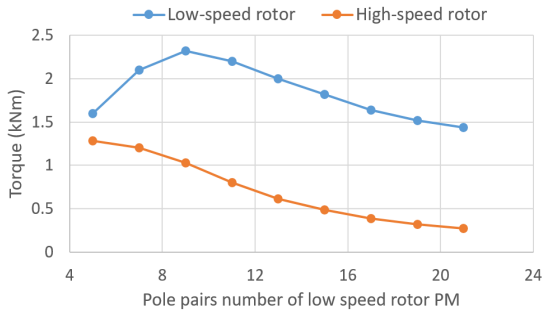


Fig. 9 Torque variation for pole pairs number in magnetic gear using Halbach array

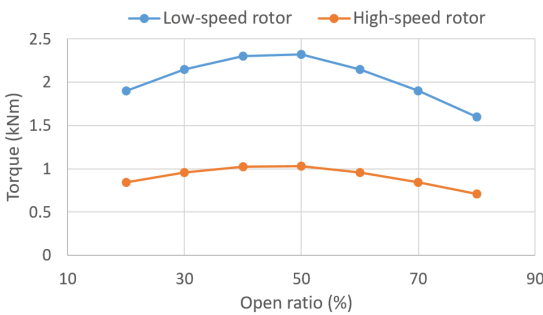


Fig. 10 Torque according to open ratio of modulator

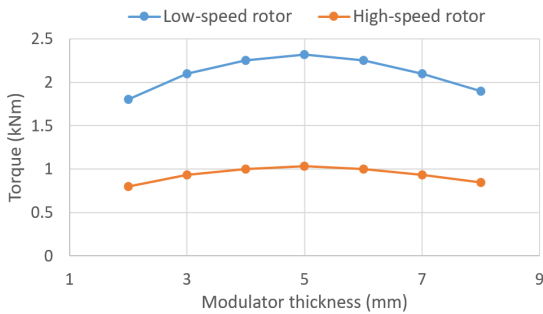


Fig. 11 Torque variation for modulator thickness

쌍으로 고정된 상태에서 저속측 PM 어레이의 극수를 변화시키며 분석한 결과이다. 저속측 극수가 증가함에 따라 전달 토크가 커지다가 1/2.25를 지난 후에는 점차 감소하는 것을 알 수 있는데 이는 동일한 체적내에서 PM의 극수만을 크게 하는 것은 전달 토크 측면에서 큰 효과가 없음을 의미한다. 즉, PM 표면 자기장도의 경우 길이의 자승에 반비례하는 것으로 알려져 있는 등 단위 PM 자체의 크기를 줄이는 것은 토크 생성에 부정적임을 알 수 있다.

다음으로 자기 필터링 역할을 하는 모듈레이터의 개방 비(Open ratio)이다. 개방 비는 모듈레이터를 구성하는 단위 개체의 한 주기 내에서의 점유 비를 나타내는데 Fig. 1이나 Fig. 5에서는 모두 50%로 설정되어 있다. 개방 비가 크면 필터링 효과가 작아지고 반대로 개방 비가 작으면 필터링 효과는 크지만 자기 차폐에 의한 영향이 커지므로 적절한 크기의 개방 비 선택은 토크 최적화를 위해 중요한 변수임을 알 수 있다.

마지막으로 모듈레이터의 두께에 의한 영향을 Fig. 11에 나타내었다. 모듈레이터 두께 역시 최적의 수치가 있는 것처럼 보이는데 모듈레이터는 자기 필터링 기능을 하므로 고속측 자기장을 필터링하기 위한 적절한 두께가 필요하지만 너무 과도하면 오히려 저속측과 고속측 PM간의 간격을 크게 하여 자기장의 크기를 감소시킨다. 따라서 적절한 두께가 요구되는데 함께 고려해야 할 인자는 고속측 자기장의 세기이다. 모듈레이터에 입력으로 작용하는 자기장 값의 범위에 따라 이를 필터링하는 최적의 모듈레이터 두께와 Fig. 10에 제시된 개방 비를 연동하여 결정할 수 있다.

5. 결론

동심 MG에서 고속측의 PM 자화 패턴을 변형하여 반경 방향 자기장 강도를 극대화한 Halbach 어레이를 적용할 때 이로 인한 토크 증대 효과를 확인하였다. 이는 반경 방향 자기장 성분의 자기 포커싱 효과에 기인함을 유한요소해석을 통한 공극 자기장 성분의 고조파 해석을 통해 설명하였으며 이러한 Halbach 어레이의 적용으로 MG에 포함되어있는 PM의 체적을 줄일 수 있음을 보였다. 또한 동심 MG의 설계 변수에 따른 자기력 변화 특성을 참고하여 Halbach 어레이의 설계 변수 민감도 분석을 수행하였다. 이를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- 1) 고속측 극수를 고정된 상태에서 저속측 극수를 변화시킬 때 감속비 증가로 인한 단위 PM의 체적 감소는 과도한 전달 토크의 감소를 초래한다.
- 2) 이웃하는 모듈레이터간의 개방 비는 필터링효과와 자기장 전달 효과가 조화를 이루는 적절한 값이 존재한다.
- 3) 마찬가지로 모듈레이터의 두께는 과도하면 공극 자기장의 감소를 그리고 너무 작으면 자기 필터링 효과의 감소를 초래한다.

Acknowledgement

본 연구는 2021년도 한국교통대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

- 1) L. Jian, G. Xu, G. Y. Gong, J. Song, J. Liang, and M. Chang, "Electromagnetic Design and Analysis of a Novel Magnetic-gear-integrated Wind Power Generator using Time-stepping Finite Element Method", *Progress in Electromagnetics Research*, Vol. 113, p.351-367, 2011.
- 2) M. S. Kim and K. S. Jung, "Magnet Gear with Two-axial Magnetic Paths", *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 31, No. 6, p.543-550, 2014.
- 3) R.C. Holehouse, K. Atallah and J. Wang, "Design and realization of a linear magnetic gear", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 47, No. 10, p.4171-4714, 2011.
- 4) S.J. Lee and K.S. Jung, "Characteristics study of a magnet gear speed reducer Speed control of the magnet gear-based speed reducer with a unified harmonic modulator", *J. of Korean Soc. Manuf. Technol.*, Vol. 24, No. 3, p.348-354, 2015.
- 5) L. Jian and K. Chau, "A coaxial magnetic gear with Halbach permanent-magnet arrays", *IEEE Trans. on Energy Conversion*, Vol. 25, No. 2, p.319-328, 2010.
- 6) K. Jung, "Speed control of the magnet gear-based speed reducer for non-contact power transmission", *J. of Korea Academia-Industrial Cooperation Soc.*, Vol. 17, No. 7, p.380-388, 2016.