

액시얼 마그네틱 하모닉 기어의 특성 해석

원 훈 희 · 정 광 석*

한국교통대학교 기계자동차항공공학부 기계공학전공

Characteristic Analysis of Axial Magnetic Harmonic Gear

Hunhee Won · Kwangsuk Jung*

School of Mechanical, Automotive and Aeronautical Engineering, College of Fusion Technology,
Korea National University of Transportation, Daehak-ro 50, Chungju 27469, Korea

(Received 2020.10.05 / Accepted 2020.11.02)

Abstract : Magnetic gears of non-contact power type have great advantages in terms of maintenance and repair than mechanical gears, and are used in various ways. Harmonic gears can derive a higher gear ratio than conventional gears through power transmission through a unique rotation mechanism. Magnetic harmonic gears, in which the gear teeth of the harmonic gears are replaced with magnets, have the advantages of both gears, but are difficult to implement and practical, so many studies are being conducted. In this study, we check whether the results of various types of magnetic gears can be applied to harmonic gears. By applying the axial type magnetic gear to the harmonic gear, the characteristic analysis is conducted to see if the result comparable to the existing radial type magnetic harmonic gear is obtained.

Key words : Eccentricity(편심), Harmonic Analysis(고조파 분석), Harmonic Gear(고조파 기어), Magnetic Flux Density(자기 밀도), Magnetic Gear(자기 기어), Sine wave(정현파)

1. 서 론

마그네틱 기어(Magnetic Gear; 이하 MG)는 기계식 기어의 기어치를 영구 자석(Permanent Magnet; 이하 PM)으로 대체하고, 강자성체로 이루어진 모듈레이터를 통해 자기장을 필터링하여 고속축과 저속축의 자기결합에 의한 동력전달 방식을 가지고 있다^{1,2)}. MG는 비접촉 동력 전달방식으로 유지보수 측면에서 큰 이점을 가지고 있으나, PM의 극수에 따라 기어비가 고정되는 제한이 있다³⁾.

MG의 기어비적 제한을 보완하기 위하여 하모닉 기어의 웨이브 제너레이터를 편심된 PM레이어로 대체한 마그네틱 하모닉 기어(Magnetic Harmonic Gear; 이하 HG)가 제안되었다^{4,5)}. 변형 파동기어라 불리는 하

모닉 기어는 본래 타원형태의 웨이브 제너레이터(wave generator)를 통해 플렉스 스플라인(flexspline)에 정현파의 회전을 부여함으로써, 플렉스 스플라인과 서큘러 스플라인(circular spline)의 기어치가 맞물리며 동력전달을 하는 고유 특성을 가지고 있다. 기계식 기어의 맞물림에 의한 동력전달을 영구자석간의 인력, 척력으로 실현하는 HG는 MG와 같이 비접촉 동력 전달 방식을 취하고 있다. 특히 HG는 저속로터 PM 레이어의 편심회전에 의한 동력전달 방식이며 MG와 달리 모듈레이터의 자기 필터링 효과 없이도 PM 레이어 간에 동력을 전달할 수 있다. 하지만 저속로터는 편심 회전을 함과 동시에 기어비에 따라 감속 회전을 하고 이를 출력축으로 전달하기 위해 복잡한 메커니즘이 필요하다⁴⁾.

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

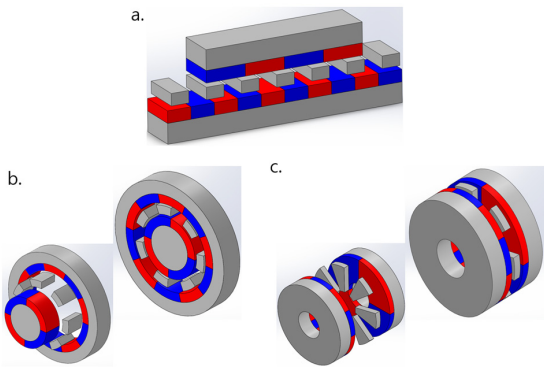


Fig. 1 Various driving methods of MG (a) Linear type (b) Radial type (c) Axial type

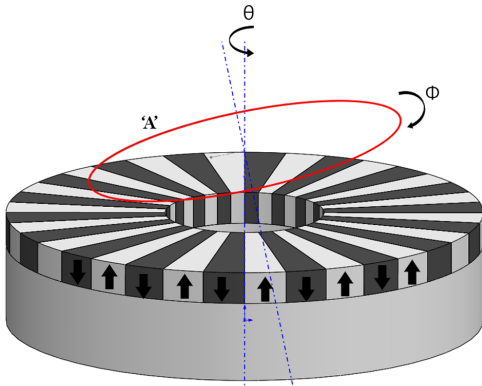


Fig. 2 Air gapping motion of the axial eccentric rotor by its rotation

본 논문에서는 여러 토폴러지를 갖는 MG의 방법론 중에서 이전 연구에서는 전혀 고려되지 않았던 액시얼(Axial) HG에 대해 유한요소해석을 통한 자기 밀도 분석과 토크 분석을 통해 해당 모델의 HG로서의 응용 가능성을 논의한다.

2. 마그네틱 하모닉 기어의 작동 원리

MG의 구동 방법은 기계식 기어와 같이 여러 가지가 있지만 대표적인 3가지의 예시를 Fig. 1에 나타내었다⁶⁾. 하모닉 기어에 MG의 구동 방법을 적용하기 위해서는 독특한 방법론이 필요하며 특히 PM레이어 사이에 정현과 형태의 공극 변화 운동을 발생시키는 고속로터의 입력과 PM레이어의 동력전달에 의해 감속 운동을 하는 저속로터의 출력이 분리가 되어야한다. 선형 타입인 Fig. 1(a)는 입력과 출력의 분리가 불가능

한 메커니즘으로 HG에 적용될 수 없다. 래디알 타입과 액시얼 타입인 Fig. 1(b)과 (c)는 편심회전과 동심회전을 분리할 수 있으므로 HG가 될 수 있는 구조적 특징을 갖고 있다.

하모닉 기어의 구동은 3가지의 로터로 이루어지는데, 고속회전을 하며 편심운동을 발생시키는 웨이브 제너레이터, 편심운동을 전달 받아 고정자의 치와 상호작용하여 감속 회전하는 플렉스 스플라인 그리고 고정자 역할을 하는 서클러 스플라인 등이다. HG에서 웨이브 제너레이터의 역할을 하는 로터는 고속로터에 해당하고 플렉스 스플라인의 역할을 하는 로터는 일반적으로 저속 로터에 해당한다.

래디알 타입 HG는 이전의 연구에서 기계식 하모닉 기어의 특성에 필적하는 성능을 갖는 것으로 알려졌으므로 본 논문에서는 액시얼 타입 HG에 대한 가능성을 확인해보고 시뮬레이션을 통해 특성해석을 진행하려한다. Fig. 2는 액시얼 타입 HG의 정현파형태의 공극회전 θ 와 PM 레이어사이의 동력전달에 의한 회전 ϕ 를 표기한 그림이다. 그림에서 아래의 PM레이어는 고정자 역할을 하며 18극으로 예시하였다. 액시얼 타입에서 θ 축으로의 편심회전을 구현하기 위해서는 'A'와 같이 고정자에 대해 기울어진 형상을 가져야 한다.

Fig. 3은 액시얼 타입 HG의 구조적 특징을 확인하기 위한 그림이다. 하모닉 기어의 3가지 로터 중 고속로터는 저속로터에 편심회전을 전달하는 역할이므로 그림상으로 표현하지 않았다. 모델에서 저속로터는 9극, 고정자는 10극이므로 저속로터는 고속로터에 대

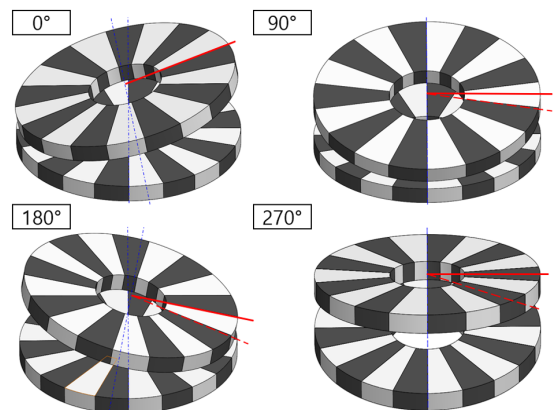


Fig. 3 Operation mode of the axial HG according to rotation

해 -1/9의 감속비를 갖는다. 따라서 고속로터의 회전이 0°~270°까지 편심회전을 함에 따라 저속로터의 PM 레이어는 이에 동기되어 감속비의 비율로 0°~ -30°의 범위에서 회전한다.

3. 액시얼 HG의 시뮬레이션 검증

하모닉 기어에서 웨이브 제너레이터가 발생시키는 사인파 형태의 회전을 MG에 적용하기 위해선 상호 자기 작용하는, 대항하는 PM 레이어간에 사인파 형태의 공극 자기장을 만들어 줘야한다. 본 장에서는 특정 모델에 대한 유한 요소 해석 결과를 통해 모델의 토폴로지 검증 과정을 논의한다. 유한 요소 해석은 상업용 툴인 Maxwell 18.0의 3차원 해석 모듈을 통해 수행하였다. 해석에 사용된 액시얼 타입 HG의 주요 제원을 Table 1에 나타내었다.

Fig. 2에 제시된 좌표계를 기준으로 고정자 PM 레이어에 대해 축방향으로 편심 되어있는 저속 로터 PM의 내측 공극 'A'에의 축 방향 공극 자기장 밀도 분포를 구해보면 Fig. 4와 같다. 그림에서 붉은 선은 공극

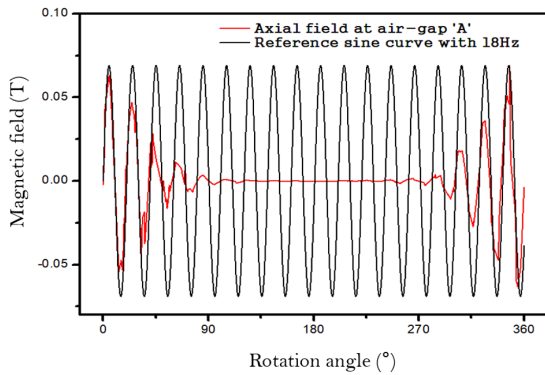


Fig. 4 Axial magnetic field at the air-gap 'A' by stator and comparison with 18Hz sine curve

Table 1 Specifications of magnetic harmonic gear used in simulation

Part	Specification	Material
Stator PM	Outer, inner radius : 10, 5mm Pole number : 6 ~ 18 Thickness : 3mm	NdFeB (Nd35)
Low- speed rotor PM	Outer, inner radius : 10, 5mm Pole number : 5 ~ 17 Thickness : 3mm	NdFeB (Nd35)

자기장 밀도의 변화를 의미하며 검은 선은 비교 평가를 위한 18Hz의 사인 함수 곡선을 의미한다. 붉은 선이 검은 선에 비해 짧은 주기를 갖는 구간 즉, 18Hz 이상의 높은 주파수를 갖는 영역이 확연히 드러나는데, 이를 수치적으로 확인하기 위하여 Fig. 4에 나타낸 자기 밀도 분포에 대해 공간 고조파 분석을 수행하여 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5에서 저속 로터와 고정자 PM 레이어 사이의 자기장을 공간 고조파 분석을 통해 확인한 결과 고정자의 극수에 해당하는 18극 외에 18±1극이 현저한 것을 확인할 수 있다. 하지만 이와 대조적으로 Fig. 6에서와 같이 래디얼 타입 HG에서 내측 저속 로터 PM에 의한 고정자 사이의 자기장 성분에 대해 공간 고조파 분석을 해보면 주극 성분을 제외한 +1의 극 즉, 19극이 현저하게 나타남을 알 수 있다. 따라서 래디얼 타입은 외측 레이어의 극수가 반드시 내측 레이어보다 커야

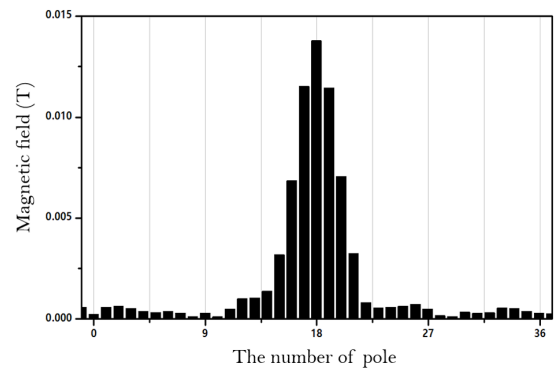


Fig. 5 Area harmonic analysis of magnetic density distribution Shown in figure 4

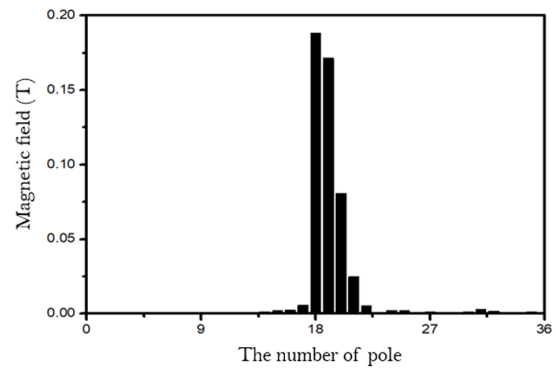


Fig. 6 Harmonic analysis result for the air-gap magnetic field at outside of low speed rotor in the radial HG

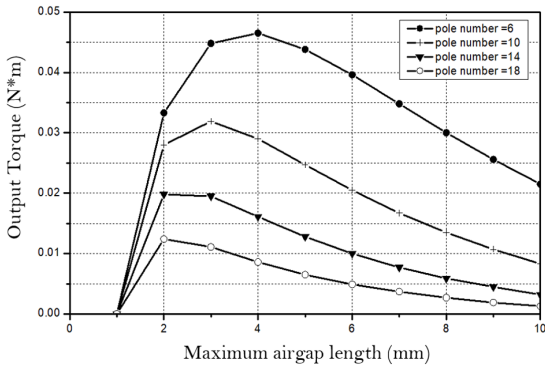


Fig. 7 Variation of maximum torque on low-speed rotor with maximum air-gap length change

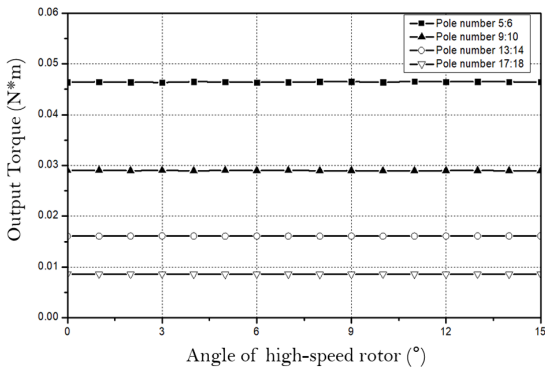


Fig. 8 Variation of maximum torque with high speed rotor rotation

하며 그렇지 않을 경우 감속이 아니라 증속기가 되어 버린다. Fig. 5에서 액시얼 타입의 경우 기준 극 대비 ± 1 의 극 즉, 17극 또는 19극이 비슷한 크기인 것을 확인 할 수 있는데, 이는 각 로터의 PM 레이어를 래디알 타입과 달리 가속 또는 감속을 위해 자유롭게 선택할 수 있다는 장점을 갖는다는 것을 의미한다. 이러한 특성은 감속 로터로부터 동심 회전을 추출해야 하는 하모닉 기어의 토폴로지 관점에서 큰 이점이라 할 수 있다. Fig. 5와 Fig. 6의 종축 자기 강도의 값은 다른 모델에 대해 수행하여 나온 결과이므로 절대 수치는 다른 값을 갖는 것을 알 수 있다.

4가지 기어비를 갖는 액시얼 타입 HG에 대해 최소 공극을 1mm로 고정하고 최대 공극을 1~10mm까지 증가시키며 최대 토크를 비교한 그래프를 Fig. 7에 나타내었다. 당연한 결과이지만 최대 공극이 1mm로 최소 공극과 같을 때는 HG의 기능을 잃어 토크가 0으로

나오며, 기어 비에 따라 조금씩 차이는 있지만 최대 공극이 2~4mm일 때 최대 토크가 나오고 이후 공극의 증가에 따라 토크의 값이 점차 줄어드는 양상을 확인할 수 있다. 토크의 크기가 공극의 크기에 상당히 큰 영향을 받고 있음을 확인할 수 있다. 즉, 공극이 너무 과다하면 자기장 강도가 급격히 저하되고 반대로 공극이 너무 작아지면 정현파 공극 운동의 폭이 작아 편심에 의해 생성되는 보조극 성분이 마찬가지로 작아지기 때문이다. 따라서 Fig. 7을 통해 적절한 수준의 공극 크기가 존재함을 간접적으로 확인할 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 7에서와 마찬가지로 4가지 기어비를 갖는 HG의 편심회전축 고속로터의 회전에 따른 전달 토크의 변화를 해석한 결과를 나타낸 그래프이다. 고속로터가 $0^\circ \sim 15^\circ$ 범위에서 회전에 따라 저속로터는 각 기어 비에 따라 $-0/G^\circ \sim -15/G^\circ$ (G 는 기어 비)의 범위로 회전하며, 회전각에 따른 최대 전달 토크의 리플은 전혀 없다는 것을 확인할 수 있다. 상기 해석을 통해 액시얼 타입 HG에서는 기어비와 상관없이 전 구간에서 고품질의 토크 특성을 얻을 수 있음을 알 수 있다. 기어비에 따라 다소 가변되는 특성을 갖지만 축방향으로 편심된 회전체의 정현파 공극 운동으로 감속 기능이 있는 액시얼 MG의 HG 응용을 위한 토폴로지로서의 가능성을 확인할 수 있다.

4. 결론

하모닉 기어는 반도체 생산 기계, 로봇의 관절 등 작은 부피로 높은 기어비를 도출 할 수 있어 여러 분야에서 사용되고 있다. 이를 대체하기 위한 방법으로 제시된 마그네틱 기어는 마모로 인해 제한된 수명을 갖는 기계식 기어를 비접촉 동력 전달 방식으로 바꿔 유지 보수 측면에서 높은 이점을 갖고 있다.

본 논문에서는 3가지의 마그네틱 기어를 소개하고, 그중 액시얼 타입을 하모닉 기어의 구동 방식으로 적용할 수 있는지에 관한 연구를 진행하였다. 우선, 기존의 래디알형 HG의 연구와 다른 점을 자기 밀도 분포와 영역 주파수 분석 결과를 통해서 제시하였다. 또한 4가지 기어비를 갖는 축형 모델에 대해 최대 공극 길이의 변화에 따른 최대 토크와 고속로터의 회전에 따른 전달 토크의 리플 특성을 유한 요소 해석을 통해 확인하였다. 시뮬레이션 결과를 통해서 PM 로터의 편심 회전에 따라 공극 조화운동에 기인하는 주극의 차분

극이 정상적으로 생성되어 감속 기능이 구현됨을 확인하였으며 발생한 토크의 품질 특성 역시 래디얼 타입과 크게 다르지 않는 등 액시얼 타입 HG의 하모닉 기어로서의 응용 가능성을 확인 할 수 있었으며, 래디얼 타입 편심 회전량 추출 메커니즘 등의 제약을 극복 할 수 있는 방법의 하나로 적용이 가능할 것으로 판단 된다.

Acknowledgement

본 연구는 2020년 한국교통대학교 지원을 받아 수행하였음.

References

- 1) Atallah, K., Calverley, S. D., Howe, D., "Design, analysis and realization of a high performance magnetic gear", IEE Proc.-Electr. Power Appl., 151:2 135-143. 2004.
- 2) Rasmussen, P., Andersen, T., Jorgensen, F., Nielsen, O., "Development of a high-performance magnetic gear", IEEE Trans. on Industry Applications 41:3 764-770., 2005.
- 3) Jung, K. S., "Analysis of pole ratio effect of magnetic reducer", J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 21:1 277-283., 2020.
- 4) Jorgensen, F., Andersen, T., Rasmussen, P., "The cycloid permanent magnetic gear", IEEE Trans. on Industry Applications 44:6 1659-1665., 2008.
- 5) Rens, J., Atallah, K., Calverley, S., Howe, D., "A novel magnetic harmonic gear", IEEE Trans. on Industry Applications 46:1 206-212., 2010.
- 6) Park G. S., Kim, S. J., Jung, S. Y., Kim, Y. J., "Characteristic Comparative Analysis of Transfer Torque and Power Density for Radial-type and Axial-type Magnetic Gear", Proceedings of the Korean Institute of Electrical Engineers 161-163, 2015.