한국교통대학교 융·복합기술연구소 논문집, Vol. 12, No. 1, pp. 7-12 (2022)
https://doi.org/10.22710/JICT.2022.12.1.007
Copyright ⓒ 2022 ICT
ISSN : 2233-8667

고조파 조절기 형상이 자석 기어의 코깅 자기력에 미치는 영향 분석

정 광 석*

한국교통대학교 기계자동차항공공학부 기계공학전공

Influence of Harmonic Modulator Shape on the Cogging Force of Magnetic Gear

Kwangsuk Jung*

Department of Mechanical Engineering, Korea National Univ. of Transportation 27469, Korea
(Received 2022.10.21. / Accepted 2022.11.09.)

Abstract : The reduction ratio of the magnetic gear is determined by the ratio of the number of poles between the high-speed permanent magnet layer and the low-speed permanent magnet layer. In general, it is known that the greater the least common multiple of both poles, the smaller the torque ripple called by cogging of the magnetic force generated in the magnetic gear. However, little is known about the effect of the harmonic modulator that filters the magnetic field in the magnetic gear to magnetically couple the high-speed side and the low-speed side except for the number of poles. In this study, torque ripple characteristics according to changes in modulator shape such as opening ratio and tooth thickness are analyzed using a finite element analysis tool.

Key words : Cogging force(코깅력), Finite element analysis(유한요소해석), Harmonic analysis(고조파 해석), Harmonic modulator(고조파 조절기), Magnetic gear(자석기어)

1. 서 론

자석 기어(Magnetic Gear; 이하 MG)는 고속측과 저속측간의 극수비에 따라 감속비가 결정된다는 측면에서는 일반적인 기계식 기어 장치와 유사하나 이의 맞물림 대신 영구자석(Permanent Magnet; 이하 PM)간의 인력, 척력을 활용하여 접촉없이 동력을 전달한다. 특히, 효율적으로 가장 진보된 토폴러지로 평가되는 동심형 MG의 경우 고속측, 저속측 PM 레이어 사이에 강자성체로 구성된 고조파 조절기(Harmonic Modulator; 이하 HM)를 두고 고속측 PM에 의한 자기장을 필터링하여 저속측 PM과 자기 결합시키는 방식을 채택하고 있어 전달 밀도 측면에서는 큰 이점을 갖고 있다.[1-3)]

동심형 MG에서 고속측 PM의 극수가 고정되어있다면 저속측 극수를 달리하여 감속비를 변화시키는 것이 가능한데 감속비를 결정하는 고속측, 저속측 극수에 따라 전달 토크 품질 역시 변화된다.[4,5)] 특히, 고속측 및 저속측 극수의 최소공배수가 클수록 토크 품질 즉, 코깅 팩터(cogging factor)는 감소하는 것으로 알려져 있으며 동일한 감속비를 구현하는 가장 적절한 형태의 구성 비 역시 다양한 연구 결과가 보고되어있다.[6-7)] 그러나 동심형 MG에서 자기상호작용을 담당하는 HM의 경우 치 모서리의 형태에 따른 코깅에 미치는 효과는 충분히 예상가능하나 HM의 개방비나 다른 형상 변수의 변화가 토크 품질에 미치는 영향에 대한 분석 결과는 자료에서 확인이 불가능하다. 본 연구에서는 토크 전달 밀도에 영향을 주는 HM의 형상 변화가 코깅 등의 토크 품질에 미치는 영향을 유한요소 툴을 통해 분석하였다.

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

2. 자석기어의 토폴러지와 토크 품질

본 장에서는 MG 특히 동심 MG의 작동 원리와 감속비에 따른 토크 리플에 대해 논의한다. 이하 모든 해석 결과는 상용 전자기 유한해석 툴인 Maxwell 18.0을 활용하여 얻어진 결과이다. 해석에 활용된 초기 MG의 제원은 고속측 PM의 경우 내경은 60mm, 두께는 10mm이며 저속측 PM 역시 두께는 10mm 그리고 HM의 두께는 5mm이다. 레이어간 공극은 5mm로 설정되었으며 이에 기초하여 저속측 PM과 HM의 내외경이 결정되었다. PM은 Nd35계열 자석이며 HM은 steel1008로 설정하였다.

2.1 자석기어의 작동 원리

MG는 Fig. 1에 묘사한 바와 같이 일반적으로 극수가 적은 고속측이 내측에 그리고 극수가 많은 저속측이 외측에 위치한다. 저속측의 극수 n_L는 모듈레이터의 극수 n_M에서 고속측의 극수 n_H를 뺀 값과 일치하는데 이 때 감속비 n_R는 다음의 관계를 갖는다.[7)]

$$n_R = \frac{n_M - n_H}{n_H} = \frac{n_L}{n_H} \tag{1}$$

레이어 극수의 관계가 (1)과 같은 이유는 Fig. 2와 Fig. 3을 통해 이해할 수 있다. Fig. 2는 Fig. 1에서 고속측 PM에 의해 점선을 따라 얻어진 반경방향 자기장을 나타내는데 이 값에 대해 고조파 분석을 진행하면 Fig. 3과 같다. 그림에서 4극 성분과 13극 성분이 지배적인 것을 알 수 있는데 이 성분은 Fig. 1을 참고하면 각각 고속측 PM과 저속측 PM의 주극 성분과 일치한다. 따라서 4극인 고속측 PM의 자기성분 중17극인 HM을 통해 필터링 된 자기 성분은 17극과 4극의 차분성분인 13극이 지배적인 인자가 되고 해당 성분은 결국 저속측 PM 레이어와 동기화되어 동력이 전달되는 것이다.

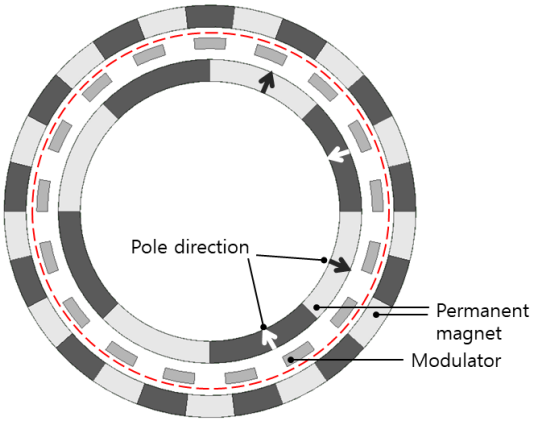

Fig. 1 Cross-sectional diagram of the concentric magnetic gear including parts description

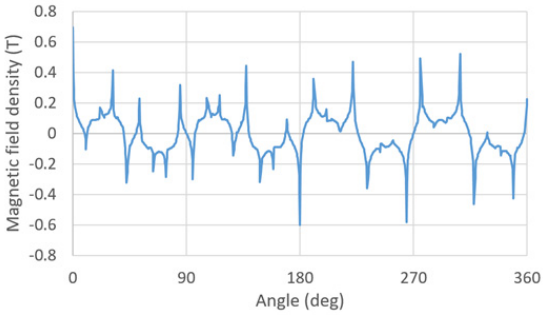

Fig. 2 Air-gap radial magnetic field by the inner permanent magnet array at the dotted line in Fig. 1

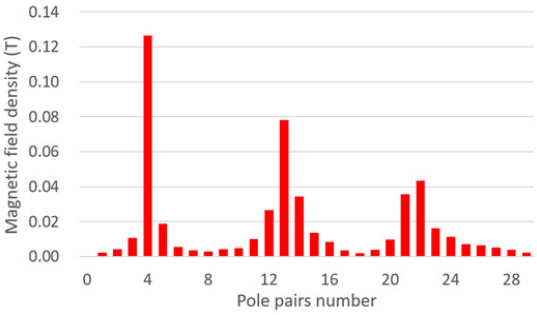

Fig. 3 Harmonic analysis result, which shows the prominent magnitude at 4 and 13, for the magnetic field shown in Fig. 2

2.2 자석기어에서 감속비에 따른 토크 리플

앞서 MG의 작동 원리를 고려하면 고속측 레이어의 PM 극수를 고정하고 저속측 PM 극수를 증가시키면 감속비를 쉽게 높일 수 있다. 그러나 감속비가 증가됨에 따라 토크 전달 밀도가 저감되는 것은 별도로 고려해도 Fig. 4와 같이 토크 리플 즉, 코깅 팩터 c_F는 일정한 주기를 갖고 변화한다. 일반적으로 c_F는 다음과 같이 정의된다.[6)]

$$c_F = \frac{2n_H n_M}{N_c} \tag{2}$$

위 식에서 N_c는 $2n_H$와 n_M의 최소공배수를 의미하는데 N_c가 클수록 c_F는 작아지게 된다. Fig. 4에서 고속측 n_H가 4일 때 c_F는 1에서 8까지 변화하는 것을 알 수 있다. 실제 극수비 4:17:13을 갖는 MG에서 다른 레이어를 고정시키고 고속측만을 3000rpm으로 회전시킬 때 각 레이어에 발생하는 토크를 구하면 Fig. 5와 같이 조

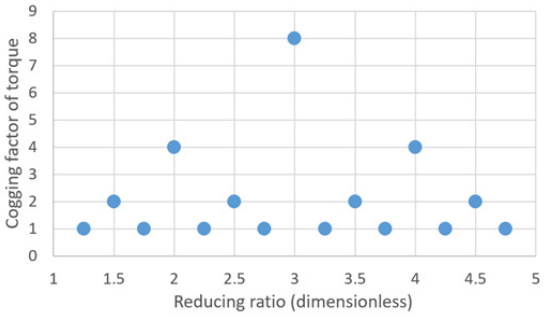

Fig. 4 Variation of cogging factor according to reducing ratio when a pole number of high speed layer is 4[6)]

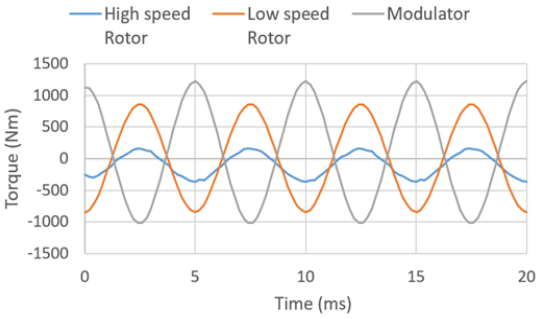

Fig. 5 Torque of each layer constituting the magnetic gear, in which a pole number of each layer is 4:17:13 and the high speed rotor rotates 3000rpm

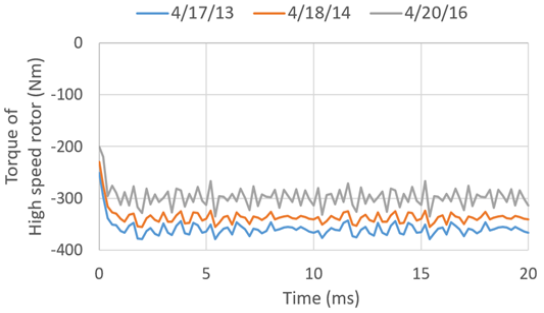

Fig. 6 Torque ripple on the high-speed rotor when each layer rotates in synchronization

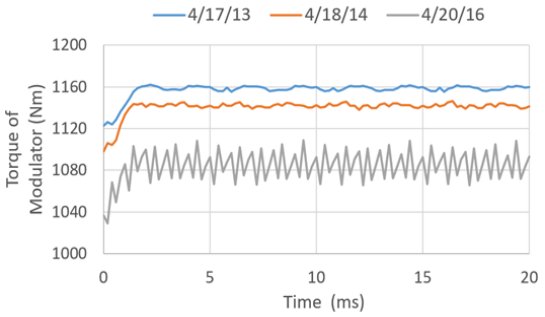

Fig. 7 Torque ripple on the modulator when each layer rotates in synchronization

화패턴을 갖는다. 이 때 각 레이어를 동기화시켜 회전시킬 때 고속측 로터에 작용하는 토크 리플과 모듈레이터에 작용하는 토크 리플을 4/17/13, 4/18/14, 4/20/16 극수비에 대해 구해보면 Fig. 6, Fig. 7과 같다. 극수비 4/17/13, 4/18/14, 4/20/16는 감속비로 환산하면 1/3.25, 1/3.5, 1/4이므로 Fig. 4에서 이 값에 해당하는 c_F는 각각 1, 2, 4이다. 따라서 코깅 팩터가 커짐에 따라 Fig. 6과 Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 토크 리플도 증가함을 알 수 있다. 그림에서 극수비에 따라 고속측 회전주파수인 4Hz외에 13Hz, 18Hz, 20Hz의 고조파 주파수가 발생하는 것을 알 수 있다. 고조파 성분의 크기는 앞서 Fig. 3의 해석 결과에서와 같이 하모닉 분석을 통해 확인할 수 있으며 상기 고조파 성분외에 고속측 성분과 저속측 성분간의 자기 결합을 통한 성분을 제외하면 나머지는 수치 오차에 해당한다. 이러한 토크 리플을 줄일 수 있는 가장 효과적인 방법은 리플이 작은 감속비를 선택하는 방법과 함께 자기 결합의 중계 요소인 HM의 단부 효과를 줄이는 방법이 있다. 본 연구에서는 일반적으로 알려진 내용외에 토크 리플이 상대적으로 과다한 4/20/16의 모델을 대상으로 HM의 형상 변화에 따른 변인 분석을 통해 HM이 토크 리플에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다.

3. 고조파 조절기의 영향

HM 즉, 고조파 조절기는 고속측 PM의 공극 자기장을 자기적으로 필터링하여 저속측 PM 공극 자기장과 자기 결합할 수 있도록 중계 역할을 하는 동심형 MG의 핵심 레이어이다. HM은 설계한 감속비를 달성하도록 일정한 간격으로 배치된 강자성체인데 Fig. 1에

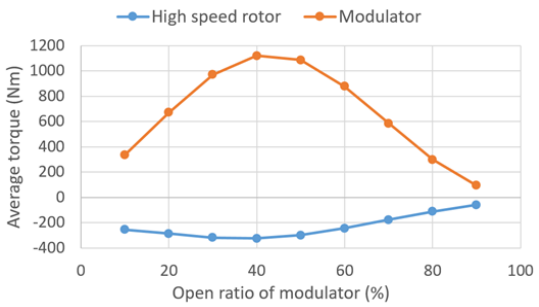

Fig. 8 Variation of the maximum torque for an open ratio of modulator, in which a pole number of the magnetic gear is 4:20:16

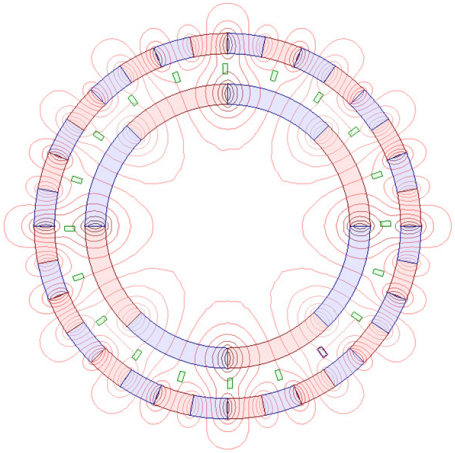

Fig. 9 Flux line of the magnetic gear with the open ratio 0.9

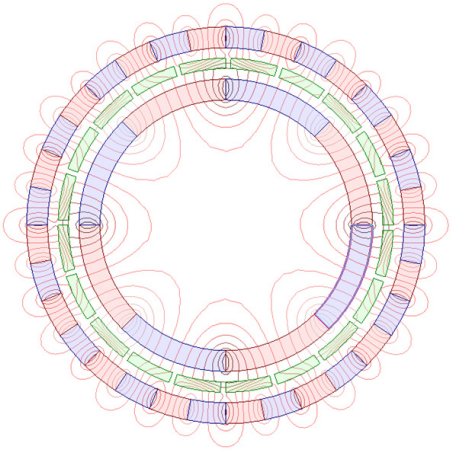

Fig. 10 Flux line of the magnetic gear with the open ratio 0.1

묘사된 것과 같이 이상적으로는 단동 유닛이 서로 이산분포된 형태이다. 따라서 HM의 형상중 자기력에영향을 주는 의미있는 설계 변수로는 개별 유닛간 개방비(open ratio)와 치(tooth)의 두께를 고려할 수 있다. 우선, 4/20/16 모델에 대해 개방비의 변화에 따른 자기력의 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 개방비가 커지면 HM과 저속측 PM의 자기 접합 면적이 작아지기 때문에 전달 토크가 줄어들고 개방비가 작아지면 필터링된 자기장의 성분이 작아져 역시 전달토크가 작아진다. 따라서 전달 토크 밀도만을 고려하면 가장 이상적인 개방비가 있는 것을 확인할 수 있다. 개방비가 양극단인 경우에 해당하는 자기 요소간의 플러스 라인 변화를 Fig. 9와 Fig. 10에 각각 나타내었다. 앞서 일부 언급한 것처럼 개방비가 큰 경우에는 고속측 자기장이 저속측으로 직접 바이패스하여 자기 필터링 효과가 감소하는 것을 알 수 있고 반대로 개방비가 작은 경우에는 고속측의 주극 성분인 4극의 영향이 과다한 것 역시 확인할 수 있다. 양극단의 개방비를 갖는 경우 고조파 필터링의 효과는 고조파 해석에서의 주극 성분과 차분극 성분의 크기 차를 통해서도 확인할 수 있다.

20%에서 90%까지의 범위에서 이러한 개방비 변화에 따른 토크 리플의 변화 선도를 구해보면 Fig. 11과 같다. 토크 변화 폭만을 고려하면 개방비가 클수록 리플이 작아지는 것을 알 수 있지만 Fig. 8에서 양극단의 개방비일 때는 절대 토크 역시 줄어들기 때문에 토크의 크기 대비 변화량은 개방비 3-40%일 때가 가장 양호한 것을 알 수 있다. 따라서 해당 감속비에서는 3-40%의 개방비가 가장 적절한 값인 것으로 판단된다.

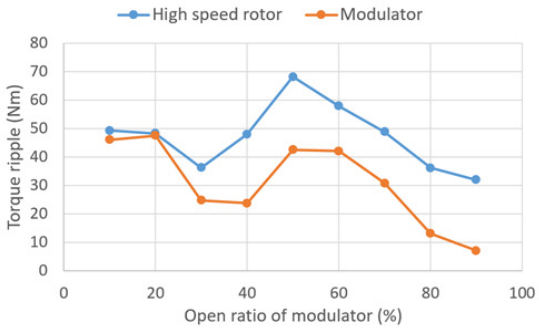

Fig. 11 Variation of the torque ripple for an open ratio of modulator, in which a pole number of the magnetic gear is 4:20:16

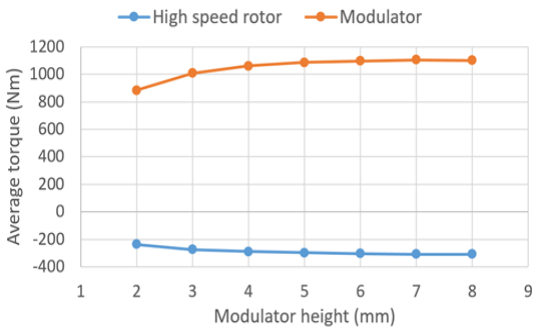

Fig. 12 Variation of the maximum torque for a modulator height, in which a pole number of the magnetic gear is 4:20:16

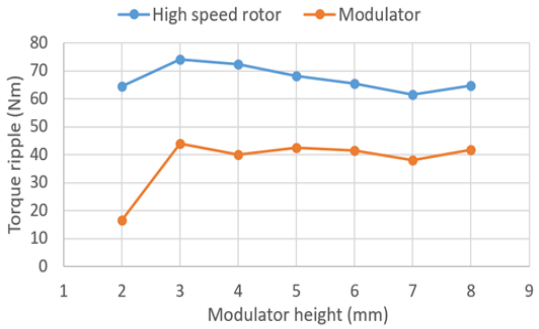

Fig. 13 Variation of the torque ripple for a modulator height, in which a pole number of the magnetic gear is 4:20:16

마찬가지로 HM의 두께 변화에 따른 특성을 분석하여 Fig. 12와 Fig. 13에 각각 나타내었다. HM의 두께는 2mm에서 8mm까지 변화시켰으며 이 때 HM의 내외부 공극의 크기는 5mm로 고정시켰다. 고조파의 두께 변화가 미치는 영향은 정성적으로는 자기 저항의 변화를 들 수 있는데 강자성체임에도 두께가 커지면 자기 저항은 증가하기 때문에 자기력의 절대 크기는 감소할 것으로 예측되지만 2mm에서 8mm 수준의 변화는 자기 저항에 미치는 영향은 미미한 것으로 보인다. 이와 반대로 HM의 핵심 기능이 자기 필터링이므로 두께가 너무 얇으면 자기 필터링 효과가 감소되어 자기력 역시 다소 줄어드는 결과를 낳는 것을 알 수 있다. 이에 반해 토크 리플은 2mm일 때를 제외하면 거의 일정한 수준인 것을 알 수 있다. 즉, HM의 두께 변화는 토크의 절대 크기와 리플에 미치는 영향이 극히 작은 것을 알 수 있다.

4. 결 론

고조파 조절기는 동심형 자석 기어 토폴러지에서 핵심 기능을 수행하는 유닛이다. 자석 기어의 감속비를 결정하는 고조파 조절기의 극수는 전달 토크의 절대 크기와 토크 품질에 미치는 영향이 다대하나 고조파 조절기 자체의 형상이 이러한 토크 품질에 미치는 영향에 대해 알려진 내용은 많지 않다. 본 연구에서는 고조파 조절기의 개방비와 두께 변화에 따른 토크 리플 특성을 유한요소 해석 툴을 활용하여 분석하였으며 주요 결과는 다음과 같다.

1) 고조파 조절기에서 토크 전달 밀도가 최대일 때의 개방비는 약 40%이다.

2) 개방비가 클수록 토크 리플은 감소하지만 전달 토크의 크기 대비 상대적인 값으로 비교하면 약 3-40% 영역에서 토크 리플이 가장 적다.

3) 고조파 조절기의 두께에 따른 토크 전달 밀도 크기는 큰 변화가 없으나 조절기의 두께가 2mm 근방에 있을 때 토크 리플은 가장 적고 두께가 증가해도 리플의 크기는 거의 변화가 없다.

Acknowledgement

본 연구는 2022년도 한국교통대학교 교내연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.

References

1) P. Rasmussen, T. Andersen, F. Jorgensen, and O. Nielsen, “Development of a High-Performance Magnetic Gear”, IEE Trans. on Industry Applications 41 (3), p.764, 2005.

2) S. Mezani, K. Atallah, and D. Howe, “A High-Performance Axial-Field Magnetic Gear”, J. of Applied Physics 99 (8), 08R303, 2006.

3) M. S. Kim and K. S. Jung, “Magnet Gear With Two-Axial Magnetic Paths”, J. Korean Soc. Precis. Eng. 31 (6), p.543, 2014.

4) K. S. Jung, “Speed Control of The Magnet Gear-Based Speed Reducer For Non-contact Power Transmission”, J. of the Korea Academia-Industrial cooperation Society 17 (7), p.380, 2016.

5) H. H. Won and K. S. Jung, “Power Transmission Characteristics of the Magnetic Gear Reducer with a Variable Gear Ratio”, J. Korean Soc. Precis. Eng. 36 (1), p.45, 2019.

6) K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, “Design, Analysis and Realization of a High Performance Magnetic Gear”, IEE Proc.-Electr. Power Appl. 151 (2), p.135, 2004.

7) K. S. Jung, “Magnetic Force Characteristics of the Speed Reducer using Magnetic Focusing”, J. of Institute of Convergence Technology 11 (1), p.7, 2021.