

# 마그네틱 감속기의 극수비 영향 분석

정광석  
한국교통대학교 기계공학과

## Analysis of Pole Ratio Effect of Magnetic Reducer

Kwang Suk Jung  
Department of Mechanical Engineering, Korea National University of Transportation

**요약** 기계식 기어의 치를 영구자석으로 대체한 동심 마그네틱 기어에서 원주방향을 따라 놓인 모든 자석이 동력 전달에 관여하므로 감속비를 결정하는 자석의 극수비는 마그네틱 기어의 거동 특성에 큰 영향을 미친다. 본 논문에서는 극수비를 변화시켜가며 마그네틱 기어에서 생성되는 전달토크의 밀도, 동손을 고려한 토크의 효율, 코깅 특성을 포함한 토크의 품질 등을 유한요소 해석을 이용하여 비교 분석하였다. 구동측의 극수를 2극에서 5극까지 변화시킬 때 전달토크가 최대가 되는 최적의 극수비가 존재함을 확인하였으며 이는 모듈레이터를 통한 구동측 자기장의 필터링 성분에 직접적인 영향을 받는다. 전달 효율 역시 와전류 생성 밀도와 자기장간에 비례특성이 있으므로 전달 토크 밀도와 유사한 경향을 나타내는 것을 알 수 있으며 낮은 기어비에서는 95% 이상의 효율을 보인다. 제한된 극수를 갖는 영구자석의 상호작용에 기인하는 코깅 특성은 일반적인 동기 모터에서와 같이 구동측 자석의 개수와 모듈레이터 치의 개수간의 최소공배수에 반비례하는 것을 확인할 수 있었다. 전달 토크 평가를 위해 실제 시험 모델이 제작되었고 실증시험이 진행되었다.

**Abstract** In a concentric magnetic gear, which replaces the teeth of a mechanical gear with a permanent magnet, the polar ratio of the magnet that determines the reduction ratio affects the behavior of the magnetic gear dramatically. This study analyzed the density of transmission torque, the efficiency of torque considering the solid loss, and the torque quality, including the cogging characteristics using finite element analysis. When the pole number on the driving side was changed from two to five, it was confirmed that there was an optimal pole ratio, in which the transmission torque was maximized. Because eddy current generation density is proportional to the magnetic field, the transmission efficiency also shows a similar tendency to the transmission torque density, and the efficiency is more than 95% at a low gear ratio. The cogging characteristics due to the interaction of the permanent magnets with the limited number of poles are inversely proportional to the least common multiple between the number of magnets on the drive side and the number of modulator teeth. A test model was built for the transmission torque evaluation.

**Keywords** : Air-Gap Magnetic Field, Harmonic Analysis, Magnetic Reducer, Torque Ripple, Transmission Efficiency

### 1. 서론

동심(concentric) 마그네틱 기어(MG: Magnetic Gear, 이하 MG)는 영구자석(PM: Permanent Magnet,

이하 PM) 레이어 사이에 고조파 모듈레이터를 두고 이를 통해 각 레이어의 자기장을 필터링하여 공극 자기장을 동기화시키는 동력 전달 장치이다[1]. MG는 소수의 치(tooth)만이 동력 전달에 관여하는 기계식 감속기와는

\*Corresponding Author : Kwang Suk Jung(Korea National Univ. of Transportation)  
email: ksjung@ut.ac.kr

Received November 22, 2019  
Accepted January 3, 2020

Revised December 20, 2019  
Published January 31, 2020

달리 모든 PM이 동력 전달에 이용되므로 비접촉 방식임에도 1단 헬리컬 감속기의 토크 전달 밀도에 달하는 성능을 갖는 연구 결과도 보고되고 있다[2].

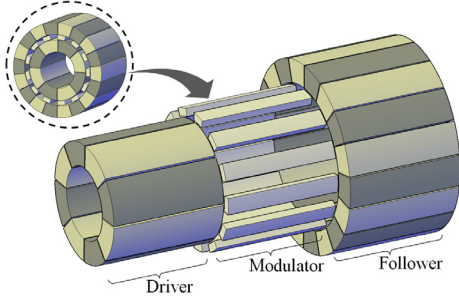


Fig. 1. Perspective layout of the concentric magnetic gear

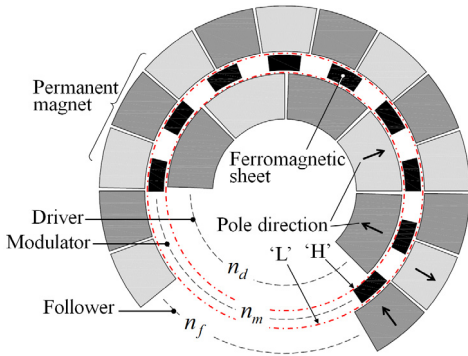


Fig. 2. Cross-sectional diagram of the magnetic gear, showing pole direction and index of each layer

MG는 PM 레이어와 강자성 모듈레이터로 구성되는데 각 소재의 물성치외에 기하학적 설계 변수와 성능간의 관계는 다양한 문헌에서 소개되어 왔다[2-6]. 그러나 MG를 이용한 감속기와 관련하여 대부분의 선행 설계 연구는 모듈레이터를 구성하는 강자성 치의 개방 비나 두께, 형상 등에 초점을 두고 있으며 감속기의 핵심 제한인 감속비를 결정하는 PM 레이어간의 극수비와 관련해서는 개략적인 논의에 그치고 있다[7,8]. 일반적으로 높은 전달 효율을 낳는 극수비 범위가 있는 것으로 알려져 있으나 이의 근거가 되는, 극수비와 관련한 다양한 민감도 해석에 관한 연구 결과는 보고된 적이 없다. 본 연구는 MG의 PM 극수에 따른 동력 전달 특성에 관한 분석 결과를 다루고 있다. 극수비는 단순히 감속비만을 결정하는 것이 아니라 생성 토크의 크기나 리플 등의 특성에도 영향을 미치며 특히 전달 효율에 미치는 영향이 다대하다. 이러

한 영향을 분석하기 위해 MG를 구성하는 레이어 사이의 공극 자기장에 대한 고조파 분석과 변수 변화에 따른 유한요소 분석 등을 활용하였으며 극수 변화뿐만 아니라 동일한 극수

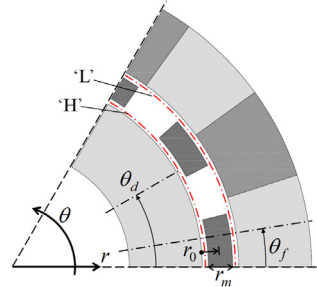


Fig. 3. Coordinate frame of the magnetic gear

비를 갖는 다양한PM 조합에 대한 비교 분석 결과를 논의한다.

## 2. 동심 마그네틱 기어 개요

래디알형 MG는 일반적으로 Fig. 1에서와 같이 내측에 고속측 혹은 구동측(driving side, driver)이라 불리는 적은 극수의 PM 레이어가, 중간에 구동측 자기장을 필터링하는 모듈레이터가 그리고 외측에 저속측 혹은 중동측(driven side, follower)이라 불리는 많은 극수의 PM 레이어 등 세 개의 레이어로 구성된다. 본 장에서는 MG의 공극 자기장 분석에 기초하여 MG 구동 방식을 소개한다.

MG를 구성하는 구동측, 모듈레이터, 중동측의 극수를 각각  $n_d, n_m, n_f$ 라 할 때 구동측 PM에 의한 공극 'H'에서의 반경 방향 자기장은

$$B_{r,d}(H,\theta) = B_D \sin(n_d(\theta - \omega_d t)) \quad (1)$$

이고 모듈레이터를 통과한 후 'L'에서 Eq. (1)은 Fig. 3에 제시된 모듈레이터의 형상 함수를 고려하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$B_{r,d}(L,\theta) = B_D \sin(n_d(\theta - \omega_d t)) \times [r_0 + r_m \sin(n_m \theta)] \quad (2)$$

Eq. (1)과 Eq. (2)는 공극 자기장의 고조파 성분을 고려하지 않고 주극 성분만을 고려한 푸리에 급수이다. Eq. (2)를 확장 정리하면

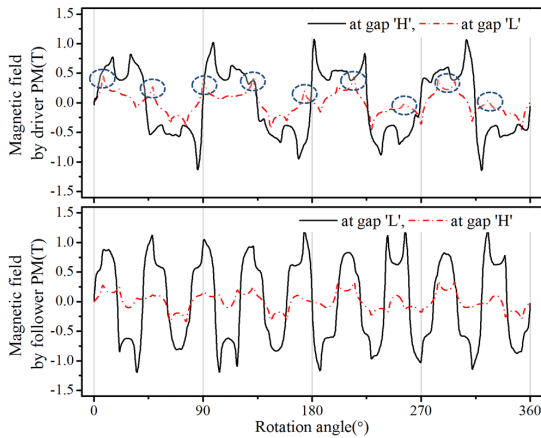


Fig. 4. Magnetic field at each air-gap by PM of the driver and the follower(4/13/9)

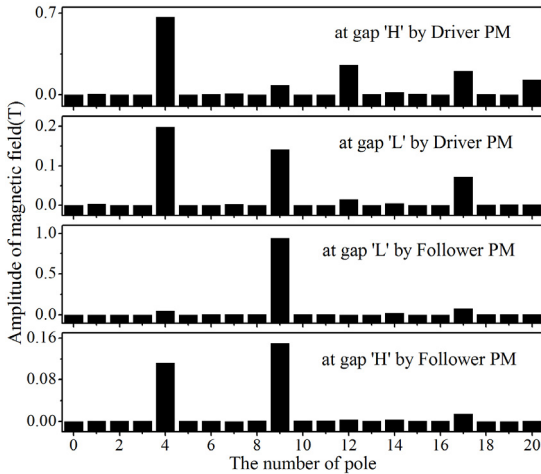


Fig. 5. Harmonic analysis of each air-gap magnetic field shown in Fig. 4

$$B_{rd}(L, \theta) = r_0 B_D \sin(n_d(\theta - \omega_d t)) + \frac{r_m B_D}{2} \times [\cos((n_m - n_d)\theta + n_d \omega_d t) - \cos((n_m + n_d)\theta - n_d \omega_d t)] \quad (3)$$

이다. 이에 반해 'L'에서의 종동측 PM 자기장은

$$B_{rf}(L, \theta) = B_F \sin(n_f(\theta - \omega_f t)) \quad (4)$$

이므로 다음 식이 성립하면 Eq. (3)과 Eq. (4)는 동기 결합한다.

$$n_m - n_d = n_f \quad (5)$$

Eq. (3)의 성분에는 Eq. (5)의 좌측 식이 양인 경우도 있지만 상대적으로 음인 경우보다 자기 강도 값이 낮아 고려하지 않았다. 동기 결합시 회전 속도가 일치해야 하는 조건을 Eq. (3), Eq. (4)의 시간 계수에 대입하면

$$-\frac{n_d \omega_d}{n_m - n_d} = -\frac{n_d}{n_f} \omega_d = \omega_f \quad (6)$$

위 식은 구동측과 종동측이 서로 반대로 회전하고 감속비는  $n_d/n_f$ 임을 의미한다. 따라서 MG를 구성하는 세 레이어의 요소 극수가 Eq. (5)를 만족하면 구동측 동력은 Eq. (6)의 비율로 감속되어 종동측에 전달된다.

상기 식은 다음 사례로 확인할 수 있다. 레이어간의 극수비  $n_d, n_m, n_f$ 가 4/13/9일 때 구동측 PM과 종동측 PM에 의한 'H', 'L'에서의 자기장은 유한요소 해석(Maxwell v18.0)을 이용하면 Fig. 4로 나타낼 수 있다. Fig. 4에서 4극쌍에 의한 주성분은 필터링되면 'L'에서 9극(파란 점선) 성분이 현저하게 나타남을 확인할 수 있으며 이 성분과 그림 하단의 종동측 PM에 의한 9극 성분은 동기결합한다. 만약 종동측이 구동원이 된다면 각 그림의 하단 에서 적색으로 나타난 필터링된 성분이 구동측 PM 주극 성분과 동기 결합한다. 공극 자기장 성분은 공간 주파수 분석을 통해 명확해지는데 그 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 'H'에서의 4극 성분이 필터링되어 4극과 9극으로 분화되는 것을 그리고 'L'에서의 9극 성분이 필터링되어 4극과 9극으로 분화되는 것을 알 수 있다.

### 3. 동심 마그네틱 기어 개요

전장의 Eq. (6)에서 확인할 수 있듯이 MG의 감속비는 구동측 PM의 극수를 고정한 상태에서 종동측 PM 극수를 늘려가며 증가시킬 수 있다. 이러한 다양한 극수비는 여러 인자로 인해 동일한 동력 전달 특성을 나타내지는 않는다. 본 장에서는 극수비 변화에따른 MG의 제특성 변화에 관해 논의한다.

우선, MG의 구동측 PM 극수를 2~5로 설정하고 종동측 PM 극수를 늘려가며 감속비를 변화시킬 때 MG의 각 레이어의 최대 전달 토크를 구하면 Fig. 6과 같다. 이하 해석에 사용된 MG의 제원은 Table 1과 같다. 전달 토크는 네 가지 경우에 대해 모두 저감속비에서는 상승하다가 비가 커질수록 완만하게 감소하는 경향을 보이는 것을 알 수 있으며 저감속비 영역에서는 구동측의 기준 극수가 커질수록 즉, 2극이 3극, 4극, 5극으로 변해갈 때 전체적인 토크는 커지지만 점점 수렴하다가 그림에는 제시되지 않았지만 6극 이상인 경우에는 오히려 토크가 줄어든다. 이러한 이유는 다음과 같이 설명할 수 있다.

Table 1. Specification of MG used in FEM analysis

ITEM		Specification
Driver PM	Size	Inner/Outer radius, Length (19mm/31mm, 60mm)
	Property	NdFeB35
Modulator	Size	32mm/36mm, 60mm
	Property	50PN1300
Follower PM	Size	37mm/49mm, 60mm
	Property	NdFeB35
Air-gap length		1mm

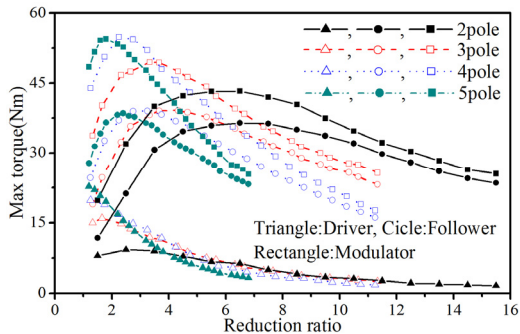


Fig. 6. Maximum torque according to reduction ratio for the magnetic gear whose driver pole varies from 2 to 5

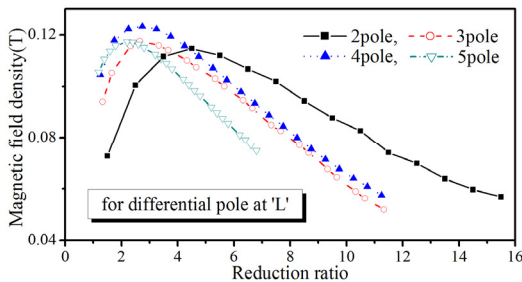


Fig. 7. Differential magnetic field of the driver main pole filtered through modulator

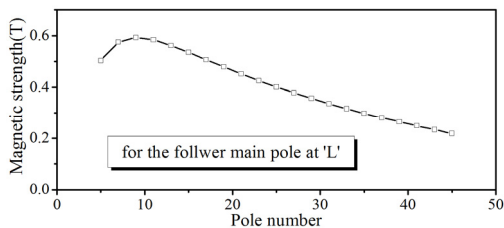


Fig. 8. Magnetic field by the follower PM according to pole number

대항하는 자기 요소간의 접선력은 공극 자기장의  $r, \theta$  방향 자기장을  $B_r, B_\theta$ 라 하면 다음 맥스웰 응력을 이용

하여 나타낼 수 있다[9].

$$f_\theta = \frac{1}{\mu_0} B_r B_\theta \quad (7)$$

Where,  $\mu_0$  denotes permeability of air space  $B_\theta$ 는  $B_r$ 에 연동되는 자기장이므로 Eq. (7)과 공극 반경의 곱으로 결정되는 전달 토크는 결국  $B_r$ 의 크기에 비례한다. 모듈레이터를 통해 필터링된 구동측 주극 자기장의 차분 성분의 감속비에 따른 변화 선도를 Fig. 7에 그리고 이와 동기 결합하는 종동측 주극 성분의 극수 변화에 따른 변화 선도를 Fig. 8에 나타내었다. 토크 식인 Eq. (7)에 대응하는 자기장 성분의 값은 차분 성분과 종동측 PM의 주성분 모두 저감속비와 낮은 극수 영역에서는 급격히 증가하다가 이후 완만하게 감소하는 특성을 갖는다. 따라서 이러한 성분의 크기를 통해 Fig. 6의 최대 토크 선도를 유추할 수 있다. 특히 구동측 PM의 주극이 4극에서 5극이 되면 오히려 차분 성분의 값이 작아지는 것을 확인할 수 있으며 따라서 전술한 바와 같이 주극이 6극 이상이 되면 전달 토크는 5극일 때 보다 더 낮아질 것을 예측할 수 있다. 일반적으로 PM의 자기 플럭스는 볼륨 감소비의 자승 수준으로 감소하는 경향을 보이는데 Fig. 8의 결과 역시 극수 증가에 따른 개별 PM의 크기 감소와 이로 인한 자속 감소에 기인한다.

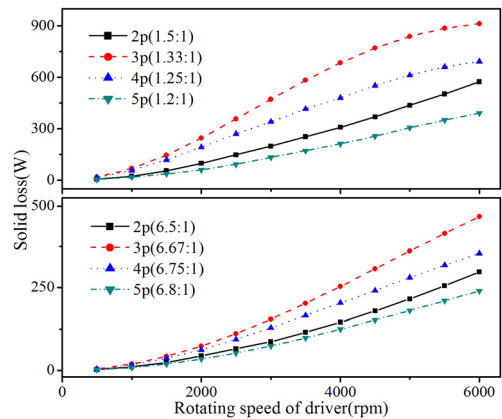


Fig. 9. Solid loss of MG according to the driver speed

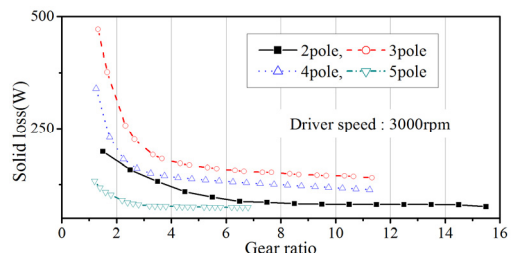


Fig. 10. Solid loss of MG according to reduction ratio

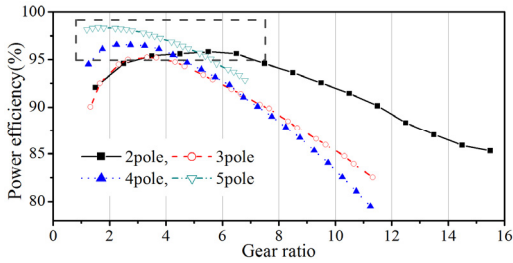


Fig. 11. Transmission efficiency of torque according to reduction ratio

전달 토크 밀도와 연동하여 전달 효율 역시 감속비에 따른 영향이 상당하다. MG의 모듈레이터는 자력 손실이 작은 전기 강판이 중첩된 상황을 고려하면 철손은 무시할 수 있고 따라서 손실 요소로 동손만을 고려하였다. MG의 구동측 회전 속도와 감속비에 따른 동손 변화를 Fig. 9과 Fig. 10에 나타내었다. 대부분 PM의 표면 와전류에 기인하는 동손의 경우 당연히 속도에 따라 증가하지만 저감속비, 고감속비 모두 구동측이 2극에서 5극으로 변화해 갈 때 3극까지는 증가하다가 4극부터는 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 4극의 경우 Fig. 7에서 알 수 있듯이 3극보다 오히려 차분 성분이 더욱 크기 때문에 자속의 스위칭에 따른 효과는 더욱 클 것으로 예상되지만 실제 손실은 더 적게 나온다. Fig. 10의 결과 역시 감속비가 커짐에 따른 자기장 저하로 인한 것이며 기어비가 증가하면 손실은 일정 값으로 수렴해 가는 것을 알 수 있다. 이러한 손실을 고려하여 전달 토크의 효율을 구하면 Fig. 11과 같다. 1단 동심 MG의 기어비로 그림의 점선 영역에서는 5극 모델의 경우 98% 수준에 달하는 효율을 보이고 있으며 4극 모델 역시 상당히 높은 수준의 효율을 나타내고 있다. 이러한 연유로 MG의 선행 연구 모델 역시 대부분 구동원 주극은 4극이며 감속비는 5:1 수준으로 설정되어있다.

#### 4. 전달 토크의 품질

다수의 PM과 모듈레이터 치로 인해 MG에서 생성되는 토크는 불가피하게 코깅 특성을 보인다. 특히 Fig. 8에서와 같이 동일한 감속비를 갖는 다양한 극수 조합이 있기 때문에 본 장에서는 감속비나 극수 조합에 따른 코깅 즉 토크 리플 특성을 논의한다.

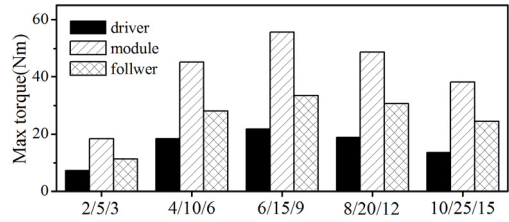


Fig. 12. Torque comparison of MG with a reduction ratio of 1.5:1

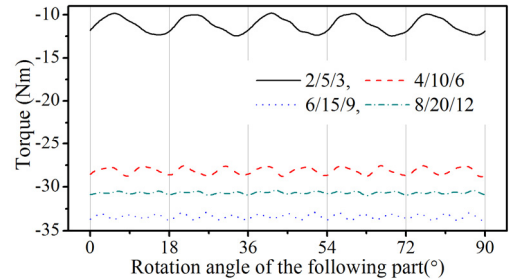


Fig. 13. Torque comparison between various combination with the same reduction ratio 1.5:1

우선, 1.5:1의 동일한 감속비를 갖는 5가지 MG 모델에 대한 정적 해석을 통해 Fig. 12에 전달 토크를 비교한 결과를 나타내었다. 전술한 바와 같이 구동측의 주극 성분이 2극에서 증가해 갈 때 6극까지는 토크가 증가하다가 8극 이상에서는 오히려 토크가 감소한다. 1.5:1의 저감속비이므로 6극까지는 각 레이어 토크가 모두 증가하는 것을 알 수 있다. 이 때의 토크는 부하각(load angle)이 최대일 때의 값이고 상대 위치를 고정하여 구동측과 종동측을 식 (6)에서와 같은 비율로 연동 회전시킬 때 종동측 토크의 변화 선도를 구해 Fig. 13에 나타내었다. 일반적인 동기 모터에서와 같이 MG의 토크 리플의 크기 역시 구동측 PM의 실제 개수인  $2 \times n_d$ 와 모듈레이터 치의 수  $n_m$ 의 최소 공배수의 역수에 비례하고 그 주파수는 최소 공배수에 해당한다. Fig. 13에 제시한 모델의 최소 공배수를 구해보면 각각 20, 40, 60, 80이므로 2/5/3 모델의 경우 20Hz는 18도에 해당하는 주기를 갖고 다른 모델은 각각 9도, 6도, 4.5도 주기를 갖는다. 리플의 크기는 공배수의 역수에 비례하므로 2/5/3일 때가 가장 크고 8/20/12일 때 가장 작다.

구동원 PM의 앵커 극수를 4극으로 고정하고 종동측 PM의 극수를 12극~16극으로 변화시킬 때 부하각을 최대로 유지한 상태에서의 종동측 토크 프로파일을 Fig. 14에 나타내었다. 해석 모델은 4/16/12, 4/20/16, 4/18/14, 4/17/13의 순서로 리플 크기가 작아지는데

구동원 PM과 모듈레이터 치간의 최소 공배수를 구해보면 위 순서로 각각 16, 40, 72, 136이므로 역수에 비례해서 리플 저감 순서를 이해할 수 있으며 4/16/12의 경우 16Hz의 주파수는 22.5도의 공간 주기를 갖는 것을 그래프 상에서 확인할 수 있다. 과도한 리플을 갖는 4/16/12는 구동측과 종동측 PM이 고조파 관계를 갖기 때문이다. Fig. 13, Fig. 14의 결과를 통해 동일한 감속비를 갖는 극수 조합간에도 토크 품질은 크게 다른 것을 알 수 있으며 PM의 극수와 모듈레이터 치의 잇수비는 코깅에 미치는 영향이 상당히 큰 것을 알 수 있다.

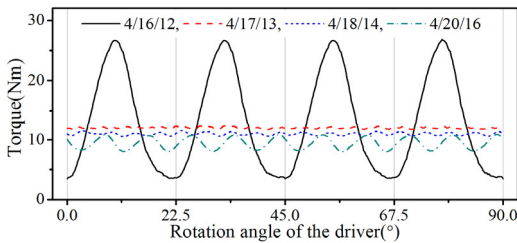


Fig. 14. Torque profiles of four models with the same driver PM number 4, under maximum load angle

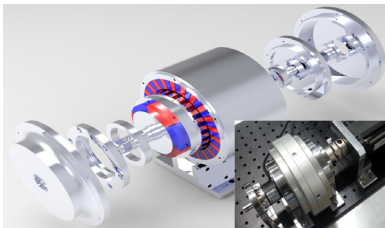


Fig. 15. Separated perspective layout of the constructed MG and its photograph

### 5. 실증 시험 및 전달 토크 증대 방안

전달 토크 특성 시험을 위해 전달효율, 토크 절대치, 코깅 특성이 고르게 우수한 3/13/10의 극수비를 갖는 MG를 제작하였다. 동 모델은 축 길이를 30mm로 줄인 것을 제외하고는 Table 1에 제시된 제원과 동일하며 실제 제작 단면도와 사진을 Fig. 15에 나타내었다. 해당 시스템을 활용하여 구동측을 고정시킨 상태에서 종동측을 1주기 회전시켜가며 측정된 토크 데이터를 해석 데이터와 비교하여 Fig. 16에 나타내었다. 정적 시험 데이터이므로 손실은 반영이 되지 않았지만 정량적으로 비슷한 수준에 있는 것으로 판단된다. 파워더브레이크로 부하토

크를 가변시켜 가며 측정된, 부하각에 따른 토크의 평균 값과 리플 편차를 Fig. 17에 나타내었다. 최대 토크는 부하각이 90도일 때이며 그 이하의 토크가 부하로 작용할 때에는 부하각 역시 생성 토크가 부하 토크와 상쇄될 때까지 줄어든다. 리플 크기는 부하각과 의미있는 관계를 갖지는 않는 것을 알 수 있는데 앞서 다양한 리플 결과에서와는 달리 작은 부하각에서도 일정 범위내로 크기가 제한되는 것을 확인할 수 있다.

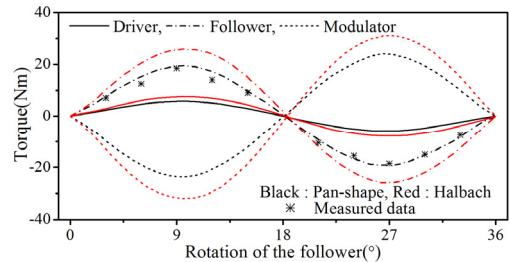


Fig. 16. Torque comparison between simulation and test result, including simulation for Halbach array

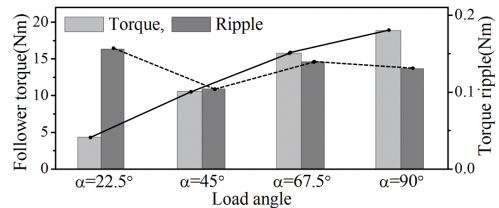


Fig. 17. Torque acting on the follower according to load angle and its ripple

MG의 전달 토크를 증대시키기 위해 MG의 각 레이어를 구성하는 PM과 모듈레이터 강자성 치의 극수를 조절하는 것 외에 PM의 극배치를 고려할 수 있다. Fig. 15에 구축된 MG의 개별 PM 형상은 Fig. 2에서와 같이 부채꼴 모양이다. 즉, 원주 방향을 따라 교번 자장이 반복되는 구조이다. 이를 널리 알려진 Halbach 배열[10]로 바꾸면 주극의 자기 포커싱 효과로 인해 구동측의 주극 성분이 커지고 따라서 전달토크 역시 Fig. 16에서 붉은 색으로 묘사된 것처럼 부채꼴 형상 대비 약 30% 증가한다. Fig. 17에 비교된 모델에서 구동측 주극이 3극이고 총 PM수는 6개이므로 이를 Halbach 배열로 바꾸면 PM수는 12개가 된다. 합리적인 수준이라면 다른 모든 조건이 동일할 때 Halbach 배열은 토크를 증가시킬 수 있는 좋은 선택지가 된다. 물론 자화강도가 큰 PM의 채택은 가장 효과적인 해결책이 될 수 있다.

## 6. 결론

기계식 감속기의 전자기 등가 버전인 MG를 대상으로 극수비 변화에 따른 제특성을 분석하였으며 이를 통해 도출한 유의미한 결과는 다음과 같다.

첫째, 구동원의 극수를 2극에서 5극까지 변화시킬 때 전달 토크를 최대로 하는 감속비는 각각 6.5/1, 3.33/1, 2.75/1, 2.2/1이다.

둘째, 동심 MG의 모듈레이터를 통해 필터링된 자장의 차분 성분과 토크 선도는 상당히 유사하다.

셋째, MG의 최대 동력전달효율은 주극이 2극에서 5극까지 변화할 때 각각 95.8%, 95.2%, 96.5%, 98.3%이다.

넷째, 동일한 감속비를 갖는 다양한 극수 조합의 코깅 리플 크기는 구동원 극수와 모듈레이터 잇수의 최소공배수에 반비례한다.

다섯째, 전달 토크의 리플 특성은 부하각에 큰 영향을 받지 않는다.

field distribution in coaxial magnetic gears", *Prog. in Electromagnetic Research*, Vol. 92, pp. 1-16, 2009.

DOI: <https://doi.org/10.2528/PIER09032301>

- [7] K. S. Jung, "Characteristics of the double reduction gearing system using magnetic gears", *J. of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 27, No. 5, pp. 417-423, 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.5.417>
- [8] N. Niguchi, K. Hirata, M. Muramatsu, Y. Hayakawa, "Transmission torque characteristics in a magnetic gear", *Int. Conf. on Electr. Machines(ICEM)*, pp. 1-6, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICELMACH.2010.5608143>
- [9] K. J. Meessen, J. H. Paulides, E. A. Lomonova, "Force calculations in 3D cylindrical structures using fourier analysis and the maxwell stress tensor", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 48, No. 1, pp. 536-545, 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2206821>
- [10] L. Jian, K. Chau, "A coaxial magnetic gear with halbach permanent magnet arrays", *IEEE Trans. on Magnetics*, Vol. 45, No. 10, pp. 4526-4529, 2010.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TEC.2010.2046997>

## References

- [1] P. Rasmussen, T. Andersen, F. Joergensen, O. Nielsen, "Development of a high-performance magnetic gear", *IEEE Trans. on Industry Applications*, Vol. 41, No. 3, pp. 764-770, 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/IAS.2003.1257784>
- [2] K. Atallah, S. Calverley, D. Howe, "Design, analysis and realization of a high-performance magnetic gear", *IEE Proc. of the Electric Power Applications Conference*, Vol. 151, No. 2, pp. 135-143, 2004.  
DOI: <https://doi.org/10.1049/ip-epa:20040224>
- [3] S. J. Lee, K. S. Jung, "Characteristic study of a magnet gear speed reducer with a unified harmonic modulator", *J. of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers*, Vol. 24, No. 3, pp. 348-354, 2015.  
DOI: <https://doi.org/10.7735/ksmte.2015.24.3.348>
- [4] D. Evans, Z. Zhu, "Influence of design parameters on magnetic gear's torque capability", *2011 IEEE Inter. Electric Machines & Drives Conference(EMDC)*, Niagara Falls, pp. 1403-1408, 2011.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/EMDC.2011.5994813>
- [5] L. Jing, L. Liu, M. Xiong, D. Feng, "Parameter analysis and optimization design for a concentric magnetic gear based on sinusoidal magnetization", *IEEE Trans. on Applied Superconductivity*, Vol. 24, No. 5, pp. 1-5, 2014.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2340460>
- [6] L. Jian, K. Chau, "Analytical calculation of magnetic

정 광 석(Kwang Suk Jung)

[정회원]



- 1997년 2월 : 연세대학교 공과대학 기계공학과 (공학사)
- 2001년 2월 : 연세대학교 공과대학원 기계공학과 (공학박사)
- 2001년 3월 ~ 2003년 2월 : LG 전자 생산기술원 선임연구원
- 2003년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 기계공학과 교수

<관심분야>

전기에너지변환기기, 초정밀 계측제어