

## 마그네틱 기어의 회전자 극수조합에 따른 전달토크 및 출력밀도 특성분석

박규상\*, 정상용\*\*, 김용재\*  
 조선대학교\*, 성균관대학교\*\*

### Transfer Torque and Power Density Characteristic Analysis according to Combination of Rotor Poles for Magnetic Gear

Gyu-Sang Park\*, Sang-Yong Jung\*\*, Yong-Jae Kim\*  
 Chosun University\*, Sungyunkwan University\*\*

**Abstract** - 기어는 회전 기계 사이의 동력 전달을 위한 장치이며 현재 산업 전반의 통상적인 기어는 기계적 기어가 주류로서 형성되어 있다. 하지만 기계적 기어는 맞물린 톱니바퀴의 물리적 접촉에 의해 접촉 경계면의 마모 및 파손, 소음과 진동의 문제가 있으며 유지보수 비용 또한 크다. 따라서 최근 물리적 접촉이 없어 기계적 기어의 많은 문제를 해결할 수 있는 마그네틱 기어 (Magnetic Gear)에 대한 관심이 높아지고 있다. 마그네틱 기어는 영구자석에서 생성된 자계를 이용하여 비접촉 동력 전달이 가능하며, 마찰손실 제거, 유지보수의 용이성, 매우 적은 소음 및 진동 등의 장점을 가지고 있다. 본 논문에서는 이러한 마그네틱 기어의 토크전달 방법과 형상변화에 따른 전달토크 특성을 2-D 유한요소해석법을 이용하여 해석하고 분석하고자 한다.

#### 1. 서 론

마그네틱 기어는 물리적 접촉이 없어, 마찰에 의한 접촉 경계면의 마모 및 파손이 없고 안정성과 내구성이 뛰어나다. 또한, 치 사이의 윤활유가 불필요하며, 유지보수가 필요 없다는 장점과 에너지 손실 경감으로 인한 고효율 구동이 가능하다. 아울러 물리적인 접촉이 없는 마그네틱 기어는 매우 적은 소음과 진동의 특징을 가지고 있다[1-2]. 특히, 입력축과 출력축의 샤프트가 분리 되어 있어 슬립을 통한 과부하에 대한 보호 능력이 뛰어나다. 본 논문에서는 이러한 마그네틱 기어의 회전자 극수조합에 따른 전달토크 및 출력밀도 분석을 수행하기 위하여 Inner 영구자석 극수가 최소 2개, Outer 영구자석 극수가 100개 이하인 경우로 범위를 제한하여 기어비가 7인 마그네틱 기어의 특성을 2-D 유한요소해석법을 이용하여 분석하였다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 마그네틱 기어의 구조 및 특성

그림 1은 마그네틱 기어의 일반적인 구조를 나타낸다. 마그네틱 기어는 영구자석을 포함하고 있는 Inner Rotor, Outer Rotor로 구성되며, Inner Rotor와 Outer Rotor 사이에는 Pole Piece가 위치하고 있다. 또한 Pole Piece의 개수는 Inner 영구자석의 쌍극수와 Outer 영구자석의 쌍극수에 의해 결정되며 Inner 영구자석의 쌍극수가  $p_1$ , Outer 영구자석의 쌍극수가  $p_2$ 일 때 Pole Piece의 개수  $n_s$ 는 식 (1)에 의해 결정된다. 마그네틱 기어의 기어비는 식 (2), (3)에 의해 결정된다.

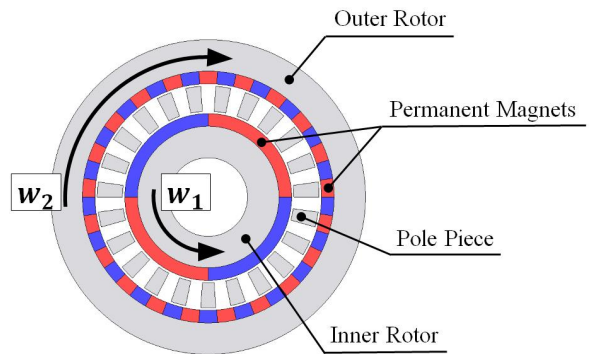
$$n_s = p_1 + p_2 \quad (1)$$

Pole Piece가 고정된 경우, 마그네틱 기어의 기어비는 다음 식(2), (3)에 의하여 결정되며  $w_1$ ,  $w_2$ 는 각각 Inner Rotor와 Outer Rotor의 회전속도이다[3]. 또한  $G_r$ 은 기어비이며, 음의 부호는 Inner Rotor와 Outer Rotor가 서로 반대방향으로 회전을 의미한다.

$$w_1 = -G_r w_2 \quad (2)$$

$$G_r = \frac{p_2}{p_1} \quad (3)$$

표 1에 각 모델의 공통 제원을 나타내었으며, Inner Rotor의 회전속도는 2100 rpm이고 Outer Rotor의 회전속도는 300 rpm으로 설정하여 7의 기어를 가지도록 하였다. 따라서 앞의 식을 이용하여 Inner Rotor의 극수, Outer Rotor의 극수, Pole Piece의 개수는 회전자 극수 조합의 변화에 의하여 결정된다.



〈그림 1〉 마그네틱 기어의 구조

〈표 1〉 각 모델의 공통 제원

Radial thickness	Outer rotor (mm)	20
	Outer PM (mm)	8
	Air gap (mm)	1.5
	Pole piece (mm)	16
	Inner rotor (mm)	20
	Inner PM (mm)	8
Total diameter (mm)		200
Shaft diameter (mm)		4
Axial length (mm)		250

##### 2.2 회전자 극수조합

표 2는 기어비가 7인 마그네틱 기어의 회전자 극수조합 표이며 Inner 영구자석 극수가 최소 2개, Outer 영구자석 극수가 100개 이하인 경우로 범위를 제한하였다. 앞의 조건에 의해 Inner 영구자석의 극수와 Outer 영구자석의 극수를 2극에서 14극까지 7가지의 경우로 선정하였으며, 또한 식 (1)에 의해 Pole Piece의 개수를 설정하였다.

〈표 2〉 회전자 극수조합

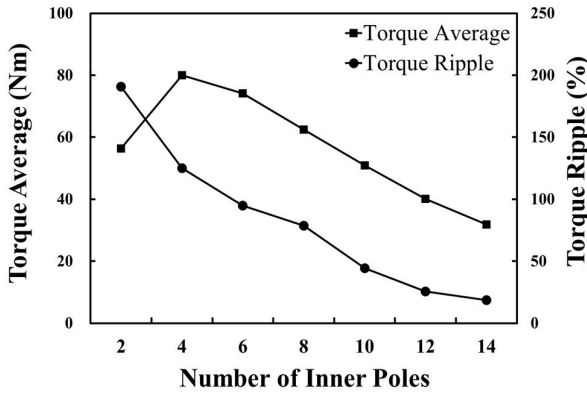
Combination	$p_1$	$p_2$	$n_s$
Case 1	2	14	8
Case 2	4	28	16
Case 3	6	42	24
Case 4	8	56	32
Case 5	10	70	40
Case 6	12	84	48
Case 7	14	98	56

### 2.2.1 전달토크 및 출력밀도

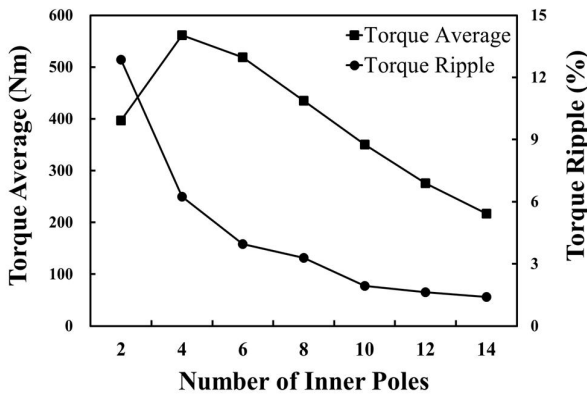
마그네틱 기어의 회전자 극수조합에 따른 전달토크의 해석결과를 표 3에 나타내었다. 또한, 그림 2, 3에 나타낸 것과 같이 Case 1부터 Case 7까지 극수를 증가시킬 경우 평균토크는 Inner Rotor와 Outer Rotor 모두 Case 2에서 가장 높은 값이 나타났으며, 이후 Case 3부터 평균토크의 값이 점차 감소하여 Case 7에서 가장 낮은 평균토크의 값을 나타내었다. 극수조합에 따른 토크리플은 Case 1부터 Case 7까지 계속 감소하는 모습을 보였다. 따라서 회전자 극수조합에 따른 전달토크 해석결과 Inner Rotor와 Outer Rotor의 극수가 많을수록 토크리플이 더 낮아지는 특성을 나타내었다.

〈표 3〉 회전자 극수조합에 따른 평균토크 및 토크리플

Combination	Torque average (Nm)		Torque ripple (%)	
	Inner	Outer	Inner	Outer
Case 1	56.3	396.5	190.8	12.9
Case 2	80.0	561.6	125.0	6.2
Case 3	74.2	518.7	94.9	3.9
Case 4	62.5	434.9	78.6	3.3
Case 5	50.9	350.6	44.5	1.9
Case 6	40.2	276.0	25.7	1.6
Case 7	31.8	217.2	18.7	1.4



〈그림 2〉 Inner Rotor의 평균토크 및 토크리플

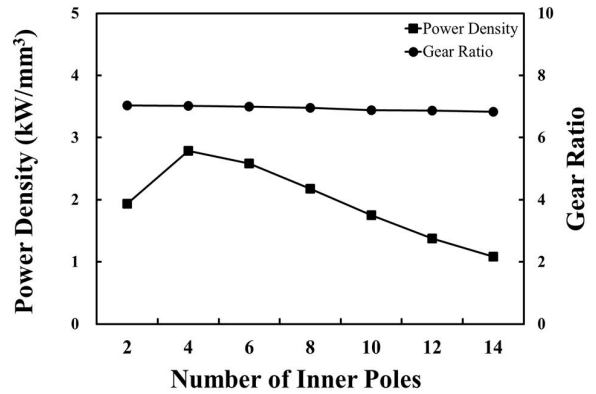


〈그림 3〉 Outer Rotor의 평균토크 및 토크리플

또한, 단면적 25132.74 mm<sup>2</sup>, 적층길이 250 mm<sup>2</sup>으로 동일한 값을 가질 때의 출력밀도의 값을 표 4에 나타내었으며 극수조합에 따라 Case 1부터 Case 7까지 변화를 주었을 때 Case 2에서 가장 높은 출력밀도의 특성이 나타났다. 이후 Case 3부터 점차 낮아져 Case 7에서 가장 낮은 출력밀도의 특성이 나타났다. Case 2에서 가장 높은 출력밀도를 나타낸 이유는 동일 체적에서 Case 2 모델이 가장 높은 평균토크를 가지고 있기 때문이며, Case 7에서 가장 낮은 출력밀도를 나타낸 이유는 가장 낮은 평균토크를 가지고 있기 때문으로 사료된다. 또한 Inner Rotor와 Outer Rotor의 평균토크의 비로써 나타낸 기어비를 그림 4에 나타내었다.

〈표 4〉 회전자 극수조합에 따른 출력밀도 및 기어비

Combination	Power density (kW/mm <sup>3</sup> )
Case 1	1.94
Case 2	2.79
Case 3	2.58
Case 4	2.18
Case 5	1.75
Case 6	1.38
Case 7	1.09



〈그림 4〉 회전자 극수조합에 따른 출력밀도

### 3. 결 론

2-D 유한요소해석법을 이용하여 마그네틱 기어의 회전자 극수조합에 따른 전달토크 및 출력밀도 분석을 수행하였으며 Inner Rotor의 극수가 2극에서 14극으로 변화할 때 기어비가 7인 경우의 극수 조합을 선정하였다. 이 때 2극인 경우의 Case 1부터 14극인 경우의 Case 7까지의 평균토크, 토크리플, 출력밀도에 관하여 분석을 하였으며, 그 결과 Case 1부터 Case 7까지 극수의 조합이 변화할 경우 Inner Rotor의 평균토크와 Outer Rotor의 평균토크 모두 Case 2에서 가장 큰 값을 보여주었으며 Case 2부터 Case 7까지 감소하는 그래프를 나타내었다. Inner Rotor와 Outer Rotor의 토크 리플은 Case 1에서 Case 7까지 극수가 증가하였을 경우 감소하는 특성을 보였다. 따라서, 극수조합에 따른 출력밀도 특성은 가장 높은 평균토크를 나타낸 Case 2에서 가장 높은 출력밀도를 나타내었으며, 가장 낮은 평균토크를 나타낸 Case 7에서 가장 낮은 출력밀도 특성을 나타내었다. 본 연구는 각 모델의 최적화된 상태가 아닌 동일한 사이즈 조건하에 회전자 극수조합에 따른 특성만을 분석하였다. 따라서 마그네틱 기어의 회전자 극수조합에 따른 결과 분석을 토대로 각각 Case의 최적화를 통한 분석을 추후 과제로 삼아 진행 할 예정이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams, "A Variable Speed Magnetic Gear Box Using Contra-Rotating Input Shafts", *IEEE Trans. Magn.*, vol. 47, no. 2, pp. 431-438, 2011.
- [2] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 37, no. 4, pp. 2844-2846, July, 2001.
- [3] L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams, "A magnetic gear box for application with a contra-rotating tidal turbine", in *IEEE Power Electronics and Drives and Conf* pp. 989-993, Thailand, 2007.