ISSN (Print) 1598-5385
ISSN (Online) 2233-6648
≪연구논문≫ Journal of the Korean Magnetics Society 24(5), 152-159 (2014) http://dx.doi.org/10.4283/JKMS.2014.24.5.152

Comparison and Torque Analysis for Magnetic Gear with Parallel/Halbach Magnetized PMs according to Design Parameters

Sang-A Hong and Jang-Young Choi*
Department of Electrical Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

(Received 19 August 2014, Received in final form 2 October 2014, Accepted 2 October 2014)

Magnetic gear can transmit torque without any mechanical contact among rotational parts in rotating mechanical systems. Especially, magnetic gear using rare-earth PMs can be used in variety of industry application because of their great power efficiency. Thus, recent trend shows that magnetic gear can be replaced with common mechanical gear. This paper deals with comparison and torque analysis for magnetic gears with parallel and Halbach magnetization according to various design parameters. Using a two dimensional (2D) finite element (FE) analysis, suitable gear ratio is selected. We performed analysis for magnetically connected inner and outer torque with respect to various design parameters including thickness of inner and outer PM, steel pole angle, segments of Halbach array and magnetization pattern of inner and outer PMs. Finally, we can obtain improved design model having parallel and Halbach magnetization with larger torque, compared with an initial design model.

Keywords : magnetic gear, parallel, Halbach, two dimensional finite element analysis.

평행방향/할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 설계변수에 따른 토크특성 해석 및 비교

홍상아 · 최장영*
충남대학교 전기공학과, 대전시 유성구 궁동, 305-764

(2014년 8월 19일 받음, 2014년 10월 2일 최종수정본 받음, 2014년 10월 2일 게재확정)

마그네틱 기어는 두 개 이상의 분리된 장치들 사이에서 기계적인 접촉 없이 토크를 전송한다. 특히, 희토류계 영구자석을 사용한 마그네틱 기어는 고 출력으로 인해 다양한 산업에 적용된다. 따라서 마그네틱 기어는 일반적인 기어를 대체할 수 있다. 본 논문에서는 이차원 유한요소해석을 이용해 평행방향과 할박 자화 마그네틱 기어의 기어비를 선정하고, 내측과 외측 영구자석 두께, 철심 각도, 할박 세그먼트 개수, 내측과 외측 영구자석 자화 패턴과 같은 설계 변수에 따라 토크 해석을 수행하였다. 해석 결과, 개선된 설계변수를 갖는 모델이 초기 설계 모델과 비교해 더 높은 토크를 가짐을 확인하였다.

주제어 : 마그네틱 기어, 평행방향, 할박 자화, 이차원 유한요소해석

I. 서 론

기어는 두 개 또는 두 개 이상의 분리된 장치들 사이에 구조적인 연결 및 동력 전달을 위해 자동차 시스템, 풍력발전기, 저속 및 고속 기기 등과 같은 기계 시스템에서 사용된다[1]. 입력과 출력축의 각각의 치가 맞물리며 기계적인 접촉을 통해 동력을 전달하는 일반적인 기어와는 달리 마그네틱 기어는 영구자석을 사용함으로써 서로 다른 자기적 극 쌍수를 갖는 각각의 일차 측과 이차 측 사이에 위치한 고정된 철심을 통해 자기적으로 연결되어 동력을 전달한다. 네오디움(NdFeB)이나 사마륨 코발트(SmCo)와 같은 희토류계 영구자석을 갖는 마그네틱 기어는 높은 자계 세기와 체적 밀도 당 높은 토크 밀도를 가져 효율이 향상되고 그 구조 또한 간단해 널리 사용된다[2, 3]. 다시 말해 고효율의 영구자석을 갖는 마그네틱 기어는 일차 측이 회전하며 영구자석에 의해 만들어진 자계가 철심에 의해 자기적인 연결을 갖게 됨으로써 이차 측이 회전하게 되고 이때 일차 측과 이차 측 사이에는

© The Korean Magnetics Society. All rights reserved.
*Corresponding author: Tel: +82-42-821-7610,
Fax: +82-42-822-4933, e-mail: choi_jy@cnu.ac.kr

어떠한 기계적인 접촉도 갖지 않는다[4, 5]. 따라서 치의 마찰·마모에 의한 손실 및 기계적인 파손이 없고 치 사이의 윤활을 위한 첨가물이 필요 없으며 소음이 적고 토크 과부하가 발생해도 슬립을 통해 기계적인 결함으로부터 보호 받을 수 있다. 또한 물리적으로 분리되어 있으며 유지 및 보수가 용이해 일반적인 기계적 기어를 대체하여 사용할 수 있다. 이러한 장점들로 인하여 높은 안정성과 신뢰성을 필요로 하는 곳에 적용된다[6-9].

본 논문에서는 2차원 유한요소해석을 이용하여 평행방향 자화와 할박 자화 영구자석을 갖는 각각의 마그네틱 기어에 대해 설계변수에 따른 토크특성 해석을 수행하였다. 2차원 유한요소해석을 통해여 내측 회전자의 토크 왜곡률이 가장 작은 기어비를 기본모델로 선정하고 초기 설계변수에 대해 평행방향과 할박 배열 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 내측과 외측 회전자에 유도되는 토크 해석을 수행하였다. 또한 서로 다른 자화 패턴을 갖는 각각의 해석모델에 대해 다양한 설계변수의 변화에 따른 해석을 수행함으로써 각각의 설계변수가 마그네틱 기어의 내측과 외측 회전자에 전달되는 토크특성에 미치는 영향을 알아보고 초기모델과 비교하여 일차측에서 이차 측으로 높은 토크를 전달하는 해석모델을 선정하였다.

II. 마그네틱 기어 초기 해석모델

1. 마그네틱 기어의 구조

Fig. 1은 8극의 내측 회전자, 19개의 철심, 30극의 외측 회전자로 구성되어 있는 마그네틱 기어의 구조를 나타낸다. 마그네틱 기어는 동축의 내측과 외측 회전자에 부착된 영구자석이 마주보는 형태로 각각의 구성부는 비접촉식으로 서로 분리되어있다. 마그네틱 기어는 영구자석 커플링과 비슷한 구조를 갖지만 양측 회전자 사이에 철심이 존재하며 내측과 외측의 영구자석은 서로 다른 극 수를 갖는다. 마그네틱 기어의 양측 회전자 사이에 위치한 철심 개수와 기어비는 내측과 외측 영구자석의 극 쌍수로부터 각각 식(1)과 (2)로 계산된다[10].

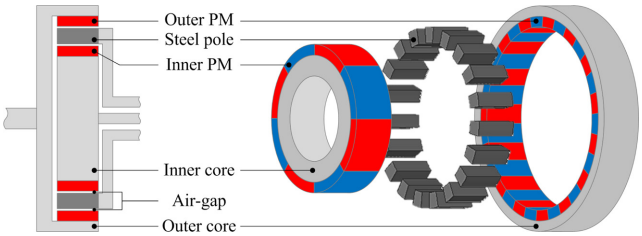

Fig. 1. (Color online) Structure of magnetic gear.

$$N_s = P_{in} + P_{out} \tag{1}$$

$$G_r = \frac{P_{in}}{P_{out}} \tag{2}$$

P_{in}과 P_{out}은 내측과 외측 영구자석의 극 쌍수를 나타낸다. 이 기어비로부터 양측 회전자의 회전속도는 식(3)의 관계를 갖는다.

$$\omega_{out} = -\frac{P_{in}}{P_{out}}\omega_{in} = -G_r\omega_{in} \tag{3}$$

내측 회전자와 외측 회전자의 회전속도는 각각 ω_{in}, ω_{out}이며 내측 회전자와 외측 회전자 사이의 철심이 고정되어있을 때 ω_{out}의 속도로 회전하는 외측 회전자는 ω_{in}의 속도로 회전하는 내측 회전자와 반대방향으로 회전한다.

2. 자화 패턴에 따른 마그네틱 기어

본 논문에서는 영구자석의 자화 패턴에 따라 평행방향과 할박 자화된 마그네틱 기어 각각에 대해 유한요소해석을 수행하였다. Fig. 2는 각각 평행방향 자화된 영구자석과 2, 3, 4 세그먼트로 구성된 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어를 보여준다. 한 극의 영구자석이 일정한 방향으로 착자된 평행방향 자화와는 달리 할박 자화를 갖는 영구자석은 한 극을 이루는 각각의 세그먼트 별로 다른 착자방향을 갖는다. 이러한 배열은 일반적인 반경방향 자화 공극자속밀도 보다 정현적인 파형을 갖고, 약 1.4배의 높은 자계세기를 갖는 것으로 알려져 있다. 또한 한 극을 구성하는 각각의 세그먼트에

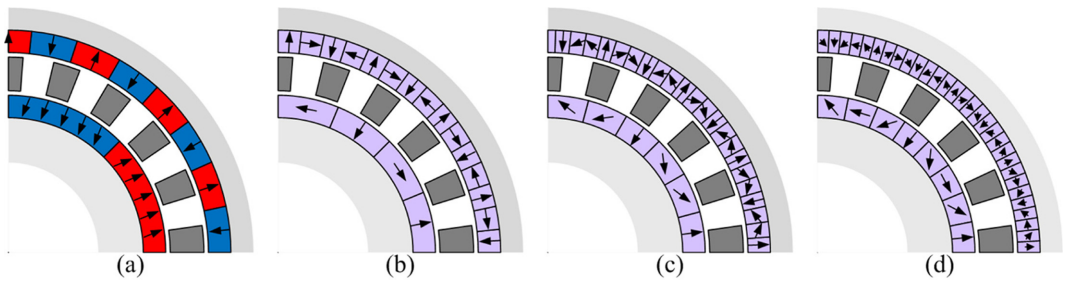

Fig. 2. (Color online) Magnetic gear according to magnetization (a) parallel magnetization (b) Halbach array with 2 segments (c) Halbach array with 3 segments (d) Halbach array with 4 segments.

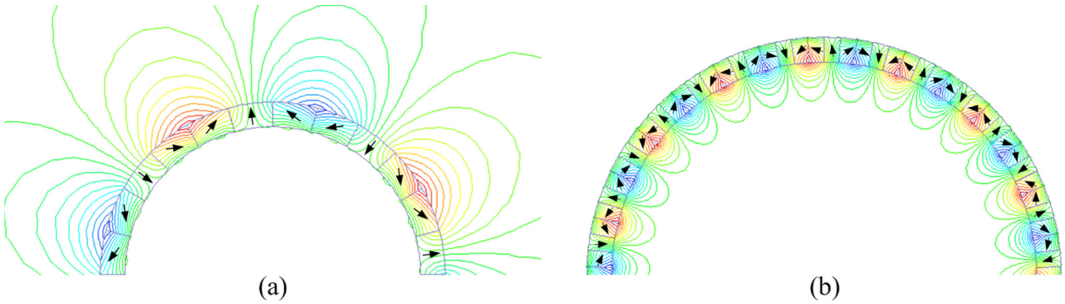

Fig. 3. (Color online) Halbach array with 3 segments (a) magnetic flux line produced by inner permanent magnets (b) magnetic flux line produced by outer permanent magnets.

Fig. 4. Magnetization direction according to segment number per pole pair (a) external field (b) internal field.

Table I. THD of inner torque according to gear ratio.

Gear ratio	2	2.5	3	3.5	3.75	4	4.25	4.5	5
Pole pairs of outer PMs	8	10	12	14	15	16	17	18	20
Steel pole numbers	12	14	16	18	19	20	21	22	24
THD of inner torque [%]	8.53	9.01	66.89	1.49	1.29	3.32	34.77	1.46	72.11

의해 자기차폐를 이룬다[11]. 내측과 외측 할박 자화 영구자석이 모두 3 세그먼트일 때 마그네틱 기어의 내 · 외측 영구자석의 자속선 분포는 Fig. 3에 표현된다. 유한요소해석 결과 영구자석의 자속선 분포는 내측 영구자석은 외부자계, 외측 영구자석은 내부 자계를 형성하는 것을 볼 수 있다. Fig. 4(a)와 (b)는 각각 할박 자화 영구자석의 극 쌍당 세그먼트에 따른 외부자계와 내부자계 배열을 보여준다. 외부자계는 내측 영구자석 회전자에, 내부자계는 외측 영구자석 회전자 배열과 동일하게 구성되며 세그먼트 수가 커질수록 조밀한 할박 배열에 의해 높은 자계 분포를 가질 것으로 예측할 수 있다.

3. 기어비에 따른 토크 특성 해석

설계변수에 따른 마그네틱 기어의 해석에 앞서 기어비를 선정하기 위해 내측 영구자석의 극 수가 8극 일 때 외측 영구자석의 극 수와 기어비의 조합에 따른 해석을 수행하였다. 내측 회전자의 영구자석 극 수가 동일할 때 기어비에 따른 유한요소해석 결과를 바탕으로 계산된 내측 회전자의 토크 Total Harmonic Distortion (THD)는 Table I에 나타난다. Table I에 제시된 바와 같이 내측 회전자 토크 THD는 내측 영구자석 극 수 8극, 외측 영구자석 극 수가 30극이고 고정된 철심의 개수가 19인 즉, 기어비 1 : 3.75 모델에서 가장 작은 값을 갖는다. 따라서 본 논문에서는 THD 해석 결과를 바탕으로 출력 토크의 왜곡률이 적은 기어비 3.75의 마그네틱 기어를 해석모델로 선정하였다.

4. 내 · 외측 영구자석 극 수에 따른 토크 특성 해석

다양한 기어비에 따른 토크특성 해석 결과, 기어비 3.75를 만족하는 해석모델 중 내측과 외측 영구자석 극 수 조합에 대한 토크특성 해석을 수행하였다. Fig. 5는 기어비 3.75가 동일할 때, 즉 내측과 외측 회전자 사이에 위치하는 철심의 개수가 19개일 때 내 · 외측 영구자석의 극 수 조합에 따른 유한요소해석 결과를 보여준다. 내측 영구자석의 극 쌍수가

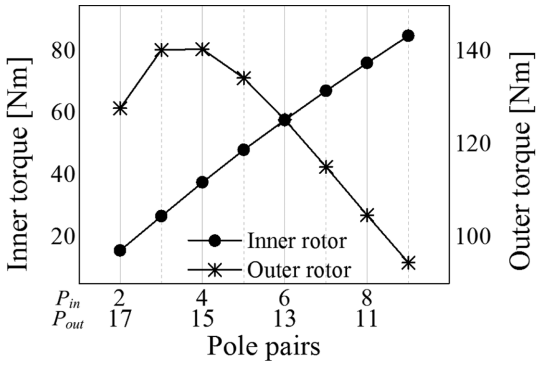

Fig. 5. Maximum torque according to combination of pole number for inner and outer PM.

Table II. Design parameters of magnetic gear.

	설계 변수	값		설계 변수	값
G_r	Gear ratio	3.75	N_s	Steel pole numbers	19
P_{in}	Pole pairs of inner PMs	4	P_{out}	Pole pairs of outer PMs	15
T_{in}	Inner PM thickness [mm]	10	T_{out}	Outer PM thickness [mm]	10
g_{in}	Inner air-gap length [mm]	0.6	g_{out}	Outer air-gap length [mm]	0.5
	Pole arc ratio of PMs	1	T_s	Steel pole thickness [mm]	15
ω_{in}	Inner rotor speed [rpm]	1000		Angle of steel pole [deg]	9.47

4, 외측 영구자석의 극 쌍수가 15일 때 최대 토크가 되었다. 따라서 본 논문에서는 기어비 3.75이고 내측 영구자석의 극 수가 8극이며 외측 영구자석의 극 수가 30극인 마그네틱 기어를 초기 해석모델로 선정하였다.

5. 마그네틱 기어의 설계 변수

내측 영구자석의 극 수가 동일할 때 기어비에 따른 유한요소해석 결과 토크 THD가 가장 작은 기어비를 가지며 내측과 외측 영구자석 극 수 조합에 따른 유한요소해석 결과를 바탕으로 본 논문에서 토크특성 해석을 위한 마그네틱 기어 초기 해석모델의 설계변수는 Table II와 같다. 따라서 본 논문에는 유한요소해석을 이용하여 1 : 3.75의 기어비와 양측 회전자 사이의 고정된 철심 19개를 갖는 마그네틱 기어가 각각 평행방향 자화, 할박 자화 영구자석을 가질 때 Table II에 제시된 설계변수의 변화에 따라 토크 해석을 수행하였다.

III. 설계 변수에 따른 토크특성 해석

Table II의 설계변수를 바탕으로 평행방향, 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 정토크 해석 결과는 Fig. 6와 같다. 식(3)에 제시된 바와 같이 3.75의 기어비를 갖는 마그네틱 기어의 내측 고속 회전자가 1000 rpm의 속도로 회전할 때 외측 저속 회전자는 내측 회전자와 반대방향 267 rpm의 속도로 회전한다. 그러나 본 논문에서는 외측 회전자를 구속시켜 놓은 상태에서의 정토크 해석을 수행하였다. 내측과 외측 회전자 사이에 위치한 고정된 철심을 통하여 내측 영구자석에 의해 생성된 자계로부터 토크가 전달되며 평행방향 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 내측 회전자와 외측 회전자에 유도되는 토크는 각각 37.59 Nm, 140.57 Nm이고 3 세그먼트 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 내측 회전자와 외측 회전자에 유도되는 토크는 각각 44.42 Nm, 168.21 Nm이다. 각각의 세그먼트에 의해 자기차폐를 갖는 할박 자화 마그네틱 기어는 평행방향 마그네틱 기어와 비교하여 내측과 외측 모두 약 1.2배 큰 토크를 갖는다.

1. 영구자석 두께에 따른 최대 토크

내측과 외측 회전자의 표면에 부착된 영구자석 두께에 따른 토크특성 해석을 위해 내측과 외측 영구자석의 극호비 1, 공극 0.6 mm, 고정된 철심 한 개가 차지하는 각도는 9.47°로 설정하였다. Fig. 7은 내 · 외측 영구자석의 두께가 1 : 1의 비율을 유지하며 변화할 때 평행방향과 할박 자화 영구자석의 두께에 따른 최대토크를 나타낸다. 영구자석의 두께가 증가할수록 철심의 두께가 감소하고 자화 패턴에 관계없이 평행방향과 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 내측과 외측에 유도되는 토크는 영구자석의 두께에 비례하여 증가하며 영구자석의 두께가 14 mm일 때 내측과 외측 회전자 모두 최대토크 값을 갖는다. 이 때의 내측과 외측의 토크는 Table II에서 제시한 영구자석 두께가 10 mm일 때보다 평행방향 자화일 때 약 20 %, 할박 자화일 때 약 36 % 증가하였다. 그러나 내외측 영구자석 두께가 모두 14 mm인 경우

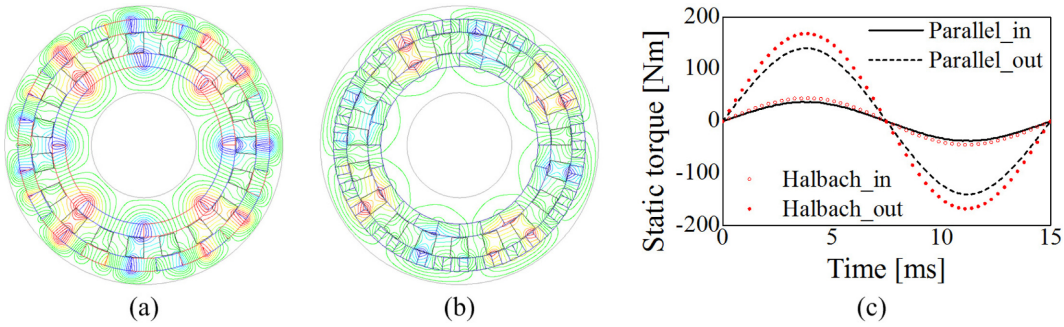

Fig. 6. (Color online) 2D FEA result for magnetic gear (a) magnetic flux distribution with parallel magnetization (b) magnetic flux distribution with 3 segments Halbach array (c) results of static torque analysis.

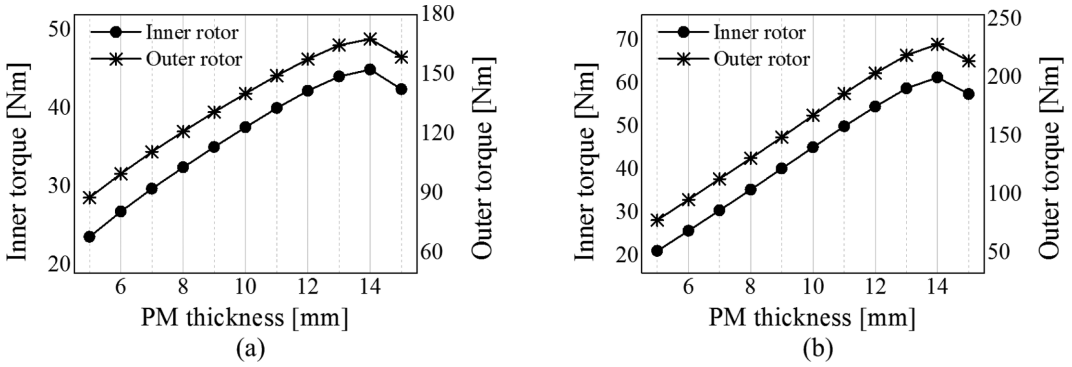

Fig. 7. Maximum torque according to PM thickness when inner and outer PM have same length (a) parallel magnetization (b) Halbach magnetization.

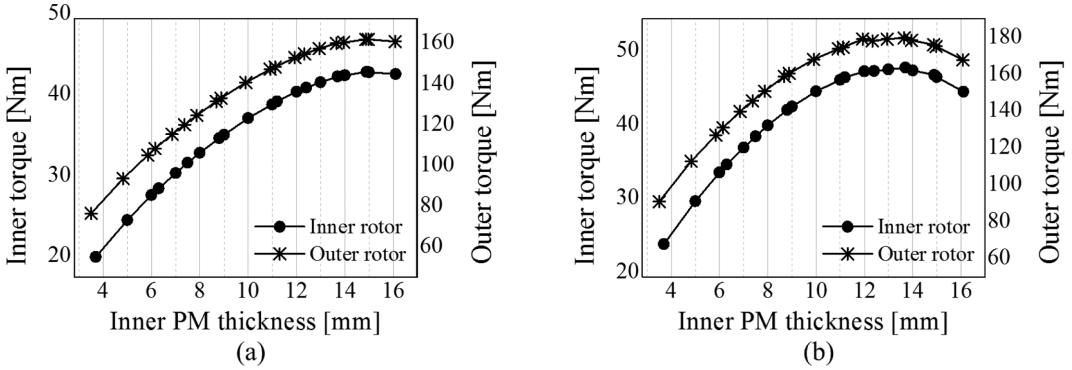

Fig. 8. Maximum torque according to inner and outer PM thickness in case of same volume (a) parallel magnetization (b) Halbach magnetization.

초기 설계모델과 비교하여 영구자석의 체적이 약 40 % 늘어나고 체적의 증가는 영구자석 사용량의 증가로 이어진다.

Fig. 8은 내측과 외측의 영구자석 두께가 10 mm인 초기 설계모델과 영구자석의 체적이 일정할 때 즉, 영구자석의 사용량이 초기설계 값과 동일하게 유지했을 때 내 · 외측 영구자석의 두께변화에 따른 토크를 나타낸다. 영구자석의 두께가 1 : 1 비율로 증가함에 따라 내측과 외측의 토크가 증가하는 것과 마찬가지로 내측 영구자석의 두께가 증가할수록 양측 회전자에 유도되는 토크 또한 증가하며 평행방향 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 경우 내측 영구자석의 두께가 14.9 mm일 때 최대토크가 되며 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 경우 내측 영구자석의 두께 13.7 mm일 때 최대토크가 되었다. 이 때의 내측과 외측의 토크는 Table II의 초기설계 값인 영구자석 두께가 10 mm일 때보다 평행방향 자화일 때 약 15 %, 할박 자화일 때 약 7 % 증가하였다.

2. 철심 각도에 따른 최대 토크

내측과 외측 회전자 사이에 위치하는 고정된 철심 한 개가 차지하는 각도에 따른 토크특성 해석을 위해 영구자석의 두께는 초기설계 값과 동일한 10 mm, 극호비는 1이며 양측의 공극 길이 0.6 mm, 철심 두께는 15 mm로 설정하였다. 마그네틱 기어 양측 회전자 사이에 위치하는 철심은 하나의 철심과 원주방향으로 철심과 철심 사이의 공극 비율이 1 : 1로 동일하다. 따라서 Table II에서 제시한 철심 한 개가 차지하는 각도를 구할 수 있다. Fig. 9는 철심 한 개의 넓이 변화에 따른 토크 해석 결과를 보여준다. 철심 한 개의 차지하는 각도가 4°에서 9°로 증가함에 따라 자화 패턴에 관계없이 내측과 외측 회전자에 유도되는 토크가 증가하고 철심의 각도가

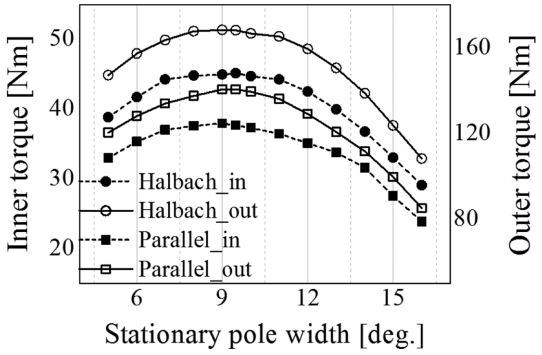

Fig. 9. Maximum torque according to angle of steel pole.

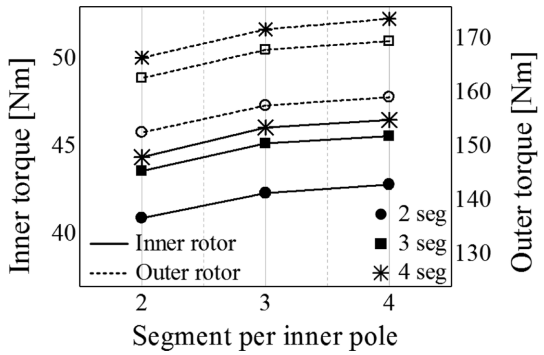

Fig. 10. Maximum torque according to inner and outer segments per pole of Halbach array.

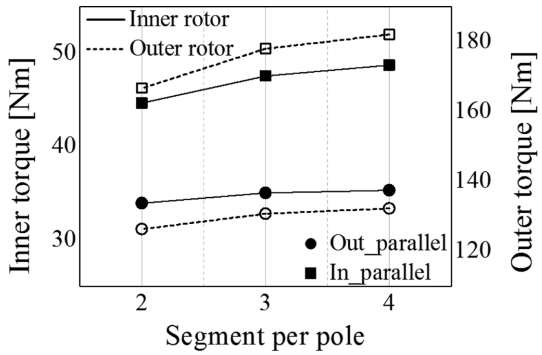

Fig. 11. Maximum torque according to inner and outer magnetization patterns.

9°와 초기 설계 값인 9.47°일 때 최대 토크를 가지며 이후에는 철심 각도의 증가와 관계없이 내 · 외측 회전자의 토크가 모두 감소한다.

3. 할박 세그먼트에 따른 최대 토크

할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 세그먼트에 따른 토크특성 해석을 위해 내측과 외측의 영구자석 두께 10 mm, 극호비 1, 공극 0.6 mm, 철심 두께 15 mm, 철심 한 개가 차지하는 각도 9.47°로 고정하였다. Fig. 10은 내측과 외측 영구자석 각각의 세그먼트 조합에 따른 해석 결과를 보여준다. 내측과 외측 영구자석 한 극의 세그먼트 수가 증가함에 따라 내 · 외측 회전자의 토크가 증가하며 할박 배열을 갖는 영구자석이 양측 모두 4 세그먼트일 때 최대 토크를 갖는다. 양측 회전자의 영구자석이 4 세그먼트일 때 최대토크 값은 내 · 외측이 모두 2 세그먼트 할박 배열 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 토크와 비교하여 약 14 % 증가하였고, 내 · 외측이 모두 3 세그먼트 할박 배열 영구자석을 가질 때와 비교하여 약 3.4 % 증가함을 보인다.

4. 내측과 외측 영구자석 자화 패턴 조합에 따른 최대 토크

내측과 외측 회전자에 부착된 영구자석의 자화 패턴에 따른 토크특성 해석을 위해 내측과 외측의 영구자석 두께 10 mm, 극호비 1, 공극 0.6 mm, 철심 두께 15 mm, 철심 한 개가 차지하는 각도 9.47°로 설정하였다. Fig. 11은 내 · 외측 영구자석의 자화 패턴 조합에 따른 해석 결과를 보여준다. 내측과 외측 영구자석의 자화 패턴에 관계없이 할박 배열을 이루는 세그먼트가 커질수록 토크가 증가하며 특히, 내측 영구자석이 평행방향 자화를 이루고 외측 영구자석이 한 극 당 4 세그먼트를 갖는 할박 자화일 때 최대 토크를 갖는다. 초기 설계변수와 동일한 크기에 내측과 외측 영구자석의 자화 패턴이 모두 평행방향과 할박 배열을 갖는 각각의 마그네틱 기어 내외측에 유도되는 토크와 비교하였을 때 내측이 평행방향 자화이고 외측이 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어는 양측 모두 평행방향 자화된 마그네틱 기어 보다 토크가 약 30 % 증가하였으며 양측 영구자석이 모두 4 세그먼트 할박 자화 마그네틱 기어에 비해 4.7 % 증가하였다.

5. 설계 변수에 따른 토크 특성 해석 결과

기어비 1 : 3.75 마그네틱 기어의 다양한 설계변수에 따른 2D 유한요소해석 결과로부터 평행방향과 할박 자화 마그네틱 기어 각각에 대하여 향상된 토크를 갖는 설계변수를 선정하였다. 내측과 외측 회전자에 부착된 영구자석의 두께가 1 : 1의 비율일 때 최대토크를 갖는 설계 변수는 영구자석의 총 사용량이 초기설계와 동일할 때 최대토크를 갖는 설계변수 보

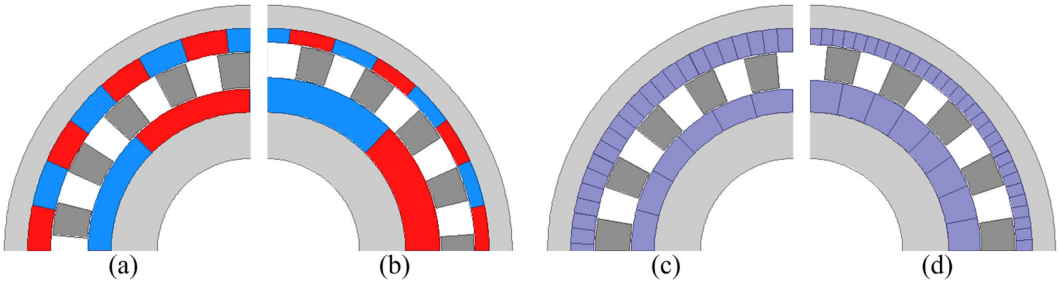

Fig. 12. (Color online) (a) parallel magnetization initial model (b) parallel magnetization improvement model (c) Halbach magnetization initial model (d) Halbach magnetization improvement model.

Table III. Comparison of torque analysis result.

	Inner torque [Nm]	Outer torque [Nm]
Initial model with parallel magnetization	37.59	140.57
Initial model with Halbach magnetization	44.42	168.22
Improved model with parallel magnetization	43.40	161.81
Improved model with Halbach magnetization	49.67	185.65

다 양측 회전자에 더 큰 토크를 유도한다. 그러나 내측과 외측 영구자석 두께가 모두 14 mm인 마그네틱 기어의 경우 영구자석 체적의 증가로 초기모델과 비교하기 어렵다고 사료되어 개선된 모델의 영구자석의 두께는 평행방향 자화 영구자석 두께 14.9 mm, 할박 자화 영구자석 두께 13.7 mm로 선정하였다.

Fig. 12는 평행방향과 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어의 초기모델과 설계 변수에 따른 토크특성 해석 결과를 바탕으로 개선된 토크를 갖는 해석모델의 비교를 보여준다. 초기모델과 마그네틱 기어의 전체 크기, 내측과 외측의 회전자 철심의 반경 길이, 공극 두께, 내측과 외측의 자기적인 연결부인 철심 한 개가 차지하는 각도가 동일한 반면, 각각의 모델에서 영구자석 두께와 철심의 두께가 변화하였다. 또한 할박 자화 마그네틱 기어의 경우 개선된 모델은 내측과 외측 영구자석 모두 극 당 3 세그먼트에서 4 세그먼트로 변경되었다.

Table III과 Fig. 13은 토크특성 해석 결과로부터 개선된 설계변수를 갖는 평행방향 자화, 할박 자화 해석모델 별 내측과 외측 회전자에 유도되는 토크와 초기모델 토크와의 비교를 나타낸다. 토크특성 해석 결과 개선된 토크를 갖는 평행방향 자화 해석모델은 초기모델의 토크와 비교하여 내측은 약 15.5 %, 외측은 약 15.1 % 증가하였으며 극 당 4 세그먼트 할박 자화 해석모델은 극 당 3 세그먼트를 갖는 초기모델과 비교하여 토크가 내측은 약 11.8 %, 외측은 약 10.4 % 증가하였다. 자화 패턴 별 개선된 토크를 갖는 해석모델을 비교하면 할박 배열을 갖는 해석모델은 평행방향 자화를 갖는 해석모델 보다 내측과 외측 각각 약 14.5 %, 14.7 %의 높은 토크를 갖는다. 토크특성 해석 결과, 초기모델과 비교하여 평행방향 자화를 갖는 마그네틱 기어가 할박 자화를 갖는 마그네틱 기어보다 더 높은 토크 증가를 보였다. 또한 내측이 평행방향 자화이고 외측이 4 세그먼트 할박 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어는 내 · 외측 모두 평행방향 자화 영구자석을 갖는 마그네틱 기어와 동일한 영구자석 두께 14.9 mm일 때 최대토크를 나타낸다. 이때, 내측의 토크가 46.66 Nm, 외측의 토크가 185.59 Nm로 개선된 설계 변수를 갖는 양측 4 세그먼트 할박 자화 마그네틱 기어의 토크와 거의 동일한 값이 나타난다.

IV. 결　　론

본 논문에서는 2차원 유한요소해석을 이용하여 자화 패턴에 따른 마그네틱 기어의 설계변수 별 토크특성을 해석을 수행하였다. 초기 마그네틱 기어의 기어비와 설계변수를 선정하여 해석모델의 전체 크기, 내측과 외측 영구자석의 극 수 및 기어비가 동일하고 일차 측과 이차 측을 자기적으로 연결시켜주는 철심이 양측 회전자 사이에 고정되어 있을 때 다양한 설계 변수의 변화에 따른 해석을 통하여 양측 영구자석 회전자에 유도되는 토크에 미치는 요인을 알아보았다. 토크특성 해석 결과를 바탕으로 마그네틱 기어의 내측과 외측 회전자가 높은 토크를 갖는 설계변수를 선정하여 개선된 모델을 해석하고 각각의 초기 모델과, 자화 패턴 별 해석 결과를 비교함으로써 토크특성 해석을 통해 양측 회전자에 전달되는 토크가 매우 향상되었음을 확인하였다. 따라서 본 논문에서 연구한 결과를 바탕으로 마그네틱 기어의 초기 설계해석이 참고할 수 있을 것으로 사료된다.

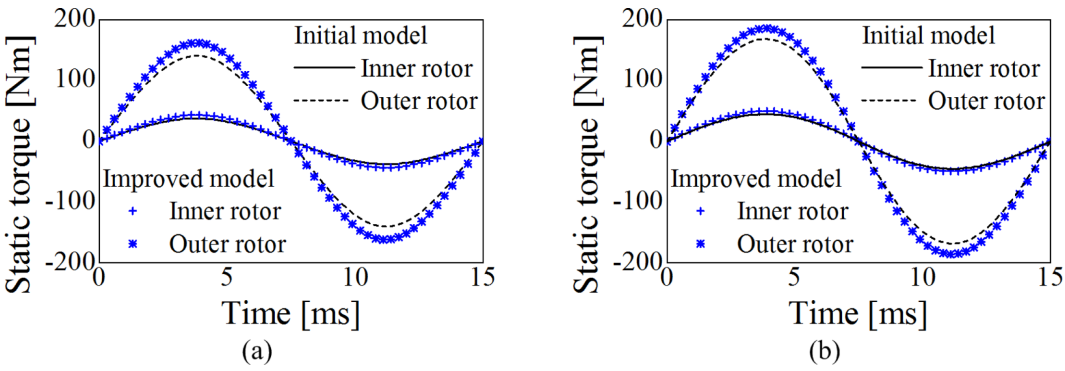

Fig. 13. (Color online) Comparison of inner and outer torque with initial model and improved model (a) parallel magnetization (b) Halbach magnetization.

감사의 글

이 논문은 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2014R1A1A1A05002745).

References

[1] K. A. Tallah and D. Howe, IEEE Trans. Magn. **37**, 2844 (2001).
[2] M. Chen, K. T. Chau, W. Li, C. Liu, and C. Qiu, IEEE Trans. Appl. Supercond. **24**, 0501904 (2014).
[3] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, IEEE Tras. Ind. Appl. **41**, 764 (2005).
[4] E. P. Furlani, IEEE Trans. Magn. **33**, 2317 (1997).
[5] S. L. Ho, S. Niu, and W. N. Fu, IEEE Trans. Magn. **46**, 2074 (2010).
[6] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, Inst. Electr. Eng. Proc. Electr. Power Appl. **151**, 135 (2004).
[7] T. Lubin, S. Mezani, and A. Rezzoug, IEEE Trans. Magn. **46**, 2611 (2010).
[8] S. Niu, N. Chen, S. L. Ho, and W. N. Fu, IEEE Trans. Magn. **48**, 4156 (2012).
[9] L. Shah, A. Cruden, and B. W. Williams, IEEE Trans. Magn. **47**, 431 (2011).
[10] L. Jian, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, IEEE Trans. Ind. Appl. **45**, 954 (2009).
[11] Z. Q. Zhu and D. Howe, Inst. Electr. Eng. Proc. Electr. Power Appl. **148**, 299 (2001).