

Study on Analysis of Transfer Torque and Improvement of Transfer Torque in Non-Contact Permanent Magnet Gear

비접촉 영구자석 기어의 전달토크 분석 및 전달토크 향상에 대한 연구

Gyu-Sang Park, Chan-Ho Kim, Yong-Jae Kim†
박규상, 김찬호, 김용재†

Department of Electrical Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Republic of Korea
† kimyj21@chosun.ac.kr

Abstract

비접촉 영구자석 기어는 높은 효율과 신뢰성의 장점을 가지고 있다. 또한, 기계적인 마찰 손실이 없으며, 소음과 진동이 적고, 윤활유가 불필요하다는 장점을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여, 비접촉 영구자석 기어는 기계적 기어의 물리적인 접촉에 의한 문제를 해결할 수 있어 높은 관심을 받고 있다. 비접촉 영구자석 기어는 기계적 기어를 대체하여 접촉 없이 토크 전달이 가능하지만 낮은 토크밀도의 문제점을 가지고 있어, 이에 대한 개선이 요구된다. 따라서 본 논문에서는 비접촉 영구자석 기어의 낮은 토크밀도의 문제점을 개선하고자 새로운 폴피스 형상을 제안하였다. 제안된 폴피스 형상에 대한 설계변수와 토크 및 토크 리플과 같은 반응변수들 간의 함수 관계를 파악하기 위하여 반응표면법을 이용하였으며, 박스-벤켄 설계를 이용하여 실험계획법을 수립하였다. 이들의 관계를 예측하기 위해 필요한 실험데이터는 수치해석기반 2-D 유한요소법을 이용하였다. 따라서 본 논문에서는 비접촉 영구자석 기어의 토크밀도 및 출력밀도 향상을 위하여 형상에 대한 전달토크 분석을 수행하였으며, 박스-벤켄 설계를 이용하여 제안된 폴피스 형상을 최적설계 하였다.

The non-contact permanent magnet gear has advantages of high efficiency and improved reliability. It has other advantages of no mechanical friction loss, very little noise and vibration, and no need for lubricant. With these advantages, the non-contact permanent magnet gear that solves the physical contact problem of the mechanical gear has drawn attention. Due to this unique non-contact characteristic, the non-contact permanent magnet gear which is capable of non-contact torque transmission has replaced mechanical gear. The mechanical gears which is in many fields of the modern industry, is used mostly for power transmitting mechanical devices. However, it also has the problem of a low torque density, which requires improvement. In this paper, a novel pole piece shape is proposed in order to improve the problem of low torque density of the non-contact permanent magnet gear. The experiment data required for predicting the relationships among them are obtained using finiteelement Operating method based on two-dimensional (2-D) numerical analysis. Therefore, this paper derived an optimal model for thenon-contact permanent magnet gear with the novel pole piece using the Box-Behnken design, and the validity of the optimal design of the proposed pole piece shape through variance analysis and regression analysis demonstrated. In this paper, we performed the transfer torque analysis in order to improve the torque density and power density, we have performed on optimal design of proposed pole piece shape using box-behnken.

Keywords : Non-contact magnet gear, transfer torque, gear ratio, response surface operating methodology, box-behnken design, torque density

I. 서론

현재 산업 전반에 걸쳐 여러 분야에서 이용되고 있는 기계적 기어는 동력을 전달하는 기계장치에 많이 사용되고 있다. 그러나 기계적 기어는 동작원리가 기어이 (Gear teeth)의 맞물림으로 구동되기 때문에 기어이의 물리적인 접촉에 의한 마찰손실, 소음 및 진동의 문제점은 불가피하다. 따라서 기계적 기어의 물리적인 접촉 문제를 해결할 수 있는 비접촉 영구자석 기어(Non-contact permanent magnet gear)가 주목받고 있다. 비접촉 영구자석 기어는 물리적인 접촉이 없어 기계적인 마찰 손실이 없고, 윤활유가 불필요하며, 유지보수가 필요 없다는 장점과 더불어 매우 적은 소음과 진동의 특징을 가지고

있다. 특히, 고효율 구동의 장점을 가지며 입력 및 출력 측 샤프트가 분리되어 있어 과부하에 대한 보호 능력이 뛰어나며, 이로 인한 신뢰성 향상의 장점을 가진다 [1]. 이러한 많은 장점으로 인하여 비접촉 영구자석 기어는 산업 전반의 많은 기계적 기어를 대체할 수 있는 가능성을 가지고 있지만 낮은 전달토크로 인하여 실질적인 적용은 어려운 상황이다 [2]. 따라서 이러한 낮은 전달토크능력 향상을 위하여 본 연구에서는 비접촉 영구자석 기어의 형상설계를 통하여 전달토크 분석을 수행하였으며, 비접촉 영구자석 기어의 낮은 전달토크 향상을 위해 자속집중형 구조를 제안하고 반응표면법(Response surface operating methodology) 중 하나인 박스-벤켄(Box-behnken) 방법을 이용하여 자속집중형 구조의 최적 설계를 수행

Table 1. Specification of basic model

Number of pole pairs on inner rotor		2
Number of pole pairs on outer rotor		20
Number of pole pieces		22
Radial thickness	Outer rotor yoke [mm]	4
	Outer rotor PMs [mm]	3
	Air gap [mm]	0.5
	Pole piece [mm]	3
	Inner rotor yoke [mm]	6
	Inner rotor PMs [mm]	5
Total diameter [mm]		70
Shaft diameter [mm]		26
Axial length [mm]		20

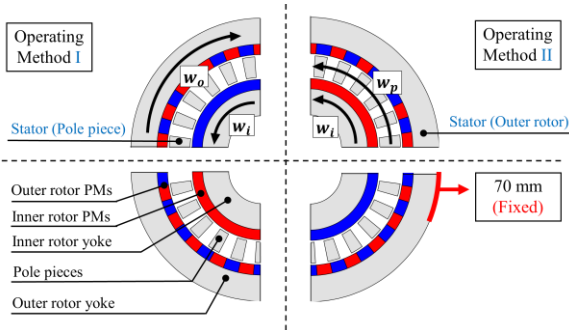


Fig. 1. Operating method of non-contact permanent magnet

하였다. 이 때, 반응표면법은 설계변수(Design variables)와 반응변수(Response variables)의 관계를 파악함에 있어서 이들의 관계가 복잡하고 함수관계가 밝혀져 있지 않은 경우 유용하게 쓰이는 최적화 방법이다 [3].

II. 비접촉 영구자석 기어의 구동

Fig. 1은 비접촉 영구자석 기어의 일반적인 구조를 나타낸다. 비접촉 영구자석 기어는 영구자석을 포함하고 있는 내부 회전자와 외부 회전자로 구성되며, 내부 회전자와 외부 회전자 사이에는 폴피스가 위치하고 있다. 폴피스는 내부 회전자의 자속과 외부 회전자의 자속을 조절(Modulating)하여 토크 전달에 있어서 중요한 역할을 한다. 또한 폴피스의 개수는 내부 회전자의 영구자석 쌍극수가 p_i , 외부 회전자의 영구자석 쌍극수 p_o 일 때, 식 (1)에 의하여 n_p 로 결정된다.

$$n_p = p_i + p_o \quad (1)$$

비접촉 영구자석 기어의 토크전달 방법은 Fig. 1과 같이 폴피스가 고정된 상태에서 구동하는 구동법 I(Operating method I)과 외부 회전자가 고정된 상태에서 구동하는 구동법 II(Operating method II)로 나눌 수 있다. 구동법 I은 폴피스가 고정되어 있으며, 내부 회전자와 외부 회전자가 반대 방향으로 회전한다. 구동법 II는 외부 회전자가 고정되어 있으며, 내부 회전자와 폴피스가 같은 방향으로 회전한다. 이러한 비접촉 영구자석 기어의 회전속도는 식 (2)에 의해 결정되며 w_i , w_p , w_o 는 각각

내부 회전자, 폴피스, 외부 회전자의 분당 회전수를 나타낸다.

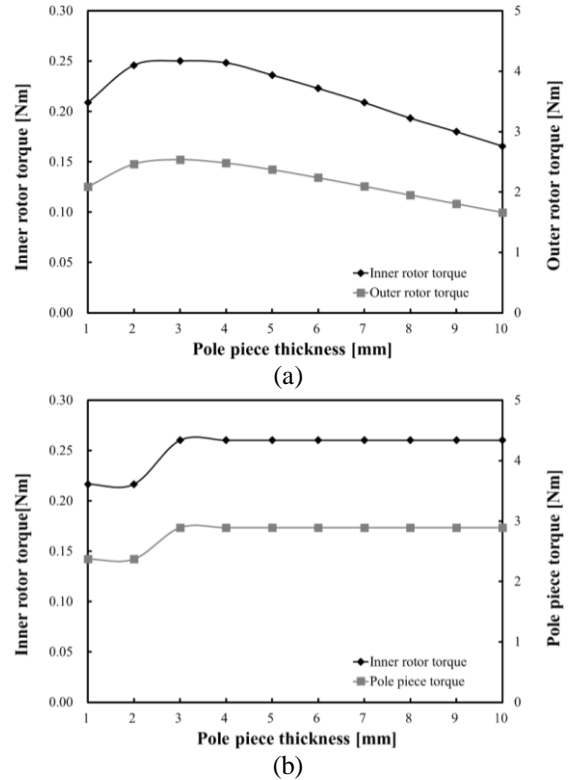


Fig. 2. Transfer torque according to the pole piece thickness. (a) Operating method I. (b) Operating method II.

$$w_i = \frac{n_p}{p_i} w_p - \frac{p_o}{p_i} w_o \quad (2)$$

식 (3)과 같이 구동법 I의 기어비(Gear ratio) G_1 은 내부 회전자와 외부 회전자의 쌍극수비에 의해 회전하며 음의 부호는 내부 회전자와 외부 회전자의 회전방향이 반대임을 의미 한다. 또한 구동법 II의 기어비 G_2 는 식 (4)에 의해 결정되며 내부 회전자의 쌍극수와 폴피스의 개수비에 의해 회전하며 회전방향은 같다.

$$G_1 = -\frac{p_o}{p_i} \quad (3)$$

$$G_2 = -\frac{n_p}{p_i} \quad (4)$$

또한, 구동법 I에서 내부 회전자가 입력축이 되고, 외부 회전자가 출력축이 될 경우 감속기의 역할을 하며, 입력축과 출력축이 반대가 될 경우 증속기의 역할을 한다. 구동법 II에서도 내부 회전자가 입력축이 되고, 폴피스가 출력축이 될 경우 감속기의 역할을 하며, 반대의 경우 증속기의 역할을 한다.

Table 1에 기본모델의 사양을 나타내었다. 구동법I의 기어비는 10이며 내부 회전자 회전속도는 6000 rpm, 외부 회전자의 회전속도는 600 rpm으로 설정 하였다. 또한 구동법II의 기어비는 11, 내부 회전자의 회전속도는 6000 rpm, 폴피스의 회전속도는 545.45 rpm으로 설정하였다.

II. 비접촉 영구자석 기어의 형상 조절에 따른 특성 분석

비접촉 영구자석 기어의 라디얼 방향 두께 형상의 변화에 따른 특성을 분석하기 위하여 각각 폴피스, 내부 회전자 철심, 내부 회전자 영구자석, 외부 회전자 영구자석, 외부 회전자 철심 순으로 라디얼 방향의 두께를 1 mm~10 mm까지 조절하여 구동법I과 구동법II로 나누어 각각의 전달토크 특성을 분석하였다.

이 때, 위에 언급되어진 각각의 두께 변수의 값이 변할 때 전체 외경의 값은 고정된 상태에서 라디얼 축의 안쪽 방향으로 두께가 증가하도록 형상을 설계하였다. 외부 회전자 철심의 두께를 변화시킨다면 나머지 외부의 영구자석 두께, 폴피스 두께, 내부 회전자의 영구자석 두께, 내부 회전자 철심의 두께는 변하지 않고 전체 외경이 70 mm로 고정된 상태에서 외부 회전자 철심의 두께만 라디얼 축의 중심 방향으로 증가하도록 설정하여 전달토크 분석을 진행하였다.

A. 폴피스 두께 조절

비접촉 영구자석 기어의 폴피스는 내부 회전자의 영구자석과 외부 회전자의 영구자석에서 생성된 자속을 조절하는 중요한 역할을 한다. Fig. 2(a)에 구동법I일 경우의 폴피스 두께에 따른 내부 회전자의 토크 및 외부 회전자의 토크의 변화 그래프를 나타내었다. 폴피스의 두께가 2 mm 지점까지 증가하며 내부 회전자의 토크 및 외부 회전자의 토크가 소폭 상승하는 모습을 볼 수 있으나 폴피스의 두께가 3 mm 이상 증가할 시에는 앞서 언급한 내용과 같이 폴피스의 외경은 고정되어진 상태에서 라디얼 축의 안쪽 방향으로 폴피스의 두께가 증가하기 때문에 내부 회전자 영구자석의 내경과 외경이 감소한다. 따라서 내부 회전자 영구자석의 면적이 감소하기 때문에 폴피스의 두께가 3 mm 지점 이상 증가할 시 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크가 감소하는 양상을 보인다.

또한 Fig. 2(b)에 구동법II일 경우의 폴피스 두께에 따른 내부 회전자의 토크 및 폴피스의 토크의 변화 그래프를 나타내었으며 폴피스의 두께가 3 mm 지점까지 증가하였을 때 내부 회전자의 토크 및 폴피스의 토크가 소폭 증가하였으나 폴피스 두께가 3 mm 이상 증가할 경우 구동법I과 같은 이유로 내부 회전자 영구자석의 면적이 함께 변하기 때문에 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 일정한 값으로 수렴하여 더 이상 증가하지 않는 모습을 보인다.

B. 내부 회전자 철심의 두께 조절

Fig. 3(a)에 구동법I일 경우의 내부 회전자 철심의 두께 변화에 따른 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의

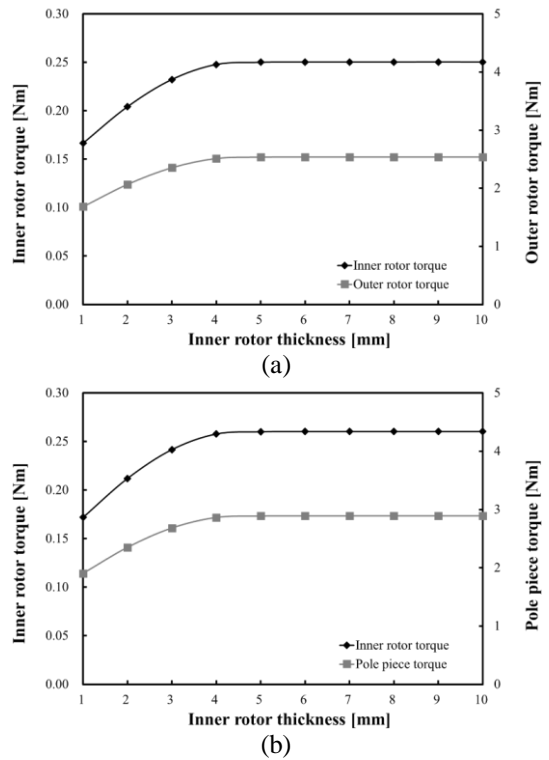


Fig. 3. Transfer torque according to the inner rotor thickness. (a) Operating method I. (b) Operating method II.

토크 그래프를 나타내었으며, Fig. 3(b)에 구동법II일 경우의 내부 회전자 철심의 두께 변화에 따른 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크 그래프를 나타내었다. 구동법I일 경우 내부 회전자 철심의 두께가 1 mm~4 mm까지 변하며 내부 회전자 철심의 내부에서 받아들일 수 있는 자속이 증가하기 때문에 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크가 증가하는 모습을 볼 수 있다. 하지만 내부 회전자 철심의 두께가 4 mm 이상 증가 하였을 시에는 내부 회전자 철심의 두께가 증가하더라도 내부 회전자 영구자석에서 발생하는 자속은 일정하기 때문에 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크가 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴하는 모습을 보인다.

구동법II일 경우 내부 회전자 철심의 두께가 4 mm 지점까지 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 증가하지만 내부 회전자 철심의 두께가 4 mm 이상 증가 하였을 시에는 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴하는 모습을 보인다.

C. 내부 회전자의 영구자석 두께 조절

Fig. 4(a)에 구동법I일 경우의 내부 회전자 영구자석 두께에 따른 내부 회전자의 토크 및 외부 회전자의 토크의 변화 그래프를 나타내었으며, Fig. 4(b)에 구동법II일 경우의 내부 회전자 토크 및 폴피스 토크의 변화 그래프를 나타내었다. 구동법I일 경우 내부 회전자 영구자석의 두께가 8 mm 지점까지 증가할 때 내부 회전자 영구자석의 면적이 증가하며 내부 회전자 영구자석에서 발생하는 자속이 증가하기 때문에 내부 회전자의 토크와

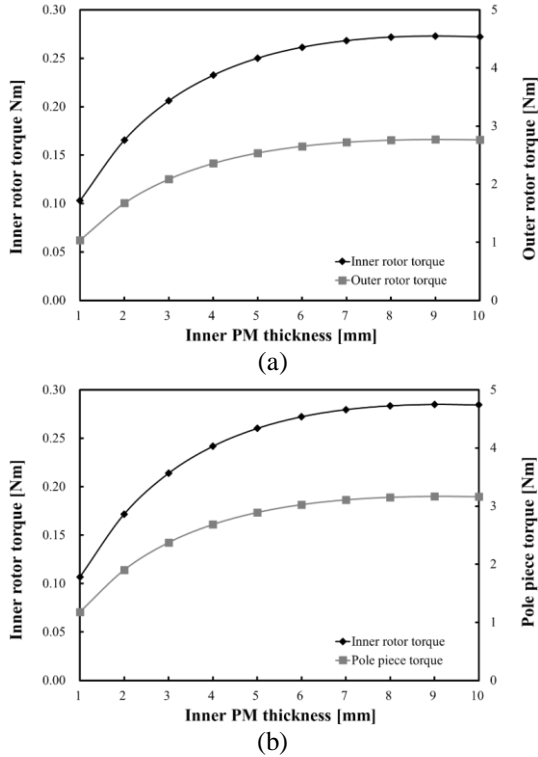


Fig. 4. Transfer torque according to the inner rotor PM thickness. (a) Operating method I. (b) Operating method II.

외부 회전자 토크가 증가한다.

하지만 내부 회전자 영구자석의 두께가 8 mm 이상 증가 하였을시 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크는 더 이상 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴한다. 이는 내부 회전자 영구자석의 두께가 증가하며 발생하는 자속은 증가하지만 앞에서 언급한 내용과 같이 내부 회전자 철심의 내경과 외경이 감소하며 내부 회전자 철심의 면적이 감소하기 때문에 내부 회전자 철심이 내부 회전자 영구자석에서 발생한 자속을 더 이상 받아들일 수 없기 때문이다.

구동법II일 경우 내부 회전자의 영구자석 두께가 8 mm 지점까지 변할 때 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 증가하였고 내부 회전자의 영구자석 두께가 8 mm 이상 증가 하였을 때에는 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 증가하지 않고 일정한 값으로 수렴하였다.

D. 외부 회전자의 영구자석 두께 조절

Fig. 5(a)에 구동법I일 경우의 외부 회전자 영구자석 두께에 따른 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크 변화 그래프를 나타내었으며, Fig. 5(b)에 구동법II일 경우의 외부 회전자 영구자석 두께에 따른 내부 회전자의 토크와 폴피스 토크의 변화 그래프를 나타내었다. 구동법I일 경우 외부 회전자의 영구자석 두께가 2 mm 인 지점까지 증가하였을 때 외부 회전자의 영구자석에서 발생하는 자속이 증가하기 때문에 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크가 소폭 증가하지만 외부 회전자의

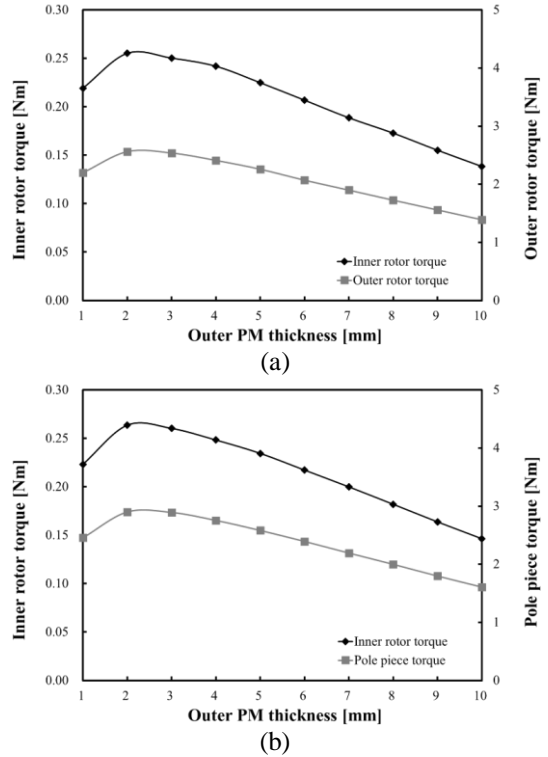


Fig. 5. Transfer torque according to the outer rotor PM thickness. (a) Operating method I. (b) Operating method II.

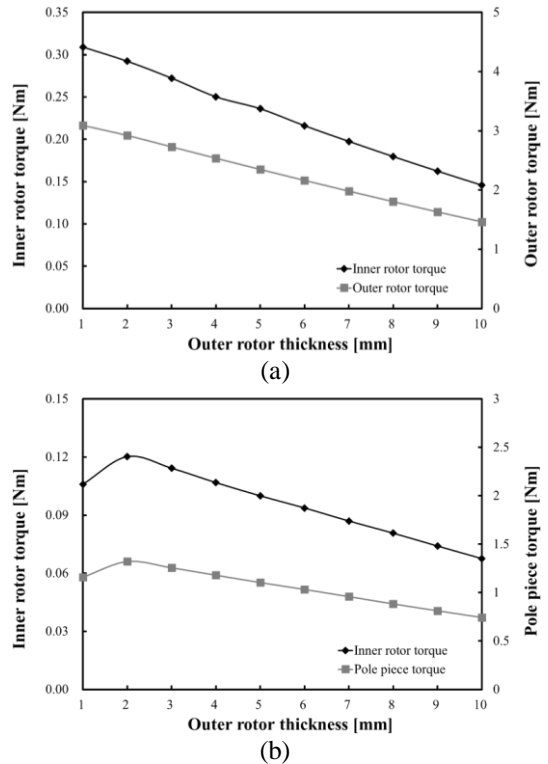


Fig. 6. Transfer torque according to the outer rotor thickness. (a) Operating method I. (b) Operating method II.

영구자석 두께가 2 mm 이상 증가 하였을 때에는 외부 회전자의 영구자석에서 발생하는 자속을 외부 회전자 철심의 내부에서 더 이상 받아들이지 못하기 때문에 내

부 회전자 토크와 외부 회전자 토크가 감소하는 그

Table 2. Range of parameters for proposed pole piece

Level		Design variable		
		A [mm]	B [mm]	C [mm]
Low	-1	1	1	0.5
Central	0	3	3	1
High	+1	5	5	1.5

Table 3. Box-behnken design

Standard Order	Coded factor			Uncoded factor		
	A [x1]	B [x2]	C [x3]	A [mm]	B [mm]	C [mm]
1	-1	-1	0	1	1	1
2	+1	-1	0	5	1	1
3	-1	+1	0	1	5	1
4	+1	+1	0	5	5	1
5	-1	0	-1	1	3	0.5
6	+1	0	-1	5	3	0.5
7	-1	0	+1	1	3	1.5
8	+1	0	+1	5	3	1.5
9	0	-1	-1	3	1	0.5
10	0	+1	-1	3	5	0.5
11	0	-1	+1	3	1	1.5
12	0	+1	+1	3	5	1.5
13	0	0	0	3	3	1

래프를 나타낸다.

또한 구동법II일 경우 외부 회전자의 영구자석 두께가 2 mm 지점까지 증가할 때 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 소폭 증가하였으나 외부 회전자의 영구자석 두께가 2 mm 이상 증가하였을 경우에는 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 감소하는 그래프를 나타내었다.

E. 외부 회전자 철심의 두께 조절

Fig. 6(a)에 구동법I일 경우의 외부 회전자 철심의 두께에 따른 내부 회전자의 토크 및 외부 회전자의 토크 변화 그래프를 나타내었으며, Fig. 6(b)에 구동법II일 경우의 외부 회전자 철심의 두께에 따른 내부 회전자의 토크 및 폴피스의 토크 변화 그래프를 나타내었다. 구동법I에서 외부 회전자 철심의 두께를 증가시킬 경우 앞에서 언급한 내용과 같이 외부 회전자의 외경의 값은 변하지 않은 상태로 라디얼 축의 안쪽 방향으로 외부 회전자 철심의 두께가 증가하기 때문에 외부 회전자의 영구자석 면적과 내부 회전자의 영구자석 면적이 감소한다. 따라서 영구자석에서 발생하는 자속이 감소하기 때문에 외부 회전자 철심의 두께를 증가시킬 경우 내부 회전자의 토크와 외부 회전자의 토크가 감소하는 그래프 양상을 보인다.

또한 구동법II일 경우 외부 회전자 철심의 두께가 2 mm 지점까지 증가 하였을때 외부 회전자의 면적이 증가하였기 때문에 외부 회전자의 영구자석에서 발생하는 자속을 외부 회전자 철심이 더 받아들이게 되어 내부 회전자의 토크와 폴피스의 토크가 소폭 상승하였으나 외부 회전자 철심의 두께가 2 mm 이상 증가 하였을 경우는 구동법II와 같은 이유로 내부 회전자의 토크와 폴

피스의 토크가 감소하는 그래프를 나타내었다.

따라서 비접촉 영구자석 기어의 폴피스의 두께, 내부 회전자 철심의 두께, 내부 회전자 영구자석의 두께, 외부 회전자 영구자석의 두께, 외부 회전자 철심의 두께에 따른 형상을 조절할 경우, 공통적으로 나타난 특징을 바탕으로 영구자석에서 발생하는 자속을 일정하게 유지시키면서 회전자 철심의 자속밀도가 포화되지 않는 범위에서 회전자의 두께를 작게 설계하는 것이 유리하다는 결론을 내릴 수 있다.

III. 비접촉 영구자석 기어의 자속집중형 구조 최적설계

전달토크 분석결과에 따라 기어비 10.5인 비접촉 영구자석 기어를 설계하였다. 내부 회전자의 영구자석 쌍극수는 2개, 외부 회전자의 영구자석 쌍극수는 21개이며, 총 외경은 200 mm, 적층길이는 100 mm이다. 비접촉 영구자석 기어의 폴피스는 내부 회전자와 외부 회전자의 자속 흐름을 조절하여 비접촉 영구자석 기어의 구동에 중요한 역할을 한다. 따라서, 본 연구에서는 이러한 폴피스에 전달토크능력을 향상시킬 수 있는 자속집중형 구조의 적용을 제안하며 Fig. 7(b)와 같이 설계변수를 설정하였다.

또한, 제안된 자속집중형 구조의 설계 변수에 대한 최적모델을 도출하고자 반응표면법 중 하나인 박스-벤켄법을 이용하였다. 박스-벤켄법은 균형 불완비 블록 계획법(Balanced incomplete block design; BIBD)에 2^k요인 배치

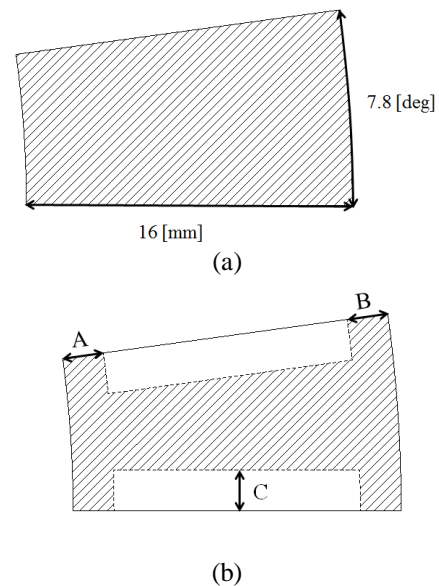
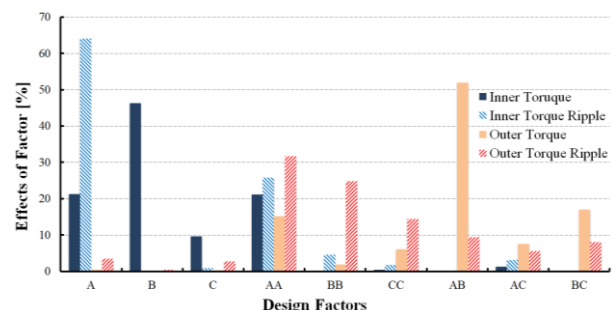


Fig. 7. Structure of conventional pole piece and proposed pole piece. (a) Conventional pole piece. (b) Proposed pole piece



185 Fig. 8. Effects of factor

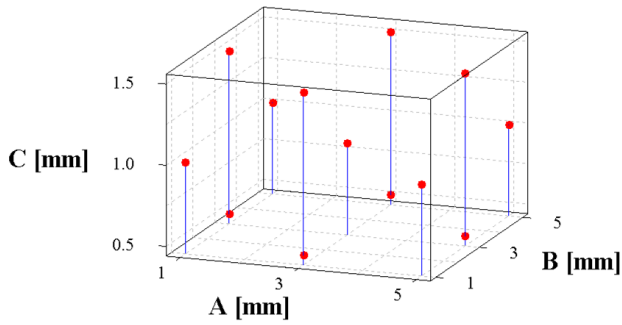


Fig. 9. 3D scatter plot of box-behnken design for pole piece shape design

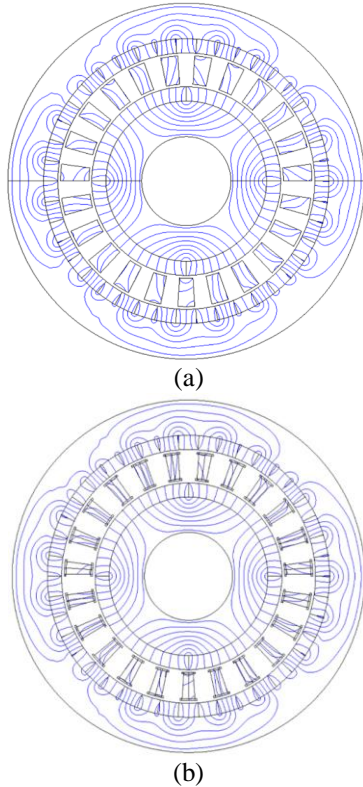


Fig. 10. Distribution of magnetic flux line. (a) Conventional model. (b) Proposed model.

계획을 결합하여 기본계획을 수립하고 중심점에서 실험 수 n_c 를 추가시켜 2차 반응표면식을 추정할 수 있는 계획법으로 꼭 지점의 실험이 포함되지 않는 실험계획이다 [4].

또한, 박스-벤켄법은 각 인자의 3수준에서 실험을 수행하여야 하는 특징을 가지고 있다 [4]. 본 연구에서는 제안된 폴피스에 대한 설계변수 A, B, C에 대한 범위를 Table 2과 같이 설정하였으며 각 설계변수의 영향력은 Fig. 8과 같다. 또한, Table 3과 같이 실험점을 구성하였으며, 3D 산점도는 Fig. 9와 같다.

비접촉 영구자석 기어의 자속집중형 구조 최적모델을 도출하기 위하여 중첩 등고선도(Overlaid contour plot)를 이용하였다. 중첩 등고선도는 다수의 반응변수에 대한 개별적인 등고선을 겹쳐보는 방법으로 여러 반응들 간의 타협 지역(Compromise area)을 시각적으로 식별할 수 있게 해준다 [5]. 이러한 중첩 등고선도는 한 번에 두

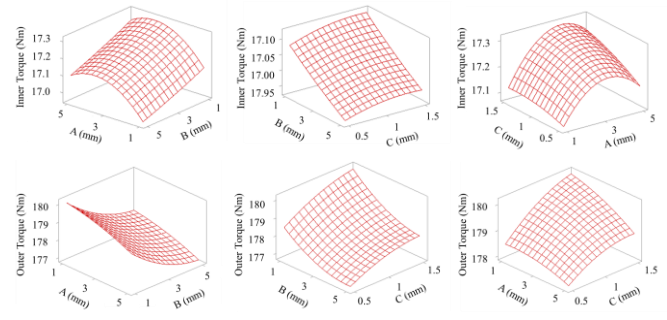


Fig. 11. Response surface of inner torque, outer torque, inner torque ripple and outer torque ripple.

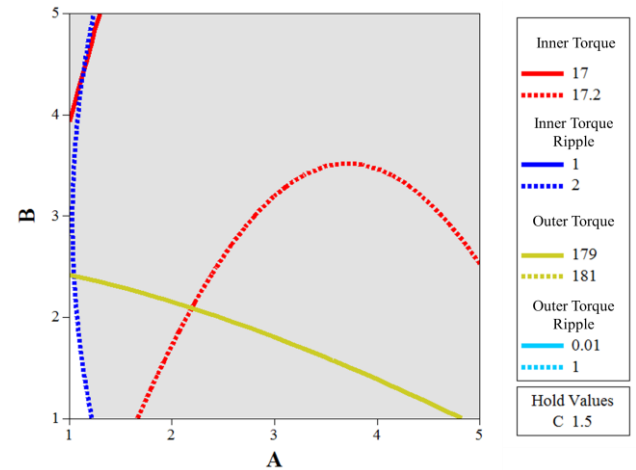


Fig. 12. Effects of factor

개의 설계변수의 특성을 파악할 수 있으므로 세 개의 설계변수를 가지는 경우 한 개의 설계변수를 변화시켜 가면서 두 개의 설계변수에 대한 특성을 파악하여야 한다. 따라서 본 연구에서는 설계변수 C를 변화시키면서 설계변수 A, B의 등고선도를 분석하였으며, Fig. 12는 설계변수 C를 1.5 mm일 때 설계변수 A, B의 반응표면을 등고선도로 나타낸 것이다. 중첩 등고선도의 흰색부분이 나타내는 영역의 범위는 Fig. 11의 오른쪽 범례와 같으며, 자속집중형 구조의 최적모델이 흰색영역 안에 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 10에 기존모델과 자속집중형 구조를 적용한 제안모델의 형상과 자속선 분포를 나타내었으며, 제안모델의 경우 자속이 폴피스에 집중되는 것을 볼 수 있다.

또한, 기존모델과 자속집중형 구조를 적용한 제안모델의 토크-각도 그래프를 Fig. 13(a),(b)와 Fig. 14(a),(b)에 나타내었다. 구동법I인 경우의 내부 회전자의 토크는 2.4%, 외부 회전자의 토크는 4.2% 향상되었다. 또한, 구동법II인 경우의 내부 회전자의 토크는 4.9%, 외부 회전자의 3.8% 향상되었다. 이 때 토크-각도 그래프는 정현적인 파형을 나타내고 있으며, 토크-각도 곡선의 최대값은 정상상태 토크파형의 토크에 기인한다[6-7]. 또한 구동법I과 구동법II일 때의 토크값과 토크가 개선된 정도를 Table 4에 나타내었다.

구동법I과 구동법II의 두가지 제안모델의 경우 기존모델의 폴피스 보다 부피가 감소함에 따라 전체질량 또한 감소하였다. 이와 같은 토크향상, 질량의 감소는 비접촉 영구자석 기어의 중량당 출력밀도 향상의 결과를 가져왔으며, 기본모델에 비하여 구동법I은 6% 향상되었으며 구동법II는 5% 향상되었다.

Table 4. Torque improvement rate according to operating method

Operating method I			
Inner rotor torque		Outer rotor torque	
Conventional model	Proposed model	Conventional model	Proposed model
16.8 [Nm]	17.2 [Nm]	173.2 [Nm]	180.5 [Nm]
2.4% increase		4.2% increase	
Operating method II			
Inner rotor torque		Pole piece torque	
Conventional model	Proposed model	Conventional model	Proposed model
16.5 [Nm]	17.2 [Nm]	191.3 [Nm]	198.5 [Nm]
4.2% increase		3.8% increase	

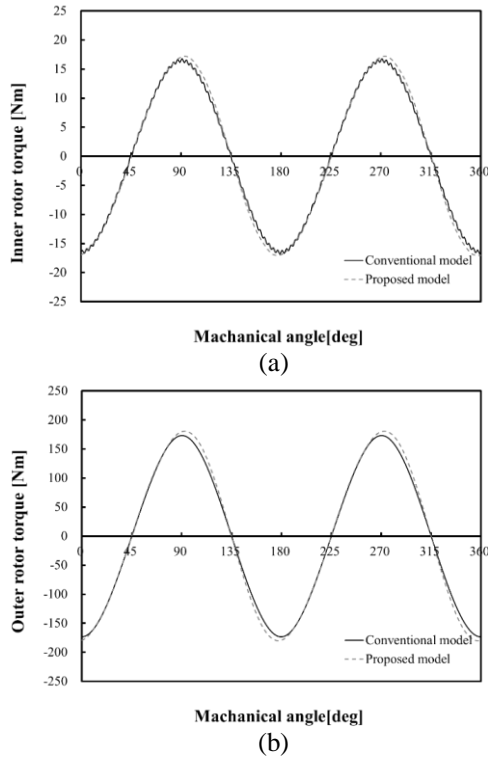


Fig. 13. Torque-angle curve of operating method I. (a) Inner rotor torque. (b) Outer rotor torque.

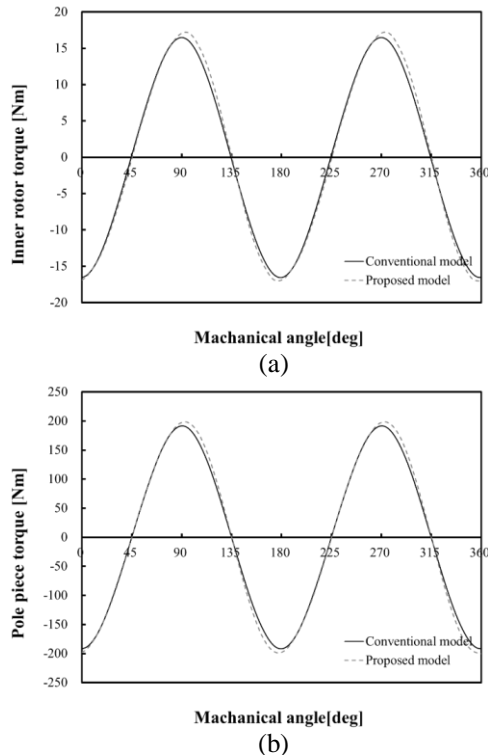


Fig. 14. Torque-angle curve of operating method II. (a) Inner rotor torque. (b) Pole piece torque.

IV. 결론

본 연구에서는 비접촉 영구자석 기어의 낮은 전달

토크 능력을 향상시키고자 폴피스, 내부 회전자 토크 및 내부 회전자의 영구자석, 외부 회전자 철심 및 외부 회전자 영구자석 두께 형상조절에 따른 전달토크 특성을 구동방법에 따라 분석하였으며, 박스-벤젠법을 적용하여 자속집중형 구조의 최적설계를 위한 실험계획법을 수립하고 중첩 등고선도를 이용하여 최적설계를 수행하였다.

자속집중형 구조가 적용된 비접촉 영구자석 기어의 전달토크는 구동법I의 경우 내부 회전자의 토크가 2.4%, 외부 회전자의 토크는 4.2% 향상되었다. 또한 구동법II의 경우 내부 회전자의 토크는 4.2%, 외부 회전자의 토크는 3.8% 향상되었다.

결론적으로 토크값의 결과를 통한 비접촉 영구자석 기어의 중량당 출력밀도는 구동법I일 경우에 기본모델 대비 6% 향상되어 96.1 W/kg로 개선되었음을 확인할 수 있었으며, 구동법II일 경우에 기본모델대비 5% 향상되어 105.9 W/kg로 개선되었음을 확인할 수 있었다. 이러한 수치적 결과를 통하여 비접촉 영구자석 기어에 자속집중형 구조를 적용함으로써 전달토크능력이 향상되었음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 한국전력공사의 재원으로 기초전력연구원의 2014년 선정 기초 연구개발과제의 지원을 받아 수행된 것임. [과제번호 : R14XA02-8]

This research was supported by Korea Electric Power Corporation (KEPCO) through Korea Electrical Engineering & Science Research Institute. [grant number : R14XA02-8]

REFERENCES

- [1] K. Atallah, S.D.Calverley, and D.Howe, "High-performance magnetic gear", J. Magn. Mater., 272-276(1), pp. E1727-1729, May, 2004.
- [2] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear", IEEE Trans. Magn., 37(4), pp. 2844-2846, July, 2001.
- [3] Gil-Sun Choi, Sung-Chin Hahn, "Multiobjective Optimal Double-Layer PM Rotor Structure Design of IPMSM by Response Surface Method and Finite Element Method", Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, 24(6), pp 123-130, June, 2010.
- [4] L. Jian, G. Xu, J. Song, H. Xue ,D. Zhao and J. Liang, "Optimum Design for Improving Modulating-Effect of Coaxial Magnetic Gear using Response Surface

- methodology and Genetic Algorithm”, Progress in Electromagnetics Research, 116, pp 297-312, 2011
- [5] Y.H. Im, S.M. Jang, “Optimal Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Consideration of Magnet BH Characteristic with Different Rotor Type using Response Surface Methodology”, The Transactions of the Korean Institute of Electrical Engineers, 62(8), August, 2013
- [6] L. Jian, G. Xu, Y. Gong, J.Song, J. Liang, and M. Chang, “Electromagnetic design and analysis of a novel magnetic-gear-integrated wind power generator using time-stepping finite element method”, Progress In Electromagnetics Research, 113, pp. 351-367, February 2011.
- [7] L.Jian and K.T.Chau, “A Coaxial magnetic gear with Halbach permanent magnet arrays”, IEEE Trans. Energy Conv., 25(2), pp. 319-328, Jun. 2010.