





년

2 월

碩士學位論文

[UCI]I804:24011-200000265312

2016년 2월 碩士學位論文

# 마그네틱 기어의 자속집중형 폴피스 형상 최적설계에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

燦

雷

金

氣工學科

浩

마그네티 기어의 자속집중형 폴피스 형상 金 燦 浩



# 마그네틱 기어의 자속집중형 폴피스 형상 최적설계에 관한 연구

A Study on Optimal Design of Flux Concentrating Pole Piece for Magnetic Gear

2016年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

金燦浩





# 마그네틱 기어의 자속집중형 폴피스 형상 최적설계에 관한 연구

指導教授 金 容 載

이 論文을 工學 碩士學位申請 論文으로 提出함

2015年 10月

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

金燦浩





# 金燦浩의 碩士學位論文을 認准함



2015年 11月

朝鮮大學校 大學院





ABSTI	ACT ·····	•• v
I. 서	론	- 1
Ⅱ. 이	특적 고찰	2
A. 7]7	적 기어	· 2
B. 마그	네틱 기어	• 5
1. 마그	네틱 기어의 원리 및 구조	• 5
2. 마그	네틱 기어의 전달토크 특성	• 7
Ⅲ. 자	·집중형 폴피스의 최적설계	11
A. 자극	집중형 폴피스의 구조	• 11
B. 자설	집중형 폴피스의 설계변수 선정	• 12
C. 반용	표면분석법	· 13

Collection @ chosun



D. 박스-벤켄 설계	15
Ⅳ. 자속집중형 폴피스의 특성분석	19
A. 다중회귀분석	19
B. 반응표면분석	23
C. 최적모델의 전달토크 특성분석	27
1. 자속밀도 특성	27
2. 토크-각도 곡선 및 정상상태토크파형	27
3. 출력밀도 특성	33
Ⅴ. 결 론	34
참고문헌	35





# 표 목차

Table 1. Specification of magnetic gear    7
Table 2. Analysis result of magnetic gear10
Table 3. Variable range of pole piece   17
Table 4. Box-behnken design
Table 5. ANOVA table inner torque    20
Table 6. ANOVA table outer torque    20
Table 7. ANOVA table inner torque ripple    21
Table 8. ANOVA table outer torque ripple    21
Table 9. Response surface analysis    23
Table 10. Result of optimization    33





그림	목차
----	----

Fig. 1. Gearbox fire and gear failures of mechanical gear
Fig. 2. 3-D structure of magnetic gear
Fig. 3. Magnetic gear
Fig. 4. Analysis model and generated mesh
Fig. 5. Flux density and flux line
Fig. 6. Steady-state waveform of conventional magnetic gear
Fig. 7. Conventional magnetic gear11
Fig. 8. Proposal magnetic gear with concentrated pole piece 12
Fig. 9. Response surface methodology 15
Fig. 10. Flow diagram of response surface methodology16
Fig. 11. Scatter plot of box-behnken design 18
Fig. 12. Response surface plot of inner torque and outer torque
Fig. 13. Response surface plot of inner torque ripple and outer torque
ripple
Fig. 14. Overlaid contour plot
Fig. 15. Flux density and flux line
Fig. 16. Radial flux densities of conventional model and optimal model 30
Fig. 17. Torque-angle curve of conventional model and optimal model
Fig. 18. Steady-state torque of conventional model and optimal model





# ABSTRACT

# A Study on Optimal Design of Flux Concentrating Pole Piece for Magnetic Gear

Chan-Ho Kim

Advisor : Prof. Yong-Jae Kim, Ph. D. Department of Electrical Engineering Graduate School of Chosun University

Magnetic gear which is capable of non-contact torque transmission has replaced mechanical gear and has advantages of high efficiency and improved reliability. However, it also has the problem of a low torque density, which requires improvement. In this paper, a novel pole piece shape was proposed in order to improve the problem of low torque density of the magnetic gear. In order to identify the functional relationship between design variables of the proposed pole piece shape and response variables such as torque and torque ripple, response surface methodology was used, and Box-Behnken design was used to establish the design of experiment. In addition, using variance analysis and regression analysis of design variables and response variables, response surface of the response variable to the design variable, and its response surface equation, were estimated to derive optimal design variables for the proposed pole piece shape. The experimental data required for predicting the relationships among them are were obtained using finite element method based on 2-D numerical analysis. Therefore, this paper derived an optimal model for the magnetic 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 was demonstrated.





# I.서 론

현재 산업전반에 결쳐 여러 분야에서 이용되고 있는 기계적 기어(Mechanical gear)는 동력을 전달하는 기계장치에 많이 사용되고 있다. 그러나 기계적 기어의 동작원리가 기어이의 맞물림으로 구동되기 때문에 기어이의 물리적인 접촉에 의 한 마찰손실, 소음 및 진동의 문제점을 피하는 것은 어렵다. 따라서, 기계적 기어 의 물리적인 접촉 문제를 해결할 수 있는 마그네틱 기어(Magnetic gear)가 주목 받고 있으며, 마그네틱 기어는 기계적인 마찰손실이 없고, 매우 적은 소음과 진 동, 윤활유가 불필요한 장점을 가지고 있다. 이러한 마그네틱 기어는 비접촉의 고유한 특징으로 인하여 많은 이점과 고효율 구동의 특징을 가지고 있으나 낮은 토크밀도를 가지고 있기 때문에 이에 대한 개선이 필요한 실정이다.

이러한 비접촉 토크전달을 할 수 있는 마그네틱 기어는 기계적 기어를 대체하 여 고효율, 신뢰성 향상 등의 장점을 가지고 있으나, 낮은 토크밀도의 문제점을 가지고 있어 기계적 기어를 대체하기에 어려움이 뒤따른다. 따라서 본 논문에서 는 마그네틱 기어의 낮은 토크밀도의 문제점을 개선하고자 새로운 폴피스 형상 을 제안한다. 제안된 폴피스 형상에 대한 설계변수와 토크 및 토크 리플 같은 반 응변수들간의 함수 관계를 파악하기 위하여 반응표면법을 이용하였으며, Box-Behnken 설계를 이용하여 실험계획법을 수립하였다. 또한 설계변수와 반응 변수의 분산분석 및 회귀분석을 이용하여 설계변수에 대한 반응변수의 반응표면 및 반응표면식을 추정하여 제안된 폴피스 형상에 대한 최적설계변수를 도출하였 다. 또한, 수치해석 기반 2-D 유한요소해석법을 이용하여 마그네틱 기어의 전달 토크특성을 분석하였으며, 이를 통하여 최석설계 변수를 예측하기 위한 실험데이 터를 수집하였다. 따라서 본 논문에서는 Box-Behnken 설계를 이용하여 제안된 폴피스 형상을 가진 마그네틱 기어의 최적모델을 도출하고 분산분석과 회귀분석 을 통해 제안된 폴피스 형상의 최적설계에 대한 타당성을 입증하였다.

- 1 -





## Ⅱ. 이론적 고찰

#### A. 기계적 기어

기계적 기어는 동력전달과 전환을 담당하는 기본요소로 자동차, 산업기계, 터보기 계, 농업기계, 컨설기계, 철도, 선박, 항공기, 공작기계, 사무용 및 계측기기 등 모든 산업 부문에 걸쳐 널리 사용되고 있으며, 로봇을 포함한 각종 자동화 장치의 구동 및 동력전달에 사용되고 있다 [1]. 또한, 기어 잇수의 조합을 바꿈으로써 속도 전달 비를 자유롭고 정확하게 선택할 수 있으며, 기어의 조합수를 증감하여 회전축 상호 의 관계위치를 자유롭게 할 수 있다는 점에서 현재와 같이 보급되어 널리 쓰이고 있 다. 기계적 기어는 두 개의 기어가 직선으로 맞물려 있는 헬리컬 기어, 2개의 축이 직각 또는 둔각으로 만나 축 간 운동을 전달하는 베벨 기어, 헬리컬 기어와 나선형 톱니를 가진 베벨기어가 수직으로 맞붙는 구조를 가진 헬리컬 베벨 기어, 가운데의 선(Sun)기 기어와 주변을 회전하는 1개 이상의 유성(Planet) 기어, 내접(Internal) 기 어로 구성되어 있는 유성 기어 등으로 분류된다.

이러한 기계적 기어는 속도를 낮추고 높은 토크를 발생시키기 위한 목적으로 사용 하게 될 경우 감속기어라 불리우며, 토크를 낮추고 속도를 높이기 위한 목적으로 사 용하게 될 경우 증속기어라 불리운다. 이와 같이 감속기어는 고속·저토크 에너지를 저속·고토크 에너지로 변환시키는 역할을 하며, 증속기어는 저속·고토크 에너지를 고 속·저토크에너지로 변환하는 역할을 한다.

하지만, 이러한 기계적 기어는 윤활유 주입 및 보수 점검의 문제점이나 소음, 진 동, 마찰에 의한 열 발생 등의 문제점을 가지고 있으며, 이러한 문제점의 주된 원인 은 기어이(Gear teeth)의 맞물림에 의한 구동에 있다. 특히 기계적 기어의 가장 큰 문제점은 마찰에 의한 기어손상(Gear failures)이며, 풍력발전기의 기어박스 같은 경 우 그림 1(a)와 같이 기어손상에 의하여 화재가 발생 할 수 있다.

이러한 화재의 원인이 되는 기어손상은 그림 1(b)에서 그림 1(h)에 나타낸 것과 같이 연마마모(Abrasive wear), 소성유동(Plastic flow), 과부하 절손(Overload breakage), 마모 (Wear), 피팅(Pitting), 스커핑(Scuffing), 경화층 파손(Case crushing)등이 있다 [2, 3].







(a) Gearbox fire of wind turbine



(d) Abrasive wear





(e) Plastic flow



(g) Case crushing



(b) Overload breakage



(c) Scuffing



(f) Wear



(h) Pitting







이러한 기계적 기어의 단점을 보완하기 위하여, 그림 2와 같이 새로운 형태의 마 그네틱 기어가 K.Atallah 등에 의하여 제안되었다 [4, 5]. 마그네틱 기어는 기계적 기 어의 근본적인 문제인 마찰을 제거함으로써 비접촉 구동이 가능하며, 소음 및 진동 최소화, 윤활유 주입 및 보수점검의 용이성, 과부하에 대한 보호, 안정성 및 신뢰성 향상, 고효율 구동과 더불어 정확한 최대토크 전달 등의 이점을 가지고 있으나 낮은 토크전달 능력으로 인하여 이에 대한 연구가 필요하며, 이러한 장점으로 인하여 해 외에서는 마그네틱 기어에 대한 많은 관심으로 꾸준한 연구가 진행되고 있다. 따라 서, 본 논문에서는 마그네틱 기어를 이용하여 기어를 구성하고 토크밀도 및 출력밀 도를 향상 시키는 연구를 진행하였다.



Fig. 2. 3-D structure of magnetic gear





#### B. 마그네틱 기어

#### 1. 마그네틱 기어의 원리 및 특성

일반적으로 마그네틱 기어는 그림 3과 같이 이너로터, 아우터로터, 폴피스로 구성된다. 또한, 이너로터와 아우터로터는 영구자석 전동기의 치나, 요크 등에 사 용되는 재료인 전기강판을 적층하여 사용하며, 각각의 로터에는 영구자석이 부착 되어 있다. 또한, 이너로터와 아우터로터 사이에 존재하고 있는 폴피스는 이너로 터와 아우터로터의 영구자석에 발생하는 자속의 흐름을 원활하게 해주며, 조절 (Modulating)하는 역할을 한다 [4-7].

이러한 마그네틱 기어의 구동방식은 폴피스가 고정되어 있을 때, 이너로터와 아우터로터가 반대로 회전하는 감속기 또는 가속기로 이용될 수 있으며, 아우터 로터가 고정된 상태에서 이너로터와 폴피스가 회전하는 구동을 할 수 있다. 본 연구에서는 폴피스가 고정된 상태에서의 구동에 대한 연구를 수행하였으며, 이러 한 구동에서 아우터로터는 저속으로 구동되고 이너로터는 고속으로 구동된다.



Fig. 3. magnetic gear



마그네틱 기어의 이너로터의 영구자석 쌍극수가  $p_i$ , 아우터로터의 영구자석 쌍 극수가  $p_o$ 일 때, 식 (1)에 의하여 폴피스의 개수  $n_p$ 로 결정된다.

$$n_p = p_i + p_o \tag{1}$$

또한, 이너로터의 회전속도가  $w_i$ , 폴피스의 회전속도가  $w_p$ , 아우터로터의 회전 속도가  $w_o$ 일 때, 식 (2)와 같이 정의된다.

$$w_i = \frac{n_p}{p_i} w_p - \frac{p_o}{p_i} w_o \tag{2}$$

이러한 마그네틱 기어는 폴피스가 고정된 상태에서 구동하는 방법과 아우터로 터가 고정된 상태에서 구동하는 방법으로 구동되기 때문에 하나의 마그네틱 기 어에서 두 개의 기어비를 구현할 수 있다. 따라서 폴피스를 고정한 상태에서의 기어비는 식 (3)과 같고 아우터로터를 고정한 상태에서의 기어비는 식 (4)와 같 다.

$$G_1 = \frac{p_o}{p_i} \tag{3}$$

$$G_2 = \frac{n_p}{p_i} \tag{4}$$







#### 2. 마그네틱 기어의 전달토크 특성

마그네틱 기어의 전달토크 특성분석을 위하여 표 1과 같이 이너로터의 극수는 4극, 아우터로터의 극수는 42극으로 설정한 마그네틱 기어를 초기모델로 설정하 였다. 따라서 마그네틱 기어의 기어비는 10.5, 폴피스의 개수는 23개로 결정되었 으며, 이너로터의 샤프트 외경은 50 [mm]이며, 총 외경은 200 [mm], 적층은 100 [mm]로 설정하였다.

Gear ratio	10.5	
$B_r$ of magnetic m	1.23	
Steel material	35PN230	
Number of inner	2	
Number of outer	pole pair	21
Number of pole p	23	
Radial thickness [mm]	Inner rotor	20
	Inner permanent magnet	8
	Outer rotor	20
	Outer permanent magnet	8
	Pole piece	16
	Air-gap	1.5
	Stack length	10
Rotational speed	Inner rotor	1000
[rpm]	Outer rotor	95.2381

Table 1. Specification of magnetic gear

표 1과 같은 제원으로 모델링한 결과는 그림 4(a)에 나타내었으며, 유한요소해 석에 필요한 메시(Mesh)는 그림 4(b)와 같이 분할하여 해석을 수행하였으며, 노 드(Node)의 개수는 167,255개이며, 요소(Element)의 개수는 233,213개이다. 또한, 유한요소해석결과 마그네틱 기어의 자속밀도 형상과 자속선도는 그림 5에 나타 내었으며, 최대 자속밀도는 1.9 [T]이다.







(a) Analysis model(b) Generated meshFig. 4. Analysis model and generated mesh



Fig. 5. Flux density and flux line







또한, 그림 6에 정상상태 토크파형을 나타내었으며, 마그네틱 기어의 이너로터 의 토크는 18.15 [Nm], 아우터로터의 토크는 190.52 [Nm]이다. 또한, 이너로터의 토크 리플은 3.75 %, 아우터로터의 토크리플은 0.06 %로 매우 적은 토크리플을 나타내었다. 이러한 리플은 기기의 소음 및 진동의 원인이 되며, 적은 토크리플 을 가질수록 높은 신뢰성 및 안정성을 갖는다.



Fig. 6. Steady-state waveform of conventional magnetic gear





설계된 마그네틱 기어의 최종 설계 결과를 표 2에 정리하여 나타내었으며, 현재 마그네틱 기어의 이너로터 및 아우터로터의 출력은 1900 [W]로 설계되었다. 따 라서, 토크비는 10.49로 이론적인 기어비 10.5에 매우 근접한 값을 나타내었다.

본 논문에서는 위와 같은 마그네틱 기어 모델을 가지고 토크 및 출력밀도를 향상시키기 위하여 자속집중형 폴피스를 적용하였다.

Gear ratio	10.5 : 1				
Number of inner	r pole	4			
Number of outer	42				
Number of pole	piece	23			
X7 - 1	Inner rotor (rpm)	1000			
Velocity	Outer rotor (RPM)	95.23			
Torque	Inner rotor (Nm)	18.15			
	Inner ripple (%)	3.75			
	Outer rotor (Nm)	190.52			
	Outer ripple (%)	0.06			
Demon	Inner rotor (W)	1901.46			
Power	Outer rotor (W)	1900.16			
Gear ratio (1 / 1	10.49				
Power density (	99.64				

Table 2. Analysis Result of magnetic gear

# III. 자속집중형 폴피스의 최적설계

### A. 자속집중형 폴피스의 구조

그림 7은 일반적인 폴피스 형상을 가진 종래의 마그네틱 기어를 나타내었다. 식 (4)에 일반적인 폴피스 간의 간격을 나타내었으며, 한 개의 폴피스가 이루는 각도는 θ/2이다. 이러한 폴피스는 이너로터와 아우터로터 사이에서 자속의 흐름 을 원활하게하고 조절하여 자속과 동력을 전달해주는 중요한 역할을 한다 [9, 10].

$$\theta = 2\pi/N_s \tag{4}$$



Fig.7. Conventional magnetic gear



## B. 자속집중형 폴피스의 설계변수 선정

본 연구에서는 폴피스의 형상을 그림 8와 같이 자속집중형 구조를 적용함으로 써 토크밀도 및 출력밀도를 향상시키고자 한다. 자속집중형 폴피스 형상의 최적 설계를 위하여 설계변수 α, β, γ 를 선정하여 구성하였으며, Box-Behnken 설계 에 따라 실험을 구성하였다. 또한, 이너로터, 아우터로터의 토크와 토크리플을 목 적함수로 설정하고 수치해석기반 유한요소해석법을 이용하여 해석을 수행하였다.



Fig. 8. Proposal magnetic gear with concentrating pole piece





### C. 반응표면분석법

반응표면법(Response surface methodology)은 반응변수와 독립변수(설계변수) 들과의 함수관계를 말하며, 일반적으로 반응표면식은 알려져 있지 않다. 반응표 면분석에서는 변수들을 이용하여 반응표면에 대한 통계적 모형을 가정하고, 독립 변수의 여러 조건에서 실험을 수행하여 데이터를 얻은 후에 회귀분석을 통하여 반응표면을 추정한다 [11-12]. 추정된 반응표면을 이용하여 독립변수의 변화에 따른 반응변수의 변화 정도를 분석할 수 있으며, 반응변수를 최대화 또는 최소화 하거나, 목적함수에 도달하게 하는 독립변수의 수준조합을 찾아내거나 원하는 반 응값을 얻을 수 있다. 또한, 반응표면법은 분산분석이나 실험계획법을 통하여 최 적조건을 찾았을 때, 입력변수  $x_1, \dots, x_n$ 가 결과 y값과 어떤 관계식을 갖고 있는 지 분석해 주는 방법으로 여러 요인들에 의해 최적의 반응조건을 찾는데 사용되 고 반응변수에 곡률이 존재할 때, 반응표면 설계를 이용한다 [11-12]. 반응표면설 계는 두 개 이상의 요인들간의 관계를 파악하는데 사용되며, 설계변수  $x_1, \dots, x_n$ 과 종속변수 y간의 미지의 함수를 f로 나타내면 y = f(x)로 나타낼 수 있으며 미지 함수를 반응함수라 한다. 독립변수 x가 k개 일 때 반응함수 y를 2차 회귀 모형으로 가정하면 다음 식 (5)와 같이 표현된다 [11].

$$y = \beta_0 + \sum_i^k \beta_i x_i + \sum_i^k \beta_{ii} x_{ii}^2 + \sum_{i \le j}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon$$
(5)

ϵ는 통계적인 오차이며, 일반적으로 평균이 0이고 분산이 σ<sup>2</sup>을 가지는 정규분
 포로 가정한다. 따라서 근사함수로부터 추정한 반응함수를 벡터형태로 나타내면,

$$y = X\beta + \epsilon \tag{6}$$

여기에서, *X*는 설계변수의 행렬, β는 회귀계수의 벡터, ϵ는 임의의 오차의 벡 터이다.

- 13 -

Collection @ chosun



다음 식(7)은 독립변수가 3개일 때의 각 행렬을 나타낸 것이다 [12].

$$y = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{bmatrix}, \ \beta = \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \beta_2 \\ \beta_3 \\ \beta_{11} \\ \beta_{22} \\ \beta_{33} \\ \beta_{12} \\ \beta_{13} \\ \beta_{23} \end{bmatrix}, \ \epsilon = \begin{bmatrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \\ \vdots \\ \epsilon_n \end{bmatrix},$$

$$X = \begin{bmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & x_{31} & x_{11}^2 & x_{21}^2 & x_{31}^2 & x_{11}x_{21} & x_{11}x_{31} & x_{21}x_{31} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & x_{32} & x_{12}^2 & x_{22}^2 & x_{32}^2 & x_{12}x_{22} & x_{22}x_{32} \\ 1 & x_{13} & x_{23} & x_{33} & x_{13}^2 & x_{23}^2 & x_{33}^2 & x_{13}x_{23} & x_{13}x_{33} & x_{23}x_{33} \\ \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & x_{3n} & x_{1n}^2 & x_{2n}^2 & x_{3n}^2 & x_{1n}x_{2n} & x_{1n}x_{3n} & x_{2n}x_{3n} \end{bmatrix}$$
(7)

또한, 회귀계수의 벡터는 임의의 오차의 제곱합을 최소로 하는 최소자승법 (Least squares method)을 이용하여 추정하는데 회귀계수백터의 최소제곱추정량 은 다음 식 (8)과 같다 [13].

$$\beta = (X'X)^{-1}X'y \tag{8}$$

위 식들을 이용하면 토크, 토크리플과 같은 반응함수들의 추정식을 만들어 낼 수 있으며, 설계변수의 변화에 따른 반응 함수를 예측할 수 있게 된다.



#### D. 박스-벤켄 설계

반응표면법은 CCD와 본 연구에서 이용한 박스-벤켄(Box-Behnken) 설계로 나 뉘는데 인자의 수가 3개 일때의 각 실험점을 그림으로 나타내면 그림 9와 같다. 본 연구에서 이용한 Box-Behnken 설계는 반응표면법 중 하나로 1차, 2차 항을 효율적으로 추정하고자 할 때, 모든 요인들이 동시에 낮은 수준 혹은 높은 수준 이 아니라는 것을 확신할 때, 모든 실험이 안정된 영역에서 이루어진다고 확신할 때, 활용한다 [11-12]. Box-Behnken 설계는 요인수가 같은 경우 중심합성설계보 다 실험 횟수가 상대적으로 적고, 꼭지점에서의 실험비용이 너무 많이 들거나 현 실적으로 실험이 불가능한 경우 유리하게 사용할 수 있다는 장점을 가지고 있다 [14]. 중심합성계획법은 factorial point와 axial point에서 실험을 하는 반면에, Box-Behnken 설계는 각 factorial point의 center point에서 실험을 한다. 이 실 험점은  $x_1, x_2$  또는  $x_1, x_3$  또는  $x_2, x_3$ 에 의한 factor combination으로 나눌 수 있다.



Fig. 9. Response surface methodology





따라서 Box-Behnken 설계는 꼭지점이 포함되지 않으며, 육면체 각 변들의 중 심과 전체 실험범위의 중심에서 실험을 한다. Box-Behnken 설계의 실험은 2개 의 인자만 꼭지점 수준(±1, ±1)에서 실험을 수행하고 나머지 인자는 중앙값으로 고정한다. 하지만 중심합성설계를 이용할 경우 실험점이 꼭지점과 중앙점을 이탈 하는 축점(±1.682)의 실험이 필요하기 때문에 축점을 벗어나는 경우 중심합성설 계를 이용할 수 없다 [14-15]. 이러한 Box-Behnken 설계는 그림 10과 같은 플로 우 차트에 의하여 설계를 진행한다.



Fig. 10. Flow diagram of response surface methodology





제안된 폴피스 형상을 설계할 때에도 축점에서의 설계가 불가능한 경우가 생 기기 때문에 제안된 폴피스 형상의 최적설계는 Box-Behnken 설계를 이용하였 다. Box-Behnken 설계는 인자의 3수준에서 실험을 하여야한다 [14]. 따라서, 본 논문에서 제안하는 자속집중형 폴피스의 설계변수는 표 3과 같이 3수준의 설계 범위를 갖도록 설계하였으며, 이를 선점도로 나타나게 되면 그림 11과 같다. 회 전성을 갖는 설계들은 설계 중심으로부터 동일한 거리를 가지고 있는 모든 점들 에서 예측 분산을 일정하게 해주는 성질을 가지고 있어, 통계적 예측의 질을 향 상시킨다. 이러한 Box-Behnken 설계의 총 실험의 크기는 식 (9)과 같으며, 여기 에서 k는 인자수,  $n_c$ 는 중심점의 실험수이다. 따라서, 표 4와 같이 Box-Behnken 실험을 계획하였다.

$$4 \times \frac{k(k-1)}{2} + n_c \tag{9}$$

Loval		Design variable			
Level		$\alpha  [{ m mm}]$	$\beta$ [deg]	$\gamma$ [mm]	
Low	-1	3	0.5	0.5	
Central	0	4.5	1.75	1.75	
High +1		6	3	3	

Table 3. Variable range of pole piece





Fig. 11. Scatter plot of box-behnken design

Standard	Coded factor			Uncoded factor		
	α	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	β	$\gamma$
Order	$x_1$	$x_2$	$x_3$	mm	deg	mm
1	-1	-1	0	3	0.5	1.75
2	+1	-1	0	6	0.5	1.75
3	-1	+1	0	3	3	1.75
4	+1	+1	0	6	3	1.75
5	-1	0	-1	3	1.75	0.5
6	+1	0	-1	6	1.75	0.5
7	-1	0	+1	3	1.75	3
8	+1	0	+1	6	1.75	3
9	0	-1	-1	4.5	0.5	0.5
10	0	+1	-1	4.5	3	0.5
11	0	-1	+1	4.5	0.5	3
12	0	+1	+1	4.5	3	3
13	0	0	0	4.5	1.75	1.75

Table 4. Box-behnken design



## IV. 자속집중형 폴피스의 특성분석

### A. 다중회귀분석

단순회귀분석은 독립변수와 종속변수가 1개이며 이들 사이의 관계가 직선관계 로 가정하고 회귀분석하는 것이다. 하지만 일반적으로 대부분의 공업적 또는 사 회적 현상을 설명할 때에는 종속변수에 영향을 미치는 독립변수의 개수가 두 개 이상일 경우가 대부분이다. 따라서 두 개 이상의 독립변수를 사용하며 독립변수 와 종속변수 둘 사이 관계를 선형으로 가정하고 회귀분석하는 다중회귀분석을 수행하여야 한다 [11]. 회귀분석을 시행하기 위해 분산분석표를 이용하며, 분산분 석표에서 각 항들의 P-value가 0.05이하 일 때 높은 유의성을 나타내고 P-value 가 0.05 이상 일 때는 유의하지 않는 항으로 해당하는 항을 제거한 후 회귀분석 을 시행하여야 한다. 이러한 P-value은 예측하려는 데이터와 예측에 사용하는 데이터 사이에 관련성이 없을 확률을 나타내는 것이다. 회귀식의 항들이 모두 직 교성이 보장되면 모두 제거할 수 있지만 직교성이 보장되지 않으면 한번에 한 개씩 제거하면서 적합한 모델을 찾아야 한다 [12].

Box-Behnken 실험계획에 따라 해석을 수행한 결과를 이용하여 제안된 폴피스 에 대한 설계변수 α, β, γ의 회귀분석을 시행하였다. 이너 토크 및 아우터 토크 의 분산분석 결과 제곱항의 αα항, 교호작용항의 βγ, αγ항이 유의하지 않은 인 자로 판명되어 제거하였으며, 이너 토크리플의 경우에는 제곱항의 αα, γγ와 교 호작용항의 βγ가 유의하지 않은 인자로 판명되어 제거하였다. 아우터 토크 리플 의 경우에는 제곱항과 교호작용항이 모두 유의하지 않은 인자로 판명되어 제거 하였다. 그 결과로 이너 토크, 아우터 토크, 이너 토크리플, 아우터 토크리플의 분산분석표는 표 5, 표 6, 표 7, 표 8에 나타내었다.





Source	DF	SS <sup>1)</sup>	$MS^{2)}$	$F^{3)}$	P <sup>4)</sup>
Regression	6	10.9102	1.8184	24.14	0.001
Linear	3	7.8364	2.6121	34.68	0.000
$\alpha$	1	0.4942	0.4942	6.56	0.043
$\beta$	1	5.8333	5.8333	77.44	0.000
$\gamma$	1	1.5088	1.5089	20.03	0.004
Square	2	2.4926	1.2463	16.55	0.004
etaeta	1	0.6427	1.3754	18.26	0.005
$\gamma\gamma$	1	1.8499	1.8499	24.56	0.003
Interaction	1	0.5812	0.5812	7.72	0.032
lphaeta	1	0.5812	0.5812	7.72	0.032
Residual error	6	0.4520	0.0753		
Total	12	11.3621			

Table 5. ANOVA table inner torque

1) 
$$SS_{Regression} = \sum (y - \bar{y})^2$$
,  $SS_{Regression} = \sum (y - \bar{y})^2$ 

2) 
$$MS_{Regression} = SS_{Regression}/k$$
,  $MS_{Error}/(n-k-1)$ 

3)  $F = MS_{Regression} / MS_{Error}$ 

4) P-value < 0.05

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	6	1215.90	202.65	22.45	0.001
Linear	3	919.50	306.50	33.95	0.000
α	1	56.19	56.19	6.22	0.047
$\beta$	1	709.83	709.83	78.64	0.000
$\gamma$	1	153.48	153.48	17.00	0.006
Square	2	229.06	114.53	12.69	0.007
$\beta\beta$	1	25.38	82.59	9.15	0.023
$\gamma\gamma$	1	203.68	203.68	22.56	0.003
Interaction	1	67.35	67.35	7.46	0.034
$\alpha\beta$	1	67.35	67.35	7.46	0.034
Residual error	6	54.16	9.03		
Total	12	1270.07			

Table 6. ANOVA table outer torque





Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	6	3.4555	0.5759	10.68	0.005
Linear	3	1.4510	0.4837	8.97	0.012
α	1	1.0074	1.0074	18.68	0.005
$\beta$	1	0.2019	0.2019	3.74	0.101
$\gamma$	1	0.2417	0.2417	4.48	0.079
Square	1	1.3383	1.3383	24.82	0.002
etaeta	1	1.3383	1.3383	24.82	0.002
Interaction	2	0.6663	0.3331	6.18	0.035
$\alpha\beta$	1	0.3387	0.3387	6.28	0.046
$\alpha\gamma$	1	0.3275	0.3275	6.07	0.049
Residual error	6	0.3275	0.0539		
Total	12	3.7791			

Table 7. ANOVA table inner torque ripple

Table 8. ANOVA table outer torque ripple

Source	DF	SS	MS	F	Р
Regression	3	0.0074	0.00248	5.79	0.017
Linear	3	0.0074	0.00248	5.79	0.017
α	1	0.0014	0.00149	3.48	0.095
$\beta$	1	0.0038	0.00388	9.06	0.015
$\gamma$	1	0.0020	0.00207	4.84	0.055
Residual error	9	0.0038	0.00042		
Total	12	0.0113			





표 5에서 표8까지 DF는 주어진 조건하에서 자유롭게 변화할 수 있는 점의 수 를 나타내며, SSR은 회귀제곱합, SSE는 잔자제곱합, MS는 각각의 평균제곱을 나타낸다. 또한 F-value는 F-검정을 위한 검정통계량으로 회귀방정식이 데이터 의 성질을 설명하는데 유의한가, 유의하지 않은가를 검정한다 [11-16]. 또한, P-value는 유의확률로써 우리는 회귀분석 절차로 설계된 모형이 0.05(일반적으로 0.1, 0.05 또는 0.01이하)로 될 경우 유의하다고 결정하고 분석을 수행하였다.

아우터 토크 리플의 분산분석표에서 선형항의 α와 γ가 P-value가 0.05 이상으 로 유의하지 않는 인자이지만 선형항 전체가 유의하므로 제거하지 않고 회귀분 석을 수행하여도 무방하다. 따라서 이너로터의 토크, 아우터로터의 토크, 이너로 터의 토크리플은 2차모델로써 추정할 수 있지만 아우터로터의 토크 리플의 경우 주효과만 작용하기 때문에 선형모델로써 추정가능하다. 각각의 설계변수에 따른 회귀분석 추정식은 식(10), 식(11), 식(12), 식(13)에 나타내었다.

$$f_{IT}(\alpha,\beta,\gamma) = 16.6984 + 0.190063\alpha + 1.80165\beta + 1.4733\gamma$$
(10)  
-0.44856\beta\beta - 0.520208\gamma\gamma - 0.203293\alpha\beta

$$\begin{split} f_{OT}(\alpha,\beta,\gamma) = & 176.427 + 2.06292\alpha + 14.4774\beta + 15.6006\gamma \\ & - 3.47581\beta\beta - 2.1884\alpha\beta \end{split} \tag{11}$$

$$f_{ITR}(\alpha,\beta,\gamma) = 1.76956 - 0.3021\alpha + 0.90599\beta - 0.82582\gamma$$
(12)  
-0.42208\beta\beta + 0.1552\alpha\beta + 0.152613\alpha\geta

$$f_{OTR}(\alpha,\beta,\gamma) = 0.052752 + 0.0091\alpha - 0.01763\beta + 0.01289\gamma$$
(13)





### B. 반응표면분석

반응표면분석은 Box-Behnken 계획에 따라 실험을 수행한 결과를 이용하여 다 중회귀분석을 수행하였으며, 이를 통해 이너로터의 토크, 아우터로터의 토크, 이 너로터의 토크리플, 아우터로터의 토크리플의 표면도를 그림 12, 그림 13에 나타 내었다. 표면도를 작성한 후에는 표 9와 같이 표면도의 정상점이 최대점, 최소점, 변곡점인지 판단해야한다 [11]. 정상점이 최대점인 경우 가운데로 갈수록 값이 점점 커지는 동심원을 이루고 있다. 최소점인 경우 가운데로 갈수록 값이 점점 작아지는 동심원을 이루고 있으며, 변곡점일 경우 등고선이 사방으로 퍼져 있는 모양이다 [18-20]. 각각의 표면도는 한번에 두개의 설계변수의 반응표면을 볼 수 있기 때문에 한 개의 인자를 고정시킨 상태에서 반응표면분석을 수행하여야 하 기 때문에 무수히 많은 표면도를 이용하여 분석하여야 한다. 따라서 최적의 설계 변수 값을 고정한 표면도만 나타내었다.

거사자	표면도	등고선도	
성장심	(Surface plot)	(Contour plot)	
최대점	함수 ŷ이 산 모양을 함	가운데로 갈수록 값이 점점 커 지는 동심원	
최소점	함수 ŷ이 컵 모양을 함	가운데로 갈수록 값이 점점작 아지는 동심원	
변곡점	함수 $\hat{y}$ 이 말안장(saddle)모양을 함	등고선이 사방으로 펴져 있는 모양	

Table 9. Response surface analysis







Fig. 12. Response surface plot of inner torque and outer torque







Fig. 13. Response surface plot of inner torque ripple and outer torque ripple



중첩등고선도 방법은 다수의 반응변수에 대한 개별적인 등고선을 겹쳐보는 방 법으로 어떤 반응변수에 관한 최적조건이 다른 반응변수에 관해서는 최적에서 멀리 떨어져 있을 수 있기 때문에 사용된다 [20]. 중첩등고선도는 여러 반응들간 의 타협 지역을 시각적으로 식별할 수 있게 해주기 때문에 편리한 장점을 가지 고 있다. 제안된 폴피스 형상의 설계변수에 대한 중첩등고선도는 그림 14와 같 다.

그림 14에서 오른쪽 범례의 범위에 해당하는 영역은 빗금친 영역이며 제안된 폴피스 형상의 최적설계변수값이 빗금친 영역 안에 있음을 알 수 있다. γ가 1.43 [mm] 일때 α의 범위는 5.3 [mm]에서 6 [mm] 사이이며, β의 범위는 0.5 [deg]에 서 0.8 [deg] 사이에 최적 값이 존재한다. 따라서, 표면도와 중첩등고선도를 통한 분석을 통해 제안된 폴피스의 최적 설계변수 α는 6 [mm], β는 0.5 [deg], γ는 1.43 [mm]으로 결정하였다.



Fig. 14. Overlaid contour plot



#### C. 최적모델의 전달토크 특성분석

#### 1. 자속밀도 특성

반응표면분석을 통하여 제안된 폴피스의 최적 설계변수 α는 6 [mm], β는 0.5 [deg], γ는 1.43 [mm]로 결정하였다. 그림 15(b)에는 최적화가 수행된 제안된 폴 피스를 가진 최적모델의 형상과 자속선도를 나타내었으며, 비교를 위해 그림 15(a)와 같이 기존모델의 형상과 자속선도를 나타내었다. 또한, 그림 16(a)에 이 너로터의 회전각도에 대한 이너측 공극에서의 자속밀도 그래프를 나타내었으며, 그림 16(b)에는 아우터측 공극에서의 자속밀도 그래프를 나타내었다. 이너측 공 극에서의 자속밀도의 최대값은 기존모델에서 1.62 [T]이며, 최적모델의 경우는 1.78 [T]으로 0.16 [T]상승하였다. 또한, 아우터측 공극에서의 자속밀도 최대값은 기존모델에서 0.79 [T]이며, 최적모델의 경우에는 0.83 [T]으로 0.04 [T] 상승하 였다.

#### 2. 토크-각도곡선 및 정상상태 토크파형

토크-각도 곡선은 아우터로터를 고정시킨 후 이너로터를 회전시키면서 이너로 터와 아우터로터의 각도에 따른 토크 특성을 파악할 수 있다 [21, 22]. 이러한 토 크-각도 곡선의 최대값은 정상상태에서의 토크에 기인한다 [23]. 기존모델과 최 적모델의 이너로터의 토크-각도 곡선을 그림 17(a), 아우터로터의 토크-각도 곡 선을 그림 17(b)에 나타내었다. 이너 토크의 최대값은 18.47 [Nm]에서 18.79 [Nm]로, 아우터 토크의 최대값은 190.99 [Nm]에서 196.81 [Nm]로 향상되었다. 이러한 결과는 제안된 폴피스의 구조에 따른 공극 자속밀도 상승에 의한 영향으 로 사료된다. 또한, 그림 18(a)와 그림 18(b)에 기존모델과 최적모델의 정상상태 토크파형을 나타내었다. 현재 나타내고 있는 정상상태 토크파형은 이너로터가 1000 [rpm], 아우터로터가 기어비에 의하여 95.23 [rpm]으로 회전할 때의 이너로 터의 회전각도에 따른 토크 파형이다.





그림 18(a)와 같이 이너로터 토크의 경우에는 18.15 [Nm]에서 18.71 [Nm]로 향상되었으며, 그림 18(b)와 같이 아우터로터 토크의 경우에는 190.52 [Nm]에서 196.07 [Nm]로 향상되었다. 또한, 이너로터 토크리플은 3.75 %에서 0.8 %로 저 감되었으며, 아우터로터의 토크리플은 0.06 %에서 0.11 %로 상승하였다. 아우터 로터의 경우 토크리플이 상승하였지만, 상용 전동기가 5 % 미만의 리플율을 가 지도록 설계하는 것을 고려할 때 매우 적은 리플율을 가지고 있는 것으로 판단 된다.

이러한 토크-각도 곡선과 정상상태 토크파형에서의 토크상승은 자속밀도 특성 을 분석한 것과 같이 이너로터 측과 아우터로터 측의 공극자속밀도의 향상이 원 인으로 작용한 것으로 판단되며, 토크리플 특성이 개선된 것으로 보아 자속집중 형 구조의 폴피스가 자속을 집중시켜주고, 이너로터의 자속과 아우터로터에서 발 생하는 자속의 흐름을 원활하게 한 것으로 판단된다.







(a) Conventional model



(b) Optimal model Fig. 15. Flux density and flux line







Fig. 16. Radial flux densities of conventional model and optimal model







Fig. 17. Torque-angle curve of conventional model and optimal model







Fig. 18. Steady-state torque of conventional model and optimal model



#### 3. 출력밀도 특성

제안된 폴피스 형상을 가진 마그네틱 기어는 이너 및 아우터 측의 공극 자속 밀도의 상승에 의해 이너토크 및 아우터 토크의 향상을 나타내었다. 또한 전체적 인 토크 향상과 더불어 최적모델의 경우 기존모델과 대비하여 중량당 출력밀도 또한 향상된 결과를 가져왔다. 중량당 출력밀도의 향상은 마그네틱 기어의 토크 향상의 영향과 폴피스 형상 변화로 인한 질량감소의 영향으로 나타난 결과이다. 출력밀도를 계산하기 위하여 기존모델과 최적모델의 면적, 부피, 밀도, 질량을 표 10에 계산하여 나타내었다. 그 결과로 기존모델의 총질량은 19.07 [kg] 이며, 최 적모델의 총 질량은 18.83 [kg] 이다. 또한 기존모델의 아우터 토크는 190.52 [Nm]이며, 최적모델의 아우터 토크는 196.07 [Nm]이므로, 기존모델과 최적모델 출력은 1900 [W], 1955 [W]이다. 따라서 기존모델의 중량당 출력밀도는 99.64 [W/kg]이며, 최적모델의 중량당 출력밀도는 103.82 [W/kg]으로 4.19 % 향상된 결과를 보였다.

		Conventional	Optimal
		model	model
Magnets	Volume (cm <sup>3</sup> )	1570	0.80
$(7.60 \text{ g/cm}^3)$	Weight (kg)	11.94	
Rotors	Volume (cm <sup>3</sup> )	628.32	
$(7.55 \text{ g/cm}^3)$	Weight (kg)	4.74	
Pole pieces	Volume (cm <sup>3</sup> )	314.16	283.45
$(7.55 \text{ g/cm}^3)$	Weight (kg)	2.39	2.15
Total weight (kg)		19.07	18.83
Outer torque (Nm)		190.52	196.07
Power (W)		1900	1955
Power density (W/kg)		99.64	103.81

Table 10. Result of optimization





## V. 결론

본 연구에서는 비접촉 토크전달을 할 수 있는 마그네틱 기어의 토크밀도 및 출력밀도 향상을 위하여 새로운 폴피스 형상을 제안하고, 새로운 폴피스에 대한 최적설계를 수행하였다. 제안된 폴피스 형상에 대한 설계변수와 토크 및 토크 리 플과 같은 반응변수들간의 함수 관계를 파악하기 위하여 반응표면법을 이용하였 으며, Box-Behnken 설계를 이용하여 실험계획법을 수립하였다. 또한, 설계변수 와 반응변수의 분산분석 및 회귀분석을 통하여 설계변수에 대한 반응변수의 반 응표면도 및 반응표면식을 추정하여 제안된 폴피스 형상에 대한 최적설계변수값 을 도출하였다. 이들의 관계를 예측하기 위해 필요한 실험데이터는 수치해석 기 반 2-D 유한요소해석법을 이용하여 그 특성을 분석하였다. 따라서 제안된 폴피 스를 가진 마그네틱 기어의 최적모델은 이너측 공극에서의 자속밀도 최대값이 1.62 [T]에서 1.78 [T]로 상승하였으며, 아우터측 공극에서의 자속밀도 최대값은 0.79 [T]에서 0.83 [T]로 상승하였다. 그 결과 이너 토크의 경우 18.16 [Nm]에서 18.69 [Nm]로, 아우터 토크의 경우 190.52 [Nm]에서 196.07 [Nm]로 향상되었다. 또한, 기존의 폴피스에 비하여 제안된 폴피스의 형상이 체적 및 질량을 더 적게 사용함으로써, 중량당 출력밀도가 99.64 [W/kg]에서 103.81 [W/kg]으로 4.18 % 상승하였다. 따라서, 본 연구에서 제안하는 제안된 폴피스 형상이 토크밀도 및 출력밀도 향상에 효과적임을 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 새로운 폴피스 형상은 종래의 마그네틱 기어의 토크밀 도 및 출력밀도를 향상시킬 수 있어, 마그네틱 기어의 문제점인 낮은 토크밀도에 대한 문제점을 개선할 수 있다고 사료된다. 또한, 반응표면법과 회귀분석을 통하 여 반응표면분석과 추정식을 도출하였으며, 이를 통하여 최적설계에 대한 타당성 을 입증하였다. 따라서 마그네틱 기어의 낮은 토크밀도 개선은 현재 산업현장이 나 기계 등에서 사용되고 있는 기계적 기어를 대체할 수 있는 가능성을 높일 수 있다고 사료된다.





#### 참 고 문 헌

- 오용준, "기어박스의 동적 성능 해석을 위한 동력순환식 부하시험기의 개발 에 관한 연구", 창원대학교 공업·정보대학원 공학석사학위논문, 2002.
- [2] 김찬호, 정상용, 김용재, "10MW급 대형 풍력발전기 기어박스를 위한 마그네 틱 기어의 설계 및 전달토크 비교분석", 2015 대한전기학회 제46회 하계학 술대회, pp.922-923, 2015.7.
- [3] 김찬호, 김용재, "10MW급 해상풍력발전기 드라이브 트레인을 위한 마그네틱 기어의 속도별 설계 및 출력밀도 특성분석", 전기학회논문지, 64권, 12호, 2015.12.
- [4] K. Atallah and D. Howe, "A novel high-performance magnetic gear," IEEE Trans. Magn., vol. 37, no. 4, pp. 2844 - 2846, Jul. 2001.
- [5] K. Atallah, S. D. Calverley, and D. Howe, "High-performance magnetic gears," J. Magn. Magn. Mater., vols. 272 - 276, no. 1, pp. E1727 E1729, May. 2004.
- [6] 김찬호, 김성진, 정상용, 김용재, "희토류 영구자석 저감을 위한 돌극형 비접
   촉 기어의 구동 특성분석", 2014 대한전기학회 제45회 하계학술대회, pp.783-784, 2014.7.
- [7] 김찬호, 김성진, 정상용, 김용재, "자속집중형 구조를 가진 비접촉 영구자석 기어의 전달토크 향상에 대한 연구", 2014 대한전기학회 전기기기 및 에너 지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, pp.132-134, 2014.4.
- [8] Sung-Jin Kim, Chan-Ho Kim, Sang-Yong Jung, Yong-Jae Kim, "Optimal Design of Novel Pole Piece for Power Density Improvement of Magnetic Gear Using Polynomial Regression Analysis", IEEE Trans. Energy Conv.,





Vol. 30, No. 3, Sep. 2015.

- [9] N. W. Frank, S. Pakdelian, and H. A. Toliyat, "Passive suppression of transient oscillations in the concentric planetary magnetic gear," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 26, no. 3, pp. 933 - 939, Sep. 2011.
- [10] K.Atallah, S.D.Calverley, and D.Howe, "Design, analysis and realisation of a high-performance magnetic gear," Inst. Elect. Eng. Proc. Elect. Power Appl., vol. 151, no. 2, pp. 135 - 143, Mar. 2004.
- [11] 이승훈, "공학통계 자료분석", ㈜이레테크, 2008.
- [12] 이상복, "예제중심의 실험계획법", ㈜이레테크, 2008.
- [13] 한길선, "반응표면법을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 고토크밀도 및 저 토크리플을 위한 용량별 최적설계", 한밭대학교 공업대학원 석사학위논문, 2009.
- [14] 조일형, 이내현, 장순응, 안상우, 윤영한, 조경덕, "실험계획법 중 Box-Behnken(박스-벤켄)법을 이용한 반응성 염료의 광촉매 산화조건 특성 해석 및 최적화", 대한환경공학회지, 28권, 9호, 2006.9.
- [15] 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," Progr. Electromagn. Res., vol. 116, pp. 297 - 312, 2011.
- [16] Pan Seok Sin, Han-Deul Kim, Gyo-Bum Chung, Hee Sung Yoon, Gwan-Soo Park, and Chang Seop Koh, "Shape Optimization of a Large-Scale BLDC Motor Using an Adaptive RSM Utilizing Design Sensitivity Analysis", IEEE Trans on magn., vol.43, no.4, pp.1653-1656, apr. 2007.





- [17] 이형우, 박찬배, 이병송, "집중권을 시행한 영구자석 매입형 동기전동기의 철손 저감", 한국철도학회논문집, 15권, 2호, pp.135-140, 2012.4.
- [18] H. M. Hasanien, A. S. Abd-Rabou, and S. M. Sakr, "Design optimization of transverse flux linear motor for weight reduction and performance improvement using response surface methodology and genetic algorithms," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 25, no. 3, pp. 598 - 605, Sep. 2010.
- [19] B. H. Lee, J. P. Hong, and J. H. Lee, "Optimum design criteria for maximum torque and efficiency of a line-start permanent-magnet motor using response surface methodology and finite element method," IEEE Trans. Magn., vol. 48, no. 2, pp. 863 - 866, Feb. 2012.
- [20] S. Prakash, J. Lillymercy, S. Nithiyalakshmi, and K. Palanikumar, " Prediction of surface roughness parameters in drilling of MDF composite panel using Box - Behnken experimental design (BBD)," in Proc. Frontiers Auto. Mech. Eng., 2010, pp. 68 - 74.
- [21] L. Jian, K. T. Chau, and J. Z. Jiang, "A magnetic-geared outer-rotor permanent-magnet brushless machine for wind power generation," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 45, no. 3, pp. 954 - 962, May/Jun. 2009.
- [22] P. O. Rasmussen, T. O. Andersen, F. T. Jorgensen, and O. Nielsen, "Development of a high-performance magnetic gear," IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 41, no. 3, pp. 764 - 770, May/Jun. 2005.
- [23] L. Jian,G.Xu,Y. Gong, J. Song, J. Liang, andM.Chang, "Electromagnetic design and analysis of a novel magnetic-gear-integrated wind power generator using time-stepping finite element method," Progr. Electromagn. Res., vol. 113, pp. 351 - 367, 2011.

