

# 반응표면분석법을 이용한 영구자석의 형상 및 특성에 따른 매입형 영구자석 동기기의 최적 설계

## Optimal Design of Interior Permanent Magnet Synchronous Machines Consideration of Magnet BH Characteristic with Different Rotor Type using Response Surface Methodology

임 영 훈\* · 장 석 명†  
(Young-Hun Im · Seok-Myoung-Jang)

**Abstract** - Interior Permanent Magnet Synchronous Machines (IPMSMs) with rare earth magnet are widely used in electric vehicles and hybrid electric vehicles. IPMSMs having high efficiency, high torque, and a wide speed range are employed in propulsion system. And the rotor in an IPMSM is generally made of a rare earth magnet to achieve a large energy product and high torque. This paper discusses issues regarding design and performance of IPMSMs using different factors of BH magnetic characteristic. It is necessary to choose factors of magnetic material according to permanent magnet shape in rotor for high performance. Response Surface Methodology (RSM) is selected to obtain factors of magnetic material according to variety of rotor shapes. The RSM is a collection of mathematical and statistical techniques useful for the analysis of problems in which a response of interest is influenced by several variables and the objective is to optimize response. Therefore, it is necessary to analyze the torque characteristics of an IPMSM having magnet BH hysteresis curve with different rotor shape. Factors of residual flux density ( $B_r$ ) factor and intrinsic coercive force ( $H_c$ ) are important parameters in RSM for rotor shape. The rotor shapes for IPMSMs having magnet BH characteristic were investigated using the RSM, and three shapes were analyzed in detail using FEA. The results lead to design consequence of IPMSMs in the various rare earth magnet materials.

**Key Words** : Response surface methodology(RSM), Rare earth magnet, Interior permanent magnet motor, Torque

### 1. 서 론

고효율이면서도 높은 출력밀도의 영구자석 매입형 동기기는 최근 회토티계 영구자석의 발달과 회토티계 중 네오디뮴계열 합금의 개발과 더불어 고속, 고효율 전동기의 개발에 많이 응용되고 있으며, 기계적 안정성과 출력 밀도 측면에서 고속 응용에 가장 적합한 전동기로 평가된다. 이러한 영구자석 매입형 동기기는 속도에 따른 토크의 변화를 통해 가변속이 가능하여 차량에 적용 가능해지면서 친환경 하이브리드 자동차에도 사용되고 있다[1]. 특히 하이브리드 자동차 내에 배터리 충전 및 엔진 시동용으로 영구자석 매입형 동기기가 사용되고 있고, 저소음이면서 고속 운전 및 정밀 제어의 장점을 통해 하이브리드 자동차 내 모터로도 많이 사용되고 있다. 하이브리드 자동차에 주로 이용되는 영구자석 매입형 동기기는 회전자 내부에 영구자석을 매입하여 영구자석의 형상과 배치에 대한 설계를 자유롭게 할 수 있고, 마그네트 토크와 더불어 릴럭턴스 토크도 이용 가능하며, 매입

되는 영구자석의 재료를 회토티계로 이용하여 높은 토크 특성을 얻을 수 있다[2]. 하지만, 매입형 영구자석 동기기는 표면 부착형 영구자석 동기기보다 코깅 토크 및 토크 리플이 상대적으로 크게 발생한다. 이러한 코깅 토크 및 토크 리플 저감을 위해 회전자에 매입되는 영구자석이 V 형태인 것뿐만 아니라, 이중층인 V 형태인 형상 설계 방법 등이 제시되었다[3]. 또한, 회전자 형상이 스포크 타입인 동기기를 통해 높은 출력 밀도를 얻고자 하였다[4]. 하지만, 이러한 영구자석 매입형 동기기의 회전자 형상에 대한 연구가 활발히 진행되고 있음에도, 회전자 내부에 매입되는 영구자석은 잔류자석밀도가 높은 자석만을 선택하여 회전자 형상에 상관없이 회전자 내부에 영구자석을 매입하여 사용하고 있다[5]. 최근에는 NdFeB, SmCo, AlNiCo, 페라이트 자석을 회전자 내부에 각각 매입한 연구가 수행되었지만[6], 더욱 정밀한 설계를 위해서 매입되는 영구자석의 형상에 따른 영구자석의 자기 특성을 최적설계를 위한 변수로 고려한다면, 최적화된 영구자석 매입형 동기기 특성을 얻을 수 있을 것이다. 본 논문에서는 이러한 요구를 만족하고자 영구자석 매입형 동기기의 회전자 내부에 영구자석 형상에 따라 잔류자속밀도  $B_r$ 와 보자력  $H_c$ 의 특성이 다른 영구자석을 각각 선택함으로써 최적 특성을 도출할 수 있는 영구자석 매입형 동기기를 얻고자 하였다. 최근 잔류자속밀도와 보자력이 다양한 영구자석이 일본의 TDK 또는 ShinEtsu 등을 통해 출시되었고[7], 이를 통해 영구자석을 선택할 수 있는 폭이 넓어져

\* Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

† Corresponding Author : Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University, Korea

E-mail : smjang@cnu.ac.kr

Received : July 3, 2013; Accepted : July 25, 2013

동기기의 특성에 따라 다양한 영구자석을 제공 받을 수 있다. 이러한 영구자석 매입형 동기기의 회전자 내부에 매입되는 영구자석 형상에 따라 특성이 다른 영구자석을 선택하기 위해 영구자석 특성인 잔류자속밀도 Br과 보자력 Hc의 특성을 변수로 하여 동기기의 특성을 해석하였다. 최적화하는 방법은 2개의 변수인 Br과 Hc를 이용하여 동기기 특성인 토크, 토크리플 및 코깅 토크를 해석하여 최적 특성을 도출하는 실험계획법의 반응표면분석법을 이용하였다. 반응표면분석법은 실질적인 목적 함수를 쉽게 만들 수 있을 뿐만 아니라 최적화 수행에 필요한 계산시간도 많이 단축할 수 있다[8]-[11]. 또한, 반응표면분석법의 분산 분석을 통해서 출력값에 이바지하는 설계변수의 영향도 해석할 수 있어 체계적이고 효율적인 접근 방법을 도출할 수 있다[12]. 본 논문에서는 반응표면분석법을 통해 최적설계의 수를 적절히 결정하고, 최적의 설계를 실현함으로써 회전자 내부에 영구자석 형상에 따라 자기 특성이 다른 영구자석을 얻을 수 있고, 토크, 토크 리플 및 코깅 토크인 전자기적 특성을 비교하여 최적화된 영구자석의 자기 특성을 제시하였다.

## 2. 영구자석 특성과 매입형 영구자석 동기기

### 2.1 회토티계 영구자석 특성

그림 1은 2011년 Hitachi Metals, Ltd.에서 개발된 TDK의 Neodymium-Iron-Boron Magnets NEOREC Series인 회토티계 중 NdFeB계열인 영구 자석 재료 특성으로, 높은 잔류자속밀도를 가지는 분류와 높은 보자력을 가진 분류를 선정하여 표시하였다[7]. 일반적으로, 자성체의 자계의 세기 H와 자속밀도 B의 관계를 나타내는 곡선인 히스테리시스 곡선의 모양은 재료에 따라 다르고, 또 같은 재료일지라도 열처리, 기계적 처리에 따라 형태를 달리할 수 있다. 이중, 히스테리시스 곡선에서 자속이 잔류하고 있는 자성체는 영구자석이 된다. 최근에 NdFeB, SmCo, AlNiCo, 페라이트 자석 등 다양한 영구자석 중에서 회토티계 영구자석은 높은 잔류자속밀도를 가지고 있는 장점이 있지만, 고온에서 사용하기 어렵고 내식성, 내산화성이 떨어지는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 보호코팅 등의 다양한 신기술의 도입으로 내식성 및 내산화성을 크게 개선하였다. 개선된 회토티계 영구

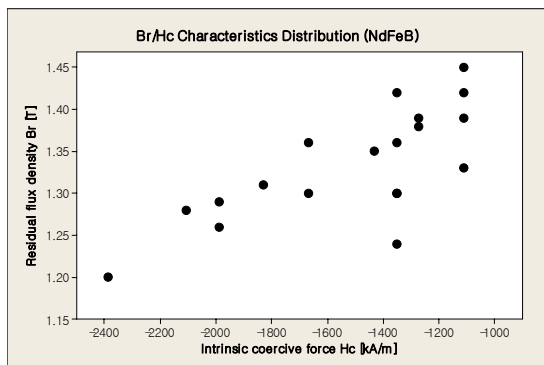


그림 1 고성능 회토티계 영구자석의 특성 분포 (● : NdFeB 계열인 영구자석 모델들)

Fig. 1 Characteristics distribution of NdFeB magnet

자석을 사용하여 영구자석의 특성인 잔류자속밀도 Br과, 보자력 Hc에 따라 동기기의 특성이 다양한 결과로 나타날 수 있게 되었다. 그러므로 회토티계 영구 자석의 특징인 잔류자속밀도 Br과 보자력 Hc의 특성만을 선택하여 변수로 결정하고 다양한 영구자석이 매입되는 형상을 통해 동기기의 특성 해석을 하였다.

### 2.2 영구자석 매입형 동기기

그림 2는 6극 9 슬롯의 영구자석 매입형 동기기의 단면도를 나타낸다. 표 1은 이 동기기 모델의 사양을 나타낸 것이다. 즉, 본 논문에서의 동기기는 고정자의 외경이 100mm이고 회전자의 외경이 54mm로서 4.7kW급의 정격속도 6,500rpm의 영구자석 매입형 동기기이다.

표 1 6극 9 슬롯의 영구자석 매입형 동기기의 사양

Table 1 Specification of IPMSM

항목	사양 [단위]
고정자 외경	100 [mm]
회전자 외경	54 [mm]
정격속도	6540 [rpm]
극수	6
슬롯수	9

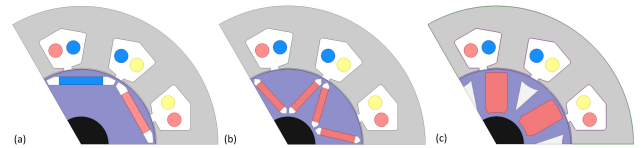


그림 2 6극 9 슬롯의 영구자석 매입형 동기기의 단면도

Fig. 2 Structure of IPMSM with 6 poles and 9 slots

영구자석 매입형 동기기는 회전자 내부의 영구자석이 매입되는 형상에 따라라도 동기기의 특성이 다양하게 나타나게 된다. 회토티계 영구자석을 사용하여 회전자 내부에 매입되는 영구자석의 형상을 3가지로 선택하였다. 그림 2의 (a)는 회전자 내부의 영구자석이 바 형태로 매입된 영구자석 동기기로 일반적인 형태이고[8], (b)는 회전자 내부의 영구자석이 V 타입의 형태로 매입되어, 토크 리플 및 코깅 토크를 줄이기 위해 최적화하는 형태이며[9], (c)는 회전자 내부의 영구자석이 스포크 타입의 형태로 토크를 증가시키기 위해 최적화하는 형태이다[11][12]. 각각의 형태에 따라 유한요소법을 이용하여 토크, 토크리플 및 코깅 토크를 구하여 영구자석의 매입되는 형상과 영구자석의 자기 특성치인 잔류자속밀도 Br과, 보자력 Hc의 변수들과의 영향을 분석하고자 한다.

## 3. 반응표면분석법을 이용한 분석

### 3.1 반응표면분석법

반응표면분석법이란 실험에 대한 체계적인 실험 방법의 의미를 지니는 것으로, 해결하고자 하는 문제에 대하여 통계분석

을 통하여 최소의 실험 횟수로부터 실험을 체계적으로 진행하고, 데이터를 정확히 분석하여 최적의 값을 얻도록 계획하는 것으로, 다양한 변수에 대해 목적함수의 영향을 고려하는데 널리 사용된다[13]. 그림 3은 반응표면분석법의 흐름도이다. 그림 3을 통해 반응표면분석법은 먼저 실험에 다루어야 할 변수 및 변수의 수를 확정하고, 실행할 수 있는 실험 횟수를 결정하며, 변수의 적절한 범위를 결정한다. 본 논문에서의 변수는 잔류자속밀도  $Br$ 와 보자력  $H_c$ 로 확정하였고, 변수의 수준을 통해 실험 횟수를 9회 결정하였으며, 중심합성법 중 내접 모형을 통해 적절한 범위를 선정하였다. 일반적으로 설계 시 변수들에 따른 많은 실험의 수를 수행하여 많은 시간이 필요로 하지만, 반응표면분석법을 통해 실험 시간을 단축할 수 있다. 이렇게 결정된 조건을 통해 선정된 9개의 실험 횟수 모델에 대해 실험 계획에 맞게 유한요소법을 통해 해석한다. 즉, 9개의 실험 횟수 모델은 유한요소법을 통해 토크, 토크 리플 및 코깅 토크 등의 기기 성능을 목적함수로 하여 해석하였다. 수치 해석의 발달과 수치 해석의 향상된 정확성은 실험과 근소한 오차를 나타내므로 대부분의 실험은 해석으로 대체할 수 있다. 특히 여러 설계 인자를 고려한 최적설계를 수행할 경우, 시제품을 제작하고 시험하는 것이 현실적으로 시간상, 비용상 불가능하기에 이를 전자장 수치 해석인 유한요소법을 이용하였다[10]. 그림 3의 흐름도를 통해 해석된 결과를 분산 분석을 통해 유의성을 검토하여, 반응표면분석법의 중첩 등고선도 및 반응 최적화를 통해 회전자 내부에 매입되는 영구자석 형상과 영구자석의 자기 특성에 따른 최적화된 조건 및 최적 설계 결과를 도출하였다.

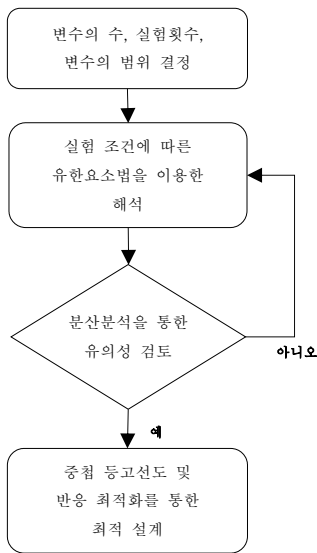


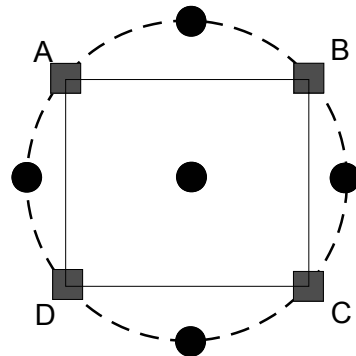
그림 3 반응표면분석법의 흐름도

Fig. 3 Flow chart of RSM

### 3.2 영구자석 특성을 고려한 반응표면분석법

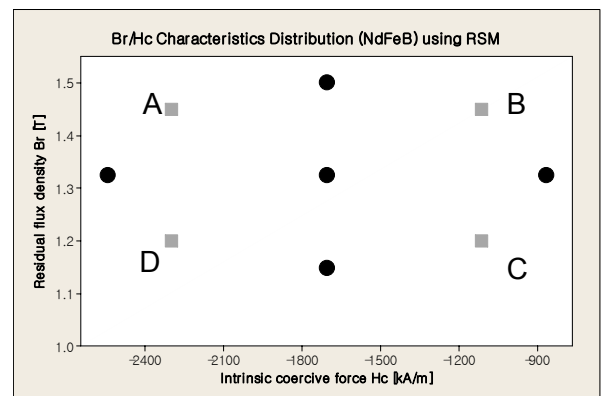
반응표면분석법을 이용한 실험에서 추정식이 2차식일 때 중심합성법을 사용하여 변수의 수준을 결정한다. 본 논문과 같이 실험할 수 있는 수준의 최대 및 최소값에 제한이 있는 경우 내접 모형(CCI)을 선택하여 변수의 수준을 결정한다.

그림 4의 (a)는 중심합성법의 일반적인 내접 모형(CCI)을 나타낸다. A로부터 D 위치는 실질적인 변수의 최대 및 최소값을 나타내는 4개의 실험 횟수이고, 추가된 5개의 실험 조건은 최적 조건이 존재하는 영역을 적절한 범위로 선정하여 최적치를 추정하기 위한 실험 횟수로, 총 9개의 실험 횟수를 통해 최적의 값을 산출해 낼 수 있다. 그림 4의 (b)는 그림 1의 회토류계 영구자석 분포로부터 수준치를 선정하기 위해 그림 4의 (a)의 내접 모형(CCI)이 적용된 실제적인 영구자석 특성 변수에 대한 수준치이다. 수준치의 범위에,  $Br$ 은 A와 B 위치에서는 1.45[T]이고, C와 D 위치에서는 1.2[T]이며,  $H_c$ 는 A와 D 위치에서는 2,390[kA/m]이고, B와 C 위치에서는 1,114[kA/m]이다. 실제적인 회토류계 영구자석 특성 조건이 적용된 내접 모형(CCI)을 작성하여 9개의 실험 횟수를 통해 최적의 값을 산출해 낼 수 있는 수준치를 선정할 수 있었다.



- : 실제 특성 범위를 고려한 영구자석 최대값 및 최소값
- : 중심합성법을 통한 확장값 및 중심값

(a) 중심합성계획법의 내접 모형(CCI)



(b) 영구자석의 특성 조건에 적용된 내접 모형(CCI)

그림 4 중심합성계획법의  $Br$ 과  $H_c$ 의 인자 조건

Fig. 4  $Br$  and  $H_c$  condition using RSM

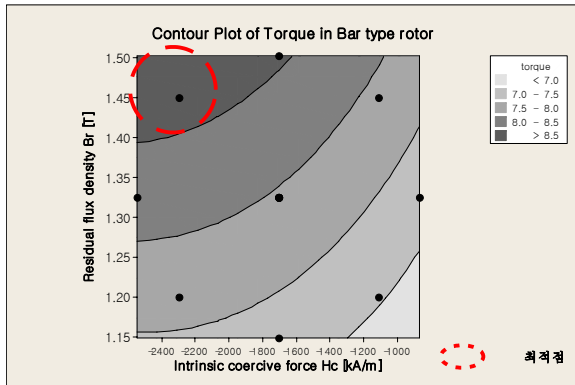
### 3.3 반응표면분석법을 통한 분석

유한요소법을 통해 해석된 결과인 토크, 토크 리플 및 코깅 토크에 대한 잔류자속밀도  $Br$ 과 보자력  $H_c$ 인 변수의 추세를 등고선도 및 3차원 표면도를 통해 분석하였다. 등고선

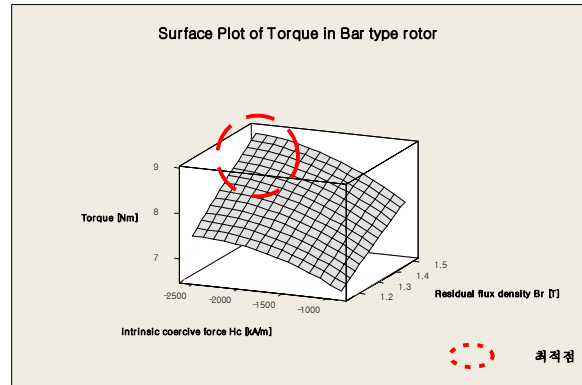
도는 2차원의 평면 그래프로써, 변수의 변화 양상과 원하는 결과 값을 얻는 조건이 어디인지 파악하고 설계의 결과를 평면으로 그려준다. 또한, 3차원 표면도는 3차원의 표면으로 출력되는 그래프로써, 등고선도와 유사하게 변수의 형상을 입체적으로 확인하는데 유용하게 사용되며, 등고선도 보다는 변수와 결과 값 간의 자세한 추세를 판단할 수 있다. 본 논문에서는 2개의 영구자석 관련 변수와 3개의 동기기 특성 해석 결과를 각각의 회전자 내부에 매입되는 영구자석의 형상에 따라 도출하였다.

### 3.3.1 바 형태의 영구자석 형상에 대한 분석

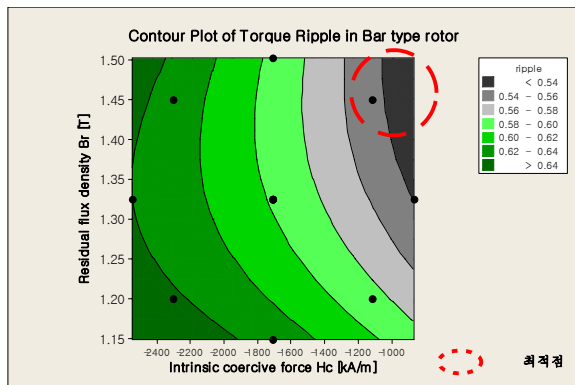
바 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 분산분석을 통해 유의하지 않은 인자를 분석하였고, 2차 이상의 곡선을 가진 잔류자속밀도 인자는 토크와 관련해서 유의하지 않았고, 1차 직선 및 2차 이상의 곡선을 가진 보자력 인자는 코깅 토크와 관련해서 유의하지 않아 제거하였다. 그림 5는 바 형태의 영구자석 형상을 매입한 동기기의 인자 분석에 따른 등고선도와 3차원 표면도이다. 그림 5의 (a),(b)를 통해



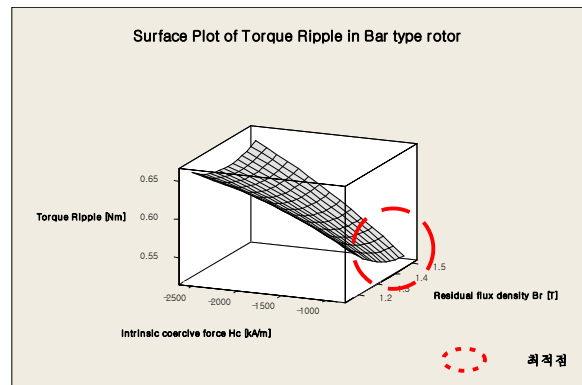
(a) 토크의 등고선도



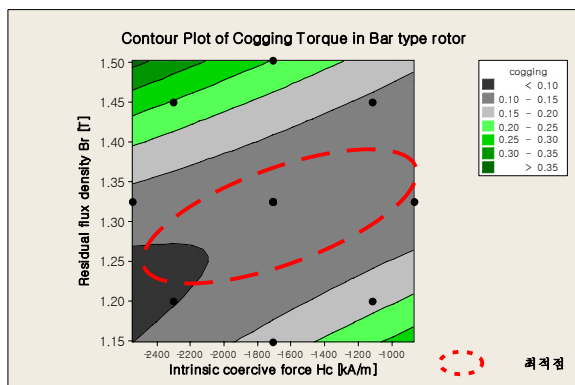
(b) 토크의 3차원 표면도



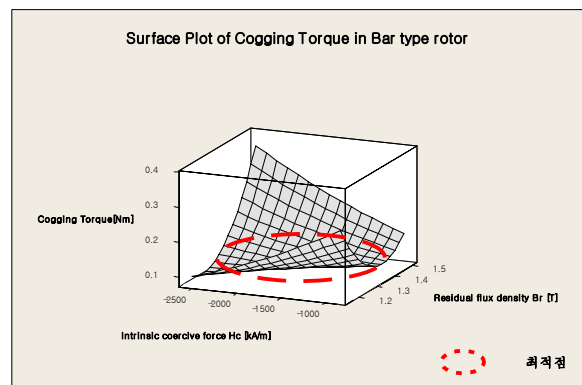
(c) 토크 리플의 등고선도



(d) 토크 리플의 3차원 표면도



(e) 코깅 토크의 등고선도



(f) 코깅 토크의 3차원 표면도

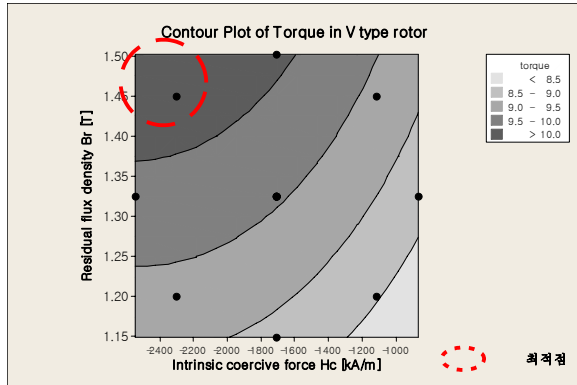
그림 5 바 형태의 영구자석 모델의 인자 분석

Fig. 5 Analyze response design of Bar type magnet model

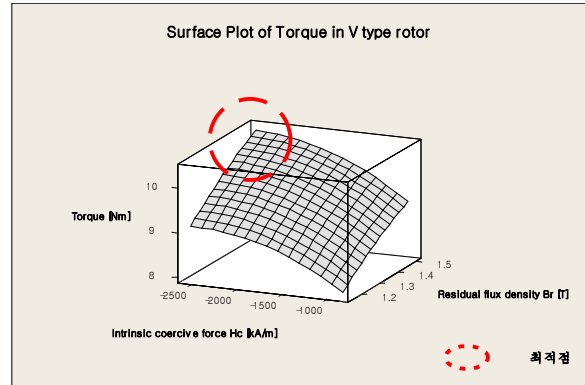
토크는 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 높은 잔류자속밀도와 높은 보자력이면 증가함을 나타내었고, 그림 5의 (c),(d)를 통해 토크 리플은 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 낮은 보자력인 경우 잔류자속밀도와 관계없이 감소함을 나타내었고, 그림 5의 (e),(f)를 통해 코깅 토크는 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 잔류자속밀도가 1.15[T]~1.30[T]인 경우 보자력과 관계없이 감소함을 나타내었다. 이를 통해 분산 분석 후 등고선도 및 3차원 표면도를 통해 최적화를 위한 각각의 결과 값에 따른 변수들의 추이를 알 수 있었다.

### 3.3.2 V 형태의 영구자석 형상에 대한 분석

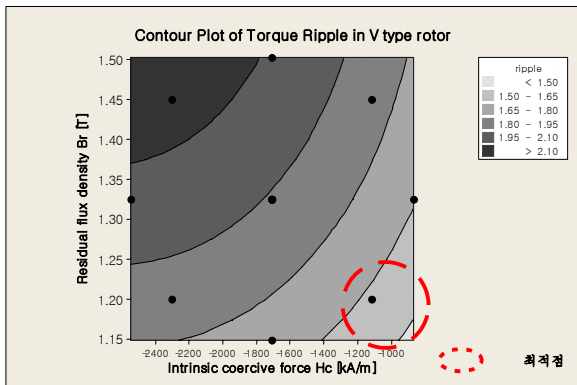
V 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 분산분석을 통해 유의하지 않은 인자를 분석하였고, 잔류자속밀도와 보자력의 교호작용 인자는 토크와 토크 리플과 관련해서 유의하지 않아 제거하였다. 그림 6은 V 형태의 영구자석 형상을 매입한 동기기의 인자 분석에 따른 등고선도와 3차원 표면도이다. 그림 6의 (a),(b)를 통해 토크는 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 높은 잔류자속밀도와 높은 보자력이면 증가함을 나타내었고, 그림 6의 (c),(d),(e),(f)를 통해



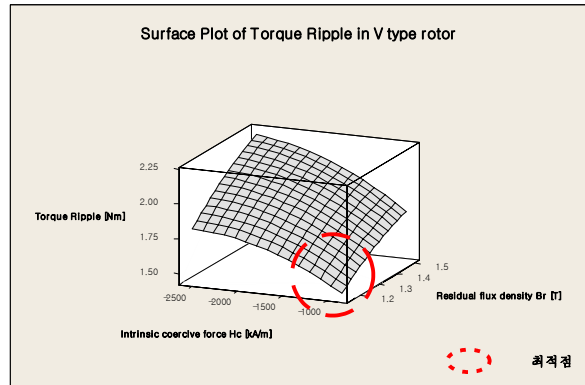
(a) 토크의 등고선도



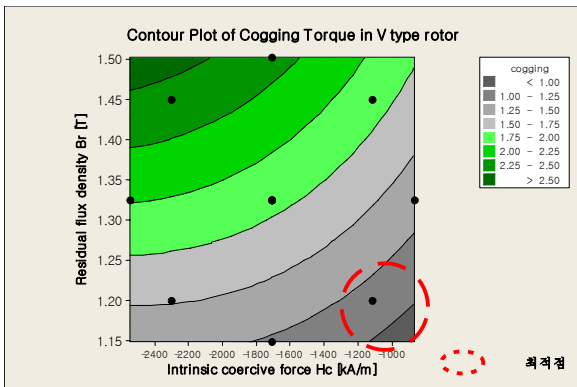
(b) 토크의 3차원 표면도



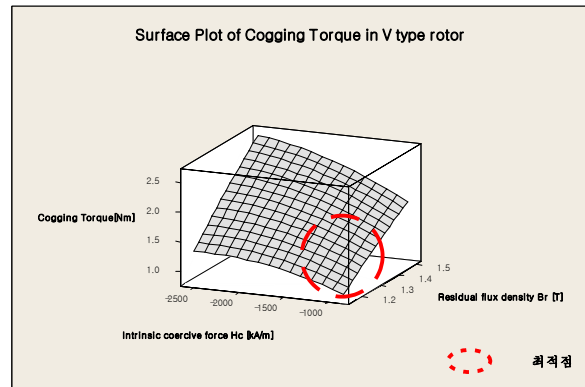
(c) 토크 리플의 등고선도



(d) 토크 리플의 3차원 표면도



(e) 코깅 토크의 등고선도



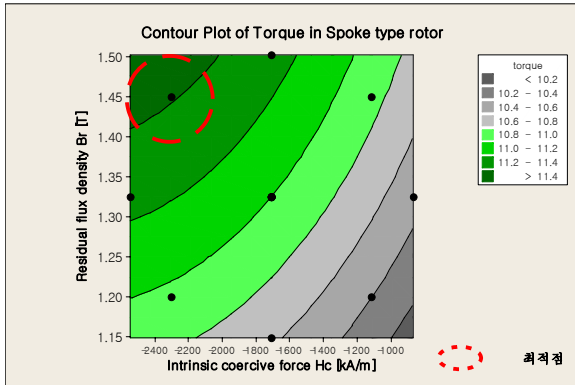
(f) 코깅 토크의 3차원 표면도

그림 6 V 형태의 영구자석 모델의 인자 분석  
Fig. 6 Analyze response design of V type magnet model

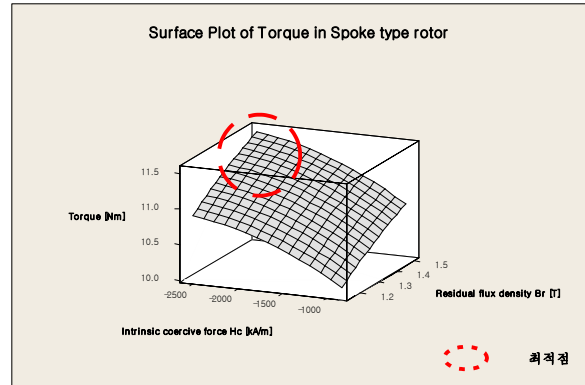
토크 리플 및 코깅 토크는 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 낮은 보자력인 경우 잔류자속밀도가 낮아질수록 감소함을 나타내었다. 이를 통해 분산 분석 후 등고선도 및 3차원 표면도를 통해 최적화를 위한 각각의 결과 값에 따른 변수들의 추세를 알 수 있고, 바 형태의 영구자석 형상을 한 회전자와 V 형태의 영구자석 형상을 한 회전자의 분석 결과를 비교하여 코깅 토크 측면에서 잔류자속밀도와 보자력인 변수들이 다른 추이를 보여주고 있음을 알 수 있었다.

### 3.3.3 스포크 형태의 영구자석 형상에 대한 분석

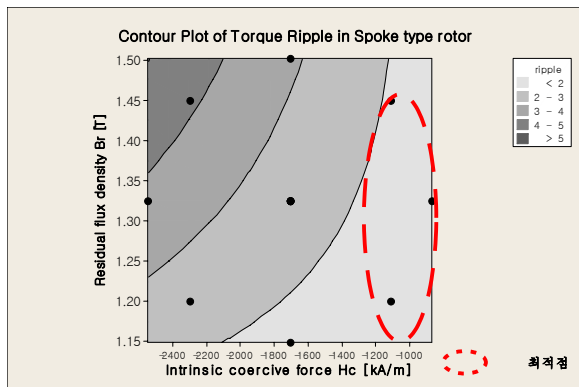
스포크 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 분산분석을 통해 유의하지 않은 인자를 분석하였고, 잔류자속밀도와 보자력의 교호작용 인자가 토크와 관련해서 유의하지 않았고, 2차 이상의 곡선을 가진 잔류자속밀도와 보자력 인자는 토크 리플과 관련해서 유의하지 않아 제거하였다. 그림 7은 스포크 형태의 영구자석 형상을 매입한 동기기의 인자 분석에 따른 등고선도와 3차원 표면도이다. 그림 7의 (a),(b)



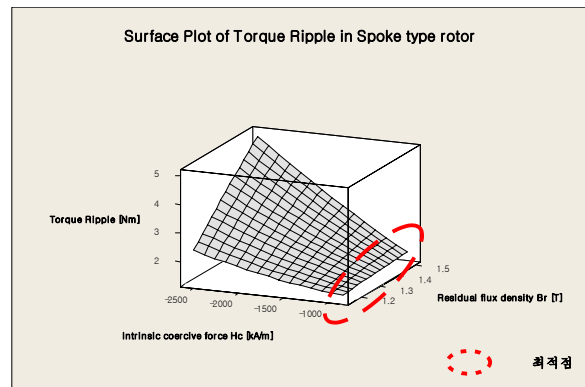
(a) 토크의 등고선도



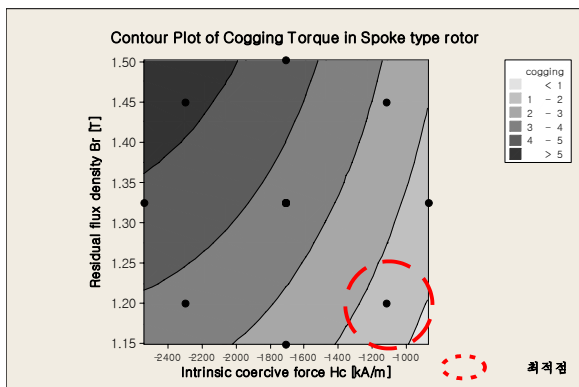
(b) 토크의 3차원 표면도



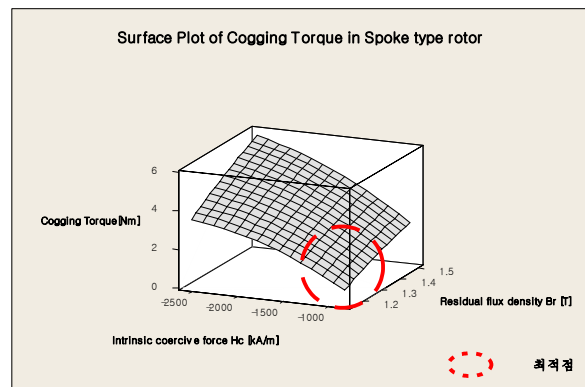
(c) 토크 리플의 등고선도



(d) 토크 리플의 3차원 표면도



(e) 코깅 토크의 등고선도



(f) 코깅 토크의 3차원 표면도

그림 7 스포크 형태의 영구자석 모델의 인자 분석

Fig. 7 Analyze response design of Spoke type magnet model

를 통해 토크는 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 높은 잔류자속밀도와 높은 보자력이면 증가함을 나타내었고, 그림 7의 (c),(d)를 통해 토크 리플은 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 낮은 보자력 1,000~1,200 [kA/m]인 경우 잔류자속밀도와 관계없이 감소함을 나타내었고, 그림 7의 (e),(f)를 통해 코깅 토크는 그림 내의 작은 점선 원으로 표시된 부분인 낮은 보자력인 경우 잔류자속밀도가 낮아질수록 감소함을 나타내었다. 이를 통해 분산 분석 후 등고선도 및 3차원 표면도를 통해 최적화를 위한 각각의 결과 값에 따른 변수들의 추세를 알 수 있고, 바 형태 및 V 형태의 영구자석 형상을 한 회전자와 스포크 형태의 영구자석 형상을 한 회전자의 분석 결과를 비교하여 토크 리플 측면에서 잔류자속밀도와 보자력인 변수들이 다른 추이를 보여주고 있음을 알 수 있었다.

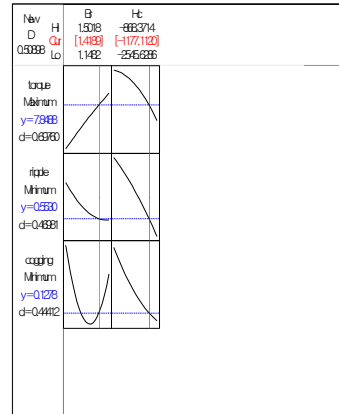
#### 4. 반응표면분석법을 이용한 최적 설계

그림 5 내지 7의 등고선도 및 3차원 표면도를 통해 영구자석의 자기 특성에 따라 토크, 토크 리플 및 코깅 토크를 얻는 조건이 어디인지 파악하였다. 이러한 분석의 유의성과 더불어 반응표면분석법의 중첩 등고선도 및 반응 최적화를 통해 회전자 내부에 매입되는 영구자석 형상 및 자기 특성에 따른 최적화된 조건 및 최적 설계 결과를 도출하고자 한다. 중첩 등고선도란 변수에 대한 최소한의 요구조건을 충족하는 결과 값의 영역을 표시하는 것으로 중첩 등고선도의 흰색 영역이 변수들의 요구조건을 충족시키면서 목표 값을 달성하는 영역이다. 또한, 반응 최적화를 통해 결과 값들과 조건들을 모두 고려한, 즉 최대 토크와 최소 토크 리플 및 최소 코깅 토크를 고려하여 만족도를 통해 도출되는 최적값이 얼마나 목표값에 만족하는지를 알 수 있다. 만족도는 1에 가까울수록 주어진 최적 조건이 목표 값을 만족하게 한다는 의미이며, 여러 가지 조건 중 될 수 있는 대로 1에 가까운 조건을 도출해야 한다. 이로부터 반응표면분석법의 중첩 등고선도 및 반응 최적화를 통해 회전자 내부에 매입되는 영구자석 형상 및 자기 특성에 따른 최적화된 조건 및 최적 설계 결과를 도출하였다.

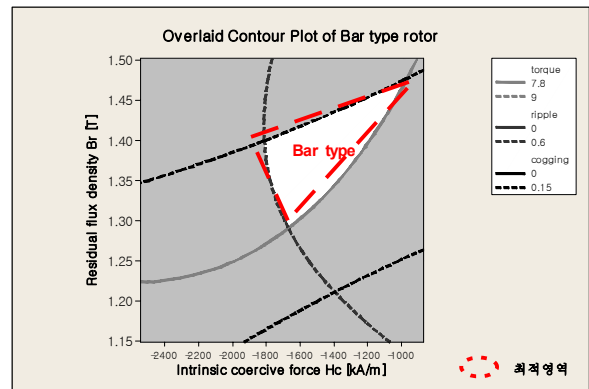
##### 4.1 바 형태의 영구자석 형상에 대한 영구자석 특성의 최적 설계

바 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 그림 8의 영구자석 형상에 대한 영구자석 특성 최적화를 통해 최적화된 결과 값을 알 수 있었다. 그림 8의 (a)는 영구자석 특성 변수와 동기 특성 결과 값을 모두 고려한 반응 최적화이며, 그림 8의 (a)에 최적값(Cur)을 통해 잔류자속밀도는 1.42[T], 보자력은 1,177 [kA/m]인 경우 최적 설계임을 나타내고 있고, 목표 값이 최적인지 나타내는 만족도(D)는 0.509로 1에 가깝지는 않았지만, 영구자석 특성 변수의 수준 안의 범위에서는 가장 큰 만족도를 나타냄으로써, 최적 조건임을 나타내고 있다. 또한, 그림 8의 (b)는 중첩 등고선도를 나타내고 있고, 흰색 영역인 잔류자속밀도는 1.30~1.45[T], 보자력은 1,000~1,800[kA/m]의 범위에 해당하는 특성이 있는 영구자석을 포함한 동기기는 동기 특성에서 최적의 요구 조건을

충족하는 최적 결과 값의 영역임을 나타내고 있다. 바 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 다양한 영구자석 중 최적 결과 값의 영역이 그림 8의 (b)의 삼각형 형태인 흰색 영역 범위에 해당하는 특성이 있는 영구자석을 사용하면 영구자석 매입형 동기기의 최적특성을 얻을 수 있음을 나타내고 있다.



(a) 반응 최적화



(b) 중첩 등고선도

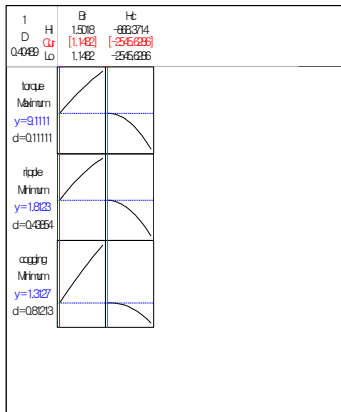
그림 8 바 형태의 영구자석 모델에 대한 영구자석 특성 최적화

Fig. 8 Response optimizer and overlaid contour plot of Bar type magnet model

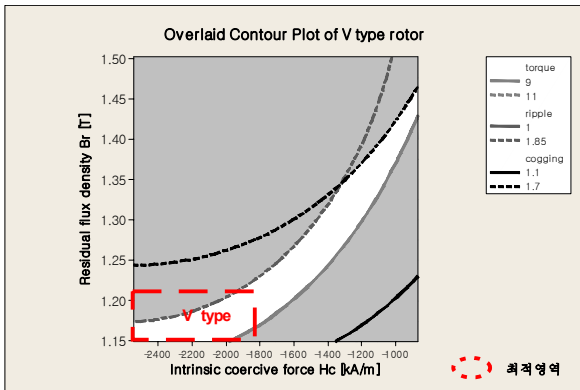
##### 4.2 V 형태의 영구자석 형상에 대한 영구자석 특성의 최적 설계

V 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 그림 9의 영구자석 형상에 대한 영구자석 특성 최적화를 통해 최적화된 결과 값을 알 수 있었다. 그림 9의 (a)는 영구자석 특성 변수와 동기 특성 결과 값을 모두 고려한 반응 최적화이며, 그림 9의 (a)에 최적값(Cur)을 통해 잔류자속밀도는 1.14[T], 보자력은 2,545 [kA/m]인 경우 최적 설계임을 나타내고 있고, 목표 값이 최적인지 나타내는 만족도(D)는 0.405로 바 형태인 영구자석 형상과 비교하여 만족도는 낮고, 1에 가깝지는 않았지만, 영구자석 특성 변수의 수준 안의 범위에서는 가장 큰 만족도를 나타냄으로써, 최적 조건임을 나타내고 있

다. 또한, 그림 9의 (b)는 중첩 등고선도를 나타내고 있고, 흰색 영역인 잔류자속밀도는 1.20[T] 이하이면서, 보자력은 2,000[kA/m] 이상의 범위에 해당하는 특성이 있는 영구자석을 포함한 동기기는 동기 특성에서 최적의 요구 조건을 충족하는 최적 결과 값의 영역임을 나타내고 있다. V 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 다양한 영구자석 중 최적 결과 값의 영역이 그림 9의 (b)의 2차원 곡선의 라인 형태인 흰색 영역 범위에 해당하는 특성이 있는 영구자석을 사용하면 영구자석 매입형 동기기의 최적특성을 얻을 수 있음을 나타내고 있다.



(a) 반응 최적화



(b) 중첩 등고선도

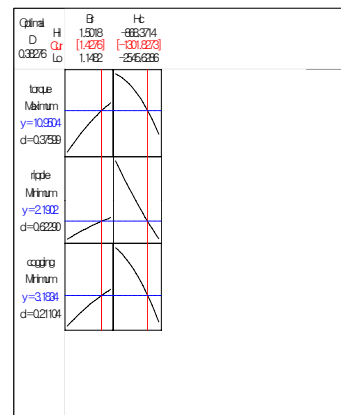
그림 9 V 형태의 영구자석 모델에 대한 영구자석 특성 최적화

Fig. 9 Response optimizer and overlaid contour plot of V type magnet model

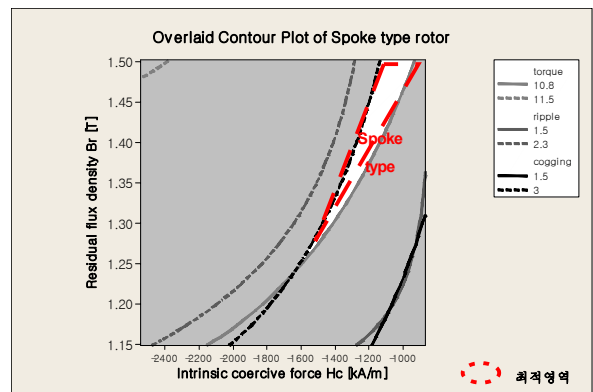
### 4.3 스포크 형태의 영구자석 형상에 대한 영구자석 특성의 최적 설계

스포크 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 그림 10의 영구자석 형상에 대한 영구자석 특성 최적화를 통해 최적화된 결과 값을 알 수 있었다. 그림 10의 (a)는 영구자석 특성 변수와 동기기 특성 결과 값을 모두 고려한 반응 최적화이며, 그림 10의 (a)에 최적값(Cur)을 통해 잔류자속밀도는 1.42[T], 보자력은 1,300 [kA/m]인 경우 최적 설계임을

나타내고 있고, 목표 값이 최적인지 나타내는 만족도(D)는 0.382로 바 형태 및 V 형태인 영구자석 형상과 비교하여 만족도는 낮고, 1에 가깝지는 않았지만, 영구자석 특성 변수의 수준 안의 범위에서는 가장 큰 만족도를 나타냄으로써, 최적 조건임을 나타내고 있다. 또한, 그림 10의 (b)는 중첩 등고선도를 나타내고 있고, 흰색 영역인 잔류자속밀도는 1.3~1.45[T], 보자력은 1,000~1,600[kA/m]의 좁은 범위에 해당하는 특성이 있는 영구자석을 포함한 동기기는 동기기 특성에서 최적의 요구 조건을 충족하는 최적 결과 값의 영역임을 나타내고 있다. 스포크 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자는 다양한 영구자석 중 최적 결과 값의 영역이 그림 10의 (b)의 매우 좁은 삼각형 형태인 흰색 영역 범위에 해당하는 특성이 있는 영구자석을 사용하면 영구자석 매입형 동기기의 최적특성을 얻을 수 있음을 나타내고 있다.



(a) 반응 최적화



(b) 중첩 등고선도

그림 10 스포크 형태의 영구자석 모델에 대한 영구자석 특성 최적화

Fig. 10 Response optimizer and overlaid contour plot of Spoke type magnet model

### 4.4 매입된 영구자석 형상 및 특성을 고려한 최적 설계 결과

그림 11은 잔류자속밀도 Br과 보자력 Hc인 영구자석 특성 변수를 이용하여 동기기 특성인 토크, 토크리플, 코깅 토



크를 유한요소법으로 해석하였고, 최적 특성을 도출하는 실험계획법의 반응표면분석법을 이용하여, 회전자 내부에 영구자석 형상이 다른 3개의 모델에 따라 영구자석 특성 변수에 대한 최적의 요구조건을 충족하는 결과 값의 영역을 나타내고 있다. 그림 8부터 10을 통해 각각 회전자 형상에 따라 변수의 최적 범위가 다르며, 이를 토대로 그림 1의 고성능 회토류계 영구자석의 실제 특성 분포에 적용하여 그림 11과 같이 최적 범위를 알 수 있었다.

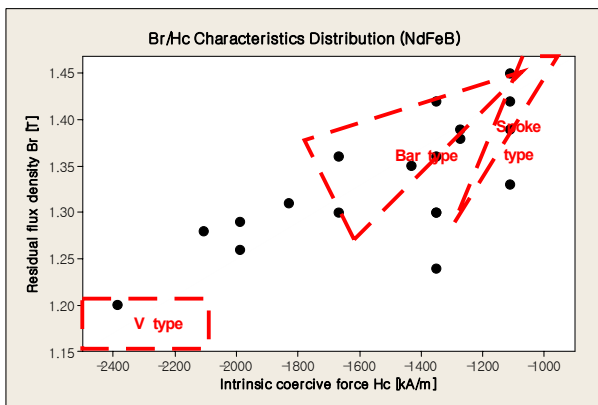


그림 11 영구자석 형상에 따른 영구자석 특성 최적 결과  
 Fig. 11 Optimal result of magnet characteristic according to rotor type

표 2는 영구자석 형상에 따른 회토류계 영구자석의 자기 특성에 따른 최적 값을 나타내고 있다. 여기서, 영구자석 특성치인 최대 에너지적을 고려하고자 한다. 영구자석의 자기 에너지의 공급원은 자속밀도 B와 자기력 H와의 곱인 BH에 비례한다. BH는 자석 동작점에 따라 변하지만 어떤 동작점인 곳에서 최대가 되는데 이를 최대 에너지적이라고 하며, 최대 에너지적인 큰 값이 최적화된 점이라 할 수 있다[14]. 표 2에 따르면, 바 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자일 때, 최적설계를 통해 구한 최적의 Br과 Hc 영역 중에서 그림 1의 고성능 회토류계 영구자석의 실제 특성 분포 중 이를 만족하는 4개의 실측 모델 중 최대 에너지적이 390[kJ/m<sup>3</sup>]으로 가장 큰 모델인 잔류자속밀도가 1.42[T]이며, 보자력이 1,353[kA/m]인 영구자석이 바 형태의 영구자석 형상에 매입하는 최적의 영구자석 모델이고, V 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자일 때, 최적설계를 통해 구한 최적의 Br과 Hc 영역 중에서 그림 1의 고성능 회토류계 영구자석의 실제 특성 분포 중 이를 만족하는 2개의 실측 모델 중 최대 에너지적이 278[kJ/m<sup>3</sup>]으로 가장 큰 모델인 잔류자속밀도가 1.2[T]이며, 보자력이 2,626[kA/m]인 영구자석이 V 형태의 영구자석 형상에 매입하는 최적의 영구자석 모델이며, 스포크 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자일 때, 최적설계를 통해 구한 최적의 Br과 Hc 영역 중에서 그림 1의 고성능 회토류계 영구자석의 실제 특성 분포 중 이를 만족하는 2개의 실측 모델 중 최대 에너지적이 366[kJ/m<sup>3</sup>]으로 가장 큰 모델인 잔류자속밀도가 1.39[T]이며, 보자력이 1,114[kA/m]인 영구자석이 스포크 형태의 영구자석 형상에 매입하는 최적의 영구자석 모델임을 알 수 있었다. 이를 통해 영구자석의 자기 특성 변수에 따른 동기

기의 최적 특성을 구하고, 최적화를 통해 영구자석의 자기 특성의 최적 영역에 해당하는 실제 영구자석 모델을 선택할 수 있었다.

표 2 영구자석 형상에 따른 회토류계 영구자석 특성 결과  
 Table 2 Result of magnet characteristic according to rotor type

	최적 영역 Br[T]	실측치 Br[T]	최적 영역 Hc[kA/m]	실측치 Hc[kA/m]	Energy Product [kJ/m <sup>3</sup> ]
Bar type	1.30 ~ 1.45	1.42	1,000 ~ 1,800	1,353	390
		1.39		1,273	374
		1.35		1,432	352
		1.36		1,671	257
V type	~ 1.20	1.20	2,000 ~	2,388	271
Spoke type	1.3~1.45	1.39	1,000	1,114	366
		1.33	~ 1,600	1,114	334

### 5. 결 론

본 논문에서는 반응표면분석법을 이용하여 영구자석 매입형 동기기의 영구자석의 자기 특성을 고려한 회전자 형상에 따른 매입되는 영구자석 특성에 대한 최적 설계를 수행하였다. 영구자석 매입형 동기기의 회전자 내부에 매입되는 영구자석 형상에 따라 잔류자속밀도 Br과 보자력 Hc의 특성이 각각 다른 영구자석을 선택함으로써, 영구자석 매입형 동기기의 최적 특성을 도출할 수 있었다. 특히, 영구자석이 매입되는 형상뿐만 아니라 영구자석의 자기 특성을 최적설계를 위한 변수로 사용하여, 매입되는 영구자석 형상과 영구자석의 특성이 최적화된 영구자석 매입형 동기기 특성을 얻을 수 있었다. 신뢰성이 확보된 유한요소 기반의 해석에 실험계획법인 반응표면분석법을 접목하여 변수에 따른 최적의 실험 횟수를 적절히 결정하여 최적 설계의 시간을 단축하면서도 최적의 설계를 실현하였고, 회전자 내부에 매입되는 영구자석 형상 및 영구자석의 자기적 특성을 모두 고려하여, 바 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자일 때, 반응 최적화 및 중첩 등고선도에서 나온 결과와 최대 에너지적을 고려하여 잔류자속밀도가 1.42[T]이며, 보자력이 1,353[kA/m]이고 최대 에너지적이 390[kJ/m<sup>3</sup>]인 영구자석이, V 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자일 때, 반응 최적화 및 중첩 등고선도에서 나온 결과와 최대 에너지적을 고려하여 잔류자속밀도가 1.2[T]이며, 보자력이 2,626[kA/m]이고 최대 에너지적이 278[kJ/m<sup>3</sup>]인 영구자석이, 스포크 형태의 영구자석 형상을 매입한 회전자일 때, 반응 최적화 및 중첩 등고선도에서 나온 결과와 최대 에너지적을 고려하여 잔류자속밀도가 1.39[T]이며, 보자력이 1,114[kA/m]이고 최대 에너지적이 366[kJ/m<sup>3</sup>]인 영구자석이 최적 조건에 가장 만족하는 실제 영구자석 모델임을 알 수 있었다. 이를 통해 회전자 내부의 매입되는 영구자석 형상 및 영구자석의 자기적 특성을 모두 고려한 최적 동기기의 설계 방향을 도출할 수 있었다.

## References

- [1] J. M. Miller, "Propulsion systems for hybrid vehicles," The Institution of Electrical Engineers, 2004.
- [2] L. Qinghua, M. A. Jabbar, and M. Khambadkone, "Response surface methodology based design optimization of interior permanent magnet synchronous motors for wide-speed operation," in Proc. PEMD, vol. 2, pp. pp. 546-551, Apr 2004.
- [3] Liang Fang, Sung-Il Kim, Soon-O. Kwon, and Jung-Pyo Hong, "Novel Double-Barrier Rotor Designs in Interior-PM Motor for Reducing Torque Pulsation", IEEE Trans. Magn., vol. 46, no. 6, pp 2183-2186, June 2010.
- [4] B. K. Lee, G. H. Kang, J. Hur, and D. W. You, "Design of spoke type BLDC motors with high power density for traction applications," in Proc. Industry Applications Conf. vol. 2, 3-7, no. 2, pp.1068-1074, Oct. 2004.
- [5] C. Siguimoto, N. Sadowski, M. Luz, and C. Cezario, "Design and analysis of interior permanent magnet synchronous motors with optimized performance," in 18th ICEM 2008., pp. 1-5, Sept. 2008.
- [6] Abdul Rehman Tariq, Carlos E. Nino-Baron and Elias G. Strangas, "Consideration of magnet materials in the design of PMSMs for HEVs application ", IEEE Power and Energy Society General Meeting, San Diego, pp 1-6, July, 2011.
- [7] TDK corp., Hitachi Metals, Ltd. "Neodymium-Iron-Boron Magnets NEOREC Series" Br/Hcj characteristics distribution, May 2011.
- [8] Young-Hun Im, Seon-Ik Hwang, Seok-Myeong Jang, Jang-Young Choi, and Ji-Hwan Choi, "Analysis of Torque Pulsation Considering Interior Permanent Magnet Rotor Rib Shape Using Response Surface Methodology " IEEE Trans. Magn., vol 48 no 2., Feb, 2012.
- [9] J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, and J. H. Lee, "Rotor design on torque ripple reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", IEEE Trans. Magn., vol. 42, no. 10, Mar 2006.
- [10] T. Ishikawa, M. Yamada, and N. Kurita, "Design of magnet arrangement in interior permanent magnet synchronous motor by response surface methodology in consideration of torque and vibration," IEEE Trans. Magn., vol. 47, no. 5, pp. 1290-1293, May 2011.
- [11] Kyu-Yun Hwang, Sang-Bong Rhee, Byoung-Yull Yang, and Byung-Il Kwon, "Rotor Pole Design in Spoke-Type Brushless DC Motor by Response Surface Method", IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 4, pp 1833-1836, April 2007.
- [12] K. Y. Hwang, J.H. Jo, and B. I. Kwon, "A Study on Optimal Pole Design of Spoke-Type IPMSM With Concentrated Winding for Reducing the Torque Ripple by Experiment Design Method", IEEE Trans. Magn., vol. 45, no. 10, pp 4712-4715, Oct 2009.
- [13] A. I. Khuri and J. A. Cornell, "Response Surfaces: Designs and Analyzes" New York: Marcel Dekker, 1996.
- [14] Gordon R. Slemon, "Magnetolectric devices: transducers, transformers, and machines" Wiley, 1966.

## 저 자 소 개



## 임영훈 (任映勳)

1968년 12월 6일생. 1994년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 1996~2008년 삼성 종합 기술원 전문연구원. 2008~2009년 삼성전자 책임연구원. 2009년~2010년 현대모비스 책임연구원. 2010년~현재 특허청. 2010년~현재 충남대학교 전기공학과 박사과정.

E-mail : yhim126@gmail.com



## 장석명 (張錫明)

1949년 7월 3일생. 1986년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업(공학박사). 1989년 미국 Univ. of Kentucky (방문연구교수). 2004년~2005년 당학회 부회장, 전기기기 및 에너지 변환 시스템 부분회 회장 역임. 1978년~현재 충남대학교 전기공학과 교수.

E-mail : smjang@cnu.ac.kr