

## 영구자석의 감자를 고려한 Spoke Type 전동기의 회전자 형상 설계

김대우\*, 이태용\*, 송준영\*, 김용재\*\*, 정상용\*  
 성균관대학교\*, 조선대학교\*\*

### Rotor Design of Spoke Type Motor considering Demagnetization of Permanent Magnet

Dae-Woo Kim\*, Tae-Yong Lee\*, Jun-Young Song\*, Yong-Jae Kim\*\*, Sang-Yong Jung\*  
 SungKyunKwan University\*, Chosun University\*\*

**Abstract** - Spoke type의 전동기는 자속이 집중되어 높은 공극자속밀도를 가진다. 뿐만 아니라 spoke type 전동기는 자석의 감자가 다른 타입의 전동기들보다 쉽게 발생한다는 단점이 있다. 따라서 본 논문에는 자석감자를 고려한 형상설계를 두 개의 설계변수를 이용하여 진행하고, 이 설계변수들에 따른 감자특성을 해석하고자한다.

을 이용하여도 높은 출력밀도를 가지게 된다 [1]. 이러한 형태의 전동기는 회전자측 자속이 다른 전동기들보다 철심을 많이 이용하기 때문에, 영구자석위의 회전자 오프닝과 베리어의 높이에 의해 특성이 크게 변화한다 [2]. 따라서 이 두 설계변수들을 각각  $X_1$ 과  $X_2$ 로 지정해 바꾸어가며 자석의 감자를 줄이고, 전동기의 특성을 향상시키는 설계를 진행한 다.

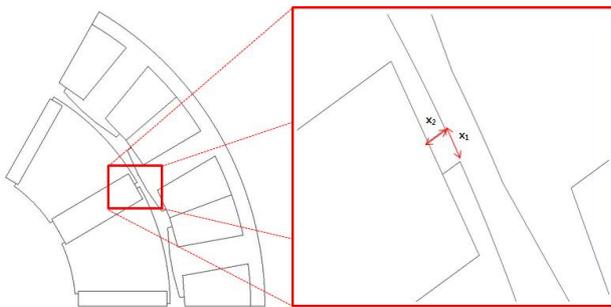
### 1. 서 론

Spoke type 전동기는 매입형 영구자석 동기전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor, IPMSM)의 한 형태로, 영구자석이 회전자 내에 방사매입형으로 삽입되는 구조를 가진다. 이러한 구조적 특성으로 인해 spoke type 전동기의 자속이 집중되어 원주매입형의 IPMSM 전동기보다 높은 공극자속밀도를 가지며, 같은 양의 자석을 사용한 다른 전동기들보다 높은 토크를 낼 수 있다. 하지만 높은 자속밀도와 릴럭턴스 차이가 다른 형태의 전동기에 비해 코깅토크가 크게 발생하여 소음과 진동의 원인이 된다 [1]. 이런 이유로 코깅토크 저감을 위한 회전자의 설계관련 연구와 논문들은 많이 찾아 볼 수 있지만, spoke type 모터의 다른 단점인 자석감자를 고려한 논문은 많지 않다. 영구자석을 이용하는 전동기는 자석감자가 일어날 경우 출력에 직접적으로 영향을 받기 때문에, 자석감자를 고려한 형상설계가 중요하다.

본 논문에서는 spoke type 전동기의 기본설계 형상을 이용하여 목표 출력을 만족하도록 구동을 한 뒤, 자석의 감자를 확인하여 감자가 되지 않도록 회전자의 형상을 변화시키는데 집중하였다. 또한, 형상 변화했을 때 발생한 특성변화를 분석하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 기본모델 분석

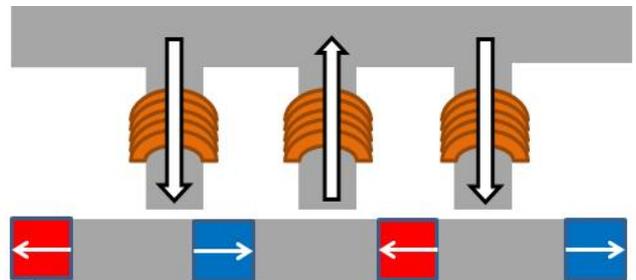


〈그림 1〉 Spoke type 전동기 기본형상과 파라미터

#### 〈표 1〉 기본 전동기 모델의 사양

항목	사양	항목	사양
극 / 슬롯 수	12/18	자석	$B_r$ 0.47[T] $H_c$ 307[kA/m]
고정자 내경 / 외경	51/70[mm]	회전자 오프닝( $X_1$ )	1[mm]
회전자 내경 / 외경	30/50[mm]	베리어 높이( $X_2$ )	0.5[mm]
적층 / 회전자 턴 수	30[mm]/30	자석 두께	6[mm]

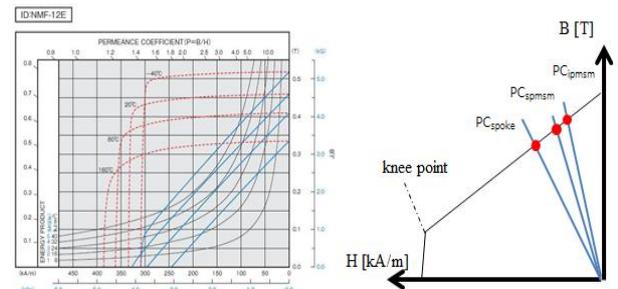
그림 1의 spoke type 전동기 회전자 운전속도는 600rpm이다. Spoke type 자석의 착자 방향이 다른 전동기들과 다르게 tangential한 방향으로 되어있으며, 이에 대한 자기회로가 그림2에 표현되어있다. 자석의 착자방향의 특성상 자속이 집중되기 때문에 자속 밀도가 낮은 ferrite자석



〈그림 2〉 Spoke Type 전동기의 자기회로

#### 2.2 Spoke type의 감자특성 분석

페라이트 영구자석은 희토류 영구자석에 비해 30% 수준의 잔류자속 밀도와 낮은 보자력을 가지고 있어 이를 이용한 고출력 전동기의 설계가 어렵다 [3]. 뿐만 아니라, 페라이트 자석은 감자가 쉽게 일어난다는 단점이 있다. 낮은 자력은 spoke type 전동기의 구조적 특성상 높은 자속밀도를 사용할 수 있기 때문에 보완이 되지만, 자석의 감자는 설계과정에서 고려를 하여 설계를 해야 한다.



(a) 페라이트 자석 감자 곡선 (b) 전동기별 운전점

#### 〈그림 3〉 감자특성 분석

그림3의 (a)는 형상에 사용된 페라이트 자석의 감자곡선을 나타낸 그래프이다. (b)는 모터 종류에 따른 퍼미언스 계수(Permeance Coefficient)와 운전점을 나타내고 있으며, 식으로는 다음과 같이 나타낸다.

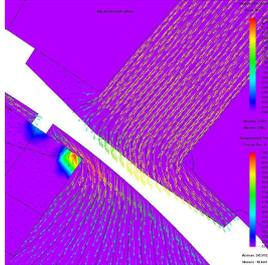
$$PC = \frac{B_m}{\mu_0 H_m} \quad (1)$$

운전점의 변화를 알아보기 위해 기본형상에 사용한 페라이트 자석을 spoke type, IPMSM, 그리고 SPMSM에 각각 사용하여 퍼미언스 계수에 따른 운전점을 찾아보았다. 그 결과, 전동기의 특성에 따라 운전점이 변하는 것을 확인 할 수 있었으며, 퍼미언스 계수는 IPMSM에 사용하였을 때 가장 컸고, SPMSM, 그리고 spoke type 순서로 나타나는 것을

알 수 있었다. 이 결과, spoke type의 경우 운전점이 감자와 관련이 있는 knee point와 가까워지기 때문에 SPMSM과 IPMSM보다 감자에 취약하다는 것을 확인 할 수 있다. 따라서 설계변수를 조정하여 운전점을 knee point에서 멀어지도록 하여 감자의 가능성을 줄이는 것이 본 설계의 목표이다.

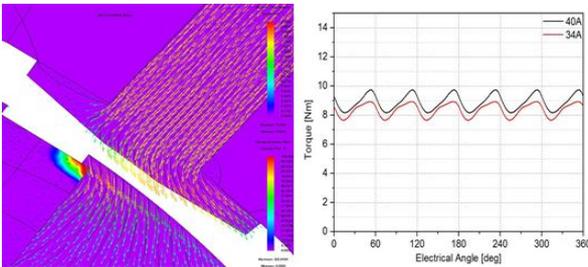
### 2.3 자석의 감자를 고려한 회전자 설계 및 특성해석

형상의 설계변수( $X_1$ ,  $X_2$ )를 바꾸어가며 특성을 비교하기 위해 목표토크 8.3Nm의 출력을 기준으로 하였으며, 기본형상의 경우 목표토크를 내기 위한 전류인 40A를 인가하였다.



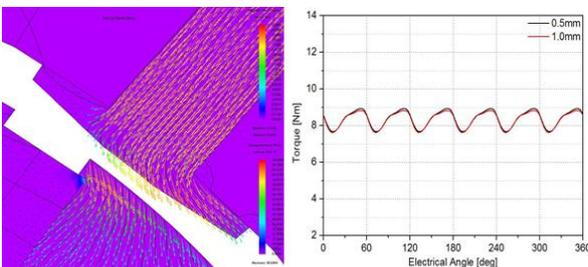
〈그림 4〉 목표토크 도달 시 기본형상의 감자형상

그림 4는 기본형상에 40A전류를 인가하였을 때 발생한 자석감자와 자속의 벡터를 보여준다. 기본형상은 회전자의 오프닝이 작아 오프닝에 자료가 형성되어 자석의 모서리에 부분적으로 감자가 발생하며, 감자율은 최대 점에서 240.3%로 나타난다. 이러한 감자 특성은 설계변수에 따라 변하기 때문에 설계변수  $X_1$ 과  $X_2$ 의 변화에 따른 감자특성을 확인하였다.



(a) 34A인가시의 감자형상 (b) 전류(40&34A) 토크비교  
〈그림 5〉 회전자 오프닝( $X_1$ ) 5mm의 감자형상 및 토크파형

그림 5는 회전자 오프닝의 변수를 1mm에서 5mm로 수정하였을 때의 자석의 감자율 분포도와 토크파형을 나타낸다. 설계변수  $X_1$ 을 바꾼 형상의 경우 자석의 감자율이 오프닝의 중간과 모서리에 나누어 분포되어 있는 기본형상과 달리, 자석의 감자가 모서리에 집중되었다. 또한, 오프닝의 길이가 길어지며 누설자속이 줄어들어 같은 40A의 전류를 인가하였을 때 토크의 평균이 8.90Nm까지 증가하였다. 따라서 인가전류를 34A까지 줄여 평균토크를 8.38Nm으로 목표토크를 만족하였다. 하지만 누설자속이 줄어들어 감자율의 최대 점 값은 240.3%에서 363.6%로 증가하였다. 목표토크는 만족하였으나, 모서리 부분의 감자현상을 개선시키기 위해 베리어의 높이( $X_2$ )를 변화시켜 감자율을 확인하였다.



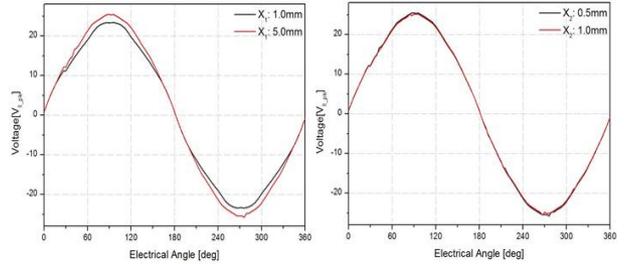
(a) 34A인가시의 감자형상 (b)  $X_2$ (0.5&1.0mm) 토크비교  
〈그림 6〉 베리어 높이( $X_2$ ) 1mm의 감자형상 및 토크파형

자속에 의한 베리어 부분의 영향을 줄이기 위하여 설계변수  $X_2$ 를 기존 0.5mm에서 1.0mm로 증가시켰다. 그림 6의 (a)는  $X_2$ 의 값이 1.0mm일 때 34A를 인가하여 얻은 감자형상이다. Demagnetization ratio가 기존의 363.6%에서 30.65%로 줄었으며, 감자되는 영역이 기존보다 감소하

었다는 것을 확인 할 수 있다 (b)는  $X_2$ 의 값이 0.5mm와 1.0mm일 때의 토크파형을 비교한 것이다. 각각에 대한 평균 토크의 값은 8.38Nm과 8.33Nm으로, 베리어의 두께가 변화했지만 목표토크인 8.30Nm을 만족한다.

### 2.4 개선 모델의 출력성능 변화 분석

기본형상에서 자석의 감자를 확인하고 두 개의 설계변수를 수정하여 감자율을 줄이는 형상을 설계하였다. 설계변수  $X_1$ 을 1.0mm에서 5.0mm으로,  $X_2$ 를 0.5mm에서 1.0mm로 수정하여 최종모델을 선정하였다. 각 설계변수의 변화에 따른 평균토크가 변하는 것을 확인하였으며, 이에 대한 요인은 각각의 설계변수에 따른 역기전력 파형에서 확인 가능하다.



(a) 회전자 오프닝( $X_1$ ) (b) 베리어 높이( $X_2$ )

〈그림 7〉 설계변수 변화에 따른 역기전력 파형

그림 7은 설계변수  $X_1$ 과  $X_2$ 의 변화에 따른 역기전력 파형을 나타낸 것이다. 우선 (a)의 회전자 오프닝에 의한 역기전력 파형을 보면, 회전자의 오프닝이 커질수록 역기전력이 커진다는 것을 알 수 있다. 또한, (b)의 베리어 높이에 따른 역기전력 파형에서는 베리어의 높이가 커질수록 역기전력은 감소한다는 것을 알 수 있다. 회전자 오프닝이 커질수록, 그리고 베리어의 높이가 작아질수록 쇄교자속양이 증가하며, 그 결과 역기전력이 상승한다. 역기전력이 상승함에 따라 전동기의 출력밀도가 향상된다. 하지만, 본 논문에서는 자석 감자를 고려한 형상설계를 목표로 하기 때문에 두 가지의 설계변수를 적절히 이용하여 감자를 최소화한  $X_1$  : 5.0mm,  $X_2$  : 1.0mm 형상을 최종 회전자 형상으로 택하였다.

## 3. 결 론

본 논문에서는 자석감자를 고려한 spoke type 전동기의 회전자를 두 개의 설계변수를 고려하여 설계하였다. 초기형상에 감자가 발생한다는 것을 확인한 후, 회전자 오프닝( $X_1$ )과 베리어 높이( $X_2$ )를 바꾸어 가며 목표 토크에 따른 자석 감자를 확인 하였다.

일반적으로 전동기를 설계할 때는 쇄교자속의 양을 향상시키는 것이 전동기의 효율을 개선시킬 수 있다. 하지만,  $X_2$  설계변수의 경우 길이가 증가함에 따라 감자는 줄어들지만 쇄교자속이 줄어 역기전력과 토크가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 따라서  $X_2$ 의 값을 정할 때에는 실험적으로 감자와 출력 모두를 만족하는 값을 찾아야 할 것이다.

설계변수  $X_1$ 과,  $X_2$ 를 수정하여 감자율의 최대 점을 240.3%에서 30.65%로 줄일 수 있었으며, 8.30Nm의 목표토크를 도달하는데 필요한 인가 전류가 40A에서 34A로 감소하였다. 또한, 초기형상과 최종형상의 자석감자형상을 비교하면 감자되는 영역이 줄어드는 것을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 한광규, "Spoke Type Motor의 운전특성 향상을 위한 구조 최적화연구", 2008년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, p35-37, 2008. 4. 5
- [2] 이 현, "Spoke type IPM 모터의 토크리플 저감을 위한 회전자형상 최적설계", 2009년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 춘계학술대회 논문집, p76-78, 2009. 4. 23
- [3] 김관호, "페라이트를 이용한 영구자석 기기의 착자 형태에 따른 부분 감자의 영향", 2013년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부문회 추계학술대회 논문집, p174-176, 2013. 10. 25