

## Study on Enhancement of Magnetic Contact Forces between Iron Bed and Back Yoke in Electric Motor

Oh-Gyu Kwon, Gui-Hwan Kim, and Hong-Soon Choi\*

Kyungpook National University, Daegu 41566, Korea

(Received 17 October 2016, Received in final form 3 December 2016, Accepted 6 December 2016)

The shape of a iron bed supporting a permanent magnet in a large-sized motor is a important factor for determining the coupling strength with the yoke. In a large-sized motor, there is a difference in electromagnetic force with the yoke depending on the shape of the iron bed. In this paper, we show the differences and problems by calculating the electromagnetic force between the double bed and the single bed through the virtual air gap, and show that the single bed is superior in terms of the binding force. It is also shown that the binding force between the bed and the yoke is improved by carving the groove shape under the bed.

**Keywords :** virtual air gap, double bed, single bed, groove, electromagnetic force

### 대형 전동기에서의 영구자석 철 받침대와 요크 간의 전자기 결합력 향상에 관한 연구

권오규 · 김귀환 · 최홍순\*

경북대학교, 대구시 북구 대학로 80, 41566

(2016년 10월 17일 받음, 2016년 12월 3일 최종수정본 받음, 2016년 12월 6일 게재확정)

대형 전동기에서 영구자석을 받치는 철제 받침대의 형상은 요크와의 결합력을 결정하는 매우 중요한 요소이다. 대형 전동기에서 받침대의 형상에 따라 요크와의 결합력 차이가 있다. 이 논문에서는 이중 받침대(Double bed)와 단일 받침대(Single bed)의 결합력을 가상공극 법을 통해 계산하여 차이점과 문제점을 제시하고 단일 받침대가 결합력 향상 측면에서 우위에 있음을 보여준다. 또한 받침대의 아래에 홈(Groove) 형상을 새김으로써 받침대와 요크 간의 결합력이 향상됨을 보인다.

**주제어 :** 가상공극, 이중 받침대, 단일 받침대, 홈 형상, 전자기력

#### I. 서 론

최근 풍력을 이용한 발전기나 대형선박에서의 추진력을 위해 영구자석을 사용한 전동기의 사용은 갈수록 증가하는 추세이다. 영구자석을 사용하는 MW급 대형전동기의 경우 자석과 자석을 받치는 철제 받침대를 사용하여 볼트로 요크에 고정하게 되는 경우가 많다. 자석은 요크와의 인력이 결합력으로 작용하므로 이 힘의 크기에 따라 볼트에 의한 추가 체결력의 요구 수준이 달라진다. 받침대를 사용하는 이유는 자석을 직접 요크에 장착하는 경우보다 자석의 훼손 가능성을 방지할 수 있고 조립이 용이하기 때문이다. 이런 경우에 두

개의 자석을 하나의 철 받침대에 고정하는 것을 단일 받침대(Double bed, DB)라고 한다. 반면에 자석 하나당 하나의 철 받침대를 사용하는 것을 이중 받침대(Single bed, SB)라고 한다.

본 논문에서는 이러한 두 경우에 대한 자석과 철 받침대의 요크와의 전자기 결합력을 시뮬레이션을 통해 계산하는 방법을 제시한다. 그 결과로 DB의 경우 전자기 결합력이 음의 값, 즉, 요크와 반발력으로 나타남을 보인다. SB의 경우는 충분한 결합력을 가진 것으로 나타났다.

철과 같은 자성체끼리 붙어 있는 경우 각각에 대해 분리된 전자기력 계산이 불가능하였으나 최근의 연구에서는 가상공극을 자성체 접촉면에 도입하여 이러한 문제를 해결할 수 있었다[1-5]. 그 이전에는 시뮬레이션 모델에서 아주 작은 공극을 자성체 사이에 끼워 넣어서 두 물체간의 힘을 계산하는

방법이 주로 사용되어 왔다. 이 방법은 실제와의 차이로 인해 정확도 문제가 발생한다. 작은 공극에서의 자성체간의 인력은 거리에 따라 상당한 변화가 있으므로 작은 공극이라 하더라도 실제 접촉과는 많은 오차가 생긴다. 가상공극은 모델링시기가 아닌, 후처리 단계에서 임의의 면을 가상으로 삽입하여 구해낼 수 있다. 실제 접촉상황을 모델링 한 것이므로 정확도가 우수하다. 상용 프로그램인 COMSOL™[6]의 경우 물체 사이의 영역이 매우 얇은 경우 모델링 단계에서 쥘로투자율(thin low permeability)를 가지는 영역을 입력하여 자성체 접촉 문제를 다룰 수 있게 한다. 후자의 경우 영역의 두께를 0으로 모델링하고 투자율을  $\mu_0$ (공기)로 입력하면 가상공극과 동일한 접근이라 볼 수 있다. 쥘로투자율은 전처리 단계에서 입력해주어야 한다.

다음으로 본 논문에서는 전자기적 결합력을 증대하기 위하여 요크의 표면에 작은 홈(groove)을 다수 새겨 넣으면 전자기적 결합력이 상당량 증가함을 보이고자 한다. 또한 접촉하는 전체 면적의 차이는 같게 하면서 홈 하나의 부피를 작게 가져가고 개수를 늘려 새김으로서 생기는 릴렉턴스에 의해 전동기 회전 시 토크 감소를 최소화 한다. DB의 경우에는 요크와 자석반침대간에 반발력을 본 논문에서 제안하는 홈을 접촉면에 새김으로서 반발력이 인력으로 전환되는 것을 관찰할 수 있었다. 홈에 의한 효과는 SB의 경우도 요크와의 결합력을 더욱 증가시킴으로써 해서 볼트에 의해 추가적으로 필요한 체결력을 줄일 수 있으며 전동기의 내 이탈 방지 신뢰성을 높일 수 있다.

## II. 본 론

### 1. 가상공극개념의 소개와 적용

전기기기를 설계할 때에 접촉하는 두 자성체 사이의 전자기력 계산은 불가피하다. 하지만 기존의 계산법에서는 자성체 덩어리의 공기와 접하는 면에서의 전자기력 표면밀도에 대한 계산은 가능하였으나 공기영역이 존재하지 않는 접촉하고 있는 두 자성체 사이의 전자기력 표면밀도 그리고 자성체 내부에 존재하는 전자기력 체적밀도에 관해서는 계산이 불가능 하였다[1-3]. 그러나 최근 연구 중 가상 공극이라는 개념에 의해 접촉하고 있는 자성체간의 전자기력 계산이 가능하게 되었다[4, 5]. 가상공극 개념은 접촉하고 있는 자성체와 자성체 사이에 가상적으로 아주 얇은 공기층을 두어 자성체 간의 전자기력을 정확히 계산할 수 있는 기법이다.

Fig. 1에서와 같이 접촉하는 두 자성체 사이에 두께가 0 mm 인 공기층을 두고 투자율을  $\mu_0$ 로 하여 필드의 경계조건으로부터 공극내의 필드 값을 계산한다. 이때 가상공극 안의 자기장의 세기는 아래 식(1)을 따르게 된다[7-10]. 아래식

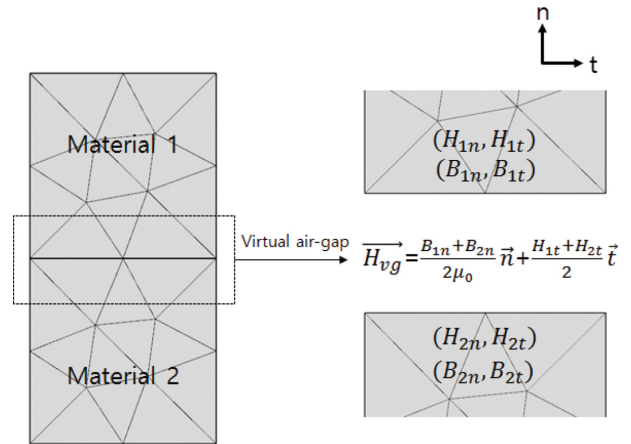


Fig. 1. Virtual air gap field between two magnetic materials (The index n and t denotes normal and tangential component respectively).

의  $\vec{i}$ 는 접선방향,  $\vec{n}$ 은 수직방향을 의미한다.

$$\vec{H}_{vg} = H_n \vec{n} + H_t \vec{i} = \frac{\vec{H}_{vg1} + \vec{H}_{vg2}}{2} \quad (1)$$

여기서  $\vec{H}_{vg1}$ 은 자성체 1에 의한 가상공극에서의 자계세기이며  $\vec{H}_{vg2}$ 은 자성체 2에 의한 가상공극에서의 자계세기를 의미한다.  $\vec{H}_{vg1}$ 와  $\vec{H}_{vg2}$ 의 자세한 식은 식(2)과 식(3)을 따른다.

$$\vec{H}_{vg1} = \frac{B_{1n} \vec{n} + H_{1t} \vec{i}}{\mu_0} \quad (2)$$

$$\vec{H}_{vg2} = \frac{B_{2n} \vec{n} + H_{2t} \vec{i}}{\mu_0} \quad (3)$$

$B_{1n}$ 과  $H_{1n}$ 은 각각 자성체 1에 의한 수직방향의 자속밀도를 그리고 자계세기를 의미한다. 그리고  $B_{1t}$ 와  $H_{2t}$ 은 각각 자성체 2에 의한 접선방향의 자속밀도와 자계세기를 의미한다. 식(2)과 식(3)을 식(1)에 적용하면 식(4)이 된다.

$$\vec{H}_{vg} = \frac{B_{1n} + B_{2n}}{2\mu_0} \vec{n} + \frac{H_{1t} + H_{2t}}{2} \vec{i} \quad (4)$$

가상공극에서 경계조건이 만족하기 위해서는  $\vec{B}_n$ 과  $\vec{H}_t$ 은 연속이어야 한다. 따라서 아래 식(5), (6), (7), (8)이 유도된다.

$$\vec{B}_{vg} = \mu_0 \vec{H}_{vg} \quad (5)$$

$$\vec{B}_r = \mu_0 \vec{M}_0 \quad (6)$$

$$B_n = \mu_0 \mu_r H_n + \mu_0 M_{0n} \quad (7)$$

$$H_t = \frac{B_t - B_{rt}}{\mu_0 \mu_r} \quad (8)$$

여기서  $\vec{B}_r$  은 잔류자속을  $\vec{M}_0$  은 자성체의 자화를 의미한다. 위 식들에 의한 가상공극이 적용된 맥스웰 스트레스 식은 아래 식(9), (10)를 따르게 된다.

$$\vec{f}_{svg} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B}_{vg} (\vec{B}_{vg} \cdot \vec{n}) - \frac{1}{2} |\vec{B}_{vg}|^2 \vec{n} \quad (9)$$

$$\vec{f}_{svg} = \frac{1}{2\mu_0} (B_{vgn}^2 - B_{vgt}^2) \vec{n} + \frac{1}{\mu_0} B_{vgn} B_{vgt} \vec{t} \quad (10)$$

여기서  $B_{vgn}$ ,  $B_{vgt}$  은 가상공극에서의 수직방향과 접선방향의 자속밀도를 의미한다. 식(10)은 가상공극이 적용된 맥스웰 스트레스 식이다. 본 논문에서는 가상공극의 개념을 적용한 맥스웰 스트레스 텐서 식을 이용하여 전동기의 영구자석을 받치는 철제 받침대와 요크 사이에 작용하는 전자기력에 의한 결합력을 계산한다. DB형상과 SB형상에 의한 전자기 결합력 차이가 있음을 보여주고 그것의 해결 방법을 제시한다.

### 2. 이중 받침대(DB)의 해석

전동기 내에서의 DB의 형상은 시뮬레이션하기 위해 Fig. 2와 같이 모델링 하였다. 모델은 실제 전동기의 크기를 반영하기 위해 깊이를 50 cm로 모델링하였다. 이 모델은 회전형 전동기를 전자기 결합력 해석을 위해 간략화한 선형 모델로서 대칭에 의한 일부 영역만을 모델링한 것이다. DB는 2개의 영구자석을 하나의 받침대를 볼트로 결합하여 제작이 간단해지므로 비용을 절감하는 구조이다. 이것을 해석하기 위해 DB와 요크가 접하는 면에 가상 공극 개념을 도입하여 전자기적 결합력을 계산한다. 시뮬레이션의 모델링 단계에서 가상공극을 가지는 영역을 입력하여 받침대와 요크의 두 자성체 사이의 전자기력에 의한 결합력을 계산할 수 있었다. 가상공극은 두 물질 사이에 두께가 0인 간격을 넣을 수 있으며 여기에 투자율을  $\mu_0$ 로 입력할 수 있다. 이것은 두 자성체 사이에 두께가 0인 공기층을 두는 것과 같은 효과이다. Fig. 2에

서는 DB와 요크 사이에 가상공극을 입력하여 계산한다. 또한 Fig. 2는 3상 구동상태로 해석한다. 회전 시 최대 토크를 얻는 상태를 구현하기 위해 전류는 왼쪽에서 첫 번째 티쓰의 권선에  $\pm 1 \text{ A/mm}^2$ 의 전류밀도를 흘려주었으며 두 번째 코일에는  $\pm 2 \text{ A/mm}^2$  그리고 세 번째 코일에는  $\pm 1 \text{ A/mm}^2$ 을 입력하였다. 이것은 영구자석의 잔류자속(Br)값은 1.3 T로 입력하였다. 이를 통해 해석한 결과로 나온 전자기력은 영구자석과 DB 받침대의 결합체와 요크 간에 반발력으로 계산된다. Fig. 2의 자속선을 보면 자속이 아래 요크까지 다다르지 못하고 받침대 내부로 1/2 이상의 자속이 흐른다. 그로 인하여 전자기력에 의한 받침대와 요크 사이의 결합력이 부족하다. 이때 전류에 의해 전자석으로 유도된 티쓰에 의해 영구자석과 DB는 티쓰에 붙으려 하고 요크는 고정되어 있으므로 상대적으로 영구자석과 DB는 요크에서 떨어져 나가려는(반발력)의 힘을 가진다. 또한 본 모델의 전동기가 회전하게 되면 원심력에 의한 힘과 증력에 의한 힘 그리고 충격에 의한 힘 등으로 인하여 추가 반발력이 발생한다. 그러므로 본 DB구조를 채택하는 경우 요크와 결합하려면 상기 반발력을 이겨내는 강력한 요크-받침대 간의 볼트체결이 요구된다.

### 3. 단일 받침대(SB)의 해석

DB와는 다르게 하나의 받침대와 하나의 영구자석을 볼트로 결합하는 방식을 SB라고 한다. SB는 Fig. 3과 같이 모델링 한다. 전류밀도와 영구자석의 잔류자속(Br)은 DB와 같은 값을 입력하였다. 이에 따른 해석 결과 자속선은 Fig. 3과 같이 나타난다. SB는 DB와 다르게 자속이 받침대를 지나 요크에 까지 모두 다다르게 된다. 따라서 전자기력에 의한 받침대의 힘이 요크와 결합하려는 힘의 결과를 가진다.

### 4. 이중 받침대와 단일 받침대의 차이점

DB와 SB는 제작비용 차이와 전자기력에 의한 결합력의 차

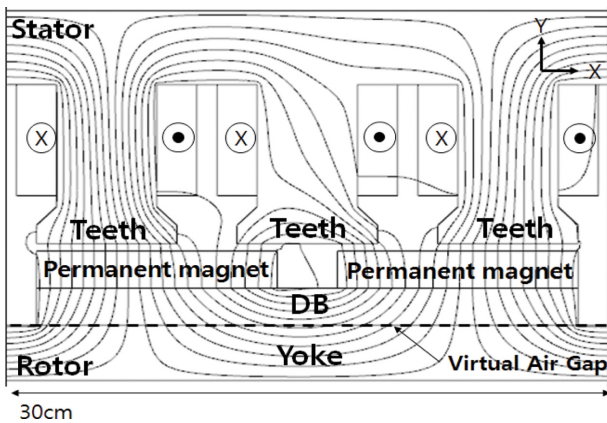


Fig. 2. DB model.

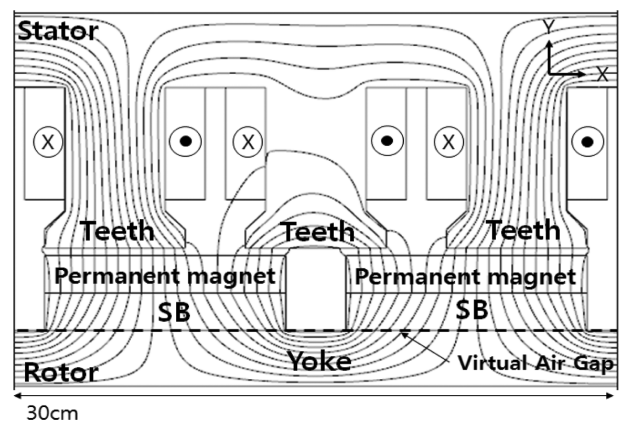


Fig. 3. SB model.

**Table I.** Calculated force values of DB and SB.

	DB	SB
Rotor force X-direction	942.54N	940.45N
Contact force Y-direction	12562N	-52086N

이를 보인다. 비교를 위한 DB와 SB의 해석 결과 값은 Table I로 나타내었다.

여기서 Rotor force X-direction은 Fig. 2 모델에서 로터가 X 방향으로 받는 힘을 의미하며 실제 전동기 모델에서는 로터가 받는 토크를 의미한다. 그리고 Contact force Y-direction은 영구자석과 받침대가 Y 방향으로 받는 힘을 나타낸다. 이것은 실제 전동기 모델에서 영구자석과 받침대가 요크에 붙으려는 힘을 의미한다. DB의 전자기력에 의한 받침대와 요크의 결합력은 Y 방향 12562(N)로 요크와 떨어져 나가려는 반발력을 의미한다. SB의 경우 전자기력에 의한 힘이 Y 방향으로 -52086(N)이다. 이것은 아래로 향하는 힘을 의미하며 요크와 결합하는 힘으로 볼 수 있다. 따라서 SB의 경우 DB의 경우와 다르게 전자기력에 의한 힘이 반발력이 아닌 결합력으로 작용한다.

DB의 경우 SB와 다르게 요크와 철재 받침대 사이에 반발력을 보이게 된다. 그 이유는 DB의 경우 영구자석에서 생성되는 자속이 요크에 1/2 정도만 흐르게 되고 나머지는 받침대 내부를 지나가기 때문이다. 따라서 결합력이 부족한 DB는 SB에 비해 받침대 이탈방지 신뢰성이 매우 낮다. 반면에 SB는 영구자석에 의한 자속이 모두 요크까지 도달하게 되어 전자기력에 의한 결합력이 발생하고 그 값도 상당히 높은 수준이다.

전동기가 회전 시 자석과 받침대 사이에 추가적인 힘이 작용하게 된다. DB를 사용한 전동기의 경우 추가적인 중력과 원심력을 철 비중에 의해 계산하게 되면 아래 식을 따르게 된다.

$$F_g = mg \tag{12}$$

$$F_0 = mr \times \omega^2 \tag{13}$$

위 식에서  $F_g$ 은 회전 시 자석과 받침대가 아래방향으로 매달려 있을 때 작용하는 중력에 의한 힘을 나타내며  $m, g$ 은 각각 받침대의 질량과 중력가속도를 나타낸다.  $F_0$ 은 원심력을 나타내며  $r$ 은 중심축에서 받침대까지의 거리를 나타낸다.  $\omega$ 은 회전 시 받침대의 각속도를 의미한다.  $r$ 은 50 cm로 설정하였으며  $\omega$ 은 150 rpm으로 설정하여 계산하였다. DB의 경우 중력과 원심력의 합이 5226.54(N)로 계산 되었다. 따라서 철재 받침대가 받는 총 힘은 전자기력과 중력, 원심력에 의한 힘이므로 12562(N) + 5226.54(N) = 17788.54(N)가 된다. 이에

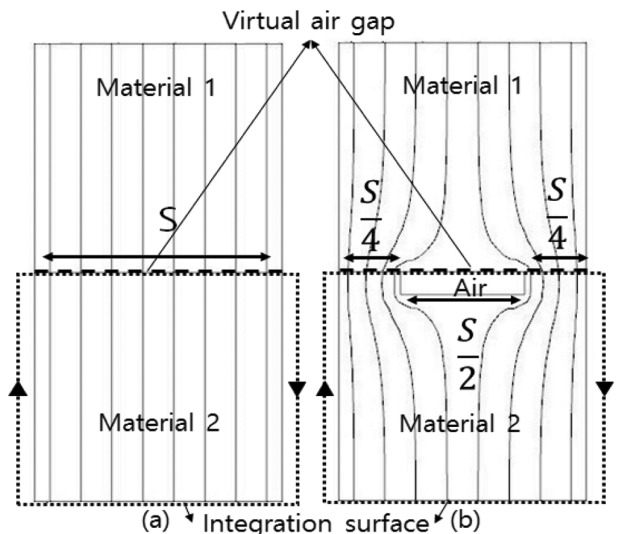
반해 SB의 경우 DB와 같은 방법으로 계산된 중력과 원심력의 합은 4913.22(N)이다. 계산된 중력과 원심력을 전자기력에 의한 결합력과 더하게 되면 -52086(N) + 4913.22(N) = -47172.78(N)이 된다. 따라서 SB의 경우 회전 시 중력과 원심력의 합을 고려하여도 요크와 결합하는 힘으로 계산된다. 전동기의 회전 시 DB는 전자기력에 의한 반발력과 철 비중에 의한 중력 그리고 원심력이 합해진 17788.54(N)를 온전히 볼트에 의한 체결력으로 고정되어야한다. 이에 반해 SB의 경우 중력과 원심력의 합보다 전자기력에 의한 결합력이 약 10 배 이상 강하므로 볼트에 의한 체결력의 필요성이 상당히 감소한다. 따라서 대형 전동기의 경우 제작비용이 크더라도 SB를 사용하는 것이 유리하다. 만약 대형 전동기에서 회전자의 형상을 DB로 선정할 경우 전동기 회전자에 가해지는 중력과 원심력, 그리고 전자기 반발력 모두를 견디도록 체결용 볼트 사양을 높여야만 한다.

### III. 홈 형상 제안

#### 1. 홈 형상에 의한 결합력 증대

DB는 제작비용이 절감되지만 전자기력에 의한 결합력이 반발력으로 나타난다는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해 홈 형상에 의한 결합력 강화 연구를 소개하고자 한다.

홈 형상은 아래 Fig. 4와 같다. Fig. 4(a) 모델은 평행자극이 존재하는 공간에 접촉하는 두 자성체에 홈이 없는 경우를 표현한다. Fig. 4(b) 모델은 Fig. 4(a)와 같은 조건에서 접촉하는 두 자성체 사이에 홈이 존재할 경우를 표현한다. 이때 홈의 크기는 Fig. 4(a)의 접촉하는 면적에 1/2의 길이로 설정하였으며 높이는 1 cm이다. 홈 안의 비어있는 공간은 공기로



**Fig. 4.** (a) Normal shape (b) Groove shape.

채워져 있으며 외부도 모두 공기로 채워져 있다. 여기서 Fig. 4(a)의 접촉하는 두 자성체는 면적은  $S$ 이다. 홈에 의해 Fig. 4(b)에서 두자성체가 접촉하는 면적은  $S/2$ 가 된다. Fig. 4(a), (b) 모델은 깊이 1 m로 설정하고 해석하였다.

평행자계가 존재하는 공간에 Fig. 4와 같이 자성체를 배치 하면 자성체1과 자성체2는 자화되고 자화된 자력에 의해 서로 붙으려고 한다. 본 제시하는 예제에서와 같이 이상화된 평행자계에서는 Fig. 4(a)의 경우는 각 자성체에 작용하는 전체 힘은 0이지만, 실제 상황이라면 대개 서로 당기는 힘이 작용한다. 이때 붙으려는 힘에 의해 자성체1과 자성체2 사이에는 전자기적 스트레스가 생기게 된다. 이를 계산하는 방법이 가상공극이 적용된 맥스웰 스트레스 식이다. 기존의 계산법으로는 완전히 붙어 있는 자성체 사이에 존재하는 스트레스를 계산하지 못하였지만 본 논문에서는 가상공극을 적용한 맥스웰 스트레스 식을 이용하여 계산한다[6, 9]. 가상공극을 적용한 맥스웰 스트레스 식은 이미 제시된 식(10)과 같다.

평행자계에서 자성체를 통과한 자속은 수직성분만 존재하므로 식(10)에 을 적용할 수 있다. 따라서 식(10)은 식(14)로 간략화 된다.

$$\vec{f}_{svg} = \frac{1}{2\mu_0} B_{vgn}^2 \vec{n} \quad (14)$$

먼저 Fig. 4(a)에서 두 자성체가 접촉하는 면에 존재하는 스트레스는 식(14)을 통해 계산할 수 있다. 이때 자성체의 표면을 따라 맥스웰 스트레스 식으로 적분하면 두 자성체가 받는 각각의 총 힘을 얻을 수 있다. 가상공극으로 표현된 접촉면에서만 스트레스의 적분은 아래 식(15)과 같다. 또한 Fig. 4(b)에서도 접촉하는 면적  $S'$ 을 곱해주게 되면 총 힘을 얻을 수 있다. 이것을 식으로 표현하면 식(16)이 된다.

$$\vec{F}_A = \frac{1}{2\mu_0} B_{vgn}^2 \vec{n} S \quad (15)$$

$$\vec{F}_B = \frac{1}{2\mu_0} B_{vgn}^2 \vec{n} S' \quad (16)$$

이때  $B_{vgn}$ 과  $S$ 은 Fig. 4(a)의 수직방향 자속밀도성분과 접촉하는 면적을 의미하며  $B'_{vgn}$ 과  $S'$ 은 Fig. 4(b)에서 수직방향 자속밀도성분과 접촉하는 면적을 의미한다.

Fig. 4(a), (b)에서의 자성체가 자속이 포화되지 않는다고 가정할 때 Fig. 4(a), (b)의 자성체를 통과한 총 자속은 같다. Fig. 4(a), (b)의 총 자속이 같을 때 자속은 자속밀도에 면적을 곱한 것이므로 Fig. 4(a)의 자속밀도와 면적을 곱한 값과 Fig. 4(b)의 자속과 면적의 곱의 값은 같다. 이것을 식으로 표현하면 식(17)이 된다.

$$\Phi = B_{vgn} S = B'_{vgn} S' \quad (17)$$

여기서  $S$ 의 넓이는  $S'$ 에 비해 2배이므로 식(17)이 성립하기 위해서  $B_n$ 은  $B'_n$ 에 1/2배가 되어야 한다. 이를 식으로 표현하면 식(18) 와 식(19)이 된다.

$$S = 2S' \quad (18)$$

$$2B_{vgn} = B'_{vgn} \quad (19)$$

위 식(18), (19)을 식(16)에 대입하면 잔류자속은 제곱에 비례하고 면적은 비례하므로 식(20)이 유도된다.

$$\vec{F}_B = \frac{1}{\mu_0} B_{vgn}^2 \vec{n} S \quad (20)$$

따라서 식(15)은 식(20)에서 식(21)을 유도할 수 있다.

$$2\vec{F}_A = \vec{F}_B \quad (21)$$

위의 결과는 의미 있는 결과이다. 접촉면의 형상에 의해 전자기력에 의한 두 자성체의 붙으려는 힘이 달라지기 때문이다. 따라서 우리는 이 결론을 전동기의 받침대 형상에 적용하여 결합력을 강화 하는 것을 목표로 한다.

### 2. DB모델에 홈 형상 적용

위의 본론 3.1의 결과를 통해서 DB에 홈 형상을 적용하면 받침대와 요크 사이의 결합력을 증가 시킬 수 있다. 이를 해석하기 위한 모델은 Fig. 5와 같다.

위의 Fig. 5(a)는 Fig. 2의 모델에서 로터측만을 가져온 것이다. 그리고 Fig. 5(b)는 받침대 아래에  $1 \times 0.5 \text{ cm}^2$  크기의 홈 6개를 새긴 것이다. Fig. 5(c), (d)는 각각  $0.5 \times 0.25$

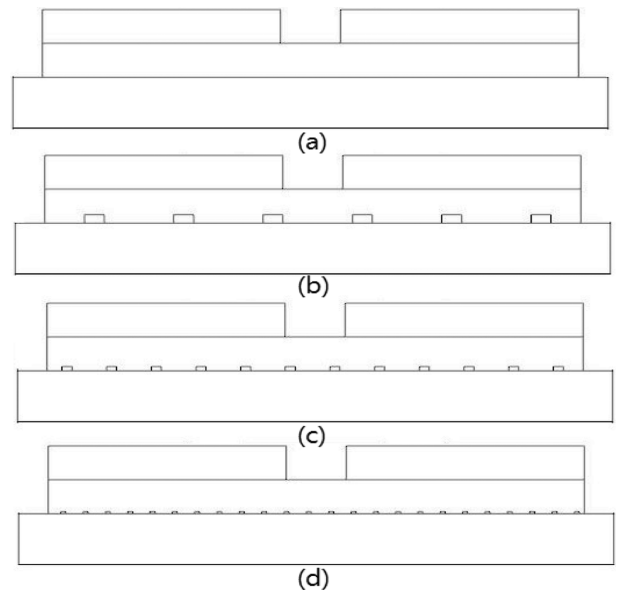


Fig. 5. DB carved grooves.

**Table II.** Calculated force values of DB according to various grooves.

	Rotor force X-direction	Contact force Y-direction
No grooves	942.54N	12562N
6 grooves (1 × 0.5 cm <sup>2</sup> )	942.54N	-14308N
12 grooves (0.5 × 0.25 cm <sup>2</sup> )	942.60N	-15919N
24 grooves (0.25 × 0.125 cm <sup>2</sup> )	942.50N	-17738N

cm<sup>2</sup>, 0.25 × 0.125 cm<sup>2</sup>의 크기 홈을 12개, 24개로 새긴 것이다. Fig. 5(a), (b), (c), (d) 각각의 경우의 모델은 Fig. 2와 같은 조건으로 해석하였다. 이에 따른 결과는 아래 Table II와 같다.

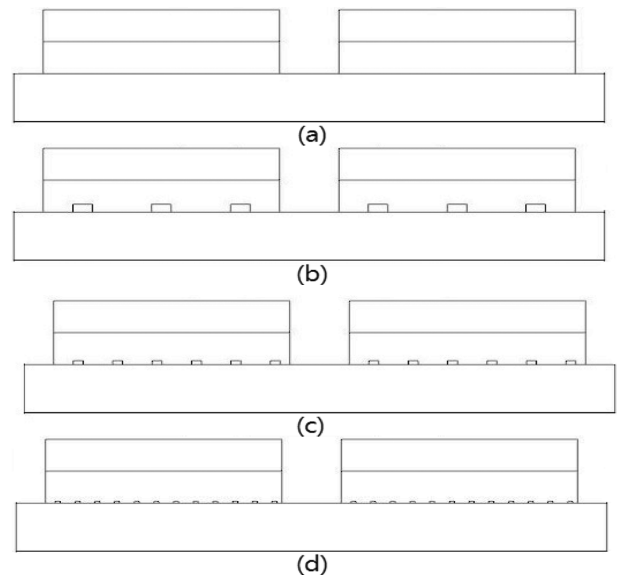
위의 해석 결과 홈 형상에 의해 받침대와 요크 사이의 결합력에서 차이점을 보인다. 홈을 새기기 전의 DB의 결합력은 Y방향으로 12562(N)의 힘이 작용한다. Y방향으로 양의 값은 위로 올라가려는 힘이고 받침대가 요크보다 위에 있으므로 이 힘은 받침대가 요크에서 떨어져 나가려는 힘이다. 반면 홈을 새겨 넣은 경우 Y방향으로 -14308(N)의 힘이 계산된다. Y방향으로 음의 값을 가지는 것은 아래로 향하는 힘을 의미하며 받침대가 요크보다 위에 있으므로 이 힘은 받침대와 요크가 붙으려는 힘이다. 따라서 DB에 홈을 새겨 넣을 경우 결합력이 반발력에서 인력으로 바뀌게 된다. DB에 홈을 새겨 넣은 경우 받침대와 요크 사이에 공기층이 생기게 되어 릴럭턴스가 증가하게 된다. 이때 생긴 릴럭턴스는 전동기 회전 시 토크를 감소시킬 수 있다. 하지만 접촉하는 면적은 같게 하고 홈의 크기를 줄여 여러 개를 새겨 넣게 되면 홈이 존재하는 부피는 줄어든다. 홈의 부피가 작을수록 릴럭턴스의 영향은 작아지게 된다. 따라서 홈을 작게 나누어 여러 개로 새길 경우 토크의 감소는 줄이고 결합력은 증가시킬 수 있다. 또한 여기에서 제시하지는 않았으나 동일한 크기의 홈이라도 그 면에서의 홈의 개수를 증가시키면 결합력도 증가함을 보인다.

### 3. SB모델에 홈 형상 적용

본론 3.2에서 보인 결과는 SB에 적용하여도 비슷한 결과를 얻을 수 있다. SB에서도 홈 형상에 의해 결합력이 증가한다. 이것을 해석하기 위한 모델은 Fig. 6과 같다.

위의 Fig. 6은 Fig. 5와 같이 SB 모델에서 로터측만을 가져온 것이며 받침대 아래에 홈 형상을 적용한 것이다. 이에 따른 결과는 아래 Table II과 같다.

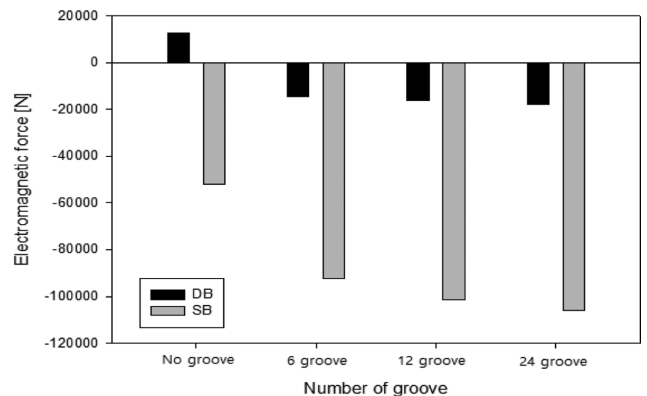
SB에서도 홈을 새기기 전과 홈을 새긴 후 결합력의 차이를 보인다. 홈을 새기기 전 받침대와 요크사이의 결합력은 Y방향으로 -52086(N)이었지만 홈을 새긴 후에 결합력은 -92238(N)로 증가한다. 이것은 본론 3.1의 DB에서와 같은



**Fig. 6.** SB carved grooves.

**Table III.** Calculated force values of SB according to various grooves.

	Rotor force X-direction	Contact force Y-direction
No grooves	940.45N	-52086N
6 grooves (1 × 0.5 cm <sup>2</sup> )	940.29N	-92238N
12 grooves (0.5 × 0.25 cm <sup>2</sup> )	940.35N	-101249N
24 grooves (0.25 × 0.125 cm <sup>2</sup> )	940.43N	-105916N



**Fig. 7.** The comparison of DB, SB contact force values according to various groove types.

결과이다. 또한 SB에서도 DB의 경우와 마찬가지로 접촉면의 크기는 같게 유지하면서 홈의 부피를 줄이고 개수를 늘렸을 릴럭턴스에 의한 토크 감소를 줄일 수 있다.

위 Fig. 7은 여러 가지의 홈 형상에 의한 DB와 SB의 결합력 차이를 비교하는 그래프이다. 위 그래프를 보게 되면 홈이 없는 DB의 경우에만 반발력으로 작용하게 되며 나머지 경우에는 결합력으로 나타나게 된다. 홈이 있는 경우에는

DB에 비해 SB가 5배 정도 결합력이 강하다. 위 그래프를 통해 DB보다 SB의 경우 전자기력에 의한 결합력이 5배 우수하다는 것을 알 수 있다. 또한 DB는 홈이 없을 때는 반발력으로 나타나며 홈이 있는 경우 인력으로 변하게 된다는 결과를 얻을 수 있다. 마지막으로 홈의 부피를 크게 6개로 새기는 경우 보다 12개, 24개로 잘게 나누어 여러 개 새기는 것이 결합력에 유리하다는 결과를 얻는다.

#### IV. 결 론

본 논문은 대형 영구자석 전동기에서 영구자석을 받치는 두 가지 철제 받침대의 형상에 따라 요크와의 결합력이 차이가 있음을 보였다. 접촉하는 자성체 간의 힘을 계산하기 위해서 가상공극법 또는 신티투자율법을 적용하였다. 그리고 받침대 아래에 홈 형상을 새겨 넣어 토크의 손실 없이 요크와의 결합력 증가가 가능함을 제시하였다.

#### 감사의 글

“이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재

단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. NRF-2013R1A1A2064161)”.

#### References

- [1] K. Reichert, H. Freundl, and W. Vogt, in Proc. COMPUMAG, pp. 64-74 (1976).
- [2] Kabashima, Takefumi, Atsushi Kawahara, and Tadahiko Goto, IEEE Trans. Magn. **24**, 1 (1988).
- [3] Vandeveld, Lieven, and Jan Melkebeek, IEEE Trans. Magn. **37**, 5 (2001).
- [4] H. S. Choi, S. H. Lee, and I. H. Park, IEEE Trans. Magn. **41**, 5 (2005).
- [5] H. S. Choi, I. H. Park, and S. H. Lee, IEEE Trans. Magn. **42**, 4 (2006).
- [6] COMSOL™, www.comsol.com.
- [7] S.-H. Lee, The Transactions of The Korean Institute of Electrical Engineers **58**, 2 (2009).
- [8] J. H. Seo and H. S. Choi, IEEE Trans. Magn. **50**, 2 (2014).
- [9] B. S. Park, H. D. Kim, H. S. Choi, and I. H. Park, ICEE (2014).
- [10] H. S. Choi, S. H. Lee, Y. S. Kim, K. T. Kim and I. H. Park, IEEE Trans. Magn. **44**, 6 (2008).