

# 가상공극개념을 이용한 영구자석의 전체전자기력과 상호체적력밀도 계산

論 文

58-2-10

## Evaluation of Global Force and Interaction Body Force Density in Permanent Magnet Employing Virtual Air-gap Concept

李世熙<sup>†</sup>  
(Se-Hee Lee)

**Abstract** - The global force and interaction body force density were evaluated in permanent magnets by using the virtual air-gap scheme incorporating the finite-element method. Until now, the virtual air-gap concept has been successfully applied to calculate a contact force and a body force density in soft magnetic materials. These force calculating methods have been called as generalized methods such as the generalized magnetic charge force density method, the generalized magnetizing current force density method, and the generalized Kelvin force density method. For permanent magnets, however, there have been few research works on a contact force and a force density field. Unlike the conventional force calculating methods resulting in surface force densities, the generalized methods are novel methods of evaluating body force density. These generalized methods yield the actual total force, but their distributions have an irregularity, which seems to be random distributions of body force density. Inside permanent magnets, however, a smooth pattern was obtained in the interaction body force density, which represents the interacting force field among magnetic materials. To evaluate the interaction body force density, the intrinsic force density should be withdrawn from the total force density. Several analysis models with permanent magnets were tested to verify the proposed methods evaluating the interaction body force density and the contact force, in which the permanent magnet contacts with a soft magnetic material.

**Key Words** : Virtual Air-gap, Permanent Magnet, Global Force, Contact Force, Interaction Body Force Density

### 1. 서 론

전기-기계 역학시스템의 대상매질에 작용하는 전체전자기력과 분포하는 전자기력밀도는 대상매질의 운동, 구조변형, 진동, 소음 등의 물리현상을 발생시키는 근원적인 힘으로 대부분의 전자기 결합문제 해석에서 필수적으로 요구되어진다. 전자기 매질에서 전자기력을 계산하는 방법은 응력텐서법, 가상변위법, 등가자기소스법, Kelvin 전자기력밀도법 등 다양한 방법들이 제시되어 왔으며 이러한 힘들은 전체힘을 계산할 경우에 만족스러운 결과를 보여 주고 있다[1][2]. 하지만 분포전자기력밀도는 서로 다르게 얻어져 지금까지도 많은 논란이 되어 오고 있는 실정이다[2]. 이러한 논란의 대상은 전기기기 시스템에 흔히 사용되는 쇠나 실리콘강판 등과 같은 연자성체에 주로 국한되어 연구되어 왔으나 영구자석과 같은 경자성체도 전동기나 자기센서 등과 같은 자기시스템의 중요한 재료로 널리 사용되므로 이에 관한 연구가 중요하게 인식되고 있다[3][4][5].

영구자석의 전자기력계산법도 연자성체의 경우와 동일한 방법들이 사용되며 시스템내의 주변 매질과 분리되어있는

경우 전체힘을 계산하는 것은 별다른 문제없이 만족스러운 결과를 보여주고 있다[5]. 그동안 주로 사용되어온 전자기력은 선형매질의 경우 표면력으로 표현이 되지만, 두 매질이 접촉할 경우 표면력으로 표현되는 방법들에서는 전자기접촉력이 틀리게 얻어져 일반적인 전자기력계산법으로 사용하기에 일관성이 결여되어 있음이 지적되었다[6][7]. 영구자석도 자기시스템을 구성할 경우 주로 자로를 확보하기 위하여 연자성체와 함께 사용하게 되는데, 이 경우 철-영구자석의 접면이 형성되어 연자성체에서 발생하는 접촉력 문제가 영구자석에도 동일하게 발생한다. 또한, 특수한 상황에서 일부 표면전자기력은 거동을 예측함에 있어서 전혀 다른 분포를 보여주어 물리적 거동현상을 설명할 수 없는 논리적인 오류가 있음이 제기되었다[2].

이러한 문제점을 해결하기 위하여 전자기력은 체적력으로 매질에 작용한다는 개념에 근거하여 체적력을 표현하기 위한 방법으로 가상공극개념이 최근 도입되면서 만족스러운 결과를 도출하여 왔다[6][7][8]. 현재까지는 주로 연자성체에 대해 적용이 되어왔으며, 영구자석에 대해서는 부분적으로 도입이 되어 왔으나 아직 체계적으로 연구가 되지 않은 실정이다. 따라서 본 논문에서는 기존의 전자기력밀도 계산법과 가상공극개념을 도입하여 영구자석에서의 전자기력을 계산하였다. 이를 통하여 영구자석 시스템의 전자기접촉력의 해결 뿐 만 아니라, 영구자석 내부에 분포하는 전자기체적력에 대해서도 고찰하고자 한다.

영구자석에 분포하는 전자기력밀도는 영구자석이 단독으

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 慶北大學校 전기전자컴퓨터학부  
助教授 · 工博

E-mail : shlees@knu.ac.kr

接受日字 : 2009年 1月 9日

最終完了 : 2009年 1月 17日

로 존재하는 경우 자체자화에 의해 얻어지는 순수전자기력 밀도와 다른 주변의 매질과 시스템을 구성하면서 분포하는 전체전자기력밀도가 있다. 한편, 일부 연구자들에 의해 가상변위법에서 에너지의 변화를 시스템 내에서 영구자석이 상호작용하면서 변화하는 에너지양만 고려하여 전자기력을 계산한 상호전자기력밀도 분포가 제시되었다[3]. 이와 동일한 개념으로 영구자석에서 가상공극개념에 의한 상호전자기력 밀도를 도출하기 위하여 전체 시스템이 구성된 상태에서 얻어진 전체체적력밀도에서 자체자화에 의한 순수체적력밀도를 제거함으로써 영구자석 내부에 분포하는 상호체적력밀도를 구하였다. 그동안 유한요소법과 가상공극개념을 도입한 체적력의 분포는 자계의 방향에 대해 물리적으로 무관한 유한요소의 기하학적 상태에 따라 방향성이 관찰되어 이를 제거하기 위한 노력이 제시되어 왔다. 여기에서 결과적으로 얻어진 상호체적력밀도 분포는 가상변위법에 의해 얻어진 상호전자기력밀도에 대응되는 개념으로 연속적인 분포형태의 물리적인 의미를 지니고 있어 매우 흥미로운 결과를 제시하고 있다. 이를 영구자석-철과 영구자석-영구자석 시스템에 각각 적용하여 그 유효성을 입증하였다.

## 2. 기존의 전자기력 계산법

본 절에서는 비교대상으로 선택된 일부 전자기력계산법들에 대해 간략히 언급하기로 한다. 우선, 자계의 세기  $\mathbf{H}$ 와 자속밀도  $\mathbf{B}$ 의 관계를 나타내는 구성방정식은 영구자석을 고려하여 다음과 같이 표현한다.

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}_s + \mathbf{M}_p) \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{M}_s$ 는 연자성체에서의 자화,  $\mathbf{M}_p$ 는 영구자석에서의 영구자화를 나타낸다.

맥스웰응력에 의한 전자기력은 응력텐서의 발산양으로 구해지는 체적력밀도를 체적적분함으로써 대상체에 가해지는 전체힘을 계산할 수 있으며, 가우스 적분법칙에 의해 대상체를 감싸는 폐적분으로 바꾸게 되면 단지 대상체를 감싸는 임의의 면적분에 의해서 전자기력을 계산할 수 있다. 맥스웰 응력법에 대한 최종 표현식은 다음과 같다[9].

$$\mathbf{F} = \oint_S \left\{ \mu_0(\mathbf{n} \cdot \mathbf{H})\mathbf{H} - \frac{1}{2}\mu_0 H^2 \mathbf{n} \right\} dS \quad (2)$$

여기서  $S$ 는 대상체를 감싸는 표면을 나타내며,  $\mu_0$ 은 진공중의 투자율,  $\mathbf{n}$ 은 외향단위법선벡터를 나타낸다.

가상일의 원리에 의한 전자기력은 수학적으로 에너지를 미소변위에 대하여 미분을 취함으로써 구해진다. 이에 대한 구현으로는 우선 직접적인 미소변위를 주어 에너지변화량을 계산하고 이를 미소변위로 나누어서 구하는 차분형태가 있다. 이와 다르게 유한요소해석과 접목하여 가상변위에 대한 에너지의 직접적인 미분을 통해 계산하는 방식이 있다. 본 논문에서는 후자의 방식을 이용하여 힘을 계산하였으며  $s$  방향에 대한 전자기력의 표현  $F_s$ 는 다음과 같다[1].

$$F_s = \sum_{e=1}^{nf} \oint_{\Omega_e} \left\{ -\mathbf{B}^T \mathbf{G}^{-1} \frac{\partial \mathbf{G}}{\partial s} \mathbf{H} + \int_0^H B dH |\mathbf{G}|^{-1} \frac{\partial |\mathbf{G}|}{\partial s} \right\} d\Omega \quad (3)$$

여기서  $e$ 는 가상변위가 수행되는 절점에 걸려있는 모든 요소를 나타내며 총수는  $nf$ 개이다. 아올러  $\Omega_e$ 는 가상변위가 수행될 때 왜곡되는 요소이며,  $|\mathbf{G}|$ 는 야코비안 행렬  $\mathbf{G}$ 의 행렬식이다. 식 (3)은 전체힘 계산시 일반자성체에 적용되어도 무방하지만 영구자석 시스템에서 상호작용력을 고려하기 위하여 영구자석의 자화가 착자된 이후 공기 중에 노출된 시점을 기준으로 시스템의 구성이 될 때 에너지변화량을 고려하여 힘을 계산하는 방식이 일부 연구자들에 의해 제시되었다[3]. 이때 에너지변화에 기여하는 부분은 영구자석이 시스템에 포함되면서 외부의 매질과 상호작용하는 부분만 취함으로써 계산이 되는데, 얻어지는 전자기력의 분포는 저자들에 의해 상호전자기력분포로 주장되고 있다[3].

등가자화소스법은 자하나 자화전류를 이용하는 방법으로 자성매질을 등가의 자하 또는 자화전류밀도로 각각 대체하고 외부자계에 의해 받는 힘을 계산하는 방식이다. 자하에 의한 전자기력밀도 표현은 다음과 같다[5].

$$\mathbf{F} = \int_V \rho_{mr} \mathbf{H}_{ext} dV + \int_S \sigma_{ms} \mathbf{H}_{ext} dS \quad (4)$$

여기서  $\rho_{mr} = -\mu_0 \nabla \cdot \mathbf{M}$ ,  $\sigma_{ms} = \mu_0 \mathbf{M} \cdot \mathbf{n}$ 로서 자하  $\mathbf{M}$ 에 대하여 각각 체적자하밀도와 표면자하밀도를 나타내며,  $\mathbf{H}_{ext}$ 는 외부에서 등가자하에 인가되는 외부자계의 세기이다. 한편, 자화전류에 의한 전자기력은 다음과 같이 표현된다[5].

$$\mathbf{F} = \int_V \mathbf{J}_{mr} \times \mathbf{B}_{ext} dV + \int_S \mathbf{J}_{ms} \times \mathbf{B}_{ext} dV \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{J}_{mr} = \nabla \times \mathbf{M}$ ,  $\mathbf{J}_{ms} = \mathbf{M} \times \mathbf{n}$ 로서 각각 체적자화전류밀도와 표면자화전류밀도를 나타내며,  $\mathbf{B}_{ext}$ 는 등가자화전류에 인가되는 외부자속밀도의 세기이다. 식 (4)와 (5)에서 표현되는 것처럼 영구자석의 비투자율이 선형인 경우 등가체적자하와 등가체적자화전류는 존재하지 않게 된다. 대부분의 영구자석은 비투자율이 거의 공기에 가까우므로 본 논문에서는 영구자석의 투자율이  $\mu_0$ 인 경우에 대해서만 고려하기로 한다. 따라서 등가자화소스에 의한 전자기력밀도는 표면에만 존재하게 되며 자화방향에 따라 전자기력밀도의 분포는 두 방법에서 상반된 분포를 지니게 된다.

## 3. 가상공극개념에 의한 영구자석에서의 전자기력밀도

가상공극개념을 도입하여 영구자석에서의 전자기력을 계산하기 위하여 유한요소법과 결합한 등가자하 및 등가자화전류에 의한 방법, 그리고 켈빈의 전자기력 계산법을 이용하기로 한다[6][7][8]. 하나의 요소를 중심으로 주변에 가상공극을 분포시키면 각각의 요소는 개별단위의 대상체가 되어 전자기력은 하나의 요소단위로 계산된다. 이를 해당 요소의

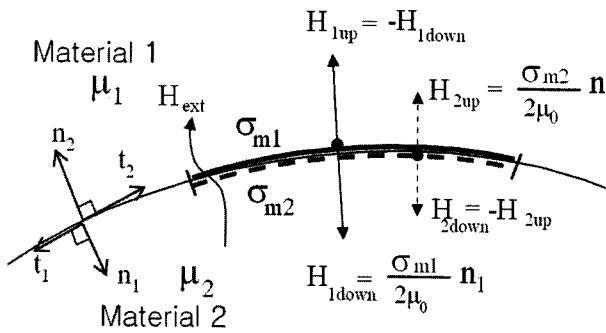


그림 1 가상공극 도입 시 등가자하밀도 및 외부자계의 세기.  
Fig. 1 Equivalent magnetic charge density and external magnetic field intensity with virtual air-gap.

체적으로 나누어서 체적전자기력 밀도를 계산하게 되며 각 영역의 전자기력밀도 분포를 적분하면 대상체에 작용하는 전체힘을 계산하게 된다. 다음에 이들 방법에 대한 전자기력 밀도(f) 표현을 간략히 소개한다.

매질내부에 가상공극을 도입함으로써 서로 마주보게 되는 경계면이 생성되며 이곳에 분포하는 등가자하  $\sigma_{m1}$ 과  $\sigma_{m2}$  및 등가자하에 미치는 외부자계의 세기  $H_{ext}$ 에 대한 개략도를 그림 1에 나타내었다. 그림 1에서 가상공극이 도입되면 자하에 작용하는 외부자계의 세기는 가상공극이 도입되기 전 자하에 미치는 자계의 세기에 마주보고 있는 자하에 의해 생성된 자계의 세기가 더해져 다음과 같이 표현된다.

$$H_{ext} = (H_1 + H_2) / 2 + H_{2up} \quad (6)$$

여기서  $H_1$ ,  $H_2$ 는 가상공극이 형성되기 전 각각 영역 1과 영역 2의 경계면에서 얻어지는 자계의 세기이며,  $H_{2up}$ 은  $\sigma_{m2}$ 에 의해 위쪽으로  $\sigma_{m1}$ 에 대해 작용하는 자계의 세기이다. 이를 이용하여 최종적으로 외부자계로 인하여  $\sigma_{m1}$ 에 작용하는 전자기력밀도는 다음과 같이 표현된다[6].

$$f = \sigma_{m1} H_{ext} \quad (7)$$

가상공극개념을 도입한 자화전류에 의한 전자기력밀도의 경우도 위와 유사한 개념을 도입하여 정리하면 그림 2와 같은 개략도로 표현된다. 가상공극이 도입되면서 자화전류에 작용하는 외부자속밀도는 가상공극이 도입되기 전 자화전류에 미치는 자속밀도에 마주보고 있는 자화전류에 의해 생성된 자속밀도가 더해지며 다음과 같이 표현된다.

$$B_{ext} = (B_1 + B_2) / 2 + B_{2up} \quad (8)$$

여기서  $B_1$ ,  $B_2$ 는 가상공극이 형성되기 전 영역 1과 영역 2의 경계면에서 얻어지는 자속밀도이며,  $B_{2up}$ 은 그림 2에서처럼  $J_{2s}$ 에 의해  $J_{1s}$ 에 작용하는 자계의 세기이다. 이를 이용

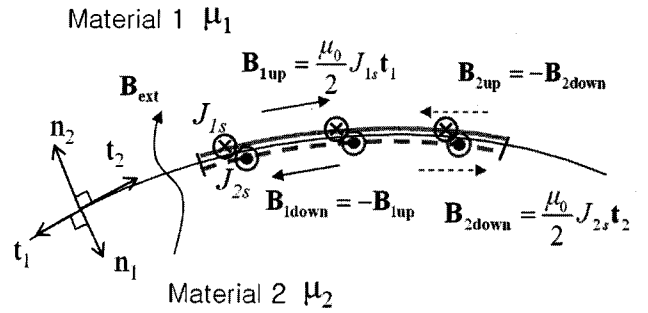


그림 2 가상공극 도입 시 등가자화전류밀도 및 외부자속밀도의 세기.

Fig. 2 Equivalent magnetizing current density and external magnetic field density with virtual air-gap.

하여 최종적으로 분포하는 외부자속밀도  $B_{ext}$ 에 대하여  $J_{1s}$ 에 생성되는 전자기력밀도는 다음과 같이 표현된다[7].

$$f = J_{1s} \times B_{ext} \quad (9)$$

결과적으로 위의 두 전자기력 계산을 유한요소 해석과 접목하게 되면 각 유한요소들은 공기로 둘러싸이게 되며 요소단위의 전자기력이 구해지게 된다.

마지막으로 일반적으로 사용되는 자기쌍극자 모델을 기초로 하여 유도된 켈빈의 전자기력밀도 표현식은 다음과 같다[8].

$$f = (\mu_0 M \cdot \nabla) H_{ext} \quad (10)$$

이를 가상공극개념과 접목을 하기 위해서 외부자계를 어떻게 구하는가에 대한 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해서 우선 그림 3에서 보는 바와 같이 식 (7)에서 계산된 외부자계의 세기를 각 요소면에서 구한다. 식 (10)에서 알 수 있듯이 힘을 계산하기 위해서는 결국 외부자계에 대한 미분값을 구하여야 하는데 이를 수행하기 위해서는 각 변의 중점을 요소변의 외부자계 값으로 하는 절점에 부여하여 내부 삼각형 요소를 생성하고 요소의 형상함수를 사용하여 미분을 수행하였다.

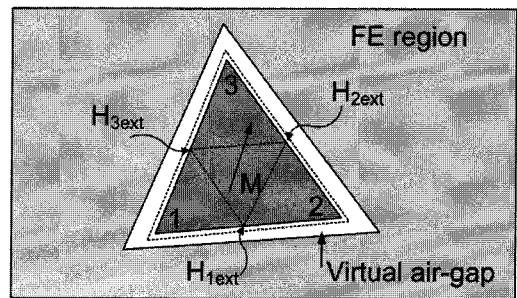


그림 3 가상공극과 외부자계의 미분을 계산하기 위해 도입된 내부 삼각형요소.

Fig. 3 Virtual air-gap and an inner element for calculating the gradient field of  $H_{ext}$ .

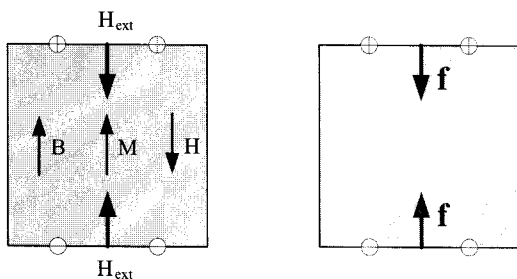
#### 4. 전자기접촉력과 상호체적력밀도 분포의 고찰

앞서 언급한 바와 같이 전자기력밀도의 분포에 관해서는 지금까지도 논란이 되어 오고 있는데, 가상공극에 의한 상호체적력밀도 분포와 접촉시의 전자기력의 추이를 이해하기 위해서 기존의 자하에 의한 전자기력밀도와 자화전류에 의한 전자기력밀도에 대해서 고찰하기로 한다.

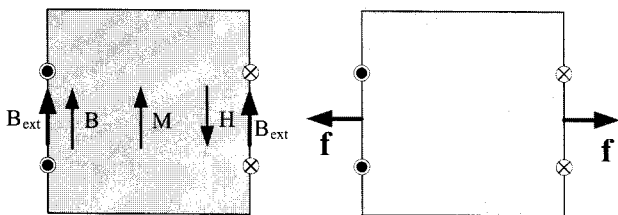
영구자석을 선형매질로 가정하게 되면 자화는 일정하고 식 (4)와 식 (5)에서 자하 및 자화전류에 의한 전자기력 기여는 단지 표면에만 형성된다. 이때 자계의 분포와 전자기력밀도의 분포 형태는 그림 4와 같다. 그림 4(a)는 자하에 의한 전자기력밀도 분포를, 그림 4(b)는 자화전류에 의한 전자기력밀도 분포를 나타낸다. 기존의 방식에 의해 구해진 두 전자기력밀도 형태는 모두 표면에서만 얻어지게 되며, 자화방향에 대해 고정된 면에만 전자기력밀도가 분포하게 된다. 즉, 자하의 경우 자화방향에 대해 수직인 면에만 자하가 분포하며, 자화전류의 경우에는 자화의 방향에 대하여 수평면에만 자화전류가 분포하기 때문에 전자기력밀도 분포는 두 방법에서 완전히 다른 분포를 가지게 된다.

이러한 상황에서 외부의 자성체가 접촉되는 경우, 특히 투자율이 1보다 큰 매질이 접촉되면 전자기력밀도 값이 왜곡이 되어 전체 전자기력이 틀리게 구해진다. 하지만 자화의 방향과 접촉면이 놓여있는 구조에 따라 자하와 자화전류의 형태가 완전히 상반된 분포를 보여주기 때문에 자성체가 어느 면에 부착되는가에 따라 전자기접촉력에 왜곡을 주는 정도가 틀리게 된다.

한편, 영구자석의 상호전자기력밀도 분포는 전체전자기력 분포에서 순수전자기력분포를 제거함으로써 얻어지게 된다. 이는 가상변위의 원리에 의해 처음 제시되었으며, 결과적으로 얻어지는 분포는 상호작용력의 관점에서 물리적으로 받



(a) 영구자석에서의 자하와 전자기력 분포



(b) 영구자석에서의 자화전류와 전자기력 분포

그림 4 영구자석의 등가자화소스법에 의한 전자기력분포  
 Fig. 4 Distributions of magnetic force density in permanent magnet by using the equivalent magnetizing sources.

아들여질 수 있는 형태이나 다른 방법들과 마찬가지로 접촉 시에는 왜곡이 발생하여 계산방식에 있어 일관성을 유지하기 어렵게 된다.

본 논문에서 제시하는 가상공극 개념을 도입한 전자기력 밀도 분포는 기본적으로 요소별 단위로 얻어지는 체적력밀도의 분포이다. 이를 토대로 가상변위법에서 고려된 바와 같이 상호작용력의 분포를 계산하기 위해 외부자성체가 존재하는 경우 얻어지는 전자기력밀도로부터 영구자석이 외부의 자성체가 없는 경우 자체 자화에 의해 얻어지는 전자기력밀도의 분포를 빼어 순수하게 서로 상호작용하는 전자기력밀도의 분포를 계산하였다. 결과적으로 얻어진 상호체적력밀도는 물리적으로 타당성을 지니고 있으며 접촉 시에도 왜곡없이 일관되게 적용될 수 있음을 다음 절의 수치해석 예를 통해 보이고자 한다.

#### 5. 수치해석 결과

영구자석에 대하여 가상공극을 적용한 전자기력의 유효성을 보이기 위해 해석모델들에 대해 전체전자기력, 전자기접촉력, 체적력밀도, 상호체적력밀도분포 특성에 대해서 논의하기로 한다. 해석 대상모델은 영구자석대 영구자석, 영구자석대 철의 접촉면이 형성되는 모델, 그리고 영구자석이 서로 접촉되어 구성된 Halbach 시스템에 대하여 전체힘과 체적력밀도분포에 대해서 논의하기로 한다.

##### 5.1 영구자석대 영구자석

그림 5는 서로 다른 힘의 방향이 작용하는 해석 모델들로서 그림 5(a)는 수평힘으로 작용하는 경우, 그림 5(b)는 수평과 수직힘으로 작용하는 경우를 비교하기 위한 해석모델이다. 영구자석의 자화의 세기는 모두 x방향으로 잔류자속 밀도 1 [T]를 부여하였다. 표 1은 전체힘을 나타내는데, 모든 방법에서 거의 동일한 결과를 보여주어 가상공극개념을 도입한 전자기력방법에서도 유효하게 적용되고 있음을 보여준다.

그림 6(a)는 자체자화에 의한 전자기체적력밀도 분포를 나타낸 것으로 공간상에 왼쪽의 영구자석만 존재할 때 얻어지는 분포이다. 그림에서 보듯이 매우 불규칙한 패턴이 얻어지는데 이는 요소에 대해서 자계가 들어오고 나가는 형태로 개별요소의 힘이 결정되는데 내부의 요소들이 불규칙하게 놓여 있기 때문에 기인한다. 이 상태에서 또 다른 하나의 영구자석이 놓이게 되면 이에 반응하여 새로운 전자기력밀도 형태가 분포하는데 여기서 6(a)의 전자기력밀도 형태를 빼면 그림 6(b)와 같은 최종적으로 상호체적력밀도 분포를 구할 수 있게 된다. 물론 상호체적력밀도 분포를 모두 적분하여 계산한 전체전자기력도 동일한 전체힘을 나타낸다.

이와 동일한 방법으로 해석모델 5(b)에 대해서도 상호체적력밀도를 계산할 수 있으며 이를 그림 7에 나타내었다. 두 방법에서 알 수 있듯이 상호작용력은 불균일하게 존재하는 자체 자화에 의한 체적력밀도를 뺀으로서 전자기력이 작용하는 방향으로 유의미한 체적력밀도를 보여줌을 알 수 있다.

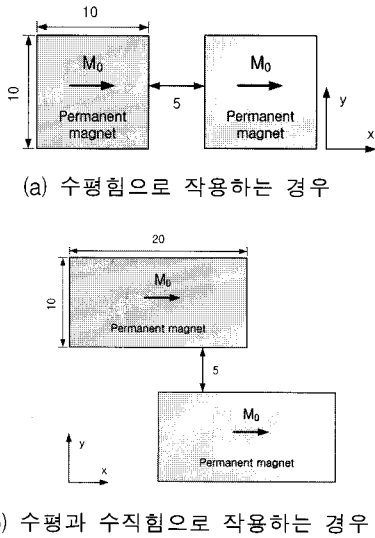


그림 5 영구자석대 영구자석 해석모델 (단위: [mm]).  
Fig. 5 Analysis models with two permanent magnets (Unit: [mm])

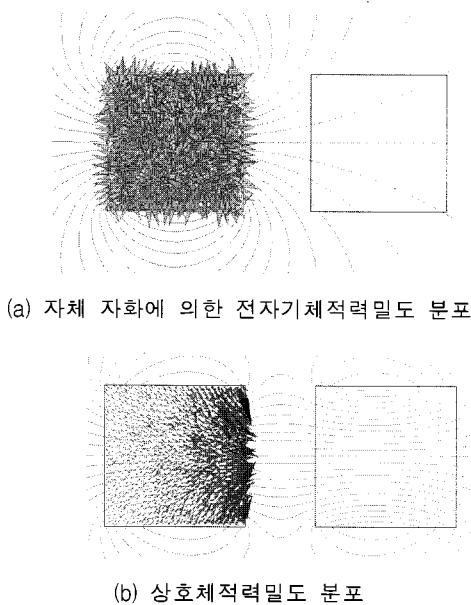


그림 6 해석모델 5(a)에 대한 전자기체적력밀도 분포.  
Fig. 6 Distribution of electromagnetic body force density for Fig. 5(a).

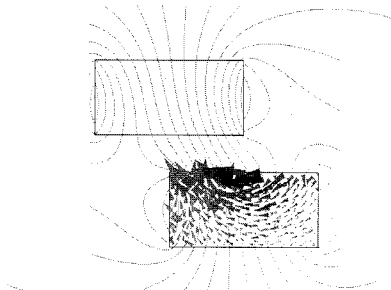


그림 7 해석모델 5(b)에 대한 상호체적력밀도 분포.  
Fig. 7 Distribution of interaction body force density for Fig. 5(b).

표 1 전체 전자기력의 비교

Table 1 Comparison of total forces

해석모델	Model: 5(a)		Model: 5(b)	
	Fx [N/m]	Fy [N/m]	Fx [N/m]	Fy [N/m]
계산방법				
맥스웰응력법	699	-471	203	
가상변위법	698	-470	206	
자하법	699	-466	205	
자화전류법	699	-471	205	
켈빈력-VA*	699	-466	205	
자하법-VA*	699	-465	205	
자화전류법-VA*	699	-471	205	

\* VA: 가상공극개념을 도입한 방법임을 표시

5.2 영구자석대 철

그림 8은 영구자석이 자기시스템에 사용될 때 주로 연자성재질과 혼용되어 사용되는데 이때 필수적으로 접촉현상이 일어나며 이러한 경우를 고려하기 위해 각기 다른 자화방향에 따른 전자기접촉력과 상호체적력밀도 분포를 계산하였다. 그림 8(a)와 그림 8(b)는 각각 x와 y 방향으로의 자화를 지닌 영구자석을 해석한 것으로 두 경우에 대한 전체전자기력을 그림 9에 나타내었다.

그림 9에서 보는 바와 같이 자화방향과 접촉면에 상관없이 가상공극 개념을 적용한 해석방법들(그래프에서 확장명 "-VA")에서는 모두 일관되고 동일한 힘의 추이를 보여주고 있다. 특히 그림 4에서 고찰한 바와 같이 세면이 요크부분과 접촉하기 전까지 그림 8(a)는 자하에 의한 전자기력 계산법이 유의미한 결과를 주게 되며 그림 8(b)는 자화전류에 의한 전자기력계산법이 유의미한 결과를 주게 되므로 이들 방법과 가상공극개념을 도입한 방법들과 비교하여 결과적으로 타당함을 알 수 있다. 이러한 양상은 그림 9(a)와 그림 9(b)에서 잘 나타나있다.

그림 10은 영구자석과 요크가 접촉을 이루면서 움직이는 경우에 대해서 공극이 6mm일 때 상호체적력밀도 분포를 도시하고 있다. 자속이 집중하는 곳에 큰 상호체적력밀도가 분포하게 되며 전자기력장이 형성된 유의미한 형태를 얻을 수 있다.

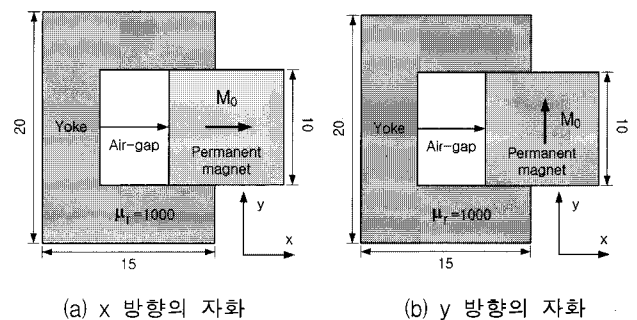
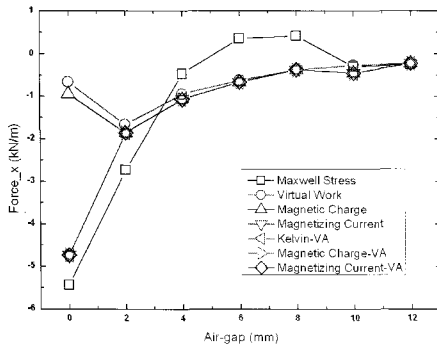
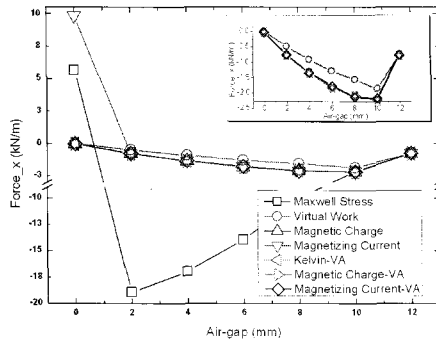


그림 8 자화방향에 따른 해석모델 (단위: [mm]).  
Fig. 8 Analysis models with two different directions of magnetization (Unit: [mm]).



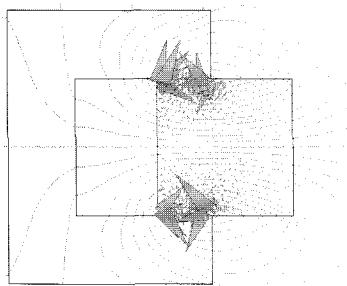
(a) 해석모델 8(a)에 대한 전자기력



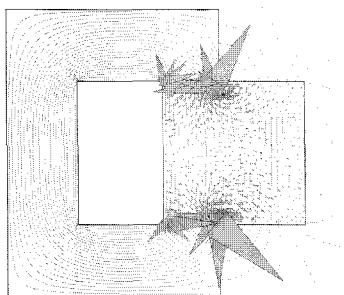
(b) 해석모델 8(b)에 대한 전자기력

그림 9 공극에 따른 전체 전자기력의 비교.

Fig. 9 Comparison of total forces with air-gaps.



(a) 해석모델 8(a)에 대한 상호체적력밀도 분포도



(b) 해석모델 8(b)에 대한 상호체적력밀도 분포도

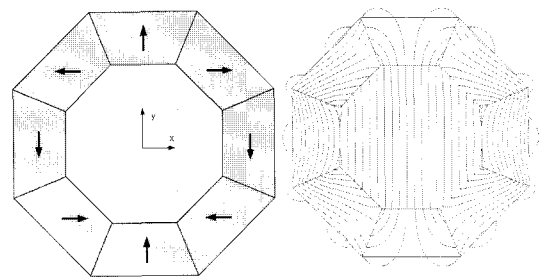
그림 10 공극 6mm인 경우 상호체적력밀도 분포도

Fig. 10 Distributions of interaction body force density with the air-gap of 6mm.

### 5.3 Halbach 시스템의 상호체적력밀도

그림 11은 균등자계형성을 위해 구성된 Halbach 영구자석 시스템을 나타낸다. 각 영구자석은 그림 11(a)의 자화의 방향으로 잔류자속밀도 1 [T]를 가지며, 이때 벡터등자기포텐셜의 분포를 그림 11(b)에 나타내었다.

그림 12는 Halbach 시스템에서 가상공극개념을 도입한 전자기력계산법에 의한 상호체적력밀도 분포를 나타낸 것이다. 서로 같은 극성이 인접한 경우 상호체적력밀도는 척력의 분포가 존재하며 다른 극성이 인접한 경우 인력의 분포가 존재하여 영구자석에 작용하는 힘의 경향을 상호체적력밀도를 통해 쉽게 파악할 수 있다.



(a) 해석모델

(b) 벡터등자기포텐셜 분포

그림 11 Halbach 해석모델 및 벡터등자기포텐셜 분포.

Fig. 11 Halbach analysis model and distribution of vector equipotential.

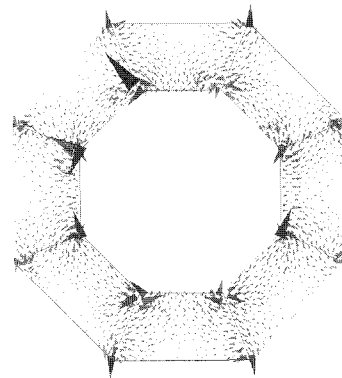


그림 12 Halbach 시스템의 상호체적력밀도 분포.

Fig. 12 Interaction body force density for a Halbach system.

## 6. 결 론

그동안 주로 연자성체에 대해 그 유효성이 보고되어온 가상공극개념을 도입한 전자기력해석 방법을 경자성체에 대해 체계적으로 적용을 하여 그 타당성을 입증하였다. 유한요소법과 접목할 경우 하나의 요소는 공기로 둘러싸인 하나의 매질로 간주되어 개별적으로 힘이 구해진다. 이렇게 함으로써 두 다른 매질이 접촉할 경우의 전체전자력과 매질 내부에 존재하는 체적력의 분포를 정량적으로 구할 수 있다. 특히, 시스템을 구성하고 있는 자성체의 분포힘을 계산할 경우, 가상공극 적용시 해석상의 어려움으로 여겨지던 불규칙한 체적력밀도 분포에서 영구자석의 자체자화가 가지는 체

적력밀도 분포를 제거함으로써 전자기력이 가해지는 방향으로 매질간 상호작용개념만 추출된 유의미한 전자기체적력을 도출하였다. 본 논문에서는 이를 상호체적력밀도로 언급하였으며, 결과적으로 가상공극법과 결합한 전자기력밀도 계산법은 접근방법의 종류에 상관없이 유일한 체적력밀도와 상호체적력밀도 분포로 구해지게 된다. 향후 이를 전자기시스템의 기계적 변형 및 진동문제에 접목하여 실험적으로 이에 대한 타당성을 규명하고자 한다.

**감사의 글**

이 논문은 2008학년도 경북대학교 신입교수정착연구비에 의하여 연구되었음

**참 고 문 헌**

[1] J. L. Coulomb, "A methodology for the determination of global electromechanical quantities from a finite element analysis and its application to the evaluation of magnetic forces, torques and stiffness," IEEE Trans. Magn., vol. MAG-19, no. 6, pp. 2514-2519, 1983.

[2] Se-Hee Lee, Xiaowei He, Do-Kyung Kim, and Shihab Elborai, Hong-Soon Choi, Il-Han Park, and Markus Zahn, "Evaluation of the mechanical deformation in incompressible linear and nonlinear magnetic material using various electromagnetic force density methods," Journal of Applied Physics, 97, 10E108, 2005.

[3] L. H. De Medeiros, G. Reyne, G. Meunier, J. P. Yonnet, "Distribution of electromagnetic force in permanent magnets," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 3012-3015, September 1998.

[4] L. H. De Medeiros, G. Reyne, G. Meunier, J. P. Yonnet, "Comparison of global force calculations on permanent magnets," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 34, no. 5, pp. 3560-3563, September 1998.

[5] Federico Delfino, Andrea Manella, Paolo Molfino, and Mansueto Rossi, "Numerical calculation of total force upon permanent magnets using equivalent source method," COMPEL, vol. 20, no. 2, pp. 431-447, 2001.

[6] Hong-Soon Choi, Se-Hee Lee, and Il-Han Park, "General formulation of equivalent magnetic charge method for force density distribution on interface of different materials," IEEE Trans. on Magnetics, vol. 41, no. 5, p. 1420-1423, May 2005.

[7] Hong-Soon Choi, Il-Han Park, and Se-Hee Lee, "Generalized equivalent magnetizing current method for total force calculation of magnetized bodies in contact," IEEE Trans. on Magnetics, vol.42, no.4, pp. 531-534, April 2006.

[8] Se-Hee Lee, Hong-Soon Choi, and Il-Han Park, "Introducing the virtual air-gap scheme to the Kelvin force densities with external and total field," IEEE Trans. on Magnetics, vol.43, no. 4, pp. 1457-1460, April 2007.

[9] K. Reichert, H. Freun, and W. Vogt, "The calculation of force and torque within numerical magnetic field calculation method," Proceedings on COMPUMAG, pp. 64-74, 1976.

**저 자 소 개**



**이 세 희 (李世熙)**

1996년 숭실대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 성균관대학교 전기전자컴퓨터학부 졸업(박사). 2002년-2005년 성균관대학교 정보통신기술연구원 선임연구원, 2003년-2006년 미국 메사추세츠공대(MIT) 포스닥연구원, 2006년-2008년 한국전기연구원 선임연구원, 2008년-현재 경북대학교 전기전자컴퓨터공학부 조교수.  
주 관심분야: 전자기다중물리(전자기-열-유체-구조), 전자장수치해석, 방전해석 및 응용, 전자기마이크로/나노유체.  
Tel : 053-950-5511  
Fax : 053-950-5511  
E-mail : shlees@knu.ac.kr