

영구자석 전동기에서의 체적력 분포 관찰

최홍순, 김영선, 박일한
성균관 대학교 전기전자공학과

Body Force Distribution in Permanent Magnet Motors

Hong-soon Choi, Young-sun Kim, Il-han Park
Department Electronic and Electrical Engineering, Sungkyunkwan University

Abstract – 전기기기에서의 전자기력 계산은 기기의 성능뿐 아니라 기계적 변형, 진동을 예측하는 주요 파라미터이다. 지금까지는 Maxwell stress tensor법이나 자하법, 가상변위법등에 의해 전체 전자기력 또는 토크를 계산하여 왔으나, 이 방법들은 모두 분포 전자기력을 계산할 수 없었다. 본 논문에서는 기기 내부의 체적 전자기력분포를 계산하는 방법을 제시하고, 그 예로써 영구자석형 전동기의 전자기력 분포를 보여준다. 체적력의 계산은 저자에 의해 제안된 가상공극법에 기반하여 구현할 수 있다.

1. 서 론

전기기기 내의 전자기력 계산은 기계역학적인 관찰을 위해서는 필수적인 과정이라 할 수 있다. 기계적 변형, 진동, 토크 등의 계산과 자성체 또는 유전유체의 거동 해석을 위해서는 전체에 미치는 전자기력 또는 분포 전자기력이 반드시 필요하다. 공학자가 많이 사용 사용하는 방법으로 Maxwell stress tensor법, 자하법, 자화전류법, 가상변위법등이 있는 데, 이 방법들은 주로 전체 전자기력 또는 전체 토크를 구하는 데 유효함이 보여 왔다. Maxwell stress법에 의한 전자기력을 구하기 위해 적분하는 과정에서 표면으로 표현된 적분경로를 따라 적분을 행할 때, 그 경로를 따라 반드시 공극 또는 진공이어야 한다는 것이 지금까지 일반적으로 받아들이는 원리이다. 두 개의 자성체가 접하고 있을 경우, 각 자성체에 미치는 전자기력을 구하려면 그 사이에 모델링 측면에서 공기층을 만들어 주어야 수치적인 계산이 가능하였다. 본 저자는 [1][2]에서 자성체가 접하고 있는 경우라도 전자기력을 계산할 수 있는, 일반화된 자하법(generalized magnetic charge method)과 일반화된 자화전류법(generalized magnetizing current method)을 성공적으로 제안하였다. 여기서는 등가소스인 자하 또는 자화전류가 접하고 있는 면에서도 상쇄되어 없어지지 않는다는 가정을 도입하여 접촉 상태에서도 각 자성체의 전자기력을 계산 한 것이다. 자하 또는 자화전류가 자화(magnetization)을 모델링하기 위한 가상적인 방법이고, 이러한 등가 소스가 분자 또는 원자 내부에서 발생한다고 할 때, 두 원자간에 완전한 접촉이 이루어져 표면으로 등가화된 소스가 상쇄 된다고 보는 것은 애초에 무리가 있는 가정이라 볼 수 있다. 상쇄된다고 보기 보다는 서로 일정한 거리를 두고 모두 존재하되, 그 효과가 일정 거리 이상에서 상쇄된다고 보는 것이 더욱 합리적이라 볼 수 있는 것이다. 일반화 되는 과정을 관찰하면 마치 자성체의 접촉면 사이에 가상적으로 공극이 있는 것과 같은 수식이 유도됨을 논문 [3]에서 보였다. 본 논문에서는 이러한 일반화를 유한요소의 각 요소에 적용하여, 요소 각각에 미치는 전자기력을 구하는 방법과 그 결과를 전동기에 적용하여 보여주고 그 의미에 대해 토론하고자 한다. 그림 1에는 본 논문에서 예제로서 사용하는 SPM형과 IPM형 전동기를 보여준다.

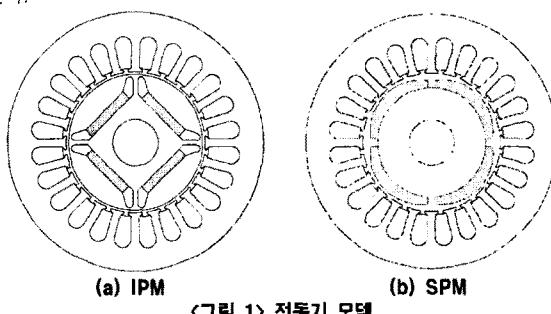


그림 1) 전동기 모델

2. 본 론

2.1 가상공극에 의한 체적력 계산

자성체 접촉면 또는 표면에서의 가상공극은 다음과 같다 [3].

$$\mathbf{H}_s = (\mu_r H_n + M_{0n}) \mathbf{n} + H_t \mathbf{t} \quad (1)$$

여기서, H_n 은 필드세기의 수직방향, H_t 는 필드세기의 수평방향 성분, μ_r 는 비투자율, M_{0n} 은 전류자화 수직성분을 각각 의미한다. 이 식은 또

한 다음과 같이 나타내어 질 수 있다.

$$\mathbf{B}_s = B_n \mathbf{n} + \frac{B_t - B_{n\perp}}{\mu_r} \mathbf{t} \quad (2)$$

여기서, 자속밀도의 수직방향 성분은 B_n , 수직방향은 B_t , $B_{n\perp}$ 는 전류자속밀도의 수평방향 성분이다. 이러한 가상공극을 그림 2(a)와 같이 삼각요소의 세변에 모두 존재하는 것으로 보고, 이 요소의 전체 전자기력을 구하고 요소의 체적으로 나누어 주면, 요소 내의 평균 체적력 밀도의 뜻을 갖게 된다. 가상공극은 자성체 내의 요소에 대해 공극과 접하고 있는 상황을 만들어 주므로, 기존의 자하법과 자화전류법 등을 적용할 수 있을 뿐만 아니라, Maxwell stress법을 적분 경로를 그림 2(b)와 같이 하여 적용이 가능하다.

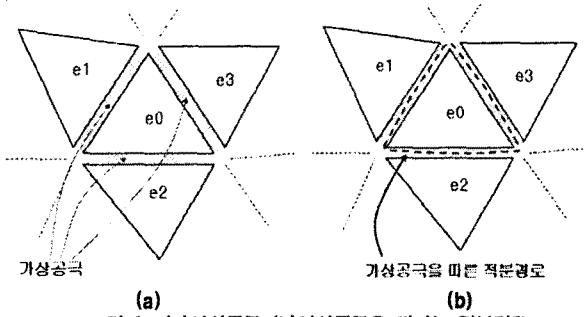


그림 2) (a) 가상공극 (b) 가상공극을 따른 적분경로

2.2 체적력의 의미

다음 절의 전동기 체적력 분포에서도 보여 지겠지만, 전동기 내의 체적력은 표면에 치우치지 않은, 자성체 내부에 비교적 끌고온 분포하고 있다고 보아야 할 것이다. 이러한 분포는 그 동안 많은 연구자가 제시한 분포와는 전혀 다른 양상을 띠고 있다. 전자기력을 수식을 유도해 넣을 때, 모든 개념은 기본적으로 체적력으로부터 출발함에도 불구하고, 최종적인 전자기력의 분포는 항상 표면에 표면전자기력 밀도로 분포하고, 체적력 성분은 없거나 아주 작은 값만을 보일 뿐이었다 [4]~[6]. 중요한 관찰점의 하나로, 본 논문에서 제시하는 체적력은 전자기력 계산법과 상관없이 항상 일정한 체적력으로 결과가 나온다는 것이다. 반면에 표면력으로 분포된 것은, 자하법, 자화전류법, Maxwell stress법 등에 따라 다른 분포를 보인다. 체적력이 계산법에 상관없이 일정하게 나오는 것은, 전체 전자기력이 계산법에 상관없이 일정하게 나오는 상황과 동일하며, 전자기력 유도의 기본 출발 개념과도 비교컨대 일관성이 있고, 타당성이 있다고 말할 수 있다. 과연 체적력과 표면력은 어느 것이 진리일까라는 의문이 이 시점에서 대두된다. 아니면 모두 진리이거나 특정 상황에 따라 다른 선택이 가능할 것인가? 그리고 Maxwell stress에서 적분 경로가 공기로 한정하였는데, 왜 그러한 제한이 수식의 유도에서는 보여지지 않음에도 불구하고 등장하게 되었는가? 그리고 많은 연구자들이 사용하고 있는 Maxwell stress의 표면력(stress)은 물리적인 의미가 과연 없는 것일까? 그리고 자하법, 자화전류법에서 표현되는 표면력은 의미가 있을 것인가? 다르게 표현되는 전자기력 수식은 왜 모두 동일한 결과를 보이는 것인가? 이러한 논란들은 전자기학이 성립된 이후 자성체의 전자기력을 계산하고자 하는 많은 물리학자와 전기공학자에 의해 끊임없이 제기되어 오고 있는 고질적인 논란거리이다. 현재 이 부분에 대한 수학적, 물리적 검토가 본 저자들에 의해 이루어지고 있으나, 본 논문에서는 지면상의 이유와 정교한 결론내림을 위해 다루지 않기로 한다. 조만간 다른 논문 작업을 통해 발표가 될 것이다. 일단 여기서는 수치적으로 계산이 가능하게 된 체적력을 있는 그대로 받아들이고 사용하기로 한다.

자연상에 존재하는 대표적인 체적력으로는 중력을 들 수 있다. 중력도 질량 m 에 대해 작용하는 중력장 \mathbf{G} 로서 $\mathbf{f} = m\mathbf{G}$ 와 같이 표현이 가능하다. 전기장이 전하 q 에 작용하는 쿨롱 전자기력 $q\mathbf{E}$ 와 비교하면 유사한 형태를 띠고 있음을 알 수 있다. 그러나 전자기장에서는 문제가 좀 더 복잡한 양상을 띤다. 우선 전하 또는 자하가 $+/-$ 값을 모두 가질 수 있으므로, 항상 당기는 방향의 힘을 가지는 중력에 비해 당기는 힘과 반발하는 힘을 모두 가지

는 커다란 차이점을 가지고 있다. 자성체나 유전체 내의 경우 전자기력은 더욱 미묘하고 복잡하다. Kelvin의 체적력 수식 $\mu_0(\mathbf{M} \cdot \nabla) \mathbf{H}$ 은 자성체 내에서의 필드 변화가 체적력 발생의 근원이 됨을 의미하고 있다. 즉, 자성체의 경우 일정한 방향과 크기를 갖는 외부 필드에 놓여질 경우, 전체 전자기력을 0이 되지만, 불균일한 외부 필드하에서는 자성체 내부의 필드도 불평형하게 될 것이므로, 전체전자기력이 발생되는 것이다. 일정한 풍력장에서 질량이 놓일 경우에 그 것에 중력이 발생하는 현상과는 완전히 상반된 결과인 것이다. 참고로, 체적력을 표현하는 Kelvin력도 실제로 구현하는 과정에서는 지금까지 표면력으로 대부분 표현되는 결과를 보이고 있다.

2.3 전동기 체적력 분포

그림 3에는 본 논문에서 제시한 방법으로, IPM 전동기에 최대 전류를 인가하였을 때의, 전자가 체적력의 분포를 나타내었다. 자성체 표면에 일부 표면력이 강하게 나타나고 있지만, 내부에 비교적 고루 분포하고 있다고 볼 수 있다. 자성체 표면의 체적력 분포의 원인은 아직 정확히 알 수 없으나, 실제 물리적인 현상 또는 수치적인 오차등의 원인에 의한 것이라 잠정 결론 내릴 수 있을 것이다. 요소에서 체적력을 구하게 되면 일정량 불규칙한 분포를 보이게 되는 데, 그림 3의 분포는 이러한 분포를 정규화한 결과이다.

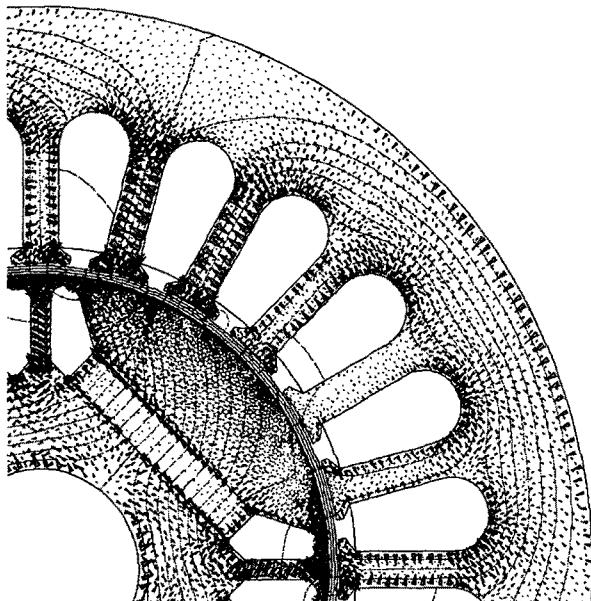


그림 3 IPM 전동기의 체적력 분포

2.4 부위별 토크 기여도 관찰

그림 4에는 SPM 전동기의 반지름의 증가에 따른 누적된 토크의 기여를 나타내었다. 최종 공극에서의 반지름에서는 회전자의 전체 토크가 계산이 된다. 그림 5에는 IPM 전동기의 원주 방향에 따른 각 부분에서의 토크 기여를 나타내었다. 이 그래프를 적분하면 전체 토크가 된다. 그림 6에는 IPM 전동기의 티쓰에 따른 토크 기여를 나타낸다. 그림 4-그림 6은 모두 전동기의 최대전류를 인가하였을 때의 토크 분포이다.

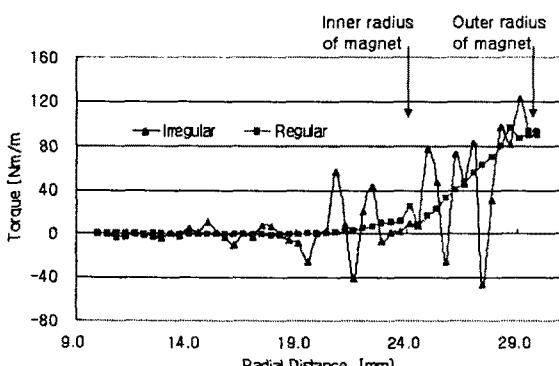


그림 4 SPM 전동기의 반지름에 따른 누적 토크 기여도

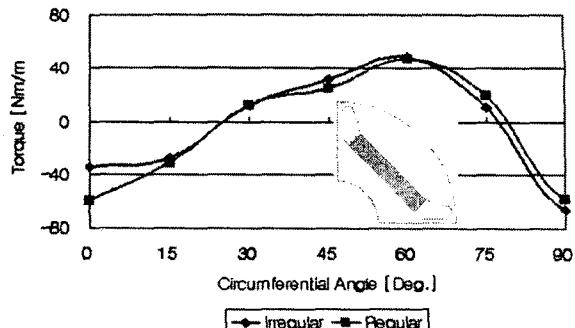


그림 5 IPM 전동기의 원주방향에 따른 토크기여

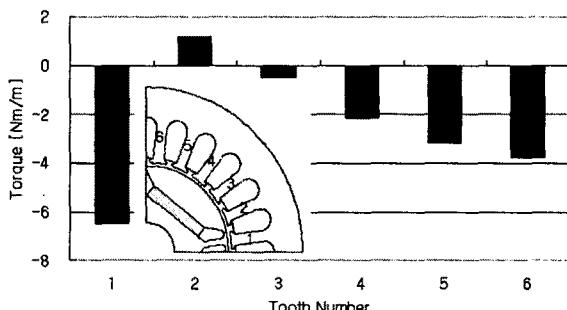


그림 6 IPM 전동기의 티쓰에 따른 토크기여

3. 결 론

본 논문에서는 기기 내부의 체적 전자기력분포를 계산하는 방법을 제시하고 그 결과를 제시하였다. 예로써 IPM형과 SPM형의 영구자석형 전동기의 전자기력 분포를 제시하였다. 체적력의 계산은 저자에 의해 제안되었던 가상공극법에 기반하여 구현할 수 있음을 보였으며, 각 부위에서의 전자기력 또는 토크에 기여하는 성분을 계산할 수 있음을 보였다. 체적력은 기계적 변형, 진동 등의 계산과 전자기적 현상을 이해하는 데 많은 기여를 할 것으로 생각한다.

감사의 글
본 연구는 한국학술진흥재단 젊은과학자연구활동지원사업의 “전기차 동차 전동기 파라미터 최적 추출을 통한 동력계 회로 통합시뮬레이션 기법 개발” 과제에 의한 지원으로 수행되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] H. S. Choi , S. H. Lee, and I. H. Park, "General formulation of equivalent magnetic charge method for force density distribution on interface of different materials," *IEEE Trans. Magn.*, vol.41, no.5, pp. 1420–1423, May 2005.
- [2] H. S. Choi, I. H. Park, and S. H. Lee, "Generalized Equivalent Magnetizing Current Method for Total Force Calculation of Magnetized Bodies in Contact", *IEEE Trans. Magn.*, Vol.42, No.4, pp.531-534, April 2006
- [3] H. S. Choi, I. H. Park, and S. H. Lee, "Concept of virtual air gap and its application for force calculation," *IEEE Trans. Magn.*, vol.42, no.4, pp. 663–666, April 2006.
- [4] K. Delaere, W. Heylen, K. Hameyer, and R. Belmans, "Local magnetostriction forces for finite element analysis," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3115–3118, Sep. 2000.
- [5] L. H. Medeiros, G. Reyne, and G. Meunier, "A unique distribution of forces in permanent magnets using scalar and vector potential formulations," *IEEE Trans. Magn.*, vol. 36, no. 5, pp. 3345–3348, Sep. 2000.
- [6] L. Vandevelde, T. G. D. Hilgert, and J. A. A. Melkebeek, "Magnetostriction and magnetic forces in electrical steel: finite element computations and measurements," *IEE Proc.-Sci. Meas. Technol.*, vol. 151, vo. 6, pp. 456–459, Nov. 2004.