

사다리꼴 형태 부상용 전자석의 유효길이 평가 방법

* 구대현, 강도현, 신판석

한국전기연구소 전력기기연구실

EVALUATION METHOD FOR THE EFFECTIVE LENGTH OF TRAPEZOIDAL-TYPE ELECTROMAGNET

Koo, Dae Hyun, Kang, Do Hyun and Shin, Pan Seok

Power Apparatus Lab., KERI

ABSTRACT

An evaluation method for the effective length of electromagnet - which has U-shape in frontview and trapezoidal in side view - is presented. Using 2D FEM, 2 analysing models are introduced for calculating effective length of the magnet : the front model is using the normalized equi-pole face area of the magnet and the side model using the normalized equi-magnetic circuit. The ratio of the effective length to the length of bottom plate (core) comes out 1.25 - 1.30. In addition, 3D FEM analysis has been done and a proto-type test model is manufactured to verify the analysing method. The ratio by the experiment appears 1.2, which is reasonably in good agreement with the suggested numerical results.

1. 서론

자기부상열차용 전자석의 형태는 TRANSRAPID, Birmingham People Mover, KIMAG-01 등에서 사용된 중속형 전자석과 BSST나 대전 EXPO용 자기부상열차에서 사용되는 횡속형 전자석으로 대별된다. 횡방향 자속형태의 전자석은 효율의 향상과 기계적인 안정을 위해서 대개 측면 pole의 형상이 사다리꼴이 된다. 이와같이 전자석이 정면에서 U자형이고 측면에서 사다리꼴의 형태를 이룰 때 설계나 해석과정에서 그 유효길이의 정확한 산정이 필요하며, 이를 위해서 이론적인 계산과 해석적인 방법으로 예측할 수 있을 것이다. 그러나 보다 정확한 산정을 위해서는 정밀한 3차원 해석과 그 실증 실험이 필수적으로 뒷받침 되어야 하므로 본 연구에서는 등가자로 단면적해석과 측면해석에 의한 FEM 2D 해석, FEM 3D 해석 등으로 예측방법을 제시하였으며 Proto-type model의 실증실험 결과를 해석결과와 비교 분석하여 유효길이 평가 방법의 타당성을 검토하였다.

2. 전자석 설계 및 2차원 해석 모델

2.1 전자석 설계

부상용 전자석 설계시 부상력은 전자석과 Rail 사이의 공극에 대한 자계에너지의 변화량으로 표시되어 일반적으로 부상력 F 는

$$F = \frac{1}{2} B^2 \frac{t l}{\mu_0} K \quad (1)$$

$$B = \frac{H \mu_0}{2g_0} \quad (2)$$

여기서, B : 공극자속밀도, t : 전자석 Pole 폭, l : 전자석 길이, K : 누설계수 H : 기자력, μ_0 : 공기 무자율, g_0 : 공극길이

식 (1)에서와 같이 부상력 계산을 위해서 정확한 l 값을 알아야 하기 때문에 pole의 측면이 사다리꼴의 형상을 이룰 때는 밑면과 윗면 사이에 존재하는 유효길이를 예측하는 것이 필요하며 이것은 최적설계 정수들을 결정하는데 주요한 Parameter가 될 것이다.

2.2. 2차원 해석 모델

그림 1은 2차원 해석모델로 본 연구에서 적용되는 모델이 z 방향으로 길이가 긴 경우 2차원 해석의 결과가 타당성을 가지고 있으나 그림 2와 같이 철심의 측면을 Hw 만큼 연장시켰을 경우 2차원 해석결과에서 사다리꼴을 고려할 수 없기 때문에 3차원 실제모델 해석 결과와 상당한 차이를 가진 것이 예상되며 정확한 설계를 하기 위하여 유효길이를 Bottom plate 길이 l_1 과 Rail 대면 길이 l_2 사이에서 예측할 필요성이 있다.

그림 2는 전자석 측면 형상으로 부상력을 증가시키고 전자석 연결부위의 급격한 자속변화의 방지와 하중의 균등분배를 위하여 철심을 길이방향으로 Hw 만큼 증가시켰다.

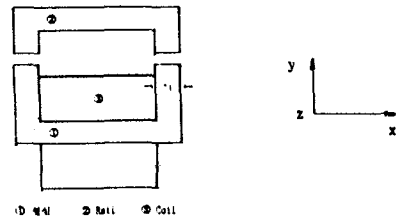


그림 1. 2차원 전자석 해석 모델

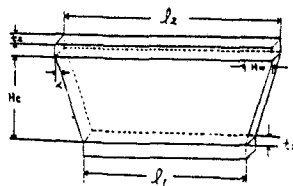


그림 2. 전자석 측면 형상

2.2.1 등가자로 면적 (정면) 해석법

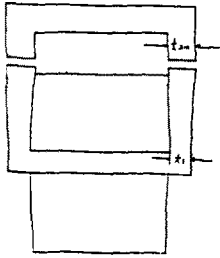


그림 3. 유효길이 계산 모델

그림 2에서 철심의 Bottom 부분과 Pole face 에서의 자로단 면적은 각각 다음과 같다.

Bottom 부분 자로단면적 = $t_1 l_1$ (3)

Pole face 자로단면적 = $t_2 l_2$ (4)

그림 3은 그림 2의 형상에서 유효길이를 계산하기 위한 모델로 z방향의 길이를 l_1 으로 한 경우 식 (4)의 pole face 면적을 그림 3 에서 Pole face 폭을 t_{2n} , 길이를 l_1 으로 설정한 경우의 면적과 같이 두면 t_{2n} 은 다음과 같다.

$$t_{2n} = \frac{t_2 l_2}{l_1} \quad (5)$$

즉, 그림 3은 그림 2의 경우와 자로 형태는 다르지만 Pole face 면적을 동일하게 한 경우 이다.

따라서, 그림 2와 그림 3의 해석모델 경우 실제 부상력이 동일하다고는 단정할 수 없지만 Pole face 면적이 같기 때문에 부상력이 같다는 가정하에 유효길이비율 식 (6)과 같이 단위 길이에 대한 실제 Pole폭인 경우 (그림 1)의 부상력에 대한 등가 pole폭인 경우 (그림 3)의 부상력비로 나타낼수 있다.

$$\text{유효길이비} = \frac{\text{그림 3의 부상력}}{\text{그림 1의 부상력}} \quad (6)$$

따라서 유효길이는 l_1 x 유효길이비로 산정 할 수 있다.

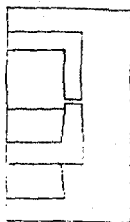


그림 4. 2차원 해석모델 (실제 제작 전자석의 단면) ($t_1 = 34[\text{mm}]$, $t_2 = 28[\text{mm}]$, $H_w = 0[\text{mm}]$, 공극 = $9[\text{mm}]$)

본 연구와 관련하여 제작된 Proto-type 전자석 모델은 $t_1 = 34 [\text{mm}]$, $t_2 = 28 [\text{mm}]$, 공극 = $9 [\text{mm}]$, $H_w = 87 [\text{mm}]$, $l_1 = 476 [\text{mm}]$, $l_2 = 650 [\text{mm}]$, 기자력 = $9,900 [\text{AT}]$ 인데 그림 4는 H_w 를 고려하지 않은 2차원 해석 정면 (단면)을 나타내고 그림 5는 $H_w = 87 [\text{mm}]$ 를 Pole face 등가 폭 $t_{2n} = 38.2 [\text{mm}]$ 로 고려한 해석모델이다.

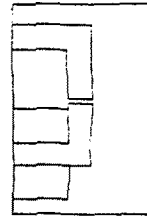
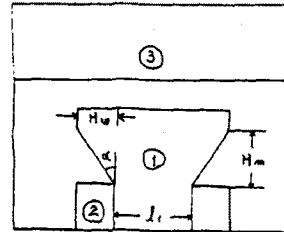


그림 5. 유효길이 계산모델 ($t_1 = 34[\text{mm}]$, $t_{2n} = 38.2[\text{mm}]$, $H_w = 87[\text{mm}]$, 공극 = $9[\text{mm}]$)

2.2.2 측면 해석법



① CORE ② COIL ③ RAIL
그림 6. 측면 해석 모델

그림 6은 측면해석 모델로 정면에서 철만을 절단한 후 전자석의 자로를 절친 형태가 되는데 H_w 를 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 해석해서 유효길이비를 산정하고자 한다.

3. 전자석의 부상력 계산
전자석 Coil에 직류전류를 인가했을 때 해석영역내의 자기 Vector potential A의 방정식은 Maxwell의 전자방정식에 의해 다음 식 (7)과 같이 유도 될 수 있다.

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot} A \right) - J = 0 \quad (7)$$

여기서 μ 는 투자율, J는 입력 전류밀도를 나타낸다. 식 (7)을 2차원 장으로 취급할때 A 및 J의 z축 성분만을 고려하여, $A_x = A_y = 0$, $J_x = J_y = 0$ 이라 놓고 A_z 성분이 z방향으로 일정하다고 가정하면

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = J_z \quad (8)$$

와 같은 Poisson 방정식이 된다. 식 (8)을 풀기 위한 경계조건은 그림 4의 경우 외각 해석영역에 식 (9)와 같이 Neumann 조건으로 설정하고 그림 6의 경우 Dirichlet 조건을 해석 영역 좌우 중앙에 식 (10) 과 같이 설정했다.

$$\frac{\partial A}{\partial n} = 0 \quad (9)$$

$$A = 0 \quad (10)$$

식 (8)을 유한요소법을 이용하여 Vector potential A가 정해지면 자속밀도의 B_x , B_y 는 식 (11)에 의해서 식 (12)로 주어진다.

$$B = \text{Curl } A \quad (11)$$

$$B_x = \frac{dA_z}{dy}, \quad B_y = \frac{-dA_x}{dx} \quad (12)$$

한편, Rail과 전자석 Core 사이에 적용하는 힘은 가상 변위의 원리에 의해서 구했다.

3.1 등가자로 면적 (정면) 해석 결과

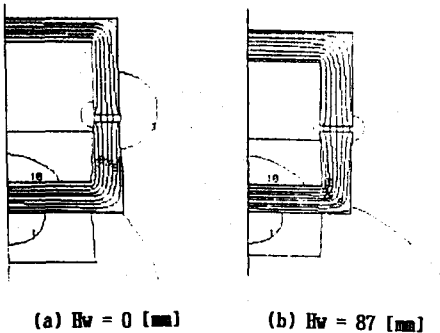


그림 7. 등 Vector potential lines.

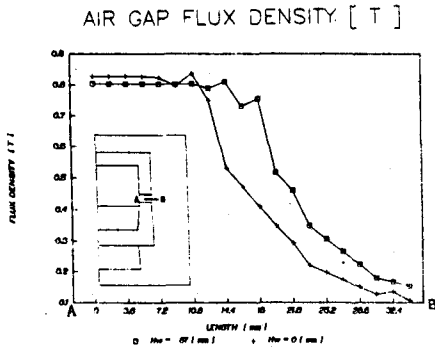


그림 8. 공극자속 밀도

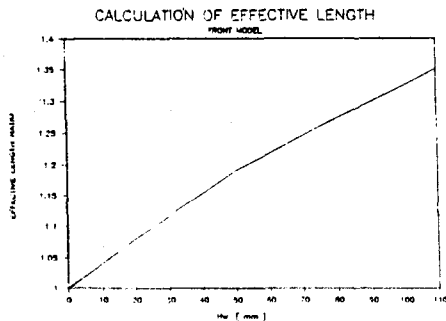


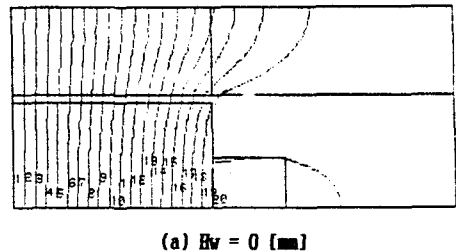
그림 9. 유효길이 비

그림 7(a)와 7(b)는 $H_w = 0, 87[\text{mm}]$ 인 경우 등 Vector potential lines 을 나타내고 있는데 그림 7(b)의 경우 Vector potential 최대치와 최소치는 각각 0.4604×10^{-1} , $-0.657 \times 10^{-2} [\text{wb/m}]$ 로 그림 7(a)의 0.4079×10^{-1} , $-0.692 \times 10^{-2} [\text{wb/m}]$ 보다 크게 나타났다. 이것은 t_{2a} 이

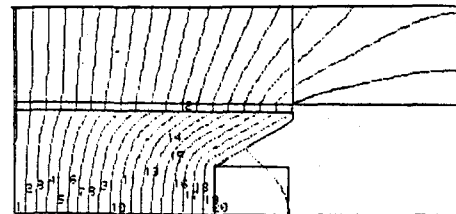
증가함에 따라 자기저항이 감소하고 자속이 증가함을 의미한다.

한편, 그림 8은 그림 7(a)와 7(b)의 경우 공극자속 밀도를 나타내고 있는데 자속밀도 최대값은 각각 $0.82[\text{T}]$, $0.80[\text{T}]$ 로 그림 7(a)의 경우 큰 값을 나타내고 있으나 평균치가 그림 7(b)의 경우가 크기때문에 부상력이 크게 나타났다. 그림 9은 유효길이 비 계산 결과로 $l_1 = 476 [\text{mm}]$, $l_2 = 34 [\text{mm}]$, $l_3 = 28 [\text{mm}]$ 인 경우 H_w 의 변화량에 대한 유효 길이 비로 $H_w = 50 [\text{mm}]$ 까지 H_w 가 $10[\text{mm}]$ 증가함에 따라 약 4%의 부상력이 증가하고 있고 $H_w = 50 [\text{mm}]$ 에서는 약간 포화현상이 나타남을 알 수 있다. H_w 를 더욱 증가시키면 포화현상이 크게 작용하여 부상력 증가 비율이 줄어들 것으로 판단된다.

3.2 측면해석 결과



(a) $H_w = 0 [\text{mm}]$



(b) $H_w = 87 [\text{mm}]$

그림 10. 등 Vector potential lines

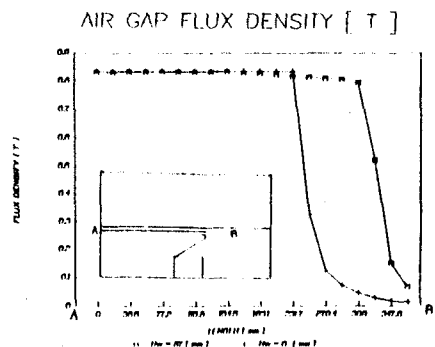


그림 11. 공극자속 밀도

그림 10(a), 10(b)는 $H_w = 0, 87 [\text{mm}]$ 인 경우 측면 해석 방법으로 유효길이비를 산정하기 위한 계산 모델로 해석 모델이 좌우 대칭이므로 절반 만 선택했으며 $H_w = 0, 87 [\text{mm}]$ 인 경우 등 Vector potential을 나타내고 있는데 그림 10(b)의 경우 Vector potential 최대치와 최소치는 각각 0.3435×10^{-1} , 0.3469×10^{-3} 로 그림 10(a)의 0.258×10^{-1} , 0.261×10^{-3} 보다 크게 나타났다. 또한, 그림 11은 공극에서의 자속밀도 값으로 최대값은 서로 비슷한 $0.83 [\text{T}]$ 값을 나타내고 있으나 $H_w = 87 [\text{mm}]$ 인 경우 평균치가 크므로 부상력이 증가 되었다.

그림 12는 $l_1 = 476$ [mm]인 경우 H_v 의 증가에 대해 측면 해석에 의한 유효길이버로 정면해석과 비슷한 결과를 나타내고 있다.

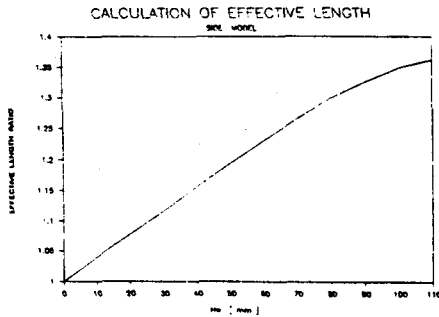


그림 12. 유효길이버

4. 유효길이 계산 결과 비교 검토

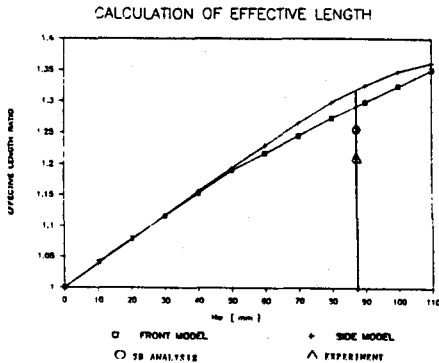


그림 13. 유효 길이버 결과

그림 13은 2차원 정면해석과 측면해석, 한국전기연구소 보유 전자장 해석 프로그램 EMAS의 3차원해석에 의한 유효길이버와 시작품의 시험 결과를 나타내고 있다. 정면해석과 측면해석에 의한 유효길이버는 $H_v = 50$ [mm]까지는 거의 비슷한 값을 가지고 있으며 $H_v = 50$ [mm] 이상에서는 측면해석 모델의 비가 약간 증가하면서 포화됨을 알 수 있다.

본 연구와 관련하여 제작된 proto type 부상용 전자석은 $H_v = 87$ [mm]인데 정면해석 그림 4의 경우 4,897 [N], 그림 5의 경우 6,317 [N]으로 부상력비는 1.29이고 측면해석에서 z축 방향길이를 30 [mm]로 정할때 그림 10(a), 10(b)의 경우 부상력이 각각 8,063 [N], 10,622[N]로 부상력비가 1.32로 되어 측면해석과 정면해석에 의한 유효길이버는 거의 비슷한 값을 가지고 있다.

한편, 그림 13에서 한국전기연구소 보유 EMAS 3차원해석 프로그램으로 $H_v = 87$ [mm]인 경우 계산한 결과 유효길이버가 1.25로 나타내고 있다. 3차원 해석모델에서는 Pole의 면적뿐만 아니라 전면누설, 전면에서 Coil의 형태 등의 영향으로 2차원 해석에서 고려 할수 있는 Fringe effect 등이 계산결과로 나타나기 때문에 부상력비가 낮게 나타났다. 또한, 사다리꼴의 모양과 직사각형 모양의 부상력을 실험한 결과 유효길이버가 1.20로 3차원 해석보다 약 5% 정도 낮게 나타났다. 예상대로 2차원 해석보다는 3차원 해석이, 3차원 해석보다는 실증실험 결과가 더 낮은 유효길이버를 가지고 있으며 측면 사다리꼴의 형태와 단면이 다양하므로 여러가지 요인들이 고려되어 유효길이버를 결정해야 되며 본연구에 이용된 Proto-type model의 유효길

이버는 1.2 - 1.25 사이라고 한다면 불림이 없을 것이다.

5. 결론

자기부상용 전자석의 형태가 원방향으로 U자형이고 중방향으로 사다리꼴의 형태를 이룰때 그 유효길이를 선정하기 위하여 FEM 2D에 의한 등가자로 단면적 (정면) 해석법과 측면해석법, FEM 3D 해석법, Proto-type model의 실험 결과 등을 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 가. 2D FEM 해석에 의한 등가자로 단면적 (정면) 해석법과 측면법에 의한 유효길이버는 비슷한 형태를 나타내었다.
- 나. 3D 해석법에 의한 유효길이버와 2D 법에 비해 약 5% 정도 적다.
- 다. 실험에 의한 유효길이버가 해석적인 방법에 의한 유효길이버보다 약 5% 정도 적으며 본 연구의 Proto-type model에서 유효길이버는 1.2 - 1.25 사이에서 선정할 수 있다.

앞으로 각 해석법에 의한 유효길이버 차이점의 원인을 파악하여 정확한 유효길이버 계산방법의 정립이 필요하며 실험에서의 차이점을 보완해야 할것으로 사료된다.

* 후기

본 연구는 과학기술처의 국책연구과제인 '자기부상열차 개발' 과제의 일환으로 재정지원을 해주신 과학기술처와 자기부상열차 개발 국책연구사업단에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 임달호, "전기계의 유한요소법", 동명사 1987
- [2] 한국전기연구소, "자기부상 및 추진 시스템 기술개발" 1991
- [3] 한국전기연구소, "한국형 자기부상 모듈 개발" 1991