2001년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집(2001.4.19~21)

자기 부상형 정밀 저울의 자계와 힘을 선형화하기 위한 최적 설계

안광옥, 이창환, 임창환, 정현교
서울대학교 전기공학부

Optimal Design of Magnetic Scale for Linearizing Field and Force

Kwang-Ok An, Chang-Hwan Lee, Chang-Hwan Im, Hyun-Kyo Jung
School of Electrical Engineering , Seoul National University

Abstract - 자기 부상력을 이용한 정밀 저울은 화학 실험실과 같이 정밀한 측정을 필요로 하는 곳에서 사용되고 있다. 이 정밀 저울은 저울의 측정대가 초기 위치로부터 이동하는 거리와 자속 밀도와의 상관관계를 이용하여 무게를 구하는 방식을 사용한다. 그런데 기존의 정밀 저울은 힘이나 자속 밀도가 측정대의 이동하는 거리에 대해서 비선형적인 특성을 갖고 있기 때문에 거리에 대한 무게를 계산하는데 어려움이 있었고, 따라서 이동 가능 범위가 제한되어 있다는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이런 문제점들을 해결하기 위해서 자기 부상형 정밀 저울의 자석 표면에 부가적인 금속 구조를 덧붙인 새로운 모델을 제안하였고, 유한요소법과 진화 알고리즘을 사용하여 금속 구조의 형태를 최적화하였다. 그 결과 기존 자기 부상형 정밀 저울의 문제점인 비선형적 특성을 해결하고, 이동 가능 범위도 향상시켜 더 간단하면서도 정확하게 무게를 계산할 수 있게 하였다.

1. 서 론

정밀 저울은 실험실과 같이 정밀한 측정을 필요로 하는 곳에서 주로 사용된다. 이런 정밀 저울에는 2가지 방식이 있는데 첫 번째 방식은 측정대의 위치는 고정시키고 전류를 변화시켜서 무게를 측정하는 방식이다. 이 방식은 광센서(optimal sensor)와 같은 민감한 위치 센서를 가지고, 저울의 측정대가 어느 특정한 위치에 고정되어 있는가를 계속 체크한다. 그리고, 측정대의 위치가 변화되면, 전류의 양을 변화시켜서 측정대의 위치를 원상태로 복원시킨다. 이 때, 전류의 변화량을 측정하는 방식으로 무게를 계산한다. 그러나, 이 방식은 변화되는 전류를 측정하는 것과 저울의 오 동작시 시스템의 안정도를 유지하는 것이 어렵다는 단점이 있다. 두 번째 방식은 전류의 양을 고정시키고 측정대의 위치를 변화시키면서 무게를 측정하는 방식이다. 이 방식은 우선, 측정대의 위치가 달라진 경우, 홀 센서(hall sensor)등을 이용하여 저울의 측정대가 초기 위치에서 얼마나 이동되었는가를 알아내고, 그 거리의 변화량을 이용하여 무게를 측정하게 된다. 그런데, 이 저울은 힘이나 자속 밀도가 측정대의 이동하는 거리에 대해서 비선형적인 특성을 갖고 있기 때문에 거리에 대한 무게를 계산하는데 어려움이 있다. 또, 이런 특성으로 인해 기존 자기 부상형 정밀 저울의 경우, 저울을 설계할 때 이동 가능 범위나 구조가 제한되어 있다는 단점이 있었다. 본 논문에서는 이러한 점들을 해결하기 위해서 자기 부상형 정밀 저울의 자석의 표면에 부가적인 금속 구조를 덧붙인 새로운 모델을 제시한다. 그리고, 유한 요소법(FEM ;Finite Element Method)과 (1+3) 진화 알고리즘(ES ;Evo lution Strategy)을 사용하여 금속 구조의 형태를 최적화하고 이를 기존 모델의 특성과 비교 분석한다. 그리고, 최적화된 결과를 바탕으로 기존 모델의 문제점들을 해결하여 측정대의 이동거리에 대한 자속 밀도나 힘이 선형적인 특성을 갖게 되었고, 측정대의 이동 가능 범위 또한 증가하였음을 검증하도록 한다.

2. 최적화 및 해석 방법

2.1 유한 요소의 정식화

이 논문에서 다루고 있는 자기 부상형 정밀 저울은 축대칭 구조를 갖는다. 따라서, 축대칭 구조의 유한 요소 정식화 과정이 필요하다. 그런데, 기존의 정식화 방법을 이용하면, $r = 0$ 부근에서 해가 정확하게 구해지지 않는 문제점이 있었다. 이 문제점을 해결하기 위해서 새로운 벡터 포텐셜을 도입한 새로운 정식화 과정을 이용하였다 [1].

2.1.1 새로운 축대칭 정식화 과정

우선, 새로운 변수 W를 (1)과 같이 정의한다.

$$W = rA \tag{1}$$

그 다음 일반적으로 사용하는 (r,z) 좌표계를 ($s=r^2$, z) 좌표계로 변환한다. 그러면 일차 삼각형 요소에서 포텐셜은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$W(s) = a+bs+cz \text{ (a,b,c는 상수)} \tag{2}$$

Galerkin법에 의해서 정식화를 하면 다음 (3)과 같은 선형 연립방정식이 성립한다.

$$\sum_j S_{ij} W_j - b_i = 0 \quad (i=1,\ldots,N) \tag{3}$$

이 때,

$$S_{ij}(B) = \int_D \underline{B}[\omega_i] \cdot \underline{B}[\omega_j] dD$$

$$b_i = -\int_D J\omega_i r^{-1} dD - \int_S H_t \omega_i r^{-1} dS$$

$$\underline{B}[\omega_i] = [\frac{-1}{\sqrt{s}} \frac{\partial \omega_i}{\partial z}, 2\frac{\partial \omega_i}{\partial s}]$$

$$dD = 2\pi r\, drdz = \pi\, dsdz$$

여기서 $A(r,z)$는 벡터 포텐셜, $W(r,z)$는 노드의 값 $\omega_i(r,z)$는 형상 함수를 나타낸다.
그리고, J는 전류 밀도, H_t는 자계의 접선방향 성분, dD는 축대칭의 체적 성분, $\underline{B}[\omega_i]$는 유도 연산자를 뜻한다.

2.2 진화 알고리즘의 적용

위에서 설명한 방법을 이용해서 구한 힘이나 자속 밀도가 거리와 선형적인 특성을 갖게 하기 위해서,(1+3) 진화 알고리즘을 적용하였다. 최적화 방법 중 목적함수가 복잡해서 전체 최적점을 찾기가 어려운 경우 적절한 확률 분포에 따른 난수를 발생시켜 설계 공간을 탐색하여 전체 최적점을 찾는 확률론적 방법을 사용한다. 이러한

확률론적인 방법에는 시뮬레이트 어닐링(simulated annealing), 유전 알고리즘(genetic algorithm), 진화 알고리즘(evolution strategy : ES)등이 있다. 이 중 진화 알고리즘은 재생산(reproduction), 선택(sele ction), 적응(annealing)의 세 가지 과정으로 이루어지는 방식이다. 첫째로 재생산은 부모개체를 기본으로 유전적 구속범위 내에서 변이를 일으키는 과정이다. 재생산을 통하여 발생된 자식개체의 목적함수와 부모개체의 목적함수를 비교하여 우수한 개체를 다음 세대의 부모 개체로 선택하는 선택 과정은 자연계의 적자 선택의 원리를 모사한 것이다. 마지막으로 변화된 주위환경에 적응하는 과정은 금속의 제련과정 중 풀림 과정을 모사한 알고리즘인 시뮬레이티드 어닐링을 적용한 부분이다. 이렇게 시뮬레이티드 어닐링과 유전 알고리즘의 장점을 결합한 진화 알고리즘은 전체 최적점 탐색이 가능할 뿐 아니라, 알고리즘이 비교적 간단하면서도 수렴 속도가 빠른 탐색 기법이다. 따라서, 본 논문에서는 새로운 모델을 진화 알고리즘을 기반으로 최적화 하였고, 더 좋은 최적값을 얻기 위해서 (1+1) ES보다 (1+3) ES를 이용하여 결과의 정확도를 높혔다. [2-5]

3. 최적화 과정 및 결과

3.1 기존의 정밀 저울

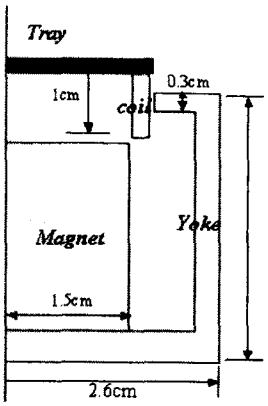


그림 1. 기존 자기 부상형 정밀 저울의 치수

그림 1은 최적화 하기 전, 기존 자기 부상형 정밀 저울의 모형과 저울의 치수를 나타낸 것이다. 저울은 축대칭 구조를 가지고 있으며 Magnet과 Yoke 사이의 공간에서 coil이 이동하는 거리를 이용하여 무게를 측정하는 구조이다. 측정대(Tray) 밑에 부착한 홀 센서(Hall sensor)를 이용해 자속 밀도 변화를 측정하고, 측정대의 이동 거리를 추정한다.

3.2 최적화 과정

진화 알고리즘에서 사용된 목적함수는 다음 (4)와 같다.

$$object = \frac{1}{1+\sum_i |F_{oi} - F_i|} + \frac{1}{1+\sum_i |B_{oi} - B_i|} \qquad (4)$$

여기서 F_{oi}는 선형화된 힘의 값, F_i는 힘의 값, B_{oi}는 선형화된 자속 밀도의 값, B_i는 자속 밀도의 값이다. (4)의 식의 값이 '2'가 될 때, 거리에 대한 두 값의 상관 관계가 완전히 선형 관계를 이룬다. 이 목적함수 값이 만족되도록 (1+3)ES를 이용해서 최적화된 금속 구조를 설계했다. 덧붙인 금속 구조와 코일에 근접해 있는 Yoke의 끝부분을 6개의 변수로 설정한 후 (1+3)ES를 이용해 모양을 바꿔가면서 최적화 하였다. 그림 2는 설계변수의 위치를 나타내고 있다.

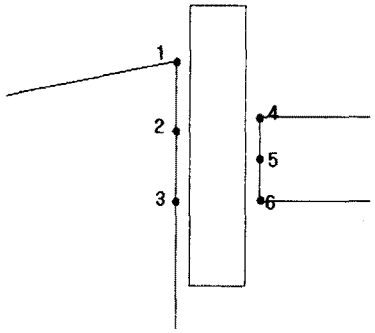


그림 2. 설계변수의 위치

3.3 최적화된 결과

표 1은 6개의 설계변수의 최소값, 최대값, 초기값 및 최적값을 나타내고 있다. 각각의 값의 단위는 [mm]이고, 원통 좌표계에서의 r 좌표 값을 나타낸다. 최소값과 최대값은 설계 변수의 초기 조건으로 주어진 것이고, 초기값은 ES에서 startimg시 일정수의 임의의 개체들을 발생시키고, 발생 개체 중에서 우수한 개체를 선택한 것이다. 그리고, ES의 최종 결과가 최적값이 된다.

표 1. 설계변수의 범위 및 최적값

설계변수의 번호	최소값	최대값	초기값	최적값
1	10	15	12.5	14.79
2	10	15	12.5	13.67
3	13	15	11	14.82
4	18	20	19	19.22
5	18	20	19	19.98
6	18	20	19	19.81

그림 3은 최적화된 모델이다.

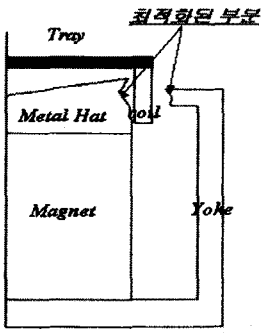
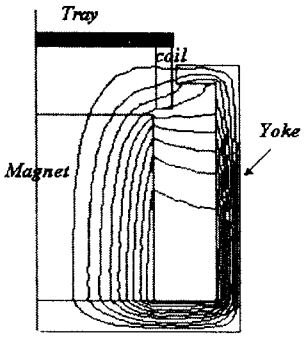
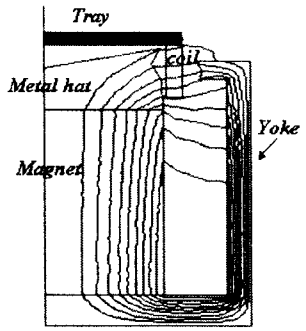


그림 3. 최적화된 자기 부상형 정밀 저울

그림 4는 기존의 모델(a)과 최적화된 모델(b)의 자속의 흐름을 나타낸다



(a) 기존의 모델



(b) 최적화된 모델

그림 4. 기존 모델과 최적화된 모델의 자속 밀도 패턴

그림 5는 저울의 측정대가 초기 위치에서부터 변화될 때 힘과 거리의 관계를 나타낸다.

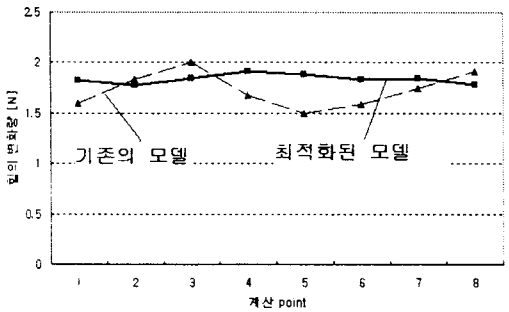


그림 5. 거리와 힘의 변화량의 관계

여기서, ▲ : 기존의 모델 / ■ : 최적화된 모델을 나타낸다. 이 그림에서 각각의 계산 포인트는 저울의 측정대가 1mm단위로 이동할 때 이동 전의 측정된 힘과 이동 후의 측정된 힘의 크기의 차를 나타낸다. 따라서 일정한 크기를 나타낼수록 더 선형적인 특성을 나타냄을 알 수 있다. 최적화된 모델은 기존의 모델에 비해 힘과 거리의 상관 관계가 선형적임을 검증했다.

그림 6은 저울의 측정대가 변화하는 동안 자속 밀도와 거리의 관계를 나타낸다.

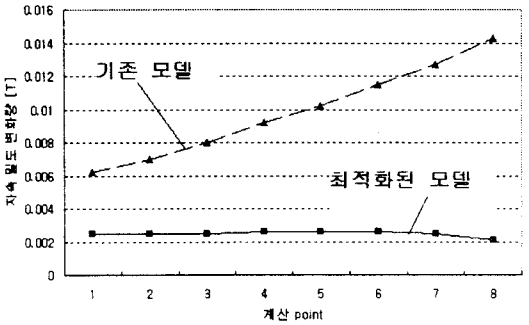


그림 6. 거리와 자속 밀도 변화량의 관계

여기서, ▲ : 기존의 모델 /■ : 최적화된 모델을 나타낸다. 이 그림 역시, 각각의 계산 포인트는 저울의 측정대가 1mm단위로 이동할 때 이동 전의 측정된 자속 밀도와 이동 후의 측정된 자속 밀도의 크기의 차를 나타낸다. 이 그래프로부터 최적화된 모델이 기존의 모델에 비해 거리와 자속 밀도의 관계가 더 선형적인 특성을 보임을 확인할 수 있다.

위와 같은 결과를 종합해 볼 때, (1+3)ES로 금속 구조를 덧붙인 새로운 모델을 최적화하면 거리에 대해 힘이나 자속 밀도의 상관 관계가 선형적으로 나옴을 알 수 있고, 측정대의 이동 가능 범위 또한 기존 모델에 비해서 훨씬 증가했다는 것도 확인할 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 비선형적인 특성으로 인해 무게를 측정하는데 어려움이 있었던 자기 부상형 저울을 유한 요소법과 (1+3)ES를 이용하여 최적화한 새로운 모델을 제안한다. 최적화된 모델은 거리에 대해 힘이나 자속 밀도가 선형적인 특성을 나타냈고, 이로 인해서 저울의 측정대의 이동 범위도 크게 증가했다. 향후 본 논문에서의 최적화 결과를 기반으로 하여 민감도법 등을 이용한 보다 발전된 형상 최적화를 적용하고, 보다 선형성을 가지는 저울의 설계를 수행할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] F. Henrotte, H. Hedia, N. Bamp, A. Genon, A. Nicolet and W. Legrons, "A New Method for Axisymmetrical Linear and Nonlinear Problem", IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 29 No.2, pp. 1352 - 1355, 1993

[2] 박정태, "피지결정법을 이용한 전기자동차용 유도전동기의 다중목적 최적설계", 서울대학교 공학박사 학위논문,1997

[3] Charles S. Beightler, Don T. Phillips, Dorglass J. Wilde, "Foundations of Optimization", 1980

[4] Manfred Kasper, "Shape Optimization by Evolut ion Strategy", IEEE Transactions on Magnetics , Vol. 28, Vol. 2, March, 1992

[5] 김민규, "전기자동차 구동용 3상 유도전동기의 다중목적 최적설계", 서울대학교 공학석사 학위논문, 1997