

실험계획법을 이용한 열유동 결합된 자기차폐문제의 최적설계

백주용*, 김태훈**, 이세희*
 경북대학교*, 기초전력연구원**

Optimal Design for Magnetic Shielding by Using the Design of Experiments Incorporating with Thermal-Fluidic Coupled Analysis

Jooyong Baek*, Tae-Hoon Kim**, and Se-Hee Lee*

Kyungpook National University*, Korea Electrical Engineering and Science Research Institute**

Abstract - 전자기 시스템에서 발생하는 손실의 대부분은 열에너지로 발생되며 전력기기와 같은 대용량 시스템의 경우 금속도체부의 국부적 온도상승은 그 자체로도 시스템의 성능을 저하시키거나 심각한 경우 사고를 유발시키며 수명을 단축시킨다. 이를 개선하기 위한 방안으로 Hot-spot 부근에 자기실드를 삽입하여 누설자속을 차폐시키는 방법도 고려되고 있다. 본 논문에서는 이러한 열유동 결합된 자기차폐 문제의 최적설계를 실험계획법을 이용하여 수행하였다.

싱크는 구리, 실드는 규소강, 냉각유일은 변압기유로 선정하였다. 초기모델의 실험계획의 목표는 자기실드의 자기차폐를 이용한 싱크의 와전류 손실 및 온도상승 저감을 목표로 선정하였다. 선정된 설계인자는 그림 2(b)와 같으며 각각의 설계인자를 개별적으로 평가하였을 때 차폐성과 밀접한 연관을 가지는 것으로 확인되었다.

1. 서 론

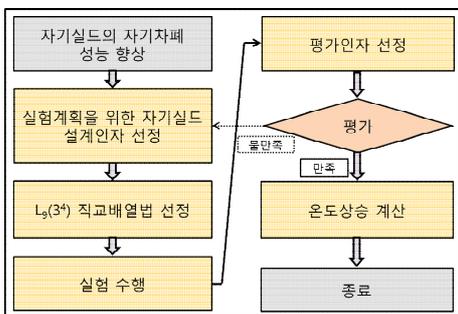
세계적으로 에너지 절약 및 CO₂ 배출 저감을 위한 노력이 정부 주도로 이루어지고 있으며 이 때문에 에너지 변환 효율은 시스템을 평가하는 매우 중요한 요인이 되고 있다. 전자기 시스템에서 발생하는 손실의 대부분은 열에너지로 발생되며 전력기기와 같은 대용량 시스템의 경우 금속도체부의 국부적 온도상승은 그 자체로도 시스템의 성능을 저하시키거나 심각한 경우 사고를 유발시키며 시스템의 수명을 단축시킨다. 이와 같이 전자기 시스템에서 열적 문제는 매우 중요한 사안이기 때문에 이를 설계단계에서 예측하고 개선시키기 위한 다양한 연구가 진행되고 있다. 열적 문제를 개선시키는 방안으로 Hot-spot 부근에 자기실드를 삽입하여 누설자속을 차폐하는 방법도 고려되고 있다.

본 논문에서는 실험계획법을 이용하여 이러한 전자기-열유동 결합문제에서 자기실드의 자기차폐 성능을 개선시키는 최적설계 초기모델을 제시하였으며, 이를 기반으로 실제 변압기의 자기실드 차폐성능 향상을 위한 최적설계를 수행하였다[1-3].

2. 본 론

2.1 실험계획법

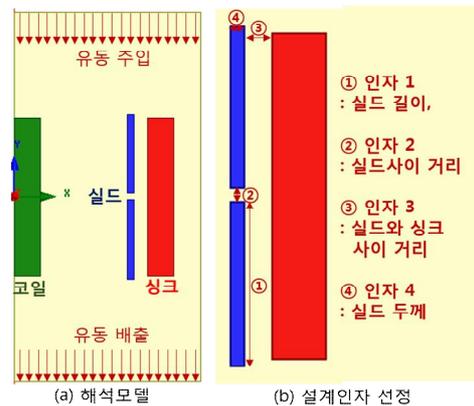
본 논문에서는 열유동이 결합된 자기차폐문제의 최적설계 방안으로 직교배열법을 이용한 실험계획을 사용하였으며 실험계획 절차는 그림 1과 같다. 자기실드의 자기차폐 성능 향상목표를 차폐 대상의 전력손실 및 온도상승을 줄이는 것으로 선정된 후 이에 맞는 설계인자를 선정한다. 실험은 직교배열법을 이용하여 수행되며 평가에 만족된 실험결과를 차폐대상의 온도상승을 계산한 후 실험을 종료한다.



〈그림 1〉 실험계획의 흐름도

2.2 실험계획법을 이용한 최적설계 초기모델

실험계획법을 이용한 열유동 결합된 자기차폐문제의 최적설계 방안을 제시하기 위해 그림 2와 같은 간단한 초기모델을 고안하였다. 해석모델의 구조는 강제 순환되는 냉각유일 내부에 z방향의 코일, 코일 주변 자기장에 의해 유기되는 와전류 손실을 계산하기 위한 싱크(Sink), 그리고 자기차폐를 위한 자기실드를 그림 2(a)와 같이 고안하였다. 초기모델의 해석조건으로 냉각유일의 강제순환 속도는 10[m/s], 코일은 100[A]의 전류가 흐르는 권선 1000턴으로 각각 선정하였으며 물성계질은 코일 및



〈그림 2〉 해석모델 및 설계인자 선정

실험계획 인자의 수준과 범위는 표 1과 같으며 이를 L₉(3⁴) 직교배열법을 이용하여 실험계획을 수행하였다. 실험계획의 평가인자는 표 4와 같이 싱크의 총 손실 및 평균온도로 선정하였다.

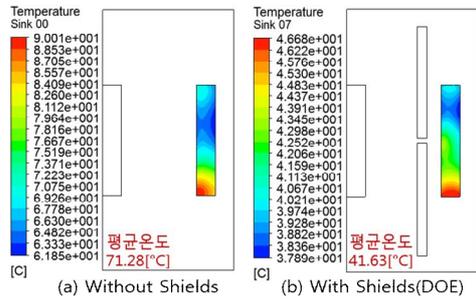
〈표 1〉 초기모델 실험계획의 인자의 수준과 범위

	인자 1	인자 2	인자 3	인자 4	단위
수준1	60	5	5	5	[mm]
수준2	90	10	10	10	
수준3	120	15	15	15	
범위	60 - 120	5 - 20	5 - 20	10 - 20	

〈표 2〉 L₉(3⁴) 직교배열을 이용한 초기모델 실험계획

실험번호	인자 1 [mm]	인자 2 [mm]	인자 3 [mm]	인자 4 [mm]	싱크 총 손실 [kW]	싱크 평균 온도 [°C]	순위
1	60	5	5	5	31.22	68.23	9
2	60	10	10	10	27.86	60.88	8
3	60	15	15	15	25.38	54.59	5
4	90	5	10	15	16.63	45.21	3
5	90	10	15	5	21.15	50.95	4
6	90	15	5	10	28.66	56.98	6
7	120	5	15	10	13.09	41.63	1
8	120	10	5	15	21.23	44.93	2
9	120	15	10	5	26.91	58.32	7

실험을 통해 얻어진 가장 우수한 조건은 싱크의 총 손실 및 평균온도가 가장 낮은 실험 7로 선정되었으며 실험 7의 총 손실 및 평균 온도는 각각 13.09[kW], 41.63[°C]으로 나타났다. 실험 7모델과 자기실드가 없는 모델의 싱크 온도를 비교하였을 때 그림 3과 같이 실험모델이 자기실드가 없는 모델보다 평균온도 29.65[°C], 최대온도 40.33[°C] 더 낮게 나타났다.



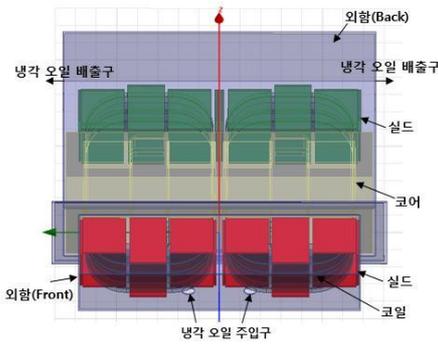
〈그림 3〉 자기실드 유무에 따른 싱크 온도비교

2.3 변압기 자기차폐 최적설계 적용사례

2.3.1 변압기 해석모델

앞서 제시된 열유동이 결합된 자기차폐문제의 최적설계를 실제 산업에서 운용되고 있는 변압기에 적용해보았다. 본 논문의 변압기 해석모델은 고속철도차량용 주변압기로서 다른 종류의 전력용 변압기와는 달리 코일부와 외함 사이의 거리가 매우 짧은다는 특이점을 지니고 있다. 이로 인해 외함은 권선 및 철심에서 발생하는 누설자속의 영향을 상대적으로 많이 받게 되며 온도는 상당히 증가하게 된다. 이와 같은 국부과열 현상을 방지하기 위해 코일부와 외함 사이에 자기실드를 삽입하고 실험계획법을 이용하여 자기차폐 성능을 향상시켰다.

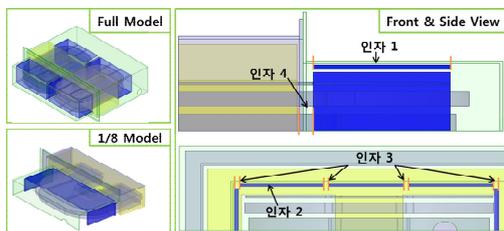
변압기 해석모델은 4350[kVA] 단상 외철형 변압기이며 그림 4와 같이 코일, 코어, 자기실드, 외함으로 구성되며 변압기 내부에 냉각오일이 강제 순환되는 구조이다[1].



〈그림 4〉 변압기 구조

2.3.2 실험계획법을 이용한 자기실드 최적설계

실험계획법은 외함의 총 손실 및 온도를 감소시킬 수 있는 보다 작은 부피의 자기실드 형상을 고안하는 것을 목표로 선정하였다. 실험계획의 해석 영역은 그림 5와 같이 코일부와 외함 사이의 거리가 가장 짧아서 국부과열 현상이 극심하게 나타나는 변압기 전면부 1/8 영역을 선정하였다. 자기실드의 설계인자는 자기실드의 길이, 자기실드의 두께, 자기실드 간의 사이거리, 자기실드와 코어 사이거리로 각각 선정하였으며 설계인자의 유효성 평가를 통해 각각의 인자들이 차폐성과 밀접한 연관이 있음을 확인하였다.



〈그림 5〉 실험계획 해석영역 및 인자선정

실험계획의 인자의 수준과 범위는 표 3과 같으며 이를 $L_9(3^4)$ 직교배열법을 이용하여 실험계획을 수행하였다. 실험계획의 평가인자는 표 4와 같이 외함의 총 손실 및 부피로 선정하였다. 실험결과는 외함 총 손실 및 부피에 가중치를 적용하여 평가하였으며 이를 통해 얻어진 가장 우수한 조건은 실험 8로 선정되었다. 실험 8의 외함 총 손실 및 부피는 각각 26.33[W], 1,299,200[mm³]로 나타났다. 실험 9의 모델을 열유동 해석을 통해 자기실드가 없는 모델과 외함 온도분포를 비교하였을 때 그림 6과 같이 자기실드가 없는 경우에 발생되었던 외함 측면의 Hot-spot이

자기실드를 고안함으로써 발생하지 않았음을 확인할 수 있었다. 두 모델 간의 Hot-spot 온도는 표 5와 같이 실험계획법을 이용한 자기실드의 최적설계를 통해 26.93[°C] 감소되었다.

〈표 3〉 변압기모델 실험계획의 인자의 수준과 범위

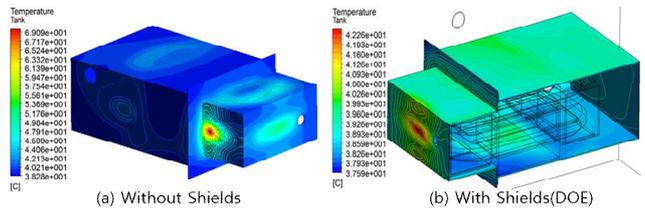
	인자 1	인자 2	인자 3	인자 4	단위
수준1	270	3	5	18	[mm]
수준2	280	5	10	28	
수준3	290	7	15	38	
범위	260 - 300	3 - 10	5 - 20	10 - 40	

〈표 4〉 $L_9(3^4)$ 직교배열을 이용한 변압기모델 실험계획

실험 번호	인자 1 [mm]	인자 2 [mm]	인자 3 [mm]	인자 4 [mm]	외함 총 손실 [kW]	외함 부피 [mm ³]	순위
1	270	3	5	18	32.96	724140	5
2	270	5	10	28	31.90	1182600	7
3	270	7	15	38	31.25	1621620	10
4	280	3	10	38	29.71	734160	3
5	280	5	15	18	30.38	1198400	5
6	280	7	5	28	29.36	1760080	4
7	290	3	15	28	29.52	742980	2
8	290	5	5	38	26.33	1299200	1
9	290	7	10	18	29.0	1782340	8

〈표 5〉 변압기 외함 Hot-spot 온도비교

	without Shields	with Shields(DOE)	Difference
Hot-spot 온도 [°C]	69.09	42.26	26.93



〈그림 6〉 변압기 외함 온도분포 비교

3. 결 론

본 논문은 열유동 결합된 자기차폐문제의 최적설계의 방안으로 실험계획법을 사용하였으며 이를 적용하기 위한 간단한 초기모델을 제시하였다. 또한 이를 기반으로 실제 운용되고 있는 변압기의 자기실드 차폐 성능 향상을 위한 최적설계를 수행하였다. 초기모델 및 변압기모델의 실험계획은 $L_9(3^4)$ 직교배열법을 이용하여 수행되었으며 자기실드가 없는 모델과 최적설계 모델을 비교한 결과 차폐대상의 온도가 상당히 감소되었음을 확인하였다. 이를 통해 실험계획법을 이용한 자기실드 최적설계가 다양한 전자기-열유동 결합 문제에서 발생하는 열적 문제를 개선할 수 있는 매우 유용한 수단임을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 백주용, “전자기-열유동 결합해석 기법을 이용한 전자기시스템의 자기차폐와 온도특성 해석”, 경북대학교 전기공학과 석사학위 논문, 2014.
- [2] 백주용 외 4명, “고속열차용 주변압기의 전자기차폐 특성해석”, 대한전기학회 추계학술대회, pp. 10-11, 2014.
- [3] Yong Teng Jing, et. al., “Calculation and Analysis of Hot-spot Temperature-rise of Transformer Structure Parts Based on Magnetic-Thermal Coupling Method”, Applied Mechanics and Materials, Vol. 513-517, pp. 3459-3462, 2014.