

배선용 차단기의 소호실 설계를 위한 Arc의 자기구동력의 3차원 해석

송희찬*, 손종만*, 강성화, 임기조
충북대학교 전기공학과 *LG산전(주) 전력기기 연구소

3-D Finite Element Analysis of Magnetic Force on the Arc for Design of Arc Chamber of Molded Case Circuit Breaker

Song Hee-Chan*, Son Jong-Man*, Kang Sung-Wha, Lim Kee-Joe
Chungbuk National University *LG Industrial Systems Co.,Ltd.

Summary

The Design of arc quenching parts of molded case circuit breakers depends on the utilization of strength and distribution of the magnetic field by which the arc is forced. The magnetic field causes the arc to move into a set of V-slotted iron grids, where the arc is extinguished rapidly. This paper present the effective method to design V-slotted iron plates of the arc breaking chamber of molded case circuit breakers. This magnetic force was calculated by using the flux densities in the arc which are obtained by three dimensional finite element method, as a result of that this paper verified by testing that a grid model which has biggest magnetic force is excellent in the arc quenching ability.

I. 서론

배선용 차단기는 600V, 직류 500V 이하의 전로의 보호에 사용되는 몰드 케이스 서킷트 브레이커(Mold Case Circuit Breaker)의 차단기를 말한다^[1].

최근 지압 배전 계통이 대용량화 됨에 따라 배선용 차단기에 있어서는 중대된 회로의 규약 단락 전류(사고 전류)차단 시에 접점간에 발생하는 아크(Arc)를 소호 시키는 차단 성능을 향상시켜야 한다.

아크란 기중 온도가 7000 ~ 25000 °K의 플라즈마를 말한다. 이러한 플라즈마는 크게 나누어 3가지의 구성물로 이루어지는데, 그것은 자유전자, 이온 그리고 중성 원자가 그것이다. 기체 중의 양극간에 높은 전계가 가하여졌을 때, 입자가 가속화되어 이온화 과정이 진행되어 플라즈마를 형성하게 된다^[2].

일반적으로 저압 차단기에서 사용되는 소호 방식은 접촉자가 개리하여 아크가 발생하면, 아크 전류와 자성판이 만드는 자계의 구동력에 의해 아크가 그리드의 안쪽으로 이동되고, 각 그리드 사이에 짧은 아크로 분할하여 냉각, 소멸시키는 방식(기중 자기차단 방식)이다^[3].

아크를 자성판으로 이동시키기 위해 자계에 의한 전자(電磁)구동을 이용하므로 자기 구동력의 크기가 어느 정도인가를 해석해 볼 필요가 있다. 이를 정량적으로 구하

기 위해서, 최근에는 2차원 유한 요소법의 자계 해석을 응용하여 해석한 보고가 있으나^[4,5], 3차원적으로 복잡한 형상을 갖는 소호실을 고려할 때, 정확한 자기 구동력을 산출하는 데는 미흡한 점이 있다.

본 논문에서는 자성체의 자기 특성의 비선형, 자기 포화를 고려한 3차원 유한 요소법의 자계 해석을 이용하여, 배선용 차단기의 전류 차단 시에 접점 간에 발생하는 아크에 의한 자기 구동력의 정량적 해석을 하였다. 그 결과로 얻은 아크에 의한 자기 구동력이 가장 큰 그리드를 소호실 설계에 적용하여, 단락 차단 비교 시험을 실시하였다.

II. 배선용 차단기의 아크 소호

1. Grid 사이의 전압강하 및 전차단 시간

접촉자가 개리하여 발생하는 아크가 소호실 내로 들어오면 그리드는 모두 음극 또는 양극으로 작용하여 각 금속판 사이에는 음극 강하(Cathode Fall)와 양극 강하(Anode Fall)가, 그리고 양극주(Positive Column)에 의한 전압 강하가 발생한다.

단락 공기 중에서 짧은 전극에서 발생하는 각 그리드 간의 아크 전압은 20 ~ 40V 정도이며, 소호실 내의 금속판이 N개라면 금속판 말단에서 발생하는 아크 전압은 식(2-1)과 같이 된다^[3].

$$V_{arc} = 20 \sim 40 (N-1) \quad [V] \quad (2-1)$$

배선용 차단기의 전차단 시간은, 단락 발생 시점에서 배선용 차단기가 개극하기 까지의 시간을 개극 시간, 개극에 의해 발생한 아크가 소멸되어 차단이 완료되기까지의 시간을 말한다. 전류 차단을 한 후 차단기의 극간에는 전원 측의 자기 전압의 파형은 회로 고유의 값으로 되므로, 절연 내력이 자기 전압에 견딜 수 있으면 차단에 성공하게 된다^[3,6].

III. 3차원 비선형 정자계 해석법

1. 자기 벡터 포텐셜(Vector Potential)에 의한 방정식

자기 현상을 고찰하는데 기초가 되는 방정식은 맥스웰(Maxwell) 방정식이다. 맥스웰 방정식 중 암페어(Ampere)의 법칙의 미분형은 식(3.1)로 표현된다.

$$\text{rot } H = J + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (3.1)$$

일반적인 자계는 대상으로 하는 해석 영역 내에 강재 전류(입력 전류와 동가로 생각할 수 있는)가 존재한다. 이 경우에는 $\text{rot } B \neq 0$ 이 되어서 보존적이 될 수 없다. 이와 같은 경우에는 B를 시간과 공간의 함수로 되는 벡터 A로 식(3.2)와 같이 놓을 수 있다^[7,8]

$$B \neq \text{rot } \bar{A} \quad (3.2)$$

$$\text{rot} \left(\frac{1}{\mu} \text{rot } A \right) - J_0 = 0 \quad (3.3)$$

2. 유한 요소법에 의한 비선형 정자계 해석

비선형 반복 수법에 뉴-톤 램슨(Newton Raphson)법을 이용하면, 풀어야 할 매트릭스(Matrix)는 식(3.4)과 같이 된다.

$$\left(\frac{\partial G_i}{\partial A_j} \right) \{ \Delta A_j \} = - \{ G_i \} \quad (i, j = 1, 2, 3, \dots, nu) \quad (3.4)$$

여기서, nu : 미지수의 총수

Gi : 갈라친 법을 적용했을 때의 잔차 (Residual Error)

식(3.4)의 매트릭스를 ΔA_j 가 충분히 작아질 때까지 반복 계산하면, 자기 벡터 포텐셜의 비선형 해를 구할 수 있다.

3. 아크 자기 구동력의 계산법

아크 전류에 작용하는 힘을 자계 중의 도체 전류에 작용하는 힘과 동일한 것으로 보면, 자계 중의 아크에는 플레밍의 왼손 법칙에 따르는 전자력, 즉 자기 구동력이 발생한다. 자속 밀도 B에 z방향의 자속 성분은 존재하지 않는다고 가정하면, 자기 구동력 F는 식(3.5)과 식(3.6)과 같이 Fx 성분과 Fy 성분으로 나누어 생각할 수 있다^[9].

$$F_x = \sum_{i=1}^n f_{ix}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \cdot \nabla_i^{(e)} \cdot B_{iy}^{(e)} \quad (3.5)$$

$$F_y = \sum_{i=1}^n f_{iy}^{(e)} = \sum_{i=1}^n J_i^{(e)} \cdot \nabla_i^{(e)} \cdot B_{ix}^{(e)} \quad (3.6)$$

여기서, $J_i^{(e)}$: 요소 e의 전류 밀도

$B_{ix}^{(e)}$: 요소 e의 자속 밀도의 x방향성분

$B_{iy}^{(e)}$: 요소 e의 자속 밀도의 y방향성분

$\nabla_i^{(e)}$: 요소 e의 면적

Fig. 3.1과 같은 아크를 소호실 내로 끌어들이는 자기 구동력은 아크에 작용하는 전자력 중 y방향 성분만의 힘이므로 아크 부의 x방향 자속 밀도와 아크 전류의 곱으로 구해짐을 알 수 있다. 즉, 유한 요소로 분할한 아크의 자기 구동력은 식(3.6)에서 F_y 를 계산하여 얻을 수 있다.

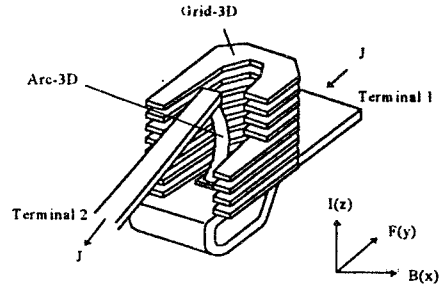


그림 3.1 자기 구동력 개념도

Fig. 3.1 Concept of magnetic forces

4. 자계 해석 System

자계 해석 시스템은 형상에 대한 모델링과 해석 영역을 3각형 요소로 분할하는 Pre-processing part와 자성 재료의 자기 특성(B-H curve)Data 및 경계 조건을 설정하여 FEM 계산을 하는 Solving part와 해석 결과에 대한 Graphic display가 가능한 Post-processing part로 이루어져 있다^[10].

IV. 자계 해석 모델링

1. 해석을 위한 모델링

현재 사용되고 있는 그리드의 형상 설계는 몇 개의 구상 모델을 제작하여, 시험을 한 후에 적당한 모델을 확정하는 시행 착오법을 따랐다.

본 논문에서는 배선용 차단기 100AF의 소호실을 본래의 그리드와 3개의 개량 그리드를 모델링 하였다. 개량 그리드는 구상 단계에서 검토되어지는 형상, 두께를 변화시켜서 모델링 하였다.

Table 4.1 해석 Model 1, Model 2, Model 3, Model 4 의 그리드의 형상, 구성 및 두께

	Feature	Conditions
Model 1		Grid 1 ~ Grid 6 : Thickness (2mm) Angle of Distribution : 20 Degree
Model 2		Grid 1 ~ Grid 6 : Thickness (2mm) Angle of Distribution : 20 Degree
Model 3		(a) Grid 1 : Thickness (2mm) (b) Grid 2 ~ Grid 7 : Thickness (1.6mm) Angle of Distribution : 20 Degree
Model 4		(a) Grid 1 : Thickness (2mm) (b) Grid 2 ~ Grid 9 : Thickness (1.2mm) Angle of Distribution : 20.5 Degree

V. 해석 및 시험결과

1. 자계 해석 결과

Fig. 5.1은 해석을 위해 구성한 아크 챔버(arc chamber), 고정 접점, 가동 접점 및 아크를 모델링한 그림이다. 맥스웰 소프트웨어를 이용하여 3차원 형상을 만들고, 자동 매쉬를 나누어 각각의 경계 조건을 입력하고, 아크에 작용하는 자기 구동력을 구하였다.

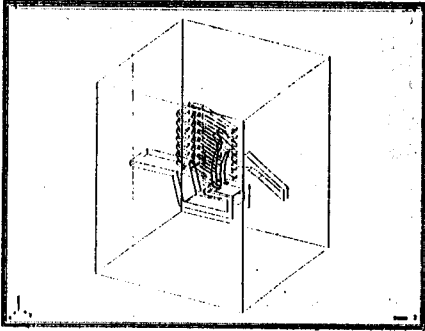


그림 5.1 소호실의 해석 Model
Fig. 5.1 Analysis model of arc chamber

Fig. 5.2는 해석을 위한 프리프로세싱 과정 중 해석 모델에 대한 Mesh도를 나타낸 것으로 3차원 사면체(Tetrahedra)의 수는 14,339이다.

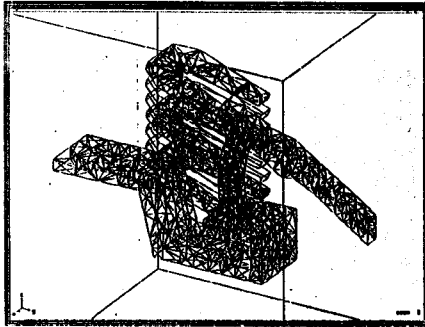


그림 5.2 Mesh 도
Fig. 5.2 The feature of mesh

Fig. 5.3은 아크 챔버를 구성하는 그리드의 자기적 특성을 나타내는 B-H 곡선이다. H가 $5 \times 10^4 [A/m]$, B가 $1.9 [T]$ 일 때를 포화 개시점으로 잡았다.

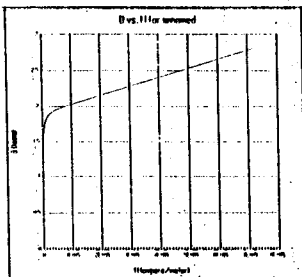


그림 5.3 그리드의 B-H curve
Fig. 5.3 B-H curve of grid

Fig. 5.4는 4번 그리드 내의 평면을 정의하여 자속 밀도의 크기와 방향을 출력한 결과이다. 아크 전류에 의한 자기 구동력은 그리드 바깥 쪽의 자속 밀도의 크기와 그리드 격자 형상 내의 공기 층에서의 자속 밀도의 차에 의해 결정된다.

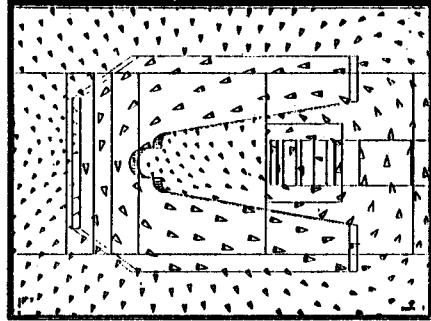


그림 5.4 4번 그리드 내의 자속 밀도 벡터도
Fig. 5.4 Magnetic flux density in 4th

Fig. 5.5은 4번과 5번 그리드 사이 공기층 부분의 자속 밀도의 벡터도로, 그리드 안쪽 공기층에 자속이 존재하지 않고 그리드 바깥쪽에 자속이 존재함을 알 수 있다.

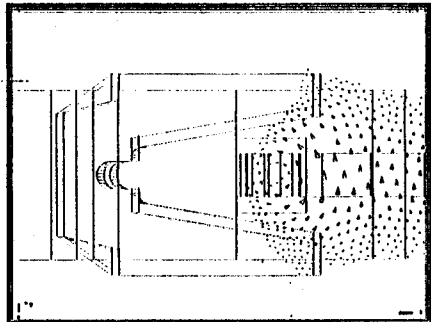


그림 5.5 4번과 5번 그리드 사이의 자속 밀도 벡터도
Fig. 5.5 Magnetic flux density between 4th and 5th grid

Fig. 5.6은 해석 모델의 정 중앙 부분을 Y-Z 평면으로 정의하여 자속 밀도의 크기와 방향을 본 것이다.

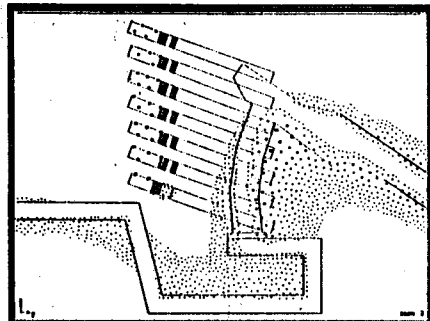


그림 5.6 y-z 단면 중심의 자속 밀도 벡터도
Fig. 5.6 Magnetic flux density in middle plane of y-z section

Fig. 5.7은 각 그리드의 자속 밀도의 크기를 보기 위하여, 각 그리드의 Z 방향으로 라인(Line)을 정의하여 자속 밀도의 크기를 구한 것이다.

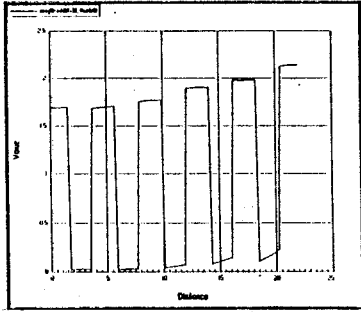


그림 5.7 각 그리드 내부의 자속 밀도 크기
Fig. 5.7 Magnitude of magnetic flux density of each grid

이상의 4가지 모델에 대한 아크의 자기구동력을 해석한 결과를 Table 5.1에 정리하였다.

표 5.1 자기 구동력 해석 결과

Table 5.1 The result of magnetic force simulation

	Conditions	자기구동력(N)
Model 1	Grid 1 ~ Grid 6 : Thickness (2mm) Angle of Distribution : 20 Degree	42.3
Model 2	Grid 1 ~ Grid 6 : Thickness (2mm) Angle of Distribution : 20 Degree	54.7
Model 3	Grid 1 : Thickness (2mm) Grid 2 ~ Grid 7 : Thickness (1.6mm) Angle of Distribution : 20 Degree	105.2
Model 4	Grid 1 : Thickness (2mm) Grid 2 ~ Grid 9 : Thickness (1.2mm) Angle of Distribution : 205 Degree	70.1

위의 결과에서 개량 그리드 모델 중 가장 큰 자기 구동력을 발생시키는 그리드는 모델 3임을 알 수 있다.

Model 3에 대해서 전류의 크기를 순차적으로 올리면서 자기 구동력을 해석한 결과를 Fig. 5.8에 나타내었다. Model 3과 같이 그리드를 배치하면 아크 전류가 9~16 kA의 범위에서 자기 구동력의 증가도가 높음을 알 수 있다.

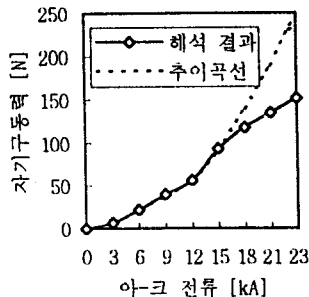


그림 5.8 아크 전류 증가에 따른 자기 구동력
Fig. 5.8 Magnetic force by an increment of arc current

2. 시험결과

위의 결과를 토대로 개량 아크 소호실 세 가지 모델 (Model 2,3,4)의 시료 록 제작하여 단락 차단 시험의 비교 시험을 하였다. 단락 차단 시험은 다음과 같은 조건으로 실시하였다. 동작 책무는 "O"-"-CO" 를 1회로 한다. 여기서 "O"(open test)는 시험 회로의 투입용 차단기에서 단락 회로를 폐로로 하고, 공시 차단기로 차단할 수 있음을 나타낸다. "CO"(close open test)는 공시 차단기에서 단락 회로를 폐로로 하고 계속해서 쉬지 않고 시험 차단기로 차단할 수 있음을 나타낸다. "I"는 "O"시험과 "CO"시험의 시간 간격으로 차단기를 리셋할 수 있는 최소 시간으로 한다. 다만, 어떠한 경우도 2분보다 짧게 할 필요는 없다[1].

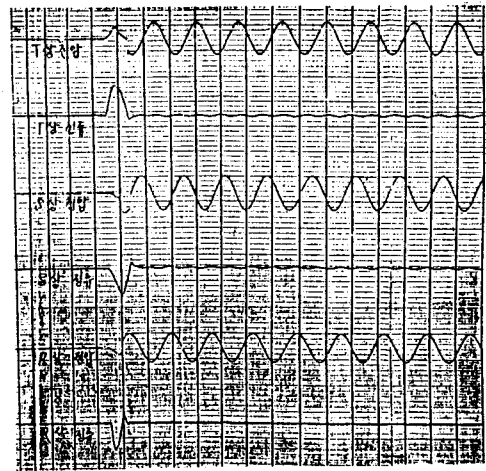


그림 5.9 Model 2의 "O" 시험 오실로그래프
Fig. 5.9 Oscillogram of "O" test of Model 2

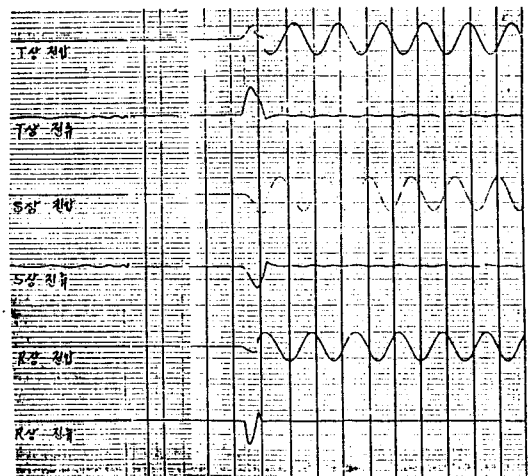
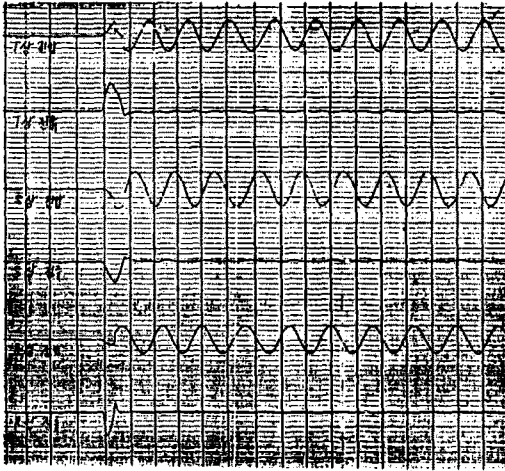


그림 5.10 Model 3의 "O" 시험 오실로그래프
Fig. 5.10 Oscillogram of "O" test of Model 3

참고 문헌



[1] 공업진흥청, "KSC 8321", 한국표준협회, 1993
 [2] 韓國電氣研究所, "低壓 Air Circuit Breaker 開發研究", pp. 19-29, 1988
 [3] LG 산전 기술센터, "Arc 소호", pp. 3-46, 1993
 [4] 伊藤, 河瀬, "單相交流 電磁石의 定常吸引力 特性의 數値解析法", 電學論 A, 110, 605, 1990
 [5] 中田, 伊藤, 河瀬, "有限要素法에 의한 交直電磁石의 設計와 應用", 森北出版, pp. 59, 1991
 [6] LG 산전, "배선용 차단기 기술자료집", pp. 32-35, 1994
 [7] 電氣學會, 大電流工學 Handbook, 코로나社, pp. 6-13, 1992
 [8] 임담호, 電氣系의 有限要素法, 동명社, pp. 66-77, 1987
 [9] 伊藤, 河瀬, 立岡, "配線用 遮斷器에 있어서의 Arc 磁氣驅動力의 3次元 有限要素 解析法", 電學論 B, 113, 10, 1101-1103, 1993
 [10] ANSOFT, "Maxwell 3D Field Simulator-3D Magnetostatic Problem", pp. 4, 1993

VI. 결론

본 논문에서는 배선용 차단기의 전류 차단 시에 접점간에 발생하는 아크에 의한 자기 구동력의 정량적 해석을 하였으며, 그 결과 아크에 의한 자기 구동력이 가장 큰 그리드를 도출하여 소호실 설계에 적용하고, 세 가지의 Model에 대하여 단락 차단 비교 시험을 실시하였다. 본 논문에서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 배선용 차단기의 소호실 설계시에, 3차원 유한 요소법을 이용하여 그리드의 형상, 매수, 배치 방법 및 배치 각도의 변화에 따라서 아크 전류의 자기 구동력의 해석을 통하여, 그리드의 최적 형상을 얻을 수 있었다.
2. 자기 구동력이 가장 크게 나타난 Model 3에 대해서 전류의 크기를 순차적으로 올리면서 자기 구동력을 해석한 결과, 아크 전류가 9 ~ 16 kA 범위에서 자기 구동력의 증가도가 높았으며, 그 이상 전류가 증가하여도 자기 구동력의 증가도는 둔해지는 경향을 보였다.
3. 시험 후의 오실로그래프를 비교하여 볼 때, Model 3 그리드의 전 차단 시간이 상당히 짧고, 차단 성능이 가장 양호함을 확인하였다.
 향후 실제 차단 용량을 높이기 위해서 그리드 이외에 요소 - 촉벽, 아크 런너 등의 형상이나, 재질의 개선, 아크 가스의 제어 구조, 절연 성능 개선 등을 병행해야 하겠다.

본 연구의 결과를 응용하여, 아크의 자기 구동력을 가장 크게 낼 수 있는 소호실의 그리드의 최적 형상을 구할 수 있고, 이를 차단기의 소호실 설계에 이용하면 기존의 설계 시간 및 설계 비용을 줄일 수 있을 것으로 생각된다.