

### 3차원 자기해석을 통한 GIS 모선의 와전류에 의한 온도 상승

이방욱 · 손종만 · 강종성 · 서정민  
LG 산전 전력연구소 전력기기연구팀

#### 3D Magnetic Analysis on Temperature Rise Resulting from Induced Eddy current In Gas Insulated Switchgear

B. W. LEE · J. M. SOHN · J. S. KANG · J. M. SEO

Electric Equipment Team, Electrotechnology R&D Center, LG Industrial Systems

**Abstract-** In this work, temperature rise and eddy current distribution on the enclosure and conductor of 3 pole gas insulated switchgear were investigated using analytical and experimental measures.

The design of the diameters of the conductors and the enclosures of a meal clad gas insulated switchgear is primarily based on the insulation requirements. It is very difficult problem to predict the temperature rise of enclosed switchgear due to the complexity of the phenomena of heat transfer and existence of eddy current loss. To overcome this situations, we focused on the eddy current distribution on the enclosure of switchgear caused by high current 3 pole conductor as a fundamental basis.

The experimental results about temperature distribution of 3 pole gas insulated switchgear were reported and measurements are compared with predictions of three-dimensional thermal model for eddy current analysis. As a result, three dimensional numerical analysis found to be in close relationship with experimental results and thermal model is efficient to predict the abnormal temperature rise in switchgear.

및 도체부에 흐르는 쇠교자속으로 인한 와전류로 인하여 용기 각부의 높은 온도상승이 문제가 되고 있다.

따라서 차단기 업체에서는 탱크의함 재질을 일반 철판 대신 스테인레스 스틸(STS)를 사용하여 온도영향을 줄이려는 시도를 하고 있지만 이에 대한 정량적, 정성적 해석은 이루어지고 있지 않은 현실이다. 또한 STS를 사용시의 재료비 증가요인이 문제가 되고 있다.

그러므로 최적화된 차단기 모선 및 외함의 설계를 통해 규격 이상의 온도상승을 억제하는 방안이 필수적으로 마련되어야 한다. 현재까지 3상 GIS모선에 대하여 대류 및 복사에 의한 온도해석은 실시된 바 있지만, 와전류에 의한 발열 및 온도상승에 관한 해석은 이루어지고 있지 않다[3]

과다한 온도상승 억제를 위한 방안으로 차단기 외함의 크기, 두께 및 재질등의 결정 그리고 통전부의 크기 등의 상호관계를 명확히 파악하는 것이 필요하다. 하지만 이러한 요인들을 일일이 시험을 통해서 규명하는 것은 매우 어려운 문제이다.

본 연구에서는 3차원 유한요소법을 이용한 전자계 해석을 통해 와전류에 의한 GIS 외함의 온도상승을 해석적으로 규명하고 실험치와 비교분석하고자 한다[4]. 해석 조건 및 대상으로서는 3상평형 및 불평형상태에서 GIS 외함 직경 및 pitch, 외함 재질등을 변화시킴으로써 GIS 모선의 온도 상승에 미치는 외류 영향을 해석하였다.

## I. 서 론

모든 전력기구나 전자기기에 있어서 와전류로 인한 금속의 발열로 인한 손실 문제를 묵과할 수는 없다. 이 와전류는 일반적으로 금속부분의 표면에 근접하게 위치하는 외부 시변 전류에 의하여 발생된다.

따라서, 전력기기 응용에 있어서, 와전류로 인하여 야기되는 온도상승에 관한 정보를 습득하는 것이 중요한 디자인 요소로 대두되고 있다. 왜냐하면 와전류로 인한 손실이 전체 손실에 있어서 큰 비중을 차지하고 있기 때문이다. 그러므로 와전류의 크기, 그로 인한 손실 및 온도상승을 예측할 수 있는 계산방법 및 기술습득이 중요하다[1,2].

특히 대전류를 통전하는 전력기기에 있어서는 단락사고나 대전류 통전시 발생하는 와전류 및 그로 인한 온도상승치를 구하고 과도한 온도상승에 대한 억제책을 세우는 것은 기기 설계에 있어서 중요한 문제이다.

본 연구에서 관심을 둔 분야는 초고압 가스 절연시스템의 외함 및 도체의 온도 상승에 관한 문제이다.

GIS는 차단기, 단로기 및 모선 등으로 구성되고 모든 구성품은 SF6 가스로 밀봉된 탱크내에 설치된다. 특히 모선부에서는 재료비 절감 및 설치면적의 축소 및 효율성면에서 3상 일괄형 구조가 많이 채택되고 있다. 하지만, 모선의 연속통전시 발생하는 주열 및 모선 각부

## II. 자기와 열계 결합장의 해석

우선 맥스웰 방정식을 이용하여 전자기장 계산으로부터 해석을 시작한다.

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + j\omega \vec{D} \quad (1)$$

$$\text{rot } \vec{E} = -j\omega \vec{B} \quad (2)$$

위 (1), (2)식과 함께 다음 식과 같은 물질 방정식이 있다.

$$\vec{j} = \sigma \vec{E} \quad (3)$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H} \quad (4)$$

모든 자기량들이 시간에 따라 교변한다는 가정하에 적용하면, 해석은 복소영역  $\vec{D}$ 에서 이루어지고 변이전류 밀도의 시간적 변화량은 무시된다. 자속밀도의 원천은 존재하지 않고,

$$\text{div } \vec{B} = 0 \quad (5)$$

자기 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 를 이용하여 다시 쓰면,

$$\vec{B} = \text{rot } \vec{A} \quad (6)$$

자기 벡터 포텐셜은 rotational 영역과 gradient 영역으로 구성되어 있다.

$$\vec{A} = \vec{A}_o + \vec{A}_p \quad (7)$$

이때,

### III. 3상 GIS 와류 및 온도해석

$$\vec{A}_\phi = \text{grad}\phi_A \quad (8)$$

(2)식의 유도법칙과 (6), (7), (8)식으로부터 다음식이 유도된다.

$$\text{rot}\vec{E} = -j\omega\text{rot}(\vec{A}_\omega + \text{grad}\phi_A) \quad (9)$$

(9)식으로부터,

$$\vec{E} = -j\omega(\vec{A}_\omega + \text{grad}\phi_A) + \vec{E}_0 \quad (10)$$

$$\vec{E}_0 = -\text{grad}\phi_0 \quad (11)$$

식이 유도된다.

$\vec{E}_0$ 에 관해서는 다음식이 성립한다.

$$\text{rot}\text{grad}\phi_0 = 0 \quad (12)$$

전계  $\vec{E}_0$ 는 원천이 없다고 가정하면, 전기 포텐셜  $\vec{E}_0$ 는 다음식으로 결정된다.

$$\text{div}\text{grad}\phi_0 = 0 \quad (13)$$

전기 포텐셜  $\phi_0$ 의 이면에는, 유도전압이 존재하고 가정하고 식 (3)과 식 (10)으로부터 다음과 같은 전기적 도체인 영역에서 전류밀도 분포 계산을 위한 관계식이 유도된다.

$$\vec{J} = -j\omega x(\vec{A}_\omega + \text{grad}\phi_A) + x\vec{E}_0 \quad (14)$$

(4)식과 (6)식 그리고 전류밀도 관계에 관한 (14)식을 이용하면 맥스웰 방정식 (1)로부터 다음식과 같은 미분방정식이 구해진다.

$$\text{rot}\frac{1}{\mu}\text{rot}\vec{A}_\omega + j\omega x(\vec{A}_\omega + \text{grad}\phi_A) = x\vec{E}_0 \quad (15)$$

또한,  $\vec{A}_\omega$ 에 추가적으로,  $\phi_A$ 가 결정되어야 하므로

$$\text{div}\vec{J} = 0 \quad (16)$$

윗 식이 (14)식에 필요하고, 결과적으로 (13)식을 고려하면 다음 식이 성립한다.

$$\text{div}\text{grad}\phi_A + \text{div}\vec{A}_\omega = 0 \quad (17)$$

(15)식과 (17)식이 전자계 분포 해석을 위한 기본식이 된다.

도체와 비도체 영역 계면과의 관계를 깊이 고려해보면 (14)식으로부터 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 의 수직성분이 전기적으로 도전영역에서는 영이 되어야 한다. 이것은 전류밀도의 방향을 결정하며, 전류는 도전영역으로부터 흘러나가는 안된다는 것을 의미한다. 전기적으로 비전도성 영역에서는, 스칼라 포텐셜  $\phi_A$ 는 실제적으로 중요하지 않다. 이것은 그값을 일정상수로 간주해도 된다는 의미이다. 실제적으로 (14)식과 (15)식은 전기 도전을  $x$ 에 의해 연관될 수 있다.

전류밀도는 열원 분포로부터 계산될 수 있으며, 열원 밀도는 다음 식으로 주어진다.

$$p_v = \frac{J^2}{x} \quad (18)$$

온도영역은 Fourier의 열-전도 방정식으로부터 계산될 수 있다.

$$\frac{\partial(c\rho\theta)}{\partial t} = \text{div}(\lambda\text{grad}\theta) + p_v - \vec{v}\text{grad}(c\rho\theta) \quad (19)$$

여기서, 속도 벡터계  $\vec{v}$ 는 연속적인 속도운동이 일어난다는 것을 고려한 것이며, 본 해석에서는 고려하지 않았다. 전자계와 온도해석계는 일정 속도에서는 정상상태로 되고 전기전도율  $x$  ( $x, y, z$ )와 투자율  $\mu$  ( $x, y, z$ )사이의 온도 의존성으로부터 결합되어 해석할 수가 있다.

정격 170kV, 3000A급 GIS 3상 일괄형 모선구조를 해석모델로 설정하고 탱크 외함의 재질 및 반경등을 변수로 설정하여 해석을 실시하였다. 일반적으로 3상 일괄형 모선에서 통전 전류는 정확한 3상 평형을 이루기가 어렵고 3상 불평형 상태가 발생하므로, 3상평형 및 불평형 상태에서 와류의 영향에 의한 온도상승을 해석하였다. 해석시 고려한 사항은 다음과 같다.

첫째, 3상 일괄형 모선구조에서는 내부 가스의 대류영향으로 각상의 도체의 자유대류계수(free-convection factor)가 다르지만, 해석 변수를 줄이는 측면에서 모든 도체의 자유대류계수를 동일하게 보았다.

둘째, 외함 탱크의 온도는 대류의 영향으로 상부 및 하부에서 큰 편차를 나타내므로 각각의 자유대류계수를 달리 입력하였으며, 탱크 내부의 자유대류계수는 미미하므로, 탱크외부와 공기면에 자유대류계수를 입력하였다.

셋째, 도체의 표피효과를 고려하여 도체의 요소분할시 5mm 이하로 하였으며, 탱크부에 대해서는 철관을 3부분으로 나누어서 요소분할하여 해석한 결과 큰 차이가 없으므로 표피효과를 무시하여 일괄적으로 탱크두께 전체에 대하여 요소분할하여 해석하였다.

넷째, 탱크 부위의 와류분포를 보면 탱크의 외측과 내측이 서로 반대방향으로 분포하며, 탱크 철관의 내부 중간부위에는 와류가 분포하지 않는다. 따라서 탱크에 대한 와류해석은 이차원적으로는 해석이 불가하므로, 3차원으로 요소분할하여 해석을 실시하였다.

도체는  $\phi$  80/10 mm인 알루미늄이며 외경은 600mm이다. 탱크 내부는 SF6 가스로 밀봉되어 있으며 탱크재질은 SPW41이다. 각각의 요소에 대한 물질 데이터를 표 1에 나타내었다.

	알루미늄	SPW41	STS304	SF6	공기
도전율	3.54e+07	5.5e+06	1.1e+06		
열전달계수	201	54	13.8	1.64e-02	2.5e-02
투자율	1	1500	5	1	1

표 1. 해석에 사용된 물질 데이터

그림 1은 해석시 사용한 요소분할도이며, 요소수는 38279개이며, 절점수는 7608개이다.

그림 2와 3은 3000A 삼상 평형 전류를 인가하였을 때 전류 및 자속분포를 나타내고 있으며, 이때 자유대류계수는 내부 도체는 21[J/sec·m×m°C], 탱크상부는 13[J/sec·m×m°C], 하부는 15[J/sec·m×m°C]이며 주위 온도는 17.5°C로 하였다.

그림 4는 도체의 통전전류에 의한 Joule 손과 탱크부의 와류에 의한 손실을 보여주고 있다. 3상 일괄형 구조이므로 측면 상부에서 손실이 많이 발생한다.

그림 5는 3000A 삼상 평형 전류 인가시 손실에 의한 온도분포를 나타내고 있다. 주위온도를 포함하여 탱크 측면 및 상부는 37°C, 도체는 46°C, 하부는 27°C 정도로 해석되었다. 측면은 3상배치에서 상대적으로 도체가 가깝게 위치해 있으므로 온도상승이 많이 되었으며, 상부가 하부보다 높은 것은 내부 대류에 의한 영향이 컸음을 알 수 있다.

그림 6은 삼상 불평형 전류(R상:2800A, S상:3400A, T상:2800A) 인가시 온도분포를 보여주고 있다. 주위온도 포함시 S상 도체는 53°C, R상과 T상은 42°C이다. 탱크 온도는 3상 불평형 전류가 인가되었으므로, 탱크 우측 상부에 상대적으로 와류가 집중하여 48°C로 온도가 가장 많이 올라갔으며 평형시보다 10°C정도 온도가 올라갔다.

하부는 24℃ 정도로 평형시와 비교하여 별 차이가 없었다. 이 해석결과는 실제 온도시험을 실시한 결과와 비교하여 잘 일치하는 것으로 판명되었다.

그림 7은 삼상 평형일 때 탱크의 재질을 SPW41에서 스테인레스 스틸인 STS304로 변경하였을 때 온도분포를 해석한 결과이다. 이때 도체온도는 43℃, 탱크는 상부가 22℃, 하부가 20℃ 정도로 온도상승이 거의 없었음을 알 수 있으며, 이는 STS304가 비자성 재료이므로 와류에 의한 영향이 거의 없었음을 알 수 있다.

마지막으로 그림 8은 삼상평형일 때 탱크 외경을 600mm에서 700mm로 늘렸을 때 온도분포를 해석한 것이다. 이때 도체온도는 직경변화와 관계없이 일정했으며, 탱크 온도는 32℃ 정도로 4℃가량 줄어들었음을 알 수 있다.

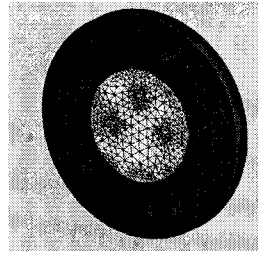


그림 1. 요소분할도

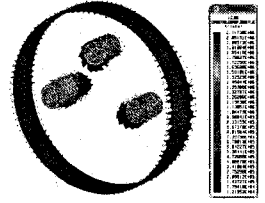


그림 2. 전류밀도

#### IV. 결 론

3차원 유한요소법을 이용한 전자계 해석을 통해 와전류에 의한 GIS 외함의 온도상승을 해석적으로 규명하고 실험치와 비교분석한 결과는 다음과 같다.

첫째, 삼상 평형 전류인가, 삼상 불평형 전류 인가시 와류에 의한 온도상승을 수치해석할 수 있었으며, 특히 3상 불평형 전류 인가시 와류가 국부적으로 집중하여 온도가 상승하는 것을 알 수 있었다.

둘째, 3상 불평형 전류 인가시 온도 상승 시험을 통해 얻은 데이터와 수치해석을 통한 온도상승 결과는 도체와 탱크 상부 온도에 대하여 거의 일치하였다.

셋째, 비자성 재료인 스테인레스 스틸을 탱크 외함에 적용시에는 와류에 의한 영향이 거의 없으므로 이로 인한 온도 상승이 미미함을 입증하였으며, 탱크 외경을 증가시에는 온도 하락의 효과가 있음을 알 수 있었다.

본 연구에서는 와류에 의한 온도상승을 주요점으로 하고, 대류에 의한 영향을 고려하여 해석을 실시하여 실험치와 비교분석하였다. 실제로 좀더 정확한 온도분포를 구하기 위해서는 도체발열에 의한 radiation 영향, 도체 접속부의 온도상승 및 모선 분기점에서의 온도해석에 관하여 고려하여야만, 정확한 해석이 가능하리라 사료된다.

#### [참 고 문 헌]

- [1] Wolfgang Andree, "3D Eddy Current Computation in the Transverse Flux Induction Heating Equipment", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. 30, NO.5, September 1994
- [2] Kuo-Ta Hsieh, "A Lagrangian Formulation for Mechanically, Thermally Coupled Electromagnetic Diffusive Processes with Moving Conductors", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. 31, NO.1, January 1995
- [3] 김현훈, 한성진 외, "초고압 GIS 모선의 열 해석을 위한 정수 산정", 전력기기 심포지엄 논문집, pp.71-76, 1999
- [4] Johh, R. Brauer, "3D Coupled Electromagnetic and Structural Finite Element Analysis of Motional Analysis of Motional Eddy Current Problems", IEEE Trans. on MAGNETICS, Vol. 30, NO.5, September 1994

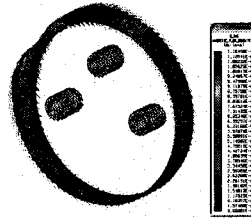


그림 3. 자속밀도 분포

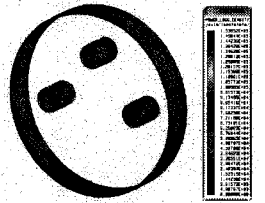


그림 4. 와류에 의한 손실

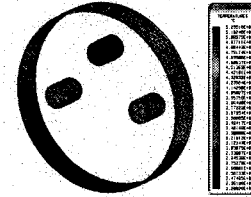


그림 5. 3상 평형 온도 분포

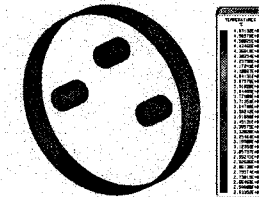


그림 6. 3상 불평형 온도 분포

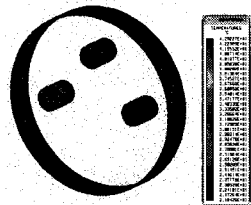


그림 7. 탱크재질 STS304

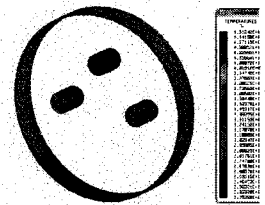


그림 8. 직경(700mm) 온도해석