

Analysis of the Magnetic Field and Eddy Current Characteristics in Isolated Phase Bus System

金 鎮 洙^{*} · 河 德 容^{**} · 崔 勝 吉^{***} · 姜 衡 富[§]
 (Kim Jin-Soo · Choi Seung-Kil · Ha Duk-Yong · Kang Hyung-Boo)

Abstract - Isolated phase bus(IPB) has a special structure for carrying large current generated by a generator to a main transformer. In the analysis of IPB, the accurate understanding of the magnetic field distribution generated by large current is important. Especially, while the bus conductor current is flowing, almost same amount of current as bus conductor current is induced in the enclosures under the influence of time varying magnetic field, and therefore the large electric loss and the deterioration of insulating capability might occur due to Joule heating effect. Hence for the optimal design of IPB satisfying the condition to minimize the loss, the accurate analysis of magnetic field distribution and eddy current characteristics around the enclosures is absolutely required. In this paper, the magnetic field distribution and the eddy current characteristics of three phase isolated phase bus have been investigated. In the analysis of time varying magnetic field, instead of finite difference method(FDM) which is generally used, finite element method with phasor concept is investigated under the assumption that the bus current is purely sinusoidal. The characteristics is studied along the phase angle by comparing the effect of eddy current on the magnetic field distribution with the case that eddy current is not considered, and also the effect of material, thickness and radius of enclosure on the eddy current distribution is discussed.

Key Words : IPB, eddy current, FEM

1. 서 론

상분리 모선은 발전기를 통해 생성된 대전류를 주변압기까지 안전하게 수송하기 위한 특수한 모선 구조로서, 알루미늄 외함(Enclosure), 주전류 통전용 도체(Conductor), 도체의 고정 및 지지를 위한 지지절연물(Post insulator) 등으로 구성된다. 이와 같은 대전력용 기기의 개발을 위해서는 무엇보다도 먼저 적용 환경인 대전류 통전에 대한 전자계 현상의 해석을 바탕으로 도전재료 및 절연재료의 선정, 기본 배치 설계기술의 확보, 와전류에 의한 외함의 온도상승 해석 등이 요구된다. 특히 대전류에 의해 발생하는 자계 분포 및 와전류에 대한 정확한 이해는 외함의 온도상승 및 이로 인한 손실을 추정하는데 기초가 된다. 따라서 손실의 최소화 조건을 만족하는 상분리 모선의 최적 설계를 위해서는 모선 외함과 주변의 자계분포 및 와전류 특성에 대한 정확한 해석이 요구된다. 하지만 아직까지 상분리 모선에 대한 관심이 부족하여 이에 대한 정량적 해석을 수행한 예가 드물어 상분리 모선의 설계에 대한 기초가 매우 부족한 실정이다.

본 연구에서는 위와 같은 필요성에 의해 2차원 유한요소법을 이용하여 3상 상분리 모선의 자계 및 와전류 특성 해석을 수행하였다. 본 논문에서는 시변 자계 해석시 해석시간 단축을 위해 일반적으로 사용되는 시간차분 근사법 대신에, 유도체 전류를 순수한 정현파로 가정함으로써 페이지를 사용하는 복소수 근사법을 검토하였다. 이로써 외함에 유기되는 와전류 및 유기된 와전류가 상분리 모선 시스템의 자계 분포에 미치는 영향을 외함이 없는 경우와 비교하였으며, 위상별 분포 특성을 해석하였다. 또한 유도체 전류가 한주기 동안 변화하는 동안의 와전류 특성 변화를 검토하였으며, 외함의 재질, 두께 및 반경의 변화가 와전류 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 상분리 모선의 구조 및 와전류 해석이론

2.1 상분리 모선의 구조 및 해석모델 사양

그림 1은 상분리 모선의 구조 및 단면도를 나타낸 것이다. 상분리 모선의 내부 도체와 외함은 일반적으로 경량화를 위해 알루미늄이 주로 사용되며, 간혹 동도체가 이용되기도 한다. 발전기와 모선 외함은 절연 주름관(Insulating Bellows)에 의해 전기적으로 절연된다. 외함은 일정한 간격으로 구획화되어 있으며, 각 구획마다 3상 외함이 금속판으로 단락되어 접지되어 있다. 본 연구에서는 실제로 상용화되어 있는 Calvert사의 20kV, 3000A 정격의 상분리 모선을 해석모델로

* 正 會 員 : 現 代 重 工 業 (株) 機 電 研 究 所 研 究 員
 ** 正 會 員 : 漢 陽 大 電 氣 工 學 科 博 士 課 程
 *** 正 會 員 : 安 山 工 科 大 學 電 氣 科 專 任 講 師 · 工 博
 § 正 會 員 : 漢 陽 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博
 接 受 日 字 : 2001 年 1 月 31 日
 最 終 完 了 : 2001 年 10 月 17 日

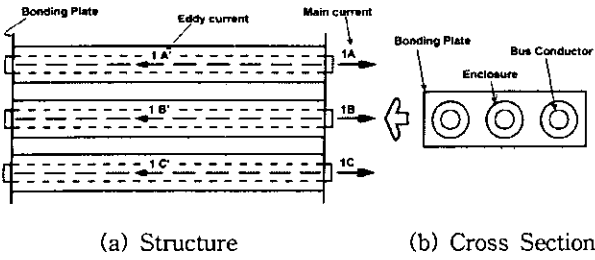


그림 1. 상분리 모선의 구조와 단면도
 Fig. 1 Basic diagram of isolated phase bus and its cross-section

표 1. 상분리 모선의 사양

Table. 1 Specification of isolated phase bus

정격 전압 (Bus Rated Voltage)	kV	20
정격 허용전류 (Specified Bus Ampacity)	A	3000
정격 충격 내전압 (Rated BIL Level)	kV, peak	125
단시간 전류 (Momentary Current)	kA	200
주도체 (Conductor)		
재질 (Material)		Aluminum
방사율 (Emissivity)		0.9
도전율 (Conductivity)	%IACS	59%
외경 (Outside Diameter)	mm	120.65
두께 (Wall Thickness)	mm	9.525
외함 (Enclosure)		
재질 (Material)		Aluminum
내부 표면 방사율 (Internal Emissivity)		0.9
외부 표면 방사율 (External Emissivity)		0.8
도전율 (Conductivity)	%IACS	59%
외경 (Outside Diameter)	mm	571.55
두께 (Wall Thickness)	mm	4.775
상간 거리 (Phase-Phase Spacing)	mm	843

사용하였으며, 표 1에 정격 사양을 나타내었다.

표 1에서 정격 허용전류는 허용된 온도 상승 범위 내에서 통전할 수 있는 최대 전류를 의미하며, 허용전류는 도체의 재질, 도체 및 외함의 구조, 주위 온도 및 설치 환경에 의해 결정된다. 내부 도체는 표피 효과를 고려하여 튜브형으로 설계되어 있으며 그 두께는 표피 깊이($\delta = 1/\sqrt{\pi f \mu \sigma}$)를 고려해 결정된다.

2.2 와전류의 해석방법

2.2.1 와전류의 수치해석적 접근

자기장과 전기적 현상사이의 관계는 다음의 Maxwell 방정식으로 기술할 수 있다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \tag{2-1}$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} \tag{2-2}$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \tag{2-3}$$

여기서 \mathbf{E} 는 전기, \mathbf{B} 는 자속밀도, \mathbf{H} 는 자계의 세기이며, \mathbf{J} 는 전류밀도이다.

이와 같은 계 방정식을 해석하는 방법은 크게 두 가지로 분류되는데 하나는 편미분방정식을 조작하여 계산하기 쉬운 다른 미분 방정식을 유도하는 것이다. 전기 및 자계 관련 해석과 특히 와전류 분포 특성에 대한 해석은 일반적으로 미분 방정식의 정식화에 의존한다. 그러나 편미분방정식은 여러 해를 갖으며, 경계 조건을 만족하는 해를 찾기가 쉽지 않으며, 복잡한 구조를 가진 경우 타당한 경계조건을 적용하기 어렵다. 또 다른 방법은 문제를 적분 공식화하는 것이다. 적분 공식화는 경계조건을 적용하기 좋을 뿐만 아니라 수치계산 방법에 응용하기도 쉽다[1].

와전류문제를 해석하는 대표적인 방법에는, 자기 벡터 포텐셜법, 전류 벡터 포텐셜법 및 자계의 세기에 의한 방법 등이 있는데, 본 연구에서는 자기 벡터 포텐셜법을 사용하였다[2]-[5].

자기 벡터 포텐셜법은 자기 벡터 포텐셜 \mathbf{A} 로 표현된 와전류를 포함하는 자계의 지배방정식에 의하여 해석하는 방법므로, 자기 벡터 포텐셜에 의한 지배방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\text{rot}(\nu \text{rot} \mathbf{A}) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \tag{2-4}$$

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \text{grad} \phi \tag{2-5}$$

여기서 ν 는 자기저항율 ($= \frac{1}{\mu}$), σ 는 도전율, ϕ 는 전위이며, \mathbf{J}_0 는 외부로부터의 입력 전류밀도이고, \mathbf{J}_e 는 와전류 밀도이다.

식 (2-4)를 2차원적으로 표현하면 식 (2-6)과 같이 되고, 와전류 밀도 \mathbf{J}_e 는 식 (2-7)로 주어진다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\nu_x \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\nu_y \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial y} \right) = -(\mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e) \tag{2-6}$$

$$\mathbf{J}_e = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \tag{2-7}$$

2.2.2 시변자계 해석을 위한 지배방정식 및 정식화

와전류를 고려할 경우, 식 (2-2)의 Ampere 법칙은 다음 식 (2-8)과 같이 표현된다.

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e \tag{2-8}$$

식 (2-3)으로부터 $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B}$ 인 자기벡터포텐셜 \mathbf{A} 를 정의할 수 있으며, 식 (2-1)로부터 식 (2-9), 식 (2.10)이 유도된다.

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{A}) \tag{2-9}$$

$$\nabla \times \left(\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0 \tag{2-10}$$

식 (2-10)에서 회전이 영(0)이므로 스칼라 포텐셜의 존재를 의미하며, 다음과 같이 스칼라 함수 ϕ 의 정도로 나타낼 수 있다[6].

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla \phi \quad (2-11)$$

$$\mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (2-12)$$

식 (2-12)의 우변 제 1항은 시변 전류에 의한 것이고, 제 2항은 전하에 의한 것이다. 특히 제 2항은 해석영역의 경계 조건에서 불균일성, 불평형, 비대칭 등이 원인이 된다. 위 식들로부터 식 (2-13)과 같은 와전류 밀도식이 유도된다.

$$\mathbf{J}_e = \sigma \mathbf{E} = -\sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi \quad (2-13)$$

식 (2-13)과 $\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$ 의 관계식을 식 (2-8)에 대입하면 식 (2-14)의 지배방정식이 얻어진다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 + \mathbf{J}_e = \mathbf{J}_0 - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi \quad (2-14)$$

$$\frac{1}{\mu} \left(\nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A} \right) = \mathbf{J}_0 - \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \sigma \nabla \phi$$

Coulomb gauge 조건에 의해 $\nabla (\nabla \cdot \mathbf{A}) = 0$ 이므로 식 (2-14)는 식 (2-15)로 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \nabla^2 \mathbf{A} = -\mathbf{J}_0 + \sigma \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} + \sigma \nabla \phi \quad (2-15)$$

전류가 z방향 성분만 존재한다고 가정하면 \mathbf{A} 역시 z방향 성분만 존재한다. 재료의 투자율이 등방성이라 보아 2차원으로 해석할 경우, 위 식을 전개하면 식 (2-16)과 같은 지배방정식이 얻어진다.

$$\frac{1}{\mu} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right]$$

$$= -J_{0z} + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \sigma \nabla \phi \quad (2-16)$$

2.2.3 시간 미분항의 처리

시간미분항의 처리하는 방법에는 차분근사법과 복소수 근사법의 2가지가 주로 이용된다. 차분근사법은 시간미분항을 차분적인 방법으로 시간축 Δt 에 의해 이산화 시켜서 반복 계산하는 방법이며, 과도해를 비롯하여 비선형 해석이 가능한 장점을 가진다. 그러나 반면에 계산시간이 길어지며, Δt 의 설정 방법에 따라서 해의 정도가 좌우되는 결점이 있다.

복소수 근사법은 벡터 포텐셜이나 전류밀도 등과 같은 전자계의 모든 물리량이 교류 정상상태에서는 시간에 대해 정현적 변화를 한다고 가정하여 이것을 복소수로 표현하고, 시간미분 $\frac{\partial}{\partial t}$ 를 $j\omega$ 로 변환하여 벡터 기호법적으로 연산하는 방법이다[1].

따라서 여기전류와 전압 등이 다같이 정현적 변화를 하는

선형 해석의 경우는 정확한 해를 구할 수 있으나, 자성체 내의 자기적 특성을 비선형 해석할 경우는 일반적으로 큰 오차를 가져 올 염려가 있다. 특히 고조파문제를 고찰할 필요가 있는 경우에는 복소수근사법의 적용은 불가능하게 된다. 벡터 포텐셜 및 전류밀도가 정현적 변화를 하는 경우에, 이것을 복소수로 표현하면 식 (2-16)은 식 (2-17)과 같이 된다.

$$\frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial x} \right) + \frac{1}{\mu} \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{\partial \dot{\mathbf{A}}}{\partial y} \right) = -\mathbf{J}_0 + j\omega \mathbf{A} + \sigma \nabla \phi \quad (2-17)$$

여기서 $\dot{\mathbf{A}}$ 및 $\dot{\mathbf{J}}_0$ 를 복소수로 처리하기 위해서는 계산기의 기억용량이 커지게 되지만, 차분근사법과 같은 시간적 계층의 처리 과정이 없어 반복계산이 불필요하므로 계산 시간은 단축된다.

이 방법에 의하면 근사 결과가 복소수로 되므로 기준 phasor가 결정되어야 한다. 식 (2-17)의 경우에는 입력전류 $\dot{\mathbf{J}}_0$ 가 기준 phasor가 되며, 입력전류가 없고 자속량 등이 경계 조건으로 주어지는 경우에는 주어진 자속이 기준 phasor로 된다. 따라서 해석결과와 phasor량의 편각은 기준 phasor와의 위상차로 나타난다. 본 해석에서는 각 외함의 서로 단락되어 전기적으로 폐회로를 이루므로 결국 3상 와전류의 합은 0이 된다. 그러므로 우변의 제 2항 $\nabla \phi = 0$ 이라고 할 수 있다[7]. 이를 이용해 식 (2-17)의 우변을 정식화하면, 다음과 같다.

$$-\int J_0 N_{ie} dx dy + j\omega \int \sum_{i=1}^3 \sigma N_{ie} N_{je} A_{ie} dx dy \quad (2-18)$$

이상을 종합하여 계 방정식을 구성하면 식 (2-19)와 같다.

$$[\mathbf{K}_{ij}][\mathbf{A}_{ie}] + j\omega[\mathbf{M}_{ij}][\mathbf{A}_{ie}] = \{\mathbf{F}_e\} \quad (2-19)$$

여기서,

$$[\mathbf{K}_{ij}] = \frac{1}{4 \Delta_e} \begin{bmatrix} b_1 b_1 + c_1 c_1 & b_1 b_2 + c_1 c_2 & b_1 b_3 + c_1 c_3 \\ b_2 b_1 + c_2 c_1 & b_2 b_2 + c_2 c_2 & b_2 b_3 + c_2 c_3 \\ b_3 b_1 + c_3 c_1 & b_3 b_2 + c_3 c_2 & b_3 b_3 + c_3 c_3 \end{bmatrix}$$

$$[\mathbf{M}] = \frac{\sigma \Delta_e}{12} \begin{bmatrix} 2 & 1 & 1 \\ 1 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \end{bmatrix}, \quad \{\mathbf{F}_{ie}\} = \frac{-J_0 \Delta_e}{3} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix}$$

이다.

유한요소법에 의해 식 (2-19)의 시스템 행렬의 해를 구하면 각 절점에서의 자기벡터 포텐셜값을 계산할 수 있다. 따라서 삼각형 요소의 자속 밀도는 $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ 의 관계식으로부터 식 (2-20)과 같이 된다.

$$\mathbf{B}^e = \frac{1}{2 \Delta_e} \sum_{j=3}^3 (c_j^e \mathbf{a}_x - b_j^e \mathbf{a}_y) A_j^e \quad (2-20)$$

최종적으로 외함에서의 와전류 밀도는 $\mathbf{J}_e = \text{Re}(j\omega \sigma \mathbf{A}) = -\omega \sigma \mathbf{A}_{imag}$ 이며, 절점의 J_{ie} 를 삼각형 요소의 전류밀도로 환산하고 각 요소면적을 곱하여 누적함으로써 각 상 외함의 전류를 구할 수 있다.

$$J_{ed}(x, y) = \sum_{i=1}^3 N_i J_{ie}, \quad x, y \text{ 는 세 점의 중심} \quad (2-21)$$

3. 해석 및 연구결과

3.1 유한요소 해석 모델

본 해석에 이용된 상분리 모선은 Calvert사의 20kV 3000A 모델이며 그림 3은 한 상에 대한 요소분할도를 확대하여 나타낸 그림이다. 그림에서 가상경계는 요소 개수 조절과 요소 분할의 편의를 위해 설정한 것이다. 한 상 내의 절점과 요소 수는 각각 1,911개와 3,090개이다.

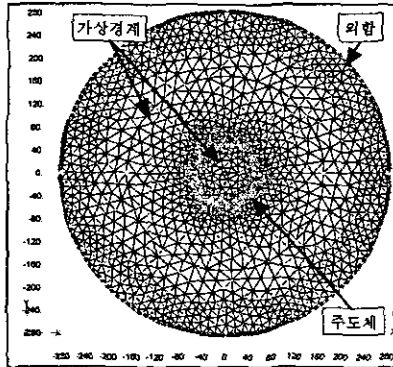


그림 3. 1상 요소분할도

Fig. 3 Meshed figure of one phase bus of IPB

그림 4에서 3상 모선과 고정 경계사이의 3층의 경계는 그림 3에서와 마찬가지로 요소 개수 조절과 요소분할의 편의를 위해 설정한 가상 경계이며, 3상 해석시 사용된 절점과 요소 수는 각각 11,362개와 22,722개이다.

본 해석에서는 각 상 도체로부터 상간거리 3배 정도의 경계를 정하고 이 경계에 고정 경계 조건으로 $\mathbf{A}=0$ 를 부여하였다. 이는 자속밀도 \mathbf{B} 가 반경 r 에 대해 도체 외부에서는

$$\mathbf{B} \propto \frac{1}{r}$$

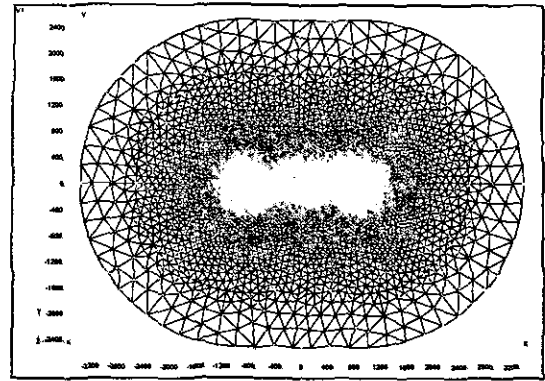
로 거리에 반비례해서 감소하고, 또한 3상 평형전류 ($\sum \mathbf{J}_0 = 0$)에 의해 상간거리의 3배 이상 떨어진 지점에서는 자계가 서로 상쇄되어 0에 가까워지기 때문이다. 또한 해석 오차를 줄이기 위해 경계는 3상을 고려한 형상으로 설계하였으며, 이러한 설계로 자계의 왜곡을 최소화할 수 있고 해석의 정밀도를 높일 수 있다.

3.2 해석결과 및 고찰

3.2.1 자계 분포 특성

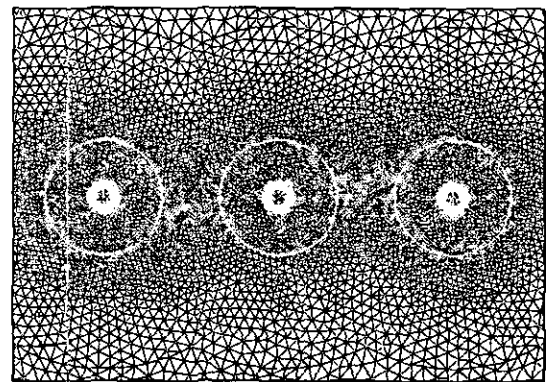
3.2.1.1 외전류를 고려하지 않은 3상 모선의 자계 해석

외전류 해석에 앞서 3상 모선 도체에 의한 자속 분포 특성을 파악하기 위해 외함이 없는 경우의 전자계 현상을 해석하였다. 해석 모델은 동일하며, 외함의 도전율을 공기와 같도록 하여 계산한 것이다. A상 입력 전류를 기준 페이저(phasor)로 하여, A상의 위상 $\omega t = 0^\circ$ (B상 $\omega t = 120^\circ$, C상 $\omega t = 240^\circ$)



(a) 해석영역 요소분할도

(a) Meshed figure of analysis domain



(b) 외함 주변 상세분할도

(b) Detailed figure near enclosures

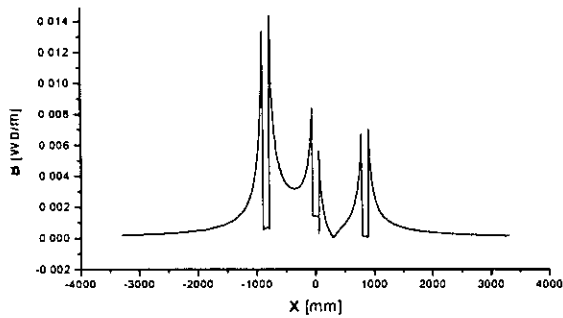
그림 4. 상분리 모선의 요소분할도

Fig. 4 Meshed figure of IPB

일 때를 기준으로하여 해석을 수행하였다. 그림 5 (a)는 $\omega t = 0^\circ$ 일 때 x축상에서의 자속 밀도의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 A상의 전류가 가장 크므로 그 영향이 가장 큰 것을 알 수가 있다. 그림 5 (b)는 해석 영역 내에서 외함 부근의 자속 분포를 나타낸 것이며, 여기서 외함 주변의 자속이 밀하게 보이는 것은 외함 및 그 부근의 요소가 밀하게 구성되어 있어 자속의 표현 빈도가 높은 것을 의미하며 실제로 그 부분의 자속밀도가 더 큰 것을 의미하진 않는다. 그림 5에서 A상 외함과 B상 외함 사이의 자속분포를 보면, A상 전류에 의한 자계와 B상 전류에 의한 자계가 이 부분에서 서로 중첩되어 강화됨을 알 수 있으며, 이와 반대로 B상 외함과 C상 외함 사이에서는 자계가 서로 상쇄되어 약해짐을 볼 수가 있다. 자계가 가장 약한 부분이 B상 쪽으로 치우친 것은 A상 전류에 의한 영향으로 판단된다.

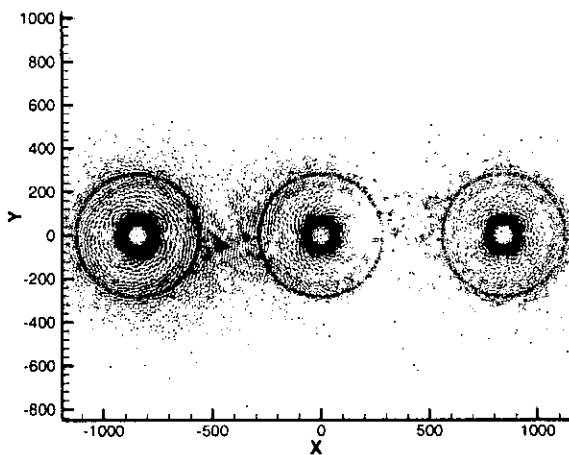
3.2.1.2. 외전류를 고려한 3상 모선의 해석

그림 6~9는 외함을 고려한 3상 모델을 해석한 것으로, 모선이 축방향, 즉 주도체 전류 진행방향으로 충분히 길어 축방향으로의 변화가 없다고 보고 축 방향에 수직인 단면에 대한 2차원 전자계 해석을 수행한 것이다. 그러나, 실제 모선의 외함은 일정 간격마다 단락판으로 단락되어 있어 단락판을 통



(a) X축상의 자속밀도 변화(Y=0)

(a) Variation of magnetic flux density on the X-axis (Y=0)



(b) 자속분포도

(b) Figure of magnetic field distribution

그림 5. 와전류를 고려하지 않은 상분리 모선의 자속분포 (A상 $\omega t = 0^\circ$)

Fig. 5 Magnetic field distribution of IPB when eddy current not considered (Phase A: $\omega t = 0^\circ$)

해 순환하는 와전류가 존재할 수 있으며, 이것은 축방향 이외의 성분으로 자계를 왜곡시킬 수 있다. 따라서 이 것의 영향을 정확히 고려하기 위해서는 향후 단락판에서의 와전류 및 이를 포함하는 상분리 모선 시스템에 대한 3차원 해석이 필요하다.

그림 6은 $\omega t = 0^\circ$ (A상 주도체 전류기준)일 때의 자속분포를 나타낸 것이다. 그림 6 (a)는 x축을 기준으로 자속밀도의 변화를 나타낸 것으로, 주전류가 큰 A상에서의 자속 밀도가 가장 큰 것을 알 수 있으며, 각 상 공히 외함 외부에는 자속이 거의 존재하지 않음을 확인할 수 있다. 그림 6 (b)는 이때의 자속 분포도를 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 외함 외부에는 자속이 거의 존재하지 않음을 알 수 있다. A상은 $\omega t = 0$ 이므로 B상은 $\omega t = 120^\circ$, c상은 $\omega t = 240^\circ$ 이고, 전류는 지면으로 들어가는 방향 기준이다. 그림에서 보듯이 주도체 내부의 자속 분포는 A상은 시계방향이고 B, C 상

은 반시계방향이다.

그림 7은 $\omega t = 45^\circ$ 일 때이며, B상에 의한 자속이 더 커지고 있음을 그래프에서 확인할 수 있다. 그림 8은 $\omega t = 60^\circ$ 일 때이며, 이 때는 B상의 전류가 가장 크며 지면으로 들어가는 방향을 가지는 반면, A상과 C상의 전류는 B상 전류의 1/2이 지면에서 나오는 방향이다. 그림 9는 $\omega t = 120^\circ$ 일 경우이며, 이때는 C상의 전류가 가장 크고 A상과 B상은 같은 크기의 자속 분포를 갖는다.

위와 같이 어느 경우에도 외함 외부에 자계는 거의 존재하지 않으며 이를 그림 5의 경우와 비교할 때 와전류가 미치는 영향을 확실히 알 수 있으며, 이러한 현상을 다음 절에 기술되어 있는 와전류 특성 해석에서 좀 더 자세히 고찰하였다

3.2.2 와전류 특성

3.2.2.1 위상에 대한 와전류 변화

본 해석에서는 모선의 주전류의 위상을 5° 씩 변화시키면서 상분리 모선의 각 상의 와전류의 크기를 해석하였다. 해석 결과로부터 외함에 유기되는 와전류는 해당 상의 주도체 전류와 180도의 위상차를 나타냄을 볼 수 있으며[그림 10] 그 크기가 주도체 전류의 99% 정도가 됨을 확인할 수 있었다. 와전류의 위상은 주도체 전류와 정반대이고 크기가 거의 같기 때문에 암페어 주회법칙에 따라 외함 외부의 자계는 거의 차폐되며, 앞의 그림 6에서 그림 9까지의 자계 분포도로부터 확인할 수 있다.

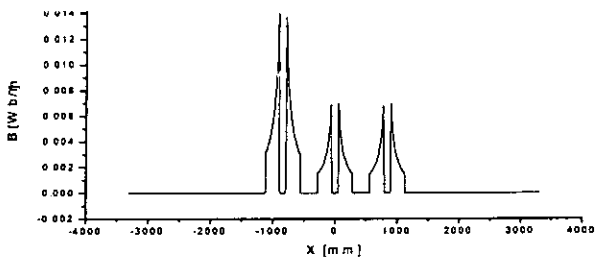
3.2.2.2 외함 반경 변화와 와전류 특성

다음은 상분리 모선 외함의 반경을 기본 모델에서 변화를 주었을 때 그 와전류 특성을 해석한 것이다. 외함의 내경을 기준으로 주어진 기본값의 -15%부터 15%까지 5%씩 변화시키면서 와전류 크기의 변화를 본 것이다. 단, 여기서 외함의 두께는 기본 모델과 같은 값으로 일정하다.

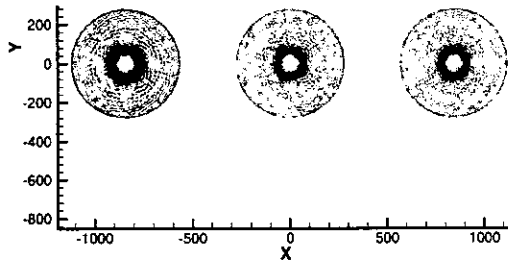
그림 11은 해석 결과를 나타내는데 그림에서 보듯 외함의 반경이 변화하여도 와전류 크기는 거의 일정함을 볼 수가 있다. 즉 주어진 모선 전류하에서는 외함에 유기되는 와전류가 그 반경에 거의 영향을 받지 않음을 알 수 있다. 단, 이 경우에 있어서 외함의 단면적이 변화하므로 전류밀도는 이에 따라 변화한다.

3.2.2.3 외함 두께 변화와 와전류

다음은 모선 외함의 두께를 변화시켰을 때의 와전류 특성을 살펴본 것으로, 외함 두께를 기본 모델의 값에서 -50%부터 50%까지 25%씩 변화시켰을 때 와전류 변화를 살펴본 것이다. 단, 내경은 281 mm로 기본 모델과 동일하게 하였다. 그림 12는 외함 두께 변화에 따른 와전류 크기를 나타낸 것으로 반경을 변화시켰을 때와 마찬가지로 그 크기가 거의 변화가 없음을 알 수 있다.



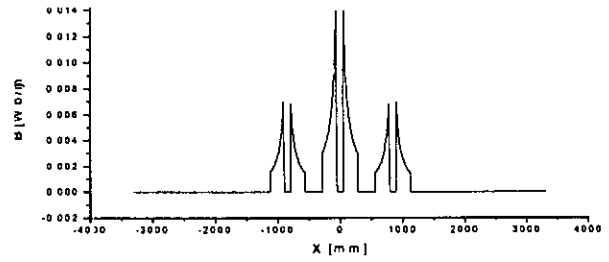
(a) X축상의 자속밀도 변화(Y=0)
(a) Variation of magnetic flux density on the X-axis (Y=0)



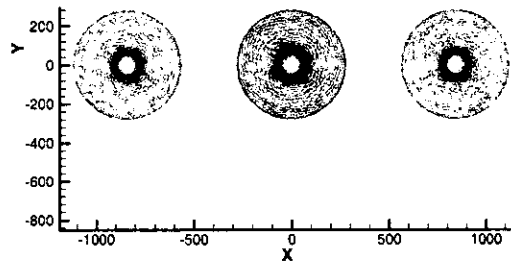
(b) 자속분포도
(b) Figure of magnetic field distribution

그림 6. 와전류를 고려한 경우 상분리 모선의 자속분포 (A상 $\omega t = 0^\circ$)

Fig. 6 Magnetic field distribution of IPB when eddy current considered (Phase A: $\omega t = 0^\circ$)



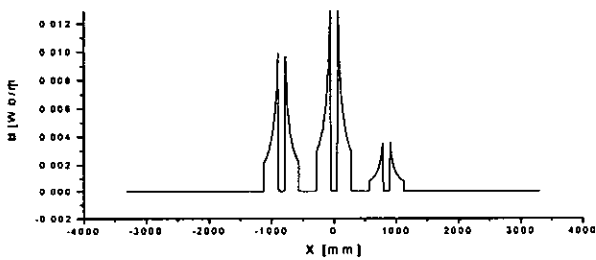
(a) X축상의 자속밀도 변화(Y=0)
(a) Variation of magnetic flux density on the X-axis (Y=0)



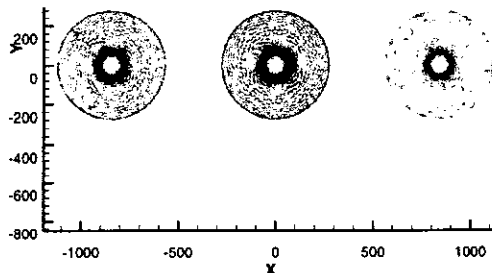
(b) 자속분포도
(b) Figure of magnetic field distribution

그림 8. 와전류를 고려한 경우 상분리 모선의 자속분포 (A상 $\omega t = 60^\circ$)

Fig. 8 Magnetic field distribution of IPB when eddy current considered (Phase A: $\omega t = 60^\circ$)



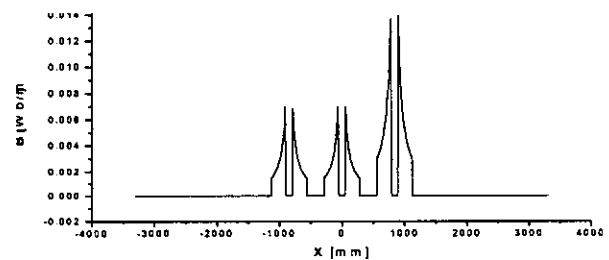
(a) X축상의 자속밀도 변화(Y=0)
(a) Variation of magnetic flux density on the X-axis (Y=0)



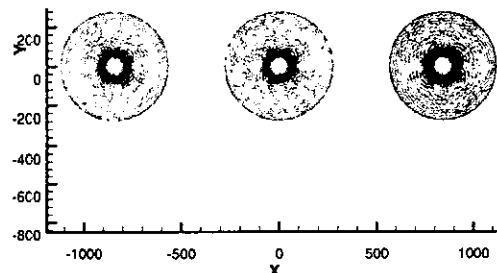
(b) 자속분포도
(b) Figure of magnetic field distribution

그림 7. 와전류를 고려한 경우 상분리 모선의 자속분포 (A상 $\omega t = 45^\circ$)

Fig. 7 Magnetic field distribution of IPB when eddy current considered (Phase A: $\omega t = 45^\circ$)



(a) X축상의 자속밀도 변화(Y=0)
(a) Variation of magnetic flux density on the X-axis (Y=0)



(b) 자속분포도
(b) Figure of magnetic field distribution

그림 9. 와전류를 고려한 경우 상분리 모선의 자속분포 (A상 $\omega t = 120^\circ$)

Fig. 9 Magnetic field distribution of IPB when eddy current considered (Phase A: $\omega t = 120^\circ$)

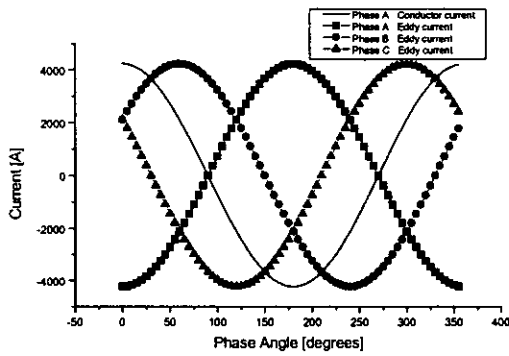


그림 10. 위상에 따른 와전류의 변화
Fig. 10 Variation of eddy current along the phase angle

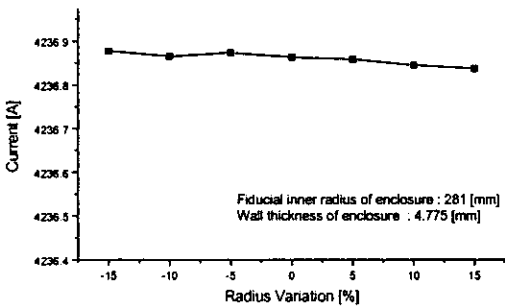


그림 11. 외함 반경의 변화와 와전류 [A상] ($\omega t = 0^\circ$)
Fig. 11 Eddy current with different radii of enclosure

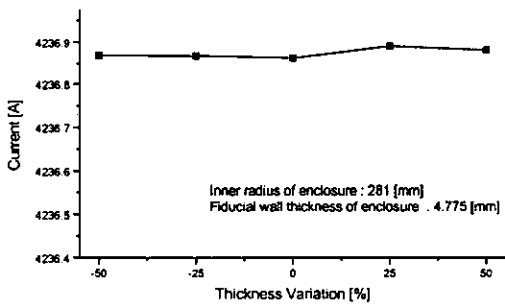


그림 12. 외함 두께 변화와 와전류 [A상] ($\omega t = 0^\circ$)
Fig. 12 Eddy current with different wall thickness of enclosure

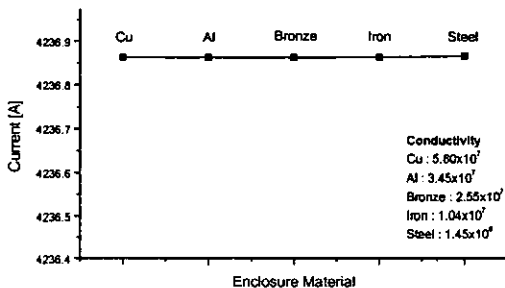


그림 13. 외함 재질과 와전류 [A상] ($\omega t = 0^\circ$)
Fig. 13 Eddy current with different materials of enclosure

3.2.2.4 외함 재질에 따른 와전류 특성

마지막으로 외함의 재질(도전율)을 변화시켰을 때의 와전류 특성을 살펴보았다. 적용한 재질의 도전율은 표 2와 같으며, 그림 13은 이 때의 와전류 해석 결과이다. 그림에서 알 수 있듯이 도전율의 변화에도 와전류는 크게 변하지 않음을 알 수가 있다.

표 2. 재질에 따른 도전율

Table. 2 Conductivity of materials

재 질	도전율	
	[S]	%IACS
Cu	5.80×10^7	100
Al	3.45×10^7	59
Bronze	2.55×10^7	44
Iron	1.04×10^7	18
Steel	1.45×10^6	2.5

4. 결 론

본 연구에서는 상분리 모선의 자계 및 와전류 특성에 대한 해석 연구를 수행하였다. 와류가 없는 경우의 자계를 해석하여 그 자속 분포를 확인하였고, 3상 평형 전류에 의해 모선에서 상간거리의 2배 이상 떨어진 위치에서는 자계가 미약함을 알 수 있어 해석에 적용한 경계가 타당함을 확인할 수 있었다. 또한 3상 자계해석을 수행하여 외함 외부의 자계가 외함에 유기된 와전류에 의해 거의 차폐됨을 확인하였으며, 와전류를 고려하지 않은 경우와 비교해 그 특성을 살펴보았다. 와전류와 주도체 전류의 관계를 살펴보기 위해 전류 한 주기에 대해 와전류 특성을 분석한 결과, 각 상 외함 모두에서 주도체 전류와 180° 의 위상차를 갖고 크기가 거의 동일한 와전류가 유기됨을 볼 수 있었고, 이것이 자계 차폐의 근원임을 알 수 있다. 그리고 외함의 반경을 변화시키면서 와전류 크기를 비교한 결과 와전류는 외함의 반경에 크게 영향을 받지 않음을 알 수 있었고, 외함의 두께를 변화시켰을 때 역시 같은 결과를 얻을 수 있었다. 마지막으로 외함의 재질에 따른 특성을 살펴보았는데, 외함의 도전율이 50배 가까이 차이가 나는 상황에서도 와전류는 거의 변하지 않았다.

이상에서 얻은 결과로 상분리 모선의 외함에 유기되는 와전류는 모선 전류에 의한 자계를 차폐하여 상간 상호 영향을 막아주는 역할을 하는 것을 알 수 있었으며, 와전류는 외함의 형상(두께 및 반경)과 재질에 크게 영향 받지 않음을 알 수 있었다. 하지만 여기서 와전류에 의한 손실 문제가 대두되는데, 와전류 특성해석으로 미루어 볼 때, 외함의 재질 및 형상을 적절히 조절함으로써 발열에 의한 온도 상승을 조절하여 주율열에 의한 손실을 최소화할 수 있음을 예측할 수 있으며, 이에 앞으로 발열에 의한 온도 분포 해석이 요구되어진다.

감사의 글

이 논문은 한국전력공사의 연구비 지원에 의해 기초전력공동연구소 주관으로 이루어진 과제 (관리번호 : 00-중-03) 결과로 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 任達鎬, “電氣係의 有限要素法”, 동명사, 1986
- [2] Jianming Jin, “The Finite Element Method in Electromagnetics”, John Wiley & Sons, 1993
- [3] 崔勝吉, “3차원 수치해석 기법을 이용한 전력용차단기의 전자계 현상 해석”, 博士學位論文, 漢陽大學校, 2000
- [4] O. Biro, K.Preis, “On the use of the magnetic vector potential in the finite element analysis of three-dimensional eddy currents”, IEEE Trans. on Magn., Vol. 2, No. 4, July 1989
- [5] A. Kameari, “Transient eddy current analysis on thin conductors with arbitrary connections and shapes”, J. of Comput. Phys., Vol.42, No.1, July 1981, pp.124-140
- [6] D. K. Cheng, “Field and Wave Electromagnetics”, Addison-Wesley, 1989
- [7] T. Nakata, N. Takahashi and K. Fujiwara, “Physical meaning of grad ϕ in eddy current analysis using magnetic vector potentials”, IEEE Trans. of Mag., Vol.24, No.1, pp.178-181, 1988

저 자 소 개



김진수 (金鎭洙)
 1974년 12월 24일 생. 1998년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 현대중공업 주식회사 기전연구소 연구원.
 E-mail : imania@korea.com



최승길 (崔勝吉)
 1965년 5월 18일 생. 1988년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 안산공과대 전기과 전임강사.
 E-mail : skc0386@ansantc.ac.kr



하덕용 (河德容)
 1963년 12월 23일 생. 1986년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.
 E-mail : dyha63@hanmir.com



강형부 (姜衡富)
 1937년 8월 29일 생. 1962년 일본 오사카대 전기공학과 졸업. 1964년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1969년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 현재 한양대 전자전기컴퓨터공학과 정교수.
 E-mail : hbkang@email.hanyang.ac.kr