

AC Magnetic Field Analysis of Current Carrying Conductor Design for EHV GIS

金 鉉勳* · 李 政燮* · 韓 聲鎮** · 鄭 鎮教*** · 李 秉潤*** · 朴 敬燁§
(H.H.Kim, J.S.Lee, S.C.Hahn, J.K.Jung, B.Y.Lee, K.Y.Park)

Abstract - The current carrying conductor and the tank which consist of GIS must be properly designed to withstand the electrical, thermal and mechanical stresses that arise during normal service and during short-circuit conditions. In order to design the current carrying conductor for EHV GIS, it is important to consider temperature-rise when rated current flows. In this paper, we analyze magnetic field distribution and power-loss, according to the change of materials when AC current flows into single-phase and three-phase bus bar, respectively. These results will be used as the basic design data when determining dimensions and materials for the current carrying conductor of EHV GIS.

Key Words : Gas Insulated Switchgear (GIS), Gas Circuit Breaker (GCB), Current carrying conductor

1. 서 론

초고압 전력기기는 일반적으로 정격전압 100kV 이상의 송변전용 전력기기를 말하지만, 광의적으로는 100kV 이상의 송압 및 강압 변전소에 사용되는 전력기기를 포함한다. 이 기기는 제품의 성능과 품질이 설계/소재/가공/조립기술에 크게 영향을 받으며 특히 설계기술의 비중이 절대적이다. 그리고 초고압·대용량의 기기일수록 고도의 기술을 필요로 하고, 제품의 신뢰성이 매우 중요시되는 기술 집약적 산업이어서 부가가치가 높은 편이다. 전력기기 산업은 국가 기간산업으로서 전 산업 및 국민생활의 에너지를 공급하는 산업이며 타 산업의 설비투자 및 사회간접자본 투자와 전원설비의 신규증설, 확충 등에 의해 수요의 영향을 많이 받는 산업인 반면 중간재 투입이 많은 업종으로 전문화, 계열화되어 있어 관련 산업에의 파급효과가 매우 큰 산업이다. 그런데 선진국들을 중심으로 그 동안 개발하여 온 초고압부문의 기기 개발은 아직 까지도 이들의 고유기술로서 후발국으로의 기술이전을 기피하고 있는 실정이다. 우리 나라는 외국기술의 도입에 의해

초고압 전력기기를 생산한 지가 거의 30년에 이르고 있다. 그 동안 독자적인 설계/개발기술의 확보는 미흡하지만 제조 기술/시험평가기술은 거의 세계적인 수준에 도달해 있다. 다행히 근래 들어 선진국들의 이 분야에 대한 연구개발 투자가 다소 주춤하고 있으며 후발 개발도국들도 이 분야의 진출에는 아직 역부족 상태에 있으므로 이 분야의 국제경쟁력을 세계수준으로 키워야 할 시점인 것이다.[1]

초고압 전력기기중에서 가스절연개폐장치(GIS: Gas Insulated Switchgear)는 변압기를 제외한 차단기(GCB: Gas Circuit Breaker), 단로기(DS: Disconnecting Switch), 접지개폐기(ES: Earthing Switch), 모선(Bus), 스페이스(Spacer), 붓싱, PT, CT 등을 SF₆ 가스가 들어있는 밀봉된 금속용기에 넣어서 시스템화한 전력기기이다.[1,2] 이 장치는 가스 절연 개폐기기와 고압 전류부가 모두 SF₆ 가스와 함께 금속 용기에 밀봉되어 있기 때문에 설계와 제작시 고도의 신뢰성이 요구된다. GIS는 1960년대말 처음 개발된 이후 고전압, 대용량화, 소형화가 계속되어 왔으나, 최근 들어 변전소부지를 확보하기가 점점 어려워짐에 따라 소형화에 대한 요구는 더욱 커지고 있다. 이에 따라 차단부와 CT를 동일 용기 내에 넣거나, 차단기, 단로기, 모선 등을 3상 일괄화하는 방법에 의해 소형화시키고 있다. 그런데 국내 관련 제작업체들은 거의 외국업체와의 기술제휴에 따라 독자적인 설계/해석기술을 확보하지 못하여 신제품 개발능력이 미흡하다고 생각된다.[3]

GIS의 기초 기술중 설계기술은 절연설계와 통전설계로 구분한다.[4] GIS 절연설계 기술은 가스중 절연 및 절연물 내

* 准 會 員 : 東亞大學 電氣工學科 碩士課程

** 正 會 員 : 東亞大學 電氣工學科 教授 · 工博

*** 正 會 員 : 韓國電氣研究所 前任研究員

§ 正 會 員 : 韓國電氣研究所 責任研究員

接受日字 : 1998년 10월 15일

最終完了 : 1999년 3월 31일

부, 연면(沿面), 삼중 접촉부(triple junction)등의 절연물 주위에 금속 이 물질이 혼입되어 있을 때의 절연성 확보가 중요하다.

한편, GIS에 필요한 통전 성능으로는 정격전류를 흘리는 정격 통전용량, 사고시 단락전류에 따른 단시간 통전용량 및 접지선에 흐르는 접지 유도전류 통전용량 등으로 나눌 수 있다. GIS와 같은 밀폐형의 모선에 연속으로 전류가 흐르는 경우 모선이 만드는 자속에 의한 손실이 GIS의 내부 및 외부 온도 상승의 원인이 된다. 온도 상승의 원인은 모선이 만드는 자속이 금속에 쇄교 함으로서 발생하는 와류손과 도체에 서의 줄손실등이 주된 발열원이 된다. 이 발열원이 모선 및 용기 구조물 등에 온도 상승을 일으키므로, 이것을 어떤 값 이하로 만들 필요가 있다. 특히 GIS의 소형화, 대용량화를 위해서 정격전류 통전시의 온도 상승이 중요하기 때문에 재료 특성을 고려하여 온도 상승한도를 만족하는 치수(탱크지름, 도체지름등) 및 재질(도체, 용기의 재질등)을 선택하여야 한다. 본 논문에서는 초고압 GIS 모선의 통전설계를 위한 연구로서 단상 및 삼상 모선에 교류 전류를 인가하였을 경우 치수에 관련된 탱크 지름, 도체 지름과 재질의 변화에 따른 자체분포 특성 및 전력손실을 계산하여 그 결과를 제시한다.

2. 초고압 GIS 모선의 교류자계 해석 이론

2.1 해석이론 및 지배 방정식

초고압 GIS 모선의 통전성을 평가하기 위해서 먼저 모선이 축방향으로 충분히 길다는 가정하에 2차원 해석을 한다. 모선에 정상 교류전류가 흐를 때의 전자기적 현상은 변위전류를 무시한 다음의 준정상 맥스웰 방정식(Quasi - static Maxwell's equation) [5] 으로 표현하며

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{E} = -j\omega\vec{B} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \vec{D} = \rho \quad (4)$$

식(3)으로부터 자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 는

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (5)$$

이고, 자속밀도 \vec{B} 와 자계 \vec{H} 는

$$\vec{H} = \nu \vec{B} \quad (6)$$

이고, 여기서 매질정수 ν 는 자기저항율로 투자율 μ 의 역수이다.

식 (1) 과 (5) 및 (6)으로부터 지배방정식

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) = \vec{J} \quad (7)$$

을 얻는다. 한편 도체에 유기되는 와전류는

$$\vec{J}_e = \sigma \vec{E} \quad (8)$$

이고, 식(8)은 식(2)와 식(5)로부터

$$\vec{J}_e = \sigma(-\nabla\phi - j\omega\vec{A}) \quad (9)$$

가 되는데, 여기서 ϕ 는 스칼라 포텐셜 이다.

이로부터 식(1)의 전류 \vec{J} 를 전원전류 \vec{J}_s 와 와전류 \vec{J}_e 로 나누어 다시 쓰면

$$\nabla \times \nu(\nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_s + \vec{J}_e = \vec{J}_s - \sigma(\nabla\phi + \frac{\partial \vec{A}}{\partial t}) \quad (10)$$

이 된다. 따라서 시간에 대해 정현적으로 변화하는 (sinusoidally time-varying) 전류가 z-방향으로 흐른다면 지배방정식의 2차원 표현은

$$\frac{\partial}{\partial x} (\nu_x \frac{\partial A}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\nu_y \frac{\partial A}{\partial y}) = -\vec{J}_s + j\omega\sigma\vec{A} + \sigma \frac{\partial \phi}{\partial z} \quad (11)$$

이 된다.

2.2 발생 손실[6]

GIS 모선은 도체와 금속용기로 구성되어 있다. 모선에 전류가 흐르면 도체에 손실이 생기며, 금속용기에는 도체에 흐르는 전류가 만드는 자계에 의해 와전류가 발생한다. 따라서 금속용기의 재질, 치수, 그리고 단상 통전 혹은 삼상 통전에 따라 발생하는 손실이 다르게 된다. 도체에 유기 되는 와전류는 식(8)과 같으며, 이를 이용하면 단위 길이당 도체의 손실 P는

$$P = \int \frac{I^2}{\sigma} dS \quad (12)$$

이며 여기서 dS 는 전류가 흐르는 미소 단면적이다. 본 논문에서는 금속용기에 유기되는 와전류로부터 용기에 발생하는 단위 체적당의 손실을 단상/삼상 통전, 도체와 탱크의 종류 및 치수 등의 여러 조건에 따라 고찰하였다.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 단상모선의 자계 및 손실해석

본 연구에서 다룬 단상 모선 모델은 그림 1과 같고, 사양은 표 1에 나타내었다. 표에서 보는바와 같이 모델 A ~ C 는 Al 도체이고, 모델 D ~ F 는 Cu 도체이다. 그리고 이들에 대해

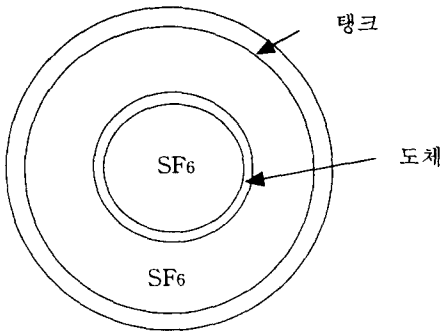


그림 (a) 단상 모선의 단면모델

Fig. (a) Cross section of single-phase bus bar

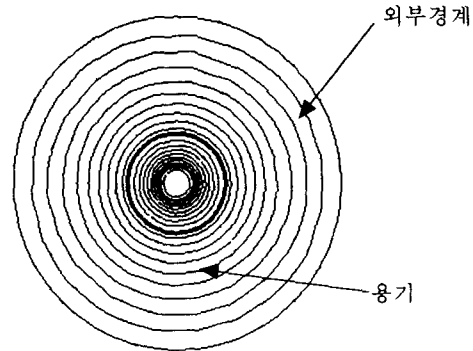


그림 2 (a) 자속분포 ($\omega t = 0^\circ$)

Fig 2. (a) Flux distribution ($\omega t = 0^\circ$)

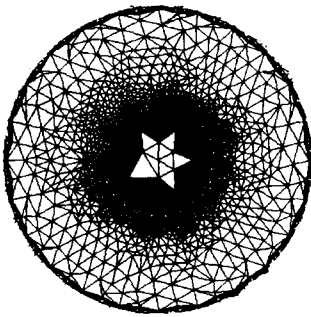


그림 (b) 유한요소 분할도

Fig. (b) Finite element meshes

그림 1 단상 모선의 단면 모델 및 요소 분할도

탱크의 재질을 Al과 Fe, STS (Stainless Steel)인 경우 도체 전류를 4,000[A], 6,000[A], 8,000[A]로 변화시켜 자계와 손실을 해석하였다. 유한요소 해석시 절점수는 589개, 요소수는 1,202개이며 전원 주파수는 60[Hz]이다.

표1 Case 1 (단상모선)

Table 1 Case 1 (Single-phase bus bar)

(단위 : mm)

사양 모델명	도체			TANK			전류	가스
	종류	내반경	외반경	종류	내반경	외반경		
Model A	Al	80	100	Al	300	305	4000/ 6000/ 8000[A]	SF ₆
Model B	Al	80	100	Fe	300	305		
Model C	Al	80	100	STS	300	305		
Model D	Cu	80	100	Al	300	305		
Model E	Cu	80	100	Fe	300	305		
Model F	Cu	80	100	STS	300	305		

(단. $\sigma_{Cu} = 5.8 \times 10^7 [S/m]$, $\sigma_{Al} = 3.82 \times 10^7 [S/m]$,

$\sigma_{STS} = 0.11 \times 10^7 [S/m]$, $\sigma_{Fe} = 1.03 \times 10^7 [S/m]$)

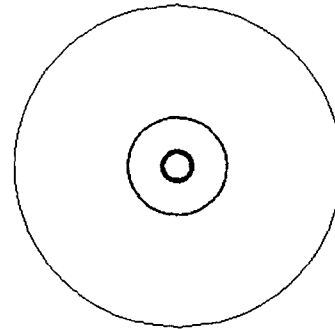


그림 2 (b) 자속분포 ($\omega t = 90^\circ$)

Fig 2. (b) Flux distribution ($\omega t = 90^\circ$)

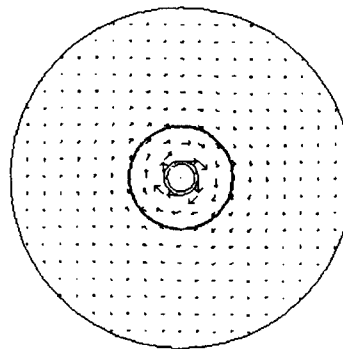


그림 3 (a) 자속밀도 벡터 ($\omega t = 0^\circ$)

Fig 3. (a) Flux Density ($\omega t = 0^\circ$)

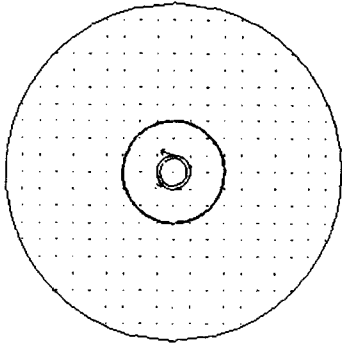


그림 3(b) 자속밀도 벡터 ($\omega t = 90^\circ$)
 Fig 3. (b) Flux Density ($\omega t = 90^\circ$)

유한요소 해석시 탱크에 유기되는 와전류에 의한 탱크의 차폐 효과를 알기 위하여 외부 경계는 탱크 외반경의 3배가 되는 곳에 고정경계조건을 설정하였다. 모델 A 에 4,000 [A]의 교류전류가 흐를 때 탱크부에서의 차폐효과를 알아보기 위하여 자속 분포도와 자속밀도 벡터를 그림 2와 3에 각각 나타내었다. 전류의 위상이 변화함에 따라 자속 및 자속밀도 분포가 달라짐을 알 수 있다. 그림 4와 5는 전류위상 변화에 따른 도체에서의 손실을 나타낸 그림으로 체적 당 손실은 도체 및 탱크재질의 영향을 받음을 알 수 있다. 도체의 재질을 Al과 Cu로 각각 다르게 하였을 때 탱크에서의 손실을 그림 6과 그림 7에 나타내었다. 그림 6과 7을 비교하여 보면 도체의 재질에 관계없이 탱크재질을 도전율이 작은 STS로 하면 탱크의 손실을 줄일 수 있어 향후 GIS 모선의 설계시 이를 고려하여야 할 것이다. 한편 그림 8과 그림 9는 도체의 전류를 변화시켰을 때 탱크에서의 손실을 나타낸 그림이다. 이 그림에서도 앞의 그림 6 및 7과 같이 탱크의 재질이 STS일 때 손실이 가장 적어짐을 알 수 있어 열 해석/설계시 이를 고려하여야 할 것이다.

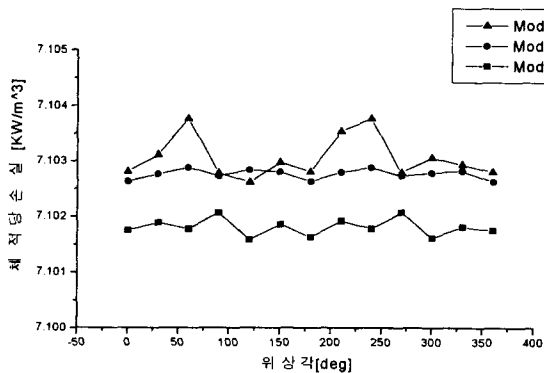


그림 4 도체가 Al일때의 도체부에서의 손실
 Fig. 4 loss of the conductor part (conductor : Al)

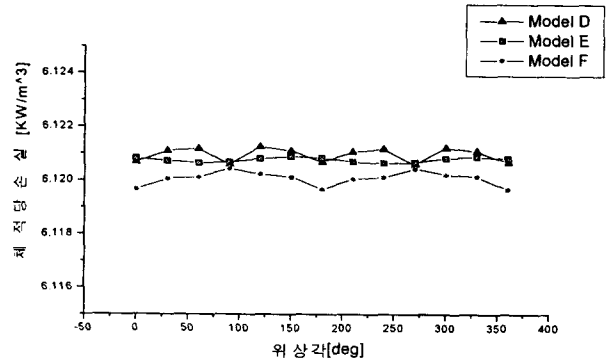


그림 5 도체가 Cu일 때의 도체부에서의 손실
 Fig. 5 loss of the conductor part (conductor : Cu)

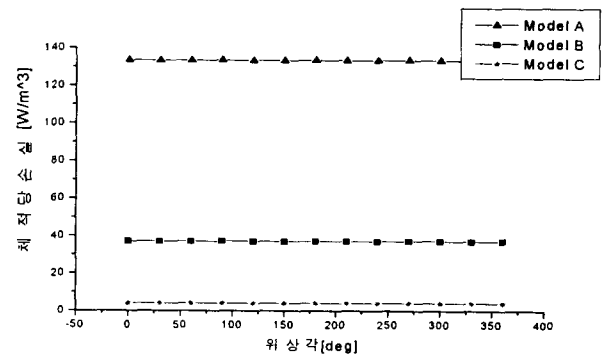


그림 6 도체가 Al일 때의 탱크부에서의 손실
 Fig. 6 loss of the tank part (conductor : Al)

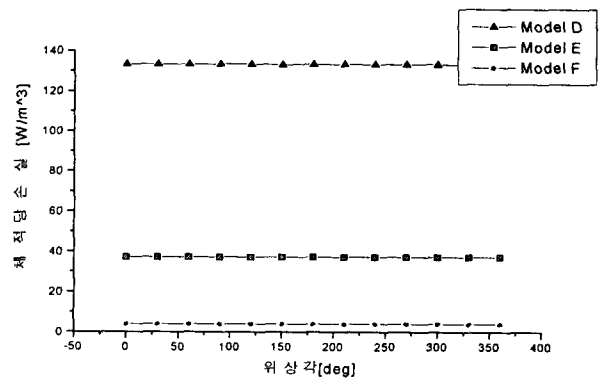


그림 7 도체가 Cu일 때의 탱크부에서의 손실
 Fig. 7 loss of the tank part (conductor : Cu)

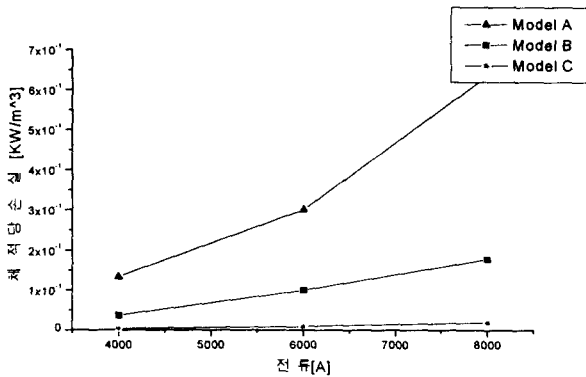


그림 8 전류에 따른 탱크부 손실 (도체가 Al일 때)
 Fig. 8 According to current tank part loss (conductor : Al)

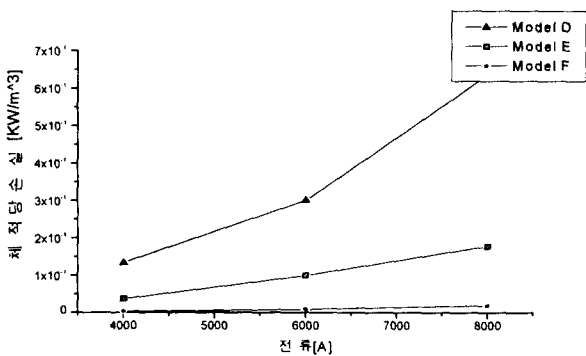


그림 9 전류에 따른 탱크부 손실(도체가 Cu일 때)
 Fig. 9 according to current tank part loss (conductor : Cu)

3.2 삼상모선의 자계 및 손실 해석

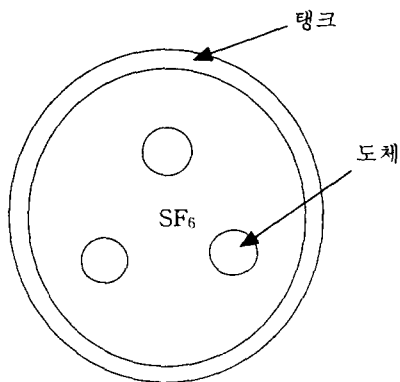


그림 (a) 삼상 모선의 단면 모델
 Fig. (a) Cross section of three-phase bus bar

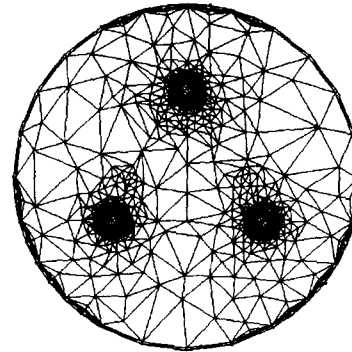


그림 (b) 유한요소 분할도
 Fig. (b) Finite element meshes

그림 10 삼상 모선의 단면 모델 및 요소 분할도

본 연구에서 다룬 삼상 모선의 모델은 그림 10과 같고 모델 사양은 표 2와 같다. 표에서 보는바와 같이 3가지 모델로 해석하였으며 도체 재질은 모두 Cu 이고 탱크 재질은 Al, Fe, STS 로 하여 자계와 손실을 해석하였다. 삼상 교류전류의 실효치는 6,000 [A] 이고 절점수는 772개, 요소수는 1,571개이며 입력 주파수는 60[Hz] 이다.

표 2 Case 2 (삼상모선)

Table 2 Case 2 (Three-phase bus bar)

단위(mm)

사양 모델	도체	탱크	전류 [A]	도체 반경 (mm)	탱크 반경 (mm)	탱크 두께 (mm)	도체 간격 (°)	가스
Model I	Cu	Al	6000	60	600	9	120°	SF ₆
Model J	Cu	Fe	6000	60	600	9	120°	SF ₆
Model K	Cu	STS	6000	60	600	9	120°	SF ₆

(단. $\sigma_{cu} = 5.8 \times 10^7 [S/m]$, $\sigma_{Al} = 3.82 \times 10^7 [S/m]$,

$\sigma_{STS} = 0.11 \times 10^7 [S/m]$, $\sigma_{Fe} = 1.03 \times 10^7 [S/m]$)

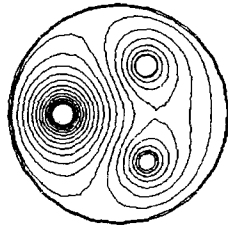


그림 (a) 자속분포 ($wt = 0^\circ$)
Fig. (a) Flux distribution ($wt = 0^\circ$)

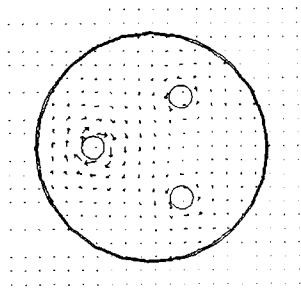


그림 (b) 자속밀도 벡터 ($wt = 0^\circ$)
Fig. (b) Flux Density ($wt = 0^\circ$)

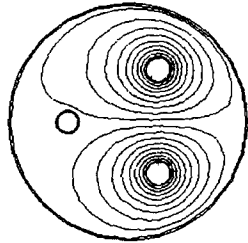


그림 (c) 자속분포 ($wt = 90^\circ$)
Fig. (c) Flux distribution ($wt = 90^\circ$)

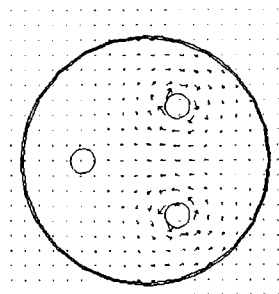


그림 (d) 자속밀도 벡터 ($wt = 90^\circ$)
Fig. (d) Flux Density ($wt = 90^\circ$)
그림 11 모델 I의 자속과 자속밀도 분포

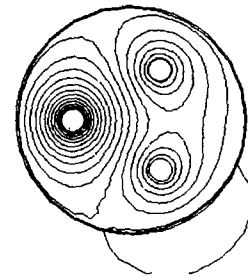


그림 (a) 자속분포 ($wt = 0^\circ$)
Fig. (a) Flux distribution ($wt = 0^\circ$)

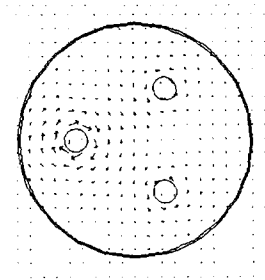


그림 (b) 자속밀도 벡터 ($wt = 0^\circ$)
Fig. (b) Flux Density ($wt = 0^\circ$)

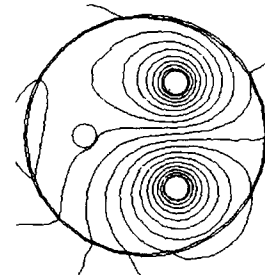


그림 (c) 자속분포 ($wt = 90^\circ$)
Fig. (c) Flux distribution ($wt = 90^\circ$)

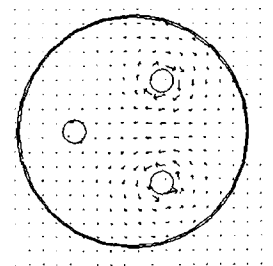


그림 (d) 자속밀도 벡터 ($wt = 90^\circ$)
Fig. (d) Flux Density ($wt = 90^\circ$)
그림 12 모델 J의 자속과 자속밀도 분포

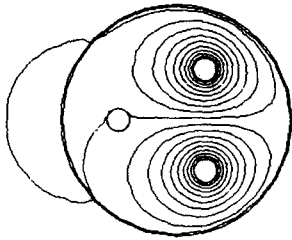


그림 (a) 자속분포 ($wt = 0^\circ$)
Fig. (a) Flux distribution ($wt = 0^\circ$)

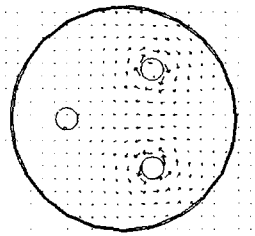


그림 (b) 자속밀도 벡터 ($wt = 0^\circ$)
Fig. (b) Flux Density ($wt = 0^\circ$)

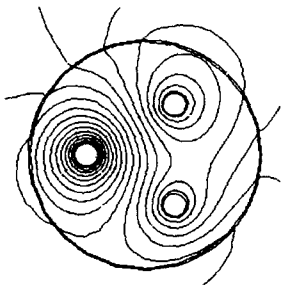


그림 (c) 자속분포 ($wt = 90^\circ$)
Fig. (c) Flux distribution ($wt = 90^\circ$)

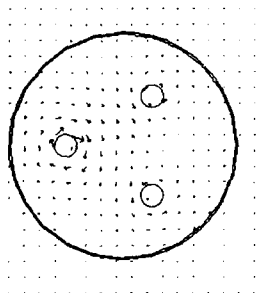


그림 (d) 자속밀도 벡터 ($wt = 90^\circ$)
Fig. (d) Flux Density ($wt = 90^\circ$)

그림 13 모델 K의 자속과 자속밀도 분포

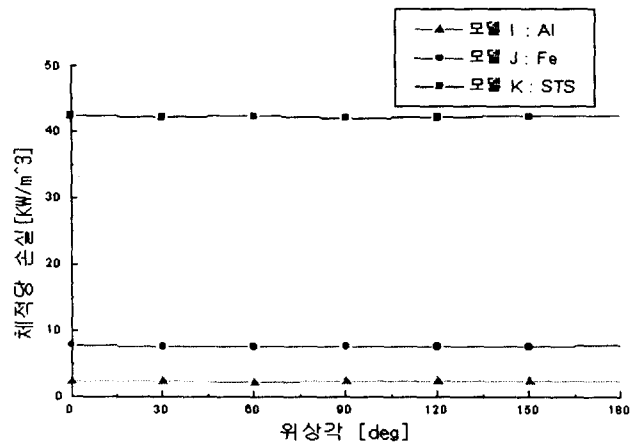


그림 14 탱크부에서의 체적당 전력 손실
Fig.14 The power loss of tank

삼상모선에 정상 교류전류(3상)가 흐를 때 각 모델에서의 자속 및 자속밀도분포를 그림 11~ 13에 나타내었다. 그림에서 보듯이 삼상모선에서는 전류의 위상 변화에 따라 자속의 중심 축이 옮겨가는 것을 알 수 있으며 자속분포도를 보면 Al 탱크 재질일 경우(모델 I)는 저항율이 작기 때문에 유도전류가 흐르기 쉽고, 자속은 탱크와 도체간에 집중하게 되므로 자계 차폐(magnetic shielding)가 상대적으로 잘된다. 그러나 탱크 재질을 Fe 와 STS을 사용 했을 때는 자계 차폐가 되지 않으므로 탱크 설계시 이를 고려해야 할 것이다. 탱크에서의 손실을 나타낸 그림 14를 보면 도전율이 클수록 전력손실이 작아지는 것을 알 수 있고, 위상에 따른 탱크부에서의 체적당 전력손실은 거의 변화가 없는 것을 알 수가 있다.

4. 결론

GIS와 같은 밀폐형 모선에 전류가 흐르면 모선이 만드는 자속에 의한 손실이 GIS의 온도 상승의 원인이 된다. 본 논문에서는 단상 및 삼상 GIS 모선에 단상 혹은 삼상의 교류전류를 통전하여 도체 및 탱크의 재질과 치수 변화에 따른 자계 분포와 전력손실을 해석하였다. 단상 모선에 정상 교류전류가 흐를 때 탱크에서의 손실은 도체전류에 비례해서 커지고 도전율이 큰 Al 보다 도전율이 작은 STS의 경우 손실이 작은 것을 확인할 수 있었다. 그러나 삼상 일괄형 모선에서는 반대로 탱크의 도전율이 큰 쪽이 손실이 작은 것을 확인할 수가 있다. 따라서 단상 모선일 경우 도전율이 작은 것을, 삼상 일괄형 모선일 경우 도전율이 큰 물질을 탱크 재질로 사용하면 손실을 줄일 수 있음을 확인할 수 있었다. 본 논문에서는 다루지 않은 단락시 고장전류에 의한 자계 및 손실해석도 곧 발표될 것이며 이들 결과는 향후 GIS 모선과 탱크의 치수 및 재질을 결정하는 설계자료로 이용될 수 있을 것이다.

본 연구는 산업자원부 지원 중기거점 기술개발 과제인 초고압 전력기기 기초 설계기술 개발로 수행한 연구 결과임.

참 고 문 헌

[1] 한국전기연구소, "초고압 전력기기 기술개발을 위한 연구 기획", 통산 산업부, 1997.
 [2] M.Khalifaed, "High Voltage Engineering", Chap.10, Marcel Dekker, Inc., 1990, New York
 [3] 이 경행, "초고압 전력기기의 기술 동향", 전기학회지, 제46권 제8호, pp.23-30, 10월, 1997년.

[4] H.Sadakuni, K.Sasamori, H.Hama, K.Inami, "Insulation and current carrying design for GIS", JIEE, pp.33-42 SP-96-12, 1996.
 [5] JIEE, "일본 전기학회 기술 보고", 제208호, 2월, 1986.
 [6] 효성중공업(주) 기술 연구소, "362kv 63kA GIS 설계 및 제조 기술 개발에 관한 연구", 한국전력공사, 1996.

저 자 소 개



김 현 훈 (金 鉉 勳)
 1975년 1월 7일생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 3월 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (051) 200-6746
 E-mail : d9434786@seunghak.donga.ac.kr



정 진 교 (鄭 鎭 敎)
 1967년 10월 18일생. 1991년 강원대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구소 전력기기연구부 스위치기어연구팀에서 선임연구원으로 재직중.

Tel : (0551) 280-1565
 E-mail : bylee@keri.re.kr



이 정 섭 (李 政 燮)
 1975년 2월 21일생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 3월 ~ 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (051) 200-6746
 E-mail : d9335503@seunghak.donga.ac.kr



이 병 윤 (李 秉 潤)
 1967년 11월 9일생. 1990년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 한국전기연구소 전력기기연구부 스위치기어 연구팀에서 선임연구원으로 재직중.



한 성 진 (韓 聲 鎭)
 1955년 6월 27일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1994년 8월 ~ 1995년 8월 캐나다 Queen's 대학 방문 교수. 1983년 3월 ~ 현재 동아대 공대 전기공학과 교수.

Tel : (051) 200-7737
 E-mail : schahn@daunet.donga.ac.kr



박 경 엽 (朴 敬 燁)
 1957년 1월 3일생. 1979년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1986년 부산대 공대 전기공학과 졸업(석사). 1993년 영국 Liverpool 대학 졸업(공학박). 1978년부터 1981년 까지 효성중공업 전장설계부에서 사원으로 근무.

1981년부터 한국전기연구소에서 재직중이며 현재 전력기기 연구부 스위치기어 연구팀에서 책임연구원으로 재직중
 Tel : (0551) 280-1561