

## GIS 모선부 절연설계/평가 프로그램 개발

김동현, 석복열, 김영기, 이형구, 강종호, 조만규  
현대중공업

### The Development of Program for Insulation Design/Evaluation of GIS Bus Section

Kim Dong-Hyun, Seok Bok-Yeol, Kim Young-Ki, Lee Hyeong-Goo, Kang Jong-Ho, Cho Man-Kyu  
Hyundai Heavy Industries Co., Ltd

**Abstract** - In this study, an insulation design program which can calculate electric field of the GIS bus parts easily was developed. It also can evaluate the insulation safety depending on gas density. For bus parts of 1φ GIS, it was intended to provide a optimal diameter of a conductor and an enclosure automatically for the convenience of GIS insulation designer. This program was coded by Visual Basic and electric field was calculated by the Charge Simulation Method(CSM), which is one of the most accurate method for an electric field analysis.

## 1. 서 론

당사는 다양한 전압레벨과 용량의 가스절연개폐장치(GIS: Gas Insulated Switchgear)를 설계·생산하는 업체로서, 고객의 요구에 따라 다양한 사양의 GIS를 신속하고 정확하게 설계해야 한다. 이러한 실정을 고려하여 실무자의 설계업무를 지원하려는 목적으로 GIS 모선부 절연설계 및 평가 프로그램을 개발하였다. 삼상 GIS 모선부 전계해석시 정확도가 가장 높은 방법 중 하나인 전하중첩법을 프로그램에 적용하였으며[1-3], Visual Basic 언어를 이용하여 외함반경, 도체의 위치, 및 인가전압 등의 몇 가지 설계 변수만을 입력하는 것으로 다양한 사양의 형상에 대하여 자동으로 전계계산 및 절연안전도를 평가할 수 있는 프로그램을 개발하였다. 특히, 단상에 대해서는 최적값을 도출하여 사용자로 하여금 편리하도록 해석하였다. 또한, 열·유동해석을 이용하여 GIS 모선부의 발열특성을 파악하였으며, 이로 인한 GIS 내부의 국부적인 밀도변화에 따른 절연상의 문제점을 고려하여 허용전계기준을 적용함으로써 GIS의 절연신뢰성을 향상시키고자 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 단상 전계해석 기법

단상 GIS 모선부의 단면은 그림 1(a)와 같은 형태의 중심원통형 모델로 간략화 할 수 있다. 이와 같은 모델은 수치해석적 방법을 이용하여 전계값을 계산할 수도 있으나 좌표변환법이나 등가사상법 등을 이용한 식(1)로부터 최대전계를 도출하였다[4]. 이러한 방법을 이용하여 보다 쉽고 정확하게 전계값을 계산할 수 있으며 또한 전계가 최소가 되는, 변수의 최적값도 손쉽게 추정할 수 있다.

$$E = \frac{V}{r \ln \frac{R_2}{R_1}} \quad \text{식(1)}$$

### 2.2 삼상 전계해석 기법

삼상 GIS 모선부 전계계산은 공간상의 전위분포 및 전계분포를 간단한 수식으로 도출하기 어려우므로 수치해석적 방법인 전하중첩법(Charge Simulation Method)을 이용하였다. 그림 1(b)와 같이 GIS 모선부 전계해석을 위해서 외함 외부 및 도체 내부에 가상으로 총 200개의 무한선전하를 배치함으로써 전위분포 및 전계를 계산하였다. 가상전하는 도체 경계면의 전위를 기준으로 오차가 10<sup>-4</sup>[%]이내가 되도록 배치하였다.

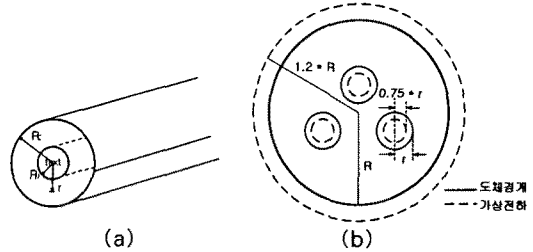


그림 1 단상 및 삼상 GIS 모선부 단면도

### 2.3 절연안전도

본 논문에서는 설계 모델이 전기적 절연 측면에서 안전성 여부를 판단하기 위하여 '절연안전도' 개념을 도입하였다. 이는 단상 및 삼상 GIS 모선부에 대한 전계해석에 의한 최대전계와 제조사들의 허용전계기준을 비교함으로써 계산된다.

$$\text{절연안전도} = \frac{\text{허용전계기준}}{\text{최대전계값}}$$

절연안전도가 1을 기준으로 이보다 크면 전기절연 측면에서 안전함을 나타내고 작으면 절연파괴의 가능성이 있음을 나타낸다[5].

### 2.4 GIS 모선부 밀도분포 해석

GIS 내부의 도체 및 여타의 원인에 의한 발열현상이 발생할 경우에는 GIS 내부에 밀도가 국부적으로 변할 수 있고, 상대적으로 낮은 밀도부위에서는 절연내력의 저하로 인하여 절연파괴의 원인이 될 수 있다. 따라서, GIS 모선부의 절연설계를 위해서는, 기존의 방식대로 정해진 가스의 압력에 해당하는 허용전계기준과 비교하여 설계하기보다는 GIS 내부에서 발생하는 발열현상에 따른 모선부 내부의 국부적인 밀도변화까지 고려한 설계가 이루어져야 한다[5].

#### 2.4.1 유동해석

GIS 모선부의 밀도 분포를 추정하기 위하여 단상 및

삼상 모선에 대하여 유동해석을 수행하였다. GIS 모선부에서는 도체가 통전전류 손실 등에 의하여 발열되면 도체의 온도가 상승하여 도체 주위의 밀도가 낮아져서 내부 유체의 상승기류가 발생하게 된다. GIS 모선부의 유동해석을 위해서 GIS 모선부의 길이방향으로 유동 및 열전달이 없다고 가정하여 모선의 단면 부분만을 유동장으로 정의한 2차원 모델을 이용하였으며 이상기체 상태방정식을 이용하여 밀도의 분포를 추정하였다.

#### 2.4.2 단상유동해석 결과

단상 모선에 대한 총 80회의 유동해석을 수행하였으며 결과의 일부를 그림 2에 나타내었다. 그림 2에서 볼 수 있듯이 모선부의 주 열전달 매카니즘은 자연대류에 의한 것이므로 밀도차이에 의한 비교적 약한 유동이 일어난다. 즉 전류가 통전 되면서 고온의 도체 부근에는 내부 가스인 SF<sub>6</sub>가스의 밀도가 줄어들고 그로 인한 상승기류의 유동이 발달하므로 탱크의 온도 분포는 상부에서 가장 고온을 나타내며, 하부로 갈수록 온도가 떨어져 하단에서 가장 저온을 나타낸다.

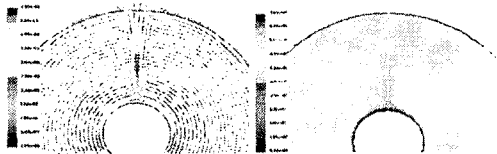


그림 2 유동속도와 온도의 예제(단상)

밀도 분포는 온도가 고온인 부분에서 가장 낮으며, 저온인 부분에서 가장 높으므로 도체의 바로 위 부분에서 밀도가 가장 낮으며 탱크의 하단에서 가장 높다. 또한 탱크 전체적으로는 상단 부분이 하단 부분에 비하여 낮은 밀도 분포를 나타낸다. 도체의 온도( $T_c$ )가 각각 다를 때 탱크 내부 밀도의 분포가 그림 3에 나타나 있다.

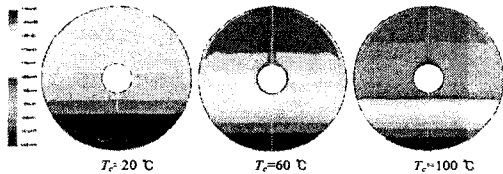


그림 3 온도  $T_c$ 에 따른 밀도 분포(단상)

#### 2.4.3 삼상유동해석 결과

그림 4에서 볼 수 있듯이, 단상에서의 마찬가지로 삼상에서도 전류가 통전되면서 고온의 도체 부근에는 내부 가스인 SF<sub>6</sub>가스의 밀도가 줄어들고 그로 인한 상승기류의 유동이 발달하게 되며 이에 따라 온도장도 상부에서 고온을, 하부에서 저온을 각각 나타내게 된다. 삼상 도체의 온도가 각각 다른 경우 탱크내부의 밀도의 분포를 그림 5에 나타내었다.

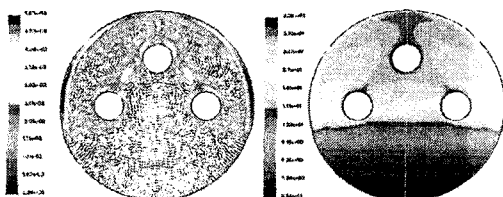


그림 4 유동속도와 온도의 예제(삼상)

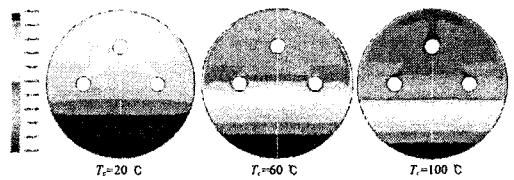


그림 5 온도  $T_c$ 에 따른 밀도 분포(삼상)

### 3. GIS 모선부 절연설계/평가 프로그램

GIS 모선부 절연설계/평가 프로그램은 Windows 환경에서 개발되었고 Visual Basic 언어로 작성되었다. 상기 언급한 이론적인 내용들을 토대로 프로그램 내부적으로 연산 과정이 포함되어 있다. 사용자의 용이한 프로그램 사용을 고려하여 단상 및 3상 모선부 전계해석, 절연 안전도 평가, 밀도변화를 고려한 절연안전도 평가 그리고 GIS 특수형상에 대한 간이계산 순으로 작업을 진행할 수 있도록 인터페이스를 구성하였다. 프로그램의 매뉴화면은 그림 6과 같이 구성되어 있다.



그림 6 매뉴화면

#### 3.1 단상 전계해석 결과

입력전압, 입력전압의 유형, 외함내부반경, 도체외부반경, 가스압력 등을 입력하면 전계 및 전위가 계산되고 그 결과가 그림 7과 같이 나타난다. '최대전계' 아래의 있는 빈칸에는 전계 계산 결과의 최대치가 나타나고 '마우스위치값' 아래의 빈 칸에는 결과화면 그래픽에서 마우스가 위치한 곳의 전계를 표시함으로써 프로그램 사용자로 하여금 원하는 위치의 전계를 쉽게 볼 수 있도록 하였다. 또한 단상 모선부에 대한 최적설계 기준을 제시하는 기능도 갖추고 있다. 전압과 전계가 정해졌을 때 외함과 도체의 최적 치수, 전압과 도체 치수 또는 외함 치수가 정해졌을 때 각각 외함치수와 최적 전계, 도체치수와 최적 전계가 계산된다.

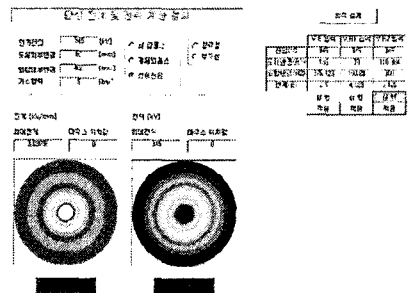


그림 7 단상 전계 및 전위 분포

#### 3.2 삼상 전계해석 결과

그림 8(a)에 삼상 해석을 위한 입력화면을 나타내었다. Phase와 각도 1, 2, 3을 제외한 다른 변수들은 단상 전계해석과 같은 방법으로 입력하면 된다. 각도 1, 2, 3은 항상 기준이 되는 지점에서 각 도체들이 위치한 각도로서, 이 각도들과 중심에서 도체사이의 거리를 입력함으로써 설계시 사용자 의도대로 도체의 위치를 정확히 배치할 수 있다. 그림 8(b)에 결과화면을 나타내었

으며 최대전계 및 마우스 위치값은 단상에서 설명한 바와 같고 전계계산 결과화면의 검은 점은 전계해석 결과 최대전계가 발생한 곳을 표현한 것이다. 이 부분은 향후 전계벡터를 고려하여 화살표 형식으로 나타내는 방안을 고려 중에 있다.

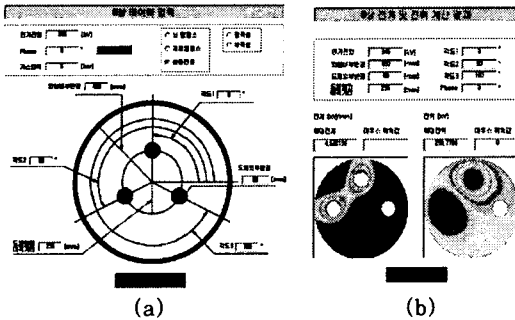


그림 8 삼상 전계 및 전위 분포

### 3.3 절연안전도 평가

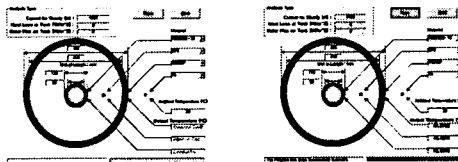
당사 및 국내·외 GIS 제조회사의 허용전계기준을 고려하여 절연안전도를 평가하였으며 이를 프로그램에 적용하였다. 절연안전도를 평가한 화면은 그림 9에 나타나 있다.

회 사	A 사	B 사	C 사
허용전계기준	19.464	20.36	20.485
절연안전도	4.038	4.222	4.26

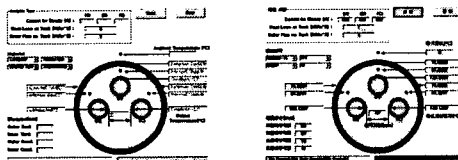
그림 9 절연안전도 평가

### 3.4 국부적인 밀도변화 추정

2절에서 언급한 바와 같이 수많은 해석을 통하여 도체온도 상승 및 외함파 도체의 비열 변화에 따른 데이터를 정리하였고 이를 바탕으로 국부적인 밀도변화에 대한 추정식을 도출하여 프로그램에 적용하였다.



(a) 변수 입력 및 온도상승 결과(단상)



(b) 변수 입력 및 온도상승 결과(삼상)

그림 10 단상 및 삼상 모선부 온도상승

밀도변화를 추정하기 위해 먼저 변수를 입력하여 온도상승을 계산하고 이를 바탕으로 국부적인 밀도변화를 추정하게 된다. 온도상승 계산을 위한 입력화면 및 그 결과를 그림 10에 나타내었고 밀도변화를 추정한 결과가 그림 11에 나타나 있다.

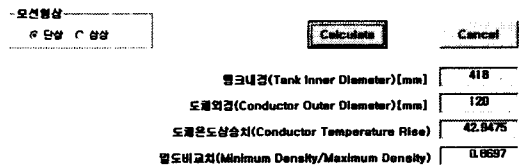


그림 11 밀도변화 추정

### 3.5 국부적인 밀도변화에 따른 절연안전도 평가

위에서 언급한대로 국부적인 밀도변화를 추정하여 절연안전도 평가를 실시한 결과화면을 그림 12에 나타내었다. 이 결과와 3.3절의 그림 9에 나타나 있는 결과를 비교해 보면 허용전계기준이 낮아졌고 이에 따라서 절연안전도 또한 낮아진 것을 알 수 있다. 이러한 결과를 볼 때 GIS 모선부 내의 국부적인 밀도변화를 추정하고 이를 고려하여 절연설계를 하는 것이 바람직하다고 사료된다.

회 사	A 사	B 사	C 사
허용전계기준	17.629	19.041	18.321
절연안전도	3.657	3.95	3.801

그림 12 밀도변화를 고려한 절연안전도

## 4. 결 론

본 연구에서는 당 사에서의 GIS 설계 업무를 지원하는 절연설계/평가 프로그램을 개발함으로써 설계업무의 원활한 수행을 도모하였다. 수식으로 간단히 도출되는 단상에 대해서는 수식을 계산하여 전계해석을 수행하였으며 삼상의 경우는 기본적인 수식으로 접근이 어려우므로 수치해석적 방법을 이용하였다. 그리고 발열특성에 의한 GIS 내부의 국부적인 밀도변화를 고려하여 이에 따른 절연안전도를 평가할 수 있도록 하였다.

개발된 프로그램은 Windows 환경에서 Visual Basic을 이용하여 작성되었으며 본 프로그램의 주요기능으로는 전위 및 전계 계산, 절연안전도 평가, GIS 내부의 밀도변화 추정, 그리고 최적설계 등이 있다. 프로그램 검증은 전자기장 수치해석 상용패키지를 이용하였고 그 결과 유사한 결과를 얻었다.

본 프로그램을 사용함으로써 GIS 모선부에 대한 손쉬운 전계해석을 수행할 수 있을 뿐만 아니라, 설계 및 전기적 절연 측면에서의 안전도 평가를 실시하는 데 있어서 유용하리라 사료된다. 그리고 향후 지속적인 연구를 통하여 본 프로그램의 기능 추가 및 보안을 실시할 계획이다.

### (참 고 문 헌)

- [1] 河野 照哉, 宅間 ただす, 數値電界計算法, 1970, コロナ社.
- [2] T. Takuma, T. Kawamoto, and H. Fujinami, "Charge Simulation Method with Complex Fictitious Charges for Calculating Capacitive-Resistive Fields", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-100, No. 11, November 1981.
- [3] H. Singer, H. Steinbigler, P. Weiss, "A Charge Simulation Method for the Calculation of High Voltage Fields", IEEE Trans. on Power Apparatus and System, Vol. PAS-93, pp. 1660-1663, Sept/Oct 1974.
- [4] 原 雅則, 秋山 秀典, 高電壓 パルスパワー工學, 森北出版株式会社.
- [5] 석복렬 외 3명, Gas 압력 및 전압에 따른 1 $\phi$ , 3 $\phi$  전계 해석 및 절연설계 프로그램 개발, 연구보고서, Dec. 2002., 현대중공업