

800kV급 GIS의 모델차단부용 스페이서의 형상설계

신 영준, 장 기찬, 박 경엽, 정 진교, 송 원표*, 강 종호**

한국전기연구소 개폐장치연구팀, *효성중공업 기술연구소, **현대중공업 고압차단기부

Shape Design of A Spacer for 800kV GIS Interrupter

Y.J. Shin, K.C. Chang, K.Y. Park, J.K. Chong, *W.P. Song, **J.H. Kang

Korea Electrotechnology Research Institute, *HICO, **HEECO

ABSTRACT

The severe conditions such as rated voltage of 800kV, gas pressure of $5\text{kg}/\text{cm}^2$ and rated lightning impulse withstand voltage of 2400kV were adopted for the design of spacers in the 800kV GIS to give a sufficient design margin. The design criteria on the maximum electric field strength of the center conductor and the insulator surface were established by considering the insulator surface characteristics, electrode area and surface effects in the unequal electric field strength of the given gap.

The design parameters such as inter/outer envelope degree, thickness, inter/outer inserts, triple junction gap were determined by calculating the electric field using FLUX-2D program package and by referring to the published papers. The mechanical stress analysis was conducted on the feasible model spacers that showed good electric field distributions to confirm the sufficient mechanical design margin. The 800kV spacer designed as described above is now in the process of manufacturing.

1. 서언

2001년경 우리나라의 최고송전전압은 765kV로 격상될 예정이며, 여기에 사용될 중요한 송변전기기중의 핵심인 GIS의 차단부를 순수 국내기술로 개발할 계획으로 한국전기연구소가 주관이 되어 효성중공업(주) 및 현대중공업(주)와 공동연구로 1991년 말부터 연구가 진행되고 있다.

1988년부터 약 6년간에 걸쳐 한국전기연구소에서 스페이서에 대한 개발연구^{1,2}를 수행하였지만, 기개발된 스페이서를

800kV급 GIS의 모델차단부에 사용하는데 있어서 중심도체의 크기 및 절지탱크에의 취부부분 등 구조상의 문제와 절연설계기준으로 채택했던 LIWV 1800kV가 모델차단부의 LIWV 2400kV와 큰 차이가 있는 등 절연설계상의 문제가 있어 급회 800kV급 GIS의 모델차단부에 취부할 수 있는 스페이서를 별도로 설계하여 개발하기로 하였다.

먼저 개발할 스페이서에 대한 절연설계기준을 설정하고, 스페이서의 형상설계에 있어서 중요한 설계요소인 형상각도, 3중 접합부의 미소간격, 삼입체 등에 대한 전개해석을 집중적으로 수행하여 몇가지 모델형상을 결정한 후, 주어진 형상에 대하여 응력해석을 행하여 최종 스페이서의 형상을 결정하였다. 이 형상설계를 사용하여 현재 급형을 제작중에 있으며, 스페이서를 제작한 후 절연시험, 수압시험 등 특성시험을 행할 예정으로 있다.

2. 스페이서의 절연설계기준

스페이서가 실제 GIS의 차단부 및 모선부에 취부되어 사용되는 조건으로는 정격전압이 800kV이며, 충전가스압력은 차단부가 $6\text{kg}/\text{cm}^2$ 이고 모선부 및 단로부가 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 할 예정이지만, 향후 콤팩트화 및 저가스압화에 대비하여 차단부를 포함한 모든 부분의 충전가스압력을 $5\text{kg}/\text{cm}^2$ 로 동일하게 결정하고, 경보압력 또는 쇄정압력 $4\text{kg}/\text{cm}^2$ 를 가스압력에 대한 설계기준으로 채택하였다. LIWL의 조건으로 ANSI에는 정격전압 800kV에 대해 2050kVp로, IEC에는 정격전압 765kV에 대해 개폐충격내전압 1550kVp시 1800, 1950, 2400kVp 등 여러가지가 규정되어 있지만, 이 중에서 가장 가혹한 2400kVp로 채택하였다.

스페이서의 형상을 설계함에 있어서 초보적 개념으로 효성중공업(주)에서 개발하여 사용중에 있는 362kV급 스페이서를 800kV급으로 확장하는 것으로 하되, 스페이서 표면에 부분적 전개집중이 일어나지 않고, 표면을 따라 균등한 전계분포를 가져야 하며, 스페이서와 전극 사이에서 최대전계강도가 발생하지 않아야 하고, 스페이서 내부에 기포와 이물질 등의 결함이 없어야 하는 등의 기본설계개념을 적용하였다.

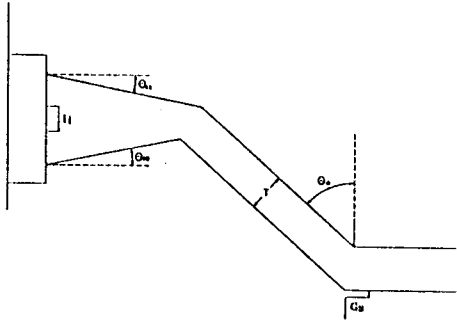


그림 1. 스페이스의 중요 설계변수

설계전계강도를 결정하는 방법으로 다음 2개의 식을 사용해 가스의 허용전계강도를 구한 후 각 부분에 적용할 수 있는 설계전계강도를 계산하는 방법과 절연과피전계강도에 대한 실험식에 전극면적 및 표면효과와 이물질, 수분, 분해가스 등에 대한 여유도를 고려하여 결정하는 방법 등 여러가지가 있다. 이 식에서 a, b, α, σ는 상수, P는 가스압력을 나타낸다.

$$E_g = aP^b, E_{bd} = a \cdot E_g \cdot (1 - 3\sigma) \quad (1)$$

여기서는 다음식과 같은 불평등전계에서 주어진 갭의 최대 전계강도에 대한 실험식에 전극면적효과, 전극표면효과, 절연물의 연면특성 등을 고려하여³ 표 1과 같이 설계전계강도에 대한 기준을 결정하였다. 이 식에서 R은 전극 곡률반경의 조화평균을 의미한다.

$$E_{bd} = 89P \left(1 + \frac{0.175}{\sqrt{PR}} \right) \quad (2)$$

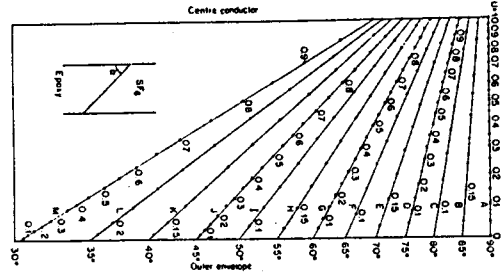
표 1. 설계전계강도 기준

구 분	설계전계강도
중심도체	236kV/cm 이하
스페이스 표면	177kV/cm 이하
스페이스 연면방향	118kV/cm 이하

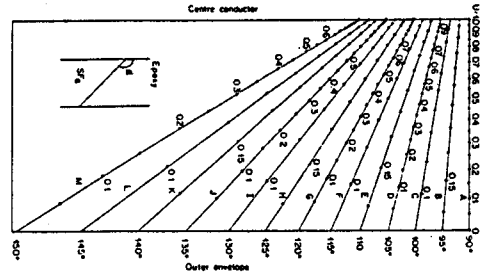
3. 스페이스의 형상 설계

스페이스의 형상설계에 있어서 중요한 설계변수로 그림 1에 나타나 있듯이 내부형상각도, 외부형상각도, 스페이스두께, 내부삽입체의 형상, 외부삽입체의 형상, 3중접합부의 미소갭의 형상 등을 설정하고, 이에 대해 개발된 문헌을 참고하고 또한 당 연구소가 보유하고 있는 FLUX-2D 프로그램을 이용해 집중적으로 전계해석을 행하여 설계변수를 결정하였다.

그림 2(a)의 원판형 스페이스에서 각도변화에 따른 전위분포⁴를 보면, 각도 α가 작으면 접지탱크측의 3중접합부쪽으로 전계가 집중하고, α가 크면 중심도체측의 3중접합부쪽으로 전계가 집중하며, α가 55도와 80도 사이이면 상당히 균등한 전계분포를 이루고 있다. 특히 α가 75도일 때 가장 균등한 전계분포를 이루고 있으므로 상하면 모두 내부형상각도 θ₁가 15도



(a) 원판형 스페이스



(b) 원추형 스페이스

그림 2. 스페이스 각도변화에 따른 전위분포

로 동일한 원판형으로 결정하였다. 상면면의 각도는 15도이고 하면면의 각도가 10도일 때와 15도일 때의 전계분포를 계산하여 비교해 본 결과 15도일 때의 전계분포가 훨씬 균등하였다.

그러나 θ₁가 15도인 원판형 스페이스의 경우 누설거리는 반경방향 가스갭의 1.04배에 불과하며, 누설거리를 길게 하기 위해서는 원추형의 스페이스를 사용할 필요가 있다. 그림 2(b)의 원추형 스페이스에서 각도변화에 따른 전위분포⁴를 보면 하면면의 경우 중심도체측의 3중접합부쪽으로 전계가 집중하므로 누설거리를 약 2배로 증가시킬 수 있도록 α가 150도인 경우를 하면면으로, α가 30도인 경우를 상면면으로 택하면, 즉 외부형상각도 θ₀를 30도로 택하면 연면방향의 전계는 비교적 균일한 분포를 이룰 수 있다. 따라서 전체적인 스페이스 형상은 중심도체로 부터 원판형(α=75도), 원추형(α=30, 150도), 원판형(α=90도)으로 된 복합형상이 된다.

동축원통전극계에서 최대전계 \bar{E}_{max} 는 내부도체의 표면에서 일어나고, 그 크기는 다음식과 같이 주어진다⁵.

$$|\bar{E}_{max}| = \frac{U}{r_{ic} \ln \frac{r_{oc}}{r_{ic}}} \quad (3)$$

여기서, U는 인가전압, r_{ic}는 내부도체의 반경, r_{oc}는 외부도체의 내반경을 나타낸다. 인가전압으로 LIWL 2400kV가 가해질 때, 스페이스가 취부될 모델차단부의 내부도체 표면에서 일어나는 최대전계의 크기는 대략 157kV/cm로 계산된다. 그러나 실제 모델차단부의 스페이스 취부부분에서 정확한 동축원통전극계를 형성하지 못하고 외부도체의 반경이 매우 크게 되므로 최대전계의 크기는 이 값보다 훨씬 줄어들 것으로 예상된다. 이

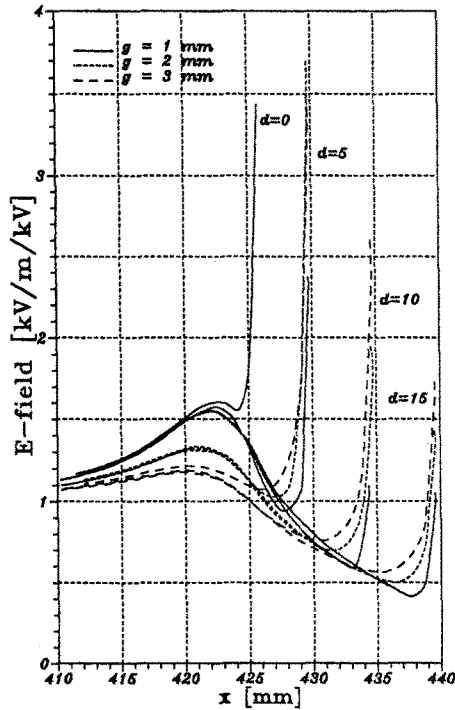


그림 3. 미소갭의 최대전계강도

론적으로는 내부도체의 반경에 대한 외부도체의 내반경의 비가 약 2.71일 때 최대전계의 크기는 최소값이 된다.

스페이스의 두께는 일반적으로 다음식과 같이 계산될 수 있지만⁶, 기계적 용력을 고려하여 두께가 50mm, 60mm 2가지 경우에 대해 전계해석을 행한 결과, 두께가 두꺼운 쪽이 스페이스 상하면의 전계분포가 균등하게 완화되었다.

$$T = \frac{\sqrt{2} r_{ic}}{4} \quad (4)$$

내·외부 삽입체(Insert)가 스페이스에 매설되면 원판형 스페이스의 경우 약 70%, 원추형 스페이스의 경우 약 25% 정도 임계내전압이 상승하므로⁴ 매설할 삽입체의 형상에 대해 검토하였다. 내부삽입체의 반경방향 폭 15mm, 축방향 길이 30mm, 곡률반경 5R을 기준으로 각 변수를 변화시켜 가면서 전계해석을 행한 결과, 폭을 좁게 할수록 그리고 곡률반경을 크게 할수록 전계분포가 균등하게 되었으며, 삽입체의 길이에 따라서는 스페이스 상하면의 전계분포에 거의 영향을 주지 못했다. 따라서 내부삽입체는 R20xR40xR20의 극소삽입체를 그대로 채택하고 외부삽입체는 호성(주)이 제안한 실드링을 채택하기로 결정하였다.

3중접합부에서 전계를 완화시키기 위해 스페이스 내부에 전계완화용 실드를 설치하는 방법과, 스페이스와 접지탱크의 플랜지가 만나는 지점에 수mm의 미소갭을 설치하는 방법, 별도의

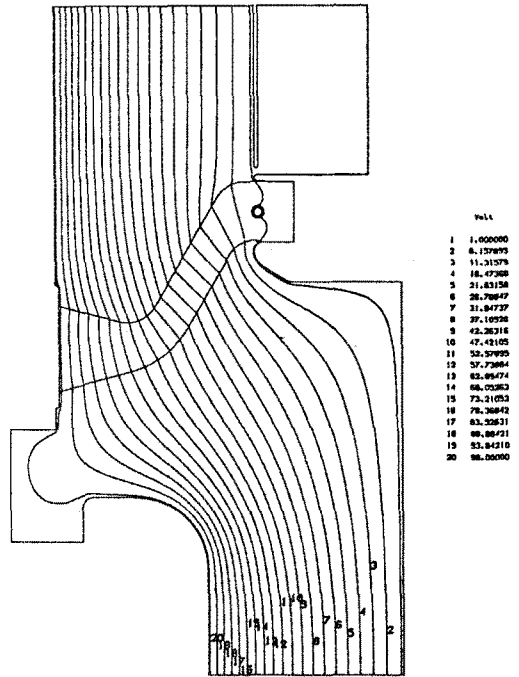


그림 4. 스페이스의 전계해석 예

전극을 근처에 설치하는 방법 등 여러가지가 있지만^{7,8}, 여기서는 미소갭을 설치하는 방법을 채택하기로 하고 3중접합부의 미소갭, 특히 접지탱크측의 미소갭의 전계완화를 위해 미소갭의 폭 1mm, 길이 10mm를 기준으로 집중적인 전계해석을 수행한 결과, 그림 3에 나타나 있듯이 WxL=1x10mm의 미소갭이 전계완화에 최적이었다. 이렇게 설계한 스페이스를 모델차단부에 취부한 상태로 전계해석을 행한 예가 그림 4에 나타나 있다.

스페이스를 설계할 때 고려해야 할 기계적 특성으로 Principal, Bending, Shear 스트레스와 같은 기계적 용력과, 압력 상승에 대한 기계적 강도, 온도상승에 의한 열적 스트레스 등이 있다. 상기와 같이 전기적 형상을 설계한 후 호성(주)이 보유하고 있는 PATRAN 프로그램을 이용하여 용력해석을 수행한 결과 탱크접속부, 중심도체접속부, 스페이스금속부에서의 압축 용력과 인장용력 등이 설계기준치에 충분한 여유가 있는 것으로 나타났다.

4. 결론

800kV급 GIS의 모델차단부 좌우 양측에 취부할 스페이스의 설계기준으로 가스압력 5kg/cm², 정격설계전압 800kV, 정격외 임펄스내전압 2400kV 등의 가혹한 조건을 채택하여 설계치에 충분한 여유를 가지도록 하였다.

또한 불평등전계에서 주어진 갭의 최대전계강도에 대한 실험식에 전극면적효과, 전극표면효과, 절연물의 연면특성 등을

고려하여 설계전계강도에 대한 기준을 중심도체에 대해서는 236kV/cm, 스페이스 표면에 대해서는 177kV/cm, 스페이스 연면 방향 성분에 대해서는 118kV/cm 이하로 설정하였다.

스페이스의 설계변수로 내·외부 형상각도, 스페이스 두께, 내·외부 삽입체의 형상, 3중접합부의 미소갭의 형상 등을 설정한 다음, 기발표된 외국문헌을 참조하고 FLUX-2D 프로그램을 사용해 전계해석을 행하여 설계변수를 결정하였으며, 전기적 형상설계를 한 후 PATRAN 프로그램을 사용해 응력해석을 행하여 기계적 형상설계에도 충분한 여유가 있음을 확인하였다.

이 형상설계를 사용해 현재 스페이스금형을 제작중에 있으며, 스페이스를 제작한 후 절연시험, 수압시험 등 특성시험을 실시하여 설계치를 확인할 예정으로 있다.

이 연구결과는 한국전력공사가 지원한 생기반과 제 94IP30으로 수행한 연구내용중의 일부입니다.

참고문헌

1. 한국전기연구소, "차기 초고압기기의 국산화 기술연구," 과기처 연구과제보고서, 1989 & 1990
2. 한국전기연구소, "저손실 초고압 전기재료 개발 연구," 과기처 연구과제보고서, 1991
3. Hitachi Research Laboratory, "Breakdown characteristics in SF₆ gas gap," Hitachi Ltd.
4. N.G. Trinh, F.A.M. Rizk and C. Vincent, "Electrostatic field optimization of the profile of epoxy spacers for compressed SF₆-insulated cables," IEEE Trans., Vol.PAS-99, No.6, Nov./Dec. 1980, pp 2164-2174
5. J.R. Laghari and A.H. Qureshi, "Surface flashover of spacers in compressed gas insulated systems," IEEE Trans., Vol.EI-16, No.5, Oct.1981, pp 373-387
6. S. Menju, Y. Tsuchikawa and N. Kobayashi, "Electric potential and field of conical insulators for SF₆ metal-clad switchgear," IEEE Trans., Vol.PAS-91, No.2, 1972, pp 390-398
7. K. Itaka, T. Hara, T. Misaki and H. Tsuboi, "Improved structure avoiding local field intensification on spacers in SF₆ gas," IEEE PES summer meeting, 82SM 406-7, 1982
8. M. Sakaki, M. Takakura, N. Morino and S. Tanigaki, "GIS의 가스絶緣技術," 明電時報, No.5, 通卷 232號, 1993, pp 5-12