

300 kN 현수애자의 설계를 위한 전계해석에 관한 연구

김익수, 최재구, 문인옥, 장원률*, 주병수**
한국전기연구소, *고려애자공업(주), **한전

A Study on Electric Field Analysis for 300 kN Suspension Insulator Design

I.S. Kim, J.G. Choi, I.W. Moon, W.Y. Jang and B.S. Joo[†]
KERI, *KRI, **KEPCO

Abstract - This paper presents some of the results of current research on 300 kN Suspension Insulator Design.

In this paper, authors first used 2-dimensional field calculation to solve the electric field distribution of an insulator unit and insulator strings, and then 3-dimensional field calculation in order to overcome the shortcomings of 2-dimensional field calculation in which an axis-symmetrical coordinate has been used. And, it was found that the environmental configuration of 300 kN Suspension Insulator String gives great roles to the field distribution of the insulators.

1. 서 론

전기에너지의 제어·변환의 간편성으로 말미암아 그 수요가 점차 증가하여 원격지에 위치한 발전소로부터 도시 및 산업지대까지 대용량에너지의 장거리 송전이 필요하게 되었다. 이는 전력집중의 가속화를 가져오며, 국토가 좁은 우리나라의 경우, 환경오염문제와 더불어 초고압·대용량 전력기기의 개발이 요구되고 있으며, 초고압·대용량 전력기기의 실용화연구는 신뢰성향상과 경제성 측면에서 연구를 진행하여 전력에너지의 안정적 공급을 달성하여야 한다. 이를 위하여 초고전압용 애자의 개발은 필수적이다.

초고전압 송전선로용 지지물인 애자는 자기체가 현재까지 절연성능의 신뢰성 관점에서 대부분이 사용되고 있으나, 전체를 수입하고 있는 실정이다. 초고전압용 송전선로용 300 kN 현수 애자를 개발하기 위한 형상 설계의 고려사항 중 중요한 요소의 하나는 애자의 전기적 절연강도 확보를 검증하기 위한 전계 해석이다.

본 고에서는 300 kN 현수 애자unit 및 애자련에 대한 전계 해석을 유한요소법(Flux2D 및 Flux 3D)을 사용하여 계산과 해석을 수행하였다.

2. 본 론

2.1 300 kN 현수애자unit의 2차원 전계해석

그림 1은 300 kN 현수애자unit에 대한 전계 해석 결과로서 등전위선도를 나타내고 있다. 등전위선의 간격은 약 5% 씩 분포되어 있고, 경제조건으로써 상부 캡 전극에 0 V, 하부 핀 전극에 1 V를 주었다.

그림 2 (a)는 자기부 연면에서의 전계의 세기를 보이며,

그림 2 (b)는 (a)의 전계의 세기를 그래프로 나타낸 것이다. 그림 2에서 보는 바와 같이, 전계의 세기가 특히 집중하여 인가되는 자기부의 부분은 96번-140번 사이와 64번-173번 사이이다. 이 두 지점간의 전계 세기를 비교하여 계산한 결과, 전계가 가장 집중된다고 사료되는 곳은 64-173번 사이로, 그 전계 세기는 144 V/m(1 V 인가시)으로 나타났다. 이를 근거로 자기부의 설계시 필요로 하는 절연강도는 다음 식 (1)에 의해 상정한다.

$$\text{필요한 절연 강도} = \text{최대 전계 세기} \times \text{설계 여유도} \\ (3.5 - 4.0) \times \text{안전율} \quad \text{---(1)}$$

인가전압 15 kV로 상정하여 계산하면, 절연 파괴강도는 15.2 - 17.3 kV / mm이면 양호한 것으로 사료되며, 표 1은 시편에 대하여 절연파괴강도를 실험한 자료이다.

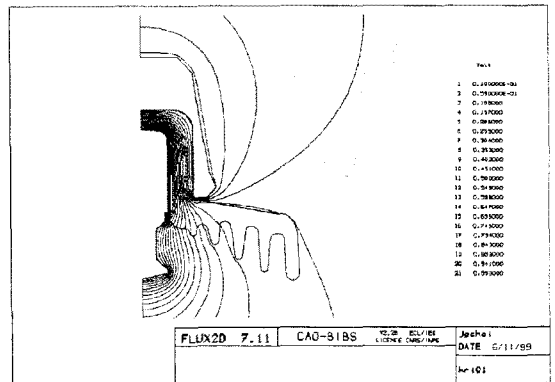


그림 1. 애자 unit의 등전위선도

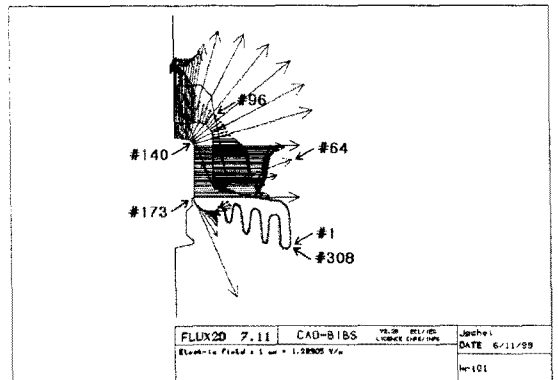


그림2. (a) 자기부 연면에서의 전계의 세기

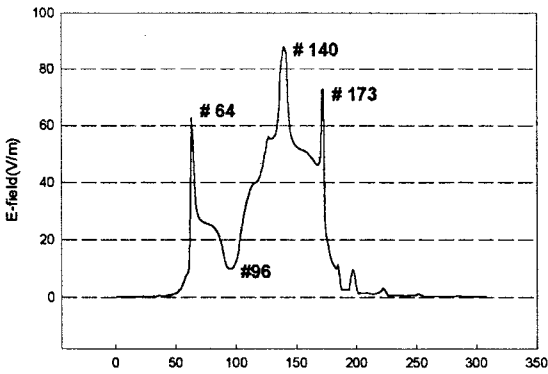


그림 2. (b) 위치에 따른 전계의 세기
표 1. 자기부 시편의 절연파괴 강도 결과

시편	절연파괴 강도	비 고
#1	24.95 kV/mm	평균값 : 24.63 kV/mm
#2	24.20 kV/mm	V_{99} : 22.44 kV/mm
#3	24.76 kV/mm	(Student's t분포 적용)

그림 3은 자기부와 상부 캡이 접촉하는 삼중점(#64)과 하부 편이 접촉하는 삼중점에서 전계 완화 효과를 도모하기 위한 애자의 형상의 일례를 나타낸 것으로, 그림 2 (b)와 비교하면 삼중점에서의 전계 완화 효과가 있음을 나타내고 있다.

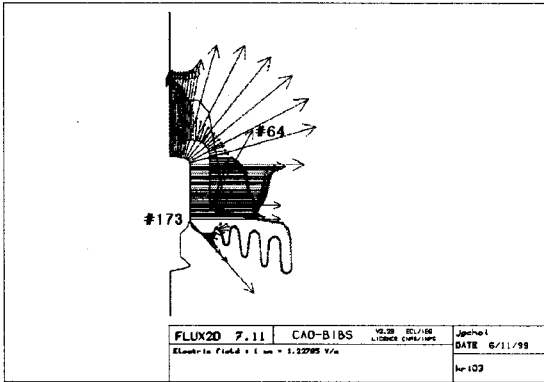


그림 3. (a) 전계완화용 애자의 자기부연면에서의 전계

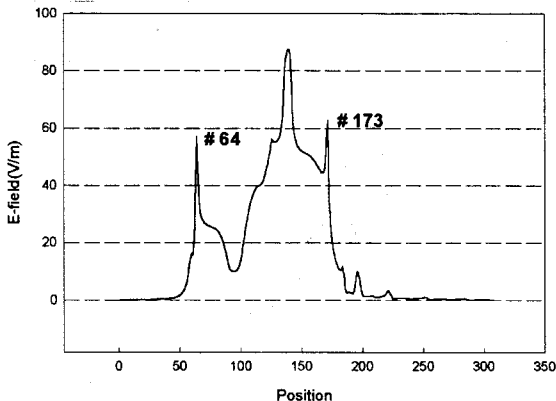


그림 3. (b) 전계 완화 애자의 자기부 위치에 따른 전계

2.2 300kN 애자런의 2차원 전계해석

그림 4는 애자런의 전계해석(Flux 2D 적용)의 일례를 나타낸 것으로, 애자런을 rod - rod 전극(즉, 고압부 편에 전압 1 V를 인가하고, 접지축 캡부분을 전압 0 V로 하여 계산한 일례이다. 그림에서 알 수 있듯이 고압 인가부와 접지부에 전계가 집중되고, 애자런의 중간부분은 전계가 그렇게 높지 않음을 보인다. 따라서 이 경우 shield ring 또는 horn을 취부하여 전극 양단에서의 전계 완화를 도모할 필요가 있음을 알 수 있다.

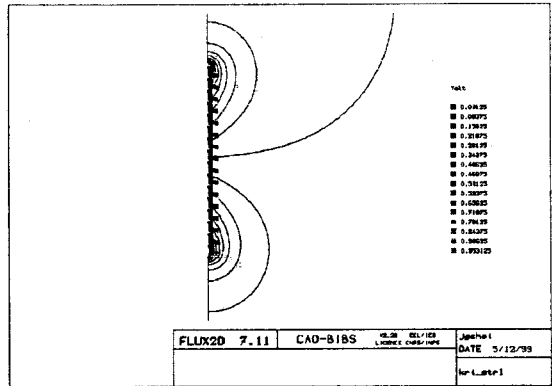


그림 4. (a) 애자런의 등전위선도

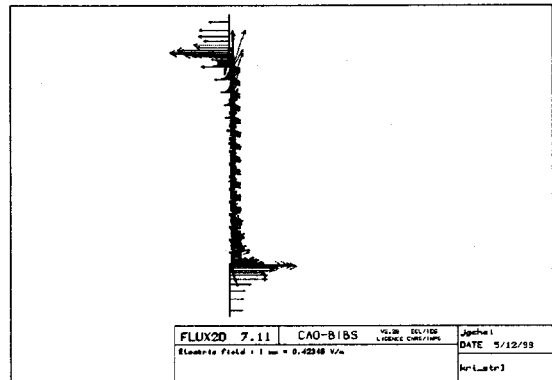


그림 4. (b) 애자런 연면에서의 전계의 세기

그림 5는 대지를 고려한 현수애자런의 전계해석(Flux 2D 적용) 일례를 나타낸 것으로, 애자런을 rod - plane 전극으로 (즉, 고압부 편에 전압 1 V를 인가하고, 접지축 캡 부분 및 대지를 전압 0 V로)하여 계산한 일례이다. 대지가 평판전극으로 작용하기 때문에 고압부에 강한 전계집중이 있음을 알 수 있다.

그러나, 실제로 현수 애자런에 가해지는 형상은 애자런 하부 금구류에 인가선로가 취부되고, 상부에는 금구류를 지지하는 철탑의 존재도 고려되어야 한다. 이와 같은 인가선로 및 철탑이 전계에 미치는 영향은 축대칭 2차원 전계해석으로는 계산이 불가능하므로, 실제 실선로를 모의한 3차원의 해석을 행할 필요가 있다고 사료된다.

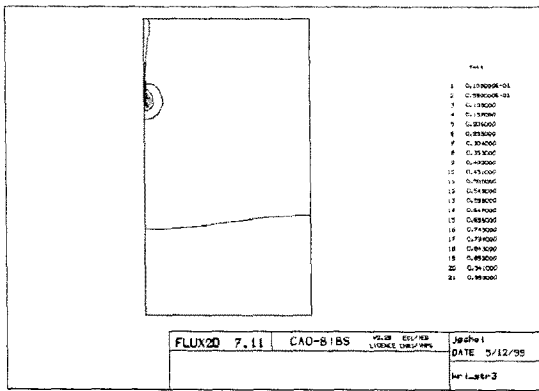


그림 5. (a) 현수 애자련의 등전위선도

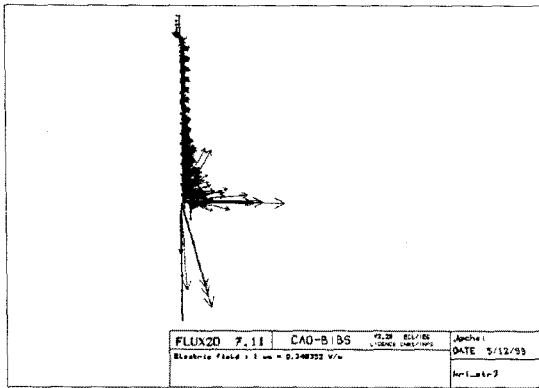


그림 5. (b) 애자련 연면에서의 전계의 분포

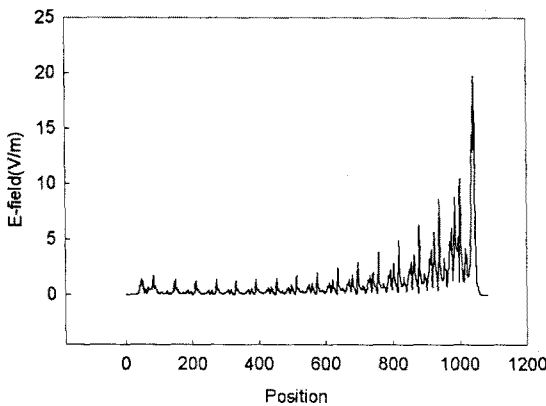


그림 5. (c) 애자련 연면에서의 전계의 세기

2.3 300 kN 현수애자련의 3차원 전계 해석

2차원 전계해석은, 앞절에서도 언급했듯이, 평균좌표 또는 최대칭좌표를 이용하기 때문에 다양한 형상을 가지는 피시물의 전계해석에는 한계가 있다. 그래서 하부금구류에 취부된 선로도체 및 상부금구류를 지지하는 철탑을 고려한 전계해석을 하기 위해 3차원 전계해석을 수행하였다. 그림 6은 실험실에서의 애자련 시험시의 모델 애자련에 대한 3차원 전계해석의 결과를 보여주고 있다. 여기서 모델 애자련은 하부금구류에 x축방향으로 선로도체가 취부되어 있고, 접지축은 철탑을 모의한 접지선

의 구조로 하였다. 해석결과 접지축과 선로축에 전계가 완화 되어 있음을 알 수 있다. 그림 6 (b)는 애자련의 하부 금구류(고압부)와 상부 금구류 사이의 연면에 따른 전위분포 및 전계분포를 나타낸 것이다. 상부 금구류 부근의 전위의 기울기가 약간 큰 것을 볼 수 있다.

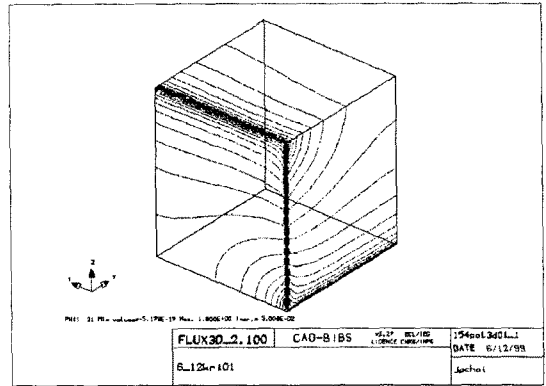


그림 6. (a) 애자련 시험용 모델애자련의 3차원 등전위선도

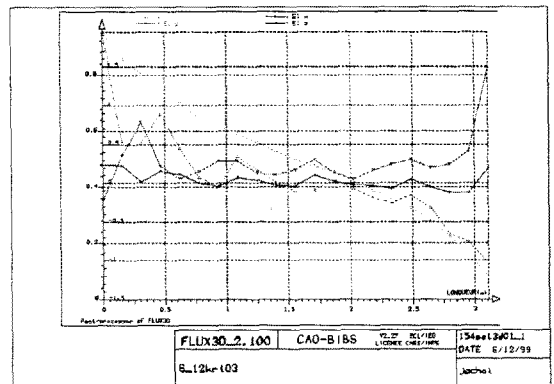


그림 6. (b) 모델애자련의 연면상 전위분포 및 전계분포

그림 7은 현수 애자련의 경우에 있어서의 실선로(철탑과 선로도체 모의)를 고려한 모델 애자련에 대한 3차원 전계해석의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 상부 금구류에 부착되어 있는 철탑과 하부 금구류에 부착되어 있는 선로로 인하여 애자련 사이의 전위 기울기가 매우 완만해진 것을 볼 수 있다.

2.4 고찰

현수 애자 unit에 있어서의 필요한 절연 설계를 위한 절연 파괴 강도는 현수 애자 unit에 걸리는 전압을 상정하여야 한다. 300 kN 현수애자 16개에 걸리는 전계전압은 $362 \text{ kV}/\sqrt{3} (= 209 \text{ kV})$ 으로, 가혹하게 인가되는 unit 당의 전압은 $(209 \text{ kV}/16 \text{ units} \times \text{집중율}(115\%)) = 15 \text{ kV}$ 으로 계산되어 상정된 것이다. 전계 해석 결과로는 캡 전극 부분과 핀 전극 부분의 사이의 자기부분에 전계가 집중하여 가장 가혹하게 인가되므로, 필요한 경우에 이에 대한 전계 완화를 행하면 된다.

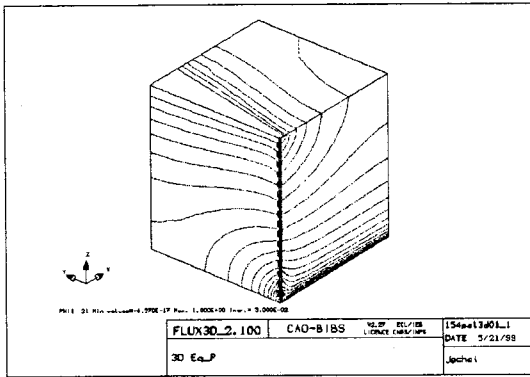


그림 7. (a) 실선로 모의 모델애자련의 3차원 등전위선도

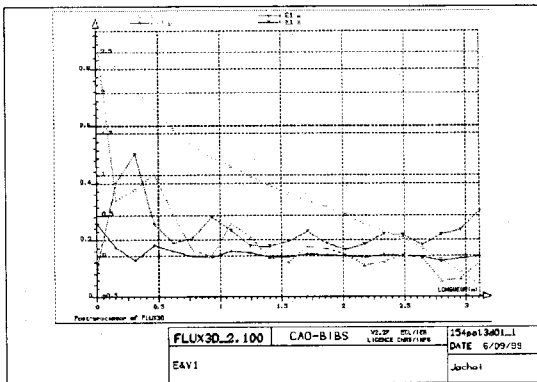


그림 7. (b) 실선로 모의 모델애자련의 연면에서의 전위 및 전계분포

그림 3에 자기부와 도체가 접촉하는 삼중점에서의 전계 집중을 완화하기 위한 형상을 제시하였다. 이것은 실제 제작상의 문제가 발생하지 않는 한에서 애자 형상 설계에 있어서 고려될 수 있을 것으로 사료된다. 애자련의 전계 해석에 있어서, 그림 4의 경우는 애자련을 축 대칭 2차원의 rod-rod 전극으로 모의한 경우이며, 그림 5의 경우는 그림 4에 대지의 영향을 추가하여 rod - plane 전극구조로 행한 것으로, 2차원 축대칭 전계 해석시, 고압부에서의 최대 전계는 20 V/m(단, 인가전압 : 1 V, 애자련의 애자unit 수 : 16개로 한 경우)이었으나, 선로 도체와 철탑을 고려한 모델인 그림 7에서는 최대 전계가 2.7 V/m(단, 인가전압 : 1 V, 애자련의 애자unit 수 : 16개로 한 경우)으로 상당히 완화되었음을 알 수 있다.

이것은 2차원 전계 해석으로는 선로도체 및 철탑의 모의가 불가능하기 때문이다. 따라서 애자련에 대한 전계 해석에는 3차원 전계 해석이 바람직하다고 사료된다. 또한, 그림 6은 실험실에서 애자련 시험 모델을 모의한 경우의 전계 해석의 결과(단, 인가전압 : 1 V, 애자련의 애자 unit 수 : 16개로 한 경우)로서, 상부의 접지전극 부분과 하부의 전압 인가전극 부분에 있어서의 전계의 세기는 각각 1.5 V/m와 1.8 V/m이었으며, 실선로 모델애자련의 전계 해석 결과인 그림 7과 비교하면, 전계의 세기는 거의 동일함을 알 수 있다.

3. 결 론

300 kN 현수애자의 개발을 위하여 설계부분에 있어서의 전계 해석을 애자 unit 및 애자련에 대하여 행한 결과, 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

1) 현수 애자 unit의 전계 해석 결과, 핀 전극과 켈 전극의 사이에 있는 자기부에 전계가 집중되었으며, 이에 필요한 절연강도는 15.2 kV/m - 17.3 kV/m으로 사료되며, 시편의 절연파괴 시험결과 Student - t 분포의 99% 신뢰도의 값을 적용한 결과 22.44 kV/m으로 만족한 결과를 나타냈다.

2) 애자련의 전계 해석에 있어서는 축 대칭 2차원으로 해석하는 경우는 고압부와 접지부에 전계가 집중됨을 나타내고 있으나, 실제 상태의 인가선로 및 철탑 등을 모의한 3차원의 해석에서는 이들의 영향으로 고압부와 접지부의 전계가 완화됨을 나타냈다.

참고문헌

- [1] IEEE Std 4 : IEEE Standard Techniques for High-Voltage Testing, 1995
- [2] IEC 60060-2 : High - voltage test techniques Part 2 : Measuring Systems, 1994-11.
- [3] Irwin Miller and John E. Freund, Probability and Statistics for Engineers, Prentice - Hall, 1977, pp. 173-175.
- [4] IEC 60305 : Insulators for overhead lines with a nominal voltage above 1000 V - Ceramic or glass insulator units for a.c. systems - Characteristics of insulator units of the cap and pin type, 1995-12