

Analysis of Dielectric Characteristics of 400kN Suspension Insulator Using FEM

崔 再 九* · 金 益 秀** · 文 仁 旭*** · 徐 瑩 權§

(Jae-Gu Choi · Ik-Soo Kim · In-Wook Moon and Hyoung-Gweon Suh)

Abstract - This paper presents some of the results of current research on 400kN Suspension Insulator Design. In this paper, authors carried out 2-dimensional field calculation in order to analyse dielectric characteristics of the insulator unit and 3-dimensional field calculation in order to analyse dielectric characteristics of the insulator strings. And the results of puncture tests of insulators were compared with the required field intensity of the insulator. As results, it was found that electric field on the insulator unit is severest between two triple junctions, dielectric characteristics of insulator strings are much influenced by the surrounding configuration and the manufactured insulators have good results of puncture tests.

Key Words : Dielectric characteristics, FEM, 400kN, Suspension Insulator

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, 환경조화문제와 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[1]. 초고전압 송전선로용 지지물인 애자는 자기체가 현재까지 절연성능의 신뢰성 관점에서 대부분이 사용되고 있으나, 전체를 수입하고 있는 실정이다. 초고전압용 송전선로용 400kN 현수애자를 개발하기 위한 형상 설계의 고려사항 중 가장 중요한 요소의 하나는 애자의 전기적 절연강도를 검증하기 위한 전계 해석이다.

그러므로 본 고에서는, 400kN 초고전압용 애자개발의 일환으로서, 애자의 절연강도를 검증하고, 애자의 절연특성을 최적화하기 위해 유한요소법(Flux2D 및 Flux 3D)을 사용한 현수애자unit 및 애자련에 대한 전계해석을 수행하였다. 또한, 전계해석 결과를 근거로 애자의 절연과피실험[2]을 수행하여 제작된 400kN 현수애자의 절연특성을 검증하였다.

- * 正 會 員 : 韓國電氣研究院 産業協力部 前任研究員
- ** 正 會 員 : 韓國電氣研究院 産業協力部 責任研究員·工博
- ***非 會 員 : 韓國電氣研究院 産業協力部 責任技士
- § 非 會 員 : 高麗碍子工業(株) 部長

接受日字 : 2001年 11月 01日
最終完了 : 2001年 12月 19日

2. 본 론

2.1 400 kN 현수애자unit에 대한 2차원 전계해석

그림 1은 400kN 현수애자unit에 대한 전계해석 결과로서 전형적인 등전위선도를 나타내고 있다. 등전위선의 간격은 약 5%씩 분포되어 있고, 경계조건으로써 상부 캡 전극에 0V, 하부 핀전극에 1V가 주어져 있다. 이 때, 자기부와 핀 그리고 자기부와 캡의 조립에 충전재로서 이용되는 시멘트는 경화 후에도 10%이상의 수분을 함유하기 때문에 절연저항이 낮아[3], 도체로 간주되어 계산되었다.

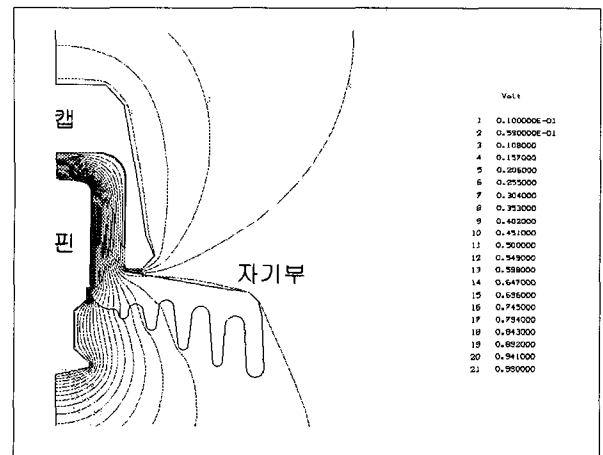


그림 1 400kN 현수애자 unit의 등전위선도

Fig. 1 Equipotential lines of 400kN suspension insulator

그림 2 (a)는 애자의 절연특성을 보다 구체적으로 살펴보기 위해 자기부 연면에서의 전계의 세기를 구한 것이며, 그림 2 (b)는 (a)의 전계의 세기를 자기부 연면의 위치에 대해서 그래프로 나타낸 것이다. 그림 2에서 보이는 바와 같이, 전계의 세기가 특히 집중되는 자기부의 부분은 96번-140번 경로와 64번-173번 경로로서 각각의 합은 98V/m와 135V/m이다. 가장 가혹한 전계집중경로를 만드는 64번과 173번 위치는 삼중점으로서, 애자제작 후 실시하는 puncture test에서 빈번히 발생하는 외부관통 위치와 잘 일치하고 있다[4]. 그러므로 이 부분에서의 절연내력이 애자 전체의 절연특성을 좌우한다고 할 수 있다.

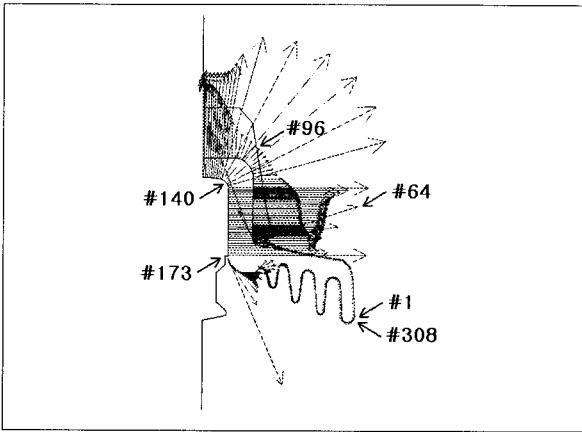


그림 2 (a) 자기부 연면에서의 전계의 세기
Fig. 2 (a) Strength of electric field on ceramic part

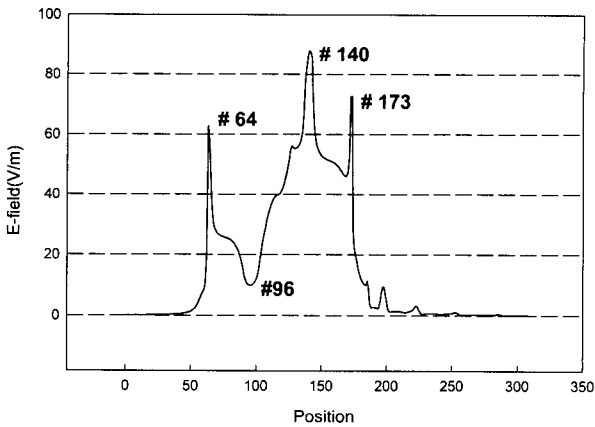


그림 2 (b) 자기부 위치에 따른 전계의 세기
Fig. 2 (b) Strength of electric field according to position of ceramic part

그래서, 그림 3은 자기부와 상부 캡이 접촉하는 삼중점(#64)과 하부 편이 접촉하는 삼중점(#173)에서 전계 완화 효과를 도모하기 위한 애자 형상의 일례를 나타내고 있다. 확대된 그림에서 접선부와 같이, 각 삼중점에서 전계집중이 가능한 한 방지되도록 금속부, 시멘트와 자기부의 형상이 설계되어 있다. 이 때, 자기부 경로에 걸리는 전계 세기의 합은 120V/m를 나타내고 있다. 그림 2 (b)와 비교하면 두 삼중점간의 전계가 10%이상 완화된 것을 알 수 있다.

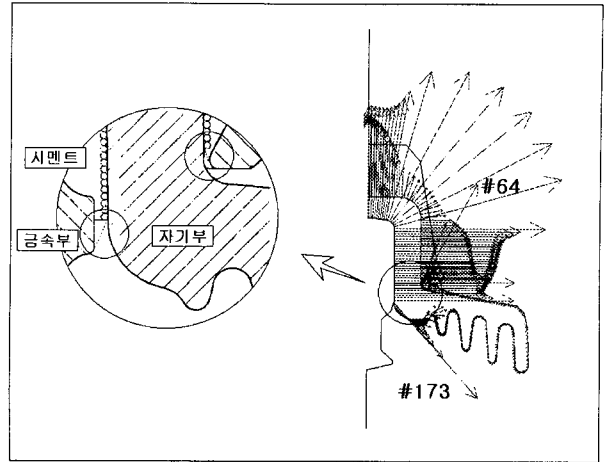


그림 3 (a) 전계완화용 애자의 자기부연면에서의 전계
Fig. 3 (a) Electric field on ceramic part of field-mollified insulator

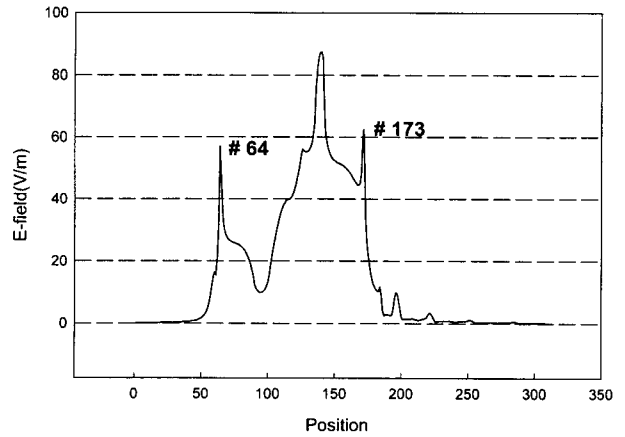


그림 3 (b) 전계완화용 자기부 위치에 따른 전계
Fig. 3 (b) Electric field according to position of field-mollified ceramic part

2.2 400kN 현수애자련의 3차원 전계해석

2차원 전계해석은 평면좌표 또는 축대칭좌표를 사용하기 때문에 비대칭 형상을 가지는 피시물의 전계해석에는 한계가 있다[5]. 그래서 하부금구류에 취부된 선로도체 및 상부금구류를 지지하는 철탑을 고려한 전계해석을 하기 위해 3차원 전계해석을 수행하였다. 그림 4 (a)는 실험실에서의 애자련 시험시의 모델 애자련에 대한 3차원 전계해석의 결과를 보여주고 있다. 해석은 애자주위의 360°의 공간중에서 90°만 수행되었으나, 피해석대상이 대칭적인 형상을 가지고 있기 때문에 문제가 전혀 없을 뿐 아니라 컴퓨터의 계산효율을 극대화할 수 있다. 또한, 각각의 애자에 대해서는 기본적인 애자의 형상은 유지하면서 계산의 편의를 도모하기 위해 보다 단순한 형상으로 모델링되었다. 그리고, 모델 애자련은 하부금구류에 x축방향으로 선로도체가 취부되어 있고, 접지축은 y축방향으로 인가선을 모의한 구조로 구성되어 있다. 애자련전체에 걸리는 전압의 5%에 상당하

는 각각의 등전위선들이 접지인가선측과 선로측 사이의 공간에 배치되어 있으며, 인가선의 곡률반경이 선로측보다 작기 때문에 등전위선들이 더 조밀하게 위치하고 있다. 그림 4 (b)는 애자련의 고압측과 저압측 사이의 전위분포를 나타낸 것이다. 이 그림에서도 상부 저압측 부근의 전위의 기울기가 상대적으로 큰 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 현수 애자련의 경우에 있어서의 실선로를 고려한 모델 애자련에 대한 3차원 전계해석의 결과를 보여주고 있다. 그림에서 상부 금구류에 부착되어 있는 철타므로 인하여 저압측에서의 등전위선도의 밀도가, 그림 4 (a)와 비교할 때, 매우 낮아진 것을 알 수 있다. 그림 5 (b)에서도 철타의 효과로 인하여 저압측에서의 전위의 기울기가 매우 완만해진 것을 확인할 수 있다.

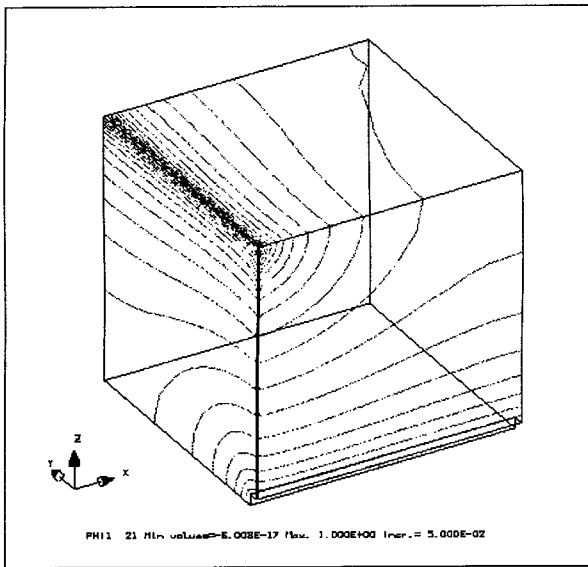


그림 4 (a) 시험용 모델애자련의 3차원 등전위선도
Fig. 4 (a) 3D equipotential lines of insulator string for testing model

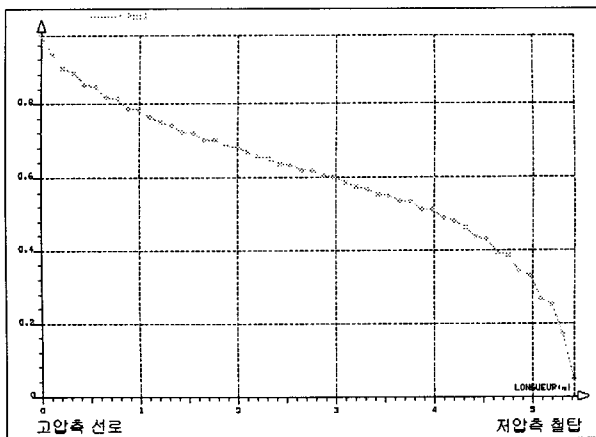


그림 4 (b) 시험용 모델애자련의 연면에서의 전위분포
Fig. 4 (b) Potential distribution of insulator string for testing model

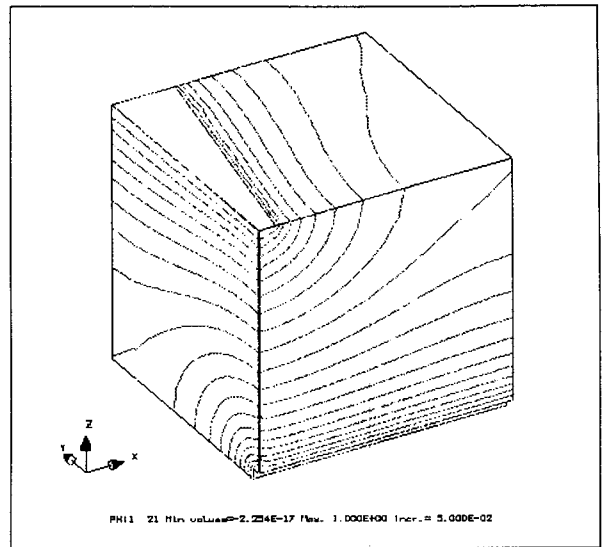


그림 5 (a) 실선로 모델애자련의 3차원 등전위선도
Fig. 5 (a) 3D equipotential lines of insulator string for real line model

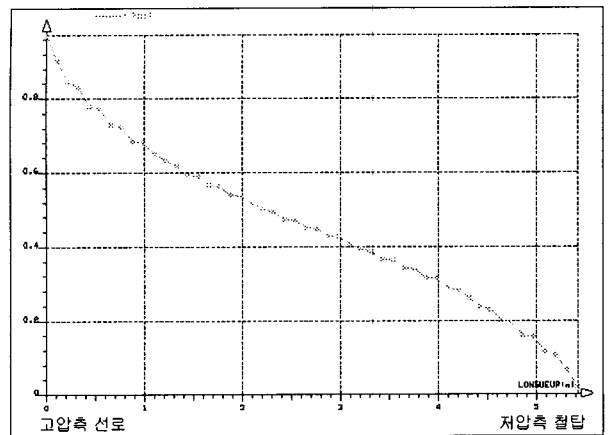


그림 5 (b) 실선로 모델애자련의 전위분포
Fig. 5 (b) Potential distribution of insulator string for real line model

2.3 전계해석결과에 대한 고찰

그림 3에 자기부와 도체가 접촉하는 삼중점에서의 전계 집중을 완화하기 위한 형상을 제시하였다. 실제 제작상의 문제가 되지 않는 범위 내에서 애자의 형상설계에 고려될 수 있을 것으로 사료된다. 또한, 전계해석 결과, 전계가 애자련의 양단에서 집중하고 더욱, 캡 전극부분과 핀 전극부분 사이의 자기부에 전계가 집중하여 가장 가혹하게 인가되므로, 필요한 경우 이에 대한 전계 완화(셴드링, 아킹혼 등)를 행하면 된다. 그 일례로서 셴드링의 효과를 고찰하기 위해 전계해석을 수행한 결과가 그림 6에 주어져 있다. 그림 6 (b)에서, 애자련의 양단에 취부된 셴드링으로 인하여 애자련 양단에서의 전위의 기울기가, 그림 5 (b)와 비교하면, 더욱 완만해진 것을 확인할 수 있다. 그리고, 그림 6 (c)의 전계완화형 모델애자련의 고

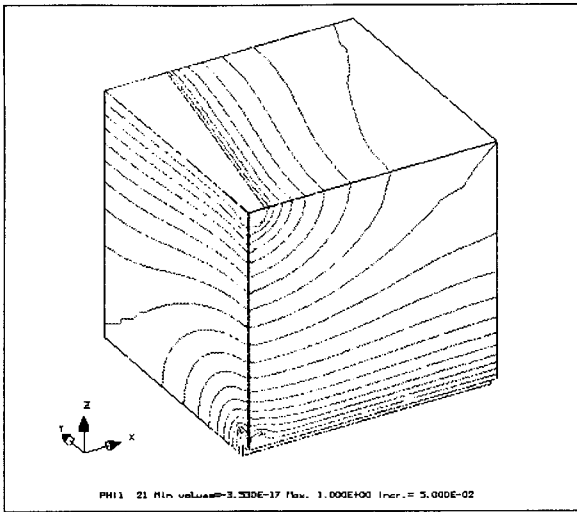


그림 6 (a) 전계완화형 애자련의 3차원 등전위선도
 Fig. 6 (a) 3D equipotential lines of field-mollified insulator string

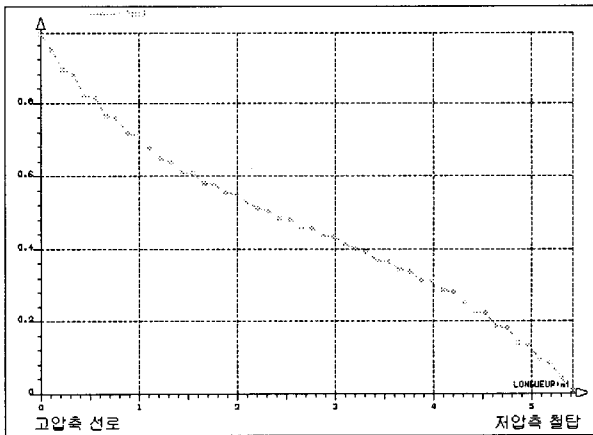


그림 6 (b) 전계완화형 애자련의 전위분포
 Fig. 6 (b) Potential distribution of field-mollified insulator string

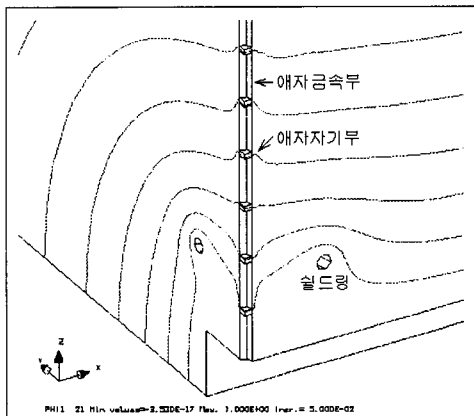


그림 6 (c) 전계완화형 애자련의 고압측 전위분포
 Fig. 6 (c) Potential distribution of high voltage part of field-mollified insulator string

압축 전위분포를 살펴보면, 각 애자모델이 하나의 전위선만을 분담하고 있다. 이것은 애자련의 절연특성에 있어서 각각의 애자가 균일하게 전압을 분담하는 이상적인 형상을 보여주고 있다. 이와 같은 이상적인 형상에서는 RIV(radio interference voltage)특성도 좋아지고[4], 식 (1)의 애자에 요구되는 절연강도가 대폭 낮아지기 때문에 애자를 생산함에 있어서 그 만큼의 여유도를 가질 수 있다.

현수애자 시편 및 unit에 있어서의 필요한 절연 설계를 위한 절연파괴 강도를 구하기 위해서는 현수애자 unit에 걸리는 전압을 상정하여야 한다. 우리나라 765kV선로의 청정지역에 사용되는 것으로 상정하면[6], 400kN 현수애자련 즉, 현수애자 28개에 걸리는 전체전압은 $765\text{kV}/\sqrt{3} = 442\text{ kV}$ 로 되며, 그림 5에서 전체전압의 5%에 해당하는 등전위선이 두 개 지나가는 애자가 존재하므로, 가장 가혹하게 인가되는 unit당의 전압은 442kV의 10%로서 44.2kV로 계산되어 상정된다. 그림 2에서 전계가 가장 집중된다고 사료되는 곳은 140번으로서, 그 전계 세기는 88V/m(1V 인가시)로 나타났다. 이를 근거로 자기부의 설계시 필요로 하는 절연강도는 다음 식 (1)에 의해 상정한다.

$$\begin{aligned} \text{필요한 절연 강도} &= \text{최대 전계 세기} \times \text{설계 여유도}(3.5\sim 4.0) \\ &\times \text{안전율}(1.15\text{로 상정}) \end{aligned} \quad (1)$$

인가전압을 44.2kV로 상정하여 계산하면, 시편의 경우, 절연 파괴강도는 15.7 ~ 17.9 kV/mm이면 아주 충분한 것으로 사료된다. 시제작된 400kN 현수애자의 시편에 대한 절연파괴 시험결과는, 표 1과 같이, 평균 18.2kV/mm로서 상정된 기준값을 상회하였다. 그리고, 애자 unit의 경우는 한전구매규격에 따르면 140kV/unit 이상일 것이 요구된다. 표 2는 애자 unit에 대한 절연파괴강도를 시험한 결과를 나타내고 있다. 제작 여건상 2개의 시료 밖에 시험하지 못하였으나, 모두 기준값을 초과하는 절연특성을 나타냈다.

표 1 애자 시편의 절연파괴강도시험 결과

Table 1 Results of puncture test of insulator piece

시편	절연파괴 전압 (kV/mm)	평균 값 (kV/mm)	기준 값 (kV/mm)
#1	18.5	18.2	15.7 ~ 17.9
#2	17.2		
#3	19.7		
#4	18.4		
#5	17.4		

표 2 애자 unit의 절연파괴강도시험 결과

Table 2 Results of puncture test of insulator unit

애자	절연파괴 전압 (kV/unit)	평균 값 (kV/unit)	기준 값 (kV/unit)
#1	185	189	140 이상
#2	193		

5. 결 론

400kN 현수애자의 개발을 위하여 애자 unit 및 애자련에 대하여 전계해석을 수행한 결과, 다음과 같은 사항을 알 수 있었다.

- 1) 765kV 송전선로용 400kN 현수애자에 대한 전계해석 결과, 전계집중이 가장 가혹한 자기부의 위치(삼중점)를 확인하였으며, 전계 집중을 완화하기 위한 형상을 제안하였다.
- 2) 애자련의 전계 해석에 있어서는 시험용 모델애자련, 실선로 모델애자련 등을 모의한 3차원의 전계해석을 수행함으로써 애자련의 절연특성이 주위형상에 큰 영향을 받는 것을 확인하였다.
- 3) 전계완화형 애자련에서 전계완화용 쉴드링을 취부하여 해석함으로써 애자련에서 각각의 애자에 균일한 전압이 분담되는 효과를 검증하였다.
- 4) 시제작된 400kN 현수애자의 절연과피 실험결과, 애자시편의 경우 평균값이 18.2kV/mm로서 상정한 기준치(15.7 ~ 17.9 kV/mm)를 상회하였다. 또한, 애자 unit의 경우도 189kV/unit로서 기준값을 초과하였다.

이상과 같이 400kN 초고전압용 애자개발의 일환으로서 애자에 대한 전계해석을 수행함으로써 400kN 현수애자의 개발을 위한 기초자료를 확보함은 물론, 70ton 및 80ton 애자의 개발에 대해서도 더욱 박차를 가할 수 있다고 사료된다.

참 고 문 헌

- [1] 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
- [2] IEC 60383 : Tests on insulators of ceramic material or glass for overhead lines with a nominal voltage greater than 1000V, 1993
- [3] 森田健兒, 野岐 宏, 刀根如人, “急峻雷インパルスによる懸垂がいしの絶縁破壊機構”, 電氣學會論文誌 116권 11호, pp. 1415 - 1421, 1996
- [4] 日本電氣學會, がいし、オーム社, pp. 93 - 103, 1983. 6
- [5] Flux 3D manual
- [6] 한국전력공사, 765kV 송전선로 절연설계지침 및 해설서, pp. 39 - 42, 1994. 12

저 자 소 개



최 재 구(崔 再 九)

1969년 3월 16일생. 1994년 경북대학교 전기공학과 졸업. 1996년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 산업협력부 시험기술연구실 선임연구원.
Tel : 055-280-1534, Fax : 055-280-1690
E-mail : jgchoi@keri.re.kr



김 익 수(金 益 秀)

1957년 8월 20일생. 1981년 부산대학교 전기공학과 졸업. 1983년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 한국전기연구원 시험기술연구실장. 책임연구원
Tel : 055-280-1530, Fax : 055-280-1690
E-mail : isk133@keri.re.kr



서 형 권(徐 瑩 權)

1961년 4월 22일생. 1984년 영남대학교 금속공학과 졸업. 1987년 동대학원 금속공학과 졸업(석사). 현재 고려애자공업(주) 생산부장
Tel : 055-232-7081,
Fax : 055-232-7086
E-mail : hksuh1234@hanmail.net

문 인 옥(文 仁 旭)

1957년 10월 30일생. 1976년 경남공고 전기공학과 졸업. 현재 한국전기연구원 고전압시험실 책임기사
Tel : 055-280-1537,
Fax : 055-280-1690
E-mail : iwmoon@keri.re.kr