

NURB곡면을 이용한 3차원 절연설계 알고리즘과 그 응용

이병윤*, 명성호*, 한인수**, 박종근**, 김응식***, 민석원****, 신영준*

*한국전기연구소, **서울대학교, ***호서대학교, ****순천향대학교

Three-Dimensional Insulation Design Algorithm Using NURB Surface and Its Application

B.Y.Lee, S.H.Myung, I.S.Han, J.K.Park, E.S.Kim, S.W.Min, Y.J.Shin

KERI, Seoul Nat'l Univ., Hoseo Univ., Soonchunhyang Univ.

Abstract - In this paper, a three-dimensional algorithm for the insulation design of the high-voltage equipment is presented. In general, the insulation design consists of two steps. They are electric field calculation and correction of the shape to be designed.

In the proposed algorithm, the combination method of charge simulation and surface charge simulation is used to calculate the three-dimensional electric fields.

As for the correction of the shape, indirect control provided by rational B-spline is more useful than direct control. The use of rational B-spline reduces in the number of design variables and garrantees the smooth curvature of the designed shape.

The proposed algorithm is applied to the design of the shape of the shield ring which has been designed by the method of trial and error.

1. 서 론

고전압 설비의 절연설계는 시스템의 안전한 동작을 위해 매우 중요하다. 일반적으로 절연설계는 설계영역을 결정하고 전계오차를 평가하기 위한 전계해석과 설계영역에서 요구되는 전계분포를 얻기 위한 형상수정의 두 단계로 구성된다. 현재까지 다수의 2차원 및 축대칭 3차원 절연설계 알고리즘이 제안되었으나 3차원의 경우는 위의 두 단계에서의 어려움 때문에 소수의 알고리즘만이 제안되었다.[1~8] 그 가운데 Tsuboi 와 Misaki는 표면전하법과 최적화기법을 이용한 3차원 절연설계 알고리즘 [8]을 제안하였으며 접지된 육면체의 외함으로 실드된 구전극 표면에서 평동전계분포를 얻기 위해 적용되었다. 설계는 외함을 고정시킨 채로 구전극 표면에서의 전계분포를 구하고 전계값이 큰 부분의 형상을 원하는 전계분포를 얻을 때까지 반복 수정하는 방식으로 진행되었다. 설계변수로는 전계계산을 위해 곡면삼각형요소로 분할한 구전극 표면의 절점들을 이용하였고 매 단계에서의 변수들의 수정량은 최적화기법을 이용하여 설계영역에서 전

계오차의 제곱의 합이 최소가 되도록 결정되었다. 비록 이 방법으로 만족할만한 계산정도를 얻을 수 있으나 많은 설계변수가 요구되고 최종적으로 설계된 형상의 곡률이 불연속이 되어 전계집중점이 발생할 가능성이 있다. 따라서 설계된 형상의 표면을 다듬기 위한 후처리 알고리즘이 요구되었다.

본 논문에서는 이러한 문제를 처리하기 위해 근사곡면에 속하는 NURB(Non-Uniform Rational B-spline) 곡면을 도입한 절연설계 알고리즘을 제안하였다.[9,10] 이 알고리즘은 NURB곡면의 특성을 이용하여 형상수정에 요구되는 변수를 감소시켰을 뿐만 아니라 최종적으로 설계된 형상의 곡률의 연속성을 보장해 준다. 제안된 알고리즘의 유효성을 입증하기 위해 실드링의 절연설계에 적용하였다.

2. 형상의 간접수정법

설계형상 표면에서 요구되는 전계분포를 얻기 위해서 설계변수는 어떠한 방식으로든 수정되어야 한다. 전계분포를 구하기 위해 표면전하법을 이용한 기존의 연구에서는 형상표면의 절점들을 직접 이동시켜 형상을 수정하였다. [1~8]. 그런데 이와 같은 형상의 직접수정은 많은 수의 설계변수를 요구할 뿐만 아니라 설계된 형상의 곡률이 불연속성을 나타내기 쉽다.

이러한 문제는 근사곡면을 이용한 형상의 간접수정으로 해결될 수 있다. 본 논문에서 이용한 NURB 곡면은 근사곡면의 하나로 제어점들로 구성되는 특성다면체를 근사하여 형상을 표현한다. NURB곡면은 식(1)과 같이 정의된다.

$$S(u, v) = \frac{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n W_{i,j} P_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)}{\sum_{i=0}^m \sum_{j=0}^n W_{i,j} N_{i,k}(u) N_{j,l}(v)} \quad (1)$$

여기에서,
u,v:매개변수
k,l:매개변수 u와 v에 관한 Blending function의 차수
W_{ij} : 가중치

P_{ij} : 제어점
 $N_{i,k}, N_{j,l}$: Blending function
 n, m : 매개변수 u 와 v 방향의 제어점수

Blending function들은 다음의 식으로 주어진다.

$$N_{i,1}(u) = 1 \quad \text{if } t_i \leq u < t_{i+1}$$

$$= 0 \quad \text{otherwise} \quad (2)$$

$$N_{i,k}(u) = \frac{(u-t_i)N_{i,k-1}(u)}{t_{i+k-1}-t_i} + \frac{(t_{i+k}-u)N_{i+1,k-1}(u)}{t_{i+k}-t_{i+1}} \quad (3)$$

여기에서 t_i 는 knot값이며 다음과 같이 주어진다.

$$t_i = 0 \quad \text{if } i < k$$

$$t_i = i - k + 1 \quad \text{if } k \leq i \leq n \quad 0 \leq i \leq n + k$$

$$t_i = n - k + 2 \quad \text{if } i > n \quad (4)$$

$$0 \leq u \leq n - k + 2 \quad (5)$$

식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 Blending function의 차수가 결정되면 NURB곡면으로 구성된 형상은 다음의 두가지 방법으로 수정될 수 있다..

- 제어점에 의한 형상수정
 제어점을 이동시키면 특성다면체가 재구성된다. NURB곡면은 특성다면체의 모양을 근사하여 형상을 구성시키므로 형상의 변화를 얻을 수 있다.

- 가중치에 의한 수정
 동일한 특성다면체에 대하여 가중치 W_{ij} 에 따라 근사된 곡면은 제어점 P_{ij} 로부터 가깝거나 멀게 형성된다. 따라서, 제어점의 좌표와 가중치들을 설계변수로 이용할 수 있다.

3. 전계오차와 균일성

설계된 형상의 전계오차와 균일성을 다음과 같은 식으로 평가하였다.

$$\text{전계오차} = \left| \frac{E_{\max \text{ or } \min} - E_d}{E_d} \right| \times 100[\%] \quad (6)$$

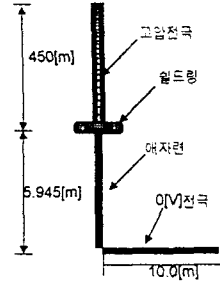
$E_{\max \text{ or } \min}$: 설계영역내의 최대 또는 최소 전계값
 E_d : 설계전계조건

$$\text{균일성} = \frac{E_{\max}}{E_{\min}} \quad (7)$$

E_{\max}, E_{\min} : 설계영역내의 최대 및 최소전계값

4. 쉴드링의 설계

그림 1에 지상으로부터 28m에 설치된 절연시스템의 평면도를 보여주고 있다. 여기에서 고전압 전극은 0 [V]의 전극으로부터 애자련에 의해 절연되



고압전극의 반경 = 0.3127[m]

0[V]전극의 반경 = 0.17[m]

그림 1. 지상 28[m]에 있는 절연시스템의 평면도

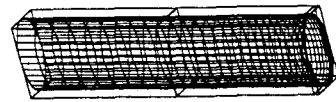


그림 2. NURB 곡면으로 표현된 애자련

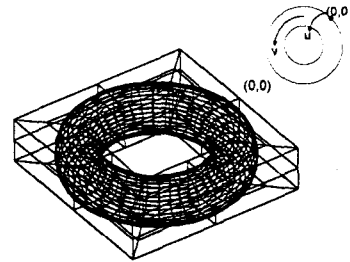


그림 3. NURB곡면으로 표현된 쉴드링

어있다. 쉴드링은 고전압전극과 애자련의 접속부위에 코로나 발생을 완화시키기 위해 설치되어 있다. 물론 쉴드링 자체의 표면에서도 코로나가 발생되지 않아야 한다. 이러한 조건을 만족하는 쉴드링을 설계하기 위해 제안된 방법을 적용하였다. 전계분포를 구하기 위해 고전압 전극과 접지전극은 각각 16개의 유한사선전하[11]로 모의하였으며 그림 2 및 3에 보인 바와 같이 NURB곡면으로 표현된 애자련과 쉴드링은 각각 32개와 64개의 상수전하밀도분포를 갖는 곡면사각형 요소로 분할하였다.

그림 4에는 쉴드링의 초기형상으로 부터 전계분포를 구하여 결정한 설계영역과 설계변수들을 나타내었다. 설계조건은 설계영역내에서 주어진 평등전계분포를 얻는 것이다. 그러기 위해 설계영역내에서의 전계오차의 제곱의 합을 목적함수로 두고 최적화기법을 사용하여 이것을 최소화시킨다. 최적화기법으로는 경사법에 속하는 Gauss-Newton법을 이용하였다. 설계변수의 초기값과 수렴값을 표 1에

나타내었다. 표 2에는 설계조건에 따라 설계된 형상의 전계오차와 균일성을 나타내었다. 그림 5는 설계조건이 12[kV/cm]일 때의 설드링의 초기형상과 수렴형상을 보여주고 있다. 그림 6에는 설계조건에 따라 설계된 설드링의 단면을 도시하였다. 애자런과 설드링 표면에서의 전계분포를 그림 7과 8에 각각 나타내었다.

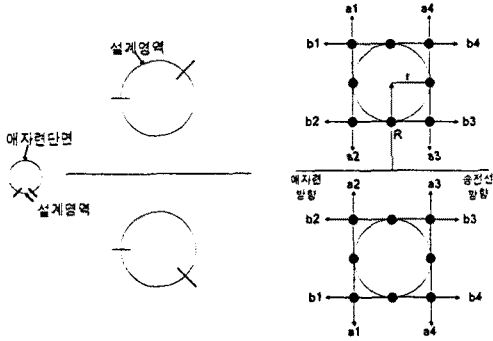


그림 4. 설계영역과 설계변수

표 1. 초기형상과 설계형상의 설계변수값

설계조건	초기형상(m)	설계형상(m)
12 kV/cm	R=0.616	R=0.606
	r=0.073	r=0.0557
	a1=0.0	a1=-0.0063
	a3=0.0	a2=-0.0013
	a3=0.0	a3=0.044
	a4=0.0	a4=0.0074
	b1=0.0	b1=0.0089
	b2=0.0	b2=0.024
13 kV/cm	b3=0.0	b3=0.034
	b4=0.0	b4=-0.0037
	R=0.59	R=0.581
	r=0.064	r=0.049
	a1=0.0	a1=-0.0124
	a3=0.0	a3=0.013
	a3=0.0	a3=0.044
	a4=0.0	a4=0.0074
b1=0.0	b1=0.0089	
b2=0.0	b2=0.024	
b3=0.0	b3=0.034	
b4=0.0	b4=0.0037	

표 2. 설계형상의 전계오차와 균일성

설계조건	전계오차	균일성
12kV/cm	0.66	1.0125
13kV/cm	0.77	1.014

5. 결 론

본 논문에서는 3차원 절연설계 알고리즘이 제안되었다. 이 알고리즘에서는 전계분포를 구하기 위해 전하중첩법과 표면전하법의 혼합법을 이용하였고 요구되는 전계분포를 최적화기법을 적용하여 구하였다. 설계변수의 수를 감소시키고 곡률이 연속

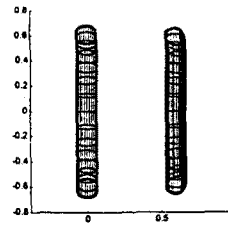


그림 5. 설드링의 초기형상과 설계형상

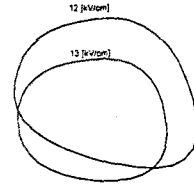


그림 6. 설계조건에 따라 설계된 설드링의 단면

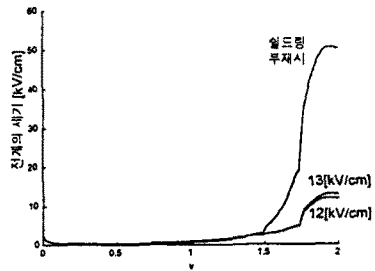


그림 7. 애자런 표면에서의 전계분포

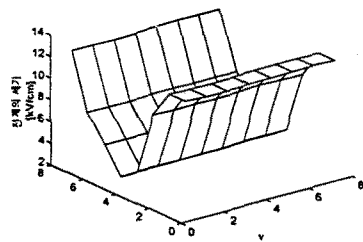


그림 8. 설드링 표면에서의 전계분포

인 형상을 설계하기 위해 NURB곡면이 도입되었다. 제안된 알고리즘을 애자런 표면에서의 코로나 발생을 완화시키기 위해 설치된 설드링의 형상을 설계하기 위해 적용하였다. 설계 결과로부터 제안된 알고리즘이 절연설계에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 기대된다.

[참 고 문 헌]

- [1] J.D.Welly, Optimization of Electrode Contours in High Voltage Equipment Using Circular Contour Element,

- 5th International Symposium on High Voltage Engineering*, BRAUNSCHWEIG, August, 1987, paper 31.03
- [2] H. Gronewald, Computer-aided design of HV insulators, *4th International Symposium on High Voltage Engineering*, Athens, Greece August, 1983, paper 11.01
- [3] Fei Zeng-Yao, Zhou Pei-Bai, Optimum Design of The High Voltage Electrode, *5th International Symposium on High Voltage Engineering*, BRAUNSCHWEIG, August, 1987, paper 31.09
- [4] D. Metz, "Optimization of high voltage fields", *3rd ISH Symposium.*, Milan, 1979, paper 11.12.
- [5] Jin Liu, Jian-ni Sheng, The Optimization of The High Voltage Axisymmetrical Electrode Contour, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.24, no.1, January, 1988, pp.39-42
- [6] M. Abdel-Salem, E.K. Stanek, Field Optimization of High-Voltage Insulators, *IEEE Trans. on Industry Applications*, vol.1A-22, no.4, July/August, 1986, pp.594-601
- [7] M. Abdel-Salam, E.K. Stanek, Optimum Field Stress on High-Voltage Insulators, *IEEE Trans. on Electrical Insulation*, vol.EI-22, no.1, February, 1987, pp.47-56
- [8] H.Tsuboi and T.Misaki, The Optimum Design of Electrode and Insulator Contours by Nonlinear Programming Using The Surface Charge Simulation Method, *IEEE Trans. on Magnetics*, vol.24, no.1, January, 1988, pp.35-38
- [9] M.E. Mortenson, *Geometric modelling*, John Wiley & Sons. pp.151-239
- [10] L.Piegl, Modifying the shape of rational B-splines. Part 2: Surfaces, *Computer-aided design*, vol.21, no.9, 1989, pp.538-546
- [11] B.Y. Lee, J.K. Park, S.H. Myung, S.K. Min, E.S. Kim, An Effective Modelling Method to Analyze Electric Field Around Transmission Lines and Substations Using Generalized Finite Line Charge, *IEEE Trans. on PES Summer Meeting*, 96SM 394-7 PWRD, 1996