

## 풍소음 저감용 특수 다중도체 방식의 3차원 전개해석

민석원 · 송기현

순천향대학교 정보기술공학부

### 3-Dimensional Analysis on Electric Field of Special Conductor Bundle for Reducing Aeolian Noise

SukWon Min · KiHyun Song

Division of Information Technology Engineering,  
Soonchunhyang University, Asan 336-745, Korea

**Abstract** - In this paper, 3-dimensional charge simulation method was developed to analyze electric field distributions of special conductor bundles equipped with spiral rods for reducing aeolian noise.

When we applied this method to 765 kV double circuit transmission line, we found calculation error of this method was within a reasonable boundary of 1%.

#### 1. 서 론

현재 우리 나라는 전력수요증가와 인구의 대도시 집중화 현상으로 인해 신뢰도 높은 대용량 장거리 전력수송 설비를 점점 확충해야 하는 실정으로 765 kV 송전선로를 건설 중에 있다[1]-[4].

이런 765 kV 송전선로의 운전을 앞두고 새로이 대두된 문제점으로 송전선에서 바람으로 인한 풍소음의 기계적 소음이 문제가 되었고, 그 문제의 해결 방안으로 spiral rod를 송전선로의 소도체에 감음으로써 풍소음을 줄일 수 있었다.

한편 이런 spiral rod의 반경은 소도체의 반경에 비해 매우 작아 spiral rod 표면은 전개강도가 높아지는 전개 불균등 현상이 나타나게 되어 코로나가 쉽게 발생하게 된다.

따라서 본 저자들은 2차원장 전하 중첩법을 이용하여 기계적인 풍소음을 줄이면서 동시에 전계를 가장 낮게 형성하는 spiral rod의 형상과 수를 찾는 연구를 하여 대각 밀착 4조가 적합함을 발표한 적이 있다[5][6].

그러나 2차원장의 해석으로 3차원 송전선로에서 일어나는 물리적인 현상을 정확히 예측한다는 것은 한계가 있을 것으로 생각되었고, 실제 송전선로를 3차원으로 모의 계산을 해 보는 연구의 필요성이 제기 되어 본 연구에서는 3차원장으로 spiral rod를 모의할 수 있는 3차원 전하 중첩법을 개발하여 spiral rod가 1개인 경우(1조 풍소음 저감방식), spiral rod가 2개인 경우(대각2조와 밀착2조 풍소음 저감방식), spiral rod가 4개인 경우(대각 4조 풍소음 저감방식)의 전위, 전계를 계산·검토 해 보았다.

#### 2. 계산원리

##### 2.1 spiral 전위식

spiral 전하의 전위식은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\phi = \int \frac{\rho_L}{4\pi\epsilon_0 l} dl \quad (1)$$

여기서 분모의  $l$  은 거리이므로 식(2)와 같이 표현된다.

$\rho_L$  은 선전하밀도를 표현한 식으로 2.2 spiral 전하의 전개식에서 설명한다.

$$l = \sqrt{(x - a \sin u)^2 + (y - a \cos u)^2 + (z - bu)^2} \quad (2)$$

여기서  $dl$  를  $du$  로 변환하면

$$|dl| = \sqrt{(-a \sin u)^2 + (a \cos u)^2 + (b)^2} du = \sqrt{a^2 + b^2} du \quad (3)$$

로 나타내어진다.

또한 전하밀도의 모의는 밀도함수 표현식을 어떻게 하는 것이 가장 계산 오차를 줄일 수 있는가에 관해 참고 문헌[7]을 통하여 검토한 결과, 상수로 모의하는 것이 가장 좋음을 확인하였다.

따라서, 선전하 밀도를 상수로 모의한 전위식은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = \int \frac{\sqrt{a^2 + b^2} k}{4\pi\epsilon_0 l} du \quad (4)$$

##### 2.2 spiral 전하의 전개식

spiral 전하의 전개식은 식(1)에서  $\rho_L$  의 종류가 다양하므로 먼저 전위값을 구해서 그 결과가 가장 작은 오차를 포함하고 있는 식을 토대로 전개 계산식을 유도하였다.

오차분석의 과정을 통해서 선전하 밀도를 상수로 취급하는 것이 가장 오차를 줄일 수 있었다.

또, 적분구간도  $-\pi \sim 3\pi$  까지 설정해서 계산할 때 전위 계산 오차가 가장 적게 나타나서 전개 계산의 적분구간도  $-\pi \sim 3\pi$  로 하였으며  $x, y, z$  방향의 전개 성분식은 다음과 같다.

$$E_x = -\frac{\partial \phi}{\partial x} = \int \frac{\sqrt{a^2 + b^2}(k)(x - a \sin u)}{4\pi\epsilon_0 l^3} du \quad (5)$$

$$E_y = -\frac{\partial \phi}{\partial y} = \int \frac{\sqrt{a^2 + b^2}(k)(y - a \cos u)}{4\pi\epsilon_0 l^3} du \quad (6)$$

$$E_z = -\frac{\partial \phi}{\partial z} = \int \frac{\sqrt{a^2 + b^2}(k)(z - bu)}{4\pi\epsilon_0 l^3} du \quad (7)$$

로 나타내어진다.

#### 3. 송전선에 적용결과

위에서와 같이 전위 및 전개식에는 적분이 필요한데 해석식이 없어서 본 연구에서는 Gaussian quadrature의 수치 계산법을 적용하였다.

Gaussian quadrature에서 오차를 최소한으로 줄이기 위해서 구간  $[a, b]$  내의 점들을 적절히 선택하고 가중치를 적합하게 선택해야 한다.

좀더 정확한 계산결과를 모의하기 위해서 구간을 15,

20, 30, 40으로 변화시켜 검토한 결과 40 차수까지를 적용하면 수치상의 계산 오차를 줄일 수 있었다.

송전선의 전계를 3차원으로 계산하기 위해서는 2개의 모델이 요구된다. 첫 번째는 소도체를 모의하기 위한 유한장 3차원 선전하 모델이고 두 번째는 spiral rod를 모의하기 위한 선전하 모델이다.

이 두 가지 모델을 이용하여 그림 2의 송전선을 모의하자면 소도체 1개당 1경간을 모의하기 위해 최소한 10개의 전하가 필요하고 spiral rod도 최소한 20개의 전하가 필요하다. 결국 1상당  $6 \times 30 = 180$ , 송전선이 6상이므로  $6 \times 180 = 1080$ 개의 모의전하가 최소한 소요된다.

이렇게 송전선의 3차원 전계계산은 많은 변수를 요구하고 있어 이것을 있는 그대로 표현하기가 매우 어려울 뿐만 아니라 그대로 표현하여도 계산오차가 커질 것으로 예상된다.

따라서 본 연구에서는 소도체는 선로 방향으로 전계의 세기가 그렇게 변화하지 않을 것으로 생각되어 무한장 선전하로 가정하였고 spiral rod도 pitch마다 같은 현상이 반복될 것으로 생각하여  $u$ 를  $-\pi$ 에서부터  $3\pi$ 까지만 고려하여 계산하였고, spiral wire가 한바퀴 감긴 즉, 한 pitch인  $0 \sim 2\pi$ 까지 만을 해석하였다.

### 3.1 spiral rod가 첨가된 특수 다중도체 방식

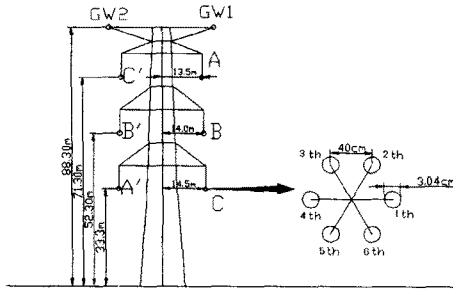


그림 1. 765kV 송전선로 개략도

그림 1은 현재 건설중인 765 kV 송전선로의 개략도로 송전선로 모델링 데이터를 보여주고 있으며, 그 송전선로에 spiral rod를 소도체의 진행방향으로 감은 형상을 그림 2, 그림 7, 그림 10, 그림 13에서 나타내고 있다. 각 송전선로는 역상 배열로 각 상 및 가공지선까지의 높이는 평균 지상고를 사용하였다. 각 상은 6도체 방식, 소도체 간격은 40cm로 하였으며, 소도체 및 가공지선의 반지름은 각각 1.52cm, 0.805cm를 적용하였고, spiral rod의 반지름은 0.31cm이다.

### 3.2 1조 풍소음 저감 전선 방식

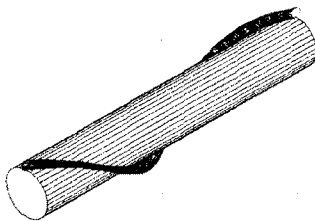


그림 2 1조 풍소음 저감 전선 방식

1조의 전계계산에서는 전계를 계산하고자 하는 소도체는 5개의 무한장 선전하로, 그 외의 소도체는 2개로 소도체를 모의하였으며 spiral rod는 8개의 나선전하로 모의하였다.

그림 3 ~ 그림 6은 spiral rod의 적분구간을 네 구간 ( $-\pi \sim 0, 0 \sim \pi, \pi \sim 2\pi, 2\pi \sim 3\pi$ )으로 하고 spiral rod의 1 pitch 길이를 33cm할 때 소도체 표면 및 spiral rod 표면에 나타나는 전위 및 전계를 나타낸 것이다.

spiral rod내의 가상전하를 중앙에 배치하고 윤곽점의

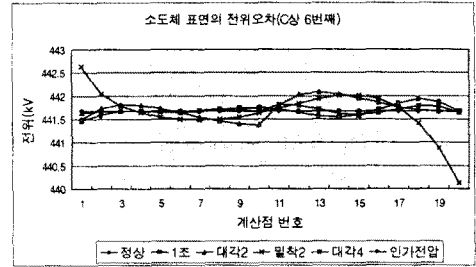


그림 3 3차원 나선전하를 이용한 1조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체 표면 전위계산 결과

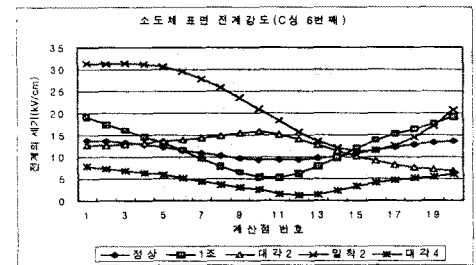


그림 4 3차원 나선전하를 이용한 1조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체 표면 전계계산 결과

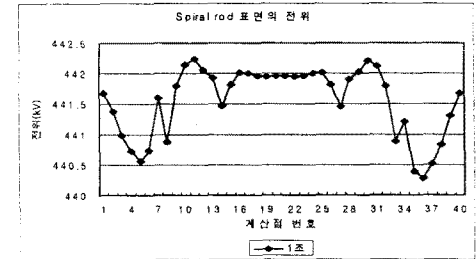


그림 5 3차원 나선전하를 이용한 1조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전위 계산 결과

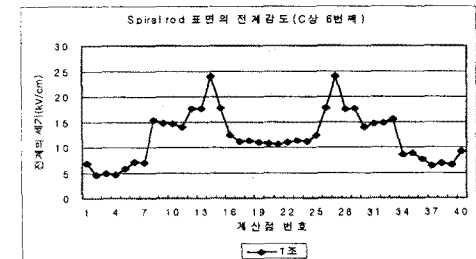


그림 6 3차원 나선전하를 이용한 1조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전계 계산 결과

개수는 2개의 가상전하에 대해 gaussian quadrature 적분 구간을 네 구간으로 나누므로 총 8개가 필요하여 이에 대응하는 윤곽점의 위치는 spiral rod의  $0, 2/7\pi, 4/7\pi, 6/7\pi, 8/7\pi, 10/7\pi, 12/7\pi, 2\pi$ 에 위치시켰다.

그림 3에서와 같이 소도체 표면 전위계산 결과는 최대 오차가 약 0.06% 발생하였다. 이에 대응하는 그림 4의 소도체 표면의 전계의 세기는 최대 19.6[kV/cm] 정도가

나왔다.

그림 5는 spiral rod에 나타나는 전위계산 결과로 최대 오차가 약 0.13% 정도 밖에 나오지 않았다. 이에 대응하는 그림 6의 spiral rod 전계의 세기의 최대치는 소도체 6번에서는 약 24[kV/cm] 정도 나왔다. 따라서 gaussian quadrature 적분구간을 네 구간으로 하였을 경우 오차가 매우 작게 발생하는 것을 알 수 있었으며, 계산된 전계 값은 신뢰할 수 있었다.

### 3.3 대각 2조 풍소음 저감 전선 방식

그림 7은 대각 2조 풍소음 저감 전선의 3차원 모델도 로 전계계산에는 1조와 같은 모의전하 배치방법을 사용 하였다. 즉, 전계를 계산하고자 하는 소도체는 5개의 무 한장 선전하로, 그 외의 소도체는 2개로 소도체를 모 의하였으며 spiral rod는 8개의 나선전하로 모의하였다.

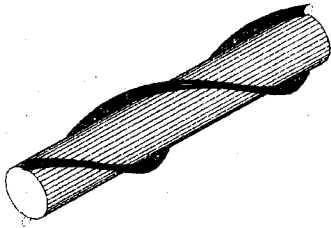


그림 7 대각 2조 풍소음 저감전선 방식

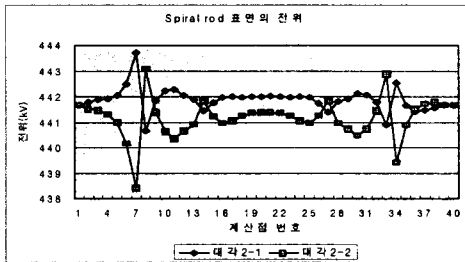


그림 8 3차원 나선전하를 이용한 대각 2조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전위계산 결과

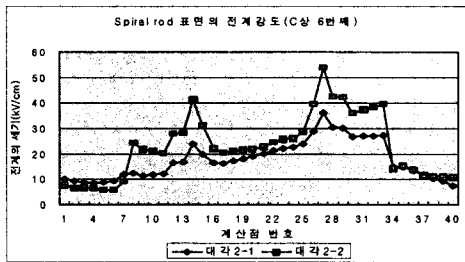


그림 9 3차원 나선전하를 이용한 대각 2조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전계계산 결과

그림 3에서 알 수 있듯이 대각 2조의 소도체 표면전위 계산결과는 최대 오차가 0.09%로 신뢰할 만하다고 생각 하였다. 또한 그림 4에서 대각 2조의 소도체 표면전계 계산결과는 최하상 6번 소도체에서 약 15.96 kV/cm의 최대치를 보였고 계산결과도 신뢰할 만 것으로 생각되었 다.

그림 8은 대각 2조의 여섯 번째 소도체의 spiral rod 표면전위 계산결과로 2번 spiral rod의 7번 계산점에서 약 0.73%의 비교적 큰 오차가 나타났지만 다른 계산점 에서는 인가전압과 비슷한 수치로 계산결과를 신뢰할 수 가 있었다.

그림 9는 대각 2조의 여섯 번째 소도체의 spiral rod 표면전계 계산결과로 가장 큰 전계는 2번 spiral rod (하 부에서 상부로 회전하는 spiral rod)의 27번 계산점에서 53.7 kV/cm로 나타났으며 1번과 2번이 닮은 꼴 형태를 보이고 있다. 그러나 이것은 현실적으로 매우 높은 값으 로 실험으로 확인할 필요가 있다고 생각된다.

### 3.4 밀착 2조 풍소음 저감 전선 방식

그림 10은 밀착 2조 풍소음 저감 전선의 3차원 모델도 로 전계계산에는 1조와 같은 모의전하 배치방법을 사용 하였다. 즉, 전계를 계산하고자 하는 소도체는 3개의 무 한장 선전하로, 그 외의 소도체는 2개로 소도체를 모 의하였으며 spiral rod는 8개의 나선전하로 모의하였다.

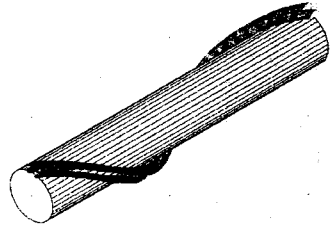


그림 10 밀착 2조 풍소음 저감전선 방식

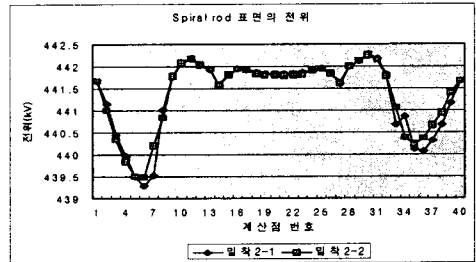


그림 11 3차원 나선전하를 이용한 밀착 2조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전위계산 결과

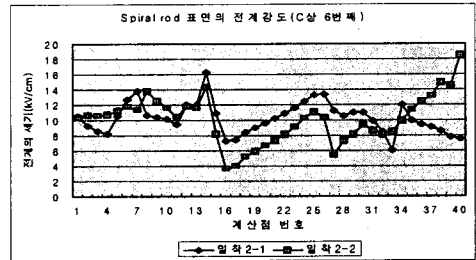


그림 12 3차원 나선전하를 이용한 밀착 2조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전계계산 결과

그림 3에서 알 수 있듯이 밀착 2조의 소도체 표면전위 계산결과는 최대 오차가 0.35%로 다른 방식에 비해 계 산오차가 가장 컸으나 이 정도의 오차는 신뢰할 만한 수 준이라고 생각하였다. 또한 그림 4에서 밀착 2조의 소도체 표면 전계 계산 결과는 최하상 6번 소도체에서 약 31.3 kV/cm의 최대치로 다른 방식에 비해 월등히 높을 을 보였다.

그림 11은 밀착 2조의 여섯 번째 소도체의 spiral rod 표면전위 계산결과로 2번 spiral rod의 6번 계산점에서 약 0.54%의 비교적 큰 오차가 나타났지만 다른 계산점 에서는 인가전압과 비슷한 수치로 계산결과를 신뢰할 수 가 있었다.

그림 12은 대각 2조의 여섯 번째 소도체의 spiral rod

표면전계 계산결과로 가장 큰 전계는 2번 spiral rod (상부에서 하부로 회전하는 spiral rod)의 12번 계산점에서 18.5 kV/cm로 소도체 표면보다 오히려 낮은 값을 나타냈으며 1번과 2번이 닮은 꼴 형태를 보이고 있다.

### 3.5 대각 4조 풍소를 저감 전선 방식

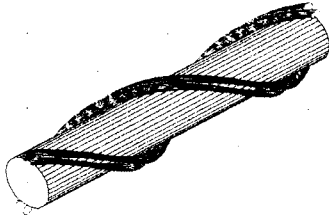


그림 13 대각 4조 풍소를 저감전선 방식

그림 13은 대각 4조 풍소를 저감 전선의 3차원 모델도 로 전계계산에는 1조와 같은 모의전하 배치방법을 사용 하였다. 즉, 전계를 계산하고자 하는 소도체는 10개의 무 한장 선전하로, 그 외의 소도체는 3개로 소도체를 모 의 하였으며 spiral rod는 8개의 나선전하로 모의하였다.

그림 3에서 알 수 있듯이 대각 4조의 소도체 표면전위 계산결과는 최대 오차가 0.03%로 신뢰할 만하다고 생각 하였다. 또한 그림 4에서 대각 4조의 소도체 표면전계 계산결과는 최하상 6번 소도체에서 약 7.84 kV/cm의 최 대치로 다른 방식에 비해 가장 낮은 값을 보였다.

그림 14는 대각 4조의 여섯 번째 소도체의 spiral rod 표면전위 계산결과로 4번 spiral rod의 34번 계산점에서 약 0.42%의 비교적 큰 오차가 나타났지만 다른 계산점 에서는 인가전압과 비슷한 수치로 계산결과를 신뢰할 수 가 있었다.

그림 15는 대각 4조의 여섯 번째 소도체의 spiral rod 표면전계 계산결과로 가장 큰 전계는 4번 spiral rod (하 부에서 상부로 회전하는 spiral rod)의 40번 계산점에서 13.4 kV/cm로 나타났으며 대각 2조와 밀착 2조의 특성 이 복합적으로 보이고 있다.

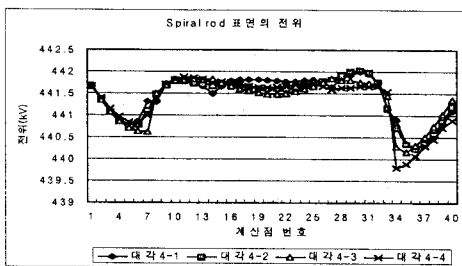


그림 14 3차원 나선전하를 이용한 대각 4조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전위계산 결과

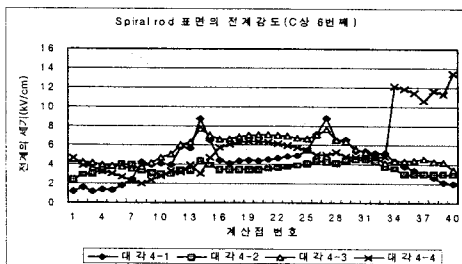


그림 15 3차원 나선전하를 이용한 대각 4조 방식 송전선 최하상 6번째 소도체의 spiral rod 표면 전계계산 결과

### 3.6 각 방식의 상별 최대 평균 전계치

표 1과 2는 이상의 기법을 토대로 송전선의 각 상의 최대 평균 전계치를 계산한 결과이다. 표 1은 각 방식의 상별 최대 평균 전계치를 소도체와 spiral rod를 구분하 지 않고 최대치만을 고려하여 표현한 것이다. 이 표에서 대각 2조만이 현실적으로 이해하기 어려운 값으로 표현 이 되고 있어서 최대평균 전계강도를 표 2와 같이 소도 체와 spiral rod로 구분하여 전계강도의 최대치를 구한 후에 평균값으로 표현하여 보았다. 이 경우는 대각 4조 방식을 제외한 방식은 문제가 없어 보이지만 대각 4조 방식은 전계강도치가 정상치 보다 낮게 나오는 문제점을 보이고 있었다. 따라서 어느 쪽으로 표현하는 것이 좋은 가에 관해서는 코로나 케이지에서의 전계계산 및 시험 결과를 바탕으로 다시 검토가 있어야 할 것으로 사료된 다. 그러나 어떤 쪽이든 최대 평균 전계강도치가 1조, 대 각 2조, 밀착 2조, 대각 4조의 순으로 낮아지는 2차원 계 산결과와는 달리 3차원 계산결과는 대각 2조, 밀착 2조, 1조, 대각 4조의 순으로 낮아지고 있었다.

표 1 소도체와 spiral rod 구분없이 최대치만 고려한 경우의 송전선 각상의 최대평균전계강도(단위: kV/cm)

	1조	대각 2조	밀착 2조	대각 4조
A상	22.294880	53.306230	30.183746	13.281476
B상	24.035835	54.316769	29.987817	13.443596
C상	24.346887	54.292950	28.714710	13.344197

표 2 소도체와 spiral rod 구분하여 최대치를 고려한 경우의 송전선 각상의 최대평균전계강도(단위: kV/cm)

	1조	대각 2조	밀착 2조	대각 4조
A상	19.882479	36.663729	22.922134	9.385991
B상	21.536742	37.353650	22.981331	9.465990
C상	21.844613	37.254240	21.741199	9.369235

## 4. 결 론

현재 건설중인 765kV 송전선로에 야기되는 문제점의 하나인 풍소음을 줄이기 위한 방법으로 풍소를 저감 전 선(spiral rod)을 설치하였을 경우의 송전선 소도체 및 spiral rod 표면에 발생하는 전계의 세기를 3차원 전하중 첩법을 이용하여 검토하였다.

여러 가지 spiral rod 가선방식을 검토한 바, 각각의 경우에 큰 오차없이 전계값을 구할 수 있었으며 2차원장 에서는 가장 낮은 전계값을 나타낸 것은 대각 4조 방 식이고 1조, 대각 2조, 밀착 2조, 대각 4조 순으로 전계값 이 낮아짐을 알 수 있었다. 반면에 3차원장에서는 가장 낮은 전계값을 나타낸 것은 대각 4조 방식이나 대각 2 조, 밀착 2조, 1조, 대각 4조 순으로 전계값이 낮아지고 있었다.

특히, 대각 2조의 경우는 현실적으로 이해하기 어려운 매우 높은 전계 값을 나타내고 있어 코로나 케이지에서 의 전계 계산 및 시험 결과를 바탕으로 다시 검토가 있 어야 할 것으로 생각되어 진다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 민석원, 김경부, "코로나 케이지를 이용한 765 kV 초고압 송전선 다중 도체방식 선정", 대한 전기학회 논문지 제542권 7호, 84-94, 1993
- [2] 민석원, 박종근, "코로나 잡음 특성을 고려한 초고압 송전선의 다중 도체 배열 방식 연구", 대한 전기학회 논문지 제39권 5호, 508-515, 1990
- [3] S.W.Min, J.B.Kim, D.I.Lee, "A Study on Corona

- Characteristics of Symmetric and Asymmetric Conductor Bundle for 765kV Double Circuit Transmission Line by the Use of Corona Cage", Proc. of 8th ISH, Vol.3, 457-460, 1993
- [4] S.W.Min, J.K.Park, J.B. Kim,"Conductor Bundle Geometry Optimization in view of Conductor Surface Gradient", IEE Japan, 111-B, 1065-1072,1991
- [5] 민석원, 김용준, 송기현, 박은서 "전하 중첩법을 이용한 765kV 2회선 송전선로 특수 다중도체 방식의 전계분포 해석", 2000년도 대한전기학회 방전 및 고전압연구회 춘계 학술연구 발표회 논문집, 3-8, 2000
- [6] S.W.MIN, Y.J.Kim, K.Y.Shin, D.I.Lee, M.N.Ju, K.H.Yang, "Analysis on Electric Field Distributions and Corona Characteristics of Special Conductor Bundles For 765kV Double Circuit Transmission Line", ACED-2000, H-802, 423-426, 2000
- [7] 민석원, 박은서, 송기현, "전하중첩법용 spiral 전하에 관한 검토", 2000년 한국 조명, 전기 설비 학회 학술대회 논문집, 179-182, 2000