

코로나 케이지 내부에서의 풍소음 저감용 특수 다중도체 방식의 3차원 전계분포해석 II

민석원, 송기현

순천향 대학교 정보 기술 공학부

3-Dimensional Analysis II on Electric Field of Special Conductor Bundle for Reducing Aeolian Noise In Corona Cage

Suk Won Min, Ki Hyun Song

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

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

Comparing electric field distributions of special conductor bundles in 765kV transmission line with ones in corona cage, we decide experimental voltages of special conductor bundles in corona cage.

1. 서 론

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

이런 765kV 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 전계강도가 높아지는 전계불균등 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, 그 결과를 발표하였다[7][8].

본 논문에서는 기존에 발표한 실적이 있는 대각 밀착 4조 외에 대각 1조 및 2조, 밀착 2조의 코로나 케이지 내부에서의 3차원 전계강도 분포를 검토하였다. 또한, 이를 토대로 송전선로의 3차원 전계강도와 비교 분석하여 케이지에서의 실험전압을 결정하였다.

2. 본 론

2.1 계산 원리

2.1.1 나선 전하의 전위식

나선전하의 전위식은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

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

여기서 분모의  $\ell$ 은 거리이므로 식(2)와 같이 표현된다.

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

여기서  $d\ell$ 를  $du$ 로 변환하면

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

로 나타내어진다.

또한, 전하밀도  $\rho_L$ 의 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, 나선하 밀도를 상수로 모의한 전위식은 다음과 같이 표현된다.

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

2.1.2 나선 전하의 전계식

나선 전하의 전계식은 식(1)에서  $\rho_L$ 의 종류가 다양하므로 먼저 전위 값을 구해서 그 결과가 가장 작은 오차를 포함하고 있는 식을 토대로 전계 계산식을 유도하였다.

오차분석의 과정을 통해서 나선하 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 전계 계산의 적분구간도  $-\pi \sim 3\pi$ 로 하였으며  $x, y, z$  방향의 전계 성분식은 다음과 같다.

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

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

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

2.2 송전선로와 케이지 실험선로

그림 1은 3상 2회선 765kV 송전선로의 모형도이며, 해석방법은 앞서 발표한 논문의 내용과 같다. 그림 2는 단상 모의 선로인 코로나 케이지 모형도이다.

코로나 케이지는 가로, 세로길이가 각각 6m이며 지면으로 수직인 방향으로 길이가 20m 인 직육면체이다. 따라서, 전위가 0인 케이지면의 모의는 유한 직선 전하

를 이용하여 모의를 하여야 3차원 전계를 계산할 수 있으나, 이 경우는 지면 방향으로의 전계가 크게 변화가 없을 것으로 가정하여, 본 논문에서는 무한 직선 전하로 모의하였다. 또한, 케이지는 4면이지만 영상 전하를 고려하여 3면만 모의하였으며 한 면당 15개의 무한 직선 전하를 사용하였다.

그림 3, 4는 풍소음 저감용 전선의 도체방식을 종류별로 나타내고 있다.

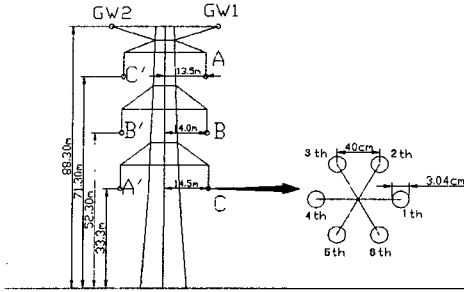


그림 1. 765kV 송전선로 모형도

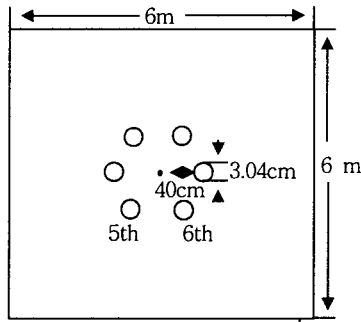
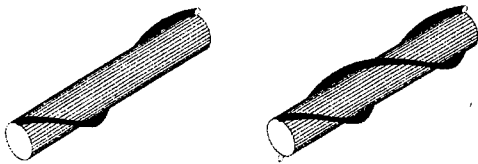
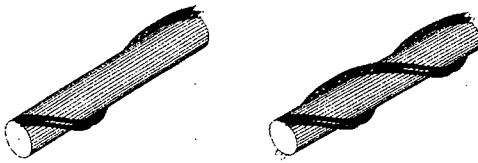


그림 2. Corona Cage 모형도



(a) 대각 1조 (b) 대각 2조

그림 3. 대각 1조 및 대각 2조 풍소음 저감전선 방식



(a) 밀착 2조 (b) 대각 밀착 4조

그림 4. 밀착 2조 및 대각 밀착 4조 풍소음 저감전선 방식

### 2.3 케이지의 전위계산 오차 분석

케이지에서의 전위계산은 사용된 전하수가 작아 계산이 좀더 쉽고 작은 오차를 보일 거라 생각되었으나, 송전선로의 계산보다 더 큰 오차를 보였다. 이는 케이지가 송전선로보다 경계조건이 어려워서 나타나는 오차라 생각된다.

그림 5는 케이지에서 소도체 표면 전위오차를 각 방식별로 나타낸 것이다. 대부분이 0.5%의 오차범위에 들고 있어 신뢰할 만하다고 생각되지만 밀착 2조의 5번째 계산점에서는 0.6% 정도의 오차를 보였다.

그림 6은 케이지에서의 대각 1조 방식의 spiral rod 표면 전위오차를 나타낸 것이다. 최대 전위오차 약 0.2% 정도가 나타났다. 그림 7에서는 케이지에서의 대각 2조 방식, 그림 8은 케이지에서의 밀착 2조 방식, 그림 9는 대각 밀착 4조 방식의 spiral rod 표면에서의 전위결과로 최대 오차가 약 0.5% 발생하였다.

spiral rod의 표면전위 계산오차 분포를 보면 계산점의 중간, 즉 spiral rod의 중간부분에서는 오차가 균일하게 분포되어 있으나, spiral rod 양끝의 계산점에서는 계산오차가 커짐을 볼 수 있다. 이 오차는 더 연구하여 개선해야 할 것으로 생각된다.

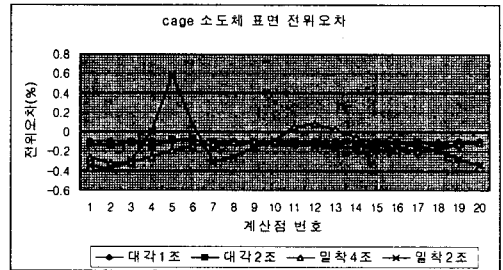


그림 5. 케이지에서의 소도체 표면 전위 계산오차

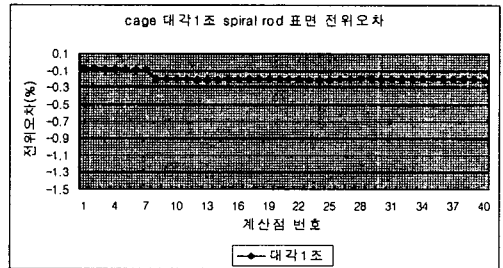


그림 6. 케이지에서의 1조방식의 spiral rod 표면 전위 계산오차

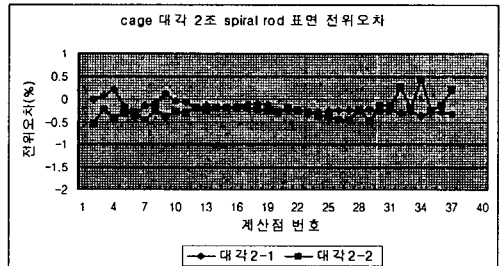


그림 7. 케이지에서의 대각 2조 방식의 spiral rod 표면 전위 계산오차

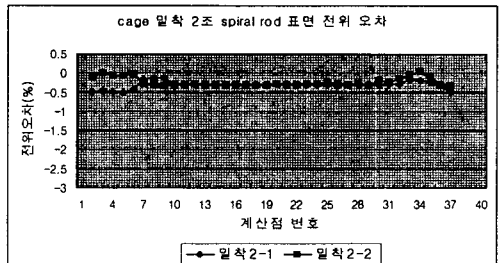


그림 8. 케이지에서의 밀착 2조방식의 spiral rod 표면 전위 계산오차

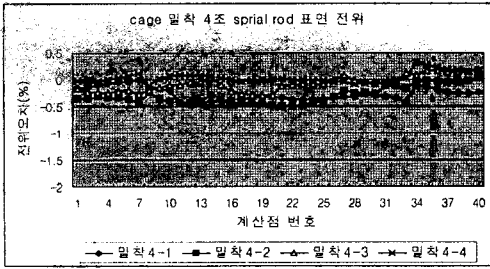


그림9. 케이지에서의 밀착 4조방식의 spiral rod 표면 전위 계산오차

#### 2.4 전계계산을 통한 케이지 실험전압 결정

앞서 말했듯이 케이지 선로 실험시의 인가전압을 결정하는 것이 본 논문의 목적이다.

만약에 전계계산을 통해 나타난 케이지에서의 전계분포가 송전선로의 전계분포의 형태를 따라가고 있다면, 케이지의 실험 전압을 결정할 수 있을 것이다.

케이지의 실험전압을 결정하기 위해서는 각상별 최대 평균 전계강도를 이용하는 방법과 평균전계 강도를 이용하는 방법이 있지만, 본 논문에서는 평균값을 이용하였다.

다음에서 보여질 그림에서의 "평균값의 배"라는 수치는 송전선에서 나타나는 전계값의 평균을 케이지에서 나타나는 전계 값의 평균으로 나누어 그 배수를 다시 케이지에서 나타나는 전계 값에 곱한 것이다.

이렇게 함으로써 케이지에서 나타나는 전계강도의 분포가 송전선에서 나타나는 전계강도의 분포를 따라가고 있는지 알 수 있다.

그림 10에서 그림 17까지는 도체 방식별 표면 전계분포를 나타내고 있다. 모든 예를 다 보이기에는 무리가 있기에 각 도체방식에서 임의의 한 소도체와 spiral rod를 골라 그래프로 나타내었다.

#### 2.4.1 대각 1조 풍소음 저감 방식

케이지에서 대각 1조방식의 경우 소도체에 15개의 무한장 직선전하를 사용하였고, 한 spiral rod 당 12개의 선전하를 배치하였다. spiral rod 양끝의 윤곽점은 단극 효과(edge effect)를 줄이기 위해 10도 씩 늘려 계산하였다.

그림 10을 보면 소도체에서의 평균값의 배를 위한 곡선은 송전선로의 평균분포를 따라가고 있으며, 이것은 그림 11의 spiral rod 표면 전계분포에서 마찬가지로 송전선로의 분포를 따라 평균값의 배를 위한 곡선이 그려지는 것을 볼 수 있다. 그러나, 송전선의 소도체 전계분포와 케이지의 소도체 전계분포가 다르다는 것을 알 수 있다.

평균전계값은 소도체에서 송전선로의 값이 케이지 값의 3.35배, spiral rod에서 2.61배이었으므로 이 두값의 평균인 2.98배가되어 대각 1조의 경우 코로나 케이지에서의 실험 전압은 약 300kV로 정해진다.

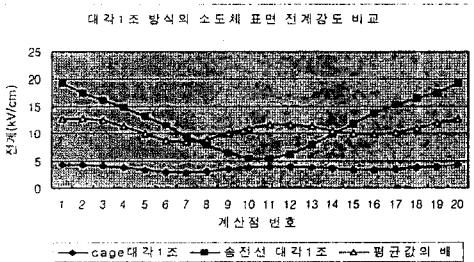


그림 10. 대각 1조방식의 소도체 표면 전계 분포

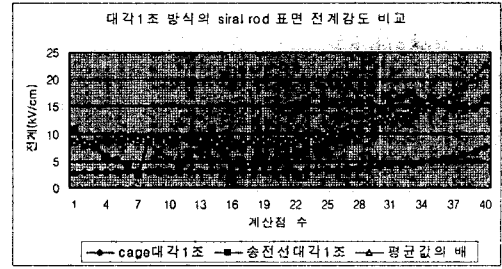


그림 11. 대각 1조 방식의 spiral rod 표면 전계분포

#### 2.4.2 대각 2조 풍소음 저감 방식

케이지에서의 대각 2조방식의 경우 전하의 수는 대각 1조와 동일하게 하였으나, 양끝 윤곽점을 30도 늘였다.

그림 12에서 케이지와 송전선의 소도체 표면 전계 분포는 다르다는 것을 알 수 있으며, 대부분의 소도체에서의 전계강도는 균일하게 나타나는데 비해 6번과 15번 계산점에서 갑자기 전계강도가 커지는 특이한 현상을 보인다. 이 원인은 실제 현상이 그런 것인지 계산 오차에 의한 것인지를 다시 확인할 필요가 있다고 생각된다.

그림 13에서는 spiral rod에서의 분포는 평균값의 비로 나타냈을 때 송전선의 분포를 따라가고 있다는 것을 알 수 있다.

평균 전계 값은 소도체에서 송전선로의 값이 케이지 값의 4.07배, spiral rod에서 3.93배로 코로나 케이지에서의 실험전압은 약 400kV로 정해진다.

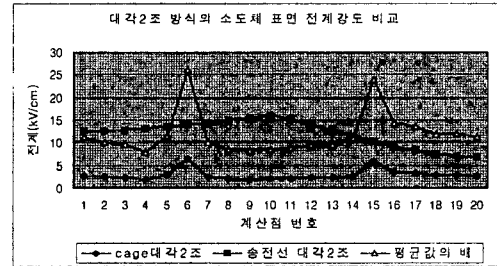


그림 12. 대각 2조 방식의 소도체 표면 전계분포

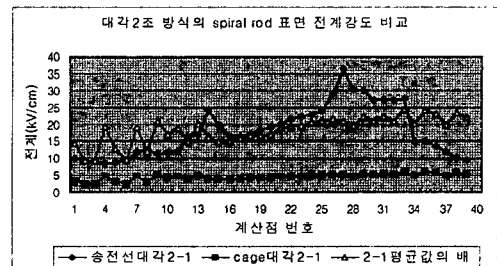


그림 13. 대각 2조 방식의 spiral rod 표면 전계분포

#### 2.4.3 대각 밀착 2조 풍소음 저감 방식

밀착 2조의 경우 소도체에 6개의 무한장 직선전하를 배치하였고, 한 spiral rod당 12개의 선전하를 배치하였다. spiral rod 양끝의 윤곽점은 30도씩 늘려 계산하였다.

밀착 2조의 경우에도 그림 14의 소도체 표면 전계강도의 분포는 상이하였다. 하지만 그림 15의 spiral rod 표면전계분포를 보면 spiral rod의 평균값의 배를 위한 곡선은 송전선로의 최대 전계분포를 따라 그려지고 있다.

평균 전계 값은 소도체에서 송전선로의 값이 케이지 값의 5배, spiral rod에서 2.86배이므로, 두 값의 평균인 3.93배가되어 코로나 케이지에서의 실험 전압은 약 390kV로 정해진다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 풍소를 저감용 특수 다중도체 방식의 코로나 잡음 특성을 시험하기 위한 코로나 케이지에서의 도체 방식의 3차원 전계 분포를 해석하였다.

해석 결과로 본 논문에서 제시한 방법은 최대 전위 계산 오차가 약 0.5%로 신뢰할 만한 수준임을 알았다.

코로나 케이지 내의 소도체 표면 전계강도 분포와 송전선의 소도체 표면 전계강도 분포가 약간은 상이하게 보였지만 평균 값의 배를 취한 곡선과 비교해 볼 때 송전선의 전계분포와 유사한 형태를 가지고 있었음을 확인할 수 있었고, spiral rod 는 유사한 분포를 갖고 있음을 알 수 있었다. 대각 1조 방식과 밀착 4조 방식에서는 소도체와 spiral rod의 전계분포가 유사하여 실험전압을 결정하는데 무리가 없음을 알 수 있었으나, 대각 2조와 밀착 2조의 경우에는 특정한 부분에서 소도체의 전계 값이 크게 나타나 실험 전압을 결정하기에는 무리가 있다고 생각된다. 또한 모든 경우의 spiral rod에서의 전계계산 결과를 볼 때, spiral rod의 양끝부분에서 균일한 결과를 보이지 못하고, 값이 산란되는 현상이 일어났다.

앞으로의 연구를 통하여 계산결과와 신뢰도를 향상시킬 것이다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 민석원, 김정부, "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 측정법을 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, "전하측정법용 spiral 전하에 관한 검토", 2000년 한국 조명, 전기 설비 학회 학술대회 논문집, 179-182, 2000
- [8] 민석원, 송기현, "풍소를 저감용 특수 다중도체 방식의 3차원 전계해석", 2001년도 대한전기학회 전력기술분회 춘계 학술대회 논문집, 254-258, 2001

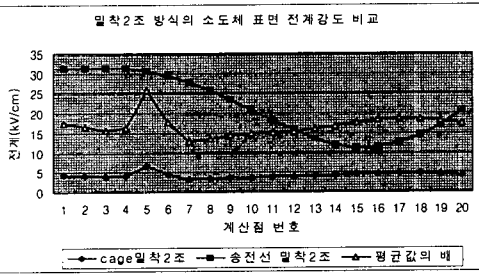


그림 14. 밀착 2조 방식의 소도체 표면 전계분포

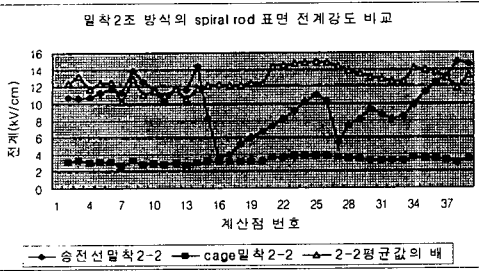


그림 15. 밀착 2조 방식의 spiral rod 표면 전계분포

#### 2.4.4 대각 밀착 4조 풍소음 저감 방식

밀착 4조의 경우 소도체에 6개의 무한장 직선전하를 배치하였고, 한 spiral rod당 6개의 선전하를 배치하였다. spiral rod 양끝의 윤곽점은 10도씩 늘어 계산하였다.

그림 16의 평균값의 배를 취한 곡선은 송전선로의 소도체 전계분포를 따라가고 있음을 확인할 수 있고, 그림 17의 spiral rod는 송전선과 spiral rod 모두 비슷한 전계분포를 나타내고 있음을 알 수 있다.

평균 전계값은 소도체에서 송전선로의 값이 케이지 값의 0.92배, spiral rod에서 1.75배이므로, 두 값의 평균인 1.34배가 되어 코로나 케이지에서의 실험 전압은 약 30kV로 정해진다.

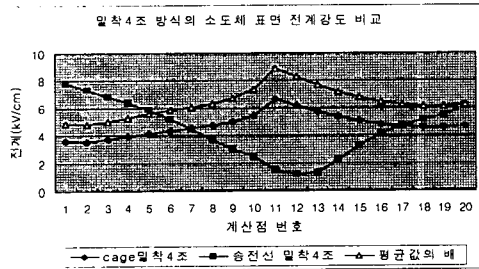


그림 16. 밀착 4조 방식의 소도체 표면 전계분포

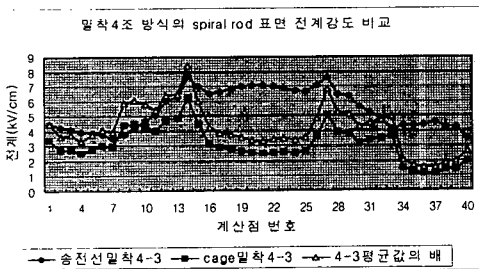


그림 17. 밀착 4조 방식의 spiral rod 표면 전계분포