

# 초고압 직류 가공송전 후보 도체방식의 이온류 환경특성 코로나 케이지 모의시험

論 文

56-10-15

## Corona Cage Simulation on Environmental Characteristics Caused by the Ion Flow of Candidated Conductor Bundles for HVDC Overhead Transmission

朱 玠 魯<sup>†</sup> · 梁 光 鎬<sup>\*</sup> · 李 東 一<sup>\*\*</sup> · 申 玖 容<sup>\*\*\*</sup>

(Munno Ju · Kwangho Yang · Dongil Lee · Kooyong Shin)

**Abstract** - Small ions generated at conductor corona sources remain in the atmosphere until they recombine with ions of opposite polarity, attach to aerosols, or make contact with an object. Ion current density is major factor to design conductor configuration of DC overhead transmission line. Several techniques have been used to measure the ion current of HVDC overhead transmission line. In this study, the ion current density was measured by a plate electrode made of a metal flat board at DC corona cage. The sensitivity of the plate electrode is  $0.156\mu\text{A}/\text{m}^2/\text{V}$ . To obtain an useful database on corona discharge, it is necessary to do corona test on several kinds of conductor bundles. Therefore, a number of experiments were conducted on several kinds of conductor bundles. To reliably analyze ion effects, corona cage test data were obtained over a long period of time under various weather conditions and expressed as a statistical distribution. Ion current density distribution in foul weather shows a significant increase in levels over the corresponding fair weather. Based on this results, we evaluated the environmental characteristic caused by ion flow of three candidated conductor bundles.

**Key Words** : Ion Current Density, Corona Discharge, Corona Cage, HVDC Transmission Line

### 1. 서 론

송전선로 도체 표면에 공기의 절연파괴 강도를 초과하는 전계가 집중되면 코로나 방전이 발생한다. 도체표면 주위의 공기절연파괴는 빛, 가청소음, 라디오 잡음, 전선진동, 오존(ozone) 등의 장해를 유발하며, 이때 필요한 에너지는 손실로 나타난다[1]. 직류 송전선로 도체의 코로나 발생 메커니즘은 공간전하(space charge)의 영향으로 인하여 교류 송전선로의 경우와 달리 기상별 각종 환경장해의 발생특성이 서로 상반되게 나타난다[2][3]. 교류 가공송전선로 도체의 경우 반주기마다 전압의 극성이 교번하기 때문에 전선표면상의 코로나 방전에 의해 발생하는 공간전하의 극성과 진행방향도 반주기마다 변화한다. 따라서 공간전하는 전선 부근의 전계분포에 미치는 영향이 크지 않다. 그러나 직류 송전선로 도체의 경우는 코로나 방전에 의해 발생된 공간전하의 흐름은 한쪽으로만 진행되어 지표면 또는 반대 극성을 가진 전선 방향을 향해 이동하며, 전선에서 어느 정도 이격된 공간까지 분포하는 공간전하는 전선표면과 그 근방의 전계분포에 영향을 주고, 근접한 반대극성의 전선 주위 전계분포에도 영향을 준다. 이

와 같이 직류 송전선로의 경우는 도체 주위의 전계분포에 공간전하가 미치는 영향이 크기 때문에 전선지상고와 송전선로의 구조물에서 받는 영향도 교류 가공 송전선로에 비해 크다. 또한 이러한 공간전하가 최대도체표면전위경도 및 지표면 전계강도에 영향을 주기 때문에 극배열 및 선로형상에 따라서 달라지는 직류송전선로의 코로나 특성을 예측 시에는 직류 코로나 방전에 의한 이온류의 환경특성을 고려해야 한다.

따라서 본 논문은 초고압 직류(HVDC) 가공 송전선로 도체의 코로나 방전에 의한 이온발생특성을 파악하기 위해서 HVDC 가공송전선로에서 발생하는 코로나 방전을 모의할 수 있는 직류 코로나 케이지를 활용한 전기환경 모의실험을 수행하고 그 주요 결과를 기술하였다.

### 2. 이온류 특성 및 측정방법

#### 2.1 이온류에 의한 대전전압

직류 코로나 방전의 경우 교류와 달리 동일한 극성이 지속되므로 코로나 방전에 의해 발생한 이온은 먼지, 입자 등에 부착되어 지표면으로 이동하는 이온흐름 즉, 이온류(ion flow)를 형성한다. 그림 1에는 코로나 방전에 의해 발생하는 이온의 흐름에 의해 직류 송전선로 아래에 위치한 인체 또는 물체에 유도되는 대전전압의 현상을 나타내었다. 그림 1과 같이 신발을 신은 사람이 직류 송전선로 직하 부근에 있는 경우 신발과 대지와의 접촉저항에 의해 인체에 대전전압이 발생된다. 이러한 대전전압에 의해 인체의 일부가 접지물에 접촉하기 직전에, 교류의 경우와 유사한 미소 갱방전이 발생하여 가벼운 전기적 충격을 감지하게 된다.

† 교신저자, 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 先任研究員 · 工博

E-mail : mnju@keri.re.kr

\* 正 會 員 : 韓國電氣研究院 電力研究團 責任研究員 · 工博

\*\* 正 會 員 : 韓國電力研究院 電力系統研究所 首席研究員 · 工博

\*\*\* 正 會 員 : 韓國電力研究院 電力系統研究所 先任研究員

接受日字 : 2007年 3月 26日

最終完了 : 2007年 7月 16日

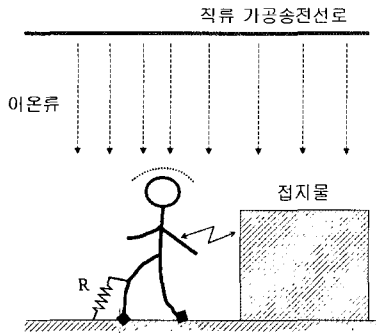


그림 1 이온에 의한 인체 대전전압모델

Fig. 1 Induced voltage model of the human body by ion

대전된 전압이 인체에서 방전되면 충격에 의한 불쾌감을 주기 때문에 직류 송전선로의 경우 지표면 이온전류밀도의 측정과 평가는 매우 중요하다. 이러한 대전전압의 크기는 신발과 대지와와의 접촉저항치에 의해서 결정된다. 따라서 강우시(降雨時)는 신발과 대지와와의 접촉저항 크기가 물에 의해 매우 작아지기 때문에 강우시 대전전압은 매우 작다.

교류 송전선로의 경우는 정전유도전압을 제한할 목적으로 지표상 전계강도를 제한하나, 직류 송전선로의 경우는 인체에 대한 대전전압을 제한해야 한다. 우리나라에서는 전기설비기술기준(산업자원부 고시 제2004-19호, 2004.2.17, 119조 유도장해의 방지)에서 교류전계를 3.5kV/m로 규제하고 있다. 그러나 현재 직류전계에 의한 인체대전전압 제한치는 제정되어 있지 않다. 직류 송전선로에서도 교류의 경우와 동일한 전계가 발생하고, 이 전계를 균등전계로 가정했을 때 1.5m의 대전체 높이의 경우 대전전압은 5.25kV가 된다. 한편 인체에 대한 전기적 충격은 교류와 직류간에 '직류/교류=3'의 관계가 있는 것으로 나타나, 교류 3.5kV/m에서의 전기적 충격을 직류 대전전압으로 환산하면 15.75kV가 된다. 즉, 교류 3.5kV/m에서의 전기적 충격은 직류 대전전압 15.75kV<sub>DC</sub>와 유사하다는 의미이다. '직류/교류=3'의 의미는 인체를 대상으로 AC에서 느껴지는 감지전압과 DC에서의 감지전압과의 크기를 실험을 통하여 통계적으로 구한 값이다[4]. 따라서 직류 송전선로의 경우 인체에 전기적 충격에 의한 불쾌감을 주지 않기 위해서는 대전체의 높이가 1.5m인 경우 대전전압이 15.75kV<sub>DC</sub> 이하가 되도록 송전선로의 형상을 설계해야 한다.

2.2 이온류 측정방법

직류송전선로 도체에서 발생되는 이온전류밀도를 측정하기 위한 실험은 직류 코로나 방전 현상을 모의할 수 있는 코로나 케이지(Corona Cage)에서 수행하였다. 코로나 케이지 실험장치의 구조 및 직류발생장치의 사양은 참고문헌 [5]에 상세히 나타내었다[5]. 이온류의 특성을 파악하기 위해 참고문헌 [6]의 HVDC ±500kV 상용선로에 가선이 유력한 6×480(C)mm<sup>2</sup>, 6×810mm<sup>2</sup>, 4×810mm<sup>2</sup>의 세 가지 후보 도체방식들에 대해 다양한 실험조건에서 모의시험을 수행하여 이온전류밀도가 가장 적게 발생하는 도체방식을 확인하고 그 이온특성을 파악했다.

이온전류밀도의 검출은 그림 2와 같이 케이지 내부 중앙에 평판전극을 설치하여 측정하였다. 평판의 크기는 가로 세로

각각 0.8m이며, 평판전극으로 이동한 이온류가 저항을 통해 대지로 흐를 때의 단자전압을 검출함으로써 이온전류밀도를 측정한다. 측정된 전압은 매우 작기 때문에 증폭기를 이용하여 신호를 검출하였으며, 증폭기 사양은 다음과 같다.

- Gain: ×20 ~ ×1000
- Attenuation: 100
- Output: DC ± 10 V, ± 15 mA
- Frequency Response: DC ~ 100 kHz
- Noise: 1 μV 미만
- Filter: Cut-off 50 Hz ~ 50 kHz
- Operating Temperature: 0 ~ 50℃

그림 3에는 이온전류밀도를 측정하는 방법을 나타냈다. 평판전극을 케이지에 설치할 경우 평판의 끝 부분에서 전계가 집중되기 때문에 실제 평판면적 A보다 더 큰 A'의 면적에 해당하는 이온류가 측정된다. 이러한 문제는 평판전극의 크기에 비해 매우 낮은 높이로 평판을 지면에 설치하여 오차를 줄일 수 있다. 따라서 오차를 줄이기 위해 본 실험에서는 평판전극의 높이가 1cm 되도록 내부 케이지에 설치했다.

또한 직류 송전선로 도체 직하에서 평판전극에 의해 측정되는 전류의 합은 식(1)과 같다[7].

$$I = JA + \epsilon A \frac{dE}{dt} \tag{1}$$

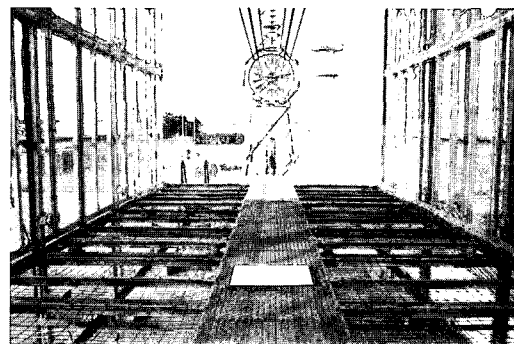


그림 2 코로나 케이지에 설치된 평판전극 사진

Fig. 2 The picture of flat plate electrode is installed in corona cage

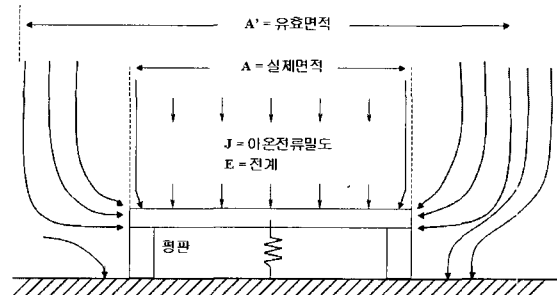


그림 3 이온전류밀도 측정용 평판전극

Fig. 3 Flat plate electrode for measuring ion current density

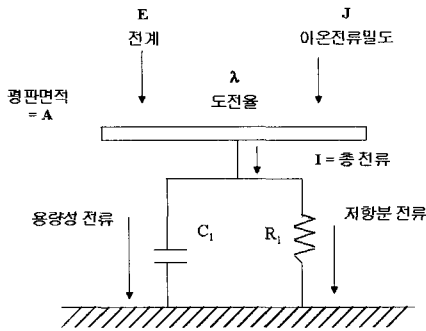


그림 4 평판전극의 변위전류 보상

Fig. 4 Displacement current compensation in plate electrode

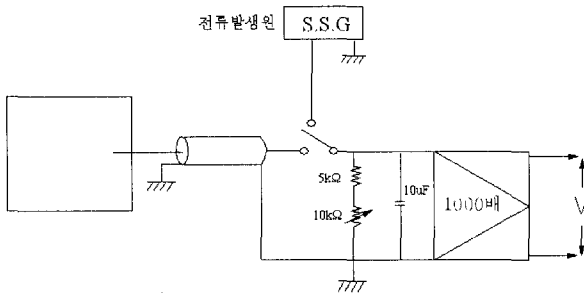


그림 5 평판전극 교정실험 단선도

Fig. 5 Diagram of calibration for plane electrode

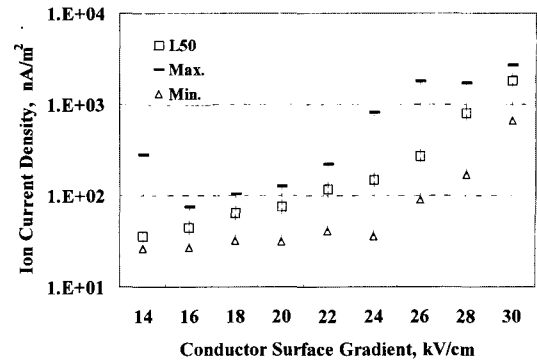
여기서  $J$ 는 이온전류밀도 [ $A/m^2$ ],  $A$ 는 평판전극의 면적 [ $m^2$ ],  $E$ 는 전계강도 [ $V/m$ ],  $\epsilon$ 는 자유공간의 유전율로 8.85 [ $pF/m$ ]이다. 식(1)의 첫 번째 항은 코로나 방전에 의한 이온 전류이고, 두 번째 항은 평판전극위의 전계의 변동에 의해 발생 되는 변위전류이다.

이러한 변위전류는 인가된 직류전압의 맥동성분, 송전선로 도체의 흔들림 등에 의해 생길 수 있다. 이와 같이 평판 전극을 이용하여 이온전류밀도를 측정하는 방법은 전계의 변화에 의해 발생하는 변위전류와 실제 이온의 흐름에 의한 도체의 전류를 구별할 수 없다. 따라서 본 실험에서는 변위전류의 효과를 최소화하기 위해 측정저항  $R_1$ 에 콘덴서  $C_1(10\mu F)$ 을 그림 4와 같이 설치하여 실제로 코로나 방전에 의해 발생하는 이온만을 측정하였다.

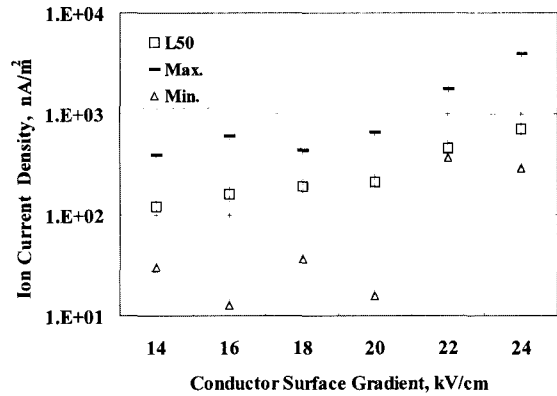
평판전극의 측정감도는 그림 5와 같이 먼저 전류 검출용 저항의 저항값을 측정기로 확인하고, 표준신호발생기를 이용하여 전류를 흘려 직류증폭기의 출력전압을 측정하여 구하였다. 측정결과  $0.8m \times 0.8m$ 의 평판전극, 측정저항  $10k\Omega$ , Gain 1000인 증폭기를 통하여 구한 평판전극의 이온전류밀도 감도는  $0.156\mu A/m^2/V$ 로 나타났다.

### 3. 실험 결과

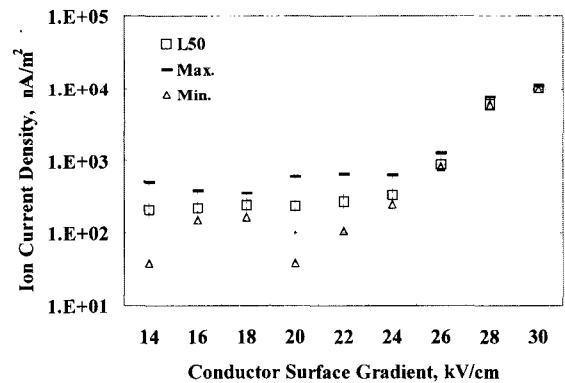
그림 6에는  $6 \times 480(C)mm^2$ ,  $6 \times 810mm^2$ ,  $4 \times 810mm^2$  3종의 후보 송전도체방식을 각각 케이스에 가선하고, 각 도체방식의 표면전위경도가  $12 \sim 30kV/cm$ 가 되도록 인가전압을 가변했을 때의 이온전류밀도 발생특성을 나타내었다.



(a)  $6 \times 480(C)mm^2$



(b)  $6 \times 810mm^2$



(c)  $4 \times 810mm^2$

그림 6 도체표면 전위경도별 이온전류밀도 발생특성

Fig. 6 Ion current density versus conductor surface gradient

세 도체방식 모두 약  $20kV/cm$  부근부터 코로나 방전에 의한 이온 발생량이 증가하는 경향을 나타낸다.

그림 7에는 세 가지 후보도체방식의 코로나 케이스 인가전압별 이온전류밀도 특성을 나타내었다. 코로나 케이스 인가전압을 상승함에 따라 이온전류밀도는 모두 증가하였으며, 동일 인가전압의 조건에서 각 도체의 발생량의 크기는  $4 \times 810mm^2$ ,  $6 \times 480(C)mm^2$ ,  $6 \times 810mm^2$ 순으로 나타나  $6 \times 810mm^2$  방식이 대전에 의한 유도전압 면에서 가장 친환경적인 도체방식임을 알 수 있다. 또한 동일한 상용선로 형상조건하에서 도체방식별 이온전류밀도 발생특성을 비교하기 위해 각 도체방식들을

최저지상고 18 m, 극간격 22 m인 쌍극 1회선 ±500 kV 직류 가공 송전선로에 설치하였을 경우의 도체표면 전위경도를 직류전계해석프로그램을 이용하여 계산하였다. 4×810 mm<sup>2</sup> 도체방식을 상기 선로형상에 가선하여 도체표면 전위경도를 계산한 결과 17.77 kV/cm이었으며, 6×480(C) mm<sup>2</sup> 도체방식은 16.83 kV/cm, 6×810 mm<sup>2</sup> 도체방식은 13.77 kV/cm인 결과를 얻었다. 각 복도체방식들의 상용선로에서의 도체표면전위경도를 코로나 케이지에서 동일하게 모의하기 위하여 소요되는 케이지 인가전압은 전술한 직류전계해석프로그램을 이용하여 구했다. 그 결과 4×810 mm<sup>2</sup> 도체방식은 314kV, 6×480(C) mm<sup>2</sup> 도체방식은 301 kV 그리고 6×810 mm<sup>2</sup>방식은 294 kV를 인가해야 됨을 알았다. 이상의 시험전압을 각 시험도체방식별로 인가한 후 약 6시간 동안 10초마다 데이터를 얻어 통계적으로 처리한 결과를 그림 8에 나타내었다. 이와 같이 ±500 kV 직류 가공 송전선로의 코로나 방전을 모의한 결과 6×480(C) mm<sup>2</sup>가 6×810 mm<sup>2</sup>보다 약간 크게 나타났고, 4×810 mm<sup>2</sup> 방식의 잡음이 가장 크게 발생되어 6×810 mm<sup>2</sup> 도체방식이 선하 대전전압의 전기환경 면에서 보다 유리한 것으로 나타났다.

그림 9에는 기상조건별 이온전류밀도 발생특성을 나타내었다. 코로나 케이지에서 4×810mm<sup>2</sup> 도체방식인 경우 도체표면 전위경도 E [kV/cm]는 인가전압 V [kV]와 식 (2)의 관계가 성립된다.

$$V = 17.68 \times E \tag{2}$$

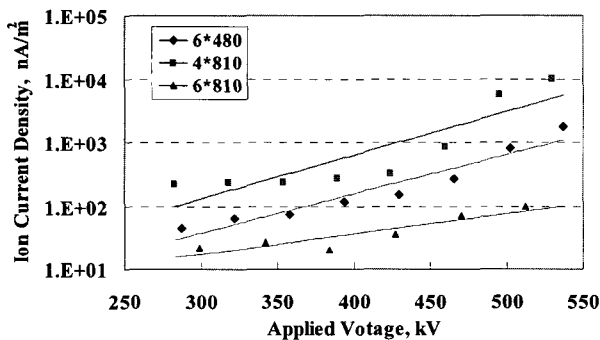


그림 7 코로나 케이지 인가전압별 이온전류밀도 증가 추이  
Fig. 7 Ion current density versus applied voltage at corona cage

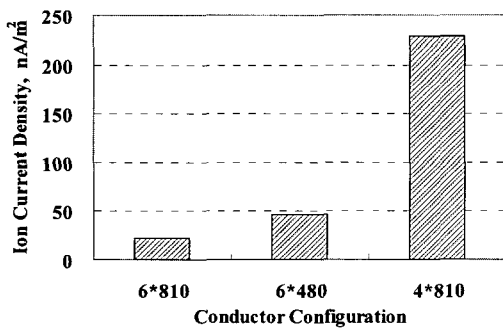


그림 8 후보 도체방식간의 이온전류밀도 발생량 비교  
Fig. 8 Comparison of ion current density between candidate conductor bundles

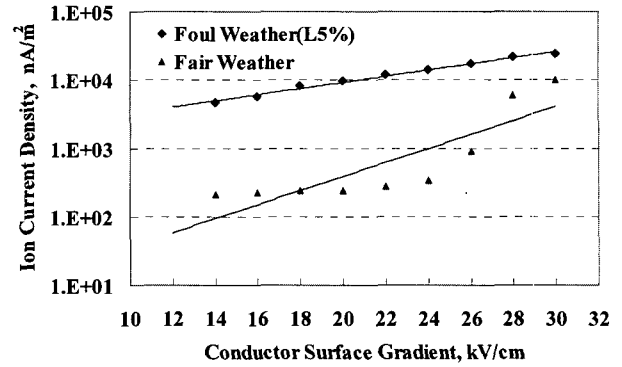


그림 9 기상조건별 이온전류밀도 발생특성(4×810 mm<sup>2</sup>)  
Fig. 9 Characteristic of ion current between fair weather and heavy rain in 4×810 mm<sup>2</sup>

동일 도체표면 전위경도에서 강우시가 청명시보다 이온전류밀도가 높게 나타났다. 이는 강우 시 도체에 부착되는 물방울(水滴)에 의해 코로나 방전이 더욱 활성화되어 청명시보다 용이하게 이온이 많이 발생되어 이로 인해 이온전류밀도가 증가된 것으로 판단된다. 그러나 강우시 이온전류밀도의 발생량이 청명시보다 크지만 대전체에 대전되는 전압은 대전체와 대지면과의 저항 크기에 따라서 영향을 받기 때문에 강우시 지면의 빗물에 의한 저항의 감소로 대전체의 대전전압은 청명시보다 매우 낮게 나타난다. 따라서 대전전압의 측면에서는 청명시의 경우가 인체에 더욱 더 큰 충격전압을 발생시킬 수 있다고 말할 수 있다.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 초고압 직류 가공 송전선로의 코로나 방전에 의해 발생하는 이온류에 의한 환경특성을 파악하기 위해 직류 코로나 케이지에서 세 가지 후보 송전도체방식들을 교체하면서 인가전압, 기상조건 등의 변화에 따른 특성실험을 수행하였으며, 주요한 결론은 아래와 같다.

1. 직류 코로나 케이지에서 이온전류밀도를 측정하기 위해 0.8 m × 0.8 m의 평판전극을 제작하였으며, 미소신호를 측정하기 위해 증폭기를 사용한 평판전극의 감도는 0.156 μA/m<sup>2</sup>/V로 나타났다.

2. 평판전극을 통해 얻은 데이터를 통계적으로 분석한 결과, 도체표면 전위경도가 약 20 kV/cm 부근부터 코로나에 의한 이온 발생량이 증가하는 경향을 보였으며, 동일한 인가전압의 조건에서 각 도체방식의 발생량 크기는 4×810 mm<sup>2</sup>, 6×480(C) mm<sup>2</sup>, 6×810 mm<sup>2</sup>순으로 나타나 6×810 mm<sup>2</sup> 방식이 대전에 의한 유도전압 면에서 가장 친환경적인 것을 확인했다.

3. 상용모델의 하나인 ±500 kV 직류가공 송전선로의 코로나 방전을 모의한 결과 6×480(C) mm<sup>2</sup>가 6×810 mm<sup>2</sup>보다 약간 크게 나타났고, 4×810 mm<sup>2</sup> 방식의 잡음이 가장 크게 발생되어 6×810 mm<sup>2</sup> 도체방식이 선하 대전전압의 전기환경 면에서 보다 유리한 것으로 나타났다.

4. 동일한 도체표면 전위경도에서 강우시가 청명시보다 물방울의 영향에 의한 코로나 방전 활성화에 의해 이온전류밀

도가 많이 발생하는 것으로 나타났다. 그러나 대전전압의 관점에서는 강우시 빗물에 의해 대전체와 대지면의 저항이 작아지기 때문에 오히려 청명시 인체에 미치는 대전전압의 영향을 보다 고려해야 한다.

5. 향후 2008년부터 초고압 직류 실증 시험선로에 6×480(C)mm<sup>2</sup> 4×810mm<sup>2</sup> 도체방식들을 가선했 후 선로의 수직방향으로 평판전극을 다수 설치하여 이온전류밀도의 lateral 특성, 도체 극성별 발생특성, 풍향 및 풍속에 따른 기상영향 등을 조사하여 보다 실용적인 초고압 직류 가공선로에서의 이온류 전기환경특성을 평가할 예정이다.

**참 고 문 헌**

[1] M. Lauersdorf, K. Feser, "Detection and Suppression of Corona Discharge During PD-Measurement by Means of RI-Reception", IEEE International Symposium on Electrical Insulation, pp. 310-313, 1994

[2] Transmission Line Reference Book - 345kV and Above, 2nd Edition, Electric Power Research Institute(EPRI), pp.205-328 1982

[3] Mitsura Yasui, Yochi Takahashi, A. Takenaka, K. Naito, Y. Hasegawa, K. Kato, "RI, TVI, and AN Characteristics of HVDC Insulator Assemblies under Contaminated Condition", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 3, No. 4, pp.1913-1921, 1988

[4] Y. Amano Y. Sunaga, "武山 ±250 kV 직류 실규모 시험선로 직하 물체의 대전현상" 電力中央研究所報告 175524, 1976.

[5] 주문노, 길경석, 양광호, 이성두, "HVDC 가공 송전선로 전기환경특성 모의시험용 코로나 케이지 계측시스템 개발", 대한전기학회 논문지, 55C-5-4, pp. 245~249, 2006. 5.

[6] 주문노, 길경석, 양광호, 이성두, 황기현 "HVDC ±500 kV 가공 송전선로의 최적 도체방식 선정을 위한 전기환경특성 평가", 대한전기학회 논문지, 55C-11-3, pp. 520~526, 2006. 11.

[7] HVDC Transmission Line Reference Book, Electric Power Research Institute(EPRI), pp 4-24~4-35, 1993

**저 자 소 개**



**주문노 (朱玟魯)**

1968년 7월 7일생. 1994년 인하대 환경공학과 졸업. 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년 한국해양대 전기공학과 졸업(박사). 1996년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경연구그룹 선임연구원. 2001년도 KERI 대상 수상.  
Tel : 055-280-1324  
E-mail: mnju@keri.re.kr



**양광호 (梁光鎬)**

1957년 11월 16일생. 1999년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1986년~현재 한국전기연구원 전력연구단 전기환경연구그룹 책임연구원, 전력설비 환경설계기술팀장. 1999년도 대한전기학회 및 2000년도 한국과학기술단체총연합회 우수논문상 수상, 2001년도 KERI 대상 수상, 2003~2006년도 Marquis Who's Who 등재. KIEE, IEEE 정회원.  
Tel : 055-280-1322,  
E-mail : khyang@keri.re.kr



**이동일 (李東一)**

1958년 3월 15일생. 1996년 9월 한양대 전기공학과 박사 학위 취득. 1978년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 수석 연구원 재직중. 전력연구원 송전기술그룹장 및 고장전력 시험센터장 겸임. 대한전기학회 종신회원. CIGRE SC22-14 위원. IEEE 정회원.  
Tel : 042-865-5850  
E-mail : dilee@kepri.re.kr



**신구용 (申玖容)**

1967년 7월 8일생. 1993년 9월 경남대 전기공학과 석사 학위 취득. 1988년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 선임연구원 재직중. 대한전기학회 정회원.  
Tel : 042-865-5853,  
E-mail : kyshin@kepri.re.kr