

초고압 직류 가공 송전선로에서 발생하는 이온 계측시스템 개발

論 文
57-11-23

The Development of System for Measuring Ion Generated from HVDC Overhead Transmission Line

朱 琬 魯[†] · 梁 光 鎬^{*} · 李 東 一^{**} · 申 玖 容^{***} · 林 才 燮[§]
(Munno Ju · Kwangho Yang · Dongil Lee · Kooyong Shin · Jaeseop Lim)

Abstract The electrical discharge of high voltage direct current(HVDC) overhead transmission line generate audible noise, radio noise, electric field, ion current and induced voltage on the ground. These items are major factors to design environmentally friendly configuration of DC transmission line. Therefore, HVDC transmission lines must be designed to keep all these corona effects within acceptable levels. Several techniques have been used to assess interference caused by ions on HVDC overhead transmission line. In this study, to assess the ion characteristic of DC line, the ion current density and induced voltage caused by ion flow were measured by plate electrodes manufactured from a metal flat board and charged bodies, respectively. The charged body has two types of cylinder and cylindrical plate. From the results of calibration experiments, the sensitivity of flat electrode and charged body can be obtained. At present, the developed system is used to investigate the ion generation characteristics of Kochang DC ±500kV test line.

Key Words : Corona discharge, HVDC transmission line, Ion current density, Electric field, Environment

1. 서 론

직류 송전선로의 코로나 발생 메커니즘은 공간전하(space charge)의 영향에 의해 교류 송전선로와는 다른 환경장해 발생특성을 나타낸다[1][2][3][4]. 코로나 개시 전압(Corona Onset Voltage) 이하에서 직류 송전선로를 운전 하는 경우에는 정전계(Electrostatic Field)만이 존재하고 이온전류는 선로 밑에서 측정되지 않으나, 그 이상의 전압에서 운전하면, 즉 공기절연과파(Air Breakdown)를 가져오는 도체상의 도체표면전위경도 이상의 전압이 인가된 경우에는 도체와 같은 극성을 가진 이온이 도체로부터 방출되기 시작한다. 이러한 코로나 방전의 결과로서 생긴 공간전하는 선간전압에 의해서 결정되는 정전계와 결합하여 지표면 전계를 증가시킨다. 또한 교류전계는 도체와 물체사이에서 정전용량의 결합(Capacitive Coupling)으로 전류나 전압을 유도하나, 직류전계는 이온의 발생으로 인해 물체에 대전전압을 유지시킨다. 또한 교류 송전선에 의해 생긴 이온은 교번 전계로 인해 도체 부근에 제한되어 존재하지만, 직류송전의 경우는 도체로부터의 이온이 대지나 반대 극성의 도체로 이동된다. 따라서 이러한 이온의 흐름은 그림 1과 같이 도체와 도체사이

또는 도체와 대지면 사이에서 이온전류(Ion Current)를 발생시킨다. 그러므로 교류 송전선 하에서의 전기환경은 대지의 전계강도로 충분히 특성화할 수 있지만, 고압 직류 송전선로 주변에서의 전기적 환경문제는 공간전하밀도(Space Charge Density), 전류밀도(Current Density) 그리고 전계강도(Electric Field Strength)의 3가지 기본변수로 정의할 필요가 있다. 지표면 직류전계강도와 공간전하밀도는 기존에 개발된 상용제품으로 측정할 수 있지만, 직류선로 근방의 지표면 이온전류밀도와 이온에 의한 대전전압을 측정할 수 있는 센서는 상용제품이 거의 없는 실정이다.

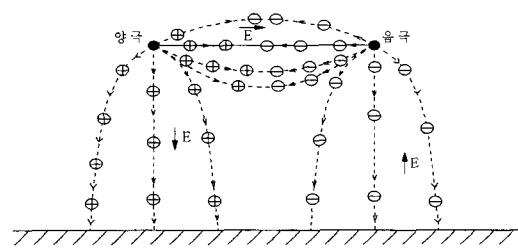


그림 1 쌍극 1회선 직류 송전선로에서의 이온의 흐름
Fig. 1 Ion flow from one bi-pole DC transmission line

따라서 본 연구에서는 인체에 대전되는 대전전압을 측정하기 위해 인체를 모의한 대전체와 지표면 이온전류밀도를 측정할 수 있는 센서를 개발하고, 고압 직류 시험선로 주변에 설치하여 직류선로 이온발생특성을 조사하는데 활용하였다.

2. 이온류 계측센서 설계 및 제작

2.1 대전체

인체에 유도되는 전압을 모의하기 위하여 대전체를 그림

[†] 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

[§] 正會員 : 韓國電力研究院 電力系統研究所 一般研究員

接受日字 : 2008年 8月 22日

最終完了 : 2008年 9月 8日

2, 3과 같이 인체 모형과 유사하게 각각 높이 1.5m와 1.7m, 1m 직경의 원판 및 직경 30cm인 원통 형태로 제작하였다. 원판형 대전체의 높이는 센서 주변의 폴 등의 영향을 무시할 수 있으면서 동시에 센서 지지용 용이한 높이로 하였으며, 원판의 재질은 가볍고 부식에 강하며 제작이 용이한 알루미늄으로 하였다. 대전체 지지용 파이프는 저가이면서 튼튼한 염화파이프(PVC)를 사용하였으며, 파이프 직경은 강도, 균형을 유지할 수 있는 크기로 하였다. 원통형 대전체는 기술표준원에서 수행한 '제5차 한국인 인체지수조사사업'(2003.4~ 2004.11)의 결과에 의거하여 한국인 성인남자(19~65세)의 평균 신장과 가슴둘레를 고려하여 규격을 결정하였다[5]. 대전체 내부에는 인체의 대지 접촉저항을 모의하기 위해 측정저항 100GΩ 및 10GΩ 2종을 설치하였다. 이러한 대지접촉저항은 상대습도 등과 같은 조건에 의해 시간에 따라 변하지만, 일반적으로 인체의 대지 접촉저항은 100GΩ과 10GΩ으로 모의할 수 있다. 100 GΩ은 사람이 절연성능이 높은 절연화를 신었을 때의 청명시 대지 접촉저항을 모의한 값이며, 10GΩ은 일반인 신발의 지면 접촉저항을 모의한 값이다.

이와 같이 대전체 내부의 측정저항은 10GΩ 및 100GΩ의 고저항값을 갖기 때문에 측정 시 누설전류가 발생될 수 있다. 따라서 누설전류 방지대책으로써 측정저항을 내부에 설치 시 저항 표면 및 PVC 파이프 내면에 실리콘 파우더로도포하고, PVC 파이프 표면은 테프론 테이핑 작업을 하였다. 또한 상기의 방습대책 이외에 방습용 히터를 지지파이프 하단에 설치하였다. 방습용 히터(heater)는 10cm*15cm*1mm 정도의 알루미늄 판의 방열판(약 5W)을 설치하여 파이프 내부에서 발생될 수 있는 수분을 제거하고, 히터의 전원선은 잡음 유도를 방지하기 위해 2선을 꼬아서 배치하였으며, 서해안에 인접한 고창 전력시험센터의 위치상 장기간 옥외에서 염해에 견딜 수 있도록 모든 부분에 방식대책을 적용하였다. 또한 대전체 제작 시 고려해야 할 사항은 대전체를 직류송전선로 하에 설치 시 측정상황에 따라 대전체 모서리(edge)에서 발생할 수 있는 Earth Corona 문제이다. Earth Corona 방전은 대전체 주변 전계와 대전체 모서리 전계의 차이가 크게 되면 대전체 모서리에서 코로나가 발생하는 현상으로서 계측에 오차를 발생시킬 수 있다. 따라서 그림 2, 3에서와 같이 원판대전체는 원판부분에, 원통대전체는 원통하단에 이를 방지하기 위해 대전체에 소형 차폐환(shield ring)을 취부하였다. 이상과 같이 제작된 대전체의 사양은 아래와 같다.

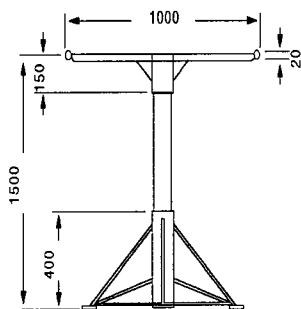


그림 2 원판형 대전체
Fig. 2 Charged body of cylindrical plate type

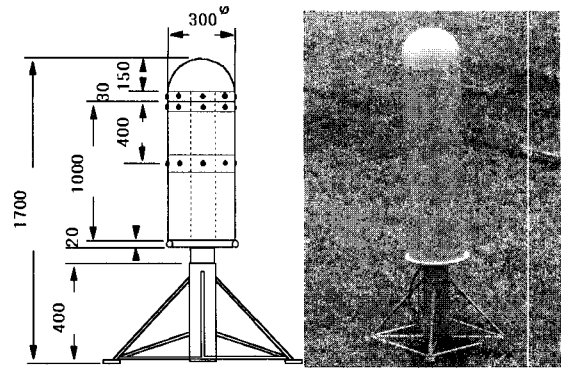


그림 3 원통형 대전체
Fig. 3 Charged body of cylinder type

- 원판 대전판 크기 : 1m 직경 원판
- 원판 대전판 재질 : 2mm 알루미늄 판
- 지지기둥 재질 : PVC 파이프(외경 114mm)
- 내부설치 저항
 - 10GΩ(Volts Max. 80kV, 길이 33cm, 직경 1.5cm)
 - 100GΩ(상동)
- 지지 받침대 및 앵카핀 : 용융아연도금

원통 대전체의 사양은 대전체 형상이 원통인 것만 제외하면 측정저항과 내부 구조가 원판 대전체와 동일하다.

2.2 평판전극

평판전극은 도체의 코로나 방전에 의해 발생된 이온에 의한 지표면 이온전류밀도를 측정하기 위한 것이며, 평판전극도 고창 시험선로에 장기간 설치되어 운영되기 때문에 염해에 대한 내구성을 갖도록 전극 방식대책을 적용하였다. 또한 방습대책으로서 측정전극을 지지하기 위한 절연물(spacer)의 하단에 히터를 설치하였다. 평판센서 하단에 설치된 히터는 열선을 알루미늄 파이프에 감아 전극지지용 스페이서의 습기를 제거하도록 설계하였다. 또한 전원에 접속하기 위한 방습히터 전선의 길이는 2m 정도로 하고, 잡음유도를 방지하기 위해 2선을 꼬아 결선하였다. 또한 그림 4와 같이 측정전극의 스페이서에 아크릴 원통을 설치하여 평판의 측정용 전극에서 발생될 수 있는 누설전류분을 최대한 감소시켰다. 이와 같이 제작된 평판전극의 사양은 그림 5에 나타냈으며, 주요 사양은 아래와 같다.

- 측정전극 크기 : 2m×1m, 1매
- Guard 전극 크기 : 0.5m×2m, 4매
- 전극 재질 : 2mm 두께의 알루미늄 판
- 지지 가대 재질 : □자형 용융아연도금 channel
- 측정전극 스페이서 : 12개
 - Spacer 재질 : 테프론
 - 원통 재질 : 투명 아크릴
 - 베이스 : 아크릴 판
 - 방습 히터: 25mm 직경의 알루미늄파이프, 3W/개

제작된 대전체와 평판전극을 그림 6, 7과 같이 직류 시험선로의 중간에서 수직방향으로 설치하여 선로주변에서의 대전전압과 이온전류밀도 발생특성을 측정하였다.

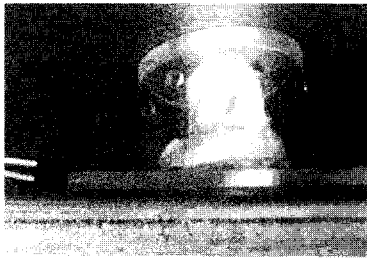


그림 4 평판전극 하부에 설치된 히터
Fig. 4 Heater installed under plate electrode

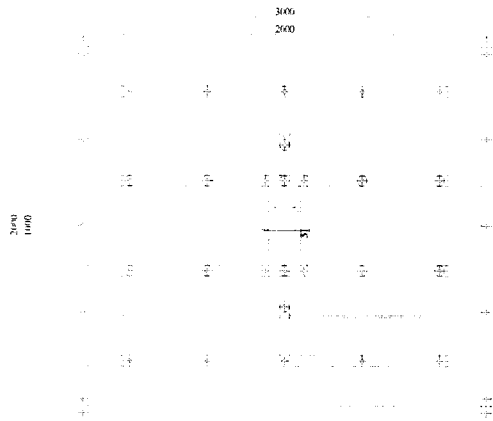


그림 5 평판전극 설계도
Fig. 5 The drawing of plate electrode

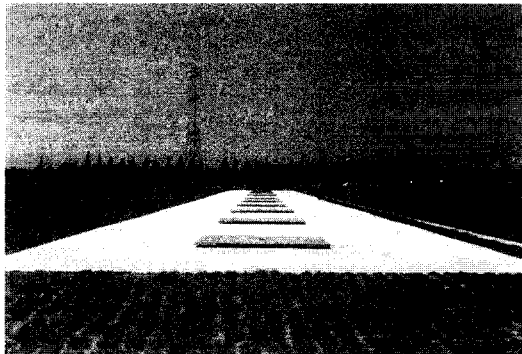


그림 6 직류 시험선로에 설치된 평판전극
Fig. 6 Plate electrode installed at the DC test line



그림 7 직류 시험선로에 설치된 대전체
Fig. 7 Charged bodies installed at the DC test line

3. 계측시스템 교정 실험

제작된 평판전극과 대전체 각각의 신호검출 부분에 전류 및 전압발생장치를 이용하여 전류와 전압을 인가하고 교정 실험을 수행하였다. 교정실험에서 취득한 데이터를 통해 각 센서들의 측정감도를 결정하였다[6]. 직류시험선로 주변에 설치된 평판전극과 대전체는 설치 위치에 따라 센서와 측정 동까지의 거리가 수 m에서 수백 m에 이른다. 따라서 장거리 신호선에 대한 외란 대책으로써 각 센서에 인접한 필드 포인트(field point)의 신호검출용 저항까지는 동축케이블을 사용하고, 필드포인트에서 측정된 신호는 이더넷(ethernet)을 통해 DAS용 PC로 전송하여 계측신호를 저장하는 방식의 시스템을 구축하였다. 그림 8과 그림 9에는 필드에 설치한 각각의 평판센서에서 필드 포인트까지의 신호선 구성도와 설치사진을 나타내었다.

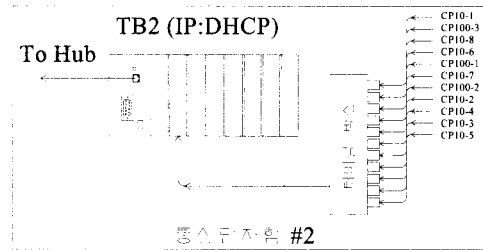


그림 8 평판전극의 신호 흐름도
Fig. 8 The signal flow of plate electrode

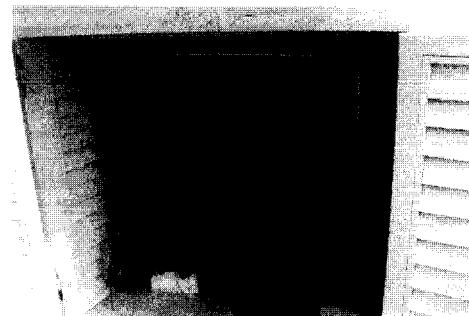


그림 9 이온전류밀도 측정용 통신단자함
Fig. 9 Communication terminal box for measuring ion current density

3.1 대전체

대전체의 측정감도를 결정하기 위해 먼저 대전체 내부의 측정저항과 동일한 저항을 직렬로 연결한 후 통신단자함의 측정저항을 정확히 $10k\Omega$ 으로 조정한다. 그림 10과 같이 회로를 구성한 후 고전압을 인가하여 출력전압이 인가전압의 1/2이 되는지 확인함으로써 대전체 측정저항의 누설성분을 조사한다. 습기 등에 의한 누설성분을 저감하기 위해 대전체 내부에 방습용 히터를 설치하였지만 실제로 대전체가 누설 저항분을 갖고 있으므로 실제 검출되는 전압으로 대전체의 누설저항의 값을 구하여 측정값을 보정한다. 직류전압발생장치를 이용하여 대전체에 $10kV$ 까지 고전압을 인가한 경우 DAS(Data Aquisition System) Server에서 측정된 결과를 그림 11에 나타내었다.

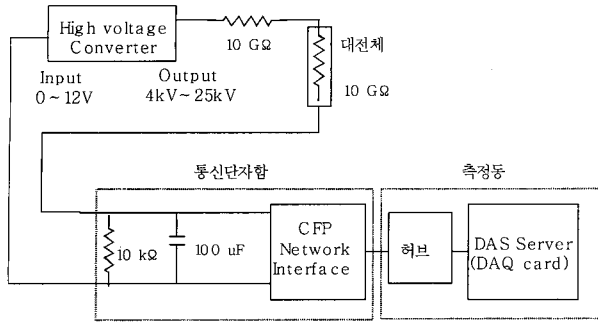


그림 10 대전체 교정실험 개략도
Fig. 10 Calibration diagram for charged body

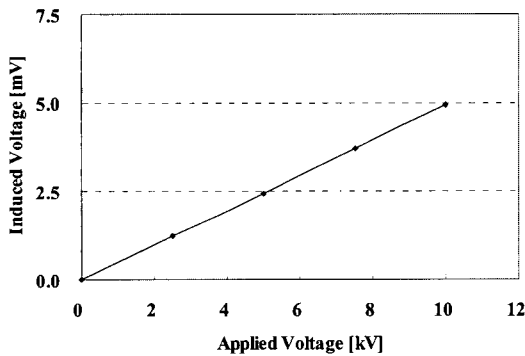


그림 11 대전체 교정실험 결과의 예
Fig. 11 The example of calibration result for charged body

그림 11에서와 같이 10GΩ 대전체에 10kV 고전압을 인가한 결과 측정전압은 4.96mV로 측정되었다. 따라서 대전체의 측정감도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{대전전압[V]} = (\text{측정전압[V]} / 10^4 [\Omega]) \times \text{대전체저항}[\Omega] \times K \quad (1)$$

여기서 K는 각 센서별 누설분을 보정한 환산계수로서 정기적으로 교정실험을 수행하여 측정오차를 최소화 할 예정이다. 또한 대전체에 이용된 필드포인트의 아날로그 신호의 정격측정범위는 ±60mV이며, 유효 분해능은 3μV이기 때문에 대전체에 의해 측정할 수 10GΩ과 100GΩ대전체의 측정범위는 각각 -60kV ~ +60kV와 -600kV ~ +600kV이며, 분해능은 3V와 30V가 된다. 각 대전체의 측정감도를 구한 후 시험선로 주변에 대전체를 설치한 후 대전전압을 실측하였다. 그림 12에는 쌍극 1회선 직류 시험선로를 극간격 22m, 지상고 22m, 시험도체방식 6×480(C)mm², 시험선로 전압을 0kV부터 500kV까지 가압하였을 때의 정규성 직하에서의 측정결과를 나타내었다. 상기 선로형상의 측정결과, 대전전압은 선로전압을 약350kV 인가 시부터 선로전압에 비례하여 증가하였다. 그림 13에는 직류 시험선로 직하 주변에 선로에 수직방향으로 설치한 8개의 대전체에서 측정한 대전전압의 Lateral 특성을 나타내었다. 선로 중심으로부터 동일한 이격거리를 가진 대전체에서 검출된 대전전압은 극성의 특성에 따라 부호만 반대일 뿐 거의 동일한 크기의 값을 나타냈으며, 최대값은 최외상 도체의 직하에서 발생되었다 [7][8][9].

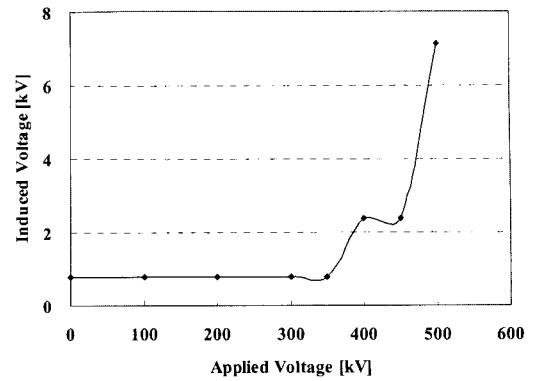


그림 12 시험선로 인가전압에 따른 대전전압 추이
Fig. 12 Induced voltage according to the applied voltage

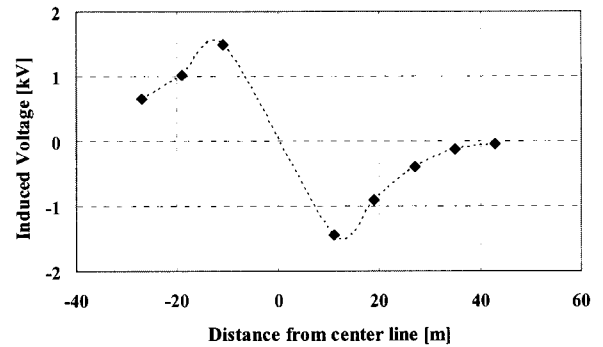


그림 13 대전전압의 lateral profile(±500kV 청명시)
Fig. 13 Lateral profile of induced voltage (±500kV fair)

3.2 평판전극

평판전극의 감도를 측정하기 위해 그림 14와 같이 평판전극에 직류전류발생장치를 연결하여 측정전극에 직류전류를 입력한 후 출력전압을 조사하였다. 면적 2m² 측정전극에 의해 검출되는 전압이 20mV일 때 이온전류밀도는 1μA/m²이므로 측정감도는 식 (2)와 같이 된다. 그림 15에는 직류시험선로 주변에 설치한 평판전극 중 하나에 직류전류를 인가하였을 때의 측정결과를 나타내었다.

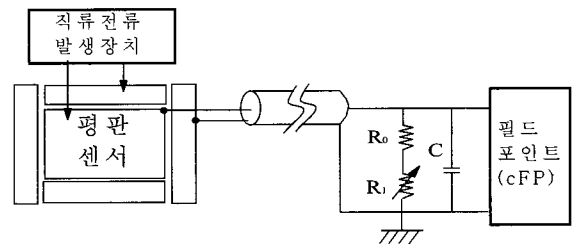


그림 14 평판전극 교정실험 개략도
Fig. 14 Calibration diagram of flat board electrode

$$\text{이온전류밀도[nA/m}^2\text{]} = (1000[\text{nA/m}^2]) / (0.02[\text{V}]) = 5 \times 10^4 \times \text{측정전압[V]} \quad (2)$$

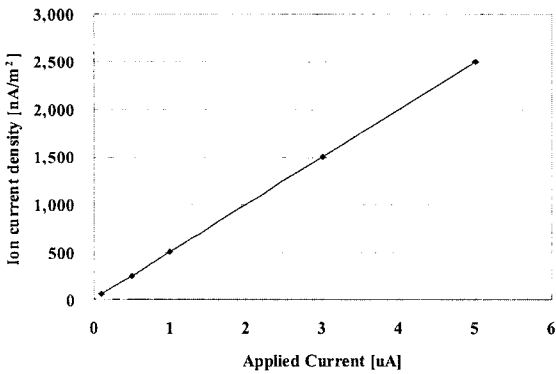


그림 15 평판전극 교정실험 결과
Fig. 15 Calibration result of flat board electrode

또한 평판전극 측정시스템에 이용된 필드포인트의 아날로그 신호 정격측정범위도 $\pm 60\text{mV}$ 이므로, 평판전극에 의해 측정할 수 이온전류밀도 범위는 $-3\mu\text{A}/\text{m}^2$ 에서 $+3\mu\text{A}/\text{m}^2$ 이며, 분해능은 $0.15\text{nA}/\text{m}^2$ 가 된다. 그림 16에는 쌍극 1회선 직류 시험선로를 극간격 22m, 지상고 22m, 도체방식 6×480(C) mm², 시험전압 500kV인 조건일 때 정극성 측에 설치한 평판전극에서 측정된 이온전류밀도의 lateral 특성을 나타냈다.

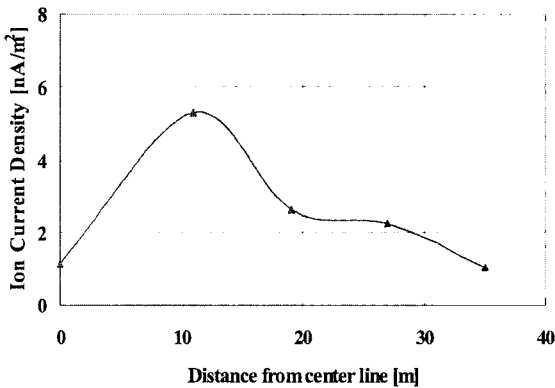


그림 16 이온전류밀도의 lateral profile ($\pm 500\text{kV}$)
Fig. 16 Lateral profile of ion current density ($\pm 500\text{kV}$)

4. 결론 및 향후계획

본 논문에서는 초고압 직류 가공 송전선로의 코로나 방전에 의해 발생하는 이온류의 환경특성을 파악할 목적으로 지표면 이온전류밀도와 대전전압을 조사할 수 있는 계측시스템을 설계, 제작하였으며, 또한 시스템 교정실험과 직류 시험선로 시운전에 적용한 결과를 기술하였다. 주요한 결론과 향후의 계획은 아래와 같다.

1. 직류시험선로 주변의 이온전류밀도를 측정하기 위한 3 m × 2 m 크기의 평판전극을 제작하였으며, 또한 인체에 유도되는 대전전압을 조사하기 위해서 인체를 모의한 원통형, 원판형의 대전체를 설계, 제작하였다.
2. 제작된 센서들은 옥외 직류송전 시험장에서 장기간 노출되므로 습도에 의한 누설분이 발생될 수 있기 때문에 측

정시스템의 방습대책으로써 센서 내부에 Heater를 설치하여 계 측오차를 최소화 하였다.

3. 직류시험선로 주변에 설치된 각 센서들과 측정실까지의 거리는 최대 수백m의 이격거리가 있다. 따라서 검출된 아날로그 신호를 센서 인근에서 디지털 신호로 변환하는 방식(field point)을 채용하여 신호선에서 발생될 수 있는 신호의 외란을 방지하였다.

4. 모든 센서에 대한 교정을 통하여 각각의 계측감도를 구한 후 직류시험선로에 설치하여 시운전한 결과, 선로 인가 전압에 대한 발생특성 및 선로중심으로부터의 거리감쇠특성(lateral profile)이 양호하게 나타남을 확인하였다.

5. 향후에는 개발된 이온류 계측시스템을 활용하여 선로의 형상, 시험도체방식 및 선로전압 등에 따른 환경데이터를 직류시험선로에서 장기간 취득함으로써 초고압 직류 가공 송전선로의 이온전류밀도의 lateral 특성, 도체 극성별 발생 특성, 풍향 및 풍속 등 기상요소에 따른 영향 등을 평가할 예정이다.

참 고 문 헌

- [1] HVDC Transmission Line Reference Book, Electric Power Research Institute(EPRI), pp 4-76~4-81, 1993
- [2] P. Sarma Maruvada, Serge Drogi, "Field and ion interactions of hybrid AC/DC transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, Volume 3, No. 3, July 1988
- [3] Michael G. Comber, Gary B. Johnson, "HVDC Field and Ion Effects Research at Project UHV Results of Electric Field and Ion Current Measurements", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. PAS-101, No. 7, July 1982
- [4] 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
- [5] 제5차 한국인 인체지수조사사업 연구보고서, 산업자원부 기술표준원, 2005
- [6] IEEE, "IEEE Guide for the Measurement of DC Electric-Field Strength and Ion Related Quantities", IEEE Std. 1227-1990(R2001)
- [7] 電力中央研究所 研究報告 T88095, "塩原UHV直流試験線におけるイオン流場及ぼす風速の影響" pp 11~43, 1993
- [8] 電力中央研究所 研究報告 184016, "塩原UHV直流試験線によるイオン流およびコロナ特性の基礎研究(II)-イオン流と電界に及ぼす全線地上高と極間距離の影響-" pp 16~35, 1984
- [9] Y. Amano Y. Sunaga, "武山 ±250 kV 直流実規模試験線路 直下物体の帯電現状" 電力中央研究所報告 175524, 1976.

저 자 소 개



주 문 노 (朱 玟 魯)

1968년 7월 7일생. 1996년 인하대 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



양 광 호 (梁 光 鎭)

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



이 동 일 (李 東 一)

1958년 3월 15일생. 1996년 9월 한양대 전기공학과 박사 학위 취득. 1978년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 수석연구원 재직중. 대한전기학회 종신회원. CIGRE SC22-14 위원. IEEE 정회원.

Tel : 042-865-5850

E-mail : dilee@kepri.re.kr



신 구 용 (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



임 재 섭 (林 才 燮)

1975년 10월 15일생. 2003년 2월 순천향대 전기공학과 석사 학위 취득. 2004년 한국전력공사 입사. 현재 전력연구원 일반연구원 재직중.

Tel : 042-865-5856

E-mail : jslim04@kepri.re.kr