

## Comparative Performance Evaluation of Lightning Air Terminals by the HV Laboratory Test

李在福\* · 明聖鎬\*\* · 趙延奎\*\*\* · 金点植<sup>§</sup>  
(Jae-Bok Lee · Sung-Ho Myung · Yuen-Gue Cho · Jeom-Sik Kim)

**Abstract** - There are claims that ESE(Early streamer emission) Air terminals offer a vastly increased zone of protection over that of traditional lightning rods by causing the emission of an upward streamer/leader that will propagate towards the tip of downward leader at an early stage in the attachment process than would occur for a simple rod in the same geometrical configurations. This paper shows the results of comparing test a particular type of ESE air terminals with a simple rod conducted in the KERI HV laboratory, which are lightning impulse voltage test, flashover direction test and corona emission current measurement. The results from this test show a completely random scattering of flashovers to the conventional and ESE air terminals under identical electrical and geometrical conditions, and thus shows no advantage of one terminal over the other.

**Key Words** : Lightning protection of buildings, ESE(Early streamer emission) air terminal, EGM(Electrogeometrical model), RSM(Rolling sphere method), Corona emission current, CFO(Critical flashover voltage)

### 1. 서 론

피뢰침은 대기 뇌방전의 초기 단계에서 피뢰침 선단에서 발생하는 상향리더가 하향리더를 유리하고 뇌격전류를 대지로 방류시킴으로써 주변 구조물로의 직격위 위험을 방지하는 설비이다. 보통의 피뢰침은 대기 뇌방전이 발생할 때 피뢰침 선단에서 발생하는 상향 스트리머가 하향리더를 유리함으로써 뇌격전류를 대지로 방류시킨다. 기존의 송전선로와 발·변전소 가공지선의 차폐설계와 건물의 피뢰설계에는 Armstrong과 Whitehead씨가 제안한 전기기하학적 모델(Electrogeometrical model : EGM)[1]을 적용하여 있으며, 최근에는 Lee씨가 제안한 회전구체법(Rolling sphere method : RSM)[2]을 적용한 건축물의 피뢰설계가 구미 각국에서 널리 적용되고 있다[3, 4].

최근 국내외에서 관심이 고조되고 있는 이른바 ESE(Early streamer emission) 피뢰침은 동일한 전기기하학적 조건에서 일반 피뢰침보다 상향스트리머를 조기에 발생시킴으로써 뇌격의 보호반경을 증가시킨다는 주장이 제기되고 있다[5~9].

ESE 피뢰침의 우수성을 주장하는 측에서는 상향리더 선단의 전계가 일반 피뢰침의 선단 전계보다 작으면 상향리더가 연속적으로 진전할 수 있기 때문에 보호반경이 증가되는 논리이다.

따라서 본 논문에서는 이들 주장에 대한 이론적인 분석과 함께 일반 피뢰침과 시중에 판매되고 있는 다수의 ESE 피뢰침의 성능을 검증하기 위해 충격전압시험과 코로나 방출전류의 시험 결과를 비교하여 나타내었다. 그 결과 ESE 피뢰침은 일반 피뢰침보다 두드러진 성능이 나타내지 않음을 확인하였으며, 현재 프랑스 규격 NF C 17-102-1995[10] 표준에서 규정된 ESE 피뢰침의 성능평가 방법의 문제점을 이론적으로 분석하였다.

### 2. 피뢰침의 성능지수

피뢰침이란 낙뢰를 수리함으로써 충격성 대전류 특성을 가진 직격위가 주변 구조물 혹은 설비로 가해질 때 생기는 손상 혹은 재난을 방지하기 위한 것이다. 따라서 피뢰침은 유리침과 같이 뇌격을 유도하는 것이라 할 수 있다.

피뢰침의 성능은 동일한 뇌격전류에 대해 보호반경이 큰 것이 좋다. 이와 같은 보호반경내에 접근하는 낙뢰는 피뢰침에 가해짐으로써 피 보호물을 보호하는 원리이다.

그러나 ESE 피뢰침은 일반 피뢰침에서 적용하고 있는 보호반경의 개념을 벗어나 특수하게 설계된 피뢰침의 구조로 인해 상향 스트리머가 조기에 발생함으로써 보호반경이 커진다는 것이다.

따라서 피뢰침의 성능은 동일한 충격전압 파형에 대해 절

\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 先 任 研 究 員  
\*\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 責 任 研 究 員  
\*\*\* 正 會 員 : 韓 國 電 氣 研 究 員 先 任 技 術 員  
<sup>§</sup> 正 會 員 : 韓 國 海 洋 大 學 校 電 氣 工 學 科 博 士 課 程  
接受日字 : 2001年 12月 4日  
最終完了 : 2001年 12月 19日

연파괴전압이 작고, 방전시간이 짧아야 우수하다고 할 수 있다. 프랑스 규격에서는 이와 같은 성능지수로 그림 1과 같이 일반 피뢰침과 ESE 피뢰침이 방전에 이르는 시간  $\Delta T$ 를 자연적인 뇌방전 현상과 유사하게 모의한 고전압 시험실에서 측정하여 피뢰침을 평가하고 있다.

ESE 피뢰침의 시간 이득을  $\Delta T$ 라 하면, 상향리더( $\Delta L$ )의 길이 이득은  

$$\Delta L = v \cdot \Delta T \text{ [m]}$$
 $v$  : 상향리더 속도 [m/ $\mu$ s]  
 $\Delta T$  : ESE 피뢰침의 트리거 시간 이득차 [ $\mu$ s]

이며, 보호반경  $R_{ESE}$ 는

$$R_{ESE} = \sqrt{(d_s + \Delta L)^2 - (d_s - h)^2}$$

가 되며, 일반 피뢰침의 보호반경( $R_{SR}$ )은 단지

$$R_{SR} = \sqrt{d_s^2 - (d_s - h)^2}$$

가 된다는 개념이다.

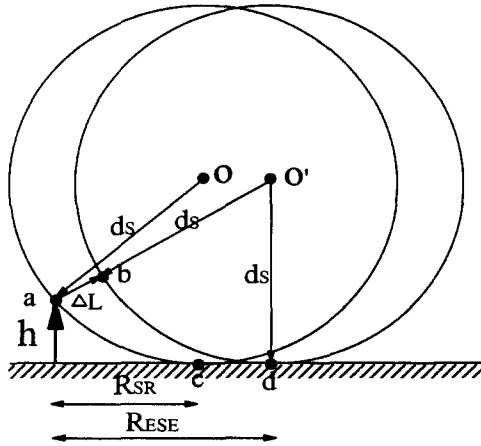


그림 1. ESE 피뢰침과 일반 피뢰침의 뇌 보호반경  
 Fig.1 Lightning protective radius of ESE air terminal and simple rod

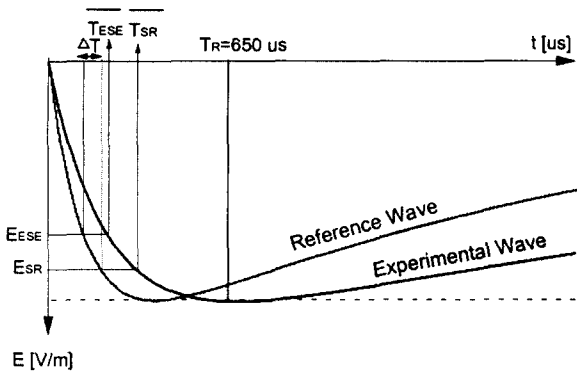


그림 2. ESE 피뢰침의 트리거시간 이득의 설명도  
 Fig. 2. Evaluation diagram of triggering time advance for ESE air terminal

이와 같은 조기방전으로 인한 보호거리의 확장은 다음과 같은 과학적인 모순점이 있다. 첫째, 그림 2와 같이 두 종류의 피뢰침 방전시간(절연파괴시간)을 기준 파형의 종축과

수평으로 이은 점에 해당하는 시간  $\overline{T_{SR}} - \overline{T_{ESE}}$ 가 음인 경우, 이에 해당되는 시간차  $\Delta T$ 와 상향스트리머의 속도  $v$ 와 곱으로 상향리더의 길이 이득을 정하며, 기준 파형의 상승시간  $T_R$ 을 짧게 할수록  $\Delta T$ 가 작아지므로 길이 이득도 작아진다. 즉, 기준 파형의 변화에 따라 보호반경이 달라지는 문제점이 있다.

둘째, 일반 피뢰침보다 ESE 피뢰침이 조기에 스트리머를 발생한다고 하더라도 일단 스트리머가 발생하면 두 가지 피뢰침 모두 동일한 전계강도에서 상향리더가 진전하는 것이 일반적이다.

셋째, 정극성 상향스트리머의 전파속도는 100 cm/ $\mu$ s이다. 이는 Suzuki씨 등[11]이 고전압시험실에서 측정한 시험결과에서는 즉, 초기에 1 cm/ $\mu$ s이며, 상향리더와 하향리더의 공극 간격이 짧아지는 최종단계에서는 100 cm/ $\mu$ s이 이른다. 결과와 문헌[12]의 10 cm/ $\mu$ s와는 큰 차이점을 나타낸다.

넷째, 건물의 뇌보호에 보호반경개념을 잘못 적용하고 있다. 만약 주장하는 보호거리를 확보한다 하더라도 그림 3과 같은 구조물에 전기기하학적 모델을 적용하면 건물의 가장자리 bc를 보호할 수 없음을 확인할 수 있다.

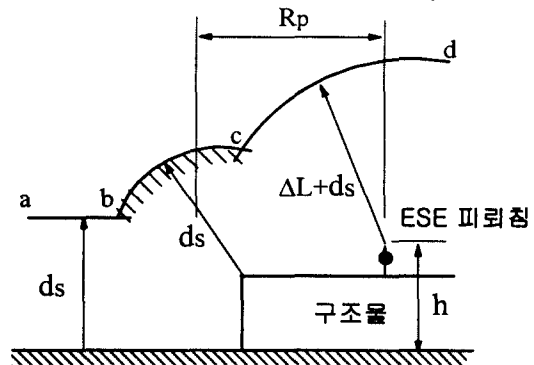


그림 3. ESE 피뢰침의 뇌격 노출부  
 Fig. 3. Stroke exposure area of building with ESE air terminal

### 3. 피뢰침의 충격전압 성능시험.

#### 3.1. 뇌충격 임계 심락전압 시험

자연적인 뇌방전 현상은 뇌우시에 바람이 부는 경우가 많고, 습도가 시험실에 비해 매우 높은 조건으로 발생한다. 또한, 피뢰침이외의 구조물에서도 스트리머/리더가 발생하므로 현장시험을 통해 일반 피뢰침과 ESE 피뢰침의 성능을 비교하기에는 시간과 공간적인 제약이 받게 된다. 따라서, 본 시험은 낙뢰(대지 뇌방전)의 대부분을 차지하는 부극성의 뇌방전을 시험실에서 모의하기 위해 뇌운에 상당한 평판전극에 부극성의 충격전압을 인가하고, 지상의 피뢰침에 상당하는 봉 전극을 접지시키는 방식으로 한국전기연구원의 고전압 시험실에서 모의하였다.

시험 전극은 지름 3 m 평판전극으로부터 1.2 m 하부에 그림 4와 같은 2가지 형태의 일반 피뢰침과 3가지 형태의 ESE 피뢰침을 각각 설치하였다. 이때 전극과 피뢰침 사이

에 부극성 표준 뇌충격전압(1.2/50  $\mu$ s)을 그림 4의 5가지 피뢰침 모델에 대해 각각 30회씩 인가하였다. 인가한 결과 표 1과 같이 C형 ESE 피뢰침에서 최소 뇌충격 임계섬락전압(CFO)이 1,134 kV을 나타내었으며, 국내에서 널리 사용되고 있는 A형 일반 피뢰침에서는 1,142 kV의 CFO 전압을 나타냄을 볼 때 뇌충격전압에 대한 두 형식의 피뢰침의 보호성능은 별 차이가 없음을 알 수 있다.

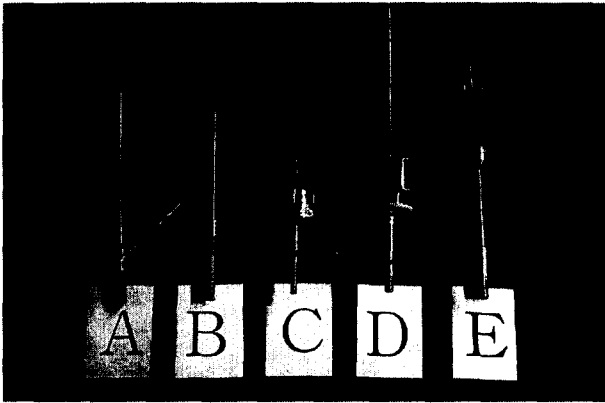


그림 4. 시험 피뢰침  
Fig. 4. Tested air terminals

표 1. 피뢰침 샘플에 대한 뇌충격 임계섬락전압 비교  
Table 1. Lightning impulse CFO voltages for several lightning air terminals

형식	뇌충격 임계섬락전압(CFO) [kV]
A	- 1,142
B	- 1,139
C	- 1,134
D	- 1,158
E	- 1,145

3.2 피뢰침의 개폐충격전압 성능 비교시험

세계에서 유일하게 ESE 피뢰침에 대한 성능시험이 표준으로 제정되어 있는 프랑스의 규격에서는 일반 피뢰침과 ESE 피뢰침의 성능 비교의 지수로 방전 시간차를 측정하는 방법을 적용하고 있다. 이 방법에서는 파두장이 짧은 표준 뇌충격 전압파형이 아닌  $2 \times 10^8 \sim 2 \times 10^9$  V/m/sec의 파두 기울기를 가진 부극성 개폐충격전압을 인가하도록 하고 있어, 본 시험에서는  $1.66 \times 10^9$  V/m/sec의 기울기를 가진 그림 5와 같은 300/2500  $\mu$ s 개폐충격전압(분압비 : 1/2,180)을 사용하였다.

또한 프랑스 규격에서는 뇌격 이전에 코로나와 공간전하가 존재하는 자연적인 대지전계를 모의하기 위해 10 kV/m~25 kV/m 크기의 전계를 전극간에 가하도록 하고 있다. 이에 본 시험에서는 DC 내압기를 사용하여 1.2 m의 전극간에 부극성의 30 kV 전압을 인가하여 전극간의 평균 전계가 25 kV/m를 유지하도록 한 상태에서 개폐충격전압을 각각의 피뢰침에 대해 120 회씩 인가하였다.

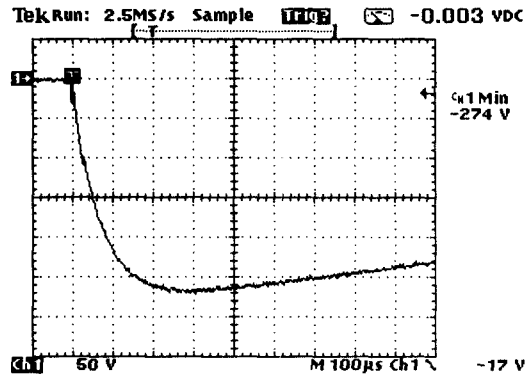
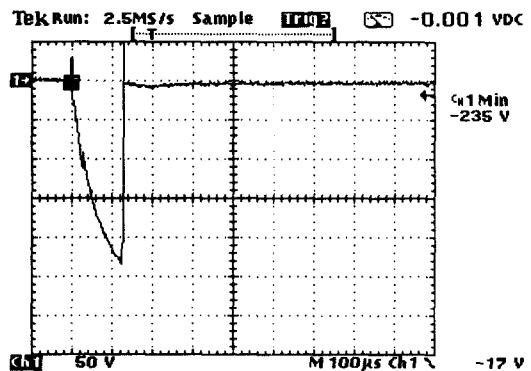
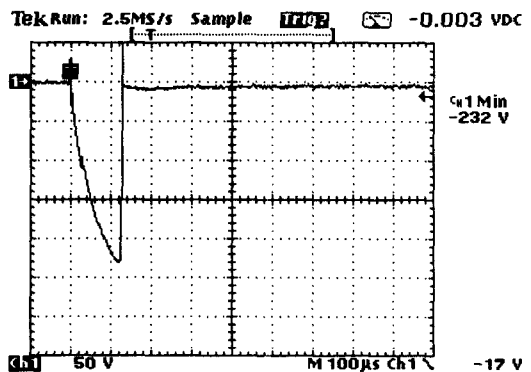


그림 5. 부극성 개폐충격전압 인가 파형  
Fig. 5. Applied negative switching Impulse waveform

그 결과 각 피뢰침에 대한 방전파형(분압비 : 1/2,180)의 일부는 그림 6과 같으며, 일반 피뢰침의 평균 트리거 시간  $T_{SR}$ 은 122.3  $\mu$ s이며, ESE 피뢰침의 평균 트리거 시간  $T_{ESE}$ 은 120.6  $\mu$ s로 일반 피뢰침과 ESE 피뢰침간에 2  $\mu$ s 이내의 방전 시간차를 나타내었다. 절연과피전압 평균에서도 일반 피뢰침은 -543.3 kV, ESE 피뢰침은 -540.4 kV로 거의 차를 보이지 않고 있음을 확인하였다.



(a) 일반 피뢰침



(b) ESE 피뢰침

그림 6. 개폐충격전압에 대한 피뢰침의 방전파형  
Fig. 6. Waveform of flashover to simple rod and ESE air terminal for switching impulse  
(a) Simple rod (b) ESE air terminal

### 3.3 방전방향을 통한 성능비교

두 종류의 피뢰침을 동일한 전기기하학적 조건으로 배치하고, 개폐충격전압을 인가하여 방전이 일어나는 방향을 통해 피뢰침의 성능을 판단하였다. 시험 조건으로 그림 7과 같이 평판전극과 피뢰침 상부간의 거리를 각각 1.2 m 간격으로 설치하였고, 두 피뢰침 간의 간격은 1.8 m로 유지하여 평판전극의 가장자리와 피뢰침간에 방전이 일어나지 않도록 배치하였다.

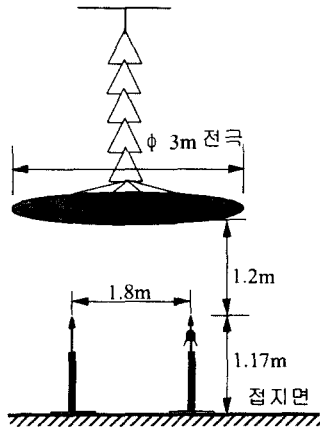


그림 7. 피뢰침의 방전방향 시험을 위한 시료의 배치도  
 Fig. 7. Experimental setup to evaluate stroke direction for two type air terminal

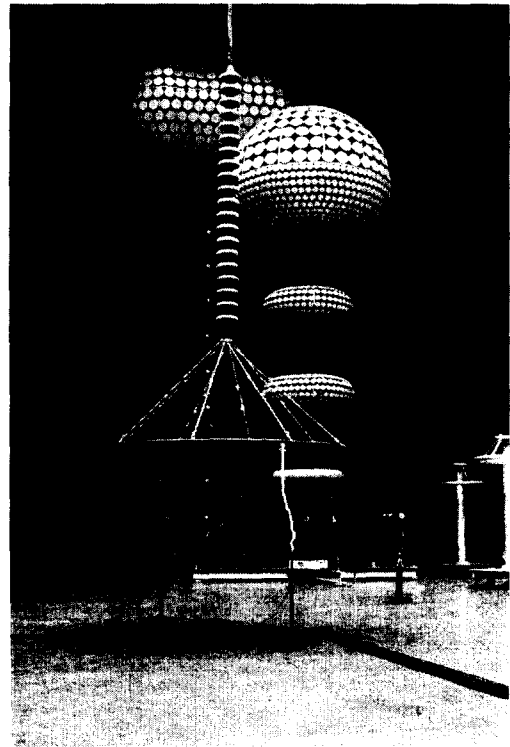
통계적인 편차를 줄이기 위해 총 120 회의 개폐충격전압을 인가하였으며, 총 인가 회수에 대해 60 회 이후에는 전극의 배치에 따른 영향을 배제하고자 두 피뢰침의 위치를 서로 바꾸어 시험하였다. 그림 8은 두 피뢰침의 방전방향을 촬영한 것으로 총 120 회의 시험에서 ESE 피뢰침으로의 방전회수는 61 회, 일반 피뢰침으로는 55 회의 방전회수를 나타내었으며, 4 회의 두 피뢰침 모두 방전이 발생하지 않았다.

이와 같은 결과는 뇌충격에서 나타난 임계섬락전압의 차이와 유사하여 ESE 피뢰침이 일반 피뢰침보다 두드러지게 성능이 향상된다고 하기 힘들다.

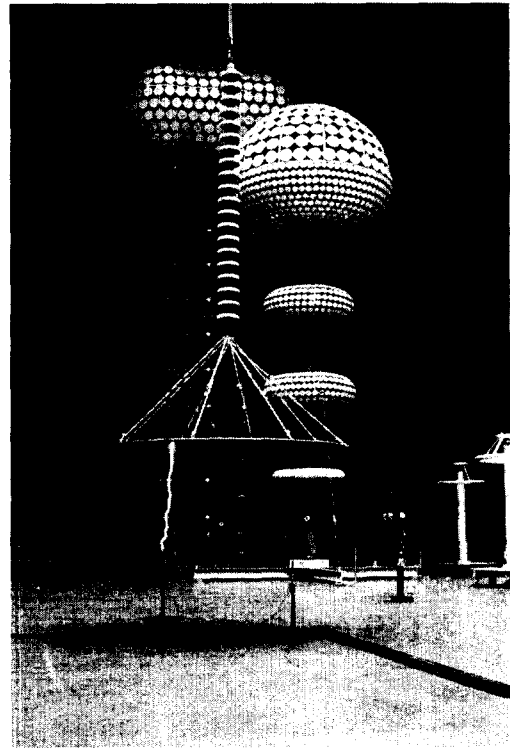
### 3.4 코로나 방출전류 시험

뇌운이 형성되어 하향리더가 상향스트리머/리더와 마주치는 뇌 부착과정(Attachment process)에서 지상의 전계는 수 kV/m에서 수 100 kV/m에 이른다.

이때 지상에 설치된 피뢰침 상단에서는 국부적인 공기 절연파괴로 코로나 현상이 나타난다. 전극간에 전계가 강해지면 코로나 현상은 전자사태를 거쳐 정극성의 피뢰침에서 스트리머로 진전되며, 스트리머 선단의 전계가 더욱 강해지면 리더라는 필라멘트형 방전로가 형성되어 지상의 정전하가 대지로 이동하는 이른바 귀환뇌격이 발생하게 된다. 이와 같이 뇌방전 부착과정의 초기단계인 코로나 현상은 피뢰침의 성능을 나타내는 지수로 사용되고 있다.



(a) 방전방향 A형



(b) 방전방향 C형

그림 8. 피뢰침 개폐충격전압 방전방향 시험  
 Fig. 8. Switching impulse flashovers to air terminals  
 (a) Stroke to type A (b) Stroke to type C

즉, 피뢰침으로부터 방출되는 코로나 전류에 의해 피뢰침 선단에서 공간전하를 형성하며, 이들 공간전하로 인해 피뢰

침 선단의 전계가 작아진다는 것이다. 따라서 코로나 방출 전류가 클수록 방전이 일어나기 어렵다는 것이다[13,14]. 본 시험에서는 이와 같은 코로나 방출전류를 통한 피뢰침의 성능지수를 확인하기 위해 부극성의 DC 전계의 증가에 따른 여러 가지 형태의 피뢰침에 대한 코로나 방출전류를 측정하였다.

본 실험에서는 이를 확인하기 위해 그림 7과 같은 전극하부의 중심에 피뢰침을 두고, 피뢰침과 직렬로 100 kΩ의 분로 저항을 설치하여  $V/10^5$ 의 분류비를 이용하여 코로나 방출전류를 측정하였다. 인가전압에 대한 코로나 방출전류를 연속적으로 측정하기 위해 Labview 프로그램을 이용하여 오실로스코프상에서 전압 대 전류 측정치를 간단히 얻을 수 있었다.

그림 9는 5가지 피뢰침에 DC 전계를 인가했을 때 각각의 피뢰침에 흐르는 코로나 방출전류를 나타낸 곡선들이다. 측정결과에서 100 kV/m의 인가 전계까지는 방출전류가 모든 피뢰침에서 거의 비슷한 결과를 보이고 있으나 이 값 이상에서는 일반 피뢰침 A형의 경우에서 가장 큰 방출전류가 흐르고 있다. 본 실험에서 전극간격 d와 인가 전계 E의 평균치(V/d)를 적용했다. 그러나 실제 상황에서는 하부의 피뢰침 선단부근에서 강한 불평등 전계가 형성되기 때문에 전체적으로 지상의 전계는 측정치 보다 작은 것이 일반적이다.

그림 10은 일반 피뢰침 A형과 ESE 피뢰침 C형에서 공극을 변화시켰을 때 코로나 방출전류의 양상을 나타낸다. 전체적으로 일반 피뢰침 A형의 방출전류가 크며, 공극이 증가해도 방출전류의 크기는 두 피뢰침에서 약 10 μA 이내의 차이를 나타내고 있다.

따라서 코로나 방출전류 시험에서도 피뢰침의 성능은 뇌충격 CFO전압의 크기에서와 같이 일반 피뢰침과 ESE 피뢰침에서 두드러진 차이점을 나타내고 있지 않다. 이와 같은 결과는 방전 방향의 비교시험 결과와 비슷한 양상이다.

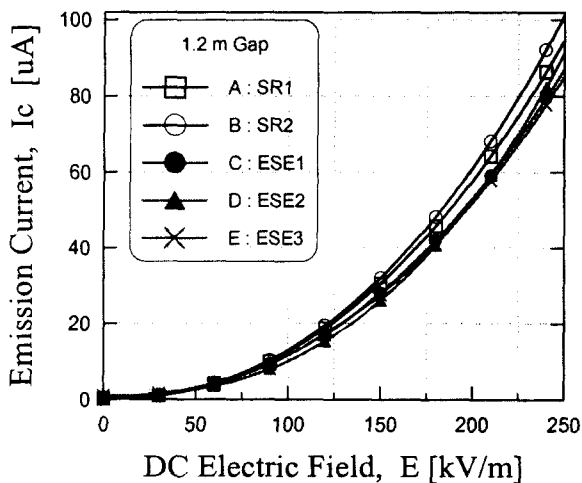


그림 9. 1.2m 갭에서의 피뢰침의 코로나 방출전류비교  
Fig. 9. Dependence of corona emission currents on different air terminals for negative DC electric field

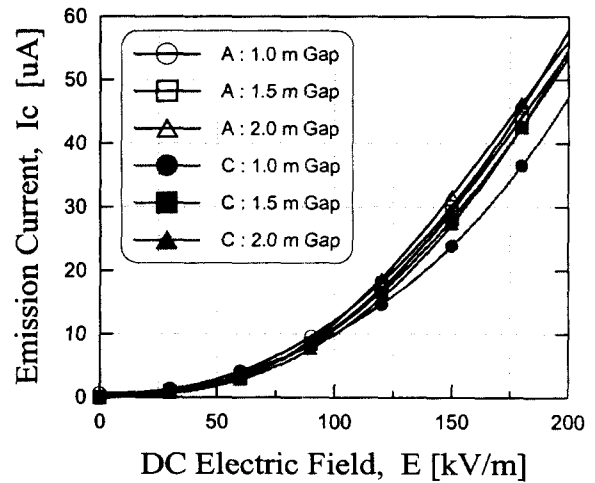


그림 10. 공극에 따른 A, C형 피뢰침의 코로나 방출전류 비교  
Fig. 10. Variation of the corona emission currents with negative DC electric field for different air gaps

#### 4. 결 론

외국의 이온 방사형 광역피뢰침으로 일컫는 ESE 피뢰침의 국내 공급이 급속히 확산되고 있어 이에 대한 피뢰침의 성능을 비교하기 위해 본 시험에서는 충격전압시험과 코로나 방출 전류시험을 수행하였다. 그 결과 ESE 피뢰침의 효과를 입증할만한 증거를 찾지 못했으며, 비교시험 결과도 이를 뒷받침 해 주고 있다.

일부 ESE 피뢰침의 뇌충격 임계접촉전압(CFO)은 일반 피뢰침보다 높게 나타났으며, 조기방전 시간에 있어서 C형 ESE 피뢰침의 경우, 일반 피뢰침보다 평균적으로 2μs 일찍 방전에 이르는 성능을 나타내고 있다. 그러나 조기 방전 시간이 스트리머/리더의 발생에 영향을 미침으로써 뇌보호 성능이 매우 향상된다고 지나치게 해석하는 것은 바람직하지 않다. 피뢰침 성능비교 시험결과로 볼 때 기존 피뢰침이 설치되어 있는 경우는 추가로 보강공사로 설비를 보호하는 것이 ESE 피뢰침으로 교체하는 것 보다 경제적이며, 설비보호 측면에서도 효과적이라 판단된다.

#### 참 고 문 헌

- [1] H. Armstrong and E. Whitehead, "Field and Analytical Studies of Transmission Line Shielding", IEEE Trans PAS, Vol.87, No.1, Jan., 1968.
- [2] R. H. Lee, "Lightning Protection of Buildings", IEEE Trans. on IA, Vol.IA-15, No. 3, pp.236~240, May/June 1979.
- [3] NFPA 780-1997, Standard for the Installation of Lightning Protection Systems.
- [4] IEC 61024-1-2 : 1985, Protection of Structures against Lightning : Part 1-2 : General Principles.
- [5] K. Katoh et al., "Working Principles of Prevectrons : Theory and Practices", International Workshop on Physics of Lightning", pp.73~74, IWPL2001.

- [6] DUBAL MESSIEN Company, Satelit+ ESE Manual.
- [7] A. Rousseu et al, "Which Test for E.S.E Lightning Conductors?", Proceedings of 10th. International Symposium on HV. Eng, Montreal(Canada), pp.273 ~277, August 25-29, 1997.
- [8] G. Berger, "Determination of the Inception Electric Field of the Lightning Upward Leader", Proceedings of 8th. International Symposium on HV. Eng, Yokohama(Japan), paper 70.02, 1993.
- [9] K.P. Heary et al. "An Experimental Study of Ionizing Air terminal Performance", IEEE 88 SM. 572-0.
- [10] NF C 17-102-July 1995, Lightning Protection of Structures and Open Areas against Lightning using ESE Air Terminals.
- [11] T. Suzuki, K. Miyake, I. Kishizima, "Studies on Experimental Simulation of Lightning". IEEE PAS., Vol.PAS-100, No. 4, pp.1703~1711, April 1981.
- [12] P. Chowdhuri, Electromagnetic Transient in Power Systems, RSP LTD, pp.229~232, 1996.
- [13] F. D'Alessandro, G.Beger, "Laboratory Studies of Corona Current Emissions from Blunt, Sharp and Multipointed Air Terminals", ICLP-98, 4b.2, pp.418~424, 1998.
- [14] S. Grzybowski, et al., "Comparative Testing of Ionizing and Non-ionizing Air Terminals", 10th. Inter. Sym. on HV. Eng, Montreal(Canada), pp.331 ~334, August 25-29, 1997.c

저 자 소 개



**이 재 복 (李在福)**  
 1962년 8월 17일 생. 1985년 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 한국전기연구소 전기환경송전연구그룹 선임연구원  
 Tel : 055-280-1323, Fax : 055-280-1329  
 Email : jblee@keri.re.kr



**조 연 규 (趙延奎)**  
 1957년 3월 10일 생. 1982년 경남대 전기공학과 졸업. 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 선임기술원  
 Tel : 055-280-1343, Fax : 055-280-1329  
 Email : ygcho@keri.re.kr



**명 성 호 (明聖鎬)**  
 1959년 3월 20일 생. 1981년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹장  
 Tel : 055-280-1320, Fax : 055-280-1329  
 Email : shmyung@keri.re.kr



**김 점 식 (金点植)**  
 1973년 1월 11일 생. 1995년 원광대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국해양대 전기공학과 박사과정. 한국전기연구원 전기환경송전연구그룹 위촉연구원  
 Tel : 055-280-1325  
 Email : jpoint@orgio.net