

뇌보호시스템에서 인하도선의 효과적인 설치기법

(Effective Installation Methods of Down Conductors in Lightning Protection Systems)

이복희* · 엄주홍 · 이승철 · 강성만

(Bok-Hee Lee · Ju-Hong Eom · Seung-Chil Lee · Sung-Man Kang)

요 약

현대의 뇌보호시스템은 낙뢰로 인한 감전이나 건축물, 전기·전자기기의 파손과 같은 위험성을 제거하는 것이 요구되지만 종래의 뇌보호설비는 단지 인명의 피해나 건축물을 보호하는 것이 주된 역할이었다. 오늘날 컴퓨터, 정보통신설비 등을 효과적으로 보호할 수 있는 뇌보호설비가 필수적 요건으로 대두되었다. 본 논문에서는 뇌과전압으로부터 컴퓨터와 전자장비를 보호할 수 있는 기술을 개발할 목적으로 인하도선의 종류와 설치기법에 따라서 인하도선에 유도되는 전위상승 억제에 대한 연구를 수행하였다. 그 결과 인하도선의 전위상승에 의한 측면방전과 위험성을 줄이기 위해서는 인하도선으로 낮은 특성임피던스를 가지는 동축케이블이 적당하며, 인하도선과 금속판을 상단과 하단에서 본딩하는 방법이 효과가 높게 나타났다.

Abstract

A modern lightning protection system is required to eliminate the risks such as electrical shocks and damages of structures, electrical and electronic equipments due to lightning. However, the conventional lightning protection systems play an important role in protecting persons and structures only. Thus an effective lightning protection system is indispensable today in computer, information and communication facilities and etc. The major objective of this paper is to develop the technology to protect electronics and computerized facilities against lightning-caused overvoltages. The study is oriented on the control of the potential rise of down conductors with the type and installation method of down conductors. As a result, to reduce side flashes and hazards caused by the potential rise of down conductor due to lightning current, the coaxial cable with a low characteristic impedance and high insulation level is suitable for a down conductor. In particular it is extremely effective to bond down conductors to the steel supporter, metal raceways and steel frame of structures.

Key Words : Lightning protection system, Down conductor, Lightning impulse current, Potential rise, Characteristic impedance, Electrical bonding

* 주저자 : 인하대학교 전자전기공학부 교수
Tel : 032-860-7398, Fax : 032-863-5822
E-mail : bhlee@inha.ac.kr
접수일자 : 2002년 3월 23일
1차심사 : 2002년 3월 28일
심사완료 : 2002년 4월 17일

1. 서 론

정보통신기기, 컴퓨터, 공장자동화기기, 신호 및 제어기기 등 전자기기의 사용이 증가됨에 따라 낙뢰에

의하여 발생하는 피해의 양상이 매우 다양하게 나타나고 있다. 또한 지능형 건물의 신축이 늘어나고 있으며, 건축물의 파괴침에 낙뢰가 유입됨에 따라 건물 내의 전기시설물과 정보설비, 방송설비, 방송설비, 소방설비, 감시시스템 등의 제어회로의 소손, 전력설비의 제어기기, 전화교환기의 소손 등 낙뢰로 인한 직·간접적인 피해가 크게 증가하고 있다[1,2]. 초고속 인터넷 설비와 전자기기는 파괴침이나 그 주변의 낙뢰에 기인하여 발생하는 유도뢰서지나 전자펄스(electromagnetic pulse)의 장애를 받기 쉬우며, 이들에 대한 보호대책이 새로운 문제로 제기되어 왔다[3,4].

그림 1에 나타낸 바와 같이 부적절한 뇌보호장치의 설치로 인하도록선과 건물 구조체를 통하여 흐르는 뇌격전류에 의해 건물 구조체의 전위가 상승하므로 구내의 고전압 기기나 통신장치 등의 절연파괴나 섬락이 발생하여 뇌격전류가 고압 배전선이나 통신케이블에 분류되어 흐르거나 건물 내부의 배선류에 유도전압을 발생시켜 기기를 파괴시키게 된다. 또한 건물 외부까지 저압 배전선이 가설되어 있는 경우 저압 기기도 절연파괴를 일으키게 된다[5].

수뢰장치와 뇌격에너지를 대지로 방류시키는 접지전극을 연결하여 주는 인하도록선의 설계 및 시공에 있어서도 인체의 감전에 대한 안전은 물론이고 정보·통신·감시시스템의 확실한 보호를 고려하여야 한다. 뇌보호시스템의 중추적 신경 또는 동맥의 역할을 하는 인하도록선은 수뢰장치로부터 뇌격전류를 효과적으로 접지체에 전달하는 경로이다. 수뢰장치에 입사한 낙뢰에 의한 뇌격전류가 흐르는 인하도록선의 주변에 발생하는 전자장은 건물의 내부에 설치되어 있는 컴퓨터를 비롯하여 전자·통신·제어·정보화기기의 오동작 또는 심각한 기기의 파손이나 고장을 가져올 수도 있다. 특히 건물에 낙뢰가 입사하였을 때 또는 인하도록선의 전위가 높아져 파괴침의 절연장치에서 섬락이 발생하거나 측면방전이 일어나게 되면 더욱 더 피해는 크게 된다. 따라서 인하도록선의 설계 및 시공에 있어서 그의 중요성과 역할을 다할 수 있도록 충분한 검토가 필요하므로 본 연구에서는 인하도록선의 종류와 설치기법에 따른 인하도록선의 전위상승을 측정하고 평가하는 실험적 연구를 수행하였다.

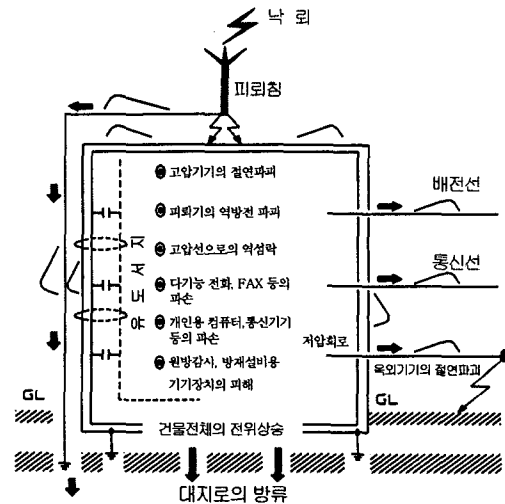


그림 1. 부적절한 외부뇌보호설비에 의한 피해양상
Fig. 1. Damage aspects caused by improper external lightning protection systems

2. 실험 장치 및 방법

뇌보호설비(lightning protection system)에 있어서 인하도록선에 나타나는 전위상승 분석에 대한 실험을 수행하기 위해서 $6 \times 6 \times 6[m^3]$ 크기의 구조물을 시설하였다. 그리드형 접지전극을 구조물과 분당하였으며, 구조물과 인하도록선을 접속한 합성접지저항은 $2.7[\Omega]$ 이었다. 구조물은 건축공사 현장에서 거푸집의 제작에 많이 사용하는 직경 $50[mm]$, 길이 $6[m]$ 인 금속제 파이프를 제작하였다.

뇌격전류에 의한 인하도록선의 전압강하를 측정하기 위한 실험회로를 그림 2와 같이 구성하였다. 시험전류를 인가시켜 주기 위한 전류보조전극은 피측정의 격자형 접지전극으로부터 $47[m]$ 떨어진 위치에 길이 $1.8[m]$ 의 봉형 접지전극 5개를 병렬로 연결하는 구조로 시설하였으며, 접지저항은 $7.7[\Omega]$ 이다. 기준전위를 얻기 위한 전위보조전극은 길이 $1[m]$ 의 봉형 접지전극을 사용하였으며, 큰 임펄스전류가 인가되는 경우 측정전류의 페루프와의 상호유도작용에 기인하는 오차를 줄이기 위하여 IEEE의 권장사항에 따라 전류보조전극의 방향과 90° 의 각도를 이루어 $35[m]$ 떨어진 위치에 시설하였다[6].

뇌보호시스템에서 인하도선의 효과적인 설치기법

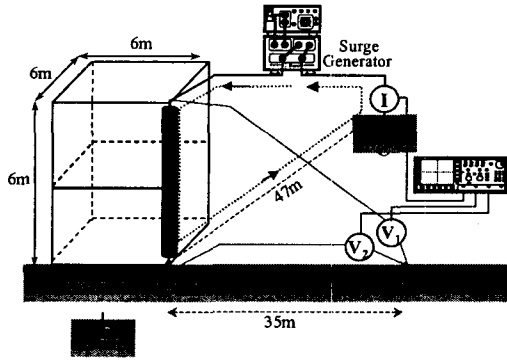


그림 2. 측정회로의 개략도
Fig. 2. Schematic diagram of the measurement circuit

본 실험에 사용한 인하도선의 종류로는 38[mm²]의 GV전선, 특성임피던스가 3[Ω]인 뇌보호설비의 인하도선 전용으로 사용하는 케이블, 그리고 특성임피던스가 10, 50, 75[Ω]인 동축케이블을 사용하였다. 특성 임피던스가 10, 50, 75[Ω]인 동축케이블은 뇌서지전류가 고주파임을 고려할 때 인하도선의 특성임피던스가 전위상승에 미치는 영향을 비교·검토하기 위한 목적으로 실험에 적용하였다. 실험에 적용한 인하도선과 금속제 전선관 또는 케이블의 금속시스사이의 본딩조건을 그림 3에 나타내었다.

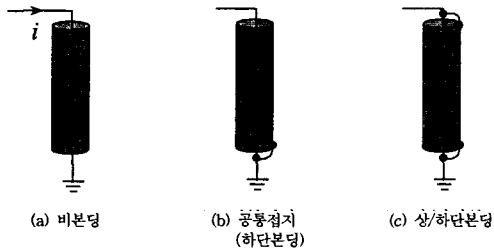


그림 3. 금속제 전선관과 인하도선의 본딩조건
Fig. 3. Bonding conditions between the down conductor and metal raceway enclosure

단면적 38[mm²]인 GV전선의 경우 내경이 42[mm]인 금속관에 넣었으며, 동축케이블의 경우는 케이블의 금속시스(metal sheath)를 전선관 대용으로 하여 본딩하고, 본딩조건에 따른 인하도선의 전위상승에 대하여 실험하였다. 뇌서지전류의 공급에는 조합형 임펄스전류발생기를 사용하였으며, 단락상태에서는 8/20[μs], 20[kA]의 전류가 발생되지만 인가전류의 파

형과 크기는 측정회로의 조건에 따라 변동된다.

3. 결과 및 고찰

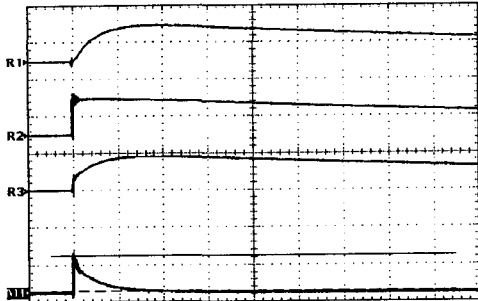
3.1 인하도선의 전위상승

본 실험에서는 내경이 42[mm]인 금속관에 GV전선을 인입하여 시설할 경우 금속관의 본딩 조건에 따라 뇌임펄스전류에 의해 인하도선에 유도되는 전압을 측정하였다. 그리고 케이블을 사용하는 경우는 케이블의 심선을 인하도선으로 금속시스를 금속관 대용으로 하여 본딩 조건에 따라 인하도선에 유도되는 전압을 측정하고, 본딩 조건별 그리고 인하도선의 재료별의 결과를 비교·검토하였다.

인하도선에 유도되는 전압은 뇌격전류의 흐름에 의해서 인하도선에 형성되는 전압강하에 상당하며, 인하도선 상단의 전위에서 접지전극의 전위의 차로부터 산출할 수 있다. 인하도선과 금속관을 본딩을 하지 않은 경우 뇌임펄스전류의 파형, 인하도선의 상단에서의 전위와 유도전압의 대표적인 파형을 그림 4에 나타내었다. 인가전류와 유도전압의 파형은 500[MHz], 25[GS/s], 4채널의 축적형 오실로스코프로 측정하였으며, 전압과 전류의 크기는 피크값으로 나타내었다. 또한 인하도선에 유도되는 전압은 오실로스코프의 연산기능을 이용하여 인하도선의 상·하단에서 측정된 전위의 차(파형 MI)로 산출하였다.

그림 4에 나타난 측정결과로부터 인하도선의 하단의 전위 파형 즉, 접지전극의 전위 파형(R3)은 초기 상승부분을 제외하고는 인가전류의 파형과 거의 비슷하게 나타났다. 이것으로부터 접지전극의 전위는 주로 인가전류에 의한 접지저항강하가 대부분이며, 초기부분의 전위상승은 접지전극의 인덕턴스에 의한 전압강하인 것으로 볼 수 있다. 인하도선의 저항에 의한 전압강하(ohmic voltage drop)는 뇌격전류의 상승 시간범위에서는 무시할 수 있을 정도로 작으므로, 인하도선의 유도전압은 $L \frac{di(t)}{dt}$ 으로 전류의 변화율에 비례한다. 즉, 인하도선의 전압강하는 주로 인덕턴스에 의하여 형성됨을 알 수 있다.

반경 r[m], 길이 l[m]인 직선상의 동선(비투자율 1)의 인덕턴스는 다음 식과 같이 산출할 수 있다[7].



R1 : 인가전류, 1 (kA/div)
 R2 : 인하도선 상단의 전위, 2 (kV/div)
 R3 : 접지전극의 전위, 2 (kV/div)
 M1 : 인하도선의 유도전압
 Time : 20 (μs/div)

그림 4. 인하도선과 금속관을 본딩하지 않았을 때의 인가 전류 및 인하도선의 유도전압 파형
 Fig. 4. Waveforms of the incident current and induced voltages of the down conductor when the down-conductor is not bonded to the steel raceway enclosure

$$L = 2l \left(\ln \frac{2l}{r} - \frac{3}{4} \right) \times 10^{-7} \quad [H] \quad (1)$$

동선 38[mm²], 30[m]인 인하도선의 리액턴스는 60[Hz]에 대해서 0.02[Ω]이지만 100[kHz]에서는 약 34[Ω]으로 대단히 큰 값을 나타내므로 무시할 수 없는 특성량으로 된다. 또한 그림 4에 나타난 파형(R2)은 인하도선 상단의 전위파형으로 인하도선과 접지전극을 포함한 전위상승이며, 접지저항을 R[Ω]이라고 하면 인하도선의 전위는 개략적으로

$$v(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt} \quad (2)$$

이다. 즉, 건축물의 뇌보호설비의 수뢰장치에 낙뢰가 입사하였을 경우, 뇌격전류가 인하도선을 통하여 대지로 방류되기까지의 경로는 근사적으로 인하도선의 인덕턴스 L과 접지저항 R의 직렬회로라고 볼 수 있다. 따라서 급격하게 변동하는 뇌격전류에 의한 인하도선의 전위는 인하도선의 인덕턴스의 영향이 지배적이므로 인덕턴스를 작게 하는 것이 인하도선의 전위상승을 억제하는데 효과적임을 알 수 있다. 인하도선의 전위는 인덕턴스의 영향 때문에 뇌임펄스전류

의 초기 상승부분에서 매우 높게 상승하는데, 특히 고층 건물과 같이 인하도선의 길이가 상당히 길어지게 되면 이러한 현상은 더욱 두드러지게 나타나게 된다. 인하도선의 전위가 높아지면 뇌격전류를 효과적으로 대지로 방출시키지 못할 뿐만 아니라 측면방전과 같이 인하도선과 금속관 또는 건축물의 금속체사이에서 섬락이 일어날 가능성이 커지므로 위험도는 높아지게 된다.

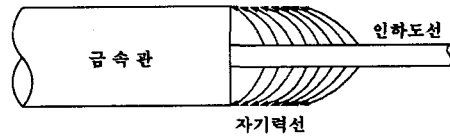


그림 5. 인하도선과 금속관을 본딩하지 않았을 때 발생하는 초킹효과
 Fig. 5. Choking effect that occurs when a steel raceway is not bonded to the down conductor

인하도선과 금속관을 본딩하지 않은 경우 전류가 흐를 때 금속관은 자속을 집중시키는 철심으로 작용하게 되며, 그림 5에 나타난 바와 같이 금속관의 끝단에는 매우 높은 밀도의 자기력선이 형성된다. 따라서 높은 임피던스의 초크(choke)로 작용하며, 금속관의 끝단에서는 대단히 많은 열이 발생하여 인하도선을 용단시킬 가능성도 있다[8]. 이와 같이 고주파의 매우 큰 뇌격전류가 입사하게 되면 본딩되지 않은 금속관의 끝단에 자기력선이 집중적으로 발생하여 임피던스를 증가시켜 뇌격전류의 흐름을 방해하는 작용을 초킹효과(choking effect)라고 한다. GV전선의 경우 금속관을 GV전선과 본딩시키지 않는 경우에는 초킹효과에 의하여 임피던스의 급증을 초래하므로 뇌격전류가 효과적으로 방출되지 못하게 되어 인하도선의 전위가 상승하게 되며, 뇌격전류의 대지로의 방출이 억제되므로 인하도선과 금속관을 상하단에서 본딩하는 것이 효과적이다. 경질합성비닐관과 같이 비자성 및 비도전성 재료를 보호관으로 사용하는 경우는 초킹효과가 나타나지 않으므로 인하도선을 금속관에 본딩하지 않은 경우보다 인하도선의 전위상승이 낮아진다. 그러나 인하도선을 금속관과 전기적으로 접속하면 전선관으로 경질합성 비닐관을 사용하는 경우보다는 뇌격전류의 통전효과가 매우 우수하다.

3.2 본딩방법에 따른 인하도선의 유도전압

GV전선을 내경 42[mm]인 금속관에 인입하고 금속관과 인하도선을 본딩한 경우와 본딩하지 않은 경우의 인하도선에 유도되는 전압을 측정하였으며, 1[kA]당 인하도선에 유도된 전압을 그림 6에 나타내었다.

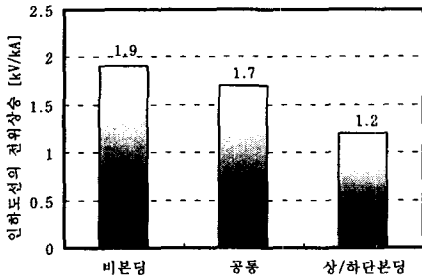


그림 6. 본딩방법에 따른 인하도선의 전위상승
Fig. 6. Potential rises of the down conductor as a function of the bonding methods

인가전류의 크기가 1[kA]일 때 인하도선의 전압은 인하도선과 금속관을 본딩하지 않은 경우가 1.9[kV]로 가장 높게 나타났으며, 하단본딩, 상·하단 본딩 순으로 나타났다. 인하도선의 전위가 상승하게 되면 주위의 다른 도체계사이에서 접촉이 발생하지 않는 경우 용량결합에 의해서 건축물 내의 절연된 도체계에는 높은 전위가 발생하게 된다. 그림 7에 나타낸 바와 같이 대지정전용량이 $C_g[F]$, 인하도선사이의 상호 정전용량이 $C_s[F]$ 인 금속체에 유도되는 전위는

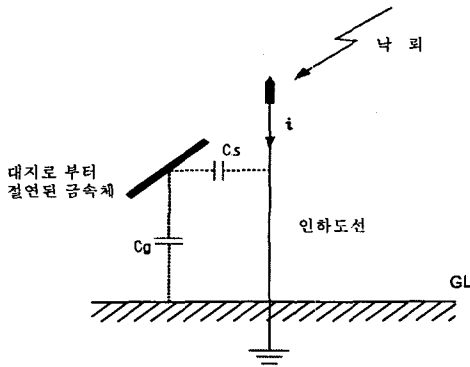


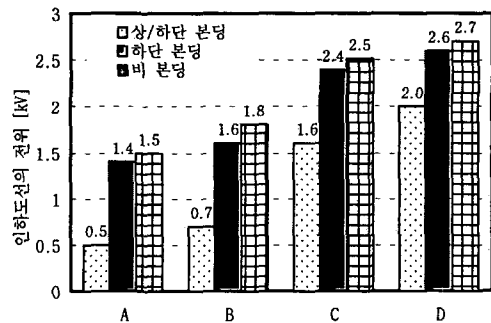
그림 7. 용량결합에 의해서 대지로부터 절연된 금속체에 유도되는 전압
Fig. 7. Induced voltages at the conductor isolated from the ground due to capacitive coupling

$$V = \frac{C_s}{C_g + C_s} V_s \quad (3)$$

가 되며, 여기서 V_s 는 뇌격전류에 의해 유도된 인하도선의 전압이다[3]. 따라서 인하도선의 주위에 위치한 금속체나 전기기구 등은 모두 접지를 하는 것이 안전하며, 정전유도장해를 방지할 수 있다.

3.3 동축케이블의 유도전압

인하도선으로 사용한 케이블의 종류에 따른 심선과 금속시스의 본딩조건별 뇌서지전류 1 kA당의 유도전압의 크기에 대한 비교를 그림 8에 나타내었다. 그리고 본딩하지 않은 경우와 본딩한 경우의 효과를 인하도선의 종류별로 비교하여 그림 9에 나타내었다. 뇌격전류는 서지(surge)로서 작용하기 때문에 단순한 정상상태의 전기저항이 아니라 임피던스로서 다루어야 정확한 분석과 대책이 이루어질 수 있다.



- A : 특성임피던스 3Ω의 케이블
- B : 특성임피던스 10Ω의 케이블
- C : 특성임피던스 50Ω의 케이블
- D : 특성임피던스 75Ω의 케이블

그림 8. 본딩방법별 인하도선의 종류에 따른 전위상승의 분포
Fig. 8. Distributions of the potential rises for bonding methods as a function of types of down conductor

인하도선을 상·하 양단에서 본딩한 경우가 전위상승이 가장 낮았으며, 특히 특성임피던스가 3[Ω]인 케이블의 전위상승이 본딩을 하지 않은 경우의 약 33[%]로서 전위상승의 저감에 가장 양호한 특성을 알 수 있다. 인하도선과 금속관 또는 케이블의 금속시스를 본딩하면 금속관의 직류 전기저항이 인하도선

에 비하여 매우 큰 경우라고 하더라도 뇌격전류는 고주파 성분을 많이 포함하므로 표피효과(skin effect)에 의해서 뇌격전류의 대부분은 금속관을 통하여 흐르게 된다. 따라서 인하도선과 금속관을 상하 양단에서 본딩하면 단순히 전기저항을 병렬로 접속한 효과가 아니라 초킹효과의 억제 및 표피효과에 의한 상승적 작용으로 임피던스가 매우 낮아지므로 본딩하지 않은 경우에 비해서 전위상승이 0.3~0.7배 정도로 낮아지게 된다. 이러한 관점에서 볼 때 인하도선의 전위상승의 저감측면에서는 인하도선과 금속관을 본딩하는 것이 매우 효과적임을 알 수 있다.

낙뢰시 뇌격전류를 어느 한 군데에 집중되어 흐르지 않도록 분산시켜 방출시키는 것이 필요하며, 인하도선을 건축물의 철골이나 금속구조체에 완전하게 본딩을 하여 등전위화를 이루도록 하는 것도 효과적인 방법이다. 건축물 구조체를 구성하는 철골, 철근의 임피던스에 의하여 낙뢰시에 각 층에서 특히 중고층 건축물이 되면 지표층과 지상층 사이의 임피던스가 커질 가능성이 있다. 따라서 각 층에 큰 전위차가 발생하는 일이 있으므로 각 층마다 건축물 구조체의 철골 또는 철근에 견고하게 접속한 기준 접지점을 설치하고 전기·전자설비의 접지선을 모두 이 기준 접지극에 접속하는 것이 적절한 방법이다[9,10]. 이 경우 기준 접지점은 각 층의 분전반 또는 별도로 각 층마다 접지센터를 설치하는 것이 바람직하다.

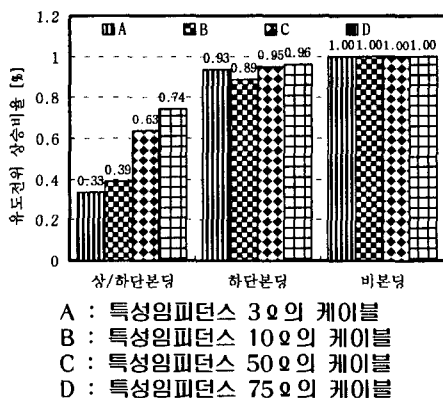


그림 9. 인하도선의 종류별 본딩방법에 따른 전위상승의 분포

Fig. 9. Distributions of the potential rises for down conductors as a function of bonding methods

4. 결 론

본 연구에서는 낙뢰로부터 인명과 건축물의 보호는 물론이고 컴퓨터를 비롯한 전자기기를 효과적으로 보호할 수 있는 뇌보호시스템을 구성하는 인하도선 설치기법에 대한 실험적 연구를 수행한 바 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 낙뢰가 건축물의 돌침에 입사한 경우 뇌격에너지가 안전하게 대지로 방출하기 위해서는 인하도선과 금속관을 수뢰부측과 접지전극측 양단에서 본딩하는 것이 효과적이다.

(2) 인하도선으로는 특성임피던스가 낮은 케이블이 적합하며, 인하도선을 금속관이나 케이블의 금속시스에 전기적으로 접속함으로써 인하도선에 유도되는 전위를 낮출 수 있다.

(3) 뇌격전류에 의한 인하도선의 전위상승은 인하도선의 인덕턴스의 영향이 지배적이며, 정전유도장해나 측면방전을 억제하기 위해서는 인하도선 부근의 금속체는 접지하는 것이 바람직하다.

References

- (1) S. Taguchi, "Lightning protection in Building", Railway and Electrical Engineering, Vol.8, No.5, pp.120~122, 1997.
- (2) A. Karwowski and A. Zeddard, "Transient currents on lightning protection systems due to the indirect lightning effect", IEE Proceeding of Science and Measurement Technology, Vol.142, No.3, pp.213~216, 1995.
- (3) Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, Guidebook on Lightning Protection Systems of Structures, IEE of Japan, pp.66~77, 1992.
- (4) A. Orlandi, C. Mazzetti, M. Yarmarkin, Z. Flisowski, B. Kuca. "Shielding Properties of Lightning Protection Systems under LEMP", Proceedings of the 10th International Symposium on High Voltage Engineering, Montreal, Quebec, Canada August 25~29, pp.1351~1361, 1997.
- (5) Institute of Electrical Installation Engineers of Japan, Lightning Protection for Information-oriented and Computerized Society, IEE of Japan, pp.10~52, 1999.
- (6) IEEE Standards Board, "IEEE Std 81-1983; IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, Inc., pp.17~30, 1983.
- (7) H. Hukushima and K. Horiuchi, Electromagnetics, Corona Publishing Co. LTD., pp.60~79, 1999.
- (8) H. Kijima, Grounding and Lightning protection, Institute

뇌보호시스템에서 인하도선의 효과적인 설치기법

- of Electronics, Information and Communication of Japan, pp.110~138, 1997.
- [9] A. Oriandi, F. Schietroma, "Attenuation by a Lightning Protection System of Induced Voltages Due to Direct Strikes to Building", IEEE Trans. on Electromagnetic compatibility, Vol.38, No.1, pp.43~50, 1996.
- [10] R. P. O'Riley, Electrical Grounding, International Thomson Publishing Company, 5th Edition, pp.60~79, 1999.

◇ 저자소개 ◇

이 복 희 (李福熙)

1954년 6월 29일생. 1980년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1988~89년 동경대학 생산기술연구소 객원연구원. 1995년 호주 Queensland대학 방문교수. 1999년 Cincinnati대학 방문교수. 현재 인하대 공대 전자전기공학부 교수.

엄 주 홍 (嚴柱弘)

1972년 9월 5일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 2월 인하대 대학원 졸업(석사). 2002년 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.

이 승 칠 (李承七)

1943년 4월 1일생. 1971년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 2월 서울산업대 산업대학원 안전공학과 졸업(석사). 2002년 2월 인하대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 한진중공업 상무.

강 성 만 (姜成萬)

1973년 4월 6일생. 1998년 2월 인하대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 현재 인하대 대학원 전기공학과 박사과정.