

원전낙뢰보호 및 접지계통에 대한 규제기술연구

이재도, 주운표, 이상근, 김대식  
한국원자력안전기술원

A Study on the Regulatory Technology for Lightning Protection and Grounding System in Nuclear Power Plants

J.D.Lee, O.P.Zhu, S.K.Lee, D.S.Kim  
Korea Institute of Nuclear Safety

**Abstract** - The regulatory guide, RG-1.204 and its underlying or confirmatory research, NUREG/CR-6866 were studied for Korean application to LPGS of NPPs. However they excluded the application to that of NPPs. So US-NRC approved selectively industrial standards to that of NPPs on Nov. 2005. It is necessary to understand the basis of regulatory technology related regulatory positions on LPGS and important to implement the guidance on LPGS as a reasonable standard. The paper is examined what and how state of the art of relevant technology applied to the LPGS as well as the trip-out events related to electrical system were involved with LPGS. We reviewed the relevant standards applicable to Korean NPPs. Following are concluded to recommend. ① IEEE Std-1050 is recommended as a guide for I&C grounding against EMI and lightning transients ② IEEE Std-665, Std-666, Std-C62.23 for electrical grounding against voltage surges and lightning transients ③ Inspection should be thoroughly be implemented a frequency of 3-5 year period according to NFPA780 or KSC-IEC 61024.

은 순간에 단락되면서 높은 에너지를 방출하는 현상이다. 공기 절연층의 절연파괴로 인한 코로나현상으로 발생된 열은 3만~5만도로 급격하게 공기를 가열시켜 공기는 팽창 압축되어서 기압은 30기압이상 급증하여 초음파 압력 충격파로 5C의 전하를 500 MJ수준에서 에너지를 방출한다. 이를 천둥소리와 번개빛으로 감지할 수 있다. 전자기학적으로는 강력한 전자기파로 인하여 노출된 도체에 강한 자기력을 발생시켜 도체를 휘게 하거나, 용융, 압축시키는 효과를 보인다. 미국 송전선 345kV의 고장의 65%는 직격뢰에 의한 영향으로 알려졌다. 전기공학 입장에서 보면 뇌란 회로관점에서 거대한 스위치가 구름과 대지 혹은 대지돌출부/송전선을 연결시켜 최대 120kA, 평균 30~50kA의 뇌전류를 방전시킨다. 가상 스위치는 단순한 회로일 수도 있으나 정전용량과 인덕턴스가 결합된 복잡한 회로를 구성시킨다. 이 과정에서 회로에 과도값을 발생시킨다. 이러한 과도값이 전기공학에서의 관심사가 된다. 특히 뇌는 진행파로 송전선 혹은 구조물의 동가 회로에 진행하면서 교란을 발생시키고 과도값을 유도시킨다. 여기서 뇌의 짧은 순간은 높은 주파수를 가지므로 주파수의 함수인 서지임피던스가 과도 전압을 유발한다[2].

1. 서 론

최근 국내·외 원전 불시정지원인의 대부분이 규제대상에 포함되지 않은 비안전관련 전력설비에서 발생하고 있다. 미국 NRC는 관련 용역 혹은 기술배경 확인 연구를 통하여 원전에서 낙뢰로 인한 과도 파전압은 장비손상, 계통 오동작, 전력상실 등의 원인이 됨을 확인하였다. 또한, NRC는 2005년 11월에 Regulatory Guide 1.204, "Guidelines for Lightning Protection of Nuclear Power Plants"를 발표하였는데, 이 규제지침은 규제기관이 사업자에게 규제기관에서 규제요건으로 받아들여지는 기술기준을 사용하여 실무적인 방법으로 적용하도록 하기 위함이다. NRC는 관련연구[1]를 통하여 발전소가 적절한 방법으로 낙뢰등에 대비하여 보호시설을 하지 않으면, 뇌방전으로 인한 과도전압은 원전에서 기기의 손상, 계통의 오동작 또는 전원상실을 일으킬 수 있다는 것을 확인하였다. 국내는 신규원전의 경우, 미국과 동일한 설계기준을 적용하는 추세이므로 신규원전의 경우는 별 문제점이 없을 것으로 판단되나 운전중인 원전에 대해서는 낙뢰 및 서지 관련 기술기준에 상응하는 보수나 검사 규정이 없어 적절한 규제기술 지침을 제시할 필요가 있다.

2. 낙뢰이론

2.1 낙뢰이론 개요

낙뢰현상은 대규모 정전기 방전이 마치 스위치처럼 짧

2.2 낙뢰의 회로분석

뇌 현상을 전기회로로 동가화하면 뇌운을 거대한 평판 정전용량을 가진 캐패시터로 가정할 수 있다. 단순화 집중 분포정수를 가정하여 구름의 반경을 1km라 하고, 높이를 1km로 가정할 때 뇌격의 반경은 20cm라 두면 인덕턴스와 캐패시터는 아래 식과 같다.

$$L = 2 \times 10^{-7} \int_{r_1}^{r_2} (1 - \frac{x^2}{r^2}) \frac{1}{x} dx \quad [H/m]$$

$$= 2 \times 10^{-7} \ln \frac{r_2}{r_1} \quad [H/m]$$

$$C = \frac{\epsilon_0 A}{d} = \frac{8.854 \times 10^{-12} \times \pi \times 10^6}{10^3 \times 4}$$

$r_1 = 10cm$  이고  $d \approx r_2 = 1km$ 에 1km의 경로를 대입하면 전체 인덕턴스는 2.18mH가 나오고, 원형 평판 캐패시터의 정전용량은  $6.95 \times 10^{-9} [F]$ 이 된다. 만약  $24\mu s$  동안 진동한다면 서지임피던스는 540Ω가 된다. 그러나 이온화경로는 전류를 크게 감쇄시킬 것이 예상된다. 만약 이온화경로의 저항이 5000Ω이라면 전류는 1.5:30ps의 파가 될 것이다[3].

뇌운을 평행 캐패시터로 보고, 하향뢰의 서지임피던스를 단순화시켜 계산하기 위한 개념도, 상향되는 서지 임피던스가 이온화경로가 변화한 상태로 10배정도 크게 가정하였다. 선행뢰가 대지 혹은 대지 돌출부에 뇌격을 가하는 등가회로를 아래 그림 1에서 보여준다. 그림에는 뇌운 정전용량은  $C_H$ 이고, 진행파가 송전 선로 서지임

피던스  $Z(Z_1$ : 프라즈마 서지임피던스,  $Z_2$ : 송전탑 프라즈마 서지임피던스,  $Z_T$ : 송전탑 자체서지임피던스,  $Z_{GW}$ : 접지 서지임피던스)를 통하여 주된 방전 프라즈마가 채널  $D_1$ 으로 내려온다. 송전철탑  $D_2$ 를 통해서 방전프라즈마는  $Z_2$ 를 통하여 송전탑  $Z_T$ 과 가공지선  $Z_{GW}$ 의 병렬회로에서 분포된다. 선행방전이 SW가 닫혀서 이루어지면 캐패시터에 저장된  $C_H$ 전하가 회로를 타고 전압/전류 진행파로 흐르게 된다. 진행파는 스위치 앞이 불연속 점이므로 반사/굴절을 하게 되어 복잡하지만 철탑 전위를 형성하게 된다. 이를 보다 단순 등가화 하면 그림1의 오른쪽과 같다. 집중선로서 개념을 해석하면 100m 단위 그리고 최소 수 마이크로초단위로 해석한다. 이 때 설계자는 낙뢰 발생빈도를 고려하여 철탑의 절연강도를 정하게 된다.

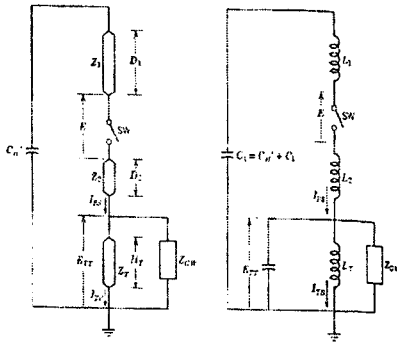


그림1 뇌가 송전철탑으로 떨어질 때 등가회로한 개념도

### 3. 낙뢰보호실무

#### 3.1 낙뢰보호 실무와 기술기준

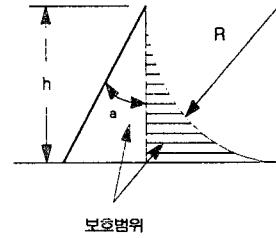
가장 광범위하게 인용되고 권위를 인정받는 낙뢰보호요건은 1904년 최초로 제정된 NFPA 780 이다. 또한 관련된 IEEE Std 모두 NFPA 780[4]을 원문 그대로 인용하고 있으며 일반 구조물에 대한 원리를 적용하고 있기 때문이다. 낙뢰에 대한 보호원리는 KS-IEC 61024[5] 및 UL96에서 서로 교차적으로 인용하고 있다. 내용 적용에 있어서 KSC-IEC 61024가 보다 구체적이다.

#### 3.2 낙뢰 보호구역

뇌격이 보호범위 내로 침입할 확률은 수뢰부 시스템을 적절하게 설계함으로써 상당히 감소된다. 낙뢰 보호구역 범위는 '보호각법(그림2)', '회전구체법(그림3)', '메시 크기법(그림4)'의 3가지로 결정한다.

보호각법은 그림2와 같이 건축물에 설치하는 수뢰부 시스템의 하부 또는 수뢰부 시스템 사이의 낙뢰에 대한 보호가 일정한 각도 안 범위에서 이루어진다. 건축물의 보호레벨 및 높이에 따라 보호각을 다르게 적용한다. 보호각법은 보호레벨에 따른 회전구체반경에 해당하는 높이 이하의 건축물에 적합하다.

회전구체법은 그림3와 같이 건축물에 설치하는 수뢰부 시스템의 하부 또는 수뢰부 시스템 사이의 낙뢰에 대한 보호범위가 구체(공과 같은 물체)를 굴렸을 때 수뢰부 시스템 사이의 구체가 닿지 않는 부분이 된다. 건축물의 보호레벨에 따라 회전시키는 구체의 크기(R)를 다르게 적용한다. 회전 구체법은 복합된 모양의 건축물과 특수 건축물에 적합하다. 하향뢰가 입체각을 가지면서 주변의 대지 혹은 건물의 돌출부분으로 방전이 이루어지는 원리를 응용한 것으로 실제적으로 많이 사용되는 방법이다.



보호범위

그림2 보호각(a), 보호높이(h), 회전구체반경(R)의 개념

회전구 개념을 이용하는 보호구역을 설정할 때는 모든 가능한 구의 위치까지 고려해야 한다. 보호각 개념으로 보호받지 못한 사례가 발생함에 따라 개선된 개념으로 설계에 널리 적용된다.

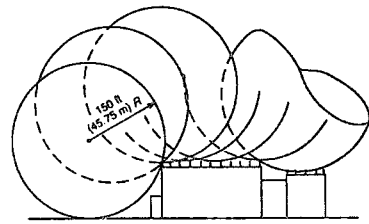


그림 3 회전구체법 : 회전구 보호구역 개념도

메시크기법은 그림4와 같이 건축물에 설치하는 수뢰부 시스템이 그물 또는 케이지 형태로 되는 경우에 땅의 사이가 낙뢰에 대한 보호범위가 부분이 된다는 것을 기반으로 하는 것으로서, 건축물의 보호레벨에 따라 메시의 폭(L)을 다르게 적용한다. 메시 크기법은 건축물에 널리 이용할 수 있으며, 건물의 상부가 평평한 경우에 적합하다.

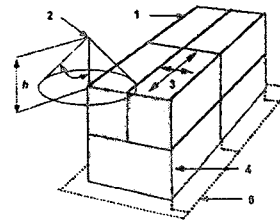


그림 4 메시 크기법 개념

KSC-IEC 61024[5]보호등급에 따른 낙뢰보호구역은 표 1과 같이 회전구체 반경에 따라 보호레벨이 정해진다. 이에 보호레벨이 정해지면 건축물의 상태에 따라 적절한 낙뢰보호구역 방법을 결정하고 수뢰부가 배치되어진다.

표 1 보호레벨에 따른 수뢰부의 배치

| 보호<br>레벨 | h(m) | R(m) |    |    |    | 메시폭<br>(m) |
|----------|------|------|----|----|----|------------|
|          |      | 20   | 30 | 45 | 60 |            |
| I        | 20   | a    | a  | a  | a  | 5          |
| II       | 30   | 25   | 25 | *  | *  | 10         |
| III      | 45   | 45   | 35 | 25 | *  | 15         |
| IV       | 60   | 55   | 45 | 35 | 25 | 20         |

여기서 \*는 회전구체법 및 메시법만 적용된다.

### 3.3 낙뢰보호장치

뇌격단자기구는 NFPA 780-2004[4]에서는 LPS(낙뢰보호시설)의 부품으로서 뇌선패를 차단하여 그들을 대지로 연결시키는 통로라 정의하였다. 뇌격단자기구는 '공기터미널, 금속 기둥(masts), 영구적인 구조물 금속체 그리고 가공지선을 통칭한 광범위한 모든 뇌 인입 장치'를 말한다.

인하도선은 종래에는 피뢰침, 인하도선, 접지단자 3가지로 피뢰설비의 중요한 부품의 하나이다. 최근 개념은 인하도선 개념은 하향도체 개념 뿐 아니라, 주도체 개념으로 접근하여 뇌격단자기구로부터 수평, 수직, 상향으로 향하는 모든 도체를 통칭하며 2개이상의 통로로 접지단자에 접속하도록 규정하고 있다.

접지도체들은 접지단자로 공통 대지 전위를 제공하도록 구조물 내부 혹은 위에서 상호 연결하여 단자 처리한다. 공통 접지에는 낙뢰보호뿐 아니라, 전력선, 전화선, 안테나 접지 그리고 지하에 매설된 금속체 배관까지 포함시킨다. 지하 매설 금속배관은 수도관, 구조물 7.6m 이내에 있는 우물용 금속케이싱, 가스관, 지하 금속전선관, 지하 액화석유가스 배관 등 모두 포함시킨다. 낙뢰보호용 주도체는 낙뢰보호시설의 접지와 상호연결한다.

### 3.4 낙뢰보호시스템 유지 및 관리

낙뢰보호 유지관리는 NFPA 780-2004[4]와 KSC-IEC 61024-1-2 지침과 같이 상세히 체계화 되어 있다. 낙뢰보호시스템의 유지관리 절차는 관리프로그램에 점검 리스트로 사용될 일상적인 항목을 포함시켜 최근 결과와 이전 결과를 비교할 수 있도록 해야 한다. 검사주기 결정은 인으로 계절적 영향에 따라 수시로 육안검사를 하는 것이 좋으며 전체적인 검사와 시험은 2-6년 간격으로 실시한다. 낙뢰설비의 사용전 검사는 온폐장소 연속적 시험과 접지저항 측정하여 접지단자 설비와 개별 접지전극을 검사하고 등전위 접합확인 연속성 시험 검사를 적용해야 한다.

낙뢰설비의 보수 점검은 설비 도체/부품을 점검, 클램프와 스프라이스의 조임상태, LPS 저항의 측정, 접지단자 저항 측정, 서지억제 장치의 시험 및 검사, 구성 부재와 도체의 재고정 시험을 통해 적절히 수행해야 한다.

## 4. 원전 낙뢰 현황 분석과 대응방안

원전 낙뢰고장 사건과 관련하여 1980년대 조사한 상세한 기록이 NRC Information Notice 85-86[6]의 4개 원전조사결과로 설명되어 있다. 관련 기술기준에 따라 적합하게 설계/시공하여 보수하고 적절하게 검사만 한다면 낙뢰밀도가 높은 지역이라도 충분히 보호할 수 있음을 보여주고 있다.

### 4.1 미국 원전낙뢰사건 현황 분석

최근 입수한 연구보고서에 따르면 낙뢰로 인한 직접사고를 구분하여 아래와 같이 분석하고 있다. NRC의 LER(사업자 사건 보고서)에 대한 분석결과, 1980년부터 2003년까지 전반적으로 낙뢰로 인한 사건은 감소추세를 보이고 있으며, 송전선 낙뢰로 인한 것 보다는 국부적인 낙뢰로 인한 손상으로 확인되고 있다. 1996년도 발행된 NUREG 보고서에 따르면 미국 107개 발전소 중에 60개 발전소는 낙뢰로 인한 소의전원 상실이나 원자로 정지가 한 건도 없었으나, 나머지 발전소들은 낙뢰로 인한 소의전원 상실이 빈번한 것으로 나타났다. 또 다른 일부 발전소는 원자로 정지에 취약한 것으로 보고되었다. 미국 중서부와 동부 발전소는 낙뢰 사건이 빈번하게 발생되고 있으며, 이는 지역별 특성에 따른 낙뢰발생건수에 직접 비례한다.

그러나 특이한 점은 비롯 낙뢰빈도가 심하지 않은 지역이라도 특정 조사기간 동안 한번은 낙뢰관련 사고가 일정하게 높은 수치를 보였는데, 이는 부적절한 낙뢰보

호시설에 기인한 것으로 확인된다. 특히, 계속제어계통은 신호민감도가 디지털계측기 확대로 높아져 뇌격시 거짓 신호로 인한 오동작으로 밝혀졌다.

미국의 원전발전소에서 낙뢰보호설비에 대한 엄격한 기준을 적용하였으며, 이러한 기준으로 설계된 보호계통을 설치하여 이로 인한 영향을 완화시켰다.

### 4.2 국내 원전 낙뢰사고 현황분석

KINS의 사고·고장 분석 불시정지 유형별 분류현황을 보면 아래와 같이 전기적인 결함이 차지하는 비율은 거의 10%를 상회하고 있었고, 특히 2002~2003년에는 40%를 넘는 것으로 확인할 수 있다. 78년도부터 포함시키면 송전계통 사고는 22건 정도가 기록되었고, 낙뢰가 직간접적으로 연결된 경우는 13/22건, 낙뢰가 직접적 원인인 경우는 4/13건이 있었다. 우리나라 원전은 고리1호기('78.4 상업운전), 고리2호기('83.7 상업운전), 월성1호기('83.4 상업운전)을 제외한 원전들은 NFPA-780에 의한 낙뢰보호시설을 운영하고 있을 것으로 추정한다. 다만 1980년 이전에 설계된 원전의 경우, 낙뢰보호시설에 대한 최근 설계개념이 적용되지 않았으나, 그동안 사고 내용을 검토한 결과, 송전선에서 들어오는 낙뢰고장이의 태풍으로 인한 상기 원전에 낙뢰영향이 있었을 것으로 추정한다. 따라서 상기한 원전은 낙뢰보호시설내용이 충실한 지 여부가 중점 관심사항이 될 것이다.

## 5. 결 론 : 규제입장 및 지침

낙뢰에 관한 규제기술을 낙뢰이론, 낙뢰요건, 낙뢰보호원리 및 대책, 기술기준 및 규제요건에 대하여 알아보았다. 주로 미국자료를 바탕으로 하였으나, 국내 기술기준인 KSC-IEC 61024의 낙뢰관련 기술기준도 검토하였다. 특히 국가전기용품 규격인 KSC가 IEC 61024를 승인 하였으므로 이에 대한 상세내용을 원전 시설에 그대로 적용해도 별다른 문제점이 없을 것으로 검토된다. 다만 별도의 4가지 IEEE Std 665, 666, C62.23, 1050은 접지에 대한 상세한 지침이므로 이를 접지설계시에 반영한다. 외부 낙뢰시설자체에 대한 기술은 NFPA 780-2004와 KSC-IEC 61024의 3종 문서를 그대로 설계에 반영하는 경우 별다른 문제점이 발견되지 않는다. 미국 규제 지침서와는 달리 국내에 적용할 규제지침은 국내규격 KSC를 도입하는 것이다. 보호등급 I로 원자력 시설을 규정하고 이에 따른 보호범위에 수반되는 보호등급I 즉, 회전구체반경 20m의 적용, 메시법 적용, 보호각은 보호각 25도 미만으로 적용하고, 보호대상물 높이도 20m를 제한하는것이 바람직하다. 그 외에 발전소 특유의 내부설계에 있어서는 IEEE Std 665,666, C62.23, 1050에 따라서 설계/시공/보수 지침으로 적용할 것을 권고한다.

### [참 고 문 헌]

- [1] NUREG/CR-6866, "Technical Basis for Regulatory Guidance on Lightning Protection in Nuclear Power Plants", Oak Ridge National Laboratory, ORNL/TM-2001/140. Jan. 2006
- [2] Allan Greenwood, "Electrical Transients in Power Systems". John Wiley & Sons, Inc, 제14장.
- [3] C.F. Wagner, G.D. McCan, "Lightning Phenomena", Electrical Transmission and Distribution Reference Book, by Central Station Engineers of Westinghouse Electric Corporation, 1964
- [4] NFPA780-2004, "Standard for the Installation of Lightning Protection Systems 2004 Edition"
- [5] KSC-IEC 61024-1, "건축물 등의 뇌 보호 시스템-일반원칙", "Protection of structures against lightning - Part 1: General principles"
- [6] NRC Information Notice 85-86, "Lightning strikes at NPP: Office of inspection and enforcement, NRC Nov 1985".