

피뢰보호 방식과 보호공간의 평가

글/박호석((주)세민 E&S 대표이사)
강인권(대우엔지니어링 전기기술사)
김종연((주)세민 E&S 기술과장)

1. 서 언

자연 방전현상인 직격뢰에 의하여 많은 재해가 유발되고, 고층건물, 고지대 또는 옥외 개방지역은 낙뢰의 위험도가 높아서 더욱 완전한 피뢰보호가 필요하다.

이러한 직격뢰에 대한 가장 보편적인 피뢰보호 방식으로 뇌격전류를 흡인하여 대지로 방류하는 피뢰침 설비가 다양한 연구와 더불어 개량되어 왔다.

그러나, 현재 적용되고 있는 피뢰침 설비의 보호공간(보호각) 개념은 불완전하여, 실제적인 뇌격의 양상을 고려하여 완전한 피뢰보호를 수행하도록 국제적으로 재정립 되어가고 있다.

이에, 뇌격의 특성, 피뢰 보호 방식 및 피뢰보호 공간의 평가에 대하여 전기 기하학적 견지에서 검토하며, 또한 피뢰 보호 시스템에 필요 적용되어야 하는 피뢰 보호 등급에 대하여 서술한다.

2. 뇌 방전의 종류와 발생

2.1 뇌 방전의 특성

뇌 재해를 유발하는 낙뢰는 뇌운과 대지 사이의 전기적 방전현상이며, 이의 기본적 특성인 뇌운의 형성, 뇌격의 발생 및 진행과정, 그리고 그 영향에 대해 서술한다.

뇌운의 형성

불안정하고 온난, 다습한 기류는 적란운의 생성을 촉진하며, 이 적란운은 매우 광범위하며, 수평거리는 약 10Km반경, 수직거리는 약 15Km까지 걸쳐 발생된다. 적란운의 특징적인 형상은 가끔 뼈의 단면에 비교되는데, 즉, 상하부에 평면 형태가 보이는 것이다.

적란운의 고온 변화경도(Gradient; 온도는 최상부에서 -65°C 까지 하강)는 급속한 상승기류를 생성시키며, 이는 물 입자의 전하 대전현상을 야기시킨다.

표준적인 뇌운에서 얼음결정체로 구성되어 있는 상부는 일반적으로 정(+)전하로 대전되고, 물입자로 된 하부는 부(-)전하로 대전된다. 유도작용에 의해 뇌운의 최하부는 반대극성의 전하가 생성된다.

이렇게 하여 적란운은 거대한 평면구름과 대지로 된 일종의 커패시터(Capacitor)를 구성하게 되고, 이의 중심거리는 12Km에 이르기도 한다.

지면에서 대기중의 전계는 청명한 기후시에 100V/m이지만, 대지방전시(뇌격시)에는 대전 전하의 극성이 반대로 변하고, 절대값으로 15-20kV/m에 도달한다.

뇌격의 발생

전기방전의 발달방향(상승 또는 하강)과 대전되는 전하의 극성(정극성 또는 부극성)에 의거하여 구름과 대지간 뇌격은 4종류로 구분된다. 실제로 하강 및 부극성(-)의 뇌격이 훨씬 빈번하게 발생한다. 우리나라와 같은 온도지역 및 평지에서는 이런 경우가 전체 구름과 대지간 방전의 90% 정도라고 간주된다.

낙뢰의 진행 과정

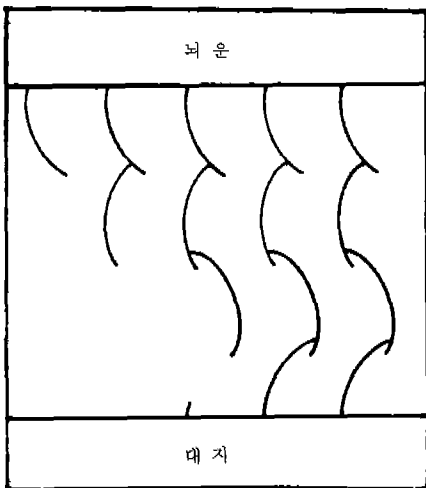
단순한 육안관찰로는 뇌격의 서로 다른 각종 형태를 구분할 수 없으며, 이의 관찰에는 고성능의 영상촬영 장치가 필요하다.

대부분의 뇌격은 다음과 같은 과정으로 진행된다(그림 1).

첫번째의 하강 리더(Leader)가 뇌운의 한지점을 출발하여 약 50,000Km/s의 속도로 약 50m 거리를 급속히 전진하고는 소멸한다.

두번째의 하강 리더가 동일 지점을 떠나서 이전 것과 동일속도, 동일경로를 따르고, 첫번째 하강 리더의 최종 도달지점을 넘어서 동일거리만큼 전진하여 차례로 소멸한다.

이 과정은 최종 하강 리더의 선구가 대지로부터 수십m 또는 수m의 지점에 도착될 때까지 반복된다.



<그림 1> 뇌격형성의 각종 형태

그런 후에 상승 리더(Leader)와의 접촉이 이루어지고, 대지로부터 뇌운을 향한 회귀성 뇌격이 발생된다. 이것이 주 방전이며 주 방전에 의해 이온화된 채널(Channel)을 통해 파괴되지 않고 통과하는 2차 전하군이 뒤따르게 된다.

평균적인 부극성(-)의 뇌격에서 최대전류는 25,000A에 근접한다.

뇌 방전의 영향

먼저 유체매질(대기)속으로 전파하고 이어서 대지와 도전되어 있는 고체매질 속으로 전파하는 고강도의 충격파(Impulse)전류의 영향, 즉 뇌 방전의 영향은 다음과 같다.

- 가시적 영향(섬광) : Townsend Avalanche 메카니즘에 기인한다.
- 청각 영향 : 방전 채널에서 압력 상승에 의해 생성되는 고압파(Shock wave)의 전파에 기인하며, 이 효과의 지각(인식)은 약 10km로 제한된다.
- 열적 영향 : 줄(Joule)효과에 의해 생성된 열에 기인한다.
- 열 역학적 영향 : 다른 도체에 의해 생성된 자장에 놓여진 도체에 적용되는 기계적인 힘이다.
- 전기 화학적 영향 : 상대적으로 미세한 효과이며, 파라데이 법칙(Faraday's Law)의 적용에 의한 전기 분해작용에 의해 나타나는 효과이다.
- 유도 영향 : 다양한 전자계 속에서 모든 도체는 유도전류의 장이 되는 것에 기인한다.
- 생명체에의 영향 : 어떤 강도의 순시전류의(인간 또는 동물) 통과는 심장박동 정지 또는 호흡정지에 의한 감전사의 위험을 초래하기에 충분하다. 이외에도 화상의 위험이 있다.

2.2 뇌 방전의 종류

뇌 방전은 뇌운과 대지간의 최초 리더(Leader)

〈표 1〉 뇌 방전의 정수(Parameter)

부(-)극성의 하강 방전

발생확률 P(%)	전류과고치 I(kA)	전하량 Q(C)	전 방전시간 t(S)	방전 횟수 n
50	26	9	0.09	1.8
10	73	69	0.56	5
1	180	330	2.7	12

의 방향과 극성에 의해서 분류된다.

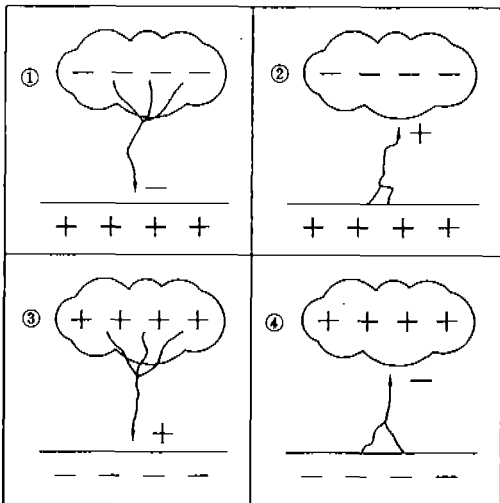
부(-)극성의 하강 리더는 전체 뇌 방전의 약 90% 이고, 정(+)극성의 방전은 산악지대에서 자주 발생한다(그림 2).

뇌 방전은 각종 전류의 조합으로 구성되고, 크기는 시간과 더불어 변화한다.

많은 관측결과를 집약해 보면, 뇌 방전의 발생 확률에 의거 표 1과 같이 요약된다. 평균적인 뇌 방전은 파고치가 약 25kA, 입상시간 2μs, 전하량 10C이다.

2. 3 뇌 방전의 메카니즘

뇌운과 대지간 방전의 제1단계는 구름으로부터 대지로 향한 약 100m의 계단(Step)형으로 전파되는 계단형 선구(Stepped Leader)이다. 계속되는 2개의 계단(Step)의 사이에 10~100μs의 휴지시간이 있고 분기형태가 발생한다.



① 부(-)극성의 하강 방전 ② 정(+)극성의 상승 방전
③ 정(+)극성의 하강 방전 ④ 부(-)극성의 상승 방전

〈그림 2〉 뇌 방전의 형태

리더(Leader), 채널(Channel)의 선단이 대지에 접근하게 되면 일반적으로 대지의 돌출부분(수목, 피뢰침 등)으로부터 상승 리더가 발생하고, 하강 리더가 상승 리더의 하나에 도달하게 되면, 구름과 대지간에 전리된 채널이 가능하게 된다. 이것이 대전류를 흘리는 단락통로가 된다. 여기서 우리는 대지와 구름과의 사이에 귀환뇌격이라 부르는 강렬한 뇌섬광을 볼 수가 있다. 뇌 방전은 일반적으로 동일한 채널을 통한 수회의 귀환뇌격에 의거하여 발생한다.

전체 뇌 방전은 0.2~1초간이고, 평균 1회의 귀환뇌격이 계속 발생한다(그림 3).

3. 피뢰 보호방식

낙뢰에 의한 대표적인 사고 및 보호대책은 다음의 두가지로 대별될 수 있다.

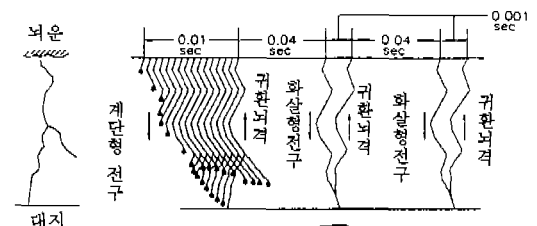
첫째는 뇌격이 주택, 건물 또는 특정한 지역을 강타했을 때 직격뢰에 의해 야기되는 사고의 경우 막대한 피해가 생긴다.

이런 위험에 대한 보호는 피뢰 돌침방식과 케이지(Meshed Cage) 방식에 의해 가능하다.

일반적으로는 직격뢰에 대해 구조물을 보호하기 위하여 특별한 뇌격 흡인용 돌침이 설치되며, 이는 구조물의 나머지 부분을 보호하고 뇌격 통로의 임피던스(Impedance)를 최소화 하면서 대지로 뇌격전류를 방류하는 것이다.

특히 낙뢰위험이 큰 장소에서는 매설 가공지선(Strained Wire)방식이 고려될 수 있다.

두번째는 전력 케이블 또는 정보 전송망 등에 낙뢰했을 때와 같이 간접적으로 야기되는 사고시



○ 전구 : 전단선구
○ 정지 카메라 영상 ○ 보이즈 카메라(Boys Camera)에 의한 분석 영상

〈그림 3〉 보이즈 카메라에 의한 하강 뇌 방전의 시간적 과정

에 이의 영향을 받기 쉬운 장비는 생성된 서지 전압과 유도전류에 대해 보호되도록 해야한다.

상기중에서 직격뢰에 대한 피뢰대책으로 가장 보편적인 피뢰 돌침방식과 완전보호용 케이지 방식의 구성에 대해 서술한다.

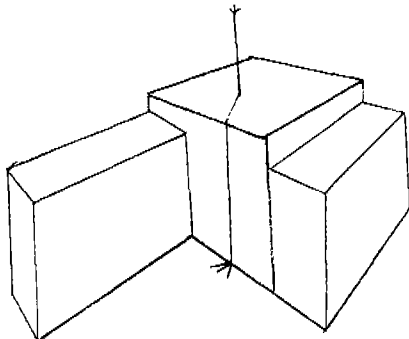
3. 1 피뢰 돌침방식

피뢰 돌침방식에서 돌출된 외형의 피뢰돌침은 상승 스트리머(Streamers)의 생성을 촉진하며, 따라서 돌침선단은 주변에서 발생하는 뇌격의 뇌격지점으로 된다.

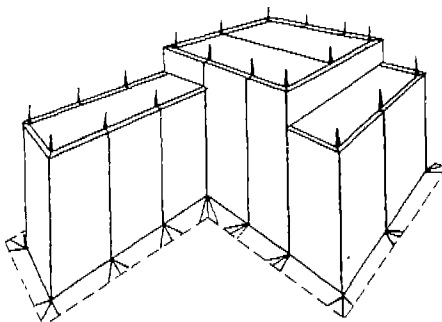
돌침형 피뢰설비는 돌침형 피뢰도체, 인하도록, 접지저항 측정함 및 접지봉 등으로 구성된다(그림 4).

3. 2 케이지방식

케이지(Meshed Cage)는 도체망에 의해 뇌격전류의 배분 및 대지로의 전도를 유효하게 한 것으로 돌침, 수평도체, 인하도록 및 접지봉 등으로 구성된다(그림 5).



<그림 4> 피뢰 돌침방식에 의한 건물의 보호



<그림 5> 케이지방식에 의한 건물의 보호

4. 피뢰보호 공간의 평가

4. 1 전기 기하학적 모델의 적용

전기 기하학적 모델과 회전 구체법(Rolling Sphere Method)은 피뢰설비를 설계하는 데 사용되는 간단하고 편리한 방법이다(그림 6).

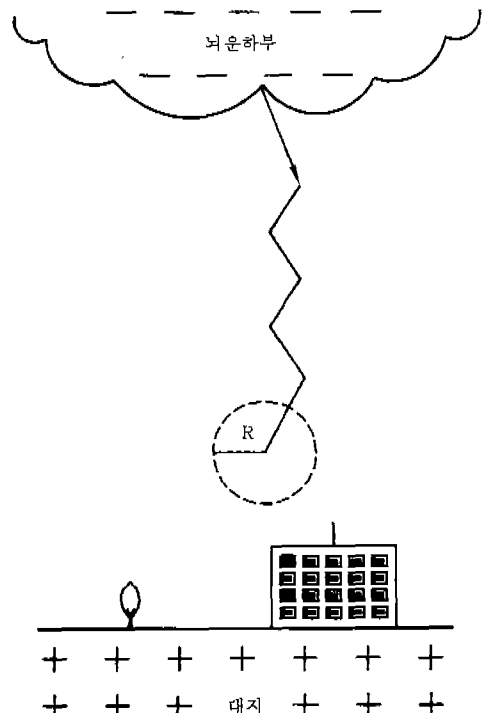
대지로부터 하강 리더를 향해서 발생하는 상승 리더의 거리가 뇌격거리 R이다. 이 거리는 뇌전류의 크기에 의해서 결정되고 개략 100m 정도이다.

전기 기하학적 모델에 의하면, 뇌격지점은 가상 대상물이 평탄한 대지로 되어 있어도 하강 리더로부터의 거리 R내의 제1물체로 결정된다. 따라서, 하강 리더의 선단은 반경 R인 구체의 중심이 되고, 이 구체는 하강 리더와 더불어 어느 궤도를 따라서 하강하고 대지에 접근하는 것으로 생각된다. 구체가 최초에 도달하는 점이 뇌격지점이 된다.

이 전기 기하학적 모델 및 가상구체법의 적용에 의한 피뢰보호 공간 및 적용시 주의사항에 대해 서술한다.

돌침에 의한 보호공간

회전 구체법의 적용에서는 가상구체를 대지 또



<그림 6> 뇌격의 가상 구체도

는 돌출물에 근접시켜서 전 방향으로 회전하도록 상정한다.

이 회전 구체법에 의거하여 그림 7 및 그림 8의 사선부분이 보호공간으로 결정되고, 이 공간은 직격뢰를 받지 않는다. 더욱, 이 회전구체가 보호장치(피뢰침, MeshedCage 등)에 접촉하고 전체 보호물체에 접촉하지 않으면, 이 보호장치는 뇌격에 대해서 유효한 것이다.

반대로 접촉할 경우에는 전체 보호물체에 회전구체가 접촉하지 않도록 보호장치를 변경하여 설치해야 한다.

뇌격에 대한 보호를 하기 위해서는 전체 보호물체를 이 보호 공간내에 들어가게 하거나 더욱 여러개의 피뢰침을 사용하는 경우에는 각각의 보호공간의 합성공간내에 들어가게 해야 한다.

보호 콘(Cone)

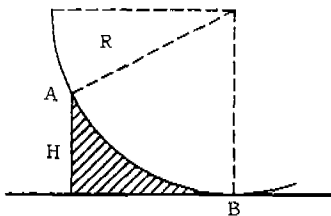
가상구체를 수직돌침의 주변으로 회전시킬 경우에 뇌격으로부터 보호되는 공간이 한정되어 진다. 이 보호공간이 보호 콘(Cone)이 되고 여러본의 돌침의 경우에는 각각의 보호 콘의 합성이 된다.

전기 기하학적 모델의 적용 주의사항

가상구체법 적용시에는 뇌격을 흡인하기 쉬운 물체의 형상, 사용재료(도체 또는 절연체), 주변의 환경조건(습도, 바람, Ion화 등), 지상 구조물의 높이 등 각종 요인을 고려해야 한다.

4. 2 보호 공간의 평가

최근 피뢰침 보호범위의 평가에 회전 구체법



<그림 7> 회전구체법에 의한 보호 공간

(Rolling Sphere Method)이 적용되는 추세이며, 국제적 표준인 NFPA 78, IEC/TC 81 및 BS 6651에 이의 적용이 명시되어 있다.

즉, 피뢰침의 높이에 관계없이 일률적인 보호각을 적용하는 것은 합당하지 않으며 피뢰보호 등급, 회전구체의 반경 및 피뢰침의 높이에 의거하여 피뢰침의 피뢰보호 범위를 평가, 설정하는 것이다.

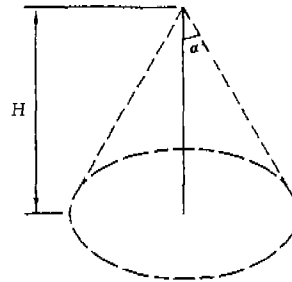
피뢰보호 공간 평가에의 이해를 돕기 위해 참고로 유럽 표준의 피뢰보호 공간의 평가(안)을 기술한다.

○ 피뢰방식별 피뢰보호 공간

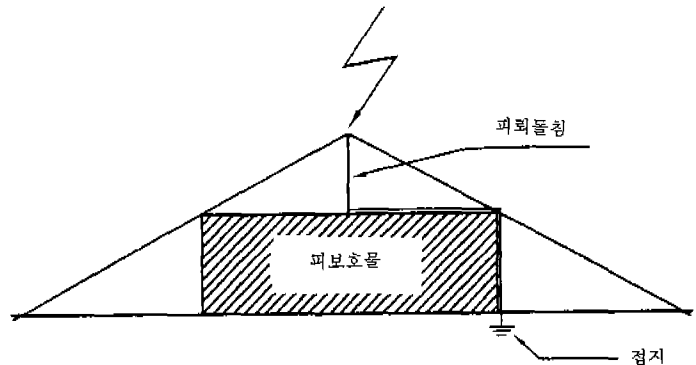
1) 피뢰방식별 피뢰보호 공간

① 수직돌침 방식에 의한 보호공간

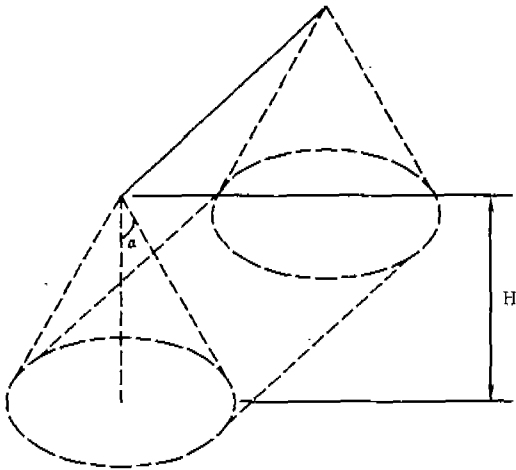
수직돌침에 의한 보호영역은 피뢰축상의 정점을 기준으로 보호 등급과 피뢰방식의 높이에 따른 정점반각 α 를 가지는 정원뿔 형태를 가지는 것으로



<그림 9> 수직돌침 피뢰방식에 의한 보호 공간



<그림 8> 피뢰돌침에 의한 보호 공간



<그림 10> 가공지선 피뢰보호 설비에 의한 보호 공간 정의된다.

보호공간의 예는 그림 9에 주어저 있다.

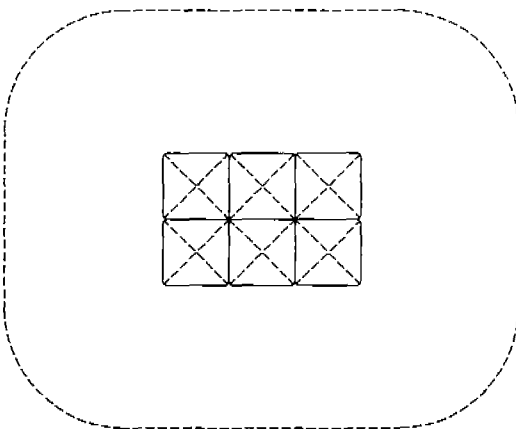
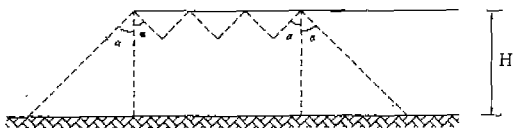
② 가공지선 방식에 의한 보호 공간

지선에 의해 보호되는 공간은 지선상에 정점을 가지는 가상의 수직돌침에 의해 보호되는 공간의 성분에 의해 정의된다.

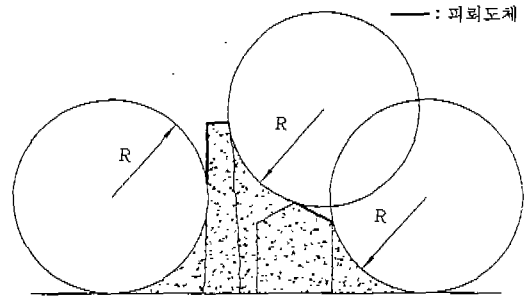
보호공간의 예가 그림 10에 주어저 있다.

③ 메쉬 방식에 의한 보호 공간

메쉬에 의한 보호 공간은 메쉬를 구성하는 단일



<그림 11> 메쉬 피뢰보호 설비에 의한 보호공간



<그림 12> 회전구체법에 의한 피뢰보호 방식의 설계 (피뢰도체는 회전구체와 접촉하게되는 모든 지점과 부분에 설치된다. 회전구체 반경은 선정된 보호등급에 일치해야 한다)

도체에 의해 결정된 보호 공간의 조합에 의해 정의된다.

메쉬에 의한 보호 공간의 예가 그림 11에 주어저 있다.

2) 회전구체법에 의한 피뢰보호 공간

이 방식 적용에서는 피뢰보호 영역의 어느 지점도 보호 등급에 따라 반경(R)을 가지는 회전구체를 모든 가능한 방향으로 지표면, 주변 및 구조물 상부에서 회전시켰을 때 접촉하지 않게 되는 영역이 보호공간으로 정의된다.

이 경우에 회전구체는 지표면 또는 피뢰설비만을 접촉하게 될 것이다(그림 12).

5. 피뢰보호 등급의 선정

5.1 보호 등급의 구분

요구되는 피뢰보호 설비의 특성은 피뢰보호 구조물의 특성과 수행되는 보호 등급에 의거한다.

유럽 표준에서는 서로 다른 4개의 보호 등급이 고려되며, 피뢰보호 설비의 효율은 보호 등급 I로부터 보호 등급 IV로 감소한다.

적합한 보호 등급을 위해 위험도 평가 기준에서 선정되어야 한다.

피뢰보호 등급별 제특성은 다음에 보인다.

- 보호 등급과 효율 사이의 관계; 표 2
- 보호 등급별 인하도록 사이의 표준거리; 표 3
- 보호 등급별 뇌격특성; 표 4

<표 2> 보호 등급과 효율 사이의 관계

보호 등급(P)	효율(E)
I	0.98
II	0.95
III	0.90
IV	0.80

<표 4> 보호 등급별 뇌격특성

뇌격정수	부호	단위	보호 등급		
			I	II	III-IV
최대전류	I	kA	200	150	100
총 전하	Q _{total}	C	300	225	150
임펄스 전하	Q _{impulse}	C	100	75	50
고유 에너지	SE	kJ/Ω	10000	5600	2500
평균 급증도	di/dt	kA/μs	200	150	100

○ 보호 등급별 회전구체 반경 및 보호각; 표 5

5. 2 보호 등급의 선정

1) 일반

적정 보호 등급 선정의 목적은 구조물에 대한 직격뢰에 대한 피해위험을 최대 허용등급 이하로 감소시키는 데에 있다.

피뢰보호 방식의 적정보호 등급 선정은 피뢰호 구조물에 대한 직격뢰의 예상빈도 및 연간허용 낙뢰빈도에 기초한다.

2) 뇌격 대지 밀도

연간 km²당 대지 뇌격으로 표시되는 뇌격대지 밀도는 뇌격 위치 망(Network)을 통한 측정에 의해 결정되어야 한다.

3) 구조물에 대한 직격뢰의 예상빈도

구조물에 대한 직격뢰의 연평균 예상빈도는 뇌격 대지밀도, 고립구조물의 등가집합 영역, 환경계수의 곱으로 정의된다.

이때 구조물의 등가집합 영역은 구조물과 같은 연간 직격뢰 빈도를 갖는 지표면 면적으로 정의된다.

4) 구조물에 대한 허용 낙뢰 빈도

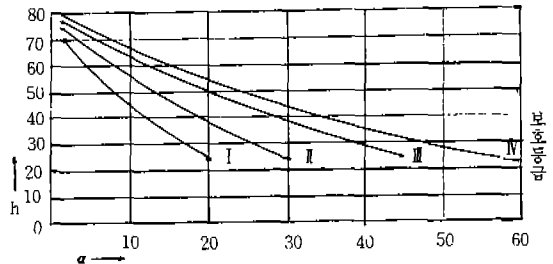
구조물에 대한 허용 낙뢰빈도 값은 인간적, 문화적, 사회적 손실이 포함되어 있는 국제위원회의

<표 3> 보호 등급별 인하도록 사이의 표준거리

보호등급(P)	표준거리(m)
I	10
II	15
III	20
IV	25

<표 5> 보호 등급별 회전구체 반경 및 보호각

보호 등급	보호 방식		
	회전구체 반경 R (m)	메쉬 크기 M (m)	보호각 α (°)
I	20	5×5	아래그림 참조
II	30	10×10	
III	45	15×15	
IV	60	20×20	



주 : 1. 점(·)표시 값 이상에서는 적용불가
2. h는 피뢰호 지역위 피뢰점의 높이

책임사항이다.

구조물에 대한 허용 낙뢰빈도 값은 손실이 사유 재산에만 관련되는 곳에서는 구조물의 소유자나 피뢰설비의 설계자에 의해 수립될 수 있다.

구조물에 대한 허용 낙뢰빈도 값은 다음과 같은 적합한 요소를 고려한 피해위험 분석을 통해 추정될 수 있다.

- 구조형태
- 가연성 및 폭발성 물질의 존재
- 낙뢰수반 효과를 감소시키기 위해 구비된 방책
- 피해에 관련되는 사람의 수
- 관련 공공 서비스의 형태 및 중요도
- 피해받은 물질의 가치
- 기타요소(표 6)

단 : 지역별 규정이 특별한 방법으로 구조물에 대한 허용 낙뢰 빈도값을 부과할 수도 있다.

5) 피뢰방식 선정 절차

구조물에 대한 허용 낙뢰 빈도값은 구조물에 대

<표 6> 뇌격의 중요 영향

구조물의 종류	구조물의 형태	뇌격의 영향
일반구조물 (주 참조)	주거 건물	전기설비의 파손, 화재 및 자재 파손 파손은 일반적으로, 뇌격지점 또는 뇌격동로에 노출된 물체에 한정된다
	농장	화재의 일차적 위험과 위험한 보폭전압 전력 공급중단에 의한 이차적 위험, 그리고 환기와 식량공급 설비등의 전자제어의 고장에 기인한 생필품에 대한 생활 위해
	극장, 학교 백화점, 상점 스포츠 지역	혼란상태를 야기할 수 있는 전기시설(예, 전기조명)의 파손 소화장비 가동을 지연시키는 결과를 야기하는 화재탐지 설비 고장
	은행 보험회사 상업회사 등	상기의 영향외에 통신불능, 컴퓨터의 고장 및 자료망실
	병원 간호사 숙소 교도소	상기의 영향외에 집중적 보살핌이 필요한 사람의 문제, 거동이 불편한 사람들의 구출난이 등
	산업시설	공장 내부 시설에 사소한 것으로 부터 심각한 파손까지 있으며 생산손실 등
	박물관 및 유적지	문화유산의 대체 불가능한 손실.

주 : 민감한 전자장비가 여러종류의 구조물 내에 설치될 수 있으며 이것은 뇌격에 의한 과전압에 의해 쉽게 파손될 수 있다

한 실제 낙뢰 빈도값(구조물에 대한 직격뢰의 연평균 예상빈도)와 비교된다.

이 비교는 피뢰방식이 필요한지, 필요하다면 어떤 방식인지를 결정짓게 한다.

만약 구조물에 대한 직격뢰의 연평균 예상빈도 값보다 구조물에 대한 허용 낙뢰 빈도값이 크면 피뢰보호 방식은 필요하지 않다.

만약 구조물에 대한 허용 낙뢰 빈도값보다 구조물에 대한 직격뢰의 연평균 예상 빈도값이 크면, $E \geq 1$ -(구조물에 대한 허용 낙뢰빈도/구조물에 대한 직격뢰의 연평균 예상빈도) 효율의 피뢰방식이 설치되어야 하고, 적절한 보호 등급이 표 2에 의거하여 선정되어야 한다.

E값 계산 후, 보호 등급은 다음으로부터 유추된다.

$E > 0.98$	Level I + 추가보호방책
$0.95 < E \leq 0.98$	Level I
$0.90 < E \leq 0.95$	Level II
$0.80 < E \leq 0.90$	Level III
$0 < E \leq 0.80$	Level IV
$E \leq 0$	보호불필요

피뢰보호 설비설계는 선정된 보호 등급의 표준에 주어진 요구조건을 만족시켜야 한다.

만약, E보다 낮은 E' 효율의 피뢰방식이 설치되면 추가보호 방책이 제공되어야 한다.

추가보호 방책은 다음 예와 같다.

- 접촉 및 보폭 전압 제한 방책
 - 화염전파 제한 방책
 - 민감한 장비에서의 뇌 유도 과전압 효과를 완화시키는 방책
- 피뢰보호 방식의 요구효율 E의 최저 제한값은 구조물에 대한 직격뢰 빈도 및 허용 낙뢰빈도의 함수로 된다.

6. 결 어

이상 서술된 바와 같이 현재 적용되고 있는 피뢰침의 보호공간 개념은 뇌격 및 낙뢰의 특성 면에서 회전구체법이 적용되어 수정, 보완되어야 함이 자명하다.

즉, 일률적인 피뢰침의 보호각(60°, 45° 등)이 아닌 뇌격의 특성 및 피뢰침의 설치높이에 의거한 보호공간 개념이 적용되어야 완벽한 피뢰보호 수행이 가능 한 것이다.

피뢰침에 의한 완벽한 피뢰보호를 수행하기 위해서는 기존의 피뢰보호 공간의 개념에서 벗어나 피뢰 보호 등급이 적용되고 회전구체법이 적용된 피뢰보호 공간 개념(보호각)이 적용되어야 하며, 피뢰침 설비 및 관련 표준 또한 이 기초하에서 연구, 수정 및 보완되어야 할 것이다.