

낙뢰특성에 대한 기술동향과 LPATS 데이터에 의한 한반도 낙뢰현황

우정욱 · 심용보 <한전 전력연구원>

1 서 론

낙뢰의 발생 메카니즘을 알기 위해서뿐만 아니라, 기상예보, 전력회사의 설비보호, 일반인의 안전 등을 목적으로 전 세계에서는 다양한 방법의 낙뢰 관측, 예보 등이 이루어지고 있다.

이 논문에서는 낙뢰측정을 시도하고 있는 각 설비의 개괄적인 현황을 설명하고, 한국전력거래소 및 한전에서 운용중인 LPATS(낙뢰위치 표정시스템)에 의해 얻어진 7년간의 낙뢰발생 현황에 대해 기술하고자 한다.

2 본 론

2.1 뇌격측정 방식의 종류

2.1.1 뇌격전류 직접 측정 장치

낙뢰의 발생 현상 파악을 위한 노력 중에서 뇌격의 전기적인 크기 및 파형을 직접적으로 측정하기 위한 시도가 이루어지고 있다. 특히 전력회사를 중심으로 연구기관에서는 송전선로와 인공구조물을 관측지점으로 정해 계절마다 뇌격전류의 제특성(파고치, 극성, 파형, 지속시간, 다중도 등)을 측정하여 절연설계 시 자료로 활용하고, 기타 간접측정 방식에 의한 낙뢰 관측설비의 기본 자료로 사용하고 있다.

뇌격전류는 내뢰설계에 있어 가장 중요한 요소이지만, 수 kA~수백 kA의 크기, 크기·지속시간이 광범위하고, 발생시간이 정해져 있지 않기 때문에 직접적인 계측은 그만큼 어려움을 가지고 있다. 그 종류는 아래와 같은 것들이 있다. 가장 활발한 연구를 하고 있는 기관으로는 미국의 플로리다 대학과 일본의 전력중앙연구소 등을 들 수 있다.

▷ 뇌격전류파형 측정장치

자강편, Shunt Resister 방식, Rogowski Coil 방식, 고주파 CT 방식, Teinograph 방식, surge memory 방식

Shunt Resister나 Rogowski Coil 방식에 의해 관측되는 전류는 E/O와 O/E 변환기를 통하여 transient record 등의 기록장치에 기록된다. 측정계는 전원으로부터의 노이즈 침입을 방지하기 위해, 절연변압기 및 MG(모터-발전기)에 의해 상용전원으로부터 분리하여 사용한다.

이와 달리 낙뢰빈도가 많은 지역에 자강편이라 불리는 금속편을 철탍각 등에 붙여서, 철탍각에 흐르는 전류에 의한 자계에 의해 자강편이 자화되는 양을 뇌격전류를 추정하는 고전적인 방법이 있다. 자강편에 의한 전류측정은 간단, 많은 데이터 확보가능하나, 뇌격전류의 파라미터의 파고치밖에 구할 수 없고, 자강

편을 회수하기 전에 역극성의 뇌격이 있으면 자장편이 감쇄하는 단점이 있다.

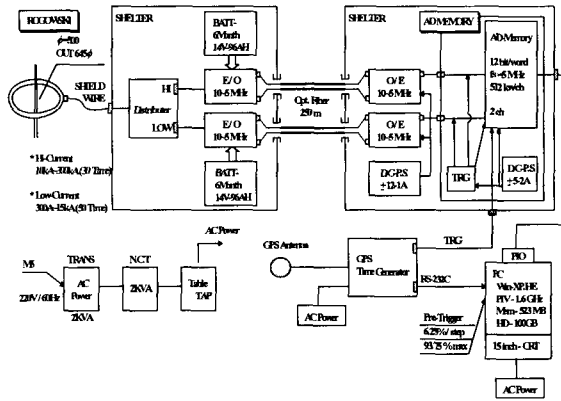


그림 1. Rogowski Coil을 이용한 뇌격전류 측정시스템의 예 (전력연구원)

2.1.2 낙뢰빈도 측정장치

지역별 뇌방전 빈도를 뇌격전류, 극성 등을 매개변수로 하여 측정하여 기상자료나 송변전의 절연설계시 자료로 활용하기 위한 설비가 다수 고안되어 있다. 국내에는 현재 한국전력거래소에서 운용중인 LPATS와 기상청의 IMPACT/LDAR가 운용중이다.

▷ 뇌방전 계수기

▷ 뇌격위치 표정장치(LLS, LPATS, IMPACT/LDAR)

	LLP system	LPATS	SAFIR	LDAR
Measured field	Electromagnetic field	Electric field	Electric field	
Frequency	VLF-MF 1-300kHz	VLF-MF 2-500kHz	VHF-UHF VLF-MF(EA)	VHF 45-200MHz
Antenna	Parallel Perpendicular loop	Whip	Dipole	
Location	DF+TOA	TOA	DF	TOA
Waveform discrimination	Comparison of waveform parameters	Comparison of waveform parameters	Comparison of waveform parameters (EA)	

낙뢰위치를 표정하기 위해서는 귀환뇌격에서 흐르는 대전류에 의해 발생하는 장파대 부근(10(kHz)~300(kHz))의 전자계가 이용되고 있으며, 표정정도는 수 km 이하이다. 일반적으로 말하는 포착율은 하계는 80% 이상, 동계는 60% 이상이 된다고 한다. 이 데이터를 이용하여 각 국에서는 낙뢰빈도 지도를 작성하고 있다.

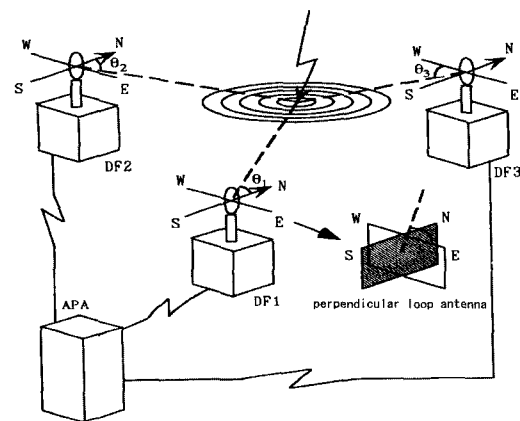


그림 2. LLP 시스템

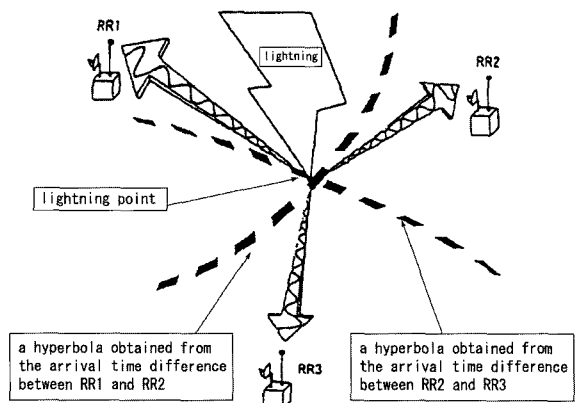


그림 3. 도달시간차 방식

LLP 시스템과 LPATS system은 1993년에 각 시스템의 개발회사가 동일그룹이 되어 양사간 경쟁은

종료되었으나 최근에도 인수 합병 과정이 거듭되고 있다. 미국에서는 양 시스템을 합친 낙뢰위치표정의 전미 네트워크가 완성되었으며, LLP 시스템의 최신형은 종래의 LLP 시스템에 도달시간차법을 조합하여 고정도의 표정이 가능하게 되었다.

LLP 시스템은 귀환뇌격전류에 의한 전계를 2조의 루프 안테나에 의해 계측하고, 그 신호강도로부터 교회법에 의해 전자파원 표정한다. 주변설비로 수신국(DF : Direction Finder), 중앙처리장치 등을 가지고, 전자계 파형을 각종의 조건에 의해 판정하고, 대지뇌격으로부터 신호의 정도를 표정에 이용한다. 미국에서의 하계뇌의 데이터를 기초로 제작되었으며, DF의 설치장소에 따라 근접구조물의 영향으로 site error(방위오차) 발생하며, 10도 이상의 오차도 있지만, 통계적인 보정 등에 의해 수도 이하로 억제하였으며, 통계적인 데이터로서는 충분히 의미가 있지만, 개개의 뇌격전류에 대해서는 반드시 정도가 높은 측정치라고 말하는 것은 불가능하다.

LPATS은 도달시간차로부터 전자파원을 표정하며, 수신국(RR : Remote Receiver), 중앙처리장치 등으로 구성되어, site error는 원리적으로 LPATS에서는 존재하지 않지만, 수신강도가 설치조건에 영향을 받기 쉽고, 신호강도의 절대치를 바르게 측정하기 위해 수신국의 감도교정 필요하다.

2.1.3 뇌격 촬영장치 (방전로의 광학적 관측)

낙뢰의 발생 경로를 확인하고 그 발생 메카니즘을 연구하기 위하여 진전경로를 자동 관측하는 시스템들이 개발되어져 있다. 고구조물을 대상으로 뇌격의 침입경로를 무인으로 자동촬영, 뇌격지점과 뇌격의 침입양상, 상향 하향뇌의 구분, 뇌격지점, 뇌격거리, 진전속도 등을 관측함을 주목적으로 하며, 특히 전력회사에서 송배전선로의 내뢰성 향상자료로 활용하고 있다.

▷ 뇌격의 정지화상 촬영장치

광량적분방식 카메라, 다중뇌방식 카메라, TV 진상방식 카메라, 간이형 Streak 방식 카메라, 액정 셔터 카메라

▷ 뇌격진전 속도 촬영장치

Boys 카메라, Image Converter 방식 카메라, 포토다이오드나 CCD 소자를 이용한 관측장치(예: 자동뇌방전진전속도 측정장치)



그림 4. 상향뇌의 정지사진 (예)

광학관측의 한 예로 일본 전력중앙연구소에서는 포토 다이오드를 2차원적으로 배치하여 뇌방전의 진전양상을 2차원적으로 관측하는 전자동형 뇌방전 진전양상 관측장치(ALPS : Automatic Lightning Discharge Progressing Feature Observation System)를 개발하여 운용중에 있다. single lens reflect camera에 의해 뇌방전 수광하고, 카메라의 집점면에 종40열, 횡40열의 1600개 광 케이블 단면 설치하였다. 파이버에 입력된 광은 Pin형 포토다이오드로 전기적신호로 변환, 증폭, 대수 압축시켜진 후에 16단계의 레벨로 나뉘어져 기록된다.

ALPS의 운용결과 동계뇌의 특징인 상향진전방전의 진전상황이 명확히 포착 가능하였으며, ALPS와 뇌격전류와의 동시관측을 통하여 뇌격전류에 포함되

어 있는 전류 펄스와 방전진전과의 관계, 뇌격전류의 순시치와 방전로의 발광강도와의 관계등 뇌방전현상의 해명에 유용한 데이터들을 획득하고 있다.

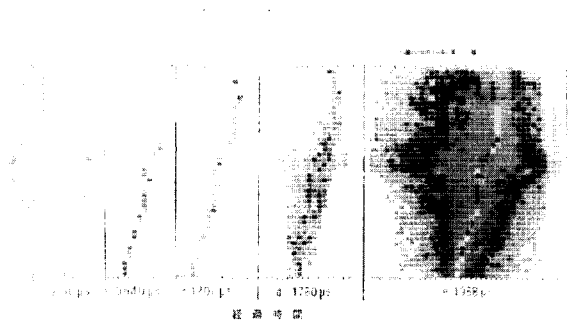


그림 5. ALPS에 의한 뇌관측 결과(전력중앙연구소)

2.1.4 전자계측 장치 : 뇌의 발생 및 이동상황 관측

높은 구조물을 관측지점으로 선정하여 그 주변에서 뇌운의 형성에 따르는 지상전계와 그 변동상황, 그리고 뇌방전시의 지상전계와의 변화를 관측하여 뇌운의 발생, 성장, 소멸에 이르는 전 과정을 낙뢰발생 시간과 대응시켜 관측하기 위한 장치이다.

▷ 전자계측 장치

Flat Plate 안테나 방식(고속 전계측정), Loop 안테나 방식(고속 전계측정), 첨단코로나 전류계(정전계 측정), Field Mill(저속 전계측정), D&B 방식(고속 전자계측정)

Field mill은 정전계를 측정하는 장치의 통칭으로, 정전계중에 전극(감응 전극)을 설치하여 전극표면에 전하가 유도되는 것을 이용한다. 다른 금속판을 이 전극상에 회전시켜 주기적인 전계 차폐를 시킨다. 유도 전하의 변화로 전계의 측정이 가능하게 된다. 따라서, 시간분해능은 차폐전극의 회전수와 분할수로 결정되며, 감응전극을 회전시켜서 전계를 관측할 수도 있다.

2.1.5 뇌써어지 전압측정

낙뢰후 뇌써어지의 전파특성 파악하고, 뇌 피해 유무를 확인하고 뇌격전류 제특성과 대응시켜 측정결과를 비교 해석하기 위한 목적으로 다음과 같은 설비들이 있다.

▷ 애자간 전압측정장치

콘덴서 분압방식, 광 PT 방식

▷ 유도뢰전압 측정장치

임펄스 분압기

2.1.6 음 측정(뇌 소리의 관측)

천둥이란 뇌방전로에 대전류가 흐름에 따라 급격한 발열에 의해 공기가 팽창할 때 내는 음으로서, 이를 관측하는 것은 메커니즘의 해명 이외에도 뇌방전로의 추정에 이용되고 있다.

수 m의 간격으로 설치된 3대 이상의 마이크로폰에서 천둥을 측정하여 각 마이크로폰에 도달한 신호의 시간차로부터 음원의 위치를 추정하는 방식을 사용하며, 방전로로부터 직각방향에서 가장 강한 음파가 지배적인 영향을 미치며, 위치의 오차는 바람 및 상관해석의 정밀도로 결정되며, 기상조건에 의해 광학적인 관측이 어려운 경우에도 뇌방전로의 추정이 가능하다.

2.1.7 뇌운 측정 (레이더에 의한 관측)

기상레이더에 의한 뇌운 관측이 기상청, 대학, 전력회사 등에서 이루어지고 있다. 이용 주파수는 마이크로파대(3~30[GHz], 파장 1~10[cm])이며, 운내의 우적, 싸라기눈, 우박 등에 의해 산란되어, 반사되는 것을 관측한다. 레이더 반사의 크기는 입자반경의 6승과 그 총량에 비례하여, 강수정도의 추정이 가능하다. 전력회사에서는 운정고도, 운중의 강수입자량 등을 판단하여 발뇌 조건을 결정하여, 각사의 계통 운용 부문, 설비보수 담당개소에 제공하고 있다.

- ▲ 도플러 레이더나 2중 편파 레이더 등의 고성능 레이더 뇌관측에 이용
- ▲ 우적이 빔방향으로 속도성분을 가질 경우 :
→ 도플러 효과에 의해 반사되어 마이크로파 주파수에 도플러 천이
- ▲ 도플러 레이더 :
→ 도플러 천이를 이용, 강우 입자의 속도로부터 구름내의 바람장 측정
- ▲ 속도의 3차원 성분의 측정에는 3대의 도플러 레이더가 필요
- ▲ 질량 연속식을 사용 : 2대의 도플러 레이더에서 3차원의 바람장 추정
- ▲ 2중 편파 레이더 : 레이더 반사강도, 수평편파와 수직편파의 강수입자 산란강도 비 → 강수입자의 형상을 추정

2.2 한반도 낙뢰발생 현황

2.2.1 지역별, 월별 낙뢰빈도 분석

현재 운용중인 LPATS에 저장되고 있는 낙뢰자료(*.1, *.LGT)를 사용하여, 1996년부터 2002년까지의 7년간의 낙뢰데이터를 분석하였다. 설정 영역은 위도 33~39°, 경도 124~131° 범위 내에서 분석하였으며, 이 범위는 한반도의 남한 전역을 포함하고, 한반도 주변 해안을 포함한다. 낙뢰의 정의에서는 10 [km] 이내, 500[msec] 이내의 낙뢰는 동일낙뢰의 다중낙뢰로 정의하였다.

아래 그림 6은 1996년부터 2002년까지의 낙뢰자료를 분석한 결과로, 1998년도의 낙뢰수가 가장 많은 낙뢰수를 보여주고 있으며, 작년인 2001년도의 경우는 두 번째로 많은 낙뢰수를 기록하고 있었으며, 연도별로 심한 편차를 보여 주고 있다. 이로 보아 절연설계에 직접적으로 이용하기 위한 데이터로써는 아직 더 많은 양, 즉 오랜 기간의 낙뢰 데이터 축적이 필요하다.

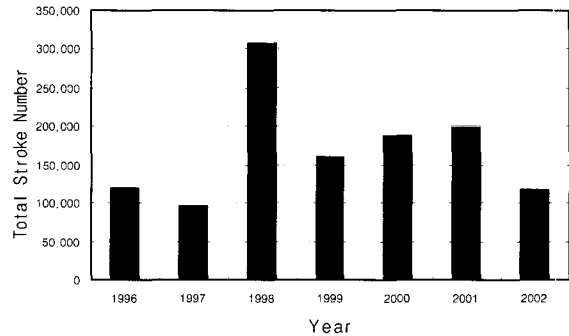


그림 6. 전체 발생낙뢰수의 변화

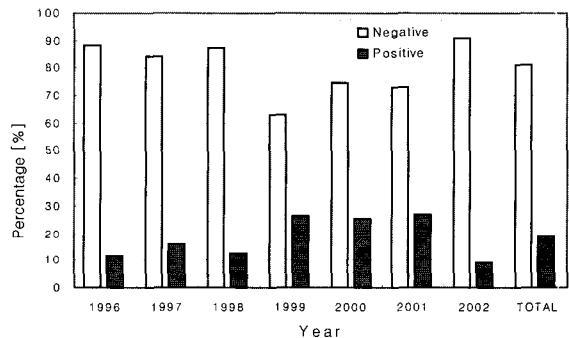


그림 7. 발생낙뢰의 극성분포

그림 7은 각 연도별 발생낙뢰의 극성비율을 보여주고 있는 그래프로써 부정극성의 비율이 약 80%, 정극성이 약 20% 정도를 기록하고 있다. 1999년부터 3년간 정극성의 비율이 점차 높아지다가 2002년에는 다시 감소되는 경향을 보인다.

그림 8은 발생낙뢰의 다중도를 분석한 결과로, 대부분의 낙뢰가 하나의 낙뢰 안에 4~5개 이내의 뇌격을 보유하고 있음을 알 수 있다. 7년간 다중도가 최대인 낙뢰는 다중도가 10인 낙뢰이었다.

2002년의 경우는 4 이상의 낙뢰는 나타나지 않았다. 연도별로 특별한 경향이 나타나고 있지 않아서 장기간의 관측에 의한 통계자료가 필요한 항목이다.

그림 8은 낙뢰자료에 의한 뇌격의 월별 분포이다. 1998년, 1999년에는 8월이 가장 많은 낙뢰 수를 기록하고 있으나, 전반적인 경향으로는 7월이 가장 빈도가 높다. 태풍이나 뇌우가 많은 하절기(7, 8월)에 대다수의 낙뢰가 집중되고 있음을 알 수 있어, 하계 낙뢰에 의한 피해에 대해 특별한 주의가 필요하리라 여겨진다.

그림 9는 낙뢰자료에 의한 뇌격의 지역별 분포를 보여주고 있다. 특히, 단위 면적당(km²) 발생 뇌격횟수를 비교하였다. 전체적으로 충남, 경기 지역의 뇌격밀도가 상대적으로 높음을 알 수 있다. 대도시의 경우는 서울과 대전이 상대적으로 높았다. 따라서 뇌격수가 많은 지역도 주목할 필요가 있지만, 상대적으로 대지 뇌격밀도가 많은 지역도 지형적인 영향이나 기후 등을 중심으로 추후 좀더 정밀한 검토가 필요하리라 여겨진다.

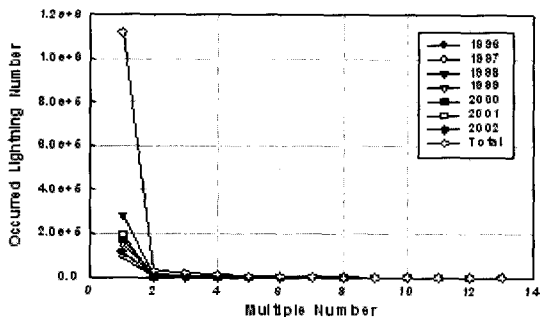


그림 8. 발생낙뢰의 다중도분포

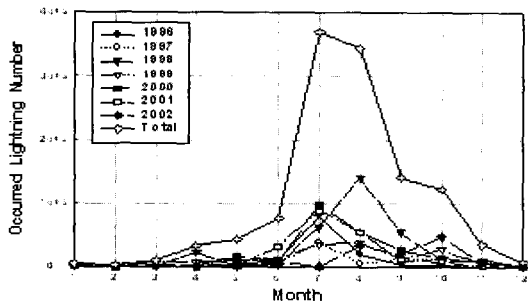


그림 9. 발생낙뢰의 월별분포

2.2.2 뇌격누적분포

각 년도별 발생한 뇌격 중에서 극성별로 최대값들은 매년 갈수록 뇌격전류의 크기가 커지고 있어 자체 보장이 이루어진 금년 이전의 최대값들은 큰 의미가 없을 것으로 사료되어 내용에서는 생략했다.

2002년의 경우는 일부 감지기의 보정작업이 이루어지고 있어서 어느 정도 일반적으로 보고 되는 정도의 값들로 이루어지고 있었다.

작년인 2002년 내륙에 떨어진 가장 큰 뇌격은 부극성의 경우에는 1월 1일 05시에 경북 영양군 대천리에 -145.3[kA]의 뇌격이 발생하였으며, 정극성의 경우에도 역시 1월 1일 06시에 경북 안동시 독골에 171.4[kA]의 뇌격이 발생하였다.

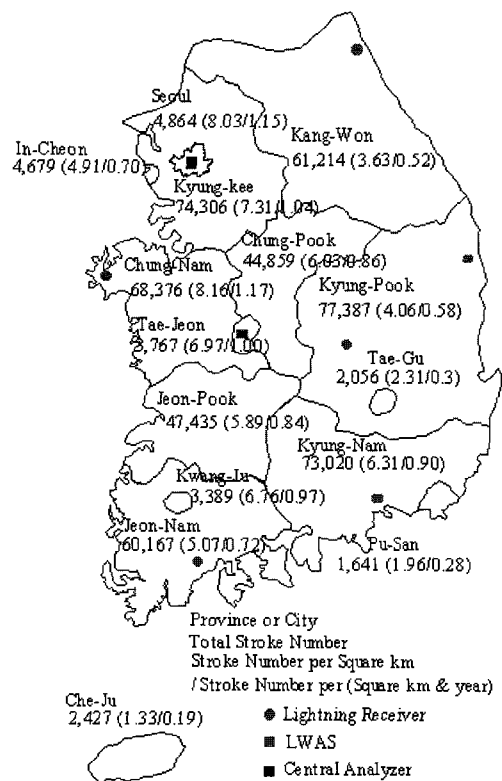


그림 10. 발생낙뢰의 지역별 전체 횟수 및 밀도분포

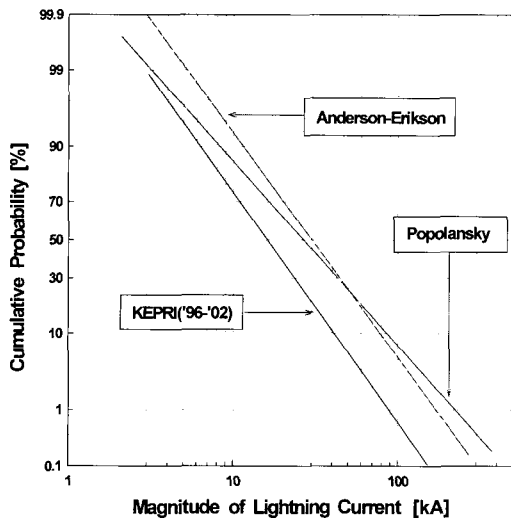


그림 11. 누적확률 분포곡선

표 1. 뇌격전류 평균값

	'96	'97	'98	'99	'00	'01	'02	평균
Average I [kA]	19.29	23.28	23.22	17.70	21.89	14.57	22.61	20.36
Mean I [kA]	16.22	19.29	19.78	13.02	16.58	10.79	19.21	16.21

표 1은 뇌격전류의 산술 평균값과 중간값을 보여주고 있다. 1999년, 2001년을 제외하고는 대개 비슷한 값을 보여주고 있으며, 2002년에는 22.61[kA]이었으며 7년 평균값은 20.36[kA]이었다.

그림 11은 실제 낙뢰데이터를 이용하여 기존에 절연설계에 이용하고 있는 한반도 고유의 누적빈도분포곡선 수식을 유도하여 표현한 것이며, 그 수식은 아래와 같다. 통계 계산결과, 1996년부터 2002년까지의 경우 $M=16.24$ [kA], $m=2.84$, σ (표준편차)=15.47이었다.

$$P = \frac{1}{1 + (I/16.24)^{2.84}}$$

위 식과 그림에서 보듯이 중간값은 Anderson-Erikson식이나 Popolansky식과 비교하면 다소 낮은 값으로 지역별 특성이나 측정방법이 다르므로 나타나는 차이로 이해할 수 있으며, 전체적으로 우리나라 뇌격전류의 크기가 다른 나라에 비해 적음을 알 수 있고, 그래프의 기울기는 Anderson-Erikson 식과 상당히 근접한 값을 보여주고 있다.

뇌격발생빈도를 절연설계에 적용하기 위해서는 년 평균 뇌우일수로 정의되는 IKL(Iso-keramic Level) 혹은 TD(Thunderstorm Day)로 나타내어야 한다.

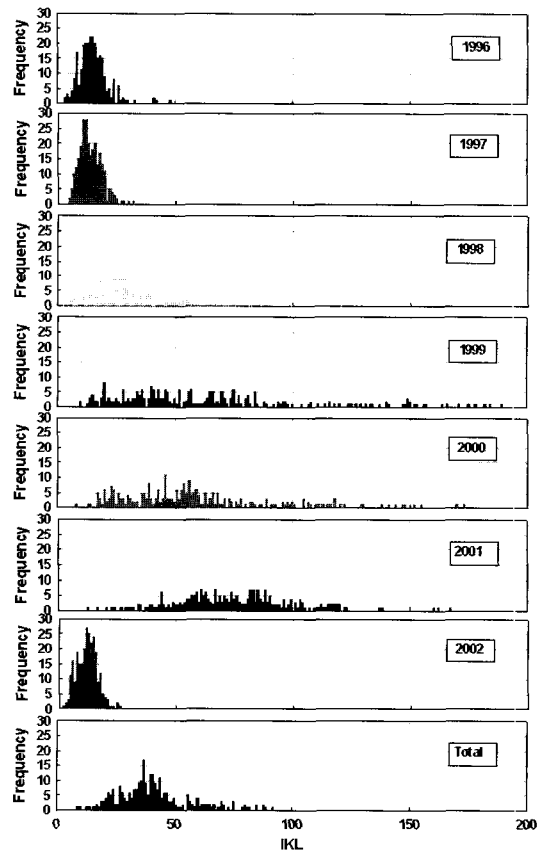


그림 12. 연간뇌우일수도 분포

그림 12는 1996년부터 2002년의 자료를 근거로

한반도 내의 7년 동안의 연간뇌우일수를 위·경도 1도를 4등분(15분)하였을 때의 날짜 분포를 보여주고 있다. 주로 16일에서 30일 범위에서 많은 빈도를 보여주고 있으며, 최대 연간뇌우일수는 100일 정도이었다. 그림 8은 1996년도부터 2000년까지의 자료를 근거로 하여 평균연간뇌우일수도(IKL Map)를 경위도를 각각 4등분한 MESH 형태로 나타낸 것이다.

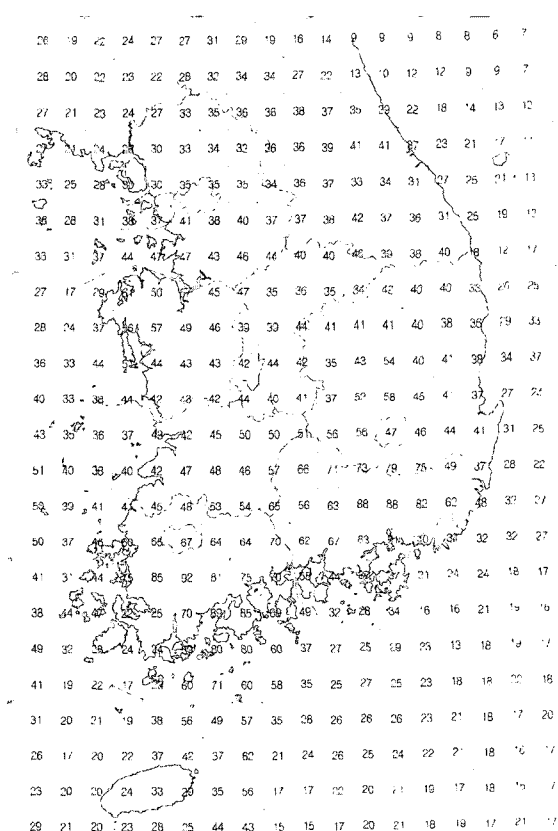


그림 13. 1996~2002년 IKL Map (Mesh Type)

3. 결 론

이 논문에서는 낙뢰측정을 시도하고 있는 각 설비의 개괄적인 현황을 설명하고, 한국전력거래소 및 한전에서 운용중인 LPATS(낙뢰위치 표정시스템)에 의해 얻어진 7년간의 낙뢰발생 현황에 대해 기술하였다.

◇ 저자 소개 ◇



우 정 옥(禹貞旭)

1968년 9월 19일생. 1992년 경북대 전기공학과 졸업. 1994년 경북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 한전 전력연구원 입사. 현재 한전 전력연구원 전력계통연구실 선임연구원. 관심분야 : 낙뢰 관측 및 계통과 전압 해석.



심 응 보(沈應輔)

1959년 12월 23일생. 1982년 한양대 전기공학과 졸업. 1982년 한국전력공사 입사, KIEE & CIGRE Member. 현재 한전 전력연구원 책임연구원. 관심분야 : 계통과 전압 해석 및 절연협조.