

## 일본 중서부지방에서 발생하는 동계 뇌 방전의 특징

이종호<sup>1</sup> · 河崎善一郎<sup>2</sup> · 류찬수<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>기상청 원격탐사과, 156-010, 서울특별시 동작구 신대방동 460-18

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Osaka University, Osaka, Japan

<sup>3</sup>조선대학교 과학교육학부, 501-759, 광주광역시 동구 서석동 375

## The Characteristics of Winter Lightning Observed in the Mid-western Part of Japan

Jong-Ho Lee<sup>1</sup> · Z. Kawasaki<sup>2</sup> · Chan-Su Ryu<sup>3,\*</sup>

<sup>1</sup>Remote Sensing Division, Korea Meteorological Administration, Seoul, Korea

<sup>2</sup>Department of Electrical Engineering, Osaka University, Osaka, Japan

<sup>3</sup>Department of Earth Science, Chosun University, Gwangju, Korea

**Abstract:** This study analyzes the results of thunderstorm data observed in the mid-western part of Japan during the winter of 1996~1997. There were 35 instances of thunderstorms with 4,426 instances of lightning detected during the observation period. This study estimates the frequency of lightning occurrence through classification of detected lightning into two types, and analyzes the relationship between lightning types and synoptic pattern. According to the analyzed results, cloud-to-cloud discharge and positive polarity occupied 78% and 42.3% of total discharge, respectively. It is rare for lightning to occur in the winter season, usually occurring during the night (midnight to 5 a.m.). Lightning frequently occurs when there is a prevailing synoptic wind from the northwest. According to the analyzed results of multiplicity and multi-point lightning, the mean values of multiplicity and multi-point lightning are 1.4 and 1.2, respectively.

Keywords: SAFIR, thunderstorm, flash, positive polarity, multiplicity

**요약:** 이 연구는 일본 중서부 지방에서 1996년 겨울철에 발생한 뇌우의 관측 자료를 분석한 것이다. 관측기간 중 35 회의 뇌우가 발생하였으며 발생된 뇌 방전 수는 4426개였다. 관측된 뇌 방전 수를 뇌 방전 종류로 구분하여 그 발생 비율을 구하였고, 뇌 방전의 종류와 기압배치와의 관계도 분석하였다. 그 결과 구름 뇌 방전의 비율은 약 78%이었으며, 양극성 낙뢰가 42.3%로 나타났다. 동계의 낙뢰활동은 미약하나 0~5시에 가장 강하였다. 또한, 낙뢰는 북서 계절풍이 강한 경우에 활발하게 발생되고 있음을 알 수 있었다. 다중뇌와 다지점 낙뢰의 분석결과 평균 다중도는 1.4이고, 평균 다지점 낙뢰는 1.2로 나타났다.

주요어: 뇌운, 섬광, 양극성, 다중도

## 서론

최근 전자공학의 발달로 광역의 낙뢰 활동을 모니터링 할 수 있는 시스템이 개발되어 낙뢰관측에 이용되고 있다. 이들을 낙뢰위치 표정 시스템이라 부른다. 일본에서는 1970년대 후반부터 LLP(Lightning

Location and Protection)를, 이 후 LPATS(Lightning Positioning And Tracking)를 각각 전력회사에서 도입하여 낙뢰를 관측하고 있다(The committee, 1996). 이들은 낙뢰방전에 동반되어 반사되는 중파대의 전자파를 이용해서 낙뢰위치의 표정을 하는 시스템으로 전기설비에 대한 낙뢰피해의 방지를 목적으로 현재까지 운용되고 있다.

한편, Osaka대학과 관서전력이 공동연구의 일환으로 사용하고 있는 SAFIR(시스템 de Surveillance et d'Alerte Foudre par Interferometrie Radioelectrique)

\*Corresponding author: csryu@chosun.ac.kr

Tel: 82-62-230-7380

Fax: 82-62-230-7936

도 상기의 두 시스템과 같은 종류의 뇌 방전 위치표정의 기능을 갖고 있으며, 이 시스템은 1991년부터 안테나를 3지점에 설치하여 Kinki(近畿)북부, Wasaka(若狹) 및 Hokuriku 지방을 탐지 범위로 해서 운용해 왔으며, 그후 1996년 11월에는 안테나 하나를 추가하여 Kinki 남부도 포함하여 뇌 방전 활동을 관측하고 있다(Sonoi *et al.*, 1993; Kawasaki *et al.*, 1991, 1994; Matsui *et al.*, 1996). 또 1995년 4월부터는 재단법인 기상협회에서 관동지방에 SAFIR 시스템을 설치하여 관측을 하고있다(Okuyama *et al.*, 1996).

SAFIR는 뇌 방전에 동반하는 VHF(very high frequency)파대 펄스의 방사원 방위를 간섭법에 기초해서 탐지하는 시스템으로 높은 정확도로 뇌 방전위치의 표정이 가능하다. 또한 SAFIR는 높은 분해능으로 낙뢰뿐만 아니라 구름방전에서 방사되는 VHF 펄스파를 탐지하는 것이 가능하여 탐지효율이 LLP나 LPATS 보다 높다. 또, 통계적으로는 뇌 방전의 80% 이상이 구름방전이라고 알려져 있고(Takeuti, 1987), 많은 경우 구름 방전이 낙뢰보다 수분에서 십 수분 선행한다는 이론에 근거하면 VHF파대의 펄스를 탐지하면 낙뢰의 예측이 가능하다.

낙뢰와 구름방전은 모두 구름 속에 축적된 전하중화 현상이고, 구름방전을 포함한 뇌 방전의 광역 표정을 하는 것은 종합적으로 뇌우를 탐지는 물론 낙뢰를 예측할 수 있다는 점에서 중요한 의미가 있다.

본 연구에서는 SAFIR을 이용하여 다 높은 정확도로 관측되기 시작한 1996년도의 일본 중부 서해안 지방의 겨울철 뇌 방전 표정을 이용하여 뇌 방전 현상의 특징을 조사하였다.

**시스템의 개요와 해석조건**

Fig. 1은 안테나 설치 지점과 SAFIR에 의한 관측 범위 및 본 논문에서 해석 범위를 나타낸 것이다. 그림의 지리 정보는 일본 국토지리원 1km 격자의 평균 표고 데이터를 사용하였다. Osaka대학과 관서전력(주)이 공동 운영하고 있는 SAFIR는 4개의 소자로 구성된 간섭계 안테나를 Fig. 1과 같이 4개 지점에 설치하여 관측하며, 뇌 방전에 동반되어 방사되는 VHF파 펄스를 각각의 안테나에서 수신하고, 위상 차에 의해서 전파의 도래방위를 구하여 교회법(交會法)에 의하여 뇌 방전 위치를 표정하고 있다. 각 안테나의 각각 수신 진동수는 Miyazu(宮津)市 116.5MHz, Hikone(彦根)市 115.5MHz, Mikuni(三國)町 114.0MHz,

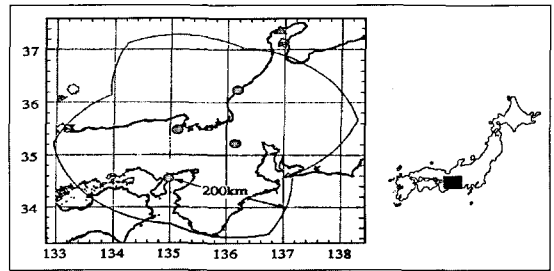


Fig. 1. Operation coverage of SAFIR and the region for analysis.

Table 1. The discrimination criteria for cloud to ground.

Rise time	0.125-15μA
Decay time	15-255μA

Kitaawaji(北炎路) 115.0MHz(대역폭 1MHz)로 동조하고 있다. 본 연구에서 뇌우 자료의 해석 범위는 35~37°N, 134~137°E 로 하고 있으며, 고층기상 자료는 Wajima(輪島) 고층기상대에서 얻어진 것을 사용하였다. 관측기간은 SAFIR가 4개 지점에 안테나를 설치해서 관측을 개시한 1996년 11월30일부터 1997년 2월 28일까지이다.

SAFIR의 시간 창은 100μs로서 실제 통신속도를 고려하여 1초에 최대 100점의 표정을 하고 있다. 따라서 통상 1회의 방전에 대해서 수에서 수십의방전 점이 그 이동과 함께 표정 된다. 이때 표정 된 각 점이 동일한 뇌 방전인지를 자동적으로 판정하기 위하여 다음의 기준을 사용하였다.

- (1) 1개의 뇌 방전의 계속 시간을 최대 500ms로 한다.
- (2) 뇌 방전의 수평 이동 거리는 인접하는 표정점의 거리가 25km를 넘지 않는다.
- (3) (2)의 2점간을 방전이 전파하는 속도는 광속의 1/3을 초과하지 않는다(10m/s).

또한, 방전 종별의 식별은 SAFIR 시스템에 부속되어 있는 Fast 안테나에 의해서 측정된 전계 변화를 기초로 하였다(Kawasaki *et al.*, 1994). 이 전계 변화 측정은 VHF파 수신기와 동기하고 있어 뇌 방전을 구름방전, 음극성 낙뢰, 양극성 낙뢰의 3개로 식별하고 있다. Table 1은 현재까지의 보고(Uman, 1987)와 본 연구팀의 관측결과(Kawasaki *et al.*, 1991; Ushio *et al.*, 1994)에서 결정한 낙뢰 식별의 조건을 나타내고 있다.

이 연구에서의 관측 결과 대부분의 구름 속의 방

**Table 2.** The total amount of detected lightning flash in Dec. 1996 ~ Feb. 1997.

Division	Cloud-to-cloud flash	Cloud-to-ground flash of negative polarity	Cloud-to-ground of positive polarity	Total of lightning flashes
Frequency of lightning flashes	3451	563	412	4426
Percentage (%)	78.0	12.7	9.3	100.0
Percentage of polarity	×	57.7	42.3	100.0

전에 이어서 낙뢰가 기록되고 있다. 이는 근거리 뇌 방전을 대상으로 하여 관측·분석하고 있는 간섭계에 의한 동계(冬季) 뇌 관측 결과와 동일한 현상이다. 따라서 이 연구에서는 이들의 일련의 방전현상은 복수의 방전이 아니라 하나의 방전으로 처리하였다. 즉, 구름방전과 낙뢰가 500ms 이내의 시간 간격으로 표정되고 있는 경우, 전체의 구름 속 방전을 포함하여 1개의 낙뢰로 판별하였다. 또한, 다중뇌와 다지점 낙뢰에 대해서도 500ms 이내에 생기는 귀환뇌격은 1개의 방전으로 취급하였다. 또 SAFIR의 절대적인 표정 정도는 1~2km 정도이나 SAFIR 시스템의 설치 위치나 장비의 특성, 지형의 영향 등을 총칭하는 관측소에러는 동일한 경향을 갖고 있기 때문에(Wada *et al.*, 1997) 표정 분해능은 500m 정도의 정확도를 얻을 수 있다. 따라서 본 연구에서 논의하고 있는 방전 거리나 다지점 뇌격의 판별 등에 있어서 문제로 되어 있는 상대적인 정확도는 500m 이내로 있다고 간주된다.

## 뇌 방전 빈도분포와 뇌 방전 증별에 의한 분류

### 뇌 방전의 누계

연구 기간 중 뇌 방전을 구름방전, 양극성 낙뢰, 음극성 낙뢰로 나누어서 Table 2에 나타내었다. 이 표에서 전체 방전 중 구름방전이 차지하는 비율은 4426사례 중 3541사례로 78%나 되었다. 또 낙뢰의 극성에 의하면 양극성 낙뢰가 차지하는 비율은 42.3%이었다. Suzuki(1992)는 동해 연안의 동계 뇌의 장기 관측 결과에서 양극성 낙뢰의 비율이 약 33%라고 보고하였다. 이는 첩탐에서의 방전의 통계이므로 단순히 비교 할 수는 없으나 본 연구의 결과는 이들의 관측결과 보다 양극성의 비율이 높게 나타났고, Orville and Silver(1997)에 의해 보고된 미국의 경우보다도 상당히 높은 비율이어서 Hokuriku(北陸) 지방의 동계 뇌의 특징을 잘 표현하고 있다고 판단된다.

### 뇌 방전의 빈도 분포

Fig. 2는 뇌 방전의 빈도를 나타내 것이다. 이에 의하면 12월 중의 뇌 방전 활동은 1일, 2일, 21일, 22일, 23일에 특히 활발하고 그 이외의 날은 약하거나 낙뢰 활동이 없었다. 또 12월 22일은 뇌 방전 중 낙뢰가 차지하는 비율이 523 사례 중 228 사례로 44.4%로 나타나 다른 날에 비하여 낙뢰의 비율이 높게 나타났다.

Fig. 3은 뇌 방전의 빈도를 시간별로 나타낸 것으로 0~5시 사이에 가장 활발하고, 6~11시 사이는 최저로 나타나 시각 의존성을 확인 할 수가 있었다. 이는 하계의 정오부터 일몰 전까지 출현빈도가 높은 것과 대비되는 현상으로 이는 권계면에 달하는 대륙성 한냉기단(cP)의 해상이류가 주된 요인이 되며, 계절풍에 대항하는 풍계, 즉 일몰 이후의 육풍의 성격을 갖는 기류의 발생이 국지적인 쉬어 선을 형성하여 수렴이 일어나 상승기류를 형성하고 그 결과가 뇌운이 발생한다는 이론(Ishihara *et al.*, 1989; Kawasaki *et al.*, 1994)과 부합된다. 또한, 뚜렷하지 않지만 12~23시 사이에는 증가하는 경향을 볼 수 있는데 이는 여름철의 그것과 유사한 원리로 해석된다.

### 뇌 방전의 지역적 분포

연구지역을 5 km 격자로 나누고, 그 격자 안의 뇌 방전 및 낙뢰의 발생 빈도를 조사하였다. 그 결과 전체 방전활동의 밀도가 가장 높은 곳은 Mikuni(36°N, 136°E)이었다. 이 지역에서 뇌 방전이 많이 발생하는 원인은 (1) 해상을 이루어 온 기단이 지형의 영향으로 강제상승이 일어나 뇌운이 발달하고, (2) 이 지역은 연해주의 한랭한 기단과 한반도를 경유하는 비교적 고온의 두 기단이 수렴하는 불연속선이 있다는 것(Uyemura, 1980), 등을 들 수 있다. 또한 관측 결과에서 알 수 있듯이 구름방전활동이 활발한 지역에서 낙뢰활동도 활발하게 관측되고 있음을 알 수 있다(Fig. 4).

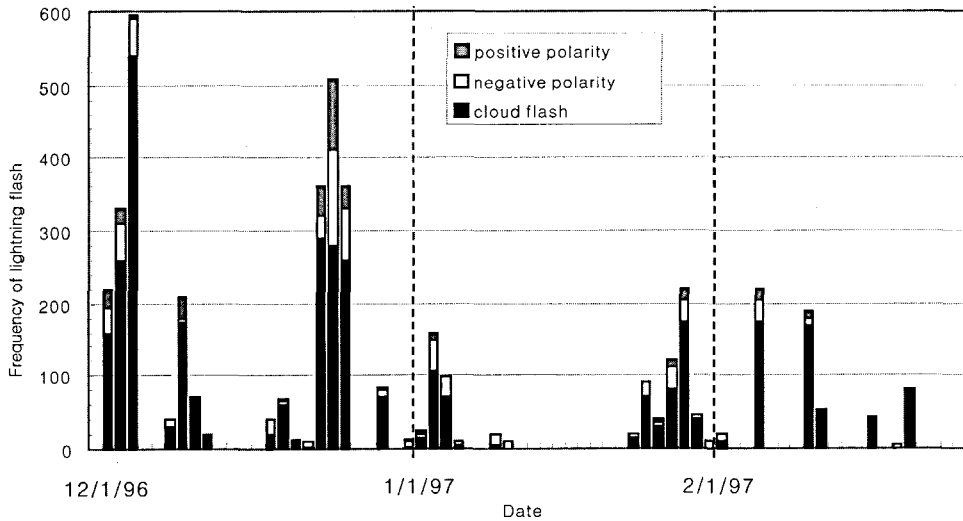


Fig. 2. The thunderstorm days and the frequency of lightning flashes.

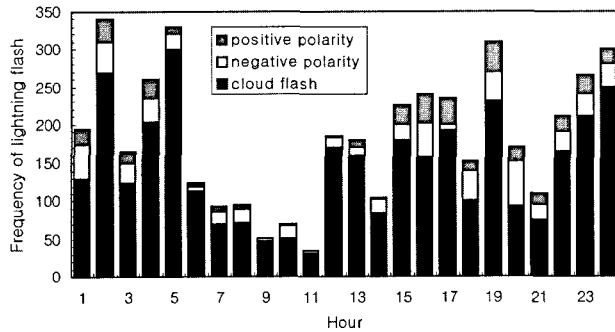


Fig. 3. The diurnal variation of lightning flashes from the aspects of statistics.

### 기상 조건과 뇌 방전종별의 관계

#### 지상일기도와 뇌 방전종별과의 관계

Fig. 2에 따르면 방전 종별의 비율이 방전이 발생한 날의 기상 차이에 의존함을 생각할 수 있다. 따라서, 본 연구에서는 지상 일기도를 사용해서 Hokuriku 지방의 동계의 기상을 일본 기상청에서 일반적으로 사용하는 (1) 강한 북서계절풍형 (2) 북서계절풍형 (3) 북서계절풍 해소형 (4) 전선 통과형 (5) 소저기압 발생형으로 분류하여 기압배치와 뇌 방전 종별과의 관계를 조사하였다. 여기서 특히 (1)과 (2)의 구분은 지상 일기도에서 북서계절풍형이라고 판단되는 사례 중에서 500 hPa의 기온이  $-35^{\circ}\text{C}$  이하의 경우를 특히 강한 북서계절풍형이라 분류하였다. 이와 같은 방법에 의해서 기상형태와 방전 종별과의 관계를 조사한

결과를 Table 3에 나타냈다.

Table 3에 의하면 기압배치에 따른 방전 종별의 비율이 다른 경향을 갖는다는 것을 알 수 있었다. 특히, 강한 북서계절풍형으로 분류되는 조건에서 발생되는 방전은 구름방전의 비율이 84.2%로 다른 기압배치에 비해 높게 나타나고 있다. 반면에 전선 통과형에서 뇌 방전은 구름 방전의 비율이 62.1%로 되어 있어 상대적으로 낙뢰의 비율이 높게 되어 있다. 또 북서계절풍형이 해소되었을 때 발생하는 방전 중에는 양극성 낙뢰가 51.8%로 나타나 다른 5개의 분류 중 유일하게 양극성 낙뢰의 비율이 음극성을 초월하고 있음을 알 수 있었다.

#### $-10^{\circ}\text{C}$ 온도층 고도와 뇌 방전 종별의 관계

Takahashi(1984)는 동계뇌의 수치실험을 통해서

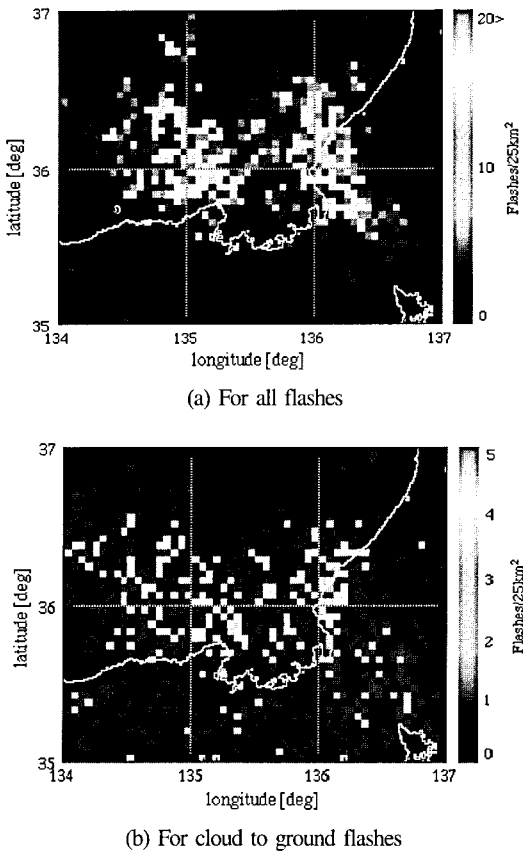


Fig. 4. Lightning Flash Density per 5 km × 5 km.

-10°C 온도층 부근에 부전하가 농밀하게 축적된다고 하였다. 또 Michimoto(1993)는 방전활동의 유무와 강약은 -10°C 기온층의 고도에 강하게 의존한다는 것을 주장하였다. 본 연구에서는 방전활동을 이 -10°C

기온층의 고도를 기준으로 하여 (1) 1.4km 이하 (2) 1.4~1.8km (3) 1.8~2.2km (4) 2.2~2.6km (5) 2.6km 이상의 5종류로 분류해서 방전 종별과의 관계를 조사하였다(Table 4). 이에 의하면 (1)의 조건에서는 구름방전의 비율이 90.4%인데 반하여 (5)의 조건에서는 45.2%로 나타나 -10°C 온도층의 고도가 높을수록 낙뢰의 비율이 높고, 양극성 비율도 높게 나타나는 경향이 있음을 알 수 있다. 또한, 2.2~2.6km 사이에서 극대가 나타나는 현상도 주목할 값이다. 이는 양극성 낙뢰에 기여하는 양 전하 층이 연직 바람 쉬어에 의한 뇌운의 경사에 의해서 지면으로 향하는 경우와 하부 음 전하층의 조기 강하에 의한 소멸 때문에 직접 지면으로 향하는 경우 등 어느 쪽도 가능성이 있다는 것을 시사하고 있어 단일의 요인으로 이해하는 것이 불가능하다는 것을 의미하고 있다. 한편 뇌 방전의 약 74%가 -10°C 기온층의 고도가 1.8 km보다 높을 때 발생하고 있다는 것은 매우 중요한 사실이다.

안정지수(SSI)와 뇌 방전 종별과의 관계

안정지수(Showalter Stability Index, SSI) (1) 4 이상, (2) 0~4, (3) 0~-3, (4) -3~-6 및 (5) -6 이하의 5개 등급으로 분류하여 방전의 형태와의 관계를 조사하였다(Table 5). 그 결과 SSI -6 이하의 (5) 등급으로 분류된 경우가 총 방전사례의 75.4%(3338 사례)였고, 이중 구름 방전이 차지하는 비율은 75.6%이었다. 반면에, 안정지수가 0~4인 등급은 방전사례는 적으나 방전의 95.2%가 구름방전으로 나타나 안정지수 값이 클수록 구름방전의 비율이 높게 나타나는 것을

Table 3. Meteorological conditions and the ratio of cloud to ground flashes against total flashes.

Type	Weather	Stronger monsoon	Monsoon	Weak monsoon	Frontal thunder.	Polar low
A	a	1176	657	554	465	599
	b	130	107	67	159	100
	c	90	71	72	125	54
	d	1396	835	693	749	753
B	a	84.2	78.7	79.9	62.1	79.5
	b	9.3	12.8	9.7	21.2	13.3
	c	6.4	8.5	10.4	16.7	7.2
C	b	59.1	60.1	48.2	56.0	64.9
	c	40.9	39.9	51.8	44.0	35.1

A: Frequency of lightning flashes, B: Percentage (%), C: Percentage of polarity, a: Cloud-to-cloud flash, b: Cloud to ground flash of negative polarity, c: Cloud to ground flash of positive polarity, d: Total of lightning flashes

**Table 4.** The altitude of the  $-10^{\circ}\text{C}$  air temperature level and the ratio of cloud to ground flashes against total flashes.

Division		$\leq 1.4$ km	1.4~1.8 km	1.8~2.2 km	2.2~2.6 km	2.6 km $\leq$
A	a	85	932	1343	671	420
	b	7	72	240	80	164
	c	2	43	151	81	135
	d	94	1047	1734	832	719
B	a	90.4	89.0	77.5	80.6	58.4
	b	7.4	6.9	13.8	9.6	22.8
	c	2.1	4.1	8.7	9.7	18.8
C	b	77.8	62.6	61.4	49.7	54.8
	c	22.2	37.4	38.6	50.3	45.2

A: Frequency of lightning flashes, B: Percentage (%), C: Percentage of polarity  
 a: Cloud-to-cloud flash, b: Cloud to ground flash of negative polarity,  
 c: Cloud to ground flash of positive polarity, d: Total of lightning flashes

**Table 5.** The SSI and the ratio of cloud to ground flashes against total flashes.

Division		$> 4$	0~4	0~3	-3~-6	-6 $\geq$
A	a	0	100	341	486	2525
	b	0	4	21	59	479
	c	0	1	17	60	334
	d	0	105	379	605	3338
B	a	0	95.2	90.0	80.3	75.6
	b	0	3.8	5.5	9.8	14.3
	c	0	1.0	4.5	9.9	10.0
C	b	0	80.0	55.3	49.6	58.9
	c	0	20.0	44.7	50.4	41.1

A: Frequency of lightning flashes B: Percentage (%)  
 C: Percentage of polarity  
 a: Cloud-to-cloud flash b: Cloud to ground flash of negative polarity  
 c: Cloud to ground flash of positive polarity  
 d: Total of lightning flashes

알 수 있었다.

또한, 안정지수와 뇌 발생 및 뇌 주의보와의 관계를 알아보기 위하여 해석기간을 12시간씩으로 나누어서 조사하였다(Table 6). 그 결과 뇌 발생이 차지하는 비율은 안정지수가 -6이하 등급인 경우 31사례 중 24사례로 77.4%이고, -3~-6 등급인 경우는 45 사례 중 18 사례로 40%, 0~3의 등급에서는 48사례 중 11사례로 22.9%, 0~4의 등급에서는 40사례 중 7 사례로 17.5%로 나타났다.

관측 범위내의 뇌 주의보 발표와 안정지수와의 관계를 조사한 결과, 주의보 발표는 안정지수 -6 이하 등급인 경우에는 31사례 중 29사례, -3~-6의 등급에서는 45사례 중 21사례 0~3 등급의 경우에는 48사례 중 17사례, 0~4 등급에서는 40사례 중 10사례이고, 4 이상의 경우에는 6사례 중 1사례였다.

뇌 주의보의 적중률은 12월에는 22사례 중 19사례로 86.4%, 1월에는 37사례 중 20사례로 54.1%, 2월에는 17사례 중 11사례로 64.7%이었다.

또한, 안정지수에 대한 기압배치의 수 및 구름방전의 비율을 조사한 결과, 강한 계절풍형 및 소저기압 발생형의 경우 뇌 방전은 안정지수 -6이하에서 발생한다는 것을 알 수 있었다(Table 7). 이는 운정이 낮은 동계 뇌운에 안정지수를 적용하는 것은 과학적으로 의미가 약하다는 것을 나타내는 것으로, 앞으로 동계 뇌를 보다 적절하게 예측하는데는 종래의 안정지수를 대신하는 새로운 지수의 제안이 필요하다는 것을 보여주고 있다.

**다중뇌 와 다지점 낙뢰의 빈도 분포**

앞서 기술처럼 SAFIR는 1개의 뇌 방전을 복수의

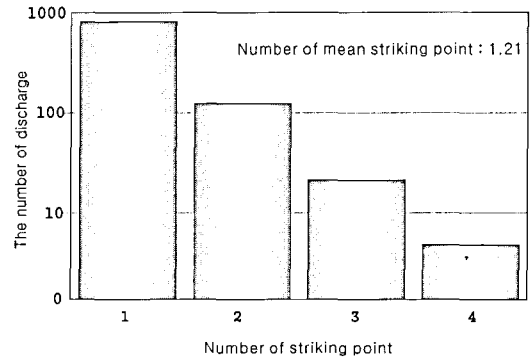
**Table 6.** The relation between frequency of the thunderstorm advisory and thunderstorm day and SSI.

SSI	Frequency of thunderstorm advisory / Case	Number of days with thunderstorm / Case
-6	27 / 31	24 / 31
-6-3	21 / 45	18 / 45
-3-0	17 / 48	11 / 48
0-4	10 / 40	7 / 40
4	1 / 6	0 / 6

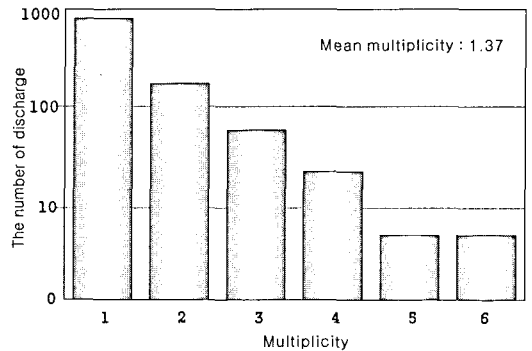
**Table 7.** The relation between SSI and meteorological conditions and the ratio of cloud to cloud flashes against total flashes.

SSI	The number of case of meteorological condition	Frequency of cloud to cloud flash / Total of lightning flashes
	Stronger monsoon	: 0
	Monsoon	: 2      78 / 78
0-4	Weak monsoon	: 4      21 / 26
	Frontal thunderstorm	: 0
	Polar low	: 0
	Stronger monsoon	: 0
	Monsoon	: 8      186 / 209
0-3	Weak monsoon	: 4      83 / 91
	Frontal thunderstorm	: 1      72 / 79
	Polar low	: 0
	Stronger monsoon	: 0
	Monsoon	: 8      63 / 85
-3-6	Weak monsoon	: 5      414 / 508
	Frontal thunderstorm	: 0
	Polar low	: 0
	Stronger monsoon	: 9      1170 / 1390
	Monsoon	: 4      339 / 463
<-6	Weak monsoon	: 5      36 / 68
	Frontal thunderstorm	: 2      392 / 666
	Polar low	: 5      597 / 751

뇌격 위치와 시간을 표정 하는 것이 가능하므로 다중 뇌와 다지점 낙뢰에 관한 해석이 가능하다. 본 연구에서는 뇌격의 시간 간격이 500ms 이내의 집합 중에서 뇌격 지점간의 거리 500m를 기준으로 하여 뇌격 지점 간의 거리가 500m 이내인 낙뢰를 다중뇌(multiplicity)라 정의하고 500m 이상인 낙뢰를 다지점 낙뢰(multi point strike)라 정의하여 뇌격 지점 수의 빈도 분포를 구했다. Fig. 5는 낙뢰의 다중도의 빈도 분포를 나타낸 것이고, Fig. 6는 낙뢰의 뇌격 지점 수의 빈도 분포를 보인다. Fig. 5에는 다중도 1의 빈도 분포가 가장 많고, 다중도가 높게 됨에 따라 뇌 방전 수는 대수적으로 감소하고 있고, 최다의 다



**Fig. 5.** The histogram of the multiplicity.



**Fig. 6.** The histogram of the number of striking points of multi-point flashes.

중도는 6으로 나타났다. 이 결과는 지금까지 알려진 하계 뇌의 결과와 비교할 때 분명히 다중도 수가 낮게 되어 있어 전하 분리에 관계하는 동계 뇌의 역학적 활동도가 낮다는 것을 의미한다고 생각할 수 있다. 실제로 전체 낙뢰에 있어서 평균 다중도는 1.37로 산출되어 지금까지의 보고(Takeuti and Nakano, 1973; 1983)와 같이 다중도는 낮게 되는 경향이 있다.

한편, Fig. 6에서 최다의 뇌격 지점 수는 4점으로 뇌격 지점 수에 대한 방전수도 대수적으로 감소하고 있고, 평균 뇌격 지점 수는 1.21이었다.

다지점 낙뢰는 송전 계통의 동계 뇌 대책이라고 하는 관점에서 흥미 있는 현상이고, 다지점 낙뢰에서 뇌격 시간 간격이나 뇌격 지점간의 거리는 다지점 낙뢰 사고 등을 생각할 때 중요한 척도라고 생각된다. Fig. 7은 다지점 낙뢰에 있어서 뇌격 시간 간격의 빈도 분포를 나타낸 것이고, Fig. 8은 뇌격 지점간의 거리의 빈도 분포를 보이고 있다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 뇌격 시간 간격 100ms라 정의한 시간

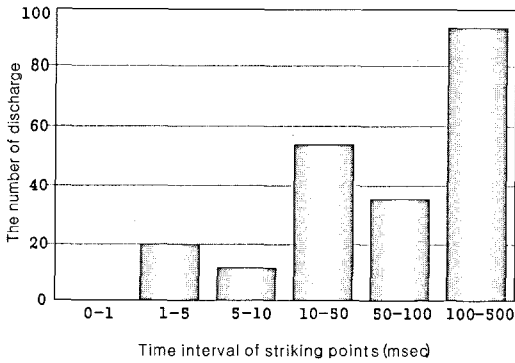


Fig. 7. The histogram of time interval of multi-point strikes.

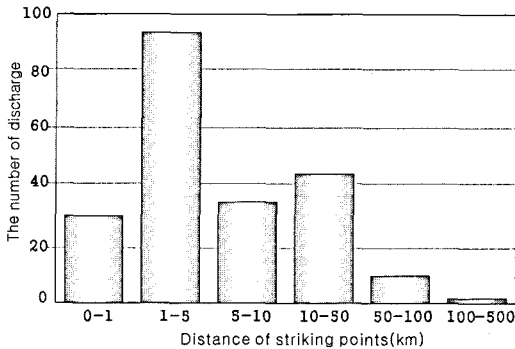


Fig. 8. The histogram of distances between multi-point strikes.

의 최대 값으로 있는 500ms까지의 범위의 방전이 가장 많고, 10~50ms까지의 간격에서 생기는 뇌격이 비교적 많았다. Fig. 8에서 뇌격점간의 거리는 1~5km로 있는 것이 가장 많아 다른 것에 비교해서 2배 이상의 빈도로 나타났다.

또, 50km 이상 떨어져서 생기는 다지점 낙뢰는 대단히 적다는 것을 알았다. 이 뇌격 지점간의 거리, 뇌격 시간 간격 등 대략 10km로 있는 뇌은 세포의 직경을 생각할 때 겨울철 낙뢰에서 자주 다지점 낙뢰가 발생하는 하나의 요인으로는 다중 뇌로 있어야 할 뇌격이 전하분리의 속도가 하계 뇌에 비해서 비교적 늦어서 뇌격 간격이 길기 때문에 다른 방전로를 취할 가능성이 높게 된다고 생각되나 정확한 해석을 위해서는 지속적인 관측과 자료의 축적이 필요하다.

다지점 낙뢰는 광학 관측에 의하여 그 통계가 구해져 있으나(Takagi et al., 1991) 그 지점 수는 본 연구의 결과보다도 많게 되어 있어 뇌격 지점간의 거리,

뇌격 시간 간격은 공히 짧게 되어 있다. 특히 뇌격 지점간의 거리는 50m 이내의 범위에서의 복수지점에 의 뇌격이 가장 많이 관측되고 있다. 따라서 양 관측에 의한 결과의 차이는 관측 범위의 차이를 나타내고 있다고 사료된다. 즉 광학 관측의 관측 범위는 십 수 km로 좁은 범위이나 그 공간 분해능이 높다는 점에서 작게 세분된 뇌격 지점의 차이 등도 관측이 가능하다고 생각할 수 있다. 한편 SAFIR는 넓은 범위에 미치는 다지점 낙뢰를 통계적으로 포착할 수 있다. 광학 관측은 Type B, C(가지로 나누어진 다지점 낙뢰, Takagi et al., 1991)를 많이 관측하고, SAFIR와 같은 광역 뇌 위치표정 시스템은 Type D(동일세포 내에서 개시점이 다른 다지점 낙뢰)를 중심으로 관측하고 있다고 생각 할 수 있다. 예를 들어 50m라고 하는 좁은 범위에서 뇌격 점의 차이를 다지점 낙뢰라 생각할 것인가 아니면 다중뇌의 일종이라고 생각할 것인가는 이론의 여지가 있으나 본 연구에서는 이런 형태의 방전현상은 다중뇌로 취급하였다.

## 결론

SAFIR를 사용해서 관측한 1996년도의 Hokuriku, Wakasaz지방의 겨울철 뇌우의 특성을 연구한 결과 및 결론은 다음과 같다.

1) 뇌 방전 중 구름방전의 비율은 78%이고, 낙뢰의 구성은 양극성 낙뢰가 42.3%로 나타나 타 연구에 비해 비교적 높은 비율이다.

2) 12월에는 뇌 활동이 미약하나 비교적 강한 경우가 2회 있었고, 일 변화는 0~5시 사이에 빈도가 가장 높았고, 6~11시까지 가장 낮았으며, 이후 점차 증가하였다.

3) 뇌 방전의 지역적 밀도 분포는 36°N, 136°E (Mikuni) 부근의 뇌 방전 밀도가 가장 높게 나타났고, 이는 한기의 이류 및 지형에 의한 강제상승에 원인이 있다고 판단된다.

4) 기압배치형과 관계는 동형이 강하면 구름방전의 비율이 높고, 전선통과 시 발생하는 뇌 방전에서는 낙뢰의 비율이 높았다.

5) -10°C 온도층의 고도가 높으면 낙뢰 특히 양극성 낙뢰의 비율이 높게되는 경향이 있고, 북서계절풍형에 동반하는 뇌 방전은 안정지수가 -6 이하의 조건하에서 발생하였다.

6) 낙뢰의 다중도, 다지점 낙뢰의 뇌격 지점 수의



빈도 분포를 각각 구하였다. 그 결과, 평균 다중도는 1.37이고, 평균 뇌격 지점 수는 1.21이었다. 또한, 다 지점 낙뢰의 뇌격 시간 간격은 100ms 이상이 가장 많았고, 10~50ms의 간격에서 발생하는 다지점 낙뢰가 비교적 많았으며, 뇌격 지점간 거리는 1~5km의 것이 가장 많았다.

## 참고문헌

- 이종호, 河崎善一郎, 류찬수, 1999, 겨울철 뇌 방전 현상의 관측 결과. Proceeding 1999년도 한국기상학회 추계학술발표회, 186-187.
- Ishihara M., H. Sakaibara and Z. Yanahisawa, 1989, Doppler radar analysis of the structure of mesoscale snow bands developed between the winter monsoon and the land breeze. *J. Meteor. Soc. Japan*, 67, 503-520.
- Kawasaki Z. I., K. Matsuura, and Y. Sono, 1991, Development of long-time record device for lightning electrostatic field wave forms and observation Results. *T. IEE Japan*, 111-B(5), 521-528.
- Kawasaki, Z. I., K. Yamamoto, K. Matsuura, T. Matsui, Y. Sono, and N. Shimokura, 1994, "SAFIR operation and evaluation of it's performance", *Geophys. Res. Letters*, 100, 1133-1136.
- Kawasaki Z. I., K. Yamamoto, K. Matsuura, P. Richard, T. Matsui, Y. Sono, N. Kobayashi, G. Naito, T. Wakai and T. Shindo, 1994, The role of the lower atmospheric conditions to development of winter thunderclouds in the Japan Sea Coast. *J. Atmos. Electr.*, 14, 31-40.
- Matsui, T., M. Achi, Z. I. Kawasaki, M. Wada and K. Matsuura, 1996, Forecasting of cloud to ground discharge by SAFIR. *T. IEE Japan*, 116-B(4), 428-443.
- Michimoto, K., 1993, A study of radar echoes and their relation to lightning discharge of thunderclouds in the Hokuriku district part II: Observation and analysis of "single-flash" thunderclouds in midwinter. *J. Meteor. Soc. Japan*, 71, 195-204.
- Okuyama, W., S. Taguchi and M. Ogura, 1996, The lightning activities in kwandong district of japan between 1995 and 1996. *Preprints of J. Meteor. Soc. Japan*, 70, 142.
- Orville, R. E. and A. C. Silver, 1997, Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95. *Mon. Wea. Rev.*, 125, 631-637.
- Suzuki, T., 1992, Long term observation of winter lightning on Japan Sea Coast. *Res. Lett. Atmos. Electr.*, 12, 53-56.
- Soni, Y., Z. I. Kawasaki, 1993, Results of lightning measurements by SAFIR and composition with weather radar echo. *T. IEE Japan*, 113-B(9), 987-992.
- Takagi N., T. Watanabe, I. Arima, H. Itou, Z. Kawasaki, M. Nakano, T. Takeuti, H. Kinisita, M. Suzuki and Y. Saikawa, 1991, Lightning flash with multiple strikes to the ground. *T. IEE Japan*, 111-B, 93.
- Takahashi, T., 1984, Thunderstorm electrification a numerical study. *J. Atmos. Sci.*, 41, 2541-2558.
- Takeuti, T., 1987, "The Lightning Discharges", Nagoya Uni. Press, Japan, 87-89.
- Takeuti, T. and M. Nakano, 1973, On Lightning Discharge in Winter Thunderstorms. *J. Meteor. Soc. Japan*, 51, 494-496.
- Takeuti, T. and M. Nakano, 1983, Winter thunderstorms of the Hokuriku Coast. *Tenki, Japan*, 30, 13-18.
- The committe of lightning protection design. Subcommittee of lightning characteristic, 1996, Lightning location system in Japan and a lightning frequency map using the data obtained by them. *T. IEE, Japan*, 116-B(4), 395-402.
- Uman M., 1987, "The Lightning Discharge", Academic Press, 112.
- Ushio T., D. Wang, Z.I. Kawasaki, K. Matsuura and Y. Sono, 1994, Synchronized multipoint measurements of lightning electric field changes. *T. IEE Japan*, 114-B, 1160.
- Uyemura H., 1980, On the structure and formation of the disturbances causing a heavy snowfall over the coastal area of the sea of Japan under the winter monsoon. *Tenki, Japan*, 27, 33-44.
- Wada, M., Z. I. Kawasaki, K. Matsuura, K. Nakamura and K. Horii, 1997, UHF interferometric observation and rocket-triggered lightning. *T. IEE Japan*, 117-B(4), 494.