

최근 남한지역에서 발생한 낙뢰의 통계적 특성

엄효식^{1,2} · 서명석^{1,*}

¹공주대학교 대기과학과, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

²공군 제73기상전대

Statistical Characteristics of Recent Lightning Occurred over South Korea

Hyo-Sik Eom^{1,2} and Myoung-Seok Suh^{1,*}

¹Department of Atmospheric Science, Kongju National University, Kongju, 314-701, Korea

²73rd Weather Group, Republic of Korea Air Force

Abstract: Lightning data, observed from total lightning detection system (TLDS) of KMA, for the recent five years (2002-2006) have been analyzed for temporal and spatial characteristics of frequency, intensity, duration, and flash rate. Lightning frequency varies largely with years (most frequent in 2006) and the lightning during the summer accounts for 75% of total flashes and only 0.6% of lightnings strike in cold season. In rainy season (JJAS), the ratio of positive flashes to negative ones is as low as 0.15, but it increases up to 0.98 in February. The seasonal variation of lightning duration is strongly linked with lightning occurrences, whereas flashes rates show weak seasonal variability. In a daily scale, lightning, on average, occurs more often at dawn (2 am, 5-7 am) and in the mid-afternoon (15 pm), and the lightning at dawn (around 5 am) is most intense during the day. The western inland areas and the West/South Sea show high lightning density during JJAS, whereas eastern part and the East Sea exhibit a low density of lightning. Considering the low ratio of positive flashes (0.15) for the whole analysis domain during summer period, Chungnam and Jeonbuk areas have a high ratio of flashes over 0.4. However, these should be analyzed with much caution because weak positive cloud-to-cloud discharges can be regarded as cloud-to-ground flashes. The western inland also exhibits long annual flash hours (15-24). And the West Sea has high flash rates as a result of large density and low flash hours. The most frequent time of lightning occurrence over most inland areas lies between mid-afternoon and early-evening, whereas mountainous and coastal areas, and the northern Kyoungki and Hwanghae provinces show the maximum lightning strikes in the morning and at dawn, respectively.

Keywords: total lightning detection system, lightning, frequency, intensity, duration

요약: 최근(2002-2006) 발생한 낙뢰의 빈도, 강도, 지속시간 및 낙뢰율의 시·공간적 특성을 분석하였다. 빈도는 경년 변동이 크게 나타났으며, 여름과 겨울에 각각 전체 낙뢰의 75%, 0.6%가 발생하였다. 정극성 낙뢰는 우기(6-9월)에 부극성 낙뢰의 0.15 비율로 발생했으나 동계에는 그 비율이 증가하여 2월경에 부극성 낙뢰의 0.98까지 증가하였다. 낙뢰 지속시간은 여름에 집중되는 계절변동이 크게 나타났으나 낙뢰율의 변동은 이에 비해 작았다. 낙뢰는 새벽(2시, 5-7시)과 오후 중반(15시)에 두 번의 최대 빈도가 나타났으며 5시경에는 낙뢰강도가 강하였으나, 15시를 전후로 하는 오후 중반에는 낙뢰 강도가 약했다. 낙뢰밀도는 남한 서부 내륙 및 서·남해상에 높으며, 영동 및 동해지역은 낮았다. 충남 및 전북지역에서 0.4 이상으로 높게 나타났는데, 구름내 방전일 가능성이 있어 해석의 주의를 요한다. 낙뢰 밀도가 높은 서부내륙에서는 우기 낙뢰 지속시간이 연 평균 15-24시간으로 나타났으나, 서해상에서는 낙뢰 발생 시의 집중도가 높고 강도가 강하였다. 대부분의 내륙에서는 오후 중반에서 저녁 사이에 낙뢰 발생 빈도가 최대였으나 산악 및 해안, 중서부 지역은 각각 오전과 새벽에 최대로 발생하였다.

주요어: 신 낙뢰관측 시스템, 낙뢰, 빈도, 강도, 지속시간

*Corresponding author: sms416@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8533

Fax: 82-41-856-8527

서 론

우리나라는 삼면이 바다로 둘러싸여 있고, 내륙은 높은 산맥이 남북방향으로 영동지역에 위치한 가운데 여기서 파생된 작은 산맥들이 동서로 형성되어 있어 기상현상이 지역에 따라 매우 다양하게 나타난다. 특히 국지적인 집중호우와 대설, 대류성 강수 등은 이러한 지형적인 영향을 많이 받기 때문에 예보에 많은 어려움이 따른다. 대표적인 예로 호우 및 돌풍을 동반하는 여름철 낙뢰 현상은 대부분 단시간 내에 발달과 성숙, 소멸과정을 거치며 수 시간 전에 예측도 어려운 경우가 많다. 또한 우리나라는 늦봄에서 여름 사이에 대륙성과 해양성 기단의 영향을 받아 대기의 성질이 순압성과 경압성이 복합적으로 나타나기 때문에 국지적인 집중호우시 낙뢰의 발생 예측도 매우 어려운 상황이다. 이러한 낙뢰 발생으로 인한 피해는 매년 꾸준히 발생하고 있는데, 2008년 5월 19일 여수산업단지에는 낙뢰로 인한 정전으로 120억 원의 피해가 발생하였고(경향신문, 2008), 낙뢰로 인한 인명사고도 빈번히 발생하고 있다. 기상청에 의하면 2001년 새로운 낙뢰 관측 장비가 도입된 이래로 2007년 155만 5,230회로 가장 많은 낙뢰가 발생하였다고 한다(기상청, 2008).

이러한 낙뢰 현상을 객관적이고 정량적으로 관측하기 위하여 1987년 기상청은 낙뢰 관측 시스템(Lightning location and protection, LLP)을 도입하여 낙뢰의 위치 및 시간, 강도를 관측하였다(정은실 외, 2002). LLP는 방향 탐지법(Direction finding, DF)을 이용하였으며 2조의 루프 안테나로 방위를 탐지하고 파형을 분석하여 낙뢰의 극성 및 강도를 측정하였다. 그러나 장비의 낮은 정확도와 노후화로 인하여 2001년에 기상청은 최첨단 신 낙뢰관측 시스템(Total lightning detection system, TLDS)을 도입하여 운영하고 있으며, 구 장비(LLP)에 비해 낙뢰 관측 효율과 위치 정확도가 더 높은 것으로 알려져 있다(정은실 외, 2002). TLDS는 대기방전(Cloud-to-ground; CG)을 주로 탐지하는 Improved accuracy from combined technology electronic stability programme (IMPACT ESP)와 구름 방전을 관측하는 Lightning detection and range II(LDAR II)의 두 가지 센서로 구성되어 있다. 한편 한국전력에서는 별도로 1995년 Lightning position and tracking system(LPATS)를 도입한 이후, 2005년 8대를 교체하여 운영 중이다(한전

낙뢰 감시 네트워크, 2008).

현재 기상청에서 운영 중인 TLDS는 낙뢰의 위치를 결정하기 위하여 Time-of-arrival(TOA) 방식과 Magnetic direction finding(MDF) 방식을 사용하고 있다. TOA 방식은 낙뢰로부터 발생된 전기적 신호가 각 센서에 도달하는 시간을 고려하여 위치를 결정하는 방법으로 정확한 위치를 결정하기 위해서는 최소 3개의 관측 센서가 필요하며, MDF 방식은 낙뢰가 발생한 방향을 이용하여 거리를 결정하며 최소 2개의 센서가 필요하다. 대기방전을 감지하는 IMPACT ESP 센서는 TOA 방식과 MDF 방식을 합성하여 낙뢰의 위치를 결정하고, LDAR II 센서는 TOA 방식으로 방전의 위치를 결정한다.

낙뢰 발생이 빈번하고 관측 네트워크가 잘 갖추어진 미국에서는 낙뢰발생에 대한 다양한 통계적 연구가 수행되었다. National Lightning Detection Network(NLDN)에서 관측된 낙뢰 자료를 이용하여 Orville(1991, 1994)과 Orville and Silver(1997)는 1989년부터 1995년까지 미국 전역의 낙뢰밀도를 분석하여 플로리다 지역을 중심으로 하는 미국 남동부 지역에서 $9-13 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도로 낙뢰 밀도가 높고 여름철에 집중되는 계절변동을 제시하였다. Zajac and Rutledge(2001)은 1995-1999년의 자료를 이용하여 하계 뇌우의 대부분은 부극성(음의 전하가 대지로 방전되는) 뇌우이며, 대부분의 지역에서 부극성 낙뢰의 일 변동이 정극성(양의 전하가 대지로 방전되는) 낙뢰의 일 변동에 비해 2시간 정도 선행함을 보였다. 또한 낙뢰 발생이 빈번한 플로리다주를 중심으로 10년(1986-1995)간의 계절별 낙뢰발생 특성이 분석되었고, 지역에 따른 빈도의 차이는 다양한 종관적 배경과 중규모 조건에 의해 결정됨이 밝혀졌다(Hodarish et al., 1997). Orville et al.(2002)은 미국의 NLDN 자료와 Canadian Lightning Detection Network(CLDN) 자료를 처음으로 통합 분석하여 북미지역의 낙뢰발생 특성을 제시하였다. 한편 유럽지역에서는 지중해를 중심으로 중규모 대류 시스템에 동반된 낙뢰에 대한 연구가 수행되었으며(Correoso et al., 2006; Katsanos et al., 2007; Pineda et al., 2007), De Pablo and Soriano(2002)는 이베리아 반도의 낙뢰빈도가 대서양 해수면 온도와 양의 상관성이 있음을 보였다.

이러한 낙뢰발생에 대한 시·공간적인 발생 특성과 더불어 강수와의 관계, 지속시간(duration)과 낙뢰율(flash rate)에 대한 연구도 수행되었다. Sheridan et

al.(1997)은 미국 중남부 지역에서 4-10월 동안에 대기 낙뢰와 평균 강수량 간에 선형적 상관관계가 있음을 보였다. Huffines and Orville(1999)는 낙뢰 지속시간을 분석하여 플로리다 지방에 연 평균 120시간이 발생함을 제시하였고 낙뢰 밀도와 지속시간과의 상관성을 분석하였다. Soriano and Pablo(2002)는 1992-1994년의 3년간 이베리아 반도에서 발생한 낙뢰의 지속시간과 낙뢰율을 분석하여 계절변동과 지역 변동이 크게 나타남을 보였고, 낙뢰율이 지속시간보다는 시공간적 변동이 작음을 보였다.

국내의 경우 강수의 시·공간적인 특성을 이해하고 유사한 특성을 갖는 지역을 구분하는 연구는 꾸준히 이루어졌으나(허창희와 강인식, 1988; 이동규와 박정균, 1999; 나득균 외, 2005; 홍기욱 외, 2006), 낙뢰의 발생특성에 대한 연구는 이에 비해 저조하였다. 이종호와 류찬수(2001)가 1997년 1월-1998년 2월까지 과거 기상청 LLP에서 관측된 자료를 분석하여 경기, 충청 및 서해안 지역에 낙뢰 발생빈도가 높고 시간적으로는 새벽 1-3시와 오후 14-15시에 낙뢰 발생빈도가 높음을 보였다. 또한 우정욱과 심응보(2003)와 Lim and Lee(2005) 각각 1996-2002년, 1996-2000년의 한전 낙뢰 자료를 이용하여 낙뢰 현상을 통계적으로 분석하였다. 이들의 연구에 의하면 낙뢰 현상은 계절적으로는 여름에, 지리적으로는 한반도

서부지역에서 가장 빈번하게 발생함을 보였으며 강수 현상과는 상관성이 높지 않음을 제시하였다. 또한 한반도와 인접한 일본 중서부 지방의 동계 낙뢰는 겨울철 북서 계절풍이 강할 때 활발히 발생하였다(이종호 외, 2003).

국·내외에서 수행된 다양한 연구에도 불구하고 2001년 도입되어 운영중인 기상청 신 낙뢰 관측 시스템(TLDS)의 자료를 활용한 연구는 매년 발간되는 기상청 낙뢰연보를 제외하고는 체계적으로 이루어지지 않았고, 특히 2002년 이후의 최근 낙뢰 발생특성에 대한 분석이 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구의 목적은 낙뢰 탐지효율 및 공간분해능이 우수한 기상청 TLDS 관측 자료를 이용하여 최근(2002-2006) 낙뢰 현상의 시·공간적 발생특성을 통계적으로 분석해 보는 것이다. 이러한 연구는 최근 남한 지역의 낙뢰발생 특성에 대한 정보를 축적할 뿐만 아니라 낙뢰 예측성 향상 및 재해 경감에도 활용될 수 있을 것이다. 또한 Lim and Lee(2005) 등의 과거 연구결과와의 비교를 통하여 우리나라에서 발생한 낙뢰 특성의 변화에 대해서도 분석하고자 한다.

자료 및 연구방법

최근 낙뢰 발생특성의 통계적 분석을 위해 사용된

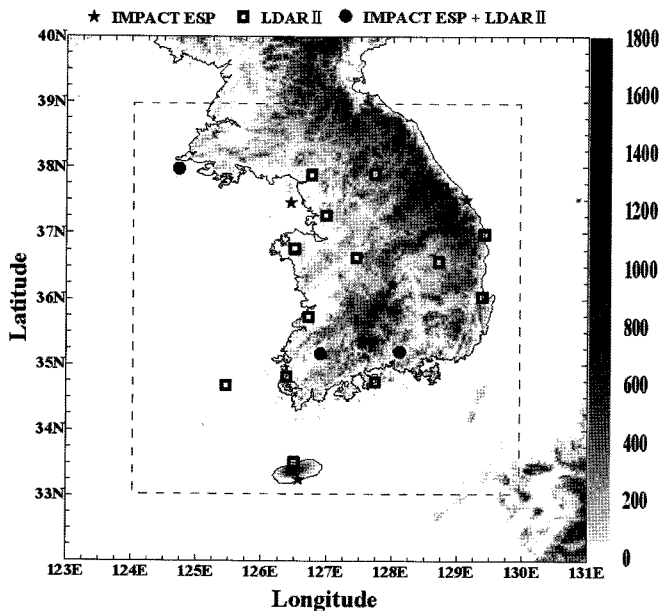


Fig. 1. Distributions of seven IMPACT ESP sensors and seventeen LDAR II sensors currently operating in the South Korea with topography. An inner dotted box is the analysis domain (33-39°N, 124-130°E) used in this study.

월/일/년	시:분:초	위도	경도	강도	M	CE1	CE2	CEE	CEA	CHI	NRS	T
05/20/04	16:41:43.038	37.7938	126.0956	-73.1	0	10.6	1.0	10.6	155	0.4	4	G
05/20/04	16:41:45.259	39.1117	128.7353	+56.0	0	28.9	1.3	22.2	28	5.0	2	G
05/20/04	16:41:57.178	37.1250	124.9335	+8.2	0	13.3	0.7	19.0	107	1.7	2	G
05/20/04	16:42:06.121	38.0735	128.1778	-6.7	0	13.6	0.7	19.4	34	0.2	2	G
05/20/04	16:42:06.449	37.7371	128.2321	-8.0	0	3.6	0.5	7.2	42	0.8	4	G

Fig. 2. An example of collected lightning data.

Table 1. Contents of lightning data observed by TLDS

No.	Abbreviation	Description	Unit
1	Int	Intensity with polarity	KA (kiloampere)
2	M	Maximum multiplicity	
3	CE1	Length of the semi-major axis of the confidence ellipse	km
4	CE2	Length of the semi-minor axis of the confidence ellipse	km
5	CEE	Eccentricity of the confidence ellipse	
6	CEA	Confidence ellipse angle of orientation in degrees from north	degree
7	CHI	Chi-square value of the stroke	
8	NRS	Number of reporting sensors	
9	T	Type of lightning, "C" for cloud, "G" for cloud-to-ground	

자료는 기상청에서 2001년 도입되어 운영 중인 신 낙뢰관측 시스템(TLDS)에서 관측된 자료이다. 자료 기간은 최근 5년(2002-2006)으로 관측센서의 분포와 분석 영역(위도 33-39°N, 경도 124-130°E)은 Fig. 1 과 같다. 현재 기상청에서 운영중인 낙뢰센서는 7개의 IMPACT ESP 센서와 17개의 LDAR II 센서로 전국에 비교적 균일하게 분포하고 있다.

TLDS에서 관측된 낙뢰 자료는 Fig. 2와 같은 형식의 아스키 방식으로 저장되어 있으며 관측 내용과 저장된 형식은 Table 1과 같다. 연구에 사용된 자료는 TOA 센서의 특성상 낙뢰 현상이 관측된 센서의 수(NRS)가 3개 이상인 자료만을 사용하였으며, 시간적으로는 500 ms 이내, 공간적으로는 10 km 이내의 낙뢰는 동일 뇌우로 간주하였다(Lim and Lee, 2005). 또한 분석 영역에서 낙뢰 탐지 효율이 90%로 알려져 있기 때문에(정은실 외, 2002) 이를 보정하기 위하여 낙뢰 빈도에 1.11을 곱하였다. 이는 미국 NLDN의 관측 효율이 70%로 알려져있어 이를 보정하기 위해 1.4를 곱한 것과 같은 방법이다(Orville, 1991, 1994; Livingston et al., 1996; Hodanish et al., 1997; Orville and Silver, 1997; Huffines and Orville, 1999; Boccippio et al., 2000).

낙뢰의 통계적 특성은 크게 다양한 시간규모와 공간분포에 따라 빈도(밀도), 강도, 극성(polarity), 낙뢰 지속시간, 낙뢰율을 분석하였다. 시간 규모는 경년규모에서 일 변동 규모까지 분석하였으며, 선행 연구

(Huffines and Orville, 1999; Zajac and Rutledge, 2001; Orville et al., 2002)에서는 실제 종관관측에서 천둥소리를 듣고 낙뢰를 관측할 수 있는 범위가 20 km(Reap and Orville, 1990) 이내임을 고려하여 0.2° 간격의 격자가 선택되었으나, 본 연구에서는 국내에서 가장 최근 체계적으로 낙뢰 현상을 분석한 Lim and Lee(2005)의 연구방법과 같은 0.25°×0.25° 격자 간격으로 총 625개(동서 방향 25개×남북방향 25개)의 격자에 대하여 분석하였다. 이 격자의 길이는 위도 37°N, 경도 128°E에서 동서 방향으로 약 22.2 km, 남-북 방향으로 약 27.8 km이다.

낙뢰 빈도는 매 격자에서 관측된 총 낙뢰수를 격자의 면적으로 나누어 연간 단위 면적당의 낙뢰밀도(km⁻² yr⁻¹)로 분석을 하였으며 낙뢰 강도 분석을 위해 평균값, 중앙값, 변동폭(사분위 범위, Inter quartile range)을 사용하였다. 낙뢰 지속시간 산출을 위하여 낙뢰 발생 후 15분 이내에 추가적인 낙뢰가 발생하지 않은 경우 낙뢰가 종료된 것으로 간주하였으며, 분석의 용이함을 위하여 Huffines and Orville(1999)과 Soriano and Pablo(2002)가 사용한 방법을 사용하였다. 이것은 모든 분석 격자에 대하여 시간을 15분 간격의 블록으로 나눈 후 낙뢰가 발생한 블록들만의 합을 4로 나누는 방법이다. 또한 낙뢰율은 매 격자에 대하여 총 낙뢰 빈도를 낙뢰 지속시간으로 나눈 것으로 낙뢰가 발생한 경우 단위 시간당 발생한 낙뢰 빈도로 간주할 수 있다.

연구 결과

시간 규모에 따른 낙뢰발생의 특성

Fig. 3은 최근 5년 동안(2002-2006) 전체 분석영역에서의 연도별 낙뢰발생 특성이다. 발생빈도는 경년 변동이 크게 나타나고 있으며 연도별로는 2004년이 35만 번 내외로 낙뢰 빈도(정극성, 부극성 모두)가 가장 적었으며 2006년이 76만 번 내외로 가장 많이 발생하였다. 낙뢰의 극성에 따른 빈도분포는 부극성(Negative)이 정극성(Positive) 낙뢰의 빈도를 압도하여, 전체 낙뢰의 80-90%를 차지한다. 연도별로는 2004년이 92%로 부극성 낙뢰의 비율이 가장 높았으며, 2002년은 84%의 비율로 가장 낮았다. 이러한 전체 낙뢰중 정극성 낙뢰의 비율은 과거 1996-2002년의 한전 관측자료를 이용한 우정욱과 심응보(2003)의

약 20%보다는 적으며, 1997년 1월-1998년 2월의 데이터를 분석한 이종호와 류찬수(2001)의 10%와 미국의 Orville et al.(2002)의 11-12%와 유사한 결과이다. 평균적으로는 정극성 낙뢰가 연간 8만 번 내외, 부극성 낙뢰가 54만 번 정도 발생하였다.

전체 분석영역에서 낙뢰의 경년변동과 더불어 계절과 월에 따른 변동도 크게 나타났다(Fig. 4). 낙뢰가 가장 빈번하게 발생하는 달은 8월로 약 100 만번 정도의 낙뢰(전체의 약 30%)가 발생하였고, 2월이 3,500번 내외로 빈도가 가장 낮게 나타났다. 계절적으로는 여름철 전체의 약 75%인 230 만번의 낙뢰가 발생한 반면, 12-2월의 동계기간에는 약 0.6%인 2 만번 정도로 계절간의 극심한 차이를 보였다. 이러한 결과는 우정욱과 심응보(2003), Lim and Lee(2005)의 계절 및 월별 변동 패턴과 유사하나, 과거에 비해

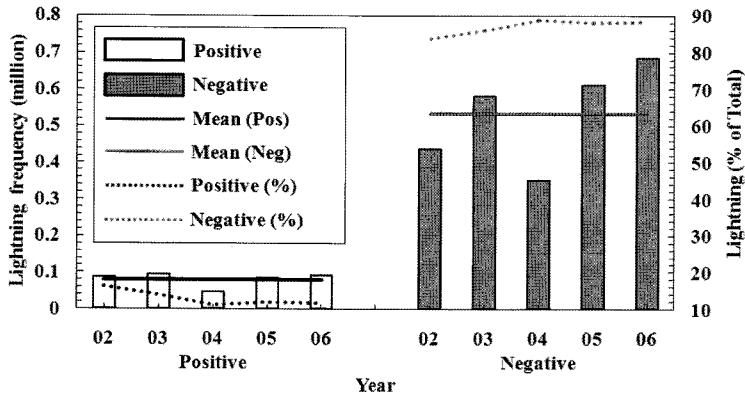


Fig. 3. Annual frequencies (bar), fractions (dotted line), and mean values (horizontal solid line) of positive and negative flashes for the whole analysis domain between 2002 and 2006.

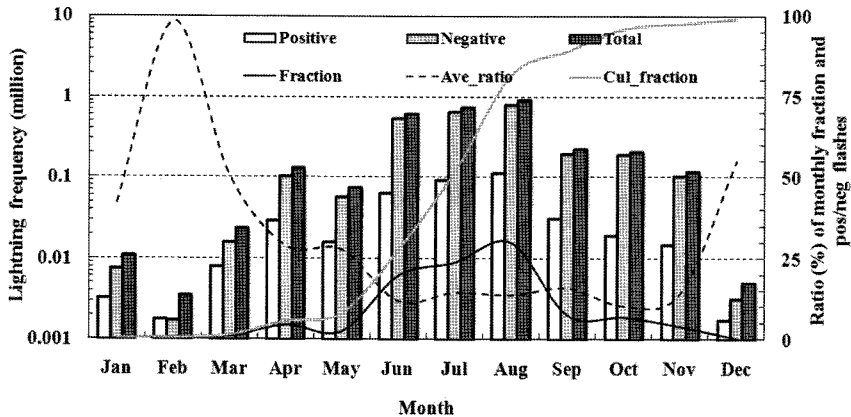


Fig. 4. Monthly variations of the numbers (bar) of positive, negative, and total flashes, monthly fraction (black solid line), monthly cumulated fraction (gray solid line), and the ratio (black dashed line) of positive to negative flashes for the whole analysis domain between 2002 and 2006.

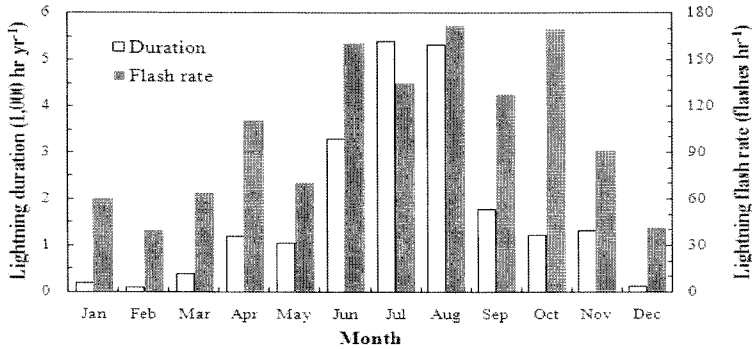


Fig. 5. Same as in Fig. 4 except for the lightning duration (hr yr⁻¹) and the flash rate (flashes hr⁻¹).

6월의 발생빈도가 상대적으로 증가한 것을 알 수 있다. 극성에 따른 낙뢰 발생의 비율(정극성/부극성)을 보면, 6월에서 11월까지 정극성 낙뢰가 음극성 낙뢰의 15-20% 수준이나, 12월부터는 정극성 낙뢰의 비율이 증가하여 2월경에는 98%로 최대값이 나타났다. 따라서 2월에는 연중 낙뢰빈도가 가장 적지만, 정극성 낙뢰가 부극성 낙뢰가 거의 같은 비율로 발생함을 알 수 있다.

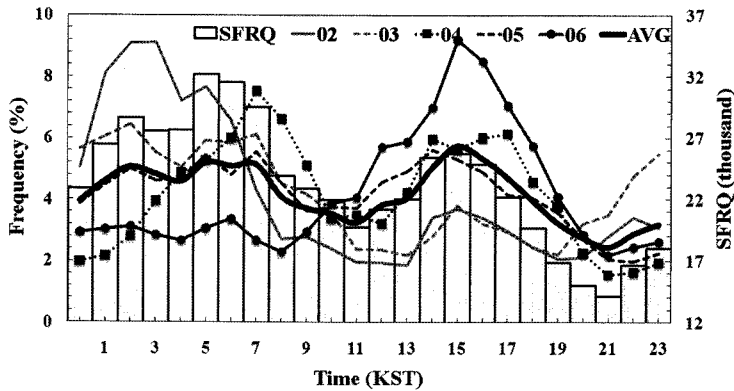
낙뢰의 빈도와 더불어 낙뢰의 지속시간은 낙뢰 활동의 정도를 판단해볼 수 있는 하나의 지표로 활용될 수 있다. Fig. 5에서 낙뢰 지속시간의 강한 계절 및 월별 변동이 나타났는데, 6월에 급격히 증가하여 7월과 8월에 각각 5,385시간과 5,315시간으로 최대 지속시간을 보인 뒤 9월에 급격히 감소하였다. 우기에 전체의 66%인 14,003시간이 나타났으며 겨울철(12-2월)에는 1.9%인 398시간의 지속시간을 보였다. 전체 낙뢰 빈도를 낙뢰지속시간으로 나눈 낙뢰율은 Soriano and Pablo(2002)의 결과처럼 지속시간에 비해 약한 계절 변동이 나타났는데, 이는 낙뢰 지속시간과 낙뢰빈도에 밀접한 관계가 있기 때문으로 분석된다. 6, 8, 10월이 낙뢰발생시 시간당 160-170회 정도의 높은 낙뢰율이 나타나지만, 8월에는 낙뢰지속시간 및 낙뢰율이 높게 나타났고, 낙뢰빈도가 가장 적은 2월(Fig. 4)은 낙뢰 발생 시간당 39.9회 정도의 가장 낮은 낙뢰율이 나타났다.

Fig. 6a는 전체분석 영역에서 우기 동안에 낙뢰 빈도의 일변동을 나타낸 것이다. 평균적으로 새벽(2시, 5-7시)과 오후 중반(15시)에 전체 낙뢰의 5.1-5.7% 정도의 빈도로 이봉형(bi-modal)의 최대빈도가 나타나고 이러한 일 변동은 해에 따라 경년변동이 크게 나타났다. 2002년과 2003년은 각각 새벽 2시에 9%, 새

벽 2시 및 5-7시에 5-6% 최대빈도가 나타났고 오후 15시 경에 3-4% 정도로 오후 극대가 약하게 나타났다. 2004년과 2005년은 새벽과 오후의 두 번의 최대 빈도가 잘 나타났으며, 2006년은 새벽 극대가 거의 나타나지 않으며 오후 중반 15시 경에 9.1%의 일 중 최대 빈도를 보였다. 이러한 낙뢰 발생의 이봉형 일 변동은 과거 Lim and Lee(2005)의 결과와 비교했을 때 새벽시간의 낙뢰 비율이 증가했으며, 과거 30년간(1973-2002)의 우기 기간 중에 이봉형 일 강수의 양상과 일치함을 알 수 있다(정지현과 서명석, 2005). 한편, 강한 낙뢰의 일 변동을 분석하기 위하여 전체 낙뢰강도의 분포(Fig. 7)에서 얻어진 3분위 값의 강도(25.2 KA)를 초과하는 낙뢰를 강한 낙뢰로 정의하고 이 임계값을 초과하는 빈도를 SFRQ로 하였다. 시간에 따른 SFRQ 분포에서 새벽 5시경에 약 32,000 회로 최대 빈도가 나타났으며, 15시에 26,000회 정도로 나타났다. 따라서 평균적인 낙뢰 빈도는 오후 15시를 전후로 최대로 나타났으나 25.2 KA 이상의 강한 낙뢰의 빈도는 새벽 5시 전후에 최대로 나타남을 알 수 있다.

낙뢰 빈도의 일 변동과 더불어 낙뢰 강도의 일 변동을 살펴보기 위하여 시간에 따른 낙뢰 강도와 변동성을 분석하였다(Fig. 6b). 전체적인 낙뢰강도(Fig. 7)가 큰 값쪽으로 치우친 매프러운 감마분포(positively skewed gamma distribution)를 보이기 때문에 낙뢰강도의 평균값은 중앙값에 비해 3.6-4.2 KA 정도 큰 값을 보였지만 시간에 따른 그 변화 양상은 유사하게 나타났다. 낙뢰 강도는 낙뢰 빈도가 많은 오후 중반(15-16시)에 중앙값과 평균값이 각각 18.9 KA, 15.5 KA 정도로 약한 반면, 새벽 5시 전후와 오전 10시 전후에 중앙값과 평균값이 17-18 KA, 22KA

(a) Lightning frequency (%)



(b) Lightning intensity (KA)

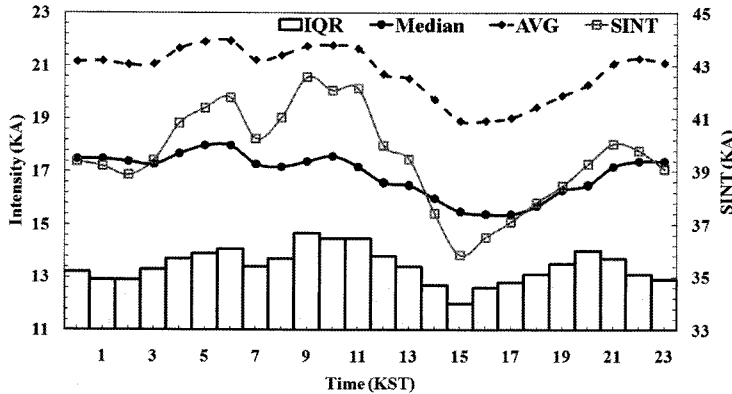


Fig. 6. Diurnal variations of (a) total flashes and (b) lightning intensity (KA) occurred in the analysis domain during JJAS for the years 2002-2006. SFRQ and SINT denote the frequency and the mean intensity (KA) over 25.2 KA (75th percentile of the whole intensity), respectively.

정도로 강하게 나타났다. 또한 25.2 KA 강도를 초과하는 낙뢰들의 평균강도로 정의되는 SINT의 분포에서도 15시를 전후로 한 오후중반에 35.86 KA로 가장 약한 강도를 보였다. 따라서, 오후 중반은 전체적인 낙뢰빈도도 높고 25.2 KA를 넘는 낙뢰의 빈도(SFRQ)도 높지만(Fig. 6a) 상대적으로 약한 낙뢰의 비중이 더 높다는 것을 알 수 있다. 반면, 5시 전후의 새벽은 낙뢰 빈도와 낙뢰 강도가 다른 시간대에 비해 높으며, 특히 9-11시의 오전은 낙뢰빈도는 낮지만 발생하는 낙뢰의 강도가 강하다는 것을 알 수 있다. 중앙값을 기준으로 50%의 데이터가 분포하는 범위의 폭을 나타내는 사분위 범위(IQR, defined as the difference between 75th percentile and 25th percentile)의 시간분포에서 15시에 12 KA로 최소, 9시에 14.7 KA로 최대값을 보였다.

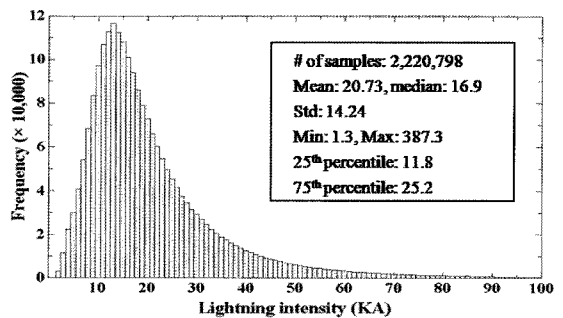


Fig. 7. Lightning intensity (KA) histogram with statistical values of intensity for the entire analysis domain during JJAS between 2002 and 2006.

낙뢰 발생의 공간분포 특성

Fig. 8은 최근 5년간의 우기에 발생한 낙뢰에 대하여, 공간분포 특성 및 지리적 환경과의 관계를 분석

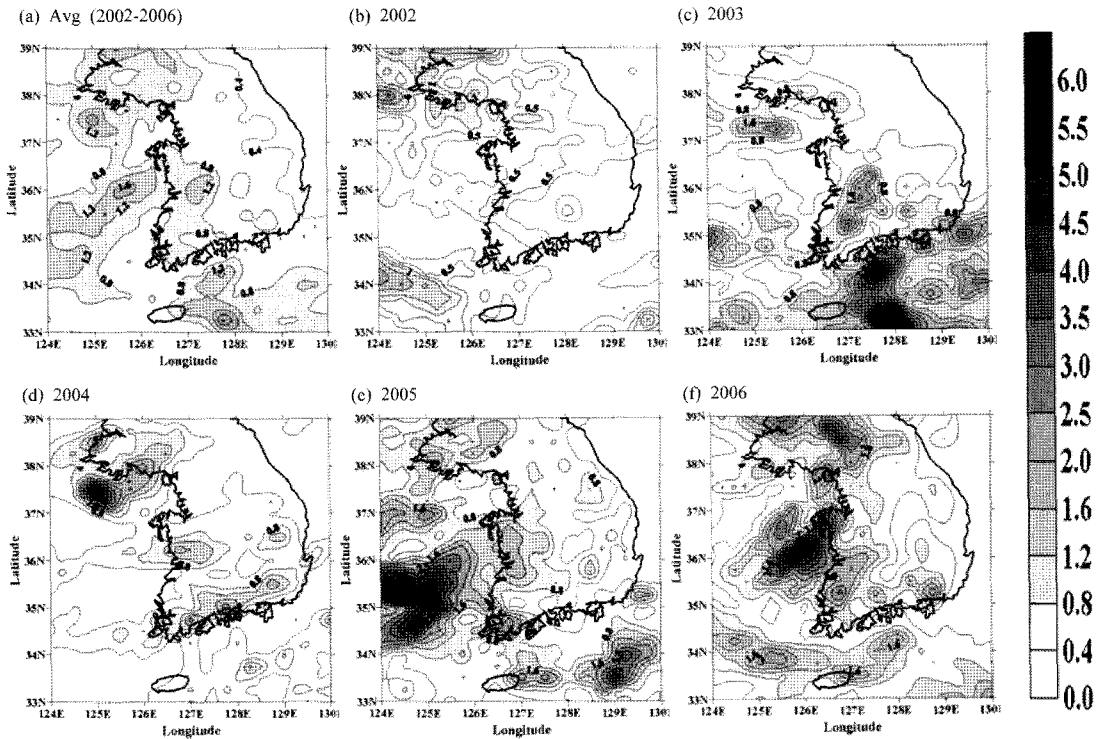


Fig. 8. Distributions of total lightning density ($\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$) during JJAS for the years 2002-2006 over South Korea. Measured values were multiplied by 1.11 to correct 90% detection efficiency.

한 것이다. 낙뢰 밀도는 평균적으로 한반도 서부 지역 및 남해상과 서해상에서 $1.2\text{-}1.6 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도로 높게 나타났으며, 영동 및 동해 지역으로는 밀도가 $0.4 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이하로 낮게 분포했다. 내륙지역에서는 충청 및 호남지역에서 $0.8\text{-}1.2 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 의 높은 낙뢰 밀도를 보였다. 이러한 낙뢰 밀도 및 공간적인 발생 특성은 경년 변동이 크게 나타나는데, 2002년에는 주로 중서부 해상 및 남서해상에서 발생하였다. 2003년은 중동부 내륙 및 동해를 제외한 남부 및 서해상과 남해상에서 낙뢰 밀도가 높는데, 특히 남해상의 밀도가 높아 제주 남동쪽으로는 $6 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도의 밀도가 나타났다. 2004년은 황해도 남쪽 해상에서 $5.61 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 로 최고 밀도를 보였고 충남 및 남부지방에서 $0.8\text{-}1.6 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 의 낙뢰 밀도가 나타났다. 2005년과 2006년은 서해상을 중심으로 $6.0 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 정도의 높은 낙뢰 밀도가 나타나며, 이에 인접한 서부 내륙 지역에서 낙뢰 밀도가 높았다. Lim and Lee(2005)의 결과와 비교할 때 한반도 서부내륙에서 발생빈도가 높고 동해안 지역에서 낮은 점은 비교적 일치하나 서해 및 남해 바다에서 과거에는 발생빈도가 매우

낮았으나 본 연구에서는 발생빈도가 매우 높게 나타나 큰 대조를 보이고 있다.

Fig. 9는 2002년부터 2006년까지의 우기에 낙뢰의 극성에 따른 발생 밀도의 분포이다. Fig. 4에서 6-9월의 정극성 낙뢰의 발생 비율(정극성/부극성)이 15% 정도이기 때문에 부극성 낙뢰의 밀도분포는 전체 낙뢰밀도 분포(Fig. 8a)와 유사한 공간 분포 및 수치를 보인다. 하계 정극성 낙뢰 분포의 경우 대부분의 분석 영역에서는 밀도가 낮으나 충남 및 호남 지역과 남해상 지역에서 $0.4 \text{ km}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ 이상의 밀도가 집중되어 나타난다. 또한 전체 분석 영역에서 하계 정극성/부극성의 비율이 15% 내외이지만(Fig. 4) 공간적으로는 소백산맥 서쪽의 일부 내륙지역과 남해상 지역에 60% 이상으로 나타나는데(Fig. 9c), 이러한 공간분포 특성의 원인에 대해서는 산악 지형(Fig. 1)과 관계가 있는 것으로 추정되나 보다 깊이 있는 연구가 필요하다.

전체 분석영역에 대한 낙뢰강도 분포가(Fig. 7) 오른쪽으로 치우친 감마분포를 따르기 때문에 극값에 민감하게 반응하지 않는 중앙값(median value)을 사

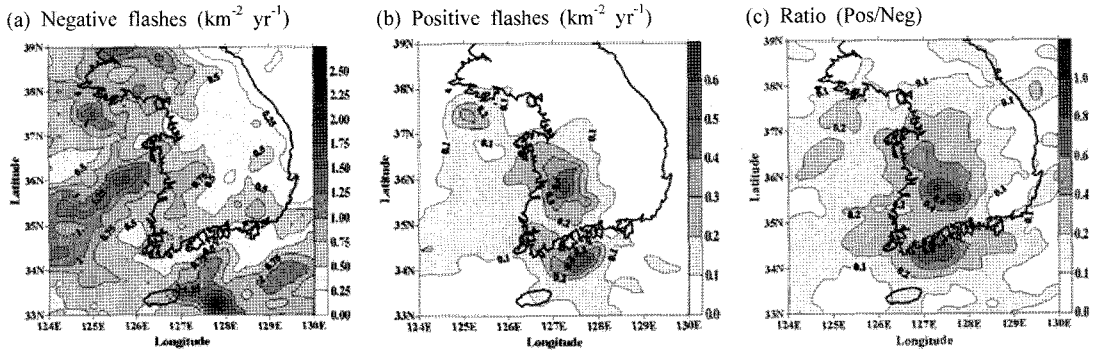


Fig. 9. Same as in Fig. 8 except for the density ($\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$) of (a) negative, (b) positive flashes, and (c) ratio of positive to negative flashes.

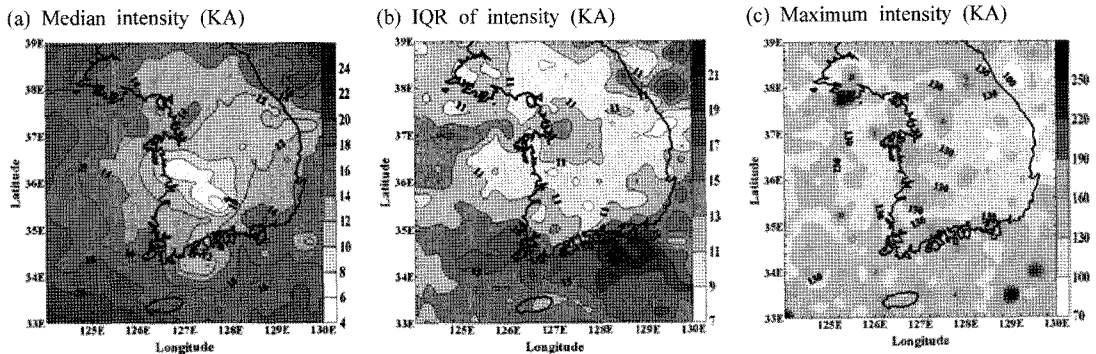


Fig. 10. Same as in Fig. 8 except for (a) median lightning intensity (KA), (b) inter quartile range (IQR) of intensity (KA), and (c) maximum intensity (KA).

용하여 2002-2006년 6-9월 동안에 낙뢰 강도의 공간 분포를 살펴보았다(Fig. 10). 낙뢰 강도는 낙뢰밀도가 높은 충청 및 전북지역에서 6-10 KA 정도로 가장 약하게 나타났으며, 낙뢰활동이 왕성한 서해인근 해상에 10-14 KA, 남해상에 12-14 KA 정도로 나타났다. 내륙지역에서는 영남 및 경기·강원 북부지역에 12-14 KA의 분포를 보였으며, 전반적으로 내륙에 비해 해상에서 낙뢰 강도가 높게 분포한다. 대체적으로 내륙지역에서 낙뢰빈도는 높으나 강도가 약한 것은 돌출된 지형등에 의해 대전되기가 용이하고 구름하부와 지형사이의 거리가 짧아 상대적으로 약한 전위차에서도 구름-대지 방전이 발생하기 때문으로 추정된다. 이러한 관점에서 낙뢰 밀도가 높은 충청 및 호남지방에서 소백산맥 줄기(Fig. 1)를 따라 낙뢰 강도가 약하게 나타남을 알 수 있다.

낙뢰강도의 변동성을 공간적으로 살펴보기 위해 낙뢰강도의 사분위수 범위(IQR)을 매 격자에 대하여 분석하였다(Fig. 10b). 남해상에서 15-19 KA로 높은

분포를 보인 가운데 내륙에서는 경기 및 충청 북부 지역과 남서부 및 영남 지역에 11-13 KA의 범위가 나타났다. 낙뢰 강도와 마찬가지로 전반적인 변동폭도 해상이 내륙지역에 비해 크게 나타났다. 분석 격자에 따른 최대 낙뢰강도 분포에서(Fig. 10c) 강원 남부내륙 지역에서 78 KA인 반면, 웅진반도 남쪽으로 387 KA로 공간적인 변동성이 크게 나타났다. 내륙지역에서는 낙뢰 발생밀도가 높은 서부지역과 경기·강원 북부지역에 걸쳐 130-180 KA정도의 최대 낙뢰강도가 관측되었고, 낙뢰밀도가 높은 서해인근 해상으로는 100-130 KA 범위로 나타났다. 분석기간 중에 최대 정극성 낙뢰와 최대 부극성 낙뢰 강도는 각각 2003년 7월 26일 05시 22분에 387.3 KA(32.9°N, 123.9°E), 2005년 8월 10일 03시 26분에 -340.5 KA(33.5°N, 129.0°E)로 관측되었다.

강도가 강한 낙뢰의 발생빈도를 공간적으로 살펴보기 위하여 전체 분석 영역의 낙뢰강도 분포에서 3분위 값인 25.2KA와 중앙값 16.9KA(Fig. 7)를 넘는

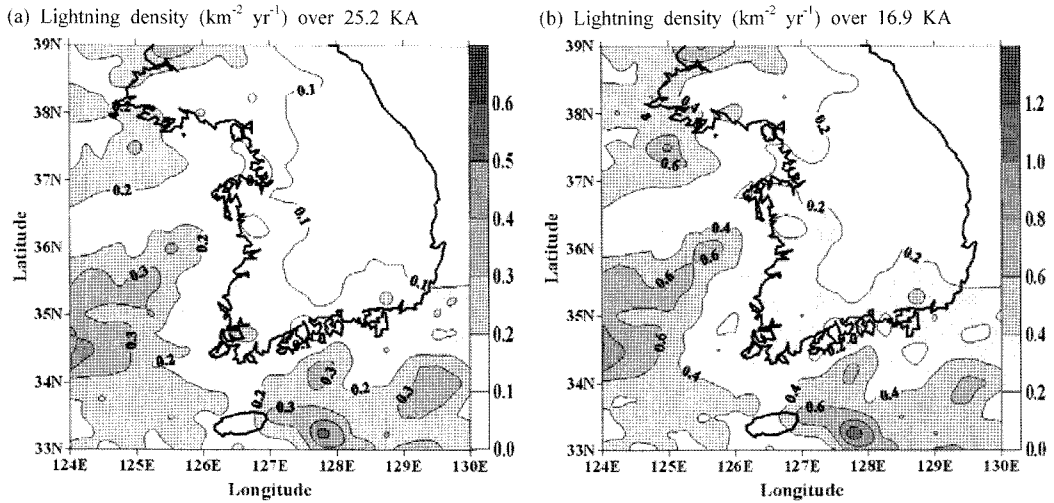


Fig. 11. Same as in Fig. 8 except for the lightning density ($\text{km}^{-2} \text{yr}^{-1}$) over (a) 25.2 KA and (b) 16.9 KA, respectively.

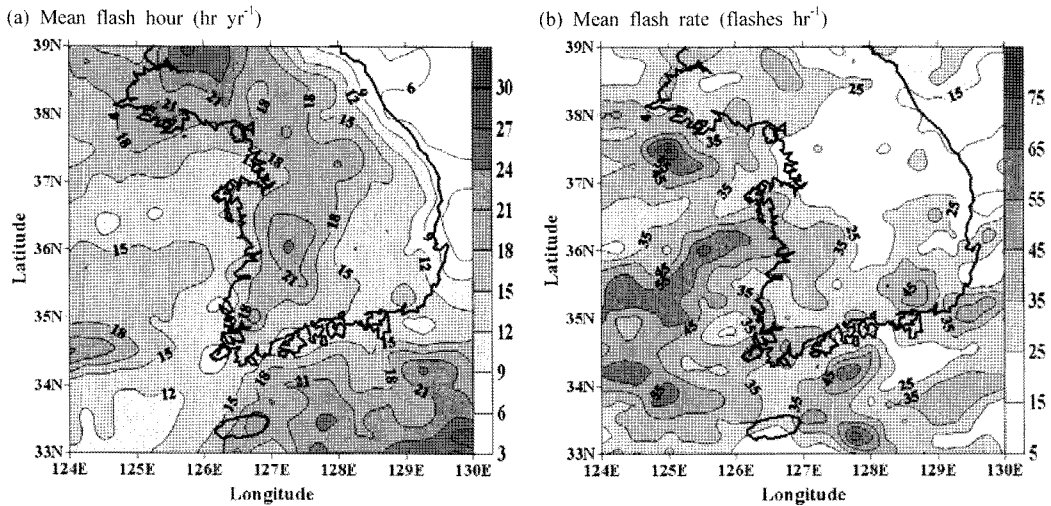


Fig. 12. Same as in Fig. 8 except for (a) mean flash hour per year (hr yr^{-1}) and (b) mean flash rate (flashes hr^{-1}).

낙뢰 발생 밀도를 공간적으로 분석하였다(Fig. 11). (a)와 (b)의 분포는 공간적으로 거의 일치하며 (b)의 낙뢰밀도는 (a)의 거의 2배로 나타난다. 이는 상위 25% 또는 상위 50%의 강도에 해당하는 강한 낙뢰가 동해를 제외한 서부 및 남부 지방에서 발생하고, 낙뢰의 강도 분포가 매끄러운 감마분포를 따르기 때문으로 분석된다. 특정 임계값 이상의 낙뢰밀도의 분포는 Fig. 8a와 유사하게 서부지역 및 남부지역에서 높게 나타나며 기타 내륙지역에서는 아주 낮게 나타난다. 따라서 상위 50% 또는 그 이상에 해당하는 비교적 강한 낙뢰는 공간적으로 주로 서부 및 남부해안 지역에서 발생함을 알 수 있다. 바다에서의 낙뢰강도

가 상대적으로 강한 것은 해수면인 평면이기 때문에 구름과 해수면사이의 거리가 멀어 방전이 일어나기 위해서는 전위차가 커야하기 때문으로 추정된다.

Fig. 12는 낙뢰 지속시간 및 낙뢰율의 공간분포 특성이다. 낙뢰 지속시간은 황해도부터 시작하여 전라도까지의 한반도 서부 및 강원 영서 지역에 걸쳐 연평균 하계기간(6-9월)에 $15\text{-}24 \text{ hr yr}^{-1}$ 정도로 나타나고 있으며 영동 및 영남 지방은 $6\text{-}15 \text{ hr yr}^{-1}$ 의 분포를 보이고 있다. 낙뢰 빈도가 낮은 동해에서는 6 hr yr^{-1} 미만인 반면, 남해상에서는 전반적으로 18 hr yr^{-1} 이상 높게 나타나고 있다. 낙뢰가 발생했을 경우 단위 시간당 낙뢰빈도로 볼 수 있는 낙뢰율(Fig. 12b)

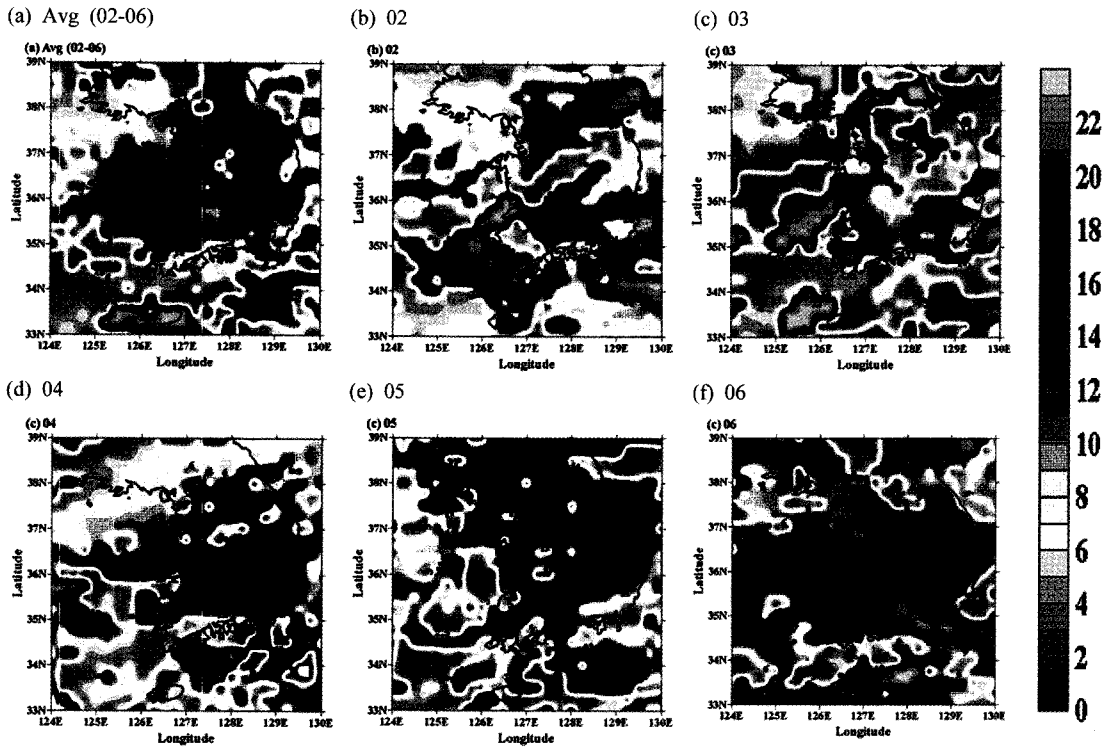


Fig. 13. Same as in 8 except for the most frequent time of lightning strikes.

에서 낙뢰밀도가 높고 지속시간이 짧은 서해상을 중심으로 $40 \text{ flashes hr}^{-1}$ 이상으로 높게 나타나고 중부 내륙지역을 중심으로는 $25 \text{ flashes hr}^{-1}$ 이하로 낮게 나타났다. 따라서 같은 위도의 충남 및 호남 지역에 비해 서해는 낙뢰가 발생하기 어렵기 때문에 지속시간은 짧고, 일단 발생하면 빈도도 많고 강도도 강하다고 볼 수 있다. 또한 내륙지역은 해상에 비해 (동해 제외) 낙뢰가 빈번히 발생하여 지속 시간은 길지만 서해에 비해 낙뢰 집중도는 낮다고 볼 수 있다.

Fig. 13은 낙뢰의 최대발생 시간을 연도에 따라 공간적으로 나타낸 것이다. (a)는 2002년부터 2006년까지 평균된 최대 발생시간으로 내륙 지역에서는 4개의 특성이 나타난다. 남한지역에서 분지 및 평야 지역(Fig. 1)에서는 오후 중반에서 야간(15-20시)에 최대빈도가 나타나며 태백산맥과 소백산맥으로 이어지는 산악지역에서는 9-15시경에 낙뢰가 가장 빈번하였다. 한편 동해안과 남해안은 주로 오전중에 발생빈도가 높았으며 경기 북부지역 및 황해도 지역에서는 새벽에 낙뢰가 많이 발생하는 특성을 보인다. 낙뢰발생 밀도가 가장 높게 나타났던 서해 및 남해에서는 각각 오후중반과 새벽에 최대빈도를 보였다. 이러한

낙뢰의 최대발생 시간의 공간분포도 경년 변동을 보이는데, 2002년과 2003년은 새벽 극대가 우세한 반면, 2005년과 2006년은 오후 중반에 극대가 뚜렷하게 나타난다.

요약 및 결론

본 연구에서는 기상청 신 낙뢰관측 시스템에서 관측된 최근 5년(2002-2006)의 자료를 이용하여 낙뢰 빈도, 강도, 지속시간 및 낙뢰율의 특성을 시·공간적으로 분석하였다. 이러한 결과는 최근 남한 지역의 낙뢰 발생특성을 이해하고 낙뢰 예측성 향상 및 재해경감에 기본자료로 활용될 수 있을 것이다.

연별 낙뢰 발생 빈도는 2006년에 약 76만 번으로 가장 많았고, 2004년은 약 35만 번으로 가장 적게 발생하여 연도에 따라 낙뢰의 경년 변동이 크게 발생하였다. 5년 평균된 월별 발생빈도에서는 8월에 백만 번 내외로 가장 높은 빈도를 보였으며 2월에는 3,500번 내외로 가장 적게 발생하였다. 계절적으로는 여름철에 연 낙뢰의 75%가 발생하였으며, 겨울에는 전체 낙뢰의 0.6% 정도가 발생하여 계절변동도 크게

나타났다. 여름철에 정극성 낙뢰가 부극성 낙뢰의 15% 정도로 나타나지만, 겨울에는 정극성 낙뢰의 비율이 증가하여 2월경에 98% 정도로 최대치를 보였다. 낙뢰 지속시간은 낙뢰빈도와 유사한 계절 및 월 변동을 보였으나 낙뢰율의 계절변동은 이에 비해 약하게 나타났다.

낙뢰의 빈도는 평균적으로 새벽(2시, 5-7시)과 오후 중반(15시)에 두 번의 최대가 나타나지만 해에 따라 경년 변동이 크게 나타났다. 낙뢰 강도는 15시에 가장 약한 반면 새벽 5시 전후와 오전 10시 전후에 평균값이 22 KA 정도로 최대값을 보였다. 25.2 KA를 초과하는 강도의 강한 낙뢰의 빈도는 새벽 5시 경에 최대로 나타났고 강도도 강한 반면, 15시 전후의 오후 중반은 전체적인 낙뢰빈도는 높으나 상대적으로 약한 낙뢰의 비중이 높게 나타났다. 또한 오전 9-11시는 낙뢰의 빈도는 낮지만 발생하는 낙뢰의 강도가 높았다.

하계(6-9월) 낙뢰 발생의 공간적인 특성으로는, 평균적으로 한반도 서부 지역 및 서해상과 남해상에서 낙뢰밀도가 높으며, 내륙지역에서는 영동 및 동해 지역에서 밀도가 낮았고 충청 및 호남지역에서 밀도가 높게 나타났다. 전체 분석영역에서 여름에 정극성/부극성의 비율이 0.15 내외로 낮게 나타났지만, 충청 및 호남 지역에서는 여름에도 정극성의 비율이 0.4 이상으로 높게 나타났다. 낙뢰 강도의 공간분포에서는 충남 및 전북 지역을 중심으로 6-10 KA(중양값)의 약한 강도가 나타났고, 일반적으로 해상지역이 내륙지역에 비해 강하게 나타났다. 따라서 충청 및 호남 일부지역에서 정극성 낙뢰의 비율이 높고 낙뢰 강도가 약하기 때문에 관측된 정극성 대지방전이 구름내 방전일 가능성이 있어 해석에 주의할 필요가 있다(Cummins et al., 1998; Wacker and Orville, 1999a, 1999b; Zajac and Rutledge, 2001; Orville et al., 2002).

낙뢰 지속시간 및 낙뢰율 분포에서 영동 및 영남을 제외한 내륙지역은 낙뢰가 발생하는 빈도와 더불어 낙뢰 지속시간도 연간 15-24 hr 정도로 길게 나타났지만, 서해상 지역은 낙뢰 밀도는 높으나 지속시간이 짧다. 이것은 낙뢰가 시작되면 낙뢰의 집중도가 높고 강도가 강한 낙뢰가 발생됨을 제시한다. 낙뢰 최대발생 시간의 공간분포에서 서해상 및 대부분의 내륙지역은 오후 중반에서 저녁 사이에 최대로 나타났으나, 내륙 산간지방이나 남해안 및 동해안 지방에

서는 오전에 빈도가 가장 많았고 경기북부 및 황해도 지역에서는 새벽에 최대빈도를 보였다. 최대발생 시간의 공간분포도 경년변동이 크게 나타났다.

본 연구의 결과는 과거 국내의 선행 연구들(이종호와 류찬수, 2001; 우정욱과 심응보, 2003; Lim and Lee, 2005)과 낙뢰빈도 및 계절·일 변동의 결과가 다소간의 차이가 있었는데, 이는 상이한 데이터의 출처 및 관측 방식, 최근 증가된 관측센서, 기상현상의 경년변동 및 기후변화, 사용된 품질검사와 공간 분해능 차이 등의 결과로 추정된다. 이번 연구에서는 최근 5년간의 데이터를 사용하여 남한 지역의 낙뢰 발생 특성을 분석하였으나, 경년변동이 크고 분석기간이 짧아 남한지역의 일반적인 낙뢰특성이라고 보기는 어려울 것이다. 따라서 추후 신 낙뢰관측 시스템의 데이터가 다년간 축적되어 남한지역의 일반적인 낙뢰 특성이 분석되기를 기대한다.

사 사

이 연구는 기상청 기상지진기술개발사업(CATER 2009-3114)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

- 나득균, 박중흡, 서명석, 홍윤, 2005, 종관적 특성에 따른 남한 강수 특성 분석: 30년(1973-2002) 기후통계. 한국지구과학회지, 26, 732-743.
- 우정욱, 심응보, 2003, 낙뢰측정에 대한 기술동향과 LPATS 데이터에 의한 한반도 낙뢰현황. 조명·전기설비학회지, 17, 16-23.
- 이동규, 박정균, 1999, 군집분석을 이용한 남한의 여름철 강수지역 구분. 한국기상학회지, 35, 511-518.
- 이종호, 류찬수, 2001, 한반도의 낙뢰 특성 분석. 대기지, 11, 255-258.
- 이종호, 河崎善一郎, 류찬수, 2003, 일본 중서부지방에서 발생하는 동계 뇌 방전의 특징. 한국지구과학회지, 24, 181-189.
- 정은실, 이종호, 김병선, 권두순, 2002, 기상청 신 낙뢰관측 시스템의 특성 및 자료 활용방안. 대기지, 12, 580-583.
- 허창희, 강인식, 1988, 한국지역 강수의 변동성에 관한 연구. 한국기상학회지, 24, 38-48.
- 홍기욱, 서명석, 나득균, 2006, 최근 30년간(1976-2005) 우리나라 강수의 시·공간 변동과 지리환경. 한국지구과학회지, 27, 433-449.
- Boccippio, D.J., Cummins, K., Christian, H.J., and Goodman, S.J., 2001, Combined satellite and surface-based estimation of the intracloud-cloud-to-ground lightning

- ratio over the continental United States. *Monthly Weather Review*, 129, 108-122.
- Correoso, J.F., Hernandez, E., Garcia-Herrera, R., Barriopedro, D., and Paredes, D., 2006, A 3-year study of cloud-to-ground lightning flash characteristics of mesoscale convective systems over the Western Mediterranean Sea. *Atmospheric Research*, 79, 89-107.
- Cummins, K.L., Murphy, M.J., Bardo, E.A., Hiscox, W.L., Pyle, R.B., and Pifer, A.E., 1998, A combined TOA/MDF thchnology upgrade of the U.S. national lightning detection network. *Journal of Geophysical Research*, 103, 9035-9044.
- De Pablo, F., Soriano, L.R., 2002, Relationship between cloud-to-ground lightning flashes over the Iberian Peninsula and sea surface temperature. *Journal of the Royal Meteorological Society*, 128, 173-183.
- Hodanish, S., Sharp, D., Collins, W., Paxton, C., and Orville, R.E., 1997, A 10-yr monthly lightning climatology of Florida, 1986-95. *Weather and Forecasting*, 12, 439-448.
- Huffines, G.R. and Orville, R.E., 1999, Lightning ground flash density and thunderstorm duration in the continental United States: 1989-96. *Journal of Applied Meteorology*, 38, 1013-1019.
- Katsanos, D., Lagouvardos, K., Kotroni, V., and Argiriou, A., 2007, Combined analysis of rainfall and lightning data produced by mesoscale systems in the central and eastern Mediterranean. *Atmospheric Research*, 83, 55-63.
- Lim, E. and Lee, T.-Y., 2005, Statistical characteristics of lightning over the Korean Peninsula for 1996-2000. *Journal of the Korean Meteorological Society*, 41, 41-55.
- Livingston, E.S., Nielson-Gammon, J.W., and Orville, R.E., 1996, A climatology, synoptic assessment, and thermodynamic evaluation for cloud-to-ground lightning in Georgia: A study for the 1996 Summer Olympics. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77, 1483-1495.
- Orville, R.E., 1991, Lightning ground flash density in the contiguous United States-1989. *Monthly Weather Review*, 119, 573-577.
- Orville, R.E., 1994, Cloud-to-ground lightning flash characteristics in the contiguous United States: 1989-1991. *Journal of Geophysical Research*, 99, 10833-10841.
- Orville, R.E. and Silver, A.C., 1997, Lightning ground flash density in the contiguous United States: 1992-95. *Monthly Weather Review*, 125, 631-638.
- Orville, R.E., Huffines, G.R., Burrows, W.R., Holle, R.L., and Cummins, K.L., 2002, The North American lightning detection network (NALDN)-First results: 1998-2000. *Monthly Weather Review*, 130, 2098-2109.
- Pineda, N., Rigo, R., Bech, J., and Soler, X., 2007, Lightning and precipitation relationship in summer thunderstorms: Case studies in the North Western Mediterranean region. *Atmospheric Research*, 85, 159-170.
- Reap, R.M. and Orville, R.E., 1990, The relationships between network lightning locations and surface hourly observations of thunderstorms. *Monthly Weather Review*, 118, 94-118.
- Sheridan, S.C., Griffiths, J.F., and Orville, R.E., 1997, Warm season cloud-to-ground lightning-precipitation relationships in the South-central United States. *Weather and Forecasting*, 12, 449-458.
- Soriano, L.R. and Pablo, F.D., 2002, Study of lightning event duration and flash rate in the Iberian peninsula using cloud-to-ground lightning data. *Atmospheric Research*, 61, 189-201.
- Wacker, R.S. and Orville, R.E., 1999a, Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 U.S. National Lightning Detection Network upgrade: Part I. Observations. *Journal of Geophysical Research*, 104, 2151-2157.
- Wacker, R.S. and Orville, R.E., 1999b, Changes in measured lightning flash count and return stroke peak current after the 1994 U.S. National Lightning Detection Network upgrade: Part II. Theory. *Journal of Geophysical Research*, 104, 2159-2162.
- Zajac, B.A. and Rutledge, S.A., 2001, Cloud-to-ground lightning activity in the contiguous United States from 1995 to 1999. *Monthly Weather Review*, 129, 999-1019.
- 경향신문, 2008, 여수산단 정전으로 인한 직접 피해액만 120억. http://news.khan.co.kr/kh_news/khan_art_view.html?artid=200805201637081&code=950312 (검색일: 2009. 2. 13.)
- 기상청, 2008, 보도자료. <http://web.kma.go.kr/open/info/notify/notify.jsp?page=1&num=1187807&mode=view&field=subject&text=%B3%AB%B7%DA&order=&dir=&bid=notify&ses=> (검색일: 2009. 2. 13.)
- 한전 낙뢰 감시 네트워크, 2008, Old-new system 비교. http://www.lightning.or.kr/info/info_sub1.jsp?menu=1 (검색일: 2009. 2. 13.)