2006-2007년 여름 사례로 본 구름-지면 낙뢰와 강우의 관계

오석근¹ · 서명석^{1,*} · 이윤정²

¹공주대학교 대기과학과, 314-701, 충남 공주시 신관동 182

²(주)환경예측연구소, 302-831, 대전시 서구 둔산1동 1380-1

On the Relation Between Cloud-to-Ground Lightning and Rainfall During 2006 and 2007 Summer Cases

Seok-Geun Oh¹, Myoung-Seok Suh^{1,*}, and Yun-Jeong Lee²

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

²Environmental Prediction Co. Ltd., Daejeon 302-831, Korea

Abstract: A relationship between cloud-to-ground lightning and rainfall was investigated by using the two-years (2006-2007) summer lightning data and the automatic weather stations (AWSs) data of the Korea Meteorological Administration. The negative lightning occurred at the core of highly concentrated convection, which is often accompanied with heavy rains. Whereas most positive lightning occurred at the anvil cloud with low density and light rains. The rainfall intensity is strongest when the negative and positive lightning occurred concurrently, and one with lightning is much stronger than that without lightning. A portion of the positive lightning of the total lightning was less than 10% during summer seasons, and the lightning without rains was about 34%. The rain rate was strongly correlated with the negative flash rate, and the correlation coefficients varied between 0.87 and 0.94 according to the co-location radius (5-15 km) of AWSs. Most of the lightning occurred 10 minutes before and/or concurrently occurred with rains. A portion of the convective rainfalls of the total rainfalls was at least 20% when we define the rainfalls with lightning as convective. The convective rainfall was greater during August than in June and July. In general, the portion of convective rainfalls showed a maximum diurnal variation during late afternoon as in the rains and lightning.

Keywords: lightning, rainfall, frequency, intensity, convective rainfall

요약: 본 연구에서는 2006-2007년 여름(6-8월)동안의 기상청 낙뢰 관측자료와 자동관측소 강우량 자료를 사용하여 여름철 낙뢰와 강우의 관계에 대해 분석하였다. 대부분의 부극성 낙뢰는 대류가 활발한 중심에 집중되어 발생하고 낙뢰빈도가 높고 강한 강우를 동반하였다. 반면 대부분의 정극성 낙뢰는 구름의 가장자리 또는 모루운에서 발생하고 낙뢰빈도는 낮으며, 약한 강우를 동반하였다. 일반적으로 강우강도는 부극성과 정극성이 함께 발생했을 경우 가장 강하고 부극성 낙뢰, 정극성 낙뢰, 그리고 낙뢰가 발생하지 않은 순으로 나타나고 있다. 여름철 전체 낙뢰 중 정극성 낙뢰의 비율은 평균 10% 이하이며 강우를 유발하지 않는 낙뢰의 비율은 평균 34%이다. 강우강도는 특히 부극성 낙뢰빈도와 높은 양의 상관관계를 보였고, 낙뢰는 강우와 동시에 발생하거나 약 10분정도 선행하는 경향을 보였다. 낙뢰를 동반한 강우를 대류성 강우로 정의하여 분석한 결과 우리나라 여름철 강우 중 적어도 20% 이상은 대류성 강우이며 6, 7월보다는 8월에 대류성 강우가 많이 발생하고 있다. 또한 강우 및 낙뢰와 같이 대류성 강우의 비율도 오후에 최대치를 보이는 일변동을 보인다.

주요어: 낙뢰, 강우, 빈도, 강도, 대류성 강우

*Corresponding author: sms416@kongju.ac.kr

Tel: 82-41-850-8533

Fax: 82-41-856-8527

서론

우리나라는 동아시아 몬순의 영향으로 여름철 대기가 불안정하여 낙뢰와 집중호우 같은 재해기상이 집중적으로 발생하며, 복잡한 지형과 해양의 영향으로 낙뢰와 강우의 시·공간적 변동성이 크게 나타난다. 최근에는 지구온난화 등의 영향으로 집중호우와 같은 극한 강우현상의 발생일수가 증가하고 있으며 강우강도도 강해지고 있는 것으로 보고되고 있다(권원태 외, 2002; 김찬수와 서명석, 2009). 또한 분석기간이 짧은 하지만 극성에 관계없이 낙뢰의 강도도 강해지는 것으로 보고되고 있다(명지수와 서명석, 2010).

낙뢰의 약 80%는 구름 내부에서 또는 구름과 구름 사이에서 발생하며, 약 20%만이 구름과 지면 사이에서 발생한다. 이때, 구름과 지면 사이에서 발생하는 낙뢰를 구름-지면 낙뢰(Cloud-to-ground lightning)라 하며, 구름-지면 낙뢰는 음전하가 지면으로 방전되어 발생하는 부극성 낙뢰와 양전하가 지면으로 방전되어 발생하는 정극성 낙뢰로 나뉜다. 이러한 낙뢰는 종종, 강한 대류 활동의 지시자로 이용되고 강한 강우를 동반하기도 한다. 하지만 집중호우를 유발시키는 저기압형태에서도 눈에 띄는 낙뢰 활동 없이 강우현상이 발생할 수 있다(Lim and Lee, 2001; Lim, 2002). 따라서 낙뢰와 강우현상과의 관계는 좁은 지역에서의 강한 강우 시스템을 이해하기 위한 중요한 정보가 될 수 있다.

Zipser(1994)는 미국 서부 지역에서 낙뢰와 강우자료를 이용하여 낙뢰 발생일수와 월별 강우의 비율에 대해 연구하였다. Sheridan et al.(1997)은 미국 중남부 지역에서 4-10월에 구름-지면 낙뢰빈도와 평균 강우량 간에 선형적 상관관계가 있음을 보였다. Cheze and Sauvageot(1997)은 사례연구를 통해 전체 낙뢰와 강우 사이의 상관성보다 구름-지면 낙뢰와 강우 사이의 상관성이 더 높음을 밝혔고, Piepgrass et al.(1982)은 구름-지면 낙뢰의 빈도 최대치가 강우강도의 최고치보다 수 분 정도 선행함을 보였다. Petersen and Rutledge(1998)은 낙뢰활동이 폭풍의 역학 및 미세물리과정과 밀접하게 관련되어 있기 때문에 대류형 강우현상의 분포 및 잠열 방출에 대한 제시인자가 될 수 있음을 제시하였다. 또한 Tapia et al.(1998)은 대류형 강우와 낙뢰 발생의 계절변동 및 일 변동이 높은 상관관계를 가지며, 낙뢰를 활용한 강우예측을 통해

돌발홍수와 같은 악기상의 단기에측이 가능함을 보였다. Grecu et al.(2000)은 낙뢰자료를 강우량 추정에 사용하여 대류가 활발하지 않은 권운 지역을 제거함으로써 강우량 추정결과의 오차제곱근을 15% 감소시켰고, Petrova et al.(2009)은 낙뢰 밀도와 강우강도 사이의 상관계수가 0.89-0.98로 두 현상 사이에 상관성이 높음을 보였다.

최근 기상청과 한국전력에서 낙뢰를 정량적으로 관측함에 따라 국내에서도 낙뢰와 강우에 대한 관계 및 특성에 대한 연구가 이루어졌다. Kar and Ha(2003)는 강우량과 구름-지면 낙뢰의 비율로부터 대류형 강우 확률을 계산하여 서해안 부근에서 강우확률이 가장 높음을 보였다. 또한 Lim and Lee(2005)는 강우 시스템을 4개의 유형으로 구분하고, 밴드형 대류계에서 낙뢰와 강우의 상관성이 가장 높게 나타남을 보였다. 하지만 이 연구들을 제외하면 지상관측 낙뢰자료와 레원존데 자료를 이용하여 낙뢰의 통계적인 특성을 분석하는 연구(이종호 외, 2003; 엄효식과 서명석, 2009; Eom et al., 2008)와 강우의 시·공간적인 변동특성에 대한 연구들이 주로 이루어졌다.

선행 연구에서 살펴본 바와 같이 정량적 낙뢰 관측자료의 부족으로 국내에서는 아직까지 낙뢰와 강우 사이의 관계 및 특성에 대한 연구가 충분히 이루어지지 못하고 있다. 또한 낙뢰와 강우특성에 대해 처음 시도되었던 Kar and Ha(2003)의 연구의 경우 낙뢰와 강우의 관측지점의 수가 각각 10, 23개로 그 수가 비교적 작고, 낙뢰와 강우관계를 월단위로 분석하였다는 점에서 실제 매우 짧은 시간단위로 발생하는 낙뢰와 강우 현상 사이의 관계를 분석하는 데 한계가 있다.

따라서 본 연구에서는 24개와 533개 지점으로부터 각각 관측된 10분 간격의 낙뢰와 강우자료를 이용하여 여름철 낙뢰와 강우와의 관계에 대해 분석하였다. 본 연구의 결과는 남한지역에서의 낙뢰와 강우와의 관계에 대한 정보 제공 뿐 아니라, 수치모델의 강우유형(대류성, 층운형)에 대한 예측수준 검증시에도 활용될 수 있을 것이다. 본 논문의 다음 절부터는 본 연구에서 사용된 자료와 연구방법에 대해 설명하고, 낙뢰 발생시 낙뢰 빈도, 강도 및 극성별 강우 특성에 대해 소개하였다. 마지막으로 본 연구에서 밝혀진 결과를 요약하고, 향후 필요한 연구 내용을 제시하였다.

자료 및 연구 방법

본 연구에서는 여름철 낙뢰와 강우와의 관계를 분석하기 위해 2006년과 2007년의 여름철(6-8월) 관측 자료를 이용하였다. 2006년과 2007년의 여름철(6-8월)은 어느 해보다 낙뢰와 강우 발생이 많았던 해로 2006년에는 장마기간 동안에 758.0 mm의 강우가 발생하여 평년 246.2 mm 보다 2배 이상 많은 강우가 있었고(기상청, 2006), 2007년에는 총 155만 5,230회의 낙뢰가 발생하여 2001년 새로운 낙뢰 관측 장비가 도입된 이래로 가장 많은 낙뢰가 발생하였다(기상청, 2008).

본 연구에서 사용한 관측자료는 2001년 기상청에 도입되어 운영중인 신 낙뢰관측 시스템(Total Lightning Detection System, TLDS)에서 관측된 구름-지면 낙뢰 중 관측된 센서(NRS)가 3개 이상인 낙뢰자료와 자동기상관측장비(Automatic Weather Systems, AWSs)에서 관측된 강우자료로 두 자료의 출처는 모두 기상청이다. TLDS는 구름과 지면 사이에서 발생하는 낙뢰를 주로 탐지하는 IMPACT ESP(IMProved Accuracy from Combined Technology Electronic Stability Programme)와 구름 내부 또는 구름과 구름의 방전도 탐지할 수 있는 LDAR II(Lightning Detection And Range II)의 두가지 센서로 구성되어 있다. 현재 기상청에서 운영 중인 낙뢰센서는 7개의 IMPACT ESP와 17개의 LDAR II로 전국에 비교적 균일하게 분포하고 있다. 기상청에서 제공하는 낙뢰 자료에는 발생시간, 위치, 낙뢰유형, 극성, 강도자료가 포함되어 있다. AWSs 자료는 총 533개 지점으로 남한 전역에 분포하고 있다(Fig. 1). AWSs 자료는 낙뢰현상과 다양한 시간대의 강우현상과의 관계를 규명하기 위해 사용하였으며, 10분 간격의 누적 강우량 자료를 이용하였다.

분석 기간은 2006년부터 2007년까지이며 우리나라에서 낙뢰발생 빈도가 여름철에 집중되어 나타나는 것(우정욱과 심용보, 2003; 엄효식과 서명석, 2009, Lim and Lee, 2005)을 고려하여 여름철 낙뢰와 강우에 대해서만 분석하였다. 정극성 낙뢰강도가 10 kA 이하인 경우, 구름 내부 또는 구름 대 구름에서 발생한 낙뢰(Cummins et al., 1998)라는 선행연구를 고려하여 정극성 낙뢰강도가 10 kA 이하인 낙뢰자료는 분석대상에서 제외하였다. 또한, 낙뢰 발생 사례에 대하여 관측효율이 90% 이상(정은실 외, 2002)으로 알려

Fig. 1. Geographical distribution of automatic weather systems (AWSs), 7 IMPACT ESP sensors and 17 LDAR II sensors currently operating in South Korea.

Table 1. Summary of lightning frequency and rainfall

Year	Month	Total C-G lightning freq. (freq./10 min.)	Monthly mean rainfall (mm/month)
2006	Jun.	189,103(43.8)	143.54
	Jul.	112,698(25.2)	524.93
	Aug.	75,072(16.8)	98.73
2007	Jun.	96,453(22.3)	73.20
	Jul.	169,592(38)	214.86
	Aug.	339,225(76)	273.60

진 위도 33-39°N, 경도 124-130°E 영역에서 낙뢰 발생시 강우의 특성을 분석하였고 본 연구에 사용된 각 월별 낙뢰와 강우자료는 Table 1에 정리하였다.

낙뢰와 강우자료는 관측주기와 관측자료의 공간대표성이 서로 다르기 때문에 두 자료를 함께 사용하기 위해서는 시·공간을 일치시키는 과정이 필요하다.

Fig. 2는 낙뢰자료와 강우자료의 시·공간 일치를 나타내는 그림이다. 본 연구에서 사용한 AWSs 강우자료가 10분 간격의 자료이기 때문에 AWSs를 기준으로 매 10분 동안 발생한 낙뢰자료를 강우자료와 일치시켰다. 두 자료의 공간일치는 과거 선행 연구 중 관측지점 주변 0.1°(위도)×0.1°(경도) 격자 내에서 발생한 낙뢰빈도수를 계산하여 관측지점의 강우와 비교·분석을 통해 낙뢰와 대류성 강우와의 관계를 규명하고자 했던 Soriano et al.(2001) 방법과 AWSs가 최대 반경 약 10 km 이내를 대표한다는 가정에 기초

Fig. 2. The method of temporal and spatial collocations of lightning data and AWSs rainfall data.

한 이윤정(2010)의 공간 일치 방법을 이용하여 AWSs 지점을 중심으로 낙뢰 발생위치가 반경 10 km, 5 km 이내이면 그 낙뢰를 AWSs에서 측정된 강우와 관련된 낙뢰로 하였다.

낙뢰 발생시 강우특성을 분석하기 위해 위의 시·공간 일치 과정을 통해 AWSs 관측 강우자료와 낙뢰 자료의 대응쌍 자료 환경(Match-up DB)을 구축하였다. 간단한 통계를 통해 극성별 낙뢰빈도 및 강도와 강우강도와의 상관성 그리고 낙뢰와 강우발생의 시간 차에 대해 분석하였다. 또한 낙뢰는 강한 상승운동이 있을 때에만 발생하므로 낙뢰를 이용하여 대류성 강우를 정의하고 여름철(6-8) 강우 중 대류성 강우 비율(Convective Rainfall Ratio) CRR에 대해서도 분석하였다.

연구 결과

Fig. 3은 상대적으로 낙뢰발생이 많았던 2006년 6월 10일과 2007년 7월 29일 사례에 대해 극성별 낙뢰와 10분 누적 강우의 공간분포를 영향반경별로 나타낸 것이다. 두 사례 모두 대류 중심 부근, 즉 운정 회도온도가 낮은 지역에서 V 형태 또는 U 형태의 “확장된-V(enhanced-V)”가 나타나는데, 이러한 “확장된-V”는 강한 상승기류에 의해 뇌우의 상층 부분이 성층권 하부까지 발달할 때 발생된다(McCann, 1983). MTSAT-1R 위성의 공간해상도가 4 km이기 때문에 오버슈팅(overshooting)된 부분이 뚜렷하게 나타나는 않으나 상승운동이 강하게 일어나는 곳의 주변으로 그보다 높은 온도를 갖는 구름들이 분포하여 전체적인 뇌우형태는 V 모양을 띠고 있다. 이러한 “확

장된-V” 형태를 가지는 뇌우 시스템에서는 악기상이 발생될 가능성이 높는데, 두 사례 모두 구름-지면 낙뢰가 각각 하루 동안 총 88,500, 94,023회 발생하였고, 한반도 중부지역(강화 40.6 mm/day, 전주 40.0 mm/day, 서산 95.0 mm/day)과 경상도 지역(울진 60.5 mm/day, 봉화 91.5 mm/day, 부산 34.0 mm/day)에 많은 강우를 유발시켰다.

2006년 6월 10일 1833 KST, 영상을 보면 광주-대전에 이르는 지역에서 대류활동이 활발하게 일어나 회도온도가 약 230 K 이하로 낮게 나타나고 있으며, 그 일대를 따라 0.5-3.0 mm/10 min의 강우가 분포하고 있다. 부극성 낙뢰는 회도온도가 215 K로 가장 낮은 광주와 대전부근 즉, 대류 중심에서 활발하게 나타나고 있으며, 이 부근의 강우량은 2.0 mm/10 min로 주변보다 강한 강우를 보인다. 정극성 낙뢰는 경기도 일대로 넓게 퍼진 모루운에서 드물게 발생하고 있으며, 강우량도 0.5 mm/10 min 이하로 약한 강우를 보이고 있다.

2007년 7월 29일 1433 KST, 영상에서는 강원도와 충북 내륙 및 경북 내륙에 걸쳐 220 K 이하의 낮은 회도온도를 보이고 있고, 무주와 청송 부근을 중심으로 부극성 낙뢰가, 그 주변에서 정극성 낙뢰가 발생하고 있다. 강우량은 회도온도가 210 K 이하로 낮게 나타나는 대류 중심 지역을 따라 1.0-4.0 mm/10 min의 분포를 보이는데, 부극성 낙뢰가 발생하는 곳에서는 4.0 mm/10 min로 주변보다 강하게, 그 외 지역에서 1.0 mm/10 min로 약하게 나타나고 있다.

6월 10일 사례에서 부극성 낙뢰는 대부분 남서류에 의해 온난습윤공기가 유입되는 대류 중심의 전면에서 발생하고 정극성 낙뢰는 대류 중심 주변에서 발생하였지만, 7월 29일 사례에서는 부극성 뿐만 아니라 정극성 낙뢰도 대류중심에서 발생하고 있다. 이들 사례로부터 대부분의 부극성 낙뢰는 대류가 활발한 대류중심에 집중되어 발생하고 낙뢰빈도도 높으며, 강한 강우를 동반하는 것을 알 수 있다. 반면 대부분의 정극성 낙뢰는 구름의 가장자리 또는 모루운에서 주로 발생하고 낙뢰빈도는 상대적으로 낮으며, 강우강도가 약하다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 제시된 사례 이외에 다른 사례에서도 위의 사례와 유사한 특징들이 나타났다.

AWSs를 중심으로 강우와 낙뢰의 공간 일치 반경을 10 km로 하여 분석기간 동안의 월별 낙뢰 발생과 강우의 특성을 Table 2에 요약하였다.

Fig. 3. Distribution of BT(IR1), lightning (positive (+) and negative (-)), and rainrate (isoline) (a-1, b-1) at 1833 KST, 10th June, 2006 and (a-2, b-2) at 1433 KST, 29th July, 2007, when the representative radius of AWSs are 5 km and 10 km, respectively.

낙뢰는 부극성, 정극성 그리고 두 극성이 동시에 발생한 경우에 대해 각각 강우 특성을 분석하였다. 또한 낙뢰유무에 따른 강우의 특성을 비교하기 위하여 낙뢰를 동반하지 않는 강우의 특성에 대해서도 분석하였다. 월에 따라 차이는 있었으나, 일반적으로 낙뢰강도는 정극성인 34.87 kA로 부극성의 -16.62 kA 보다 두 배 이상 강하게 나타났고, 두 극성의 낙뢰가 동시에 발생한 경우에는 강도가 약해지는 특성

을 보이고 있다. 강우강도는 부극성 낙뢰와 정극성 낙뢰가 모두 발생한 경우가 3.35 mm/10 min로 가장 크고 다음으로 부극성 낙뢰만 발생한 경우가 2.94 mm/10 min, 정극성 낙뢰만 발생한 경우 1.99 mm/10 min이며 낙뢰가 발생하지 않은 경우가 1.07 mm/10 min로 가장 약하게 나타났다.

극성별 평균 낙뢰강도와 강우강도, 표준편차는 공간 일치 반경에 관계없이 나타났다. 여기서 특이한

Table 2. Lightning intensity and rain rate according to the lightning polarity for the rain and no rain when the representative radius of AWSs is 10 km (5 km)

(a) Rain with lightning

Year/ Month	Rain															
	Negative				Positive				Negative and Positive							
	Inten- sity	Rain rate	Stdv.	Stdv.	Inten- sity	Rain rate	Stdv.	Stdv.	Ratio_1	NE_Int.	PO_Int.	Rain rate	Stdv.	Stdv.	Stdv.	Ratio_2
	(kA)	(mm/10 min)	(of lightning)	(of rain)	(KA)	(mm/10 min)	(of lightning)	(of rain)	(%)	(kA)	(kA)	(mm/10 min)	(of neg- ative)	(of pos- itive)	(of rain)	(%)
2006/ Jun.	-13.14 (-12.83)	2.15 (2.73)	7.69 (7.71)	2.47 (2.84)	33.69 (31.91)	1.27 (1.48)	19.28 (19.54)	1.16 (1.4)	3.4 (3.8)	-11.58 (-12.87)	27 (25.94)	2.38 (3)	7.03 (7.5)	14.94 (16.75)	2.51 (2.92)	10.89 (17.41)
2006/ Jul.	-18.2 (-17.84)	3.51 (4.23)	12.14 (12.88)	3.16 (3.47)	34.25 (34.04)	2.83 (3.08)	20.15 (23.37)	2.5 (2.64)	3.88 (4.13)	-18.01 (-19.22)	27.12 (25.1)	3.94 (4.35)	10.28 (11.49)	18.24 (18.63)	3.07 (3.15)	11.01 (14.84)
2006/ Aug.	-18.48 (-17.97)	3.49 (3.9)	7.35 (7.29)	3.5 (3.63)	29.48 (28.06)	1.96 (2.28)	15.34 (13.44)	2.35 (2.86)	0.78 (0.76)	-17.81 (-17.56)	19.03 (17.86)	4.01 (5.32)	7.06 (7.45)	11.32 (11.55)	3.62 (3.97)	3.98 (6.41)
2007/ Jun.	-14.73 (-13.85)	2.35 (2.96)	10.38 (10.78)	2.68 (3.02)	40.58 (43.86)	1.43 (1.35)	26.49 (26.35)	1.71 (1.6)	2.22 (2.64)	-12.96 (-13.25)	29.75 (22.22)	2.22 (2.37)	6.76 (6.48)	21.09 (16.78)	2.2 (2.56)	11.88 (16.05)
2007/ Jul.	-17.27 (-16.23)	2.92 (3.51)	11.64 (10.95)	2.93 (3.21)	37.81 (37.13)	2.38 (2.37)	23.39 (25.02)	2.34 (2.28)	2.07 (2.22)	-14.71 (-14.69)	23.31 (20.24)	3.6 (4.87)	8.71 (9.14)	15.56 (15.41)	3.36 (3.92)	3.11 (4.7)
2007/ Aug.	-17.92 (-17.6)	3.21 (3.97)	12.71 (12.93)	3.13 (3.46)	33.46 (33.55)	2.06 (2.39)	22.53 (22.44)	2.18 (2.31)	1.53 (1.59)	-16.74 (-15.82)	23.91 (19.83)	3.96 (5.05)	8.71 (7.77)	16.72 (13.45)	3.58 (4.09)	5.06 (6.86)
Ave	-16.62 (-16.05)	2.94 (3.55)	10.32 (10.42)	2.98 (3.27)	34.87 (34.76)	1.99 (2.16)	21.2 (21.7)	2.04 (2.18)	2.31 (2.52)	-15.3 (-15.57)	25.02 (21.86)	3.35 (4.16)	8.09 (8.3)	16.31 (15.43)	3.06 (3.43)	7.66 (11.05)

(b) Rain with no lightning and lightning with no rain

Year/ Month	Rain				No rain				
	No lightning			Negative		Positive		Total lightning	
	Intensity	Rain rate	Stdv.	Intensity	Stdv.	Intensity	Stdv.	Ratio_3	Ratio_4
	(kA)	(mm/10 min)	rain	(kA)	(negative)	(kA)	(positive)	(%)	(%)
2006/ Jun.		1.00 (1.02)	0.94 (0.98)	-12.52 (-12.53)	8.14 (8.11)	29.27 (28.27)	20.26 (19.23)	5.41 (6.35)	33.38 (27.44)
2006/ Jul.		1.23 (1.26)	1.38 (1.43)	-17.4 (-17.55)	13.21 (14.19)	27.4 (25.03)	19.68 (18.22)	3.67 (4.15)	21.84 (14.85)
2006/ Aug.		1.15 (1.21)	1.48 (1.59)	-17.38 (-16.74)	8.75 (8.65)	26.24 (25.16)	17.45 (15.23)	1.02 (0.9)	50.12 (36.1)
2007/ Jun.		0.79 (0.81)	0.78 (0.81)	-13.95 (-14.05)	9.02 (8.71)	24.92 (23.99)	19.27 (17.15)	5.65 (6.72)	44.72 (34.99)
2007/ Jul.		1.05 (1.08)	1.1 (1.16)	-14.93 (-14.79)	12.06 (12.71)	28.15 (31.2)	22.95 (27.6)	2.11 (2.63)	23.94 (18.25)
2007/ Aug.		1.2 (1.27)	1.45 (1.56)	-18.34 (-17.71)	15.28 (15.38)	24.3 (22.6)	19.65 (17.34)	2.22 (2.89)	30.41 (20.55)
Ave		1.07 (1.11)	1.19 (1.26)	-15.75 (-15.56)	11.08 (11.29)	26.71 (26.04)	19.88 (19.13)	3.35 (3.94)	34.07 (25.37)

것은 강우 동반 유무에 상관없이 정극성 낙뢰의 표준편차가 부극성 낙뢰의 표준편차보다 두 배 이상 크게 나타나는 것이다. 이것은 낙뢰강도의 변동성이 부극성 낙뢰보다 정극성 낙뢰에서 두 배 이상 크다

는 것을 의미한다. 이러한 현상은 부극성 낙뢰는 대류가 강하게 발생하는 구름 하부 중심 부근에 위치한 음전하로부터 발생되는 반면 정극성 낙뢰는 대부분 모루운과 같이 구름 상부에 넓게 퍼진 곳에 위치

Fig. 4. Lightning frequency (upper) and lightning intensity (lower: kA) according to the rain rate (mm/10 min).

한 양전하로부터 발생하는 것과 관련이 있는 것으로 보인다(Zajac and Weaver, 2002). 이 때 부극성 낙뢰는 구름 내 음전하 중심과 지면과의 거리가 상대적으로 가깝기 때문에 작은 전위차에도 낙뢰가 발생할 수 있어 낙뢰 발생 빈도는 높지만 낙뢰강도는 약하게 나타난다. 하지만 정극성 낙뢰는 구름내 양전하 중심과 지면과의 거리가 멀어 낙뢰가 발생하기 위해서는 매우 큰 전위차를 가져야하고, 따라서 강도는 강하지만 낙뢰 발생 빈도는 낮게 나타난다. 부극성 낙뢰빈도와 강우강도가 6월보다 7, 8월에 상대적으로 강하게 나타나는데 이는 6월보다 7, 8월에 상대적으로 대기중의 수증기가 많은 것과 관련된 것으로 보인다. 여름철 낙뢰 중 정극성 낙뢰의 비율은 평균 10% 이하이며 강우를 유발하지 않는 낙뢰의 비율은

평균 34%이다.

Fig. 4는 강우강도별 극성별 낙뢰빈도 및 강도를 나타낸 것이다. 부극성 낙뢰는 강우강도가 증가될수록 낙뢰빈도가 증가되는 경향을 보이나, 낙뢰강도는 거의 일정하게 나타나고 있다. 하지만 정극성 낙뢰의 강도와 빈도는 강우강도와 무관함을 보이고 있다. 이것은 앞에서도 설명한 바와 같이 부극성 낙뢰는 대류의 중심에 주로 발생하기 때문에 대류가 강해질수록 낙뢰빈도와 강우강도가 동시에 증가하는 반면 모 루운에서 주로 발생하는 정극성 낙뢰의 경우는 대류의 강약(강우강도)과는 크게 관련이 없는 것으로 보인다.

Table 3은 강우강도와 낙뢰빈도 및 낙뢰강도와의 상관계수를 나타낸 것이다. 강우강도는 AWSs 영향

Table 3. The correlation coefficients between lightning frequency, intensity (kA) and rain rate (mm/10 min.) according to polarity and the representative radius of AWSs. The bold characters represent over 95% significant level

AWSs R Lightning	≤15 km		≤10 km		≤7 km		≤5 km	
	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.	Pos.	Neg.
Frequency	0.38	0.94	0.19	0.94	0.18	0.93	-0.28	0.87
Intensity (kA)	0.07	0.44	-0.20	0.16	-0.03	0.32	0.10	0.32

Fig. 5. Temporal variations of lightning frequency (positive (black), negative (gray)) and rainfall intensity (a) at 10th June, 2006 and (b) at 29th July, 2007.

반경에 관계없이 부극성 낙뢰빈도와 평균 0.92로 강한 양의 상관을 보이지만, 정극성 낙뢰강도와 빈도, 부극성 낙뢰강도와는 상관관계수 값이 매우 작거나 AWSs의 대표 반경에 따라 상관관계수 값이 상이하게 나타나고 있다. 전체 구름-지면 낙뢰 중 정극성 낙뢰의 비율이 평균 10% 이하인 것을 고려하면 전체 구름-지면 낙뢰의 특성은 부극성 낙뢰의 특성을 따른다고 가정할 수 있다. 따라서 위의 결과는 구름-지면 낙뢰빈도와 대류성 강우 사이에 강한 양의 상관성이 있다는 선행연구(Williams et al., 1989; Petersen and Rutledge, 1998)들과 일치한다. Fig. 5는 2006년 6월 10일과 2007년 7월 29일 사례에서 임의의 두 지점에

대해 강우와 낙뢰의 시계열을 나타낸 것이다.

두 사례의 시계열에서 보는 바와 같이 낙뢰와 강우는 거의 동시에 발생하거나 낙뢰가 강우보다 약 10분 정도 선행함을 볼 수가 있다. 그림에는 보이지 않았지만 다른 사례들에서도 대부분 낙뢰가 강우보다 10분 정도 선행하거나 낙뢰와 강우가 동시에 발생하고 있다.

우리나라 여름철 강우에서 낙뢰와 강우의 선행 여부를 알아보기 위하여 강우 누적 시간을 10분 간격으로 변화시키면서 533개 AWSs 전 지점에 대해 월 평균 강우 확률을 산출하였다(Fig. 6). 강우 확률 산출에는 식 (1)을 이용하였으며, YES는 낙뢰 발생시

(a) 2-year summer mean

(b) 2-year monthly mean

(c) Monthly mean of 2006

(d) Monthly mean of 2007

Fig. 6. Probability of rainfall for the occurrence of total C-G lightning according to the accumulation time intervals.

강우도 발생한 경우이고 NO는 낙뢰 발생시 강우가 발생하지 않는 경우이다.

$$P_{rain}(\%) = \frac{YES}{YES+NO} \times 100 \quad (1)$$

낙뢰가 발생했을 때 10분 후에 강우가 발생할 확률이 55.47% 가장 높았고, 낙뢰와 강우가 동시에 발생할 확률이 54.97%로 다음으로 높게 나타나 낙뢰의 최대치가 강우의 최대치보다 수 분 이상 선행한다는 Piepgrass et al.(1982)의 연구결과와 일치한다. 또한 낙뢰가 발생하기 전보다 낙뢰 발생 후의 강우 확률이 대체적으로 높았으며 이러한 결과는 월 및 연도에 관계없이 나타나고 있다. 단지 2년 여름만의 사례 연구만으로 낙뢰와 강우의 정확한 선행시간을 알기엔 부족하지만 2006년과 2007년의 강우 및 낙뢰 발생이 현저히 달랐었던 점을 고려하면 낙뢰 발생 전의 강우확률 보다 낙뢰 발생 후 강우가 내릴 확률이 높으며 낙뢰와 강우는 거의 동시에 발생하거나 낙뢰가 강우보다 약 10분 정도 선행할 가능성이 높음을 알 수 있다.

일반적으로 강우는 발생 메커니즘에 따라 층운형과 대류형으로 나눈다. 현재 정량적 강우예보의 가장 강력한 도구인 대부분의 수치모델에서는 강우를 층운형과 대류형으로 구분하여 발생시키지만 지상에서의 강우량 관측은 대부분 총량만 관측을 한다. 즉, 지상 관측자료만으로는 강우의 유형을 구분할 수도 없고 전체 강우중에서 대류형 강우가 차지하는 비율을 알 수가 없다. 따라서 수치모델의 강우 유형별 예측 수준을 검증하기 위해서는 다른 방법이 필요하다. 또한 대부분의 국지성 폭우나 집중호우는 대류형 강우에 의한 것이므로 우리나라 여름 강우에서 대류형 강우가 차지하는 비율에 대해 조사할 필요가 있다. 낙뢰는 대부분 강한 상승운동에 의해 운정 고도가 0°C 이하로 발달할 때 발생함으로 낙뢰는 대류형 강우의 지시자로 활용할 수 있다. 본 연구에서는 우리나라 여름 강우 중 대류형 강우의 비율을 알아보기 위하여 강우 발생 전후 10분 동안에 낙뢰가 발생하면 그 강우는 대류성 강우로 정의하였고 낙뢰 발생 시간을 강우를 기준으로 최대 전후 30분까지 변화를 주어 낙뢰를 이용한 대류성 강우 정의에 대한 타당성을 분석하였다.

Fig. 7은 여름철 동안의 구름-지면 낙뢰와 총 강우 및 대류성 강우 비율의 일 변동을 나타낸 것이다. 낙

뢰의 경우 월에 따라 시차는 있지만 주로 오후 3-5시 사이에 강한 최대치를 보이는 일변동을 보이고 있다. 반면 강우는 월에 따라 변동 패턴에 차이는 있지만 주로 상대적으로 강한 새벽 최대치와 약한 오후 최대치가 나타나는 쌍봉형의 일변동을 보이고 있다. 낙뢰를 이용하여 정의된 대류성 강우의 경우 낙뢰 발생 시간변화와 상관없이 모두 낙뢰와 유사한 일 변동을 보인다. 특히 오후 16시 경에 대류성 강우비율이 가장 높게 나타나고 있는데 이는 기상 레이더를 이용하여 구름-지면 낙뢰와 대류성 강우의 관계에 대해 연구한 Zhou et al.(2002)의 결과와 일치한다. 전체적으로 12시 전에는 낙뢰율보다 대류성 강우비율이 높게 나타나고 12시 이후에는 낙뢰율이 대류성 강우율보다 높게 나타나고 있다. 이는 동일 강우 강도에 대해 낙뢰빈도가 오전에는 적으나 오후에는 많음을 제시한다. 월별로는 6월과 8월에 대류성 강우 비율의 일변동이 크고 상대적으로 7월에 작게 나타나고 있다. 하지만 이 결과는 2년간의 자료만을 이용하였으므로 이 결과를 일반화하기 위해서는 보다 장기간의 자료에 대해 분석하여야 할 것이다.

Table 4는 여름철 강우중 대류성 강우 비율을 월별로 나타낸 것으로 대류성 강우 비율은 식 (2)로 산출하였다. 여기서 대류성 강우란 전체 강우 중에서 강우 발생 전후 30분 동안에 낙뢰를 동반하는 강우를 의미한다. 또한 AWSs 대표 반경을 10-30 km까지 변화를 주어 여름철 대류성 강우 비율을 분석하였고, 이때 강우발생 횟수에 사용되는 강우자료는 공간일치 반경 내의 AWSs 강우값들의 평균이 아닌 중앙의 AWSs 강우값만 사용하였다. 강우 발생 횟수는 10분 누적강우가 0.5 mm 이상일 때 강우가 발생한 것으로 계산하였다.

$$CRR(\%) = \frac{Convective\ rain}{Total\ rain} \times 100 \quad (2)$$

여름철 대류성 강우 비율은 AWSs 대표 반경에 따라 최소 11.6%에서 최대 23.5%로 나타났고 8월에 6, 7월 보다 상대적으로 많은 대류성 강우가 발생함을 보여준다. 실제 여름철 대류성 강우 중에는 낙뢰를 동반하지 않고 발생하는 경우도 있기 때문에 낙뢰는 이용하여 정의한 대류성 강우 비율은 실제 대류성 강우 비율보다 작을 것이다. 따라서 우리나라 여름철 강우중에서 대류성 강우는 적어도 20% 이상 발생한다고 추정할 수가 있다.

(a) Summer

(b) June

(c) July

(d) August

Fig. 7. Diurnal variation of total rainfall (%), convective rainfall ratio (%) and total C-G lightning ratio (%) according to the accumulation time.

Table 4. Convective rainfall ratio (%) accompanying by total C-G lightning during summer

Year	Month	Convective rainfall ratio (%)		
		AWSs_R ≤10 km	AWSs_R ≤20 km	AWSs_R ≤30 km
2006	Jun.	13.8	18.3	20.3
	Jul.	6.8	12.3	17
	Aug.	14.6	23.1	28.2
2007	Jun.	6.4	10.3	12.9
	Jul.	10	16.6	21.9
	Aug.	22.9	34.9	43.3
Summer		11.6	18.5	23.5

요약 및 결론

본 연구에서는 2006-2007년 여름철(6-8월)의 기상청 낙뢰 관측자료와 AWSs 강우량 자료를 사용하여 남한에서의 여름철 낙뢰와 강우와의 관계에 대해 조사하였다. 본 연구에서 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 부극성 낙뢰는 대류가 활발한 뇌운 중심에서 집중적으로 발생하여 낙뢰빈도는 높으며 강우 강도도 강하였다. 반면 대부분의 정극성 낙뢰는 구름의 가장자리 또는 모루운에서 발생하여 낙뢰빈도는 낮고 강우강도도 약하였다.

(2) 강우강도는 부극성과 정극성이 함께 발생했을 때, 부극성만, 정극성만, 그리고 낙뢰가 발생하지 않은 순으로 강하게 나타나고 있다. 전체 여름 중 6월보다 7, 8월에 상대적으로 부극성 낙뢰빈도와 강우강도가 강하게 나타났고, 여름철 낙뢰 중 정극성 낙뢰의 비율은 평균 10% 이하이며 강우를 유발하지 않는 낙뢰의 비율은 평균 34%이다.

(3) 강우강도와 부극성 낙뢰빈도는 AWSs 영향반경 및 누적시간에 관계없이 높은 양의 상관관계를 보이고 있어 부극성 낙뢰가 대류형 강우의 지표가 될 수 있음을 제시하고 있다.

(4) 월 및 연도에 상관없이 낙뢰는 강우보다 약 10분 선행하거나 동시에 발생하는 것으로 나타나고 있다.

(5) 낙뢰를 동반한 강우를 대류성 강우로 정의한 결과 우리나라 여름철 강우 중 적어도 20% 이상은 대류성 강우이며 6, 7월보다는 8월에 대류성 강우가 많이 발생하고 있다. 또한 강우 및 낙뢰와 같이 대류성 강우의 비율도 오후에 최대치를 보이는 일변동을 보인다.

본 연구의 결과는 우리나라 여름철 낙뢰 및 강우 특성 분석의 기초자료로 활용될 수 있을 것이다. 또한 수치 및 기후모델에서 모의하는 강우 유형에 대한 검증자료로도 활용될 수 있을 것이다. 하지만 현업에 이용되기 위해서는 보다 장기간의 자료를 통해 낙뢰와 강우 사이의 통계적 관계정립이 필요할 것이다.

사 사

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

참고문헌

- 권원태, 남경엽, 민승기, 최영은, 2002, 남부지방 일강우량과 호우의 경향분석. 대기, 12, 192-195.
- 김찬수, 서명석, 2009, 베이지안 방법을 이용한 우리나라 강우특성(1954-2007)의 변화시점 및 변화유형 분석. 대기, 19, 199-211.
- 명지수, 서명석, 2010, 남한 지역에서 발생한 구름-지면 낙뢰의 극성별 특성. 한국지구과학회지, 31, 314-326.
- 엄효식, 서명석, 2009, 최근 남한지역에서 발생한 낙뢰의 통계적 특성. 한국지구과학회지, 30, 210-222.
- 우정욱, 심용보, 2003, 낙뢰측정에 대한 기술동향과 LPATS 데이터에 의한 한반도 낙뢰현황. 조명·전기설비학회지, 17, 16-23.
- 이윤정, 2010, 여름철 낙뢰 발생 시 강수 및 위성의 회도 온도 특성. 공주대학교 석사학위논문, 61 p.
- 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. 대기, 12, 580-583.
- Cheze, J.L. and Sauvageot, H., 1997, Area-average rainfall and lightning activity. Journal of Geophysical Research, 102, 1707-1715.
- Cummins, K.L., Murphy, M.J., Bardo, E.A., Hiscox, W.L., Pyle, R.B., and Pifer, A.E., 1998, A Combined TOA/MDF technology upgrade of the U.S. national lightning detection network. Journal of Geophysical Research, 103, 9035-9044.
- Eom, H.S., Suh, M.S., Ha, J.C., Lee, Y.H., and Lee, H.S., 2008, Climatology of stability indices and environmental parameters derived from rawinsonde data over South Korea. Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences, 44, 269-286.
- Grecu, M., Anagnostou, E.N., and Adler, R.F., 2000, Assessment of the use of lightning information in satellite infrared rainfall estimation. Journal of Hydrometeorology, 1, 211-221.

- Kar, S.K. and Ha, K.J., 2003, Characteristics differences of rainfall and cloud-to-ground lightning activity over South Korea during the summer monsoon season. *Monthly Weather Review*, 131, 2312-2323.
- Lim, E., 2002, Effect of lightning data assimilation on the prediction of precipitation system derived by a cold front. Ph.D. Dissertation, Yonsei University, Seoul, Korea, 148 p.
- Lim, E. and Lee, T.Y., 2001, Effect of lightning assimilation on the prediction of precipitation system associate with a cold front. *Proceeding of International Conference on Mesoscale Meteorology and Typhoon in East Asia*. Taipei, Taiwan, 415-419.
- 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.
- McCann, D.W., 1983, The enhanced-V: A satellite observable severe storm signature. *Monthly Weather Review*, 111, 887-894.
- Petersen, W.A. and Rutledge, S.A., 1998, On the relationship between cloud-to-ground lightning and convective rainfall. *Journal of Geophysical Research*, 103, 14025-14040.
- Petrova, S., Mitzeva, R., Kotroni, V., Latham, J., and Peneva, E., 2009, Analysis of summer lightning activity and precipitation in the Central and Eastern Mediterranean. *Atmospheric Research*, 91, 453-458.
- Piepglass, M.V., Krider, E.P., and Moore, C.B., 1982, Lightning and surface rainfall during Florida thunderstorms. *Journal of Geophysical Research*, 89, 11789-11805.
- Sheridan, S.C., Griffiths, J.F., and Orville, R.E., 1997, Warm season cloud-to-ground lightning-precipitation relationship in the South-Central United States. *Weather and Forecasting*, 12, 449-458.
- Soriano, L.R., Pablo, F.D., and Diez, E.G., 2001, Relationship between convective precipitation and cloud-to-ground lightning in the Iberian Peninsula. *Monthly Weather Review*, 129, 2998-3003.
- Tapia, A., Smith, J.A., and Dixon, M., 1998, Estimation of convective rainfall from lightning observations. *Journal of Applied Meteorology*, 37, 1497-1509.
- Williams, E.R., Weber, M.E., and Orville, R.E., 1989, The relationship between lightning type and convective state of thunderclouds. *Journal of Geophysical Research*, 94, 13213-13220.
- Zajac, B.A. and Weaver, J.F., 2002, Lightning Meteorology I: An introductory course on forecasting with lightning data. Preprints, Symposium on the Advanced Weather Interactive Processing System (AWIPS), Orlando, FL, American Meteorology Society, p. 6.
- Zhou, Y., Qie, X., and Soula, S., 2002, A study of the relationship between cloud-to-ground lightning and precipitation in the convective weather system in China. *Annales Geophysicae*, 20, 107-113.
- Zipser, E.J., 1994, Deep cumulonimbus cloud systems in the Tropics with and without lightning. *Monthly Weather Review*, 122, 1837-1851.
- 기상청, 2006, 보도자료. http://kwra.or.kr/search/download.php?file_name=07_1%20%B1%E2%C8%C4%BA%AF%C8%AD%BF%CD%202006%B3%E2%20%C0%E5%B8%B6.pdf (검색일: 2009. 2. 13)
- 기상청, 2008, 보도자료. <http://www.newswire.co.kr/newsRead.php?no=339333> (검색일: 2009. 2. 13)

2010년 10월 6일 접수
2010년 11월 23일 수정원고 접수
2010년 12월 2일 채택