

ORIGINAL ARTICLE

나로우주센터 상공의 낙뢰 발생 특성 연구

김홍일 · 최은호 · 서성호 · 서성규^{1)*}

한국항공우주연구원 나로우주센터 비행안전기술부, ^{1)전남대학교 대학원 건설·환경공학과}

A Study on the Characteristics of Lightning Detection over the Naro Space Center

Hong-Il Kim, Eun-Ho Choi, Sung-Ho Suh, Seong-Gyu Seo^{1)*}

Flight Safety Technology Division, NARO Space Center, Korea Aerospace Research Institute, Daejeon 34133, Korea

¹⁾*Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea*

Abstract

The latest aerospace technology is important for the stable flight of a launch vehicle, but weather conditions on the day of launch are also one of the essential factors for successful launch campaign. If a launch vehicle is directly struck while preparing to take off from the launch pad on the day of launch or the electronic device are damaged by induced current during flight of the launch vehicle, this means launch failure and can lead to enormous national loss. Therefore, for a successful launch campaign, it is necessary to analyze the lightning detection characteristics of the Naro Space Center. In this study, the seasonal factors of the lightning that occurred over the Naro Space Center from 2003 to 2017, the influence of the polarity, and the correlation with the lightning intensity was confirmed. As a result, there was a high probability of intensive occurrence of multiple lightning strikes in summer, and a high proportion of positive (+) lightning strikes in winter. Lastly, in the distribution of the number of lightning strikes, an average of 2.0 to 2.5 negative (-) lightning strikes occurs in the coastal regions of the South and West Seas when one flash happens.

Key words : Naro Space Center, Lightning, Launch vehicle, Flash, Stroke, Peak current

1. 서론

발사체는 최첨단 과학기술의 집약이라고 불릴 만큼 수백 개의 신기술 및 정밀 부품을 사용하며, 대기권 밖으로 비행하기 때문에 극저온, 고압 조건을 견딜 수 있게 제작되어야 한다. 따라서 성공적인 발사를 위해서는 끊임없는 단위/통합 시험과 성능 인증이 필요하다. 이와 더불어 발사 성공에 중요하게 요구되

는 요인이 발사 당일 기상상태라 할 수 있다.

해외의 경우 바람과 낙뢰의 영향으로 발사당일 발사가 지연된 사례를 종종 확인할 수 있다. 대표적으로 ESA (European Space Agency) 소속의 기아나 Kourou(쿠르 발사장)의 경우, 총 162회 발사 중 9회(약 5.6%)의 발사가 바람으로 인하여 지연되었으며 13회(약 8%)의 발사는 낙뢰로 인하여 지연되었다. 또한 미국의 Eastern Range(케네디우주센터 및 케이

Received 3 March, 2022; Revised 23 June, 2022;

Accepted 30 June, 2022

*Corresponding author: Seong-Gyu Seo, Department of Civil and Environmental Engineering, Chonnam National University, Yeosu 59626, Korea
Phone: +82-61-659-7264
E-mail: sseo@jnu.ac.kr

© The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

프 커네버럴 발사장)의 경우, 낙뢰로 인하여 약 35%의 발사 지연, 약 4.7%의 발사중지 사례가 있었다(Lions, 1996; Chang, 1996). 국내에서도 나로우주센터는 연안지역에 접해 있는 외나로도 섬에 위치하고 있어 잦은 기후변화가 발생하는 지역이므로 발사를 위한 기상조건이 매우 열악할 뿐 아니라(Lee et al., 2004), 실제 2010년 8월 나로호 2차 발사 시에는 당일 오전까지도 유입되는 중층운으로 인하여 기상발사기준(WLCC: Weather Launch Commit Criteria)의 낙뢰발사기준(Kim et al., 2019)을 만족하지 못해 발사가 연기될 수 있는 상황이 발생되었다.

최근 우리나라는 지구 온난화에 의한 잦은 이상기후로 여름철 국지성 집중호우로 낙뢰를 동반한 피해가 증가하고 있다(Park, 2008). 이는 발사장 발사 임무 수행 시에도 낙뢰로 인한 직/간접적인 피해가 발생할 수 있는 가능성이 높아졌다는 것을 의미한다. 발사장에서 발생할 수 있는 낙뢰로 인한 직접적인 피해는 엔진 시험, 연소 시험 등의 추진기관 시험과정에서 낙뢰 직격에 의한 감전사고, 건축물과 설비의 파괴를 들 수 있고, 낙뢰로 인한 간접적인 피해는 낙뢰에 의해 발생하는 2차적인 피해로 전력설비의 정전, 통신설비의 통신중단, 유도전류 발생에 따른 전자제어장치 훼손, 시험일정 연기 등을 들 수 있다. 특히 발사 당일 발사 궤적 상에 낙뢰가 감지되거나 발사 후 발사체 인근에 유도 전류에 의한 전자기기 손상이 발생할 경우, 이는 곧바로 발사 실패로 이어지며 막대한 국가적인 손실이 발생할 수 있다(Barker et al., 1996; Dwyer et al., 2003).

따라서 성공적인 발사를 위해서는 이 요소들이 포함된 나로우주센터 상공의 낙뢰 특성 분석이 반드시 진행되어야 하며, 이를 위해서 본 논문에서는 나로우주센터 인근지역에서 관측된 2003년부터 2017년까지 기상청 낙뢰감지네트워크로 관측된 낙뢰 자료를 활용하여 계절 분석, 강도 분석, 성분 분석 등의 연구를 수행하고자 한다.

2. 자료 및 분석방법

2.1. 자료

본 연구에서는 나로우주센터 상공의 낙뢰 발생 특성 분석을 위해서 2003년 1월 1일부터 2017년 12월 31일까지의 기상청 낙뢰감지네트워크 관측망에서 관측된 자료를 사용하였다. 기상청 낙뢰감지네트워크는 구름방전 17개소(LDAR ESP 센서), 대기방전 7개소(IMPACT ESP 센서)로 한반도 전역에 관측망을 구

성하고 있으며, 각각 전자기파 방향탐지(MDF: Magnetic Direction Finding)방식과 도달시간차(TOA: Time-of-arrival) 방식을 혼합하여 낙뢰를 탐지한다. 우선 전자기파 방향탐지방식은 낙뢰로부터 발생한 전자파가 도달되는 방향을 측정하여 2개의 안테나로부터 낙뢰의 위치를 결정한다. 또한 도달시간차 방식은 낙뢰가 발생하여 각각의 센서에 도달한 시간의 차이를 이용하여 낙뢰 발생의 위치를 계산한다(Krider et al., 1980; Dowden et al., 2002). 기상청 낙뢰감지네트워크의 낙뢰감지효율은 우리나라 영해선 및 나로우주센터 반경 200km 이내에서 발생하는 구름-대지 방전에 대하여 90% 이상의 성능을 보이며, 1 km 이내의 위치 정확도(Wi et al., 2010)를 가지고 있다. 관측된 기상청 낙뢰관측자료에는 낙뢰발생 시간, 위치(위 경도), 극성, 최극값, 낙뢰 감지 참여 센서 개수 등의 정보가 포함되어 있다. 기상청 낙뢰 감지센서의 설치 위치는 Fig. 1(left) 과 같다. 단, 본 연구에서 분석 영역은 나로우주센터 인근지역이므로 기상청 전국 낙뢰 네트워크 관측망 자료 중에서 나로우주센터 반경 100 km 이내에서 관측된 낙뢰 자료를 중점적으로 분석하였다(Fig. 1(right)).

낙뢰 특성을 연구할 때 중요하게 고려해야 할 요소는 낙뢰의 성분 분석이다. 낙뢰는 1회 이상의 뇌격(Lightning stroke)으로 구성된 구름과 대기 사이에서 발생하는 전기적 방전으로 정의하고 있다(Lee, 2013). 여기에서 뇌격은 대기 또는 보호대상 구조물에 대한 단 한 번의 전기적 방전을 말한다. 이는 섬광(Lightning flash)과 구분되는데 섬광은 일반적으로 낙뢰가 발생하였을 때 번쩍하고 맨눈으로 보이는 방전 상태를 말하며, 보통 섬광을 낙뢰로 통칭하고 있으며, 이러한 섬광을 초고속카메라로 관찰하면 하나 또는 여러 개의 뇌격으로 구성되어 있음을 알 수 있다. 특히 1개의 낙뢰 즉 섬광이 발생했을 때 뇌격의 수에 따라 낙뢰 강도, 위험 반경, 및 후속 낙뢰의 경로(Channel)가 달라질 수 있다(Krider et al., 1968). 따라서 본 연구에서는 발생하는 낙뢰의 뇌격과 섬광 분포를 확인하기 위하여 US National Lightning Detection Network (NLDN)에서 사용하는 뇌격 섬광 판별 알고리즘(Cummins et al., 1998)을 적용하였다. 즉 최초 뇌격이 1회 발생한 후 1 s의 시간 동안 반경 10 km 내에 발생하는 모든 뇌격들을 1개의 섬광으로 판별하였다. 단, 1개의 섬광으로 판별된 뇌격들 간 시간 간격은 500 ms를 넘으면 안된다. 이렇게 판별된 섬광을 낙뢰 1회로 정의하여 본 연구를 수행하였으며, 1개의 낙뢰에는 뇌격의 개수(Multiplicity)가

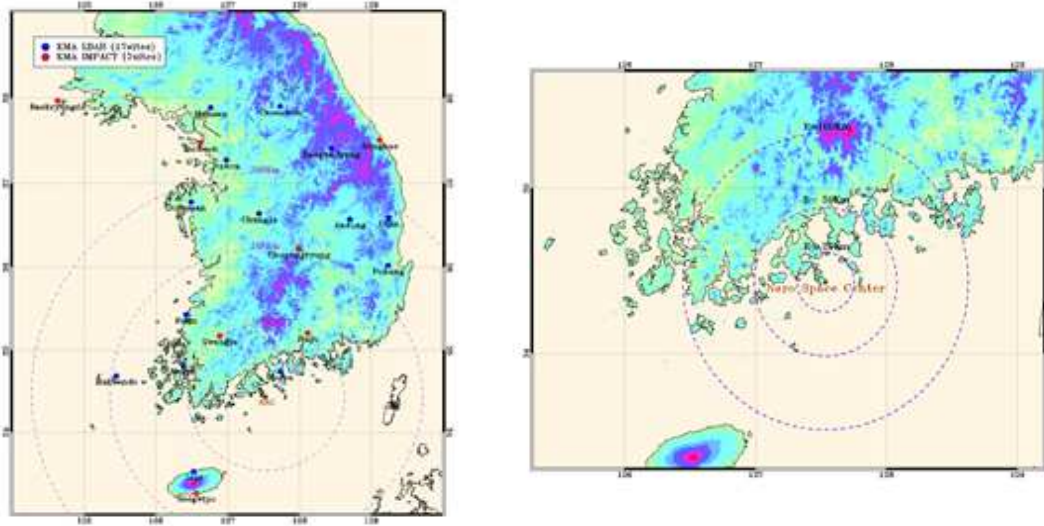


Fig. 1. Lightning detection network of Korea Meteorological Administration(left) and 100 km, 50 km and 20 km radius of the Naro Space Center(right).

Table 1. Distribution of monthly lightning days within a 100km radius of the Naro Space Center observed from lightning detection network of Korea Meteorological Administration during 2003/01/01 ~ 2017/12/31

Year/ Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2003	0	0	3	3	1	1	17	13	8	1	0	0	47
2004	2	5	8	7	15	16	23	26	16	10	10	7	145
2005	1	8	6	6	19	13	28	29	17	14	9	11	161
2006	6	6	10	20	28	26	29	30	24	-	-	-	179
2007	8	8	10	12	24	30	30	30	28	24	18	14	236
2008	4	0	10	11	16	21	28	30	27	15	17	11	190
2009	10	7	17	13	16	27	28	22	20	27	23	17	227
2010	11	16	24	24	29	28	31	31	29	31	22	25	301
2011	26	21	23	28	23	29	26	30	20	19	19	5	269
2012	5	8	17	25	30	29	31	31	27	13	15	7	238
2013	5	3	13	16	27	27	20	19	19	21	25	27	222
2014	27	10	17	18	28	30	30	31	18	5	5	1	220
2015	5	1	6	10	22	29	29	29	18	6	3	2	160
2016	1	4	5	12	11	25	29	28	26	28	23	22	214
2017	9	10	14	22	24	29	30	27	25	21	25	11	247
Total	120	107	183	227	313	360	409	406	322	235	214	160	3056
%/day	25.8	25.4	39.4	50.4	67.3	80.0	88.0	87.3	71.6	54.1	51.0	36.9	56.8

적계는 1개, 최대는 15개까지 포함할 수 있다.

Table 1은 2003년 1월부터 2017년 12월까지 기상청 낙뢰감지네트워크 관측망을 통하여 나로우주센터 100 km 반경 이내에서 감지된 월별 낙뢰일수 (Number of lightning days) 분포이다. 2006년 10월부터 12월까지는 월별 관측된 낙뢰가 기록되지 않아 본 분석에서는 제외하였다.

2.2. 낙뢰발생 특성 분석

낙뢰가 하루에 1회 관측되거나 1000회 이상 관측되더라도 낙뢰발생일수는 1일로 계산된다. 하지만 낙뢰발생일수가 같은 1일이더라도 하루 동안 많은 수의 낙뢰가 관측되었다면, 그 날은 대기상태가 상당히 불안정한 상태가 지속되었다는 것을 의미하며 다수의 낙뢰발생으로 인하여 인명피해 및 물적피해 등과 같은 2차적인 영향을 줄 수 있다. 즉 낙뢰발생일수는 계절적인 통계분석에는 유의미할 수 있지만, 낙뢰의 위험성 분석에는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 2003년~2017년 동안의 낙뢰발생일수뿐 아니라 월별 낙뢰발생 횟수를 계산하였으며, 낙뢰발생일수와 낙뢰발생횟수 간의 연관성을 분석하였다.

또한 계절에 따라 낙뢰가 발생할 수 있는 기류 분포, 대전 조건 등이 다를 수 있으므로 계절별 낙뢰 극성(Positive/Negative) 빈도수와 시간 별 낙뢰 빈도 분포를 확인하였다. 마지막으로 연도별 낙뢰 밀도 (Density) 분포와 하나의 낙뢰 속에 포함되어 있는 뇌격(Stroke) 수를 확인하여 낙뢰 극성과 뇌격 수와의 상관관계를 검토하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 월별 낙뢰발생횟수 및 평균 분포

월별 낙뢰발생일수는 국지성 집중호우와 태풍이 빈번한 여름철(6월~8월)에 가장 높게 나타났다(Table 1). 특히 2010년과 2012년의 경우 7월과 8월 모두 낙뢰발생일수가 31일로 나로우주센터 발사장 주변에 매일 낙뢰가 발생되었음을 알 수 있었다. 봄철(3월~5월)과 가을철(9월~11월)을 비교해보면 봄철 39.4%~67.3%, 가을철 51.0%~71.6%로 가을철 낙뢰발생확률이 더 높은 것을 알 수 있었다.

다음으로 낙뢰의 강도와 발생 특성을 확인을 위하여 월별 낙뢰발생횟수를 분석하였다. 특히 낙뢰발생일수는 하루에 1개 계산되지만 낙뢰발생횟수는 하루 동안 수백 개의 섬광(lightning flash)이 발생할 수 있어 낙뢰 강도와 발생 특성을 확인할 수 있다(Table 2).

월별 낙뢰발생일수 및 일일 낙뢰발생확률은 7월이 409일과 88.0%로 8월의 406일, 87.3%와 유사한 비율을 보였으나, 월별 낙뢰발생횟수에서는 8월이 283889회로 7월에 발생한 176043회보다 약 62% 많이 발생되었다. 따라서 8월에 발생한 낙뢰가 뇌운의 발달이 강했으며, 발생한 낙뢰의 강도도 강했을 것으로 추정된다. 또한 낙뢰발생횟수는 여름철(6월~8월)에 대다수의 분포를 보였으나, 특히하게도 2013년에만 6월~8월 낙뢰발생횟수보다 11월에 더 많은 낙뢰가 발생된 것으로 확인되었다. 특히 11월이 25일로 5월, 6월, 12월의 27일보다 월별 낙뢰발생일수에서는 적었지만, 월별 낙뢰발생횟수에서는 11월이 9941회로 5월(135회), 6월(4252회), 12월(6263회)보다 많은 것으로 보아 2013년도는 일반적인 낙뢰발생과는 다른 패턴을 보였으며, 이에 대한 원인은 향후 기상레이더와 같은 관측장비와의 비교분석 혹은 낙뢰관측장비의 오작동 등의 추가적인 확인이 필요해 보인다.

다음으로 계절별 낙뢰발생특성을 확인하고자 이전 분석과 같은 기간 동안의 나로우주센터 100 km 반경 내에서 발생된 월별 낙뢰발생횟수의 평균값을 확인하였다(Fig. 2).

평균적으로 낙뢰가 가장 많이 발생한 달은 8월 18925회였으며, 다음이 7월 9월 순으로 나타났다. 반대로 평균적으로 낙뢰가 가장 적게 발생한 달은 2월이었으며, 3월 12월 순으로 확인되었다. 결국 1년 중 7월과 8월 두 달은 낙뢰발생확률도 80.0% 이상으로 높게 나타날 뿐 아니라 평균적으로 월 10000회 이상의 낙뢰가 발생되고 있으므로 발사 임무를 수행하기에 가장 안 좋은 기상 조건일 가능성이 높으며, 2월은 일 낙뢰발생확률이 25.4% 및 월 평균 274회로 발사 임무를 수행하기에 최적의 기상조건을 나타낼 확률이 높은 것으로 확인되었다.

3.2. 계절별 낙뢰 특성 분석

계절별로 시간에 따른 낙뢰발생특성 확인을 위하여 시간에 따른 낙뢰발생빈도를 Fig. 3에 제시하였다.

봄철(3월~5월)의 경우 전체적으로 골고루 낙뢰가 발생되고 있으나, 15시에서 17시 사이에서 가장 높은 빈도의 낙뢰가 발생되고 있었다. 또한 여름철(6월~8월)의 경우에는 시간 별로 큰 차이는 없지만 오전 6시~7시 사이의 낙뢰 발생 빈도수가 다소 높게 나타난 것으로 밤 사이 고온 다습한 날씨의 영향으로 대류 활동이 활발하기 때문에 해가 뜨는 시점에 낙뢰가 자주 발생되었을 것으로 추정할 수 있다(Lee, 2011). 단, 겨울철 (12월~2월)에는 밤(19시~08시) 사이에는

Table 2. Distribution of monthly lightning occurrence within a 100km radius of the Naro Space Center observed from lightning detection network of Korea Meteorological Administration during 2003/01/01 ~ 2017/12/31

Year/ Month	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
2003	2	26	327	226	336	37	11065	43458	19279	3802	46	7	78611
2004	2	96	1556	1186	247	132	19817	15715	6866	72	473	24	46186
2005	1	21	30	1562	588	7897	18329	27657	1268	50	422	34	57859
2006	8	25	263	2319	198	15270	11929	29052	1489	-	-	-	60553
2007	88	142	163	5065	2406	2763	12312	35684	9171	3682	35	1192	72703
2008	303	1	134	206	1355	10526	10760	40576	4763	722	131	207	69684
2009	58	239	837	47	742	2135	14278	9802	321	1160	987	67	30673
2010	100	921	2051	304	828	1234	5023	20091	5538	721	2195	387	39393
2011	233	260	109	1529	183	3674	10254	8462	18231	521	753	41	44250
2012	6	134	171	743	1098	722	18400	26655	9502	2796	183	1133	61543
2013	12	384	280	1360	135	4252	1761	7909	2571	1344	9941	6263	36212
2014	3234	1440	1065	76	368	4332	8274	5521	3393	53	484	13	28253
2015	33	2	1303	9944	418	1393	1391	1829	1324	392	5	4	18038
2016	14	130	1496	632	30	458	4455	2670	2028	1592	572	378	14455
2017	15	19	297	646	3961	170	27995	8808	760	263	68	649	43651
Total	4109	3840	10082	25845	12893	54995	176043	283889	86504	17170	16295	10399	702064

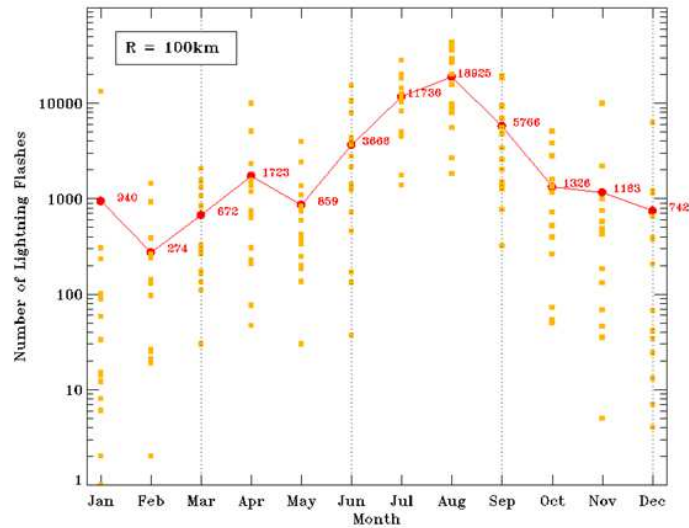


Fig. 2. Mean distribution of monthly lightning occurrence within a 100 km radius of the Naro Space Center from January 1, 2003 to December 31, 2017.

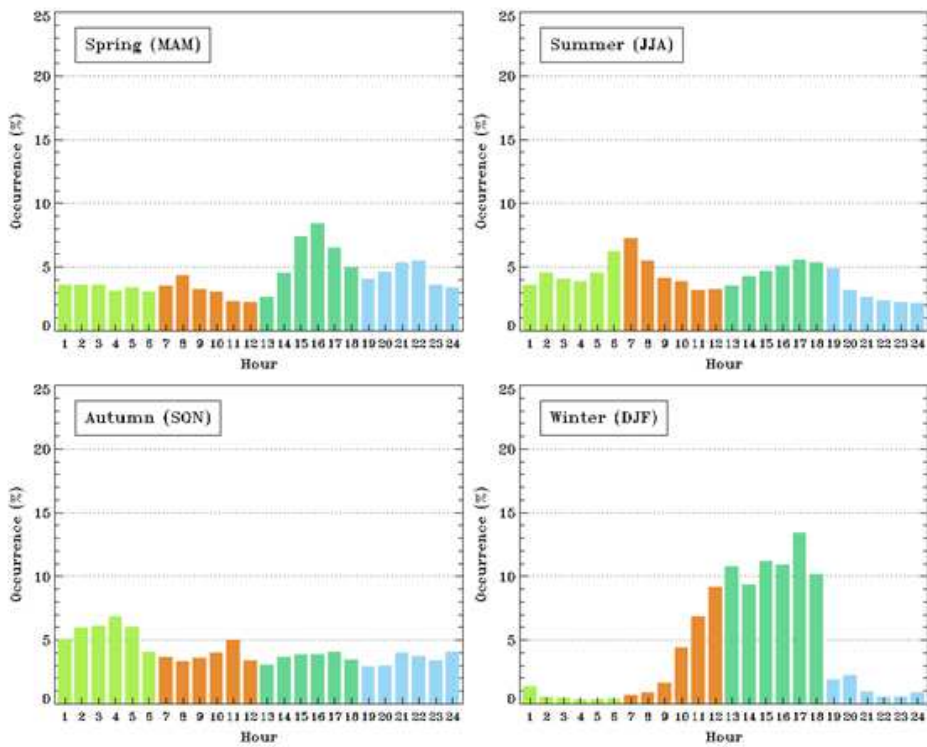


Fig. 3. Distribution of hourly lightning occurrence by season within a 100km radius of the Naro Space Center from January 1, 2003 to December 31, 2017.

낙뢰가 거의 발생되지 않고, 오전 12시~ 18시 사이에 매시간 10% 이상의 분포를 나타내는데일사량과 낙뢰의 상관성이 있을 것으로 추정할 수 있었다 (Soriano et al., 2005).

낙뢰는 음(-)전하와 양(+)전하로 극성을 나눌 수 있으며, 부극성(-) 낙뢰는 구름이 음전하를 띠고 지면이 양전하를 띠는 형태이며 정극성(+) 낙뢰는 구름이 양전하, 지면이 음전하를 띠면서 발생되며 겨울철에는 정극성 낙뢰가 많이 발생되는 게 일반적이다. (Myung and Suh, 2010) 따라서 낙뢰의 계절별 극성 분포를 확인하여 나로우주센터 상공의 낙뢰 극성을 확인하였다(Fig. 4).

낙뢰발생일수와 낙뢰발생횟수의 경우, 여름철에 가장 많은 비중을 차지한다는 것을 앞선 분석결과에서 확인하였다. 여름철 낙뢰의 극성 분포를 보면 전체 낙뢰 횟수 중에서 약 66%는 부극성(-) 낙뢰였다. 부극성(-) 낙뢰는 구름-대지 방전보다 구름방전(구름-구름 방전, 구름 내 방전)에서 흔히 나타나는데 (Ogawa and Brook, 1964) 본 연구를 통해서 여름철에는 구름-대지 방전(월 10000회 이상)보다 더 많은 구름방전이 발생되고 있는 것을 분석결과를 통해서 추정할 수 있었다. 봄철과 가을철은 낙뢰의 극성 비율이 비슷하지만 부극성(-) 낙뢰가 약 10%정도 많이 발생되었고, 겨울철은 정극성(+) 낙뢰가 84.9%, 부극성(-) 낙뢰가 15.1%로 정극성(+) 낙뢰의 비중이 상당히 높은 것으로 보아 나로우주센터 상공에서 관측된 결과값도 일반적인 겨울철 정극성(+) 낙뢰가 다수 관측되는 현상과 일치하였다.

Fig. 5는 낙뢰 극성과 극값의 상관성 유무를 확인하기 위한 계절별 극값의 평균 분포이다. 봄철 평균 극값은 약 14 KA로 극성에 상관없이 비슷했으며, 여름철의 경우 정극성 극값 평균 12.28 KA, 부극성 극값 평균 23.17 KA로 부극성 낙뢰의 강도가 약 2배 높고 극값의 중간값 또한 부극성(-) 값이 약 2배 더 강하게 나타났다. 가을철은 정극성(+) 극값은 봄철과 비슷하고, 부극성(-) 극값은 34.06 KA로 4계절 중 가장 강한 값으로 확인된다. 앞서 확인한 바와 같이 낙뢰발생횟수는 여름철보다 작기 때문에 가을철이 가장 강한 낙뢰가 발생되며 낙뢰로 인한 피해도 다른 계절에 비하여 클 수 있음을 유추할 수 있다. 겨울철은 84.9%의 비율로 정극성(+) 낙뢰가 대부분이었지만, 정극성(+) 낙뢰와 부극성(-) 낙뢰의 극값 평균은 비슷하게 나타났다. 따라서 극성 유무와 극값의 강도는 크게 상관없으며, 계절적으로는 가을철 낙뢰의 강도가 가장 강했기 때문에 향후 나로우주센터에서 발

사 임무 수행 시 이 점을 유의할 필요가 있다.

낙뢰극성별 극값의 중간값(median) 분포에서도 극성 유무와 낙뢰 강도의 상관성은 없었고, 평균값과 유사한 패턴을 보였다. 다만 가을철의 부극성(-) 평균 극값은 34.06 KA로 2배 이상 강했지만, 중간값(median)에서는 그렇지 않아 가을철은 부극성(-) 극값의 표준편차가 상당히 컸다는 것을 유추할 수 있다. 반대로 겨울철은 극값의 평균값(mean)과 중간값(median)의 강도가 겨울철 낙뢰 강도는 극성과 상관관계가 없었으며, 극값 편차도 크지 않음을 알 수 있었다.

3.3. 연도별 낙뢰밀도 및 극성별 뇌격 분포

한반도 지역과 나로우주센터 지역의 연안지역 낙뢰발생빈도 특성을 확인하기 위하여 Fig. 6과 같이 연도별 낙뢰밀도를 계산하였다.

연도별 낙뢰밀도 분포를 보면 우리나라는 연안과 인접해 있는 지역에서 높은 낙뢰밀도를 보이고 있다. 이러한 원인으로서는 연안과 인접해 있는 지역이 주로 해양성해 기후로 인하여 해양의 영향을 많이 받으므로 해륙풍이 불고 장소에 따라 해무가 자주 발생하기 때문으로 보인다. 또한 지구 온난화의 영향으로 우리나라 남해안은 점차 온대지방에서 아열대 기후로 바뀌고 있으므로 고온 다습한 환경이 연중 지속되는 특징이 있다(Kang, 1998). 따라서 우리나라는 연안과 접해 있는 지역에서 낙뢰발생밀도가 높다고 할 수 있겠다. 특히 2003년, 2006년, 2007년, 2008년, 2012년의 경우, 나로우주센터 남쪽 해안지역에서 매년 km 당 5회 이상의 낙뢰가 관측되었다(Fig. 6). 또한 우리나라는 낙뢰를 포함하는 뇌운이 편서풍의 영향으로 서해안에서 유입되거나 남서쪽에서 북동쪽으로 이동하는 경향이 있으므로 서해안 연안해역 혹은 남서쪽 연안해역에서 낙뢰밀도가 높다. 따라서 나로우주센터 인근지역의 낙뢰밀도는 높고 매년 낙뢰 위험에 더욱 많이 노출되어 있다고 할 수 있다.

낙뢰 극성에 따른 뇌격 수의 상관성 확인을 위하여 2003년부터 2017년 사이 관측된 낙뢰에 대한 극성별 뇌격 수를 Fig. 7에 제시하였다. 그 결과 낙뢰밀도 분포와 유사하게 남해와 서해 연안지방이 중부내륙 혹은 동해안 지방보다 더 높은 뇌격 수를 나타내었다. 특히 남해와 서해 연안지방의 부극성(-) 낙뢰는 1개의 섬광 발생 시 평균 2.0~2.5개의 뇌격 수를 포함하고 있어 정극성(+) 낙뢰(1.0~1.5개)보다 평균 1개 이상의 뇌격 수를 포함하고 있는 것으로 나타났다. 따라서 남해안에 위치하고 있는 나로우주센터에서는 부극성(-) 낙뢰가 발생했을 때 높은 낙뢰밀도와

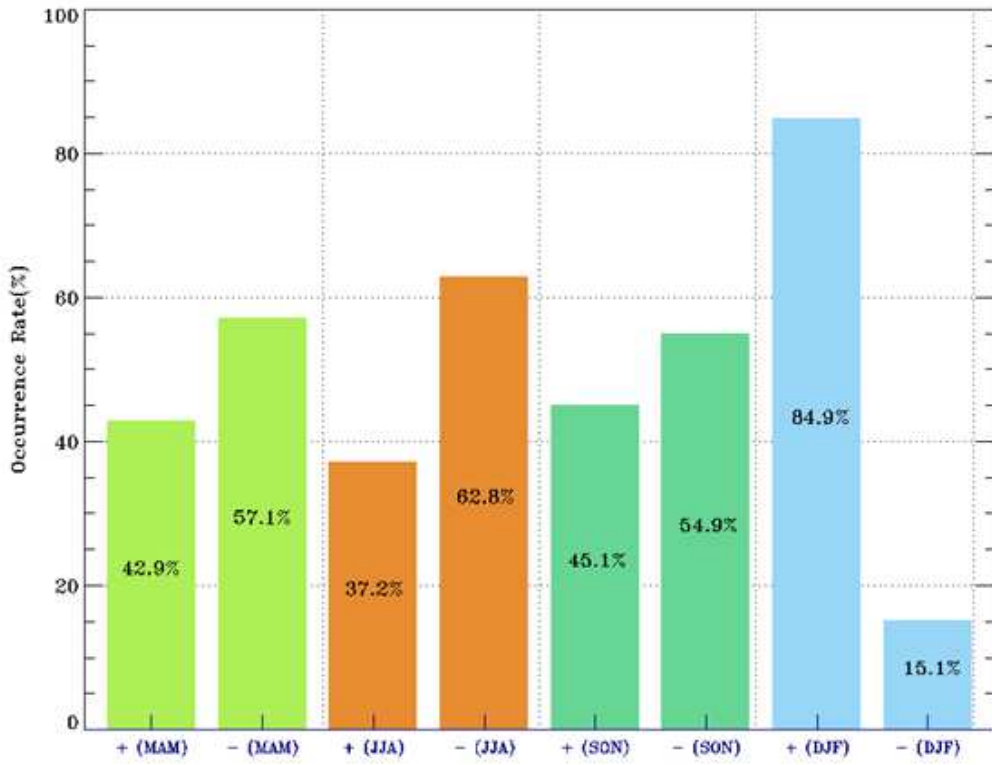


Fig. 4. Polarity distribution of lightning occurrence by season within a 100 km radius of the Naro Space Center from January 1, 2003 to December 31, 2017.

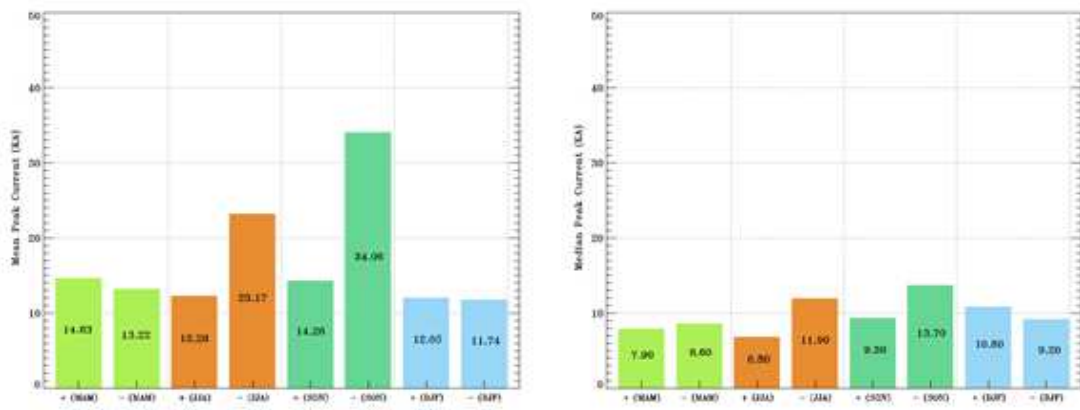


Fig. 5. Polarity distribution of mean peak current and median peak current about lightning occurrence by season within a 100km radius of the Naro Space Center from January 1, 2003 to December 31, 2017.

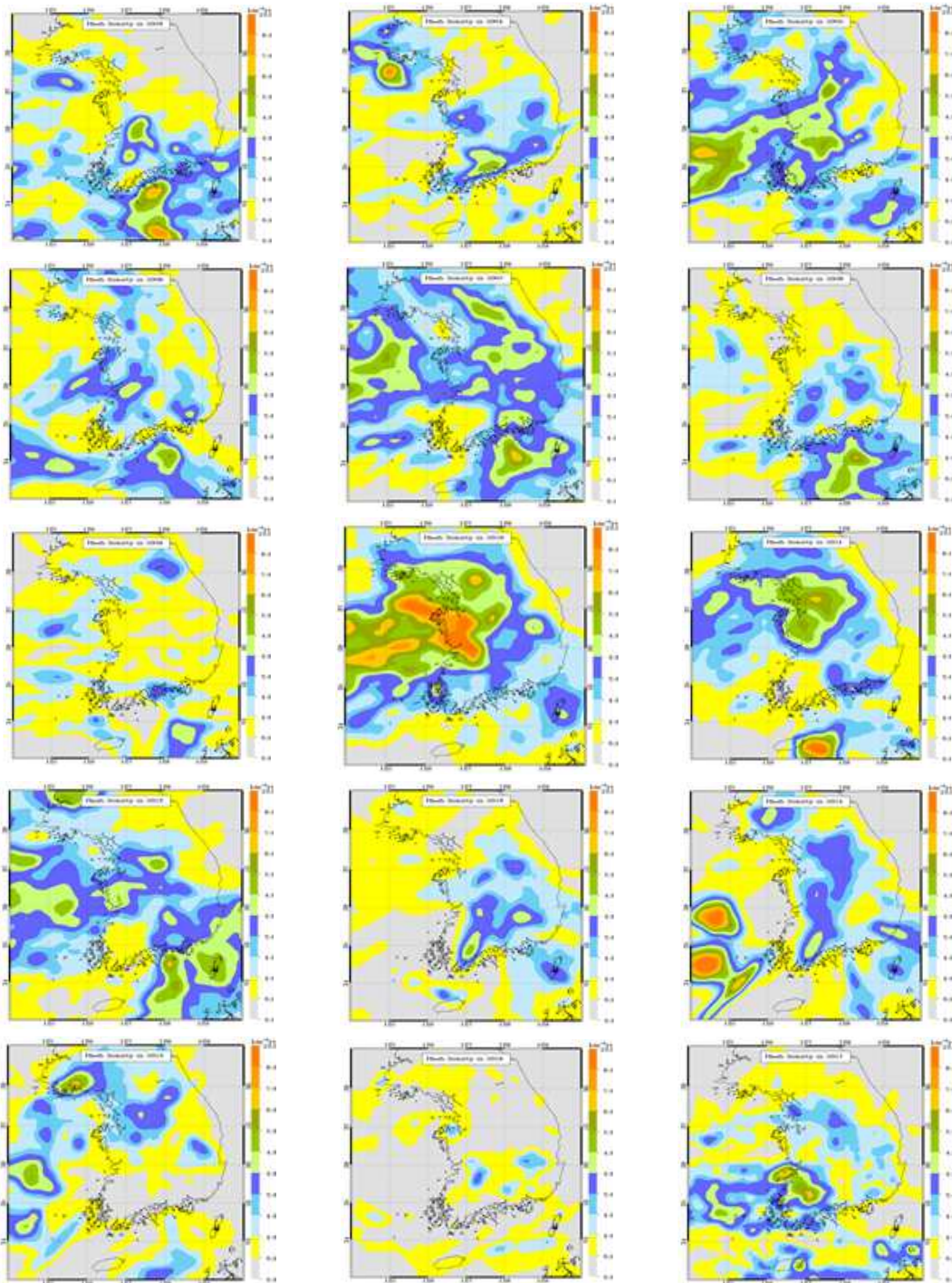


Fig. 6. Distribution of yearly lightning flash density observed in Korean peninsula from January 1, 2003 to December 31, 2017.

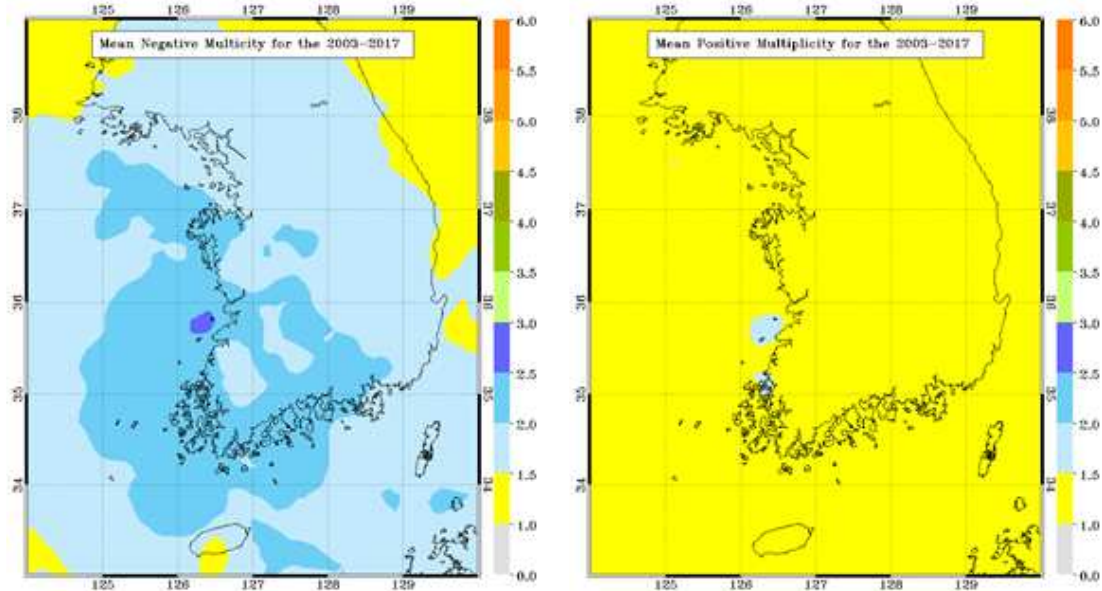


Fig. 7. Distribution of mean negative multiplicity(left) and mean positive multiplicity(right) of lightning flash observed in Korean peninsula from January 1, 2003 to December 31, 2017.

다중의 뇌격 수 분포로 인한 영향을 받을 수 있음을 추정할 수 있었다.

4. 결론

본 연구를 통하여 2003년 1월 ~ 2017년 12월까지 기상청 낙뢰 자료를 활용하여 나로우주센터 주위에 발생된 낙뢰의 특성 분석을 수행하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

첫째, 나로우주센터 상공 100 km 이내의 월별 낙뢰발생일수는 여름철(6월~8월)이 가장 많았으며, 가을철, 봄철, 겨울철 순이었다. 월별로는 7월이 낙뢰발생일수 409일, 하루 낙뢰발생확률은 88.0%로 가장 높았으나, 실제 낙뢰발생횟수는 8월이 28388회로 7월보다 약 62% 많았다. 따라서 8월은 다수의 낙뢰가 집중적으로 발생할 확률이 높고, 뇌운이 더욱 강하게 발달할 수 있는 대기 조건일 것으로 추정할 수 있었다.

둘째, 봄철에는 15시~17시, 여름철에는 오전 6시~8시, 가을철에는 새벽 2시~5시, 겨울철에는 오전 12시~18시 사이에 낙뢰발생빈도가 가장 높았다. 또한, 여름철 발생된 낙뢰의 극성 분포를 보면 부극성(-) 낙뢰가 약 2/3을 차지하고 있는 반면 겨울철은 정극성(+) 낙뢰가 약 1/7

의 비율을 차지할 정도로 높은 비중을 보였다.

셋째, 계절별 나타난 극성별 평균 극값 분포는 여름철 평균 극값(23.17 KA)보다 가을철 평균 극값(34.06 KA)이 높아 가을철이 가장 강한 낙뢰가 발생되며 낙뢰로 인한 피해도 클 수 있으므로, 향후 나로우주센터에서 가을철 발사 임무 수행 시 가을철 낙뢰 발생가능성 및 이동경로에 대한 주의가 필요해 보인다. 낙뢰극성별 극값의 중간값(median) 분포에서도 극성 유무와 낙뢰 강도의 상관성은 없었고, 평균값(mean)과 유사한 패턴을 보였다. 다만 평균값과 중간값 비교를 통하여 가을철은 부극성(-) 극값의 표준편차가 상당히 컸다는 것을 유추할 수 있었다.

넷째, 한반도 지역과 나로우주센터 지역의 연안지역 낙뢰발생빈도 특성을 확인하기 연도별 낙뢰밀도를 계산한 결과 우리나라는 서해안과 남해안의 연안지역에서 높은 낙뢰밀도를 보이고 있었다. 특히 나로우주센터 인근지역의 남쪽 해안가의 낙뢰밀도가 높았으며, 해가 갈수록 증가하는 경향을 보였다.

다섯째, 뇌격 수 분포에서는 낙뢰밀도 분포와 유사하게 남해와 서해 연안지방이 중부내륙 혹은 동해안 지방보다 더 높은 뇌격 수를 나타낸 것으로 확인되었다. 특히 남해와 서해 연안지방의 부극성(-) 낙뢰는 1

개의 섬광 발생 시 평균 2.0~2.5개의 뇌격 수를 포함하고 있어 정극성(+) 낙뢰(1.0~1.5개)보다 평균 1개 이상의 뇌격 수를 포함하고 있는 것으로 나타났다.

본 연구결과를 통하여 나로우주센터 상공에서 발생하는 낙뢰들의 계절적인 요인, 극성에 따른 영향, 낙뢰강도와의 상관성 여부 등을 확인하였다. 하지만 낙뢰발생가능성 및 발생에 의한 영향을 예측하기 위해서는 낙뢰의 발생조건 및 낙뢰발생 메커니즘에 대한 이해가 필요하다. 현재 해외에서는 Lightning Mapping Array (LMA)를 통한 낙뢰성분 분석을 연구 중에 있으며, 국내에서도 최근 국립기상과학원에서 구름물리실험챔버를 구축하는 등 낙뢰발생의 기원이 되는 대류운을 분석할 수 있는 환경이 조성되고 있다. 따라서 향후 발사임무 수행과정에서 발생할 수 있는 낙뢰에 의한 피해를 최소화하기 위해서는 관측 자료를 통한 낙뢰발생 특성연구 뿐 아니라 수치모델 및 시뮬레이션을 통한 낙뢰발생가능성에 대한 분석도 반드시 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 한국항공우주연구원의 “우주센터 2단계 사업(FR22C00)”의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- Barker, P. P., Short, T. A., Eybert-Berard, A. R., Berlandis, J. P., 1996, Induced voltage measurements on an experimental distribution line during nearby rocket triggered lightning flashes, *IEEE Trans. Power Del.*, 11, 980-995.
- Chang, I. S., 1996, Investigation of space launch vehicle catastrophic failures, *J. Spacecr. Rockets.*, 33, 198-205.
- Dowden, R. L., Brundell, J. B., Rodger, C. J., 2002, VLF lightning location by time of group arrival (TOGA) at multiple sites, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 64, 817-830.
- Dwyer, J. R., Uman, M. A., Rassoul, H. K., Al-Dayeh, M., Caraway, L., Jerould, J., Rakov, V. A., Jordan, D. M., Rambo, K. J., Corbin, V., Wright, B., 2003, Energetic radiation produced during rocket-triggered lightning, *Science*, 299, 694-697.
- Kang, I. S., 1998, Relationship between El-Nino and Korean climate variability, *J. Korean Meteor. Soc.*, 34, 390-396.
- Kim, H. I., Choi, E. H., Ha, J. S., Seo, S. G., 2019, Meteorological Environmental analysis of Naro Space Center on the day of launch of NURI Test Launch Vehicle, *Proceedings of the Autumn Meeting of Korean Meteorology Society*, HICO, Kyung-Ju, 245.
- Krider, E. P., Dawson, G. A., Uman, M. A., 1968, Peak power and energy dissipation in a single-stroke lightning flash, *J. Geophys. Res.*, 73, 3335-3339.
- Krider, E. P., Noggle, R. C., Pifer, A. E., Vance, D. L., 1980, Lightning direction-finding systems for forest fire detection, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 61, 980-986.
- Lee, C. K., 2011, A Study on the condensation characteristics with solar radiation and tilted angle, Ph. D. Dissertation, Chosun University, Gwangju, Korea.
- Lee, G. H., 2013, IEC-62305-1 (Lightning protection-general principle), *Proc. J. Korean Inst. Illum. Electr. Install. Eng.*, 27, 29-32.
- Lee, Y. S., Ha, J. J., Jeon, E. H., 2004, Climatological boundary and characteristics of coastal zone over the Southwestern Korean peninsula, *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 9, 137-170.
- Lions, J. L., 1996, Flight 501 failure, Report by the Inquiry Board, 190.
- Myung, J. S., Suh, M. S., 2010, Characteristics by the Cloud-to-Ground Lightning Polarity Occurred over South Korea, *J. Korean Earth Sci. Soc.*, 31, 335-347.
- Ogawa, T., Brook, M., 1964, The mechanism of the intracloud lightning discharge, *J. Geophys. Res.*, 69, 5141-5150.
- Park, S. S., 2008, Lightning accident damage status and lightning disaster prevention measures, *Mag. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 8, 34-43.
- Soriano, L. R., De Pablo, F., Tomas, C., 2005, Ten-year study of cloud-to-ground lightning activity in the Iberian Peninsula, *J. Atmos. Sol. Terr. Phys.*, 67, 1632-1639.
- Wi, S. B., Lee, H. J., Kim, G. B., 2010, A Political study for future optimal lightning detection network in KOREA, CATER 2009-1167, Korea University of Technology & Education, Cheonan, Korea.

- Researcher. Hong-Il Kim
Flight Safety Technology Division, NARO Space Center,
Korea Aerospace Research Institute
khi@kari.re.kr
- Researcher. Eun-Ho Choi
Flight Safety Technology Division, NARO Space Center,
Korea Aerospace Research Institute
ehchoi@kari.re.kr
- Researcher. Sung-Ho Suh
Flight Safety Technology Division, NARO Space Center,
Korea Aerospace Research Institute
suhsh@kari.re.kr
- Professor. Seong-Gyu Seo
Department of Civil and Environmental Engineering,
Chonnam National University
sseo@jnu.ac.kr