

ORIGINAL ARTICLE

2017-2022년 남한지역 레이더 및 지상 강수 자료를 이용한 인공강우 항공 실험 가능시간 분석

노용훈 · 장기호* · 임윤규 · 정운선 · 김진원¹⁾ · 이용희

국립기상과학원 기상응용연구부, ¹⁾국립기상과학원 기후변화예측연구팀

Analysis of Available Time of Cloud Seeding in South Korea Using Radar and Rain Gauge Data During 2017–2022

Yonghun Ro, Ki-Ho Chang*, Yun-kyu Lim, Woonseon Jung, Jinwon Kim¹⁾, Yong Hee Lee

Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo 63568, Korea

¹⁾Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo 63568, Korea

Abstract

The possible experimental time for cloud seeding was analyzed in South Korea. Rain gauge and radar precipitation data collected from September 2017 to August 2022 in from the three main target stations of cloud seeding experimentation (Daegwallyeong, Seoul, and Boryeong) were analyzed. In this study, the assumption that rainfall and cloud enhancement originating from the atmospheric updraft is a necessary condition for the cloud seeding experiment was applied. First, monthly and seasonal means of the precipitation duration and frequency were analyzed and cloud seeding experiments performed in the past were also reanalyzed. Results of analysis indicated that the experiments were possible during a monthly average of 7,025 minutes (117 times) in Daegwallyeong, 4,849 minutes (81 times) in Seoul, and 5,558 minutes (93 times) in Boryeong, if experimental limitations such as the insufficient availability of aircraft is not considered. The seasonal average results showed that the possible experimental time is the highest in summer at all three stations, which seems to be owing to the highest precipitable water in this period. Using the radar-converted precipitation data, the cloud seeding experiments were shown to be possible for 970-1,406 hours (11-16%) per year in these three regions in South Korea. This long possible experimental time suggests that longer duration, more than the previous period of 1 hour, cloud seeding experiments are available, and can contribute to achieving a large accumulated amount of enhanced rainfall.

Key words : Experimental time, Cloud seeding, Duration, Frequency, Enhanced rainfall

1. 서론

전 지구적으로 물은 인간 생활에 있어서 가장 필요한 수단 중 하나라 할 수 있다. 그렇지만 세계적으로 증가하는 물 수요에 비해 공급원은 현저히 부족한 것이 현실

이다(Niemczynowicz, 1999). 이미 많은 국가에서 기후변화로 인한 가뭄피해를 겪고 있으며, 식수 부족과 농작물 생산량 감소는 지구촌 곳곳의 기아 문제 확산과 같이 인간의 삶을 위협하고 있다(Mishra et al., 2019). 또한, 최근 증가하고 있는 대규모의 산불은 방대한 산림

Received 8 November, 2023; Revised 28 December, 2023;

Accepted 3 January, 2024

*Corresponding author : Ki-Ho Chang, Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences, Seogwipo 63568, Korea
Phone : +82-64-780-6664
E-mail : khchang@korea.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.

자원 훼손 및 인간과 동식물의 터전 파괴와 같이 생태계를 위협하고 있다(Somashekar et al., 2009; Ajin et al., 2016). 전 세계 여러 지역에서 꾸준히 감소하고 있는 지하수위 역시 심각한 물 부족 현상을 가중하고 있다(Pathak and Dodamani, 2019; Noor and Shafi 2023). 이러한 문제를 해결하기 위해 댐, 저수지, 담수호 등 저장 공간을 확대하거나 빗물 수집 장비를 개발할 수 있다. 그러나 근본적으로는 강수를 증가시키는 방법이 효과적이다(Bruintjes, 1999; Rauber et al., 2019; Lachhab, 2023). 이에 따라 구름에 흡습성 물질을 살포하여 강수량을 늘리려는 인공강우 기술이 제안되었고, 미국, 중국, 이란, 태국, 호주 등 전 세계적으로 용수 부족에 따른 문제를 완화하기 위해 인공강우 연구가 활발히 진행되고 있다(Silverman and Sukarnjanaset, 2000; Javanmard et al., 2007; Tessendorf et al., 2012; Rasmussen et al., 2018; Kong et al., 2021).

국내의 경우 국립기상과학원에서 가뭄, 산불, 미세먼지에 대한 대책 마련을 위해 인공강우 연구를 수행하고 있다. 국내에서 가뭄은 지역별로 규모의 차이는 있지만, 2008년 이후에는 거의 매년 가뭄이 발생하고 있고 전국적으로 피해가 확산되고 있다(NDIAC, 2018). 산불의 경우 최근 10년 동안 500건 이상이 발생하였고, 산림녹화 사업으로 수목이 증가하는 가운데, 건조한 기후와 강한 계절풍의 영향으로 산불 규모와 피해가 점차 대형화되고 있다(KFS, 2023). 아울러 최근에는 서울과 수도권을 포함하여 전국적으로 미세먼지 농도가 심각한 수준의 일수도 증가하고 있다(NIER, 2022). 국립기상과학원은 이러한 문제를 완화하기 위해 강원도 동해 지역(산불 예방), 보령댐 유역(가뭄 저감), 수도권 지역(미세먼지 농도 저감)을 목표로 매년 20여회 이상 인공강우 실험을 수행하고 있다(Ro et al., 2023). 이에 따라 다양한 기상 조건에서 최적으로 시딩하기 위한 항공기 경로를 설정하거나 인공강우 수치모델의 예측 성능 개선에 힘쓰고 있고, 실험 후에는 시딩영향 지역에서 확보할 수 있는 증우량을 산출하고 시딩 구름의 물리적인 변화를 분석하고 있다(NIMS, 2022).

인공강우 실험을 통해서 이러한 목적을 달성하기 위해서는 무엇보다 실험을 통해 많은 양의 인공 증우량을 확보할 수 있어야 한다. 하지만 시딩에 의한 대기 조건의 변화를 정량적으로 검증하는 것은 간단한 일이 아니다(Pokharel et al., 2017). 따라서 기존에는 특정 지역에서 다양한 실험을 수행한 후 통계적인 방법으로 기후 특

성 변화를 분석하여 증우량을 산출하였다(Rosenfeld and Farbstein 1992; Rasmussen et al., 2018; Al Hosari et al., 2021). 최근 Ro et al.(2023)은 시딩영향 지역과 비영향 지역을 분류하여 실험 사례별로 증우량을 산출할 수 있는 방법을 제안하였다. 이들은 국내에서 항공기 한 대를 이용하여 수행된 실험에 대해 확보가 능한 수자원량을 산출하였고, 실험당 평균 1 mm의 증우량을 확보할 수 있음을 확인하였다. 이는 물론 많은 양은 아니지만, Ro et al.(2023)은 넓은 면적에 이러한 증우가 발생한다면 많은 양의 용수를 확보할 수 있음을 전망하였다.

증우량을 더 늘리기 위해 취할 수 있는 가장 간단한 방법은 상승기류가 있는 강수가 지속되는 동안 구름에 시딩 실험을 더 수행하는 것이다. 구름이 목표지역에 장기간 영향을 준다면 실험을 며칠간 지속하여 증우량을 늘릴 수 있다. 가장 효과적인 방법은 여러 대의 항공기를 이용하여 한 대의 비행기가 시딩을 마치면 다른 항공기가 연계적으로 다음 실험을 수행하는 것이다. Jung et al.(2022)은 국내의 10년간 월별 운량, 강수량, 강수일수 등 자료를 분석하여 실험 목적별로 연평균 가능한 실험 일수를 산정하였고, 하루에 여러 번의 실험이 가능하다면 연중 얼마나 수행할 수 있는지를 전망하였다. 이는 국내에서 연계적 인공강우 실험의 가능성을 확인해 주었다. 그러나 이들의 연구 결과는 시간별로 수행되는 인공강우 실험의 특성을 반영하지는 못한 한계가 있다. 이를 해결하기 위해서는 유입된 강수 시스템이 목표지역에 얼마나 지속되는지를 확인할 필요가 있다.

이에 본 연구에서는 국내 기후조건에서 인공강우 항공 실험이 얼마나 가능한지를 결정하려 한다. 인공강우 항공 실험 가능시간을 추정하는 것은 향후 국내에서 장시간 실험을 수행하기 위해 꼭 선행되어야 할 연구이고, 실험을 통해 증우량을 최적으로 산출할 수 있다는 점에서 의의가 크다고 할 수 있다. 본 연구에서는 인공강우 실험 목표지역인 대관령, 서울, 보령 관측소에서 수집된 강수 자료를 대상으로 강수 사례의 평균 지속시간과 발생빈도를 이용하여 월별, 계절별 특성을 분석하려 한다. 또한 연계 실험 가능 횟수 대비 기존에 수행된 인공강우 실험 사례를 고찰하여 향후 국내에서 인공강우 실험을 지속적으로 수행하기 위한 지침을 제시하고자 한다.

2. 자료 및 방법

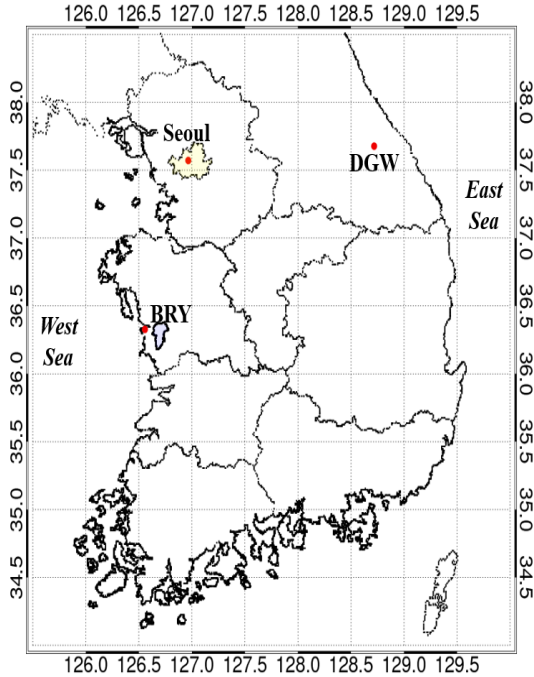


Fig. 1. Location of three target areas in this study. BRY is Boryeong station, and DGW is Daegwanryeong station. The yellow shade represents area of Seoul, and the blue shade represents Boryeong-Dam basin.

2.1. 주요 목표지역 및 강수 사례

본 연구에서는 국립기상과학원에서 가뭄 예방, 산불 예방, 미세먼지 농도 저감을 위해 수행하고 있는 인공강우 실험의 목표지역 별로 실험 가능시간을 분석하였다. 가뭄 예방 실험은 충남 보령댐의 수위 상승을 위해 보령 관측소를 대상으로 하였고, 산불 예방 실험은 강원도 지역의 생태 보호를 목적으로 토양수분을 증가시키기 위해 대관령 관측소를 기준으로 수행되었다. 또한, 미세먼지 농도 저감을 위한 실험은 수도권 지역의 대기질 개선을 목적으로 서울 관측소를 기준으로 수행되었다. 각 실험 지역에 해당하는 세 개 관측소 위치를 나타내면 Fig. 1과 같다.

Fig. 1에 나타난 서울(Seoul)과 보령(BRY) 관측소는 서해에서 유입된 강수 시스템에 영향을 받으며, 대관령(DGW)은 서쪽과 동쪽에서 유입된 시스템의 영향을 모두 받는다. 서울 관측소는 서울시(노란색 음영 부분) 중 북부에 위치하고, 보령 관측소는 보령댐 유역(파란색

음영 부분)과 인접해 있다. 보령댐 유역은 Fig. 1에서 알 수 있듯이 상대적으로 작게 나타났는데, 유역 면적 163.6 km², 저수용량 116.9백만 m³로 소유역에 해당하여 용수 부족으로 인한 가뭄 영향을 크게 받고 있다. 대관령 관측소는 고도 772.4 m에 있어 산악지형의 영향을 받고 있지만, 다양한 구름물리 관측 장비가 설치되어 있어 강원도 지역 인공강우 실험 검증 사이트로 활용되고 있다.

인공강우 항공 실험 가능 시간을 결정하기 위해 본 연구에서는 세 개 관측소에서 관측된 강수 자료를 분석하였다. 분석 기간은 2017년 9월 1일부터 2022년 8월 31일까지이며, 해당 기간에 Beachcraft사의 King Air 350HW의 기상항공기가 도입되어 인공강우 실험이 수행되었다. 세 개 관측소에서 관측된 일강수 자료를 나타내면 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 강수 사례 중 호우와 극한 사례는 다른 사례와 구분하기 위해 일강수 50 mm, 100 mm 선을 따로 표기하여 나타냈다. 그림에서 확인할 수 있듯이, 지점별로 일강수량의 변동성이 크게 나타났지만, 시기별로 강수 증가 패턴은 대체로 유사하게 나타났다. 이는 편서풍의 영향으로 한반도로 유입된 강수 시스템이 대체로 모든 지역에 영향을 준 것을 나타낸다. 지점별 최대 일강수량은 대관령 137.3 mm (2020년 9월 7일), 서울 176.2 mm (2022년 6월 30일), 보령 196.2 mm (2018년 7월 1일)로 나타났다.

2.2. 인공강우 실험 사례

국내에서 인공강우 실험은 기상항공기 운항 여부에 직접적인 영향을 받으므로 비행 조건이 적절히 성립되어야만 실험을 수행할 수 있다. 예를 들어, 구름 유입이 많은 야간과 새벽 시간대에는 기상 조건이 갖춰져도 주로 사용 제한으로 비행이 어렵다. 또한, 목표지역 주변에서 공군 훈련이나 다른 항공기의 운항 등으로 비행 구역이 제한된다면, 사전에 계획한 대로 실험을 수행하기 어렵다. 아울러 기상 조건이 수치모의 예측대로 유지되지 않아 실험 경로를 변경해야 할 때도 허용된 구역 내에서만 경로를 변경할 수 있는 제약이 있다. 따라서 인공강우 실험은 사전의 기상 예측자료와 실험 당일의 원격 관측자료를 모두 고려한 후, 비행이 허가되는 구역에서 수치모의에서 강수 변화가 예상되는 지역을 목표로 수행하고 있다. 기상항공기에 설치할 수 있는 인공강우 실험용 연소탄의 수량이 제한되어 있어 1회 실험으

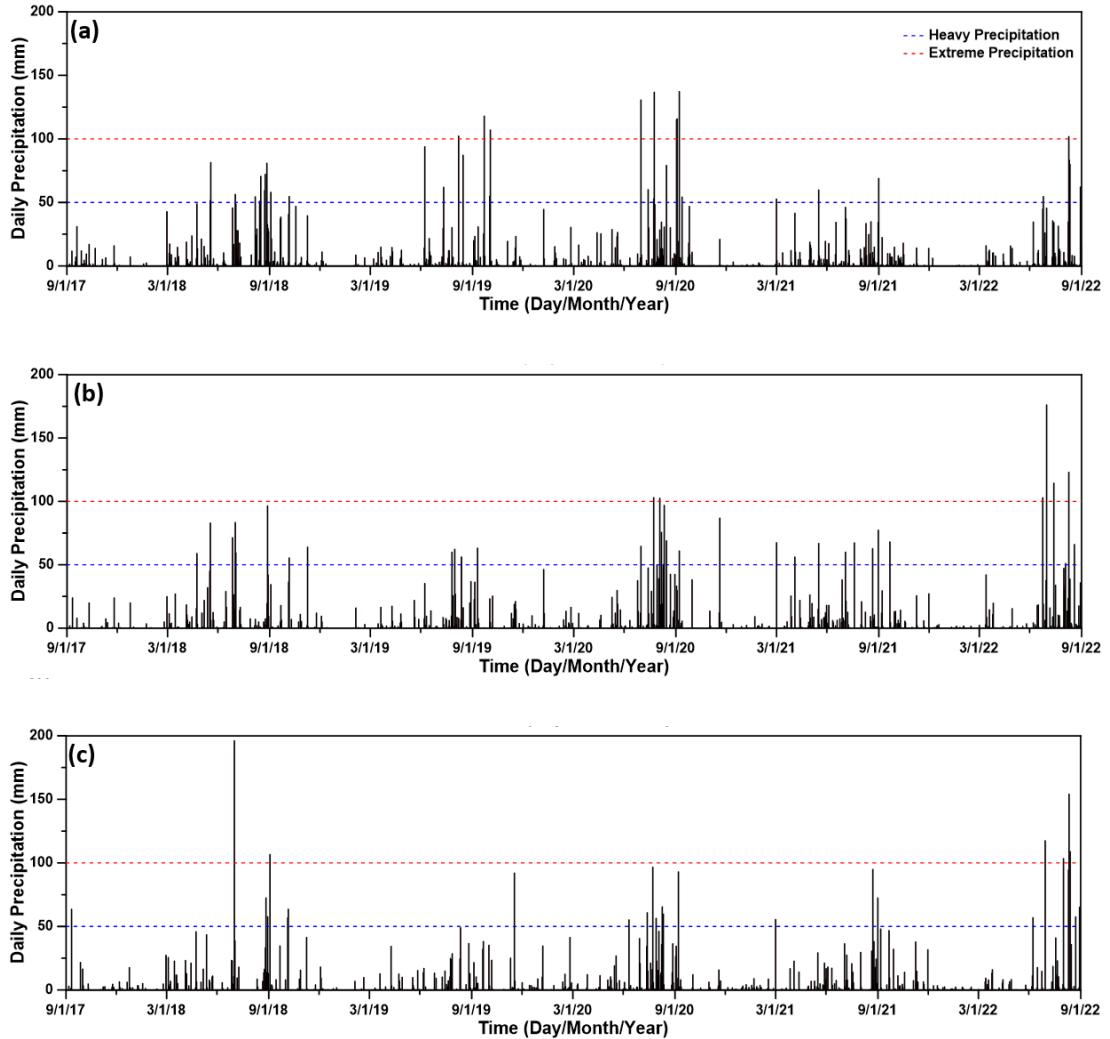


Fig. 2. Time series of daily precipitation in three target stations. (a) Daegwanryeong, (b) Seoul, (c) Boryeong.

로 구름 속에 살포할 수 있는 시당물질의 양도 제한된 가운데 실험이 수행된다. 이러한 제약 조건에도 국내에서 인공강우 실험은 2017년부터 꾸준히 진행되어왔고, 매년 실험 횟수가 증가되고 있다. 분석 기간에 수행된 인공강우 항공 실험 사례를 모두 정리하면 Table 1과 같다.

Table 1에서 확인할 수 있듯이, 각 사례는 시당 시간(분)과 강수 증가(A), 가뭄 저감(B), 산불 예방(C), 미세 먼지 농도 저감(D)과 같이 그 목적에 따라 분류되었다. 2017년부터 2019년까지는 인공 증우량을 증가시키기

위해 실험이 수행되었고, 해당 기간에는 특정 지역에 대한 제한 없이 주로 10~12월에 실험이 수행되었다. 2020년 1월부터 2022년 6월까지 7, 8월을 제외하고 가뭄, 산불, 미세먼지에 대한 대책 마련을 위해 실험이 수행되었다. 본 연구에서 고려한 분석 지역과 같이 가뭄 저감 실험은 보령, 산불 예방 실험은 대관령, 미세먼지 농도 저감 실험은 서울을 대상으로 전체 55회의 실험이 수행되었다. 시당에 소요되는 시간은 실험 지역의 기상 조건, 비행 제한시간, 1회 연소탄 점화 횟수 등에 영향을 받아 6~110분까지 다양하게 나타났는데, 평균적으

Table 1. Experiment cases of cloud seeding

Date	Seeding Time (min)	Goal	Date	Seeding Time (min)	Goal
2017.11.28.	16:56~18:00	64 A	2020.05.15.	12:43~13:05	22 B
2017.12.02.	15:29~16:40	71 A	2020.09.25.	09:54~10:32	38 C
2017.12.03.	16:22~17:17	55 A	2020.10.22.	11:00~13:00	60 D
2018.01.30.	17:09~18:01	42 A	2020.11.01.	11:26~12:20	54 D
2018.03.21.	16:07~17:14	57 A	2020.11.01.	15:33~16:29	56 D
2018.03.29.	12:00~12:56	56 A	2020.11.06.	15:02~16:24	82 C
2018.09.19.	15:26~16:05	39 A	2020.11.19.	11:11~11:30	19 C
2018.10.04.	13:01~13:44	43 A	2021.01.28.	08:26~09:06	40 D
2018.10.17.	11:33~12:47	64 A	2021.02.26.	11:44~12:34	40 C
2018.10.18.	11:31~12:41	70 A	2021.02.26.	15:22~16:09	47 C
2018.11.07.	12:00~12:51	51 A	2021.03.04.	16:05~16:48	43 B
2018.11.21.	11:50~12:32	42 A	2021.03.20.	14:07~14:40	33 C
2018.12.03.	13:22~14:05	43 A	2021.03.27.	16:08~16:30	22 B
2018.12.04.	10:56~11:33	37 A	2021.04.03.	12:19~12:55	36 B
2018.12.11.	11:14~12:05	51 A	2021.04.12.	16:42~17:13	31 B
2019.01.25.	10:13~11:01	48 A	2021.04.16.	08:24~09:16	52 D
2019.04.10.	11:40~12:30	50 A	2021.04.30.	11:03~11:25	22 C
2019.06.27.	10:38~11:22	44 A	2021.05.15.	10:06~10:24	18 D
2019.06.28.	14:58~16:13	75 A	2021.05.16.	14:03~14:43	40 C
2019.08.27.	11:31~11:58	27 A	2021.10.06.	10:19~10:38	19 C
2019.10.24.	13:23~13:53	30 A	2021.10.06.	16:12~16:44	32 C
2019.11.24.	14:26~15:08	42 A	2021.10.07.	09:23~09:39	16 B
2019.11.25.	11:02~11:37	35 A	2021.10.07.	17:28~18:02	34 C
2019.11.28.	11:24~11:48	24 A	2021.10.15.	14:21~15:11	50 C
2019.12.01.	11:08~11:28	20 A	2021.11.23.	10:00~11:14	74 B
2019.12.02.	12:00~12:16	16 A	2021.11.30.	09:15~09:47	32 D
2019.12.03.	12:15~12:30	15 A	2021.11.30.	14:22~15:02	40 D
2019.12.07.	11:54~12:06	12 A	2021.12.07.	13:06~13:58	52 C
2019.12.17.	11:52~12:24	32 A	2021.12.14.	09:29~10:41	72 D
2019.12.18.	13:24~13:30	6 A	2021.12.14.	13:40~14:30	50 D
2020.01.06.	16:42~17:07	25 D	2022.01.25.	12:42~13:32	50 C
2020.01.08.	11:46~12:01	15 B	2022.02.14.	10:50~11:14	24 C
2020.01.11.	10:24~10:42	18 B	2022.02.14.	15:04~15:40	36 C
2020.01.15.	12:55~13:12	17 B	2022.03.04.	14:04~15:00	56 D
2020.01.17.	12:52~13:05	13 C	2022.03.07.	16:53~18:33	110 C
2020.01.19.	10:38~10:48	10 B	2022.03.12.	17:11~18:09	58 C
2020.01.29.	12:18~12:27	9 C	2022.03.13.	11:43~13:21	98 C
2020.01.30.	11:58~12:09	11 C	2022.03.14.	15:57~16:44	47 C
2020.03.27.	10:59~11:11	12 C	2022.03.30.	14:07~14:57	50 B
2020.04.10.	15:06~15:45	39 C	2022.04.13.	09:43~10:26	43 C
2020.04.17.	10:39~11:15	36 B	2022.04.13.	14:39~15:02	23 C
2020.04.27.	13:51~14:10	19 C	2022.06.15.	15:22~16:00	38 C
2020.05.09.	11:10~11:26	16 B			

(A: Enhance rainfall, B: Drought mitigation, C: Forest-fire prevention, D: Dust reduction)

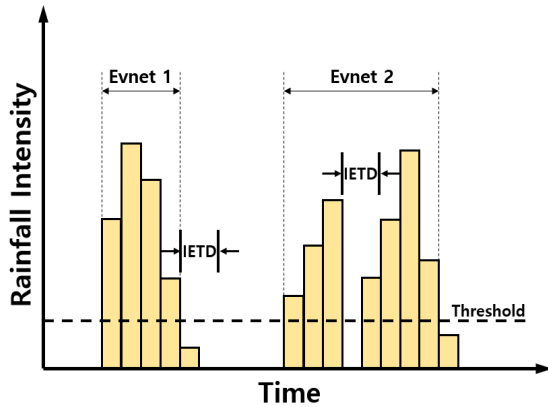


Fig. 3. Determination of independent rainfall using inter-event time definition (IETD).

로 약 1시간 이내의 시간이 소요된 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서는 인공강우 1회 실험에 필요한 평균 시딩 시간을 60분으로 고려하였다.

2.3. 분석 방법

인공강우 항공 실험의 가능 시간을 결정하기 위해 본 연구에서는 분석 기간의 강수 자료를 이용하여 사례를 구분하였다. 본 연구에는 강수 특성이 시간에 따라 다르게 나타날 수 있는 점과 인공강우 실험이 Table 1과 같이 매년 불규칙적으로 수행된 점을 고려하여 강수 사례를 월별, 계절별로 구분하여 분석하였다. 또한, Fig. 2와 같이 지역에 따라 강수가 다르게 나타나는 특성을 고려하여 대관령, 서울, 보령의 세 개 지점을 모두 분석하였다.

먼저 시간별 특성을 반영하여 강수 사례의 지속시간을 결정하기 위해 Fig. 2의 일강수를 구성하는 자료 중 10분 간격의 강수 자료를 이용하였다. 이는 1분마다 강수를 관측할 수 있는 우량계 자료의 오측, 결측 영향을 최소화하면서, 1회 실험에 대한 평균 시딩 시간 60분 동안의 강수 변동성을 최대한 반영하기 위함이다. 또한, 10분 관측 강수가 최소 0.1 mm 이상인 경우를 강수가 발생한 것으로 판단하였다. 지속시간은 목표지역에서 최소 30분 이상 관측된 사례를 기준으로 결정하였고, 연속된 사례를 구분하기 위해 무강우 지속시간을 설정하여 분석하였다.

무강우 지속시간(Inter-event Time Definition, IETD)은 Fig. 3과 같이 연속적인 강수 사례를 구분하기

위한 시간 간격을 나타낸다(Howard, 1976; James, 1994; Adams and Papa, 2000). 수공 구조물을 설계할 때는 강우강도, 지속시간, 발생빈도의 관계를 분석하는데, 강우 지속시간은 호우가 미치는 영향 시간과 다른 호우의 영향을 구분하는 기준이 되기 때문에 국내의 경우 다양한 방법으로 IETD를 결정하려는 연구가 수행되었다(MLTMA, 2011; Joo et al., 2013; Yoo et al., 2016; Lee and Jung 2017; Han et al., 2019; Baek et al., 2022; Essien et al., 2023). 이들 연구에서는 호우 특성과 설계 대상 등에 따라 IETD를 6~24시간으로 다양하게 결정하고 있다. 본 연구에서는 평균 시딩 시간이 1시간 정도로 길지 않고, 강수가 발생할 때 구름이 풍계의 영향을 크게 받는 것을 고려하여 기존 연구 결과에서 사용된 값중 작은 값인 6시간(Essien et al., 2023)을 IETD로 결정하였다. 물론 기존 연구에서는 수공구조물의 설계 규모를 결정하기 위해 장기간 관측된 강수 자료를 바탕으로 IETD를 비교적 긴 시간으로 결정하고 있지만, 본 연구에서는 인공강우의 효과 지속시간이 8시간 미만으로 짧게 나타나는 점을 고려하여(NIMS, 2022) 소유역에 적용가능한 6시간 정도를 호우사례를 구분하기 위한 기준으로 결정하였다.

IETD에 따라 세 개 지점에서 강수 사례별로 지속시간을 결정한 예를 나타내면 Fig. 4와 같다. 여기서는 분석기간 동안 특정 사례를 선정하여 10분 간격으로 관측된 강수강도를 나타냈다. Fig. 4(a)는 한반도 전역에 영향을 주는 대규모의 시스템이 유입되어 세 개 지점 모두 호우의 영향을 받은 사례이다. 그림을 보면 서쪽에 위치한 보령과 서울이 먼저 영향을 받았고, 편서풍의 영향으로 점차 대관령으로 시스템이 이동한 것을 알 수 있다. 이러한 경우에는 각 지점에서 강수 시작과 종료 구간이 명확하게 나타나 그림과 같이 지속시간을 결정하기 수월하다. 반면, Fig. 4(b)와 같이 지속시간이 30분 미만으로 짧게 나타난 경우에는 IETD 정의에 따라 강수강도에 상관없이 강수 사례로 구분하지 않았다. 그러나 Fig. 4(c)와 같이 일정 기간에 강수 자료의 시간적 간헐성에 따라 여러 개의 강수 사례가 발생해도 전체 IETD가 6시간 이상이지 않으면 하나의 강수 사례로 판단하고 지속시간을 상대적으로 길게 결정하였다. 간헐성은 강수의 특성 결정에 큰 영향을 주기 때문에(Ro et al., 2020), 본 연구에서는 지상 관측자료를 이용한 지속시간 결정에 미치는 이러한 영향을 최소화하기 위해 레이더 강수 자료를 함께 비교·분석하였다. 레이더 강수는

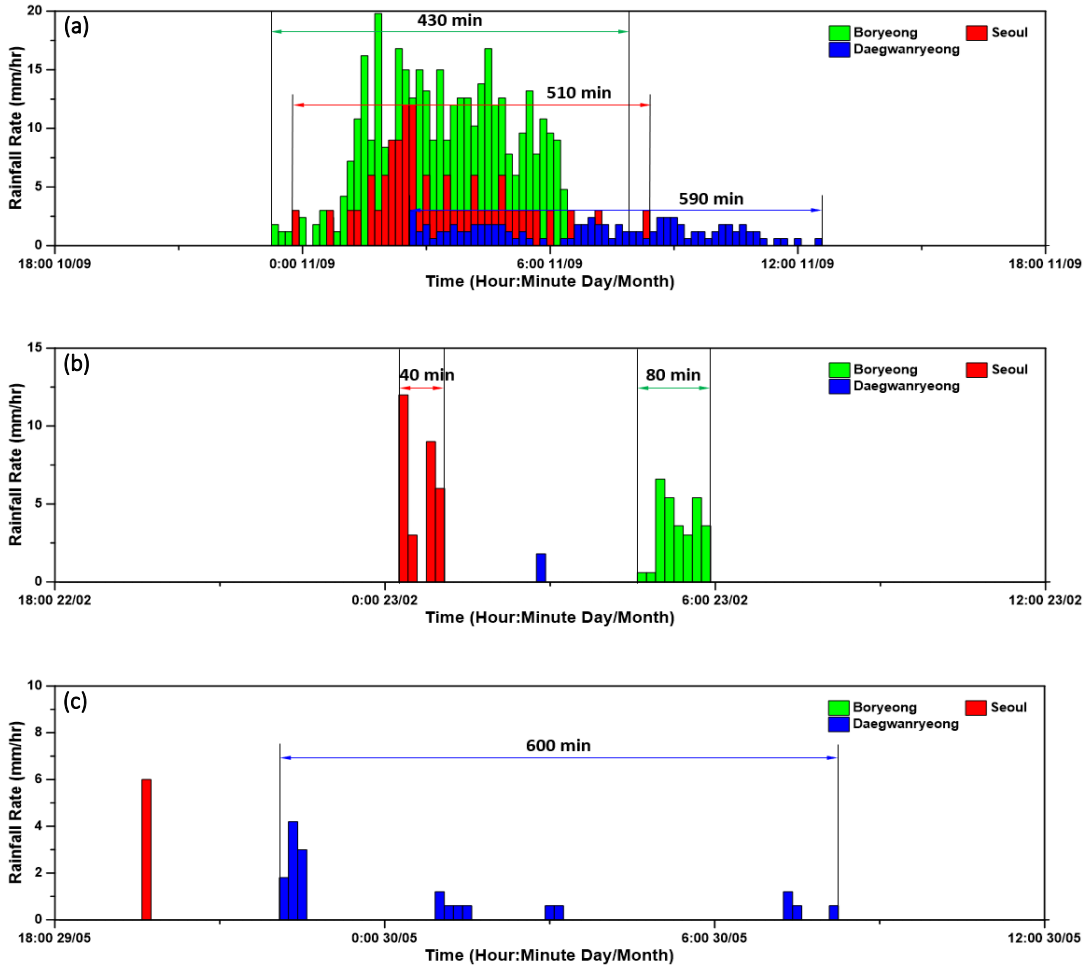


Fig. 4. Example of rainfall duration decision. (a) Event 1 (2017.9.11), (b) Event 2 (2018.2.23), and (c) Event 3 (2018.5.30).

기상청에서 국내 현업용 강수 추정에 활용하고 있는 레이더 반사도(Z)와 강수강도(R) 관계식, $Z = 148R^{1.59}$ 를 이용하여 산출하였다(0.1 mm 이상). 물론 레이더 강수가 지상 강수에 비해 불확실성이 큰 것으로 알려져 있지만(Ro et al., 2020), 레이더는 관측 특성상 우량계와 비교하여 대기 중에 분포한 수적을 민감하게 감지할 수 있는 이점이 있다. 이는 항공기를 이용하여 구름 속에 시딩물질을 살포하는 인공강우 실험에 있어 대상 지역에 영향을 주는 강수 시스템의 지속시간을 분석하기에 우량계보다 더 유리하다. 따라서 본 연구에서는 우량계 강수 자료와 함께 레이더 강수 자료를 이용하여 강수 사례별로 지속시간을 결정하였고,

월별, 계절별 강수의 평균 지속시간을 산정하였다.

다음으로 지속시간에 따라 분류된 강수 사례에 대해 월별, 계절별 평균 발생빈도를 분석하였다. 이는 IETD에 따라 결정되는 값으로, 강수 사례가 발생할 때는 인공강우 실험을 지속적으로 수행할 수 있기 때문에, 본 연구에서는 강수 사례의 지속시간과 함께 발생 빈도도 함께 고려하였다. 결정된 두 값을 곱하면 월별, 계절별 강수 사례의 총 발생 시간을 확인할 수 있다. 본 연구에서는 이와 같은 방법으로 산출된 값에 1회 실험에 필요한 시딩 시간 60분을 고려하여 세 개 관측소별로 인공강우 항공 실험을 얼마나 수행할 수 있는지를 결정하였다.

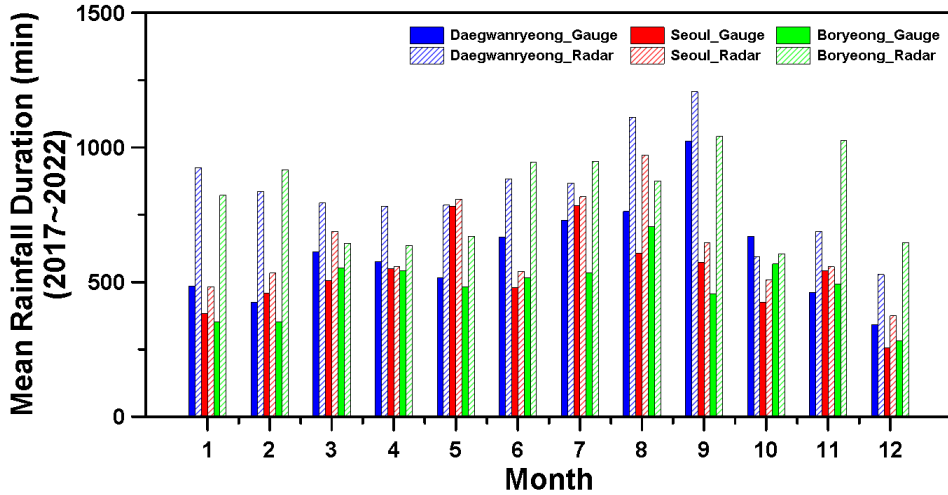


Fig. 5. Monthly-mean duration of precipitation event for the rain gauge and radar data of the three stations.

3. 분석 결과

3.1. 강수 평균 지속시간

앞에서 제시한 분석 방법(2.2절)에 따라 5년 동안 관측된 강수 사례에 대해 분석하였다. 강수 사례는 지상 강수와 레이더 강수 자료를 모두 이용하여 분류하였다. 먼저 각 지점에 대한 월평균 지속시간을 Fig. 5에 나타냈다.

Fig. 5의 막대그래프에서 색칠된 부분은 지상 강수 자료를 이용하여 산정한 평균 지속시간을 나타내고, 빗금친 부분은 레이더 강수를 이용하여 분석한 결과이다. 그림을 보면 거의 모든 경우에서 레이더 강수가 지상 강수보다 월평균 지속시간이 길게 결정된 것을 알 수 있다. 대관령과 보령은 9월, 서울은 8월에 평균 지속시간이 가장 길게 나타났다. 반면, 12월에는 거의 세 지점 모두 지속시간이 짧게 나타났다. 지상 강수와 레이더 강수의 평균 지속시간 차는 10분 이내인 경우도 있었으나(서울 지점 4월, 540분(9시간) 이상 차이가 나는 월도 있었다(보령 지점 2월). 대관령은 레이더 강수의 평균 지속시간이 지상 강수보다 대체로 180분(3시간) 이상 길게 나타났으며, 1, 2, 8월에는 350분(약 6시간) 이상 길게 나타났다. 10월에는 레이더 강수의 월평균 지속시간이 지상 강수보다 작게 나타났는데, 이는 2017년과 2018년에 지속시간이 3시간 미만으로 짧게 나타난 사

례가 많이 있었기 때문이다. 서울은 8월에만 레이더 강수와 지상 강수의 평균 지속시간이 큰 차이를 나타냈고, 대부분 120분(2시간) 이내의 편차를 나타냈다. 보령은 다른 두 지점과 비교하여 상대적으로 레이더 강수와 지상 강수의 월평균 지속시간이 큰 차이를 보였다.

계절별 강수 사례의 평균 지속시간을 비교하면 Fig. 6과 같다. Fig. 6을 보면 강수의 계절 평균 지속시간은 월별 결과와 유사하게 레이더 강수가 지상 강수보다 크게 나타났으며, 전반적으로 봄에서 여름까지는 지속시간이 증가하다가 가을에서 겨울까지 감소하는 경향을 나타냈다. 이러한 결과는 여름철 강수가 집중되는 한반도의 기후 특성을 나타낸다(Chang et al., 2011; Kyoung et al., 2011). 지역별로는 지상 강수의 계절 평균 지속시간이 전체 경향과 다소 상이한 결과를 보였는데, 대관령은 봄에서 가을까지 지속시간이 증가하다가 겨울철에 상대적으로 감소하였다. 서울에서는 봄과 여름의 지상 강수의 지속시간 차이가 크게 나타나지 않았다. 보령은 지상 강수와 레이더 강수 모두 지속시간 변화가 전반적인 증감 패턴과 유사하게 나타났는데, 특히 레이더 강수 지속시간은 여름에서 겨울까지의 차이가 크지 않았다. 이러한 결과는 국내에서 여름철에 강수가 집중되는 경향이 있으나 강수의 지속시간은 계절별로 큰 차이를 나타내지 않는 것을 보여준다.

전반적으로 월별과 계절별 평균 지속시간을 분석한 결과 레이더 강수가 지상 강수보다는 지속시간이 길게 결정되는 것을 나타냈고, 이는 레이더 강수 자료의 공간

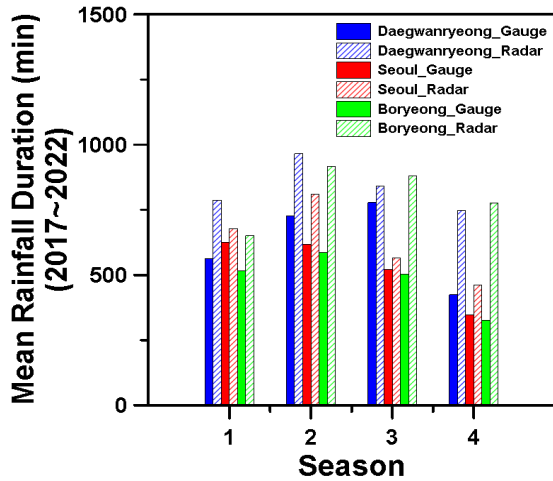


Fig. 6. Seasonal-mean duration of precipitation event for the rain gauge and radar data of the three stations (1: Spring, 2: Summer, 3: Autumn, 4: Winter).

적 관측 채움이 지상 강수보다는 큰 것을 보여주었다. 이는 인공강우 항공 실험을 장시간 수행하기에 유리한 것으로 본 연구에서는 연계 실험의 최대 가능 시간 결정에 지상 강수와 함께 레이더 강수의 분석 결과를 적극적으로 고려하였다.

3.2. 강수 사례 평균 발생빈도

세 개 지점에 대해 월평균 강수 사례 발생빈도를 분석한 결과는 Fig. 7과 같다. Fig. 7에서 확인할 수 있는 것처럼, 강수 사례는 대체로 8월까지의 평균 발생빈도가 증가하다가 이후 감소하는 양상을 나타냈다. 서울 관측소의 8월, 레이더 강수 발생빈도는 13회로 가장 크게 나타났으며, 대관령과 보령도 같은 월에 10회 이상 강수가 발생하였다. 대관령은 1월과 12월에 지상 강수의 평균 발생빈도가 레이더에 비해 상대적으로 작게 나타났다. 3월에서 10월까지는 세 지점 모두 강수가 평균 5회 이상은 발생하였고, 모든 월을 평균한 결과 지상 강수는 6회, 레이더 강수는 7~8회로 나타났다. 이는 평균적으로 매주 한 번 이상은 인공강우 실험이 가능한 것을 보여준다.

강수 사례의 계절별 평균 발생빈도를 분석한 결과는 Fig. 8과 같다. Fig. 8을 보면, 지상 강수의 경우 대관령은 봄에서 가을까지 강수 평균 발생빈도가 가장 많이 나타났고, 겨울에는 다른 두 지점보다 작게 나타났다. 보

령은 모든 계절 동안 평균 5회 이상 강수가 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 대관령과 서울은 가을과 겨울철에, 보령은 봄철에 레이더와 지상 강수 평균 발생빈도가 2회 이상 차이를 나타냈지만, 전체적으로는 두 값이 유사하게 나타났다. 모든 계절을 평균한 결과는 지상과 레이더 강수별로 대관령(6, 8회), 서울(6, 8회), 보령(6, 7회)로 계절마다 최소 6회 이상은 실험이 가능한 것으로 나타났다.

3.3. 인공강우 실험 가능 시간 결정

앞에서 결정한 강수 평균 지속시간과 발생빈도를 곱하면 인공강우 실험을 수행할 수 있는 총 시간을 산정할 수 있다. 여기에 1회 실험에 소요되는 시딩 시간 60분(1시간)을 고려하면 인공강우 실험을 얼마나 연계적으로 수행할 수 있는지를 결정할 수 있다. 먼저 월별로 가능한 실험 지속시간과 이에 따른 연계적 실험 가능 횟수를 정리하면 Table 2와 같다.

Table 2에서 알 수 있듯이, 레이더 강수 자료를 이용하여 산정한 월평균 실험 지속시간과 가능 횟수는 지상 강수를 이용한 경우보다 크게 나타났다. 대관령의 경우 12월에 레이더 강수 자료의 분석 결과는 지상 강수 대비 5배 이상 크게 나타났고, 이때 지상 강수의 사례의 월평균 지속시간은 684분, 연계 가능 실험 횟수는 11회로 다른 월과 지점에 비해 가장 작게 나타났다. 레이더 강수 자료를 이용한 경우가 인공강우 실험을 장시간 수행하기에 유리한 것을 알 수 있는데, 이는 레이더가 우량계보다 관측 밀도가 커서(레이더: 1 km 이내, 우량계: 평균 12 km 이내) 공간적으로 더 상세한 관측이 가능하고 시간에 따라서도 강수 시스템의 움직임을 연속적으로 관측할 수 있기 때문이다. Table 2에서 세 지점 모두 8월에 가장 많은 실험을 할 수 있는 것으로 나타났는데, 대관령은 13,356분(223회)로 가장 많이 나타났고, 서울 12,636분(211회), 보령 9,625분(160회)로 산정되었다. 대관령은 2, 10, 11, 12월을 제외하면 거의 월별 6,000분(100회) 이상은 인공강우 실험이 가능한 것으로 나타났다. 서울은 2, 11, 12월을 제외하면 매월 3,000분(50회) 이상은 실험이 가능한 것을 나타냈다. 보령은 모든 월에 대해 3,600분(60회)은 실험이 가능한 것으로 나타났다. 월별 전체 평균을 비교하면 대관령은 7,025분으로 117회, 서울은 4,849분으로 81회, 보령은 5,558분으로 93회 정도 실험을 할 수 있는 것을 알 수 있다. 같은 방법으로 계절별 분석 결과를 정리하면

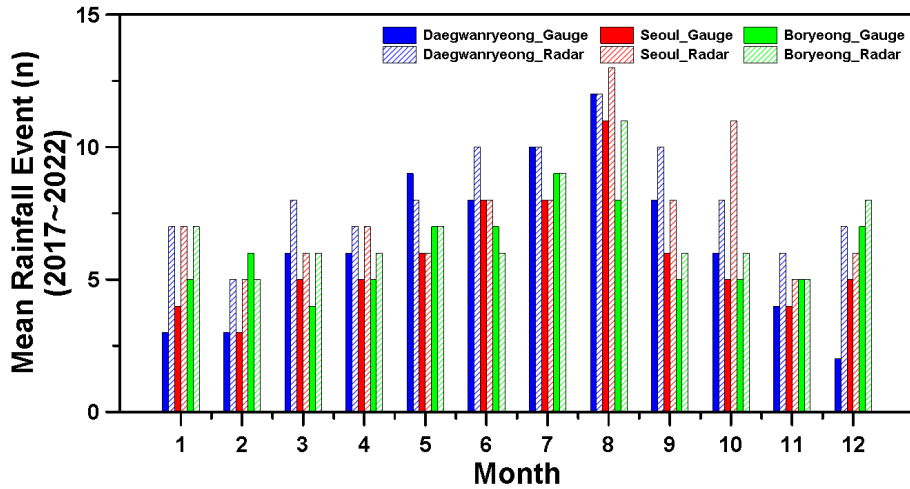


Fig. 7. Monthly-mean frequency of precipitation event for the rain gauge and radar data of the three stations.

Table 3과 같다.

Table 3에서 레이더 강수 자료를 분석한 결과를 보면 대관령은 봄에서 가을까지는 6,000분(100회) 이상 실험이 가능하고, 여름에는 10,626분(177회)으로 다른 지역에 비해 가장 많은 실험을 수행할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 산악지형의 영향으로 대관령이 다른 지역과 비교하여 강수 발생빈도가 높은 것을 나타낸다. 서울과 보령은 여름철에 각 7,290분(122회), 8,244분(137회)로 가장 많은 실험을 할 수 있는 것으로 나타났다. 봄에서 가을까지는 실험 지속시간과 가능 횟수가 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 겨울철에는 대관령과 서울은 다른 계절에 비해 실험 지속시간이 상대적으로 감소한 것으로 나타났지만, 보령은 가을철과 유사한 수준으로 세 지점 중 가장 많은 실험이 가능한 것으로 나타났다. 이는 보령이 해안 지역에 분포하고 있어 서울보다 서해로부터 유입된 시스템에 영향을 많이 받는 것을 나타낸다. 특히 겨울철 해상에서 유입되는 강수 시스템의 영향을 상대적으로 크게 받는 것을 알 수 있는데, 이는 인공강우 실험에 유리한 것을 나타낸다. 전반적으로 계절별 분석 결과는 세 지점 모두 지리적·지형적 요인에 영향을 크게 받는 것을 확인할 수 있다. 아울러 계절별 전체 평균을 비교한 결과는 월평균 전체를 분석한 결과와 유사하게 나타났다.

3.4. 실험 사례 평가

앞에서 산출된 강수 사례의 월별과 계절별 평균 지속

시간을 이용하여 Table 1에 나타난 과거 실험 결과를 검토하였다. 본 연구에서는 인공강우 항공 실험 지속시간이 가장 길게 결정된 레이더 강수 자료를 이용하여 과거 사례를 고찰하였다. 또한, 과거 국내에서 수행된 실험 사례가 항공기 한 대만으로 매 1회 실험만 수행된 것을 고려하여 앞에서 분석한 월별, 계절별 실험 가능 횟수 대비 실제 수행된 실험 횟수를 비교하였다.

2019년까지 수행된 실험 사례를 보면 대부분의 실험이 10-12월에 수행되었고, 연중 약 10회 정도 수행된 것을 알 수 있다. 이 기간에는 전국의 모든 지역을 대상으로 수행되었기 때문에 대관령, 서울, 보령 중 가장 많이 실험을 할 수 있는 지역을 기준으로 수행된 실험을 평가하였다. Table 2를 보면, 10월은 서울에서 93회, 11월과 12월은 보령에서 모두 86회로 가장 많은 횟수의 실험이 가능한 것으로 나타났다. 따라서 10-12월에는 총 265회(15,900분)의 실험이 가능한 것으로 분석되었고, 2019년 동안 이 기간에 수행된 실험이 10회라는 점을 고려하면, 26.5배는 더 실험이 가능했던 것을 알 수 있다. 계절별 평균 지속시간과 비교하면 10월은 가을에 해당하므로 Table 7에서 대관령은 112회까지 실험이 가능한 것을 알 수 있고, 11월과 12월은 겨울이므로 보령에서 할 경우 각 91회까지 실험이 가능한 것으로 나타났다. 이는 총 294회로 연계 실험이 가능할 경우 해당 기간에 약 30배는 더 실험이 가능할 것을 보여준다. 계절별 평균 지속시간과 비교하면 10-12월은 가을과 겨울에 해당하는데 Table 3에서 가을에는 대관

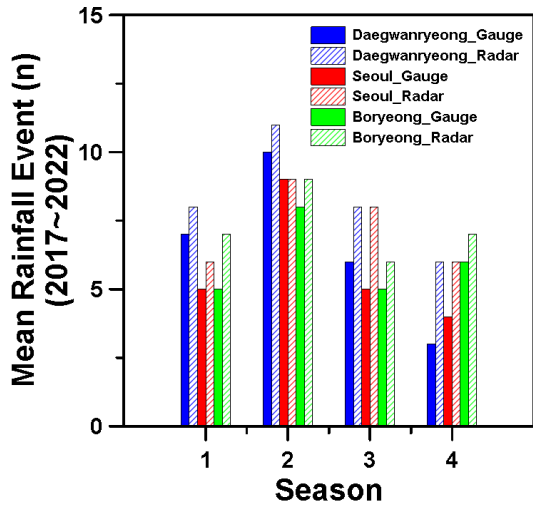


Fig. 8. Comparison of seasonal-mean frequency of precipitation for rain gauge and radar data of three stations (1: Spring, 2: Summer, 3: Autumn, 4: Winter).

령에서 112회, 겨울에는 보령에서 91회로 가장 많은 실험이 가능한 것을 알 수 있다. 따라서 가을과 겨울에는 209회(12,540분)의 실험이 가능하므로 수행된 10회 실험보다 약 20.9배는 실험을 더 할 수 있었던 것을 보여준다. 1회 실험으로 확보할 수 있는 인공 증우량을 고려하면, 이러한 결과는 인공강우 연계 실험으로 현재 수준과 비교하여 막대한 양의 수자원을 확보할 수 있음을 짐작할 수 있다.

2020~2022년에 수행된 실험 사례에 대해서도 같은 방법으로 고찰할 수 있다. Table 2의 가능한 실험 횟수 대비 Table 1의 수행된 실험 사례를 비교하면, 3년 동안 가장 많은 실험이 수행된 대관령에서는 2020년 1월은 108회 중 3회, 3월은 106회 중 1회, 4월은 91회 중 2회, 9월은 201회 중 1회, 11월은 60회 중 2회만 수행된 것을 알 수 있다. 2021년과 2022년도 월별 최대 4회(각 10월, 3월)만 실험이 수행되었지만, 월평균 117회로 약 29.3배의 실험이 더 수행될 수 있었다. Table 2를 보면, 2020년 대관령은 계절별로 3번씩만 실험이 수행되었지만, 평균적으로 봄철 105회(35배), 가을철 112회(37.3배), 겨울철 75회(25.0배)까지 수행할 수 있었다. 여름철에는 Table 1에서 대관령뿐만 아니라 서울과 보령에서도 거의 실험이 수행되지 못한 것을 알 수 있는데, 이는 여름철 강수가 집중되는 국내 기후 현

상에 따라 인공강우 실험이 제한되었기 때문이다.

전반적으로 월별 총계(Table 2)는 대관령 1,406회(시간), 서울 970회(시간), 보령 1,111회(시간)로 모두 연중 약 1,000회(시간) 정도 실험을 할 수 있고, 계절별 총계(Table 3)는 대관령 469회, 서울 311회, 보령 392회로 연중 300회 이상 실험이 가능함을 확인하였다. 계절별 분석 결과는 3개월 자료의 평균을 합산한 것이라 월별 총계와 차이가 크지만, 이는 국내에서 연평균 1일 1회는 인공강우 실험이 가능한 것을 보여준다. 따라서 연중 많은 횟수의 인공강우 실험이 가능한 조건에 비해 실질적으로 국내에서는 제한된 실험만 수행되고 있고, 얻지 못하는 이익이 막대한 것을 짐작하게 해준다.

4. 결론

본 연구에서는 국내 기후조건에서 인공강우 항공 실험의 가능 시간을 분석하였다. 이를 위해 국립기상과학원의 인공강우 실험 목표지역인 대관령, 서울, 보령에서 2017년 9월부터 2022년 8월까지 수집된 지상 강수와 레이더 강수 자료를 분석하였다. 강수 사례를 구분하기 위해 무강우 지속시간(IETD) 개념을 적용하였고, 자료에 대해 월별, 계절별 강수 평균 지속시간과 발생빈도를 분석하였다. 본 연구에서는 1회 실험에 소요되는 시딩 시간을 1시간으로 가정하여 연계 실험 가능 횟수를 결정하였고, 분석 결과를 바탕으로 과거에 수행된 실험 사례를 고찰하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 강수의 평균 지속시간을 분석한 결과 전반적으로 월별과 계절별 모두 레이더 강수가 지상 강수보다는 지속시간이 길게 결정되었다. 지속시간은 대체로 봄에서 여름은 증가하고 가을에서 겨울은 감소하는 경향을 나타냈지만, 큰 차이를 보이지 않았다. 인공강우 연계 실험 가능횟수 결정에는 자료의 공간적 채움이 더 좋은 레이더 강수가 보다 추천할 만한 결과로 판단되었다. 이는 레이더가 우량계보다 관측 밀도가 크고 강수 시스템을 보다 상세하게 관측할 수 있어 관측 공백이 적기 때문이다.
- 2) 30분 이상의 강수 사례의 월별 평균 발생빈도는 레이더 강수의 경우 세 개 지점 모두 최소 5회 이상 발생할 수 있는 것으로 나타났다. 또한, 3월에서 10월

Table 2. Estimation of monthly total experimental times and number of experiments in cloud seeding experiment for the rain gauge and radar data of the three stations

Month	Daegwanryeong				Seoul				Boryeong			
	Gauge		Radar		Gauge		Radar		Gauge		Radar	
	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)
1	1455	24	6475	108	1532	26	3374	56	1755	29	5754	96
2	1272	21	4185	70	1377	23	2665	44	2118	35	4580	76
3	3678	61	6352	106	2530	42	4122	69	2208	37	3864	64
4	3462	58	5474	91	2750	46	3899	65	2705	45	3816	64
5	4653	78	6288	105	4692	78	4842	81	3374	56	4683	78
6	5336	89	8830	147	3840	64	4320	72	3619	60	5670	95
7	7290	122	8680	145	6264	104	6536	109	4815	80	8532	142
8	9156	153	13356	223	6666	111	12636	211	5640	94	9625	160
9	8192	137	12070	201	3432	57	5176	86	2285	38	6246	104
10	4020	67	4760	79	2130	36	5588	93	2835	47	3624	60
11	1848	31	4128	69	2168	36	2785	46	2465	41	5135	86
12	684	11	3696	62	1275	21	2250	38	1974	33	5168	86
Total	51046	852	84294	1406	38656	644	58193	970	35793	595	66697	1111
Average	4254	71	7025	117	3221	54	4849	81	2983	50	5558	93

Table 3. Estimation of seasonal total experimental times and number of experiments in cloud seeding experiment for the rain gauge and radar data of the three stations

Season	Daegwanryeong				Seoul				Boryeong			
	Gauge		Radar		Gauge		Radar		Gauge		Radar	
	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)	Experimental Time (min)	Number of Experiment (freq.)
Spring	3941	66	6296	105	3120	52	4068	68	2585	43	4557	76
Summer	7270	121	10626	177	5553	93	7290	122	4680	78	8244	137
Autumn	4668	78	6728	112	2600	43	4528	75	2510	42	5274	88
Winter	1272	21	4482	75	1388	23	2772	46	1950	33	5439	91
Total	17151	286	28132	469	12661	211	18658	311	11725	196	23514	392
Average	4288	72	7033	117	3165	53	4665	78	2931	49	5879	98

까지는 레이더 강수와 지상 강수 모두 평균 5회 이상 실험이 가능한 것으로 나타났고, 이는 매주 한 번은 인공강우 실험이 가능하다는 의미이다. 계절별 분석 결과에서는 지상 강수와 레이더 강수의 발생빈도가 대체로 유사하게 나타났고, 레이더 강수는 세 지점 모두 계절별 최소 6회 이상은 실험이 가능한 것으로

나타났다.

3) 강수 평균 지속시간과 발생빈도를 이용하여 인공강우 실험 가능 시간을 산출한 결과 레이더 강수에 산정한 결과가 지상 강수보다 크게 나타났다. 매월 평균적으로 대관령은 7,025분(117회), 서울은 4,849분(81회), 보령은 5,558분(93회) 정도 실험이 가능

한 것을 확인하였다. 계절별 평균은 월평균 분석 결과와 유사하게 나타났고 세 지점 모두 여름철에 가장 많은 실험이 가능하며, 지리적·지형적 영향을 크게 받는 것으로 나타났다.

- 4) 과거 실험 사례를 평가한 결과 월별, 계절별 평균적으로 실제 수행된 실험 대비 적게는 20.9배 많게는 37.3배까지 실험을 더 수행할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 인공강우 실험이 여러대 항공기로 연속 실험하는 실용화 체계가 갖춰진다면 연계 실험으로 방대한 양의 인공 증우량을 확보할 수 있음을 확인하였다. 무엇보다 국내에서는 레이더 강수량(0.1 mm 이상)에 기반하여 인공강우 실험은 연간 970~1,406시간(11~16%)가 한국의 지역별로 가능한 것으로 나타났지만, 실질적으로 제한된 실험만 수행되고 있음을 확인하였다. 이에 따라 인공 증우량을 확보하지 못해 얻지 못하는 이익도 20~40배인 것으로 판단된다.

상기와 같은 결과를 통해 국내에서 인공강우 실험을 얼마나 수행할 수 있는지를 확인할 수 있었다. 물론, 본 연구의 분석 결과는 과거 5년 자료의 기후 특성을 반영한 것으로 매월 또는 계절별로 동일한 기후가 유지되고, 대상 지역으로 구름이 유입되는 조건에서 가능하다. 또한, 대기 중 분포한 강수 시스템뿐만 아니라 보다 상세한 관측이 가능한 레이더 자료의 이점이 있어 인공강우 실험이 가능한 총 시간을 분석할 수 있었다. 국내에서 현재 기상항공기 한 대만을 이용하여 인공강우 실험을 수행하는 여건을 고려하면 이와 같은 결과는 항공기 연계 실험이 가능할 경우 연중 인공강우 실험으로 현재보다 많은 양의 증우량을 확보할 수 있음을 시사해 준다. 본 연구의 분석 결과 대로 국내에서 실험 횟수가 현재보다 20~40배 증가하고, 1시간 실험당 1 mm가 가능하다면, 연간 증우량 80~110 mm를 확보하는 것이 가능할 수 있다. 물론 이러한 결과는 실험에 적합한 기상 조건이 되었을 때, 인공강우 실험이 지속적으로 수행되어야만 가능할 것이다. 본 연구의 결과에서는 국내에서 실험용 항공기가 비행하기 어려운 야간 및 새벽 시간대가 포함되어 있고, 목표지역에 영향을 주는 강수의 지속시간도 지형 조건에 따라 불확실성이 크게 나타날 수 있다. 무엇보다 실험 중 비행 구역이 제한되면 이상적인 실험 효과를 창출하기 어려울 수 있다. 그러나 상기와 같은 연구 결과는 인공강우 실험의 주요 목적을 성취하

는데 크게 기여할 수 있을 것이고, 국내에서 인공강우 연구에 대한 신뢰성을 높일 수 있을 것이다. 향후, 본 연구의 결과를 활용하여 국내에서 인공강우 항공 연계 실험체계 구축 및 운영을 먼저 시작하고, 이에 따른 경제적 효과도 함께 분석할 필요가 있다.

감사의 글

본 연구는 기상청 국립기상과학원 “기상조절 및 구름 물리 연구(KMA2018-00224)”의 지원을 받았습니다.

REFERENCES

- Adams, B. J., Papa, F., 2000, Urban storm water management planning with analytical probabilistic models, John Wiley & Sons Inc.
- Ajin, R. S., Loghini, A. M., Jacob, M. K., Vinod, P. G., Krishnamurthy, R. R., 2016, The risk assessment study of potential forest fire in Idukki Wildlife Sanctuary using RS and GIS techniques, *Int. J. Adv. Earth Sci. Eng.*, 5(1), 308-318.
- Al Hosari, T., Al Mandous, A., Wehbe, Y., Shalaby, A., Al Shamsi, N. A., Al Naqbi, H., Yazeedi, O. A., Mazroui, A. A., Farrah, S., 2021, The UAE cloud seeding program: A statistical and physical evaluation, *Atmosphere*, 12, 1013.
- Baek, J., Kim, J., Park, J., Lim, K., Shin, H., 2022, A Study on the rainfall management target considering inter-event time definition (IETD), *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 55(8), 603-611.
- Bruintjes, R. T., 1999, A Review of cloud seeding experiments to enhance precipitation and some new prospects, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 80(5), 805-820.
- Chang, K., Jeong, J., Cha, Y., Yang, H., Choi, Y., Kwon, W., 2011, Characteristics of recent precipitation trends and drought years, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 11(1), 54-64.
- Essien, A. E., Guo, Y., Dickson-Anderson, S. E., 2023, Extensive rainfall data analysis: event separation from continuous record, fitting of theoretical distributions, and event-based trend detection, *Environ. Sci.: Adv.*, 2(5), 695-708.
- Han, D. G., Kim, D. H., Kim, J. W., Jung, J. W., Lee, J. J., Kim, H. S., 2019, Estimation of mega flood using mega rainfall scenario, *J. Wetlands Res.*, 21(S-1), 90-97.
- Howard, C. D., 1976, Theory of storage and treatment-plant overflows, *J. Environ. Eng. Division*, 102(4), 709-722.

- James, W., 1994, Current practices in modelling the management of storm water impacts, Lewis Publishers, Boca Raton.
- Javanmard, S., BodaghJamali, J., Noorian, A. M., 2007, Preliminary results of site selection study for cloud seeding in order for precipitation enhancement in IR of Iran, *J. Wea. Mod.*, 39(1), 87-95.
- Joo, J., Lee, J., Kim, J. H., Jun, H., Jo, D., 2013, Inter-event time definition setting procedure for urban drainage systems, *Water*, 6(1), 45-58.
- Jung, W., Chang, K. H., Cha, J. W., Ku, J. M., Lee, C., 2022, Estimation of available days for a cloud seeding experiment in Korea, *J. Environ. Sci. Int.*, 31(2), 117-129.
- KFS, 2023, 2022 forest fire statistics, Korea Forest Service.
- Kong, M., Wang, G., Wu, Y., Liu, G., Gu, Y., Wu, W., 2021, A Nationwide analysis of water scarcity and cloud seeding demand levels from analyzing water utilization data, agricultural drought maps, and local conditions in China mainland, *Ear. Space Sci.*, 8(6), 1-18.
- Kyoung, M. S., Kim, H. S., Sivakumar, B., Singh, V. P., Ahn, K. S., 2011, Dynamic characteristics of monthly rainfall in the Korean Peninsula under climate change, *Stochastic Envir. Res. Risk Assess.*, 25, 613-625.
- Lachhab, R., 2023, Economic impacts of weather modification on water resources and drought: evidence from California, *Research in Agricultural & Applied Economics*.
- Lee, J. W., Jung, G. H., 2017, Estimation of interevent time definition using in urban areas, *J. Korean Soc. Hazard Mitig.*, 17(4), 287-294.
- Mishra, V., Tiwari, A. D., Aadhar, S., Shah, R., Xiao, M., Pai, D. S., Lettenmaier, D., 2019, Drought and famine in India, 1870-2016, *Geophys. Res. Lett.*, 46(4), 2075-2083.
- MLTMA, 2011, Improvement and supplementation of probability rainfall, Ministry of Land, Transport and Maritime Affairs.
- NDIAC, 2018, 2013~2018 sustained drought analysis and assessment report, National Drought Information-Analysis Center.
- Niemczynowicz, J., 1999, Urban hydrology and water management-present and future challenges, *Urban Water*, 1(1), 1-14.
- NIER, 2022, 2021 Air quality statistics, National Institute of Environmental Research.
- NIMS, 2022, Research on weather modification and cloud physics, National Institute of Meteorological Sciences.
- Noor, A., Shafi, M. M., 2023, Impact of climate change on the confined aquifers resources and factors responsible for decline and vulnerability of groundwater in district Karak, *Sarhad J. Agri.*, 39(2), 545-551.
- Pathak, A. A., Dodamani, B. M., 2019, Trend analysis of groundwater levels and assessment of regional groundwater drought: Ghataprabha river basin, India, *Nat. Resour. Res.*, 28, 631-643.
- Pokharel, B., Geerts, B., Jing, X., Friedrich, K., Ikeda, K., Rasmussen, R., 2017, A Multi-sensor study of the impact of ground-based glaciogenic seeding on clouds and precipitation over mountains in Wyoming. Part II: Seeding impact analysis, *Atmospher. Res.*, 183, 42-57.
- Rasmussen, R. M., Tessendorf, S. A., Xue, L., Weeks, C., Ikeda, K., Landolt, S., Breed, D., Deshler, T., Lawrence, B., 2018, Evaluation of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP) using two approaches: Traditional statistics and ensemble modeling, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 57, 2639-2660.
- Rauber, R. M., Geerts, B., Xue, L., French, J., Friedrich, K., Rasmussen, R. M., Tessendorf, S. A., Blestrud, D. R., Kumkel, M. L., Parkinson, S., 2019, Wintertime orographic cloud seeding—A review, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 58(10), 2117-2140.
- Ro, Y., Chang, K. H., Chae, S., Lim, Y. K., Ku, J. M., Jung, W., 2023, Estimation of the total amount of enhanced rainfall for a cloud seeding experiment: case studies of preventing forest fire, drought, and dust, *Adv. Meteorol.*, 2023, 1-18.
- Ro, Y., Yoo, C., 2020, Consideration of rainfall intermittency and log-normality on the merging of radar and the rain gauge rain rate, *J. Hydrol.*, 589, 125178.
- Rosenfeld, D., Farbstein, H., 1992, Possible influence of desert dust on seedability of clouds in Israel, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 31(7), 722-731.
- Silverman, B. A., Sukarnjanaset, W., 2000, Results of the Thailand warm-cloud hygroscopic particle seeding experiment, *J. Appl. Meteorol. Climatol.*, 39(7), 1160-1175.
- Somashekar, R. K., Ravikumar, P., Mohan Kumar, C. N., Prakash, K. L., Nagaraja, B. C., 2009, Burnt area mapping of Bandipur National Park, India using IRS 1C/1D LISS III data, *J. Indian Soc. Remote Sens.*, 37, 37-50.
- Tessendorf, S. A., Bruintjes, R. T., Weeks, C., Wilson, J. W., Knight, C. A., Roberts, R. D., Peter, J. R., Collis, S.,

Buseck, P. R., Freney, E., Dixon, M., Pocerlich, M., Ikeda, K., Axisa, D., Nelson, E., May, P. T., Richter, H., Piketh, S., Burger, R. P., Wilson, L., Siems, S. T., Manton, M., Stone, R. C., Pepler, A., Collins, D.R., Bringi, V. N., Thurai, M., Turner, L., McRae, D., 2012, The Queensland cloud seeding research program,

Bull. Am. Meteorol. Soc., 93(1), 75-90.

Yoo, C., Park, C., Jun, C., 2016, Evaluation of the concept of critical rainfall duration by bivariate frequency analysis of annual maximum independent rainfall event series in Seoul, Korea, J. Hydrol. Eng., 21(1), 05015016.

-
- Senior Researcher. Yong-Hun Ro
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
royh1@korea.kr
 - Team Leader. Ki-Ho Chang
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
khchang@korea.kr
 - Research Scientist. Yun-Kyu Lim
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
imyunkyu@korea.kr

-
- Research Scientist. Woon-Seon Jung
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
wsjung01@korea.kr
 - Science Advisor. Jin-Won Kim
Climate Change Research Team, National Institute of Meteorological Sciences
jinwonk@korea.kr
 - Department Head. Yong-Hee Lee
Research Applications Department, National Institute of Meteorological Sciences
lyhee94@korea.kr