

ORIGINAL ARTICLE

## 한반도 목적별 인공강우 실험가능일 추정

정운선\* · 장기호 · 차주완 · 구정모 · 이철규

국립기상과학원 융합기술연구부

### Estimation of Available Days for a Cloud Seeding Experiment in Korea

Woonseon Jung\*, Ki-Ho Chang, Joo Wan Cha, Jung Mo Ku, Chulkyu Lee

Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea

#### Abstract

In this study, we investigated the characteristics of the meteorological and environmental conditions for a cloud seeding experiment over the Korean peninsula and estimated the available days for the same. The conditions of available days appropriate for a cloud seeding experiment were classified according to four purposes: water resources, drought relief, forest fire prevention, and air quality improvement. The average number of available days for a cloud seeding experiment were 91.27 (water resources), 45.93-51.11 (drought relief), 40.28-46.00 (forest fire prevention), and 42.19-44.60 days/year (air quality improvement). If six experiments were carried out per available day for a cloud seeding experiment, the number of times cloud seeding experiments could be conducted per year in a continuously operating system were estimated as 547.62 (water resources), 275.58-306.66 (drought relief), 241.68-276.00 (forest fire prevention), and 253.14-267.60 times/year (air quality improvement). From this result, it was possible to determine the appropriate meteorological and environmental conditions and statistically estimate the available days for a cloud seeding experiment. The data on the available days for a cloud seeding experiment might be useful for preparing and performing such an experiment.

**Key words** : Cloud seeding, Available day, Atmospheric environmental condition

#### 1. 서론

전 세계적으로 기후변화에 의한 홍수, 가뭄, 산불 등의 재해가 발생하고 있으며(IPCC, 2014), 가뭄 해결을 위한 방법 중 인공강우가 대두되고 있다(WMO, 2018).

인공강우는 구름층은 형성되어 있으나 대기 중에 구름씨 역할을 하는 구름응결핵 또는 빙정핵의 수가 적어 구름방울이 빗방울로 성장하지 못할 때 인공의 구름씨 살포를 통해 구름발달과 강수응결을 활성화시켜 더 많은

강수를 내리게 하거나 다른 지역에 강수를 미리 내리게 하는 기술이다. 인공증우 및 인공증설은 Schaefer(1946)와 Vonnegut(1947)에 의해 과냉각 구름 안에 인공 빙정핵을 살포하면 빙정의 수농도를 증가시킬 수 있다는 발견에서 비롯되었다. 인공증우 및 인공증설 방법은 구름 온도에 의한 강수 형성과정에 따라 달라진다. 차가운 구름(0°C 이하)에는 요오드화은 또는 드라이아이스와 같은 빙정핵을 살포하여 구름 속 과냉각 물 입자를 얼음으로 바꿔 빙정을 생산하거나 강화시켜 강수를 유발한다.

Received 3 December, 2021; Revised 27 January, 2022;

Accepted 3 February, 2022

\*Corresponding author: Woonseon Jung, Convergence Meteorological Research Department, National Institute of Meteorological Sciences, Jeju 63568, Korea  
Phone : +82-64-780-6687  
E-mail : wsjung01@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.

따뜻한 구름(0°C 이상)에는 염화나트륨 또는 염화칼슘 등의 흡습성 물질이 응결핵 역할을 하여 구름 내 충돌병합 과정을 촉진하여 강수 형성에 도움을 준다.

WMO(2018)는 가뭄극복, 수자원 확보, 산불예방 등을 위하여 인공강우 프로젝트 발전에 기여하였으며, 현재 전 세계적으로 미국, 중국, 아랍에미리트, 일본 등 다양한 인공강우 프로젝트가 진행 중이다. Flossmann et al.(2019)는 전 세계 인공강우 전문가들과 인공강우 기본 이론, 인공강우 국제 동향, 인공강우 신물질 등에 대하여 설명하였다. 최근 아랍에미리트는 국가주도하에 강수 증가 목적의 인공강우 실험과 국제 전문가들과의 연구과제를 수행하고 있다(Hashimoto et al., 2017; Tai et al., 2017; Jung et al., 2018).

한국의 인공강우는 1963년 항공기를 이용한 실험이 실시되었고(Yang, 1965), 그 후 지속적인 실험을 수행하였으며, 2018년부터는 기상항공기를 이용한 인공강우 실험이 활발히 이루어지고 있다. Cha et al.(2019)는 한국 기상청 국립기상과학원에서 수행한 인공강우 실험 총 54회(인공증설 36회, 인공증우 18회)에 대하여 유의미한 인공강우 실험결과를 도출하였다고 언급한 바 있다. 또한 Jung et al.(2021)은 한반도 인공강우 항공실험을 위한 기상조건의 특징을 알아보기 위하여 기압계, 고층기상, 항공관측 결과 등을 분석하였다. Lee et al.(2010)은 수자원확보, 산불방지효과, 가뭄피해저감, 대기질개선효과 등 다양한 목적별 경제적 편익을 추산하여 인공강우 활용 가능성을 설명하였다. 목적별 인공강우 실험을 효과적으로 수행하기 위해서는 목적에 맞는 환경조건과 실험에 적합한 기상조건 등에 대한 조사가 중요하다. Jung et al.(1998)은 계절별 강우량, 강우강도, 운량 분포 등을 통하여 한반도 4개 구분영역에 대한 한반도에서 인공증우 가능성에 대해 알아본 바 있다. 그러나 목적별 인공강우 실험을 위한 기상 및 환경에 대한 연구는 부족한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 인공강우 목적별 환경조건과 기상조건을 조사하여 인공강우 실험가능일을 산출하고자 한다. 또한 목적별-지역별 인공강우 시험가능일을 상세 조사하고, 연속운영 현업체계 시 인공강우 실험가능성을 평가하고자 한다. 이를 이용한 효과적인 인공강우 실험수행 및 향후 기술 개선을 도출하고자 한다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

한반도의 인공강우 실험가능일을 산정하기 위하여 2010년부터 2019년까지 10년간의 자료를 이용한 통계적 분석을 수행하였다. Fig. 1은 한반도 분석영역을 나타낸다. 서울, 인천, 경기, 강원, 대전, 충북, 충남, 광주, 전북, 전남, 대구, 울산, 부산, 경북, 경남, 제주 총 16개의 도 또는 시 구역을 대상으로 분석하였다.

목적별 인공강우 실험을 분석하기 위하여 수자원확보, 가뭄피해경감, 산불피해예방, 대기질개선 총 4가지의 목적에 따라 자료를 이용하였다. 인공강우 실험에 적합한 기상조건을 알아보기 위해 기상청에서 제공하는 강수량, 강수일수, 운량을 이용하였다. 여기서 구름많은 정의는 운량이 6 이상인 날을 기준으로 산정하였다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험가능성 분석을 위하여 기상청에서 제공하는 표준강우지수(Standardized Precipitation Index 6 : SPI6)를 이용하였다. 표준강우지수는 McKee et al.(1993, 1995)가 개발한 가뭄지수로 강수량만을 이용하여 가뭄의 깊이를 산정하며 각 시간 단위에 따른 강수량의 과잉 혹은 부족을 나타내기 때문에 시간 단위에 따라 장-단기 가뭄을 유연하게 나타내는 특징이 있다. 2009년 ‘The inter-regional workshop on indices and early warning systems for drought’에서 가뭄 전문가들은 세계 공통의 기상학적 가뭄지수로 SPI를 사용하기로 합의하였다(WMO, 2009). 과거 가뭄에 대한 재현성, 가뭄단계의 일치성 등을 분석한 결과 SPI6 지수가 과거 가뭄 모니터링에 대한 정확성을 나타내었다(Lee et al., 2006). SPI6는 6개월의 시간척도를 기준으로 한 표준강우지수로서, 습함( $SPI \geq 1.00$ ), 정상( $-0.99 \leq SPI \leq 0.99$ ), 약한가뭄( $-1.49 \leq SPI \leq -1.00$ ), 보통가뭄( $-1.99 \leq SPI \leq -1.50$ ), 심한가뭄( $SPI \leq -2.00$ )로 구분된다. 가뭄발생일은 SPI6가 -1 이하인 날들을 의미하며, 약한가뭄, 보통가뭄, 심한가뭄을 모두 포함한다. 산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능성 분석을 위하여 산림청에서 제공하는 산불발생일, 국립산림과학원에서 제공하는 산불위험지수(Forest Fire Risk Index : FFRI)를 이용하였다. 산불위험지수는 기상요인에 대한 산불발생 위험지수, 지형에 따른 위험지수, 임상에 따른 위험지수의 인자별 가중치를 부여해서 최종적으로 산출된다. 본 연구에서는

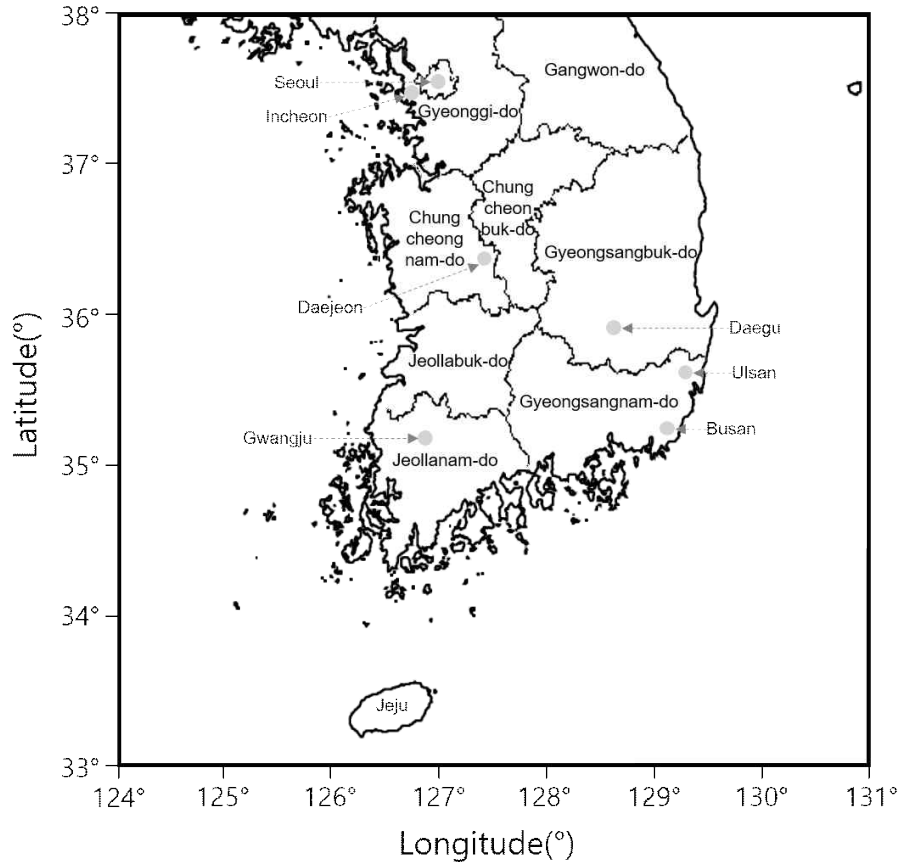


Fig. 1. The map of target region for in Korea.

고려하는 산불조심기간(2월 1일~5월 15일, 11월 1일~12월 15일)은 산림보호법 시행령 제22조를 따른다. 본 연구에서는 두 기간을 포함한 11, 12, 2, 3, 4, 5월의 총 6개월을 산불조심기간으로하여 상세히 분석하였다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험가능성 분석을 위하여 한국환경공단(국가대기오염정보관리시스템)에서 제공하는 미세먼지 PM<sub>10</sub> 농도, 초미세먼지 PM<sub>2.5</sub> 농도 정보를 이용하였다. PM<sub>10</sub> 농도의 경우는 2010년부터 2019년까지 10년간의 자료를 획득할 수 있었으나, PM<sub>2.5</sub> 농도의 경우는 2014년부터 2019년까지 6년간의 자료를 얻을 수 있어, 해당기간에 대하여 통계적으로 분석하였다.

본 연구에서는 10여년간 장기간의 한반도 전역의 기상, 산림, 환경 등 다양한 자료를 이용하여 인공강우 실험

가능일 연구를 수행하였다.

## 2.2. 방법

본 연구에서는 목적별 인공강우 상관변수를 고려한 분석 기준을 제시하였다.

Table 1은 목적별 인공강우 실험가능일 추정조건을 나타낸다. 인공강우 실험목적은 수자원 확보, 가뭄피해경감, 산불피해예방, 대기질개선 총 4가지로 구분한다. 인공강우 실험가능일 분석 기준 중 가장 중요한 것은 인공강우로 발달할 수 있는 구름이며, 이를 대표할 수 있는 기상변수는 운량이다. 그 외 인공강우 필요성을 고려하기 위하여 목적별 추가변수를 이용하였다. 수자원 확보 목적의 인공강우 실험가능일은 구름많음(운량 6 이상)일

**Table 1.** The condition for available day of cloud seeding in each purpose such as water resources, drought relief, forest fire prevention, and air quality improvement

Purpose	Condition	
	Abbreviation	Description
Water resources	CD	Cloudy day
Drought relief	CD+RA	Cloudy day below average rain amount
	CD+RD	Cloudy day below average rainy day
Forest fire prevention	CD+FFP	Cloudy day in forest fire prevention period
	CD+FFP+1	Cloudy day in forest fire prevention period and January
Air quality improvement	CD+PM <sub>2.5</sub>	Cloudy day over average particulate matter 2.5 $\mu\text{m}$ (PM <sub>2.5</sub> )
	CD+PM <sub>10</sub>	Cloudy day over average particulate matter 10 $\mu\text{m}$ (PM <sub>10</sub> )

(Cloudy Day : CD)을 기준으로 하였다. 기뿔피해경감 목적의 인공강우 실험가능일은 평균 강수량 이하인 날 중 구름많음일(Cloudy Day+Rain Amount : CD+RA), 평균 강수일수 이하인 날 중 구름많음일(Cloudy Day+Rainy Day : CD+RD)을 각각 구분하여 분석하였다. 산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능일은 산불방지 기간(2~5월, 11~12월) 중 구름많음일(Cloudy Day+Forest Fire Prevention period : CD+FFP), 산불방지기간과 1월을 포함한 기간(1~5월, 11~12월) 중 구름많음일(Cloudy Day+Forest Fire Prevention period+January : CD+FFP+1)을 각각 구분하여 분석하였다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험가능일은 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일(Cloudy Day+Particulate Matter 2.5  $\mu\text{m}$  : CD+PM<sub>2.5</sub>), 평균 PM<sub>10</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일(Cloudy Day+Particulate Matter 10  $\mu\text{m}$  : CD+PM<sub>10</sub>)을 각각 구분하여 분석하였다. 여기서 분석 기준인 평균 값은 지역별 월별에 따라 달라지므로, 각 평균값을 고려하여 인공강우 실험가능일을 산정하였다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 월별 지역별 10년 평균 변화 특성 분석

인공강우 실험가능일을 추정하기 위하여 먼저 월별 지역별 10년 평균 변화 특성을 분석해보았다. Table 1의 기준을 살펴보면 운량, 강수량, 강수일수, 산불예방기간, PM<sub>2.5</sub> 농도, PM<sub>10</sub> 농도가 인공강우 실험가능일 산정 관련 상관변수로 작용한다.

Fig. 2는 월별 운량과 강수량 변화에 대한 지역과 지역별 평균을 나타낸다. 선그래프는 운량, 막대그래프는 강수량을 나타낸다. 운량은 색깔도형선인 서울, 인천, 경기, 강원, 대전, 충북, 충남, 광주, 전북, 전남, 대구, 울산, 부산, 경북, 경남, 제주와 검정선인 16개 구역 평균을 표시하였다. 운량의 경우는 전 지역에서 여름철 증가, 겨울철 감소하는 패턴을 보이며, 제주는 평균과 유사한 패턴을 보이거나 큰 편차가 나타났다. 구름많음 기준인 운량 6 이상인 달은 평균적으로 6, 7, 8, 9월이며, 특히 제주는 10월을 제외한 전 기간에서 운량 6 이상을 기록하여 많은 구름이 존재함을 확인할 수 있다. 강수량의 경우는 여름철 증가, 겨울철 감소하는 패턴을 보이며, 운량의 변화와 유사하게 나타났다. 수자원확보 목적의 인공강우 실험 시, 운량 6 이상인 구름많음일을 기준으로 전 지역에서 6, 7, 8, 9월에 적합한 구름조건이 나타났다. 인공강우 실험 시 가장 중요한 기상조건은 구름이다(Cha et al., 2018). 인공강우 기술은 대기 중 구름이 존재하나 빗방울로 성장하지 못할 때 구름씨를 살포하여 구름-강수형성과정을 강화하는 원리이므로, 구름의 존재가 필요충분조건이 되어야 한다.

Fig. 3(a)는 강수량, (b)는 강수일수, (c)는 가뭄일수의 월변화에 대한 지역과 지역별 평균을 나타낸다. Fig. 3(d)는 단계별 가뭄발생확률의 월변화를 나타낸다. Fig. 3(a)의 강수량의 경우는 여름철 증가, 겨울철 감소하는 패턴을 보이며, 7, 8월에는 200.00 mm 이상의 월 평균 강수량을 기록하였다. 특히 7월에 서울에서 428.80 mm의 최대강수량을 기록하였으며, 제주는 평균과 유사한

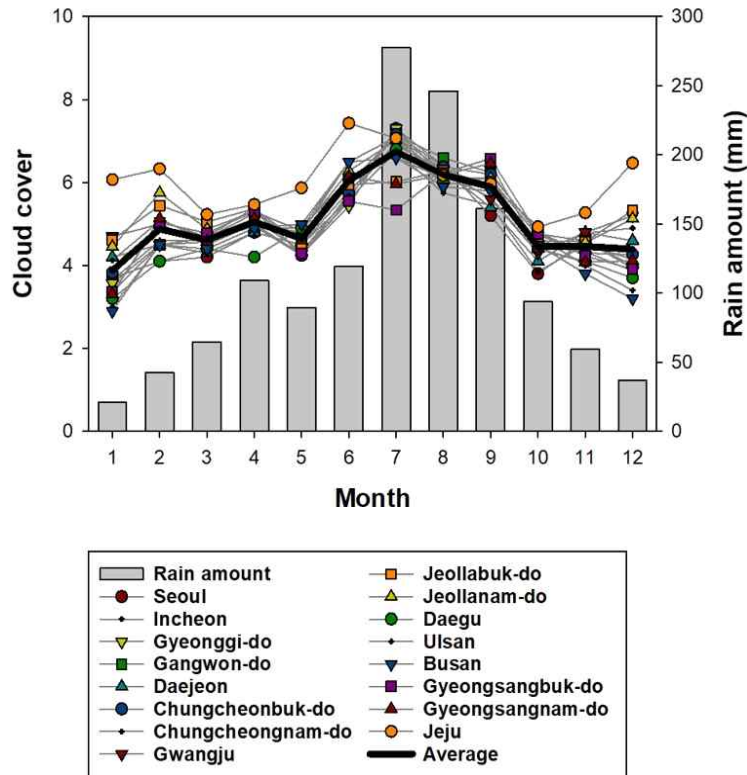


Fig. 2. The monthly variation of cloud cover and rain amount in each region and their average value.

패턴을 보이거나 평균보다 높은 값을 기록하였다. Fig. 3(b)의 강수일수의 경우도 여름철 증가, 겨울철 감소하는 패턴을 보이며, 4, 7, 8월에는 10일 이상의 월 평균 강수일수를 기록하였다. 특히 7월에 서울에서 16.80일의 최대 강수일수를 기록하였으며, 제주는 10월을 제외한 전 기간동안 유사하게 9.67일 이상의 강수일수를 기록하였다. Fig. 3(c)의 가뭄일수의 경우는 여름철 증가, 봄철 감소하는 패턴을 보이며, 6, 7, 8, 9월에는 7.28일 이상의 월 평균 가뭄일수를 기록하였다. 특히 6월에 서울에서 12.90일의 최대 가뭄일수를 기록하였으며, 월별 지역간 편차는 최소 3.94일부터 최대 12.00일까지 매우 넓게 나타났다. Fig. 3(d) 가뭄단계는 SPI6를 기준으로 습함, 정상, 약한가뭄, 보통가뭄, 심한가뭄로 구분한다. 가뭄발생 확률은 전체 중 SPI6를 기준의 습함, 정상, 약한가뭄, 보통가뭄, 심한가뭄의 비율로 계산하였다. 가뭄발생확률의 경우는 습함 상태 16.33%, 정상 상태 65.61%, 약한가뭄

상태 9.96%, 보통가뭄 상태 5.05%, 심한가뭄 상태 3.05%의 평균값을 보였다. 약한가뭄의 경우 6월에 최대 16.84%, 3월에 최소 4.55%가 나타났으며, 보통가뭄의 경우 7월에 최대 7.74%, 3월에 최소 1.81%가 나타났고, 심한가뭄의 경우 9월에 최대 6.83%, 3월에 최소 0.63%가 나타났다. 이로써 가뭄강도가 심해질수록 최대 가뭄 발생 시기가 점차 늦춰지는 것을 확인하였다(6월→9월). 특히 가뭄에 해당하는 약한가뭄, 보통가뭄, 심한가뭄의 합으로 살펴보면 6월에 최대 26.05%, 3월에 최소 6.99%가 나타났다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험 시, 평균 강수량 200 mm 이하인 날 중 구름많음일을 기준으로 전 지역에서 1~6, 9~12월에 적합한 구름조건이 나타났다. 또한 평균 강수일수 10일 이하인 날 중 구름많음일을 기준으로 1~3, 5~6, 9~12월에 적합한 구름조건이 나타났다. 제주는 평균과 다른 지역적 차별성을 보였다.

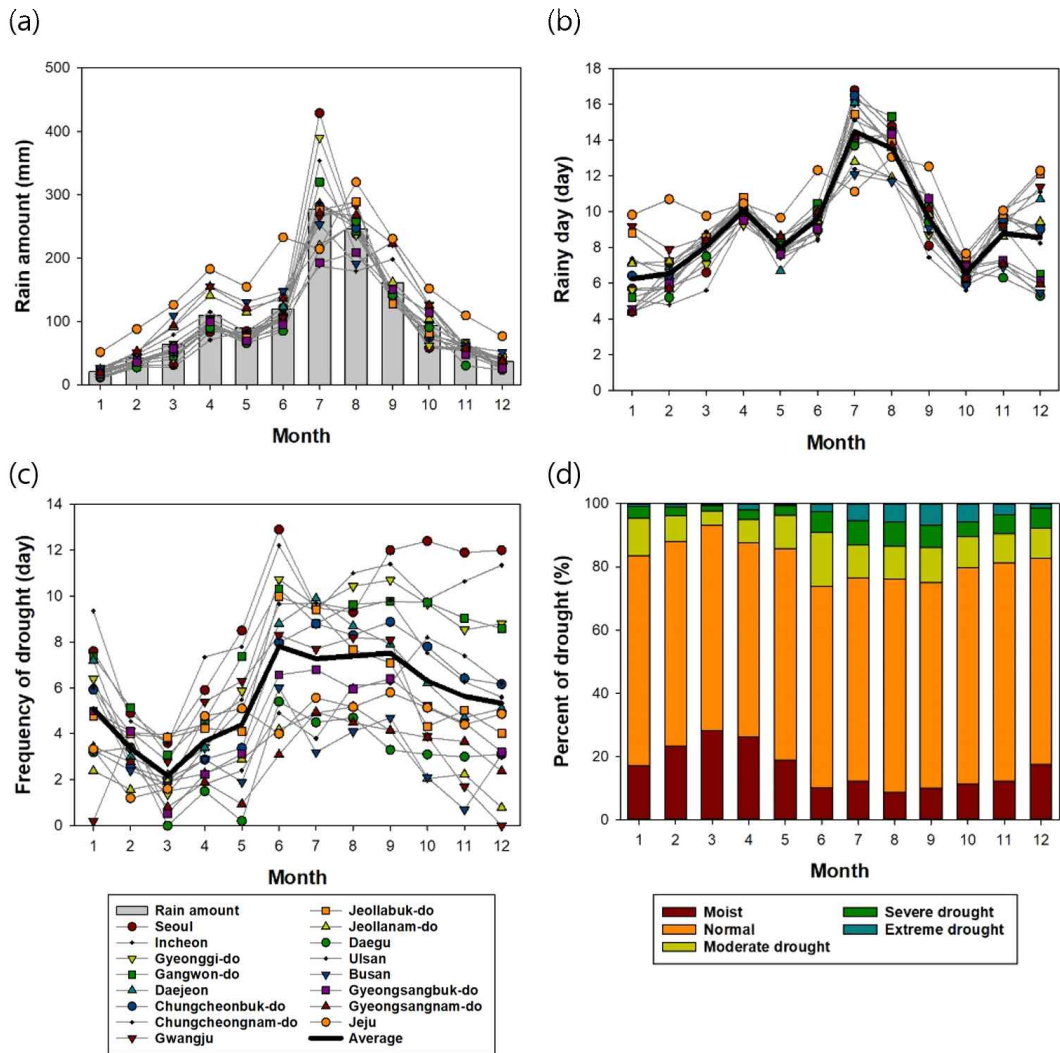


Fig. 3. The monthly variation of (a) rain amount, (b) rainy day, (c) frequency of drought in each region and their average value, and (d) percent of drought in each stage.

Fig. 4(a)는 산불발생일, (b)는 산불위험지수의 월변화에 대한 지역과 지역별 평균을 나타낸다. Fig. 4(a)의 산불발생일의 경우는 겨울-봄철 증가, 여름철 감소하는 패턴을 보이며, 3월에는 최대 6.43일의 월 평균 산불발생일을 기록하였다. 특히 3월에 경기도에서 20.80일, 3월에 경상북도에서 15.00일, 4월에 강원도에서 13.20일의 빈번한 산불발생일을 기록하였다. Fig. 4(b)의 산불위험지수의 경우도 겨울-봄철 증가, 여름철 감소하는 패턴

을 보이며, 4월에는 최대 41.24의 산불위험지수를 기록하였다. 특히 3~5월에 대구에서 49.59~50.12, 4~5월에 서울에서 47.37~48.87의 높은 산불위험지수를 기록하였다. 산불발생일과 산불위험지수는 비례관계로 나타나 산불위험지수가 실제 산불발생 현상을 잘 대변하는 것을 확인하였고, 장마 등 집중호우가 발생하기 전인 겨울-봄철에 토양의 수분공급 부족 현상으로 산불발생 가능성이 높아짐을 확인할 수 있었다. 전체적으로 산불발생 기간은

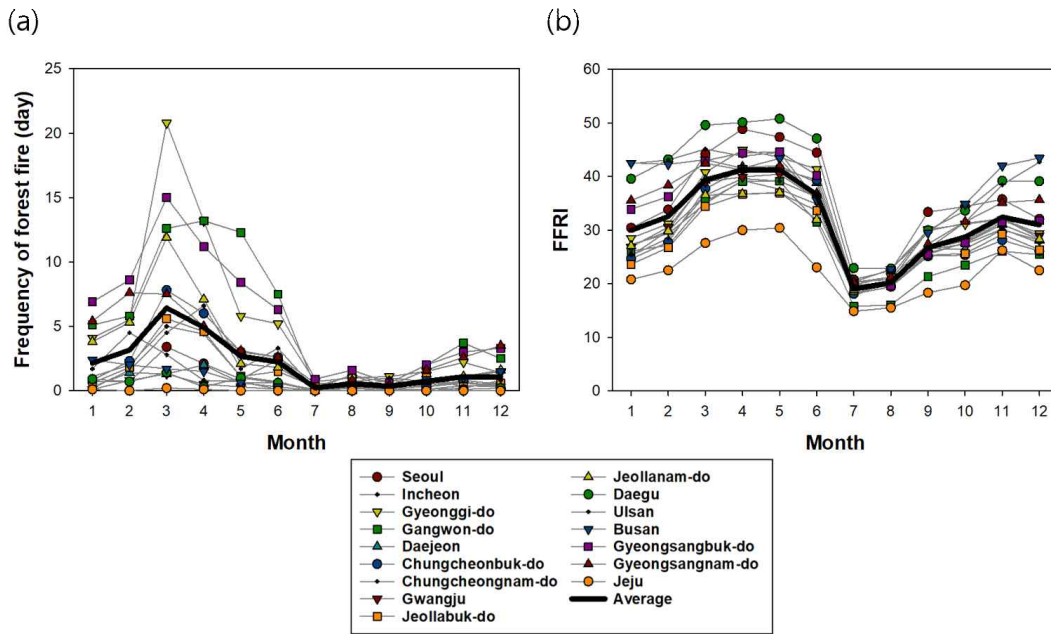


Fig. 4. The monthly variation of (a) frequency of forest fire and (b) forest fire risk index in each region and their average value.

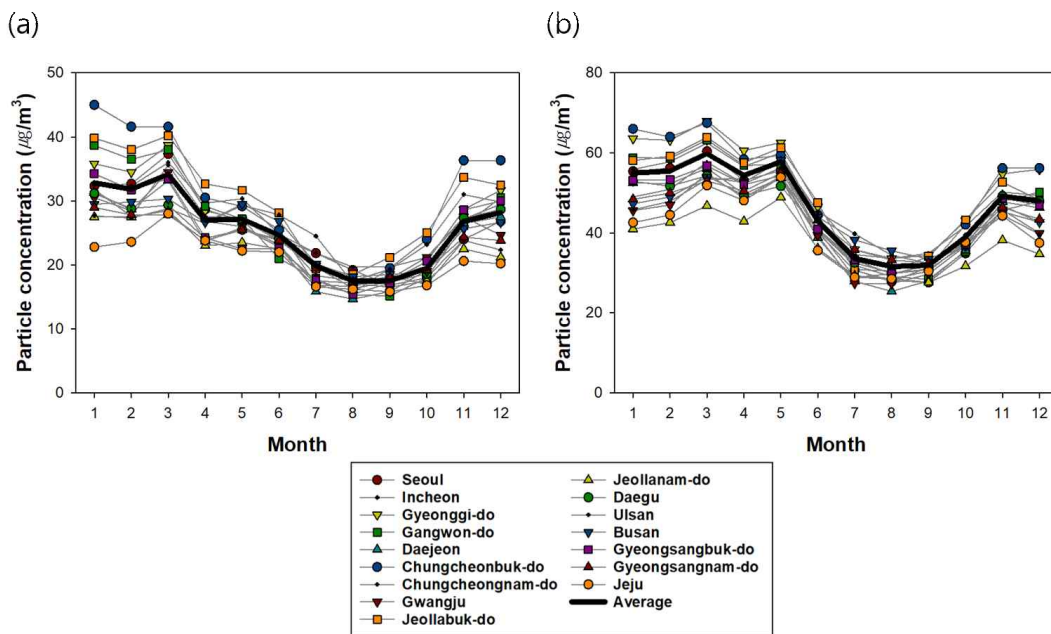


Fig. 5. Same as fig. 4 but for (a)  $\text{PM}_{2.5}$  concentration and (b)  $\text{PM}_{10}$  concentration.



겨울-봄철에 집중되어 있으며, 이는 산림보호법의 산불조심기간에 해당한다. 산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능일을 분석하기 위하여, 산불조심기간(2~5월, 11~12월) 중 구름많음일, 산불조심기간과 1월을 포함한 기간(1~5월, 11~12월) 중 구름많음일을 고려하고자 한다.

Fig. 5(a)는 PM<sub>2.5</sub> 농도, (b)는 PM<sub>10</sub> 농도의 월변화에 대한 지역과 지역별 평균을 나타낸다. Fig. 5(a)의 PM<sub>2.5</sub> 농도의 경우는 겨울-봄철 증가, 여름철 감소하는 경향을 보이며, 3월에는 최대 33.84  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 월 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도를 기록하였다. 특히 1~3월에 충청북도에서 41.60~45.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 전라북도에서 38.00~40.20  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 PM<sub>2.5</sub> 농도를 기록하였다. Fig. 5(b)의 PM<sub>10</sub> 농도의 경우도 겨울-봄철 증가, 여름철 감소하는 경향을 보이며, 3월에는 최대 57.79  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 월 평균 PM<sub>10</sub> 농도를 기록하였다. 특히 3월에 경기도에서 68.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ , 1~3월에 충청북도에서 67.50~64.00  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 높은 PM<sub>10</sub> 농도를 기록하였다. 전체적으로 높은 미세먼지 발생기간은 겨울-봄철에 집중되어 있으며, 이는 편서풍에 의한 중국으로부터의 공기 유입으로 겨울철과 봄철에 황사 발생, 건조한 대기 및 지표, 지역적 영향 등에 의한 결과로 추정된다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험 시, 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일을 기준으로 전 지역에서 1~5, 11~12월에 적합한 구름조건이 나타났다. 또한 평균 PM<sub>10</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일을 기준으로 전 지역에서 1~5, 11~12월에 적합한 구름조건이 나타났다. 제주, 전라남도 등 몇 개 지역에서는 평균과 다른 지역적 차별성을 보였다.

### 3.2. 목적별-지역별 인공강우 실험가능일

앞 절에서 살펴본 월별 지역별 10년 평균 변화 특성을 토대로, 목적별-지역별 연간 인공강우 실험가능일을 산정해보았다.

Table 2는 목적별-지역별 연간 인공강우 실험가능일을 나타낸다. 목적은 수자원확보, 가뭄피해경감, 산불피해예방, 대기질개선을 구분하였으며, 지역은 서울, 인천, 경기도, 강원도, 대전, 충청북도, 충청남도, 광주, 전라북도, 전라남도, 대구, 울산, 부산, 경상북도, 경상남도, 제주로 총 16개의 도 또는 시 구역으로 구분하였다. 목적별 인공강우 실험가능일 추정조건은 Table 1에 설명하

였다.

수자원확보 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 91.27일이며, 제주에서 최대 105.68일, 충청북도에서 최소 80.96일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 24.72일로 나타났다. 수자원확보 목적의 인공강우 실험 주요지점인 충청남도는 연간 91.14일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다.

가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험가능일은 평균 강수량 이하인 날 중 구름많음일(CD+RA), 평균 강수일수 이하인 날 중 구름많음일(CD+RD)을 각각 구분하여 분석하였다. 평균 강수량 이하인 날 중 구름많음일 기준 시, 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 51.11일이며, 광주에서 최대 74.80일, 경상북도에서 최소 31.13일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 43.67일로 나타났다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험 주요지점인 충청남도는 연간 54.65일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다. 평균 강수일수 이하인 날 중 구름많음일 기준 시, 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 45.93일이며, 광주에서 최대 65.70일, 부산에서 최소 37.30일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 28.40일로 나타났다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험 주요지점인 충청남도는 연간 46.31일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다.

산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능일은 산불방지기간(2~5월, 11~12월) 중 구름많음일(CD+FFP), 산불방지기간과 1월을 포함한 기간(1~5월, 11~12월) 중 구름많음일(CD+FFP+1)을 각각 구분하여 분석하였다. 실험가능일은 산불방지기간(2~5월, 11~12월) 중 구름많음일 기준 시, 산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 40.28일이며, 제주에서 최대 50.63일, 경상북도에서 최소 33.34일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 17.29일로 나타났다. 산불피해예방 목적의 인공강우 실험 주요지점인 강원도는 연간 38.63일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다. 산불방지기간과 1월을 포함한 기간(1~5월, 11~12월) 중 구름많음일 기준 시, 산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 46.00일이며, 제주에서 최대 62.54일, 경상북도에서 최소 36.49일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 26.05일로 나타났다. 산불피해예방 목적의



**Table 2.** The regional available day of cloud seeding in each purpose such as water resources, drought relief, forest fire prevention, and air quality improvement

Region	Water resources (day/year)	Drought relief (day/year)	Forest fire prevention (day/year)		Air quality improvement (day/year)		
	CD	CD+RA	CD+RD	CD+FFP	CD+FFP+1	CD+PM2.5	CD+PM10
Seoul	98.80	57.20	50.10	44.60	51.40	44.40	51.40
Incheon	90.00	52.70	46.45	41.25	45.75	45.75	45.75
Gyeonggi-do	82.63	48.83	47.67	37.00	41.40	41.40	41.40
Gangwon-do	91.01	50.29	43.55	38.63	42.34	42.34	42.34
Daejeon	104.30	62.60	56.40	47.50	54.80	47.00	54.80
Chungcheonbuk-do	80.96	46.28	40.24	33.76	38.12	33.64	38.12
Chungcheongnam-do	91.14	54.65	46.31	41.10	47.49	47.49	38.12
Gwangju	105.40	74.80	65.70	48.30	56.80	56.80	45.40
Jeollabuk-do	83.84	58.36	49.70	38.18	44.55	44.55	34.93
Jeollanam-do	96.58	49.58	38.82	41.98	49.24	47.17	38.48
Daegu	86.89	57.22	40.89	35.33	39.44	34.33	39.44
Ulsan	90.70	37.10	37.80	40.00	44.70	54.90	50.40
Busan	85.80	34.50	37.30	39.30	43.50	53.20	38.70
Gyeongsangbuk-do	83.18	31.13	39.13	33.34	36.49	25.88	36.49
Gyeongsangnam-do	83.39	38.00	38.00	33.52	37.41	45.09	30.38
Jeju	105.68	64.48	56.88	50.63	62.54	49.59	48.89
Average	91.27	51.11	45.93	40.28	46.00	44.60	42.19

인공강우 실험 주요지점인 강원도는 연간 42.34일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다.

대기질개선 목적의 인공강우 실험가능일은 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일(CD+PM<sub>2.5</sub>), 평균 PM<sub>10</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일(CD+PM<sub>10</sub>) 각각 구분하여 분석하였다. 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일 기준 시, 대기질개선 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 44.60일이며, 광주에서 최대 56.80일, 경상북도에서 최소 25.88일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 30.92일로 나타났다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험 주요지점인 서울, 인천, 경기도는 연간 41.40~45.75일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다. 평균 PM<sub>10</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일

기준 시, 대기질개선 목적의 인공강우 실험가능일은 연간 평균 42.19일이며, 대전에서 최대 54.80일, 경상남도에서 최소 30.38일이 나타났으며, 최대-최소 지점간 차이는 24.42일로 나타났다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험 주요지점인 서울, 인천, 경기도는 연간 41.40~51.40일을 기록하여 인공강우 실험이 가능함을 확인하였다.

전체적으로 목적별 인공강우 실험은 대부분 여름철(6~8월)을 제외하고 인공강우 실험이 가능한 것을 확인하였다(수자원확보 목적 제외). 월별 실험가능일은 최소 3.16일/월에서 최대 13.65일로 나타나 그 차이가 크며, 지점별로 차이를 보였다. 평균적으로 수자원확보 목적의 인공강우 실험가능일은 91.27일/년, 가뭄피해경감목적

의 인공강우 실험가능일은 45.93~51.11일/년, 산불피해 예방 목적의 인공강우 실험가능일은 40.28~46.00일/년, 대기질개선 목적의 인공강우 실험가능일은 42.19~44.60일/년으로 나타났다. 목적별 인공강우 주요지점의 실험가능일의 경우, 수자원확보 목적인 충청남도는 91.14일/년, 가뭄피해경감 목적인 충청남도는 46.31~54.65일/년, 산불피해예방 목적인 강원도는 38.63~42.34일/년, 대기질개선 목적인 서울, 인천, 경기도는 41.40~51.40일/년을 기록하였다. 목적별·지역별 인공강우 실험가능일을 통하여, 인공강우 실험계획 수립 시 인공강우 필요성 및 목표지역 선정과 실험가능 일수에 대한 기초자료로 활용 가능할 것이다. 이로서 체계적이고 경제적인 인공강우 실험계획 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다.

### 3.3. 연속운영 현업체계 시 목적별 인공강우 실험가능성 평가

앞 절에서 살펴본 목적별·지역별 인공강우 실험가능일을 기준으로 국내 현업화 체계가 완성되었을 경우, 목적별 인공강우 실험가능일 당 실험횟수를 산출해보았다. 현재 우리나라는 1일 1회 4시간 주간 비행 기준의 인공강우 실험을 수행하고 있으나, 인프라와 인력 부족으로 인공강우 실험이 적합한 기상조건에서 1일 1회 실험만이 가능한 상황이다. 본 연구에서는 인공강우 전용 항공기 대수 및 인공강우 수행 인력 증가 등 인공강우 실험 활성화 및 인프라 구축이 이루어지면 목적별 인공강우 실험가능일 당 실험횟수를 증가시킬 수 있다고 가정한 것이다.

Table 3은 위에서 가정한 조건에서 연간 목적별 인공강우 실험가능횟수를 나타낸다. 지점별로 연속운영 현업체계 시 목적별 인공강우 실험가능일을 설명하기에 복잡함이 있어 전 지점 평균으로 나타내었다. 상시운영 인공강우 실험체계를 갖춘 이스라엘, 태국 등은 수 대의 항공기를 이용한 연속적인 인공강우 실험을 실시하고 있다. 이처럼 기존 실험시간(4시간)을 탄력적으로 유지하면서 수 대의 항공기를 활용하여 인공강우 실험횟수를 1일 1, 2, 4, 6, 8, 12, 18, 24회로 늘렸을 때, 수자원확보, 가뭄피해경감, 산불피해예방, 대기질개선 목적의 연간 인공강우 실험가능횟수를 상세히 산출한 것이다. 수자원확보 목적의 인공강우 실험의 경우, 전 지점 평균 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 91.27회, 2회 실험 시

182.54회, 6회 실험 시 547.62회, 12회 실험 시 1095.24회, 24회 실험 시 2190.48회의 실험이 가능하다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험의 경우, 전 지점 평균 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 45.93~51.11회, 2회 실험 시 91.86~102.22회, 6회 실험 시 275.58~306.66회, 12회 실험 시 551.16~613.32회, 24회 실험 시 1102.32~1226.64회의 실험이 가능하다. 산불피해예방 목적의 인공강우 실험의 경우, 전 지점 평균 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 40.28~46.00회, 2회 실험 시 80.56~92.00회, 6회 실험 시 241.68~276.00회, 12회 실험 시 483.36~552.00회, 24회 실험 시 966.72~1104.00회의 실험이 가능하다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험의 경우, 전 지점 평균 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 42.19~44.60회, 2회 실험 시 84.38~89.20회, 6회 실험 시 253.14~267.60회, 12회 실험 시 506.28~535.20회, 24회 실험 시 1012.56~1070.40회의 실험이 가능하다.

주요지점별로 살펴보면, 수자원확보 목적의 인공강우 주요지점인 충청남도는 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 91.14회, 2회 실험 시 182.28회, 6회 실험 시 546.84회, 12회 실험 시 1093.68회, 24회 실험 시 2187.36회의 실험이 가능하다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 주요지점인 충청남도는 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 46.31~54.65회, 2회 실험 시 92.62~109.30회, 6회 실험 시 277.86~327.90회, 12회 실험 시 555.72~655.80회, 24회 실험 시 1111.44~1311.60회의 실험이 가능하다. 산불피해예방 목적의 인공강우 주요지점인 강원도는 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 38.63~42.34회, 2회 실험 시 77.26~84.68회, 6회 실험 시 231.78~254.04회, 12회 실험 시 463.56~508.08회, 24회 실험 시 927.12~1016.16회의 실험이 가능하다. 대기질개선 목적의 인공강우 주요지점인 서울, 인천, 경기도는 연간 인공강우 실험가능일에 1회 실험 시 41.40~51.40회, 2회 실험 시 82.80~102.80회, 6회 실험 시 248.40~308.40회, 12회 실험 시 496.80~616.80회, 24회 실험 시 993.60~1233.60회의 실험이 가능하다.

이처럼 목적별 실험가능횟수를 증가하려면 인공강우 관련 예산확보, 인프라 구축, 전담인력 확보 등이 선행적으로 이루어져야 한다. 하지만 현재 우리나라는 인공강우 기초연구 단계로 인공강우 실험을 통한 기초기술

**Table 3.** The available number of cloud seeding experiment in each purpose such as water resources, drought relief, forest fire prevention, and air quality improvement (available day : AD)

Number of cloud seeding experiment (#/AD)	Water resources (#/year)	Drought relief (#/year)	Forest fire prevention (#/year)	Air quality improvement (#/year)
1 time	91.27	45.93~51.11	40.28~46.00	42.19~44.60
2 times	182.54	91.86~102.22	80.56~92.00	84.38~89.20
4 times	365.08	183.72~204.44	161.12~184.00	168.76~178.40
6 times	547.62	275.58~306.66	241.68~276.00	253.14~267.60
8 times	730.16	367.44~408.88	322.24~368.00	337.52~356.80
12 times	1095.24	551.16~613.32	483.36~552.00	506.28~535.20
18 times	1642.86	826.74~919.98	725.04~828.00	759.42~802.80
24 times	2190.48	1102.32~1226.64	966.72~1104.00	1012.56~1070.40

확보에 주력하고 있고, 2018년 기상항공기 나라호 도입 이후 인공강우 항공실험을 활성화하기 위하여 노력하고 있으나, 현재까지 연구 목적의 인공강우 실험을 수행 중이다. 반면, 이스라엘, 미국, 태국, 중국, UAE 등의 국가에서는 인공강우 현업운영을 수행하고 있으며(WMO, 2018), 인공강우 현업을 통해 비약적인 인공강우 기술 발전을 이루고 있다. 인공강우 선진국처럼 인공강우 현업 운영을 수행하기 위해서는 예산확보, 인프라 구축, 전담 인력 확보 등을 통한 인공강우 실험 활성화가 이루어져야 할 것이다. 이를 통해 현업활용 가능체계가 구축된다면 수자원확보, 가뭄피해경감, 산불피해예방, 대기질개선 등의 국가적 편익이 발생할 것이다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 한반도 인공강우 관련 기상특성 분석과 실험가능일을 추정해 보았으며, 분석한 결과는 다음과 같다.

1. 10년 평균 기상 특성 분석 결과, 구름많음(운량 6 이상)은 평균보다 6~9월에 높게 나타나며, 여름철 높은 운량과 강수량, 강수일수가 나타났다. 최대 가뭄발생 시기는 가뭄강도가 심해질수록 점차 늦춰지는 것을 확인하였다. 산불발생일, PM<sub>2.5</sub> 농도, PM<sub>10</sub> 농도는 겨울-봄철 증가, 여름철 감소하는 패턴을 보였다.
2. 수자원확보 목적의 인공강우 실험가능일은 구름많

음(운량 6 이상)일을 기준으로 하였다. 가뭄피해경감 목적의 인공강우 실험가능일은 평균 강수량 이하인 날 중 구름많음일, 평균 강수일수 이하인 날 중 구름많음일을 각각 구분하여 분석하였다. 산불피해예방 목적의 인공강우 실험가능일은 산불방지기간(2~5월, 11~12월) 중 구름많음일, 산불방지기간과 1월을 포함한 기간(1~5월, 11~12월) 중 구름많음일을 각각 구분하여 분석하였다. 대기질개선 목적의 인공강우 실험가능일은 평균 PM<sub>2.5</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일, 평균 PM<sub>10</sub> 농도 이하인 날 중 구름많음일을 각각 구분하여 분석하였다.

3. 인공강우 실험가능일은 연간 평균 91.27일(수자원 확보), 45.93~51.11일(가뭄피해경감), 40.28~46.00일(산불피해예방), 42.19~44.60일(대기질개선)로 나타났다.

4. 연속운영 현업체계 시 인공강우 실험가능횟수의 경우, 인공강우 실험가능일에 6회 실험 시 연간 547.62회(수자원확보), 275.58~306.66회(가뭄피해경감), 241.68~276.00회(산불피해예방), 253.14~267.60회(대기질개선)로 나타났다.

본 연구결과는 여러 불확실성을 내포하고 있다. 분석 결과는 일 자료에 기반을 두고 있어 연속실험에 대한 하루 가능 실험횟수의 정확한 분석이 어렵다. 다만, 누적되는 인공강우 실험효과 산정을 위하여, 선진국과 같이 수대의 항공기를 이용한 상시 연속실험이 가능할 경우를 대비하여 기상학적 실험 가능 횟수를 추정해보았다. 가뭄은

개략적 분석을 위해 6개월 강수량 변동으로만 분석되었으나, 저수 용량 등 지역적 상세분석이 필요하다. 또한 한랭전선 통과를 약 6시간으로 가정한 경우, 인공강우 물질 살포시간(약 1시간)과 구름 반응시간(1시간)을 고려할 때, 3대의 항공기를 교대로 이용하면 연속적인 인공강우 실험이 가능할 것으로 사료된다.

본 연구를 통하여 한반도 인공강우 관련 기상특성 분석과 실험가능일에 대해 통계적으로 알아보았다. 수자원 확보, 가뭄피해경감, 산불피해예방, 대기질개선 총 4가지 목적에 따라 산정한 인공강우 실험가능일을 통하여, 인공강우 실험계획 수립 시 인공강우 필요성 및 목표지역 선정과 실험가능 일수에 대한 기초자료로 활용 가능할 것이며, 체계적이고 경제적인 인공강우 실험계획 수립에 도움을 줄 수 있을 것으로 기대한다. 또한 인공강우 기초 연구단계인 우리나라가 예산확보, 인프라 구축, 전담인력 확보 등을 통한 인공강우 현업운영을 수행하기 위한 기초자료로 활용되기를 바란다.

### 감사의 글

이 연구는 기상청 국립기상과학원 「기상조절 및 구름 물리 연구 (KMA2018-00224)의 지원으로 수행되었습니다. 연구 자료 제공 및 협력에 도움을 준 기상청, 산림청, 국립산림과학원, 한국환경공단(국가대기오염정보관리시스템), 수자원공사에 감사드립니다.

### REFERENCES

- Cha, J. W., Jung, W., Chae, S., Ko, A. R., Ro, Y., Chang, K. H., Seo, S., Ha, J. C., Park, D., Hwang, H. J., Kim, M. H., Kim, K. E., Ku, J. M., 2019, Analysis of results and technics about precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea, *Atmos.*, 29, 481-499.
- Flossmann, A. I., Manton, M., Abshaev, A., Bruintjes, R., Murakami, M., Prabhakaran, T., Yao, Z., 2019, Review of advances in precipitation enhancement research, *Bull. Am. Meteorol. Soc.*, 1465-1480.
- Hashimoto, A., Murakami, M., Haginoya, S., 2017, First application of JMA-NHM to meteorological simulation over the United Arab Emirates, *SOLA*, 13, 146-150.
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), Pachauri, R. K. Meyer, L. A., 2015, *Climate change 2014: Synthesis report*, Cambridge University Press, IPCC, Cambridge, 1-151.
- Jung, K. Y., Eom, W. G., Kim, M. J., Jung, Y. S., 1998, A study of feasibility of cloud seeding in Korea, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 31(5), 621-635.
- Jung, W., Murakami, M., Shinoda, T., Kato, M., 2018, Optimization of land surface parameters for weather simulations over arid and semi-arid regions, *SOLA*, 14, 197-202.
- Jung, W., Chang, K. H., Ko, A. R., Ku, J. M., Ro, Y., Chae, S., Cha, J. W., Lee, C., 2021, Meteorological conditions for the cloud seeding experiment by aircraft in Korea, *J. Environ. Sci. Int.*, 30(12), 1027-1039.
- Lee, C., Chang, K. H., Cha, K. H., Jung, J. W., Jeong, J. Y., Yang, H. Y., Seo, S. K., Bae, J. Y., Kang, S. Y., Choi, Y. J., Cho, H. M., Choi, C. Y., 2010, Estimation for the economic benefit of weather modification (Precipitation enhancement and for dissipation), *Atmos.*, 20, 187-194.
- Lee, J. H., Jeong, S. M., Kim, S. J., Lee, M. H., 2006, Development of drought monitoring system: I. Applicability of drought indices for quantitative drought monitoring, *J. Korea Water Resour. Assoc.*, 39(9), 787-800.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1993, The relationship of drought frequency and duration of time scales, 8th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Anaheim CA, 179-186.
- McKee, T. B., Doesken, N. J., Kleist, J., 1995, Drought monitoring with multiple time scales, 9th Conference on Applied Climatology, American Meteorological Society, Dallas TX, 233-236.
- Schaefer, V. J., 1946, The production of ice crystals in a cloud of supercooled water droplets, *Science*, 104, 457-459.
- Tai, Y., Liang, H., Zaki, A., Hadri, N. E., Abshaev, A. M., Huchinaev, B. M., Griffiths, S., Jouiad, M., Zou, L., 2017, Core/shell microstructure induced synergistic effect for efficient water-droplet formation and cloud-seeding application, *ACS Nano*, 11, 12318-12325.
- Vonnegut, B., 1947, The nucleation of ice formation by silver-iodide, *J. Appl. Phys.*, 18, 593-595.
- World Meteorological Organization (WMO), 2009, Experts agree on an universal drought index to cope with climate risks, World Meteorological Organization press release

No. 872, WMO, Geneva.

World Meteorological Organization (WMO), 2018, Peer review report on global precipitation enhancement activities, WWRP 2018-1, WMO, Geneva, 1-129.

Yang, I. K., 1965, Basic investigation and preliminary Field test for Precipitation Enhancement. Asia-Pac. J. Atmos. Sci., 1-13.

---

• Research scientist. Woon-Seon Jung  
Convergence Meteorological Research Department,  
National Institute of Meteorological Sciences  
wsjung01@korea.kr

---

• Senior research scientist. Ki-Ho Chang  
Convergence Meteorological Research Department,  
National Institute of Meteorological Sciences  
khchang@korea.kr

• Senior research scientist. Joo-Wan Cha  
Convergence Meteorological Research Department,  
National Institute of Meteorological Sciences  
jwcha@korea.kr

• Researcher. Jung-Mo Ku  
Convergence Meteorological Research Department,  
National Institute of Meteorological Sciences  
kjm1868@korea.kr

• Director. Chul-kyu Lee  
Convergence Meteorological Research Department,  
National Institute of Meteorological Sciences  
chulkyu.lee@korea.kr