Atmosphere. Korean Meteorological Society
Vol. 36, No. 1 (2026) pp. 65-74
https://doi.org/10.14191/Atmos.2026.36.1.065
pISSN 1598-3560 eISSN 2288-3266

해 설
(Review)

인공강우 시딩물질 요오드화은(AgI)의 환경영향: 50년간의 연구 리뷰

정은실[1),2)]*
[1)]경북대학교 미래과학기술융합학부, [2)]경북대학교 대기원격탐사연구소

(접수일: 2025년 8월 9일, 수정일: 2025년 9월 4일, 게재확정일: 2025년 11월 21일)

Environmental Impacts of Silver Iodide (AgI) in Cloud Seeding: A Fifty-Year Review

Eunsil Jung[1),2)]*
[1)]School of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University, Sangju, Korea
[2)]Center for Atmospheric REmote Sensing (CARE), Kyungpook National University, Daegu, Korea

(Manuscript received 9 August 2025; revised 4 September 2025; accepted 21 November 2025)

Abstract Cloud seeding, a form of weather modification that disperses seeding materials into clouds to induce precipitation, has been widely implemented to alleviate drought and manage water resources. Most previous studies on cloud seeding have focused on evaluating its efficiency in increasing precipitation, while research on the environmental impacts of seeding materials has been extremely limited. This study provides a comprehensive review of the environmental impacts of silver iodide (AgI), the most widely used glaciogenic agent in cloud seeding. Since its introduction in the mid-20th century, AgI has been applied globally to enhance precipitation, yet concerns remain regarding its long-term ecological effects. A synthesis of international and domestic literature indicates that, at current application levels, AgI rarely results in detectable toxic effects, with post-seeding concentrations typically in the order of a few parts per trillion (ppt), comparable to or below natural background levels. Nonetheless, laboratory studies have demonstrated that free silver ions (Ag^+) can exert acute and sublethal toxicity on aquatic organisms. These findings highlight the dual reality that AgI is generally safe at operational concentrations but cannot be completely excluded from long-term ecological risk. Institutional assessments, including those by the World Meteorological Organization (WMO) and national agencies, similarly conclude that while AgI poses minimal short-term hazard, systematic monitoring and transparent reporting are required to address scientific uncertainties. Based on these insights, this review emphasizes the need for long-term ecological studies, quantitative release scenarios, and optimized seeding strategies that minimize material use while maximizing efficiency.

Key words: Cloud seeding, Environmental impact, Silver iodide (AgI), Water quality, Weather modification policy

*Corresponding Author: Eunsil Jung, School of Advanced Science and Technology Convergence, Kyungpook National University, Kyungpook, Sangju 37224, Korea.
Phone: +82-54-530-1445, Fax: +82-54-530-1449
E-mail: eunsil.jung@knu.ac.kr

1. 서 론

기후변화로 인한 가뭄 심화와 수자원 부족 문제는 전 세계적으로 점차 심각해지고 있으며, 이에 따라 인공강우(artificial precipitation 또는 cloud seeding)는 물 자원 확보를 위한 보완적 기술로 주목받고 있다. 인공강우는 구름 내 미세물리 과정을 인위적으로 조작하여 강수 발생을 유도하는 방식으로, 주로 요오드화은(silver iodide, AgI), 염화칼슘($CaCl_2$), 염화나트륨(NaCl) 등이 시딩물질로 활용된다.

지금까지 수행된 인공강우 연구의 초점은 주로 강수 증대 효과를 정량적으로 검증하는 데 두어져 왔다(Breed et al., 2014; WMA, 2016; Flossmann et al., 2019; Rauber, et al., 2019; Essien, 2024). 반면, 시딩물질이 환경에 미치는 영향에 대한 평가는 제한적으로만 이루어졌다. 기존 연구 결과를 종합하면, 대다수의 현장 기반 연구에서는 AgI가 현재 수준에서 사용될 경우 강수·강설에서 수 ppt 범위의 낮은 농도로 관측되며, 이는 자연적 배경 수준과 유사하거나 그 이하로 보고되었다(WMA, 2009; WMO, 2010; Cardno ENTRIX, 2011; Potapov et al., 2016; GAO, 2024). 이러한 결과는 AgI가 대부분 불용성 입자 형태로 존재하여 생물학적 이용 가능성이 낮기 때문이며(Cooper and Jolly, 1970; WMA, 2009), 따라서 현 수준의 사용은 생태계나 인간 건강에 중대한 위해를 초래하지 않는 것으로 평가된다(GAO, 2024).

그러나 일부 실험실 연구에서는 AgI가 특정 조건에서 독성을 나타낼 수 있음이 보고되었다. Eisler (1996)는 자유 은 이온(Ag^+)이 낮은 농도에서도 수생 생물에 유해할 수 있음을 지적하였고, Fajardo et al. (2016)은 AgI 입자와의 직접 접촉 조건에서 세균과 조류의 생리적 억제가 발생함을 보고하였다. 이러한 결과는 실제 현장 노출 조건과는 차이가 있으나, AgI가 반복적으로 사용될 경우 토양 및 수계 내 은의 축적 가능성이 증가하여 장기적 생태계 영향으로 이어질 수 있다는 우려도 제기되었다(Malik et al., 2018). 이러한 상반된 결과는 장기적 생태계 영향에 대한 실측 기반 정량 평가가 아직 부족함을 보여주며, 지속적인 모니터링과 보완 연구의 필요성을 뒷받침한다.

한편, NaCl과 $CaCl_2$와 같은 흡습성 염류는 따뜻한 구름을 대상으로 한 인공강우 실험에 활용되지만, 이들의 환경영향을 직접적으로 평가한 연구는 거의 없다. 다만 두 물질은 수십 년 간 도로 제설제 및 제빙제로 광범위하게 사용되어 왔고, 이 과정에서 수질 염도 증가, 토양 구조 붕괴, 식생 피해 등의 환경영향이 보고되었다(Godwin et al., 2003; Novotny et al., 2009; Fay and Shi, 2012). 그러나 인공강우에서의 NaCl과 $CaCl_2$의 사용량과 빈도는 제설제에 비해 현저히 적어 직접적인 비교에는 한계가 있다. 따라서 본 논문에서는 따뜻한 구름형 시딩물질(NaCl, $CaCl_2$)은 논의에서 제외하고, 차가운 구름형 시딩물질인 AgI의 환경영향을 중심으로 고찰하고자 한다.

이에 본 연구는 국내외 문헌을 종합적으로 분석하여 AgI의 환경영향에 관한 최신 과학적 정보를 정리하고, 향후 연구 방향과 정책적 개선을 위한 근거를 제공하고자 한다. 또한, 본 연구는 지금까지의 연구가 개별 사례나 질적평가에 머물러 온 한계를 인식하고, 시딩물질의 환경영향 평가 현황과 연구 공백(research gap)을 정리함으로써 향후 정량적·수치적 접근을 위한 기초 연구 틀(framework)을 제시하고자 한다.

2. 시딩물질 개요

인공강우에 사용되는 시딩물질은 구름 내 미세물리 과정을 조절하여 응결핵 또는 빙정핵으로 작용하는 입자상 또는 기체상 화학물질로 구성된다. 대표적으로 요오드화은(AgI), 염화칼슘($CaCl_2$), 염화나트륨(NaCl), 액화이산화탄소(CO_2), 드라이아이스(dry ice) 등이 있다. 시딩물질은 구름의 온도 조건에 따라 차가운 구름형과 따뜻한 구름형으로 구분되며, 이에 따라 사용하는 물질의 물리·화학적 특성도 상이하다. 본 논문은 차가운 구름형 시딩물질인 AgI에 초점을 맞추어 고찰한다.

2.1 차가운 구름형 시딩물질: 요오드화은(AgI)

차가운 구름(구름 온도 $-5^{\circ}C$ 이하)을 대상으로 하는 시딩에는 요오드화은(AgI)이 가장 널리 사용된다. AgI는 결정 구조가 얼음의 육방정계(hcp structure)와 유사하여, 구름 내 과냉각된 물방울의 결빙을 유도하는 빙정핵으로 작용한다. 미국, 중국, 이스라엘, 호주 등 여러 국가에서 수십 년간 사용되어 왔으며, 현재까지 가장 보편적이고 효과적인 차가운 구름형 시딩 물질로 평가된다(WMO, 2010, 2018; Flossmann et al., 2019).

한편, 은(Ag) 화합물 중 수중에서 해리되어 형성되는 자유 은 이온(Ag^+)은 중금속 특성을 지니며, 높은 반응성으로 인해 생물학적 독성 및 환경 내 축적 가능성에 대한 우려가 지속적으로 제기되어 왔다. 그러나 AgI는 물에 거의 녹지 않는 낮은 용해도를 가져, 자연상태에서 Ag^+로 전환되는 비율이 제한적이며, 대부분 입자상 불용성 형태로 존재한다(Eisler, 1996). 시딩 후 방출된 AgI 입자는 대기 중 장거리 이동 후 강수나 건식 침강을 통해 지표에 침적될 수 있으며, 이 과정에서 수계·토양·생물체 등에 축적 될 가능성이 있다.

2.2 따뜻한 구름형 시딩물질: 염화나트륨(NaCl), 염화칼슘($CaCl_2$)

NaCl과 $CaCl_2$는 따뜻한 구름 시딩에서 사용되는 대

표적 흡습성(hygroscopic) 물질로, 응결핵을 형성하여 강수 과정을 촉진한다. 그러나 이들의 환경영향에 대한 직접적 연구는 부족하며, 본 논문에서는 고찰 대상에서 제외한다.

3. 시딩물질(AgI)의 환경영향

시딩물질의 환경적 영향에 대한 과학적 평가는 주로 강수, 토양, 수질, 생물체 내 은(Ag) 농도 변화를 중심으로 이루어져 왔다. 본 장에서는 주요 국가 및 프로그램에서 수행된 환경 모니터링 사례를 분석하여, 차가운 구름형 시딩물질로 널리 사용되는 요오드화은(AgI)의 환경 영향을 기존 문헌에 기반하여 종합적으로 정리하였다. 이스라엘과 호주 또한 AgI를 장기간 사용한 대표적 국가이지만, 기존 논문들은 대부분 시딩 효과(강수량 증가)에 초점을 맞추고 있어, Ag의 환경 중 농도(수질, 토양 등)에 대한 정량적 분석 자료는 부족하다. 국내에서도 인공강우 실험이 수행되고 있으나, 시딩물질의 환경 중 농도 변화를 직접적으로 측정한 정량적 분석 자료는 아직 보고된 바 없다. 따라서 본 절에서는 비교적 정량적 데이터가 확인 가능한 미국과 유럽 사례를 중심으로 구성하였다.

3.1 미국

미국에서는 1940년대 후반부터 다양한 형태의 인공강우 프로그램이 시행되어 왔으며, 요오드화은(AgI)이 주요 시딩물질로 널리 활용되어 왔다. 개별 지상 시딩 장비에서 방출되는 시딩 물질의 양은 일반적으로 시간당 5~25 g의 AgI이며, 항공기의 경우 대상 지역의 크기에 따라 시간당 수백 g에서 수 kg의 AgI 가 방출된다(WMA, 2009). 1978년에는 인공강우 활동으로 인해 약 3,000 kg(3톤)의 은(AgI 형태)이 환경에 방출되었으며, 이는 전체 은 배출량의 약 0.1%에 해당한다(Eisler, 1996; WMA, 2009). 현재 미국과 캐나다에서의 인공강우 활동에서도 매년 비슷한 양의 요오드화은이 사용되고 있다.

3.1.1 대기 및 강우, 생물학적 영향

Cooper and Jolly (1970)는 요오드화은(AgI)의 생태학적 영향을 문헌 리뷰를 통해 종합적으로 분석한 대표적 초기 연구이다. 저자들은 은(Ag)의 독성이 주로 이온 형태(Ag^+)에서 발현되며, AgI는 불용성이 높아 실제 환경에서 Ag^+로 전환될 가능성이 제한적이므로 생물학적 이용 가능성이 낮다고 평가하였다.

운용 측면에서 AgI 지상 발생기의 방출량은 구름 특성, 실험 목적, 발생기 성능, 연료와 연소 조건, 기상 환경 등에 따라 시간당 6-1,589 g 범위로 보고되었다. 이에 따라 시딩된 강수의 은 농도는 0.01~1.76 μg L^{-1} 수준이었으며, 눈 시료에서는 최대 4.5 μg L^{-1}까지 보고되었다. 이러한 수치는 자연 담수(0~3.5 μg L^{-1}, 평균 약 0.1 μg L^{-1})의 범위와 대체로 겹쳤으며, 따라서 AgI 시딩에 따른 대기 및 강수 내 은 농도 증가는 존재하더라도 자연적 변동 범위 이내로 평가되어 환경적 위해성은 낮은 것으로 판단되었다.

생물학적 영향에 대한 연구에서는 미생물·어류·수생 무척추동물이 은 이온(Ag^+)에 매우 민감하여, 당시 보고된 $AgNO_3$ 기반 실험실 독성 연구에서는 10~100 μg L^{-1} 수준에서도 치명적 영향이 보고되었다. 이러한 수치는 1970년대 문헌 기준으로, 현대의 수생 생물 보호 기준치(0.12~1.9 μg L^{-1})와 비교할 때 수십 배 높은 값이다. 반면, 포유류와 고등식물은 동일한 Ag^+ 노출에서도 뚜렷한 피해가 보고되지 않았으며, 주요 부작용은 피부 착색(Argyria)에 국한되었다. 또한 AgI에 포함된 요오드는 당시 평가에서 환경 위해성이 무시할 수 있는 수준으로 보고되었다.

종합하면, Cooper and Jolly (1970)는 AgI 사용이 일반적인 조건에서 생태계에 큰 위해를 가하지 않는다고 보았으나, 민감한 수생 생물군(특히 미생물, 어류, 수생 무척추동물)에 어떠한 영향을 미칠 수 있는지에 대해서는 연구가 부족하다고 지적하였으며, 이에 따라 은의 장기적 거동과 저농도 노출 효과에 관한 추가 연구와 모니터링의 필요성을 제기하였다.

미국 플로리다에서 수행된 Florida Area Cumulus Experiment (FACE)는 AgI를 사용한 대표적 적운형 인공강우 실험으로, 1970년대에 집중적으로 시행되었다. 단일 실험일 기준 최대 20 kg day^{-1}의 AgI가 투입되었으며(ATSDR, 2010), 시딩 후 강우 내 은(Ag) 농도는 0.01~4.5 μg L^{-1}로, 비시딩 조건(0~0.02 μg L^{-1})에 비해 뚜렷하게 높게 보고되었다(Wisniewski et al., 1976; ATSDR, 2010). 이는 고강도 시딩이 국지적인 은 농도 상승을 유발할 수 있음을 시사하지만, 토양 및 식생에 대한 장기적 영향은 보고되지 않았으며, 생태계에 대한 단기적 영향도 명확히 확인되지 않았다.

Eisler (1996)는 은(Ag) 화합물 전반에 대한 포괄적인 독성학 리뷰를 통해, 미국 내 주요 Ag 배출원이 인공강우가 아닌 사진 산업임을 지적하였다. 저자는 미국에서 요오드화은(AgI)을 이용한 인공강우의 연간 사용량이 약 3,000 kg(3톤) 수준에 불과하며, 이는 사진 산업 등 다른 배출원에 비해 상대적으로 작은 규모라고 보고하였다. 또한 AgI 시딩 후 강수와 적설에서 관측된 은 농도는 대부분 자연적 배경 수준과 유사하거나 약간 높은 범위(수 ng~수 μg L^{-1})에 머무른다고 정리하였다. Eisler는 Ag 자체가 발암성이나 기형 유발 가능성은 낮다고 평가하면서, 실제 독성을 유발하는 주체는 불용성 AgI 입자 자체가 아니라 수중에서 해리되어 생물학적으로 이용 가능한 자유 은 이

온(free Ag^+)임을 강조하였다. 특히 $AgNO_3$ 기반의 실험실 연구에서는 free Ag^+가 1.2~4.9 μg L^{-1}에서 수생생물에 치명적인 영향을, 0.17~0.6 μg L^{-1}에서도 생리적 이상을 유발하는 것으로 보고되었다. 저자는 AgI가 대부분 불용성 형태로 존재하여 직접적인 독성은 낮다고 보았으나, Ag 화합물의 용해도와 독성은 pH, 수질 경도(Ca^{2+}, Mg^{2+} 농도), 염화물·황화물·탄산염 및 유기물과 같은 리간드(ligand)의 존재에 따라 크게 달라질 수 있음을 지적하였다. 이러한 조건에서 자유 은이온(Ag^+)이 생성되면 수생 생물에 대한 잠재적 위험성이 증가할 수 있으므로, Ag의 환경 내 장기적 거동과 축적을 파악하기 위한 지속적인 모니터링이 필요하다고 권고하였다.

3.1.2 토양 및 수체

앞선 연구들이 대기 및 강우 중 은 농도에 초점을 맞추었다면, 이 절에서는 시딩 물질의 침적 및 토양·수체 내 축적 가능성에 대한 현장 기반 및 실험실 기반 연구들을 구분하여 소개한다.

Weaver and Super (1973)은 AgI의 지표 침적 또는 토양 영향을 평가한 연구로서, 겨울철 지형성 인공강우 프로그램을 통해 강설량이 약 10~20% 증가하고, 이에 따라 연간 약 0.3 g ha^{-1}의 은(Ag) 침적이 발생할 수 있다고 보고하였다. 이들은 이러한 침적 수준이 생물체에 유해하지 않으며, 토양 상부에 은이 축적되더라도 최소 100년 이상 식물 및 미생물에 부정적 영향을 미칠 가능성은 낮다고 평가하였다. 다만, 100~400%에 달하는 비현실적으로 큰 강설 증가가 이루어질 경우에는 일부 식생에 부정적인 영향을 미칠 가능성이 있음을 경고하였다.

이후 수십 년간 미국 서부 지역에서는 다양한 인공강우 프로그램이 운영되었으며, 대부분 요오드화은(AgI)을 주요 시딩물질로 사용하였다. 유타주는 1973년부터 겨울철 강설량 증대를 위해 약 120개의 지상 발생기를 가동해왔고, 콜로라도, 아이다호, 와이오밍 등지에서도 민간 및 주정부 주도의 시딩 프로그램이 활발히 시행되었다. 특히 와이오밍주는 2005년부터 Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP)를 통해 통제구역 기반의 과학적 실험을 실시하며, 시딩 효과와 환경 영향을 정량적으로 평가하였다.

이들 프로그램 중 Sierra Nevada 산악 지역은 장기 모니터링 사례로 주목되며, 1950년대 후반부터 2000년대 초반까지 40년 이상 인공강우 실험이 수행되었다. Mokelumne River 유역 및 Lake Almanor 등을 포함한 여러 지점에서 장기간 수질 및 퇴적물 내 은(Ag) 농도가 모니터링되었으며, 시딩된 강우의 Ag 농도는 일반적으로 0.01 μg L^{-1} 이하였고, 일부 사례에서는 최대 1.0 μg L^{-1}까지 보고되었다(Cardno ENTRIX, 2011). 이는 비시딩 강우(0~0.3 μg L^{-1}; WMA, 2009)에 비해 다소 증가한 수준이었으나, 미국 환경보호청(Environmental Protection Agency, EPA)의 생태독성 기준(1.4 μg L^{-1}) 및 음용수 기준(100 μg L^{-1})에는 미치지 않았다. 또한 침적물과 수체 내 Ag 농도는 대부분 자연 배경 범위(0.0005~0.06 μg L^{-1})에 머무르는 것으로 나타났다. Cardno ENTRIX (2011)과 WMA (2009) 보고서는 AgI의 낮은 수용성과 생물학적 비 이용성에 주목하며, 장기적인 환경 축적이나 생태 독성은 관측되지 않았다고 결론지었다.

종합하면, 미국에서 수행된 여러 모니터링 및 현장 연구들은 Ag 농도가 일반적으로 환경 기준을 초과하지 않으며, AgI가 대부분 불용성 형태로 존재해 생물학적 이용 가능성이 낮음을 보여준다(Cooper and Jolly, 1970; Weaver and Super, 1973; WMA, 2009; Cardno ENTRIX, 2011). ATSDR (2010) 또한 고강도 시딩 조건에서 단기적 농도 상승은 관측되었으나, 식생 및 수체 생물군집에 대한 명확한 영향은 없었다고 보고하였다. 한편, 실험실 조건에서는 자유 은 이온(Ag^+)이 수생 생물에 치명적 또는 아급성 독성을 유발할 수 있음이 제시되었는데(Eisler, 1996), 이러한 결과는 실제 현장 환경과는 차이가 있으나 민감한 생물군에 대한 잠재적 위험성을 완전히 배제할 수 없음을 시사한다. 따라서 AgI의 장기적 거동과 저농도 노출 효과를 규명하기 위한 지속적 모니터링과 보완적 연구가 필요하다.

3.2 유럽

3.2.1 현장 모니터링 연구

몰도바 및 러시아 북캅카스 지역에서는 수십 년에 걸쳐 인공강우 실험이 수행되어 왔으며(Potapov et al., 2016; Korneev et al., 2017), 시딩물질 변화에 따른 환경 영향이 정량적으로 평가되었다(Potapov et al., 2016). 초기에는 몰도바에서 요오드화납(PbI_2)이 시딩물질로 사용되었으나, 대기 및 토양 내 납 축적이 확인되며 환경오염 우려가 제기되었다. 이에 따라 1983년 이후부터는 은(Ag) 기반 시딩제(AgI, 2%)로 전환되었고, 연간 사용량도 헥타르당 약 0.5 g 이하로 크게 감축되었다. 이후 장기 모니터링 결과, 토양 및 수체 내 은 농도는 대부분 자연적 배경 수준(≤ 10 μg kg^{-1} 또는 μg L^{-1})을 유지하였으며, 유의미한 축적이나 환경학적 위해는 관찰되지 않았다. 연구진은 이전의 납 기반 조성물은 환경 잔류성과 독성 면에서 명백한 문제를 유발했으나, AgI 시딩은 장기간 수행하더라도 토양과 수자원에 환경학적으로 의미 있는 영향을 미치지 않는다고 평가하며, 시딩 물질의 선택과 사용량 조절이 환경영향을 좌우하는 핵심 변수임을 강조하였다. 이러한 결과는 소량의 AgI 사용이 상대적으로 안전함

을 실증한 대표적 사례로 제시된다.

후속 연구로서 Korneev et al. (2017)은 1979~2014년 동안 러시아 북캅카스 및 몰도바 지역에서 수행된 시딩 실험 자료를 분석하였다. 그 결과, 시딩 기간 중 대기 중 Ag 농도는 0.064~43 μg m^{-3}로 나타났으며, 이는 공기질 기준치(최대허용농도, MPC = 10,000 μg m^{-3})의 수천 분의 1 이하 수준이었다. 수질 내 Ag 농도는 1.7~7.4 μg L^{-1}로, 비교 지역의 0.9~4.1 μg L^{-1}과 유사하거나 다소 높았으나, 수질 기준치(MPC = 50 μg L^{-1})를 초과하지는 않았다. 특히 시리아 지역에서 수행된 대규모 시딩 실험(면적 약 15만 km^2, 연간 AgI 사용량 81 kg)에서조차 단위 면적당 Ag 사용량은 0.545 g km^{-2}에 불과하여, 자연 기원 배출량(약 70톤/년)이나 산업 기원 배출량(약 2,290톤/년)에 비해 극히 낮은 수준이었다. 이러한 정량적 결과를 바탕으로, Korneev et al. (2017)은 "인공증설 실험이 지역 환경에 미치는 영향은 극히 낮다(extremely low)"고 결론지었다.

3.2.2 실험실 기반 연구

Fajardo et al. (2016)은 스페인에서 토양 세균(*Bacillus cereus*, *Pseudomonas stutzeri*), 토양 선충(*Caenorhabditis elegans*), 담수 조류(*Dictyosphaerium chlorelloides*, *Microcystis aeruginosa*)를 대상으로 AgI의 급성 독성을 실험실 조건에서 평가하였다. 연구 결과, 환경 기준치(46.4 μg L^{-1})에서도 세균의 생존율과 조류의 광합성 활성이 유의하게 억제되었으며, 통합 독성 지수(TBI)는 "높음(High)" 수준으로 분류되었다. 반면, 토양 선충(*C. elegans*)에서는 뚜렷한 영향이 관찰되지 않았다. 저자들은 이러한 독성이 Ag^+의 방출보다는 AgI 입자 자체의 직접 접촉 효과에 기인할 수 있다고 해석하였으며, 반복적인 시딩에 따른 누적 침적이 생태계에 잠재적 위험을 초래할 수 있음을 지적하였다. 다만 이 연구는 실험실 조건에서의 직접적·고농도 노출을 전제로 하므로, 실제 인공강우 환경에서 나타나는 희석·흡착·화학적 변환 등의 완충 작용은 충분히 반영되지 않았다. 따라서 최악의 시나리오(worst-case scenario)에 가까운 결과로 볼 수 있으며, 실제 생태계 영향은 이보다 낮을 가능성이 크다. 그럼에도 불구하고, 이러한 결과는 AgI의 장기적 축적 가능성과 특정 민감 생물군에 대한 잠재적 영향을 환기시킨다는 점에서 의미가 크며, 앞서 소개된 현장 기반 모니터링 연구들과는 상반된 시사점을 제공한다. 이는 AgI의 환경 안전성에 대한 지속적인 재검토와 현장 기반 연구 병행의 필요성을 부각시킨다.

이와 같이 지금까지의 연구들은 주로 개별 사례나 실험실 조건에서의 질적 평가에 머물러 있으며, 지역 간 조건 차이와 시딩 특성의 다양성으로 인해 통계적·정량적 비교 연구는 거의 이루어지지 않았다. 이러한 한계는 시딩물질의 환경영향에 대한 과학적 불확실성을 해소하기 위해, 장기적 관측 자료를 기반으로 한 정량적 분석 연구가 필요함을 시사한다. 시딩물질로 사용된 AgI가 환경에 미치는 영향에 대한 주요 결과는 Table 1에 요약되었다.

3.3 국내 사례

국내에서는 2006년부터 강원도 대관령 지역의 구름물리선도센터(CPOS)를 중심으로 겨울철 지상 기반 인공증설 실험이 수행되어 왔으며(Lee et al., 2009; Yang et al., 2018), 2018년 평창 동계올림픽을 계기로 항공기 기반 실험도 본격화되었다(Cha et al., 2019). 주요 시딩물질로는 요오드화은(AgI)과 염화칼슘($CaCl_2$)이 사용되고 있으며, 일부 항공 실험에서는 염화나트륨(NaCl)도 활용되었다(Lim et al., 2023).

지금까지의 국내 인공강우 관련 연구는 대부분 시딩 효과, 즉 강수량 증대 검증에 초점을 맞추고 있으며(Chae et al., 2018; Yang et al., 2018; Cha et al., 2019; Lim et al., 2023; Ro et al., 2023), 시딩물질의 환경적 영향에 대한 연구는 매우 제한적이다.

현재까지 수행된 관련 연구는 CPOS 하류 수계인 오대천-1을 대상으로 한 일련의 분석들에 국한되며, 이들 연구는 모두 은(Ag)의 환경 중 농도(수질, 토양 등)를 직접 측정한 정량적 연구가 아니라, 장기 수질 자료를 이용한 간접적 평가 연구에 해당한다(Jung, 2025a, 2025b; Jung and Hyun, 2026).

오대천-1을 대상으로 한 연구에서는 1997~2023년 장기 수질자료를 활용하여 시딩 전후의 물리·화학적 수질지표 변화를 분석하였다. 연구에서 비교 대상으로 설정한 3월과 10월은 각각 시딩 후 해빙기와 비시딩기를 대표하는 시기로, 시딩 여부에 따른 상대적 차이를 평가하기 위해 선정되었으며, 3월에는 수온 상승, 용존산소(Dissolved Oxygen, DO) 감소, 전기전도도(Electrical Conductivity, EC) 증가가 통계적으로 유의하게 관측되었다(Jung, 2025a). 또한, 비영향권 지점인 북천과의 공간적 비교에서도 오대천-1에서만 수온 상승, DO 감소, EC 증가가 통계적으로 확인되어 시딩물질의 하류 유입 가능성을 시사하였다(Jung, 2025b).

더 나아가, CPOS에서 지상 증설 실험이 수행되기 전(1997~2005)과 이후(2006~2024)를 구분하여 비교한 결과, 시딩 후 기간에 EC-총질소(Total Nitrogen, TN) 및 EC-질산성질소(NO_3^--N) 간 상관이 현저히 강화되는 등 변수 간 구조적 재편이 관찰되었다(Jung and Hyun, 2026). 이는 수온-생화학적 산소요구량(Biochemical Oxygen Demand, BOD), BOD-총인(Total Phosphorus, TP)과 같은 전통적 부영양화 상관 구조가 약화되거나 소멸한 것과 대조적이다.

Table 1. Summary of environmental impacts from AgI-based cloud seeding studies.

Study Area/Type	Medium	Ag Concentration	Impact Summary	Reference
USA/ Laboratory & field review	Water, biota	Not quantitatively specified (focus on solubility and bioavailability)	AgI exists mainly as an insoluble particulate form, with very low bioavailability and minimal direct toxicity; potential toxicity arises only when Ag^+ is released under specific water chemistry conditions.	Cooper and Jolly, 1973
USA/Field	Atmosphere, Ecosystem	0.3 g/ha/year (estimated deposition)	Negligible ecosystem impact at estimated deposition rates; potential vegetation effects under extreme snowfall increase.	Weaver and Super, 1973
USA, Florida/Field	Atmosphere, Precipitation/ Rainwater	Rainwater Ag up to 4.5 μg L^{-1} (seeding), background 0~0.02 μg L^{-1}); released up to 20 kg AgI per day	Temporary increased Ag levels in rainwater during seeding, but no significant long-term soil/vegetation impact.	Wisniewski et al., 1976; ATSDR, 2010
USA, Sierra Nevada/Field	Precipitation	Rainwater 0.01~1.0 μg L^{-1}, Background 0~0.3 μg L^{-1}	Slight increase compared to non-seeded area; much lower than the EPA drinking water standard (100 μg/L)	WMA, 2009; Cardno ENTRIX, 2011
	Surface Water (Rivers/Lakes)	Mean Ag ranged from 0.0005~0.06 μg L^{-1}	Ag levels similar to or below natural background; no measurable ecological impact.	WMA, 2009; Cardno ENTRIX, 2011
	Soil/Sediment	-	Long-term monitoring over decades showed no significant accumulation of Ag. Most Ag remained in insoluble form with low bioavailability.	WMA, 2009; Eisler, 1996
USA/Field	Air	Ag emissions from 1970s seeding: ~3 tons/year (3,000 kg per year)	Emissions extremely small compared with other industrial sources; Far below air quality standards.	Eisler, 1996; WMA, 2009
Laboratory (Global, review of toxicology studies)	Water, Biota (plants, invertebrates, vertebrates)	Lethal: 1.2~4.9 μg L^{-1} (free Ag^+) Sub-lethal: 0.17~0.6 μg L^{-1} (free Ag^+) Safe threshold: > 50 μg L^{-1} (humans)	Free Ag^+ is toxic to aquatic organisms at very low concentrations; risk strongly influenced by water chemistry (hardness, pH, ligands).	Eisler, 1996
Europe, Spain/ Laboratory	Aquatic organisms (Soil bacteria/algae)	Up to 1.5 μg L^{-1} of free Ag^+ released from AgI suspensions	Toxicity observed in sensitive organisms at environmental levels (~46 μg L^{-1}) under direct exposure to AgI particles; worst-case scenario.	Fajardo et al., 2016
Europe, Moldova, North Caucasus/Field	Air, Water	Air: 6.4×10^{-5}~0.043 mg m^{-3}, Water: 1.7~7.4 μg L^{-1}	Ag levels well below air/water quality standards; environmental impact extremely low.	Korneev et al., 2017
Europe, Moldova/Field	Soil, Water	≤ 0.01 mg kg^{-1} (soil), ≤ 0.01 mg L^{-1} (water)	No evidence of accumulation after replacing PbI_2 with AgI; AgI evaluated as environmentally safer.	Potapov et al., 2016

Note: Most field studies report that the environmental impact of AgI is minimal, with silver concentrations at or below natural background levels. However, some laboratory studies have demonstrated toxicity under specific conditions, highlighting the need for continued long-term monitoring.

Table 2. Summary of domestic studies on the environmental impacts of cloud seeding in South Korea.

Study Site / Region	Study Period	Key Findings	Notes	Reference
Odaecheon-1 (downstream of CPOS)	1997~2023 (March & October)	Statistically significant trends observed after seeding: increase in water temperature and EC, and decrease in DO. Indicates thermal and ionic changes within the influenced watershed.	Long-term trend and seasonal comparison	Jung (2025a)
Odaecheon-1 (impact zone) vs. Bukcheon (reference site)	1997~2024 (March)	Significant increases in water temperature and EC, and a decrease in DO, were observed only at Odaecheon-1, while no significant changes were detected at Bukcheon. Suggests possible downstream transport of seeding materials.	Spatial comparison (impact vs. non-impact zone)	Jung (2025b)
Odaecheon-1 (downstream of CPOS)	1997~2024 (before seeding: 1997~2005; after seeding: 2006~2024)	After the onset of seeding experiments, correlations between EC-TN and EC-NO_3^--N strengthened markedly, whereas WT-BOD weakened. Indicates structural reorganization of parameter relationships and collapse of traditional eutrophication linkages.	Correlation-structure analysis and impact evaluation	Jung and Hyun (2026)

이러한 결과는 인공증설이 하천 수질에 직접적인 농도 변화뿐 아니라, 변수 간 상관 구조의 재편을 통해 간접적인 영향을 미칠 수 있음을 시사한다. 다만, 국내 연구에서는 AgI와 $CaCl_2$의 영향을 구분하지 않고 통합적으로 다루고 있어, 각 시딩물질의 개별적 거동 및 매체 간(대기-수질-토양) 전이 특성을 명확히 규명하기 어렵다는 한계가 있다. 또한 해빙수나 토양 내 시딩물질(특히 AgI)의 농도를 직접 분석한 자료가 부재하여, 인공증설의 환경영향 평가는 여전히 초기 단계에 머물러 있다.

따라서 본 논문은 이러한 국내 연구의 한계를 연구공백(research gap)으로 제시하며, 향후 Ag 농도 및 화학종(speciation) 분석을 포함한 장기적·통합적 환경영향 평가와 지속적 모니터링 체계 구축의 필요성을 강조한다. 나아가 시딩물질별(AgI, $CaCl_2$) 거동과 장기적 환경영향을 정량적으로 평가하는 후속 연구가 지속적으로 수행될 필요가 있다. 본 절에서 언급한 국내 연구들의 주요 내용을 Table 2에 정리하였다.

4. 시딩물질에 대한 제도적 관리 및 정책 현황

인공강우 실험은 대기 및 수자원 관리와 밀접하게 연관된 기술임에도 불구하고, 국가별로 상이한 제도적 틀 내에서 관리되고 있다. 미국은 세계적으로 가장 오랜 기간 인공강우 실험을 수행해 온 국가 중 하나지만, 시딩 물질 사용과 관련된 통합적인 연방 차원의 규제는 존재하지 않는다. 미국회계감사원(GAO, 2024)에 따르면 현재 10개 이상의 주(State)에서 자체적으로 인공강우 프로그램을 운영하고 있으며, 대부분은 주 단위 또는 민간기관 주도로 추진되고 있다. 연방 기관인 NOAA, EPA, DOE 등은 주로 기술 개발이나 자문 수준의 역할에 국한되어 있어, 시딩 물질이 유발할 수 있는 환경적·사회적 영향에 대한 체계적 평가가 이루어지기 어려운 구조이다. 특히 인공강우 프로젝트 시행에 앞서 환경영향평가(EIA)를 연방 차원에서 의무화하지 않고 있으며, 실험 대상 지역 외부(예: 하류 지역)에 미치는 강수 유도 효과에 대한 규제나 보상 기준도 명확하지 않다(Simon, 2021). 다만 NOAA는 Weather Modification Reporting Act (WMRA)에 따라 시딩 프로젝트 정보를 의무적으로 수집·공개하고 있어 일정 수준의 투명성과 모니터링 기반을 제공하고 있다. GAO (2024)는 최근 종합 평가에서 "현 수준에서의 AgI 사용은 환경 및 보건상 중대한 우려를 일으키지 않는다"고 결론지었으며, 미국 환경보호청(EPA) 역시 GAO (2024) 보고서를 인용하여 동일한 입장을 밝혔다. 그러나 GAO 보고서는 AgI 사용이 향후 더욱 광범위해질 경우 잠재적 장기 영향에 대비한 모니터링 필요성 또한 지적하였다.

호주 또한 유사한 문제를 안고 있다. Simon et al. (2020)은 호주 내 인공강우 활동의 법적·제도적 현황을 분석한 결과, 다수의 주에서 환경영향평가 없이 인공강우 프로젝트가 시행되고 있으며, 시딩 물질의 축

적 가능성이나 비표적 지역에 대한 영향이 제도적으로 충분히 고려되지 않는다고 지적하였다. 특히 AgI 등의 사용과 관련된 과학적 불확실성이 존재함에도 불구하고, 이를 규제하거나 감시할 국가 차원의 통합 법제나 모니터링 체계가 부재하다는 점이 문제로 언급되었다. 이에 따라 연구진은 통일된 법적 프레임워크 마련과 예방원칙 적용, 이해관계자 참여 확대의 필요성을 제안하였다.

한국의 경우 인공강우 실험은 대부분 정부 주도로 수행되며, 기상청 산하 국립기상과학원이 이를 주관하고 있다. 국내 인공강우 실험과 관련된 정보는 국립기상과학원의 기술보고서와 다수의 학술 논문을 통해 공개되고 있으며, 여기에는 실험의 시기, 장소, 사용 물질, 투입량 등이 포함되어 있다. 이러한 자료는 매년 국회와 공공기관에 보고되어 기본적인 투명성이 확보되고 있다. 다만, 현재는 개별 논문이나 보고서 단위로 제공되고 있어, 연구자와 일반 대중이 보다 쉽게 접근할 수 있는 온라인 기반 통합 데이터베이스 체계의 구축이 필요하다. 향후 이러한 정보가 일원화된 형태로 제공된다면, 연구 활용도와 대중적 접근성이 더욱 높아질 것으로 기대된다.

국제적으로는 세계기상기구(WMO, 2010, 2018)가 인공강우 기술 적용에 관한 권고사항을 제시하고 있다. WMO는 인공강우의 효과와 환경적 영향에 대한 과학적 불확실성이 여전히 크다는 점을 인정하며, 모든 프로젝트는 엄밀한 과학적 검증과 장기적 모니터링을 전제로 수행되어야 한다고 강조하였다. 또한 인공강우 활동은 국가별 제도적 관리 체계 속에서 이루어지되, 투명한 보고 체계와 지역사회 참여, 그리고 환경영향평가(EIA)를 통한 사전 검토가 필요하다고 권고하였다. 시딩물질(AgI 등)에 대해서는 현재까지의 사용 수준에서 심각한 위해가 보고되지는 않았으나, 장기 누적 가능성이 존재하며, 지역적 환경 조건(예: 수질, 토양, 생태계 특성)에 따라 영향이 달라질 수 있으므로 정량적 평가와 국제적 정보 공유가 필요하다고 지적하였다.

종합하면, 인공강우 기술의 환경적 지속가능성을 확보하기 위해서는 기술적 효과성뿐 아니라 제도적 투명성과 과학 기반의 환경 리스크 평가가 병행되어야 하며, 특히 시딩물질의 장기적 영향과 지역 생태계에 대한 정밀한 대응이 중요함을 확인할 수 있다.

5. 종합 논의 및 결론

본 연구는 인공강우 실험에서 사용되는 대표적 시딩물질인 요오드화은(AgI)의 환경영향에 관한 과학적 논의와 제도적 관리 현황을 종합적으로 검토하였다. 국내외 문헌을 바탕으로 시딩물질의 잠재적 위해성 여부와 장기적 모니터링 필요성에 대해 다음과 같은 시사점을 도출하였다.

대부분의 현장 기반 연구에서는 AgI가 현재 수준에서 사용될 경우 명확한 독성 피해는 관측되지 않았으며, 시딩 이후의 은(Ag) 농도는 일반적으로 수 ppt 수준으로, 자연적 배경 농도와 유사하거나 그 이하임이 보고되었다(Cooper and Jolly, 1970; WMA, 2009; Cardno ENTRIX, 2011). 반면, 일부 실험실 연구는 특정 조건에서 독성 가능성을 보여주며(Eisler, 1996; Fajardo et al., 2016), 이러한 상충은 주로 시딩 사용 농도의 차이, Ag 화학종 차이(불용성 입자 vs 용해된 이온), 그리고 노출 경로의 차이 즉, 현장에서는 강수·강설을 통한 간접적·저농도 노출이 일어나는 반면, 실험실에서는 Ag^+ 용액을 직접 투여하거나 AgI 입자를 생물과 접촉시키는 직접적·고농도 노출이 모의된다는 점에서 비롯된다. 따라서 두 접근법은 상호 보완적이며, AgI의 잠재적 영향을 종합적으로 이해하기 위해 함께 고려될 필요가 있다.

즉, 현 시점에서 AgI의 단기적 위해 가능성은 낮은 것으로 판단되지만, 반복적·누적적 사용에 따른 잠재적 축적 가능성은 배제할 수 없다. 특히 하류 수계, 저수지, 습지 등 민감한 지역에서는 세심한 모니터링이 요구된다. 이를 위해 향후 모니터링은 다음과 같이 구체화될 필요가 있다.

1. 시기적 측면: 겨울철 시딩 직후 및 해빙기(3~4월)를 집중 관찰 대상으로 설정한다.
2. 매체별 모니터링: 대기 침적(강우·강설), 하천·저수지 수질, 토양 및 퇴적물, 수생 생물체(어류·저서생물)를 포함한 다층적 분석을 수행한다.
3. 분석 항목: 총은(Ag) 농도뿐만 아니라 Ag의 화학종(speciation) 자유 은 이온(Ag^+), 불용성 침전물(AgI, Ag_2S, AgCl 등), 리간드 결합형(Ag-chloride, Ag-sulfide, Ag-organic complexes), 나노입자 형태를 구분하여 분석한다. 또한 축적 가능성 지표(토양 및 퇴적물 장기 추세, 생물 농축 계수, 먹이망 전이 가능성)와 함께 생물학적 반응 지표(예: 산화 스트레스, 성장률, 군집 구조 변화)를 병행 측정해야 한다.

이를 바탕으로 본 연구는 다음과 같은 제언을 제시한다.

1. AgI는 현재 사용 수준에서는 뚜렷한 환경 위해를 일으키지 않을 가능성이 크지만, 장기적 누적 가능성에 대비한 체계적 모니터링이 필요하다.
2. 시딩 빈도, 지역, 사용량 등을 고려한 정량적 배출 시나리오와 수계 유입 시뮬레이션 연구가 병행되어야 한다.
3. 시딩물질의 사용 이력과 배출경로에 대한 정보 공유가 강화될 필요가 있으며, 하류 지역에 대한

사전영향평가 체계 마련이 바람직하다.

4. 지속적인 모니터링과 함께, 기후 조건과 구름 특성을 고려한 최적화된 시딩 전략을 도입함으로서 최소 사용으로 최대 효과를 달성할 수 있도록 기술 개선이 추진되어야 한다.

결론적으로, AgI 시딩물질은 현재 수준에서 안전하게 활용될 수 있으나, 장기적 관점에서의 과학적 근거 축적과 구체적이고 체계적인 모니터링, 그리고 투명한 정보 공개는 기술의 지속가능성과 사회적 신뢰를 높이는 데 핵심적 기반이 될 것이다. 끝으로, 본 논문은 지난 50년간의 문헌을 종합하여 시딩물질의 환경영향 평가 현황과 연구 공백을 제시한 리뷰 연구로서, 향후 통계적·수치적 분석 연구를 위한 기초 방향을 마련했다는 데 의의가 있다. 향후에는 시딩 자료와 장기 모니터링 데이터를 통합하여 시딩물질의 거동과 누적효과를 정량적으로 검증하는 연구가 수행될 필요가 있다.

감사의 글

본 논문의 개선을 위해 좋은 의견을 제시해 주신 두 분의 심사위원께 감사를 드립니다.

REFERENCES

ATSDR, 2010: *Toxicological Profile for Acrolein*. Chapter 5: Potential for Human Exposure. U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, Atlanta, GA, Agency for Toxic Substances and Disease Registry. [Available online at https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiles/tp146.pdf].

Breed, D. W., R. Rasmussen, C. Weeks, B. Boe, and T. Deshler, 2014: Evaluating winter orographic cloud seeding: design of the Wyoming Weather Modification Pilot Project (WWMPP). *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **53**, 282-299, doi:10.1175/JAMC-D-13-0128.1.

Cardno ENTRIX, 2011: Geochemistry and Impacts of Silver Iodide Use in Cloud Seeding. Prepared for the North American Weather Modification Council, 34 pp [Available online at https://weathermod.org/wp-content/uploads/2017/11/Pub-Entrixreport.pdf].

Cha, J. W., and Coauthors, 2019: Analysis of results and techniques for precipitation enhancement by aircraft seeding in Korea. *Atmosphere*, **29**, 481-499, doi: 10.14191/Atmos.2019.29.4.481.

Chae, S. H., K.-H. Chang, S. K. Seo, J.-Y. Jeong, B.-J. Kim, C. K. Kim, S. S. Yum, and J. W. Kim, 2018: Numerical simulations of airborne glaciogenic cloud seeding using the WRF model with the modified Morrison scheme over the Pyeongchang region in the winter of 2016. *Adv. Meteorol.*, **2018**, 9189540, doi:10.1155/2018/8453460.

Cooper, C. F., and W. C. Jolly, 1970: Ecological effects of silver iodide and other weather modification agents: A review. *Water Resour. Res.*, **6**, 88-98, doi:10.1029/WR006i001p00088.

Eisler, R., 1996: *Silver hazards to fish, wildlife, and invertebrates: A synoptic review*. U.S. Department of the Interior, National Biological Service, Biological Report 32, 44 pp.

Essien, M., 2024: Evaluation of cloud seeding techniques for precipitation enhancement. *Glob. J. Climate Stud.*, **1**, 53-64 [Available online at https://forthworthjournals.org/journals/index.php/GJCS/article/view/85].

Fajardo, C., G. Costa, L. T. Ortiz, M. Nande, M. L. Rodríguez-Membibre, M. Martín, and S. Sánchez-Fortún, 2016: Potential risk of acute toxicity induced by AgI cloud seeding on soil and freshwater biota. *Ecotoxicol. Environ. Saf.*, **133**, 433-441, doi:10.1016/j.ecoenv.2016.06.028.

Fay, L., and X. Shi, 2012: Environmental impacts of chemicals for snow and ice control: State of the knowledge. *Water Air Soil Pollut.*, **223**, 2751-2770, doi:10.1007/s11270-011-1064-6.

Flossmann, A. I., M. Manton, A. Abshaev, R. Bruintjes, M. Murakami, T. Prabhakaran, and Z. Yao, 2019: Review of advances in precipitation enhancement research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, **100**, 1465-1480, doi:10.1175/BAMS-D-18-0160.1.

GAO, 2024: *Cloud Seeding Technology: Assessing Effectiveness and Other Challenges*. GAO-25-107328, U.S. Government Accountability Office, Washington, D.C., USA, 64 pp [Available online at https://www.gao.gov/assets/gao-25-107328.pdf].

Godwin, K. S., S. D. Hafner, and M. F. Buff, 2003: Long-term trends in sodium and chloride in the Mohawk River, New York: The effect of fifty years of road-salt application. *Environ. Pollut.*, **124**, 273-281, doi:10.1016/S0269-7491(02)00481-5.

Jung, E., 2025a: Seasonal shifts in correlation structure of stream water quality following artificial cloud seeding. *KSWST J. Water Treat.*, **33**, 195-204, doi:10.17640/KSWST.2025.33.4.195.

_______, 2025b: Effect of winter cloud seeding on downstream water quality: spatial comparison of Bukcheon and Odaecheon-1. *KSWST J. Water Treat.*, **33**, 221-227, doi:10.17640/KSWST.2025.33.4.221.

Jung, E., and K. Hyun, 2026: Impact of artificial precipitation on stream water quality during snowmelt season. *KSCE J. Civ. Eng.*, doi:10.1016/j.kscej.2026.100532.

Korneev, V. P., E. I. Potapov, and G. G. Shchukin, 2017: Environmental aspects of cloud seeding. *Russ. Meteorol. Hydrol.*, **42**, 477-483, doi:10.3103/S106837391707007X.

Lee, M.-J., and Coauthors, 2009: Preliminary results of the ground-based orographic snow enhancement experiment for the easterly cold fog (cloud) at Daegwallyeong during the 2006 winter. *Adv. Atmos. Sci.*, **26**, 222-228, doi:10.1007/s00376-009-0222-x.

Lim, Y.-K., and Coauthors, 2023: Analysis of cloud seeding case experiment in connection with Republic of Korea Air Force transport and KMA/NIMS atmospheric research aircrafts. *J. Environ. Sci. Int.*, **32**, 899-914, doi:10.5322/JESI.2023.32.12.899.

Malik, S., H. Bano, R. A. Rather, and S. Ahmad, 2018: Cloud seeding: Its prospects and concerns in the modern world—A review. *Int. J. Pure Appl. Biosci*., **6**, 791-796, doi:10.18782/2320-7051.6824.

Novotny, E. V., A. R. Sander, O. Mohseni, and H. G. Stefan, 2009: Chloride ion transport and mass balance in a metropolitan area using road salt. *Water Resour. Res*., **45**, W12410, doi:10.1029/2009WR008141.

Potapov, E. I., A. S. Sidorenko, and E. A. Zasavitsky, 2016: Environmental impact studies related to ice-forming aerosol usage in cloud seeding activities in Moldova. *Mold. J. Phys. Sci*., **15**(1-2), 91-100.

Rauber, R. M., and Coauthors, 2019: Wintertime orographic cloud seeding—A review. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, **58**, 2117-2140, doi:10.1175/JAMC-D-18-0341.1.

Ro, Y. H., K.-H. Chang, S. Chae, Y.-K. Lim, J. M. Ku, and W. S. Jung, 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**, 5478666, doi:10.1155/2023/5478666.

Simon, M., 2021: Enhancing the weather: Governance of weather modification activities of the United States. *Wm. Mary Environ. Law Policy Rev*., **46**, 149-190 [Available online at https://scholarship.law.wm.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=1804&context=wmelpr].

______, K. Brent, J. McDonald, and J. McGee, 2020: Enhancing the weather: Governance of weather modification activities in Australia. *Environ. Plann. Law J*., **37**, 695-716 [Available online at https://www.researchgate.net/publication/348281266].

Weaver, T. W., and A. B. Super, 1973: Ecological consequences of winter cloud seeding. *J. Irrig. Drain. Div*., **99**, 387-399, doi:10.1061/JRCEA4.0000942.

Wisniewski, A., K. Glover, A. Neuendorffer, and W. Henderson, 1976: Silver concentrations of precipitation from seeded and non-seeded clouds. *J. Appl. Meteorol*., **15**, 1004-1008, doi:10.1175/1520-0450(1976)015<1004:SCOPFS>2.0.CO;2.

WMA, 2009: *WMA Position Statement on the Environmental Impact of Using Silver Iodide as a Cloud Seeding Agent*. Weather Modification Association. [Available online at https://weathermod.org/wp-content/uploads/2018/03/EnvironmentalImpact.pdf].

______, 2016: *WMA Capabilities Statement on Weather Modification.* Weather Modification Association, April 2016 [Available online at https://weathermod.org/wp-content/uploads/2018/03/Capabilities.pdf].

WMO, 2010: WMO Statement on Weather Modification. WMO Expert Meeting, Abu Dhabi, UAE, 27 April 2010. World Meteorological Organization.

______, 2018: *Peer review report on global precipitation enhancement activities*. WMO Rep. WWRP, 2018-1, 129 pp.

Yang, H.-Y., K.-H. Chang, S. Chae, E. Jung, S. Seo, J.-Y. Jeong, J.-H. Lee, Y. Ro, and B.-J. Kim, 2018: Case study of ground-based glaciogenic seeding of clouds over the Pyeongchang region. *Adv. Meteorol.*, **2018**, 9465923, doi:10.1155/2018/9465923.