

안개소산과 인공증우(설) 기술

○ 장기호, 이명주, 정진임, 장영진, 양하영,
김금란 | 국립기상연구소 지구환경시스템연구팀 연구관
E-mail : khchang@metri.re.kr

1. 머리말

안개는 각종 운송수단의 운행에 지장을 주는 등 심각한 피해를 입히고 있다. 항공기의 결항 또는 지연 등으로 인한 경제적, 시간적 손실이 크나 현재로서는 마땅한 대안이 없는 실정이다.

최근 첨단 비행 이착륙 시스템의 발달에도 불구하고 안개의 존재는 비행기의 운항율을 크게 떨어뜨린다. 독일 메인(Main)주의 프랑크푸르트(Frankfurt) 공항은 안개로 인한 항공기 지연에 따른 손실액이 시간당 250,000 Euro (Möeller, et al., 2003)로 추산된다. 2006년 서울지방항공청의 「항공기 비정상 운항 분석」 보고서에 의하면 관할 6개 공항(인천, 김포, 청주, 양양, 군산, 원주)의 국내외 항공기의 지연 및 결항, 회항률 등을 비교 분석한 결과 안개·바람 등의 기상요인에 의해 운항이 지연된 경우는 731편(총 지연편 대비 6.9%)이고, 목적지 공항의 기상으로 결항한 편은 1,836편(총 결항편 대비 40.1%)이었다. 또한 회항의 주요 사유는 목적지 공항의 기상 악화(333편)로서 6개 공항의 총 회항편(428편)의 회항 사유 중 77.8%를 차지했다. 일반적으로 국제선 보잉 747 점보 여객기 한대가 안개로 인해 목적지에 착륙을 못하고 부산 김해공항에 내렸다 다시 인천으로 되돌아오면 약 2천만원의 추가 비용이 발생한다고 한다. 이 밖에도 공군 공항에

서는 안보, 초계비행 등으로 전투기 등이 이착륙해야 하나, 안개로 인한 활주로 시정악화로 인해 전략적으로 어려움을 겪고 있다.

안개는 항공뿐 아니라 지상과 해상 운송수단의 운행에도 지장 및 인명피해를 주고 있다. 짙은 안개 속에서의 교통사고는 연쇄 사고를 일으켜 피해규모가 크고 치사율도 높다. 교통사고에 대한 통계자료(2006년)에 따르면 안개 낀 날 교통사고 사망자수는 맑은 날의 약 3배에 이른다고 한다. 미국의 한 고속도로에서는 1981~1989년(9년) 동안 안개 관련 사고로 6,000여명의 인명이 목숨을 잃었다(NCHRP, 1998). 우리나라에서는 2006년 10월 3일 서해대교에서 29대의 차량이 부딪쳐 57명의 사상자를 낸 연쇄추돌 안개 참사가 있었으며, 최근에는 고양시 자유로에서 33중 추돌사고가 있었다.

안개는 태풍이나 허리케인, 가뭄과 같이 무서운 자연재해로 느껴지지 않는 것이 사실이다. 하지만 복잡한 현대사회가 되면서 안개는 사회경제생활에 막대한 영향력을 행사하고 있다. 태풍이나 집중호우와 더불어, 안개는 인간이 제어하기 원하는 대표적인 기상현상이 되고 있다.

안개소산 기술을 공항과 고속도로 등에서 활용하면 시정 악화에 따른 사고의 위험성을 감소시킬 뿐 아니라 연료비용 및 시간 감축 등으로 사회경제적으로 미치는 파급효과가 막대할 것이다.

2. 국내외 안개소산 선행 연구

2.1. 기상조절 정의 및 발전 역사

미국 기상학회 정책선언문(1992. 1. 5)에서는 기상조절을 “의도적인 기상조절”과 “비의도적인 기상조절”로 분류하고 있다. 의도적인 기상조절은 특정한 목적을 가지고 어떤 지역의 안개나 구름, 강수 등의 기상을 국지적으로 변화시키는 것이며 비의도적인 기상조절은 사람들의 활동에 의해 부수적으로 발생하는 장기적인 기상 상태의 변화를 일컫는다. 그런데 우리가 흔히 말하는 기상조절은 어떠한 목적을 가지고 계획 하에 기상조절이라는 임무를 수행하는 것을 말하며 보통 인공증우나 인공증설, 안개소산, 우박억제, 폭풍우 완화 등이 이에 속한다.

일찍부터 날씨를 조절하고 싶은 사람들의 강한 열망에 비해 기상조절 기술의 역사는 채 60년이 되지 못한다. 세계기상기구(WMO) 자료에 의하면 현재 미국, 멕시코, 오스트레일리아, 타이, 러시아, 중국, 아르헨티나, 그리스, 남아프리카 공화국 등 세계 33개국에서 실용화 프로젝트가 수행 중이다. 기상조절 초기에는 인공증우가 활발히 수행되다 1960년대에 들어와서부터 안개소산과 태풍약화로 영역이 확대되었으며 2000년대에는 강수절감에 선진국들은 투자를 하고 있다.

기상조절의 발전단계를 나눈다면 크게

㉠ 1950년-1960년대의 낙관론 시기 - 인공증우에 대한 가능성 확인으로 무작위적 실험이 곳곳에서 진행되었다.

㉡ 1970년대의 활발한 항공실험 시기 - 국가적인 지원 하에 기상조절에 대한 연구와 실험이 가장 활발히 수행되었던 시기이다.

㉢ 1980년대의 물리적 접근법 시기 - 70년대 말을 분기점으로 인공증우에 대한 열기가 줄기 시작하였으나 과학기술과 컴퓨터의 발달로 새로운 관측기기와 구름 및 증우 수치모델이 개발되었다. 따라서 구름과 강수의 발달 과정에 대한 물리적 검증에 대한 연구의 일환으로 구름관측과 모델링 연구

가 활발히 진행되었다.

㉣ 1990년대와 2000년대의 첨단 기법 동원 시기 - 기술선진국과 기술이전을 필요로 하는 국가와의 국제 공동 프로젝트가 활발히 진행되었으며 무인항공기, 레이더 및 위성자료를 활용 가능성에 대한 연구가 진행 중이다. 특히 선진국들(일본, 러시아)은 대형 구름챔버를 구축하여 안개소산 방안을 모색하고 있다.

2.2. 구름과 비 생성 과정의 이해

앞에서 언급한 기상조절 기술을 이해하기 위해서는 먼저 비가 내리는 과정에 대한 이해가 필요하다. 일반적으로 비가 내리는 과정은 두 가지 방법으로 설명할 수 있다.

첫째는 빙정설이다. 구름 꼭대기가 0℃ 이하로 냉각돼 있고 구름이 빙정(대기 중에 자연스럽게 생기는 얼음결정)으로 되어 있을 때, 과냉각된 물방울의 구름입자와 빙정이 공존하는 구름층이 생긴다. 이 때 물방울 표면의 포화 수증기압과 빙정 표면의 포화 수증기압 차로 인해 물방울은 증발되고 이 물방울이 빙정에 달라붙어 빙정이 성장하게 된다. 이렇게 커진 빙정은 어느 정도 크기를 가지면 무거워져서 떨어지게 된다. 그리고 떨어지면서 어느점을 지나 녹게 되는데 이를 비라고 부르는 것이다.

비가 내리는 또 다른 과정은 병합설이다. 이는 구름 꼭대기가 영하로 냉각돼 있지 않아도 강수가 발생하는 과정을 설명할 수 있다. 해수면으로부터 대기 중으로 이동해 온 해양입자로 구성된 응결핵(condensation nuclei)에 의해 생기는 큰 구름입자가 그보다 작은 구름 입자를 병합하면서 성장해 강수가 된다는 것이다.

인공증우란 구름은 있으나 구름 속 자연 핵의 농도가 낮아 구름방울이 빗방울로 성장하지 못해 강수를 기대할 수 없거나 그 밖의 이유로 낮은 강수율이 예상되는 구름에 드라이아이스와 같은 물질을 주입시켜 주위 기온을 영하 40℃ 이하로 낮추어 빙정핵(freezing nuclei) 생성을 촉진시키거나 인위적으로 요오드화은이나 염화칼슘 등의 활성 빙정핵 핵

은 활성 응결핵을 주입하여 강수율을 높여주는 기술이다. 이 방법은 현재 기술로는 아무 구름이나 적용할 수 있는 것이 아니라 빙정을 형성할 만큼 온도가 충분히 낮고 강수를 발달할 수 있을 만큼 수명이 긴 구름에만 적용할 수 있다.

2.3 안개소산의 정의 및 초기 연구

안개소산은 작은 물방울(0.001~0.1mm)로 구성된 안개(부유 물입자)를 인위적인 방법을 이용하여 소멸시키는 기술을 말하며 문헌상에 따르면 실제로 안개를 제거하려는 시도는 인공증우보다 좀 더 앞서 나타났다. 1930년 네덜란드 왕립연구소의 물리학자 버랏(Veraat)은 드라이아이스를 이용해 안개를 흩어지게 하는 야외 실험을 시도했다.

이후 스웨덴의 베르저론(Bergeron)과 독일의 핀다이센(Findeisen)은 1933년과 1935년 각각 드라이아이스를 안개에 뿌려주면 안개구성 입자들이 빙정이 되어 땅으로 떨어지게 된다는 것을 이론적으로 증명하였다. 한편 1938년 미국 MIT의 휴그톤(Houghton)은 오늘날 옷장 속에 넣어두는 습기제거제의 성분인 염화칼슘을 이용해 안개를 제거하는 실험을 수행했다. 그 후 1942년 2차 세계대전 중에는 영국의 공군 비행장에서 연료를 연소시켜 나오는 열로 안개를 가열하여 소산시키는 실험(Fog Investigation Dispersal of, FIDO)을 실시하기도 했다. 이는 최초로 열 가열 방법(thermal method)을 안개소산 실험에 적용한 것으로 효과는 양호했으나, 비용이 엄청나고 연료 연소에 의한 스모그가 발생하는 문제를 보였다.

연구 초기의 드라이아이스를 이용한 안개소산 기술은 인공증우 기술과 별반 다르지 않았다. 사실 구름이나 안개는 다른 기상현상이 아니다. 단지 안개와 구름의 차이는 지표면 근처에 있느냐 그렇지 않느냐 일 뿐이다. 따라서 구름에서 비를 내리게 하는 인공증우 기술이 안개를 제거하는데 유효할 수 있다. 하지만 이 방법으로는 모든 안개를 제거하지 못한다. 구름과 달리 안개는 넓은 지역에 걸쳐서 발생하므로 이 방법으로는 안개를 한 번에 소산케 하

는 즉각적인 효과를 기대하기는 어렵다. 그리고 여러 번의 실험을 통해 이 방법은 제한된 종류의 안개에만 효과를 거둘 수 있다는 결과를 얻었다. 이에 대한 내용을 다음 절에서 살펴보고자 한다.

2.4 안개 분류에 따른 안개소산 기술 연구

안개는 기온에 따라 찬 안개와 따뜻한 안개로 구분하고, 발생 원인에 따라 복사 안개, 이류 안개, 증발 안개 등으로 구분한다. 오늘날 안개를 제거하는 방법은 크게 네 가지로 나눌 수 있는데, 이들의 적용은 안개의 발생 원인이 아니라 안개의 기온에 따라 결정된다. 냉안개는 기온이 0℃ 이하인 경우의 안개를 말하며, 이를 제거하기 위해서는 인공증우(설)의 인공 빙정핵 뿌리기 또는 급격한 온도강하를 통한 과냉각 과정 강화 방법 등이 적용될 수 있다. 일반적으로 인공 빙정핵 물질로는 요오드화은(AgI)이 많이 사용되며 과냉각을 유도하는 물질로는 드라이아이스(Dry ice)를 많이 사용한다. 그 밖에 액화질소, 액화탄소, 요오드화납(PbI₂)와 요오드화나트륨(NaI)의 혼합물 및 염화나트륨(NaCl), 염화칼륨(KCl), 산화마그네슘(MgO) 화합물을 사용하는 실험연구도 진행되고 있다. 실제로 이 기술은 이탈리아 북부지역의 공항이나 고속도로에서 현재 사용되고 있다.

우리나라는 봄, 가을철에 안개가 많이 발생하며 영하로 기온이 떨어지지 않기 때문에 따뜻한 온안개(0℃ 이상 안개)가 대부분이다. 따라서 우리나라에 필요한 기술은 온안개 제거법이다. 그러나 온안개는 아직 뚜렷한 제거 방법이 없다고 알려져 있다(WMP report, 2000). 다만 온안개 절감을 위한 여러 가지 방안을 모색하는 연구개발이 있다. 현재의 기술은 안개입자를 비가 될 정도로 성장시키거나 반대로 증발시켜 버리는 방법이 대표적이다.

안개입자를 성장시키는 방법은 인공증우에서 흡습성 구름씨 물질을 이용한 인공증우 방법과 동일하다(Larry, 1971). 다만 인공증우와는 달리 짧은 시간 내 안개를 제거하기 위해서 이온화 방법을 추가하는 등 보다 효과있는 방안을 모색하는 연구가 세

계적으로 진행 중이다. 최근에는 안개를 비로 내리게 하는데 전자기장을 활용하는 방법이 많이 연구되고 있다. 전자기장을 만들어주는 장치를 이온제너레이터라고 부른다. 안개가 자욱한 지역에서 이온제너레이터를 작동시키면 고전압의 전기를 발생하여 주위의 대기 속 분자가 이온화 된다. 이 이온은 응결핵으로 작용하면서 물방울을 끌어당겨 응집시켜 빗방울로 떨어지게 한다. 이탈리아 베르나(Verna) 공항에서 러시아의 이온제너레이터를 이용한 안개소산 실험이 실시되었는데 실험 결과에 따르면 가로 5m 세로 4.4m의 장비를 가동했을 때 5배 이상의 가시거리가 증가하였다고 한다. 이온제너레이터 방법은 새로운 대안이지만 아직 잘 알려지지 않았고 이론적 배경에 대한 학술적 연구발표가 없는 상황이기 때문에 객관적 검증이 어려운 실정이다. 따라서 앞으로 구체적이고 세밀한 검토가 필요하다고 본다.

한편 이와는 달리 안개입자를 증발시켜 제거하려면 어떻게 해야 할 것인가. 액체상태의 물을 기체상태로 바꾸려면 가열을 해야 한다. 마찬가지로 증발을 통한 안개 제거에는 많은 양의 열이 필요하다. 이를 위해 상당한 양의 연료를 소모해 열을 발생시킬 수 있는 장치가 이용되며 보통 공항에서는 초고속 비행기의 엔진을 사용한다. 안개가 자욱한 활주로에 제트 비행기를 가동시켜 엔진이 빨강게 달아올라 열을 방출하면 안개방울이 수증기로 증발하거나 대류 현상이 발생해 안개가 소산된다(Appleman, 1970). 일본은 공항활주로에 30m 간격으로 열 발생기를 장치하여 안개 발생 시 자동으로 대기의 온도를 상승시켜 안개를 소산하는 방법을 사용하고 있다. 이 같은 열 방식은 일반적으로 발생하는 안개의 여러 유형에 가장 효과적인 제거 방법이다. 하지만 자욱한 안개를 모두 없애기에는 연료 소모가 너무 많기 때문에 대부분이 비경제적이다. 그리고 가열 공간을 원하는 장소로 한정하기가 어렵고 바람의 영향을 많이 받는다. 또한 탄소화합물 연료를 사용하기 때문에 연소로 인해 대기 중에 수분이 공급되어 추가적인 가열이 필요하다. 이런 까닭에 최근에는 마이크로파나 레이저를 이용한 기술이 개발되

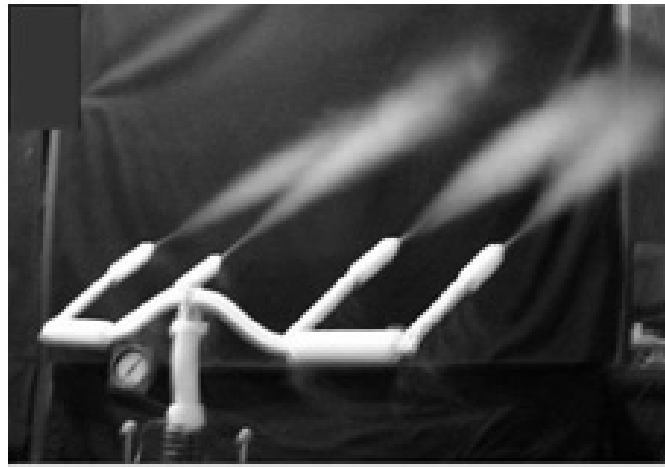
고 있다. 이는 마이크로파와 레이저를 안개에 쏘아 안개입자나 수증기입자에 부딪치게 하여 입자를 분해하고 파괴하는 방법이다. 이 때 열이 발생하여 안개입자를 가열시켜 증발되게 한다. 또한 레이저를 이용한 야외 실험을 통해서 따뜻한 안개를 완전히 소멸시켰다는 보고도 있다. 1 watt/cm로 이 시스템은 20초 동안 1/4 마일의 시정을 향상시킬 수 있다고 한다. 그러나 아직은 장비가 매우 고가이고 연구개발이 진행 중이기 때문에 선불리 단언할 수는 없는 입장이다(Kunkel, 1979).

적용하는 장소에 따라서도 안개소산 방법은 달리 적용해야 한다. 공항과 고속도로에서 요구하는 시계와 높이 등이 다르기 때문에 동일하게 기술을 적용할 수 없고 각각 상황에 맞게 조정하여야 한다. 공항에서는 항공기의 이착륙을 전제로 하기 때문에 안개를 소산해야 하는 지역이 길고 높아야 한다. 그리고 공항에서는 장비를 고정적으로 배치하여 안개발생시 마다 가동하면 되지만 고속도로에서는 시계와 고도가 크지 않아도 되고 도로의 특성상 일직선이 아니기 때문에 장비가 이동식(transportable)이어야 한다. 단점은 가열하는 공간을 국부적으로 제한하기가 쉽지 않아서 바람이 분다든지 하면 목표대상지역으로 유도하기가 어려워지고 탄소화합물을 연료로 사용하기 때문에 연소 후에 추가적으로 대기에 수분을 공급해 주는 역할을 하여 추가적인 가열이 요구되어 그만큼 효율이 떨어진다. 이 기술은 프랑스 드골 공항과 미국 LA공항에서 실용화하려고 하였으나 위에 기술한 단점과 비용이 많이 들어 현재는 사용이 중지되었다. 이탈리아에서는 러시아와 계속적인 공동연구와 민간기업의 실용화시키기 위한 노력이 계속되고 있는 것으로 판단된다.

아직까지 안개소산 기술은 전 세계적으로 그 필요성은 크게 인식하고 있으나 실험에 성공한 사례가 인공증우 기술에 비해 많지 않다. 특히 전자기장과 열 기술은 안개소산의 효과가 시스템을 작동 시에만 나타나고 시스템을 정지시키면 다시 주변의 안개가 몰려들어오는 현상을 보인다. 완벽하게 안개를 제거하기 위해서는 보다 큰 전자기적 영향력이나 강한 열에너지가 필요할 것으로 사료된다. 그



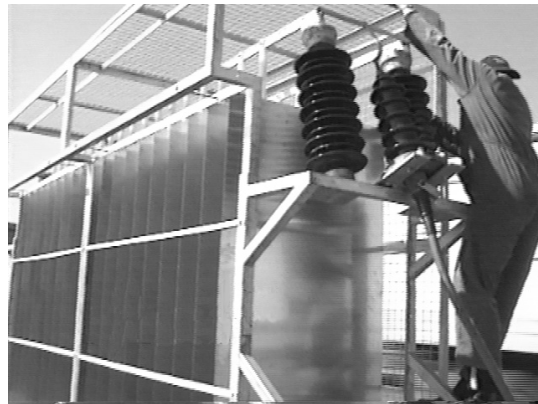
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 1. 러시아와 이탈리아 고속도로와 공항에서의 안개소산 장치

(a)와 (b)는 고정식 액화질소가스 분무장치이며 (c)와 (d)는 이동식 이온제너레이터임.

리고 이런 여러 기술들을 효과적으로 활용하여 실제적 안개소산을 가능케 하려면 대상 지역에 주로 발생하는 안개의 유형 등 지역별 특성 분석 등이 선행되어야 하며, 경제적 효율성을 고려한 안개소산 방법을 적용하는 것이 필요하다.

물론, 안개소산의 기초 및 원천 기술 개발에 투자는 교통, 군사 등의 세계적 선도 위치를 확보할 수 있는 길이 될 것이다.

2.5 국내의 안개소산 기술 선행 연구

우리나라의 인공강우는 1960년 대 초반에 시작되었으나 한반도의 기후학적 조건의 제약, 예산과 관심 부족 등의 이유로 오랜 기간 중단되었다가 1995년 가뭄을 계기로 기상청 주도로 다시 시작되었다. 그러나 다시 실시된 연구도 3년 만에 중단되었다가 2001년 발생한 심각한 봄 가뭄을 계기로 그

필요성이 대두되어 현재까지 연구가 지속되고 있다. 2002년 초반까지 우리나라의 인공강우 연구는 가뭄이 발생하면 이에 대한 한시적인 대응책으로써 실험 중심으로 실시되었다면 2002년 이후의 연구는 기초이론 연구와 관측을 중시하고 이를 소규모 실험으로 검증하는 체계로 바뀌었다. 그러나 우리나라의 기상조절 연구는 50~60년 동안 기술을 축적해 온 선진기상국에 비해 수행한 기간도 짧고 지속적인 투자와 전담인력이 부족하여 아직 기초 기술연구 및 기반 구축 단계이다. 선진국의 사례에서 보듯이 기술에서 실제 실용화까지는 지속적인 시간과 노력이 필요하다.

기상청 국립기상연구소는 대관령 구름물리선도 관측센터를 중심으로 겨울철에는 냉안개를 이용한 인공증설 실험을, 봄철의 온안개를 대상으로 온안개 절감 기술 개발 실험을 실시하는 등 관련 기술을 축적하고 있다. 현재 국립기상연구소 기상조절 연구그룹은 1) 구름물리 이론 및 수치모델 연구, 2) 구름물리 관측 및 분석, 그리고 3) 구름물리 실험 및 관련 장비개발을 중점적으로 수행하고 있다. 2005년부터 기상조절 실험결과를 증명하고 실험을

보다 용이하게 하기 위해 자동 강설/우박 입자 영상 포집기, 기상조절 실험용 연소탄 점화장치, 연소탄 원격 점화장치 등의 새로운 기기들을 발명하고 특허출원 및 등록하였다.

연세대학교를 중심으로 2002-2005년도 동안 기상조절 실험 시의 기상장 모사를 위한 중규모 삼차원 Clark-Hall 모형(1991) 연구를 진행하여 실제적인 시딩 모의가 가능케 되었으며 Takahashi and Kawano (1998)의 미세규모 구름모형 연구 또한 실시하여 삼차원의 미세규모 구름모의가 가능하게 되었다.

이와 같은 모형 연구를 통해 최적의 기상조절 조건에 대한 이론적 이해 기반을 확보하였다. 한편 국립기상연구소는 독자적으로 층돌-병합과정을 시뮬레이션이 가능한 미세구름조절모델(MCM, Ver. 1.0)을 개발하였다. 이는 장기적으로 자체 모형 개발의 기반을 구축하였다는데 그 의의를 둘 수 있다.

기상조절 실험 전후의 구름 및 안개입자의 특성 변화를 관측하기 위하여 (구) 대관령 기상대에 “구름물리 선도관측센터”를 구축하였다. 구름물리 선도관측센터의 관측기기는 전방산란스펙트로메타 (Forward Scattering Spectrometer Probe, 이하 FSSP),



그림 2. 대관령 구름물리 선도관측센터의 지형 및 안개가 이루하는 모습

마이크로파 레디오메타(Microwave Radiometer, 이하 MWR), 마이크로 강수레이더(Micro Rain Radar, 이하 MRR), 삼차원 자동기상관측시스템(3D AWS), 광학디스트로메타(PARSIVEL Disdrometer), 그리고 시정계(Sentry Visibility Sensor)로 구성되었다. 상세한 구름물리선도관측센서의 관측결과와는 장기호 등(2007)에 주어져 있다. 현재 위 관측기기의 산출물들은 모두 검보정을 실시하였으며 웹페이지(<http://weamod.metri.re.kr>)를 통해 실시간으로 표출(제한적 허용)되고 있다.

안개소산에 관한 국내연구를 살펴보면, Cha 등(2006)은 FSSP를 통한 안개관측결과 등 대관령의 기후적 구름특성에 대한 연구가 있었다. Chang 등(2007)은 흡습성물질인 염화칼슘(CaCl_2) 연소탄을 이용한 안개소산 방법을 테스트 해보았으며 그 결과 처음 6분 동안에는 시정이 감소하였으나 연소탄을 연소한 후 10~20분 동안 시정의 증가를 FSSP 기기 관측을 통하여 확인하였다. 실험 경로에 따른 두 가지 방법의 안개소산 민감도 테스트 소규모로 진행하였는데 약 10분 정도 안개입자가 성장하는

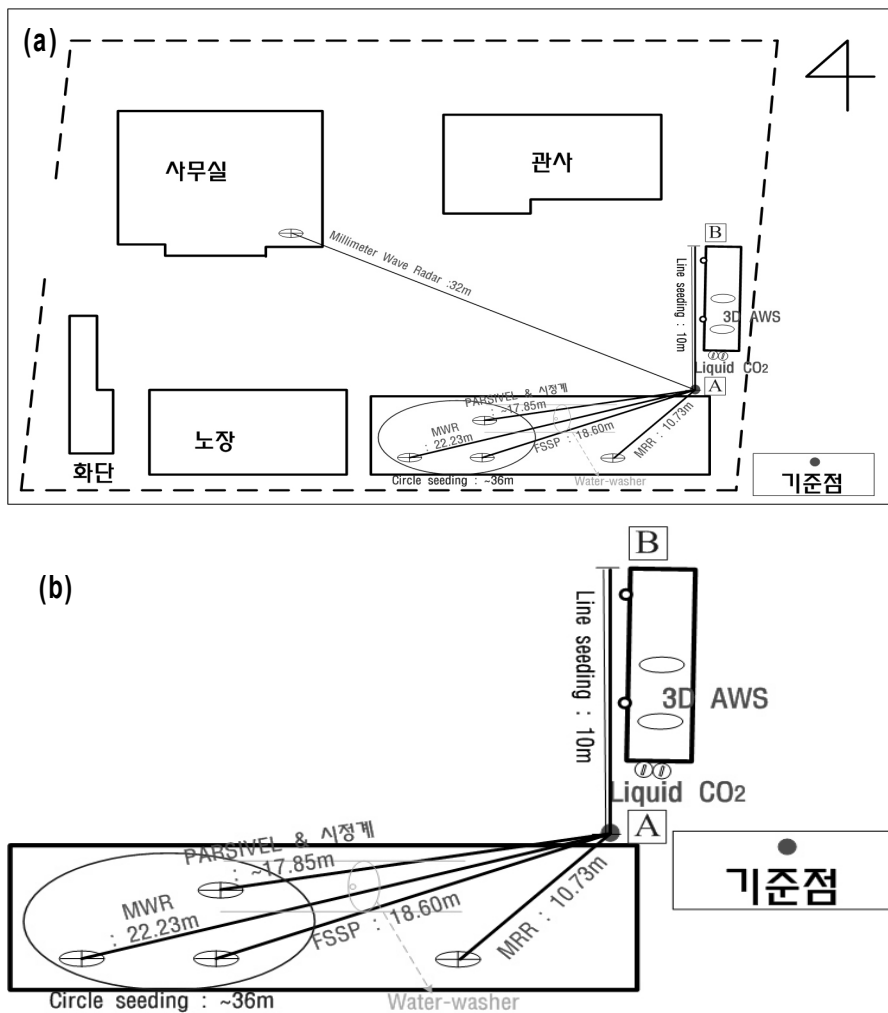


그림 3. 시딩 경로에 따른 안개소산 실험의 실험장비 및 관측기기 배치도

것을 관측할 수 있었으며 평균 13분간 약 1.4 배의 시정개선 효과를 보였다.

이 실험결과는 이론으로 예측한 안개소산 효과와 잘 부합되는 결과로 향후 공항이나 도로 등의 장소에서 이류안개에 대한 안개소산의 가능성을 엿볼 수 있게 하였다. 제 3장에서는 이 연구 결과에 대해 보다 자세히 살펴보도록 하겠다.

3. 최근 국내의 안개소산 실험

국립기상연구소에서는 2005년부터 2007년까지 자연 상태의 따뜻한 이류 안개를 소산시킬 수 있는 방법의 일환으로 흡습성입자 시딩 방법을 찾기 위해 지속적으로 유입하는 안개를 대상으로 1) 목표 지역의 주위를 순환하는 방법(원형시딩 방법)과 2) 안개 유입 방향의 직각으로 교차하는 방법(선형시딩 방법)에 대하여 안개소산 실험을 수행하였다. 실험 전과 후 효과분석을 위하여 시정계 또는 FSSP 환산시정계를 이용하였다. 측정된 실험 전에 대한 실험 후의 시정개선비(Visibility Improvement factor), 시딩의 효과가 최초로 나타나기까지 걸리는 시간(시딩효과시간), 그리고 시정이 개선되기 시작하여 지속되는 시간(시정개선시간)을 서로 비교분석하였다.

3.1 안개소산 실험 장소

안개소산 실험은 구 대관령 기상대(37°41'N, 128°45'E)에 구축된 “구름물리 선도관측센터”에서 실시되었다. 종관기상 관측장비 뿐만 아니라 특히 구름물리 관측을 위해 첨단 구름과 강수관측을 위한 측기가 설치된 이 사이트는 해발고도 842.52m의 고지대에 위치하고 있어 하층운과 안개가 빈번하게 발생해 구름 및 안개관측과 기상조절 실험을 하기에 최적 장소로 선정된 것이다. 그림 2는 이 장소의 지형과 이 장소로 안개가 이루하는 모습을 보여 주고 있다. 그림에서 붉은 원으로 표시된 지점이 이 사이트로써 붉은 화살표로 나타난 것과 같이 강릉시 부근의 동해안에서 발생한 안개와 산악에 의해 형성된 안개의 통과지점이다.

3.2 안개소산 실험 설계 및 관측요소

본 연구에서는 자연 상태의 이류 안개를 제거하기 위한 효과적인 실험 방법으로써 이동 시딩 방법이 고정 시딩 방법보다 비용대비 더 좋은 실험 방법이라고 간주한다. 따라서 보다 효과적인 동풍 유입 안개를 소산시킬 수 있는 이동 시딩 방법을 찾기 위해 이동경로에 따라 다른 두 개의 안개소산 시딩 방법을 테스트 해 보았다. 선형 시딩과 원형 시딩이 그것인데 말 그대로 선형 시딩은 안개 유입 방향(동풍)의 남북 방향으로 10m 직선거리를 흡습성 연소탄이 연소되는 2분 30초의 시간동안 선형으로 5회 왕복하는 시딩 방법이며 원형 시딩은 여러 관측기기 주변(목표지역)을 원 궤적(거리 약 36m)을 그리며 연소탄이 연소되는 시간동안 5회 왕복하는 시딩 방법이다. 각각의 실험은 전 시딩 실험의 효과의 상쇄에 필요한 최소한의 시간인 1시간 간격으로 실시하였다. 실험동안에는 FSSP, PARSIVEL 디스트로메타, 시정계, Ka밴드 레이더로부터 안개입자크기분포, 강수입자크기분포, 시정 그리고 레이더 signal to noise 등의 자료를 확보한다. 사용된 흡습성 연소탄은 미국 ICE사의 제품으로 실험에 의해 초당 약 0.5 × 1011개의 응결핵을 생산한다.

그림 3은 위 방법의 안개소산 실험을 실시한 사이트의 실험장비 및 관측기기 배치도를 나타낸 것이다. 이 그림의 동쪽 변에 있는 사각형은 컨테이너로서 내부에 관측 장비 서버와 실험에 필요한 장비가 있다. 이 사각형의 지붕에 있는 두 개의 원은 3차원 바람장을 관측할 수 있는 자동기상관측시스템(AWS)이다. 그리고 청색의 원은 염화칼슘 연소탄을 이용한 원형시딩의 경로를, A-B 표시는 선형 시딩 경로를 보여준다. 그림 4의 (b)는 (a)에서 관측 장비가 설치된 박스 부분을 확대한 것이다. 여기에서는 앞에서 설명한 원형 시딩과 선형 시딩 방법을 순서대로 EXP-1과 EXP-2로 표기하도록 한다.

그림 3의 남동쪽의 사각형에는 관측기들이 설치되어 있다. 이 상자의 남쪽 옆에는 오른쪽에서부터 마이크로강수레이더(MRR), 전방산란스펙트로메타(FSSP), 마이크로레디오메타(MWR)의 순서로

기들이 위치해 있다. FSSP의 앞에는 시정계와 디스트로메타(PARSIVEL)가 배치되어 있다. Ka 밴드 레이더는 사무실의 남동쪽 지붕에 설치하였다. 이 레이더의 해상도는 22.5 m로 레이더를 연소탄이 연소되는 동쪽(풍상측)을 향하게 하면 시간이 흐름에 따라 샘플링 되는 자료의 수가 매우 적어져 의미가 없게 되므로, 풍하측인 서남서쪽을 향하여 설치되게 하였다. 그리고 이 레이더의 자료처리기는 바로 아래 사무실에 설치하였다. 그림에서 관측기기의 배열이 선형 시딩의 경로인 지점 A-B의 중앙에 위치하지 못한 이유는 주요 관측기들이 본 실험 사이트인 대관령기상대가 신 대관령기상대로 이전하기 전에 설치되었는데 설치 당시 관사 마당에 관측기기를 설치하기에 무리가 따랐기 때문이다. 그리고 PARSIVEL 디스트로메타나 FSSP 등은 지상에서 3 m 높이에 설치하였는데 이 측기와 컨테이너 안의 서버를 연결하는 통신 라인과 전원 선을 지중에 매설하였기 때문에 측기를 이동하기 위해서는 전원, 통신라인의 재설치가 불가피 하므로 많은 시간과 비용이 소요될 것이 예상되어 측기의 이동을 실행하지 못했다. 이러한 한계 내에서 최대한의 효과를 얻기 위한 관측기기를 그림과 같이 배치하였다. 이와 같은 배치는 연소탄을 연소시킬 때 입자가 원뿔형으로 확산되는 점을 고려하여 선형 시딩의 기준점 A를 최대한 남동쪽으로 정하였으며, 관측기

기의 관점에서 입자가 최대 확산되는 효과를 가지는 지점인 B를 선형 시딩의 다른 끝 점으로 지정하였다.

실험기간 동안 FSSP를 이용하여 안개입자의 크기분포 스펙트럼의 변화를 관측하였다. FSSP로 측정된 안개입자들의 분포를 이용하면 시정을 환산하는 것이 가능하다. 안개에 의한 빛의 감쇠가 주로 Mie 산란에 기인한다는 이론(Köschmieder, 1924)에 의하여 시정 V 는 다음과 같은 식에 의해 계산될 수 있다.

$$V = \frac{3.912}{\sum_i \pi k_s N_i r_i^2}, \quad (1)$$

여기서 산란면적계수 k_s 는 보통 2의 값을 가지며 N_i 와 r_i 는 각각 i 번째 채널의 수농도와 입자 반경이다. FSSP의 입자크기 관측범위(2-47 μm 선택)에 제한이 있으므로 산출된 시정 V 값에는 관측오차가 포함될 수 있다.

그런데 안개의 시정이 개선되기 위해서는 안개 입자의 크기분포가 더 큰 입자크기와 더 작은 개수로의 이동하거나 안개 내 수액량(liquid water content)이 감소되어야 한다. 수액량이 일정하다고 가정하면, 시정개선도(visibility improvement factor) VF 는 대략적으로 초기시정(initial visibility)에 대한 최후시정(final visibility)의 비로 계산할 수 있다.

$$VF \approx \frac{\bar{r}_f}{\bar{r}_i}, \quad (2)$$

여기에서, \bar{r}_i and \bar{r}_f 는 각각 안개수적의 초기의 평균입자반경과 최후의 평균입자반경을 나타낸다. 시딩 전과 후의 입자크기분포가 주어지면, 시정개선도 VF 는 식 (2)로부터 도출 할 수 있다. 본 연구에서는 Jiusto et al.(1968)의 이론을 바탕으로 시딩 전과 후의 시정을 예측하여 이론적인 VF 값을 구할 수 있었으며 실제 안개소산 실험을 실시하여 시딩 전과 후의 시정을 관측하여 실험적인 VF 값 또한 얻을 수 있었다.

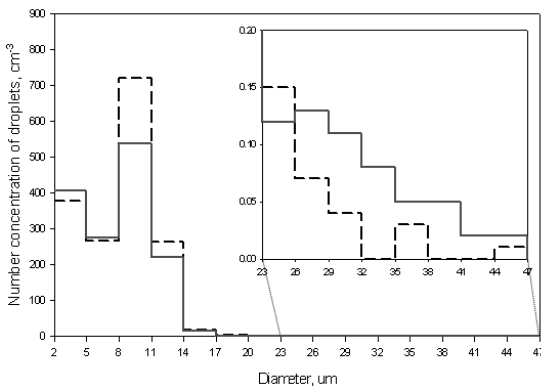


그림 4. 안개소산 실험 전(검은 점선)과 실험 후(붉은실선)의 FSSP로 관측한 안개입자 크기분포 비교

3.3 시딩 경로에 따른 안개소산 실험 결과

그림 4는 전형적인 실험 전과 후의 입자크기분포의 변화를 측정한 것이다. 그림을 보면, 시딩 후 안개입자의 크기분포가 큰 입자 쪽으로 이동하였음을 알 수 있다. $26\mu\text{m}$ 이하의 작은 입자의 개수가 감소하고 $26\mu\text{m}$ 이상의 큰 입자의 개수가 증가하였다. 이러한 입자크기분포 스펙트럼의 이동은 응결 과정(condensation process)의 강화에 의해 기인하는데 Jiusto et al. (1968) 논문의 실험실 규모 안개소산 실험의 결과와 일치하며 이를 통해 시딩이 개선되는 결과가 초래되었다.

그림 5와 그림 6은 각각 EXP-1과 EXP-2의 기상 변수들의 시계열을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이, 두 실험의 초기 기상조건(약한 연직 풍속을 동반한 약한 동풍계열 안개)은 유사하다. 그림 5의 (c)와 그림 6의 (c)는 각 실험의 FSSP에서 산출된 시딩의 시계열 변화를 보여주고 있다. 여기서 염화칼슘 연소탄 시딩 후 첫 번째 피크가 있기 전까지 걸리는 시간을 시딩효과시간(impact time)이라 정의하는데

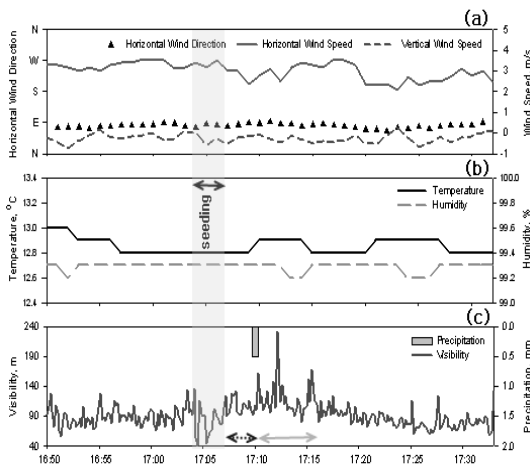


그림 5. EXP-1(원형시딩)의 관측자료 시계열 : (a) AWS 관측 3차원 풍향과 풍속, (b) AWS의 온도와 습도, 그리고 (c) FSSP 환산시딩과 AWS 관측 강수량. (c)의 파란색 점선 화살표는 시딩효과시간(impact time)이며 보라색 실선 화살표는 시딩개선시간(visibility improvement period)을 나타낸다.

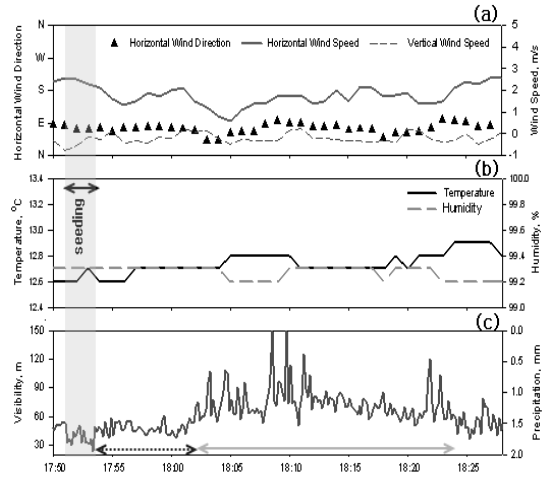


그림 6. EXP-2(선형시딩)의 관측자료 시계열.

그림을 보면 시딩효과시간 후 시딩이 지속적으로 개선되는 시간이 존재함을 알 수 있다. 이 시간을 시딩개선시간(the visibility Improvement period)이라고 정의하고 실험간 비교를 해 보면, EXP-2의 시딩개선시간이 EXP-1보다 더 길다는 것을 알 수 있다. 그림 5의 (c)를 보면 EXP-1의 시딩 그래프에서 첫 번째 피크가 나타날 때 5mm의 강수도 같이 관측된다. 명확하지는 않지만 이 강수는 시딩에 의해 발생한 것으로 추론할 수 있다. 이 부분에 대한 논의는 인공증우에 대한 잠재적 가능성을 검증하는 추가적인 실험 등을 필요로 하는 바이다. 본래 염화칼슘 연소탄은 항공 시딩에 의한 인공증우를 목적으로 개발된 제품이다.

표 1은 시딩효과시간, 시딩개선시간, VF 에 대해 각기 다른 경로의 안개소산 시딩 실험 결과와 Jiusto et al. (1968) 논문의 안개소산 알고리즘을 적용한 이론적 예측 결과를 서로 비교 정리해 놓은 것이다. EXP-1과 EXP-2의 실제 실험 결과를 보면, 두 실험 평균 13분의 시딩개선시간동안 약 1.38배 시딩이 개선되었다. 그리고 각 실험의 시딩개선도 VF 는 이론적 예측치와 잘 일치하고 있다. 한편 EXP-2의 시딩개선정도는 EXP-1의 시딩개선정도보다 일반적으로 더 크게 나타나는데 이는 시딩개선시간에서 더 두드러진다. 그러나 EXP-1은

표 1. EXP-1과 EXP-2의 시정개선 결과의 실제 실험치와 이론치의 비교

	EXP-1		EXP-2		두 실험 평균	
	실험치	이론치	실험치	이론치	실험치	이론치
시딩효과시간 (분)	3.00	-	8.33	-	5.67	-
시정개선시간 (분)	6.33	-	19.67	-	13.00	-
평균 시정개선비	1.29	1.49*	1.47	1.32*	1.38	1.41
최대 시정개선비	2.50	-	2.00	-	2.25	-

EXP-2에 비해 더 짧은 시딩효과시간과 더 높은 최대 VF 값을 보인다. 이는 원형 시딩 경로(circulating seeding path)에 비해 선형 시딩 경로(crossing seeding path)의 안개소산 효과는 느리게 그리고 약하게 나타나나 더 긴 시정개선시간을 보인다는 것을 의미한다.

실험결과의 분석을 통해 자연 상태의 이류 온 안개를 소산하기에 효율적인 이동 시딩 방법은 공항에서 발생하는 안개를 제거하는데 적합할 것이다. 이 방법을 이용한 비행기 이·착륙시 요구되는 최소 시정값 이상의 시정 향상은 분당 하나의 활주روه 한 대의 비행기가 이륙 혹은 착륙할 수 있을 것으로 추정된다(Communication, Joon-Hyen Ahn, 2006). 일반적으로 공항에서는 긴 시딩개선시간과 안정적인 시정개선비를 더 요구하게 되므로 시딩 경로에 따른 안개소산 민감도 테스트 결과를 고려했을 때 지속적으로 유입되는 이류 안개에 대해서는 선형 시딩 경로가 더 적합한 방법이라고 판단된다. 대조적으로 다리나 교량 위의 도로 같이 좁은 지점에서 빠른 안개소산이 필요한 경우에는 목표지역 주위를 순환하는 원형 시딩 방법이 추천된다.

4. 안개소산 실험 요약 및 결론

안개소산 기술은 공항과 고속도로 등에서 활용하면 시정 악화에 따른 사고의 위험성을 감소시킬 뿐만 아니라 회항 또는 감속에 따른 연료 및 시간 감축으로 경제적으로 미치는 파급효과가 크다. 그러므로 꼭 필요한 기술이라고 할 수 있다. 미국은 유타, 워싱

턴, 오레곤주에서 안개소산 실험 프로젝트를 실시하였으며, 특히 민, 군 비행장에서 활발히 진행되고 있다. 러시아는 수문기상청의 중앙고층기상대 주관으로 러시아의 주요 공항에서 실험이 다수 실시되었으며 최근 이탈리아와 공동으로 이탈리아의 고속도로에서 안개 소산 실험을 실시하고 있다. 그 외 노르웨이, 영국, 중국 등에서도 실험을 위한 기초연구가 이루어지고 있다. 한편 국내에서는 국립기상연구소를 중심으로 2005년부터 안개소산 기술에 대한 이론 연구 및 소규모의 실험을 착실히 수행하고 있다.

우리나라는 국립기상연구소를 중심으로 2005-2007년도 대관령에서 실시한 봄철 온안개소산 실험은 보다 효과적인 자연 상태의 따뜻한 이류 안개를 소산시킬 수 있는 흡습성입자의 이동 시딩 방법을 찾기 위한 목적으로 실시되었다. 본 연구에서는 지속적으로 유입하는 안개에 대해 소산 목표지역의 주위를 순환하는 방법(원형 시딩 방법)과 안개 유입 방향의 직각으로 교차하는 방법(선형 시딩 방법), 이 두 가지의 시딩 경로에 따른 시정 개선의 민감도 테스트를 실시하였다. 그 결과 이류안개에 대해서 직선 시딩 방법은 장기간의 시정개선시간을 가지므로 공항과 같이 넓은 지역의 이류안개 절감에 보다 적합하며 원형 시딩 방법은 빠르고 강한 시정개선 효과를 나타내므로 좁은 지역에 더 적합한 것으로 판단 할 수 있다.

앞으로 각 경로에 대한 추가적인 실험과 최적의 시딩 농도(연소탄 이동 속도와 안개소산 지역의 효율적인 범위)에 대한 조사 등의 연구가 필요하다. 또한 연소탄이 연소되는 동안 시딩한 흰색 흡습성 입자에 의해 일시적이지만 악화되는 시정 때문에 새로운 투명한 흡습성 물질을 찾기 위한 노력도 필요하다.

기상조절의 여러 방법이 현재 시도되고 있지만 기상현상의 그 복잡함으로 인해 실험 실시에 앞서 대상지역 및 목적에 따른 구름물리에 대한 이해, 적합한 설치 장비에 대한 기술개발 등이 선행되어야 한다. 또한 실험 전, 구름에 대한 정확한 예측 및 정보가 필요하다. 보다 과학적인 안개소산 실험 및 시스템을 구축하기 위하여 아직도 주변 기술의 발전이 또한 필요하다.

기상 이변에 의한 피해가 날로 증가하는 것으로 볼 때 미래에는 기상조절의 필요성이 더욱 절실해질 것이다. 따라서 미래에 쾌적하고 건강한 삶을 구현하기 위해서는 기상조절 기술에 투자가 필요하다. 대부분의 과학기술이 그렇듯이 선진국들은 최신 실험자료 등을 공개하고 있지 않고 있으며, 기술 격차를 키워 핵심기술을 팔아먹고 있다. 인공증설 및 안개소산 실험에 사용되는 소모품인 연소탄 1개의 단가는 약 20만원 정도이며 이를 공항 등의 넓은 지역에 사용할 때 기하급수적인 이익을 얻는 것이다.

안개소산 등의 기상조절기술은 인류 역사 이래 꿈꿔 온 분야지만 실제적 규모의 기상조절에 대해서는 지속적인 실험 및 통계적 검증연구가 필요하다. 그래서 대부분의 선진국들은 5개년 계획(중국 11차 5개년, 일본 1차 5개년 계획)으로 기술개발하고 있다. 기상청 국립기상연구소 기상조절연구그룹은 연구 인력을 확충하고 지속적인 실험 기술개발에 매진하고 있으며, 안개로 인한 항공기결항 및 충돌사고, 가뭄 및 태풍 피해 등이 먼 옛날 이야기가 되고자 하는 꿈을 차곡차곡 실행해 나가고 있다.

- 참고문헌 -

1. Appleman, H.S., and F.G. Coons, Jr., 1970, "The use of jet aircraft engines to dissipate warm fog", J. Appl. Meteor., Vol. 9, pp. 464~467.
2. Cha J.W., K.H. Chang, J.Y. Jeong, H.Y. Yang, Y.H. Cho, M.J. Lee, G.M. Park, J. C. Nam, 2005, "Microphysical cloud observation and fog dissipation experiment at Daegwallyong site", METRI Newsletter, Vol. 4, No. 39, pp. 4~7.

3. Chang, K.H., M.J. Lee, J.Y. Jeong, H.Y. Yang, J.W. Cha, K.M. Park, and S.N. Oh, 2007, "An experimental study for the hygroscopic-particle moving seeding method to dissipate natural advection fog", J. Korean Meteor. Soc., Vol. 43, No. 3, pp. 299~303.
4. Jiusto, J.E., R.J. Pille, and W.C. Kocmond, 1968, "Fog modification with giant hygroscopic nuclei", J. Appl. Meteor., Vol. 7, pp. 860~869.
5. Köschmieder, H., 1924, "Theorie der horizontalen Sichtweite", Beilr Phys. Atmos., Vol. 12, pp. 33~53.
6. Kunkel, B.A., 1979, "A modern thermo-kinetic warm fog dispersal system for commercial airports", J. Appl. Meteor., Vol. 18, pp. 794~803.
7. Larry, V., E.D. Figgins, and H.S. Appleman, 1971, "Operational dissipation of supercooled fog using liquid propane", J. Appl. Meteor., Vol. 10, pp. 515~525.
8. National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), 1998. "Synthesis 228: Reduced visibility due to fog on the highway, a synthesis of highway practice", TranSafety, Inc., pp. 57.
9. Möller, D., W. Wieprecht, J. Hofmeister, D. Kalass, F. Elbing, and M. Ulbricht, 2003, "Fog dissipation by nucleation scavenging using particle blasting". Eight WMO scientific conference on weather modification, Casablanca, Morocco. WMP report no. 39, pp. 389~392.
10. WMO-Executive Council Panel of Experts / CAS Working group on Physics and Chemistry of Clouds and Weather Modification Research, 2000: Report. Geneva, Switzerland, 20-24 November 2000, WMP report series n° 36, WMO/TD No. 1059, pp. 151.
11. 장기호, 오성남, 정기덕, 양하영, 이명주, 정진임, 조요한, 김효경, 박균명, 염성수, 차주완, 2007, "구름물리 관측시스템 및 산출물 검증", 대기지, Vol. 17, No. 1, pp. 101~108.