

기상조절(인공강우와 안개저감)의 경제적 가치 추정 연구

이철규 · 장기호* · 차주완 · 정재원 · 정진임 · 양하영 · 서성규 ·
배진영 · 강선영 · 최영진 · 조하만 · 최치영
기상청 국립기상연구소

(2010년 3월 26일 접수; 2010년 5월 26일 승인)

Estimation for the Economic Benefit of weather modification (Precipitation Enhancement and Fog Dissipation)

Chulkyu Lee, Ki-Ho Chang*, Joo-Wan Cha, Jae-Won Jung, Jin-Yim Jeong,
Ha-Young Yang, Sung-Kyu Seo, Jin-Young Bae, Sun-Young Kang,
Young-Jean Choi, Ha-man Cho and Chee-Young Choi

National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration
(Manuscript received 26 March 2010; in final form 26 May 2010)

Abstract

We estimate the economic benefit of weather modification (precipitation enhancement and fog dissipation) by assuming its operation for the considered regions. Based on the statistical data, the economic benefit of the virtually operational precipitation enhancement experiments for the Andong and Imha basins, where the natural precipitation is relatively lack in South Korea, is calculated 348 for the water resources, 22,458 for forest fire prevention, and 28,458 million won/year for the drought relief. The benefit of the fog dissipation operation for the Incheon International Airport is estimated 7,365 million won/year for the flight delay due to fog. The calculated ratio of benefit to cost for precipitation enhancement operation for the basins is 14.07, which is comparable to that conducted in other countries.

Key words: weather modification, precipitation enhancement, fog dissipation, estimation of economic benefit

1. 서론

최근 기후변화 등에 의한 이상기상 현상으로 가뭄, 홍수로 인한 피해가 급증하는 추세이다. 이 중 가뭄 발생은 물부족 사태를 초래하여 사회전반에 악영향을 미친다. 또한 우리나라는 2000년대 이후 국민생활수준의 향상과 도시화 및 산업화의 가속화로 용수 수요가 지속적으로 증가하고 있어 미래 물공급에 대한 우려가 있다. 이러한 이유로 수자원의 확보와 용수의 안정적 공급 및 체계적 관리에 대한 필요성이 더욱 커지고 있다. 수자원

은 다른 사회간접자본과는 달리 대체할 수 있는 수단이 없기 때문에 정부는 댐 건설에 의한 수자원 확보정책을 지속적으로 추진해 왔다. 그러나 이 정책은 댐 적지 감소, 환경문제, 수물보상비의 상승 등으로 곤란한 상황에 직면해 있다. 이러한 시점에서 부족한 물을 충당하기 위해서 새로운 대체수자원 개발이 필요하다.

주로 논의되는 대체수자원 확보 방안에는 지하댐, 강변여과수, 해수담수화, 해양심층수, 인공강우 등이 있다. 그 중 인공강우란 구름층은 형성되어 있으나 대기 중에 응결핵 혹은 빙정핵이 적어 구름 방울이 빗방울로 성장하지 못할 때 인위적으로 인공의 구름씨를 뿌려 특정지역에 강수를 유도하거나, 과냉각수적을 자연적인 상태보다 빨리 동결시켜 잠열 방출에 의한 구름내부의 상승류가 강화되어 자연적인 강우량에 비해 더욱 많은 강수를 유발하는 것이다. 인공강우는 개발에 따른 환경문제를 최소화하며 비교적 적은 비용으로

*Corresponding Author: Ki-Ho Chang, Hydrometeorological Resources Team, National Institute of Meteorological Research, Korea Meteorological Administration, Seoul 156-720, Republic of Korea.
Phone: +82-2-6712-0353, fax: +82-2-841-0787
E-mail: khchang@korea.kr

수자원을 확보하고 가뭄 피해를 경감케 하는 방안이 될 수 있다. 우리나라는 이상가뭄 및 수자원 부족에 대비하기 위하여 지난 1995년부터 인공강우 기술을 통한 강수 증가의 가능성을 연구해오고 있다.

한편 오늘날 물류량 증가, 교통·통신 발달 및 대기오염 증가 등에 따라 공항 및 교량, 도로에 발생하는 안개로 인한 인적, 경제적 피해 또한 심각하다(김지영 등, 2000; 임현호 등, 2005; 박종길 등, 2007). 따라서 대형 사고로 이어지는 교통안전 분야에서 안개 문제의 해결은 필수적이다. 안개소산은 열, 바람, 화학물질 등을 이용하여 공기 중에 부유하는 안개입자를 증발 또는 낙하시켜 시정을 개선하는 기술이다. 안개소산 기술을 공항 및 고속도로 등에서 활용하면 시정 악화에 따른 사고의 위험성을 감소시킬 뿐 아니라 연료비 절약 및 시간 감축 등으로 사회·경제적으로 미치는 효과가 크다.

인공강우, 안개소산 등 기상조절은 전 세계적으로 37개 국가에서 150개 이상의 기술개발 또는 실용화 프로젝트가 수행되고 있다(UCAR, 2008). 이는 기상조절이 국가적으로 필요한 기술로서 많은 경제적 이익이 보고되고 있기 때문이다(예, Griffith and Solak, 2002; Griffith et al., 2007). 그러나 항공기 등 초기인프라 비용이 크게 들기 때문에 기상조절 기술개발을 기후변화 및 국내 수자원 부족에 대응하는 국가 전략 기술로 추진하기 위해서는 우선적으로 기상조절 기술에 대한 경제적 가치를 기존 실험결과를 바탕으로 추산할 필요가 있다.

국내에서 안개, 가뭄 등에 관한 경제적 피해에 대한 연구는 다소 있었다. 김포공항의 안개로 인한 항공기 지연 및 결항으로 연평균 약 1,000 억원의 손실이 발생하고 있는 것으로 추산되었으며(Chang, et al., 2007; 박종길 등, 2007), 2009년 태백지역에 대한 가뭄사태에 대하여 정신적 보상금액을 제외한 일상생활 피해금액, 산업 피해금액, 공공부분 피해금액을 합산하여 총 519.5억원의 피해액이 산정되었다(태백시, 2009). 그러나, 기상조절의 경제적 효율에 대한 체계적 연구가 부족하였다.

기상조절 기술개발은 장기간에 걸친 실험이 수반되어야 하고 인공강우에 의해서 확보되는 수자원 양에 대한 평가와 농업, 공업 등 간접적 효과에 대한 객관적인 경제성 평가가 매우 어렵다. 안개저감에 의한 편익 또한 단순히 시정개선으로 인한 이익 이외에도 다양한 정성적 효과가 있으나 객관적인 효과 입증이 어렵다. 따라서, 본 연구에서는 기상조절에 의한 정성적, 간접적 경제적 효과는 가급적 배제하고 기존의 실험결과를 적용한 경제적 이득에 관하여 논하고자 한다.

본 연구에서는 우리나라 대표적 물부족 지역인 안동·임하댐 지역(한국수자원공사, 1998)을 대상으로 인공강우를 수행할 경우에 대하여 직접적인 피해액 또는 통계자료를 근거한 수자원 확보, 산불방지 효과, 가뭄 피해 저감효과의 부문에서 편익을 산정하였고, 사회적 비용 지불 의사와 같은 사회적 파급효과에 따른 편익은 수도권 대상으로 대기질 개선 효과 측면에서 산정하였다(KEARY 등, 1998). 또한 안개 피해 규모가 가장 크다고 사료되는 인천공항을 대상으로 안개저감(시정개선)을 실시할 경우에 대하여 항공기 이착륙 지연의 개선에 대한 직접적인 피해액 감소 측면에 대해서 경제적 가치를 산정하였다. 전용항공기 도입 및 운영 비용, 유효범위측정 등을 위한 지상 인프라 등 기상조절 실험실시에 필요한 총비용을 산정하고 최종적으로 기상조절의 비용대비 편익분석을 산정한다.

2. 인공강우 및 안개저감

2.1 인공강우

인공강우는 응결핵 또는 빙정핵이 적어 구름방울이 빗방울로 성장하지 못하는 구름에 인위적으로 응결핵이나 빙정핵으로 작용할 수 있는 인공의 구름씨를 뿌려 원하는 지역에 강수를 내리게 하는 기술로 구름의 온도에 따라 적용되는 실험 방법과 구름씨가 달라진다. 일반적으로 한랭구름(0°C 이하의 구름)에는 빙정핵 및 냉각물질을 이용한 시딩방법(Glaciogenic seeding)을 이용한다. 이는 빙정핵(예, AgI)이나 냉각물질(예, 드라이아이스)을 시딩하여 구름 속 과냉각 물입자를 얼음으로 전환시켜 빙정을 생산하거나 강화시키는 방법으로 접근방식에 따라 정적시딩(Static seeding)과 동적시딩(Dynamic seeding)으로 나뉜다. 정적 시딩은 미세물리과정에 초점을 두며 구름발달 초기단계에서 시딩을 한다. 따라서 빙정의 수를 늘리고 초기강수 과정을 촉진시킨다(Deshler et al., 1990; Ryan and King, 1997). 동적 시딩은 과냉각물입자를 얼음으로 전환시켜 구름 내 부력을 강화시킨다(Krauss et al., 1987; Rosenfeld and Woodley, 1993). 이는 구름의 생명을 길게 하여 보다 많은 강수를 생산한다.

우리나라의 인공강우는 1963년 동국대학교 양인기 교수팀이 지상 연소실험과 드라이아이스를 이용한 항공실험을 시도한 것이 시초이다(Yang, 1965). 그 후 32년 동안 투자 부족 등의 이유로 실험이 중단되었다가

1994~1995년, 2001년 발생한 가뭄을 계기로 필요성이 대두되어 기상청 국립기상연구소를 중심으로 현재까지 연구가 이어지고 있다.

2.2 안개저감

안개저감은 작은 물방울(0.001-0.1mm)로 구성된 안개(부유 물입자)를 인위적인 방법을 이용하여 저감시키는 기술을 말한다. 안개는 기온에 따라 찬 안개와 따뜻한 안개로 구분된다. 냉안개는 기온이 0°C 이하인 경우의 안개를 말하며, 이를 제거하기 위해서는 인공강우의 인공 빙정핵 뿌리기 또는 급격한 온도강하를 통한 과냉각 과정 강화 방법 등이 적용될 수 있다. 온안개에 대해서는 현재 효율성 있는 제거 방법이 연구·보고 되고 있지 않으나(WMO, 2000), 안개입자를 비가 될 정도로 성장시키거나 반대로 열을 이용하여 증발시켜 버리는 방법에 대한 연구개발이 진행되고 있다. 이러한 기술은 안개소산의 효과가 시스템을 작동 시에만 나타나고 시스템을 정지시키면 다시 주변의 안개가 물려들어오는 등의 단점이 있다. 따라서, 완벽하게 안개를 제거하기 위해서는 보다 큰 에너지가 필요할 것으로 사료된다. 그리고 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.

우리나라는 봄, 가을철에 안개가 많이 발생하며 영하로 기온이 떨어지지 않기 때문에 따뜻한 온안개가 대부분이다. 따라서 우리나라에 필요한 기술은 온안개 제거법이다. 국립기상연구소에서는 흡습성물질 연소탄(주요성분 염화칼슘(CaCl₂))을 이용한 시딩 방법으로 온안개 저감방법을 연구하고 있다. 자연 상태의 이류 온안개를 소산하는데 가장 효과적인 흡습성물질 시딩 방법을 찾기 위해 대관령 구름물리선도센터(37°41'N, 128°45'E)에 유입되는 동풍의 이류안개를 대상으로 실험을 수행하여, 안개저감실험 24회 평균 28%의 시정 개선 효과를 보았다(정진임 등, 2009; Lee et al., 2009).

3. 경제적 가치 산정

3.1 인공강우

인공강우는 수자원이 부족한 유역을 대상으로 실시

함으로써 저수 부족 등에 따른 가뭄발생을 예방할 수 있으며 그에 따른 편익이 발생할 수 있다. 또한 인공강우는 유역 내에 댐, 저수지 같은 중량급 시설물 설치 및 운용 없이 수자원 부족량을 메울 수 있어 대체시설에 의한 편익 또한 존재하게 된다. 그러나 이러한 많은 편익에 대한 경제적 가치를 정량적으로 평가하는 것은 매우 어려운 일이다.

따라서, 본 연구에서는 국내에서 일강수량이 가장 적은 지역인 경북지역(한국수자원공사, 1998)의 주요 유역인 안동·임하댐 상류유역(총 유역면적 2,945 km²)에 인공강우 실험을 1년간 실시한다는 가정 하에 크게 직접적 피해액 또는 통계자료를 근거한 방법과 사회적 비용 지불 의사를 이용하는 방법 두 가지로 구분하여 경제적 가치를 산정하였다. 전자의 경우로 안동·임하댐 수자원 확보, 산불방지 효과, 가뭄피해 저감 효과의 세 가지 측면에서 편익을 산정하였으며, 후자의 경우로써 수도권 대기질 개선 효과의 측면에서 편익을 산정하였다. 표 1은 산정된 연평균 경제적 가치를 보여준다.

1) 수자원 확보

수자원 확보 측면에서의 경제적 가치(EV, 단위 백만원/년)는 용수확보(RW = 0.00693백만원/km²-mm), 발전량(EP = 0.008백만원/km²-mm), 수질개선(WQ = 0.00621백만원/km²-mm), 이취물질감소(OF = 0.00764백만원/km²-mm)에 대해서 식 (1-1, 1-2)과 같이 산정된다(차기욱, 2009).

$$EV = (RW + EP + WQ + OF) \times RF \quad (1-1)$$

$$RF = AR \times RFR \times F \times N \quad (1-2)$$

식(1-1)에서 연평균 인공강우량(RF, 단위 mm)은 식(1-2)와 같이 계산된다. 식(1-2)에서 AR은 시범지역 유효면적(1,260 km²), RFR은 평균인공강우량(0.56 mm), F는 평균실험성공율(0.43)이다. N은 연간 인공강우 실험 가능 횟수(40회/년)로써 매년 12월~5월 중에 실시된다. 평균인공강우량은 인공강우 성공사례(3회)에 대한 평균 증우량으로 0.56 mm 이 적용되었다(국립기상연구소, 2009; 기상청, 2009a). 2008년~2009년 총 7회의 AgI 시딩의 인공강우실험 중 3회를 성공하였다(국립기상연구소, 2009; 기상청, 2009). 인공강우 성공기준은 자연강수(지상레이더 반사도) 유입이 없는 상황에서 평균 1시간 내외(15분~2시간)사

Table 1. Yearly benefits from weather modification

Category	Field	Benefit (million won/year)	Reference
Precipitation enhancement ¹⁾	Water resources	84	차기욱(2009)
	Electric power generation	97	차기욱(2009)
	Water quality improvement	75	차기욱(2009)
	Off-flavor reduction	92	차기욱(2009)
	Forest fire prevention	22,458	산림청(2009)
	Drought relief	28,458	김백조(2009)
	Air quality improvement	5,689	김백조(2009)
Fog dissipation ²⁾	Improvement of flight delays	7,365	한국공항공사 (2008) 박종길 등(2007)
Sum		58,629 ³⁾ (64,318)	

¹⁾ Precipitation enhancement experiment near the Andong and Imha dams.

²⁾ Fog dissipation experiment at the Incheon international airport

³⁾ It does not include the benefit by air quality improvement for the clean area such as the Andong and Imha basins.

이에 인공강우 목표지역에서 지상강수와 실험전후 항공레이더 변화가 발생한 경우만 해당한다. 인공강우 총 7회의 실험에 대한 성공한 3회에 평균실험성공률을 계산하였고, 성공한 3회에 대해서 평균 증우량을 계산에 적용하였다. 연간 인공강우 실험 가능 횟수는 1983년부터 2008년(26년)간 안동기상대 구름관측 자료를 이용하여 12월~5월 사이에 40%이상의 중·하층 적란운계열 일수(26.1%, 적란운계열 42.8%)에 대하여 하루에 2회 실험 실시 기준으로 계산하였다.

수자원공사의 원수판매량기준(용수단가 48원/톤)을 이용하여 수자원 확보 측면에서 산정된 안동 및 임하댐 유역에 대한 인공강우의 수자원 확보측면의 경제적 가치는 연간 348백만원으로 산정되었다.

2) 산불방지 효과

2008년 7월부터 2009년 3월까지 평년보다 적은 강수량을 기록하면서 전국적으로 가뭄과 함께 건조한 날씨가 지속되면서 산불이 빈번하게 발생하였다. 특히 2009년 4월의 경우 강수가 발생하기 직전인 19일까지 해안 지역을 제외한 전국 대부분 지역의 실효습도가 50% 이하를 유지되면서 총 193건의 산불이 발생하였다. 2009년 4월 20일~21일의 강수(전국평균 37.71mm)이후 10일간 전국적으로 산불발생이 없었던 것이 보고되었다(기상청, 2009b; 김백조, 2009). 이 결과로부터 1mm의 강수는 0.265일간의 산불예방효과가 있는 것으로 추정된다. 이에 입각하여 인공강우로 인한 산불예방의 경제적 가치(FV, 단위 원/년)를 식 (2)와 같이 산정한다.

$$FV = (PV + TV) \times RF \times PR \quad (2)$$

산림의 면적당 가치는 공익가치(PV, 10,307,652원/ha)와 목재가치(TV, 2,502천원/ha)의 합으로 계산하였다. 면적당 공익가치는 산림청 2005년 공시 자료의 산림 총 공익가치(659,066억원)를 산지총면적(6,393,949ha)을 나누어 계산하였고, 면적당 목재가치는 1998~2003년 산림청 통계자료에 나타난 산불에 의한 입목피해액을 피해면적으로 나누어 산정하였다. 1mm 강수의 산불방지율(PR)은 1mm강수 산불방지일수(0.265일)/실험기간(6개월, 12-5월)로 계산하였다. 산불방지 측면에서 경제적 가치는 연간 22,458백만원으로 산정되었다.

3) 가뭄피해 저감 효과

가뭄이 지속된 지역에서 강수는 주요한 수자원으로서의 역할뿐만 아니라 가뭄해갈이라는 자연재해 경감 효과를 가진다. 즉, 가뭄지역에 대한 강수의 가치는 강수 뿐만 아니라 가뭄해소에 따른 사회·경제적 기회비용 절감도 가치평가의 대상이 될 수 있다. 그러나, 가뭄은 지속시간에 따라 농작물 피해와 지역주민의 생활불편이 다르게 평가되기 때문에 피해액 산정이 불명확하다. 특히 가뭄발생시 제한급수 등으로 주민들이 겪는 생활상의 불편은 자원재화의 효율적인 한계가격이나 수요측정을 위한 자료를 얻을 수 있는 직접적인 시장이 존재하지 않는다. 따라서 본 연구에서는 가뭄피해비용 저감가치(DV, 단위 원/년)를 식 (3)과 같이 연평균 봄가뭄주기(DO = 2.5년), 인공강우로 인한 가뭄해소율(DS), 가뭄피해비용(DP)을 고려하여 계산하였다.

Table 2. Cost for precipitation enhancement experiments over Andong and Imha basins.

	Building cost (million won)	Annual cost (million won)
Aircraft and airborne instrumentation	15,000	2,038 ¹⁾
Operation and management	-	1,000
Ground-based instrumentation	4,470	607 ¹⁾
Sum	-	3,645

¹⁾Assuming the use for 10 years.

$$DV = \frac{1}{DO} \times DS \times DP \quad (3)$$

봄가뭄 주기는 기상청 전국 강수량측자료를 이용하여 최근 10년(2000~2009년) 동안 1~6월 사이에 평년대비 30%이하의 강수량이 한달 이상 지속된 해를 기준으로 산정하였다. 최근 10년간 평균 2.5년(10년/4회) 주기로 2000년(평년대비 16% 강수량, 2~5월), 2001년(평년대비 10%, 3~6월), 2006년(평년대비 26%, 3월), 2009년(평년대비 24%, 1~6월)에 봄가뭄이 발생하였다. 인공강우로 인한 가뭄해소율은 연평균 인공강우량(RF)/가뭄해소강우량(37.71mm, 기상청(2009b), 김백조(2009))에 의해서 계산하였다. 가뭄피해비용은 가구당 하루 가뭄피해비용(10,722원, 박상덕과 김만재(2009)), 경북총가구수(555,910가구; 안동과 임하댐은 경북의 주요급수원임), 가뭄일수(30일, 최소일수로 가정)의 곱으로 계산하였다. 가뭄피해 저감측면에서 산정된 경제적 가치는 연간 28,458 백만원이다.

4) 대기질 개선 효과

대기오염은 인체 및 자연생태계 파괴와 같은 물리적 피해를 줄 뿐만 아니라 주변 환경의 쾌적성 감소에 따른 사회 심리적인 부분에도 영향을 미친다. 일반적으로 강수는 응결침적과정을 통하여 대기 중 미세먼지 및 기체상오염물질을 제거한다(Rosenfeld, 2000; Rosenfeld et al., 2002). 따라서 대기오염도가 개선되는 정도에 따른 사회적 비용 지불의사를 산출하여 강수에 따른 경제적 가치를 산출할 수 있다. 본 연구에서는 수도권 내 대기질 개선 측면은 미세먼지 및 기체상 오염물질 제거를 통한 대기질 개선 가치(0.4734백만원/km²-mm)(기상청, 2009b; 김백조, 2009)와 연평균 인공강우량의 곱으로 계산하였다. 대기질 개선 측면에서 인공강우에 대한 경제적 가치는 연평균 5,689백만원으로 산정되었다.

3.2 안개저감

안개저감기술의 경제적 효과 산정은 인천공항을 대상으로 항공기 지연으로 인한 비용저감 측면에서 수행되었다. 시간당 운송원가에 근거한 항공사 연간운송손실(TL)과 근로시간당 생산을 반영한 연간승객편익(PP)을 산출하여 안개로 인한 항공기 지연 손실액을 계산하였다. 인천공항에 안개저감 실험 실시에 따른 연간 경제적 편익(LV, 단위 원/년)은 항공기 지연으로 인한 총 손실액에 안개저감(시정개선) 기술 적용을 통한 항공기 지연개선 확률(AP)을 고려하여 식 (4)와 같이 계산되었다.

$$LV = (TL + PP) \times AP \quad (4)$$

여기서 TL은 한국공항공사 통계자료에 따라 안개로 인한 항공기 이착륙 지연시 평균대기시간(45분/편), 운송원가(16,270,000원/시간), 그리고 국적기 평균 지연편수(1013편/년)의 곱으로 산정되었다. PP는 국적기평균승객(149명/편), 국적기 평균지연편수(1013편/년), 그리고 승객편익(266,650원/명)(박종길 등, 2007)의 곱으로 계산되었다. 안개저감(시정개선) 기술 적용을 통한 항공기 지연개선 확률은 식 (5)와 같이 계산하였다.

$$AP = \frac{BT}{BI}, \quad (5)$$

여기서 BT는 2006~2008년도 인천공항 시정값이 비행 가능 최저치 이하인 경우의 수이고, BI는 BT 중에 안개저감에 의한 시정의 28%(정진임 등, 2009) 개선에 의해 비행이 가능한 경우(비행기상최저치/1.28 < 시정 < 비행기상최저치)의 횟수이다. 본 연구에서는 인천공항 15R 활주로의 비행기상최저치(착륙시 Runway

Table 3. The ratio of benefit to cost for precipitation enhancement experiments over Andong and Imha basins.

Annual benefit (million won/year)	Annual cost (million won/year)	Benefit to cost ratio
51,264	3,645	14.07
56,953 ¹⁾		15.64 ¹⁾

¹⁾ Includes the benefit on air quality improvement

Table 4. The ratio of benefit to cost for precipitation enhancement experiments.

Country	Experiment period	Experiment area	Ratio of benefit to cost	Considered Items	Reference
The United States	1940-1990	California	6	EP ¹⁾	Henderson (2003)
	1941-2001	Utah	12	EP	Merrill et al. (2005)
	1950-2008	North Dakota	63	Agricultural crops	Bangsund and Leistriz (2009)
	1993-1996	Lucky Park Dam	10	EP	Griffith and Solak (2002)
	2005	Wyoming	4	EP	WMI (2005)
China	2007	over China	46	Many ²⁾	CAMS ³⁾
Australia	1964-1994	Tasmanian	13	EP	Ryan and King (1997)

¹⁾ Benefit from the electric power generation by artificial precipitation.

²⁾ Includes water resource, electric power generation, air and water quality improvement, forest fire prevention, drought relief, agricultural crops, etc.

³⁾ Website of Chinese Academy of Meteorological Sciences, China Meteorological Administration (<http://www.cma.gov.cn/>).

Visibility Range (RVR) 100m, 이륙시 RVR 150m)를 이용하였다 (항공기상청, 2009). 인천공항 비행기상 시정최저치를 기준으로 계산된 항공기 지연개선 확률(AP)는 14%로 계산되었으며, 식 (4)로부터 인천공항 대상으로 안개저감 기술을 적용할 때의 경제적 편익은 7,365백만원/년으로 계산되었다.

4. 시범지역 인공강우 비용 및 편익비율 산정

연간 인공강우 소요비용은 항공기 도입가(15,000백만원), 인공강우 기상감시·검증망설치운영비(4,470백만원)를 연간 등가지불 금액으로 환산하고, 항공기 연간관리비(1,000백만원/년; 기상 전용항공기 도입 및 운영에 관한 연구(2009))를 합산하여 산정하였다 (표 2 참조). 연간 등가지불 금액(YC)은 각 항목 총비용(IC)에 대하여 내용연수(n) 10년, 자본상환율(i) 6%를 가정하여 식 (6)과 같이 계산되었다.

$$YC = IC \times \frac{i \times (1+i)^n}{(1+i)^n - 1} \quad (6)$$

인공강우 실험의 연평균 총 소요비용은 3,645백만원

이고, 앞 절에서 계산한 안동임하댐 유역에 대한 인공강우 실험의 비용대비 편익은 대기질 개선 편익을 제외할 경우는 14.07이고, 대기질 개선 편익을 포함할 경우 15.64이다 (표 3 참조).

표 4는 미국, 중국, 호주의 인공강우에 대한 비용대비 편익을 보여주고 있다. 본 연구에서 산정된 인공강우 비용대비 편익비율은 다른 나라의 인공강우로 인한 수력발전량 증가편익과 비교할 만하다. 간접효과로 농작물 및 기타 여러 분야에 대해서 산정한 편익비율은 상대적으로 큰 비용대비편익을 보여주고 있다. 향후 인공강우의 간접적 효과도 심도 있게 고려할 필요가 있다고 사료된다.

5. 결론

본 연구에서 항공기 등 대형 인프라비용이 소요되는 기상조절기술(인공강우 및 안개저감)에 대하여 본격 시행 이전에 경제성 편익을 모의로 추산하였다. 인공강우에 의한 경제적 가치를 국내 대표적 강수량 부족지역인 안동·임하댐 유역을 대상으로 수자원확보(348백만원/년), 산불방지효과(22,458백만원/년), 가뭄피해저감(28,458백만원/년), 수도권지역을 대상으

로 대기질개선효과(5,689백만원/년)의 부문에 대하여 산정하였다. 인공강우의 수자원 확보 편익은 저수지나 댐의 저수율을 평소에 높게 유지함으로써 갈수기시 농업용수 및 농업용수 공급을 원활히 하여 농업, 공업 등에 대한 추가적 효과를 줄 수 있을 것이다. 또한 인공증설은 스키장 등의 레저효과도 가능할 수 있을 것이다. 이러한 간접적인 측면을 추가적으로 고려할 경우 경제적 가치는 현재 산정된 가치보다 훨씬 클 수 있을 것이다.

안개저감에 의한 경제적 가치를 보기 위해 인천공항 대상으로 항공기 이·착륙 지연 개선에 따른 편익은 총 7,365백만원/년으로 산정되었으며, 다른 공항 및 도로까지 확장된다면 경제적 가치는 더욱 높아질 수 있을 것으로 사료된다. 향후 시범공항(인천공항 등)에 대한 안개저감 운영체제 구축을 위한 비용대비 경제성분석 연구를 추가적으로 수행할 계획이다.

본 연구는 국내 최초로 기상조절(인공강우와 안개저감) 기술의 경제적 가치를 가급적 직접적인 측면에 대해 산출한 결과로서 실용적 기상조절 실험체제 구축을 위한 국가적 투자결정에 대한 기반자료로 활용될 수 있을 것이다.

제안에 사용된 여러 가정들은 관련 근거자료에 입각하였으나, 기상의 연간 변동성, 지역에 따른 편익가치의 변동성 등의 불확정성들이 존재한다. 이런 불확정성은 5년 이상의 장기적 기상조절 실시로 줄어들 수 있을 것이라 사료된다. 향후 기상조절의 경제적 가치를 보다 체계적으로 산출할 수 있는 기법을 개발해 나갈 계획이며, 이를 위해서는 수문, 환경, 사회, 경제 등의 다각적인 연구가 필요 할 것으로 사료된다.

사 사

본 연구는 기상청 재원의 국립기상연구소 주요사업 "신생활, 산업기상 기술개발" 및 "녹색성장 기상자원 기술개발"과 한국연구재단(No. 2009-0085533, R01-2006-000-10470-0)의 일환으로 수행 되었습니다.

참고문헌

국립기상연구소, 2009: '2008년 인공증설 비행실험' 보고서
기상청, 2009a: '2009년 인공증설(중우) 비행실험 결과', 기상청 보도자료(www.kma.go.kr)
_____, 2009b: '가뭄 속에 내린 단비의 경제적인 가치는?', 기상청 보도자료(www.kma.go.kr)
김백조, '강수의 경제적 가치 산정', *강수의 경제적 가치 평가*

워크숍, 2009년 7월 1일. 공군회관, p13-23.
김지영, 오성남, 전영신, 최재천, 부경은, 민희경, 2000: 김포 국제공항의 안개예측(I): 안개의 발생 특성, 한국기상학회 봄 학술발표회지, 223-320.
박상덕, 김만재, 2009: 가뭄재해 특성과 피해액 산정 방안. 물과 미래, 42, 12-20.
박종길, 정우식, 이중우, 최효진, 군태순, 백종호, 2007: 인천 국제공항 안개사례를 통한 경제적 재해 규모분석, *한국항공운항학회지*, 15, 40-47.
임현호, 김동혁, 송기욱, 2005: 인천국제공항에서의 운항을 통해서 살펴본 안개예측의 중요성, *한국항공운항학회지*, 13, 1-10.
정진입, 장기호, 차주완, 정재원, 양하영, 김유철, 최영진, 이훈, 김용훈, 2009: 흡습성물질 시딩에 의한 안개저감 실험 연구, 2009년 한국기상학회 가을 학술대회 논문집, 110-111.
차기욱, '댐사업측면에서의 강수의 경제적 가치', *강수의 경제적 가치 평가 워크숍*, 2009년 7월 1일. 공군회관, p47-58.
태백시, 가뭄백서, 2009
한국공항공사, 2008: 항공통계 (Airport Traffic Report)
한국수자원공사, 1998: '이상가뭄에 대비한 신기술 개발 연구 (II) - 구름 · 강우수치모델 적용 타당성 및 인공강우 기술 연구' 보고서.
한서대학교, 2009: 기상전용 항공기 도입 및 운영에 관한 연구 보고서.
항공기상청, 2009: 공항별 비행기상 최저치 및 경보 발표기준.
Bangsund, D., and F. L. Leistritz, 2009: Economic impacts of cloud seeding on agricultural crops in North Dakota, *Report prepared for the North Dakota Atmospheric Resource Board*, North Dakota State Water Commission (<http://www.swc.state.nd.us>)
Chang, K. H., M. J. Lee, K. D. Jeong, J. Y. Jeong, H. Y. Yang, J. W. Cha, K. M. Park, and S. N. Oh, 2007: An experimental study for hygroscopic-particle moving seeding method to dissipate natural advection fog, *J. Korean Meteor. Soc.*, 43, 3, 299-303.
Deshler, T., D. W. Reynolds, and A. W. Huggins, 1990: Physical response of winter orographic clouds over the Sierra Nevada to airborne seeding using dry ice or silver iodide. *J. Appl. Meteorol.*, 29, 288-330.
Henderson, T. J., 2003: New assessment of the economic impacts from six winter snowpack augmentation projects, *J. Weath. Modifi.*, 35, 41-44
Griffith, D. A. and M. E. Solak, 2002: Economic feasibility assessment of winter cloud seeding in the Boise river drainage, Idaho, *J. Weath. Modifi.*, 34, 39-46.
Griffith, D. A., M. E. Solak, and D. P. Yorty, 2007: A level II weather modification feasibility study for winter snowpack augmentation in the Salt river and Wyoming ranges in Wyoming, *J. Weath. Modifi.*, 39, 1-9.
J. Keary, S.G. Jennings, T.C.O'Connor, B. Mcmanus, and M. Lee, 1998: PM10 Concentration Measurement in Dublin City, *Env. Monitoring and Assessment*, 52, 3-18.

- Krauss, T. W., T. T. Brintjes, J. Verlinde, and A. Kahn, 1987: Microphysical and radar observations of seeded and non-seeded continental cumulus clouds. *J. Clim, Appl. Meteorol.*, 26, 585-606.
- Lee, M. J., K. H. Chang, G. M. Park, J. Y. Jeong, H. Y. Yang, K. D. Jeong, J. W. Cha, S. S. Yum, J. C. Nam, K. Kim, and B. C. Choi, 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, 2, 222-228.
- Merrill, A., T. Adams, and D. Cole, 2005: Uta cloud seeding program increased runoff/cost analysis', Utah Division of Water Resources (<http://www.water.utah.gov/>)
- Rosenfeld, D., 2000: Suppression of rain and snow by urban and industrial pollution, *Science*, 287, 1793-1796.
- Rosenfeld, D., and W. L. Woodley., 1993: Effects of cloud seeding in West Texas: Additional results and new insights, *J. Appl. Meteorol.*, 32, 1848-1866.
- Rosenfeld, D., R. Lahav, A. P. Khain, M. Pinsky, 2002: The role of sea-spray in cleansing air pollution over ocean via cloud processes, *Science*, 297, 1667-1670.
- Ryan, B. F., and W. D. King, 1997: A critical review of the Australian experience in cloud seeding, *Bull. Am. Atmos. Sci.*, 34, 812-826.
- UCAR, 2008: Weather modification programs worldwide (<http://www2.ucar.edu/news/weather-modification-multimedia-gallery>)
- WMI(Weather Modification Inc. (<http://www.weathermod.com>)), 2005: Wyoming level II weather modification feasibility study, *Report for Wyoming Water Development Commissions* (<http://www.state.wy.us>).
- 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.
- Yang, I. K., 'A preliminary survey for the seeding experiment in Korea', *1965 International Conference on Cloud Physics*, Tokyo and Sapporo, Japan, May 24-June 1, 1965.