

MA12) 산성안개의 평가 및 관리기술과 연구 동향

CONTROL TECHNOLOGY & EVALUATION OF ACID FOG AND TENDENCY OF RESEARCH

김 만 구¹⁾ · 김 민 건²⁾ · 박 찬 원³⁾ · 김 일 환³⁾ · 성주현⁴⁾ · 김 희 갑¹⁾

강원대학교 ¹⁾자연과학대학 환경과학과, ²⁾공과대학 기계·메카트로닉스 공학부,
³⁾공과대학 전기·전자·정보통신 공학부, ⁴⁾의과대학 예방의학교실

1. 서론

현재 동북아시아를 중심으로 한 산성비가 지구규모의 환경문제로서 주목을 받고 있으며, 세계 각지에서 산성강하물에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 생태계 및 주변 환경에 미치는 영향이 더욱 심각할 것으로 지적되고 있는 산성안개에 대한 연구는 활발하지 못하다. 이는 아래와 같은 이유와 어려운 점들이 있기 때문이다.

산성안개가 산성비보다 생태계에 더 심각한 영향을 미치는 이유로 지적되는 것들은;

1. 안개는 지표면부근에서 발생하며, 미립자로 대기 중 체재시간이 길고, 오염물질을 다량 함유하고 있을 가능성이 높다.
2. 산성비는 오염된 초기강우가 계속하여 내리는 강우에 의하여 씻겨버리기지만 안개는 수분량이 적어 나뭇잎이나 산업구조물 등에 흡착하여 해를 미칠 수 있는 시간이 길다.
3. 입자하나가 포함하는 수분이 안개의 경우 매우 작기 때문에 pH가 산성비보다 10-100배 정도 낮아 생태계 및 실외 물건에 대한 영향이 산성비보다 심각하다는 점 등이고,

산성안개의 연구가 산성비보다 활발하지 못한 이유로서는;

1. 안개의 채취가 비와 같이 간단하지 않다.
2. 안개발생 횟수가 비보다 많지 않다.
3. 안개채취기의 자동화가 용이하지 않다는 점 등이다.

우리 나라에서는 공업용수, 관개용수, 식수의 확보를 위한 다목적댐의 건설이 최근 활발히 건설되었고 현재도 많은 댐이 건설중이거나 계획 중에 있다. 그러나, 이들 댐의 수자원을 확보하고 이용하는 관점에서만 수자원이 수자원공사와 한전에 의해서 관리되고 있는 실정이다. 이들 댐의 건설에 따른 지역의 환경 영향평가는 한국전력이 학계나 환경용역업체에 위탁하여 안개의 발생빈도의 증가 등에 관한 기상학적인 조사에 그칠 뿐 안개의 조성이나 이로 인한 주민, 구조물, 농작물, 수목 등에 대한 영향은 평가 및 연구 방법이 전무하여 전혀 관리되고 있지 않다. 본 연구에서는 인공댐 주변의 안개발생일수 증가상향과, 환경중에 미치는 영향을 평가하고 앞으로의 관리대책에 대하여 논의하고자 한다.

2. 안개연구의 국내외 동향

산성안개에 관한 외국의 연구는 Houghton이 산악지역에 발생한 안개의 pH가 3.0 정도로 매우 낮은 것을 보고하였다¹⁾. 1978년 뉴욕대학의 Atmospheric Science Research Center는 Adirondaks에 위치한 Whiteface 산에서 안개와 구름의 pH가 그 지역의 강우보다 10배 정도 산성인 것을 밝힌 이래²⁾, 1982년 Waldman 등³⁾에 의해 산성안개의 화학적 조성에 관한 연구 결과가 발표되어, 산성안개에 대한 관심이 높아졌으며 체계적인 연구를 시작하였다. 특히 로스앤젤레스의 광화학스모그사건 이후 Hoffmann 등의 그룹이 이 지역의 안개에 대하여 활발한 연구를 하고 있으며 최근에는 Hering의 그룹에 의하여 로스앤젤레스만을 중심으로 한 Southern California Air Quality Study (SCAQS)가 수행되었다.

로스앤젤레스 분지에서 채취된 안개는 주성분이 NO_3^- , SO_4^{2-} , NH_4^+ , H^+ 이었고 최저 pH는 2.2로 매우 강한 산성안개였다⁴⁾. 또 안개 중 성분이온의 시간별 변화는 안개가 발생하기 시작하는 저녁 시간대에

높은 농도의 NO_3^- , SO_4^{2-} , H^+ 를 나타내었으며, 이들 이온의 농도가 수분양의 증가에 따라 감소하였다. 그러나, 익일 일출과 함께 안개입자의 수분이 증발하므로 안개 중 각 이온의 농도는 다시 증가하는 현상을 보고하였다.

일본의 연구상황은 1963년 Okita 등⁵⁾이 일본의 해발 3026m 산악지역에서 pH 3.4 ~ 5.9의 산성안개를 측정 한 후 일본 공중위생원의 Hara^{6,7)}, 일본 국립환경연구소의 Murano 등^{8,9,10)}이 산성안개에 관해 활발한 연구를 하고 있으며, 이들이 측정한 안개의 pH는 2.8부터 4.9 사이였다. 특히 1977년 7월 2일 동경에서 100 km 떨어진 내륙지역의 산에서는 pH가 2.8인 강한 산성안개가 관측되었다. 관동지방의 내륙에서 pH 2.8의 강산성 안개가 관측된 것은, 동경부근의 공업지역과 자동차에서 배출되는 오염물질 중 가스상의 오염물질이 해풍을 타고 내륙으로 유입되면서 광화학 반응에 의해 생성된 2차 오염물질이 안개의 핵으로 작용하는 것을 원인으로 지적하고 있다. 우리 나라에서도 일본의 관동지역의 산성안개 생성과정과 매우 유사한 지형학적 조건을 갖추고 있다. 즉 오염물질의 배출원이 밀집한 경인 공업지역과 서울의 자동차에서 배출되는 배기가스가 약 100 km 떨어진 춘천으로 이동하는 과정에서 2차 오염물질(기체상, 입자상 물질)이 생성되어 춘천지역 안개의 산성화에 기여할 것으로 예상된다. 국내의 안개에 관한 연구는 매우 미진한 실정으로 김 등¹¹⁾이 소백산, 춘천에서 채취한 안개에 관한 몇몇 연구만이 보고된바 있다.

안개에 관한 국제회의는 1998년 캐나다 밴쿠버에서 제 1회 대회가 개최되었고 2001년 2차대회가 개최될 예정이다.

3. 전국의 안개발생 현황과 인공댐 건설로 인한 춘천지역의 안개일수 증가

우리 나라에서는 기상청 측정지점들에서 안개의 지속시간에 대한 기록을 하고 있으며, 이에 기초하여 안개의 발생양상을 분석해 보면 다음 그림 1과 같다. 표고가 높은 대관령관측소를 제외한, 춘천, 안동, 진주, 양평, 충주, 승주 관측소 모두 5년간 300일-500일 정도의 안개발생일수를 나타내는데 이들 지점 모두 인공댐이 건설된 지역이다.

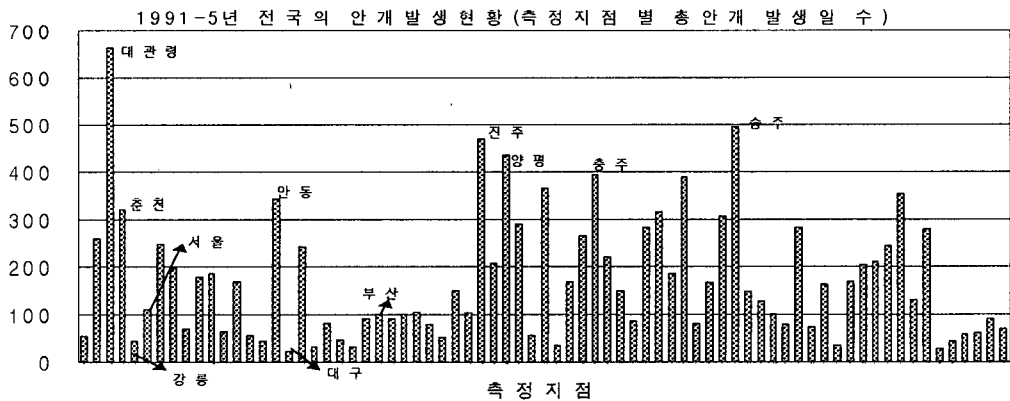


그림1. 우리나라의 1991-1995년 사이의 지역별 총 안개발생일 수.

위의 그림에서 볼 수 있는 것처럼 지역간에 안개발생에 큰 편차가 있어서 최고 30배 정도의 차이가 있다. 안개가 비교적 다발하는 대규모 댐 주변지역 (춘천, 안동, 양평, 충주 등)의 경우는 평균 5일에 하루 정도 안개가 발생하고 있다. 그림 2에서 보는바와 같이, 춘천에서는 1974년 소양댐이 건설된 이후 춘천지역의 안개일수는 전년도 31일에서 77일로 2배 이상 증가하였다.

3. 자동안개채취기의 개발

안개의 연구를 위해서는 무엇보다 먼저 대기중의 안개를 쉽게 채취하여 화학적인 분석이 가능할 정도의 시료량을 채취 할 수 있는 안개채취기의 개발이 선행되어야 한다. 외국에서는 기상학자들을 중심으로 한 안개채취기에 관한 연구가 1960년대부터 시작되었다. 자연풍을 이용한 Passive형 안개 채취기는 천의 표면⁹⁾, 격자¹²⁾, 그물¹¹⁾에 맺힌 안개를 모으는 것이고, 강제풍을 이용한 Active형은 안개를 포함한

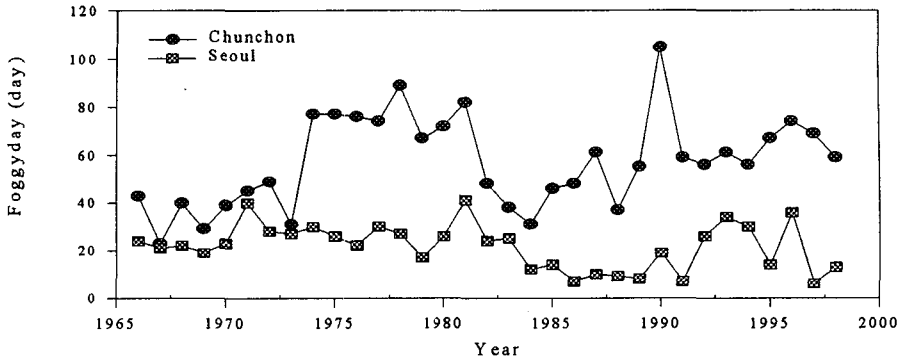


그림2. 서울과 춘천의 연간 안개일수 비교

공기를 그물¹³⁾이나 격자¹⁴⁾에 충돌시키는 것과 가는 줄을 우산살과 같은 형태로 만들어 이를 회전시켜 안개에 충돌시키는 것¹⁵⁾과 가는 슬릿가 있는 입구를 축에 만들고 그 뒤에 채취병을 단 Rotating arm collector¹⁶⁾, Jet impector¹⁷⁾를 이용한 안개채취기가 개발되었다. 최근 5종의 안개채취기의 성능을 비교한 연구가 수행되었으나¹⁸⁾, 이들 채취기의 상대 채취 속도, 채취된 안개의 화학적인 조성, 안개농도의 양에 따른 작동상태, 채취되는 안개의 입자크기 등이 달라 아직 안개채취기의 규격이나 표준품은 마련되지 못한 실정이다.

현재 본 연구팀에서는 안개발생시기부터 종료까지 자동으로 안개를 채취할 수 있는 무인 자동 안개채취기를 개발하고 있으며, 데이터를 주컴퓨터에서 데이터의 수집, 저장 및 처리가 가능하도록 원격제어 및 원격 데이터 분석을 위한 무선통신 시스템을 개발하고 있다.

4. 산성안개에 의한 구조물의 부식

오래전부터 야외 금속 조각 및 동상 등이 부식되고, 전차선(전철케이블) 또는 현수교의 와이어로프(피야노선재)가 제 수명을 다하지 못하고 쉽게 끊어지는 현상들이 관찰되어져 왔다. 이러한 현상들은 대기 오염의 진행에 따른 것으로 생각될 수 있으며, 구체적으로 산성비 또는 산성안개에 의하여 초래되는 현상으로 추측된다.

본 연구팀은 힘이 작용하는 파피 현상에 산성안개가 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 세계 최초로 주목하여, 여러 파피현상 중 특히 피로파피에 미치는 산성안개의 영향에 관해 연구하고 있다.

산성안개 속에 포함된 오염물질 중 유황산화물, 질소산화물, 염소이온 등은 금속재료의 부식물질로 알려져 있다. 이러한 부식물질들이 개입하게 되면 이른바 환경조장파피를 유발시킬 수 있다. 단일 부식성 환경하에서의 피로강도는 건전 대기중의 피로강도보다 30%정도 저하하는 것으로 알려져 있다. 그런데 산성안개 속에는 여러 성분의 부식물질들이 복합적으로 포함되어 있어서, 여러 종류의 부식물질에 노출된 금속재료가 어떠한 형태의 피로강도 저하 현상을 보일 것인가에 대해서는 대단히 궁금한 사항이다.

우선 오염되지 않은 안개를 상정한 증류수 환경 및 산성안개 환경 두 종류의 분위기 속에서 피로시험을 수행하여, 이른바 피로강도를 구하여 그림 3에 나타냈다. 그 결과, 산성안개 환경하의 피로강도는 증류수 환경하의 피로강도보다 80%정도 현저하게 감소하는 결과를 얻었다. 이 결과는 일반적으로 알려진 부식피로의 감소 폭보다 훨씬 큰 것으로, 산성안개 특유의 부식 현상을 유발한 결과로 여겨진다. 그 원인으로서는 여러 가지가 있지만, 특히 두드러진 현상은 산성안개 속에서는 다수의 피로크랙이 형성되어서 서로 합체하여 긴 크랙으로 발전하게 되어 재료를 파단으로 이끈다는 점이다.

피로크랙의 전파속도에 미치는 산성안개의 영향에 대하여 검토하여 그 결과를 그림 4에 나타냈다. 그 결과, 약산성의 안개(pH=5) 및 빠른 시험속도(10Hz)하에서의 크랙전파 속도는 증류수 시편보다 오히려 느려서, 결과적으로 피로수명의 증가를 가져왔다. 이것은 산성안개의 부식작용으로 인하여 피로파면에 부식물질이 퇴적되어 이른바 쉼기효과로 인하여 크랙팁에서의 유효응력 크기를 감소시킨 결과로 이해된다.

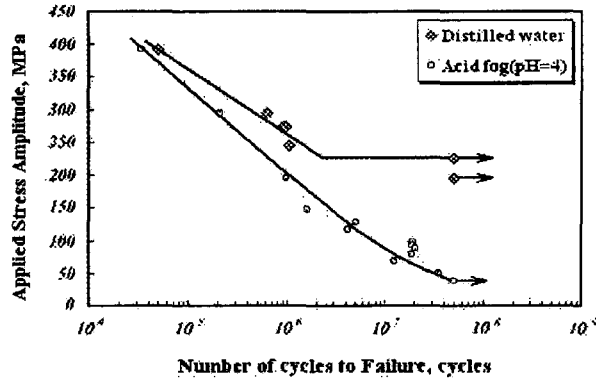


그림 3. 증류수 환경 및 산성안개 환경에서 금속의 피로강도.

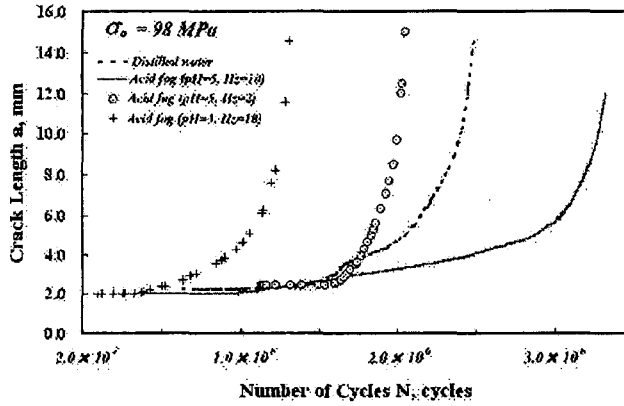
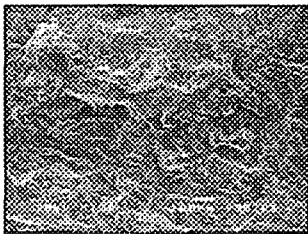
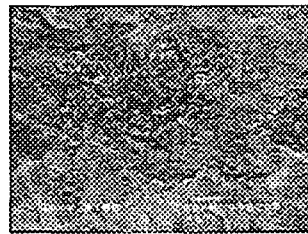


그림4. 산성안개가 피로크랙의 전파속도에 미치는 영향.

그림 5는 증류수 환경 및 산성안개 환경하에서 피로파단된 파면의 사진을 보여주고 있는데, 산성안개 하의 파면에서 다량의 부식 생성물이 관찰된다. 한편 강산성의 안개수(pH=3)를 사용하고 느린 시험속도(2Hz)로 크랙전파 시험을 수행한 결과, 위와 같은 현상은 반전되었다. 즉 증류수 환경보다 훨씬 빠른 크랙전파속도를 보였고 따라서 피로수명도 감소하였다. 이것은 일시적으로 파괴현상에 유리하게 작용하였던 부식 퇴적물이 강산성 및 오랜 부식노출 시간으로 인하여 용해되어 제거효과가 소실되고, 또한 크랙팁이 용해 확장되면서 응력감소시에 크랙폐구를 방해하기 때문이라고 생각된다. 즉 크랙폐구의 방해로 인하여 유효응력 크기가 커져서 크랙 전파를 촉진한 때문이다.



Distilled Water



Acid Fog

그림 5. 증류수 환경 및 산성안개 환경하에서 피로파단된 파면의 사진.

5. 산성안개의 건강영향 평가

Acid aerosol (as particle)은 soot, particle 성분 중에서도 가장 직접적으로 호흡기 질환을 일으키는 원인물질로 지목되고 있다. 특히 Acidity 자체 (pH 3-4 정도의 산성도)는 호흡기에 직접 자극을 주어서 천식의 발작, 기존 호흡기질환의 악화등을 가져오는 것이 확인되고 있다.

그러나, 안개의 경우는 산성비보다도 일반적으로 더 강한 산성도에도 불구하고, 건강영향을 확인할 수 있는 연구결과가 매우 부족한 상황인데, 이는

- 1) 안개의 입자가 호흡기 특히 폐포에까지 들어갈 수 있지 입자크기에 관한 연구가 충분치 않다.
- 2) 안개가 주로 발생하는 지역, 시간대가 사람들이 많이 활동하는 시간과는 다르기 때문에 안개가 발생했다고 해서 곧바로 호흡기의 장애로 연결되지 않는 경우가 많으며, 지역적으로도 (같은 춘천시에서도) 국소적으로 안개가 밀집되는 현상이 많아서 평가에 어려움이 있다.
- 3) 안개속에는 미량이나마 알데하이드, PAH, 유기물질 등의 성분이 포함되어 있다. 이러한 성분들이 이 정도의 농도수준에서 호흡기 질환을 유발할 수 있다는 증거는 아직 부족하다.

이외에도 산성안개의 건강영향 분석을 위해서는 안개 이외의 강력한 건강장해 요인으로 지목되고 있는 기상조건, 대기오염 등 많은 연구에서 관련성이 나타나고 있는 요인들을 보정 해야한다. 그리고 개인대상에 대한 연구로 흡연/간접흡연 등의 요인들 및 실내-실외 활동도 등이 추가되어야 한다.

본 연구팀에서는 춘천시의 주요병원 응급실 자료와 안개 자료의 상관성을 GAM 설명모형을 이용하여 평가하였다. 결과 그림 6에 나타난 것과 같이 기상요인 특히 상대습도 및 기온과의 관련성 이외에는 다른 요인들에 의한 호흡기질환 내원의 초과발생이 확인되지 않고 있다.

GAM 모형

Log(일별 천식으로 인한 응급실 내원자 수의 기대치) = GAM { α + Lowess(시간) + Lowess(기온) + Lowess(상대습도) + 요일에 대한 위장변수(daywk2--daywk7) + Lowess(대기오염도) }

앞으로 민감한 집단에 대한 개인별 연구와 입자의 크기, 산성도 및 화학적 구성성분 등의 내용이 측정값을 토대로한 분석 및 건강과의 관련성이 이미 확인되어 있고 보다 강력할 것으로 생각되는 요인들 포함시켜 안개의 건강영향 평가를 할 계획이다.

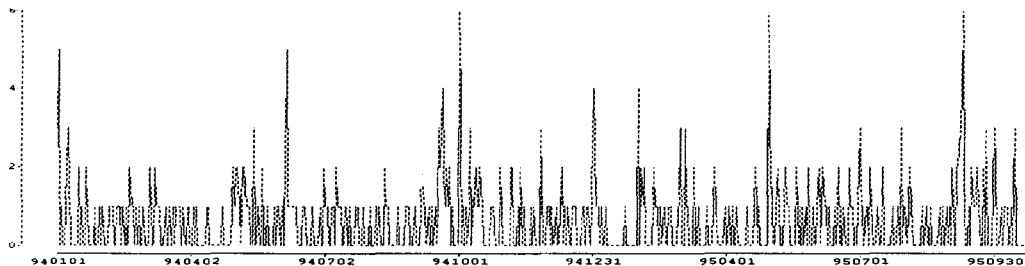


그림 6. 춘천지역의 병원 및 종합병원에 1994-1995년 기간 동안 천식, 만성폐색성폐질환으로 인한 일별 응급실 내원 양상 (지방공사강원도춘천의료원, 한림대학부속춘천성심병원, 인성병원, 춘천제일병원, 국군춘천병원 포함)

6. 일본 산악지대 고사목의 원인 연구

최근 관동지방의 아카기산, 탄자와, 오오다이가하라 해발 1,000m에서 2,000m 사이의 산에 나무들이 많이 고사하고 있다. 그리고 피해지역 역시 매년 확장되고 있어 원인을 해명하려는 많은 연구가 수행되

었다. 고사목의 원인으로는 凍害, 버섯균 등도 거론되고 있으나 산성안개가 주요 원인으로 지목되고 있다²⁰⁾. 고사목이 나타나는 지역을 크게 셋으로 나누어 원인을 살펴보면, 동해에 접한 서쪽 산악지역에서는 중국, 한국 등 대륙에서 날아온 오염물질에 의해 눈이 산성화된 것을 주요 원인으로 지목하고 있으며, 태평양을 면한 동쪽 산악지역에서는 산성안개가 주요원인으로 지목되고, 기타 평지 지역에서는 대기 오염물질과 개발로 인한 수맥의 변화를 주요 원인으로 지목하고 있다²¹⁾. 특히 산악지역에서 안개와 구름은 습성침적 중에서도 occult deposition으로 따로 분리해 많은 노력을 기울여 연구하고 있으며, 동해안과 태평양 연안지역에 내리는 산성강하물의 모니터링에 많은 노력을 기울이고 있다.

7. 맺는말

인공염으로 인한 안개일수 증가, 안개의 산성화 및 이로 인해 주변지역에 미치는 영향은 충실히 평가되어 관리방안이 마련되어야 할 것이다.

그리고 아직 우리 나라의 산에는 일본과 같이 고사목이 많이 나타나지 않고 있다. 그러나, 중국의 경제 성장과 함께 에너지 소비량이 증가하면 현재보다 훨씬 많은 량의 산성물질이 우리나라 대기로 유입되어 습식 및 건식강하물들이 산성화 될 것으로 예상된다. 그러므로 건, 습식강하물에 대한 기초자료를 충실히 축적하여 미래에 대비해야하며, 대책 및 관리방안을 마련해야 한다.

8. 감사

본 연구는 한국과학재단 특정기초연구(1999-2-309-001-3)지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- 1) National Atmospheric Deposition Program, NADP/NTN Coordinator's Office, 1988.
- 2) Topol, L.E. UAPSP precipitation data displays for January 1, 1979-June 30, 1982, Vol. 1 Electric Power Plant Research Institute, Palo Alto, CA, 1983.
- 3) Waldman, J.M. et al. Science, 218, 677, 1982.
- 4) Blanchard, C.L., K.A. Tonnesen Precipitation-Chemistry Measurements from the California Acid Deposition Monitoring Program, 1985-1990, Atmos. Environ., 27A, 1755, 1993.
- 5) Okita, T. J. Meteor. Soc. Japan, 46, 120, 1986.
- 6) Hara, H. et al. Bull. Chem. Soc. Jpn., 63, 2691, 1990.
- 7) Hara, H. Jpn. J. Limnol., 52, 125, 1991.
- 8) 村野健太郎, 環境科學研究報告, B-196-R-11-8, 7, 1984.
- 9) 村野 健太郎, 酸性霧 公害と對策, 25, 725, 1989.
- 10) 村野 健太郎, 酸性霧汚染の實態, 公害と對策, 27, 229, 1991.
- 11) 김만구, 임양석, 박기준, 황훈, 산성강하물의 침착량과 동태 해명에 관한 연구-춘천지역 안개의 화학 조성(1996~1997), 한국대기보전학회지, 14, 5, 491-498, 1999.
- 12) Hileman, B., Acid Fog, Environ. Sci. Technol., 17, 117A, 1983.
- 13) Mrose, H., Tellus, 18, 266, 1966.
- 14) Lazrus, A. E., et al., Tellus, 22, 106, 1970.
- 15) Sadasivan, S., Atmos. Environ., 14, 33, 1980.
- 16) Daube, B., et al., Atmos. Environ., 21, 893, 1987.
- 17) Brewer, R. L., et al., Atmos. Environ., 17, 2267, 1983.
- 18) Spink, A. J., et al., Atmos. Environ., 24A, 2263, 1990.
- 19) M. Tamaki, Environmental Conservation Engineering, 20, 10, 623-632, 1997.
- 20) 玉置 元則, 大氣環境學會誌, 30, 1, A1-A11, 2000.