

대관령 산악지역 안개조절을 위한 구름특성 조사

Investigation on Cloud Properties for Fog Modification at Daegwallyeong Mountains

양 하 영* / 오 성 남**
Yang, Ha Young / Oh, Sung Nam

Abstract

Cloud meteorological properties over Daegwallyeong mountain area were analyzed for experimental cloud seeding which related to a feasibility study of fog modification. The cloud seeding for fog modification has been refocused to using hygroscopic chemical to dissipate warm fog. In this study, the statistics of fog observations were analyzed and discussed. Fog properties mostly showed the Summer warm fog, the early morning occurrences before to 6 o'clock AM, and 7 to 9 o'clock dissipation in the statistics. In the Spring and Winter season an easterly wind produced cold fog which is good applied with AgI seeding agents. Extrapolation of these results suggests that the suitable seeding method and material for fog modification will be introduced from the actual seeding experiments in the cold and warm fog.

key words : cloud seeding, fog modification, warm fog, cold fog

요 지

구름씨뿌리기 방법에 의한 안개조절의 가능성을 파악하기 위해 대관령 산악지역의 구름특성을 분석하였다. 구름씨뿌리기에 의한 안개조절은 흡습성 물질을 이용한 온안개 소산에 집중되고 있다. 이 연구에서는 관측된 안개의 특성을 통계적으로 분석하고 이에 대해 논의하였다. 안개의 대부분은 여름철에 발생한 온안개이고 6시전 이른 아침에 발생하여 7시~9시 소산되는 특성을 보인다. 봄철과 겨울철에는 AgI시딩에 적합한 동풍계열의 냉안개가 발생한다. 이 결과로부터 안개소산에 적합한 구름씨뿌리기방법과 물질을 추론할 수 있으며 이는 실제 냉안개와 온안개 실험에 적용할 수 있다.

핵심용어 : 구름씨뿌리기, 안개 조절, 온안개, 냉안개

1. 서 론

대기 중의 수증기가 응결핵(Cloud Condensation Nuclei, CCN)을 중심으로 응결 성장하게 되면 구름이나 안개가 된다. 구름과 안개는 지면에 접하거나 상공에 있는 경우에 따라 구별된다. 따라서 산악지역에서 발생하는 안개는 구름으로 분류한다. 안개 입자의 직경은 5 ~ 40 마이크로미터이며, 1 cm³ 중에 10 ~ 30개의 수적을 포함한다. 수적의 양은 시정과 반비례(시정

1km : 0.01 ~ 0.02g/m³, 시정 50m : 1g/m³)하며 일정한 경우 입자가 작을수록 산란효과가 높아 시정이 감소한다. 인위적인 안개 소산의 목적은 안개에 의하여 발생한 시정감소 현상을 향상시키고 농작물이나 교통수단에 대한 수증기 착빙효과를 억제함이다. 안개 소산은 안개 발생 원인보다는 발생한 안개의 온도특성에 따라 주로 결정된다. 소산에 사용되는 방법과 재료는 안개지역에 열을 가함으로써 수증기 소산을 유도하는 열 소산(thermal diffusion method)과 구름 응결핵을

* 기상연구소 원격탐사연구실 (e-mail : hayang@metri.re.kr)

** 정희원 · 기상청 기상연구소 원격탐사연구실장, 이학박사

분사하여 강우효과를 유도하는 cloud seeding 방법으로 구별할 수 있다. 특정지역에 수증기 입자 이온화와 강풍 등을 이용하는 경우도 있으나 일반적 방법으로 볼 수 없다. Weinstein(1974)는 헬리콥터나 제트엔진을 이용하여 경계층내의 공기를 강제로 혼합시켜서 역전층을 파괴하고 따뜻한 공기의 혼합에 의해서 안개를 증발시키는 소산실험을 행하였다. 이 방법은 시정 개선의 효과는 있지만 경제적인 측면에서 비효과적으로 나타났다. Vardiman et al. (1971)는 Fairchild 공군기지 에서 과냉각안개에 빙정입자(ice crystal)를 분사한 결과 -0.5°C 이하에서 시정개선 효과가 높게 나타남을 보였다. Kunkel 과 Silverman (1970)은 안개소산을 위하여 흡습성 물질과 시정과와의 관계를 수치실험을 하였다. 이들은 NaCl 등 여러 흡습성 물질을 안개에 투입한 결과 소산 효과는 보였지만 독성과 부식성도 나타남을 발견하였다. 이러한 안개를 인위적으로 소산시키거나 적정 수준까지 시정을 양호하게 만드는 기술은 아직 대규모로 실용화된 사례는 없다.

우리나라에서 발생하는 안개는 지역과 지형적 환경 조건에 따라 다양하게 발생되어지고 있다. 그러나 우리나라에서의 안개 발생과 관련한 연구는 안개의 발생원인, 안개의 유형 및 발생 패턴과 안개의 지역적인 분포에 대한 연구가 대부분이고(김성삼, 1970; 민경덕, 1976; 허인혜, 1997), 안개 입자를 측정하여 안개발달과 안개 소산에 관련한 연구는 미비한 실정이다. 안개 억제제를 위한 실험은 안개의 물리적 역학적 조건을 파악한 후에 가능하다. 즉 안개의 특성을 조사함으로써 억제하기 위한 seeding 규모와 재료, 시간 등을 결정할 수 있기 때문이다.

본 연구의 목적은 대관령기상대 지역 안개의 중관기상학적 그리고 물리적 특성을 파악하여 구름물리 방법의 안개소산을 위한 통계적 정보를 수집함이다. 이를 위하여 지역적 안개 발생 및 소산의 빈도와 발생 시각, 기상요소와의 상관성 등을 구하였다. 그리고 구름의 입자 상태를 파악하기 위하여 전방산란스펙트rometer (Forward Scattering Spectrometer Probe, FSSP)관측을 하였다.

2. 자료 및 방법

본 연구에서 조사된 안개 발생 지역은 해발고도 842m의 대관령 기상대($37^{\circ}41' \text{N}$, $128^{\circ}45' \text{E}$)지역이다. 분석에 사용된 기상요소는 대관령 기상대에서 관측한 1987~2003년 기간 동안의 기온, 습도, 강수, 바람 등이다. 대관령 기상대의 관측노장에는 구름입자 측정을 위한 전방산란 입자계수기(Forward Scattering Spectro-

meter Probe, FSSP)를 비롯하여 Ka밴드 마이크로 강우레이더(Micro Rain Radar, MRR), 마이크로파 레디오메타(Microwave Radiometer, MWR), 전천일사계, 자동기상관측기(Automatic Weather System, AWS)등 안개 및 강우 구름측정용 측기들이 있다.

안개의 발생시각과 소산시각은 기상청의 기후자료 관리시스템(Climata Data Management System)의 기사를 이용하였다. 안개 발생 빈도는 안개가 발생하여 시정이 1km 이상으로 회복되는 시각까지를 1회로 계수하고 하루 중에 안개가 소산된 후 다시 발생한 경우는 2회의 안개로 간주하였다. 안개 지속시간은 안개 발생 시각과 소산 시각의 차이 값이다.

안개의 입자분석을 위해 FSSP 관측 값을 분석하였다. FSSP는 구름입자의 Mie scattering 특성을 이용하여 구름을 구성하는 입자들의 크기별 수농도 분포를 측정하는 장비로 구름의 미세물리학적 특성연구에 널리 사용되고 있다. FSSP로 관측 가능한 구름입자의 크기 범위는 $0.5\sim 47\mu\text{m}$ 로 4개의 입자 크기 범위를 선택할 수 있도록 설계되었으며 관측하고자 하는 입자들의 크기 범위에 따라 range 0($2\sim 47\mu\text{m}$), range 1($2\sim 32\mu\text{m}$), range 2($1\sim 16\mu\text{m}$), range 3($0.5\sim 8\mu\text{m}$)에서 선택할 수 있다. 각 range는 15개의 채널로 나누어져 측정이 되는데 이는 측정에 요구되는 range size를 선택하여 측정하기 위함이다. 각 채널별 중간 값 간의 직경차이는 range 0은 $3\mu\text{m}$, range 1은 $2\mu\text{m}$, range 2는 $1\mu\text{m}$, range 3은 $0.5\mu\text{m}$ 이다. 이 연구에서는 구름입자 관측을 위해 주로 사용하는 range 0($2\sim 47\mu\text{m}$)을 선택하여 관측하였다.

3. 지형과 안개 발생

대관령 기상대는 강원도 평창군의 동쪽 끝 지점으로 서 북쪽으로는 새봉산(1084m)과 남쪽으로 약 2 km 거리에 해발고도 1,123 m의 능경봉, 1,157 m의 선자령봉 서쪽으로 백석산(1,365m) 등 험하고 높은 산이 가로막고 있어 하나의 골짜기 형태의 지형을 이루고 있다(그림 1). 해발고도 수백 m 이상인 산악지역에 대한 연구로는 신현진(1978)의 대관령 농무특성에 관한 연구와 김경익(1995)의 보현산 천문대(1,127m)의 안개 발생 빈도 분석이 있다. 이들 연구에 의하면 대관령 관측소와 보현산 천문대에서의 안개는 지표 냉각에 의한 복사무보다는 동풍계열의 바람에 의해 동해에서 유입되는 다습한 기류에 의한 이류무와 저기압 통과에 따른 하층운에 의한 경우가 대부분이라고 하였다. 또 허인혜(1998)와 전종갑(1998)은 한반도에 동풍계열의 기류가 유입될 경우 안개 지속시간이 길었는데 이는 대기의 강제 상승으로 지형성 구름을 형성하는 경우 장시간

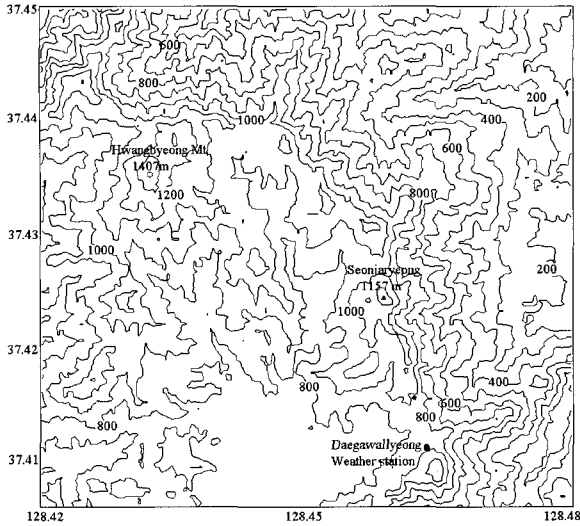


그림 1. 대관령 기상대 지형 특성

동안 안개가 발생하기 때문이라고 하였다. 뿐만 아니라 중위도 지방의 주요 강수 기구가 되는 온대성 저기압이나 한대 전선대의 영향을 받고 있는 경우도 대관

령은 구름 속에 있게 되므로 안개 현상으로 관측될 수 있어서 안개의 빈도가 높다고 하였다.

본 노장은 1986년 8월까지 고랭지작물 시험장에 위치하였으나(해발 820m) 약 1.5km 떨어진 현 노장(해발 842.5m)으로 이전하였다. 노장 이전 전 14년(1972~1985) 기간 동안의 연평균 안개일수는 약 111일(그림 2a)이고 이전 후 17년(1987~2003)의 안개일수는 약 145일(그림 2b)로서 34일 증가하였다. 이는 노장 이전으로 해발고도가 22m 증가하였고 경사가 가파른 동쪽 사면으로 이동되었기 때문으로 판단된다.

1987년~2003년 기간 동안 대관령 기상대의 안개 발생은 2,464회로 전 기간에 대하여 42%이상이 여름철에 발생하였으며 가을철과 봄철에 각각 27.4%, 20.9%이고 겨울철에는 9.8%로 나타났다. 대관령 지역의 연 평균 안개 지속시간은 10.4시간으로 계절별 지속시간을 보면 겨울철의 지속시간이 11.5시간으로 가장 길고, 봄철과 여름철의 지속시간이 각각 10.0, 10.9시간이고 가을철의 지속시간은 9.3시간으로 나타났다(그림 3).

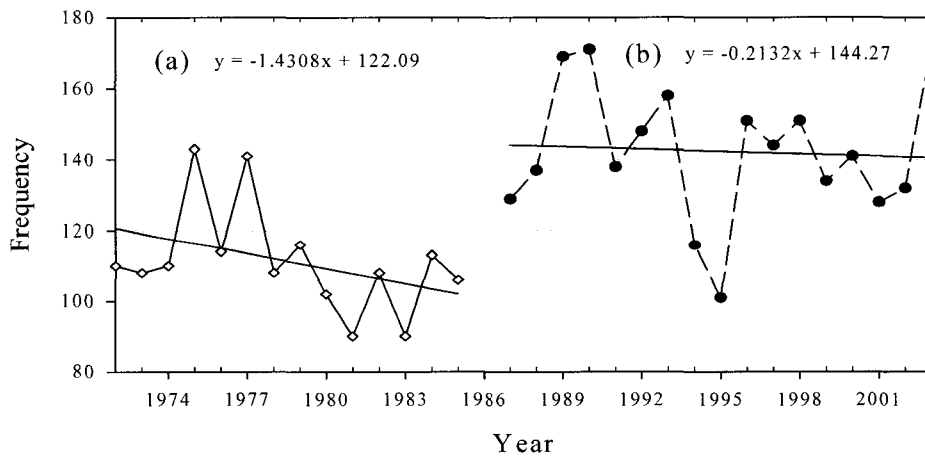


그림 2. 대관령 지역의 두 기간 (1972.1~1985.12), (1987.1~2003.12) 동안의 안개 발생 경년 변화

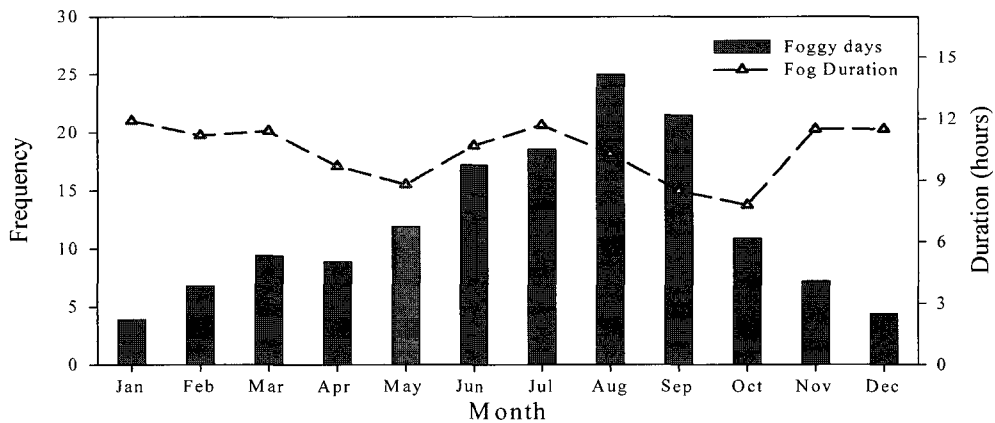


그림 3. 대관령 안개 발생 빈도와 지속시간(1987~2003)

그림 4는 대관령 안개의 발생시각 및 소산시각의 빈도를 계절별로 나타낸 것이다. 안개 발생 시각을 보면 4시~6시에 가장 빈도가 높으나 대체로 전 시간대에 걸쳐 골고루 분포함을 알 수 있다. 소산 시각 또한 전 시간대에 골고루 분포하지만 겨울철의 경우 다른 계절과 다르게 7시~9시에 소산되는 빈도보다 16~20시 사이에 소산되는 빈도가 더 높게 나타났다. 그림 5는 안개 지속시간을 계절별로 나타낸 것이다 이를 보면 계절별로 차이는 있지만 2~5시간의 지속시간을 가지고 있는 복사무의 빈도가 높게 나타나지만 24시간 이상 지속되는 이류활승무의 빈도도 높게 나타남을 알 수 있다. 가을철의 경우 활승무보다는 2~4시간의 지속시간을 가지는 복사무에 의한 안개가 발생하므로 발생하는 빈도는 높지만 지속시간이 짧게 나타나고 겨울철은 발생하는 빈도는 낮지만 24시간 이상 지속되는 안개가 14%이상 발생하는데 이는 복사무보다는 활승무가 많이 발생하기 때문으로 생각된다. 대관령에서의 안개는 동풍계의 기류가 유입될 경우 오래 지속 되는데 1992년 8월 15일 발생한 안개는 1992년 8월 22일까지 175시간 지속되었다.

4. 대관령 지역 안개 물리적 특성

4.1 기상요소와의 관계

대관령 지역 안개의 특성을 파악하기 위하여 기온, 바람, 강수 등 기상요소와의 관계를 조사하여 보았다. 표 1은 1987년부터 2003년 기간 동안 대관령 기상대에서 안개 발생시 기온을 나타낸 것이다. 0°C이하의 안개(냉안개)가 12.1%, -5°C이하가 1.9%로서 적은 빈도를 나타내고 전체 안개의 85% 이상이 0°C이상(온안개)일 때 발생하였다.

그림 6은 전체일과 안개 발생일의 풍향을 백분율로 나타낸 것이다. 이를 보면 대관령 기상대의 주풍은 서풍으로 나타나나 안개가 발생할 때의 풍향은 동풍일 때 65.5%, 서풍일 때 16.6%의 빈도를 보였다. 그림 7을 보면 안개 발생시 풍향과 풍속과의 관계를 알 수 있다. 안개 발생시의 연평균 풍속은 2.0m/s로 0.5m/s 이하가 24.8%, 1m/s 이하 16.4%, 1.5m/s 이하 17.6%, 2m/s 이하 11.1%로 나타났다. 즉 대관령 안개는 풍속이 대부분 2m/s 이하(70%)일 때 발생한다. 따라서 대관령에서 안개는 동풍계열(NE, E, ESE)이고 풍속이 2m/s이하일 때 많이 발생함을 알 수 있다. 그림 8은 안개 발생과 시정과의 관계를 알아보기 위해 노장의

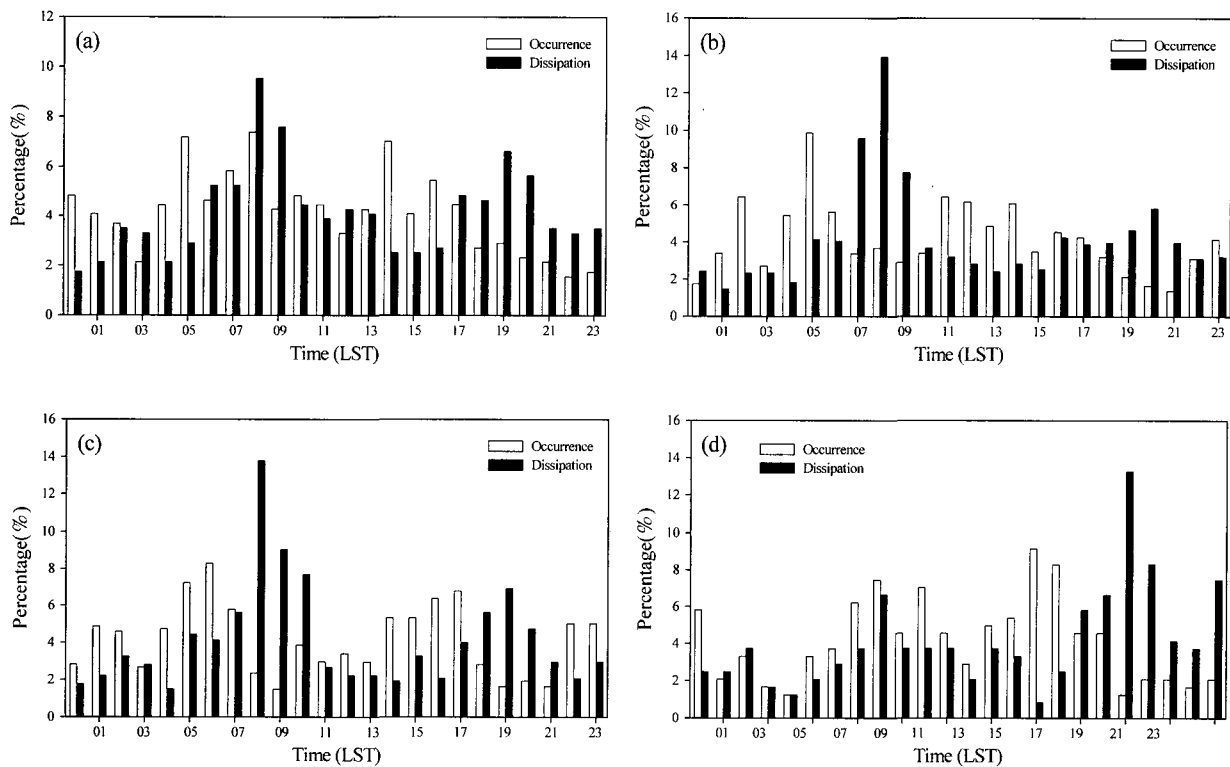


그림 4. 대관령 안개의 계절별 발생 및 소산 빈도
(a)봄, (b)여름, (c)가을, (d)겨울 (1987~2003)

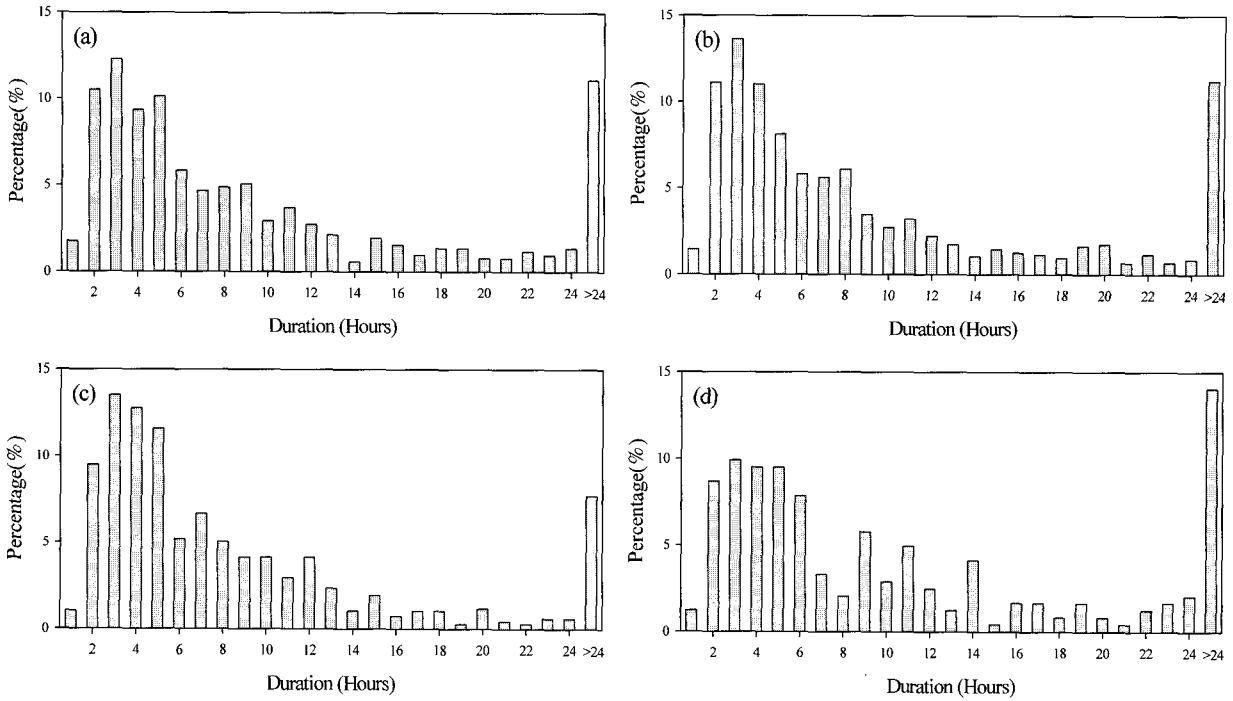


그림 5. 대관령 안개의 계절별 안개 지속시간 빈도
(a)봄, (b)여름, (c)가을, (d)겨울 (1987~2003)

표 1. 대관령 기상대 안개 발생 시 기온(1987~2003)

Month Temp(°C)	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Total
-10 ~ -5	12	9	6	0	0	0	0	0	0	0	0	5	32
-5 ~ 0	27	46	52	8	0	0	0	0	0	3	11	31	178
0 ~ 5	5	10	23	51	20	2	0	0	8	20	42	16	197
5 ~ 10	1	1	3	32	78	19	0	0	26	56	21	1	238
10 ~ 15	0	0	1	8	35	119	65	48	149	58	1	0	484
15 ~ 20	0	0	0	0	2	62	154	204	89	0	0	0	511
20 ~ 25	0	0	0	0	0	2	23	54	7	0	0	0	86
> 25	0	0	0	0	0	0	0	7	0	0	0	0	7
Total	45	66	85	99	135	204	242	313	279	137	75	53	1733

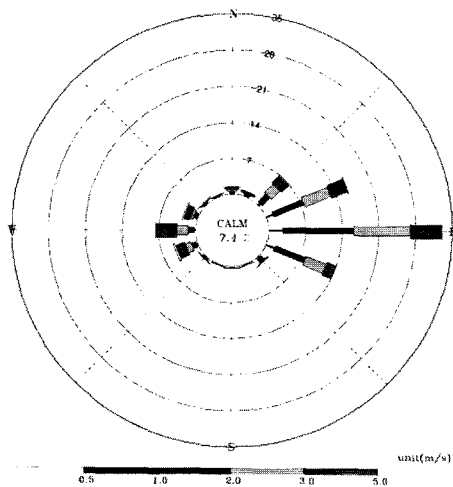


그림 6. 대관령 지역 풍향 변화

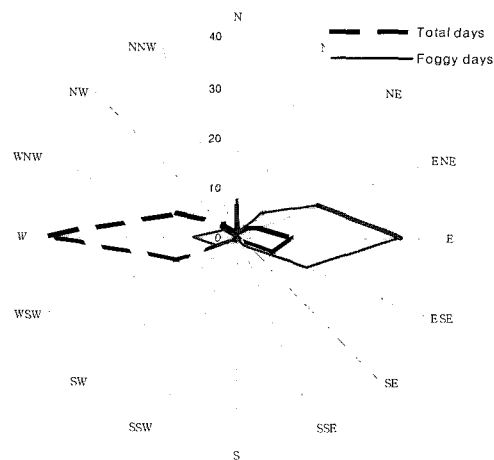


그림 7. 안개 발생 시 풍속 및 풍향 변화
(1987~2003)

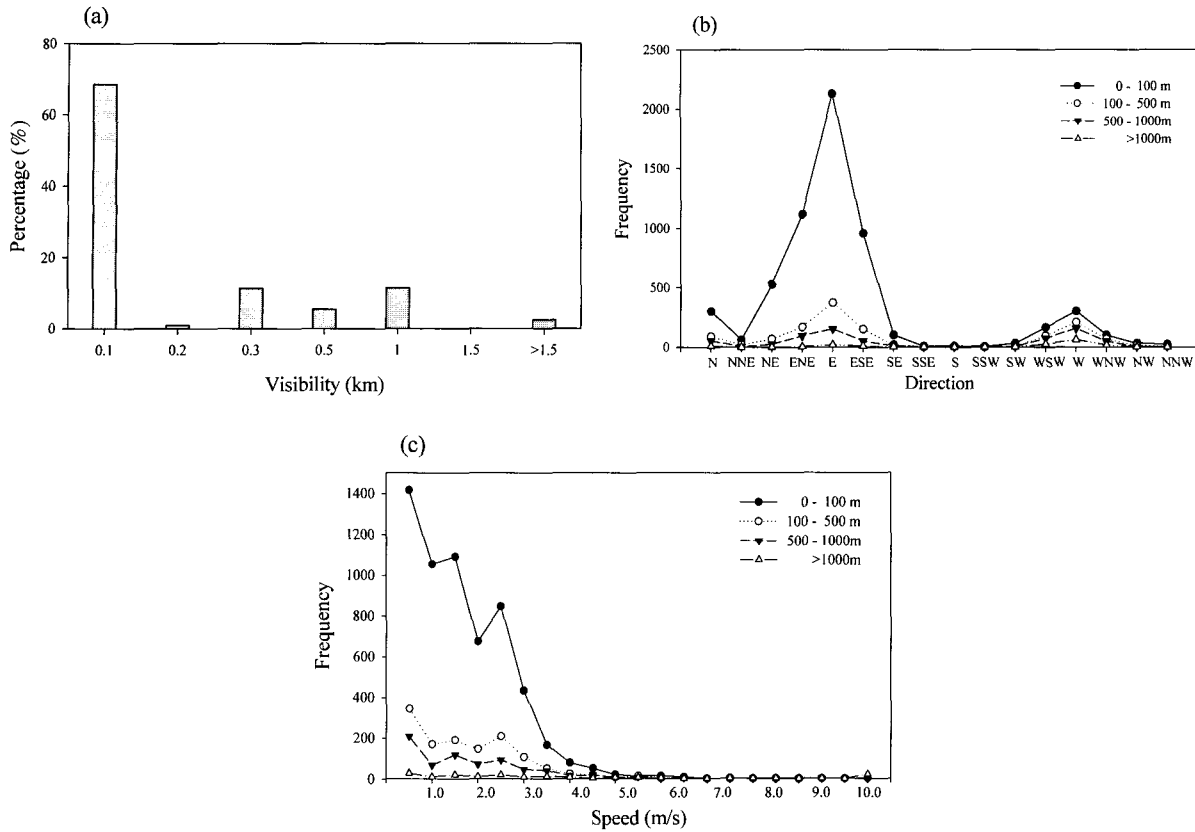


그림 8. 안개 발생 시 (a)시정과 (b)풍향 (c)풍속의 상관성

목측기록과 비교하였다. 그림 8(a)는 1km이하의 시정을 보인 전체 시간에 대한 각각의 시정 범위를 비율로 나타내었다. 안개의 68%이상 시정거리 100m 이내에서 발생하였음을 알 수 있다. 그림 8(b)와 그림 8(c)는 각 시정 범위에 대한 풍속 풍향의 분포를 나타내었다. 이를 보면 시정거리 100m일 때 동풍계열 2.0m/s이내에서 가장 높은 빈도수를 나타낸다. 안개 발생과 강수와의 상관성(그림 9)을 보면 대관령 기상대의 경우 여름철 안개가 발생할 때 50%이상 강수가 있음을 알 수

있다. 즉 시정 분포를 보면 여름철 잦은 강수와 안개 발생으로 인하여 다른 계절에 비해 평균 시정거리가 짧게 나타난다는 것을 알 수 있다.

4.2 안개의 입자 특성

대관령 안개의 미세물리 구조를 알기 위해서 FSSP를 이용하여 구름입자 크기와 수농도를 측정하였다. FSSP는 원래 항공기 장착용으로 개발되었으나 공기 흡입기를 표본공기 유입구에 장착하면 지상의 정지된

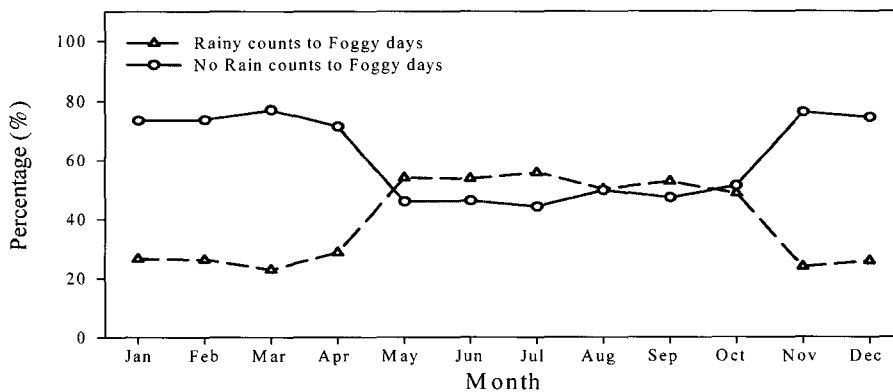


그림 9. 안개와 강수와의 상관성

위치에서 관측이 가능하다. 대관령기상대 노장 한편에 3m타워를 세우고 그 위에 FSSP를 설치하였으며 2003년 11월부터 관측이 시작되었다. 지상에서의 관측이기 때문에 구름이 관측고도(해발 840m)에 걸릴 때에만 구름입자가 관측된다. 엄밀히 말하면 관측되는 입자들이 대관령기상대의 입장에서는 안개입자라 할 수 있다.

구름의 수농도 값(Number concentration, N_c)은 구름입자를 사이즈별로 나누어 측정된 구간별 개수이다. 이는 FSSP에 의해 관측된 값을 샘플 볼륨 값으로 나누어 구할 수 있다. 구름의 수함량(Liquid water contents, L_c)은 물의 밀도를 $1g/cm^{-3}$ 이라 가정하여 각 채널별 수농도 값에 물의 부피 $(\pi/6) \times D^3$ 을 곱한 값을 모두 더해서 구할 수 있다. 여기서 사이즈별 입경크기는 Range 0에 해당하는 1채널의 크기 $2\sim 5\mu m$ 의 중간 값인 $3.5\mu m$ 를 선택하였다.

$$L_c = \frac{\pi}{6} \times \sum_{i=1}^{15ch} (N_{ci} \times D_i^3 (3.5)^3 \times 10^{-6}) (g/m^3) \quad (1)$$

구름 입자의 평균 직경(Mean volume diameter, MD)은 1차 모멘트를 이용하여 구한다. 1차 모멘트란 각 채널별 값에 그 채널에 맞는 직경(Range 0)을 선택하여 측정된 범위의 중간 값을 곱한 것을 말한다. 이것을 L_c 로 나누어서 구름의 평균직경을 구할 수 있다.

$$D = \frac{\sum_{i=1}^{15ch} (N_{ci} \times D_i)}{N_{ci}} \quad (2)$$

구름물의 평균 직경에 대한 표준편차(Standard

Deviation, SD)는 위에서 구한 평균 직경에서 각 채널별 직경을 빼서 편차를 구하고 2차 모멘트(그 편차의 제곱에 각 채널 값을 곱해준 값의 총합)를 구해 L_c 로 나누어 구한다.

$$\sigma(N_c) = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{15ch} \{(D_i - D)^2 \times N_{ci}\}}{N_{ci}}} \quad (3)$$

FSSP에 관한 보다 상세한 장비특성과 관측 원리는 염성수 등(2004)의 논문을 참조하기 바란다. 안개 입자의 분포를 알기 위해 2004년 3월 5일과 2004년 8월 2일의 두 사례를 선정하였다. 그림 10은 2004년 3월 5일의 기상요소별 시계열 분포를 나타낸 것으로 평균 기온 $-5.7^\circ C$, 동풍계열의 $1.4m/s$ 의 바람이 있었고 습도는 94.6%이다. 이날 안개는 14시 20분에 발생하여 18시 20분에 소멸하였다. 그림 11을 보면 바이칼호 서쪽과 몽골에 중심을 둔 찬 대륙 고압대가 만주지방까지 그 세력을 유지하고 남동진하고 있으며 남해상에 중심을 둔 고압대사이로는 기압골이 화중내륙에서 우리나라 중북부지방을 지나 연해주 방면으로 형성되어 있다. FSSP에 의해 관측된 시간은 12시 49분부터 16시 31분까지이다. 그림 12는 이 날 관측된 구름입자의 수농도(a)와 수함량, 평균직경(b)의 시간변화이다. 수농도는 $50cm^{-3}$ 에서 $200cm^{-3}$ 이며 극대치는 $250cm^{-3}$ 이다. 이때 안개입자의 크기는 $2\sim 5\mu m$ 가 대부분이다. 구름입자들의 수함량은 $20mg/m^3$ 으로 일정한 값을 보이고 평균직경도 $2\sim 4\mu m$ 안에서 일정한 값을 보이고 있다. 수농도는 $44.4 cm^{-3}$, 수함량은 $20mg/m^3$, 평균 직경은 $3.2 \mu m$ 을 나타내었다.

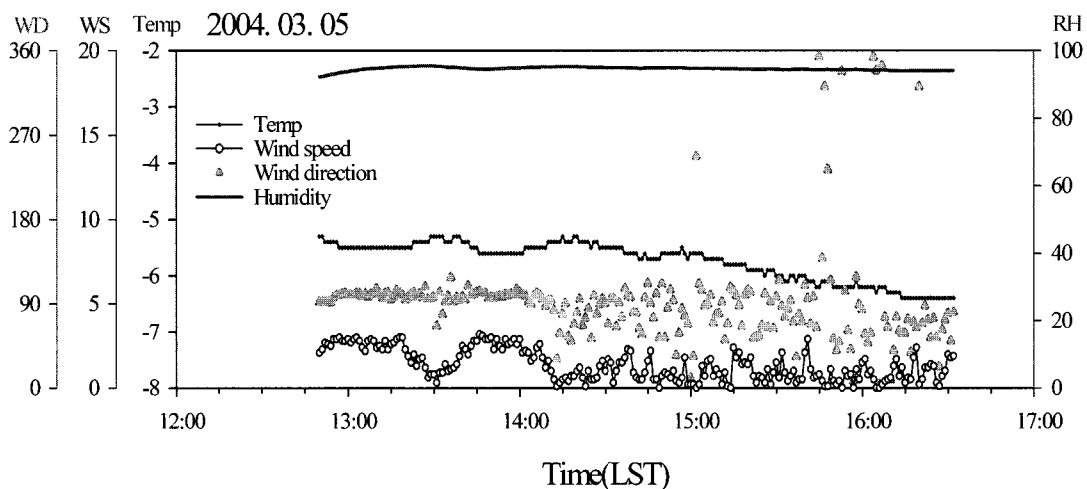


그림 10. 2004년 3월 5일 기상요소 시계열 분포

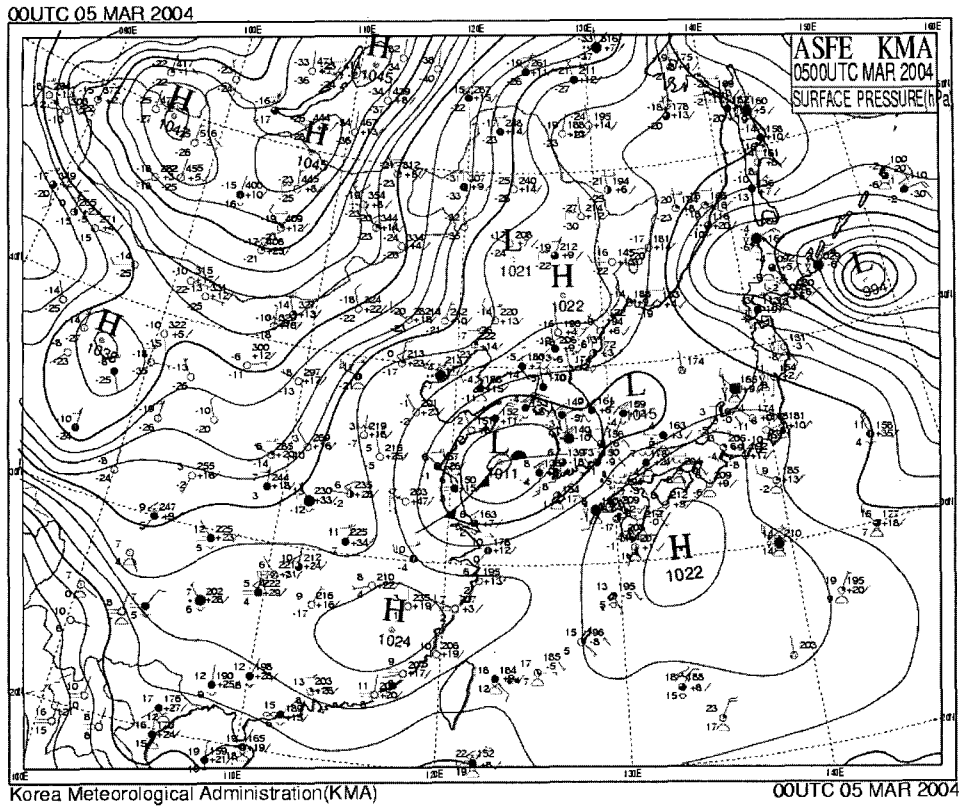


그림 11. 2004년 3월 5일 00UTC 지상일기도

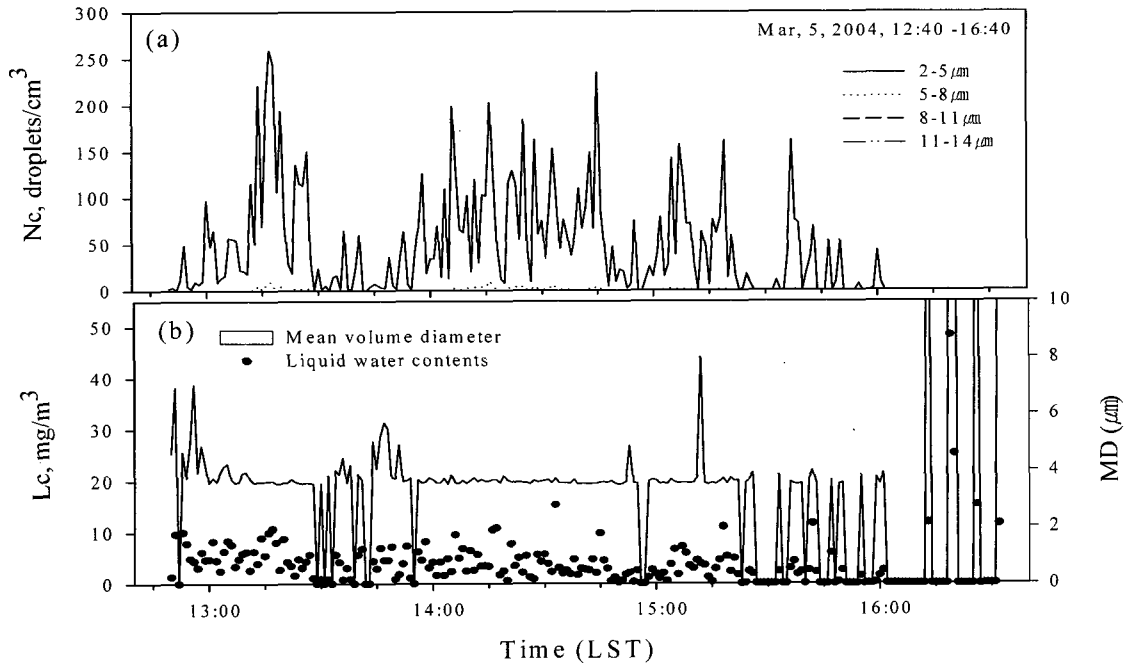


그림 12. FSSP에 의한 안개 입자별 수농도 분포(a), 수액량, 평균직경(b)(2004. 03. 05)

그림 13은 2004년 8월 2일의 기상요소별 시계열 분포를 나타낸 것으로 평균 기온은 19.3°C이며 동풍계열의

1.0m/s의 바람이 있었고 습도는 97.8%이다. 안개는 7월 31일부터 계속되다가 8월 2일 11시에 박무가 되었

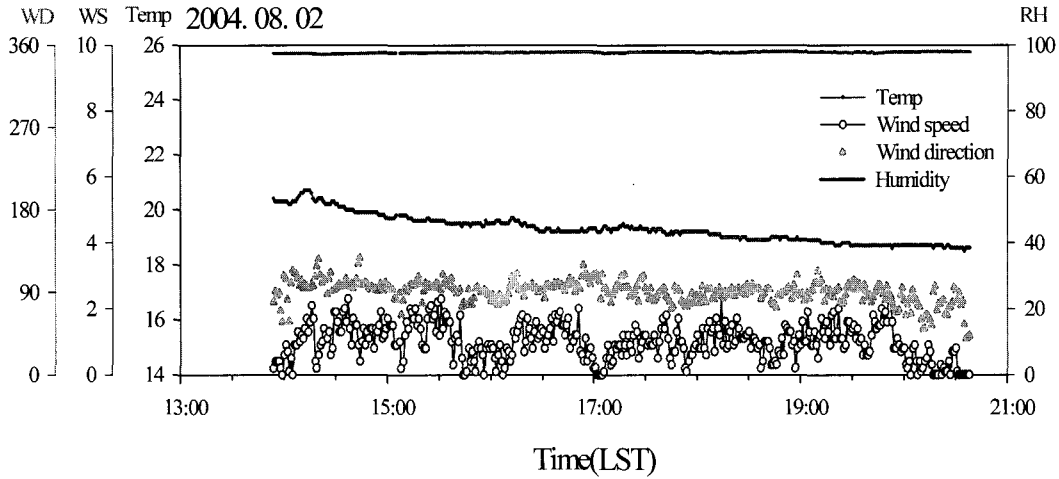


그림 13. 2004년 8월 2일 기상요소 시계열 분포

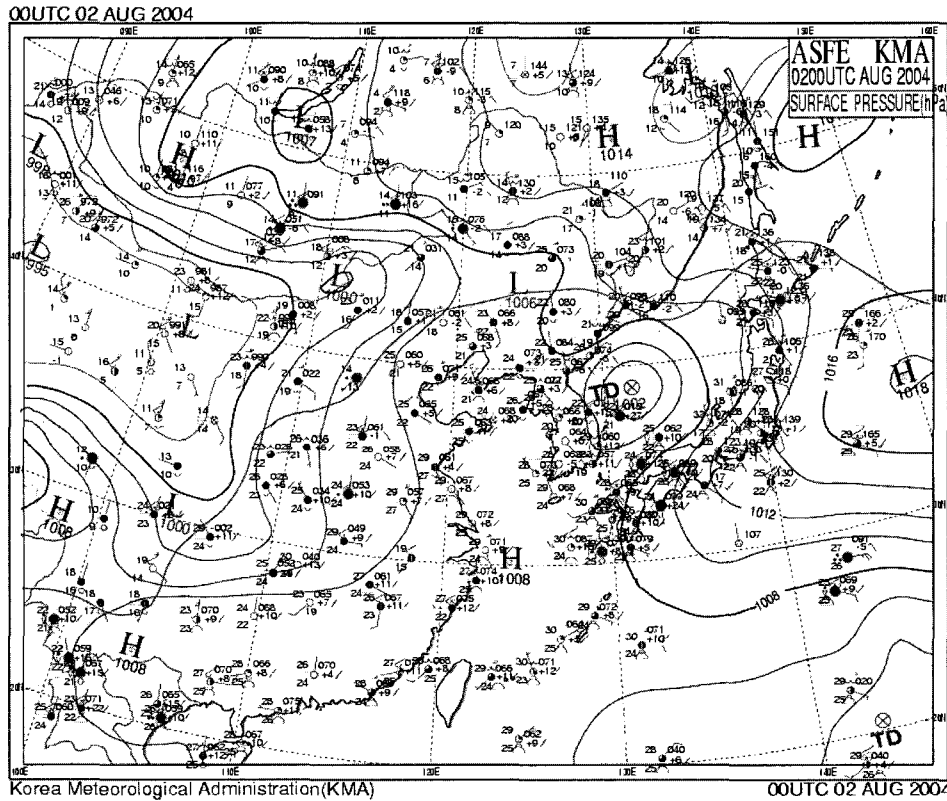


그림 14. 2004년 8월 2일 00UTC 지상일기도

다가 13시 20분부터 짙은 안개로 바뀌어서 22시 20분에 소멸되었다. 그림 14를 보면 태풍에서 약화된 이동성 저기압이 발생되어 동북부 해상으로 진행함으로서 한반도 주변은 기압경도력이 완화되어 우리나라는 북태평양고기압 가장자리에 있다. FSSP에 의해 관측된 시간은 13시 53분부터 20시 37분까지이다. 그림 15는 이 날 관측된 구름입자의 수농도(a)와 수합량, 평균직경(b)의 시간변화이다. 수농도는 100cm^{-3} 에서 300cm^{-3} 이며 극대치는 380cm^{-3} 이다. 관측 초기에는 2~5

μm 크기의 입자들이 대부분이었으나 후반으로 갈수록 다양한 크기의 안개들이 관측되었다. 구름입자들의 수합량은 $20\text{mg}/\text{m}^3$ 에서 $60\text{mg}/\text{m}^3$ 까지 점점 증가하는 경향을 보이고 있고 평균직경도 5~15 μm 안에서 시간이 지남에 따라 증가하는 경향을 보이고 있다. 수농도는 164.7cm^{-3} , 수합량은 $40\text{mg}/\text{m}^3$, 평균 직경은 6.1 μm 을 나타내었다.

입자들의 크기분포를 좀 더 자세히 살펴보기 위하여 두 사례의 평균입자분포를 그림 16에 나타내었다. 일

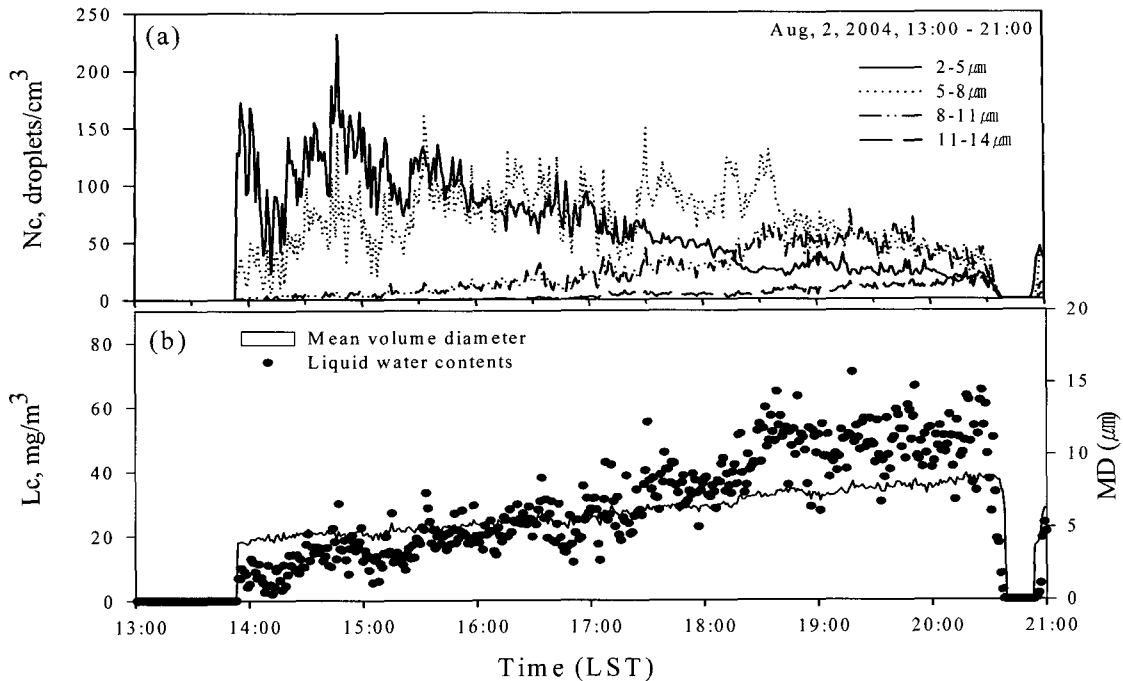


그림 15. FSSP에 의한 안개 입자별 수농도 분포(a), 수액량, 평균직경(b)(2004. 08. 02)

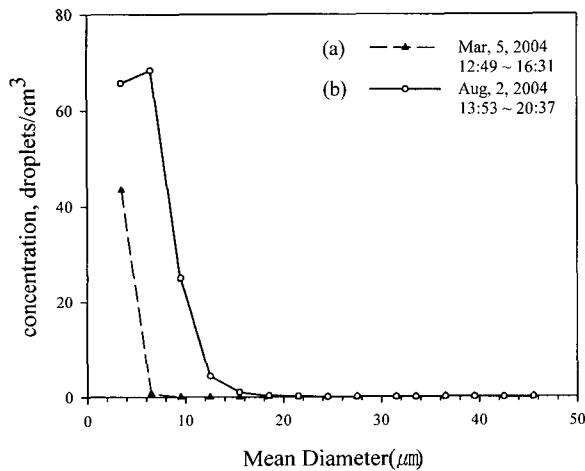


그림 16. 2004년 3월 5일(a)와 2004년 8월 2일(b)의 평균 수농도 분포

반적으로 구름입자 크기분포는 에어로솔 크기분포를 나타낼 때 주로 쓰이는 로그수밀도 함수보다는 각 채널별 수농도를 채널의 중앙값에 표시함으로써 나타낸다. 따라서 각 채널에서의 수농도 값은 채널의 너비 구간에 속하는 모든 입자의 수농도를 나타내며 사실상 수밀도함수의 의미를 갖는다. 2004년 3월 5일(그림 16(a))의 경우 채널1에 대부분의 구름입자가 존재하고 있다. 그러나 2004년 8월 2일(그림 16(b))의 경우는 최대값이 채널2에 나타나고 채널5에도 구름입자가 관측되었음을 알 수 있다.

5. Seeding과 안개소산

안개 소산은 공항에서 항공기 이착륙을 방해하는 안개에 의한 경제적 손실 때문에 시작되었다. 최초의 안개 소산 실험은 Veraat(1930)의 드라이아이스를 이용한 것이다. 그 후 Bergeron(1933)과 Findeisen(1935)에 의해 이론으로 정립되었고 Houghton(1938)은 흡습성물질을 이용하여 안개 소산 실험을 하였다. 2차 대전 중(1942)영국의 공군 비행장에서 연료 연소통 가열 방법을 안개 소산 실험에 최초로 적용하였고, 미국의 GE사(1946)가 supercooled 안개에 고체 CO₂를 이용하였다. Gerdel(1968)과 Kunkel(1970), Vardiman(1971)등의 결과를 보면 안개 소산 방법은 안개 발생 원인보다는 발생한 안개의 상태, 즉 냉안개(0°C이하, supercooled fog)와 온안개(0°C이상, warm fog)에 따라 결정된다. 가장 보편적으로 사용되는 냉안개 소산 방법은 Bergeron 방법이다. 인공의 얼음 입자를 투입하면 과냉각된 안개 입자가 증발하여 수증기가 얼음 입자 위에 흡착된다. 얼음입자가 충분히 커지면 부착에 의해 자라기 시작한다. 얼음입자가 눈으로 지상에 떨어질 때까지 성장하여 안개는 완전히 소산하게 된다. 안개가 완전히 소산되지 않더라도 작은 안개의 입자 개수가 줄어들어 시정이 좋아지게 된다. 이때 사용되는 입자로는 AgI와 그 밖의 인공 빙정핵을 뿌려주거나 드라이아이스 등

을 통해 주변의 온도를 급격히 낮추어 주어 빙정핵을 얻어 낼 수 있다. 빙정핵이 될 얼음 입자의 적합한 농도는 대상 안개의 특성과 안개의 소산 시간에 달려있다. 안개를 소산시키려면 빙정핵 농도는 리터당 10~50개로 비교적 낮은 농도를 사용한다. 결과적으로 얼음 결정이나 작은 눈송이로 떨어지게 되고 부분적이나 국지적으로 짧은 시간 안에 안개를 소산시키려면 리터당 1000개의 얼음입자가 있어야 한다(Jiusto and Weickmann, 1973). 이러한 경우 안개는 굵은 입자가 생성되며 시정은 항공기의 운행이 허용될 정도로 좋아 지지만 안개는 완전히 소산되지 않는다. 공항에서 시도 하는 전형적인 냉안개 제거 작업은 활주로와 평행한 경로를 따라 안개 층에 항공기로 2~3kg/km의 드라이아이스를 뿌리는 것이다. 빙정 커튼이 1km 간격으로 생길 정도의 빈도로 반복한다. 그 외의 방법은 낮은 속도로 상승하는 풍선에 드라이아이스 자루를 매달아 지상에서 근접하여 비행하는 항공기 뿌리기와 유사하게 그 경로를 움직이게 하는 것이다.

현재까지 냉안개의 경우는 소산하는 방법이 실용화 되었다고 할 만큼 많은 성과를 보고 있다. 러시아에서는 액체질소를 분사하여 냉안개의 침적을 유발함으로써 소산시키는 것이 일반화되어 있고 이 기술은 이탈리아의 북부지역 공항이나 고속도로에서 사용되고 있다.

온안개는 냉안개보다 훨씬 빈번하게 발생하는데 안개 소산은 온난 안개가 더 어렵다. 온난 안개의 조절 방법은 cloud seeding으로서 안개에 흡습성 물질을 뿌려 응결하도록 하여 안개 입자를 소산하는 것이다. 최소한 수 백 미터 정도의 두께를 가진 안개에서 흡습성 씨 뿌리기 물질이 떨어지는 동안 충분히 성장할 시간이 있을 때 안개 입자의 부착 효과가 중요하다. Houghton과 Radford (1938)는 최초로 흡습성 물질을 이용하여 온안개 소산 실험을 하였다. 이론적인 분석을 토대로 칼슘용액을 seeding 물질로 실험을 하였는데 seeding 결과 시정 개선효과가 수치예상보다 낮게 나왔지만 그 이후 흡습성 물질을 이용한 실험에 많은 영향을 주었다(Jiusto et al, 1968; Kunkel, 1973). 온난 안개의 인공 조절은 기술적인 측면에서 볼 때 구름의 인공 조절 때와 같이 운송 시스템과 씨 뿌리기 물질의 선택이 중요하다. 씨 뿌리기 물질로는 이미 사용했던 흡습성의 가루를 포함해서 주로 염화나트륨과 요소, 그리고 흡습성 물질의 살포가 있다. Silverman과 Kunkel (1970)은 건조 입자가 안개 속을 수 미터 떨어지는 동안 충분히 성장할 수 있는 낙하 속도를 갖는 살포 방법이 효과적이라는 결론을 내렸다. 이들은 모의실험에서 NaCl 가루의 최적 크기는 20마이크론으로

제안하였다. 그보다 입자 크기가 작으면 NaCl 용액 방울이 제시간 내에 충분히 자라 떨어지지 못하는 과다 살포 효과가 나타난다. 반면 크기가 50마이크론 이상이면 영향을 미치기 전에 낙하해 버린다. 공항의 경우 바람 쉬어와 난류가 활주로의 시정이 완전히 좋아지기 전에 안개 소산 지역을 다시 안개로 채워 버린다. 이런 영향을 극복하려면 초기 낙하 속도가 빠른 큰 입자가 필요하다. 이런 경우에 40마이크론 정도의 입자가 적당하다. 그러나 이상적 조건하에서 20마이크론의 입자를 사용할 때와 같은 효과를 얻으려면 거의 같은 개수의 입자를 사용해야 하므로 10배 정도의 물질이 필요하다.

6. 결 론

대관령 산악지역 안개 조절을 위한 구름특성 조사를 위하여 1987년~2003년 기간에 발생한 안개의 통계적인 특성과 기온, 바람, 강수 등 기상요소와의 상관성을 조사하였다. 대관령 안개의 대부분이 4시~6시에 발생하고 7시~9시에 소산됨을 보였다. 연평균 안개 지속시간은 10.4시간으로서 주로 여름철과 가을철에 발생하며 동풍계열의 기류가 유입될 경우 오래 지속되는 특성을 보였다. 가을철의 경우 활승무보다는 2~4시간의 지속시간을 가지는 복사무에 의한 안개의 발생빈도가 높지만 지속시간이 짧게 나타나고 겨울철의 경우 발생빈도는 낮지만 24시간 이상 지속되는 안개가 14% 이상 발생하여 복사무보다는 활승무의 영향이 높음을 보였다. 발생된 안개의 42% 이상이 여름철이며 특히 안개와 강수 현상을 동반하는 경우가 50% 이상으로 나타났다.

안개 발생시 기온은 0℃ 이하가 12.1%로 나타났고 -5℃ 이하가 1.9%로 낮은 빈도수를 보여 0℃ 이상이 85%로서 대관령 안개의 대부분이 온안개임을 알 수 있다. 안개와 바람과의 관계에서 동풍계열의 바람이 있을 때 65% 이상으로서 대부분의 안개가 2m/s 이하의 풍속에서 발생하였다. 시정과와의 관계에서 시정이 100m이내의 짙은 안개가 자주 발생하였다.

대관령에서 발생하는 안개의 안개 입자분포를 파악하기 위해 전방산란스펙트로미터(FSSP)관측값을 분석한 결과 두 사례의 경우에서 평균직경이 3.2 μ m를 가진 냉안개의 수농도는 44.4 cm^{-3} 수함량은 20 mg/m^3 이고 온안개의 경우 수농도는 164.7 cm^{-3} 평균직경은 6.1 μ m, 수함량은 40 mg/m^3 로서 수농도에서 큰 차이를 보였다. 수농도와 직경과 수함량 등의 차이가 있으므로 소산을 위한 구름씨뿌리기 물질 사용량을 조절함이 요구된다. 대관령은 냉안개와 온안개가 나타나는 지역이므로 -

5°C이하의 냉안개의 경우 옥화은(AgI)을 사용하고 온안개의 경우 흡습성물질(hygroscopic)에 의한 소산 실험을 수행할 수 있음을 파악하였다.

감사의 글

이 연구는 기상청에서 시행하는 기상지진 기술개발 사업의 “한반도 기상조절 기술개발” 과제의 지원으로 수행되었다.

참고 문헌

- 기상연구소 (2004) 한반도 기상조절 기술개발(I), MR033R13, pp. 60-66
- 김경익, 민경덕, 윤일희, 박상군 (1995) 보현산 천문대의 안개 발생 빈도분석, 한국기상학회지, 31(1), pp. 35-44.
- 김성삼, 이내영 (1970) 한국 안개 기후구 설정에 관하여, 한국기상학회지, Vol. 6, pp. 1-15
- 민경덕, 김동정 (1990) : 가을철 한반도의 기압계 유형과 안개 발생에 관한 연구, 경북대학교 환경과학 연구소, Vol. 4, pp. 13-32.
- 신현진 (1978) 대관령 농무 특성에 관하여, 한국기상학회지, 14(1), pp. 21-28.
- 염성수 (2004) : 작은 온난 적운에서의 구름미세물리 상관관계의 규모 의존성, 한국기상학회지, 40(5), pp. 531-540
- 염성수, 오성남, 김정윤, 김창기, 남재철 (2004) 전방산란 스펙트로미터(FSSP)를 이용한 한반도에서의 구름입자 크기분포 관측, 한국기상학회지, 40(5), pp. 623-631.
- 전종갑, 이은정, 류승아, 유수현 (1998) 우리 나라 지역별 안개 발생 특성과 대기 오염물질 농도와와의 관계, 한국기상학회지, 34(3), pp. 486-496.
- 허인혜, 이승호 (1998) 한국의 안개 분포와 특성, 한국지리환경교육학회지, pp. 71-85.
- Ahrens, C. D. (1985) Meteorology today, 2nd ed. Westing Publishing Co., pp. 523.
- Appleman H. S, Coons Jr. F. G (1970) The Use of Jet Aircraft Engines to Dissipate Warm Fog. *Journal of Applied Meteorology*, Vol. 9, No. 3, pp. 464 - 467.
- Geoge, J.J. (1951) Compendium of Meteorology. *American Meteorological Society*, pp. 1179-1189.
- Geoge, J.J. (1960) Weather Forecasting for Aeronautics. *Academic Press.*, pp. 667.
- Gerdel R. W. (1968) Note on the Use of Liquefied Propane for Fog Dispersal at the Medford-Jackson Airport, Oregon. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 7, No. 6, pp. 1039 - 1040.
- Houghton, H. G., and W. H. Radford (1938) On the local dissipation of natural fog. *papers Phys. Oceanogr. Meteor.*, 6, No. 3, pp. 63
- Jiusto J. E. Pilie R. J. and Kocmond W. C. (1968) Fog Modification with Giant Hygroscopic Nuclei. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 7, No. 5, pp. 860 - 869.
- Kunkel B. A. (1973) A Statistical Approach to Evaluating Fog Dispersal Operations. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 12, No. 5, pp. 883 - 887.
- Kunkel B. A. (1979) A Modern Thermo-Kinetic Warm Fog Dispersal System for Commercial Airports. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 18, No. 6, pp. 794 - 803.
- Kunkel B. A., Silverman B. A. (1970) A Comparison of the Warm Fog Clearing Capabilities of Some Hygroscopic Materials. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 9, No. 4, pp. 634 - 638.
- Kunkel B. A., Silverman B. A. and Weinstein A. I. (1974) An Evaluation of Some Thermal Fog Dispersal Experiments. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 13, No. 6, pp. 666 - 675.
- Silverman B. A. and Kunkel B. A. (1970) A Numerical Model of Warm Fog Dissipation by Hygroscopic Particle Seeding. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 9, No. 4, pp. 627 - 633.
- Vardiman Larry, Figgins E. D. and Appleman H. S. (1971) Operational Dissipation of Supercooled Fog Using Liquid Propane. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 10, No. 3, pp. 515 - 525.
- Weinstein A. I. (1974) Projected Utilization of Warm Fog Dispersal Systems at Several Major Airports. *Journal of Applied Meteorology*: Vol. 13, No. 7, pp. 788 - 795.

© 논문접수일 : 2005년 06월 09일

© 심사의뢰일 : 2005년 06월 09일

© 심사완료일 : 2005년 06월 27일