

부산 서부지역의 이슬 생성과 화학적 특성

전 병 일 · 황 용 식 · 박 문 포*

신라대학교 환경공학과, *인제대학교 산업의학연구소, **기상청 밀양관측소
(2004년 11월 29일 접수; 2004년 12월 24일 채택)

Formation and Chemical Characteristics of Dewfall in Western Busan Area

Byung-II Jeon, Yong-Sik Hwang* and Moon-Po Park**

Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea

*Institute of Industrial Medicine, Inje University, Busan 633-165, Korea

**Milyang Meteorological Observatory, Korean Meteorological Administration, Milyang 627-130, Korea

(Manuscript received 29 November, 2004; accepted 24 December, 2004)

In order to understand chemical characteristics and dewfall formation in western Busan area, we analysed monthly distribution of dewfall, and investigated the correlation between dewfall formation amount and meteorological factors. This study used the modified teflon plate (1m×1m) at Silla university in Busan from August 2002 to April 2003. In order to estimate qualitatively water soluble components, IC, ICP and UV methods for water soluble ions are also used respectively. Dewfall amount of sampling periods (47 day) collected 3.8 mm. Meteorological conditions for the formation of dewfall above 50 g/m² showed that temperature diurnal range(°C) was 5.6°C above, cloud amounts (1/10) at dawn of the sampling day was 7/10 below, mean wind speed at dawn (0~6hr) of the sampling day was 4.4 m/sec below, and mixing ratio at 6hr of the sampling day was 3.2 g/kg above. Distribution of water soluble ions in dewfall founded the highest concentration (206.1 µeq/l for SO₄²⁻, 42.4 µeq/l for NH₄⁺, 249.2 µeq/l for Ca²⁺, and 42.0 µeq/l for Mg²⁺) during the March, the lowest concentration (73.0 µeq/l for SO₄²⁻, 4.6 µeq/l for NH₄⁺ and 72.7µeq/l for Ca²⁺) during the August. Monthly equivalent ratio of [SO₄²⁻]/[NO₃⁻] showed the highest value (4.99) during the October, the lowest value (1.84) during the August, and the mean value was 3.45.

Key Words : Dewfall, Meteorological condition, Water soluble ion, Equivalent ratio

1. 서 론

이슬은 지표의 물체가 야간복사에 의해 냉각되어 부근의 기온이 이슬점이하로 떨어지면서 응결되어 생성된 것이다¹⁾. 이슬생성의 세 가지 기본적인 조건은 풍부한 습기와 충분한 야간복사냉각 그리고 지면이나 풀잎사귀 등에 수분이 풍부하여야 한다. 충분한 습기는 주위의 호수 또는 연안으로부터 공급되거나 비가 온 후의 습한 토양에서 공급된다고 할

수 있다. 우리나라에 늦여름부터 늦가을까지 이슬이 많이 생기는 이유가 이와 같은 조건을 갖추었기 때문이다. 한여름의 경우, 습기는 풍부하지만 충분한 야간복사냉각이 어렵고, 한겨울의 경우, 야간복사는 강하지만 공기 중의 습기가 부족하다. 최대의 복사냉각을 얻기 위해서는 (1) 맑은 하늘, (2) 약한 바람 (3) 지표근처에 차갑고 건조한 공기가 습한 공기를 덮을 조건이 필요하다²⁾.

이슬의 역할을 생태학적 관점에서 보면, 어린 묘목의 생존과 생장을 연장시켜 작물증산을 증가시키거나, 식물의 증산작용을 감소시키며 잎이 시드는 것을 막고 열대지역에서의 착생 미생물 서식환경에 습도를 증가시키는 장점이 있다³⁾. 또한 이슬은 농작

Corresponding Author : Byung-II Jeon, Department of Environmental Engineering, Silla University, Busan 617-736, Korea
Phone: +82-51-309-5056
E-mail: bijeon@silla.ac.kr

물에 대하여 지상으로부터 물 공급원이 될 뿐만 아니라, 이슬에 의하여 농작물의 염류농도가 조절되어 작물생리에 좋은 영향을 끼친다. 한편, 농작물의 염면에 이슬이 많이 맺히면, 밤 동안의 호흡작용이 방해되어 농작물의 소모가 적어지므로 기온의 일교차가 큰 것과 같은 영향을 작물영양생리에 주게 되므로 좋은 결과를 가져다준다. 또한 강수량이 적은 섬 지방에서는 이슬을 인공적으로 포집하여 생활용수로 사용하는가 하면, 심지어 음용수로 사용하는 방안도 고려중인 지역도 있다⁴⁾.

그러나 이슬이 자주 맺혀 작물체의 표면이 장시간 젖어 있으면 박테리아와 균에 의한 감염을 증진시켜 병원균이 번식하기 쉽다. 과일 및 채소의 표면에 이슬이 많이 붙으면 얼룩점이 생기는 원인이 되어 품질이 나빠질 염려가 있다. 또한 이슬은 많은 식물질병의 번식과 확장, 벌레의 활동 그리고 살충제의 살포에 중요한 역할을 한다. 그리고 땅콩, 면, 감귤류 등의 농작물 수확량은 이슬에 의해 많은 영향을 받는다⁵⁾. 이슬은 표면젖음 현상으로 인해 재료의 부식에 매우 큰 기여를 할 수 있다. 표면젖음은 재료에 전해질을 제공해서 전기화학적 부식을 향상시키고 산성매개물질의 증가는 화학적인 반응이 활발하도록 한다.

우리나라에서 이슬에 대한 연구의 사례를 살펴보면, 주영특과 김영채⁶⁾가 산성이슬과 분진이 수목에 미치는 영향을 알기 위해 경부고속도로변의 수목을 이용하여 생육상태, 엽록소 함량, 부착분진량, 이슬의 산도를 조사한 바 있다. 정용승과 김태근⁷⁾은 충분 청원군에서 안개, 이슬, 서리를 채취해 산성도와 그 변동을 분석한 바 있으나, 그 화학적 조성에 대해서는 조사하지 않았다. 이정택 등⁸⁾은 비 준락 내 습윤상태를 추정하고자 이슬추정시간을 검토하여 사용한 바 있다. 또한 김영채 등⁹⁾은 산림지역 내에 형성되는 이슬의 pH와 화학적 특성 그리고 용존원 소량을 파악하기 위해 서울의 남산, 경기도 신갈, 강원도 평창의 3개 지역을 대상으로 이슬을 채취하여 분석한 바 있다.

우리나라에서는 이슬생성과 기상요소와의 관계나 산성이슬의 화학적인 특성과 조성에 관한 체계적인 연구를 한 바는 아직까지 없는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 부산시 사상구 패법동에서 이슬을 포집하여 기상조건에 따른 이슬의 생성 및 화학적 조성 특성을 밝히고자 하였다.

2. 실험방법

2.1. 이슬 포집지점과 포집기간

본 연구를 위한 이슬 포집지점은 Fig. 1과 같이 부산시 사상구 패법동 신라대학교 자연관 옆 잔디

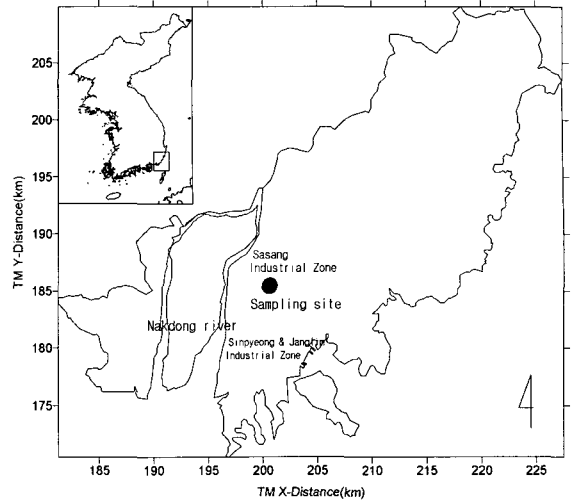


Fig. 1. Location of sampling site in Busan western area.

밭에서 인위적인 영향이 최소화되도록 선정하였다. 측정지점의 주위는 백양산으로 둘러싸여 있으며 남서쪽으로 계곡이 있고, 포집지점과 약 3 km 떨어진 지역에 사상공업지역이 위치하고 있으나, 최근에는 많은 공장이 타 지역으로 이주하여 점오염원의 영향이 많이 소멸한데 비해, 대형 유통단지가 들어섬에 따라 자동차의 증가가 뚜렷하여 선오염원에 의한 영향이 증가되고 있다. 측정지점 주위의 특별한 점오염원은 사상지역에서 남쪽으로 5 km 떨어진 신평·장림공단에 많이 분포하고 있고, 남서풍이 유입될 경우에는 신평·장림공단과 사상지역에서 오염물질이 이류하여 본 측정지점에 영향을 미칠 수 있다. 이슬의 포집기간은 2002년 8월부터 2003년 4월까지이며, 이슬이 서리로 변하는 기간인 겨울철을 제외한 2002년 8월, 9월, 10월 그리고 2003년 3월, 4월의 총 5개월간이다.

2.2. 이슬의 포집방법

이슬 포집장치는 지면으로부터의 지구복사를 차단하기 위해 2 mm의 합판 위에 야간복사에 의한 냉각효과를 유발하기 위해 2 mm의 두께의 알루미늄 판을 부착시키고, 그 위에 화학적으로 반응이 없는 2 mm 두께와 1 m x 1 m 넓이의 테플론 판로 구성되어 있다. 이 판들은 지표로부터의 오염을 제거하기 위해 지면으로부터 약 1 m 위에 설치하였다. 이슬의 포집은 이슬이 발생할 수 있는 기상조건(운량이 5/10 이하이고, 풍속이 5 m/sec 이하)이라고 판단되는 전날 저녁 9시경에 지정된 장소에 설치하고 일출 전에 화학적으로 깨끗한 테플론을 이용하여 표면에 생긴 이슬 전량을 깨끗하게 쓸어 담아 초순수로 세척된 폴리에틸렌 병에 수집하였다.

2.3. pH 측정과 전기전도도 측정

테플론 판으로부터 이슬을 포집한 후, 바로 현지에서 pH 측정기(Orion, 410)와 전기전도도계(HI 991300, Hanna계)를 이용하여 pH와 전기전도도를 측정하였다. pH meter는 표준용액(pH 4.0과 pH 7.0)으로 보정하였으며, 전기전도도는 측정 전에 1,413 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 과 1100배 희석한 1.28 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 의 표준용액(HI7031)을 사용하여 실온에서 전극의 눈금 보정을 하였다. 두 항목을 측정된 후 실험실로 가져와 0.45 μm 필터를 이용하여 침전물이나 부유물을 제거한 후, 4°C의 온도를 유지하는 냉장고에 보관하였고, 이온 분석은 가능하면 시료 채취 당일 또는 그 다음날 실시하였다.

2.4. 기상자료

이슬발생량을 기상조건과 관련시켜 고찰하기 위해 기상자료의 확보가 매우 중요하다. 특히 이슬량에 영향을 미치는 기온, 풍속 그리고 운량의 자료를 부산지방기상청에서 관측한 일기상통계표¹⁰⁾를 이용하였으며, 또한 공기 중의 혼합비를 계산하기 위해서 수증기압과 현지기압을 이용하였다.

2.5. 화학적 성분 분석

화학적 성분을 분석하기 위하여 4°C에서 냉장 보관된 이슬 시료는 이온 크로마토그래피(IC; DX-500, Dionex Co., USA)를 이용하여 Cl⁻, F⁻, NO₃⁻, PO₄³⁻ 및 SO₄²⁻를 분석하였다. 이들 음이온 분석시 사용된 컬럼은 IonPac AS14이며, 이동상은 3.5 mM Na₂CO₃와 1 mM NaHCO₃을 혼합하여 사용하였다. 그러나 F와 PO₄³⁻은 대부분의 시료에서 검출한계(각각 0.01, 0.05 ppm)이하로 나타나 제외하였으며, NH₄⁺은 흡광광도계(U-2000, Hitachi Co., Japan)를 이용하여 인도페놀법으로 분석하였다. 또한 양이온(Ca²⁺, Na⁺, K⁺ 및 Mg²⁺)은 여과후에 그 여액을 여러 가지 금속성분의 동시 정량이 가능한 ICP/AES(ICP-IRIS, Thermo Jarrell Ash Co., USA)를 이용하여 ICP법으로 분석하였다. 이들의 검출한계는 각각 0.003, 0.010, 0.010 및 0.003 ppm이며, 검출한계 이하의 자료는 ND(Not detected)로 표시하였다. 정량 분석된 원시 자료는 이슬 채취량을 가중하여 계산한 후 자료해석에 활용하였다. 따라서 본 연구에서 분석한 이온 성분은 Cl⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻의 음이온과 NH₄⁺, Ca²⁺, K⁺, Mg²⁺, Na⁺ 양이온으로 모두 8개 항목이다. 이슬 시료 중 H⁺의 농도는 pH 측정치로부터 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 이슬발생량

Table 1은 부산지역에서 연구기간 중 포집된 이슬발생일수와 이슬발생량을 나타낸 것이다. 이슬포집일수는 2002년 8월에 5일, 9월에 12일, 10월에 12일, 그리고 2003년 3월에 9일, 4월에 9일로 총 47일이었으며, 이슬발생량을 강수량으로 환산하였을 때, 2002년 9월이 가장 많은 1.3 mm이었고, 2003년 3월이 가장 적은 0.4 mm을 기록하였다. 이슬발생량은 전체 강수량에 비해 매우 적은 양이지만, 비가 전혀 오지 않는 가뭄이라면 농작물의 성장에 매우 큰 효과를 발휘할 것으로 판단된다. 연구기간 중(5개월)의 47일간 연구지역에서 포집된 이슬량은 3.8 mm로 부산지방의 30년간 평균 강수량(1491.6 mm)의 1/392에 해당하는 것으로 나타났으며¹¹⁾, 부산지역에서 지난 10년간(1993~2002) 연평균 이슬발생일수를 92.4일로 하여 이슬발생량을 계산한다면¹⁰⁾ 대략 7.6 mm의 이슬이 생성된다고 할 수 있다. 이는 연평균 강수량의 1/196에 해당하는 것으로 Takeuchi et al.¹²⁾에 의해 일본 요코하마에서 조사된 1/250보다 많은 이슬량을 나타내었다.

이슬이 습윤한 지역에서는 습기의 중요한 공급원이 아니지만 척박한 지역에서의 식물 생물체는 그들의 생존에 매우 중요하다. 예를 들면 이스라엘지방에서 이슬은 매년 55 mm에 해당하는 강수량을 공급하며, 가뭄인 시기에 이슬 강수량이 비 강수량을 초과하는 이스라엘의 Negev 사막 같은 곳은 특히 중요하며, 이러한 습기는 식물이 가장 큰 스트레스를 받을 시기인 건조한 여름철에 매우 유용한 역할을 한다^{2,13)}.

3.2. 이슬발생량과 기상인자

3.2.1. 이슬량과 일교차

이슬은 야간복사에 의해 지표면이 충분히 냉각되면 많은 이슬이 생성될 수 있으므로, 냉각율의 근거가 되는 이슬 측정 전일의 최고기온과 당일의 최저기온의 차(일교차)가 매우 커야 한다. Fig. 2(a)는 이슬발생량과 일교차와의 관계를 나타낸 것이다. 여기에서, 일교차가 클수록 이슬량이 증가하는 경향을 나타내었다. 일교차가 7 °C 이상이면 대부분 50 g/m² 이상의 이슬이 생성된 것으로 나타나, 일교차가 매우 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다. 100 g/m² 이

Table 1. Occurrence day and amount(mm) of dewfall in Busan

Element \ Month	Aug. 2002	Sep. 2002.	Oct. 2002	Mar. 2003	Apr. 2003
Occurrence day	5	12	12	9	9
Amount(mm)	0.4	1.3	1.0	0.5	0.6

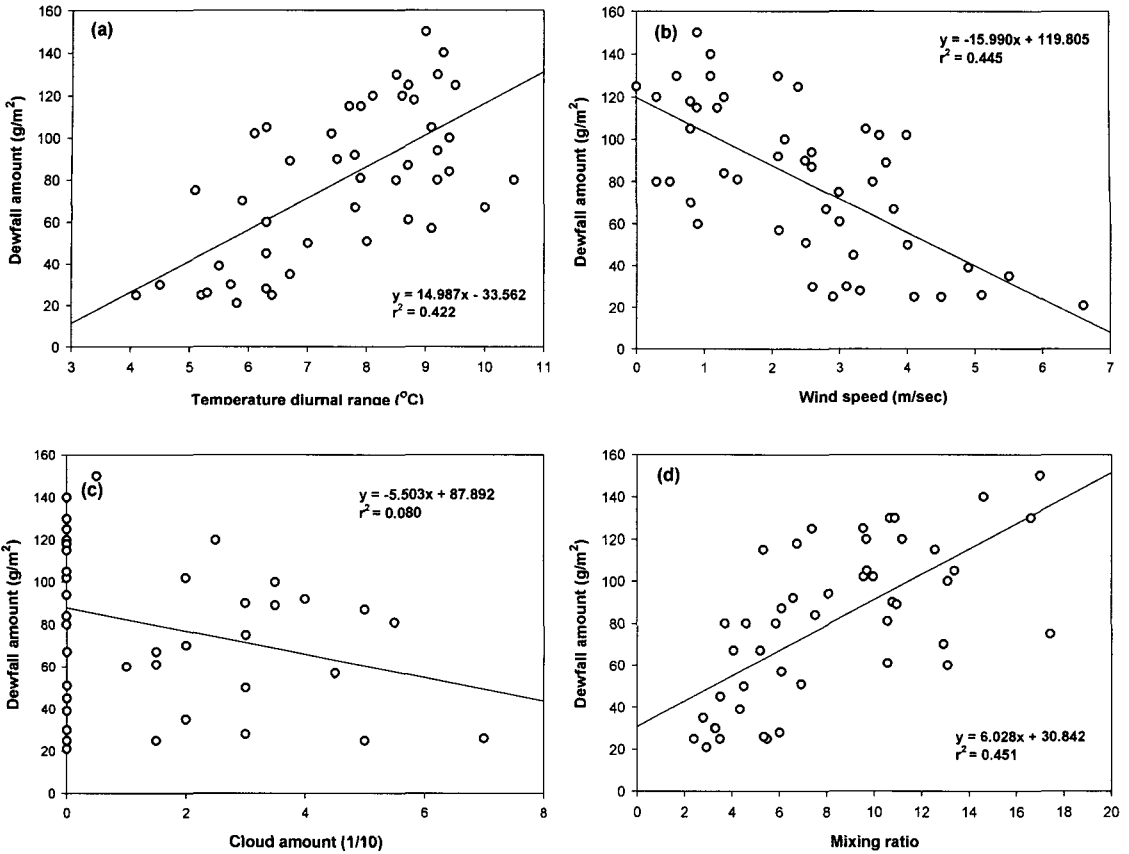


Fig. 2. Relationship between meteorological elements (temperature diurnal range(a), wind speed(b), cloud amount(c), mixing ratio(d)) and dewfall amount.

상의 이슬량을 나타낸 경우는 일교차가 8~9 °C일 때로 나타났다.

3.2.2. 이슬량과 풍속

Fig. 2(b)는 이슬량과 측정당일 새벽 0시부터 6시까지 6시간 동안의 평균풍속과의 관계를 나타낸 것이다. 풍속이 증가함에 따라 이슬량이 감소하는 경향을 나타내고 있다. 50 g/m² 이상의 이슬량을 나타내기 위해서는 풍속이 4 m/s 이하이고, 120 g/m² 이상의 이슬량을 생성하기 위해서는 2.5 m/s 이하의 약한 풍속이 있어야 된다는 것을 시사하고 있다. 따라서 새벽의 풍속은 이슬의 생성에 매우 중요한 역할을 하는 것으로 보이며, 풍속이 크면 이슬의 생성효과보다도 증발효과가 더 크기 때문에 이슬 생성이 멈추던가, 증발되어 결국 감소하는 경향이 나타난다¹⁴⁾.

3.2.3. 이슬량과 운량

Fig. 2(c)는 이슬량과 오전 3시와 6시의 평균운량과의 관계를 나타낸 것이다. 새벽의 운량은 지표면의 야간복사의 강도를 좌우하는 중요한 역할을 한

다. 그림에 의하면 운량이 0(쾌청)인 경우가 대부분으로 나타났으며, 50 g/m² 이상의 이슬이 생성되기 위해서는 7/10이하의 운량이 있는 경우라고 할 수 있다.

3.3.4. 이슬량과 혼합비

Fig. 2(d)는 이슬량과 혼합비와의 관계를 나타낸 것이다. 혼합비는 습윤공기 중에 포함된 건조공기와 수증기의 질량비(g/kg)를 말하며, 공기 중의 절대습도를 나타내는 인자로서 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 다음과 같은 식 (1)를 사용하여 혼합비(W)를 계산하였다.

$$W = \frac{0.622e}{P - e} \quad (1)$$

여기서, P는 현지기압, e는 수증기압으로 부산지방기상청에서 관측한 일기상통계표의 값을 이용하였다. 그림에서 보면, 혼합비가 증가할수록 이슬량이 증가하는 것을 알 수 있다. 혼합비가 3.2 g/kg 이상일 때, 50 g/m² 이상의 이슬량을 나타내었다. 본 연구에서 이슬이 포집된 경우의 2003년 3과 4월의

평균혼합비가 3.8 g/kg, 5.8 g/kg인 것을 감안한다면 혼합비와 이슬량의 관계는 매우 유의하다고 할 수 있다.

따라서 이슬생성량과 기상요소와의 관계를 통해서 얻어진 결과를 종합하면, 50 g/m² 이상의 이슬이 생성되기 위해서는 포집 전일의 최고기온과 포집 당일의 일교차가 5.6 °C 이상, 포집 당일 새벽의 평균 풍속이 7/10이하, 포집일 새벽(0시~6시)의 평균 풍속이 4.4 m/s이하, 포집일 6시의 혼합비가 3.2 g/kg 이상일 때라고 할 수 있다. 이러한 조건은 향후 이슬 연구에 매우 유용하게 사용될 수 있을 것이라 판단된다.

3.3. 이슬의 화학적 조성

3.3.1. 분석자료의 검증

순수 자연대기에서 이온물질은 평형을 이루어야 하나 분석기기, 분석방법, 분석자의 부주의 등으로 인하여 실제 참값과는 많은 차이를 보일 수 있다¹⁵⁾. 현재 강수 중 함유된 이온성분의 신뢰성을 평가하는 방법에는 전기적 중성원리를 기본으로 하는 이온수지법과 전기전도도법이 있다¹⁶⁾. 이온수지법은 분석된 시료 중에서 함유된 음이온의 당량농도 총합과 양이온의 당량농도 총합의 비로서 나타낸다.

Fig. 3은 본 연구지점에서 포집된 이슬의 수용성 이온성분 결과를 이온수지법을 적용하여 양이온의 총합과 음이온의 총합의 관계를 도식화 한 것이다. 본 연구에서는 두 값 사이의 결정계수(r^2)가 0.974로 나타났다. 전체적인 이온수지의 분포를 보면, 총 양이온은 저농도에서 우세하게 나타났고 총 음이온은 고농도에서 우세하게 나타났다. 또한 전기전도도법에서 계산된 전기전도도와 실측된 전기전도도 사이의 상관계수는 0.921로서 유의한 차이($p < 0.01$)를 보였다. 이들 값들은 20% 이내의 허용오차 범위¹⁷⁾를 만족함으로써 자료해석에는 문제가 없는 것으로 판

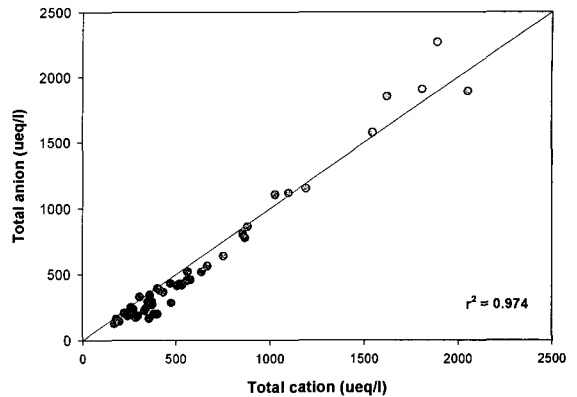


Fig. 3. Relationship between the sum of cations and the sum of anions. The straight line represents one-to-one line between the sum of cations and anions.

단되며, 따라서 본 연구에 이용된 분석자료의 품질은 매우 양호한 것으로 나타났다.

3.3.2. 이슬의 화학적 조성과의 타 지역과의 비교

Table 2는 부산과 일본의 요코하마 그리고 미국의 미시간, 인디애나 폴리스, 아칸사스, 펜실바니아에서 포집된 이슬의 화학적 성분을 조사하여 나타낸 것이다^{14,18~21)}. 부산지역의 평균 pH는 5.26으로 일본의 요코하마의 5.41과 미국의 인디애나폴리스의 6.82보다 낮았다. 따라서 두 지역에 비해 산성인 이슬이 발생하는 것으로 나타났다. Na⁺, K⁺, Cl⁻은 일본의 요코하마에 비해 높게 나타났고, 나머지 성분인 NH₄⁺, Mg²⁺, Ca²⁺, NO₃⁻, SO₄²⁻ 등은 낮게 나타났다. 또한 미국의 인디애나폴리스에 비해서 Mg²⁺, Ca²⁺를 제외한 다른 이온성분들은 부산지역의 이온성분이 높게 나타났으며, Na⁺과 Cl⁻은 해양의 영향으로 특히 더 높은 값을 보였다. 그리고 Mg²⁺는 요

Table 2. Volume-weighted mean concentrations (ueq/l) range of major ions in dewfall in Busan and other sites

	This study		Okochi et al., ¹⁴⁾		Mulawa et al., ¹⁸⁾	Foster et al., ¹⁹⁾		Wanger et al., ²⁰⁾	Pierson et al., ²¹⁾	
	Busan n=47		Yokohama, Japan n=52		Warren, Michigan n=9~40	Indianapolis, Indiana n=20		Fayetteville, Arkansas n=93	Allegheny Pennsylvania	
pH	5.26	4.39~7.6	5.41	4.11~7.74	3.62~8.20	6.82	6.2~6.8	6.37	4.0	3.5~5.3
Cl ⁻	348.6	49~2214	165	32.4~1013	106±252	6.1	3.3~16	11	5	0.3~16
NO ₃ ⁻	44.7	5~126.6	92.4	10.1~1003	166±282	25.5	2.2~78	38	32	3~138
SO ₄ ²⁻	123.8	30.6~588.3	271	20.5~1864	242±312	31.6	3.8~106	66	73	10~254
NH ₄ ⁺	20.3	0.1~99	454	64.1~3470	65±26	6.9	3.7~105	94	8	0~55
Ca ²⁺	139.0	27.7~661	274	28.9~2064	690±935	150	50~266	115		
K ⁺	234.5	14.1~1758	22.8	4.58~147	4.1±3	1.3	2.8~26	9		
Mg ²⁺	29.4	7.2~86.9	66.3	5.58~794	31±11	32.6	12.2~70	11		
Na ⁺	180.2	26.9~809.9	128	21.2~709	20±6	3.9	1.4~8.9	7.8		

코하마보다는 낮았으나 미시간 지역과 인디아나폴리스 지역의 농도와는 유사한 분포를 보였다. 산성 화물질인 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 의 경우, 부산지역의 농도가 일본의 요코하마에 비해 낮고, 미국의 인디아나폴리스 보다는 높게 나타났다. 본 연구의 산성도가 요코하마보다 높은 이유는 NO_3^- 및 SO_4^{2-} 와 같은 인위적인 오염원에 의한 산성화 성분들은 각각 2.1배 및 2.2배로서 요코하마에서 높게 나타났으며, 중화성분인 NH_4^+ , Mg^{2+} 및 Ca^{2+} 는 각각 22.4배, 2.3배 및 2.0배로서 요코하마에서 높았으나, 해양기원인 Cl^- 은 요코하마에 비하여 2.11배로서 높게 나타났다. 따라서 이러한 성분이 산성도에도 영향을 미쳐 pH값이 부산, 요코하마, 인디아나폴리스 순으로 나타난 것으로 판단된다.

Table 3은 부산지역에서 포집한 이슬 중 이온성분의 월별 특성을 나타낸 것이다. pH의 경우, 4월이 5.03으로 가장 낮고, 다음으로 10월이 5.05로 두 번째이며, 9월이 가장 높은 6.00으로 나타났다. 전기전도도는 3월이 95.7 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 으로 가장 높았으며, 10월이 59.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 로 가장 낮았고, H^+ 농도는 pH와 반대로 4월이 가장 높고 9월이 가장 낮았다. 3월에 SO_4^{2-} 가 206.1 $\mu\text{eq}/\ell$, NH_4^+ 가 42.4 $\mu\text{eq}/\ell$, Ca^{2+} 이 249.2 $\mu\text{eq}/\ell$, Mg^{2+} 이 42.0 $\mu\text{eq}/\ell$ 으로 가장 높았으며, 8월에 SO_4^{2-} 이 73.0 $\mu\text{eq}/\ell$, NH_4^+ 이 4.6 $\mu\text{eq}/\ell$ 그리고 Ca^{2+} 이 72.7 $\mu\text{eq}/\ell$ 로 가장 낮았다. 대체로 봄철을 대표하는 3월에 SO_4^{2-} 를 제외한 대부분의 양이온 성분이 대량 분포하며, 8월에 Cl^- 과 K^+ 를 제외한 기타 성분이 소량 포함되어 있었다. nss- SO_4^{2-} (non sea salt sulfate)는 SO_4^{2-} 중 자연적인 해염성분을 제외하여 계산한 값이기 때문에 인위적인 오염물질만을

정량적으로 파악할 수 있는 인자로 사용된다. nss- SO_4^{2-} 는 이슬량이 가장 낮은 3월에 165.2 $\mu\text{eq}/\ell$ 으로 가장 높았으며, 9월에 28.0 $\mu\text{eq}/\ell$ 으로 가장 낮았다.

3.3.3. 산성이슬의 발생빈도

Fig. 4는 본 연구에서 포집한 이슬의 pH 분포에 따른 발생빈도를 나타낸 것이다. 그림에 의하면 pH 4미만은 발생하지 않았으며, 4이상 5미만의 경우가 10일(21.3%), 5이상 6미만이 15일(31.9%), 6이상 7미만이 21일(42.6%) 그리고 7이상 8미만이 2일(4.3%)로 나타났다. 따라서 pH 6미만이 25일로 전체의 53.2%를 차지하여 이슬 중에 산성물질이 많이 포함되어 있다는 것을 알 수 있다.

산성비의 기준을 이슬에 적용하여 pH 5.6 이하인 이슬 발생일이 전체 47일 중 19일로서 40.4%를 차지하였다. 그러므로 부산지역의 이슬은 대기오염 물

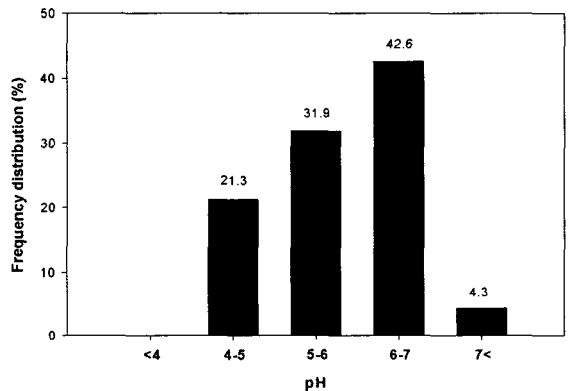


Fig. 4. The frequency distribution of pH of dewfall sampled in Busan.

Table 3. Monthly ionic fluxes of dewfall measured in Busan

Element \ Month	Aug. 2002	Sep. 2002	Oct. 2002	Mar. 2003	Apr. 2003
dewfall(g/m ²)	82.6±44.1	110.1±21.8	84.9±30.8	44.7±24.1	69.7±35.9
pH	5.17	6.00	5.05	5.13	5.03
EC(μS/cm)			59.4±50.9	95.7±72.7	60.2±31.8
H ⁺	6.73±9.08	0.99±0.96	8.86±11.10	7.44±13.27	9.23±11.36
Cl ⁻	1220.8±971.7	186.2±143.3	292.0±382.6	347.5±330.3	189.1±77.2
NO ₃ ⁻	38.3±27.3	45.4±31.7	37.1±18.2	48.6±32.2	53.0±25.9
SO ₄ ²⁻	73.0±54.2	94.0±47.6	109.5±66.3	206.1±161.7	134.4±81.1
NH ₄ ⁺	4.6±5.1	6.6 ±4.7	11.1±6.7	42.4±28.6	35.6±27.5
Ca ²⁺	72.7±53.9	74.9±23.7	119.5±50.0	249.2±190.1	174.2±187.0
K ⁺	953.9±775.4	81.2±79.4	230.8±299.7	214.9±252.5	82.2±40.5
Mg ²⁺	21.1±18.4	20.0±6.1	27.4±11.4	42.0±25.0	37.4±22.8
Na ⁺	155.8±143.2	262.7±243.0	141.4±96.6	162.8±117.6	158.7±79.8
nss-SO ₄ ²⁻	33.9±25.2	28.0±38.9	74.0±59.0	165.2±134.5	94.5±63.9
nss-Ca ²⁺	66.8±52.3	64.9±27.1	114.1±48.7	243.0±186.1	168.1±184.8

unit: $\mu\text{eq}/\ell$

질의 침적에 의하여 대기질이 개선될 수 있지만, 침적표면이 될 수 있는 동·식물과 자동차 및 건축구조물의 부식 및 산성화에 영향을 미칠 수 있으므로 매우 의미있는 것으로 생각된다.

3.3.4. 산성이슬의 원인물질과 중화성분

Fig. 5는 산성화물질인 $[NO_3^- + SO_4^{2-}]$ 과 중화물질인 $[NH_4^+ + Ca^{2+}]$ 와의 관계를 나타낸 것이다. 대기 중에 부유하는 에어로졸에 함유된 성분 중에서 산성비와 산성안개 그리고 산성이슬의 원인물질로 판단되는 황산염과 질산염은 강수에 의해 지면에 도달되면, 토양이나 호수를 산성화시켜 인간에게 직·간접적으로 많은 영향을 미친다. 또한 $[NH_4^+ + Ca^{2+}]$ 는 대부분 자연발생원인 토양으로부터 비산되어 대기 중에 떠 있다가 강수를 중화시켜 pH를 알칼리성으로 변환시키는 역할을 한다. Fig. 5(a)에서와 같이 pH 5.6미만의 산성이슬에서는 산성화물질이 중화물질보다 매우 높은 것을 알 수 있으며, Fig. 5(b)에서와 같이 pH 5.6이상인 경우는 중화물질이 산성화물질보다 많은 것을 알 수 있다. 따라서 산성이슬의 원인물질로서 산성화물질의 $[NO_3^- + SO_4^{2-}]$ 성분이 매우 큰 영향을 미치고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 6은 본 연구에서 포집한 이슬 중의 총이온농

도, 산성화의 주요 원인물질인 Cl^- , NO_3^- 그리고 SO_4^{2-} 의 합, 중화성분인 Ca^{2+} 과 NH_4^+ 의 합 그리고 이슬량과 pH와의 관계를 나타낸 것이다. 그림에 의하면, pH가 높을수록 이슬량이 증가하고 pH가 낮을수록 이슬량이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 pH가 증가함에 따라 주요 양이온(중화물질)인 Ca^{2+} 가 증가하고 NH_4^+ 는 감소하였다. pH가 감소함에 따라 주요 음이온(산성화물질)인 NO_3^- , SO_4^{2-} 이 증가하고 Cl^- 는 감소하였다. 따라서 부산지역 이슬의 산성화는 NO_3^- 와 SO_4^{2-} 에 의한 영향이 매우 큰 것으로 판단된다. 두 음이온 중 어느 성분이 더 우세하게 영향이 미치는지 대해서는 향후 연구가 필요한 것으로 보인다. 또한 중화물질인 Ca^{2+} 와 NH_4^+ 에 대해서도 구체적인 조사가 이루어져야 할 것으로 보인다. 이슬은 비에 비해 pH가 높은 경향이 있는데, 이는 이슬은 지표면에서 생성되기 때문에 에어로졸의 침적의 영향을 받기 쉽고, 높은 pH의 이슬생성은 Ca^{2+} 에 의한 침적이라고 판단된다.

Fig. 7은 부산에서 포집된 이슬 중 산성도를 강하게 유발하는 원인물질로 알려져 있는 NO_3^- 과 SO_4^{2-}

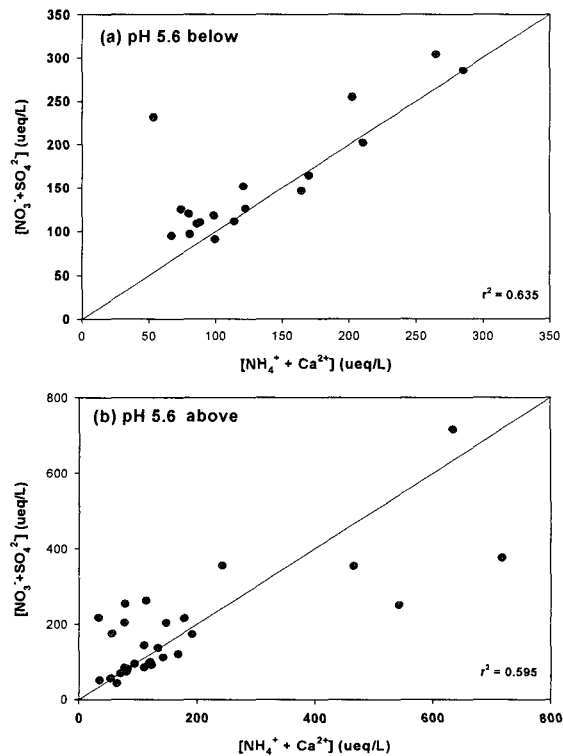


Fig. 5. Relationship between $[NO_3^- + SO_4^{2-}]$ and $[NH_4^+ + Ca^{2+}]$.

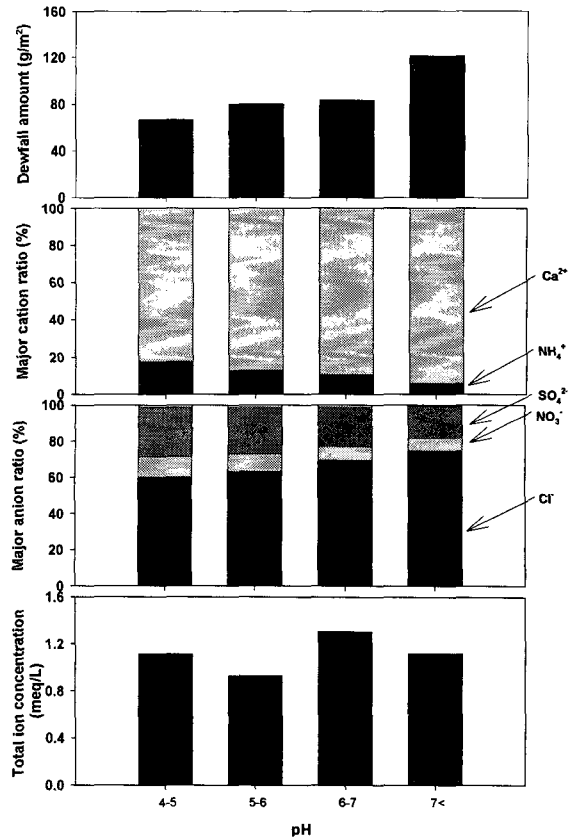


Fig. 6. Relationship between total ion concentration, major anion, cation ratio, dewfall and pH in Busan.

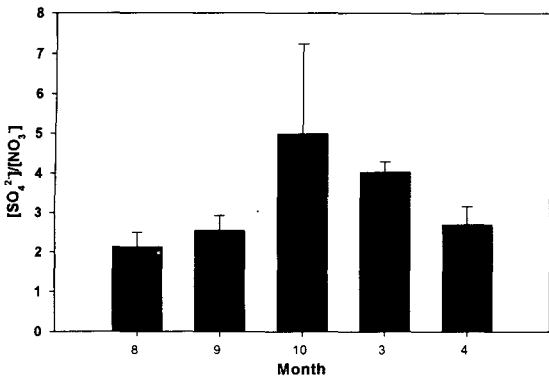


Fig. 7. Equivalent Ratio of [SO₄²⁻]/[NO₃⁻] in dewfall sampled in Busan.

의 비(SO₄²⁻/ NO₃⁻)를 월별로 나타낸 것이다. 10월이 4.99로 가장 높았고 8월이 1.84로 가장 낮았다.

본 포집기간 중 평균비율은 3.45로 나타났다. 본 연구기간이 5개월로 매우 한정이지만 여름, 봄보다는 가을인 10월이 매우 높게 나타났다. 방소영 등²²⁾이 1999년 1월부터 2001년 12월까지 우리나라 해안 지역에 내린 강수를 대상으로 조사한 SO₄²⁻/ NO₃⁻의 비가 안면도 1.84, 제주 고산 2.661, 울릉도 2.27인 것에 비해 비교적 높은 값이 나타났다. 따라서 본 연구지역은 타 지역보다 황산화물의 영향이 질산화물 영향보다 높은 것으로 나타났다.

3.3.5. 이온성분간의 상관성

Table 4는 이슬 중 수용성이온들 간의 상관성을 조사하기 위하여 SPSS(Windows for v. 10.0)로 t-test의 양측검정을 실시하여 유의성을 조사한 결과와 Pearson 상관계수를 구하여 나타낸 것이다. 연구지역에서 이슬 중 수용성 이온들 간의 Pearson 상

관계수가 0.5이상이고, t-test의 양측검정으로 유의성을 조사한 결과 p<0.01인 경우를 설명에 이용하였다. 이슬량은 각 이온성분과 음의 상관으로서 Mg²⁺과 가장 높은 상관(r=-0.726)을 보였으며, 이슬발생량이 적을수록 각 이온성분들은 많이 침적되어 제거되는 것으로 보인다. 해염입자의 주성분인 Cl⁻는 전기전도도의 변화에 영향을 주는 것으로 나타났다. K⁺와 유의한 상관을 보였다. 또한 전기전도도에 영향을 주는 성분으로는 SO₄²⁻, Ca²⁺, K⁺ 및 Mg²⁺임을 보였다. 인위적 기원인 NO₃⁻와 비해염성 SO₄²⁻는 양이온들(Ca²⁺, NH₄⁺, Mg²⁺ 및 Na⁺)과 좋은 상관으로 유의한 차이(p<0.05)를 보였다. 또한 0.9이상의 높은 상관을 보인 이온들은 Cl⁻와 K⁺, nss-Ca²⁺와 Mg²⁺이었다.

4. 결 론

2002년 8월부터 2003년 4월까지 겨울철을 제외한 5개월간 부산지역에서 이슬을 포집하여 이슬발생량과 기상인자와의 관계 그리고 화학적 조성을 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 이슬발생일은 2002년 8월에 5일, 9월에 12일, 10월에 12일, 그리고 2003년 3월에 9일, 4월에 9일로 총 47일이었으며, 강수량으로 환산하였을 때, 연구기간 중(5개월)의 47일간 포집된 이슬량은 3.8 mm로 부산지방의 30년간 평균 강수량의 1/392에 해당하였다.
- 2) 50 g/m² 이상의 이슬이 생성되기 위해서는 포집전일의 최고기온과 포집 당일의 일교차가 5.6℃ 이상, 포집 당일 새벽의 평균 운량이 7/10이하, 포집일 새벽(0시~6시)의 평균 풍속이 4.4 m/s이하, 포집일 6시의 혼합비가 3.2 g/kg 이상일 때라고 할 수 있다.

Table 4. Correlation coefficient between the ion concentrations in dewfall sampled in Busan

	Dewfall	EC	H ⁺	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	K ⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	nss-SO ₄ ²⁻
EC	-0.594**	1.000										
H ⁺	-0.211	-0.342	1.000									
Cl ⁻	-0.297*	0.855**	-0.060	1.000								
NO ₃ ⁻	-0.345*	0.461*	-0.109	0.049	1.000							
SO ₄ ²⁻	-0.607**	0.829**	-0.060	0.155	0.694**	1.000						
NH ₄ ⁺	-0.660**	0.326	0.081	-0.121	0.317*	0.534**	1.000					
Ca ²⁺	-0.637**	0.704**	-0.128	0.169	0.515**	0.785**	0.591**	1.000				
K ⁺	-0.262	0.767**	-0.074	0.984**	-0.031	0.089	-0.155	0.132	1.000			
Mg ²⁺	-0.726**	0.754**	-0.036	0.239	0.540**	0.758**	0.660**	0.918**	0.179	1.000		
Na ⁺	-0.039	0.648**	-0.090	0.116	0.636**	0.456**	0.024	0.202	0.008	0.305*	1.000	
nss-SO ₄ ²⁻	-0.663**	0.804**	-0.027	0.121	0.493**	0.917**	0.588**	0.789**	0.096	0.713**	0.062	1.000
nss-Ca ²⁺	-0.640**	0.699**	-0.125	0.165	0.491**	0.771**	0.595**	0.999**	0.133	0.912**	0.159	0.792**

*p<0.05, **p<0.01

nss; non sea salts

- 3) 이슬 중 이온성분의 월별 특성의 경우, pH는 4월 <10월<3월<8월<9월 순이었고, 전기전도도는 3월>4월>10월 순이었으며, 수소이온농도는 pH와 반대로 4월>10월>3월>8월>9월 순이었다. 3월에 SO_4^{2-} 가 206.1 $\mu\text{eq}/\ell$, NH_4^+ 가 42.4 $\mu\text{eq}/\ell$, Ca^{2+} 이 249.2 $\mu\text{eq}/\ell$, Mg^{2+} 이 42.0 $\mu\text{eq}/\ell$ 으로 가장 높았으며, 8월에 SO_4^{2-} 이 73.0 $\mu\text{eq}/\ell$, NH_4^+ 이 4.6 $\mu\text{eq}/\ell$ 그리고 Ca^{2+} 이 72.7 $\mu\text{eq}/\ell$ 로 가장 낮았다.
- 4) pH 4미만의 이슬은 발생하지 않았으며, 4이상 5미만의 경우가 10일(21.3%), 5이상 6미만이 15일(31.9%), 6이상 7미만이 21일(42.6%) 그리고 7이상 2일(4.3%)로 나타났다. pH 5.6 이하인 산성 이슬의 발생일수가 전체 47일 중 19일로서 40.4%를 차지하였다.
- 5) pH 5.6미만의 산성이슬에서는 산성화물질이 중화물질보다 매우 높았고, pH 5.6이상인 경우는 중화물질이 산성화물질보다 압도적으로 많았다. pH가 증가함에 따라 주요 양이온(중화물질)인 Ca^{2+} 가 증가하고 NH_4^+ 는 감소하였다. pH가 감소함에 따라 주요 음이온(산성화물질)인 NO_3^- , SO_4^{2-} 이 증가하고 Cl^- 는 감소하였다.
- 6) NO_3^- 과 SO_4^{2-} 의 당량비($\text{SO}_4^{2-}/\text{NO}_3^-$)를 월별로 보면, 10월이 4.99로 가장 높았고 8월이 1.84로 가장 낮았으며, 평균비율은 3.45로 나타났다.
- 7) 해염입자의 주성분인 Cl^- 는 전기전도도의 변화에 영향을 주는 것으로 나타났으며, K^+ 와 유의한 상관관을 보였다. 또한 전기전도도와 SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ 및 Mg^{2+} 등은 비교적 높은 상관관을 나타내었다. 인위적 기원인 NO_3^- 와 비해염성 SO_4^{2-} 는 양이온들(Ca^{2+} , NH_4^+ , Mg^{2+} 및 Na^+)과 좋은 상관관을 나타내었다.

감사의 글

본 연구는 2002년 신라대학교 교내 연구비에 의해 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- 1) 김광식, 1995, 증보 농업기상학, 향문사, 367pp.
- 2) Zangvil, A., 1996, Six years of dew observation in the Negev Desert, Israel, J. Arid Environ., 32, 361-372.
- 3) Wallin, G. R., 1967, Agrometeorological aspects of dew, Agric. Meteorol., 4, 85-102.
- 4) Muselli, Marc, D. Beysens, J. Marcillat, I. Milimouk, T. Nilsson and A. Louche, 2002, Dew water collector for potable water in Ajaccio(Corsica Island, France), Atmospheric

- Research, 64, 297-312.
- 5) Getz, R. R., 1978, Dew-monitoring network in the Southeast, Bull. Amer. Meteor. Soc., 59(9), 1150-1154.
- 6) 주영득, 김영채, 1991, 산성이슬에 의한 경부고속도로변 수목의 피해에 관한 연구, 경희대학교 연구논문집, 12, 106-112.
- 7) 정용승, 김태균, 1992, 충북 청원군의 안개, 이슬, 서리의 산성도 연구, 한국대기보전학회지, 8(1), 45-51.
- 8) 이정택, 윤성호, 정영상, 1989, 우리나라에 있어서의 벼 군락내의 열수지에 의한 이슬지속시간의 추정, 농업시험연구논문집(토양비료편), 31(1), 1-5.
- 9) 김영채, 정동준, 김홍률, 2000, 3개 산림지역의 이슬의 산성도 및 화학적 특성의 비교(서울, 용인, 평창을 중심으로), 한국농림기상학회지, 2(2), 31-40.
- 10) 부산지방기상청, 2002, 2003, 일기상통계표.
- 11) 기상청, 2001, 한국기후표.
- 12) Takeuchi, M., H. Okochi and M. Igawa, 2000, A study on chemical components and acidification mechanism of dew-water, J. Jpn. Soc. Atmos. Environ., 35(3), 158-169.
- 13) Kidron, G., 1999, Altitude dependent dew and fog in the Negev Desert, Israel, Agric. For. Meteor., 96, 1-8.
- 14) Okochi, H., T. Kajimoto, Y. Arai and M. Igawa, 1996, Effect of acid deposition on urban dew chemistry in Yokohama, Japan, Bull. Chem. Soc. Jpn., 69, 3,355-3,365.
- 15) 최재천, 이민영, 이선기, 1994, 고산지역 강수의 화학성분 특성에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 10(1), 64-72.
- 16) WMO/GAW, 1996, Report of the workshop precipitation chemistry laboratory techniques, 102, 14-16.
- 17) 권우택, 김선태, 나춘기, 박기학, 이남훈, 이주삼, 홍지형, 황갑성, 1996, 산성비 조사법, 동화기술, 371-393pp.
- 18) Mulawa, P. A., S. H. Cadle, F. Lipari, C. Ang and R. T. Vandervennet, 1986, Urban dew: Its composition and influence on dry deposition rates, Atmos. Environ., 20(7), 1389-1396.
- 19) Foster, J. R., R. A. Pribush and B. H. Carter, 1990, The chemistry of dews and frosts in Indianapolis, Indiana, Atmos. Environ., 24(8), 2229-2236.

- 20) Wagner, G., K. Steele and M. Peden, 1992, Dew and frost chemistry at a midcontinental site, United States, J. Geophys. Res., 97-20591-20597.
- 21) Pierson, W. R., W. W. Brachaczek, R. A. Gorse, S. M. Japar and J. M. Norbeck, 1986, Acid rain and atmospheric chemistry at Allegheny mountain, Environ. Sci. Technol., 21, 679-691.
- 22) 방소영, 최재천, 박상순, 조경숙, 오성남, 2003, 한반도 배경지역 강수 중 수용성 이온성분의 화학적 특성 분석, 한국기상학회지, 39(1), 29-41.