

이온성분의 환경거동과 기상인자와의 관계:
제주지역을 중심으로 한 유·무기성 이온성분의
대기-해양지화학

The Behavior of Particulate-Bound Ionic Components
and Their Relationships with Meteorological Parameters:
Air-Sea Geochemistry of Inorganic and
Organic Ions in Cheju Island

김기현·이강웅¹⁾

상지대학교 환경과학기술연구소, ¹⁾한국외국어대학교 환경학과
(1998년 6월 18일 접수, 1998년 8월 30일 채택)

Ki-Hyun Kim and Gang-Woong Lee¹⁾

Institute of Environmental Science and Technology, Sang Ji University
¹⁾*Dept. of Environmental Sciences, Hankook University of Foreign Studies*

(Received 18 June 1998; accepted 30 August 1998)

Abstract

The concentrations of ten inorganic (sodium, chloride, sulfate, ammonia, etc.) and three organic (acetate, formate, and MSA) ions associated with airborne particulate matter were measured from Cheju Island, Korea during the three field intensive campaigns conducted in (1) Sept./Oct. 1997 (fall), (2) Dec. 1997 (winter), and (3) April 1998 (spring). The results of our measurements indicated that the concentration levels of most ionic species were decreasing significantly across the three experimental periods. The patterns of concentration reduction were clear as the sum of all cation and anion species changed dramatically across those periods such as $294 > 144 > 65$ and $193 > 96 > 74$ nequiv/m³, respectively. The changes were best explained in terms of the wind rose patterns of the study site. Since our sampling spot is located on the western-end point of Cheju Island, it is likely to reflect the effects of diverse sources such as natural, marine processes during NW and local non-maritime ones during SE winds. Hence, the periodical changes in ionic concentrations may be accounted for by the comparable changes in wind direction.

To further investigate environmental characteristics of these ionic components, correlation analysis was conducted not only between meteorological and ion data but between different ion-pairs. The results of these analyses confirm that the concentration levels of ionic species are strongly affected by wind speed and temperature and that there are certain patterns between ion species to which such effects apply. In light of the significance of the wind rose patterns in the area, we further extended these analyses into four data groups that were divided on the basis of wind direction. The results of these analyses showed that the strength of correlations between important pairs (e.g., between windspeed and most of major inorganic species including sodium and chloride) can be ranked

on the order of wind direction such as: $W > N > E > S$. In addition, it also revealed that the effects of temperature on the distribution of major ions are very diverse, depending on data grouping scheme for such analysis. The results of this study thus suggest that environmental behavior of chemical components be analyzed in various respects, rather than simple standard, especially if measurements are made in complex environmental condition under which both natural and anthropogenic effects are competing each other.

Key words : ion, particulate matter, natural, anthropogenic, wind rose

1. 서 론

바다와 내륙이 인접한 지역에서 발견되는 입자상 물질들은 대개 해염성(또는 자연적) 기원과 내륙성(또는 인위적) 기원의 성분이 동시에 일정비율로 존재한다(Keene *et al.*, 1986). 이들 성분은 각각 이질적인 기원으로부터 대기 중으로 배출이 이루어지기 때문에, 대기 중에서 다양한 환경거동을 보여준다. 이와 같이 특수한 지리적 여건에서 채취한 입자상 물질의 성분분석을 통해, 이들을 조성하는 이질적인 기원의 오염물질들에 대한 화학적 성분의 절대적 및 상대적 농도분포의 관계와 이들의 농도분포가 여러 가지 환경인자들과 어떻게 반응하는 가를 분석하는 일은 복합적인 환경계에서 진행되는 물질순환을 이해하는데 중요한 단서로 활용하는 것이 가능하다(Kim and Song, 1997).

국경을 초월한 오염물질의 장거리이동이 국제적으로 대기오염문제의 중요한 이슈로 등장하면서, 국내에서도 이러한 부분에 대한 연구의 필요성이 강하게 대두되고 있다(김기현 등, 1997, 1996). 본 연구진은 97년 가을(1차: 97/9/26~10/5)과 겨울(2차: 97/12/10~20) 및 98년 봄(3차: 98/4/20~27)의 3차례 측정기간동안 제주의 고산측정점으로부터 입자상물질을 채취하였고, 이에 함유된 무기성 - Na^+ , Cl^- , 해염성 SO_4^{2-} , 비해염성 SO_4^{2-} , NH_4^+ 등 - 및 유기성 이온물질 - HCOO^- (formate), CH_3COO^- (acetate), CH_3SO_3^- (methanesulfonate: MSA) - 의 농도를 분석하였다. 본문에서는 1, 2차 및 3차 실험의 모든 결과를 총취합하여, 각종 이온성분들의 분포특성을 시간과의 함수관계로 해석하고, 기상인자와 각 성분의 관계를 지화학적 관점으로 분석하였다.

2. 연구 및 실험방법

2.1 채취 및 분석

본 연구는 제주도의 북서쪽 해안가에 위치한 고산지역의 측정점을 중심으로 총 3차례의 집중측정기간 동안 입자상물질의 시료를 채취하였고, 그로부터 MSA를 포함한 유기성 이온과 Na^+ , Cl^- 등을 위시한 무기성 이온을 분석하였다. 이온성분의 분석에 필요한 입자상 시료의 채취는 해안선으로부터 수미터 떨어진 절벽부의 내측에 위치한 field 실험용 trailer에서 이루어졌다.

시료의 채취는 poresize 0.2 μm , 직경 47 mm의 Gelman PTFE 필터를 장착한 필터홀더(filter holder)를 진공펌프에 장착한 후 대략 17 l/min의 유속과 0.91 kg/cm^2 (~13 psi) 정도의 압력에서 실시하였다. 최초로 이온성분의 분석이 시도된 1차 집중측정기간 중에는 우선적으로 24시간 간격으로 1일 1회 시료의 채취가 이루어졌다(김 & 이, 1998). 그러나 2차 및 3차 측정시에는 낮 시간대(0900~1700)와 저녁시간대(1700~0800)를 대표할 수 있게끔, 프로 그래밍된 시간대에 작동하는 타이머를 이용하여 1일 2회씩 그리고 매회 한 개의 시료를 채취하였다.

시료의 분석방법은 이미 김과 이(1998)의 연구결과에 자세히 기술되었으므로, 아래와 같이 간략하게 요약하였다. 일반적으로 무기성 성분의 분석에 비해, 유기성 성분의 분석에는 많은 어려움이 따른다. 따라서 본 연구에서는 농도분석이 용이하지 않은 유기성 성분의 분석에 적합한 것으로 알려진 Ionpak AS 11과 AG 11 칼럼을 장착한 이온크로마토그래피 모델(Waters Action Analyzer 620S)을 사용하였다. 각 이온성분의 농도계산은 3~4회 측정된 blank 값으로 대략 4개 이상의 검량점에서 측정된 자료들을

보정한 후, 검량곡선을 작성하여 사용하였다. 그런데 작성된 검량곡선들은 거의 대부분의 성분에 대해 농도 대 피크 높이간에 높은 상관성을 보여 주었다 ($r^2 > 0.98$). 이를 이용해서 일차적으로 7가지의 음이온 성분 (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^- , F^- , CH_3SO_3^- , HCOO^- , CH_3COO^-)과 3가지의 양이온 성분 (Na^+ , K^+ , NH_4^+)의 농도를 결정하였다. 그리고, 2차적으로 해수중에서 대표적인 보존성 성분 (conservative component)으로 알려진 Na^+ 의 농도치를 이용하여 SO_4^{2-} 농도를 두가지 유형으로 분리하고, Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 의 농도도 추정하였다.

SO_4^{2-} 농도는 Na^+ 의 농도 값으로 (1) 해염성기원의 황산이온농도 (sea-salt sulfate: SS-SO_4^{2-})를 산출한 후, 이를 총농도에서 감하므로써 (2) 비해염성기원 (non-sea-salt sulfate: NSS-SO_4^{2-})의 농도를 분리 계산하였다. 그리고 분석기기의 사정으로 실측이 이루어지지 않은 주요 양이온 성분인 Ca^{2+} 과 Mg^{2+} 의 농도치는 이들이 보존성 성분이란 점을 감안하여 (SO_4^{2-} 와 마찬가지로), Na^+ 와 이들 성분과의 해수 중 농도비를 이용하여 추론하였다 (김 & 이, 1998; Wilson, 1975). 이들의 함량이 토양과 같은 비해염성과 해수로부터 기원하는 해염성 생성원에 동일하게 영향을 받는다는 점을 감안하면, 이러한 추론은 불완전하다. 그러나 추정이 가능한 부분을 감안하므로써, 양·음이온 간의 당량 불균형을 최소한으로 시정하기 위해 불가피하게 고려되었다.

2.2 기상

입자상 이온물질의 채취가 이루어진 지점이 제주 고층레이더기상대의 인근에 위치한다는 점을 감안하여, 기상자료의 해석은 기상대에서 시간대별로 측정된 자료를 활용하였다. 실험기간 중 측정된 풍속, 풍향, 기온, 상대습도와 같은 기본적인 기상인자의 변화특성은 표 1과 그림 1에 각각 제시하였다. 실험 기간동안 관측된 기본적인 기상인자들은 각각의 집중실험기간별 다양한 형태의 분포를 나타내었다. 전체 측정기간 중 대체로 7m/sec 내외의 유사한 풍속이 유지되었지만, 1~3차 기간대별 온도의 변화는 상대적으로 크게 나타났다. 특히 측정점이 해안가에 위치해 있다는 점을 감안하여, 그림 1에는 각 기간별 풍향의 빈도를 집중적으로 분석하였다. 전체적으로 해양성인 북풍의 빈도가 가장 높게 나타났지만, 3차실험이 진행된 4월기간 중에는 반대로 내륙쪽을 거친 남풍이 높은 빈도로 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 풍속은 평균치와 유사하게 6 m/sec 대에서 가장 빈번하게 출현하였지만, 20 m/sec에 이르는 빠른 속도의 바람도 발생하였다는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해, 전체 측정기간 중의 기온은 19°C를 중심으로 상대적으로 높은 온도의 발생이 빈번하였다.

3. 결과 및 토론

1, 2, 3차 집중측정기간을 통해 측정된 모든 이온

Table 1. A statistical summary of meteorological data measured during the three field measurement periods.

Parameter Unit	Windspeed m/sec	Temperature °C	RH %	Rainfall mm	Irradiance MJ/m ²
(a) 1st exps. (Sept./Oct. 1997)					
Mean ± SD	7.01 ± 3.59	20.14 ± 2.02	68.3 ± 13.7	11.0 ± 13.0	98.4 ± 83.6
Range (N)	0 ~ 14.3(280)	15.5 ~ 25.9(99)	40 ~ 98(99)	1 ~ 44(11)	0 ~ 306(153)
(b) 2nd exps. (Dec. 1997)					
Mean ± SD	7.51 ± 3.83	9.92 ± 3.08	60.0 ± 25.2	12.2 ± 13.8	52.2 ± 58.2
Range (N)	1.5 ~ 16.3(256)	3.9 ~ 15.6(85)	4.9 ~ 94(85)	2 ~ 45(9)	1 ~ 259(101)
(c) 3rd exps. (Apr. 1998)					
Mean ± SD	6.41 ± 4.01	16.78 ± 2.84	87.2 ± 9.62	2.5 ± 1.7	121 ± 110
Range (N)	0 ~ 18.3(200)	10.6 ~ 21.2(66)	59 ~ 96(66)	1 ~ 6(20)	0 ~ 346(108)
(d) All data combined					
Mean ± SD	7.02 ± 3.81	15.78 ± 5.15	70.5 ± 20.7	7.03 ± 10.3	92.3 ± 90.4
Range (N)	0 ~ 18.3(736)	3.9 ~ 25.9(250)	4.9 ~ 98(250)	1 ~ 45(40)	0 ~ 346(362)

*Each individual dataset used for the computation are measured basically at an hourly interval.

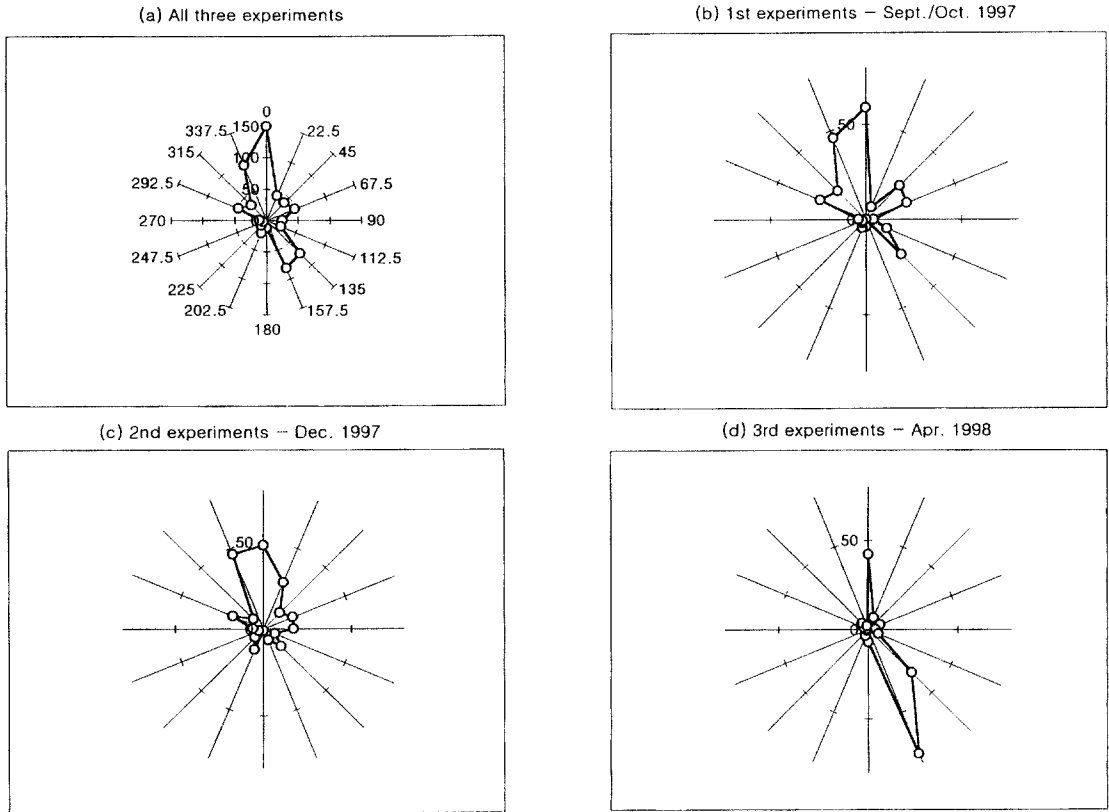


Fig. 1. Frequency distribution of wind rose during three field measurements: (a) all data, (b) 1st experiments (Sept./Oct. 1997), (c) 2nd expts. (Dec. 1997), and (d) 3rd expts. (Apr. 1998).

성분의 기간별 평균농도와 취합된 평균농도가 표 2에 제시되어 있다. 모든 농도 수치는 수평적인 비교가 가능하게 nequiv/m³로 통일하였다. 그리고 이들 성분들간의 관계를 설명하는 주요 비율수치에 대한 통계치도 표에 추가적으로 제시하였다. 유기성 이온들의 측정결과를 단순히 비교하면, formate가 0.26 nequiv/m³로 가장 높고 그 뒤로 acetate나 MSA가 따랐다. 평균과 표준편차의 크기로 비교하면, acetate 외에는 대체로 농도변화가 크다는 것을 알 수 있다. 무기성 이온들의 경우를 보면, 음이온 중에서는 Cl, NO₃, SS-SO₄ 등이 10 nequiv/m³를 초과하는 높은 당량의 농도를 유지하는 반면, 양이온들 중에서는 Na과 NH₄가 높은 농도를 유지하는 것으로 나타났다. 아래에는 이들 성분의 농도자료를 이용하여, 다양한 관점에서 이들의 지화학적 거동을 설명하였

다.

3.1 이온성분의 계절적 분포특성

1, 2, 3차 실험이 가을, 겨울, 봄의 3계절에 걸쳐 이루어졌기 때문에, 각 기간별 또는 기간과 기간 사이에 나타나는 이온성분들의 계절적인 농도변화 추세를 어느 정도 비교할 수 있다. 모든 이온성분들에 대해 기간별 평균농도의 크기를 비교하면, 대단히 뚜렷한 추세가 확인된다. 직·간접적인 방식으로 농도측정이 이루어진 13개의 이온성분 중 단 2개를 제외한 모든 성분들이 가을>겨울>봄의 순으로 농도가 감소하는 것이 확인되었다(MSA와 F가 예외적으로 각각 3차 및 2차 측정기간에 가장 높은 농도를 보였다). 이러한 결과가 실질적인 추세라는 것은 모든 양이온들(Σ (Cation))과 음이온들의 농도합

Table 2. A statistical summary of the ionic concentration data measured from Cheju Island during three field measurement campaigns (Sept. 97~Apr. 98). (Units in nequiv/m³.)

A. The concentrations of ionic components

	1st Exp.	2nd Exp.	3rd Exp.	All Exps.
Acetate	0.293 ± 0.175* 0.135 ~ 0.603(6)*	0.254 ± 0.134 0.038 ~ 0.458(12)	0.208 ± 0.088 0.024 ~ 0.377(14)	0.241 ± 0.125 0.024 ~ 0.603(32)
Formate	0.453 ± 0.560 0.014 ~ 1.936(10)	0.254 ± 0.129 0.009 ~ 0.534(19)	0.129 ± 0.170 0.019 ~ 0.637(14)	0.260 ± 0.313 0.009 ~ 1.936(43)
MSA	0.103 ± 0.069 0.037 ~ 0.269(10)	0.103 ± 0.090 0.012 ~ 0.332(18)	0.317 ± 0.222 0.029 ~ 0.782(10)	0.159 ± 0.161 0.012 ~ 0.782(38)
F ⁻	0.254 ± 0.184 0.047 ~ 0.518(9)	0.496 ± 0.568 0.024 ~ 1.868(15)	0.254 ± 0.434 0.014 ~ 1.497(11)	0.358 ± 0.459 0.014 ~ 1.868(35)
Cl ⁻	115 ± 145 8.1 ~ 430(10)	52.5 ± 40.0 3.4 ~ 139(17)	29.1 ± 36.9 0.6 ~ 120(15)	58.93 ± 82.48 0.602 ~ 430(42)
NO ₃ ⁻	69.9 ± 107 12 ~ 361(10)	22.4 ± 20.0 3.2 ~ 67(20)	12.1 ± 10.4 1.63 ~ 32.8(10)	31.72 ± 58.11 1.63 ~ 361(40)
NSSS ⁽¹⁾	97.3 ± 47.8 17.9 ~ 169(10)	75.6 ± 46.7 26.9 ~ 175(20)	23.5 ± 24.7 0.48 ~ 70.9(14)	64.0 ± 49.8 0.48 ~ 175(44)
SSS ⁽²⁾	11.2 ± 10.6 1.4 ~ 34.4(10)	7.0 ± 7.0 0.6 ~ 25.4(21)	5.33 ± 6.22 0.15 ~ 17.6(15)	7.39 ± 7.85 0.15 ~ 34.4(46)
Ca ²⁺	4.09 ± 3.86 0.5 ~ 12.5(10)	2.55 ± 2.56 0.2 ~ 9.2(21)	1.89 ± 2.22 0.05 ~ 6.4(15)	2.669 ± 2.843 0.053 ~ 12.5(46)
Mg ₂ ⁺	2.01 ± 1.93 0.2 ~ 6.2(10)	1.26 ± 1.25 0.1 ~ 4.6(21)	0.94 ± 1.10 0.03 ~ 3.18(21)	1.319 ± 1.404 0.027 ~ 6.20(46)
Na ⁺	93 ± 87.9 11.4 ~ 285(10)	57.8 ± 58.4 4.9 ~ 210(21)	43.1 ± 50.5 1.2 ~ 146(15)	60.66 ± 64.76 1.215 ~ 285(46)
NH ₄ ⁺	85.3 ± 53.2 13.8 ~ 186(10)	32.6 ± 29.2 2.4 ~ 118(20)	26.1 ± 28.9 0.11 ~ 89(15)	42.1 ± 42.0 0.111 ~ 186(45)
K ⁺	9.9 ± 10.3 1.1 ~ 26(9)	3.4 ± 3.1 0.3 ~ 11(20)	2.02 ± 1.40 0.39 ~ 5.42(13)	4.362 ± 5.894 0.3 ~ 26(42)

B. The concentration ratios between ionic components of various combination

Σ(Cation)	193 ± 91 74 ~ 370(10)	95.9 ± 73.8 13.6 ~ 260(21)	73.7 ± 74.3 2.70 ~ 195(15)	110 ± 88.7 2.7 ~ 370(46)
Σ(Anion)	294 ± 190 120 ~ 609(10)	144 ± 95 39.1 ~ 374(21)	65.1 ± 64.9 1.4 ~ 169(15)	151 ± 140 1.41 ~ 609(46)
Σ(Cat.)/Σ(Ani.)	0.73 ± 0.18 0.40 ~ 0.98(10)	0.75 ± 0.63 0.35 ~ 2.57(21)	1.20 ± 0.31 0.66 ~ 1.95(15)	0.89 ± 0.51 0.35 ~ 2.57(46)
Na ⁺ /Cl ⁻	1.091 ± 0.313 0.481 ~ 1.595(10)	0.766 ± 0.293 0.557 ~ 1.845(17)	1.68 ± 0.30 1.21 ~ 2.17(11)	1.12 ± 0.49 0.481 ~ 2.174(38)
Form /Acet.	1.425 ± 1.756 0.064 ~ 4.909(6)	1.887 ± 2.830 0.617 ~ 10.8(12)	0.405 ± 0.311 0.112 ~ 0.992(9)	1.29 ± 2.11 0.064 ~ 10.8(27)
(F ± A)/Ani. ⁽³⁾	0.29 ± 0.36 0.01 ~ 1.23(10)	0.32 ± 0.13 0.01 ~ 0.55(19)	3.94 ± 5.72 0.03 ~ 17.2(14)	1.49 ± 3.63 0.01 ~ 17.2(43)
Org/Ani. ⁽⁴⁾	0.34 ± 0.37 0.06 ~ 1.3(10)	0.41 ± 0.17 0.08 ~ 0.83(19)	4.26 ± 5.66 0.27 ~ 17.2(14)	1.65 ± 3.65 0.06 ~ 17.2(43)
NSSS/NO ₃ ⁻	2.84 ± 1.77 0.42 ~ 5.41(10)	5.04 ± 2.95 0.99 ~ 12.1(20)	5.95 ± 5.51 1.26 ~ 18.9(9)	4.69 ± 3.58 0.42 ~ 18.9(39)
NSSS/SSS	21.0 ± 25.2 1.29 ~ 74.3(10)	22.3 ± 22.3 2.2 ~ 94.9(20)	6.68 ± 6.21 1.27 ~ 22.6(14)	17.1 ± 20.4 1.27 ~ 94.9(44)
MSA/NSSS ⁽⁵⁾	0.13 ± 0.09 0.03 ~ 0.36(10)	0.17 ± 0.16 0.01 ~ 0.63(17)	1.33 ± 0.99 0.53 ~ 3.17(9)	0.45 ± 0.71 0.01 ~ 3.17(36)

* The upper one denotes mean ± 1SD, while the lower showing the range of concentration and the total number of data (N in parenthesis).

The numbers given in superscripts denote: (1) NSSS=non-sea-salt sulfate; (2) SSS=sea-salt-sulfate; (3) F=formate and A=acetate; (4) Org. include: MSA, Formate, and Acetate; (5) Calculated ratios are given in percent values. All values in (3) - (5) are in percent.

(Σ(Anion))에서도 뚜렷하게 확인이 되었다. 음이온들의 경우 1~3차 기간을 거쳐, 294 > 144 > 65 nequiv/m³로 매회 50% 이상으로 농도의 감축이 이루어졌다. 이러한 농도감축의 경향은 음이온들의 경

우에도 유사하게 나타났다($193 > 96 > 74$ nequiv/m³).

이와 같은 농도변화의 수준이 어떤 의미를 갖는가의 여부는 과거 동일한 지역에서 측정된 연구결과와 비교하면 어느 정도 추정이 가능할 것으로 보인다. Chen *et al.* (1997)이 약 3년(1992~1995) 기간 동안 고산지역에서 측정한 결과, NSS-SO₄ (142), Na (74), NH₄ (72), K (10), Mg (25), Ca (25 nequiv/m³)의 평균농도가 발표되었다. Ca나 Mg와 같은 추정성분을 제외하면, 이들 성분의 3년 평균농도치는 표 2에 제시된 본 연구의 1차 측정치와 비교적 근접하다. 따라서, 2차 및 3차측정기간대에 발견된 농도의 감소추세는 어느 정도 비정상적인 추세로 보인다. 특히 Chen *et al.* (1997)이 겨울이나 봄기간대에 이온농도가 가장 높게 나타난다고 발표한 사실을 감안하면, 본 연구의 3차실험인 봄기간에 가장 낮은 농도가 나타난 것은 대단히 예외적인 결과로 보인다.

각 측정기간별로 농도변화가 강하게 진행되는 현상은 어떻게 설명이 가능할까? 우선 주변 환경조건들과의 관계를 조사해 보면, 가을철에 겨울철보다 높은 농도를 보이는 것은 주요 해염성분들의 배출이 가장 활발하게 이루어지는 서-북풍의 발생빈도가 높게 나타났다는 점을 들 수 있다(그림 1). 이를 확인하기 위해 그림 2에는 모든 자료를 동서남북의 4개 영역으로 구분한 후 각각의 풍향군으로 취합한 후, 자료들을 각 성분의 전체평균농도로 normalization한 결과가 제시되어 있다. 제주도의 서측 끝에 위치한 고산 측정점의 경우, 서풍이 불 때 주요 이온들의 농도(총이온농도의 대부분을 설명하는)가 뚜렷하게 증가하는 것을 알 수 있다(이러한 부분에 대한 설명은 아래에 풍향별 농도자료의 분석에서 보다 자세히 제시하겠다.). 그리고 2차기간에 비해 3차기간에 이온들의 농도가 강하게 감소하는 현상 또한 풍향과의 관계로 어느 정도 설명이 가능할 것 같다. 이미 기상조건에 대한 설명에서, 3차측정기간은 일상적으로 발견되는 해양성의 북서풍보다는 어느 정도 제주 내륙지역의 영향을 받는 것으로 보이는 남-동풍의 발생빈도가 높은 것으로 나타났다. 3차 측정에서 남-동풍의 빈번한 발생과 그에 따른 제주내륙 지역의 공기가 유입된 영향은 각종 오염물의 농도비에서 확인된다. 비록 3차 측정에서 나타난 이상적으로 낮은 이온성분들의 농도는 풍향의 이변으로 어느 정도 설명이 되지만, 본 연구에서 발

견된 측정 기간대별 농도변화의 추이는 그 기간 중에 에어로졸의 유입량의 절대적인 감소 및 그에 따른 이온성분의 변화 그리고 음-양이온 간의 균형을 이루려는 작용 등이 복합적으로 작용한데 따른 결과로 추정이 된다.

이론적으로 당량단위로 취합된 양이온과 음이온 간의 농도합에 대한 비율은, (1) 모든 구성성분들에 대한 분석이 완벽하게 이루어지고 또한 (2) 모든 이온들 간에 평형상태가 유지될 경우, 1의 값을 취하여야 한다($\Sigma(\text{Cation})/\Sigma(\text{Anion}) = 1$). 따라서 이러한 전제는 이온성분의 연구분석에 일종의 정도관리적(quality assurance: QA) 차원의 기준으로 활용될 수 있다. 본 연구에서도 대부분의 주요이온들과 유기성 이온에 대한 분석이 이루어졌으므로, 어느 정도 이와 같은 전제조건에 합치는 결과를 예상할 수 있다. 실제로 1, 2차 기간에 각각 0.73와 0.75로 1.0에서 25% 정도 부족한 평균값을 보였다. 이와 같이 1보다 작은 수치가 나온 원인으로 Ca나 Mg와 같은 양이온들 해염성분만을 감안하여 추정한 것과는 어느 정도 연관성이 있을 것으로 보인다. 그런데 3차기간에는 그 비 값이 약 20% 이상 증가한 1.20로 나타났다. 1, 2차 기간에 비해 3차 기간대가 뚜렷하게 다른 경향을 띄는 현상은 대부분의 유기성 성분들 간의 비 값이나 NSS-SO₄와 관련된 비 등에서 거의 예외없이 확인이 된다. 특히 NSS-SO₄/SS-SO₄ 간의 비가 평소에 20을 약간 초과하는 값을 나타내다가, 3차기간에 6.7 정도로 떨어진 것은 바람의 방향이 이온성분들간의 관계에 얼마만큼 큰 영향을 미치는가를 확인시켜 주고 있다.

3.2 이온성분의 일주기 농도분포

24시간 단위로 실험이 이루어진 1차 측정과 달리, 2, 3차 측정기간 중에는 주간대(0900~1700)와 야간대(1700~0800) 별로 1일 2회씩 성분의 분석을 실시하였으므로, 일주기 농도변화의 추이 파악이 가능하다. 표 3에는 두 측정기간의 모든 자료를 주·야간대로 분리한 후 요약한 결과를 제시하였다. 그 결과를 보면, 모든 유기성 이온성분들은 예외없이 야간대에 비해 주간대에 높은 농도를 띄고 있다. 반면에 무기성 성분들은 약간 복잡한 경향성을 보이고 있다. 2차 측정에서는 모든 무기성 성분이 주간대에 높은 농도를 보이지만, 3차 측정에서는 그 반

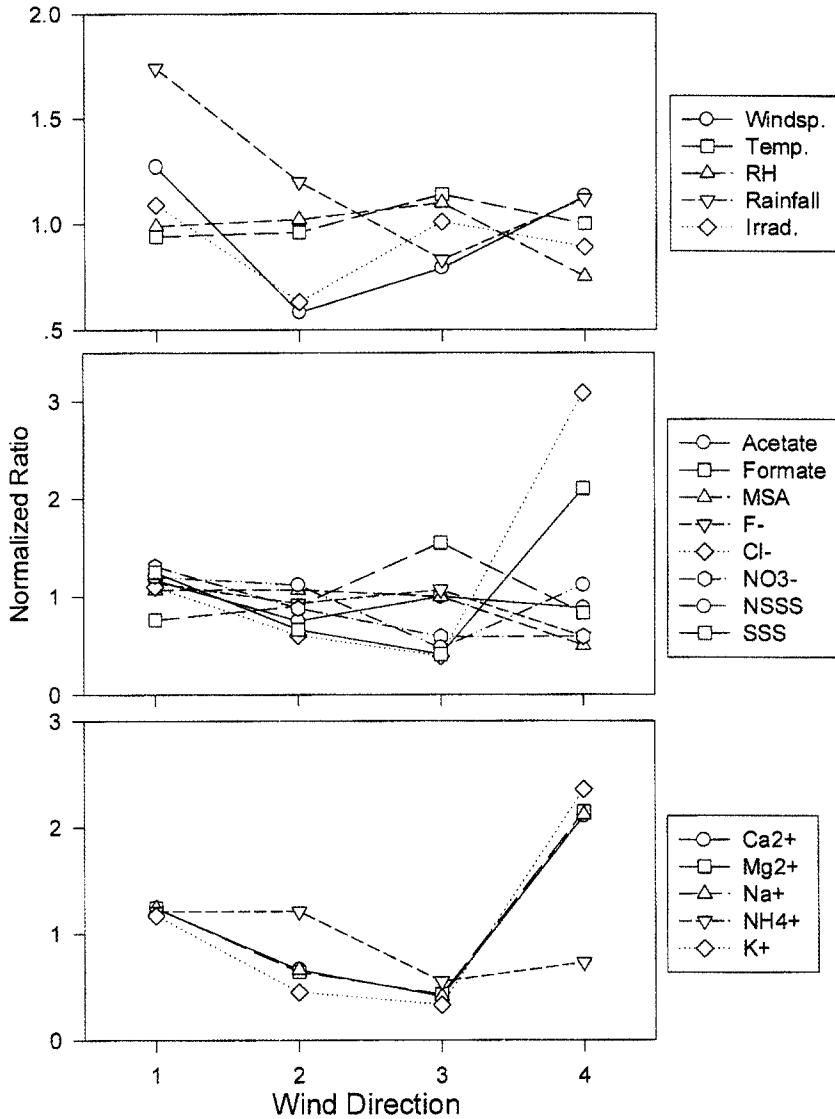


Fig. 2. Comparison of individual parameter as a function of wind direction. All data were initially sorted out on the basis of wind direction and the mean for each of the four directions were normalized by the grand mean of all data. The numbers for wind direction 1 through 4 represent north, east, south, and west, respectively.

대로 거의 대부분의 무기성 이온들이 주간대에 약간 더 낮은 농도를 띄는 것으로 나타났다. 이와 같은 주야간대의 농도변화는 측정지점이 해안가라는 점을 감안할 때, 일주기로 변화가 진행되는 해-육풍의 순환과도 어느 정도 관련이 있을 것으로 보인다.

일주기 변화경향의 본질적인 차이를 파악하기 위해 90% 신뢰구간에서 이들의 차이에 대한 유의성을 조사하였다. 그 결과, 3차 측정에서 나타난 주야간대의 농도차이는 통계적으로는 별 다른 의미를 부여하기가 어렵다는 결론이 내려졌다. 그리고 2차 측정이나 전체 자료에 대한 검정에서도 주간대 농

Table 3. A comparison of the diurnal variabilities in the concentrations of ionic species using the data collected during the 2nd and 3rd experiments. (Units in nequiv/m³.)

	Daytime (All)	Nitetime (All)	Daytime (2nd)	Nitetime (2nd)	Daytime (3rd)	Nitetime (3rd)
Acetate	0.299±0.098 0.156~0.458(12)	0.170±0.087 0.024~0.323(14)	0.362±0.073 0.297~0.458(6)	0.146±0.078 0.038~0.271(6)	0.236±0.078 0.156~0.377(6)	0.188±0.094 0.024~0.323(8)
Formate	0.262±0.193 0.009~0.637(15)	0.150±0.103 0.019~0.410(18)	0.300±0.158 0.009~0.534(9)	0.214±0.086 0.095~0.410(10)	0.206±0.241 0.035~0.637(6)	0.070±0.056 0.019~0.168(8)
MSA	0.207±0.150 0.013~0.532(13)	0.156±0.205 0.012~0.782(15)	0.141±0.109 0.013~0.332(9)	0.065±0.044 0.012~0.158(9)	0.353±0.127 0.25~0.532(4)	0.292±0.277 0.029~0.782(6)
F ⁻	0.634±0.644 0.024~1.868(13)	0.153±0.156 0.014~0.509(13)	0.782±0.655 0.024~1.868(8)	0.170±0.137 0.033~0.401(7)	0.398±0.617 0.055~1.497(5)	0.135±0.186 0.014~0.509(6)
Cl ⁻	54.5±48.1 1.34~139(15)	30.1±27.3 0.60~77.8(17)	76.9±42.1 29.8~139(8)	30.9±23.0 3.4~63.9(9)	28.9±43.6 1.34~120(7)	29.1±33.2 0.602~77.8(8)
NO ₃ ⁻	24.75±22.77 2.20~67.00(15)	13.25±8.49 1.63~32.8(15)	33.53±22.96 5.90~67.00(10)	11.35±6.48 3.2~19.8(10)	7.20±7.12 2.20~19.3(5)	17.04±11.43 1.63~32.8(5)
NSSS	70.4±55.3 0.8~175(16)	39.7±32.3 0.48~134(18)	99.5±47.7 52.3~175(10)	51.7±32.6 26.9~134(10)	21.9±24.0 0.80~66.8(6)	24.8±26.8 0.48~70.9(8)
SSS	7.26±6.68 0.35~24.4(17)	5.48±6.78 0.15~25.4(19)	8.72±6.58 2.6~24.4(10)	5.49±7.46 0.6~25.4(11)	5.18±6.73 0.35~17.6(7)	6.14±6.15 0.15~16.3(9)
Ca ²⁺	2.59±2.39 0.13~8.8(17)	1.99±2.46 0.053~9.2(19)	3.15±2.38 0.9~8.8(10)	2.00±2.71 0.2~9.2(11)	1.79±2.35 0.128~6.40(7)	1.98±2.25 0.05~5.93(8)
Mg ²⁺	1.26±1.17 0.064~4.40(17)	1.01±1.23 0.027~4.60(19)	1.52±1.15 0.5~4.40(10)	1.03±1.35 0.1~4.60(11)	0.889±1.168 0.064~3.176(7)	0.98±1.12 0.03~2.95(8)
Na ⁺	59.0±54.5 2.92~202(17)	45.2±56.1 1.22~210(19)	71.7±54.1 21.2~202(10)	45.2±61.9 4.9~210(11)	40.8±54.1 2.9~146(7)	45.1±51.3 1.22~135(8)
NH ₄ ⁺	36.7±33.1 0.83~118(17)	23.3±23.2 0.11~89(18)	46.9±35.1 10.5~118(10)	18.22±10.60 2.40~33.8(10)	22.0±25.4 0.834~74(7)	29.64±32.88 0.11~89(8)
K ⁺	3.89±3.08 0.5~11(16)	1.88±1.68 0.3~6.4(17)	4.99±3.42 0.5~11(10)	1.83±1.72 0.3~6.4(10)	2.07±0.98 0.645~3.40(6)	1.97±1.76 0.39~5.42(7)

도가 야간대 농도보다 높게 나타난 대부분의 무기성 양이온 성분의 상당 수도 통계적으로 의미가 없다는 결론이 나왔다. 따라서 본 연구기간 중 측정된 자료로부터 다음과 같은 결론을 유추하는 것이 가능할 것으로 보인다. 1) 유기성 성분들은 실제로 야간대에 비해 주간대에 높은 농도를 띄고, 2) 무기성 성분들도 - 대부분의 음이온 성분들이나 K와 NH₄ 같은 일부 양이온 성분들 - 유기성 성분들과 유사하게 실제로 주간대에 높은 농도를 유지할 수 있다. 이 중에서 특히 유기성 성분들이 주간대에 높은 농도를 유지하는 현상은 이들의 생성이 빛과 관계가 깊은 생물적인 현상과 어느 정도 연관성이 있을 것으로 보인다.

3.3 이온 대 기상인자간의 관계-계절별로 분류한 자료의 조사

본 연구기간 동안 측정이 이루어진 모든 자료를 이용하여, 이온성분과 기상변수들 간의 상관관계를 확인한 결과가 표 4에 제시되어 있다. 표 4에 제시된 결과에는 상관성의 강약을 쉽게 구분할 수 있게끔 (*)를 첨가하였다(단 1시간 단위로 측정된 기상인자와 11~12시간 단위로 측정된 이온성분을 1:1로 대응시키기 위해, 편의상 이온농도는 매회 측정 중 동일한 시간농도를 유지한다고 가정하였다.). 표 4의 결과를 보면, 화학적 인자들 중에서 풍속이나 온도와 뚜렷한 경향을 보이는 성분들의 존재가 확인되고 있다. 특히 풍속과의 관계를 보면, 여타 모든 변수들이 불규칙한 경향을 보이는데 반해, 해수성기원의 주요 양이온 성분들(Na⁺, K⁺)과 주요 음이온

Table 4. Results of correlation analysis to investigate the relationships between chemical components and meteorological data.

	Acetate	Formate	MSA	F	Cl	NO ₃	NSSS [^]	SSS ^{^^}	Ca ²⁺	Mg ¹⁺	Na ⁻	NH ₄ ⁺	K ⁺
(a) All data													
Wspeed	0.0898	-0.1085	-0.1206	0.0411	0.4241*	0.0626	-0.0303	0.5007*	0.4973*	0.4977*	0.4973*	-0.1335	0.3058*
Temp.	0.2492	0.2541	0.0395	-0.0803	0.2215	0.2791	0.1815	0.0204	0.0241	0.0179	0.0248	0.4525	0.3122
RH	-0.1317	-0.0417	0.2473	-0.1428	0.0276	-0.0063	-0.2036	0.0946	0.0956	0.0963	0.0954	-0.0262	-0.0218
IR	-0.2598	0.1215	-0.1671	-0.1267	0.2914	0.2756	0.3097	0.2583	0.2582	0.2556	0.258	0.2104	0.2831
(b) 1st exps.													
Wspeed	-0.1166	-0.2717	-0.3815*	-0.5593*	0.647*	0.2162	-0.1405	0.5937*	0.5921*	0.5946*	0.5937*	-0.1964	0.5467*
Temp.	0.051	0.0763	0.1816	-0.0859	-0.0037	-0.1042	0.0577	-0.0421	-0.0423	-0.0428	-0.0425	0.0773	0.0068
RH	-0.391	-0.0032	0.0439	-0.3654	0.131	-0.085	-0.0814	0.3211	0.3208	0.3204	0.3207	-0.1913	-0.1266
IR	-0.2742	-0.0909	-0.1389	-0.1354	0.2344	0.1483	0.2759	0.2297	0.2295	0.2295	0.2296	-0.0388	0.2742
(c) 2nd exps.													
Wspeed	0.2106	0.0264	-0.0845	0.2806	0.1392	-0.0604	0.0239	0.5409*	0.5455*	0.539*	0.543*	-0.0497	0.1783
Temp.	-0.1186	0.2145	0.693*	0.2353	0.3471	0.2413	0.0504	-0.4337	-0.4423	-0.4272	-0.4389	0.2789	-0.0212
RH	0.1174	0.2442	-0.0081	0.0031	0.1948	0.166	-0.0145	0.1285	0.1289	0.1361	0.1262	0.1372	0.1893
IR	0.6116*	0.2779	-0.2402	-0.3206	0.4925	0.363	-0.1115	-0.3198	-0.3218	-0.327	-0.3211	0.1873	-0.0414
(d) 3rd exps.													
Wspeed	0.0029	0.1904	-0.0376	0.0876	0.4239*-0.4471	-0.0871	0.4902*	0.4682*	0.4682*	0.4682*	-0.1219	0.5779*	
Temp.	0.6879*	0.2954	-0.668*	-0.1473	-0.8229*-0.2166	-0.3331	-0.8538*	-0.8102*	-0.8102*	-0.8102*	-0.4983	-0.7482*	
RH	0.066	0.0566	-0.3225	0.0356	-0.2782	-0.2424	0.1206	-0.1989	-0.2333	-0.2333	-0.2333	-0.0154	0.0461
IR	-0.0127	0.0849	0.3563	0.2262	-0.012	0.75*	-0.1365	-0.0727	-0.0727	-0.0728	-0.0727	-0.2461	0.0735

Note: ^ and ^^ denote non-sea-salt and sea-salt sulfate, respectively. * represents the case whose probability of no correlation is 10 % or less.

성분들(Cl⁻, SS-SO₄²⁻)은 강한 양의 상관관계를 보인다. 풍속과의 관계와는 반대로, 이들 해염성기원의 주요 성분들은 거의 공통적으로 온도와 음의 상관관계를 취하고 있다. 특히 3차년도 2차 및 3차 측정기간에는 이러한 음의 상관관계가 상당히 뚜렷하게 나타난다. 따라서 단순히 이들 주요 이온성분들과 기상인자와의 관계를 계절별로 분류하여 보면, 대체로 하수면 위의 대기 중에서 강한 바람이 불수록 또는 기온의 저하가 강하게 일어날수록 촉진되는 것으로 보인다.

해수를 구성하는 주요 양·음이온성분들이 풍속이나 기온과 높은 상관관계를 유지하고 있다는 것을 확인할 수 있지만, 이에 반해 다른 성분들은 상당히 다른 추세를 보이고 있다. NH₄⁺나 NO₃⁻와 같은 질산성이온이나 NSS-SO₄²⁻, F 같은 무기성 이온성분들은 풍속이나 기온과 같은 환경인자들과의 상관성을 확인하기가 쉽지 않다. 비록 이들간에도 상관성의 경향이 드물게 확인되곤 하지만, 이런 불규칙한 경향에 대해 의미를 부여하기는 어려운 것으로 보인다. 주요 성분들에 비해 이들 성분들이 불

규칙한 경향을 보이는 주된 요인으로는 이들 대부분의 기원이 해양과 같이 안정적인 공급원이 아니라 불규칙한 인위적 기원 등에 강하게 영향을 받는다는 점을 고려하지 않을 수 없다. 특히 거의 모든 경우, NSS-SO₄가 SS-SO₄보다 많은 양으로 발견되는 현상은 NSS-SO₄가 황화합물의 순환에 더 중요한 역할을 하리라는 사실을 뒷받침한다(김기현 1998-투고중).

위에서 무기성이온들 간의 관계를 상관성의 존재나 강약의 유무에 따라 크게 두 가지 유형으로 대별하였다. 만약 MSA, acetate, formate와 같은 유기성 이온성분들도 이와 같은 관점에서 보면, 주요 무기이온을 제외한 일반적인 무기이온성분들과 같이 대체로 낮은 상관성을 보이고 있다. 비록 드물지만, 2, 3차 측정기간중 이들은 온도나 일사량과 같은 환경인자와 강한 양의 상관관계를 보이기도 한다. 이러한 관계는 이들의 발생이 광화학적 반응과 어느 정도 연계되어 있으리라는 점을 시사하는 것으로 보인다.

3.4 이온성분 대 기상인자간의 관계-풍향별로 분류한 자료의 조사

이미 여러 가지 기상요인들과 이온성분들간의 관계가 여러 가지 형태로 밝혀졌다. 지금까지의 분석을 통해, 여러 인자들이 이온성분의 환경거동에 어떻게 영향을 미치는 가와 같이 이들의 역할을 구분하는 것이 어느 정도 가능하다. 예를 들어, 풍속과 같은 경우 그 강약에 따라 이온농도의 변화가 뚜렷하게 변화하는 추세를 보이는 것을 고려할 때, 이온성분의 배출에 물리적으로 영향력을 행사하는 요인으로 볼 수 있다. 그리고 위에서 3차 측정과 같이 남-동풍이 빈번하게 발생할 때, 여타 방향에서 바람이 불 때와 달리 화학적 인자들의 조성비가 크게 변화하는 것을 확인하였다. 이런 점을 감안하면, 풍향은 자연적 요인과 인위적 인자간의 상대적인 관계의 설정에 영향을 미치는 방식으로 (이온성분의 배출에) 화학적인 관점에서 영향력을 발휘하는 요인으로 분류할 수도 있다. 모든 인자를 이와 같이 분류하는 것은 어렵겠지만, 기온의 경우, 대체로 풍속과 높은 상관성이 발생할 때 출현한다는 점을 감안하면, 전자의 성격에 보다 더 가까울 것으로 보인다.

다.

이와 같이, 기상인자들의 여러 가지 특성을 볼 때, 이온성분의 화학적관계를 보다 명료하게 설명하기 위해서는 위에서 실시한 상관성 분석에 대비해서 (기간별로 분류한 자료집단의 상관성분석), 화학적 인자들간의 관계가 다소 복잡하게 나타나는 풍향과 같은 요인을 중심으로 자료를 세밀하게 분석하는 것이 어느 정도 의미가 있을 것으로 보인다. 이러한 전제를 확인하기 위해, 자료를 동서남북의 4방향으로 4분한 후 상관성분석을 실시하였다. 표 5에 제시된 결과는, 풍향에 따라 기상인자와 이온성분간의 관계가 상당히 다양하게 표출될 수 있음을 확인시켜준다.

풍향별로 분류했을 때, 가장 특이한 점은 기온과 이온들간의 상관관계라고 할 수 있겠다. 이미 위에서 본 바와 같이 계절별로 분류한 자료에 대해 분석했을 때는, 기온과 이온들은 관계가 형성될 때 대체로 강한 음의 상관성을 취하는 것으로 나타난 바 있다(표 4 참조). 그러나, 풍향별로 취합한 표 5의 결과는 이러한 추세와 상당히 동떨어져 있다. 이와 같은 분석의 가장 중요한 결과는 내륙성으로 보이

Table 5. Results of correlation analysis between chemical components and meteorological data after all datasets are divided into four directions.

	Acetate	Formate	MSA	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	SSSS [^]	SSSS ^{^^}	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺
(A) North													
Windspeed	-0.1209	-0.0267	-0.0897	0.0154	0.2974	0.0492	-0.1849	0.442*	0.4406*	0.4450*	0.4393*	-0.2503	0.0153
Temperature	0.3201	0.2192	0.0268	-0.1922	0.1328	0.3373	0.4304	-0.121	-0.1251	-0.1319	-0.1218	0.6344*	0.3707
RH	-0.4562	-0.184	0.432	-0.2667	0.2553	-0.0917	-0.1086	0.2581	0.2589	0.2525	0.2569	-0.0387	0.0008
Irradiance	-0.0608	-0.1457	0.2304	0.0808	-0.1412	-0.0229	-0.0114	-0.1396	-0.1237	-0.1339	-0.1229	0.0654	-0.1915
(B) East													
Windspeed	-0.0123	0.0309	-0.2879	0.0004	0.255	-0.2488	-0.3538	0.1708	0.187	0.1735	0.1813	-0.4736*	0.1502
Temperature	0.099	0.2856	0.0972	0.1034	0.4438	0.406	0.088	0.5679	0.5687	0.5703	0.5683	0.5649	-0.0275
RH	-0.2396	-0.0497	0.4491	-0.0353	0.5415	0.1644	-0.0276	0.5037	0.4978	0.5075	0.5033	0.3513	0.3423
Irradiance	0.2028	0.1036	0.0285	-0.1066	0.2599	0.1851	-0.0613	0.3346	0.3689	0.3675	0.3673	0.0971	0.046
(C) South													
Windspeed	0.4834*	-0.1163	-0.2196	0.266	-0.0741	-0.4489	-0.3458	-0.1077	-0.1148	-0.1131	-0.1132	-0.4256*	0.0473
Temperature	0.363	0.4197	-0.0256	0.0954	-0.045	0.5359	0.2718	0.0868	0.0937	0.0558	0.0904	0.4096	0.1096
RH	0.4079	-0.1746	-0.3195	-0.3216	-0.005	-0.1255	-0.3582	0.0418	0.0409	0.0348	0.0411	-0.2875	0.1877
Irradiance	0.2718	0.2378	0.0422	-0.0579	-0.138	-0.0469	-0.1885	-0.1282	-0.0873	-0.0962	-0.0887	-0.0958	-0.163
(D) West													
Windspeed	-0.0452	-0.1344	-0.2598	-0.2947	0.8835*	-0.237	0.0512	0.7443*	0.7370*	0.7358*	0.7370*	0.2032	0.7399*
Temperature	-0.5026	0.0565	0.2925	-0.1864	0.8003	0.2821	-0.1348	0.5256	0.5656	0.5637	0.5635	0.5502	0.7335
RH	-0.4718	0.1779	0.4548	-0.2923	0.4635	0.1307	-0.074	0.5485	0.5825	0.6132	0.5825	0.3331	0.43
Irradiance	0.3414	-0.4119	0.4934	0.0358	-0.1007	-0.1113	-0.027	-0.2352	-0.1749	-0.1742	-0.1752	-0.1439	-0.0752

Note: ^ and ^^ denote non-sea-salt and sea-salt sulfate, respectively. * represents the case whose probability of no correlation is 10% or less.

Table 6. Results of correlation analysis between different chemical components measured during three field measurements made at Cheju Island, Korea (Sept. 1997 ~ Apr. 1998).

	Acetate	Formate	MSA	F ⁻	Cl ⁻	NO ₃ ⁻	NSSS ^Δ	Na ⁺	NH ₄ ⁺	K ⁺
Acetate	(441)	0.4027*	-0.3073*	0.2936*	-0.148	0.3602*	0.5713*	-0.1934	0.5827*	0.3473*
Formate		(640)	-0.125	0.2724*	-0.0143	0.0346	0.2879*	0.0335	0.3071*	0.2902*
MSA			(579)	0.1638	-0.1088	-0.0004	-0.1101	-0.0015	0.182	-0.155
F ⁻				(515)	-0.1724	0.0004	0.1233	-0.106	0.0578	-0.1286
Cl ⁻					(623)	0.0074	0.1394	0.9056*	0.029	0.7695*
NO ₃ ⁻						(595)	0.4558*	0.0455	0.541	0.1447
NSSS ^Δ							(648)	0.184	0.8322*	0.5136*
Na ⁺								(672)	0.0291	0.5943*
NH ₄ ⁺									(656)	0.4694*
K ⁺										(617)

^Δ denotes non-sea-salt sulfate. # denotes number of observation after adjustment. * represents the case whose probability of no correlation is 10⁻⁶ or less.

는 등, 남풍의 경우 대체로 약한 상관관계가 양음의 구분없이 산재한 데 반해, 해풍의 영향을 확인시켜 주는 서, 북풍의 경우 풍속과 주요이온들 간에는 강한 양의 상관관계가 나타난다($P < 0.001$ 의 조건에서 상관성이 확인). 따라서 이들 결과를 취합하면, 주로 해양성기의 서풍이나 북풍이 불 때, 풍속의 강약(또는 경우에 따라 기온의 강도)에 따라 해염성분들의 배출이 직접적으로 영향을 받는 것으로 보인다. 그에 반해, 내륙성 요인들에 영향을 받았을 것으로 보이는 남풍이나 동풍이 측정지점으로 유입될 때는, 그런 관계가 잘 나타나지 않았다. 이러한 사실은 풍향에 따라 자연적 또는 인위적 발생원의 상대적 영향력이 가시적으로 변화하는 지역에서, 오염물질의 측정을 시도한다면 여러 가지 요인들의 관계를 동시에 다각도로 분석하는 것이 중요하다는 점을 시사한다.

3.5 이온성분 상호 간의 관계

이온과 이온들간에 존재하는 상관성의 분석을 통해서도 이온화합물의 거동에 영향을 미치는 여러 가지 측면들을 또 다른 각도에서 조명하는 것이 가능하다. 표 6에는 한 시간 단위대로 분리한 모든 이온성분들 간의 관계를 분석한 결과가 제시되어 있는데, 표 4, 5와 마찬가지로 이들 중 비교적 상관성의 의미가 강한 짝들에 대해서는 별도로 (*) 표시로 구분하였다. 이러한 분석을 표에 제시된 전체 자료 뿐 아니라 추가적으로 1, 2, 3차의 실험에 각각으로 적용하였을 때, 4차례의 상관분석에서 4회 연속적으

로 강한 상관성을 보인 짝들은 6개나 발견되었다. 주요 무기성 이온성분들, 예를 들어, (1) Na⁺와 Cl⁻, (2) Na⁺와 K⁺, (3) K⁺와 Cl⁻ 짝들이 전체의 반인 3개를 차지하는데, 이러한 상관성의 확인은 이들이 주로 해수로부터 기원하는 성분이라는 점을 확인시켜 주고 있다. 그외에는 비주류에 속하는 이온성분들 간에서 이런 관계를 다시 볼 수 있는데, NH₄⁺ 이온이 NSS-SO₄나 acetate와 그리고 formate가 F⁻ 이온과 지속적으로 상관성을 유지하는 것이 확인되었다. 특히 해염으로부터 기원하지 않고 가스상 성분으로부터 입자상으로 전환하는 질산성 이온과 비해염성 황산이온(NH₄⁺이온이 NSS-SO₄)간의 높은 상관관계는, 이들 성분이 특정 기상인자에 대해 상관성의 강약을 보여 주는 경향에 상당한 일관성이 나타난다(이와 유사하게 NSS-SO₄는 NO₃이온과도 3차례나(비록 횡수면에서는 부족하지만) 높은 상관성을 보인 것으로 확인된다). 위 6가지 짝들의 경우보다 빈도면에서는 한 단계 낮지만, 여러 이온성분들 간의 상관성의 존재가 3차례 이상 확인되었는데, 특히 유기성 이온성분들 간에 강한 상관성이 확인되었다. 따라서 이온들 간의 상관성을 분석한 결과는 표 4 등에 제시된 기상과 이온농도 간의 분석 결과들과 상당히 일관성을 보여 주는데, 이러한 발견은 이온과 이온의 관계 또는 기상인자와 이온의 관계들이 결코 우연적으로 발생하는 것이 아니란 점을 확인시켜 주고 있다. 그리고 위에서 기상인자와 이온의 관계를 분석한 것과 마찬가지로 풍향의 함수로 분리하여 이온들간의 상관성 분석을 시도하

였다. 그러나 결과는 풍향-이온의 관계 처럼 방향에 따른 경향성을 뚜렷하게 확인하기는 어려웠다.

4. 결 론

제주의 고산에 위치한 측정점으로부터 대기오염 물질의 장거리이동에 대한 연구의 일환으로 입상물질과 결합된 이온성 무기물질과 유기물질의 농도 분석을 3차례에 걸친 집중측정기간동안 실시하였다 (1997년 9월~1998년 4월). 이들 측정 자료를 이용하여, 이온성분들의 계절별 및 일별 농도분포특성에 대해 분석을 실시하였다. 그리고 이들 자료를 이용하여, 이온과 기상인자 및 이온과 이온의 관계 등을 시간적 함수의 관계 및 기상학적인 요인과의 관계라는 관점에서 분리하여 분석하였다. 대부분의 이온 성분들은 측정이 이루어진 가을, 겨울, 봄을 거치며 뚜렷하게 농도의 저감이 이루어지는데, 이러한 현상들은 주요 환경인자들의 상대적인 변화경향과 연관이 지어 설명할 수 있다. 그러나 이러한 경향이 단순히 측정이 이루어진 지점의 시공적인 환경인자 또는 그와 관련된 기상인자들의 변화에 의해 조절되는 것인지 또는 오염물질의 시간적 순환양상의 일부본 인지를 구분하기는 어렵다. 이러한 부분에 대한 명확한 해답을 제시하기 위해서는 보다 많은 자료의 축적이 필요할 것으로 보인다.

이러한 연구결과는 또한 여러 가지 이온성분들이 각각의 환경지화학적 특성에 따라 여러 기상인자들과 다양한 관계를 유지하고 있다는 사실을 보여 주었다. 특히 이들간의 상관성분석의 결과는 이온들의 농도가 풍향, 풍속, 기온과 같은 요인에 상당히 많은 영향을 받고 있다는 것을 보여 주었다. 특히 이온의 농도가 어떤 지화학적 요인에 의해 조절되는 가를 설명하기 위해서는 변수와 변수간의 관계를 시간과의 관계는 물론, 풍향과 같은 기상요인의 함수로 분류하여 그들간의 관계에 대한 의미해석을 세분화하여 시도하는 것이 중요할 것으로 사료된다.

감사의 글

본연구와 관련된 시료의 채취 및 분석에 수고를

아끼지 않은 제주대학교의 전기현군, 한국외국어대학교의 장유운, 박주영, 강범주군을 위시한 조교 및 대학원생 일동에게 감사드립니다. 기상자료를 지원 해주시는 제주고층레이더기상대의 대장님 및 crew 일동에게도 깊은 감사드립니다. 본연구는 국립환경 연구원의 동북아 대기오염 장거리이동과제의 연구비 지원과 1998년 상지대학교 교내연구비의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- 김기현, 오재룡, 강성현, 이수형, 이강웅(1996) 해수 및 대기 중 DMS의 분석: 마산만을 중심으로, 한국대기보전학회지, 12(4), 495-504.
- 김기현, 이강웅, 허철규, 강창희(1997) 제주도 연안해역을 중심으로 한 DMS 농도의 관측, 한국대기보전학회지, 13, 161-170.
- 김기현, 이강웅(1998) 해양환경의 에어로졸 화학 - 농도와 함량비를 이용한 이온성분간의 관계에 대한 추론, 한국대기보전학회지 14(2), 143-152.
- 김기현(1998) 비해염성 황산이온과 해염성 황산이온의 기원별 분류와 환경학적 중요성, 한국대기보전학회지, 투고중.
- Chen, L.-L., Carmichael, G.R., Hong, M.-S., Ueda, H., Shim, S., Song, C.H., Kim, Y.P., Arimoto, R., Prospero, J., Savoie, D., Murano, K., Park, J.K., Lee, H.-G. and Kang, C. (1997) Influence of continental outflow events on the aerosol composition at Cheju Island, S. Korea. *J. Geophys. Res.*, 102, 28,551-28,574.
- Keene, W.C., Pszenny, A.A.P., Galloway, J.N. and Hawley, M.E. (1986) Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation. *J. Geophys. Res.*, 91, 6647-6658.
- Kim K.-H. and Song D.W. (1997) The concentrations of lead in urban and nonurban atmospheres of Won Ju city, Korea. *Water, Air and Soil Pollution* 98(3-4), 225-273.
- Wilson, T.R.S. (1975) Salinity and the major elements of seawater, in *Chemical Oceanography*, Vol. 1, Academic, USA.