

김해지역의 산성강우와 기압유형

박종길·황용식*
인제대학교 환경시스템학부·부산대학교 대기과학과
(1999년 1월 15일 접수)

Weather Patterns and Acid Rain at Kimhae Area

Jong-Kil Park and Yong-Shik Hwang*

School of Environmental Science & Engineering, Inje University, Kimhae 621-749, Korea

*Dept. of Atmospheric Science, Pusan National University, Pusan 609-735, Korea

(Manuscript received 15 January, 1999)

This study was carried out to investigate the characteristics of acidity in the precipitation and weather patterns that were influenced it at Kimhae area from March, 1992 to June, 1994.

The range of pH value in the precipitation at Kimhae is 3.45 to 6.80 and the average is pH 4.62, and the major anion components associated with acidity in the precipitation are Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- . These distributions are to be expected the influence of industrialization such as, urbanization and construction of industrial complex at Kimhae area and the long range transporting of air pollutants from China.

The weather patterns governing the acid rain at Kimhae were classified broadly into four types(Cyclone(type I-a, type I-b), Migratory Anticyclone(type II), Tropical Cyclone(type III), Siberia High(type IV)) and weather pattern which had the most occurrence frequency of acid rain was type I-a and the average pH value of precipitation in this pattern was 4.45, and we are found that the source area of air mass which was accompanied with high acidic precipitation in Kimhae was the central China include with Peking through the analysis of surface weather maps, 850 hPa wind fields, and the streamline analyses.

Key words : weather pattern, acid rain, industrialization, wind field, streamline analysis

1. 서론

최근 산성강우의 영향은 국지적인 환경문제가 아니라 지구 규모(global scale)의 환경문제로 등장하였고, 대도시로부터 수백 km 떨어져 있는 교외지역에서의 강수가 거의 pH 5.0에 가깝다고 보고되고 있다. 또한 오랫동안 산성강우는 인체에 직접적인 악영향을 미친다고 보지 않았으나, 최근 산성 에어로솔이 인체에 영향을 미친다는 보고가 나오기 시작하였으며, 산성비에 노출될 경우 상기도와 폐의 활성을 저하시키고, 어린이들에게는 기관지염을 유발시키기도 한다.¹⁾

강수가 지속될 경우 washout과 rainout 현상에 의해 시간이 지남에 따라 강수의 pH 값이 달라질 것으로 예상되는데, 최금찬 외²⁾는 초기강우일 때 높은 pH 값을 나타내고 시간이 지날수록 pH 값이 낮아진다고 하였으며, 박종길과 황용식³⁾은 산성도가 높은 초기강수에서 일정 시간이 지남에 따라 pH 값이 임의의 값에 수렴하며 초기강수의 경우 washout에 의한 세정효과로 더욱 pH 가 낮아진다고 하였다. 이근준과 정용승⁴⁾은 충남 웅천에서 관측되어진 시간에 따른 강수의 pH 값은 시간이 지남에

따라 낮아지거나 높아지는 경우를 보여 발원지와 이동경로에 따라 산성도가 달라질 수 있음을 지적하였다.

강수의 발원지나 기단에 대한 연구로는 김용표 외⁵⁾가 1994년 3월과 4월에 850 hPa 등압면상의 공기 이동을 역제적분석으로 분석 기간중 기단의 90%가 중국으로부터 유입된다고 하였으며, 강동근 외⁶⁾는 동북아시아 기상 측정자료를 이용하여 850 hPa 등압면으로 대표되는 기단의 이동경로를 계산하여 하계를 제외한 전 기간이 중국으로부터 기단이 유입되며 하계에는 중국의 남부를 통과하는 기단이 50%이상 차지한다고 하였다. 이는 한반도가 중국의 동쪽에 위치하고 편서풍 지대이므로 그 영향은 크다고 할 수 있으나, 그들이 어느 곳을 발원지로 하는지, 모두가 산성비를 동반하는지에 대한 분석은 없었다. 또한 나춘기와 정재일⁷⁾은 전주시 강수의 화학적 조성연구에서 우리나라의 강수를 초래하는 기단은 대륙성 건조기단과 해양성 습윤기단으로 구분할 수 있는 산소와 수소의 동위원소를 분별하는 중수소 초과량($d = \delta D - 8\delta 18O$)을 이용하여 강수의 발원지에 따른 pH를 비교하였으나, 우리나라의 경우 강수를 초래하는 기단은

4~5가지의 종류가 있으며,⁸⁾ 동일 기단이라 하더라도 그들의 진로에 따라 강수의 산도가 달라지므로,⁹⁾ 강수를 초래하는 공기의 이동 경로에 따라 강수의 산도를 비교하는 것이 보다 효과적일 것이다.

본 연구에서는 김해시 어방동 인제 대학교 옥상에 설치된 간이 강수채집기를 사용하여 강수시 매시간 간격으로 강수를 채취한 후 pH 및 강수 속에 포함된 각종 이온을 정량분석하고, 우리 나라에 산성비를 초래하는 기상조건을 기압 유형별로 분류하여 강한 산성비를 유발한 강수 시스템의 기압유형과 850 hPa의 바람장 및 유선분석을 통하여 산성강우의 발원지를 추적해 보고자 한다.

2. 자료 및 연구방법

김해지역의 강수 중 산도 및 이온 성분의 특성을 파악하기 위하여 간이 강수채집기를 인제대학교(35°15'40"N, 128°54'20"E) 창조관 옥상에 설치하고 1992년 3월부터 1994년 6월까지 강수를 채수하였다. 관측장소는 Fig. 1에서 보듯이 북서쪽에는 해발 325m의 분성산과 북동으로 해발 630m의 신어산이 있고, 남동으로는 380m의 뚝대산으로 둘러싸인 분지 지형에 위치하며 그 사이로 길게 김해 평야가 인접해 있다. 또한 학교 주변은 안동 공단과 삼방동 일대의 신축 주택지구가 형성되고 있어 앞으로의 대기 오염은 심각할 것으로 예상되는 지역이다.

간이 강수채집기를 이용하여 채수된 강수는 DMS pH/Ion meter를 pH 4.00과 pH 7.00의 완충용액을 사용하여 보정한 후 pH를 측정하였으며, 초 순수로 세척된 폴리에틸렌 병에서 4°C의 냉장 상태로 보관하였다. 강수 중 pH에 직접적인 영향을 미치는 수용성 이온의 화학적 성분을 파악하기 위하여 시료의 일정량을 0.8 μm의 공극을 가지

는 얇은 막 여과지(membrane filter)로 여과하여 강수 중의 입자상과 액상을 분리한 후 분석에 사용하였다.

본 연구의 대상이 될 강수 중의 수용성 이온은 여액을 Dionex Co.의 이온 분석기를 이용하여 Cl⁻, NO₂⁻, NO₃⁻, SO₄²⁻, PO₄³⁻, F⁻, Mg²⁺, Ca²⁺, Mn²⁺ 그리고 K⁺를 분석하였고 이를 통해 김해지방 산성비의 화학적 성분을 파악하였다. 또한 산성강우 일의 기상조건과 기압유형을 알아보기 위하여 일본 기상청에서 발행한 인쇄일기도를 사용하였으며, 각 기압 유형별 850 hPa의 바람장은 10~60°N와 100~160°E내의 54개의 관측 지점 외에 해상관측 자료를 포함한 71개 동북아시아의 관측지점의 기상전문 자료를 객관 분석하여 사용하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 강수중의 산도 및 이온 성분

Table 1은 김해지방에 내린 강수중의 pH 및 각종 이온의 농도를 나타낸 것으로 강수 시작부터 끝까지 비교적 채수가 잘 이루어진 26회의 결과를 나타낸 것이다. 관측결과 pH의 범위는 3.45~6.80 이었으며, 평균 pH 값은 호수의 어류에 치명적인 영향을 준다는 pH 값에 가까운 4.62로 나타났다. 그리고 pH 나 각 이온의 농도가 지나치게 낮거나, 높아 평균값에 영향을 크게 미치는 것을 제거하기 위해 구한 trimmean의 경우도 pH가 4.53으로 낮게 나타나 김해지방에 내리고 있는 강수의 대부분이 pH 5.0 이하의 강산성을 알 수 있다.

산도의 계급별 발생빈도를 살펴보면(Fig. 2), pH 4.5 1~5.00 계급의 발생빈도가 30.77%로 가장 높았으며 그 다음이 pH 4.01~4.50 계급으로 26.92%로 나타났으며, 어류의 생식에 치명적인 영향을 미치는 pH 4.0 이하의 계급도 19.23%로 나타나 강산성의 비가 내릴 확률이 높음을 보여주고 있다. 또한 pH 5.0 이하의 산성강우가 내린 날의 누적빈도도 조사기간 중 77%나 되었으며, 평균 pH 이하의 강산성의 비가 내린 날의 발생빈도도 62%나 되었다. 박국태 등¹⁰⁾이 1993년에 우리나라의 중부지방에서 관측한 평균 pH값(성남시; pH 6.27, 인천시; pH 5.80, 강릉시; pH 4.83, 충청북도 청원; pH 6.06)에 비해 강산성을 나타내었으며, 1990년 4월부터 9월 걸쳐 김해에서 관측한 이부용 등¹¹⁾의 평균 pH값(4.84)에 비해서도 낮게 나타나 김해지방은 다른 지방에 비해 강우의 산성도가 높을 뿐 아니라, 1990년에 비해 강우의 산성화가 더욱 진행되었음을 알 수 있다. 이는 최근 김해시의 인구증가율이 급격히 증가하였으며 그에 따른 주택 보급율의 증가와 난방 및 공장과 차량 증가³⁾로 인한 산성 오염물질의 배출량 증가와 최근 공업화를 서두르고 있는 중국으로부터 오염물질이 장거리 수송되는 것이 주요 요인으로 작용하고 있다고 생각되어진다.

김해지방에 내린 강수일에 따른 수용성 이온의 농도(Table 1)는 많은 차이를 보이고 있는데, 수소이온의 경우 일별 평균 농도의 범위는 0.16 ~ 354.81 μM로 나타났으며, 관측기간의 평균 농도는 61.21 μM 이었다. 음이온의 경우 Cl⁻이 116.57 μM로 가장 높은 농도를 나타내었으며 그 다음은 SO₄²⁻가 55.01 μM, NO₃⁻는 33.21 μM

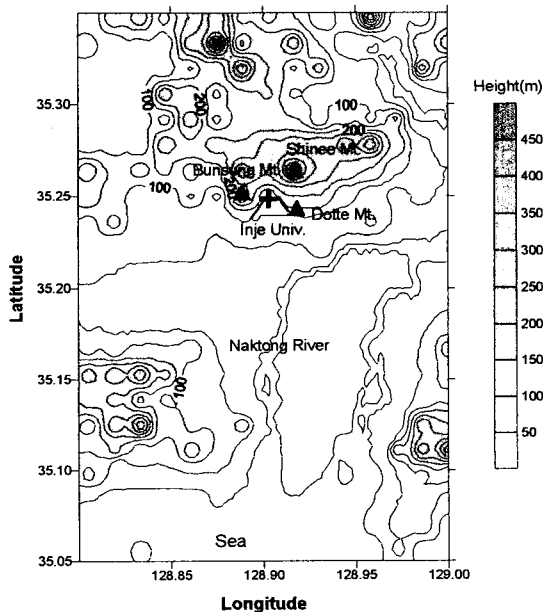


Fig. 1. The topography of observation site and Kimhae area.

으로 나타나 그 순서는 다르나 산성강수에 영향을 미치는 주요 이온 성분은 일치하고 있다. 분석기간은 다르지만 1990년에 동일 지점에서 채취된 강수의 분석¹¹⁾에서 pH, SO₄²⁻, Cl⁻, NO₃⁻의 농도와 비교하면 pH는 4.692(H⁺=20.32 μM)였으며, 산성 침적물의 농도는 각각 62.13 μM (5.964 ppm), 40.48 μM(1.417 ppm), 1.94 μM(0.120 ppm)로서 본 연구 기간이 1990년에 비해 SO₄²⁻를 제외하고 비교적 높은 농도를 나타내 해를 거듭할수록 오염도가 높은 산성강수가 나타남을 알 수 있었다.

강수중의 각 이온의 농도는 강수량이나 다른 요인에 의해 극한값을 가져 평균값의 본래 의미를 달리하는 경우가 많으므로 각각 5%에 해당하는 양 극단의 값을 제외한 평균값, Trimmean을 구해보면, H⁺의 경우 32.74 μM로 전체 평균보다 낮게 나타났으며, 음이온의 경우 Cl⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻ 순으로 각각 59.86 μM, 34.98 μM, 19.79 μM로 나타났다. 이온별로 보면 NO₂⁻와 PO₄³⁻의 음이온은 거의 검출되지 않았으며, SO₄²⁻는 4.02~410.62 μM의 범위를 보여 북해에 인접한 연안지역에서 관측한 Balls¹²⁾의 3~375 μM과 비슷한 분포를 보였으며, Cl⁻은 Balls¹²⁾

의 연구결과(21~5300 μM)와 비교할 경우 다소 낮은 7.76~584.63 μM의 범위를 나타내었다. 주요 음이온의 경우도 Balls¹²⁾은 Cl⁻ > SO₄²⁻ > NO₃⁻의 순으로 나타나 김해지

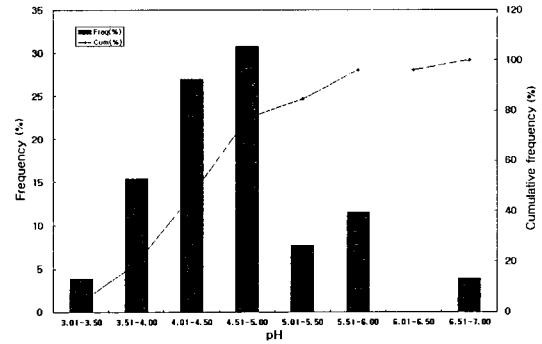


Fig. 2. Occurrence frequency and cumulative frequency distribution of each acidity classes at Kimhae from March, 1992 to June, 1994.

Table 1. pH values and concentrations of each ion in the precipitation from March 1992 to June 1994 at Kimhae. An abbreviated word, ND, represents meaning that not detected. Units : μM(micromole per liter)

Date	Rain(mm)	pH	H ⁺	Cl	NO ₂ ⁻	NO ₃ ⁻	SO ₄ ²⁻	PO ₄ ³⁻	F	Mg ²⁺	Ca ²⁺	Mn ²⁺	K ⁺
920317	4.0	3.70	199.53	584.63	ND	73.98	131.82	ND	ND	26.38	17.50	0.046	49.78
920320	10.0	3.88	132.79	56.37	ND	15.05	26.03	ND	ND	1.19	4.68	0.031	18.74
920429	1.0	5.19	6.46	214.41	ND	11.09	15.08	ND	ND	0.59	10.97	0.000	122.58
920507	118.0	4.41	38.55	71.11	ND	9.47	21.63	ND	ND	5.71	4.99	0.023	3.35
920710	31.5	3.45	354.81	126.01	ND	45.70	84.21	ND	4.53	10.26	18.58	0.379	7.34
920924	71.0	4.51	31.35	20.63	ND	6.33	24.49	ND	ND	0.42	7.77	0.043	1.75
930324	13.5	4.15	70.79	21.69	ND	23.08	32.71	ND	ND	0.34	7.11	0.046	4.51
930517	6.5	4.32	47.72	319.40	ND	13.15	55.17	1.00	ND	3.85	4.82	0.056	260.82
930809	1.5	4.86	13.80	333.57	ND	24.85	20.83	ND	ND	3.89	32.58	0.111	198.18
930810	94.5	5.57	2.68	327.87	ND	11.14	4.02	ND	ND	1.00	15.44	0.014	362.32
930826	70.0	4.81	15.36	29.62	ND	9.08	6.85	ND	ND	0.00	2.79	0.013	12.98
930914	7.5	4.56	27.54	25.36	ND	13.19	16.68	ND	ND	0.41	8.37	0.011	7.54
931121	6.5	3.66	218.78	99.05	6.17	76.56	67.94	ND	14.93	5.34	32.50	0.123	20.18
940503	14.0	4.30	50.12	26.23	ND	13.97	37.34	ND	ND	4.08	32.24	0.029	1.65
940511	25.5	4.45	35.48	10.63	ND	8.43	26.21	ND	ND	0.46	4.88	0.018	2.86
940514	49.5	3.88	131.83	26.83	ND	21.52	46.81	ND	ND	1.58	5.75	0.036	2.52
940517	0.5	6.80	0.16	125.18	ND	193.45	410.62	ND	9.47	41.73	387.28	0.022	21.36
940521	5.0	4.58	26.30	60.18	ND	37.61	55.33	ND	13.37	5.56	24.39	0.059	4.14
940525	72.0	4.14	72.71	52.33	ND	20.89	56.22	ND	1.39	3.68	7.48	0.091	2.79
940526	31.0	4.71	19.29	7.76	ND	5.73	7.48	ND	ND	0.00	0.00	0.000	1.59
940608	1.0	5.56	2.75	22.89	1.99	43.11	128.33	ND	6.99	7.20	77.52	0.218	3.12
940617	16.5	5.91	1.23	36.30	11.56	11.90	11.32	0.18	15.42	0.15	13.09	0.000	3.40
940622	9.5	4.53	29.50	38.18	8.76	15.20	23.29	0.77	7.09	0.38	8.43	0.001	5.02
940623	0.5	4.43	37.15	303.89	65.62	103.52	22.96	24.27	15.16	1.21	13.07	0.027	144.81
940627	5.0	5.03	9.36	34.64	6.69	29.50	46.08	0.00	11.11	3.06	48.31	0.124	13.69
940630	16.5	4.81	15.33	56.06	5.92	25.95	50.86	1.92	9.62	2.97	24.78	0.086	11.85
Mean	-	4.62	61.21	116.57	-	33.21	55.01	-	-	5.05	31.36	0.06	49.57
Trimmean	-	4.53	32.74	59.86	-	19.79	34.98	-	-	2.38	13.05	0.04	9.80

역의 경우와 일치하였다. 이는 김해지역이 해안가에 위치하여 해염기원의 Cl^- 의 영향을 많이 받고 있으며 최근 도시화, 산업화에 따라 산성 침적물인 SO_4^{2-} , NO_3^- 이온이 증가하고 있기 때문으로 생각된다.

양이온의 경우 Trimmean은 $H^+ > Ca^{2+} > K^+ > Mg^{2+}$ 의 순으로 나타났으며 순서에는 다소 차이는 있으나 산성우에 영향을 미치는 주요 양이온은 선행 연구와 일치하고 있다. 해안지역의 강수의 성상을 연구한 Balls¹²⁾의 경우는 $Mg^{2+} > Ca^{2+} > K^+$ 이었으며, 우리나라 강원도 원주에서 분석한 권영식과 허원범¹³⁾의 결과나 박국태 등¹⁰⁾의 결과와 비교해 볼때 해안과 내륙지역의 뚜렷한 구별은 나타나지 않았다. 이는 Balls¹²⁾의 경우 강수시료를 산처리한 후 원자흡수분광도계를 이용하여 수용성과 구분하지 않고 분석하였고, 권영식과 허원범¹³⁾은 입자상 물질의 세정효과를 보기 위해서 초기강수에 중점을 두었으나, 본 연구에서는 김해지역의 지역적인 특성 및 강수 지속 시간별로 시료를 채취한 점과 수용성 이온만을 분석하였기 때문에 양이온의 농도가 다소 차이가 난 것으로 생각된다.

따라서 김해지역의 강수 중에 분포하는 주요 음이온은 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 이며 양이온은 Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} 로 선행 연구와 일치하며 전체적으로는 농도가 다소 증가하여 이 지역의 대기 오염도가 점차 증가하고 있는 것으로 생각된다.

3.2. 산성 강수일의 기압유형

강수의 산성도는 rainout 과 washout 의 복합적인 요인에 의해 시간에 따라 달라질 수 있다. 대기 중에 존재하는 먼지나 해염 입자와 같은 응결핵 뿐 아니라 대기 중에 방출되어진 SO_x , NO_x 등의 인위적인 대기오염물질이 응결핵화 함으로써 비구름을 형성(rainout)하고 편서풍에 의해 오염지역으로 이동되어 강수를 나타낼 경우 씻겨 내림(washout)에 의해 강수의 산성도는 초기강수에서 높게 나타나고 시간이 지남에 따라 점차 일정한 값을 나타낼 수 있다. 그러나 하계 국지적인 대류현상에 의해 오염 지역에서 형성된 강수의 경우 산성도는 초기에는 높으나 시간에 따라 낮아지거나, 난류에 의한 토양성분의 영향으

로 오히려 초기강수에 산성도가 낮은 경우도 발생할 수 있다.³⁾ 이와 같이 강수의 발생 메커니즘에 따라 또는 어느 지역에서 발원된 강수인가에 따라 강수의 산성도도 달라진다.

따라서 산성 강수가 있었던 날의 기압유형을 박종길 등⁸⁾과 이부용 등¹¹⁾의 방법에 따라 분류하고 각 유형별 강산성을 나타낸 날의 지상 일기도와 850hPa의 바람장을 분석하였다. 아울러 산성 강수의 시간변화를 나타낸 1994년 5월 25일을 사례로 선택하여 강수 전후의 바람장 및 유선분석을 도시하여 강산성을 초래한 강수의 발원지를 추적하였다.

김해지방에 산성강수를 동반한 기압유형을 분류해보면 Table 2와 같이 4가지 유형, 온대성 저기압형(Cyclone, 유형 I), 이동성 고기압형(Migratory Anticyclone, 유형 II), 열대성 저기압형(Tropical Cyclone, 유형 III), 시베리아 고기압형(Siberian High, 유형 IV)으로 나눌 수 있다. 그 중 유형 I은 저기압 세력의 주된 이동방향에 따라 두 가지 형태로 나눌 수 있는데, 중국의 중부지방에서 형성되어진 저기압이 서진하여 한반도에 강수를 동반한 경우를 I-a형, 중국 양자강 이남의 화남 지방에서 형성된 저기압이 북동진하여 한반도나 남해안으로 이동하면서 강수를 동반한 경우를 I-b형으로 분류하였는데 이는 각각 박종길 등⁸⁾의 type III-b, III-c 과 유사하다. 유형 II는 이동성 고기압이 한반도를 통과하면서 강수를 동반한 경우로 박종길 등⁸⁾의 type II 와 유사하며, 유형 III는 열대지방에서 발생한 저기압이나 태풍에 의해 강수를 동반하는 경우로 박종길 등⁸⁾의 type V 와 유사하다. 그리고 이부용 등¹¹⁾에서는 없었던 시베리아 고기압이 남동 방향으로 세력을 확장하면서 한반도에 강수를 동반하는 경우를 유형 IV로 분류하였으며 박종길 등⁸⁾의 type I-a와 유사하다.

Table 2에서 알 수 있듯이 본 연구기간동안 김해지역에 가장 많은 산성비를 내린 기압 유형은 화중 지방에서 발생한 저기압이 서진하여 한반도를 통과하면서 강수를 동반한 유형 I-a로 전체의 46.2%를 차지하였으며 pH 3.45~5.56의 범위를 나타내었고 평균 pH 4.45의 강한 산성강수를 나타내었다. 이는 이부용 등¹¹⁾의 연구와 잘 일

Table 2. Weather patterns of rainy day from March 1992 to June 1994. The number, 920507 represents meaning of May 7, 1992.

Weather Pattern	Type	Rainy Day	Freq.(%)	pH	
				mean	range
Cyclone	I-a	920507, 920710, 930517, 930826, 940503, 940511, 940514, 940525, 940526, 940622, 940623, 940630	46.2	4.45	3.45~5.56
	I-b	920317, 920320, 920429, 930324, 930912, 930914, 940608, 940617, 940627	30.8	4.75	3.70~5.91
Migratory Anticyclone	II	940517, 940521	7.7	5.69	4.58~6.80
Tropical Cyclone	III	920924, 930809, 930810	11.5	4.86	4.45~5.57
Siberian High	IV	931121	3.9	3.66	

치한다. 그리고 양자강이남의 중국 남부지방에서 발생한 저기압이 북동진하여 한반도나 남부 해안지방에 강수를 동반한 유형 I-b도 두 번째로 발생빈도가 높았으며 전체의 30.8%를 차지하였다. pH 값도 3.70~5.91의 다양한 범위를 나타내었으며 평균 pH는 4.75로 비교적 낮은 pH를 보였다. 이동성 고기압이 한반도를 지나면서 강수를 동반한 유형 II는 pH가 평균 5.69로 나타나 가장 산성도가 낮았으며 그 빈도는 낮았다. 열대성 저기압 또는 태풍에 의해 동반된 강수의 경우인 유형 III는 평균 pH가 4.86으로 두 번째로 산성도가 낮았으나, 일본의 경우 가장 산성도가 낮았다고 小山⁹⁾이 지적하였다. 시베리아 고기압의 장출에 의한 경우는 본 연구기간 중에는 1회 관측되었으며, 매우 높은 산성도를 보였으나 회수가 적어 비교는 어렵다.

따라서 김해지역에 내린 강수는 I-a 형이 가장 많았으며, 다른 기압유형에 비해 산성도는 pH 4.45로서 강한 산성 강우로 나타났다. 이는 최근 북경지역이 공업화·도시화를 서두르고 있어 그 지역의 오염 물질이 구름 입자에 용해되어 장거리 수송되었기 때문으로 생각된다.

다음은 각 유형별 강산성의 비를 동반한 날의 종관 기상장과 바람장을 분석해 보면 다음과 같다.

3.2.1. 온대성 저기압형

우리 나라에 강수를 나타내는 온대성 저기압은 그 발전지에 따라 3가지형으로 구별할 수 있는데,^{8,11)} 즉 화북 지방에 중심을 둔 저기압이 우리 나라로 이동하는 경우와 북경을 포함한 화중 지방에 중심을 둔 저기압이 한반도로 이동하는 경우, 그리고 양자강 이남에서 발생한 저기압이 한반도로 이동하는 경우이다. 본 연구의 조사기간 중 산성강우를 나타낸 경우는 유형 I-a와 유형 I-b이다.

3.2.1.1. I-a의 기압유형

1992년 7월 10일은 유형 I-a의 산성 강우일 중 가장 pH가 낮았던 날로 화중 지방에 중심을 둔 저기압이 편서풍에 실려 강수일의 0000 UTC에는 중국 산둥 반도에 가까운 서해 중부지역에 1006 hPa의 중심을 두고 있으며, 1200 UTC에는 서해상에 1008 hPa의 저기압이 서해상에 중심을 두어 한반도에 남서 또는 남동풍의 풍계를 형성하며 한반도에 영향을 주고 있었다. 이날 김해지방에 내린 강수량은 31.5 mm였으며 강수의 pH는 3.45였다. 종관 기상장내의 기압계의 이동을 뒷받침하기 위해 850 hPa의 바람장(Fig. 3)을 분석해 보면, 0000 UTC에는 저기압 중심 부근에서 한반도를 향하여 SW풍이 5m/s 이상으로 불고 있으며, 1200 UTC에는 약간 동진한 상태에서 우리나라에 SW~W 계열의 바람이 불고 있어 저기압이 한반도 중부 이남 지역으로 이동하였음을 보여 주고 있다.

따라서 유형 I-a의 경우 최근 공업화를 서두르고 있는 북경지역을 지남으로써 강우의 산성도가 높아질 수 있다고 생각된다.

3.2.1.2. I-b의 기압유형

I-b 유형중 가장 강산성의 비를 동반한 1992년 3월

17일 0000 UTC에는 양자강 이남에 중심을 두었던 저기압이 중국 내륙에 고기압이 발달하므로써 동지나 해상으로 밀려나 약한 기압골을 형성하였고 연해주부근에 1030 hPa의 고기압이 자리하고 있어 서해안 지방은 기압골의 영향을 받기 시작하나, 우리나라 동부 해안 지역은 고기압의 영향을 받고 있었다. 1200 UTC에는 기압골이 1016 hPa의 약한 저기압으로 발달한 반면 연해주부근의 고기압은 약해져 기압능으로 전환되며 동쪽으로 이동하였고 한반도는 남서쪽에서 다가오는 약한 저기압의 영향을 받게 되었다. 이로 인해 김해지방에 4.0 mm의 적은 강수량을 기록하였으나, pH는 3.70이었다. 이 상태의 일기도를 생략한 대신 850 hPa 바람장(Fig. 4)을 살펴보면, 0000 UTC에는 동지나 해상에 강한 SW~W 계열의 바람이 우세하였고, 김해를 포함한 우리나라에는 NE 계열의 바람이 불고 있었으나, 1200 UTC에는 연해주부근의 고기압이 약해지고 남서쪽에서 약한 저기압이 다가오므로써 한반도 남부 지방에는 SW 바람이 우세하여 남동진하는 저기압의 영향을 받았음을 보여주고 있다.

3.2.2. 이동성 고기압형(유형 II)

유형 II에서 강산성의 비를 동반한 1994년 5월 21일은 김해지방에 5 mm의 약한 강수가 내렸으나, pH는 4.58로 강산성을 나타내었다. 이날의 종관 기상은 중국의 중부내륙에 1018 hPa의 고기압과 동중부 태평양상에

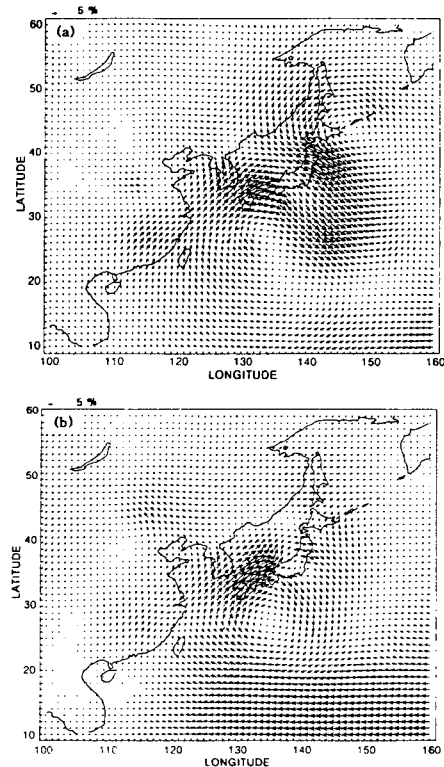


Fig. 3. 850 hPa wind field for (a) 0000 UTC, (b) 1200 UTC, July 10, 1992.

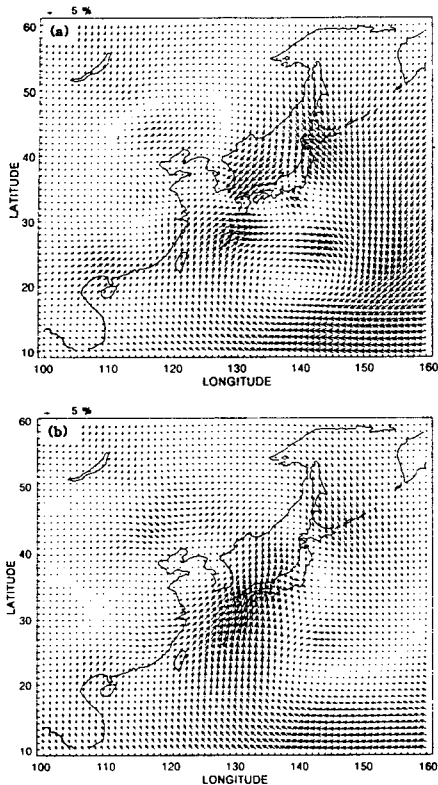


Fig. 4. Same as Fig. 3. except March 17, 1992.

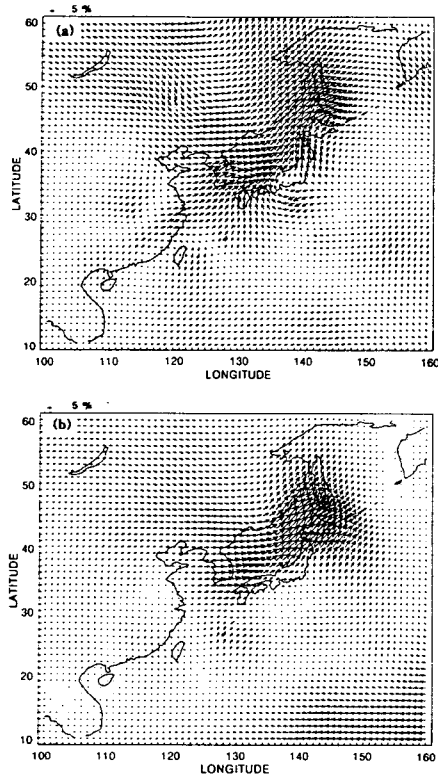


Fig. 5. Same as Fig. 3. except May 21, 1994.

1028 hPa의 고기압이 대상으로 놓여 우리 나라 주변은 이동성 고기압이 대상으로 정체하고 있으며, 북만주에 중심을 둔 저기압의 가장자리에서 약한 강수를 보이다가 1200 UTC에는 동중부 태평양상의 고기압이 1038 hPa로 발달하였고, 이로 인해 우리 나라 주변의 이동성 고기압도 강해져 강수는 끝이 나고 날씨의 맑아졌다. 그에 해당하는 850 hPa의 바람장(Fig. 5)을 살펴보면 0000 UTC에는 정체하는 이동성 고기압의 서쪽 가장자리에 위치한 한반도에 SW~W 계열의 바람이 우세하였으며 1200 UTC에는 대상 고기압이 발달해 W계열의 바람이 우세하게 나타나 중관 기상장을 뒷받침해주고 있었다.

3.2.3. 열대성 저기압형(유형 III)

1992년 9월 24일은 유형 III 가운데 열대 지방에서 발생한 중심기압 994 hPa의 열대성 저기압이 우리 나라에 영향을 주어 산성비를 동반한 경우로 이날의 강우량은 71.0 mm였으며, pH는 4.51로 역시 강산성을 나타내어 일본의 小山⁹⁾의 연구 결과와 유사하였다. 이날의 기상개황은 0000 UTC에는 북 중국 내륙 깊숙히 1032 hPa의 고기압이 위치하고 열대성 저기압 테드(Ted)는 중국 양자강유역의 동부 연안까지 북상하여 한반도를 포함한 북동부 지역이 기압골을 형성하여 열대성 저기압의 영향을 받기 시작하였으며, 1200 UTC에는 중국 내륙의 고기압이 1028 hPa의 고기압을 cell 형태로 분리시키면서 남동진하여 열대성 저기압 테드는 동진하게되고 한반도에 위치하였다. 그 결과 한반도는 열대성 저기압 테드의 영향

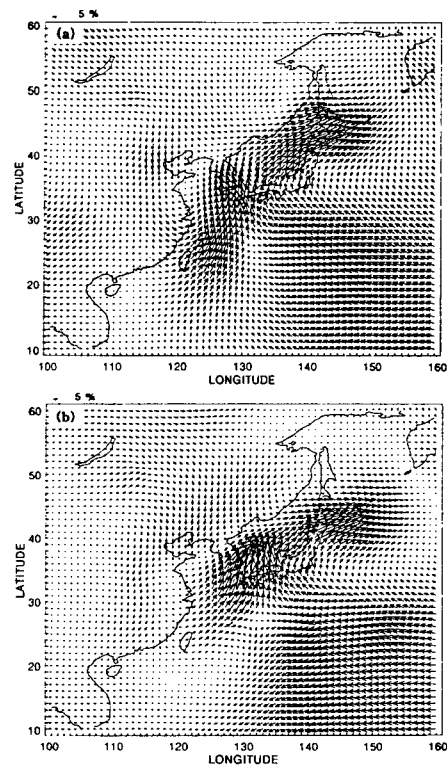


Fig. 6. Same as Fig. 3. except September 24, 1992.

하에 존재하였고 많은 강수량을 기록하였다. 지상 일기 도대신 바람장을 제시하였는데(Fig. 6), 0000 UTC에 한반도는 열대성 저기압 테드의 영향으로 강한 남풍 계열의 바람이 우세하였고 테드의 동진과 함께 1200 UTC에는 관측지점 주변에 남서계열의 바람이 강하여 열대성 저기압의 이동경로와 잘 일치하고 있다.

3.2.4. 시베리아 고기압 장출형(유형 IV)

1993년 11월 21일 0000 UTC에는 전형적인 서고동저형의 기압배치를 가진 날로 시베리아에 중심을 둔 1044 hPa의 고기압과 동해 북부 해상에 전선을 가진 저기압이 위치하였으나, 1200 UTC에는 시베리아 고기압이 동쪽으로 크게 세력을 뻗었으므로써 고기압 전면에 위치한 저기압의 가장자리가 한반도를 통과하면서 김해지방에 6.5 mm의 강수량을 기록하였으며, 평균 pH는 3.66을 나타내었다. 850 hPa의 바람장(Fig. 7)에서도 0000 UTC에는 시베리아 고기압의 장출에 따른 NW~W계열의 바람이 우세하였으며, 1200 UTC에서 동해상에 위치한 저기압의 후미에서 NW계열의 바람이 부는 등, 이런 경우에도 낮은 pH를 나타낼 수 있었다.

3.3. 사례연구

연구기간 중 김해지역에 내린 산성강수 중 가장 빈도가 높고 pH가 낮았던 유형 I-a 가운데 시간별 강수량과 pH 등의 자료를 연속적으로 구할 수 있었던 1994년

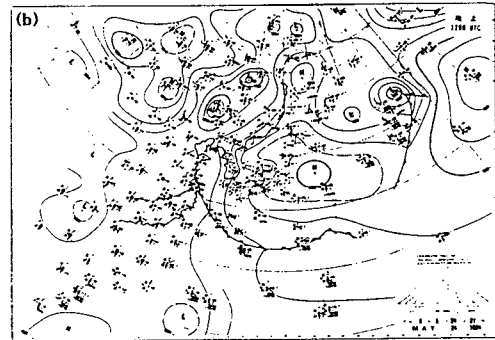


Fig. 8. Surface weather map for (a) 0000 UTC, (b) 1200 UTC, May 24, 1994.

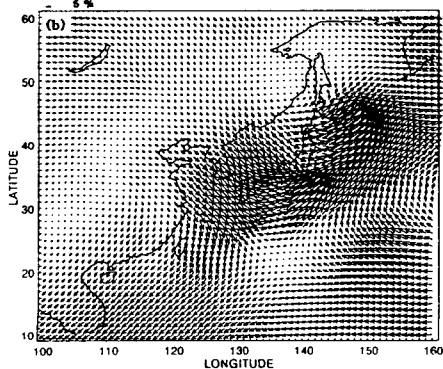
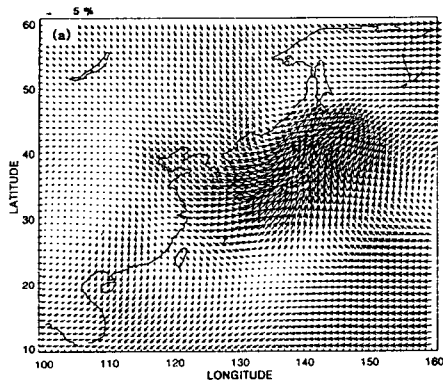


Fig. 7. Same as Fig. 3, except November 21, 1993.

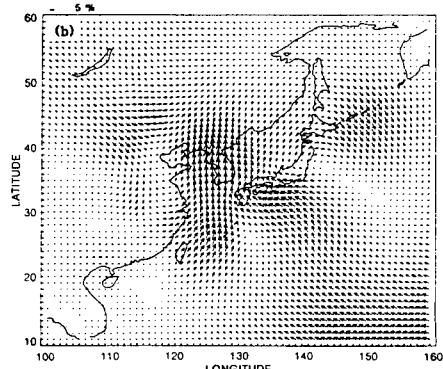
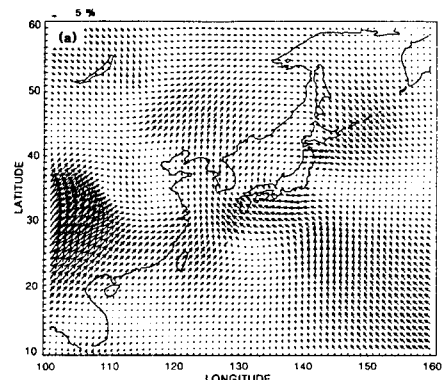


Fig. 9. Same as Fig. 4, except May 24, 1994.

5월 25일을 택하였으며, 강수일 전후인 1994년 5월 24일부터 26일까지 연속적으로 지상일기도와 850 hPa의 바람장 및 유선분석(streamline analysis)을 실시하여 저기압의 이동 경로를 정성적으로 밝히고 김해지역에 내린 강산성의 강우가 지역 대기오염 외에 강수의 발원지의 대기 오염도에 영향을 받을 수 있음을 조사하였다.

Fig. 8은 화중 지방에 중심을 둔 저기압이 한반도에 영향을 주어 강산성의 비를 내리게 한 하루전인 1994년 5월 24일의 지상 일기도를 나타낸 것으로 화중 내륙지역에 1004 hPa의 저기압으로 존재하다가 1200 UTC에는 서해부근까지 이동하였으며, 850 hPa 바람장(Fig. 9)에서도 화중 내륙지역에 SW계열의 강풍대가 존재하여 동쪽으로 이동하였음을 보여주며, 1200 UTC에는 서해부근에서 W~SW계열의 바람이 존재하여 저기압계의 이동을 뒷받침해 주고 있다. 상층기류의 흐름을 파악할 수 있는 850 hPa의 유선 분석(streamline analysis)은 1200 UTC를 기준으로 등풍향선법에 의해 분석하였다. 5월 24일 0000 UTC 대신 5월 23일 1200 UTC의 유선 분석도에서 화중내륙에 저기압이 존재하였음과 강수 전일인 5월 24일 1200 UTC에 저기압이 약간 동진하였음을 잘 나타내고 있다(Fig. 10).

강수 당일인 1994년 5월 25일 0000 UTC에는 서해 남부상에 중심을 두고 있으며, 1200 UTC에는 제주도 남부 해상까지 북동진하였다(Fig. 11). 850 hPa의 바람장(Fig. 12)에서도 지상일기도와 같이 저기압의 북동진을 나타내고 있다. 유선 분석(Fig. 13)에서도 우리 나라 서해 남부상에서 북동진하는 유선을 볼 수 있다. 1994년 5월 26일의 새벽까지 강수는 지속되었으며, 1200 UTC

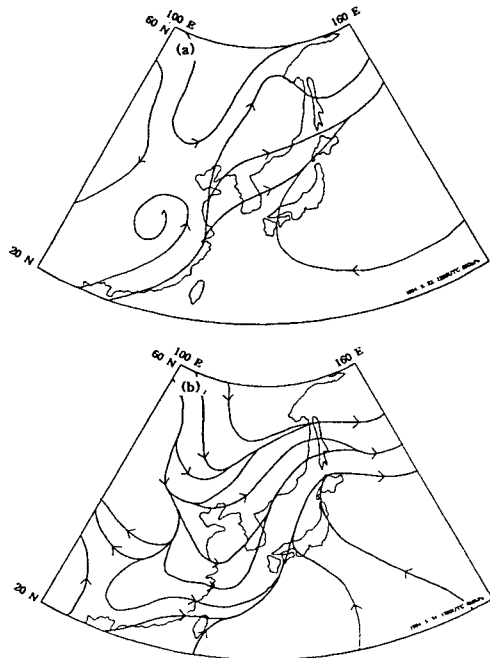


Fig. 10. 850 hPa streamline analysis for 1200 UTC, (a) May 23, (b) May 24, 1994.

지상일기도에서 이 저기압은 우리 나라를 빠져나가 일본 열도에 영향을 주고 있다(Fig. 14). 850 hPa의 바람

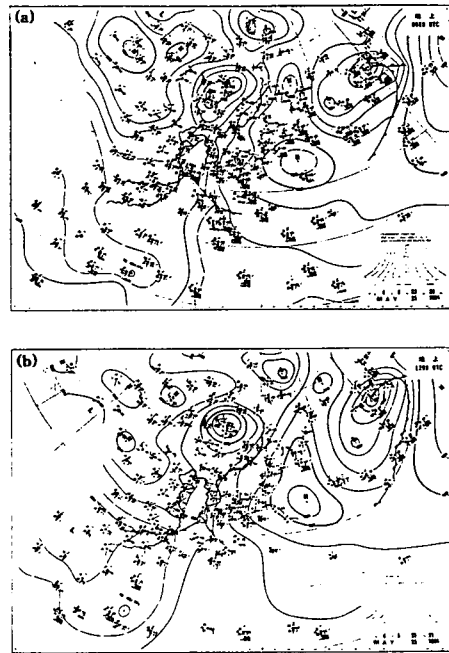


Fig. 11. Same as Fig. 8, except May 25, 1994.

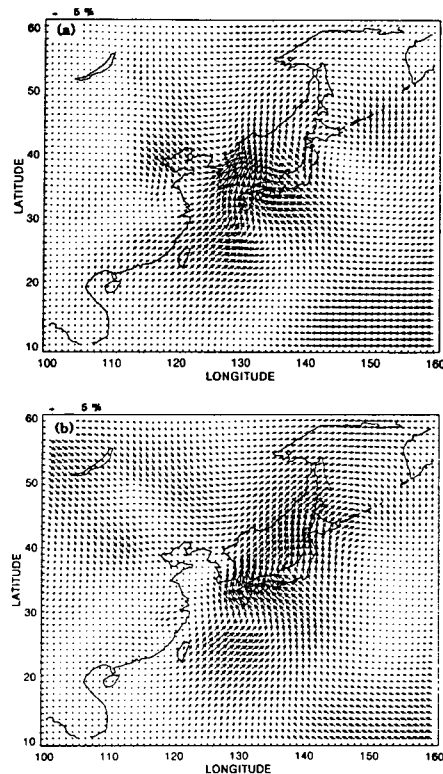


Fig. 12. Same as Fig. 3, except May 25, 1994.

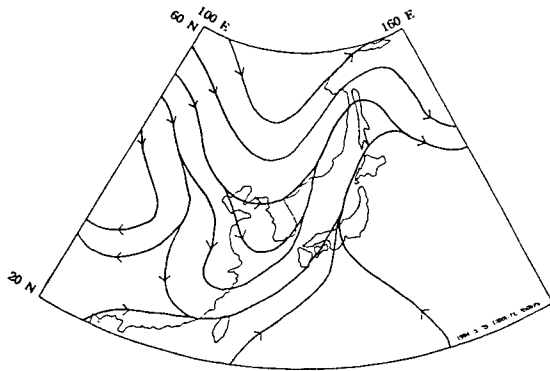


Fig. 13. 850 hPa streamline analysis for 1200 UTC, May 25, 1994.

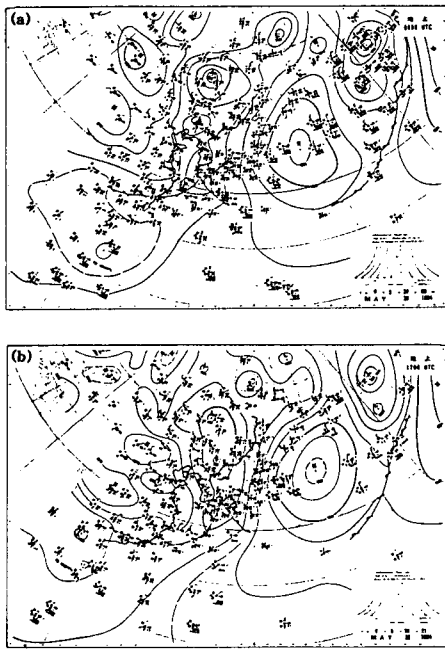


Fig. 14. Same as Fig. 8, except May 26, 1994.

장(Fig. 15)에서도 0000 UTC에서 한반도 남해상에 S W~S 계열의 바람이 불다가 1200 UTC에서 우리 나라 전체가 강한 W계열의 바람으로 동쪽으로 이동하여 우리 나라에 강수의 영향이 없어졌다. 유적 분석(Fig. 16)에 의해서도 우리 나라 전역은 NW~W계열의 유선이 강하게 나타나고 있어 지상일기도와 850 hPa의 바람장을 잘 뒷받침해주고 있다.

따라서 강우의 산성도는 관측지점의 대기 오염도 뿐 아니라 비구름이 형성된 지점의 대기 오염도에도 크게 영향을 받을 수 있음을 알 수 있었다. 이후 전년에 걸친 산성강우 일의 기압유형을 분류하여 그에 따른 산성도의 변화를 살펴본다면 강수의 발원지별 산성도를 보다 정확하게 파악할 수 있을 것으로 생각된다.

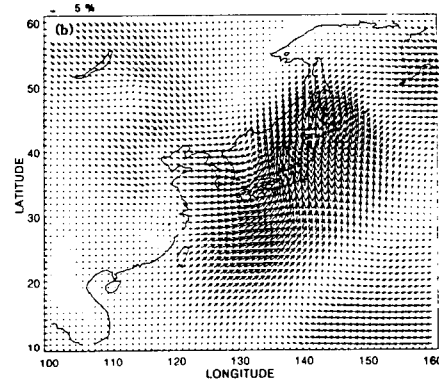
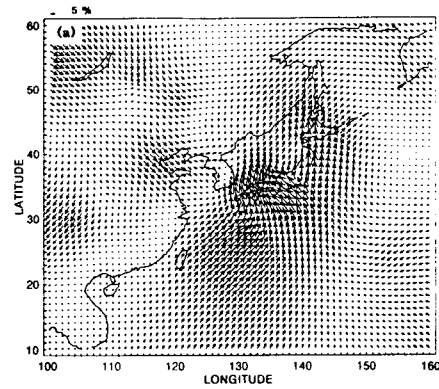


Fig. 15. Same as Fig. 3, except May 26, 1994.

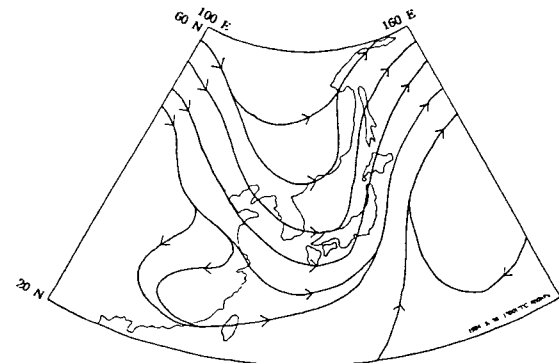


Fig. 16. 850 hPa streamline analysis for 1200 UTC, May 26, 1994.

4. 결 론

김해지역에 내린 강수의 산성도 및 화학성분을 분석하고, 김해지방에 산성비를 내린 기압 유형을 분류하여 그 특성을 조사한 결과 다음과 같이 요약할 수 있다.

1) 김해지역에 내린 산성강우의 pH의 범위는 3.45~6.80이었으며, 평균은 pH 4.62로 나타나 강산성 강우가 내리고 있으며, 강수중의 pH와 관련된 주요 음이온의 분포는 Cl^- , SO_4^{2-} , NO_3^- 으로 나타났다. 이는 김해지역의 도시화와 공단조성 등의 공업화가 주 요인으로 생각되며, 최근 공업화를 서두르고 있는 중국으로부터의 장거리 수

송도 일부 그 영향으로 생각된다.

2) 김해지역에 내린 산성강우는 기압유형에 따라 4가지 유형과 세분된 5가지 형인 온대성 저기압형(Cyclone, 유형 I-a, 유형 I-b), 이동성 고기압형(Migratory Anticyclone, 유형 II), 열대성 저기압형(Tropical Cyclone, 유형 III), 시베리아 고기압형(Siberian High, 유형 IV)으로 분류할 수 있었다.

3) 온대성 저기압형인 유형 I-a는 비교적 pH 값이 낮은 산성비의 출현이 가장 빈번하였으며, 지상일기도, 850 hPa의 바람장과 유선 분석을 통하여 강산성의 강수계(system)가 화중 지방으로부터 한반도로 장거리 수송되어졌음을 알 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 1997년도 인제대학교 학술연구구성비 보조에 의한 것임.

참고 문헌

- 1) Lutgens F. K. and E. J. Tarbuck, 1995, *The Atmosphere - An Introduction to Meteorology*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey 07632, 6th Edition, 320-336.
- 2) 최금찬, 김창완, 조정구, 박정호, 1998, 부산시 일부지역에 대한 초기 및 후속강우의 이온성분 특성, 한국대기보전학회지, 14(4), 361-368.
- 3) 박종길, 황용식, 1997, 김해지방의 강수의 산도 및 화학적 성분특성, 한국환경과학회지 6(5), 232-245.
- 4) 이근준, 정용승, 1996, 충남 웅천에서 관측된 강수의 산성도 연구, 한국대기보전학회지, 12(2), 179-188.

- 5) 김용표, 김성주, 진현철, 백남준, 이종훈, 김진영, 심상규, 강창희, 허철구, 1996, 제주도 고산에서의 1994년 여름 측정:(I) 입자 이온 조성, 한국대기보전학회지, 12(3), 297-306.
- 6) 강동근, 김선대, 김정욱, 1993, 동북아시아 대기오염물질의 장거리 이동에 관한 연구, 한국대기보전학회지, 9(4), 329-339.
- 7) 나춘기, 정재일, 1997, 전주시에서 채수된 강수의 화학적 조성, 한국대기보전학회지, 13(5), 371-382.
- 8) 박종길, 김유근, 안영하, 1991, 기상재해연구-태풍과 해난(1), 한국어업기술학회지, 27(1), 56-63.
- 9) 小山功, 1987, 酸性雨日の 氣象と件 地域特性, 研究ツセ-ナル11(9), 16-25.
- 10) 박국태, 문경인, 허정구, 홍현복, 1995, 경기도 성남시, 인천시, 강원도 강릉시, 충북 청원군 강수의 화학적 성분에 관한 비교 연구, 한국환경과학회지, 4(3), 285-294.
- 11) 이부용, 김유근, 박종길, 1991, 부산·경남지역의 산성비에 관한 연구, 부산대학교 환경문제연구소 환경연구보, 제9권, 87-97.
- 12) Balls P. W., 1989, Trace Metal and Major ion composition of Precipitation at a North Sea Coastal site, *Atmospheric Environment*, Vol. 23, No. 12, 2751-2759.
- 13) 권영식, 허원범, 1993, 원주지역의 산성강우 현상에 관한 연구, 한국기상학회지, 29(2), 127-132.