

기단 역궤적분석에 의한 경주시 대기오염물질의 농도 변화

Variation of Concentration of Air Pollutants with Air Mass Back-Trajectory Analysis in Gyeongju

김 경 원* · 방 소 영¹⁾ · 정 종 현²⁾
경주대학교 환경공학과, ¹⁾기상연구소, ²⁾서라벌대학 보건행정학과
(2007년 6월 20일 접수, 2008년 2월 28일 채택)

Kyung Won Kim*, So Yung Bang¹⁾ and Jong Hyun Jung²⁾
Department of Environmental Engineering, Gyeongju University,
¹⁾Meteorological Research Institute,
²⁾Department of Public Health Administration, Sorabol College
(Received 20 June 2007, accepted 28 February 2008)

Abstract

Gyeongju, which was the central city of the ancient civilization at Silla Kingdom, has various kinds of stone cultural properties. It is significantly important to preserve historical sources of Korea. However, recent air quality data measured in Gyeongju did not show good air quality level. In order to investigate variation of the concentration of the air pollutants with meteorological condition, an air quality monitoring and an aerosol sampling were conducted during the intensive monitoring period in Gyeongju. Impacts of the meteorological factors on the air pollutants were also analyzed based on the air mass pathway categories using HYSPLIT model and the local wind patterns using MM5 model. The prevailing air mass pathways were classified into four categories as following; category I affected by easterly marine aerosols, category II affected by northwesterly continental aerosols, category III affected by southwesterly continental aerosols, and category IV affected by northerly continental aerosols. The concentrations of the air quality standards were relatively lower during the fall intensive monitoring period. At that time, the easterly marine air mass pattern was dominated. The seasonal average mass concentration of $PM_{10,Opt}$, which optically measured at the monitoring site, was the highest value of $77.6 \pm 28.3 \mu g m^{-3}$ during the spring intensive monitoring period but the lowest value of $20.1 \pm 5.3 \mu g m^{-3}$ during the fall intensive monitoring period. The concentrations of SO_2 and CO were relatively higher when the air mass came from the northwestern continent or the northern continent. The concentrations of SO_4^{2-} and NO_3^- increased under the northwesterly continental condition. It was estimated that the acidic aerosols were dominated in the atmosphere of Gyeongju when the air mass came from the continental regions.

Key words : Air pollutants, PM_{10} , Sulfate, HYSPLIT model, MM5 model

*Corresponding author.
Tel : +82-(0)54-770-5390, E-mail : kwkim@gju.ac.kr

1. 서 론

우리나라의 자연공원은 전국토의 약 7.6%를 차지하고 있으며, 환경부장관이 지정한 총 20개소의 국립공원 중 특히 경주국립공원은 사적공원으로 지정되어 있다. 국립공원은 자연생태계와 수려한 자연경관, 문화유적 등을 보호하고 지속적으로 이용할 수 있도록 하여 자연환경의 보전, 국민의 여가와 휴양 및 정서생활의 향상을 기하기 위하여 지정한 일정구역이다. 이런 연유로 일 년 내내 경주시의 곳곳은 답답한 도시의 대기환경으로부터 휴식을 취하고자 하는 국내·외 관광객으로 북적인다. 관광객들은 수려한 경관을 보기 위해서 경주시를 방문한다. 그러나 최근 경주시의 대기오염 현황은 경주시가 주변의 광역시보다 대기환경에 대한 보전상태가 수려할 만큼 낮다고 할 수 없는 형편에 이르렀다. 대구지방환경관리청 환경측정망 자료(대구지방환경관리청, 2006) 및 울산광역시 대기환경오염도 자료(울산광역시, 2006)에 의하면, 2004년 경주시에서 관측된 대기환경기준물질 중 연평균 미세먼지(PM_{10})의 질량농도는 $68 \pm 12 \mu g/m^3$ 으로 대구 및 울산의 연평균 질량농도보다 높은 것으로 조사되었다. 이러한 경주시의 대기오염 현황은 우리나라 주요도시의 연평균 농도와 비교한 결과에서도 인구수 280,092명 자동차 등록대수 96,697대에 불과한 경주시가 주요 광역도시의 대기오염 현황보다 대기오염도가 그다지 좋지 않은 것으로 분석되었다(환경부, 2006). 경주시의 대기환경은 국립공원 지역으로서의 대기질 개선뿐만 아니라, 전국의 4%에 해당하는 문화재 총 297점(국보 31점, 보물 76점, 사적 74점, 유형문화재 29점, 기타 87점)의 문화·유산을 대기오염으로부터 후세대에게 보전하기 위하여 대기오염물질의 지역간 이동에 대한 정성적이며 정량적인 분석 및 평가가 필요한 시기가 되었다. 하늘의 구름이 늘 움직이듯이 대기오염물질들도 대기의 역학적 운동에 따라 늘 이동한다. 대기의 역학적 운동은 소규모 기류에서부터 대규모의 기단을 형성하며, 대기 중으로 배출된 다양한 오염물질을 수송시킬 수 있으며, 배출된 1차 오염물질은 화학적 반응을 통해 2차 오염물질로 성장된다. 이와 같이 대기오염물질의 거동 및 반응은 기상조건이 중요한 역할을 하게 되며 해안과 접해있는 연안지역에서 배출

되어지는 대기오염물질의 거동 및 영향을 연구하기 위하여 대기질 모델링의 입력자료로서 기상장모델링에 관하여 다양한 연구가 수행된 바 있다(김유근 등, 2006; 김진영 등, 2005; Zampieri *et al.*, 2005; Rogerson, 1999; Pielke and Uliasz, 1998; Pleim and Chang, 1992; Brost *et al.*, 1982). 사적이 많은 유적 관광지인 경주는 주변에 대구, 울산과 포항 등 광역시 및 공단 지역에 접해 있어 대기오염물질의 이동이 예상될 수 있으며, 2차 반응에 의하여 생산되는 오존, 유기화합물 및 산성침적물 등은 사회·경제적 손실을 유발시키므로 연구 대상 지역의 바람장의 변화를 모사하기 위하여 고해상도 기상장모델 모의가 필요하다. 본 연구에서는 연안지역의 영향을 받으면서 구릉과 같은 복잡 지형에 영향을 받는 경주지역을 모의하기 위해 3차원 중규모 기상장모델인 MM5가 사용되었다.

현재 경주시 대기오염자동측정소는 1개소로서 1994년 11월에 우리나라 총 142개소의 대기오염자동측정소 중 국가측정망으로 주거밀집지역인 성건동 677-3번지 성건동사무소 옥상에 설치되었으며, 대기환경기준물질인 SO_2 , CO, NO_x , PM_{10} , O_3 , 풍향, 풍속, 온도, 습도가 측정되고 있다(경주시, 2005). 경주시의 대기질 현황에 대한 조사는 대기오염자동측정소에서 관측된 각 대기환경기준물질의 특성을 기상조건과 비교 검토함으로써 파악될 수 있으며, 필터에 포집된 $10 \mu m$ 이하의 입자상 물질인 PM_{10} 의 화학적 성분 중 2차 오염물질의 질량농도의 변화를 조사함으로써 대기오염물질의 이동 특성과 연관된 경주시의 대기질 현황이 파악될 수 있다. 본 연구에서는 광학적으로 측정된 자동측정망 자료와 필터로 포집된 실측자료 간의 분석을 구분하여 해석하고자 각각 $PM_{10,Opt}$ 과 $PM_{10,Filter}$ 의 두 표기 방법이 도입되었다. 본 연구에서는 집중관측 기간 동안 경주시 대기오염자동측정소에서 측정된 대기환경기준물질의 농도와 경주시 국립공원 지역에서 관측된 PM_{10} 중 이온성분의 농도 변화를 기상요소와 연계함으로써 경주시에서 관측된 기상요소에 의한 대기오염물질의 농도변화의 특성이 조사되었다.

2. 측정 및 분석 방법

2.1 PM_{10} 의 측정 및 이온분석

본 연구에서는 에어로졸 관측 및 대기질 관측이

경주시 국립공원 지역과 도심지역에서 동시에 수행되었다. 그림 1에서와 같이 경주시 국립공원 서악지구 내에 위치한 경주대학교 공학관 옥상 위의 관측지점 (sampling site)에서 10 μm 이하 ($D_p < 10 \mu\text{m}$)의 입자상 물질 ($\text{PM}_{10, \text{Fil}}$)이 채집되었으며, 경주시 성건동 소재 대기오염자동측정소에서 측정된 대기환경기준물질인 아황산가스 (SO_2), 이산화질소 (NO_2), 일산화탄소 (CO), 오존 (O_3) 및 미세먼지 ($\text{PM}_{10, \text{Opt}}$)의 자료가 활용되었다. $\text{PM}_{10, \text{Fil}}$ 과 $\text{PM}_{10, \text{Opt}}$ 은 각각 물리적 및 광학적 방법으로 정량된 농도를 의미한다. 경주시 국립공원 지역 대기 중 PM_{10} 의 채집을 위하여 총 4회의 계절별 집중관측이 수행되었다. 제1차 겨울철 집중관측은 2006년 1월 20~30일, 제2차 봄철 집중관측은 2006년 3월 20~30일, 제3차 여름철 집중관측은 5월 31일~6월 10일, 제4차 가을철 집중관측은 9월 4~14일 각각 10일간씩 총 40일간 수행되었다. PM_{10} 을 채집하기 위하여 경주시 국립공원 서악지구 내에 위치한 경주대학교 옥상에 PM_{10} 을 채집할 수 있는 URG사 cyclone 모델 URG-2000-30ENB 관측 장

비가 설치되었다. URG-2000-30ENB cyclone에 의해 24시간 간격으로 채집된 10 μm 이하의 입자상 물질은 이온 분석이 실시되었다. 이온분석을 위하여 Gelman사 47 mm, 2.0 μm 공극의 Zeflour 필터가 사용되었으며, DKK TOA사 모델 IA-300 이온분석기 (ion analyzer)를 사용하여 이온크로마토그래피 (ion chromatography: IC) 분석법으로 음이온 중 SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- 과 양이온 중 NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 가 정성 및 정량 분석되었다. 대기환경기준물질이 측정된 대기오염자동측정소 (air quality monitoring station)는 그림 1에서와 같이 해발고도 24.6 m 주거밀집지역인 경주시 성건동사무소 옥상에 설치되어 관리 및 운영되고 있으며 (경주시, 2005), 측정항목 중 SO_2 는 T-API (Teledyne Instruments Advanced Pollution Instrumentation Division)사 Model 100E에 의하여, NO_x 는 T-API사 Model 200E에 의하여, CO 는 T-API사 Model 300E/EM에 의하여, O_3 는 T-API사 Model 400E에 의하여, $\text{PM}_{10, \text{Opt}}$ 은 Met One Instruments사 Model BAM-1020에 의하여 측정되었으며, 풍향, 풍속, 기온,

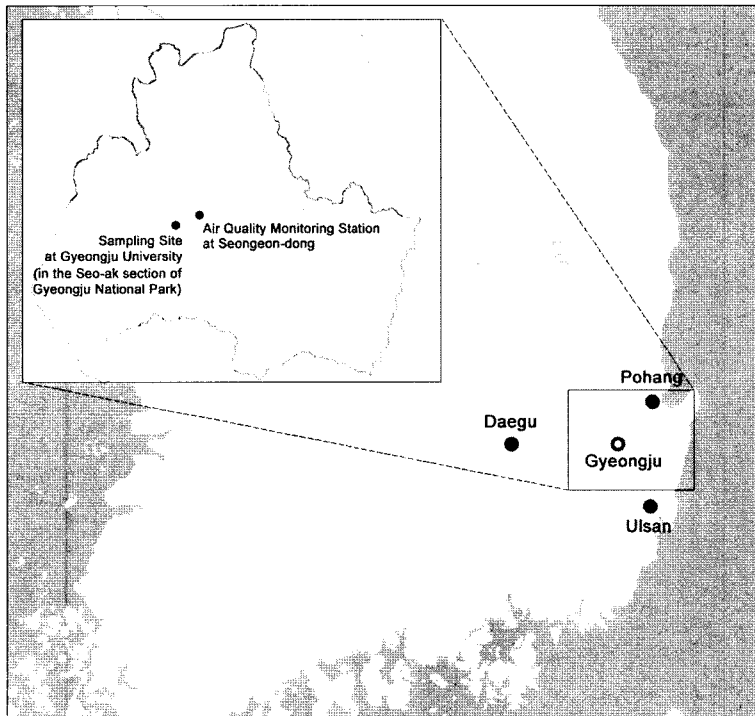


Fig. 1. Image map of the study area in Gyeongju.

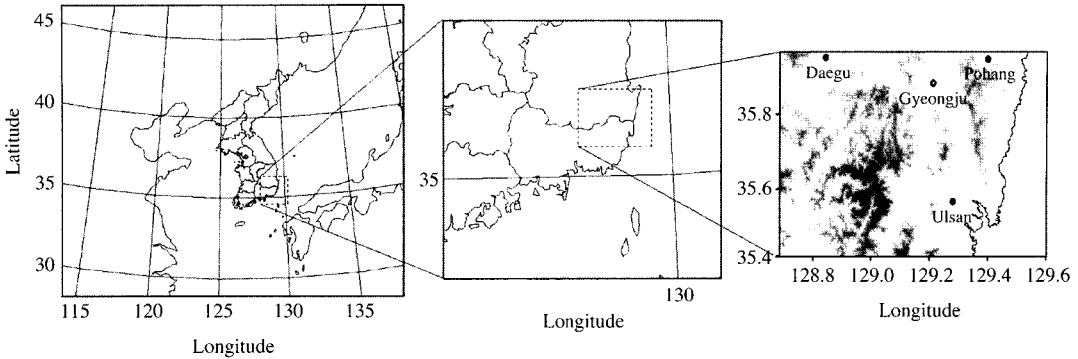


Fig. 2. Topography of nested domains used in this study.

상대습도의 기상요소가 측정되었다. 본 연구에서는 집중관측 기간 동안 데이터베이스에 축적되는 5분 평균농도 자료 중 75% 이상의 유효성을 가지는 자료를 획득하여 대기환경기준물질의 농도 자료로 사용되었다(환경부, 2005).

2.2 기상자료 분석

경주시에 관측된 대기오염물질의 기상요소에 의한 농도변화의 특성을 조사하기 위하여 중규모 국지순환계를 표현할 수 있는 기상장 수치모의와 중·장거리 기단의 이동 경로를 모사할 수 있는 기단 역궤적(air mass back-trajectory) 분석이 수행되었다. 기상장의 수치모의에는 대구, 울산 및 포항 지역을 포함하는 경주권역 내의 풍향 및 풍속의 경향을 조사하기 위하여 미국 NCAR(National Center for Atmospheric Research)에 의하여 개발된 MM5 모델이 사용되었다(Grell et al., 1994). 본 연구에서는 모델의 등지격자도메인을 사용하여 Lambert 등격자투영법(Lambert-conformal grid projection)으로 수평격자를 나타내었으며(NWS Office of Science and Technology, 1999), 단방향 등지계산(one way nesting)법으로 그림 2에서와 같이 경주권역의 기상장이 모사되었다. 초기 및 경계 자료는 기상청에서 운영 중인 중규모 모델(RDAPS: Regional Data Assimilation and Prediction System)에 의하여 산출된 30 km 격자자료가 이용되었다. 기상청의 MM5 모델의 연직층은 33층으로 지표로부터 최하층의 높이는 84.8 m이다. 이 높이는 미기상 변화 및 지표부근의 오염물질 이동 등을 모사하기에 적절하지 않으므로 대기오염물질의 변화를

조사하기 위하여 본 연구에서는 층이 세분화되어 연직 층의 전 층(full level)을 36층, 반 층(half level)을 35층으로 하여 최하층이 11.8 m로 지표면의 기상장이 반영될 수 있도록 설정되었다(National Center Atmospheric Research, 2003). 또한 집중관측 기간 동안 경주시에 도착하는 기단의 중·장거리 이동 경로를 파악하기 위하여 미국의 NOAA/ARL에 의하여 개발된 HYSPLIT-4(hybrid single-particle Lagrangian integrated trajectory) 모델이 사용되었다. 동경 129.2°, 북위 35.7°를 도착지점으로 3일간 역궤적(back-trajectory) 경로를 모사하기 위하여 미국 NCEP(National Center for Environmental Prediction)의 GDAS(global data assimilation system) 자료를 북반구에 대해 Lambert 등격자투영법을 이용하여 129×129 격자 간격으로 변환한 FNL(Final Run)자료가 사용되었다(Draxler, 1996). 기단의 역궤적 경로는 해발고도 500, 1,000, 2,000 m에 대하여 각각 6시간 간격으로 모사되었다.

3. 결과 및 고찰

집중관측 기간 동안 경주시 대기오염자동측정소에서 관측된 대기환경기준물질의 시계열 농도 변화를 그림 3에 나타내었다. SO₂의 계절별 평균농도는 겨울철과 여름철 집중관측 기간 동안 각각 0.007±0.004 ppm으로 상대적으로 높았으며, 가을철 집중관측 기간 동안 0.001±0.000 ppm으로 가장 낮았다. O₃의 계절별 평균농도는 봄철과 여름철 집중관측 기간 동안 각각 0.029±0.010 ppm 및 0.024±0.010 ppm으

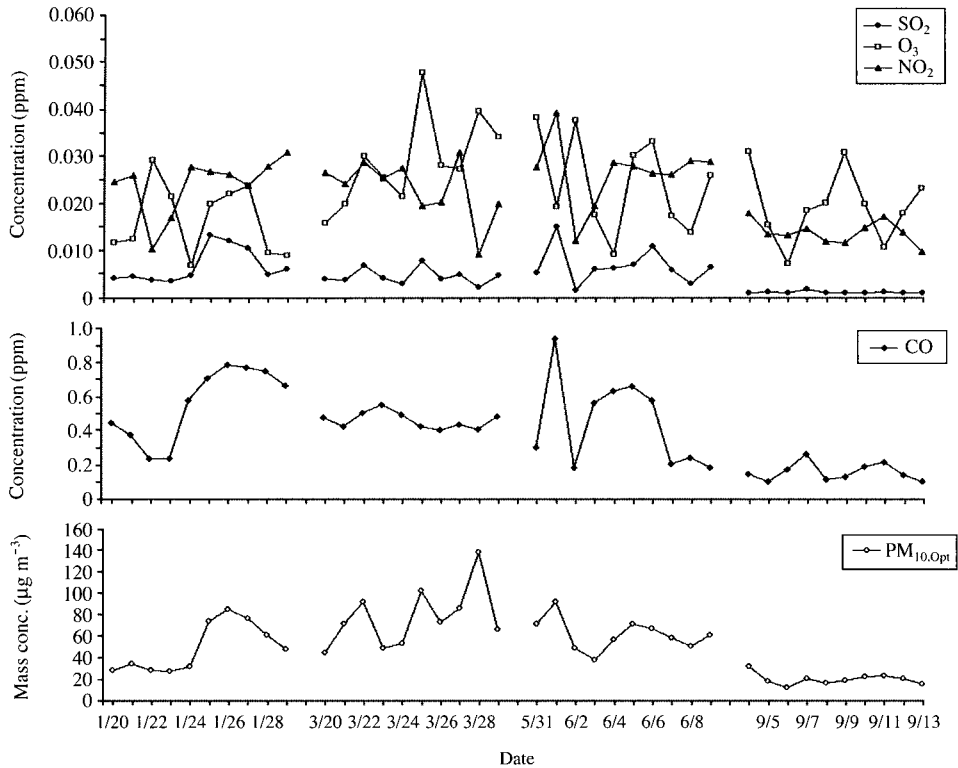


Fig. 3. Temporal variation of concentrations of air quality standards measured at the air quality monitoring station during the intensive monitoring period.

Table 1. Annual average concentration of air quality standards for Gyeongju, Daegu, Ulsan, and Pohang in 2006 and average concentration of them in this study.

Area	SO ₂	NO ₂	CO	O ₃	PM _{10,Opt}
	ppm				µg m ⁻³
Gyeongju	0.003 ± 0.002	0.020 ± 0.003	0.4 ± 0.1	0.022 ± 0.007	51.2 ± 20.8
Daegu	0.006 ± 0.003	0.023 ± 0.007	0.6 ± 0.2	0.021 ± 0.008	54.0 ± 19.0
Ulsan	0.007 ± 0.002	0.025 ± 0.008	0.4 ± 0.1	0.021 ± 0.004	55.8 ± 19.5
Pohang	0.007 ± 0.003	0.023 ± 0.008	0.7 ± 0.4	0.026 ± 0.007	61.2 ± 20.2
This study	0.005 ± 0.004	0.022 ± 0.007	0.4 ± 0.2	0.022 ± 0.010	52.2 ± 28.6

로 겨울철 및 가을철 집중관측 기간 동안의 평균값인 0.017 ± 0.008 ppm 및 0.019 ± 0.008 ppm보다 상대적으로 높았다. NO₂의 계절별 평균농도는 여름철 집중관측 기간 동안 각각 0.027 ± 0.007 ppm으로 가장 높았으며 가을철 집중관측 기간 동안 0.014 ± 0.002 ppm으로 가장 낮았고, CO의 계절별 평균농도는 겨울철과 봄철 집중관측 기간 동안 각각 0.6 ± 0.2 ppm

및 0.5 ± 0.1 ppm으로 상대적으로 높았으며, 가을철 집중관측 기간 동안 0.2 ± 0.1 ppm으로 가장 낮았다. PM_{10,Opt}의 계절별 평균농도는 봄철 집중관측 기간 동안 각각 77.6 ± 28.3 µg m⁻³으로 가장 높았으며 가을철 집중관측 기간 동안 20.1 ± 5.3 µg m⁻³로 가장 낮았다. 전체 집중관측 기간 동안 SO₂, O₃, NO₂, CO 및 PM_{10,Opt}의 평균농도는 표 1에서와 같이 각각

0.005±0.004 ppm, 0.022±0.010 ppm, 0.022±0.007 ppm, 0.4±0.2 ppm 및 52.2±28.6 μg m⁻³로 계산되었으며, 가을철 집중관측 기간에 측정된 대기환경기준물질의 평균값이 전체적으로 낮았던 것으로 분석되었다. 집중관측 기간 동안 강수빈도 및 강수량은 가을철이 각각 4일 및 누적합계 6mm/일로 가장 높았으며, 다른 계절에서는 각각 1일 및 1mm/일 미만인 것으로 조사되었다. 가을철 집중관측 기간 동안의 개선된 대기오염 수준의 원인은 강수에 의한 세정효과와도 관련이 있는 것으로 사료된다. 집중관측 기간 동안 관측된 대기환경기준물질 중 SO₂의 평균농도는 연평균 농도의 약 1.7배를 나타내었으나, SO₂를 제외한 대기환경기준물질의 평균농도는 경주시의 연평균 농도와 거의 유사하여 집중관측 기간에 관측된 측정값이 경주시의 평균적인 대기오염 수준을 반영한 것으로 조사되었다. 집중관측 기간 동안 관측된 연평균 대기환경기준물질의 농도 수준은 전체적으로 주변도시들에 비하여 낮은 경향을 나타내었으나, NO₂, O₃, PM_{10.0 μ m}}의 농도는 주변 광역시 및 공업도시들의 농도의 약 85~95% 수준으로 소도시인 경주시의 대기오염 수준이 주변도시의 대기질 오염 수준에 근접한 것으로 조사되었다. 본 연구에서 측정된 대기환경기준물질의 농도와 경주시 주변의 광역시 및 공업도시인 대구광역시, 울산광역시 및 포항시의 2006년 대기오염물질의 연평균 농도를 비교한 결과를 표 1에 요약하였다.

경주시는 태백산맥의 하단부로 서편에는 단석산이, 동편에는 동대산이 이어져 있는 경상북도의 동남쪽에 위치한 내륙지역과 동해안을 접하고 있어 해안 지역에 인접한 지정학적 특성을 지니고 있으며, 동서 및 남북 간의 거리가 약 50 km 이내인 공간적 범위를 지니고 있다. 반경 약 80 km 이내에 대구광역시, 울산광역시 및 포항시가 각각 북서쪽, 남쪽 및 북동쪽에 위치하고 있으며 동쪽으로는 토함산 국립공원과 동해가 중·장거리에 걸쳐 분포하고 있다. 중거리 규모에서는 북서쪽으로 서울시를 포함한 수도권이 위치하고 있으며, 남서쪽으로 중소 도시를 거쳐 남해가 위치하고, 북쪽으로 산악지역을 거쳐 북한지역이 위치하고 있다. 장거리 규모에서는 북서쪽으로 황해를 거쳐 중국 대륙의 주요 대도시가 위치하며, 남서쪽으로 남해를 거쳐 중국 대륙의 남동해안의 도시들이 위치하고, 북쪽으로 중국 대륙의 북동쪽의 황토지

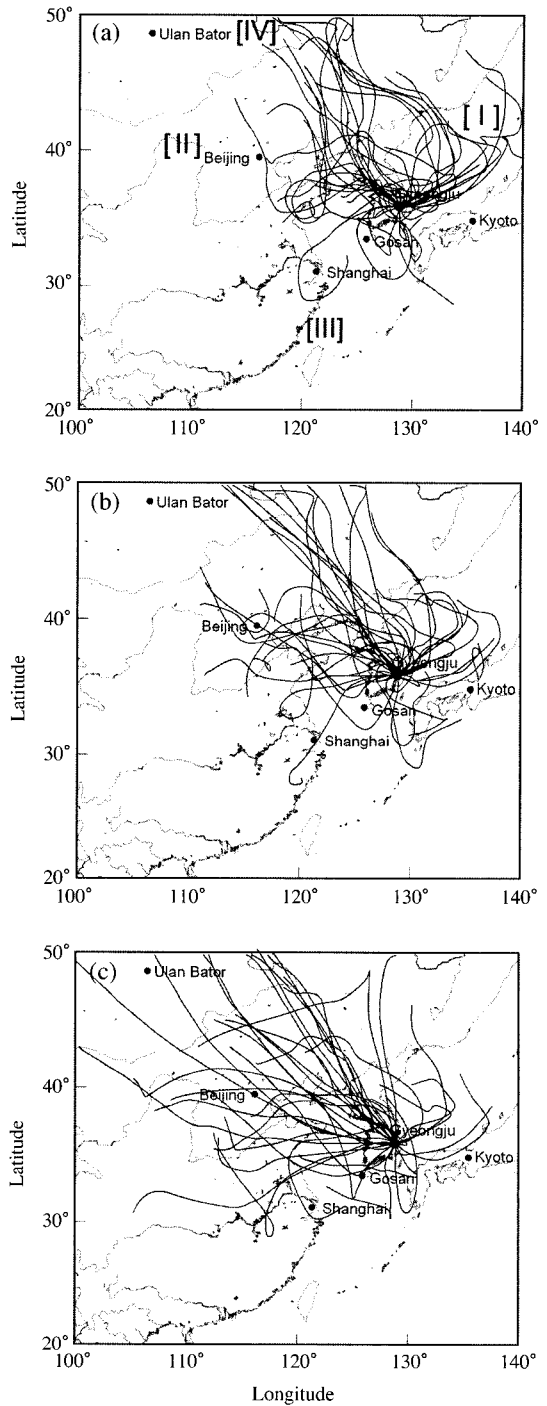


Fig. 4. Three-day backward trajectories ending at 00UTC (09LTC) at Gyeongju with altitudes of 500 m (a), 1,000 m (b), and 2,000 m (c) during the monitoring periods using the HYSPLIT model.

대가 위치하고 있다. 이러한 경주시의 지리적 특성을 고려하여 기상요소 분석이 수행되었다. 그림 4에서와 같이 집중관측 기간 동안 경주시에 도착한 기단의 중·장거리 이동 경로를 추정할 수 있는 HYSPLIT 모델의 기단 역궤적 분석 결과가 각각 500, 1,000, 2,000 m 고도에 대하여 모사되었다. 고도별 기단 역궤적 분석 결과 500 m에서 2,000 m로 고도가 상승되면서 기단의 역궤적 이동경로는 동쪽 해양 방향으로부터의 유입 빈도가 감소하고 북쪽, 북서쪽 및 남서쪽 대륙으로부터의 유입 빈도가 상승한 것으로 조사되었다. 관측기간 동안 동쪽 해양 방향으로부터의 유입 빈도는 500, 1,000, 2,000 m로 고도가 감소할수록 각각 13, 12, 6회로 감소하였으며, 북쪽 대륙 방향으로부터의 유입 빈도가 각각 9, 10, 15회로 가장 많이 증가하였다. 기상 조건의 변화는 상기와 같이 네 가지 사례로 분류되어 경주시에 관측된 대기오염물질의 농도 변화가 조사되었다. 중·장거리 규모를 기준으로 분류된 대기의 이동 특성에 대하여 지표면에서의 풍향 및 풍속에 대한 변화를 검토하기 위하여 각 사례별 고도 11.8 m에서의 평균 풍향 및 평균 풍속의 변화가 MM5 모델을 사용하여 모사되었다. 그림 5에 도식된 기상장은 각 사례별로 대표적인 24시

간 평균 풍향 및 평균 풍속을 나타낸다. 집중관측 기간 동안 동쪽 해양으로부터 경주시에 유입된 사례인 그림 5의 (a)에서와 같이 지상풍의 방향은 해양의 북동쪽으로부터 내륙으로 진입된 후 동풍 방향으로 변경되어 산악지대를 거쳐 경주시로 유입된 것으로 모사되었으며, 경주권역에 대한 기상장의 분포가 다른 사례에 비하여 상대적으로 불균일한 특성을 나타내었다. 북서쪽 대륙으로부터 유입된 사례인 그림 5의 (b)와 남서쪽 대륙으로부터 유입된 사례인 그림 5의 (c)의 기상장의 분포는 대체로 균일한 특성을 나타내었으며, 북쪽 대륙으로부터 유입된 사례인 그림 5의 (d)의 기상장의 분포에서는 경주시의 북동쪽에 위치한 포항시를 거쳐 유입되는 풍향 특성을 포함하고 있는 것으로 조사되었다. 경주시의 국지 기상장의 특성은 중·장거리 규모의 기단의 이동 특성에 따른 분류에서와 전체적으로 부합하는 결과를 나타내었다. 경주시의 기상조건은 계절별로 뚜렷한 차이를 나타내었다. 겨울철 집중관측 기간의 기상장은 북쪽 대륙으로부터의 풍향이 우세하였으며, 봄철 집중관측 기간에는 북서쪽 대륙으로부터의 풍향이 우세하였다. 동쪽 해양으로부터의 풍향은 여름철과 가을철 집중관측 기간에 우세하였으며, 특히 가을철 집중관측

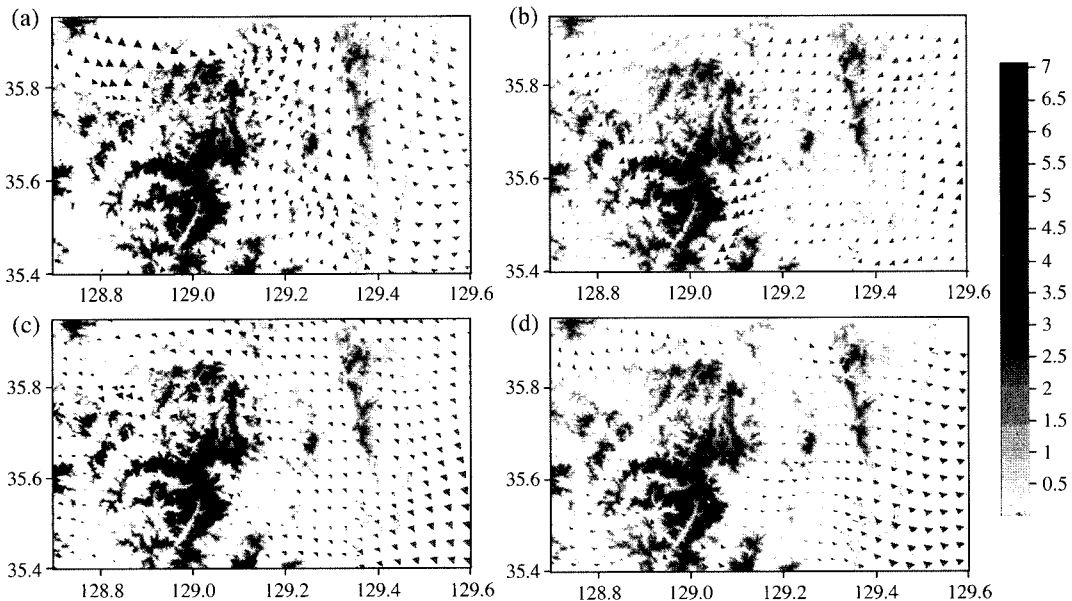


Fig. 5. Four categories of wind direction and velocity estimated by MM5 model; (a) northeastern marine, (b) northwestern continental, (c) southwestern continental, (d) northern continental.

기간의 기상장 중 85%를 차지하였다. 발현빈도가 가장 작았던 남쪽 대륙으로부터의 풍향은 여름철 및 가을철 집중관측 기간에 나타났다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 경주시 대기질 수준이 낮았던 가을철의 대기환경기준물질의 저 농도 현상은 동쪽 해양으로부터의 기단의 이동 및 풍향 경향과 밀접한 상관성을 지닌 것으로 판단되었다.

중·장거리 기단 이동 특성 및 국지 기상조건에 따른 경주시에서 관측된 대기오염물질의 농도변화를 조사하기 위하여 사례별 및 고도별로 대기환경기준물질의 평균농도가 재구성되었다. 표 2의 각 사례는 동쪽 해양으로부터 유입된 사례 I, 북서쪽 대륙으로부터 유입된 사례 II, 남쪽 대륙으로부터 유입된 사례 III 및 북쪽 대륙으로부터 유입된 사례 IV로 분류되어 요약되었다. 각 사례별로 고도 500 m, 1,000 m 및 2,000 m에 따른 기단의 역궤적 이동 경로에 대한 대기환경기준물질의 농도분포 결과는 각 고도별로 분류되어 재구성된 사례의 각 대기환경기준물질의 평균값으로 계산되었다. 발현빈도가 가장 높았던 기상조건은 고도 500 m와 1,000 m에서 각각 14회 및 2,000 m에서 16회로 조사된 사례 II이었다. 사례 II의 기상조건에서의 대기환경기준물질 SO₂, O₃, NO₂, CO 및 PM_{10,Opt}의 평균농도는 전반적으로 다른 사례들에 비하여 높았던 것으로 조사되었다. 고도 500 m와

1,000 m의 발현 날씨는 동일하였으며, SO₂, O₃, NO₂, CO 및 PM_{10,Opt}의 평균농도는 각각 0.006±0.003 ppm, 0.027±0.017 ppm, 0.025±0.011 ppm, 0.5±0.2 ppm 및 68.1±14.5 µg m⁻³로 관측되었다. 사례 II의 대기오염 수준은 대기환경기준물질의 농도가 상대적으로 낮았던 사례 I과 비교하여 항목별로 약 1.4~2 배 높은 것으로 관측되었다. 특히 사례 II의 고도 500 m와 1,000 m 조건의 SO₂의 평균농도가 사례 I 조건의 평균농도에 비하여 약 2배로 가장 높았다. 대기환경기준물질 중 SO₂, O₃, CO 및 PM_{10,Opt}은 표 2에서와 같이, 북서쪽 및 북쪽 대륙으로부터 유입된 기상조건인 사례 II와 사례 IV에서 상대적으로 높았으며, NO₂는 북서쪽 및 남서쪽 대륙으로부터 유입된 기상조건인 사례 II와 사례 III에서 상대적으로 높았다. 각 사례에서 관측된 경주시의 평균 풍속은 약 2 m/sec로 경주시 부근 주변도시의 배출원으로부터 대기 중으로 배출된 대기오염물질이 수 시간 내에 도착될 수 있는 풍속이었다. 단거리 규모에서 경주시의 북서쪽에는 대구광역시, 북동쪽에는 포항시가 위치하고 있어 사례 II 및 사례 IV의 기상조건에서 관측된 1차 오염물질인 SO₂와 CO의 고농도 발현의 원인과 상관성을 지니고 있는 것으로 추정된다. 뿐만 아니라, 2차 오염물질의 성격을 띠는 O₃ 및 PM_{10,Opt}은 중·장거리 규모에서 배출되어 이동될 수 있는 대기

Table 2. Variation of concentrations of air quality standards and meteorological factors measured at the air quality monitoring station with air mass pattern during the intensive monitoring period. Air mass pattern was classified into four categories; I (eastern marine), II (northwestern continental), III (southwestern continental), IV (northern continental). WS, AT, and RH are wind speed, atmospheric temperature, and relative humidity, respectively. PM_{10,Opt} was measured by the optical method.

Air mass pattern	Altitude m	Frequency	SO ₂	NO ₂	O ₃	CO	PM _{10,Opt}	WS	AT	RH
			ppm				µg m ⁻³	m s ⁻¹	°C	%
I	500	13	0.003±0.002	0.018±0.007	0.018±0.009	0.3±0.1	35.0±10.9	1.8±0.5	13.0±8.6	48.4±27.0
	1000	12	0.003±0.002	0.019±0.007	0.018±0.009	0.3±0.2	36.5±11.4	1.8±0.5	13.0±8.6	48.4±27.0
	2000	6	0.004±0.003	0.020±0.007	0.021±0.008	0.4±0.2	45.2±12.1	2.2±0.6	16.5±9.5	42.7±29.8
II	500	14	0.006±0.003	0.025±0.011	0.027±0.017	0.5±0.2	68.1±14.5	2.1±1.0	7.3±4.6	43.6±26.6
	1000	14	0.006±0.003	0.025±0.011	0.027±0.017	0.5±0.2	68.1±14.5	2.1±1.0	7.3±4.6	43.6±26.6
	2000	16	0.004±0.001	0.023±0.010	0.022±0.015	0.4±0.1	52.0±11.2	1.8±0.8	6.7±4.6	44.5±26.2
III	500	3	0.005±0.003	0.028±0.013	0.019±0.013	0.2±0.1	56.8±12.9	1.9±0.9	16.9±2.5	42.6±32.3
	1000	4	0.004±0.002	0.024±0.010	0.019±0.011	0.2±0.1	46.8±10.9	1.9±0.7	16.9±2.5	42.6±32.3
	2000	5	0.004±0.002	0.022±0.009	0.018±0.012	0.3±0.1	43.7±11.1	1.8±0.7	11.6±3.9	52.2±37.7
IV	500	9	0.005±0.002	0.021±0.009	0.022±0.011	0.5±0.2	53.9±27.8	2.3±1.2	1.1±4.0	44.5±22.2
	1000	10	0.005±0.002	0.021±0.009	0.022±0.012	0.4±0.2	50.8±25.6	2.3±1.1	1.1±4.0	44.5±22.2
	2000	15	0.006±0.002	0.022±0.010	0.024±0.012	0.4±0.2	58.8±23.0	2.3±1.1	5.6±3.7	42.0±26.9

오염물질로서 경주시의 북서쪽에 위치한 수도권 및 중국 대륙으로부터의 이동 및 한반도의 북쪽에 위치한 지역으로부터의 이동과 상관성이 있는 것으로 추정된다.

고도에 따른 기상조건별로 대기오염물질의 농도 변화를 조사하기 위하여 집중관측 기간 동안 경주시에서 관측된 대기환경기준물질의 농도 분포를 기단 역케적 분석 결과를 토대로 16 방위 및 고도별로 분류하여 그림 6에 도식하였다. SO₂의 농도는 집중관측 기간 동안 0.001~0.013 ppm 범위의 분포를 나타내었으며, 0.004~0.006 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 전체 발현빈도의 32.5%를 차지하며 가장 높았다. 0~0.002 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 22.5%, 0.006~0.008 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 17.5%를 나타내었으며, 0.010 ppm 이상의 발현빈도는 12.5%를 나타내었다. 고도 500 m와 1,000 m에서 분석된 0.010 ppm 이상의 SO₂의 고농도는 서쪽 및 북동쪽 방향으로부터의 유입 시에 발현되었고, 2,000 m에서 분석된 결과에서는 북서쪽으로부터의 유입 시로 이동되었다. 동쪽과 남서쪽으로부터의 유입 시에는 대체로 저농도를 나타내었으며, 고도가 상승될수록 동쪽으로부터의 발현빈도는 작아졌다. 따라서 경주시에서 집중관측 기간 동안 측정된 대기환경기준물질 중 SO₂의 농도는 발현빈도와 고농도가 모두 높았던 북서쪽으로부터의 유입에 의한 영향과 상관성이 가장 높은 것으로 판단된다. NO₂의 농도는 집중관측 기간 동안 0.009~0.031 ppm 범위의 분포를 나타내었다. 특히 0.025~0.030 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 전체 발현빈도의 42.5%로 가장 높았다. 이어서 0.010~0.015 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 20.0%, 0.015~0.020 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 12.5%를 나타내었으며, 0.030 ppm 이상의 고농도의 발현빈도는 7.5%를 나타내었다. 모든 고도에서 분석된 0.030 ppm 이상의 NO₂의 고농도는 북서쪽, 남서쪽 및 북동쪽 방향으로부터의 유입 시에 발현되었으며, 북쪽으로부터의 유입 시에는 대체로 집중관측 기간의 평균 농도를 나타내었다. 따라서 경주시에서 집중관측 기간 동안 측정된 대기환경기준물질 중 NO₂의 농도는 발현빈도가 높았던 북서쪽으로부터의 유입 시에 지배적인 영향을 받았으며, 남서쪽 및 북동쪽으로부터의 유입 시에도 고농도의 발현빈도가 일부 발생된 것으로 판단된다. CO의 농도는 집중관측 기간 동안

0.1~0.9 ppm 범위의 분포를 나타내었다. CO의 농도는 0.2~0.4 ppm과 0.4~0.6 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 각각 27.5%로 가장 높았다. 0.6~0.8 ppm에 해당되는 CO의 농도 범위의 발현빈도는 20.0%를 나타내었고, 0.1~0.2 ppm에 해당되는 CO의 농도 범위의 발현빈도는 15.0%를 나타내었으며, 0.8 ppm 이상의 고농도의 발현빈도는 10.0%를 나타내었다. 고도 500 m와 1,000 m에서 분석된 0.8 ppm 이상의 CO의 고농도는 북쪽 및 북동쪽 방향으로부터의 유입 시에 우세하였고, 2,000 m에서 분석된 결과에서는 북서쪽으로부터의 유입 시로 이동되었다. 동쪽과 남서쪽으로부터의 유입 시에는 대체로 저농도를 나타내었다. 따라서 경주시에서 집중관측 기간 동안 측정된 대기환경기준물질 중 CO의 고농도 현상은 북쪽 및 북동쪽으로부터의 유입에 의한 영향과 상관성이 높은 것으로 판단된다. O₃의 농도는 집중관측 기간 동안 0.007~0.048 ppm 범위의 분포를 나타내었으며, 0.020~0.025 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 전체 발현빈도의 22.5%를 점유하며 가장 높았다. 이어서 0.015~0.020 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 17.5%, 0.030~0.035 ppm의 농도 범위의 발현빈도가 15.0%를 나타내었으며, 0.035 ppm 이상의 고농도의 발현빈도는 10.0%를 나타내었다. 고도가 상승할수록 0.035 ppm 이상의 O₃의 고농도는 북서쪽 방향으로부터의 유입 시에 우세하였으나, 500 m 및 1,000 m의 고도에서는 남서쪽 및 북동쪽에서도 고농도가 발현되었다. 동쪽으로부터의 유입 시에는 대체로 저농도를 나타내었다. 따라서 경주시에서 집중관측 기간 동안 측정된 대기환경기준물질 중 O₃의 고농도 현상은 낮은 고도에서는 북서쪽, 북동쪽, 남서쪽으로부터의 유입에 의한 영향과 밀접한 관계가 있는 것으로 판단되었다. PM_{10,0pt}의 농도는 집중관측 기간 동안 12.4~138.2 µg m⁻³ 범위의 분포를 나타내었다. PM_{10,0pt}의 농도는 20.0~40.0 µg m⁻³의 농도 범위의 발현빈도가 27.5%로 가장 높았다. 이어서 60.0~80.0 µg m⁻³의 농도 범위의 발현빈도가 25.0%로 높았고, 40.0~60.0 µg m⁻³의 농도 범위의 발현빈도가 20.0%를 나타내었으며, 80.0 µg m⁻³ 이상의 고농도의 발현빈도는 15.0%를 나타내었다. PM_{10,0pt}의 고농도는 전 고도에서 북서쪽 및 남서쪽 방향으로부터의 유입 시에 우세하였고, 동쪽으로부터의 유입 시에는 대체로 저농도를 나타내었다. 따라서 경주시에서 집중관측 기간

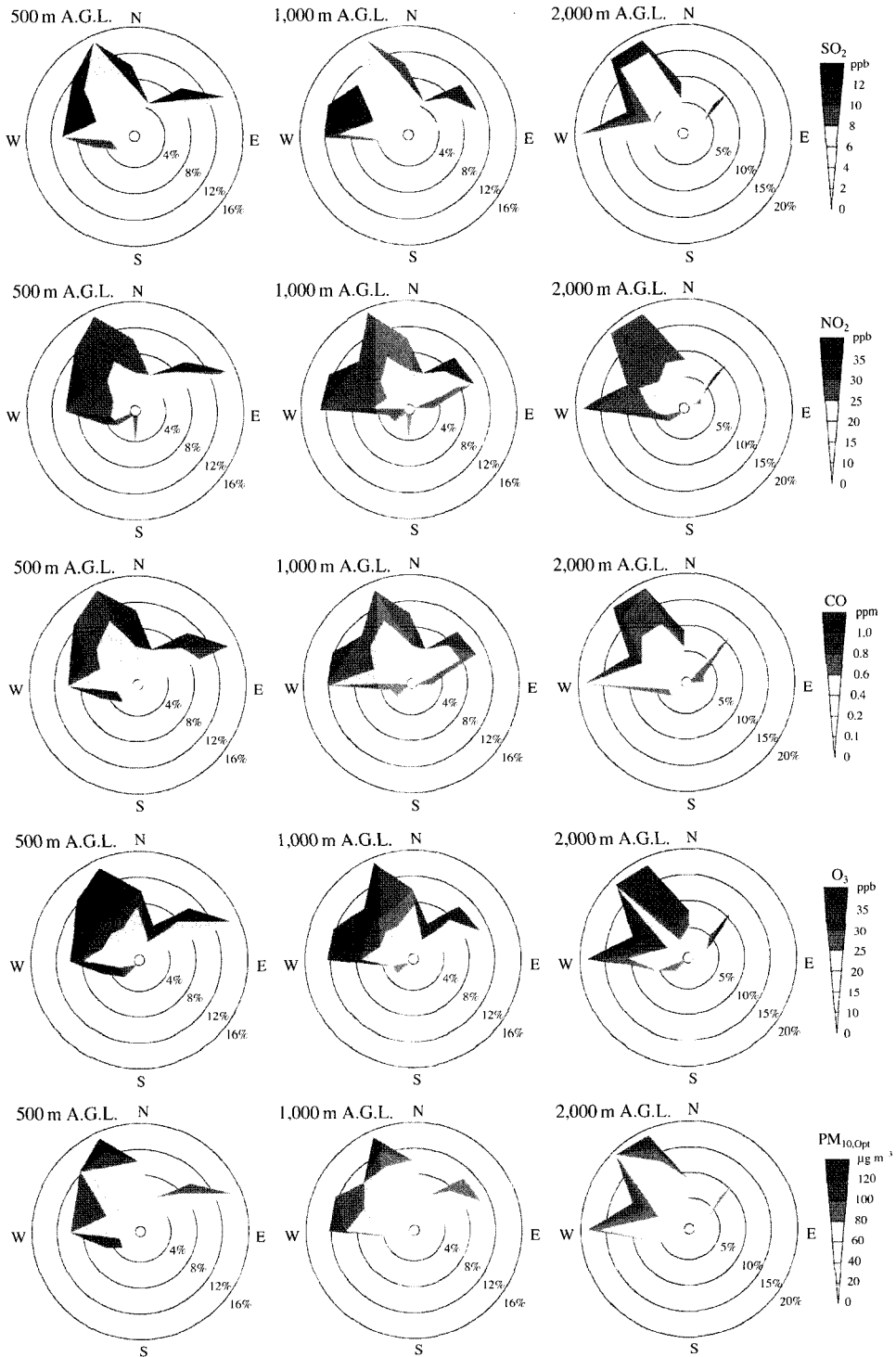


Fig. 6. Variation of concentrations of air quality standards measured at the air quality monitoring station with air mass pathway and altitude (A.G.L.: above ground level).

동안 측정된 대기환경기준물질 중 $PM_{10,Opt}$ 의 농도는 발현빈도와 고농도가 모두 높았던 북서쪽 및 남서쪽으로부터의 유입에 의한 영향과 상관성이 가장 높은 것으로 판단된다.

상기 대기환경기준물질 중 필터에 채집된 $PM_{10, Fil}$ 의 질량농도와 광학적으로 측정된 $PM_{10, Opt}$ 의 질량농도간의 상관관계를 조사하기 위하여 그림 7에 두 요소에 대한 질량농도 간의 산포도를 나타내었다. $PM_{10, Fil}$ 과 $PM_{10, Opt}$ 간의 상관관계를 의미하는 R^2 는 0.9785로 좋은 상관성을 나타내었으며, $PM_{10, Opt}$ 에 대한 $PM_{10, Fil}$ 의 평균 상대오차 ($(PM_{10, Opt} - PM_{10, Fil}) / PM_{10, Opt}$)는 $8.4 \pm 5.3\%$ 로 계산되었다. 집중관측 기간 동안 두 지점에서 측정된 $10 \mu m$ 이하의 입자상 물질의 질량농도는 유사한 경향을 나타낸 것으로 파악되었다.

대기 중의 입자상 물질인 PM_{10} 에 대한 분석 방법에는 원소성분, 탄소성분 및 이온성분 분석이 주요한 것으로 알려져 있다 (Kim *et al.*, 2004; Moya *et al.*, 2001; Turn *et al.*, 1997). 일반적으로 PM_{10} 중 이온성분에는 2차 오염물질의 성격을 지니며 에어로졸의 산성도와 밀접한 관계를 지닌 황산이온 및 질산이온 등이 있다 (Saxena *et al.*, 1986). 본 연구에서는 대기 오염자동측정소에서 관측된 두 산성 에어로졸의 전구물질인 SO_2 와 NO_2 의 농도 변화 결과를 토대로 기

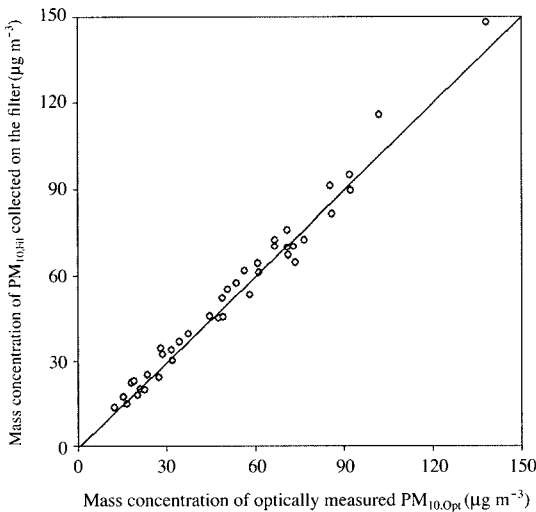


Fig. 7. Scatter plot of mass concentrations between $PM_{10, Fil}$ collected on the filter at the sampling site of Gyeongsju University and $PM_{10, Opt}$ optically measured at the air quality monitoring station.

상조건에 따른 입자상물질 중의 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 질량농도 변화가 조사되었다. 집중관측 기간에 채집된 $PM_{10, Fil}$ 의 이온성분 중 음이온은 SO_4^{2-} 의 질량농도가, 양이온은 NH_4^+ 의 질량농도가 각각 가장 높은 것으로 분석되었다. 표 3에서와 같이 집중관측 기간 전체에 대한 음이온인 SO_4^{2-} , NO_3^- , PO_4^{3-} , Cl^- 의 평균 질량농도는 각각 5.0 ± 3.3 , 3.3 ± 2.1 , 0.4 ± 0.2 , $0.3 \pm 0.2 \mu g m^{-3}$ 이었으며, 양이온인 NH_4^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ 의 평균 질량농도는 각각 6.6 ± 4.8 , 1.0 ± 0.6 , 0.4 ± 0.2 , $1.0 \pm 0.4 \mu g m^{-3}$ 이었다. $PM_{10, Fil}$ 의 질량농도에 대한 총 이온의 질량농도의 평균 분율에서는 계절별로 겨울철과 봄철 집중관측 기간의 평균값이 표 3에서와 같이, 여름철과 가을철 집중관측 기간의 질량농도의 분율에 비하여 상대적으로 높았다. 특히 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 $PM_{10, Fil}$ 의 질량농도에 대한 평균 질량분율은 각각 약 10~11% 및 약 6~7%로 겨울철 및 봄철 집중관측 기간에 상대적으로 높았다. 이러한 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 계절적 특성은 기상조건별로 분류한 결과에서 사례 II와 사례 IV의 평균 질량분율이 다른 사례에 비하여 상대적으로 높았던 원인과 상관성을 지니고 있다. 사례 II는 기단의 북서쪽으로부터의 유입 조건으로서 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 $PM_{10, Fil}$ 의 질량농도에 대한 평균 분율은 각각 약 10~11% 및 약 6~7%로 계산되었으며, 사례 IV는 기단의 북쪽으로부터의 유입 조건으로서 평균 질량분율은 각각 약 9~10% 및 약 6~7%로 계산되었다. 또한 양이온 중 해양으로부터의 기원 특성을 나타내는 성분인 Na^+ (Chow *et al.*, 1996)의 $PM_{10, Fil}$ 의 질량농도에 대한 평균 질량분율은 동쪽 해양으로부터의 유입된 조건인 사례 I에서 약 1.9~2.5%로 상대적으로 높았다. 결과적으로 집중관측 기간 동안 경주시에서 관측된 $PM_{10, Fil}$ 중 에어로졸의 산성도와 관계있는 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 질량농도의 변화는 기단의 유입경로가 북서쪽 및 북쪽인 사례에서 증가하는 것으로 분석되었다.

박지연과 임호진 (2006)에 의하면 2006년 2월 17일부터 4월 18일까지 본 연구의 집중관측 기간을 포함하는 기간 동안 대구광역시 동구 신암5동사무소에서 PM_{10} 의 수용성 이온성분에 대한 관측 및 분석이 수행되었다. PM_{10} 의 수용성 이온성분 중 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 관측 기간 평균 질량농도는 각각 약 $8.9 \mu g m^{-3}$ 및 약 $7.8 \mu g m^{-3}$ 인 것으로 보고되었다. 대구광역시에서 관측된 SO_4^{2-} 및 NO_3^- 의 질량농도는 표 3에

Table 3. Variation of concentrations of PM_{10,FI} and ionic components measured at the sampling site of Gyeongju University with air mass pattern during the intensive monitoring period. PM_{10,FI} was measured by physical method.

Air mass pattern	Altitude m	PM _{10,FI}	SO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	PO ₄ ³⁻	Cl ⁻	NH ₄ ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	MF
											μg m ⁻³
I	500	36.4±24.5	2.4±1.5	1.7±1.1	0.3±0.2	0.2±0.1	2.9±2.6	0.7±0.4	0.3±0.1	0.9±0.2	36.8±14.5
	1000	38.2±24.7	2.5±1.6	1.7±1.1	0.3±0.2	0.2±0.1	3.0±2.6	0.7±0.4	0.3±0.1	0.9±0.2	36.7±19.2
	2000	46.3±29.3	3.1±1.9	2.1±1.4	0.4±0.3	0.3±0.2	3.1±2.0	0.8±0.4	0.3±0.1	0.9±0.2	35.9±16.3
II	500	68.9±22.6	7.6±2.4	4.7±1.5	0.6±0.2	0.4±0.1	9.9±4.2	1.3±0.5	0.5±0.2	1.1±0.4	37.7±18.1
	1000	68.9±22.6	7.6±2.4	4.7±1.5	0.6±0.2	0.4±0.1	9.9±4.2	1.3±0.5	0.5±0.2	1.1±0.4	37.7±18.1
	2000	53.4±27.9	5.6±3.3	3.4±1.9	0.4±0.2	0.3±0.2	7.0±4.9	1.0±0.5	0.4±0.2	1.0±0.4	35.6±15.2
III	500	56.7±4.0	3.8±0.4	2.8±0.4	0.5±0.1	0.3±0.0	4.7±0.3	1.0±0.1	0.5±0.0	1.0±0.1	25.5±11.0
	1000	46.3±21.1	3.2±1.2	2.3±0.9	0.4±0.2	0.3±0.1	3.8±1.7	0.8±0.4	0.4±0.2	0.9±0.2	25.2±10.3
	2000	42.9±23.4	2.8±1.3	2.1±1.0	0.4±0.2	0.2±0.1	4.4±3.4	0.8±0.5	0.4±0.2	1.0±0.3	23.5±10.8
IV	500	56.4±39.1	5.6±3.9	4.0±2.5	0.5±0.3	0.3±0.2	8.0±5.1	1.1±0.7	0.4±0.2	0.9±0.5	25.5±11.3
	1000	52.8±38.6	5.3±3.8	3.8±2.5	0.4±0.3	0.3±0.2	7.3±5.3	1.0±0.7	0.4±0.2	0.9±0.5	26.2±12.1
	2000	59.7±32.5	5.9±3.5	4.2±2.3	0.5±0.3	0.3±0.2	8.0±5.2	1.2±0.6	0.4±0.2	1.0±0.4	28.2±13.7
Winter		49.7±22.2	5.0±2.2	3.5±1.4	0.4±0.2	0.3±0.1	8.5±3.7	1.0±0.4	0.4±0.2	1.0±0.5	40.4±19.7
Spring		79.8±31.3	8.9±3.0	5.5±2.1	0.7±0.2	0.4±0.2	11.8±4.2	1.5±0.7	0.6±0.2	1.2±0.5	38.3±18.5
Summer		63.2±16.2	4.7±1.7	3.1±1.1	0.5±0.1	0.3±0.1	4.6±1.2	1.1±0.1	0.4±0.1	0.9±0.1	24.9±12.3
Fall		21.0±5.8	1.6±0.4	1.1±0.2	0.2±0.1	0.1±0.0	1.4±0.3	0.4±0.1	0.2±0.1	0.8±0.1	27.4±13.4
Avg.		53.4±29.7	5.0±3.3	3.3±2.1	0.4±0.2	0.3±0.2	6.6±4.8	1.0±0.6	0.4±0.2	1.0±0.4	33.8±15.3

* Mass fraction of sum of ion species out of PM_{10,FI}

서와 같이 경주시에서 봄철 관측된 값의 각각 약 1.0 배 및 약 1.4배를 나타낸다. 경주시의 대기질 수준은 산성을 지닌 주요 2차 오염물질인 SO₄²⁻ 및 NO₃⁻의 분석결과에서와 같이 대구광역시와 유사한 수준인 것으로 사료된다.

4. 결 론

국내·외에서 널리 알려진 역사·문화유산의 도시인 경주시는 국립공원 지역과 문화재가 곳곳에 산재하여 개발이 엄격하게 규제되고 있는 소규모 인구의 도시이다. 선진국의 국립공원 지역은 쾌적한 대기 환경이 효과적으로 유지 및 관리되고 있으나, 경주시의 최근의 대기오염 수준은 국립공원 지역의 대기환경이라고 하기에는 부적절한 상황에 이르렀다. 이러한 경주시의 대기오염현황을 파악하기 위하여 본 연구에서는 경주시 대기오염자동측정소에서 측정된 대기환경기준물질과 대기 중에서 채집된 10 μm 이하의 입자상 물질의 이온성분에 대한 분석 및 국지 기상

장과 기단의 중·장거리 이동 특성을 통하여 집중관측 기간 동안의 기상조건에 따른 대기오염물질의 농도의 변화 특성이 조사되었다.

집중관측 기간 동안 경주시 대기오염자동측정소에서 관측된 대기환경기준물질의 시계열 농도 변화에서는 경주시의 동쪽 해양으로부터 기단의 유입된 사례가 우세하였던 가을철 집중관측 기간에 측정된 대기환경기준물질의 평균값이 전체적으로 낮았던 것으로 분석되었다. 경주시의 대기오염수준은 주변의 광역시 및 공업도시들에 비하여 소폭 낮았으나, NO₂, O₃, PM₁₀의 농도는 주변도시들의 대기오염 수준의 약 85~95%로 근접된 수준을 나타내었다. 중·장거리 기단 이동 특성 및 국지 기상조건에 따른 경주시에서 관측된 대기오염물질의 농도변화에서는 SO₂, O₃, CO 및 PM₁₀은 북서쪽 및 북쪽 대륙으로부터 유입된 기상조건에서 농도가 증가되었으며, NO₂는 북서쪽 및 남서쪽 대륙으로부터 유입된 기상조건에서 농도가 높았다. 특히 SO₂의 농도는 북서쪽으로부터의 유입 시에 고농도의 발현빈도가 높았으며, CO의 고농도 현상은 북쪽 및 북동쪽으로부터의 유입에 의

한 영향과 상관성이 높은 것으로 판단되었다. O₃은 북서쪽, 북동쪽, 남서쪽으로부터의 기단 유입 시에 고농도가 발현되었고, PM₁₀의 농도는 발현빈도와 고농도가 모두 높았던 북서쪽 및 남서쪽으로부터의 유입에 의한 영향과 상관성이 가장 높은 것으로 판단되었다. 또한 10 μm 이하의 입자상 물질의 증가는 SO₄²⁻ 및 NO₃⁻의 질량농도가 기단의 유입경로가 북서쪽 및 북쪽인 사례에서 증가하는 것으로 분석됨으로써 2차 오염물질의 성격을 띠는 입자상 물질의 중·장거리 이동으로부터 영향을 받는 것으로 추정되었다. 그러나 가까운 장래에 1개소에 불과한 경주시 대기오염자동측정소에서 관측된 측정 자료가 경주시의 대기질을 온전히 대표할 수 있는 지에 대한 추가적인 연구가 검토될 필요가 있는 것으로 사료된다. 본 연구의 결과는 경주시의 곳곳에 산재한 다양한 석조문화재의 영향에 관한 기반 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2005년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2005-042-C00174), 이에 감사드립니다.

참고 문헌

- 경주시(2005) 시정백서.
- 김유근, 정주희, 배주현, 오인보, 권지혜, 서장원(2006) WRF 모형을 통한 복잡 연안지역에서의 해상풍 모의개선, 한국대기환경학회지, 22(3), 309-323.
- 김진영, 김영성, 원재광, 윤순창, 우정현, 조규탁(2005) 팔당호 유역에 대한 질소와 황의 건식 침적량 추정, 한국대기환경학회지, 21(1), 49-62.
- 대구지방환경관리청(2006) 환경질현황 대기오염 (<http://taegu.me.go.kr>).
- 박지연, 임호진(2006) 대구지역 겨울철과 봄철 미세먼지의 수용성 이온성분 특성, 한국대기환경학회지, 22(5), 627-641.
- 울산광역시(2006) 울산광역시 2005년 월별 대기환경오염도 (<http://www.ulsan.go.kr>).
- 환경부(2005) 대기오염측정망 기본계획(2006~2010), 11-1480000-000773-01.
- 환경부(2006) 환경백서.
- Brost, R.A., J.C. Wyngaard, and D.H. Lenschow (1982) Marine stratocumulus layers Part II: Turbulence budgets, *J. Atmos. Sci.*, 39, 818-836.
- Chow, J.C., J.G. Watson, and D.H. Lowenthal (1996) Sources and chemistry of PM₁₀ aerosol in Santa Barbara county, CA, *Atmos. Environ.*, 30, 1489-1499.
- Draxler, R.R. (1996) Boundary layer isentropic and kinematic trajectories during the August 1993 North Atlantic Regional Experiment Intensive, *J. Geophys. Res.*, 101, 29,255-29,268.
- Grell, G.A., J. Dudhia, and D.R. Stauffer (1994) A Description of the fifth-generation Penn State/NCAR Mesoscale Model (MM5), NCAR Technical Note, NCAR/TN-398+STR.
- Kim, K.W., Z. He, and Y.J. Kim (2004) Physico-chemical characteristics and radiative properties of Asian Dust particles observed at Kwangju, Korea during the 2001 ACE-Asia IOP, *J. Geophys. Res.*, 109, D19, D19S02.
- Moya, M., A.S. Ansari, and S.N. Pandis (2001) Partitioning of nitrate and ammonium between the gas and particulate phases during the 1997 IMADA-AVER Study in Mexico City, *Atmos. Environ.*, 35(10), 1791-1804.
- National Center Atmospheric Research (2003) PSU/NCAR mesoscale modeling system tutorial class notes and user's guide.
- NWS Office of Science and Technology (1999) Interface control document for AWIPS-NESDIS (NOAAPORT ICD, section 4.7) (<http://www.nws.noaa.gov/noaaport/html/refs.shtml>).
- Pielke, R.A. and M. Uliasz (1998) Use of meteorology models as input to regional and mesoscale air quality models-limitations and strengths, *Atmos. Environ.*, 32, 1455-1466.
- Pleim, J.E. and J.S. Chang (1992) A nonlocal closure model for vertical mixing in the convective boundary layer, *Atmos. Environ.*, 26A, 965-981.
- Rogerson, A.M. (1999) Transcritical flows in the coastal marine atmospheric boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 56, 2761-2779.
- Saxena, P., A.B. Hudischewskyj, C. Seigneur, and J.H. Seinfeld (1986) A comparative study of equilibrium approaches to the chemical characterization of secondary aerosols, *Atmos. Environ.*, 20(7), 1471-1483.
- Turn, S.Q., B.M. Jenkins, J.C. Chow, L.C. Pritchett, D.E. Campbell, T.A. Cahill, and S.A. Whalen (1997)

Elemental characterization of particulate matter emitted from biomass burning: wind tunnel-derived source profiles for herbaceous and wood fuels, *J. Geophys. Res.*, 102(D3), 3683-3699.

Zampieri, M., P. Malguzzi, and A. Buzzi (2005) Sensitivity of

quantitative precipitation forecasts to boundary layer parameterization: a flash flood case study in the Western Mediterranean, *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 5, 603-612.