

경주권역으로의 대기오염물질 유입현황과 석조문화재에 미치는 영향

정종현[†] · 손병현* · 김현규** · 최원준*** · 남철현****

서라벌대학 생명보건학부, *한서대학교 환경공학과, **포항공과대학교 환경공학부,
부산대학교 환경공학과, *대구한의대학교 보건학부

The Present State of an Air Pollutants Inflow into Gyeongju and Effects on Stone Cultural Properties

Jong-Hyeon Jung[†] · Byung-Hyun Shon* · Hyun-Gyu Kim** ·

Won-Joon Choi*** · Chul-Hyun Nam****

Division of Biotechnology & Health, Sorabol College

**Department of Environmental Engineering, Hanseo University*

***Department of Environmental Science & Engineering, Pohang University of Science & Technology*

****Department of Environmental Engineering, Pusan National University*

*****Division of Health, Daegu Haany University*

(Received May 2, 2005/Accepted August 12, 2005)

ABSTRACT

In this study, we focused on the geographical and the meteorological conditions, the atmospheric examination, the soil contents and compositions in order to establish cultural properties conservation plan in Gyeongju and its surroundings. Also, the transport route with environmental contaminants in Ulsan and Pohang was examined. The results could be summarized as follows ; Air pollutant and environmental contaminant was transported by two types of winds. One is induced by local winds, the other is induced by synoptic winds. Air contaminant transported from coastal regions to inland regions were associated with wind velocity. Gyeongju had good atmospheric conditions, i.e. SO₂ 0.009~0.011 ppm, CO 0.6~0.8 ppm, NO₂ 0.015~0.020 ppm, O₃ 0.017~0.032 ppm, PM₁₀ 46~62 µg/m³ and Pb 0.034~0.060 µg/m³, which was below environmental air quality standards and was little lower than those of Pohang and Ulsan. However, Ulsan and Pohang city are located on south-east coast and have many industrial facilities. Hence, air pollution problems become serious issues in Ulsan, Pohang, Busan, Daegu and other cities due to the emission of air pollutants from the various industrial facilities, incinerator and power plants, etc. The soil of Gyeongju had heavy metals conditions, i.e. Cd 0.01~0.08 mg/kg, Cu N.D~2.39 mg/kg, As N.D~0.07 mg/kg, Hg N.D~0.15 mg/kg, Pb 0.49~1.39 mg/kg, Cr⁶⁺ 0.02~0.42 mg/kg, Fe 0.74~1.55 mg/kg, Mn 0.11~0.49 mg/kg and Zn 1.11~3.56 mg/kg. However, pH value of soil had range of 4.12~7.45. The results showed that high pH concentration of soil could occur due to air pollution diffusion and environmental contaminant transport at Ulsan and Pohang city.

Keywords: stone cultural properties, conservation, damage, transport, Gyeongju

I. 서 론

경주시는 신라천년의 고도로서 불국사, 석굴암, 남산, 첨성대 등 역사적으로 중요한 유형문화재가 분포되어 있으며, 우리나라 최고의 역사 관광도시로서 경상북도의 동남부에 위치하고 있다. 특히 남산 및 인근지

역 등에는 다양한 역사유적이 분포되어 있고, 2000년 11월에는 호주 케언스에서 열린 유네스코(UNESCO) 세계유산위원회 총회에서 경주 남산 및 인근지역이 세계문화유산(World Heritage List)으로 등재됨으로써 인류공동의 문화유산으로 거듭나게 되었다. 지형학적인 관점에서 경주시 주변지역에는 태백산맥의 줄기가 자리 잡고 있으며, 이들 산맥과 동해안 사이에 700 m급의 산들이 울산시 북구지역까지 분지형태를 형성하며 산재되어 있다.¹⁾

이와 함께 경주 중심지로부터 북동 및 남동방향으로

[†]Corresponding author : Division of Biotechnology & Health, Sorabol College
Tel: 82-54-770-3713, Fax: 82-54-741-5429
E-mail : airgas@sorabol.ac.kr

직선거리 약 30 km에 지점에 울산광역시와 포항시가 위치하고 있다. 1970년대 산업화가 시작된 이후 우리나라의 대도시 대기환경은 급속도로 악화되어 대도시 지역과 대규모 공단지역의 경우는 한낮에도 광화학스모그로 인해 시정상태가 발생하고 있으며, 최근 들어 오존주의보도 빈번하게 발생하여 환경오염의 수준이 위험한 지경에 이르렀다. 이러한 환경오염은 국민들의 생활건강과 직결되어 커다란 사회적 문제로 대두되었고, 국민들도 점차 환경에 대한 관심이 높아지고 있다. 특히, 경주 인근도시의 산업구조는 석유관련산업 및 화학공업, 철강산업, 자동차 등 중화학공업 위주로 구성되어 있으며, 대규모의 유사한 산업시설들이 밀집되어 있기 때문에 환경오염물질의 다량 배출과 공중보건상 위해를 유발할 수 있는 시설이 경주·울산·포항지역 인근에 분포되어 있는 실정이나, 환경오염에 의한 문화재 피해조사에 대한 기초연구는 부족한 실정이다.¹⁴⁾ 이러한 환경오염에 의한 석조문화재에 대한 피해가 심각해짐에 따라 일본의 Kei 대학에서는 캄보디아의 Bayon 사원에 대하여 계절변화 및 하루 중 시간 변화에 따른 온도변화가 석조구조물의 풍화에 미치는 영향에 대하여 연구하였으며, 이탈리아, 포르투갈, 스페인에서는 화강암과 대리석이 석조문화재 재료의 주류라는 점에 대하여 연구를 통해 석조문화재의 보존 및 복원에 대한 연구를 수행하고 있다.⁵⁻⁸⁾ 한편, 국내에서는 매장문화재 주변의 지하수 유동, 석조문화재의 광물연구, 지구화학적 연구 및 풍화특성에 대한 연구와 석조문화재 처리재료 개발 등의 연구가 진행되었으며, 석조문화재의 보존을 위하여 향후 지속적인 연구가 필요한 실정이다.^{5,9,10)}

본 연구에서는 경주권역에 유입되는 환경오염물질이 석조문화재에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구의 일환으로 경주 및 포항과 울산권역의 지형, 대기질, 기상 자료를 조사하였고, 본 연구자의 이전의 연구결과를 바탕으로 경주권역으로의 대기오염물질 이동 및 유입 가능성을 예측하였으며, 이를 바탕으로 환경오염물질에 의한 석조문화재의 영향을 조사하고자 한다. 또한, 보다 실질적이고 환경공학적인 측면에서의 접근방안을 모색하기 위한 연구의 일환으로 경주권역의 중금속 및 토양 산성화 진행과정을 평가하였으며, 이를 석조문화재 보존을 위한 기초자료로서 활용하고자 한다.

II. 대상 및 방법

본 연구에서는 석조문화재에 미치는 영향을 조사하기 위한 방안의 일환으로 답사를 실시하였으며, 경주와 울

산 및 포항지역의 최근 10년간(1994~2003)¹¹⁾ 월별 기상자료를 분석하였고, 기상현황을 파악하기 위하여 기온, 강수량, 상대습도, 천기일수, 풍향 및 풍속, 일조시간, 증발량 등을 확인하였다. 또한, 경주시 대기질 현황을 분석하기 위해 대기측정차량을 이용하였으며, 대기환경질 1차 조사는 2004년 7월 26일~30일, 2차 조사는 2004년 10월 18일~22일에 실시하였고, 3차 조사는 2004년 12월 28일~30일에 실시하여 본 연구자의 이전의 자료¹²⁾와 비교 및 분석하였다. 대기질 측정차량을 이용한 대기질 측정항목은 환경정책기본법에 준하여 총 6개 항목을 분석하였다. SO₂는 API사의 SO₂ analyzer (U.S.A, API Model:100A)를 사용하였고, NO₂는 Thermo Environmental사의 Chemiluminescent type의 analyzer(U.S.A, Model : 43C)를 이용하였다.^{13,14)} CO (U.S.A, Model : 300)와 O₃(U.S.A, Model : 400)은 API사의 analyzer를 이용하여 분석하였으며, PM-10은 MET ONE사(U.S.A, Model : BAM-1020)의 채취장치를 이용하였다.

한편, 경주권역 토양 시료분석을 위하여 문화재가 분포하고 있는 지역을 중심으로 대표 토양시료를 채취하기 위해, 대상지역의 중심이 되는 1개 지점과 주변 4방위의 5~10m 거리에 있는 1개 지점씩 총 5개 지점을 선정하여 토양표면의 잡초나 유기물 등 이물질층을 제거한 후 토양시료채취기(sampler)를 이용하여 약 0.5 kg 씩 채취하였으며, 채취한 토양시료는 잘 분쇄 혼합하고 통풍하기 좋으며, 직사광선이 닿지 않는 장소에서 자연 건조하였다. 이때 시료는 균일한 두께로 통풍이 잘되게 펼쳐 놓고 건조한 토양을 표준체에 통과시켜 2 mm 이상의 돌이나 식물뿌리를 걸어내어 풍건세도 하였다. 이것을 사분법으로 혼합하고 100 g을 취하여 분석용 시료로 사용하였다. 항목별 중금속 분석을 위하여 분석용 시료 적당량을 평량할 때 토양입자의 차이가 크거나 비중의 차이가 있는 입자의 혼입으로 인하여 시료 채취량에 오차가 발생할 우려가 있는 토양시료는 분석용 시

Table 1. The analytical apparatus of soil and heavy metals

Parameter	Analytical apparatus
pH	pH meter
Temp.	HANNA
Water Contents	Drying Oven
PCB, Organic-P, Phenol, Oil	Gas Chromatograph (HP-5890 GC)
Cd, Cu	ICP MASS Spectrometer (MLAN 6100)
Pb, Cr ⁺⁶ , As, Hg	ICP AES (GBC)
CN	Spectrophotometer (ASCO V-550)

료 전부를 분쇄하여 시료로 사용하였으며, Table 1에서는 실험에 이용한 분석용 장비의 사양을 기술하였다. 본 연구조사에서 분석한 항목은 수소이온농도, PCB, 유기인, 페놀류, 유류, CN, Cd, Cu, Pb, Cr⁶⁺, As, Hg 등을 선정하였으며, 토양오염공정시험법에 준하여 분석하였고, 분석은 부산대학교 기초과학지원센터 및 서라벌대학 환경산업연구소에서 분석하였다.

III. 결과 및 고찰

경주지역의 문화재로는 국보 31점, 보물 76점, 사적 74점, 사적 및 명승 2점, 천연기념물 3점, 중요민속자료 16점, 중요무형문화재 2점 등 국가지정 문화재 204점과 유형문화재 29점, 기념물 18점, 민속자료 1점, 무형문화재 8점을 포함한 지방지정문화재 56점, 그리고 문화재 자료 40점 등 총 300점의 문화재를 보유하고 있다. 또한, 울산지역 인근에는 국보 2점, 보물 5점, 사적 5점, 천연기념물 3점, 중요민속자료 1점, 중요무형문화재 2점 등 국가지정 문화재 88점과 유형문화재 11점, 무형문화재 2점, 기념물 42점, 문화재자료 17점을 포함한 시지정 문화재 72점 등 총 160점의 문화재 및 관련자료를 보유하고 있으나, 대기오염물질의 유입에 의한 피해조사는 부족한 실정이다.^{15,16)}

따라서 경주권역으로의 대기오염물질 이동 및 유입 가능성을 예측하기 위한 기초연구의 일환으로 경주, 울산 및 포항권역의 지형도를 Fig. 1에 나타내었다. 울산 및 포항권역의 산업구조는 대부분 철강공업 및

석유화학공업 등과 같은 중화학공업 위주로 구성되어 있으며, 이러한 공업단지에서는 대규모의 대기오염물질 배출업종 및 산업시설이 밀집되어 있기 때문에 산성가스, 질소산화물, 휘발성 유기화합물질(VOCs)과 특정 대기유해물질(HAP) 등을 포함한 다량의 환경오염물질이 배출되어 경주, 울산 및 포항권역의 국지적인 대기환경질을 악화시키고 공중보건상 위해를 유발시킬 수 있으며, 산업지역 및 공단지역 인근에 위치한 다수의 목조 및 석조 문화재가 대기오염물질과 기타 환경오염물질 등의 유입에 의하여 표면이 부식되고 작은 구멍이 뚫리는 현상이 초래되고 있다.¹²⁾ 특히 경주 불국사의 다보탑이 대기오염물질에 의해 표면이 부식되고 작은 구멍이 뚫려 있으며, 심한 경우 표피가 떨어져 나가 석재가 검게 부식되고 강도 또한 약화돼 대책 마련이 시급한 상황²⁾이며, 박리/박락현상으로 석재표면이 심하게 손상되었고, 석가탑은 중심부의 지반 침하로 모서리가 위로 치솟는 등 구조적인 변형이 심각하다. 또한, 신라시대에 만들어진 다른 석조문화재들 또한 문화재 표면의 박리 및 탈리현상이 가속화되고 있으며, 일부 문화재에서는 석재표면이 심하게 손상되고 있으며, Fig. 2에서는 산성비 및 각종 대기오염물질과 풍화작용으로 훼손된 일부 석조문화재를 조사하여 나타내었다.

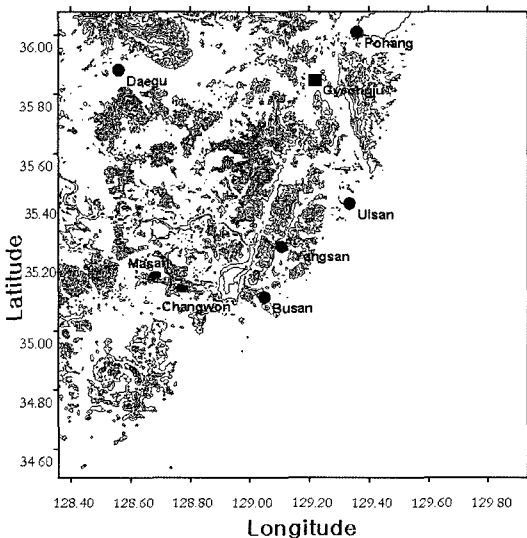


Fig. 1. Topography of southeastern area of Korea.

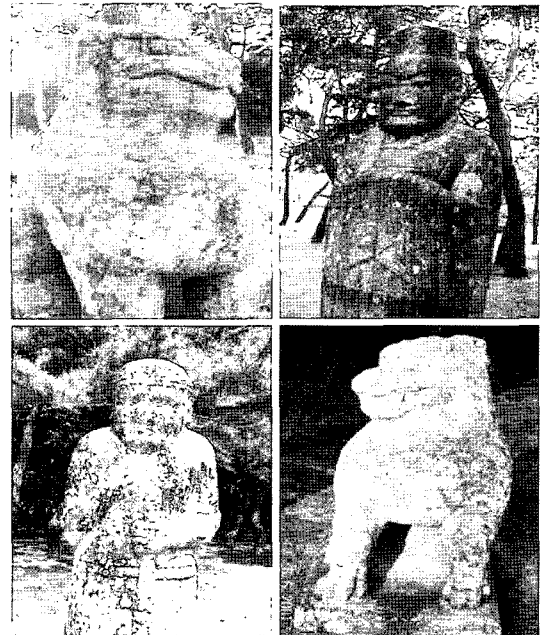


Fig. 2. The damage investigation of stone cultural properties in Gyeongju and boundary.

Table 2. The concentration of air pollutants by measuring vehicle in Chungundong and Bomundong,, Gyeongju

Pollutant		Measuring time	TSP ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	SO ₂ (ppm)	O ₃ (ppm)	NO ₂ (ppm)	CO (ppm)	Pb ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
Chungundong	2001	1st	92	59	0.010	0.018	0.015	1.0	0.070	
		2nd	100	71	0.010	0.020	0.017	1.2	0.070	
		Avg.	96	65	0.014	0.019	0.016	1.1	0.070	
	2004	1st	-	49	0.010	0.031	0.016	0.7	0.050	
		2nd	-	46	0.009	0.024	0.016	0.6	0.046	
		3rd	-	62	0.010	0.018	0.018	0.7	0.045	
		Avg.	-	52.3	0.010	0.024	0.017	0.7	0.047	
	Bomundong	2001	1st	85	47	0.011	0.013	0.013	0.8	0.057
			2nd	91	75	0.011	0.013	0.015	0.8	0.061
Avg.			88	61	0.011	0.013	0.014	0.8	0.059	
2004		1st	-	46	0.010	0.031	0.015	0.7	0.060	
		2nd	-	61	0.009	0.021	0.017	0.7	0.046	
		3rd	-	55	0.009	0.017	0.018	0.6	0.037	
		Avg.	-	54.0	0.009	0.023	0.017	0.7	0.048	
Bomun area		2001	1st	135	71	0.015	0.018	0.017	1.3	0.129
			2nd	142	90	0.017	0.020	0.019	1.5	0.101
	Avg.		138.5	80.5	0.016	0.019	0.018	1.4	0.115	
	2004	1st	-	53	0.011	0.032	0.019	0.8	0.059	
		2nd	-	56	0.010	0.023	0.019	0.8	0.045	
		3rd	-	51	0.010	0.019	0.020	0.8	0.034	
		Avg.	-	53.3	0.010	0.025	0.019	0.8	0.046	

Table 2에서는 석조분화재에 미치는 영향을 조사하기 위한 기초연구의 일환으로 대기측정차량을 이용하여 경주시 천군동, 보문단지, 보문동 지역의 대기오염물질 농도를 측정하여 나타낸 것이다. 2001년의 경우 대기질을 실측조사한 결과, SO₂는 0.010~0.017 ppm, CO는 0.8~1.5 ppm, NO₂는 0.013~0.019 ppm, O₃는 0.013~0.020 ppm으로 나타났고, TSP는 85~142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, PM₁₀은 47~90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, Pb는 0.057~0.129 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 분포를 나타내었으며, 경주시 전역의 대기질 상태는 낮은 오염도를 나타내었고, 전 지점 모두 환경기준 이내의 대기질을 유지하는 것으로 조사되었다. 2004년 경주시 대기질 실측조사 결과에서도 PM₁₀은 46~62 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, SO₂는 0.009~0.011 ppm, NO₂는 0.015~0.020 ppm, CO는 0.6~0.8 ppm, O₃는 0.017~0.032 ppm, Pb는 0.034~0.060 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 조사되었고, 대기질의 경우 장·단기 환경기준치 이내의 아주 양호한 대기질을 유지하고 있는 것으로 조사되었으며, 포항시와 울산광역시내 측정소의 대기질 현황과 비교한 결과에서도 보문 및 천군지역을 포함한 지역기상이 인근 포항이나 울산에 비해 상대적으로 양호한 상태인 것으로 나타났다.

경주시 일대는 경북 동남부의 내륙지방에 위치하여

해양성 기후가 부분적으로 나타나고 있으나, 전체적으로는 대륙성 기후지대에 속한다. 경주지역의 연평균기온 12.60°C로 온화한 편이며, 월평균 기온 중 최난월은 25.30°C의 8월로 나타났으며, 계절별 평균기온은 봄철(3, 4, 5월) 12.28°C, 여름철(6, 7, 8월) 23.84°C, 가을철(9, 10, 11월)은 13.66°C, 겨울철(12, 1, 2월)은 0.6°C로 겨울철에는 포항지역권보다는 상대적으로 기온이 낮은 편으로 나타났다. 연평균 총강수량은 1,071.3 mm로 전국평균보다 역시 적은 것으로 나타났으며, 봄철에는 197.7 mm, 여름철에는 632.6 mm, 가을철에는 182.7 mm, 겨울철에는 58.4 mm이며, 여름철인 6~8월에 연평균 수량의 41.0%를 차지하여 집중호우의 형태를 보였으며, 전형적인 온대지방의 내륙성 기후를 나타내고 있다. 또한 상대습도는 우기인 6~8월 사이가 68.3~73.2%로 가장 높은 값을 보이고 있으나, 전년 평균습도는 63%로 일상생활에 적합한 70%를 다소 하회하고 있는 상태이다. 연평균 총일조시간은 2,210.1 hr이며, 월평균 일조시간은 184.17 hr이다. 월평균 일조시간의 최고치는 5월의 221.6 hr이며, 최저치는 12월의 156.8 hr로 나타났다. 기상자료에 의한 천기일수는 맑음 104일, 흐림 86일, 강우(≥ 0.1 mm) 81일, 결빙 128

일, 서리 88일, 눈 10일, 안개 31일로 나타났다. 연평균 풍속은 1.8 m/s이고, 계절별 주풍향은 봄은 서풍계로서 서북서풍(WNW)이 11.7%, 여름은 동풍(E)이 12.6%, 가을은 서북서풍(WNW)이 10.9%, 겨울은 서북서풍(WNW)이 22.7%로 나타났다.¹¹⁾ 본 연구조사에 의하면 일정한 한쪽 방향만으로서의 바람이동은 존재하지 않으며, 주풍이 부는 시기에도 계절 및 일교차의 변화에 따라 바람의 방향은 바뀌게 된다. 따라서 경주지역에 유입되는 환경오염물질은 바람에 의한 이송 및 확산현상에 의하여 유입이 가능할 것으로 예상된다. 또한, 다른 연구^{17,18)}에 의하면 경주지역에서 발생하는 바람은 낮과 밤사이의 뚜렷한 일교차에 의해 주기적으로 발생되고 있으며, 국지적인 해륙풍과 함께 해풍 및 곡풍에 의하여 수송되고 있는 것으로 확인되었다.

한편, 포항시는 온대 해양성 기후지역으로 태백산맥의 남쪽인 경북의 동남부에 위치하고 있어 산악 내륙지역에서는 대륙성 기후의 영향을 받아 겨울철에 북서풍이 강하게 불며 강설량이 많은 편이고, 동해안 지역에서는 북동풍이 강하게 불어오고 있으며,¹⁹⁾ Table 3에서는 포항권역의 기상¹¹⁾을 나타내었다. 연평균기온 14.51°C로 비교적 온화한 편이며, 월평균 기온 중 최난월은 25.99°C의 8월로 나타났다. 또한, 계절별 평균기온은 봄철(3, 4, 5월) 13.73°C, 여름철(6, 7, 8월) 24.27°C, 가을철(9, 10, 11월)은 16.36°C, 겨울철(12, 1, 2월)은 3.69°C로 겨울철에도 우산권과 마찬가지로 평균기온이 영하로 내려가지 않는 온화한 지역으로 나타났다. 연평균 총강수량은 1,221.8 mm로 전국평균보다 적은 것으로 나타났으며, 봄철에는 242.2 mm, 여름철에는 588.4 mm, 가을철에는 302.6 mm, 겨울철에는 88.6

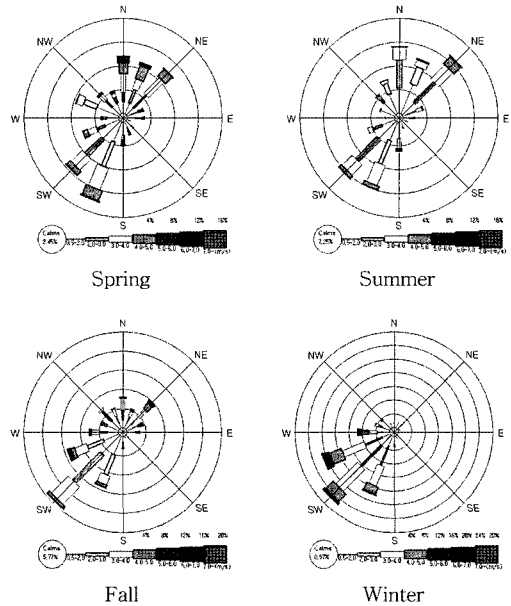


Fig. 3. The wind speed and frequency distribution of wind rose in Pohang.

mm이며, 여름철인 6,7,8월의 강수량이 전체 강수량의 거의 절반에 육박하는 51.8%를 차지하여 집중호우의 형태를 보였다. 연평균 총일조시간은 2,263.5 hr이며, 월평균 일조시간은 188.63 hr이다. 또한, 월평균 일조시간의 최고치는 5월의 217.5 hr이며, 최저치는 7월의 172.5 hr로 나타났다. 천기일수는 과거 10년간의 평균으로서 맑음 114일, 흐림 98일, 강우(≥0.1 mm) 100일, 결빙 74일, 서리 7일, 눈 5일, 안개 4일로 나타났다. Fig. 3

Table 3. The meteorological condition and monthly weather in Pohang

	Temperature (°C)			Precipitation (mm)	Humidity (%)	Dose sunshine (hr)	Wind speed (m/sec)	Wind direction
	Avg.	Max.	Min.					
1	2.14	6.72	-1.64	39.8	47.5	186.06	3.11	WSW
2	4.22	9.14	0.13	28.5	49.1	186.03	2.85	SW
3	8.46	13.31	4.14	54.9	52.9	195.64	2.93	SW
4	14.35	19.43	9.84	73.8	56.0	216.46	2.81	SW
5	18.37	23.31	14.14	113.5	63.8	217.52	2.65	SW
6	21.47	25.47	18.21	175.9	73.1	181.76	2.40	NNE
7	25.35	29.04	22.46	196.5	76.3	172.45	2.62	SW
8	26.99	29.71	23.18	216.0	77.2	175.15	2.49	N
9	21.85	25.78	18.63	196.1	73.0	168.76	2.63	N
10	16.81	21.56	12.76	57.1	63.3	192.88	2.51	SW
11	10.42	15.33	6.27	49.4	56.4	182.92	2.68	SW
12	4.70	9.48	0.80	20.3	48.1	187.89	2.91	SW
Avg.	14.51	19.02	10.74	101.8	61.4	188.63	2.72	SW

의 포항지역 바람장미도에 의하면 전 풍속등급에 걸쳐 대표적인 주풍향이 남서(SW), 서남서(WSW), 서풍(W)으로 나타났으며, 특히 대기오염물질의 이송 및 확산을 결정하는 가장 중요한 인자는 바람에 의하여 대기오염물질의 정성적인 특징이 결정되게 되며, 대상지역 대기질의 정성적인 특성을 파악하기 위해서는 풍향 및 풍속의 정확한 분석이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 최근 10년간의 포항지역 연평균 바람장미도를 작성한 결과, 연평균풍속이 2.7 m/s이며, 무풍이 차지하는 비중이 10% 이내를 나타내었다.¹¹⁾ 따라서 포항지역의 대기오염물질은 해륙풍, 해풍, 곡풍과 함께 기타 영향에 의하여 경주권역으로의 이송 및 확산현상이 원활할 것으로 예상된다.

이와 함께 본 연구에서는 울산지역의 기상개황을 파악하기 위하여 울산기상대에서 관측된 최근 10년간(1994~2003)¹¹⁾의 기상자료를 분석하였으며, Table 4에서는 울산권역의 기상¹¹⁾을 나타내었다. 울산지역의 연평균기온은 14.38°C로 비교적 온화한 편이며, 평균 최고기온은 19.38°C, 평균 최저기온은 10.12°C이다. 또한, 동 기간중 월별 최고 평균기온은 8월에 30.15°C, 최저 평균기온은 1월에 -1.94°C이며, 연교차는 32.09°C이었다. 또한, 계절별 평균기온은 봄철(3, 4, 5월) 13.44°C, 여름철(6, 7, 8월) 24.25°C, 가을철(9, 10, 11월)은 16.12°C, 겨울철(12, 1, 2월)은 3.70°C로 겨울철에도 평균기온이 영하로 내려가지 않는 온화한 지역으로 나타났다. 최근 10년간 연평균 총강수량은 1,280.90 mm를 나타내었으며, 강수량의 계절별 분포를 보면 우기인 6~9월 사이의 강수량이 647.09 mm로 전체 강수량의 49.5%를 차지하여 집중호우의 형태를 보였다. 연

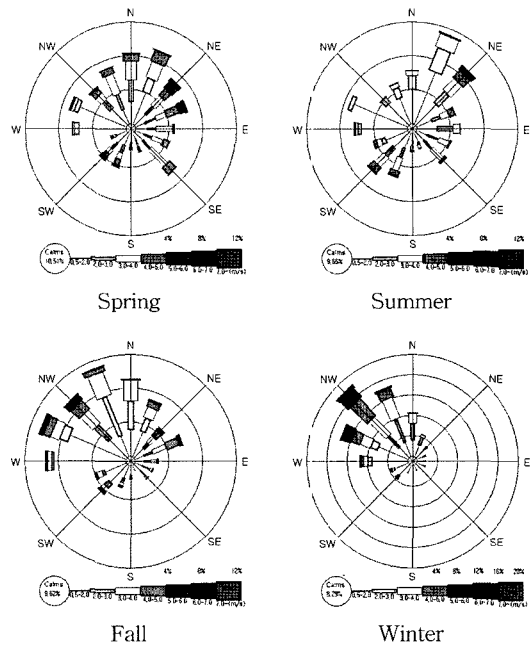


Fig. 4. The wind speed and frequency distribution of wind rose in Ulsan.

평균 총일조시간은 2,166.36 hr이며, 월평균 일조시간은 5월의 207.80 hr이었으며, 최소 일조시간은 7월의 154.67 hr이었다. 천기일수는 10년간의 평균으로서 맑음 119일, 흐림 97일, 서리 36일, 눈 5일, 안개 6일로 나타났다. 주풍량은 북서풍(NW) 및 북북서풍(NNW)으로 조사되었으며, Fig. 4에 바람장미도로 나타내었으며, 울산권역에서 발생한 바람과 환경오염물질이 해륙

Table 4. The meteorological condition and monthly weather in Ulsan

	Temperature (°C)			Precipitation (mm)	Humidity (%)	Dose sunshine (hr)	Wind speed (m/sec)	Wind Direction
	Avg.	Max.	Min.					
1	2.27	7.39	-1.94	41.1	47.7	184.46	2.06	NW
2	4.27	9.70	-0.35	29.6	47.7	184.26	2.35	NNW
3	8.29	13.54	3.52	65.4	52.9	186.77	2.36	NNW
4	13.91	19.42	8.84	86.4	57.7	202.24	2.25	N
5	18.12	23.46	13.20	138.7	64.1	207.80	1.93	NW
6	21.35	25.76	17.55	199.1	72.3	160.80	1.80	NE
7	25.26	29.10	22.07	209.3	76.4	154.67	2.00	WSW
8	26.14	30.15	23.00	238.7	75.8	164.43	1.86	NE
9	21.70	26.09	18.04	137.4	72.9	163.43	1.97	NE
10	16.44	21.95	11.82	65.8	64.8	187.05	1.82	NW
11	10.23	15.87	5.57	49.7	58.6	177.95	1.89	NNW
12	4.57	10.12	0.13	19.8	49.0	190.5	2.07	NW
Avg.	14.38	19.38	10.12	106.7	61.7	180.53	2.03	NW

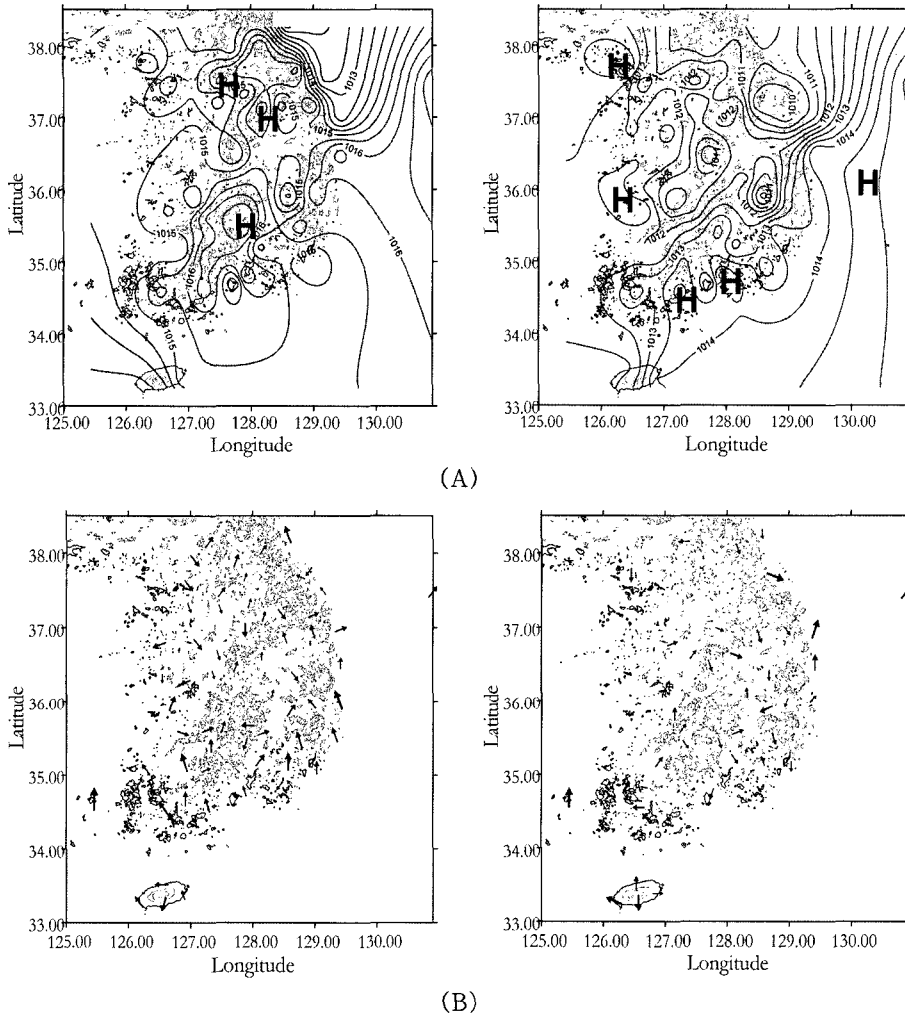


Fig. 5. The distributions of sea level pressure and wind pattern in Korea.^{17,18)} (A) distributions of sea level pressure, (B) distributions of wind pattern.

풍, 해풍, 곡풍 등에 의하여 경주로 이송시키는 것으로 확인¹⁷⁾되었으며, 본 연구자도 10년간의 기상자료를 이용하여 풍향 및 발생빈도를 비교·분석한 결과 북북서풍(NNW) 및 북서풍(NW)의 바람이 울산권의 대기오염물질을 경주권역으로 이송시키는 것으로 예측된다.

Fig. 5에서는 이전의 연구자^{17,18,20)}에 의하여 조사된 한반도 지역의 해면 기압분포와 지상 바람장을 나타낸 것이다. Fig. 5(A)에서 조사된 한반도 지역의 기압분포도는 해안지역 뿐만 아니라 내륙지역에서도 뚜렷한 고기압의 분포를 나타내는 것으로 조사되었으며, 고지대를 중심으로 뚜렷하게 형성된 고기압은 지구복사에 의한 지면의 냉각효과가 대기로 전달되었기 때문이다. Fig. 5(B)에서는 한반도 지역의 지상 바람장의 변화를 조사

한 것으로서 지상의 바람장은 전반적으로 고지대의 정상부에서 저지대로 향하는 바람과 함께 연안지역을 중심으로 육지에서 바다로 불어가는 육풍의 형태로 존재함을 확인하였다. 따라서 경주권을 포함한 한반도 내륙지역의 상대적인 고기압은 일출이후 지면가열에 의한 연안지역의 상대적인 저기압 현상 때문이며, 또한, 특정 시간대에 조사된 바람장은 전반적으로 연안지역에서 내륙지역으로 불어가는 해풍과 함께 저지대에서 고지대로 불어가는 곡풍이 형성되고 있음을 확인시켜 주고 있다. 특히 본 연구에서 조사하고 있는 포항 및 울산권역에서 유입되는 환경오염물질은 국지적인 기압분포의 변화와 함께 영남권역에 유입되는 바람의 분포의 변화 즉, 내륙의 저기압, 해풍, 육풍, 곡풍 및 산풍 등에

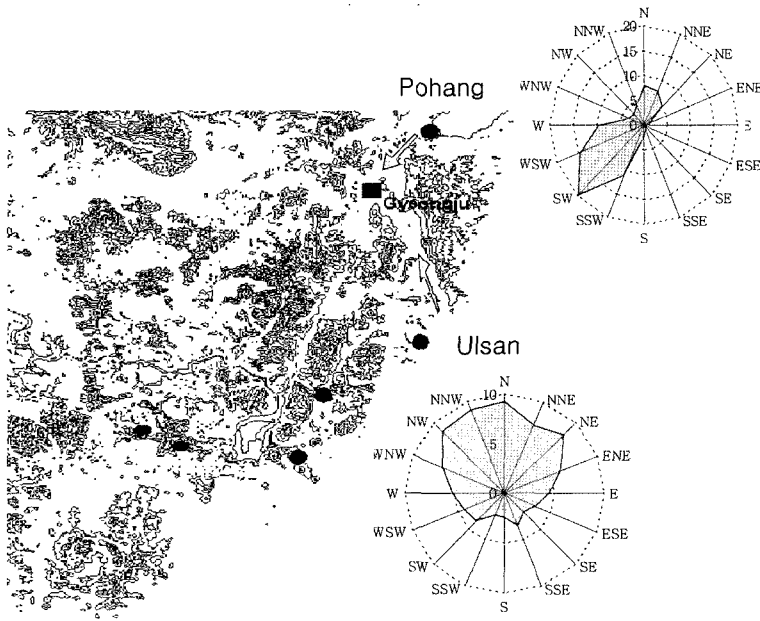


Fig. 6. The Prediction of contaminant input route and wind direction of four seasons at Pohang and Ulsan.

의하여 이동 및 확산되는 것으로 확인되었다.^{1,2,17,18,20,21)}

Fig. 6에서는 조사된 연구결과들을 바탕으로 포항 및 울산권역에서 유입되는 대기오염물질의 대표적인 유입 경로를 예측하였다. 경주와 포항지역에서 발생하는 가을철 바람은 낮과 밤사이의 뚜렷한 일교차에 의해 주기적으로 발생되고 있으며, 겨울철 바람의 주방향은 국지적인 해륙풍의 발생에 의한 것보다는 한반도 전체에 우세하게 발생하는 북서풍 계열의 기압배치에 의해 좌우되고, 뚜렷한 해륙풍이 주기적으로 발생되지는 않는 것으로 보고하고 있다.^{1,17)} 또한, 경주지역 대기오염물질의 농도는 부산, 울산, 경주, 포항 등에서의 대기 모델링과 실측치 농도를 비교한 결과 경주에서 뚜렷한 고농도 경향을 보이고 있으며, 이는 배출된 대기오염물질이 해륙풍과 함께 국지적 대기 순환체인 해풍과 곡풍을 따라 수송된다고 보고하였다.^{1,17,18,20)} 울산권역의 경우에도 시루봉(503 m), 토함산(745 m), 삼태봉(629 m)과 같은 산들이 경주시 천북면에서 울산시 북구지역까지 연결되어 있는 관계로 이 지역으로의 대기오염물질 확산과 이송은 상대적으로 저조할 것으로 예상되나, 울산권역에서 발생된 대기오염물질은 경주에서 울산까지 연결된 산지 옆부분을 따라 이동하게 된다. 특히 저지대, 분지 및 경주에서 울산까지 국도 주변지역을 따라 경주권으로 유입되고 있는 것으로 판단되며, 해풍이 대구

뿐만 아니라 부산 및 양산지역에서도 유입됨을 확인할 수 있다. 또한, 포항의 경우 산악기복이 심한 태백산맥의 끝자락에 자리잡고 있으며, 서북의 2분수령은 청송군 및 영천시와 연결되어 있으며, 남북의 대소산악은 경주시와 경계를 이루고 있다. 따라서 포항지역에서 배출되는 대기오염물질은 태백산맥으로의 확산과 이송은 상대적으로 저조할 것으로 예상되며, 경주권역 저지대가 위치하고 있는 형상강 수계를 이용하여 다량이 환경오염물질이 경주권역으로 유입될 것으로 예상된다. 특히 경주와 포항 7번 국도와 함께 포항제철소를 거쳐 31번 국도 주변에는 환경오염물질의 배출량이 많은 산업체들이 분포하고 있으며, 포항권역의 대기오염물질은 저지대인 형상강 수계, 경주와 포항간 7번 국도, 주변 분지 및 기타 도로를 따라 대기오염물질이 유입¹⁹⁾되는 것으로 판단되며, 포항지역에서 시작된 해풍은 포항에서부터 동서방향으로 내륙까지 형성되어 있는 저지대의 깊은 골을 따라 이동하게 되며, 저지대의 끝자락인 대구와 구미지역까지도 영향을 미칠 수 있을 것으로 예상된다.

Table 5와 Fig. 7에서는 경주권역에서 채취한 토양시료의 중금속농도를 분석하여 추정값을 기술한 것이다. 분석항목은 수소이온농도, PCB, 유기인, 페놀류, 유류, CN, Cd, Cu, Pb, Cr⁶⁺, As, Hg이며, A(총효)지점의

Table 5. The heavy metal concentrations and soil contents according to sampling point (unit : mg/kg)

	A	B	C	D	E	F	G	H	Std. dev.
Cd	0.01	0.03	0.02	0.01	0.06	0.04	0.08	0.07	0.0273
Cu	0.37	1.42	2.39	1.23	0.24	N.D	0.55	0.36	0.7874
As	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	0.03	N.D	0.05	0.07	0.0200
Hg	0.0008	0.0007	0.0025	0.0005	0.09	0.15	0.06	0.07	0.0555
Pb	0.49	0.53	1.38	0.58	0.80	0.92	1.39	1.30	0.3880
Cr ⁶⁺	0.04	0.10	0.02	0.02	0.18	0.42	0.04	0.06	0.1361
Organic-P	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D.	-
PCB	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D.	-
CN	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D.	-
Phenol	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D.	-
Oil	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.	N.D	N.D	N.D.	-

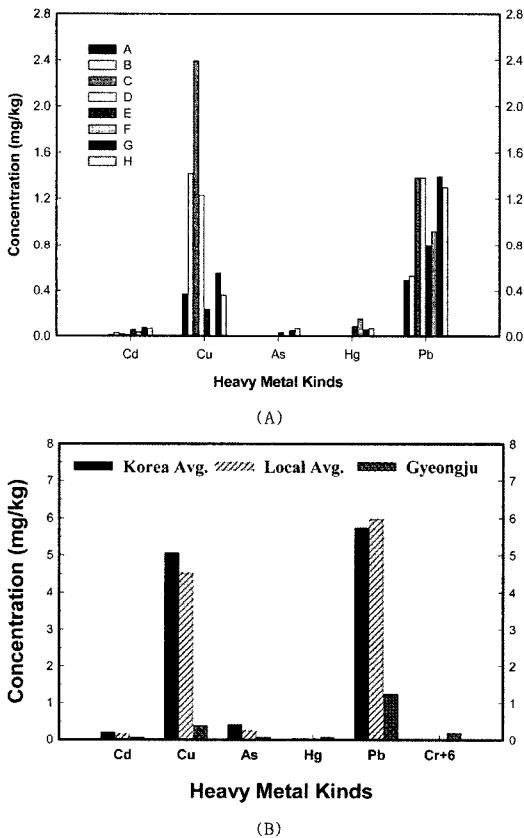


Fig. 7. The comparison of concentration variation according to heavy metals kinds in Gyeongju and another region.

중금속 분석결과 Cd, Cu, Pb는 각각 0.01, 0.37, 0.49 mg/kg을 함유하고 있는 것으로 조사되었고, Hg는 0.0008 mg/kg을 나타내었고 As, 유기인, PCB, CN 등은 검출되지 않았다. B(월정교)지점의 중금속 분석결과 Cd, Cu, Pb, Hg는 각각 0.03, 1.42, 0.53, 0.0007 mg/

kg을 함유하고 있는 것으로 조사되었고, As, 유기인, PCB, CN 등은 검출되지 않았다. C(첨성대)지점의 중금속 분석결과 Cd, Cu, Pb는 각각 0.02, 2.39, 1.38 mg/kg을 함유하고 있는 것으로 조사되었고, Cu의 경우가 he지점의 2~4배 정도 많은 것으로 조사되었다. Hg의 경우는 0.0025 mg/kg으로 높은 Hg의 양을 함유하는 것으로 조사되었지만, 토양오염기준치 이하로 검출되었고, As, 유기인, PCB, CN 등은 검출되지 않았다. D(반월성)지점의 중금속 분석결과 Cd, Cu, Pb는 각각 0.01, 1.23, 0.58 mg/kg을 함유하고 있는 것으로 조사되었으며, Hg의 경우 0.0005 mg/kg으로 타지점보다 낮은 값을 나타내었다. E(동방), F(배반), G(보문), H(천군)지역의 중금속 분석결과 토양중의 중금속 함유량은 Cd : 0.04~0.08 mg/kg, Cu : N.D~0.55 mg/kg, As : N.D~0.07 mg/kg, Hg : 0.06~0.15 mg/kg, Pb : 0.80~1.39 mg/kg, Cr⁶⁺ : 0.04~0.42 mg/kg, Fe : 0.74~1.55 mg/kg, Mn : 0.11~0.49 mg/kg, 그리고 Zn은 1.11~3.56 mg/kg의 범위를 나타내었고, 유기인, PCB, CN 등은 검출 되지 않았으며, 토양오염 조사지점 모두 환경보전법상의 측정항목 모두 기준치를 만족시키는 것으로 조사되었다. 따라서 본 연구에서 조사된 경주지역 토양중의 중금속 함유량의 범위는 Cd은 0.01~0.08 mg/kg, Cu는 N.D~2.39 mg/kg, As는 N.D~0.07 mg/kg, Hg은 N.D~0.15 mg/kg, Pb은 0.49~1.39 mg/kg, 그리고 Cr⁶⁺은 0.02~0.42 mg/kg인 것으로 조사되었으며, 경주지역 중금속 농도는 토양기준치를 하회하는 것으로 조사되었고, 토양환경보전법상의 가장 엄격한 기준인 “가” 지역 기준을 모두 만족한 것으로 나타났다. Fig. 7(B)에서는 우리나라 토양속에 포함된 중금속 평균치와 경주지역 중금속 측정치를 비교하여 나타내었다. 경주지역의 중금속에 의한 토양오염 진행여부는 미소하며, 우리나라의 토양오염 기준과 비교해 볼 때, 이

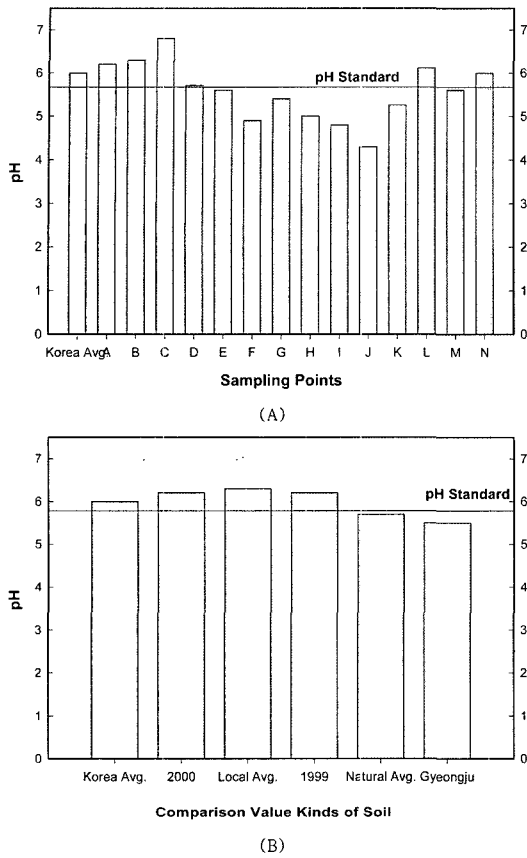


Fig. 8. The comparison of pH variation according to sampling points in Gyeongju and another region.

들에 월철 미치지 못하는 낮은 값으로 확인되었으며, 경주지역 주변 토양의 중금속에 의한 피해는 적을 것으로 판단된다. 그러나 토양오염도 현황과 비교할 때 Hg의 경우에는 전국평균치와 비슷한 수준이고, Cr⁶⁺의 경우에는 다소 높은 편이며, 그 이외 다른 항목들은 모두 낮은 것으로 조사되었다.

한편, Fig. 8에서는 A : 충효지역, B : 반월성지역, C : 침성대지역, D : 서천교지역, E : 동방지역, F : 배반지역, G : 남촌지역, H : 천군지역, I : Expo 지역, J : 영지석불좌상, K : 선도산 고분군, L : 원원사지 석탑 부근, M : 사천왕사지터, N : 남천지역 등에서 채취한 토양의 산성도를 측정하였다. 충효지역에서는 6.2, 반월성지역에서는 6.3~7.0, 침성대지역에서는 6.8~7.2, 서천교지역에서는 5.71~6.7, 동방지역에서는 5.6, 배반지역에서는 4.9, 남촌지역에서는 5.4, 천군지역에서는 5.0, Expo 지역에서는 4.8, 영지석불좌상에서는 4.3, 선도산 고분군에서는 5.26~6.2, 원원사지 석탑 부

근에서는 6.12, 사천왕사지터에서는 5.6, 남천지역에서는 6.0~6.2의 pH 값을 나타내었다. 이와 함께 나정교 지역에서는 5.9, 강동대교에서는 5.94, 서악 일대에서는 7.45로 분석되었으며, 외동지역의 측정 시료에서는 4.12~6.8의 pH 값을 나타내었다. 따라서 측정된 시료의 pH 값은 4.12~7.45 범위를 나타내었으며, 전국적인 기준치보다는 경주지역 일부에서 다소 토양 산성화가 진행되고 있는 과정으로 사료된다. 특히 울산 및 포항지역의 환경오염물질은 내륙의 저기압, 해풍, 육풍, 곡풍 및 산풍 등에 의하여 이동 및 확산되는 것으로 확인되었다.^{1,17,18,20} 따라서 향후 울산, 포항, 부산, 대구, 양산 등으로부터 비산 되어지거나 배출되어지는 황사, 산성비, 대기오염물질 및 자동차 배기가스에 의한 토양산성화와 문화재 훼손에 대한 지속적인 모니터링을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 연구에서는 경주권역에 유입되는 환경오염물질에 의한 문화재에 미치는 영향을 규명하기 위한 연구의 일환으로 경주권역 및 포항과 울산권역의 지형, 대기질, 기상자료를 조사하고, 이전의 연구결과를 바탕으로 경주권역으로의 대기오염물질 이동 및 유입 가능성을 예측하였다. 이상의 연구로부터 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 경주시 대기질 현황조사 결과 PM₁₀은 46~62 µg/m³, SO₂는 0.009~0.011 ppm, NO₂는 0.015~0.020 ppm, CO는 0.6~0.8 ppm, O₃는 0.017~0.032 ppm, Pb는 0.034~0.060 µg/m³의 분포를 나타내었으며, 경주시 전역의 대기질 상태는 모두 낮은 오염도를 나타내었고, 전 지점 모두 대기환경보전법상 기준치 이하인 것으로 나타났다. 또한, 포항시와 울산시 대기질과 비교한 결과, 보문 및 천군지역을 포함한 경주 지역기상이 인근도시와 비교하여 상대적으로 양호한 것으로 판단된다.

2. 포항권역에서 발생된 대기오염물질은 저지대인 형산강 수계, 경주와 포항간 7번 국도, 주변 분지 및 기타 도로를 따라 대기오염물질이 유입되는 것으로 판단되며, 울산권역에서 발생된 대기오염물질은 경주에서 울산까지 연결된 산지 옆부분을 따라 이동하게 되며, 특히 저지대, 분지 및 경주에서 울산까지 국도 주변지역을 따라 경주권으로 유입되고 있는 것으로 판단된다.

3. 경주지역 토양중의 중금속 함유량은 Cd는 0.01~0.08 mg/kg, Cu는 N.D~2.39 mg/kg, As는 N.D~0.07 mg/kg, Hg는 N.D~0.15 mg/kg, Pb는 0.49~1.39

mg/kg, 그리고 Cr⁶⁺은 0.04~0.42 mg/kg인 것으로 조사되었으며, 경주지역 중금속 농도는 토양기준치를 하회하는 것으로 조사되었다.

4. 경주지역 토양시료의 pH는 4.12~7.45 범위를 나타내었으며, 일부지역의 토양산성도는 전국적인 기준치보다는 다소 높으며, 경주 및 인근지역 토양은 울산이나 포항 등으로부터 배출되어진 아황산가스, 질소산화물, 염화수소 등의 대기오염물질과 자동차 배출가스 등에 의하여 토양의 산성화가 일부 지역에서 진행되고 있는 것으로 사료된다. 또한, 울산, 포항, 부산, 대구, 양산 등으로부터 비산되어지거나 배출되어지는 황사, 산성비, 대기오염물질 및 자동차 배가스에 의한 토양산성화와 문화재에 미치는 영향에 대한 지속적인 모니터링을 수행하여야 할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2003년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었으며(KRF-2003-042 C00002), 이에 감사드립니다.

참고문헌

- Jung, J. H., Choi, S. G. and Kim, Y. O. : Analysis of atmospheric phenomena and air quality at Gyeongju, Pohang and Ulsan. *Journal of the Environmental Research*, **1**, 31-49, 2001.
- Jung, J. H. and Choi, S. G. : Damage investigation and conservation measure of stone cultural asset with environmental pollution. *Journal of the Environmental Research*, **1**; 5-28, 2001.
- Jung, J. H., Shon, B. H. and Jung, D. Y. : Analysis of stone cultural asset effect with air pollution contaminant(I) - The occurrence present state of air pollution contaminant with Korea and China. *Journal of the Environmental Research*, **1**, 53-65, 2001.
- Jung, J. H., Shon, B. H. and Lee, G. W. : Analysis of stone cultural asset effect with air pollution contaminant(II) - The effect of air pollution contaminant, acid rain and yellow sand with stone cultural asset. *Journal of the Environmental Research*, **1**, 69-84, 2001.
- 박형동, 장윤섭, 최시영, 이상균, 이준용, 신기혜, 정창엽, 이종윤, 이효성 : 문화재 첨단복원기술 공동연구, 과학기술부, 2004.
- Feng, Q., Sjogren, P., Stephansson, O. and Jing, L. : Measuring fracture orientation at exposed rock faces by using a non-reflector total station. *Engineering Geology*, **59**(1-2), 133-146, 2001.
- Nagano, T. and Nakashima, S. : Study of colors and degrees of weathering of granitic rocks by visible diffuse reflectance spectroscopy, *Geochem. Jour.*, **23**, 75, 1989.
- Hao, T., Wang, Q. and Suh, M. : Gravity prospecting of underground palace of Ming Tombs, China. *Journal of Geophysical Research*, **3**(3), 185-192, 2000.
- 이찬희, 최석원, 한경순, 원경식 : 경주 서악동 삼존불 입상의 기계적 훼손과 보존과학적 접근. *지질학회지*, **7**(4), 611-627, 2001.
- 최석원, 이찬희 : 부여 대조사 화강암 미륵보살입상의 물리적 및 화학적 풍화. *지질학회지*, **36**(4), 559-574, 2000.
- Meteorological Administration, Annual Meteorological Report, 1994-2003.
- 정중현, 최석규, 조세환 : 북천지역 자연학습 체험단지 조성을 위한 기본계획(I)-하상분석, 대기질 및 생태분석-. *한국환경위생학회*, **28**(2), 23-39, 2002.
- 정중현 : 중·소형 폐기물소각로 및 배연탈황공정용 홍합(Hard-Shell Mussel) 해양 패각폐기물 Sorbent 적용기법 연구. *한국환경위생학회지*, **29**(1), 34-42, 2003.
- 정중현, 손병현, 정덕영, 김현규, 이협희 : 폐기물소각로의 유해 대기오염물질 배출 특성. *한국환경위생학회지*, **29**(5), 17-26, 2003.
- 경주시, 통계연보, 2004.
- 울산시, 환경백서, 2004.
- Jung, W. S. : A study on the medium-range transport of air pollutants associated with regional-scale atmospheric circulation system, Ph.D Dissertation, Pusan National University, 2001.
- Hyun, M. S. : The meteorological analysis for interpretation of high ozone concentration appeared at Gyeongju, M.S Dissertation, Pusan National University, 2001.
- 포항시, (2002-2011) 포항시 환경보전 종합계획, 7-27, 2002.
- Lee, H. W., Jung, W. S. and Hyun, M. S. : Meteorological analysis of high ozone concentration in Gyeongju(I). **38**(1), 59-68, 2001.
- Lee, S. I. : Analysis of air quality with asset conservation in Gyeongju area I. *Sorabol College*, **18**, 327-344, 2000.