

실시간 측정을 통한 천안시 대기 중 연간 PM2.5, PM10 농도 특성 조사

허정혁¹, 오세원^{1*}

¹상명대학교 공과대학 환경공학과

Characterization of Annual PM2.5 and PM10 Concentrations by Real-time Measurements in Cheonan, Chungnam

Junghyuk Heo¹ and Sewon Oh^{1*}

¹Department of Environmental Engineering, Sangmyung University

요 약 2015년 대기환경기준에 추가되는 PM2.5의 천안시 대기 중 오염도를 조사하기 위해, 2010년 2월부터 2011년 1월까지 천안시 상명대학교에 광산란방식의 Dust Monitor를 설치하여 대기 중 연간 PM2.5 농도 특성을 PM10 농도와 같이 조사하였다. 측정 기간 중 연평균 PM2.5 농도는 $40.45\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 시행예정인 연평균 기준인 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 일평균 PM2.5 농도는 $2.43\sim 174.84\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 전체 측정 기간 중 약 26%의 측정일이 일평균 기준치인 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 초과하였다. 같은 기간 중 일평균 PM10 농도 기준을 초과하는 측정일 수는 11%로 나타나, PM2.5의 오염도가 PM10에 비해 상대적으로 심각함을 나타냈다. 계절별로는 봄과 겨울철에 높은 PM2.5 농도를 보였으며, 강우의 영향을 많이 받는 여름철의 PM2.5 오염도가 다른 계절에 비해 상대적으로 낮았다. 일 중 PM2.5의 농도 분포는 출퇴근 시간대에 높은 농도를 나타내는 전형적인 도시형 특성을 나타냈으며, 이는 인위적 배출원 중 이동오염원에 의해 생성되는 미세입자가 PM2.5의 주요 성분임을 시사한다.

Abstract From 2015, PM2.5 standards will be added to Korean national ambient air quality standards. To characterize PM2.5 levels in Cheonan, annual PM2.5 concentrations along with PM10 concentrations were investigated between February 2010 and January 2011 using a dust monitor. The annual PM2.5 concentration was $40.45\mu\text{g}/\text{m}^3$ and over the standards($25\mu\text{g}/\text{m}^3$). The daily average PM2.5 concentrations ranged from 2.43 to $178.84\mu\text{g}/\text{m}^3$, and 26% days exceeded the daily PM2.5 standard($50\mu\text{g}/\text{m}^3$). During the same periods, only 11% days exceeded the daily PM10 standard, showing that PM2.5 were more concerning levels than PM10. Seasonal variations showed the highest concentrations in spring and winter, and lowest concentration in summer due to heavy rain fall. Changes in PM2.5 concentrations during the day were remarkable and showed the highest concentrations in commuting periods. The results indicated that the concentrations of PM2.5 in Cheonan were at the concerning level, and mainly from the mobile sources.

Key Words : PM2.5, PM10, Dust monitor, Cheonan

1. 서론

국내의 대기 중 입자상 물질에 대한 환경기준은 1983년 총부유성입자인 TSP(Total Suspended Particle)에 대해 연평균 $150\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 $300\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 기준으로 시행

되어 점진적으로 강화되어 왔다. 현재는 입자 크기에 따른 인체에 미치는 영향을 고려하여 TSP 기준을 삭제하고, 입경이 $10\mu\text{m}$ 이하인 PM10을 미세먼지로 규정하고, 연평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 $100\mu\text{g}/\text{m}^3$ 의 기준을 적용하고 있다. 그러나 최근 직경이 $2.5\mu\text{m}$ 이하의 초미세먼지인

본 논문은 상명대학교 2010년 교내 연구비 지원에 의해 수행되었음.

*교신저자 : 오세원(sewonoh@smu.ac.kr)

접수일 11년 09월 02일

수정일 (1차 11년 12월 12일, 2차 11년 12월 27일)

계재확정일 12년 01월 05일

PM2.5의 인체 영향에 대한 광범위한 연구결과에 기초하여, PM2.5 기준 설정에 대한 필요성이 제기되어 왔으며 [1-3], 미국과 일본을 포함하는 많은 국가에서는 PM10과 함께 PM2.5 기준을 추가하여 대기 중 입자상 물질의 기준을 정하고 있다. 국내에서도 PM2.5 기준 도입에 대한 필요성이 커짐에 따라, 환경부에서는 2011년 환경정책기본법 시행령을 일부 개정하여, PM2.5가 추가된 대기환경 기준을 2015년부터 시행할 것을 예고하였다[4]. 예고된 PM2.5 기준농도는 연평균 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로, 미국과 일본의 기준 농도인 연평균 $15\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 $35\mu\text{g}/\text{m}^3$ 와, 세계보건기구의 권고기준농도인 연평균 $10\mu\text{g}/\text{m}^3$, 24시간 평균 $25\mu\text{g}/\text{m}^3$ 보다는 높은 농도로 설정되었으나[5,6], 향후 점진적인 강화가 예상된다.

PM2.5는 연소과정, 이동오염원과 같은 인위적 배출원에서 발생되며, 응축, 응집 등의 화학적 과정을 통하여 생성되는 미세입자(Fine particle)로, 주로 자연적 배출원에서 기계적 과정에 의해 생성되는 입경 $2.5\mu\text{m}$ 이상의 조대입자(Coarse particle)와 발생원 및 성분에서 차이를 나타낸다[7]. 현재 국내 대기환경측정망에서는 자동측정법인 베타선흡수법 측정기를 이용하여 총 331개 지점에서 PM10을 측정하고 있으나, PM2.5의 전국 측정망은 구축되어 있지 않다. 이에 환경부에서는 2015년까지 PM2.5 측정소를 현재의 4개 지점에서 36개 지점으로 확대하여, 국내 대기 중 PM2.5 오염도를 모니터링 할 계획이다[8]. 이로 인해 국내 주요 거점 지역별 PM2.5 측정 및 자료의 축적은 미미한 실정이며, 지금까지 국내 대기 중 PM2.5 오염도 조사는 일부 연구진을 중심으로 진행되어 왔다. 하지만 이들 조사의 대부분은 서울, 부산 등 주요 대도시가 측정 대상으로 편중되어 있어, 대도시 이외 지역에서의 오염도에 대한 정보가 부족한 실정이다[9-11]. 또한 이들 조사가 대부분 장기간의 연속 측정으로 수행되지 않고 특정기간에 집중적으로 수행되어, 연평균 농도 및 일평균 농도의 연중 분포와 같은 상세한 자료를 도출하지 못한 한계를 가지고 있다[12]. 이에 본 연구에서는 국내 대표적인 중소도시 중의 하나인 천안시를 대상으로, 대기 중 PM2.5 농도를 1년간 연속적으로 측정하여 연중 농도 특성을 분석하고자 하였다.

천안시는 2009년 충남인구의 약 26.6%인 약 551,000명이 거주하는 충남의 산업 및 상업의 중심지로서, 12개 산업단지에 총 677개소의 대기오염배출시설이 있으며, 배출시설은 해마다 증가하는 추세이다[13]. 이에 따라 지역 대기 질 관리에 대한 중요성이 커지고 있으며, 현재 총 3개 대기측정망(원성동, 성황동, 백석동)에서 PM10을 포함하는 지역 대기 질을 측정하고 있다. 이들 측정소에서 측정된 PM10 측정자료를 살펴보면, 천안지역의 연간

PM10 농도는 원성동과 성황동에서는 기준치를 만족하고 있으나, 산업단지에 인접한 백석동의 경우 연간 기준치를 만족하지 못하고 있는 실정이다. 2005년부터 2009년까지 원성동 측정망의 연도별 연평균 PM10 농도는 각각 44, 49, 47, 44, $46\mu\text{g}/\text{m}^3$ 이었으나, 백석동 측정망의 경우 각각 70, 70, 64, 55, $51\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 농도는 감소하고 있으나, 기준치인 $50\mu\text{g}/\text{m}^3$ 을 상회하고 있다[14]. 이는 천안의 대기 중 입자상 물질의 오염도가 지역에 따라 우려할 수준임을 나타내는 것으로, 향후 PM2.5 기준 도입 시 이의 달성여부 역시 불명확한 실정으로 이에 대한 상세한 조사가 필요한 실정이다.

2. 연구방법

천안시 대기 중 PM2.5의 연간 농도 변화를 포함하는 상세 오염 특성을 조사하기 위해, 2010년 2월부터 2011년 1월까지 충청남도 천안시 상명대학교 본관 옥상에 광산란방식(Light Scattering)의 Dust Monitor(Grimm, Model 1.107)를 설치하여 PM2.5 질량 농도를 1분 간격으로 실시간 연속 측정하였다. 측정이 수행된 상명대학교는 비록 천안시의 주요 주거, 행정, 산업지역과 떨어져 있어 측정값이 지역의 대표성을 나타내기는 곤란하나, 경부고속도로가 인접해 있어 지역 내 높은 대기 오염도를 나타내는 지점이다[12]. 천안시는 경부고속도로가 지역을 관통하고 있어, 이로부터 인근 지역에 미치는 소음과 대기 질 악화에 대한 우려가 있어 왔다. Dust Monitor는 약 1.2L/min의 대기시료를 유입하여 레이저 광원에서 발생하는 빛이 각 입자에 의해 산란되는 레이저 신호를 이용해 입자의 크기를 15개의 구간으로 구분하여, 각 구간의 입자의 수를 질량 농도로 전환하는 측정 장치로서, TSP, PM10, PM2.5, PM1과 같은 입자의 크기별 농도의 실시간 동시 측정이 가능한 장점을 가지고 있다. 이와 함께 Dust Monitor에 기상측정장치(Grimm, Model 165 Weather Housing)를 장착하여 PM2.5 농도 측정과 동시에 온도, 습도, 압력, 풍향 및 풍속을 포함하는 기상자료를 측정하였는데, 표 1에 측정 기간 동안의 각 월별 주요 기상현황을 기술하였다. 1분 간격으로 측정된 PM2.5 농도는 국내 대기환경의 기준인 0°C , 1기압의 표준 상태로 환산한 후, 각 측정일별 24시간 평균 농도를 산출하여 기준치와 비교하였다. 또한 측정기기의 신뢰도를 확인하기 위해 24시간 평균 PM10 농도를 산출하여, 천안지역 국가 대기측정망에서의 측정치와 비교하였다.

[표 1] 연구기간 중 월별 주요 기상현황

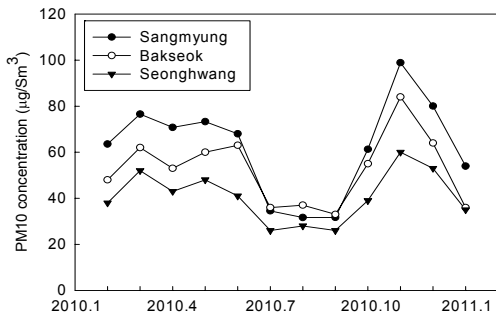
[Table 1] Average meteorological conditions during the study

	온도 (°C)	상대습도 (%)	풍속 (m/sec)
2010. 2	3.7	60.5	0.85
2010. 3	6.6	58.9	1.19
2010. 4	11.2	55.8	1.23
2010. 5	18.9	58.6	1.06
2010. 6	24.3	63.5	0.66
2010. 7	26.9	71.3	0.99
2010. 8	27.6	75.5	0.82
2010. 9	22.7	72.8	0.75
2010. 10	15.3	67.4	0.65
2010. 11	8.0	58.5	0.97
2010. 12	1.8	61.3	1.04
2011. 1	-3.3	57.4	0.84

3. 결과 및 고찰

3.1 국가대기측정망과의 PM10 농도 비교

본 연구 측정치의 신뢰성을 확인하기 위해, 연구기간 중 상명대학교에서 측정된 PM10 농도와 천안지역 국가 대기측정망 중 측정지점과 인접한 위치에 있는 백석동과 성황동 측정망에서 보고된 PM10 농도를 비교하였다. 현재 국가측정망에서는 PM10만을 측정하고 있으며, 일부 측정망에서 측정되고 있는 PM2.5농도는 발표되지 않고 있어, PM10 자료만을 이용하여 농도를 비교하였다. 그림 1에는 본 연구의 측정치와 국가측정망 자료의 월 평균 PM10 농도를 도시하였는데, 그림에 나타난 바와 같이 측정치가 기존 측정망의 PM10 농도 변화 흐름이 유사한 형태를 보이고 있어, 측정치의 신뢰성을 간접적으로 확인할 수 있었다.

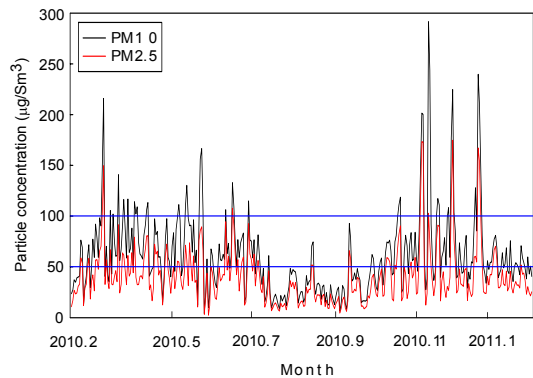


[그림 1] 국가측정망과 월평균 PM10 농도
[Fig. 1] Comparison of monthly average PM10 concentrations to the values measured at National monitoring sites

2010년 2월부터 2011년 1월에 상명대학교에서 측정된 일평균 PM10 농도는 4.14~291.74µg/m³의 범위로, 연평균 농도가 61.23µg/m³으로 국내 연평균 대기환경기준(50µg/m³)을 초과하였다. 또한 측정기간의 약 11%에 해당하는 40회의 일평균 농도가 대기환경기준(100µg/m³)을 초과하고 있어, 측정지점의 PM10 오염도가 우려할 수준임을 나타내었다. 같은 기간 성황동 국가측정망의 PM10 일평균 농도는 3.50~183.88µg/m³의 범위로, 연평균 농도가 40.54µg/m³로 대기환경기준을 만족하고 있어, 본 연구진의 측정치와 큰 차이를 보이고 있다. 반면 백석동 측정망의 경우, 일평균 농도의 범위는 1.67~236.46µg/m³, 연평균 농도는 51.24µg/m³으로 국내대기환경기준을 초과하였으며[15], 측정기간의 약 8%에 해당하는 29일의 일평균 농도가 일평균기준을 초과하는 것으로 나타나 본 연구진의 측정치와 유사한 오염도를 나타내고 있다. 이는 백석동과 상명대학교 측정지점이 천안의 주요 산업단지와 교통량이 많은 중심 상업지점에 인접하고 있어, 유사한 오염도를 보이는 것으로 판단된다. 이와 함께 상명대학교 측정지점은 교통량이 많은 경부고속도로에 인접하고 있어 이의 영향으로 세 지점 중 가장 높은 오염도를 나타내는 것으로 사료된다.

3.2 연간 PM2.5 농도 특성

2010년 2월부터 2011년 1월까지 상명대학교 본관 옥상에서 Dust Monitor로 측정된 천안시 대기 중 일평균 PM2.5 농도변화를 PM10 농도와 같이 그림 2에 도시하였으며, 상세한 분포 특성을 표 2와 그림 3에 나타냈다.



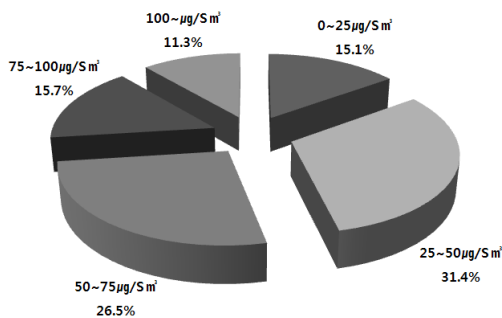
[그림 2] 연간 일별 PM2.5, PM10 농도 변화
[Fig. 2] Annual daily average PM2.5 and PM10 concentrations during the study

표 2에 기술한바와 같이 측정된 PM2.5 일평균 농도는 2.43~174.84µg/m³의 범위였으며, 연평균농도가 40.45µg/m³

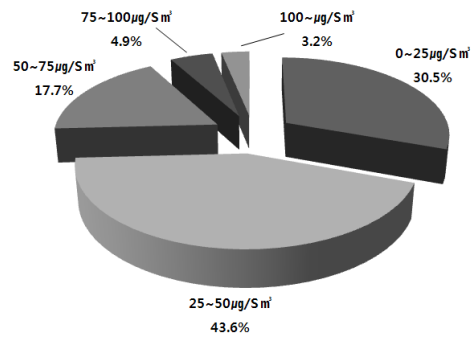
m³으로, 2015년 시행예정인 연평균 기준치인 25 μ g/m³을 초과하였다. 일평균 PM2.5 농도 분포는, 25 μ g/m³ 이하의 저농도가 전체의 30.5%, 25~50 μ g/m³이 43.6%, 50~75 μ g/m³은 17.7%, 75~100 μ g/m³은 4.9%, 100 μ g/m³이상의 고농도가 3.2%를 차지하였으며, 연간 Dust Monitor가 가동된 총 344일의 측정 기간 중 일평균 기준치인 50 μ g/m³를 초과한 일수가 89회로 약 26%의 초과 비율을 보였다. 이는 앞서 분석한 PM10의 기준 초과 비율인 11%의 2배를 상회하는 값으로, 측정지역의 대기입자 중 미세입자(Fine particles)의 오염도가 상대적으로 심각함을 보여준다. 측정된 PM10 중 미세입자인 PM2.5가 차지하는 비율은 67.0 \pm 1.3%(95%신뢰구간)으로 나타났다. 이상의 결과는 측정지점 대기 입자는 인위적 배출원에서 발생하는 미세입자가 주요한 구성 성분임을 나타내는 것으로, 향후 천안시 대기입자의 효과적인 제어를 위해서는 이동오염원을 포함하는 인위적 배출원으로 부터 입자의 생성을 저감할 수 있는 대책이 가장 중요한 요소임을 시사한다.

[표 2] 천안시 대기 중 PM2.5, PM10 농도 특성
 [Table 2] Detailed values of daily average PM2.5 and PM10 concentrations measured in Cheonan (μ g/S m³)

	평균	최소	최대	표준 편차	
PM2.5	봄	45.15	2.43	91.57	19.96
	여름	31.77	6.56	107.86	21.66
	가을	40.04	4.56	173.34	31.79
	겨울	45.18	10.77	174.84	30.91
	연	40.45	2.43	174.84	27.19
PM10	봄	73.16	4.14	166.53	32.47
	여름	43.48	8.49	133.02	26.68
	가을	63.13	6.38	291.74	49.58
	겨울	65.92	12.88	239.79	42.05
	연	61.23	4.14	291.74	40.23



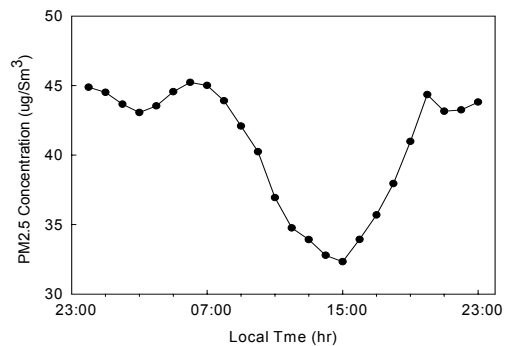
(1) PM10



(2) PM2.5

[그림 3] 일평균 PM2.5, PM10 농도 분포
 [Fig. 3] Distribution of daily average PM2.5 and PM10 concentrations

한편 일중 시간대별 오염 특성을 파악하기 위해, PM2.5 측정치를 1시간 평균 농도로 구분하여 분석하였다. 대부분의 측정기간 동안 일 중 PM2.5 농도는 시간대에 따라 많은 변화를 보였는데, 그림 4에 본 연구에서 얻어진 전형적인 시간대별 농도변화(연간평균치)를 도시하였다. 그림 3에 나타난 바와 같이 일 중 PM2.5 농도는 교통량이 증가하는 출근 시간대인 오전 6-8시에 최대농도를 보인 후 감소하다가, 퇴근 시간대인 오후 5시 이후에 다시 증가하는 전형적인 도시형 특성을 나타내고 있다. 이상의 결과는 본 연구 지역의 대기 중 PM2.5의 주요한 배출원이 이동오염원임을 나타내는 것으로, 향후 효과적인 PM2.5 제어를 위해서는 이동오염원에 대한 고려가 중요한 요소임을 보여준다. 이와 함께 교통량이 감소하는 오후 9시 이후부터 새벽까지 높은 PM2.5 농도가 지속되고 있는데, 이는 이 시간대 지표면 온도의 감소에 따른 역전층의 형성으로 오염물질의 분산이 원활하게 이루어지지 못하기 때문으로 사료된다.



[그림 4] 일 중 시간대별 PM2.5 농도 변화
 [Fig. 4] Changes of hourly average PM2.5 concentrations during the day

4. 결론

2010년 2월부터 2011년 1월 까지 천안시 대기 중 PM2.5의 연간 농도 특성을 조사하여 다음의 결과를 도출하였다. 연구 기간 중 천안시 연평균 PM2.5 농도는 40.45 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 으로 2015년 시행예정인 연평균 기준치를 초과하였으며, 일평균 농도의 경우 전체 측정 기간 중 약 26%의 측정일이 일평균 기준을 초과하였다. 한편 PM10 중 미세 입자인 PM2.5가 차지하는 비율을 분석한 결과 측정지점의 입자상 오염물은 인위적 배출원에 의한 발생 비율이 높다는 것을 확인할 수 있었으며, 시간대별 농도 변화를 통하여 인위적 배출원 중 이동오염원이 PM2.5의 주요 배출원임을 알 수 있었다. 계절별로는 봄, 겨울철의 오염도가 상대적으로 높았으며, 황사 발생이 없고 강우의 영향을 많이 받는 여름철 오염도가 가장 낮게 나타났다. 이상의 결과는 천안시의 경우, 대기 중 PM2.5에 대한 성분분석과 이에 기초한 오염원 추정 등 상세한 조사를 통해 효과적인 PM2.5 저감대책의 수립이 필요함을 시사한다.

References

[1] Klemm, R.J., R.M. Mason Jr., C.M. Heilig, L.M. Neas, and D.W. Dockery, "Is daily mortality associated specifically with fine particles? Data reconstruction and replication of analyses", *Journal of Air and Waste Management Association*, 50, pp.1215-1222, 2000.

[2] Kang, C.M., Park, S.K., Sunwoo, Y., Kang, B.W., Lee, H.S., "Respiratory Health Effects of Fine Particles (PM_{2.5}) in Seoul", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 22, No. 5, pp.554-563, 2006.

[3] Lighty, J.S., J.M. Veranth, and A.F. Sarofim, "Combustion aerosols: Factors governing their size and composition and implications to human health", *Journal of Air and Waste Management Association*, 50, pp.1565-1618, 2000.

[4] Korea Government, Gazette No. 17475, The date of issue 2011. 3. 29

[5] Md. Firoz Khan, Yuichiro Shirasuna, Koichiro Hirano, Shigeki Masunaga, "Characterization of PM_{2.5}, PM_{2.5-10} and PM_{>10} in ambient air, Yokohama, Japan", *Atmospheric Research*, 96 pp.159-172, 2010

[6] U.S. EPA, National Ambient Air Quality Standards For Particulate Matter; Final Rule, Federal Register, Part II Environmental Protection Agency, Vol. 72, No. 79,

2007

[7] William C. Hinds, "Properties, Behavior, and Measurement of Airborne Particle", *Aerosol Technology*, pp. 1-13, 1998.

[8] Ministry of Environment, 2010 Environmental Statistics Yearbook, No. 23

[9] Kim, T.S., Park, J.S., Kim, S.D., Han, J.S., "A Study on the Characteristics of PM₁₀ and PM_{2.5} in Seoul metropolitan area", *Journal of Korean Society of Urban Environment*, Vol. 5, No. 2, pp.13-27, 2005.

[10] Park, K.H., Jo, J.K., Jeon, B.K., Yoo, S.Y., Choi, K.C., "PM2.5 Chemical Composition and Source Identification Study in Southeast Busan Coastal Area", *Construction Environment Research*, Vol. 3, No. 4, pp. 29-39, 2004.

[11] Park, J.Y., Lim, H.J., "Characteristics of Water Soluble ions in Fine Particles during the Winter and Spring in Daegu", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 22, No 5, pp.627-641, 2006.

[12] Lee, H.M., Oh, S.W., "Characterization of PM10 and PM2.5 in Cheonan Area Using a Dust Monitor", *Journal of Korean Society for Atmospheric Environment*, Vol. 24, No. 3, pp.367-375, 2008.

[13] Korea industrial Complex Corp, Korea industrial Complex Directory 2009

[14] Ministry of Environment, Annual Report of Ambient Air Quality in Korea, 2005, 2006, 2007, 2008, 2009

[15] Ministry of Environment, Monthly Report of Ambient Air Quality in Korea, February 2010 and January 2011

허정혁(Junghyuk Heo)

[정회원]



- 2010년 2월 : 상명대학교 환경공학과 (공학사)
- 2010년 3월 ~ 현재 : 상명대학교 바이오환경기반공학과(석사과정)

<관심분야>

대기오염제어, 대기오염물 분석

오 세 원(Sewon Oh)

[정회원]



- 1990년 2월 : 서울대학교 공업화학
학과 (공학사)
- 1992년 2월 : 서울대학교 공업화학
학과 (공학석사)
- 2001년 5월 : University of
Florida, 환경공학과 (공학박사)
- 2001년 9월 ~ 현재 : 상명대학
교 환경공학과 교수

<관심분야>

대기오염제어, 대기오염물 분석