

대구 안심연료단지 환경오염물질 노출 평가(Ⅲ) - 원소 탄소, 결정형 실리카 및 안정동위원소비를 이용한 오염원 기여율 및 분포특성 -

정종현^{1*} · 피영규 · 손병현² · 배혜정 · 양원호³ ·
김지영⁴ · 김근배⁴ · 최종우⁴ · 박성준⁵ · 이관⁵ · 임현술⁵

¹대구한의대학교 보건학부, ²한서대학교 환경공학과,
³대구가톨릭대 산업보건학과, ⁴국립환경과학원, ⁵동국의대 예방의학교실

Exposure Assessments of Environmental Contaminants in Ansim Briquette Fuel Complex, Daegu(Ⅲ) - Contribution and distribution characteristics of air pollutants according to elemental carbon, crystalline silica, and stable isotope ratio -

Jong-Hyeon Jung^{1*} · Young-Gyu Phee · Byung-Hyun Shon² · Hye-Jeong Bae · Won-Ho Yang³ ·
Ji-Young Kim⁴ · Geun-Bae Kim⁴ · Jong-Woo Choi⁴ · Sung-Jun Park⁵ · Kwan Lee⁵ · Hyun-Sul Lim⁵

¹Faculty of Health Science, Daegu Haany University

²Dept of Environmental Engineering, Hanseo University

³Department of Occupational Health, Catholic University of Daegu

⁴National Institute of Environmental Research

⁵Department of Preventive Medicine, Dongguk University College of Medicine

ABSTRACT

Objectives: This study measured and analyzed the concentrations of crystalline silica, elemental carbon and the contribution ratio of pollutants which influence environmental and respiratory disease around the Ansim Briquette Fuel Complex in Daegu, Korea.

Methods: We analyzed the crystalline silica and elemental carbon in the air according to FTIR(Fourier Transform Infrared Spectroscopy) and NIOSH(National Institute of Occupation Safety and Health) method 5040, respectively. In addition, lead stable isotopes, and carbon and nitrogen stable isotopes were analyzed using MC-ICP/MS(Multi Collector-Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometer), and IRMS(Isotope Ratio Mass Spectrometer), respectively.

Results: The concentration of crystalline silica in the direct exposure area around the Ansim Briquette Fuel Complex was found to be 0.0014 ± 0.0005 mg/S m^3 , but not to exceed the exposure standards of the ACGIH(American Conference of Governmental Industrial Hygienists). In the case of the autumn, the direct exposure area was found to show a level 2.5 times higher than the reference area, and on the whole, the direct exposure area was found to have a level 1.4 times higher than the reference area. The concentration of elemental carbon in the direct exposure area and in the reference area were found to be 0.0014 ± 0.0006 mg/S m^3 , and

*Corresponding author: Jong Hyeon Jung, Tel: 053-819-1418, Fax: 053-819-1412, E-mail: airgas@dhu.ac.kr
Faculty of Health Science, Daegu Haany University. 1 Hannydae-ro, Gyeongsan-si, Gyeongbuk 712-715
Received: September 10, 2015, Revised: September 16, 2015, Accepted: September 25, 2015

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

$0.0006 \pm 0.0003 \text{ mg/Sm}^3$, respectively. This study confirmed the contribution ratio of coal raw materials to residentially deposited dusts in the area within 500 meters from the Ansim Briquette Fuel Complex and the surrounding area with a stable isotope ratio of 24.0‰(0.7-62.7‰) on average in the case of carbon and nitrogen, and 33.9‰(26.6-54.1‰) on average in the case of lead stable isotopes.

Conclusions: This study was able to confirm correlations with coal raw materials used by the Ansim Briquette Fuel Complex and the surrounding area. The concentration of some pollutants, crystalline silica, and elemental carbon emitted to the direct-influence area around the Ansim Briquette Fuel Complex were relatively higher than in the reference area. Therefore, we need to impose continuous and substantive reduction countermeasures in the future to prevent particulate matter and coal raw materials in the study area. It is time for the local government and authorities to prepare active administrative methods such as the relocation of Ansim Briquette Fuel Complex.

Key words: briquette fuel complex, crystalline silica, elemental carbon, stable isotope ratio, respiratory disease

I. 서 론

최근 환경오염물질로 인한 심각한 피해가 우려되는 지역을 중심으로 환경보건평가 및 지역주민건강 영향조사가 정부와 지자체를 중심으로 수행되고 있다. 2003년부터 울산·온산지역 주민들을 대상으로 환경노출 및 생태지표 모니터링 사업을 진행하고 있으며, 2006년을 기점으로 시화·반월, 포항, 광양만, 청주지역 등에서 환경오염 노출수준 및 생태지표 모니터링 사업이 수행되고 있다(Jung, 2008; MoE, 2009; NIER, 2010; Jung, 2012; Jung et al., 2012; Kim et al., 2012; Lee et al., 2012; NIER, 2014).

한편, 대구광역시 동구 안심연료단지는 1971년부터 대구 인근지역에 있던 연탄공장이 집단으로 이주하여 연탄을 생산하는 연료단지를 형성하였으며, 이후 시멘트·레미콘 공장이 추가적으로 입주하였다. 과거 연탄공장은 대부분의 경우 철로와 인접한 도심지 주거지역 내에 위치한 경우가 많았다. 특히 덮개가 설치되어 있지 않은 저탄장이 노천에 설치되어 있는 경우에는 바람의 이류 및 확산 등에 의하여 연탄입자와 비산먼지 및 각종 분진이 지역주민들의 생활권역에 손쉽게 노출되어 집단적인 환경민원 문제가 지속적으로 제기되기도 하였다(Jeon et al., 1996; Jung et al., 1996; Jung et al., 1997; Cho et al., 1997; Jung, 2008; NIER, 2010; Kang et al., 2012; Jung, 2012; Jung, 2014; NIER, 2014; Jung et al., 2015).

우리나라에서 최초로 보고된 진폐(Pneumoconiosis) 사건으로는 서울특별시 상봉동 연탄공장 주변지역 주민들에게서 발생한 사건이 있으며, 진폐증의 원인 물질로는 무연탄과 석탄입자 등 입자상물질에 의한

영향을 받은 것으로 보고되었다. 진폐증 사건의 진행 과정으로 연탄공장 주변지역에서 8년 동안 거주하였던 40대 가정주부가 1983년부터 호흡기계 질환에 노출되어 치료를 받던 중 1986년 국립의료원에서 진폐증 환자로 판정된 사건이 있다(Jang & Lim, 2008; NIER, 2014). 대기 중 입자상물질에는 양이온, 음이온, 중금속 및 미량금속 성분 등이 포함되어 있으며, 입자의 크기와 화학적 물성에 따라 다양하게 구분된다. 장기간 노출될 경우 지역주민들의 건강에 위해를 유발하고 시정 악화, 산업활동 장애, 시민의 체감오염도 악화, 건강 피해 및 의료비용 증가, 환경성 질환 및 호흡기계 질환 유발, 식물의 광합성 작용 등에 악영향을 유발하여 최근 주요한 사회문제로 부각되고 있다(Jeon et al., 1996; Jung et al., 1996; Jung et al., 1997; Cho et al., 1997; Jung, 1999; Jung, 2008; NIER, 2010; Jung, 2012; Jung et al., 2012; Jung, 2014).

환경오염물질 중에서 입자상물질의 경우 무거운 것은 지면으로 침적되며, 가벼운 것은 대기 중으로 비산된다. 특히 진폐증과 호흡기계 질환에 영향을 미치는 석탄입자와 무연탄이 함유된 비산먼지는 장기간에 걸쳐 주거지역에 노출될 경우 호흡기계 질환 및 환경성 질환을 유발할 수 있고, 의료비용의 증가 및 노동력의 상실 등과 같은 사회 이차 비용의 증가 문제를 초래할 수 있다(Jung et al., 1996; Jung et al., 1997; Jung, 1999; Jung, 2008; NIER, 2010; Jung, 2012; Jung et al., 2011; Jung, 2014). 그러나 국내의 경우 환경성 질환 및 인체영향에 관한 선행연구는 대기오염물질 등을 중심으로 분석하고 특성을 평가하는 방식으로 진행되어 왔고, 특히 원소 탄소(Elemental Carbon, EC) 및 안정동위원소를 이용한

오염물질 및 오염원 기여율 평가에 대한 기초연구는 부족한 실정이다.

따라서 이 연구에서는 안심연료단지 주변지역 주민의 건강피해와 환경오염 실태를 파악하고 관리방안을 마련하기 위하여 대기 중 결정형 실리카 (Crystalline silica, Quartz) 및 원소탄소를 분석하였다. 또한, 안정동위원소를 이용하여 안심연료단지 주변지역 주민들이 거주하고 있는 주택지역 오염원 기여율 평가작업을 수행하였다. 향후 안심연료단지 주변지역 주민들의 환경오염 노출 실태와 건강영향 문제를 해결하기 위한 기초자료로 활용하고자 한다.

II. 연구내용 및 방법

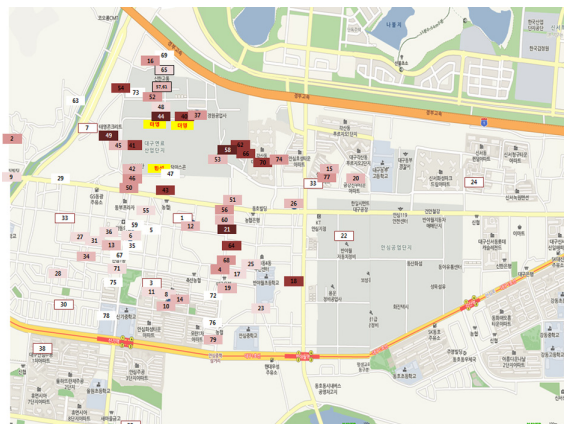
1. 연구 대상지역

대상지역에는 연탄(3개)과 레미콘(1998년 이전에는 시멘트 생산) 공장, 아스콘 및 콘크리트공장 등 6개 업체가 가동 중이다. Figure 1은 안심연료단지 시료채취 위치도를 나타낸 것이다. 시료채취는 안심연료단지의 동·서·남·북방향으로 총 4개의 지점(A, B, C, D)을 선정하였으며, 참고지역(E) 1개 지점을 선정하여 직접영향권역에서의 측정결과와 비교하였다(NIER, 2014).

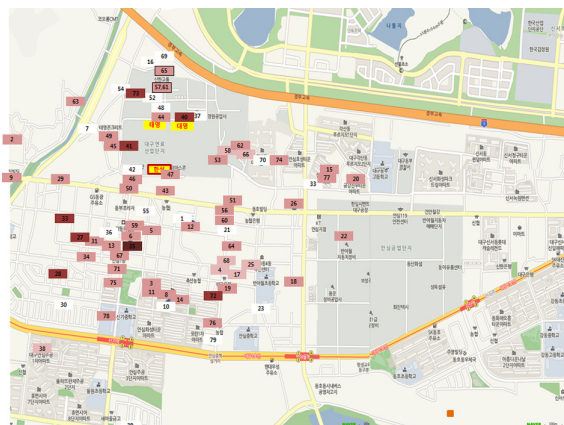
한편, Figure 2(A)에서는 탄소·질소 안정동위원소비를 이용한 주택 침적먼지의 조사지점을 자세히 나



Figure 1. Sampling point of this study



(A)



(B)

Figure 2. Sampling points of deposited dust for the calculation of stable isotope ratio(A: carbon and nitrogen. B: lead)

타내었다. 이 연구에서는 탄소·질소 안정동위원소비를 이용한 주택 침적먼지 기여율을 평가하기 위하여 73곳의 대상지역에서 시료를 채취하여 분석하였다. 또한, Figure 2(B)에서는 납 안정동위원소비를 이용한 주택 침적먼지 조사지점을 상세히 나타내었다. 납 안정동위원소비 이용한 주택 침적먼지 기여율 평가를 위하여 61곳의 대상지역에서 시료를 채취하여 측정 및 분석작업을 수행하였다(NIER, 2014).

2. 시료 채취 및 분석 방법

1) 시료채취 및 항목

대상지역에서 주민들이 거주하는 지점별로 계절별 오염물질의 농도 변화를 분석하였다. 대기오염물질

시료 채취는 2013년 8월 11일부터 2014년 2월 21일 사이에 수행하였다. 여름철의 경우 장마와 태풍 등 기상현상을 고려하여 2013년 8월 11일부터 8월 27일 시료를 포집하였다. 가을철의 시료채취는 비와 눈 등 농도에 영향을 줄 수 있는 기상조건 등을 감안하여 10월 9일부터 10월 22일까지 진행하였다. 겨울철의 시료채취는 2014년 1월 18일부터 2월 21일까지 측정하였다(NIER, 2014).

입자상물질 중 결정형 실리카 및 원소탄소의 농도 분포 및 노출특성을 파악하였다. 이와 함께 안정동위원소 이용 주택지역 오염원 기여율 평가를 위한 시료채취는 안심연료단지 및 주변지역에서 현장 조사와 더불어 수행하였다. 시료채취 기간은 2014년 1월 7일부터 3월 30일까지였으며, 시료채취 대상은 연료단지와 거리를 고려한 시료(방위, 거리 고려)와 환자군이 위치한 지점 등을 고려하였다. 안정동위원소를 이용하여 안심연료단지 주변지역 주민들이 거주하고 있는 주택지역 오염원 기여율 평가작업을 수행하였다(NIER, 2014).

2) 분석방법

(1) 결정형 실리카와 원소탄소

호흡성먼지 내 원소탄소 확인을 위하여 미국국립산업안전보건연구원(National Institute for Occupational Safety & Health, NIOSH) 5040 방법에 준하여 호흡성 먼지를 채취하였고, aluminum cyclone에 pre-loaded된 heat treated quartz filter를 사용하였다. 특히 공기 중 호흡성 분진의 포집은 직경 37 mm, 공극 5 μ m인 PVC 여과지(Gelman Sciences, Ahn arbor, Michigan, USA)가 들어있는 카세트를 aluminum cyclone(SK, USA)에 장착시켰다. 사이클론은 공기시료 채취기(SKC Inc, Illinois, USA)에 연결하였다. 공기시료 포집기의 유량은 건식유량보정계(BIOS Defender 510, USA)를 이용하여 각각 분당 2.5 liter로 보정하였다. 여과지는 포집 전과 분석 전에 항상 흡습기에서 24시간 건조시킨 후 사용하였다. 또한 필터의 정전기 영향을 배제하기 위해 정전기제거장치(Model 4000464, SIMCO, USA)를 이용하여 포집전·후에 정전기를 제거하였다. 중량분석은 0.01 mg의 감도를 가진 천평기(CP244S, Sartorius, Germany)를 사용하여 5회 반복하여 칭량하되 최대값과 최소값을 제거한 후 평균값을 사용하였다. 여과지

는 채취 후 오염이나 손실을 방지하기 위하여 glass petri dish를 이용하여 시료를 보관하고 이동시켰다(NIER, 2010; NIER, 2014).

결정형 실리카의 분석은 FTIR(Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, Cary 600, Agilent, USA)을 이용하였다. KBr은 습기를 제거하기 위해 110~120℃에서 하룻밤 건조시킨 후 사용하였고, 시료의 전처리에는 muffle furnace에서 2시간 동안 여과지 및 유기물을 회화시켰다. KBr 200 mg을 시료에 첨가 막자사발을 사용하여 혼합시켰으며, 직경 13 mm의 펠렛을 만들고 이 펠렛을 FT-IR 기기 내에 장착하였다. 검색대상 주사범위는 2000 cm^{-1} ~400 cm^{-1} 이었고, 공여과지에 대한 분광도 보정을 기본으로 하였다. 정량분석을 위해 사용된 표준물질(1878a respirable quartz, NIST, USA)의 특징적인 피크는 799 cm^{-1} 을 이용하여 결정형 실리카를 분석하였다(NIER, 2010; Bae et al., 2013; NIER, 2014; Kim et al., 2014; Kim et al., 2015). 결정형 실리카 분석을 위한 FTIR의 분석 조건은 Table 1에 자세히 나타내었다.

한편, 공기 중 원소탄소의 평가는 NIOSH의 5040 방법에 따라 실시하였다. 고온전기로부터 전처리된 37 mm 석영여과지(SK Inc., USA)에 저농도 원소탄소 검출이 용이하도록 4.2 LPM 사이클론(GK2.69, BGI Inc., USA)을 사용하여 50% cut-point가 4 μ m인 호흡성 분진을 채취한 후, 여과지에서 1.5 cm^2 잘라내 OC/EC 분석기(Sunset Laboratory Inc., USA)로 원소탄소 농도를 정량 분석하였다(NIER, 2014).

시료의 전처리는 대기 먼지 포집시료 및 주택 침적 먼지 시료는 탄소동위원소비 분석의 경우 여과지

Table 1. Experimental condition of Fourier Transform Infrared Spectrophotometer

Source	Rear : MIR source
Detector	Front : DLa TGS, Ambient
Beam splitter	Multi-layer on KBr
Spectral range	4,000-400 cm^{-1} (single beam)
Maximum resolution	0.25 cm^{-1}
Number of sample scans	20
Number of background scans	20
Resolution	4.0 cm^{-1}
Scan speed	5 kHz

Table 2. Experimental condition of Isotope Ratio Mass Spectrometer

Program Setting Parameter	N ₂	CO ₂	SO ₂
Combustion tube temperature	1150℃		
Reduction tube temperature	850℃		
Adsorption column standby temperature	45℃		
Adsorption column cooling temperature	60℃		
Flush time	25 sec		
O ₂ delay time	5 sec		
Integrator reset delay peak	15 sec	1 sec	1 sec
Peak anticipation	130 sec	130 sec	150 sec
Desorption temperature	45℃	90℃	220℃
Source Parameter			
Accelerating voltage(V)	3795.63	3959.29	2440.87
Extraction voltage	72	75.98	66.23
Half plate differential(V)	-96.57	-95.78	-72
Z plate voltage(V)	-69.94	-82.95	-41.65
Electron volts(eV)	73.89	69.92	71.76
Ion repeller voltage(V)	-5	-4	-5
Trap current (uA)	200	200	200
Magnet current(mA)	4000	3000	3800

시료를 염산원액을 이용하여 산혼증방법으로 무기탄소를 제거 후 동결 및 건조하여 분석작업을 수행하였다. 질소 안정동위원소비는 전처리 없이 바로 분석하였다. 토양시료와 같은 고체 시료는 1 N HCl로 무기탄소 제거 후 동결건조 하여 IRMS로 분석하였으며, Table 2에서는 IRMS 기기의 분석조건을 상세히 나타내었다.

또한, 탄소 및 질소 안정동위원소비 값은 표준물질을 함께 분석하여 표준물질 대비 분석물질의 값을 천분율(‰)로 표기하였다. 이와 함께 표준물질로는 $\delta^{13}\text{C}$ 국제 표준물질인 VPDB(Vienna Pee Dee Belemnite), $\delta^{15}\text{N}$ 은 N₂(Atmospheric air)를 이용하였으며, $\delta^{13}\text{C}$ 분석은 소급성을 확보한 표준물질로서 IAEA-C-6(Sucrose), USGS24(Graphite), $\delta^{15}\text{N}$ 분석은 IAEA-N-2(Ammonium Sulfide), IAEA-NO-3(Potassium nitrate)을 사용하였다. 납 안정동위원소비 분석을 위하여 토양, 대기포집 여지 등을 산분해 하고 ICP/MS로 농도를 분석한 이후에 내부 표준물질로 Tl(SRM 997)을 넣고 MC-ICP/MS로 분석하였으며(NIER, 2014), 기기의 세부적인 분석조건을 Table 3에 자세히 나타내었다.

Table 3. Experimental condition of Multi Collector-Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometer

Instrument settings	Conditions
RF Power	1300W
Acceleration voltage	6000V
Coolant gas flow	13.0 L/min
Auxiliary gas flow	0.8 L/min
Cone(sampler + Skimmer)	Ni
Analyzer pressure	6.0 x 10 ⁻⁹ mbar
Signal intensity	32 ~ 354 V/ ppm
Sample introduction	
Desolvation system	DSN-100, Cold Vapor Generation
Nebulizer type	GE micromist nebulizer
Nebulizer pressure	30.0 psi
Sample uptake rate	100 $\mu\text{L}/\text{min}$
Spray chamber temperature	110℃
Membrane temperature	110℃
Hot gas flow	0.3 L/min
Membrane gas flow	2.80 L/min
Mix gas flow(CVG)	0.07 L/min
Analysis	
Scan	25 Scans(1 block)
Mass bias correction	Internal standard correction (NIST997 Tl standard)
Instrument drift	< 0.3%

나. 안정동위원소 이용 주택지역 오염원 분석법

안정동위원소를 이용하여 주택지역 오염원의 기여율을 평가하는 방법은 각각의 시료채취 지점에서 포집된 대기 TSP, 주택침적먼지 시료, 안심연료단지에 위치한 연탄공장의 석탄원료와 함께 조사지역의 토양, 도로먼지 등을 대상으로 안정동위원소비 분석작업을 진행하였다. 납 안정동위원소 분석은 MC-ICP/MS(Multi Collector-Inductively Coupled Plasma/Mass Spectrometer, Nu plasma II, UK)를 이용하였으며, 탄소 및 질소 안정동위원소 분석을 위하여 IRMS(Isotope Ratio Mass Spectrometer, GV Inst. Isoprime 100 with Vario micro EA)를 이용하였다. 특히, 안심지역의 주택 침적먼지에 대한 오염원의 기여율 평가에서는 각각 환경오염 기여물질의 대표값을 선정하였고, 이를 바탕으로 석탄 오염원 기여율을 산정하였다. 특히 기여율 평가에 사용된 모델은 US EPA IsoSource Model(Ver. 1.3.1, USA)을 이용하였다(NIER, 2014).

Table 4. Comparison of crystalline silica concentration according to the season in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings (Unit:mg/Sm³)

Crystalline silica Sampling point	Mean±S.D.*				Conc. ratio [‡]
	Summer	Fall	Winter	Mean	
A	0.0017±0.0005	0.0003±0.0003	0.0020±0.0011	0.0013±0.0009	0.9
B	0.0013±0.0002	0.0012±0.0009	0.0018±0.0004	0.0014±0.0003	1.0
C	0.0013±0.0009	0.0022±0.0032	0.0021±0.0004	0.0019±0.0005	1.3
D	0.0013±0.0002	0.0004±0.0004	0.0018±0.0004	0.0012±0.0007	0.8
Mean	0.0014±0.0002	0.0010±0.0009	0.0019±0.00015	0.0015±0.0006	1.0
E	0.0015±0.0004	0.0004±0.0002	0.0017±0.0005	0.0014±0.0005	

* S.D. : Standard Deviation

[‡] Conc. ratio : Crystalline silica concentrations in the direct exposure area/crystalline silica concentrations in the reference area

III. 결과 및 고찰

1. 결정형 실리카와 원소탄소의 농도분포 및 계절별 특성

Table 4에서는 안심연료단지 직접영향권역 4개 지점(A, B, C, D)에서 채취한 계절별(여름, 가을, 겨울) 결정형 실리카의 지점별 측정결과를 구분하여 나타내었다. 결정형 실리카의 경우 세계보건기구(WHO) 산하 국제 발암연구소(International Agency for Research on Cancer, IARC)에서 Group 1(사람에게 암이 확인된 물질)으로 규정하고 있으며, 진폐와 폐암을 유발하는 것으로 알려져 있다. 이러한 유형의 진폐증 가운데 규폐증은 작업자가 결정형 실리카가 주성분인 호흡성 분진에 노출되었을 때 발생된다(NIER, 2014). 대기 중에 기준은 없으나 미국산업위생전문가협회(American Conference of Governmental Industrial Hygienist, ACGIH)에서는 근로자에 대한 노출기준을 0.05 mg/m³으로 설정하고 있다.

안심연료단지 직접영향권역 4개 지점(A, B, C, D)에서 채취한 여름철 결정형 실리카의 평균농도는 0.0014±0.0002 mg/Sm³ 이었고 참고지역(E)에서의 농도는 0.0015±0.0004 mg/Sm³으로 나타났다. 가을철 결정형 실리카의 농도는 0.0010±0.0009 mg/Sm³이었으며 참고지역의 경우 0.0004±0.0002 mg/Sm³으로 나타났다. 겨울철 결정형 실리카의 농도는 0.0019±0.0002 mg/Sm³이었고 참고지역에서의 농도는 0.0017±0.0005 mg/Sm³으로 나타났다. 계절별 결정형 실리카를 측정한 결과 ACGIH의 노출기준을 초과하지는 않았지만 참고지역과 비교하여 그 농도가 다소 높았으며, 계절

별로는 겨울철이 다른 계절에 비해 다소 높은 경향을 나타내었다.

이와 함께 Table 5는 안심연료단지 직접영향권역 및 참고지역의 계절별 결정형 실리카 농도를 비교하여 나타내었다. 직접영향권역의 결정형 실리카 농도는 0.0014±0.0005 mg/Sm³, 참고지역의 실리카 농도는 0.0012±0.0007 mg/Sm³으로 확인되었다. 계절별 결정형 실리카 농도를 비교한 결과, 가을철의 경우 직접영향권역이 참고지역보다 2.5배 높은 수준을 나타내었으며, 전체적으로는 직접영향권역에서 참고지역보다 1.4배 높은 수준으로 확인되었다.

Figure 3에서는 안심연료단지 직접영향권역과 참고지역의 계절별 결정형 실리카 농도를 나타낸 것이다. 안심연료단지 직접영향권역에서 채취한 계절별 결정형 실리카 농도 역시 전반적으로 겨울(0.0018~0.0020 mg/Sm³)이 여름(0.0013~0.0017 mg/Sm³) 및 가을(0.0000~0.0022 mg/Sm³)에 비해 다소 높은 수준을 보였다. 지점별로는 안심연료단지 남쪽방향 118 m에

Table 5. Comparison of crystalline silica concentration according to the direct exposure area and reference area in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings (Unit : µg/Sm³)

Crystalline silica Season	Mean±S.D.		Conc. ratio
	Direct exposure area	Reference area	
Summer	0.0014±0.0002	0.0015±0.0004	0.9
Fall	0.0010±0.0009	0.0004±0.0002	2.5
Winter	0.0019±0.0002	0.0017±0.0005	1.1
Mean	0.0014±0.0005	0.0012±0.0007	1.4

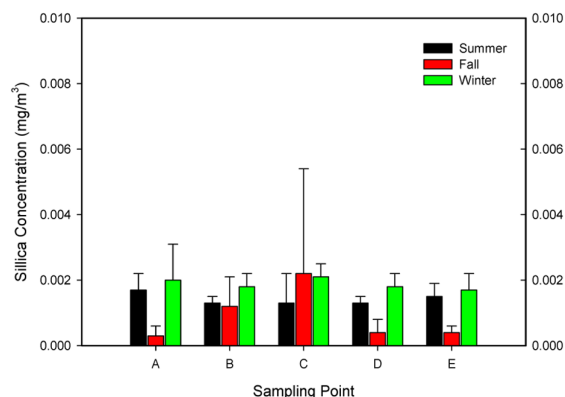


Figure 3. Effect of sampling point on crystalline silica concentration in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings

위치한 C 지점이 다른 지역에 비교하여 높은 수준으로 조사되었다.

입자상물질의 탄소성분은 화석연료의 불완전연소와 대기 중에서의 2차 광화학 반응으로 생성되는 원소의 불순물 형태로서 도시대기 입자의 10~40%를 점유하는 부유 입자상물질의 주요 구성성분이며, 유기탄소(Organic Carbon, OC), 원소탄소, 탄산염탄소(Carbonate Carbon, CC)로 분류된다(Pusan metropolitan city, 2008; NIER, 2014). 또한 탄소성분은 대기오염물질의 발생원 추정과 지역적 대기오염의 평가에 이용되며 기상학적인 관점에서도 대류권 내 태양복사의 흡수를 지배하는 입자로서 중요성을 입증하고 있다(Pusan metropolitan city, 2008). 유기탄소는 인위적, 자연적 발생원에서 직접 배출되거나 대기 중에서 기체상 유기화합물이 광화학반응 등에 의해 입자로 변환되어 생성된다. 미국 EPA는 미세입자 영역($dp \leq 2.5 \mu m$)의 1차 오염원을 불법소각, 목재탄소, 자동차

등으로 분류하고 있고, 거대입자 영역($dp \geq 2.5 \mu m$)의 1차 오염원을 타이어, 아스팔트의 마모, 도로 부유분진 등으로 분류하고 있다. 또한, 미세입자 영역의 2차 유기탄소는 자동차와 불법소각, 목재연소 등에서 배출된 탄화수소가 대기 중에서 산화되어 발생하는 것으로 분류하였다(Pusan metropolitan city, 2008; Do, 2011; NIER, 2014).

입자상 탄소성분은 대기 중의 다환방향족탄화수소(Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PAHs), 입자상 유기화합물 및 휘발성 유기화합물질(Volatile Organic Compounds, VOCs) 등과 같은 유해성대기오염물질(Hazardous Air Pollutants, HAPs)과 쉽게 결합하여 독성물질로 작용한다(Jung, 2008; Pusan metropolitan city, 2008; NIER, 2010; Jung, 2012; Jung et al., 2012; NIER, 2014). 원소탄소는 태양복사열을 흡수하여 지구의 기온을 상승시키는 작용을 하는 것으로 조사되었고, 토양 및 도로먼지와 산업활동 및 차량의 이동에 의하여 많이 발생하는 것으로 보고되고 있다(Pusan metropolitan city, 2008; Do, 2011; NIER, 2014).

원소탄소는 대부분 화석원료의 연소에 의해 대기 중으로 직접 배출되는 1차 오염물질이며, 안심연료단지와 같은 석탄입자의 영향을 확인하기 위해서는 원소탄소에 대한 기초조사가 반드시 필요하다. 따라서 Table 6은 안심연료단지 직접영향권역 4개 지점(A, B, C, D)에서 채취한 계절별(여름, 가을, 겨울) 원소탄소의 지점별 결과를 나타낸 것이다. 안심연료단지 직접영향권역 4개 지점의 여름철 원소탄소의 평균농도는 $0.0010 \pm 0.0005 \text{ mg/Sm}^3$ 수준으로 확인되었으며, 참고지역(E)에서는 검출되지 않았다. 가을철 원소탄소의 농도는 $0.0011 \pm 0.0006 \text{ mg/Sm}^3$ 수준으로

Table 6. Comparison of elemental carbon(EC) concentration according to the season in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings (Unit : mg/Sm^3)

Sampling point	EC Mean±S.D.				Conc. ratio
	Summer	Fall	Winter	Mean	
A	0.0014±0.0009	0.0010±0.0011	0.0015±0.0000	0.0013±0.0003	2.2
B	0.0015±0.0004	0.0010±0.0005	0.0009±0.0003	0.0011±0.0003	1.9
C	0.0004±0.0002	0.0020±0.0008	0.0024±0.0014	0.0016±0.0011	2.7
D	0.0007±0.0003	0.0005±0.0006	0.0035±0.0012	0.0016±0.0017	2.6
Mean	0.0010±0.0005	0.0011±0.0006	0.0011±0.0006	0.0014±0.0009	2.3
E	N.D.	N.D.	0.0006±0.0003	0.0006±0.0003	

확인되었으며, 참고지역에서는 검출되지 않았다. 겨울철 원소탄소의 농도는 $0.0021 \pm 0.0011 \text{ mg/Sm}^3$ 수준으로 확인되었으며, 참고지역에서의 농도는 $0.0006 \pm 0.0003 \text{ mg/Sm}^3$ 으로 확인되었다. 대기오염을 유발하는 미세먼지는 화학적으로 크게 금속성분 및 탄소성분 등으로 이루어져 있다. 원소탄소의 경우 10% 이상의 양은 자동차, 식물의 연소로 배출되며 10% 미만의 양은 포장도로, 연료의 연소, 소각, 석탄발전소 등에서 배출되는 것으로 알려져 있다. 대기 중 원소탄소는 인위적인 배출원의 영향정도를 평가하는 지표로 사용되며, 인체의 폐 등에 민감하게 작용하는 것으로 알려져 있다(Pusan metropolitan city, 2008; Do, 2011; NIER, 2014). 원소탄소는 일반 대중에 대한 건강보호 기준은 마련되어 있지 않으며, 2003년까지 ACGIH에서 작업장 노출기준으로 고시하였던 원소탄소 농도가 0.02 mg/m^3 이었던 것을 감안하면, 이번 안심연료단지의 측정결과는 노출수준이 높지 않은 것으로 나타났다. 다만, 참고지역에 비해서 직접영향권역의 원소탄소 농도가 상대적으로 높게 측정되었다.

이와 함께 Table 7에서는 안심연료단지 직접영향권역 및 참고지역의 계절별 원소탄소 농도를 비교하여 나타내었다. 직접영향권역의 원소탄소 농도는 $0.0014 \pm 0.0006 \text{ mg/Sm}^3$ 수준으로 확인되었으며, 참고지역의 원소탄소 농도는 $0.0006 \pm 0.0003 \text{ mg/Sm}^3$ 으로 확인되었다. 계절별 원소탄소 농도를 비교한 결과, 겨울철의 경우 직접영향권역이 참고지역보다 3.5배 높은 수준을 나타내었으며, 전체적으로는 직접영향권역에서 참고지역보다 2.3배 높은 수준으로 확인되었다.

Figure 4는 직접영향권역(안심 연료단지)과 참고지역 계절별 농도(EC)를 비교한 것이다. 이 연구에서

조사된 안심연료단지 직접영향권역에서 채취한 계절

Table 7. Comparison of EC concentration according to the direct exposure area and reference area in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings

(Unit : $\mu\text{g/Sm}^3$)

Season	Mean \pm S.D.		Conc. ratio
	Direct exposure area	Reference area	
Summer	0.0010 \pm 0.0005	N.D.	-
Fall	0.0011 \pm 0.0006	N.D.	-
Winter	0.0021 \pm 0.0011	0.0006 \pm 0.0003	3.5
Mean	0.0014 \pm 0.0006	0.0006 \pm 0.0003	2.3

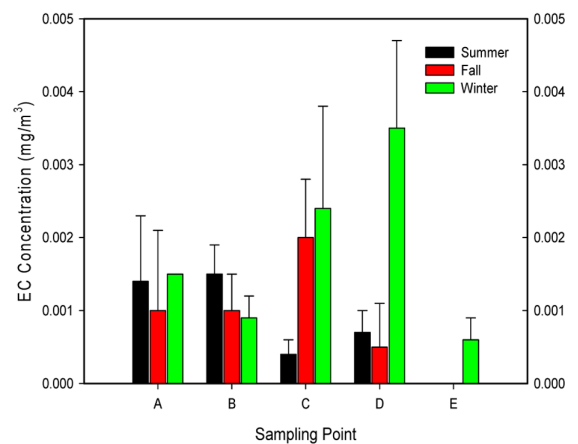


Figure 4. Effect of sampling point on EC concentration in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings

별 원소탄소 농도 역시 전반적으로 겨울($0.001 \sim 0.004 \text{ mg/Sm}^3$)이 여름($0.000 \sim 0.002 \text{ mg/Sm}^3$) 및 가을($0.001 \sim 0.002 \text{ mg/Sm}^3$)에 비해 다소 높은 수준을 보였다. 지점별로는 안심연료단지 계절에 따라 다소 차이가 있었는데 여름의 경우 안심연료단지 북서방향

Table 9. Comparison of quartz and EC concentration according to the season in the Ansim Briquette Fuel Complex and its surroundings

(Unit : $\mu\text{g/Sm}^3$)

Contents Sampling site	Seasons	Crystalline silica				Elemental carbon			
		Summer	Fall	Winter	Mean	Summer	Fall	Winter	Mean
A		1.7 \pm 0.5	0.3 \pm 0.3	2.0 \pm 1.1	1.3 \pm 0.9	1.4 \pm 0.9	1.0 \pm 1.1	1.5 \pm 0.0	1.3 \pm 0.3
B		1.3 \pm 0.2	1.2 \pm 0.9	1.8 \pm 0.4	1.4 \pm 0.3	1.5 \pm 0.4	1.0 \pm 0.5	0.9 \pm 0.3	1.1 \pm 0.3
C		1.3 \pm 0.9	2.2 \pm 3.2	2.1 \pm 0.4	1.9 \pm 0.5	0.4 \pm 0.2	2.0 \pm 0.8	2.4 \pm 1.4	1.6 \pm 1.1
D		1.3 \pm 0.2	0.4 \pm 0.4	1.8 \pm 0.4	1.2 \pm 0.7	0.7 \pm 0.3	0.5 \pm 0.6	3.5 \pm 1.2	1.6 \pm 1.7
Mean		1.4 \pm 0.2	1.0 \pm 0.9	1.9 \pm 1.5	1.5 \pm 0.6	1.0 \pm 0.5	1.1 \pm 0.6	1.1 \pm 0.6	1.4 \pm 0.9
Reference area		1.5 \pm 0.4	0.4 \pm 0.2	1.7 \pm 0.5	1.4 \pm 0.5	N.D.	N.D.	0.6 \pm 0.3	0.6 \pm 0.3

112 m에 위치한 B 지점이 가을에는 남방향 118 m에 위치한 C 지점이 다른 지역에 비해 높은 수준으로 조사되었다.

2. 안정동위원소를 이용한 주택지역 오염원 기여율 평가

1) 주택 침적먼지 중 안정동위원소비 분석결과

이 연구에서 각 시료의 탄소 및 질소 안정동위원소비를 분석한 결과, $\delta^{13}\text{C}$ 값은 -26~22‰, $\delta^{15}\text{N}$ 값은 0~20‰ 범위 내에 분포하였다. Figure 5는 탄소 및 질소 안정동위원소를 이용한 오염원의 기여율을 나타낸 것이다. 탄소·질소 안정동위원소비를 이용하여 산정한 안심연료단지 석탄오염원의 주택 침적먼지 기여율은 석탄연료, 농토양, 도로 주변 먼지를 오염원으로 가정하여 산출하였다. 결과적으로 탄소 및 질소 안정동위원소비를 이용한 기여율은 공단 주변 500 m 범위 내에서 평균 24.0%(0.7~62.7%) 수준으로 확인되었다.

Figure 6은 납 안정동위원소비를 이용하여 오염원 주택 침적먼지의 영향권역을 분석하였고, Figure 7에서는 납 안정동위원소비($\text{Pb}^{207/206}$ vs. $\text{Pb}^{208/206}$)를 이용한 안심연료단지 석탄의 주택침적먼지 기여율을 평가한 것이다. 안심연료단지를 중심으로 동, 서, 남, 북 방향에서의 지점별 4방위로 분석작업을 수행한 결과, 석탄연료단지의 영향권역은 동쪽>남쪽>서쪽 방향 순으로(북쪽으로는 다른 오염원의 영향 추정) 형성됨을 확인하였다.

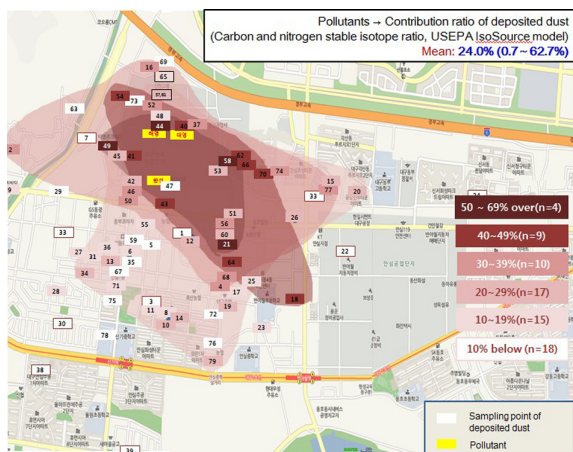


Figure 5. Contribution ratio and distribution characteristics of pollutant according to the stable isotope ratio of carbon



Figure 6. Effect zone and direction analysis of deposited dust and pollutant according to the lead stable isotope ratio

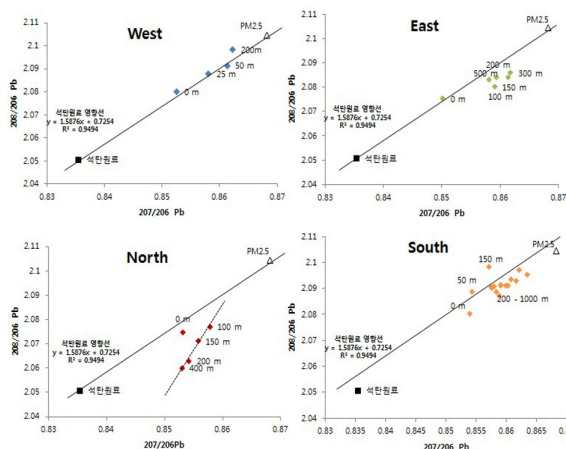


Figure 7. Distribution characteristics and wind direction of lead stable isotope ratio ($\text{Pb}^{207/206}$ vs. $\text{Pb}^{208/206}$)

또한, Figure 8은 석탄원료와 주택 침적먼지 시료의 납 안정동위원소비 상관관계를 그림으로 나타낸 것이고, Figure 9는 납 안정동위원소비를 이용한 오염원 주택 침적먼지의 영향권역을 분석한 것이다. 안심연료단지 경계지 TSP 및 주거지역 TSP, 석탄 등의 $\text{Pb}^{207/206}$ vs. $\text{Pb}^{208/206}$ 값을 분석한 결과, 안심연료단지 오염원 - 안심연료단지 경계지역 TSP - 주거지역 TSP - 주택 침적먼지와의 상호 인과관계를 확인할 수 있었다.

Figure 10은 납 안정동위원소를 이용한 안심연료

단지 오염원의 기여율을 나타낸 것이다. 안심연료단

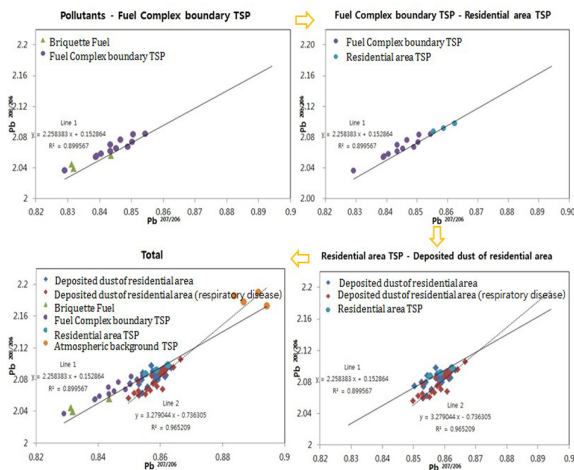


Figure 8. Correlation of lead stable isotope ratio between raw material and deposited dust

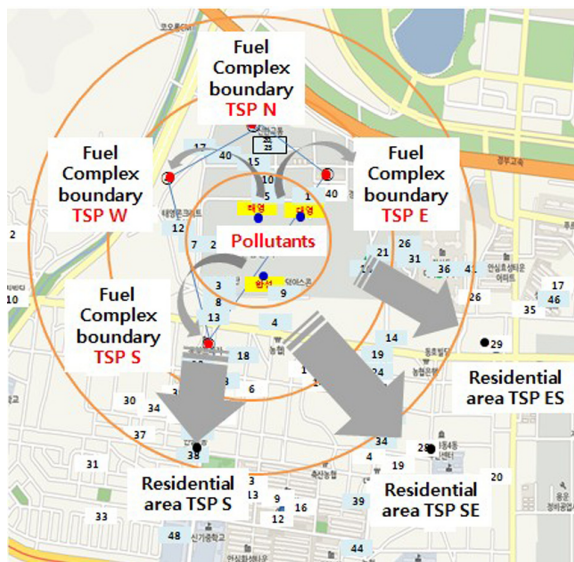


Figure 9. Effect zone and direction analysis of deposited dust and pollutant according to lead stable isotope ratio

지에서 발생하는 석탄, 안심연료단지 경계지역 총먼지(TSP), 주거지역 총먼지, 주거지역 주변먼지, 주택 침적먼지와 함께 배경대기 중의 납 동위원소비를 이용하여 기여율을 산정한 결과, 석탄오염원의 영향은 납으로는 평균 33.9% (26.6~54.1%)로 확인되었다. 단, 이상의 모든 결과에서 오염원은 석탄연료(C, N, Pb 안정동위원소비), 주변토양(C, N 안정동위원소비), 도로먼지(C, N 안정동위원소비), 배경대기(Pb)로

한정하여 산출한 결과이다.

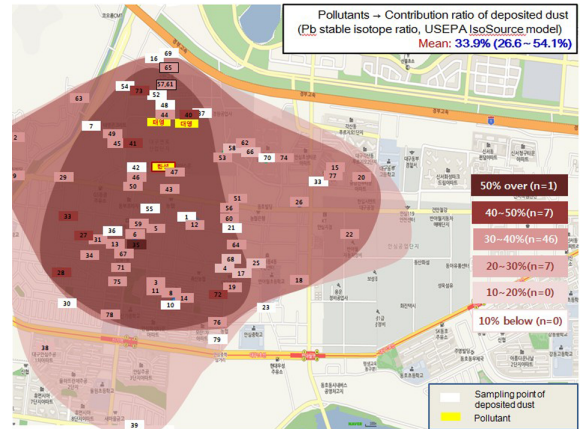


Figure 10. Contribution ratio and distribution characteristics of pollutant according to the lead stable isotope ratio

이 연구를 수행한 결과, 대상지역의 분진은 농도가 대구시 다른 지역보다 높고, 확인된 주요성분이 연료단지에서 사용하는 석탄과 관련성을 보여 연료단지의 영향을 받고 있는 것으로 조사되었다. 특히 안정동위원소비를 이용하여 안심연료단지 주변지역 주민들이 거주하고 있는 주택지역 오염원 기여율 평가작업을 수행한 결과, 석탄원료의 주택침적먼지 기여율은 안심연료공단으로부터 500 m 이내에서 탄소·질소 안정동위원소비로는 평균 24.0%(0.7~62.7%) 조사되었고, 납 안정동위원소비로는 평균 33.9%(26.6~54.1%)로 확인되었다. 따라서 안심연료단지에 위치하고 있는 공장에서 발생하는 환경오염물질은 주변 환경에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 안심연료단지 주변지역 주민들은 대상지역의 공장으로부터 직·간접적으로 영향을 받고 있는 것으로 추정되며, 향후 환경오염물질의 발생원을 적극적으로 차단하기 위하여 지속적인 저감대책이 요구되는 시점이며, 지자체 및 관계기관에서는 안심연료단지 이전 등과 같은 보다 적극적인 행정대책을 준비하여야 할 시점으로 판단된다.

IV. 결 론

안심연료단지 주변지역 주민의 건강피해와 환경오염의 실태를 파악하고 관리방안을 마련하기 위하여 대기 중 결정형 실리카 및 호흡성먼지 내 원소탄소의

농도를 분석하였고, 안정동위원소를 이용하여 안심연료단지 인근의 주택지역 오염원 기여율을 평가하였다. 이상의 연구로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 안심연료단지 직접영향권역의 결정형 실리카 농도는 $0.0014 \pm 0.0005 \text{ mg/Sm}^3$ 수준이었고 안심연료단지 직접영향권역에서 채취한 계절별 결정형 실리카의 농도는 ACGIH의 노출기준을 초과하지는 않았다. 가을철의 경우 직접영향권역이 참고지역보다 2.5배 높았으며 전체적으로는 직접영향권역에서 참고지역보다 1.4배 높은 수준으로 나타났다. 계절별로는 겨울철이 여름 및 가을철에 비해 다소 높게 나타났다. 또한, 지점별로 결정형 실리카의 농도를 분석한 결과, C 지점이 다른 지역에 비해 높은 수준으로 조사되었다.

2. 안심연료단지 직접영향권역에서의 원소탄소 농도는 $0.0014 \pm 0.0006 \text{ mg/Sm}^3$ 이었고 참고지역의 원소탄소 농도는 $0.0006 \pm 0.0003 \text{ mg/Sm}^3$ 으로 나타났다. 원소탄소는 일반 대중에 대한 건강보호 기준은 마련되어 있지 않으며, 2003년까지 ACGIH에서 작업장 노출기준으로 고시하였던 원소탄소 농도가 0.02 mg/m^3 이었던 것을 감안하면, 이번 안심연료단지의 측정결과는 노출수준이 높지 않은 것으로 나타났다.

3. 안심연료단지 직접영향권역에서 채취한 계절별 원소탄소 농도특성을 분석한 결과, 전반적으로 겨울($0.001 \sim 0.002 \text{ mg/Sm}^3$)이 여름($0.000 \sim 0.015 \text{ mg/Sm}^3$) 및 가을($0.000 \sim 0.002 \text{ mg/Sm}^3$)에 비해 다소 높은 수준을 나타내었다. 계절별 원소탄소 농도를 분석한 결과, 겨울철의 경우 직접영향권역이 참고지역보다 3.5배 높은 수준을 보였다. 또한, 전체적으로는 직접영향권역에서 참고지역보다 2.3배 높은 수준으로 확인되었다. 계절별로는 겨울철이 여름 및 가을철에 비해 다소 높은 수준을 나타내었다. 또한, 지점별로 원소탄소의 농도를 분석한 결과, B 지점(여름)과 C 지점(가을)이 다른 지역에 비해 높은 수준으로 조사되었다.

4. 탄소·질소·납 안정동위원소를 이용한 주택지역 오염원 추적 연구를 수행한 결과,공단 경계지역 TSP, 주거지역 TSP, 주택 침적먼지, 석탄연료, 논토양, 도로먼지 중에서 안심연료단지 오염원 - 공단경계지역 TSP - 주거지역 TSP - 주택 침적먼지로의 상호 인과관계를 확인하였다.

5. 납 안정동위원소를 이용한 석탄 오염원의 주택

침적먼지 영향권역을 분석한 결과, 동쪽>남쪽>서쪽 방향 순으로 영향권역(북쪽으로는 다른 오염원의 영향 추정)이 형성되었다. 오염원을 석탄연료(C, N, Pb 안정동위원소비), 주변토양(C, N 안정동위원소비), 도로먼지(C, N 안정동위원소비), 배경대기(Pb)로 한정하여 평가한 결과, 연료단지 석탄원료의 주택침적먼지 기여율은 안심연료공단지로부터 500 m 이내에서 탄소·질소 안정동위원소비로는 평균 24.0%(0.7~62.7%) 확인되었다. 또한, 납 안정동위원소비로는 평균 33.9%(26.6~54.1%)로 확인되었다.

6. 대상지역의 분진 농도가 대구시 다른 지역보다 높았으며, 이 연구에서 확인된 주요성분이 연료단지에서 사용하는 석탄과 관련성을 나타내어 연료단지의 영향을 받고 있는 것으로 조사되었다. 특히 안심연료단지에 위치하고 있는 공장에서 배출되는 환경오염물질은 주변지역 대기환경에 영향을 미치고 있는 것으로 판단된다. 특히 대상지역에서 발생하는 환경오염물질과 주변지역 주민들이 거주하고 있는 주택지역 오염원과의 인과관계를 확인한 결과, 안심연료단지 및 주변지역은 대상지역의 공장에서 발생하는 환경오염물질로부터 직·간접적으로 영향을 받고 있는 것으로 판단된다.

감사의 글

이 연구는 국립환경과학원의 2013년도 지원사업 [대구 안심연료단지 주변지역 주민건강영향조사, No. 2014-11-1480523-001587-01]으로 수행되었고, 일부 연구비를 지원하여 주신 대구광역시청 및 대구광역시 동구청에 감사드립니다.

References

- Bae HJ, Jung JH, Phee YG. Analysis of quartz concentrations by FTIR-DOF and FTIR-Transfer method in concrete manufacturing industries. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2013;23(2):75-83
- Choi BW, Jung JH, Choi WJ, Jeon CJ, Shon BH. Distribution characteristics of ambient heavy metals based on the pollution source and their carcinogenic risk assessment in Ulsan. Korea. Korean Society of Environmental Health. 2006;32(5):522-531

- Choi BW, Jung JH, Choi WJ, Shon BH, Oh KJ. Characteristics of the distribution of high ambient air pollutants with sources and weather condition in Ulsan. Korean Society of Environmental Health. 2006;32(4):324-335
- Cho SW, Min BC, Jung JH, Jeon YH, Kim DY, Jeong DY. A study on desulfurization by anthracite-bituminous coal blend combustion in a fluidized bed. Korean Society of Environmental Health. 1997;23(3):102-108
- Do HS. Characteristics assessment of trace element concentration in dust by facilities and areas in Daegu, Korea. Daegu Haany University. Ph.D Dissertation. 2011
- Jang CG, Lim HS. Environmental health epidemiology. KNOU press. 2008
- Jeon YH, Jung JH, Shon BH, Cho SW, Oh KJ. A study on adsorption characteristics of SO₂ gas in a fixed bed adsorber. Korean Society of Environmental Engineers. 1996;18(8):961-969
- Jung JH. A study on health hazard evaluation among residents in fuel complex, Ansim, Daegu. The Korean Society for Preventive Medicine. Fall Conference. 2014:324
- Jung JH. A study on reaction characteristic of SO₂/NOx simultaneous removal for alkali absorbent/additive in FGD and waste incinerator process. Pusan National University. Ph.D Dissertation. 1999
- Jung JH. A study on the cause investigation of increasing fine particles(PM₁₀) and reduction plans in Pohang Steel Industrial Complex, GENTEC, 2009.
- Jung JH, Cho SW, Lim HS. Distribution characteristics of environmental contaminant at soil in an Industrial Complex Area. Clean Technology. 2012;18(4):200-208
- Jung JH, Cho SW, Shon BH, Jeon YH, Oh KJ. A study on the use of low-grade domestic anthracite by anthracite - bituminous coal blend combustion in a fluidized bed combustor. Journal of Environmental Science. 1997; 6(3):267-276
- Jung JH, Cho SW, Shon BH, Kim YS, Oh KJ. A study on contaminant emission and combustion of anthracite - bituminous coal blend in a fluidized bed coal combustor. Korean Society of Environmental Health. 1996;22(3):28-36
- Jung JH. Effects of air pollutants on the health/environmental risk assessment and weathering of stone cultural properties in Gyeongju and its vicinities. Daegu Haany University. Ph.D Dissertation. 2008
- Jung JH. Health risk assessments and concentrations of environmental pollutants in an industrial complex. Dongguk University. Ph.D Dissertation. 2012.
- Jung JH, Lee HD, Jeon SB, Yoo JK, Shon BH. Chemical characteristics and particle size distribution of PM₁₀ in Iron and Steel Industrial Complex. The Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 2012; 13(11):5601-5609
- Jung JH, Lee HD, Shon BH. Assessment of location of the air quality monitoring stations according to the analysis of wind sector division in Pohang. The Korea Academia-Industrial Cooperation Society. 2012; 13(4):1931-1938
- Jung JH, Oh IB, Phee YG, Nam MR, Lee HD, Lee SS, Yu SD, Kim BS, Yoo SJ, Lee K, Lim HS. Effect zone of environmental pneumoconiosis and fugitive dust in an industrial complex and its vicinities. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene. Summer Conference. 2015:110
- Jung JH, Phee YG, Shon BH, Yang WH, Kim JY, Kim GB, Choi JW, Park SJ, Lee K, Lim HS. Distribution characteristics of pollutants according to elemental carbon and stable isotope ratio in an industrial complex and its vicinities. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene. Summer Conference. 2015:111
- Jung JH, Phee YG, Oh IB, Shon BH, Yoon MR, Kim GB, Yu SD, Min YS, Lee K, Lim HS. Exposure characteristics of TSP, PM₁₀, PM_{2.5}, and heavy metals in an industrial complex and its vicinities. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene. Summer Conference. 2015:112
- Kang SW, Shim SH, Jung SH, Jung JH, Lee SS. Mercury emission characteristics from co-combustion of coal and sludge. Korean Society of Atmospheric Environment. 2012;28(2):182-189
- Kim DS, Ahn SC, Ryu JM, Yu SD. Monitoring study on exposure levels of environmental pollutants in residents of a non-industrial area, Korea. J Environ Health Sci, 2012;38(6):482-492
- Kim JH, Jung JH, Phee YG. Exposure assessment of airborne cobalt in manufacturing industries. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2015;25(2):166-173
- Kim SH, Bae HJ, Jung JH, Phee YG. Particle size-related dust and quartz concentration of stone grinding operations. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2014;24(4):462-470
- Lee HD, Yoo JW, Kang MK, Kang JS, Jung JH, Oh KJ. Evaluation of concentrations and source contribution of PM₁₀ and SO₂ emitted from industrial complexes in Ulsan, Korea: Interfacing of the WRF - CALPUFF modeling tools, Atmospheric Pollution Research.

- 2014;5:664 - 676
- Lee JH, Baek NJ, Kim YP, Moon GJ. Visibility study in Seoul on August, 1993. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 1995;11(3):291-298
- Lee JH, Baek NJ, Shim SG, Kim YP. Measurement of carbonaceous species in fine particles at Kosan, Cheju Island during the two summer seasons of 1994 and 1995. Journal of Korean Society for Atmospheric Environment. 1997;13(3):179-191
- Ministry of Environment(MoE). Environmental Health Act. 2009.
- Nam MR, Jung JH, Phee YG. Exposure assessment of PM_{2.5} in manufacturing industry office buildings. Journal of Korean Society of Occupational and Environmental Hygiene, 2013;23(4):356-366
- National Institute of Environmental Research(NIER). The monitoring study on exposure level and biomarker of environmental pollutants in the Pohang industrial complex(5th annual report). 2010
- National Institute of Environmental Research(NIER). A study on health hazard evaluation among residents in fuel complex, Ansim, Daegu. 2014;1-491
- Pusan metropolitan city, A study on the reduction plans of fine particles(PM₁₀) in Pusan metropolitan city. 2008