

탄소 안정동위원소를 이용한 석탄화력발전소 인근 오염원 기원 추정 : 당진시를 중심으로

Estimation of Pollutant Sources in Dangjin Coal-Fired Power Plant Using Carbon Isotopes

윤수향*, 조봉연**

충남연구원 기후변화대응연구센터/동국대학교 건설환경공학과*, 동국대학교 건설환경공학과**

Soohyang Yoon(perfume3443@gmail.com)*, Bong-Yeon Cho(bycho@dongguk.edu)**

요약

석탄화력발전소, 제철소 등 대규모 배출시설이 밀집되어 있는 충청남도 당진시는 지자체 차원에서 대기질 개선과 온실가스 감축 등을 위해 적극 노력하고 있음에도 불구하고 시민들의 건강에 대한 우려가 높다. 이에 본 연구에서는 석탄화력발전소와 외부요인 등이 지역 대기오염에 미치는 영향 파악을 위해 일반적으로 미세먼지 또는 초미세먼지 등의 기원 추적자로 이용하는 탄소 안정동위원소를 활용하여 지역 오염원의 기원을 추정하였다. 또한, 석탄화력발전소로부터의 이격거리를 고려하여 선정된 2지점에 대한 계절별 실측데이터와 선행 연구 분석을 통해 구축한 라이브러리 및 역궤적 분석으로 오염원의 기원을 해석하였다. 탄소 안정동위원소비의 분석결과 겨울 > 봄 > 가을 > 여름 순으로 고농도 경향성을 보였으며, 라이브러리와 매칭결과 이동오염원과 노천소각의 영향이 상대적으로 높은 것으로 분석되었다. 본 연구는 시범연구로 지속적인 모니터링과 데이터 축적을 통한 연구결과의 신뢰성 확보에 주력해야 할 것으로 판단된다.

■ 중심어 : 동위원소 | $\delta^{13}\text{C}$ | 석탄화력발전소 | 오염원 | 당진시 |

Abstract

Residents in Dangjin, South Chungcheong Province, in which large-scale emissions facilities such as coal-fired power plants and steel mills are concentrated, are very much concerned about their health despite the local government's aggressive efforts to improve air quality and reduce greenhouse gases. To understand the impact of coal-fired power plants and external factors on local air pollution, the origins of local pollutants were investigated using stable carbon isotopes that are generally used as tracers of the provenance of fine or ultrafine dust. The origins of the pollutants were analyzed with the data library, built using the seasonally measured data for the two separate locations selected considering the distance from the coal-fired power plant and the analysis of previous studies, and with the back trajectory analysis. As a result of analyzing stable isotope ratios, the tendency of high concentration was found in the order of winter > spring > fall > summer. According to the data matching with the library, the mobile pollutants and open-air incineration had a relatively higher impact on the local air pollution. It is believed that this study, as a pilot study, should focus on securing the reliability of the study results through continuous monitoring and data accumulation.

■ keyword : Isotope | $\delta^{13}\text{C}$ | Coal-fired Power Plant | Source Contribution | Dangjin City |

* 본 연구는 충청남도(화력발전소 주변지역 기후환경영향 연구(2~3차년도))의 지원을 받아 수행하였습니다.

접수일자 : 2021년 01월 21일

심사완료일 : 2021년 02월 15일

수정일자 : 2021년 02월 04일

교신저자 : 조봉연, e-mail : bycho@dongguk.edu

I. 서론

발전 및 산업·제조시설이 밀집되어 있는 충청남도는 전국 석탄화력발전소 60기 중 절반에 해당하는 30기가 위치하고 있어 온실가스 배출량과 지역 대기오염물질 배출 기여도가 높으며, 이로 인한 충남도민들의 건강, 주변 생태계 등이 위협받고 있다. 석탄화력발전소 관련 연구는 주변지역 주민들에 대한 건강·환경영향조사, 피해비용 산정, 방지시설 개선에 따른 배출억제에 관한 연구가 대다수이다[1-7]. 석탄화력발전소 영향에 대한 다양한 연구가 진행되고 있으나 오염기원과 피해에 대한 정량적 기여도 평가와 인과관계를 규명하는데는 한계가 있다.

이에 최근에는 국립환경과학원을 중심으로 안정동위원소를 활용한 오염원 소스에 대한 추정, 배출 영향 등에 대한 관계규명 연구가 추진되고 있다. 일반적으로 안정동위원소를 활용한 연구는 동위원소 분별(Isotopic Fractionation)로 물질간의 동위원소 값이 달라지는 원리[8]를 이용하여 환경학, 지구과학, 수문학, 생명과학 등 다양한 분야에서 폭넓게 이용되고 있으며, 계절변화나 오염원 기원 분석을 통한 환경오염원 추적, 배출원의 라이브러리 구축, 원산지 추적, 범죄수사 등에 주로 활용되고 있다[8-18].

본 연구에서는 (1) 미세먼지 또는 초미세먼지 등의 추적에 적합한 탄소 안정동위원소를 활용하여 라이브러리 구축과 매칭을 통해 계절별 기원차이를 확인하고, (2) HYSPLIT 모델을 이용한 역궤적 분석으로 매칭결과를 검증하여 석탄화력발전소 주변지역의 오염원에 대한 과학적 실증자료 구축과 탄소 안정동위원소에 대한 오염원 추적자료써의 활용 가능성을 검토하고자 한다.

II. 연구방법

1. 시료채취 및 분석

연구대상지는 2016년 기준 석탄에 의한 전력시설용량 전국 50.1%를 담당하는 충청남도의 화력발전소 소재 4개 기초지자체(보령시, 당진시, 태안군, 서천군(가

등중단)) 중 2017년 PM10, PM2.5 연평균농도가 가장 높은 당진시를 시범지역으로 선정하였다.

당진시 내 화력발전소 영향과 외부요인에 의한 오염물질의 영향 검토를 위해 도시대기측정소와 방재기상관측소(Automatic Weather System), 화력발전소와의 이격거리(TM좌표), 풍향·풍속, 대기오염공정시험기준 등을 고려하여 2지점(석문면사무소(A), 당진시청(B))에서 대기샘플링을 실시하였다. 화력발전소로부터 남동방향으로 직선거리 10.3km에 위치한 A지점은 3층 건물로 주변에 해당 건물보다 높은 건물 또는 지형지물이 없으며, 3층 옥상에 측정장비를 설치하였다. 도시대기 측정소가 위치한 B지점은 A지점과 유사한 조건에 직선거리 21.4km에 위치한 지점으로 시료채취를 위하여 3층 옥외공간에 측정장비를 설치하였다.

시료채취는 2018년 4월부터 2019년 1월까지 계절별로 총 4회 실시하였으며, 대기오염공정시험기준(ES 01115)에 따라 대용량 먼지 포집기(TE-5000, TISCH)를 사용하여 지상으로부터 1.2m 높이에서 1m³/min 유량으로 24시간 연속채취하였다. 측정기간은 2018년 4월~2019년 1월로 계절별 총 4회 실시하였고, 측정기간의 기상조건은 인근 방재기상관측소 자료를 활용하였고 [표 1]과 같다.

표 1. 측정기간의 기상조건

지점	측정기간	기온(°C)			풍속(m/s)	풍향
		평균	최고	최저		
A	(봄) 2018.04.09.~04.10.	11.8	3.6	19.0	2.7	110(북북서)
	(여름) 2018.07.11.~07.12.	19.7	15.9	25.5	1.3	323(남동동)
	(가을) 2018.10.17.~10.18.	9.7	4.0	16.9	0.9	65(북북동)
	(겨울) 2019.01.16.~01.17.	0.8	-3.0	4.8	2.0	329(남동동)
B	(봄) 2018.04.11.~04.12.	11.8	6.3	18.3	2.1	256(남서남)
	(여름) 2018.07.12.~07.13.	20.2	15.0	25.2	1.1	233(남서남)
	(가을) 2018.10.18.~10.19.	10.9	5.6	17.7	0.9	0(동)
	(겨울) 2019.01.17.~01.18.	0.4	-5.5	7.5	0.9	343(남동동)

측정기기를 통해 포집한 대기의 총 부유물질(total suspended particles, TSP) 중 유기탄소를 오염원 추적자로 선정하였으며, 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C_{V-PDB}$) 파악을 위해 한국기초과학지원연구원에서 보유하고 있는 안정동위원소 질량분석기(IRMS, Isotope Ratio Mass Spectrometry, Isoprime 100, Elementar-GV Instrument, U.K)를 활용하였고, 국제원자력기구(IAEA)에서 공급하는 표준물질 Pee Dee

Belemnite (PDB), USGS 24를 사용하였다[10]. 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$)는 식(1)을 적용하여 산정하였고 여기서 R은 $^{13}C/^{12}C$ 을 의미한다.

$$\delta^{13}C(\%) = \left(\frac{R_{\text{시료}} - R_{\text{표준물질}}}{R_{\text{표준물질}}} \right) \times 1000 \quad (1)$$

2. 라이브러리 구축

채취한 시료의 오염원 추적을 위하여 본 연구와 유사한 국내외 논문과 보고서 21편을 검토·분석하여 [표 2]와 같이 국가별 탄소 안정동위원소 통합 라이브러리를 구축하였다. 국외에서는 측정결과 기반의 오염원 기원 규명 관련 정보구축 연구가 활발히 진행되고 있으며, 국내의 경우 국립환경과학원, 한국표준과학연구원 등을 중심으로 실측값과 확산모형을 통한 기여도 규명연구가 중점적으로 추진되고 있는 것으로 파악되었다.

표 2. 국가별 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$) 라이브러리

국가	지역	기원(계절)	$\delta^{13}C$ %	인용	
뉴질랜드	Mount Victoria tunnel	자동차 배기가스	-25.9±0.8	[19][28]	
대한민국	태안(파도리)	봄(3월)	-24.63	[18]	
		봄(4월)	-23.89	[18]	
		봄(5월)	-27.08±0.4	[18]	
		가을(10월)	-23.47±0.2	[18]	
		겨울(12월)	-25.22	[18]	
		Non-Event	-24.44±1.1	[18]	
		석탄화력발전시설 비산재		-28.57~-7.96	[11]
			시멘트소성시설 비산재	-12.29~-3.15	[11]
	보령(발전소 1km)	PM2.5(여름-7월)	-24.57±0.54	[13]	
		PM2.5(여름-8월)	-25.76±0.51	[13]	
		PM2.5(가을-10월)	-24.68±1.33	[13]	
		보령(발전소 20km)	PM2.5(여름-7월)	-23.89	[13]
			PM2.5(가을-10월)	-24.59±1.48	[13]
		인천(경서동)	PM2.5	-22.06~-26.60	[12]
서울	터널	-25.31±0.20	[14]		
남산3호터널	터널(가을)	-25.33~-25.06	[15]		
홍지문터널	터널(가을)	-25.46~-25.05	[15]		
서울	톨게이트	-25.49±0.16	[14]		
남인천TG	톨게이트(가을)	-25.67~-25.28	[15]		
멕시코	멕시코시티	도로분진(봄~가을)	-21±0.2	[27][28]	
	centra Camionera del Norte	디젤차량 연소(봄)	-24.6±0.3	[27][28]	
	tunnel of Avenida Chapultepec	가솔린차량 연소(봄)	-25.5±0.1	[27][28]	
브라질	tunnel of Rio de Janeiro	자동차 배기가스(봄)	-25.1±0.4	[28][29]	
일본	유리혼조 시	석탄연소	-23.3	[21][28]	

아키타현	도로분진(가을)	-18.4~-16.4	[21][28]
	C4식물(봄~가을)	-19.3~-16.1	[21][28]
	백나무 숲	-26.5±0.1	[21][28]
	차콜 연소	-27.4±1.7	[21][28]
	C3식물(봄~가을)	-34.7~-28.0	[21][28]
	PM2.5(봄)	-24.4~-23.9	[21]
	PM2.5(여름)	-25.0~-24.2	[21]
	PM2.5(가을)	-24.8~-24.0	[21]
	PM2.5(겨울)	-24.6~-23.6	[21]
	SPM(봄)	-25.4~-23.8	[21]
	SPM(여름)	-25.7~-24.6	[21]
	SPM(가을)	-25.4~-24.4	[21]
	SPM(겨울)	-24.4~-23.1	[21]
	중국	베이징	여름
		석탄+차량(겨울)	-25.14 [11][14][17]
홍콩		자동차(겨울)	-26.62 [11][14][17]
장춘		겨울	-23.2±0.1 [25]
		석탄연소(겨울)	-23.13 [11][14][17]
Zhujiang tunnel	자동차 배기가스(여름)	-25.0±0.3 [28]	
캐나다	Cassier tunnel	자동차 배기가스	-27.0±0.1 [22][28]
프랑스	파리	석탄연소(봄~가을)	-23.9±0.5 [28][30]
		중유연소(봄~가을)	-26.0±0.5 [28][30]

선행연구에 의하면, 대기 중 탄소성 입자의 동위원소 비는 [표 3]과 같이 기원이 다양하고 지역 특성이 뚜렷하지 않으며, 실측데이터가 부족해 특정 오염원 추적에는 한계가 있다. 특히, 대기오염의 가장 많은 비중을 차지하는 석탄화력발전시설, 제철소 등 대규모 배출시설에 의한 오염원 규명에 관한 기초연구가 매우 미흡한 실정으로 장기적인 과학적 데이터 축적이 시급한 것으로 조사되었다.

표 3. 주요 기원별 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$) 라이브러리

구분	$\delta^{13}C$ %	인용
토양	-18.8±3.4	[21]
꽃가루	-28	[23][24][26]
C3식물	자연계	-32.0~-23.8 [16][25]
	Potherb mustard	-32.1 [21]
	대두	-28.8 [21]
	로즈마리	-31.7 [21]
	마른잎	-29.4 [21]
	몬트부레치아	-32.3 [21]
	벼	-28.0±0.1 [21]
	수박	-29.4 [21]
	오이	-29.2 [21]
	카모마일	-34.7 [21]
C4식물	해바라기	-30.7 [21]
	자연계	-13.5~-11.5 [25]
	옥수수	-16.1 [21]
	잔디	-19.3 [21]
연소	느티나무	-31.1 [16]
	벗짚	-27.1 [16]
	생장나무가지	-28.1 [16]
	생장나무가지 침엽	-30.1 [16]

	은행잎	-29.3	[16]
	쫄면잎	-27.2	[16]
	콩가지	-28.1	[16]
연소 (바이오매스)	C3식물	-32~-20	[17]
	C4식물	-17~-9	[17]
	농작물	-28.14~-27.12	[16]
	목재류	-31.08~-27.21	[16]
	자동차 배기가스	-28~-24.7	[16][25]
연소 (차량)	가솔린	-27	[28][31]
	가솔린 차량	-25.1~-23.5	[21][30]
	가솔린(SUV)	-20.6±1.5	[21]
	가솔린(경차)	-24.4±0.7	[21]
	가솔린(승용차)	-24.1±0.6	[21]
	디젤	-29	[28][31]
	디젤 차량(건설기계, 버스, 대형차량 등)	-24.9~-24.0	[21][30]
연료 (화석)	가스	-34	[17]
	고체	-23	[17]
	액체	-27	[17]
연료	백난로 숯	-26.5±0.1	[21]
	연탄	-21.3	[16]
	갈탄	-21.9	[16]
	차콜	-29.1~-25.7	[16][21]
연소 (연료)	석탄	-24.9~-21	[25]
	갈탄	-24.8	[16]
	차콜	-23.3	[16]
입자상 물질	굴뚝먼지	-24.4	[16]
	굴뚝재	-28.6	[16]
	아스팔트 분진	-1.8	[21]
	연석 분진	-16.4	[21]
	콘크리트 분진	-18.4	[21]
해양 생물상		-22	[17]

3. HYSPLIT 모델링

라이브러리를 활용한 채취시료의 오염원 기원 추정의 검증을 위해 미국의 NOAA/ARL(National Ocean and Atmospheric Administration/Air Resources Laboratory)에서 개발한 라그랑지안 입자확산모델 HYSPLIT(Hybrid Single Particle-Lagrangian Integrated Trajectory) 모델로 오염물질의 역방향 궤적을 추적하였다. HYSPLIT 모델은 오염물질의 농도뿐만 아니라 오염물질의 전방향 및 역방향으로의 궤적 추적이 가능하며[32], 분석영역 격자체적 내에서 연속적으로 배출되는 입자들을 주어진 시간농도에 대해 계산한다. 모델링을 위해서는 온도, 고도, 바람장, 해면기압 등의 기상자료가 필요하며, 일반적으로 미국 NCEP(National Centers for Environmental Prediction) 자료를 사용한다. 본 연구에서는 동경 126.65°, 북위 36.89°를 도착지점으로 NCEP 기상예측모델 결과인 공간해상도 1°의 GDAS(Global Data

Assimilation System) FNL(Final) 전구 재분석 자료를 적용하여 72시간으로 역궤적 경로를 모사하였다.

III. 연구결과

1. 안정동위원소비 분포

측정기간 동안 두지점에서의 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$)는 [표 4]와 같으며, 봄 -25.9~-25.1%, 여름 -27.9~-26.3%, 가을 -26.4~-25.9%, 겨울 -25.6~-24.2% 범위의 값을 가지는 것으로 나타났다.

석탄화력발전소와의 이격거리에 의한 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$)는 상대적으로 멀리 위치한 A지점에서 가벼운 값(봄철 제외)이 분포하고 가까운 B지점에 무거운 값이 분포하는 것으로 측정되었는데, 이는 오염기원의 영향도 있지만, 측정기간의 풍향과 풍속에 의한 영향도 높은 것으로 판단된다.

표 4. 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$) 분석결과

구분		이격거리	Mean	Mean±SD	Median
A	(봄) 2018.04.09.~04.10.	21.4km	-25.8%	-25.8±0.1%	-25.8%
	(여름) 2018.07.11.~07.12.		-26.4%	-26.4±0.1%	-26.4%
	(가을) 2018.10.17.~10.18.		-26.0%	-26.0±0.1%	-26.1%
	(겨울) 2019.01.16.~01.17.		-24.9%	-24.9±0.8%	-24.9%
B	(봄) 2018.04.11.~04.12.	10.4km	-25.2%	-25.2±0.1%	-25.2%
	(여름) 2018.07.12.~07.13.		-27.7%	-27.7±0.2%	-27.7%
	(가을) 2018.10.18.~10.19.		-26.3%	-26.3±0.1%	-26.3%
	(겨울) 2019.01.17.~01.18.		-25.1%	-25.1±0.0%	-25.1%

계절별 농도패턴은 [그림 1]과 같이 겨울철의 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}C$)가 가장 무거운 값을 보였고 봄, 가을, 여름 순으로 가벼운 값을 보이는 것으로 측정되었으며, 두지점은 유사한 계절 경향성을 보였다.

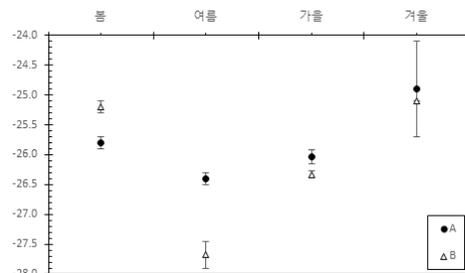


그림 1. 당진시 계절별 $\delta^{13}C$ 분포도

2. 라이브러리 매칭을 통한 기원 추정

본연구에서의 실측값과 선행연구결과를 토대로 작성한 라이브러리값의 비교를 통해 계절별 기원을 추정하여 [그림 2]에 나타내었다. 계절별 주요 오염기원은 상이하나, 상대적으로 이동오염원과 노천소각이 당진시 대기오염에 상당한 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

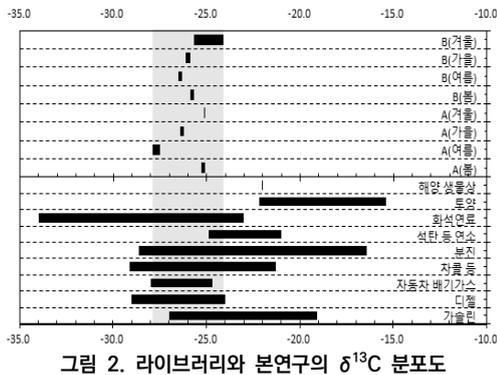


그림 2. 라이브러리와 본연구의 $\delta^{13}\text{C}$ 분포도

당진시 봄철 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)는 멕시코의 Avenida Chapultepec 터널, 브라질 Rio de Janeiro 터널, 일본 아키타현, 국내 홍지문 터널과 서울 톨게이트, 남인천 톨게이트와 유사한 값을 보이는 것으로 조사되었다. 주요 오염기원은 이동오염원에 의한 배기가스, 증유(연료) 연소, 화석연료(액체), 바이오매스(농작물) 연소 등으로 추정된다.

비교적 가벼운 값을 보이는 여름철의 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)는 캐나다 Cassier 터널과 유사한 것으로 분석되었다. 주로 바이오매스 중 C3식물과 목재류의 연소, 이동오염원에 의한 배기가스, 자연계에 존재하는 C3식물, 벚짚과 잣나무잎 연소 등에 의한 지역 대기오염 영향이 상대적으로 높은 것으로 추정된다.

가을철의 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)는 베이징(중국)과 유리혼조시(일본)에서의 측정값과 유사한 것으로 조사되었고 주 오염원은 석탄화력발전시설 비산재와 숲, 차풀 그리고 이동오염원에 의한 배기가스 등으로 분석되었다.

겨울철의 경우 멕시코 Avenida Chapultepec 터널, 중국 베이징에서의 석탄과 자동차 연소 측정값, 일본 아키타현의 여름과 겨울철 부유입자물질(SPM)·PM10,

충청남도 태안군 파도리측정소에서 측정된 겨울시료, 보령화력발전 인근 1km에서 측정된 여름시료, 서울·남인천 톨게이트와 유사한 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)를 보이는 것으로 조사되었고 주요 오염기원은 이동오염원(대형차량 등)의 배기가스로 추정된다.

3. HYSPLIT 모델을 이용한 역궤적 분석

HYSPLIT 모델을 통한 측정기간 동안의 역궤적 분석 결과를 [그림 3]-[그림 6]에 나타내었다.

봄철 측정기간은 2018.04.09.~12.이며, 중국동북지역 및 동남지역 기원의 장거리 오염물질이 서해와 남해상을 거쳐 당진시로 유입된 것으로 분석되었다.

한편, 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)가 가장 낮은 여름철의 측정기간은 2018.07.11.~13.로 남동풍에 의한 태평양 기원 장거리 오염물질이 일본을 거쳐 유입된 것을 확인할 수 있었다.

가을의 경우 2018.10.17.~19.에 측정하였으며, 중국, 몽골, 러시아에서 발생한 장거리 오염물질이 북한을 통과하여 측정지점에 유입됨으로써 대기오염에 영향을 주는 것으로 나타났다.

겨울시료는 2019.01.16.~18. 기간동안 측정하였고 러시아와 중국 기원의 장거리 오염물질이 북서풍에 의해 국내에 유입되어 고농도 사례일이 관측된 당진시에 상당한 영향을 미친 것으로 확인되었다.

IV. 결론

본 논문은 석탄화력발전소 주변지역 대기오염원의 기원 추적에 관한 연구로 과학적 실증자료 구축과 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)의 환경오염원 추적자로서의 활용 가능성 검토를 위해 라이브러리와 HYSPLIT 모델을 이용하여 결과를 비교·검증하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

1. 실측값은 석탄화력발전소와의 인접도와 계절적 요인에 의한 영향이 큰 것으로 분석되었으며, 이격거리가 멀수록 가벼운 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)가 분포하는 것을 확인할 수 있고, 겨울과 봄철에 상대적으로 무거운 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)가 주로 관측되었다.

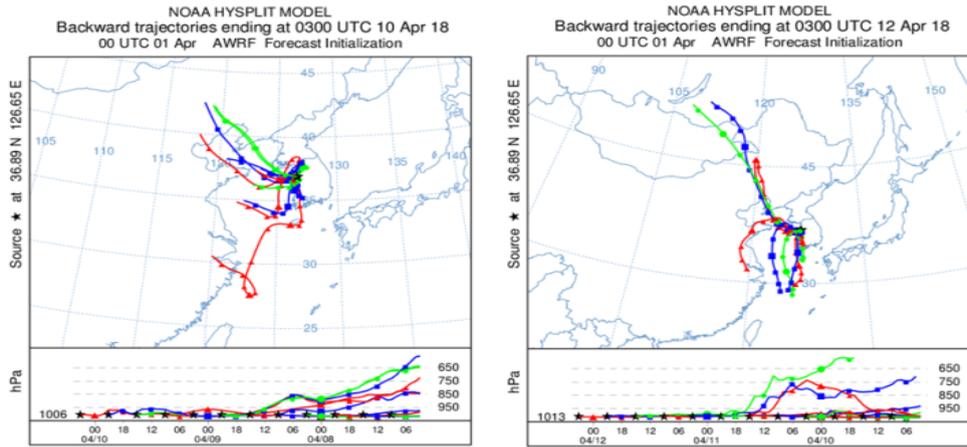


그림 3. 봄철 역궤적 분석 결과

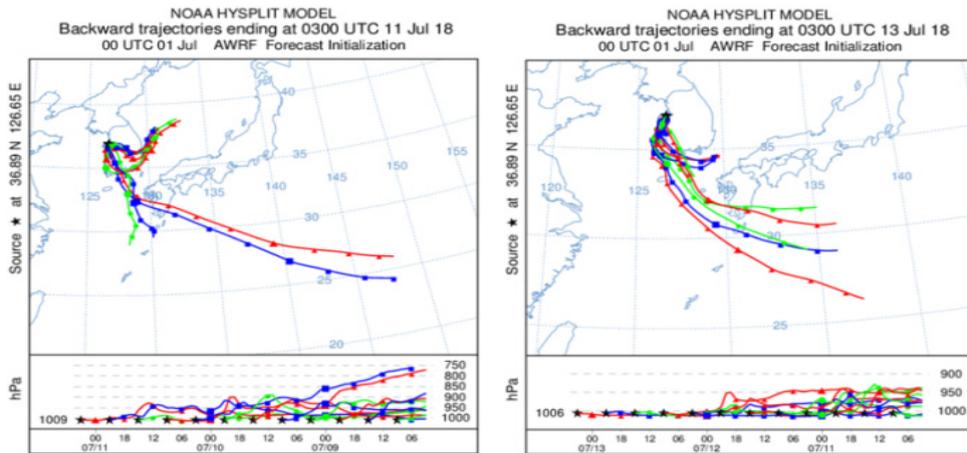


그림 4. 여름철 역궤적 분석 결과

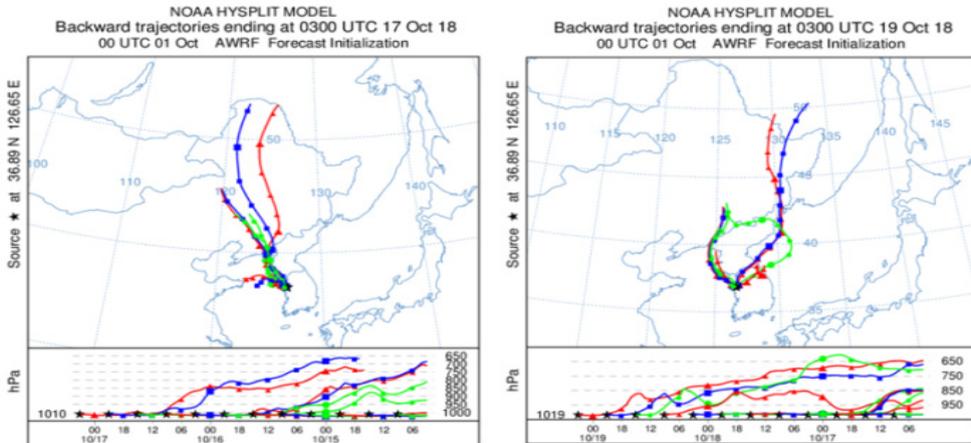


그림 5. 가을철 역궤적 분석 결과

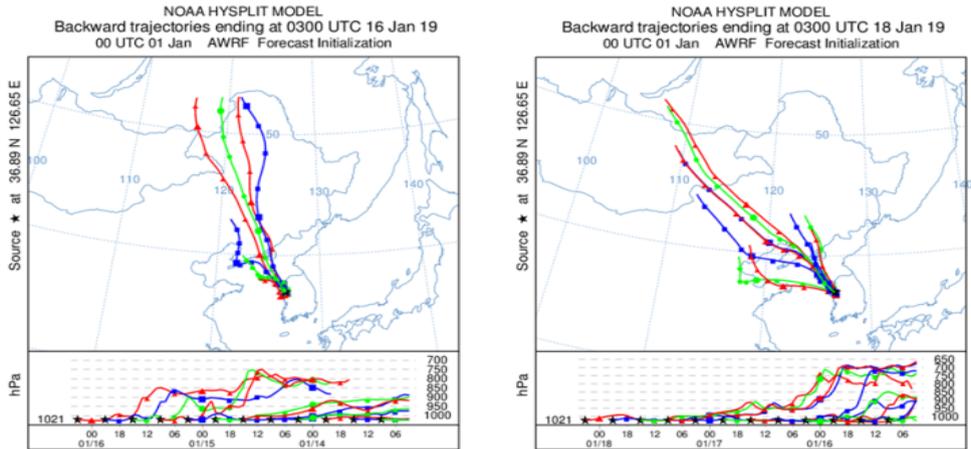


그림 6. 겨울철 역궤적 분석 결과

2. 라이브러리와의 매칭결과에 의하면, 봄에는 국내 외 터널에서의 측정값과 유사한 수준을 보이고 여름의 경우 자연계에 존재하는 측정값과 유사한 것으로 분석되었다. 가을에는 인접국가인 중국, 베이징의 일부 도시와 유사한 값을 보이는 것으로 조사되었으며, 겨울은 국내의 터널과 석탄화력발전시설, 차량 배기가스와 값이 유사한 것으로 분석되었다.

3. 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)의 추적기법 적용을 위해 라이브러리와의 매칭 방법론을 HYSPLIT 모델로 검증하였으며, 봄과 여름을 제외한 가을(중국 기원의 석탄화력발전시설 장거리 오염물질 유입), 겨울(중국과 국내 기원의 석탄화력발전시설과 차량 배기가스 장거리 오염물질 유입)의 유입기류 경로와 매칭결과가 유사한 것을 확인할 수 있었다.

결과적으로 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$)는 환경오염원 추적자로 내외부 유입-유출 기여도 파악, 오염기원에 따른 맞춤형 저감정책 수립, 국내외 저감협력을 위한 근거자료로의 활용도가 높을 것으로 기대된다.

본 연구에서 도입한 기법은 선행연구 라이브러리에 의존하는 방법으로 비교 DB가 누락되거나 미흡한 경우 원인자 추적에 한계가 있다. 즉, 보유하고 있는 DB 범위에서 제한적 기원 추정이 가능하다.

이에 결과의 신뢰성을 확보하기 위해서는 첫째, 측정지점, 횡수 등을 확대하여 조사지점에 대한 장기적인 실측데이터를 누적시켜야 한다. 둘째, 비교 대상인 오염원에 대한 동일 추적자의 실측데이터가 구축되어 있어

야 하며, 영향을 줄 수 있는 주변 환경매체를 고려하고 해당 데이터를 확보해야 한다.

후속연구로 탄소 안정동위원소비($\delta^{13}\text{C}$) 이외의 원소를 적용한 추적연구가 필요하며, 활발한 연구를 통한 장기 모니터링 DB가 누적되고 대기확산모델의 예측-검증과정이 수반된다면, 석탄화력발전소가 주변지역에 미치는 영향에 대하여 보다 명확히 규명할 수 있을 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] T. E. Adil'bayeva, A. V. Talovskaya, Y. G. Yazikov, and I. A. Matveenko, "The level of air pollution in the impact zone of coal-fired power plant (Karaganda City) using the data of geochemical snow survey (Republic of Kazakhstan)," *Earth and Environmental Science*, Vol.43, pp.1-5, 2016.
- [2] E. Amster and C. L. Levy1, "Impact of Coal-fired Power Plant Emissions on Children's Health: A Systematic Review of the Epidemiological Literature," *J. of Environ Res Public Health*, Vol.16, No.11, pp.1-11, 2019.
- [3] V. C. Kok, P. R. Winn, Y. J. Hsieh, J. W. Chien, J. M. Yang, and G. P. Yeh, "A Pilot Survey of Potentially Hazardous Trace Elements in the

- Aquatic Environment Near a Coastal Coal-Fired Power Plant in Taiwan,” *Environmental Health Insights*, Vol.13, pp.1-11, 2019.
- [4] 서동환, 맹준호, “화력발전소 회차리장 조성에 따른 환경영향 최소화를 위한석탄회 재활용 확대방안에 관한 연구,” 한국환경영향평가학회, 제24권, 제5호, pp.472-486, 2015.
- [5] 송창우, 한협철, 이종운, “보령 석탄 화력발전소 인근 토양 내 중금속 분포 특성,” 한국자원공학회지, 제56권, 제1호, pp.10-22, 2019.
- [6] 전병근, 이상혁, “점오염원의 대기오염방지시설 개선에 의한 대기질 영향 분석,” 한국산학기술학회 논문지, 제16권, 제4호, pp.2876-2882, 2015.
- [7] C. Patricia, *Emissions of Inorganic Trace Pollutants from Coal Power Generation*, Air Pollution: monitoring, quantification and removal of gases and particles, pp.127-144, 2019.
- [8] 박현우, 김민섭, 박재선, 윤숙희, 김명진, 김지영, 신현상, 최중우, “화학적 조성과 안정동위원소 비 분석을 이용한 PM2.5 발생원 추적,” 한국환경분석학회지, 제20권, 제4호, pp.266-278, 2017.
- [9] 박광수, 김혁, 유석민, 노샘, 박유미, 석광설, 김민섭, 윤숙희, 김영희, “안정동위원소를 이용한 이동오염원에 의한 대기 중 NO의 거동특성 연구,” 분석과학, 제32권, 제1호, pp.17-23, 2019.
- [10] 이원석 김민섭, 황종연, 김금희, 최성현, 최중우, 홍석영, 이성수, 이수영, 이혜리, 김지영, 윤숙희, 박상아, 김명옥, 임보라, 박현우, *IRMS를 이용한 환경오염물질의 안정동위원소 분석기법 연구(III)*, 국립환경과학원, 2014.
- [11] 김영희, 석광설, 박진수, 김혁, 이성수, 최중우, 황종연, 김정훈, 박진주, 유석민, 박광수, 김민섭, 최경희, *안정동위원소를 이용한 중금속 오염물질의 장거리 이동 추적 연구(I)*, 국립환경과학원, 2013.
- [12] 김영희, 석광설, 박유미, 임정연, 최중우, 안준영, 신혜정, 임용재, 김지영, 김민섭, 박진주, 유석민, 박광수, *안정동위원소를 이용한 중금속 오염물질의 장거리 이동 추적 연구(II)*, 국립환경과학원, 2014.
- [13] 김영희, 석광설, 박유미, 임정연, 최중우, 김기준, 김지영, 김민섭, 윤숙희, 박진주, 유석민, 박광수, 최경희, *국내 주요 배출원별 안정동위원소 라이브러리 구축 (II)*, 국립환경과학원, 2014.
- [14] 김영희, 석광설, 박유미, 안준영, 이민도, 임용재, 김지영, 김민섭, 박진주, 유석민, 박광수, 김명진, *안정동위원소를 이용한 중금속 오염물질의 장거리 이동 추적 연구(III)*, 국립환경과학원, 2015.
- [15] 김영희, 석광설, 박유미, 김지영, 김민섭, 박진주, 유석민, 박광수, 김명진, 박재선, 김정수, 유홍민, *국내 주요 배출원별 안정동위원소 라이브러리 구축(III)*, 국립환경과학원, 2015.
- [16] 한양대학교, *안정동위원소를 이용한 환경 오염원 추적 연구기반 구축(II)*, 국립환경과학원, 2015.
- [17] 김영희, 석광설, 김혁, 안준영, 이민도, 김지영, 김민섭, 유석민, 박광수, 노샘, 김명진, 최경희, *안정동위원소를 이용한 중금속 오염물질의 장거리 이동 추적 연구(IV)*, 국립환경과학원, 2016.
- [18] 박현우, *화학적 조성과 동위원소 분석을 이용한 PM2.5 발생원 추적*, 서울과학기술대학교, 석사학위논문, 2017.
- [19] T. Ancelet, P. K. Davy, W. J. Trompeter, A. Markwitz, and D. C. Weatherburn “Carbonaceous aerosols in an urban tunnel,” *Atmospheric Environment*, Vol.45, pp.4463-4469, 2011.
- [20] T. W. Boutton, “Stable Carbon Isotope Ratios of Natural Materials: II. Atmospheric, Terrestrial, Marine, and Freshwater Environments,” *Environmental Science*, Vol.24, No.3, pp.173-185, 1991.
- [21] Hiroto Kawashima and Yuya Haneishi, “Effects of combustion emissions from the Eurasian continent in winter on seasonal $\delta^{13}C$ of elemental carbon in aerosols in Japan,” *Atmospheric Environment*, Vol.46, pp.568-579, 2012.
- [22] L. Huang, J. R. Brook, W. Zhang, S. M. Li, L. Graham, D. Ernst, A. Chivulescu, and G. Lu, “Stable isotope measurements of carbon fractions (OC/EC) in airborne particulate: A new dimension for source characterization and apportionment,” *Atmospheric Environment*, Vol.40, pp.2690-2705, 2006.
- [23] J. Jung and K. Kawamura, “Springtime carbon emission episodes at the Gosan background

- site revealed by total carbon, stable carbon isotopic composition, and thermal characteristics of carbonaceous particles," Atmospheric Chemistry and Physics, Vol.11, pp.10911-10928, 2011.
- [24] J. Moura, C. S. Martens, M. Moreira, R. Lima, I. Sampaio, H. P. Mendlovitz, and M. C. Menton, "Spatial and seasonal variations in the stable carbon isotopic composition of methane in stream sediments of eastern Amazonia," Tellus B: Chemical and Physical Meteorology, Vol.60, pp.21-31, 2008.
- [25] J. J. Cao, J. C. Chow, J. Tao, S. C. Lee, J. G. Watson, K. F. Ho, G. H. Wang, C. S. Zhu, and Y. M. Han, "Stable carbon isotopes in aerosols from Chinese cities: Influence of fossil fuels," Atmospheric Environment, Vol.45, pp.1359-1363, 2011.
- [26] L. A. Martinelli, P. B. Camargo, L. B. L. S. Lara, R. L. Victoria, and P. Artaxo, "Stable carbon and nitrogen isotopic composition of bulk aerosol particles in a C4 plant landscape of southeast Brazil," Atmospheric Environment, Vol.36, pp.2427-2432, 2002.
- [27] D. L. Veneron, "The stable carbon isotope composition of PM2.5 and PM10 in Mexico City Metropolitan Area air," Atmospheric Environment, Vol.43, pp.4491-4502, 2009.
- [28] S. Dai, X. Bi, L. Y. Chan, J. He, B. Wang, X. Wang, P. Peng, G. Sheng, and J. Fu, "Chemical and stable carbon isotopic composition of PM2.5 from on-road vehicle emissions in the PRD region and implications for vehicle emission control policy," Atmospheric Chemistry and Physics, Vol.15, pp.3097-3108, 2015.
- [29] R. L. Tanner and A. H. Miguel, "Carbonaceous Aerosol Sources in Rio De Janeiro," Aerosol Science and Technology, Vol.10, pp.213-223, 1989.
- [30] D. Widory, S. Roy, Y. L. Moullec, G. Goupil, A. Cocherie, and C. Guerrot, "The origin of atmospheric particles in Paris: a view through carbon and lead isotopes," Atmospheric Environment, Vol.38, pp.953-961, 2004.
- [31] D. Widory, "Combustibles, fuels and their combustion products: A view through carbon isotopes," Combustion Theory and Modelling, Vol.10, pp.831-841, 2006.
- [32] 안혜연, 강윤희, 송상근, 김유근, "CALPUFF와 HYSPLIT의 방사성물질 대기확산 특성 비교," 한국대기환경학회지, 제31권, 제6호, pp.573-584, 2015.

저 자 소 개

윤 수 향(Soohyang Yoon)

정회원



- 2009년 2월 : 선문대학교 환경공학과(공학사)
- 2011년 2월 : 동국대학교 토목환경공학과(공학석사)
- 2013년 8월 : 동국대학교 건설환경공학과(박사 수료)
- 2015년 10월 ~ 현재 : 충남연구원

원 기후변화대응연구센터 연구원

〈관심분야〉 : 기후변화 대응, 환경교육, 정책연구, 안정동위원소, 수자원환경공학

조 봉 연(Bong-Yeon Cho)

정회원



- 1986년 2월 : 동아대학교 토목공학과(공학석사)
- 1991년 2월 : 일본 동경대학교 도시공학과(공학박사)
- 1997년 9월 ~ 현재 : 동국대학교 건설환경공학과 교수

〈관심분야〉 : 상·하수도, 막여과, 해수담수화