

전자빔을 이용한 SF₆ 처리 공정의 경제성 분석

Cost Benefit Analysis of SF₆ Decomposition Process Using an Electron Beam

박 준 형 · 서 서 희 · 손 윤 석*

한국원자력연구원 공업환경연구부

(2017년 7월 5일 접수, 2017년 8월 7일 수정, 2017년 8월 8일 채택)

Jun-Hyeong Park, Seo Hee Seo and Youn-Suk Son*

Research Division for Industry & Environment, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 5 July 2017, revised 7 August 2017, accepted 8 August 2017)

Abstract

This study was performed to investigate whether the decomposition process of SF₆ using an electron beam is economically reasonable when applied to the actual field. To do this, electron beam experiment and economic analysis were conducted. The experiment conditions are initial concentration of 1% of SF₆, 1 mA of input energy and 15 mA of flow rate with H₂ as an additive which were obtained from our previous research. As a result, removal efficiency of SF₆ was 90% for 8 hours continuously. In addition, economic analysis shows positive results in terms of using SF₆ decomposition process using electron beam. According to the analysis, the revenue is approximately 1.66 billion won in the first year and 3 billion won in the second year.

Key words : SF₆, Sulfur hexafluoride, Economic analysis, Electron beam

1. 서 론

육불화황(Sulfur Hexafluoride: SF₆)가스는 우수한 절연성능과 불활성을 가지는 특징이 있어 절연매체로 주로 사용되고 있으며 전력기기의 대용량 고전압화 및 소형화에 크게 이바지하여 변전용 전력설비의 절연매체로 현재 가장 널리 사용되고 있다(Lee, 2002). 그러나 SF₆는 대표적인 온실가스로 지정되어 있으며 그중에서도 지구온난화 지수(Global Warming Potential: 23,900)가 가장 높은 물질로 열적, 화학적으로 매우 안

정하기 때문에 한번 대기로 방출되면 3,200년 동안 대기 중에 잔존해 연간 방출량이 적더라도 계속해서 누적될 경우 그 영향이 매우 크다고 할 수 있다(EPA, 2015; Tsai, 2007; Yoo *et al.*, 2007; Chang and Lee, 2004; IPCC, 2001).

한편 SF₆ 처리 방법으로는 화학흡착법(Chemical adsorption), 심냉분리법(Cryonic capture), 압력순환 흡착법(Pressure swing adsorption) 등 non-destructive 기술과 연소식(Combustion method), 촉매식(Catalytic method), 플라즈마 분해법(Plasma decomposition), 전자빔 분해법(Electron beam decomposition) 등과 같은 destructive 기술들이 연구되어 왔다(Son *et al.*, 2016;

*Corresponding author.

Tel : +82-(0)63-570-3345, E-mail : sonys@kaeri.re.kr

Kim *et al.*, 2013a, b; Park *et al.*, 2012; Ryu *et al.*, 2012; Lee *et al.*, 2011, 2009). 특히 전자빔을 이용한 공정에서는 고농도 자유라디칼과 이온들이 빠른 속도로 대상 물질과 반응해 그 처리 속도가 매우 빠르고, 버너를 활용해야 하는 연소, 플라즈마 등을 이용하는 처리 기술보다 저온에서 운영이 가능하기 때문에 에너지 사용량이 적은 장점이 있어 여러 물질이 복합적으로 배출되는 산업시설에 경제적으로 적용할 수 있다고 보고되고 있다(Park *et al.*, 2005; Hirota *et al.*, 2004).

Ryu *et al.* (2012)과 Kim *et al.* (2013a, b)은 1,000 ppm 미만의 SF₆를 대상으로 전자빔과 함께 H₂를 첨가물질로 하여 처리할 경우 최대 90% 이상의 효율을 얻는 것으로 보고하고 있다. 또한 Son *et al.* (2016)은 고농도의 SF₆ (2~10%)를 전자빔을 이용해 최적의 처리 조건을 도출해 보고하였다.

한편, 2016년 12월 기준 한국의 온실가스배출량은 세계 6위, 배출증가율 2위, 산업부문, 연료연소부문 배출량 세계 7위지만, 국가적 기후변화 대응노력은 온실가스 배출 상위 90% 국가 58개국 중 54위(German Watch, 2016)로 매우 저조한 것으로 평가되었다(표 1). 또한 Climate home은 최근 기후행동추적(Climat Action Tracker: CAT)의 분석 결과를 인용하여 사우디아라비아, 호주, 뉴질랜드와 함께 우리나라를 2016년 4대 기후불량국가로 선정하는 등 국제사회에서 미흡한 기후관리국이라는 이미지가 강화되고 있는 실정이기 때문에 국가적인 차원에서 온실가스의 관리가 절실히 필요한 실정이다(Climaeactiontracker.org, 2017).

전자빔을 이용한 SF₆ 처리 공정의 최적화 요소기술은 선행연구를 통해서 이미 확보되었지만, 이 기술을 실제 현장 가동조건에서 제어효율의 안정화와 이에 따른 정량적인 효과를 분석한 사례는 없는 것으로 여겨진다. 따라서 본 연구에서는 선행연구를 통해 개발된 전자빔을 이용한 SF₆ 처리 공정을 바탕으로 현장 가동 조건에서 안정성 여부를 파악하고, 그 결과를 바탕으로 처리 대상 물질인 SF₆의 처리 예상량 및 기업의 수익 규모를 관련 근거의 제시와 함께 분석해보고자 한다.

2. 연구 방법

2.1 SF₆ 처리 기술의 안정화

기존 연구를 통해 얻은 전자빔을 이용한 SF₆ 처리 기

Table 1. GHG emissions and response levels by county.

World emission ranking	Total emissions by Countries (IEA, 2015)	Emissions by sources (GIR, 2014 and 2016)				Emissions growth in OECD (13~14)	Emissions growth in OECD (90~14)	Emissions growth in OECD (13~14)	CCPI, 2016 ^a
		Fuel combustion per person in 2014 (CO ₂ ; OECD)	Fuel combustion (the world)	Transportation	Industry				
1	China	Luxembourg	China	USA	USA	USA	Turkey	Denmark	
2	United States	USA	USA	Russia	Russia	Russia	USA	United Kingdom	
3	India	Australia	India	Japan	France	Turkey	Canada	Sweden	
4	Russia	Canada	Russia	Canada	Australia	England	New Zealand	Belgium	
5	Japan	Estonia	Japan	Germany	Germany	Canada	Iceland	France	
6	Germany	Korea	Germany	Turkey	Canada	Japan	Norway	China(47)	
7	Korea	Japan	Korea	Canada	England	Italy	Sweden	Korea(57)	
8	Canada	Czech	Iran	Ukraine	Spain	Poland	Hungary	Japan(58)	
9	Iran	Germany	Canada	France	Poland	Korea	Korea		
10	Saudi Arabia	Netherlands	Saudi Arabia	Australia	Ukraine	Spain	Spain		

^aClimate Change Performance Index, 2016

술은 제어인자 및 조건에 따른 최적의 제어효율 기술을 확보하였지만, 현장에 바로 적용하기에는 장기운영 측면에서 그 한계가 있다. 따라서, 본 연구에서는 기존 연구(Park *et al.*, 2017; Son *et al.*, 2016)를 통해 확보한 최적 가동조건을 통해서 전자빔 공정을 현장에서 1일 가동기준인 8시간 동안 지속적으로 제어효율을 유지할 수 있는지를 알아보았다. 본 연구에서 사용된 가동 조건은 표 2에 나타내었고, 제어효율은 GC-GASPRO (90 m (L)*0.32 mm (I.D.), J&W Scientific, USA) 칼럼이 장착된 GC/MS (GCMS-QP2000 Ultra, Shimadzu, Japan)를 통해 분석하였다.

2.2 경제성 평가 대상 분석

경제성 분석의 처리 대상 물질인 SF₆의 국내 배출 및 사용현황을 살펴보면 2014년 8월 기준 (주)한국전력이 증전기기에 사용 중인 SF₆ 총량은 5,332톤(127.51백만 톤CO₂e, 에너지타임즈, 2014.08.28)이며, 최근 5년간 누출, 유지보수 및 노후설비 폐기 등으로 대기방출 양이 최근 연 110만톤CO₂e에 이르고 있다고 한다(표 3). 대기방출량만을 대상으로 국내 배출권 가격(20,500원/톤, 2017.06)을 적용할 경우 약 2억 3천만 원의 규모이다.

국내 전력산업분야 SF₆의 시장규모 및 감축 가능량 추정은 온실가스종합정보센터에서 발행한 2016 국가온실가스 인벤토리 보고서(GIR, 2016)를 근거로 하였다.

Table 2. Optimal conditions of SF₆ decomposition process.

Factor	Optimal condition
Initial concentration (%)	1
Flow rate (L/min)	5
Input energy (mA)	15
Additive gas	H ₂
Background gas	Ar

2.3 비용편익 계산 기준

실험을 통해 확보한 SF₆ 처리 기술을 상업적으로 활용하였을 경우 처리기업의 비용편익을 계산하였는데, 2014년 기준 전력산업 배출 SF₆ 총량인 약 322톤SF₆/년을 처리 대상량으로 고정하였다. 기준 전자빔의 용량은 2.5 MeV, 40 mA (100 kW)을 기준으로 하였으며 SF₆의 처리효율은 90%로 가정하고 분석하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 현장 적용

SF₆의 제어효율을 일정 수준 이상 안정적으로 유지하는 것은 전자빔 공정이 현장에 적용 가능한지 여부를 판단할 수 있는 중요한 요소이다. 따라서, 개발된 전자빔 제어공정의 현장 적용 여부를 판단하기 위해 1% SF₆를 유속 5 L/min, 투입에너지 15 mA, 첨가가스 H₂를 사용해 실험한 결과를 그림 1에 나타내었다. 그 결과 제거효율은 약간의 편차는 보였지만 지속적으로 90% 이상 유지되는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 개발된 SF₆ 처리 기술의 현장 활용이 가능할 것으로 판단하고,

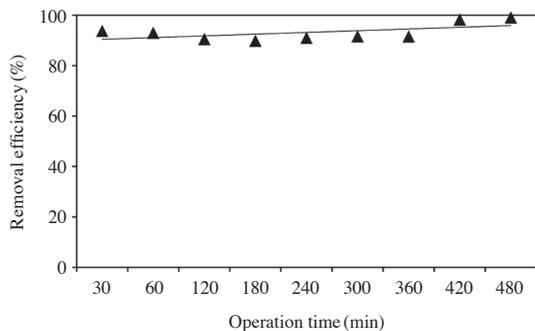


Fig. 1. Long-term operation test using an electron beam (5 L/min, 15 mA; Park *et al.*, 2017).

Table 3. Usage and emissions of SF₆ in KEPCO (Korea Electric Power Corporation). (Unit: tons)

	2010	2011	2012	2013	2014
Supplement	0.9	13.2	26.4	26.3	23.2
Maintenance	40.8	6.7	2.7	2.9	6.2
Obsolete equipment	16.9	10.5	9.6	13.1	14.8
Etc. (emergency inspection)	13.6	8.3	3.0	4.1	1.9
Total emissions (SF ₆)	72.2	38.7	41.7	46.4	46.1
Total emissions (CO ₂ e)	1,725,580	924,930	996,630	1,108,960	1,101,790

Table 4. SF₆ emissions from the power system (GIR, 2016).

(Unit: tons)

	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999
Production	23	45	49	50	124	491	299	283	131	395
Use	97	142	187	240	311	532	991	1,316	1,529	1,926
Disposal	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009
Production	322	338	295	330	227	391	248	330	306	333
Use	2,243	2,527	2,869	3,202	3,427	3,957	4,349	4,684	4,979	5,246
Disposal	-	-	-	-	184	62	74	137	120	46
	2010	2011	2012	2013	2014					
Production	611	242	138	147	154					
Use	5,634	6,169	6,332	6,386	6,467					
Disposal	110	79	5	5	6					

이를 바탕으로 경제성 분석을 진행하였다.

3.2 SF₆ 시장규모 및 배출량 산정

경제성 분석에 앞서 SF₆의 시장규모 및 배출량의 산정은 온실가스종합정보센터에서 발행한 2016 국가온실가스 인벤토리보고서를 근거로 하였으며, 2014년을 기준으로 한해 SF₆ 발생량은 약 322톤SF₆(7,186,730톤CO₂e)이며 동년 배출 할로카본 및 SF₆ 소비량의 38.3%에 해당된다. 2014년을 기준으로 한해 SF₆ 발생량 계산 근거는 다음과 같다.

표 4에서 2014년 기준 생산단계 154톤SF₆ 및 폐기단계 6톤SF₆가 발생되고 있는 것으로 집계되어 있다. 그러나 이 현황표에 추가되어야 할 SF₆ 배출량은 다음과 같다. 즉, 중전기기 정기점검 중 배출량의 경우 한전의 내규에 따르면, 정기점검은 매 6년마다(최초 점검은 7년), 정기점검 시 SF₆ 97%를 회수한다고 하므로 2014년 한해 배출량은 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$(6467 \div 6) \times 0.03 = 32.34 \text{톤SF}_6$$

또한 상기 표에는 수명완료 된 중전기기는 배제되어 있다. 따라서, 수명완료 된 장비의 SF₆ 재사용율을 60% (40%는 순도 97% 이하로 폐기 가정), 또, 중전기기의 수명을 20년으로 본다면, 2014년 사용기준 수명완료 기기의 SF₆ 배출량은

$$6467 \times 1/20 \times 0.4 = 129.34 \text{톤SF}_6$$

따라서, SF₆ 처리시장규모는 2014년을 기준으로 하

여 계산하면

$$154 \text{(생산단계)} + 6 \text{(폐기)}$$

$$+ 32.34 \text{(정기점검)} + 129.34 \text{(수명완료)}$$

$$= \text{약 } 322 \text{톤SF}_6 \text{ (7,695,800톤CO}_2\text{e)}$$

(7.7백만원 × 20,500원/톤 = 약 1578억 원, 2017년 6월 거래기준)

즉, 2014년 기준 중전기기에서 배출된 총량의 비율은 산업공정(54.6백만톤CO₂e) 총 배출량의 14.1%이며 (표 5), 2014년도 우리나라 온실가스 총 배출량(690.6백만톤CO₂e, 표 5)의 1.11%, 할로카본 및 SF₆ 소비량(20.1백만톤CO₂e, 표 6)의 38.3%, 한전이 사용하고 있는 SF₆ 사용량의 약 6.03%에 해당된다.

2012년 한전이 사용 중인 SF₆ 총량은 5,335톤으로, 127.51백만톤CO₂e에 해당되며, 대체 절연물질 개발 시 전량 폐기해야 할 대상이다.

3.3 비용편익 계산

비용편익 계산은 선행연구를 통해 개발된 기술을 상업적으로 활용하였을 경우 처리기업의 비용편익을 2.3절에 기재한 조건을 기준으로 계산하였으며 그 과정은 다음과 같다.

제어효율이 90%일 때 100kW급의 전자빔을 활용하여 하루 SF₆를 처리했을 경우 100 kW/3486 kGy (흡수선량) × 0.9 (제거효율) × 24 hr (하루 가동) = 2,232 kg/day의 양을 처리할 수 있다. 따라서, 1톤의 1% SF₆를 처리하기 위해서는 1000 kg × (1/2,232 kg/day) = 0.448

Table 5. The emissions and absorptions of GHG by field (GIR, 2016).(Unit: million ton CO₂eq.)

	Greenhouse gas emissions						Growth rate in 2014 compared to 1990	Growth rate in 2014 compared to 2013
	1990	2000	2010	2012	2013	2014		
Energy	241.4	410.4	565.2	597.7	606.7	599.3	148.3%	-1.2%
Industrial process	19.4	49.6	54.0	51.7	52.0	54.6	177.3%	5.0%
Agriculture	21.6	21.8	22.4	21.9	21.9	21.3	-1.5%	-2.7%
LULUCF ^a	-34.1	-58.8	-54.3	-44.7	-42.8	-42.5	24.5%	-0.7%
Waste	10.4	18.9	15.1	15.8	16.0	15.4	47.8%	-3.3%
Total emissions (Exclude LULUCF)	293.1	500.6	656.6	687.1	696.5	690.6	135.6%	-0.8%
Net emissions (Include LULUCF)	259.0	441.8	602.3	642.4	653.8	648.1	150.2%	-0.9%

^aLand use, Land-Use Change and Forestry**Table 6. The emissions of GHG in the industrial process field (GIR, 2016).**(Unit: million ton CO₂eq.)

	1990	1995	2000	2005	2010	2011	2012	2013	2014
Mineral	18.2	31.5	28.6	28.1	30.9	32.0	32.0	32.1	33.2
Chemical	0.3	3.5	7.2	11.2	0.7	0.8	0.8	0.8	0.9
Metal	0.1	0.1	0.1	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4
Production of halocarbons and SF ₆	1.0	2.6	3.2	6.4E-05	1.3E-04	1.2E-04	8.5E-05	3.0E-05	-
Consumption of halocarbons and SF ₆	0.2	6.0	10.3	14.8	22.1	18.6	18.6	18.7	20.1
Total	19.7	43.8	49.6	54.3	54.0	51.7	51.7	52.0	54.6

day가 소요된다. 이를 100% 처리하는 기준으로 하면 44.8 day가 요구되는 것으로 나타났다. 이는 1년에 1대의 가속기에서 100% SF₆ 약 8톤을 처리할 수 있는 것을 의미한다. 이때 사용되는 전기세를 계산해보면 100 kW × 80원/kW·h = 8,000원/hr이며 24시간 가동한다고 가정하면 1일당 192,000원의 비용이 발생한다. 따라서 100% SF₆ 1톤을 처리하기 위해서는 192,000원/day × 44.8 day = 8,610,600원이 발생하게 된다. 그러므로 100% SF₆ 8톤(1년 처리기준)을 처리하기 위해서는 68,812,800원의 전기세가 발생할 것으로 추정할 수 있다. 여기서 SF₆ 1톤은 CO₂ 23,900톤에 해당됨으로, 1톤의 SF₆의 배출권거래를 통해 489,950,000원(한국거래소, 2017.06; CO₂ 1톤당 20,500원)의 수익을 확보할 수 있을 것으로 판단된다. 이를 바탕으로 2.5 MeV, 40 mA (100kW) 전자빔 가속기 한 대를 사용하여 SF₆를 처리했을 때 연간 수익을 산정한 결과를 표 7에 나타내었다.

표 7과 같이 전자선 가속기 설치 최초 년도에는 16.6억 원 정도의 이익이 창출되는 것으로 추정되고, 차년도부터는 전자선 가속기의 설치비용이 제외되기 때문에 수익은 30억 원 이상이 될 것으로 예상된다.

Table 7. Profit chart (an electron beam: 2.5 MeV, 40 mA (100kW)).

(Unit: billion won)

Income of SF ₆ emission trading	39.87
Cost of building and electron beam accelerator	-20
Electricity cost	-0.69
Labor cost	-1.5
Maintenance cost (0.5% of process)	-0.1
Additive gas cost	-1
Final revenue (Income of SF ₆ emission trading - Cost of building and operating an electron beam)	16.58

또한 SF₆ 처리 공정에서 분해부산물로 발생하는 무수 HF (Hydrogen fluoride)와 황은 회수 및 자원화로 부산 폐기물 처리비용을 경감하고 환경문제 발생을 최소화할 수 있다. 재활용되는 고농도 HF는 타 불화물의 원료 또는 전자, 반도체의 에칭에 활용할 수 있으며, 고순도 황 분말은 황 함유 의약품이나 유기황 화합물의 원료로 활용할 수 있기 때문에 부산물 처리를 통해서도 수익을 얻을 수 있을 것으로 판단되지만 회수 기술이 완성단계가 아니기 때문에 본 경제성 평가에서는 제외하고 평가하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 최적 조건을 통해서 확보한 SF₆ 처리 기술을 활용하여 현장 적용을 할 경우 처리사업자를 기준으로 수익분석을 초기 투자비, 인건비, 첨가가스 구입비, 전자빔 가동 전기비 등의 비용과 처리로 확보할 수 있는 배출권 거래를 통한 수익 등을 고려하여 분석하였다. 그 결과 고려된 모든 비용을 지출하더라도 첫해에 초기 투자비를 전액 회수할 수 있는 것으로 나타났다. 전자빔을 설치하는 1차년도에도 16.6억 원 정도의 수익이 발생했으며, 설치비용이 제외되는 2차년도부터는 30억 원 이상의 수익을 얻을 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 본 처리 기술을 현장에 활용할 경우 경제적 타당성이 높은 기술로 현장 적용이 용이할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 과학기술정보통신부에서 주관하는 원자력연구개발사업 (과제번호: 523350-17)의 지원에 의해 이루어진 것으로 이에 감사 드립니다.

References

- Chang, M.B. and H.M. Lee (2004) Abatement of Perfluorocarbons with Combined Plasma Catalysis in Atmospheric-pressure Environment, *Catalysis Today*, 89(1-2), 109-115.
- Climate Home (2017) Climate Action Tracker, <http://climateactiontracker.org/countries/southkorea.html>
- Energy Times (2014) KEPCO discharged 80% of SF₆, <http://energytimes.kr/news/articleview.html?idxo=25662>
- EPA (2015) SF₆ Emission Reduction Partnership for the Magnesium Industry, <<http://www.epa.gov/magnesium-sf6/basic.html>>
- GIR (2014) National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. 11-1480745-000003-10.
- GIR (2016) National Greenhouse Gas Inventory Report of Korea. 11-1092067-000002-10.
- Hirota, K., H. Sakai, M. Washio, and T. Kojima (2004) Application of electron beams for the treatment of VOC streams, *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 43(5), 1185-1191.
- IEA (2015) Key Trends in CO₂ Emissions, 2015 edition.
- IPCC (2001) The Scientific Basis, Cambridge, England Cambridge University Press, Chapter 4, 244.
- Jan, B., M. Franziska, B. Christoph, R. Eva, and H. Ingo (2016) The Climate Change Performance Index, German Watch.
- Kim, J.B., J.Y. Ruy, C.Y. Choi, S.H. Jang, and Y.I. Son (2013a) A study of destruction efficiency and particulate by-products of sulfur hexafluoride (SF₆) using high ionization energy with oxygen, water vapor and hydrogen, *The Journal of Korea Society of Waste Management*, 30(8), 870-878. (in Korean with English abstract)
- Kim, J.B., J.Y. Ruy, C.Y. Choi, S.H. Jang, Y.H. Yoon, and B.G. Kim (2013b) A study on destruction and removal efficiency (DRE) and by-products of sulfur hexafluoride (SF₆) using high ionization energy with conditioning agents (O₂, H₂O, and H₂), *The Journal of Korea Society of Waste Management*, 30(6), 592-599. (in Korean with English abstract)
- KRX (2017) Global premier exchange, <<http://marketdata.krx.co.kr/md/#document>>
- Lee, D.H. (2002) Trends on the Research for Alternatives of SF₆ Gas, *The Proceedings of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 7, 10-12. (in Korean with English abstract)
- Lee, H.J., M.W. Lee, H.K. Lee, and S.H. Lee (2011) Separation and Recovery of SF₆ Gas from N₂/SF₆ Gas Mixtures by using a Polymer Hollow Fiber Membranes, *Journal of Korean Society Environmental Engineers*, 33(1), 47-53. (in Korean with English abstract)
- Lee, K.S., K.S. Park, K.T. Park, L.-K. Kim, and C.G. Park (2003) The Characteristics of Insulation with Temperature Variations of SF₆, *The Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers*, 52C(8), 354-358. (in Korean with English abstract)
- Lee, S.H., N.K. Park, S.H. Yoon, W.C. Chang, and T.J. Lee (2009) Catalytic Decomposition of SF₆ by Hydrolysis and Oxidation over γ -Al₂O₃, *Clean Technology*, 15(4), 273-279. (in Korean with English abstract)
- Park, H.G., N.K. Park, T.J. Lee, W.C. Chang, and W.T. Kwon (2012) Catalytic Decomposition of SF₆ by Hydrolysis over γ -Al₂O₃ Supported Metal Oxide Catalysts, *Clean Technology*, 18(1), 83-88. (in Korean with English abstract)
- Park, J.H., I.H. Shin, S.H. Seo, C.Y. Choi, and Y.S. Son (2017)

- The Optimization of SF₆ Decomposition Process using an Electron Beam, Radiation Physics and Chemistry, under review.
- Park, K.N., K.J. Kim, J.C. Kim, S. Young, and H.N. Song (2005) Removal efficiency of toluene by Ebeam-catalyst coupling system, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 21(6), 667-673. (in Korean with English abstract)
- Ryu, J.Y., C.Y. Choi, J.B. Kim, S.J. Lee, S.G. Kim, H.S. Kwak, and Y.M. Yun (2012) Destruction of NF₃ Emitted from Semiconductor Process by Electron Beam Technology, Journal of Korean Society Environmental Engineers, 34(6), 391-396. (in Korean with English abstract)
- Son, Y.S., S.J. Lee, C.Y. Choi, J.H. Park, T.H. Kim, and I.H. Jung (2016) Decomposition of high concentration SF₆ using an electron beam, Radiation Physics and Chemistry, 124, 220-224.
- Tsai, W.T. (2007) The decomposition products of sulfur hexafluoride (SF₆): Reviews of environmental and health risk analysis, Journal of Fluorine Chemistry, 128(11), 1345-1352.
- Yoo, H.J., J.S. Kim, J.S. Lee, D.M. Moon, J.B. Lee, J.H. Kim, and I.Y. Lee (2011) Measurement and Characterization of Atmospheric SF₆ at Korea GAW Center in 2007, Journal of Korean Society for Atmospheric Environment, 27(1), 1-15. (in Korean with English abstract)