

# 방사성폐기물 유리화 시설의 배기체 처리 공정

전웅경 · 박종길 · 양경화 · 송명재

한전 전력연구원 방사선안전그룹

**경** 제적 및 기술적 측면에서의 타당성 연구 조사 후, 현재 우리나라에서는 가압 경수로에서 발생하는 저준위 방사성 폐기물을 처리하기 위한 방법으로 유리화 기술을 사용하는 데 관심을 기울이고 있다.

원자력발전소에서 발생하는 각 폐기물에 대한 특성 및 발생 경향이 조사되었다.

기술성 평가를 위해 직접 유도 전류 가열식 저온로(CCM), 수직 전극 가열식 저온로(CCVE), 양자 촉매 추출 공정(QCEP), 플라즈마 토치 용융로(PT) 등 가망성이 있는 4개의 용융로를 선택하여 가장 적절한 용융로를 결정하기 위한 평가를 하였다.

경제성 평가는 기술성 평가에서 선택된 한 용융로를 이용하여 4개의 처리 전략에 대해 수행하였다.

각 처리 전략에 대해 자본과 운영비를 예측하고 폐기물 유형과 처리 개념을 고려하여 얻은 감용비를 이용하여 처분 부피를 계산하였다.

처분 비용 분석 및 기술성 평가 결과로부터 가장 적절한 처리 전략이 선택되었다.

이러한 내용의 타당성 연구 결과, 가연성 방사성 폐기물은 직접 유도 전류 가열식 저온로를 사용하여 처리하고, 비가연성 방사성 폐기물에 대해서는 플라즈마 토치 용융로를 이용하는 공정이 적절한 것으로 나타났다.

현재 CCM과 플라즈마 토치 용융로를 갖춘 유리화 파일럿 플랜트를 설계하기 위한 연구를 진행 중이다.

이 파일럿 플랜트의 목적은 위에서 언급한 사항들을 충분히 이해함으로써, 우리나라에 유리화 상용 시설을 건설·운영할 수 있도록 하기 위한 것이다.

일반적으로 유리화 시설에서 가장 중요한 부분 중의 하나는 폐기물의 열처리시 발생하는 유해 배출물을 최소화하는 것이다.

배기체를 처리하는 데 있어서의 어려움을 최소화하기 위해 폐기물의 전

처리 과정을 거치기도 한다.

적절한 열처리 장치를 선택하는 것도 배기체 처리를 용이하게 하는 데 중요한 역할을 한다.

열처리 공정에 사용되는 과잉의 공기·산소·촉매 등은 발생하는 유해 물질의 성질과 처리될 배기체의 부피에 영향을 준다.

다양한 유해 배기체의 처리 및 억제를 위해 배기체 처리 시스템이 필요하다.

플라즈마 토치와 저온로 공정은 다양한 배기체를 발생시킬 수 있으며, 이들은 공기 오염 및 원자력 관련 규정에 맞도록 적절히 처리되어야 한다.

만약 이 배기체가 처리되지 않으면 환경에 심각한 영향을 끼치게 된다.

독성 금속, 방사성 핵종, 탄화수소, 입자, 산성 가스 등과 같은 배출물이 확산됨으로써 환경에 저해되는 영향을 주게 된다.

배기체 처리 문제는 폐기물의 특성 분석, 열처리 공정, 배기체 처리 규

정, 배기체 특성, 공기 오염 조절 장치의 평가, 공정 평가, 수치적 모델링, 경제적 측면 등 넓은 범위의 영역에 걸쳐 있다.

배기체의 방출 특성이 폐기물의 특성에 의존한다는 것은 분명하다.

미국 전력연구소(EPRI)에서는 폐기물들의 특성을 분석하였으며, 이는 한전 전력연구원(KEPRI)의 보고서에 요약되어 나타나 있다.

유리화 설비를 건설·운전한다는 최종적인 목표를 달성하기 위하여 일차적인 주목표는 공정으로 투입된 폐기물 내에 함유되어 있는 독성 물질 뿐 아니라 공정 내에서 여러 복잡한 반응에 의해 발생된 물질들을 적절히 처리하는 것이다.

폐기물들이 적절히 처리되는지를 확인하기 위하여 최종적인 처리물의 환경 영향을 조사하고, 최종적으로 생성된 물질의 특성을 분석할 필요가 있다.

최종적으로 처리된 폐기물은 유리 고화체 및 공정에서 발생된 배기체의 두 종류로 나눌 수 있다.

유리화 설비에서는 1,200°C 이상의 고온을 사용하므로 배기체 처리 조건은 폐기물과 유리 원료에서 발생될 수 있는 다양한 물질들의 휘발성을 고려해야 한다.

유리와 폐기물 사이, 또는 다른 종류의 폐기물 사이에 여러 가지의 상호 작용이 있을 수 있다.

휘발 물질과 고체 폐기물 사이에서

(표 1) 보일리와 소각로를 갖춘 연소 공정에서 발생되는 오염물에 대한 방출 허용치

오염 물질	배출 허용 기준	
	98. 12. 31일까지의 유효치	99. 1. 1. 이후의 유효치
NH <sub>3</sub>	200ppm 이하	100ppm 이하
CO	600(12)ppm 이하	600(12)ppm 이하
HCl	60(12)ppm 이하	50(12)ppm 이하
Cl <sub>2</sub>	60(12)ppm 이하	60(12)ppm 이하
SO <sub>2</sub>	300(12)ppm 이하	300(12)ppm 이하
NO <sub>2</sub>	200ppm 이하	200ppm 이하
CS <sub>2</sub>	30ppm 이하	30ppm 이하
HCHO	20ppm 이하	20ppm 이하
H <sub>2</sub> S	15ppm 이하	15ppm 이하
F	3ppm 이하	3ppm 이하
HCN	10ppm 이하	10ppm 이하
Br	5ppm 이하	5ppm 이하
C <sub>6</sub> H <sub>6</sub>	50ppm 이하	50ppm 이하
C <sub>6</sub> H <sub>5</sub> OH	10ppm 이하	10ppm 이하
Hg	5mg/Sm <sup>3</sup> 이하	5mg/Sm <sup>3</sup> 이하
As	3ppm 이하	3ppm 이하
Cd	1.0mg/Sm <sup>3</sup> 이하	1.0mg/Sm <sup>3</sup> 이하
Pb	10mg/Sm <sup>3</sup> 이하	5mg/Sm <sup>3</sup> 이하
Cr	1.0mg/Sm <sup>3</sup> 이하	1.0mg/Sm <sup>3</sup> 이하
Cu	10mg/Sm <sup>3</sup> 이하	10mg/Sm <sup>3</sup> 이하
Ni 및 그 화합물	20mg/Sm <sup>3</sup> 이하	20mg/Sm <sup>3</sup> 이하
Zn	30mg/Sm <sup>3</sup> 이하	30mg/Sm <sup>3</sup> 이하
비산 먼지	1.0mg/Sm <sup>3</sup> 이하	0.5mg/Sm <sup>3</sup> 이하

주 : 이 표는 우리나라의 대기환경보전법 시행 규칙(1996. 9. 14 환경부령 제24호 전문 개정)에서 규정된 값들이다. 배출 허용 기준란의 ( )는 표준 산소 농도(O<sub>2</sub>의 백분율)를 말한다.

도 물리적·화학적 반응이 일어나며 이로써 결국 휘발성 물질을 용융물로 끌어들이 용융로 외부로 빠져나가는 것을 줄이게 된다.

특히 기체·고체 입자 방출물인 에어로졸, 용융로를 빠져나가는 액체상 물질이 있을 수 있다.

에어로졸들은 가스가 빠져나가는 힘에 의해 유입되거나 또는 휘발성

물질의 재응축에 의해 생성된다.

에어로졸이 제거되지 않고 그대로 배기체와 함께 외부 환경으로 방출되는 경우에는 환경과 사회에 치명적인 영향을 미치게 된다.

중금속, 독성 유기물, 방사성 물질들의 유해한 영향은 잘 알려져 있으며, 이에 대한 적절한 배기체 처리 시스템이 필요하다.

**특집 II · 방사성 폐기물 처리 기술의 혁신**

**〈표 2〉 우리 나라의 방사성 유체 규제치**

단위 :  $\mu\text{Ci/cc}$

Type	1	2
Cs-137 S	$6 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
Cs-137 I	$1 \times 10^8$	$5 \times 10^{10}$
Cs-134 S	$4 \times 10^8$	$1 \times 10^9$
Cs-134 I	$1 \times 10^8$	$4 \times 10^{10}$
Co-60 S	$3 \times 10^7$	$1 \times 10^8$
Co-60 I	$9 \times 10^6$	$3 \times 10^{10}$
Co-58 S	$8 \times 10^7$	$3 \times 10^8$
Co-58 I	$5 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
Fe-55 S	$9 \times 10^7$	$3 \times 10^8$
Fe-55 I	$1 \times 10^8$	$3 \times 10^8$
Ni-63 S	$6 \times 10^8$	$2 \times 10^9$
Ni-63 I	$3 \times 10^7$	$1 \times 10^8$
Ce-144 S	$1 \times 10^8$	$3 \times 10^{10}$
Ce-134 I	$6 \times 10^8$	$2 \times 10^{10}$

주: 열 1은 방사성 관리 구역에서 작업자들에 해당되는 값이며, 열 2는 기타 다른 사람들에 대해 규정된 값들이다.

이 논문은 우리 나라에 건설될 유리화 파일럿 시설을 위한 배기체 처리 문제를 고찰한 것이다.

오리엔테이션 테스트로 얻은 결과는 파일럿 시설을 설계하는 데 기본적인 자료가 될 것이며, 또한 파일럿 시설에서 얻은 결과는 상용 유리화 시설 설계에 기본 자료로 이용될 것이다.

**배기체 규정**

우리 나라의 배기체 관련 규정은 환경에서의 공기 오염을 억제하기 위한 것이다.

방출 기준치를 지키기 위하여 유리화 시설의 설계시 이에 적절한 배기

**〈표 3〉 가연성 잡고체 방사성 폐기물과 농축 폐액 내의 방사성 핵종 농도**

단위 :  $\mu\text{Ci/cc}$

핵종	가연성 잡고체		농축 폐액	
	LMAV	최대	LMAV	최대
H-3	1.9E-03	2.3E-01	1.4E-02	2.4E-01
C-14	1.1E-03	3.8E-01	6.0E-05	4.1E-02
Fe-55	1.5E-01	2.7E+03	7.1E-03	8.3E-02
Co-58	-	5.7E+02	2.3E-01*	-
Co-60	4.1E-02	1.4E+02	2.2E-03	4.1E-02
Ni-63	3.5E-02	2.4E-01	1.7E-03	5.6E-02
Sr-90	1.8E-04	8.2E-03	5.2E-06	7.0E-05
Tc-99	4.8E-05	2.0E+00	5.5E-06	4.7E-05
I-129	1.0E-04	-	3.9E-07	1.3E-5
Cs-134	-	7.5E-01	7.9E-01*	-
Cs-137	1.6E-02	1.1E+01	4.3E-03	8.0E-02
Ce-144	4.0E-03	1.4E+01	3.0E-05	5.0E-04
Pu-238	9.6E-06	1.4E-02	5.6E-08	1.5E-06
Pu-239	9.5E-06	3.7E-02	7.1E-09	2.4E-06
Pu-241	1.6E-03	3.3E+00	1.1E-05	2.0E-04
Am-241	6.4E-06	2.1E-02	4.7E-08	1.4E-06
Cm-242	4.6E-06	6.5E-03	1.6E-07	1.3E-06
Cm-244	6.0E-06	6.0E+00	5.6E-08	7.2E-07
계	2.5E-01	3.4E+0.3	1.2E+00	9.4E+0.3

주: 1. LMAV : Log Maen Average

2. 참고 문헌 : EPRI 보고서(NP-5077, Mar. 1987)

3. \* 국내 원전 데이터

체 처리 시스템을 갖추어야 한다.

유해 배출물이 환경으로 퍼져 나가는 것을 막기 위해서는 열처리 공정을 배기체 처리 공정과 결합하여 생각해야 한다.

기체 방출 관련 규정은 장소(나라)와 시간에 따라 다를 수 있다.

우리 나라에는 배기체에 관한 여러 규정이 있으나 수시로 그 규제 내용이 바뀌고 있다.

그러므로 유리화 시설 설계시에는

앞으로의 공기 오염 규제 내용에 대해 예측하여 이를 고려해야 할 필요가 있다.

많은 독성의 배출물에 대해 제한치가 규정되어 있다.

이러한 제한치들은 〈표 1〉에 일부 나타난 바와 같이 더욱 엄격해질 것으로 예상된다.

방사성 방출 규정은 〈표 2〉에 나타내었다.

**폐기물 특성**

우리 나라의 가압경수로(PWR)에서 발생하는 폐기물은 붕산 폐액, 폐이온 교환 수지, 가연성 잡고체, 비가연성 잡고체, 유리 조각 등이다.

붕산 폐액은 건조되어 주성분은 분말상의  $Na_2B_4O_7$ 이다.

〈표 3〉은 액체 방사성 폐기물에 함유되어 있는 주요 성분을 나타내고 있다.

PWR의 가연성 방사성 폐기물은 비닐 시트와 신발 커버, 방호복과 신발, 종이와 목재류, 스폰지 등으로 분류된다.

가연성 방사성 폐기물 내의 주요 동위 원소들을 〈표 3〉에 나타내었다.

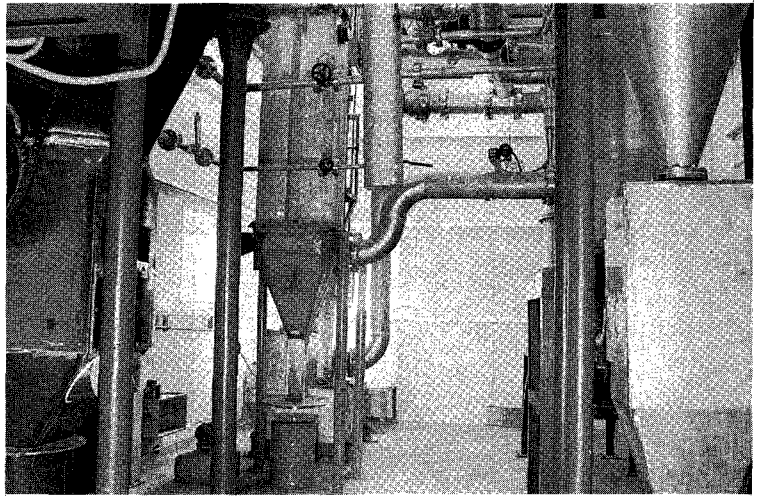
비가연성 방사성 폐기물의 경우에는 콘크리트와 석면, 공기 필터, 유리 및 금속, 그리고 모래로 분류된다.

폐이온 교환 수지는 양이온 및 음이온 교환 수지로 나눌 수 있으며 Cs-137을 다량으로 함유하고 있는 것으로 예측하고 있다.

Cs-137은 녹는 점이  $670^{\circ}C$ 로 휘발성이 매우 높아 처리 계통에서 포집하기가 어려운 점이 있다.

**배기체 특성**

배기체는 각 분류 기준에 따라 다른 항목으로 분류되어질 수 있으며, 각 물질의 반응 특성을 이해함으로써 다양한 폐기물을 처리하는 방법을 알



방사성 폐기물 소각 처리 시설

수 있다.

여기서는 배기체를 독성 금속, 방사성 핵종, 탄화수소, 미립자, 그리고 산성 가스로 분류하였다.

**1. 독성 금속**

독성 금속은 일반적으로 다음의 두 경로 중 하나에 의해 열처리 공정(플라즈마 토치, 저온 용융로)에서 발생된다.

금속 방출물 중 일부는 재 입자가 배기체로 유입되어 배출된다.

이 입자들은 공급된 폐기물 내에 함유되어 있는 금속을 포함한 무기 물질로 이루어져 있다.

금속 방출물 중 나머지는 휘발에 의한 것이다.

배기체가 냉각되면 휘발성 금속은 배기체와 함께 이동중인 입자와 같은 물질의 표면으로 응축되기 시작한다.

이렇게 금속 증기가 응축되어 하나의 작은 입자를 생성한다.

온도가 다르면 증기압이 달라지므

로 휘발에 의해 발생하는 금속들은 오염 제어 시스템 내의 다양한 온도에 따라 배기체 처리 시스템 전체로 분산되어진다.

**2. 방사성 핵종**

일반적인 방사성 핵종의 다수는 방사성 금속 동위 원소이다.

이 방사성 핵종들은 다른 금속들과 마찬가지로 배기체 처리 시스템 내에 분산된다.

세슘과 같은 방사성 핵종들은 용융로 주위에서 가스화되며, 이 가스화된 방사성 핵종들은 기체 상태 그대로 배기체 처리 시스템을 통과해 간다.

연속적인 배기체 처리 계통에 사용되는 장치의 종류 및 유형에 따라 기체 상태의 방사성 물질들 중 일부는 응축·흡수 또는 흡착에 의해 포집되어질 수 있다.

기체상 핵종의 일부는 내부 표면으로의 흡착과 탈착을 반복하면서 천천히 배기체 시스템을 통과하여 이동한

(표 4) 산성 가스 제거 기술(SOx, NOx)

습 식 법	건 식 법	반건식법
총전담식 스크러버 저수식 스크러버 가압수식 스크러버 스프레이식 스크러버 습윤 유동층식 스크러버	건조 흡수제 주입 건조 유동층식 스크러버	스프레이식 건조기 흡수제 (spray dryer absorber)

다.

이러한 방식으로 기체상 핵종은 배기체 처리 시스템 전체에 퍼지게 될 것이다.

### 3. 탄화수소

탄화수소(HC) 방출은 불완전 연소 생성물(PICs) 및 연소 반응을 거치지 않고 연소 영역을 통과하는 투입 폐기물 내의 휘발성 탄화수소에서 비롯된다.

독성 화합물의 발생에 관한 연구에서는 구리와 같은 금속이 204°C~482°C 사이의 배기체 온도에서 이러한 독성 물질을 생성시키는 반응의 촉매로 작용한다는 것을 증명하였다.

다이옥신과 퓨란의 생성 정도는 온도에 민감하게 달라진다.

배기체의 온도가 249°C에서 291°C로 증가하면 다이옥신과 퓨란의 발생량이 10배로 늘어나는 것을 관찰하였다.

배기체가 냉각되어졌을 때 열처리 설비에서 발생하는 모든 탄화수소 물질들이 응축되는 것은 아니다.

배기체 시스템에서는 계속 기체상을 유지하는 메탄과 같은 물질들도

다량 존재한다.

이러한 물질들 중에는 비교적 안정하여 완전히 이산화탄소로 연소되기에 가장 어려운 일산화탄소가 있다.

CO는 배기체 중 가장 높은 농도를 차지하는 기체상태의 불완전 연소 물질이다.

### 4. 미립자

배기체 처리 장치의 성능과 대중의 보호라는 측면에서 미립자에 관련된 두 가지 중요한 문제가 있는데 이는 배기체 내 미립자의 양과 입자의 크기 분포이다.

제어 측면에서 입자의 양은 이것이 입자 제거 장치에 부담을 주기 때문에 중요하다.

그리고 입자 크기 분포는 작은 입자들이 일반적으로 유입되어 배기체 처리 계통을 빠져나갈 확률이 크므로 중요하다 할 수 있다.

각각의 공기 오염 제어 장치는 입자의 크기에 대해 다른 포집 효율을 가지고 있으므로 배기체에서 입자의 크기에 대한 정보는 적합한 시스템을 선택하는 데 도움이 된다.

이것은 불필요하거나 또는 입자 포

집에 소용없는 장치에 대한 비용 소모를 막을 수 있다.

입자상 물질들은 오염 물질로 간주되며 일반적으로 배기체 부피당 질량으로 제한치가 규정되어 있다.

입자는 독성 금속, 방사성 핵종, 그리고 탄화수소를 함유하고 있을 수 있다.

Flyash에 포함되어 있는 독성 금속, 방사성 핵종, 탄화수소 함량 때문에 입자의 제거는 폐기물의 열처리 과정에서 발생하는 방출물들을 제어하는 데 중요한 역할을 한다.

그러므로 이 공정에 문제가 있다면 이것은 입자뿐만 아니라 다른 오염 물질을 제거하는 데 영향을 끼치게 된다.

배기체 처리 시스템을 설계시 입자의 양과 입자 크기 분포는 가장 중요하게 고려해야 할 사항이다.

### 5. 산성 가스

산성가스라는 용어는 주로 염산(HCl), 황산화물(SOx), 질산화물(NOx)을 일컬어 지칭하는 말이다.

투입되는 폐기물의 성분에 따라서 불산(HF), 황산(H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>), 인산(H<sub>3</sub>PO<sub>4</sub>), 그리고 기타 다른 산들이 미량으로 존재할 수 있다.

HCl은 염소화 물질을 함유하고 있는 폐기물을 열처리할 경우에 발생된다.

유사하게 NOx는 질소화된 물질을 함유하고 있는 폐기물을 처리할 경우

〈표 5〉 미립자 제거 기술

건 식 법	습 식 법
백 하우스	
전기 집진기	벤츄리 스크러버
Ceramic Candle	Other High-energy Scrubbers
HEPA 필터	Self-Induced Scrubber
금속 필터	Rotary Atomizing Wet Scrubber
Nested-filters	Free Jet Scrubber
Gravity Settling Chamber	Ionizing Wet Scrubber
사이클론 분리기	Flux Force/Condensation/Collision Scrubber
Mechanical Centrifugal Separator	Froth Scrubber
Impigement Separator	
Barrierless Ultrasonic Air Cleaner	

〈표 6〉 NOx 제거 기술

건 식 법	습 식 법
선택적 촉매 환원법	산화와 흡착법 세척제와 킬레이트제
선택적 비촉매 환원법	
비선택적 촉매 환원법	
직접 분해법	
전자빔 공정	

나 또는 보조 연료로부터 발생한다.  
공기 중의 질소 분자(N<sub>2</sub>)는 폐기물 내에 함유되어 있는 산소나 공기 중의 기체에는 약간의 NO<sub>x</sub>가 측정될 수 있다.  
이렇게 발생한 NO<sub>x</sub>를 thermal NO<sub>x</sub>라 하며 그 발생량은 열처리 장치의 운전 온도에 의존한다.  
일반적으로 발생하는 대부분의 NO<sub>x</sub>는 NO이며 그 다음으로는 NO<sub>2</sub>가 차지하고 있다.

**공기 오염 제어 장치(APCD)**

플라즈마 토치 및 저온 용융로에

적합한 최적의 배기체 처리 시스템을 설계하기 위하여 다양한 공기 오염 제어 기술을 검토하였다.

플라즈마 토치 및 저온 용융로에서 일어나는 반응들은 기체를 발생시키며 이들은 연소로에 대해 설계된 배기체 장치로 처리될 수 있다.

연소로에는 넓은 범위의 다양한 배기체 장치를 적용할 수 있다.

현재 약 40여 종의 공기 오염 제어 기술이 있다.

일반적으로 각각의 공기 오염 제어 장치(APCD)는 한 종류의 폐기물을 처리할 목적으로 설계되었으나 보통 여러 종류의 폐기물들을 처리하는 데 이용된다.

〈표 4〉와 〈표 5〉는 산성 가스 제거와 입자 제거에 대한 다른 기술들을 보여주고 있다.

**1. 독성 금속 제거 기술**

이 기술들은 휘발성 물질을 응축시

키고 금속을 입자로서 포집하는 기술이므로 미립자 제거 기술을 적용하는 것이 적절하다.

**2. PIC 처리 기술**

불완전 연소 생성물(PIC)을 제어하기 위하여 적당한 공기 첨가와 온도 조절이 필요하다.

후단 연소기에서 충분한 시간 동안 체류케 함으로써 PIC의 발생을 최소화시킨다.

산성 가스 및 입자 제거 기술이 PIC 제거 기술을 포함하고 있으며, 기타 다른 기술로는 활성탄 흡착법과 촉매 환원법 등이 있다.

**3. NOx 감량 기술**

질소 산화물을 제거하기 위해 사용되는 방법들은 아래와 같다.

- ① 연료로부터 생성되는 NO<sub>x</sub>를 줄이기 위해 연소 물질로부터 질소를 제거한다.
- ② NO<sub>x</sub>가 생성되는 온도에서 산소의 공급을 제한한다.
- ③ Thermal NO<sub>x</sub>를 줄이기 위해 연소부의 온도를 낮춘다.

그리고 〈표 4〉에 나타난 것은 NO가 생성된 후에 이용될 수 있는 기술들이다.

**4. 방사성 핵종**

미립자 및 산성 가스 제거 기술이 응용될 수 있다.

**기술 현황**

유리화 시설에 적합한 배기체 처리 시스템을 설계하기 위하여 현재의 기술 상태를 반영하는 다양한 시스템들을 검토하였다.

기본적으로 유리 용융로, 플라즈마 용융로, 또는 소각로와 같은 열처리 설비에 이용될 수 있는 OGTS에 관심을 두고 조사하였다.

한전 전력연구원(KEPRI)의 유리화 설비에서는 소각로를 고려하고 있지 않으나, 소각로의 OGTS는 저온 용융로나 플라즈마 용융로에 적용될 수 있다.

이러한 기술들을 조사한 결과 다른 열처리 설비라 할지라도 그 OGTS는 매우 유사함을 볼 수 있었다.

OGTS 계통 설계에 중요한 역할을 하는 요소는 폐기물 특성, 처리 온도, 첨가물 등이다.

기술 현황은 MSE(미국), CEA(프랑스), NUKEM(독일), BNFL(영국) 등의 연구소와 회사를 중심으로 조사하였다.

**오리엔테이션 테스트**

오리엔테이션 테스트는 배기체 발생량에 대한 데이터를 제공하며 파일럿 시설의 배기체 처리 시스템 설계에 필요한 기본 데이터를 제공한다.

이로써 파일럿 시설에 필요한 배기체 처리 시스템의 크기 및 용량을 결정할 수 있다.

즉 용융로에서 빠져나가는 총 기체량은 파일럿 시설 건설 비용의 상당량을 차지하는 배기체 처리 시스템 전체의 용량을 결정하게 된다.

폐기물의 유리화/열분해에서 발생하는 배기체는 유리화 설비의 효율을 제한한다.

예를 들어 이온 교환 수지를 처리할 경우에 저온로의 냉각벽에 침적된 탄소는 용융로를 운전하는 데 있어 저해 요소가 된다.

폐기물을 태울 경우 제한 요소는 배기체 부피이며 따라서 배기체 처리 시 입자가 과잉으로 유입되는 것을 막아야 한다.

파일럿 시설을 이용하면 배기체 특성을 더 잘 이해할 수 있으며 이는 상용 시설을 설계하는 데에 이용될 것이다.

연속 방출 감시 시스템(CEMS : Continuous Emission Monitoring System)은 파일럿 시설에 사용되어 배기체 처리 시스템을 빠져나가고 환경으로 유입되는 배기체를 분석하게 된다.

프랑스 CEA에서는 저준위 가연성 방사성 폐기물의 유리화 시험 및 방출되는 배기체를 연구하기 위하여 저온로 시험대를 설계·장착하였고, 이는 비방사성 모의 폐기물(이온 교환수지, 건조 가연성 방사성 폐기물, 농축 폐액 등)을 유리화하는 데 이용되고 있다.

지름이 300mm인 저온 용융로, 고

주파 발생기, 폐기물 공급 및 계량 장치, 유리 분말 공급 및 계량 장치, 배기체 처리 장치 등이 설치·운전되고 있다.

3개의 다른 유리화 공정도 검토되고 있으며 배기체는 선택될 한 유리화 시설에 좌우된다.

3개의 공정은 아래와 같다.

**1. 열분해/하소 - 재의 유리화**

유리화 전에 이온 교환 수지나 가연성 방사성 폐기물을 열분해/하소 처리함으로써 직접 유도 전류 가열식 저온로(CCM)로 공급되는 폐기물의 부피와 CCM에서 발생하는 배기체의 양을 크게 줄일 수 있다.

그러나 전처리 과정에서도 배기체는 발생될 것이므로 열분해로/하소로에 대해서도 적절한 배기체 처리 설비가 필요하다.

하소로에서는 약간의 불꽃이 발생할 수 있으며 이는 후단 연소기로 유입될 폭발적인 기체의 발생을 억제한다.

그러나 유해한 황 기체가 생성될 수 있으므로 전처리 시스템에 대한 배기체 처리 설비 설계시 이를 고려해야 한다.

**2. 산화성 열분해/부분 연소 - 재의 유리화**

전처리로 산화성 열분해를 하게 되면 폐기물은 부분적인 산화 반응을 일으킨다.

이 공정은 후단 연소기에 폭발성이 큰 반응물(메탄·수소분자)이 축적되는 것을 최소화한다.

### 3. 직접 투입식 유리화

직접 투입식 유리화는 전처리 과정을 필요로 하지 않으며 따라서 전처리 설비가 필요 없다.

그러나 폐기물을 직접 투입하여 유리화하므로 CCM에 대한 배기체 처리 설비는 전처리가 있는 공정에 비해 더욱 부담이 크다 할 수 있다.

순수한 산소를 CCM에 공급하여 유리화하면 강한 불꽃이 발생되며 이는 연소 반응이 효과적으로 일어나고 있음을 나타낸다.

이 공정은 연소와 유사하여 퓨란이나 다이옥신을 형성시킬 수 있는 물질이 생성되므로 문제가 되고 있다.

오리엔테이션 테스트를 위하여 배기체 처리 시스템이 설치되었다.

배기체 처리 시스템은 우리나라에 건설될 파일럿 시설에 대한 배기체 처리 시스템 설계 자료 도출을 목적으로 한다.

오리엔테이션 테스트 결과가 얻어진 후에는 각 장치에 대해 필요되는 부품, CCM으로의 공급 장치 설계, 제어 회로 등에 대해 더 잘 이해할 수 있을 것이다.

배기체에 대한 기본적인 데이터와 함께 이러한 세부 사항들을 이용하여 배기체 처리 설비에 필요한 장치의 크기 및 주요 부품들을 결정한다.

배기체 처리 시스템은 다음의 기능을 가지고 있다.

일산화탄소 및 유기 잔유물의 후단 연소, 냉각 및 응축을 위한 세정, 공기 회석에 의한 세정, 먼지 제거(벤츄리 효과), 산성 가스 세정, 그리고 배기체 추출 등이다.

KEPRI에서는 공동 연구 기관과 함께 파일럿 시설에서 방출되는 배기체의 특성을 파악하기 위한 시험을 진행하고 있으며, 이를 통해 전처리 및 유리화 처리 과정에서 발생하는 배기체의 유형과 양을 알 수 있다.

한 예로 열분해 연구를 함으로써 CO와 SO<sub>2</sub>의 발생 정도를 조사하고 있다. 휴대형 가스 분석기인 IMR을 이용하여 양이온 교환 수지의 열분해 시 발생하는 배기체를 온도에 따라 분석하였다.

비록 많은 데이터가 일반적인 유형의 폐기물에 대한 것이지만, 각 폐기물은 그 배기체 특성상 매우 특징적이다.

폐기물의 혼합에 대한 배기체의 특성을 조사하기 위하여 혼합 수지와 가연성 방사성 폐기물을 가지고 시험하고 있다.

용융로와 다양한 배기체 처리 설비에서 방출되는 에어로졸을 채취하기 위한 실험 장치에는 Cascade Impactor와 DMPS(Differential Mobility Particle Size Classifiers)가 있으며, 이들이 함께 사용되어 0.01m에서 10m 범위의 입자를 분

석하게 된다.

### 파일럿 플랜트

KEPRI와 이 프로젝트의 계약자들은 공동으로 파일럿 플랜트를 설계하고 건설할 예정인데, 파일럿 플랜트는 최대 처리 용량 50kg/hr의 직접 유도 전류 가열식 저온로(CCM)와 CCM 냉각 계통 및 배기체 처리 공정으로 구성된다.

배기체 처리 공정은 CCM을 이용하여 증발기 농축 폐액, 가연성 폐기물, 폐수지 등을 처리할 때 발생하는 배기체와 처리 용량 10kg/hr의 플라즈마 토치 용융로(PM)를 이용하여 비가연성 방사성 폐기물과 액체 처리용 폐필터의 혼합물을 용융 처리할 때 발생하는 배기체의 발생 특성을 모두 고려하여 설계될 것이다.

유기 폐기물을 처리할 때 발생하는 배기체 발생량은 매우 중요하다.

왜냐하면 배기체 처리 공정으로의 입자 유입을 막기 위해서는 배기체 발생량을 제한해야 하기 때문이다.

앞에서 언급하였듯이 파일럿 플랜트 운전시 도출된 자료는 최대 250 kg/hr의 처리 용량을 갖는 상용시설 설계 자료로 활용될 것이다.

배기체 처리 공정에는 다음과 유사한 기기들이 포함될 것으로 예상된다.

후단 연소기, 1차 냉각기, 회석기, 공기 송풍기, 제진 필터, 벤츄리 세정



기, 세정액(가성소다) 저장 탱크 및 재순환 펌프 등이다.

### 컴퓨터 시뮬레이션

현재 배기체 처리 공정 설계에 활용할 수 있는 시뮬레이션 전산 코드는 완성되지 않았지만, 전산 모델링은 설계시 단순한 문제점을 해결하거나 결과를 예측하는 데 매우 유용하게 사용될 수 있다.

시뮬레이션 전산 코드를 적절히 활용하면 경비를 절감할 수 있고, 새로운 처리 방법의 성능을 예측할 수 있어서 전체적인 공정 설계에 도움이 된다.

배기체 처리 공정을 모델링하는 데는 복잡한 모델링으로부터 매우 단순한 모델링까지 여러 방법을 적용할 수 있는데, 예를 들어 나비에-스톡스 유체 모델은 시간과 위치별로 배기체 처리 상황을 모사할 수 있는 반면, 배취 모델은 매우 단순하면서도 효율적인 모델이다.

처리 방법을 선택하는 데 중요한 인자의 하나는 경비이기 때문에 계산시 너무 많은 시간을 소모하는 코드는 바람직하지 않을 것이다.

배기체 처리 공정을 모델링하는 데는 물리·열역학·화학 등 다양한 분야의 지식이 필요하다.

전산 코드나 모델은 배기체 내에 존재하는 성분, 성분들의 입자 분포, 농도, 그리고 처리 공정 내 단위 기기

들의 제거 효율 등을 예측할 수 있어야 한다.

이러한 코드를 개발하는 한 가지 방안으로서 먼저 배기체 내 성분을 분석하고 계산하는 것인데, 이는 배기체 처리 공정과 용융로 내의 기체 성분과 농도를 결정하는 것을 뜻한다.

다음 단계로는 배기체의 열역학적 특성(압력·온도·엔트로피 등)을 분석하는 것이다.

그런 다음에는 배기체 처리 공정 내의 특정 단위 기기들에 대한 분석을 수행하여 단위 기기별로 배기체 내 성분들의 감소량 또는 생성량을 계산해야 한다.

마지막으로 각 단위 기기들의 크기를 결정하기 위해서는 물질/에너지 평형식을 설정해야 한다.

또한 2차 폐기물의 발생량 및 특성, 배기체 처리 공정에 입자의 침적, 어떤 물질의 제어 효율성 등도 파악해야 할 주요 인자들이다.

유사한 코드들을 소개하면 다음과 같다.

### 1. ASPEN 코드

ASPEN 코드는 용융로와 배기체 처리 공정에 대해 물질 수지, 화학 평형, 열역학 등을 계산할 수 있는 모델이다.

ASPEN의 물질/에너지 수지 모델은 새로 제정된 방출 규제 조건, 엄격한 방출 규제 조건에 대한 만족 여부를 확인할 수 있을 뿐만 아니라, 비정

상 상태에 대해서도 계산이 가능하다.

### 2. FIDAP 코드

이 코드는 열전달을 모델링하고 플라즈마 아크와 유리화 공정의 온도를 예측하는 데 이용되고 있는 전산 프로그램이다.

국부적인 온도를 예측하는 것은 폐기물이 용융될 때의 발생물을 결정하는 데 필요한 Gibbs 자유 에너지 최소값을 계산하는 데 반드시 필요하다.

국부 온도는 용융로의 위치에 따라 1,000°C~2,000°C의 값을 갖는데, 이러한 온도 변화는 중금속이나 방사성 핵종의 분배에 상당한 영향을 미친다.

### 3. MAEROS2 코드

MAEROS2는 수치 해석을 이용한 코드이며 Gelbard에 의해 개발되었고, 시간에 따라 발생하는 다성분 에어로졸과 입자 크기를 모델링하는 밀도 평형식(Population Balance Equation : PBE)을 단순화시킨 형태이다.

MAEROS2의 변형된 코드는 <그림>에서 볼 수 있듯이 실험실 규모의 유해 폐기물 소각로에서 발생하는 에어로졸을 잘 예측할 수 있다.

따라서 이 코드는 에어로졸 발생 현상을 조사하는 데 이용할 수 있다.

이 코드나 유사한 코드를 약간 변

형시켜 배기체 내에 존재하는 성분을 예측하는 코드와 연계시키면, 용융로에서 발생하거나 배기체 처리 공정 내에 존재하는 에어로졸을 예측하는데 이용할 수 있다.

이 코드는 또한 배기체 시료를 채취할 때 시료 내의 에어로졸 거동 변화를 예측하는 데도 사용될 수 있을 것이다.

코드의 변형을 위해서는 배기체 처리 공정의 어떤 단계에서의 거동을 모델링하는 것이 필요하게 될 것이지만, 기본적인 물리현상에 대한 모델링은 코드 자체 내에서 가능하다.

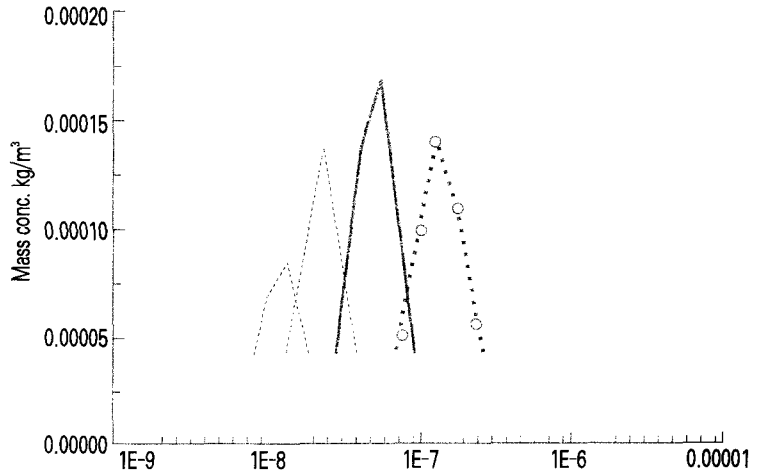
이 코드는 현재 균질 핵형성(Homogeneous Nucleation), 응축(Condensation), 그리고 응집(coagulation) 현상을 해석할 수 있도록 만들어져 있다.

세정기와 같이 배기체 공정의 어떤 단계에 도달하면 새정액 분사에 의한 효과를 고려할 수 있는 부가적인 메커니즘을 추가로 고려해야 한다.

**결론**

KEPRI의 궁극적인 목표는 상용 유리화 시설을 건설하는 것이며, 이를 위해서는 실험실 규모의 가능성 실험, 오리엔테이션 테스트, 파일럿 플랜트 테스트를 거치게 된다.

유리화 시설이 법적 규제를 충족시킬 수 있는 안전한 시설이 되기 위해서는 적절한 배기체 처리 공정을 갖



〈그림〉 응축 및 켈빈 효과를 억제하고 핵형성(nucleation)과 응집 현상만을 고려한 상태에서 MEROS2 코드로 시뮬레이션한 납산화물의 입자 크기 분포

주 : 4가지의 모든 요소를 고려하여 시뮬레이션한 것이다.

추어야 한다.

배기체 처리 공정을 설계하는 데는 폐기물 발생 특성, 용융로 특성, 배기체 유출 규제 지침, 배기체 발생 특성, 공기 오염 방지 설비에 대한 성능 평가, 계통 성능 평가, 수치 해석적 모델링, 경제성 등의 광범위한 요소를 고려해야 한다.

국내의 배기체 배출 규제 지침은 날로 엄격해질 전망이다. 배기체 처리 공정 기기들의 성능 확보와 공중 보호면에서 배기체 내 성분들의 성질과 양(예를 들어 화학적 거동 및 형태)을 파악하는 것은 매우 중요하다.

발생되는 성분들은 유해 중금속, 방사성 핵종, 탄화수소, 입자, 산성 가스로 분류될 수 있다.

공기 오염 제어 기술은 일반적으로 습식과 건식으로 대별할 수 있고 배

기체의 종류와 제거 효율에 따라 40여종에 달하는 기기들이 존재한다.

현재 유리화의 배기체 처리 공정에 고려되고 있는 기본적인 기기들은, 불완전 연소물을 완전 연소시키는 기기, 입자 제거기, 산성 가스 세정기, 입자 여과기, 그리고 배출 연속 감시 장치인데, 이 기기들은 소각기 같은 기타 열처리 시스템에도 적용되고 있는 것들이다.

아직은 배기체 처리 공정을 설계하는 데 활용할 수 있는 시뮬레이션 전산 코드가 유용하지 않지만, 수치 해석적인 모델링은 설계 속도를 증가시키고, 실험적으로 모델링하기 어려운 상황을 점검하고, 계통을 최적화하는 일 등에 아주 효율적으로 활용될 수 있다. ☼