

PGV(Plasma Gasification & Vitrification) 시스템을 통한 폐기물의 자원화 기술

유 대 우[†], 김 영 석*
STX중공업, *㈜에드플라텍 연구소

A Study on Recycling Technology of Wastes by Using PGV(Plasma Gasification & Vitrification) System

David Rhyew[†], Young Suk Kim*

STX Heavy Industries Co., Ltd., Seoul 100-741, Korea
*Advanced Plasma Technology Inc., Daejeon 305-309, Korea

(Received November 12, 2008; revised December 7, 2008; accepted December 18, 2008)

ABSTRACT : PGV(Plasma Gasification & Vitrification) system has been developed based on a pyrolysis melting gasification technology that provides the possibilities of acquiring renewable energy. As volume of wastes increases with the rapid industrialization and population growth, eco friendly disposal is drawing more social attention. Pyrolysis plasma technology is regarded as the best environmentally friendly process for the waste disposal among numerous waste disposal processes. Introduced in this paper is the behavior of the plasma torch and a computational fluid simulation dynamics is discussed for designing the melting furnace. Some PGV applications have also been discussed.

Key words : Plasma(플라즈마), Pyrolysis(열분해), Gasification(가스화), Waste(폐기물), Hydrogen(수소)

1. 서론

급속한 산업화와 인구증가로 각종 폐기물의 발생은 급증하고 있는 반면, 일반폐기물의 처리에 주로 사용되는 매립방법은 매립장 부지의 부족과 중금속 및 침출수에 의한 토양오염, 그리고 대기(CO₂ 방출), 지하수 오염 등 주변환경의 오염이 심각한 사회 문제로 대두되고 있어 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다. 반면 부피감량 등의 장점을 가진 소각로 방식의 경우 선진 외국기술을 도입하여 그 동안 여러 설치운전을 통하여 어느 정도의 기술축적이 이루어져 왔으나, 소각 시 불완전연소에 의해 발생하는 다

이옥신과 소각잔재처리를 비롯한 각종 2차 공해물질의 처리비용을 저감하기 위한 기술의 진보가 요구되고 있다. 대량의 소각재가 배출되기 때문에 이를 처분할 매립장이 또한 필요하고 매립소각재로부터 방출되는 침출수 등 2차 오염 역시 사회적으로 큰 우려사항이 되고 있는 실정이다. 소각 시 발생하는 유해가스를 감소시키기 위해서는 연소실 온도를 고온(1,100℃ 이상)으로 유지하면서 적정혼합 및 필요한 체류시간을 갖추어야 하지만, 일반적인 소각로에서는 고비용문제로 이러한 조건을 충족시키기 어렵기 때문에 새로운 차원의 연소시스템이 필요성이 대두되었다. 뿐만 아니라 최근 발효된 교토협약에 따른 이산화탄소의 저감의무, 곧 발효될 것으로 예상되는 런던협약에 따른 폐기물의 해양투기 금지, 하수슬러지 처리대책 등 점차 강화되고 있는 환경규제와 지역 주민들의 환경오염에 대한 높은 관심 등을 감안할 때 폐기물의 안전하고 완벽한 처리방법의

[†] Corresponding author

Tel.: +82-2-310-2006; fax: +82-2-310-2499

E-mail address: dwrhyew@onestx.com

개발과 적용이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

최근 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 열분해 용융시스템에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다^{1, 2)}. 일본 등 선진국들을 중심으로 개발되어 적용을 시작한 열분해 용융시스템은 기존의 소각방식에 비해, 열분해로 내부는 저산소에서 운전되며 고온으로 유지된다는 점에서 다이옥신 등 공해물질의 발생기회를 최대한 차단할 수 있다고 할 수 있다. 또한 용융로부터 최소한으로 배출되는 바닥재(bottom ash)는 유리화(glassify 또는 vitrify)되어 2차 오염이 없는 슬래그 상태로 배출된다. 다양한 열분해 용융시스템 중에서 특히 플라즈마 토치를 이용한 시스템은 처리해야 하는 배출가스의 양이 기존 소각로의 1/7에 불과하여 시설규모를 획기적으로 소형화하는 것이 가능하다.

많은 장점을 지닌 열분해 용융기술은 세계적으로도 소수의 기업에서 개발하여 상용화 과정에 있는 신기술이다. 그 동안 독성이 강한 폐기물, 소각재 등의 재(再)처리 경우에 한하여 제한적으로 적용되어 왔으나, 처리시스템의 후단에서 에너지를 회수하기가 적당하지 못하여 상용화에 어려움이 있었다.

본 논문에서는 플라즈마를 이용하여 폐기물의 열분해 용융 가스화 및 유리화(vitrification) 기술을 상용화한 PGV시스템에 대해 알아보고, PGV 시스템을 이용하여 추진중인 폐기물 자원화 사업과 더 나아가 향후 응용분야에 대해서도 알아보려고 한다.

2. 플라즈마

2.1 플라즈마 토치

플라즈마는 전기방전 등의 방법으로 수천도 이상



Fig. 1 100 kW plasma torch(Adplatech)

의 고온에서 얻어지는 물질의 상태로서 분자 또는 원자가 이온과 전자로 분리되어 있는 상태를 말한다. 우주를 구성하는 물질의 99% 이상이 플라즈마 상태로서 스스로 빛을 발하는 모든 항성은 플라즈마로 구성되어 있으며 핵융합 반응에 의한 막대한 에너지를 방출하고 있다. 지구상에서는 +핵융합연구나 반도체 생산 등에 활용하기 위해 다양한 플라즈마를 인공적으로도 발생시킬 수 있으며, 번개나 벼락과 같은 자연적인 현상으로도 플라즈마가 발생되고 있다. 이러한 플라즈마는 전리된 기체상태로서 전장 등에 의한 입자의 가속이 손쉽기 때문에 고온으로의 가열이 용이하여 수억도 이상의 온도도 얻을 수 있다.

대기압에서 플라즈마를 발생시키는 플라즈마 토치는 아크나 고주파로 기체를 전리시켜 고온의 플라즈마를 만들어내는 장치로서 폐기물의 열분해 용융에는 대용량의 아크 토치를 주로 사용한다. 플라즈마 열분해 용융기술의 핵심인 플라즈마 토치의 시스템 비용은 전체 시설비의 약 15%를 차지하고, 전체 시설에서 사용되는 에너지의 70% 정도를 차지하기 때문에 전반적인 시설가격은 물론이고 운전비에서도 중요한 부분을 차지한다. 특히전극의 수명이나 전기효율 등 토치의 특성이 운전의 안정성과 성능 그리고 경제성을 크게 좌우하는 아주 중요한 요인이다. Fig. 1은 플라즈마 토치의 작동 모습인데 중심부의 온도는 10,000℃ 이상의 고온이고, 불꽃 외부의 온도도 약 3,000℃ 이상이다. 이러한 고온에 의하여 엔탈피가 매우 높은 기체가 얻어지기 때문에 열분해 용융로의 가열에 매우 효과적이다.

2.2 동작원리 및 특성

Fig. 2는 PGV시스템의 플라즈마 토치 구조이다.

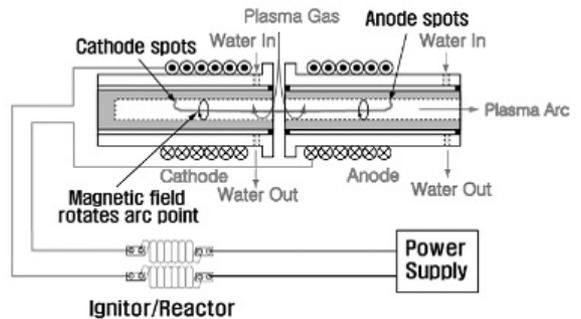


Fig. 2 Schematic of plasma torch

음극의 한쪽 끝이 막힌 공동형 구조이며, 양극은 노출 형태로 되어 있다. 양 전극의 사이로 플라즈마 가스를 인입하여 양극 사이에 초기 방전을 일으켜 시동한다. 방전을 일으키는 방법은 여러 가지가 있지만 본 시스템에서는 외부 고전압에 의한 방전을 기본으로 한다. 방전이 시작되면 아크는 가스의 유동 방향을 따라 급속히 길어지게 되고, 아크가 일정 길이 이상이 되면 더 이상 통전하지 못하고 방전은 일시적으로 중단되게 된다. 그러나 일단 한번 방전이 시작되면 플라즈마 상태가 존재하기 때문에 다시 거리가 짧은 곳에서 쉽게 방전이 시작된다. 이러한 지속방전 방식이 플라즈마 토치가 연속적으로 동작하게 되는 원리이다.

3. 용융로 설계

3.1 수치해석 조건

플라즈마 용융로 내 3차원 난류유동의 해석을 위해 정상상태, 비압축성, 뉴턴 유체로 가정하고 일반 종속변수에 대한 지배방정식은 대류 및 확산 플럭스(flux)의 텐서와 단위체적당 생성항의 합으로 식(1)과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial x}(\rho u \phi) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v \phi) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w \phi) \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial z} \right) + S_{\phi} \end{aligned} \quad (1)$$

위 식에서 ϕ 는 일반적인 종속변수로서 속도(u, v, w) 및 압력(p), 엔탈피(h)를 나타낸다. 이때 종속변수 ϕ 는 단위질량당 물리량을, S_{ϕ} 는 엔탈피, 운동량의 생성항을 나타내며 다음 식과 같이 간단하게 나타낼 수 있다.

$$\nabla \cdot (\rho u \phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \phi) + S_{\phi} \quad (2)$$

플라즈마 용융로 내 난류유동장을 해석하기 위해 속도 성분 u, v 에 대해 순간 운동방정식을 시간평균한 값을 이용하였고, $k-\epsilon$ 난류모델을 적용하였으며, 난류점성계수 μ_t 는 아래 식과 같은 Prandtl-Kolmogorov 관계식에 의해 단위 질량당 난류에너지 k 와 난류에너지 소산율 ϵ 을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\mu_t = \frac{C_{\mu} \rho k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

플라즈마 용융로에서 보조연료 및 유기 폐기물의 용융 시 발생하는 연소생성물 중 CO_2 와 H_2O 는 강한 흡수 및 방사체이기 때문에 열전달 중 복사모델의 적용이 필요하다. 본 논문에서는 지금까지 용융로 등에 잘 적용 되어진 DOM(Discrete Ordinate Method)을 사용하였다.

벽 근처에서의 수치해석은 특별한 처리가 요구되는데, 벽 가까이에서 층류 저층이 형성되기 때문이다. 식(3)의 난류점성계수는 완전히 발달한 난류지역에 적용되므로 벽 근처에서는 식(4)와 같이 난류점성계수가 새롭게 정의되어야 한다.

$$\begin{aligned} \mu_{eff} &= \mu & \text{if } y^+ < 11.5 \\ &= \frac{\mu y^+}{2.5 \ln(9y^+)} & \text{if } y^+ \geq 11.5 \end{aligned} \quad (4)$$

여기서, $y^+ = \rho k^{\frac{1}{2}} C_{\mu}^{\frac{1}{4}} \frac{y}{\mu}$ y_I 은 최초의 내부 grid point에서 벽까지의 거리를 말한다.

3.2 수치해석 방법

식(1)과 같이 표현된 일반적인 2차 편미분 지배방정식의 해를 얻기 위해서 검사체적에 기초한 유한차분법과 Power Law Scheme을 이용하여 이산화방정식을 유도하였다. 차분화된 운동방정식의 셀 압력의 decoupling을 없애기 위해 엇갈린 격자망을 사용하였다. 또한 Line by line TDMA 알고리즘에 의해 해를 구하였으며 압력과 속도의 연계는 SIMPLE 알고리즘에서 변형, 발전된 SIMPLEC 알고리즘을 사용하였다. 아래에 본 논문에서 사용한 수치해석코드와 모델 및 반응을 간단하게 나타내었다.

유동해석에 쓰인 코드는 FLUENT v6.1이며, 용융로 내의 유동장은 난류, 가스반응 및 복사를 포함하고 있으므로 다음과 같은 해석 모델을 적용하였다.

- 난류 : Renormalized Group k model
- 복사 : DOM(Discrete Ordinate Method)
- 가스의 흡수 : WSGGM(Weighted Sum of Gray Gases Model)
- 가스반응 : Kinetic rate/eddy break up model

3.3 수치해석 결과

플라즈마 토치로 공급되는 공기의 유량은 500 l/min이며 토치에서 불꽃이 배출되는 곳의 직경은 1 cm 정도로 매우 작기 때문에 배출유속은 음속보다 빠르게 되며 계산결과 2,000 m/s이다. 토치 불꽃의 온도는 5,000°C 이고 용융로 내부의 온도와 벽 온도, 배출온도는 실제 측정자료를 사용하였으며 각각 1,500°C, 800°C, 1,300°C 이다.

Inlet으로 플라즈마 토치 불꽃이 유입되며, outlet으로 배기가스가 배출된다. Fig. 3의 온도분포를 보면 출구가 입구보다 상부에 위치하는 경우 입구 하부의 온도가 낮음을 알 수 있다. 이는 입구에서 유입된 플라즈마 토치의 뜨거운 열기가 바로 출구로 빠져나가는 비율이 높기 때문이다. 이 경우 폐기물이 충분히 반응할 만한 체류시간을 제공하지 못하여 폐기물이 완전히 용융되지 못한 채 배출된다.

폐기물이 용융로 내에서 충분한 반응을 할 수 있는 체류시간의 확장과 폐기물 소각 시 용융로 출구로

배출되는 분진을 최소화하기 위하여 플라즈마 반응 용융로의 형태를 다시 설계하여 수치해석하였다. 용융되지 못한 폐기물이 배출되는 것을 방지하기 위하여 플라즈마 토치가 공급되는 지역과 폐기물이 유입되는 부분에 차폐막을 설치하였다.

Fig. 4과 Fig. 5에 유동장과 온도장을 각각 나타내었다. z=30 cm인 부분의 단면으로 용융로의 중앙 단면이다. 용융로 내부에 차폐막을 설치한 경우 플라즈마 토치 반대편에 커다란 재순환영역이 생성됨을 알 수 있으며 이러한 재순환영역으로 인하여 폐기물과 토치 불꽃의 혼합시간이 증가하여 폐기물을 완전히 용융시킬 수 있으며 용융로 내의 온도가 상승하였다. 또한 용융로 중앙 부분에서 벽 방향으로 갈수록 재순환 영역이 약화되면서 노 내의 온도가 낮아짐을 알 수 있다.

4. 플라즈마 열분해 용융 가스화

폐기물의 플라즈마 열분해 용융기술은 폐기물을 10,000°C 이상의 고온 상압 플라즈마를 이용하여 산소가 제한된 상태에서 가열하여 그 내부의 유기물질을 물리 화학적으로 분해하는 기술로서, 용융슬래그와 용융비산재를 포함하는 배가스를 생성한다.

가스화란 탄소, 수소 등을 함유한 고체 또는 액체의 원료에서 합성용 가스, 공업용 연료가스 등의 연료가스를 만드는 것으로, 좁은 의미로는 폐기물을 열에 의한 증발이 아닌 화학적 변화에 의해 기체로 변환하는 공정을 말하고 일반적으로는 열분해되는 물질이 공기, 산소, 물, 이산화탄소 등의 반응가스의 첨가에

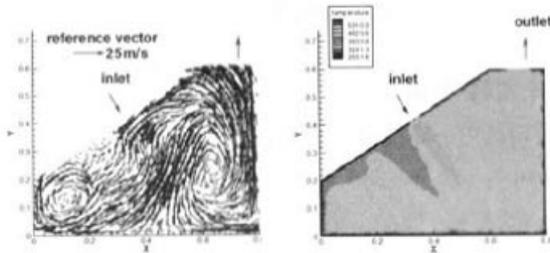


Fig. 3 Distribution of flow and temperature in melting furnace

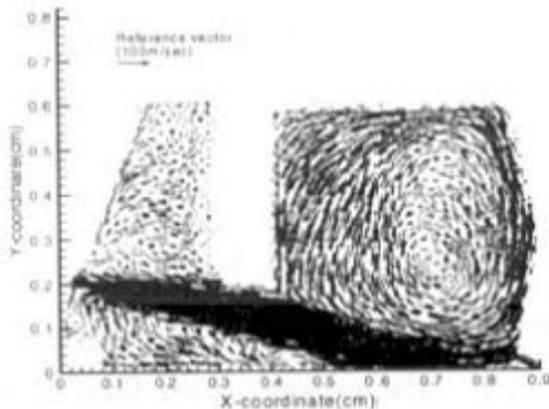


Fig. 4 Distribution of flow in melting furnace (installed curtain)

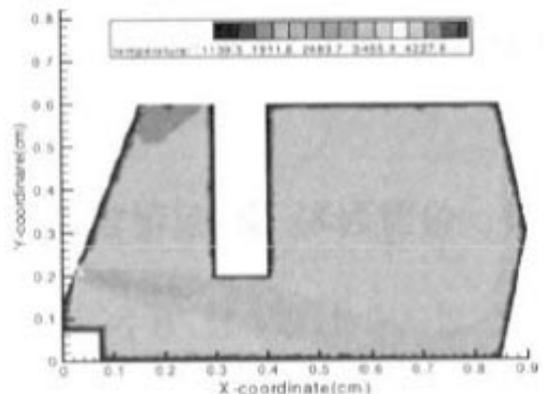


Fig. 5 Distribution of temperature in melting furnace (installed curtain)

의해 활성화되는 열분해의 한 형태를 의미한다.

폐기물 내의 유기물은 단위 분자인 수소, 일산화탄소 등으로 쪼개어 가스화하고 무기물은 용융 슬래그화 하여 배출한다. 산소가 제한된 상태에서 폐기물을 고온 열분해함으로써 다이옥신과 질소산화물, 황산화물들의 발생을 최소화하여 배출가스 내의 공해물질이 소각공정에 비하여 획기적으로 줄어들며, 소각재 대신 중금속 용출이 되지 않는 유리상의 슬래그를 배출하기 때문에 2차 오염도 없는 획기적인 폐기물 처리방법이라 할 수 있다. Fig. 6에 대표적인 플라즈마 열분해 용융공정을 나타내었으며, 이 공정은 플라즈마 토치로 가열된 1,500°C 이상의 고온 용융로에서 폐기물을 직접 열분해 용융하는 용융 시스템과 생성된 열분해 가스를 가스 냉각기와 백필터 및 스크러버로 구성된 간단한 시설로 정화하는 배가스 정화시스템 및 정화된 배가스를 연료로 활용하는 에너지 회수 시스템으로 구성된다. 특히 배가스 정화시스템은 고온의 용융로에서 배출되는 열분해 가스의 양이 같은 용량의 소각로 대비 1/7 정도에 불과하기 때문에 전체적인 시설 규모를 획기적으로 최소화 시킬 수 있을 뿐만 아니라 오염물질의 생성을 원천적으로 차단하는 공정의 특성으로 다이옥신 제

거설비 등이 필요 없이 가장 기본적인 설비만으로 구성된다.

Fig. 7은 플라즈마 열분해 용융공정을 실증하기 위해 Ad Platech에서 개발한 플랜트의 실제 사진이다. 3 ton/day급의 소형시설로 특별한 대기오염 방지설비를 갖추지 않고도 50 ton/day급 이상의 대형소각로에 적용되는 더 엄격한 환경규제치를 충분히 만족시키는 결과를 보였고, 플라즈마 열분해 용융공정에서 무기물의 용융에 의해 배출되는 유리상의 슬래그 내부에 함유되어 있는 중금속이 지하수나 빗물 등에 의해 외부로 유출되는 현상이 발생할 가능성에 대한 용출시험 결과 모든 관리대상 중금속 성분에 대하여 검출 한계치를 밑도는 결과를 보이고 있어서 도로의 기층재 또는 벽돌이나 타일 등의 생산에 재활용이 가능한 것으로 보고되고 있다. 특히 보통 소각로의 경우 총 처리용량의 약 15% 정도가 바닥재와 비산재의 형태로 배출되어 매립장에서 최종 처리되어야 하는 것과 달리 열분해 용융의 경우는 생활 및 산업 폐기물의 경우 약 1 ~ 3% 정도의 재활용이 가능한 슬래그만을 배출하게 된다.

5. PGV기술을 이용한 폐기물 자원화

플라즈마 열분해 용융시스템은 앞서 언급한 환경오염 저감측면에서의 장점 외에도 폐기물로부터 유용한 에너지 자원을 고효율로 생산하여 활용할 수 있다는 향후 매우 중요한 역할을 담당하게 될 중요한 장점을 갖고 있다^{4,5)}. 즉 폐기물의 열분해 과정에서 생산되는 다량의 수소와 일산화탄소 등의 연료가스를 활용하여 발전과 스팀 생산 등의 열병합 공정이나 미래 에너지원인 수소생산에 활용할 수 있다. 생활 및 산업쓰레기를 열분해 할 경우 쓰레기의 종류에 따라 차이를 보이고 있지만 적은 경우 50%에서 많을 경우 90%까지 수소와 일산화탄소의 함량을 보이고 있으며, 이로부터 충분히 높은 효율로 발전이 가능할 뿐만 아니라 경제성 있는 수소에너지 생산에도 활용이 가능하다.

5.1 전력 생산

쓰레기 1 ton을 처리하기 위한 전력은 플라즈마 토치에 600 kWh 정도가 소요되지만 연료가스의 형태로 배출되는 가스가 보유한 열량은 약 2,800 kWh로서 약 22% 정도의 효율로 발전할 경우 자체 소요 전력을 충당할 수 있고 현재 개발되어 있는 가스엔

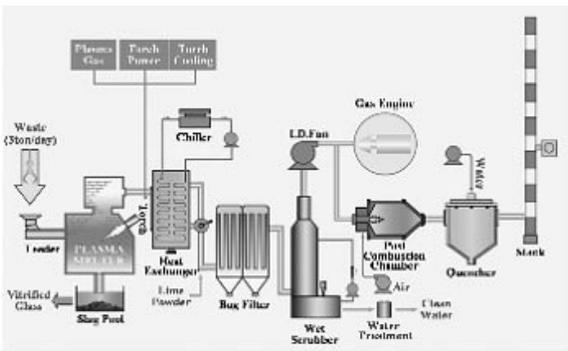


Fig. 6 Schematic of PGV system



Fig. 7 PGV system in 3 ton/day (Adplatech)

진 등의 기술을 적용할 경우 30% 이상의 효율로 발전이 가능하기 때문에 잉여전기의 생산도 가능하다. 뿐만 아니라 고열량의 산업폐기물인 경우는 배출가스의 열량은 쓰레기 1 ton 당 약 2,000 kWh 정도로서 고효율의 열병합발전에 매우 적합하다.

5.2 수소 생산

Fig. 8은 플라즈마 열분해 용융시스템을 활용한 수소생산의 개념도이다. 실험결과 각종 폐기물을 플라즈마로 열분해하였을 경우 배출가스 총량의 약 20% ~ 45% 정도에 해당하는 수소가스가 함유되어 있음을 알 수 있었다. 또한 이 열분해 가스는 청정연료의 형태로 정화되어 있는 상태로서 수소를 정제하여 회수하는데 PSA(Pressure Swing Adsorption) 공법 등 현재의 정제기술 수준으로도 적용에 큰 문제가 없다. 따라서 앞으로 다가올 수소경제 시대에 수소연료를 공급할 수 있는 중요한 하나의 수단이 될 가능성을 충분히 제시하고 있다. 생활쓰레기의 경우 약 15 ton 처리 시 수소를 1 ton 생산할 수 있으며, 산업쓰레기와 건조 하수 슬러지의 경우는 각각 10 ton과 12 ton 정도를 처리하였을 경우 수소를 각 1 ton씩 생산할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 즉 버려지고 처리되어야 할 폐기물로부터 전력과 스팀 등의 에너지를 생산할 수 있을 뿐만 아니라 중요한 미래 에너지 자원으로 대두되고 있는 수소를 다량 생산해 낼 수 있다.

6. PGV 시스템 파일럿 플랜트

연속적 동작이 가능한 플라즈마 토치를 개발하여 수 천도 이상의 고온으로 폐기물을 열분해 용융하였다. 플라즈마 용융로 설계에는 CFD 코드를 이용하

여 수치해석을 통해 최적의 용융로를 설계제작하였다. 이를 통해 PGV 시스템을 구성하였고, 일 처리량 10톤 규모의 실증 플랜트를 가동 중에 있다(Fig. 9 참고)⁶⁾. 열분해 후 약 24%의 가연성 가스가 발생되었고, 배출슬래그 용출시험 결과 중금속은 용출되지



(a) The inside of the pilot plant



(b) Melting furnace

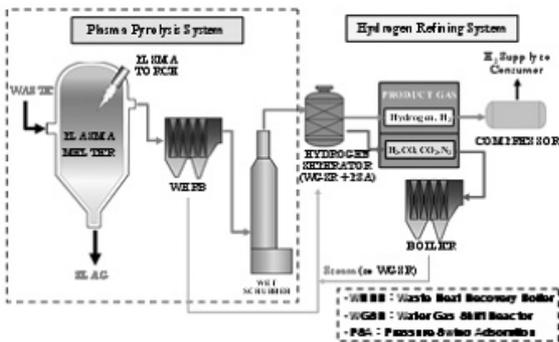


Fig. 8 Schematic of PGV system for hydrogen production

Fig. 9 PGV pilot plant in Cheongsong

Table 1 The results of elution test for slag

	Cu	Pb	Zn	Cr
Reject	< 0.000	< 0.000	< 0.000	< 0.000
Slag	< 0.000	< 0.000	< 0.000	< 0.000
	Cd	As	Hg	Remarks
Reject	< 0.000	< 0.000	< 0.000	unit [mg/ℓ]
Slag	< 0.000	< 0.000	< 0.000	

Analysis : Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Table 2. The results of test for dioxin and exhaust gases

	tolerance	Cheongsong
Dioxin/Furan (ngTEQ/m ³)	5	0.03
NOx (ppm)	150	18
SOx (ppm)	70	6
CO	200	5
HCl	40	0.38
dust (mg/Sm ³)	80	0.43
Smoke (degree)	below 2	0
C6H5OH (ppm)	10	0.9

Analysis : Analysis : DK Science (for dioxin), Gyeong Buk Environment Co., Ltd (for exhaust gases)

않았다(Table 1 참조). 또한 배가스 측정 결과 다이옥신을 비롯한 유해가스 모두 기준치 이내로 양호하였다(Table 2 참조).

7. PGV 시스템의 특징

PGV 시스템은 기존의 소각처리 방식과는 달리 산소공급이 제한된 상태에서 1,300℃ 이상의 고온으로 폐기물을 용융하기 때문에 다이옥신, 질소산화물(NOx) 및 황산화물(SOx)의 배출을 최소화할 수 있고, SCR 등의 환경설비가 필요 없다. 또한 소각재는 용융 유리화되어 재활용이 가능한 물질로 전환되며 2차 고형폐기물의 발생도 없어진다.

순수 국내기술로 개발된 PGV 시스템은 해외에 원천기술이 있는 타 열분해 용융시스템에 비해 많은 장점을 갖는다. 대부분의 열분해 용융시스템은 900℃ 정도의 열분해로에서 폐기물을 열분해한다. 여기서 발생한 소각재는 용융로에서 슬래그화되고, 합성가스는 연소실로 보내져 고온연소시킨다. 열원으로

코크스, 등유 등을 사용하므로 운영비가 증가하게 되고, 산소에 의한 연소과정을 거치게 되어 양질의 배가스를 얻기가 힘들고 따라서 배가스를 이용한 발전 및 수소 회수 등 에너지화가 어렵게 된다. 이에 반해 PGV 시스템은 열분해 용융로에서 산소의 투입이 제한된 환경 하에서 플라즈마에 의한 고온열분해와 용융과정이 동시에 일어난다. 시스템이 간단할 뿐만 아니라 열분해 가스화 과정에 산소가 관여하지 않아 순도 높은 합성가스를 얻을 수 있고, 이를 이용한 발전 및 수소 회수 등이 가능하다.

또한, 기존의 타 플라즈마 기술에서 문제가 되었던 플라즈마 토치의 교체비용문제를 장수명 플라즈마 토치기술을 개발함으로써 획기적으로 해결 절감하였다⁷⁾, 또한 합성가스를 이용하여 생산해낸 전력으로 플라즈마의 소비전력 및 소내전력을 충당시킬 수 있어 경제적으로도 우수한 성과를 얻게 되었다.

8. 향후 PGV 응용 분야

8.1 방사능 폐기물 유리화 사업

방사능 폐기물이란 방사성물질 또는 그로 인해 오염된 폐기의 대상이 되는 물질로, 원전연료로 사용된 사용 후 연료를 비롯해 원전 내 작업자들이 사용했던 장비 등과 방사성 동위원소를 사용하는 병원, 산업체 등에서 발생하는 폐기물을 포함한다. 이 방사성폐기물의 안전한 처리는 필수적이다. 지금까지는 드럼 내에 폐기물을 밀봉한 후 해수면 이하 80 ~ 130 m 위치의 지하 동굴에 콘크리트 구조물을 만들고, 수거물이 담긴 드럼을 저장한 후 동굴을 메우는 방식이었다. 하지만, 한정된 공간으로 인해 폐기물 처리장의 추가적인 건설이 필요한 현실이나 환경단체, 주민 등의 넘비현상으로 이의 지하처리장 확보가 만만치 않은 과제로 되고 있음은 주지하는 바와



Fig. 10. Vitrification facility for radioactivity wastes (Korea Hydro & Nuclear Power Co., Ltd)

같다.

유리화(vitrification)기술이란 방사성물질을 용융상태의 유리구조 내에 단단히 가두어 극한 조건에서도 외부유출을 완전히 차단, 안전성을 높이는 한편 폐기물 발생량을 75% 이상 감소시킬 수 있는 첨단 기술로써, PGV 기술을 이용하여 용융시키면 방사능 폐기물을 안정된 유리구조를 갖는 슬래그로 유리화하여 처리할 수 있다. Fig. 10은 한국수력원자력에 건설하여 시험가동 중인 방사능 폐기물 유리화 시설의 모습이다.

8.2 오일샌드 연료화

오일샌드란 일반적으로 비투멘(Bitumen), 모래, 물, 점토 등의 자연상태 혼합물을 말한다. 이 중 10~12%를 차지하는 비투멘은 점성질의 초중질유(重質油)로서 합성원유로 만들어져 정유공장에 공급된다. 통상 2톤의 오일샌드에서 약 1배럴의 원유를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있다. 그 동안은 높은 생산비용으로 경제성이 없었으나, 최근 중국, 인도의 에너지 수요 급증과 현재의 유가 수준에서는 원유의 대체제로서 개발 수요가 증가하고 있다.

오일샌드에서 원유를 생산하는 방법은 노천채굴(Mining) 방식과 지하회수(Steam Assisted Gravity Drainage) 방식이 있다. 노천채굴 방식은 일반 석유 채굴과 유사하며 대형트럭과 셔블을 이용해 채굴하여 파쇄 및 선별 과정을 거친 후 추출공정 등을 통해 연료로 사용된다. 하지만 PGV 시스템에 이용할 경우 선별과정을 비롯한 정제과정 등 전처리 과정 없이 바로 연료로 사용할 수 있기 때문에 생산 비용이 저렴하여 높은 경제성을 얻을 수 있다.

지하회수 방식은 변형된 시추공 생산 기법의 하나인데 주입정을 통해 뜨거운 스팀을 주입하여 가열시킨 비투멘을 중력효과에 의해 주입정보다 하부에 위

치한 생산정으로 추출해내는 방식이다. Fig. 11은 지하회수 방식의 모식도이다. 여기서 필요한 스팀은 원 거리에 위치한 발전소로부터 공급 받거나 근처에 디젤엔진을 설치하여 공급받게 된다. 하지만, 발전소까지 스팀 공급관을 연결하거나 디젤엔진 구동 시 필요한 연료로 인해 생산비용이 증가할 수 밖에 없다.

PGV 시스템은 지하회수 방식에도 매우 효율적이다. 컴팩트한 시스템으로 오일샌드 생산지 근처에 설치가 용이하고 오일샌드를 정제과정 없이 바로 연료로 사용할 수 있으며, 시스템에서 생산되는 스팀을 오일샌드에 공급함으로써 경제적이고 효율적인 원유의 생산이 가능하다.

8.3 버려진 원유(crude oil)의 활용

석유의 생산과정을 보면, 지하의 유층까지 굴착하여 유정을 통해 지상의 채유정까지 원유를 뽑아 올린다. 이때 유층의 상부에 존재하는 원유에는 다량의 황 성분이 포함되어 있어 초기에 채굴된 원유는 지금까지 버려져 왔다. 현재 이러한 버려진 원유들이 사막의 모래와 섞여 방치된 상태로 있으며, 많은 양의 이산화탄소를 배출시키고 있다. 이의 해결 방안에 대해 여러 논의가 이루어지고 있으나, 아직 뚜렷한 해법을 찾지 못하고 있다.

PGV 시스템은 플라즈마를 이용하여 고온에서 열분해 용융을 하기 때문에 모래 및 불순물이 섞여있는 원유의 처리가 가능하다. 또한 시스템에서 생산되는 스팀을 증류 방식의 해수담수화 플랜트, 발전 플랜트에 공급하여 음용수 생산 및 발전사업에 기여할 수 있다.

9. 결론

환경오염에 대한 사회적 관심이 고조되고 있는 가운데 폐기물의 발생이 증가함에 따라 친환경적인 처리방법에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 논문에서는 이러한 폐기물의 청정처리 대안으로 플라즈마를 이용한 열분해 용융 가스화 기술을 소개하였다.

열분해 후 발생하는 합성가스를 이용하여 발전이 가능하고 발전된 전력을 시스템운전에 자체 사용이 가능하고 남은 잉여 전력을 판매할 수도 있고, 아니면 WGS(Water Gas Shifting) 반응 및 PSA 공법을 통하여 수소가스를 회수할 수도 있다. 즉 PGV 시스템을 이용하면 지금까지 버려지던 폐기물로부터 전력과 스팀을 생산하고, 미래의 에너지원으로 주목

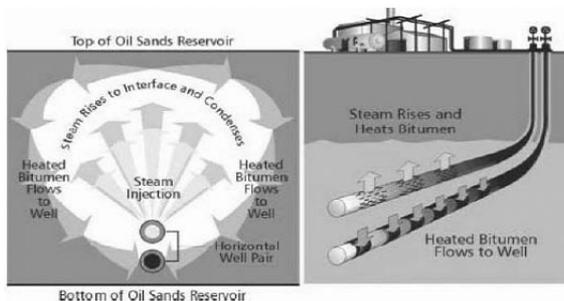


Fig. 11 In situ: SAGD method in place8)

받고 있는 수소에너지 생산도 가능하다.

PGV 시스템은 방사능 폐기물 처리에도 유용하다. 방사성물질을 유리화시킴으로써 안전성을 높임과 동시에 부피를 대폭 줄일 수 있게 되어, 기존의 방사능 폐기물 처리장을 대신할 수 있다. 그리고, 유가가 급등하고 있는 현재 대체에너지 개발에도 PGV 시스템의 활용이 가능하다. 개발 수요가 증가하고 있는 오일샌드를 전처리 과정 없이 바로 사용가능하고, 생산시스템에서 필요로 하는 스팀을 자체적으로 공급함으로써 저렴한 생산비용으로 에너지화할 수 있기 때문에 사업수행 시 경제적 우위에 설 수 있다.

또한 중동 사막지역에 버려진 막대한 양의 원유를 처리하면서, 이때 생산된 스팀과 가스를 활용하여 지역발전에도 이바지할 수 있다. 이와 같이 PGV 시스템을 이용하여 일반 및 방사능 폐기물의 친환경적인 처리뿐만 아니라 자원화 기술을 통해 에너지를 생산할 수 있다.

참고문헌

1. Williams, J.D., Iddles, D.M. and Chapman, C.D., 1995, Industrial treatment of waste materials using tetronics plasma systems, Thermal Plasmas for Hazardous Waste Treatment, pp. 112 125
2. Inaba, T., Watanabe, Y., Nagano, N. and Endo, M., 1998, Ar torch plasma characteristics and its application to waste treatment, Thin solid films, Vol. 316, pp. 111 116
3. Patanker, S. V., 1980, Numerical heat transfer and fluid flow, Mcgraw hill book company
4. 김영석, 이진호, 도철진, 2006, 애드플라텍 플라즈마 열분해 가스화 용융기술, 한국열환경공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 112 115
5. 황순모, 2006, 애드플라텍 플라즈마 열분해 가스화 용융시설, 환경관리공단 제4회 폐기물 처리기술 워크샵
6. 이각로, 이진호, 도철진, 김영석, 2008, 애드플라텍 10톤/일급 상용 생활폐기물 열분해 가스화 용융시설 소개, 한국열환경공학회 춘계학술발표회 논문집, pp. 189 194
7. 황순모, 도철진, 임수택, 정재승, 유병주, 박명규, 정인영, 2003, 장수명 플라즈마 토치, 공개특허 특2003 0060478
8. Max Wang, 2008, Canadian Oil Sands SAGD Fundamentals, 해외건설협회 ICAK 세미나