

## 플라즈마를 이용한 폐기물의 열분해 용융기술

폐기물의 소각을 대체하기 위하여 개발된 고온 플라즈마를 이용한 열분해 용융기술에 대하여 소개하고자 한다.

황순모

(주)에드플라텍 (smhwang@adplatech.com)

그동안의 급속한 산업화와 인구증가로 생활 및 산업 쓰레기 등 각종 폐기물의 발생은 급증하고 있는 반면에 쓰레기의 처리에 주로 사용되는 매립은 매립장의 부족과 지하수 및 토양 오염 등 2차 오염의 발생이 심각한 사회문제로 대두되고 있어 근본적인 해결책이 되지 못하고 있다. 반면 부피감량 등의 장점을 가진 소각의 경우는 선진 외국기술을 도입하여 그동안의 많은 경험을 바탕으로 활발한 기술축적이 이루어져 왔으나, 소각 시 발생하는 다이옥신을 비롯한 공해물질을 저감하기 위한 기술의 진보와 적극적인 투자가 요구되고 있으며 소각재를 다량 배출하기 때문에 매립장이 또한 필요하고 이에 따른 2차 오염이 역시 우려되어 사회적으로 큰 관심사항이 되고 있는 실정이다. 뿐만 아니라 최근 발효된 교토협약에 따른 이산화탄소 저감의무 및 곧 발효될 것으로 예상되는 런던협약에 따른 폐기물의 해양투기 금지로 인한 하수 슬러지 처리대책 등에도 열분해 용융기술이 큰 기여를 하게 될 것이다. 점차 강화되고 있는 환경규제와 지역 주민들의 환경오염에 대한 높은 관심 등을 감안할 때 폐기물의 안전하고 완벽한 처리방법의 개발과 적용이 시급히 요구되고 있는 실정이다.

최근 일본을 비롯한 선진국들을 중심으로 활발하게 개발되어 적용을 시작한 열분해 용융기술들은 다이옥신 등 심각한 공해물질의 배출이 거의 없고, 바닥재와 비산재 등 소각 후 발생하는 고형 폐기물의

발생도 없으며, 열분해 가스로부터 직접 에너지를 회수할 수 있는 폐기물 자원화 개념 등 많은 장점을 갖고 있다. 다양한 열분해 용융기술 중에서 특히 고온의 플라즈마 토치를 이용한 기술은 앞서 언급한 장점 외에도 처리해야 하는 배출가스의 양이 기존 소각로의 1/7 정도에 불과하여 시설규모를 획기적으로 소형화 하는 것이 가능하고 또한 효율적인 에너지 회수가 가능한 장점 등이 있다.

이러한 플라즈마 열분해 용융기술은 그동안 독성이 강한 폐기물 처리나 방사성 폐기물 감량화, 소각재 용융처리 등에 십수 년간 성공적으로 적용되어 왔으나, 후단에서 에너지를 회수하기 적당하지 못한 소규모 시스템이 대부분이었고 따라서 높은 운영비용 등의 문제가 지적되어 생활폐기물 등의 처리에는 적당하지 못한 것으로 판단되어 왔다. 그러나 최근 강화되는 환경규제를 만족시키기 위해 소각로에 설치되는 대기오염 방지시설의 설치비와 운영비가 점차 높아지게 되면서 비교 경쟁력을 확보하게 되어 최근 미국 등을 중심으로 활발한 기술개발과 적용이 이루어지고 있다.

### 플라즈마

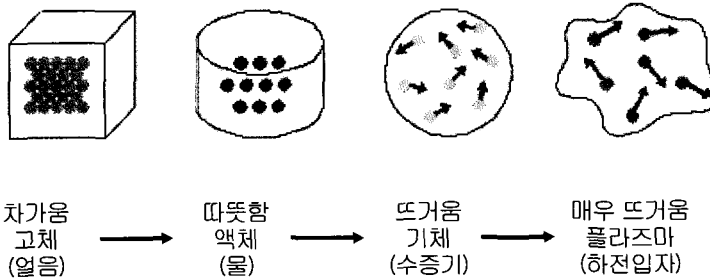
플라즈마는 전기방전 등의 방법으로 수천도 이상의 고온에서 얻어지는 물질의 상태로서 분자 또는 원자가 이온과 전자로 분리되어 있는 상태이다. 우

주를 구성하는 물질의 99% 이상이 플라즈마 상태에서 스스로 빛을 발하는 모든 항성은 플라즈마로 구성되어 있으며 핵융합 반응에 의한 막대한 에너지를 방출하고 있다. 지구상에서는 핵융합연구나 반도체 생산 등에 활용하기 위한 다양한 플라즈마를 인공적으로 발생시키고 있을 뿐만 아니라, 번개나 벼락과 같은 자연적인 현상으로도 플라즈마가 발생되고 있다. 오래전 그리스 철학자들이 만물을 구성하는 네 가지 원소로 흙과 물, 공기와 불을 지적하였는데 이 네 가지 원소는 고체, 액체, 기체, 그리고 플라즈마를 의미한다고 볼 수 있다. 즉 고체에 열을 가하면 액체상태로 변화하고, 더 열을 가하면 기체상태를 거쳐 최종적으로 플라즈마 상태로 변화하게 되는데, 플라즈마는 전리된 기체상태로서 전장 등에 의한 입

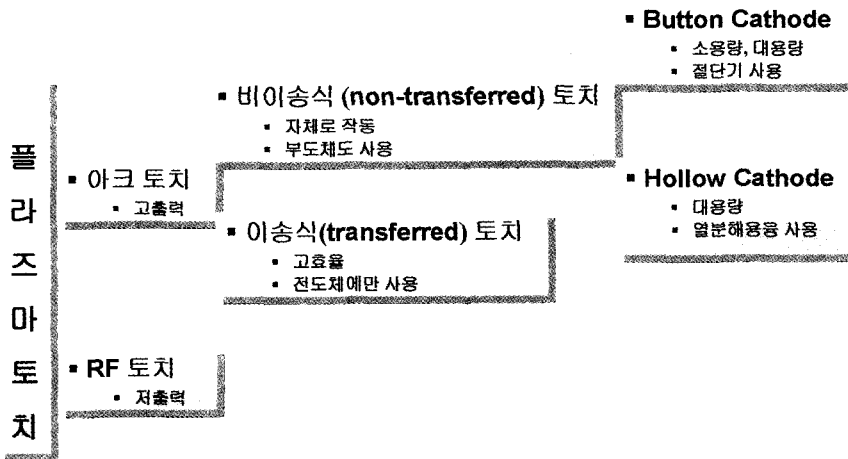
자의 가속이 손쉽게 때문에 고온으로의 가열이 용이하여 수억도 이상의 온도도 얻을 수 있다.

### 플라즈마 토치

대기압에서 플라즈마를 발생시키는 플라즈마 토치는 그림 2와 같이 분류할 수 있으며, 아크나 고주파로 기체를 전리시켜 고온의 플라즈마를 만들어내는 장치로서 폐기물의 열분해 응용에는 대용량의 아크 토치를 주로 사용한다. 플라즈마 토치는 크게 비이송식과 이송식으로 구분할 수 있으며, 전극의 형태에 따라서 공동형과 막대형으로 구분된다. 용융처리 대상물질의 전도성 여부에 따라서 이송식과 비이송식 또는 겸용 형태의 토치가 사용되며, 공동형과 막대형



[그림 1] 물질의 제4상태 플라즈마



[그림 2] 플라즈마 토치의 분류

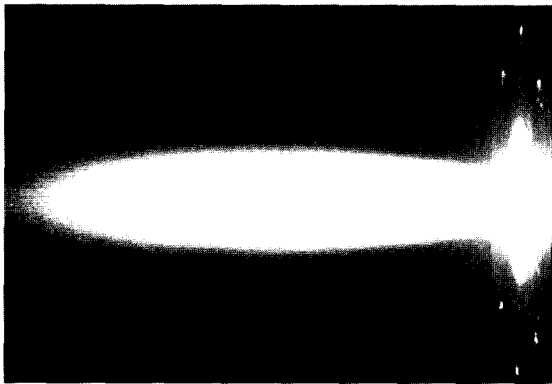
은 토치의 출력과 사용되는 플라즈마 기체의 종류에 따라서 사용성이 결정된다. 다양한 종류의 폐기물을 용융 처리하기 위해서는 일반적으로 공기나 산소를 플라즈마 기체로 사용하는 비이송식 공동형 직류 플라즈마 토치가 적절한 것으로 판단되고 있다.

플라즈마 열분해 용융기술의 핵심인 플라즈마 토치는 시스템 비용이 전체 시설비의 약 15%를 차지하고 전 시설에서 사용되는 에너지 비용의 70% 정도를 차지하기 때문에 전반적인 시설가격은 물론이고, 전

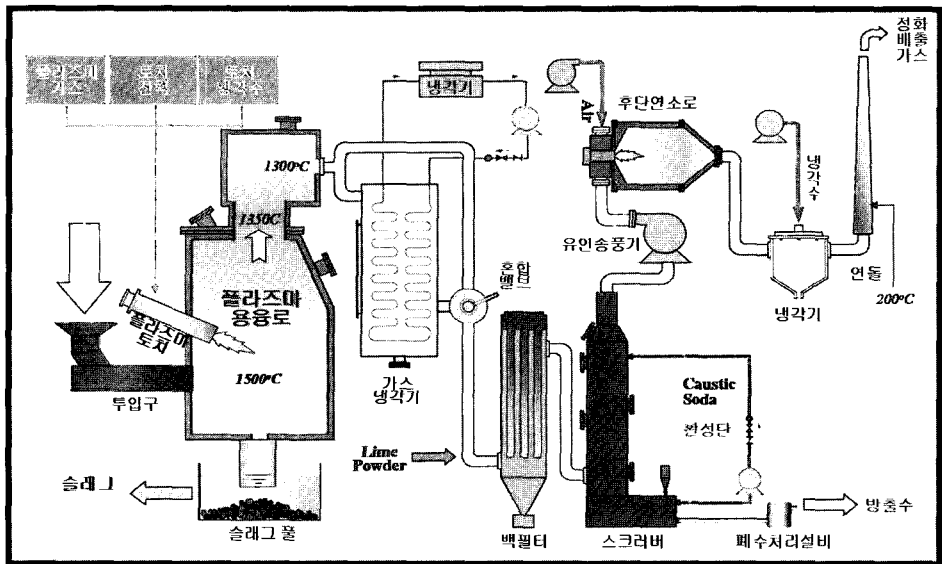
극의 수명이나 전기 효율 등 토치의 특성이 운영비를 크게 좌우하는 아주 중요한 역할을 맡고 있다. 그림 3은 플라즈마 토치의 동작 광경으로 중심부의 온도는 10,000도 이상의 고온으로서 불꽃 외부의 온도도 약 3,000도 이상이다. 이러한 고온에 의하여 엔탈피가 매우 높은 기체를 얻을 수 있으며, 따라서 열분해 용융로의 가열에 매우 효과적인 것을 알 수 있다.

### 폐기물의 열분해 용융

폐기물의 플라즈마 열분해 용융기술은 10,000도 이상의 고온 상압의 플라즈마를 이용하여 폐기물을 가열하는 기술이다. 폐기물 내의 유기물은 열분해하여 단위 분자인 수소, 일산화탄소 등으로 쪼개어 가스화하고 무기물은 용융 슬래그화 하여 배출한다. 산소가 결핍된 분위기에서 폐기물을 분해하기 때문에 다이옥신과 질소산화물, 황산화물들의 발생을 원천적으로 봉쇄하므로 배출가스 내의 공해물질이 소각공정에 비하여 획기적으로 줄어들며, 소각재 대신 중금속 용출이 되지 않는 유리상의 슬래그를 배출하기 때문에 2차 오염도 없는 획기적인 폐기물 처리방법이다. 그림 4에 대표적인 플라즈마 열분해 용융



[그림 3] 플라즈마 토치의 동작광경

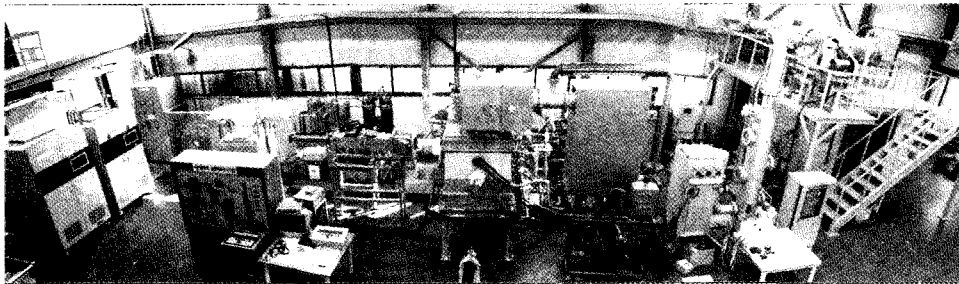


[그림 4] 플라즈마 열분해 용융공정

공정을 보였으며, 이 공정은 플라즈마 토치로 가열된 1,500도 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 용량 소각로 대비 1/7 정도에 불과하기 때문에 전체적인 시설 규모가 획기적으로 작게 만들 수 있을 뿐만 아니라 오염물질의 생성을 원천적으로 차단하는 공정의 특성으로 다이옥신 제거설비 등이 필요 없이 가장 기본적인 설비만으로 구성된다.

플라즈마 열분해 용융공정을 실증하기 위해 국내에서 개발된 플랜트의 실제 사진을 그림 5에 보였으며, 이 시설에서 각종 폐기물을 처리하는 과정에서 방출되는 배가스의 환경 오염치를 공식 측정하

결과를 표 1에 보였다. 3톤/일급의 소형시설로 특별한 대기오염 방지설비를 갖추지 않고도 50톤/일급 이상의 대형소각로에 적용되는 더 엄격한 환경규제치를 충분히 만족하는 결과를 보이고 있어서 플라즈마 열분해 용융공정의 우수성을 보여주고 있다. 한편 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 보고 되고 있다. 특히 소각로의 경우 총 처리용량의 약 15% 정도가 바닥재와 비산재의 형태로 배출되어 매립장에 최종 처리되어야 하는 것과 달리 열분해 용융의 경우는 생활 및 산업폐기물의 경우 약 1~3% 정도의 재활용 가능한 슬래그를 배출하게 된다.



[그림 5] 3톤/일급 플라즈마 열분해 용융 실증시설

<표 1> 대기오염물질 배출 측정결과

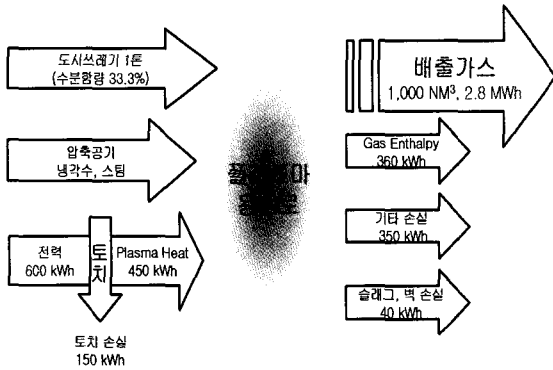
유해물질	환경규제치('05년 50톤/일급 이상/이하)	플라즈마열분해용융시스템 (3톤/일급)측정치	외국H시 열분해용융 시스템(22톤/일급)측정치
다이옥신 (ngTEQ/m <sup>3</sup> )	1 / 5 (100톤 이상 : 0/1)	0.021	0.05 이하
NOx (ppm)	80 / 150	13	87
SOx (ppm)	30 / 70	1.5	5
CO (ppm)	50 / 200	22	8
HCl (ppm)	30 / 40	1.7	60
DUST (mg/m <sup>3</sup> )	30 / 80	7	15

### 폐기물 자원화 개념

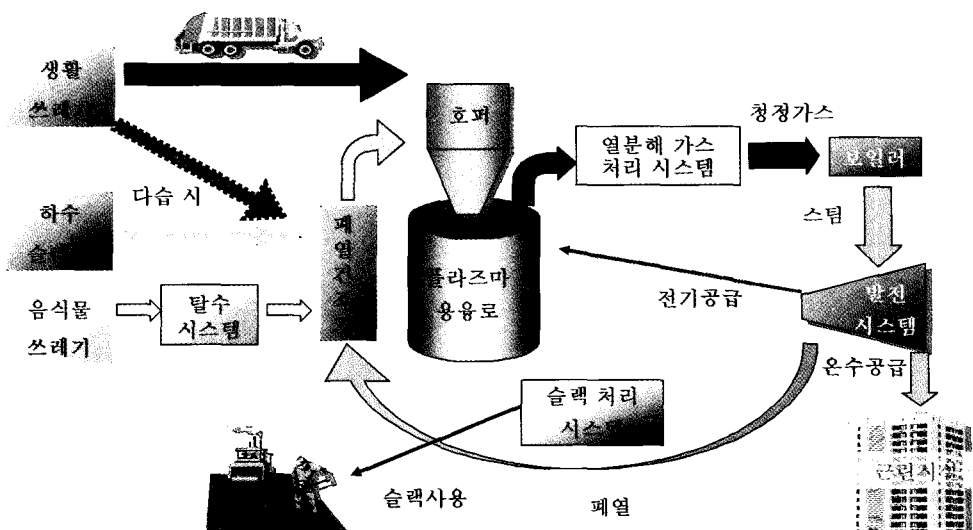
플라즈마 열분해 용융시스템은 앞서 언급한 환경 오염 저감측면에서의 장점 외에도 폐기물로부터 유용한 에너지 자원을 고효율로 생산하여 활용할 수 있다는 향후 매우 중요한 역할을 담당하게 될 중요한 장점을 갖고 있다. 즉 폐기물의 열분해 과정에서 생산되는 다량의 수소와 일산화탄소 등의 연료가스를 활용하여 발전과 스팀 생산 등의 열병합 공정이거나 미래 에너지원인 수소생산에 활용할 수 있다. 생

활 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. 도시쓰레기를 플라즈마 열분해 용융처리 할 경우의 에너지균형도를 그림 6에 보였으며, 쓰레기 1 톤을 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 가스엔진 등의 기술을 적용할 경우 30% 이상의 효율로 발전이 가능하기 때문에 잉여전기의 생산도 가능하다. 뿐만 아니라 고열량의 산업폐기물인 경우의 배출가스의 열량이 쓰레기 1 톤당 약 10,000 kWh 정도로서 고효율의 열병합발전이 매우 적합하다.

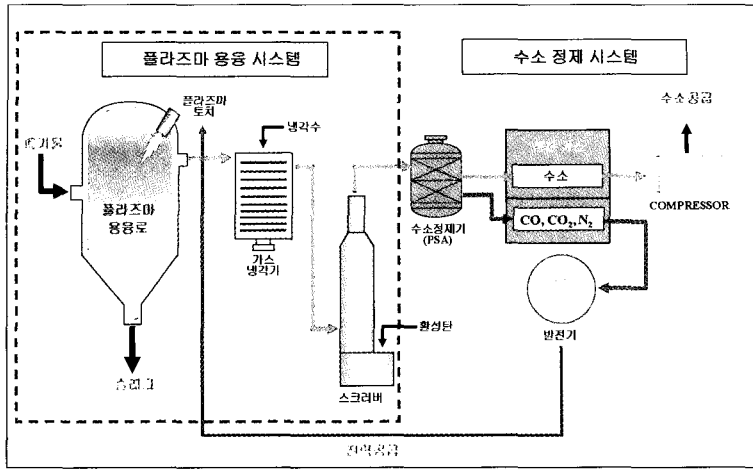
플라즈마 열분해 용융공정을 이용한 도시폐기물 플라즈마 종합처리 시스템의 구성 예를 그림 7에 보였다. 플라즈마 열분해 용융과정에서 발생된 연료가스로 전기를 생산하여 플라즈마 토치 운전의 소모되는 전기를 공급하고 발전과정에서 발생하는 온수를 지역난방에 활용하는 형태로서, 생활쓰레기와 음식물쓰레기 및 하수슬러지를 함께 처리할 수 있다.



[그림 6] 도시쓰레기 플라즈마 열분해 용융 에너지균형도



[그림 7] 도시폐기물 플라즈마 종합처리 시스템



[그림 8] 폐기물의 플라즈마 열분해처리에 의한 수소생산 개념

처리되는 폐기물의 함수율은 용융로의 전반적인 에너지 효율과 밀접하게 관련되기 때문에 가능한 한 약 40% 이하로 유지하는 것이 적절하며 따라서 폐열을 이용한 건조기를 이용하여 높은 함수율의 폐기물을 건조하는 것이 요구된다. 물론 함수율이 높은 폐기물을 그대로 처리하는 것도 가능하지만 폐기물에 다량 포함된 물의 기화열로 많은 양의 에너지를 소모해야 하기 때문에 경제적인 시설의 운영에 적합하지 못하다.

그림 8에 플라즈마 열분해 용융시스템을 활용한 수소생산의 개념도를 보였다. 실험결과 각종 폐기물을 플라즈마를 이용하여 열분해 하였을 경우 배출가스 총량의 약 20% ~ 45% 정도 수소가스가 함유되어 있음을 알 수 있었다. 또한 이 열분해 가스는 청정연료의 형태로 정화되어 있는 상태로서 수소를 정제하여 회수하는데 PSA 방법 등 현재의 정제기술 수준으로도 적용에 큰 문제가 없다. 따라서 앞으로 다가올 수소경제의 시대에 수소연료를 공급할 수 있는 중요한 하나의 수단이 될 가능성을 충분히 가지고 있다고 보겠다. 생활쓰레기의 경우는 약 15 톤 처리 시 수소를 1 톤 생산할 수 있으며, 산업쓰레기와 건조하수 슬러지의 경우는 각각 10 톤과 12 톤 정도를 처리하였을 경우 수소를 1 톤씩 생산할 수 있는 것으로 나타나고 있다. 즉 버려지고 처리되어야 할 폐기물로부터 전력과 스팀 등의 에너지 생산뿐만 아니라 중요한 미래 에너지 자원으로 간주되고 있는 수소를

다량 생산해 낼 수 있다.

폐기물의 처리에 있어서 매립과 소각에 의한 환경적인 부담을 경감시킬 수 있는 새로운 방식으로서 열분해 용융방식이 최근 많은 관심을 끌고 있다. 이 중 플라즈마 열분해 용융방식은 그동안 독성이 매우 강하거나 처리가 곤란한 일부 폐기물을 대상으로 제한적으로 적용되어온 기술이지만, 이제 유럽과 일본 및 대만을 중심으로 20 톤/일 ~ 50 톤/일급의 중형시설과 200 톤/일 ~ 300 톤/일급의 대형시설들이 이미 운영되거나 건설 중에 있다. 우리나라에서는 아직 플라즈마 방식뿐만 아니라 어떠한 방식의 열분해 용융시설도 상용운전을 시작하지 못하고 있다. 플라즈마 방식과 써모셀렉트 방식의 열분해 용융시설의 과일렛 플랜트가 3 톤/일급 정도의 규모로 개발되어 운영되고 있으며, 일부 지방자치단체에서 열분해 용융방식의 폐기물 처리시설을 발주 또는 발주 준비 중에 있는 실정이다. 하지만 많은 지방자치단체들과 폐기물 처리사업자들이 점차 강화되는 환경규제와 민원제기 등의 환경변화에 따라서 열분해 용융시설에 점차 많은 관심을 기울이고 있기 때문에, 확실한 우월성을 갖는 환경오염 방지 및 고효율 에너지 생산을 통한 효과적인 폐기물 자원화 등 기존의 소각이나 매립과 비교 할 수 없는 장점을 잘 활용하는 경우 향후 국내 폐기물 처리문제의 해결에 크게 기여할 수 있을 것이다. ㉔