

# 폐기물의 열분해 가스화 용융 기술

박현서, 김성중\*, 권영배\*\*

전주대학교 환경과학과, \*인천대학교 안전공학과, \*\*한국기계연구원

## 목 차

1. 서 론
2. 열분해 가스화 용융기술의 필요성
3. 열분해 가스화 반응
4. 저온 가스화 용융방법
5. 고온 가스화 용융방법
6. 유럽지역의 열분해 가스화 용융기술 비교 평가
7. 일본지역의 열분해 가스화 용융기술 비교 평가
8. 결론

### 1. 서 론

폐기물의 발생은 인간활동에서 발생하는 부산물로서 인류가 존재하는 한 상호연관을 지속적으로 갖게 된다. 최근에 와서 쾌적한 자연환경의 구축을 위해서 폐기물의 처리와 처분방법이 종합적이고 다양하게 개발되고 있으며, 보다 경제적인 방안의 연구가 진행되고 있다.

이러한 종합적인 처리 및 처분 방법은 우선적으로 폐기물의 양을 줄이고, 환경적인 안정을 목적으로 하고 있으며, 더 나아가서는 폐기물의 자원을 큰 목적으로 삼고 있다. 특히 천연지하자원이 부족한 우리 나라는 폐기물의 자원화가 필연적으로 고려되어야 한다. 국내에서 발생하는 사업장 일반폐기물과 생활쓰레기를 합친 일반쓰레기의 발생 특성을 환경부 자료와 국내의 폐기물 조성별 발열량을 기준으로 하

여 가연성 일반쓰레기의 에너지 잠재력 1995년에 490만 TOE(오일 10,000kcal/kg기준)이다. 이러한 에너지 잠재력은 1989년도 기준으로 국내 총 에너지소모량 81,659,000TOE와 비교할 때, 가연성 일반쓰레기의 에너지 잠재력은 전체의 약 6%에 해당한다. 1995년 현재 생활쓰레기의 약 4%에 해당하는 1,922톤/일 소각처리되고 있으며, 사업장 일반폐기물의 경우에는 5,691톤/일(5.9%)이 소각처리되고 있다. 또한 재활용율이 매우 낮고 매립처리 비중이 매우 크다.

이에 정부에서는 쓰레기 종량제 실시와 지방자치의 본격적인 실시와 OECD 가입 등 국내·외적인 여건이 크게 변화되어 국가의 폐기물관리목표 및 전략을 수정하였다. 환경부는 이 계획을 통해 2001년까지 생활폐기물의 재활용율을 35%까지 제고하고, 소각처리율을 20% 수준으로 끌어올려 매립되는 폐기물을 45% 수준으로 유기하기로 결정하였다. 이를 위해 통합관리시스템(Integrated Waste Management System, IWMS)을 구축하는 방안이 고려되고 있으며, 통합관리시스템의 구축과 함께 폐기물처리시설에 대한 이미지를 개선하고 처리의 효율성을 증대시키기 위하여 첨단플랜트설비를 갖춘 폐기물 종합처리시설을 설치할 계획이다. 기존에 매립, 소각, 재활용 등 폐기물처리시설이 각각 따로 설치되고 있어 부지확보에 어려움이 많고, 확보된 부지를 효과적으로 사용할 수 없을 뿐 아니라 부대시설, 인력장비 등을 중복적으로 설치하거나 확보하게 되어 고비용 저효율의 구조적 문제점을 안고 있다.

이러한 폐기물 종합처리시스템에서 설치하여야 할 소각시스템의 경우 현재까지 다양한 형태가 개발적으로 활용되고 있으나, 설치지역 주민의 민원발생 및 2차 부산물의 처리에 관한 애로점 등이 발생하고 있다. 그림 1은 소각기술의 적용이 가장 보편화 된 일본의 소각시스템 변화 추이와 국내 현황을 나타낸 것이다. 일본의 경우 쓰레기의 에너지화 시설로서의 활용이 높으며, 쓰레기의 발열량 상승에 따른 열병합형 발전시스템으로서 적용하고 있다. 특히 소각시스템의 열회수 효율 및 2차 오염물질 배출을 억제하기 위한 성능향상을 목적으로 가스화 용융시스템의 개발이 이루어지고 있다. 국내의 경우에는 일본에 비해 대형 소각시스템의 개발 및 적용이 낙후되어 있다.

특히 국내에서는 앞으로 음식물 쓰레기의 감량화로 인하여 수분함량이 줄어들어 폐기물의 발열량 증가와 투입폐기물의 5~15% 정도로 배출되는 소각회분(바닥재와 비산재)에 중금속이 농축되어 있으므로 이에 대한 대안이 필요하다. 따라서 중금속

을 함유한 회분의 용융고화를 유도하는 동시에 2차 오염물질의 발생 억제와 완전한 에너지 순환형 소각시스템의 개발과 기존에 공급된 소각시스템에 응용할 수 있는 회분용융 고화설비의 보급을 위한 준비가 필요하다.

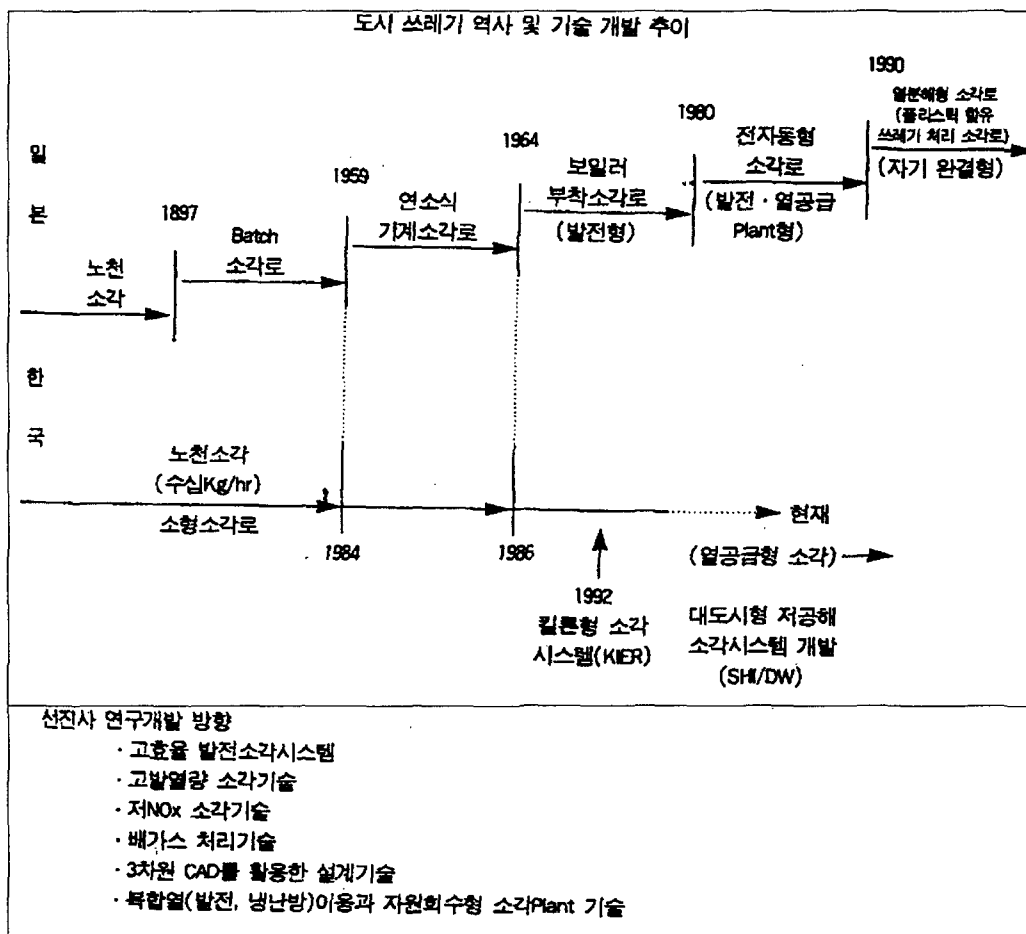


그림 1. 소각기술의 변천 및 선진국과의 기술 비교

## 2. 가스화 용융기술의 필요성

소각로에서 발생하는 다이옥신 및 퓨란 등의 유기독성물질의 생성억제와 매립되고 있는 중금속을 함유한 회분의 처리문제가 현재 소각시스템에서 표출되고 있는 문제점이다. 현재 국내에서는 정부에서 다이옥신 등의 유기독성 물질의 배출현황을 조사하고 있으며, 생활쓰레기와 사업장일반폐기물의 소각으로 발생하는 회분의 양은 760톤/일(소각량의 10% 고려)일 것으로 추정된다. 특히 회분의 경우 개정된 폐기물 관리법에 의해서 지정폐기물로 판정되면 안전매립이나 용융고화 등의 2차 처리가 필요하게 된다.

소각시 부수적으로 발생하는 열을 최대한 회수할 수 있도록 시스템 구성과 소각시스템의 간소화 및 compact화에 의한 시스템의 용이한 운전성 확보 및 설치 단가의 적정한 조정이 필요하다. 그림 2에서는 이러한 현 과제와 해결방안의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 현 문제점을 해결하기 위한 장래 도입과제로서 6가지의 기술이 선진국(일본, 독일, 영국)에서 개발되고 있다. 특히 저온가스화 용융기술은 현재 직면해 있는 문제들을 해결할 수 있는 기수로 대두되고 있다.

표 1은 현 소각기술과 앞으로 시스템의 개발 후 실용화가 가능한 시스템의 중간처리성능, 환경보전의 대응성, 유지관리의 용이성, 경제성 및 실용성을 비교한 것이다.

## 3. 열분해 가스화 반응

가연성 폐기물의 가스화 과정에서 일어나는 열화학적인 변화는 매우 복잡하며, 다양한 반응경로를 거치기 때문에 정확한 이해가 어렵다. 그러나 그림 3과 같이 전체적인 화학반응 경로를 정확하게 이해함으로써 가스화 반응시 발생하는 가연성 물질의 최적조건을 도출할 수 있다.

표 2는 폐기물의 열분해 및 가스화반응을 포함하는 화학반응의 엔탈피 변화를 나타내고 있다. 열분해 반응은 주로 무산소 상태에서 일어나는 열적분해과정(thermal degradation)이며, 흡열반응이다. 그러나 가스화 반응은 완전연소를 일으키기에 불충분한 산소 분위기 또는 무산소 상태에서 폐기물의 탄소 및 수소성분 등이 주위의 기체와 반응하여 기체상 물질로 전환되는 과정을 나타낸다. 열분해 생성

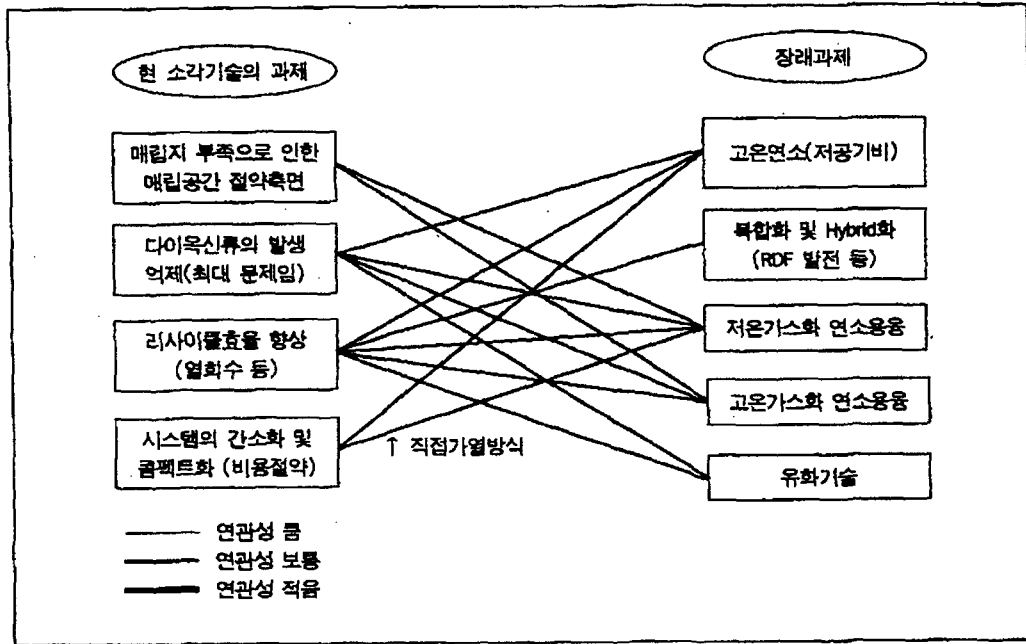


그림 2. 현 소각기술의 선결과제와 앞으로 해결해야 할 과제

물 중에는 상온에서 기체상 물질( $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{C}_1\text{-C}_4$  hydrocarbon 등) 뿐 아니라 응축성 오일성분도 많이 생성된다. 이러한 응축성 오일은 지방족 및 방향족계 유기화합물들로 구성되어 있으며, 이들 유기화합물들은 특히 폐합성수지, 페타이어, 폐고무류, 폐섬유류의 열분해과정에서 다양하게 생성된다. 또한 기체상 물질 중  $\text{C}_1\text{-C}_5$ 의 탄화수소 성분도 열분해 과정에서 많이 생성된다.

예를 들면, 페타이어에서 기체상 또는 오일상의 지방적 화합물은 파라핀계 유기화합물의 열분해(thermal cracking)에 의해서 생성되며 또한 질소를 함유하는 유기생성물은 amine계 유기화합물의 열분해와 휘발작용(volatilization)에 의해서 생성되고, 황을 함유한 유기생성물은 폐기물 중에 존재하는 황화합물에 의해서 생성된다. 따라서 매우 다양한 열분해 및 휘발과정에 의해서 오일성분이 생성된다. 1차 연소실에서 생성된 가연성 가스와 오일성분은 2차 연소실에서 2차 공기를 주입하여 고온과 일정한 체류시간을 부여함으로써 완전연소를 유도하게 되고 이때 발생하는 열을 이용하여 회분의 용융이 가능하다.

표 1. 현재 소각기술과 차세대 소각처리 기술로 고려되고 있는 소각시스템 비교

구분	현재 소각기술	고온소각기술 (저공기비 소각)	복합 및 hybrid화 기술		가스화고온 소각용융		유화기술
			수퍼쓰레기 발전	RDF발전	저온가스화	고온가스화	
중간 처리성	현재 광범위하게 사용	현 소각기술과 유사(연소공기량 적음.)	현 소각기술과 동일함. (전력생산시스템 강화)	· RDF제조설비 필요. · RDF제조에 부적합한 물질은 별도처리요.	· 간접가열방식은 선별 파쇄기 필요 · 불연물은 용융되지 않음. (분리하여 2차연소에서 용융) 한계발열량 : 2000kcal/kg	· 전처리 불필요 · 불연물은 용융 배출됨.	· 처리대상은 주로 플라스틱 폐기물임. · 전처리설비 필요. · 분리에 부적합 물질은 별도 처리요.
환경보존의 대응성	굴뚝에서의 다이옥신 배출과 회분처리에 문제	다이옥신 배출억제는 가능하나, thermal NOx의 배출이 증가.	굴뚝에서의 다이옥신 배출과 회분처리에 문제	좌동	· 배가스중에 다이옥신 농도를 줄일수 있고 회분(slag)내에 다이옥신 없음. · Thermal NOx 증가	· 열분해 회수형 장치는 배가스중에 다이옥신 농도를 줄일수 있고 회분(slag)내에 다이옥신 없음. · Thermal NOx 증가	· 회수유의 직접사용이 불가능하므로 별도 정제시설필요. 부자재의 소모가 큼. · 직접소각에 비해 지구환경보전성이 다소 떨어짐.
자원순환형으로서의 적응성	소각 배가스의 고온발생에 의한 실용적인 전력생산. 효율 15 ~ 20% 정도.	boiler효율이 향상되므로 현행소각보다 에너지효율이 향상.	발전효율은 25%이상으로 높으나 보조연료 필요. 천연연료사용으로 복합발전 효율을 50%까지 확대 가능.	발열량이 증가한 현재의 쓰레기에서 회수 측면에서 적용하는데 큰장점은 없음. 일반 소각발전과 비교)	boiler효율 향상으로 발전효율 향상. 환원성 분위기의 열분해로에서 배출되는 회분에서 유가물질 분리가 가능(Fe, Al)	발열량이 높아 연소가 잘되는 순산소, 석회석 투입필요 (전력생산과 자원회수 측면에서도 장점이 있음) 용융상태의 품질낮음.	유화설비 및 부자재의 추가소모에 의한 에너지 낭비요소 존재
최종처분장소의	소각 회분매립 지정 폐기물로 취급될때 중간처리요.	좌동	좌동	RDF 제조시 배출되는 불연물 매립. 석회 혼합 RDF 소각후 회분량 증가.	회분 1/2~1/3 감소 전처리시설의 잔재를 혼합매립하는 경우 매립량이 많아짐.	회분 1/3로 감소하고 재이용가능.	전처리에서 배출되는 불연물과 회분의 혼합매립에 의한 매립부하량 증가.
유지관리성	증명된 기술로서 안정한 운전의 확보가능.	일부 안정한 운전조건 확보필요.	현소각시스템과 큰차이없음. (산업발전설비와 연계사용.)	현소각기술보다 유지관리비 증가	2차고온 용융로의 적절한 운전조건 확보필요. 연속운전시 내화재 수명연장이 최대과제임.	고온운전에 관한 안정성 확보필요 (운전조건) 연속운전시 내화재 수명연장이 최대과제임. 열분해가스 회수형은 tar제거요	실험실규모의 운전으로 아직 관리상의 어려움.

구분	현재 소각기술	고온소각기술 (저공기비 소각)	복합 및 hybrid화 기술		가스화고온 소각용융		유화기술
			수퍼쓰레기 발전	RDF발전	저온가스화	고온가스화	
경제성	배출기준의 강화와 설치되는 소각시설이 대규모화, 복잡화되고 있어 건설및 유지관리비 증가	배가스량의 감소로 후처리시설이 작아지고 콤팩트화가 가능하나 고온설비비상승. 유지관리비상승. 에너지회수율 증가.	오일가격 및 전력비가 안정한 사회적인 분위기에서는 큰효과 없음.	RDF 시설의 종류에 따라 건설 및 유지 관리비가 다르나 어느정도 경제적인 장점은 있음. 생석회혼합RDF는 건설 및 유지비용이 큼.	소각+회분용융 시스템과 비교하여 건설비는 시스템이 간단하므로 싸며, 유지관리비는 증가하나 에너지 회수효율 향상으로 상쇄.	소각+회분용융 시스템과 비교하여 건설비는 시스템이 간단하므로 싸며, 유지관리비는 부재의 사용으로 고가	재생유의 가치에 따라 다르나 고비용설비임. (80만원/톤)
실용성	다이옥신 문제, 매립지 부족, 저에너지 회수율 등의 원인으로 대체기술 필요성 대두.	기존 기술과 플랜트에서의 수요 열비의 구축이 가능하나 현재 설비비는 없음.	현기술로 실용플랜트 구축이 가능. 수련 기술이 아님.	기존 기술로 시스템 구현이 가능하며 유동상식이 최적.	현재 가장 활발히 개발중인 방법. 실용화가 성공하면 급격히 기존 시설 대체가능.	부재이용으로 저온가스화 공정에 비해 불리함. (이의 해결이 필요.)	현재 연구실 단계. 독일에서 실용화에 실패함.

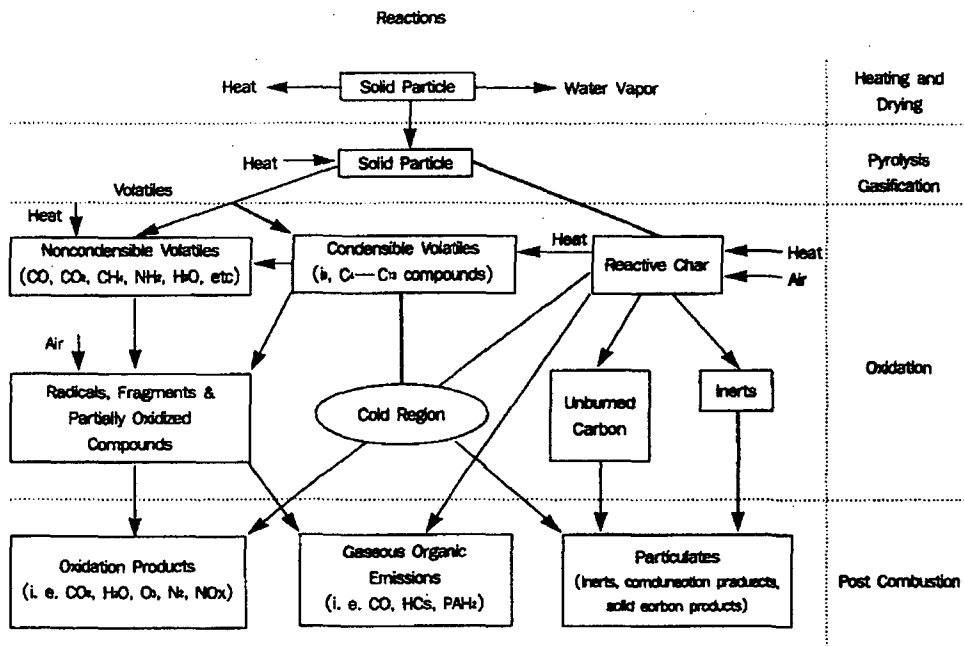


그림 3. 폐기물의 열처리시 발생하는 화학반응 경로

표 2. 열분해 및 가스화 반응에서의 엔탈피 변화

Transformation of waste	Reaction	Enthalpy (Mj/kg mole)	Reaction Temp. (°C)
Pyrolysis	Dry waste --> Char + Volatile (H <sub>2</sub> O, H <sub>2</sub> , CO, CH <sub>4</sub> , C <sub>2</sub> H <sub>4</sub> etc.)	+ ΔH	200~500
Gasification	C + H <sub>2</sub> O ↔ CO + H <sub>2</sub> O	135.7	500~800
	C + CO <sub>2</sub> ↔ 2CO	167.9	
	CO + H <sub>2</sub> O ↔ CO <sub>2</sub> + H <sub>2</sub>	-32.18	
	C + 2H <sub>2</sub> ↔ CH <sub>4</sub>	-91.6	
	CO + 3H <sub>2</sub> ↔ CH <sub>4</sub> + H <sub>2</sub> O		
	C + 1/2 O <sub>2</sub> ↔ CO etc.		

#### 4. 저온 가스화 용융소각방법

저온 가스화 용융소각시스템은 500~800℃에서 가스화 반응기와 간접가열식 가스화 반응기를 적용하는 두 가지 시스템이 있다. 직접 가열식은 가스화 반응기에 예열된 공기를 직접 투입하여 폐기물의 일부를 연소시켜 발생하는 열이 열분해 및 가스화 반응을 순차적으로 일으키도록 유도하는 방식이나, 간접가열식은 가스화로에 예열된 연소공기를 투입하지 않고 열교환 설비를 이용하여 열분해 및 가스화반응에 필요한 열을 전달시키거나 산소의 함량이 적은 배가스를 직접 투입하여 가스화시키는 방법이다.

앞에서 설명된 바와 같이 폐기물을 가스화시키면 비가연성 물질(H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, HCl, SO<sub>x</sub>, NO<sub>x</sub>, Cl<sub>2</sub> 등)과 가연성 물질(CO, CH<sub>4</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>6</sub>, C<sub>2</sub>H<sub>4</sub>, C<sub>3</sub> 이상의 탄화수소류 등)이 발생되며, 특히 직접가열식의 경우에는 가스화 생성물질 중에 비가연성물질의 함량이 간접가열식에 비해 다소 높아 발열량(2,000~4,000kcal/m<sup>3</sup>)이 낮은 가스가 발생된다. 그러나 간접가열식의 가스화로에서 산소의 공급을 억제하고 외부의 열원을 폐기물로 전달시켜야 하므로 전열장치가 다소 복잡하다.

가스화반응기에 발생된 가연성 가스를 공기와 접촉시켜, CO, 탄화수소류 등을 완전 산화시키기 위한 2차 연소실 기능과 용융기능을 갖는 시스템 구성 및 설계시 필요한 조건은 다음과 같다.



- i) 부대시설 : 연소공기 주입장치(공기fan, 공기노즐, 유량조절장치), 열분해가스의 분무 노즐, 보조 버너(LPG 또는 경유)
- ii) 운전요인 : 열분해가스의 조성(가연분함량, 수분량 등) 및 유량, 인입온도, 공기량
- iii) 설계요인 :
  - ① 열분해가스의 분무방식 및 공기주입 방법(화염형성)
  - ② 연소실 형상 및 내화재 사용
  - ③ 염소가스의 화염억제 효과 제어 방법
  - ④ 슬래그의 용융온도 조절(첨가제)
  - ⑤ 전열방식 및 체류시간
  - ⑥ 회분(소각잔사 및 비산재)의 투입방법

이러한 가스화 소각시스템은 70년대 오일쇼크후 Union Carbide사 등에서 처음으로 개발되었으나, 그 당시 시스템의 경제적인 가치가 떨어져 사용화에 성공하지 못하였다. 그러나 현재 일본에서는 소각시 발생하는 에너지회수율의 향상과 회분의 용융에 따른 매립비용의 감소 및 재활용 효과와 다이옥신 등의 유독물질 배출저감 등으로 인하여 가스화 용융소각시스템이 개발 중에 있다. 현재 직접가열식의 대표적인 사례로서 외부 또한 내부순환형 유독층 가스화 시스템을 적용하고 있으며, 일본의 Ebara, Hitachi, IHI(오스트리아의 SGP사와 기술제휴, 15톤/일), 가와시키 중공업(35톤/일)에서 개발 중에 있다.

직접가열식 유동층 가스화반응기에서 모래층의 온도는 500~600℃이고, free board의 영역은 700~750℃ 정도 유지되고 있다.

또한 가연성 가스의 2차 연소를 통해 회분을 용융시키는 용융로의 온도는 약 1,350℃ 정도이며, 연소공기공급량은 1.3 정도의 과잉공기 상태를 유지시킨다. 슬래그화율은 80~85% 정도이며, 배가스량은 기존 소각의 80~85% 정도에 해당한다. 에너지 수지는 그림 4에서 보는 바와 같으며, 에너지 회수율(발전)은 기존 소각 공정에 비해 2~3% 향상된 23~24% 정도 얻을 수 있다. 또한 다이옥신의 배출량은 고온소각으로 줄일 수 있으나, thermal NO<sub>x</sub>의 배출은 다소 증가한다.

간접가열식 가스화 용융시스템은 독일의 Simens사에서 일본의 Mitsui사로 기술을 이전하여 20톤/일 규모의 실증플랜트가 개발 중에 있으며, 로타리킬른식(RC

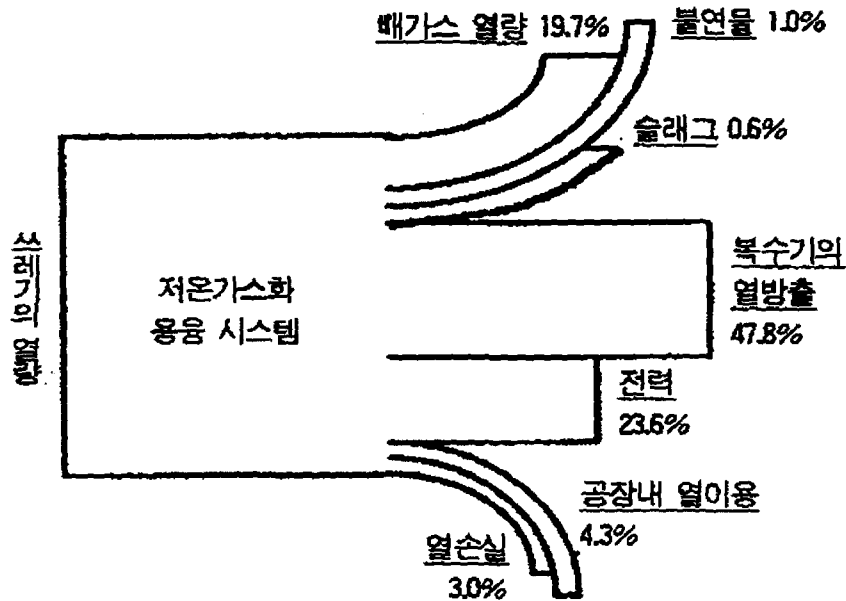


그림 4. 저온가스화 소각시스템에서 에너지 회수

type)을 채용하고 있다. 현재 독일의 Siemens에서는 480톤/일 규모의 시설이 건설 중에 있다. 이 시스템은 150~200mm 크기의 파쇄된 쓰레기를 투입하고, 가스화로에 열교환을 위해 공급되는 가열공기는 520~550℃ 정도이며, 열분해 온도는 450℃ 정도 유지된다. 용융로에서의 온도는 1,300℃ 정도이며, 과잉공기비는 1.2~1.3 정도이다.

### 5. 고온 가스화 용융소각방법

고온 가스화 용융시스템은 일본의 NKK, NSC등에서 실증 또는 준상용 플랜트를 운영하고 있다. 고온가스화 용융로는 기존의 용광로와 유사한 시스템으로 폐기물의 가스화와 용융을 위해 외부의 보조열원으로 Coke를 이용하고, 슬래그의 용점을 조정하기 위해서 석회가 투입되며, 폐기물은 전처리 없이 일괄투입된다. 따라서 용융로에 coke와 석회가 폐기물과 혼합되어 적층되어 용융 및 가스화 현상이 포괄적으

로 일어난다. 용융로의 최하부층은 고온연소영역이 형성되어 용융이 일어나고 2,000℃ 정도의 온도가 유지되며, 그 위에 탄화물 이동층과 열분해 및 가스화 층이 차례로 형성된다. 용융로의 상부에서 생성가스의 온도는 1,000℃이며, 또한 용융로에 예열공기는 3단으로 나누어 공급되며 최하부에 공급되는 공기의 양은 전체의 35% 정도 투입된다. 용융로 바닥에서 용융물은 금속성분과 슬래그 성분으로 비중 차이에 의해서 분리되어 배출된다.

고온 가스화 용융로에서 발생된 가연성가스는 두가지 방법으로 이용할 수 있다. 첫째는 가연성가스를 2차 연소시켜 발생된 열을 보일러에서 스팀으로 전환시켜 에너지를 회수하는 방법이고, 둘째는 발생된 가연성가스의 발열량이 큰 경우 적용되는 방법으로서 1차적으로 제거한 다음 가스터빈을 활용하여 에너지(전기)를 생산하고 폐열을 다시 회수하여 스팀터빈을 구동시켜 에너지를 회수하는 combined cycle 형식의 에너지 회수방법이다. 이 시스템의 단점으로는 외부에서 일부의 보조열원을 공급하는 것이다.

## 6. 유럽지역 열분해 가스화 용융기술의 비교평가

\* 자체열 이용형 간접열분해 저온가스화 시스템

	Siemens	Noell
1. 시스템의 특징	회전식 로타리킬른내부에 전열관을 설치하여 폐기물을 간접열분해시키고 열분해 생성물을 2차연소시켜 고온에서 회분의 용융을 유도하는 시스템(에너지이용은 스팀 활용에 한정됨.) 기술의 유래 : 쓰레기처리용으로 개발	회전식 로타리킬른을 원통외부에서 가열하여 폐기물을 간접열분해시키고 열분해 생성물을 고온고압에서 가스화시키면서 회분의 용융을 유도하는 시스템 기술의 유래 : 쓰레기처리용으로 개발
- 실적 (운영)	Siemens : 480톤/일 일본에 기술 라이선스 Takuma : 20 톤/일 (98.6) Mitsui : 20 톤/일	실증로 : 6 톤/hr (유해폐기물 적용) 시험로 : 12 톤/일 (쓰레기: 회전식 킬른 열분해 슬러지 : 건조기) 일본에 기술 라이선스 NGK Insulator Ltd.
- 감용비	1/260 (건식탈염소 기준)	
- 감량비	1/52	1/40
- 한계발열량 (kcal/kg)	1,300	1,400
- 공기비	1.2 ~ 1.3 (소각로에 비해 배가스발생량이 30%정도 감소함.)	가스화후 연료생산으로 산소만 일부 공급
- 에너지 회수율	3,100 kWh (200t/24h, 2100kcal/kg)	전기생산효율 : 약 5% (실증경험 없음)
- 운영비 (조업지수등)	일본 1,000엔/톤 한국 25,000 ~ 35,000 원/톤	독일 DM 400 /톤
- 소요면적		L55 x W18 x H35 (0.5톤/hr)
- 최대설계용량	RK열분해장치(1 unit) ; 4~14톤/hr	RK열분해장치 (1 unit) ; 6톤/hr 가스화 용융장치 (1 unit) ; 25 톤/hr (현재 기술수준)
- 경제적인 처리 규모	400 ton/일 이상	400~500 ton/일 (연료가스 생산목적)
- 공정제어방식		중앙제어식 비분산시스템 (S/W; 자체개발, H/W; Siemens)
- 기타	2차연소용융과정에서 NOx발생량이 소각로에 비해 큼.)	슬래그처리설비에서 발생하는 금속 황화물의 안전매립처리 필요.)

<b>2. 열분해장치</b>		
- Type 및 구조	RK형태로 로내부에 열교환 tube가 장착되어 있으며, 현재 물질이송동 약간의 문제가 있음.	RK형태로서 원통형 반응기의 외부표면에 다수의 구획으로 분리하여 열분해에 필요한 열을 공급하는 구조.
- Dimension	직경(D) ; 3~4 m 길이(L) ; 20~30 m 회전수 ; 2~3 rpm 기울기 ; 1.5°	<현재 0.5톤/시간 설비> 직경(D) ; OD 1.7 m, ID 1.5 m 길이(L) ; 12~14 m 회전수 ; 2~3 rpm 기울기 ; 3/1000
- 운전방식 (간접/직접)	간접	간접
- 열공급방식	LNG 연소 배가스 활용 열분해가스 활용 열공급매체의 온도 (입구:520℃, 출구:300℃)	LNG연소 배가스 활용 열분해가스 활용
- 운전온도	450℃	550℃
- 투입폐기물의 크기 및 수분량	200 mm이하 (불연물제거 필요하고 수분은 10~20%정도로 국내적용시 건조설비 필요)	300 mm이하 파쇄필요 (수분 5%정도, 국내적용시 건조설비 필요)
- 폐기물의 체류 시간	60 min	60~90 min
- 생성물의 특징	철, 알루미늄분리회수 기타잔재물 파쇄후 2차연소용용도로 투입. 생성물 분포(독일쓰레기 기준) 기상물질 ~65% 고상물질 ~35% (C:30%,유기물:9%,불연물:61%)	철, 알루미늄분리회수 기타잔재물 파쇄후 용용도로 투입. 생성물 분포(독일쓰레기 기준) 액상물질 ~35% 기상물질 ~25% 고상물질 ~40%
<b>3. 2차연소 또는 가스화 용융장치</b>		
- Type 및 구조	수직형 연소 분무용용로 (모든 가스화 생성물을 전량 직접 연소시킴.) 산화제로 공기를 사용함(단계적으로 공급시킴.)	수직형 연소 분무용용로(분해가스, 산소, 소각잔재물을 동시에 분무하여 용융시키고 가스를 개질함.) 산소농도 제어시스템을 사용. 고도의 조업기술이 필요.
- Dimension (실적대비 최대 규모)	U자형태의 반응로로써 온도의 균일 조절 및 산소공급을 다단으로 설치하여 공급하는 구조(공기의 공급으로 고온유지에 의해 NOx발생이 큼.)	수직형 반응기로 하단부에 급냉시스템이 설치됨.
- 투입 및 버너의 특징	분해가스, 잔재물을 동시분무 잔재물은 냉각, 진동분리기, 공기선별기, 파쇄기, 입자분리기등을 이용하여 처리 분쇄잔재물(1mm이하)은 pneumatic system을 이용하여 투입	분해가스, 산소, 열분해잔재물을 동시에 압축에 의해 분무 열분해 잔재물은 1mm이하로 mill분쇄 잔재물의 투입은 25bar이상의 가압장치 사용(유동식압력 투입설비) 투입배관 직경 ; 약 10mm(상용화시 수정필요 추정됨.)

- 공기공급량 (공기비)	1.2~1.3 (예열공기 사용)	가스화용 산소공급(폐기물 특성에 따라 다름.)
- 운전온도 및 압력	1,300℃, 음압	1,300~1,500℃, 5~25bar
- 보조열 사용	가동시 사용	가동시 사용
- 내화재		용융로의 내벽은 수냉식 구조 (조업시 수냉벽은 슬래그층에 의해 보호막이 형성됨.)
<b>4. 에너지 회수 시스템</b>		
- 회수방식	steam(40 atm, 400℃)-> 발전	1)스팀 -> 발전 2) 가스-> 가스의 복합적인 이용
- 열회수효율	25%	(아직 설비 구성이 없음)
<b>5. Feeding system</b>	압축 screw feeder	screw feeder
<b>6. 슬래그배출 및 이용</b>		
- 배출형식	수냉	수냉
- 이용방법	건축, 토목자재	건축, 토목자재
- 슬래그의 특징 (조성)	독일용출기준 만족	독일용출기준 만족
<b>7. 대기오염제어 시스템</b>		
- 시스템구성도 (기본)	ESP+SDA+B/F+습식+SCR	cooler+scrubber+황화물 제거
- 배가스 조성	독일기준에 만족함. NOx : 70 mg/Nm <sup>3</sup> , SOx : 0.8 mg/Nm <sup>3</sup> , CO : 5 mg/Nm <sup>3</sup> , HCl : 70 mg/Nm <sup>3</sup> , 분진 : 0.05 mg/Nm <sup>3</sup> , THC : 0.28 mg/Nm <sup>3</sup> , dioxin : 0.004 mg/Nm <sup>3</sup>	독일기준에 만족함. NOx : 40 mg/Nm <sup>3</sup> , SOx : 5 mg/Nm <sup>3</sup> , CO : 10 mg/Nm <sup>3</sup> , HCl : 1 mg/Nm <sup>3</sup> , 분진 : 3 mg/Nm <sup>3</sup> , dioxin : 0.01 mg/Nm <sup>3</sup>

\* 용융분리형 간접열분해 가스화 시스템

	Thermoselect	PKA
1. 시스템의 특징	압축된 폐기물을 고정식 드럼형태의 반응기에서 간접열분해시키고, 생성물을 가스화 용융반응기 하부에서 무기물을 LNG 보조버너로 용융시키고 상부에서 생성물을 가스화시켜 개질된 합성가스를 생산하는 장치 기술의 유래 : 쓰레기 처리설비로서 개발	드럼형의 건조기를 사용하여 폐기물을 건조시킨후 RK형태의 반응기에서 간접열분해시킨후 기체상생성물은 가스분해기에서 개질된 합성가스를 생산하고 고체상생성물은 재활용금속을 분리한후 별도의 용융로에서 용융시키는 시스템 기술의 유래 : 쓰레기 처리설비로서 개발
- 실적(운영)	실증로 : 100톤/일 (5개의 상용시설을 독일내에 공급할 계획임.)	실험로 : 12xhs/일 실증로 : 80톤/일(건설중)
- 감용비	1/50	1/30
- 감량비	1/3~1/4	1/7
- 한계발열량	1,430	1,000 (30% 수분을 함유한 독일쓰레기의 경우도 건조설비 설치하여 운전함.)
- 공기비	~5,140 O2/톤	산소/공기 사용
- 에너지 회수율	4,600 kW (200t/d, 2,400 kcal/kg)	3,800 kg (200t/24h, 2,000kcal/kg)
- 슬래그화율		
- 내화재 수명	가스화장치의 상부내벽 : 18개월 용융부분 : 6개월 * 열분해장치의 가열판은 3일 이내 수리가 가능	screw feeder
- 건설비	300,000US\$/톤,일	DM60,000,000 (현재 건설중인 장비)
- 운영비	300톤/일 ;100 US\$/톤 200톤/일 ;150 US\$/톤	4,000엔/톤
- 소요면적	<설비용량 : 480톤/일> 프랜트면적 : 59x105x21m 대지면적 : 130x195m	<설비용량 : 80톤/일> 프랜트면적 : 25x45x14m 대지면적 : 65x85m

- 설계용량	단위기수당 설계 : 150톤/일, 300톤/일	120톤/24시간 * 기본설계규모 단위기수당 : 1.5, 2.5, 5.0톤/일
- 경제적인 처리 규모	400톤/일	.
- 공장제어방식	중앙집중식 제어 (열분해, 가스화, 용융이 일체의 형 태로서, 각부분에서의 온도분포제어, 압력제어(30mmbar), 산소농도제어 등을 함.)	1/30
<b>2. 열분해장치</b>		
- Type 및 구조	직육면체의 원추형태로써 반응기의 외벽에서 열을 공급함. 폐기물은 압축된상태(10%정도)로 연속적으로 투입(압축과정에서 일부 수분이 제거됨.) 폐기물의 투입압력: 8bar (내구연한 : 10~20년) 열분해가스는 열분해장치 후단부에 수직형태의 가스화장치가 직접연결 되어 있음. 온도는 1200℃, O <sub>2</sub> 이용, 체류시간 4초	스팀건조기에서 건조된 폐기물 이 투입됨. 회전식 RK형태의 열분해반응기 로 외벽으로부터 열공급이 이루어 짐. 열분해가스는 독립적으로 설치 된 가스반응기로서 저공기비에 서 개질되어 합성가스를 생산함.
- Dimension (실적대비 최대 규모)	반응기 두께 : 투입구쪽 58mm, 출구쪽 78mm	
- 운전방식 (간접,직접)	간접	간접
- 열공급방식	생성가스의 연소열 활용	생성가스의 연소열 활용(550℃ 유지)
- 운전온도	열분해 : 출구 800℃ 가스화장치 : 1,200℃, O <sub>2</sub> 이용 (300m <sup>2</sup> /톤) 체류시간 4초	열분해 : 출구 550℃ 가스화장치 : 1,100℃, O <sub>2</sub> 이용 체류시간 2초
- 투입폐기물의 크기 및 수분량	압축시스템을 이용하며 다른 전처리 는 필요없음.(2cm이하, 수분 50%이 하)	파쇄기에서 10mm이하로 파쇄하 여(수분 30%이하) 사이로에서 저장후 건조기에 투입함.
- 생성물의 특징	합성가스 : 59%(36.5%CO, 34.5%H <sub>2</sub> , 25%CO <sub>2</sub> , 3%N <sub>2</sub> , 1%H <sub>2</sub> O) 물23%, 슬래그15%, 금속2% 기타 1%(황, 염회수등)	개질가스 열량 : 1,070 kcal/Nm <sup>3</sup> 열분해생성물 : 고상 30~40%, 오일성분 15%, 기상 : 45~55%
- 폐기물체류시간	120 min	45~60 min



<b>3. 용융장치</b>		
- Type 및 구조	내부또는 표면용융형태의 반응기로써 열분해장치에 직접 연결되어 있음. (순산소 활용) 용융부분에는 고체성의 열분해생 서물이 5톤정도 체류하면서 일정 한 높이를 유지함.	(산소를 이용한 분무식 용융시스 템으로 추정)
- dimension (실적대비 최대 규모)	직접용융부분과 균질화영역으로 되어 있으며, 보조버너가 7개정도 설치됨.	
- 공기공급량 (공기비)	산소공급(300m3/톤)	산소공급
- 운전온도	2,000℃	1,500℃
- 보조열 사용	(보조열료 LNG 버너)	
- 내화재		세라믹 라이닝
<b>4. 에너지 회수 시스템</b>		
- 회수방식	열분해가스는 균질화 가스화 반응 을 거쳐 연소후 보일러와 스팀터 빈을 이용하여 발전하거나 합성가 스를 정제후 직접 가스엔진을 활 용하여 전력 생산	열분해가스를 균질화 가스반응을 거쳐 가스엔진/터빈을 이용하여 발전
- 열회수 효율	10.9%의 전력생산과 29.5%의 열 생산	
<b>5. Feeding system</b>	압축screw feeder(압축비 1/10)	screw feeder (금속성분 분리)
<b>6. 슬래그 배출 및 이용</b>		
- 배출형식	균질화후 수냉배출 (균질화조에서 낙하되는 용융스래 그에 수분사를 병행하여 수냉시 킴.)	수냉
- 이용방법	토목건축자재	토목건축자재
- 슬래그의 특징 (조성)	독일의 침출기준 만족함.	독일의 침출기준 만족함.

7. 대기오염 제어 시스템		
- 시스템 구성도	냉각 및 세정 (산성/염기성 2단 세정) 글리세린을 이용한 집진+황화물세정+가스가열기+활성탄처리	급냉+습식세정+bag filter+활성탄
- 배가스 조성	독일기준에 만족함. NOx : 80 mg/Nm <sup>3</sup> , SOx : 2 ppm, CO : 30 mg/Nm <sup>3</sup> , HCl : 0.05ppm, 분진 : 9 mg/Nm <sup>3</sup> , dioxin : 0.002 ng/Nm <sup>3</sup>	독일기준에 만족함. NOx : 64 mg/Nm <sup>3</sup> , SOx : 18 mg/Nm <sup>3</sup> , CO : 42 mg/Nm <sup>3</sup> , HCl : 0.9 mg/Nm <sup>3</sup> , 분진 : 0.9 mg/Nm <sup>3</sup> , THC : 0.5 mg/Nm <sup>3</sup> , dioxin : 0.006 mg/Nm <sup>3</sup>

\* 자체열 이용형 직접열분해 가스화 시스템

	Krupp	Lurgi
1. 시스템의 특징	가압식 순환유동층 가스화로(High Temp. Winkler Gasifier)를 이용하여 폐플라스틱, RDF등을 갈탄과 혼합하여 10~30bar와 800~1100℃에서 산소와 스팀을 이용하여 합성가스를 생산하여 복합발전 또는 도시가스라인에 공급하는 장치이고, 부산물로서 유탕이 생산됨. 또는 발생된 char나 무기물은 catalytic Extraction Process에서 용융되고 가연분은 가스화됨. (용융부분은 기술도입으로 이루어지고 시스템이 완결된 설비는 없음.) (Lurgi-Oko Gas Process)	(Lurgi-Oko Gas Process) 순환유동층가스화로를 이용하여 전처리된 도시쓰레기를 800~1100℃에서 예열공기를 이용하여 가스를 생산하여 가스를 개질시켜 보일러와 용융이 일체인 반응기에서 회분을 용융시키는 시스템 (Lurgi Wilkonex Process) 상기와 가스화과정은 같으나 생성가스를 고온연소시키면서 회분을 용융시키고 후단에 보일러를 설치하여 에너지회수하는 시스템 (Lurgi-Oko Gas Process를 설치하기 위한 허가 진행중) 기술유래 : 갈탄가스화
- 실적 (운영)	갈탄가스화는 상용운전함. (2톤/시간, 6.5톤/시간, 30톤/시간(2기)등)	슬러지가스화 : 4톤/시간 도시쓰레기가스화용융 : 2x7.5톤/시간 (허가진행중)
- 감용비		
- 감량비		
- 한계발열량	RDF까지 처리가능(약 3000 kcal/kg 이상)	1450~2900 kcal/kg

- 공기비		
- 에너지 회수율	갈탄의 에너지회수율 : 80~85%	
- 내화재 수명		
- 건설비		
- 운영비 (조업지수등)	DM 70~100/톤	
- 소요면적		Lurgi-Oko process의 7.5톤/시간 (floor area : 15x60 m)
- 최대설계용량	30톤/시간	7.5~25톤/시간
- 경제적인 처리 규모		
- 공정제어방식		
<b>2. 가스화 장치</b>		
- Type 및 구조	가압식 순환유동층 원료장입시 3단의 투입설비가 필요 (가압식 pneumatic process)	순환유동층
- dimension (실적대비 최대규모)	30톤/시간 처리용량	25톤/시간
- 운전방식	직접가스화	직접가스화
- 공기공급량, 공기온도 (직접가열식)	공기, 스팀(당량비 이하)	공기, 스팀(당량비 이하)
- 운전온도	800~1100℃	800℃
- 투입폐기물의 크기 및 수분량	25mm이하(RDF : $\phi$ 18x5 mm) 도시쓰레기의 경우 반드시 RDF화 가 필요함.	파쇄, 선별(철, 비철금속) 및 건조필요
- 폐기물의 체류 시간		
- 생성물의 특징	가스화 생성물 (MSW : Sewage sludge=9:1) 가스연료 ; 3,500 Nm3 ceramic ; 16% 응축수 ; 22.2% 철 ; 4.6% 기타 ; 1.6%	가스화 생성물 (MSW =7.5톤/시 간) 가스연료 ; 6,500 Nm3/시간 슬래그 ; 24%, 기타 ; 1.5%

<b>3. 용융장치</b>		
- Type 및 구조	Catalytic Extraction Process(미 Molten Metal Technologies에서 개발)를 가스화 잔재물용융에 적용 금속산화물의 용융층을 이용한 용융 산소를 투입하여 무기물의 산화(안정한 화합물)와 유기물질의 가스화 반응유도 ceramic 생산 가능	Lurgi-Oko Gas Process ; 보일러와 용융로의 일체형으로 분무용융형태 (Lurgi Wikonex process) ; 고온연소장치
- dimension (실적대비 최대규모)		
- 용융열원	가스화잔재물의 탄소또는 보조열원	가스화로에서 생성된 가스
- 공기공급량 (공기비)	산소공급	공기
- 운전온도	1500℃	1500℃
- 보조열 사용		
- 내화재		
<b>4. 에너지 회수 시스템</b>		
- 회수방식	생성물을 복합발전에 활용	스팀생산 + 발전
- 열회수 효율	80~85%	
<b>5. Feeding system</b>	가압식 유체 공급설비	screw feeder
<b>6. 슬래그 배출 및 이용</b>		
- 배출형식		
- 이용방법	ceramic으로 생산가능	
- 슬래그의 특징 (조성)		
<b>7. 대기오염 제어 시스템</b>		
- 시스템구성도	보일러(냉각효과)+집진(filter)습식세정+유황회수(CO2회수)=> 합성가스 생산	전기집진기+Venturi 세정기+충전탑+Lime 분무기+집진기+SCR

## 7. 일본지역의 열분해 가스화 용융기술 비교평가

\* 업체별 설비비교

회사명	방식	보유플랜트	특징
Ebara	유동층 가스화 + 산화용융로 + boiler	- 10톤/일(실험) - 30톤/일(실험)	- 일본에서 유동층 가스화 분야에서 제일 먼저 실증 plant 완공 및 가동중 - 선회 용융로는 독일의 ABT사에서 도입
川崎 神戸 MHI 日立造船	유동층 가스화 + 용융로 + boiler	실증로 건설중 또는 예정	- 유동층 가스화와 회용융로가 연결된 형태로 시스템의 특징이 유사함. - 현재 연구단계.
NSC NKK	shaft고온가스화 + boiler 또는 gas engine	NSC - 상업로 (5건 11로) - 최대용량 150톤/일 x 2로 NKK - 32톤/일	- 제철고로방식의 용융로에서 응용. - 가스화와 용융이 단일반응기내에서 발생. - coke, Limestone등의 부원료 사용. - '70년 후반에 연구시작하여 상업운전 경험이 있음.(NSC) - 고도의 운전기술이 요구됨.

\* 기술비교

형식	저온가스화(열분해) 용융로		고로형 가스화용융로
	유동상식 열분해로	로타리킬른식 열분해로	
주요개발업체	에바라, MHI, 神鋼, 히다 지造船, 川崎重工	三井造船, 타쿠마	신일본제철, NKK
방식개요	저공기비 부분연소에 의한 열분해 방식:500~600℃ 열분해로의 후부에 용융로설치 열분해 생성물을 연료원으로써 저공기비의 고온연소에 의한 용융	외열식 간접가열 열분해방식	로저분가 용융로 로저부용융로로부터 고온배가스에 의한 열분해 방식
보조연료	기본적으로 가동시에만 필요(가스, oil) 쓰레기 발열량이 낮을 경우 보조연료 필요		coke(보조연료) 석회석(slag 융점, 점도조정) 산소
전처리	파쇄정도(유동소각로와 동등)	150mm이하로 파쇄	파쇄정도
Dioxin	용융로에서 고온완전연소 열분해가스의 고온완전연소 열회수후 배가스처리		2차연소로로 고온완전연소 열회수후 배가스처리
에너지 회수	저공기비 연소에 의해 보일러효율향상, 전력 효율 향상		2차연소로 보일러에 의한 열 회수, 발전
유기물회수	금속 미산화상태로 회수 연료화가 용이 용융공정 : 용융슬래그 회수		금속은 각성분이 혼합된 용융 메탈로 회수 용융슬래그 회수

## 8. 결 언

정부에서는 쓰레기 종량제 실시와 음식물 쓰레기 퇴비화 등을 추진하고, 국가 폐기물 종합계획에 의거 2001년까지 생활폐기물의 소각처리율을 20% 수준으로 끌어 올리려는 계획을 구상하고 있다. 이를 위해 통합 폐기물관리 시스템을 구축하는 방안이 고려되고 있으며, 폐기물처리시설에 대한 이미지를 개선하고 처리의 효율성을 증대시키기 위하여 첨단 플랜트 설비를 갖춘 폐기물 종합처리시설을 설치할 계획이다. 부속시설인 소각시스템의 경우 현재까지 다양한 형태가 개발되어 활용되고 있으나, 특히 다이옥신 등의 유기독성물질 배출 우려에 따른 설치지역 주민의 민원과 5~15% 정도 발생하는 2차 부산물의 처리에 관한 애로점 등이 발생하고 있다.

음식물 쓰레기의 중간처리 시설의 보급이 확대되면 쓰레기의 발열량이 증가하게 되고 이에 고발열량에 따른 고효율의 에너지 회수방법이 고려되어야 한다. 또한 폐기물 관리법에 의해 소각회분이 지정 폐기물로 분리될 경우 회분이 중간 처리방법이 다시 고려되어야 한다. 일본의 경우 상기 두가지 원인을 해결하기 위해서 소각시스템의 열회수 효율 증대, 회분의 용융처리 및 2차 오염물질 배출을 억제하기 위한 성능향상을 목적으로 가스화 용융시스템의 개발이 이루어지고 있다. 국내에서도 폐기물 종합처리시설의 계획시 발열량의 증가와 회분의 중간처리를 위한 시스템의 신중한 고려가 있어야 된다.

특히 현재 가동되고 계획중인 소각시스템은 회분의 용융재활용 설비가 구성되어 있지 않으므로 저발열량의 폐기물 소각에서 발생하는 소각회분은 별도의 회분처리시설을 설치하여 처분되어야 한다. 즉 회분처리시설을 광역적으로 설치하여 중·소규모 소각로와 대규모 도시소각로에서 발생하는 회분을 수거하여 처분하는 설비를 설치하여야 한다. 또한 장래에 폐기물의 발열량 소각시스템에서 회분의 직접 용융과 에너지 회수율을 높일 수 있는 시스템의 평가 및 계획이 필요하다.