

폐기물 가스화 용융 기술의 개요

윤 용 승

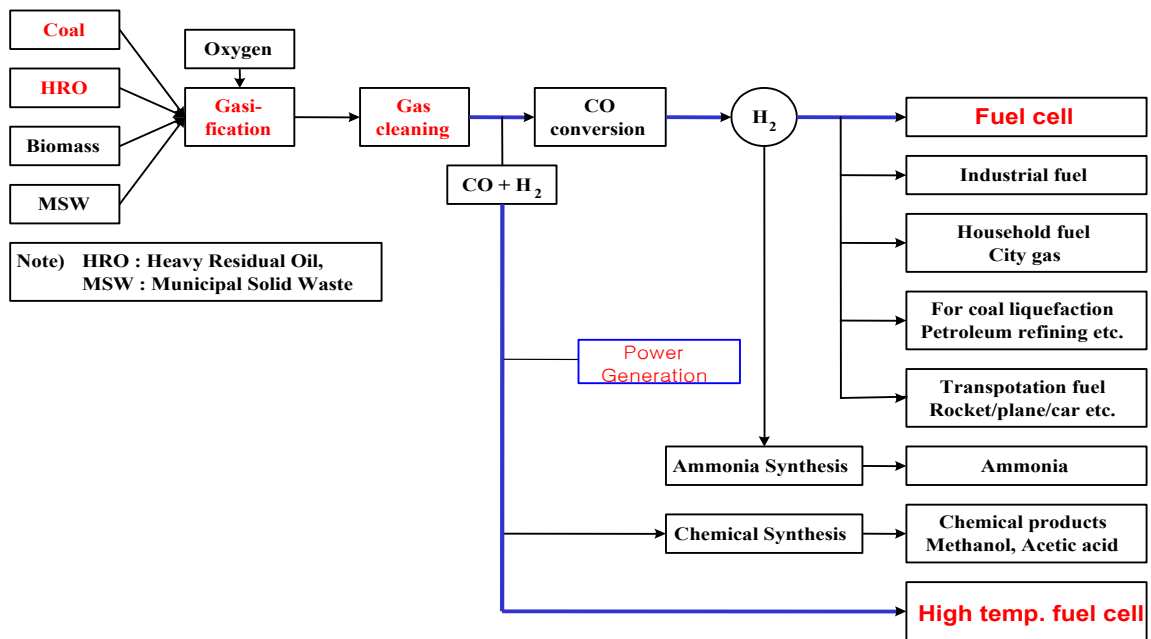
고등기술연구원 Plant Engineering 센터

1. 가스화기술 개발의 배경 및 장점

가스화기술의 역사는 200년이 넘게 유럽에서 발전하여 왔으나 환경문제와 에너지효율 문제를 해결하는 수준의 가스화기술은 1970년대 들어서부터 공정기술로 재개발되어 오고 있다. 70년대의 오일쇼크 이후 석유 대체원으로서 가스화공정이 개발되어 22-27기압에서 운영되는 석탄가스화공정과 60기압이상에서 운영되는 비료나 암모니아 합성용의 석탄 및 petroleum coke 가스화공정이 상용화되었고, 80년대 들면서부터 환경문제가 부각되면서 가스화반응 자체의 특성상 SOx와 NOx의 발생이 안된다는 점을 활용한 공정개발이 이루어져 오고 있다. 특히, 폐기물을 대상으로 하는 가스화공정은 환경문제와 에너지효율 문제를 동시에 접근할 수 있는 공정으로서 향후 연소반응에 근거한 공정을 점차 대체할 것으로 예측되고 있다.

가스화용융 기술의 요체는 기본방식보다 높은 효율을 얻으면서도 향후 강화될 환경규제치도 만족할 정도로 깨끗하게 더러운 시료로 여겨졌던 고유황, 고회분의 저급 석탄, 정유공장 부산물 및 도시쓰레기까지도 에너지원으로 깨끗하게 처리할 수 있다는 점이다.

아래의 [그림 1]에는 가스화공정을 통하여 적용할 수 있는 시료의 종류와 최종 적용처가 도시되어 있다. 시료로는 석탄과 정유공장의 중잔유 (HRO: Heavy Residual Oil), biomass, 도시쓰레기 폐기물 (MSW: Municipal Solid Waste)가 있고, 최종 사용처는 발생가스의 정제를 통하여 연료전지의 원료가스로 적용이 가능하고 암모니아 및 비료생산에도 사용할 수 있다.



[그림 1] 가스화반응이 실용적으로 적용될 수 있는 시료 및 최종 수요처

가스화 용융 분야에서 최근에 상업화 규모로 개발된 공정으로는 석탄 가스화를 이용한 복합발전 분야가 있다. 이 기술은 석탄에 포함된 탄소, 수소 성분은 가스 연료인 일산화탄소와 수소 가스로 전환함과 동시에 석탄 내에 포함된 회재를 용융하여 슬래크로 배출한 후, 발생된 석탄가스는 사용 목적에 따라 세정 공정을 거친 후 연소된 가스를 이용한 가스 터빈, 폐열을 이용한 증기 터빈을 구동한 발전을 통하여 기존 석탄 화력 발전 방식보다, 고효율, 청정 발전 방식으로 알려져 있다.

중국의 경우에는 자체 석탄매장량이 풍부하기 때문에 석탄가스화를 통하여 도시가스화 비료생산을 하는 공장이 이미 10여기 운영되고 있고, 일본 Ube 화학의 경우에도 정유공장 찌꺼기인 petroleum coke를 사용하여 암모니아를 대량 생산하고 있다. 석탄뿐만이 아니라 국내 정유사에서 배출되는 기존의 처리방법으로는 엄청난 환경오염을 발생시킬 수 있는 고유황을 함유한 정유공장 아스팔트 등은 가스화방법이 아니고서는 환경적합적으로 에너지원으로 활용할 방법이 없는 상황이고, 국내의 가용 에너지자원(아스팔트에 약 85%는 탄소, 10%는 수소성분임)을 발굴하여 활용한다는 측면에서도 가스화기술은 필수적인 요소가 된다.

또 다른 가스화 용융 분야로는 폐기물의 가스화 용융으로, 기존 연소 방식으로 폐기물을 처리하는 소각 방식의 기술적인 문제점을 극복하고, 때때로 발생하는 지하수, 토양 등의 오염문제를 해결할 수 있는 대안으로 대두되어 1980년대 중반부터 활발한 개발 및 상업화가 진행되고 있다.

폐기물의 가스화 처리시의 장점으로는 우선 화학반응 자체에서 주요 공해물질인 SOx와 NOx가 발생치 않는다는 점이다. 소각로와 같이 연소반응에 근거한 공정에서 발생하는 SOx, NOx의 발생량을 최소화할 수 있다. 이는 가스화반응이 산소가 불충분한 불완전연소이므로 화학반응 자체에서 SOx, NOx가 발생치 않고 시료내의 S와 N 성분이 대신 H₂S와 NH₃로 대부분 발생되므로 후단공정에서의 처리가 용이하게 된다. 재의 용융처리를 연소에 근거하는 경우에 플라즈마나 전기아크 등 수천도의 고온에서 처리케 되는데, 이 때는 공기중의 질소와 산소가 반응하여 발생하는 thermal NOx가 수%까지 발생할 수 있어서 공해처리 설비에 큰 부담을 주게 된다. 이러한 thermal NOx를 줄이기 위해 반응분위기를 산소가 없도록 질소 등으로 대체하는 경우가 있게 되나 가스화반응에서는 온도가 높더라도 반응자체에서 NOx가 발생치 않게 되는 장점이 있다.

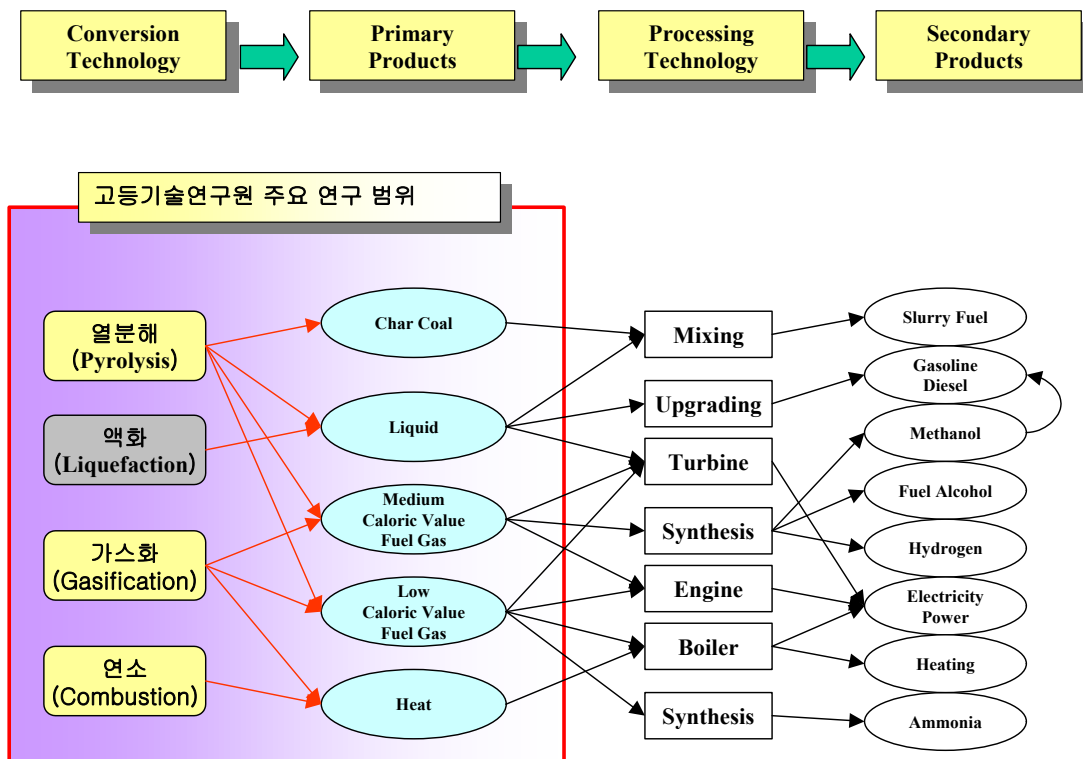
또한, 가스화반응의 장점으로는 시료내 열량의 대부분을 chemical energy로 바꾸어 발생케 되므로 후단 정제공정에서의 온도변화에 전체공정의 효율감소가 적게 된다는 점이다. 연소반응에 의한 생성가스는 주로 CO₂이고 CO₂는 발열량이 없기 때문에 dioxin 등의 저감을 위해 급속 세정을 하게 되면 가스내의 현열이 거의 없어지게 되어 에너지의 손실이 크게 된다. 반면에 가스화반응의 주요 생성물은 CO와 수소이므로 이들 가스는 연소시 큰 발열량을 내게 된다. 즉, 가스화반응에 의해서는 시료내의 상당부분 에너지가 CO나 수소같이 chemical energy를 가진 가스로 발생되고 이들 가스는 급속냉각을 시키더라도 자체의 chemical energy가 그대로 유지되어 필요시 연소를 시키면 가스터빈이나 증기터빈을 통해 에너지를 재회수할 수가 있게 된다. 시료의 함유에너지로부터 얼마나 chemical energy로 회수하는 가 하는 비율을 나타내는 것이 냉가스효율(cold gas efficiency)인데 석탄의 경우는 이 냉가스효율이 65-80%에 달하고 폐기물의 경우에는 폐기물의 성상이 천차만별이므로 대별하기는 어려우나 최대 60%까지 가능하다.

따라서, 지금과 같이 환경과 에너지 문제가 점차 심각해지고 일반인들의 인식도가 높아지는 상황에서는 현재와 같은 연소에 근거한 공정으로부터 가스화에 근거한 공정으로의 전이는 필연적으로 보여진다. 단지 가스화에 근거한 공정은 생성가스가 폭발성 및 유독성을 지니고 있으므로 설비의 복잡성은 피할 수 없는 상황이므로 얼마나 경제성 있고 안정성 있게 공정을 구성하는가가 실용화를 얼마나 앞당길 수 있는가를 결정하는 가장 중요한 인자가 될 것이다.

다른 또 하나의 중요한 장점은 시료내에 S성분이 많을수록 유리하다는 것이다. S성분은 가스화반응에 의해 H₂S가스로 주로 발생되는데 정유공정에서 50년이상 사용되어 오고 있는 Claus공정을 통하면 H₂S 가스로부터 elemental 유황이나 황산을 생산해낼 수 있다. 이들 유황이나 황산은 유상판매가 가능하게 되므로 시료내의 S 성분을 공해물질인 SO_x로 발생시키는게 아니라 오히려 판매할 수 있는 제품으로 추출해내게 되기 때문에 시료에 유황성분이 많을수록 연소처리 공정에 비해 더욱 경제적으로 유리하게 된다. 주요 적용 시료의 예가 정유공장의 찌꺼기 제품인 중잔유 (heavy residual oil)로서 유황함량이 6-8%에 이른다. 현재는 아스팔트나 선박용 병커C유에 첨가 회석하여 처리하고 있으나 아스팔트의 가격이 낮아지거나 환경오염 구제가 강화되면 중잔유의 처리가 문제가 될 때문에 상당수의 해외 정유사에서는 이미 가스화공정을 채택하여 발전 및 수소를 생산해 사용하고 있고 국내의 2개 정유사에서도 가스화공정의 채택을 추진하고 있다.

2. 기술의 계통도 및 핵심기술

일반적으로 저급의 화석 연료나 폐기물로부터 thermochemical conversion을 통하여 고급의 에너지를 얻는 전환 기술로는 열분해, 액화, 가스화, 연소 등을 들 수 있다. 이들 전환 기술들은 반응 온도, 압력 그리고 공급된 반응물 종류 및 유무에 따라 서로 다른 1차 생성물을 얻을 수 있다. 이들 1차 생성물들은 다시 사용 목적에 따라 여러 단계의 변환 공정을 통하여 최종적으로 유용한 생성물을 만들고 있다. [그림 2]에는 Thermochemical Conversion Technologies 계통도를 개략적으로 나타내었다.

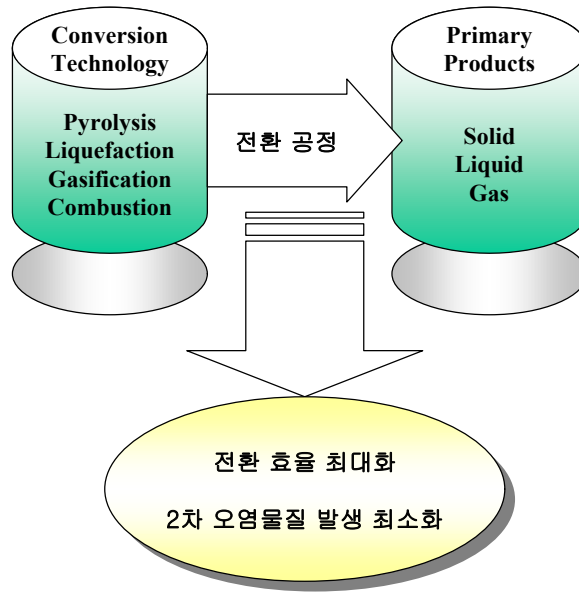


[그림 2] Thermochemical Conversion Technologies 계통도

각각의 전환 기술(conversion technology)로부터 1차 생성물을 얻는 공정을 개발하는 데 있어

서, 전환 효율을 최대화하고, 전환 공정에서 발생하는 2차 공해물질 또는 불필요한 부산물의 발생을 최소화하는 것이, 저급 연료나 폐기물을 thermochemical conversion을 이용하여 에너지와 폐기물을 처리하는 연구자 및 개발자의 최종 목표라 할 것이다([그림 3] 참조).

따라서, 이러한 전환 공정을 통하여 에너지의 전환 효율을 최대화하면서 2차 오염물질의 발생을 최소화 할 수 있는 공정 개발이 기술의 핵심이라 할 수 있다.



[그림 3] 전환 공정 개발의 목표

3. 폐기물 가스화 용융 기술

이 기술은 폐기물을 열분해 등을 통하여 가스화기로 공급되는 폐기물의 성상의 1차 조정 한 후 가스화 용융로에서 폐기물 내의 탄소와 수소 성분은 기상의 가스 연료인 일산화탄소와 수소로 전환하고 불연물은 용융하여 슬래크로 배출함으로써, 폐기물의 무해화, 안정화 처리가 가능할 뿐만 아니라, 생성된 연료 가스를 청정 연료 또는 화학 원료로 재활용함으로써, 폐기물의 처리 및 이용 효율을 극대화 할 수 있는 기술이다. 이러한 가스화 용융 기술은 기존 폐기물 소각 처리시 발생되는 다이옥신 문제와 소각재의 중금속 용출에 의한 환경 오염문제를 동시에 해결할 수 있는 기술로 최근 상업화가 활발히 추진되고 있다.

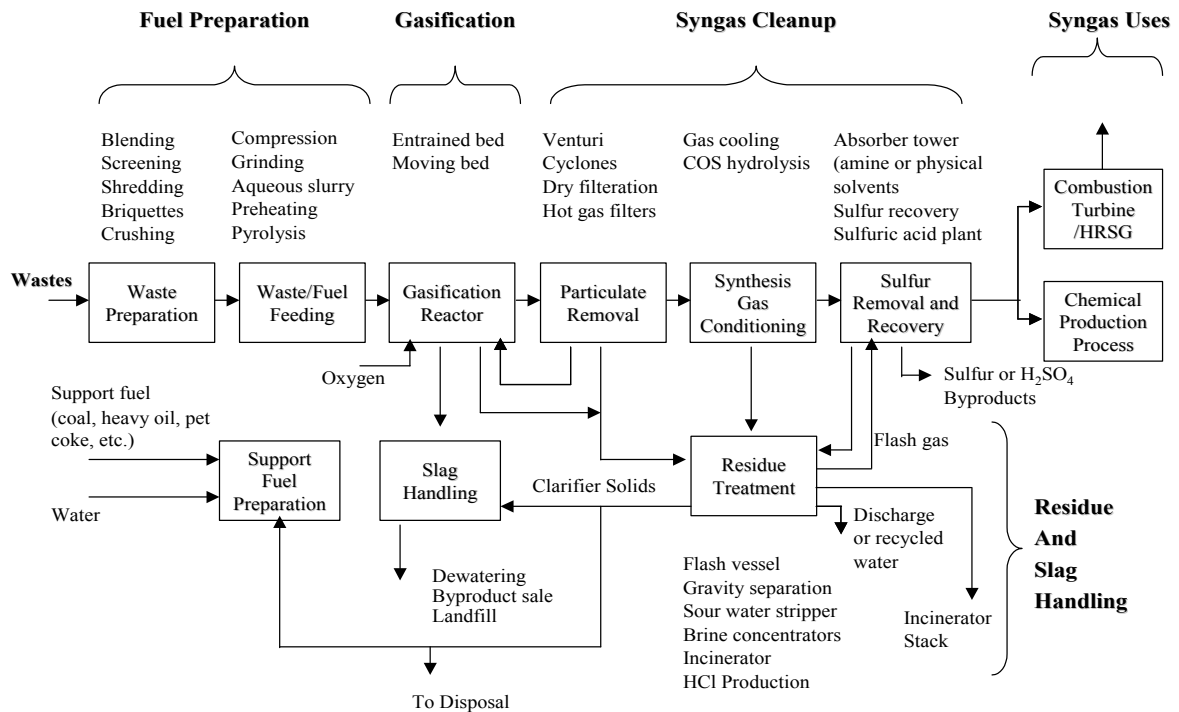
열분해, 가스화 소각 용융에 의해 폐기물을 처리하여 기술을 보유하는 업체 현황을 <표 1>에 나타내었다. 폐기물 처리분야에서는 가스화용융 공정과 열분해 및 소각 용융공정이 폐기물 대상에 따라 다르기도 하지만 경합하는 기술이므로 비교를 위해 표에는 같이 표기하였다. 현재 상용화 수준에 도달되어 도시 폐기물을 처리하는 시스템 중에서 일본의 Nippon Steel, NKK을 제외하고는 대부분 가스화·소각 용융로 전단에 열분해로를 설치하여 가스화·소각 용융로의 운전 안정성을 도모하면서 열분해 잔류물 중 회수 가능한 물질 등을 사전에 회수한 공정을 채택함을 알 수 있다. 반면, Nippon Steel, NKK은 제철소에서 사용하고 있는 용광로의 원리를 폐기물 처리에 적용한 것으로, 폐기물과 코크스 등을 채워 넣고 산소를 하부에서 불어넣어 폐기물을 용융하는 방식으로 특별한 물리적인 폐기물 전처리 시스템이 필요 없는 것이 특징이다.

이와같이 폐기물 가스화 응용 방식을 폐기물에 적용할 경우, 각각의 제작사 고유한 공정을 구성하고 있으며, 이러한 공정의 구성은 폐기물 전처리 시스템, 가스화 방식, 생성 가스 처리 시스템, 생성 가스 활용 방법, 잔류물 처리 방법 등으로 대별될 수 있으며, 각각의 공정에 대한 구성의 일반 사항을 [그림 4]에 나타내었다.

<표 1> 가스화 소각 응용로의 상용화 현황

Status	Suppliers	Process	Markets
Fully commercial	ABB/Ebara	Gasification/Combustion/Melting	ASR, MPW
	Nippon Steel	Gasification/Melting	MSW, ASR, MPW
	Thermoselect	Pyrolysis/Gasification/Melting	MSW, Industrial waste
Commercial	Mitsui	Pyrolysis/Combustion/Melting	MSW, ASR
	Takuma	Pyrolysis/Combustion/Melting	MSW, ASR
	Von Roll	Pyrolysis/Combustion/Melting	MSW, ASR
Semi-commercial	Krupp Uhde	Gasification/Melting	MSW, ASR
	PKA	Pyrolysis/Gasification/Melting	Mixed waste
Pilot Scale	NKK	Gasification/Melting	MSW, MPW, ASR

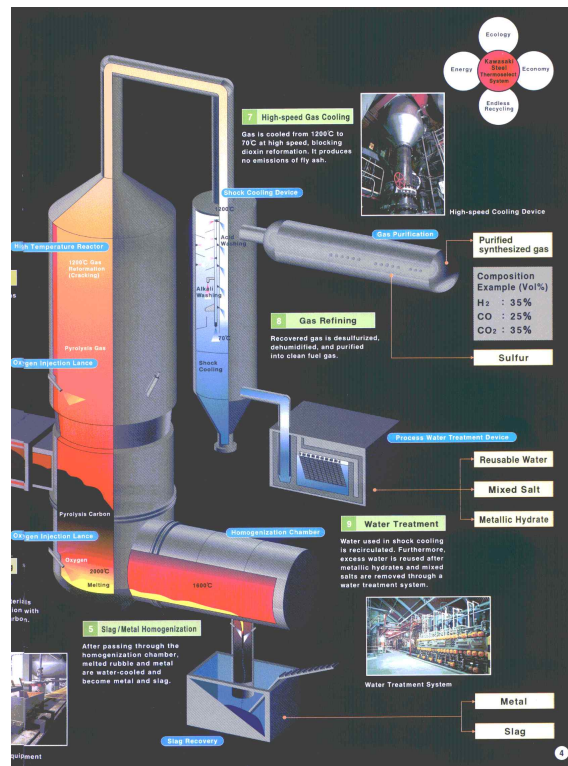
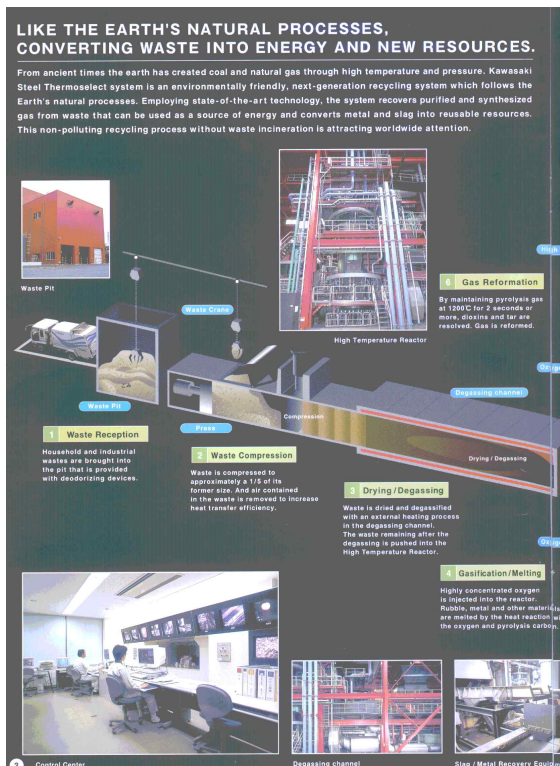
주) MSW : Municipal Solid Waste, MPW : Mixed Plastic Waste, ASR : Auto Shredder Residue



[그림 4] 폐기물 처리시 가스화 응용 공정의 구성 개략도

위 <표 1>에 나타난 도시폐기물을 사용하는 열분해/가스화/용융 공정의 한 예로서 아래의 [그림 5]에 Thermosteel 공정을 나타내었다. 이 공정은 처음 스위스에서 개발되었으나 오히려 일본에서 기술을 수입한 후 개량되어 현재 하루 150톤을 처리하는 규모로 실용화되어 있다.

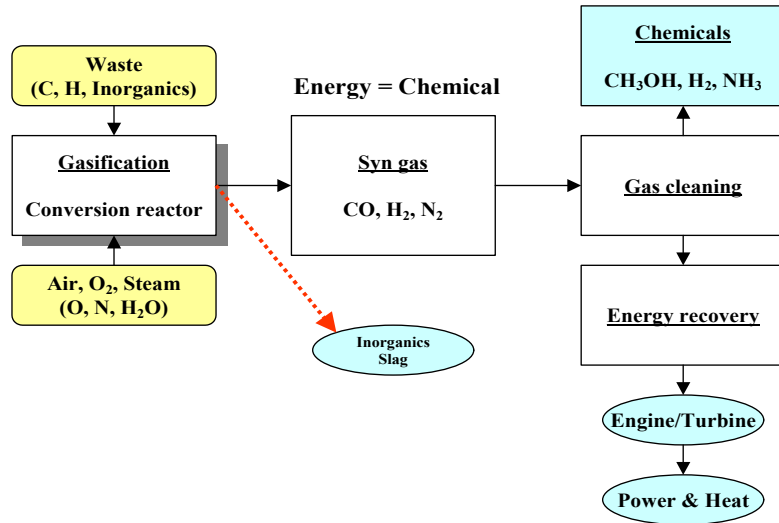
[그림 5]의 왼쪽 중앙에 보여진 관이 탈가스화 channel로서 입축된 쓰레기의 열분해가 일어나고 탄화된 쓰레기 덩어리가 그림의 오른쪽 반응탑 아래쪽에 검은색으로 표현된 부분으로 떨어져 산소버너의 고온으로 용융되어 미연분은 슬래크로 발생되고 가연분은 일산화탄소와 수소의 가연성가스로 발생하여 반응기 위쪽으로 나아가 급속세정탑을 거치면서 오염물질이 제거되고 정제된 가스는 발전 및 타 용도로 활용케 된다.



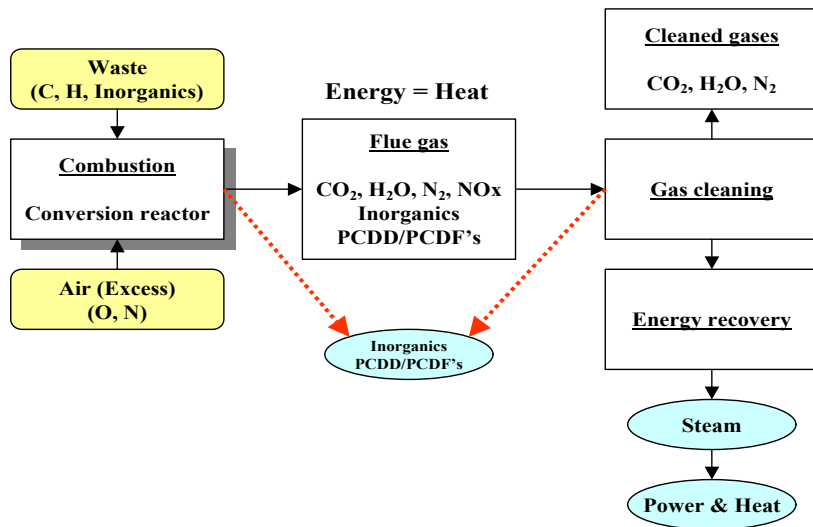
[그림 5] 도시 폐기물 열분해/가스화/용융 공정의 예 (Thermosteel 공정)

4. 가스화(gasification)와 소각(incineration)의 비교

최근 들어 가스화가 기존 소각 처리의 문제점을 해결할 수 있는 하나의 대안으로 논의되고 있고 일부 선진국에서는 이미 가스화 응용 방식을 적용한 상용화급 폐기물 처리 설비가 운전 중에 있다. 가스화 공정과 소각 비교는 [그림 6]과 [그림 7]에 각각 나타내었다.



[그림 6] 가스화 공정의 개략도



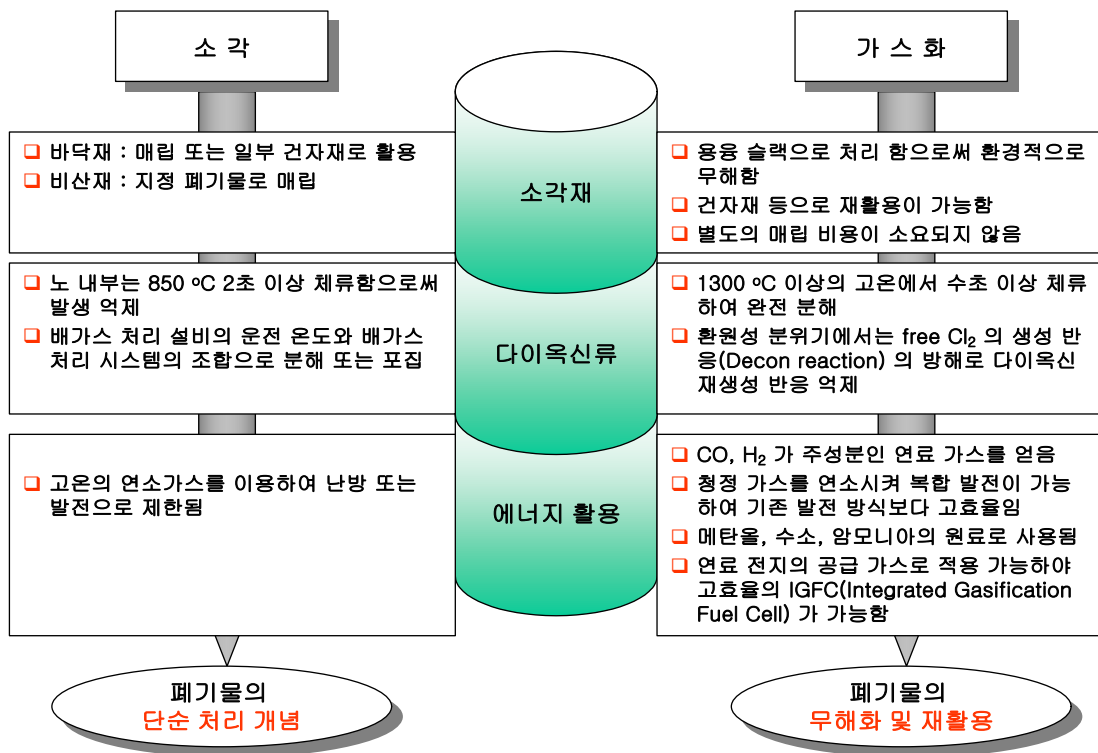
[그림 7] 소각 공정의 개략도

가스화와 소각의 운전 압력, 온도, 반응물 등의 특성 비교는 <표 2>에 나타내었다.

<표 2> 가스화와 소각의 비교

	Incineration	Gasification
운전 온도	~ 1000℃	> 1300℃
운전 압력	atmospheric	high pressure(atmospheric)
회재 상태	ash	slag
공급 가스	air	oxygen(air), steam
주 반응	$C + O_2 = CO_2$ $H_2 + \frac{1}{2} O_2 = H_2O$	$C + H_2O = CO + H_2$ $C + CO_2 = 2CO$
생성 가스	CO ₂ , H ₂ O	CO, H ₂ , CH ₄ , CO ₂
가스 세정	Post scrubbing	Intermediate scrubbing
오염 물질	SO ₂ , NO _{2x} , PCDD/PCDF's	H ₂ S, HCN, NH ₃
Char 반응	fast (with O ₂)	slow (with H ₂ O, CO ₂)
산화제	In excess	Deficient
목적	폐기물의 감량화, 안정화 고온의 연속 가스	폐기물의 감량화, 안정화, 재활용 연료 가스, 화학 원료 생성

현재 폐기물을 소각 처리할 때 발생하는 문제점과 이러한 문제점을 해결할 수 있는 가스화의 방법을 아래 [그림 8]에 요약하였다.



[그림 8] 가스화와 소각의 특징 비교