

## 폐기물 가스화를 통한 재활용 기술

차세대 폐기물 열적 처리 시스템 중에서 폐기물을 환경적으로 무해하게 처리하면서 에너지 이용 효율을 극대화 할 수 있는 핵심 기술인 폐기물 가스화(gasification)를 통해 얻어진 합성 가스의 이용 방법에 대하여 소개하고자 한다.

유 영 돈

고등기술연구원(ydnyoo@iae.re.kr)

윤 용 승

고등기술연구원(ysyun@iae.re.kr)

### 폐기물 소각, 가스화 및 열분해

폐기물 소각(incineration)은 폐기물 내의 가연분을 산소와 반응시켜 CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O가 주성분인 연도가스로 변환하면서, 남는 잔재(ash)는 매립 등으로 최종 처분하는 폐기물의 감량화 및 안정화를 목적으로 하는 중간 처리 방법이다. 폐기물 소각은 폐기물 열적 처리 방법 중에서 경제적이면서 기술적으로 성숙된 검증 기술이지만 소각 과정 중에 원치 않는 2차 오염물질의 발생으로 기술적인 측면뿐만 아니라 사회적인 측면에서도 많은 관심의 대상이 되고 있다. 소각 과정 중에 발생하는 2차 오염물질 중에서 먼저 가스상으로는 다이옥신과 같은 독성 유기물질, 산성 가스 등을 들 수 있으며, 고상 물질로는 소각 잔재 그 자체보다는 소각 잔재 내에 포함되어 환경 오염을 야기하는 중금속을 들 수 있다. 이러한 2차 오염물질은 폐기물 그 자체에 오염물질이 이미 포함되어 있다는 점과 소각로에서 폐기물의 연소 특성상 필연적으로 일정량 발생될 수밖에 없기 때문에 어떻게 발생량을 최소화하는 것이 관건일 것이다.

기존 폐기물 소각 처리 방법의 단점을 극복하여 폐기물을 환경적으로 무해하면서 안정적으로 처리하는 열적 처리(thermal treatment) 중에서 폐기물을 자원의 관점에서 재활용을 극대화할 수 있는 방법으로는 가스화(gasification)와 열분해(pyrolysis)를 들 수 있다.

폐기물 가스화(gasification)는 폐기물 내의 가연분(탄소 및 수소 성분)을 가스상의 CO, H<sub>2</sub> 가스가 주성분인 합성 가스(synthesis gas)로 전환하는 방법으로, 최근 들어서는 가스화와 용융이 결합되면서 불연물이 대부분인 잔재를 용융하여 환경적으로 무해한 슬래크(slag) 처리하여 건자재 등으로 재활용할 수 있는 폐기물 무해화 및 재활용 기술이다. 특히, 소각 과정 중에 발생하는 다이옥신은 1400℃ 이상에서 운전되는 가스화로 내에서 완전 분해가 가능하며, 소각로에서 배출되는 배가스 처리 공정에서 문제가 되는 다이옥신 재합성 메커니즘인 de-novo 합성을 근본적으로 억제할 수 있는 장점이 있다. 특히 CO, H<sub>2</sub>가 주성분인 합성 가스는 청정 가스 연료(보일러, 가스 엔진 및 가스 터빈의 연료)로 이용한다든지, 다양한 화학 공정 제품을 생산할 수 있는 화학 공정의 원료 및 수송용 또는 발전용 연료로 사용이 가능한 액체 연료 제조에도 이용할 수 있다.

폐기물 열분해(pyrolysis)는 가스화와 유사하지만, 무산소 분위기(또는 저산소 분위기)에서 폐기물을 400~600℃ 정도의 비교적 낮은 온도로 가열하여 가스화를 통해 얻어진 합성가스 발열량 보다 높은 고발열량의 합성 가스 및 탄소와 불연물이 혼합된 탄화물을 얻을 수 있는 폐기물 처리 기술로써, 얻어진 합성 가스를 응축하여 오일을 회수하는 것이 주목적인 재활용 기술이다. 소각, 가스화 및 열분해 각각의 특징은 표 1에 나타내었다.

### 폐기물 가스화를 통해 얻어진 합성 가스를 이용한 발전

먼저, 표 2에 가스화 및 열분해를 통해 얻어진 합성 가스의 다양한 활용 예를 나타내었다. 가장 일반

적으로 이용하는 방법으로는 폐기물로부터 얻어진 합성 가스를 별도의 연소실(보일러 형태의 2차 연소실)에서 연소시켜 증기를 발생하여 활용하고 배출되는 연소가스(flue gas)는 일반적으로 알려진 소각로의 배가스 처리 시스템에서 정제한 후 대기로 배출

<표 1> 소각, 열분해 및 가스화의 특징

		소각	열분해	가스화
산화제 공급		완전 연소에 필요한 이상의 과잉 공기 공급	무산소(산소가 희박한 분위기)	완전 연소에 필요한 산소보다도 부족한 산소량 공급
온도		1000℃ 내외	400~600℃	1300℃ 이상
생성물	가스상	CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> O가 주성분인 연도 가스(flue gas)	CO, H <sub>2</sub> 와 CH <sub>4</sub> 등의 탄화수소 계열 가스가 주성분인 합성 가스(synthesis gas)로 발열량은 10~20 MJ/Nm <sup>3</sup> 정도이며, 합성 가스를 응축하여 오일을 얻을 수 있음	CO, H <sub>2</sub> 가 주성분인 합성 가스(synthesis gas)로 발열량은 10~15 MJ/Nm <sup>3</sup> 정도임
	고상	소각재(ash)	불연물+탄화물	슬랙(응용 시) 소각재(비 응용시)
에너지 이용 방법		- 폐기물의 화학에너지는 모두 열 에너지로 변환 - 열 에너지로부터 증기를 얻어 발전하거나, 난방 등에 활용	- 폐기물의 화학에너지는 합성 가스의 화학에너지와 열에너지로 변환 - 합성 가스의 화학 에너지는 오일 등의 2차 화학 에너지로 변환하여 액체 연료로 이용	- 폐기물의 화학에너지는 합성 가스의 화학에너지와 열에너지로 변환 - 합성 가스의 화학 에너지는 연료 가스 및 화학 원료로 이용
목적		- 폐기물의 중간 처리 - 폐기물의 안정화 및 감량화	- 폐기물을 탄화물, 오일 등으로 전환하여 재활용	- 폐기물의 무해화, 안정화 - 폐기물을 합성 가스로 전환하여 발전 연료 및 화학원료로 재활용

<표 2> 가스화 및 열분해를 통해 얻어진 합성 가스의 활용 방법

목적	방법	현재 국외 기술 단계(국가)
연료 가스로 이용	- 정제되지 않는 합성 가스를 2차 연소실에서 연소한 후 증기를 회수하고, 연소 배가스는 기존 소각 공정에서 채택한 정제 공정을 거친 후 대기로 배출 - 회수된 증기는 증기 터빈을 통해 발전하거나 난방에 이용	상업화 단계(일본, 유럽)
	- 정제된 합성 가스를 가스 엔진 또는 가스 터빈의 연료로 공급하여 복합 발전 또는 열병합 발전 - 가스 엔진 또는 가스 터빈에서 요구되는 수준으로의 합성 가스 정제가 필요함	가스엔진은 상업화 단계이며(일본, 독일), 가스터빈은 적용 실적 없음
	- 고도 정제된 합성 가스를 응용탄산염 연료전지(MCFC) 또는 고체산화물 연료전지(SOFC)등과 같은 고온용 연료 전지의 연료로 이용하여 발전	실증 단계(일본)
	- 정제 또는 미정제 합성 가스를 타 화석 연료를 사용하는 발전 시스템으로 공급하여 연료로 이용(co-firing)	상업화 단계(유럽)
화학 원료 및 원료 물질 제조에 이용	- 고도 정제된 합성 가스를 메탄올, DME와 같은 화학원료 및 액체 연료를 생산하는 원료 물질로 이용 - 고도 정제된 합성 가스 중에서 CO 또는 CO <sub>2</sub> 를 분리 회수하여 수소를 생산하고, 회수된 CO <sub>2</sub> 는 별도 이용하거나 고립	메탄올 제조만 상업화 단계(독일)

시키는 방법이다. 이 방법과 기존 소각 방법과의 큰 차이점은 고품의 폐기물을 직접 연소시키는 것이 아니라, 폐기물을 가연성 가스로 전환 후 가연성 가스를 소각한다는 측면인데, 연소 특성상 고체 연료보다 가스 연료에 대한 연소 제어가 용이하고 및 오염물질 배출 특성이 낮다는 장점을 이용한 처리 방법이다. 최근 들어서는 가스화를 통해 얻어진 합성가스를 이용한 가스 엔진 발전의 상업화 설비가 가동하기 시작하였으며, 연료전지 발전에 대한 실증 설비가 가동되기 시작한 단계이다.

그림 1에는 폐기물 처리량에 따라 폐기물로부터 전환된 합성 가스를 이용한 발전 효율을 나타낸 것으로, 각 발전 설비로부터 얻어진 전력 중에 소내 소비 전력을 제외한 송전단 전력을 기준으로 한 송전단 효율을 나타낸 것이다. 국내 대형 소각 설비의 대부분을 차지하고 있는 스토커 방식에서는 소각로부터 배출되는 고온의 연소 가스의 현열을 이용하여 생산된 증기를 증기터빈으로 공급하여 발전하는 방식으로 송전단 발전 효율은 11~17% 사이이다. 스토커식 소각 시스템에 용융 설비가 연계되었을 경우의 발전 효율은 4~12% 정도로서, 5~7% 정도의 발전 효율 감소를 초래한다.

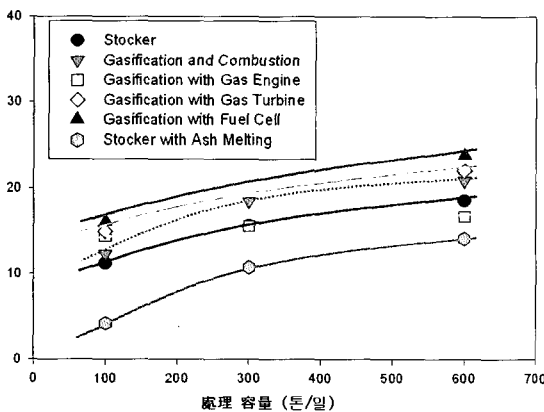
가스화를 통해 얻어진 합성 가스를 이용하여 발전할 경우에는 합성 가스를 보일러에서 연소하여 발전하는 방식, 합성 가스를 가스 엔진 연료 또는 가스

터빈 연료로 사용하여 발전하는 방식 그리고 합성 가스를 연료 전지의 연료로 사용하여 방식 등을 들 수 있다. 합성 가스를 연료전지와 연계할 경우가 발전 효율 17~23% 정도로 가장 고효율 발전이 가능함을 알 수 있다. 또한, 기존 대형 화력 발전소의 폐기물 가스화를 통해 얻어진 합성가스를 연료로 공급하여 발전하는 co-firing 발전 방식도 유럽 등에서는 이미 상용화되고 있다.

특히, 150 톤/일급 이하의 폐기물 처리 용량에서는 합성 가스를 이용한 가스 엔진 발전이 합성 가스를 연소하여 증기 터빈을 이용한 발전보다 발전 효율이 높으며, 최근 국내에서 발주되는 대부분의 소각 설비 용량이 100 톤/일 내외의 소형이라 점을 볼 때, 국내에서도 향후에 발주되는 폐기물 처리에 적용되는 공정으로 폐기물 가스화를 통한 가스엔진 발전을 적용을 적극 검토할 단계라 할 수 있다.

합성 가스를 연료로 이용하여 가스 엔진 발전하는 상업용 설비로는 스위스 Thermostelect사의 폐기물 열분해 가스화 용융 공정이 적용된 일본의 Mutsu 설비이다. (도시 폐기물을 대상으로 한 70톤/일급 2기 용량) 본 설비에서 사용된 가스 엔진은 GE Genbacher사의 1.2 MW급 2기로, 가스 엔진 자체의 발전 효율은 35~36% 정도이며, 투입된 에너지를 기준으로 한 전체 발전 효율은 19%로 매우 높은 발전 효율을 얻고 있다. 또한 가스 엔진에서 배출되는 고온의 연소 가스로부터 열 회수 장치를 설치하여 증기를 발생하여 소내 설비의 열원, 난방, 급탕 등으로 회수하여 가스 엔진으로 공급된 에너지의 65%를 회수하였다.

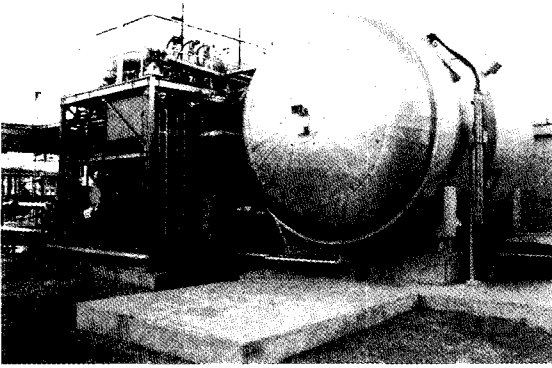
현재, 폐기물의 가스화 용융을 통해 얻어진 합성 가스를 연료전지 연료로 사용하여 발전하는 상업용 공정은 아직까지 없지만, 일본중부전력에 의해 300 kW급 용융탄산염 연료전지 시스템을 新名古屋 화력 발전소 내에 설치하여 실증 운전을 실시하였다.<sup>1)</sup> 이 실증설비는 일본용 용융탄산염연료전지(MCFC) 연구조합이 신에너지산업기술총합개발기구(NEDO)로부터 위탁받아 수행한 것으로 2002년부터 2004년까지 실증 운전을 실시하였다. 폐기물로부터 얻어진 합성 가스는 저온습식세정공정을 통해 H<sub>2</sub>S, HCl 분진 등이 연료전지에서 요구되는 농도 이하로 제거된



[그림 1] 폐기물을 이용한 발전 효율

1) <http://www.chuden.co.jp/press/data/pre2002/pre0210.html>

후 연료전지로 공급된다. 연료전지 운전 압력은 3.4 기압, 연료전지 출력 336 kW, 연료전지와 연계된 터빈 출력은 22 kW로 전체 발전 전력은 358 kW를 얻어 54%의 발전단 효율을 얻었다. 연료전지의 사진은 그림 2에 나타내었다.



[그림 2] 일본 중부전력의 폐기물 가스화로와 연계된 MFCF 시스템 사진

현재 국내에서도 천연 가스를 개질(reforming)하여 얻어진 합성 가스를 연료로 사용하는 100 kW급 용융탄산염 연료전지가 개발되어, 향후 폐기물 가스화를 통해 얻어진 합성 가스를 이용한 연료전지 시스템 개발에 기반이 확보되었다.

표 3은 폐기물을 소각, 열분해 및 가스화 공정과 증기 터빈을 연계하여 발전할 경우, 배가스 내의 오염물질의 농도를 나타낸 것이다. 특히, Lurgi사의 스토커식 소각 방식에서 채택한 배가스 처리 공정은 다양한 소각 설비에서의 배가스 처리 공정 중에서 다이옥신 제거 효율이 가장 우수한 spray absorber, fabric filter로 구성된 공정으로, 이 경우 다이옥신 배출 농도가 0.03 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup>인 반면, 가스화, 열분해, 열분해와 가스화 공정의 조합 공정에서의 배가스 처리 설비는 소각 설비와 비교하여 비교적 단순하지만, 배가스 내의 다이옥신 농도를 보면, 0.001 ng-TEQ/Nm<sup>3</sup> 이하로 매우 낮게 배출됨을 알 수 있다. 폐기물 내에 포함된 황 성분은 소각 공정에서는 SO<sub>2</sub> 형태인 반면 가스화 공정에서는 H<sub>2</sub>S 형태로 배출되기 때문에 가스 엔진 등에 허용되는 수준까지의

<표 3> 주요 업체별 배가스 내의 오염물질 농도

Technology Supplier	Lurgi	Thomoselect	Compact Power	WasteGen	Energos
Process	Grate combustion	Pyrolysis & gasification	Pyrolysis & gasification	Pyrolysis	Gasification
Power generation	Steam cycle	Steam cycle	Steam cycle	Steam cycle	Steam cycle
Gas treatment	Spray absorber Fabric filter(with lime and activated carbon)	Wet scrubbing (4 stage)	Fabric filter	Lime with feed Fabric filter	
NOx control	SNCR	SNCR/SCR	SCR	SNCR	
Dioxin (ng-TEQ/Nm <sup>3</sup> )	0.03	0.0005	0.003	0.001	0.0009
Particulates (mg/Nm <sup>3</sup> )	< 1	< 2	2	1	0.01
SO <sub>2</sub> (mg/Nm <sup>3</sup> )	20	< 6	< 1	20	17
NOx (mg/Nm <sup>3</sup> )	< 200	< 45	< 37	167	128
HCl (mg/Nm <sup>3</sup> )	7	< 1.5	2	5	1.2

황 성분 제거는 이미 다양하게 개발된 상업화된 공정을 통해 각국에서 정한 환경기준치 이하로 정제되어 배출되고 있다. 또한 소각로로 공급되는 공기는 완전 연소에 필요한 공기 이상으로 공급(연소 가스 내에 산소가 존재)하지만, 공기를 사용하지 않는 열분해, 완전 연소 조건보다 적은 양의 산소를 공급하는 가스화의 특성상 발생된 배가스 또는 합성 가스 유량이 소각 배가스 유량보다 1/5 이하로, 가스 정제 설비 규모가 작아도 된다는 장점이 있다.

폐기물 가스화를 통해 얻어진 합성 가스를 연료 전지 연료로 사용할 경우, 연료전지의 전극 손상 및 전해질의 오염을 최소화 하여 연료 전지의 수명을 연장할 위해서는 합성 가스를 가스엔진, 가스터빈 연료로 사용할 경우와 비교하여 오염물질을 훨씬 낮은 농도까지 정제가 요구된다. 특히, H<sub>2</sub>S는 0.1~1 ppm 이하, HCl은 0.1 ppm 이하, 분진 1 mg/Nm<sup>3</sup> 정

도로, 일반적인 합성가스 정제 공정으로는 처리되지 않는 수준이다. 따라서, 연료전지용 합성 가스를 제조하기 위해서는 기존 일반적인 합성가스 정제공정에서 채택한 흡수 공정에 추가로 흡착 공정(ZnO에 의한 흡착 또는 활성탄에 의한 흡착 등)을 연계한 고도 정제 공정이 요구되고 있다.

표 4에는 다양한 폐기물을 대상으로 하여 상업용 또는 실증용 설비의 가동 예를 나타내었다. 일본이나 유럽의 일부 국가에서는 2000년에 들어서면서 스위스의 Thermoselect사의 열분해 가스화 용융 공정, 일본의 미쯔이조선의 R21 공정 등 몇몇 공정이 상업화 수준의 기술 개발이 되었지만 현재까지도 다양한 처리 용량에 대한 상업용 설비 운전 결과 부족 등으로 기술에 대한 신뢰성, 안정성 그리고 경제성을 파악할 수준에 도달하지 못한 것이 사실이다. 따라서, 아직까지 가스화 또는 열분해 방식을 적용한 폐기물

<표 4> 상업용 또는 실증용 폐기물 열분해, 가스화 공정

Technology supplier	Plant location	Feed Rate (Ton/Y)	Operational since	Feedstock	Products	Power generation
Brightstar Environmental	Wollongong (Australia)	25,000	2001	Sorted MSW	Electricity	Gas engine
British Gas-Lurgi	Schwarze Pumpe (Germany)	500,000	1993 (Rotating grate gasifier) 2000 (Slagging gasifier)	Plastics, RDF, Wood, sewage sludge, coal	Methanol (120,000Ton/y) Electricity (35MW)	
Compact Power	Avonmouth (UK)	8,000	2001	Clinical waste	Electricity, steam	Steam cycle
Energos	Ranheim (Norway)	10,000	1998	Commercial, industrial waste	Steam	NA
Energos	Averoy (Norway)	30,000	2000	MSW	Electricity, Steam	Steam cycle
Energos	Hurum (Norway)	35,000	2001	MSW, industrial waste	Steam	NA
Energos	Sarpsborg (Norway)	70,000	2002	MSW, industrial waste	Electricity, Steam	Steam cycle
Energos	Forus (Norway)	37,000	2002	MSW	Steam	NA
Energos	Minden (Norway)	37,000	2002	MSW, commercial waste	Steam	NA
Energos/Novera	Castellon (Spain)	25,000	2002	Plastics	Electricity	Gas engine

(계속)

<표 4> 상업용 또는 실증용 폐기물 열분해, 가스화 공정(연속)

Technology supplier	Plant location	Feed Rate (Ton/Y)	Operational since	Feedstock	Products	Power generation
FERCO	Vermont (USA)	165,000	1997	Biomass, tree chips, wood pellets	syngas	co-fired in neighbouring power station
Foster Wheeler	Lahti (Finland)	80,000	1998	Mixing containing plastics, paper, wood waste	syngas	Co-firing in coal fired boiler
GEM	Bridgend (UK)	60,000	Not yet fully operational	MSW	syngas	Limiting testing on gas engine
Lurgi	Rudersdorf (Germany)	100MWth	1996	RDF	Syngas	NA
Mitsui	Yame (Japan)	70,000	2000	MSW	Electricity	Steam cycle
Mitsui	Toyoashi (Japan)	120,000	2002	MSW	Electricity	Steam cycle
Thermostelect	Karlsruhe (Germany)	225,000	2002	Domestic and industrial waste	Syngas	Steam cycle, syngas export
Thermostelect	Chiba (Japan)	100,000	1999	Domestic and industrial waste	Syngas	Co-firing in power station, gas engine for testing
Thermostelect	Mutsu (Japan)	50,000	2003	Industrial waste	Syngas	Gas engine
TSP Termiska	Greve-in-Chianti (Italy)	67,000	1992	Palletised RDF	Electricity (3.5MW)	Steam cycle
Techtrade WasteGen	Burgau (Germany)	35,000	1984	Mixed domestic and industrial waste	Electricity	Steam cycle
Techtrade WasteGen	Hamm (Germany)	100,000	2002	Mixed domestic and industrial waste	Electricity	Steam cycle

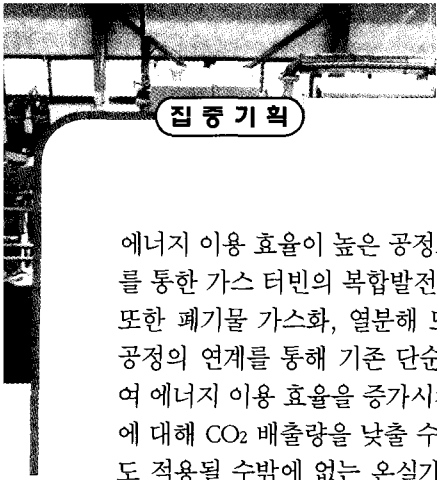
주) MSW : Municipal Solid Wastes, RDF : Refuse Derived Fuel

처리 설비 설치 용량은 크지 않고 소용량 설비에 적용되고 있어 일본과 유럽의 몇몇 나라를 제외하면 기술 검증 및 평가 단계라 할 수 있다.

이러한 현재의 기술 수준으로 전체 시스템의 효율을 증가시킬 수 있는 또 다른 방법으로는 기존 상용화된 대형 발전설비(예를 들면 석탄 연소 발전)에 폐기물로부터 얻어진 합성가스를 공급하여 co-firing 하는 방식을 들 수 있다. 즉, 소규모 가스화 설비와 연계된 가스 엔진 및 가스 터빈 발전 시스템에서의

가스 정제 설비에서의 에너지 손실 및 비효율성을 대형 발전 설비에 연계함으로써 피할 수 있다는 점과 대형 발전 설비의 기존 utility를 사용할 수 있어 건설비도 절감할 수 있어, 단기간 내에 적용할 수 있는 경제성 있는 공정으로 제안되어 이미 상업화되고 있는 실정이다.

다양한 폐기물에 대한 적용 가능한 처리 방법에 대한 에너지 효율과 비용을 분석한 Faaij 등의 연구 결과에 의하면, 현재의 기술을 토대로 2010년에 가장



에너지 이용 효율이 높은 공정으로는 폐기물 가스화를 통한 가스 터빈의 복합발전임을 제시하고 있다.<sup>2)</sup> 또한 폐기물 가스화, 열분해 또는 가스화와 열분해 공정의 연계를 통해 기존 단순 소각 방식과 비교하여 에너지 이용 효율을 증가시킴으로써 동일 발전량에 대해 CO<sub>2</sub> 배출량을 낮출 수 있어, 향후 우리나라도 적용될 수밖에 없는 온실가스 저감을 위한 하나의 대안으로 적용될 수 있다.

### 폐기물 가스화를 통한 화학원료 제조

또 다른 합성 가스의 이용 방안으로는 합성 가스의 주성분인 CO, H<sub>2</sub>를 이용하여 화학원료로의 전환을 들 수 있다. 기존 이용 방법은 전력 생산에 국한되었

지만, 화학원료로의 전환을 통해 수송의 용이하고 오염물질을 획기적으로 저감할 수 있는 액체 연료 [메탄올, DME(Di-Methyl Ether) 등]를 생산할 수 있으며, 합성가스에서 CO 또는 CO<sub>2</sub>를 제거함으로써 수소 얻을 수 있다. 현재 다양한 폐기물을 대상으로 가스화를 통해 얻어진 합성 가스로부터 화학원료를 상업적으로 생산하고 있는 설비는 독일의 Schwarze Pumpe의 메탄올 제조 설비로, 현재 연간 120,000 톤의 메탄올을 생산하면서 35 MW의 전력을 생산하고 있다. 아직까지 폐기물로부터 화학원료를 생산하는 상업용 설비는 연구 개발 단계이지만, 원유 및 천연 가스 가격 상승 및 폐기물 처리 비용의 상승에 따라 경제성이 확보될 수 있을 것으로 예상된다. ㉔

2) Faaij, A., Hekkert, M., Worrell, E. and Van Wijk, A., "Optimization of the final waste treatment system in the Netherlands", Resources, Conservation and Recycling, Vo.22, pp.47-82 (1998)