

유해폐기물 처리용 소각 대체기술 동향

양희철[†] · 조용준 · 은희철 · 김응호

한국원자력연구원
305-353 대전시 유성구 덕진동 150-1
(2007년 7월 2일 접수, 2007년 7월 15일 채택)

On the Alternative Incineration Technologies for the Treatment of Hazardous Waste

Hee-Chul Yang[†], Yung-Zun Cho, Hee-Chul Eun and Eung-Ho Kim

Korea Atomic Energy Research Institute, 150-1, Duckjin-dong, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea
(Received 2 July 2007; accepted 15 July 2007)

요 약

소각은 유기성 유해폐기물에 대해 가장 발달된 유용한 처리기술로 인정되어 왔다. 그러나 PCBs와 같이 유해한 폐기물의 처리를 위한 소각로의 부지확보나 인허가가 유해한 대기오염 물질의 배출에 대한 주민의 우려로 용이하지 않다. 최근에 많은 소각 대체기술들이 개발되어 왔으며 이 기술들은 소각에 비해 다이옥신이나 퓨란과 같은 유해한 물질의 배출이 적어 주민의 우려를 완화시킬 수 있다. 본 논문에서는 다양한 유해폐기물의 종류에 대해 현재 적용이 가능한 소각 대체기술들을 검토하였다. 다양한 범주의 비열처리 및 열처리 소각 대체기술들을 공정운전조건, 적용대상 폐기물 및 이차폐기물 발생특성의 관점에서 평가하고 몇 가지 소각 대체기술들에 대해서는 공정의 운전원리에 대해 자세히 설명하였다.

Abstract – Incineration has been regarded as the best developed technology available for organically hazardous waste. However, permitting and siting incinerators to treat hazardous waste such as a waste containing PCBs is very difficult due to the public concerns associated with toxic air emissions. Recently, a lot of alternatives to an incineration have been developed and these technologies have the potential of alleviating public concerns by decreasing emissions of hazardous materials such as dioxins and furans. This paper reviews currently available alternative incineration technologies for various hazardous waste streams. Various categories of non-thermal and thermal alternative incineration technologies have been evaluated in terms of their process operating condition, applicability of a waste stream and their emission of secondary waste. Detailed descriptions of operating principles of several technologies are also provided.

Key words: Alternative Incineration Technology, Chemical Oxidation, Steam Reforming, Gas-phase Reduction, Molten Salt Oxidation

1. 소각 대체기술이란?

가연성 폐기물의 처리를 위한 소각공정은 오랫동안 운영되어 왔고 또 이의 개선을 위한 수많은 연구개발이 끊임없이 수행되어 왔다. 그 결과 개선된 폐기물 소각공정은 유해물질의 환경배출을 적절히 억제하고 있으며, 최근에는 폐기물 소각공정의 운전으로 인한 환경위해성에 대한 논란은 거의 일어나지 않고 있다. 그럼에도 불구하고 다이옥신이나, 산 가스 또는 방사성핵종이나 유해중금속 등과 같은 유해물질의 환경배출이 우려되어 소각처리가 용이하지 않은 특수한 종류의 폐기물들이 있다. 이러한 폐기물에는 PCBs (polychlorinated biphenyls)와 같은 POPs(persistent organic pollutants: 잔류성 유기오염물질) 함유 폐기물, PVC 등과 같은 할로겐화 유기

폐기물, 방사성물질과 화학적 유해물질이 동시에 포함되어 있는 혼성폐기물(mixed waste), 화약류 등의 폭발성물질(explosives)이나 추진제(propellants)와 같은 반응성폐기물 및 병원성폐기물 등이 이에 해당된다. 소각 대체기술이란 다이옥신이나 산 가스, 유해중금속 등의 환경유해물질 배출을 근본적으로 방지하면서 이러한 소각처리가 용이하지 않은 폐기물을 분해 처리할 수 있도록 개발되었거나 개발 중인 새로운 폐기물 처리기술을 의미한다고 할 수 있다.

2. 소각 대체기술 개발 배경

소각 대체기술은 산화 대체기술(alternative oxidation technologies: AOTs)이라고도 표현된다[1]. 즉 화염에 노출되지 않은 상태에서 자유산소(free oxygen)에 의한 산화처리 없이 유기물질을 분해하는 기술로 정의된다. 열처리 공정(thermal treatment process) 또는 비열처

[†]To whom correspondence should be addressed.
E-mail: nhcyang@kaeri.re.kr

리공정(nonthermal treatment process)으로 크게 구분되는 산화 대체 기술들은 모두 전통적인 산화 열처리 기술인 소각에 비해서는 상대적으로 아주 적은 양의 배기가스를 배출하고, 독성 재조합 생성물인 다이옥신/퓨란(PCDD/Fs)의 생성을 근본적으로 억제하는 공정 특성을 가진다. 고온 열처리 소각 대체기술들도 소각로의 운전 온도보다 낮은 온도에서 운전되어 납, 카드뮴, 비소 등의 준휘발성(semi-volatile) 유해중금속은 물론 세슘 등의 방사성 핵종 들을 쉽게 휘발시키지 않아 이의 배출이 억제할 수 있다. 즉 소각 대체기술이란 근본적으로 파인공기 고온연소에 대한 대체기술로 다이옥신 및 유해중금속의 배출을 근본적으로 억제할 수 있는 공정을 의미한다고 할 수 있다.

미국에서는 소각이나 산화 열처리 공정에서 배출되는 유해한 배기가스에 대한 주민들의 우려가 소각 대체기술에 대한 개발과 보급에 가장 큰 동기가 되었다고 보고되고 있다. 특히 주민들은 다음과 같은 사실들에 크게 우려하고 있다고 한다고 보고되고 있다.

- 미연소생성물(products of incomplete combustion: PICs) 및 유해중금속의 배출
- 소각로의 운전과정에서 배출되는 많은 양의 배기가스
- 비정상 운전이나 사고로 인한 유해물질의 배출 가능성, 즉 제어되지 않은 상태에서의 유해물질의 대량 배출 가능성
- PVC 등 할로겐화유기물 소각 시 피할 수 없는 다이옥신과 퓨란의 합성생성과 이 생성물들의 배출

1994년 이후 미국 EPA에서 2,3,7,8 tetrachlorodibenzo-p-dioxin (TCDD)의 독성에 대한 재평가가 이루어졌으며, 1997년에 기존 및 계획 중인 소각로에 대한 배기가스 허용 기준이 더욱 강화되었다[2-6]. 새로운 규정의 만족을 위하여 부가적인 배기가스 처리설비의 설치 및 운영이 필요하게 되었는데 이에 소요되는 비용이 과대하여 기존 소각로 운영의 경제성이 부재하게 되었으며, 이로 인하여 수많은 소각로의 가동이 중지되었는데 병행성 폐기물 소각로의 경우에만 약 5,000기 이상이 가동 중지·해체되었다[6].

한편, 유럽에서도 2000년에 소각로에 대한 배기가스 허용기준이 크게 강화되어 미국과 마찬가지로 많은 소각로의 운영이 중단되었다. 최근 체코, 폴란드 등 새로운 10개국에 유럽연합에 가입되었는데 이들 국가에서 운영해오던 소각로는 다이옥신 허용기준 0.1 ng/m³ TEQ를 만족시킬 수 없어 고비용의 배기가스 처리장치로 기존의 소각로를 보강할 것인지 아니면 소각로의 운영을 중단하고 소각 대체 공정을 이용할 것인지에 대한 선택을 필요로 하고 있다. 유럽연합에서는 2004년 5월에 발효된 POPs(persistent organic pollutants: 잔류성 유기오염물질)의 근절에 관한 스톡홀름협약을 준수하기에 적

합한 소각 대체공정을 정책적으로 권장하고 있으며, 소각 대체기술 적용의 필요성을 다음 다섯 가지 항목으로 강조하고 있다[7].

- 소각로는 다이옥신과 중금속과 같은 유해한 기체상 오염물을 환경으로 배출한다.
- 다이옥신과 중금속을 반드시 포함하는 소각재는 유해한 오염물질이다.
- 소각로는 후처리장치 비용이 과대하므로 소각 대체공정보다 경제성이 부족하다.
- 소각로는 지속적으로 강화되는 배기가스 허용기준을 충족하기 위해 끝없는 장치 개선이 필요하다.
- 소각 대체기술의 적용으로 POPs 근절에 관한 국제 협약을 준수할 수 있다.

3. 대상 폐기물 및 2차 폐기물 발생 특성

몇 가지 기술들을 제외한 소각 대체기술들은 대부분 적용대상 폐기물이 소각에 비해 상당히 제한적이다. 따라서 폐기물의 특성에 따라 적용될 수 있는 소각 대체기술이 결정된다고 할 수 있다. 또한 소각 대체기술의 적용성은 폐기물에 포함되어 있는 POPs, 중금속, 방사성핵종 등과 같은 유해물질의 자체의 특성보다는 오염된 폐기물매질의 특성에 더 크게 의존된다. 따라서 폐기물 매질에 따라 소각 대체기술의 적용성이 결정된다고 할 수 있다. 우선 폐기물 매질별 특성에 따라 유해물질을 함유하는 폐기물을 크게 분류하면 다음 Table 1과 같이 나타낼 수 있다[8].

소각 대체기술로서의 적용성을 평가할 때 고려하여야 할 또 다른 중요한 사항은 처리시에 발생하는 배기가스와 2차 폐기물이다. 여러 가지 소각 대체기술들은 각기 다른 장단점을 가지고 있지만 가장 중요한 배기가스의 발생량과 2차 폐기물의 발생량 측면에서 폐기물의 처리기술의 큰 범주로 분류할 경우에 Table 2에 나타낸 바와 같은 특징을 지님을 알 수 있다. 즉 분류되는 기술들을 처리온도가 높은 순으로 나열해 볼 경우, 순서대로 배기가스의 발생량이 많은 반면 상대적으로 2차 폐기물의 발생량이 적은 등의 단점과 장점

Table 2. Rank of waste treatment technologies as a function of off-gas volumes and secondary waste amount

Waste treatment technology	Rank of treatment temperature	Rank of off-gas volume	Rank of secondary waste amount
Thermal destruction	1	1	4
Chemical destruction	2	2	3
Separation process	3	3	2
Biological treatment	4	4	1

Table 1. Categories of hazardous waste matrix

Waste matrix	Hazardous waste categories
Waste water, water sludge	Pure waste water, waste sludge including waste water, waste water sludge
Organic liquid, organic sludge	Organic liquid waste, waste organic sludge
Miscellaneous solid	Pure non-combustible solid waste, pure combustible solid waste, mixtures of non-combustible waste and combustible solid waste
Soil, debris	Soil, sand/pebbles, organic debris, inorganic debris
Specific waste	POPs waste, halogenated organics(PVC, PTFE, and organic waste contains brominate flame retardants, etc), Halogenated organics, halogenated organic solvents, waste containing volatile hazardous metals such as mercury, Lead, cadmium, etc. mixed waste (hazardous waste containing radionuclides)

을 동시에 지니고 있는 것으로 분석되었다. Table 2는 소각 대체기술 뿐만 아니라 소각을 포함한 다른 모든 폐기물 처리기술들도 이러한 규칙을 따른다고 할 수 있다[1, 8].

4. 소각 대체기술의 적용성

다양한 소각 대체기술들을 저온산화공정(low-temperature oxidation), 탈할로겐화(dehalogenation), 열탈착(thermal desorption), 고온처리(high-temperature treatment) 등의 4가지 군으로 크게 분류하고 각각의 기술에 대해 적용온도 및 압력, 적용가능 폐기물, 분해 제거효율, 배기가스 종류 및 2차 폐기물에 대해 요약하여 Table 3에 나타내었다. Table 3에 나타낸 소각 대체기술들 외에도 photolytic oxidation, ultrasonic, electron beam 및 x-ray/gamma ray 기술과 같은 radiation induced oxidation 기술들을 소각 대체기술에 포함하는 경우도 있지만 이 기술들은 주요 소각대상인 가연성 유기물질을 처리하기 어렵고 주요 처리대상이 수용액상 오염물질인 폐수이기 때문에 본 기술 분석에서 제외하였다. 유사한 이유에서 생물학적 처리(biological treatment) 및 토양세척(soil washing) 기술들도 본 소각 대체기술 동향분석에서 제외하였다.

본 동향분석에서는 Table 3에 나타낸 여러 가지 폐기물 처리기술들 중 다양한 폐기물 종류에 대해 적용성이 높은 저온처리(비열처리) 및 고온처리(열처리) 기술들의 각각에 대해 우리나라에 비교적 많이 알려져 있지 않은 기술이지만 유해폐기물의 소각 대체기술로서의 그 적용 범위가 높은 기술들, 즉 주 소각대상 폐기물인 가연성 유기폐기물을 처리할 수 기술들을 선정하여 각 공정의 운전 원리에 대해 정리하였다.

4-1. DETOX[10, 11]

미국의 New Mexico에 있는 Albuquerque 사의 Delphi Research에 의해 개발된 공정으로 촉매 화학적 분해공정(catalytic chemical destruction process)을 대표할 수 있는 공정이다. 이 공정은 촉매를 사용하여 산화제를 자체적으로 재생시키면서 유해유기물을 산화·분해하는 공정이다. 약 150~250 °C의 저온에서 운전되고 촉매의 특성상 규제되는 배기가스를 근본적으로 생성시키지 않을 뿐만 아니라 운전 온도가 낮아 배기가스에 휘발성 중금속이 포함되지도 않는다. 사용되는 작용유체인 Pt 및 Ru가 담겨진 FeCl₃를 포함하는 시약용액(reagent solution)은 반응과정에서 소멸되지 않을 뿐만 아니라 금속성분도 쉽게 녹이므로 폐기물에 포함되어 있던 유해중금속 등은

Table 3. Operating conditions, acceptable waste streams, DRE and secondary wastes of alternative incineration

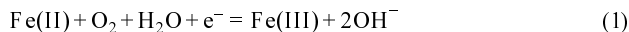
Alternative incineration technology	Temperature (°C)	Pressure (Psig)	Acceptable waste streams	DRE*	Off-gas streams	Secondary waste streams
Wet chemical oxidation [9-20]						
- Wet air oxidation	100-200	300-3,000	Aqueous, organics <10%	60->99%	CO ₂ , VOCs	Organic reaction byproducts
- DETOX SM	100-300	20-200	Organic sludge, soil, liquid, soil	>99.9%	CO ₂ , VOCs, HCl	Depleted acid, inorganic sludges
- Direct chemical oxidation	80-100	Ambient	Organic sludge, soil, liquid	>95%	CO ₂ , CO, VOCs	Dilute aqueous, batch residuals
- Acid digestion	150-200	0-15	Organic sludge, soil, liquid, soil	>99.9%	CO ₂ , VOCs, NOx	Depleted acid, inorganic sludge
- Electrochemical oxidation	Ambient-70	Ambient	Organic sludge, cellulose, plastic	90%>99%	CO ₂ , CO, NOx, HNO ₂	Depleted acid, inorganic sludge
Dehalogenation [21-25]						
- KPEG/APEG	Ambient-115	Ambient	Halogenated organics, soil, sludge	>99.5%	VOCs	Biphenyls, reaction byproducts
- BCDP	320-350	Ambient	Halogenated organics, soil, sludge	>99.5%	VOCs, dust	Biphenyls, reaction byproducts
- Birch reduction	Ambient	Ambient	Halogenated organics, soil, sludge	>99.5%	Ammonia	Biphenyl, CaCl ₂ , Ca(OH) ₂
- LARC	Ambient	Ambient	Halogenated organics, soil, sludge	>99.5%	None	Biphenyl and NaCl
- Photo-reduction	<500	Ambient	Gaseous halogenated organics	Unknown	HCl	Hydrocarbons
- Biodechlorination	Ambient	Ambient	PCBs-contaminated aqueous waste and soil	Unknown	CO ₂	Biomass
Gas phase destruction [26-33]						
- Thermal reduction	>850	Ambient	Chlorinated organic waste	>99.99%	H ₂ , CH ₄ , CO, H ₂ O, light hydrocarbons	Scrubber sludge
- Electron beam	Ambient	Ambient	Gaseous organics, <3,000 ppm	>99%	CO ₂ , CO, Cl ₂ , HCl, trace phosgene	Acidic scrubber solution
- Silent discharge plasma	Ambient	Ambient	Gaseous organics	>99%	CO ₂ , HCl, trace PICs, PCDD/PCDFs	Scrubber solution
- High energy corona	Ambient	Ambient	Gaseous organics, 5 ppb-10,000 ppm	>99%	NOx, O ₃ , HCl, Cl ₂ ; phosgene	Scrubber solution
- Photolytic	Ambient-700	Ambient	Gaseous organics	90->99%	DCAC, phosgene, PCDD/PCDFs, PICs	Scrubber solution
- Packed bed reactor	870-1,010	Ambient	Gaseous organics	>99.99%	CO ₂ , H ₂ O, acid gases, <2ppm NOx	Scrubber solution
Thermal treatment [34-46]						
- Molten salt	700-950	Ambient	Low-ash organics, halides	>99.99%	CO ₂ , CO, H ₂ O	Recyclable salt, ash, chlorides
- Metal melting	1,300-870	Ambient	Organic, inorganic solid and liquid	>99.99%	CO ₂ , CO, VOCs, particulates, metals	Slag, recyclable metals
- Steam reforming	850-1,100	Ambient	Organic liquid, solid, sludge and solid	>99.99%	HCl, CO ₂ , H ₂ O	Ash, scrubber solution
- Supercritical water	450-650	Ambient	Aqueous or suspended organics	>99.99%	CO ₂ , H ₂ O, N ₂ , N ₂ O	Salts, acids, oxides
- Plasma pyrolysis	5,000-15,000	Ambient	Organic liquid	>99.99%	CO ₂ , H ₂ O, CO, NOx, particulates	Powdered carbon
- Chem char	1,200	Ambient	Organic liquid, sludge, soil	>99.99%	CO ₂ , CO, H ₂ O, H ₂ , CH ₄ , trace VOCs	Depleted carbon char/slag containing metals
- Packed bed reactor	300-3,000	Ambient	Organic liquid	>99.9%	CO ₂ , H ₂ O, HCl, PICs, dioxins/furans	Scrubber solution and condensate
- Vitrification	1,000-1,600	Ambient	Sludge, solid, organic liquid	>99.9%	Acid Gas, CO ₂ , CO, NOx, SOx	Glass and metals
- Plasma torch/electric arc	1,500-5,300	Ambient	Sludge, solid, organic liquid	>99.99%	CO, CO ₂ , HCl, NOx, SOx, VOCs, metals	Slag and metals

*DRE depends on organic waste stream, residence time in the reactor, performance of additional treatment system

Table 4. Destruction efficiency of delphi DETOX process (unstirred reactor)

Organic material	Absolute destruction efficiency [%]	Absolute destruction efficiency on vermiculite [%]
O-xylene	99.9997	
1,2,3 tri methyl-benzene	99.9997	99.98
Trichloroethylene	99.995	99.55
Hexachlorobenzene	99.995	
Polychlorinated biphenyl	98.9	
Carbon tetrachloride	"complete"	
Trichloroethane	"complete"	

회수되거나 처분되기 전까지는 이 시약용액 내에 계속해서 축적되어 환경으로 배출되지 않는다. 이 시약용액에 존재하는 산소는 다음과 같은 반응 메카니즘으로 환원된 철 이온을 철로 산화시키는 역할을 한다.

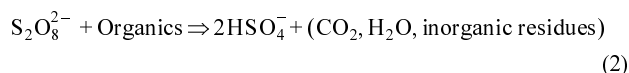


이 기술의 난분해성 유기물에 대한 분해 및 제거효율은 PCB 화합물에 대해 98.9%, 비염화 유기용매에 대해서는 99.999%를 상회하는 높은 분해효율을 보이는 것으로 알려져 있다(Table 4 참조). 특히, 약 20~200 psig의 중 저압에서 운전되는 공정으로 액체폐기물에 대해 적용이 용이하다. 고체폐기물에 대해서도 적용이 가능하나, 작용 유체(working fluid)내로 불활성 고체 매질의 용해성 여부에 따라 그 적용이 제한된다고 할 수 있다.

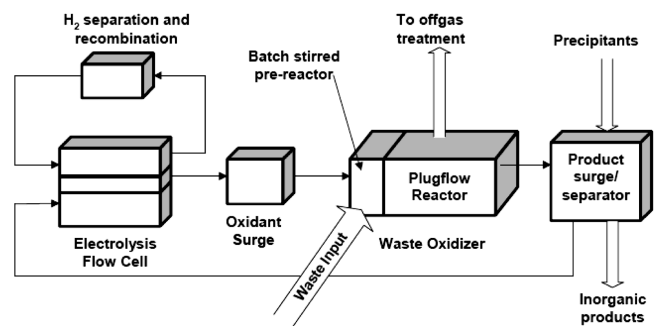
4-2. 직접화학적산화(direct chemical oxidation: DCO)[12-14, 17]

직접화학적산화(direct chemical oxidation: DCO)는 상압 및 저온(<100 °C)에서 유해 유기성분을 분해시키는 수용상 공정(aqueous-based process)으로 폐화학무기 등의 분해에도 적절한 기술로 평가되고 있다. 이 기술은 산이나 염기용액 내에 있는 과산화이황산 음이온(peroxydisulfate anion: $\text{S}_2\text{O}_8^{2-}$)을 산화제로 이용한다. 산화반응에 의해 생성되는 수소 황산나트륨(sodium hydrogen sulfate)이나 수소 황산암모늄(ammonium hydrogen sulfate)은 전해작용에 의해 다시 산화제로 변하여 재사용된다. 산화반응은 peroxydisulfate 농도에 대한 1차 반응으로 알려져 있다. 거의 모든 용해성 유기물에 대한 분해 반응상수 k_d 는 $0.01 \sim 0.005 \text{ min}^{-1}$ 범위에 있고 과산화이황산 음이온(peroxydisulfate anion)이 화학적 활성 이온인 SO_4^- 로 분해되는 속도에 따라 전체 산화반응의 속도가 결정된다. 이 분해반응의 속도는 DCO 반응조의 온도를 80~100 °C 까지 상승시키면 크게 증가하는 것으로 알려져 있고 반응조의 온도를 그 이상으로 올리면 PVC 등의 염화유기물도 분해할 수 있다고 알려져 있다.

DCO 공정의 흐름도를 Fig 1에 나타내었다. 이 공정은 peroxydisulfate salts(주로 sodium 또는 ammonium염)로 유기물을 이산화탄소와 물로 무기화한다. 사용되는 산화제를 전극에서 재생하여 사용하기 때문에 2차 폐기물의 발생을 최소화하고 있다. 폐기물 처리반응식은 다음과 같이 표현된다.



이러한 peroxydisulfate 공정은 잘 개발되어 있는 기존 화학공정

**Fig. 1. Principle of operating conditions of direct chemical oxidation process.**

기술의 응용이라고 볼 수 있다. 산화된 ammonium peroxydisulfate는 가장 강한 산화제의 일종으로 이의 산화력은 불소, 오존 및 oxyfluoride 다음으로 강하다고 알려져 있다. Peroxydisulfate의 산화 포텐셜은 거의 모든 종류의 유기물을 분해할 수 있을 정도로 강하여 실로 널리 적용될 수 있는 공정이라고 할 수 있다. 여러 가지 유기물은 상압 및 80~100 °C의 온도에서 이 DCO 공정으로 분해될 수 있으나, PVC 중합체 등과 같은 난분해성 유기물의 경우 peroxydisulfate에 의한 산화처리에 앞서 140~180 °C에서 두 시간 정도의 열화 전처리가 필요하다고 한다.

이 DCO 기술의 가장 큰 장점은 다양한 유기성 고체 및 액체의 산화분해에 적용될 수 있다는 것이다. 대상 폐기물에는 유기용매, 세제, 살충제, 불수용성 기름(water-insoluble oil) 및 그리스(grease), charcoal filter media, incinerator chars와 tars, 종이류, 불화물을 제외한 플라스틱류, 염화, 황화 및 질화 폐기물류, 흙, 모래 및 슬러지와 같은 유무기 매질에 포함되어 있는 유기물 등이 포함될 수 있다. 또 산화제 용액은 특히 접근이 용이하지 않은 폐기물, 즉 방사능으로 오염되어 있는 기계류나 glove box 내에 포함되어 있는 유기물의 처리 및 화학무기류, 폭발물 및 추진제(propellants)의 제염이나 분해에도 널리 사용될 수 있다. 또 ammonium peroxydisulfate 산화제는 거의 대부분 상온에서 아무런 제약 없이 저장될 수 있으므로 유해폐기물 분해설비가 크게 걸어도 드러나지 않아도 되며 필요시 자주 또 쉽게 보충해서 사용할 수 있다. 따라서 공정은 이동설치가 가능한 벤치 규모에서부터 큰 고정설치형의 장치로 쉽게 처리 규모의 변경이 가능하다. 여러 가지 유해유기물에 대한 DCO의 분해효율을 다음 Table 5에 나타내었다.

한편 DCO 공정으로 acetic acid, formamide, ethylene glycol, tributyl phosphate, trialkyl amines, kerosene, methyl chloroform,

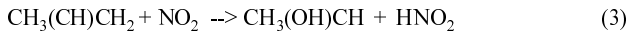
Table 5. Destruction efficiency of direct chemical oxidation process

Compound	Feed concentration	Percent destruction	Destruction rate [kg/M ³ -day]
Batch reactor			
Kerosene	9.6 g/L	99.97	186
Triethylamine	0.96 g/L	98.8	205
2,4,6-TNT	(0.003M)	99.9	760
Polyvinyl chloride Pieces and powder		50	3
Ethylene glycol	0.80 g/L		
Plug flow reactor			
Ethylene glycol	6.2 g/L	99.93	432

trinitrotoluene와 다른 폭발물, 생화학 및 화학 무기시약의 모의물질, 종이류 및 섬유류, PCB 류, pentachlorophenol, ion exchange resins (DOWEX) 및 모의 슬러지에 포함된 탄소잔류물 등의 광범위한 폐기물에 대한 성공적인 실증시험이 수행되었는데 이 결과로 얻어진 이 기술의 주요특성, 장치재료 및 배기가스의 특성은 다음과 같다. 처리용량에 대해서 요약하면 다음과 같다.

4.3. 산소화(acid digestion)[19,20]

Acid digestion 기술은 질산인산염(nitric-phosphoric acid)으로 종이, 플라스틱, 수지(resins) 및 군수품(munitions) 등을 적당한 온도에서 분해할 수 있는 소각 대체기술이다. 이 기술은 질산을 산화제로 사용하고 인산을 carrier로, 팔라듐 혼합물을 촉매로 사용한다. 인산은 질산의 비등점을 상압에서 상승시켜 용액 내에 잔류(retention) 하도록 해 준다. 유기물의 산화 반응은 보통 용액 내에 녹아 있는 NO₂ 및 NO에 의해 발생하는 유기성 라디칼(organic radical)의 생성으로부터 시작된다.



이 공정은 보통 상압에서 130~180 °C의 온도에서 운전되지만, 난분해성 플라스틱류를 분해하기 위해서는 그 이상의 가압과 가온이 필요하다. 산화속도는 종이류나 군수품류에 대해서는 수초밖에 걸리지 않을 정도로 빠르지만, 어떤 난분해성 플라스틱의 분해에는 1시간 이상 걸리는 경우도 있다. 폐기물에 포함된 유해 중금속들은 유기물의 분해 후에 용액 내에 남는다.

0~5 psig 가압 하에 130~150 °C 온도범위에서 대부분의 유기화합물은 쉽게 산화되어 물과 이산화탄소로 분해된다. Polystyrene 이온 교환수지는 175 °C 및 5~10 기압에서 효과적으로 분해된다. 0.001 M의 palladium 촉매를 사용하여 일산화탄소의 배출을 억제하고 N₂O의 생성을 최소화 한다. 발생하는 NO 및 NO₂를 포집하여 회수되는 HNO₃와 함께 산소화 반응기로 환류 시킬 수 있다. 아울러 과산화수소를 사용하여 NO와 NO₂를 회수하여 NO_x의 배출을 100 ppm 이하로 낮출 수 있다고 한다. Table 6에 산소화 공정의 몇 가지 폐기물에 대한 처리속도를 나타내었다.

4.4. 수증기 개질(steam reforming)[13]

고온(300~1,200 °C)에서 수증기를 폐기물내 유기성분과 반응시켜 CO, CO₂ 및 H₂로 주로 구성되는 합성가스(synthesis gas)를 발생시킨다. 미량의 메탄가스(CH₄)도 불완전 반응 생성물로 발생되며 할로젠화 유기폐기물의 처리시에는 할로젠화산을 포함하는 배기가스를 발생하며 질화물이나 황산화물이 폐기물에 존재할 때에는 SO_x 및 NO_x가 발생되어 배기가스에 포함된다. 유해폐기물의 steam

reforming 공정은 다음의 기본적인 두 단계를 반드시 거치면서 폐기물내의 유기성분을 분해하는 공정이다.

1) 약 300~800 °C의 온도 범위에서 폐기물내의 유기성분이 수증기나 수증기와 합성가스의 혼합가스와 접촉하여 열분해 되면서 휘발성 유기성분은 휘발하고 비휘발성 유기성분은 비휘발성 무기성분과 함께 coke나 char의 형태로 남는다.

2) 앞의 1단계의 과정에서 휘발된 유기성분은 약 1,200 °C의 고온에서 수증기에 의해 분해되어 합성가스를 생성한다. 합성가스에 포함된 산가스는 scrubber에 의해 세정되고 합성가스는 다시 산화되어 이산화탄소와 물로 전환되어 대기로 배출된다.

이러한 수증기 개질 공정도 앞에 소개한 DCO(direct chemical oxidation) 기술이나 뒤에 소개할 MSO(molten salt oxidation) 공정과 같이 지난 수십년 동안 화학공학 산업 분야(석탄으로부터 합성가스의 생산)에서 이용되어 오던 상업화된 기술을 폐기물 처리기술에 응용한 것이라 볼 수 있다.

미국의 Synthetica Technologies 및 ThermoChem, Inc.이 미국 DOE(department of energy)의 혼성폐기물(mixed waste: hazardous and/or radioactive waste)을 처리하기 위한 steam reforming 공정을 개발하였다. Synthetica Technologies 사의 steam reforming plant인 synthetica detoxifier는 두 단계 공정으로 구성된다. 먼저 폐기물의 열분해 공정으로 폐기물의 특성에 따라 달리 적용되는 다음 4종류의 폐기물 투입 설비를 경유하여 300~600 °C의 고온 수증기 및 합성가스와 접촉하면서 폐기물 중의 유기물이 열분해 되고 휘발된다.

- drum feed evaporator : 드럼 포장된 폐기물 투입용
- moving bed evaporator : 슬러리나 할로젠화 탄화수소 및 질산화물 투입용
- heated shredder : 잡고체 폐기물을 투입용
- screw feeder : 오염도양의 처리용

각각의 폐기물 투입계통에서 휘발된 유기물질 및 부분적으로 개질된 배가스 들은 전기적으로 가열되어 1,100 °C 이상의 온도로 유지되는 고온의 수증기 개질로(steam reforming reactor)인 detoxifier로 공급된다. 수증기 개질 반응로에서 배출되는 배가스는 냉각된 후 입자상 물질의 제거장치, 산가스 제거장치 및 흡착층(adsorption bed)을 통과하면서 잔여 유기물, 중금속 및 산가스를 제거한 후 대기로 배출되게 된다. Thermochem이라는 촉매 산화기(catalytic oxidizer)를 통해 피(bleed)와 같은 생물학적 폐기물 등도 쉽게 분해되어 이산화탄소와 수증기로 전환된다. 배기가스의 일부는 다시 가열되어 폐기물 증발계통(feed evaporator)으로 환류된다. 이 공정을 개발한 Synthetica 사는 용매(solvent), 기름으로 오염된 천 조각이나 종이 및 방호복(protective clothing) 등을 8시간에 200-L drum을 처리하는 규모의 실증에 성공하였으며 폐기물의 감량 및 감용은 각각 99.7% 및 98%였다. 이 수증기 개질공정은 많은 에너지를 필요로 하는 공정이며, 1 ton/day 용량의 군용 화학제(military chemical agent)를 처리하는데 335 kW 용량의 전기적으로 가열되는 detoxifier가 필요하다고 한다.

Thermochem 사의 수증기 개질공정도 마찬가지로 두개의 큰 공정으로 구분된다(Fig. 2참조). 우선 폐기물의 종류에 따라 650~900 °C의 광범위한 온도범위로 간접적(전기적)으로 가열되어 유지되는 유

Table 6. Treatment rates of acid digestion

Chemical material	Temperature [°C]	Pressure [psig]	Rate [g/L-h]	Rate [kg/M ³ -h]
EDTA	140	0-5	142	142
Cellulose	150	0-5	95	95
Neoprene	165	0-5	50	50
Polystyrene resin	170	5-10	65	65
Polypropylene	180	10-15	35	35
Nitromethane	155	0-5	“fast”	similar to EDTA & cellulose

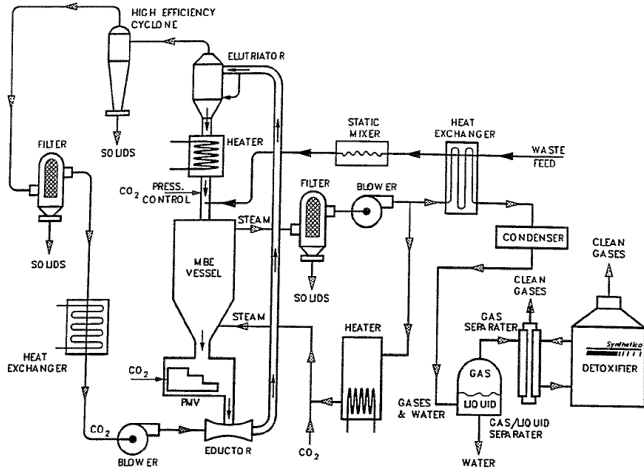


Fig. 2. Flow diagram of steam reforming process.

동층로에서 폐기물이 수증기와 반응하여 열분해 된다. 액체와 슬러리는 유동층 위로 분무되고 고형 폐기물은 7mm 직경 크기 정도로 분쇄되어 스크류 피더를 통해 유동층로 내부로 투입된다. 유동층로에서 발생하는 배기가스는 여과된 후 더 높은 온도의 2차 반응기에서 다시 개질 반응을 통해 완전히 분해된다. 2차 개질 반응기에서 나오는 배기가스는 분사 벤추리 세정기(ejector venturi scrubber)를 거치는데 이때 포함되어 있던 산가스와 입자상 물질이 세정되며 수증기도 응축, 제거된다. 세정된 합성가스는 열적 산화기(thermal oxidizer)에서 산화된 후 다시 냉각되어 대기로 배출되기 전에 충전탑(packed tower)이나 분무탑(spray tower)에서 다시 세정된다. 이 수증기 개질공정의 2차 폐기물에는 유동층 물질(fluidized bed material), 세정탑 슬러지(scrubber sludges) 및 오염된 차(contaminated char)가 있다.

농축폐액이나 순수한 유기폐액도 수증기 개질 공정으로 특별한 문제점 없이 처리할 수 있다. 특히 수용성 폐기물은 폐기물의 증발로나 유동층에서와 같은 1단계의 개질로에 자동적으로 수증기를 공급해주는 역할을 할 수 있다는 장점도 가지고 있다. 토양이나 슬러지 같은 물질들은 1단계의 개질로로 투입이나 가스와의 접촉과 관련된 몇가지 문제점을 가지고 있지만 일반적인 산업기술을 응용함으로써 쉽게 해결될 수 있을 것이다. 폐기물의 투입 및 1단계의 접촉방법에 따라 입자상 물질들을 취급할 수 있는 공정 장비가 추가되어야 할 필요성도 있다. 수증기 개질 공정은 가연성 잡초체 매질이나 유해성 유기물에 대한 감용처리효과는 소각과 비교될 수 없을 정도로 높다. 만약에 유기성 성분들이 비가연성 물질내에 포함되어 있어도 공정 수증기와와의 접촉에 의해 충분히 분해될 수 있다.

4-5. 기상 환원(gas phase reduction)[26, 27]

Eco logic process라고 불리는 기상환원 설비의 공정도를 Fig. 3에 나타내었다. 이 기술은 유해성 유기물을 증기화한 다음 전기적으로 가열되는 850~950 °C의 고온로에서 수소(> 50% dry basis)와 혼합하여 수소분해반응(hydrogenolysis)으로 폐기물을 완전히 분해시키는 공정이다[27]. 수소분해반응의 산물은 주로 메탄과 에틸렌이며 폐기물내 산소, 수분 및 할로겐의 함량에 따라 약간의 H₂O, CO, CO₂ 및 할로겐화 가스가 포함된다. 공정반응을 개시하기 위하여 “seed hydrogen”이 필요하며 정상상태 운전 중에는 수증기 개질로

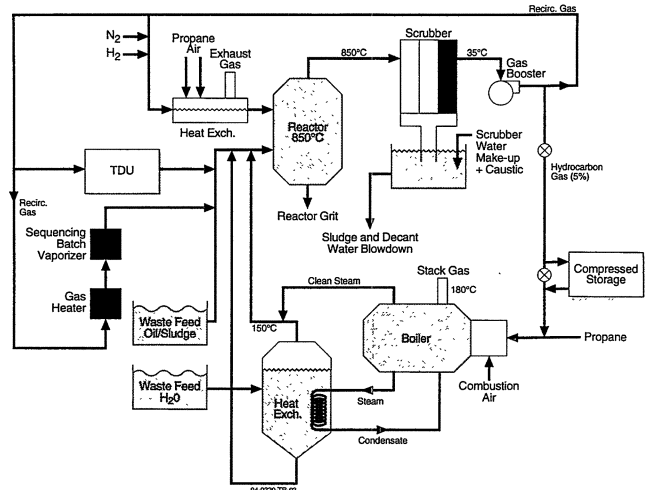


Fig. 3. Flow diagram of Eco logic process.

에서 다음 반응에 의해 수소분해반응 산물로부터 수소를 발생시킨다.



폐기물내 수분이나 첨가된 수증기로부터 water shift reaction에 의해서도 수소가 발생된다.



수소분해반응으로부터 생성되는 가스는 다음과 같은 다단계의 습식세정 장치에 의해 냉각되고 세정된다.

- 산성가스를 세정하기 위한 가성소다 분무 충전탑
- 벤젠이나 나프탈렌과 같은 고분자 탄화수소를 제거하기 위한 중성유(neutral oil) 세정장치 및
- 이산화탄소를 제거하기 위한 monoethanolamine(MEA) 세정기

탄화수소는 중성유에 흡수되어 수증기개질로(steam reformer)로 보내어져 분해된다. 이산화탄소는 MEA에서 흡수되고 일부는 대기로 배출된다. MEA에 의한 이산화탄소의 흡수는 개질반응과 water shift reaction이 원활하게 일어나도록 돕고 공정의 Boiler와 수증기 개질로 및 가스히터를 가열하는데 필요한 높은 열량의 가스를 발생시키기 위해 반드시 필요하다. 세정기를 지나는 기체는 주로 hydrogen(60%), light hydrocarbons(30%), carbon dioxide(8%), carbon monoxide(2%)와 benzene 및 naphthalene과 같은 미량의 고분자량 방향족 탄화수소가 포함된다. 환류에 필요한 양 이상의 가스는 공정장치의 가열을 위하여 압축, 저장되고 분석된다. Co-fired(propane/process gas) boiler에서 steam reformer 및 liquid waste evaporator에 필요한 공정가스가 발생되어 소각로의 경우와 같이 과잉의 공정 가스로서의 역할을 한다. 수소분해반응(hydrogenolysis reactions)은 기상에서 종료되어야 하기 때문에 많은 기술과 계통들이 주요 유기오염물질(principle organic contaminants; POCs)을 탈착하여 고온 반응로로 이동하기 위해 필요하다.

액상의 폐기물은 steam heated evaporator에서 증기화되어 hydrogenolysis reactor로 바로 이송된다. 농축된 유기액체 및 증발 농축액은 원자화노즐(atomizing nozzle)을 통해 hydrogenolysis reactor로 분사된다. 균일상 고체폐기물 매질내의 유기성분은 thermal

reduction mill(hot ball mill)이나 thermal desorption unit(molten tin bath)에서 탈착되거나 증기화된다. 덩치가 크거나 monolithic한 고체는 sequencing batch vaporizer(SBV)라고 불리는 insulated autoclave 같은 용기를 이용하여 증기화한다. 환류되는 product gas는 이와 같이 증기화된 가스상 물질들을 head-end system이라고 하는 폐기물의 증발계통으로부터 고온의 hydrogenolysis reactor로 이동시키는 carrier gas 역할을 한다. Purge gas는 gas fired 또는 전기히터(electric heaters)에서 가열되어 head-end 계통으로 이동된다.

SBV chamber들은 부분적으로는 전기에 의해 가열된다. Eco logic 공정은 이미 상업화되어 있으며 150 tons/day 용량으로 오염유기토양 및 기타 고체폐기물을, 수성폐기물에 대해서는 60 tons/day로, concentrated(100%) PCB liquids에 대해서는 30 tons/day 용량으로 운전되고 있다.

4-6. 용융염 산화(molten salt oxidation) [33-37]

용융염산화(molten salt oxidation, MSO)는 POPs 등의 유해유기물과 유해중금속을 함유하는 폐기물들을 비화염 산화반응(flameless oxidation reaction)을 통해서 분해함과 동시에 무기물질과 중금속물질을 용융염내에 체류하게 하는 장치로, 현재 다양한 유해성유기폐기물의 처리에 있어 소각을 대체할 수 있는 소각 대체기술(alternative to incineration technology)로 알려져 있다.

미국의 Rockwell International은 처음으로 용융염을 석탄가스화 공정에서 발생하는 SO₂ 가스에 대한 세정기(scrubber)로 사용하는 연구를 수행하므로 MSO의 응용성을 입증하였고, MSO가 PCBs (polychlorinated biphenyls), TBP(tributyl phosphate), 여러 가지 화학무기와 같은 유해물질의 분해에 매우 효과적이라는 것을 실험으로 증명하였다. 최근에는 특정 폐기물의 소각처리에 대한 문제점(중

금속배출, 염소계 물질의 처리에 대한 어려움, 다이옥신 배출문제 등)이 대두되면서, 소각을 대체할 수 있는 새로운 폐기물 처리방법에 대한 연구가 미국을 중심으로 세계적으로 이루어지고 있으며, 이러한 추세에 따라 MSO는 유력한 소각 대체기술(alternative to incineration)로 인정받아 미국에서는 LLNL(lowrence livermore national laboratory), ETEC(energy technology engineering center), ORNL(oak ridge national laboratory), LANL(los alamos national laboratory)등 여러 기관에서 많은 연구가 이루어져 왔다. DOE는 California의 Woodland Hill에서 MSO에 대한 peer review를 실시하여 소각과 비교한 MSO 공정의 장점 및 단점에 대한 논의를 하였으며, ETEC와 Rockwell International에서 연구한 연구결과를 가지고 기술평가를 수행한 결과 DOE에 보관되어 있는 다양한 종류의 유해성 폐기물 처리에 MSO가 적용될 수 가능성이 크다는 결론을 내렸다.

한국원자력연구원에서 개발한 이단 용융염 산화공정의 공정도를 Fig 4에 나타내었는데 이 공정은 PCBs를 포함하는 절연유와 이를 배출한 전기자재의 제염용 유기용제 등의 처리를 위해 개발된 공정이다. 이 MSO 공정은 화학적(chemical) 방법과 열적(thermal) 방법을 동시에 사용하여 폐기물을 처리하는 공정으로 MSO 공정에서 폐기물중의 유기물은 불꽃이 발생하지 않는 산화반응(flameless oxidation)을 통해 분해되어 CO₂, N₂ 그리고 H₂O로 전환되고, 할로젠이나 황과 같은 이종원자(heteroatom)들은 산가스로 전환된 후, NaCl이나 Na₂SO₄와 같은 형태로 용융염내에 포집된다. 한편, 산화분해가 불가능한 무기물질이나 중금속들은 금속 또는 산화물의 형태로 용융염내에 머무르게 된다.

용융염으로 Na₂CO₃만이 사용되었을 경우에 폐기물과 용융염과의 화학반응에 의한 유기물의 분해 및 독성물질의 근원인 할로젠원소의 포집은 다음의 반응에 의해 한꺼번에 이루어진다.

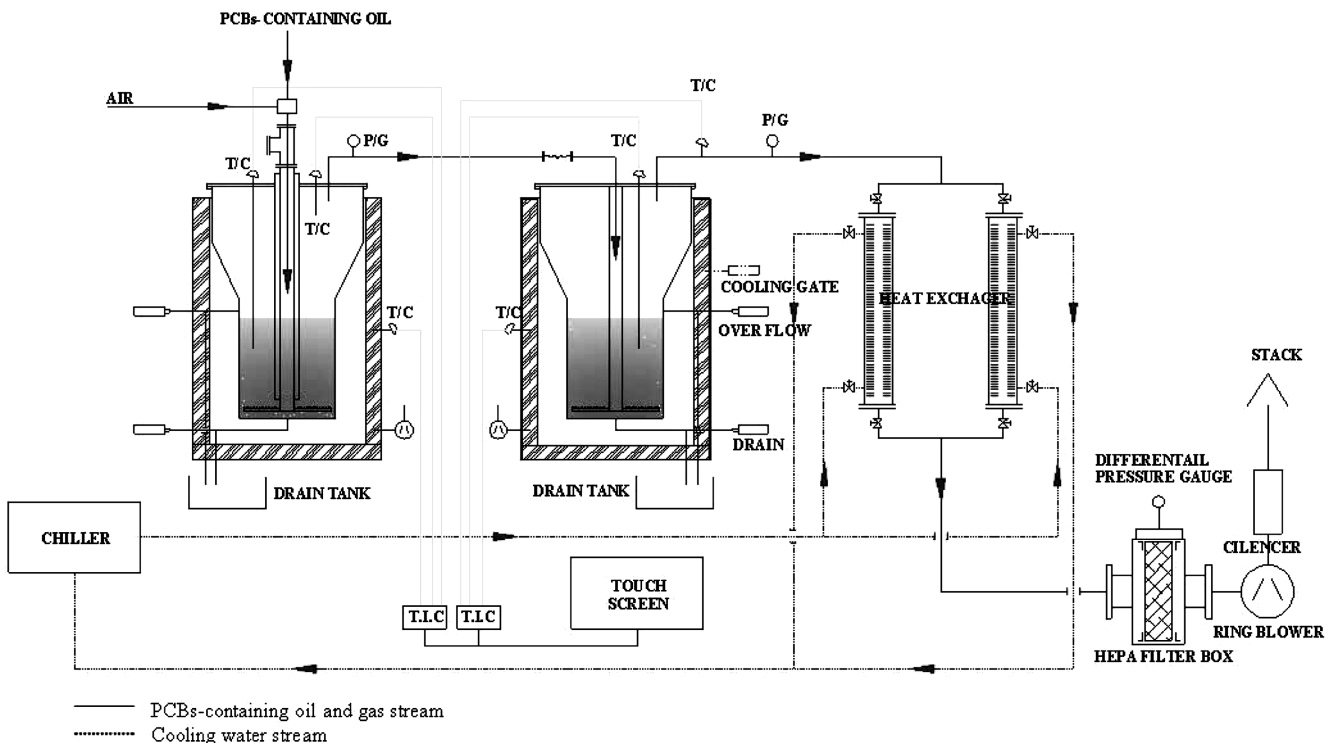
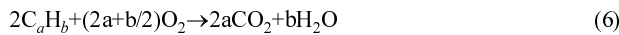


Fig. 4. Flow diagram of two-stage molten salt oxidation process.

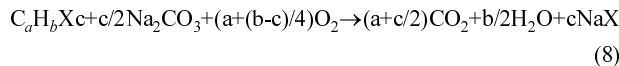
- 유기물질만을 포함하고 있는 폐기물



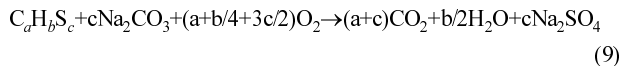
- 질소(N)를 포함하고 있는 유기폐기물



- 할로겐(X)을 포함하고 있는 유기폐기물



- 황(S)을 포함하고 있는 유기폐기물



이 용융염산화공정은 PCBs를 포함한 거의 모든 POPs에 대한 분해효율이 99.9999% 이상이며, 염화유기용매 등과 같은 할로겐화 폐기물의 분해시에 산 가스를 발생시키지 않는다. 최근에는 폭발성 폐기물도 안전하게 처리할 수 있는 것으로 평가되어 미 해군에서는 이 기술을 폐화약류를 처리하기 위해 실용화하였다.

5. 결 론

우리나라도 다이옥신 생성 등의 우려로 소각처리가 어려운 PCBs와 같은 POPs 함유 폐기물은 물론 PVC 등의 할로겐화 폐기물이 많이 발생되고 있다. 또한 반응성 및 폭발성 폐기물은 물론 혼성 폐기물과 병원성 폐기물과 같이 소각 대체공정의 적용이 필요한 폐기물들도 발생되고 있다. 본 기술동향 분석에서 소개한 기술들은 소각처리가 어려운 폐기물을 효과적으로 처리할 수 있는 기술들로서의 잠재적 가능성이 아주 큰 기술들이다. 소개한 대부분의 기술들은 각각이 개선해야 할 여러 가지 문제점들을 가지고 있지만 개개의 공정들이 지금까지의 소각이나 고온용융 등의 기술로는 여러 가지 이유에서 처리가 어려워 발생현장의 한 구석에 보관 중이던 폐기물들, 즉, PCBs와 같은 POPs 함유 폐기물이나 염화유기용매와 같은 고 할로겐화 폐기물, 폭발성 폐기물, 혼성 폐기물 및 병원성 폐기물과 같은 폐기물들의 처리에 적합한 기술들이므로 이들의 개선 및 실용화를 위한 투자가 필요하다고 판단된다.

참고문헌

- Schwinkendore, W. E., Musgrave, B. C. and Drake, R. N., Evaluation of Alternative Nonflame Oxidation Technologies for Destruction of Hazardous Organics Waste, INEL/EXT-97-00123, INEL(1997).
- Summary of Comparative Results, Integrated Nonthermal Treatment and Integrated Thermal Treatment Systems Studies, DOE/EM-0322, US DOE(1996).
- McGregor, D. B., Partensky, C., Wilbourn, J. and Rice, J. M., "An IARC Evaluation of Polychlorinated Dibenzo-p-dioxins and Polychlorinated Dibenzourans as Risk Factors in Human Carcinogenesis," *Environ. Health Perspect.*, **106**(2), 755-760(1998).
- Egeland, G., Sweeney, M., Fingerhut, M., Wille, K. and Schnoor, T., "Total Serum Testosterone and Gonadotropins in Workers Exposed to Dioxin," *Am. J. Epidemiol.*, **139**(3), 272-281(1994).
- Birnbaum, L., "Developmental Effects of Dioxins," *Environ. Health Perspect.*, **103**(7), 89-94(1995).
- Weisglas-Kuperus, N., "Neurodevelopmental, Immunological and Endocrinological Indices of Perinatal Human Exposure to PCBs and Dioxins," *Chemosphere*, **37**(9-12), 1845-1853(1998).
- Howard, C. V., *Particulate Aerosols, Incinerators and Health - Health Impacts of Waste Management Policies*, Kluwer Academic Publishers(2000).
- Schwinkendorf, W. E., Alternatives to Incineration Technical Area Status Report, DOE/MWIP-26, U. S. Department of Energy, Office of Technology Development, Washington DC(1995).
- Adu-Wasu, K., McCabe, D. J. and Wilmarth, W. R. Using Wet Air Oxidation Technology to Destroy Tetraphenylborate, WSRC-STI-2007-00176, Savana River National Laboratory(2007).
- Goldblat, S. and Patrick D., Engineering Development and Demonstration of DETOXSM Wet Oxidation for Mixed Waste Treatment, CONF-950216-56(1995).
- Elsberry, K. D. and Dhooge, P. M., Treating Contaminated Organics Using the DETOX Process, LA-UR-93-1206(1993).
- Lawrence Livermore National Laboratory Report, Direct Chemical Oxidation of Hazardous and Mixed Wastes, UCRL-JC-120141, March 28(1995).
- Cooper, J. F., Wang, F., Farmer, J., Adamson, M., King, K. and Krueger, R., "Direct Chemical Oxidation: Peroxydisulfate Destruction of Organic Wastes," Proceedings World Environmental Congress, International Conference and Trade Fair, Sept. 17, London Ontario(1995).
- Wang, F., Cooper, J. F., Farmer, J., Adamson, M. and Shell, T., "Destruction of ion Exchange Resins by wet Oxidation and by Direct Chemical Oxidation-a Comparison Study," Proceedings World Environmental Congress, International Conference and Trade Fair, London Ontario(1995).
- Cooper, J. F., Wang, F., Krueger, R., King, K., Farmer, J. C. and Adamson, M., Destruction of organic wastes by ammonium peroxydisulfate with electrolytic regeneration of the oxidant, UCRL-121979 Rev 1, LLNL Internal Report, September, LLNL(1995).
- Cooper, J. F., Krueger, R. and Farmer, J. C., "Destruction of VX by Aqueous-phase Oxidation Using Peroxydisulfate: Direct Chemical Oxidation," Proceedings Workshop on Advances in Alternative Demilitarization Technologies, 429(1995).
- Cooper, J. F., Wang, F., Krueger, R., King, K., Shell, T., Farmer, J. C. and Adamson, M., "Demonstration of Omnivorous Non-thermal Mixed Waste Treatment: Direct Chemical Oxidation Using Peroxydisulfate," UCRL-ID-123193(1996).
- Cooper, J. F., Wang, F., Shell, T. and King, K., "Destruction of 2,4,6-trinitrotoluene Using Ammonium Peroxydisulfate," UCRL-ID-124585, LLNL(1996).
- Cooper, J. F., Wang, F., Krueger, R. and King, K., "Destruction of Organic Wastes with Electrolytic Regeneration of the Oxidant," UCRL-JC-121979 rev. 2(1997).
- Smith, J. R., Air-Nitric Acid Destructive Oxidation of Organic Wastes, SRC-MS-93-169, Westinghouse Savannah River Corporation, Aiken, SC.(1993).
- Kornel, A., *Standard Handbook of Hazardous Waste Treatment and Disposal*, H.M. Freeman, editor, McGraw Co., New York (1989).
- Superfund Innovative Technology Evaluation Program Technology Profiles, EPA/540/R-93/526, Sixth Edition, U.S. EPA, Wash-

- ington, DC(1993).
23. Pittman, C. U. and Tabaei, S. M. H., "Dechlorination of PCBs and Pesticides with Strong Bases;" Proceedings of I&EC Special Symposium, American Chemical Society, Atlanta, GA, 27(1993).
 24. Kitchens, J. F., "Cleanup of Spilled Chlorinated Hydrocarbons with the LARC Process;" Proceeding of the 1984 Hazardous Material Spills Conference, 110(1984).
 25. Abramowicz, D. A., "Aerobic and Anaerobic Biodegradation of PCBs: A Review;" *Critical Reviews in Biotechnology*, **10**, 241-247(1990).
 26. Evans, G. M., Chemical Reduction of PCBs, EPA/542/N-93/005, EPA Tech Trends(1993).
 27. Gas Phase Chemical Reduction; Eco Logic International, Inc., EPA/540/MR-93/522, U. S. EPA Demonstration Bulletin(1993).
 28. Troxler, W. L., Goh, S. K. and Dicks, L. W. R., "Treatment of Pesticide-Contaminated Soils with Thermal Desorption Technologies;" *J. Air and Waste Management Association*, **43**(12), 1610-1619 (1993).
 29. Harwood, E., "Comparing Thermal Counter Flow and Parallel Flow Soil Remediation Process;" Proceeding of the 1992 Incineration Conference, Albuquerque, NM(1992).
 30. Roy, K. A., "Thermal Separation Process Removes Organics From Soils and Sludges;" Proceedings of Hazmat World, 57(1992).
 31. Palmer, C. R. and McElwee, M., "Successful Demonstration of the VAC*TRAX Thermal Desorption Process on Hazardous and Mixed Waste;" *Spectrum '94*, 16(1994).
 32. Low Temperature Thermal Treatment (LT³) Technology, Roy F. Weston, Inc., EPA/540/AR-89/019, Application Analysis Report, U.S. Environmental Protection Agency, Office of Research and Development, Washington, DC, December(1992).
 33. Hsu, P. C., Foster, K. G., Ford, T. D., Wallman, P. H., Watkins, B. E., Pruneda, C. O. and Adamson, M. G., "Treatment of Solid Wastes with Molten Salt Oxidation;" *Waste Management*, **20**, 363(2000).
 34. Lacchia, M. P., Shaw, B. D. and Megas, E., "High Speed Imaging of TATB- and HMX-Based Energetic Material Decomposition in Molten Salts;" *Expl. Prop. Pyrotech.* **25**, 19-25(2000).
 35. Pandeti, S. and Buckley, S. G., "Molten Salt Oxidation of Chlorobenzene;" *Combust. Sci. Technol.* **176**(2), 257-276(2004).
 36. U.S. EPA, Technical Resource Document Demonstrating Testing for Mixed Waste Thermal Treatment Technologies, Energy and Environmental Research Cooperation, Irvine, 8(2004).
 37. Yang, H. C., Cho, Y. J., Eun, H. C. and Kim, E. H., "Destruction of Chlorinated Organic Solvents in a Two-Stage Molten Salt Oxidation Reactor System;" *Chemical Engineering Science* in press, doi:10. 1016/J.ces. 2007.01.055(2007).
 38. Lightfoot, B. W., Robilliard, K. R. and Matuszewicz, R. W., "Ausmelt Submerged Lancing Technology for Smelting and Detoxification of Hazardous and Radioactive Waste;" Proceedings of 1992 Incineration Conference, Albuquerque, 771(1992).
 39. Voelker, G. E., Steedman, W. G. and Chandran, R. R., "Steam Reforming of Low Level Waste;" DOE/MC/32091-97/C0789 (1997).
 40. Gloyra, E. F. and Li, L., "Supercritical Water Oxidation: An Engineering Update;" *Waste Management*, **13**(5-7), 379-394(1993).
 41. Geimer, R., Batdorf, J. and Wolfe, P., "Test Results From the Demonstration of the Plasma Hearth Process;" Proceedings of the 1993 Incineration Conference, Knoxville, TN, 301(1993).
 42. Kinner, L. L., Manahan, S. E. and Larsen, D. W., "Gasification of Waste-Contaminated Soil by the ChemChar Process;" *J. Environmental Science and Health*, **A28**(3), 697(1993).
 43. Rosocha, L. A., "Two-stage Thermal/Nonthermal Waste Treatment Process;" Proceedings of the 1993 Incineration Conference, Knoxville, TN, 461-469(1993).
 44. Dalton, J. D. and Steverson, E. M., "Vitrification Treatability Study and Process Demonstration Capability Assessment;" DOE/MWIP-12(1994).
 45. EPA Applications Analysis Report, Retech, Inc. Plasma Centrifugal Furnace, EPA/540/A5-91/007, U.S. EPA, Risk Reduction Engineering Laboratory, Cincinnati, OH(1992).