

폐기물의 고품 연료화 기술



최 언 석

(KIMM 열유체환경연구부)

- '77-'84 부산대학교 화학기계과(학사)
- '84-'85 현대정공(주)
- '91-'92 부산대학교 화학공학과(석사)
- '86-현재 한국기계연구원 선임연구원



권 영 배

(KIMM 환경기계연구기획단)

- '61-'65 충남대학교 화학공학과(학사)
- '86-'90 충남대학교 화학공학과(박사)
- '79-현재 한국기계연구원 환경기계연구기획단장
- '96-현재 충남대학교 환경공학과 겸임교수
- '97-현재 한국폐기물학회 부회장

1. 서 론

인류가 환경문제에 대한 인식을 가지기 시작한 것은 1962년 Rachel Carson이 '침묵의 봄' (The Silent Spring)에서 공해문제의 심각성을 경고한 후 70년대 초반 로마클럽이 '성장의 한계' (The Limit of Growth)라는 보고서에서 자원의 고갈과 환경오염문제의 심각성을 경고하면서 부터 비롯되었다. 환경문제는 범지구적으로 인류가 지금까지 경험하지 못한 가장 심각한 위협이 되고 있으며 21세기는 '환경의 세기'가 될 것이라는 공감대가 세계적으로 폭넓게 형성되고 있다. 우리나라도 OECD에 가입하면서 환경권고에 따른 온실가스 저감문제, 유해폐기물 처리문제 등에서 많은 애로를 겪고 있으며, 특히 폐기물처리 문제는 NYMBY(Not In My Back Yard)와 NIMTO(Not In My Term Of Office)와 맞물려서 이미 심각한 사회적 문제가 되었다. 최근에 폐기물의 적정한 관리를 위해서는 폐기물의 배출량 억제와 재활용 촉진이 최우선의 과제로 인식되고 있고 자원절약, 환경보전의 측면에서 폐기물을 에너지 자원으로서 유효하게 이용할 수 있는 각종 방법들에 대해 관심이 높아지고 있다. 폐기물 소각시설에 있어서 발전·열이용은 대표적인 에너지 유효이용 기술의 하나이지만, 비교적 대규모 소각시설에 한정되고, 또한 열이용에 있어서 수요-공급의 불균형이 문제로 지적되고 있다. 앞으로 폐기물의 유효이용을 비약적으로 증진시키기 위해서는 현 기술의 개혁 및 새로운 기술의 개발이 필요하며, 후자에 속하는 유망한 기술로서 폐기물의 고품연료(refuse derived

fuel : 이하RDF)기술이 대두되고 있다. RDF는 수분과 불연물을 제거하고 남은 가연물을 조개탄과 같이 사용하기 쉬운 형상으로 성형한 폐기물고형연료로서 화석연료의 대체 에너지로 이용되어질 수 있을 뿐만 아니라 수송성과 저장성이 뛰어나 폐기물에너지의 이용 및 장소에 대한 자유도가 넓어지는 장점이 있다.

RDF에 관한 연구개발은 미국, 일본 등의 선진 외국에 있어서는 이미 30년전 부터 진행되어 왔으며 현재는 발전, 지역난방등에 널리 사용되고 있다. 그러나 우리나라는 외국의 기술을 사전평가 및 조사도 없이 무분별하게 도입하거나, 소규모의 민간기술로 몇번 시도해본 사례가 있으나 기술적 문제로 거의 실패하였다. RDF는 다종다양하며, 불균질한 폐기물을 원료로 하고 있으며, 또한 폐기물의 성상은 나라마다 다르기 때문에 외국의 연구사례, 프로세스를 그대로 우리나라의 폐기물에 적용하는 것은 대단히 어렵다. 따라서

우리나라의 폐기물에 맞는 적절한 프로세스의 개발이 절대로 필요하고, 아울러 RDF 생산시설을 유효하게 운영하기 위해서는 적절한 프로세스 개발과 함께 기술적, 사회공학적, 경제적 측면에서 정량적으로 평가하여 실용화를 위한 방안을 모색하는 것도 중요한 과제이다.

2. RDF 기술 개요

함수율이 높은 일반폐기물을 RDF화하는 공정은 제작사에 따라 다소 차이는 있지만 일반적으로 다음과 같은 선별, 파쇄, 건조, 성형공정으로 구성된다.

- 선별공정 : 원료로 사용되는 폐기물을 RDF 생산에 알맞게 하고, 또한 사용목적에 지장을 주지 않도록 유리, 금속등의 불연물을 풍력이나 자력 혹은 인력으로 선별하는 공정

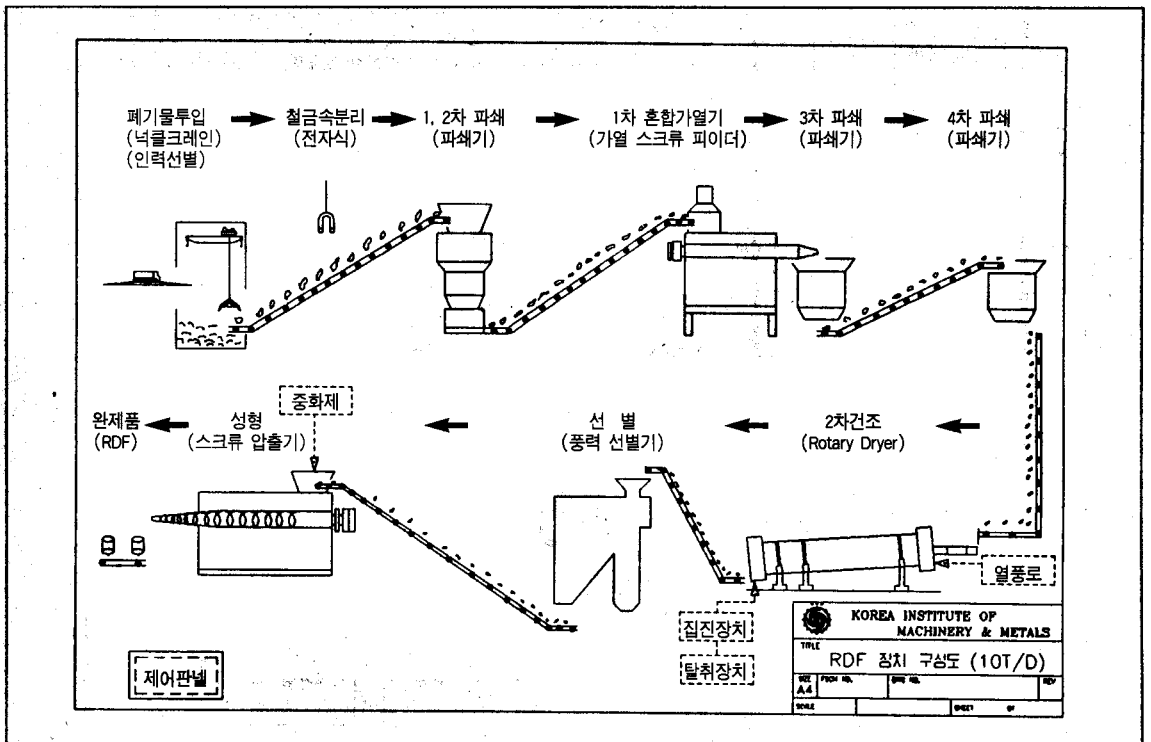


그림 1. RDF제조공정도^[1]

- 파쇄공정 : 건조와 성형이 잘 될수 있도록 원료의 크기를 균일하고 작게 파쇄 혹은 분쇄하는 공정
- 건조공정 : 열풍과 같은 고온의 열원으로 원료를 가열하여 원료속의 수분을 증발시키는 공정
- 성형공정 : 가연물질을 사용하기 위해서 이동하거나 저장하기 편리한 형태로 성형하는 최종 단계

일반적으로 RDF의 질을 높이기 위해서 부분공정을 2중 또는 3중으로 반복하는 경우가 많으며 제작사에 따라서는 공정순서를 다르게 변경하기도 한다.

그림 1과 그림 2에 RDF 제조공정의 예와 여

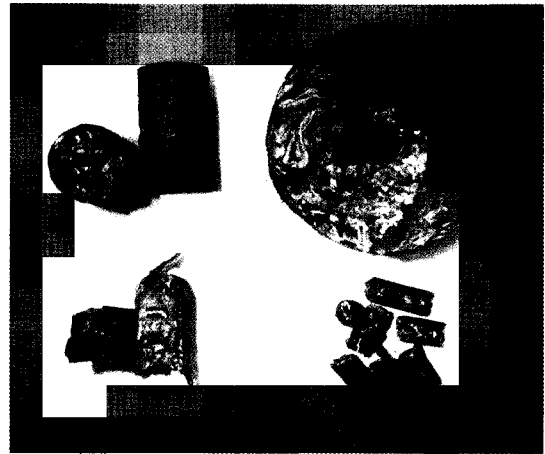


그림 2. 여러가지 성형RDF^[1]

러 형상의 RDF모습을 각각 나타내었다.

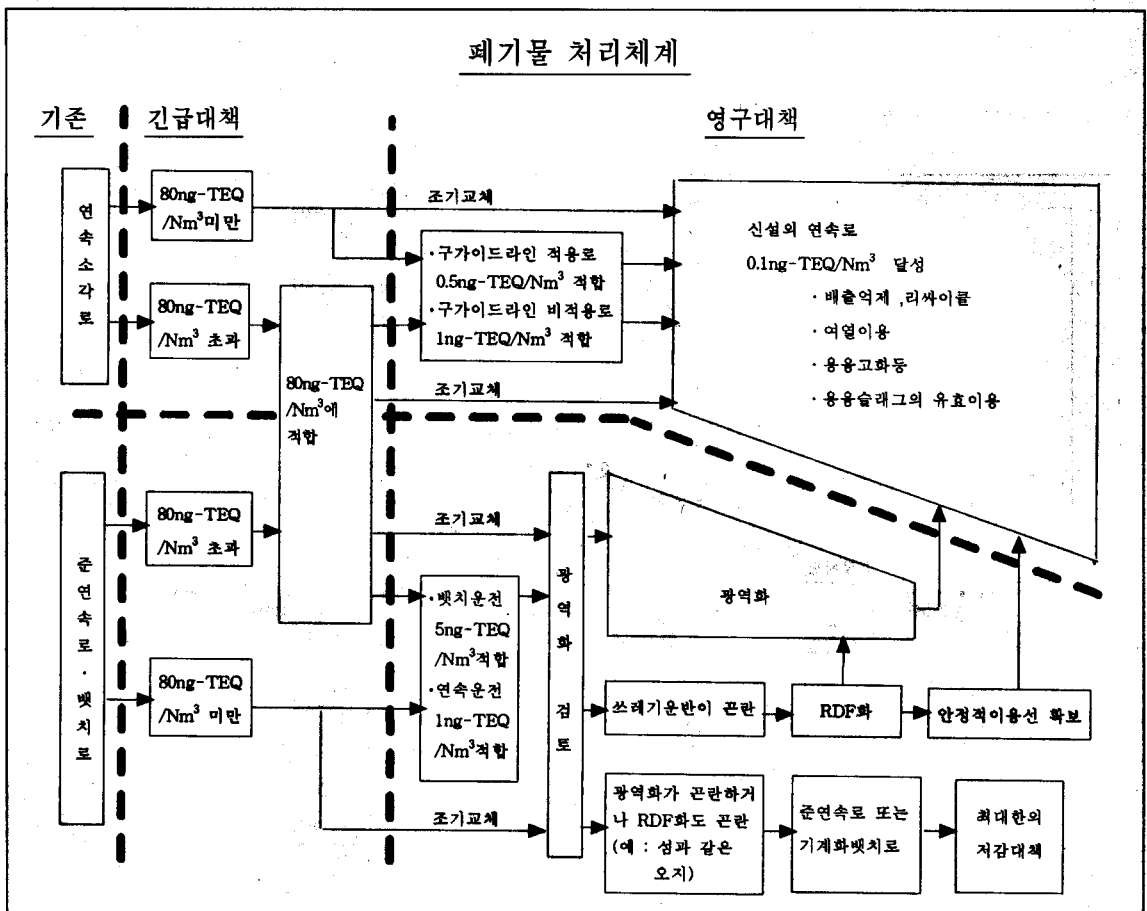


그림 3. 일본의 폐기물처리 지침도

3. RDF 현황 및 동향

3.1 일본의 기술동향

일본은 현재 일반폐기물이 연간 약 5천만톤정도로 배출되고 있는데 소각율 75%와 매립 15%정도로 폐기물을 처리하고 있다. 최근에 중소도시의 중소형 소각로에서 배출되는 다이옥신이 사회적으로 심각한 문제가 되고있어서 그림 3과 같은 새로운 폐기물처리지침을 시행하고 있다.^[2]

후처리장치가 잘 설치된 대형소각로는 상대적으로 다이옥신 문제의 심각성이 적지만 주로 중소지방자치단체에 설치된 중소형 소각로는 배출되는 폐기물의 발생량이 한정되어 있으므로 연속운전이 어렵고, 따라서 운전시작과 정지과정같은 비정상조업이 빈번함에 따라 다이옥신 배출문제가 심각하므로 일본의 후생성은 그림 3과 같은 폐기물처리 광역화정책을 수립하였고 지자체별 사정에 맞게 대형소각이나 RDF화를 도입하도록 하고 있다. 일본의 RDF기술은 크게 RMJ방식과 카트렐방식의 2종류로 나눌수 있는데 건조공정의 순서와 첨가제의 종류를 달리하고 있고 나머지는 유사한 공정으로 구성되어 있는데, 건조후 성형을 하고 소석회를 첨가하는 RMJ방식이 실용화플랜트에 더 많이 적용되는

것으로 나타나고 있다. 현재 일본에서 가동중인 RDF시설은 약 40여곳이며 대표적인 RDF시설은 표 1과 같다. 일본의 RDF사업은 후생성의 신규지침시행 이후 매우 활발한 움직임을 보이고 있는데, 예를 들면 '97년 6월에는 RDF발전사업을 추진하기로 결정한 미에현을 중심으로 결성된 「RDF화 전국자치체회의」에 76개 지방자치단체가 이미 참가하였고 12월에는 동경가스사를 비롯한 31개의 유력기업이 「RDF/M 포럼」을 설립하여 RDF/M(Refuse Derived Fuel/Material) 보급촉진에 박차를 가하고 있다.^{[3][4]} 일본 정부도 폐기물 소각시설에만 지원하였던 폐기물처리시설 국고보조금을 1994년 토야마현 난토 리싸이클센터의 RDF시설부터 국고보조지원시설로 결정하였고 현재는 100톤/일 이하의 시설은 RDF시설을 권장하고 있으며 일본의 에너지기술개발중심기관인 NEDO(New Energy and Industrial Technology Development Organization)에서도 RDF발전기술의 개발을 중요과제로 지원하고 있다.^[3] 또한 히타치, 가와사키, 수미토모, 미쓰비시 등 대기업이 RDF기술 선발주자인 토오요넨키사 등의 중소기업과 합작하거나 자체개발에 박차를 가하고 있어서 향후 일본에서 RDF기술의 보급은 급속히 증가할것으로 예상된다.

표 1. 일본의 RDF플랜트 현황

사업주체	명칭 및 소재지	단계 가동	완성년월	처리능력	용도		개요	비고 플랜트업체
					이용	이용대상		
북해도	삿포로시 환경국 청소부 (공장운영 삿포로시 환경사업공사)	삿포로시 쓰레기자원화 공장, 삿포로시	가동 '90. 4 가동	15t/hr (200t/d)	지역 냉난방, 급탕	호텔, 병원, 펄프 공장	<ul style="list-style-type: none"> 원료 : 자원쓰레기 (건설계 폐기물인 파레트, 나무상자, 나무조각, 골판지를 포함) 종이조각, 연질페플라스틱 나무 : 종이 : 페플라스틱의 혼합 비율은 5 : 4 : 1(40mm, L100mm로 성형) 처리능력 200t/일(13시간 운전), 발열량 4,500kcal/kg 北海道열공급공사의 専用焼却으로 150t/일 사용 외 	극동개발(주) 栗本鐵工所(주)
	富良野市	농업폐기물 처리시설, 富良野市 山部	가동 '88. 7 가동	1t/hr	온방 급탕 온실	사업소, 학교	<ul style="list-style-type: none"> 농촌지역축진대책사업건으로서 (감용, 재생처리) 가정쓰레기(종이)와 폐필름을 원료로한 고형연료화 공공시설의 보일러 	중도기계(주)

	사업주체	명칭 및 소재지	단계 가동	완성 년월	처리능력	용 도		개 요	비 고 플랜트업체
						이용	이용대상		
후쿠시마현	(株)板田 工務店 福島支店	福島縣 葉郡大熊町	가동	'93. 2 가동	12t/hr (6,000 t/년)	열원	공공 시설, 민간 기업	<ul style="list-style-type: none"> 일반폐기물계 페플라스틱처리 (지바현松戶시 불연쓰레기) 크리닝공장 보일러의 열원으로 서 이용 	연료플랜트, (사)일본 리사이클 마네지먼트 크리닝 플랜트, 동경세척 기계제작소
도지끼현	(주)일본 리사이클 마네지먼트	野木 所	가동	'92. 11 가동	10t/일	열원	공공 시설, 민간 기업	<ul style="list-style-type: none"> 원료 : 생활쓰레기 (생쓰레기는 폐기때문에 수분이 적다) 처리량 : 약 10t/일(1,250kg/h) 콤포스트라인 병행 발열량 : 5,000kcal/kg (φ15mm) (2t/일) 	(주)일본 리사이클 마네지먼트
군마현	(주)關商店	群馬縣 關林	가동	'91. 7 가동	40t/일	(주)紅三足 利工場 : 染物工場의 보일러 연료	<ul style="list-style-type: none"> 산폐플라스틱계 80%, 종이류 20% 전주상태 직경30mm×길이50~70mm 발열량 : 6,000~7,000 kcal/kg 	(주)시나넨, 御池鐵工所, 호우라이 보일러 : 타쿠마	
	邑樂郡 板倉町	板倉町 자원화센터	건설중	'97. 3	20(t/7h)	열원	공공 시설	<ul style="list-style-type: none"> 가정쓰레기중의 가연물을 주체 생쓰레기의 콤포스트화 시설(3t/일)을 병용 ('95년 4월 국고보조) 	(주)일본 리사이클 마네지먼트, (주)地域計劃室
시즈오카현	御殿場市 小山町 廣역 행정조합	쓰레기 고형연료화 시설, 小山町 桑木	착공 '95 /10	'98. 3 예정	150(t/일)	열원	御殿場시 내 민간 기업	<ul style="list-style-type: none"> 원료 : 생활쓰레기(생쓰레기를 포함한 가연쓰레기) <실시설계완료 '95년 3월, 수주액 약 80억엔> <보조 : 착공 '95년 10월~'98년 3월> 	荏原製作所, 후지타, 三菱商社
후쿠이현	(주)武生環境 保全	福井縣 武生市	가동	'90. 6 가동	0.5 t/hr (100t/월)	열원	판로 개척 중	<ul style="list-style-type: none"> 산폐(페플라스틱)처리(페플라스틱, 폐지, 커피 찌꺼기, 복사토너) 전주상태 직경 10mm×길이20~40 발열량 : 6,000~7,000kcal/kg 	(주)일본 리사이클 마네지먼트
토야마현	廣역권 사무조합서부지역(福光町, 城端町, 井口村 2町1村)	남방 리사이클 센터, 福光町 立野原	가동	'88. 4 준공 '95. 6 완공	28(t/7h)	냉온 방열원	공공 시설 (리사이클 시설, 복지 시설, 중학교)	<ul style="list-style-type: none"> 원료 : 생활쓰레기 (생쓰레기를 포함한 가연쓰레기) 이용지 : 남방리사이클센터내 냉온방, 용융, 소설 복지시설의 난방용, 신설중학교의 냉온방 온수플장용 등으로 검토 	국고보조 제1호 플랜트 플랜트 : (주)일본 리사이클 마네지먼트 설계시공 감리 : (주)地域

	사업주체	명칭 및 소재지	단계 기종	완성 년월	처리능력	용도		개요	비고 플랜트업체
						이용	이용대상		
사 가 현	愛知郡 廣域行政組合	湖東리조날 리 사이클플라자, 湖東町	건설중	'97. 3	22(t/7h)	열원	공공 시설	• 원료: 생활쓰레기 (생쓰레기를 포함한 가연쓰레기) ('95년 4월 국고보조)	計劃室 지도: 환경계획센터
	(주)일본마네지먼트	榛原 사업소, 榛原町大字 萩原	가동	'90. 11	125kg/h (8t/d)			• 원료: 榛原町の 생활쓰레기 • 전주형태: 직경 10mm×길이 20~40mm • 발열량: 약 4,250 Kcal/kg	(주)東洋燃機(현재의 일본리사이클마네지먼트)
오 오 이 타 현	津久見市 J카트렐 실증 프로세스	공동연구, 津久見市	실증 실험 종결	'93. 11 ~ '94. 11 종결	20t/일	시멘트용 원료	산업용 열원·시멘트원료	• 수집도시쓰레기 • 오오이타현津久見시: '93년 11월부터 실증 • 小野田시멘트(주)에서 시멘트원료, 연료로의 이용을 시험	津久見市(주)小野田 시멘트, (주)임원제작소
	津久見市 (건설공사중)	津久見市	건설중	'95.2 ~ '96.12	32t/일	상동	상동	• 수집도시쓰레기	共同企業體:(주)荏原製作所, (주)후지타, 三菱商社

3.2 미국의 기술동향

미국의 RDF기술은 유럽에서 전파되어 발전원의 하나로 급속히 기술개발을 이루어 액·가스 처리를 동반한 RDF 전용소각플랜트가 개발되어 현재에는 많은 RDF설비가 설치되어 있다. 미국의 RDF 발전배경에는 폐기물의 수분이 적고 가연분이 많기 때문에 발열량이 높고 RDF의 시장성 및 유통시스템이 잘 확립되어 있기 때문이다. 1972년부터 St. Louis시에서 설계용량 300t/d급 RDF공장이 최초로 가동한 이후, 1975년에 가동하기 시작하여 현재까지 이르는 가장 오래된

RDF공장인 Ames시의 200t/d급을 비롯한 30여 개의 수백톤급 대형 RDF시설이 건설되었고 Rochester시의 설계용량 2,000t/d급 초대형 RDF 시설도 건설되었다. 이들중에서 Ames와 Baltimore, Madison시등 다수의 RDF시설이 잘 가동되고 있으나 Haverhill등의 RDF시설은 중지하였는데 이들은 기술적 문제보다는 경제성 문제때문으로 알려져 있어 RDF는 수요처와 관계되는 주변여건도 중요한 요소로 작용하고 있음을 알수있다. 미국의 RDF는 표 2와 같이 ASTM에서 c-RDF(coarse), f-RDF(fine), d-RDF(densified)등을 1번부터 7번까지로 나누어

표 2. ASTM에 따른 RDF제품의 분류

분 류	제 조 방 법
RDF-1	폐기물로 배출된 상태의 것
RDF-2	폐기물을 파쇄하여 6인치 메시스크린을 중량비로 95%통과하는 것(coarse-RDF)
RDF-3	폐기물을 분쇄하여 금속, 유리, 기타의 유기물을 선별한 것으로서 2인치 메시스크린을 중량비로 95%통과하는 것(fine-RDF)
RDF-4	폐기물을 분쇄가공하여 10메시스크린(2mm)을 중량비로 95%통과하는 것(Powder-RDF)
RDF-5	폐기물을 분쇄한 후 펠렛, 큐브, 조개탄모양으로 압축한 것(densified-RDF)
RDF-6	폐기물을 액상 연료로 가공한 것
RDF-7	폐기물을 기체 연료로 가공한 것

표 3. 미국의 RDF 플랜트 가동현황

위 치	년 도	용량(ton/D)	용 도
San Marcos, Calif.	1989	1600	발전
Hartford, Conn.	1983	2000	발전
Wilmington, Del.	1984	1000	발전
Dade County, Fla.	1982	3000	발전
Dade County, Fla.	1988	600	시멘트소성
Lakeland, Fla.	1981	300	발전
West Palm Beach, Fla.	1990	2000	발전
Honolulu, Hawaii	1989	2800	발전
Ames, Iowa	1975	200	발전
Bangor, Maine	1988	800	발전
Biddeford, Maine	1987	700	발전
Lawrence, Mass.	1985	1300	발전
Rochester, Mass.	1988	1800	발전
Weymouth, Mass.	1991	300	발전
Baltimore County, Md.	1978	1200	발전
Detroit, Mich.	1989	3300	발전
Duluth, Minn.	1985	400	증기생산
Elk River Falls, Minn.	1989	1500	병합발전
Newport, Minn.	1987	1000	발전
Reuter, Minn.	1987	400	성형RDF 판매
Thief River Falls, Minn.	1985	80	성형RDF 판매
Reno, Nev.	1988	1000	병합발전
Albany, N.Y.	1982	750	지역난방
Niagra Falls, N.Y.	1981	2200	병합발전
Akron, Ohio	1978	1000	지역난방
Columbus, Ohio	1983	2000	발전
Oklahoma City, Okla.	1990	1000	발전
Portland, Ore.	1991	1200	발전
Portsmouth, Va.	1988	2000	증기생산
Tacoma, Wash.	1988	500	지역난방
Tacoma, Wash.	1988	300	발전
La Crosse, Wisc.	1988	400	발전
Madison, Wisc.	1979	400	발전

규격화하고 있을 정도로 높은 수준이다.

생산된 RDF는 대부분 석탄화력발전소에서 석탄과 혼합하여 전력생산용 연소연료로 사용하고 있으며 최근에는 RDF사용시의 배연가스 특성연구와 대기오염방지를 위해 grate의 개선이나 석회투입기술등을 개발하고 있다.

캐나다에서도 RDF시설을 10여년전부터 가동하고 있으며 NITEP(the National Incinerator Testing and Evaluation Program)를 미국 EPA와 공동으로 착수하여 1984년부터 5년간 RDF시설에서의 환경영향을 조사하는등 RDF기술에 많은 관심을 갖고 있다.^{[5]-[10]}

3.3 유럽의 기술동향

유럽의 RDF기술은 유럽이 발상지이지만 전부 폐기물의 중간처리시설로서 소각처리시설의 고도기술이 발달되어와서 폐기물이 가지고 있는 열에너지는 소각로에서의 여열이용개념이 정착되어있기 때문에 RDF에 관한 관심이 낮다. 그러나 장래의 에너지 공급이 불안정하기 때문에 최근에 RDF가 새로이 인식되고 있다. 차후에는 EC를 중심으로 한 RDF의 시장개발 및 RDF연소의 유해가스 규제 등에 대한 것이 과제로 되고 있다.^[11] 유럽에도 20여곳의 RDF 플랜트가 건설되어 가동중인 것으로 알려져 있으며 대표

적인 곳을 표 4.에 나타내었다.

3.4 한국의 RDF정책 및 기술동향

현재 국내에서는 실용화된 RDF플랜트가 없으며 과거에 몇번의 시도가 있었으나 실패하였다.

1983년부터 1988년까지 서울 난지도 매립장에 1,500t/d규모의 대형RDF시설을 덴마크 I. Kruger사로부터 도입하였으나 국내와 유럽폐기물성상의 차이점, 분리수거의 중요성등에 관한 사전 조사가 없이 무분별하게 도입하여 기술적 이유로 실패하였다. 또한 1991년 청주에서 국내기업기술로 200m³/d급 RDF시설을 건설한 바 있으나 단위공정별 수지 불균형과 처리용량부족, 부실운영등으로 역시 폐기하였다. 연구실적으로는 '90년대 초반에 국책과제로 폐목재와 폐PE Film을 혼합한 RDF를 제작하고 연소성능을 실험한 연구사례가 있고, 함수율이 높은 음식폐기물이 포함된 일반 가정폐기물을 대상으로 한 RDF기술의 연구는 국책과제로 한국기계연구원에서 1996년부터 처음으로 시작하였다. 각 나라마다 폐기물의 성상에 차이가 있으므로 폐기물처리와 관련되는 기술은 자체의 기술개발이 가장 중요하고 외국기술은 부분적으로 응용가능한 부분만 신중하게 검토해서 도입하는 것이 바람직하다.

표 4. 유럽의 RDF플랜트

지역명(시설명)/국가	용량(ton/d)	설치시기	내용	폐기물종류	제조사
Byker(Reclamntion Plant)/영국	240	1980	열이용, 석탄보일러혼소	도시폐기물 powder RDF	Warren사
Herten Rhur/독일	1,000	1982	열이용, 석탄보일러혼소	도시폐기물 pellet RDF	Combustion사
Kovik/스웨덴	240	1981	열이용, 석탄보일러혼소	도시폐기물 pellet RDF	PLM사
Moudon/스위스	200	1988	열이용, 석탄보일러혼소	도시폐기물 pellet RDF	Catrel사
페르기아/이태리	-	1977	열이용	도시폐기물	-
Yerres et Serart/프랑스	150	1977	열이용	도시폐기물	-

4. RDF의 특성

4.1 일반특성

RDF의 특성은 환경 및 에너지의 두가지 측면에서 살펴볼수 있는데 환경특성으로는 대략 폐기물처리측면상의 특성, 대기오염특성, 기타 잔류물특성으로 나눌수 있고 에너지특성으로는 연소특성, 건설비 및 유지관리비, 자원화특성으로 나눌수 있다.

4.1.1 환경적 측면에서의 RDF특성

가. 폐기물처리상의 특성

- 가연성 폐기물이 선별, 파쇄, 건조, 성형공정을 거치므로 균일하고 견고한 제품특성을 갖게 되고 고품연료로서 이용이 가능하다.

- 소각처리 시설에 비교해서 건설비가 저렴하고 유지관리가 용이하다.

- 시설의 건설에 있어서 주민과 합의가 쉽다. 고품연료화 시설은 선별, 파쇄, 건조, 성형공정으로 구성되는데 건조시 증유 또는 등유의 연소에 따른 열풍이 필요하지만, 배연가스는 문제가 없다. 또 리사이클 시설로써 지역을 대표하는 시설이 되기 때문에 지역의 이미지향상에 유리하다.

- 폐기물 고품연료화에 따라서 모든 가연성 폐기물이 연료로 바뀌고, 열원으로 재이용하는 것이 가능하기 때문에 유효이용성이 높다. 또 고품연료를 사용함에 따른 자원(석유, 석탄)의 절약도 된다.

- 주민의 관심이 높아지므로 폐기물 처리에 관한 계몽이 용이하고 각종 폐기물 처리 대책에 관한 이해를 구하기 쉽다.

- 폐기물 처리 시스템의 측면에서 보면 고품연료를 사용함으로써 비로소 처리가 완료된다.

따라서 사용처 및 사용량등이 장기적으로 안정되는 것이 필요하며 자치단체의 공공복지시설 등에서 사용하는 방법등을 고려해볼만 하다.

나. 대기오염 물질의 발생 및 방지대책

- 발열량의 변동이 적으므로 완전연소(CO농도 : 100ppm이하) 및 연소로내 온도의 관리가 용이하다.

- 염화수소 발생농도가 낮다. 염화비닐수지등 유기염소재질의 대형제품이 고품연료화의 인력선별 공정에서 대강 제거되고, 또한 소석회를 첨가시키므로 발생농도가 낮다.

- 다이옥신의 발생농도가 낮다. (4.2절 참조)

- 연료중의 수분이 10%이하이므로 배연가스중의 수분이 적어서 백연방지의 대책이 필요없다.

- 일반적으로 중금속류의 염화물은 증기압이 높아서 휘발하기 쉽다. 고품연료화 공정에서 대형의 염화비닐류가 제거되고 소석회도 첨가되므로 중금속류의 염화물이 적게 생성되므로 비산이 적다.

- 연료 전용 연소보일러에서의 배연발생농도가 낮기 때문에 집진장치의 부담이 경감된다.

다. 기타 특성

- 연소재는 불연물이 미리 제거되므로 잔재량이 10%이하가 되며 또 비산재의 발생량도 고품화 된 연료이기 때문에 적게 발생한다.

- 연소재 속에 중금속의 용출량이 적고 비산재에는 염소계 플라스틱제거를 위한 소석회등이 첨가되어 있으므로 휘산하기쉬운 중금속염화물의 생성을 억제하는 것이 가능하다.

- 완전연소를 하기 때문에 소각재중의 미연물은 매우 적다.

4.1.2 에너지측면에서의 RDF특성

가. 연소특성

- 연소가 안정적이다. 제조공정에서 불연물이 미리 제거되고, 작게 파쇄된 다음에 혼합, 압축, 성형되므로 조성이연성분이 균일하여 발열량이 거의 4,000~4,500Kcal/Kg 정도의 연료가 된다. 발열량이 일정하므로 연소에 필요한 공기량이

표 5. RDF발열량 시험결과^[1]

		크 기	재 료	발열량(cal/g)
한국(KIMM)		외경 13cm 내경 2.5cm	MSW	4533.6
일본(H시설)		외경 1cm	MSW	4121.8
미국	(원통)	φ 4.5cm	종이, 플라스틱	4281.3
	(정방형)	3×3cm	종이류	3510.8
독일		φ 7cm	목재	4403.2

일정하고, 또한 연료의 모양이 거의 일정하므로 열전도도도 균일하다. 표 5는 당 연구원에서 개발한 RDF를 비롯해서 여러나라의 RDF샘플을 수집하여 당연구원에서 bomb calorimeter로 측정된 발열량을 나타내고 있다. 폐기물의 조성에 따라 다소 발열량이 달라질수 있으나 대체로 균일한 값을 나타내고 있음을 알수 있다.

< 특징 >

- 크기와 모양이 거의 균일하다.
- 불연물은 인력선별, 자력선별, 풍력선별로 제거된다.
- 염화비닐계 플라스틱을 대강 제거할수 있다.
- 폐기물 고형연료화 건조과정에서 함수율은 10%이하가 된다.
- 파쇄, 분쇄물이 혼합, 교반되므로 고형연료의 조성이 거의 균일하다.

나. 자원화의 특성

- 열에너지의 회수효율이 높다. RDF의 연소시 열발생은 다음의 이유로 높고 안정하다.
- 열회수율 목적으로 한 전용보일러를 이용하므로 열회수효율이 높다.
- RDF화 과정에서 건조, 파쇄, 혼합등으로 수분이 10%이하이고 조성이 균일하므로 발열량이 거의 일정하다.
- 압축성형에 따라서 RDF의 형상이 균일하므로 열전도등이 변화가 적어서 연소성이 매우 좋다.
- 열이용의 범위가 넓다.

- RDF의 운반, 보관이 용이하고 필요한 장소와 필요한 시기에 열이용이 가능하다.
- 열이용의 형태에 적합한 전용보일러를 선택함에 따라서 열이용범위가 넓다.
- 기존의 석탄보일러등에서 이용이 가능하다.
- 발전이용에서는 석탄 화력발전소등에서 석탄과 혼소가 가능하다.

< 사례 >

- 학교, 호텔, 병원, 사무실등의 냉난방 및 급탕
- 화초, 야채, 과일등의 하우스난방
- 청소업 및 식품업의 급탕
- 제지공장, 시멘트제조업, 석회제조업, 제철소의 보조연료
- RDF발전시스템과 일반폐기물 소각발전시스템에서의 발전효율을 비교해서 조사한 연구에 의하면 동일 폐기물량으로 발전해서 송전가능한 전기량이 RDF발전의 경우가 소각발전에 비해 약 2.6배정도 효율이 높은 것으로 보고하고 있다.^[12] 실제로 일본의 미에현에서는 RDF발전사업을 「지방공영 기업경영활성화사업」으로 결정하여 수익사업으로서의 타당성조사를 마쳤고 전국규모의 「RDF화 전국자치체회의」를 결성하였으며 토치기현, 이바라키현등을 비롯한 많은 지자체가 RDF사업을 결정하였다. 또한 북큐우시에서 제3섹터인 전원개발사의 주도로 20~30 Mw급의 RDF발전소를 준공하고 시험가동 중에 있다.^[13]
- 중소 지방자치단체에 설치된 중소형소각로

는 배출되는 폐기물의 발생량이 한정되어 있으므로 연속운전이 어렵고, 따라서 지속적으로 안정적인 에너지공급을 할수 없으므로 폐열의 이용은 실질적으로 거의 이루어지지않고 있다. 반면에 RDF는 아무리 소량의 폐기물이라도 고품 연료화해서 필요시, 필요한 장소에서 연료자원으로 사용이 가능하다.

다. 건설비 및 유지관리비

- RDF시설은 인력선별공정, 파쇄선별공정, 건조공정 및 압축성형공정으로 구성되는데 이중에서 연소설비는 건조용 열풍발생로 뿐이고 또한 배연가스 중의 대기오염 물질의 농도가 낮기 때문에 높은 굴뚝 및 고도의 공해방지 설비가 필요없다. 또한 설비도 단순하고 비교적 소형이기 때문에 건물도 작고, 기계설비등도 저렴하다. 따라서 같은 규모의 폐기물 소각처리시설과 비교해서 설비비는 상당히 저렴하다. 그런데 폐기물 처리의 관점에서 보면, RDF를 연소해야만 비로소 폐기물처리가 완료되는 것이므로 RDF전용 보일러의 건설비도 고려해야 하지만, 기존의 석탄보일러를 이용하거나 발전소와 같은 대형 RDF사용시설을 건설해서 여러곳에서 만들어진 RDF를 일괄처리하는 광역화정책으로 원가를 낮출수 있다.

- 폐기물 1t당 RDF처리 비용(운전관리비)은 소각처리시설보다도 높은 경향이 있지만 고체연료로 판매하거나 에너지회수율을 높임으로써 비용을 절감할수 있다.

RDF기술은 현재까지는 보급이 적게 되어 있고 따라서 상대적으로 기술발전의 폭이 좁았지만 앞으로 관심이 고조됨에따라 많은 기술의 발전이 가능할것으로 예상된다.

4.2 RDF와 다이옥신

최근에 폐기물소각로에서의 다이옥신배출이 심각한 문제가 되고 있으므로 여기서 RDF와 다

이옥신과의 관계를 별도로 살펴보고자 한다.

일반소각로에서 다이옥신 생성과 관계되는 폐기물중의 성분에는 다이옥신생성 기원물질인 PVC, PCB등의 유기염소계화합물과 불완전연소를 유발하는 수분, 그리고 비산재에 함유되어 다이옥신 생성에 촉매역할을 하는 Cu, Fe등의 금속성분이 있다. 즉, PVC등의 열분해시 생성되는 클로로포름, 클로로페놀과 같은 다이옥신 전구물질이 미연탄소(soot)와 같은 비산재의 표면에서 Cu, Fe에 의한 촉매반응으로 최종적으로 다이옥신이 생성되는 'De-novo synthesis'라고 불리는 화학반응 과정이 소각로에서 가장 중요한 다이옥신 생성경로로 알려져있다. 그러나 RDF는 연소될 때 상대적으로 다이옥신생성이 매우 적은 것으로 알려져 있는데 이것과 관련되는 De-novo synthesis 인자들을 항목별로 살펴보면 다음과 같다.

4.2.1 다이옥신 생성인자

가. 폐기물 성상

폐기물 수분함량은 다이옥신의 배출에 강한 상관성을 보이는데, 이는 수분과 과잉공기(혹은 산소농도)가 화염온도를 결정하는 주요인이기 때문이고, 수분함량이 높으면 온도와 산소농도 모두가 떨어지는 경향을 보이므로 궁극적으로는 효과적인 연소를 달성할 수 없게 된다. 또한 병, 깡통등과 같은 불연물의 혼입량이 일정하지 않으면 전체적인 폐기물 성상이 일정하지 않게되고 따라서 연소발열량이 불안정하기 때문에 연소환경에 불안정한 변화를 가져오게된다. 이 경우에 소각로는 제어의 어려움을 가져오고 그 결과 불완전연소가 일어나 다이옥신의 생성을 조장하게 된다. 특히 기계화배치로에서 폐기물소각시 다이옥신 농도변화는 측정상한값과 하한값의 차이가 7배나 되는 연구결과도 있어서 다이옥신 발생억제를 위한 연소제어가 매우 어려움을 알수 있다. 그러나 RDF는 그림 1에서 보듯이 수분을 제거하는 건조공정과 불연물을 제거하는 선

별공정을 거쳐서 제조되어 불완전연소요인이 사전에 제거되므로 연소시 다이옥신생성량이 크게 줄어든다.

나. 연소조건

다이옥신이 생성되지않도록 하기 위해서는 완전연소를 위한 온도, 혼합, 체류시간의 3T조건이 중요한데 이를 위해서 유럽공동체 지침에는 850℃ 이상의 온도(Temperature), 소각로형상 개선과 2차공기주입에 의한 난류개선(Turbulence), 체류시간 2초(Time)를 요구하고 있다. 이렇게 함으로써 클로로포름과 같은 다이옥신 전구물질의 생성방지와 비잔재인 미연탄소를 줄일수 있기 때문이다. RDF는 수분이 10%이하이므로 연소시 연소실내부 전체가 고온분위기가 되고, 둘째로 RDF는 동일한 형상으로 성형되어 있어서 연소실내로 투입되면 일반폐기물과 달리 일정한 공극이 형성되므로 연소공기의 흐름이 원활하여 가연성분과의 혼합이 균일해지며, 셋째로 연소실 내에서 RDF로부터 기화되어 나오는 가연가스의 분포가 균일하여 부분적 불균일이 존재하는 일반소각로와 비교할 때 동일한 연소실 체적으로도 충분한 체류효과를 갖는다.

다. 배가스상태

폐기물속의 염소원중에서 NaCl과 같은 무기염 보다는 반응성이 좋은 HCl이나 Cl₂가 다이옥신 생성에 더 중요한 역할을 하는데 PVC가 열분해되면서 HCl이 생성되는 경로가 특히 중요한 것으로 알려져 있다. RDF연소배가스중에는 첨가제로 사용되는 석회성분에 의해 HCl성분이 CaCl₂형태로 중화되어 없어지므로 원천적으로 다이옥신의 생성량이 적어진다. 또한 배가스중에 CO와 다이옥신은 상호관계가 있다는 연구도 있어서 일본은 CO농도를 50ppm이하로 권장하고 있다. CO는 불완전연소시 다량 발생하므로 연소제어가 용이한 RDF가 다이옥신저감에 매우 유리하다.

라. 조업상태

폐기물소각시 운전시작과 정지과정에서는 비정상조업상태가 되어 다량의 다이옥신이 발생하는 것으로 알려져 있어서 가능한한 연속운전을 하는 것과 비정상조업시간의 단축이 매우 중요하다. 그러나 RDF는 연료비(고정탄소/휘발분)가 0.12-0.19정도로 휘발분이 매우 많아서 연소하기가 쉽고 점화온도도 230℃ 정도로 낮기 때문에 RDF연소로의 가동시작부터 정상온도 도달까지의 시간이 짧다. 따라서 다이옥신이 발생하기 쉬운 비정상조업시간이 짧아지며 또한 정지시에도 RDF는 함수율이 10%이하이므로 소화시간이 짧아져 비정상조업시간이 단축된다.

마. 연소실형상

일반적으로 폐기물을 소각시킬 때 연소실 공간내부에서의 가스혼합이나 열전달분포와 같은 연소조건이 불균일하면 다이옥신이 생성되므로 균일한 연소조건을 만들기 위해서는 배연가스의 유동에 관한 유체역학적 거동을 최대한 고려해서 설계하지 않으면 안되는 어려움이 있다. 그러나 RDF는 전술한 바와 같이 휘발분이 많고 수분이 적어서 양호한 연소조건을 가지고 있으므로 연소실의 형상에 영향을 적게 받는다.

이상의 내용과 관련된 다이옥신생성 영향인자를 정리하면 표 6.과 같다.

4.2.2 RDF연소시 다이옥신 농도

표 7은 일본에서 실제로 3개현의 일반생활폐기물로 생산한 RDF를 연소시킬 때 배출되는 다이옥신농도를 3회시험하여 측정된 평균값이다.

위의 연구는 백필터에서의 다이옥신 제거율이 평균 93.1%로 보고하고 있으며, 특히 위 표에서 No. 1 실험의 결과 등가독성이 강한 4염화물의 제거율이 80%이하로 나타나서 No. 2와 No. 3 실험에서는 백필터전단에 단순한 공냉관을 설치하였고 그 결과 4염화물의 제거율이 97%로 개선되었다고 보고하고 있다. 상기 실험에 사용한 연

소로는 150kg/hr급 스토카식 연소로로서 후처리 장치는 싸이클론과 백필터만을 부착하였다. 또 다른 연구보고서는 130kg/hr급의 순환유동층 연소로를 이용해서 RDF연소실험을 하였는데 그 결과는 표 8과 같다.

위의 연소로는 후처리시설로 백필터만 설치하

표 6. 다이옥신류 생성의 영향인자^[14]

구 분	영 향 인 자
쓰레기	쓰레기의 질
	쓰레기의 성상
연소조건	로내 온도
	로내 체류시간
	쓰레기와 공기의 혼합
배기가스상태	배출되는 비산회재의 양 및 조성
	수분함유량
	산소농도
	일산화탄소농도
조업상태	연소성분에 대한 황의 비율
	소각로 가동개시
	조업중단
	소각로의 노후화 정도
	운전상태
연소실험상	방지시설의 운전조건
	연소실의 모양과 구조

표 7. 스토카식 연소로에서의 RDF연소시 다이옥신류 농도^[15]

시 험	CO농도변화 (ppm)	평균 (ppm)	다이옥신류농도(ng-TEQ/Nm ³)	
			백필터 입구	백필터 출구
No. 1	31-76	54	12	2.0
No. 2	25-84	51	15	0.2
No. 3	0-59	15	11.9	0.002

표 8. 순환유동층 연소로에서 RDF연소시 다이옥신류 농도^[16]

시 험		단 위	A	B	C	D	F
연소방식			외부순환	내부순환	외부순환	내부순환	내부순환
연 료			카트렐RDF	카트렐RDF	RMJ-RDF	RMJ-RDF	카트렐RDF + 석탄 20%
다이옥신류 농도	백필터 입구	(ng-TEQ/Nm ³) (O ₂ =12%)	0.59	11.05	0.38	4.61	5.96
	백필터 출구		0.013	-	0.008	0.18	0.2

고 있으며 앞서 언급한 연구와 거의 같은 결과를 보이고 있다. 특히 외부순환 유동층연소로가 RDF연소에 좋은 성능을 나타내고 있는 것은 주목할 만한 사실이다.

일본의 생활폐기물 성상은 우리나라의 생활폐기물 성상과 가장 비슷하므로 위의 연구결과들은 현재 다이옥신이 심각한 사회문제가 되고 있는 우리나라에서 좋은 참고자료가 된다고 할수 있겠다.

5. 맺는말

이상의 내용을 정리하면

- RDF는 근원적으로 다이옥신발생이 적으며, 발생된 다이옥신도 간단한 오염방지시설로 처리할수 있다.
- RDF는 발열량이 높고 연소성이 뛰어나며 2차오염이 적기 때문에 경제성있는 대체에너지로 사용할수 있다.
- 폐기물처리의 관점에서 보면 RDF는 소각시켜서 감량화가 끝나야 처리가 완료되는 것이므로 넓은 의미의 소각처리법에 속하지만, 2차오염이 적고 소량의 폐기물에너지도 전부 회수가 가능한 장점이 있다. 따라서 뱃치식 소각에 의한 2차 환경오염문제와 소각폐열 에너지의 이용이 거의 불가능한 중소도시의 폐기물처리시설로 RDF가 매우 적합하다.
- 폐기물성상이 우리나라와 가장 비슷한 일본의 경우 다이옥신해결정책으로서 100t/d 이상의 연속식소각로 및 100t/d 이하의 폐기물 처리시설은 RDF시설에만 국고보조금을 지

원하는 폐기물처리 광역화정책을 시행하고 있으므로 우리나라도 폐기물처리광역화정책을 적극 검토해볼 필요가 있다.

석유도입에 많은 외화를 지출하고 있고, 부존 자원이 부족한 우리나라로서는 폐기물에너지에 많은 관심을 가지고 기술개발에 힘써야 하며 아울러 환경친화적인 기술의 개발이 동시에 이루어져야 하는데, 환경과 에너지 양측면에서 모두 만족할수 있는 RDF기술은 좋은 폐기물처리기술로 평가되며 앞으로 기술의 개발과 보급을 적극적으로 추진할 필요가 있다.

참 고 문 헌

- [1] 최연석, 권영배 외, '도시폐기물의 고품연료화 장치개발에 관한 연구', 통상산업부 보고서, 1997.
- [2] 平岡正勝 外, 'ごみ處理に係るダイオキシン類發生防止等ガイドライン'ごみ處理に係るダイオキシン削減對策檢討會, 1997.
- [3] 週刊 エネルギーと環境, No. 1457, 1997.
- [4] 週刊 エネルギーと環境, No. 1477, 1997.
- [5] H.D.Ege Jr., 'RDF co-firing with coal in utility boilers', FACT- 41, 17, ASME, 1993.
- [6] N.G.Lassahn Jr. 'Cofiring of refuse derived fuel and coal at the C.P.Crane power plant', Air Pollution Control Association, 1985.
- [7] David L.Sokol, 'Refuse Derived Fuel versus Mass-Burn technology', Ogden Martin's Haverhill/Lawrence, Massachusetts project, Aiche symposium vol. 84, No. 265, 1988.
- [8] A.W.Joensen, et al, 'Performance of the grate-modified suspension fired boiler at Ames, Iowa while burning RDF and coal mixtures', EPRI WS 79-225, 1980.
- [9] Robert E. Sommerlad, et al, 'Environmental Characterization of RDF incinerator technology', Aiche, 1988.
- [10] Oscar O. Ohlsson, 'A review of Refuse-Derived Fuel(RDF) facilities : design considerations and opportunities', US DOE Report conf- 8904197-1, 1989.
- [11] L.Bonfanti, et al, 'Evaluation of PCDD/PCDF emission from the combustion of RDF with coal', Chemosphere, Vol. 20
- [12] 平岡正勝 外, '發電用 燃料としての RDF適合性等 調査', ISERGE 資料 No. 14, 1995.
- [13] 日本經濟新聞, 1997. 07. 15
- [14] 다이옥신 핸드북, 한국과학기술연구원 환경연구센터, 동화기술, 1996.
- [15] 鍵谷 司, 'ごみ固形燃料に関する調査研究シリーズ(6)' 環境の計劃, Vol. 5, No. 3, 1994.
- [16] 平岡正勝 外, 'RDF利用發電に関する事業化可能性 調査', ISERGE 資料 No. 13, 1995.
- [17] 金贏載, '都市ごみ固形燃料生産に関する研究', 학위논문, 1994.
- [18] 佐勝 健二, 'RDF の燃焼', 燃焼研究 104, p 29-52, 日本燃焼學會