

# 폐기물 고체연료화 기술의 필요성과 현황

한국에너지기술연구소 폐기물연구팀

신 대 현

## 요 약

우리 나라의 '97년도 폐기물 발생량은 6,900만 톤에 달했으며, 이중 30% 정도가 가연성 폐기물이다. 가연성 폐기물은 전통적으로 매립과 소각에 의해 처리되어 왔으나 그와 같은 처리방식으로 인한 환경공해의 발생으로 인해 사회적 갈등이 증폭되어 왔고, 이에 따라서 폐기물의 처리는 각 지방자치단체들의 가장 큰 난제로 대두되었다.

가연성 폐기물은 부패성이라는 특징으로 인하여 불연성 폐기물에 비하여 환경오염 유발의 정도가 훨씬 심각하지만 재활용 측면에서 보면 에너지자원의 보고라고 평가된다. 폐기물을 에너지로 사용하는 기술은 크게 소각, 고체연료화 및 열분해(오일화 또는 가스화)로 구분된다. 소각기술은 에너지회수보다는 감량처리가 주목적이고 열분해기술은 고분자 폐기물에 한정된 기술이라고 볼 수 있다.

본 논문에서는 국내의 폐기물 발생 및 처리현황, 매립 및 소각처리에 따르는 문제점, 그리고 가연성 폐기물처리에 적합한 성향고체연료기술 및 그의 국내의 현황 등을 소개하였다.

## 1. 서 론

불연성 폐기물은 무기질 자원으로 활용하는 것이 바람직하지만 매립으로 처리하더라도 그에 따른 환경 문제가 크게 발생되지 않는다. 그러나 가연성 폐기물은 부패하여 토양과 지하수 오염, 악취 및 온실가스 발생 등 다양한 환경오염을 유발하기 때문에 환경부에서도 폐기물 처리방식을 매립에서 소각으로 전환하는 계획을 수립하여 추진 중에 있다. 그러나 가연성 폐기물의 소각처리에도 공해물질의 발생과 에너지자원의 낭비라는 문제가 따른다. 즉, 가연성 폐기물은 양질의 재활용 자원이다. 폐합성수지류, 폐지, 폐목재 등은 발열량이 매우 높으므로 에너지 자원으로 활용이 가능하며, 축산용 사료를 대부분 수입에 의존하고 있는 우리 입장에서는 음식쓰레기도 훌륭한 사료용 원료임이 틀림없다. 또한 폐기물의 적절한 자원으로의 활용은 에너지 절약과 매립지에서의 온실가스 발생방지 등의 측면에서 기후변화협약에 따른 이산화탄소 저감요구에 부응할 수 있는 방안으로 평가된다.

여기서는 국내의 폐기물 발생 및 처리현황과 그에 따른 문제점을 살펴보고, 가연성 폐기물의 에너지 잠재량과 이를 활용할 경우에 대한 에너지 절약효과를 분석하였으며, 가연성 폐기물을 성형 고체연료화 하는 기술에 대하여 국내외 현황을 요약 정리하였다.

## II. 폐기물의 고체연료화 기술의 필요성

### 1. 폐기물의 발생 및 처리 현황[1]

< 표 1 >은 94년도 이후 우리 나라의 폐기물 발생량 변화추이를 발생원별로 나타낸 것이다. 가장 최근의 통계인 '97년도의 발생량은 매일 약 19만 톤의 폐기물이 발생하였고, 2001년에는 하루 22만톤에 달할 것으로 추정되고 있다.

생활 폐기물의 경우는 점차 감소하는 추세이고 사업장 폐기물은 증가하는 경향을 보였으며, 건설폐기물의 크게 증가하여 총 폐기물 발생량의 증가를 주도하고 있음을 알 수 있다. '97년도의 경우, 사업장 폐기물의 발생량이 49.4%로 거의 절반을 차지하고 있으며, 생활계 폐기물과 건설폐기물이 각각 25%정도씩을 차지하고 있다.

< 표 1 > 우리 나라의 폐기물 발생량 변화추이

( 단위 : 톤/일 )

구 분		'94	'95	'96	'97
총 계	발생량	143,347	143,597	175,334	189,200
	증감(%)	20.6	0.2	22.1	7.9
생활계 폐기물	발생량	58,118	47,774	49,925	47,895
	증감(%)	▽ 7.7	▽ 17.8	4.5	▽ 4.1
사업장 폐기물 (배출시설계)	발생량	73,389	83,148	96,984	93,528
	증감(%)	31.1	13.3	16.6	▽ 3.6
건설 폐기물	발생량	11,840	12,675	28,425	47,777
	증감(%)	-	7.1	124.3	68.1

< 표 2 >는 '97년도 가연성 폐기물의 정상별 발생량을 보인 것이다. 가연성 폐기물의 전체 발생량의 약 39%를 차지하며, 이중 고체연료로 활용이 가능한 종이, 나무, 합성수지류는 연간 약 600만 톤에 이르며, 생활계 폐기물중 합성수지류는 기타로 분류되었고, 재활용품 중에 상당부분을 차지하는 플라스틱류의 85%정도가 재활용되지 못하고 소각처리되는 것을 감안하면 고체연료로 활용할 수 있는 폐기물은 700 - 800만 톤에 이를 것으로 추정된다.

가연성 폐기물 중에 수분을 80%이상 차지하여 그의 처리가 매우 어려운 오니류와 음식물 쓰레기의 발생량이 54% 이상을 차지하여 이의 처리도 매우 심각한 사안임을 알 수 있다.

< 표 2 > 가연성 폐기물의 정상별 발생량('97)

구분	총발생량	가연성 폐기물						재활용품	불연성 폐기물
		종이류	나무류	합성수지류	음식물 또는 오니류	동물성 잔재물	기타		
생활계폐기물	47,895	6,057	1,905	3,349	13,063 (음식물)	-	4,365	12,481	6,675
사업장배출시설계폐기물	93,528	966	892	3,474	19,703 (오니)	1,929	887	-	65,677
건설폐기물	47,777	455	1,848	811	-	-	678	-	43,985
계 (천톤/년)	189,200 (69,058)	7,478 (2,729)	4,645 (1,695)	7,634 (2,786)	32,766 (11,960)	1,929 (704)	5,930 (2,164)	12,481 (4,556)	116,337 (42,463)

< 표 3 >은 '97년도의 가연성 폐기물에 대한 처리현황이다. 가연성 폐기물의 처리방법은 크게 매립, 소각 및 재활용으로 나눈다. 표에서 볼 수 있듯이 매립이 58.4%로 대부분을 차지하고 있고, 소각 16.8%, 재활용이 24.8%를 차지하고 있다. 고체연료화가 가능한 종이류, 나무류 및 합성수지류는 전체의 약 33%를 차지하지만 약 15.6%만이 재활용되고 84.4%가 매립이나 소각처리되고 있는 실정이다. 음식쓰레기나 오니류 및 동물성 잔재물은 수분이 80 - 90%로 매우 높기 때문에 소각보다는 가축 사료화나 비료로 재활용하는 것이 바람직하고, 그 외의 재활용이 불가능한 가연성 폐기물은 연료로 가공하여 산업체의 대체연료로 활용하는 것이 바람직하다고 할 수 있다.

환경부의 자료에 따르면 생활폐기물의 재활용(23.7%)이나 소각처리율(4.0%)은 폐기물의 발생량 증가로 인해 상대적으로 점차 낮아지게 되는 것으로 예상하고 있다. 재활용이

나 소각비율을 높이기 위한 계획을 수립하여 추진중이며, 그 세부 실천목표는 다음의 < 표 4 >와 같다. 생활폐기물의 경우는 2001년도까지 재활용과 소각율을 35%와 20%까지 높이고 매립율은 45%까지 낮추는 것을 목표로 하고 있다. 또한 산업일반폐기물의 경우도 매립율을 '95년도 32.5%에서 2001년도에는 20%까지 낮추는 것을 목표로 하고 있다 [2].

< 표 3 > 국내 가연성 폐기물의 처리현황 (1997년도)

( 단위 : 톤/일 )

구분	종류	종류							
		음식물 채소류	종이류	나무류	폐합성 수지	오니	동물성 잔재물	기타	계
매립	생활폐기물	10,974	4,947	1,391	2,809	-	-	3,797	23,918
	사업장일반폐기물	-	76	75	678	8,428	197	559	10,013
	건설폐기물	-	160	572	271	-	-	289	1,292
	소계 (%)	10,974	5,183	2,038	3,758	8,428	197	4,645	35,223 (58.4)
소각	생활폐기물	815	1,036	445	502	-	-	543	3,341
	사업장일반폐기물	-	299	521	1,680	2,542	192	168	5,402
	건설폐기물	-	130	691	410	-	-	186	1,417
	소계 (%)	815	1,465	1,657	2,592	2,542	192	897	10,160 (16.8)
재활용	생활폐기물	1,275	74	69	59	-	-	35	1,512
	사업장일반폐기물	-	592	295	1,107	8,734	1,207	505	12,440
	건설폐기물	-	166	586	130	-	-	130	1,012
	소계 (%)	1,275	832	950	1,296	8,734	1,207	665	14,959 (24.8)
총 처리량 (%)		13,064 (21.7)	7,479 (12.4)	4,645 (7.7)	7,646 (12.7)	19,699 (32.6)	1,596 (2.6)	6,207 (10.3)	60,336 (100)

## 2. 매립 및 소각처리의 문제점

앞에서도 언급하였듯이 가연성 폐기물을 매립 처리하는 데는 크게 세 가지의 사회적 문제가 야기된다. 그 첫째는 NIMBY 현상에 따른 매립장 확보의 어려움이고, 둘째는 매

< 표 4 > 환경부의 사업장폐기물 관리 목표[2]

생활 폐기물				
구분	단위	1995	1998	2001
관리구조		.	.	.
●재활용	%	23.7	30.0	35.0
●소각	%	4.0	15.0	20.0
●매립	%	72.3	55.0	45.0
(위생매립)	%	(65.7)	(85.0)	(100.0)
사업장 폐기물				
구분	단위	1995	1998	2001
관리구조		.	.	.
●재활용	%	61.2	65.0	68.0
●소각	%	6.3	10.0	12.0
●매립	%	32.5	25.0	20.0

「녹색환경의 나라」 건설을 위한 국내 폐기물 관리 종합대책

립장에서의 환경오염 발생이며, 셋째는 자원의 낭비를 들 수 있다.

세계적으로 폐기물의 위생적인 처리가 시작된 것은 그리 오래 전의 일이 아니다. <표 5>는 폐기물 처리방법의 변천과정을 보인 것이다[3]. 이와 같은 변화는 매립처리에 따르는 환경오염 문제의 발생을 줄이고, 폐기물을 최대한 자원으로 재활용하는데 연유한 것이라고 볼 수 있다. 현대사회에서 폐기물의 발생은 필연적이라고 볼 때, 발생을 최대한 억제하는 것이 최선의 방법이지만 우리가 궁극적으로 추구하는 처리 방식은 발생된 폐기물을 최대한 자원화하고 중간처리과정을 거쳐 감량화함으로써 매립량을 최소화하는 것이라고 볼 수 있다.

매립장에서 발생하는 환경오염문제로는 침출수에 의한 토양 및 지하수의 오염, 폐기물이 부패되어 발생하는 악취 및 지구온난화 가스의 발생을 들 수 있다. 폐기물을 매립하면 음식물쓰레기나오니류, 동물성 잔재물은 쉽게 부패되면서, 자체의 수분과 땅속으로 스며드는 우수 등과 함께 지하수를 오염시킨다. 또한, 부패과정에서 유기물들은 악취와 함께 이산화탄소(CO<sub>2</sub>) 및 메탄가스(CH<sub>4</sub>)를 대량으로 발생시킨다.

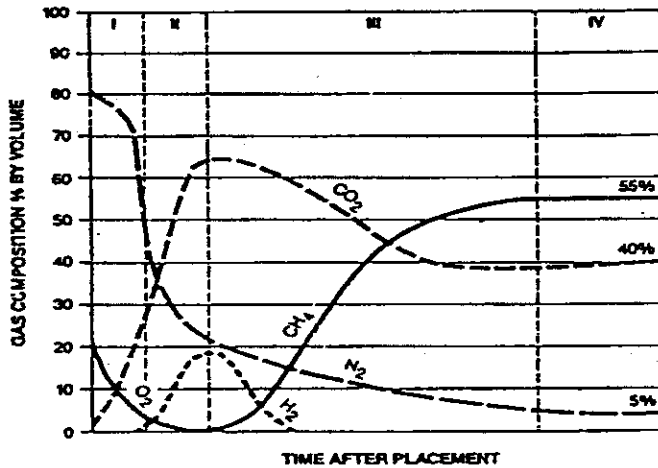
[그림 1]은 매립지에서 발생하는 매립지 가스(Land Fill Gas : LFG)의 경과시간에 따른 조성변화를 보인 것이다. 매립 초기 즉 호기성 분해기(I)에는 주로 질소가스(N<sub>2</sub>)가 발생되지만 혐기성 비메탄 생성기(II)에는 CO<sub>2</sub>의 발생이 급격히 증가하고, 불안정한 혐기성 메탄 생성기(III)에는 CO<sub>2</sub>의 감소와 함께 메탄가스의 발생이 크게 늘어난다. 그리고

< 표 5 > 폐기물 처리방식의 변천과정

시 대	폐기물 처리 과정
농경 사회	폐기물의 발생이 거의 없는 자연순환 시스템
산업혁명 이후	폐기물 ————— 단순매립
70년대	폐기물 ————— 중간처리 (소각) ————— 단순매립
80년대	폐기물 → 자원화 → 중간처리 (소각) → 위생매립
90년대	발생원 규제 → 폐기물 → 자원화 → 중간처리 → 위생매립 → 부지 자원화

마지막 단계인 안정된 혐기성 메탄생성기(IV)에는 가스의 조성이 일정해지며, 이산화탄소와 메탄이 50%내외로 대부분 발생됨을 알 수 있다. 그 외에도 이산화탄소의 발생이 활발한 시기에는 약간의 수소(H<sub>2</sub>)가 발생된다[4].

< 표 6 >는 여러 연구자들이 폐기물의 종류에 따른 매립지 가스 발생량을 계산에 의해 추정된 결과로서, 가스의 발생량과 메탄의 함량 및 폐기물의 조성을 나타내고 있다. LFG의 발생량은 폐기물의 성분 중 분해가 가능한 성분의 함량에 좌우된다. 대부분이 분해성 성분일 경우 폐기물의 1kg당 400 - 500 리터의 가스가 발생되며, 메탄의 함량은



- I. 호기성 분해기
- II. 혐기성 비메탄생성기
- III. 불안정한 혐기성 메탄생성기
- IV. 안정된 혐기성 메탄생성기

[ 그림 1 ] 일반적인 매립지가스(LFG)의 조성변화

50-60% 범위인 것으로 보고되고 있다[4].

< 표 7 >은 매립지에서 발생하는 가스의 성분을 조사한 사례이다. LFG 는 대부분이 메탄과 이산화탄소로서 40 - 50%를 차지하고 있으며, North Kent의 경우는 질산가스의 함량이 24%로 매우 높은 것으로 보고하고 있는데, 이 경우는 가스의 회수속도가 큰 것으로 보아 불안정한 혐기성 메탄생성기에 측정된 것으로 추정된다[4].

< 표 6 > 폐기물 종류에 따른 매립지 가스(LFG) 발생량 및 메탄 함량

연구자	총가스발생량 <sup>a)</sup> ( l/kg)	메탄함량 <sup>a)</sup> ( l/kg)	추정방법 및 설정된 가정
Alpern (1973)	424	212 (50%)	수분함량 : 20% 분해가능한 탄소량 : 0.2522 lb/kg 모든 탄소가 가스로 분해
Anderson & Callinan (1970)	412	239 (58%)	폐기물조성 : 20.7% 셀룰로오스, 당분, 진분 : 46.6% 지질 : 4.5% 단백질 : 2.1% 기타 유기물 : 1.2% 회분 : 24.9%
Leckie (1974)	499	269 (58%)	복합시료
	430	232 (54%)	폐기물을 종이류, 음식폐기물로 구분 종이류 : C <sub>203</sub> H <sub>334</sub> O <sub>138</sub> N 음식폐기물 : C <sub>6</sub> H <sub>27</sub> O <sub>8</sub> N
Dair & Schwegler (1974)	187	94 (50%)	폐기물중 50%가 분해가능 분해가능 폐기물 중 50%가 휘발성고형분
Golueke (1970)	349	175 (50%)	수분함량 : 20% 판지류 : 40% (90%가 분해가능) 인쇄지류 : 33% (50%가 분해가능) 음식 및 정원폐기물 : 27%(50%가 분해가능)
Pfeffer (1974)	249	125 (50%)	수분함량 : 25% 폐기물의 70%가 생분해 가능 생분해가능분의 70%가 가스로 전환

a) : wet refuse 기준

따라서 폐기물은 매립하지 않고 소각으로 처리하는 그 자체만으로도 온실가스 저감효과가 매우 크다고 볼 수 있다. 가연성 폐기물의 소각처리는 도심에 소각처리장을 건설함에 따르는 문제점과 소각할 때 발생하는 각종 유해가스 및 다이옥신의 발생이 침해한 사회적 문제점임은 이미 잘 알려진 사실이기 때문에 바람직한 처리 방법이 아니며, 또한 에너지의 회수이용률이 극히 낮아 국내 소요 에너지량의 거의 대부분을 수입에 의존하는 우리로서는 에너지원의 낭비라는 또 다른 문제점으로 남는다. 따라서 가연성 폐기물을 단순 소각에 의해 처리할 일이 아니라 이를 가공하여 산업체의 대체연료로 활용할 경우 그 만큼 다른 화석에너지를 절약할 수 있으며, 국제사회의 쟁점이 되고 있는 온실가스의 저감효과도 큰 효과로 평가할 수 있다.

< 표 7 > LFG의 조성 측정 사례

사 례	LPG 조성 (vol %)	조 건
부산 석대동 매립지	CH <sub>4</sub> : 40.2 CO <sub>2</sub> : 50.3	매립장 : 2.7 × 10 <sup>6</sup> Ton 면 적 : 520,000 m <sup>2</sup> 기 간 : '87 ~ '93 LFG 회수속도 : 3,380 m <sup>3</sup> /h
California Wittier	CH <sub>4</sub> : 43.0 CO <sub>2</sub> : 33.0 O <sub>2</sub> : 2.0 N <sub>2</sub> : 19.0	매립장 : 4.5 × 10 <sup>6</sup> Ton 면 적 : 2,300,000 m <sup>2</sup> 기 간 : '91년도 LFG 회수속도 : 41,000 Nm <sup>3</sup> /h
North Kent	CH <sub>4</sub> : 45.0 CO <sub>2</sub> : 30.0 O <sub>2</sub> : 1.0 N <sub>2</sub> : 24.0	매립장 : 10 <sup>6</sup> Ton 면 적 : 400,000 m <sup>2</sup> LFG 회수속도 : 7,500 Nm <sup>3</sup> /h

\* LFG의 발열량 : 1,230 ~ 2,450 kcal/Nm<sup>3</sup>

### 3. 폐기물의 에너지 잠재량

< 표 8 >은 1997년도에 발생한 가연성 폐기물의 종류별로 에너지 잠재량을 산출한 결과로서, 총 에너지 잠재량은 약 620만 TOE(Ton Oil Equivalent)에 달한다. 그러나 총 발생량의 54%정도를 차지하는 음식물쓰레기와 오니(하·폐수 슬러지)는 발열량이 낮아서 대체연료로의 활용이 어렵고 사료 또는 비료화의 방향으로 자원화하는 것이 바람직하다고 판단된다[8,9].



폐합성수지류, 폐고무, 폐타이어 등의 평균발열량은 8,000 - 8,500 kcal/kg으로 최고의 에너지원이며, 종이, 나무류도 5,000 kcal/kg 내외로서 양질의 에너지자원이다[5,6]. 대체연료화가 가능한 가연성 폐기물의 발생량은 '97년도를 기준으로 연간 722만 톤에 달했으며, 이를 원유량으로 환산하면 510만 TOE에 해당된다. 이 에너지량은 국내에서 소비된 에너지량의 4.0 %로서 이를 산업체의 대체연료 자원으로 적극 활용할 경우 국내 에너지수입대체에 의한 외화 절감은 물론, 그에 상응하는 온실가스 저감효과를 얻을 수 있다.

미활용 폐기물 에너지 자원의 이용을 극대화하는 방안은 폐기물이 발생되는 업체 자체의 공정용 대체연료로 사용하거나 석유류를 연료로 하는 에너지 다소비 중소기업의 대체연료로 활용하는 것이다. 폐기물의 발생 형태와 물성은 매우 다양하며, 이들을 발생된 상태 그대로 연료로 사용하기 위해서는 기존의 대규모 소각시설을 이용할 수밖에 없으며, 쾌적한 환경을 유지해야 하는 현장 여건에서 혐오 시설인 폐기물 소각시설을 운영하는 것은 매우 불합리한 방법이다. 또한 일반 소각시설은 공정에서 요구되는 열 부하에 정밀하게 대응하는 것이 불가능하다.

따라서 폐기물이 진정한 산업체 대체연료로 활용되기 위해서는 가공 공정을 거쳐 규격화하고, 이를 다른 고체연료와 마찬가지로 편리한 수송, 저장 등이 가능하도록 해야 한다. 위와 같은 개념의 폐기물 연료화를 위해서는 규격화된 연료의 가공 기술과 가공연료의 규격에 적합한 연소시스템을 개발하여 표준화된 기술을 보급하는 것이 필요하다.

< 표 8 > 국내 가연성 폐기물의 에너지 잠재량(1997년도)

폐기물 종류	발생량 (천톤/년)	평균발열량 (kcal/kg)	에너지 잠재량(TOE)	비고
음식물쓰레기	4,768	614	292,755	사료화 및 비료화
종이류	2,730	5,500	1,501,500	대체에너지로 이용
나무류	1,695	4,500	762,750	대체에너지로 이용
폐합성수지류	2,791	8,250	2,831,400	대체에너지로 이용
오니류	7,190	600	431,400	비료화
동물성잔재물	583	1,450	84,535	사료화
기 타	2,200	1,500	330,000	소각열회수이용
합계	22,587		6,234,340	

1) 1.0 TOE = 10<sup>7</sup> Kcal

2) '96년도 국내 에너지 소비량 131,360 천 TOE

### III. 성형 고체연료화(RDF) 기술

#### 1. RDF의 정의 및 기술 개요

국내에는 폐기물의 고체연료화기술이 폐기물을 이용한 RDF기술로서 알려져 있지만, 광의의 RDF는 매우 다양하게 분류하고 있다. < 표 9 >는 ASTM에서 규정하고 있는 RDF의 분류표로서, RDF(Refuse Derived Fuel)란 의미대로 폐기물로부터 얻어진 모든 종류의 연료를 뜻한다. 표에서 볼 수 있듯이 RDF-1부터 RDF-5까지는 고체상태의 연료로서 1번부터 3번까지는 가공을 전혀 하지 않았거나 단순 가공한 것으로서 소각용 폐기물에 가까우며, RDF-4는 분말상태이고, RDF-5는 국내에 RDF로 알려진 성형 고체연료이다. RDF-6과 RDF-7은 열분해에 의해 얻어지는 액체연료와 기체연료이다. 성형 고체연료인 RDF-5와 RDF-6 및 RDF-7은 연료의 형태를 갖추어 다른 화석연료와 같이 수송이나 저장이 가능하며, 산업용 연료로서 충분한 가치가 있다고 평가할 수 있다[7].

< 표 9 > ASTM 방식에 의한 RDF의 분류

분류	약칭	종류별 정의
RDF-1		대형 폐기물만을 제거한 통상의 폐기물로서 연료로 이용이 가능한 것
RDF-2	Coarse-RDF (C-RDF)	150 x 150 mm 규격의 스크린 통과분 95%의 입도로 선별된 폐기물(불연성 물질 분리 여부에 무관)
RDF-3	Fluff-RDF (F-RDF)	50 x 50 mm 통과 95%의 입도로 분쇄하여 불연성 물질을 제거한 것
RDF-4	Powder-RDF (P-RDF)	10 mesh(2 mm) 스크린 통과 95%의 입도로 분쇄한 후와 불연성 물질을 제거한 것
RDF-5	Densified - RDF (D-RDF)	폐기물을 분쇄한 후 Pellet, Cube 및 Briquette 상으로 압축 성형한 것
RDF-6	Liquid Fuel	폐기물로부터 얻어진 액상 연료
RDF-7	Gaseous Fuel	폐기물로부터 얻어진 기체 연료

성형 고체연료는 폐기물을 전처리하고, 이를 성형기에 의해 일정한 형태로 만들며, 이를 연료로 사용하는 것이다. 또한 폐플라스틱과 같은 고분자 물질은 무산소 분위기에서 고온으로 가열하면 저 분자화되면서 다량의 액상 연료유가 얻어지는데 이를 열분해기술이라고 한다. 여기서는 처리비용이 적게 들고 대량처리가 가능하다는 장점으로 이미 선진국에서는 실용화되어 있고, 국내에서도 이를 실용화가 추진되고 있는 성형고체연료기

술을 소개하고자 한다.

폐기물을 고체연료화(RDF)하면 소각에 의한 폐열회수방법에 비해 여러 가지 장점이 있다. 즉, 수송성과 저장성이 향상되어 열 사용시설에의 적용성과 열 효율이 커져서 대체 연료로서 충분한 가치를 가진다. 따라서, 소각기술이 폐기물의 감량화에 비중을 둔 반면에 성형 고체연료화 기술은 에너지 회수에 중점을 둔 기술이다.

고체연료화 기술은 도시폐기물을 대상으로 시작되었다. 에너지함량이 높은 물질을 대상으로 하기 때문에 도시폐기물을 이용하기 위해서는 복잡한 전처리공정을 거쳐야 하고, 이를 연소시키기 위한 별도의 설비가 요구된다. 국내 도시폐기물의 경우는 수분함량이 높고, 불연성 물질이 많아 열량이 낮기 때문에 이들을 고체연료화(RDF)하려는 시도가 있었으나 성공하지 못했다. 반면에 일부 산업체에서는 자체에서 발생하는 고체 폐기물의 특성에 맞는 연소기술을 개발하여 에너지를 회수하는 사례들이 있으나 일반화되지는 못하였다. 산업체에서 발생하는 폐기물은 도시폐기물과는 달리 분리수거가 용이하고, 성분이 단순하며, 발열량이 높기 때문에 고체연료의 제조에 적합하다. 따라서 일부 사업자에서는 자체 소각처리를 하고 있고 발생하는 폐열을 회수하여 이용하고 있다. 그러나 아직도 발생업체의 자체처리는 소각방식에 의존하고 있어서 에너지의 회수율이 낮으며, 대부분의 업체가 위탁처리하고 있다.

## 2. 국내·외의 고체연료화 기술 현황

### 1) 국내기술 현황

국내에 최초로 RDF기술이 소개된 것은 '80년대 초 서울시에서 외국의 기술을 도입하여 난지도 도시쓰레기(MSW)를 이용한 고체 RDF 생산설비를 건설했던 것이며, '90년대 초에 청주시와 진주시에서 국내기술로 RDF생산플랜트를 설치하여 가동한 바 있다. 그러나 모두 시험가동단계에서 많은 문제점의 발생으로 정상가동을 이루지 못하고 실패하였다. 또한 '97년도에 미국계 회사가 군포시의 폐기물을 대상으로 100톤/일 규모의 RDF생산시설을 건설하여 시험가동을 한 바 있으나 현재는 시설을 경기도 포천 지역으로 이동 설치하여 시험가동중이다. 실패의 원인은 쓰레기 품질의 불량, 부적합한 기술의 선정에 의한 조사·분석의 미흡을 들 수 있다. '80년대 초에는 대도시 지역에서도 연탄을 많이 사용하여 불연성 물질의 비율이 높았고, 음식쓰레기의 비율이 높았기 때문에 불연성 물질의 분리의 어려움, 건조에 따르는 에너지의 과다 소모, 원료와 제품의 부패 등의 문제가 발생된 것으로 알려져 있다. 쓰레기의 품질이 불량하더라도 이를 감안하여 적합한 기술이 선정되었거나 그에 대한 대책이 강구되었다면 쓰레기의 품질이 큰 문제가 되지 않았겠지만 기술개발의 과정을 거치지 않았고, 또한 조사·분석이 매우 미흡했다고 결론지을 수 있다.

연구 사례로서는 1987년 국립환경연구원에서 과학기술부의 지원으로 도시폐기물로 제조된 고체 RDF의 연소를 위한 기초실험을 실시한 것이 최초이며, 최근에는 한국기계연구원에서 1996년부터 3년간 산업자원부의 지원으로 도시폐기물을 이용하는 RDF 제조에 관한 연구를 실시하였으며, 한국에너지기술연구소에서 '98년부터 폐합성수지류를 이용하여 RDF를 생산 이용하기 위한 연구를 수행하고 있다.

최근에는 일부 중소기업에서 고체 RDF 기술에 관심을 개발을 하고 있으며, S 기업에서는 0.5 ton/h 규모의 RDF생산설비를 갖추고 특정 업체에서 발생하는 폐기물로 RDF를 생산하여 비닐하우스 등의 용도로 공급하고 있다. 또한 H 기업에서 군포시에 설치하였던 RDF 생산시설을 인수하여 포천지역에 설치하여 지난 8월부터 시운전 중에 있으며, 다른 H 기업에서 국내 K 엔지니어링의 기술로 동두천 지역에 80톤/일 규모의 플랜트를 건설하여 시험가동중이다.

성형고체연료는 제조기술도 중요하지만 제조된 RDF를 소비하기 위한 전용 연소장치의 개발이 필요하다. 그러나 국내에서는 제조기술에만 치중하여 아직 이의 개발을 위한 연구가 수행된 바 없으며, 한국에너지기술연구소에서 합성수지계 RDF를 연소하기 위한 가스화 연소장치를 개발 중에 있고, S 기업에서 시설원예용으로 50만 kcal/h 규모의 RDF용 온수 보일러를 개발하여 판매중에 있으나 기술적인 보완이 요구된다.

## 2) 외국의 기술현황[8]

폐기물을 연료로 가공하여 이용하는 기술은 70년대부터 유럽에서 먼저 시작되어 일본, 미국, 스위스 등 선진국에서 오래 전부터 실용화되었다. 하지만 각국의 사회적 여건에 따라 기술의 발전과정과 방향이 차이를 보이고 있다.

일본은 (주)구모다, 가와사끼중공업(주), J-Catrel 그룹 등 15개회사에서 RDF제조공정에 대한 기술을 개발하여 플랜트를 생산하고 있고, 북해도의 삿포로시를 비롯하여 약 12개의 상용 플랜트가 가동되고 있으며, 대부분 소규모이고, Pellet형태의 RDF로 이용되고 있다. 생산된 RDF는 학교 병원 등의 공공시설 열원이나 열병합발전소 등의 연료로 사용하고 일부 산업용 연료로도 활용하고 있다. < 표 10 >은 일본의 RDF 플랜트 현황을 요약한 것으로서 12개의 상용 플랜트가 가동중이며, 스위스에서 도입한 J-카트렐 공정이 상업화 단계에 있다.

미국의 경우는 90년대 초까지 33기의 RDF 플랜트가 가동된 바 있으나 경제성을 이유로 상당수의 플랜트가 가동을 중단하였다. 미국의 폐기물 이용기술의 특징은 폐기물을 적절한 크기로 절단 및 분리하여 연료화하는 Fluff-RDF의 형태로서 석탄이나 가스연료와 함께 연소하는 방식(Co-Firing)을 택하고 있으며, 주로 발전이나 지역난방 등에 활용하고 있다. 그러나 최근에는 성형고체연료방식의 도입을 위해 기술이 개발되고 있다. < 표 11 >은 미

국내에서 상용규모로 개발되었던 RDF플랜트 현황을 보인 것이다. 10개 지역에 설치되었던 것 중에서 5개 지역은 상업운전을 하고 있다. 10개 지역에 16개의 다른 보일러에서 혼합연소를 시도하였는데, 단지 2개의 보일러만 정상적으로 RDF co-firing 시설이 가동되고 있으며, 나머지는 기술적인 문제보다는 경제성 등의 이유로 가동을 중단하였다. 즉, 상업적 운전으로 연결되지 못한 사유는 플랜트 규모, RDF 제조 설비의 경제성, 보일러의 열전달 표면에서 slagging과 fouling 문제 등이다. 각 보일러의 용량은 8만~3백만lb/hr 스팀 범위이고, 작은 설비는 spreader stoker-fired boiler를 사용하고 큰 설비는 미분탄연소, 싸이클론 연소보일러를 사용하였는데, 5개 지역의 8기의 보일러에서는 상업운전을 하고 있다.

유럽의 경우는 영국의 Warren사, 독일의 Combustion사, 스웨덴의 PLM사 및 스위스의 Catrel사 등에서 RDF 제조공정에 대한 기술을 보유하고 있다. 80년대에 설치된 4기의 대규모 RDF플랜트가 가동되고 있으며, 시설이 대규모이고, 건조·성형 공정을 거치는 성형 RDF를 생산하여 이용하고 있다.

UK Waste 처리회사의 'Clearaway'는 석탄, Coke같은 전통적인 연료 대신 Waste-derived fuel로 대체하고 다른 Plant는 HM inspectorate of Pollution Control의 기술을 사용하고 있다. Hampshire county council에서는 폐기물 처리 기술로 UK-Isle의 Weight, Hastings, Byker 등에 3개의 플랜트가 가동되고 있다.. 플랜트는 대략 100,000ton/y의 생활

<표 2- 10> RDF 기술 실용화 현황 ( 일 본 )

地 域	事業 主體	名 稱	단계별		완공년월	처리규모 (t/d)	용 도
			개발	실용			
北海道	사포로市 (環境事業公社)	사포로市 廢棄物資源化工場		○	90. 4.가동	200	지역냉난방급탕 호텔, 병원등, 랩브공장
	富良野市	業廢棄物處理施設		○	88. 7.가동	7.2	난방, 급탕, 온실, 학교
福島縣	(株)阪田工務店 福島 支店	福島縣雙葉郡		○	93. 2.가동	20	열원
栃木縣	(주)日本리사이클	野木事業所		○	92. 11.가동	10	열원, 공공시설민간기업
群馬縣	(주)關商店	群馬縣館林		○	91. 7.가동	40	(주)紅三足利工場:染色 工場의 보일러 연료
	邑樂郡板倉町	板倉町資源化센터		○	97. 3.준공	20	열원, 공공시설
静岡縣	御殿場市 小山廣域行政組合	廢棄物固形燃料化 施設		○	98. 3.준공	150	열원, 御殿場市内 民間 企業
福井縣	(주)武生環境保全	福井縣武生市		○	90. 6.가동	5	판로개척중
富山縣	勝波光域圏事務組合	南勝리싸이클		○	95. 4.준공	28	공공시설 냉난방열원
滋賀縣	愛知郡廣域行政組合	湖東리저널리싸이 클그룹		○	97. 3.예정	22	공공시설 열원
奈良縣	(주)일본리사이클	榛原事業所		○	90. 11.가동	8	
大分縣	津久見 J-카트렐공정 실증플랜트	共同研究	○		94. 11.종료	20	산업용 열원, 시멘트원 료
	津久見市	津久見市		○	96. 12.준공	32	상동

폐기물을 처리할 수 있으며, 33,000ton/y의 연료를 생산할 수 있다. The Byker plant는 1970 및 1980년대에 Byker에 설치된 RDF plant는 첫 상용 플랜트중의 하나였고, 유럽에 RDF 기술을 소개된 후 10년 동안 계속 효과적인 폐기물 처리시설로 평가받고 있다. 초기에는 덩어리나 분쇄된 형태의 연료를 회수하려고 했으나 가연성 RDF의 경우 연소기 형태를 고려하여 적당한 Pellets를 생산하기로 하였다. FBC 시스템은 전 세계적으로 유일하게 Solid Waste Combustion에서 사용되고 있으며, 그 중 첫 번째 설치된 것이 150톤/일의 소규모로 스위스에 설치되었다. 도시고체폐기물(MSW)과 폐수슬러지를 함께 처리하고 폐열 보일러로 생성된 스팀은 난방과 발전에 이용하고 있다. Italy는 석탄발전소에서 50 kW 연소로를 이용하여 RDF에 대하여 기술적·환경적 문제를 평가하였다. RDF와 석탄을 혼합 연소할 때 유기 미세 오염물질 (PAH : Polycyclic Aromatic Hydrocarbons, PCDD : Polychlorodibenzodioxins, PCDF : Polychlorodibenzofurans, toluene에 추출되는 모든 유기 물질)이 배출되는 것으로 보고되었다.

### 3. 성형 고체연료화 공정

#### 1) 개요

고체연료화 공정은, 종류별 정의로부터 유추할 수 있듯이 원료의 성상과 최종 제품의 형태 다르며, 통상 전처리 공정과 성형 공정으로 구분된다. 도시폐기물의 전처리 공정은 대형 폐기물(가전기기, 매트리스 등)의 제거, 자기선별기에 의한 고철의 제거, 파쇄, 기력이나 스크린에 의한 선별 등으로 구성되며, 선별된 고열량의 가연성 물질만 성형공정으로 투입된다. 성형공정에서는 분쇄, 건조, 압축조형 및 냉각과정을 거치며, 다른 연료와 적절히 혼합하여 연료로서 사용된다.

비교적 성분이 균일하고 가공이 쉬운 산업폐기물의 경우는 파쇄 또는 분쇄와 같은 단순 가공으로 분말이나 입자상태로 연료화하여 사용하는 것이 가능하며, 이에 적합한 연소장치를 선택하는 것이 중요하다. 폐기물이 고형연료로 이용되기 위한 조건으로는 열량이 높고, 함수율이 낮으며, 유독성 대기오염을 일으키는 성분이 없어야 한다. 산업체에서 발생하는 폐기물은 대부분 성분이 고르고, 열량이 높으며, 수분이 적기 때문에 RDF로서 매우 적당하다. 특히, 도시폐기물과는 달리 성형공정을 거치지 않고 파쇄와 같은 단순 가공만으로도 사용이 가능하기 때문에 이에 대한 기술개발이 진행되고 있으며, 합성수지, 폐고무, 폐지, 폐목재 등이 많이 발생하는 산업체와 석유류 연료를 많이 소비하는 중소기업에서는 산업폐기물을 이용한 연료대체에 많은 관심을 가져야 할 것이다.

#### 2) 공정 및 핵심 장치

대표적인 성형고체연료(RDF) 생산공정으로서 카트렐 방식과 RMJ 방식이 있다. 카트렐

방식은 스위스에서 개발된 것으로서 일본에서 이를 도입, 개선하여 J-카트렐 공정으로 부르고 있다. 한국기계연구원에서 개발된 공정은 RMJ 방식으로 알려져 있으며, 그 외의 포천의 공정은 미국에 특허 공정이고, 동두천 공정은 잘 알려져 있지는 않으나 기존의 외국 공정과 유사할 것으로 보인다. [ 그림 3 ]은 카트렐 공정의 흐름도를 보인 것이다. 대부분의 공정이 이와 유사하여 파쇄기, 자력선별기, 혼합반응기, 건조기, 선별기, 성형기 등으로 구성되어있지만, 방습, 방취 및 방균을 목적으로 카트렐 방식은 CaO를 첨가제로 사용하는 것이 특징이며, RMJ방식은 CaO 대신 Ca(OH)<sub>2</sub>를 사용하고 있는 점에 차이가 있다. 또한 생석회나 소석회를 사용하는 것은 연소시 발생하는 다이옥신류의 발생을 줄이는데 기여하는 것으로 알려졌다.

RDF 제조공정의 핵심장치는 성형기이다. 일반적으로 알려진 성형기는 가열되는 스크류 이송기 후단에 원형 구멍을 다수 설치한 형태로서, 전처리된 폐기물이 스크류로 공급되고 스크류에 의해 밀려나가는 폐기물이 높은 압력과 열을 받으며 작은 구멍들을 통해 배출되면서 성형된다. 이러한 성형기는 투입되는 동력에 비하여 생산량이 적어서 폐기물을 대량 처리하기가 곤란하다는 것이 문제로 지적되고 있다. H 사의 포천 공장에 설치된 성형기는 가축사료인 목초를 저장하기 위해 미국에서 개발된 장치를 RDF 생산공정에 적용한 것으로서, 스크류 후단에 스크류보다 직경이 큰 고속회전 임펠러를 설치하고, 스크류의 이송방향과 직각인 원통 표면에 사각형 배출구를 다수 설치한 형태로서, 임펠러가 회전하면서 스크류에 의해 유입되는 원료를 타격하여 구멍으로 배출시키는 원리로 되어 있다. 또한 압축 스크류를 가열하지 않고 스크류와 임펠러의 마찰열만으로 가열되도록 한 것도 이 성형기의 특징이다. 동두천 공정의 경우는 성형기의 외형이 포천의 경우와 다르지만 성형 원리는 같은 것으로 추정되지만 확인하지는 못 하였다.

RDF의 형상은 원통형(기계연구원)이 일반적이며, 사각기둥의 형태(포천과 동두천)의 경우도 있다. 직경 원통형의 경우 직경은 1~4cm, 길이 3~10cm이다. 사각형의 경우 한 변의 길이가 2~5cm 정도이다. 부피밀도 600kg/m<sup>3</sup> 정도이며, 원료 폐기물에 관계없이 수분 약 10% 이내, 발열량은 원료의 성분에 따라 4,000~7,000kcal/kg 정도이고, 5~25% 정도의 회분을 함유하고 있다. 연료비는 0.12~0.19로 휘발분이 대부분이고 착화온도도 약 230℃로 낮다. PVC가 함유되므로 염소분이 0.5~1.0%이며, 유황분은 0.04~0.2%로 낮다.

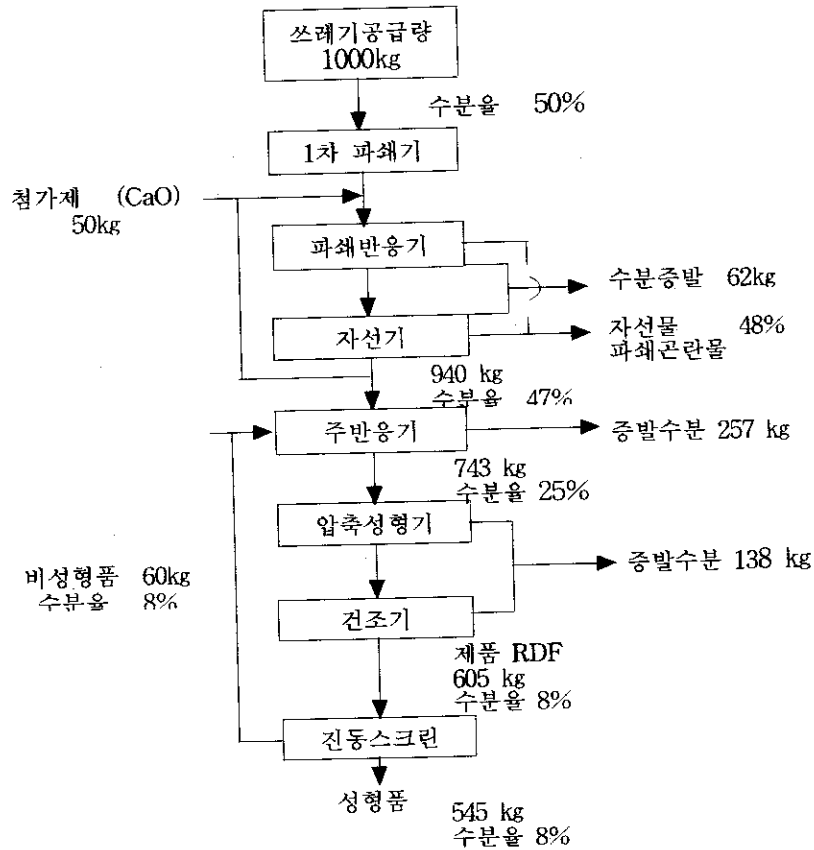
### 3) 연소 및 공해물질의 발생

RDF 연소용 보일러로서는 도시쓰레기소각로와 같이 스토커형 연소로와 유동층 연소로의 사용이 가능하나 대부분 스토커 형식이 대부분이며, 규모가 작을수록 스토커 형식이 적합하다.

RDF연소시 발생하는 배가스는 SO<sub>x</sub>의 발생이 10ppm 정도로 낮은데, 이는 원료중에 유

황합량이 적고, RDF에 첨가된 Ca 성분이 SOx와 반응하여 석고를 형성하기 때문이다. NOx의 경우도 60~170ppm으로 연소조건에 따라 변화폭이 큰 편이나 일반 소각로에 비해 매우 낮은 편이며, CO 농도도 10~470ppm으로 큰 분산을 나타내는 것으로 보고되었다.

일본의 보고자료에 따르면, 연소로내의 온도가 830℃~850℃로 고온으로 연소되고 있는 것에 관계없이 HCl농도가 대부분 100ppm이하로 극히 낮은 수치를 나타내 다이옥신 농도도 5ng/m<sup>3</sup>N이하로 낮고 특히 백필터 출구에서는 0.5ng/m<sup>3</sup>N이하로 충분히 낮은 수치로 되어 있다. 백필터에 잡힌 비산재는 CaO, CaCl<sub>2</sub>, CaCO<sub>3</sub>, CaSO<sub>4</sub> 등의 Ca분을 다량 함유된 것이 특징적이다.



[그림 3] 카트렐 방식에 의한 RDF 제조 공정



## 1. 결 론

1. 가연성 폐기물의 적절한 처리는 환경적인 측면만을 고려하더라도 시급히 해결되어야 할 문제임이 틀림없다. 매립처리의 어려움으로 인해 소각시설의 설치가 매우 활발하게 추진되고 있으나 작은 노력으로도 엄청난 에너지절약효과를 기대할 수 있는 점을 감안할 때 폐기물의 에너지자원화는 매우 시급한 현실이다.
2. 폐기물의 대량처리처리의 가능성과 국내 적용의 용이성을 감안하면 성형고체연료화 기술이 가장 현실성이 있는 기술로 평가되고 있다. 고체연료화 기술의 국내 도입은 가장 처리가 쉬운 산업폐기물이나 생활폐기물로부터 분리회수된 폐플라스틱류를 대상으로 먼저 실용화할 필요가 있다. 처리가 가장 힘든 가정에서 발생하는 일반 생활쓰레기는 수분이 80-90%인 음식물쓰레기의 철저한 분리수거를 제도화하고, 이의 효과적인 처리를 위해 우리 실정에 맞는 전처리기술의 개발이 뒷받침되어야 한다.
3. 지금까지 국내에서 추진된 RDF관련 연구나 사업은 제조기술에 치중하였고, 생산된 RDF의 소비를 위한 대책이 전혀 없었다. 그러나 RDF의 소비방안이 없는 한 제조분야의 활성화는 불가능하므로 RDF를 쇄비하기 위한 연소기술의 개발이 매우 시급하다고 판단된다.
4. RDF가 보급될 경우 연소시설에서 발생하는 공해물질의 발생이 논란이 될 것으로 예상되지만, 단순히 RDF의 사용시 발생하는 공해만을 논할 것이 아니라 매립이나 소각처리에 비하여 훨씬 효과적인 방법임을 감안하여 정책을 추진하여야 할 것이다.
5. 또한 폐기물에너지 자원은 원유량으로 환산하면 520만 TOE에 해당된다. 이러한 미활용 폐기물 에너지량은 국내에서 소비되는 에너지량의 4.0%로서 이를 산업체의 대체연료 자원으로 적극 활용할 경우 산업체에 주는 경제적 효과 외에도 국내 에너지 수입대체에 의한 외화 절감은 물론, 그에 상응하는 온실가스저감효과를 얻을 수 있다는 점도 매우 높이 평가되어야 한다.

## 참 고 문 헌

1. 환경부, 1998, “ '97 전국 폐기물발생 및 처리현황(요약) ”
2. 환경부, 1997, “『녹색환경의 나라』 건설을 위한 국가 폐기물 관리 종합계획”
3. 이남훈, 1996, “21세기 폐기물 매립지의 역할”, 폐기물 매립기술 개발방향에 관한 심포지움, 한국건설기술연구원
4. 장동순, “난지도 매립 폐기물 열처리 고도 연구”, 충남대학교, 1995. 10.
5. 박영재 외, 1992, “폐기물 자원조사 및 재활용에 관한 연구”, 한국에너지기술연구소 보고서 KE-92004G
6. 기술분석 자료, 1994, “폐플라스틱의 발생·처리현황 및 재활용 기술 분석(draft)”, 한국에너지기술연구소, 폐자원재활용연구팀
7. Shigekatsu MORI, 1996, “쓰레기 고품화 발전시스템”, 연료 및 연소, V.64, N.8, pp563-570
8. 신대현 외, “폐합성수지류의 산업체 연료화 이용기술 개발”, 한국에너지기술연구소 보고서 KIER-981325