

해양폐기물을 이용한 폐기물연료(RDF)



길 상 인

(KIMM 열유체환경연구부)

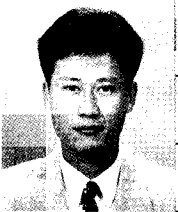
- '80 - '84 한양대학교 기계공학(학사)
- '84 - '86 한국과학기술원 기계공학(석사)
- '86 - '91 한국과학기술원 기계공학(박사)
- '91 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



심 성 훈

(KIMM 열유체환경연구부)

- '78 - '85 부산대학교 기계공학(학사)
- '86 - '88 한국과학기술원 기계공학(석사)
- '88 - 현재 한국기계연구원 선임연구원



윤 진 한

(KIMM 열유체환경연구부)

- '86 - '92 충남대학교 조선공학(학사)
- '92 - '96 충남대학교 기계공학(석사)
- '96 - 현재 한국기계연구원 선임연구원

1. 서 론

새로이 발생하는 해양폐기물의 양이 매년 빠른 증가속도를 보여 현재는 연간 30만톤에 육박하고 있으나, 이 가운데 수거되어 처리가 이루어지고 있는 폐기물은 10만톤을 넘지 못하고 있다. 따라서 매년 많은 양의 폐기물이 바다 속에 누적되어가고 있으며, 이로 인한 어민의 피해가 점차 커지고 있는 실정이다. 현재 수거되고 있는 폐기물은 매립과 소각 그리고 일부 금속에 대해 재활용의 방법으로 처리가 이루어지고 있으며 페타이어는 시멘트 소성로의 보조연료로 활용되기도 한다.

재활용이 가능한 폐기물을 제외한 대부분의 해양폐기물은 지정폐기물 소각로에서 소각처리와 지정매립장에서 매립 등 정상적이지 못한 방법에 의해 처리가 이루어지고 있다. 지정폐기물이라 함은 폐산이나 폐알칼리 등과 같이 사업장에서 발생하는 유해성 폐기물을 의미한다. 해양폐기물의 경우 지정폐기물이 아님에도 불구하고 적절한 처리시설이 없기 때문에 현재 지정폐기물로 다루어지고 있다. 지정폐기물 처리설비는 경기, 울산, 여수 등과 같은 대규모 공단지역에 많이 위치하고 있다. 따라서 해양폐기물 수거 현상과는 거리가 먼 경우가 많으므로 해양폐기물의 처리를 위해서 비싼 처리비와 더불어 운송경비를 부담해야 한다.

소각과정에서 발생하는 다이옥신 문제, 매립장 침출수에 의한 농토의 오염과 악취 발생 그리고 폐기물 이송차량에 의한 생활환경 파괴와 같은 각종 환경문제의 유발은 주민들로 하여금 환경

시설의 설치를 반대하게 만들었으며 그 영향이 해양폐기물의 처리에까지 미치고 있다.

본 연구는 수거된 해양폐기물을 원료로 이용하여 폐기물연료(RDF : Refuse Derived Fuel)를 제조하는 공정 개발을 목적으로 하고 있으며, 공정의 적합성 평가를 위하여 제조된 RDF의 물성 분석을 다루고 있다. 해양폐기물의 전처리(pre-treatment) 및 연료자원화 공정에 대한 실험적 연구를 통하여 해양폐기물을 단순 처리대상의 개념에서 대체에너지로 변환시키고자 하였다. 이렇게 생산된 RDF는 지구온난화방지를 위한 이산화탄소 배출 규제를 받지 않으므로 각종 에너지에 대한 의존도 높은 국내산업의 보호에도 도움이 될 것으로 사료된다.

2. 본 론

2.1 해양폐기물

그림 1에 나타난 바와 같이 해양폐기물은 크게

- 해저폐기물
- 부유폐기물
- 페스티로폼

으로 분류할 수 있으며 이 가운데 해저폐기물이 차지하는 무게비율은 90%에 이른다. 해상에서의 각종 표식나 어구의 해상부유를 위해 사용되는 스티로폼 류가 차지하는 부피는 해저폐기물과 부유폐기물을 합친 것과 비슷하지만 무게로는 2%를 넘지 않는다. 이러한 해양폐기물은 표 1에

서 보는 바와 같이 폐목재, 페로우프, 페어망, 페와이어로프, 페타이어, 페스티로폼, PET 및 잡쓰레기의 7가지 성분으로 분류할 수 있다. 다양한 성분과 폐기물의 상태로 인하여 분류가 복잡한 육상폐기물에 비해서 해양폐기물은 조성이 간단하여 다양한 처리나 활용이 가능하다.

표 1. 해저폐기물의 예상 조성

성분	비율
타이어	3.8%
와이어로프	25.8%
로우프	25.9%
목재류	7.9%
금속류	19.1%
기 타	17.5%

표 2는 해양폐기물과 육상폐기물의 특성을 비교한 것이다. 해양폐기물은 고분자계물질의 고탍유로 인하여 해수의 함유에도 불구하고 발열량(저위)이 4,000kcal/kg을 상회하는 반면 육상폐기물은 수분을 많이 함유하고 있는 주방쓰레기와 불연성 물질의 혼합으로 인하여 발열량이 1,500kcal/kg에 불과하다. 육상폐기물의 경우 부패로 인한 악취발생의 가능성이 높기 때문에 신속한 처리가 필요하지만 해양폐기물은 이러한 문제를 고려하지 않아도 된다.

해양폐기물의 처리에 있어서 가장 중요한 사항은 페로우프에 함유된 납의 안정적 제거이다. 그림 2는 페로우프의 전단면을 나타낸 것으로서 로우프가 바다 속에 잘 가라앉도록 하기 위하여



그림 1. 여러 가지 형태의 해양폐기물

표 2. 해양폐기물과 육상폐기물 특성 비교

	해양 폐기물	육상 폐기물
1. 주요조성	플라스틱류, 목재, 타이어, 금속류(조성이 간단)	주방쓰레기, 플라스틱류, ... (조성이 복잡)
2. 발열량(저위)	약 4,000kcal/kg	약 1,500kcal/kg
3. 함수율	변동이 심함	50% 전후
4. 주요처리방법	재활용, 매립, 소각	매립, 재활용, 소각
5. 문제점	염분/고발열/열가소성	수분/저발열

여러 가닥의 납선이 들어있었다. 현재에는 납의 사용을 억제하고 있으나 과거 제조된 로우프에서는 많은 양의 납이 사용된 것으로 확인되었으며 실제 해저에서 수거된 페로우프의 경우 대부분 납이 검출되고 있다. 작게는 3가닥에서 많게는 12가닥 이상의 납이 들어 있으며 순수 로우프의 무게에서 납이 차지하는 비중은 최고 10%를 훨씬 넘는 것으로 확인되었다. 앞서 소개한 바와 같이 연간 발생하는 해양폐기물에는 25% 이상의 페로우프가 포함되어 있으며 이 로우프에는 환경문제를 야기시킬 수 있는 엄청난 양의 납이 함유되어 있다.

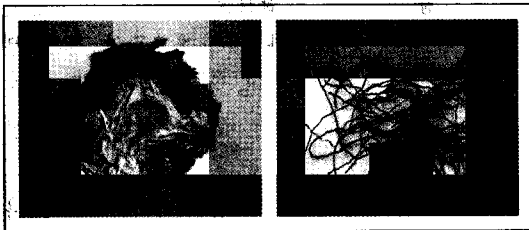


그림 2. 로우프의 전단면과 로우프속의 납

폐기물의 소각과정에서 처리에 가장 큰 어려움을 겪는 것 중의 하나가 납의 배출이다. 납은 비교적 낮은 온도에서 기화되는 특성을 갖고 있어서 폐기물의 연소과정 중에 많은 양이 연소가스과 함께 배출된다. 납이 대기중으로 날아가는 것을 방지하기 위하여 백필터를 설치하기도 한다. 그러나 이는 납의 함유량이 ppm order일 때 해당되는 사항이며 해양폐기물에서와 같이 엄청난 양의 납이 함유되어 있는 경우 공해방지설비에서 전량 처리되기를 기대하기는 어려운 것으

로 생각된다. 따라서 납의 적절한 처리방법이 없는 상황에서 페로우프는 선별에 의한 납의 안정적 처리가 필수적이며 향후 납의 사용을 절대적으로 억제해야만 한다.

그림 3은 페로우프를 잘게 자르고 이것을 풍력 선별하여 납과 피복을 분리한 결과이다.

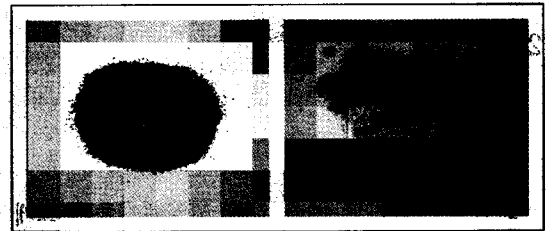


그림 3. 페로우프 풍력선별후의 납과 피복

2.2 해양폐기물 전처리 및 자원화 시스템

그림 4는 해양폐기물 자원화 시험플랜트 전경을 나타내고 있다. 이 설비에는 그림 5에서 보는 바와 같이 해저의 빨과 염분에 의해 오염된 해양폐기물을 세정하고 조대성 폐기물을 전단 및 파쇄하는 전처리 장치도 부착되어 있다. 전처리 시스템은 선별, 전단, 납제거, 파쇄, 해수세정의 5가지 단계로 이루어져 있으며 자원화(연료화)시

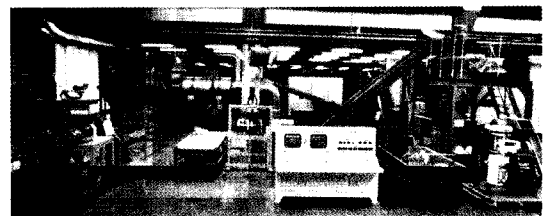


그림 4. 해양폐기물 전처리 및 자원화 시험플랜트 전경

시스템은 2차 파쇄, 3차 파쇄, 건조, 저장, 성형의 5 단계로 되어 있다. 전처리시스템의 처리능력은 시간당 100kg이며 자원화시스템의 폐기물연료(RDF) 생산능력은 시간당 50kg이다.

실험에 사용된 해양폐기물은 전남 여수의 국동항(해저폐기물)과 통영(페스티로폼) 그리고 인천항(부유폐기물)에서 수집된 것을 사용하였다.



그림 5. 수거된 해저폐기물

폐기물 처리에 있어서 폐기물연료화(RDF)를 이용하는 장점들로는 다음과 같은 것들이 있다.

- 수송성
- 저장성
- 연소성
- 청정성

폐기물 발생지와 이용시설과의 차이로 인한 운송에 커다란 어려움이 없으며 RDF의 보관(저장)이 손쉬워 안정적인 연료로서의 역할을 할 수 있다. 폐기물의 직접연소에 비해 필요한 공기량이 적기 때문에 오염된 연소가스의 발생총량이 적게되며 RDF방식에 의한 폐기물 처리는 일산화탄소, 황산화물, 질소산화물, 다이옥신 등의 공해발생량도 감소시킬 수 있다.

2.3 RDF성형 및 물성

그림 4의 해양폐기물 전처리 및 자원화시스템 공정에서 최종적으로 생산되는 것은 폐기물연료(RDF)로서 그림 6과 같이 성형이 이루어진다.

해양폐기물 RDF의 제조 및 성형을 위한 실험을 위하여 다음과 같은 3가지 조건을 선택하였다.

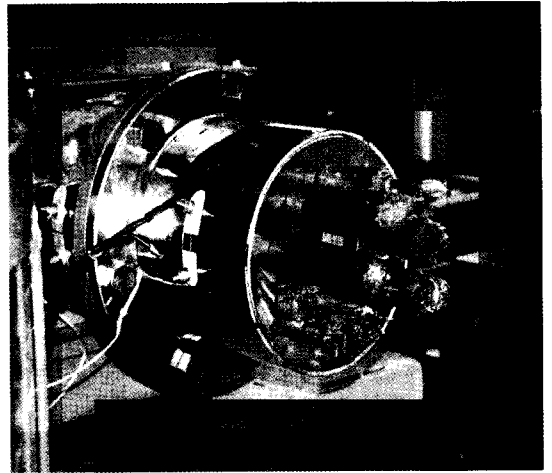


그림 6. 해양폐기물 RDF 성형 모습

[실험조건]

- 조건 1. 해저폐기물 100%
- 조건 2. 부유폐기물 100%
- 조건 3. 해저폐기물 80%/부유폐기물 10%/페스티로폼 10%

조건 1은 수중 침적폐기물 청정사업에서 수거되는 물질을 대상으로 하고 있으며 처리해야 할 해양폐기물의 80%에 이른다. 부유폐기물은 항만의 수거선에 의해 수집된 물질만을 대상으로 하고 있으며 혼합상태를 나타낸 조건 3은 국내발생 해양폐기물의 발생율에 따라서 결정한 값이다.

그림 7은 앞의 실험조건에 따라 시험플랜트에서 생산된 RDF를 나타낸 것으로 이에 대한 물성분석 결과를 표 3에 제시하였다.

해저폐기물 RDF와 혼합폐기물 RDF는 110~130℃의 온도조건에서 정상적인 성형이 이루어졌으나, 부유폐기물은 발포성 및 열가스 특성으로 인하여 성형상태가 다소 불량하였다. 해저폐기물 만을 원료로 하는 경우 발포성질을 갖는 물질의 함유가 거의 없어 표면이 곱게 만들어졌으나, 성형에 필요한 에너지는 비교적 많이 요구



그림 7. 각종 해양폐기물 RDF

되었다. 그러나 소량의 부유폐기물과 페스티로폼이 포함된 혼합폐기물 RDF는 성형과정에서의 온도조건에 의해 부분적 발포가 일어나고 이로 인하여 성형이 잘되는 것을 실험적으로 확인할 수 있었다. 실제 동일 성형에너지로서 만들어지는 RDF는 부유폐기물이 해저폐기물의 2배에 이르는 효율성을 나타내었다.

페로우프나 폐어망 그리고 목재 등이 주원료가 되는 해양폐기물 RDF는 가연분의 함유량이 80%를 상회하는 것으로 나타났으며 저위발열량은 6,000kcal/kg이 넘는 것으로 분석결과 확인되었다. 현재 국내에 도입되고 있는 호주 Drayton 탄의 발열량이 6,200~6,700kcal/kg임을 고려할 때 해양폐기물 RDF가 훌륭한 대체에너지가 될 수 있음을 알 수 있다. 이러한 고발열성은 탄소와 수소의 높은 함유율에 근거함이 원소분석 결

과 확인되었다. 육상폐기물을 이용하여 만들어진 RDF의 경우 발열량이 4,000~5,000kcal/kg 정도로서 고분자계 물질의 함유량이 많은 해양폐기물에 비해 열량이 많이 떨어진다. 일본이나 미국 등에서는 RDF의 적절한 활용을 위해 발열량에 따른 RDF의 등급제도를 추진하고 있으며, 해양폐기물은 최상위등급의 연료가 될 것이다.

원소분석 결과에서 황의 함유율이 0.2%를 상회하는 것으로 나타났다. 플라스틱의 제조과정에서 소량 첨가된 것으로 사료되는 황은 RDF의 제조과정에서 첨가되는 소석회의 칼슘과 반응하여 안정화되므로 크게 우려하지 않아도 된다. 또한 본 연구에서는 염소(Cl) 성분에 대한 분석을 실시하지 않았으나 황과 마찬가지로 소석회에 의해 안정화되게 된다.

해양폐기물의 이용이나 처리에 있어서 유의해

표 3. 해양폐기물 RDF의 물성

		조건1(해저폐기물)	조건2(부유폐기물)	조건3(혼합폐기물)
3성분 분석	수 분	0.80%	0.71%	0.77%
	가연분	81.29%	83.24%	85.20%
	불연분	17.91%	16.05%	14.03%
원소 분석	C	57.76%	64.04%	61.14%
	H	7.065%	7.028%	5.882%
	N	4.110%	1.822%	3.774%
	S	0.258%	0.212%	0.254%
저위발열량		6,066kcal/kg	6,769kcal/kg	6,403kcal/kg
염분농도		19.1ppm	34.3ppm	78.1ppm

야할 사항은 염분이다. 폐기물의 염분 함유량이 높게 되면 부식으로 인하여 소각로와 같은 처리 시설의 수명단축이 일어나고 매립장에서는 인근 토지를 오염시키게 된다. 염분의 과다함유는 해양폐기물 RDF에도 적용되는데 고염분의 RDF는 이것을 연료로 사용하는 설비의 부식문제를 일으키게 된다. 그러므로 염분의 세정은 해양폐기물 RDF의 활용성 확대에 매우 중요하다. 시험플랜트에서는 시수를 사용하여 염분과 찌를 완전히 제거하도록 하였으며 이러한 세정의 결과 해양폐기물 RDF에서는 19~78ppm정도의 낮은 염분농도를 나타내고 있었다.

시험플랜트에서 처리 가능한 해양폐기물의 양은 1.5톤/일이며 여기서 생산되는 RDF는 500kg/일이다. 이를 위하여 소비되는 전력량은 약 500kWh이며 이외에 폐기물 건조를 위해 약 80만kcal/일의 에너지가 별도로 필요하다. 현재의 비용(전력 및 LNG)하에서 환산된 RDF 생산비는 78,000원/톤으로 매우 높게 나타나고 있으나 설비가 대형화되면 생산비는 많이 낮아질 수 있을 것으로 생각된다.

RDF의 주요 예상 활용처로는 대형 도시폐기물 소각로의 보조연료, 하수슬러지 소각로의 보조연료, 발전시설, 담수화설비의 주에너지, 지역 난방시설, 기타 고체연료의 사용이 가능한 생산 시설 등이 있으며 일본에서는 이 가운데 RDF를 이용한 발전(power generation)이 활발히 이루어지고 있다.

3. 결 론

현재의 수거된 해양폐기물 처리는 고비용에 의한 경제성 저하, 비환경친화적 처리, 장거리 운송에 따른 여러 가지 문제의 발생, 극히 일부 지역에 국한된 해양폐기물 처리의 가능 등 많은 개선이 요구된다.

본 연구는 해양폐기물의 효과적 처리를 위한 전처리 및 연료화에 대한 공정 개발을 위해서

수행되었으며 실용화에 필요한 기초기술을 확립하고자 처리에 따른 문제점을 도출하고 이에 대한 해결방안을 제시하고자 하였다. 수행된 연구의 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 페로우프에는 선별이외에 처리방법이 없는 많은 양의 납이 함유되어 있음이 실험과정에서 확인되었다. 납은 비교적 낮은 온도에서도 기화를 하기 때문에 열적인 처리가 불가능하여 자동화에 의한 풍력선별 방법을 실용화에 도입하고자 한다.

2) 찌와 염분의 세정은 해양폐기물의 자원화에 있어서 필히 요구되는 공정이다. 찌는 해저폐기물의 수거과정에서 처리하는 것이 효율적이며 수거선이나 육지로 올라오지 않도록 하는 것이 필요하다. 염분은 담수를 이용하여 대부분 제거할 경우 육상폐기물의 수준까지 농도를 저하시킬 수 있다.

3) 해저폐기물, 부유폐기물 그리고 페스티로폼이 혼합된 혼합폐기물이 어느 한가지 물질을 사용하는 것보다 양호한 성형의 폐기물연료가 만들어짐을 알 수 있었다. 이는 스티로폼이나 PET 등의 발포성으로 인하여 성형에 필요한 실질적 에너지가 감소하였기 때문이다. 특히 부유폐기물이나 폐부자만을 이용한 폐기물 연료의 제조는 발포성과 접착성으로 인하여 적절한 형태의 폐기물연료 성형이 매우 어려웠다.

4) 해양폐기물을 이용한 폐기물연료(RDF)는 저위발열량이 6,000kcal/kg 이상으로써 석탄에 버금가는 양질의 연료임이 확인되었다. 이는 해양폐기물의 주성분이 고분자계 물질이기 때문이다. RDF에 대한 분석결과 적절한 세정과정의 도입으로 인하여 염분농도가 수십ppm 수준에 불과하여 기존에 우려된 부식문제가 해결됨으로써 향후, 해양폐기물을 이용하여 만들어진 폐기물연료의 활용성이 더욱 확대될 것으로 기대된다.

폐기물 처리시설은 혐오시설이라는 생각으로 인하여 이러한 시설을 주민이나 발생지로부터 격리함으로써 문제를 해결하는 경향이 많이 나

타나고 있다. 이러한 이유로 폐기물의 자원화나 에너지 활용성이 떨어지게 된다. 폐기물 처리의 근본적 해결은 발생자에 의해 처리하고자 하는 의식이며 폐기물의 연료화는 지역내에서 자연스러운 처리를 유도할 수 있을 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [1] 폐기물 해상처리시스템 개발(연구보고서 및 시스템 설계보고서), 1998, 과학기술부.
- [2] 도시 폐기물의 고형 연료화 장치 개발(연구보고서), 최연석 외, 1999, 산업자원부.
- [3] 폐기물 소각로 계획과 설계, 이봉훈, 1993, 세화출판사.
- [4] 폐기물 핸드북, 1998, 일본폐기물학회, 도서출판 세화.
- [5] RDF의 연소, 佐勝健二, 연소연구 104, 일본연소학회.
- [6] Integrated Solid Waste Management, George Tchobanoglous 외, McGraw-Hill Inc.
- [7] Sumutomo, Kawasaki, Ebara, Kurimoto의 RDF 제조관련 기술 자료.
- [8] 폐기물 고형연료화 기술의 현상과 과제, 김영재, 한국폐기물학회 산학협동심포지움, 2000.