

해양환경보전기술 연구개발 동향 및 사례: 고형 해양폐기물을 중심으로

1. 서 론

지속적인 산업화와 도시화의 물결로 인하여 바다는 태초부터 유지해 온 청정함을 잃어가고 있다. 영국에서 처음 일어난 산업혁명 이후 19세기 후반에는 템즈강변에 위치한 의사당에서 회의를 진행하기 어려울 정도로 템즈강의 오염은 극에 달하였다. 이것이 인간의 산업활동에 의한 첫 번째의 수계오염으로 기록되고 있으며, 그 이후에는 하천 오염의 단계를 벗어나 연안 및 먼 바다의 오염으로 치닫고 있다. 이러한 해양오염은 바다의 자정능력에 대한 무한한 기대에서 비롯되며, 육상에서 발생한 오염물질들의 무분별한 해양배출에 기인한다. 특히, 우리나라는 전세계에서 유례를 보기 어려울 정도로 급속하게 산업화와 도시화가 진행되어 연안의 오염이 심각하며, 이로 인하여 해양생물이 위협받고 해양생산성과 선박의 통항안정성도 저하되고 있다(강창구 2002).

오염물의 종류는 육지로부터 직접 유입되는 고형 및 액상의 폐기물과 선박에서 투기되는 폐기물, 선박 사고에서 비롯되는 해양 유류오염 등을 들 수 있다. 또한 해양오염의 대부분(고형폐기물의 경우 77%, Greenpeace 1998)이 인간의 육상활동에 의한 것이므로, 오염원의 해양유입을 근원적으로 차단하는 노력이 우선시되어야 한다. 더불어, 자정능력의 한계를 벗어난 오염정도에 대해서는 환경보전 및 복원기술을 적용하여야 한다.¹⁾

본 고에서는 해양환경보전기술에 대하여 간략히 기술하고, 고형 해양폐기물에 대한 대응기술개발 연구를 중심으로 해양환경보전기술의 연구개발 동향을 소개하였다.



성 훈 근

· 1970년 6월 7일
· 서울대학교 공학박사(1999년 2월)
· 현 재 : 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 해양안전방제연구본부 선임연구원
· 관심분야 : 수차파수조기법
 환경유체유동(multi-phase flow) 수치해석기법
 해양조사 장비 개발
· 연 락 처 : 042-868-7298
· E-mail : hgsung@kriso.re.kr

- 1) 해양수산부(2003)에 의하면, 해양오염문제에 대한 접근방향이 1970 및 80년대의 오염물질 사후처리단계, 1980년대의 사전오염예방기술단계, 2000년대에는 환경보전 및 복원기술 중심으로 변화하였다.
- 2) 해양오염원에 대한 정확한 분석 및 사전예방 대책 강구, 해양오염물질의 사후 관리에서 사전예방적 해양환경관리로 전환, 해역별 특성에 맞는 환경개선대책을 수립·시행, 과학적 지식의 개발 및 활용을 통한 해양환경관리의 혁신 추진, 전방위 해양환경보전을 위한 제도적 역량 증진, 주변해역의 효과적 환경관리를 위한 지역적·국제적 협력확대, 해양환경보전에 대한 주민의식 개혁 및 자율참여 유도

2. 해양환경보전기술의 영역

해양환경보전기술의 정의와 관련하여 해양환경보전 종합계획(국무총리실 2001)에서 발의한 소위 7대 추진전략²⁾ 및 5대 정책분야³⁾에 의하면, “쾌적하고 생명력 넘치는 해양환경조성”을 해양환경보전의 개념으로 정의내리고 있다. 또한 해양수산부(2003)는 “환경과 인간이 조화되는 건강한 해양 조성”을 해양환경보전기술의 역할로 인식하고 있다. 한편 환경부(1998)에 의하면 이와 관련하여 G-7 환경공학기술개발사업의 중점기술로써 대기 및 수질 등의 오염방지기술과 폐기물 처리기술 및 예방기술이 포함되고 해양환경보전기술은 해양오염방제 및 환경회복기술을 포함하고 있다.

국가과학기술지도(NTRM; National Technology Road Map)에 의하면 해양오염 평가 및 저감기술과 관련하여 향후 10년간 추진하여야 할 연구개발 및 목표로써 1) 해양 수·저질 평가 및 오염저감 기술, 2) 해양폐기물 종합처리시스템 기술, 3) 적조 예보 및 방제 기술, 4) 연안습지 보전·복구 및 활용 기술, 5) 해양생태계 모니터링 및 보전 기술, 6) 유류 및 유해액체물질 유출사고 대응 기술을 제시하고 있다.

따라서 본 고에서는 해양보전기술을 “청정한 해양 수질과 건강한 해양생태계 및 안정적인 해양자원을 유지·복원하는데 요구되는 기술”로서 정의한다.⁴⁾

이것은 보전(保全)의 사전적 의미(온전하게 보호하여 유지함)를 그대로 적용한 것으로 포괄적인 정의로 이해할 수 있다.

위의 정의를 수용한다 하여도 현실적으로 해양환경보전기술은 “오염물의 제거 및 오염된 해역의 복원”이라는 측면에서 이해되는 경향이 있다. 이는 환경부에서 추진한 연구과제 공모에서도 일부 드러나고 있다(환경부 1998).

한편, ScienceDirect 사에 의하면 “환경(environment)”이라는 단어가 포함된 이름을 가진 전문학술지는 38개가 있으며, 이들 중 해양환경문제에 대한 구체적인 연구성과를 수록하는 학술지는 1) Advances in Environmental Research, 2) Environmental Pollution, 3) Marine Environmental Research, 4) Marine Pollution Bulletin으로 집계되었다. 한편 국내에서는 한국해양환경공학회 학회지와 학술대회를 통하여 활용성 높은 연구결과를 수록하고 있는 것으로 판단된다.⁵⁾

본 고에서는 오염물질의 종류에 따라서 해양환경보전기술을 분류할 수도 있음을 지적하고, 저자의 연구경험을 바탕으로 고형 해양폐기물을 중심으로 해양환경보전기술의 연구개발 동향에 대하여 기술한다. 이에 따라 Marine Pollution Bulletin과 한국해양환경공학회지 및 발표회 논문집을 주요 학술지로 하여 작성하였다.

3. 고형 해양폐기물 관련 연구 동향

국내 연안은 고형 해양폐기물로 인하여 해양생태계의 생산성이 저하되고, 선박의 해상안전이 위협받고 있으며, 바다의 심미적 가치가 격감하고 있다. 고형 해양폐기물에 대한 주요 기술은 발생량 저감(예방), 조사, 수거, 처리 기술로 대별할 수 있다. 아래에서 각 세부 기술에 대하여 연구개발 동향을 제시한다.

3.1 부유쓰레기 해양유입 방지기술

국내 해양폐기물의 비교적 많은 부분을 차지하는 육상기인 해양폐기물에 대하여 하천을 통하여 해양으로 유입되는 부유쓰레기를 차단하는 것이 비용적, 실행적 측면에서 매우 중요한 것으로 인식되고 있다(강창구 외, 2000, 2001, 2002a, 2002b). 따라서 예방기술

3) 육상기인 오염원의 해양유입 방지, 해양기인 오염원의 관리, 해양수질 개선 및 생태적 보전, 국제협력 및 지역환경 보전, 해양환경관리기반 강화

4) 바다의 심미적인 가치유지도 이에 포함될 수 있다.

5) 물론 핵심 기술적인 요소는 유체역학, 생물학, 화학공학 등의 다양한 학문의 영역을 포괄하지만, 구체적인 응용연구적인 관점에서 기술한 것이다.

로서는 하천과 수로(강화도의 염하수로 및 석모수로 등)를 통한 해양유입을 방지할 수 있는 기계적 방법이 필요하다. 부유쓰레기는 선박의 통항안전성을 저해하고 해양생물의 생명을 위협할 뿐 아니라(Unepetty & Evans 1997⁶⁾, Cadee 2002⁷⁾, Thiel 2003⁸⁾ 칠 등), 바다의 심미적 가치를 떨어뜨리는 요인이 된다.

육상기인 부유쓰레기의 대부분은 하천을 통하여 바다로 유입되고 해안으로 밀려가거나 혹은 시간이 지나면서 비중이 커져 해저면 바닥으로 가라앉게 된다. 인천해역의 해양폐기물 조사결과에 따르면 조사지역에서 어업기인 해양폐기물과 육상기인 해양폐기물의 무게비율은 97:3이었으며, 부피비는 90:10으로 나타났다(강원수 외, 2001a). 어업기인 해양폐기물이 50년 이상 침적된 어망 및 각종 어구를 포함하는 것이고, 육상기인 해양폐기물은 비교적 근래에서부터 유입된 것이라는 사실을 감안하면 국내에서 하천을 통하여 해양으로 유입되는 부유쓰레기의 총량은 실로 엄청난 양인 것으로 추정된다. 따라서 하천과 수로에서는 부유쓰레기의 흐름을 차단하고 포집하는 장치(부유쓰레기 차단막-강창구 2000)가 필요하고, 연안해역에서는 부유쓰레기의 이동을 차단하고 포집할 수 있는 장치(부유쓰레기 수거망-강창구 2000)가 요구된다.

부유쓰레기가 해양으로 쉽게 유입되는 데에는 사실상 우리나라 하천의 특성에 기인하는 측면이 크다. 우리나라의 지형적 특성으로 인하여 대규모 하천의 기울기가 급하여 유속이 빠르게 되고 빠른 유속으로 인하여 홍수시에는 하안의 각종 쓰레기를 휩쓸고 내려가게 된다. 또한 하상계수(해당하천의 최대유량과 최소유량의 비)가 나일강 1:30, 양자강 1:22, 라인강 1:14인데 비해, 우리나라의 주요 하천인 한강의 경우 1:393, 낙동강은 1:372, 금강은 1:299이다. 즉 갈수기에는 강바닥의 대부분은 드러나게 되어 각종 쓰레기의 유입이 쉽게 발생할 수 있다.

부유쓰레기 수거망과 차단막에 대한 기술은 오일붐에 대한 기존 연구 성과(Cross & Hault 1970, Milgram 1970, Sung et al. 1995, 유정석 외 1998)를 확장하여 적용한 것이다. 수거망과 차단막은 그림 1에 보인 바와 같이 일반적인 오일붐의 형상을 하고 있으며, 스킵트부분이 격자구조로 되어 있어 부유쓰레기의 포획이 용이하고 어도를 차단하지 않도록 하였다. 수거망은 해안선에서 멀지 않은 해역에서 사용하고 작업방식이 오일붐과 유사하지만(그림 2), 오일붐의 일반적인 예인속도보다 훨씬 더 큰 유속 3m/sec 에도 견딜 수 있는 구조가 바람직한 것으로 보인다. 또한 하천과 수로에 사용하기 위한 부유쓰레기 차단막은 이보다 더 큰 유속(강화도 석모수로 및 염하수로에서는 4m/sec를 상회하는 경우도 있음)에 노출되기 때문에 인장강도 설정에 세심한 주의가 요구된다(성홍근 & 유정석 2002). 한편, 전통적으로 사용되어온 오일붐 혹은 차단막에 걸리는 장력추정기법의 타당성을 재검토할 필요성이 있으며, 보다 정확한 장력추정을 위한 기법 개발의 필요성이 높다(유정석 외 2002). 특히, 하천 및 수로용 차단막의 경우 수거방법과 연계하여 전장방법을 설정하여야 하며, 차단막과 계류계의 연성거동 해석을 통해 설계방법의 신뢰도를 높여야 한다(강창구 외 2001). 한편 초기의 부유쓰레기 수거망 및 차단막은 판 스프링을 이용한 자동팽창식이었으나, 실제 하천에 설치할 수 있는 강인한 구조를 위하여 지자체에 보급할 수 있는 차단막은 고품식으로 제작되었다(강창구 외 2002). 이는 공기팽창식이 부유쓰레기에 의해서 부력실이 파손될 우려가 있고, 공기밸브 부위가 장력에 견디기 어렵기 때문이다.

3.2 해양폐기물 조사기술

해양폐기물 조사기술은 조사장비의 개발과 운용기술로 이루어진다. 조사장비는 해양폐기물의 종류와 조

6) 플라스틱이 생물체에 미치는 영향에 대한 연구

7) 플라스틱 부유쓰레기에 의한 바다새의 피해 사례 제시

8) 레연안의 부유쓰레기 분포에 대한 연구

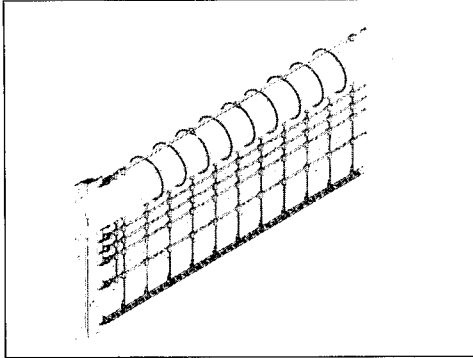


그림 1. 수거망 및 차단막 형상

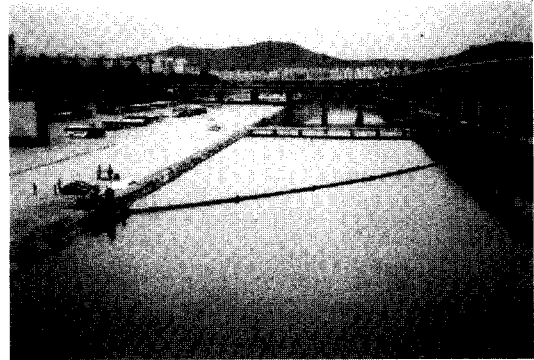


그림 3. 부유쓰레기 차단막(강, 댐용)

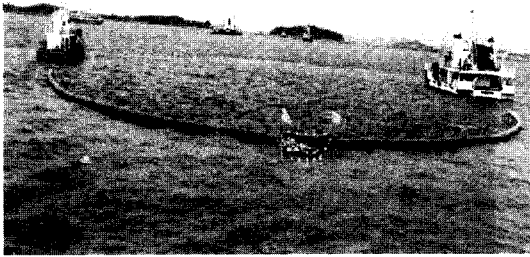


그림 2. 연안 부유쓰레기 수거망



그림 4. 부유쓰레기 해양유입 차단막(수로용)

사위치(수면과 해저면)에 따라 다르다. 또한 해저면 폐기물의 경우 수심에 따라 달라진다. 현재까지 부유쓰레기의 경우 낭장망을 활용하여 성상과 중량을 분석한 예가 있으며(강원수 2001a), 하천을 통한 부유쓰레기 유입 분석방법으로 고정점에서 목측에 의한 방법(강창구 2002)과 항공기를 이용한 이동관찰방법(Lecke-Mitchel & Mullin 1997)이 있다. 그러나 낭장망 등의 직접 샘플링 기법이 아니면, 중량추정이 부정확하다는 단점이 있다. 더불어 조사기법으로부터 실제 폐기물 양을 추정하는 기법과 관련하여 Velandar & Mocogni(1995), Chiappone et al.(2002)에서 시도된 것과 같이 보다 체계적 분석방법을 활용할 필요성이 높

다. 국외의 경우 부유쓰레기와 관련하여 Derraik(2002)⁹⁾, Cadee 2002¹⁰⁾ 등과 같이 생태계에 미치는 영향에 대한 연구가 주종을 이루며, 특정 해역에 대한 부유쓰레기 조사결과에 대한 연구(Thiel 2003, Lecke-Mitchel & Mullin 1997)도 보고되고 있다.

해저면 폐기물에 대해서는 수심 100m 이하인 해역에서 형망선의 어구·어법을 이용한 샘플링기법(Galgani et al.(1995), Galil et al.(1995), Stefatos et al.(1999), 강원수 외 2001b)이 주로 활용되었다. 한편 강원수 외(2001b)에서는 양방향음파탐사기(Side Scan Sonar)와 Grab이나 Corer를 이용한 직접샘플링 방법과 형망선을 이용한 방법을 조합하여 해저 침적폐기물의 분포

9) 플라스틱 쓰레기가 해양생태계에 미치는 영향분석

10) 플라스틱 부유쓰레기에 의한 바다새의 피해 사례 제시

를 분석하였다.

한편, 수심이 깊은 해역에 대하여 Galgani et al.(2000)는 수심 2700m 해역(발트해, 북해, 켈트해, 비스케이 만)에 유인잠수정(Cyana 와 Nautil)을 투입하여 해저면 쓰레기의 분포 및 조성을 분석하였다. 그러나, 유인잠수정 혹은 기존의 ROV 등을 이용한 방법은 운용 기술과 비용의 확보가 용이하지 않다.

저수심인 경우에 Donohue et al.(2001)¹¹⁾와 같이 잠수부를 동원하여 해양폐기물 조사작업을 실시하는 방법이 있으나, 잠수부를 활용한 방법은 조사효율이 낮고, 깊은 수심에 적용하기 어려우며 안전성에 중대한 결함을 가지고 있다.

한편, 강창구 외(2002)는 대수심(수심 500~1,000m)에서 해저폐기물을 조사할 수 있는 장비(대수심 침체어망 조사장비)를 개발하였다. 아래에서 한국해양연구원에서 동해안 주요 어장의 침체어망 조사를 위해 개발한 대수심 침체어망 조사장비의 개발개념과 장비의 주요사양 및 실험역 성능시험에 대하여 간략히 기술한다.

전술한 바와 같이 유인잠수정, ROV, AUV 등의 첨단 해양탐사장비를 사용하는 것은 비용적인 측면에서 적합하지 않기 때문에, 보다 저렴하면서도 해저면의 폐기물에 대한 조사를 가능하게 할 수 있는 장비의 개발이 이루어져야 한다.¹²⁾

동해안의 경우 탁도가 나쁘지 않기 때문에 카메라를 이용한 조사가 가능하다는 것이 매우 중요한 출발점이라고 할 수 있다. 삼척시에서 2001년에 용역 실시한 침체어망 인양사업 실태조사에서 실제로 간단한 형태의 수중카메라를 약 100m 내외의 해역에 투입하여 해저면의 침체어망을 촬영한 사례가 있었다. 그러나 이러한 방법은 150m 이상의 수심에 적용하기에는 무리가 있고, 카메라의 자세도 나쁘기 때문에 촬영한 영상이 양호하지 않다(강창구 외 2002). 그러므로

ROV보다 비용이 적게 들고 간단한 수중카메라보다는 정교한 중간적인 형태의 조사장비를 개발하는 것이 최적이라고 판단하였다. 이와 같은 범주에 속하는 해양 탐사장비는 Tow-sled형의 조사장비라고 할 수 있다. 이러한 장비는 탑재장비를 보호할 수 있고 원하는 수심까지 내릴 수 있는 강도와 외형을 갖추고 있다. 탑재하는 장비의 종류와 Tow-sled의 자항여부에 따라 목적과 기능을 달리한다.

가장 첨단적인 형태의 Tow-sled형 조사장비는 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institute)에서 개발한 ARGO II이다. ARGO II는 1993년에 제작되었으며, 길이가 4.6m에 달하고 6,000m 수심까지 투입할 수 있으며, 잠수시간은 최대 6시간이다. 탑재장비는 광학카메라와 비디오 카메라 및 라이트와 자세센서, LBL(Long Base Line), Imagenex 855 Sonar 등이며, DC Truster에 의한 추력시스템도 갖추고 있다.

비교적 원시적인 형태의 Tow-sled는 일본 수산공학연구소(NRIFE, National Research Institute of Fisheries Engineering)에서 개발한 DVMSTS(Deep-sea Video Monitoring System on a Towed Sledge)이다. 수심 1,000m 내외에서 대게(Queen Crab)의 서식 밀도를 조사하기 위해 개발된 DVMSTS는 간단한 타원형 구조의 프레임에 광학비디오카메라와 라이트를 장착한 형태를 지니고 있다.

한국해양연구원에서는 침체어망 조사장비의 개발목적과 개발기간 등을 고려하여 일본 수산공학연구소의 DVMSTS의 형태로 개발방향을 정하였다. 일본 수산공학연구소의 DVMSTS는 비교적 평탄한 해역에서 해저면을 촬영하는 장비인 반면, 침체어망 조사장비는 보다 더 심한 해역조건과 해저지형에 노출될 가능성이 높기 때문에 보다 더 높은 강도를 가지도록 하였다. 이와 같은 기본 개념을 가지고서 설계된 침체어망 조사장비는 그림 5에 제시된 바와 같다.

11) 하와이 해역 북서지역 섬주위 해역에서 저인망과 자망 및 계류사 등의 폐어구에 의한 산호초 지역의 피해를 확인하였다.
12) 해양폐기물의 조사는 수거작업을 전제로 하여 이루어지는 경우가 많으며, 이 경우 조사작업은 수거작업에 대한 용역사업의 시설계를 뒷받침하기 위한 자료제공을 목적으로 한다. 따라서 조사작업이 너무 많은 비용이 소요되는 것은 정책적으로 바람직하지 않은 것으로 이해되고 있다.

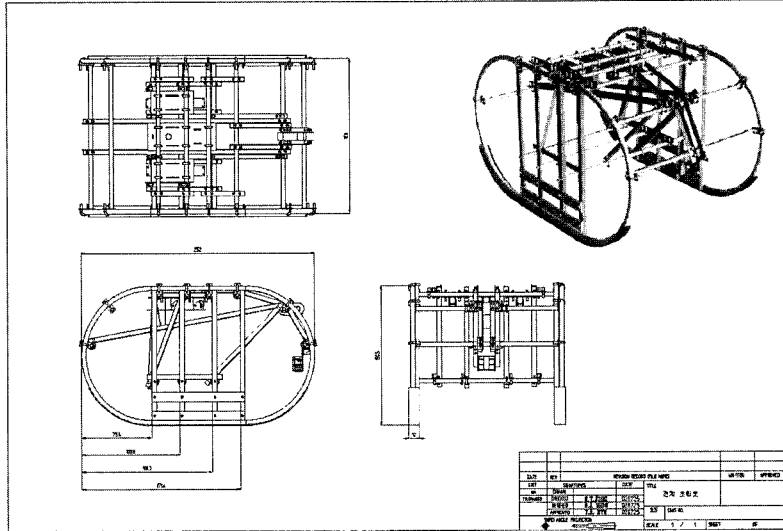


그림 5. 침체어망 조사장비 설계도면

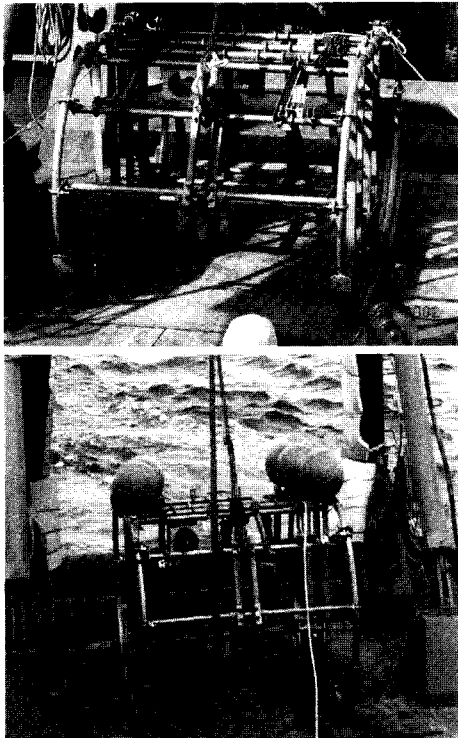


그림 6. 대수심 침체어망 조사장비

침체어망 조사장비에 탑재할 장비는 우선 심해 촬영시스템과 전방위소나 및 위치추적시스템이다¹³⁾. 심해 촬영시스템은 광학카메라와 조명(라이트), 비디오 저장장치(Video Recording Unit), 전원공급을 위한 배터리 및 저장장치와 라이트를 콘트롤할 수 있는 콘트롤러, 저장장치와 전원공급장치, 콘트롤러를 보호할 수 있는 심해 하우징으로 구성된다. 전방위소나(FLS, Forward Looking Sonar)는 주로 ROV와 같은 수중잠항체의 앞쪽에 있는 물체와의 충돌회피를 위해 사용되는 일종의 레이더와 같은 기능을 하는 것으로 Imagenex사의 FLS로 최대 1Mhz의 주파수를 갖는 고해상도의 음향탐지기이다. 위치추적장치는 Tow-sled에 장착된 Transducer가 작업모선에 부착된 Tranceiver와의 교신을 통하여 Tow-sled의 위치를 추적할 수 있는 장비이다.

이 밖에도 작업모선의 위치를 추적할 수 있는 DGPS unit과 Tow-sled의 투입과 예인경로를 결정하기 위해서 해저면을 조사하기 위한 양방향음파탐지기(S.S.S.; Side Scan Sonar)가 요구된다. 특히 해저면의 형태가 사전에 알려져 있지 않은 경우에 양방향음파탐지기의

13) 일본 수산공학연구소의 DVMSTS는 심해 촬영시스템만을 탑재하고 있다.

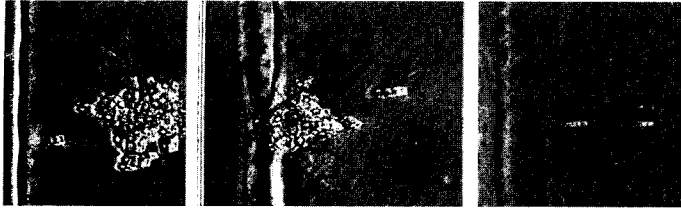


그림 7. 양방향음파탐지기(S.S.S.)를 이용한 해저면조사결과(해저지형, 어초 및 침선 등의 인공구조를 확인 가능, 삼척 정라항 앞바다)

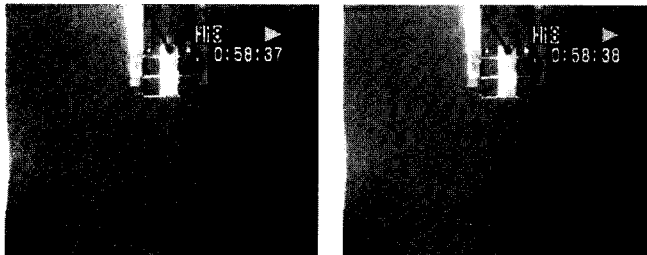


그림 8. 심해촬영시스템 영상취득결과 (2002.11.14, 삼척 정라항 앞바다, 수심 20m 해역)

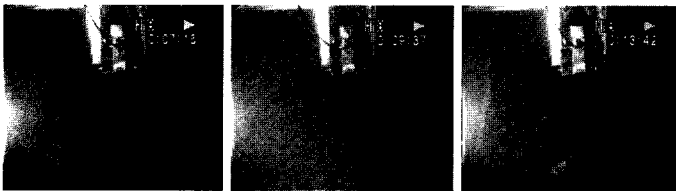


그림 9. 심해촬영시스템 영상취득결과 (2002.11.14, 삼척 정라항 앞바다, 수심 50m 해역)



그림 10. 심해촬영시스템 영상취득결과 (2002.11.15, 삼척 정라항 앞바다, 수심 230m 해역)



그림 11. Tow-sled가 어초를 타고 넘어가면서 촬영한 화면 (삼척 정라항 앞바다)

사용은 매우 중요한 선결조건이다. 선택 사항으로 작업해역의 조류정보 획득을 위해서 ADCP(Acoustic Doppler Current Profiler)를 사용할 수 있다.

개발된 침체어망 조사장비를 실험해역에서 운용하기 위한 작업모션은 Tow-sled를 손쉽게 입수/회수할 수 있는 윈치 및 적절한 높이와 구조를 가진 A-frame을 탑재하고 있어야 한다. Tow-sled의 투입/회수 및 양방향음파탐지기의 운용을 위하여 선미에 충분한 작업공간이 확보되는 것도 중요하다. 또한 Tow-sled가 페어망 등에 걸리는 경우를 대비하여 윈치는 충분한 용량을 가지고 있어야 한다.

그림 6은 작업모션 선미에 위치한 침체어망 조사장비를 보이고 있다. 예인 중 조사장비의 자세를 안정화시키기 위해서 상부에는 부력재, 하부에는 중량물을 취부하였다. Tow-sled의 자세 안정성을 확인하기 위하여 부력재 및 중량물을 탑재한 상태에서 해표면에서 예인시험을 실시하였다(강창구 외 2002). 그림 7은 양방향음파탐지기(S.S.S. : Side Scan Sonar)를 이용하여 해저면 지형을 조사한 결과를 보이고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 해저지형은 물론이고 어초 및 침선 등의 인공구조물을 직접 확인할 수 있기 때문에, 침체어망 조사장비의 예인경로를 결정하는데 중요한 자료를 제공한다. 한편, 해저면 침체어망에 대한 조사결과가 수거작업에 활용되기 위해서는 DGPS와 전자해도를 이용한 위치정보시스템이 필수적이다.

그림 8과 9에 보인 바와 같이 심해 촬영시스템을 탑재한 Tow-sled를 이용하여 침체어망과 같은 해저면 침적 폐기물을 식별할 수 있음을 확인할 수 있었다. 또

한 수심 230m 해저면에서 새우, 불가사리, 가오리, 해파리 등의 해양생물과 페로프, 해파리 사체 및 바다장어 및 대게에 대한 영상을 획득하였다(그림10).

이 밖에도 침체어망 조사장비의 활용방법에 대하여 실험역 성능시험의 주요 결과 중 일부를 제시한다. 타도가 높은 해역의 경우 광학카메라에 의한 물체식별은 거의 불가능하다. 부산해역의 수심 30m 해역으로 조속이 거의 없는 시간대에 촬영하였지만, 타도가 높아 해저면 영상에서 물체의 식별은 거의 불가능하였다. 부산해역의 수심 110m 해저면 영상에 대하여 물체 식별은 가능하나, 동해안과 비교해서는 타도가 나쁜 것으로 확인되었다. 따라서 타도가 높은 해역에서 해저면 영상을 취득하기 위해서는 다른 장비를 사용하여야 한다.

한편, Tow-sled의 강도와 관련하여 삼척해역에서 중요한 경험을 할 수 있었다. 그림 11에 도시한 것과 같이 Tow-sled가 해저면에 놓인 어초를 타고 넘어가는 상황에서 Tow-sled의 일부 부재가 어초에 걸려 2~3톤 이상으로 추정되는 외력이 가해짐으로써 Tow-sled의 횡부재에 직접적인 변형을 초래하였다. 그러므로 양방향음파탐지기를 이용하여 안전한 예인경로를 설정하여도 해저면에서 이러한 상황은 예상할 수 있어야 하며, Tow-sled의 주요 구조부재의 강도를 충분히 확보해야 한다.

침체어망 조사장비와 같은 해양폐기물 조사장비 기술은 계류계의 거동해석 등, 다소 고전적인 해양공학과 ROV, AUV 및 각종 해양탐사장비에 대한 첨단 해양공학적 이론과 기술을 결합함으로써 완성도를 높일 수 있으며, 실험역에서의 안정성을 향상시킬 수 있다.

3.3 해양폐기물 수거기술

해양폐기물 수거장비의 개발은 바가지 혹은 선박형태의 수거시스템과 작업조건에 맞추어 사용할 수 있도록 제작된 수거장비로 나누어진다. 선박형태의 수거시스템에 대해서는 재래식 어장정화선의 형태를 벗어나, 보다 효율이 우수한 수거선을 개발하고자 하는 노력이 있었다(강창구 외 2002, 조용진 외 2001, 조용

진 외 2002a, 2002b). 아래에서 이에 대하여 간략히 소개한다.

현재까지 개발된 수거시스템은 천해역(수심 15m)을 대상으로 하여 개발된 “다기능 해양폐기물 수거시스템”으로 서해안의 얕은 수심과 빠른 물살에 적합한 선박형으로 개발되었다(그림 12). 또한 스크류가 페어망에 걸려 이동과 작업이 중단되지 않도록 선의 추진시스템을 탑재하였다. 수거장비는 수심 15m 해저면의 폐기물을 수거할 수 있는 다관절 수거시스템과 예인식 수거작업을 가능하게 하는 Gallows와 갈구리 예인식 수거장치를 포함한다. 이 밖에도 수거시스템의 보조장비로서, 위치정보시스템과 와이어절단시스템, 자동세척시스템 등이 있다(그림 13). 이러한 개별적인 수거장비는 작업현장에서 손쉽게 빠른 시간내에 교체할 수 있는 구조를 가지고 있어야 한다. 한편 혼탁한 수중에서 폐기물을 식별할 수 있는 탐지시스템의 필요성이 매우 높다는 것을 지적하고자 한다(강창구 2001).

해양폐기물 수거시스템의 설계와 제작은 선박으로서의 요구조건(해역환경, 주요치수 등)과 수거작업을 위해서 필요한 조건(수거장비, 작업 및 저장 공간 등)을 충족하도록 목적선의 설계 및 제작과정을 따라 이루어진다. 또한 수거장비의 경우에는 기존 장비의 성능을 개선하는 노력과 함께 새로운 형태의 수거장비를 개발하는 것도 포함되어야 한다. 수거시스템과 장비의 성능을 확인하고 보완하기 위하여 실험역 시험은 필수적인 것으로 판단된다.



그림 12. 다기능 해양폐기물 전용 수거시스템

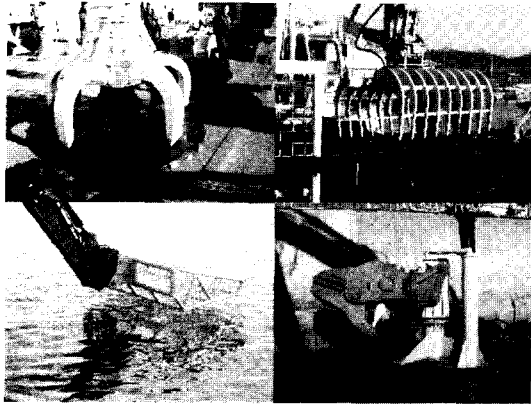


그림13. 해양폐기물 수거장비

해양폐기물 수거선은 작업수심이 깊어지면, 해당하는 수거장비의 사양에 중대한 변화가 있기 때문에 추가적인 연구가 필요한 것으로 보인다. 예를 들어, 동해안 침체어망 문제와 관련하여 현재 수거장비로 사용하고 있는 것은 어업인이 사용하는 갈구리를 변형시킨 것으로 와이어를 충분히 풀어 갈구리가 해저면에 닿게 한 다음 침체어망이 걸릴 때까지 예인하여 수거하는 방식을 사용하고 있다. 그러나 이러한 방식은 작업효율이 낮아 개선된 방법에 대한 필요성이 높다.

이에 대하여 전술한 대수심 침체어망 조사장비를 사용할 수 있다. 그러나 이 장비는 조사장비일 뿐 수거기능을 가지고 있지 못하고 폐기물의 위치에 대한 정보만을 준다. 갈구리를 이용한 기존 수거방법은 정확한 위치를 예인할 수 없기 때문에 조사한 결과를 이용한 수거방법에도 문제가 있다. 계류동력학에 의하여 갈구리와 와이어의 거동해석기법에 따라 예인시 갈구리의 위치를 예측할 수 있으나, 수면하의 유속분포에 대한 불확실성이 높아 추정치에 오차요인이 높다고 할 수 있다.¹⁴⁾

3.4 해양폐기물 처리기술

해양폐기물에 대한 처리기술은 수거된 해양폐기물

을 효과적이고 친환경적으로 처리 혹은 재활용할 수 있는 기술을 지칭한다. 최근까지도 대부분의 해양폐기물은 매립에 의하여 처리되었으나, 이제는 자원화, 감량화, 무해화의 3원칙에 의해 처리할 수 있는 기법을 개발한 것으로 보인다(강창구 외 2002, 김용섭 2000, 길상인 외 2001, 김용섭 외 2001, 길상인 외 2002a, 2002b, 2002c).

해양폐기물은 육상폐기물에 비하여 폐기물의 조성이 간단하고, 자원화 가능한 물질을 다량으로 함유하고 있으며, 발열량이 높고, 부패하거나 악취의 가능성 낮으므로 조속한 처리를 요하지 않는다는 장점이 있다. 반면, 폐기물간의 함수율 변동이 심하며, 염분에 의한 처리설비의 부식위험성이 높고 절단과 파쇄를 요하는 폐기물이 많으며 발생위치가 분산되어 수집이나 집하체계의 구성이 용이하지 않다.

이러한 장단점 분석을 통하여 해양폐기물의 안정적 처리를 위해서 전처리시스템(염분제거 등)의 개발이 선행되었으며, RDF(Refuse Derived Fuel)를 생산하는 자원화시스템과 어구용 펠스티로폼을 감용할 수 있는 장비와 해양폐기물을 무해하게 소각할 수 있는 설비를 개발하였다(강창구 외, 1999, 2000, 2001, 2002). 아래에서는 개발된 해양폐기물 처리방법 및 시스템에 대하여 간략히 소개한다.

수거된 해양폐기물의 처리에 대한 기술적 접근은 “해수가 첨가된 폐기물”의 안정화에서 시작되어야 하며 폐기물의 특성상 자원화로까지 이어질 수 있다. 그러나 해수에 대한 전처리적 대응이 적절치 못하게 되면 폐기물 처리 설비의 부식, 폐기물을 자원으로 사용하는 설비의 활용 거부 등 폐기물 처리에 큰 문제가 발생할 수밖에 없다. 현재 염분에 의한 처리설비의 부식을 방지하고, 조대성 폐기물(목재, 로우프 등)의 처리를 가능하게 하고 해양폐기물의 자원화를 극대화하며 처리설비에 의한 공해물질 발생을 최소화하기 위하여 세정기, 절단기, 파쇄기, 탈수기, 건조기 등으로

14) 따라서 조사와 수거를 동시에 할 수 있는 기법의 개발이 요구되고 있으며, 한국해양연구원에서 이에 대한 연구를 진행하고 있다.

해양환경보전기술 연구개발 동향 및 사례: 고품 해양폐기물을 중심으로

이루어지는 전처리시스템이 개발되어 있다¹⁵⁾(그림 14).

현재 국내에서는 폐기물 처리를 위해 매립에 크게 의존하고 있으나 부지확보와 2차 오염문제로 인하여 소각에 대한 의존경향을 점차 증가시켜가고 있다. 매립의 경우 좁은 국토의 활용성 문제로 더 이상의 매립지를 확보하기는 어려운 실정이며 이전의 매립지를 보다 효율적으로 활용하기 위한 여러 가지의 아이디어가 나오고 있는 실정이다. 또한 소각에 있어서는 배출가스의 유해성 문제와 보다 깨끗한 연소가스의 배출 요구에 부응하기 위한 설비비의 증가 등 환경적, 경제적 문제가 부각되어 있으며 이로 인하여 새로운 폐기물 처리방법의 출현에 대한 관심이 커지고 있다.

이러한 문제는 우리나라만의 문제가 아니며 일본에

서는 더욱 심각하여 새로운 폐기물 처리안으로 폐기물의 연료화가 대두되었다. RDF, 즉, 폐기물연료화 기술은 1960년대 영국에서 처음 소개되었으며 1970년대 미국에서 석탄보일러에 폐기물을 석탄과 혼합하여 사용한 것이 시초라 할 수 있다. 우리 나라에서도 RDF 시스템의 도입을 시도한 적이 있다. 1980년대 서울의 난지도에 폐기물을 이용한 RDF제조를 시도하였으나 당시 폐기물의 상당부분을 차지하던 연탄 그리고 발열량이 떨어지는 주방쓰레기가 다량으로 함유되어 있어 국내의 RDF시도는 실패하게 되었다. 그러나 연탄의 사용이 사라지면서 폐기물이 양질화되고 최근 지구온난화 문제가 대두되면서 RDF에 대한 관심이 급격히 증가하고 있다. 이는 RDF의 사용으로 천연자원

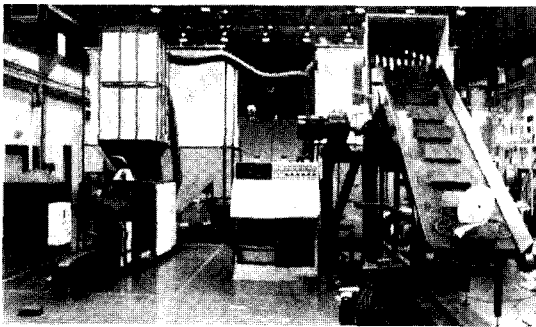


그림 14. 해양폐기물 전처리/자원화시스템

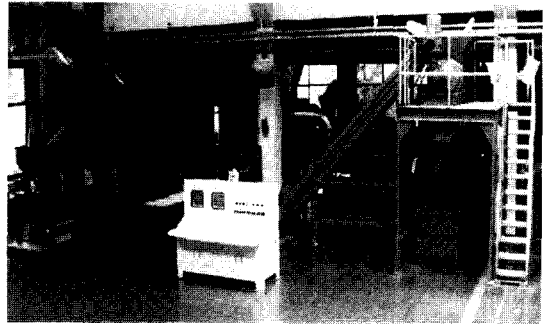


그림 16. 어구용 페스티로폼 감용시스템

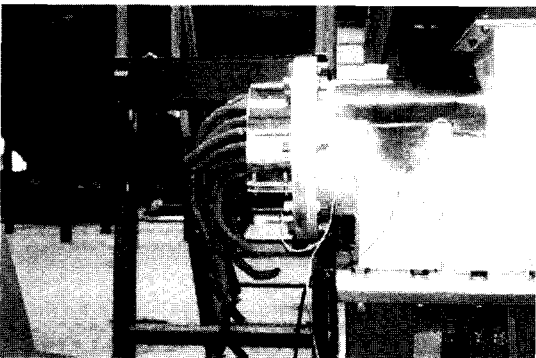


그림 15. 해양폐기물 RDF 성형과정

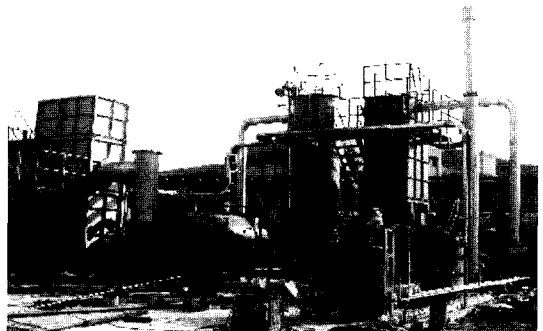


그림 17. 해양폐기물 전용소각로

15) 현재 개발되어 있는 전처리시스템은 함수율: 30% 이하, 염분농도: 0.1% 이하, 길이: 50cm 이하의 설계기준을 가지고 있다.

에너지의 사용을 줄이고 이산화탄소의 배출 규제 문제를 해결할 수 있기 때문이다. 한편, 일본에서는 RDF의 제조와 제조된 RDF의 사용을 의무화하는 지방자치체가 점차 많아지고 있다.

페플라스틱류, 폐목재 등을 주성분으로하는 해양폐기물은 우수한 RDF 재료가 될 수 있으며, 현재 해양폐기물을 RDF로 만들 수 있는 전용 자원화시스템이 개발되어 있다(길상인 외 2001, 그림 15).

폐기물 자원화와 관련하여 부피를 줄여 처리방법의 감량화하는 방법을 가장 효과적으로 사용할 수 있는 해양폐기물은 어구용 페스티로폼 부자이다. 양식장 등지에서 무분별하게 버려지는 연간 3,000만개 이상이 발생하고 있는 것으로 추정하고 있다. 현재 페스티로폼 부자에 대한 감용장치가 개발되어 있다(길상인 외 2002a, 그림 16). 실증 시스템의 운전에 의해 검증된 폐부자 감용비는 약 1/100이므로, 감용에 의하여 보관과 이송작업이 매우 용이하게 되었다. 현재 개발된 “어구용 페스티로폼 감용시스템”은 경남 남해군에 이관되어 활용되고 있다.

소각의 경우 유럽의 기술 선진국들은 100년 이상의 역사를 가지고 있으나, 우리나라의 소각기술은 1980년대부터 유럽의 기술이 직접 또는 일본 등지를 경유하여 도입된 것이 대부분이다. 대표적인 기술로서는 고품폐기물 소각을 위한 스토커소각과 슬러지(항만, 하수, 제지) 소각에 많이 활용되고 있는 유동층 소각 등이 있으나, 해양폐기물에 대한 적용에 있어서는 세부 소각기술과 함께 전처리시스템의 구성 또한 중요하게 고려되어야 한다(강창구 외 2002). 현재 해양폐기물의 특성에 맞게 전용소각로가 개발되어 있다(그림 17).

4. 향후 해양환경보전기술의 연구방향

전술한 해양폐기물의 예방, 조사, 수거, 처리의 세부기술은 이제 실용화 이전단계에 접어 든 것으로 평가되고 있다. 따라서 앞으로는 지자체 등의 수요자에

이관하여 현장에서 직접 활용할 수 있도록 하는 것이 바람직하다. 그러므로 우선적으로 실용화 및 보급화를 위해서 요구되는 각 시스템과 장비의 안정성을 높이는데 주력해야 한다.

이와 관련하여 향후 해양환경보전 기술 개발에 있어서도 수요자의 입장과 국가의 해양환경보전 정책의 주된 방향을 고려하여 최종적인 활용방안을 설정하는 작업이 우선적으로 이루어져야 한다.¹⁶⁾ 환경문제는 국가의 정책적 결정과 해당 과학기술이 조화를 이루지 못하면 실로 엄청난 피해를 볼 수 있기 때문에, 해양환경보전 정책이 실패로 돌아가지 않도록 해당 분야에서 전문성 있는 과학기술자의 역할이 중요하다. 예를 들어, 육상폐기물의 경우 소형 소각로의 실패에서 보듯이 세부적인 기술검토없이 해당 장비의 개발과 보급이 이루어져, 국가적으로 엄청난 예산낭비와 환경적인 피해를 감수해야만 했다.

더불어 해양환경보전기술의 경우 소위 학제간 공동연구의 필요성이 높음을 지적하고자 한다. 해양폐기물에 의한 피해를 최소화하고 해양환경을 보전하기 위한 기술은 특정 학문의 영역에 국한되지 않고 다양한 학문의 영역을 아우를 때 가장 효과적인 해법을 제시할 수 있다. 따라서 향후 해양폐기물 관련 수요기술의 도출과 세부 기술의 개발은 자연과학과 공학적 연구방법의 조화로운 결합이 중요한 것으로 판단된다. 자연과학에 의한 연구결과는 주로 피해분석과 현황에 대한 신뢰성 있는 현황 자료를 제시하는 방향이 바람직한 것으로 보인다. 한편, 공학적 방법은 환경복원을 위해 필요한 구체적인 기술의 개발을 위주로 하는 것이 타당하다. 그러나, 피해 조사 및 분석 과정에도 해양장비의 개발과 운용에 관련된 기술이 요구되어 공학적 접근방법 및 요소기술이 중요하게 사용된다. 또한 환경복원 기술개발 분야에서 기계적 장치를 개발하고 제작함에 있어서도 해양환경현상에 대한 자연과학적 이해가 뒷받침되어야 한다. 그러므로 해당 기술의 성격에 맞는 연구 추진체계 구축이 연구성과의 성패의

16) 물론 요소기술과 해당 정책은 상호작용을 주고 받으면서 발전 및 확립될 수 있다.

관건이 될 것이다.

5. 결 론

본 고에서는 해양환경보전기술에 대하여 간략히 기술하고, 고품 해양폐기물을 중심으로 예방, 조사, 수거, 처리 기술의 연구성과를 위주로 설명하였다. 현재 고품 해양폐기물에 대한 대응기술이 각 부분에서 전반적으로 기반기술의 단계를 넘어서 실용화 단계 혹은 실용화 직전단계로써 실용화를 위한 기술의 안정화가 중요함을 지적하였다. 또한 향후 해양환경보전 기술의 연구방향에 있어, 수요자의 입장과 국가의 해양환경보전 정책의 관점을 고려하여 최종적인 활용방안을 우선 설정하고 이에 맞추어 기술개발이 이루어져야 함을 강조하였다. 더불어 해양환경보전기술 개발에서 다양한 학문분야 간의 공동 및 협동연구의 중요성이 높음을 지적하였다.

후 기

본 고는 해양수산부 용역과제로 수행중인 “해양폐기물 종합처리시스템 개발연구”의 일부분을 포함한다.

참고문헌

[1] 강원수 외 2001b, 인천앞바다 쓰레기 실태조사 및 수거처리 실시설계, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 연구용역 보고서

[2] 강원수 외 2001a, 수중침적 폐기물 실태조사 및 분포도 작성, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 연구용역 보고서

[3] 강창구, 2002, 해양폐기물 종합관리 방안, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 1-13.

[4] 강창구 외 2000, 2001, 2002a, 2002b, 해양폐기물 종합처리시스템 개발연구(I, II, III, V), 한국해양연구원 해양시스템안전연구소 연구용역 보고서

[5] 국무총리실 2001, 해양환경보전 종합계획(2001~2005), 국무총리실 수질개선기획단(관계부처 합동)

[6] 길상인, 윤진환, 김석준, 심성훈, 최연석, 2001, 해양폐기물을 이용한 폐기물연료(RDF)의 제조 및 특성 분석, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 79-84.

[7] 길상인, 김석준, 윤진환, 유정석, 2002a, 어구용 페스티로폼

감용시스템 개발, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 41-46.

[8] 길상인, 윤진환, 최연석, 강창구, 유정석 2002b, 수거된 해양폐기물 자원화 기술개발(I) -해양폐기물의 폐기물연료화, 한국해양환경공학회지 제5권 제2호, pp. 28-34.

[9] 길상인, 김석준, 윤진환, 강창구, 유정석, 2002c, 수거된 해양폐기물 자원화 기술 개발(2)-어구용 페스티로폼의 자원화를 위한 열적 감용시스템 개발, 한국해양환경공학회지 제5권 제2호, pp. 35-40.

[10] 김용섭, 2000, 오일 회수를 위한 페로프와 페어망 열 분해 장치 개발에 대한 연구, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 17-24.

[11] 김용섭, 정충훈, 김백현, 2001, 해양폐기물 소각을 위한 방향성 건류 소각로 초기 설계, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 117-125.

[12] 성홍근, 유정석, 2002, “부유물 차단막 실험역 성능시험 연구”, 선박해양기술 제34호, pp. 75-82.

[13] 유정석, 성홍근, 유재문, 2002, 부유물 차단막에 작용하는 장력추정에 관한 실험연구, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 183-191.

[14] 유정석, 이문진, 김진환, 강창구, 1998, 오일붐의 실험역 성능평가에 관한 연구, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 233-246.

[15] 유정석, 이문진, 김진환, 1999, 오일붐의 실험역 성능평가 기법 개발, 한국해양환경공학회지 제2권 제1호, pp. 49-62.

[16] 조용진, 문일성, 신명수, 유정석, 강창구, 2001, 해저폐기물 전용수거선 crl 개념설계, 한국해양환경공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 68-78.

[17] 조용진, 문일성, 신명수, 유정석, 강창구, 2002a, 천수용 다기능 해양폐기물 수거시스템 개발(PART 1 : 초기 개념설계), 한국해양환경공학회지 제5권 제2호, pp. 50-61.

[18] 조용진, 문일성, 신명수, 유정석, 강창구, 2002b, 천수용 다기능 해양폐기물 수거시스템 개발(PART 2 : 시스템 구성 및 성능시험), 한국해양환경공학회지 제5권 제2호, pp. 62-67.

[19] 해양수산부 2003, 해양환경보전 연구개발 사업, 해양수산부 해양정책국

[20] 환경부 1998, <http://www.ksrdc.or.kr/project/envi.htm>, '98 환경기술연구개발사업 추진공고

[21] Cadec, G.C. 2002, “Seabirds and Floating Plastic Debris”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 44, pp.1294-1295.

[22] Chiappone, M., White, A., Swanson, D.W. & Miller, S.L. 2002, “Occurrence and Biological Impacts of Fishing Gear and Other Marine Debris in Florida Keys”, Marine Pollution Bulletin, Vol. 44, pp.597-604.

[23] Cross, R.H. & Hault, D.P. 1970, “Oil Booms in Tidal Currents”, Proc. 12th Int. Conf. on Coastal ASCE, pp.

특 집

- 1745-1758.
- [24] Derraik, J.G.B. 2002, "The Pollution of the Marine Environment by Plastic Debris", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 44, pp.842-852.
- [25] Donohue, M.J., Boland, R.C., Srameck, C.M. & Antonelis, G.A. 2001, "Derelict Fishing Gear in the Northwestern Hawaiian Islands: Diving Surveys and Debris Removal in 1999 Confirm Threat to Coral Reef Ecosystems", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 42, No. 12, pp.1301-1312.
- [26] Galgani, F., Jaunet, S., Campillo, A., Guenegon, X. & His, E. 1995, "Distribution and Abundance of Debris on the Continental Shelf of the North-Western Mediterranean Sea", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 30, No. 11, pp.713-717.
- [27] Galgani, F., Leanute, J.P., Moguelet, P., Souplet, A., Verin, Y., Carpentier, A., Goraguer, H., Latrouite, D., Andral, B., Cadiou, Y., Mahe, J.C., Poulard, J.C. & Nerisson, P. 2000, "Litter on the Sea Floor Along European Coasts", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 40, No. 6, pp.516-527.
- [28] Galil, B.S., Golik, A. & Turkay, M. 1995, "Litter at the Bottom of the Sea: A Sea Bed Survey in the Eastern Mediterranean", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 30, No. 1, pp.22-24.
- [29] Greenpeace 1998, Report on the World's Oceans, Greenpeace Research Laboratories Report
- [30] Lecke-Mitchel, K.M. & Mullin K. 1997, "Floating Marine Debris in the US Gulf of Mexico", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 34, pp. 702-705.
- [31] Milgram, J.H. 1971, "Forces and Motions of a Flexible Barrier"
- [32] Stefatos, A., Charalampaskis, M., Papatheodorou, G. & Ferentinos, G. 1999, "Marine Debris on the Seafloor of the Mediteranean Sea: Examples from Two Enclosed Gulfs in Western Greece", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 36, No. 5, pp.389-393.
- [33] ScienceDirect사 홈페이지, <http://www.sciencedirect.com>, Elsevier Science
- [34] Sung, H.G., Cho, I.H. & Choi, H.S. 1995, "The Motion Characteristics of a 2-D Flexible Oil Boom in Regular Waves", *MARIENV95 (Int. Conf. on Tech. for Marine Env. Preservation, Tokyo, Japan)*, pp. 339-344.
- [35] Thiel, M., Hinojosa, I., Vasquez, N. & Macaya, E. 2003, "Floating Marine Debris in Coastal Waters of the SE-Pacific (Chile)", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 46, pp.224-231.
- [36] Uneputty, P. & Evans, S.M. 1997, "The Impact of Plastic Debris on the Biota of Tidal Flats in Ambon Bay (Eastern Indonesia)", *Marine Environmental Research*, Vol. 44, No. 3, pp. 233-242.
- [37] Velandar, K. & Mocogni, M. 1995, "Beach Litter Sampling Strategies: Is There a 'Best' Method", *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 38, No. 12, pp.1134-1140. ⚓