Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol.4, No. 2. pp. 61~67, May 2001

해양유입 부유쓰레기 차단막 시스템 개발

홍기용[(1)], 최학선[(1)], 조일형[(2)]

Development of a barrier system for floating debris at river

by
K. Y. Hong[(1)], H. S. Choi[(1)] and I. H. CHo[(2)]

요 약

해양으로 유입하는 부유쓰레기를 하천에서 차단하는 시스템의 개발에 관해 소개한다. 차단막 시스템은 육상쓰레기에 기인하는 연안역의 해양오염을 방지하기 위한 목적으로 개발되었다. 시스템은 차단막, 계류시스템, 차단막 감는장치로 구성된다. 차단막은 판스프링에 의한 자동팽창식으로 설계되었으며, 부유쓰레기를 수거하는 콘베이어시스템으로 이송시키는 기능을 한다. 차단막 시스템의 설계기준을 정립하기 위하여, 설계인자들을 고찰하였다. 정립된 설계기준에 기초하여, 차단막 시스템의 시제품이 제작되었으며, 한강의 탄천에서 성능을 시험하였다. 성능시험 결과는 개발된 차단막 시스템이 효과적으로 하천의 부유쓰레기를 수거할 수 있음을 나타낸다.

Abstract

Development of a barrier system for floating debris at river is introduced. The system is to prevent pollution of coastal water caused by marine debris which originates from land. The system consists of barrier boom, mooring system and boom winder. The barrier boom, which is self-inflatable with circular band spring, guides floating debris to a collecting conveyer system. Design parameters of the barrier system were reviewed and its design criteria were established. Based on the established design criteria, a pilot barrier system was built and tested at Tanchon branch of the Han river. It is proved that the suggested system is very efficient to collect floating debris at river.

Keywords : floating debris(부유쓰레기), ocean pollution prevention(해양오염방지),
self- inflatable(자동팽창식), barrier boom(차단막)

(1) 정회원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소, kyhong@kriso.re.kr
(2) 제주대학교

1. 서 론

연안이용이 활발해지면서 연근해 환경오염의 심각성도 점차 정도를 더해가고 있어서, 건전한 해양환경 보전의 중요성이 크게 대두되고 있다. 전세계적인 해양오염을 발생원에 따라 살펴본 바에 따르면 육상활동에 기인하는 오염이 44%, 대기로부터의 유입이 33%, 해상활동에 기인하는 오염이 23%로 구분된다(Green Peace, [1998]). 이는 육상으로부터 유입되는 오염원이 해양환경을 가장 심각하게 위협하는 요소임을 보여준다. 특히 우리나라와 같이 인구밀도가 높고 이에 따라 국토의 이용성이 높은 지역에서는 육상에서 유입되는 해양오염원의 비율이 상대적으로 높을 것으로 추정된다. 육상에서 해양으로 유입되는 오염물질의 발생원은 각종 생활 쓰레기와 하수, 산업 및 축산 폐수, 연안역 개발에 따르는 부유물질 등이 있다. 산업축산 폐수와 부유물질 등은 각종 법적 규제를 통해 관리가 강화되고 있으나, 부유쓰레기 형태가 대부분인 하천유입 생활쓰레기는 실직적인 규제가 매우 어려우며, 홍수나 폭우시 일시에 하천으로 대량 유입되고 있는 실정이다.

부유쓰레기가 하천을 통해 바다로 일단 유입되면 넓은 지역에 산재되고, 또한 침전되어 효과적인 수거가 매우 어렵게 된다. 또한 우리나라의 서·남해와 같이 해안의 형상이 복잡하고 유속이 빠른 연안에서는 단시간 안에 널리 산재되어 수거의 어려움이 가중된다. 또한 해양은 하천에 비해 수심이 상대적으로 깊어서 침전된 쓰레기의 수거가 매우 어렵고, 육상의 하천과는 달리 파랑이라는 부가적인 어려움이 존재하므로 작업조건도 불리하게 된다. 그러므로 육상 쓰레기에 의한 해양오염을 효과적으로 저감시키기 위해서는 해양으로 유입되기 전에 육상에서 차단하여 수거하는 것이 바람직하다.

육상활동에 기인하는 부유쓰레기가 해양환경에 미치는 심각한 위협에 대한 인식이 확산되면서 이에 관한 연구도 활발해지고 있다(Coe and Rogers, [1996]). 부유쓰레기 수거시스템에 대한 선행 연구로는 강창구 등[2000]이 선박에 장착하여 해양 부유쓰레기를 수거하는 시스템을 연구한 바 있으며, 본 연구는 하천에서 효과적으로 부유쓰레기를 수거할 수 있는 자동 수거시스템의 중요한 구성요소인 차단막 시스템의 개발을 목적으로 한다.

2. 차단막 시스템 설계

차단막 시스템은 쓰레기의 유입을 차단하여 한 곳으로 모으는 차단막, 유속의 흐름에 대응하여 차단막을 고정시키는 계류장치, 그리고 차단막의 이동, 설치, 회수의 편의성을 고려한 감는장치로 구성된다.

2.1 판스프링 자동팽창식 차단막

해양으로 유입되는 쓰레기를 수집하기 위한 차단막은 기본적으로 해양에서 누유확산 방지에 쓰이는 오일붐과 유사한 성능을 요구받는다(ASTM, [1994]). 다만 사용목적과 설치 환경조건이 서로 상이하므로 이들 요소들을 고려한 설계가 필요하다. 해양유입 부유쓰레기 차단막은 주로 하천에 설치되므로 유속이 가장 중요한 설계 환경요소가 되며, 파도나 바람은 보조적인 외력 조건이 된다. 또한 오일붐과는 달리 계류장치에 의한 고정이 요구되므로 수심 변화가 중요한 설계 환경인자가 된다.

차단막은 크게 다섯 개의 요소로 구성되어 있다(Fig. 1). 부력부는 차단막이 설계된 흘수와 건현을 유지하면서 부유쓰레기를 원하는 지점으로 유도하여 수거할 수 있도록 한다. 수면을 따라 위치하는 부력부는 부유쓰레기가 표면에 부착되지 않고 물의 흐름을 따라 차단막의 끝단으로 원활히 이송될 수 있도록 매끄러운 형상을 유지해야한다. 또한 연직방향으로는 보오텍스의 발생에 의해 과도한 하중이 발생하지 않도록 유선형의 형 상을 지니는 것이 바람직하다. 건현은 수면과 수거망의 연직높이로 정의되며, 부유쓰레기가 차단막의 상부로 유출되는 것을 방지한다. 장력지지부는 흐름에 의해 차단막에 작용하는 장력을 지지하는 부분으로 와이어 또는 체인 등이 사용된다. 망으로 이루어진 차단부는 흐름에 의하여 쓰레기가 하부로 유출되는 것을 방지하며, 밸러스트는 차단막을 수직방향으로 유지시키는 기능을 한다. 부가적으로 계류선을 연결하기 위한 계류점과 차단막을 계류하거나 끌 때 걸리는 힘을 분산하기 위한 블라이들이 설치되기도 하며, 단위 길이의 차단막과 차단막을 연결하기 위해서는 연결장치가 사용된다.

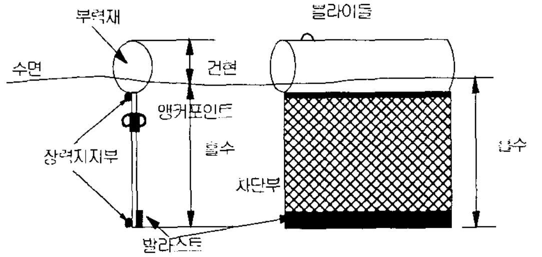


Fig. 1 Components of floating debris barrier

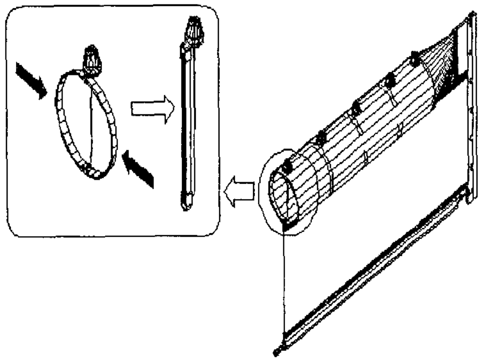


Fig. 2 Self-inflatable barrier with circular band spring

본 연구에서 채택한 차단막은 판스프링을 사용한 자동팽창식 시스템이다(Fig. 2). 보관이나 이동시에는 압축된 형태로 감는장치에 장착되며, 설치시에는 판스프링과 공기입출기와의 상호작용에 의하여 밸브가 자동으로 개폐됨으로써 기계적인 공기주입 없이도 자동으로 형상을 유지한다. 판스프링과 밸브는 코일스프링에 의해 연결되며, 압축보관시에는 코일스프링이 인장되어 밸브가 열리므로 공기가 배출된다. 설치시에는 판스프링이 원형으로 복원되면서 코일스프링이 이완되므로 공기가 유입 된 후 밸브가 닫히게 된다. 이 방식은 고형식이나 공기팽창식에 비해 설치 및 회수가 용이하며, 부유쓰레기에 의해 부력부의 부분적인 손상이 발생하는 경우에도 판스프링의 탄성에 의해 일정한 형상의 유지가 가능한 장점을 지닌다. 단점으로는 복잡한 구조에 기인하여 판스프링이나 밸브 등의 손상의 우려가 있으며, 밸브의 수밀이 완벽히 이루어지기 어렵고, 판스프링만으로 형상을 유지하므로 부력부의 표면 형상이 공기팽창식에 비해 매끄럽지 못하다는 점을 들 수 있다. 다만, 하천에서는 파랑의 영향이 미미하고 해양에 비해 기타 환경조건이 양호한 편이므로 상기의 단점에도 불구하고 판스프링 자동팽창식 차단막은 해양유입 부유쓰레기의 수거에 적합한 시스템이다.

차단막의 장력지지부를 설계하기 위해서는 차단막에 작용하는 하중의 계산이 요구되며, 상대적으로 작은 값을 갖는 파랑과 바람의 영향을 무시하면 차단막의 장력은 흐름에 의해 유기된다. Swift et al.[1992]은 조류중에 놓인 오일붐에 걸리는 장력과 붐의 형상에 관한 수학적 모델을 제시한 바 있다. 차단막은 양쪽 끝은 계류장치에 의해 하천의 양안에 고정되는 것이 일반적이므로 편의상 한쪽 끝점을 원점으로 가정한다. 계산을 위한 입력자료들은 차단막의 다른 끝점의 위치(x_s, y_s), 사용된 차단막의 길이, 부력부의 깊이, 차단막 주위의 흐름분포이며 계산을 통하여 차단막의 xy 평면의 형상과 차단막에 걸리는 항력과 장력을 구할 수 있다. 이로부터 설치된 장소의 흐름상태에 따라 차단막의 최적 계류지점을 선정할 수 있으며, 차단막에 걸리는 장력으로부터 장력지지부의 재질과 강도를 설계할 수 있다.

차단막의 미소요소에 대한 힘의 평형관계를 Fig. 3에 도시하였다. 접선방향 힘의 평형식은 $\Delta s \to 0$ 일때 $\Delta\theta$, $\Delta T \to 0$ 을 가정하면 아래와 같다.

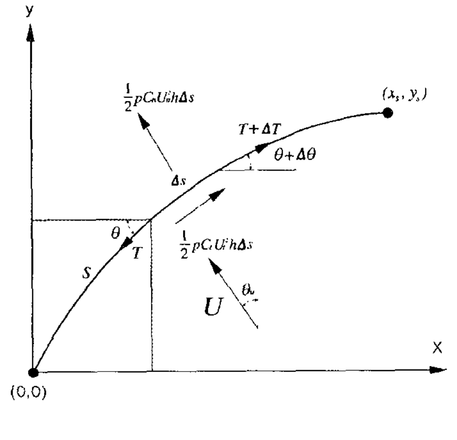


Fig. 3 Force equilibrium on barrier element

$$\frac{dT}{ds} = -\frac{1}{2}\rho_w C_t d U^2 \sin^2(\theta - \theta_u) \qquad (1)$$

여기서 ρ_w는 물의 밀도, d는 차단막의 흘수, U는 유속의 크기, T는 차단막에 걸리는 장력을 나타낸다. 또한 s는 접선방향 좌표이고, θ와 θ_u는 각각 차단막의 설치각도와 유속의 방향을 나타내는 좌표이다. 접선방향 항력계수 $C_t(\simeq 0.03)$는 실험을 통하여 구한다. 한편 법선방향의 힘의 평형식은 다음과 같다.

$$\frac{d\theta}{ds} = -\frac{1}{2T}\rho_w C_n d U^2 \cos^2(\theta - \theta_u) \qquad (2)$$

여기서 $C_n(\simeq 1.5)$은 법선방향 항력계수이며 실험으로부터 구한다.

차단막의 기하학적 형상으로부터 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다.

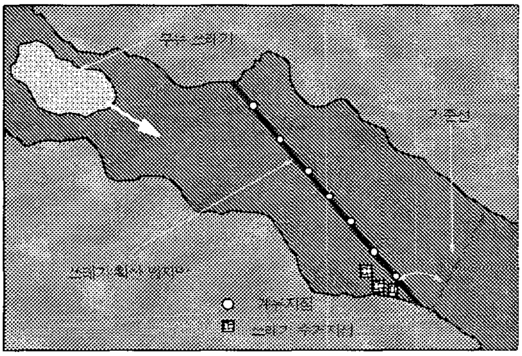
$$\frac{dx}{ds} = \cos\theta, \quad \frac{dy}{ds} = \sin\theta \qquad (3)$$

여기서 $ds = \sqrt{dx^2 + dy^2}$의 관계를 만족하며, 식(1), (2), (3)으로 주어진 4개의 1차 미분방정식으로부터 T, x, y, θ를 구할 수 있다. 이들 비선형 미분방정식은 수치적으로 해를 구할 수 있으며, Newton-Raphson 반복 계산법이 흔히 사용된다.

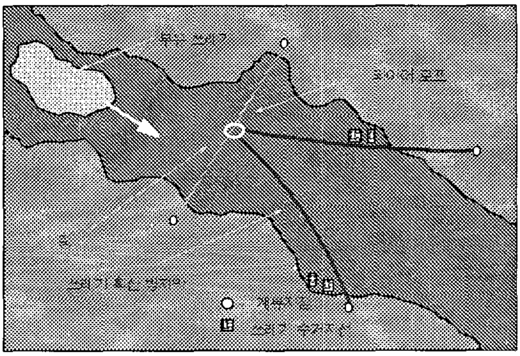
2.2 계류장치의 설계 및 설치

수거시스템의 계류장치는 하천의 흐름에 대응하여 차단막의 위치를 유지시키기 위한 장치로서 유속의 크기, 하천의 폭, 수심, 수위변동 폭이 주요 설계인자이다. 계류방식으로는 말뚝계류식, 중력계류식, 앵커방식 등이 있으며, 이들 방식을 혼합하여 사용하기도 한다. 말뚝계류식은 하천의 폭이 좁은 경우 강안에 말뚝을 설치하여 차단막을 연결하는 방식으로서 안정성이 높은 장점이 있다. 중력계류식은 콘크리트 블록과 같은 중량물을 하천 바닥에 설치하여 차단막을 지지하는 방식으로서 수위변동에 관계없이 적용이 가능한 장점이 있다. 앵커방식은 하천의 환경조건이 양호한 경우에 적용이 가능하며, 비교적 간편하게 설치할 수 있는 잇점이 있다.

하천의 폭 및 유속에 따라 계류장치의 배치 방법을 달리함으로써 계류장치 및 차단막에 걸리는 하중을 적절히 조절할 수 있다. Fig. 4(a)는 하천의 폭이 작거나 유속이 완만한 경우에 적합한 일자형 배치 방법이며, Fig. 4(b)는 반대 조건을 갖는 경우에 설치되는 V자형 배치 방법이다. 차단막의 차단막의 설치각도는 안정성 측면에서 중요하다. 흐름의 입사각이 커질수록 차단막의 단위 길이당 작용하는 항력이 감소하므로 안정성이 증가하며, 쓰레기의 원활한 이송에도 효과적이다.



(a) I-type



(b) V-type

Fig. 4 Deployment of mooring system

2.3 차단막 감는장치(winder)

차단막의 신속한 설치와 보관 및 이동의 편의성을 극대화하기 위해서는 차단막의 특성을 고려한 전용 감는장치(winder)가 필요하다. 설계된 감는

장치는 유압모터에 의해 구동되며, 속도조절장치를 갖고 있어 차단막의 종류에 따라 감는 속도를 조절할 수 잇다.

3. 시제품 제작 및 시연회

개발된 수거시스템의 유효성을 검증하기 위하여 시제품이 제작되었으며, 현장에 적용하여 성능을 평가하였다. 차단막 시제품은 200m의 길이로 제작되었으며, 일자형의 중력계류방식이 사용되었다. 성능 시연회는 한강 지류인 탄천 하류지역에서 실시되었다. 탄천은 최대 1.5m/s 의 유속을 가지며, 수심은 1.0-1.5m 정도이다. 전체 차단막 시제품 중 160m 만을 설치하였으며, 강 폭이 84m, 상류의 고정점과 하류의 고정점간의 흐름방향 길이가 125m가 되는 지점을 선정하여 차단막을 고정하였다. 차단막의 설계를 위해서는 차단막에 걸리는 장력의 크기를 먼저 추정할 필요가 있다. 유속의 크기가 1m/s, 2m/s, 3m/s 인 경우에 상기 설치 조건에 대해 차단막의 최대장력을 계산한 결과 각각 3.3ton, 13.1ton, 29.5ton으로 추정되었다. 탄천의 설치조건 선정에서는 탄천에서의 최대 유속 1.5m/s에서 상류 끝단에서의 입사각이 약 30° 로 제한되고, 하류쪽 끝단에서는 약 45° 정도로 제한되는 조건을 선정하였다. 이는 차단막에 걸리는 장력의 크기를 일정한계 내로 제한하면서, 동시에 부유쓰레기가 차단막의 표면을 따라 효율적으로 이송되어 차단막의 하류쪽 끝단에서의 수거작업이 용이하도록 하기 위함이다.

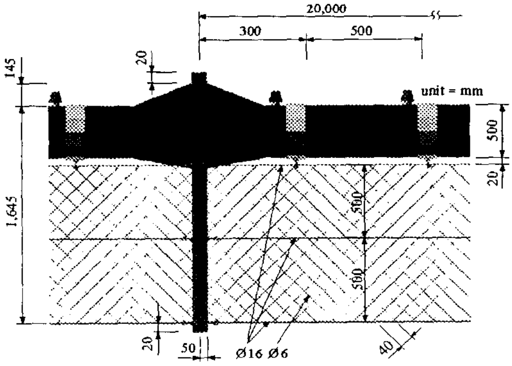


Fig. 5 Design of debris barrier

Fig. 5에 차단막 시제품의 개념도가 보여지며, Table 1에 구성요소들의 특성치가 요약된다. 차단막 한 식의 길이는 20m 이며, 연결장치를 이용하여 필요한 길이만큼 이어서 사용할 수 있다. 차단막 전체의 높이는 1.83m이며, 건현의 높이는 0.46m이고, 부력부의 지름은 0.5m이다. 부력부는 강도가 우수한 하이팔론(hypalon) 고무도포지를 사용하여 제작되었다. 장력지지부는 직경 16mm의 와이어를 3줄 사용하였으며, 와이어 전체의 인장강도는 36ton이다. 차단망은 나일론으로 제작되었으며, 그물코의 크기는 4cm이다. 계류장치는 중력식을 채택하였고, 10ton의 중량을 갖는 콘크리트 블록의 상부에 연결장치를 가진 기둥을 세워 양쪽 강안에서 차단막과 연결하였다. 제작 완료된 차단막의 모습과 차단막 감는장치가 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 보여지며, 시연회 장소에 설치된 차단막 시스템이 Fig. 8에 보여진다.

Table 1 Characteristics of pilot barrier boom

모델명	부유쓰레기 차단막
부력방식	자동팽창식
건현	0.460 m
흘수	1.060 m
전체 높이	1.830 m
연결장치	스테인레스 플레이트
1세트 길이	20.0 m
차단부	와이어로프 + 나일론네트
총 중량	6.50 kg/m
예비부력	194.0 kg/m
예비부력 / 총 중량	29.8
수선면적	0.27 m^2/m
장력지지부	16mm 와이어 로프 3줄
인장강도	36 ton
천 소재	Hypalon (1.25kg/m^2)
천 인장강도[kg/5cm]	600(세로), 575(가로)
색깔	블랙 + 오렌지
- 설치장소 - 설치유속 - 보관기구	강, 호수 3 m/sec. 와인더(Winder)

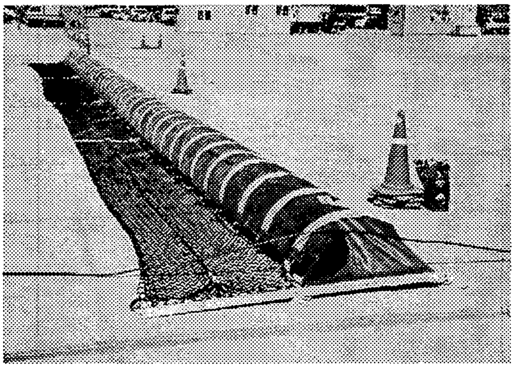


Fig. 6 A pilot product of barrier boom

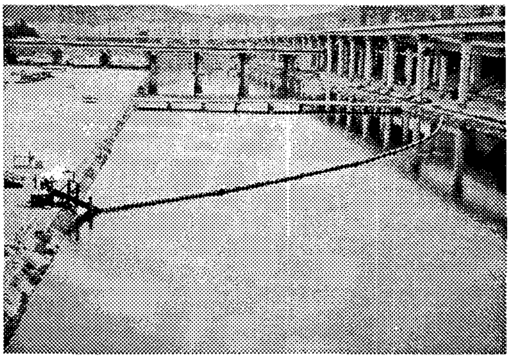


Fig. 8 Deployed floating debris barrier system

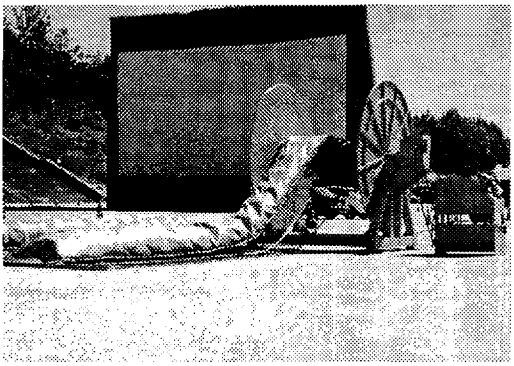
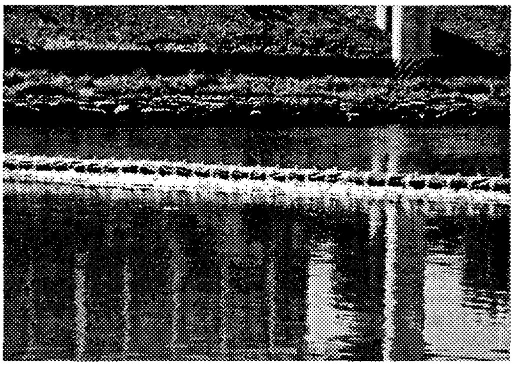
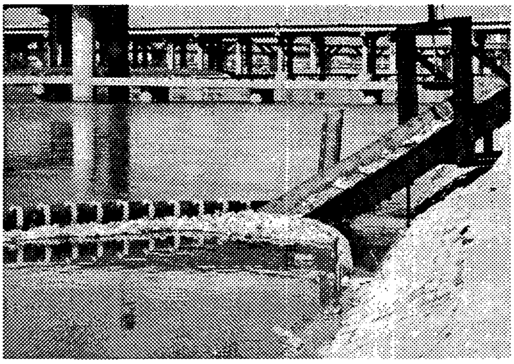


Fig. 7 Barrier boom winder

시연에서는 부유쓰레기를 수거시스템 설치지점 상류에서 방류한 후, 흩어진 부유쓰레기가 수거시스템에 의해 효과적으로 수거되는지 여부를 관찰하였으며, 상당히 만족스런 결과를 얻을 수 있었다(Fig. 9(a)와 (b)). 쓰레기의 원활한 이동은 차단막의 설치각도에 민감한 경향을 보였으며, 유속에 따라 최대 허용각도가 결정될 수 있다. 부력부의 수선면 형상에 따라 일부 쓰레기가 연직 하방으로의 흐름을 따라 침전되는 경향을 보이므로 수선면 부근의 부력부 형상의 개선이 필요하며, 차단망에 침전 쓰레기가 과도하게 누적되는 문제도 개선이 필요하다. 시연회 장소는 비교적 환경조건이 양호한 편이나, 보다 가혹한 환경조건과 설치 폭이 넓은 지역에 개발된 수거시스템을 적용하기 위해서는 차단막의 견고성과 안정성에 대한 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다.



(a)



(b)

Fig. 9 Field test of the efficiency of developed barrier system

4. 결론

해양으로 유입되는 부유쓰레기를 차단하여 강안에서 수거가 가능토록 하는 차단막 시스템에 관한 연구개발 내용을 소개하였다. 차단막 시스템은 부유쓰레기를 포집하는 판스프링 자동팽창식 차단막, 중력식계류장치, 그리고 차단막의 보관과 신속한 설치 및 회수를 위한 감는장치로 구성되었다. 차단막 시스템 구성요소들에 대한 설계인자들을 고찰하여 하천 부유쓰레기 처리에 적합한 차단막 시스템 설계기술을 정립하였다. 개발된 시스템의 성능검증을 위해 시제품을 제작하고 탄천에서의 시연회를 통하여 성능을 평가하였다. 개발된 차단막 시스템은 만족할만한 차단 및 수거 성능을 보여주었으며, 설치 및 회수의 작업성이 우수하고 차단된 쓰레기의 자동이송이 가능하여 견고성과 안정성의 개선이 이루어진다면 해양유입 부유쓰레기의 효과적인 차단시스템으로서 폭넓은 활용이 기대된다.

후기

본 연구 결과는 해양수산부의 연구비 지원으로 수행된 “해양폐기물 종합처리시스템 개발” 과제에서 얻어진 성과중의 일부임을 밝히며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

[1] 강창구 외, 2000, "해양폐기물 종합처리시스템 개발", 해양수산부 보고서 (연구기관: 한국해양연구소 · 한국해양수산개발원).

[2] ASTM, 1994, "Standard guide for the selection of booms in accordance with water body classification", Standard F1523.

[3] Coe, J.M. and Rogers, D.B., 1996, *Marine debris*, Springer, 289-390.

[4] Green Peace, 1998, "Report of the world's ocean", Greenpeace Research Laboratories Report.

[5] Swift, M.R., Celikkol, B., LeCompagnon, G. and Goodwin, C.E., 1992, "Diversion oil boom in current", *J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Eng.,* Vol.118, No.6, 587-598.