

## 해양쓰레기의 부유 및 침강에 관한 실험연구

송무석<sup>(1)</sup>, 이준목<sup>(1)</sup>, 이문진<sup>(2)</sup>, 유정석<sup>(2)</sup>

### An experimental study on drifting and sinkage of marine debris

by

Museok Song<sup>(1)</sup>, Junemok Lee<sup>(1)</sup>, Moonjin Lee<sup>(2)</sup> and Jeongseok Yu<sup>(2)</sup>

#### 요 약

해저 쓰레기 지도작성을 위하여 사용되는 수치모델에 제공될 정보로써, 각종 해양폐기물에 대한 수면체류시간과 침강속도에 대한 실험을 수행하고 결과를 정리하였다. 폐기물을 해수침투성과 비침투성으로 구분하고, 침투성 폐기물에 대하여는 해수중 부유시간을, 그리고 비침투성에 대하여는 파랑중 부유시간을 측정하였다. 침강이 발생하는 시점에서 폐기물들의 침강속도는 수중에서의 자유낙하 실험으로 계측하고 이들을 물적, 형상적 특성에 따라 논하였다. 정리된 폐기물 거동 정보에 기초하여 한강하류를 끼는 경기만과 낙동강 유역을 대상으로 수치모사를 실시하여 다양한 부유시간을 갖는 폐기물의 예상침적지를 추정하였다. 한강을 통한 유입쓰레기가 강화도의 북쪽과 동쪽에 많이 침적된다는 사실과 강화도의 서편과 영종도를 중심으로한 인천항 부근 그리고 대부도의 북부와 남부에도 상당량이 침적될 수 있음을 확인하였고, 낙동강의 경우 가덕도의 동부해역과 부산만의 동남부 해역까지 쓰레기가 침적될 수 있음을 확인하였다.

#### Abstract

An experimental study was performed to provide the numerical models to predict the physical fate of marine debris with the key information concerning their drifting and sinkage on the sea. For hygroscopic materials their floating times in a pseudo ocean environment were measured, and for non-hygroscopic objects their drifting times in a certain wave condition were measured. For sinking materials or objects became to be sinkable free falling experiment was performed to evaluate their falling speed. Summarized information was condensed into a numerical model to predict the most possible region of a significant marine debris accumulation, and the seas connected to the Han river and the Nak-Dong river were considered for the simulation.

Keywords: Marine Debris(해양폐기물), Litter Dynamics(Litter Fate, 해양폐기물거동), Floating Time (부유시간), Sink Speed (침강속도), 한강/낙동강 해양쓰레기지도

1) 정희원, 홍익대학교 조선해양공학과, msong@hongik.ac.kr

2) 정희원, 한국해양연구원 해양시스템안전연구소

## 1. 서 언

20세기 후반 들어 UN 해양법이 발효되는 등 해양개발에 대한 관심이 고조됨과 더불어 다양한 형태의 해양개발에 따른 지속적인 해양환경의 부정적인 변화가 국제사회의 커다란 관심사가 되고 있다 (해양수산부[2000A]). 해양환경에 영향을 줄 수 있는 여러 가지 인위적인 인자들 중, 인간의 생산 및 소비활동에서 발생하는 각종 폐기물의 해양유입은 해양을 황폐화시키는 핵심 요소로 인식된다 (Coe & Rogers[1996]). 대부분의 경우 인위적이라 할 수 있는 이러한 폐기물들의 해양유입은 이미 국내의 각종 연구에서 그 심각성이 보고된 바 있는데 (KRISO[1999], 해양수산부[2000A]) 수산업에 미치는 영향, 선박의 안전운항에 미치는 영향 그리고 심미적인 영향 등의 다양한 폐해로 적극적인 문제 해결을 위한 노력이 필요한 시점이라고 할 수 있다.

1998년 Green Peace의 'Report on the world's Ocean'에 의하면 전세계 해양오염의 주 발생 원을 육상활동기인(77%), 해상기인(12%), 해양투기(10%)로 분류하고 있다. 발생원에 따라 그 성분이 상당히 달라질 수 있는데, 이들 각종 폐기물의 해양환경에서의 분해 시간은 신문의 경우 6주, 섬유 장갑은 1년, 스티로폼 부표는 80년, 알루미늄 캔의 경우는 200년, 플라스틱 짝은 400년, 플라스틱 병은 450년, 낚시줄은 600년 이상이 소요된다. 다시 말하면 일단 해양에 유입되면 인간이 다시 회수하지 않는 한 폐기물들은 해저면에서나 부유상태로 존재하며 전술한 문제들을 악화시킨다. 이러한 배경에서 해양수산부를 중심으로 한 해양폐기물 수거 및 처리의 노력이 최근 시도되고 있는 바, 현재 통영, 여수, 극동항 등의 주요 항의 해저 쓰레기 실태를 파악하고 이를 바탕으로 체계적인 수거를 시도하고 있는 단계이다 (KRISO[1999], 해양수산부[2000A]). 우리 해역에서의 해저쓰레기에 대한 기본적인 조사로는 구본삼 등[2000]의 제한된 해역에 관한 연구가 있다.

한편, 해저 쓰레기의 수거를 위하여는 쓰레기의 위치와 종류 그리고 양에 대한 정보가 필수적으로 요구된다. 이를 위하여 현재 사용되고 있는 방법은, KRISO[1999]의 연구에서 보고된 바와 같이, 수중음파탐지장치를 (SONAR) 이용한 1차탐사 후 잠수부를 동원한 비디오촬영을 통한 확인

으로 쓰레기 지도를 작성하는 것으로, 정확성이 높은 반면 많은 인력과 시간 그리고 경비를 요하는 작업이며, 또한 확인된 정보가 다른 조사되지 않은 지역과 비교하여 오염의 상대적인 정도를 설명해 주지는 못한다. 이러한 문제를 해결하는 보조적인 수단으로 조류, 바람, 파랑 등의 해양환경정보를 바탕으로 유입된 쓰레기의 거동을 수치적으로 모사하는 방법이 있는데 (해양수산부[2000A]), 정확성은 다소 떨어지지만 오염농도를 미리 파악할 수 있다는 점에서 전술한 방식을 효과적으로 보완할 수 있다. 이러한 수치모델의 정확성을 높이자면 해류, 조석류, 파도, 바람 그리고 하천으로부터의 담수유입 등의 다양한 해양환경요소의 정확성과 더불어 각종 폐기물의 이러한 환경하에서의 거동특성에 대한 이해가 필수적이다 (Coe & Rogers[1996]). 즉 폐기물의 수면 체류를 결정하는 풍화 특성과 침강이 일어날 경우 그 폐기물의 침하속도에 관한 정보를 대표적으로 생각할 수 있는데, 이들을 바탕으로 초기 위치와 상태가 알려진 폐기물의 침적 위치를 추정한다거나 발견된 해저쓰레기의 발생원을 역추적하는 등의 접근이 가능하다.

이에, 본 연구에서는 각종 해양폐기물을 대상으로 부유특성과 침강속도 특성을 실험적으로 살펴봄으로써 효과적이고 정확성이 향상된 해저쓰레기 지도 모델을 위한 필수적인 정보를 제공하고자 하였다. 우선 다양한 해양폐기물을 부유 특성에 따라 분류하고 각각에 대하여 수면체류시간을 결정하였으며 일단 침강이 시작되는 폐기물에 대하여는 수중자유낙하 실험을 통하여 침강속도를 결정하였다. 또한, 정리된 부유시간 및 침강속도 자료를 이용하여 기존의 해수유동 수치모델 계산을 수행하고 결과를 논하였다.

## 2. 해양폐기물의 분류

인간의 활동이 다양하게 확대되어 가면서 각종 폐기물의 해양으로의 유입은 범세계적인 문제로 인식되고 있다. 지역적인 특성에 따라 오염물의 주 발생원이 조금씩 달라지지만 일반적으로 육상활동기인, 해상기인 그리고 해양투기로 나누어지는 형태로 쓰레기가 해양으로 유입되고 있다. 비교적 체계적인 연구가 진행되고 있는 지중해지역과는 달리 (Coe & Rogers[1996]) 충분한 자료가

부족한 현실에서 우리의 상태를 말하기는 어렵지만 양을 파악하기 어려울 정도의 해양쓰레기가 우리의 해역에 분포하고 있는 점은 사실인 듯하고 (KRISO [2000], 구분삼 등[2000]) 그 종류도 어부들의 어구에서 홍수철에 떠내려오는 냉장고 까지 매우 다양하다. 1999년부터 국내의 항구를 중심으로 이루어지고 있는 해양쓰레기실태조사의 결과에 따르면 (KRISO [2000]) 로프류, 목재류, 타이어류 등의 폐기물들이 많고 그 외의 인간 활동에 기인하는 다양한 오염물들이 무게비로 20~30%를 차지하는 것이 우리 해양쓰레기 분포 특성이다.

해양폐기물을 분류함에 있어서 목적에 따라 여러 가지 방법이 있을 수 있지만, 본 연구의 경우 폐기물의 해양환경에서의 거동, 특히 해수면에서의 부유시간과 해저면으로의 침강속도가 관심인 경우에는 폐기물의 화학성분과 같은 물적 특성보다는 해수중에 폐기물이 뜰 수 있는냐의 구분과 떠 있을 경우 어떠한 형태로 부력을 잃어가는지의 구분이 중요하다 하겠다.

이러한 관점에서 Table 1과 같이 폐기물을 정리하였다. 표에서 침투성이라 함은 물체의 표면을 통하여 해수가 유입됨으로써 물체의 평균 비중이 증가하고, 따라서 결국에는 침하가 발생할 수 있는 폐기물의 특성을 말한다. 이러한 폐기물은 대체로 목재, 섬유 그리고 가죽들로 이루어져 있는데, 각각 4×4 (four by four) 혹은 2×2 (two by two)라고 불리는 건설용 각목, 각종 의류, 섬유질 로프류 그리고 구두 등의 신발류가 이들에 속한다.

유입성은 물체의 내부가 비어 있어 자중을 지탱할 충분한 부력을 가지지만 물체의 내부와 연결된 해수의 특정한 유입구를 통하여 침수가 발생함으로써 부력을 잃는 특성을 말한다. 이들 유입성 폐기물들에는 흔히 발견하는 다양한 재질로 이루어진 각종 음료수 용기와 고무재질로 이루어진 신발과 타이어류가 있다. 실제로 비중이 커서 부유할 수 없는 금속성 로프 등도 섬유질의 침투성 로프류와 구분하여 유입성으로 분류하였다.

### 3. 해양 폐기물의 해수면 부유시간

폐기물의 수면부유시간을 결정하는 주요인자는 적용해역에서의 해상상태와 더불어 해당폐기물의 특성이다. 이러한 특성에 따라 전 절에서는 폐기물을 침투성과 유입성으로 구분하였고 본 절에서는 이들 폐기물이 보편적이라고 할 수 있는 해상 환경에서 어느 정도 부유할 것인지에 대하여 각각의 경우에 대하여 실험적으로 살펴보았다.

#### 3.1 침투성 폐기물

침투성 폐기물은 침수표면을 통하여 해수가 물체로 흡수되어 해수에 대한 물체의 평균 비중이 1.0 보다 커지면서 침강하게 된다. 결국 해수의 침투율이 중요한 인자인데, 이 침수율은 침수표면적에 비례하고 물체 내부의 공간 정도 (void fraction) 그리고 물체 표면 및 내부에서의 해수 질량 이동을 등에 영향을 받는 복잡한 물적 특성이다 (Dordrecht[1991], Nield[1992]). 다양한 해양

Table 1 침수 형태에 따른 해양폐기물 분류

침수특성	화학성분	예
침투성	목재류	건설용 목재, 합판
	섬유류	폐의류, 로프
	가죽류	신발, 의류
유입성	비닐, 플라스틱류	음료수용기, 스티로폼
	유리류	음료수용기
	고무류	페타이어, 신발
	금속류	음료수용기, 식기, 페로프

폐기물의 부유시간을 파악함을 목표로하는 본 연구에서는 엄밀한 연구가 요구되는 상기한 요소에 대해 언급하기는 어렵고, 따라서 대표적인 폐기물에 대하여 가능한 체계적인 실험을 수행하고 이를 정리하였다.

이를 위하여 길이, 폭, 높이가 각각 4m, 2.5m, 1.25m인 직사각형 수조에 해수를 채우고 다양한 폐기물을 부유시켜 침강 직전까지 걸리는 시간을 측정하였다. 사용한 해수는 인천에서 수송해 온 비중 1.02의 바닷물로 총량은 약 9.2톤이다. 해수의 온도는 계절에 따라 섭씨 14도에서 5도까지 변화였고 수분의 증발 등으로 발생하는 비중은 침수를 첨가하여 가능한 원래의 비중을 유지하도록 하였다. 해상에서의 수면 특성을 보장한다는 의미에서 기포발생장치와 임펠러를 이용한 흐름 발생장치를 설치하였다. Figure 1은 수조와 부가 장치의 배치를 보이고 있는데, 각종 물체를 상부에 설치된 가로막대에 낚시줄로 연결하고 VCR로 모니터링하여 장시간의 부유시간을 측정하였다.

앞에 설명한 바와 같이 해수의 침투율은 여러 가지 인자에 영향을 받겠지만 본 연구에서는 파랑 등의 환경적 영향보다는 침투가능 총 해수량과 침투가 일어날 수 있는 물체의 표면적의 비가 핵심요소라고 가정하고 Table 2에 보이는 각종

물체를 대상으로하여 1차 실험을 실시하였다. 물체의 종류는 일반 건설용 목재로 재질의 균일성 등을 고려하기가 무척 어려운데 1차적으로 목재의 체적을 4가지로 변화시키고 각 체적에 대하여 목재의 형상을 달리하여 체적 대 침수표면적의 비가 변화도록 하였다.

실험을 시작한 후 만 3개월여가 지난 상황에서 침강이 발생한 경우는 표에 별표(\*)로 표시된 네 가지 경우였는데, 침강이 발생하지 않은 경우와 비교하여 볼 때에 비중이 0.7 이상으로 상대적으로 무겁다는 것과 형상이 길쭉하여 체적 대 침수 표면적의 비가 상대적으로 작다는 점이다. 부유 시간은 체적이 작은 경우부터 60시간, 20시간, 40시간, 5시간으로 어느 정도 오차를 감안한다면, 침강이 발생한 네 가지 경우 아래의 식(1)로 표현되는 간단한 모델에 부합되는 결과를 보이고 있다.

$$\{Floating Time\} \sim (\nabla/S)(1/V_o)(\gamma_w - \gamma_o)/\gamma_w \quad (1)$$

식 (1)에서 첫항은 체적 대 침수면적 비, 둘째 항은 침투속도의 역수 그리고 셋째 항은 비중비인데, 우리의 결과와 비교하자면 첫째항인 체적 대

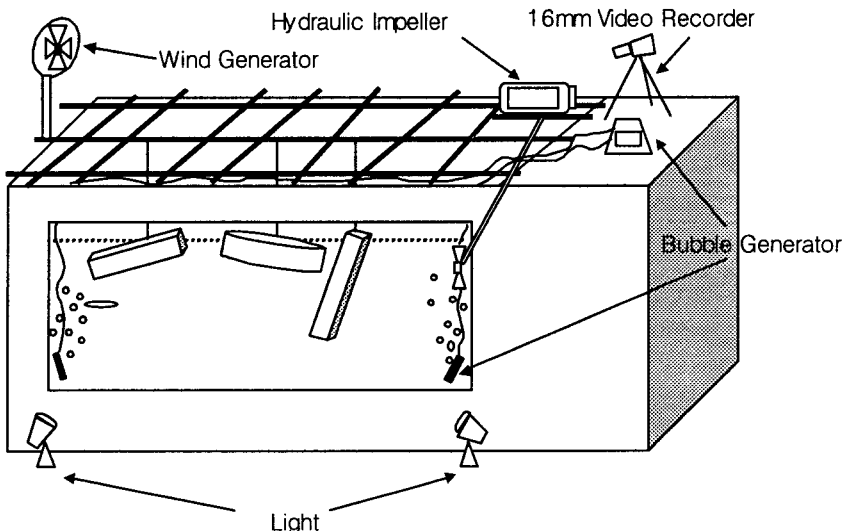


Fig. 1 Schematic sketch of sea-water basin

침수면적 비가 중요한 인자로 나타나고 있다. 하지만 비중이 0.45 정도인 다른 목적재는 침강이 발생하지 않아 위의 식에 필요한 계수를 파악하기 어렵고, 이러한 상황에서 보다 균일한 물적 특성을 가진 목적재를 이용하여 보편적으로 이용될 수 있는 자료를 얻고자 2차 실험을 병행하였다.

2차 실험에 사용된 목적재는 단면 모양 6가지(정사각형 2가지, 직사각형 4가지), 목적재의 길이 각 3가지의 (30cm, 60cm, 120cm) 시편을 3개씩 제작하여, 총 54개의 샘플로 이루어졌다. 1차 실험 때와 마찬가지로 일반 건설용 목적재를 사용하였지만 건조상태가 매우 양호하여 비중이 0.5 정도로 가벼운 편이었고, 불규칙적으로 자리잡고 있는 용이 등의 영향으로 우리가 원하는 균일성을 확보하기는 매우 어려운 것으로 파악되었다. 현재 너달이 경과한 상태인데 비중이 0.9 이상인 두 경우만이 침강한 상태이고 부유시간은 각각 6일과 13일이다.

이상의 결과에서 목적재의 경우 (1)식으로 부유시간을 이해할 수는 있지만 그 정량적인 값은 목적재의 종류와 모양 그리고 건조상태 및 균일성 정도에 따라 상당한 편차를 보인다는 것을 알 수 있다. 현재 상태로 의미있는 값을 도출하기에는 어려움이 있으나 비중 0.7 이상의 건설용 목적재의 경우 수일에서 10여일 정도의 부유시간을 가진다고 할 수 있다.

목적재 이외의 침투성 폐기물로는 Table 3에 보인 바와 같이 의복 등과 신발류를 대상으로 실험하였는데 면의류의 경우 대략 수분, 함성수지의 경우 1~2시간 그리고 구두의 경우 1~2일 정도의 부유시간을 보였다. 삼마 로프의 경우는 50분 정도의 부유시간을 가지는 것으로 나타났다.

### 3.2 유입성 폐기물

병이나 강통과 같이 표면을 통하여 해수의 침투가 발생하지 않는 경우는 물체의 파도 중 거동이 부유시간을 결정한다. 일반적으로 걸보기 비중이 1.0 이하인 용기는 수면이 고요할 경우 영원히 떠있게 된다고 볼 수 있다. 해수면이 거칠어지면 부유하는 폐기물은 자신의 질량과 형상에 따라 조금씩 다르게 수면에서 움직이게 되는데 이 때에 해수 유입구와 해수면과의 상대적인 거리가 없어지는 순간이 생기게 되면 해수의 유입이 발생한다. 이러한 현상에 따른 폐기물별 해상환경

에서의 부유시간을 파악하고자 본 연구에서는 8종류의 강통류와 5종류의 병류를 대상으로 실험을 수행하였는데 Table 4와 5에는 이들의 형상특성을 정리하여 보였다. Type에 대한 설명은 Table 6에 보였는데 다른 물체에 관한 설명은 뒤에 이용된다.

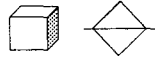
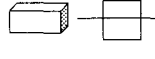
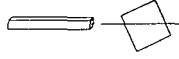
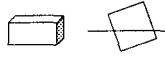
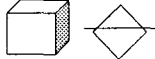
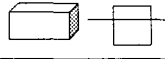
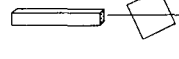


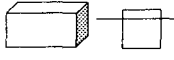
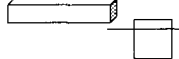
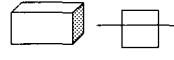

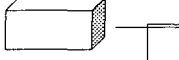

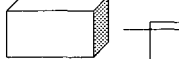
실험은 길이, 폭, 깊이가 각각 20m, 0.5m, 0.6m인 조파수조에서 수행하였는데 Fig. 2에 보인바와 같이 좌측에 플랩타입의 규칙파용 조파기가 있다. 파고는 생성 가능 최대인 8cm 전후로 가능한 고정을 하고 파주파수를 서서히 증가시키며 물체의 거동을 해수 유입구로 물이 유입되는지를 살펴면서 관찰하였다.

대부분의 경우 예상한대로 특정 파주파수에 이르기 전에는 물의 유입이 발생하지 않았는데 켄류의 경우 파주기 0.6초 전후, 병류의 경우 파주기 0.8초 전후에서 물의 유입이 발생하기 시작하고 일단 물의 유입이 시작되면 거의 모든 경우에 2~3분대의 부유시간을 가진 후 침강하였다. 특이한 현상은 소주병의 경우 물이 어느 정도 유입되면 병이 거꾸로 선채로 수면에 떠있는 양상을 보였는데, 병의 무게중심의 위치가 바닥으로부터 40%이상의 상부에 위치하는 경우 약간의 침수가 이루어 지면 무게중심이 상부로 이동하여 병이 거꾸로 뒤집힌다는 사실을 확인 할 수 있었다

이러한 기본적인 정보를 바탕으로 해수의 유입이 발생하는 해상상태는 파에 대한 물체의 거동이 최대가 되는 조건이 됨을 유추할 수 있는데, 이를 확인하는 과정으로 선형 수치해석을 실시하였다. 연직축대칭 구조에 작용하는 파력을 효율적으로 산정하기 위한 연직축대칭 Green 함수를 이용하는 보편적인 경계면 적분방법을 사용하여 (Isaacson[1982]) B1 형태의 맥주병을 대상으로 병이 초기에 물을 먹고 똑바로 선 홀수 0.1m의 경우에 대하여 운동을 계산하였다. 결과로 최대 수직운동이 일어나는 파주기는 0.82초로 나타나는데 이 주기는 앞에 설명한 병류의 실험에서 얻어지는 물의 유입이 발생하는 파주기와 거의 일치하는 것으로 이해할 수 있었다.

이에 대상으로 삼은 모든 용기류에 대하여 1차 실험(파주파수를 증가시키며 물의 유입이 발생하기 시작하는 주파수를 파악하는 실험)에서 얻어진 파주파수에 대하여 각각 반복 실험을 수행하고 켄류에 대한 결과를 Table 7에 보였다.

Table 2 사용된 목재 자원 및 부유형태

체적(cm <sup>3</sup> )	형상 (B×D×L, cm)	질량 (g)	비중	침수 표면적 (cm <sup>2</sup> )	체적/ 침수표면적 (cm)	형상 및 침수형상
713.4	8.2×8.7×10	323.5	0.442	240.34	2.97	
	12×6.4×9.3	292.8	0.401	256.44	2.78	
	4×4×44.6*	581.7	0.795*	353.36	2.02	
	20.9×5.7×6.0	332.0	0.454	270.66	2.64	
1070.1	8.2×8.7×15	598.1	0.545	381.4	2.81	
	12×6.4×13.9	524.3	0.447	358.06	2.99	
	4×4×66.9*	777.0	0.708*	615.01	1.74	
	20.9×5.7×9	524.8	0.478	385.44	2.78	
1426.8	8.2×8.7×20	677.7	0.463	429.43	3.32	
	12×6.4×18.6	663.7	0.454	406.8	3.51	
	4×4×89.2*	1055.2	0.722*	689.68	2.07	
	20.9×5.7×111.5	709.1	0.435	467.94	3.05	
1783.5	8.2×8.7×25	831.5	0.455	566.16	3.15	
	12×6.4×23.2	797.8	0.436	524.8	3.40	
	4×4×111.5*	1451.5	0.794*	1302.96	1.37	
	20.9×5.7×15	921.4	0.504	579.16	3.08	

해양쓰레기의 부유 및 침강에 관한 실험연구

Table 3 기타 침투성 폐품의 부유시간 및 침강속도

구분	무게(g)	부유시간(분)	침수후무게(g)	침강속도(m/s)	비고
바지1	465	12	1412	0.08	여성용 면
바지2	346	대략1시간내외	865	0.08	신사복하의
바지3	446	21	1328	0.09	면바지
속옷1	51	1	135	0.04	남성팬티
속옷2	54	3	162	0.06	남성팬티
남방1	213	대략1시간내	639	0.07	와이셔츠
남방2	327	117	1297	0.13	폴로스타일
운동복상의	403	대략1시간내	1557	0.16	짚업스타일
구두1	401	9시간	511	0.11	정장구두
구두2	405	17시간	598	0.12	쇼트부츠
구두3	169	32시간	243	0.15	하이힐

Table 4 일루미늄 캔류 형상특성

구분 종류	공기중 무게(g)	체적 (cm <sup>3</sup> )	높이 (cm)	반경 (cm)	유입구 면적 (cm <sup>3</sup> )	무게/체적 (g/cm <sup>3</sup> )	수면으로 부터유입구 높이 (cm)	체적/유입 면적 (cm)
Type A1	27.50	291.28	13.31	2.64	1.36	0.0944	2.52	214.18
Type A2	27.45	290.19	13.26	2.64	1.48	0.0945	2.50	196.07
Type A3	29.26	311.67	9.17	3.29	1.79	0.0938	2.81	174.12
Type A4	28.00	288.65	13.29	2.63	1.14	0.097	2.50	253.20
Type A5	35.70	226.10	10.41	2.63	1.43	0.158	2.51	158.11
Type A6	38.00	226.10	10.41	2.63	1.24	0.168	2.48	182.34
Type A7	29.25	290.64	13.28	2.64	1.31	0.101	2.51	221.86
Type A8	36.00	226.10	10.41	2.63	1.37	0.160	2.41	165.04

Table 5 병류의 형상특성

구분 종류	무게 (g)	길이 (cm)	유입구면적 (cm <sup>2</sup> )	체적/유입면 적(cm)	mass moment inertia in air(kg × m <sup>2</sup> )	무게중심 (From bottom : %)	비고
Type B1	550	28.5	2.22	288.29	$7.52 \times 10^{-3}$	38.60	
Type B2	545	28.5	2.22	288.29	$7.17 \times 10^{-3}$	37.90	
Type B3	440	25.7	2.22	225.22	$4.65 \times 10^{-3}$	37.74	
Type B4	295	21.05	2.83	127.21	$2.36 \times 10^{-3}$	40.86	upset
Type B5	312	20.5	2.83	127.21	$2.20 \times 10^{-3}$	41.40	upset

Table 6 Group 설명

Group Number	Type A (캔)	Type B (유리병)	Type C (타이어)	Type D (와이어로프)
1	네스티	라거 640ml	한국 Super TR 700*	굵은것
2	실론티	카스 640ml	한국 노르딕 70*	중간것
3	사각사각	카스 500ml	한국 옵티마골드	가는것
4	이프로	진로 참이슬	한국 레디알 H406	삼마로프
5	레쓰비	선양 그린	우성 SB 702*	
6	네스카페		금호 파워스타 756	
7	팰시		금호 아이젠 65	
8	델몬트			

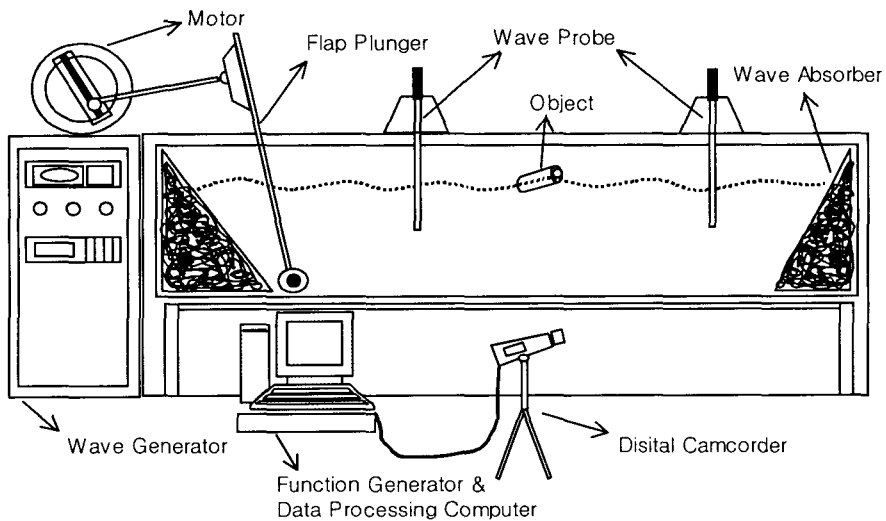


Figure 2 Schematic sketch of wave-making basin



## 해양쓰레기의 부유 및 침강에 관한 실험연구

각각 10회의 실험을 수행하여 오른쪽 끝에 모 드값을 적었는데, 전술한대로 대체적으로 수분대의 부유시간을 나타내며, Table 4와 비교하여 보면 체적 대 유입구 면적비가 큰 경우가 (A4) 작은 경우보다 (A7) 유입구의 수면으로부터의 높이가 큰 경우가 (A3) 작은 경우보다 부유시간이 길어지는 경향이 있다.

병류의 경우에 대한 결과는 Table 8에 보였다. 무게중심의 위치 영향으로 병은 거꾸로 뒤집히지 않는 경우 체적 대 유입구면적 비가 큰 경우 4분에서 8분 정도, 작은 경우 1분에서 2분 정도의 부유시간을 가진다. 일반적으로, 침수초기에는 수면위로 돌출한 부분이 상대적으로 큰 까닭으로 병의 회전운동이 (pitching) 침수에 적극적인 영향을 미쳤고, 이후 완전침수 직전까지는 병의 수직운동이 (heave) 침수를 지배함을 관찰 할 수 있었다.

유입성 폐기물의 부유시간 측정 실험의 결론은

부유시간이 일반적으로 얼마라고 이야기하기가 매우 어렵다는 것이다. 용기에 따라 물이 조금이라도 흘러들기 시작하는 파주파수가 존재하고 이 파주파수 이상일 경우에 한하여 전술한 바의 수분대의 부유시간을 가진다고 보는 것이 타당하다. 주파수가 더 클 경우에도 물이 유입되지 않지만 용기의 크기를 고려할 때 이러한 경우는 실제 해상에서 발생할 가능성이 거의 없다고 하겠다. 따라서 병이나 캔의 경우 이러한 경계해상상태를 (critical condition) 만날 확률이 있느냐하는 것이 오히려 중요한 변수라고 결론지을 수 있다.

### 3.3 해양생물의 부착효과

스티로폼이나 페트병과 같이 거의 침강이 예상되지 않는 경우나 목재와 같이 장시간 수면에 부유하는 폐기물의 경우는 물체의 표면에 다양한 해양생물이 부착함으로써 부유특성이 많이 달라질

Table 7 알루미늄 캔류의 파중 부유시간 측정 결과

종류 \ 횟수	1회	2회	3회	4회	5회	6회	7회	8회	9회	10회	MODE (min)
	Type A1	1'14"	1'40"	3'57"	42"	2'32"	4'55"	1'55"	9'5"	2'25"	2'29"
Type A2	52'29"	1'58"	4'7"	7'55"	1'59"	3'52"	1'6"	1'59"	8'38"	4'52"	2'
Type A3	177'21"	42'37"	79"	58'53"	85'59"	124'50"	20'5"	36'32"	46'47"	21'10"	20'~30'
Type A4	1'43"	3'59"	3'2"	3'28"	4'54"	2'56"	7'46"	2'30"	4'6"	7'58"	3'~4'
Type A5	1'9"	7'7"	1'53"	1'33"	4'7"	2'33"	1'43"	8'19"	1'15"	3'21"	2'~3'
Type A6	1'20"	1'52"	1'7"	1'00"	1'46"	5'17"	2'10"	1'47"	7'29"	2'49"	2'~3'
Type A7	2'3"	2'16"	2'20"	7'33"	2'34"	1'11"	6'57"	6'34"	8'39"	13'33"	2'~3'
Type A8	3'8"	4'15"	1'9"	1'29"	2'7"	6'6"	2'00"	1'27"	4'23"	4'5"	1'~2'

Table 8 병류의 파중 수면부유시간 측정 및 침강시험 결과

종류 \ 구분	부유시간 측정결과					침강속도 (m/sec)	C <sub>D</sub>	C <sub>D</sub> *
	1회	2회	3회	4회	5회			
Type B1	6'45"	2'39"	3'39"	3'56"	4'43"	1.39	0.82	0.87
Type B2	8'08"	7'17"	11'49"	8'10"	8'48"	1.12	1.19	0.85
Type B3	1'18"	54"	2'53"	1'24"	1'32"	0.958	1.61	0.86

수 있음이 예상된다. 국방과학연구소[1992]는 포항만에서 3가지 재질의 판재를 (고무, 알루미늄, FRP) 해수중에 위치시키고 해양생물의 부착 정도를 관찰한 바 있다.

이 연구에 따르면 물체의 상대적인 비중에 영향을 줄 수 있는 연세우류 등의 대형 해양생물이 수심일(7일~12일) 동안에 부착함을 확인하였다. 연구의 목적이 본 연구의 그것과 달라 시간에 따른 중량의 증가 등의 물리적인 정보가 제시되고 있지는 못하지만, 고무표면에 수면에 가까울수록 부착물의 양이 증가하는 것으로 보고하고 있다. 이렇게 볼 때에 우리가 충분히 긴 부유시간을 가질 것으로 예상하는 다양한 폐기물들이 수심일 이상의 부유시간을 가지지 못할 수 있고, 이는 그러한 폐기물이 상대적으로 해안선에서 가까운 지역에 침적될 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 이러한 영향에 대한 고찰이 이루어지지 못하였다. 해양생물의 부착이 줄 수 있는 영향에 대한 연구는 해양생물의 관점에서 체계적인 연구가 필요한 부분이라고 판단된다.

#### 4. 해양 폐기물의 침강속도

일단 폐기물이 침수나 해수의 침투에 의하여 부력을 상실하면 침강이 발생한다. 수심이 크지 않은 해역이나 해수의 유속이 크지 않은 경우 또는 광역에서의 쓰레기 거동에 관심이 있다면 폐기물이 침강하는 속도는 큰 의미를 가지지 않는다고 볼 수 있다. 하지만 일반적으로 폐기물 이송 모델의 3차원적인 접근을 위하여는 각 폐기물의 수직거동 속도는 중요한 의미를 지닌다. 이를 살펴보기 위하여 본 연구에서는 가로, 세로, 높이가 각각 1m, 1m, 1.4m인 소형사각수조에서 침강속도 측정실험을 수행하였다 (Fig. 3, 구성과 목재류 실험의 한 경우를 함께 보았다). 해수와 물적 특성이 유사하도록 일반 수돗물에 굵은 소금을 섞어 수조를 구성하고 (구입한 해수는 탁도가 너무 높아 침강속도 추정실험에는 적합하지가 않다) 침강속도는 디지털카메라를 이용한 영상을 분석하여 정리하였다.

목재의 침강실험은 Table 2에 별표로(\*) 표시

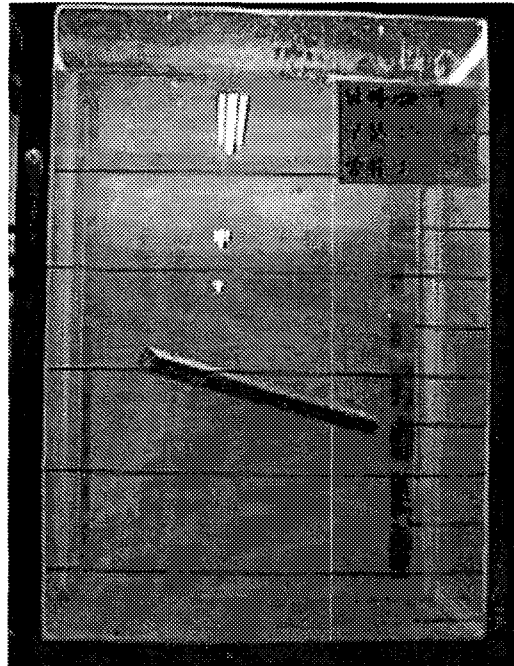
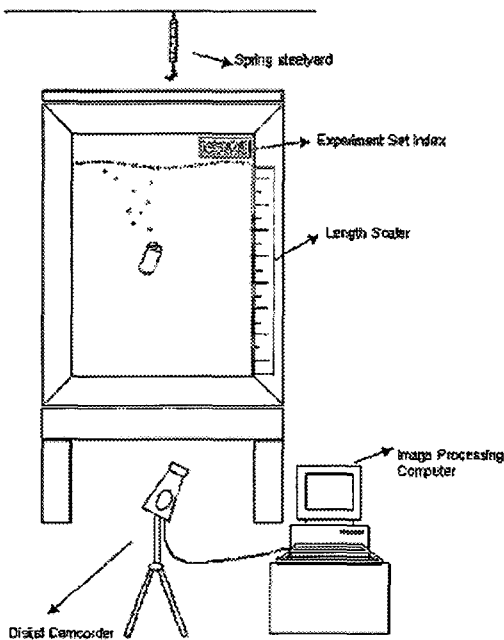


Figure 3 침강시험구성 및 목재류 실험 예

해양쓰레기의 부유 및 침강에 관한 실험연구

Table 9 알루미늄 캔류의 침강속도 측정 결과

종류 \ 구분	수중무게(kg)	침강속도(m/sec)	C <sub>D</sub>	C <sub>D</sub> *
Type A1	$1.73 \times 10^{-2}$	0.34	1.30	0.86
Type A2	$1.73 \times 10^{-2}$	0.32	1.47	0.86
Type A3	$1.85 \times 10^{-2}$	0.28	1.33	0.86
Type A4	$1.76 \times 10^{-2}$	0.26	2.30	0.86
Type A5	$2.25 \times 10^{-2}$	0.35	1.58	0.86
Type A6	$3.02 \times 10^{-2}$	0.34	2.30	0.86
Type A7	$1.85 \times 10^{-2}$	0.24	2.79	0.86
Type A8	$2.27 \times 10^{-2}$	0.26	2.87	0.86



Fig. 4 실제 해안에서 수거된 폐 타이어류

Table 10 타이어류 형상특성 및 침강속도 측정결과

종류 \ 구분	외경 (cm)	내경 (cm)	두께 (mm)	폭 (cm)	공기중 무게 (kg)	수중 무게 (kg)	관측속도 (m/sec)	C <sub>D</sub>	C <sub>D</sub> *	비고
Type C1*	74.5	40.0	20.9	18.0	15.65	2.0	0.57	0.90	1.1	수직
Type C2*	62.0	34.5	14.4	17.0	10.8	2.07	0.53	0.45	0.24	수평
Type C3	59.5	34.5	13.5	20.3	10.5	1.86	0.43	1.64	1.2	수직
Type C4	62.0	36.5	15.9	20.0	11.64	2.3	0.42	2.06	1.25	수직
Type C5*	56.5	32.0	15.2	17.3	8.7	1.52	0.56	0.55	0.25	수직
							0.42	1.73	1.1	수평
Type C6	60.6	34.5	13.3	18.0	9.2	1.58	0.41	1.70	1.1	수직
Type C7	60.0	34.5	13.0	17.8	11.15	1.92	0.45	1.73	1.1	수직

된 침강이 발생한 경우에 대하여 수행하였다. 하지만 일단 침강이 발생하면 모든 목재의 경우 해수에 대한 상대적인 무게가 유사하기 때문에 비슷한 침하속도를 가질 것으로 판단되고, 본 연구에서 얻어진 속도는 대략 0.15~0.2 m/s이다. 목재가 수직으로 침하할 경우 속도가 약간 빠르는데, 수조의 깊이 제한으로 정상상태의 (steady state) 거동이 보장되지 않는 경우는 해양연구소의 예인 수조에서 (깊이 7m) 보충실험을 수행하여 정리한 값이다.

Table 4에 보인 깡통류의 경우는 Table 9에 보인 바와 같이 0.25-0.35m/s의 침강속도를 보였는데 유사한 형상의 실린더에 걸리는 항력계수값과 (\*로 표시, Roberson & Crow[1997]) 비교할 때 상대적으로 큰 저항이 걸리는 것을 알 수 있고, 이는 침강중 깡통의 거동이 불안정하기 때문이다.

병류의 침강속도는 이미 Table 8에 부유시간과 함께 보인 바와 같이, 체적에 대한 수중무게가 상대적으로 큰 관계로 비교적 빠른 침강속도를 나타내었으며 (1.0-1.5m/s) 병의 길이가 짧아지고 무게가 작아지면 침강거동이 불안정해져서 침강속도는 다소 작아진다.

타이어의 경우, 형상의 특성상 타이어 안쪽에 고립된 공기가 밀려나오기 어렵고, 따라서 비중이 1.2 정도인 일반적인 타이어의 경우 상당히 긴 부유시간을 가질 수 있다. 실제로 실험실 내에서는 어떠한 조작을 하여도 침강조건을 만족시켜줄 수가 없었고, 따라서 이러한 경우에 대한 실험은 실험실 규모에서는 수행하기가 어렵다고 볼 수 있다. 하지만 해양에 투기되는 타이어가

오랜 기간동안 충돌과 마찰 등으로 표면에 수많은 균열이 생기는 것이 사실이고 이는 Fig. 4에 보인것과 같이 실제로 해저에서 수거된 타이어의 상태에서 확인할 수 있다.

이러한 배경에서 본 연구에서는 실험 대상 타이어에 작은 구멍을 내어 강제로 고립된 공기를 빼줌으로써 페타이어의 상태를 만들어 주고 침강속도 실험을 수행하였다. 그 결과를 Table 10에 보였는데, \*표로 표시된 경우는 수심 7m 정도인 KRISO의 수조에서 실험을 한 결과이다. 전반적으로 0.4-0.6m/s의 침강속도를 나타내는데 타이어의 형상에 따라 수평침강 혹은 수직침강이 나타날 수 있음을 확인하였다.

로프류의 침강속도는 3종류의 와이어로프와 1종류의 삼마로프에 대하여 관찰하고 결과를 Table 11에 정리하였다. 와이어 로프의 경우 0.8m/s 정도의 침강속도를 보였고 지름이 특히 작은 경우는 무게의 저항에 대한 상대적인 감소로 0.45m/s 정도의 낮은 침강속도를 나타냈다. 대응되는 항력계수값은 비슷한 레이놀즈수에서 1.0 정도인 실린더의 그것과 비교할 때에 작은 값인데, 이는 로프가 단순한 직선이 아닌 뭉치형태로 침강하기 때문으로 판단된다. 삼마로프는 수중무게의 상대적인 열세로 0.15m/s 정도의 침강속도를 보였다. 일반 합성섬유질의 로프는 4개월 이상 침강이 발생하지 않은 상태이다.

기타 폐기물들의 침강속도는 Table 3에 보인 의복류 및 신발류에 대한 것인데 대체로 0.1m/s 전후의 저속으로 비교적 안정된 형태로 침강이 발생한다.

Table 11 로프류 형상특성 및 침강속도 측정결과

종류 \ 구분	지름 (cm)	공기중무게 (kg/m)	수중무게 (kg/m)	비중	관측속도 (m/sec)	C <sub>D</sub>
Type D1	1.08	0.32	0.25	4.54	0.82	0.74
Type D2	0.63	0.145	0.135	4.41	0.81	0.64
Type D3	0.26	0.0235	0.015	4.32	0.44	0.58
Type D4	4.23	0.695	0.117	0.48	0.15(수평)	2.34
					0.18(수직)	1.25

## 5. 모델을 이용한 계산 예

끝으로 기존의 해수유동모델을 이용하여 (해양수산부[2000A], 이문진 등[1997]) 한강이 유입되는 경기만과 낙동강 유역의 해양쓰레기 침적을 수치적으로 추정하였다. 본 연구에서 파악된 바와 같이 각종 폐기물들은 그 특성에 따라 다양한 부유시간을 갖는데 이들을 크게 다섯종류로 (1일, 5일, 10일, 30일, 100일의 부유특성) 분류하고 각각에 대하여 1년동안의 수치모사를 수행하였다.

기본적인 수치해석 방법은 전술한 프레임을 그대로 사용하였으며, 일정량의 쓰레기가 한강의 하류에서 연속적으로 유입된다고 가정하였다. 반복적인 조석류와 계절별로 변하는 취송류 (1년을 4계절로 구분하여 고려), 그리고 월별 하천 유입류를 고려하였고 쓰레기 입자 추적을 위한 시간적분 간격은 조석 주기를 240등분하여 사용하였다. 쓰레기는 매순간 5개의 입자로 입력되어 총 850,000여개가 사용되었다.

Fig. 5에서 8까지 그림은 한강유역에 대해 수치모사를 1년동안에 대하여 실시하고 나타난 결과를 각각의 경우에 대하여 보이고 있다. Fig. 5와 7은 수치모사의 최종단계에서 수면에 부유하고 있는 폐기물을 붉은 입자로 표시하고 있고 Fig. 6과 8은 침강하여 해저면에 침적된 상태를 검은 입자로 보이고 있다. 부유 폐기물의 현재위치와 이미 침적된 폐기물의 위치는 엄연히 다른 정보이지만 서로 크게 다르지 않음을 볼 수 있다.

일반적으로 말하여 부유시간이 상대적으로 짧은 경우는 (Fig. 5, 6) 폐기물이 주로 강화도가 가로막고 있는 수로에 침적되고 있고 인천항 북부와 항구내부까지도 약간의 폐기물 침적이 예상됨을 볼 수 있다. 본 연구에서 파악된 바에 따르면 이러한 폐기물에는 음료수 캔, 병, 비중이 상대적으로 큰 목재류, 의복 및 신발류 그리고 재질이 손상된 페타이어류 등이 있을 수 있다. 반면 부유시간이 긴 폐기물의 경우 (Fig. 7, 8) 강화도 서쪽해역과 인천항 그리고 대부도의 북부와 남부해역을 포함하는 광범위한 해역까지 쓰레기가 확산되고 있음을 볼 수 있고 따라서 상당량의 침적쓰레기가 해당 해저에 존재하고 있음을 추정할 수 있다. 이러한 폐기물에는 비중이 작은 목재

와 고급운동화, 그리고 부유특성이 탁월한 플라스틱 용기류가 있다.

같은 내용의 수치모사를 낙동강 유역의 해역에 적용하여 Fig. 9에서 12까지 보였다. 쓰레기 방출지점은 낙동강 하구의 을숙도 중간지점을 택하고 수치변수들은 한강의 경우와 같이 하였다. 특히 이 해역의 수치모사에는 깡통류의 파랑중 특성을 고려하기 위하여 안용호[2000]의 파랑데이터를 활용하였다.

부유시간이 1일 정도로 짧은 경우는 진우도, 장자도 등으로 이루어진 경계의 북부여 대부분의 침적이 발생하였고 상대적으로 부유시간이 긴 경우에는 부산만의 동남부 해역까지 광범위한 영역으로 쓰레기가 이송되어 침적될 수 있음을 확인할 수 있다. 본 수치결과를 고찰 해 볼 때, 일반적으로 이야기되는 거제도 부근의 쓰레기는 평균적인 개념에서 낙동강으로부터 유입된 폐기물로는 보기 어렵고, 오히려 진해만과 당동만으로 유입되는 기타 하천의 영향으로 보는 것이 타당하다고 사료된다. 또한 쓰레기의 발생원이 하천과 해상을 가리지 않고 다양하다는 사실을 이해할 경우 거제도 부근의 3차원 해수유동이 만들어 내는 국부적인 압력최소 지역, 혹은 유속 최소 지역이 거제도 부근의 해저쓰레기 침적에 직접적인 영향을 미친다고 생각해 볼 수 있겠다.

현재 경기만이나 낙동강 유역의 해저쓰레기 실태 파악이 부족한 상황이므로 (해양수산부[2000B]에 강화도 북부 해역의 중층쓰레기에 대한 조사가 단편적으로 보고되어 있음) 본 연구에서 추정된 쓰레기 지도의 신뢰도를 정량적으로 평가하기에는 어려움이 있다. 또한 흐름이 빠른 해역에서 과연 침강한 쓰레기가 해저면에 축적될 수 있는지에 대한 문제, 그리고 부유시간이 매우 긴 쓰레기의 경우 해양생물의 부착으로 인한 비중 증가에 따른 침강 가능성 문제 등이 고려되지 못한 단점이 있다. 이와 같은 문제는 추후 연구의 대상을 구체화한 엄밀한 추가 연구를 통하여 파악될 수 있다고 판단되며, 현재의 본 연구 결과는 추후 경기만 및 낙동강 유역의 해저쓰레기 관련 연구 및 사업에 기본적인 자료를 제공할 것으로 사료되고 계속적인 현장조사 자료와 본 연구결과와의 비교가 필요하다고 판단된다.



Fig. 5 부유시간 1일인 쓰레기의 수면부유상태 (한강유역)



Fig. 7 부유시간 100일인 쓰레기의 수면부유상태 (한강유역)



Fig. 6 부유시간 1일인 쓰레기의 침적상태 (한강유역)



Fig. 8 부유시간 100일인 쓰레기의 침적상태 (한강유역)



Fig. 9 부유시간 1일인 쓰레기의 수면부유상태 (낙동강유역)

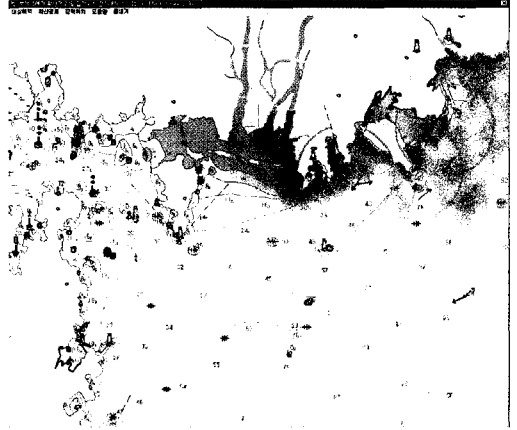


Fig. 12 부유시간 100일인 쓰레기의 침적상태 (낙동강유역)

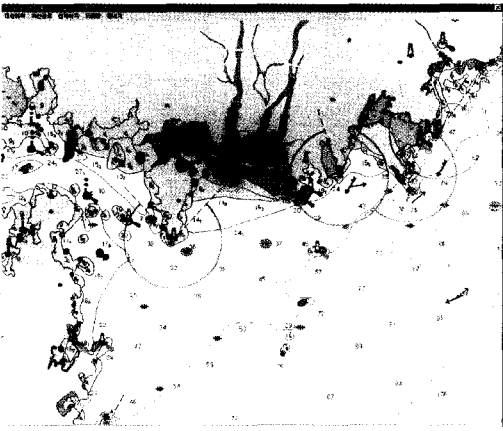


Fig. 10 부유시간 1일인 쓰레기의 수면부유상태 (낙동강유역)



Fig. 11 부유시간 100일인 쓰레기의 침적상태 (낙동강유역)

## 6. 결 언

해저 쓰레기 지도작성을 위하여 사용되는 수치모델에 제공될 정보로써, 각종 해양폐기물에 대한 수면체류시간과 침강속도에 대한 실험을 수행하였다. 폐기물을 해수침투성과 허수유입성(비침투성)으로 구분하고, 침투성 폐기물에 대하여는 해수중 부유시간을, 그리고 비침투성에 대하여는 파랑중 부유시간을 측정하였다.

침투성 폐기물의 대표적인 예인 목재의 경우 체적 대 침수면적 비가 목재의 비중과 더불어 중요한 인자임이 확인되었으나, 그 정량적인 값은 목재의 종류와 모양 그리고 건조상태 및 균일성 정도에 따라 상당한 편차를 보인다는 것을 알 수 있었고, 비중 0.7 이상의 건설용 목재의 경우 수일에서 10여일 정도의 부유시간을, 0.6 이하의 비중을 가지는 경우 수개월 이상의 부유시간을 가지는 것으로 파악되었다. 의복 등과 신발류의 경우, 면류는 대략 수분, 합성수지의 경우 1~2시간 그리고 구두의 경우 1~2일 정도의 부유시간을 보였고, 삼마 로프의 경우는 50분 정도의 부유시간을 가지는 것으로 나타났다.

유입성 폐기물의 경우 파주기가 대략 0.7초 이상인 경우 파에 대한 상대운동이 거의 없어서 안정된 형태로 부유하고 상대적으로 짧은 파를 만날 경우에 한해서 수분대의 부유시간을 가질 수 있음을 확인하였다. 병류의 경우 무게중심의 수

직위치가 바닥에서 40%를 넘을 경우 거꾸로 뒤집혀 매우 안정된 상태로 부유함도 확인하였다. 타이어의 경우 재질에 결합이 없을 경우 침강이 거의 발생하지 않는 것으로 관찰되었다.

침강이 발생하는 시점에서 폐기물들의 침강속도는 수중에서의 자유낙하 실험으로 측정하고 이들을 물적, 형상적 특성에 따라 논하였다. 목재의 경우 침강 방향에 따라 0.15~0.2 m/s의 침강속도를, 캔류의 경우는 길이 차이에 따른 불안정한 동요 여부에 따라 0.25~0.35m/s, 병류의 경우는 길이 차이에 따라 1.0~1.5m/s의 침강속도를 보였고, 타이어의 경우는 0.4~0.6m/s, 와이어로프의 경우는 직경의 크기에 따라 0.45~0.8m/s, 삼마로프는 0.15m/s 그리고 의복과 신발류는 0.1m/s 전후의 침강속도를 보였다.

정리된 폐기물 거동정보를 바탕으로 한강 및 낙동강 지역의 쓰레기 침적지를 수치적으로 살펴본데, 경기만의 경우 강화도의 북쪽과 동쪽에 많은 쓰레기의 침적이 추정되고 강화도의 서편과 영종도를 중심으로한 인천항 부근에도 상당량의 쓰레기가 침적될 수 있음을 확인하였다. 낙동강유역의 경우, 부유시간이 1일 정도로 짧은 경우는 진우도, 장자도 등으로 이루어진 경계의 북부에 대부분의 침적이 발생하였고 상대적으로 부유시간이 긴 경우에는 부산만의 동남부 해역까지 광범위한 영역으로 쓰레기가 이송되어 침적될 수 있음을 확인하였다.

본 연구의 결과를 고찰 해 볼 때, 일반적으로 이야기되는 거제도 부근의 쓰레기는 평균적인 개념에서 낙동강으로부터 유입된 폐기물로는 보기 어렵고, 오히려 진해만과 당동만으로 유입되는 기타 하천의 영향으로 보는 것이 타당하다고 사료된다. 또한 쓰레기의 발생원이 하천과 해상을 가리지 않고 다양하다는 사실을 이해할 경우 거제도 부근의 3차원 해수유동이 만들어 내는 국부적인 압력최소 지역, 혹은 유속 최소 지역이 거제도 부근의 해저쓰레기 침적에 직접적인 영향을 미친다고 볼 수 있다.

실제 해상상태를 구현하는 문제, 거기에 따르는 척도효과의 문제 그리고 다양한 해양폐기물의 대표성을 갖는 샘플을 설정하는 문제 등의 어려움이 충분히 고려되지는 못하였고, 흐름이 빠른 해역에서의 쓰레기 축적 가능성 그리고 해양생물 부착에 따른 쓰레기의 비중 증가 문제 등이 고려되지 못한 단점

이 있으나 해양폐기물 지도 작성에 적극적으로 고려될 수 있는 폐기물 거동 모델의 자료로 본 연구의 결과가 유용하게 사용될 수 있다고 판단된다.

## 후 기

본 논문은 한국해양연구소가 주관한 해양수산부지 원 “해양폐기물 종합처리시스템 개발(II)”의 위탁 연구 결과임을 밝힙니다.

## 참 고 문 헌

- [1] 구본삼, 강현, 허성희, "진해만 바다밑 쓰레기에 대한 조사 연구," 한국해양환경공학회지, 3권 4호, 2000.
- [2] 국방과학연구소, 포항만 음탐 및 설치환경 조사 연구, 연구보고서, 1992.
- [3] 안용호, 한국해역에서의 파랑의 통계적 특성에 대한 연구, 석사학위논문, 홍익대학교, 2000.
- [4] 이문진, 강용균, "연안역 와동확산: 관측 및 프랙탈 확산 모델링," 한국해양해양공학회지, 8권, 1997.
- [5] 해양수산부, 해양폐기물 종합처리 시스템 개발, 연구보고서, 2000A.
- [6] 해양수산부, 해양폐기물 종합처리 시스템 개발 (II), 중간보고회, 2000B.
- [7] KRISO, 수중침적 폐기물 정화사업, 실태조사 및 분포도 작성사업, 연구보고서, 1999.
- [8] Coe, J.M. & Rogers, D.B., Marine Debris, Sources, Impacts, and Solutions, Springer, NY, 1996.
- [9] Dordrecht, Transport processes in porous media, Kluwer Academic Publishers, 1991.
- [10] Isaacson, M., "Fixed and Floating Axisymmetric Structures in Wave," J. Waterway, Port, Coastal and Ocean Division, ASCE, Vol.108, 1982.
- [11] Nield, D.A., Convection in porous media, Springer-Verlag, NY, 1992.
- [12] Roberson and Crow, Engineering Fluid Mechanics, Wiley, NY, 1997.