

## 유출된 풍화유와 분산유의 조간대 침투 및 생태계 영향 - 용존상 물질의 침투량 변화 -

정 정 조<sup>†</sup>  
순천대학교 환경공학과

### Penetration of Weathered Oil and Dispersed Oil and its Ecological Effects on Tidal Flat as Infiltration of Dissolved Matter -

Cheong-Jo Cheong<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Suncheon National University

#### 요 약

본 연구에서는 조간대에서 유출된 기름의 표착 및 침투과정을 파악하고, 침투된 기름의 해수 침투차단 여부를 검토하는 것을 목적으로 하여 모의 조간대를 이용하여 연구를 수행하였다. 표착된 기름의 침투깊이는 분산유가 가장 낮았으며, 풍화유 그리고 원유의 순서로 깊어지는 경향을 나타냈다. 그리고 기름의 침투는 표착된 기름의 양에 의해 좌우되는 것을 알 수 있었으며, 유출된 기름의 침투는 첫번째 조석에서 거의 대부분 결정되며 그이후에는 거의 변화가 없었다. 침투된 기름은 토양 표층으로부터 2 cm 부분이 가장 농도가 높음을 알았다. 기름의 침투량의 증가와 더불어 해수의 침투량이 감소하였으며, 분산유보다는 원유나 풍화유가 보다 많은 양의 해수를 차단하였다. 따라서 해수의 침투량의 차단이라는 관점에서 볼 때 연안 조간대에서 표착유의 저서생물에 대한 피해는 풍화유나 원유가 분산유보다 클 것으로 사료된다.

**Abstract** – The purpose of this study is to quantify the penetration behavior of spilled weathered oil and dispersed oil and to evaluate the influence of the penetrated oils on seawater infiltration in tidal flat environment. The penetration depths of the spilled oils into the tidal flat sediments were gradually deeper according to increase the stranded oil volume. The penetration depth of stranded oil were abruptly dropped at first falling tide, but were not significantly fluctuated after that. Moreover, hydrocarbon concentration was most high within the upper 2 cm. Seawater infiltration was decreased in proportion to the stranded oil volume. Dispersed oil was easily permitted the seawater infiltration than weathered oil and crude oil. Therefore, quick cleaning actions for penetrated oil will be required for recovery of seawater infiltration, because the seawater contains oxygen and nutrients required for the survival of benthic organisms in tidal flat.

**Keywords:** Coastal pollution(연안오염), Model tidal flat(모형조간대), Spilled oil(유출기름), Penetration behavior(침투거동), Seawater infiltration(해수침투)

#### 1. 서 론

유용 수산생물의 양식육성의 기능, 수질정화 기능, 레크레이션과 같은 친수기능을 가지고 있는 조간대는 3,000종 이상의 다양한 저서생물들이 생존하는 생물자원의 보고이나(Reise[1985]; Brown

& McLachlan[1990]; Heip *et al.*[1995]; Rumohr *et al.*[1987]), 최근 이 연안 조간대가 인간기원의 오염물질로부터 심각한 위협을 받고 있는 실정이다. 인간기원의 오염물질 중에서 60%이상은 기름에 의한 오염으로써, 자연적 분출(natural seeps), 정유공장에서부터의 배출(refinery emission), 선박의 청소와 사고에 의한 유출(ship cleaning operations and accidental spills) 등과 같은 다양한 경로를 통해서 해양으로 유입된다. 특히, 유조선의 사고로 인해 유

<sup>†</sup>Corresponding author: ccj@sunchon.ac.kr

발되는 기름오염은 단시간에 다량의 기름이 유출되기 때문에 유출지역의 해양 또는 연안 지역의 생태계에 치명적인 영향을 미치게 된다. 대형 유조선의 사고로는 1989년 Alaska연안에서 발생한 Exxon Valdez호의 사고(약 37,000톤의 원유 유출)(Swannell et al.[1996]; Wolfe et al.[1994]), 1996년 영국의 Milford Haven에서 발생한 Sea Empress호의 사고(약 72,000톤의 원유 유출)(Stationery Office[1998]), 1997년 일본의 근해에서 발생한 Nahotoka호의 좌초사고(약 6,014톤의 C중유 유출)(岡市[1997]), 2001년 생태계의 보고인 갈라파고스 군도 부근에서 발생한 Jessica호의 좌초 사고(약 400톤의 디젤유와 300톤의 중유 유출) 사고(Edgar et al.[2003]) 등을 들 수 있다.

한편, 1991~2001년까지 국내에서 발생된 기름에 의한 해양오염 사고는 총 4,190건으로 연평균 380여건의 크고 작은 기름 유출 사고가 발생되었으며(정 등[2003]), 1995년 7월 남해의 소리도 앞바다에서 Sea Prince호가 좌초되어 원유와 중유가 약 5,035톤 유출되어 남해안 일대의 연안 어장 및 생태계가 심각하게 피해를 입고있다(정 등[2003]). 더구나, 약10년이 지난 지금까지도 토양중에는 당시에 유출되었던 기름이 잔존하여 장기적인 연안 생태계의 피해를 유발시키고 있다. 이러한 대규모의 기름유출 사고는 돌이킬 수 없는 환경재앙을 불러올 뿐만아니라, 기름에 오염된 생태계가 회복되는데는 수십년에서 수백년의 시간이 걸린다고 보고되고 있다.

사고로 인해 유출된 기름은 확산(evaporation)과 이류(advection)의 과정을 거치며 연안지역 조간대에 표착된 후 토양중으로 침투하게 되는데, 이로 인해 야기되는 생태학적 피해로는 복족류(腹足類)의 먹이 섭취장애(Samiullah[1985]), 부착조류의 광합성저하(緒方 & 藤澤[1991]), 독성에 의한 생물 피해(細川 & 桑江[1997]), 토양의 혐기성화에 따른 피해(Jhonston[1970]) 등을 들 수 있다. 그러나 생물에게 급성독성을 미치는 거의 대부분의 저비점 성분(원유; 30~40%, 중유; ~10%)은 유출된 기름이 연안지역에 도달하기 전에 휘발·소실되기, 때문에 생물에 대한 치명적인 독성 피해는 극히 미미한 것으로 보고되었다(Sebastiao & Soares[1995]; Raffaelli & Hawkins[1996]). 따라서, 표착·침투된 기름이 야기시

킬 수 있는 가장 큰 조간대의 생태계 피해로는 저생생물의 생육에 필수불가결한 용존상 물질(용존산소, 영양염, 유기물)과 입자상 물질(플랑크톤, 세균, 유기쇄설물)의 공급 차단에 따른 성장저하나 질식사일 것으로 판단된다. 그러나 조간대 생태계에 심각한 피해를 야기시키는 해수의 침투 차단에 관한 연구는 거의 수행되어 있지 않은 실정이다. 그리고 생태계 피해와 유출된 기름의 처리 대책 수립에 중요한 단서가 되는 유출된 기름의 토양 침투 거동에 관한 연구 또한 아직 미비한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 모의 조간대를 이용하여 유출된 원유 및 분산유와 풍화유의 침투 거동을 파악하고, 해수의 침투에 미치는 영향을 검토하는 것을 목적으로하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 조간대 모형장치는 몸체가 FRP(Fiber-glass Reinforced Plastics) 소재로 만들어진 조간대 수조(L 100 cm×W 50 cm×H 100 cm)와 조석 조절장치, 저류조, 온도 조절장치로 구성되어 있으며, 전 공정은 컴퓨터 시스템에 의해서 자동으로 제어된다(Fig. 1). 실험에 사용된 토양시료는 일본의 후쿠야마(福山, Fukuyama) 연안지역에서 채취하였으며, 토양의 실트의 함량, 유기물함량, 공극률, 평균입경은 각각 2.80%, 0.93%, 43% 그리고 0.65 mm이었다. 토양시료를 내경 5.5 cm, 길이 50 cm의 아크릴관에 충전한 다음 조간대 수조에 수직으로 거치시켰다. 해수의 유동은 아크릴관의 하단에 설치된 75 μm의 메쉬를 통해서 조석의 변동과 함께 상하로 이동이 가능하였으며, 충전된 토양의 안정화를 위해 기름 투입 전 3일 동안 (조석변동 횟수 12회) 조석 변동을 실시하였다.

실험에 사용된 해수는 인공염(MARINE-TEC. Co. Sealife)를 이용하여 염분농도를 32±2.0 psu로 조절하였고, 수온과 밀도는 각각 15±1 °C와 1.023 g/cm<sup>3</sup>로 제어하였다.

지금까지의 연구로부터 유출된 기름의 침투에는 파도 보다는 조석작용이 중요한 영향인자임을 알 수가 있었기 때문에, 본 연구

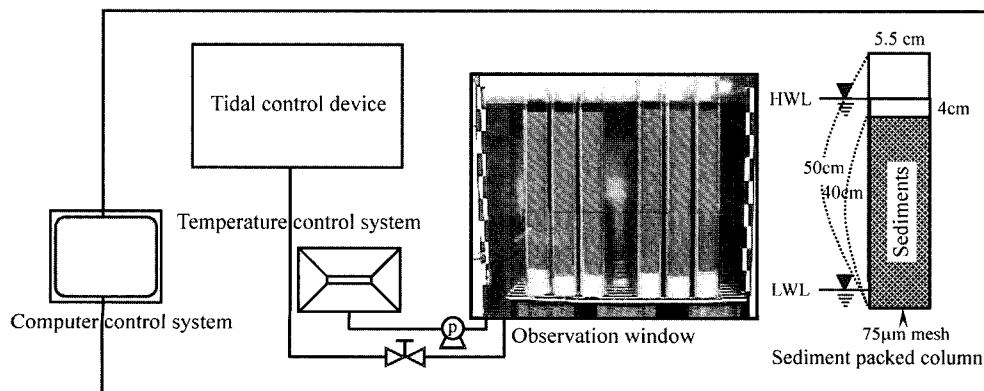


Fig. 1. Schematic diagram of experimental set-up for oiling studies.

에서는 조석변동만을 고려하여 실험을 수행하였다. Hiroshima만은 저조에서 고조까지의 평균 조위 변동시간이 6시간으로 12시간 주기의 반일주조(semi-diurnal tide)가 우세하므로 조위 변동시간 6시간과 조석 변동폭 2 m의 관계로부터 조위 변동속도를 0.009 cm/s로 하였다. 또한 조석 변동폭은 예비실험의 결과로부터 기름의 침투에 영향이 없는 40 cm 범위로 하였다.

**2.2 분산유와 풍화유**

유출된 기름은 유막(油膜)의 형태로 확산과 이류의 과정을 거치며 물리화학적인 성상이 변화하여 풍화유(weathered oil)의 형태로 변화되거나 인위적인 분산제의 살포 또는 파도와 같은 물리적인 외력에 의해서 분산유(dispersed oil)의 형태로 변형되어 연안지역 조간대에 표착하게 된다.

따라서 본 연구에서는 15에서 밀도 0.87 g/cm<sup>3</sup>, 용융점 -15°C, 황 함량 2.0%(wt.)의 특징을 가지고 있는 중동산의 Upper Zakum 원유를 이용하여 풍화유와 분산유를 제조하였다. 해수가 50-80%(v/v) 혼합된 유-중-수 에멀션을 “초코렛 무스(chocolate mousse)”라고 부르며 매우 안정한 형태로서 연안 조간대에 표착하게 된다. 따라서 초코렛 무스 형태의 풍화유를 만들기 위해서 먼저 air stripping 법으로 원유중의 저비점 성분(20% wt.)을 제거한 다음 원유와 해수의 혼합비를 2:8(v/v)로 하여 분별칼대기에 넣고 수직 교반기(TAITEC, Co., Recipro Shaker SR-v)를 이용하여 30분 동안 상하로 혼합시켰다(Babro *et al.*[1992]; Mackay *et al.*[1973]).

6시간과 조석 변동폭 2 m의 관계로부터 조위 변동속도를 0.009 cm/s로 하였다. 또한 조석 변동폭은 예비실험의 결과로부터 기름의 침투에 영향이 없는 40 cm 범위로 하였다(Fig. 2).

한편, 분산유는 해수:저비점 성분이 휘발된 원유:시판용의 분산제 TAIHO Self Mixing S-7(manufactured by TAIHO Industries

Co., LTD.)를 25:25:1(w/w)의 비율로 1 L용의 비이커에 주입한 다음, 교반기(EYELA Co., Uni Thermo Shaker NYS-3000)를 이용하여 30분 동안 수평 방향으로 혼합하여 제조하였다(Babro & Fingas[1992]; Mackay *et al.*[1973]).

기름의 점도는 점도계(U-tube Reverse Flow Viscometer, Thomas Kggaku Co., LTD)를 이용하여 측정하였으며, 그 결과를 Table 1에 제시하였다.

기름의 투여량은 선행 연구(Smith *et al.*[1981]; Delaune[1984]; Lin & Mendelsohn[1996]; Little[1987]; Oudot *et al.*[1998])를 참고하여 1, 2, 4 그리고 8 L/m<sup>2</sup>로 하였으며, 고조시에 수면위에 적하한 후, 수위를 하강시켜 토양표면에 표착시켰다.

**2.3 기름의 침투 거동**

토양에 오염물질의 거동은 Darcy의 법칙에 의해 표현될 수 있으며, 오염물질의 이동속도는 수두구배(동수구배)와 밀도, 투수계수에 비례하고 점도에 반비례한다는 것을 나타낸다(강[2000]).

본 연구에서는 각기 점도가 다른 유출된 풍화유와 분산유가 조간대 토양에서 장기적으로 어떠한 침투거동을 보이는지를 알아보기 위해서 고조시에 기름을 투입하여 수면 위에서 균일하게 분산시킨 다음, 수위를 강하(낙조)시켜 토양표면에 균일하게 표착시켰다. 기름의 표착량에 따른 침투거동과 16조석 주기(192시간) 동안 조위를 변동시켜 표착된 기름의 토양 침투거동을 관측하였다. 16조석 주기가 경과한 후 침투된 기름의 깊이에 따른 수직적 유분농도 분석을 토양시료를 채취하여 2 cm 간격으로 절단하여 혼합한 후 dichloromethane을 이용하여 추출하였다. 추출액은 TLC-FID (Thin-layer Chromatography-flame-ionization detector)를 이용하여 분석하였다.

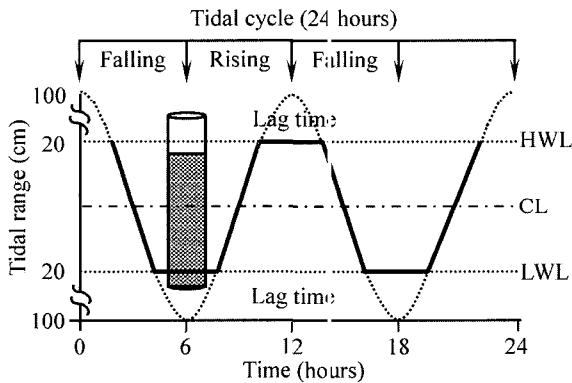
**2.4 침투된 기름의 해수 침투 차단**

침투된 기름의 해수의 침투 차단 여부를 검토하기 위해서 고조시에 기름이 침투된 컬럼을 실험장치로부터 꺼내어 깔대기가 부착된 메스실린더 위에 거치시켜 3분 동안 적하된 해수의 양을 측정하여 풍화유와 분산유 그리고 원유의 침투에 의한 해수의 침투량 변화를 비교 하였다.

**3. 결과 및 고찰**

**3.1 기름의 침투 거동**

Fig. 3은 표착된 기름량에 따른 풍화유와 분산유 그리고 C중유의 토양 침투깊이의 변화를 나타낸 결과이다. 표착된 기름의 양이 1 L/m<sup>2</sup>에서 8 L/m<sup>2</sup>로 증가함에 따라 기름의 침투깊이 또한 비례적



**Fig. 2.** Tidal fluctuation shown as the dash line. HWL; high water level, CL; center line, LWL; low water level.

**Table 1.** Viscosities and densities of used oils in this study.

Oil types	Raw crude oil	Weathered oil	
		Crude oil+Seawater (2:8, v/v)	Dispersed oil Crude oil +Dispersant (25:1, w/w)
Viscosity (cP) at 18	19	700	115
Density (g/cm <sup>3</sup> ) at 15	0.870	0.994	0.874

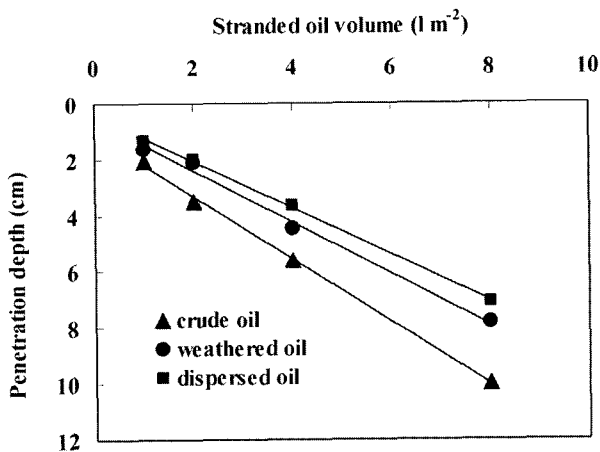


Fig. 3. Penetration depths of crude oil, weathered oil and dispersed oil (left) according to the stranded oil volume at first tidal cycle.

으로 깊어지는 경향을 나타내었다(Table 1, R<sup>2</sup>=0.99이상). 그리고 표착된 기름의 양이 동일한 조건에서는 침투깊이가 분산유가 가장 낮았으며, 풍화유 그리고 원유의 순서로 깊어지는 경향을 나타내었다. 저자는 선행연구를 통해 기름의 침투는 점도가 중요한 영향 인자임을 밝힌바 있다. 따라서, 점도의 차이로 부터 세가지 종류의 기름의 침투깊이 변화를 고찰해 볼 때, 풍화유(700 cP at 18)는 원유(19 cP at 18)보다 상대적으로 점도가 높기 때문에 역으로 침투깊이가 낮았다. 그러나 분산유의 경우에는 점도를 고려하여 침투깊이를 논하는데 있어서 어려움이 있을 것으로 해석된다. 왜냐하면 저비점 성분이 휘발된 원유에 유처리분산제를 혼합(25:1, w/w)한 분산유는 수면에 투입과 동시에 해수와 혼합비에 따라 그 점도가 달라지기 때문이다. 한편 원유와 해수를 내포한 풍화유는 확산을 통해 침투가 이루어지나 분산유는 해수중에 분산된 입자로서 침투하기 때문에 토양중으로 침투하는 동안에 입자사이의 간극에 갇혀(trapped) 침투 깊이가 상대적으로 낮은 것으로 판단된다.

Fig. 4는 침투된 기름의 16조석 주기 동안의 거동을 나타낸 결과이다. 기름의 주입 후 첫번째 낙조에서 기름의 침투 깊이가 급격

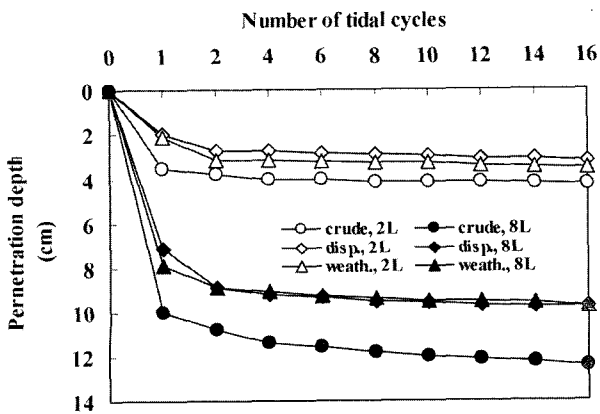


Fig. 4. Behavior of penetrated oils over 16 tidal cycles.

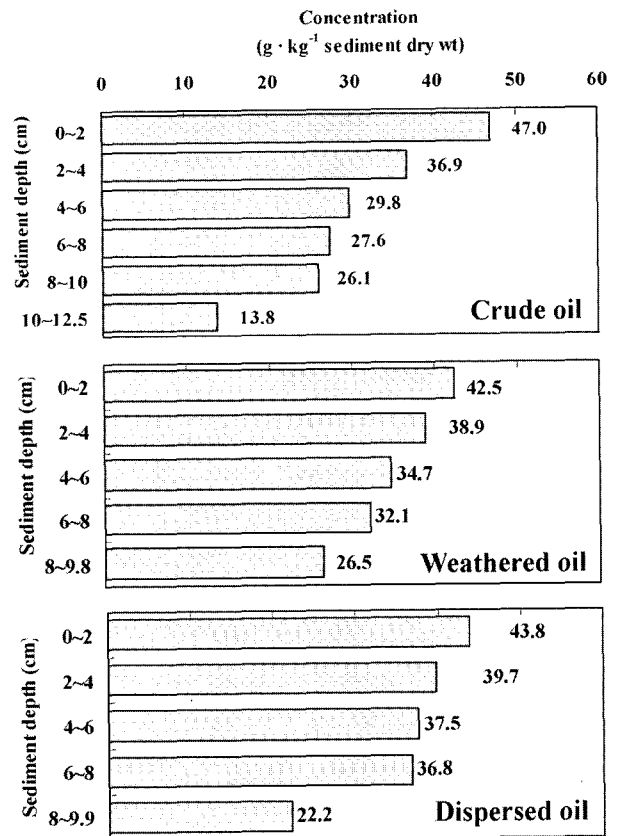


Fig. 5. Comparison of vertical distribution of penetrated oils in the condition of applied oil volume as 8 L per square meters after 16 tidal cycles.

하게 저하되었으며, 2조석까지는 다소 깊이가 깊어짐을 알 수 있었다. 원유가 8 L 표착된 경우에 2조석부터 16조석까지는 침투깊이가 다소 깊어지는 경향을 보였으나 그 이외의 기름의 침투깊이에는 커다란 변화가 없었다.

따라서 Fig. 3과 4의 결과로부터 기름의 침투에는 표착된 기름

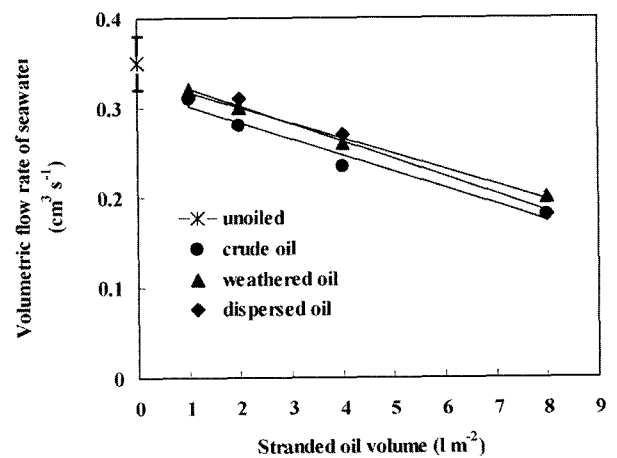


Fig. 6. Seawater infiltration through oil penetrated sediments at first tidal cycle.

**Table 2.** Relation equation and R<sup>2</sup> of oil penetration and seawater infiltration.

Oils	Penetration <sup>a</sup>		Seawater infiltration <sup>b</sup>	
	Relation equation	R <sup>2</sup>	Relation equation	R <sup>2</sup>
Crude oil	$y = 0.830x + 0.4109$	0.9987	$y = -0.018x + 0.3189$	0.9731
Weathered oil	$y = 0.9139x + 0.5978$	0.9922	$y = -0.017x + 0.3339$	0.9942
Dispersed oil	$y = 1.1178x + 1.0957$	0.9984	$y = -0.0196x + 0.3409$	0.9761

의 양이 중요한 영향을 미치는 인자임을 알 수 있었으며, 유출된 기름의 침투는 첫번째 조석에 가장 중요함을 알았다.

Fig. 5는 평방미터당 8 L의 기름 표착으로부터 16조석 주기 후에 시료를 채취하여 TLC-FID로 분석한 유분농도의 수직적 분포를 나타낸 결과이다. 결과로부터 깊이가 깊어짐에 따라서 침투된 기름의 농도는 단계적으로 감소하였으며, 침투된 기름의 깊이 별 농도는 토양표면으로부터 2 cm에서 가장 높게 나타났다.

**3.2 침투된 기름의 해수 침투 차단**

Fig. 6은 표착된 기름의 양 변화에 따른 해수의 침투량의 변화를 나타낸 결과이다. 기름이 주입되지 않은 조건에서의 해수 침투량(volumetric flow rate of seawater)은 0.35 cm<sup>3</sup> s<sup>-1</sup>이었으나, 기름의 표착량이 1의 조건에서 8 L로 증가함에 따라서 해수의 침투량이 비례적으로 감소하는 경향을 나타내었다(Table 2). 그러나 동일한 기름의 양이 침투하였을 경우에는 분산유가 원유나 풍화유보다 해수의 침투 차단이 적었다.

Fig. 7은 C중유와 분산유 그리고 풍화유를 평방미터당 각각 2 L와 8 L를 표착시켰을 경우에 있어서 16조석 동안의 해수 침투 차단에 관한 실험결과를 나타내고 있다. 1조석 이후의 해수 침투량은 커다란 변화가 나타나지 않았다. 그러나 원유와 풍화유가 침투하였을 경우와 비교해서 분산유가 침투하였을 경우에 있어서는 전체적으로 해수 침투의 차단이 상대적으로 적었다.

이는 Fig. 5의 결과에 제시된 바와 같이 분산유가 원유 및 풍화유보다 토양표면 0-2 cm의 유분농도가 낮아 토양간극의 폐쇄율

(閉鎖率)이 적었기 때문으로 판단된다.

이상의 결과로부터 해수의 침투량은 기름의 표착량과 반비례하는 경향을 나타내었으며, 침투된 원유나 풍화유 보다는 분산유가 해수의 침투차단이 적은 것을 알았다.

**4. 결 론**

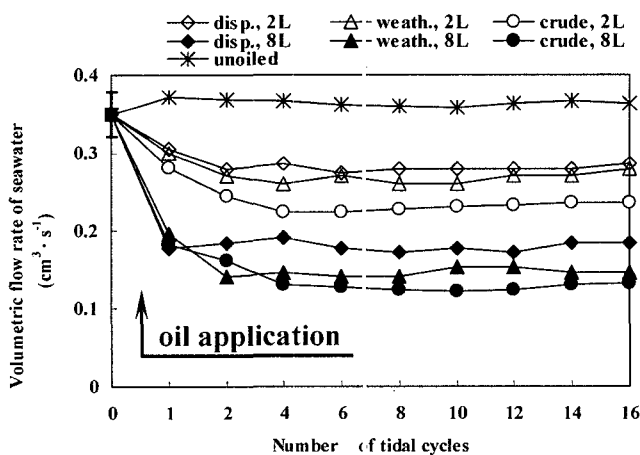
본 연구에서는 조건대에서 유출된 기름의 표착 및 침투과정을 파악하고, 침투된 기름의 해수 침투차단 여부를 검토하는 것을 목적으로 하여 모형조건대를 이용하여 연구를 수행하였다. 연구로부터 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

표착된 기름의 침투깊이는 분산유가 가장 낮았으며, 풍화유 그리고 원유의 순서로 깊어지는 경향을 나타냈다. 그리고 기름의 침투는 표착된 기름의 양에 의해 좌우되는 것을 알 수 있었으며, 유출된 기름의 침투는 첫번째 조석에서 거의 대부분 결정되며 그 이후에는 거의 변화가 없었다. 침투된 기름은 토양 표층으로부터 2 cm 부분이 가장 농도가 높음을 알았다. 기름의 침투량의 증가와 더불어 해수의 침투량이 감소하였으며, 분산유보다는 원유나 풍화유가 보다 많은 양의 해수를 차단하였다.

따라서 해수의 침투량의 차단이라는 관점에서 볼 때 연안 조건대에서 표착유의 저서생물에 대한 피해는 풍화유나 원유가 분산유보다 클것으로 사료된다.

**참고문헌**

- [1] Babro M. and Fingas M., 1992, When Oil Spills Emulsify, Chemtech, pp. 236-241.
- [2] Brown, A. C. and McLachlan, A., 1990, Ecology of Sandy Shores, Elsevier Science Publishers B.V., The Netherlands, pp. 145-163.
- [3] Delaune, R. D., 1984, Effect of oil on salt marsh biota: methods for restoration. *Environmental Pollution*, Vol. 36, pp. 207-227.
- [4] Edgar G. J., Kerrison, L., Shepherd, S. A., and Toral-Granda, M. V., 2003, Impacts of the *Jessica* oil spill on the intertidal and shallow subtidal plants and animals, *Marine pollution bulletin*, Vol. 47, 276-283.
- [5] Heip, C. H. R. and Herman, P. N. J., 1995, "Carbon flows in the Westerschelde estuary (The Netherlands) evaluated by means of an ecosystem model (MOSES)", *Hydrobiologia*, Vol. 311, 247-266.
- [6] Jhonston R., 1970, The decomposition of crude oil residence in sand columns. *J. Mar. Biol. Ass. U. K.*, Vol. 50, 925-937.



**Fig. 7.** Seawater infiltration through the (crude oil, weathered oil and dispersed oil=left, fuel oil C, weathered oil and dispersed oil=right) penetrated sediments over 16 tidal cycles.

- [7] Lin, Q. and Mendelssohn, I. A., 1996, A comparative investigation of the effects of south Louisiana crude oil on the vegetation of fresh, brackish and salt marshes. *Marine Pollution Bulletin*, 32, 202-209.
- [8] Little, D. I., 1987, The physical fate of weathered crude and emulsified fuel oils as a function of intertidal sedimentology. *Fate and Effects of Oil in Marine Ecosystems*. Martinus Nijhoff Publishers, the Netherlands, pp. 3-18.
- [9] Mackay G. D. M., Mclean A. Y., Betancourt O. J. and Johnson B. D., 1973, The Formation of Water-in Oil Emulsions Subsequent to an Oil Spill, *Journal of the Institute of Petroleum*, pp. 164-172.
- [10] Oudot, J., Merlin, F. X., and Pinvidic, P., 1998, Weathering rates of oil components in a bioremediation experiment in estuarine sediments. *Marine Pollution Bulletin*, Vol. 45, pp. 113-125.
- [11] Reise, K., 1985, *Tidal Flat Ecology, -An Experimental Approach to Species Interactions*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg Press, Germany, pp. 1-5.
- [12] Rumohr, J., Walger, E., and Zeitzschel, B., 1987, *Seawater-Sediment Interactions in Coastal Waters*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg Press, Germany, pp. 111-161.
- [13] Samiullah, Y., 1985, Biological Effects of Marine Oil Pollution, *Oil & Petrochemical Pollution*, Vol. 2, pp. 235-264.
- [14] Sebastiao, P. and Soares, C. G., 1995, Modeling the Fate of Oil Spill at Sea, *Spill Science & Technology Bulletin*, Vol. 2, pp. 121-131.
- [15] Smith, C. J., Delaune, R. D., and Patrick, W. H., 1981, A method for determining stress in wetland plant communities following an oil spill. *Environmental Pollution*, Vol. 26, pp. 297-304.
- [16] Stationery Office, 1998, *The Environmental Impact of the Sea Empress Oil Spill, Final Report of the Sea Empress Environmental Evaluation Committee*, The Stationery Office, London. pp. 1-25.
- [17] Swannell P. J., Lee K., and Mcdonagh M., 1996, Field evaluations of marine oil spill bioremediation. *Microbiological Reviews*, Vol. 60, No. 2, 342-365.
- [18] Wolfe D.A., Hameedi M., Galt J. J. A., Watabayashi G., Short J., O'Clair C., Rice S., Michel J., Payne J. R., Braddock J., Hanna S. and Sale, D., 1994, The fate of the oil spilled from the *Exxon Valdez*. *Environ. Sci. Techn.*, 28, 561A-568A.
- [19] 朝倉彰, 1996, 潮間帯の生態學, 文一総合出版, pp. 68-83, 東京.
- [20] 岡市友利, 1997, 石油流出事故による沿岸海洋汚染-影響評価と対策技術-, 水環境學會誌, Vol. 20, No. 10, pp. 632-638.
- [21] 緒方正名, 藤澤邦康, 1991, 石油による海洋汚染と環境及び生物モニタリング, 日本水産資源保護協會, 東京, pp. 15-42.
- [22] 細川恭史, 桑江朝比呂, 1997, 干潟実験置によるメソコスム実験, 土木學會論文集, Vol. 82, pp. 12-14.
- [23] 강주복, 2000, 수리학, 구미서관, pp. 614-625.
- [24] 정진원, 윤주용, 신재록, 김한규, 2003, 해상유출유 오염지역에서의 미생물처리제 활용 방안 연구, 한국해양환경공학회지, Vol. 6, No. 2, pp. 3-15.

---

2005년 4월 14일 원고접수

2005년 8월 3일 수정본 채택