

## 사질 조간대 표착유의 방제를 위한 유화분산제의 적용 평가

정 정 조<sup>†</sup>  
순천대학교 환경공학과

### Evaluation of Dispersant Application to Stranded Oil as a Clean-up Technique at Sandy Tidal Flat

Cheong-Jo Cheong<sup>†</sup>

Department of Environmental Engineering, Suncheon National University

#### 요 약

본 연구에서는 연안 사질 조간대에 표착된 기름의 방제를 위한 화학적 방제법의 적용 가능성을 파악하기 위해서 사질 조간대에서 유처리분산제의 살포에 의한 해수침투량의 변화 및 표착유의 거동을 검토하는 것을 목적으로 하여, 모의 조간대 실험장치를 이용하여 실험을 실시하였다. 파도에너지가 비교적 작은 사질 조간대에서 표착된 원유에 의해서 해수의 침투량이 감소되었으나, 분산제를 살포함으로써 인해 해수침투량이 약 30% 증가되는 것을 알 수 있었다. 사질 조간대에 표착한 원유는 토양표층 2 cm부분에서 가장 농도가 높은 경향을 나타내었으며, 유화분산제를 살포하였을 경우 침투된 기름이 작은 입자로 분산되어 토양중으로 분산되었다. 따라서 표착된 원유에 분산제를 살포함으로써 인해 저서생물의 생존에 필수적인 용존산소, 영양염, 유기물 등의 공급이 회복되어 저서생물에게 생존에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 표착된 기름에 유처리분산제를 살포함으로써 인해 표착된 기름이 작은 유적으로 분산되어 비표면적의 증대로 인한 기름분해 미생물의 분해가 촉진되어 표착유의 처리에 효과적일 것으로 사료된다.

**Abstract** – The purpose of this study is to clarify the behavior of stranded crude oil and to estimate the restoration of seawater infiltration by application of dispersant as one of cleaning techniques. We made visualization of infiltration process of seawater and stranded crude oil on the sandy beach sediments by using of a model sandy beach. Major conclusions derived from this study are as follows. The seawater infiltration volume was reduced by the stranded crude oil. However, thirty percentage of the seawater infiltration into the sediments was restored by dispersant application to the penetrated oil in sandy beach. The penetration depth of stranded oil were dropped at first falling tide, but were not significantly fluctuated after that. Moreover, oil concentration was most high within the upper 2 cm. The stranded crude oil was broken into small size droplets and dispersed into the sediments by the dispersant application. Therefore, dispersant applications play an important roles in the large increase of surface area of given volume of oil, and it resulted in promoting to biological degradation process at the oil/water interface, dispersing the stranded oil into the water column and restoration of the supplement of the dissolved oxygen and nutrients to the benthic organisms.

**Keywords:** Oil pollution(기름오염), Sandy tidal flat(사질조간대), Oil penetration(기름침투), Seawater infiltration(해수침투), Dispersant application(유화분산제의 살포)

#### 1. 서 론

2007년 12월 7일 태안 만리포 북서방 10 km 지점에서 크레인 과 허베이 스피리트(Hebei Spirit)호가 충돌하여 12,547 kL의 원

유(Kuwait crude, Iranian heavy crude, Upper Zakum crude)가 해상으로 유출된 사상 최악의 해양오염사고가 발생했다.

수입되는 원유나 석유제품은 대부분 유조선을 통해 해상으로 운송되는데, 이 경우 기상악화나 부주의로 인해 유조선 사고가 발생하면 다량의 기름이 일시에 해상으로 유출되어 해양환경을 황폐화시킨다.

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

1995년부터 2007년 까지 13년간의 국내에서 발생한 기름유출 사고 발생건수와 유출된 기름의 양은 여수 소리도 부근에서 Sea prince호의 좌초로 유출사고가 발생한 1995년에는 기름유출 사고 발생건수가 299건으로 약 15,776 kL의 기름이 유출되었으며, 이후 2000년까지는 사고 발생건수가 483건으로 증가하다가 2007년까지는 점차 감소하는 경향을 나타내고 있다(통계청 [2008]). 1995년에서 2006년까지의 평균 기름유출량은 약 1,084 kL이었으나, 2007년 태안 앞바다에서 발생한 Hebei Spirit호의 기름유출사고로 12,547 kL의 기름이 유출됨으로 인해 2007년의 기름유출량은 1,4022 kL로 급격한 증가추세를 나타내었다(통계청 [2008]).

사고로 인해 유출된 기름이 확산(spreading) 및 이류(advection)의 과정을 거치며 연안조간대에 표착하게 되면, 생물에 대해 치명적인 독성 피해를 유발하는 저비점 성분(원유; 30~40%, 중유; ~10%)(Kennish [1997])은 유출된 기름이 연안지역에 도달하기 전에 많은 부분이 휘발·소실되기 때문에 저비점 성분에 의한 급성 독성보다는 유출유의 조간대 토양표착에 의한 복족류(腹足類)의 먹이 섭취 장애(Samiullah [1985]), 부착조류의 광합성 저하(方 & 藤澤 [1991]), PAHs (Polycyclic aromatic hydrocarbons)와 같은 발암성물질의 체내 농축(細川 & 桑江 [1997]), 토양의 혐기성화에 따른 피해(Jhonston [1970]), 해수의 토양침투 차단에 따른 저서생물의 성장 및 용존산소의 공급 저해(정정조 [2005]), 그리고 표착된 기름의 세균 분해시 용존산소를 소모하기 때문에 토양중에는 심각한 용존산소의 부족이 야기되어 저서생물들이 질식사하게 되는 문제가 야기될 수 있다.

한편, 유출된 기름에 의해 오염된 해안의 방제 및 처리하기 위한 방법(정정조, [2008])으로는 물리적 방법(수작업에 의한 제거(Manual recovery), 물뿌리거나 물세척법(Flooding or washing), 진공흡입법(Vacuum), 기계적 제거법(Mechanical removal), 갈아엎기법(Tilling and aeration), 파도에 의한 세척법(Sediment reworking or Surf washing), 저온고온 고압세척법(High-pressure cold or hot water washing), 모래현탁액 뿌리기법(Sand blasting), 스팀정화법(Steam cleaning)), 화학적 방법(화학세정제 이용법(Shoreline cleaning agent), 현지소각법(In-situ burning), 화학적 방법(Chemical agent)),

생물학적 방법(미생물정화법(Bioremediation)) 등 다양한 방법들이 개발되어 적용되고 있으나, 조간대의 경우는 펄, 모래, 자갈, 암석과 같이 토양의 구성이 각기 다르기 때문에 많은 연구를 통해 조간대의 조건에 따른 과학적이고 효율적인 방제 및 처리방법이 정립되어야 할 것이다.

따라서 본 연구에서는 연안 조간대에 표착된 기름의 방제를 위한 화학적 방제법의 적용 가능성을 파악하기 위해서 사질 조간대에서 유처리분산제의 살포에 의한 해수침투량의 변화 및 표착유의 거동을 검토하는 것을 목적으로 하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용된 모의 해변 실험장치는 Fig. 1에 제시된 바와 같으며, 수조(5.0 m(L)×0.8 m(W)×1.0 m(H)), 상하운동에 의해서 파도를 발생시키는 조파장치(쇄파파고: ~50 mm high), 조석 조절장치(조석주기: 1~7 hr, 저류조(4 m<sup>3</sup>), 온도조절장치 (3~30 °C)로 구성되어 있으며, 컴퓨터에 의해서 자동으로 제어된다. 실험장치 몸체의 소재는 FRP(Fiber-Reinforced Plastics)이며, 해수침투를 관측하기 위해서 2개의 관측창(0.6 m(L)×0.9 m(W))이 부착되어 있다. 해수의 토양 침투거동을 가시화 하기 위해서 투명한 glass beads(φ 1 mm)를 현장 모래의 대용으로 사용하였다. Beads를 수조내에 충전하여 사면구배를 1/10으로 조성하였으며, 해수는 인공해수(MARINE-TEC. Co. Sealife)로써 염분농도는 32 ± 2.0 psu이며, 수온은 15 ± 1 °C로 제어하였다.

파도는 연안지역의 조간대에 도달하여 토양사면에서 붕괴되는데, 물질의 토양침투는 사면에서 붕괴되는 파도의 크기, 다시말해 쇄파파고(Hb: breaking wave height)에 의해서 직접적인 영향을 받기 때문에 본 연구에서도 쇄파파고를 파도의 기준으로 해서 해수의 침투를 관측했다. 본 연구에서는 쇄파파고는 50 mm, 파의 주기는 0.8 sec로 설정했다. 한편, 조석에 의한 수위변동속도는 간조에서 만조까지의 평균 수위변동시간 6시간과 조석변동폭 2 m의 관계로부터 계산하여 0.009 cm/s로 하였다.

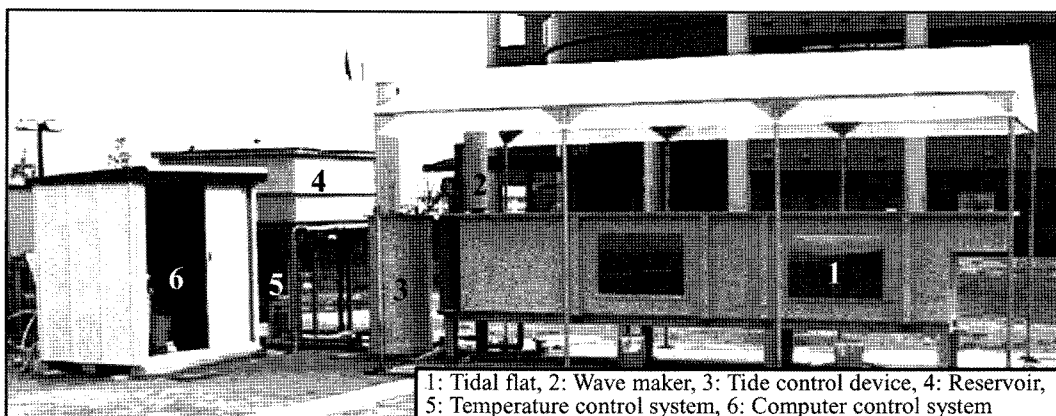


Fig. 1. Photo of experimental set-up.

### 2.2 해수의 침투

사질 해변에서 해수의 토양 침투거동을 파악하기 위해서 유동학적인 연구에서 이용되는 가시화 기법(visualization method)을 이용하였다. 현장의 실제토양을 대신하여 글래스비즈(비중: 2.5 g/cm<sup>3</sup>)를 사용하였으며, 해수의 유동을 모니터링 하기 위한 색소 트래이서(coloring tracer)로서는 해수와 비중이 거의 동일한 0.02몰농도의 과망간산칼륨용액을 사용하였다. 실험 전 피펫을 이용하여 25 mL의 과망간산칼륨용액을 토양표면에 적하하였으며, 5분 동안 파도를 발생시켜 과망간산칼륨용액의 이동을 관측했다. 해수의 침투 면적은 촬영된 영상을 카메라로 촬영하여 그 영상을 컴퓨터 소프트웨어(Image-Pro Plus, Version 4.5)로 분석하여 하였다. 해수의 침투량은 소프트웨어를 이용하여 얻어진 면적에 사면의 폭과 글래스 비즈의 공극률(0.43)을 곱하여 산정하였다.

조건대에서는 파도와 조석에 의해서 토양중으로 공급되지만 파도에 의한 침투량이 많기 때문에 본 연구에서는 파도만을 고려하였다.

### 2.3 원유 및 분산제

실험에 사용한 기름은 중동산의 UPPER ZAKUM 원유로서, 물리·화학적 특성은 점도 28 mm<sup>2</sup>/s(15°C), 비중 0.87(15°C), 유동점 -15°C, 황함량 2.00%(wt.)이다. 기름의 투여량은 선행연구(Smith *et al.* [1981], Delaune [1984], Lin and Mendelsohn [1996], Little [1987], Oudot *et al.* [1998])를 참고하여 1평방미터당 1 L를 투여하였다.

분산제는 TAIHO Self Mixing S-7(TAIHO Industries Co., LTD.)을 사용하였으며, 분산제의 살포량은 선행연구(Conmack [1999])를 참고하여 기름과 분산제의 비율을 2:1(v/v)로 하였다.

### 2.4 표착유의 침투거동

유출된 원유의 장기적 침투 거동을 파악하기 위해서 토양사면에 기름을 균일하게 표착시키기 위해서 만조시(HWL: High Water Level)에 기름을 투여하여 수면에 확산시킨 다음 수위를 강하시켜 토양표면에 표착시켰다. 그리고 15조석 동안 파도와 조석을 발생시켜 표착된 기름의 토양 침투 거동을 관측하였다. 15조석이 경과한 후 침투된 표착 원유의 깊이에 따른 수직적 유분(油分) 농도 분

석을 위해서 사전에 길이 방향으로 절단한 아크릴관(지름: 5 cm, 길이: 30 cm)을 taping하여 토양 시료를 채취하였다. 기름에 오염된 토양을 채취한 다음 테이프를 제거해서 채취된 시료를 2 cm 간격으로 절단하여 절단된 토양을 혼합한 후 dichloromethane을 이용하여 추출하였다. 추출액은 TLC-FID(Thin-Layer Chromatography - Flame Ionization Detector)로 분석하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 해수의 침투거동

Fig. 2는 파도에 의한 해수의 침투량을 산정하기 위해서 원유가 표착되지 않은 조건과 표착되지 않은 조건에서의 150 sec 후의 해수 tracer(0.02 M KMnO<sub>4</sub>용액)의 침투거동을 가시화한 결과이다.

결과에서 보듯이 원유가 표착되지 않은 조건에서 글래스비즈 표면에 과망간산칼륨 용액을 적하한 다음 파도를 발생시켰을 때, 파도는 조건대 사면에서 부서지게 되고 과망간산칼륨용액은 쇄파가 도달하는 사면의 정점(breaking wave run-up point)을 중심으로 반원형태로 글래스비즈의 사면 내부로 침투해가는 것이 관측되었다. 한편 원유가 표착된 사면에서는 표착된 원유가 해수의 침투를 방해하여 해수의 침투량이 감소하는 것을 관찰 할 수 있었다.

### 3.2 표착유의 장기 침투거동

Fig. 3은 유처리 분산제를 살포하지 않은 조건(a)과 살포한 조건(b)에 있어서의 표착된 원유의 수직적 이동에 관한 정보를 제시하고 있다. 침투하는 원유는 농도 구배에 의해 흑색층과 갈색층으

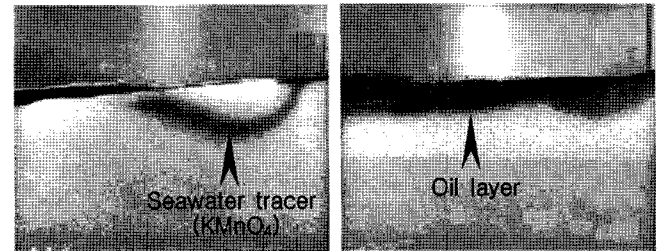


Fig. 2. Infiltration image of seawater tracer taken by digital video camera under the unoled (left) and oiled (right) condition.

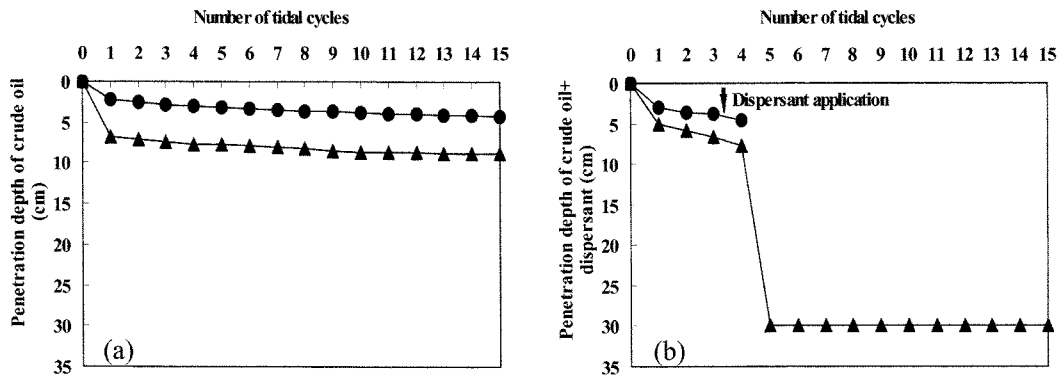


Fig. 3. Penetration of crude oil untreated (a) and crude oil treated with dispersant (b) into the sediments over 15 tidal cycles. Black circles (●) show the black band of the penetrated oil. Black triangles (▲) show the brown band of that.

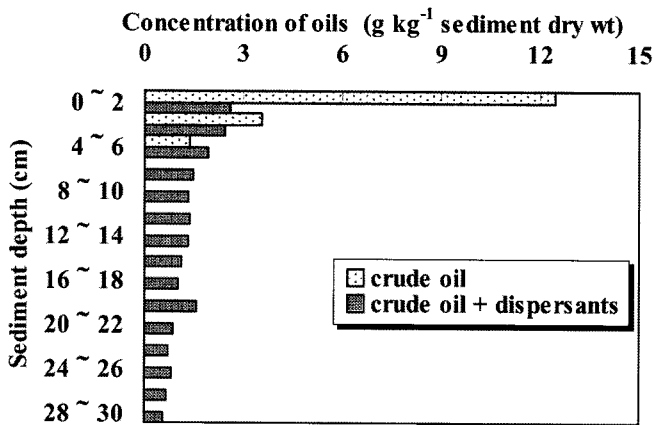


Fig. 4. Concentration of penetrated oil after 15th tidal cycle determined by TLC-FID. Applied dispersant volume is 50% for oil volume ( $0.5 \text{ L/m}^2$ ).

로 분리되는데, 첫 번째 조석에서 흑색층의 깊이가 2.2 cm까지 침투하였다. 그 이후로는 침투깊이가 완만한 증가를 보여 15번째 조석 후에는 4.2 cm까지 침투하였다. 한편 갈색층은 첫 번째 조석에서 6.8 cm에서 15조석후에는 8.8 cm로 관측되었다.

그러나 분산제를 살포한 조건에서는 3조석째까지 흑색층이 4.6 cm, 갈색층이 7.8 cm까지 이동해갔으나, 3조석의 창조시에 유처리분산제를 살포하여 파도를 발생시키고 동시에 표착되어있던 기름이 작은 입자로 분산되어 부상되는 현상이 관찰되었으며, 이와 동시에 토양중으로 침투해 있던 흑색층과 갈색층의 기름이 작은 입자로 분산되어 해수의 유동과 동반하여 토양표면으로부터 30 cm 깊이까지 침투하는 것이 관찰되었다.

Fig. 4는 원유와 원유에 분산제를 살포한 경우에 있어서 15조석 후의 유분농도의 수직적 분포를 나타낸 그림이다. 그림에 제시된 바와 같이 분산제를 살포하지 않은 경우에 있어서는 침투유분 중 약 72%는 토양표면 2 cm 깊이에 집중되어있는 것을 알 수 있었다. 반면에, 표착된 기름에 유처리분산제를 살포했던 조건에 있어서는 토양표면으로부터 30 cm(조석변동범위의 최하단)까지 분산된 기름이 침투했다. 그리고 침투된 기름도 깊이에 따라 비교적 균등한 농도 분포를 보였다. 따라서 표착된 기름에 유처리분산제를 살포함으로써 표착된 기름이 작은 유적(oil droplet)으로 분산되어 비표면적의 증대로 인해 토양미생물에 의한 분해가 촉진될 것으로 판단된다.

### 3.3 표착유의 해수침투 차단

Fig. 5는 유처리분산제의 살포조건과 비 살포조건에 있어서의 해수의 침투량 변화를 나타낸 결과이다. 유처리분산제를 살포하지 않은 조건(control)에서는 초기의 해수의 침투율이  $72.54 \text{ cm}^3/\text{s}$ 이었으나, 기름표착으로부터 2조석후에는  $46.02 \text{ cm}^3/\text{s}$ , 4조석후에는  $39.00 \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 감소하였다. 그리고 유처리분산제를 살포한 조건에서도 4조석까지는 해수의 침투율이 점차적으로 감소하여  $36.66 \text{ cm}^3/\text{s}$ 로 control 조건과 비슷하게 침투율이 감소하였다. 그러나 유

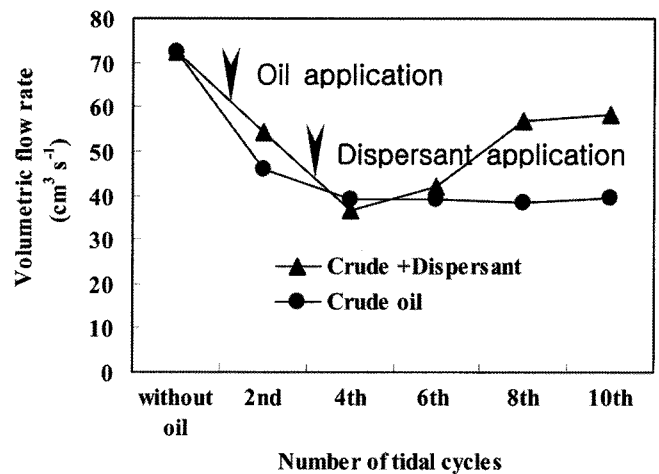


Fig. 5. Variation of volumetric flow rate of seawater by dispersant application.

처리분산제를 살포한 이후의 해수 침투율이 점차적으로 회복되었으며 10조석후에는 약 30%( $58.11 \text{ cm}^3/\text{s}$ )의 해수 침투량이 증가하는 것을 알 수 있었다.

따라서 표착된 원유에 분산제를 살포함으로써 인해 저서생물의 생존에 필수적인 용존산소, 영양염, 유기물 등의 공급이 회복되어 저서생물에게 생존에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 연안 조간대에 표착된 기름의 방제를 위한 화학적 방제법의 적용 가능성을 파악하기 위해서 사질 조간대에서 유처리분산제의 살포에 의한 해수침투량의 변화 및 표착유의 거동을 검토하는 것을 목적으로 하여, 모의 조간대 실험장치를 이용하여 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 파도에너지가 비교적 작은 사질 조간대에서 표착된 원유에 의해서 해수의 침투량이 감소되었으나, 분산제를 살포함으로써 인해 해수침투량이 약 30% 증가되는 것을 알 수 있었다.

(2) 사질 조간대에 표착한 원유는 토양표층 2 cm부분에서 가장 농도가 높은 경향을 나타내었으며, 유화분산제를 살포하였을 경우 침투된 기름이 작은 입자로 분산되어 토양중으로 분산되었다.

따라서 표착된 원유에 분산제를 살포함으로써 인해 저서생물의 생존에 필수적인 용존산소, 영양염, 유기물 등의 공급이 회복되어 저서생물에게 생존에 긍정적인 영향을 미칠 것으로 판단된다. 또한 표착된 기름에 유처리분산제를 살포함으로써 인해 표착된 기름이 작은 유적(oil droplet)으로 분산되어 비표면적의 증대로 인한 기름분해 미생물의 분해가 촉진되어 표착유의 처리에 효과적일 것으로 사료된다.

## 참고문헌

- [1] 정정조, 2005, "유출된 풍화유와 분산유의 조간대 침투 및 생태계영향 -용존상물질의 침투량 변화-", 한국해양환경공학회

- 지, 8권, 3호, 134-139.
- [2] 정정조, 2008, “유출된 기름의 해상 및 해안에서의 거동 및 방제기술”, 대한환경공학회지, 30권, 2호, 136-145.
- [3] 통계청 e-나라지표 사이트, <http://www.index.go.kr>.
- [4] 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, 東京, 15-42.
- [5] 細川恭史, 桑江朝比呂, 1997, “干潟置によるメソコスム”, 土木論文集, Vol. 82, 12-14.
- [6] Cormack, D., 1999, “The treatment of stranded oil on shorelines. Response to marine oil pollution - review and assessment”, Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 249-284.
- [7] Delaune, R.D., 1984, “Effect of oil on salt marsh biota: methods for restoration”, Environmental Pollution, Vol. 36, 207-227.
- [8] Jhonston, R., 1970, “The decomposition of crude oil residence in sand columns”, J. Mar. Biol. Ass. U. K., Vol. 50, 925-937.
- [9] Kennish, M.J., 1997, “Practical Handbook of Estuarine and Marine Pollution”, CRC Press, 93-139.
- [10] Lin, Q. and Mendelsohn, 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, Vol. 32, pp.202-209.
- [11] 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, 3-18.
- [12] 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, 113-125.
- [13] Samiullah, Y., 1985, “Biological Effects of Marine Oil Pollution”, Oil & Petrochemical Pollution, Vol. 2, 235-264.
- [14] 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, 297-304.

---

2008년 8월 25일 원고접수

2008년 10월 16일 수정본 채택