

연안 조간대에 표착된 기름이 입자상 물질의 토양침투에 미치는 영향의 실험적 연구

정정조[†] · 이영식

순천대학교 환경공학과, 국립수산과학원 남해수산연구소

(2005년 4월 6일 접수, 2005년 10월 18일 채택)

Experimental Study on Effect of Stranded Oil on the Penetration of Particulate Matters in Tidal Flat

Cheong-Jo Cheong[†] · Young-Sik Lee

Department of Environmental Engineering, Suncheon National University, South Sea Fisheries Research Institute, National Fisheries Research and Development Institute

ABSTRACT : The purpose of this study was to clarify the penetration behavior of particulate matters by wave and tidal actions in sandy beach located in enclosed bay and to evaluate the effect of stranded oil on penetration of particulate matters. Experiments were carried out using a model sandy beach facility. The particulate matters penetrated into saturated sediments by wave action from breaking wave run-up point with a semi-circular forming in low energy beach as enclosed bay. On the other hand, the penetration velocity of the particulate matters was to be faster according to the increase of slope and breaking wave height. The particulate matters by tidal action penetrated into the sediments at an angle of 45 degrees in the direction of porous water flow. The stranded oil completely blocked the penetration of the particulate matters into the sediments. These results indicate that the penetrated oil prevents the penetration of the particulate matters into the sediments and, therefore, results in the reduction in the supply of plankton, bacteria and organic detritus for the benthic organisms in the sandy beach.

Key Words : Model Sandy Beach, Wave, Tide, Particulate Matters, Penetration Behavior

요약 : 본 연구에서는 파도에너지가 비교적 작은 폐쇄성수역의 사질 조간대를 대상으로 하여 입자상 물질의 토양 침투거동을 파악하고, 유출된 기름의 조간대 사면표착이 입자상 물질의 토양침투 차단 여부를 규명하는 것을 목적으로 하여, 모의 조간대 실험장치를 이용하여 실험을 하였다. 폐쇄성 수역과 같은 파도에너지가 작은 조간대에서는 쇄파대에서 붕괴된 파도에 의해서 입자상물질이 orbital 운동을 하면서 반원형태의 침투거동 (semi-circular penetration behavior)을 보였다. 또한 사면의 구배와 쇄파파고의 증가에 따라서 입자상물질의 침투속도도 증가하였다. 조석에 의해서는 토양중 해수의 이동방향과 동일한 방향으로 45° 각도를 이루며 토양중으로 침투하였다. 유출된 기름이 토양사면에 표착됨으로 인해 형성된 점착성의 유막은 입자상 물질의 토양침투를 차단하였으며, 이로인해 해수중의 식물성 플랑크톤, 세균, 유기쇄설물과 같은 입자상물질의 침투를 방해하여 조간대에 서식하는 저서생물의 먹이 공급을 감소시켜 연안 생태계에 악영향을 미칠것으로 판단된다.

주제어 : 모의 조간대, 파도, 조석, 입자상 물질, 침투거동

1. 서론

우리나라의 조간대 갯벌은 2,393 km²(국토면적의 2.4%)로서 브라질 아마존 유역, 캐나다 펀디만, 미국 조지아만, 북해 연안 등과 더불어 세계 5대 갯벌자원으로¹⁾ 해양생물의 서식·산란지, 어업인들의 삶의 터전, 오염물질의 정화기능, 철새의 도래지 및 서식지, 재해방지 및 레크레이션의 공간으로서 효용을 갖는 등의 중요한 가치를 지니고 있다. 조간대에는 약 3,000종 이상의 다양한 생물들이 서식하고 있으며, 이들 저서생물들은 해수로부터 공급되는 입자상 물질과 용존

상 물질을 섭취하여 생존한다. 입자상 물질로는 플랑크톤, 박테리아 그리고 유기쇄설물이 있으며, 용존성 물질로서는 산소, 영양염 그리고 유기물이 있다. 이러한 입자상 및 용존상의 물질들은 반복적인 파도와 조석에 의해서 토양중의 다양한 생물에게 공급됨으로, 수리적 외력은 조간대 생태계의 유지 측면에서 볼 때 매우 중요한 역할을 하고 있다.

한편, 산업의 발달과 더불어 다양한 인간기원의 오염물질이 조간대 생태계를 위협하고 있으며, 그 중 60% 이상은 유출된 기름에 의한 오염으로 세계적으로 연간 약 1.7~8.8×10⁶톤의 석유계 탄화수소가 해양으로 유입되는 것으로 보고되고 있다.²⁾ 1989년 Alaska연안에서 발생한 Exxon Valdez호의 기름 유출사고에서 37,000톤의 원유가 유출되었으며,^{3,4)} 1996년에는 영국의 Milford Haven에서 Sea Empress호가 좌초해 약

[†] Corresponding author

E-mail: ccj@sunchon.ac.kr

Tel: 061-750-3815

Fax: 061-750-3508

72,000톤의 원유가 유출되는 사고가 있었다.⁵⁾ 또한, 일본에서도 1997년 Nahotoka호가 좌초해 약 6,014톤의 C중유가 유출되는 사고가 있었다.⁶⁾ 한편, 국내에서도 1992년부터 2001년까지 10년간 기름 오염사고 발생건수는 3,950건으로 연 평균 390여건의 크고 작은 사고가 발생되고 있으며, 매년 증가 추세에 있다.⁷⁾ 대표적으로 씨프린스호(여천군 소리도, 원유: 4,155 kL, C중유: 879 kL), 제1유일호(부산 남형제도, C중유: 2,392 kL), 호남사파이어호(여수 호유부두, 원유: 1,402 kL) 등의 사고를 들 수 있다.⁸⁾

해양에서 발생한 기름 유출사고는 해역의 다양한 생물에게 막대한 피해를 안겨다주는 것은 말할 것도 없고, 생태계의 구조나 기능에 커다란 악영향을 끼치며 물질순환 등을 저해시킨다. 조간대의 토양중에 서식하는 다양한 생물들의 생존을 위해서는 파도와 조석의 작용에 의해서 공급되는 해수층의 입자상 및 용존상 물질이 필수 불가결하나, 이들 물질의 침투 및 기름이 조간대 토양의 표면에 포착됨으로써 야기될 수 있는 물질의 공급차단에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서 본 연구에서는 파도에너지가 비교적 작은 폐쇄성 수역의 사질 조간대를 대상으로 하여 입자상 물질의 토양 침투거동을 파악하고, 유출된 기름의 조간대 사면표착이 입자상 물질의 토양침투를 차단하는 지의 여부를 규명하는 것을 목적으로 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험장치

본 연구에서 사용된 모의 해변 실험장치는 Fig. 1에 제시된 바와 같으며, 수조 (5.0 mL×0.8 m W×1.0 m H), 상하운동에 의해서 파도를 발생시키는 조파장치(쇄파파고: ~50 mm high), 조석조절장치 (조석주기: 1~7 hr), 저류조 (4 m³), 온도조절장치 (3~30℃)로 구성되어 있으며, 컴퓨터에 의해서 자동으로 제어된다. 실험장치의 몸체 소재는 FRP (Fiber-Reinforced Plastics)이며, 해수침투를 관측하기 위해서 2개의 관측창 (0.6 m L×0.9 m W)이 부착되어 있다. 입자상 물질의 토양 침투거동을 가시화 (visualization)하기 위해서 투명한 glass beads를 현장 모래의 대용으로 사용하였다. 일본 연안에서 토양의 중앙입경의 80%가 0.25~1.5 mm인 점⁹⁾을 고려하여 1 mm

의 glass beads를 이용하였다. Beads를 수조내에 충전하여 사면구배를 10/100으로 조성하였으며, 해수는 인공해수 (MARINETEC. Co. Sealife)로써 염분농도는 32±2.0 psu이며, 수온은 15±1℃로 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,¹⁰⁾ 본 연구에서도 쇄파파고를 파도의 기준으로 해서 입자상 물질의 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.

2.2. 입자상 물질과 기름

해수층의 식물성 플랑크톤, 세균, 유기쇄설물 (detritus), 실트 (silt)와 같은 입자상 물질의 대체물질로써 가시화가 용이한 흑색의 안트라사이트 (anthracite)를 트레이서로 이용하였다. anthracite는 분쇄기로 파쇄한 다음 체로 분리하여 입경 75 μm이하의 입자만을 실험에 이용하였다. anthracite의 비중은 1.5 g/cm³이었으며, 실험에는 1회 투여량을 3 g으로 하였다.

실험에 사용한 기름은 중동산의 UPPER ZAKUM 원유로서, 물리·화학적 특성은 Table 1에 제시한 바와 같다. 기름의 투여량은 선행연구¹¹⁻¹⁵⁾를 참고하여 1평방미터당 1 L를 투여하였다. 해변의 토양사면에 기름을 균일하게 포착시키기 위해서 만조시 (HWL: High Water Level)에 기름을 투여하여 수면에 확산시킨 다음 수위를 강하시켜 토양표면에 포착시켰다.

Table 1. Physico-chemical properties of crude oil used in this work

Viscosity at 15℃ (mm ² /s)	28
Specific gravity at 15℃ (g/cm ³)	0.87
Pour point (℃)	-15
Sulfur content (% wt.)	2.00
Water content (% vol.)	0.1

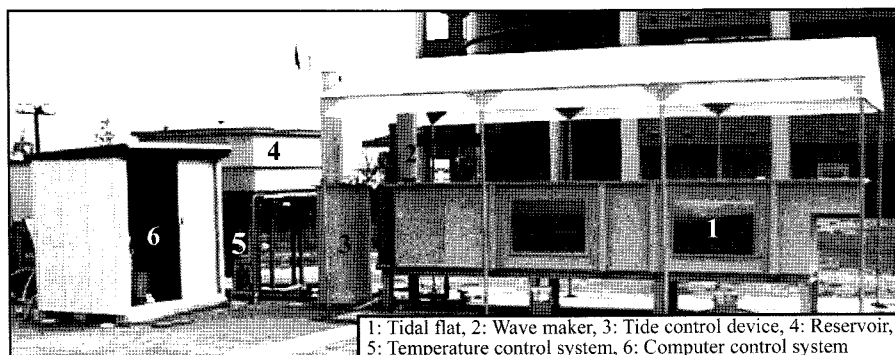


Fig. 1. Photograph of experimental setup.

2.3. 파도와 조석에 의한 입자상 물질의 침투거동

먼저 기름이 표착되어 있지 않은 평상시의 조건하에서 수위를 일정하게 유지한 후 피펫을 이용하여 입자상 물질(anthracite)를 토양표면에 적하한 다음, 파도와 조석을 발생시켜 입자상 물질의 토양 침투거동을 관측하였다. 파도와 조석에 의한 anthracite 입자의 이동은 실험장치의 관측창을 통해 비디오 카메라를 이용해 촬영한 후, 그 영상을 Image-Pro Plus (Planetron Co. LTD.)를 이용하여 분석하였다. 분석된 자료를 이용하여 시간경과에 따른 anthracite 입자의 침투면적의 시간 변화량 다시말해, 침투속도 (cm²/s)로서 제시하였다. 이를 통해 anthracite 입자의 침투속도의 변화를 정량화하였다. 또한 근접촬영을 통해 파도와 조석에 의해서 anthracite 입자가 어떠한 운동형태를 나타내는가를 조사하였다.

2.4. 조간대에 표착된 기름이 입자상 물질의 침투에 미치는 영향

기름이 표착한 조간대의 토양사면에서 입자상 물질의 침투거동을 파악하기 위해서 1평방미터당 1 L의 기름을 표착시켜 입자상 물질의 침투를 관측하였다. 이하 실험방법은 2.3절과 동일한 방법으로 수행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 파도와 조석에 의한 입자상 물질의 침투거동

Fig. 2는 조석변동이 없는 상태에서 파도에 의한 입자상 물질의 토양 침투거동을 30초 간격으로 가시화한 결과이다. 토양 사면에 anthracite 입자를 적하한 다음 파도를 발생시켰을 때, 시간경과와 더불어 anthracite 입자들이 토양속으로 확산·침투해가는 현상이 관측되었다. 발생된 파도가 쇄파대 (swash zone)에서 붕괴되는데 Fig. 3의 (a)지역에서는

쇄파의 상승작용에 의해서 토양중에는 부압(負壓)이 생성되어 토양 간극중의 anthracite입자들이 흡입·분출되는 현상이 관측되었다. 한편, 파도가 사면에서 붕괴되면 파의 분류 (wave swash)로서 해수가 사면을 따라 상승하게 되는데, 이 상승된 쇄파가 도달하는 사면의 정점인 (b)지역에서부터 anthracite 입자가 방사형으로 반원형태의 침투거동 (semi-circular penetration behavior)을 나타내며 토양중으로 침투해 가는 것이 관측되었다.

Fig. 4는 입자상 물질이 토양내부에서의 거동을 파악하기 위해 근접 관찰한 결과이다. 먼저 파도에 의한 입자상 물질의 침투거동을 살펴보면, 파도를 발생시키기 전의 초기단계에서는 흑색의 anthracite 입자가 glass bead 위에 쌓여 있는 모습이 관찰되었으나, 파도를 발생시키자 anthracite 입자가 파도에 의한 해수의 움직임에 동반하여 orbital 운동을 하면서 토양중으로 이동해 가는 것이 관찰되었다. 한편, 낙조시의 조건에서는 anthracite 입자가 해수의 이동방향과 동일한 방향으로 45° 각도를 이루며 토양속으로 이동하는 것이 관찰되었다.

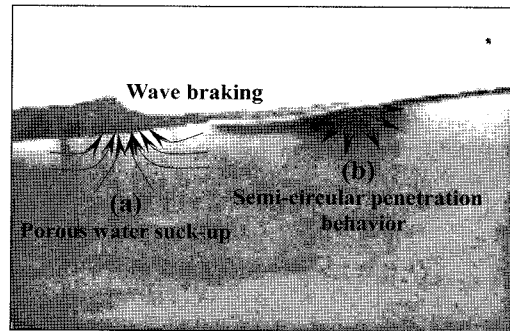


Fig. 3. Explanatory picture about penetration behaviors of particulate matters by wave action.

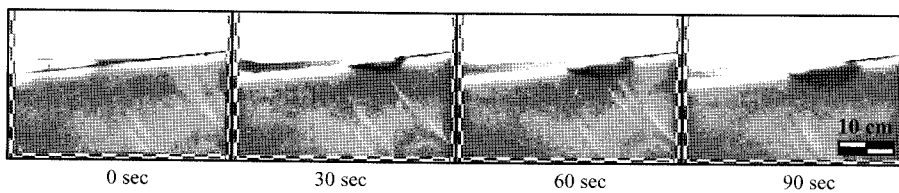


Fig. 2. Observed penetration behaviors of particulate matters by wave action.

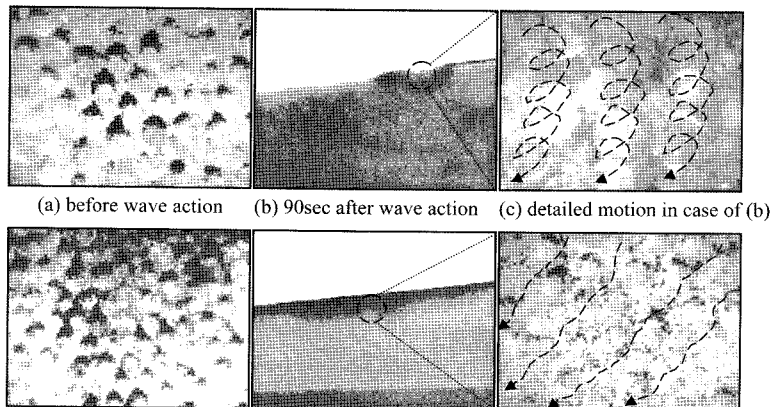


Fig. 4. Penetration behaviors of particulate matters by wave action.

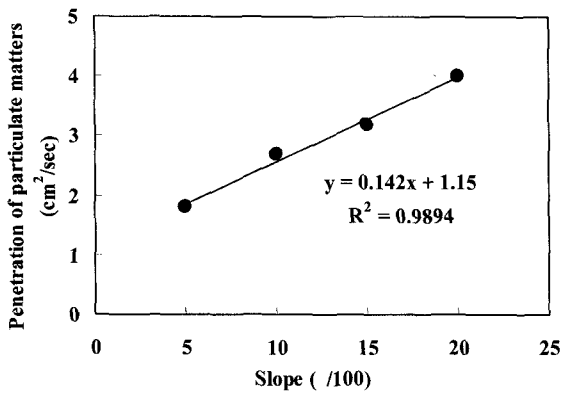


Fig. 5. Change of slope in penetration of anthracite particles.

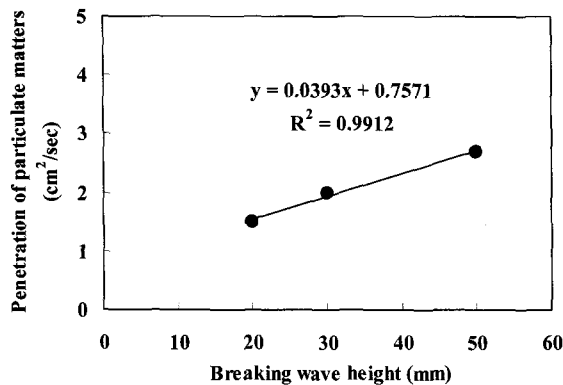


Fig. 6. Change of breaking wave height in penetration of anthracite particles.

3.2. 사면의 구배와 쇄파파고가 입자상 물질의 침투에 미치는 영향

쇄파파고 50 mm, 주기 0.8 sec의 조건에서 사면구배를 5/100, 10/100, 15/100, 20/100로 사면의 구배를 변화시켜 입자상물질의 침투율 변화를 파악한 결과를 Fig. 5에 제시하였다. 구배가 5/100에서 20/100으로 커짐에 따라 비례적으로 anthracite의 침투면적이 1.8 cm²/sec에서 4 cm²/sec로 증가되는 것을 알 수 있었다 (결정계수 R²=0.9894). 이는 사면의 구배가 커지면 수면의 평균 수위가 증가하여 파도에 의한 쇄파의 처오름(swash)이 도달하는 점에서의 수위가 증가하게

되는데 이 때문에 입자상물질의 침투율이 증가 했다고 판단 된다.

Fig. 6은 사면구배가 10/100, 파도의 주기가 0.8 sec의 조건에서, 쇄파파고를 20, 30, 50 mm로 변화시켰을 경우의 해수의 침투율 변화를 나타내고 있다. 쇄파파고가 20 mm일 경우의 침투율이 1.5 cm²/sec였으며, 30 mm와 50 mm의 경우에는 각각 2.0 cm²/sec와 2.7 cm²/sec이었다 (결정계수 R² = 0.9912).

이로부터, 해수의 침투속도는 쇄파파고가 커짐에 따라서 증가하는 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

따라서, 조간대 토양사면의 경사와 쇄파파고가 큰 조건에서 해수중의 식물성 플랑크톤, 세균, 유기쇄설물, 실트와 같은 입자상물질의 침투량이 많은 것을 알 수 있었다.

3.3. 조간대에 표착된 기름이 입자상 물질의 침투에 미치는 영향

Fig. 7은 수위를 일정하게 유지한 조건에서 파도에 의한 입자상물질의 토양침투에 미치는 표착된 기름의 영향을 검토하기 위해 기름이 표착되지 않은 조건과 기름이 표착되어 있는 조건에서 anthracite 입자의 침투를 나타낸 사진이다. 기름이 표착되어 있지 않은 조건에서는 anthracite 입자는 파도의 발생과 더불어 반원형태를 보이며 토양중으로 침투했으나, Fig. 7의 아래부분의 사진에서와 같이 원유의 표착에 의해서 anthracite 입자가 토양중으로 거의 침투되지 않았다. 그리고 300 sec 간 계속적으로 파도를 발생시켰음에도 불구하고 anthracite 입자는 침투하지 않았다. 그 원인을 파악하기 위해서 glass bead의 표면을 촬영한 결과(Fig. 8), 원유가 토양 사면에 표착함으로 인해 형성된 점착성의 유막에 anthracite 입자가 부착되어있는 것이 관측되었다. 이는 anthracite 입자가 bead 표면의 유막에 부착됨으로 인해 토양중으로 침투가 불가능 했다고 확인할 수 있었다.

이상에서와 같이, 조간대에 표착된 기름은 해수중의 식물성 플랑크톤, 세균, 유기쇄설물, 실트와 같은 입자상물질의 침투를 방해하여 조간대에 서식하는 저서생물의 먹이 공급을 감소시켜 연안 생태계에 커다란 악영향을 미칠것으로 판단 된다.

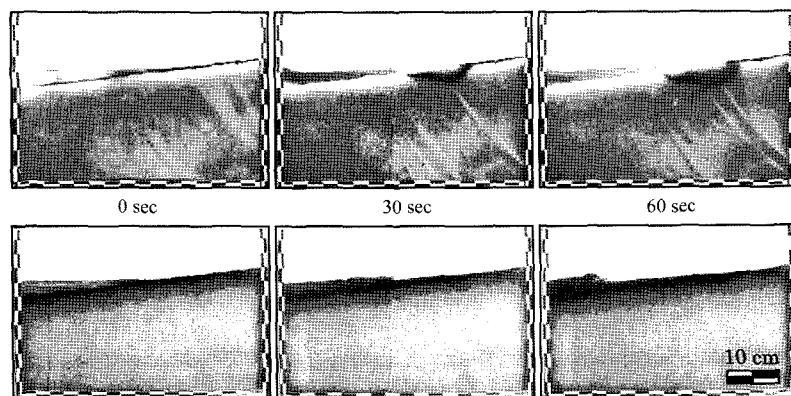


Fig. 7. Penetration of anthracite particles into un-oiled (bottom) sediments.

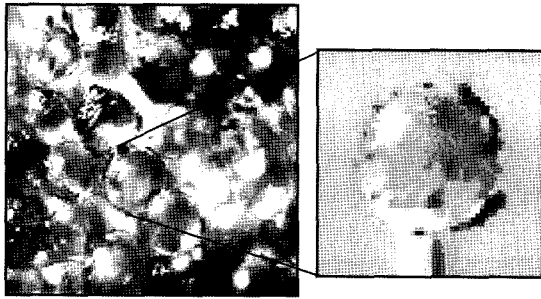


Fig. 8. Image of attached anthracite particles on the oil-coated glass bead surface.

4. 결론

본 연구에서는 파도에너지가 비교적 작은 폐쇄성수역의 사질 조건대를 대상으로 하여 입자상 물질의 토양 침투거동을 파악하고, 유출된 기름의 조건대 사면표착이 입자상 물질의 토양침투 차단 여부를 규명하는 것을 목적으로 하여, 모의 조건대 실험장치를 이용하여 실험을 실시한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 폐쇄성 수역과 같은 파도에너지가 작은 조건대에서는 쇄파대에서 붕괴된 파도에 의해서 입자상물질이 orbital 운동을 하면서 반원형태의 침투거동 (semi-circular penetration behavior)을 보이는 것을 알 수 있었다. 또한 사면의 구배와 쇄파과고의 증가에 따라서 입자상물질의 침투속도도 증가하는 것을 알았다.

2) 조석에 의해서는 토양중 해수의 이동방향과 동일한 방향으로 45° 각도를 이루며 토양중으로 침투해가는 것을 알았다.

3) 유출된 기름이 토양사면에 표착됨으로 인해 형성된 점착성의 유막은 입자상 물질의 토양침투를 차단되는 것을 알 수 있었으며, 이로인해 해수중의 식물성 플랑크톤, 세균, 유기쇄설물, 실트와 같은 입자상물질의 침투를 방해하여 조건대에 서식하는 저서생물의 먹이 공급을 감소시켜 연안생태계에 악영향을 미칠것으로 판단된다.

참고 문헌

1. 박광열, “우리나라 해양환경정책의 추진현황과 향후계획,” 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp. 3~13(2002).
2. Bear, J. and Corapcioglu, M. Y., “Hydrocarbon in porous media,” Transport processes in porous media. Kluwer Academic Publishers, Printed in the Netherlands, 69~

- 201(1991).
3. Swannell, P. J., Lee, K., and Mcdonagh, M., “Field evaluations of marine oil spill bioremediation,” *Microbiological Reviews*, **60**(2), 342~365(1996).
4. 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., “The fate of the oil spilled from the Exxon Valdez,” *Environ. Sci. Technol.*, **28**, 561A~568A(1994).
5. Stationery Office, The Environmental Impact of the Sea Empress Oil Spill, Final Report of the Sea Empress Environmental Evaluation Committee, The Stationery Office, London, 1~25(1998).
6. 岡市友利, “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*, **20**(10), 632~638(1997).
7. 정진원, 윤주용, 신재록, 김한규, “해상유출유 오염지역에서의 미생물처리제 활용 방안 연구,” *한국해양환경공학회지*, **6**(2), 3~15(2003).
8. 이봉길, “유류오염 실태와 방지대책,” *한국해양공학회 추계학술대회 논문집*, pp. 17~34(2002).
9. 坂本市太郎, “砂浜の潮汐に伴う吸? (有機物の好氣分解代謝) 機能”, *用水と廢水*, **36**, 44~52(1994).
10. McLachlan, A., “Water Filtration by Dissipative Beaches,” *Limnology and Oceanography*, **34**, 774~780(1989).
11. Delaune, R. D., “Effect of oil on salt marsh biota: methods for restoration,” *Environmental Pollution*, **36**, 207~227(1984).
12. Lin, Q. and Mendelssohn, I. A., “A comparative investigation of the effects of South Louisiana crude oil on the vegetation of fresh, brackish and salt marshes,” *Marine Pollution Bulletin*, **32**(2), 202~209(1996).
13. Little, D. I., “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, Netherlands, 3~18(1987).
14. Oudot, J., Merlin, F. X., and Pinvidic, P., “Weathering rates of oil components in a bioremediation experiment in estuarine sediments,” *Marine Pollution Bulletin*, **45**(2), 113~125(1998).
15. Smith, C. J., Delaune, R. D., and Patrick, W. H., “A method for determining stress in wetland plant communities following an oil spill,” *Environmental Pollution*, **26**, 297~304(1981).