

# 해안기름유출사고에 의한 기름확산 예측 방법 연구

김영복\*

\*경남대학교

## Study on Prediction for Prompt Countermeasures to Oil Spread in Ocean

Young-Bok Kim\*

\*Dept. of Naval Architecture, Ocean & IT Engineering, Kyungnam University, Changwon, Korea

**KEY WORDS:** Wind waves 풍랑, Oil fence 오일펜스, Diffusion theory 확산 이론, Oil spreading speed 유류 확산 속도, Spreading direction and force 확산 방향 및 힘, Marine disaster prevention system 해양재난방재기구

**ABSTRACT:** When oil spills occur in the ocean because of a ship collision or grounding, the oil in the sea will spread to the coastline. To effectively and promptly prevent such an oil spread, the prediction of the direction and speed of the spreading oil must be made. By applying the coastal wave diffusion theory with a consideration of the effects of wind and current, the oil spreading direction and speed can be predicted promptly so that the National Disaster Prevention System can effectively and promptly take countermeasures against the attack and contamination of the coastline by such oil bands.

### 1. 서 론

해양의 유류 유출은 여러 가지 원인이 있겠지만 대부분 유조선사고에 의해 생긴 것이다. 최근 우리나라도 경제성장이 급격히 이루어지고 유류 물동량이 증가함에 따라 유조선에 의한 해양오염 사고가 빈발하고 있다. 1995년에 소리도에서 발생한 시프린스호 사고는 대형 탱커선에 의한 해양오염에 대한 경각심을 불러 일으켰으며, 연이어 유일호의 좌초 후 예인 중 침몰에 따른 해양오염 사고와 호남사파이어호의 부두 충돌에 의한 해양오염 사고들은 우리나라도 상시 해난 사고에 의한 오염사고에 직면해 있는 것을 잘 보여 주고 있다. 또한 가장 최근인 2007년 12월에 충남 대산항 앞바다에서 발생한 유조선 허베이 스피릿호의 사고에서 보면 해안선이 오염될 때까지 취해진 방제 조치에 있어, 몇 가지 검토해 볼 여지가 있다. 따라서 과거부터 현재까지 해양의 유출유 유형을 분석하고, 일단 사고가 발생하였을 때는 해상에서 유출유 확산을 방지하는 조치를 취하는 것이 필요하며, 이것이 전제되어야만 해안이 오염되는 사고로 이어지지 않거나 오염되더라도 그 피해를 최소로 줄일 수 있다.

본 논문에서는 이러한 노력의 일환으로 해상에서 유출유 사고가 발생하였을 때 유출유 확산 범위 및 방향 등을 해양파 전파이론에 의해 신속히 예측함으로써, 이에 관한 방제 대책을 수립하는데 도움을 줄 수 있는 방안에 대해 연구한 결과이다. 이 정보는 종합적인 국가 해상 방제 시스템과 본 예측 자료를 연계해 줌으로써 효과적인 방제 조치가 취해지도록 하여 유류에 의한 해안 오염을 최소화할 수 있는 방안을 찾을 수 있다. 해상

유출유 확산의 형상을 퍼지 이론에 입각하여 수치 모델화하고, 시간에 따른 확산 양상을 수치해석을 통해 예측하며, 예측 정보를 실시간으로 국가 재난 시스템에 전달해 줌으로써 효과적인 방제 조치가 가능하게 할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 시스템을 통해 구난 시스템을 가동하려할 때 시급히 초기 대책을 세울 때 필요한 정보를 주기 위한 것으로, 초기 알려진 기상 자료를 바탕으로 초기 대응 수치를 제공하기 위한 것이다. 유출유 사건은 대개의 경우 초기 대응을 어떻게 하느냐에 따라 사태를 조기에 진압할 수도 있고 장기화할 수도 있기 때문에, 초기에 신속한 대응은 매우 중요하다 하겠다.

### 2. 해안 유출기름의 확산 유형

#### 2.1 해안기름유출사고 사례 1

1995년 7월 소리도의 시프린스호 유조선에 의한 유출유 사고 시 유류의 확산 형태를 보면 Fig 1에 보인 바와 같이 사고 지점인 덕포 암반에서부터, 유출유는 좌초된 선박의 탱크에서 시작하여 띠 모양을 이루며 확산되고 있음을 확인할 수 있다. 사고 경위를 보면, 이 당시 사고 해역에서 태풍경보가 발령된 해역을 운항하다가 운항미속으로 암초에 좌초된 것으로 나타나고 있으며, 사고에 대한 신고 접수 후 29시간이 지나서야 유출유 확산을 방지하기 위한 오일펜스가 설치되었다. 또한 사고 원인으로 지적된 사항으로, 신조 선박임에도 이중선체(Double hull)가 아닌 단일선체(Single hull)구조로서 대형 오염사고로 이어질 소지

교신저자 김영복: 경남 창원시 마산합포구 월영동 449, 055-249-2718, ybkim-1@kyungnam.ac.kr

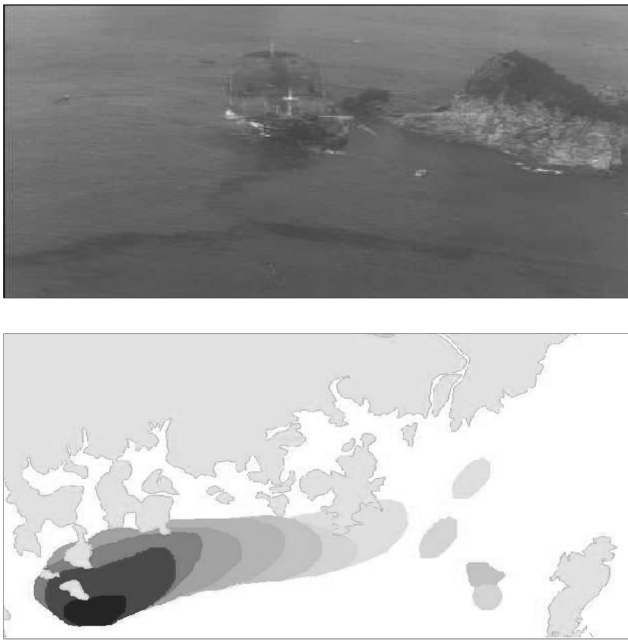


Fig. 1 Oil spilling disaster and diffusion map near to Sori-island by Sea-Prince oil tanker

를 가지고 있었다. 환경적으로 볼 때, 선박통항정보서비스(Vessel traffic services, VTS)가 부족하였고, 운항자도 재난에 대비한 대응능력이 부족하였으며, 그에 따라 운항자가 표류예측을 못함으로써 사고 후 16시간이 지난 후까지 선박 조차 파악 못하고 있었다. 따라서 사고의 원인 중 인적요인에 의한 황천시 조종훈련, 즉 적정항로 선택 및 피항 시간 선택 등 대처능력이 부족하였음이 밝혀졌다.

이와 같은 선박의 기름유출사고를 예방하기 위해서는 선박은 이중선체 구조, 환경적으로는 선박통항정보서비스 등 종합적인 관제시스템의 도움이 필요하며, 인적요인으로는 시뮬레이터에 의한 황천시 조종훈련을 해양수산연수원 등 법정 교육 훈련시 추가하여야 하며, 최소한 5년에 한번 씩은 사고예방 및 대비 대응체제 종합평가 체제구축이 필요하다는 것을 지적할 수 있겠다.

## 2.2 해안기름유출사고 사례 2

1995년 10월 호남사파이어호에 의한 여수 해안에서의 기름유출 사고를 보면, 접안하는 중 경미한 실수로 기름을 실은 화물창에 구멍을 내는 사고가 발생했으며, 이것이 기름유출 사고로 이어졌다. 기름이 해상에서 확산하는 양상을 Fig. 2에 보여주고 있다. 여수만의 경우는 사고 접수후 1시간이 채 지나지 않아서 사고 선박 주위의 기름 띠를 대부분 포위하여 오일펜스를 설치하였지만, 기름의 확산을 막을 수가 없었는데 그 이유는 빠른 조류에 오일펜스가 제 역할을 못하였기 때문이다. 해상에서의 방제대책사고 당일인 11월 18일에는 부산해양경찰서 소속 트롤스키머 선단을 사고해역에 투입하였으며, 목포·통영·제주·태안 해양경찰서에서 지원된 경비함정 및 방제정 13척과 유회수기 5대가 사고해역에 추가 투입되어 국가재난방제 체제를 가동시켰다.

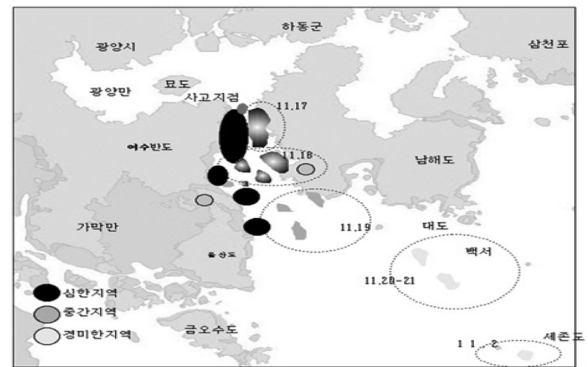


Fig. 2 Oil spilling disaster and diffusion map near to Yeosu peninsula by Honam Sapire Oil Tanker

그 외 관계기관 및 호유해운 측 인원 184명, 방제선박 31척, 오일펜스 1,760m를 동원하여 해상유출유의 회수작업 및 가막만 등 민감 해역에 오일펜스를 설치하였다. 오일펜스 외의 지역에는 유처리제 살포장치가 장착된 해양경찰소속 헬기 이용하여 항공방제작업 실시하였다. 다음 날에는 인천해양경찰서 기동방제단, 동해·군산·울산·포항·속초해양경찰서 지원세력이 추가로 도착하여 방제활동을 지원하였다. 11월 20일 해상방제를 완료하였다. 남해군, 여천시, 여수시, 여천군에서는 해안가의 유출유를 회수하기 위해 스크스키머 및 스크류스키머를 이용한 기계적 회수작업과 어선을 이용한 흡착체에 의한 흡착 수거 방법을 병행하여 사용하였다. 해안에서의 방제대책을 보면, 고압 세척기를 이용한 암벽 세척작업과 기름이 부착된 자갈, 모래에 대한 세척작업을 병행하여 사용하였다. 특히 자갈과 모래에 대한 세척작업에는 특별히 제작된 가마술에 유처리제 및 해수와 혼합하여 가열 분리 후, 자갈, 모래를 다시 깨끗한 해수로 세척하여 원상 복구하는 방법을 사용하였으며, 이러한 부착유 세척 방법은 작업능률면에서 수작업보다 효과적이고 경제적인 방법으로 각광을 받았다. 이에 따라 남해군 9개 마을과 여천시 4개 마을 및 여수시 6개 동, 여천군 11개 마을해안은 사고 당일 이후 103일 동안 닦기 작업을 실시하여 방제를 완료하였다. 이때 동원된 인력과 장비를 Table 1에 보여주고 있다.

상기 두 경우만을 보더라도 해상에서의 기름의 확산은 조류와 해안파를 따라 띠 모양을 형성한다는 것을 알 수 있다. 따라서 조류의 흐름과 속도, 해안파의 진행방향과 속도, 그리고 유출된 기름의 양 등이 기름확산의 형태와 방향을 좌우하는 주요 인자가 됨을 알 수 있다. 또한 방제대책을 위한 설치되었던 오일펜스의 높이와 유출유의 흐름강도(Flow intensity)를 견디기 위한 펜

**Table 1** A usage example of prevention apparatus and countermeasure for oil spread over Yecheon coastal area

Items	Human	Equipment		Prevention apparatus		
		Ship	Washing apparatus	Oil fence (m)	Oil absorbent (kg)	Oil dispersent (l)
Total	84,042	2,692	12	240	244,379	16,658
Yecheon-si	29,241	1,398	2	40	58,197	8,495
Yeosu-si	18,002	683	7		92,836	2,963
Yecheon-gun	32,021	498	3	200	66,550	4,525
Namhae-gun	4,805	113			6,796	675

\*출처: 국토해양부 홈페이지(<http://wcmo.mltm.go.kr>)

스의 강도 계산도 중요한 대책 수립요소임을 알 수 있다.

### 3. 해양파 전파 및 발달에 의한 해상 기름확산 예측

확산되는 유출유의 확산속도 및 범위에 대해 보다 정밀한 해석을 위해서는 아래의 확산방정식을 수치 해석적으로 풀어야 한다(이문진, 1996).

$$\frac{\partial c}{\partial t} + u \frac{\partial c}{\partial x} + v \frac{\partial c}{\partial y} + w \frac{\partial c}{\partial z} = \dot{Q} \tag{1}$$

여기서,  $c$ 는 확산된 유출유 유량,  $u, v, w$ 는 해양파의 진행방향을  $x$  방향, 파의 수평평면에서 직각인 방향을  $y$  방향, 상부방향을  $z$  방향으로 설정했을 때의 각 방향의 파 속도를 의미한다.  $\dot{Q}$ 는 전체적인 유출유 유량속도를 나타낸다.

(1) 식을 적용하기 위해서는 정확한 유출유 양과 각 방향으로의 파의 속도를 알아야 하는데, 유출 초기에는 이와 같은 정보를 정확히 알기는 어려운 일이다. 유출유 확산을 결정하는 해양파의 확산 전파속도와 방향을 초기에 알기 위한 한 방법으로 다음과 같은 간편한 방법을 제시하고자 한다. 해양파의 전파속도는 다음 식으로 결정된다.

$$u = \frac{H}{2} \sigma \frac{\cosh k(h+z)}{\sinh kh} \sin kx \sin \sigma t \tag{2}$$

$$w = -\frac{H}{2} \sigma \frac{\sinh k(h+z)}{\sinh kh} \cos kx \sin \sigma t \tag{3}$$

여기서,  $H$ 는 파고(Wave height),  $\sigma$ 는 파 주파수(Wave angular frequency)이며,  $k$ 는 파수(Wave number),  $h$ 는 수심을 의미한다. 해양파의 진행방향이  $x$ 이며, 연직방향이  $z$ 이다. 해양파의 방향은 Snell's Law(Dean & Dalrymple, 1984)에 의해서 다음 식의  $\theta$ 로 결정된다.

$$\frac{\sin \theta}{\sigma/k} = constant \tag{4}$$

여기서,  $\theta$ 는 파의 진행방향과 해안선이 이루는 각도인데 심해에서의 값을 대입하여 비례식으로 구할 수 있다. 조류의 속도는 조석 간만의 차이와 해양의 조류 선도나 기상청의 자료로부터 구할 수 있다. 따라서 조류의 속도를  $U$ , 진행방향의 속도포텐셜

(Velocity potential)을  $\phi$ 라 하면, (2), (4)식의  $u$ 와  $\theta$ 와 같이 고려하여 전체 해양파의 진행속도와 방향을 계산할 수 있다. 이제 기름띠의 확산흐름의 세기산정방법과, 이에 따른 오일펜스의 강도를 결정하는 방법에 관하여 알아보자. 참고문헌(Dean & Dalrymple, 1984; Sorensen, 1993)에 따르면 정상파(Standing wave)에 Bernoulli 식을 적용하면 진행파(Progressive waves)의 파가 전진방향 단면에 작용하는 압력의 크기는 다음 식으로 주어진다.

$$p = -\rho g z + \rho \frac{\partial \phi}{\partial t} \tag{5}$$

$$= -\rho g z + \rho g \frac{H \cosh k(h+z)}{2 \cosh kh} \cos kx \cos \sigma t$$

이 식에 따라 해양파의 각 진행방향 단면에 걸리는 힘은 다음과 같이 된다.

$$F = \int_{-h}^{\eta_w} p(z) dz \tag{6}$$

여기서  $\eta_w$ 는 파정(Wave crest), 즉 해양파가 최고 정점에 도달했을 때의 파변위(Wave elevation)이다.

해수면의 높이인  $\eta$ 가  $\eta = \frac{H}{2} \cos(kx - \sigma t)$ 임을 감안하면  $\eta_w = \frac{H}{2} \cos \sigma t$ 로 됨을 알 수 있다. 위 식과 식 (5)를 식 (6)에 대입하여 간단히 하면

$$F = \rho g \left( \frac{h^2 + \eta_w^2}{2} \right) + \rho g h \frac{\tanh kh}{kh} \eta_w \tag{7}$$

이때 최대힘이 걸리는 때를 고려하면  $\eta_w = \frac{H}{2}$ 일 때이며, 따라서 식 (7)에서

$$F_{\max} = \rho g \left( \frac{4h^2 + H^2}{8} \right) + \rho g h \frac{H \tanh kh}{2 kh} \tag{8}$$

임을 알 수 있다. 또한 진행파 이론(Dean & Dalrymple, 1984)에 따르면 진행파에 작용하는 에너지는 다음 식으로 주어진다.

$$\overline{PE} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \rho g \frac{(h+\eta)^2}{2} dx \tag{9}$$

$$\overline{KE} = \frac{1}{L} \int_x^{x+L} \int_{-h}^{\eta} \rho \frac{u^2 + w^2}{2} dz dx \quad (10)$$

여기서,  $\overline{PE}$  평균 위치에너지,  $\overline{KE}$ 는 평균운동에너지를 나타내며, 상기 식 (2), (3)를 고려하여 식 (9), (10)의 적분을 수행하고 간략히 하면,

$$\overline{PE} = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (11)$$

$$\overline{KE} = \frac{\rho g H^2}{16} \quad (12)$$

로 정리되고, 이들의 합이 전체에너지가 된다. 즉, 파가 진행될 때에 추가되는 전체평균에너지  $E$ 는 다음 식으로 주어진다.

$$E = \overline{PE} + \overline{KE} = \frac{1}{8} \rho g H^2 \quad (13)$$

로 된다. 이제 전진파가 동압력에 의해 수행되는 일을 고려하면 전진파에 의해 전달되는 에너지속도를 구할 수 있다.

$$W = \int_{-h}^{\eta} p_D \cdot u \, dz \quad (14)$$

$$\overline{W} = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} \int_{-h}^{\eta} p_D \cdot u \, dz dt \quad (15)$$

여기서,  $W$ 는 전진파의 단면에 걸리는 동적압력( $p_D = \rho g z + p$ )에 의한 일을 나타내며,  $\overline{W}$ 는 파의 한 주기 평균 에너지유동(Energy flux)을 나타낸다. 식 (15)에 식 (2)과 (5)를 대입하여 정리하면 다음과 같이 된다.

$$\overline{W} = \left( \frac{1}{8} \rho g H^2 \right) \frac{\sigma}{k} \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] = ECn \quad (16)$$

식 (16)에서 보면, 총에너지  $E$ 가  $Cn$ 의 속도로 빠져나간다는 것을 알 수 있다. 여기서,  $Cn = C_g$ 로 표시되는 에너지의 전달속도, 즉 군속도(Group velocity)가 된다. 따라서 실제 진행파가 빠져나갈 때는

$$n = \frac{C_g}{C} = \left[ \frac{1}{2} \left( 1 + \frac{2kh}{\sinh 2kh} \right) \right] \quad (17)$$

$$C = U_s \quad (18)$$

로서 정의되며, 식 (18)에서의  $U_s$ 는 진행파의 속도인데 이것을 식 (2)와 같다고 가정하면, 식 (17)을 이용해서  $C_g$ 를 구할 수 있다. 여기에 조류의 속도와 바람 속도의 영향을 더하면 정확한 기름확산 속도를 계산할 수 있게 된다.

실제 해상에서 발생하는 해양파는 단일파인 경우가 아니고 여러 가지 주파수성분을 가진 중첩파이면서 방향도 서로 다른 파들의 집합체로 보아야 한다. 따라서 상기 식에 따라 계산된 여러 성분의 파들에 대해 Fourier 식에 의해 합성하면 원하는 유출유 확산속도와 방향 및 확산파의 힘의 세기를 계산할 수 있다. 이를 이용하면 오일펜스를 설치할 범위, 시기 및 펜스의 강도 또는 높이를 결정할 수 있게 된다.

#### 4. 계산 결과

본 연구에서 제시한 방법에 따라 소리도 시프린스호 유조선의 유류 유출 사고와 호남사파이어호에 의한 여수 해안에서의 유류 유출 사고시의 유출유 확산에 대하여 계산한 결과는 Table 2와 Table 3에 정리하였다.

상기 두 Table에서 참고로 한 수심(Water depth)는 파수(Wave number)를 계산하기 위해 사용되는데, 목표로 한 파력(Wave force)과 파의 방향을 결정하는 해양파의 물리적 특성을 좌우하는 인자는 아니다. 간이 계산식을 이용한 상기의 결과는 경계조건이 사방 방사조건을 갖는 경우이며, 수심변화에 따른 파수, 파 주파수 등의 관계를 설정한 Dispersion relationship (Dean & Dalrymple, 1984) 관계식을 이용하였다. 또한 조류의 영향을 수식에 포함시키는 과정에서 선형결합 방법을 사용하였으며, 파랑의 진행방향도 유출유의 전파방향과 일치하는 것으로 가정하였다. 실제 상황에서 이 식을 적용할 때는 예보 기상 자료를 이용하여 벡터합으로 최종 기름확산 속도를 구할 수 있으리라 본다.

시프린스호의 사고에서는 제3호 태풍이 부는 조건으로 바람은 40m/s, 해양파는 유의파고 최대 10m(피크주기 18.8sec)에 해당하는 Sea state 9와 Beaufort scale 12에 해당하는 태풍상황이다. 이때 조류는 1.0m/s로 일정하며, 소리도 해안에서 유출유의 전파는 최초 30도 각도로 퍼져가기 시작한 것으로 가정했다. 여

**Table 2** Calculated spreading directions, forces and diffusion speeds of crude oil spilled by Sea Prince oil tanker

Water depth	Wind speed	Wave height	Wave freq. ( $\sigma$ )	Wave numer	Wave direction	Wave force	Assumed current speed	Final diffusion speed
m	m/s	m	rad/s	k	$\theta$ (deg)	ton	m/s	m/s
50	40	10.0	0.334	0.0166801	30.0	1,504	1.0	5.6
100	40	10.0	0.334	0.013154	39.3	5,475	1.0	4.0
200	40	10.0	0.334	0.0116075	45.9	20,946	1.0	3.1
300	40	10.0	0.334	0.0114103	47.0	46,586	1.0	2.9
500	40	10.0	0.334	0.0113864	47.1	128,588	1.0	2.9
1000	40	10.0	0.334	0.0113861	47.1	512,963	1.0	2.9

**Table 3** Calculated spreading directions, forces and diffusion speeds of crude oil spilled by Honam Sapphire oil tanker

Water depth	Wind speed	Wave height	Wave freq. ( $\sigma$ )	Wave numer	Wave direction	Wave force	Assumed current speed	Final diffusion speed
m	m/s	m	rad/s	k	$\theta$ (deg)	ton	m/s	m/s
20	15.4	5.0	0.556	0.0443776	40.0	300	1.0	4.8
30	15.4	5.0	0.556	0.0384743	47.9	583	1.0	3.9
50	15.4	5.0	0.556	0.0337496	57.7	1,436	1.0	3.1
100	15.4	5.0	0.556	0.0316292	64.4	5,299	1.0	2.7
200	15.4	5.0	0.556	0.0315164	64.8	20,675	1.0	2.6
300	15.4	5.0	0.556	0.0315162	64.8	46,300	1.0	2.6

수 여천앞바다에서 발생한 호남사파이어호에 의한 유류 유출 사고는 4~5m의 해양파와 풍속 15.4m/s의 폭풍상황에서 일어난 유출유 사고이다. 이 사고에서 주목할 것은 조류의 속도인데 이에 대해서는 가정한 값이므로 추후에 정확한 값을 사용하여 수정할 필요가 있다.

## 5. 결 론

본 연구에서는 유출유 사고가 발생한 초기에 재난방재대책을 수립하는 단계에서 단지 보고된 기상자료에 의해서 유출유 범위, 오일펜스의 크기와 설치방향 등의 방재대책수립에 필요한 정보를 간략한 계산을 통해 신속히 제공해 주는 편리한 방법이라는 것을 알 수 있었다.

본 연구에서는 기상자료의 제한으로 인해 여수 해안 소리로 유출유 사고와 여천 앞바다에서의 유출유 사고를 검토대상으로 선정하였다. 적용이 간편한 만큼 추후에는 기상자료를 좀 더 찾아보아 실제 발생했던 사고사례에 적용해 보고, 실제사고발생 시 적용할 수 있도록 보완할 예정이다.

## 후 기

본 연구는 경남대학교의 학내연구지원사업의 지원으로 수행되었으며, 연구비 지원에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- 이문진 (1996). 프랙탈을 이용한 해양 확산모델 연구. 박사논문, 부경대학교.
- Dean, Robert G. and Dalrymple, Rober A. (1984). *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*. World Scientific.
- Sorensen, Robert M. (1993). *Basic Wave Mechanics*. John Wiley & Sons.

2011년 3월 2일 원고 접수

2011년 3월 18일 심사 완료

2011년 4월 22일 게재 확정