Journal of the Korean Society
for Marine Environmental Engineering
Vol.1, No.1, pp56~65, Feb. 1998

누유확산 모델의 남해안 적용

홍기용[1], 이문진[1]

Application of Oil Spill Model to the South Sea of Korea

by
Keyyong Hong[1] and Moonjin Lee[1]

요약

해상 누유의 이동경로 및 풍화와 관련된 여러 물리현상들의 모델링 기법들이 검토되었으며, 이에 기초한 해상누유 확산 예측모델 "푸른바다"가 소개된다. 실시간 누유확산을 시뮬레이션하기 위해서는 조류에 관한 데이터베이스가 필수적이며, 본 연구에서는 누유사고가 빈번한 남해안 일대의 조류 데이터베이스가 구축되었다. 남해 조석류의 실시간 예측을 위해 4개의 주요분조(M_2, S_2, K_1, O_1 조석류)를 채택하였으며, 각 분조들의 각속도와 위상 값들은 천문상수들로부터 얻어진다. 주요분조들의 조화상수는 천해 조류 방정식을 풀어 구한다. 푸른바다는 사용자 편의성의 극대화와 해양환경 데이터베이스의 확장이 용이한 유연한 구조를 그 특징으로 한다. 매몰도 인근해역에서 좌초되어 누유를 발생시켰던 오성호 사고를 시뮬레이션함으로서 푸른바다의 유효성을 검증하였다. 시뮬레이션 결과를 관측된 누유확산 경로와 비교하였으며, 이를 통해 푸른바다가 누유의 거동 예측에 있어 타당한 추정치를 줄 수 있음을 확인하였다.

Abstract

An oil spill model, Green Sea Ranger(GSR) based on trajectory and fate modeling of spilt oil behavior is introduced. The various physical models on weathering processes are reviewed and those adopted by GSR are described. A database for currents, which is necessary for the real-time simulation of oil spill, is generated on the south sea of Korea. The real-time prediction of tidal currents in the South Sea of Korea is carried out. Four major constituents (M_2, S_2, K_1, O_1 tide) are employed in the prediction, and those angular speeds and phases are determined from the astronomical arguments. The harmonic constants of the constituents are computed by solving shallow-water tide equations. The GSR has user-freiendly GUI and flexible framework which makes it easy to expand the database for sea environments in Korean coastal waters. The GSR is validated by the simulation of O-Sung oil spill caused by a grounded oil tanker in coastal sea near Maemol-do. The simulated trajectory is compared with observed one and it is shown that the GSR gives reasonable estimation on spilt oil bahavior.

Keywords: Green Sea Ranger(GSR), oil spill model, trajectory and fate, real-time prediction, tidal currents.

(1) 정회원, 선박해양공학연구센터

1. 서 언

근래 들어 해상유출유에 의한 해양오염이 빈번해지고 피해 또한 늘고 있다. 1990년 인천 앞바다에서 있었던 누유사고나 1993년의 광양만 사고로 인한 피해의 심각성은 이미 잘 알려져 있으며, 전남 여천군 소리도 인근 해상에서 태풍을 피해 외해로 이동중 좌초되어 기름을 유출시켰던 14만톤급 유조선 씨프린스호 사고, 부산근해 남형제도 부근 해상에서 예인중 침몰하여 인근해역을 오염시킨 제1유일호 사고, 여천항 내에서 부두에 접안중 안벽에 충돌하여 선체가 파손되면서 기름이 유출되었던 호남사파이어호 사고 등에서 보듯 한국 근해는 상시적인 누유사고에 직면해 있으며, 다양한 원인에 의해 사고가 유발되고 있다. 해양오염문제는 수산업, 해양생태계 등에 치명적인 영향을 주며 방제와 피해보상에 막대한 규모의 비용이 소요되고 있다. 2000년대 우리나라 경제규모의 증대에 따른 산업화는 연안지역에서 전개될 것이 예상되므로 연안 수산양식 및 해양오염에 민감한 산업시설의 보호를 위하여 해상오염의 방지대책이 필요하다. 특히 한반도의 입지적 여건상 기름의 해상운송이 주된 운송수단으로 되고 있는 점을 감안하면 장래 발생할 수 있는 사고에 대한 종합적인 대책 마련이 시급한 실정이다.

한국 근해는 해안선의 길이가 매우 길고 복잡하기 때문에 누유사고시 연안지역의 피해가 매우 크며, 조류의 속도가 빠르므로 누유확산의 초등방제가 무엇보다 중요하다. 누유의 초등방제를 위해서는 오일붐 등의 물리적 확산방지 장비의 확보와 함께 정확한 해상조건의 파악에 기초하여 유출유의 이동 및 확산에 의한 피해가능 지역 예측하고, 유출유의 회수작업에 필요한 각종자료를 제공하는 누유확산 시뮬레이션 기술의 확보가 필요하다. 본 논문에서는 해상유출유 확산예측 모델을 구성하는 핵심 구성 요소들을 한국기계연구원의 선박해양공학연구센터에서 개발한 누유확산 예측 프로그램인 "푸른바다(Green Sea Ranger)"(Hong and Song [1997])를 중심으로 살펴보고, 이를 남해의 통영군 매물도 인근 해상에서 좌초하여 기름을 유출 시켰던 제3오성호 사고에 적용함으로써, 누유확산 예측모델의 개발 및 실용화와 관련된 제 문제를 논의하고 해결방안을 모색하고자 한다.

2. 누유의 확산 예측

2.1 누유 확산 요소

누유의 확산은 ① 유출 초기의 수면 위에서의 퍼짐(spreading), ② 조류(tidal currents)·해류(oceanic currents)와 취송류(wind-driven currents)에 의한 수송(transport), ③ 수송 및 확산과정에서 발생하는 풍화(weathering)의 세가지 형태로 분류된다. 여기서 풍화는 물리적, 화학적 그리고 생물학적 작용으로서 기름의 증발(evaporation), 유상화(emulsion), 소산(dispersion), 용해(dissolution), 광화학 작용(photochemical reaction), 분해(degradation), 침전(sedimentation), 타르덩어리 형성(tar-lump formation) 등의 과정이다. 각각의 확산 요소들은 각기 다른 환경 인자(해수와 기름의 물적 특성, 조류, 바람, 쇄파정도, 온도 등)의 영향을 받는데 연구자에 따라 약간의 차이는 있으나 전체적으로 대동소이한 모델을 사용하고 있고, 적용하려는 해역의 특성에 따라 특별한 확산 요소(예로들어 얼음 모델)를 포함시키기도 한다. 누유의 풍화작용에서 각 현상들이 차지하는 비중이 Table 1에 보여지며, 이들 현상들은 각기 다른 기간에 걸쳐 반응한다(IMO [1988]). 누유확산 예측프로그램 "푸른바다"에서는 초기 누유 확산에 중요한 요소들을 고려하여 누유확산 시뮬레이션을 수행하며, 아래에서는 각각의 요소들에 대해 살펴보고자 한다.

퍼짐(Spreading)

누유의 퍼짐은 각각 영향을 미치는 인자에 따라 중력-관성력 과정, 관성력-점성력 과정 그리고 표면장력-점성력 과정으로 분류될 수 있다. 퍼짐은 누유 확산에서 일종의 초기 조건을 결정할 뿐만 아니라, 누유 표면에서의 증발이나 이산 그리고 용해 같은 과정과 밀접한 관련이 있다. 본 연구의 모델에서 누유의 퍼짐은 실험에 근거하여 경험식을 제시한 Fay[1969]의 결과를 이용하였는데, 유층의 두께가 5mm 이하일 때는 중력과 관성력의 평형관계로부터 퍼짐을 결정하였으며 유층의 두께가 5-10mm 일 때는 관성력과 점성력의 평형관계를 이용하여 결정하였다. 한편, 두께가 10mm 이상일 때 기름의 퍼짐은 표면장력과 점성력을 주요 외력으로 적용한 Mackay et al.[1980]의 모델을 적용하였다.

이송(Advection)

이송은 조류 및 해류와 바람에 의한 취송류등과 같은 해수유동의 영향으로 누유가 해수면 상에서 이동하는 현상으로서 방제작업 지점과 피해 예상 하므로 (Delvigne [1993]), 파도 에너지나 풍속의 함수로 표현될 수 있다. 본 연구에서 소산과정은 실험을 통하여 쇄파에 의한 수면 기름의 변화

Table 1 Pathways for environmental fate of crude oil (Butler et al. [1976])

PATHWAY	TIME SCALE (Days)	PERCENTAGE
EVAPORATION	1 - 10	25%
SOLUTION	1 - 10	5%
PHOTOCHEMICAL	10 - 100	5%
BIODEGRADATION	50 - 500	30%
DISINTEGRATION & SINKING	100 - 1000	15%
RESIDUE	> 100	20%
TOTAL		100%

지역을 평가하는데 중요한 요소이다. 수송의 방향과 속력을 산정하기 위해서는 해수유동에 대한 정확한 자료가 요구되는데, 이들의 정보는 현장에서 실측한 자료나 해수유동 수치모델의 결과로부터 얻어질 수 있다.

난류 확산(Turbulent Diffusion)

난류에 의한 확산은 random walk 과정을 이용하여 누유확산을 예측한 Ellegaard et al.[1992]의 결과를 도입하였다.

증발(Evaporation)

일단 누유가 발생하면 처음 며칠동안 발생하는 풍화의 중요한 부분은 기름 성분들의 증발이다 (Table 1 참조). 이에 따라 상당 질량의 성분이 대기 중으로 이동하며, 수면 위의 기름 양은 상대적으로 줄어들고 그 특성도 변하게 된다. 본 연구에서 기름의 증발은 Stiver and Mackay[1984]의 해석적 방법을 이용하여 산정하였다. 그들은 해석적 접근 방법으로 정제에 사용되는 증류 데이터를 사용하였으며, 증발에 의한 기름의 점도변화는 증발비를 이용하여 산정하였다.

소산(Dispersion)

해상에 유출된 기름은 해상상태에 따라 작은 방울로 분쇄되어 수면하 수직 방향으로 흩어지게 된다. 시간이 지나면서 기름 방울이 수면으로 다시 떠 오를 수도 있지만 대부분은 여러 형태의 연속적인 풍화(용해, 분해, 침전 등)를 겪으며 수면하에 잔류하게 된다. 소산과정은 주로 쇄파에 기인를 관찰한 Delvigne and Sweeney[1988]의 결과를 이용하여 정량화하였다.

유상화(Emulsification)

유상화는 water-in-oil 현상을 의미하며, 오일의 특성을 변화시킨다. 유상화에 의하여 기름의 밀도, 점성, 기름의 총 부피는 증가하며, 이와 같은 특성들은 오일거동과 누유 제거 작업에 큰 영향을 미친다. 오일의 종류에 따라 유상화의 정도는 큰 차이가 있으며, 특히 아스팔트, 레진, 왁스 성분 등의 특성에 따라 유상화 정도는 달라진다 (Bobra [1991]). 본 연구에서 기름의 유상화는 Mackay et al.[1980]의 모델을 이용하여 풍속, 기름의 수분함유 정도의 함수로 표현하였으며, 유상화에 의한 기름의 점도 변화는 Mooney[1951]의 결과를 이용하였다.

회수기능(Oil Recovery and Containment)

누유회수 방법은 오일붐 설치와 유회수 장치의 사용이 보편적이다. 누유의 회수율은 이들 장비의 성능 평가 자료에 근거하여 산정될 수 있는데, 누유의 회수량은 일반적으로 시간과 초기 누유량에 선형적으로 비례하는 것으로 모델링한다.

기타(Generic Sink)

누유확산 모델링에는 이상에서 설명되지 않은 기타의 영향을 함께 고려하기 위한 여유의 기능이 추가되기도 한다. 일반적으로 용해나 미생물의 분해 같은 항을 포함시킬 수 있으며, 이에 따른 질량의 손실률은 초기 누유량에 선형적으로 비례하

는 것으로 모델링 한다.

2.2 환경 자료 데이터 베이스

정확한 누유 거동 예측을 위해서는 확산모델의 정립과 함께 외력조건으로 작용하는 사고해역 환경인자들의 자료가 요구된다. 해난사고가 해상조건이 열악한 상태에서 흔히 발생하므로 사고후 현장관측 등을 통해 환경자료를 수집하는 것이 사실상 어렵고, 누유 사고시 신속한 대응이 중요함을 감안하면, 누유의 확산 경로 예측에 필요한 환경 외력들은 사전에 데이터베이스로 구축하여 실시간 시뮬레이션을 수행하는 것이 바람직하다. 주요 환경외력으로는 바람과 해류 및 조류가 있다. 바람은 취송류를 유발하는데, 취송류는 해수유동의 한 요소로서 해류 및 조류와 함께 누유의 수송에 기여한다. 한편 GIS(Geographic Information System)는 환경 자료와 함께 누유확산 모델의 실행에 기본자료이므로 데이터베이스의 구축이 요구된다. 또한 누유의 거동은 누유의 물리적 특성에 따라 상이하므로 정확한 누유확산 예측에는 기름특성에 대한 이해가 필수적이며, 기름 종류에 따른 특성자료의 데이터베이스 구축이 바람직하다.

다음 장에서는 주요 환경자료로서 해류, 취송류, 조류등의 해수유동 실시간 예측기술에 관해 보다 상세하게 제시한다.

3. 해수유동의 실시간 예측

3.1 해류 및 취송류

한반도 주변에 영향을 미치는 해류는 황해에 황해난류, 남해에 대마난류, 동해에 동한난류, 북한한류등이 있다. 이러한 해류에 관한 정보는 현재까지 국지적으로 편중되어 있는 상태이며, 전반적인 분포에 대한 정량적인 정보는 아직까지 제시된 바 없다. 본 연구에서는 수로국의 조류도에 근거한 평균적인 해류분포를 이용하였다.

바람에 의해 발생되는 취송류는 수심에 따라 반응시간과 반응양상이 다르게 나타난다. 풍속에 대한 취송류의 유속은 수심에 따라 지수함수적으로 감소하며, 유향은 북반구에서 풍향의 오른쪽으로 편향되어 나타난다. 그러나 본 연구에서 다루고 있는 유류의 경우는 해양표면에 제한되어 이동하므로, 취송류의 연직적 특성보다는 해양표면에서의 특성에 의해 주로 다루어진다. 해양표면에서 바람과 취송류간의 관계는 연구자에 따라 조금씩 차이가 있으나(Galt [1994]), 유향은 바람의 오른쪽으로 0° ~20° 사이의 편향각을 갖도록 지정하며 유속은 풍속의 2~4%에 해당하도록 지정하는 것이 일반적이다. 한국 연안역에서 바람과 표면취송류간의 관계를 조사한 강과 이[1994]의 연구에서 표면취송류의 유속은 풍속의 3%이며, 유향은 풍향의 오른쪽으로 26° 편향되는 것으로 제시된 바 있다. 본 연구에서 취송류는 실시간의 바람에 대해 Yossef et al.[1993]이 제시한 편향각과 유속비를 적용하여 산정하였다.

3.2 조류

한반도 주변해역에서 조류는 해수유동 중 가장 중요한 요소로서 작용한다. 조류의 실시간 예측은 조류의 조화상수(harmonic constants)와 천문적 요소의 변동을 조합하여 계산하였다. 조류의 조화상수는 관측을 통하여 조화상수값이 알려진 지점들을 외해경계값으로 적용한 해수유동모델을 이용하여 산정하였다. 조류 조화상수의 계산을 위한 해수유동모델의 기본 방정식은 2차원 해수유동 방정식과 연속 방정식으로 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{\partial U}{\partial t}+U\frac{\partial U}{\partial x}+V\frac{\partial U}{\partial y}+g\frac{\partial \zeta}{\partial x}-fV+\frac{kU\sqrt{U^2+V^2}}{D+\zeta}=0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t}+U\frac{\partial V}{\partial x}+V\frac{\partial V}{\partial y}+g\frac{\partial \zeta}{\partial y}+fU+\frac{kV\sqrt{U^2+V^2}}{D+\zeta}=0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t}+\frac{\partial U(D+\zeta)}{\partial x}+\frac{\partial V(D+\zeta)}{\partial y}=0$$

여기서 t는 시간, x와 y는 직교좌표상의 거리, U와 V는 연직적으로 평균된 x와 y축 방향의 유속, g는 중력 가속도, ζ는 평균 해면으로 부터의 해면 변위, D는 평균해면으로부터의 수심, f는코리올리(Coriolis)파라메타 ($f = 2\omega\sin\phi$, ϕ=기준위도), k는 해저 마찰계수($k = 0.003$) 이다. 모델의 계산은 양해법

(explicit scheme)을 이용했으며, 이류항은 경사차분법(angled derivative scheme)을 이용하여 처리하였다. 계산과정에서 발생될 수 있는 수치 오차는 양방향 순차계산법(double sweep scheme)을 매 계산단계마다 적용하여 상쇄되도록 하였다. 연안의 천해역에서 발생될 수 있는 조간대의 처리는 Flather and Heaps[1975]가 제시한 처리 기법을 사용하였는데, 이 방법에서는 해양에 속한 격자라 하더라도 일정 수심 미만의 경우에는 육지로 취급하여 유속을 계산하지 않는다.

해수유동모델의 경계조건(boundary condition)은 연안(coast)경계조건, 하천(river)경계조건 그리고 외해(open)경계조건으로 나누어진다. 연안경계조건은 바다와 육지사이의 해수 교환이 없다는 조건, 즉 해안선에 수직인 유속성분이 '0'이라는 조건을 적용하였다. 하천경계조건은 적용하지 않았다. 외해경계조건은 연안의 관측된 조위 값에서 얻어진 조화상수 값을 이용하여

$$\zeta(t) = \sum_{k=1}^{4} A_k \cos(\omega_k t - g_k)$$

와 같이 해면변위 ζ의 변동으로 지정하였다. 여기서 ω_k는 주요 4대 분조인 M_2조, S_2조, K_1조, O_1조의 주파수이다.

해수유동모델의 결과로 계산된 조화상수를 이용하면, 연구해역내 어느 점에서나 조화방법에 의한 4대 분조 조류의 예측이 가능하다. 조화상수로부터 실시간 유속은

$$U(t_r) = \sum_{k=1}^{4} f_k(t_r) A_{uk} \cos\{\omega_k t_r - \phi_{uk} + V_k(t_r) + u_k(t_r)\}$$

$$V(t_r) = \sum_{k=1}^{4} f_k(t_r) A_{vk} \cos\{\omega_k t_r - \phi_{vk} + V_k(t_r) + u_k(t_r)\}$$

와 같이 계산된다. 여기서 ω_k는 k분조의 각속도이며, A_{uk}와 A_{vk}는 동향 및 북향성분 유속의 진폭이고 ϕ_{uk}와 ϕ_{vk}는 유속의 지각이다. 시간 정보로서 t_r은 예측하고자 하는 실시간이며, $f_k(t_r)$와 $u_k(t_r)$는 진폭 및 지각에 대한 노드변동보정치(nodal factor)이고 $V_k(t_r)$는 평형조 지각이다 (Schreman [1958]; Foreman [1977]). 본 연구에서 각 분조에 대한 천문변수 f_k, u_k 및 V_k는 1900년 1월 1일 0를 기준하여 경과된 시간의 함수로 계산하였다. 본 연구에서 적용한 조류의 실시간 예측기법은 한국 남해안의 조류를 실시간으로 예측한 이와 김[1997]의 연구에서 활용된 바 있으며, 남해안의 조류데이터베이스로 구축되었다.

4. 누유확산 예측 모델의 적용

해양오염 시뮬레이션은 누유 확산 모델을 근간으로 사고형태에 대한 모델링과 방제전략 및 현장지휘에 이르는 다양한 요소들을 포함한다. 한국기계연구원 선박해양공학연구센터에서는 해양오염 방제지원 종합 프로그램의 개발을 목표로 연구가 진행중이며, 이중 핵심 요소인 누유 확산 예측 프로그램 "푸른바다"를 개발한 바 있다 (한국기계연구원 [1994]; [1995]; [1996]). 본 장에서는 "푸른바다"의 적용예로서 1997년 4월 3일 경남 통영군 매물도 인근해상에서 1600여톤의 벙커 C유와 연료유를 선적한 채 좌초후 침몰한 제3오성호 사고에 대한 누유확산 시뮬레이션 결과를 제시하였다. 누유확산 예측모델의 환경요소로서 해수유동은 한국 남해안에 대해 구축된 해수유동 데이터베이스를 이용하였다 (이와 김 [1997]).

4.1 사고개요

제3오성호는 1997년 4월 3일 13시경 벙커-C유 1615톤을 적재하고 온산항을 출발하여 군산항으로 항해하던중 동일 21시경 통영 앞바다 매물도 남동 2마일에 위치한 등가도 암초에 좌초후 침몰하였다. 제3오성호의 사고위치는 북위 34° 36′ 30″, 동경 128° 35′ 30″이며, 사고해역은 Fig. 1과 같다.

4.2 누유확산 현황

제3오성호 사고에 의해 유출된 기름은 북동풍의 영향으로 사고해역의 남서쪽으로 이동하였다. 사고 다음날이 1997년 4월 4일 방제현장에서 보고된 기름의 확산분포는 Fig. 2와 같이 작은 덩어리가 남서향의 띠를 형성하고 있다. 사고 이틀째인 1997년 4월 5일의 확산분포는 보다 확대되었으며,

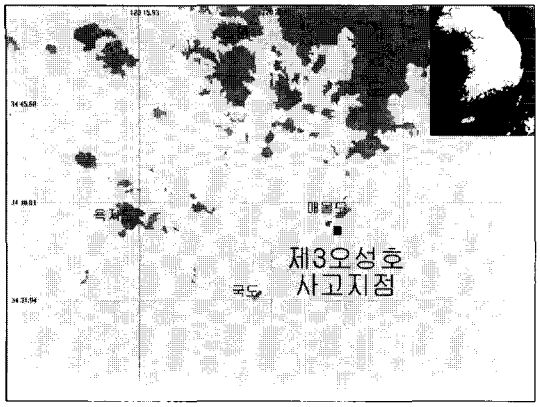


Fig. 1 Location of oil spill incident of Osungho No.3.

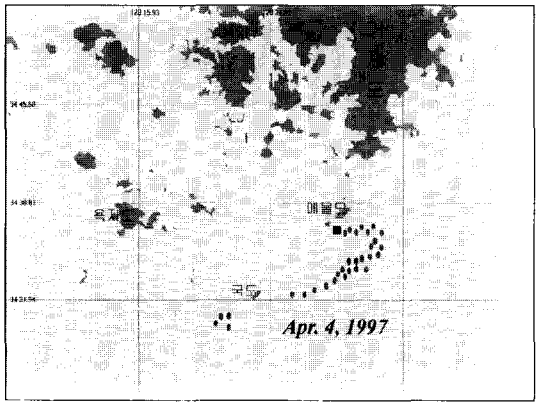


Fig. 2 Observed contaminated area on April 4, 1997.

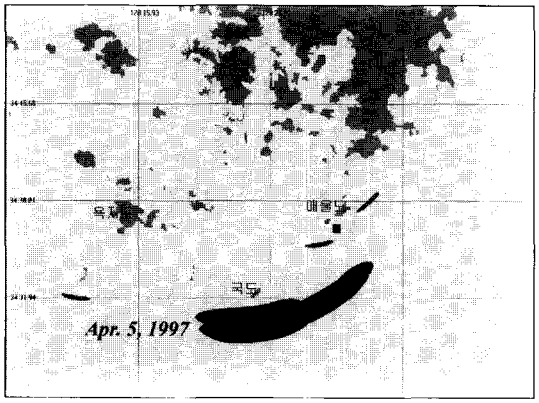


Fig. 3 Observed contaminated area on April 5, 1997.

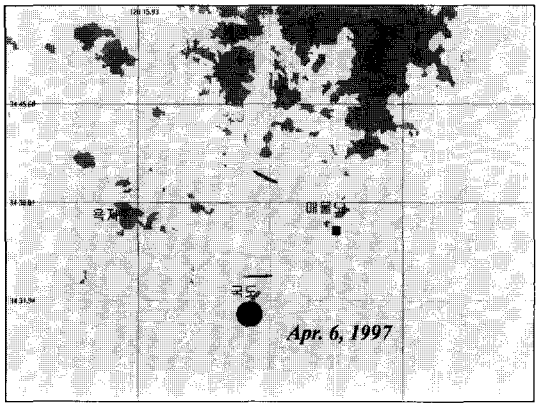
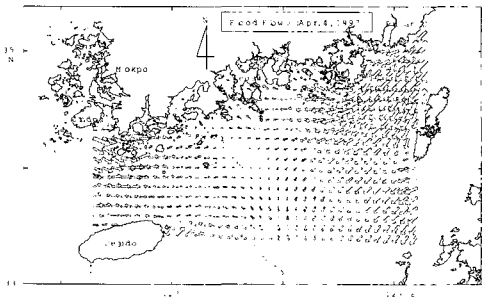


Fig. 4 Observed contaminated area on April 6, 1997.



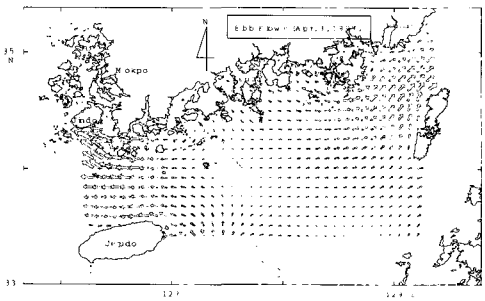


Fig. 5 Tidal currents around the oil spill region (marked by rectangle)
at flood flow time (top) and ebb flow time (down) on April 3, 1997.

사고지점 주변은 방제작업에 의해 대부분의 기름 이 제거된 상태를 보인다 (Fig. 3). 1997년 4월 6일에 해상의 기름은 대부분 제거되었으며,

사고해역 남서쪽의 국도부근에 다소 큰 영역의 기름분포만이 나타났다 (Fig. 4). 사고 당시 방제현장에서 관측된 기름의 분포는 Table 2에 정리된 바와 같다.

바람의 분포는 Fig. 6과 같다. 사고당시 바람은 주간에 남풍계열이 우세하였으며, 야간에 북풍계열이 우세하게 나타났다 (Fig. 6). 풍속은 주간에 6~10m/sec, 야간에 8~14m/sec로 야간의 풍속이

Table 2 Summary of oil spilt area.

일 시	오 염 범 위	오 염 상 태
4/4, 06:20	■ 등가도-대구을비도-국도, 크기: 반경 3~5m, 폭: 200~300m, 길이 14.816km	■ 방카C유 덩어리
07:15	■ 등가도 서방 1마일 해상 200m의 기름띠	■ 갈색의 기름띠 사이 방카C유 덩어리 남서쪽으로 이동
08:30	■ 사고해점-좌사리도 동남방 3마일 폭 200~300m, 길이 20.372km	■ 방카C유 부분적 띠 형성, 남서방향으로 이동
4/5, 06:00	■ 국도남방 2마일~대구을비도 서방 2.5마일 폭 1~2km, 길이 16km	■ 엷은 유막중 부분적 짙은 암갈색, 남서방향 이동
06:30	■ 소매물도 남방 1.6마일 폭 200m, 길이 5.556km	■ 연한 갈색 남서방향 이동
08:00	■ 국도 남서~남동 일원 해상 폭 2km, 길이 10km	■ 방카C유 두꺼운 유막
09:30	■ 갈동남방 1마일 폭 1~2.5m, 길이 5~6km	■ 부분적으로 짙은 암갈색 유막
09:30	■ 갈도남방 1마일 폭 1.852km, 길이 18.52km	■ 엷은 유막중 부분적 검은덩어리
10:00	■ 국도 남단 폭 1.852~4.63km, 길이 9.26km	■ 부분적 짙은 암갈색 유막
10:00	■ 국도 북방 1.3마일 폭 20m, 길이 200m	■ 암갈색
10:15	■ 사고해점 북동 1.5마일 폭 300m, 길이 3.704km	■ 황갈색 엷은 기름띠
10:30	■ 국도남방 1.5마일 폭 100m, 길이 3.704km	■ 무지개색 및 부분적 암갈색
4/6, 05:30	■ 국도북방 1마일 폭 300m, 길이 9.26km	■ 연한갈색 및 진한갈색
07:00	■ 국도남단 폭 2km, 길이 2km	■ 갈색 및 부분적인 검은 기름띠
07:30	■ 비진도 남방 1.4마일 폭 70~100m, 길이 2km	■ 암갈색 기름띠

4.3 누유확산 시뮬레이션

제3오성호 사고에 따른 누유확산을 시뮬레이션하기 위하여 남해안의 조류데이터베이스를 이용하였다. 사고당일 조석은 소조기(음력 2월 26일)였 으며, 사고해역주변의 통영항 고조시간은 17:57이고 저조시간은 23:57이었다. 조류데이터베이스로부터 산정한 사고당시 조류의 창조시 및 낙조시 현 황은 Fig. 5 와 같다. Fig. 5에 제시한 바와 같이 사고해역의 조류는 창조시에 북동향류를 보이며, 낙조시에 남서향의 흐름을 보인다.

사고해역의 취송류는 현장에서 관측된 바람을 이용하여 지정하였다. 사고당시 현장에서 관측된

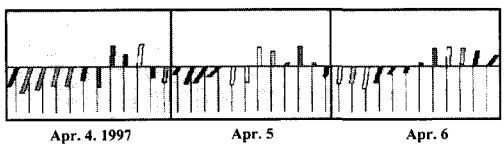


Fig. 6 Time variation of wind at the oil spill region in April 4-6, 1997.

다소 강하게 나타났다.

조류와 취송류외의 해류는 수로국 서지 No. 1420 (수로국, [1982])에 제시된 평균 항류분포를 참고하여 지정하였다 (Fig. 7). 제3오성호 사고당일의

해수유동을 입력으로한 "푸른바다"의 누유확산 시뮬레이션 결과는 Fig. 8과 같다. 시뮬레이션 결과는 방제현장에서 관측된 작은 기름덩어리의 분포를 동일하게 재현하지는 못 했으나, 분포의 양상은 비교적 유사한 것으로 나타났다. 사고 이틀째인 1997년 4월 5일의 누유확산 시뮬레이션 결과는 Fig. 9에 나타낸 바와 같이 국도 남단까지 확산된 관측결과를 잘 재현하였다. Fig. 9에서 사고해역부근에서도 기름의 분포가 나타난 것은 관측의 결과와 다른 것인데, 이는 시뮬레이션에서 방제에 의한 기름 소거를 고려하지 않았기 때문이다. 사고 삼일째인 1997년 4월 6일의 확산 시뮬레이션 결과는 Fig. 10과 같다. 관측결과에서 기름의 분포는 거의 소거되었기 때문에, 시뮬레이션 결과와는 다소 다른 양상을 보이나 국도 남단에 위치한 기름군의 분포는 시뮬레이션 결과에서도 잘 나타나고 있다.

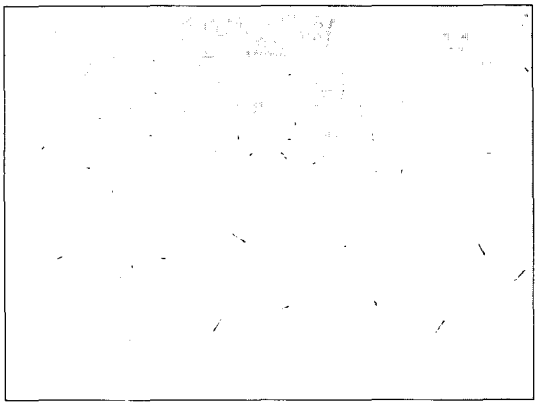


Fig. 7 Residual currents of the oil spill region (NORI, 1982).

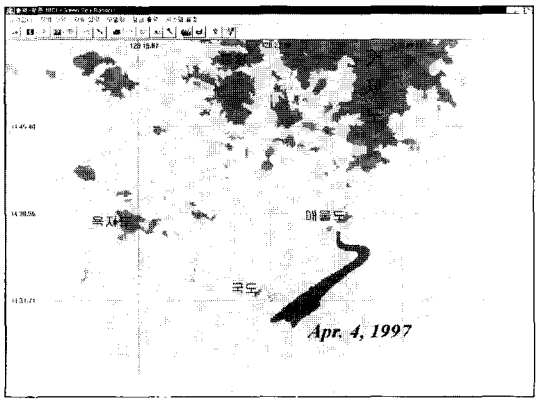


Fig. 8 Simulated trajectory of spilt oil on April 4, 1997.

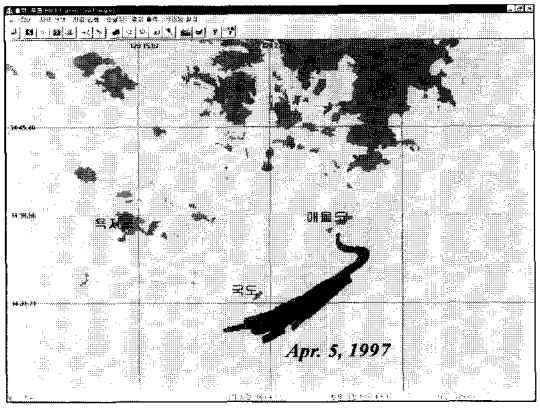


Fig. 9 Simulated trajectory of spilt oil on April 5, 1997.

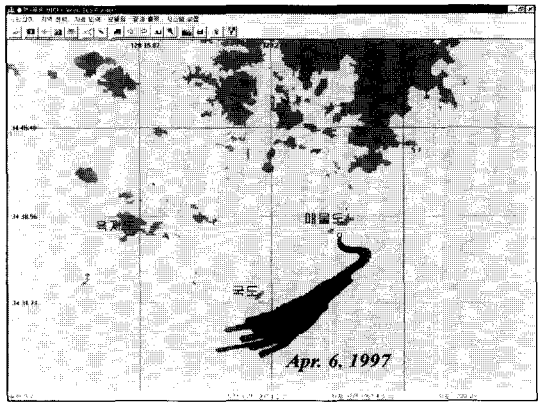


Fig. 10 Simulated trajectory of spilt oil on April 6, 1997.

5. 결 언

해양환경 오염에 있어서의 누유사고에 의한 영향은 그 피해규모의 크기와 환경회복에 걸리는 시간의 길이를 생각할 때 매우 심각한 문제이다. 유출유 사고의 영향을 극소화 하려면 오염영역을 최소화하려는 노력과 빠른 사후 처리가 필수적이며, 이를 원활하고 효과적으로 수행하기 위해서는 해상 조건에 따른 유출유 확산의 정확한 예측이 필요하다. 본 고에서는 누유확산 예측프로그램 "푸른바다"와 남해안 환경 데이터베이스를 사용하여 제3오성호 누유사고를 시뮬레이션 함으로써 해양 누유확산 예측기술의 유용성과 실용성을 고찰하였다. "푸른바다"와 관련 데이터베이스는 다음의 특성을 갖는다.

1) 확산 모델은 누유의 해수표면상의 이동경로 모델링과 누유의 물리, 화학적 변화에 관한 풍화 모델링, 그리고 누유의 방제장비 및 해안선과의 상호작용에 관한 모델링을 포함한다.
2) "푸른바다"의 전후 처리장치와 실행모듈의 GUI 설계는 사용자 편의성과 확장성에 주로 고려하였다.
3) 누유확산의 실시간 시뮬레이션을 위해서는 실시간 조류예측, GIS 및 기름특성 데이터베이스, 바람
관측자료 등이 요구된다.
4) 해수유동은 해류, 조류, 취송류 등을 포함한다. 해류는 평균적인 분포로 적용되며, 취송류는 바람에
대한 반응으로서 도입된다. 조류는 4대분조를 이용하여 구축한 데이터베이스를 이용하여 실시간으로 예측한다.

제3오성호 시뮬레이션을 통하여 다음의 사실들을 확인할 수 있었다.

1) 해류, 조류, 취송류등의 해수유동을 실시간으로 도입한 결과 유사한 분포를 재현할 수 있었다.
2) 취송류의 유출를 위한 바람의 도입시 국지적인 양상의 파악이 중요하므로, 사고발생시 사고해역에서의 바람관측이 필수적으로 요구된다.
3) 방제에 의한 기름소거의 영향으로 누유확산 예측결과과 관측현황간의 차이를 보이므로 누유확산 예측 프로그램에 방제에 의한 기름소거 효과를 포함하는 것이 필요하다.

누유확산 예측기술은 누유사고 방제활동에 필수적인 요소기술로서, 국가적 차원의 종합적인 방재시스템의 구축 및 계획 수립에 활용될 수 있으며, 사고 현장에서의 효율적인 방제 활동에도 긴요한 핵심기술이다. 그러나 현재의 기술수준은 요소기술의 결합을 통한 누유확산 예측 및 방제지원 시스템 구성의 초기단계에 머무르고 있어, 지속적인 연구에 의한 확보된 기술의 개선 및 관련 기술분야로의 영역확대가 요구된다. 특히 실효성 있는 누유확산 예측을 위해서는 누유확산 모델의 고도화와 함께, 한국연안 해양환경 데이터베이스의 광범위한 구축이 시급히 요구된다.

후기

본 논문은 과학기술처에서 1997년도 시행한 기관고유사업 "해상 누유 대응장비 및 누유 확산예측 기술 개발"의 연구결과 중 일부이다.

참 고 문 헌

[1] 강용균, 이문진, 1994, "해양 표면취송류(skin drifter)의 라그랑쥐 측류 및 분석", 한국해양학회 학술발표회 초록집, 14.

[2] 이문진, 김선영, 1997, "남해 조류의 실시간 예측", 선박해양기술, Vol. 24, 77-91. 수로국, 1982, *조류도 (부산에서 여수)*, 수로국 서지 No. 1420.

[3] 홍기용 외, 1994; 1995; 1996, *해양장비 핵심기술 개발(해상유출유 확산방지 기술 개발 I, II, III)*, 한국기계연구원, 과학기술처 보고서.

[4] Bobra, M., 1991, "Water in oil emulsification : a physico chemical study", Proc. of 1991 International Oil Spill Conference, San Diego, CA. 483-488.

[5] Butler, J.M. et al., 1976, "The fate of petro leum in the open ocean", *Sources, effects and sinks of hydrocarbons in acquatic environment*, The American Institute of Biological Sciences, 287-297.

[6] Delvigne, G.A.L., 1993, "Natural dispersion of oil by different sources of turbulence", Proc. of 1993 International Oil Spill Conference, Tampa, FL., 415-419.

[7] Delvigne, G.A.L. and Sweeney, C.E., 1988, "Natural Dispersion of Oil", Oil and Chemical Pollution 4, 281-310.

[8] Ellegaard, A.C., 1992, "A PC modeling syste m for the simulation of transport and fate of solutes and suspended substan ces", Proc. 2nd International Conf. (ASCE), Tampa, FL.

[9] Fay, J., 1969, "The spread of oil slicks on a calm sea", *Oil on the Sea*, Plenum Press, 53-63.

[10] Flather, R.A. and Heaps, N.S., 1975, "Tidal computations for Morecame Bay", Geophys. J. Royal. Astro. Soc., 42,

489-517.

[11] Foreman, M.G.G., 1978, *Manual for tidal currents analysis and prediction*, Pacific Marine Science Report 78-6.

[12] Galt, J.A., 1994, "Trajectory analysis for oil spills", Journal of Advanced Marine Technology Conference, Vol.11, 91-126.

[13] Hong, K. and Song, M., 1997, ""Green Sea Ranger", an Oil-Spill Model for Korean Coastal Waters", J. of Ship and Ocean Technology, Vol.1, No.2 (in press).

[14] IMO(Internation Maritime Organization), 1988, *Manual on oil pollution*, London.

[15] Mackay, D., Paterson, S. and Trudel, K., 1980, *A mathematical model of oil spill behavior*, Department of Chemical Engineering, Univ. Toronto, Ontario.

[16] Mooney, M., 1951, "The viscosity of a concentrated suspension of spherical particles", Journal of Colloidal Science 6, 162-170.

[17] Shureman, P., 1958, *Manual of harmonic analysis and prediction of tides*, United States Gorvernment Printing Office.

[18] Stiver, W. and Mackay, D., 1984, "Evaporation rate of spills of hydrocarbon and petroleum mixtures", Environmental Science and Technology 18(11), 834-840.

[19] Youssef, M. and Spaulding, M., 1993, "Drift currents under the action of wind and waves", Proc. of the 16th Arctic and Marine Oil Spill Program Technical Seminar, 587-615.