

## 해양유출기름의 확산 시뮬레이션 모델 개발 (II)<sup>+</sup>

### - 유류확산모델의 현장 적용

김 기 철\* · 이 중 우\*\* · 강 신 영\*\*\* · 도 덕 희\*\*\*\*

Development of Simulation Model for Diffusion of Oil Spill in the Ocean (II)

- Application of Simulation model to the Field

*K. C. Kim · J. W. Lee · S. Y. Kang · D. H. Doh*

**Key Words** : 유류유출(Oil Spill), 난류확산(Turbulent Diffusion), 모의모델(Simulation Model), 수치추적자기법(Numerical Tracer Method), 몬테-카를로 방법(Monte-Carlo Method)

### Abstract

Simulation model for diffusion of oil spill is developed. The model can perform real time simulation in the case of oil spill accident in the ocean. The model consists of three dimensional ocean circulation model and model for diffusion of oil spill. Real time flow fields which are used in the calculation of advection of oil spill are obtained in the three dimensional ocean circulation model. The model for diffusion of oil spill includes the evaporation, dissolution, emulsification, and downward diffusion. For the verification of the model, it is applied to the oil spill from the accident of Sea Prince. The result shows good agreement.

+ 이 논문은 1996년도 한국학술진흥재단의 대학부설연구소 연구비 지원에 의하여 연구되었음

\* 정회원, 동아대학교 토목해양공학부 교수

\*\* 정회원, 한국해양대학교 토목환경공학부 교수

\*\*\* 정회원, 한국해양대학교 해양개발공학부 교수

\*\*\*\* 정회원, 한국해양대학교 기계·정보공학부 교수

## 1. 서론

기름유출로 인한 해양오염은 다른 어떤 종류의 해양오염보다 광범위하고 뚜렷하게 해양환경에 해를 끼친다.

특히 우리 나라의 서해안과 남해안같이 조류가 강한 곳에서의 대형 기름유출 사고는 강한 조류에 의한 이류 현상으로 서해안과 남해안 거의 전 지역으로 확산되어 막대한 피해를 입히게 된다. 씨프린스호 기름 유출사고는 대표적인 예이다.

기름 유출사고로 인한 피해를 최소화하기 위해서는 초기에 유출 근원지 부근에서 방제작업을 하여 더 이상 확산이 되는 것을 막는 것이 가장 좋은 방법이지만 이것은 아주 힘들고 대개의 경우 방제작업이 이루어지기 전에 아주 빠른 속도로 확산이 되므로, 위에서 언급된 기름의 확산특성이 잘 반영된 확산 simulation의 개발을 통하여 유출사고의 발생 시 해당 해역에서의 기름 확산을 정확하고 신속하게 예측하고 그에 따른 방제대책을 수립하는 것이 필수적이라 하겠다.

해양유출기름의 확산모델은 여러 학자들에 의해 다루어져 왔다. Liu등(1986, 1988)은 3차원 해수유동모델에 2차원 대기모델과 기름의 weathering 모델을 접목시켜 확산모델을 만들어 여러해역에 응용하였다. 이들은 바람의 응력계산에 있어서 "wind-driven response function method"를 개발하여 적용하였다. 그러나 이들의 방법은 실제의 상황에서 즉시 적용하기 힘들고 오차를 많이 내포하고 있다. Dyke등(1983)은 유출기름의 확산에 Langmuir Circulation (LC)의 역할이 크다고 주장하고 있다. LC는 바람에 의해 생성된 해류와 Stokes Drift와의 상호작용에 의해 생성되는 대류형의 순환이다. LC에 의해 바람방향으로 표층수가 정렬되어 유출기름이 길게 정렬되는 현상을 설명한다고 하였다. 그러나 LC는 아직 뚜렷하게 측정되어진 일이 없어 하나의 이론으로 제기되어졌다. 그는 또한 oil slick monitoring에 있어서 remote sensing의 중요성을 역설하였다(1984). Yang 등

(1976)은 유출기름의 weathering 과정중 증발현상에 대한 수치모델 및 실험결과를 발표하였다. 그에 의하면 온도가 증발과정의 초기에 가장 중요한 요인이되지만 그 후로는 온도의 효과는 점점 사라지고 대신 바람의 속도가 증발에 큰 영향을 미친다고 하였다. 또한 바람에 의해 유도되는 기름의 움직임의 속도는 보통 알려진 것보다 훨씬 빠르며 바람에 의해 유도되는 물의 움직임 보다 훨씬 빠르다고 주장하였다. 국내에서는 류 등(1993)이 비교적 자세한 유류분산에 관한 모델링을 발표하였다. 해안부근의 해류풍계, 연안의 파랑 및 유류특성, 해안선과 해역이용시설 등에 의한 유류거동의 차폐효과 등을 고려한 모델을 개발하였다. 그리고 실제 동남해역에 대해 적용하여 종래의 모델과 비교하였다. 그러나 이 모델은 해수유동모델이 2차원으로서 해수유동을 자세히 재현하기에는 부족하다. 이 외에도 국내외적으로 여러 가지 모델들이 개발되어 있지만 종합적으로 정리되고 정확히 재현시키는 모델은 현재까지 개발되어 있지 않다.

본 연구에서는 현재까지 나와있는 모델들을 자세히 검토를 하고 많은 실험과 현장관측 및 지금까지의 관측치들을 database화 하여 정확하고도 신속한 예측을 할 수 있는 유류확산 모델을 개발하고자 한다. 확산 시뮬레이션(simulation) 모델은 표층에서의 해수유동에 의한 확산과 수직적인 확산을 모두 고려하여야 하므로 3차원의 해수유동 모델(hydrodynamic model)에 의해 바람, 조류 및 해류와 난류까지 모두 고려된 해수유동을 먼저 계산한다. Eulerian 방법에 의한 확산 모델은 기름띠 자체가 폭이 수십미터 정도로 되기 때문에 격자간격(grid resolution)에 한계를 가지게 된다. 그러므로 기름을 많은 수의 입자덩어리로 생각하여 각 입자의 움직임을 3차원 해수유동모델에서 계산된 유속 및 위에서 언급한 유출기름의 특성을 최대로 반영하여 계산하는 Lagrangian 방법을 사용하였다.

## 2. 해수유동모델

해수유동모델은 기본적으로 POM(Princeton Ocean Model)을 사용하였다. POM은 Blumberg와 Mellor(1980)에 의해 개발되어 공개된 3차원 해수 유동모델로 지금까지 많은 연구자들이 하구와 연안해역에 적용하여 상당한 검증을 받은 모델이다. 모델의 기본방정식은 정수압 가정과 Boussinesq 가정이 적용된 비압축성 유체의 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식이다.

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} + w \frac{\partial u}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial x} + fv + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial u}{\partial z}) + F_x \quad (2)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + w \frac{\partial v}{\partial z} = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial p}{\partial y} - fu + \frac{\partial}{\partial z} (K_M \frac{\partial v}{\partial z}) + F_y \quad (3)$$

$$\rho g = -\frac{\partial p}{\partial z} \quad (4)$$

수온과 염분의 보존식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u \frac{\partial T}{\partial x} + v \frac{\partial T}{\partial y} + w \frac{\partial T}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial T}{\partial z}) + F_T \quad (5)$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + u \frac{\partial S}{\partial x} + v \frac{\partial S}{\partial y} + w \frac{\partial S}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial z} (K_H \frac{\partial S}{\partial z}) + F_S \quad (6)$$

상기 식들에서  $u, v, w$ :  $x, y, z$  방향의 유속 (cm/sec),  $T$ : 수온(°C),  $S$ : 염분(ppt),  $\rho, \rho_0$ : 밀도와 해수표면의 평균밀도( $\text{gr/cm}^3$ ),  $f$ : Coriolis parameter,  $p$ : 압력,  $g$ : 중력가속도( $\text{cm/sec}^2$ ),

$K_M$ : 수직난류점성계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ),  $K_H$ : 수직난류 확산계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ),  $F_x, F_y$ :  $x, y$  성분의 수평난류 혼합항( $\text{cm/sec}^2$ ),  $F_T, F_S$ : 수온과 염분의 수평난류 확산항(°C/sec, ppt/sec) 등이다.  $F_x, F_y, F_T, F_S$  등은 다음의 식을 사용하였다.

$$F_x = \frac{\partial}{\partial x} [2A_M \frac{\partial u}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_M (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (7)$$

$$F_y = \frac{\partial}{\partial y} [2A_M \frac{\partial v}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial x} [A_M (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})] \quad (8)$$

$$F_{T,S} = \frac{\partial}{\partial x} [A_H \frac{\partial (T,S)}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [A_H \frac{\partial (T,S)}{\partial y}] \quad (9)$$

여기서  $A_M, A_H$ : 수평난류점성계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ ), 수평난류확산계수( $\text{cm}^2/\text{sec}$ )인데 Smagorinsky(1963)의 다음식을 사용하여 계산하였다.

$$A_M = A_H = [C \Delta x \Delta y \{ (\frac{\partial u}{\partial x})^2 + (\frac{\partial v}{\partial y})^2 + \frac{1}{2} (\frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x})^2 \}]^{1/2} \quad (10)$$

여기서  $C$ : 상수로서 0.1에서 0.3의 값을 가짐,  $\Delta x, \Delta y$ :  $x, y$  방향의 격자크기 등이다.

경계조건은 다음과 같다. 먼저 해수표면에서는

$$w = \frac{\partial \eta}{\partial t} + u \frac{\partial \eta}{\partial x} + v \frac{\partial \eta}{\partial y} \quad (11)$$

$$\rho_0 K_M (\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z}) = (\tau_{0x}, \tau_{0y}) \quad (12)$$

여기서  $\eta$ : 해수면 수위,  $\tau_{0x}, \tau_{0y}$ :  $x, y$  방향의 바람응력 등이다. 해저면 경계에서는

$$w_b = -u_b \frac{\partial H}{\partial x} - v_b \frac{\partial H}{\partial y} \quad (13)$$

$$\rho_0 K_M \left( \frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = (\tau_{bx}, \tau_{by}) \quad (14)$$

여기서  $w_b$ : 해저면에서의 수직유속성분,  $H$ : 수심,  $\tau_{bx}, \tau_{by}$ :  $x, y$  방향의 해저마찰응력 등이다. 육지와 해수의 경계에서는  $u=v=w=0$  이다. 외해(open boundary)경계에서는 다음과 같이  $M_2, S_2$ 성분의 조류를 주었다.

$$\eta = H_M \cos(\omega_M t - \phi_M) + H_S \cos(\omega_S t - \phi_S) \quad (15)$$

여기서  $H_M, H_S$ :  $M_2, S_2$  분조의 진폭,  $\omega_M, \omega_S$ :  $M_2, S_2$  분조의 각속도,  $\phi_M, \phi_S$ :  $M_2, S_2$  분조의 위상차 등이다. 모델은 처음에 유동이 전혀 없는 상태에서 시작하여 외해경계에서 조류를 주어 유동을 일으키고 거의 정상상태로 되었을 때 다시 바람장을 주어 정상상태가 될 때까지 계산하여 결과를 출력하였다.

### 3. 유류확산모델

기름은 수천의 서로 다른 화합물로 이루어져 있고 이러한 물질들의 운명은 많은 서로 다른 물리적, 화학적, 생물학적 요인들에 의해 지배되기 때문에 해양의 기름오염에 관한 연구는 아주 복잡하다. 유출된 기름은 대부분 표층에 유막을 형성하여 바람과 파(wave), 해류에 의해 이동하고, 유막은 중력 때문에 아주 얇은 기름층을 형성하며 빨리 넓은 해역으로 퍼져 나간다. 이때, 기름에 함유된 많은 양의 탄화수소들은 휘발성이 있어 금방 증발하기 시작하는데 기름이 퍼지고 유막층이 얇아지면 얇아질수록 증발속도는 증가하게 된다. 가벼운 휘발성 물질들이 증발하게 되면 기름은 더욱 무거워져 표층에 떠있기 보다는 가라앉을 수도 있게 된다. 또한 몇몇 극성을 띤 탄화수소 화합물은 해수에 용

해되어 유막층을 더욱 무겁고 점성이 강하도록 만들기도 한하고 물의 난류성질(turbulence)에 의해 물과 기름이 유화되어 조그마한 덩어리들로 분산되기도 한다. 분산된 덩어리들은 조류와 해류에 의해 넓게 퍼지며 일부는 부유물에 흡착되어 서서히 해저로 가라앉게 된다. 파도의 작용에 의해 물이 기름으로 스며들어 유화물을 만드는데, 이 유화물은 두껍고 무거우며 초코렐 비슷한 갈색을 띠게 되며 이것은 결국은 무거운 타르(tar)로 덩어리화한다. 그리고 광화학 작용에 의해 기름의 성질이 변하며, 미생물에 의해 분해되어 기름의 양이 줄어든다. 유출된 기름은 거의 대부분 이러한 과정을 거치며 확산이 된다.

유출기름의 궤적계산 중 분산과정의 계산은 결국 유출기름의 물리적, 화학적 및 생물학적 과정에 의해 결정되며 각 과정의 특징은 다음과 같다.

#### 1) 퍼짐(Spreading)

유동이 별로 없는 바다에 기름이 유출되면 중력과 표면장력에 의해 얇게 퍼진다. 중력은 기름층에 대해 수직으로 작용하여 기름의 점성과 퍼짐력이 평형을 이룰 때까지 옆으로 퍼지게 한다. 표면장력도 기름층이 더 퍼지게 한다. 이에관해 Berridge et al.(1968)이  $100 \text{ m}^3$ 의 기름이 17분만에 0.55 mm 가 되고 3시간 후 0.12mm 가 된다고 보고하였다. Fay(1971)는 퍼짐에 대한 경험식을 다음과 같이 제안하였다.

$$\pi R_{\max}^2 = A = 10^5 V^{0.25} \quad (16)$$

여기서  $R_{\max}$ 는 퍼짐의 최대반경,  $A$ =기름층의 넓이,  $V$ =유출기름의 부피이다. 퍼짐이 일어날 동안 해파와 바람은 기름층을 길게 만들고, 변형시킨다. 바람과 해파에 의한 이송속도는 바람속도의 3.4%라고 보고되었다.

2) 증발(Evaporation)

기름의 유출이 일어나자마자 증발이 곧 시작된다. 퍼짐이 일어나서 기름층이 더 얇아지면 증발은 가속된다. 증발의 양과 속도는 기름중에 휘발성성분이 얼마나 함유되어 있는가에 따라 달라진다. 보통의 원유는 수일만에 약 50%정도가 증발한다. 증발이 일어나면 기름의 성분들 중 가벼운 성분들이 없어지기 때문에 좀더 무겁고 점성이 강하게 된다. 증발량에 대한 경험식은 다음과 같다.

$$E_f = \frac{K_e C_i P_i}{RT} \quad (17)$$

여기서,  $E_f$  = 증발량, mol/(cm<sup>2</sup>)(s),  
 $K_e$  = evaporative mass transfer coefficient, cm/s  
 $C_i$  = 기름중 I번째 성분의 농도, mole fraction  
 $P_i$  = 증기압  
 $R$  = 기체상수  
 $T$  = 기온, K

3) 광화학산화(Photochemical oxidation)

많은 성분들은 대기의 산소와 태양의 복사에 의해 광화학 산화과정을 거친다. 이 과정이 일어나면 기름층중 산화화합물이 증가하여 기름의 성분을 바꾼다. 대부분의 화합물은 더 무거워 지고 용해되지 않는 점성질의 고체화하여 오랜 기간 존속하게 된다.

4) 용해(Solution)

극성을 지닌 가벼운 탄화수소 성분들중 일부가 해수에 용해된다. 이 양은 얼마되지 않지만 용해되는 성분들의 대부분이 강한 독성을 지니고 있기 때문에 생태계에 큰 영향을 미친다.

5) 유화(Emulsification)

바람과 해수의 turbulent 운동에 의해 기름과 해

수의 유상액이 형성되는데 이는 분산의 중요한 형태가 된다. 유화작용에 의해 아주 많은 조그마한 방울들이 형성되어 해수에 녹지 않고 깊은 곳까지 침강하게 된다. 이 방울들은 자신의 비중과 비슷한 깊이에서 부유하며 아주 오랜 기간동안 존속하며 해류에 의해 먼 곳까지 이송이 되기도 한다. 방울들의 크기는 5 μm에서 수mm이고 30m 정도의 깊이까지 존재하며 유출지점에서 약 250km 떨어진 곳에서 발견된 기록이 있다(Forester,1971). 궁극적으로는 고체입자에 붙어 해저로 가라앉게 된다.

기름은 위의 과정에서 알 수 있듯이 이송(advection)이 되고 분산(dispersion)이 되면서 동시에 성분도 많이 변화한다. 간단히 정리하면 해수표면에서의 퍼짐은 주로 점성, 표면장력, 관성에 의해 일어나고 시간이 경과하면 유출기름은 주로 이류와 난류분산(turbulent dispersion)에 의해 퍼져나간다. 기름이 이류되고 분산이 되면서 그의 농도는 증발, 광화학작용, 미생물에 의한 분해 등으로 점점 감소한다. 결국, 기름농도의 계산에는 이류, 분산 및 weathering 과정을 모두 함께 고려하여야 한다. 이들 과정을 Eulerian 방법의 일반적인 확산방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{u} \cdot \nabla C = \nabla \cdot (A \nabla C) + S \quad (18)$$

여기서,  $C$  : 기름의 농도,  $\vec{u} = (u, v, w)$ ,  $A$  : 확산계수,  $S$  : 기름의 weathering 등에 의한 감소나 생성량이다.

유출기름의 확산과정에 관한 시뮬레이션(simulation)을 순수한 Eulerian 방법으로 하기에는 곤란하다. 유출된 기름은 처음에는 원형으로 퍼지다가 조류, 해류 및 바람에 의해 어느 한 방향으로 길게 늘어진다. 그 폭은 보통 수십m에 불과하므로 이를 수치모델의 격자간격(grid resolution)으로 나타내기에는 한계가 있다. 그러므로 유출된 기름을 많은 입자들의 집합으로 보고 각 입자들의 변위를 추적해 나가는 Lagrangian 방법을 이용하는 것이

적당하다.

$$\Delta \vec{x} = \vec{u}' \Delta t \quad (22)$$

기본적인 Lagrangian 방법의 개요는 다음과 같다. 어떤 입자가 시간  $t_0$  에서 초기위치  $\vec{x}_0$  에 있다가 시간  $t$  에 새로운 위치  $\vec{x} = \vec{x}_0 + \Delta \vec{x}$  로 옮겨졌을 때, 그입자의 Lagrangian 속도  $\vec{u}_l(\vec{x}(\vec{x}_0, t), t)$  은 다음과 같이 주어진다.

$$\vec{u}_l(\vec{x}(\vec{x}_0, t), t) = \vec{u}(\vec{x}_0, t) + \Delta x \cdot \nabla \vec{u}(\vec{x}_0, t) \quad (19)$$

만일  $\Delta \vec{x}$  가 속도장에 의한 거리 scale 보다 아주 작다면,  $\Delta \vec{x}$  는 다음과 같이 주어진다.

$$\Delta \vec{x} = \int_{t_0}^t \vec{u}(\vec{x}_0, t) dt \quad (20)$$

그러므로 새로운 위치  $\vec{x}(\vec{x}_0, t)$  는 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \vec{x}(\vec{x}_0, t) &= \vec{x}_0 + \int_{t_0}^t \{\vec{u}(\vec{x}_0, t) \\ &+ \int_{t_0}^t \vec{u}(\vec{x}_0, t) dt \cdot \nabla_H \vec{u}(\vec{x}_0, t)\} dt \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 속도장은  $\vec{u} = \vec{u} + \vec{u}'$  로 주어지는데  $\vec{u}$  는 3차원 해수유동모델에서 구한 Eulerian 속도이고  $\vec{u}'$  은 난류속도이며 이 속도장을 계산하기 위해 몇 개의 모델들이 제시되어 있다(Sullivan, 1971; Hall, 1975; Maier-Reimer, et. al., 1982). 본 연구에서는 Monte-Carlo 방법을 적용하였다(Maier-Reimer, et. al., 1982). Monte-Carlo 방법의 개요는 다음과 같다. 각각의 입자는 평균속도를 제외하고,  $\Delta t$ 의 시간동안 아주 불규칙한 난류속도에 의해 어떤 통계적 분포함수  $f(x)$ 로부터 불규칙하게 선택할 수 있는  $\Delta \vec{x}$  만큼 움직인다. 즉,

난류확산계수  $A$  와 통계적 분포함수  $f(x)$  사이에는 Einstein의 통계적난류이론에 의해 다음과 같은 관계식을 가진다.

$$A = \frac{1}{2\Delta t} \frac{\int_{-\infty}^{+\infty} x^2 f(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f(x) dx} \quad (23)$$

$A$  는 단지  $f(x)$ 의 분산(variance)에만 관계가 있고,  $f(x)$ 의 특정형태와는 무관하다. 그러므로 가장 간단히 계산하기 위해서  $f(x)$ 를 uniform distribution 이라고 생각할 수 있다. Uniform distribution 일 경우  $A$  는 다음과 같은 형태를 취한다.

$$A = \frac{1}{6} |\vec{U}'|^2 \Delta t \quad (24)$$

여기서  $\vec{U}'$  은 난류적유속  $\vec{u}'$  의 'band width' 라고 생각할 수 있다. 즉,

$$\vec{u}' \in (-|\vec{U}'|, |\vec{U}'|) \quad (25)$$

만일 난류확산계수를 알면  $U'$  은 다음과 같이 계산된다.

$$U' = \sqrt{\frac{6A_h}{\Delta t}} \quad (26)$$

난류적 유속  $u'$  은 Monte-Carlo sampling을 사용하여  $(-|\vec{U}'|, |\vec{U}'|)$ 의 범위내에서 구할 수 있다.

$$\vec{u}' = 2(R(1)-0.5)\vec{U}' \quad (27)$$

여기서  $R(1)$ 은 0과 1사이의 난수이다. 그러므로 각각의 입자는 이류와 난류확산과정을 거쳐 다음과 같이 새로운 위치로 이동하게 된다.

$$\vec{x}_i^{t+\Delta t} = \vec{x}_i^t + \Delta t(\vec{U} + \vec{u}') \quad (28)$$

여기서  $i$ 는  $i$ 번째의 입자를 말하며  $\vec{U}$ 는 해수 유동모델에서 구한 수심평균된 속도이며  $\vec{u}'$ 은 Monte-Carlo 방법에 의해 구한 난류적유속이다.

기름을 포함하고 있는 해수는 특정한 성질을 가지고 있는 입자들의 집합으로 생각한다. 그러므로 각 Eulerian 격자의 농도는 그 격자 내의 모든 입자들의 평균(ensemble average) 농도가 된다. 각 격자의 농도는 각각의 격자에 들어있는 추적자의 수에 의해 결정된다. 예를들어  $Q$  ppm의 농도가 source에서 유출된다고 이것을  $N$ 개의 추적자에 의해 시뮬레이션을 하면 각각의 입자는  $Q/N$  ppm의 농도를 가지며  $n$ 개의 추적자를 가지는 격자의 농도는  $nQ/N_0$ 이 된다. 매 시간 스텝마다 각 격자의 입자수를 계산하여 농도를 결정하게 되는데 이때 입자수의 계산에서는 위에 열거한 weathering 과정에 의한 손실분을 각 과정당 정량화한다. 수직적으로 밀도차로 인한 부력에 의해 입자는 수직운동을 하게 되는데 수직좌표는 다음의 식으로 계산한다.

$$z_i^{t+\Delta t} = z_i^t + \Delta t w_i(\rho^t - \rho_i^t)/\rho^t \quad (29)$$

여기서,  $\rho$ 는 격자의 밀도,  $\rho_i$ 는 각 입자의 밀도이다. Weathering 과정에 의한 기름농도의 감소는 다음과 같이 수치추적자의 감쇠로 처리한다.

$$N^{t+\Delta t} = N^t(1 - \alpha\Delta t) \quad (30)$$

여기서,  $\alpha$ 는 감쇠계수인데 보통 증발과 용해과정은 7일에 약 30%, 광화학산화와 미생물의 섭식 과정은 100일에 35%, 분해와 침강과정은 1년에 35%정도이다.

#### 4. 모델의 적용 및 결과

3차원 해수유동 모델과 유출기름확산 모델을 씨프린스호의 사고에 적용하였다. 해양경찰청의 자료에 의하면 당시 씨프린스호는 원유 265,518톤을 싣고 광양항 호남정유 부두에 접안하여 하역작업을 하다 태풍경보를 통보 받고 대피하던 중 1995년 7월 23일 14:05 경 여천군 작도에 충돌하여 표류하다 15:58 경 소리도 암초에 좌초되어 원유 4155톤, 벙커-C유 780톤, B-A 100톤이 유출되었다. 사고당일 기상은 태풍 페이의 직접영향으로 풍속 25-30 m/sec 의 강한 바람이 불어 유출유는 급속히 확산되었다. 7월 26일에는 동쪽으로 남해도 앵강만과 미조리알 해상까지, 7월 28일 경에는 통영거제 해역을 지나 그 후 부산 수영만과 울산, 포항 해역까지 이동 확산되었다.

본 연구에서는 거제도 부근 해역의 확산상황을 재현하고 실제 상황과 비교 검토하였다. 계산영역은 Fig 1.과 같다. 해수유동 계산의 초기조건은 유속을 0으로, 수온은 20°C, 염분은 30ppt로 하였다. 또한 바람을 초속 10m/sec의 남동풍을 주었다. 개방경계에서 조석에 따른 해수면의 변화를 주어 모델영역내에서 해수유동을 일으키고 해수유동계산이 정상상태에 도달한 다음 결과를 받아서 확산모델의 입력자료로 사용하였다. 격자간격은 250m × 250m 로 하였고 수직적으로는 6개의 층으로 나누었다. 개방경계에서의 조석은 M<sub>2</sub> 분조와 S<sub>2</sub> 분조를 주었는데 각 분조의 조화상수 값은 한반도주변 조석조화상수 자료집(한국해양연구소, 1996)을 이용하였고 Table 1에 제시하였다.

Fig. 1(a), (b) 에 최강낙조류시의 표층과 저층의 유속분포 계산결과를 나타내었다. Fig. 2은 해양경찰청에서 측정된 1995년 7월 29일과 30일의 실제 확산 경로이다. 확산의 계산은 Fig. 2의 영역을 참고하여 왼쪽 상단의 개방경계 부근에서 source를 주어 1조석주기 후의 추적자 분포를 Fig. 3(a)에

Table 1 Tidal harmonic components at the open boundary

위치	M <sub>2</sub>		S <sub>2</sub>	
	진폭(m)	위상차 (°)	진폭(m)	위상차 (°)
좌상단	0.59	250	0.25	250
우상단	0.53	245	0.18	285
좌하단	0.72	250	0.35	280
우하단	0.57	248	0.21	286

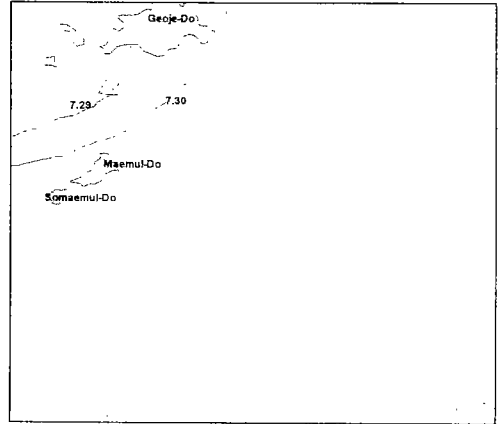


Fig. 2 Observed dispersion in the model areat

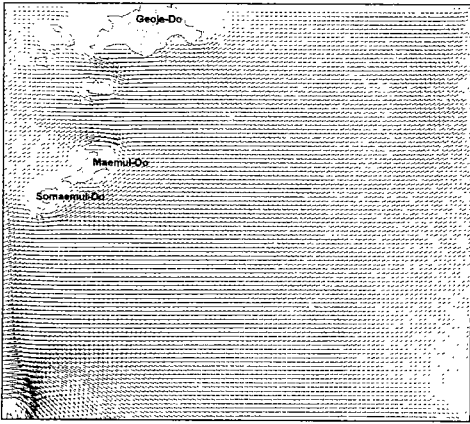


Fig. 1(a) Computed maximum ebb current fields of surface layer

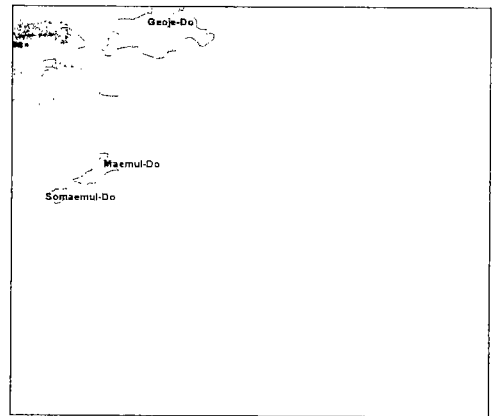


Fig. 3(a) Computed dispersion of numerical tracer,

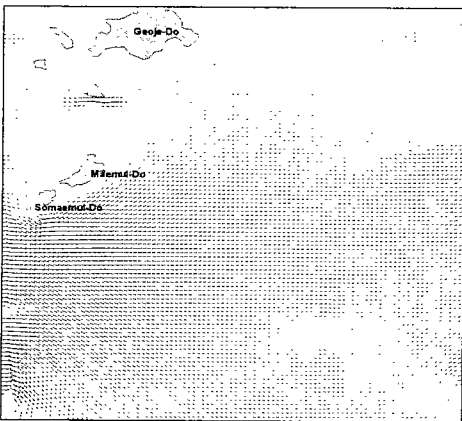


Fig. 1(b) those of bottom layer

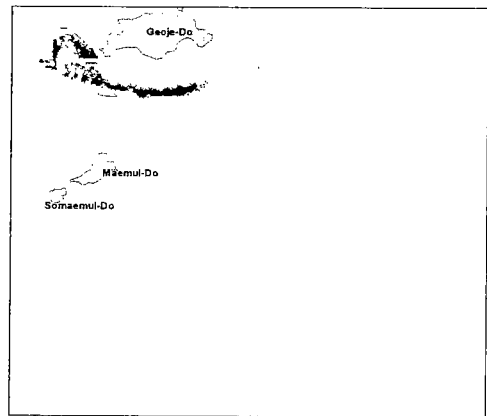


Fig. 4(b) 1 day after



그 하루 후의 분포를 Fig.3(b)에 나타내었는데 관측치와 비교하여 비교적 잘 재현하고 있음을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 연구에서는 해양에서 기름이 유출되는 사고가 발생했을 경우 기름의 확산양상을 예측할 수 있는 유류확산모델을 개발하였다. 모델은 3차원 해수 유동을 재현하는 해수유동모델과 이를 통해 계산된 해수유동을 입력자료로 하여 유출기름의 확산을 예측하는 유류확산모델의 2가지로 되어 있다. 해수유동모델은 POM을 기반으로 만들었으며, 유류확산모델은 기름의 풍화, 유화, 증발 등을 고려한 Lagrangian 기법의 수치추적자 모델이다. 모델의 검증을 위하여 씨프린스 사고에 적용하여 잘 재현함을 확인하였다.

### 참고문헌

- 1) 류 청로, 장 선덕, 이 화운, 1993: 연안해역 유류 분산의 수치 모델링, 한국 수질보전학회지, 9월, 167-177.
- 2) 한국해양연구소, 1996: 한반도주변 조석 조화상수 자료집.
- 3) Berridge, S. R., D. R. Fallows, and A. Fish, 1968: The properties of persistent oils at sea. J. Inst. Petrol., 54, 300-309.
- 4) Dyke, P. P. G., and S. F. Barstow, 1983: The importance of Langmuir Circulations to the ecology of the mixed layer. In : North Sea Dynamics, ed. By Sündermann/Lenz,

Springer-Verlag.

- 5) Dyke, P. P. G, 1984: Remote sensing of oil slick behavior. In : Remote sensing of shelf sea Hydrodynamics, Ed. by J. C. J. Nihoul, Elsevier.
- 6) Forrester, W., 1971: Distribution of suspended particles following the wreck of the tanker Arrow. J. Mar. Res., 29, 151-170.
- 7) Fay, J. 1971: Physical processes in the spread of oil on a water surface. Proc. Joint Conf. on Brevention and Control of oil spills, American Pet. Inst., Washington, 463-467.
- 8) Hall, C. D. , 1975: The simulation of particle motion in the atmosphere by a numerical randon-walk model, Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 101, 235-244.
- 9) Liu, S. K., and J. J. Lendertse, 1986: A three dimensional model of the Gulf of Alaska. Coastal Engineering, 20, 2606-2619.
- 10) Liu, S. K., and J. J. Lendertse, 1988: A modelling system for coastal oil spill risk analysis. Coastal Engineering, 22, 2574-2588.
- 11) Maier-Reimer, E., and J. Sündermann, 1982: On tracer methods in computational hydrodynamics, In Engineering applications of computational hydraulics, Vol. 1, Ed. by Abott, M. B.
- 12) Sullivan, P. J., 1971: Longitudinal dispersion within a two-dimensional turbulent shear flow. J. Fluid Mech., 49, 551-576.
- 13) Yang, W. C. , and H. Wang, 1976: Modelling of oil evaporation in aqueous environment Ocean Engineering Report, No. 7, Univ. of Delaware.