海洋安全學會誌 第 5 卷 第 1 號, pp. 9~18, 1999. 1.

論 文

실시간 유출유 확산모델링

정 연 철*

Real-time Oil Spill Dispersion Modelling

Yun-Chul Jung

〈목 차〉

Abstract
1. 서론
2. 실시간 조석계산
2.1 조석수치모델
2.2 조석예보모델
3. 유출유 확산모델
3.1 라그랑지안 입자추적법
3.2 임의행보이론
3.3 유출유의 풍화
4. 모델의 적용 및 계산결과
4.1 실시간 조류
4.2 유출유 확산모델
5. 결론
참고문헌

Abstract

To predict the oil spill dispersion phenomena in the ocean, the oil spill response model, which can be used for strategic purpose on the oil spill site, based on Lagrangian particle-tracking method was formulated and applied to the neighboring area with Pusan port where the oil spill incident occurred when the tanker ship No.1 Youil struck on a small rock near the Namhyungjeto on September 21, 1995.

The real-time tidal currents to be required as input data of the oil spill model were obtained by the two-dimensional hydrodynamic model and the tide prediction model. Evaluation of tidal currents using observation data was successful. For wind data, other input data of oil spill model, observed data on the spot were used.

* 한국해양대학교 해사대학 교수

To verify the oil spill model, the oil spill modelling results were compared with the field data obtained from the spill site. Compared the modelling results with the observation data, there exist some discrepancies but the general pattern of modelling results was similar to that of field observation.

The modelling results on 7 days after spill occurred showed that the 40% of spilled oil is in floating, 36% in evaporated, 23% at shore, and 1% in out of boundary, respectively. According to the evaluation of weighting curves of effective components to the dispersion of oil, the winds make a 37% of contribution to the dispersion of oil, turbulent diffusion 39.5%, and tidal currents 23.5%, respectively. Provided the more accurate wind data are supported, more favorable results might be obtained.

1. 서 론

유조선에 의한 대량 유유출 사고는 국가적으로 재산상의 피해가 엄청난 것은 물론, 해양환경에 치명적인 악영향을 미치기 때문에 체계적인 대응이 절실히 요청된다. 지난 95년 한해는 특별히 대형 유유출 사고가 연속적으로 발생하므로써 국민들로 하여금 불의의 유조선 사고에 의한 해양환경의 파괴를 생생하게 일깨워준바 있다. 즉, 7월의 Sea Prince호 사고를 비롯하여, 9월에는 유일호 사고, 11월에는 Honam Sapphire호 사고 등 유조선에 의한 일련의 대형 유유출 사고가 연속적으로 발생하였으며, 이에 대응하는 과정에서 우리의 방제체계 및 관련기술이 매우 낙후되어 있을뿐 아니라 앞으로 이에 대한 연구와 투자를 대폭 늘려야 할 필요성을 재인식하는 계기가 되었다.

선박에 의한 대량 유유출 사고는 근본적으로 사고를 예방하는 것이 중요하지만, 실수, 고의, 자연재해 등 여러 원인에 의해 어느 정도의 사고는 필연적으로 발생할 수 밖에 없다. 이 경우 효과적으로 대응하므로써 피해를 최소화하는 것이 긴요한데, 유유출 사고에 능동적으로 대처하기 위해서는 기본적으로 적절한 방제시스템, 방제장비 및 방제인력이 요구된다.

컴퓨터의 발전으로 1970년대 이후 본격 실용화되기 시작한 컴퓨터 방제시스템은 유출유 방제작업시 필요로 하는 각종 정보를 필요한 시기에 적절한 형태로 제공해 주므로써 현장의 작업지휘자가 정확한 판단과 의사결정을 할 수 있도록 도와주는 기능을 한다. 따라서 방제시스템은 기본적으로 사용자가 요구하는 방제작업과 관련된 다양한 정보를 확보하고 이를 필요에 따라 제공해 줄 수 있어야 하는데, 유출유 확산모델(oil-spill dispersion model)은 바로 이러한 방제시스템의 일부를 구성하고 있는 중요한 방제도구이다.

본 연구에서는 해상 유유출 사고시 유출유의 이동 및 확산과정을 모의, 예측할 수 있는 라그랑지안 입자추적법(Lagrangian particle-tracking method)에 기초한 유출유 확산모델을 개발하였으며, 이를 부산 인근 해역에 적용하였다. 모델의 중요한 입력자료인 실시간 조류(real-time tidal currents)는 기존의 2차원 조석수치모델(two-dimensional numerical tidal model)과 조석예보모델(tide prediction model)을 사용하여 계산하였으며, 유출유 확산모델의 계산결과는 제1유일호 유유출 사고시의 현장 관측자료와 비교, 검토되었다.

2. 실시간 조석계산

조석수치모델은 외해경계조건이 주어진 특정 해역에 대해서 조위 및 조류를 계산할 때 사용된다. 이 경우 외해경계조건은 시간에 따른 특정 분조의 해면변위로 주어지기 때문에, 모델의 계산결과는 실제의 조석과는 차이가 있는 특정 분조의 주기적 변동을 나타내게 된다. 그러나 여러 분조

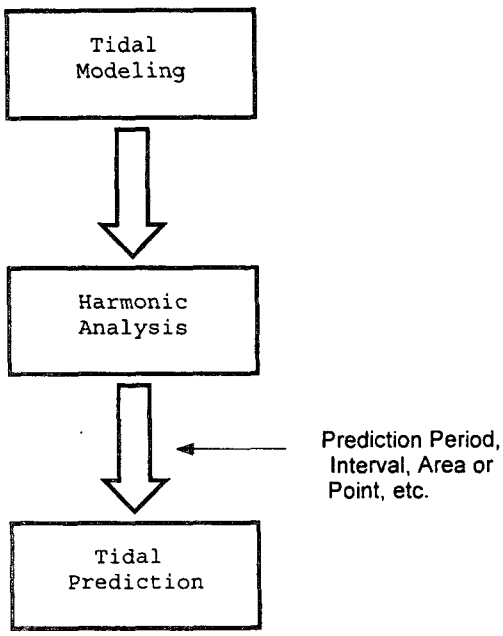

Fig. 1 Block diagram of tidal prediction process.

에 대한 조석수치모델의 계산결과를 조석예보모델을 통해 결합할 경우 실시간 조석예보가 가능하다. Fig. 1은 연구에 사용된 실시간 조석계산의 과정을 보여주는 Block Diagram이다.

2.1 조석수치모델

연구에 사용된 조석수치모델은 2차원 수심적분모델로써 수심이 비교적 얕은 연안해역의 유동장을 계산하는데 주로 사용된다. 모델에서 사용하고 있는 기본방정식은 3차원 연속방정식과 운동량방정식을 수직면($-h \le z \le \zeta$)에 대해 평균하고, 외력으로 지구자전에 의한 영향, 바닥의 마찰력 및 중력을 포함시키고, 표층에서 바람에 의한 응력을 무시함으로써 다음과 같이 나타낼 수 있다[1].

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}[(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y}[(\zeta + h)V] = 0 \tag{2.1}$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U\frac{\partial U}{\partial x} + V\frac{\partial U}{\partial y} - fV + g\frac{\partial \zeta}{\partial x} + \frac{gU\sqrt{U^2+V^2}}{C^2(\zeta+h)} = 0 \tag{2.2}$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U\frac{\partial V}{\partial x} + V\frac{\partial V}{\partial y} + fU + g\frac{\partial \zeta}{\partial y} + \frac{gV\sqrt{U^2+V^2}}{C^2(\zeta+h)} = 0 \tag{2.3}$$

여기서, U, V는 각각 수심 평균한 x, y방향 유속, ζ는 수면변위, h는 평균수면하 수심, g는 중력가속도, f는 코리오리스 계수(coriolis parameter), 그리고 C는 Chezy 마찰계수이다.

본 모델에서는 상기 방정식의 컴퓨터 수치계산을 위해서 Leendertse(1967)에 의해 조류계산에 응용되어, 현재 널리 이용되고 있는 ADI법(alternating direction implicit method)을 채택하였다. 수치해법은 여러 문헌[1][2]에 이미 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 생략한다. 그리고 각 분조의 조위변동으로 주어지는 외해경계조건은 다음과 같다.

$$\zeta(t) = A\cos(\omega t - \phi) \tag{2.4}$$

여기서, $\zeta(t)$는 분조의 조위변동, A는 분조의 진폭, ω는 분조의 각속도, 그리고 ϕ는 분조의 위상이다.

2.2 조석예보모델

실시간 조위 및 조류는 각 격자점에 있어서 조석수치모델에 의해 계산된 조석계산 자료를 토대로 조화분해에 의해 산정된 주요 분조의 조화상수로부터 다음 식에 의해 계산될 수 있다[3][4].

$$U(t) = \sum_{i=1}^{N} f_i(t) A_{ui} \cos 2\pi[\omega_i(t) - \phi_{ui} + V_i(t) + u_i(t)] \tag{2.5}$$

$$V(t)=\sum_{i=1}^{N} f_i(t)\,A_{vi}\cos 2\pi[\omega_i(t) - \phi_{vi}+V_i(t)+u_i(t)] \quad (2.6)$$

$$\zeta(t)=\sum_{i=1}^{N} f_i(t)\,A_{\zeta i}\cos 2\pi[\omega_i(t) - \phi_{\zeta i}+V_i(t)+u_i(t)] \quad (2.7)$$

여기서, $U(t)$, $V(t)$ 및 $\zeta(t)$는 각각 실시간(t)의 x, y방향 유속 및 조위변동을 그리고 ω_i, A_i 및 ϕ_i는 분조 i의 각속도, 진폭 및 국지적 지각을 각각 나타낸다. 천문변수 $f_i(t)$와 $u_i(t)$는 진폭 및 위상에 대한 실시간의 노드변동 보정치(nodal factor)이며, $V_i(t)$는 실시간의 평형조 지각(phase of the equilibrium tide)이다. 각 분조의 천문변수인 f_i, u_i 및 V_i는 달과 태양의 궤도요소와 관련하여 계산되는데, 본 모델에서는 Doodson(1921)[5]이 제시한 1900년 1월 1일 00시를 기준으로 하여 경과된 시간의 함수로서 계산하는 방법을 채택하고 있다.

3. 유출유 확산모델

일반적인 오염물 이류·확산방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial C}{\partial t}+V\cdot\nabla C=\nabla\cdot(D\nabla C)+S \quad (3.1)$$

여기서, C는 오염물의 농도, V는 유속, ∇는 gradient 연산자, D는 확산계수, S는 생성 및 소멸항이다.

해양에 유출된 기름의 이류·확산과정은 라그랑지안 입자추적법(Lagrangian particle- tracking method)에 의해 해석하는 것이 일반적이다. 이 방법은 유출유를 수면위에 부유하는 표류자들(drifters)의 모임으로 보고, 일정한 부피를 갖는 표류자들이 서로 독립적으로 움직인다는 가정하에, 이류와 확산에 의하여 각각의 표류자들이 시간에 따라 이동된 위치를 구하는 방법이다. 또한 표류자들의 분포밀도는 해수표면에서 유출유의 농도로 환산된다. 이러한 방법은 기존의 Eulerian 방법에 비해 수치 안정성(numerical stability)이 뛰어나고 계산시간이 절약되며 생성과 소멸(유출유의 증발, 육지접안 등)을 고려하기 쉬운 장점을 가지고 있다[6]. 그러나 표류자들의 수가 증가할수록 해상도는 증가하지만, 컴퓨터 메모리의 부족과 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

3.1 라그랑지안 입자추적법

식 (3.1)을 라그랑지안 방법으로 나타내면 다음과 같다[7].

$$S_i^n=(V_w^n+V_i^n)\Delta t+d_i^n \quad (3.2)$$

여기서, S_i^n는 n번째 시간부터 n+1번째 시간까지 단위시간(Δt) 동안에 i번째 표류자가 이동한 총거리이고, $(V_w^n+V_i^n)\Delta t$는 바람과 유속에 의해 이동된 거리이며, d_i^n는 확산(diffusion) 및 확장(spreading) 의해 이동된 거리이다. V_w^n는 $0.03\times W_{10}$으로 계산되며, W_{10}은 수면상 10m 고도에서의 바람의 크기를 나타낸다. V_i^n는 i번째 표류자가 위치한 곳의 유속으로서 2차원 조석수치모델의 결과를 이용한다. d_i^n는 임의행보이론(random-walk theory)에 의해 계산된다. 따라서 단위시간(Δt) 동안에 하나의 표류자가 이동한 거리는 난류확산 및 퍼짐에 의한 이동거리와 바람 및 유속에 의한 이동거리의 벡터합으로 표시된다.

3.2 임의행보이론

해양에 유출된 기름의 확산과정은 기름의 화학적 특성 및 해양의 물리적 성질에 따라 달라진다. 본 연구에서 채택하고 있는 임의행보이론의 개념은 다음과 같다. 해양에 유출된 표류자들은 무작위 운동 즉, 브라운 운동을 하며, 단위시간(Δt) 동안에 확산에 의해 표류자가 이동한 거리(d) 및

방향(θ)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$d = R_1(6(K_x + K_y)\Delta t)^{1/2} \quad (3.3)$$

$$\theta = 2\pi R_2 \quad (3.4)$$

여기서, R_1, R_2는 0과 1 사이의 난수(random number)이며, K_x, K_y는 각각 x, y방향의 확산계수이다.

확장이 확산에 미치는 영향은 유출초기에만 작용하므로, 이는 확장이 일어나는 최대반경(R_{max}), 최대시간(T_{max}) 및 확장계수(spreading coefficient, K_p)를 다음 식으로 계산하여 식 (3.3)의 K_x, K_y에 더해주므로써 고려해줄 수 있다[8].

$$R_{max} = [\frac{10^5}{\pi} V^{3/4}]^{1/2} \quad (3.5)$$

$$T_{max} = [\frac{R_{max}^2 \rho_w \nu_w}{K^4 \sigma^2}]^{1/3} \quad (3.6)$$

$K_p = 0.407 N^{0.268} (m^2/\sec)$: 유출후 경과시간 $< T_{max}$

$K_p = 0.0$: 유출후 경과시간 $> T_{max}$

여기서, V는 총유출량(m^3), ρ_w는 해수밀도(kg/m^3), ν_w는 해수의 동점성계수($m^2/\sec$), σ는 물과 기름의 계면장력($kg/\sec^2$), K_p는 확장계수($m^2/\sec$), 그리고 N는 Lagrangian 입자 하나가 나타내는 기름의 양을 각각 나타낸다.

3.3 유출유의 풍화

해양에 유출된 기름은 시간이 경과함에 따라 물리, 화학 및 생물학적 변환과정을 거치게 된다. 이러한 변환과정을 총칭하여 풍화(weathering)라 하며, 이에는 증발(evaporation), 수직분산(vertical dispersion), 유화(emulsification), 용해(dissolution), 생물분해(biodegradation) 및 광산화(photo-oxidation) 등의 여러 과정이 있다.

풍화의 각 과정들은 서로가 밀접하게 영향을 주고 받기 때문에 이를 정확하게 정량화하는 것은 매우 어렵다. 비록 모든 과정에 대한 정확한 수식을 반영한다 할지라도, 각종 파라메타의 변동이 정확하게 예측되어야 하기 때문에 사실상 이를 엄밀히 고려하는 것은 오히려 불합리할 수도 있다. 따라서 본 연구에서는 풍화과정 중에서도 그 영향이 가장 크고 유출초기에 집중적으로 발생하는 증발과정에 대해서만 고려하도록 하였다. 증발과정을 다음과 같이 1차 반응식으로 나타내었다.

$$\frac{dC}{dt} = -K_e \cdot C \quad (3.7)$$

여기서, C는 단위면적당 기름의 양이고, K_e는 증발계수(evaporation coefficient)로써 증발에 의한 기름의 손실이 크면 클 수록 큰 값을 가진다.

모델내에서는 식 (3.7)을 다음과 같이 유한차분화하여 계산하였다.

$$P^{(t+\Delta t)} = P^{(t)}(1 - K_e \Delta t) \quad (3.8)$$

여기서, $P^{(t+\Delta t)}$ 및 $P^{(t)}$는 각각 $t+\Delta t$ 및 t시간에 있어서 입자의 갯수를 나타낸다. 시뮬레이션시 입자의 증발여부는 0과 1사이의 난수(random number)를 발생시켜 그 값이 0과 $K_e \Delta t$ 사이의 값이면 증발한 것으로 취급하고, 그 외의 값이면 계속 부유하는 것으로 처리한다.

4. 모델의 적용 및 계산결과

4.1 실시간 조류

Fig. 2와 3은 각각 실시간 조류의 계산결과인데, 창조류인 1995년 10월 19일 07:00시와 낙조류인 동일 14:00시에 있어서의 유속분포를 각각 벡

터도로 나타낸 것이다. 유속은 외해에서 창조류 최대유속이 80 *cm/sec*, 낙조류 최대유속이 65 *cm/sec*로 각각 나타났다. 실시간 조석의 계산결과와 관련된 좀 더 상세한 내용은 참고문헌[7]에 수록되어 있으므로 여기서는 생략한다.

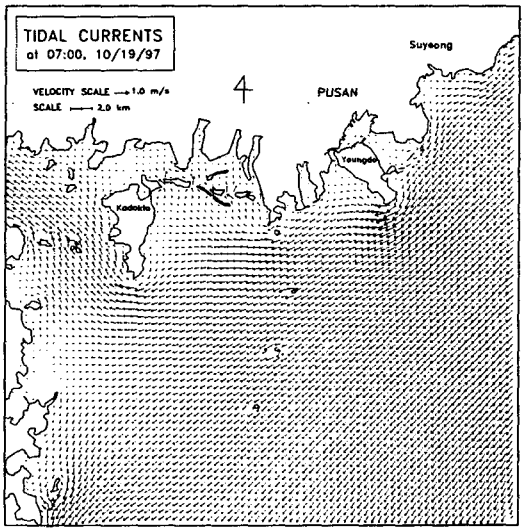

Fig. 2 Tidal currents at 7 AM on 10/19/1997.

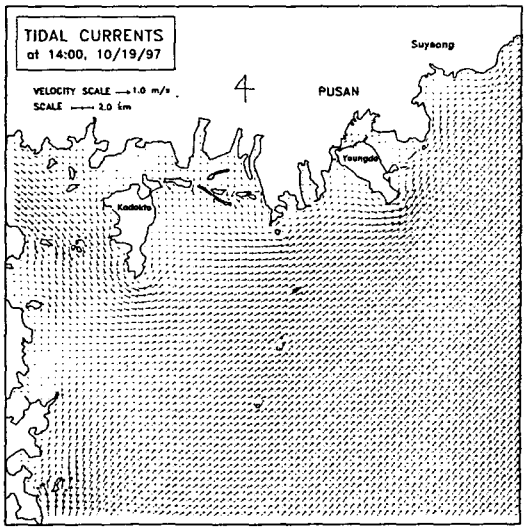

Fig. 3 Tidal currents at 2 PM on 10/19/1997.

4.2 유출유 확산모델

1995년 9월 21일 오전 4시 55분 벙커 C유 2,870톤을 적재하고 울산항을 출항하여 광양항으로 항해중이던 울산선적 유일해운 소속 유조선 제1유일호(총톤수 1,591톤)가 운항부주의로 인해 부산시 사하구 다대동 남형제도 근처 암초에 좌초되었다. 이 사고로 제1유일호 선수쪽 아래 부분에 위치한 화물유 탱크가 찢어지면서 적재중이던 벙커 C유의 일부가 유출되기 시작하였다. 관계기관에서는 좌초 선박이 완파되어 적재중인 기름이 모두 해양으로 유출될 것을 우려하여, 동 선박을 인근 안전지대로 예인하기로 결정하고 예인하던 도중, 동일 오후 4시 20분경 인근해상인 북형제도 남방 4마일 지점에서 완전히 침몰되었다. 그 후에도 침몰된 선박에서는 계속적으로 기름이 유출되었는데, 시간이 지나면서 유출량은 점차 감소되었지만 사고후 10여일이 지난 10월 2일까지도 상당

Table 1 Input data for oil spill model.

Parameters	Input values
grid size	$\Delta x = \Delta y = 312.7$ m
time step	$\Delta t = 10$ min, $\delta t_k = 1$ min.
water depth	chart datum + MSL
diffusion coefficient	$K_x = K_y = 10\ m^2/\sec$
evaporation coefficient	$K_e = 1.65\times10^{-6}\ \sec^{-1}$
spreading coefficient	$K_p = 0.124\ m^2/\sec$
wind	refer to Fig. 4

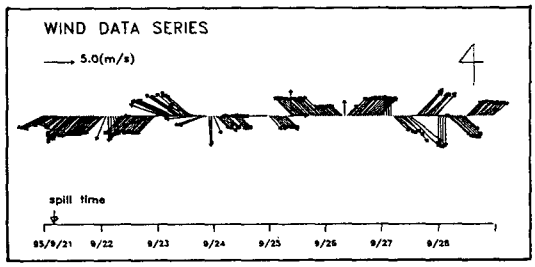

Fig. 4 Observed wind data series.

한 양의 기름이 유출된 것으로 관측되었다. 그리고 이 사고로 인해 유출된 기름의 총량은 2,870 *kl*로 추정되었다.

본 연구에서 개발된 유출유 확산모델의 적용성을 검토하기 위하여 제1유일호 유유출사고를 재현하여 보았다. 유출유 확산모델의 적용을 위해 채택된 기본변수들은 Table 1과 같다. 그리고 Fig. 4는 사고당시의 매 시간별 바람자료로서 한국해양대학교 실습선 '한바다호'에서 관측된 것이다.

Fig. 5, 6, 7, 8, 9 및 10은 각각 사고당시의 현장 관측자료(부산해양경찰서의 항공관측 결과를 참고하여 다시 작성함)와 유출유 확산모델의 계산

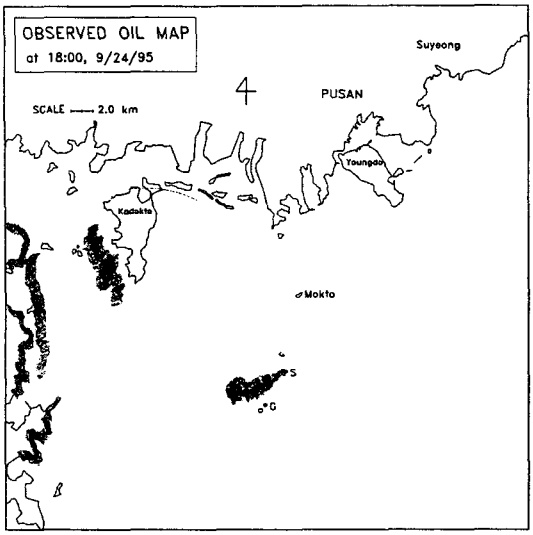

Fig. 5 Observed oil map at 18:00, 9/24/95.

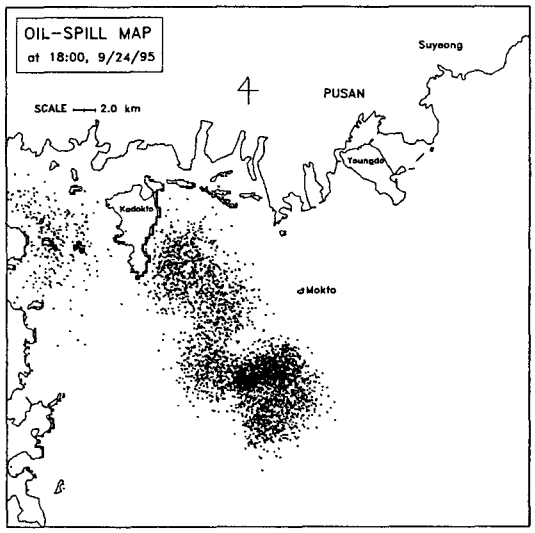

Fig. 6 Computed oil map at 18:00, 9/24/95.

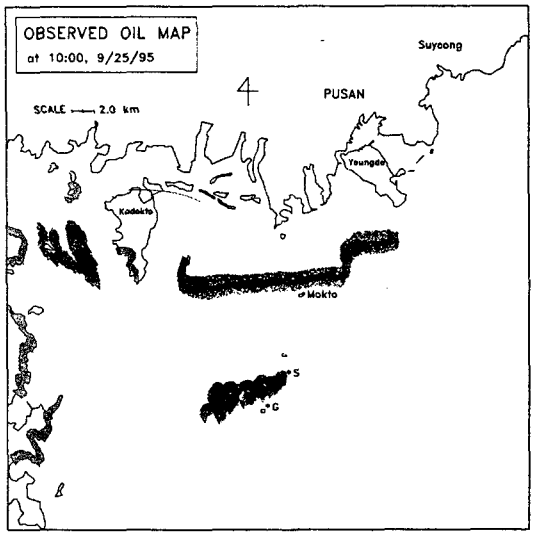

Fig. 7 Observed oil map at 10:00, 9/25/95.

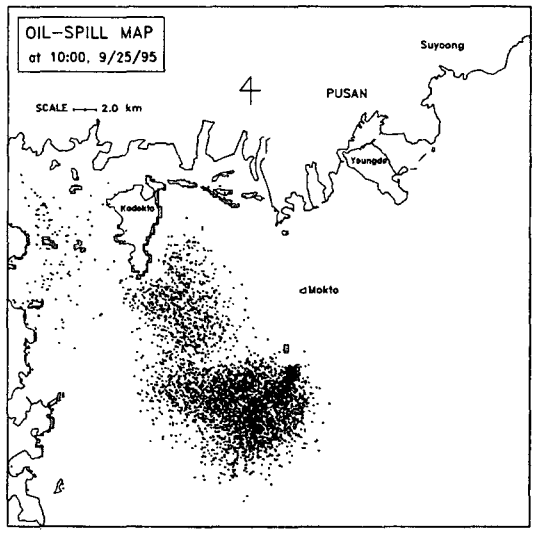

Fig. 8 Computed oil map at 10:00, 9/25/95.

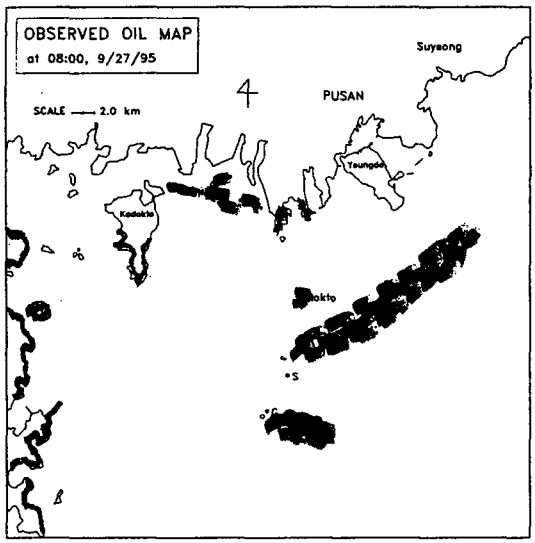

Fig. 9 Observed oil map at 08:00, 9/27/95.

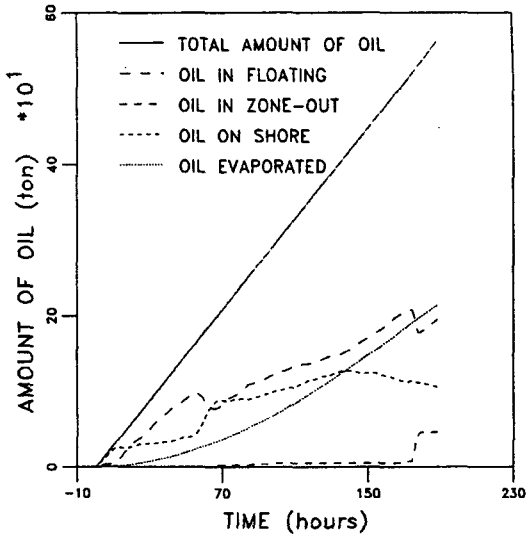

Fig. 11 Status of the spilled oil.

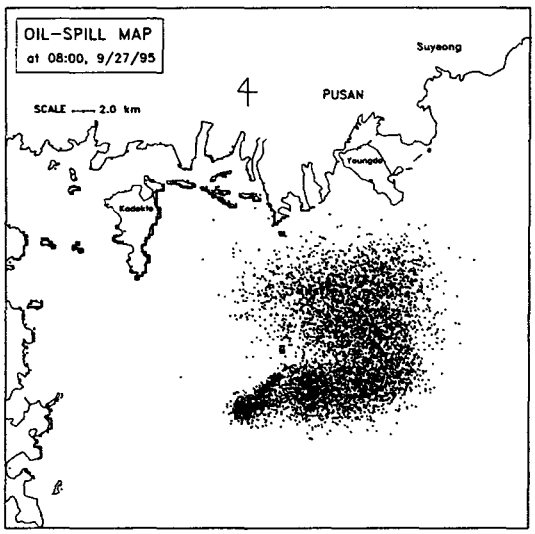

Fig. 10 Computed oil map at 08:00, 9/27/95.

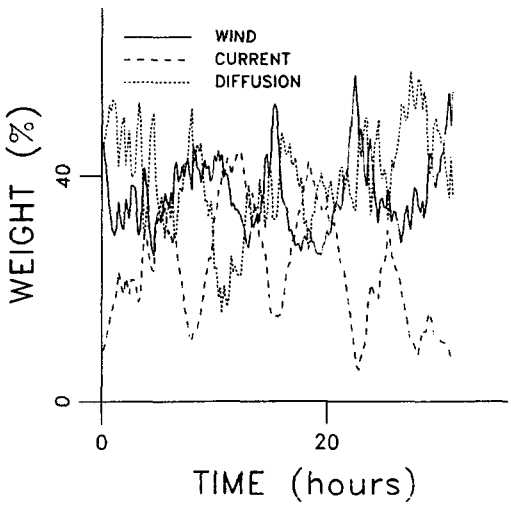

Fig. 12 Weighting curves of effective components to the dispersion of oil.

결과를 비교하여 나타낸 것이다. Fig. 5 와 6은 각각 9월 24일 오후 6시에 있어서 관측결과 및 계산결과를 보여주고 있는데, 거제도 동쪽 해안 및 가덕수도 내측의 유출유 분포는 양자가 매우 유사하게 나타나고 있는 반면, 가덕도 동쪽 해상의 유출유 분포는 상당한 차이를 보여주고 있다. 이는 유출후에 행해진 집중적인 방제작업에 따른 결과로 추정된다.

Fig. 7과 8은 각각 9월 25일 오전 10시에 있어서 관측결과 및 계산결과를 보여주고 있는데, 거제도 동쪽 해안 및 가덕수도 내측의 유출유 분포

는 양자가 매우 유사하게 나타나고 있으나, 가덕도 동쪽 해상의 유출유 분포는 약간 차이를 보이고 있다. Fig. 9와 10은 각각 9월 26일 오후 1시에 있어서 관측결과 및 계산결과를 보여주고 있는데, 거제도 동쪽 해안 및 가덕수도 내측의 유출유 분포는 대죽도 주변의 부유중인 유출유를 제외하면 매우 유사하게 나타나고 있으며, 낙동포와 목도 주변해역 및 유출지점 주변해역도 비교적 유사한 분포를 나타냄을 알 수 있다. 이러한 결과는 비록 부분적으로 차이는 있으나 전반적인 유출유의 분포형태에 있어서는 매우 유사하게 재현되었음을 알수 있다.

본 연구에서는 어느 정도 오차가 있을 것으로 예상되는 바람자료를 사용하였고, 또 관측자료는 사고직후부터 시작된 방제작업으로 인해 상당한 양의 기름이 제거되었음을 감안할 때, 계산결과와 관측결과 사이에 어느 정도의 차이는 불가피하다고 여겨진다. 그럼에도 불구하고 유출유 확산모델의 계산결과는 사고 당시의 관측자료와 비교하여 매우 유사한 것으로 보아 좀 더 신빙성이 있는 자료를 사용한다면 좋은 결과가 기대된다. Fig. 11은 시간의 경과에 따른 유출유의 상태를 나타내고 있는데, 유출 1주일후의 상태를 보면 계속해서 부유중인 유출유가 40%, 증발된 유출유가 36%, 육지접안된 유출유가 23%, 그리고 계산영역 밖으로 벗어난 유출유가 1%인 것으로 나타나고 있다.

Fig. 12는 바람, 유속 및 난류확산 등의 각 성분이 유출유의 확산에 기여하는 정도를 백분율로써 나타낸 것이다. 이는 유출 직후부터 30시간 동안 특정입자의 움직임을 관찰하여 얻어진 것인데, 이를 통해 각 성분이 유출유의 이동에 기여하는 정도를 정량적으로 평가할 수 있다. 이에 따르면 난류확산과 바람이 유속에 비해 크게 작용함을 알 수 있다. 난류확산 성분의 경우 방향성이 없이 불규칙하게 이동하는 것을 감안하면, 유출유의 이동에 바람의 영향이 가장 크게 작용함을 알 수 있다. 시간에 따라 변화하는 값을 평균한 결과, 바람이 37.0 %, 난류확산이 39.5%, 그리고 유속이 23.5%로 각각 나타났다.

5. 결 론

본 연구에서는 해양 유유출사고시 유출된 기름의 시간에 따른 이동 및 확산 양상을 예측하는데 사용할 수 있는 현장방제용 유출유 확산모델을 개발하였다. 모델은 이미 그 효용성이 입증된 라그랑지안 입자추적법(Lagrangian particle-tracking method)을 채택하였으며, 입자의 이동은 조류와 취송류에 의해 그리고 입자의 확산은 난류확산(turbulent diffusion)과 기름 자체의 물리적 퍼짐(physical spreading)에 의해 각각 발생되도록 하였다. 취송류는 일반적으로 인정되고 있는 3% 규칙을 적용하였으며, 퍼짐은 Ahlstrom(1975)이 제시한 알고리즘을 채택하였다. 그리고 유출유의 풍화작용은 그 비중이 가장 큰 증발과정만을 고려하되 1차반응을 하는 것으로 하였다. 모델의 중요한 입력자료인 실시간 조류는 2차원 조석수치모델(two-dimensional numerical tidal model)과 조석예보모델(tide prediction model)을 이용하여 계산하였으며, 또 하나의 입력자료인 바람은 매 시간의 현장관측자료를 이용하였다. 모델의 적용성을 검토하기 위해 1995년 제1유일호 유유출사고가 발생했던 부산 외해지역에 적용하였으며, 결과는 전반적으로 잘 일치하였다.

본 연구에서는 어느 정도 오차가 있을 것으로 예상되는 바람자료를 사용하였으며, 또 현장관측자료는 사고직후부터 시작된 방제작업으로 인해 상당한 양의 기름이 제거되었음을 감안할 때 계산결과와 관측결과 사이에 어느 정도의 차이는 불가피할 것이다. 그럼에도 불구하고 유출유 확산모델의 계산결과는 사고 당시의 관측자료와 비교하여 매우 유사한 것으로 보아 좀 더 신빙성있는 자료를 사용한다면 더 좋은 결과를 기대할 수 있을 것이다.

끝으로 바람자료는 유출유의 확산에 큰 영향을 미치므로 이를 정확하게 산정할 수 있는 도구가 필요하다. 대부분의 경우 관측자료는 특정지역에 있어서 고정점의 자료이므로 이를 그대로 사용하게 되면 상당한 오차가 포함될 수 밖에 없다. 특히 지형이 복잡한 연안역의 경우 이러한 경향이

더 심하다. 따라서 고정점에 있어서의 시간별 관측자료를 토대로 지형의 영향을 고려한 대상지역의 시·공간적 바람분포를 예측할 수 있는 바람모델의 개발이 요구된다. 이는 추후 연구과제로 남기도록 한다.

참고문헌

[1] J. J. Leendertse, 1967. "Aspects of a computational model for long-period water-wave propagation", Report RM-5294-PR, The Rand Corporation, Santa Monica, California, 165 pp.

[2] R. W. Lardner, M. S. Belen, and H. M. Cekirge, 1982. "Finite Difference Model for Tidal Flows in The Arabian Gulf", Comp. & Maths. with Appls. Vol. 8. No. 6, p. 425~444.

[3] Foreman, M. G. G., 1977. "Manual for Tidal Heights Analysis and Prediction", Pacific Marine Science Report 77-10, Institute of Ocean Sciences, Sidney, B. C., Canada, 97 pp.

[4] Foreman, M. G. G., 1978. "Manual for Tidal Currents Analysis and Prediction", Pacific Marine Science Report 78-6, Institute of Ocean Sciences, Sidney, B. C., Canada, 70 pp.

[5] Doodson, A. T., 1921. "The Harmonic Development of the Tide-Generating Potential", Philosophical Transation Royal Society-London, A, 100: p. 305~329.

[6] A. H. Al-Rabeh, H. M. Cekirge, and N. Gunay, 1989. "A Stochastic Simulation Model of Oil Spill Fate and Transport", Appl. Math. Modelling, Vol. 13, p. 322~329.

[7] S. Venkatesh, 1987. "The Oil Spill Behavior Model of the Canadian Atmospheric Environment Service, Part 1; Theory and Model Evaluation", Atmosphere-Ocean 26(1), p. 93~108.

[8] S. Ahlstrom, 1975. "A Mathematical Model for Predicting the Transport of Oil Slick in Waters", Battele Pacific NW Lab., Richland, Wash., 93 pp.

[9] 정 연철, 1997. "조석예보시스템의 구축 및 응용", 해양안전학회지, 제4권 제1호, p. 31~40.