

論 文

라그랑지안 입자추적법에 의한 유출유 확산모델링

정 언 철*

The Application of Lagrangian Particle-Tracking Method to Modelling of Oil-Spill Dispersion

Yun-Chul Jung

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서론

2. 2차원 조석수치모델

3. 유출유 확산모델

3.1 라그랑지안 입자추적법

3.2 임의행보이론

3.3 유출유의 풍화

4. 현장적용 및 결과

4.1 조석수치모델

4.2 유출유 확산모델

5. 결론

참고문헌

Abstract

To predict the oil-spill dispersion in marine waters, the oil-spill dispersion model based on Lagrangian particle-tracking method was developed and applied to Kwangyang and Jinju Bay. The tidal current movements to be required as input data of the oil-spill dispersion model were obtained by a two-dimensional numerical tidal model. Evaluation of tidal current movements using mean tide was successful. Modelling results were compared with the field data obtained at spill site. There were some discrepancies between modelling results and field data. However, the general pattern of modelling results was similar to that of field data. Provided the real-time tidal currents and more accurate wind data are supported, more favorable results can be obtained.

* 정희원, 한국해양대학교 운항시스템공학부 교수

1. 서 론

유조선에 의한 대량 유유출(oil-spill) 사고는 국가적으로 재산상의 피해가 엄청난 것은 물론, 해양 환경에 치명적인 악영향을 미치기 때문에 체계적인 대응이 절실히 요구되고 있다. 지난 95년 한해는 특별히 대형 유유출 사고가 연속적으로 발생하므로써 국민들로 하여금 불의의 유조선 사고에 의한 해양환경의 파괴를 생생하게 일깨워 준 바가 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 있다. 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

광양만 유유출 사고에 적용하였다. 유출유 확산모델의 입력자료로서 요구되는 해수유동자료는 2차원 조석수치모델의 계산결과를 이용하였으며, 유출유 확산모델의 계산결과는 사고당시의 현장 관측자료와 비교, 검토되었다.

2. 2차원 조석수치모델

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

연속방정식

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

운동량방정식

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \xi}{\partial x} \\ + U \sqrt{\frac{U^2 + V^2}{C^2(\xi+h)}} = 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \xi}{\partial y} \\ + V \sqrt{\frac{U^2 + V^2}{C^2(\xi+h)}} = 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

여기서, U, V는 각각 수심 평균한 x, y방향 유속, f는 Coriolis 계수 ($f=2\omega \sin \varphi$, φ 는 위도), g는 중력가속도, ξ 는 수면변위, h는 평균수면하 수심, 그리고 C는 Chezy 마찰계수이다.

상기 지배방정식의 컴퓨터 수치계산을 위해서 Leendertse[1]에 의해 조류·확산계산에 응용되어, 현재 널리 이용되고 있는 ADI법(alternating direction implicit method)을 사용하였다. ADI법은 양해법(explicit method)과 음해법(implicit method)을 동시에 사용하여 계산하는 방식으로, 해의 수렴성과

계산시간의 경제성 등에서 매우 뛰어난 방법이다. 자세한 수치해석기법은 여러 문헌[1][2][3]에 이미 소개되어 있으므로 여기서는 생략한다.

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 이류유속, ∇ 는 gradient 연산자, D는 확산계수, 그리고 S는 생성 및 소멸항이다.

해양에 유출된 기름의 이류 및 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 분포 밀도는 해수표면에서 유출유의 농도로 환산된다.

이러한 방법은 기존의 Eulerian 방법에 비해 수치 안정성(numerical stability)이 뛰어나고 계산시간이 절약되며 생성과 소멸(유출유의 증발, 육지 접안 등)을 고려하기 쉬운 장점을 지니고 있다[4]. 그러나 표류자들의 수가 증가할 수록 해상도는 증가하지만 컴퓨터 기억용량의 부족과 계산시간이 오래 걸리는 단점이 있다.

3.1 라그랑지안 입자추적법

식 (3-1)을 라그랑지안 방법으로 나타내면 다음과 같다[5][6].

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

여기서, S_i^n 는 n번째 시간부터 n+1번째 시간까지 단위시간(Δt) 동안에 i번째 표류자가 이동한

총 거리이고, $(V_w^n + V_i^n) \Delta t$ 는 바람과 유속에 의해 이동된 거리이며, 그리고 d_i^n 는 확산(diffusion) 및 확장(spreading) 의해 이동된 거리이다. V_w^n 는 $0.03 \times W_{10}$ 으로 계산되며, W_{10} 은 수면상 10미터 고도에서의 바람의 크기를 나타낸다. V_i^n 는 i번째 표류자가 위치한 곳의 유속으로서 2차원 조석수치모델의 결과를 이용한다. d_i^n 는 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. 또, 표류자가 해안에 도달하면 일시적으로 해안에 부착되었다가 일정 시간이 경과한 후 다시 움직이는 것으로 가정한다.

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[5].

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

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

여기서, R_1, R_2 는 0과 1사이의 난수(random number)이며, K_x, K_y 는 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_y 에 더해주므로써 고려할 수 있다[7].

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

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

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

$K_b = 0.0$: 경과시간 > T_{\max}

여기서, V 는 총유출량(m^3), ρ_w 는 해수밀도 (kg/m^3), ν_w 는 해수의 동점성계수(m^2/sec), σ 는 물과 기름의 계면장력(kg/sec^2), K_b 는 확장계수(m^2/sec), 그리고 N 는 Lagrangian 입자 하나가 나타내는 기름의 양을 각각 나타낸다.

3.3 유출유의 풍화

해양에 유출된 기름은 시간이 경과함에 따라서 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), 그리고 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 증발 과정에 대해서만 고려하도록 하였다. 증발과정을 다음과 같이 1차반응식으로 나타내었다[6].

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

여기서, C 는 단위면적당 기름의 양이고, K_e 는 증발계수(evaporation coefficient)로서 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 t 시간에 있어서 입자의 갯수를 나타낸다. 시뮬레이션시 입자의 증발여부는 0과 1사이의 난수를 발생시켜 그 값이 0과 $K_e \Delta t$ 사이의 값이면 증발한 것으로 취급하고, 그 이외의 값이면 계속 부유하는 것으로 처리한다.

4. 모델의 적용 및 결과

4.1 2차원 조석수치모델

본 연구에서는 2차원 조석수치모델을 사용하여 평균조석(M_2 분조)의 상황만을 재현하였으며, Fig. 1과 같이 돌산도, 두미도, 미륵도를 잇는 선을 개방경계로 여수만, 광양만 및 진주만을 포함하는 내측 해역을 계산영역으로 설정하였다. 하천을 통한 담수유입은 고려하지 않았으며, 모델구성을 위해 채택된 기본 변수들은 Table 1과 같다.

모델의 적용성을 검토하기 위하여 관측조류와 계산조류를 조류타원도로서 Fig. 2와 Fig. 3에 각각 제시하였다. 관측자료는 1982년 4월 15일부터 5월 14일까지 1개월동안 Fig. 1의 정점 C1과 C2에서 측정된 자료이며, 이를 조화분해하여 M_2 조 성분을 취한 것이다[9].

Table 1. Input Data for 2-dimensional Numerical Tidal Model

Parameters	Input values
Grid Size	$\Delta x = \Delta y = 250m$
Total Number of Grids	55,084(293 × 188)
Time Step	10.35sec
Water Depth	Chart Datum + MSL
Coriolis Coefficient	0.000083
Chezy Coefficient	$(1/0.026) * h^{1/6}$
Boundary Condition[8]	Left : 0.75m, 247° Right : 0.95m, 255°

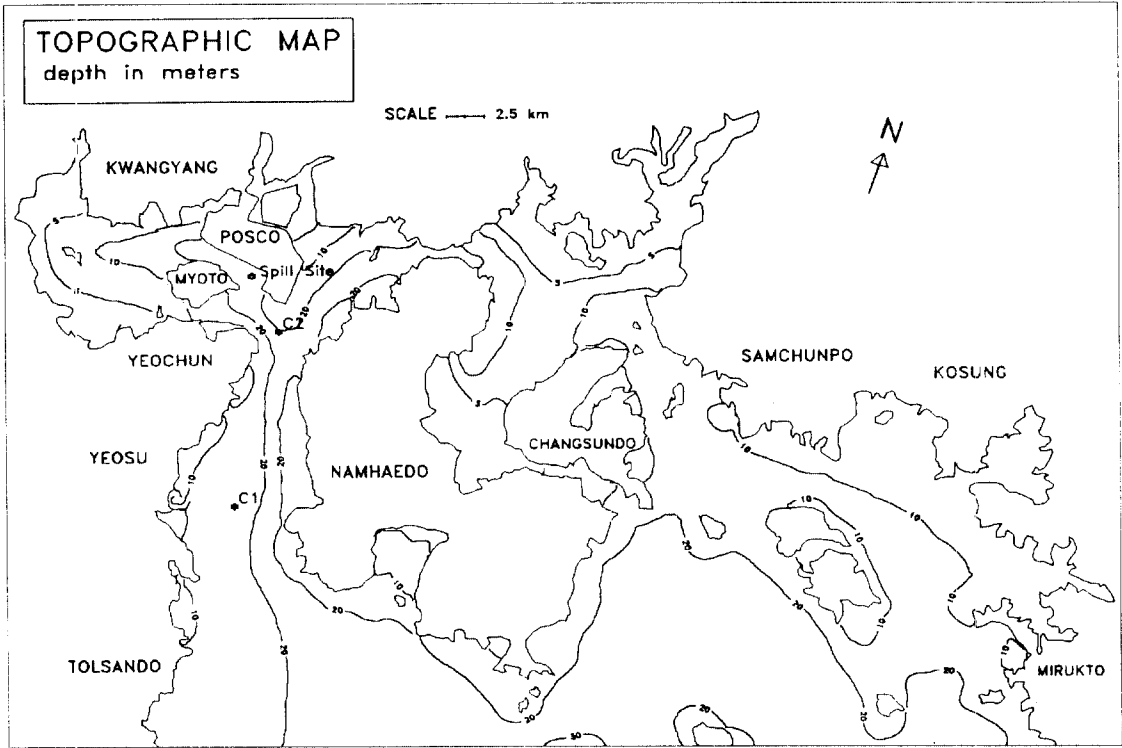


Fig. 1 Topographic map of the study area.

정점 C1의 경우 계산결과와 관측결과가 거의 유사하게 나타났으나, 정점 C2의 경우 주축방향이

약간 다르게 나타났는데, 이는 이 지점의 흐름이 두갈래로 나누어지므로 인해 약간의 위치변화에 대해서도 주축방향의 편차가 크기 때문으로 판단된다. 모델상의 계산위치와 현장의 관측위치가 서로 정확하게 일치될 수 없음을 감안할 때 이는 매우 만족스런 결과로 여겨진다.

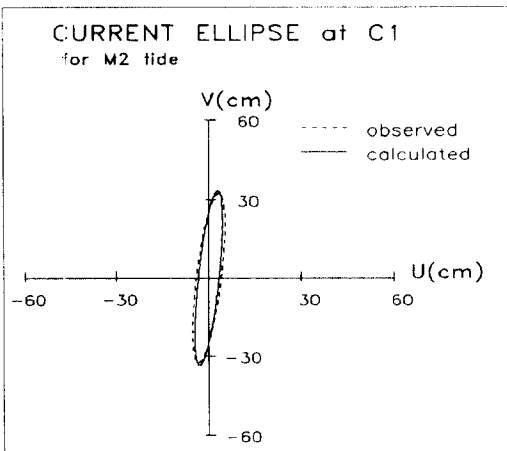


Fig. 2 Evaluation of the tidal current ellipses at C1 point

Fig. 4는 대상해역의 조류타원도로서 계산유속의 동향 및 북향성분을 Fourier분해하여 조화상수를 구한 후 합성하여 제시한 것이다. 장축의 방향은 조석의 파급방향을 의미하며, 반장축은 최강유속, 반단축은 최저유속을 각각 나타낸다. 이 그림을 보면 가장 빠른 유속은 삼천포와 창선도 사이의 수로로서 80~90 cm/sec 정도로 나타나고 있고, 노량수도의 유속은 60~70 cm/sec 정도로 각각 나타나고 있다. 그리고 대부분의 지역에서 직선적 왕복흐름을 나타내고 있으나, 진주만과 광양만 입구부근에서 회전성 흐름을 나타내고 있다.

4.2 유출유 확산모델

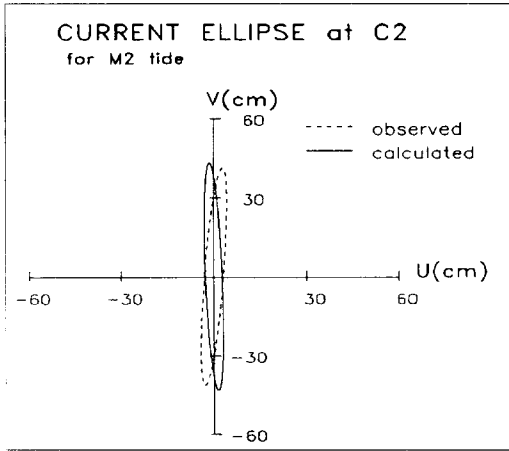


Fig. 3 Evaluation of the tidal current ellipses at C2 point.

1993년 9월 27일 19시 35분 광양만의 묘도 동방 항로상에서 총톤수 8,959톤의 파나마국적 화물선 Pyzia Sun호와 총톤수 528톤의 유류운반 바지선 제5금동호가 서로 충돌하여 벙커 C유 약 1,000kl가 유출되는 사고가 발생하였다(Fig. 1에 도시된 Spill Site 참조). 본 연구에서는 개발된 유출유 확산모델을 사용하여 사고 당시의 상황을 재현해 보았다.

유출유 확산모델의 적용을 위해 채택된 기본 변수들은 Table 2와 같다. 이들 변수중에서 확산계수는 난류확산과 유속의 기율기에 의한 전단확산을 고려한 것으로서, 시간규모에 따라 통상 1~100 m^2/sec 정도의 값이 채택되고 있으나, 본 연구에서는 선행 연구자들의 연구결과를 참고로 하여 15 m^2/sec 의 값을 채택하였다[4][5][6][8].

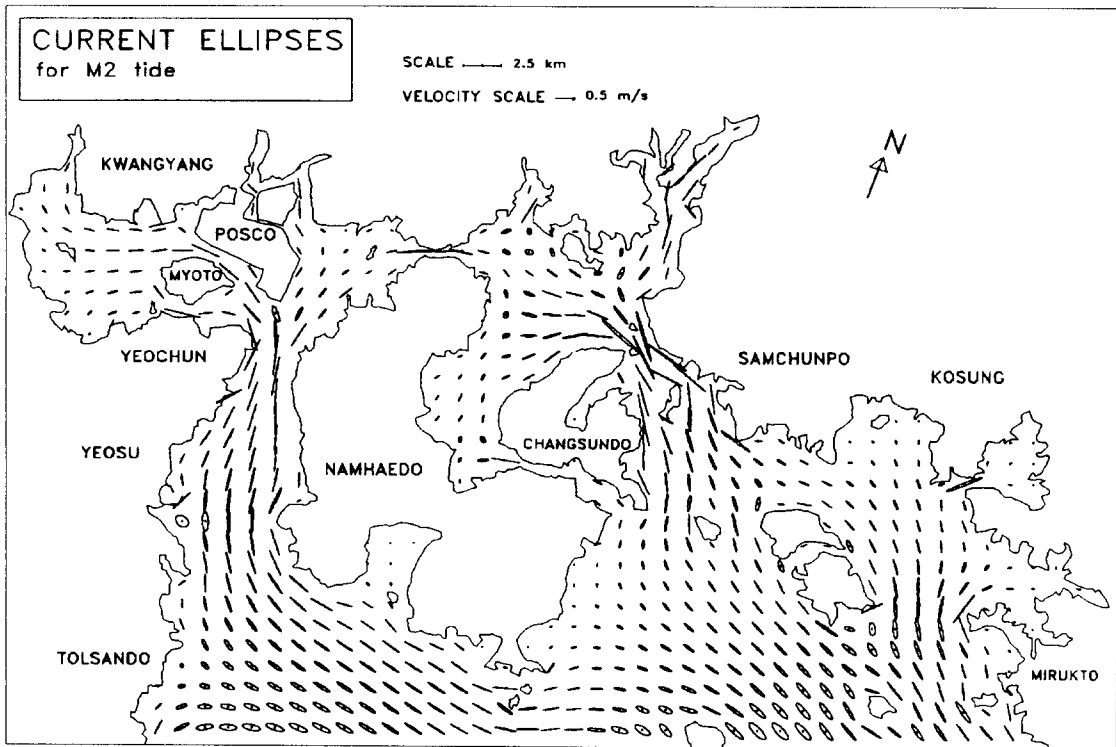


Fig. 4 Tidal current ellipses of the study area

Table 2. Input Data for Oil-Spill Dispersion Model

Parameters	Input values
Grid Size	$\Delta x = \Delta y = 250m$
Time Step	10min.
Water depth	Chart Datum + MSL
Diffusion Coefficient	15 m^2/sec
Evaporation Coefficient	0.1428 day^{-1}
Wind	Refer to Fig. 5

증발계수는 기름의 종류 및 기상조건(풍속, 기온 등)에 따라 달라지는데, 유출유가 벙커 C유인 점을 고려하여 지수배반감기(e-folding time)을 7일로 하는 $0.1428 day^{-1}$ 의 값을 주었다.

Fig. 5는 사고당시의 매 시간별 바람자료로서 여수기상관측소의 관측자료를 토대로 작성된 것이다. Fig. 6은 해양경찰청에서 작성한 사고 당시의 유출유 확산구역으로서[10], 1번 구역은 사고 1일 후, 2번 구역은 사고 2일 후, 그리고 3번 구역은 사고 3일 후의 확산구역을 각각 나타낸다.

Fig. 7, 8, 9, 10은 유출지점에서 매 시간간격당

20개의 입자를 4일동안 연속방출시켰을 때의 계산 결과로서, 각각 1일, 2일, 3일, 그리고 4일후의 결과를 나타낸다. 1일후의 확산범위를 보면 남쪽으로 여수해만 일부와 북동쪽으로 대도 남방까지 확산되고 있는 것을 알 수 있다. 계속해서 2일후에는 묘도주변과 대도주변에 많은 기름이 분포하고 있고 북동쪽으로는 노량수도 부근까지 확산되고 있음을 알 수 있다. 3일후에는 남쪽으로 남해도를 따라 여수해만까지 그리고 북동쪽으로는 일부가 노량수도를 통해 진주만으로 확산되고 있음을 알 수 있다. 그리고 4일후에는 남쪽으로 남해도를 따라 여수해만 입구까지 그리고 북동쪽으로는 약간의 기름이 창선도까지 확산되는 것을 알 수 있다. 이들 결과는 관측자료와 비교할 때 어느 정도 차이가 있지만 확산범위의 경우 상당부분 일치하는 것을 알 수 있다. 계산결과가 이처럼 오차를 나타낸 것은 평균조선에 의한 해수유동자료와 상당한 오차가 있을 것으로 예상되는 바람자료를 각각 사용했기 때문으로 판단된다. 특히, 바람의 경우 기름의 확산에 큰 영향을 미치는데, 사용된 자료가 사고지역으로부터 상당한 거리 떨어진 여수시에서 관측된 자료이고, 또 공간적으로 일정한 분포를 하는 것으로 가정했기 때문이다.

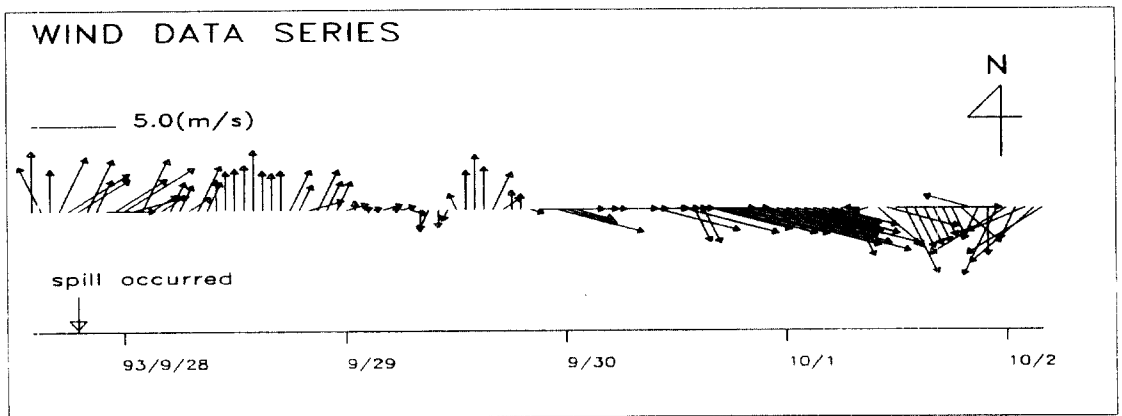


Fig. 5 Observed wind data series

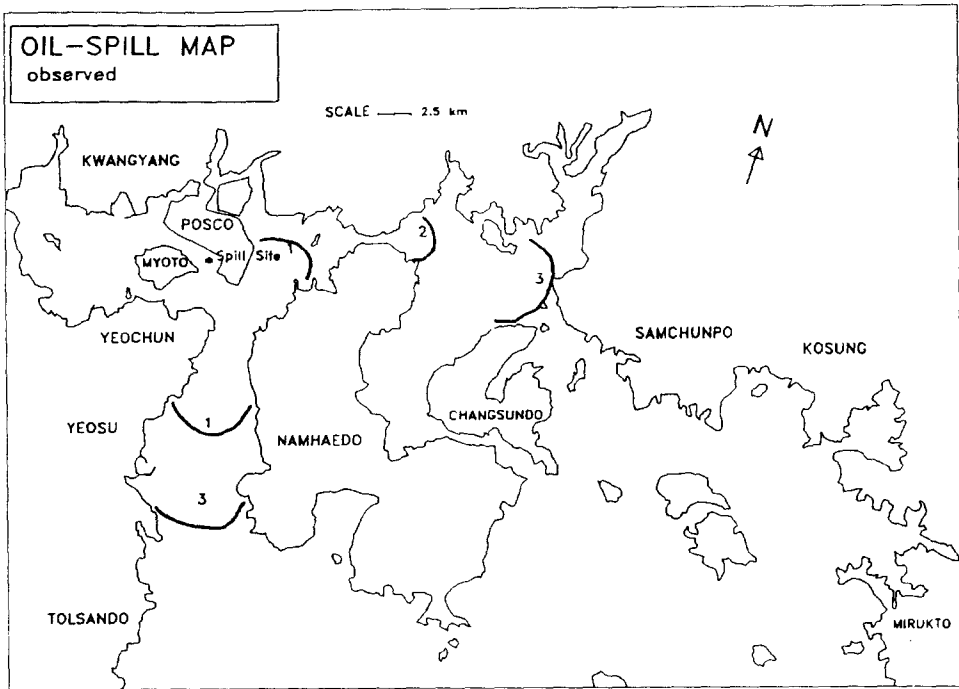


Fig. 6 Observed oil-spill map(from Maritime Police[10]).

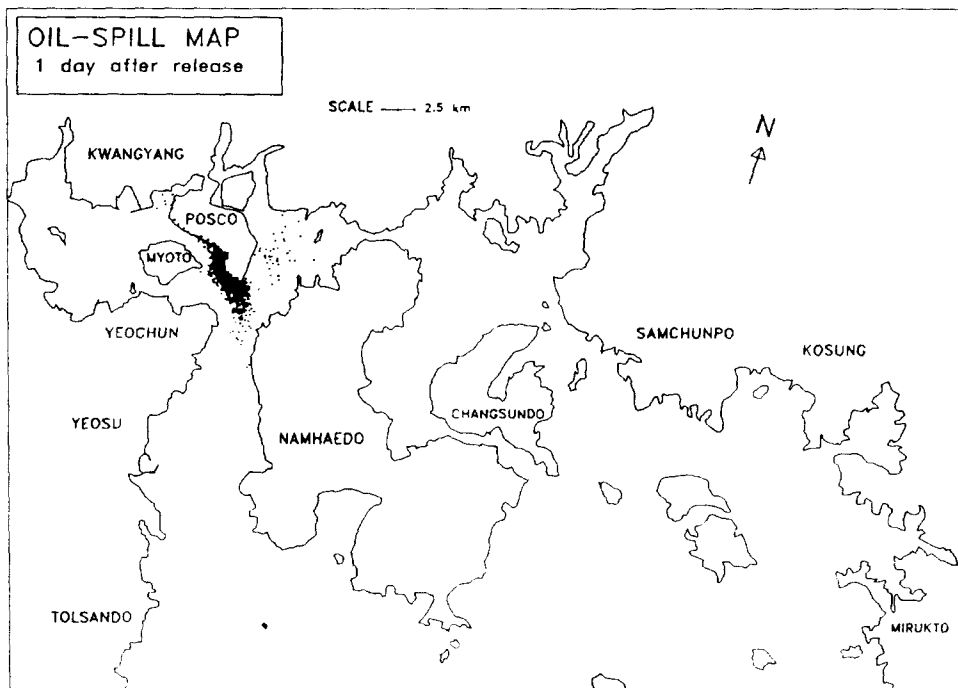


Fig. 7 Oil-spill map at 1 day after release.

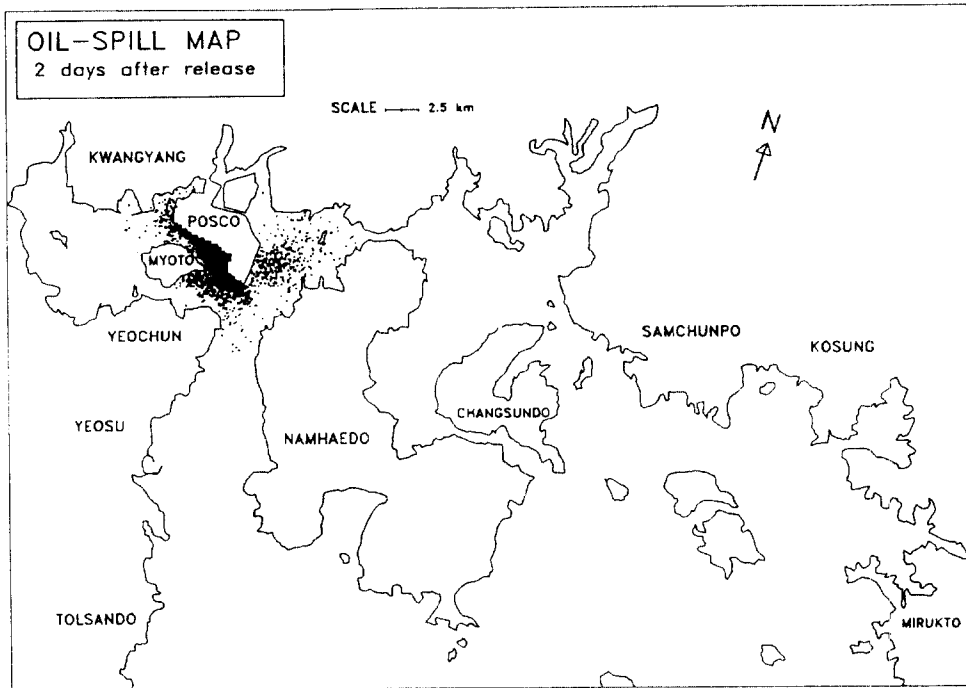


Fig. 8 Oil-spill map at 2 days after release.

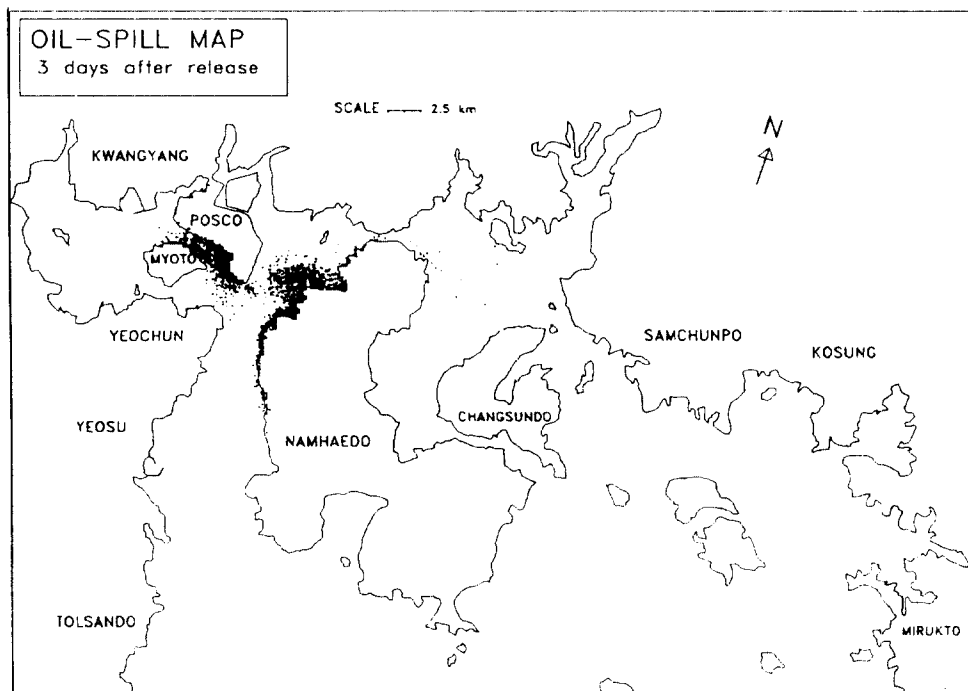


Fig. 9 Oil-spill map at 3 days after release.

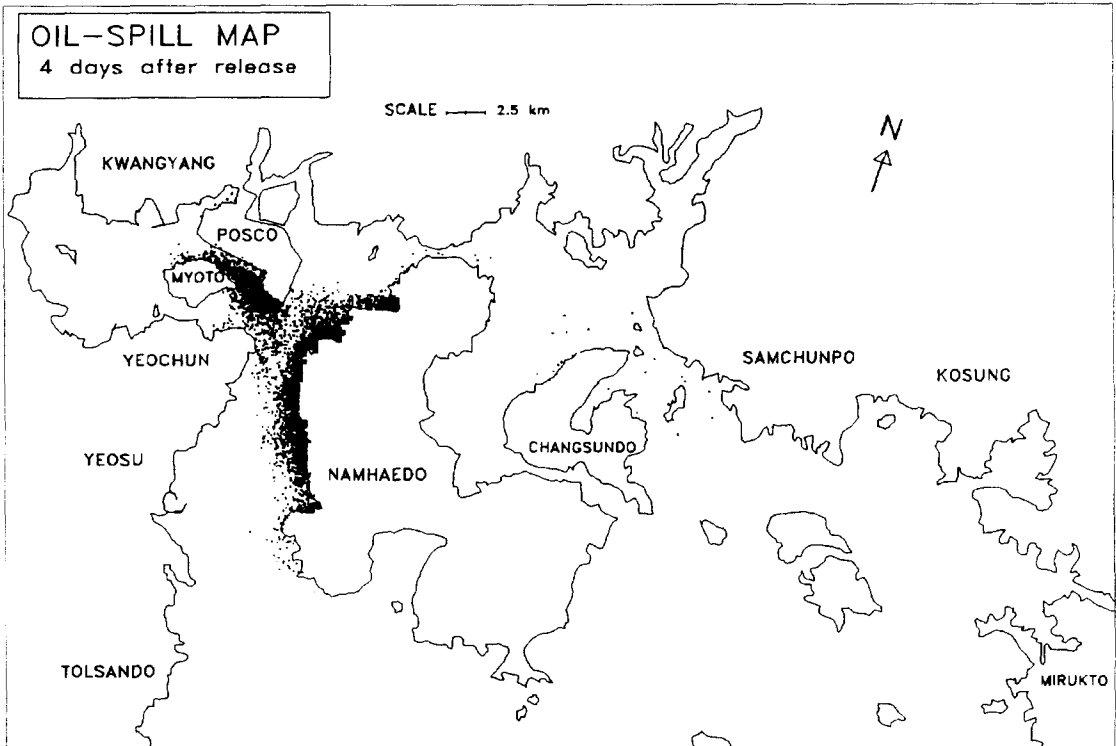


Fig. 10 Oil-spill map at 4 days after release.

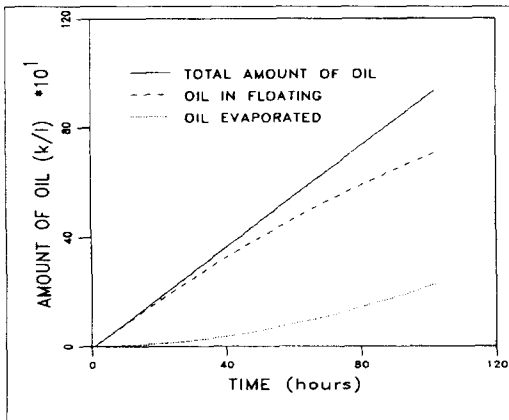


Fig. 11 Evaporation process for spilled oil.

마지막으로 Fig. 11은 시간에 따른 유출유의 증발과정을 나타낸 것으로, 이에 의하면 유출 4일후 약 24%의 기름이 증발된 것으로 나타났다.

5. 결론

해상 유출 사고시 유출유의 이동 및 확산과정을 효과적으로 예측할 수 있는 라그랑지안 입자추적법(Lagrangian particle-tracking method)에 기초한 유출유 확산모델을 개발하였으며, 모델의 유용성을 검토하기 위하여 이를 광양만 유출 사고에 적용하였다. 유출유 확산모델의 입력자료로서 요구되는 해수유동자료는 평균조석에 의한 2차원 조석수치모델의 계산결과를 이용하였으며, 이는 매우 만족스러웠다. 유출유 확산모델의 계산결과는 사고당시의 현장 관측자료와 비교되었다.

본 연구에서 유출유 확산모델의 계산결과는 평균조석에 의한 유동자료와 오차가 상당할 것으로 예상되는 바람자료를 이용하였기 때문에 실제상황과는 어느 정도 차이가 있을 수밖에 없다. 또한 관측자료는 사고직후부터 시작된 방제작업으로 상당

한 양의 기름이 제거되어 이를 고려하지 않은 계산결과와는 차이가 있을 것이다. 그럼에도 불구하고 유출유 확산모델의 계산결과는 사고 당시의 관측자료와 비교하여 확산범위에서는 유사한 것으로 보아 좀 더 신빙성있는 입력자료를 사용한다면 좋은 결과를 기대할 수 있을 것이다.

본 연구와 관련된 추후의 연구과제는 다음과 같다. 첫째, 유출유 확산모델의 기초자료가 되는 해수유동자료는 평균조석이 아닌 모든 분조(tidal constituents)를 고려한 실시간 조석으로 계산되어야 하며, 이를 위해 실시간 조류예보시스템이 구축되어야 한다. 둘째, 바람자료는 유출유의 확산에 큰 영향을 미치므로 이를 정확하게 산정할 수 있는 도구가 필요하다. 대부분의 경우 관측자료는 특정 지역에 있어서 고정점의 자료이므로 이를 그대로 이용하면 상당한 오차가 포함된다. 따라서 고정점에 있어서 시간별 관측자료를 토대로 대상 지역의 시·공간적 바람분포를 예측할 수 있는 모델의 개발이 요구된다. 셋째, 본 연구에서 개발된 유출유 확산모델은 연구목적의 모델로서 현장에서 사용하기에는 어려움이 있다. 따라서 누구나 손쉽게 현장에서 사용할 수 있도록 사용자 편의모델로 재구성되어야 한다.

참 고 문 헌

1. J. J. Leendertse, "Aspects of a Computational Model for Long-period Water-wave Propagation." Rand Corporation Report RM-5294-PR, 1967.
2. 金子安雄, 堀江 毅, 村上和男, "ADI법による潮流汚染擴散の數値計算", 港灣技術研究所報告, 14(1), 1975.
3. R. W. Lardner, M. S. Belen, and H. M. Cekirge, "Finite Difference Model for Tidal Flows in the Arabian Gulf", *Comp. & Maths. with Appls.* Vol. 8. No. 6, 1982.
4. S. Venkatesh, "The Oil Spill Behavior Model of the Canadian Atmospheric Environment Service, Part 1: Theory and Model Evaluation", *Atmosphere-Ocean* 26(1), 1987.
5. A. H. Al-Rabeh, H. M. Cekirge, and N. Gunay, "A Stochastic Simulation Model of Oil Spill Fate and Transport", *Appl. Math. Modelling*, Vol. 13, June, 1989, pp. 322~329.
6. 해운항만청, "연안해역 통항 유조선 안전항로 설정에 관한 연구", 1996.
7. S. Ahlstrom, "A Mathematical Model for Predicting the Transport of Oil Slick in Waters", *Battelle Pacific NW Lab., Richland, Wash.*, 1975.
8. 한성대, "Eulerian-Lagrangian 수송모형에 의한 광양만의 유류확산 모의", *대한환경공학회지*, 제17권, 제8호, 1995, pp. 735~747.
9. 이석우, "한국항만수로지", 집문당, 서울, 1994, pp. 118~119.
10. 한국 해안·해양공학회 소식, 제93~09호, 1993.