
 論 文

大韓造船學會論文集
 第34卷第3號 1997年 8月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 34, No. 3, August 1997

누유확산 및 이동의 추정을 위한 효율적인 수치기법

송지운***, 노준혁**, 윤범상*

An Effective Numerical Method for the Prediction of Oil Spreading

by

J. U. Song***, J. H. Rho** and B. S. Yoon*

요 약

본 연구에서는 해상누유의 시간변화에 따른 오염지역 예측을 위한 수학적모델 및 수치기법을 제안하였다. 본 모델은 기름의 분자적인 확산 뿐만아니라 해수의 표층유동에 기인한 기름의 이동을 동시에 고려하는데 그 특징이 있다. 그리고, 실제 누유사고에의 보다 실용적이고 효율적인 응용을 위해 자동적으로 계산대상영역을 설정하는 격자수정방법을 도입하였다.

본 계산기법을 다양한 가상의 누유사고에 대해 적용해 본 결과, 매우 사실적인 누유오염지도를 얻을 수 있을 것으로 여겨진다.

Abstract

A simulation model and its numerical algorithm for the prediction of time-varying oil pollution region are proposed. Not only forces inducing molecular diffusion of oil but also oil advection due to the ocean surface current are considered in the present unified model. Furthermore, an automatic modulation of computational grid is introduced to achieve more practical and effective numerical scheme.

Applying the present method to some assumed oil spill cases, quite realistic oil maps are thought to be obtained.

발 표 : 1996년도 대한조선학회 추계연구발표회('96. 11. 8)

접수일자 : 1996년 12월 20일, 재접수일자 : 1997년 4월 29일

* 정회원 울산대학교 조선 및 해양공학과

** 정회원 울산대학교 조선 및 해양공학과 대학원

*** 학생회원 울산대학교 조선 및 해양공학과 대학원

1. 서론

해상교통량이 증가함과 함께 해안이나 항만부근 해역에서 해상누유사고가 급증하고 있다. 누유사고가 발생하면 기름에 의한 오염지역 확산방지와 기름의 수거를 위해 oil fence를 설치한다. 이 작업을 효율적으로 수행하여 피해를 최소화하기 위해서는 누유가 해상에서 겪게 되는 여러 가지 과정들을 고려하여 시간변화에 따른 오염지역의 정확하고도 신속한 예측이 선행되어야 한다. 정수면에서의 기름의 초기확산은 Fay[1], Houtt[2], Matora[3], Arai[4] 등에 의한 연구가 있으며, 해수에 의한 수평이동은 수심평균개념에 입각한 2차원 기법[5,6]이 주로 사용되고 있지만, 수심이 낮고 해저지형이 복잡한 연안해역에서는 3차원 추정기법의 필요성이 강조되고 있다.

본 연구에서는 누유의 초기확산과 이동을 시간영역에서 동시에 고려하여 해상누유의 거동추정을 위한 효율적이고 일관된 수치기법의 확립을 시도하였다.

2. 누유 확산 모델

2.1 기본 방정식

기름의 지배방정식으로 점성유체의 운동방정식과 비압축성유체의 연속방정식을 이용하였다. 또, 기름의 수면상부 두께는 무시할 수 있다고 가정하고[4](Fig.1), 연속방정식을 기름층두께 만큼 적분하면 기름의 지배방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial u_o}{\partial t} + u_o \frac{\partial u_o}{\partial x} + v_o \frac{\partial u_o}{\partial y} = -g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \frac{\partial h}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u_o}{\partial y^2} \right) + F_x \quad (1)$$

$$\frac{\partial v_o}{\partial t} + u_o \frac{\partial v_o}{\partial x} + v_o \frac{\partial v_o}{\partial y} = -g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \frac{\partial h}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_o}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_o}{\partial y^2} \right) + F_y \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial u_o h}{\partial x} + \frac{\partial v_o h}{\partial y} = 0 \quad (3)$$

기름은 수면(x-y평면)에 놓여있고, $u_o, v_o, g, h, \rho_w, \rho_o, \nu$ 는 각각 기름입자의 x, y방향 속도, 중력가속도, 임의점에 있어서의 기름층의 두께, 물의 밀도, 기름의 밀도, 기름의 동점성 계수를 각각 나타낸다.

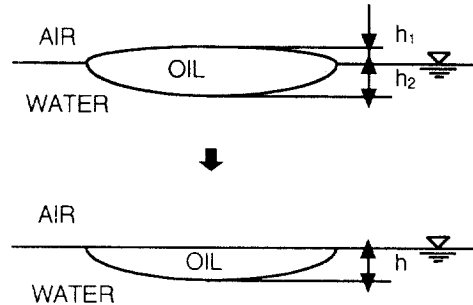


Fig.1 Idealization of oil layer on water

한편, 그런데 누유확산 모델과 3차원 해수 유동 모델의 결합에 있어서, 두 모델의 각각의 결과를 선형결합하는 것은 이론적으로는 가능하지만 계산 영역의 지형에 대한 고려와 시간의 변화에 따른 누유의 위치 변화 때문에 적용하기에는 어려움이 있다. 따라서, 본 연구에서는 수치적으로 결합된 모델을 제안하며, 기름층과 수면과의 상대속도에 의해 두 층사이의 마찰력 F_x, F_y 를 다음과 같이 계산하는 것으로 하였다[4,7].

$$F_x = -f \frac{(u_o - u_w) \sqrt{(u_o - u_w)^2 + (v_o - v_w)^2}}{h} \quad (4)$$

$$F_y = -f \frac{(v_o - v_w) \sqrt{(u_o - u_w)^2 + (v_o - v_w)^2}}{h} \quad (5)$$

여기서 f 는 기름과 물사이의 마찰력 계수이고 아래첨자 o 와 w 는 기름의 속도성분과 3차원 해수 유동모델에서 구한 표층유동의 속도 성분을 각각 의미한다.

2.2 해수의 표층유동

식(4),(5)의 해수와 기름층사이의 마찰력은 기름의 이동을 유발하는 인자로서 이식의 u_w 와 v_w

는 각각 해수표층에서의 유동속도를 의미한다. 해수의 유동은 육지지형뿐만 아니라 특히 해저지형이 복잡한 연안해역에서는 해저지형의 영향을 고려해야 하므로, 본 저자 등에 의해 이미 확립된 3차원 계산법[8]의 결과를 이용하는 것으로 하였다. 따라서 여기서는 자세한 설명을 생략하기로 한다.

2.3 수치계산 방법

본 연구에서는 계산 영역을 일정한 간격을 가진 격자로 분할 하였고, 기름 두께의 계산은 격자의 중앙에서, x와 y방향 속도성분의 계산은 각각 격자의 좌우상하에서 행해지는 교차격자체계를 사용 하였으며, 그외 계산법은 아래와 같다.

(i) 지배방정식의 차분

유한차분법을 사용하였고, 시간미분항은 전진차분을, 이류항은 해의 안정성 확보를 위해 1차정도의 상류차분을, 그외 공간미분항에 대해서는 2차정도의 중심차분을 하였다.

(ii) 경계면 처리

기름과 물이 접하는 경계 밖에 위치한 계산점에서의 값이 필요할 경우에는 속도성분들에 대해서는 인접한 내부계산점에서의 값과 같고 기름층두께는 0이라는 조건을 적용하였으며, 육지경계에서는 속도성분은 0이고 기름층두께는 두 인접한 계산점에서의 값이 같다는 조건을 사용하였다.

(iii) 새로운 누유오염지역의 평가

매시점 추정된 오염지역내의 계산점, 즉 입자의 이동을 추적하여 새로운 오염지역과 기름층의 두께를 계속적으로 예측하였다. 즉 계산과정상 계산입자의 개수는 늘어나게 된다. 또, 계산이 진행하는 도중에 기름층두께에 대해서 0이하의 값이 발생하는 계산점에서는 기름이 없는 것으로 간주 하였다.

3. 계산기법의 효율화

3.1 배경

해수의 이동에 의한 기름의 거동은 기름자체의 성질에 의한 정수층에서의 확산과 해수유동에 의

한 기름의 이동에 동시에 의존한다. 정수층 확산에 적합한 격자는 계산대상영역이 커지게 되면 computing time이 real time보다 커지게 되어 빠른계산을 필요로 하는 실제 누유사고시 오염지역 예측에 적합하지 않기 때문에 적절한 격자에 대한 고려가 있어야 한다. 이러한 점에서 상기 두 현상을 모두 고려할수 있도록, 기름이 유출되면 초기에는 기름의 성질에 의한 확산이 지배적일 것이므로 작은 격자를 사용하고 계산이 진행되면서 점차적으로 큰 간격의 격자로 자동 치환되도록 함으로써 계산기법의 효율화를 도모하였다.

3.2 오염지역 변화에 대한 계산격자의 수정

계산초기에는 기름이 존재하는 작은 영역에서 출발하여 기름오염지역이 확대됨에 따라 계산대상 영역 및 격자간격도 자동적으로 키워나가는 경제적 계산법을 도입하였다. 격자간격의 수정은 아래 Fig.2와 같이 9개의 작은 격자를 하나의 큰 격자로 대체케 하였다.

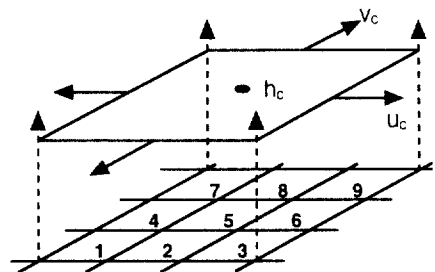


Fig.2 Grid modulation

Fig.2의 작은격자에서 큰 격자로 치환할 때 각각의 변수들에 대한 수정식은 아래와 같다.

$$h_c = \frac{1}{9} \sum_{i=1}^9 h_i \tag{6}$$

$$u_c = \frac{(u_3 + u_6 + u_9)}{3} \tag{7}$$

$$v_c = \frac{(v_7 + v_8 + v_9)}{3} \tag{8}$$

4. 계산결과

Oil map 작성을 위하여 우선, Fig.3과 같은 2km×1km의 가상영역에서 유체가 0.5 m/sec의 일정한 속도로 좌측경계를 통하여 유입된다고 가정하였다. 이때 해역의 표층유속분포를 Fig.4에 보인다. 시간에 따라 변하는 해기상 조건도 물론 고려할 수 있으나, 본 계산에서는 편의상 정상상태의 유동장을 이용하는 것으로 하였다.

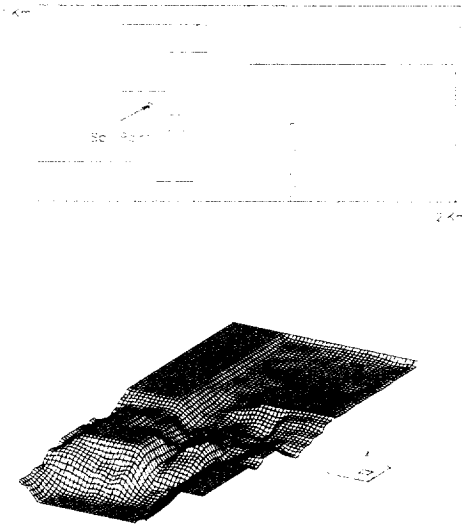


Fig.3 Artificial shore area and bottom topography used in the calculations

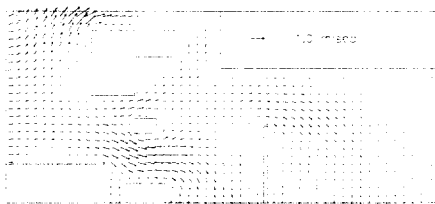


Fig.4 Surface current field in case of uniform flow (0.5m/s on west boundary)

Fig.5는 3차원 해수유동 수치계산 결과와 Fay의 확산반경에 대한 경험식을 선형중첩한 oil map을 나타낸다. 누유조건으로는 2시간 동안 매초 0.5ton의 기름이 계속해서 유출되고 있다고 가정하였다. 한편, Fig.6에서는 마찰계수 f 가 확산에 미치는 영향을 살펴보았다. 통상 기름의 분자적인 확산 속도보다 해수 유동에 의한 이동속도가 훨씬 크고 계산의 경과에 따라 기름의 속도성분이 해수 유동속도에 접근하므로 마찰계수 f 의 영향은 실제로 크지 않다는 사실을 알 수 있다.

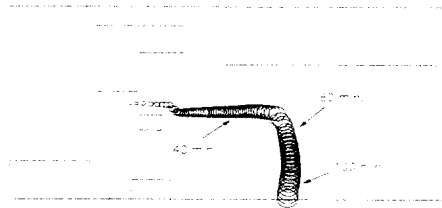
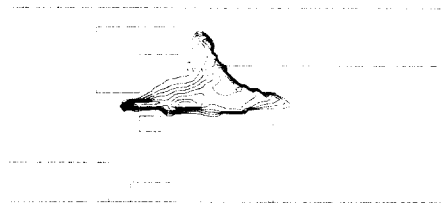
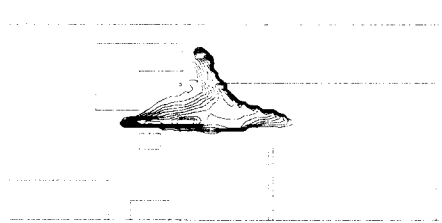


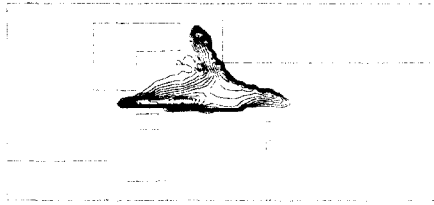
Fig.5 Spilt oil trajectory (advection + Fay's diffusion)



(a) $f = 0.01$



(b) $f = 0.05$



(c) $f = 0.1$

Fig.6 Dependency of friction coefficient on oil pollution area (present method, $t=60$ min.)

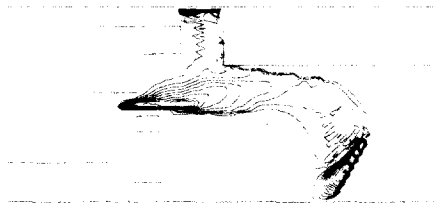
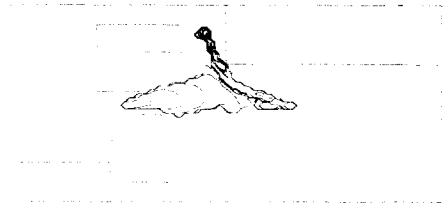


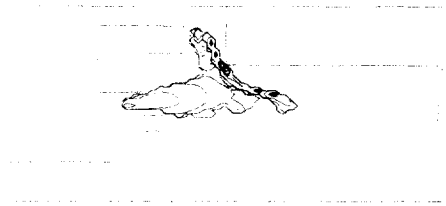
Fig.7 Numerical results of oil polluted regions with surface current (at $t=100$ min.)

Fig.7은 누유가 발생한 후 100분이 되는 시점에서 확산과 이동을 함께 고려한 경우이다. 분자적인 확산과 기름이동을 동시에 고려한 본 기법의 결과와 기름의 이동궤적에 확산반경을 중첩한 결과는 크게 다를 수 있음을 보여주고 있다. Fig.8에서는 기름의 유출량의 변화에 따른 오염지역의 변화를 비교하였다. 유출량이 오염지역의 형상에 미치는 영향은 예상외로 크지 않으며 이는 기름입자들의 각 속도성분의 크기가 대응되는 해수속도 성분의 크기에 근접하여 기름의 이동거리가 차이가 나지 않기 때문으로 여겨진다. 그러나 이 그림에는 잘 나타나지 않았으나 기름층두께에는 큰 차이가 있다.

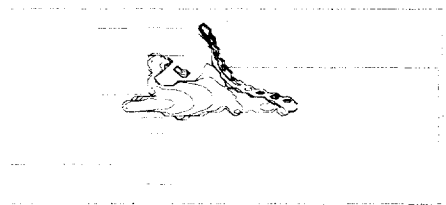
Fig.9는 50Km×50Km의 인천항 부근의 해역을 대상으로 계산을 수행한 결과이다. 누유조건은 12시간 동안 매초 0.05m³의 기름이 유출된다고 하였으며, 기상조건으로는 잔잔한 바다에 10m/s의



(a) $Q = 0.001 \text{ m}^3/\text{sec}$



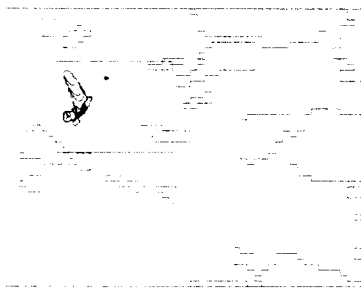
(b) $Q = 0.01 \text{ m}^3/\text{sec}$



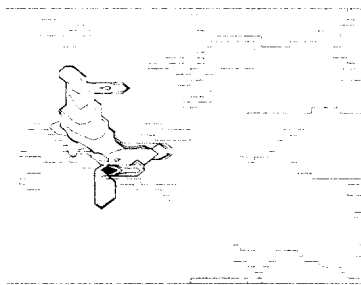
(c) $Q = 0.1 \text{ m}^3/\text{sec}$

Fig.8 Oil maps for various oil spill rates ($f=0.05$, $t=60$ min.)

북서풍만 분다고 하였다. Fig.10에서는 사용한 격자에 따라 동일 누유조건하에서 계산에 소요되는 시간을 비교하였다. 전체영역을 fine mesh로 분할해 계산한 경우와 비교할 때, 대상영역 및 격자 크기 조절방식을 도입한 본 계산법의 계산소요시간이 90%정도 감소됨을 확인함으로써 장시간의 누유오염지역 예측에 매우 효율적인 사실을 확인할 수 있다.



(a) t = 4hrs.



(b) t = 12hrs.

Fig.9 Numerical results of oil polluted regions near Incheon harbor

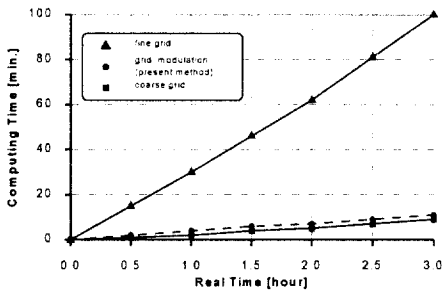


Fig.10 Comparison of computing time

5. 결론

본 연구에서는 연안해역에서 누유확산 수치 simulation 기법을 제시하였으며, 누유의 초기확산 수치모델과 해수유동에 의한 이동이 동시에 고려될 수 있는 일관된 계산기법도 제시하였다. 본 계산법에 의하면 기름층과 해수면사이의 마찰력계

수와 유출기름량은 누유오염지역예측에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 본 방법에 의해 예측된 누유오염지역은 해류유동과 Fay의 확산반경을 고려한 통상의 예측결과와 커다란 차이를 보일 수 있다. 추정된 Oil map의 정확도 측면에서는 추후 검증이 필요하나, 기상오염사고에 대해 수치추정한 본 계산결과들은 매우 사실적으로 보인다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] Fay,J.A., 'The spread of oil slick on a calm sea',Oil on the sea, Plenum Press(1969)
- [2] Houtl,D.P., 'Oil spreading on the sea', Annual Review of Fluid Mechanics Vol.4(1972)
- [3] S.Motora 'Investigation research on protection of damage due to large tankers', Report No.1, Japan Association for Prevention Marine Accident(1967)
- [4] M.Arai et al., 'Numerical simulation of spilled oil from tanker', Proc. of spring conf. Kansai Society of Naval Architects(1994)
- [5] D.Y.Lee, 'A numerical model for the movement of spilled oil', Msc Thesis, Seoul National University(1993)
- [6] Dronkers,J.J., 'Tidal computation in rivers and coastal waters', North-Holland Publishig Company, Amsterdam(1964)
- [7] Connor, J.J., Brebbia, C.A.'Finite Techniques for Fluid Flow', Butterworth & Co. Ltd(1967)
- [8] Yoon, B.S. and Rho, J.H., "Effective 3-D Computer Simulation Technology of Tide and Wind Induced Current-Real Sea Applications", Report of AFERC, POS- TECH, 1994