
 論 文

大韓造船學會論文集
 第 34 卷 第 2 號 1997年 5月
 Journal of the Society of
 Naval Architects of Korea
 Vol. 34, No. 2, May 1997

해상누유의 초기확산 예측모델 및 수치추정

윤범상**, 송지운*

Prediction Model and Numerical Simulation of the Initial Diffusion of Spilled Oil on the Sea Surface

by

B. S. Yoon** and J. U. Song*

요 약

연안해역에서의 해상 운송량이 늘어남과 함께 유조선의 충돌 및 좌초 등의 해난사고에 의해 해양환경에 막대한 피해를 끼치는 원유 유출사고도 대폭 증가하고 있다. 누유의 효율적인 수거와 환경피해를 최소화 하기 위해서는 oil map 즉, 누유오염지역의 시간영역에서 정확한 예측이 매우 중요하다. 이러한 예측은 정수면위 누유의 초기확산과 조류, 바람, 파도에 기인한 표층류에 의한 이동이라는 중요한 두가지 과정을 고려하여 이루어진다.

본 논문에서는 초기확산만을 고려하였다. 누유의 초기확산 추정을 위해 새로운 수치모델과 기법이 제안되었다. 본 모델의 타당성을 검증하기 위해 간단한 실험이 이루어졌다. 또한, 가상누유 사고에 대해 수치 시뮬레이션을 수행하였는데 본 모델로부터 기름층두께를 포함하는 매우 현실적인 oil map을 얻을 수 있었다.

Abstract

Increase of marine transportation in coastal area frequently yields oil spill accidents due to collision or grounding of oil tankers, which affects great deal of damages on ocean environments. Exact prediction of oil pollution area in time domain, which is called oil map, is very important for effective and efficient oil recovery and minimization of environmental damage. The prediction is carried out by considering the two distinct processes which are initial diffusion on the still water surface and advection due to tide, wind, wave induced surface currents.

발 표 : 1995년도 대한조선학회 춘계연구발표회('95. 11. 10.)

접수일자 : 1995년 12월 23일, 재접수일자: 1997년 2월 28일

** 정회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과

* 학생회원, 울산대학교 조선 및 해양공학과 대학원

In the present paper, only the initial diffusion is dealt with. Somewhat new simulation model and its numerical scheme are proposed to predict it. Simple diffusion experiment is also carried out to check the validity of the present method. Furthermore, some example simulations are performed for virtual oil spill accident. Quite realistic oil map including oil thickness distributions can be obtained by the present model.

1. 서론

전 세계적으로 유조선 사고가 급증하고 있는 가운데, 우리나라도 예외없이 기름유출로 인한 해양 오염 문제가 매우 심각한 지경에 놓여 있다. 유조선 사고의 방지, 이종선각에 의한 안전대책을 강구하는 것도 중요하지만 기름유출사고 후의 수거, 방계대책의 효율성 확보도 강조되어야 마땅하다. 이러한 점에서 유출된 기름의 효과적인 수거 대책 마련을 위해 기름의 해상 거동을 예측하는 일은 일차적으로 중요한 과제이다.

해상에 유출된 기름은 자신의 물리, 화학적 성질에 의해 확산되고(초기확산과정) 동시에 조류, 바람, 파도, 기타해류등에 의해 이동(수평이동과정)을 하게 된다. 그 과정중에 기름은 각종 풍화작용을 겪으며 성질 자체가 변화 되기도 한다(풍화과정). 이들 세계의 과정은 상호간에 영향을 미치는등 매우 복잡한 현상을 동반하면서 일어나지만, 모든 변수를 동시에 고려하여 기름의 거동을 추정하는 일은 현재로서는 불가능에 가깝다. 따라서 이들 세계의 과정을 분리하여 취급한 후 각각의 결과를 선형결합하는 방식을 취하는 것이 보통이다.

본 연구에서는 유출된 기름의 거동중 초기확산 과정에 초점을 맞추는 것으로 하였다. 기름의 해면확산에 대한 수학모델로서 지금까지 많은 제안이 있어, 마찰이 없는 평면 위를 기름이 확산하는 것으로 가정하고 확산반경을 구하는 Motora[1]의 모델, 물리현상을 지배하는 주요 인자에 대한 차원해석을 통해 확산반경의 법칙을 유도한 Fay의 모델 등[2,3]이 알려져 있다. 한편 Arai[4]는 천수파의 가정을 사용하여 기름두께의 시간 변화를 구해 나가는 계산기법을 제안 하였으나 실험결과와

그다지 좋은 일치도는 보여주지 못하였다.

본 논문에서는 궁극적으로 수평이동 과정과의 동시적 고려를 목표로 삼아 점성유체의 운동방정식인 Navier-Stokes방정식을 도입하되, 기름과 물사이의 마찰력외에 수평확산, 그리고 표면장력 효과를 고려한 더욱 정밀한 수학 모델을 제안한다. 원유에 대한 확산 실험결과와 본 모델에 의한 계산 결과는 좋은 일치도를 보여 줌과 동시에 확산 과정 중에 중력, 점성력, 표면장력의 역할등에 대한 몇가지 유용한 결론을 얻었기에 이를 보고하고자 한다.

2. 누유 확산 모델

2.1 기본 방정식

수면위에 놓인 기름의 확산추정을 위한 수학모델을 설정하는데 있어 우선 다음과 같은 몇가지 사항을 고려하였다.

확산을 유발 또는 저지하는 외력으로서 중력, 수평방향 점성력, 기름과 물사이의 마찰력, 그리고 표면장력을 도입하였다. 중력과 부력의 차로 인한 외력항을 효과적으로 고려하기 위하여 Arai[4]가 제시한 가정, 즉 기름의 수면상부 두께는 무시할 수 있다고 가정하면(Fig.1), 기름의 운동방정식은 다음과 같이 된다.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} = -g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \frac{\partial h}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) + F_x + \hat{\sigma}_x \tag{1}$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} = -g \frac{\rho_w - \rho_o}{\rho_o} \frac{\partial h}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) + F_y + \hat{\sigma}_y \quad (2)$$

참고로 Arai의 모델은 윗식에서 수평방향 확산항과 표면장력의 효과를 무시하고 있다. (1),(2)에서 사용한 좌표계는 Fig.2에 보이는 바와 같으며 기름은 x-y평면에 놓여있고, u, v, g, h, ρ_w, ρ_o, ν는 각각 기름입자의 x,y방향 속도, 중력가속도, 임의점에 있어서의 기름층의 두께, 물의 밀도, 기름의 밀도, 기름의 동점성계수를 나타낸다.

또한 기름과 물 사이의 마찰력은 통상 사용하는 경험모델로서[4,5] 다음식을 사용하였다.

$$F_x = -f \frac{u\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \quad (3)$$

$$F_y = -f \frac{v\sqrt{u^2 + v^2}}{h} \quad (4)$$

식(1),(2)의 마지막항인 표면장력항은 다음절에서 자세히 기술하고자 한다.

이 이외에 연속방정식을 수직(z)방향으로 적분함으로써 다음식을 얻는다.

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial uh}{\partial x} + \frac{\partial vh}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

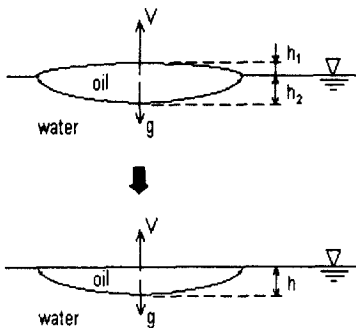


Fig.1 Idealization of oil layer on water

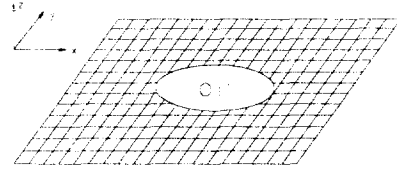


Fig.2 Coordinate system and mesh configuration

2.2 표면장력

기름이 아주 얇은막의 형태로 물위에 놓여 있다면, 이때 기름의 확산에는 표면장력이 중요한 역할을 하게 된다[1,6]. 이 표면장력에 의한 확산은 아래와 같이 정의되는 확산계수[6]의 부호에 따라 확산하게 된다.

$$S = \sigma_{23} - \sigma_{13} - \sigma_{12} \quad (6)$$

σ_{ij}는 ij의 경계면에 작용하는 표면장력이다. 그리고, 일반적으로 첨자 1은 기름, 2는 물, 3은 공기를 의미한다(Fig.3). S<0이면, 이상적인 상태로 기름은 더 이상 확산하지 않지만, S>0(실제경우)인 경우에는 계속해서 기름이 확산하게 된다.

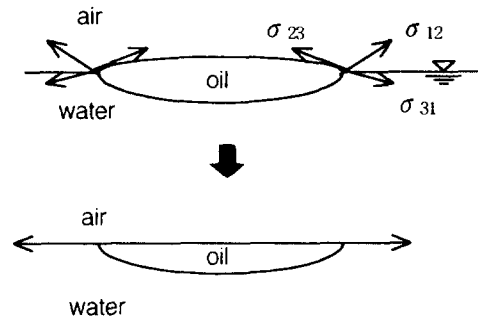


Fig.3 Simplification of surface tension

본 연구에서 사용한 수학 모델에서는, 기름층이 아주 얇다고 가정하고 기름층의 최외곽 경계면에서 물과 기름의 경계면에 작용하는 표면장력의 접선각도가 0도가 되게 하였다(Fig.3). 표면장력은

원래 기름의 경계면에 작용하는 힘이냐, 이를 지배방정식에 포함시켜 계산의 편의를 도모하기 위한 목적으로 다음과 같은 근사개념을 도입하였다. 즉, 표면장력에 의한 힘이 기름 유출지점으로 부터 기름경계면까지 선형적으로 분포하되 이힘들의 합은 표면장력과 같은 것으로 간주하였다.(Fig.4) 우선 힘의 차원을 일치시키기 위해 다음식을 사용하였다.

$$\bar{\sigma} = \sigma \frac{1}{\rho_o} \frac{1}{Rh} \quad (7)$$

$$\bar{h} = \frac{Q}{\pi R^2} \quad (8)$$

여기에서, R, \bar{h} , Q는 각각 임의 시점에서의 기름의 확산반경, 기름층의 평균두께, 유출기름량을 나타낸다. 따라서 표면장력에 의해 임의의 한 점 (node)에 작용하는 힘은

$$\hat{\sigma} = \bar{\sigma} \frac{r_{xy}}{R} c = c \sigma \frac{r_{xy}}{\rho_o R^2 \bar{h}} \quad (9)$$

여기에서, $c = \frac{2}{n+1}$

와 같이 된다. 여기에서, r_{xy} , n은 각각 임의의 점의 반경방향위치, 반경방향 grid의 개수를 나타낸다. 그러므로 x, y방향의 표면장력에 의한 힘은

$$\hat{\sigma}_x = \hat{\sigma} \cos \theta = c \frac{\sigma \pi x}{\rho_o Q} \quad (10)$$

$$\hat{\sigma}_y = \hat{\sigma} \sin \theta = c \frac{\sigma \pi y}{\rho_o Q} \quad (11)$$

와 같이 된다.

결론적으로, 표면장력을 고려 할 경우에는 식 (10),(11)을 식(1),(2)에 각각 추가 시키는 것으로 하였다.

3. 수치해석 방법

3.1 격자구조

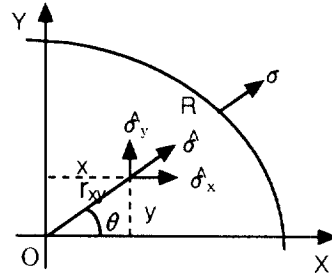


Fig.4 Field distribution assumption of surface tension

본 연구에서 사용한 계산격자구조는 계산 영역을 일정한 간격을 가진 격자로 분할하였고, 기름 두께의 계산에서는 격자의 중앙에서 이루어 졌으며, x와 y방향 속도성분의 계산에 대해서는 각각 격자의 좌우상하에서 행해지는 교차격자체계를 사용하였다. Fig.5에 격자 구조와 각각의 미지 성분이 정의되는 점들을 나타내었다.

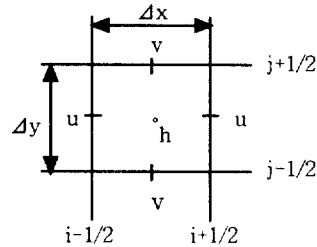


Fig.5 Structure of staggered grid

3.2 지배방정식의 차분

유한 차분법을 이용하여 지배방정식을 차분화하였다. 시간의 전개에 있어서는 전진차분을, 확산에 관한 항에 대해서는 중심차분을, 그리고 대류항에 대해서는 해의 안정성 확보를 위해 1차의 풍상차분법을 이용하였다.

3.3 오염영역 경계면의 처리

물과 기름층의 경계면에 수치계산과는 무관한 가상의 입자들을 분포시켜 내부 계산격자점들로부터 이 입자들의 속도성분을 선형적으로 외삽추

정하여 매 계산단계에서 이들을 이동함으로써 오염지역을 파악하였다. 또, 수치계산을 수행하는 과정에서 새로이 오염지역으로 평가되는 격자점에서 초기에는 cubic spline을 이용하여 내삽하였으며, 이후에는 내부격자점으로 하고 계산을 수행하였다. 육지 등의 경계면에서는 일반적인 비침투조건을 적용하였다.

4. 실험 및 계산결과

4.1 실험

기름의 초기 확산에 대한 실험은 Fig.6 에서와 같은 수조에서 이루어 졌다. 초기 상태의 기름은 아래, 위가 열린 얇은 원주에 의해 갇혀 있으며, 순간적으로 이를 제거함으로써 기름의 확산이 발생하도록 하였다. 그리고 시간의 경과에 따른 확산반경을 측정하였으며, 이는 수조상부에 부착한 격자와 video해석 결과를 이용하였다. 실험에 사용된 기름은 원유이며, 이 기름의 물성치는 아래 Table.1 과 같다.

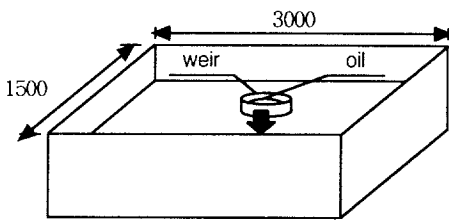


Fig.6 Oil diffusion experiment

Table.1 Properties of crude oil

밀도	930.3 kg/m ³
동점성 계수	3.312 × 10 ⁻³ m ² /sec
표면장력 계수	2.7 × 10 ⁻² N/m

4.2 계산 결과

본 수치계산은 기름이 정수중에 있다는 가정하에서 이루어 졌고, 계산 결과는 실험, 그리고 다른 계산 결과[24]와 비교를 하였으며, 이를 Fig.7에

나타내었다. 본 계산에 의한 확산반경의 시간에 대한 변화는 실험과 잘 일치하였고, Arai[4]의 결과는 시간이 지남에 따라 일치도가 나빠지는 사실로부터 시간경과와 더불어 기름층의 두께가 얇아지면서 표면장력의 역할이 점점 커지는 사실을 알 수 있다. 또한 확산초기 Arai의 결과와 실험결과의 차이로 부터 수평점성응력의 확산 저지 효과도 무시 못할 인자로 생각된다. Fay[2]의 식은 기본적으로 다량의 누유시에 적용하는 것이 일반적이나, 중력-관성력 단계의 식이 소량 누유시에도 실험과 잘 일치하는 사실이 주목된다.

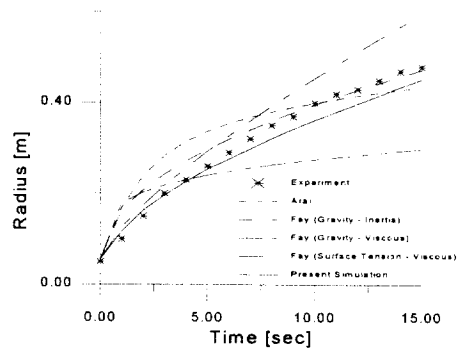


Fig.7 Comparison of the radius of spreading in time

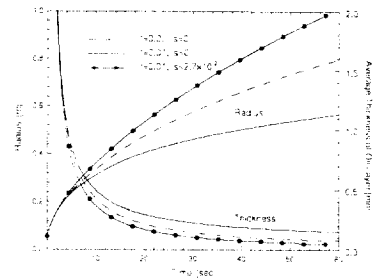


Fig.8 Effect of friction and surface tension on oil radius and thickness

Fig.8은 기름층과 수면사이의 마찰력과 표면장력이 확산반경에 미치는 영향을 조사한 그림이다. 반경이 커지면서 마찰력의 저지효과보다 표면장력의 확산유발효과가 현저히 커지는 사실을 알 수 있다. Fig.9에서는 기름의 양에 따라 중력에 의한

확산반경의 증가량 (Δr_g)과 표면장력에 의한 확산 반경의 증가량 (Δr_s)을 전체 증가량 (Δr_t)의 비로 나타내었다. 이들은 모두 계산에서 사용된 Δt 동안의 증가량을 표시한다. 기름의 양이 많아 질수록 표면장력에 의한 영향이 중력에 의한 영향을 능가하는데 걸리는 시간이 늦게 나타남을 잘 알 수 있으며, 그 시점에 있어서의 기름의 두께는 기름의 양이 많아 질수록 얇아 지고 있는데, 이는 확산 초기의 관성력이 기름의 두께에는 크게 영향을 받지 않고, 초기 관성력에 비례하여 오래 지속되는 사실에 기인하는 것으로 생각된다.

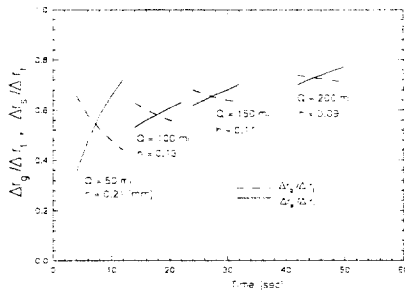


Fig.9 Comparison of the spreading rate by gravity and surface tension

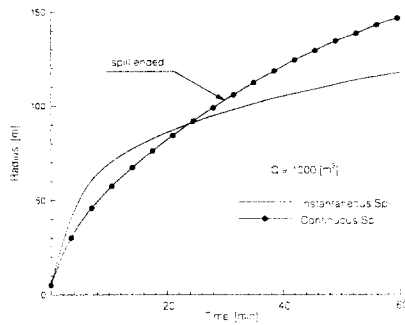
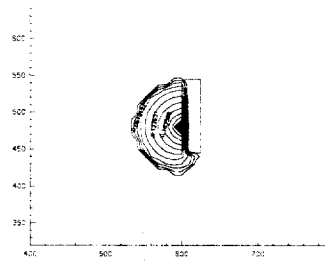


Fig.10 Oil diffusion radii in instantaneous spill and continuous spill

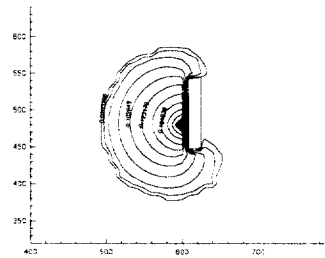
Fig.10에서는 계산 영역을 확대하여 같은 양의 기름이 일시에 유출된 경우와 계속해서 유출되는 경우(30분간 1000m^3)를 서로 비교 하였다. 전자

의 경우에는 초기의 중력효과가 후자에 비해 상대적으로 크게 나타나지만, 계속유출의 경우 중력에 의한 확산유발이 오래지속됨으로써 반경이 커지는 사실을 알 수 있다.

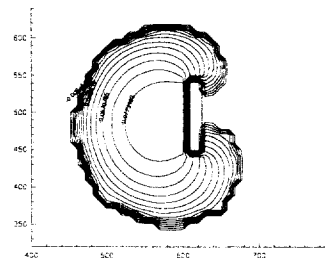
Fig.11은 길이 120m의 유조선이 중앙후부에서 2500ton의 기름이 30분간 계속해서 유출되는 경우를 가정하여 확산정도를 수치 추정하여 보았다. 시간경과와 함께 유출부위 반대쪽에도 기름층이 형성되어 가고 있는 사실을 알 수 있다.



(a) after 10 min.



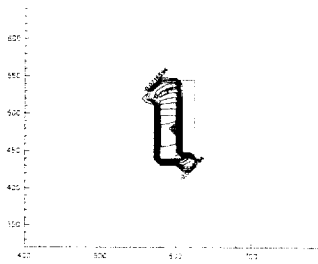
(b) after 25 min.



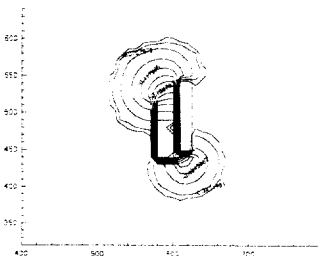
(c) after 40 min.

Fig.11 Simulated results of oil polluted regions by spill accident (continuous spill of 2500m^3 in 30 min.)

Fig.12는 Fig.11과 같은 상황에서 가상의 oil fence가 있는 경우에 대한 결과이다.



(a) after 10 min.



(b) after 25 min.



(c) after 40 min.

Fig.12 Simulated results of oil polluted regions with oil fence (continuous spill of 2500 m³ in 30 min.)

5. 결론

본 연구에서는 기름의 초기 확산 추정을 위한 수식모델을 제시하였고 실험과의 비교, 나아가 확산 유발인자에 대한 분석등을 수행하였다.

본 계산모델에 의한 계산 결과는 실험치와 잘 일치하여 그 유효성이 입증된 것으로 판단된다. 본 계산법은 경험식에 의한 방법과는 달리 유출량, 유출조건, 유출해역의 형상 등에 구애받지 않고 시간영역에서 확산 범위를 추정할 수 있는 장점이 있으며, 바람, 조류등에 의한 이동 등도 본 모델에서 직접 고려 할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 한국과학재단 지정 첨단유체공학 연구센터의 지원으로 수행되었으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] 일본해난방지협회, '대형 탱커에 의한 재해의 방지에 관한 조사 연구 · 중간보고서(제1차)' (1967)
- [2] Fay, J.A. 'The spread of oil slick on a calm sea', Oil on the sea, Plenum Press(1969)
- [3] Hoult, D.P. 'Oil spreading on the sea', Annual Review of Fluid Mechanics Vol.4(1972)
- [4] Arai, M., '탱커로 부터의 유출유의 수치시뮬레이션', 일본관서조선협회 1994 춘계발표회 논문집 (1994)
- [5] Connor, J. J., Brebbia, C. A. "Finite Element Techniques for Fluid Flow", Butterworth & Co. Ltd(1967)
- [6] Harkins, W.D. 'The Physical Chemistry of Surface Films', Reinhold(1952)