

해상 누유의 거동 예측

윤 범 상 <울산대학교 교수>

1. 시작하면서

지난 6개월 사이 씨프린스호의 좌초로 인한 원유 유출사고에 이어 알렉산드리아호, 유일호, 그리고 사파이어호 사고 등 연이은 대형사고로 한반도 주변 해역이 심한 공해에 시달리고 있다. 땅위의 공기, 땅밑의 지하수에 이어 땅을 둘러싼 바다로부터 오염의 3면 공격을 받기에 이른 것이다. 해양오염의 심각성, 해양환경보호의 중요성에 관한 국민의 관심도 점차로 높아지고 있다. 정부에서도 드디어 그 심각성을 인식한 듯, 석유회사등 관련기업의 출자를 유도해 대형 방제회사의 설립을 추진하고 있다고 들린다.

해양오염의 주범은 무엇보다도 유조선등 선박 사고로 인해 유출되는 기름이다. 유출된 기름은 일차적으로 수산 양식업등에 엄청난 피해를 입힐 뿐 아니라 아직 규명은 안되었지만 유처리제 살포로 인한 적조현상의 유발, 나아가 해양의 환경 정화작용 억제 등 엄청난 피해를 일으킨다. 유조선의 이중선각 구조 채택이 기름 유출방지를 위한 부분적인 대책은 될 수 있어도 해상교통량에 비례해서 증가하고 있는 기름 유출사고 건수를 보상하지는 못할 것이 분명하다. 즉 선박사고 건수에 의한 기름유출건수의 퍼센티지를 감소시키기는 할 테지만, 사고 건수자체의 증가를 억제할 수는 없기 때문이다. 따라서 기름 유출사고 이후의 효율적인 방제 대책이 더욱 중요할 수밖에 없다. 선박을 설계하고 건조하여 취항시키는 조선관련 연구자와 기술자는 해양오염에 관련해 책임의 일단을 느끼고 방제 문제에 적극적인 기여를 해야 할 것으로 믿으며 재미없는 이야기를 시작하고자 한다.

2. 유출된 기름의 운명과 관련 연구분야 [1]

해상에 유출된 기름은 초기확산, 수평이동과 동시에 풍화작용을 경험하며 이 과정 중에 기름벽(oil fence)에 둘러싸여 수거되던지, 태워지던지 또는 유처리제에 의해 화학처리되는 운명을 겪게 된다.

해상에 떠 있는 기름의 중력과 부력의 차 그리고 기름층의 외곽경계와 물사이에 작용하는 표면장력은 기름의 퍼짐을 유발하는 반면 관성력과 점성마찰력 등은 이를 저지하는데 이 과정을 통상 초기 확산과정이라 부른다. 한편 기름은 조류, 바람, 파도, 기타 해류 등에 의해 수평이동을 하게 되는데 상기 초기확산과 수평이동과정을 묶어, 시간경과에 따라 오염지역을 수치적으로 예측하는 것을 Oil spill modeling이라 부른다.

또한 기름은 확산이동 과정 중에 바다중의 각종 입자와 혼합되어 침하하고, 증발하며, 점성이 커져가는 등 물성치도 변하는데 이를 수식화하는 문제는 Oil fate modeling 분야에서 다룬다. Oil spill modeling에서는 기름의 질량, 점성을 포함하는 물성치 등이 중요한 인자이기 때문에 상기 두 분야는 매우 밀접한 관련을 갖고 있다. 또한 해상 누유의 거동 및 오염지역의 예측을 통하여 기름의 수거를 포함한 방제작업이 뒤를 잇게 되는데 확산 저지를 위해 파도, 조류상태에 따라 어떠한 형상의 오일펜스가 적합한지, 기름수거를 위해 어떠한 형식의 수거 장치가 효율적인지 등은 Oil recovery분야의 주된 과제가 된다.

기름 수거가 오염방제를 위한 일차적인 노력이라면 부차적으로 기름의 종류, 상황에 따라서 불에 태워버리는 방법을 집중적으로 다루는 In situ burning 분야, 기름의 분해 또는 침하를 유도하는 방법을 대상으로 하는 Chemical treatment 분야 등도 주

요한 일익을 차지하고 있다. 유처리제의 살포가 해양 플랑크톤의 성장을 위해 필요이상의 좋은 조건을 조성하여 적조현상을 유발할 가능성이 있다는 것은 지난 여름의 동해안 적조현상을 예로 하여 앞으로 집중적인 연구가 있어야 할 부분이기도 하다.

한편, 기름등 오염물질은 단시간에 효과적으로 제거, 처리해야 하는데, 이는 해상조건, 오염물질의 종류와 양, 주변해역의 상황, 해저, 해안지형 등을 효과적으로 고려하여 판단해야 한다. 어떠한 계통을 밝아, 누가, 어떠한 방식으로 방제에 임해야 가장 종합적으로 등은 Contingency planning 분야에서 취급한다.

기타 해상누유가 생태계에 미치는 영향과 회복방법등은 Bioremediation 분야에서 다루며, 각종 기름오염사고의 원인, 전개과정, 처리과정, 사후효과등을 분석하는 Case study도 활발하게 진행되고 있다.

이와 같은 해상누유 관련 분야중 조선, 해양공학에 종사하고 있는 우리가 우선 자연스럽게 관심을 가질 수 있는 것이 Oil spill modeling과 Oil recovery분야가 아닐까 한다. 다음 장에서는 이중 Oil spill modeling 기법에 대해 현황과 문제점 등을 중심으로 개괄적으로 기술하여 이해를 도모코자 한다.

3. 해상누유의 확산 모델링

Fay 모델

해상누유의 확산문제는 여러 연구자가 관심을 가지고 있어 왔으나 그중 Fay의 모델[2,3]이 가장 널리 쓰여지고 있다.

Fay는 초기확산반경을 차원해석을 통하여 다음과 같은 3단계의 확산 추정 식을 제시하고 있다.

$$\text{Gravity - Inertia 단계 : } R_i(t) = K_i(g\delta\nabla t^2)^{\frac{1}{4}}$$

$$\text{Gravity - Viscous 단계 : } R_t(t) = K_t(\delta^2 t^3 / \rho_w^2 v_w)^{\frac{1}{4}}$$

Surface tension - Viscous 단계 :

$$R_t(t) = K_t(\delta^2 t^3 / \rho_w^2 v_w)^{\frac{1}{4}}$$

여기서 확산계수 K_i , K_v , K_t 는 각각 1.14, 1.45, 2.30이며 ∇ , g , ρ_w , v_w , δ 는 각각 기름 유출량, 중력가속도, 물의 밀도, 물의 동점성계수, 표면장력이다. 그리고 δ 는

$$\delta = \frac{(\rho_w - \rho_o)}{\rho_w}$$

로서 물과 기름의 밀도차의 상대치이다. 이 수식은 explicit한 형태로 사용하기가 매우 쉽고 또 실험과도 일치도가 좋은 것으로 알려져 있으나, 지속적인 기름 유출의 경우에는 사용이 곤란하며, 누유사고가 발생한 해역의 주변형상이 고려에서 제외되어 있을 뿐아니라 무엇보다도 각 식의 적용시간대에 대한 명확한 구분이 안되어 있는 점이 단점으로 지적된다. 따라서 향후 일종의 simulation 기법이 이 문제와 관련해 주종을 이룰 것으로 보인다.

예로써 Arai 모델[4] 또는 윤과송의 모델[5]을 보면 :

Arai 모델

기름에 대한 비압축성 연속방정식과 2차원 평면상에서의 기름의 운동방정식으로 구성된다. 연속방정식은 생략하고 운동방정식으로는 다음식을 사용하고 있다.

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla \vec{v} = -g\delta \nabla h + f$$

여기서 외력인 우변의 첫항은 중력으로서 h 는 임의 위치에서의 기름층두께를 의미하며, 둘째 항은 물과 기름층사이의 마찰력으로서 경험식을 사용하고 있다. 윤과송[5]은 최근 상기 model에 수평마찰의 viscous diffusion 및 표면장력의 효과를 추가하는 방안을 제시하고 있다. 이들 simulation기법은 유출 조건, 유출량, 기름의 종류, 유출해역의 해안 지형 등을 어려움 없이 고려할 수 있는 장점이 있는 반면, 계산시간이 걸린다는 단점이 있다.

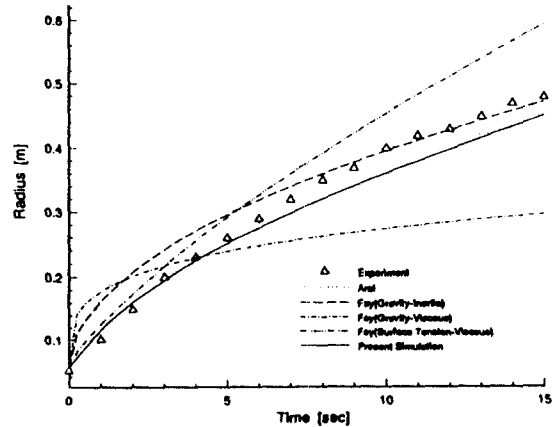


그림 1 원유의 확산반경 비교 [5].

상기 모델들에 대한 확산반경 추정결과를 실험결과와 비교해 그림 1에 보인다. 기타, 마찰이 없는 평면상을 기름이 퍼진다고 보고 확산반경을 구하는 Motora의 모델[6] 등이 있다.

4. 해상 누유의 이동 모델링

해상의 기름은 전술한 대로 확산과정을 겪으면서 조류, 바람, 파도, 기타 해류 등에 의해 이동하게 되는데 이의 예측은 피해추정 뿐만아니라 방제대책 수립과 관련해 매우 중요하다. 기름 유출후 이동된 위치는 항공기에서도 찾기가 매우 힘들다는 것이 관계자들의 얘기이고 보편 이의 중요성이 이해될 수 있을 것이다. 기름이동의 원인별로 예측기법을 살펴보면 다음과 같다.

조류

조류에 의한 이동은 주기성을 갖고 왕복운동을 하므로 비선형 표류성분을 제외하곤 장기적인 안목에서 중요성이 덜하나, 조류가 매우 강한 서해안 해역 등에선 조석의 반주기 이내에 해안선 피해가 예상되기도 하므로 이를 무시할 수 없다.

조석에 의한 유동, 특히 표층유동을 측정하는 기법에는 수심평균 유속을 미지수로 한 2차원 모델[7,8]과 해저지형의 영향을 고려한 3차원모델[9,10,11]이 있다. 같은 3차원 모델을 취급하되 Blumberg는 2차원 수심평균유속과 해저지형에 의한 수심방향 변화량의 합으로 보아 수심방향 변화량만을 3차원 추정하는 수치기법을 사용하고 있는 반면, Fujino는 물리좌표계, 운동은 시그마 좌표계를 도입하여 3차원 유속을 직접 푸는 수치기법을 이용하고 있다. 그림 2에 보이는 수심 15m인 인천해역의 특징점에서의 계산결과로부터 표층유동에 미치는 해저지형의 영향은 특히 천수역에서 현저히 나타남으로서 해저지형이 복잡한 연안 해역에서는 3차원 모델의 도입이 필요할 것으로 보인다.

바람

바람에 의해 유기 되는 취송류는 기름이동의 결정적인 요소가 된다.

통상 표층의 취송류는 경험에 입각해 해면위 10m 지점 풍속의 3%가 바람과 같은 방향으로 유기 된다는 경험치를 사용하고 있다. 그러나 바람이 분 시간, 바람의 속도에 따라 취송류 크기의 퍼센티지가 달라질 뿐만아니라, 해저지형 특히 해안지형에 따라 취송류

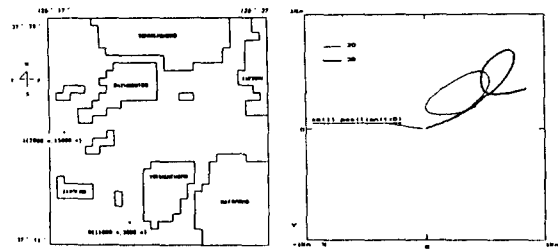
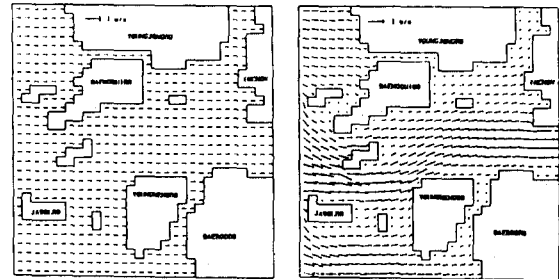


그림 2 조류에 의한 기름의 이동경로[13]



(a) 경험치(풍속의 3%) (b) 시뮬레이션 결과

그림 3 인천해역의 표층에서의 취송류[13]

의 방향 또한 달라질 수 있다는 사실이 무시되고 있다. 따라서 향후 이 부분 역시 시뮬레이션 기법의 도입이 불가피할 것으로 보인다. Tabeta[12]와 노[13] 등은 취송류를 직접 시뮬레이션 하는 기법을 제시했으며, 참고로 그림 3에 인천 해역을 대상으로 표층의 취송류를 경험치(풍속의 3%)와 3차원 계산치를 비교하였다.

파도

통상 파도에 의해 유기 되는 표류는 경험적으로 풍속의 0.05%를 추가하고 있으나, 이 또한 이론 근거가 없다. 깊은 물의 경우 Stokes[14]는 규칙파에 의한 표류속도로서 다음의 식을 유도한 바있다.

$$\bar{u} = c(ak)^2$$

여기서 c, a, k는 각각 파도의 전진속도, 파진폭, 그리고 파수를 나타낸다.

Phillips[15]는 규칙파위에 무한히 긴 얇은 막이 놓여 있을 경우 그 막의 전진속도를 다음식으로 유도하였다.

$$\bar{u} = \frac{7}{4}c(ak)^2$$

한편 이 [16]등은 계통적인 조파수조 실험을 실시하여 유한길이의 얇은 막의 파도에 의한 표류속도로써 다음 식을 제안하였다.[그림 4]

$$\bar{u} = C_k \cdot c \cdot \left(\frac{L}{\lambda}\right)^{\frac{1}{3}} (ak)^{\frac{4}{3}}$$

여기서 C_k 는 실험상수로서 1.212를 추천하고 있으며, L, λ 는 각각 막의 길이, 파장을 의미한다.

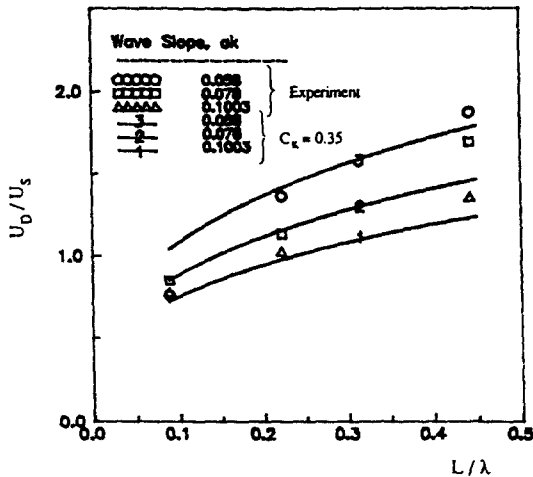


그림 4 비닐길이에 따른 전진속도[16]
(U_s : 비닐전진속도 U_D : 파도의 표류속도 L : 비닐의 길이)

5. 맺으면서

해상누유의 거동에 대한 정확한 추정은 피해의 예측 뿐만아니라 효율적인 방제 대책을 위해서도 매우 중요하다. 그럼에도 불구하고 이론적인 배경과 실험적인 검증은 거치지 않은 채로 제안된 경험 추정기법들이 산재해 있다.

조석에 의한 표층유동의 경우를 제외하고 초기 확산, 바람 및 파도에 의한 이동 모델도 아직 미완성이라 보아 마땅할 것이다. 나아가 궁극적인 표층유동의 정확한 추정이 가능하다 하더라도 그 위에 놓여진 기류가 해수의 표층과 같이 움직인다고 볼 수 있으나 하는 것도 문제이며, 이를 확인하기 위하여 실제 해상에서 누유실험을 할 수 없다는 것은 더욱 커다란 문제인 것이다.

아무튼 우리 조선, 해양산업 관련자들은 선박이나 해양구조물을 설계, 건조하여 취항시킴으로써 그 임무가 끝나는 것이 아니고, 그 들을 둘러싼 바다의 환경문제까지 폭넓은 관심을 가져야 한다는 점을 강조하며 글을 마감하고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] American Patroleum Institute : Proc. of International Oil Spill Conference, Tampa, Florida(1993)
- [2] Fay, J. A. : The spreading of oil slick on a calm sea, oil on the sea ; Plenum Press(1961)
- [3] Hoult, D. P. : Oil spreading on the sea, Annual Review of Fluid Mechanics Vol.4(1972)
- [4] M. Arai et al : Numerical simulation of spilled oil from tanker, J. of Kansai Society of Naval Architects(1994)
- [5] 윤범상, 송지운 : 해상누유의 초기확산 예측 모델 및 수치추정, 대한조선학회 추계발표대회(1995)
- [6] 일본해난방지협회 : 대형 탱커에 의한 재해 방지에 관한 조사연구, 제1차 중간보고서 별책(1967)
- [7] Ramming and Kowalik : Numerical modeling of marine hydrodynamics, Elsevier Scientific Publishing Company(1980)
- [8] 이동연 : 해상누유 확산의 수치해석, 공학석사 학위논문, 서울대학교(1993)
- [9] Blumberg, A. F. and G. L. mellor : A description of a three-dimensional coastal ocean circulation model, Three-dimensional coastal ocean models, N. Heaps, American Geophys. Union(1987)
- [10] M. Fujino and S. Tabeta : Numerical simulation of tidal currents by means of multi-level model, J. of SNAJ vol.170(1991)
- [11] 윤범상, 노준혁 : 해저지형을 고려한 조류유

동의 수치해석, 대한조선학회 논문집 제32권 1호(1995)

[12] S. Tabeta and M. Fujino : Storm surge simulation by means of multi-level model, Report of Faculty of Engineering, Univ. of Tokyo(1993)

[13] 노준혁, 윤범상 : 조석 및 바람에 의한 실해역 표층유동의 계산, 대한조선 학회논문집 32권 2호(1995)

[14] Stokes, G. G. : On the theory of oscillation waves, Trans. Camb. Phil. Soc.8(1847)

[15] Phillips, O. M. : The dynamics of the upper ocean, Cambridge Univ. Press(1977)

[16] 이정목, 강관형 : Investigation of drift velocity of spilt oil in waves, Report of AFERC, POSTECH(1993)



원 고 모 집

본 학회에서는 회원 여러분의 보다 폭넓은 참여를 원하고 있습니다.
주저하지 마시고 투고하여 주십시오.
(많은 분이 참여하실 수 있도록 원고 분량의 기준을 지켜주시기 바랍니다)

