

Fluent를 이용한 오일 붐 누유 모델링

배석한*, 정연철**

*한국해양대학교 대학원, **한국해양대학교 교수

Modelling of Oil Boom Failure using the Fluent

Suk-Han Bae*, Yun-Chul Jung**

*Graduate school of Korea Maritime University, Pusan, Korea

**Professor, Korea Maritime University, Pusan, Korea

요 약 : 해양에 기름이 유출되면 방제작업의 초기단계에서 기름의 이동 및 확산을 차단하기 위하여 오일 붐을 사용하는 것이 일반적이다. 그러나 오일 붐은 유속, 기름의 밀도와 점성, 수심, 기름의 양, 그리고 붐 흡수의 길이 등과 같은 여러 인자들에 의해 그 포획능력이 영향을 받는다. 본 연구에서는 이들 누유인자가 오일 붐의 포획과정에 어떠한 영향을 미치는지를 체계적으로 파악하기 위하여 컴퓨터 모델링을 수행하였다. 모델링을 위하여 CFD(computational fluid dynamics) 프로그램 중에서 가장 널리 알려진 Fluent를 이용하였으며 기존의 실험자료와 비교함으로써 모델링 결과를 검증하였다. 본 연구의 결과는 방제작업 책임자와 오일 붐 설계자에게 유용한 참고자료가 될 것으로 기대된다.

핵심용어 : 오일 붐, 포획능력, 컴퓨터 모델링, CFD, Fluent

Abstract : When oil is spilled at sea, the oil boom is commonly used to tackle the movement and spreading of oil in an early stage of oil spill combat. But, the retaining capability of oil boom is affected by various factors, such as water velocity, viscosity and density of oil, water depth, oil volume and the length of boom draft. In this study, computer modelling was performed to investigate how these factors influence the oil retaining process. The Fluent, most popular one of many CFD(computational fluid dynamics) programs is chosen for modelling and modelling results were verified using the empirical data. It is expected that results of this study will be useful data for oil boom designer and oil spill response commander.

Key words : oil boom, retaining capability, computer modelling, CFD, Fluent

1. 서 론

우리의 바다는 산업발전과 인구의 증가로 인한 각종 산업폐수, 생활오수, 중금속 및 기름 등 다양한 오염원의 유입으로 인해 날이 갈수록 그 오염이 가중되고 있다. 그 중에서도 기름에 의한 해양오염은 단기간에 해양환경과 생태계를 파괴시키며 그 피해가 막대하므로 무엇보다 주의가 요구된다. 기름에 의한 해양오염의 주된 원인 제공자는 선박임이 이미 널리 알려진 사실이며 선박에 의한 대부분의 기름오염은 선박의 좌초, 충돌, 침몰 등 해양사고를 통해 또는 선박운항 중의 설비손상, 부주의, 고의배출 등 다양한 원인에 의해 발생되고 있다. 최근 5년 동안의 우리나라 해양 기름오염사고 통계에 따르면 매년 400건 이상의 크고 작은 사고가 보고되고 있는데, 그 중에서 100kl 이상의 기름이 유출된 사고가 매년 5~7건 그리고 1,000 kl 이상이

유출된 대형사고도 매년 1건 정도 발생하고 있다(김, 2002).

일단 기름이 해양에 유출되면 환경의 피해를 최소화하기 위해 조기에 기름의 확산을 차단하고 이를 회수하는 것이 무엇보다 중요하다. 조기방제에 실패하여 기름이 해안에 도달할 경우 생태계에 미치는 영향도 크지만 이를 회수 및 소제하는 비용도 막대하다. 예를 들어, 해상에서 유출유의 회수에 들어가는 비용은 약 $6,500\$/m^3$ 이지만 해안소제 비용은 $130,000\sim 230,000\$/m^3$ 로 수십배나 증가하는 것으로 알려져 있다(Oil Spill U.S. Law Report, 1994). 해상에서 유출유의 확산을 차단하는 장비로는 오일 붐(oil boom)이 주로 이용되고 있다. 초창기에는 오일 붐을 이용하여 기름을 차단하는 방법이 매우 효과적이라고 판단되었으나, 1967년 유조선 Torrey Canyon호 좌초에 따른 기름 유출과 1969년 Santa Barbara 해상유전 폭발 등 대형 기름오염사고의 방제작업 과정에서 오일 붐에 의한 기름포획에 많은 어려움을 겪게 되었으며(Wilkinson, 1973), 이를 계기로 오일 붐의 구조 및 누유 메커니즘에 대한 연구가 활발하게 진행되었다. 이처럼 오일 붐의 누유 메커니즘에 대한 연구는 1960년대 후반

*종신회원, ycjung@hanara.kmaritime.ac.kr, 051-410-4286

**skybea@hanmail.net, 051-703-6655

부터 본격적으로 진행되었는데 이와 관련된 연구를 살펴보면 다음과 같다.

Wilkinson(1972)은 오일 붐에 갇힌 유층을 역학적인 힘이 지배하는 전반부와 점성응력이 지배하는 점성부로 나누어 생각하였다. 전반부의 경우 유층의 두께는 동역학적으로 계산이 가능한데, 수심과 유층 두께의 비를 기름과 물의 밀도, 유속, 그리고 수심에 의해 정의되는 Froude Number의 함수로서 나타내고 아울러 붐 내부에 기름이 차단되는 Froude Number의 상한치를 제시하고 실험을 통해 이를 증명하였다. 또한, 기름과 물의 경계면에서 에너지 소산에 따른 계면파(interfacial wave) 또는 계면난류(interfacial turbulence)의 존재를 확인하고, 이는 Froude Number 및 기름의 점도와 관련이 있으며 계면난류가 붐 내 기름포획 여부를 결정짓는 주요 인자가 됨을 밝혔다.

Lau and Moir(1977)는 Wilkinson이 제시한 Froude Number가 0.5 이상일 때 붐에 의한 기름의 차단이 불가능함을 실험을 통해 재확인하였으며, 이에 덧붙여 성공적인 차단을 위한 오일 붐의 최소 홀수를 구하는 공식을 제안하였다. 점성부에서 유층의 형태를 지배하는 전단응력은 마찰계수에 의해 결정되는데 마찰계수는 기름의 점도와 밀접한 관련이 있다고 보고하였다. 즉, 점도가 큰 기름은 유층 내부의 순환속도가 느려 상대적으로 기름과 물의 상대속도가 커지고 계면의 전단응력은 커진다고 보았다.

Milgram and Van Houten(1978)은 유적누유(droplet entrainment) 현상을 해석하기 위해 경계면에서의 동압력과 점성력의 상대적인 균형과 계측된 경계면의 형태 사이의 관계를 조사하였다. 해석방법으로는 주어진 유층 형태에 대한 포텐셜 해석으로 경계면 압력분포를 계산한 후 경계면에서의 동역학적 평형방정식으로부터 마찰계수를 구하는 방법을 채택하였다. 연구 결과 저속에서는 점성력이 유층의 형태를 결정하고, 유속이 증가하면서 기름층 전반부는 점성력과 동압력이, 후반부는 점성력이 유층 형태의 결정에 기여함을 보고하였다. 또한, 유속이 증가함에 따라 경계면에 형성되는 Kelvin-Helmholtz과의 영향을 경계면의 표면조도 증가로 인한 표면 마찰계수의 증가로 보았고, 임계속도에 이르러 파가 깨어지면서 유적누유가 발생한다고 설명하였다.

Delvigne(1989)는 한계축적(critical accumulation) 현상에 대해 처음으로 설명하였다. 그는 실험을 통해 오일 붐 내 기름의 포획 실패는 붐 홀수의 크기와는 무관하며 일단 한계유속을 초과했을 경우 모든 기름이 붐을 빠져나가는 현상을 보여주었다. 이런 형태의 누유는 동점도가 $3,000cSt$ 를 초과했을 때 발생하고 동점도의 변화($12\sim33,000cSt$)에 따른 한계유속의 변화($0.14\sim0.31m/s$)를 제시하였다.

1990년 이전까지의 이들 연구는 주로 이론적 분석에 따른 추론과 그 결과를 수조실험을 통해 확인하는 방법으로 수행되어 왔다. 이러한 이론적 연구의 대부분은 흐름을 정상상태(steady state) 및 층류(uniform flow)로 가정하여 고찰하였는데, 이 경우 난류(turbulent flow)의 영향과 유층(oil layer) 내부의 순환 현상을 확인할 수 없는 문제가 있다. 이상을 종합할 때 붐 내에

포획된 기름형상에 영향을 미치는 주요 변수는 Froude수이며 Froude Number는 유속, 기름과 물의 밀도차, 수심 등과 관련이 있음을 알 수 있다. 아울러 유막의 불안정에 기여하는 요소로써 점성응력을 들 수 있고 이 점성 응력은 기름의 점성과 밀접한 관련이 있다. 그 외에도 붐 홀수의 길이, 유량, 수심 등이 붐의 누유 과정에 영향을 미침을 알 수 있다.

1990년대 초부터 CFD(computational fluid mechanics) 기법이 오일 붐의 누유 메커니즘을 연구하는데 이용되기 시작하였다. CFD 기법은 난류의 영향과 유층내 순환류 등 이론적 연구에서 고려할 수 없었던 현상들을 고려할 수 있게 됨으로써 좀 더 사실적인 결과를 얻을 수 있고, 동시에 시간과 비용의 제약으로 실험실 실험에서 수행할 수 없었던 다양한 조건의 실험을 시도할 수 있다는 장점이 있는데 이와 관련된 기존의 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Clavelle and Rowe(1993)는 CFD의 체적법(method of volume of fluid)을 이용하여 축적한계누유 현상을 모델링하였다. An *et al.*(1996)은 CFD를 이용하여 붐의 기름 포획과 유출 과정에 대해 연구하였다. Grilli *et al.*(1996)은 기름과 물의 경계면에서의 Kelvin-Helmholtz 불안정을 모델링하기 위해 Vortex-Sheet 개념과 경계요소법(boundary element method)을 적용하였다.

Brown *et al.*(1997)은 수조실험을 통해 붐의 누유과정을 관찰하였으며 상대적으로 적은 유속인 $0.10\sim0.20m/s$ 범위에서 동점도 $10\sim5,600cSt$ 의 기름이 오일 붐 내에서 포획 또는 유출되는 것을 확인하였다. 아울러 CFD 모델링을 통해 수조실험 결과를 재현하였으며 실험 결과와 모델링 결과가 만족스럽게 일치함을 확인하였다.

Goodman *et al.*(1997)은 대표적인 CFD 모델인 Fluent를 이용하여 오일 붐의 누유 메커니즘을 연구하였는데, 유속이 한계치보다 작을 때 정상흐름과 안정된 유막이 형성됨을 확인하였다. 아울러 수조실험에서 관찰된 Surging 현상도 모델링할 수 있었다. 유속이 한계치보다 클 때 저점성 및 중점성 기름의 경우 연속누유(drainage failure) 및 유적누유(droplet entrainment failure)가 발생하고, 고점성 기름은 축적한계누유(failure by critical accumulation) 및 oil creep 현상이 발생하는 것을 모델링을 통해 확인하였다.

이상에서 살펴본 바와 같이 지금까지 오일 붐의 누유 메커니즘에 관한 연구는 주로 수조실험과 이 실험결과를 설명하기 위해 이론적 해석을 뒷받침하는 연구, 그리고 수조실험의 결과를 CFD 모델링을 통해 재현하고 그 결과를 해석한 연구 등이 주를 이루고 있다. 따라서 본 연구에서는 대표적인 CFD 프로그램으로 공인된 Fluent를 이용하여 오일 붐의 포획 및 누유 과정을 모델링하되 누유 과정에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대하여 종합적으로 검토함으로써 누유 메커니즘을 체계적으로 고찰하고자 한다.

2. Fluent의 소개

2.1 Fluent의 개요

1990년대 초부터 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)이 오일 붐의 기쁨포획 과정을 연구하기 위한 도구로 이용되고 있다. 우주항공 분야에서 처음 개발된 CFD는 그 후 많은 공학분야에서 유용한 연구도구로 각광을 받고 있다. 현재 많은 상용 CFD 프로그램이 개발되어 이용되고 있으며 유체흐름, 열 및 질량전도 문제 등에 다양하게 응용되고 있다. 본 연구에서는 상용 CFD 프로그램중 하나인 Fluent를 이용하여 오일 붐 주변의 물과 기름의 유동현상을 모델링하였다. Fluent는 1983년 Fluent Inc.에 의해 처음 개발되었으며 현재 세계 각국에서 유동문제를 연구하는 도구로서 널리 사용되고 있다. Fluent는 크게 세 부분으로 구성되어 있는데, 격자생성부(grid generator), 유동계산부(flow solver), 그리고 가시화부(physical visualizer)가 그것이다(Fluent User's Guide, 1998).

2.2 기본방정식

Fluent의 유동계산부는 Reynolds Averaged Navier-Stokes 방정식과 난류 모델링 방정식을 수치적으로 풀어나간다. 직각 격자(Cartesian coordinate) 상에서 평균류의 연속방정식 및 운동량방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \tag{1}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial U_i} \right) \right] + \rho g \tag{2}$$

여기서, ρ 는 밀도, U_i 는 평균유속, P 는 압력, g 는 중력가속도, t 는 시간, x_i 는 Cartesian 좌표, 그리고 μ_{eff} 는 유효점도이다. 유효점도(μ_{eff})는 분자점도(μ)와 난류점도(μ_t)의 합으로 정의된다.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \tag{3}$$

Fluent에서는 여러 가지 난류모델을 지원하고 있지만 통상 사용되는 $k-\epsilon$ 난류모델의 경우 난류점도는 다음 식에 의해 결정된다.

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \tag{4}$$

여기서, k 는 단위질량당 난류운동에너지, ϵ 는 에너지 소산율 그리고 C_μ 는 실험상수이다. k 와 ϵ 값은 다음 수송방정식을 풀음으로써 얻을 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - \rho \epsilon \tag{5}$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \epsilon) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \tag{6}$$

여기서 $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k 그리고 σ_ϵ 은 모두 실험상수이다. 일반적으로 수용되는 이들 상수값은 다음과 같다.

$$C_\mu=0.09, C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3 \tag{7}$$

유동계산부는식 (1), (2) 및 (5)를 공간에 대해서는 검사체적법(control volume method)을 그리고 시간에 대해서는 음해법(implicit method)을 사용하여 각각 차분화한다. 차분화된 방정식은 다양한 알고리즘을 통해 수치적으로 풀어진다.

2.3 VOF 모델의 이론

Fluent에서는 두 가지 이상의 서로 섞이지 않는 유체의 유동현상(이 경우 경계면의 위치와 형태가 관심의 대상이다)을 모델링하기 위해 유체체적 모델(VOF 모델, volume of fluid model)을 사용한다. 이 모델은 본 연구에서 관심의 대상인 기름과 물의 경계면에서의 유동현상을 규명하는데 적합한 모델이라고 할 수 있다. 다른 다중상 유체모델(multi-phase fluid model)과 달리 VOF모델은 식 (1), (2), (5) 및 (6)을 모든 유체상에 대해서 풀어나간다. 그리고 유체상을 구분하기 위해 격자내 체적분율(volume fraction)을 의미하는 변수 F 를 도입한다. 만약 F 가 0이면 기름이 가득한 셀, F 가 1이면 물이 가득한 셀, 그리고 F 가 0과 1 사이의 값이면 물과 기름을 함께 포함하고 있음을 의미한다. 일반적으로 F 는 공간과 시간의 함수이며 다음 보존방정식에 의해 지배된다.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \tag{8}$$

이 방정식은 속도장 U_i 가 얻어진 다음 양해 시간 진행법(explicit time marching scheme)에 의해 풀어진다. 시간진행과정에서 계산의 안정성을 확보하기 위해 Courant Fridrich Lewy(CFL) 수는 1보다 작아야 하는데 Fluent는 자동적으로 이를 검사하고 조정한다. 지배방정식 (1), (2), (5) 및 (6)을 전체 계산영역에 대해 풀고 난 다음 그 결과로 얻어진 속도장은 각 유체상 또는 그 혼합물의 계산에 다시 이용된다. 그리고 지배방정식 (1), (2), (5) 및 (6) 내의 밀도 ρ 와 분자점도 μ 값은 F 값에 의해 다시 결정된다.

$$\rho = F\rho_w + (1-F)\rho_o \quad (9)$$

$$\mu = F\mu_w + (1-F)\mu_o \quad (10)$$

여기서, 아래첨자 o 와 w 는 각각 기름과 물을 의미한다. F 값을 기초로 기름과 물 사이의 경계면을 쉽게 추적할 수 있다. 방정식을 풀고 나면 유동장은 벡터도(vector plot), 등치도(contour plot) 또는 종단면도(profile plot) 등을 포함한 여러 도면으로 중첩 또는 단일 도면으로 가시화할 수 있고 이들 그림을 이용하여 유동장을 정량적으로 분석할 수 있다.

3. 모델링 결과 및 고찰

3.1 모델링 조건

1) 계산격자

모델링을 위해 먼저 해당 영역에 대한 계산격자의 구성이 요구된다. 본 연구를 위해 만들어진 2차원 평면격자의 한 예를 Fig. 1에 도시하였다.

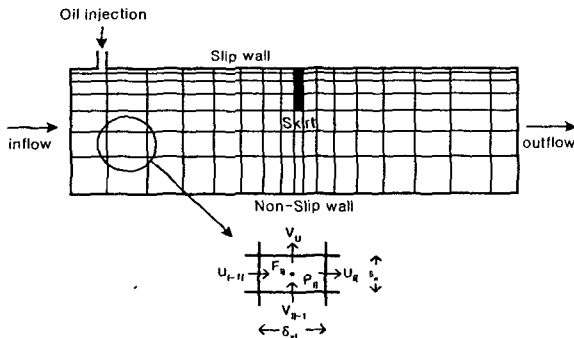


Fig.1 Example of a mesh with typical grid cell

Fig.1에서 보듯이 계산격자는 불규칙 격자 즉, 붐 스킨트 주변에서는 작은 격자를 그리고 붐에서 멀어질 수록 큰 격자를 선택하였는데, 이는 붐 주변의 유동현상을 좀 더 정확하게 관찰하기 위해서이다. 전체 계산영역의 크기는 가로 $8m$, 세로 $0.3m \sim 1.5m$ 이고, 붐은 좌측 끝단으로부터 $5m$ 떨어진 곳에 위치한다. 붐 스킨트의 두께는 $2cm$ 이고, 길이는 $7cm$, $10cm$, $15cm$ 등 세가지 종류를 채택하였다. 격자의 수는 가로 240개, 세로 70개로 구성되었다.

2) 경계조건

Fluent에서는 필요에 따라 여러 형태의 경계조건을 부여할 수 있다. 본 연구의 경우, 계산영역의 상부와 하부는 Wall 경계로 지정되었는데 그 중에서도 상부는 Slip Wall(마찰계수가 0), 하부는 Non-slip Wall 조건으로 각각 지정되었다. 상부경계의 경우, 본 연구에서는 자유표면(free surface)이지만 Fluent에서 자유표면 경계를 고려해줄 수 없으므로 Wall 경계로 지정하였

다. 이 Wall 경계는 공기와 접촉하는 자유표면에 따른 수면 높이의 변화를 고려할 수 없는 단점이 있으나 그로 인한 차이는 크지 않을 것으로 생각된다(Brown *et al.*, 1997). 좌측경계에서는 일정한 유속이 들어오는 유속경계 즉, Velocity Inlet로 지정되었으며 우측경계는 경계 상류의 유동에 적은 영향을 미치는 연속경계 즉, Outflow Boundary로 각각 지정되었다. 기름의 주입을 위해 상부 Wall에 주입구가 만들어졌으며 좌측경계와 마찬가지로 Velocity Inlet를 통해 기름이 주입된다.

2차원 실험이므로 유속의 변화는 x 성분만 다양하게 변화시켰으며 y 성분은 항상 0으로 고정하였다. 안정된 해를 얻기 위해 매 계산스텝마다 최대 50회의 반복계산이 이루어지도록 배려하였다. 계산시간 간격은 해의 수렴성을 양호하게 하기 위해 0.01초로 지정되었으나 수렴이 잘 이루어지지 않을 때에는 시간 간격을 더 작게 하여 계산하였다.

3.2 모델링 결과의 검증

모델링 결과를 검증하기 위하여 수조실험 자료와 비교하였다. 바람직한 것은 직접 수조실험을 수행하여 그 결과를 모델링 결과와 비교 검토하는 것이지만, 본 연구에서는 시간과 비용의 제한으로 수조실험을 직접 수행하지는 못하였다. 다만, 그 대안으로서 기존의 연구결과에서 제시된 실험결과를 이용하기로 하였다.

검증을 위해 채택된 수조실험 자료는 Milgram and Van Houten(1978)의 연구 결과로부터 얻어졌다. 수조실험에 사용된 기름은 밀도가 $880kg/m^3$, 점도가 $125cSt$ 인 Heavy Mineral Oil이며, 유속 $0.23m/s$ 및 $0.30m/s$ 의 조건에서 수조실험이 실행되었다. 동일한 조건으로 실행된 모델링 결과와 수조실험 결과를 서로 비교하여 도시한 것이 Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)이다.

Fig. 2(a)는 유속이 $0.23m/s$ 일 때의 비교인데, 두 데이터 사이에 비교적 유사한 결과를 보여주고 있다. 특히 유막의 전반부에서는 양호하게 일치하는 것을 확인할 수 있다. 유막의 후반부에서 상이한 결과를 보여주고 있는데 이는 실험 데이터의 오차 때문으로 해석된다.

Fig. 2(b)는 유속이 $0.30m/s$ 일 때의 비교인데, 수조실험 데이터의 경우 경계면 부근에서 매우 불안정한 모습을 보이는 반면 모델링 데이터의 경우 약간 불안정한 모습을 보여주고 있다. 이러한 결과는 경계면에 심한 난류가 형성될 경우 경계면의 위치가 불안정하게 되어 시간의 흐름에 따라 심하게 변화하게 되는데, 실험 데이터는 순간적인 영상을 촬영한 것이고 모델링 데이터는 계산시간스텝 동안의 평균적인 위치를 나타낸 것이기 때문인 것으로 해석된다. 이를 뒷받침하듯이 평균적인 유막의 두께는 두 데이터가 유사한 것으로 나타났다.

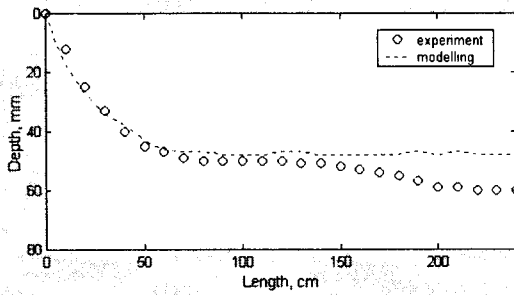


Fig. 2(a) Comparison of experiment and modelling data

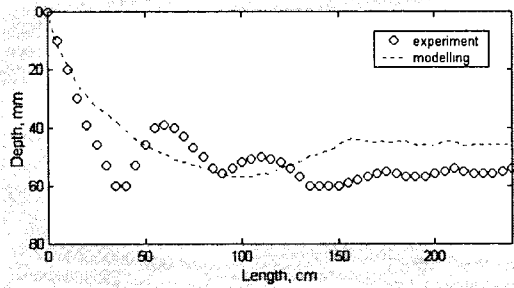


Fig. 2(b) Comparison of experiment and modelling data

3.4 주요 인자에 대한 검토

1) 유속의 영향

유속이 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 240cSt, 기름의 밀도 870kg/m³, 수심 1.0m, 그리고 붐 흡수 15cm이다. 초기유속 0.1m/s로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름을 0.015m/s의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가 안정되고 나면 유속을 0.05m/s씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을 0.4m/s까지 계속 증가시키면서 모델링을 수행하였으며 유속 0.2, 0.3, 0.4m/s에서의 결과를 도시한 것이 Fig. 3이다.

그림을 보면 유속이 증가함에 따라 유막의 길이는 점차 짧아지는 반면 유막의 두께는 증가하는 것을 확인할 수 있다. 또한 유속이 강해지면서 기름과 물의 경계면이 불안정하게 변화되는 것을 알 수 있다. 유속이 0.38m/s에 도달하였을 때 조금씩 누유되기 시작하였으며 0.4m/s에서 이러한 누유 현상이 두드러졌다. 결과적으로 유속의 증가는 유막의 형태를 두껍고 짧게 변화시킬 뿐 아니라 물과 기름의 상대속도를 증가시켜 경계면에 불안정성을 야기함으로써 누유의 직접적인 원인이 됨을 알 수 있다.

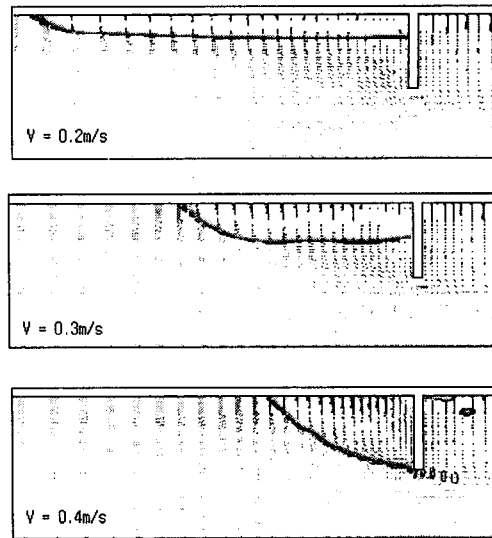


Fig. 3 Effect of velocity on oil slick

2) 점도의 영향

기름의 점도가 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 10, 240, 5600cSt, 기름의 밀도 870kg/m³, 수심 1.0m, 그리고 붐 흡수 15cm이며 기름은 100초 동안 주입하였다. 모델링 방법은 유속 모델링의 방법과 동일하게 하였으며 유속 0.4m/s에서 각 점도의 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 4이다.

일반적으로 점도는 누유에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 그림에서 알 수 있듯이 유막의 형태는 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 다만 기름 내부의 순환속도에서 각 점도 사이에 큰 차이를 보였는데 점도가 높을 수록 기름 내부의 순환속도가 약함을 알 수 있다. 이로 인해 점도가 높을 수록 물과 기름의 상대유속이 증가하고 경계면의 불안정이 두드러지게 나타났다. 누유 개시속도에 있어서는 저, 중점도 기름의 경우 0.40m/s, 고점도 기름의 경우 0.38m/s로서 점도에 따라 약간의 차이는 있지만 큰 차이를 보이지 않았는데, 이에 비추어 기름의 점도 자체는 누유 개시속도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

3) 밀도의 영향

기름의 밀도가 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 240cSt, 기름의 밀도 834, 870, 953kg/m³, 수심 1.0m, 그리고 붐 흡수 15cm이다. 초기 유속 0.1m/s로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름을 0.015m/s의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 유속 0.25m/s에서 각 밀도의 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 5이다.

그림에서 보듯이 밀도가 증가할 수록 유막의 두께가 점점 두꺼워지는 것을 알 수 있는데, 이는 밀도의 변화에 따른 중력의 변화로 인해 유막이 점차 두꺼워지는 것으로 해석된다. 누유 개

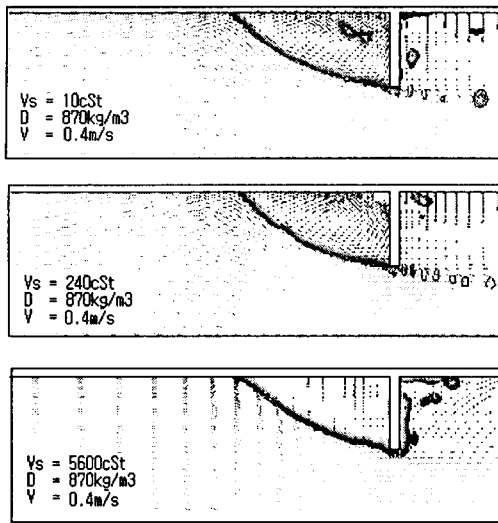


Fig. 4 Effect of viscosity on oil slick

시속도에 있어서는 저밀도 기름의 경우 $0.45m/s$, 중밀도 기름의 경우 $0.40m/s$, 그리고 고밀도 기름의 경우 $0.25m/s$ 로 각각 나타났는데, 이에 비추어 기름의 밀도는 누유 개시속도에 아주 민감한 영향을 미친다는 것을 알 수 있다.

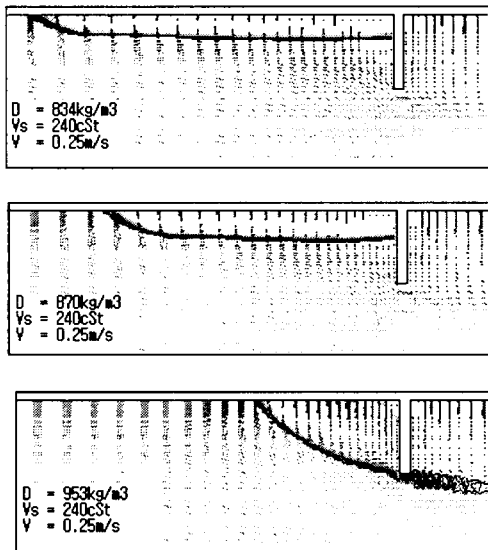


Fig. 5 Effect of density on oil slick

4) 수심의 영향

수심이 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 $240cSt$, 기름의 밀도 $870kg/m^3$, 수심 0.3, 0.5, 1.0, 1.5m, 그리고 붐 흘수 15cm이며 기름을 100초 동안 주입하여 유속 $0.3m/s$ 에서 각 수심의 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 6이다.

그림을 보면 수심 0.3~1.0m 사이에서는 수심이 얇을 수록

유막의 두께는 두꺼워지고, 길이는 짧아짐을 알 수 있다. 하지만 수심 1.0~1.5m 사이에서는 두께와 길이의 변화가 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 수심이 얇을 수록 붐 하부의 유속이 증대되고 이에 따른 붐 주위 동압력의 변화에 따른 것으로 해석된다. 일정 수심 이상에서는 유막의 형태에 변화가 없는 것으로 보아 수심의 영향은 일정 범위 이내에서 유막의 형태에 영향을 미침을 알 수 있다. 누유개시 속도는 수심 0.3m에서 $0.30m/s$, 수심 0.5m에서 $0.35m/s$, 수심 1.0m에서 $0.40m/s$ 그리고 1.5m에서 $0.40m/s$ 로 각각 나타났으며, 이에 비추어 수심은 유막의 형태뿐 아니라 누유개시 속도에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

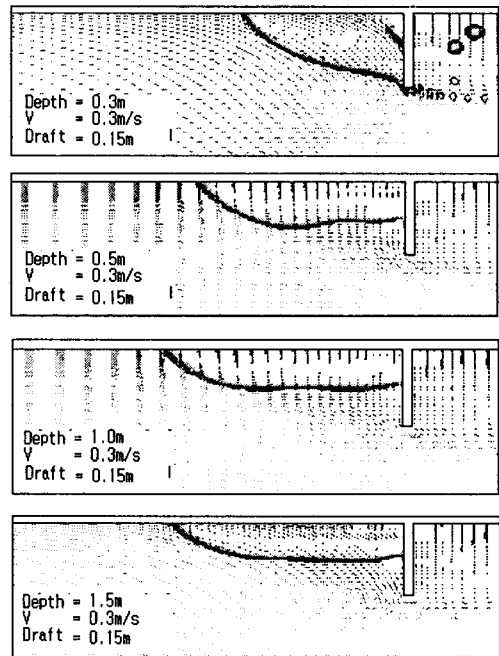


Fig. 6 Effect of water depth on oil slick

5) 기름 양의 영향

기름 양이 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 $240cSt$, 기름의 밀도 $870kg/m^3$, 기름의 양 50, 100, 150초, 수심 1.0m, 그리고 붐 흘수 15cm이며 유속 $0.3m/s$ 에서 각 기름 양에 대한 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 7이다.

그림에서 보듯이 유량이 많아지면 많아질 수록 유막의 길이는 점점 길어지며 두께도 조금씩 두꺼워지는 것을 알 수 있다. 누유되는 속도는 50초의 경우 $0.42m/s$, 100초의 경우 $0.40m/s$, 그리고 150초의 경우 $0.40m/s$ 로 각각 나타났으며 큰 차이를 보이지는 않았다. 이로 미루어 유량의 증가는 유막의 길이를 증가시키며 동시에 두께도 약간씩 증가시킨다는 것을 알 수 있다. 누유 개시속도에도 약간의 영향을 미치지만 큰 영향은 없다는 것을 알 수 있다.

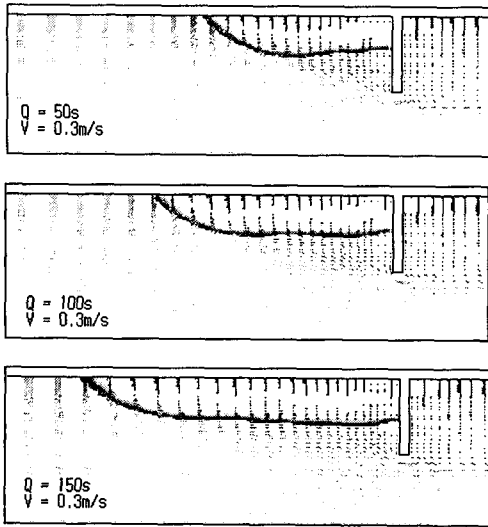


Fig. 7 Effect of oil volume on oil slick

6) 붐 흡수의 영향

붐 흡수가 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 240cSt, 기름의 밀도 870kg/m³, 수심 1.0m, 그리고 붐 흡수 7, 10, 15cm이며 유속 0.25m/s에서 각 수심에 대한 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 8이다.

흡수 7cm의 경우 연속누유가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 기름 포획에 필요한 최소흡수에 미달되었기 때문이다. 따라서 연속누유를 방지하기 위해서는 흡수의 크기가 일정 이상이어야 하며 그 크기는 기름의 양과 밀접한 관련이 있다. 흡수 10cm와 15cm의 경우, 유막의 전반부는 그 형태가 비슷하게 나타났으나 유벽에 가까이 갈수록 흡수가 작은 쪽의 유막이 더 두껍게 나타났다. 이는 유벽 주변에서의 유동의 차이로 인해 발생하는 현상으로 흡수가 작은 쪽의 유속이 더 강하고 이로 인한 압력저하가 유막의 두께를 두껍게 하는 것으로 해석된다. 누유개시 속도는 7cm의 경우 0.25m/s, 10cm의 경우 0.35m/s, 그리고 15cm의 경우에는 0.40m/s로 각각 확인되었다. 이로 미루어 스커트 길이가 길수록 기름을 포획하는데 유리하다는 것을 알 수 있으나 앞에서도 언급하였듯이 조류의 동압력으로 인해 스커트 길이를 무한정 길게 할 수는 없다.

5. 결론

본 연구에서는 Fluent를 이용하여 붐에 갇힌 기름의 누유에 영향을 미치는 누유인자에 대하여 체계적으로 검토하였으며 그 결론은 다음과 같다.

1. 유속이 증가함에 따라 유막의 길이는 짧아지고 유막의 두께는 증가한다. 또한 강한 유속은 기름과 물의 경계면에 불안정을 야기하며 결국 누유를 일으키는 원인이 된다.
2. 점도는 크면 클 수록 기름 내부의 순환속도의 차이로 인해 경계면에서 불안정을 야기하나 유막의 형태나 누유 개시속도에 큰 영향을 미치지 아니한다.

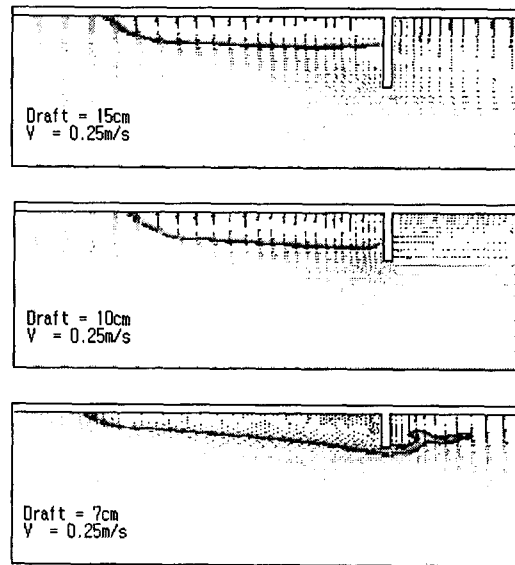


Fig. 8 Effect of boom draft on oil slick

3. 밀도가 크면 클 수록 증력으로 인해 유막의 두께가 더 두꺼워지며 이로 인해 누유 개시속도도 현저하게 달라진다. 즉, 밀도가 클 수록 낮은 유속에서 누유가 발생된다.

4. 수심이 최소수심 이하인 경우, 붐 하부의 유속 증대로 인해 유막의 두께가 증가하고 결국 낮은 유속에서도 누유가 발생된다. 그러나 최소수심 이상인 경우 수심에 관계없이 유막의 형태 및 누유속도는 거의 일정하다.

5. 기름 양의 증가는 유막의 길이를 현저하게 증가시키는 반면 두께는 약간 증가시키며 이로 인해 누유개시 속도도 다소 작아진다.

6. 최소흡수 이하에서는 연속누유가 발생하며 최소흡수의 크기는 유량과 밀접한 관련이 있다. 최소흡수 이상에서는 흡수의 크기에 따라 유막의 형태에 차이가 발생하는데 즉, 흡수가 작을 수록 유벽 근처 유막의 두께가 증가하고 결국 저유속에서 누유가 발생된다.

본 연구의 결과는 앞으로 오일 붐을 설계하는 설계자에게는 물론이고 현장에서 오일 붐을 운용하는 방재책임자에게도 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구와 관련한 앞으로의 연구과제는 컴퓨터 모델링 결과를 현장에 직접 적용하기 위한 연구가 필요하다. 즉, 본 연구에서는 붐의 누유에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 검토를 위해 일부 가상의 조건을 도입하여(붐 흡수의 크기, 수심 등) 모델링을 수행하였으나, 현장의 조건을 그대로 적용하거나 차원해석이 수반된 연구가 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

[1] 김상운, "해양오염실태와 방지대책", 제11회 한국해양수산정책포럼, 2002, pp. 3~9.
 [2] An, C.-F., E. J. Clavelle, H. M. Brown and R. M. Barron, "CFD Simulation of Oil Boom Failure", in Proc. of 4th

- Ann. Conf. of CFD Soc. of Canada, Ottawa, On, Canada, June 2-4, 1996.
- [3] Brown H. M., R. H. Goodman, D. -F. An, and J. bittner, "Boom Failure Mechanism: Comparison of Channel Experiments with Computer Modeling Results", In Proc. of 20th AMOP Tech. Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 11-13, 1997.
- [4] Clavelle, E. J. and R. D. Rowe, "Numerical Simulation of Oil Boom Failure by Critical Accumulation", in Proc. of 16th AMOP Tech. Seminar, Calgary, AB, Canada, June 7-9, 1993, pp. 409-418.
- [5] Delvigne, G. A. L., "Barrier Failure By Critical Accumulation of Viscous Oil", in proceedings of International Oil Spill Conference, American Petroleum institute, Washington D. C., 1989, pp. 143~148.
- [6] Fluent User's Guide, version 5.4, Fluent, Inc., Lebanon, NH, USA, 1998.
- [7] Goodman, R. H., H. M. Brown, C. -F. An and R. D. Rowe, "Dynamic Modeling of oil Boom Failure Using Computational Fluid Dynamics", In Proc. of 20th AMOP Tech. Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 11-13, 1997.
- [8] Lau, Y. L. and J. Moir, "Booms Used for Oil Slick Control", in Proceedings of the American Society of Civil Engineers, ASCE, Vol. 105, No. EE2, 1977, pp. 369~382.
- [9] Milgram, J. H. and R. J. Van Houten, "Mechanics of a Restrained Layer of Floating Oil above a water Current", J. Hydraulics, Vol. 12, No. 3, 1978, pp. 93-108.
- [10] Oil Spill U. S. Law Report, Cutter Information Corp., March 1994.
- [11] Wilkinson, D. L., "Dynamics of Contained Oil Slicks", J. Hydraulics Division, Vol. 98, No. HY6, 1972, pp. 1013-1030.
- [12] Wilkinson, D. L., "Limitations to Length of Contained Oil Slicks", J. Hydraulics Division, Vol. 99, No. HY5, 1973, pp. 701-712.