

工學碩士 學位論文

Fluent를 利用한 오일 붐 漏油 모델링

Modelling of Oil Boom Failure using the Fluent

指導教授 鄭 然 喆

2003年 2月

韓國海洋大學校 大學院

運航시스템工學科 裴 碩 漢

本 論文을 裴 碩漢의
工學碩士 學位論文으로 認准함.

委員長 工學博士 金 昌 濟 (印)

委 員 工學博士 薛 東 一 (印)

委 員 工學博士 鄭 然 喆 (印)

2002年 12月 26日

목 차

Abstract	i
표목차	iii
그림목차	iii
1. 서 론	1
2. 이론적 배경	7
2.1 붐의 종류와 특성	7
2.2 붐의 누유과정	10
2.3 유체 동역학과 누유인자	13
3. Fluent의 소개	18
3.1 Fluent의 개요	18
3.2 기본 방정식	18
3.3 VOF 모델의 이론	20
4. 모델링 결과 및 고찰	22
4.1 모델링 조건	22
4.2 모델링 결과의 검증	23
4.3 주요 인자에 대한 검토	26
5. 결 론.....	36
참고문헌.....	38

Modelling of Oil Boom Failure using the Fluent

Suk Han, Bae

*Department of Ship Operation Systems Engineering
Graduate School of Korea Maritime University*

Abstract

Marine oil pollution attracts scientist's attention because it can cause much damage to the marine environment in short period of time. If oil comes in marine environment, it is most important to tackle and recover the oil as soon as possible. The oil boom is used to tackle the spilled oil at sea and many kinds of oil boom are now developed and used.

The effectiveness of oil boom depends on how well it contains oil and many factors such as water velocity, viscosity and density of oil, water depth, oil volume, and the length of boom draft are known as the cause of oil boom failure.

In this study, computer modelling was performed to investigate how those factors influence the oil containment process. The Fluent, most popular one of many CFD(computational fluid dynamics) programs was chosen for modelling tool. The modelling results were verified using the empirical data. The result of this study are as follows.

As water velocity increases, the length of oil slick decreases while the thickness of oil slick increases. Also, strong water velocity causes the

instability on interface between oil and water. As oil viscosity increases, the instability on the interface between oil and water grows, but it doesn't cause the big difference in critical velocity for oil escape. As oil density increases, the thickness of oil slick increases due to the effect of gravity force, so that the big difference in critical velocity is resulted. In water depth below minimum depth, the shape of oil slick is changed as water depth changes. In water depth above minimum depth, the shape of oil slick is almost uniform. As oil volume increases, the length of oil slick increases while the thickness of oil slick increases slightly. In the length of boom draft below minimum length, drainage failure is occurred. Minimum length is determined by volume of oil. As length of boom draft increases, critical velocity increases and shape of oil slick is changed slightly.

표목차

Table 2-1 Types of oil boom and performance	8
Table 4-1 Computational conditions vs parameters	26

그림목차

Fig. 2-1 Structure of typical oil boom	7
Fig. 2-2 Escape of oil from a boom	10
Fig. 2-3 Drainage failure	11
Fig. 2-4 Droplet entrainment failure	11
Fig. 2-5 Critical accumulation failure	12
Fig. 2-6 Definition sketch of oil slick	13
Fig. 4-1 Example of a mesh with typical grid cell	22
Fig. 4-2(a) Comparison of experiment and modelling data	24
Fig. 4-2(b) Comparison of experiment and modelling data	25
Fig. 4-3 Effect of velocity on oil slick	27
Fig. 4-4 Effect of viscosity on oil slick	28
Fig. 4-5 Effect of density on oil slick	30
Fig. 4-6 Effect of water depth on oil slick	31
Fig. 4-7 Effect of oil volume on oil slick	33
Fig. 4-8 Effect of boom draft on oil slick	34

1. 서론

삼면이 바다로 둘러싸인 우리나라는 천혜의 해양자원을 보유하고 있다. 또한 우리나라의 바다는 해안선을 따라 어장과 양식장이 밀집되어 있어 수산자원의 공급원이 되고 각종 레저 스포츠, 관광 등 휴식공간도 제공한다. 국토면적이 비교적 작고 육상자원이 부족한 우리나라는 해양자원의 개발이 매우 중요하다. 하지만 해양자원의 개발을 위해서는 해양환경 보존이 선행되어야만 가능하므로 해양환경의 보존에 대한 특별한 관심과 노력이 요구되고 있다.

우리의 바다는 산업발전과 인구의 증가로 인해 각종 산업폐기물, 생활오수, 중금속, 기름 등 다양한 오염원의 유입으로 날이 갈수록 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 알려져 있으며 대부분의 기름오염사고는 선박의 좌초, 충돌, 침몰 등 해양사고를 통해 또는 선박운항 중의 설비손상, 부주의, 고의배출 등 다양한 원인에 의해 발생되고 있다.

해양사고로 인한 기름의 해양유입은 우리나라의 경제구조와 밀접한 관련이 있다. 대외무역에 크게 의존하고 있는 우리나라는 앞으로도 수출입 물동량의 증가로 선박의 대형화와 입·출항 선박척수의 증가가 지속될 것으로 예상되며 이에 따른 해양사고의 증가도 예상된다. 최근 5년 동안의 우리나라 해양 기름오염사고 통계에 따르면 매년 400건 이상의 크고 작은 사고가 보고되고 있는데, 그중에서 100kl 이상이 유출된 사고가 매년 5~7건 그리고 1,000 kl 이상이 유출된 대형사고도 매년 1건 정도 발생하고 있다[1].

일단 기름이 해양에 유입되면 해양환경의 피해를 최소화하기 위해 조기에 기름의 확산을 차단하고 이를 회수하는 것이 중요하다. 조기방제에 실패함으로써 유출된 기름이 해안에 도달하면 그에 따른 직접적인 피해도 크지만 부수적인 소제비용도 막대하게 요구된다. 예를 들어, 해상에서 유출유의 회수에 들어가는 비용은 약 $6,500\$/m^3$ 이지만 해안소제 비용은 $130,000\sim 230,000\$/m^3$ 로

회수비용의 수십배나 되는 것으로 알려져 있다[23].

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 폭발에 따른 기름유출과 대형 기름오염사고의 방제작업 과정에서 오일 붐에 의한 기름포획에 많은 어려움을 겪게 되었으며[25], 이를 계기로 오일 붐의 구조 및 누유 메커니즘에 대한 연구가 활발하게 이루어졌다.

일반적으로 오일 붐의 기름포획 과정에 영향을 미치는 인자로는 파도, 조류, 바람과 같은 환경적 인자와 기름의 양, 점도, 밀도와 같은 물리적 인자 그리고 붐의 안정성, 붐 흘수와 같은 구조적 인자를 들 수 있다[4]. 오일 붐의 누유 메커니즘에 대한 연구를 위해 바람직한 방법은 파랑과 조류를 동시에 고려하여 그 영향을 파악하는 것이지만 아직까지는 기술적인 문제로 인해 조류와 파랑을 분리하여 연구가 이루어지고 있다. 일반적으로 파랑은 오일 붐의 위치를 불안정하게 함으로써 붐의 상부로 기름을 넘치게 하거나 하부로 기름을 유출시키며, 조류는 일정 속도 이상에서 붐에 갇힌 유막을 분리시킴으로써 붐 하부로 기름을 유출시키게 된다.

앞에서 언급한 바와 같이 오일 붐의 누유 메커니즘에 대한 연구는 1960년대 후반부터 본격적으로 진행되었는데, 1990년 이전까지는 주로 이론적 분석에 따른 추론과 그 결과를 수조실험을 통해 확인하는 방법으로 수행되어왔다. 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 고려할 수 없는 문제가 있다. 이와 관련된 기존의 연구들을 살펴보면 다음과 같다.

Wicks(1969)는 유층의 전반부(frontal zone)가 중력과 유사하게 작용하는 것으로 간주하고 전반부 유층의 두께를 구하는 공식을 제시하였다. 점성부(viscous zone)의 경우 유층의 평형은 정압력과 계면 전단응력의 균형에 의해

유지되는 것으로 간주하고 선형적으로 변하는 유속분포와 계면 전단응력을 이용하여 유층 내부의 순환류를 설명하였다. 동 연구에서 사용한 유층 내의 유속 분포가 선형적으로 변한다는 가정은 틀린 것으로서 순환유속이 커지면 계면 전단응력도 커지는데 이는 논리와 반대되는 개념이다.

Cross and Hoult(1972)는 유층 전반부의 존재를 무시하고 대신 유층을 단순히 하류로 갈수록 성장하는 Leading Edge를 가지는 것으로 간주하였다. 유층 내의 순환류, 유층의 무게, 또는 유한수심을 가진 흐름 등에 대해서는 설명하지 못하였으며 기본적으로 Wicks의 분석과 동일하다.

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.

Wilkinson(1973)은 유한 수심 흐름의 영향을 고려함으로써 유층의 불균형을 야기하는 여러 조건을 발견하였다. 유층 전반부의 경우 그는 1차원 운동량 방정식을 적용하여 유층 전반부의 두께를 구하는 식을 제시하였는데, 두께는 유속, 수심 및 기름의 밀도에 좌우됨을 밝혔다. 그리고 그는 Froude Number가 0.5 이상일 때 물의 운동량 변화율과 압력 사이에 균형이 깨어지므로 유막 전반부가 불안정 상태에 놓이게 되고, 또한 유막의 두께가 총 수심의 0.3배 이상일 때 유막이 불안정하게 됨을 증명하였다.

Lau and Moir(1979)는 Wilkinson이 제시한 Froude Number가 0.5 이상일 때 붐에 의한 기름의 차단이 불가능함을 실험을 통해 재확인하였으며, 이에 덧붙여 성공적인 차단을 위한 새로운 조건을 제시하였다. 즉 실험 데이터와 간단

한 모델을 기초로 기름 포획에 필요한 오일 붐의 최소홀수를 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-Helmholtz파의 영향을 경계면의 표면조도 증가로 인한 표면 마찰계수의 증가로 보았고, 임계속도에 이르러 파가 깨어지면서 유적누유가 발생한다고 설명하였다.

Delvigne(1985, 1988)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 3,000cSt를 초과했을 때 발생하고 동점도의 변화(12~33,000cSt)에 따른 한계유속의 변화(0.14~0.31m/s)를 제시하였다.

1990년대 초부터 CFD(computational fluid mechanics) 기법이 오일 붐의 누유 메커니즘을 연구하는데 이용되기 시작하였다. CFD 기법은 난류의 영향과 유층 내 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 있는 장점이 있다.

Clavelle and Rowe(1993, 1995, 1996)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-Helmholt 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 $0.10\sim 0.20m/s$ 범위에서 동점도 $10\sim 5,600cSt$ 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 유층이 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.

한편, 오일 붐의 누유 메커니즘과 관련된 국내의 연구는 다음과 같다.

Bai and Kim(1993)은 유층의 형태를 결정하기 위한 이론적 해석방법을 제시하였는데, 그들은 정상유동 가정하에서 경계면 근처의 경계층내 유동은 층류 점성유동으로 그리고 그 외부는 비점성으로 가정하고 물의 동점성 계수를 인위적으로 증가시킴으로써 모델링 결과와 실험 결과 사이에 유사한 결과를 얻었다.

이정목 등(1997, 1998)은 유적누유가 발생하는 시기를 누유개시 시점으로 보고 유적누유 개시 속도를 예측하는 식을 유도하였다. 누유개시 속도는 밀도차, 계면장력, 유속 등에 의해 영향을 받지만 유속이 가장 중요한 요소라고 설

명하였다. 또한, 일반적인 유속에서도 조류의 동압(dynamic pressure)에 의해 붐 스킨트의 변형이 일어나 흡수의 깊이가 감소함으로써 누유가 일어나므로 붐의 기름포획 능력을 개선시키기 위해 이중유벽 설치의 유효성을 증명하고, 이 경우 붐 사이의 간격은 붐 깊이의 10배 정도가 적당함을 제안하였다.

송무석 등(1998)은 오일 붐 내에 포획된 유층의 거동을 2차원 회류수조를 이용하여 실험적으로 연구하였다. 이들은 다양한 경계면의 거동과 조건에 따른 누유의 손실 방식을 차원해석을 통하여 정리하고 유적누유와 연속누유의 발생 메커니즘을 설명하였다.

도덕희 등(1999, 2000)은 비정상 유동장에서 이중유벽 사이에 가두어진 기름이 빠져나가는 주된 메커니즘을 규명하기 위하여 기름과 물 사이의 경계면 유동을 관찰하였다. 누유 패턴을 분석함으로써 이중유벽이 단일유벽보다 우수하다는 것을 실험을 통해 증명하였다.

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 모델링 하되 누유 과정에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대하여 종합적으로 검토함으로써 누유 메커니즘을 체계적으로 고찰하고자 한다.

이를 위해 2장에서는 이론적 배경을 통해 오일 붐의 종류와 특징, 누유 과정, 오일 붐 동역학 그리고 누유 인자 등에 대해 소개하고, 3장에서는 본 연구에 사용된 Fluent 프로그램에 대해 설명하며, 4장에서는 모델링에 사용된 실험 조건, 모델링 결과의 검증, 오일 붐의 누유과정에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 종합적인 모델링과 그 결과를 제시하며, 마지막으로 5장에서는 결론을 도출하였다.

2. 이론적 배경

2.1 붐의 종류와 특성

오일 붐은 종류마다 조금씩 차이는 있으나 일반적으로 물과 기름이 튀어 넘어가는 것을 막기 위한 건현(freeboard), 하부로 기름이 빠져나가는 것을 막기 위한 수면하 스커트(skirt), 공기 또는 어떤 부력물질에 의해 부력을 얻기 위한 부력재(floatation member), 그리고 바람, 파도 및 조류 등의 영향에 견딜 수 있는 종방향 장력재(tension member) 등으로 각각 구성되어 있다(Fig. 2-1 참조).

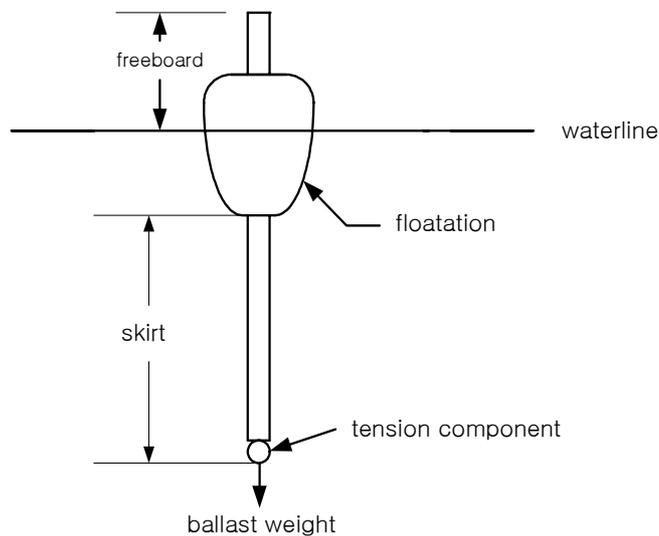


Fig. 2-1 Structure of typical oil boom

붐은 보통 고정식 붐(solid flotation boom), 장력재 붐(tension member boom), 팽창식 붐(inflatable boom), 펜스식 붐(fence boom) 등의 네가지 기본 형태로 분류되며 그 성능 및 물리적 특성은 Table 2-1과 같다.

Table 2-1 Types of oil boom and performance

종류	환경조건			성능		물리적 특성		
	외해 Hs > 1m V < 1kt	항만 Hs < 1m V < 1kt	내해 Hs < 0.35m V < 0.5kt	파 추종성	강도	취급 편의성	소제 편의성	부피
고형식 붐	2	1	1	2	2	2	1	3
장력재 붐	1	2	2	1	1	3	3	2
팽창식 붐								
압력팽창	1	1	2	2	1	1	1	1
자체팽창	2	1	1	1	3	1	2	1
펜스식 붐	3	2	1	3	2	2	3	3
Hs : 유의파고 V : 유속 1 = Good 2 = Fair 3 = Poor								

2.1.1 고형식 붐

부력재는 플라스틱 폼과 같은 부양성 재료로 구성되어 있고, 스킨트는 그 끝단에 추가 달려있으며 기름과 물에 잘 견디는 섬유로 만들어진다. 취급을 용이하게 하기 위해 15~20m 길이로 제작되며 서로 연결하여 사용한다. 이 붐의 장점은 팽창시킬 필요가 없고 부력재에 약간의 손상이 가해져도 성능의 저하를 가져오지 않는다는 것이다. 단점은 넓은 수납공간이 필요하며 보관 도중에 모양의 변화가 일어날 가능성이 있다는 것이다.

2.1.2 장력재 붐

한 방향으로만 오일 펜스의 기능을 할 수 있으나 대형 유출사고시 적합하다. 선박으로 예인시 오목 형상을 이루어 파 추종성이 뛰어나다. 강한 바람이나 파도에 잘 견딜 수 있도록 각 구획마다 수직 보강재와 폼 부력재 또는 부

력 챔버가 부착되어 있다. 단점으로는 비용이 비싸고 설치가 어렵다.

2.1.3 팽창식 붐

기체의 주입에 의해 부력을 얻기 때문에 부피가 작아 이동, 저장 그리고 취급이 용이하다. 설치가 용이한 반면 밸브나 튜브 파손시 사용할 수 없게 되고 수리가 어려운 것이 단점이다. 공기를 주입하는 방법에 따라 다시 자체 팽창식 붐(self inflatable boom)과 압력 팽창식 붐(pressure inflatable boom)으로 구분되며, 전자는 설치가 빠르고 기름 보유성능이 우수하며 후자는 무게 대 부력비가 커서 외해에서도 성능이 우수하다. 스커트 끝 부분에는 체인을 달아 종방향 장력재로 이용한다.

2.1.4 펜스식 붐

펜스 붐은 자체 부력재를 갖고 있어서 손상을 입어도 가라앉지 않는다. 무게대 부력비가 작고, 스커트가 유연하지 못하여 파 추종성이 떨어지며 취급하기가 어렵다. 일반적으로 화물 터미널에서와 같이 계속적으로 설치가 필요한 곳에서 많이 사용한다.

2.1.5 기타 특수목적 붐

특수한 사용 목적을 위해 개발된 붐으로 중류, 타르볼 등을 회수하기 위해 1mm이내의 구멍을 가지고 있어 1knot에서 회수가 가능한 넷트 붐(net boom), 물에 떠 있다가 썰물시 모래사변 또는 진흙 위에 달라붙어 기름이 해안에 접근하지 못하게 하는 연안선 붐(shoreline boom), 포획된 기름의 현장 회수가 불가능하여 현장에서 소각하거나 불에 타고 있는 기름을 회수하는 내화용 붐(fire boom) 등이 있다.

2.2 뚫의 누유과정

뚫이 기름을 포획하는 능력은 그 단면, 크기, 파 추종성 등에 의존한다. 그리고 포획된 기름이 뚫으로부터 빠져나가는 원인은 (1) 파도에 의한 Splash-over, (2) 뚫과 뚫 사이의 불완전한 연결, (3) 적절치 못한 계류, (4) 뚫 스킨트의 경사, (5) 강한 유속, (6) 기름의 물리적 성질(밀도, 점도) 등이다[5].

뚫 스킨트는 강한 유속에 의해 경사될 수 있는데 이 경우 더 이상 기름을 포획할 수 없게 된다. 뚫 스킨트의 경사는 스킨트의 길이, 추 무게 등 뚫의 설계인자에 따라 달라진다. 일반적으로 스킨트가 15도 경사되면 뚫의 기름 포획 능력은 50% 감소한다. 스킨트가 수직으로 유지된다 할지라도 물과 기름의 경계면에서 발생된 난류에 의해 기름이 빠져나갈 수 있다. 이 경우 뚫의 기름 보유 능력은 스킨트의 길이, 기름의 밀도와 점도, 유막의 깊이 등 여러 요인에 따라 달라진다. 그러나 가장 중요한 요소는 유속이다. 강한 유속 하에서는 어떤 뚫이라도 기름을 효과적으로 차단할 수 없다.

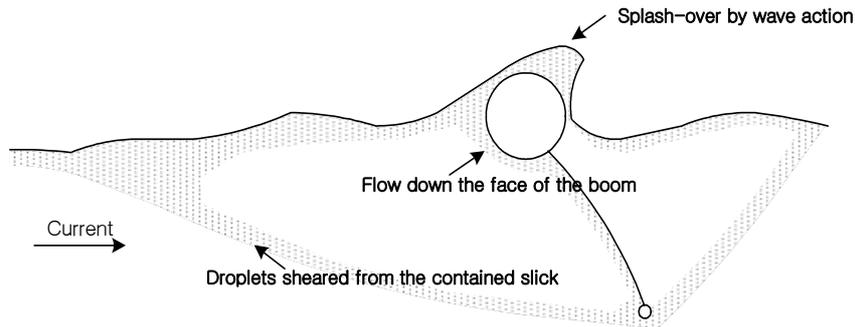


Fig. 2-2 Escape of oil from a boom

Fig. 2-2는 오일 뚫으로부터 기름이 빠져나가는 과정을 보여주고 있다. 먼저 파도에 의한 splash-over, 뚫 스킨트의 경사에 의한 유출, 그리고 물과 기름의 경계면에서 전단응력에 의한 기름의 박리 등이다. 뚫 하부로의 기름유출은 그 형태에 따라 다시 다음 세 가지로 구분된다.

2.2.1 연속누유

붐 내에 포획된 기름은 유속이 증가함에 따라 유막의 길이가 짧아지고 두께는 두꺼워진다. 만일 유속의 증가로 유층의 두께가 스키투트 길이 이상으로 두꺼워지면 기름이 유출되기 시작하는데 이를 연속누유(drainage failure)라고 하며 Fig. 2-3이 전형적인 형태이다. 연속누유의 주된 원인은 유속이며 또한 붐 스키투트의 길이와 밀접한 관련이 있다. Wilkinson(1973)은 연속누유를 예측하기 위하여 Froude Number를 이용하여 유층의 두께를 구할 수 있는 이론식을 제시하였으며, Lau and Moir(1979)는 연속누유를 방지하기 위한 최소 스키투트의 길이를 제시하였다.



Fig. 2-3 Drainage failure

2.2.2 유적누유

유적누유(droplet entrainment failure)는 기름과 물의 경계면에서 상대유속의 증가로 기름이 방울형태로 분리되어 붐 하부로 유출되는 과정을 말하며 Fig. 2-4가 전형적인 형태이다. 중, 저점성 유의 경우 상대유속이 증가하면 전



Fig. 2-4 Droplet entrainment failure

단응력에 의해 경계면이 불안정해지고 계면파가 발생하여 임계속도 이상에서 압력구배가 큰 부분으로부터 기름방울이 떨어져 나온다. 기름 양에 비해 스킨 길이 길이가 충분할 경우 연속누유보다 낮은 속도에서 스킨 길이와 무관하게 발생한다[4].

2.2.3 축적한계누유

점도가 아주 높거나 풍화과정을 거친 기름은 유적누유나 연속누유보다 더 낮은 속도에서 유층이 스킨 근처에서 상대유속 증가로 인한 흡인력을 견디지 못하고 기름이 떨어져 나오기 시작하는데 한번 유출되기 시작하면 계속해서 모든 기름이 뿔 하부로 유출되며 이를 Oil Creep 현상 또는 축적한계누유 (critical accumulation failure)라고 하고 Fig. 2-5가 전형적인 형태이다.

축적한계누유는 Delvigne(1985)에 의해 처음 발견되었는데 일반적으로 3,000cSt 이상의 고점성 기름에서 발생한다. 그러나 저점성의 기름이라 할지라도 풍화작용을 통해 점성이 증가하면 축적한계누유가 발생할 수 있다.

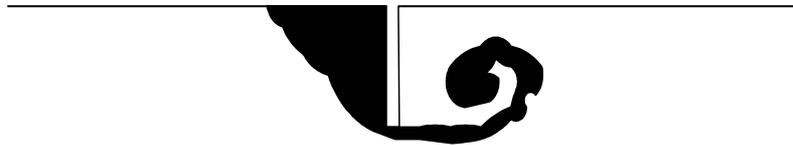


Fig. 2-5 Critical accumulation failure

2.3 유체 동역학과 누유인자

오일 붐 주위의 유체 동역학에 관한 이론을 다루고 있는 연구는 많지만, 그 이론을 체계적으로 처음 정립한 연구자는 캐나다의 David L. Wilkinson이며 이를 승계 발전시킨 연구자는 Y. Lam Lau and James Moir라고 할 수 있다.

먼저 Wilkinson은 오일 붐내 유막(oil slick)을 역학적인 힘(dynamic forces)이 우세한 전반부(frontal zone)와 점성 전단응력(viscous shear stress)이 우세한 점성부(viscous zone)로 나누어 생각하였다. 전반부는 역학적인 힘에 비하여 점성 전단응력이 상대적으로 약하므로 이를 무시할 수 있다. 정상상태 및 층류라고 가정하면, Fig. 2-6에서 보는 것처럼, 기름과 물 사이에 1차원 운동량 방정식이 적용될 수 있다. 수층(water layer)내 운동량 및 압력균형 조건으로부터 Wilkinson은 유층 전반부의 두께와 Froude Number와의 관계를 나타내는 다음 방정식을 유도하였다[25].

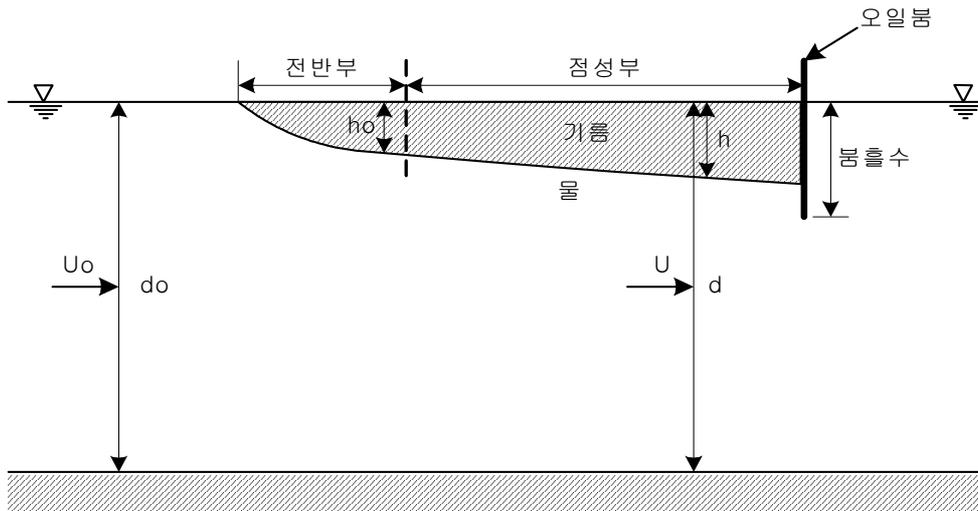


Fig. 2-6 Definition sketch of oil slick

$$F_r^2 = \phi(2 - \phi) \left(\frac{2\phi}{1 - \phi} + \frac{1}{1 - \Delta} \right)^{-1} \quad (2.1)$$

여기서 $\phi = h_o/d_o$, $\Delta = 1 - \rho_o/\rho$, $F_r = U/(g\Delta d_o)^{1/2}$, h_o 는 유막 전반부의 두께, d_o 는 유막 상류의 수심, ρ_o 는 기름의 밀도, ρ 는 물의 밀도, U_o 는 유막 상류의 유속, 그리고 g 는 중력가속도이다.

식 (2.1)은 Δ 가 F_r 에 미치는 영향이 적음을 나타낸다. 그리고 Δ 가 0에 수렴할 때 F_r 값이 0.527 이상이면 식 (2.1)의 해는 존재하지 않는다. 즉, F_r 값이 0.527 이상일 때 안정된 유막은 존재하지 아니하며 결국 기름을 분 내에 포획할 수 없다는 것을 의미한다. F_r 값이 0.527 이하일 때 식 (2.1)을 통해 전반부 유막의 두께를 예측할 수 있다.

전반부의 하류에 형성되는 점성부의 기름 두께는 물과 기름의 경계면에서의 점성 전단력에 의해 두꺼워지는 경향이 있다. 경계면에서의 평형은 점성 전단력에 대한 관성력 및 압력과 균형을 의해 좌우된다. 정상상태 및 층류라고 가정하고 유막내 순환류에 의한 운동량을 무시하면 다음 두개의 방정식을 구할 수 있다[26]. 물과 기름의 전체 시스템으로부터 다음 식을 구하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left[\rho g(1 - \Delta) \frac{d^2}{2} + \Delta \rho g \frac{(d - h)^2}{2} + \frac{\rho U_o d_o^2}{d - h} \right] = -\tau_b \quad (2.2)$$

유막의 균형조건으로부터 다음 식을 구하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{\rho_o g h^2}{2} \right) = \tau_i - \rho_o g h \frac{\partial}{\partial x} (d - h) \quad (2.3)$$

여기서, x 는 흐름방향의 길이, d 는 총수심, h 는 유막의 두께, τ_b 는 바닥에서의 전단응력, 그리고 τ_i 는 경계면에서의 전단응력이다. 전단응력 항을 무차원

마찰계수의 향으로 정의하면 다음과 같다.

$$\tau_b = \frac{f_b}{4} \rho \frac{u^2}{2} \quad (2.4)$$

$$\tau_i = \frac{f_i}{4} \rho \frac{u^2}{2} \quad (2.5)$$

여기서, f_b 는 바닥에서의 마찰계수, f_i 는 경계면의 마찰계수 그리고 u 는 주어진 단면에서의 유속이다. 식 (2.4)와 (2.5) 그리고 무차원화된 길이 항을 식 (2.2)과 (2.3)에 대입하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial D}{\partial X} \left[\frac{D}{\Delta} - H - \left(\frac{F_r}{D-H} \right)^2 \right] - \frac{\partial H}{\partial X} \left[D - H - \left(\frac{F_r}{D-H} \right)^2 \right] \\ & = \frac{-f_b}{8} \left(\frac{F_r}{D-H} \right)^2 \end{aligned} \quad (2.6)$$

$$\begin{aligned} 8H \frac{\partial H}{\partial X} \left\{ D - \left[H + \left(\frac{F_r}{D-H} \right)^2 \right] \right\} & = \left(\frac{F_r}{D-H} \right)^2 \left[\frac{f_i}{1-\Delta} \right. \\ & \left. \left\{ D - \Delta \left[H + \left(\frac{F_r}{D-H} \right)^2 \right] \right\} + f_b H \right] \end{aligned} \quad (2.7)$$

여기서, $X = x/d_o$, $D = d/d_o$ 그리고 $H = h/d_o$ 이다.

식 (2.6)과 (2.7)을 적분함으로써 Wilkinson은 D 값이 항상 1에 가까운 값을 확인하였다. 따라서, D 값을 1로 취하면 식(2.7)의 좌변 { }항 내의 값은 $H = 1 - F_r^{2/3}$ 일 때 0에 접근하게 된다. 그리고 H 가 이 값에 접근할 때 $\partial H/\partial X$ 는 무한대가 된다. 이는 기름의 두께가 이 값에 도달하면 평형상태는 더 이상 유지되지 못하고 기름이 붐 스킵트 하부로 빠져나가는 것을 뜻한다. 이 상태에서 기름의 두께는 최대두께(H_m)가 되며 그 크기는 다음과 같이 주어진다.

$$H_m = 1 - F_r^{2/3} \quad (2.8)$$

식 (2.8)에 의하면 F_r 가 0.25인 경우 유층의 최대두께는 수심의 0.6배가 되고, F_r 가 0.45인 경우 유층의 최대두께는 수심의 0.41배가됨을 알 수 있다. 대부분의 경우 뚝 스킨 길이 제한으로 인해 실제 상황에서 이러한 기름두께는 수심이 아주 얇은 수로가 아니면 얻어질 수 없다. 즉, 뚝 스킨의 길이가 유층의 최대두께를 결정하게 된다. 그리고 주어진 f_b , f_r , F_r 및 Δ 값과 기름의 최대두께를 경계조건으로 식 (2.7)을 상류방향으로 적분하면 유층의 단면 모양 및 기름의 양을 각각 구할 수 있다. Wilkinson의 이러한 결론은 이론적으로는 매우 명쾌한 것이지만 정상상태를 가정한 것이기 때문에 실제상황에 적용하기에는 무리가 있다.

Lau and Moir는 실험을 통해 Wilkinson이 제시한 F_r 가 0.5 이하일 때 기름이 포획되는 것을 확인하였다. 그러나 F_r 가 0.5 이하인 경우에도 어떤 조건에서는 기름이 누유되는 것을 발견하였다. 이 경우 누유는 기름이 유벽에 도달한 후 유벽을 타고 아래쪽으로 내려가 유벽 하부로 빠져나가면서 발생하였다. 이처럼 유벽을 타고 내려가는 수직흐름은 정상상태의 조건으로는 설명이 될 수 없기 때문에 Wilkinson의 이론에 수정이 필요하게 된다.

기름의 운동량이 유벽에 도달한 후에도 사라지지 않는다고 가정하면 기름 입자는 U_o 와 동일한 수직유속 v 를 가지고 하방향으로 이동할 것이다. 전단력을 무시하고 단지 부력만이 기름 입자의 하방향 움직임을 저지시킨다고 가정하면 다음과 같은 식이 성립한다.

$$\frac{d}{dt}(\rho_o v) = (\rho - \rho_o)g \quad (2.9)$$

여기서 t 는 시간이다. 초기조건($t=0$ 일 때 $v=U_o$)을 이용하여 식 (2.9)를 풀

면 기름 입자의 수직유속이 0이 될 때까지 기름이 하방향으로 움직이는 거리는 $U_0^2/(2g\Delta/1-\Delta)$ 이 된다. 따라서, 기름이 유벽 하부로 누유되는 것을 방지하기 위한 최소홀수의 크기 T 는 $U_0^2/(2g\Delta/1-\Delta)$ 이 된다.

이상에서 살펴본 바와 같이 오일 붐의 누유에 직접적인 영향을 미치는 인자는 Froude Number이고 Froude Number는 유속, 기름과 물의 밀도차, 수심 등과 관련이 있다. 아울러 유막의 불안정에 기여하는 인자로서 점성응력을 들 수 있고 이 점성 응력은 기름의 점성과 밀접한 관련이 있다. 이 외에도 붐 홀수의 크기, 수심 등이 붐의 누유 과정에 영향을 미침을 알 수 있다.

3. Fluent의 소개

3.1 Fluent의 개요

1990년대 초부터 전산유체역학(CFD, computational fluid dynamics)이 오일 붐의 기름포획 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 유체 흐름, 열 및 질량전도 문제 등에 다양하게 응용되고 있다. 이 연구에서는 상용 CFD 프로그램중 하나인 Fluent를 이용하여 오일 붐 주변의 물과 기름의 유동 현상을 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(graphical visualizer)가 그것이다.

3.2 기본 방정식

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

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i) = 0 \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho U_i) + \frac{\partial}{\partial x_j} = - \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu_{eff} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \right] + \rho g \quad (3.2)$$

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.

$$\mu_{eff} = \mu + \mu_t \quad (3.3)$$

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

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3.4)$$

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

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) \\ + \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} &- \rho \epsilon \end{aligned} \quad (3.5)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho U_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \frac{\partial U_i}{\partial x_j} &- C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (3.6)$$

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

$$C_\mu=0.09, C_{1\epsilon}=1.44, C_{2\epsilon}=1.92, \sigma_k=1.0, \sigma_\epsilon=1.3 \quad (3.7)$$

식 (3.1), (3.2) 및 (3.5)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.

3.3 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 이 연구에서 관심의 대상인 기름과 물의 경계면에서의 유동현상을 규명하는데 적합한 모델이라고 할 수 있다. 다른 다중상 유체모델(multi-phase fluid model)과 달리 VOF 모델은 식 (3.1), (3.2), (3.5) 및 (3.6)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.

$$\frac{\partial F}{\partial t} + U_i \frac{\partial F}{\partial x_i} = 0 \quad (3.8)$$

이 방정식은 속도장 U_i 가 얻어진 다음 양해 시간 진행법(explicit time marching scheme)에 의해 풀어진다. 시간진행 과정에서 계산의 안정성을 확보하기 위해 Courant-Fridrich-Lewy(CFL) 수는 1보다 작아야 하는데 Fluent는 자동적으로 이를 검사하고 조정한다. 지배방정식 (3.1), (3.2), (3.5) 및 (3.6)을 전체 계산영역에 대해 풀고 난 다음 그 결과로 얻어진 속도장은 각 유체상 또는 그 혼합물의 계산에 다시 이용된다. 그리고 지배방정식 (3.1), (3.2), (3.5)

및 (3.6) 내의 밀도 ρ 와 분자점도 μ 값은 F 값에 의해 다시 결정된다.

$$\rho = F\rho_w + (1-F)\rho_o \quad (3.9)$$

$$\mu = F\mu_w + (1-F)\mu_o \quad (3.10)$$

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.

4. 모델링 결과 및 고찰

4.1 모델링 조건

연구를 위해 설정된 모델링 조건은 다음과 같다.

4.1.1 계산격자

모델링을 위해 먼저 해당 영역에 대한 계산격자의 구성이 요구된다. Fluent에서는 자체적으로 격자생성 프로그램인 Gambit를 보유하고 있으며 이를 이용하여 다양한 격자를 만들어낼 수 있다. 이 연구를 위해 만들어진 2차원 평면 격자의 한 예를 Fig. 4-1에 도시하였다.

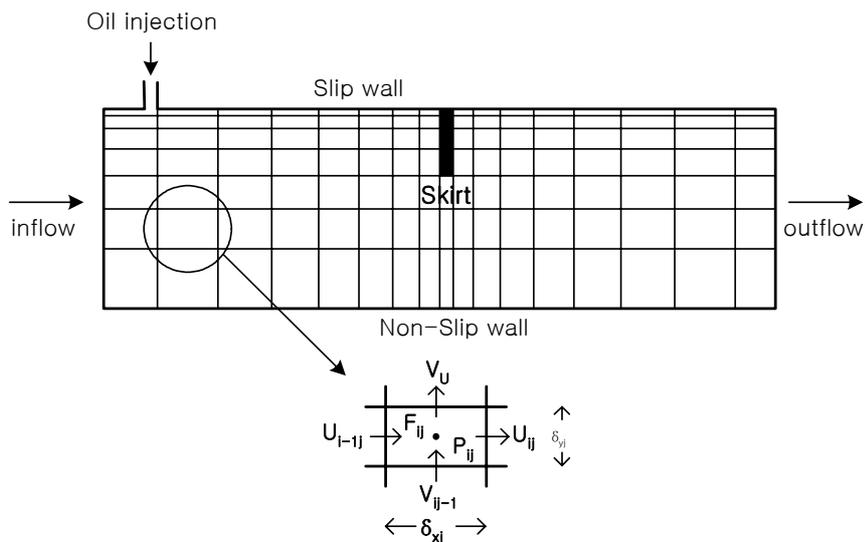


Fig. 4-1 Example of a mesh with typical grid cell

Fig. 4-1에서 보듯이 계산격자의 크기는 일정하지 않다. 즉, 붐 스킴트 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 스커트의 두께는 $2cm$ 이고, 길이는 $7cm$, $10cm$, $15cm$ 등 세 가지 종류를 채택하였다. 격자의 수는 가로 240개, 세로 70개로 구성되었다.

4.1.2 경계조건

Fluent에서는 필요에 따라 여러 형태의 경계조건을 부여할 수 있다. 이 연구의 경우, 계산영역의 상부와 하부는 Wall 경계로 지정되었는데 그 중에서도 상부는 Slip Wall(마찰계수가 0), 하부는 Non-slip Wall 조건으로 각각 지정되었다. 상부경계의 경우, 이 연구에서는 자유표면(free surface)이지만 Fluent에서 자유표면 경계를 고려해줄 수 없으므로 Wall 경계로 지정하였다. 이 Wall 경계는 공기와 접촉하는 자유표면에 따른 수면 높이의 변화를 고려할 수 없는 단점이 있으나 그로 인한 차이는 크지 않을 것으로 생각된다[13]. 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 시간간격을 더 작게 하여 계산하였다.

4.2 모델링 결과의 검증

모델링 결과를 검증하기 위하여 수조실험 자료와 비교하였다. 바람직한 것

은 직접 수조실험을 수행하여 그 결과를 모델링 결과와 비교 검토하는 것이지만, 이 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. 4-2(a)와 Fig. 4-2(b)이다.

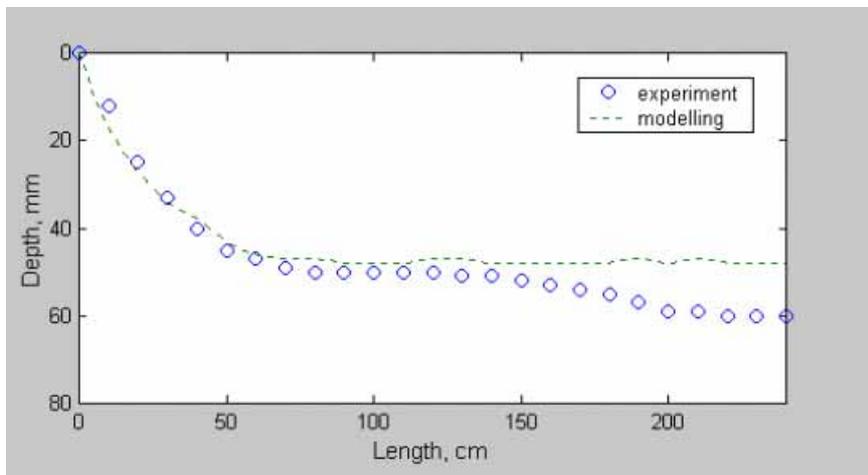


Fig. 4-2(a) Comparison of experiment and modelling data

Fig. 4-2(a)는 유속이 0.23m/s 일 때의 비교인데, 두 데이터 사이에 비교적 유사한 결과를 보여주고 있다. 특히, 유막의 전반부에서는 두 데이터가 양호하게 일치하는 것을 확인할 수 있다. 유막의 후반부에서 상이한 결과를 보여주고 있는데 이는 실험자료의 오차 때문으로 해석된다. 왜냐하면 일반적으로 안정 상태에 있는 유막의 두께는 역학적인 힘이 지배하는 전반부를 제외하고 일정한 것이 특징이기 때문이다. Fig. 4-2(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 입증하듯이 평균적인 유막의 두께는 두 데이터가 유사한 것으로 나타났다.

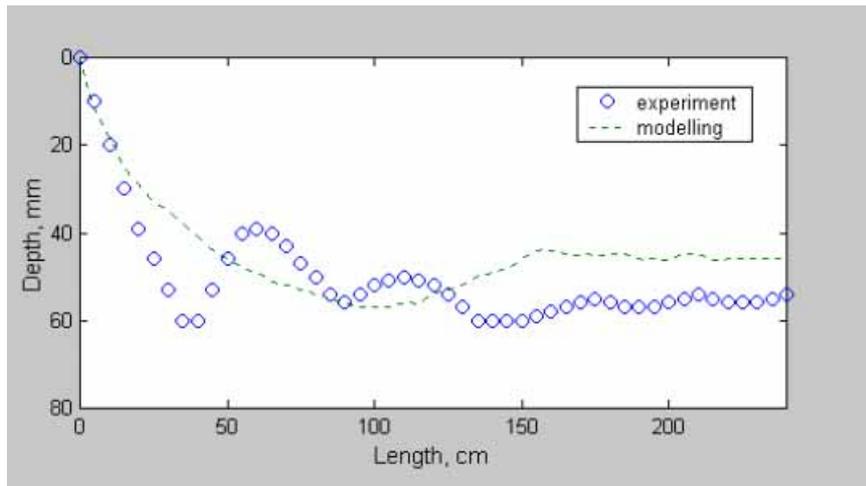


Fig. 4-2(b) Comparison of experiment and modelling data

4.3 주요 인자에 대한 검토

2장에서 살펴본 바와 같이 오일 붐 내에 포획된 기름의 누유 원인으로는 유속, 밀도, 점도, 수심, 붐 스커트의 길이 등이 있으며, 기름의 양은 유막의 길이를 길게 하고 유막의 형태에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다[4]. 이 절에서는 이들 인자가 오일 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 종합적으로 모델링하고 그 결과를 검토하였다. 주요 인자의 검토를 위해 모델링에 사용된 계산 조건은 Table 4-1과 같다.

Table 4-1 modelling conditions vs parameters

계산조건 검토인자	유속 (<i>m/sec</i>)	점도 (<i>cSt</i>)	밀도 (<i>kg/m³</i>)	수심 (<i>m</i>)	유출량 (<i>sec</i>)	붐 흘수 (<i>cm</i>)
유속의 영향	0.2,0.3,0.4	240	870	1.0	100	15
밀도의 영향	0.25	240	834,870,953	1.0	100	15
점도의 영향	0.4	10,240,5600	870	1.0	100	15
수심의 영향	0.3	240	870	0.3,0.5,1.0,1.5	100	15
유출량의 영향	0.3	240	870	1.0	50,100,150	15
붐 흘수의 영향	0.25	240	870	1.0	100	7,10,15

4.3.1 유속의 영향

유속이 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 240*cSt*, 기름의 밀도 870*kg/m³*, 수심 1.0*m*, 그리고 붐 흘수 15*cm*이다. 초기 유속 0.1*m/s*로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름을 0.015*m/s*의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가 안정되고 나면 유

속을 $0.05m/s$ 씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을 $0.4m/s$ 까지 계속 증가시키면서 모델링을 수행하였으며 유속 $0.2, 0.3, 0.4m/s$ 에서의 결과를 도시한 것이 Fig. 4-3이다.

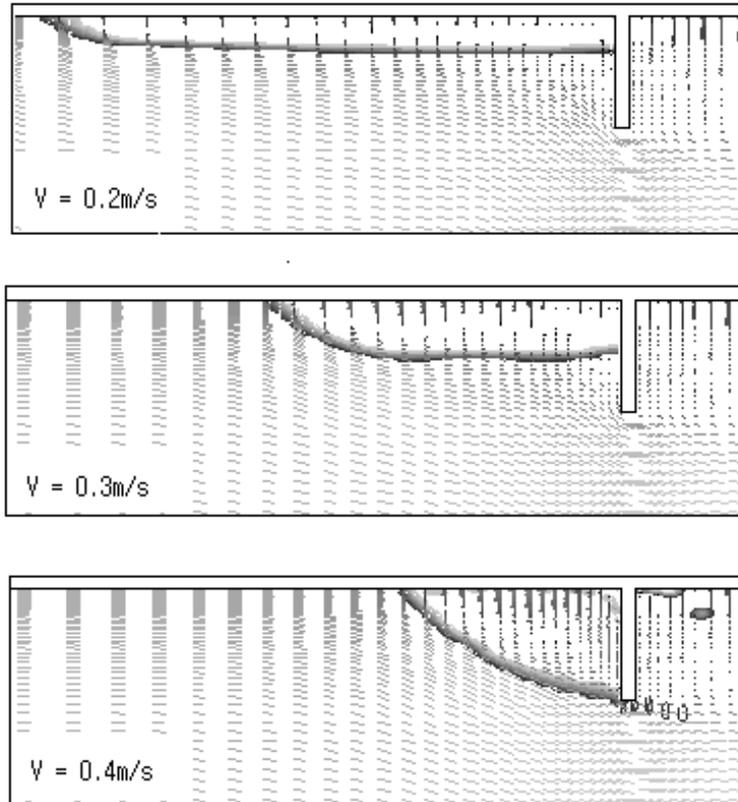


Fig. 4-3 Effect of velocity on oil slick

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 $0.38m/s$ 에 도달하였때 조금씩 누유되기 시작하였으며 $0.4m/s$ 에서 이러한 누유 현상이 두드러졌다. 결과적으로 유속의 증가는 유막의 형태를 두껍고 짧게 변화시킬 뿐 아니

라 물과 기름의 상대속도를 증가시켜 경계면에 불안정을 야기함으로써 누유의 직접적인 원인이 됨을 알 수 있다.

4.3.2 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/m^3 , 수심 1.0m, 그리고 붐 홀수 15cm이다. 초기 유속 0.1m/s 로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름을 0.015m/s 의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가

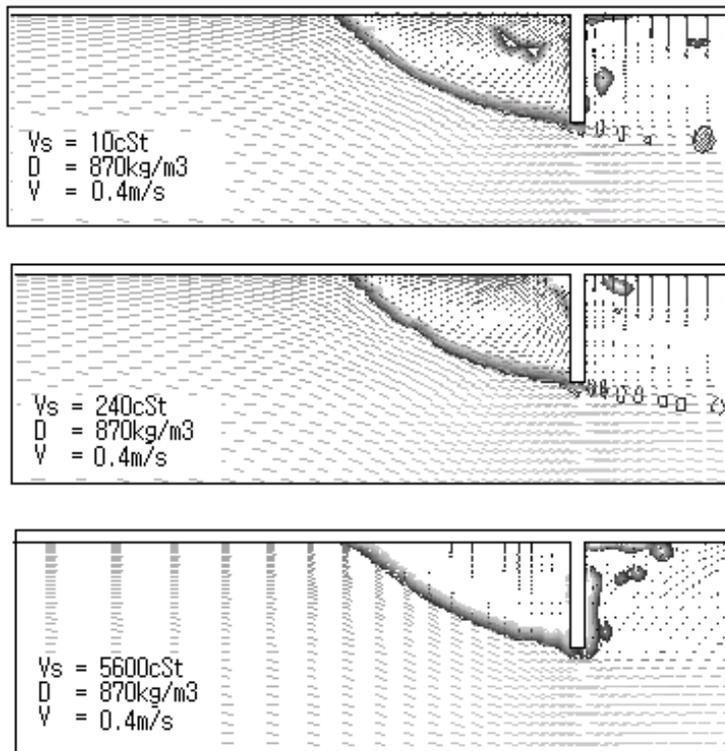


Fig. 4-4 Effect of viscosity on oil slick

안정되고 나면 유속을 $0.05m/s$ 씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을 $0.4m/s$ 까지 계속 증가시키면서 모델링을 수행하였으며 유속 $0.4m/s$ 에서 각 점도의 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 4-4이다.

일반적으로 점도는 누유에 큰 영향을 미치는 것으로 알려져 있으나 그림에서 알 수 있듯이 유막의 형태에 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. 이미 알려진 바와 같이 고점도 기름의 경우 축적한계누유 현상이 발생하였으며 중, 저점도 기름의 경우 유적누유 현상이 발생하였다. 이에 비추어 기름의 점도는 누유의 형태에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 누유 개시속도에 있어서는 저, 중점도 기름의 경우 $0.40m/s$, 고점도 기름의 경우 $0.38m/s$ 로서 점도에 따라 약간의 차이는 있지만 큰 차이를 보이지 않았는데, 이에 비추어 기름의 점도 자체는 누유 개시속도에 큰 영향을 미치지 않는다는 것을 알 수 있다.

4.3.3 밀도의 영향

기름의 밀도가 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 $240cSt$, 기름의 밀도 $834, 870, 953kg/m^3$, 수심 $1.0m$, 그리고 붐 흘수 $15cm$ 이다. 초기 유속 $0.1m/s$ 로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름을 $0.015m/s$ 의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가 안정되고 나면 유속을 $0.05m/s$ 씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을 $0.4m/s$ 까지 계속 증가시키면서 모델링을 수행하였으며 유속 $0.25m/s$ 에서

각 밀도의 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 4-5이다.

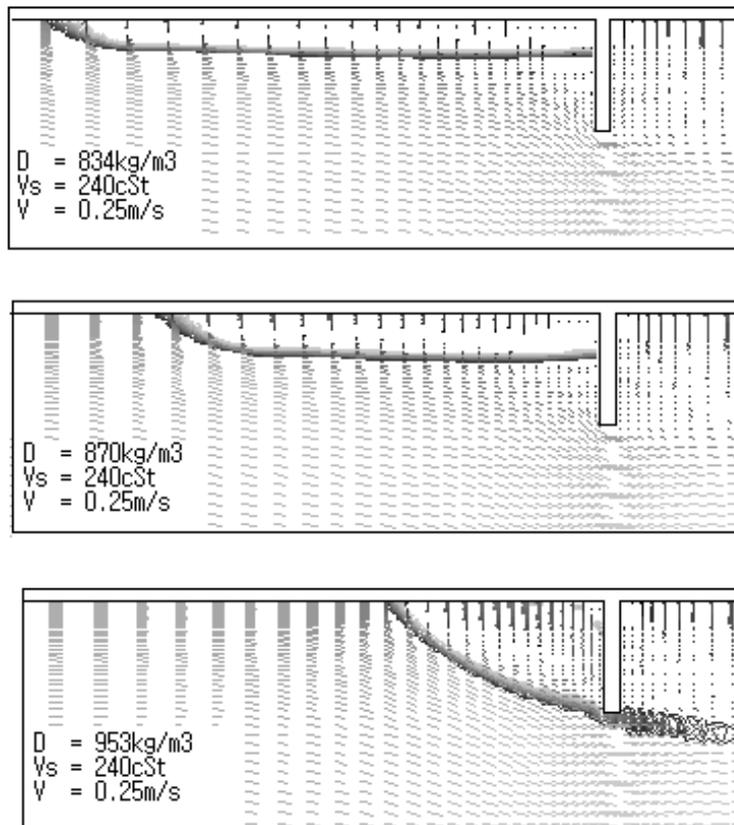


Fig. 4-5 Effect of density on oil slick

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 개시속도에 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.

4.3.4 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 홀수 15cm이다. 초기 유속 $0.1m/s$ 로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름

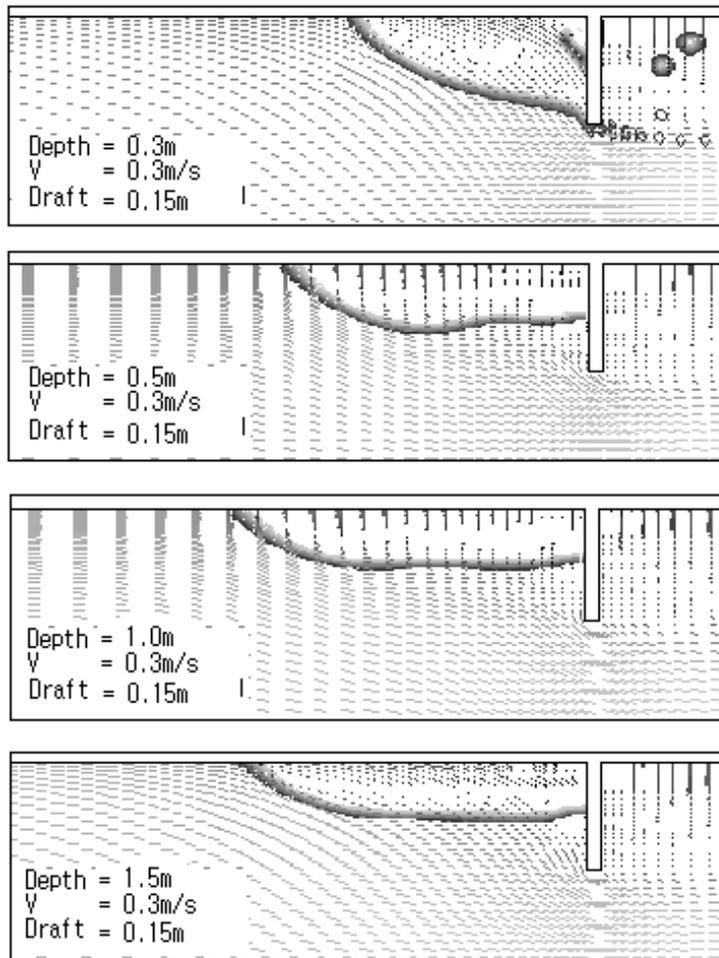


Fig. 4-6 Effect of water depth on oil slick

을 $0.015m/s$ 의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가 안정되고 나면 유속을 $0.05m/s$ 씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을 $0.4m/s$ 까지 계속 증가시키면서 모델링을 수행하였으며 유속 $0.3m/s$ 에서 각 수심의 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 4-6이다.

그림을 보면 수심 $0.3\sim 1.0m$ 사이에서는 수심이 얇을 수록 유막의 두께는 두꺼워지고, 길이는 짧아짐을 알 수 있다. 하지만 수심 $1.0\sim 1.5m$ 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 $0.3m$ 에서 $0.30m/s$, 수심 $0.5m$ 에서 $0.35m/s$, 수심 $1.0m$ 에서 $0.40m/s$ 그리고 $1.5m$ 에서 $0.40m/s$ 로 각각 나타났으며, 이에 비추어 수심은 유막의 형태뿐 아니라 누유개시 속도에도 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

4.3.5 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 $15cm$ 이다.

초기 유속 $0.1m/s$ 로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면 기름을 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가 안정되고 나면 유속을 $0.05m/s$ 씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을 $0.4m/s$ 까지 계속 증

가시킴으로써 모델링을 수행하였으며 유속 $0.3m/s$ 에서 각 기름 양에 대한 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 4-7이다.

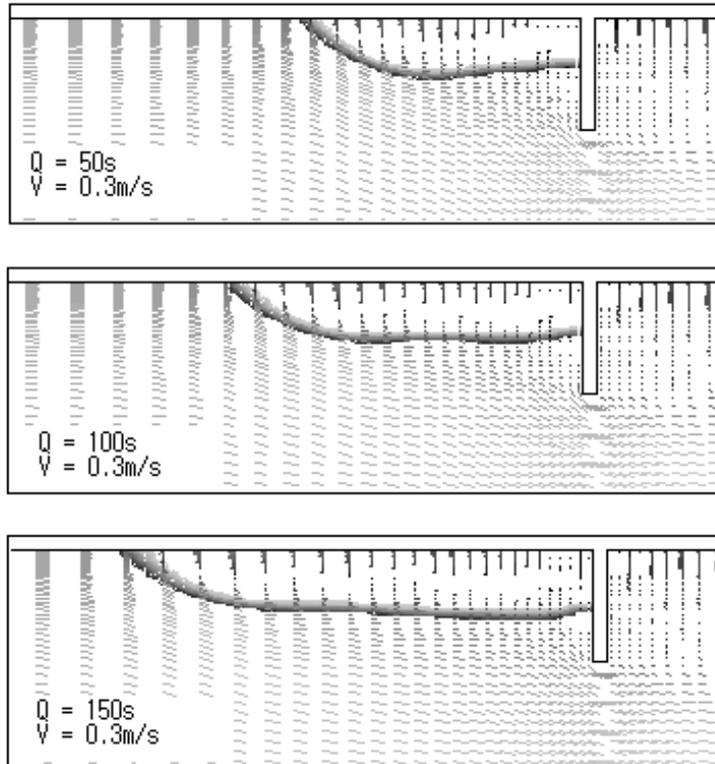


Fig. 4-7 Effect of oil volume on oil slick

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.

4.3.6 붐 흘수의 영향

붐 흘수가 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 알아보기 위해 다음과 같이 모델링을 수행하였다. 모델링에 사용된 조건은 기름의 점도 $240cSt$, 기름의 밀도 $870kg/m^3$, 수심 $1.0m$, 그리고 붐 흘수 7, 10, 15cm이다. 초기 유속 $0.1m/s$ 로 모델을 Start Up하고 나서 일정시간이 지나 유동이 안정되면, 기름을 $0.015m/s$ 의 느린 속도로 100초 동안 주입하였다. 그 후 기름이 오일 붐에 도달할 때까지 계속해서 계산을 수행하였으며, 붐에 도달한 유막의 형태가 안정되고 나면 유속을 $0.05m/s$ 씩 단계적으로 증가시키면서 동일하게 안정된 유막이 얻어질 때까지 반복적으로 계산을 수행하였다. 이러한 방법으로 유속을

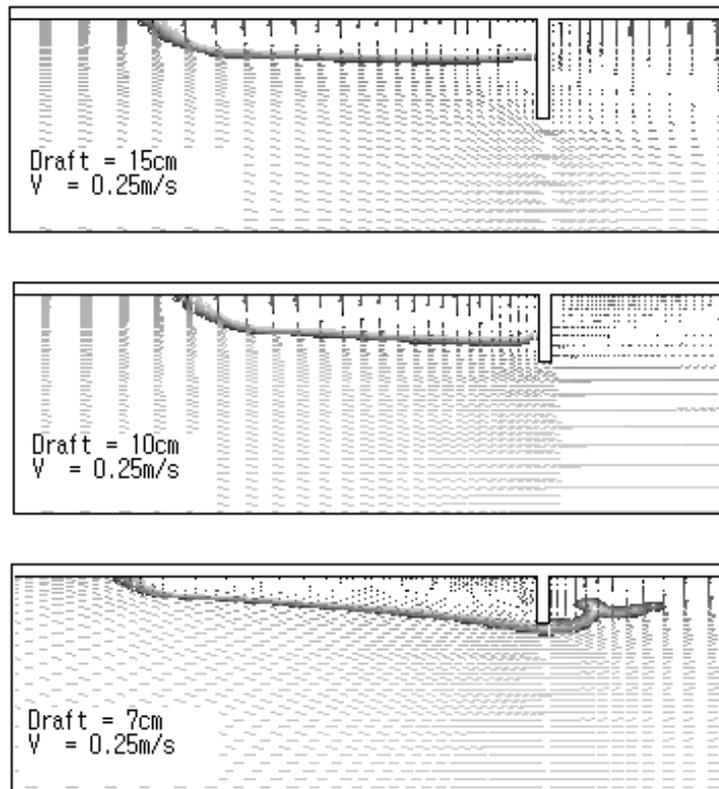


Fig. 4-8 Effect of boom draft on oil slick

0.4m/s까지 계속 증가시키면서 모델링을 수행하였으며 유속 0.25m/s에서 각 수심에 대한 모델링 결과를 도시한 것이 Fig. 4-8이다.

홀수 7cm의 경우 연속누유가 발생하는 것을 볼 수 있는데, 이는 기름 포획에 필요한 최소홀수에 미달되었기 때문이다. 따라서 연속누유를 방지하기 위해서는 홀수의 크기가 일정 이상이어야 하며 그 크기는 기름의 양과 밀접한 관련이 있다. 홀수 10cm와 15cm의 경우, 유막의 전반부는 그 형태가 비슷하게 나타났으나 유벽에 가까이 갈수록 홀수가 작은 쪽의 유막이 더 두껍게 나타났다. 이는 유벽 주변에서의 유동의 차이로 인해 발생하는 현상으로 홀수가 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 길 수록 기름을 포획하는데 유리하다는 것을 알 수 있으나 앞에서도 언급하였듯이 조류의 동압력으로 인해 스커트 길이를 무한정 길게 할 수는 없다.

5. 결 론

해양 기름오염사고는 단기간에 커다란 피해를 야기 시키기 때문에 많은 연구자들로부터 주목을 받고 있다. 해양에 기름이 유입되면 먼저 이를 조기에 차단하고 가능한 많이 회수하는 것이 중요하다. 기름의 확산을 차단하는 도구로서 오일 붐이 사용되고 있으며 다양한 형태의 오일 붐이 현재 개발되어 이용되고 있다. 오일 붐의 성능은 기름의 효과적인 포획 여부에 의하여 결정되며, 오일 붐의 누유 원인은 크게 파도, 조류, 바람, 수심 등 외부적 요인과 유출된 기름의 양, 밀도, 점도, 붐 흡수의 크기 등 내부적 요인을 들 수 있다.

이 연구에서는 대표적인 CFD 프로그램으로 공인된 Fluent를 이용하여 오일 붐의 누유 과정에 영향을 미치는 주요 인자들에 대하여 모델링을 수행하였다. 모델링 결과를 검증하기 위하여 수조실험 결과와 비교하였으며 양자가 양호하게 일치하는 것을 확인하였다. 모델링을 위해 채택된 누유 인자들은 유속, 점도, 밀도, 기름의 종류, 수심, 기름의 양, 그리고 붐 흡수의 크기 등이고, 이들이 오일 붐의 누유에 어떠한 영향을 미치는지를 종합적으로 검토하였으며 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. 점도가 크면 클 수록 기름 내부의 순환속도의 차이로 인해 경계면에서 불안정이 야기되나 유막의 형태나 누유 개시속도에는 큰 영향을 미치지 아니한다.

3. 밀도가 크면 클 수록 중력으로 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. 최소홀수 이하에서는 연속누유가 발생하며 최소홀수의 크기는 유량과 밀접한 관련이 있다. 최소홀수 이상에서는 홀수의 크기에 따라 유막의 형태에 차이가 발생하는데 즉, 홀수가 작을 수록 유벽 근처 유막의 두께가 증가하고 결국 저유속에서 누유가 발생된다.

이 연구의 결과는 앞으로 오일 붐을 설계하는 설계자에게는 물론이고 현장에서 오일 붐을 운용하는 방제책임자에게도 유용한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 이 연구와 관련하여 앞으로의 연구과제는 다음과 같다.

첫째, 시간과 비용의 제한으로 이 연구에서는 직접 수조실험을 수행하지 못하였으며, 그로 인해 모델링 결과의 검증이 다양하게 이루어지지 못한 아쉬움이 있다. 다음 연구에서는 수조실험을 통해 모델링 결과에 대한 검증이 좀 더 심도있게 다루어져야 할 것이다.

둘째, 모델링의 결과를 현장에 직접 적용하기 위한 연구가 필요하다. 즉, 이 연구에서는 붐의 누유에 영향을 미치는 주요 인자들에 대한 검토를 위해 일부 가상의 조건을 도입하여(스커트의 길이, 수심 등) 모델링을 수행하였으나, 현장의 조건을 그대로 적용하거나 차원해석이 수반된 연구가 필요할 것으로 생각된다.

셋째, 유속은 붐 스커트에 작용하여 유벽의 경사를 야기하고 결국 오일 붐의 누유에 상당한 영향을 미칠 수 있다. 이 연구에서는 Fluent 모델의 한계로 유속에 따른 유벽의 경사를 고려하지 못하였는데 앞으로 이를 고려한 모델링이 필요할 것으로 생각된다.

참고문헌

1. 김상운, “해양오염실태와 방지대책”, 제11회 한국해양수산정책포럼, 2002, pp. 3~9.
2. 도덕희, 현범수, 홍성대, 조경래, 문지섭, “이중유벽의 기름포획성능연구”, 한국해양환경공학회 '97년도 추계학술대회 논문집, 1999, pp. 243~254.
3. 성홍근, 이동연, 최항순, “2차원 오일 붐에 작용하는 동유체력에 관한 연구”, Workshop on Tidal & Oil-Spill Modeling, WTOM '93, Advanced Fluids Engr. Res. Center, POSTECH, Oct. 4-5, 1993, pp. 19~35.
4. 송무석, 현범수, 서정천, “유벽에 갇힌 기름층의 조류중 손실에 관한 연구”, 한국해양환경공학회지, Vol. 1, No.2, 1998, pp. 40~51.
5. 양찬수, “새로운 오일 펜스의 초기 설계에 관한 기초 연구”, 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 1997.
6. 유정석, 이문진, 김진환, “오일붐의 실효역 성능평가 기법 개발”, 한국해양환경공학회지, Vol. 2, No. 1, 1999, pp. 49~62.
7. 이영호, “해양오염 방제장비의 특성 및 운용”, 해양안전학회지, 제1권 제2호, 1995, pp. 119~131.
8. 이정목, 강관형, “조류와 파랑중에서의 유벽의 보유성능의 이론 및 실험적 해석”, 한국해양환경공학회 '97년도 추계학술대회 논문집, 1997, pp. 35~45.
9. 이정목, 강관형, “조류와 파랑중에서의 유벽의 보유성능 해석”, 한국해양환경공학회지, Vol. 1, No. 1, 1998, pp. 29~38.
10. 한동기, 이정목, “이중유벽의 유효성에 관한 해석”, 한국해양환경공학회 '00년도 추계학술대회 논문집, 2000, pp. 123~130.
11. 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.
12. Bai, K. J. and J. W., Kim, "A Computational Model for the Flow Around an Oil Boom", Workshop on Tidal & Oil-Spill Modeling, WTOM '93, Advabced Fluids Engr. Res. Center, POSTECH, Oct. 4-5, 1993, pp. 5~17.
 13. 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.
 14. 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.
 15. Cross, R. H., D. P. Hoult, "Correction of Oil slicks", J. of the Waterways, Harbors & Coastal Eng. Div., Vol. 97, WW2, 1971, pp. 313-322.
 16. Cross, R. H. and D. P. Hoult, "Oil Booms in Tidal Currents", J. of the Waterways, Harbors and Coastal Engineering Division, ASCE, Vol. 98, No. WWI, 1972, pp. 25~34.
 17. 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.
 18. Fluent User's Guide, version 5.4, Fluent, Inc., Lebanon, NH, USA
 19. 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.
 20. James Allen-Jones, "Design and Hydrodynamic Testing of an Oil

- Slick Containment System", In Proc. of 20th AMOP Tech. Seminar, Vancouver, BC, Canada, June 11-13, 1997.
21. 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.
 22. Milgram, J. H. and R. J. Van Houten, "Mechanics of a Restrained Layer of Floating Oil above a water Current", J. Hydronautics, Vol. 12, No. 3, 1978, pp. 93-108.
 23. Oil Spill U. S. Law Report, Cutter Information Corp., March 1994.
 24. Wilkinson, D. L., "Dynamics of Contained Oil Slicks", J. Hydraulics Division, Vol. 98, No. HY6, 1972, pp. 1013-1030.
 25. Wilkinson, D. L., "Limitations to Length of Contained Oil Slicks", J. Hydraulics Division, Vol. 99, No. HY5, 1973, pp. 701-712.

감사의 글

무지한 저에게 입학 후 지금까지 학문의 길로 인도해 주시고 많은 시행착오에도 인내로서 지도해주시고 격려해주신 정 연철 지도교수님께 무한한 감사와 존경의 마음을 전합니다. 또한, 본 논문의 심사를 맡으시면서 논문이 완성되기까지 부족한 부분을 예리하게 지적하시고 지도와 조언을 아끼지 않았던 김 창제 교수님과 설 동일 교수님께도 진심으로 감사를 드립니다.

1년 동안 함께 공부하면서 논문이 완성되기까지 함께 걱정하며 도움을 준 장 은규, 박 승진님께도 감사 드립니다.

바쁘신 업무에도 불구하고 아낌없는 격려와 관심으로 저에게 힘이 되어 주신 한국해양수산연수원의 김 영모 처장님, 배 창원 팀장님과 후배를 위하여 조언을 아끼지 않았던 이 옥용, 황 병호, 우 병구, 이 동섭, 이 충로, 구 자윤, 전 상엽, 윤 수원 교수님과 그 외 저에게 관심을 보여준 연수원의 여러 교수님께 글로나마 감사의 마음을 전하며, 특히 부서 이동으로 바쁘게 저에게 시간을 낼 수 있도록 도와주신 김 석재 팀장님, 장 인정 선생님과 자기 논문을 쓰면서도 저를 위하여 시간을 할애해준 박 성률선생님께도 진심으로 감사 드립니다. 아울러 항상 자기 일처럼 걱정해주던 오 광석, 이 창우 선생님과 저의 사무실 원 창욱 선생님께도 감사 드립니다.

마지막으로 논문의 결실을 맺기까지 음양으로 도와주신 양가 부모님과 형제자매 및 여러 선후배, 친구들에게도 감사드리며, 특히 남편과 아빠의 빈자리를 혼자 굳굳하게 지킨 사랑하는 나의 아내, 윤주와 항상 아빠에게 힘이 되고 보람을 느끼게 해주는 사랑하는 나의 아들, 성원에게 작은 결실 이나마 바치고 싶습니다.