



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

공학석사 학위논문

CFD를 이용한 손상된 라이저로부터 유출된 기름 확산에 대한 수치해석

Numerical investigation on oil spill from damaged riser
using CFD



2016년 8월

한국해양대학교 대학원

해양공학과

김 효 주

본 논문을 김효주의 공학석사 학위논문으로 인준함.



위원장

서영교

(인)

위원

박선호

(인)

위원

하승현

(인)

2016년 6월 7일

한국해양대학교 대학원

목 차

List of Tables	iv
List of Figures	v
Abstract	vii

1. 서 론

1.1 논문의 필요성	1
1.2 연구 동향	1
1.3 논문 목적	3
1.4 논문 구성	4

2. 계산 방법

2.1 지배방정식	5
2.2 수치 모델 검증	10
2.2.1 제트 유동	11
2.2.2 Rayleigh-Taylor instability	19
2.3 수치 방법	21

3. 계산 결과 및 고찰

3.1 기름 유출 수치해석을 위한 격자 및 경계 조건	22
3.2 표준 계산 결과	27
3.3 기름 밀도에 따른 영향	28
3.4 해류 속도에 따른 영향	32
3.5 유출 구멍 크기에 따른 영향	37
3.6 손상부 위치에 따른 영향	43
3.7 무차원 분석	45

4. 결론	51
참고 문헌	53



List of Tables

Table 1 R-Squared of jet flow for turbulence models at $x/d=20$	18
Table 2 Summary of simulation cases	26
Table 3 Oil size for various damaged leak size	43
Table 4 Simulation case results	46



List of Figures

Fig. 1 Details of the early development of a real jet	12
Fig. 2 Domain extent for jet flow	14
Fig. 3 Boundary conditions for jet flow	15
Fig. 4 Typical mesh for jet flow	15
Fig. 5 $x/d = 10, 20, 30, 40$ positions for jet flow	15
Fig. 6 Velocity profiles of jet flow for turbulence models	17
Fig. 7 Velocity profiles of jet flow at x/d positions	18
Fig. 8 Initial condition and typical mesh for Rayleigh-Taylor instability	20
Fig. 9 Evolution of fluid interface	21
Fig. 10 Boundary conditions, domain extent and typical mesh	23
Fig. 11 Current velocity profile and contours	24
Fig. 12 Hydrostatic pressure contours	25
Fig. 13 Oil spill process from damaged riser to free-surface for standard case	28
Fig. 14 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 1	30
Fig. 15 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 3	31
Fig. 16 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 4	32
Fig. 17 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 5	33
Fig. 18 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 6	34
Fig. 19 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 7	35
Fig. 20 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 8	36
Fig. 21 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 9	38
Fig. 22 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 10	39
Fig. 23 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 11	40
Fig. 24 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 12	41
Fig. 25 Oil size for various damaged leak size	42
Fig. 26 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 13	44
Fig. 27 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 14	45

Fig. 28 Dimensionless time required for oil mass when they reach the sea surface ($u_o t/H$) versus $2\rho_o/\rho_{sw}$, $u_{c,max}/u_o$, h/H and $2000d/H$	48
Fig. 29 Dimensionless distance for the oil mass when they reach the sea surface (l/H) versus $2\rho_o/\rho_{sw}$, $5u_{c,max}/u_o$, h/H and $2000d/H$	50



Numerical investigation on oil spill from damaged riser using CFD

Hyo Ju Kim

Department of Ocean Engineering
Graduate School of Korea Maritime and Ocean University

Abstract

When a riser is damaged, the oil spills to sea. Oil spills cause huge economic losses as well as a destruction of the marine environment. To reduce losses, it is needed to predict spilled oil volume from risers and the excursion of the oil. The present paper simulated the oil spill for a damaged riser using open source libraries, called OpenFOAM. To verify numerical methods, jet flow and Rayleigh-Taylor instability were simulated. The oil spill simulated for various damaged leak size, properties, damaged vertical locations of a riser, and current speeds. From results, the maximum excursion of the spilled oil at the certain time was predicted, and a forecasting model for various parameters was suggested.

KEY WORDS: Computational fluid dynamics (CFD), Jet flow, Oil spill, Open source library, Rayleigh-Taylor instability, Riser

제 1 장 서 론

1.1 논문의 필요성

최근 석유 및 가스의 육상 매장량의 한계를 보임에 따라, 석유 및 에너지 관련 분야에서는 해저에 매장된 석유자원에 관심을 가지는 추세이다. 그로 인해 해양플랜트 건설과 심해저 유정개발이 활발하게 진행되어, 심해 유전 개발 및 생산 비중이 증가하고 있다. 심해 유정의 경우, 깊은 수심으로 인해 부유식 해양플랜트를 이용하여 원유를 생산한다.

라이저(riser)는 해양 유정과 해양구조물의 플랫폼을 연결해주는 수직 파이프이다. 수면 아래에 설치되는 라이저의 특성상 부식과 침식 등으로 인해 구멍이 발생할 수 있다. 이로 인해 기름이 유출된다면 주변 국가 뿐 아니라 전 세계로 퍼져나가 환경 및 경제에 악영향을 주기 때문에 신속하고 정확한 대응이 요구된다.

처음부터 기름이 유출되지 않도록 관리하여 예방하는 것이 중요하지만, 설치 및 관리과정에서의 실수, 자연재해 등 예측 불가능한 여러 원인으로 인한 사고는 불가항력적으로 발생할 가능성이 있다. 사고가 발생하였을 경우, 기름의 상승 과정과 해류를 통한 확산 과정을 잘 파악하는 것이 피해를 최소화하기 위해 중요하다. 또한, 해당 해역에서의 기름의 확산 정도 및 방향을 예측하여 기름 확산을 저지하는 기본 방법을 유 차단막(oil containment boom) 방법이라 하는데, 이를 신속히 설치하고 방제 대책을 수립하는 것이 필요하다.

1.2 연구 동향

기름 확산에 대한 연구는 꾸준히 진행되어 왔다. 첫째, 유조선이나 해양플랜트의 해상 유출 사고가 발생했을 때, 유출된 기름의 확산 범위 및 방향을 예측

하는 연구들이 있다. Hong and Lee (1998)은 남해안의 조류 데이터를 바탕으로 기름 확산 예측 프로그램을 만들어 오성호 사고로 인해 발생한 기름 유출의 확산을 예측하고 검증하였다. Cheong (2008)은 유출 사고로 인한 해상에서의 기름 거동 및 유출된 기름의 처리방법들을 소개하였고, 영국에서 발생한 Torrey Canyon 호의 사고와 동경 만에서 발생한 Diamond Grace 호의 사고를 통해 유출된 기름이 해상에서 이동할 때 해류의 약 60%, 풍속의 3~4%로 이동하는 것을 확인했다. Kim (2011)은 1995년 7월 소리 도에서 발생한 시프린스호 유조선에 의한 유출 사고와 1995년 10월 여수 해안에서 호남사파이어호의 유출 사고에 의해 유출된 기름을 해양과 전파이론을 이용하여 확산 범위 및 방향을 예측하였다. Jolliff et al. (2014)는 멕시코 만에서 발생한 Deepwater Horizon 호의 기름 유출 사고에 대한 연구를 진행하였으며, 위성 해양 자료와 물리 순환 모델을 결합하여 기름 확산 현황에 대한 예측 모델을 개발했고 멕시코 만에 유출된 기름의 확산 범위를 예측하였다.

이 뿐 아니라, 수중에서의 기름 거동에 대한 실험도 이루어졌다. Masutani and Adams (2002)는 직교류에 의한 기름 및 가스와 기름이 혼합된 상태에서의 확산에 대해 실험하였다. 실제 실험을 통해 수중에서 기름 유출의 확산 경향이 어떻게 나타나는지 확인되었으나 1m도 되지 않는 작은 공간에서 일정한 유속을 주고 실험을 하였기에 실제 해역과 차이가 있었다. Johansen et al. (2003)은 노르웨이 해에 있는 Helland Hansen 지역의 수심 844m에서 실험을 수행하였다. 이 실험을 통해 blowout model을 개발하고 검증하였다. 실제 해역에서 실험이 행해졌기 때문에 해류, 풍속에 의한 영향 표면에서의 기름 집중 등 기름 유출에 관련된 현상을 광범위하게 관찰할 수 있었다. Bolszo et al. (2014)는 직교류가 있는 수중에서 유출되는 기름이 작은 입자 상태로 분사될 때 나타나는 특징과 액적의 크기를 확인하기 위해 실험하였으며, 분사되는 속도 및 직교류의 속도를 변경하며 실험하였다. 위의 실험을 통해 기름이 수중으로 유출될 때 유출 구멍으로부터 어느 정도 높이까지 하나의 기둥을 이루며 나가다가 액적형태로 흩어지는 것을 확인할 수 있었다.

한편, 실험과 더불어 전산유체역학을 이용한 연구도 많이 진행되었다. Kim et

al. (2001)은 사고 초기의 기름 유출 양을 추정하는 것이 기름 유출에서의 중요한 문제라고 판단하여, 토리첼리의 평형관계식, 탱크에서의 기름 유출 실험 및 전산유체역학을 이용한 유출량 산정 값을 비교하는 연구를 수행하였다. 그 결과 탱크에서의 기름 유출 실험을 통한 유출 속도는 토리첼리 평형 관계식을 통해 계산된 유출 속도의 35%~55%정도로 차이를 보인 반면, 전산유체역학의 해석 결과는 유출량이 잘 일치하는 등 실험 결과와 유사함을 보였다. Bakli (2014)는 전산유체역학을 이용하여 심해에서 기름과 가스가 분출되었을 때 가스와 기름 액적의 거동을 해석하였으며, 수심 844m, 공기층 366m의 계산 영역을 3차원으로 설정하였으며, 풍속 방향 및 해류의 수심에 따른 방향 변화를 반영하여 기름 및 천연가스 유출을 계산하였다. 이를 통해 심해에서 상승하는 기름 및 가스의 거동을 실제 해역과 유사하게 예측할 수 있었다. Li et al. (2013)은 해류와 해양파의 영향 아래에 기름유출을 관찰하는 효과적인 시도를 하였으며, 해류 속도는 깊이에 따라서 일정하게 적용하였다. 기름의 확산 경향을 살펴보았으며, 방제와 연관 있는 최대 이동 거리에 대해서는 관찰하지 않았다. Zhu et al. (2014)는 발해만 유출 사고에서 기름의 확산에 대하여 연구하였으며, 해저 파이프에서 자유 수면까지 기름유출 과정을 조사하였다. 또한, 기름 확산 시 밀도, 손상부의 크기 등의 변수를 고려하여 유출된 기름의 확산과정을 계산하였다. 각 변수에 대한 수면 도달시간 및 이동 거리를 무차원화 했으며, 수면에 도달 후 해류에 의한 이동을 예측하여 방제에 필요한 정보를 얻을 수 있다. 해저에서 수면까지 속도 분포를 주어 보다 현실에 가까운 전산유체역학 해석을 진행하였다.

1.3 논문 목적

기름 유출에 관한 연구들은 실제 기름 유출 데이터, 실험 및 전산유체역학을 통해 광범위하게 이루어지고 있다. 해저 바닥이나 수평 파이프, 유조선의 사고로 인한 기름 유출 연구는 많이 다뤄지고 있는데 비해, 수직 파이프에서의 기름 유출에 관한 전산유체역학해석은 더 많은 연구가 필요한 실정이다.

본 논문에서는 해양플랜트에서 발생할 수 있는 여러 기름 유출 사고 중에서

생산 라이저가 부식, 침식 등과 같은 피해로 인해 구멍이 발생하였을 경우 기름 유출의 확산 정도를 소스코드가 공개된 전산유체역학(Computational fluid dynamics, CFD) 라이브러리인 OpenFOAM (Park (2011))을 이용하여 해석하고 결과를 바탕으로 기름 확산 모델을 수립하였다.

구체적으로, 수심 150m에서 라이저에 손상이 생겨 기름 유출이 발생하였을 경우의 기름 확산을 다루었다. 특히, 수심에 따라 속도분포를 적용하여 실제에 가까운 조건을 주기 위해 노력했다. 기름 확산 모델을 통해 기름이 유출되었을 시 기름의 밀도, 해수의 속도, 손상된 위치 등과 같은 변수로 인한 확산 정도를 예측하고 그에 따른 방제대책을 수립하는 데 필요한 기본적인 자료를 제공하고 자 하였다.

1.4 논문 구성

본 논문은 라이저의 손상으로 인해 해양으로 기름 유출이 발생하였을 때 기름의 확산 정도 및 시간을 시뮬레이션하였다. 해석에는 소스코드가 공개된 전산유체역학 라이브러리인 OpenFOAM을 사용하였다.

2장은 계산 방법에 대해 기술하였다. 2.1 절에서는 기름 확산해석 모델을 수치 해석하기 위해 사용된 지배방정식을 기술하였다. 2.2절에서는 제트 유동과 밀도 차이에 의한 확산 문제인 Rayleigh-Taylor instability에 대해 각각 수치방법을 적용함으로써 사용된 모델의 적합성을 검토하였다. 2.3절에서는 앞의 검토를 통해 결정된 수치 모델을 기술하였다.

3장에서는 기름 확산 수치해석에 대해 기술하였다. 3.1 절에서는 기름 확산에 대한 해석하기 위한 격자와 경계조건을 기술하였다. 3.2 절에서는 2장에서 결정된 수치모델을 통해 계산한 표준 계산 결과를 분석하였다. 3.3 절에서는 기름의 밀도에 따른 영향을 비교하였고 3.4 절에서는 해류 속도에 따른 영향을 비교하였다. 3.5 절에서는 유출구멍의 크기에 따른 영향을, 3.6절에서는 손상부 위치에 따른 영향을 비교하였다. 3.7절에서는 나온 결과 값을 무차원화 하여 각 변수에 따른 식을 유도하였다.

마지막으로 4 장에서는 연구 결과 요약과 향후 연구 방향을 기술하였다.

제 2 장 계산 방법

2.1 지배 방정식

본 논문은 기름, 해수, 공기를 모두 비압축성 유체로 고려하였고 속도와 압력을 구하기 위해 질량 보존방정식과 운동량 보존방정식을 고려하였으며 식 (1)과 식 (2)와 같이 표현된다.(Versteeg and Malalasekera (1995)).

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v_m) = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho_m v_m}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho_m v_m v_m) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\tau}) + S \quad (2)$$

여기서, ρ 는 밀도, v 는 속도벡터를 나타낸다. S 는 소스항을 나타내고, 소스항에는 중력가속도가 포함된다. $\bar{\tau}$ 는 응력 텐서를 나타내고 아래첨자 m 은 혼합류를 의미한다. 응력텐서는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$\bar{\tau} = \mu_m (\nabla v_m + \nabla v_m^T) \quad (3)$$

자유 수면을 해석하기 위해 volume-of-fluid (VOF) 방법을 사용하였으며 VOF 방법을 포함하는 수송 방정식은 식 (4), 식 (5)와 같이 표현 된다(Hirt and Nichols (1981); Hieu et al. (2004)).

$$\frac{\partial f_{sw}}{\partial t} + u_m \frac{\partial f_{sw}}{\partial x} + v_m \frac{\partial f_{sw}}{\partial y} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial f_o}{\partial t} + u_m \frac{\partial f_o}{\partial x} + v_m \frac{\partial f_o}{\partial y} = 0 \quad (5)$$

여기서, 분수 함수는 식 (6)과 식 (7)과 같이 나타낸다.

$$f_{sw} = \frac{V_{sw}}{V_c} \quad (6)$$

$$f_o = \frac{V_o}{V_c} \quad (7)$$

여기서, 아래첨자 a , sw 및 o 는 각각 공기, 해수 및 기름을 의미하고 f_{sw} 는 해수의 분수(fractional) 함수, f_o 는 기름의 분수함수를 나타낸다. V_c 는 셀(Cell)의 부피, V_o 는 셀에서의 기름의 부피, V_{sw} 는 셀에서의 해수의 부피를 나타낸다. 혼합류에서의 밀도(ρ)와 점성계수(μ)는 식 (8)과 식 (9)과 같이 정의된다.

$$\rho_m = (1 - f_{sw} - f_o)\rho_a + f_{sw}\rho_{sw} + f_o\rho_o \quad (8)$$

$$\mu_m = (1 - f_{sw} - f_o)\mu_a + f_{sw}\mu_{sw} + f_o\mu_o \quad (9)$$

난류를 고려하기 위해 운동량 보존 방정식을 시간평균하면 식 (10)과 같이 Reynolds 응력 항이 나타난다.

$$-\rho_m \overline{v_m v_m} = \mu_t \left(\nabla \cdot \overline{v_m} + \nabla \cdot \overline{v_m^T} \right) I \quad (10)$$

여기서, I 는 단위 텐서를 나타낸다. μ_t 는 난류점성계수를 나타낸다. μ_t 를 계산하기 위해 standard $k-\epsilon$ model, Shear-Stress Transport (SST) $k-\omega$ model, Launder-Reece-Rodi (LRR) model을 고려하였다.

난류 모델 중 Standard $k-\epsilon$ model은 Boussinesq hypothesis와 더불어 난류 운동에너지 k 와 난류 운동에너지 소산율 ϵ 의 수송 방정식을 기초로 한다. Boussinesq hypothesis는 난류일 때 운동량 방정식에서 발생한 Reynolds 응력이 평균 변형률이 증가하면서 Reynolds 응력 또한 증가하는 것을 확인하고 평균 변형률과 Reynolds 응력이 관련 있다는 가정을 세운다. 식 (11)와 식 (12)은 수평 Reynolds 응력과 수직 Reynolds 응력을 나타낸다.

$$\tau_{xx} = -\rho_m \overline{u'^2}, \tau_{yy} = -\rho_m \overline{v'^2}, \tau_{zz} = -\rho_m \overline{w'^2} \quad (11)$$

$$\tau_{xy} = \tau_{yx} = -\rho_m \overline{u'v'}, \tau_{xz} = \tau_{zx} = -\rho_m \overline{u'w'}, \tau_{yz} = \tau_{zy} = -\rho_m \overline{v'w'} \quad (12)$$

여기서, Boussinesq hypothesis는 식 (13)과 같이 나타낸다.

$$\tau_{ij} = -\rho_m \overline{u'_i v'_j} = \mu_t \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) \quad (13)$$

Standard $k-\epsilon$ model은 k 와 ϵ 을 결합하여 μ_t 를 식 (14)와 같이 정의된다 (Launder and Spalding (1972); Park and Rhee (2012)).

$$\mu_t = \rho_m C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (14)$$

k 와 ϵ 의 수송 방정식은 식 (15)와 식 (16) 같이 정의된다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m k) + \nabla \cdot (\rho_m k \overline{v_m}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \quad (15)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \epsilon) + \nabla \cdot (\rho_m \epsilon \overline{v_m}) = \nabla \cdot \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \epsilon \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho_m \frac{\epsilon^2}{k} \quad (16)$$

여기서, C_μ 는 0.09를 사용했으며, $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$, σ_k , σ_ϵ 은 각각 1.44, 1.92, 1.0 그리고 1.3을 사용하였다.

난류 모델 중 SST $k-\omega$ model은 standard $k-\epsilon$ model에서 ϵ 의 수송 방정식을 ω 의 수송 방정식으로 변형한 것이다. 경계층 밖의 계산이 좋은 $k-\epsilon$ model과 벽면 근처의 계산이 좋은 $k-\omega$ model을 혼합한 것으로 벽 근처에서 역압력 구배로 인해 발생한 유동박리의 크기 및 발생한 지점을 standard $k-\epsilon$ model 보다 정확히 예측할 수 있다. k 와 ω 의 수송 방정식을 식 (17)과 식 (18) 같이 계산된다(Menter (1994)).

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U \cdot \nabla k = P_k - \beta^* k \omega + \nabla \cdot \left[(\nu + \sigma_k \nu_t) \nabla k \right] \quad (17)$$

$$\frac{\partial \omega}{\partial t} + U \cdot \nabla \omega = \alpha S^2 - \beta \omega^2 + \nabla \cdot \left[(\nu + \sigma_\omega \nu_t) \nabla \omega \right] + 2(1 - F_1) \sigma_\omega \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (18)$$

μ_t 는 식 (19)와 같이 계산된다.

$$\nu_t = \frac{\mu_t}{\rho_m} = \frac{0.31k}{\max[0.31\omega; \Omega F_2]}, \quad F_2 = \tanh \left[\left[\max \left(\frac{2\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right) \right]^2 \right] \quad (19)$$

$k-\omega$ model과 $k-\epsilon$ model을 혼합해서 사용하기 때문에 각각의 난류 상수를

혼합해서 전체의 난류 상수가 식 (20)과 같이 결정된다.

$$\varnothing = F_1 \varnothing_1 + (1 - F_1) \varnothing_2 \quad (20)$$

여기서, F_1 , P_k , CD_{kw} 는 혼합 함수(blending function), 생성항, 교차 확산 항을 나타내며 식 (21), 식 (22) 그리고 식 (23)과 같이 계산된다.

$$F_1 = \tanh \left\{ \left\{ \min \left[\max \left(\frac{\sqrt{k}}{\beta^* \omega y}, \frac{500\nu}{y^2 \omega} \right), \frac{4\sigma_{\omega 2} k}{CD_{kw} y^2} \right]^4 \right\} \right\} \quad (21)$$

$$P_k = \min(\tau \nabla U, 10\beta^* k \omega) \quad (22)$$

$$CD_{kw} = \max \left(2\rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega, 10^{-10} \right) \quad (23)$$

여기서, $\varnothing_1$ 에서는 $\alpha_1 = 5/9$, $\beta_1 = 3/40$, $\sigma_{k1} = 0.85$, $\sigma_{\omega 1} = 0.5$ 를 사용하고 $\varnothing_2$ 에서는 $\alpha_2 = 0.44$, $\beta_2 = 0.0828$, $\sigma_{k2} = 1$, $\sigma_{\omega 2} = 0.856$ 를 사용하며 β^* 는 0.09이다.

앞선 standard $k-\epsilon$ model과 SST $k-\omega$ model은 난류점성계수를 등방성, 즉 수직 Reynolds 응력이 동일한 것으로 가정한다. 그러므로 이러한 가정을 만족시킬 수 없는 유동의 범주에서는 유동의 예측이 부정확하게 된다. LRR model은 Reynolds 응력장의 방향성을 설명 할 수 있다. 위의 Reynolds 응력을 식 (24)와 같이 다시 표현 하였다(Launder et al. (1975)).

$$R_{ij} = -\frac{\tau_{ij}}{\rho_m} = \overline{v_m' v_m'} \quad (24)$$

R_{ij} 의 수송 공식은 식 (25) 같이 정의된다.

$$\frac{DR_{ij}}{Dt} = P_{ij} + D_{ij} - \epsilon_{ij} + \Pi_{ij} + \Omega_{ij} \quad (25)$$

식 (25)는 6개의 편미분 공식을 나타내며 독립 Reynolds 응력들의 수송을 위한 하나의 공식이다. P_{ij} , D_{ij} , ϵ_{ij} , Π_{ij} , Ω_{ij} 는 R_{ij} 의 생성 항과 확산 항, 소산율, 난류의 압력-스트레인 상호작용을 나타낸 항, 회전 항을 나타내며 식 (26), 식 (27), 식 (28), 식 (29), 식 (30)과 같이 표현된다.

$$P_{ij} = - \left(R_{im} \frac{\partial v}{\partial x_m} + R_{jm} \frac{\partial u}{\partial x_m} \right) \quad (26)$$

$$D_{ij} = \frac{\partial}{\partial x_m} \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \frac{\partial R_{ij}}{\partial x_m} \right) = \nabla \cdot \left(\frac{\nu_t}{\sigma_t} \nabla R_{ij} \right) \quad (27)$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{2}{3} \epsilon \delta_{ij} \quad (28)$$

$$\Pi_{ij} = -C_1 \frac{\epsilon}{k} \left(R_{ij} - \frac{2}{3} k \delta_{ij} \right) - C_2 \left(P_{ij} - \frac{2}{3} P \delta_{ij} \right) \quad (29)$$

$$\Omega_{ij} = -2\omega_k (R_{jm} e_{ikm} + R_{im} e_{jkm}) \quad (30)$$

여기서, $\nu_t = C_\mu k^2 / \epsilon$, $C_\mu = 0.09$, $\sigma_k = 1.0$ 이다. $C_1 = 1.8$, $C_2 = 0.6$ 이며 δ_{ij} 는 Kronecker delta이며 ω_k 는 회전 벡터이고, e_{ijk} 는 alternating tensor이다.

2.2 수치 모델 검증

본 논문은 손상된 라이저로부터 유출된 기름이 해수 중으로 확산하는 현상을

계산하는 것이다. 기름은 손상된 라이저로부터 제트 유동으로 분사된다. 유출된 기름은 해수와 혼합되지 않고 밀도 차에 의해 섞이게 된다. 즉, 해수 중에서 기름 유출 문제를 풀기 위해 제트 유동과 밀도 차이에 의한 확산을 동시에 고려해야 하지만 두 가지를 함께 만족하는 검증 계산이 없어 각각 따로 검증과정을 거쳤다. 이에 본 논문에서는 제트 유동과 밀도 차에 의한 섞임 문제인 Rayleigh-Taylor instability를 해석하였다.

2.2.1 제트 유동

본 논문은 수직 파이프인 라이저가 손상되었을 경우 구멍에서 분사하는 기름을 예측해야 한다. 2차원에서 분사하는 기름의 유동 형태에 대한 수치모델의 검증을 위해 평면 제트 유동을 해석하였다.

교란이 없는 유동장에서 제트 유동을 해석하였다. Fig. 1은 평면 제트 유동을 나타낸다. 평면 제트 유동은 일정한 압력으로 분사되며 경계가 없으므로 자유전단 유동을 만족하며 일정한 운동량 속(momentum flux)을 가지며 식 (31)과 같이 나타낸다.

$$J = \rho \int_{-\infty}^{+\infty} \bar{u}^2 dy = \text{constant} = C_1 \rho b^2 u_{\max}^2 \quad (31)$$

여기서, J 는 운동량 속을 나타내고 $\bar{u}$ 는 제트 유동의 속도 ρ 는 제트 유동하는 유체의 밀도, b 는 제트 유동의 너비, C_1 은 상수이며, $u_{\max}$ 는 제트 유동의 최고 속도를 나타낸다.

이 영역에서 중심축 속도와 제트 유동 너비는 제트 운동량과 밀도 거리에 관련이 있으며 식 (32)와 식 (33)과 같이 정의된다.

$$u_{\max} = f(x, J, \rho) \quad (32)$$

$$b = f(x, J, \rho) \quad (33)$$

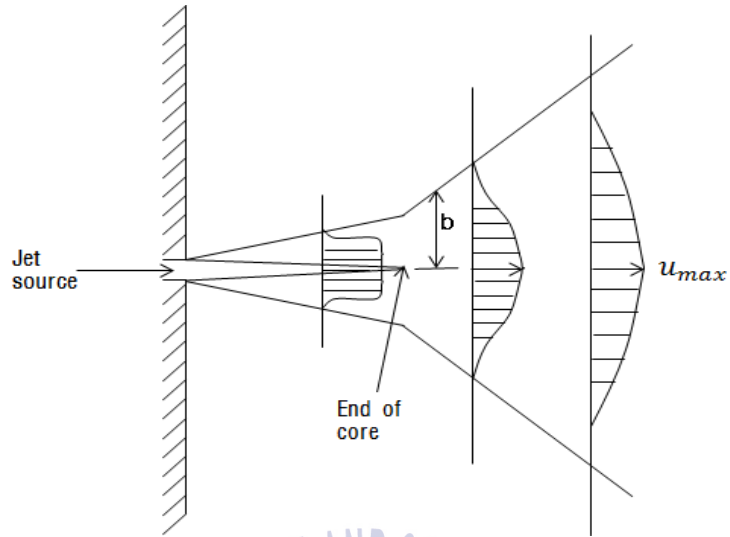


Fig. 1 Details of the early development of a real jet

무차원 분석에 의하면 너비는 선형으로 증가하며 평면 유동에서 제트의 최대 속도는 식 (34)와 식 (35)와 같이 나타낸다.

$$\text{Turbulent jet : } b = C_2 x \quad (34)$$

$$\text{Plane flow : } u_{\max} = C_3 \left(\frac{J}{\rho} \right)^{1/2} x^{-1/2} \quad (35)$$

여기서, C_2 , C_3 는 상수이다. Görtler (1942)는 ν_t 가 x 에 의한 함수라고 가정하였으며 식 (36), 식 (37)과 같이 평균 속도와 ν_t 를 나타냈다.

$$\bar{u} = u_o \left(\frac{x_o}{x} \right)^{1/2} F'(\eta) \quad (36)$$

$$\nu_t = Ku_o b_o \left(\frac{x}{x_o} \right)^{1/2}, \quad \eta = \frac{\sigma y}{x} \quad (37)$$

여기서, $F'(\eta)$ 는 유선방정식 $F(\eta)$ 에서 속도 $\bar{u}$ 를 얻기 위해 미분을 취한 값이고, x_o 는 초기 기준점, σ 는 평면 제트에서 7.67, (u_o, b_o) 는 x_o 에서 $(u_{\max}, b)$ 의 값, K 는 0.016을 나타낸다. 위의 식을 이용하여 운동량 방정식에 적용하면 유선 방정식 $F(\eta)$ 과 $\bar{u}$ 를 식 (38)과 식(39)와 같이 얻을 수 있다(White (2006)).

$$F(\eta) = \tanh(\eta) \quad (38)$$

$$\frac{\bar{u}}{u_{\max}} = \text{sech}^2(\eta) \quad (39)$$

식 (37)의 η 와 평면 제트 유동에서의 σ 를 이용하여 y/x 에 따른 속도 무차원화 값을 얻을 수 있고 이를 이용하여 수치해석결과와 비교하였다. 제트 유동의 정의를 토대로 제트 유동에 대한 수치모델 검증을 진행하였다. 제트 유동의 Reynolds number는 100,000이며 유동이 난류 영역이기 때문에 난류 모델을 적용하였다. 공기가 노즐을 통해 유출되며 주변은 유출되는 공기와 같은 성질을 가지고 있다. Fig. 2는 도메인의 크기를 나타내며 노즐의 크기는 0.025m로 설정하였으며 유출 속도는 2m/s를 적용하였다. 노즐의 크기 및 제트 유동의 속도를 다음과 같이 설정한 이유는 기름 유출 계산에서 표준 계산 조건을 유출구멍의 크기 0.05m 유출 속도 2m/s로 설정하였기 때문이다. 그래서 동일한 속도와 크기에서 제트 유동의 검증을 하였다. Fig. 3은 제트 유동의 경계 조건을 나타내며 노즐을 기준으로 대칭을 이루기 때문에 위쪽 절반을 모델링하였다. 공기는 벽(Plane)에서 0.1m 앞에서 발사되며 노즐을 통해 완전 발달한 흐름이 열린 공간으로 빠져나가도록 하여 더욱 실제 유동과 유사하도록 설정하였다. 입구 경계면에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하여 출구 경계면은 속력을 Neumann 조건으로 설정하였다. 벽은 no-slip 조건으로 설정하였고 대칭면은 대칭경계조건을 설정하였다.

수치 방법은 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식, 난류모델 방정식은 비압축

성기반 비정상상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였다. 속도와 압력의 연성은 PIMPLE algorithm을 적용하였다. 대류 항은 total variation diminishing (TVD) 기법을 사용하였으며, limiter로 van Leer (van Leer (1979))를 사용하였다. 확산 항은 2차 중심 차분을 사용하였다. 난류 유동을 고려하기 위해 적용된 k , ϵ 그리고 ω 는 TVD 기법을 사용하였고, limiter로 MUSCL (Osher (1985))을 사용하였다. 압력은 2차 중심차분법을 사용하였다. 계산의 수렴성을 증가시키기 위해 Geometric Multi-Grid (GMG) 방법을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다(Park et al. (2013)). 난류 모델의 비교를 위해 standard $k-\epsilon$ model (Launder and Spalding (1972)), SST $k-\omega$ model (Menter (1994)), LRR model (Launder et al. (1975))을 각각 적용하여 계산하였다.

Fig. 4는 제트 유동 해석에 사용된 격자를 나타내며 노즐 입구 2개, 벽면 78개, 수평방향 255개를 적용하여 총 20,078개의 정렬격자를 사용하였다. Fig. 5는 노즐의 직경 d 에 따른 x 를 나타내며 x/d 의 위치에 따라 속도분포를 확인하였다. 제트 유동을 해석하여 난류 모델별 계산 결과를 비교하였다. 난류 모델은 standard $k-\epsilon$ model, SST $k-\omega$ model, LRR model를 사용하였다.

Fig. 5는 제트 유동에서 수치해석 결과와 해석해(Analytic solution)를 비교하기 위한 x 의 위치를 나타낸다.

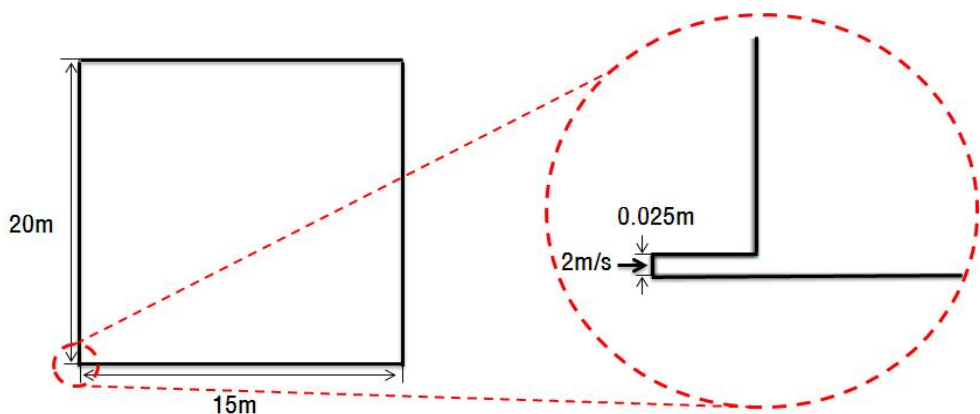


Fig. 2 Domain extent for jet flow

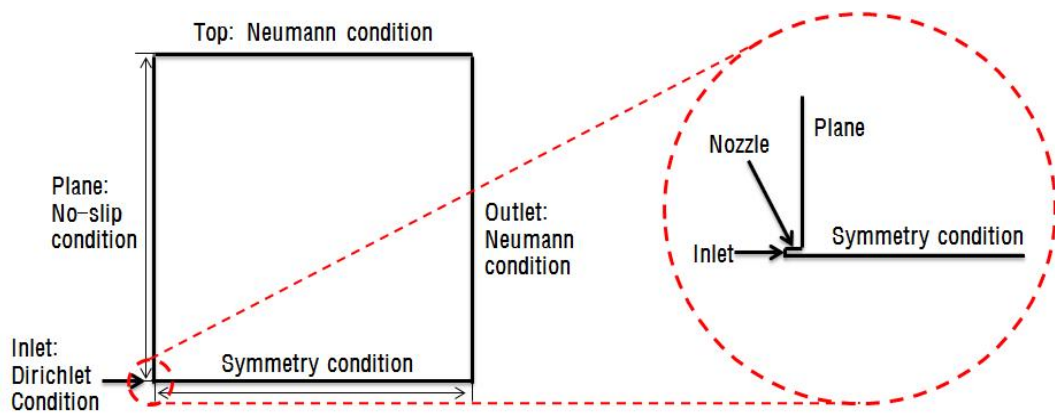


Fig. 3 Boundary conditions for jet flow

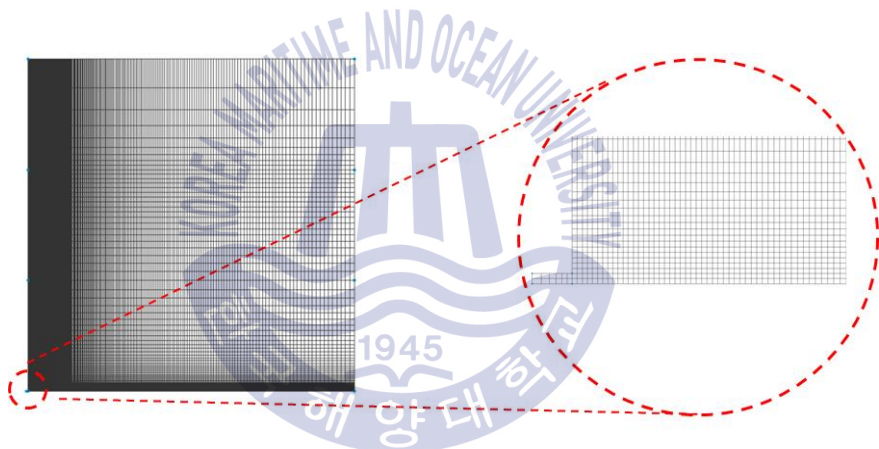


Fig. 4 Typical mesh for jet flow

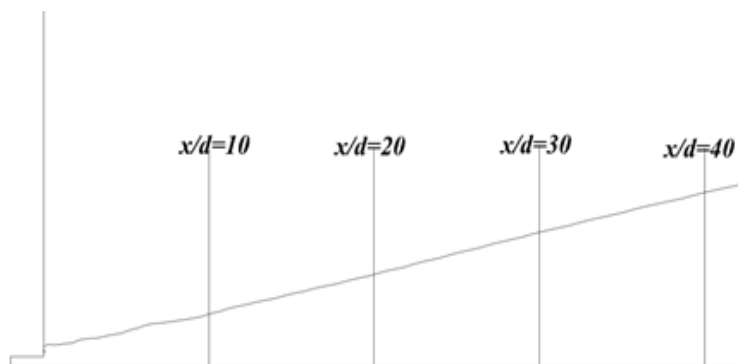
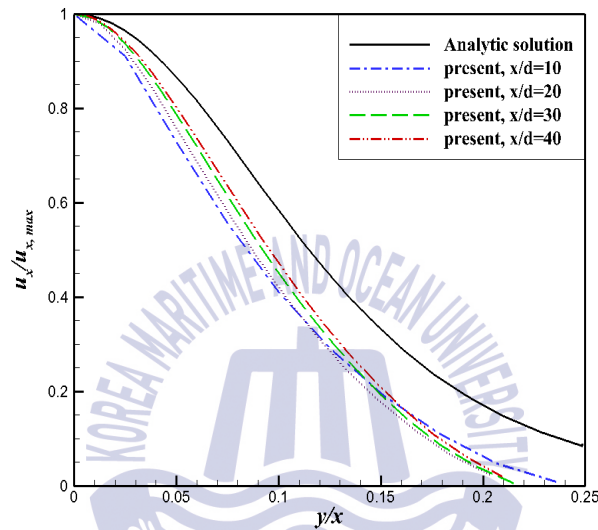
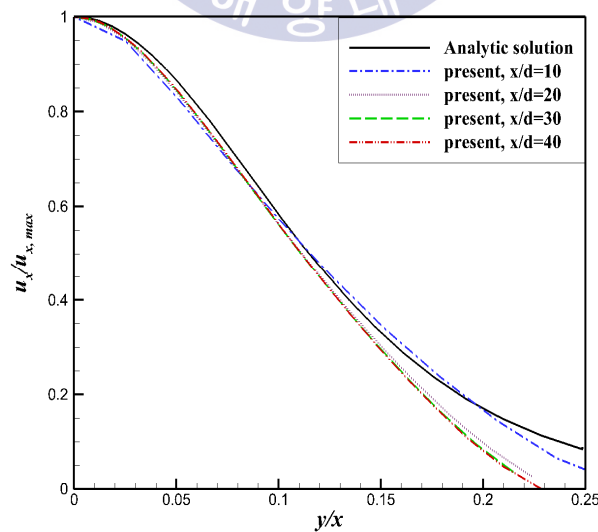


Fig. 5 $x/d = 10, 20, 30, 40$ positions for jet flow

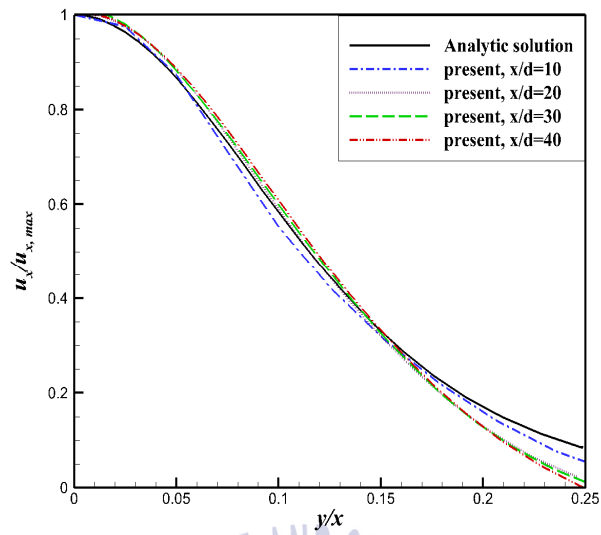
Fig. 6은 x/d 의 위치에서의 무차원화 한 위치(y/x)에서의 무차원화 한 속도 ($u_x/u_{x, \max}$)를 비교하였다. Fig. 6을 보면 standard $k-\epsilon$ model은 다른 모델들에 비해 해석해와 차이가 크게 나는 것을 확인하였고, SST $k-\omega$ model과 LRR model은 해석해와 유사하게 나왔다. Fig. 7은 x/d 의 위치에 따른 속도분포를 나타내며 제트 유동의 경계를 확인 할 수 있다.



(a) Standard $k-\epsilon$ model

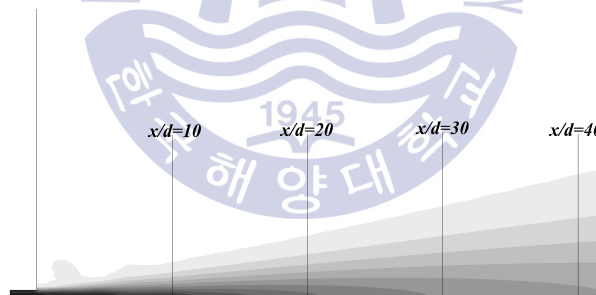


(b) SST $k-\omega$ model

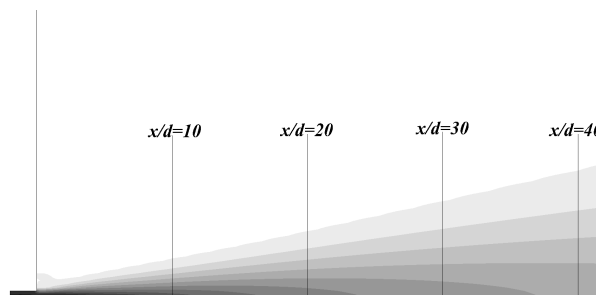


(c) LRR model

Fig. 6 Velocity profiles of jet flow for turbulence models



(a) Standard $k-\epsilon$ model



(b) SST $k-\omega$ model

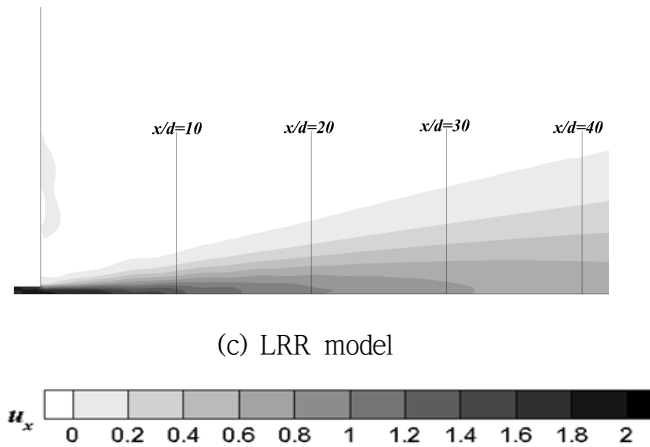


Fig. 7 Velocity profiles of jet flow at x/d positions

각 모델의 수치 계산한 결과를 결정계수(R squared, R^2)로 비교하였다. 결정계수는 식 (40)과 같이 나타낸다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_i^n (y_i - f(x_i))^2}{\sum_i^n (y_i)^2 - \frac{\sum_i^n (y_i)^2}{n}} \quad (40)$$

여기서, y_i 는 수치해석 결과, $f(x_i)$ 는 해석해를 나타낸다. Table 1은 난류모델별 결정계수를 정리한 것으로 standard $k-\epsilon$ model은 0.9401가 나왔고, SST $k-\omega$ model은 0.9954, LRR model은 0.9979가 나왔다. 위 계산을 통해 LRR model의 결정계수가 가장 높게 나온 것을 확인하였다. 제트 유동을 가장 잘 예측한 LRR model을 기름 유출 계산의 난류모델로 선정하였다.

Table 1 R-Squared of jet flow for turbulence models at $x/d=20$

	standard $k-\epsilon$ model	SST $k-\omega$ model	LRR model
R-Squared	0.9401	0.9954	0.9979

2.2.2 Rayleigh-Taylor instability

유출된 기름은 해수와 혼합되지 않고 밀도 차이에 의해 섞이게 된다. 기름과 해수의 섞임을 모사하기 위해 밀도 차에 의해 섞이는 Rayleigh-Taylor instability를 해석하였다. Rayleigh-Taylor instability는 중력가속도의 영향이 밀도가 높은 물질에서 낮은 물질로 작용하고 있는 경우 밀도가 높은 물질이 작은 물질을 밀어내면서 발생하는 경계면의 불안정성을 말한다. Fig. 8은 Rayleigh-Taylor instability의 검증계산을 위한 초기조건 및 격자를 보여준다. 가로축 120개, 세로 축 300개를 적용하여 총 35,100개의 정렬격자를 사용하였고 초기 경계면 프로파일은 $y = 2.0 + 0.1\cos(2\pi x)$ 를 적용하였다. Rayleigh-Taylor instability 해석에서 Reynolds number와 두 물질의 밀도 비를 나타내는 Atwood number (A)는 식 (41)과 같이 나타냈다.

$$A = \frac{\rho_{heavy} - \rho_{light}}{\rho_{heavy} + \rho_{light}}, \quad Re = \frac{\sqrt{Wg} W}{\nu} \quad (41)$$

여기서, 아래 첨자 *heavy*는 상대적으로 무거운 밀도, *light*는 상대적으로 가벼운 밀도를 나타내며, W 는 채널의 길이, g 는 중력가속도, ν 는 동점성계수이다. Atwood number 0.5, Reynolds number 256에서 계산하였다. 벽면은 no-slip조건으로 설정하였다.

수치 방법은 제트 유동과 동일하게 적용하였다. 두 물질의 경계면은 VOF 방법을 적용하여 해석하였다. Fig. 9는 시간에 따른 Rayleigh-Taylor instability 해석결과를 나타낸다. 시간에 따른 자유수면 변화가 He et al. (1999)과 유사하게 계산된 것을 확인하여 수치 모델이 밀도 차이에 의한 확산을 잘 묘사함을 확인하였다.

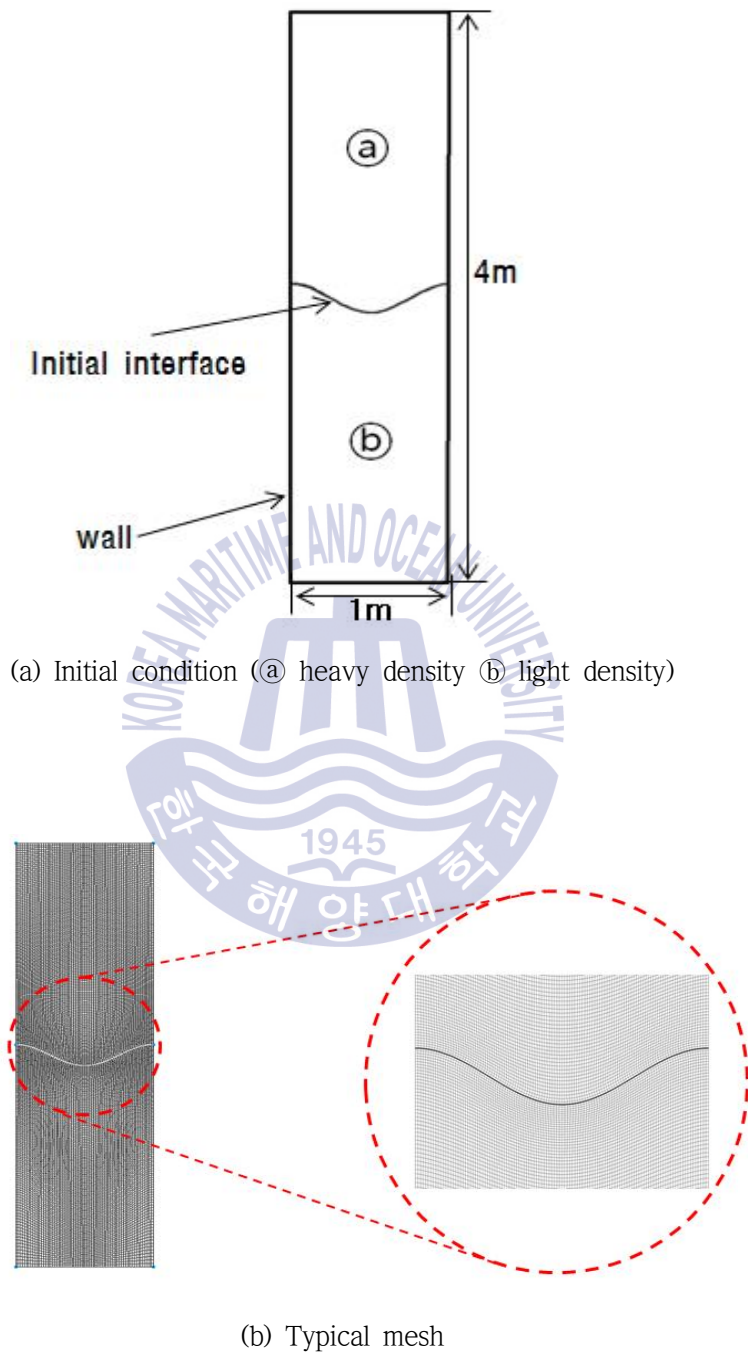


Fig. 8 Initial condition and typical mesh for Rayleigh-Taylor instability

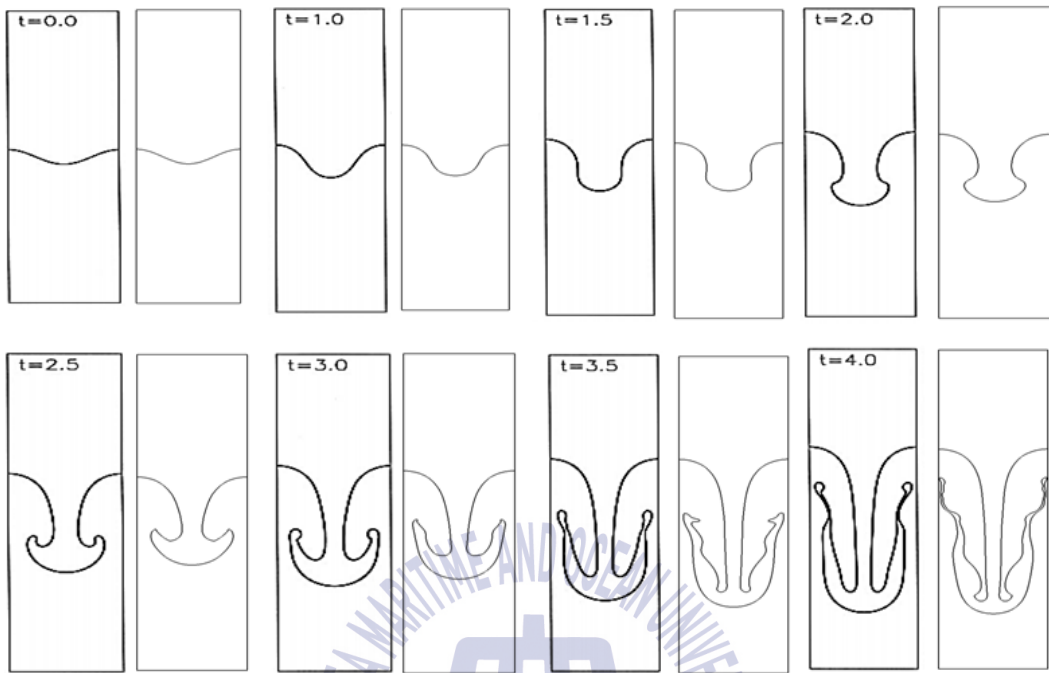


Fig. 9 Evolution of fluid interface (left-He et al. (1999); right-present)

2.3 수치 방법

제트 유동과 Rayleigh-Taylor instability의 계산을 토대로 수치 모델을 검증하였다. 질량보존 방정식, 운동량보존 방정식, 난류모델 방정식, 수송방정식은 비압축성기반 비정상상태에서 계산하였다. 셀 중심 차분법을 사용하였으며 속도와 압력의 연성은 PIMPLE algorithm을 적용하였다. 대류 항은 TVD 기법을 사용하였으며, limiter로 van Leer를 사용하였다. 확산 항은 2차 중심 차분을 사용하였다. 난류 유동을 고려하기 위해 LRR model을 사용하였다. k 와 ε 은 TVD 기법을 사용하였고, limiter로 MUSCL을 사용하였다. 압력은 2차 중심차분법을 사용하였다. 계산의 수렴성을 증가시키기 위해 GMG 방법을 사용하였고, Gauss-Seidel 반복 계산법을 이용하였다.

제 3 장 계산 결과 및 고찰

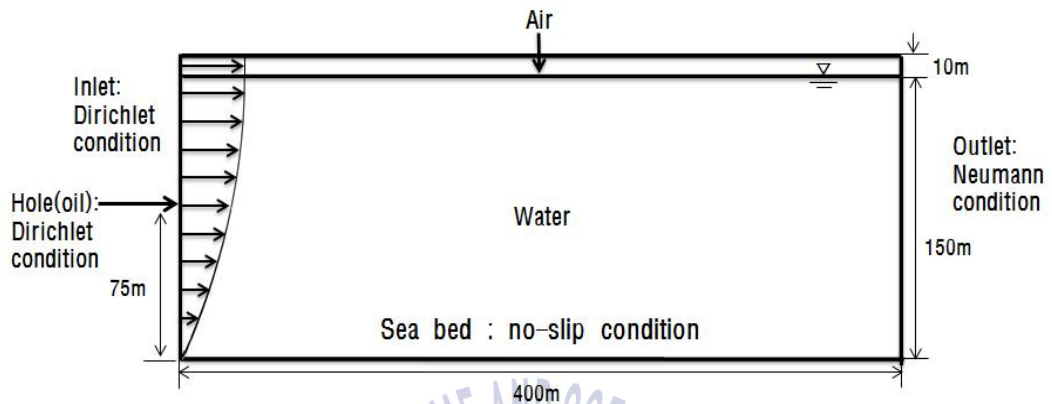
3.1 기름 유출 수치해석을 위한 격자 및 경계 조건

실제 환경과 가까운 해석 결과를 얻기 위해 동해에 위치한 동해가스전을 대상으로 수치해석을 수행하였다. 해류의 영향이 있는 상태에서 기름이 확산되는 정도를 파악하기 위해 수심에 따른 해류의 속도 분포를 입구조건에 적용하였다. 해저에서 수면까지의 속도 분포는 식 (42)를 적용하였다(Zhu et al. (2014)).

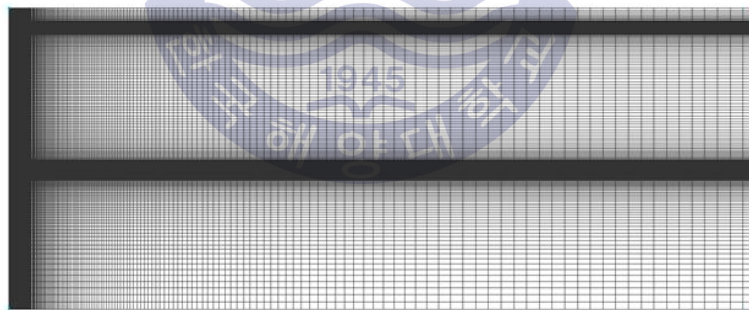
$$u_c = u_{c, \max} \left[1 - \left(1 - \frac{y}{H} \right)^2 \right] \quad (42)$$

여기서, $u_{c, \max}$ 는 해류의 최대 속도로 해수면에서의 속도를 나타내며 동해의 평균 유속인 $0.4m/s$ 를 고려하였다. H 는 수심을 나타내며 y 는 해저 면을 기준으로 수직 거리를 의미한다. Fig. 10은 경계조건, 계산영역 크기, 격자를 보여준다. 계산영역의 수직 방향을 $160m$ (수심 $150m$, 공기 $10m$), 수평 방향으로 $400m$ 설정하였다. 기름 유출 속도(u_o)는 $2m/s$ 이며, 라이저가 손상된 위치는 라이저의 중간 위치인 $75m$ 를 기준으로 삼았다. 기름 유출 계산을 위해 유출 구멍 5개, 입구 조건에서 해수 영역 255개, 공기영역 45개, 수평방향 270개를 적용하여 총 81,200개의 정렬격자를 사용하였다. 공기의 속도는 $u_{c, \max}$ 와 동일하게 적용하였다. 공기, 해수 그리고 기름의 밀도는 $\rho_a = 1.225kg/m^3$, $\rho_{sw} = 1025kg/m^3$, $\rho_o = 740kg/m^3$ 로 각각 적용하였다. 공기, 해수 그리고 기름의 점성계수는 $\mu_a = 1.8 \times 10^{-5}kg/ms$, $\mu_{sw} = 1.0 \times 10^{-3}kg/ms$, $\mu_o = 0.048kg/ms$ 를 각각 적용하였다. 기름의 밀도 경우 밀도 차이에 따른 변화를 고려하기 위하여 $710kg/m^3$ 에서

800kg/m³까지 30kg/m³씩 증가 시키며 계산하였다(Hoffmann et al. (1953)).

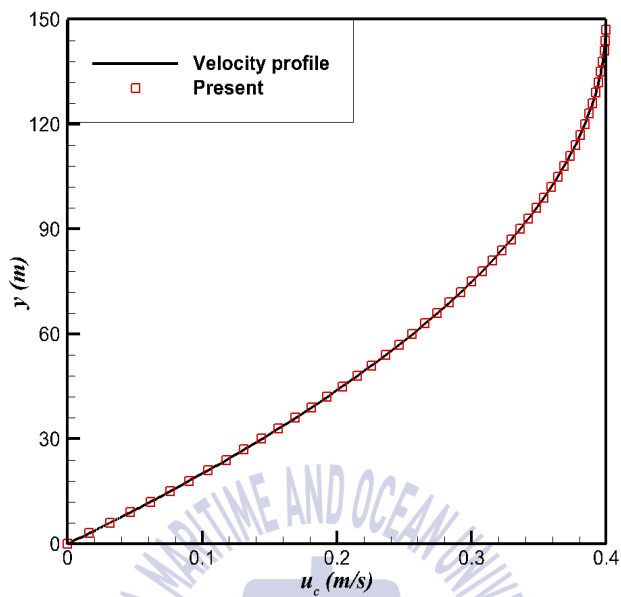


(a) Boundary conditions and domain extent

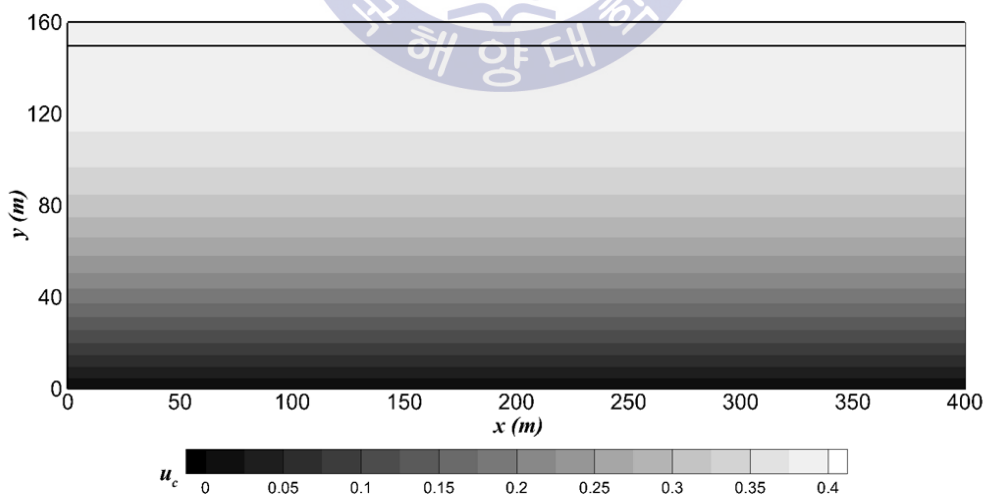


(b) Typical mesh

Fig. 10 Boundary conditions, domain extent and typical mesh



(a) Current velocity profile at inlet boundary



(b) Current velocity contours

Fig. 11 Current velocity profile and contours

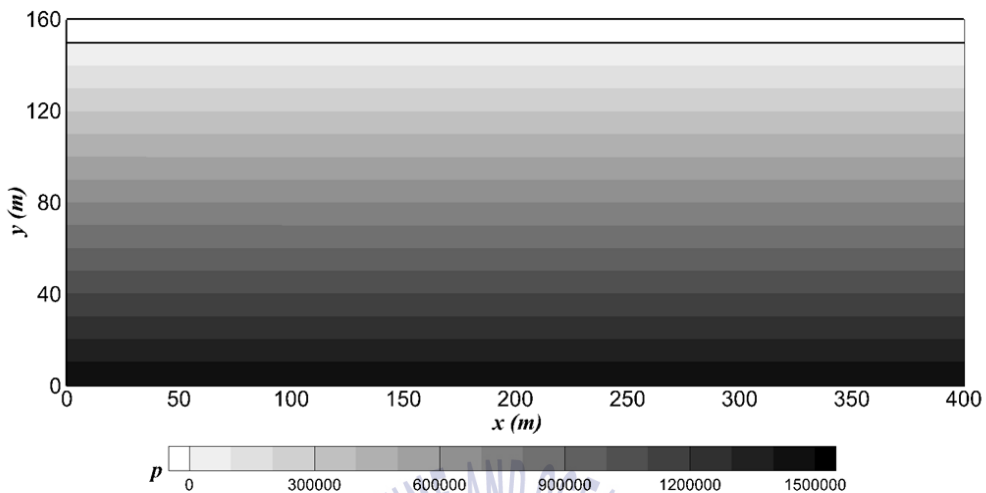


Fig. 12 Hydrostatic pressure contours

속도 분포가 제대로 적용되었는지 확인하기 위해 입구 경계면 및 계산영역에서의 속도 분포를 확인하였다. Fig. 11의 (a)는 입구 경계면에서 식 (41)과 입구에 적용된 속도분포를 그래프로 비교하였다. Fig. 11의 (b)는 계산 영역 전체에 속도 분포가 적용된 것을 나타낸 것이다. 또한, 정수압이 제대로 적용되었는지 확인하기 위해 계산영역에서의 정수압 분포를 확인하였다. Fig. 12는 정수압 분포가 수심에 따라 적용된 것을 나타낸다.

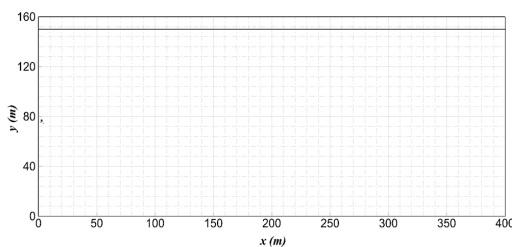
Table 2는 기름 밀도, 기름 유출속도, 해류 속도, 구멍의 지름, 손상된 라이저의 위치 변화에 따른 계산 케이스를 나타낸다. Case 2를 표준 계산으로 설정하여 각 케이스의 결과와 비교하였다.

Table 2 Summary of simulation cases

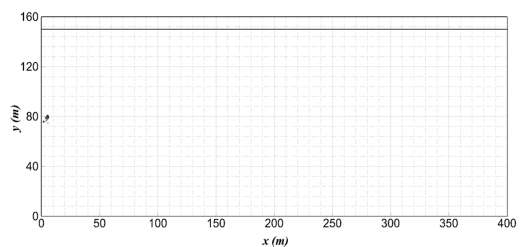
	Oil density (kg/m^3)	Oil leakage rate (m/s) (Volume flux of leakage oil (m^3/s))	Current velocity (m/s)	Leakage hole size (m)	Leakage hole position (m)
Case1	710	2 (0.003925)	0.4	0.05	75
Case2 (standard case)	740	2 (0.003925)	0.4	0.05	75
Case3	770	2 (0.003925)	0.4	0.05	75
Case4	800	2 (0.003925)	0.4	0.05	75
Case5	740	2 (0.003925)	0.2	0.05	75
Case6	740	2 (0.003925)	0.3	0.05	75
Case7	740	2 (0.003925)	0.5	0.05	75
Case8	740	2 (0.003925)	0.6	0.05	75
Case9	740	2 (0.000628)	0.4	0.02	75
Case10	740	2 (0.001413)	0.4	0.03	75
Case11	740	2 (0.002512)	0.4	0.04	75
Case12	740	2 (0.005652)	0.4	0.06	75
Case13	740	2 (0.003925)	0.4	0.05	37.5
Case14	740	2 (0.003925)	0.4	0.05	112.5

3.2 표준 계산 결과

Fig. 13은 표준 계산에서 라이저의 손상부로부터 해수면까지의 기름의 확산 정도를 시간에 따라 나타낸다. 기름이 유출된 직후 연속된 기름 유동을 형성한다. 유출된 기름이 기둥을 형성하다 유효 중량(중량-부력), 중력, 해류에 의한 모멘텀, 관성으로 인해 기름 덩어리로 흩어져서 확산되며 수면으로 상승할수록 해류의 속도가 빨라져 수평 방향으로 이동이 커지는 것을 확인 할 수 있다. 그 이유는 해류의 속도가 빠를수록 해류에 의한 x 방향 모멘텀이 커지기 때문이다. 기름 기둥은 수평으로 약 $10m$ 수직으로 $5m$ 정도의 길이로 형성되고 난 뒤 기름 덩어리 형태로 떨어져 나갔다. Fig. 11을 살펴보면 처음 수면에 도달하는 기름 덩어리와 가장 멀리 이동한 기름 덩어리가 다르다는 것을 확인 할 수 있다. 그 원인은 각각 기름 덩어리의 크기가 다르므로 인해 유효 중량, 해류에 의한 모멘텀 등 기름 덩어리에 작용하는 힘의 크기가 달라지기 때문이다. 최초로 수면에 도달한 기름이 수면에 도달했을 때 걸린 시간은 $191s$ 이며 이동 거리는 $132m$ 가 나왔다. 손상부에서 뿜어져 나온 기름은 기름 기둥을 이루다가 어느 순간 기름 덩어리로 떨어져 나가고 각각 기름 덩어리 크기에 따라 유효 중량의 영향이 크면 수면으로 상승하는 폭이 크고 해류속도에 의한 모멘텀이 크게 작용하면 수평으로 이동하는 폭이 크게 작용한 것으로 판단할 수 있다.



(a) $t = 5s$



(b) $t = 10s$

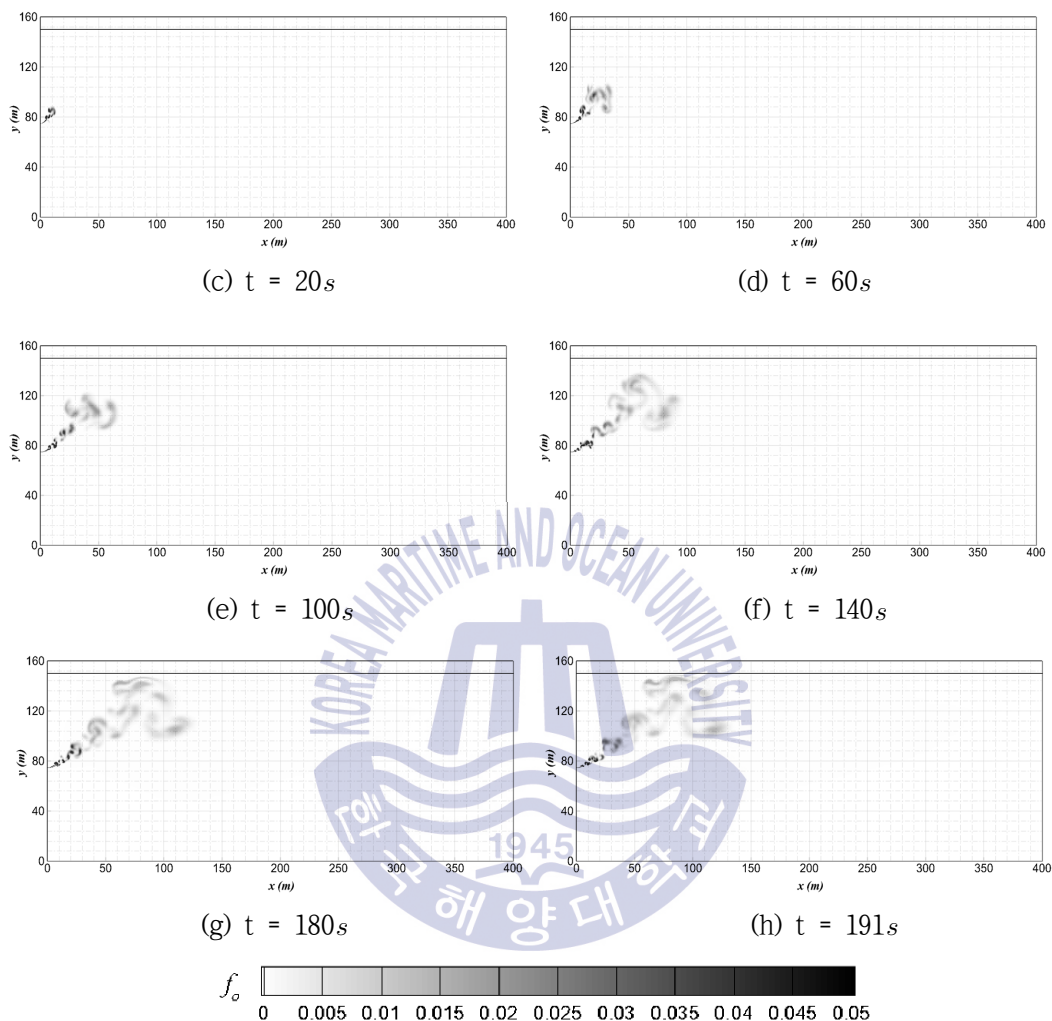
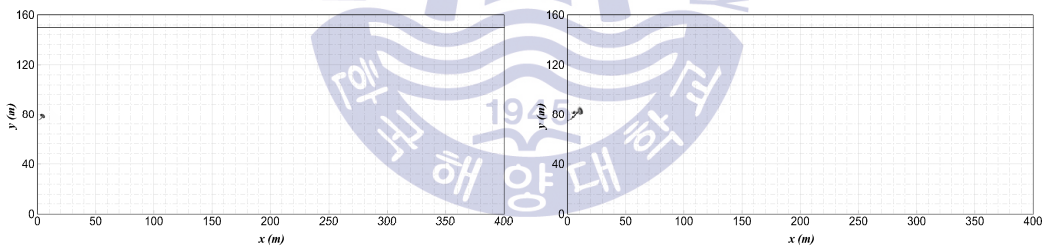


Fig. 13 Oil spill process from damaged riser to free-surface for standard case
(Case 2)

3.3 기름 밀도에 따른 영향

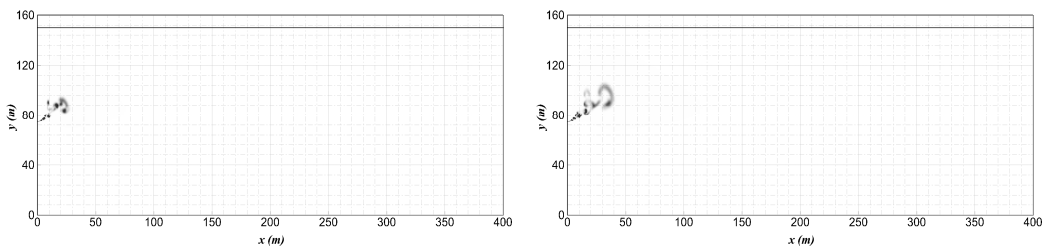
기름 밀도에 따른 기름 확산을 정도를 알아보기 위해 기름의 밀도를 710 kg/m^3 에서 30 kg/m^3 씩 증가시키며 계산하였다. 다른 조건들은 표준계산과 동일하게 설정하였다. Fig. 14, Fig. 15, Fig. 16은 기름의 밀도가 710 kg/m^3 , 770 kg/m^3 , 800 kg/m^3 일 경우 유출된 기름이 수면으로 도달하는 과정을 나타낸다.

밀도가 710kg/m^3 의 경우 기름 덩어리가 수면에 도달한 시간은 189s 로 표준 계산과 비교하면 2s 빠르게 떠올랐으며 이동거리는 133m 로 표준 계산과 비교하면 1m 멀리 이동한 것으로 계산되었다. 800kg/m^3 의 경우 수면에 도달한 시간은 198s 로 표준 계산과 비교하면 7s 늦게 떠올랐으며 이동거리는 120m 로 표준 계산과 비교하면 12m 적게 이동하였다. 계산 결과, 밀도가 커질수록 기름덩어리가 수면에 도달하는 시간은 길어졌다. 반면에 수평으로 이동한 거리는 감소하였다. 왜냐하면 기름 밀도의 변화는 기름 덩어리에 작용하는 유효 중량에 영향을 미치기 때문에 동일한 크기의 기름덩어리 중에서 밀도가 높은 기름 덩어리는 중력의 영향이 커져 유효 중량에 의한 수직 모멘텀이 작아진다. 그로 인해 밀도가 높은 기름덩어리는 수면으로 느리게 상승하여 수면에 도달하는 시간이 길어진다. 위의 결과를 보면 해양플랜트에서 밀도가 작은 기름을 생산할 때 사고가 발생한다면 밀도가 높은 기름보다 더욱 신속하게 대응해야 한다.



(a) $t = 10\text{s}$

(b) $t = 20\text{s}$



(c) $t = 40\text{s}$

(d) $t = 60\text{s}$

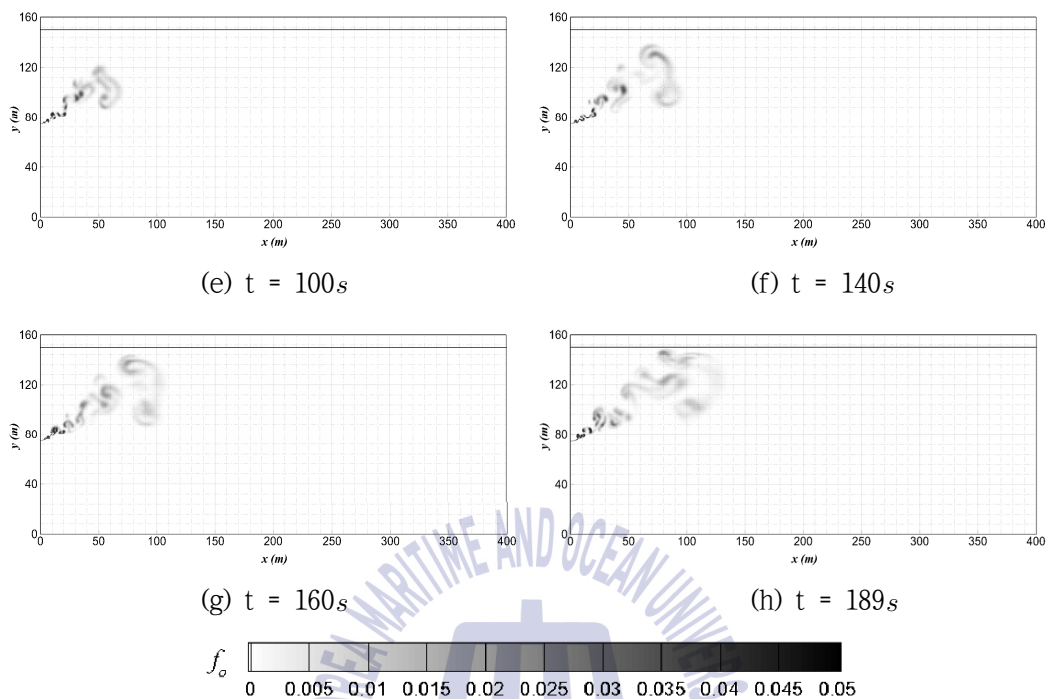
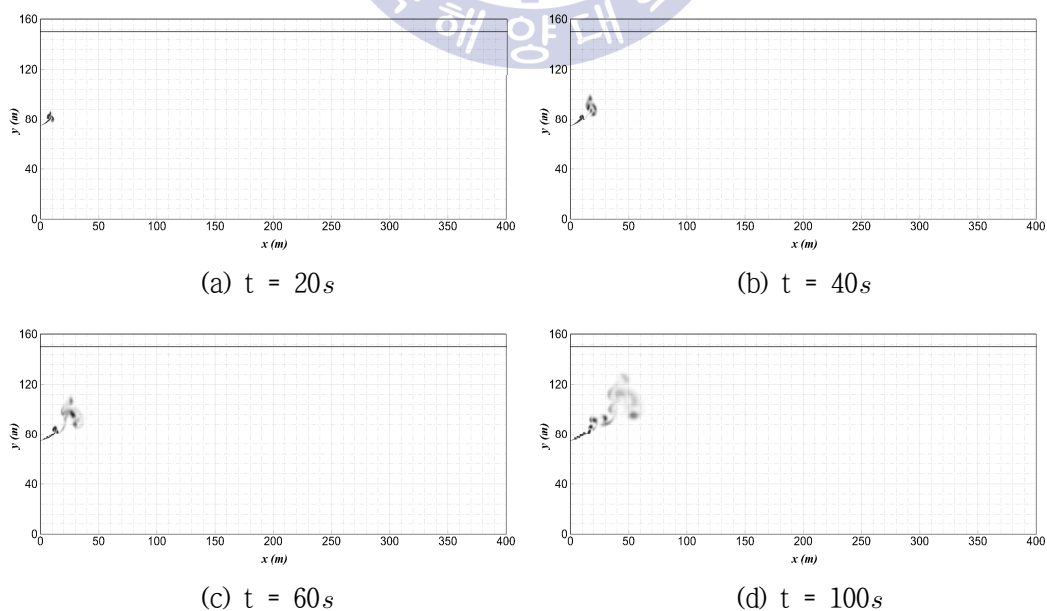


Fig. 14 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 1

$$(\rho_o = 710 \text{ kg/m}^3)$$



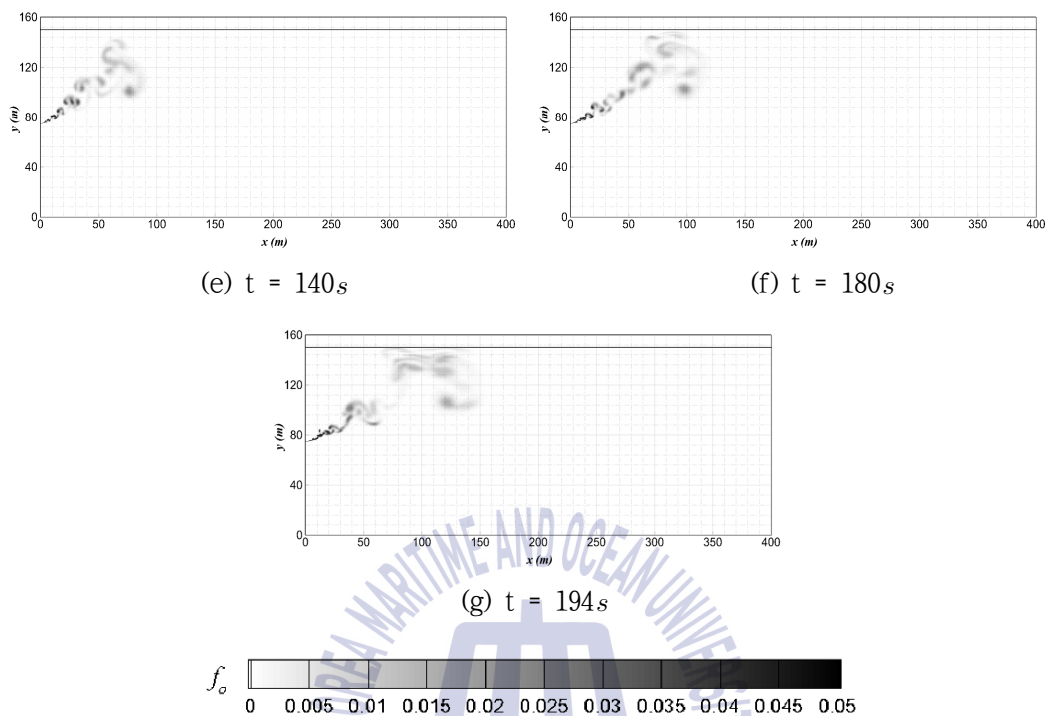
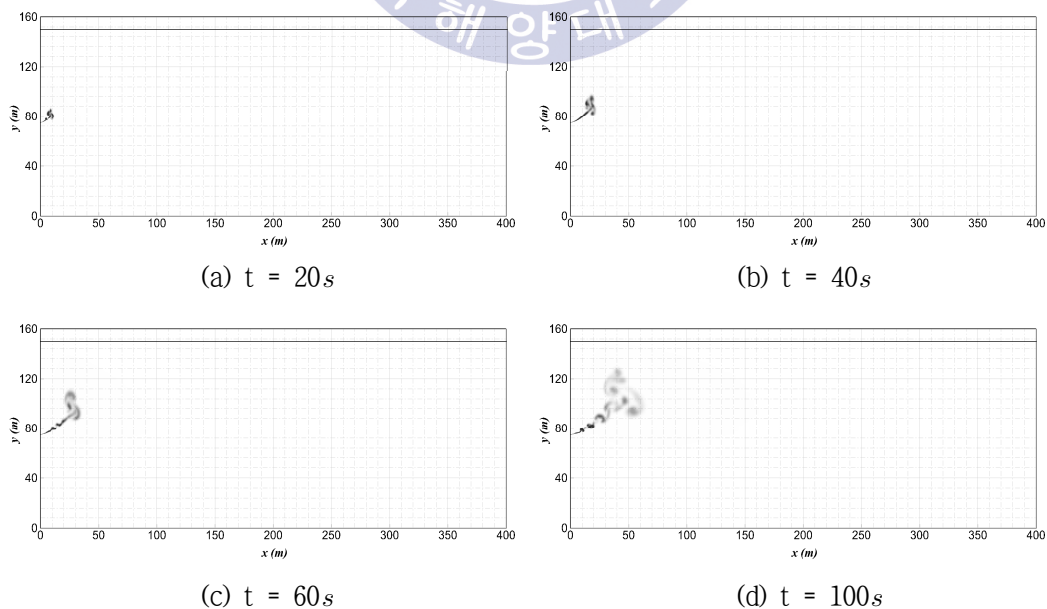


Fig. 15 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 3

$$(\rho_o = 770kg/m^3)$$



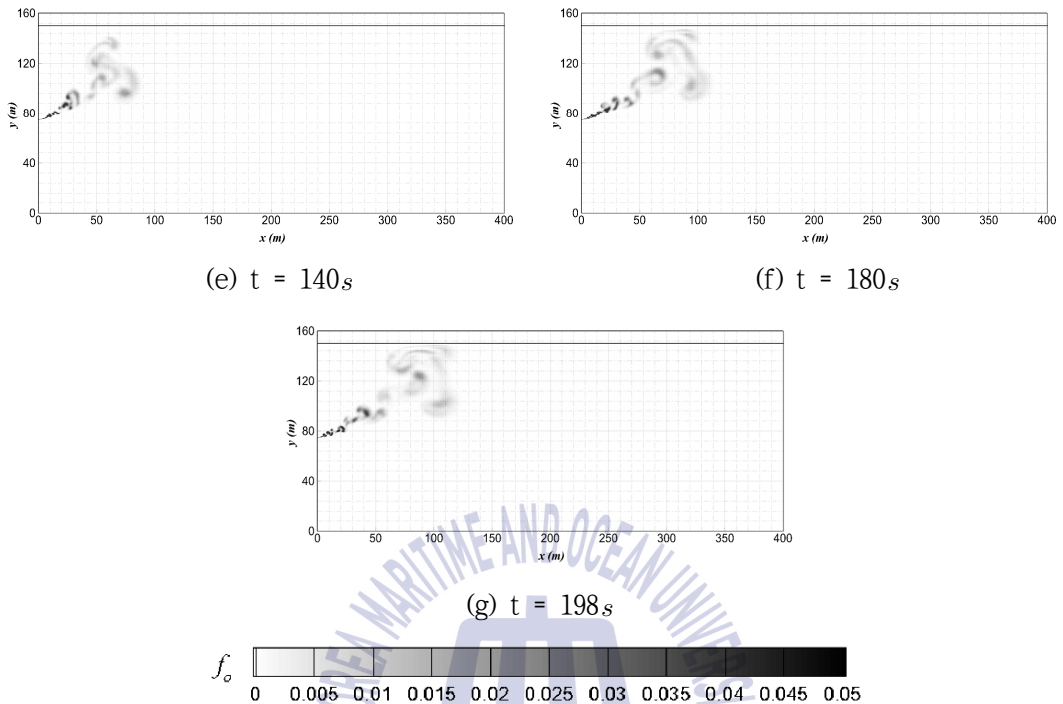


Fig. 16 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 4

$$(\rho_o = 800 \text{ kg/m}^3)$$

3.4 해류 속도에 따른 영향

해류 속도에 따라 $0.2 \text{ m/s} \sim 0.6 \text{ m/s}$ 로 증가시키며 계산하였다. Fig. 17, Fig. 18, Fig. 19, Fig. 20은 해류 속도가 0.2 m/s , 0.3 m/s , 0.5 m/s , 0.6 m/s 일 경우 유출된 기름이 수면에 도달하는 과정을 나타낸다. 해류 속도가 0.2 m/s 의 경우 수면에 도달한 시간은 138 s 로 표준 계산과 비교하면 53 s 빠르게 떠올랐으며 이동 거리는 69 m 로 표준 계산과 비교하면 63 m 작게 나왔다. 해류 속도가 0.6 m/s 의 경우 311 s 로 표준 계산과 비교하면 120 s 늦게 떠올랐으며 이동 거리는 265 m 로 표준 계산과 비교하면 133 m 멀리 이동하였다. 계산 결과, 해류의 속도가 빠를수록 수면에 도달하는 시간 및 수평으로 이동한 거리가 증가하였다.

계산 결과를 살펴보면 유출된 기름은 유출지점부터 약 $5 \text{ m} \sim 10 \text{ m}$ 정도 기름 기둥을 형성했다. 그 이후 기름 기둥에서 떨어져 나간 기름 덩어리는 해류의

영향을 받으며 확산했다. 해류속도가 빠를수록 해류에 의한 x 방향 모멘텀이 증가하고 떨어져나간 기름 덩어리에 그대로 작용하기 때문에 기름 덩어리는 더 멀리 이동하였다. 또한, 하류로 비스듬히 움직이는 기름 유동의 궤적이 더 선명하게 나타났다. 만약 해류가 빠른 곳에서 기름 유출 사고가 난다면 유 차단막을 해류가 느린 곳보다 먼 거리에 설치해야 한다.

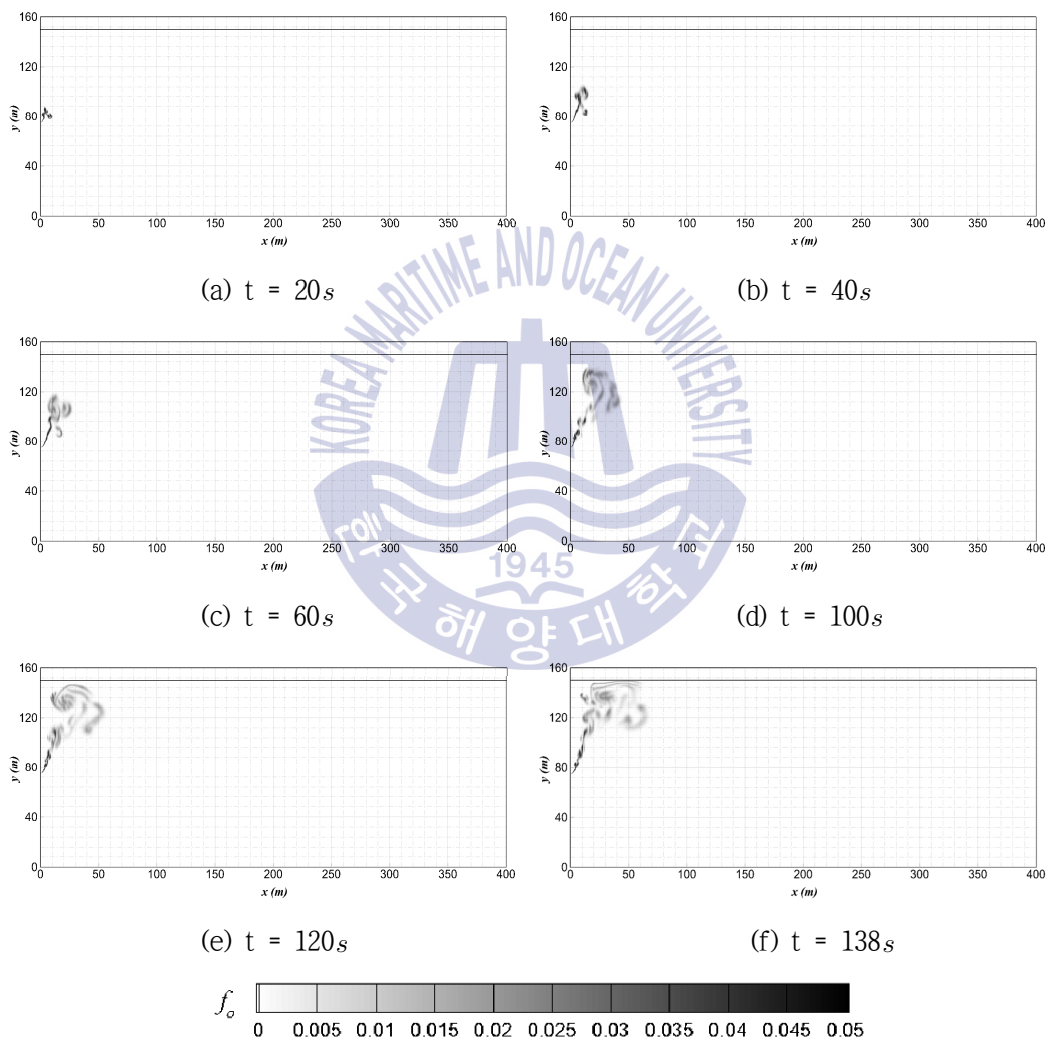


Fig. 17 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 5

$$(u_{c, \max} = 0.2m/s)$$

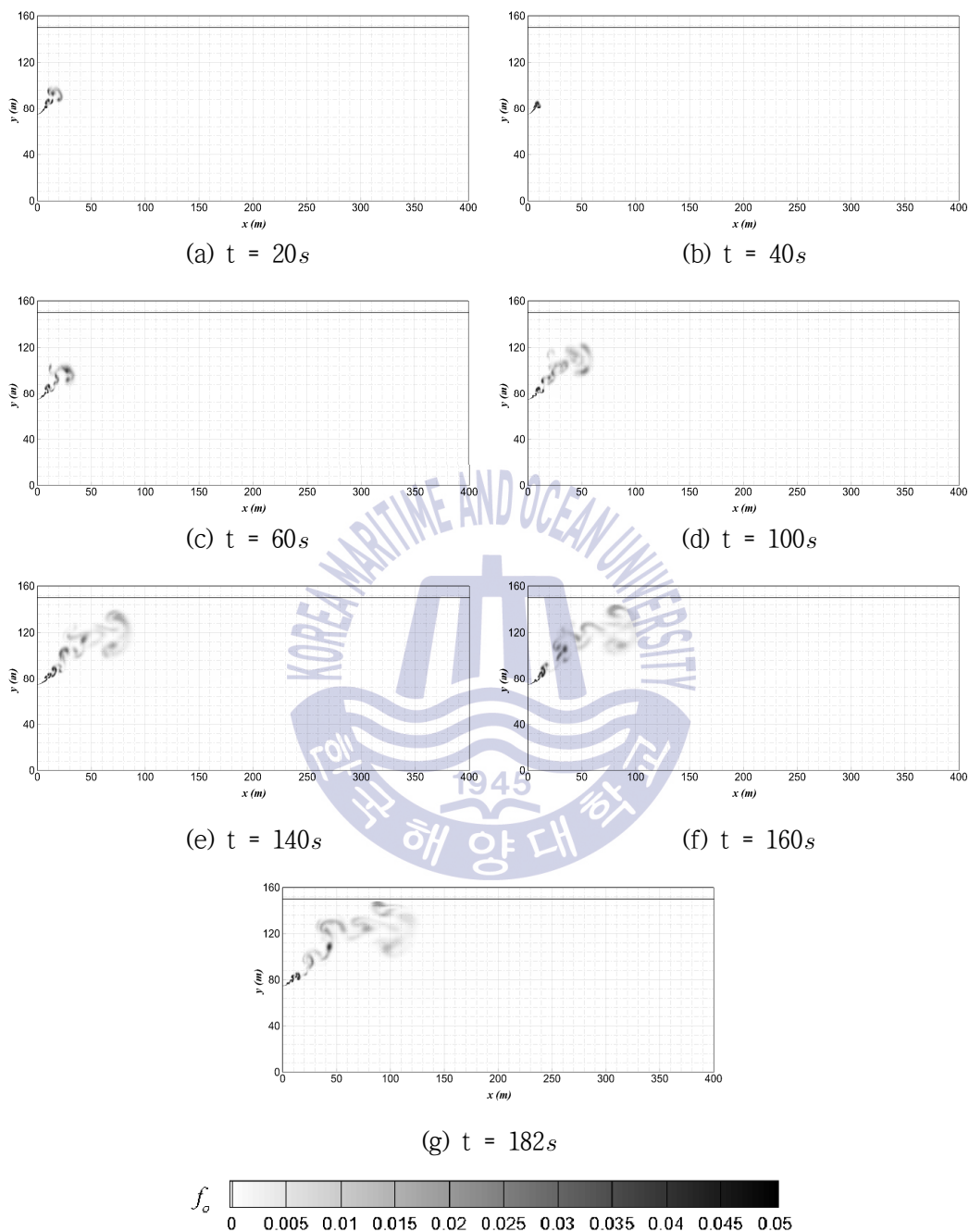


Fig. 18 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 6

$$(u_{c, \max} = 0.3m/s)$$

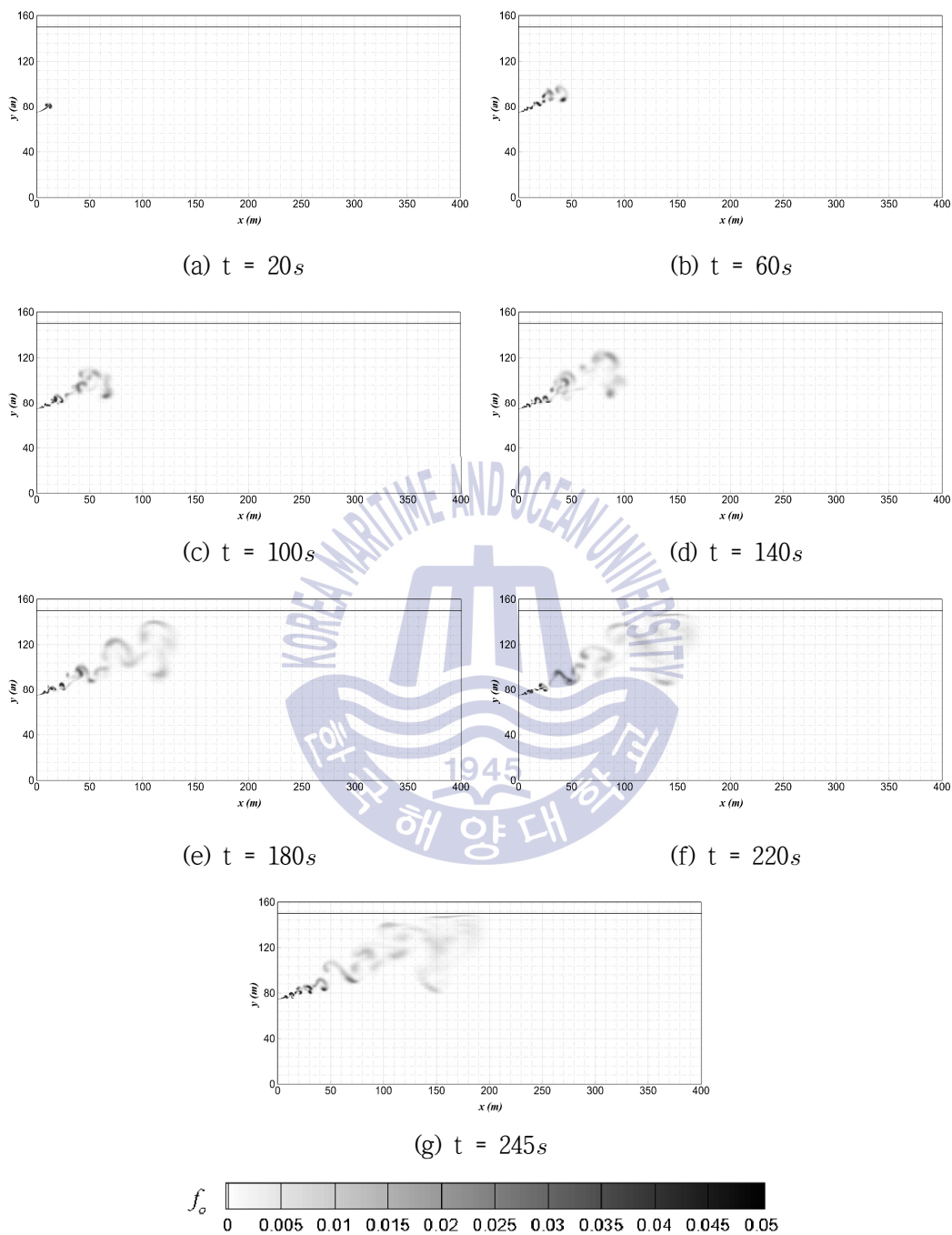
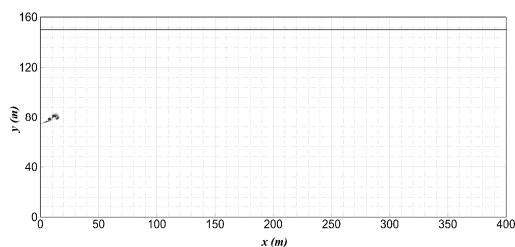
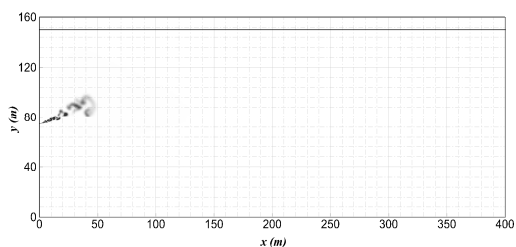


Fig. 19 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 7

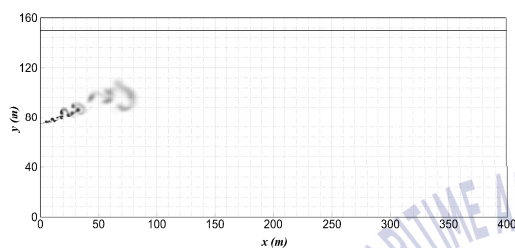
$$(u_{c, \max} = 0.5m/s)$$



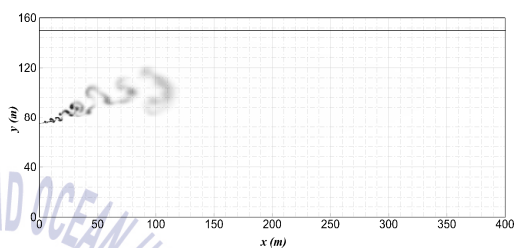
(a) $t = 20s$



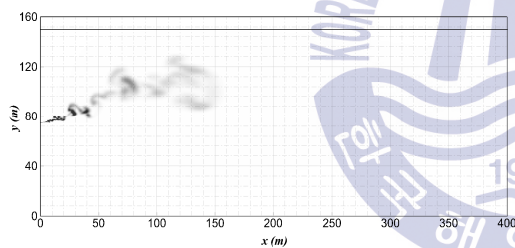
(b) $t = 60s$



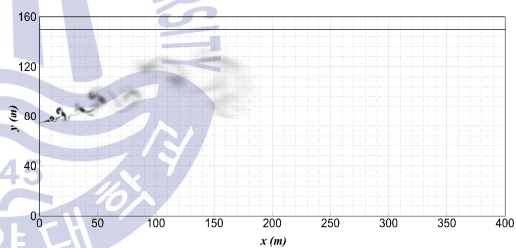
(c) $t = 100s$



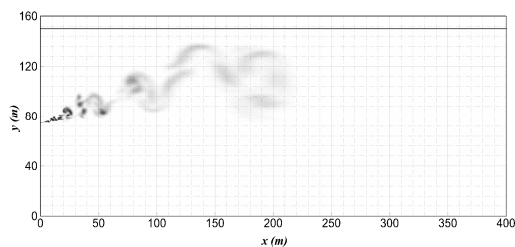
(d) $t = 140s$



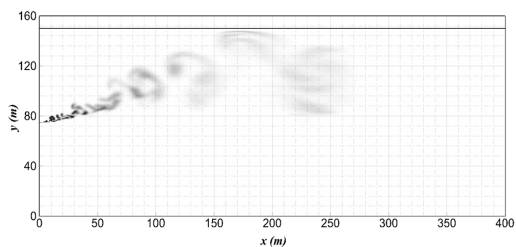
(e) $t = 180s$



(f) $t = 220s$



(g) $t = 260s$



(h) $t = 311s$



Fig. 20 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 8

$$(u_{c, \max} = 0.6m/s)$$

3.5 유출 구멍 크기에 따른 영향

유출 구멍의 크기는 $0.02m \sim 0.06m$ 로 변화시켰으며 속도는 $2m/s$ 를 기준으로 잡았다. 유량은 $0.000628m^3/s \sim 0.005652m^3/s$ 로 증가시키며 계산하였다. Fig. 21, Fig. 22, Fig. 23, Fig. 24는 유출 구멍의 크기가 $0.02m$, $0.03m$, $0.04m$, $0.06m$ 일 경우 유출된 기름이 수면에 도달하는 과정을 나타낸다. 손상된 형태는 원의 형상으로 가정하였다. 동일한 속도로 기름이 유출되었기 때문에 크기에 따라 같은 시간 기름이 유출되는 양이 달라진다. 유출 구멍의 크기가 $0.02m$ 의 경우 수면에 도달하는 시간은 $416s$ 로 표준 계산과 비교하면 $225s$ 늦게 떠올랐으며 이동 거리는 $235m$ 로 표준 계산과 비교하면 $103m$ 멀리 이동하였다. $0.06m$ 의 경우 수면에 도달하는 시간은 $181s$ 로 표준 계산과 비교하면 $10s$ 빠르게 떠올랐으며 이동 거리는 $128m$ 로 표준 계산과 비교하면 $4m$ 짧게 이동하였다. 계산 결과, 유출 구멍의 크기가 커질수록 상승시간이 짧아지고 이동 거리가 줄어들었다. 그 이유는 유출 구멍의 크기가 커질수록 유출되는 기름의 양이 많아지게 되어 기름 덩어리가 서로 쉽게 충돌하고 그로 인해 큰 덩어리로 모일 기회가 많아진다. 기름 덩어리의 크기가 커지면 그만큼 유효 중량의 영향이 커지기 때문에 기름 덩어리의 수직 모멘텀이 커진다. 그로 인해 유출 구멍이 작은 것에 비해 빠르게 수면에 도달하게 된다. 기름 덩어리의 크기를 확인하기 위해 수면에 도달한 시각을 기준으로 거리가 $40m$ 인 지점에서 기름 덩어리의 크기를 가장 작은 길이와 가장 큰 길이의 평균을 구하여 기름 덩어리의 크기를 계산했다. Fig. 25는 각 케이스 별 기름 덩어리를 나타낸다. Table 3은 각 케이스 별 기름 덩어리의 크기를 정리한 것으로 유출구멍이 $0.02m$ 인 경우 $6.5m$, $0.06m$ 인 경우 $14m$ 가 나왔다. 유출 구멍의 크기가 클수록 기름 덩어리가 커진다는 것을 확인하였다.

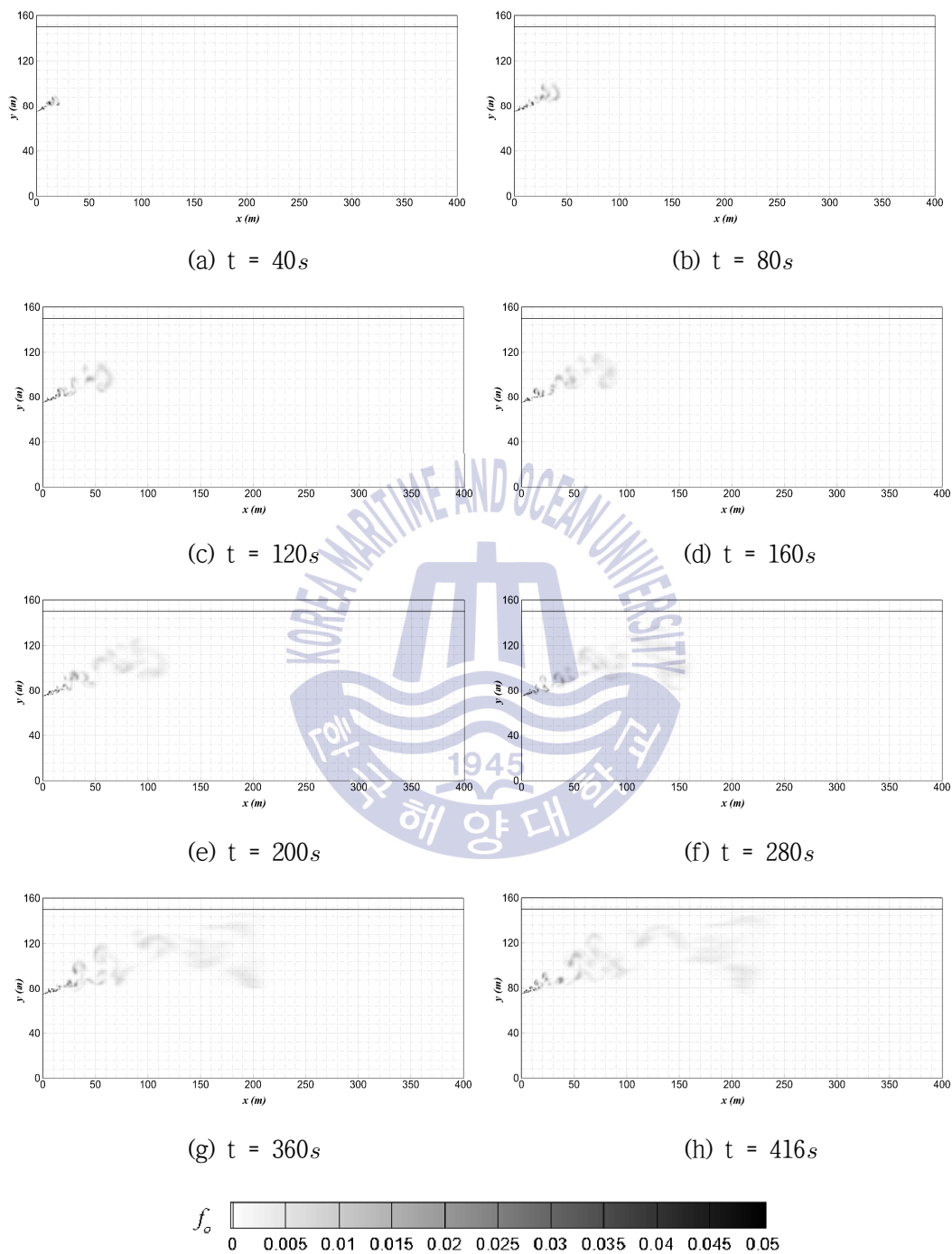


Fig. 21 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 9 ($d = 0.02m$)

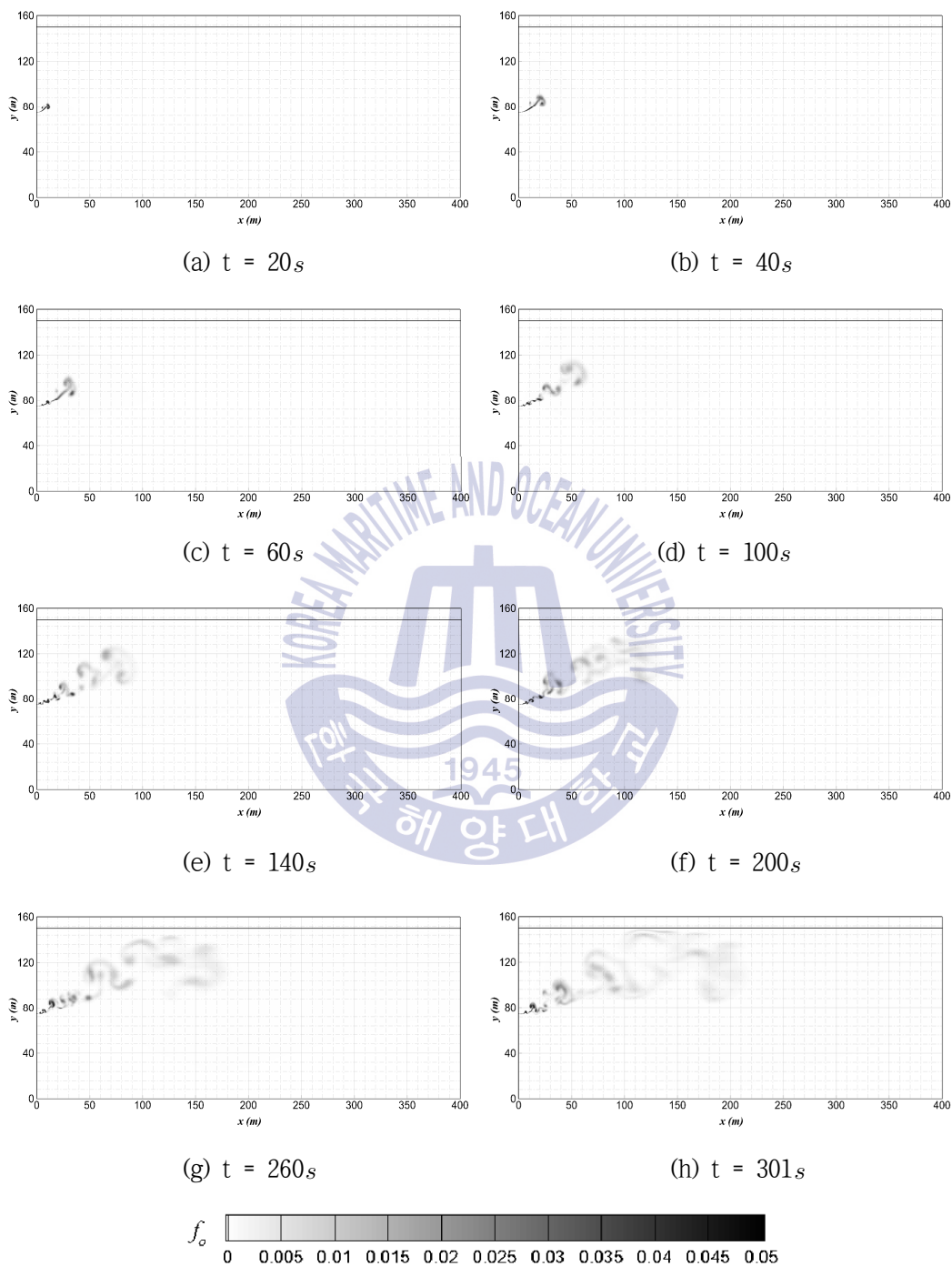


Fig. 22 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 10 ($d = 0.03m$)

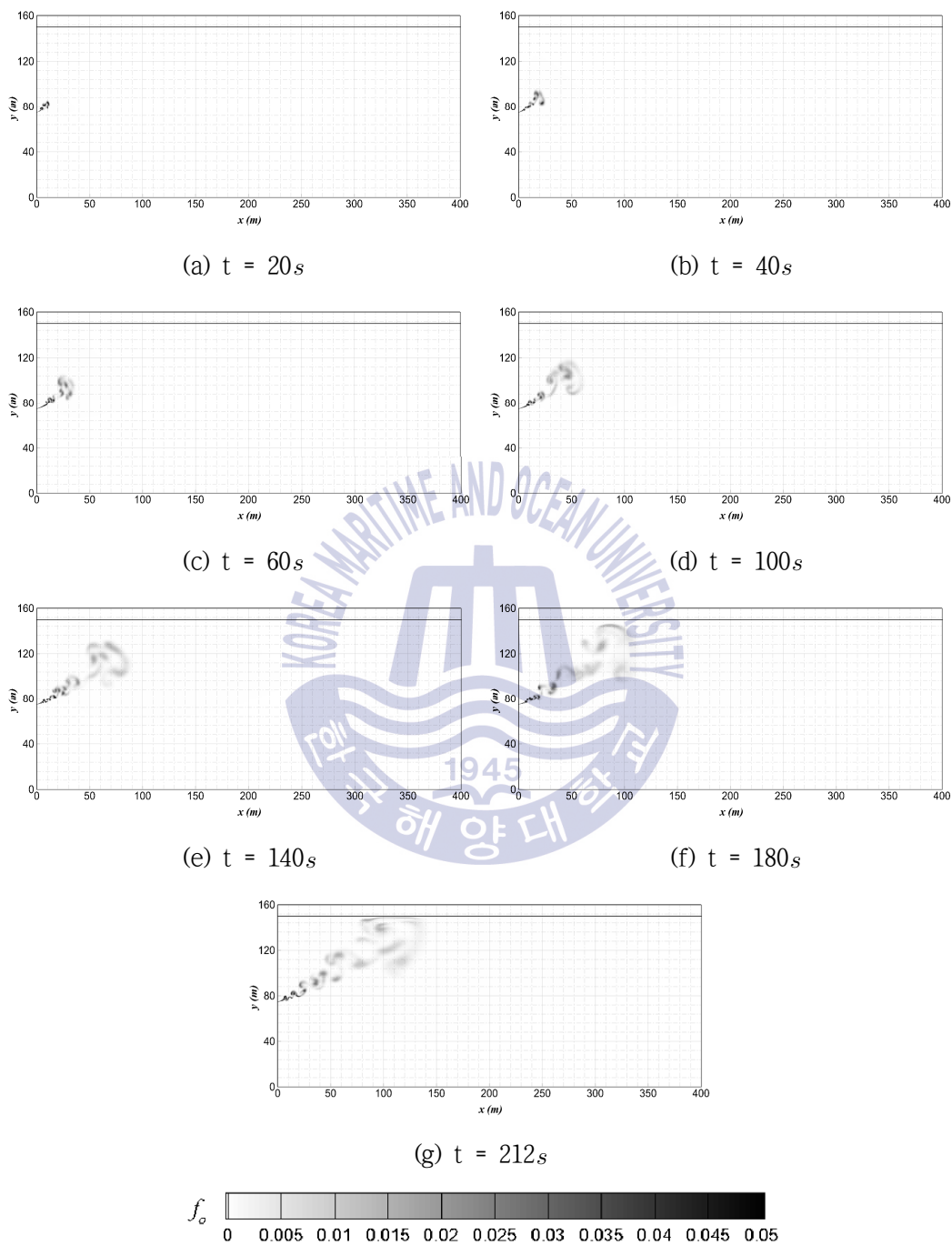


Fig. 23 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 11 ($d = 0.04m$)

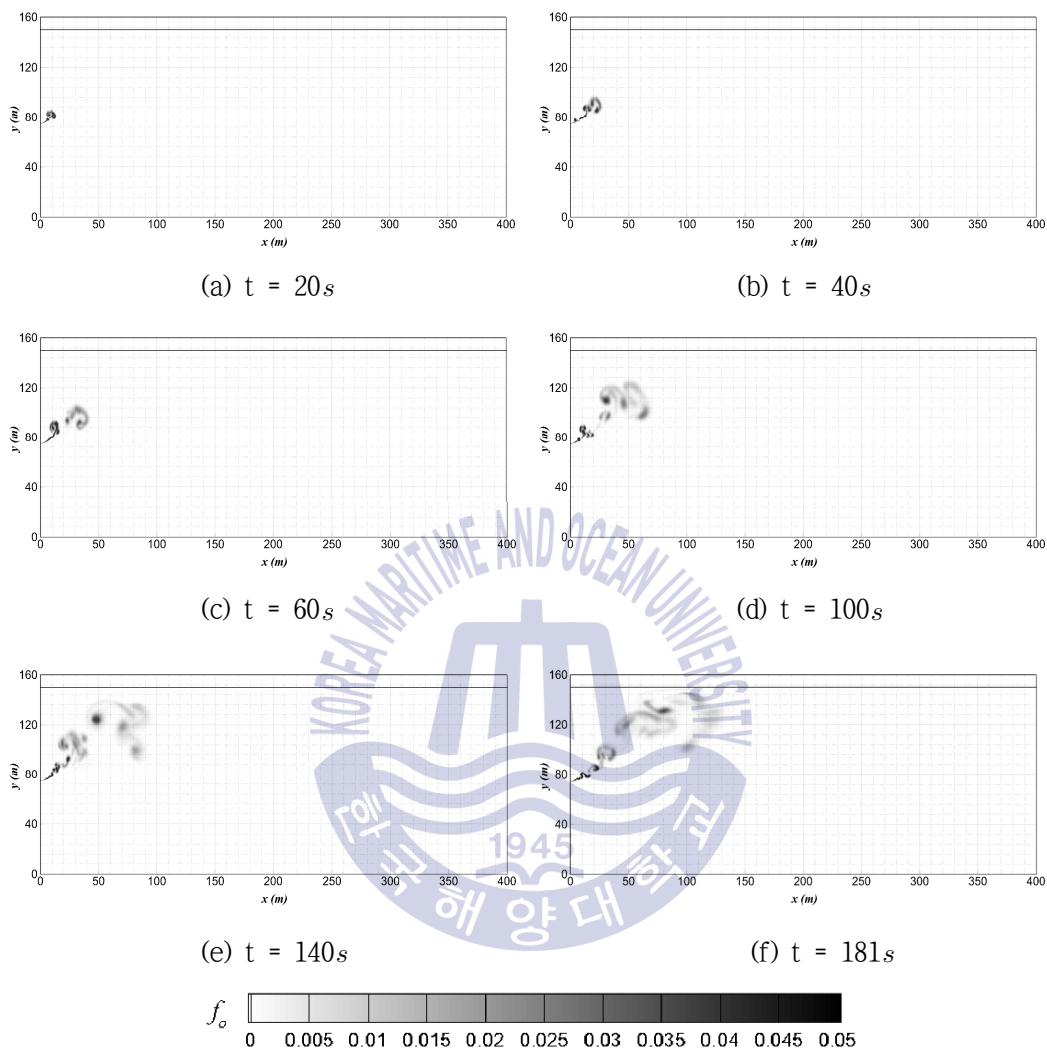
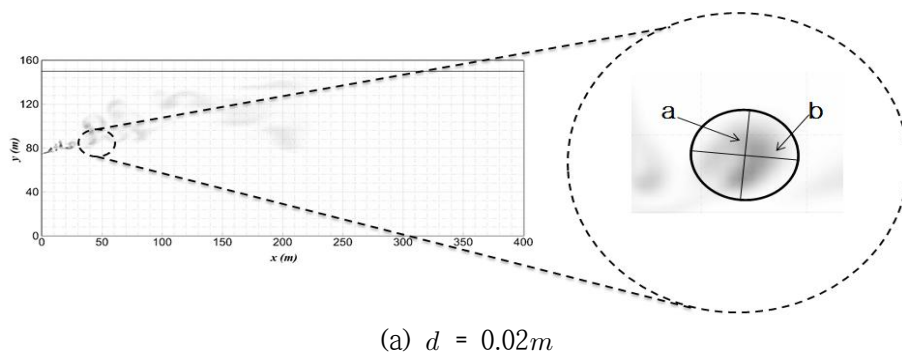
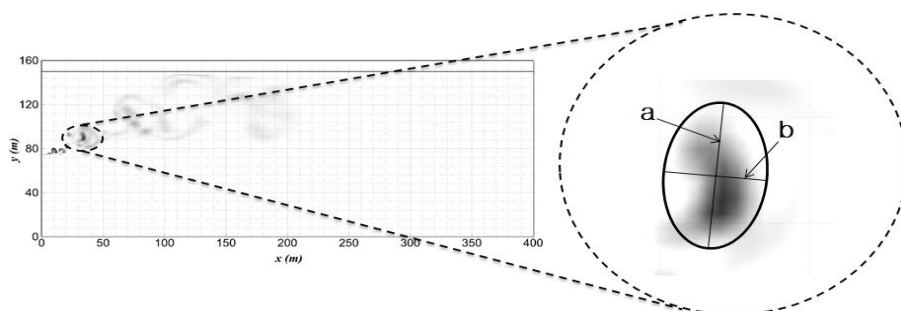
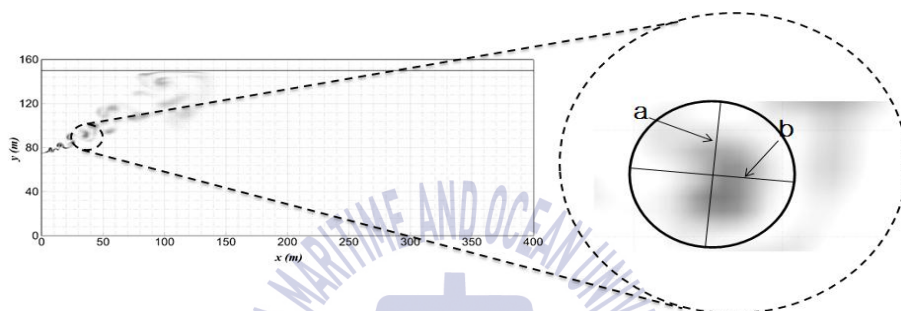


Fig. 24 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 12 ($d = 0.06m$)

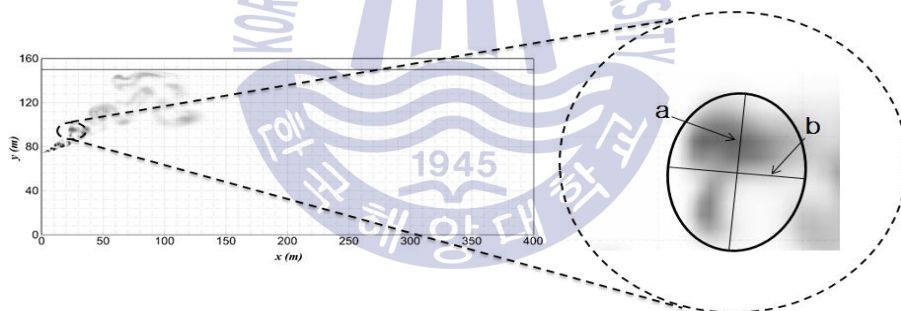




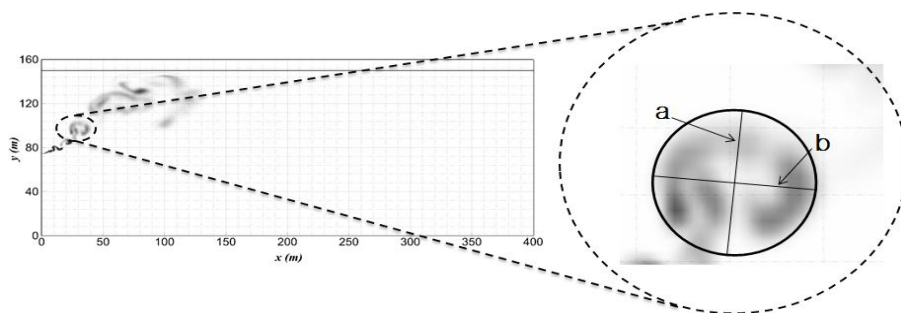
(b) $d = 0.03m$



(c) $d = 0.04m$



(d) $d = 0.05m$ (standard case)



(e) $d = 0.06m$

Fig. 25 Oil size for various damaged leak size

Table 3 Oil size for various damaged leak size

Horizontal distance 40m (from inlet)	Oil size (m)
0.02m	6.5
0.03m	7.5
0.04m	9.5
0.05m	12.5
0.06m	14

3.6 손상부 위치에 따른 영향

라이저의 손상 위치를 75m에서뿐 아니라 해저를 기준으로 라이저의 1/4(37.5m), 3/4(112.5m)지점에서 손상된 경우에 대해서 계산하였다. Fig. 26, Fig. 27은 라이저의 손상 위치가 37.5m, 112.5m일 경우 유출된 기름이 수면에 도달하는 과정을 나타낸다. 라이저의 37.5m에서는 수면에 도달하는 시간이 304s로 표준 계산과 비교하면 113s 늦게 떠올랐으며 이동 거리는 185m로 표준 계산과 비교하면 53m 멀리 이동하였다. 112.5m에서는 기름 덩어리가 수면에 도달하는 시간은 91s로 표준 계산과 비교하면 100s 빠르게 떠올랐으며 이동 거리는 70m로 표준 계산과 비교하면 62m 작게 이동하였다. 계산 결과, 기름 유출되는 지점이 수면으로 올라갈수록 해류의 영향을 많이 받아 기름 기둥이 빠르게 사라지는 것을 확인했다. 또한, 손상된 위치가 수면에 가까워질수록 수면에 도달하는 시간과 기름이 이동한 거리가 짧아졌다. 손상된 위치가 해저에 가까울수록 분출된 이후 기름은 해류에 영향을 받는 시간이 늘어나기 때문에 수면에 도달할 때까지 이동한 거리가 멀어지게 된다. 따라서 구멍이 발생하여 기름이 유출될 경우 그 위치를 빨리 파악해야, 떠오르지 않고 해수 중으로 이동하는 기름을 예측하고 방제 대책을 수립할 수 있다.

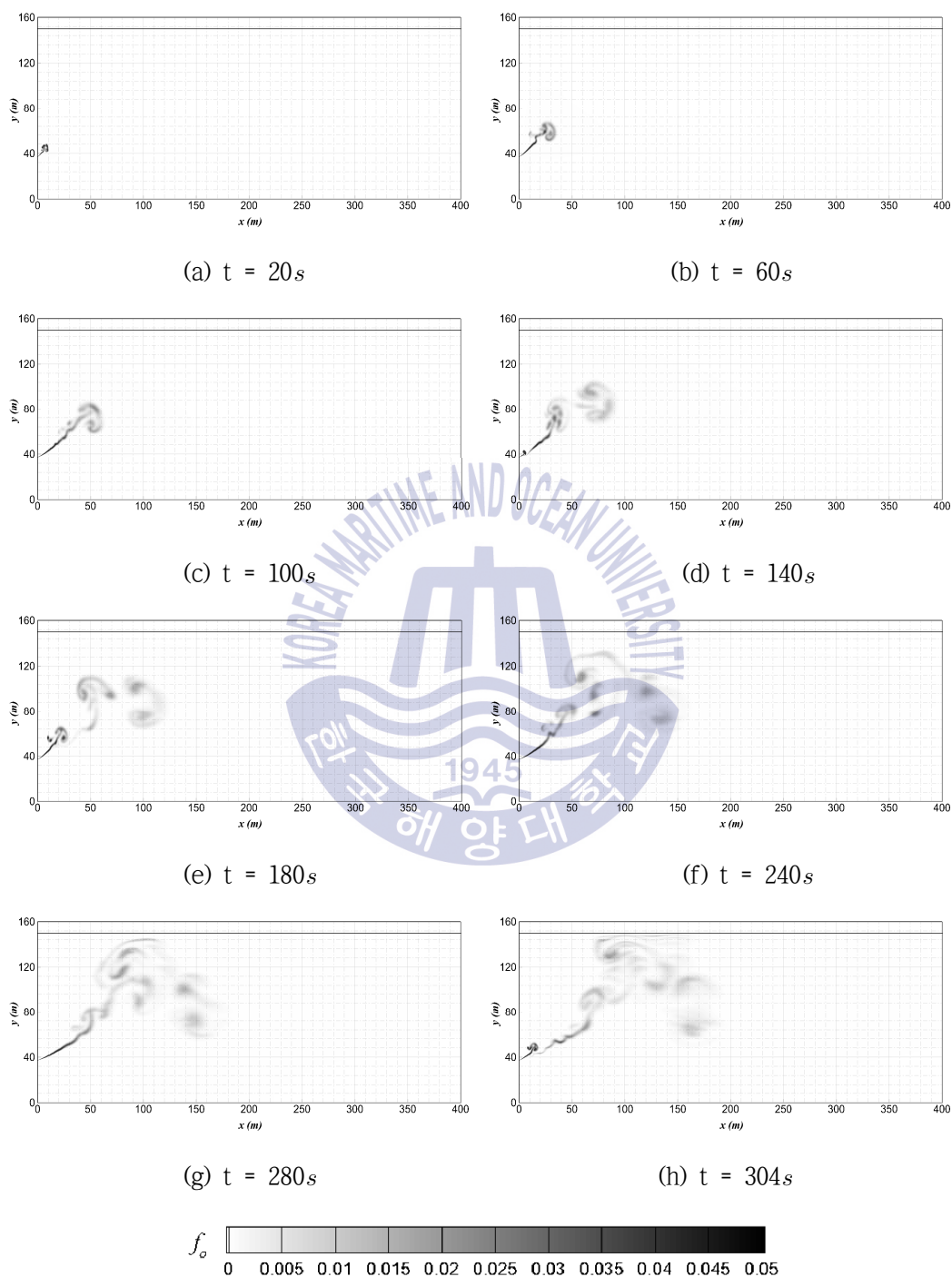


Fig. 26 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 13 ($h = 37.5m$)

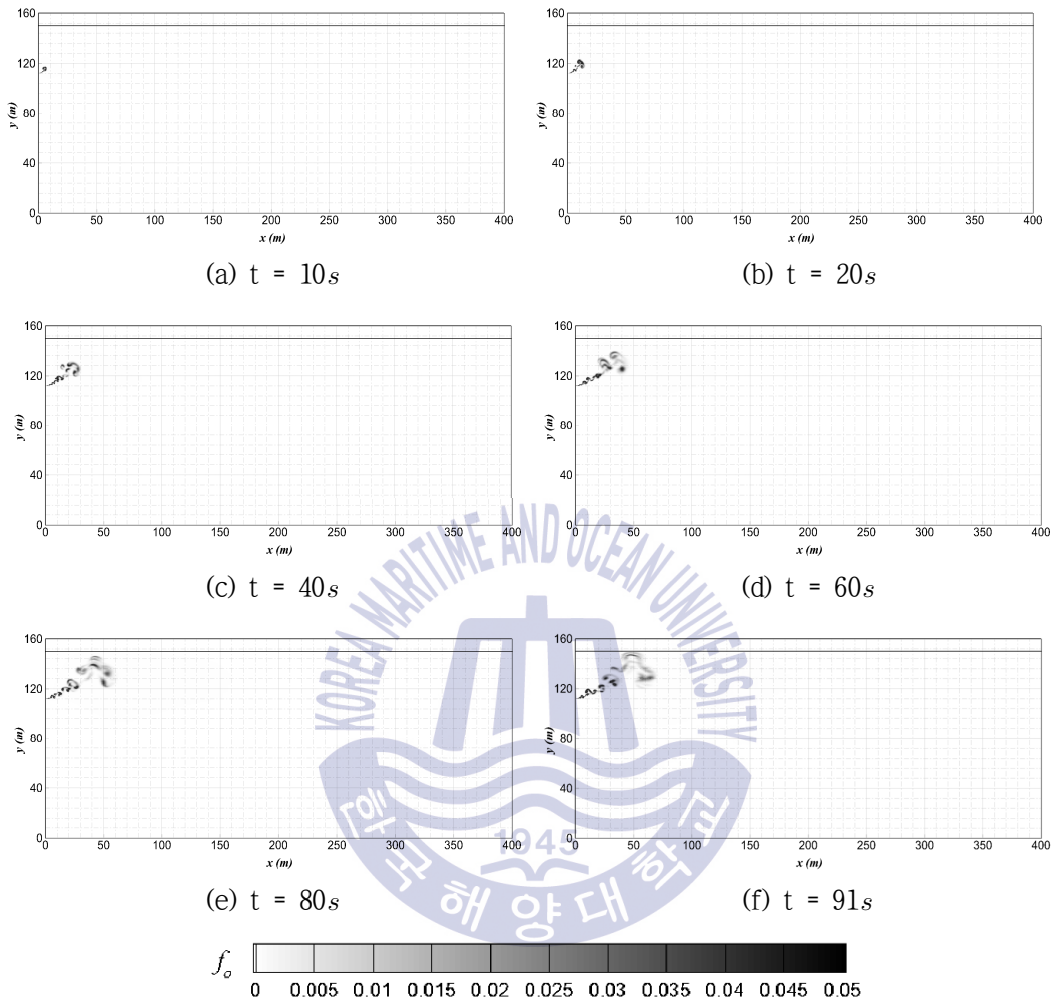


Fig. 27 Oil spill process from damaged riser to free-surface for case 14 ($h = 112.5m$)

3.7 무차원 분석

앞선 계산한 결과를 표로 정리하였다. Table 4는 각 케이스 별 조건, 수면 도달시간, 수평 이동 거리를 정리하여 나타낸 것이다. 위의 결과를 토대로 무차원화 및 식을 유도하였으며 향후 기름 유출 발생 시 기름 덩어리의 수면 도달 시간 및 이동 거리를 식을 통해 계산하여 기름 확산에 대한 방제 대책에 필요한 기본적인 자료를 제공할 수 있다.

Table 4 Simulation case results

	Oil density (kg/m^3)	Current velocity (m/s)	Oil leakage rate (m/s) (Volume flux of leakage oil (m^3/s))	Leakage hole size (m)	Leakage hole position (m)	Time (s)	Horizontal migration distance (m)
Case1	710	0.4	2 (0.003925)	0.05	75	189	133
Case2 (standard case)	740	0.4	2 (0.003925)	0.05	75	191	132
Case3	770	0.4	2 (0.003925)	0.05	75	194	130
Case4	800	0.4	2 (0.003925)	0.05	75	198	120
Case5	740	0.2	2 (0.003925)	0.05	75	138	69
Case6	740	0.3	2 (0.003925)	0.05	75	182	120
Case7	740	0.5	2 (0.003925)	0.05	75	245	196
Case8	740	0.6	2 (0.003925)	0.05	75	311	265
Case9	740	0.4	2 (0.000628)	0.02	75	416	235
Case10	740	0.4	2 (0.001413)	0.03	75	301	208
Case11	740	0.4	2 (0.002512)	0.04	75	212	150
Case12	740	0.4	2 (0.005652)	0.06	75	181	128
Case13	740	0.4	2 (0.003925)	0.05	37.5	304	185
Case14	740	0.4	2 (0.003925)	0.05	112.5	91	70

Fig. 28은 덩어리가 수면에 도달한 시간을 기름의 밀도, 유출 구멍 크기 및 위치, 해류의 속도에 따라 무차원화 한 값을 나타낸다. y 축은 기름 유출 속도와 수면에 도달하는 시간을 수심으로 나눠 무차원화 하였다. 무차원화한 시간은 해수의 밀도가 커질수록, 해수의 속도가 클수록 증가하였다. 해류속도가 커질수록 그래프는 증가하는 형태가 되는데 이는 해류 속도가 커지면서 기름 덩어리에 작용하는 수평 모멘텀이 증가하여 수평으로의 이동이 증가하는 것으로 판단된다. 반면에 유출 구멍의 크기가 커질수록, 손상부 위치가 해저에서 가까울수록 감소한다. 즉, 유출 구멍이 커질수록 수면에 도달하는 시간은 짧아지는 것을 의미하며 유출 구멍이 클수록 기름 덩어리가 커질 기회가 많아지고 그로 인해 유효 중량이 증가하여 수면에 빠르게 이동하는 것으로 판단된다. 손상부 위치가 수면에 올라갈수록 수면과 가까워지기 때문에 수면에 도달하는 시간은 빨라진다. 다음은 무차원화 한 결과를 토대로 수식으로 표현하였으며 사용의 편의를 위해 식을 2차원 또는 1차원으로 나타냈다. 각각 식은 R^2 가 0.978정도의 오차를 보였다.

$$\frac{u_o t}{H} = 0.68 \times \left(\frac{2\rho_o}{\rho_{sw}} \right) + 1.57 \left(1.38 \leq \frac{2\rho_o}{\rho_{sw}} \leq 1.57, R^2 = 0.978 \right) \quad (43)$$

$$\frac{u_o t}{H} = 1.23 \times \left(\frac{5u_{c, \max}}{u_o} \right)^2 - 0.29 \times \left(\frac{5u_{c, \max}}{u_o} \right) + 1.75 \quad (44)$$

$$\left(0.5 \leq \frac{5u_{c, \max}}{u_o} \leq 1.5, R^2 = 0.981 \right)$$

$$\frac{u_o t}{H} = -5.68 \times \left(\frac{h}{H} \right) + 5.45 \left(0.25 \leq \frac{h}{H} \leq 0.75, R^2 = 0.999 \right) \quad (45)$$

$$\frac{u_o t}{H} = 14.73 \times \left(\frac{2000d}{H} \right)^2 - 21.48 \times \left(\frac{2000d}{H} \right) + 10.22 \quad (46)$$

$$\left(0.266 \leq \frac{2000d}{H} \leq 0.8, R^2 = 0.994 \right)$$

여기서, t 는 수면에 도달한 시간, h 는 해저에서 손상부까지 높이, d 는 유출 구

명 크기이다. 식 (43)을 예를 들면 만약 수심 150m이고 $\rho_{sw}=1025kg/m^3$ 일 경우 식 (47)과 같이 표현 할 수 있다.

$$t = 0.0995\rho_o + 117.75 \quad (47)$$

여기서, 기름의 밀도가 $\rho_o=790kg/m^3$ 일 경우 기름 덩어리가 수면에 도달한 시간은 196s이다. 같은 접근 방법을 이용하면 식 (44)~(46)을 수정할 수 있다.

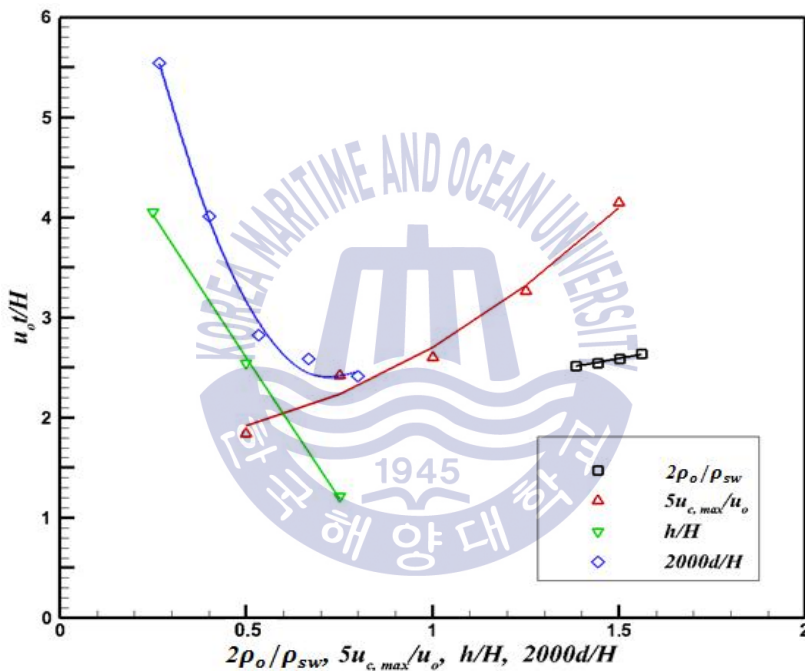


Fig. 28 Dimensionless time required for oil mass when they reach the sea surface ($u_o t / H$) versus $2\rho_o / \rho_{sw}$, $5u_{c, max} / u_o$, h/H and $2000d/H$

Fig. 29는 수면에 도달했을 때 이동한 거리를 무차원화 하여 그래프로 나타낸 것이다. y 축은 기름의 이동 거리를 수심으로 나눠 무차원화 하였다. 무차원화 한 이동 거리는 해수의 속도가 빠를수록 증가하고 밀도가 커질수록, 유출 구멍의 크기가 클수록, 손상부의 위치가 해저에 가까울수록 짧아지는 것을 확인할 수 있다. 밀도가 커지면 기름 덩어리의 질량이 커지기 때문에 상승 모멘텀이

작아지고 결과적으로 밀도가 작은 기름에 비해 늦게 떠오르고 짧게 이동한다. 다음은 무차원화 한 거리를 식으로 표현하였으며 사용의 편의를 위해 식을 2차원 또는 1차원으로 나타냈다. 각각 식은 R^2 이 0.97 정도의 오차를 보였다.

$$\frac{l}{H} = -4.38 \times \left(\frac{2\rho_o}{\rho_{sw}} \right)^2 + 12.43 \times \left(\frac{2\rho_o}{\rho_{sw}} \right) - 7.94 \quad (48)$$

$$(1.38 \leq \frac{2\rho_o}{\rho_{sw}} \leq 1.57, R^2 = 0.977)$$

$$\frac{l}{H} = 1.25 \times \left(\frac{5u_{c, \max}}{u_o} \right) - 0.17 \quad (0.5 \leq \frac{5u_{c, \max}}{u_o} \leq 1.5, R^2 = 0.987) \quad (49)$$

$$\frac{l}{H} = -1.53 \times \left(\frac{h}{H} \right) + 1.63 \quad (0.25 \leq \frac{h}{H} \leq 0.75, R^2 = 0.998) \quad (50)$$

$$\frac{l}{H} = 2.3 \times \left(\frac{2000d}{H} \right)^2 - 3.91 \times \left(\frac{2000d}{H} \right) + 2.48 \quad (51)$$

$$(0.266 \leq \frac{2000d}{H} \leq 0.8, R^2 = 0.994)$$

여기서, l 은 기름의 이동거리를 나타낸다. 식 (48)을 예를 들면 만약 수심 150m 이고 $\rho_{sw}=1025kg/m^3$ 일 경우 식 (52)와 같이 표현 할 수 있다.

$$l = -2.5 \times 10^{-3} \rho_o^2 + 3.64 \rho_o - 1191 \quad (52)$$

여기서, 기름의 밀도가 $\rho_o=790kg/m^3$ 일 경우 기름 덩어리가 수면에 도달한 시간은 124m이다. 같은 접근 방법을 이용하면 식 (49)~(51)을 수정할 수 있다. 위의 무차원 식을 통해 향후 기름 유출 사고가 발생했을 때 식을 이용하여 이동 거리 및 수면 도달 시간을 파악할 수 있다.

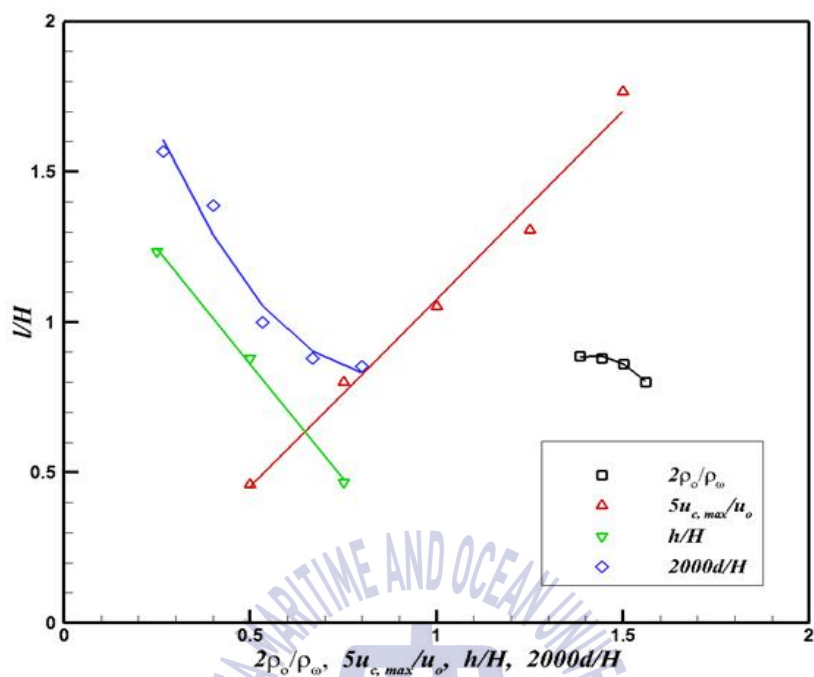


Fig. 29 Dimensionless distance for the oil mass when they reach the sea surface (l/H) versus $2\rho_o/\rho_w$, $5u_{c,max}/u_o$, h/H and $2000d/H$

4. 결 론

본 논문에서는 소스코드가 공개된 전산유체역학 라이브러리인 OpenFOAM을 이용하여 기름 유출의 확산 정도를 계산하였다. 제트유동과 Rayleigh-Taylor instability를 해석하여 수치모델 및 난류 모델을 검증하였다. 실제에 가까운 조건을 만족하기 위해 수심에 따른 속도 분포를 적용하였다. 해수와 기름의 밀도비, 손상부의 크기 및 위치, 해류 속도에 따라 기름이 수면에 도달하는 시간 및 도달하였을 때 이동한 거리를 추정하였다. 계산된 결과를 통해 무차원화 한 식을 얻었다.

계산 결과, 기름은 손상된 위치에서 약 $5m \sim 10m$ 정도 연속된 기름 기둥을 형성하고 그다음 기름 덩어리로 떨어져 나간 뒤 수면에 도달하였다. 떨어져 나간 기름 덩어리는 해류의 영향을 크게 받았다. 기름 덩어리가 상승할수록 빨라지는 해류에 의해 수평방향 모멘텀이 증가하기 때문에 더욱 멀리 퍼져 나가는 것을 확인하였다. 시간에 따라 변하는 기름 덩어리의 크기로 인해 최초로 수면에 도달한 기름 덩어리가 최대로 이동한 기름 덩어리가 아닌 것을 확인하였다. 기름의 밀도가 클수록 관성이 커지기 때문에 유효 중량에 의한 수직 모멘텀과 해류에 의한 수평 모멘텀의 영향이 작아지므로 수면에 도달하는 시간이 길어지고 수평 이동 거리가 감소하였다. 해류 속도가 클수록 해류에 의한 수평 모멘텀의 영향이 커지기 때문에 기름 덩어리가 수면에 도달하는 시간이 늘어났고 수평 이동 거리는 더욱 커지는 것을 확인하였다. 유출 구멍의 크기가 커질수록 기름 덩어리는 뭉쳐질 확률이 많아졌다. 그로 인해 거대해진 기름 덩어리는 유효 중량에 의한 수직 모멘텀이 증가하여 수면에 도달하는 시간이 짧아지는 것을 확인하였다. 손상부의 위치가 수면에 가까워질수록 기름 기둥, 수면에 도달하는 시간 및 이동거리가 짧아지는 것을 확인하였다. 위의 결과를 무차원화 한 뒤

식으로 나타냈고, 향후 기름 유출 발생 시 기름 덩어리의 수면 도달시간 및 이동거리를 계산하여 기름 확산의 방제 대책에 필요한 기본적인 정보를 제공할 수 있다.

해당 해역의 풍속 및 풍향에 따른 표층 해류의 방향 및 속도를 고려하여 표층에서 유출된 기름이 어떻게 이동하는가에 대한 연구가 필요하다.



참고 문헌

- [1] Bakli, M., 2014. *Evaluation of Gas and Oil Dispersion during Subsea Blowouts*. M.Eng. Norwegian : Norwegian University of Science and Technology.
- [2] Biksey, T.M., Schultz, A.C., Bernhardt, A. Marion, B, and Peterson, C. 2010. *Ecological and human health risk assessment*. Water Environ. Res., pp.2067-2094.
- [3] Bolszo, C.D., McDonell, V.G., and Samuelsen, G.S., 2014. Injection of Water-in-oil Emulsion Jets into a Subsonic Crossflow: an experimental study. *Atomization and Sprays*, 24(4), pp.303-348.
- [4] Cheong, C.J., 2008. Behavior and Clean-up Technique of Spilled Oil at Sea and ShoreLine. *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, 30(2), pp.136-145.
- [5] Görtler, H., 1942. Berechnung von Aufaben der freien Turbulenz auf Grund eines neuen Näherungsansatzes. *Proc. Cambridge Philos. Soc.*, 22, pp.244-254.
- [6] He, X., Chen, S. and Zhang, R., 1999. A Lattice Boltzmann Scheme for Incompressible Multiphase Flow and Its Application in Simulation of Rayleigh-Taylor Instability. *J. Comput. Phys.*, 152(2), pp.642-663.
- [7] Hieu, P.D., Katsutoshi, T. and Ca, V.T., 2004. Numerical simulation of breaking waves using a two-phase flow model. *Appl. Math. Model.*, 28(11), pp.983-1005.

- [8] Hirt, C.W. and Nichols, B.D., 1981. Volume of fluid (VOF) method for the dynamics of free boundaries. *J. Comput. Phys.*, 39(1), pp.201-225.
- [9] Hoffmann, A.E., Crump, J.S. and Hocott, C.R., 1953. Equilibrium constants for a gas-condensate system. *J. Pet. Tech.*, 5(1), pp.1-10.
- [10] Hong, K. and Lee, M., 1998. Application of Oil Spill model to the South Sea of Korea. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Energy*, 1(1), pp.55-65.
- [11] Johansen, Ø., Rye, H. and Cooper, C., 2003. DeepSpill-Field Study of a Simulated Oil and Gas Blowout in Deep Water. *Spill Sci. Technol. Bull.*, 3(5-6), pp.433-443.
- [12] Jolliff, J.K., Smith, T.A., Ladner, S. and Arnone, R.A., 2014. Simulating surface oil transport during the Deepwater Horizon oil spill: Experiments with the Viocast system. *Ocean Model.*, 75, pp.84-99.
- [13] Kim, W.J. and Lee, Y.Y., 2001. A Preliminary Study for the Prediction of Leaking-Oil Amount from a ruptured tank. *J. Korean Soc. Mar. Environ. Eng.*, 4(4), pp.21-31.
- [14] Kim, Y.B., 2011. Study on Prediction for Prompt Countermeasures to Oil Spread in Ocean. *J. Ocean Eng. Technol.*, 25(2), pp.108-112.
- [15] Launder, B.E. and Spalding, D.B., 1972. *Lectures in Mathematical Models of Turbulence*. Academic Press:London, Uk.
- [16] Launder, B.E., Reece, G.J. and Rodi, W., 1975. progress in the Development of a Reynolds-Stress Turbulent Closure. *J. Fluid Mech.*, 68(3), pp.537-566.
- [17] Li, W., Pang, Y., Lin, J. and Liang, X., 2013. Computational Modeling of Submarine Oil Spill with Current and Wave by FLUENT. *Res. J. Appl. Sci. Eng. Technol.*, 5(21), pp.5577- 5082.
- [18] Menter, F.R., 1994. Two-Equation Eddy-Viscosity Turbulence Models for

- Engineering Applications. *AIAA J.*, 32(8), pp.1598-1605.
- [19] Osher, S., 1985. Convergence of Generalized MUSCL Schemes. *SIAM J. Num. Anal.*, 22(5), pp.947-961.
- [20] Park, S, Park, S.W., Rhee, S.H., Lee, S.B., Choi, J.E. and Kang, S.H., 2011. Program development for the prediction of the Ship Resistance using OpenFOAM Libraries. *Proceedings of the Annual Autumn Meeting of the Korean Society of Computational Fluids Engineering*, Yeungnam University, pp.326-332.
- [21] Park, S., Park, S.W., Rhee, S.H., Lee, S.B., Choi J.E. and Kang, S.H., 2013. Investigation on the wall function implementation for the prediction of ship resistance. *Int. J. Nav. Archit. Ocean Eng.*, 5(1), pp.33-46.
- [22] Park, S, and Rhee, S.H., 2012. Computational analysis of turbulent super-cavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped cavitator geometry. *Comput. Fluids*, 70, pp.73-85.
- [23] Park, S, and Rhee, S.H., 2015. Comparative study of incompressible and isothermal compressible flow solvers for cavitating flow dynamics. *J. Mech. Sci. Technol.*, 29(8), pp.3287-3296.
- [24] Roohi, E., Pendar, M.R. and Rahimi, A., 2015. Simulation of three-dimensional cavitation behind a disk using various turbulence and mass transfer models. *Appl. Math. Model.*, 40(1), 541- 564
- [25] Masutani, S. and Adams E.E., 2002. *Expreimental study of multi-phase plumes with application to deep ocean oil spills*. Final Report, Univercity of hawaii.
- [26] Versteeg, H.K. and Malalasekera, W., 1995. *An introduction to computational fluid dynamics the finite volume method*. Person Education Limited:London, Uk.

- [27] van Leer, B., 1979. Towards the ultimate conservative difference scheme. V, A second-order sequel to Godunov's method. *J. Comput. Phys.*, 32(1), pp.101-136.
- [28] Wang, C., Chen, B., Zhang, B., He, S. and Zhao, M., 2013. Fingerprint and weathering characteristics of crude oils after Dalian oil spill, China. *Mar. Pollut. Bull.*, 71(1-2), pp.64-68.
- [29] White, F.M., 2006. *Viscous Fluid Flow*. 3rd Ed. McGraw-Hill:New York, USA.
- [30] Wygnanski, I. and Fiedler, H., 1969. Some measurements in the self-preserving jet. *J. Fluid Mech.*, 38(3), pp.557-612.
- [31] Zhu, H., Lin, P. and Pan, Q., 2014. A CFD (computational fluid dynamic) simulation for oil leakage from damaged submarine pipeline. *Energy*, 64, pp.887-899.

