

상대운동을 하는 방제판 주위 물-기름-공기 유동 모사

신 상 목*

부경대학교 조선해양시스템공학과

SIMULATION OF WATER-OIL-AIR FLOWS AROUND OIL BOOMS UNDER RELATIVE MOTION

Sangmook Shin*

Department of Naval Architecture and Marine Systems Engineering, Pukyong National University

The FDS-HCIB method is expanded to simulate water-oil-air flows around oil booms under relative motion, which is intended to increase the thickness of contained oil. The FDS scheme captures discontinuity in the density field and abrupt change of the tangential velocity across an interface without smearing. The HCIB method handles relative motions of thin oil booms with ease. To validate the developed FDS-HCIB code for water-oil-air flow around a moving body, the computed results are compared with the reported experimental results on the shape, length, and thickness of the oil slicks under towing. It is observed that the increase in pressure field between two barriers lifts the oil slick and the interfacial wave propagates and reflects as one barrier gets closer to the other barrier.

Key Words : 물-기름-공기 유동(Water-Oil-Air Flow), 접촉 불연속면(Contact Discontinuity), 경계비정합(Non-Boundary Conforming), 기름층 길이(Oil Slick Length), 기름층 두께(Headwave Thickness)

1. 서 론

이중선체의 도입 등 다양한 회피 노력에도 불구하고 기름 유출 사고는 계속 발생하여 심각한 해상 오염 피해를 발생시키고 있다. 기름 유출 사고가 발생한 경우 초기에 적절하게 방제판(oil boom)이 설치되면 기름 확산을 효과적으로 차단하여 해상 오염 피해를 감소시킬 수 있다. 유출된 기름 주위에 설치된 방제판은 내부에 가두어진 기름을 안전하고 효과적으로 회수하기 위해 Fig. 1과 같이 파도와 조류 등의 영향이 적은 곳으로 예인되기도 한다. Amini et al.[1]은 내부에 가두어진 기름층의 두께를 증가시켜 회수 처리의 효율을 향상시키기 위해 Fig. 2와 같이 방제판의 형태를 한 개의 큰 원형에서 여러 개의 작은 원형들로 분할하여 방제판 내부 면적의 합을 감소시키는 방법을 제안하였다.

방제판의 예인 과정이나 여러 개의 원형으로 분할하는 과정에서 유동장에 발생하는 압력 교란은 기름과 물의 경계면

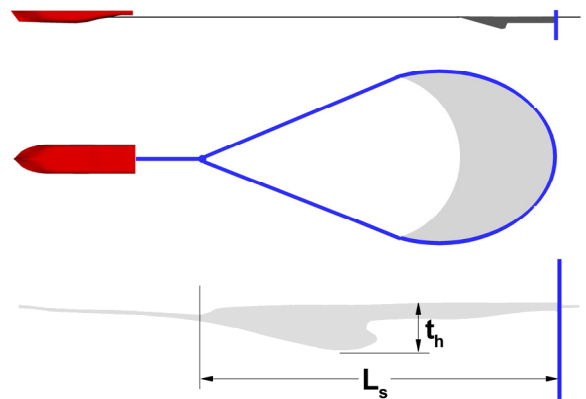


Fig. 1 Schematic drawing of a towed oil boom(above); thickness of the headwave and length of the oil slick(below)

에 자유표면파를 발생시켜 내부에 가두어진 기름이 방제판의 위나 아래로 다시 유출될 수 있다. 이러한 기름의 재유출은 방제판의 형상이나 운동 및 기름층 두께 등의 영향을 받는다. 따라서 기름의 재유출을 방지하기 위해 방제판의 흡수나 견현 또는 예인 속도 등에 대한 제한이 필요하다. 전산유체역학은 다양한 조건에 대한 수치 모사를 통해 효율적 회수와 재

Received: June 7, 2016, Revised: July 28, 2016,

Accepted: July 29, 2016.

* E-mail: smshin@pknu.ac.kr

DOI http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2016.21.3.031

© KSCFE 2016

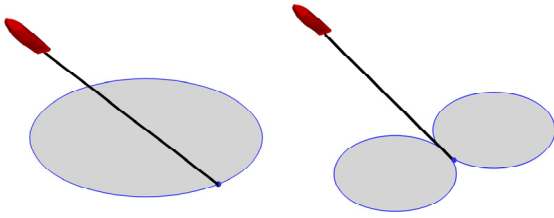


Fig. 2 Schematic drawing of increasing thickness of the oil layer by dividing the original oil boom in the Cavalli oil containment system

유출 방지를 위한 조건 도출에 활용될 수 있다.

밀도비가 큰 해수-공기의 자유표면 파인 수면파 해석의 경우 해수의 관성력과 중력이 지배적이기 때문에 상층의 공기 유동 효과는 주로 무시된다. 밀도차가 대단히 작은 심층수-표층수 사이의 자유표면 파인 내면파(internal wave) 해석의 경우에도 표층수-공기 사이 자유표면 효과는 무시되어 표층수의 윗면은 비점성의 벽으로 처리한 수치해석 결과들도 실험 결과와 좋은 일치를 보인다[2]. 그러나 움직이는 방제판 주위의 물-기름-공기 유동의 경우에는 내면파 경우와 달리 경계면 주위에서 점성응력을 무시하기 어려우며 따라서 얇은 기름층 위아래에서 밀도차로 인해 발생하는 접선속도의 급격한 변화를 제대로 포착하여야 한다. 또한 방제판이 가까워지면서 내부 압력의 전반적 증가에 따른 기름층의 상승이 오일붐 외부로의 유출에 영향을 미치기 때문에 기름과 공기 사이의 자유표면 효과를 제대로 고려하여야 한다.

Level set 및 VOF(volume of fluid) 등 다양한 자유표면 처리 기법들이 개발되어 왔다. 매질 경계면 주위에서 밀도나 접선속도 등 종속변수들의 급격한 변화에도 불구하고 부드러운 거리 함수를 처리하여 경계면을 포착할 수 있는 level set 법은 각 상들의 질량보존을 보장하지 못한다는 결점을 갖고 있다. VOF의 경우 유체함수에 대한 플럭스(flux)를 이용하기 때문에 유동장의 전체 질량보존 만족에 유리하지만 경계면 주위에서 종속변수들에 대한 연속화(smoothing) 처리를 하기 때문에 밀도차로 인해 경계면 주위에서 발생하는 접선속도의 급격한 변화를 제대로 포착하기 위해서는 경계면 주위의 격자 조밀도에 대한 요구가 커진다. FDS(flux-deference splitting) 기법[3,4]은 종속변수들에 대한 연속화 처리 없이 매질경계면을 유동장 내부의 움직이는 접촉불연속면(contact discontinuity)으로 포착해 내는 방법이다. 이 방법에서는 각 유체들의 질량 및 운동량 보존 그리고 비압축성 조건 외에는 어떠한 추가적인 처리도 도입하지 않고 불연속 문제에 대한 Riemann 해에 근거한 질량 및 운동량 플럭스를 양쪽 검사체적에서 가감하기 때문에 질량보존 보장 및 접선속도의 급격한 변화 포착

등에 유리하다. 이러한 FDS 기법의 특징은 물과 공기 사이의 얇은 기름층의 거동을 다루기에 적합하다. 그리고 경계비정합(non-boundary conforming) 기법의 일종이면서도 두께가 무한히 얇은 물체의 운동이나 변형을 쉽게 처리할 수 있는 방법인 HCIB(hybrid Cartesian/immersed boundary)법[5]은 얇은 방제판의 상대운동이나 유연한 방제판의 변형을 고려하기에 적합하다. 본 연구에서는 Shin et al.[6], Shin[7,8]에 의해 제안된 밀도가 다른 비압축성 유체들에 대한 FDS 기법과 HCIB법을 연성시킨 FDS-HCIB법을 이용하여 방제판이 예인되는 경우와 기름층 두께 증가를 위해 방제판이 좁혀지는 경우에 대한 물-기름-공기 유동 모사를 수행하였다.

2. 수치해석 기법

지배방정식은 임의의 밀도 분포를 갖는 비압축성 유체들에 대한 질량 및 운동량 보존식과 각 유체들의 비압축성 조건식이다. 유동 영역 내부에 불연속을 허용하므로 지배방정식은 다음과 같이 적분의 관점에서 표현된다.

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} Q d\Omega + \oint_S (F_{inv} - F_{vis}) dS = \int_{\Omega} B d\Omega \quad (1)$$

$$Q = [\rho, \rho u, \rho v, 0]^T \quad (2)$$

$$F_{inv} = [\rho\theta, \rho u\theta + p n_x, \rho v\theta + p n_y, \theta]^T \quad (3)$$

$$F_{vis} = [0, \tau_{xx} n_x + \tau_{yx} n_y, \tau_{xy} n_x + \tau_{yy} n_y, 0]^T \quad (4)$$

$$B = [0, 0, -\rho g, 0]^T \quad (5)$$

$$\theta = u n_x + v n_y \quad (6)$$

여기서 ρ 는 유체의 밀도, u , v 는 속도, p 는 압력, τ_y 는 점성응력, g 는 중력가속도, Ω 는 검사체적, S 는 검사표면, n_x , n_y 는 검사표면의 법선벡터 성분들이다.

식 (1)의 마지막 식에 의해 각 유체들의 비압축성 조건이 강제되어 매질경계면에서의 법선속도 연속이 보장된다. 비압축성 유체들에서 법선속도의 연속은 운동량 보존식에 의해 매질경계면에서 압력의 연속을 강제한다. 따라서 매질경계면에서 아무런 추가적인 처리 없이도 적분 관점에서의 보존식들이 만족되면 비압축성 유체들의 자유표면 유동에서 요구되는 물리적 조건들이 모두 만족된다. 그러나 이 경우에는 유동 영역 내부에 존재하는 불연속에도 불구하고 물리적으로 타당

한 플럭스가 계산되어야 한다. 이를 위해 근사화된 Riemann 문제의 해를 이용하는 밀도가 다른 비압축성 유체들에 대한 FDS 기법[6]이 적용되었다.

$$F_{inv} = \frac{1}{2} [F_{inv}(\tilde{Q}^R) + F_{inv}(\tilde{Q}^L)] - \frac{1}{2} |\hat{A}| (\tilde{Q}^R - \tilde{Q}^L) \quad (7)$$

$$|\hat{A}| = R|A|R^{-1} \quad (8)$$

여기서 \tilde{Q}^R 와 \tilde{Q}^L 는 가상시간(pseudo-time)에 대해 생성된 쌍곡선(hyperbolic) 문제의 보존변수 벡터들을 검사표면 양쪽에서 재구성한 벡터들이며, R 은 플럭스 자코비안(Jacobian) 행렬의 고유벡터들로 구성된 행렬이고, $|A|$ 는 고유치들의 절대값들을 대각요소로 하는 행렬이다. 공간에 대한 2차 정확도 유지를 위해 종속변수들의 미분치를 이용한 재구성을 사용하였으며 재구성 과정에서 제한자를 이용하여 종속변수의 진동을 억제하였다. 매질경계면에서 정수력학적 압력 기울기의 불연속에 따른 오차를 제거하기 위해 Qian et al.[4]에 의해 제안된 압력 기울기의 분리 기법을 적용하였다. 점성 계수의 경우 계산된 밀도를 기저로 가중평균 하였으며 중앙차분을 이용하여 점성응력들을 계산하였다.

상대운동을 하는 방제판에 대해 물체 경계조건을 적용하기 위해 HCIB법[5]을 적용하였다. 경계비정합 기법의 대표적 방법인 가상경계법(immersed boundary method)[9]과는 반대로 순간 유동영역의 부분집합을 계산영역으로 하는 HCIB법의 특징으로 인해 방제판과 같이 두께가 얇은 물체가 움직이거나 변형하는 경우에도 적용이 용이하다. 지배방정식은 조밀도가 조절된 배후격자계에서 이산화 되었으며 매 순간 물체 표면 위에 위치한 Lagrangian 제어점들의 위치 및 속도 벡터가 주어진다. 방제판의 두께가 배후격자계의 국부 간격보다 작아도 방제판 표면과 접촉하는 배후격자계의 선요소는 명확히 결정되며 선요소 양쪽의 절점들이 가상경계(immersed boundary) 절점으로 분류되어 이산화된 유동해석 문제의 경계를 정의한다.

매 순간 가상경계 절점들이 결정되면 각각의 가상경계 절점들마다 그 점을 관통하면서 물체 표면과 수직으로 만나는 국부법선을 부여한다. 국부법선을 유동영역으로 확장하여 배후격자계의 선요소와 만나는 점을 찾는다. 국부법선의 물체 표면 위에서의 속도벡터는 그 점을 둘러싼 Lagrangian 제어점들에서 주어진 속도벡터들을 이용하여 보간한다. 국부법선의 유동영역 방향의 선요소 위에서는 선요소 양쪽의 유체 절점들에서 비압축성 조건 만족를 위한 가상시간에 대한 갱신 과정에서 계산된 종속변수들을 이용하여 보간한다. 본 연구에서는 국부법선의 양쪽 절점에서의 종속변수 보간을 위해 거리

의 역수를 가중치로 하는 가중평균을 적용하였다.

국부법선 양쪽 점들에서 종속변수들이 보간되면 가상경계 절점으로부터 양쪽 점들까지의 거리들을 이용하여 가상경계 절점에서의 종속변수들을 추정한다. 밀도의 경우 유동영역으로부터 외삽 하였으며 압력의 경우 정수력학적 압력을 제거한 성분을 외삽한 후 가상경계절점의 높이에 따른 정수력학적 압력 차이를 반영하였다. 점착조건이 적용되는 속도의 경우에는 가상경계절점 주위에서의 국부법선을 따른 선형적 변화를 가정하였다.

3. 예인되는 방제판 주위 물-기름-공기 유동 모사

FDS-HCIB법의 이동하는 물체 주위 물-기름-공기 유동 적용에 대한 추가 검증을 위해 실험결과가 보고된 예인되는 방제판 주위 물-기름-공기 유동 실험에 대한 수치모사를 수행하고 그 결과들을 비교하였다. 실제 방제판의 경우 유체력 및 장력에 의한 방제판 길이 방향의 변형으로 인해 3차원 효과가 발생하지만 Amini et al.[1]은 이를 단순화시켜 2차원 회류 수조에서 수행한 실험 결과를 보고하였으며 본 계산에서도 2차원 유동 모사를 수행하였다. 실험에서는 청수(fresh water) 위에 유채유(rapeseed oil)를 방제판 앞에 위치시키고 일정한 유속을 유지하면서 기름층의 형태를 관찰하였다. 실험에 사용된 유채유의 비중은 0.91이고 점성계수는 청수의 85배이다. 수조의 깊이는 0.9 m로 일정하고 방제판의 흡수(draft) D 는 0.1, 0.15, 0.2 m 이며, 유속 U 는 0.1 ~ 0.35 m/s 이고 기름의 부피는 단위 폭 당 0.01, 0.02 m³/m 이다. Fang and Jonston[10]에서 보고된 바와 같이 방제판 흡수의 4배가 넘는 수심에서는 바닥면 효과가 미미하며, 실험에서 의도한 무한수심의 경우를 고려하여 계산에서는 흡수의 5배 이상 깊은 경계에서 종속변수들을 외삽 하였다.

계산에서는 방제판 흡수, 청수의 밀도, 유속을 기저로 하여 변수들 무차원화 하였다. 방제판 및 기름층 주위에서 무차원화된 수평 및 수직 격자의 최소 간격은 각각 0.05, 0.03으로 유지된 후 나머지 계산영역에서는 일정 비율로 확대되었다. 유입면에서는 속도 및 정수력학적 압력이 고정되었으며 공기와 청수의 밀도 경계면은 초기 교란이 없는 수면으로 주어졌다. 유출면에서는 밀도 및 속도 등 모든 종속변수들을 유동영역으로부터 외삽하였다. 초기 조건에서 방제판 주위의 기름 영역은 방제판 길이의 5배에 걸쳐 일정한 두께로 위치한다고 가정하였다.

Fig. 3는 방제판 흡수 0.15 m, 유속 0.3 m/s, 기름 부피 0.02 m³/m의 경우에 대해 물-기름 경계면(적색)과 기름-공기 경계면(청색)의 시간 변화를 보여준다. 방제판은 정지 상태에서부터 무차원화된 시간 t^* 가 1이 될 때까지 일정한 가속도로 속도가

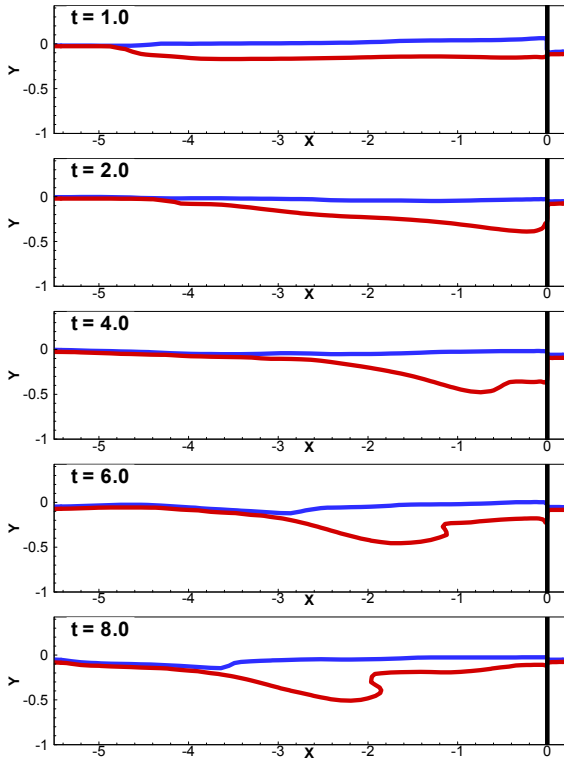


Fig. 3 Time variation of water-oil(red) and oil-air(blue) interfaces for the oil slick in front of the towed barrier

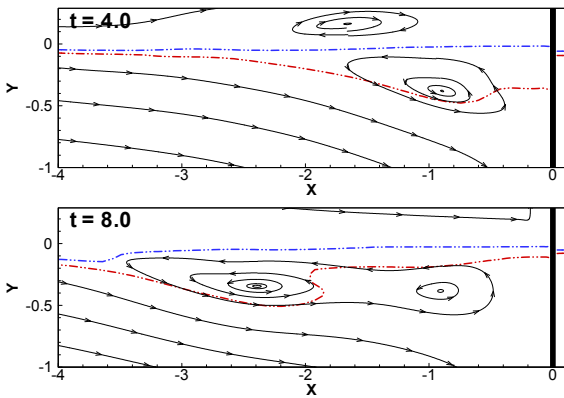


Fig. 4 Instantaneous streamlines around the towed barrier, at $t = 4$, and 8

증가한다. $t = 1$ 은 가속이 종료되는 시점으로 그동안의 가속에 의한 부가질량 효과로 방제판 앞의 기름층이 밀려 올라가 있음을 관찰할 수 있다. $t = 2$ 에서는 등속 운동이 유지되면서 공기 경계면은 다시 원래 위치로 내려오지만 기름층은 후류로 밀려나 방제판 주위로 물리면서 두꺼운 부분이 형성된다.

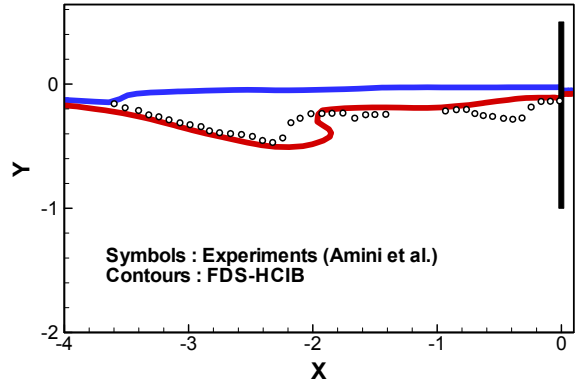


Fig. 5 Comparison of the computed oil slick shape with experimental results

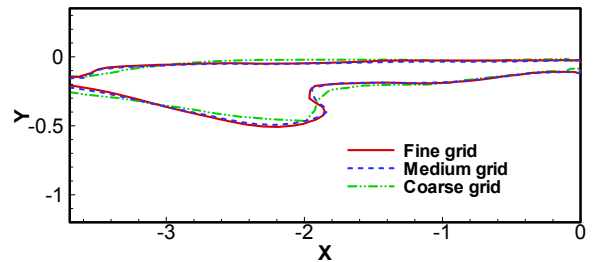


Fig. 6 Grid independency test for computed interfaces using three different size grids

$t = 4$ 에서의 순간 유선을 보여주는 Fig. 4에서 보듯이 방제판 앞에 형성된 외류의 영향으로 초기 headwave 형태가 형성된다. 이후 headwave는 점진적으로 앞으로 이동하여 실험에서 관찰된 것과 유사한 형태로 변화함을 관찰할 수 있다.

$t = 4$ 와 8에서의 경계면과 순간 유선들을 보여주는 Fig. 4로부터 초기 방제판 앞에 형성된 외류 주위에서 기름층이 두꺼워지며 시간이 지나면 headwave의 중앙에 위치한 외류에 의한 유동방향과 유사한 매질경계면이 형성됨을 관찰할 수 있다. Amini et al.[1]에서 모사된 방제판 주위 단일 유체의 흐름과 달리 매질경계면이 분리 유선(dividing streamline)처럼 되면서 기름층 내부에 외류가 형성됨을 관찰할 수 있다.

Fig. 5는 계산된 기름층 형상을 Amini et al.[1]의 실험에서 측정된 기름층 형상과 비교한 그림이다. Headwave의 직선적 기울기나 두께 및 기름층의 길이 등이 실험결과와 비교적 좋은 일치를 보임을 관찰할 수 있다.

계산 결과의 격자 수렴성 검토를 위해 세 가지 다른 크기의 격자계들을 사용하여 얻어진 기름층 형상들을 Fig. 6에서 비교하였다. 조밀한 격자계에 비해 거친 격자계와 중간 격자계에서는 최소 격자 간격들을 각 방향으로 2배와 1.5배 증가

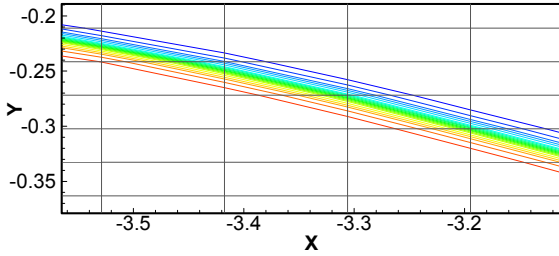


Fig. 7 Distribution of density contours across the estimated interface

시켰다. 그림으로부터 거친 격자계의 경우 headwave 후미부 형상에 다소 차이가 발생하지만 중간 격자계와 조밀한 격자계의 경우 거의 유사한 결과를 보임을 확인할 수 있다. 그러나 질량의 경우 거친 격자계에서도 거의 최초의 질량이 유지되고 있으며 격자계에 따른 질량보존 오차의 일관된 변화 양상은 관찰되지 않았다. 세 경우 모두 질량의 오차는 최초 질량에 대해 3% 이내 임을 확인하였다.

Fig. 7은 청수-기름 경계면 주위에서 계산된 밀도 분포와 배후격자계를 보여준다. 그림에서 등밀도선의 간격은 청수-기름 밀도차의 1/20로 주어졌다. 그림으로부터 경계면 주위 한 개 요소를 제외하면 각 요소에서 계산된 밀도와 물 또는 기름 밀도의 차이는 청수-기름 밀도차의 1/20 이내 임을 관찰할 수 있다.

Amini et al.[1]은 초기 기름 부피 $Vol[m^3/m]$, 유속 $U[m/s]$, 방제판 흡수 $D[m]$ 에 따라 관찰된 기름층의 길이 $L_s[m]$ 의 감소와 headwave의 두께 $t_h[m]$ 의 증가에 대해 다음과 같은 경험식을 제안하였다.

$$L_s = Vol^{2/3} \left[-11.7 \ln U - \frac{2}{\sqrt{D}} \right] \quad (9)$$

$$t_h = 1.4 \sqrt{Vol} U \quad (10)$$

Fig. 8과 Fig. 9은 기름 부피 $0.02 m^3/m$, 방제판 흡수 $0.15 m$ 의 경우에 대해 유속 U 에 따라 계산된 기름층 길이 L_s 와 headwave 두께 t_h 의 변화들을 경험식들과 비교한 그림이다.

4. 좁혀지는 방제판 주위 물-기름-공기 유동 모사

예인되는 방제판 주위 물-기름-공기 유동에 대한 실험결과와의 비교를 통해 검증된 FDS-HCIB 코드를 이용하여 좁혀지는 방제판 주위 물-기름-공기 유동을 모사하였다. 교란이 없는 정수면을 $y = 0$ 으로 하고 정지된 오른쪽 방제판은 $x = 0$

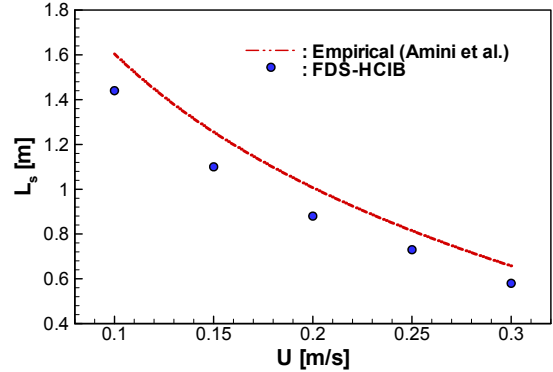


Fig. 8 Variation of oil slick length with respect to the towing velocity

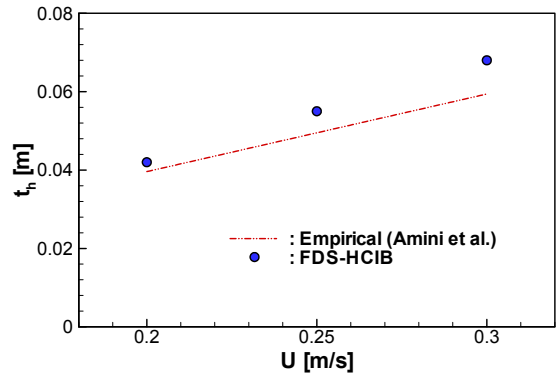


Fig. 9 Variation of headwave thickness with respect to the towing velocity

에 위치한다. 두 방제판의 정수면 하 흡수는 1.5 이고 정수면 위로 0.5 올라와 있으며 두께는 무시할 만큼 작다고 가정하였다. 초기에 기름층의 두께는 0.2 이며 왼쪽 방제판은 $x = -5$ 에 정지해 있다. 각 유체들의 물성치는 전 절에서 명시된 바와 같이 청수, 유채유, 표준 대기의 물성치들을 사용하였다. 무차원화된 시간 $t = 0$ 에서 $t = 1$ 이 될 때까지 왼쪽 방제판의 무차원화된 속도는 0 에서 1 까지 선형적으로 가속된 후 일정하게 유지된다. 최소 격자간격은 전 절의 경우와 동일하게 $\Delta x_{min} = 0.05$, $\Delta y_{min} = 0.03$ 으로 유지하였다. 계산에 사용된 조건들은 방제판들 사이의 상대운동을 제외하면 Amini et al.[1]의 예인 실험과 유사한 경우에 해당한다. 방제판들의 흡수는 각각 $0.225 m$ 이고 왼쪽 방제판의 정상상태에서 전진속도는 $0.1 m/s$ 이다. 초기 상태에 유채유 두께는 $0.03 m$ 이고 두 방제판들 사이의 거리는 $0.75 m$ 이다. 왼쪽 방제판은 초기 정지 상태에서 $1.5 s$ 동안 일정하게 오른쪽으로 가속된다. 선택된 계산 조건에서는 아래에서 설명되는 방제판 가속에 따른 부가 질량 효과 및 물-기름 자유표면파의 위상 전파속도와 방제판

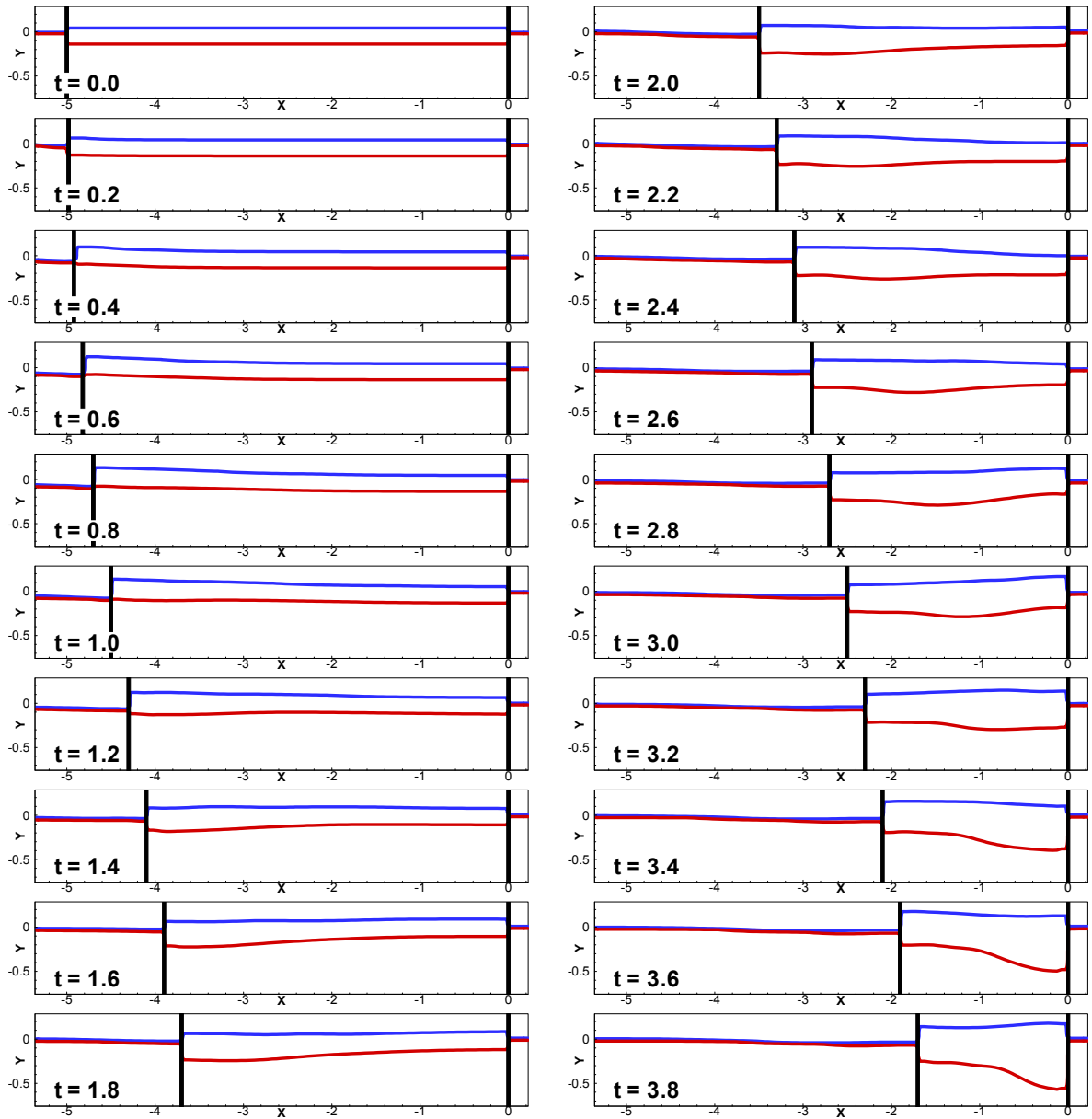


Fig. 10 Time variation of water-oil(red) and oil-air(blue) interfaces for the oil slick inside of the approaching barriers

이동 속도의 차이 등을 명확히 관찰할 수 있다.

Fig 10은 물-기름 경계면과 기름-공기 경계면의 시간에 따른 변화를 보여준다. $t = 0$ 에서 $t = 1$ 사이에서는 방제판의 가속에 따른 부가질량 효과에 의한 앞쪽의 높은 압력으로 인해 왼쪽 방제판 주위의 기름층이 위로 밀려 올라감을 관찰할 수 있다. $t = 1$ 이후에는 등속 운동이 유지됨에 따라 왼쪽 방제판 앞의 기름층은 조금씩 내려오지만 방제판 운동에 의

한 경계면 상승은 계속 유지된다. 초기에는 방제판 운동의 효과가 왼쪽 방제판 주위로 한정되지만 경계면에서 발생한 자유표면 파동의 전파는 방제판의 이동 속도가 아닌 유체층들의 밀도차와 시간에 따라 변화하는 기름층 두께에 영향을 받는다. 이러한 파동은 왼쪽 방제판이 오른쪽 방제판에 가까워지기 전에 오른쪽 방제판에 도착하여 반사되며 이러한 현상은 Fig 11의 압력장 변화에서도 확인할 수 있다. 두 방제판이

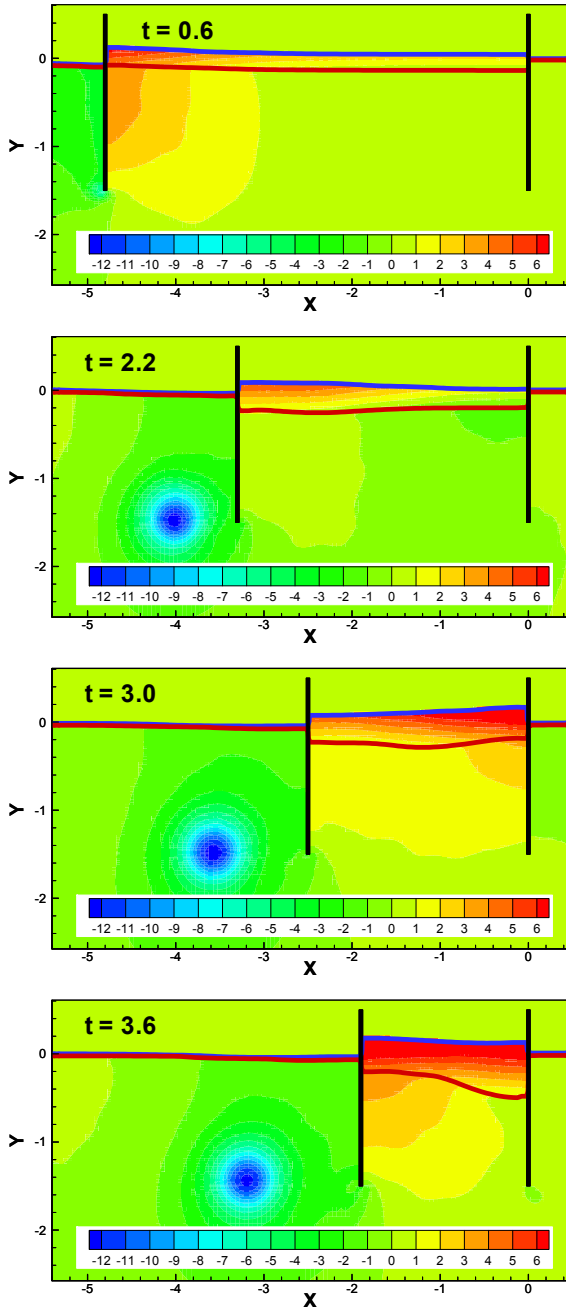


Fig. 11 Time variation of pressure fields around the approaching barriers

방제판 흡수에 비해 일정 거리 이내로 가까워지면 두 방제판 내부 유체들의 압력이 전반적으로 상승하여 내부의 기름층을 위로 밀어 올린다.

Fig. 11은 여러 단계에서 좁혀지는 방제판 주위 압력 변화

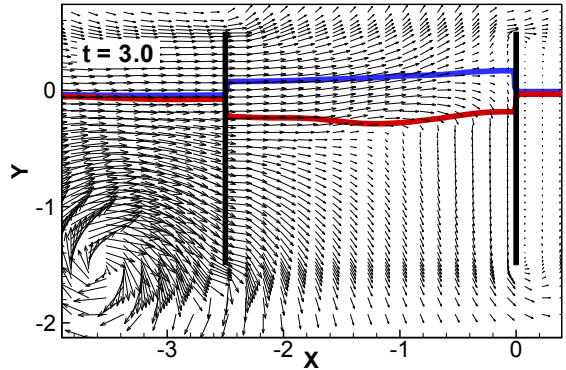


Fig. 12 Distribution of velocity vectors around the approaching barriers, at $t = 3$

를 보여준다. $t = 0.6$ 에서는 왼쪽 방제판의 가속이 진행되는 시각으로 방제판 흡수 정도의 전방까지 압력의 상승이 발생하고 이러한 압력 상승은 기름층을 밀어 올린다. 방제판 후면에서는 압력의 감소에 따른 공기 경계면의 하강이 발생하고 있다. $t = 2.2$ 에서는 방제판의 운동 속도가 유지되면서 왼쪽 방제판 앞쪽 기름층에 다소 높은 압력 영역이 발생하며 끝단 뒤쪽에 강한 외류가 방제판을 따라 움직인다. $t = 3$ 과 $t = 3.6$ 에서는 좁혀지는 방제판이 가까워지면서 내부의 압력이 전반적으로 상승하여 기름층을 밀어 올린다. $t = 3$ 에서는 정지된 오른쪽 방제판 앞의 청소 영역에 높은 압력이 발생하지만 $t = 3.6$ 에서는 높은 압력이 움직이는 왼쪽 방제판 앞의 청소 영역으로 이동했음을 관찰할 수 있다. 이미 설명한 바와 같이 방제판 이동 속도와 독립적인 전파 속도의 자유표면 파로 인해 방제판이 가까워지기 전에 방제판 내부에서 파의 반사가 이루어지고 있다.

Fig. 12는 $t = 3$ 에서의 속도 벡터 분포를 보여준다 이동하는 왼쪽 방제판 주위의 유동은 방제판의 이동과 끝단 뒤쪽의 외류가 지배하지만 오른쪽 방제판 주위에서는 유동이 거의 정체되고 양 끝단 주위로 약하게 빠져나간다. 오른쪽 방제판 주위 청소-기름 경계면 주위에서는 경계면 아래로 움직이는 유동이 발생하며 접선속도가 급격히 변화함을 관찰할 수 있다. 종속변수들의 연속화 처리를 하는 다른 기법들과는 달리 FDS 기법은 그러한 접선속도의 급격한 변화를 과도한 격자 요구 없이 포착하고 있음을 관찰할 수 있다.

5. 결론

FDS-HCIB법이 상대운동을 하는 얇은 방제판 주위의 물-기름-공기 유동 모사를 위해 확장되었다. 계산된 headwave 형상은 Amini et al.[1]의 실험결과와 좋은 일치를 보이며 유속 증

가에 따른 기름층 길이의 감소나 headwave 두께의 증가 등이 실험결과를 기초로 한 경험식과 유사한 경향을 보임을 확인하였다.

FDS 기법은 얇은 기름층 위아래 매질경계면에서의 밀도 불연속에 따른 접선속도의 급격한 변화를 포착하기에 적합하였으며 HCIB법은 방제판 두께에 관계없이 유동영역의 형상 변화를 쉽게 처리하였다.

좁혀지는 방제판 주위 유동의 경우 방제판 거리가 좁혀짐에 따라 내부 압력의 전반적인 증가에 따른 기름층 상승이 발생하며 내부 자유표면 파의 전파 및 반사에 의한 유동이 발생함을 관찰하였다.

향후 FDS-HCIB법은 방제판 형상의 3차원 효과에 대한 모사 및 다층 유동과 유연 구조물의 상호작용 모사에 활용될 수 있으리라 기대된다.

후 기

이 논문은 부경대학교 자율창의학술연구비(2016년)에 의하여 연구되었음.

References

- [1] 2008, Amini, A., Bollaert, E., Boillat, J.L. and Schleiss, A.J., "Dynamics of low-viscosity oils retained by rigid and flexible barriers," *Ocean Engineering*, Vol.35, pp.1479-1491.
- [2] 2005, Shin, S., "Internal wave computations using the ghost fluid method on unstructured grids," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.47, pp.233-251.
- [3] 1997, Kececy, F.J. and Pletcher, R.H., "The development of a free surface capturing approach for multidimensional free surface flows in closed containers," *Journal of Computational Physics*, Vol.138, pp.939-980.
- [4] 2006, Qian, L., Causon, D.M., Mingham, C.G. and Ingram, D.M., "A free-surface capturing method for two fluid flows with moving bodies," *Proceeding of the Royal Society A*, Vol.462, pp.21-42.
- [5] 2005, Gilmanov, A. and Sotiropoulos, F., "A hybrid Cartesian/immersed boundary method for simulating flows with 3D geometrically complex, moving bodies," *Journal of Computational Physics*, Vol.207, pp.457-492.
- [6] 2012, Shin, S., Bae, S.Y., Kim, I.C., Kim, Y.J. and Yoon, H.K., "Simulation of free surface flows using the flux-difference splitting scheme on the hybrid Cartesian/immersed boundary method," *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, Vol.68, pp.360-376.
- [7] 2013, Shin, S., "Simulation of two-dimensional internal waves generated by a translating and pitching foil," *Ocean Engineering*, Vol.72, pp.77-86.
- [8] 2015, Shin, S., "Simulation of relative motion of floating bodies including effects of a fender and a hawser," (in Korean) *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.20(1), pp.1-9.
- [9] 2015, Ahn, H.S., Yang, K.S. and Park, D., "Numerical simulation of flow past a square cylinder submerged under the free surface," (in Korean) *Journal of Computational Fluids Engineering*, Vol.20(4), pp.51-57.
- [10] 2001, Fang, F. and Jonston, A.J., "Oil containment by boom in waves and wind," *Journal of Waterway, Port, Coastal, and Ocean Engineering*, Vol.127(4), pp.234-240.