

압력구배가 없는 수중 파이프에서의 액체 오염물 유출에 관한 수치연구

송무석⁽¹⁾, 한재훈⁽²⁾

A Numerical Study on the Leakage of a Liquid from an Underwater Pipe without Pressure Gradient

by

Museok Song⁽¹⁾ and Jahoon Han⁽²⁾

요 약

성질이 다른 두가지 유체가 복잡한 상호작용을 하는 경우의 유동을 살펴 보기 위하여 2차원 비점성 수치해법을 개발하고, 이를 감압된 수중 파이프에서의 기름 유출 문제에 적용하였다. 두 유체의 경계면은 보오텍스 쉬트로 모델링하고 보오텍스격자법 (vortex-in-cell method)을 적용하여 유동을 해석하며, 장시간의 유동 모사를 위하여 경계면의 분할과 집합이 가능하도록 하였다. Boussinesq 가정에서 외부유체의 관내로의 유입 속도가 기존의 수학모델과 거의 동일함을 확인하였고, 경계면에서의 복잡한 상호 유입과 보오텍스 유동에도 불구하고 Lock Exchange가 발생함을 보였다. 개발된 수치해법은 다양한 해양환경의 2상유체 문제에 효과적으로 이용될 수 있다고 사료된다.

Abstract

A two-dimensional numerical method for inviscid two-fluid flows with a significant entrainment into both directions is established, and the oil leakage from a non-pressurized underwater pipe is studied. The interface between two fluids is modeled as a vortex sheet. The flow field and the subsequent interface evolution are solved by using the vortex-in-cell method. For longer flow simulation with a realistic two fluids interaction, an efficient merging scheme is introduced. In the Boussinesq limit, the speed of the external fluid intrusion into the pipe is very close to the existing mathematical models, and the lock exchange is observed in spite of a significant roll-up of the interface and entrainments. It is believed that the developed method can be utilized effectively for further detailed studies on various two-fluid flows which are encountered in many different marine oil spill problems.

Keywords: 수중누유, 2상유체, 중력흐름(Gravity Current), 와도격자법(Vortex-In-Cell Method), 경계면추적법(Front Tracking)

(1) 정희원, 홍익대학교 조선해양공학과, msong@hongik.ac.kr
(2) 정희원, University of Michigan

1. 서 론

해상에서의 각종 액체 오염물의 유출은 해양환경에 다양한 형태의 부정적인 영향을 준다 (송무석 [1998]). 여러 형태의 오염물 유출 사고 시, 주어진 환경에서 단위 시간당 유출되는 액체의 양은 피해의 평가뿐 아니라 사고 대처의 효율성을 제고하는 관점에서도 매우 중요한데, 기본적으로 다른 종류의 액체들의 혼합을 포함하는 유체역학의 문제로 엄밀한 해석에 다소 어려움이 있다. 따라서 적절한 가정을 도입한 가운데 필요한 최소한의 정보를 제공할 수 있는 수학적 모델이 연구되어온 바 있고, 이들은 거시적 물리량의 관점에서 (시간당 유출량 등) 비교적 실험치와 근사한 결과를 주고 있다. 이들에 관련된 다양한 연구는 Fanelop[1994]에 잘 정리되어 있다. 본 연구에서는 이들 2상유체 유동을 (two-phase flow) 엄밀히 모사할 수 있는 수치해법을 개발하고, 이를 압력구배가 없는 경우의 수중 송유관에서의 기름유출의 문제에 적용하여 그 실효성을 살펴보았다.

2. 수치해법 (Vortex-In-Cell/Front Tracking Method)

본 장에서는 사용된 수치해법을 간단히 설명한다. 두 유체의 경계를 보오텍스 쉬트(vortex sheet) 모델링하고, 경계면에서의 유속 차이를 보오텍스 쉬트 세기로 (vortex sheet strength) 놓은 후, 그 보오텍스 쉬트를 여러 개의 요소로 분할하여 (front element) 각 요소의 순환을 (circulation, Γ) 보오텍스 쉬트 세기를 적분하여 구한다. 이 순환값은 아래의 식에 따라서 변화하는데, 상세한 사항은 Tryggvason[1988]이나 Zufiria[1988]를 참조하면 된다.

$$\frac{d\Gamma}{dt} = 2A \int_{s^-}^{s^+} \frac{d\bar{U}}{dt} \cdot ds + \frac{A}{4} ((\gamma^+)^2 - (\gamma^-)^2) + \frac{2A}{Fr} (y^+ - y^-) + \frac{2}{We} (x^+ - x^-) \quad (1)$$

위의 식에서 A , Fr , We 는 각각 Atwood 수, Froude 수 그리고 Weber 수이고 아래와 같이 정의된다.

$$A = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_1 + \rho_2}; \quad Fr = \frac{U^2}{gL};$$

$$We = \frac{(\rho_1 + \rho_2)LU^2}{\sigma} \quad (2)$$

속도 U 와 길이 L 은 각각 경계면에서 속도차이와 유동의 대표적인 길이로서 정의되고, (본 연구에서는 파이프의 높이 D) 첨자 1과 2는 편의상으로 경계면 위의 유체를 2로, 아래의 유체를 1로 표시한다. (1)식에서 쓰인 \bar{U} 는 경계면에서의 유속이고, s 는 경계면의 접선 벡터, γ 는 보오텍스 쉬트의 세기, y 는 중력과 반대 방향의 위치 좌표, 그리고 x 는 곡률을 나타낸다. 그리고 위치자 -와 +는 분할된 요소의 좌측 및 우측의 경계를 나타낸다.

(1)식의 우변에 필요한 유속을 구하기 위하여 경계면에 집중된 보오텍스를 공간에 고정된 격자로 (stationary grid) 분포시키고, 이 알려진 와도분포를 (vorticity distribution) 이용하여 유량함수에 (stream function) 대한 Poisson 방정식을 푼다. 유량함수에 대한 경계조건은 계산 영역의 경계에서는 유체의 유입이 없으므로 0과 같은 일정한 값을 주면 되고, 파이프의 경계를 통한 유체의 이동이 없도록 보오텍스의 세기를 반복계산하여 결정한다. 공간 고정 격자에서 얻어진 유량함수를 미분하여 유속을 구할 수 있고, 이 속도를 이용하여 경계면에서의 유속을 구한다. 와도의 고정격자에로의 분배나 경계면에서의 유속을 거꾸로 구하는 과정에서 면적가중 (area weighting) 등 간단한 방법을 사용할 수도 있지만, 곡률이 사용되는 (1)식과 같은 경우를 위해서는 Peskin[1989] 함수 등을 사용하여 경계면의 곡률이 경계면을 따라 연속적으로 변하게 할 필요가 있다. 경계면의 위치와 보오텍스 쉬트 세기를 (1)식을 이용하여 새롭게 한 후 위의 와도격자법 (vortex-in-cell) 계산을 반복한다.

경우에 따라 경계면이 심하게 변형하여 한쪽의 유체가 다른 유체 안으로 떨어져 들어갈 수도 있는데 (entrainment), 이러한 과정을 수치적으로 표현하는 것은 현실적인 유동의 모사라는 관점에서 중요할 뿐 아니라, 유동모사를 오랜 시간 동안 하기 위해서도 꼭 필요하다. 반대로 이러한 중첩된 경계면의 결합 등이 수치해법에 포함되지 않을 경우 경계면 요소의 수가 기하급수적으로 증가하여 더 이상의 계산이 불가능하게 된다. 이러한 머징의 (merging) 효과는 계산예에서 더 살펴보기로 한다.

3. 계산결과 및 토론

본 장에서는 해저면에 설치된 기름 이송용 파이프

에서 기름이 유출되는 경우를 전장에서 설명한 수치 해법을 이용하여 모사한 결과를 보이고 토론한다. 이러한 상황은 파이프의 일부를 교체하기 위하여 감압을 한 후 파이프를 절단한 경우나, 사고로 파이프가 손상된 후 밸브를 잠구어 압력구배를 없애준 경우에 해당한다고 볼 수 있다. 물론 점성의 영향은 무시할 수 있어야하고, 이 경우 해수와 기름간의 밀도차가 작아 Boussinesq 가정을 이용하면 (1)의 식에서 중력을 포함하는 항만 남게되며, 또한 표면장력의 영향을 무시할 수 있다고 가정하면 유동에 영향을 주는 무차원수는 모두 없어지게 된다.

우선 파이프의 높이로 무차원한 길이를 3으로 하여 사용된 격자수의 영향을 보고자 세가지의 격자계를 이용한 계산 결과를 Fig.1에 보였다. 위로

부터 출구에 각각 격자를 10, 20 그리고 40개를 사용한 경우의 경계면 형상의 계산 결과이고, 좌측과 우측은 각각 무차원 시간이 1.5와 3.0일 경우이다. 격자가 20인 경우 초기의 작은 규모의 경계면 변형은 격자수 40인 경우와 다소 차이가 있지만 시간이 경과한 후 큰 규모의 경계면 변형은 40개의 격자 경우와 차이를 보이지 않고 있다. Fig.2에 파이프로 유입되는 유체의 앞단의 (leading edge) 위치와 밀려 나온 기름의 양을 시간에 대한 함수로 보이고 있는데 격자가 20일 경우 충분히 수렴된 해를 얻고 있음을 다시 확인할 수 있다.

Fig.3은 2장에서 언급한 머징의 효과를 보이고 있다. 좌측의 세 경우가 머징을 하지 않은 경우인데 시간의 경과에 따라 경계면이 매우 복잡하게 얽히며 중첩되어 사용되는 계산 요소의 수가 (그림

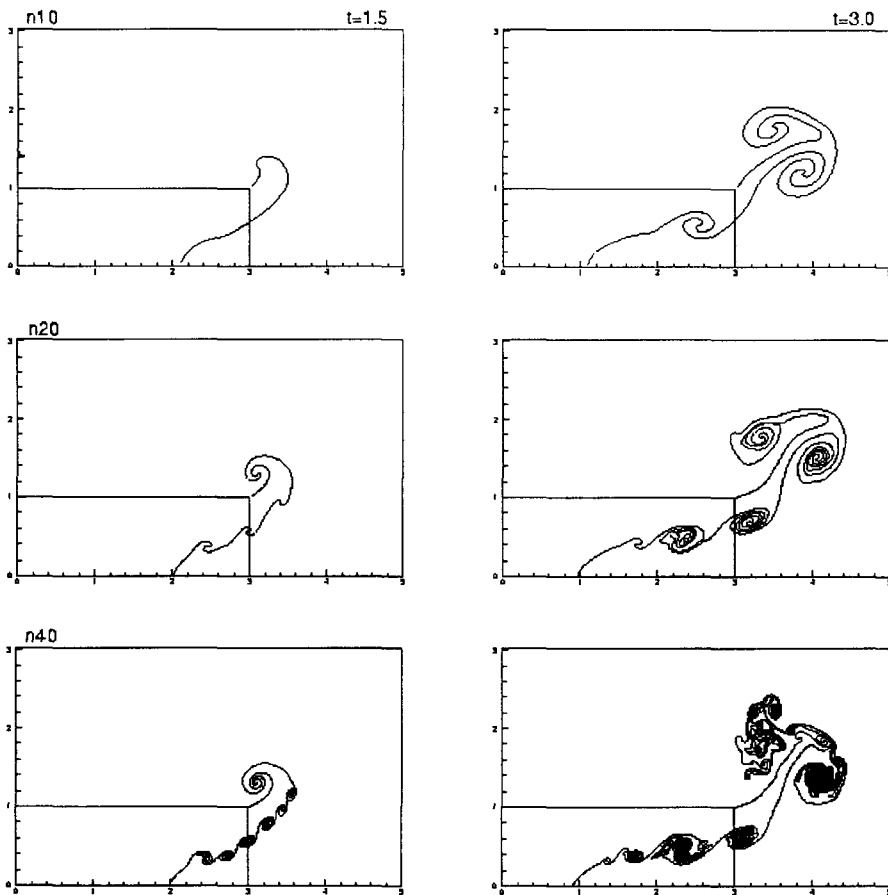


Fig.1 Front structures with different grid resolutions. From the top, 10, 20 and 40 grids are used at the exit of the pipe.

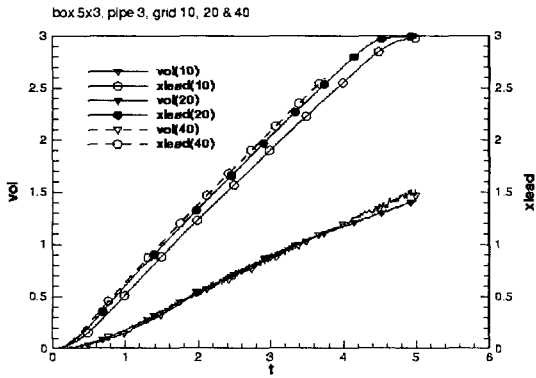


Fig.2 Resolution test with 10, 20 and 40 grids at the exit. Circles: leading edge positions in time, triangles: volume drained from the pipe. Numbers are dimensionless.

의 상단에 ne로 표현된) 기하급수적으로 늘고 있음을 알 수 있다. 반면, 오른쪽의 머징을 사용한 경우는 좌측의 경우와 비교하여 전체적인 복잡한 유동 특성을 충분한 정확도로 보이면서도 계산 요소는 크게 늘지 않았다. Fig.4에 두 경우의 속도 및 와도분포를 보였는데 두 그림 사이에서 차이점을 발견하기 어렵다. Fig.5는 머징을 결정하는데 사용되는 2가지의 수치 변수, 즉 최소 경계면 근접 거리와 (격자 크기의 배수, 즉 0.2는 두 경계요소가 격자 크기의 0.2배 보다 작으면 머징을 실시한다) 접근한 요소간의 각도의 (두 경계요소가 서로 평행한 정도) 영향을 살펴본 그림이다. 그림의 좌측에 사용된 값들은 보다 적극적인 머징을 유도하는 경우인데, 요소의 증가를 상당히 억제해 주면서도, 작은 스케일의 유동까지도 충실히 모사함을 확인할 수 있다.

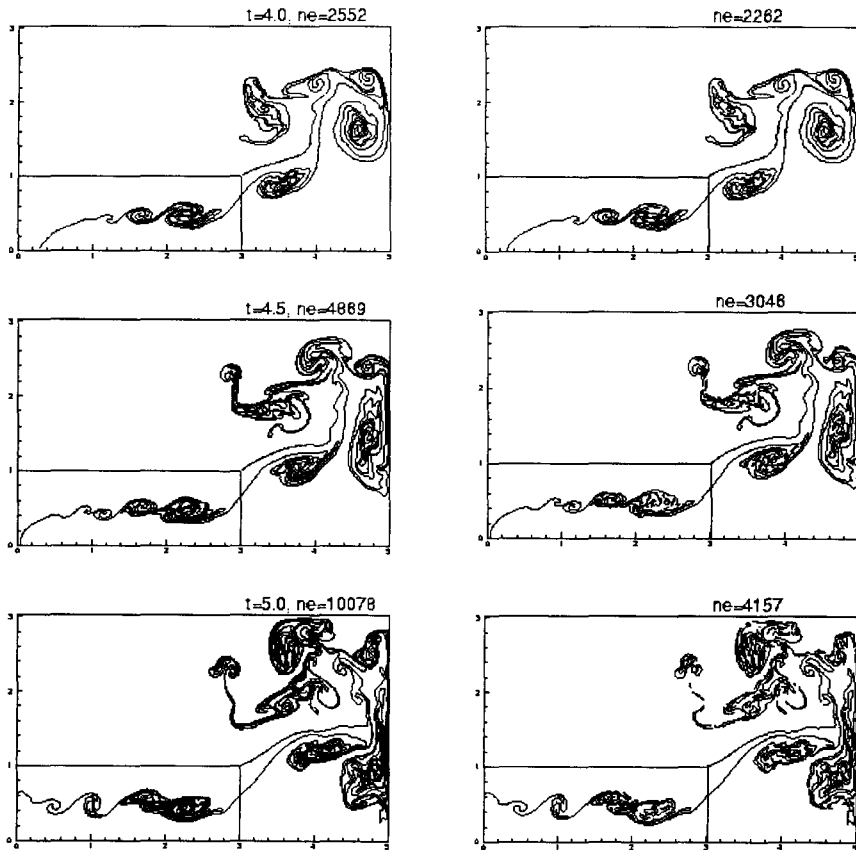


Fig.3 Front structures in time w/o (left) and w/ (right) merging. The distance and angle parameters are 0.2 and 20 degrees, respectively. ne: number of front element.

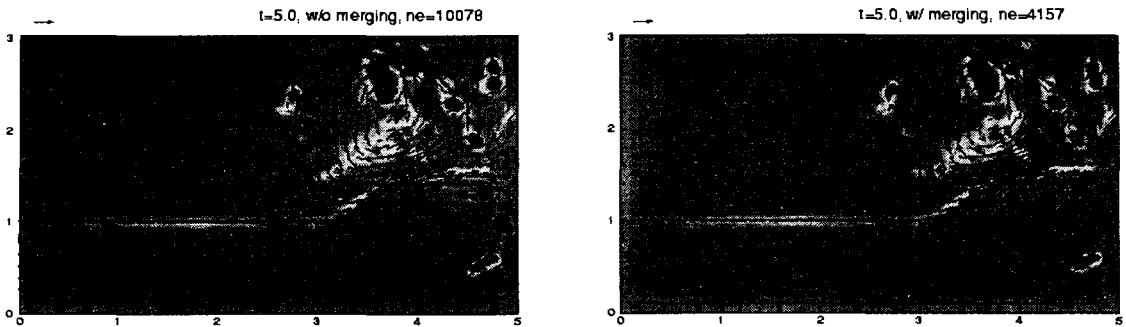


Fig.4 Comparisons of the velocity and vorticity fields w/ and w/o merging.

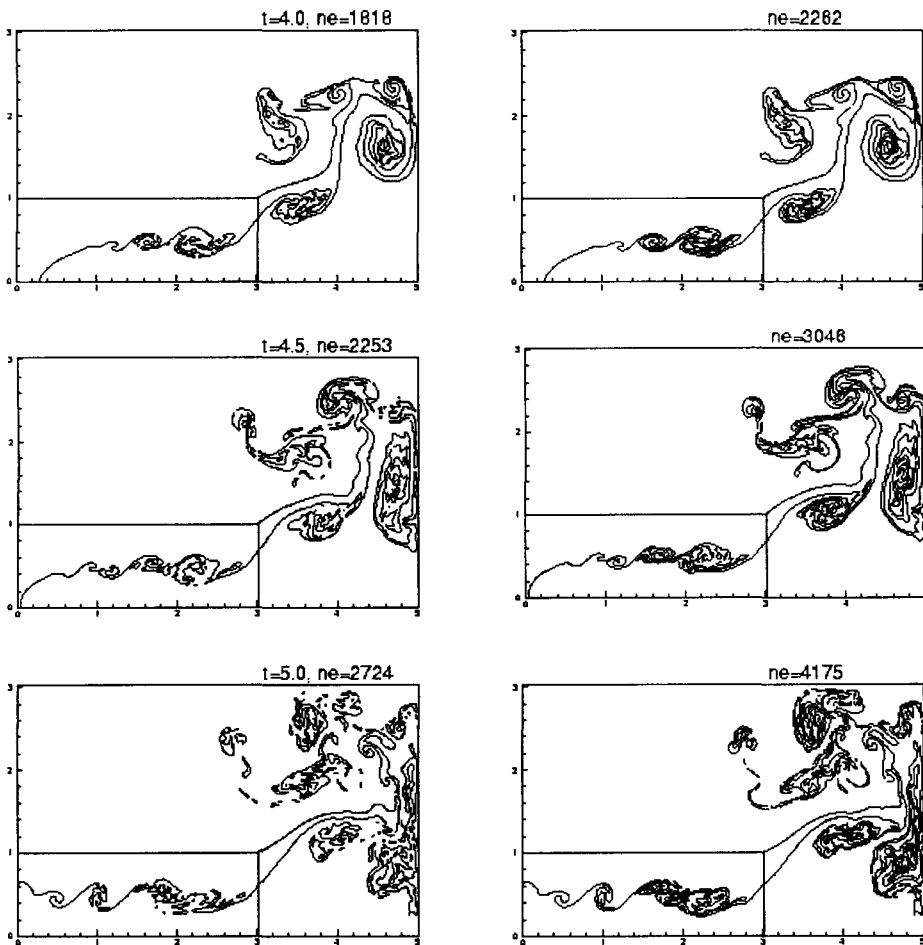


Fig.5 The effect of the merging parameter, threshold spacing. Left is with 0.4 and right is with 0.2. The criterion for the difference of inclination angle between two elements is fixed at 20 degrees for both cases.

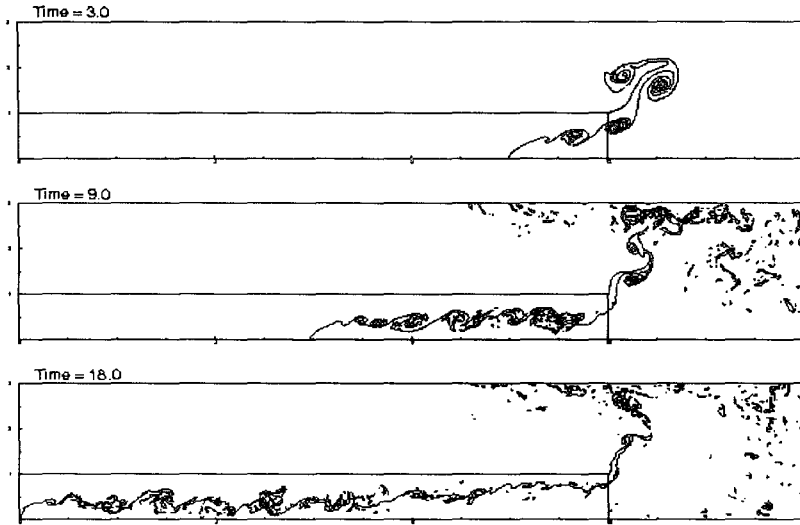


Fig.6 Time sequency of an oil discharge from a pipe. Merging is used. $A=0.1$. 20 grids are used for the exit, and $0.4/20$ degrees are merging parameters.

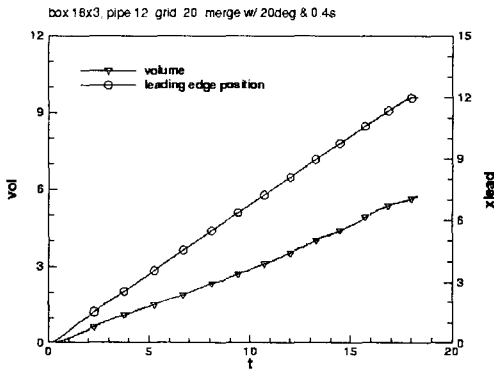


Fig. 7 Flow characteristics from the long pipe simulation. Circles: leading edge positions in time, triangles: volume drained from the pipe. Numbers are dimensionless.

Fig.6은 이상에서 도출된 수치파라미터를 사용하고 파이프의 길이를 충분히 길게 하여 (출구 크기의 12배) 유동을 모사하고 경계면의 시간에 따른 형상의 변화를 보였다. Atwood 수는 물과 ($\rho = 1000\text{kg/m}^3$) 기름의 ($\rho = 800\text{kg/m}^3$) 경우로 보고 0.1로 하였다. 보오텍스 스위트의 말림현상과 (roll-up) 수많은 물 및 기름 방울의 인트레인먼트, 그리고 누출된 기름의 수중에서의 유적화 (droplet for-

mation) 과정을 잘 보여주고 있다. 사용된 계산 영역의 수직 방향 크기가 충분하지 못하여 우측에서 크게 순환하는 유동이 다소 파이프의 출구의 유동에 영향을 주고는 있지만, 밀고 들어가는 해수의 최전단이 파이프의 좌측 끝을 치고 난 후에도 계산은 출렁이는 경계면을 잘 모사하여 (그림에 포함되지 않았음) 수치해법이 매우 안정되어 있음을 확인 할 수 있었다.

Fig.7은 Fig.6의 계산을 해수의 침입속도와 (intrusion speed) 기름의 체적손실로 (volume loss) 정리한 것이다. 경계면이 매우 복잡한 변형을 겪고 Kelvin-Helmholtz 타입의 큰 규모의 보오텍스 유동이 경계면을 따라 생성됨에도 불구하고 해수의 유입은 거의 일정한 속도로 발생하고 있고, 유체의 교환은 파이프 내에서 유입되는 유동과 유출되는 유동이 대칭인 대칭교환의 (lock exchange) 형태임을 알 수 있다. 기울기기를 정리한 침입속도 $0.675\sqrt{gDA}$ 로 (여기서 D는 파이프의 높이), 이는 Simpson[1987]의 에너지 관점의 수학모델의 결과와 ($0.71\sqrt{gDA}$) 매우 근사한데, 다소의 외이기는 하지만 점성이 중요한 역할을 하지 않는 경우 leading edge에서의 중력흐름이 (gravity current) 유동을 결정한다는 사실을 확인한 것은 의미가 있다.

4. 결론

점성의 효과가 크지 않은 경우의 다상유체 유동을 모사할 수 있는 수치해법을 개발하고 압력구배가 존재하지 않는 수중 파이프에서의 기름 유출에 대해 계산을 수행하고 그 유동 특성을 파악하였다. 수치해법은 보오텍스격자법과 (vortex-in-cell method) 경계면추적법을 (front tracking) 결합하여 경계면의 복잡한 변형과 유체 상호간의 유적화를 통한 교환을 (entrainment) 모사할 수 있도록 하였다. 파이프에서의 기름 유출 속도는 경계면의 Kelvin-Helmholtz 타입의 복잡한 보오텍스 유동의 발달에도 불구하고 전형적인 대칭교환의 (lock exchange) 경향을 보였고, 따라서 점성의 영향이 약한 경우 중력흐름이 (gravity current) 기름의 누출 속도를 결정하는 주요 메커니즘임을 확인하였다. 본 연구를 통하여 개발된 수치 해법은 비점성 2상의 유체의 복잡한 유동을 매우 안정되게 모사할 수 있어 앞으로 다양한 해양환경 유체유동의 연구에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] 송무석, 1998, "대형 유조선사고, 어떻게 대처할 것인가," (정리) 한국해양환경공학회 토론회, 한국해양환경공학회지, Vol. 1, No. 1, 6-26.
- [2] Fanelop, T. K., 1994, *Fluid Mechanics for Industrial Safety and Environmental Protection*, Elsevier, NY,
- [3] Peskin, C.S. and McQueen, D.M., 1989, "A three-dimensional computational method for blood flow in the heart, I. Immersed elastic fibers in a viscous incompressible fluid," *J. Comp. Physics*, Vol. 81, No. 2.
- [4] Simpson, J. E., 1987, *Gravity currents in the environment and the laboratory*, Ellis-Horwood Ltd.
- [5] Tryggvason, G., 1988, "Numerical simulations of the Rayleigh-Taylor instability," *J. Comput. Phys.*, Vol. 75, No. 2, 253-282.
- [6] Zufiria, J. A., 1988, "Vortex-in-cell simulation of bubble competition in a Rayleigh-Taylor instability," *Phys. Fluids*, Vol. 31, No. 11, 3199-3212.