

파손된 기름 탱크로부터의 유출양 산정을 위한 기초 연구

김우전⁽¹⁾, 이영연⁽²⁾

A Preliminary Study for the Prediction of Leaking-Oil Amount from a Ruptured Tank

by

Wu-Joan Kim⁽¹⁾ and Young-Yeon Lee⁽²⁾

요 약

바다에서 발생하는 유조선 등으로부터의 기름 유출사고는 해양환경을 크게 훼손하는 재앙에 속한다. 이러한 사고에 효과적으로 대응하기 위해서는 사고의 초기에 기름의 유출량을 정확히 판단하여 그에 적절한 대응방법을 수립하는 것이 필요하다. 기름 유출량의 추정을 위해서 사용되는 가장 간단한 방법은 토리첼리의 평형관계식을 사용하는 것이다. 하지만 이러한 평형관계식은 관성력과 점성력이 무시되었기 때문에 실제의 현상과는 다소 거리가 있다. 본 논문에서는 탱크로부터의 기름 유출양 산정을 위한 기초적인 실험과 수치계산을 수행하였다. 소형 유리 수조에 상자모양의 아크릴 기름탱크를 설치하고 종횡비가 다른 사각형의 유출구를 빠져나가는 기름의 양과 모양을 계측하였다. 그리고 유한체적법과 VOF법 등의 CFD 기술을 활용하여 기름과 물의 유동을 수치 시뮬레이션 하였다. CFD 계산결과는 실험에서 계측된 값과 좋은 일치를 보였으며, 복잡한 해난사고에서의 유출양 산정을 위한 CFD 기술의 활용가능성을 확인할 수 있었다. 본 논문의 실험조건에서 기름의 유출속도는 유출구의 형상에 따라 결정되는 유출구 내부의 마찰력에 의해 달라지며, 토리첼리 평형관계식으로부터 얻어지는 유출속도의 35~55%임을 알 수 있었고, 만약 유출구의 두께를 무시하면 종횡비에 상관없이 52%로 일정하게 추정되었다.

Abstract

When an oil-spilling accident occurs at sea, it is of the primary importance to predict the amount of oil leakage for the swift response and decision-making. The simplest method of oil-leakage estimation is based on the hydrostatic pressure balance between oil inside the tank and seawater outside of leakage hole, that is the so-called Torricelli equilibrium relation. However, there exists discrepancy between the reality and the Torricelli relation, since the latter is obtained from the quasi-steady treatment of Bernoulli equation ignoring viscous friction. A preliminary experiment has been performed to find out the oil-leaking speed and shape. Soy-bean oil inside the inner tank was ejected

(1) 정희원, 해양(연) 해양시스템안전연구소 해양운송시스템개발단, wjkim@kriso.re.kr

(2) 해양(연) 해양시스템안전연구소 해양운송시스템개발단

into water of the outer tank through four different leakage holes to record the amount of oil leakage. Furthermore, a CFD (Computational Fluid Dynamics) method was utilized to simulate the experimental situation. The Navier-Stokes equations were solved for two-density flow of oil and water. VOF method was employed to capture the shape of their interface. It is found that the oil-leaking speed varies due to the frictional resistance of the leakage hole passage dependent on its aspect ratio. The Torricelli factor relating the speed predicted by using the hydrostatic balance and the real leakage speed is assessed. For the present experimental setup, Torricelli factors were in the range of 35%~55% depending on the aspect ratio of leakage holes. On the other hand, CFD results predicted that Torricelli factor could be 52% regardless of the aspect ratio of the leakage holes, when the frictional resistance of leakage hole passage was neglected.

Keywords: Oil leaking, Tank, CFD, Torricelli factor, Aspect ratio

1. 서 론

바다에서의 기름 유출사고는 알래스카 연안에서 발생한 엑스 발테스호, 프랑스 서부해안에서 발생한 에리카호, 그리고 우리나라에서 발생한 시프린스호의 사고 등에서 알 수 있듯이 넓은 지역에 걸쳐 장기간 해양 환경을 파괴하는 재앙으로 간주된다. 이러한 유조선의 좌초 또는 충돌사고를 효과적으로 수습하기 위해서는 초기에 적절한 대응 전략을 신속하게 수립하여 피해를 최소화하는 노력을 집중해야 한다. 그리고 효과적인 초기 대응 방법을 도출하기 위해서는 사고 선박으로부터 유출되는 기름의 양을 신속하고 정확하게 파악하여야 한다. 이러한 초기 기름 유출량을 부정확하게 산정하게 되면 사고수습 방법의 선택에 혼선을 초래할 수 있으며, 자칫 잘못하면 사고의 피해가 넓은 지역으로 확산될 수 있다는 점에서 특별히 주의하여야 한다. 또한 사고에 대한 배상 과정에서 보험회사, 사고 당사자, 피해자간의 이견을 권위있게 판정할 수 없어 사고규모 및 책임 문제의 부정확한 판단으로 인한 사회 문제를 야기할 수 있다. 특히 외국 선박의 사고시 기술적 책임 소재와 규모를 판정할 수 있는 국내기술의 확보는 시급한 과제라고 할 수 있다.

현재 사용되고 있는 사고 선박으로부터의 기름 유출량 산정 프로그램은 정수압의 평형 관계(Torricelli's law)만을 고려한 간단한 유체 정역학 계산식을 사용하고 있다(Kreyszig[1983]). 이러한 정역학 관계식의 경우 유동의 시간에 따른

변화와 점성의 효과 등이 무시되었기 때문에 실제의 현상과는 다소 거리가 있는 예측 결과를 주는 경향이 있다. 정확한 유출량의 산정을 위해서는 유체역학적인 관계를 모두 고려한 유동의 운동방정식을 해석하는 좀 더 심도 깊은 연구가 필요하다 할 수 있다. 일본에서는 유조선으로부터 유출되는 기름을 해석하기 위해 수치계산기법을 도입하였으며(石田駿一, 白勢 康[1996]), 국내에서도 유출유의 궤적 등을 연구하기 위해 수치계산을 사용한 예가 있다(송무석, 한재훈[2000]).

본 연구에서는 현재 사용되고 있는 Torricelli 평형 관계식의 정확성을 살펴보고 실제의 유동현상을 파악하기 위해서 탱크로부터의 기름 유출량을 직접 계측할 수 있는 모형 수조를 제작하였다. 이 소형 수조 안에 기름탱크를 설치하고 기름탱크의 측면과 바닥면에 설치된 사각형의 구멍을 통하여 유출되는 기름의 양과 유출유의 거동을 기록하였다. 그리고 최근에 여러 유체공학 분야에서 활발히 이용되고 있는 계산유체역학(Computational Fluid Dynamics : CFD) 기법을 이용하여 기름의 유출을 직접 시뮬레이션 하였다. CFD 계산 결과와 실험에서 관측된 값을 직접 비교함으로써 실제 해난사고에서의 복잡한 기름 유출량 산정에 CFD 기술을 활용할 수 있는지에 대한 가능성을 평가하였다. 또한 실험과 CFD 계산 결과를 바탕으로 본 연구의 조건에서 관측된 기름의 유출속도와 정수압 평형 관계식으로부터 도출된 유출속도의 비율을 의미하는 Torricelli factor를 산출하였다.

2. 토리첼리 평형 관계식

우선 실험과 수치계산 방법 및 결과를 검토하기 전에 앞에서 언급된 토리첼리 평형 관계식 (Torricelli's equilibrium relation) 에 대하여 검토하기로 한다. 토리첼리 평형관계식은 준 정상 상태(quasi-steady state)를 가정하고, 베르누이 방정식에서 정수압의 차에 의해 발생할 수 있는 운동에너지, 즉 속도의 크기를 정의하고, 유체가 유출됨으로써 발생하는 탱크내의 정수압 변화와의 관계를 고려한 1차 미분 방정식을 세워서 그 해를 구하면 토리첼리 평형관계식을 얻을 수 있다.

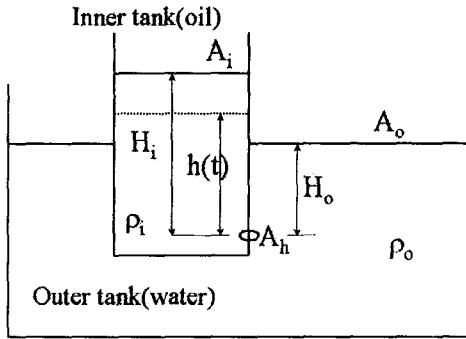


Fig. 1 Schematics of inner and outer tanks

Fig. 1에서 보이는 바와 같이 물이 들어있는 수조 안에 존재하는 내부 기름탱크에서 기름이 유출되는 상황에 대하여 생각하기로 한다. 기름이 유출되기 시작한 때로부터 시간 t 가 경과한 후, 기름 유출구의 위치로부터 내부탱크 기름의 끝단 높이를 $h(t)$ 라고 하고, 1차 미분 방정식의 해를 구하여 평형 관계식을 유도하면,

$$h(t) = \frac{1}{1 + \left(\frac{A_i}{A_o}\right)} \times \left[\frac{g \left(\frac{A_h}{A_i}\right)^2 \left(1 + \frac{A_i}{A_o}\right)^2}{2 \left(1 - \left(\frac{A_h}{A_i}\right)^2\right)} (TF t - t_{\max})^2 + \frac{\rho_o}{\rho_i} H_o + \frac{A_i}{A_o} H_i \right] \quad (1)$$

$$t_{\max} = \frac{\left(\frac{A_i}{A_h}\right)}{1 + \left(\frac{A_i}{A_o}\right)} \times$$

$$\sqrt{\frac{2}{g} \left[1 - \left(\frac{A_h}{A_i}\right)^2\right] \left[H_i - \frac{\rho_o}{\rho_i} H_o \right]}$$

과 같은 식으로 표현된다. 이 때, 유출구멍에서 기름의 유출속도는

$$V_h(t) = TF \sqrt{\frac{2g}{1 - \left(\frac{A_h}{A_i}\right)^2}} \times$$

$$\sqrt{\left[\left(1 + \frac{A_i}{A_o}\right) h(t) - \left(\frac{\rho_o}{\rho_i} H_o + \frac{A_i}{A_o} H_i\right) \right]} \quad (2)$$

으로 정의된다. 여기에서 TF 는 Torricelli Factor로서 점성의 효과 등을 포함한 실제 유출속도와 베르누이 방정식에서 정수압의 차이로 발생하는 속도와와의 비율을 의미한다. 다시 말하면 점성의 효과 등을 무시하고 정수압의 평형만을 고려할 때의 TF 는 1.0 이다. 그리고 A_o , A_i , A_h 는 각각 외부 탱크의 수선면적, 내부탱크의 수선면적, 유출구의 면적을 의미하고, H_o , H_i 는 기름이 유출되기 시작한 때인 $t=0$ 에서의 유출구로부터 외부 탱크 및 내부 탱크의 수면까지의 초기 높이를 가리킨다. 또한 ρ_o 와 ρ_i 는 초기에 외부 탱크와 내부 탱크에 각각 담겨있는 유체의 밀도를 나타내고, g 는 중력가속도를 의미한다. t_{\max} 는 정수압이 평형을 이루는 시간이며, 시간 t 까지의 총 유출량 $Q(t)$ 는

$$Q(t) = A_i [H_i - h(t)] \quad (3)$$

로 쓸 수 있다.

만약에 유출구의 구멍이 내부 탱크의 수선면적에 비해 아주 작고, 외부 탱크의 수선면적이 상대적으로 매우 큰 경우에는 $\frac{A_h}{A_i} \ll 0$, $\frac{A_i}{A_o} \ll 0$ 라 할 수 있으므로

$$h(t) = \frac{g}{2} \left(\frac{A_h}{A_i} \right)^2 (TFt - t_{\max})^2 + \frac{\rho_o}{\rho_i} H_o \quad (4)$$

$$t_{\max} = \left(\frac{A_i}{A_h} \right) \sqrt{\frac{2}{g} \left[H_i - \frac{\rho_o}{\rho_i} H_o \right]}$$

로 표현될 수 있다. 그리고 유출구명에서의 기름의 유출속도는

$$V_h(t) = TF \sqrt{2g \left[h(t) - \frac{\rho_o}{\rho_i} H_o \right]} \quad (5)$$

의 간단한 형태가 된다.

위의 관계식은 정수압의 평형이 이루어질 때까지 발생하는 유출 속도와 기름 탱크내의 기름높이 변화를 나타내며, 점성에 의한 영향이나 유출구의 모양 등에 의한 차이는 무시된다. 여기에서 각 기름 유출 상황에 알맞은 TF의 값을 선택함으로써 (1)식에서 무시하고 있는 점성의 영향이나 유출구의 형태에 의한 효과를 적절히 반영할 수 있을 것이다. 하지만 TF의 값이 경우에 따라 달라지기 때문에 실험이나 수치계산을 이용한 여러 가지 유출 케이스에 대한 해석을 통해 TF의 값을 결정하여야 한다. 본 연구에서는 우선 식용대두유가 측면과 바닥면에 설치된 종횡비가 각각 다른 네 가지 구멍을 통하여 물 속으로 유출되는 경우에 대한 TF의 값을 구하였다.

3. 기름유출 탱크 실험

탱크로부터 유출되는 기름의 양과 형태를 측정하기 위하여 Fig. 2에서 보인 바와 같이 소형 기름 유출 시험수조가 제작되었다. 실험을 수행하는 동안 유출상황을 효과적으로 관측하기 위해서 수조, 즉 외부탱크는 강화유리를 사용하여 탱크의 안쪽 면을 기준으로 147.5 cm (길이) × 67.5 cm (폭) × 80 cm (높이)의 크기로 제작되었다. 수조의 내부에 두께 1 cm를 가지는 아크릴을 이용하여 30 cm (내부 길이) × 30 cm (내부 폭) × 40 cm (높이)의 기름통을 설치하였다. 외부 수조의 상부에 레일이 있고 그 레일에 기름통이 설치되기 때문에 수조의 원하는 위치에 내부 기름통을 손쉽게 위치시킬 수 있도록 하였다. 기름통의

바닥면과 한쪽 측면은 유출구를 설치하여야 하기 때문에 두께 1.5 cm의 아크릴을 사용하였다.

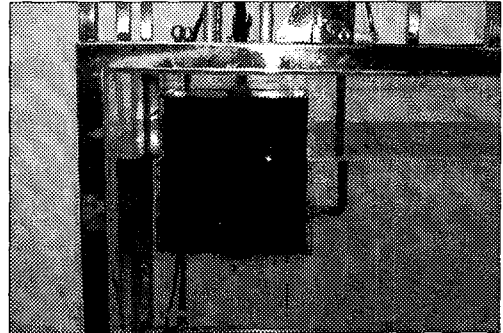


Fig. 2 Oil leakage measurement tank

유출구는 알루미늄을 사용하여 제작하였으며, 네 가지 형태의 사각형 유출구를 쉽게 교체할 수 있도록 측면과 바닥면에 나사로 체결하게 하였다. 고무 링을 사용하여 기름이 연결부에서 스며 나오지 않도록 하였으며, 순간적으로 유출구를 열 수 있는 개폐 장치를 제작하였다. 기름통에 부착된 스윙 암의 한쪽 끝에 실리콘 고무를 붙인 기름 막이판을 장착하여 유출구에 밀착시켜서 평상시에는 기름이 새지 않도록 하였고, 다른 끝에는 공압 밸브를 연결하여 순간적으로 스윙 암을 움직여서 유출구의 개폐를 조절하였다. 유출구는 사각형 형태로서 폭과 높이가 각각 1.2 cm × 1.2 cm, 2.4 cm × 0.6 cm, 3.6 cm × 0.4 cm, 4.8 cm × 0.3 cm인 구멍으로 이를 7.4 cm × 4.6 cm의 알루미늄 판에 가공하여 바꾸어가며 부착할 수 있도록 만들었다. 기름통의 바닥면의 중앙에 유출구를 설치하여 탱크 바닥으로부터의 유출상황을 재현하고자 하였고, 기름통의 한쪽 측면에는 기름통 내부 바닥면으로부터 5 cm 되는 지점에 중심이 위치하도록 유출구를 설치하였다. 바닥면과 유출구가 설치된 측면 아크릴 벽의 두께가 1.5 cm이기 때문에 유출구에는 1.5 cm길이의 유출통로가 존재하는 셈이 된다.

유출되는 기름의 양을 측정하기 위해서 내부탱크의 기름높이 변화를 기록하였다. 내부 기름탱크의 상부에 linear potentiometer(LP-300F, Midori)를 설치하였고, 그 끝에 buoy를 부착하여 기름 높이의 변화에 따라 상하로 이동하게 하였다. Linear potentiometer는 우선 내부 탱크에 물

을 채우면서 buoy의 상하이동에 따른 신호의 변화를 탱크에 부착된 자의 눈금과 비교하여 캘리브레이션 하였다. Potentiometer의 신호는 analog-digital converter(DaqBook)를 이용하여 컴퓨터에 기록하였다. 그리고 실험 중에 기름이 유출되는 모양을 기록하기 위해 디지털 비디오 리코더를 이용하여 기름의 유출상황 및 유출유체의 거동을 기록하였다.

실험은 내부 탱크에 기름을 30 cm의 높이로 채우고, 외부 수조에 내부 기름 탱크의 안쪽 바닥면으로부터 20 cm되는 높이까지 물을 채운 후 수행하였다. 즉, 초기에 10 cm 정도의 높이 차가 존재하게 된다. 내부 탱크의 기름이 나오면서 외부 탱크의 수면에 유출된 기름이 쌓이게 된다. 이는 외부 탱크의 수면이 상승하는 효과를 가져오게 된다. 내부 탱크의 수선면적은 0.09 m² 이며, 외부 수조의 실제 수선면적은 0.891625 m² 이므로 외부 탱크는 내부 탱크 기름의 높이감소에 대하여 11.7 % 정도의 높이 증가를 겪게 된다. 이러한 관계는 실제 넓은 바다에서 일어나는 현실과는 다른 실험수조내의 상황이지만 결과의 정확한 비교를 위해서 CFD를 이용한 수치계산과 토리첼리 평형관계식의 계산에도 외부 탱크의 수위 증가를 고려하였다.

기름은 시중에서 식용유로 판매되는 대두유를 사용하였다. 물에는 녹지 않으면서 기름에만 잘 용해되는 착색안료인 Orimax Blue II N (Orient 화학, # 061301)을 사용하여 대두유를 착색하여 관측이 용이하게 하였다. 대두유의 밀도 및 점성계수는 Smithsonian table[1954]과 대두유 제조업체(제일제당 고객지원실[2001], 이 현[2001])에서 제공한 표를 바탕으로 온도에 따른 변화를 밀도의 경우에는 직선으로, 점성계수의 경우에는 3차 곡선으로 가정하여 사용하였다. 이렇게 하여 얻어진 대두유의 밀도(ρ) 및 운동학적 점성계수(ν)는 온도(T)에 따라 다음과 같이 주어진다.

$$\rho = -0.67 T + 934.3 \quad (6)$$

$$\nu \times 10^5 = -0.8679 \times 10^{-4} T^3 + 0.01307 T^2 - 0.72765 T + 16.836 \quad (7)$$

여기서 온도 T 는 섭씨온도(°C)이고, 밀도 ρ 와 운동학적 점성계수 ν 의 단위는 각각 kg/m^3 과

m^2/sec 이다. 실험 당시의 온도는 25°C 이었고, 이 때의 대두유와 물의 밀도는 각각 917.55 와 997.00 (kg/m^3) 이었으며, 운동학적 점성계수는 각각 0.546×10^{-4} 과 0.890×10^{-6} (m^2/sec) 이었다. 따라서 기름의 밀도와 운동학적인 점성계수는 각각 물의 0.92 배와 61 배로 확인되었다.

4. 수치계산

수치 계산을 위한 기본 좌표계로는 수조의 길이 방향을 x 축, 중력과 반대 방향인 연직 상방향을 z 축, 그리고 수조의 폭 방향을 y 축으로 하는 Cartesian 직교 좌표계를 사용하였고, 좌표계의 원점은 내부 기름탱크의 중심선이 초기 수면과 만나는 점에 위치시켰다. 물과 기름의 두 가지 유체의 유동을 동시에 해석해야 하므로 밀도 및 점성계수가 시간 및 위치에 따라서 변하는 일반적인 유체유동의 지배방정식을 생각하여야 한다. 하지만 물과 기름은 여전히 비압축성 유체로 간주될 수 있고, 물이나 기름의 유체입자를 따라서는 유체의 밀도나 점도 등의 물성이 변하지 않는다. 이러한 두 밀도를 가지는 유체 유동의 지배방정식인 연속 방정식과 Navier-Stokes 방정식은 직교 좌표, $x_i = (x, y, z)$ 를 사용해서 다음과 같이 쓸 수 있다. 여기에서 Cartesian tensor에 대한 합산 규약(summation convention)이 사용되었다. 우선, 질량보존의 법칙인 연속방정식을 일반적인 형태로 쓰면,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i)}{\partial x_i} = 0 \quad (8)$$

밀도가 다른 두 가지 유체의 유동이 서로 화학적으로 섞이지 않는다고 가정하면(immiscible assumption), 여전히 비압축성의 성질을 가지고 있다. 이러한 비압축성 조건을 사용하면 (8)식은 일반적인 비압축성 유체의 연속방정식과 같은 형태인

$$\frac{\partial u_i}{\partial x_i} = 0 \quad (9)$$

이 된다. 이에 따라서 비압축성 유동의 해석에 사용되는 연속방정식, 즉 압력방정식의 해법을 똑같이 적용할 수 있게 된다. 한편, 유체 유동의 운동량 보존의 법칙인 Navier-Stokes 방정식은

$$\frac{\partial(\rho u_i)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u_i u_j)}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i \quad (10)$$

로 표시된다. 이 때, 유동은 대부분의 운동량을 가지는 기름의 점성계수가 크기 때문에 층류 유동이라고 가정하였다. 그러므로 점성에 의한 응력항은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\tau_{ij} = \mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \quad (11)$$

여기에서 표면장력에 의한 효과는 무시하였다. CFD 기법에서 표면장력을 처리하는 방법은 두 유체의 경계면 조건식에 포함시키거나 경계면 격자내 유체의 체적에 걸쳐서 분포시키는 방법(continuum surface force model)이 있으나 두 방법 모두 처리과정이 간단하지 않을 뿐만 아니라 유출양의 산정에는 표면장력의 효과가 크지 않을 것으로 예상되어 본 연구에서는 표면장력의 효과는 고려하지 않았다. 하지만 유출유의 거동이나 실험에서 관측된 작은 유적의 발생 등은 표면장력과 밀접한 관계가 있다고 할 수 있다.

본 연구에서 계산한 유동은 밀도가 다른 두 가지 유체가 함께 거동하는 경우에 해당된다. 이러한 다밀도(multi-density) 또는 다상(multi-phase) 유동의 해석에는 여러 가지 방법이 사용되고 있다. 통상 두 유체의 경계면을 처리하는 방법에 따라 경계추적법(interface-tracking method)과 경계포착법(interface-capturing method)으로 구분한다(Muzaferija & Peric[1999]). 경계추적법은 매순간 경계면에서의 입자를 추적하거나 경계면 자체의 이동을 추적하여 입자를 재분포하거나 또는 격자계를 재구성하여야 한다. 그리고 입자를 추적하는 방법은 3차원의 복잡한 유동에 대해서는 동시에 수많은 입자를 추적해야 하므로 너무 계산이 복잡해진다. 또한, 경계면을 따라 격자계를 재구성하는 경우에 경계면의 모양이 심하게

뒤엉켜있는 경우에는 계산이 불가능하게 되는 약점이 있다. 한편, 경계포착법은 경계추적법에 비하여 경계면의 날카로운 정도(sharpness)는 떨어지나 훨씬 강건도(robustness)가 뛰어나서 복잡한 유동의 계산에도 성공적으로 활용되고 있다.

최근 많이 사용되고 있는 경계포착법에는 VOF(Volume-Of-Fluid)법과 level-set법이 있다. 두 방법 모두 경계면을 정의하기 위해 새로운 변수를 도입하고 그 변수에 대한 편미분 방정식 형태의 이송방정식을 정의하고, 그 이송방정식의 해를 매시간 운동량 이송방정식 및 연속방정식의 해와 함께 구하는 방법을 사용하고 있다. 본 연구에서는 이론이 간명하고 이미 복잡한 유동의 해석에 사용되어 검증된 바 있는 VOF법을 사용하였다. VOF법은 하나의 격자셀 안에 존재하는 유체의 비를 VOF 값으로 나타내고 VOF 값이 1 이면 물, 그리고 0 이면 기름을 의미하게 된다. 하지만 그 경계면이 칼로 자른 듯 구분되지 않기 때문에 통상 VOF=0.5 인 면을 물과 기름의 경계면으로 삼는 것이 보통이다. 이 경우 물과 기름의 영역을 따로 구분해서 수치계산의 해를 구할 수도 있지만, 격자계의 영역을 나누어주어야 하며 이산화 및 선형방정식의 해를 구하는 과정이 복잡해지는 약점이 있다. 본 연구에서는 최근 많이 도입되고 있는 단일유체(single fluid)를 가정한 VOF법을 적용하여 유체를 VOF 값에 따라서 밀도와 점도가 바뀌는 하나의 유체로 가정하고 다음과 같이 유체의 물성을 정의하였다.

$$\begin{aligned} \rho &= \rho_1 c + \rho_2(1 - c) \\ \mu &= \mu_1 c + \mu_2(1 - c) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서 아래첨자 1은 물, 2는 기름을 의미한다. 그리고 밀도 (ρ)와 동점성 계수 (μ)는 VOF 함수의 값(c)에 따라서 정의된다. 이 때, VOF 값은 처음의 유체영역에 따라서 상수(물은 1, 기름은 0)로 정해지는 값이므로 유체의 입자 흐름을 따라가면 변하지 않는 상수 값을 가진다. 이를 이용하여 VOF 값에 대한 편미분 방정식을 다음과 같이 세울 수 있다.

$$\frac{Dc}{Dt} = \frac{\partial c}{\partial t} + u_j \frac{\partial c}{\partial x_j} = 0 \quad (13)$$

시간에 따라 유출구를 통하여 기름통을 빠져나와 물 속을 움직이는 두 밀도 유동의 해석을 위해서 매 시간 (9)식, (10)식, (13)식을 만족하는 해를 구하여야 한다. 이를 위하여 이미 선체주위의 유동해석을 위해 개발된 바 있는 유한차분법을 이용한 수치계산 방법(김우전 등[2000])을 사용하였다. 매 시간 정확한 해를 얻기 위해 2차의 정도를 가지는 Euler-implicit 방법을 사용하여 시간적분을 수행하였다. (10)식의 운동량 이송 방정식에서는 대류항의 이산화를 위해서는 MUSCL법을, 확산항의 경우에는 중앙차분법을 사용하였고, 속도-압력 연성을 위해서 SIMPLE 법을 사용하였다. 이산화된 방정식으로부터 얻어진 선형대수 방정식의 해를 SIP법을 이용하여 풀었다. 그리고 (13)식의 VOF 함수에 대하여서는 대류항의 이산화가 매우 중요한데, 간단하면서도 그 효과가 여러 유동의 계산에서 입증된 바 있는 HRIC법을 사용하였다. 본 연구에서 사용된 수치계산 방법의 자세한 내용은 참고문헌(Ferziger & Peric[1999], Muzaferija & Peric[1999], 김우전 등[2000])에 기술되어 있다.

본 연구에서는 실험에서 사용된 외부 수조 및 내부 기름탱크와 같은 크기의 영역에 격자계를 생성하여 수치계산을 수행하였는데, 다만 문제를 간단하게 하기 위해서 공기와 기름이나 물의 경계면의 처리는 수위나 기름 높이에 따라 해당되는 압력을 투명한 경계면에 시간에 따라 지정해주는 방법을 사용하였다. 그리고 측면에서 유출되는 경우, 반대편에는 거의 유체의 움직임이 없기 때문에 계산 영역에서 제외하였다. 대칭면의 한쪽만 계산을 수행하였으며, 사용된 격자계의 수는 100,000개 정도였다. 계산의 시간 간격은 0.01초로 하여 300초까지 계산을 수행하였다. 각 시간에 (9)식, (10)식, (13)식을 모두 만족하는 유동의 해를 구한 후, 유출구에서 기름의 유출속도를 적분하여 유출량을 계산하였다.

5. 결과 해석

여기에서는 2절의 토리첼리 평형관계식, 3절에서 설명한 기름유출 수조에서의 실험, 4절의 CFD기법을 활용한 수치계산 등의 결과를 비교하고, 물이 담긴 외부수조 안에 설치된 내부 기름탱크의

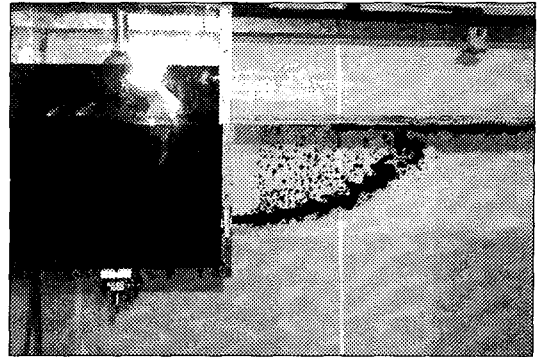


Fig. 3 Oil leakage through a hole in side wall

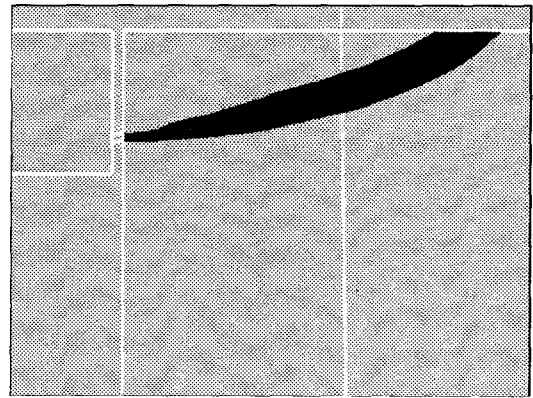


Fig. 4 CFD prediction of side-wall leakage

측면과 바닥면에 설치된 유출구를 통한 기름 유출양 및 유출유의 거동 그리고 유출구의 형상에 따른 유출량의 변화 등에 대하여 살펴보기로 한다.

5.1 측면 유출

실험에서 관측된 기름탱크의 측면 유출구를 통해 빠져나오는 기름의 모습을 Fig. 3에 보이고 있다. 유출구를 제트처럼 빠져나온 기름은 외부수조의 물보다 가벼우므로 부력으로 인해 수면 쪽으로 상승하게 된다. 이 때, 빠져나오는 기름의 모양을 관측해보면, 주된 흐름방향이 횡으로 또는 상하로 흔들리는 불안정성(instability)을 보이는 것을 알 수 있다. 그리고 수면에 가까이 와서는 불안정성이 확대되어 여러 덩어리로 분리되며 수

면에 부딪혀 퍼져 나가는 모양을 볼 수 있었다. 또한 작은 유적(droplet)이 물과 기름의 경계면에서 떨어져나가면서 수면을 향해 곧장 위로 올라가는 모습이 관측되었다. Fig. 4에서는 수치계산을 통하여 얻어진 기름유출의 어느 순간에서의 모양을 보이고 있다. 전체적인 궤적은 재현하고 있으나 실험결과에서 보이는 현상 중 불안정성이나 작은 유적들의 생성은 재현할 수 없었다. 이는 수치계산이 표면장력의 효과를 무시하였을 뿐만 아니라 기름과 물의 경계면을 정의하는데 사용된 VOF 방법이 경계면을 아주 날카롭게 구분해 주는 목적으로는 부족했기 때문이라고 생각된다. 하지만 CFD 기법을 이용하여 추정된 기름의 유출량이 Fig. 5에서 보인 바와 같이 실험결과와 잘 일치하기 때문에 CFD 기법이 유출량의 산정 및 유체유동의 개략적인 거동해석을 위해서 충분히 활용될 수 있다고 판단된다.

본 연구의 실험 및 계산에서 측면 유출구의 위치는 수면아래 15 cm 지점에 위치하고 있으며, 초기의 기름높이는 유출구로부터 25 cm 이었다. Fig. 5에서는 측면에 설치된 넓이 144 mm²를 가지는 네 개의 유출구(12 mm × 12 mm, 24 mm × 6 mm, 36 mm × 4 mm, 48 mm × 3 mm)로부터의 유출량을 나타내는 파라미터인 기름탱크내의 높이 감소량 즉, (3)식의 $[H_i - h(t)]$ 을 도시하고 있다. 수치계산의 결과는 실험에서 계측된 기름탱크의 높이감소량과 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 위에서 설명한 대로 VOF법을 사용한 CFD 기법이 비록 유출유의 거동에 대하여 표면장력의 효과나 불안정성을 모사하지는 못하였다 할지라도 정수압의 차이와 점성, 관성력 등을 포함한 유체의 운동방정식의 해를 시간에 따라 구함으로써 정확한 유출량의 추정이 가능했다고 생각된다. 초기에는 내부 기름탱크의 기름높이에 의한 압력이 바깥쪽의 수면의 높이에 의한 압력보다 훨씬 크기 때문에 유출이 빠르게 이루어지나 기름이 유출되면서 내부 기름탱크의 기름높이 감소로 인해 생기는 유출구의 내부압력 감소로 말미암아 유출의 속도는 차츰 줄어들게 된다.

또한 Fig. 5로부터 쉽게 알 수 있는 사실은 유출구의 형상에 따라서 유출 속도가 달라진다는 사실이다. 유출구가 정사각형에서 종횡비가 커질수록 높이감소의 속도, 즉 기름유출의 속도가 감

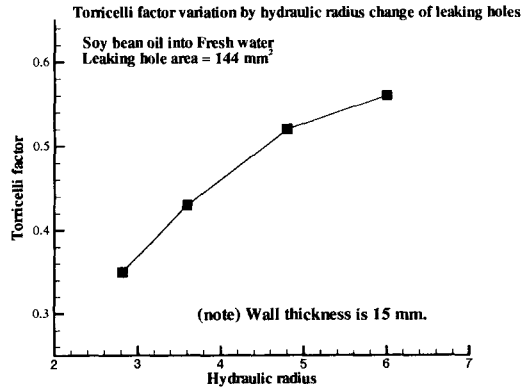


Fig. 5 Change of Torricelli factors by hydraulic radius of rectangular leakage holes

소하는 것을 알 수 있다. 유출구의 형상에 따라 기름의 유출속도가 차이를 보이는데, 이는 같은 면적을 가지는 유출구라 하더라도 형상, 즉 종횡비(aspect ratio)에 따라 기름의 유출통로인 벽면 두께 15 mm에 해당하는 사각 관로의 측면 침수 표면적이 차이가 나는 점에 기인한다고 할 수 있다. 유출 통로에서의 마찰저항은 같은 유출구의 면적이라고 하더라도 종횡비가 클수록 통로의 침수표면적이 커지기 때문에 점성유동의 입장에서 유출을 방해하는 성분이 커서 유출 속도가 상대적으로 감소한다고 추정할 수 있다. 또한 Fig. 5에 표시된 TF 가 1.0인 조건의 토리첼리 평형관계식의 결과는 유출의 속도를 크게 과대평가하고 있음을 보여주고 있다. 이 결과를 바탕으로 각 유출구의 형상에서의 TF 는 Fig. 5의 가로축인 시간의 배율로 산정될 수 있다. 이렇게 추정된 Torricelli factor를 각 유출구의 hydraulic radius에 대하여 Fig. 6에 도시하였다. 사각형 유출구의 가로를 a, 세로를 b 라고 할 때, hydraulic radius R_h는 유출구의 면적 A_h과 perimeter P_h를 이용하여 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_h = 2A_h / P_h \quad (14)$$

$$A_h = ab, \quad P_h = 2(a + b)$$

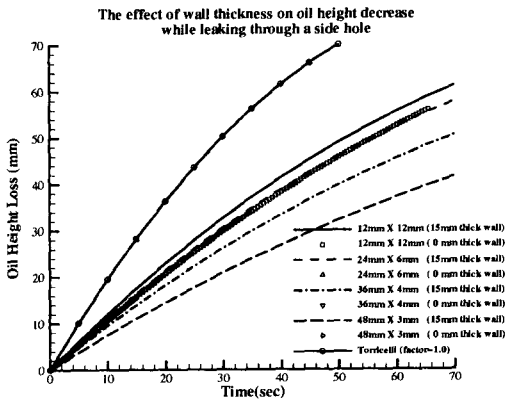


Fig. 6 The effect of wall thickness(CFD results)

Torricelli factor는 각 유출구의 점성유동 형태를 대표할 수 있는 hydraulic radius에 따라 35%에서 55%까지의 값의 변화를 보여주고 있다. 층류 유동에서 관내 유동의 마찰저항 계수는 통상 hydraulic radius에 반비례한다. 그리고 마찰저항이 클수록 즉 hydraulic radius가 작을수록 기름의 점성이 유출을 방해하기 때문에 유출속도는 감소하고 Torricelli factor 또한 작은 값을 가지는 것을 알 수 있다.

만약 위에서 얻어진 Torricelli factor를 유출구의 종횡비(aspect ratio)에 대하여 그려보면 Fig. 7에 도시한 바와 같이 선형적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 물론 이는 현재의 실험상황에 국한된 결과이지만, 유출구의 형상에 따라 달라지는 마찰저항에 의해 결정되는 유출속도의 감소율이 유출구의 종횡비와 선형적인 관계를 가지고 있다는 다소 흥미로운 결과를 얻을 수 있었다. 하지만 이러한 결과는 내부 기름탱크의 벽면 두께가 15 mm이며, 대두유가 물 속으로 층류 유동을 형성하며 유출되는 제한된 상황에서 얻어진 결과라는 사실을 다시 한번 언급해둔다.

유출구 통로의 벽면에 작용하는 마찰력의 영향을 따로 살펴보기 위해서 내부 기름탱크의 측면을 두께가 없는 가상의 벽면으로 설정하고, Fig. 5에서 이미 계산한 바 있는 유출 상황을 다시 한번 수치 시뮬레이션 하였다. 즉, 이 경우에는 내부 탱크의 벽면 두께가 0 mm이기 때문에 벽면 통로에서의 마찰력은 없다고 생각할 수 있고, 내부탱크를 빠져 나오는 기름의 유선과 국부적인

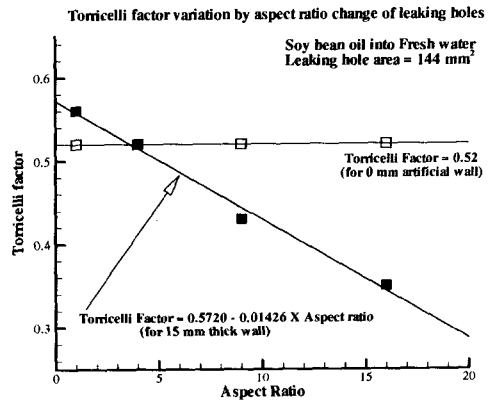


Fig. 7 Change of Torricelli factors by aspect ratio of rectangular leakage holes

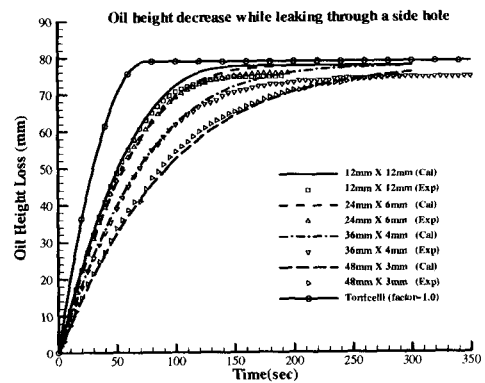


Fig. 8 Time variation of oil height while leaking through a hole in side wall

유동 패턴의 변화, 그리고 그에 따른 압력 강하 등이 Torricelli factor를 결정한다고 할 수 있다. Fig. 8에 보인 CFD 시뮬레이션 결과는 벽면 두께가 0 mm인 가상의 경우에는 유출구의 형상, 즉 종횡비에 상관없이 거의 비슷한 유출 속도를 보인다는 것을 알 수 있다. 그리고 그 유출량은 벽면 두께가 15 mm인 경우의 24 mm × 6 mm 유출구를 통한 유출량과 거의 비슷한 결과를 보이고 있다. 이를 다시 Torricelli factor로 도시하면 Fig. 7에 보인 바대로 52%의 일정한 값을 가지고 있다. 실제 해난사고에서 선체의 측면에 파공이 생기는 경우에는 벽면의 두께가 파공의 크

기에 비해 매우 작기 때문에 두께 0 mm의 가상 벽면을 통한 유출상황에 대한 수치계산에서 산정된 결과가 오히려 실제 현상에 가까울 수 있다는 다소 성급한 추정을 해볼 수 있다.

여기에서 특기할 만한 사항은 일부의 경우에는 유출구 통로 측면에서의 마찰저항이 없는 경우가 마찰저항이 있는 경우보다 유출속도가 작다는 사실이다. 유출구의 형상이 12 mm × 12 mm 인 경우에는 15 mm의 유출 통로에 마찰저항이 작용하는 경우의 Torricelli factor가 56%로서 오히려 유출속도가 빠르게 나타나는 결과를 보여주고 있다. 이를 설명하기는 쉽지 않으나 내부 기름탱크에서 유출구로 밀려나오는 유선이 두께가 없는 벽면을 지날 때 흐름의 방향 변화가 심하여 결국은 기름과 물의 경계유선(dividing streamline)을 좁히는 결과를 낳은 것이 아닌가 하는 추정을 할 수 있겠다. 또한 두께가 없는 벽면을 지날 때 바깥면에 좀더 강한 보오텍스가 형성될 수 있으며, 그로 인하여 흐름이 방해받게 되고 국부 압력이 증가할 개연성이 있는 것으로 보인다. 하지만 이러한 현상에 대한 명확한 설명은 좀더 자세한 유출구 근처에서의 국부유동 해석 결과를 필요로 한다고 하겠다.

5.2 바닥면 유출

유출구가 바닥에 있을 경우에 대하여 살펴보기로 한다. 앞에서 설명한대로 내부 기름탱크의 측면에 유출구가 있는 경우에는 유출구에서의 초기속도가 부력방향과 직각이 되기 때문에 유출유가 포물선을 그리면서 상승하는 모습을 보였다. 하지만 유출구가 바닥에 있는 경우에는 유출구에서 빠져나가는 기름의 속도와 정반대 방향으로 부력이 작용하기 때문에 빠져나간 기름이 다시 바닥면으로 올라오게 된다. 다시 올라온 기름은 내부 탱크의 바깥 바닥면을 따라 흘러서 기름탱크의 측면을 타고 올라간다. 하지만 바닥면을 따라서 흐르는 속도는 실제로 횡방향의 외력이 없기 때문에 활발하지 못하고 오히려 바닥면에 기름이 쌓이는 모습이 관측되었다. Fig. 9에서 보이는 바와 같이 유출구를 빠져나온 기름은 어느 정도의 깊이까지 내려온 후 좌우로 흔들리며 다시 상승하며 바닥면에 부딪힌다. 바닥면에 기름이 많이 쌓이게 되면 측면을 따라 위로 상승하게 된다. 초기에는 상승하는 모양이 눈에 띄나 나중에 유

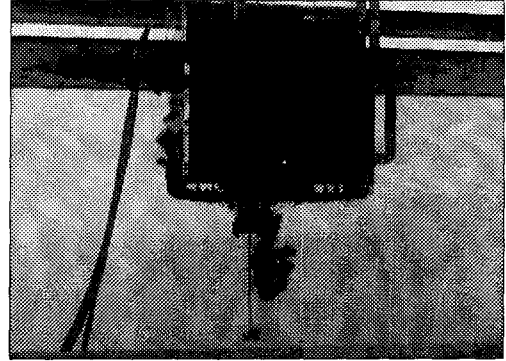


Fig. 9 Oil leakage through a hole in tank bottom

출 속도가 느려지면 벽면을 따라서 띠가 형성되는 모양을 관측할 수 있었다. 바닥면에 고인 기름은 실험 후에도 1 cm 이상의 두께로 남아있어서 다음 실험을 하기 전에 바닥에 쌓여있는 기름을 제거하여야만 하였다.

바닥면에 유출구가 위치한 경우의 실험 및 계산 결과를 Fig. 10에서 보이고 있다. 이미 앞의 측면 유출에 대한 결과에서 짐작할 수 있듯이 CFD 기법을 이용한 수치계산 결과는 이 경우에도 실험값과 좋은 일치를 보이고 있다. 그리고 바닥면을 통한 유출의 경우에도 같은 면적을 가지는 유출구라 하더라도 형상에 따라 통로의 침수표면적이 달라지므로 작용 마찰력의 차이로 인하여 유출속도가 많이 달라짐을 알 수 있다. 이

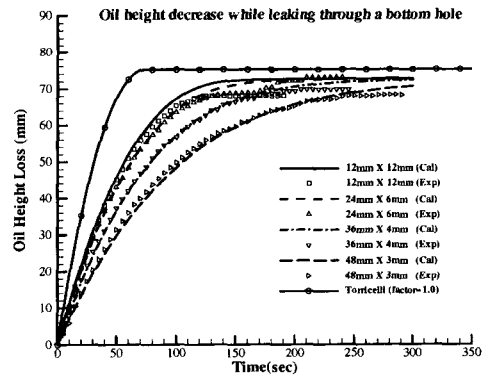


Fig. 10 Time variation of oil height while leaking through a hole in bottom wall

러한 유출구의 종횡비에 대한 Torricelli factor의 변화는 Fig. 7의 측면 유출의 경우와 같이 나타났다. 그러므로 여기에서 반복하지 않기로 한다.

6. 결 론

바다에서의 기름 유출사고를 조기에 효과적으로 수습하기 위해서는 기름의 유출양을 정확히 빠른 시간 내에 판단하여야 한다. 정수압의 평형관계만을 사용하는 토리첼리 평형관계식으로는 점성력과 관성력 등이 포함된 실제 유체유동의 정확한 예측이 어렵고 그로 인하여 유출양의 산정에 오차가 발생할 수 있다. 이러한 점을 개선하기 위해 이상화된 기름 유출상황에 대한 모형시험과 그에 대한 수치계산을 수행하여 보다 정확한 유출양 산정 방법을 구하고자 하였다. 탱크로부터의 기름 유출양을 직접 측정할 수 있으며, 또한 유동 현상을 관찰할 수 있도록 제작된 소형 유리 수조 안에서 내부 기름탱크의 측면과 바닥면에 설치된 사각형의 구멍을 통하여 유출되는 기름의 양을 측정하였다. 그리고 CFD기법을 이용한 수치계산을 수행하여 실험 값과 직접 비교함으로써 향후 수치계산을 활용한 기름 유출문제의 해석을 위한 검증에 도모하고자 하였다.

수치계산 결과는 기름유출 수조에서의 실험 결과와 좋은 일치성을 보였으며, CFD 기법이 이러한 기름 유출상황을 손쉽게 시뮬레이션할 수 있는 효과적인 방법임을 확인할 수 있었다. 그리고 실험 및 계산결과로부터 유출구의 면적이 같다고 하더라도 유출구의 모양에 따라 달라지는 유출 통로에서의 마찰력의 차이로 인하여 유출되는 기름의 속도가 다르며, Torricelli factor 35%~55% 정도에 해당하는 실제 유출속도를 가진다는 사실을 확인하였다. 또한 두께가 없는 가상의 벽면에 대한 수치계산을 수행하였으며, 이 경우에는 유출구의 종횡비에 상관없이 52% 정도의 일정한 Torricelli factor를 가진다는 사실을 밝혔다. 본 연구에서 사용한 방법을 이용하면 향후 다양한 크기와 형태를 가지는 탱크와 파공에 대한 모형 실험과 수치계산을 통하여 실제의 경우에 직접 적용할 수 있는 유출양 산정 관계식과 파라미터 등을 구할 수 있다고 판단된다.

후 기

본 연구는 한국해양연구원 해양시스템안전연구소의 일반사업과제인 “해난사고 예방 및 구난체계 구축사업(PE-00-610)”의 일부로 수행되었음을 밝혀둔다.

참고문헌

- [1] 김우진·김도현·반석호, 2000, “유한체적법을 이용한 상선 주위의 난류유동 계산에 관한 연구”, *대한조선학회 논문집*, 제37권, 제4호, 19~30.
- [2] 송무석·한재훈, 2000, “압력구배가 없는 수중 파이프에서의 액체 오염물 유출에 관한 수치연구”, *한국해양환경공학회지*, 제3권, 제2호, 18~24.
- [3] 이 현(주식회사 신동방), 2001, 식용 대두유의 밀도와 점도 (private communication).
- [4] 제일제당 고객지원실, 2001, 식용 대두유의 밀도와 점도 (internet 자료).
- [5] 石田駿一, 白勢 康, 1996, “탱크로부터의 기름 유출예측기술”, *Techno Marine(日本造船學會誌)*, Vol. 808, No. 10.
- [6] Ferziger, J. and Peric, M., 1999, *Computational Methods for Fluid Dynamics*, 2nd ed. Springer-Verlag, Berlin.
- [7] Kreyszig, E., 1983, *Advanced Engineering Mathematics*, 5th ed. 15~17, John Wiley & Sons.
- [8] Muzaferija, S. and Peric, M, 1999, “Chapter 2 : Computation of Free-surface Flows using Interface-tracking and Interface-capturing Methods”, *Nonlinear Water Wave Interaction* (ed. Mahrenholtz and Markiewicz), WIT Press.
- [9] Smithsonian Institution, 1954, “Table 327-Viscosity of Miscellaneous Liquids”, *Smithsonian physical tables*, 9th ed..