

전진하는 2차원 moonpool의 유동해석

*송 지 수¹, 박 승 오²

Flow Analysis of a Two-Dimensional Moonpool in a Moving Vessel

C. S. Song and S. O. Park

The moonpool is a vertical well in floating barge, frequently found in drilling ships and in diving support vessel. In this paper, numerical simulation of two-dimensional flow in moonpool situated in moving vessel is carried out using the commercial software FLUENT. The focus of the simulation is to understand drag generation mechanics of moonpool flow. To examine the effect of free surface motion on the drag, simulations are also carried out by employing two different boundary conditions at the free surface.

Key Words: Moonpool, VOF, 수면(Free Surface), 저항(Drag), 수치 해석(Numerical Analysis)

1. 서 론

해상 유전 및 자원의 중요성이 증대되면서 심해로의 해양 개발이 확대되고 있는 추세이다. 따라서 유전이나 해저 광물을 찾는 등의 목적을 가진 특수선의 건조도 증가되고 있다. 이런 목적으로 건조된 특수선에는 작업의 편의성과 안정성을 증대시킬 목적으로 선박의 갑판에서 바닥까지 moonpool이라 불리는 우물형태의 구멍을 뚫고 그 구멍을 통로로 하여 시추 작업이나 탐사 작업을 하게 된다. Fig.1에 전형적인 moonpool의 형상을 나타내었다. 통상적으로 moonpool은 선체의 중앙이나 선수부에 설치되고 그 크기는 선폭의 30~45%정도이며 moonpool의 형상은 사각형과 원형 등이다. Moonpool에 대한 연구는 주로 실험적인 방법이나 수학적인 방법으로 연구되어져 왔다. Aalbers[1]는 moonpool이 설치된 선박이 파도와 같이 파(wave)를 가진 물 위에 떠 있을 때, moonpool 내 수면의 거동 정도를 예측하는 식을 제

시하였다. Molin[2]은 moonpool 내부 수면의 움직임을 piston mode와 sloshing mode로 구별하고 각각의 고유 주파수를 구하여 moonpool의 폭이나 수면의 높이를 달리하면서 수면이 움직이는 주파수의 변화를 연구하였다. 또 moonpool이 선체에 설치되면, 저항이 증가된다는 연구 결과도 있다[3]. Moonpool 내부에는 물과 공기가 있는 자유 표면이 존재하므로 본 연구에서는 이를 수치적으로 해석하기 위해서 Volume Of Fluid(VOF) 라는 수치 기법을 이용하였고, 유체해석 상용소프트웨어인 FLUENT를 사용하였다. 또 문제를 단순화하기 위해서 2차원으로 가정하고 수면의 처리 방법을 대칭경계조건과 VOF 방법으로 구별하여 moonpool의 저항과 유동 패턴, 수면의 거동에 대해 비교하였고, 각 계산의 결과를 바탕으로 하여 moonpool의 저항 특성을 분석하였다.

2. 수치 기법

2.1 지배방정식

2차원 moonpool의 유동 해석은 수면을 어떻게 처리하느냐에 따라 지배방정식이 달라진다. 자유표면에

1 학생회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공 대학원

2 정회원, 한국과학기술원 항공우주공학전공

*E-mail : sopark@kaist.ac.kr

대칭경계조건을 주어, 자유표면의 움직임을 허락하지 않은 경우는 고정된 경계 안에서 하나의 유체에 대한 Navier-Stokes 유동을 해석하면 되므로 이에 대한 지배방정식은 생략한다. 자유표면의 거동을 허락한 경우는 VOF 기법을 이용하였다. VOF 기법은 각 격자 내에서 어느 한 유체에 의해 점유되어지는 부분을 0과 1 사이 값을 가지는 f 라는 함수로 정의하고 f 의 값을 이용하여 수면을 추적한다[4]. 따라서 이 경우는 연속의 식, 운동량 방정식과 f 지배방정식을 해석함으로써 수면의 모습을 알 수 있다.

$$\text{Continuity Equation : } \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

Momentum Equation :

$$\frac{\partial}{\partial t} \rho U_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \rho U_j U_i = -\frac{\partial P}{\partial x_j} + \frac{\partial}{\partial x_i} \mu \left[\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right] + \rho g_j + S \quad (2)$$

$$f \text{ Equation : } \frac{\partial f}{\partial t} + U_i \frac{\partial f}{\partial x_i} = 0 \quad (3)$$

식(3)을 통해 결정된 각 격자에서의 f 값을 식(4)에 대입하면 그 격자에서 유체의 물성치가 결정된다.

$$\rho = f\rho_2 + (1-f)\rho_1 \quad (4)$$

본 연구의 계산을 위해 FLUENT에서 선택하여 사용한 수치적인 방법을 Table.1 에 정리하였다.

2.2 문제의 정의와 격자의 선정

대부분 moonpool이 설치된 선박의 경우, 선박이 물에 잠긴 정도에 따라 moonpool의 깊이 대 너비의 비(D/W)가 0.8에서 1.3 정도의 값을 가진다. 본 연구에서는 그 중간 값인 1을 깊이 대 너비 비(D/W)로 정하였다. 또, 실제 moonpool내부의 유동장은 레이놀즈수가 커서 난류로 볼 수 있다. 그러나, moonpool내부의 유동과 특성, 저항 등의 기본적인 특성에 대해 연구하기 위해 본 연구에서는 길이(W)에 대한 레이놀즈수의 범위를 10,000에서 50,000으로 한정하였고, 모든 경우를 층류(Laminar)로 가정하였다. 2차원 moonpool의 형상을 Fig.2에 대략적으로 나타내었다. 본 연구에 사용된 격자는 기본적으로 수면을 대칭경계조건으로 처리한 격자와 수면에서 VOF 계산을 하기 위해 공기 부분을 첨가한 격자계로 나누어지는데, 공통적으로 moonpool의 양쪽 벽면과 물과 공기의 경계부분에 격자를 조밀하게 두었

고, 유입되는 자유류의 아래 부분에 대해서는 격자를 성기게 구성하였다. 격자테스트는 레이놀즈수가 100,000이고, 수면을 대칭경계조건으로 근사시킨 경우를 대상으로 하였다. Moonpool의 양 벽에서 받는 압력의 차이로부터 구한 평균 항력 계수와 $x/W=0$, $y/D=0$ 인 지점에서 시간의 변화에 따른 v 속도의 계산 결과를 비교하여 본 연구에서 사용할 격자를 선정하였다. 그리고 선정된 격자에 VOF 계산을 하기 위하여 공기 부분의 격자를 첨가하였다. 첨가된 공기 부분의 수직 길이와 moonpool의 깊이 비가 2:5 이므로 공기부분의 격자 개수도 같은 비율을 유지하도록 구성하였고, 본 연구에 사용된 격자를 Fig.3에 나타내었다.

3. 계산 결과

3.1 저항

일반적으로, 선박에 작용하는 저항은 압력 항력(pressure drag), 마찰 항력(skin drag), 조파 항력(wave drag)등 이 있다. Moonpool이 설치된 선박의 전체 저항 중 moonpool이 기여한 저항은 압력 항력이 주된 것이므로 압력 항력을 본 연구의 대상으로 삼았으며, moonpool의 압력항력은 벽면에 작용하는 압력의 적분을 통해 구할 수 있다.

먼저 moonpool의 가장 기본적인 저항 특성을 파악하기 위해 Fig.3과 같이 선체아래 부분의 유동 영역이 고려된 격자계의 유동과 moonpool만을 고려하고 경계면에 Driven Cavity와 같은 유동조건을 주어 계산된 유동의 압력저항을 비교하기로 하자. 레이놀즈수가 10,000일 경우에 계산을 수행하였고 그 결과를 Fig.4와 Table.2에 나타내었다. 두 계산 결과의 차이점은 시간에 따른 항력 계수가 하나의 값으로 수렴하는 것과 주기적으로 진동하는 것으로 나뉘게 되고, 평균항력계수도 선체의 아래 부분이 고려되지 않은 격자의 결과는 고려된 격자의 50% 정도의 값을 보인다는 것이다. 그 이유는 선체의 아래 부분이 고려되지 않은 격자일 경우, moonpool 앞면 벽 아래 모서리 부분에서 떨어져 나오는 와류가 뒷면 벽 아래 부분에 부딪히는 것이 모사되지 않기 때문이다. 실제로는 떨어져 나온 와류가 뒷면 벽과 부딪힘을 반복하면서 뒷면 벽의 압력의 증가와 진동이 발생하고 그 결과 항력도 진동하게 된다.

다음으로 moonpool 내 수면의 거동이 moonpool의 항력에 어느 정도의 영향을 미치는지 알기 위해 앞



서 언급한 바와 같이 수면을 대칭경계조건으로 계산한 결과와 VOF 방법을 이용하여 계산한 결과를 **Table.3**과 **Fig.5**에 나타내었다. **Fig.5**에서도 알 수 듯이, 레이놀즈수가 30,000이상에서는 레이놀즈수가 증가할수록, 평균항력계수의 증가는 대칭경계조건 계산결과보다 VOF 계산결과가 더 급격하고 진동 폭도 크다.

2 유동

수면을 대칭경계조건으로 근사하였을 경우, 레이놀즈수를 증가시키어도 내부의 기본적인 유동패턴은 바뀌지 않는다. **Fig.6**에는 레이놀즈수가 10,000과 1,000일 때, moonpool 내부의 유선을 나타내었다. 그러나 수면을 VOF 기법으로 계산하였을 경우, 레이놀즈수가 증가하면 **Fig.7**과 같이 moonpool 내부 유동패턴이 달라진다. 그 원인은 moonpool 내 수의 거동이 활발해지기 때문이다. 수면이 존재하는 동안에 중요한 무차원수는 관성력과 중력의 비를 나타내는 Froude수이다. Froude수의 정의는 식 (5) 같고 본 연구에서 고려된 레이놀즈수와 Froude수 **Table.4**에 나타내었다.

$$Fr = \frac{U}{\sqrt{gL}} \tag{5}$$

레이놀즈수가 증가시키면 Froude수도 따라서 증가하게 되고, 수면의 거동이 심해지면서 수면은 moonpool 내부를 출렁거리며 Sloshing 모드를 나타낸다. 레이놀즈수가 50,000일 경우, **Fig.7**에서 알 수 듯이 대칭경계조건의 계산결과에서는 볼 수 없는 moonpool 앞면 벽 수면부분에 작은 소용돌이가 나타나는데 이는 수면이 출렁거리며 방향에 따라 커짐 작아짐을 반복한다. Froude수가 증가함에 따른 수면의 거동정도를, moonpool내 물이 정지시 잠겨는 깊이(D)에 대한 수면의 변동을 백분율(%)로 환하여 **Table.5**에 나타내었다.

3 FFT를 이용한 항력의 주파수 분석

앞에서 살펴본 바와 같이 moonpool의 유동은 주기적인 변화를 갖는다. 이를 더 자세히 고찰하기 위해 항력계수와 특정 속도 성분의 진동 특성을 조사하기로 한다. 시간에 따른 항력계수의 변동, moonpool내의 x/W=0, y/D=0 인 점과 x/W=0.4, D=0 인 점에서 시간의 변화에 따른 v속도의 주파

수 분석 결과와 특히 VOF 계산의 경우 moonpool의 양 벽에서 수면 거동의 주파수 분석 결과를 **Fig.8**과 **Fig.9**에 정리하였다.

대칭경계조건으로 수면을 근사하여 계산한 경우는 레이놀즈수가 증가하여도 항력의 지배적인 주파수는 하나를 나타낸다. 그리고 그 지배적인 원인은 앞에서 언급한 바와 같이 뒷면 벽에 부딪히는 와류에 의한 압력의 변동이다.

그러나 수면의 거동을 모사하기 위해 수행한 VOF 계산의 결과, 항력 계수의 지배적인 주파수는 레이놀즈수가 10,000일 경우, 수면의 거동이 거의 없으므로 대칭경계조건 계산과 같은 결과를 보이지만, 20,000과 40,000사이에는 2개의 주파수가 나타난다. 2개의 주파수 중 낮은 주파수는 시간에 따른 수면 거동의 주파수와 일치하고, 높은 주파수는 moonpool 내의 x/W=0, y/D=0 인 점과 x/W=0.4, y/D=0 인 점에서 시간의 변화에 따른 v속도의 주파수와 일치한다. 이는 moonpool의 항력이 와류의 충돌에 의한 원인 이외에 수면의 거동과도 연관이 있음을 의미한다. 레이놀즈수가 20,000일 경우, 항력의 지배적인 주파수는 moonpool 내 두 점에서 v속도의 주파수와 같다. 하지만, 레이놀즈수가 30,000과 40,000일 때에는 항력의 지배적인 주파수는 수면 거동의 주파수와 일치하는 주파수를 나타낸다. 이는 moonpool의 전체 항력에서 수면의 거동에 의한 저항이 점차 지배적인 역할을 하게 됨을 의미한다. 레이놀즈수가 50,000일 경우, 항력의 지배적인 주파수는 하나의 주파수를 보이며 수면 거동의 주파수와 일치한다.

3.4 Moonpool의 저항 특성

Moonpool의 저항 특성에 대해 레이놀즈 수가 10,000과 50,000 일 경우에 한해 분석하였다.

레이놀즈수가 10,000 일 경우, 수면 거동이 거의 없기 때문에 수면을 대칭경계조건으로 근사한 결과와 VOF 방법으로 계산한 결과에 큰 차이가 없다. 항력이 최대 혹은 최소일 때, moonpool 양 벽의 압력분포를 **Fig.10**와 **Fig.11**에 나타내었다. 이 경우 항력은 moonpool 뒷면 벽 아래 부분의 압력분포의 변화에 따라 최대 혹은 최소 값을 가진다. 따라서 레이놀즈수가 10,000일 경우 moonpool의 항력은 수면의 계산 방법에 관계없이 moonpool 뒷면 벽의 압력분포와 관련이 있음을 알 수 있다.

그러나 레이놀즈수가 50,000일 때, VOF 방법으로



계산하였을 경우, 수면의 거동은 moonpool이 정지 시 잠겨있는 물 깊이의 4%정도이고 본 연구의 범위에서 수면의 거동이 가장 큰 경우이다. 그리고 이 경우의 평균항력계수는 대칭경계조건으로 계산하였을 경우의 평균항력계수보다 약 5% 정도 크다. 항력이 최대 값을 가지는 경우, 수면이 뒷면 벽에 부딪히면서 그 부분의 압력이 증가하고, 수면도 상승한다. 그러나 항력이 최소 값을 가지는 경우는 수면은 앞면 벽과 부딪히면서 그 부분의 압력이 증가하고, 수면도 상승한다. 항력이 최대 혹은 최소 값을 가질 때, moonpool 양 벽의 압력분포를 Fig.12와 Fig. 13에 나타내었다. 반면에 레이놀즈수가 50,000이고, 수면을 대칭경계조건으로 근사하였을 때에는 레이놀즈수가 10,000일 때와 마찬가지로 moonpool 뒷면 벽 아래 부분의 압력 변동과 관련이 있고, VOF 방법으로 계산한 결과와 차이를 보인다.

4. 결론

본 연구에서는 moonpool 이라는 형상을 2차원으로 근사하고, 레이놀즈수를 10,000부터 50,000까지 증가시키면서, moonpool의 저항과 내부 유동의 변화에 대해 살펴보았다. 먼저 선체의 아래부분이 고려되지 않은 경우를 계산하여, moonpool 저항의 기본적인 특성을 알 수 있었다. 다음으로 moonpool 내부의 수면을 VOF 라는 수치 기법을 통하여 계산한 결과와 대칭경계조건으로 근사하여 계산한 결과를 비교함으로써 moonpool의 저항에서 수면의 거동에 따른 저항이 어느 정도 영향이 있으며 있는지를 보았다.

대칭경계조건으로 계산하였을 경우, moonpool의 항력은 뒷면 벽 아래 부분의 압력 변동과 관계가 있다. 즉, moonpool 앞면 벽 아래 부분에서 떨어져 나온 와류가 뒷면 벽에 부딪히면서 그 부분의 압력 변동이 발생한다. 그리고 레이놀즈수가 10,000에서 50,000으로 증가할 때, 시간에 대한 항력의 FFT결과는 각각 하나의 지배적인 주파수를 나타낸다. 또, moonpool 내부 유동장의 모습은 레이놀즈수가 증가해도 크게 변하지 않는다.

수면을 VOF 방법을 이용하여 계산한 경우는 Froude수와 관계가 있는 수면의 거동 정도에 따라서 다른 항력의 특성을 나타내게 된다. 즉, 레이놀즈수가 10,000일 때와 같이 수면의 거동이 거의 없는 경우는 평균항력계수와 moonpool 내부 유동의 형태

등이 대칭경계 조건일 경우와 일치한다. 하지만 레이놀즈수가 50,000 일 경우는 수면의 거동이 심해져 항력이 최대 혹은 최소일 때, moonpool 앞면 벽의 수면 부분에서 압력 변동의 정도가 뒷면 벽 아래 부분에서의 압력 변동 정도에 비해 상대적으로 크고 따라서, 항력의 변동은 수면의 거동과 관련이 있음을 알 수 있다.

현재의 연구는 moonpool을 2차원으로 단순화 시키고, 유입되는 물을 층류로 가정하여 해석하였지만, 실제 moonpool은 3차원 형상이고, 난류 영역에 있으므로 이 부분에 대한 moonpool의 저항이나 유동 특징 등의 연구가 필요하다.

Variables	Scheme
Pressure	Body Forced Weighted
Momentum	QUICK
Pressure-velocity	PISO
Multiphase Model	Volume Of Fluid
VOF Parameters	Geo-Reconstruction
Surface Tension	CSF model

Table 1. Discretization Scheme

	Simulation without bottom region	Simulation with bottom region
Mean Drag Coefficient	0.0098	0.0193

Table 2. The results of simulation without bottom region and with bottom region

Re(X 10,000)	Mean Cd of Symmetry Condition	Mean Cd of VOF Simulation
1	0.0193	0.0193
2	0.0187	0.0185
3	0.0192	0.0196
4	0.0202	0.0206
5	0.0221	0.0232

Table 3. Mean Cd of Each Case

Reynolds Number (X 10,000)	Froude Number
1	0.101
2	0.202
3	0.303
4	0.404
5	0.505

Table 4. Reynolds number and Froude number

Reynolds Number (X 10,000)	Fluctuation extent of free surface (%)
1	0.1
2	0.5
3	1
4	2
5	4

Table 5. Fluctuation Extent of Free Surface

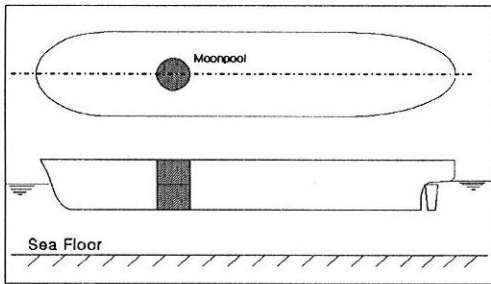


Fig.1 Moonpool의 형상

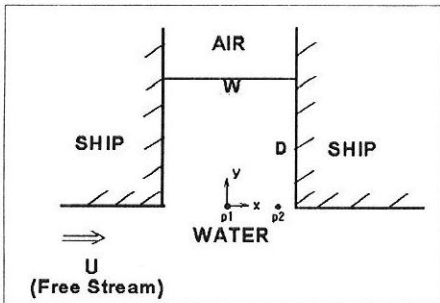
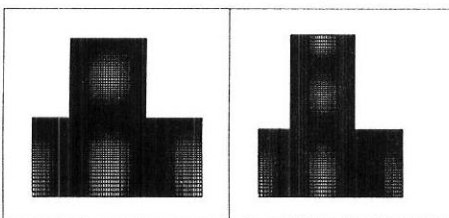
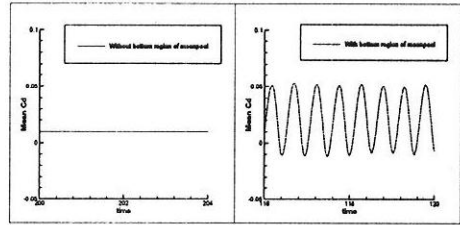


Fig.2 Moonpool의 개략도



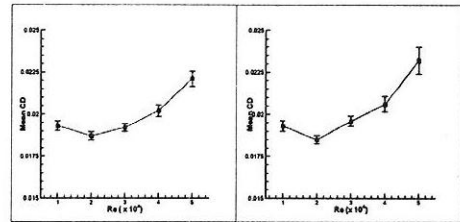
(A) 대칭경계조건 (B) VOF 계산

Fig.3 계산에 사용된 두 격자



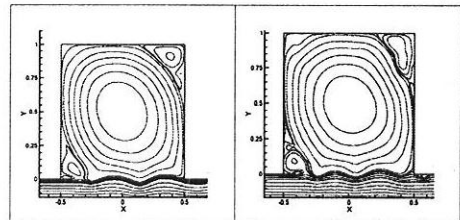
(A)아래 부분이 포함되지 않은 격자 (B)포함된 격자

Fig.4 시간에 따른 항력계수의 변화



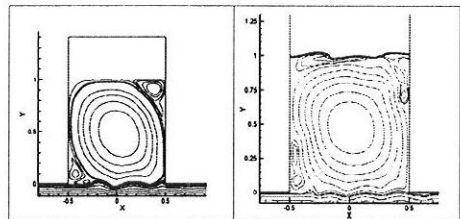
(A) 대칭경계조건 (B) VOF 계산

Fig.5 레이놀즈수에 따른 평균항력계수



(A) 레이놀즈수:10,000 (B) 레이놀즈수:50,000

Fig.6 대칭경계조건일 경우 moonpool의 내부의 유선도



(A) 레이놀즈수:10,000 (B) 레이놀즈수:50,000

Fig.7 VOF 계산일 경우, moonpool의 내부의 유선도

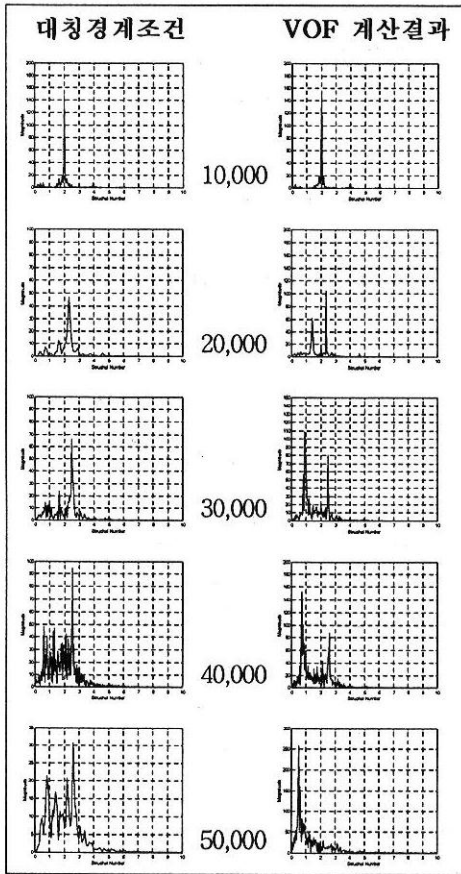
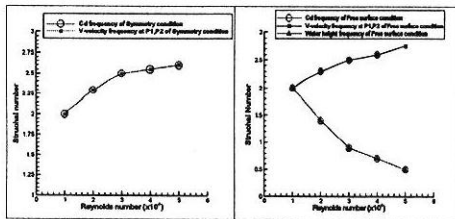
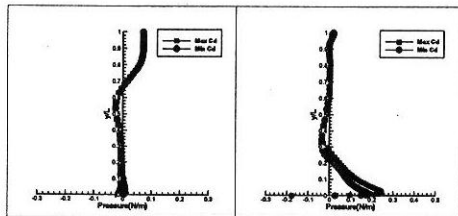


Fig.8 레이놀즈수에 따른 항력의 FFT결과



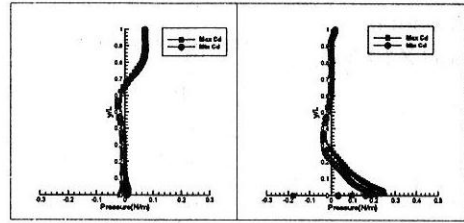
(A) 대칭경계조건 (B) VOF 계산

Fig.9 레이놀즈수에 따른 FFT결과



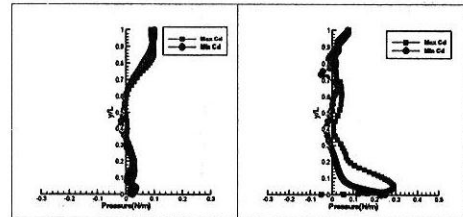
(A) Moonpool의 앞면 벽 (B) Moonpool의 뒷면 벽

Fig.10 대칭경계조건에서 항력이 최대 혹은 최소일 경우, moonpool의 벽을 따른 압력의 분포



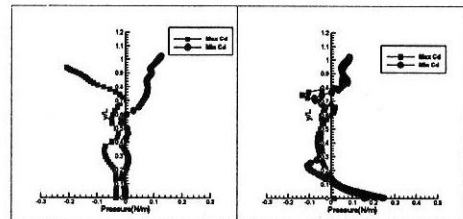
(A) Moonpool의 앞면 벽 (B) Moonpool의 뒷면 벽

Fig.11 VOF 계산에서 항력이 최대 혹은 최소일 경우, moonpool의 벽을 따른 압력의 분포



(A) Moonpool의 앞면 벽 (B) Moonpool의 뒷면 벽

Fig.12 대칭경계조건에서 항력이 최대 혹은 최소일 경우, moonpool의 벽을 따른 압력의 분포



(A) Moonpool의 앞면 벽 (B) Moonpool의 뒷면 벽

Fig.13 VOF 계산에서 항력이 최대 혹은 최소일 경우, moonpool의 벽을 따른 압력의 분포

참고문헌

- [1] Aalbers, A.B., "The Water Motion in a Moonpool," Ocean Engineering, Vol. 11, No. 6, 1984, pp. 557-579.
- [2] Molin, B., "On The Piston and Sloshing Modes in Moonpools," Journal of Fluid Mechanics, Vol. 430, 2001, pp. 27-50.
- [3] 유재훈, 최순호, "문풀과 이지무스 추진기를 장치한 드릴십의 저항추진성능," 대한조선학회 추계 논문집, 1999, pp. 424-427.
- [4] Hirt, C. W. and Nichols, B. D., "Volume of Fluid(VOF) Method for the Dynamics of Free Boundaries," Journal of Computational Physics, Vol. 39, 1981, pp. 201-225.
- [5] Brackbill, J. U., Kothe, D. B. and Zemach, C., "A Continuum Methods for Modeling Surfaces Tension," Journal of Computational Physics, Vol. 100, 1992, pp. 335-354.