

# 축척비가 문풀 내부 유동 특성에 미치는 영향

이상봉<sup>\*†</sup>

\* 동아대학교 조선해양플랜트공학과

## Effects of Scale Ratio on Flow Characteristics in Moonpool

Sang Bong Lee<sup>\*†</sup>

\* Department of Naval Architecture and Offshore Engineering, Dong-A University Busan 604-714, Korea

**요 약** : Froude(Fr) 수의 상사성을 통해 문풀의 크기와 유동 속도를 결정할 경우 축척비에 따라 문풀 내부 유동에 대한 Reynolds(Re) 수가 크게 달라진다. 즉 같은 Fr 수를 갖는다 할지라도 축척비에 따라 문풀 내부 유동 특성이 달라질 수 있음을 의미한다. 본 연구에서는 같은 Fr 수로 상사되었을 때 축척비가 문풀 내부 유동 특성에 미치는 영향을 분석하기 위해 2차원 수치 해석을 수행하였다. 문풀의 크기가 작을 때 문풀에 작용하는 힘은 매우 주기적인 특성을 보이는 반면 문풀의 크기가 커질수록 주기가 일정하지 않은 교란 특성을 보이기 때문에 과도 응답과 통계적 정상 상태의 응답을 구분하기 어려워진다. 주파수 특성에 있어서도 축척비의 제곱근에 반비례하여 나타나는 주파수 특성( $f_{0.5} \approx \sqrt{2} f_1 \approx 2f_{2.0}$ )은 Fr 수의 상사성에 따른 유동 특성으로 볼 수 있으나, 문풀의 크기가 클 때 매우 낮은 주파수( $f_{2.0}=0.07$ )로 문풀 내부에서 매우 강한 와가 발생하는데 이는 축척비에 따른 영향이다.

**핵심어** : 문풀, 축척비, 주기적 응답, 레이놀즈 수, 프루드 수

**Abstract** : When a geometric size of moonpool and an inflow velocity are determined based on the similarity of Froude number, Reynolds number is depending on the scale ratio of moonpool geometry. It means that different characteristics of flow fluctuations in moonpool can be observed depending on the scale ratio of moonpool even though Froude number is the same. In the present study two dimensional numerical simulations were performed to investigate the influence of scale ratios on the flow characteristics inside the moonpool. The inflow velocity at several scale ratios was determined to keep Froude number constant. A periodic response was observed in a small size of moonpool while a large moonpool showed complicated fluctuations with various amplitudes and frequencies, which made it difficult to distinguish the statistical steady-state response from the temporal responses in the case of large moonpool. The similarity of Froude number gave rise to a spectral characteristic which was inversely proportional to the square root of scale ratios ( $f_{0.5} \approx \sqrt{2} f_1 \approx 2f_{2.0}$ ) but a low frequent occurrence of strong vortex ( $f_{2.0}=0.07$ ) which is observed inside the large moonpool was characterized depending on scale ratios.

**Key Words** : Moonpool, Scale ratio, Periodic response, Reynolds number, Froude number

### 1. 서론

선형 설계 단계에서 수 백 미터에 달하는 실선의 저항 및 자항 성능을 추정하기 위해 실선에 대한 계측이나 수치 해석을 수행(Im et al, 2011)하기도 하지만 대개 수 미터의 모형선 성능을 실험적으로 계측하거나 수치적으로 계산한다. 이때 반드시 필요한 것이 실선과 모형선의 상사성(similarity)인데 대개의 경우 이러한 상사성은 조파 특성을 기반으로 하는 Froude(Fr) 수에 근거하여 이루어진다. Fr 수에 따른 상사

성에서는 길이 축척비( $\lambda$ )의 제곱근에 비례하여 속도가 결정되므로 모형 시험이나 수치 계산에 매우 효과적일 뿐만 아니라 물리적인 관점에서도 모형선의 조파 현상을 통해 실선의 조파 특성을 논리적으로 추론할 수 있다는데 그 의의가 있다. 문풀을 구비한 드릴십의 경우도 일반 상선과 마찬가지로 Fr 수에 근거하여 모형선의 길이와 속도가 결정되며, 문풀 내부 유동에 대한 많은 연구 결과들도 이러한 조건에서 수행되었다. 대표적으로 문풀 내부의 형상 변화가 저항 성능 및 문풀 내부 유동에 미치는 영향을 연구한 Kim et al.(2006)의 모형 시험, 문풀 형상에 따른 부가 저항의 실험

† sblee1977@dau.ac.kr, 051-200-7772

연구(Yoo and Choi, 2004), 와류(vortex flow) 충돌이 발생하는 문풀 벽면의 형상 변화를 통해 저항 성능을 개선시키고자 하는 연구(Choi et al., 2011) 그리고 문풀 내부의 압력 변동을 체계적으로 분석하기 위해 문풀의 압력 변동에 POD(proper orthogonal decomposition)을 적용한 Lee et al.(2012)의 연구, 문풀이 구비된 2차원 부유체의 상하 강제 운동에 관한 연구 결과(Heo et al, 2011)도 모두 Fr 수에 따른 상사성에 근거하여 이루어졌다.

그러나 문풀 내부 유동은 Fr 수에 의한 자유 수면과 Reynolds(Re) 수에 의한 전단층 및 와류 생성의 특성을 동시에 갖고 있다. Molin(2001)의 연구에서와 같이 문풀 내부 유동이 슬로싱 모드(sloshing mode)로 자려 진동하는 경우에는 Fr 수에 의한 유동 특성이 지배적이고, Lee et al.(2012)의 연구 결과에서 보듯이 문풀 내부 유동이 슬로싱이나 피스톤 모드(piston mode)가 아닌 경우에는 전단층에 의한 와류 생성과 충돌이 문풀 내부 압력 변동의 주요 원인이기 때문에 Re 수에 의한 점성 유동 특성이 더 강하다고 볼 수 있다. 따라서 문풀을 구비한 드릴십을 가장 정확하게 모사하기 위해서는 Fr 수와 Re 수를 모두 맞추는 것이 가장 바람직하나, 실험실 수준에서 실선의 Re 수를 재현하는 것이 불가능하므로 현실적으로 Fr 수에 따른 상사성을 채택할 수 밖에 없다. 이를 위해 모형 시험을 수행하는 구조의 특성에 따라 다양한 길이 축척비가 사용되는데 이 때 Re 수는 축척비에 의해  $Re \propto \lambda^{1.5}$ 로 결정된다. 즉 Fr 수를 동일하게 맞춘다 하더라도 실험 환경에 따라 Re 수는 매우 다른 상태이므로 문풀 내부 유동 특성이 축척비에 따라 어떻게 달라지는지에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 동일한 Fr 수 조건에서 다양한 길이 축척비를 갖는 문풀 유동을 분석함으로써 문풀의 축척비가 문풀의 내부 유동에 미치는 영향을 연구하였다. 이를 위해 자유 수면을 갖는 2차원 다상 유동에 대한 수치 모사를 수행하였으며, 각 축척비에서 나타나는 응답의 주파수 특성을 분석하였다.

## 2. 본 연구의 연구 방법 및 내용

본 연구에서 수행한 수치 해석 기법은 압력 변동에 대한 POD 분석을 수행한 Lee et al.(2012)과 동일하다. Lee et al. (2012)에서 불확실성 해석을 위해 문풀의 벽면에서 압력 변동량이 격자의 밀집도에 따라 단조 수렴함을 보였으며, 회류 구조에서 예측한 실험 결과와의 비교를 통해 수치 해석 결과를 검증한 바 있다. Lee et al.(2012)에서는 실제 드릴십에서의 압력 변동을 모사하기 위해 작업단을 설치한 문풀에 대해 연구를 수행한 반면, 본 연구에서는 축척비의 효과를 명확히 관찰하기 위해 작업단이 없는 단순한 형상의 문풀을 적용하였다. 수치 해석 코드는 FLUENT를 사용하여 2차원

다상 유동 수치 해석을 수행하였다. 입구 경계에서는 속도를 고정하고 자유 수면의 위치가 고려된 수두 압력이 주어졌으며, 출구 경계에서는 압력 및 속도 구배가 0인 조건이 주어졌다. 위쪽 면과 아래쪽 면은 대칭 경계 조건을 적용하였다. 난류 모형은 Lee et al.(2012)에서와 동일하게 realizable k-ε 모델을 사용하였다. 자유 수면의 계면을 추적하기 위해 modified HRIC(high resolution interface capturing) 기법이 적용되었다. 또한 후류 끝단을 포함한 수직 벽면에 작용하는 힘이 문풀에 작용하는 저항 변동량의 주요 인자이기 때문에 초기 조건의 영향을 배제하기 위해 후류 수직 벽면에 작용하는 힘을 통해 과도 응답을 검사하였다.

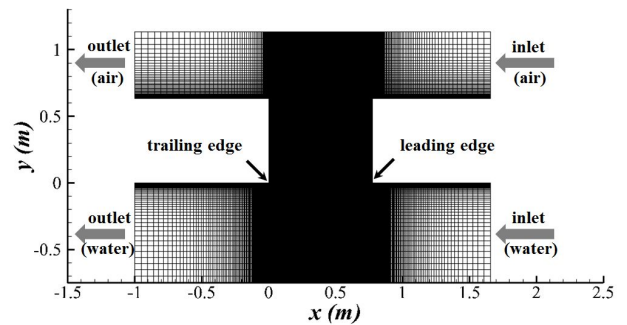


Fig. 1. Numerical domain.

기준 축척비( $\lambda_0$ )일 때 수치 해석에서 사용한 계산 영역은 Fig. 1에서 확인할 수 있다. 입구 및 출구 영역은 문풀의 전류 및 후류 끝단에서 1m만큼 떨어져서 위치한다. 문풀의 후류 끝단(trailing edge)을 원점으로 하는 좌표계를 구성하였으며,  $y=0$ 이 배의 바닥면에 해당한다. 흘수에 해당하는 문풀 내부에서 물의 깊이는  $y=0.3284$ m이다. 문풀의 전류 끝단과 후류 끝단의 간격은 0.7744m이며 이를 기준으로 한 Fr 수는 0.151이다. 최소 격자 간격은 기준 축척비 기준으로 0.002m이며, 정렬 격자계로 구성하였다. 사용된 전체 격자는 92,275개이다. 본 연구에서 사용하는 격자의 수렴성 및 불확실성에 대한 해석은 Lee et al.(2012)에서 체계적으로 수행되었다.

축척비에 따른 영향을 분석하기 위해 본 연구에서는 다양한 축척비에 대한 수치 해석이 수행되었는데, 이 때 고려되어야 하는 것이 격자 구성이다. 직관적으로 두 가지 방법을 생각할 수 있는데, 첫 번째는 기준 축척비에서 생성된 격자를 그대로 확대하거나 축소하여 격자 수를 유지하는 방법이고, 두 번째는 기준 축척비에서 사용된 격자 간격을 유지할 수 있도록 각 방향으로 격자 수를 늘리거나 줄이는 방법이다. 첫 번째 방법의 경우 문풀의 형상이 커지고 입구 경계 속도( $V_m$ )가 빨라짐에 따라 수치적인 불안정성이 발생함에 따라 본 연구에서는 두 번째 방법을 사용하였다. 축척비가 변함에 따라 유동 속도도 달라지므로 안정된 계산을 위해

각 축척비에서 사용하는 시간 간격( $\Delta t$ )도 달라져야 한다. 즉 문풀의 크기가 커질 경우 속도가 빨라졌으나 격자 간격은 변하지 않았으므로 Courant 수를 일정하게 유지하기 위해 시간 간격은  $\Delta t = \Delta x / V_m$ 에 의해 결정된다. 연구에서 사용한 축척비와 각 축척비에서 사용된 격자 수 및 시간 간격, 유동 속도는 Table 1과 같다. 표에서 Re 수는 물의 점성, 유입 속도 그리고 문풀의 깊이에 의해 결정되었다.

Table 1. Number of grids, time interval and inflow velocity corresponding to each scale ratio

Scale ratio	No. of grids	$\Delta t$ (s)	$V_m$ (m/s)	$Re_D$
$0.5\lambda_0$	31,579	$1.414 \times 10^{-2}$	0.8118	$1.26 \times 10^5$
$\lambda_0$	92,275	$1.000 \times 10^{-2}$	1.148	$2.53 \times 10^5$
$2.0\lambda_0$	324,900	$7.071 \times 10^{-3}$	1.624	$5.05 \times 10^5$

### 3. 본 연구의 연구 결과

#### 3.1 시간 및 주파수 응답

과도 응답은 초기 조건의 상태에 따라 달라지므로 본 연구에서는 모든 축척비의 유동 계산에 대해 동일한 초기 조건을 적용하였다. 문풀 외부 유동은 입구 경계 조건으로 초기화하였으며, 내부 유동은 초기 속도를 0으로 부과하였다. 이러한 초기 조건에 대해 후류 끝단을 포함한 수직 벽면에 작용하는 힘( $F_x$ )을 시간에 따라 살펴보았으며, 그 결과는 Fig. 2와 같다.

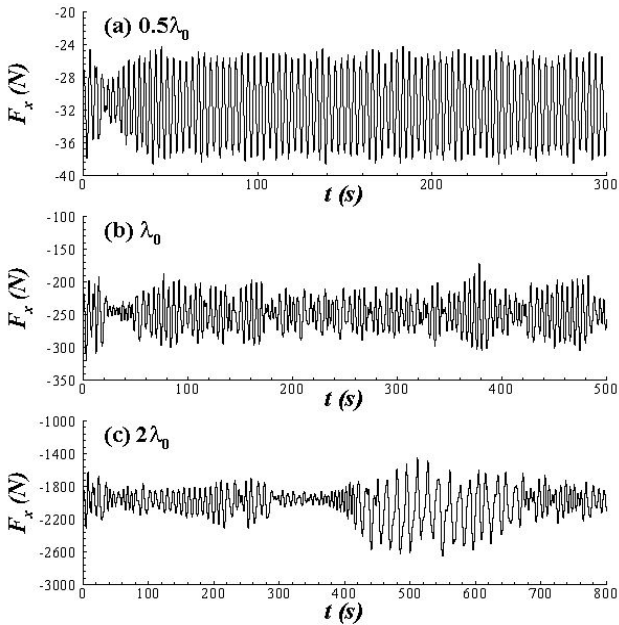


Fig. 2. Time history of  $F_x$  acting on the vertical wall.

그림에서 보듯이 문풀의 크기가 작은 경우( $0.5\lambda_0$ ) 시간이 지나면서 일정한 크기의 주기적인 응답을 보이기 때문에 과도 응답과 통계적 정상 상태의 응답을 확실히 구분할 수 있다. 40초 이후 진동 크기와 주기가 일정한 응답이 나타나므로 40초 이후의 상태를 통계적 정상 상태라고 볼 수 있다. 반면 문풀의 크기가 커져서 기준 축척비( $\lambda_0$ )가 되면 주기는 일정하나 진동 폭이 일정하지 않은 것을 관찰할 수 있다. 이에 따라 과도 응답이 끝나고 통계적 정상 상태의 응답이 시작되는 위치를 확정하기는 어려우나 약 80초 이후부터 통계적 정상 상태의 응답이라고 보는 것이 타당할 것이다. 가장 큰 문풀( $2\lambda_0$ )의 경우 후류 수직 벽면에 작용하는 힘이 매우 복잡하기 때문에 과도 응답을 명확히 구분하기가 어렵다. 힘의 변동 폭 뿐만 아니라 변동 주기도 변하는 것을 볼 수 있는데, 100초에서 350초까지의 변동 주기와 350초에서 400초까지의 변동 주기, 400초에서 650초까지의 변동 주기 그리고 650초 이후의 변동 주기가 다른 특성을 보인다.

주파수 특성을 보다 자세히 살펴보기 위해 Fig. 2에서 보인 시간 응답을 푸리에 변환하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 문풀의 크기가 작고 유동 속도가 느릴 때는  $f=0.28$ 의 주파수가 지배적인 반면 문풀의 크기가 커지면서 다양한 주파수가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그리고 mode 1에 해당하는 주파수는 축척비에 따라 일정한 비율로 작아진다. 이는 문풀의 길이( $L$ )와 유동 속도( $V$ )가 Fr 수의 상사성을 바탕으로 결정되었으므로 시간( $T=L/V$ ) 척도 역시 Fr 수의 상사성을 기반으로 추론한다면 축척비의 제곱근에 비례하여 커지게 되므로 주파수( $f=1/T$ )는 축척비의 제곱근에 반비례하게 된다.

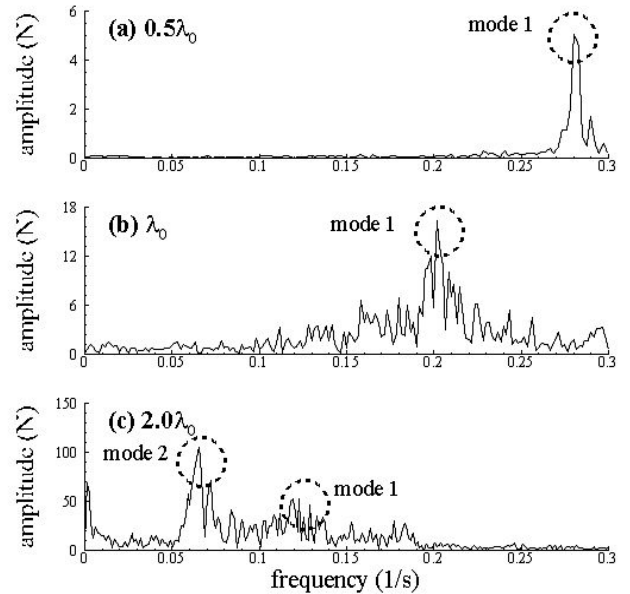


Fig. 3. Frequency responses depending on scale ratios.

## 축척비가 문풀 내부 유동 특성에 미치는 영향

그림에서 볼 수 있듯이 문풀의 크기가 작은 경우( $0.5\lambda_0$ )  $f_{0.5}=0.28$  근처에서 mode 1이 나타나다가 기준 축척비( $\lambda_0$ )에서는  $f_1=0.2$ 에서 mode 1이 나타나고 문풀의 크기가 큰 경우( $2.0\lambda_0$ )  $f_{2.0}=0.12\sim 0.13$  근처에서 mode 1이 나타난다. 근사적으로  $f_{0.5} \approx \sqrt{2}f_1 \approx 2f_{2.0}$ 이 성립하므로 mode 1은 Fr 수의 상사성에 따른 유동 현상이라고 볼 수 있다. 그러나 문풀의 크기가 크고 유동 속도가 빨라져서 Re 수가 매우 큰 (c)의 경우 (a)나 (b)와 달리 주파수가 낮은 mode 2가 존재한다. 시간 응답에서 살펴보면 Fig. 2(c)의 400초에서 650초까지의 진폭이 매우 크고 변동 주기가 긴 시간 응답이 mode 2에 해당하는 주파수 특성을 갖고 있으며, 350초에서 400초까지의 변동 주기 혹은 650초 이후에 나타나는 변동 주기가 Fr 수의 상사성에 따른 유동 특성(mode 1)이라고 볼 수 있다. 따라서 400초에서 650초 사이에 나타나는 낮은 주파수는 Fr 수의 상사성으로 설명할 수 없는 유동 특성이다. 이러한 유동 현상을 보다 자세히 관찰하기 위해 mode 1과 mode 2에서 나타나는 유동 구조를 살펴보고자 한다.

### 3.2 유동 구조

문풀 내에서 발생하는 유동 특성을 정밀하게 관찰하기 위해 각 위상에서 얻어진 속도 분포와 압력 분포에서 시간 평균된 유동장을 빼서 Fig. 4와 Fig. 5에 나타내었다. Fig. 4에서 보여지는 변동 주기는 약 7.6초로  $f_{2.0}=0.12\sim 0.13$  근처에 해당하는 mode 1이라고 볼 수 있으므로 Fr 수의 상사성에 따른 유동 특성이다. 그림에서 볼 수 있듯이 문풀의 전류 끝단에서 발달한 전단층이 mode 1으로 변동하는 경우 문풀 전류와 후류 끝단 사이에는 약 2개의 와(vortex)가 존재하고 있다. Fig. 4(b)의 경우 후류 끝단( $x=0$ )에서 와가 충돌하고 있을 때  $x=0.8$ 의 위치에서 또 다른 와가 발달하고 있으며, (c)에서는  $x=0.2$ 와 1.0에서 반시계 방향 유기 회전(induced counter-clockwise rotation)이 관찰된다. Fig. 4(d)의 경우  $x=0.4$ 와 1.2에서 두 개의 와를 관찰할 수 있으며, (e)에서도  $x=0.3$ 과  $x=1.0$ 에서 역시 두 개의 와가 발달하는 것을 볼 수 있다. 또한 와가 발생하는 위치도  $y=0$  부근으로 전단층이 발달하기 시작하는 위치이다.

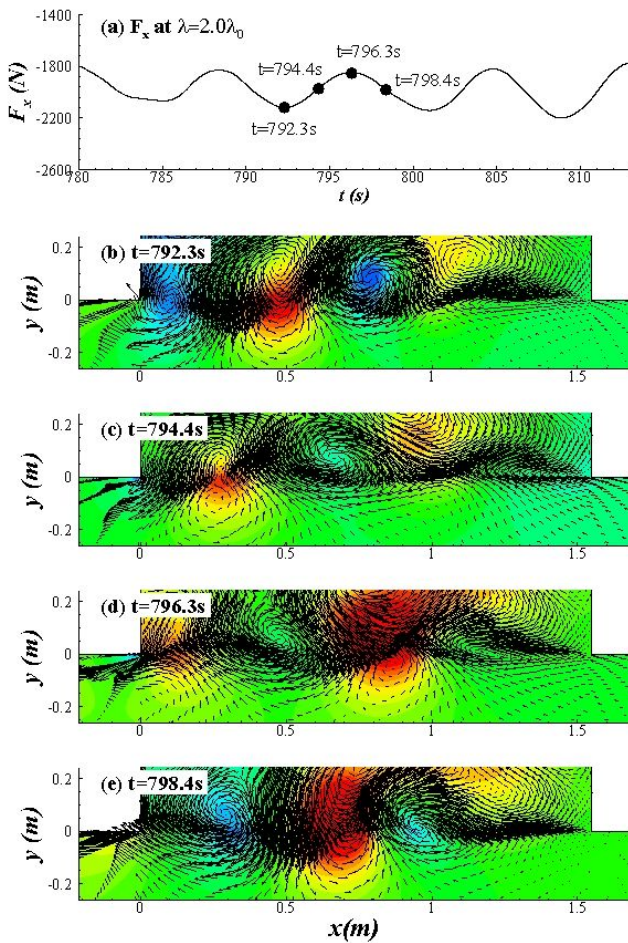


Fig. 4. Flow patterns in mode 1.

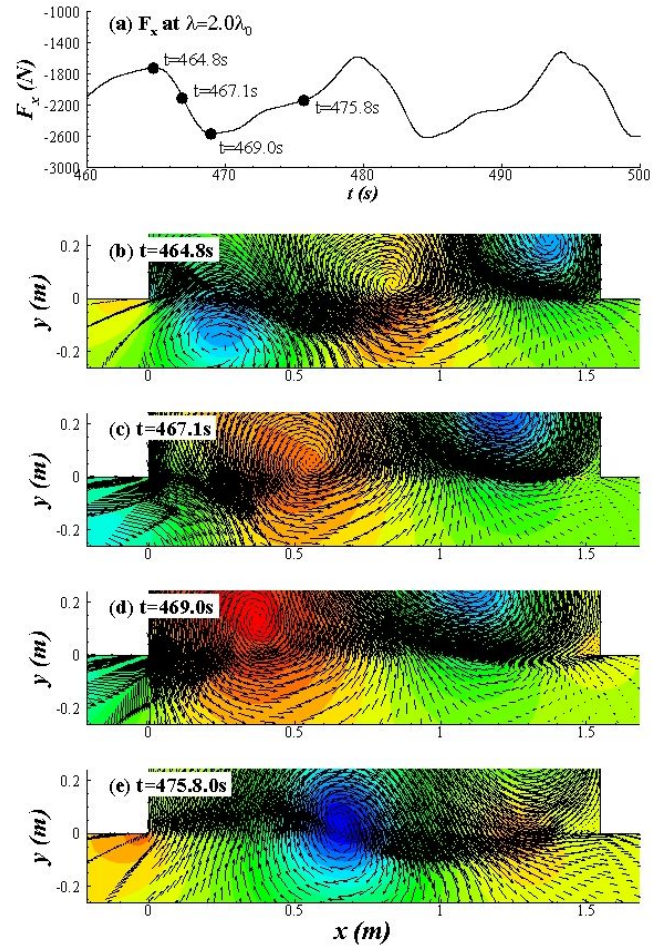


Fig. 5. Flow patterns in mode 2.

Fig. 5에서 보여지는 변동 주기는 약 15초로  $f_{2,0}=0.07$  근처에 해당하는 mode 2라고 볼 수 있다. 그림에서 보듯이 문풀의 전류 끝단과 후류 끝단 사이에 하나의 와가 매우 강하게 발달하는 특성을 갖는다. (b)에서 와가 충돌하는 순간  $x=1.4$  부근에서 다른 와가 보이는데, 이 와는 전단층이 발달하는 위치( $y=0$ )보다 문풀의 안쪽에 위치하고 있다. 여기서 발생한 와는 전단층의 속도 구배가 갖는 불안정성에 의해 발생하는 와가 아니라 문풀의 기하학적 형상과 자유 수면의 교란에 의해 생성된 와이다. 따라서 문풀의 깊이 정도의 크기를 갖는 와가 전단층에 의해 더욱 강도가 강해지면서 문풀의 후류 끝단에 충돌하는 과정을 거친다. 이상의 유동 특성을 정리해보면 mode 1의 경우 전단층의 발달에 의해 와가 발생하며 작은 크기의 와가 문풀 형상 내에 약 2개 정도 존재하기 때문에 높은 주파수의 압력 변동을 보이는 반면, mode 2의 경우 자유 수면의 영향에 의해 와가 발생하며 전단층의 발달에 따라 매우 와의 강도가 매우 강해지면서 낮은 주파수의 강한 압력 변동이 발생한다. 따라서 Fig. 4(a)에서 관찰되는 힘의 변동량보다 Fig. 5(a)에서 보여지는 힘의 변동량이 더 크게 나타난다.

이상에서 살펴본 바와 같이 전단층의 발달과 와의 형성, 충돌 등은 대표적으로 점성 효과가 반영된 유동 현상이므로 축척비에 따른 Re 수의 변화에 영향을 받게 된다. 즉 Fr 수의 상사성을 통해 문풀의 기하학적 형상 크기와 유동 속도를 결정하더라도 Re 수에 따라 상사성이 성립하지 않는 유동 구조가 나타날 수 있다.

#### 4. 결론

문풀 내부 유동을 Fr 수에 기반하여 상사할 경우 나타날 수 있는 축척비의 영향을 알아보기 위해 문풀 내부 유동에 대해 2차원 수치 해석을 수행하였다. 기존 연구에서 수행하였던 기준 축척비에 대해 절반 크기의 문풀과 2배로 큰 문풀을 사용하였으며, 각 문풀에 대해 Fr 수가 일정하도록 유동 속도를 결정하였다. 문풀의 크기가 작은 경우에는 일정한 크기와 주기의 압력 변동이 관찰되는 반면, 문풀의 크기가 커질수록 압력 변동의 양상이 복잡해지는 것을 볼 수 있었다. 기존 연구에서 사용하였던 문풀의 크기보다 2배 큰 문풀의 경우 압력 변동 주기가 변하였는데, Fr 수의 상사성에 따른 mode 1의 변동 주기와 달리 변동 폭이 매우 크고 주기가 긴 mode 2에 해당하는 유동 특성이 나타났다. Mode 1의 압력 변동 특성이 주로 전단층에 의한 와 생성에 따라 결정된다면, mode 2에 해당하는 유동 특성은 자유 수면의 가진에 따른 와 생성과 관련이 있다.

#### References

- [1] Choi, S. Y., Y. G. Lee, K. L. Jeong and Y. J. Ha(2011), Reduction of Added Resistance by Internal Flow Control in the Moonpool of a Drillship, Journal of the Society of Naval Architect of Korea, Vol. 48, No. 6, pp. 544-551.
- [2] Heo, J., J. -C. Park and M. -H. Kim(2011), CFD Analysis of Two-Dimensional Floating Body with Moon Pool under Forced Heave Motion, The Korean Society of Ocean Engineers, Vol. 25, No. 2, pp. 36-46.
- [3] Im, N. -K, S. -H. Han and T. N. L. Nguyen(2011), A Study on Ship's Maneuverability Evaluation by Real Ship Test, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 17, No. 4, pp. 383-389.
- [4] Kim, D. J., J. W. Park, J. N. Kim and U. C. Jeong(2006), An Experimental Study on the Moonpool Characteristics of a Cleaning Ship for Ocean Environment Purification, Journal of Ocean Engineering and Technology, Vol. 20, No. 2, pp. 46-51.
- [5] Lee, S. B., B. W. Han, D. W. Park, Y. W. Ahn, S. C. Go and H. W. Seo(2012), Proper Orthogonal Decomposition of Pressure Fluctuations in Moonpool, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 49, No. 6, pp. 484-490.
- [6] Molin, B.(2001), On the Piston and Sloshing Modes in Moonpools, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 430, pp. 27-50.
- [7] Yoo, J. H. and S. H. Choi(2004), Performance of Drillship with Moonpool and Azimuth Thrusters. Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 41, No. 6, pp. 33-39.

Received : 2015. 10. 19.

Revised : 2015. 12. 07.

Accepted : 2016. 02. 25.