

## 자유표면 밑을 전진하는 원주 주위의 유동에 관한 연구

이혁준\* · 신현경\*\* · 윤범상\*\*

\*현대중공업(주)

\*\*울산대학교 조선해양공학부

# Study on Flow Around Circular Cylinder Advancing Beneath Free Surface

Hyuck-Joon Yi\*, Hyun-Kyung Shin\*\* and Bum-Sang Yoon\*\*

\*Hyundai Heavy Industry Co. Ltd., Ulsan, Korea

\*\*School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan, Ulsan, Korea

**KEY WORDS:** Circular cylinder 원주, Free surface 자유표면, Vortex shedding 보텍스 진동, VOF method VOF 법, Computational fluid dynamics(CFD) 전산유체역학

**ABSTRACT:** The flow around a circular cylinder advancing beneath the free surface is numerically investigated using a VOF method. The simulations cover Froude numbers in the range of 0.2~0.6 and gap ratios ( $h/d$ ) in the range of 0.1~2.0, where  $h$  is the distance from the free surface to a cylinder, and  $d$  is the diameter of a cylinder at Reynolds number 180. It is observed that the vortex suppression effect and surface deformation increase as the gap ratio decreases or the Froude number increases. The most important results of the present study are as follows. The proximity of the free surface causes an initial increase in the Strouhal number and drag coefficient, and the maximum Strouhal number and drag coefficient occur in the range of 0.5~0.7. However, this trend reverses as the gap ratio becomes small, and the lift coefficient increases downward as the gap ratio decreases.

### 1. 서 론

원주의 후류에서 비대칭적으로 발생하는 보텍스로 인한 항력과 양력의 변화는 구조물의 진동 또는 소음을 발생시키기 때문에 유체분야에서 학문적으로는 물론 실제적인 점에서도 매우 중요한 문제 중 하나로 인식되어왔다. 이와 관련하여 무한유체 중에서의 유동문제를 다룬 주요 연구결과를 요약하면,

(1) 원주의 후류 유동은 레이놀즈 수(Rn)에 따라 Laminar영역 ( $Rn < 300$ ), Subcritical 영역( $300 < Rn < 3 \times 10^5$ ), Critical 영역( $3 \times 10^5 < Rn < 3.5 \times 10^5$ ), Supercritical 영역( $3.5 \times 10^5 < Rn < 1.5 \times 10^6$ ), uppercritical 영역( $1.5 \times 10^6 < Rn < 4.5 \times 10^6$ ), Transcritical 영역( $4.5 \times 10^6 < Rn$ )으로 구분된다는 것과(Sumer and Mutlu, 2007; Williamson, 1989; Bloor, 1964; Schewe, 1983; Roshko, 1961).

(2) 보텍스가 발생하는 빈도를 무차원화 한 Strouhal 수( $St=f \cdot d/u$ , 여기서  $f$ 는 보텍스 진동(Shedding) 주기,  $d$ 는 원주 직경,  $u$ 는 유속)는 Critical 영역 이전까지 약 0.2로 일정하다가 Critical 영역 이후에 0.4이상으로 급격히 변한다는 것(Sumer and Mutlu, 2007).

(3) 항력계수는 Critical 영역 이전까지 1.0수준이다가 Critical 영역 이후에 급격히 떨어진다는 것이다.(Sabersky et al., 1998)

한편 원주가 자유표면 밑 가까이에 있을 때에는 자유표면의 효과, 즉 자유표면 쪽의 보텍스가 억제되며, 수면 형상의 변형 등으로 인해 보텍스 발생이 더욱 비대칭적인 형태로 변화된다. 이러한 현상은 해저파이프라인, 해양구조물, 잠수함, 조력발전소 등의 해양·플랜트 등에서 예상치 못한 문제를 야기할 수가 있어 이의 사전 예측은 매우 중요하다. 그러나 자유표면이 없는 무한유체 내의 원주 유동은 거의 전 영역에 대해 연구가 된 반면에 자유표면 근처의 원주유동에 대한 연구는 상대적으로 많이 부족한 상황이다. Taneda(1965)는  $Rn=170$ ,  $0.1 \leq h/d \leq 0.6$  ( $h$ : 자유표면부터 원주까지의 거리) 영역에 대한 실험을 통해서 갭 비율(Gap ratio,  $h/d$ )이 크면 규칙적인 보텍스 진동이 생기나, 작은 갭 비율에서는 단일 레이어 보텍스가 생긴다는 것을 확인하였고, Roshko et al.(1975)은 갭 비율이 줄어들면 항력이 증가하다가 급격히 감소한다는 것을 알아내었다. Gökten(1975)은 벽면(Plane surface) 근처의 원주의 항력이 갭 비율이 약 0.5일 때 최대가 되었다가

Received 12 June 2012, revised 19 August 2013, accepted 10 October 2013

Corresponding author Bum-Sang Yoon: +82-52-259-2160, bsyoon@ulsan.ac.kr

© 2013, The Korean Society of Ocean Engineers

It is noted that this paper is revised edition based on proceedings of KAOST 2012 in Daegu.

급격히 감소한다는 것과 벽면 근처의 원주의 양력이 갭 비율이 줄어들수록 증가한다는 것을 확인하였다. Bearman and Zdravkovich(1978)은 Gap ratio가 약 0.25이하에서 Strouhal 수가 급격히 줄어든다는 것을 확인하였다. Gökten(1975)은 Strouhal 수가 갭 비율 0.5로 감소할 때까지는 증가하다가 그 이하에서는 감소한다는 것을 알아내었다.

Yu and Tryggvason(1990)은 자유표면의 변형은 프루드 수가 주요 변수라는 것을 알아내었다. Reichl et al.(2005)는  $Rn=180$ ,  $0 \leq Fn \leq 0.7$ ,  $0.1 \leq \text{갭 비율} \leq 5.0$  범위에서 Strouhal 수, Formation 길이 변화에 대해서 확인하였다.

국내에서는 Moon et al.(2005), Song et al.(1997)과 같이 원주 주위의 유동에 대한 연구와 Lee and Park(2006), Jeon et al.(1996)과 같이 복수의 원주 주위 유동에 대한 연구 등이 있다.

그럼에도 불구하고, 아직까지 물수체 주위의 유동에 대한 자유표면의 효과를 정도 높게 예측하는 기법은 아직 확립되지 않은 것으로 보이며, 따라서 일관된 결론이 많이 부족해 보이는 것이 사실이다.

이에 본 연구에서는 이미 타당성이 널리 입증된 ANSYS FLUENT R12와 Volume of fluid(VOF)기법을 도입하여 철저하게 이 문제를 해석하여 보았다. 즉, 자유표면 밑에서 전진하는 원주 주위의 유동, 수면 변화, 원주에 작용하는 항력, 양력, Strouhal 수의 변화를 프루드 수와 갭 비율을 별로 고찰하기 위하여  $Rn=180$ ,  $0.2 \leq Fn \leq 0.6$ ,  $0.1 \leq \text{갭 비율} \leq 2.0$  범위에서 다양한 해석을 수행하였으며, 그 결과를 보고한다.

## 2. 문제의 설정과 수치 해석 방법

### 2.1 계산영역 및 조건

해석을 위한 계산영역은 Fig. 1과 같이 왼쪽은 유체 유입경계면, 오른쪽은 유체 유출경계면으로 하여, 유동방향으로 그 거리를 상류쪽은 직경( $d$ )의 10배, 하류쪽은 직경의 20배로 설정하였다. 그리고 심도(자유표면에서 원주 윗면까지의 거리,  $h$ )에 따라 자유표면의 위치를 변화시켰으며, 그 외에 자유표면이 있으므로 중력가속도( $g$ )를 고려하였다. 본 계산에서 계산조건으로 사용한 중요 변수는 레이놀즈 수( $Rn$ ), 프루드 수( $Fn$ ), 갭 비율( $h/d$ ) 등이다. 본 연구에서 사용된 격자는 Fig. 2와 같으며, 레이놀즈 수별로 실

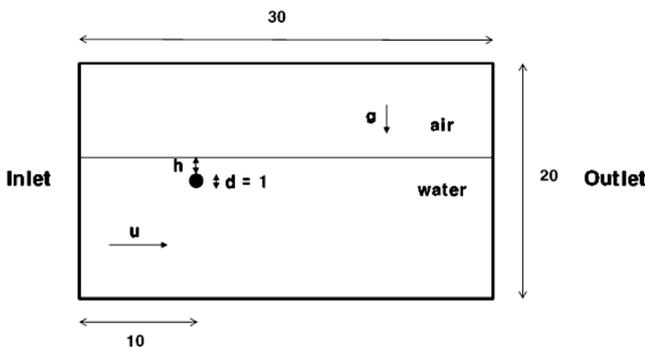


Fig. 1 Definition sketch of a circular cylinder advancing beneath free surface

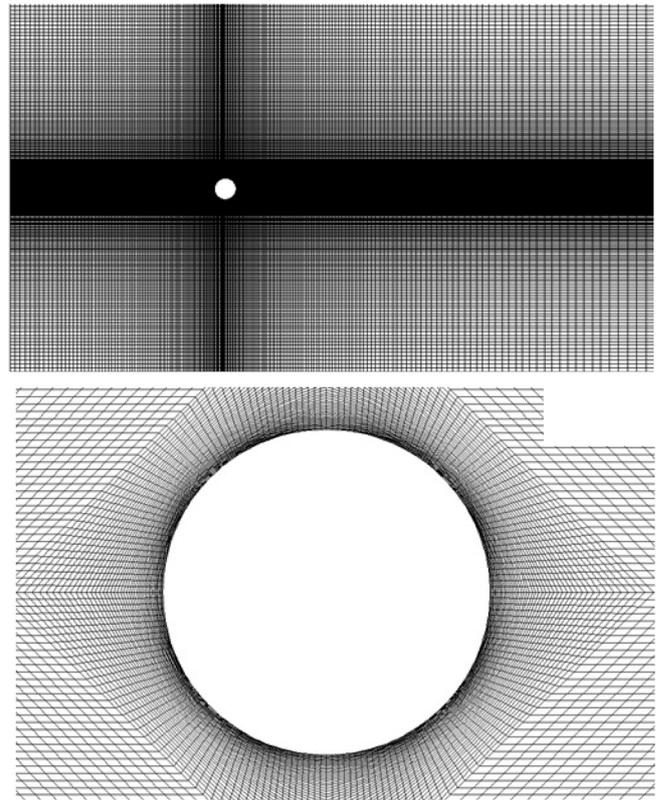


Fig. 2 Mesh with 62,100 cells used in the calculations

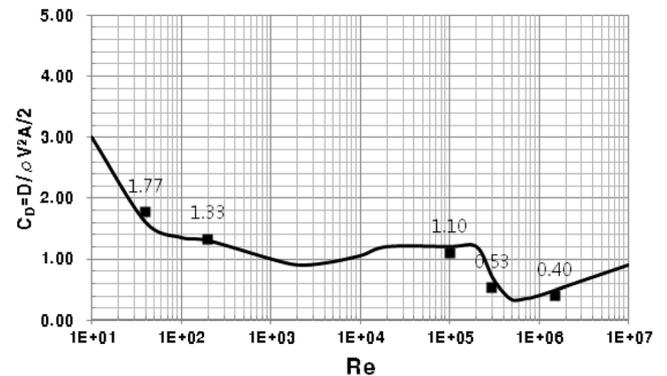


Fig. 3 Drag coefficients for a cylinder as a function of Reynolds number (full line : Sabersky et al.(1998), Dot : present)

린더의 항력계수를 계산하여 Fig. 3과 같이 Sabersky et al.(1998)의 내용과 비교해 보았다.

### 2.2 전산유체해석 및 해석 범위

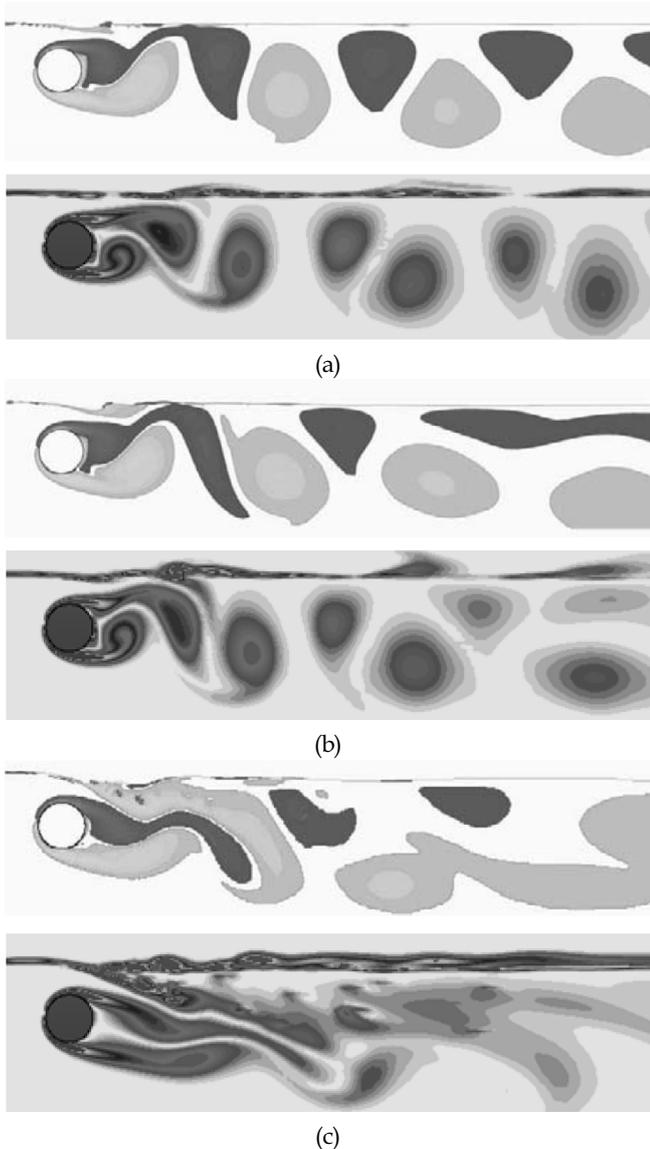
본 연구를 위한 전산유체해석은 상용 전산유체해석 프로그램인 ANSYS FLUENT R12를 사용하였다. 시간에 따른 변화를 파악하기 위한 해석(Unsteady)을 수행하였으며, 또 자유표면의 위치와 형상을 파악하기 위해서 Volume of fluid(VOF) 방법을 사용하였다. 경계조건으로서 하부와 상부 경계면에는 대칭조건을, 유입 경계면에는 'Pressure inlet', 유출경계면에는 'Pressure outlet'을 각각 적용하고 심도에 따라 자유표면 위치를 조정하였다. 물체

**Table 1** Range of numerical analysis

Rn	Fn	Gap ratio (h/d)
180	0.2, 0.3 0.4, 0.6	0.1, 0.15, 0.2, 0.4, 0.55, 0.7, 1.0, 1.5, 2.0

경계면에는 No slip 조건을 적용하였다.

자유표면 밑의 원주 주위의 유동장 해석을 위해서 사용한 해석 범위는 Table 1에 요약하였다. Barkley and Henderson (1996)에 따르면 2차원 유동이 불안정해지면서 3차원 유동으로 전이되는 레이놀즈 수가  $188.5 \pm 1.0$  로 알려져 있으므로, 본 계산에서 사용한 레이놀즈 수는 180으로 하였다. 프루드 수의 영향을 살펴보기 위하여 중력값을 변화시켜 0.2, 0.3, 0.4, 0.6로 설정하였으며, 자유표면의 영향을 살펴보기 위하여 갭 비율은 0.1부터 2.0까지로 설정하였다.



**Fig. 4** Vorticity street for a gap ratio 0.55 at (a)  $Fn = 0.3$ , (b) 0.4, (c) 0.6, upper : Reichl et al., 2005, lower : present

### 3. 유동특성에 미치는 자유표면 효과

#### 3.1 프루드 수에 따른 유동 변화

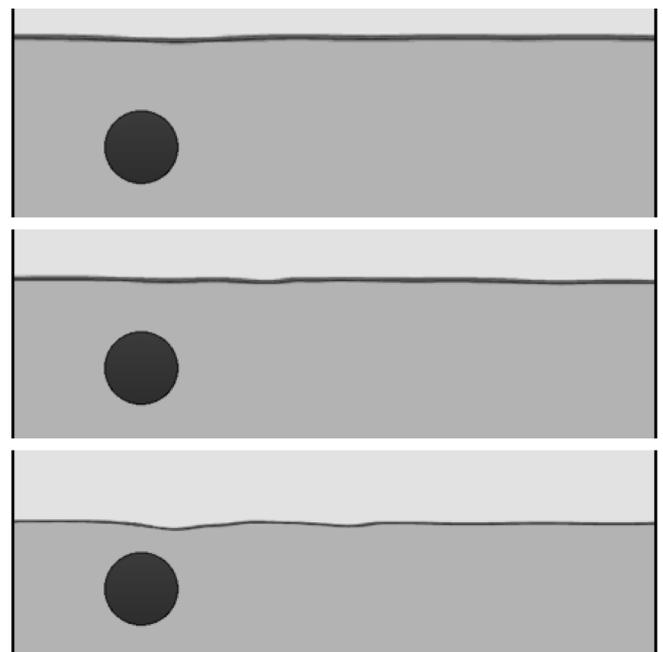
본 해석결과의 전형적인 예로써, 갭 비율이 0.55이고, 프루드 수가 0.3, 0.4, 0.6일 때의 유동 유형을 Reichl et al.(2005)의 결과와 Fig. 4에 비교하였다. 두 결과를 비교시 후류에서의 보텍스 방출 주기 및 보텍스 길이 등에는 다소 차이가 있으나, 프루드 수에 따른 유동장의 변화 유형에 있어서는 정성적으로 유사한 경향을 보였다. 즉, 프루드 수가 0.3일 때는 상하 보텍스가 비교적 균일하게 발생하고, 프루드 수가 0.4일 때는 상부 보텍스가 약해지고, 프루드 수가 0.6일 때는 원주 상부를 지난 유체가 자유표면 하부로 유입 유동이 발생하고 실린더 후부의 보텍스가 길어지는 등의 변화가 그것이다.

#### 3.2 갭 비율과 프루드 수에 따른 자유표면 변화

Fig. 5에는 프루드 수가 0.3 이고, 갭 비율이 1.0, 0.7, 0.4 일 때의 자유표면 형상을, Fig. 6에는 프루드 수가 0.6 이고, 갭 비율이 1.0, 0.7, 0.4 일 때의 자유표면 형상을 각각 보인다. 프루드 수가 0.3일 때는 자유표면은 큰 변화가 없으나, 프루드 수가 0.6 일 때는 원주 상부를 지난 유체가 쇄파현상으로 역류가 발생하여 자유표면 하부로 유체가 유입하여 자유표면의 변화가 커진다. 그리고 자유표면 쇄파위치는 갭 비율이 작아질수록 물체방향으로 근접한다. 이것은 앞에서 기술한 보텍스 억제 현상 경향과 일치하여, 갭 비율이 작아질수록, 프루드 수가 커질수록 자유표면 형상변화는 커지게 된다.

#### 3.3 갭 비율과 프루드 수에 따른 유동 변화

Fig. 7에는 프루드 수가 0.3 이고, 갭 비율이 1.0, 0.7, 0.4 일



**Fig. 5** Surface deformation at Froude number 0.3 and gap ratio 1.0 (upper), 0.7(middle), 0.4(lower)

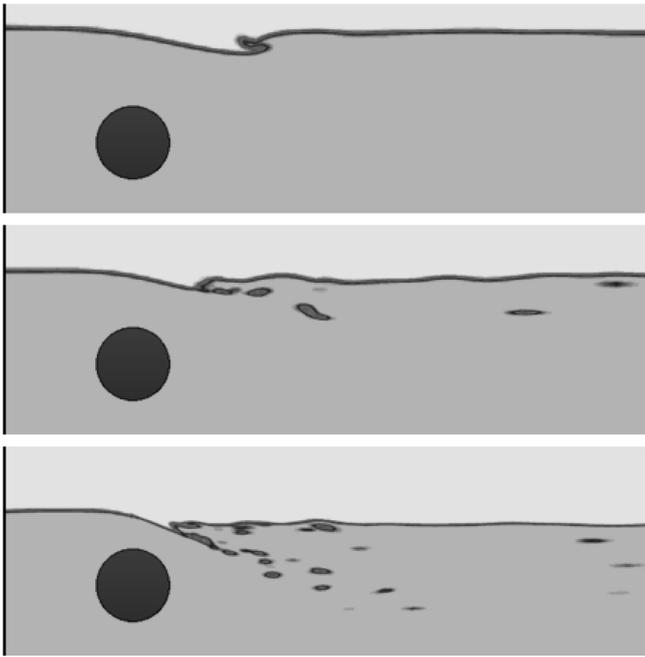


Fig. 6 Surface deformation at Froude number 0.6 and gap ratio 1.0 (upper), 0.7(middle), 0.4(lower)

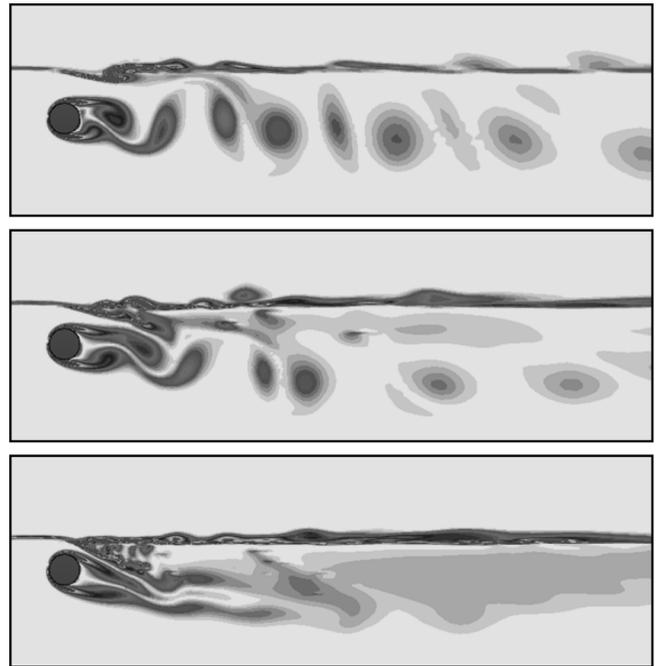


Fig. 8 Vorticity Magnitude at  $Fn = 0.6$  and gap ratio 1.0 (upper), 0.7(middle), 0.4(lower)

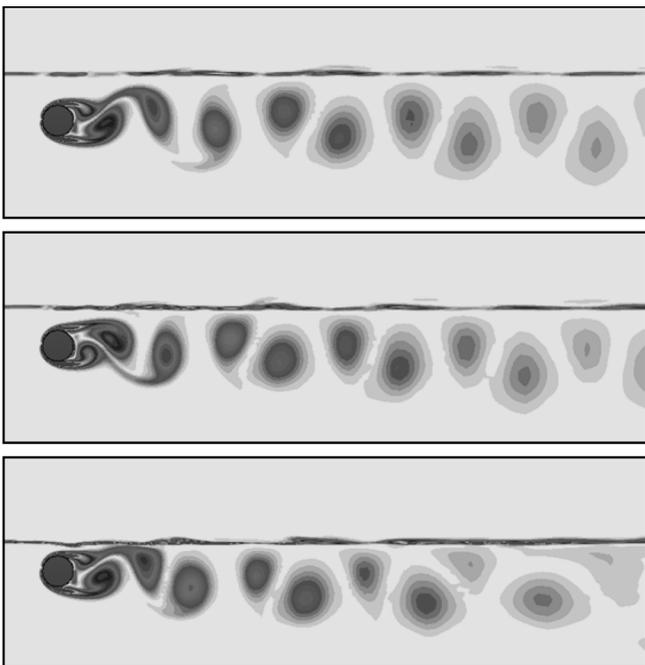


Fig. 7 Vorticity Magnitude at  $Fn = 0.3$  and gap ratio 1.0 (upper), 0.7(middle), 0.4(lower)

때의 유동장을, Fig. 8에는 프루드 수가 0.6 이고, 갭 비율이 1.0, 0.7, 0.4 일 때의 유동장을 각각 보인다. 프루드 수가 0.3일 때는 상부·하부 교대로 원형 보텍스가 발생하고 후류로 갈수록 갭 비율이 작아질수록 자유표면의 존재 때문에 상부 보텍스의 크기가 약해지는 것을 알 수 있다.

한편 프루드 수가 0.6으로 커지면, 상부 보텍스가 타원형으로

바뀌고 위치도 하부 보텍스와 거의 동일한 심도로 바뀌는 사실을 알 수 있다. 3.2에서 전술한 유입유동으로 인해 실린더 후부, 특히 자유표면 방향의 보텍스가 길어지며, 또 보텍스 진동의 규칙성이 깨지는 것으로 나타나 Tanada(1965)의 결과와 같은 경향임을 확인할 수 있었다.

프루드 수에 따른 변화를 실험적으로 입증하는 것은 실험마다 유체를 바꾸든지, 중력의 크기를 바꾸든지 하지 않는 이상 불가능하다. 중력장 내에서 같은 유체를 사용할 경우, 프루드 수가 바뀌면 자연스럽게 레이놀즈 수도 바뀌기 때문이다. 본 계산은 프루드 수에 의존하는 자유표면의 영향을 파악하기 위함이므로, 레이놀즈 수는 일정하게 하였다.

Table 1의 해석범위에 대한 갭 비율과 프루드 수 별로 원주 후부에 보텍스 발생 여부를 Fig. 9과 같이 정리하였고, 이를 Reichl et al.(2005)의 결과와 비교하였다. Reichl et al.(2005)의 계산은 본 계산에 비해 좁은 영역을 대상으로 하였으나, 전반적으로 비

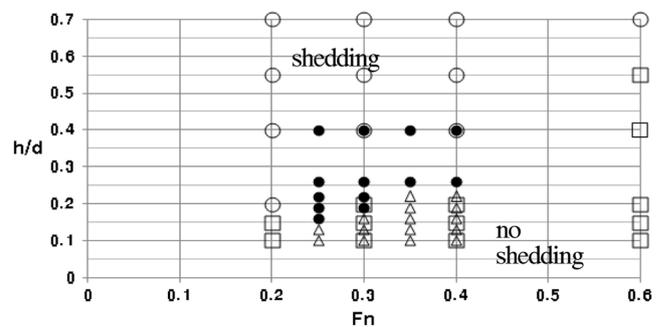


Fig. 9 Occurrence of vortex shedding according to gap ratio( $h/d$ ) and Froude number (○ : shedding, □ : no shedding(present), ● : shedding, △ : no shedding (Reichl et al., 2005))

슷한 결과를 보여준다. 즉, 프루드 수가 커질수록 보텍스 진동이 발생하지 않는 갭 비율 범위가 커지는 것을 알 수 있다.

3.4 갭 비율과 프루드 수에 따른 Strouhal 수의 변화

Fig. 10는 갭 비율과 프루드 수에 따른 Strouhal 수의 변화를 나타낸다. Strouhal 수는 자유표면이 없을 때의 Strouhal 수로 normalization한 값이다.

프루드 수가 0.2일 때를 제외한 나머지 영역에서는 갭 비율이 줄어들수록 Strouhal 수가 증가하여 약 0.7 에서 최대가 되었다가 이보다 작아지면 Strouhal 수가 감소함을 알 수 있었고, Gökten (1975)의 결과와 같은 경향임을 알 수 있었다. 자유표면의 존재는 Strouhal 수의 변화를 분명하게 야기하는 것으로 보인다.

3.5 갭 비율과 프루드 수에 따른 항력의 변화

Fig. 11은 갭 비율과 프루드 수에 따른 항력계수의 변화를 나타낸다. 항력계수는 주기적으로 변화는 항력계수의 시간평균 값이며, 자유표면이 없을 때의 것으로 Normalize 한 값이다. 프루드 수가 0.6인 경우를 제외한 나머지 모든 프루드 수의 경우에 갭 비율이 줄어들수록 항력이 증가하여 약 0.5 ~ 0.7 에서 최

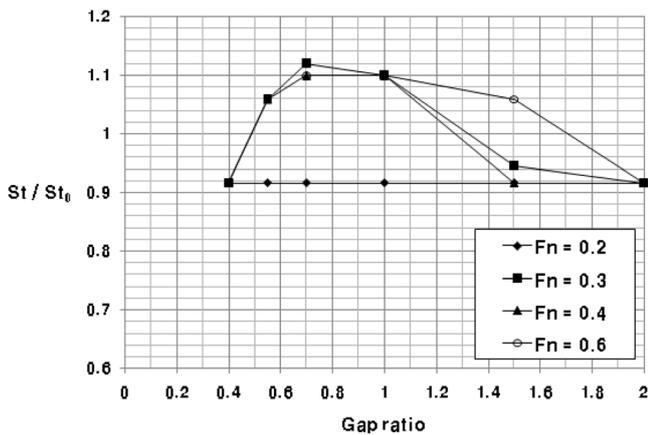


Fig. 10 Strouhal number according to Froude number and gap ratio

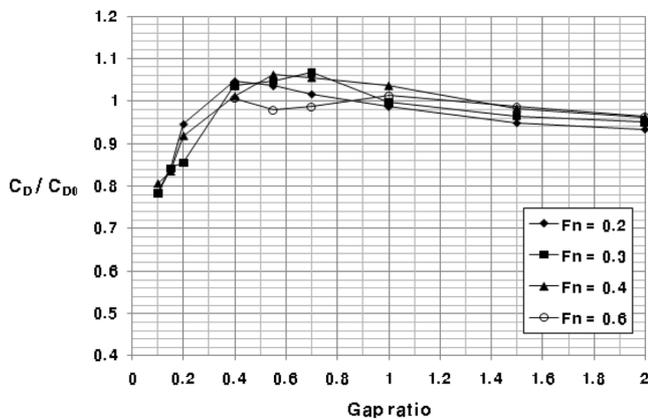


Fig. 11 Time averaged drag coefficient according to Froude number and gap ratio

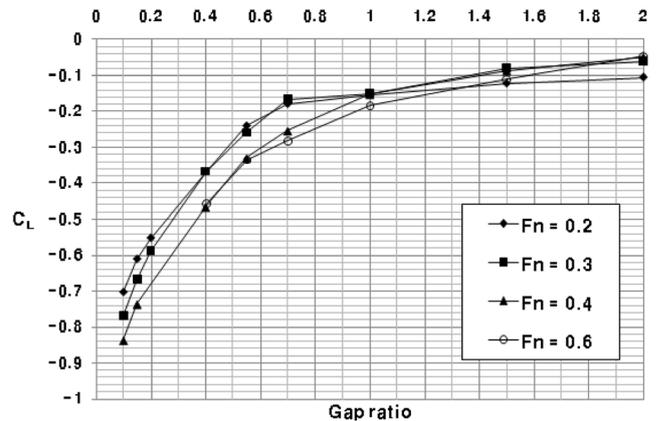


Fig. 12 Time averaged lift coefficient according to Froude number and gap ratio

대가 되었다가 이보다 작아지면 오히려 감소하는 경향을 보이고 이는 Roshko et al.(1975), Gökten(1975)의 결과와 같은 경향이다. 갭 비율이 대략 1.5 이상 되면 거의 모든 프루드 수에서 자유표면의 영향은 무시할만한 것으로 보인다.

3.6 갭 비율과 프루드 수에 따른 양력의 변화

Fig. 12는 갭 비율과 프루드 수에 따른 양력의 변화를 나타낸다. 양력계수는 주기적으로 변화는 양력계수의 시간평균 값이다. 모든 프루드 수에 대해서 갭 비율이 줄어들수록 양력이 아래쪽(자유표면 반대 방향)으로 증가하였다.

벽면 근처에 위치하는 원주주위의 유동 및 압력에 대한 벽면 효과를 측정된 실험 결과와(Gökten, 1975), 자유표면 효과를 다룬 본 연구에서 얻어진 양력의 방향이 서로 같다는 사실을 확인하였다.

이 경우 역시 모든 프루드 수 영역에서 갭 비율이 대략 1.5 이상 되면 자유표면의 영향은 무시할 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 자유표면 밑에서 전진하는 원주 주위의 유동, 수면 형상, 원주에 작용하는 항력, 양력, Strouhal 수의 변화 등에 미치는 자유표면의 영향을 알아보기 위하여, 다양한 계산을 수행하였다. 계산결과에 대한 분석을 통해 다음과 같은 몇 가지 중요한 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 갭 비율이 작아질수록 또는 프루드 수가 커질수록 보텍스 억제 효과가 커진다는 것을 알 수 있었다. 또한 갭 비율이 작아질수록 또는 프루드 수가 커질수록 수면의 형상 변화도 커지며, 보텍스 억제 효과와 수면 변화 효과사이에 상호 연관이 있다.
- (2) Strouhal 수는 갭 비율이 약 0.7 까지는 증가하다가 이보다 갭 비율이 더 작아지면 감소하는 경향을 보인다.
- (3) 항력은 갭 비율이 약 0.5 ~ 0.7 까지는 증가하다가 이보다 갭 비율이 더 작아지면 감소하는 경향을 보인다.
- (4) 양력은 갭 비율이 작아질수록 아래쪽(자유표면 반대 방향)으로 증가하는 경향을 보인다. 이 사실은 추후 실험적 확인이 반드시

필요할 것으로 사료된다.

본 연구에서 수행한 계산은 층류유동의 한 가지 경우, 레이놀즈 수가 180, 에 대한 것으로서 이 결과를 모든 경우에 대해 일반화시킬 수는 없을 것이며, 더욱 다양한 조건을 고려한 계산이 필요하다.

## 후 기

본 연구는 2012년도 산업통산자원부의 재원으로 한국에너지기술평가원(KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구과제 (No. 201240-30200110 and No. 20128520020010)입니다.

## References

- Barkley, D., Henderson R.D., 1996. Three Dimensional Floquet Stability Analysis of the Wake of a Circular Cylinder. *J. Fluid Mech*, 322, 215-241.
- Bearman, P.W., Zdravkovich, M.M., 1978. Flow Around a Circular Cylinder Near a Plane Boundary. *J. Fluid Mech.*, 89, 33-47.
- Bloor, M.S., 1964. The Transition to Turbulence in the Wake of a Circular Cylinder. *J. Fluid Mech*, 19, 290-304.
- Göktun, S., 1975. The Drag and Lift Characteristics of a Syylinder Placed near a Plane Surface. Master's Thesis, Naval Postgraduate School, Monterey, California, USA.
- Jeon, W.S., Park, J.S., Kwon, S.H., Ha, D.D., Lee, Y.H., Lee, M.H., 1996. Experimental Study of Flow Fields around Cylinder Arrays Using PIV. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 10(3), 83-88.
- Lee, S.B., Park, J.C., 2006. Characteristics of Laminar Wake Around Two-Circular Cylinder in Side-by-Side Array. *Journal of Ocean System Engineering*, 20(5), 15-22.
- Moon, J.K, Park, J.C., Yoon, H.S., Lee, B.H., Chun, H.H., Suh, S.B., 2005. Numerical Simulation on Laminar Flow Past a Rotating Circular Cylinder. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 19(3), 1-10.
- Reichl, P., Hourigan K., Thompson M.C., 2005. Flow Past a Cylinder Close to a Free Surface. *J. Fluid Mech*, 533, 269-296.
- Roshko, A., 1961. Experiments on the Flow Past a Circular Cylinder at Very High Reynolds Number. *J. Fluid Mech*, 10, 345-356.
- Roshko, A., Steinolfson, A., Chattoorgoon, V., 1975. Flow Forces on a Cylinder near a Wall or naer Another Cylinder. Paper IV-15, 1-3.
- Taneda, S. 1965. Experimental Investigation of Vortex Streets. *J. Phy. Soc.Japan*, 20, 1714-1721.
- Sabersky, R.H., Acosta A.J., Hauptmann E.G., Gates E.M., 1998. *Fluid Flow*, 4th Edition., Prentice Hall International Inc.
- Schewe, G., 1983. On the Force Fluctuations Acting on a Circular Cylinder in Crossflow From Subcritical up to Transcritical Reynolds Numbers. *J. Fluid Mech*, 133, 265-285.
- Song, M.S., Yim, G.T., Kim, W.J., 1997. Experimental and Computational Investigation of the Flow around a Circular Cylinder. *Journal of Ocean Engineering and Technology*, 11(4), 130-140.
- Sumer, B. Mutlu, 2007. *Hydrodynamics Around Cylindrical Structures*, World Scientific Publishing Company.
- Williamson, C.H.K., 1989. Oblique and Parallel Modes of Vortex Shedding in the Wake of a Circular Cylinder at Low Reynolds Number. *J. Fluid Mech*, 206, 579-627.
- Yu, D., Tryggvason, G., 1990. The Free Surface Signature of Unsteady Two Dimensional Vortex Flows. *J. Fluid Mech*, 218, 547-572.