

## 중력효과 및 캐비테이터 받음각 고려 공동 형상 예측기법 연구

김민재<sup>\*,1)</sup> · 이종주<sup>1)</sup> · 김선범<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 제6기술연구본부

### The Study of Prediction Method of Cavity Shape Considering Both Gravity Effect and Angle of Attack of Cavitator

Minjae Kim<sup>\*,1)</sup> · Jongju Yi<sup>1)</sup> · Sunbum Kim<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> The 6th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 25 August 2017 / Revised 1 November 2017 / Accepted 23 February 2018)

#### ABSTRACT

In this study, we develop a prediction method of cavity shape taking gravity effect and angle of attack of cavitator into consideration simultaneously. Logvinovich's theoretical formulas are superimposed to predict the change of cavity centerline due to both gravity effect and angle of attack of cavitator. It is found that as the angle of attack of cavitator increases, the gravity effect is weakened due to decrease in cavity volume, and even in case of the same angle of attack, cavity shape changes in different ways depending on whether the angle of attack of cavitator is positive or negative. We conclude that cavity shapes are largely affected by the angle of attack of cavitator, and the gravity effect and angle of attack of cavitator should be considered at the same time for the prediction of cavity shape.

Key Words : Cavitator(공동발생장치), Cavity Shape(공동 형상), Gravity Effect(중력효과), Angle of Attack(받음각)

#### 기 호 설 명

$D_n$  : 캐비테이터 직경, m

$R_n$  : 캐비테이터 반경, m

$L_c$  : 공동 길이, m

$D_c$  : 공동 최대 직경, m

$R_c$  : 공동 최대 반경, m

$V$  : 캐비테이터 속도, m/s

$\sigma$  : 공동수(Cavitation Number),  $\sigma = (P_\infty - P_c)/0.5\rho V^2$

$P_\infty$  : 유체압력, Pa

$P_c$  : 공동 내부압력, Pa

$\rho$  : 유체 밀도, kg/m<sup>3</sup>

$c_x$  : 항력계수(Drag coefficient),  $c_x = c_{x0}(1 + \sigma)$

$c_{x0}$  :  $\sigma = 0$ 일 때 항력계수,  $c_{x0} = 0.827$

$x_1$  : 수중운동체 축방향 위치,  $x_1 = D_n$

\* Corresponding author, E-mail: mjkim80@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

- $R_1$  :  $x = x_1$ 에서의 공동 반경,  $R_1 = 7^{1/3}R_n$ , m
- $\bar{x}$  : 수중운동체 축방향 무차원수,  $\bar{x} = x/R_n$
- $\bar{R}$  : 수중운동체 반경방향 무차원수,  $\bar{R} = R/R_n$
- $\bar{h}$  : 중력효과에 의한 공동 상승길이 무차원수,  

$$\bar{h} = \frac{h}{\frac{g(L_c/2)^2}{V^2}}$$
- $h$  : 공동 중심축 이동거리, m
- $V_y$  : 공동 상승 속도, m/s
- $g$  : 중력가속도, 9.8 m/s<sup>2</sup>
- $O_k(x)$  : 캐비테이터부터  $x$ 까지 공동 부피, m<sup>3</sup>

### 1. 서론

수중운동체가 고속으로 주행할 때 운동체 주위 유체의 압력 강하로 인해 물이 증기로 상변화하는 공동화(cavitation) 현상이 발생한다. 이 때 발생된 공동(cavity)은 수중운동체의 일부 또는 전체를 덮을 수 있는데, 이렇게 공동으로 덮여진 부분은 물과의 접촉이 차단되어 마찰저항을 감소시킬 수 있다. 특별히 공동이 수중운동체를 완전히 덮은 상태를 초공동화(Supercavitation) 상태라고 하며, 이 경우 표면마찰이 극소화되어 수중에서 초고속 주행이 가능하게 된다. 수중운동체 주위에 초공동화 상태를 만들어 주기 위해 일반적으로 공동발생장치라고 하는 캐비테이터(cavitator)를 운동체의 앞단에 부착하는데, 주로 디스크나 원뿔 형상이 많이 사용된다. 캐비테이터는 수중운동체의 초공동화를 위해 요구되는 크기의 공동을 발생시키도록 설계되어야 하며, 이를 위해선 캐비테이터로부터 발생하는 공동의 형상을 사전에 예측하는 기술이 필수적이다. 캐비테이터 형상 및 공동수(cavitation number)에 따른 공동의 형상에 관한 연구는 1950년대부터 지금까지 많은 연구가 이루어졌다. Garabedian<sup>[1]</sup>, Reichardt<sup>[2]</sup>, Logvinovich<sup>[3]</sup>은 디스크형 캐비테이터의 공동수 범위에 따른 공동의 최대 직경 및 공동 길이에 관한 연구를 수행하였다. Waid<sup>[4]</sup>는 캐비테이터 후단에 기체를 분사했을 때의 공동 최대 직경 및 공동 길이에 관한 연구를 진행하였다. Savchenko<sup>[6]</sup>는 실험결과를 바탕으로 공동수, 캐비테이터 직경에 따른 공동 형상에 관한 경험식을 제시하였다.

또한, 공동 형상은 중력효과와 캐비테이터 받음각에 따라 공동 형상이 변화되는 것으로 알려져 있다. 중력

효과는 공동과 물의 밀도 차이로 발생하는 부력으로 인해 공동이 중력의 반대방향으로 상승하는 것을 의미한다. 캐비테이터 받음각에 의한 공동 형성 변화는 공동을 발생시키는 캐비테이터와 주유동의 각도차이(받음각, Angle of Attack)에 의해 발생하는 양력에 의해 일어나는 것으로 알려져 있다.

기존 연구들은 중력효과 혹은 캐비테이터 받음각에 따른 공동 형성 변화 연구를 개별적으로 진행하였다. 실제 수중운동체는 발사 초기에는 중력효과에 의한 공동 형성 변화가 클 것으로 예상되며, 수중운동체 제어에 따른 받음각 변화로 인해 주행중 공동 형성 변화 및 중력효과에 의한 공동 형성 변화가 동시에 일어날 것으로 예상된다. 본 연구에서는 Logvinovich's independence principle을 이용하여 공동 형상을 해석하였고, 중력효과에 의한 공동 형성 변화 및 캐비테이터 받음각에 따른 공동 형성 변화를 예측하였다. 최종적으로는 중력 및 캐비테이터 받음각 효과를 동시에 고려했을 때, 공동 형성 변화에 관한 연구를 수행하였다.

### 2. 공동 최대직경, 공동길이 및 공동 형상

#### 2.1 Logvinovich's Independence Principle

Logvinovich는 포텐셜 유동장에 놓인 디스크 캐비테이터에 의한 공동 형상을 예측할 수 있는 간결한 방법을 1970년대에 고안하였다<sup>[3]</sup>.

Logvinovich는 캐비테이터에서 발생된 공동이 시간적/공간적으로 앞서 발생된 공동이나 뒤에 발생된 공동과는 무관하게 성장 및 소멸한다는 가정을 도입하여 시간에 따른 공동의 발생/소멸에 관한 이론을 정립하였다. 이 이론을 Logvinovich's independence principle이라고 한다. Logvinovich는 그의 이론을 정립하면서 디스크 캐비테이터에 의해 생성되는 공동 형상에 관한 이론식을 아래와 같이 정립하였다.

$$D_c = D_n \sqrt{\frac{c_x}{k\sigma}} \tag{1}$$

$$L_c = \frac{D_n}{\sigma} (a - b\sigma) \tag{2}$$

$$R(x) = \frac{D_c}{2} \sqrt{1 - \left(1 - \frac{R_1^2}{R_c^2}\right) \left|1 - 2 \frac{x - x_1}{L_c - 2x_1}\right|^{\frac{2}{\lambda}}} \tag{3}$$

Table 1. Empirical formulas of natural cavity shape for a disk cavitator

Author	$\sigma$ Range	$D_c$	$L_c$
Garabedian	$\rightarrow 0$	$D_n \sqrt{\frac{c_x}{\sigma}}$	$D_n \sqrt{\frac{1}{\ln \sigma}} \frac{\sqrt{c_x}}{\sigma}$
Reichardt	$< 0.1$	$D_n \sqrt{\frac{c_x}{\sigma - 0.132\sigma^{8/7}}}$	$D_c \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.7\sigma)}$
Logvinovich	0~1.2	$D_n \sqrt{\frac{c_x}{\sigma}}$	$\frac{D_n}{\sigma}(a - b\sigma)$
Savchenko	0.01~0.06	$D_n \sqrt{3.659 + \frac{0.761}{\sigma}}$	$\frac{D_n}{2} \left( 4.0 + \frac{3.595}{\sigma} \right)$

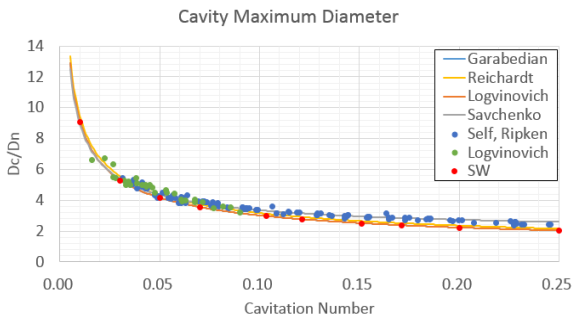


Fig. 1. Comparison of cavity maximum diameter

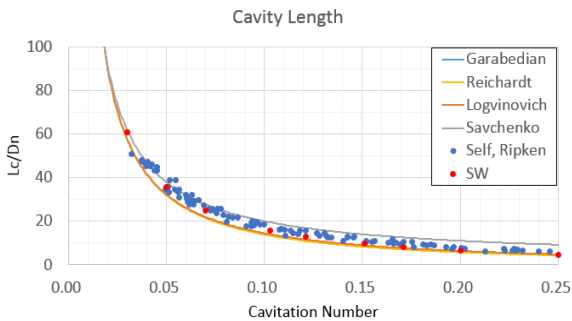


Fig. 2. Comparison of cavity length

$$R(x) = R_n \left( 1 + \frac{3x}{R_n} \right)^{1/3} \quad (4)$$

위 식에서  $D_c$ ,  $L_c$ ,  $D_n$ ,  $R_n$ 은 각각 공동 최대직경(=  $2R_c$ ), 공동길이, 캐비테이터 직경(=  $2R_n$ )이며, 항력계수  $c_x$ 는 Garabedian<sup>[1]</sup>이 제안한  $c_x = 0.827(1 + \sigma)$  식을

사용하였다.  $R(x)$ 는 캐비테이터의 중심으로부터 축방향  $x$  위치에서의 공동 반경을 나타내며, 여기서  $x_1 = 2R_n$ 이며,  $R_1$ 은  $x_1$ 에서의 공동 반경을 의미한다. 실험 상수  $a$ ,  $b$ ,  $k$ ,  $\chi$ 는 실험결과를 바탕으로 찾아낸 실험 상수로써,  $k \approx 1$ ,  $a = 1.72$ ,  $b = 3$ ,  $\chi = 0.85$ 이다. 본 연구에서는 Logvinovich의 이론식에 기반하여 공동 형상 예측 소프트웨어를 작성하였다. 공동 형상 계산 시  $x < 2R_n$ 인 경우에는 식 (4)를 이용하여 공동 형상을 계산하고,  $x \geq 2R_n$ 인 경우에는 식 (3)을 이용하여 계산하게 된다. 이 때, 공동 최대직경( $D_c$ )과 공동길이( $L_c$ )는 각각 식 (1)과 식 (2)를 사용하였다. 공동 최대 직경과 공동길이 예측을 위해 이미 많은 연구자들이 이론식 또는 실험에 기반한 경험식을 정립하였으며, Table 1에 각 연구자들의 식들을 정리하였다. 공동 형상 예측을 위한 검증에 위해 Table 1과 실험결과 간 비교를 Fig. 1, 2에 하였다. 실험결과는 Logvinovich<sup>[3]</sup>, Self & Ripken<sup>[5]</sup> 실험결과이다. Fig. 1은 공동 최대 직경에 관하여 공동수에 따라서 Table 1과 각 실험결과, 해석틀간 결과를 비교한 그래프이고, Fig. 2는 공동 길이를 비교한 결과를 도시하였다. Fig. 1, 2에 언급된 SW는 본 연구에서 작성한 해석틀에 의한 결과이다. Fig. 1에서 공동수 0.1 이하영역에서는 본 연구의 해석틀에 의한 결과와 타 연구자들의 경험식이 전반적으로 유사한 결과를 보이며, 실험과도 대체적으로 잘 일치함을 알 수 있다. 하지만 공동수가 0.1보다 큰 영역에서는 Self & Ripken의 실험결과와 실험에 기반한 Savchenko의 경험식과는 큰 차이를 보이고 있다. 이는 공동수가 클수록 공동 형상이 작아지고, 캐비테이터로

부터 박리된 유동이 재유입되는 re-entrant jet이 발생하면서 공동이 커졌다 작아졌다 하는 매우 불안정한 상태가 되어 공동의 형상을 예측하고 정의하기가 매우 어렵기 때문에 연구자들마다 공동 형상을 판단하는 기준 및 예측 오차에 따라 결과에 차이가 날 수 있다고 판단된다. Fig. 2의 공동 길이 예측 결과에서는 전반적으로 Self & Ripken의 실험결과와 Savchenko의 경험식이 공동 길이를 다소 크게 예측하는 경향이 있는 것으로 나타났으며, 타 연구자들의 경험식과 본 해석틀에 의한 결과는 대체적으로 유사한 결과를 보여주고 있다.

### 2.2 공동 형상

Savchenko<sup>[6]</sup>는  $0.012 \leq \sigma \leq 0.057$ 에서 공동 형상에 관한 경험식을  $\bar{x} \geq 2.0$  범위에서 식 (5)를 제시하였고,  $\bar{x} < 2.0$ 에서는 식 (4)를 이용한다.

$$\bar{R}^2 = 3.659 + 0.847(\bar{x} - 2.0) - 0.236\sigma(\bar{x} - 2.0)^2 \quad (5)$$

공동 형상을 예측한 Savchenko 실험결과<sup>[6]</sup>와 Savchenko 경험식 및 해석틀에 의한 공동 형상 예측 결과 비교를 Fig. 3에 도시하였다. 실험결과와 경험식 및 해석틀에 의한 결과가 서로 유사함을 확인하였다.

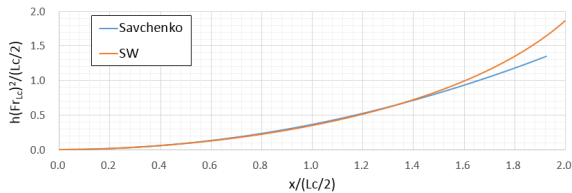


Fig. 3. Comparison of cavity rising due to gravity effect

### 3. 중력효과에 의한 공동 형상 변화

수중에서 주행하는 수중운동체의 캐비테이터에서 발생된 공동은 주변 유체와의 밀도차이에 의하여 중력의 반대 방향으로 상승하는 것으로 알려져 있고, 공동의 상승에 의해 전체 공동 형상은 변화된다. 이때  $V_y$ 로 상승중인 공동의 단위길이당 모멘트량과 부력에 의한 운동량이 동일하다는 가정으로부터 상승 높이를 식 (6)과 같이 산출할 수 있으며<sup>[3]</sup>, 이를 이용한 공동 상승

높이( $h$ )를 계산하였다.

$$h = \frac{g}{\pi V^2} \int_0^x \frac{O_k(s)}{\{R(s)\}^2} ds \quad (6)$$

중력효과에 의한 공동 형상 변화에 관한 경험식은 Savchenko<sup>[6]</sup>에 의해 아래와 같이 제시되었다.

$$h = \frac{(1+\sigma)\bar{x}}{3Fr_{Lc}^2} \quad (7)$$

식 (7)에서  $Fr_{Lc}$ 는 공동길이를 무차원화한 Froude수이다. Savchenko가 제시한 경험식과 본 연구에서 사용한 중력효과에 의한 공동 상승 예측 결과 비교에서  $x/(L_c/2) < 1.4$ 까지는 예측결과가 거의 일치함을 볼 수 있었으나 이후 범위에서는 다소 차이가 났다. 이는 공동 최대 직경 이후 영역에서 나타나는 와류 및 공동 붕괴 때문에 본 연구에서 사용한 Logvinovich's independence principle의 포텐셜 가정이 성립되지 않아 생긴 결과라 사료된다. 이러한 결과는 중력효과에 의한 공동 상승량 예측 실험을 한 Zhang<sup>[7]</sup>의 실험결과비교에서도 나타났다. Fig. 4에서 Case 1은  $Fr_{Lc} = 5.9$ ,  $\sigma = 0.065$ , Case 2은  $Fr_{Lc} = 4.55$ ,  $\sigma = 0.057$ , Case 3은  $Fr_{Lc} = 4.06$ ,  $\sigma = 0.077$ , Case 4은  $Fr_{Lc} = 4.19$ ,  $\sigma = 0.117$ 이다. Savchenko 경험식과 비교한 것과 유사하게  $x/(L_c/2) < 1.4$  영역에서는 실험결과와 유사한 결과를 얻을 수 있었으나,  $x/(L_c/2) > 1.4$  영역은 다소 상이한 결과가 도출되었다.

### 4. 캐비테이터 받음각에 따른 공동 형상 변화

캐비테이터가 받음각을 가질 경우 캐비테이터에는 양력  $F_y$ 가 발생하며, 이 양력에 의해 후류의 공동 형상이 변화하게 된다. 이 때 캐비테이터 양력은 공동의 운동량의 변화와 크기는 같고 방향은 반대이므로 Fig. 5와 같이 캐비테이터의 양력방향과 반대방향으로 공동이 휘어지게 된다. 즉, 캐비테이터 양력방향으로의 운동량  $F_y t$ 는 공동의 단위길이당 운동량  $-\rho\pi R^2(x) V^2 \dot{h}_f(x)$ 와 같아야 된다. 이를 이용하면 캐비테이터 받음각에 따른 공동의 중심축 변화는 식 (8)과 같이 계산할 수 있다<sup>[3]</sup>.

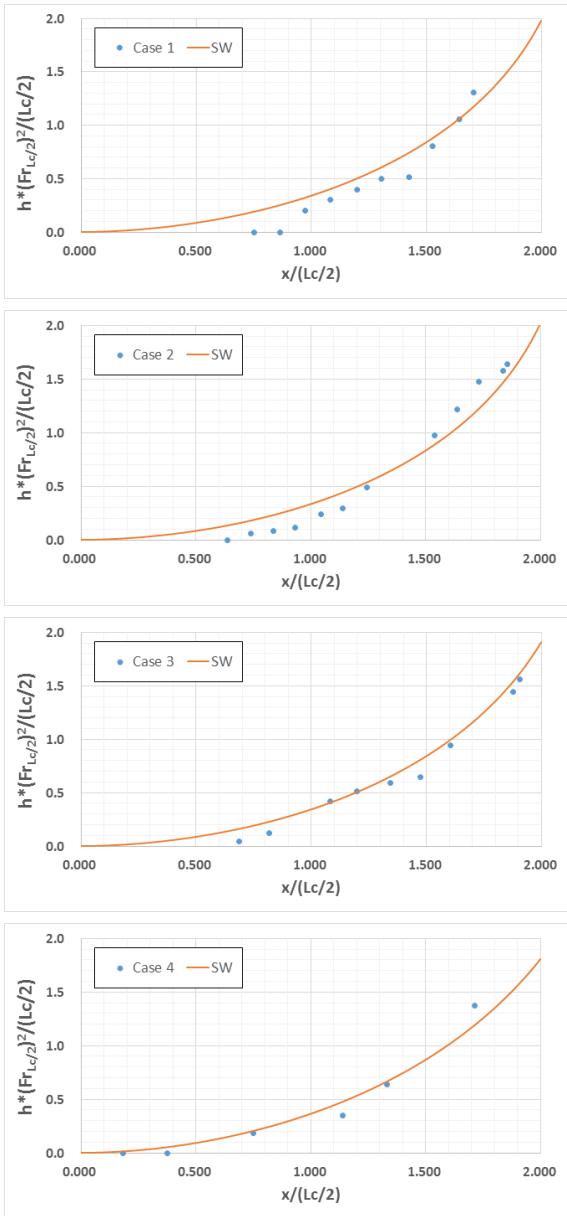


Fig. 4. Comparison of cavity rising prediction

$$h_f(x) = -\frac{F_y}{\pi\rho V^2} \int_0^x \frac{ds}{\{R(s)\}^2} \quad (8)$$

위 식에서  $F_y$ 는 캐비테이터 받음각에 따른 양력으로 본 논문에서는 Birkoff<sup>[8]</sup>가 제시한 식 (9)를 사용하였다. 식 (9)는 캐비테이터 받음각  $\alpha < 50^\circ$ 인 범위에서 실험 결과와 잘 일치하는 것으로 알려져 있다.

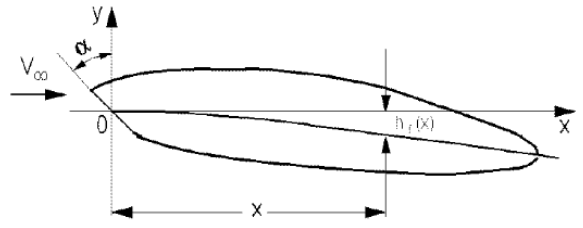


Fig. 5. Scheme of a supercavity past an inclined cavitator<sup>[9]</sup>

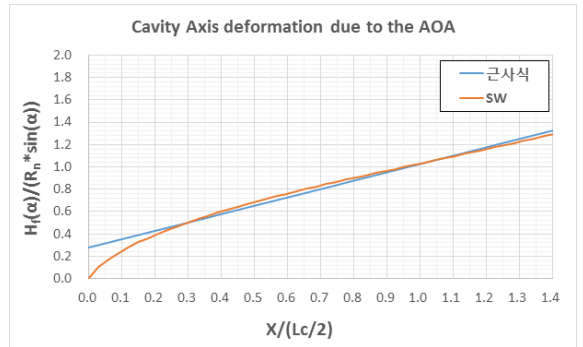


Fig. 6. The comparison of cavity axis deformation due to the angle of attack;  $\sigma = 0.08$ ,  $\alpha = 33.5^\circ$

$$F_y = F_{x0} \sin\alpha \cos\alpha \quad (9)$$

이때  $F_{x0}$ 는 캐비테이터 받음각이 없을 때( $\alpha = 0$ ) 캐비테이터에 작용하는 항력이다. 한편, 캐비테이터 받음각 변화에 따른 공동 중심축 변화를 예측할 수 있는 간단한 근사식은 식 (10)과 같이 제시되어 있다<sup>[9]</sup>. 여기서  $\bar{x} = 2x/L_c$ 이다.

$$h_f(\bar{x}) = -\frac{8F_y}{\rho V^2 \pi D_n^2} R_n (0.46 - \sigma + \bar{x}) \quad (10)$$

Fig. 6에는  $\sigma = 0.08$ ,  $\alpha = 33.5^\circ$  조건에서 식 (8)을 이용한 공동 중심축 변위 예측결과와 식 (10)을 이용한 결과를 비교하여 표시하였다. 두 식이 거의 유사한 결과를 도출하였으나,  $x/(L_c/2) < 0.3$  범위에는 다소 큰 차이를 보이고 있었다. 식 (10)의 경우, 식의 형태상 공동 중심축이 0에서부터 시작하지 않고 일정한 값을 가지도록 되어 있어 물리적으로 타당하지 않으므로 본 연구에서는 식 (8)을 사용한 공동 형상 예측 소프트웨어를 작성하였다.

5. 중력효과 및 캐비테이터 받음각 동시 고려 공동 형상 예측

중력효과는 공동의 후반부를 중력반대방향으로 변화시키고, 캐비테이터 받음각 효과는 주유동과 캐비테이터의 각도에 따라 작용방향이 다르다. 따라서 중력효과와 캐비테이터 받음각 효과에 의한 공동 형상 예측 시 캐비테이터 받음각 방향 또한 중요한 요소가 된

다. Fig. 7은 캐비테이터가 주유동 방향으로 기울어진 경우이며(positive angle of attack),  $\sigma = 0.087$  조건에서 캐비테이터 받음각 변화에 따른 공동 중심축 변화를 나타낸 그래프이다. 먼저 중력효과만 고려한 결과에서 공동의 뒷부분으로 갈수록 캐비테이터의 받음각 변화에 따른 중력효과에 차이가 발생함을 볼 수 있다. 이는 캐비테이터의 받음각이 클수록 캐비테이터의 투영면적이 작아져 결과적으로 캐비테이터 유효반경이 줄

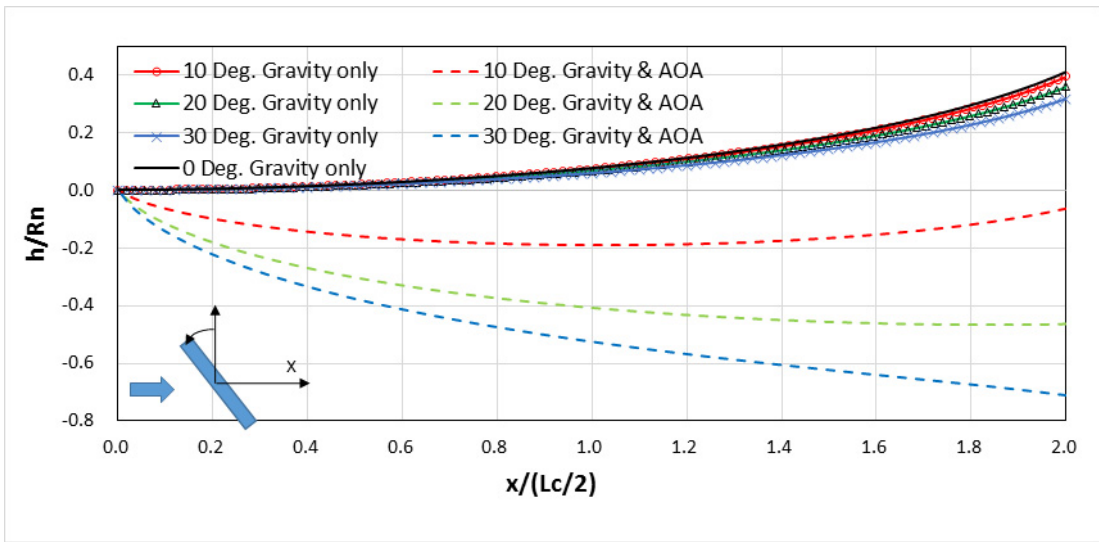


Fig. 7. Cavity center line change with respect to the positive angle of attack

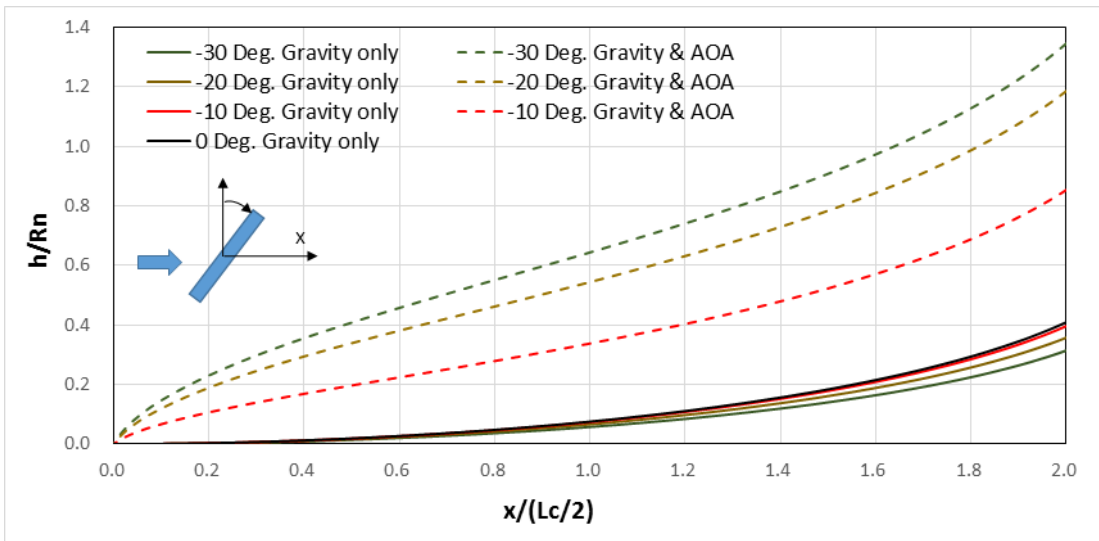


Fig. 8. Cavity center line change with respect to the negative angle of attack

어든 효과가 발생하고, 이로 인해 발생하는 공동 부피가 작아져 중력효과가 약하게 나타난 것으로 판단된다. 이러한 효과에 의해 캐비테이터 받음각에 따라 공동 최대 반경 및 공동길이, 공동 부피가 받음각이 0도 일때에 비해 줄어든 것으로 해석되었다(Table 2).

Table 2. The cavity maximum radius and length

AOA (Deg.)	$\frac{Volume_{AOA}}{Volume_{AOA=0}}$	$R_c/R_n$	$L_c/R_n$
-30	0.65	2.78	33.33
-20	0.83	3.02	36.00
-10	0.95	3.17	37.67
0	1.00	3.21	38.33
10	0.95	3.17	37.67
20	0.83	3.02	36.00
30	0.65	2.78	33.33

다음으로 중력효과만 고려한 경우와 캐비테이터 받음각 및 중력효과 모두를 고려했을 때 공동 형상이 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 캐비테이터에서 발생된 공동은 공동 발생 초기에는 캐비테이터 받음각 효과를 더 크게 받으며, 공동길이가 길수록 중력효과를 많이 받는 것으로 나타났다. Fig. 7에서 캐비테이터 받음각 10도, 중력효과와 받음각 효과를 동시에 적용한 해석결과를 보면, 공동 발생 초기에는 받음각 효과에 의해 공동이 중력방향으로 휘어 나타났지만, 공동 끝부분으로 갈수록 중력효과에 의해 공동이 상승하여 공동 중심축이 전체적으로 활모양이 되는 것을 확인하였다.

Fig. 8은 캐비테이터가 주유동 반대방향으로 기울어진(negative angle of attack)일 경우를 나타내고 있다. Fig. 7 해석결과와 달리 Fig. 8은 중력효과 작용방향과 받음각 효과 작용방향이 일치하기 때문에 공동 형상의 변화는 중력 반대방향으로만 나타나게 되며, 두 효과가 중첩되어 공동형상의 변화 폭이 크고 공동의 뒷부분으로 갈수록 점점 증가하게 된다.

상기 결과를 토대로 공동 형상은 주로 캐비테이터 받음각에 의해 크게 좌우되며, 캐비테이터 받음각 절대값이 동일해도 주유동과 캐비테이터 받음각 관계에 따라 공동 형상이 크게 달라짐을 알 수 있다. 이는 중

력효과에 의한 공동 형상 변화 방향은 항상 일정하지만, 캐비테이터 받음각의 경우 부호에 따라 양력이 작용하는 방향이 달라지고 그에 따른 공동의 운동량 변화 방향이 달라지기 때문이다.

## 6. 결론

공동 형상 예측을 위해 Logvinovich's independence principle에 기반한 공동 형상 예측 프로그램을 작성하였다. 그리고 중력효과 및 캐비테이터 받음각 효과에 대한 이론식 또한 같이 적용하였다. 해석결과, 캐비테이터 받음각이 클수록 캐비테이터 유효반경의 감소에 의한 공동 부피가 작아져 중력효과가 약해짐을 확인하였다. 또한, 중력효과만 고려한 경우와, 중력효과와 캐비테이터 받음각 효과를 동시에 고려한 경우 공동 형상은 많은 차이를 보여주었으며, 이를 통해 공동 형상 예측 시 두 가지 효과를 동시에 고려해야 한다는 결론을 얻었다. 특히, 공동 형상은 캐비테이터 받음각에 따라 크게 좌우되며, 캐비테이터 받음각 절대값이 같더라도 주유동과 캐비테이터 받음각 관계에 따라 공동 형상은 크게 달라질 수 있음을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 방위사업청의 민군기술협력사업(UM14113RD1, 초공동 캐비테이터 설계 및 성능 검증 연구)의 지원으로 수행되었습니다.

## References

- [1] Garabedian, P. R., "Calculation of Axially Symmetric Cavities and Jet," *Pac. J. Math*, Vol. 6, No. 4, pp. 611-684, 1956.
- [2] H. Reichardt, "The Laws of Cavitation Bubbles at Axially Symmetric Bodies in a Flow," *MAP Reports and Translations* No. 766, 1946.
- [3] G. V. Logvinovich, "Hydrodynamics of Free-Boundary Flows," *Halsted Press, Moscoba*, pp. 103-126, 1973.
- [4] R. L. Waid, "Cavity Shapes for Circular Disks at Angles of Attack," *California Institute of Technology*,

- California, 1957.
- [5] Morris W. Self, John F. Ripken, "Steady-State Cavity Studies in a Free Jet Water Tunnel," Office of Naval Research, 1955.
- [6] Savchenko, Yu. N. "Experimental Study of High Speed Cavitated Flow," Iny. J. of Fluid Mechanics Research, Vol. 26, No. 3, pp. 365-374, 1999.
- [7] Zhang Xue-wei, Wei Ying-jie, Zhang Jia-zhong, Wang Cong, Yu Kai-ping, "Experimentail Reasearch on the Shape Characters of Natural and Ventilated Supercavitation," Journal of Hydrodynamics, Vol. 19, No. 5, pp. 564-571, 2007.
- [8] Birkoff, G., Zarantonello, E. H., "Jets, Wakes and Cavities," Academic Press Inc. Publishers, New York, 1957.
- [9] Vladimir N. Semenko, "Artificial Supercavitation. Physics and Calculation," RTO AVT Lecture Series, ADP012080, 2001.