

원형 캐비테이터의 받음각에 따른 환기초공동 형상 예측 연구

이종주* · 김민재* · 백부근** · 김경천†

The prediction of ventilated supercavitation shapes according to the angle of attack of a circular cavitator

Jong-Ju Yi*, Min-Jae Kim*, Bu-Geun Paik** and Kyung Chun Kim†

Abstract Ventilated cavity shapes by varying angle of attack of a circular cavitator were predicted based on Logvinovich's Independence Principle in order to verify the cavity shape prediction method. The prediction results were compared with model experiments conducted in the high-speed cavitation tunnel. In the prediction of the cavity centerline, the movement of the cavity centerline due to the effect of gravity and cavitator's angle of attack were well predicted. In the prediction of the cavity contour, it was found that the cavity edge prediction error increased as the angle of attack increased. The error of the upper cavity contour was small at the positive angle of attack, and the error of the lower cavity contour was small at the negative angle of attack.

Key Words : Supercavitation(초공동), Cavity shape prediction(공동형상예측), Potential Flow(포텐셜 유동), Angle of attack(받음각)

1. 서론

수중에서 주행하는 수중운동체에 작용하는 저항은 형상저항과 마찰저항으로 구분할 수 있다. 형상저항은 수중운동체 주행방향의 단면적에 비례하고, 마찰저항은 물과 접촉하는 수중운동체 표면적에 비례하기 때문에, 일반적으로 세장형 수중운동체에 작용하는 저항성분 중 마찰저항이 형상저항보다 더 크게 기여한다. 마찰저항을 줄인다면,

동일한 추력으로 더 빠른 속도를 낼 수 있기 때문에 군사적, 상업적 목적으로 이에 관한 연구가 활발히 진행되었다. 마찰저항을 줄이기 위해 방법으로 초공동(Supercavitation)이 있다. 수중에서 물체가 빠른 속도로 주행할 경우, 물체 표면 압력이 작아지게 되며, 표면압력이 증기압보다 작아지면, 주변유체는 액체상태에서 기체상태로 변하면서 마찰저항이 줄어든다. 초공동현상은 수중운동체 자체 이동속도에 의한 자연초공동과 수중운동체에서 공기와 같은 기체를 캐비테이터 후방 부근에 분사하는 환기초공동으로 나뉜다. 환기초공동은 속도가 자연초공동에 비해 상대적으로 느린 상태에서 초공동을 형성할 수 있는 장점을 가지고 있다.

이러한 현상을 이용하기 위한 연구가 1950년대부터 Garabedian⁽⁵⁾, Logvinovich⁽¹³⁾, Waid⁽¹⁶⁾등 수많

† School of Mechanical Engineering,
Pusan National University, Professor
E-mail : kckim@pusan.ac.kr

* Agency for Defense Development

** Korea Research Institute of Ships & Ocean
Engineering

은 연구자들이 활발한 연구를 진행해 왔다.

국내에서도 초공동 현상을 이용한 초고속 수중 운동체 개발에 관련한 연구가 2010년대부터 활발히 진행되어 왔다. Ahn⁽¹⁾은 포텐셜 유동 가정을 이용한 썸기 모양 캐비테이터에 의해 형성된 초공동 형상을 예측하고 자체 실험결과 비교하였다. Kim⁽⁹⁾은 비점성 유동해석법을 기초로 한 경계요소법을 바탕으로 다양한 형상의 2차원 캐비테이터와 3차원 축대칭 캐비테이터에서 발생하는 초공동 유동을 해석하여 초공동 크기 및 작용하중 산정기법을 제시하였다. Hwang⁽⁷⁾은 VP-BEM기법을 이용하여 공동발달 초기 단계에서의 몸체 영향을 비점성 경계요소법에 기반한 수치해석을 실시하여 공동 초기의 초공동 형상, 유체력 결과를 제시하였다. Ahn⁽²⁾과 Siyao⁽¹⁵⁾는 서로 다른 초공동 실험시설에서 동일 실험조건으로 폐색효과(Blockage effect), 초공동 형상 측정 및 분석을 실시하여 동일한 계측결과를 제시하였다.

초공동 형상 계측에 관련하여 Chung⁽⁴⁾는 폐쇄형 실험장치가 아닌 실주행상황을 모사한 시험수조에서 초공동 형상을 계측하였고, Lee⁽¹¹⁾은 초고속 카메라로 계측된 초공동영상 처리를 통해 캐비테이터에 의한 초공동 형상 계측결과를 제시하였다. 또한 같은 실험시설에서 원형 캐비테이터가 받음각(Angle of Attack)을 받는 상황에서의 초공동 형상 계측결과를 Lee⁽¹²⁾가 제시하였다.

초공동 형상 예측은 수중운동체의 제어핀에 의한 제어력 예측에 중요한 요소이다. Jeong⁽⁶⁾은 3D 형상의 썸기모형 제어핀을 공동/비공동 사이에 노출시켜 양력과 항력을 계측하였고 노출면적에 따라 항력, 양력에 차이가 있다고 제시하였다.

초공동형상을 예측하기 위하여 상용코드를 이용한 유동해석을 통해 실시할 수 있다. 그러나 상용코드를 이용한 해석에는 많은 전산자원과 시간이 소요되어 고속 수중운동체 초기설계에는 적합하지 않다. 따라서 초기설계 단계에서 캐비테이터, 수중운동체 직경 및 길이를 결정하기 위하여 빠른 시간내에 초공동형상 예측기법의 필요성이 대두되었다. 본 논문은 포텐셜 유동가정을 이용한 초공동형상 예측기법을 이용하여 받음각 상태에서의 원형 캐비테이터에 의한 초공동형상 계측결과와

비교 분석하여 초공동형상 예측기법을 검증한 논문이다.

2. 실험장치

2.1 실험장치 구성

초공동 형상시험은 KRISO(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering)에 있는 HCT(High-speed cavitation tunnel)에서 수행하였다. 실험부 길이는 3 m이고 단면적은 0.3 x 0.3 m²이다. 실험부는 투명 아크릴로 제작되어 내부를 육안으로 확인할 수 있으며, 최대 유속은 20.4 m/s, 평균 유동 균일도는 99.2 %, 난류강도는 0.38 %이다.

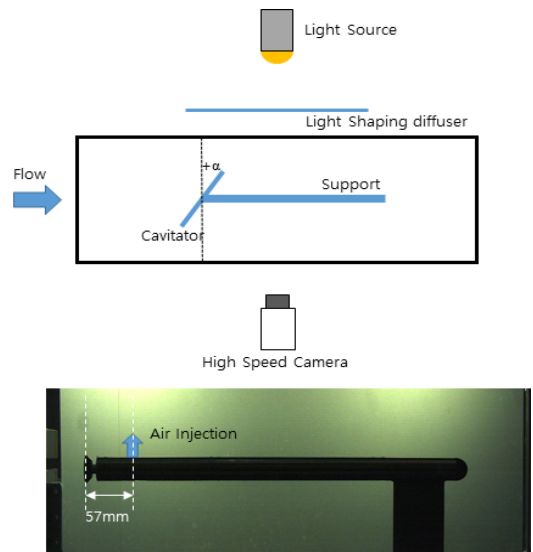


Fig. 1. A supercavity contour measurement set up

Table 1. A Ventilated cavity test condition

AOA	σ_c, σ_{min}	σ_{∞}
0	0.239	0.119
10	0.236	0.118
-10	0.234	0.117
20	0.226	0.113
-20	0.221	0.110
30	0.207	0.104
-30	0.209	0.104

실험부 상류 위치에는 분사초공동 실험을 위해 터널내로 분사된 공기를 포집하는 부분과 실험부 내부로 공급하는 공기유량제어장치를 구성하였다. 공기유량제어장치는 분사공기 압력을 일정하게 유지하는 압력탱크와 압력레귤레이터, 유량제어밸브 및 On/Off 밸브로 구성되었고, 300 L/min까지 $\pm 2\%$ 이내로 공기유량을 제어할 수 있다. 압력탱크는 최대 9 Bar까지 압력유지가 가능하고 공기분사에 따라 탱크 내부 압력이 감소할 경우, 공기압축기에서 공기를 탱크에 공급할 수 있도록 하였다. 실험시설을 이용하여 받음각을 받는 초공동 형상 가시화를 위하여 Fig. 1과 같이 고속카메라, 초공동 실험체, Light Shaping Diffuser를 설치하였다. Light Shaping Diffuser는 광원으로부터 나오는 빛을 부드럽게 산란시켜 계측하고자 하는 초공동 주위의 그림자 이미지 강도를 균일하게 해준다. 고속카메라는 초당 1000프레임으로 촬영하였다.

2.2 환기초공동 실험조건 분석

받음각 환기초공동 실험은 캐비테이터 직경 $D_n = 36\text{mm}$, $V_\infty = 10\text{m/s}$, 공기유량분사비 $C_q = 0.3$ 인 조건에서 수행하였다. Table 1에서 환기공동수 σ_c 는 최소공동수 σ_{\min} 과 동일하다. σ_{\min} 은 터널 실험부의 크기 한계로 인해 발생하는 폐색효과(Blockage Effect)에 의해 공동수가 최소가 되는 공동수를 의미한다. Brennen⁽³⁾은 식 1을 포텐셜 이론을 기반으로 터널 등각 직경과 캐비테이터 직경비에 따른 초공동 유동 수치해석을 통해 제시하였다.

$$\sigma_{\min} = 3.6416 \left(\frac{D}{D_n} \right)^{-1.232} \quad (1)$$

계측을 통해 산출되는 σ_c 는 폐색효과가 반영되어 최대공동직경, 공동길이를 산출하기 위해서는 무한영역 환경에서의 공동수 σ_∞ 를 알아야 한다. Karlikov⁽⁸⁾는 이를 위해서 실험 중 계측된 공동수

σ_c 를 무한영역 환경에서의 공동수 σ_∞ 로 변환하는 관계식을 식 2와 같이 제시하였다.

$$\sigma_\infty = \frac{2\sigma_c^2 - \sigma_{\min}^2}{2\sigma_c} \quad (2)$$

본 연구에서 $\sigma_c = \sigma_{\min}$ 임으로 식 2에 의해 $\sigma_\infty = \frac{1}{2}\sigma_{\min}$ 관계가 성립한다. 자세한 실험장치 설명 및 실험조건은 Lee⁽¹¹⁾에 언급되어 있다.

3. 결과 및 고찰

3.1 공동 가시화 결과

원형 캐비테이터의 받음각이 $0, \pm 10, \pm 20, \pm 30$ 도에서 Table 1의 실험조건에 따라 환기초공동 형상 계측을 실시하였다. 가시화 결과는 Fig. 2와 같다.

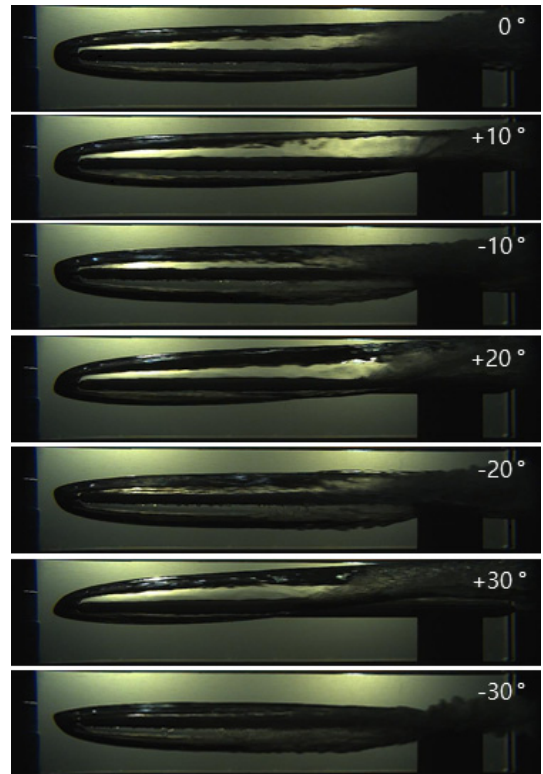


Fig. 2. The supercavitation contour measurement results

음의 반음각(-10, -20, -30)을 받는 경우, 공동 하단 형상이 유동방향과 거의 수평인 구분이 존재한다. 그리고 양의 반음각(+10, +20, +30)인 경우, 공동 하단 형상은 지속적으로 상승하는 형태를 보이고 있다. 자세한 실험결과는 Lee⁽¹²⁾ 논문을 참조하면 된다.

3.2 공동 형상

본 연구에서 사용한 공동형상 예측기법은 Logvinovich⁽¹³⁾가 제시한 Logvinovich's Independence Principle을 이용하여 개발한 기법을 사용하였다. Logvinovich⁽¹³⁾는 포텐셜 유동에 놓여있는 캐비테이터에 의해 발생된 공동이 시간적/공간적으로 앞서 발생된 공동이나 뒤에 발생된 공동과는 무관하게 성장 및 소멸한다는 가정을 도입하여 시간에 따른 공동 발생 및 소멸에 관한 이론을 제시하였다. 이 이론을 바탕으로 본 연구의 초공동형상 예측기법은 각 공동을 단위시간마다 발생시켜 초공동 발생시점의 캐비테이터 크기, 반음각, 속도를 해석하여 초공동 형상을 예측하였다. 발생된 초공동은 발생시점의 캐비테이터 운동 에너지에 의해 발생된 것으로 가정하기 때문에 발생시점에 초공동 형상 및 지속시간이 결정된다. 식 3, 4는 초공동 형상에 관한 반경식이다.

$$R = R_c \sqrt{1 - \left(1 - \frac{R_1^2}{R_c^2}\right) \left|1 - \frac{t}{t_c}\right|^{\frac{2}{\chi}}} \quad (3)$$

when $x/D_n \geq 1$

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

식(3)에서 χ 는 경험상수이며, 0.85를 사용하였다. Fig. 3은 공동길이와 최대 반경 및 시간에 관한 정의를 나타낸 그림이다. 공동길이는 캐비테이터에서 최대공동직경이 나오는 거리의 2배로 정의한다. x_1 은 유동방향으로 캐비테이터 직경($D_n = 2R_n$)만큼 떨어진 위치, R_1 은 x_1 에서의 공동반경을 의미한다. x_1 에서 최대공동직경이 나오는 x_c 까지 걸

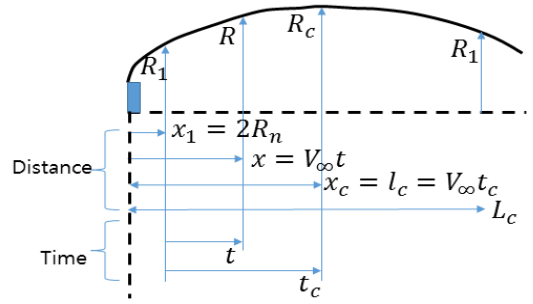


Fig. 3. A definition of the cavity length

리는 시간 t_c 와 공동길이 L_c 의 관계는 $L_c = 2(V_\infty t_c + x_1)$ 이 되며, 이를 이용하여 t_c 에 대한 정의는 식 5와 같다.

$$t_c = \frac{L_c - 2x_1}{2V_\infty} \quad (5)$$

공동길이 L_c 에 대해 Logvinovich⁽¹³⁾가 제시한 식 6를 사용하였다.

$$L_c = \frac{2R_n}{\sigma_\infty} (a - b\sigma_\infty) \quad (6)$$

식 6에서 $a = 1.92$, $b = 3.00$ 이다. 따라서 공동 길이로 식 3을 나타내면 식 7과 같이 된다.

$$R(x) = R_c \sqrt{1 - \left(1 - \frac{R_1^2}{R_c^2}\right) \left|1 - 2\frac{x - x_1}{L_c - 2x_1}\right|^{\frac{2}{\chi}}} \quad (7)$$

3.3 중력효과 및 반음각에 따른 공동 형상

캐비테이터에 의해 발생된 공동은 기체상태이며, 주변 유체보다 밀도가 낮아 부력효과가 나타나면서 공동이 상승하게 된다. 이를 중력효과(Gravity Effect)라고 한다. 공동이 상승함에 따라 공동 형상은 전체적으로 변하게 된다. 상승중인 공동의 단위 길이당 모멘트량과 부력에 의한 운동량이 동일하다고 가정하면, 상승 높이는 식 8을 이용하여 산출할 수 있다.

Table 2. A comparison of the maximum cavity diameter and length between test and present results

AOA	Test Results		Present Results	
	D_c/D_n	L_c/D_n	D_c/D_n	L_c/D_n
0	2.673	13.552	2.795	12.333
10	2.487	11.978	2.705	11.167
-10	2.563	19.622	2.765	13.611
20	2.302	8.704	2.591	10.333
-20	2.523	20.728	2.712	15.056
30	1.970	6.923	2.444	9.889
-30	-	-	2.558	15.889

$$h = \frac{g}{\pi V_\infty^2} \int_0^x \frac{O_k(x)}{\{R(x)\}^2} dx \quad (8)$$

$O_k(x)$ 는 캐비테이터에서 축방향 길이 x 까지 발생된 모든 공동의 부피를 의미한다.

캐비테이터가 설치된 수중운동체가 수중을 주행할 때 캐비테이터의 각도(α , Angle Of Attack)에 따라 양력이 발생한다. 이 양력에 의해 후류의 공동 형상은 변하게 된다. 받음각에 의한 공동상승은 식 9를 사용하였다.

$$h_f(x) = \frac{0.5\rho V_\infty^2 \pi R_n^2 (\sin\alpha)(\cos\alpha)}{\pi\rho V_\infty^2} \int_0^x \frac{ds}{\{R(s)\}^2} \quad (9)$$

3.4 해석결과 고찰

Table 2는 실험결과와 Table 1에 언급된 실험조건으로 본 연구에서 사용한 기법으로 도출한 환기초공동의 최대공동직경과 공동길이를 Lee⁽¹¹⁾의 초공동 길이정의를 따라 도출하고, 캐비테이터 직경으로 무차원화 결과이다. Lee⁽¹¹⁾은 중력 효과에 의해 초공동이 상승하는 상황에서 보다 정확한 공동 길이를 정의하기 위하여, 캐비테이터 하단 공동형상의 가장 하부에 위치한 지점에서 상단 공동까지의 수직거리를 최대공동직경이라 정의하였다. 또한 유동방향으로 캐비테이터에서 최대공동직경이 도출되는 지점까지의 거리 2배를 공동길이라고 정의하였다. Table 2에서 최대공동직경 해석결과는 0~

±20 도 실험결과와 유사한 것으로 판단되나, 공동길이 예측은 다소 오차가 있는 것으로 보인다. 이는 공동길이를 예측할 때 쓰인 식 6의 경험상수(a , b)는 받음각이 없는 실험을 통해 도출된 상수이기 때문에 공동길이 예측에 다소 부적절한 것으로 판단된다.

Fig. 4는 받음각 실험결과와 본 연구의 예측결과를 비교한 그림이다. Fig. 4의 AOA=0 도 그림에 유동방향과 원형 캐비테이터 위치를 표시하였다. 청색 점선이 실험결과이고 적색 실선이 해석결과이다. Fig. 4의 AOA=30 도 실험결과에서 실험 계측 공동의 하단 형상 부분은 지속적으로 하강하는 것으로 예측되어, 공동길이 및 최대공동직경을 산정할 수 없었다.

3.4.1 공동중심선

공동형상은 크게 공동 상단 형상, 공동 하단 형상, 공동중심선으로 나눌 수 있다. 먼저 공동중심선에 관련하여, 받음각 환기초공동 형상 계측실험은 중력효과(식 8)와 받음각 효과(식 9)가 동시에 나타난다. AOA=0 도 실험은 받음각 효과가 없고 중력효과가 작용한 결과로 공동의 중심선 이동이 중력의 반대방향으로 향해 상승함을 알 수 있다. AOA=0 도 예측결과에 비해 받음각이 양의 방향으로 커질수록 공동중심선의 상승정도는 커지는 것으로 보인다. 이는 식 9에서 언급된 받음각 α 영향으로 인해 중심선 상승과 중력효과가 합쳐진 결과이다. 받음각이 음의 방향인 경우, 중력효과와 받음각 효과의 작용 방향이 반대로 나타나게 된다. 따라서 두 효과가 적절한 조화를 보일 경우, 중심선은 거의 수평으로 나타나는 구간이 존재함을 알 수 있다. 그러나 중력효과는 초공동 부피가 커짐에 따라 그 효과가 크게 나타나지만, 받음각 효과는 거의 일정한 수준을 유지한다. 따라서 음의 받음각에서 공동발달 초기에는 공동부피가 크지 않기에 중력효과는 작고 받음각 효과가 크게 작용하여 공동중심선은 수평보다 약간 아래로 하강한다. 그리고 공동이 일정부분 성장하면 공동중심선의 수평구간이 나타난다. 공동 후미로 갈수록 공동부피 성장에 따른 중력효과가 지배적으로 나타나 공

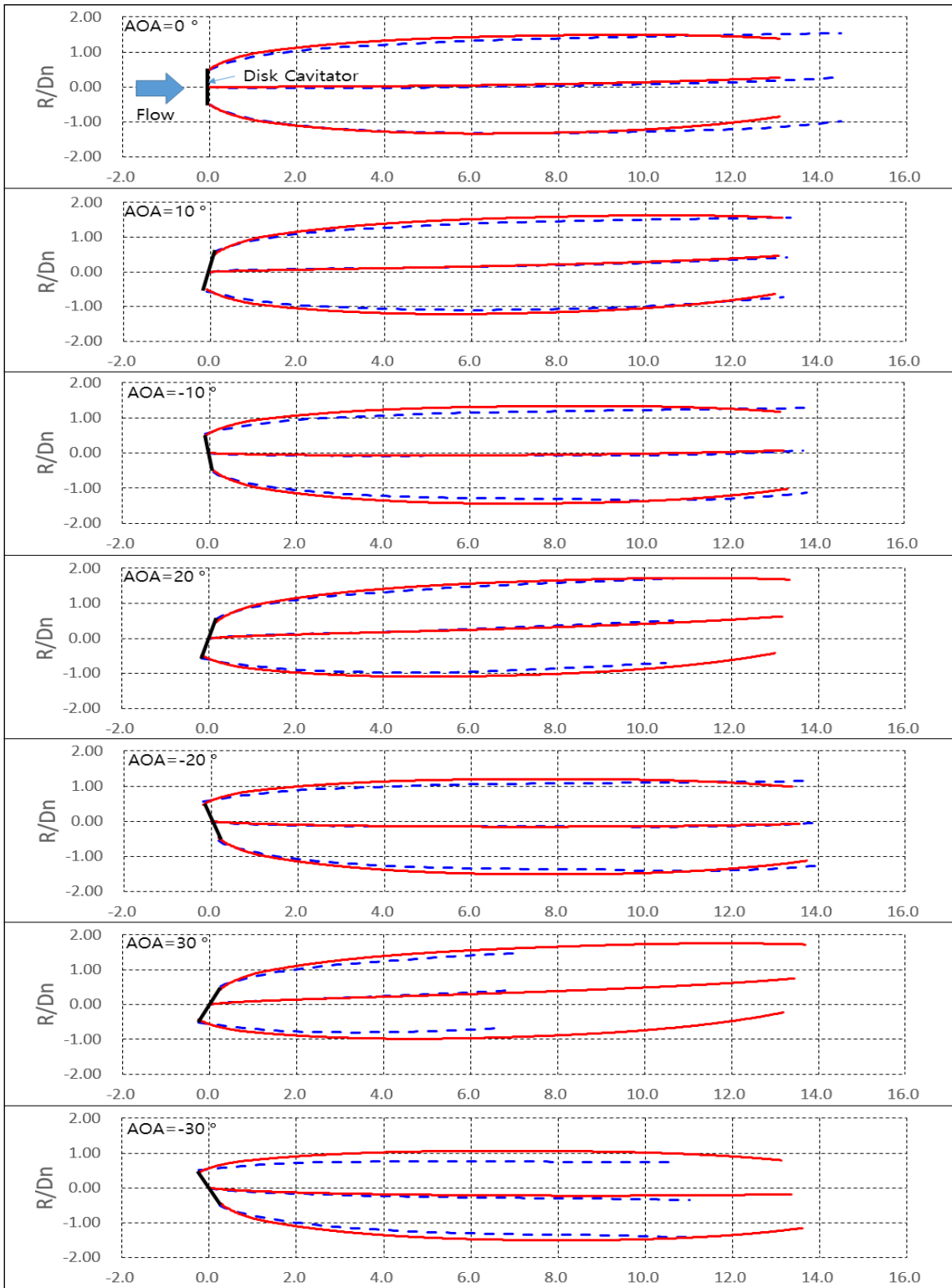


Fig. 4. A comparison of the cavity edges between the test and present results (Red line : present, Blue dot line : test)

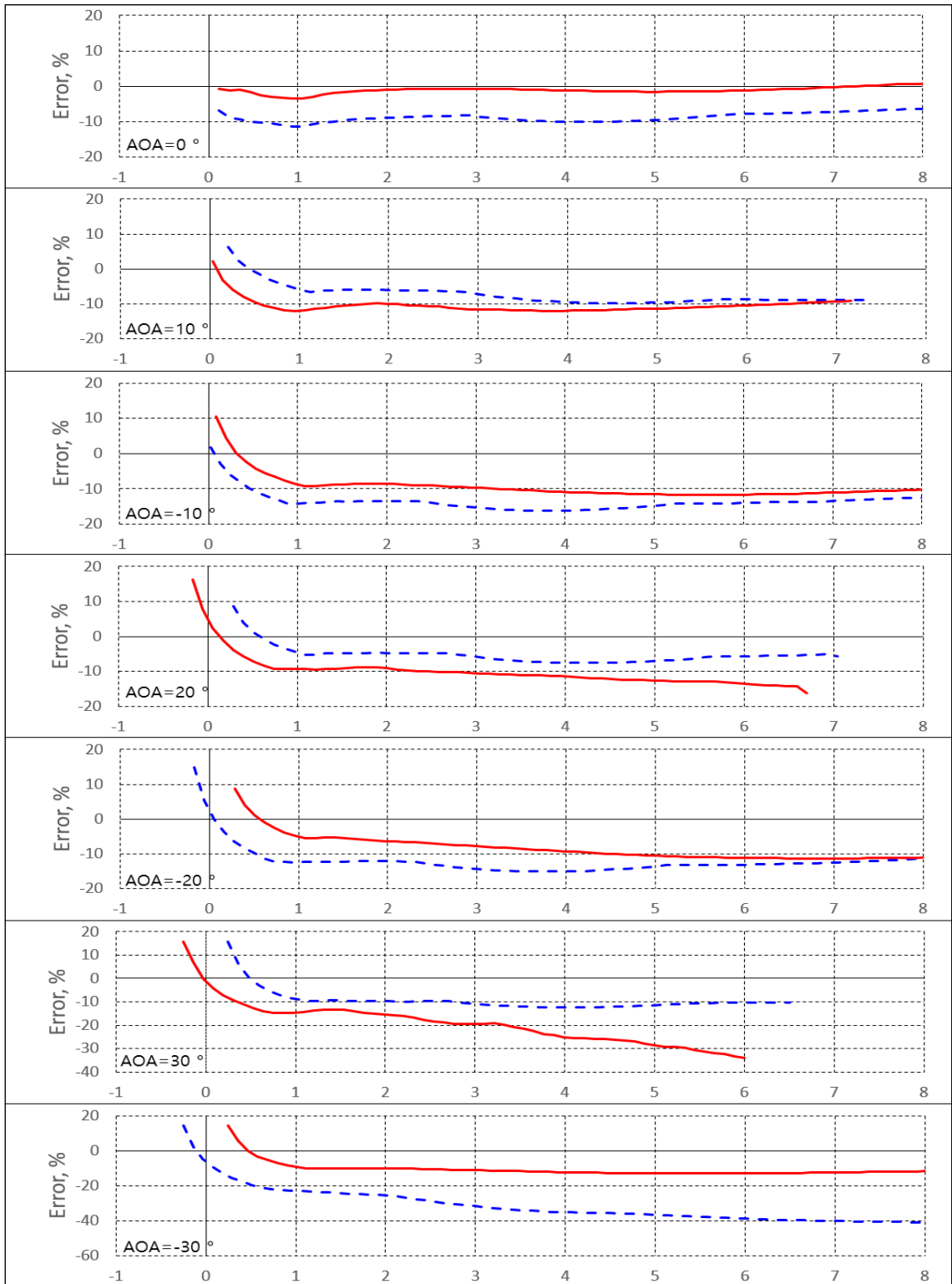


Fig. 5. The error of cavity edges(Red line : lower, Blue dot line : upper)

동중심선이 상승하게 된다. 이러한 공동중심선 이동은 실험 및 해석결과에서 나타났고, 두 결과간 서로 잘 일치함을 확인하였다.

3.4.2 공동 상/하단 형상

환기초공동 실험결과와 해석결과와의 공동직경에 관련된 오차를 식 10으로 정의하고 Fig. 5에 나타냈다.

$$Error = \frac{D_t - D_a}{D_t} \times 100 \quad (10)$$

식 10에서 D_t 는 실험에서 측정된 공동직경, D_a 는 본 연구에서 예측한 공동직경이다. Fig. 5에서 청색 점선은 공동 상단 형상 오차, 적색 실선은 공동 하단 형상 오차를 나타낸다. 공동형상 예측기법은 포텐셜 유동 가정을 이용했기 때문에 공동 후부에서 나타나는 와류에 의한 효과를 반영할 수 없다. 이에 관하여 Logvinovich⁽¹³⁾는 공동 길이의 2/3까지 공동형상 예측결과를 신뢰할 수 있다고 언급했다. 따라서 해석결과 일부는 전체 공동길이의 약 2/3 수준까지만 공동형상 예측오차를 제시하였다.

AOA=0 도 결과에서 공동 하단 형상은 실험결과와 거의 유사한 결과를 제시하고 있으나 공동 상단 형상은 약 10 % 수준의 오차가 공동길이 전반에 걸쳐 균일하게 나타났다. 그리고 양의 받음각을 받는 경우에는 공동 상단 형상의 오차가 낮은 편이었으며, 음의 받음각을 받는 경우에는 공동 하단 형상 오차가 작은 것으로 나타났다. 각 받음각이 절대값이 커질수록 오차가 증가하는 경향이 있는 것으로 판단된다.

공동형상에서 오차가 나타난 이유는 폐색효과에 의해 공동주변에서의 유동속도가 원형 캐비테이터 전단의 자유유동속도에 비해 빨라져 공동직경 해석시 도입된 경험상수(식 6의 a , b)가 폐색효과를 반영하지 못한 결과로 사료된다.

5. 결론

포텐셜 유동 가정을 도입한 초공동형상 예측기

법의 받음각에 따른 공동형상 결과를 검증하기 위하여 원형 캐비테이터 받음각에 의한 공동형상 실험결과를 이용하여 공동형상 예측결과를 검증하였다. 공동중심선 예측에서, 중력효과와 받음각 효과에 의한 공동중심선 이동을 잘 예측하였다. 공동 상/하단 형상 예측에서 받음각이 증가할수록 공동 예측 오차가 증가하는 것으로 나타났으며, 양의 받음각에서 공동 상단 형상 오차가 작고, 음의 받음각에서 공동 하단 형상 오차가 작은 것으로 나타났다. 본 연구결과를 이용하여 초공동을 이용한 초고속 수중운동체의 초기설계에서 초공동형상 예측에 사용 될 것으로 기대한다.

후 기

본 연구는 방위사업청의 민군기술협력사업(초공동 캐비테이터 설계 및 성능 검증 연구, 과제번호 14-BR-EN-32)의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

REFERENCE

- 1) Ahn B.K., Lee T.K. Kim H.T., Lee C.S., 2010, "Experimental investigation of supercavitating flows," International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 4, 123-131.
- 2) Ahn B.K., Jeong S.W., Kim J.H., Siyao Shao, Jiarong Hong, Roger E. Arndt, 2017, "An Experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitators," International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering" 9, 227-237.
- 3) Brennen C., 1969, "A numerical solution of axisymmetric cavity flows," Journal of fluid Mech. Vol. 37, part 4, pp. 671-688.
- 4) Chung J.H., Cho Y.W., 2015, "Visualization of ventilated supercavitation phenomena around a moving underwater body," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 13(1), pp.26-29.
- 5) Garabedian P.R., 1956, "Calculation of axially symmetric cavities and jet," Pac. J. Math. Vol.

- 6(4), pp. 611-684.
- 6) Jeong S.W. Park S.T., Ahn B.K., 2018, "An Experimental Study on Hydrodynamic Characteristics of a Control Fin for a Supercavitating Underwater vehicle," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 55(1), pp. 75-82.
 - 7) Hwang D.G, Ahn B.K., Park J.H., Jeon Y.H., Hwang J.H., 2021, "Numerical Analysis of the Supercavitating Underwater Vehicle According to Different Shapes and Depth Conditions Using a VP-BEM method," *Journal of the KIMST*, Vol. 24(2), pp. 237-244.
 - 8) Karlikov V.P., Sholomovich G.I., 1966, "Method of approximate account for the wall effect in cavitation flow around bodies in water tunnels," *Izvestiya Akademii Nauk SSSR, Mekhanika Zhidkostii Gaza, Izdatel'stvo Nauka*, Vol. 1(4), pp.8993.
 - 9) Kim J.H., Jang H.G., Ahn B.K. Lee C.S., 2013, "A numerical Analysis of the Supercavitating Flow around Three-Dimensional Axisymmetric cavitators," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 50(3), pp. 160-166.
 - 10) Kim M.J., Yi J.J., Kim S.B., 2018, "The Study of Prediction Method of Cavity Shape Considering Both Gravity Effect and Angle of Attack of Cavitator," *Journal of the KIMST*, Vol. 21(2), pp. 180-187.
 - 11) Lee S.J, Paik B.G., Kim K.Y., Jung Y.R., Kim M.J., Roger E.A. Arndt, 2018, "On axial deformation of ventilated supercavities in closed-wall tunnel experiments," *Experimental Thermal and Fluid Science* 96, 321-328.
 - 12) Lee J.H., Paik B.G., Kim K.Y., Kim M.J., Kim S.H., Lee S.J., 2019, "Experimental Study on Supercavitated Body with Static Angle-of-attack," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 56(6), pp. 541-549.
 - 13) Logvinovich, G. V., 1972, *Hydrodynamics of Free-Boundary flow*, Tech. rep., U.S. Department of Commerce, Washington, DC, translated from the Russian(NASA-TT-F-658).
 - 14) Self, M.W., Ripken, J.F., 1955, *Steady-state cavity studies in a free-jet water tunnel*, St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, University of Minnesota, Report No. 47.
 - 15) Siyao Shao, Ashish Kam, Byoung-Kwon Ahn, Roger E.A. Arndt, Jiarong Hong, 2017, "A comparative study of natural and ventilated supercavitation across two closed-wall water tunnel facilities," *Experimental Thermal and Fluid Science*, Vol. 88, pp. 519-529.
 - 16) Waid R.L., 1957, *Cavity Shapes for circular disks at angles of attack*, Hydrodynamics Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, California, Report No. E-73.4.