

중력효과와 받음각 효과에 따른 초공동 형상 중심선 변화에 관한 연구

이종주* · 김민재* · 백부근** · 김경천[†]

A study on the shape of supercavitation center line change according to the gravity and angle of attack effect

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

Abstract In this study, a cavity shape measurement experiment was conducted by changing the diameter and the angle of attack of a disk cavitator. Since the gravity effect is proportional to the cavity volume, the larger the cavity, the greater the effect. It is concluded that the gravity effect becomes smaller as the cavitation number decreases because of a short cavity maintaining time. The cavity centerline rises in case of the positive angle of attack and descends in case of the negative angle of attack. Since the effect of the angle of attack is inversely proportional to the square of the cavity radius, the effect of the angle of attack becomes dominant in the vicinity of the cavitator. It is judged that the horizontal section of the cavity centerline cannot be extended because the factors affecting the gravity effect and the angle of attack effect are different.

Key Words : Supercavitation(초공동), Gravity Effect(중력효과), Angle of Attack Effect(받음각 효과), Supercavity Centerline(공동중심선)

1. 서론

수중에서 고속으로 주행하기 위해서는 수중항력을 최소화하는 것이 중요하다. 수중항력으로 작용하는 요소는 마찰저항과 형상저항으로 구분할 수 있다. 형상저항은 수중운동체의 주행방향 단면적에 따라 비례하여 증가하고, 마찰저항은

물과 접하는 침수표면적에 따라 비례한다. 따라서 세장형 수중운동체에 작용하는 저항은 형상저항보다 마찰저항이 큰 것으로 알려져 있다.

마찰저항을 줄이기 위하여 다양한 방법이 연구중이며, 이중 수중 초공동화를 이용한 마찰저항 감소기법이 2차세계대전 이후부터 지속적으로 연구되고 있다. 초공동(Supercavitation)은 수중에서 고속으로 주행하는 수중운동체 표면에서 증기압보다 압력이 낮아져 액체상태의 물이 기체상태인 수증기로 변화하면서 수중운동체 표면이 수증기로 둘러싸이는 현상을 의미한다. 1950년대부터 Reichardt(1946)⁽¹⁾, Garabedian(1956)⁽²⁾, Logvinovich(1972)⁽³⁾는 원형 캐비테이터를 이용하

[†] 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

여 공동수(Cavitation number)에 따른 공동(Cavity)의 최대공동직경 및 공동길이에 관한 연구를 수행하였다. Waid(1957)⁽⁴⁾는 캐비테이터 후단에 공기를 분사시켜 초공동화에 보다 빠르게 도달할 수 있는 환기초공동(Ventilation Supercavitation)에 관한 연구를 수행하였다. Savchenko 등(1999)⁽⁵⁾은 실험결과를 이용하여 공동수, 캐비테이터 직경에 따른 공동형상 경험식을 제시하였다.

국내에서도 초공동 관련 연구가 여러분야에서 활발히 진행중이다. Ahn 등(2010)⁽⁶⁾은 썩기모양 캐비테이터에 의해 형성된 초공동 형상을 예측하기 위해 포텐셜 유동가정을 도입하였고 자체 실험결과와 비교하였다. Ahn(2017) 등⁽⁷⁾과 Siyao 등(2017)⁽⁸⁾은 서로 다른 초공동 연구시설에서 동일조건으로 초공동화 형상 예측 및 분석을 실시하였다. Lee 등(2018)⁽⁹⁾은 초고속카메라로 측정된 공동형상으로 원형캐비테이터에 의한 초공동 형상 예측결과를 제시하였으며, Lee 등(2019)⁽¹⁰⁾은 원형캐비테이터의 받음각 효과에 따른 항력을 분석하였다. Kim 등(2018)⁽¹¹⁾은 포텐셜가정을 이용하여 공동과 주변유체의 밀도차이에 의한 부력으로 공동이 중력의 반대방향으로 상승하는 중력효과(Gravity effect)와 주유동과 캐비테이터의 각도차이로 공동이 상승 또는 하강하는 받음각효과(Angle of attack effect)를 반영한 초공동형상 해석을 실시하였다. 또한 Hwang 등(2021)⁽¹²⁾은 비점성 경계요소법 기반 수치해석을 실시하여 공동 초기의 초공동 형상 및 유체력을 계산하였다. Yi 등(2021)⁽¹³⁾은 원형캐비테이터가 주유동과 받음각 상태에서 측정된 초공동 형상 예측결과와 포텐셜 유동가정을 이용한 초공동 형상 예측결과를 비교분석 하였다.

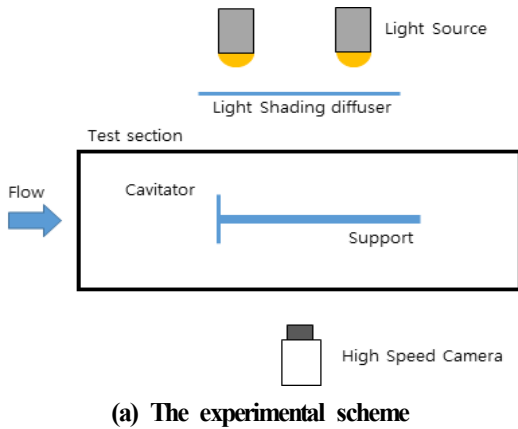
수중 고속운동체에 초공동 효과를 극대화하기 위해서는 초공동형상을 예측하고 초공동내에 수중 고속운동체가 위치하도록 설계하는 것이 중요하다. 초공동형상 예측은 상용코드를 이용한 유동 전산해석으로 가능하다. 그러나 정밀한 초공동 형상예측이 가능한 상용코드를 이용할 경우, 소요되는 전산자원 및 시간이 크다. 따라서 수중 고속운동체의 초기설계 단계에 적용하기에는 적합하지 않아 초기설계에 적용 가능

한 초공동형상 예측기법의 필요성이 대두되었다. 한다. 공동중심선은 캐비테이터 중심부터 공동 끝부분까지 공동의 중심부를 연결한 선이다. 공동중심선 이동 예측은 초공동형상 해석에서 중요한 역할을 한다. 공동중심선은 중력효과(gravity effect)와 받음각 효과(angle of effect)에 의해 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 본 논문은 포텐셜이론 기반 초공동형상 예측기법 검증을 위하여 초공동형상 중심선에 대한 예측결과와 해석결과를 비교분석한 논문이다.

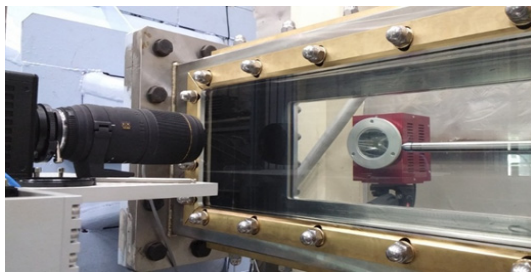
2. 초공동 실험장치 및 초공동 형상계측 결과

2.1 초공동 실험장치

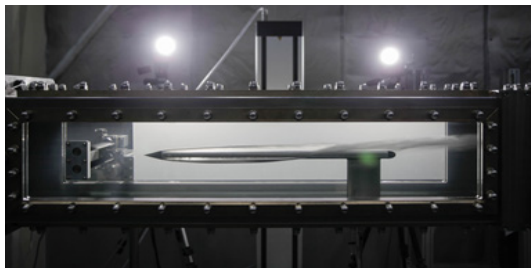
초공동 형상시험은 선박해양플랜트(KRISO, Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering)에 건설된 고속캐비테이션터널(HCT, High-speed Cavitation Tunnel)에서 수행하였다. HCT는 실험부 길이가 3m이고 단면적은 0.30 × 0.30m이다. 실험부는 최대 유속이 20.4m/s, 평균 유동 균일도는 99.22%, 난류강도는 0.38%이다. 투명아크릴로 제작된 실험부는 실험중 내부현상을 육안으로 확인 가능하다. 환기초공동 실험중 분사된 공기를 포집하기 위하여 실험부 상류 위치에 공기포집장치를 설치하였다. 분사되는 공기량은 공기유량 제어장치를 이용하여 제어된다. 공기유량 제어장치는 압력탱크, 레귤레이터, 유량제어밸브 및 On/Off 밸브로 구성되어 있고, 공기유량을 300L/min까지 ±2%이내에서 공기 유량을 일정하게 제어할 수 있다. 압력탱크는 최대 9Bar까지 압력 유지가 가능하고 공기 분사에 따라 탱크 내부압력이 감소할 경우, 공기압축기에서 공기를 탱크에 공급할 수 있도록 하였다. 초공동 형상 이미지를 정확히 측정하고, 생성된 공동의 최대직경 및 길이를 정확히 추출하기 위하여 그림자 기법(Shadowgraph)을 사용하였다. 실험 배치는 Fig. 1(a)와 같이 고속카메라, 초공동 실험체, Light shading diffuser, 광원을 순서대로 배치하였다. 고속카메라 설정과 광원의 위치, 수량은 실험환경에 맞추어 결



(a) The experimental scheme



(b) A picture of test set up



(c) The shadowgraph to supercavitation

Fig. 1. The experiment configuration and result

정하였다. 광원으로부터 나오는 빛은 Light shading diffuser를 통해 부드럽게 산란된다. 따라서 초공동 주위 그림자 이미지 강도를 보다 균일하게 해준다. 고속카메라는 초당 1000 프레임으로 촬영하였다. 초공동 형상 외곽 경계는 edge detection operator와 cubic spline algorithm을 사용하였다. Fig. 1(b)는 실제 장비배치사진이며, Fig. 1(c)는 실험중 계측된 초공동 형상이다.

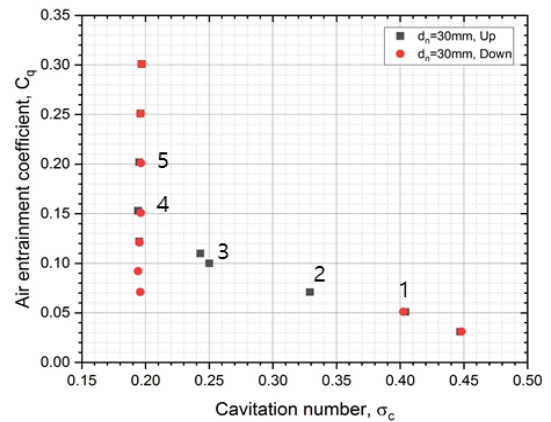
2.2 분사수에 따른 초공동형상 계측

환기초공동은 분사되는 기체의 양에 따라 공

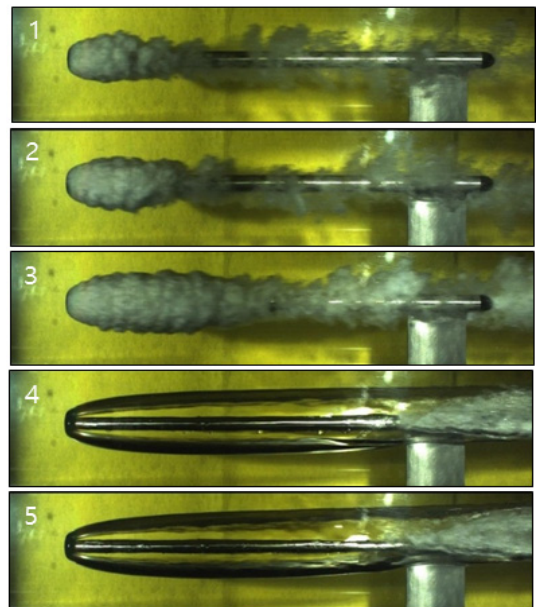
동형상이 다르다. 분사되는 기체의 양은 분사기 체량(Q)을 주유동 속도(V_∞)와 캐비테이터 직경(D_n)으로 무차원화를 식(1)과 같이 할 수 있다.

$$C_q = \frac{Q}{V_\infty D_n^2} \quad (1)$$

Fig. 2(a)는 $D_n = 30mm$ 일 때, 환기공동수 (σ_c)에 따른 분사수(C_q) 계측결과이다. 이 실험



(a) $\sigma_c - C_q$ plot



(b) The supercavitation shape according to C_q

Fig. 2. $\sigma_c - C_q$ plot and supercavitation shape

에서 기체분사 지점은 캐비테이터로부터 주유동방향으로 57mm 떨어진 지점이다. 검은색점은 C_q 를 증가시킬 때 경향이고, 붉은색점은 C_q 를 감소시킬 때 경향이다. C_q 증감 경로가 서로 다른 이력현상(Hysteresis)을 확인하였다. 또한 C_q 가 증가할수록 σ_c 는 작아지다가 폐색효과(Blockage Effect)에 의해 최소공동수(σ_{min})까지만 감소함을 확인하였다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)에 표시된 σ_c , C_q 상태에서의 공동형상이다.

3. 초공동 형상 및 중심선 예측기법

초공동 형상 예측을 위해 Logvinovich(1972)⁽³⁾가 제시한 Logvinovich's Independence Principle을 이용하였다. Logvinovich(1972)⁽³⁾는 비점성 포텐셜 가정을 이용하여 단위시간별로 발생하는 초공동이 시간적/공간적으로 독립적인 발생, 성장, 소멸한다는 가정을 하고 초공동형상에 관한 이론을 제시하였다. 이 이론을 이용한 본 연구의 초공동 형상 예측기법은 각 공동을 단위시간별로 발생시켜 공동별 반경을 예측하고 각 공동별 외곽 형상을 연결하여 전체적인 초공동 형상을 예측하는 기법이다. 최종적인 초공동형상은 식(2), (3)과 같다.

$$R = R_n \left(1 + \frac{3x}{R_n} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (2)$$

when $x/D_n \leq D_n$

$$R(x) = R_c \sqrt[3]{1 - \left(1 - \frac{R_1^2}{R_c^2} \right) \left| 1 - 2 \frac{x - x_1}{L_c - 2x_1} \right|^{\frac{2}{\chi}}} \quad (3)$$

when $x/D_n > D_n$

식(2), (3)는 캐비테이터로부터 주유동방향으로 x 만큼 떨어진 지점에서의 공동반경을 해석하는 식이다. 각 식에서 R_c 는 최대공동반경, x_1 의 크기는 캐비테이터 직경, R_1 은 x_1 에서의 초공동 반경, L_c 는 공동길이이다. 실험상수 χ 는 초공동 실험결과로부터 도출하는 값으로

Logvinovich(1972)⁽³⁾가 제시한 0.85를 사용하였다. 식(4), (5)는 Logvinovich(1972)⁽³⁾가 제시한 최대공동반경(R_c), 공동길이(L_c)이다.

$$R_c = \frac{D_n}{2} \sqrt{\frac{c_0(1 + \sigma_\infty)}{k\sigma_\infty}} \quad (4)$$

$$L_c = \frac{D_n}{\sigma_\infty} (a - b\sigma_\infty) \quad (5)$$

식(4), (5)에서 σ_∞ 는 무한원방에서 도출되는 공동수, c_0 는 무한원방에서 측정된 디스크의 항력계수(0.827)이다. k , a , b 는 χ 와 마찬가지로 초공동실험에서 도출되는 경험상수이며, Logvinovich(1972)⁽³⁾가 제시한 $k = 1$, $a = 1.92$, $b = 3.00$ 을 사용하였다. 공동이 생성되고 소멸되는데 소요되는 공동지속시간은 식(6)과 같이 추정할 수 있다.

$$t_c = \frac{L_c - 2x_1}{2V_\infty} \quad (6)$$

서론에 언급한 것과 같이 캐비테이터에 의해 발생된 기체상태인 공동과 액체상태인 주변 유체의 밀도차이로 발생하는 부력에 의해 공동이 중력의 반대방향으로 상승하는 효과를 중력효과라고 한다. 중력효과에 따라 초공동이 상승하게 되면 초공동의 중심선이 변화하게 된다. 중력효과에 의한 공동중심선 변화를 고려하기 위하여 식(7)을 이용하였다.

$$h(x) = \frac{g}{\pi V_\infty^2} \int_0^x \frac{O_k(x)}{\{R(x)\}^2} dx \quad (7)$$

식(7)에서 g 는 중력가속도, $R(x)$ 는 캐비테이터에서 주유동방향으로 x 만큼 떨어진 지점의 초공동 형상 반경, $O_k(x)$ 는 캐비테이터에서 x 위치까지 발생된 초공동 형상 부피이다.

캐비테이터면 수직방향과 주유동 속도벡터간 각도차이가 있을 경우, 양력이 발생된다. 발생된 양력의 크기에 따라 캐비테이터의 중심선은

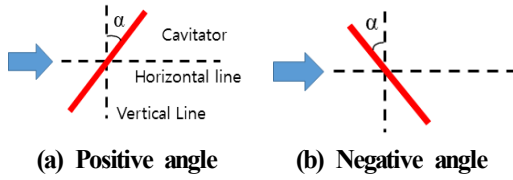


Fig. 3. The definition of angle of attack

중력효과와 마찬가지로 변화가 생긴다. 이 효과를 받음각 효과라고 하며 식(8)을 이용하여 계산하였다. 식(8)에서 ρ 는 액체상태 주변유체의 밀도, α 는 캐비테이터면 수직방향과 주유동 속도 벡터의 사이각도이고 Fig. 3과 같이 정의하였다.

$$h_f(x) = \frac{0.5\rho V_\infty^2 \pi R_n^2 (\sin\alpha)(\cos\alpha)}{\pi\rho V_\infty^2} \int_0^x \frac{ds}{\{R(s)\}^2} \quad (8)$$

4. 환기초공동 형상시험

원형 캐비테이터를 이용하여 환기초공동 실험을 Table 1과 같이 진행하였다. 터널내 한정된 공간에서 측정된 σ_c 를 무한원방에서의 실험에서 측정되는 공동수(σ_∞)로 변환하기 위해 Karlikov 등(1966)⁽¹⁴⁾이 제시한 식(9)을 사용하여 σ_∞ 를 계산하였다.

$$\sigma_\infty = \frac{2\sigma_c^2 - \sigma_{\min}^2}{2\sigma_c} \quad (9)$$

Table 1. The experimental condition and results for the maximum cavity diameter and cavity length

Case	D_n (mm)	σ_c, σ_{\min}	σ_∞	AOA, (Deg.)	D_c/D_n (Experimental)	L_c/D_n (Experimental)	D_c/D_n (Analysis)	L_c/D_n (Analysis)	C_q
1	15	0.097	0.049	0	4.007	32.900	4.165	30.000	0.300
2	30	0.196	0.098	0	3.208	18.000	3.024	15.133	0.310
3	36	0.239	0.120	0	2.673	13.552	2.765	12.333	0.302
4	45	0.299	0.150	0	2.622	11.667	2.506	9.689	0.240
5	36	0.236	0.118	10	2.487	11.978	2.705	11.167	0.297
6		0.234	0.117	-10	2.563	19.622	2.765	13.611	0.300
7		0.226	0.113	20	2.302	8.704	2.591	10.333	0.297
8		0.221	0.110	-20	2.523	20.728	2.712	15.056	0.300
9		0.207	0.104	30	1.970	6.923	2.444	9.889	0.303
10		0.209	0.104	-30	-	-	2.558	15.889	0.301

Case 1~4는 캐비테이터 직경은 다르나 받음각이 0인 경우이고 Case 3, 5~10은 캐비테이터 직경은 동일하고 받음각에서 차이가 있다. D_c/D_n 은 고속영상 측정의 초공동 형상중 직경이 가장 큰 부분을 캐비테이터 직경으로 무차원화한 결과이고 L_c/D_n 은 캐비테이터에서 D_c/D_n 가 발생된 지점까지의 거리의 2배를 한 결과이다. Case 6, 8은 음의 받음각을 받는 상태로 다른 Case보다 공동길이가 상당히 긴 것으로 나타났다. 또한 Case 10 측정결과에서 D_c/D_n 가 최대가 되는 지점이 관측되지 않아 L_c/D_n 를 제시하지 않았다. 최대공동직경 결과는 실험결과와 해석결과간 큰 차이가 없으나, 공동길이에 대해서는 다소 차이가 발생하였다. 이는 본 연구에서 가정한 포텐셜 유동가정으로 인해 환기초공동 후류부분에서 발생하는 와류로 인한 영향을 반영하지 못한 결과라고 판단된다.

5. 환기초공동 공동중심선 고찰

5.1 캐비테이터 직경에 따른 공동상승 해석

캐비테이터 직경에 따른 실험결과(Case 1~4) 결과와 Table 1에 언급된 실험조건으로 해석한 중심선 결과를 Fig. 4에 표시하였다. Fig. 4에서 실선은 실험결과, 점선은 해석결과이다. 적색 점선은 중력효과와 받음각 효과가 동시에 작용

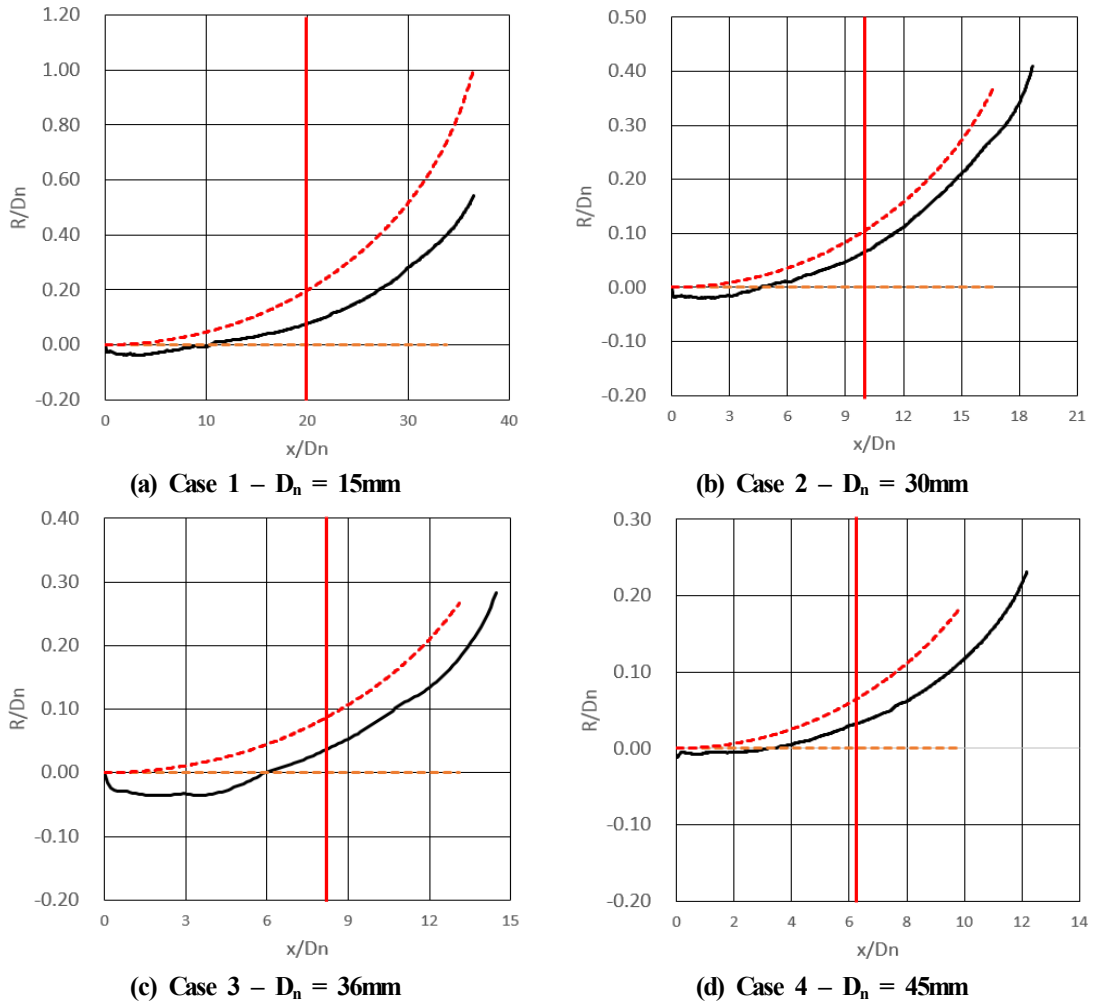


Fig. 4. The center line comparison according to the cavitator diameter without angle of attack Black solid : Experimental result, Red dot : Gravity/AOA effect, Yellow dot : AOA effect only Gray dot : Gravity effect only, Red solid : cavity 2/3 length

된 결과, 주황색은 받음각 효과 결과, 회색은 중력효과 결과를 표시하였다. X축은 무차원화된 공동길이, Y축은 무차원화된 중심선 변화량이다. Fig. 4에 도시된 결과는 받음각이 없기 때문에 받음각 효과 결과가 $R/D_n = 0$ 이다. 또한 중력효과 결과(회색 점선)와 받음각효과의 합을 나타내는 적색 점선이 겹쳐져 표시되었다. 본 연구에서 가정한 포텐셜 유동 가정으로 인해 발생하는 오차로 초공동길이의 약 2/3 이후 부분에 관한 해석결과가 부정확한 것으로 알려져 있다^[3]. 따라서 Table 1에서 제시한 해석결과 중

공동길이의 약 2/3위치를 붉은색 실선으로 표시하였다.

식(7)에서 제시된 중력효과 해석식을 살펴보면, 캐비테이터에서 해석하고자 하는 유동방향 길이까지의 전체 공동부피가 공동상승에 영향을 준다. 이러한 경향은 Fig. 4의 실험결과에서도 볼 수 있다. 캐비테이터에서 가까운 지점은 중력효과가 작기 때문에 공동중심선 변화율이 작아 상승량이 크게 나타나지 않는다. 그러나 유동방향으로 갈수록 공동부피가 커지게 되면서 공동 중심선 변화율이 커지고, 공동중심선

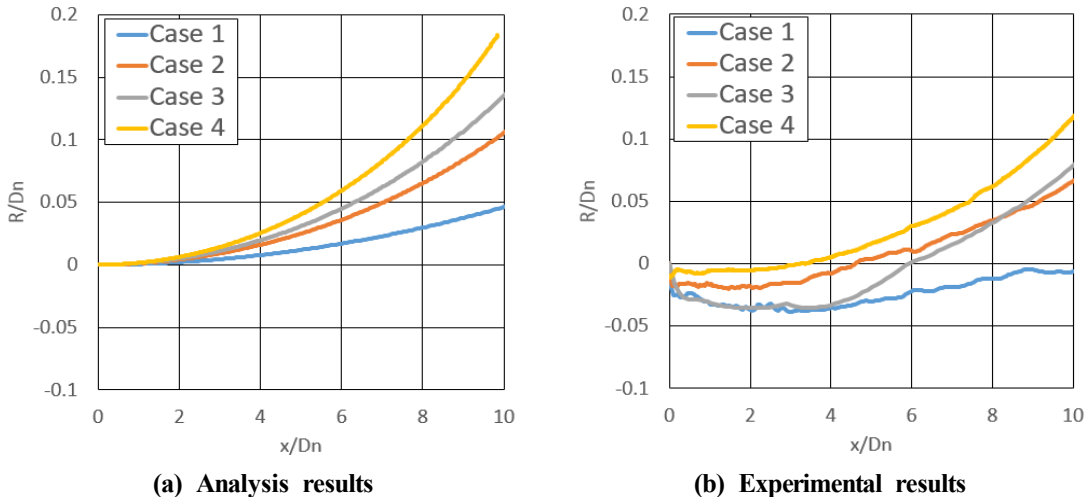


Fig. 5. The center line comparison of analysis and experimental results according to the cavitator diameter

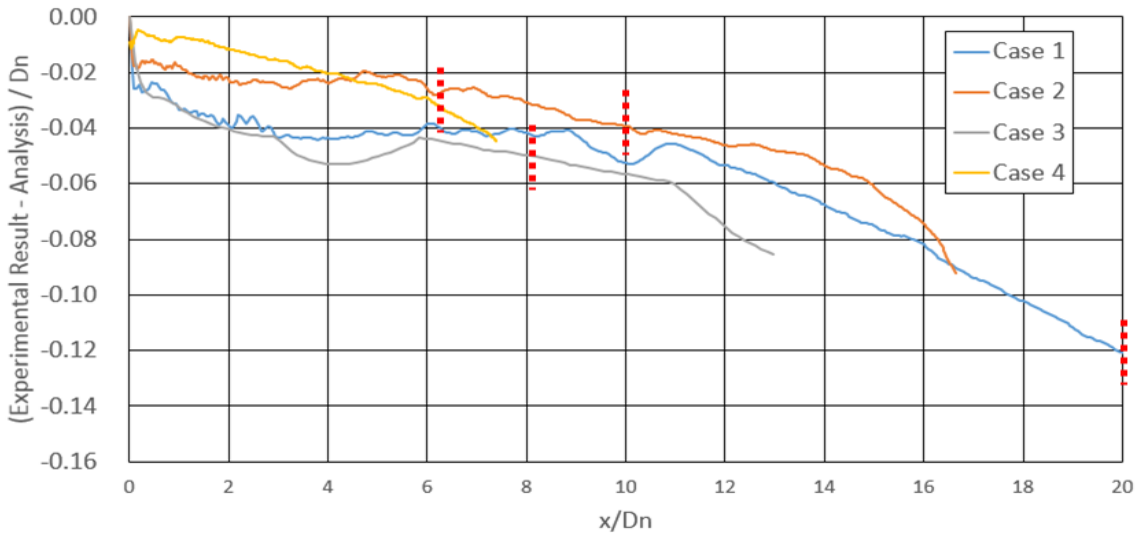
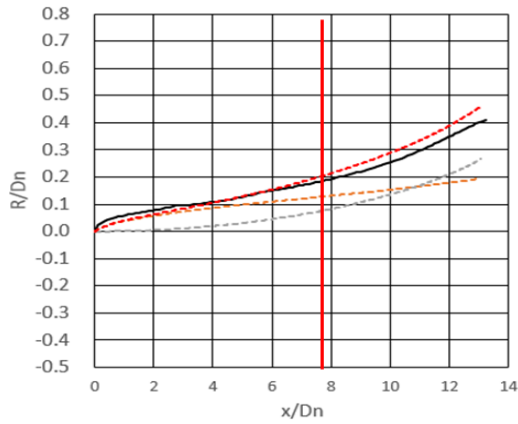


Fig. 6. The error comparison according to the cavitator diameter

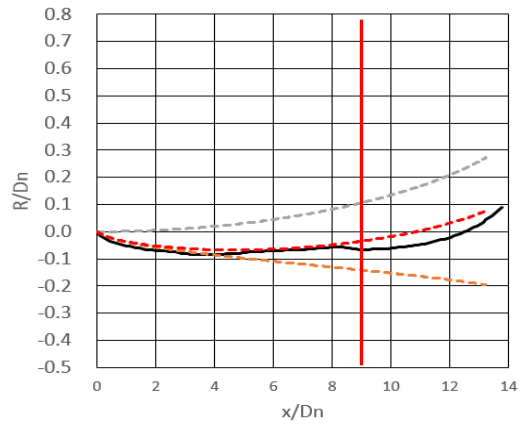
상승량이 급격하게 증가하였다. 공동중심선 변화율 경향은 실험결과에서도 확인할 수 있다. 다만, 실험결과에서 캐비테이터에서 근접한 부근($x/D_n = 0$)의 중심선은 $R/D_n = 0$ 이 되어야 할 것으로 판단되나, 받음각이 정확히 0이 되지 않아 일부 오차가 있는 것으로 판단된다. 오차에도 불구하고 Case 1~4 실험결과에서 캐비테이터에서 가까운 지점에서는 유동방향으로 공동중심선 변화율이 작게 나타나고 후류로 갈수록 공동중심선 변화율이 증가하였다. 따라서 실

험결과와 해석결과는 서로 유사한 경향을 보이고 있다.

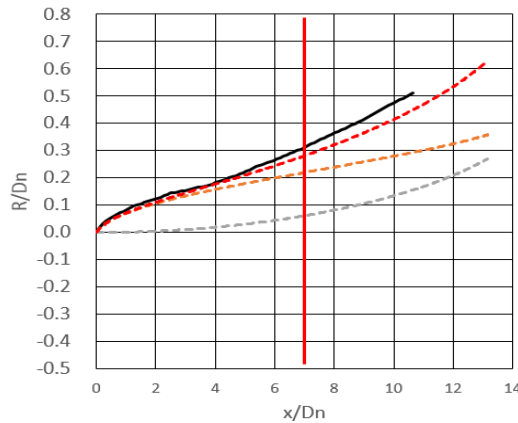
Fig. 5는 실험 및 해석결과별 공동길이 $x/D_n = 10$ 까지의 공동상승량을 나타낸 결과이다. Fig. 5(a)는 해석결과를 표시한 그림이고, Fig. 5(b)는 실험결과이다. 두 결과에서 가장 큰 상승량을 보이는 결과는 Case 4($D_n = 45\text{mm}$, $\sigma_\infty = 0.150$), 가장 작은 공동상승량은 Case 1($D_n = 15\text{mm}$, $\sigma_\infty = 0.049$)에서 나타났다. 공동수와 공동상승량은 비례관계인 것으로 판단된다.



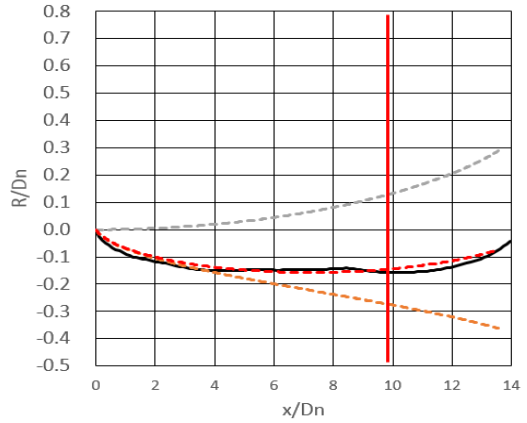
(a) Case 5 - AOA = +10°



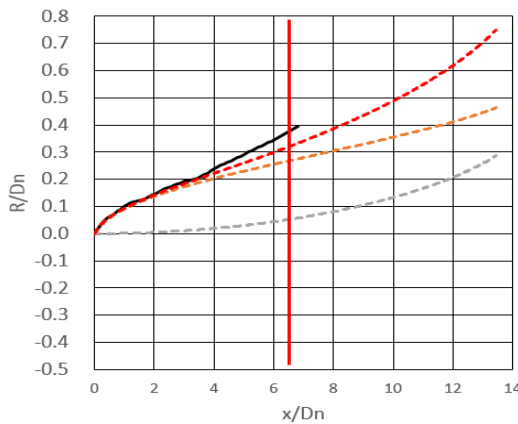
(b) Case 6 - AOA = -10°



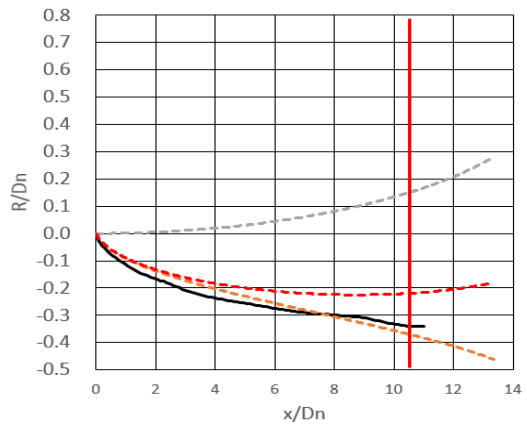
(c) Case 7 - AOA = +20°



(d) Case 8 - AOA = -20°



(e) Case 9 - AOA = +30°



(f) Case 10 - AOA = -30°

Fig. 7. The center line comparison according to angle of attack with same cavitator diameter($D_n = 36mm$)
 Black solid : Experimental result, Red dot : Gravity/AOA effect, Yellow dot : AOA effect only Gray dot : Gravity effect only, Red solid : cavity 2/3 length

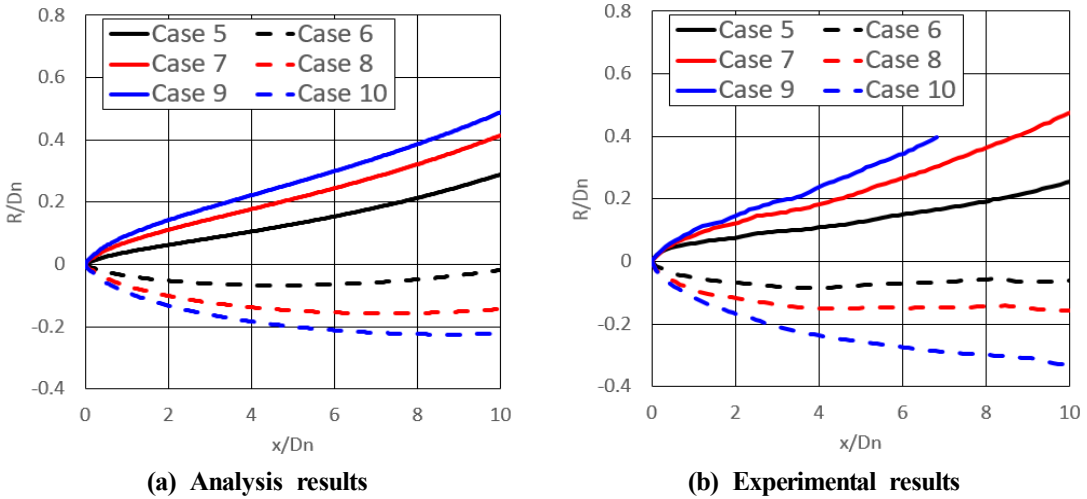


Fig. 8. The center line comparison of analysis and experimental results according to angle of attack Solid line : Positive AOA result, Dot line : Negative AOA result

공동수가 작다는 것은 수중운동체 속도가 크다는 것을 의미한다. 이때 각 공동이 상승하는 시간이 짧아 중력효과가 약하게 일어난 것으로 판단된다. 식(6)에서 수중운동체 속도(V_∞)와 공동길이(L_c)가 공동지속시간(t_c)에 영향을 주는 것으로 판단된다. 공동길이는 식(5)에서 알 수 있듯이 공동수가 작을수록 커진다. 그러나 수중운동체 속도 영향이 커져서 전체적으로 공동지속시간이 작아지는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 실험결과와 해석결과의 주유동 위치별 환기초공동 중심선 차이를 캐비테이터 직경으로 무차원화 한 결과이다. 각 분석결과마다 Case별 공동길이의 2/3지점을 붉은색 점선으로 표시하였다. 실험결과에서 나온 중심선 위치오차를 포함하여 Case 1이 가장 큰 오차를 나타내고 있다. 이는 Case 1이 가장 작은 환기공동수이며, 공동길이가 가장 길지만, 중력효과 영향을 다른 Case보다 짧게 받아 생긴 결과로 판단된다.

5.2 받음각에 따른 공동상승 해석

받음각에 따른 환기초공동 형상계측은 $D_n = 36mm$ 인 캐비테이터로 실시하였다. 받음각 변화 범위는 $-30, -20, -10, +10, +20, +30$ 도이다. Fig. 7은 받음각 상태의 환기초공동 중심선

을 나타낸 것으로 각 선의 의미는 Fig. 4와 같다. 식(8)에서 볼 수 있듯이 받음각 효과는 중력효과와 달리 공동부피가 주요 인자가 아니며, 공동반경 제공에 반비례관계이다. 따라서 공동반경이 작을 때 큰 영향을 준다.

양의 받음각 실험에서 공동중심선 변화율은 캐비테이터 부근에서 크게 나타났다. 공동발생 초기에 급격한 공동중심선 상승이 나타났고 대략 $x/D_n > 2$ 부터 공동길이와 선형관계를 보이는 것으로 판단된다. 실험결과와 해석결과 모두 $x/D_n < 2$ 에서 급격한 공동중심선 변화율을 보였다. 후류로 갈수록 받음각 효과는 선형변화를 보이고 있고 중력효과가 커졌다. 중력효과와 받음각효과가 합쳐져 전체적으로 공동중심선이 중력효과만 있을 때보다 더 큰 상승을 보이고 있다.

음의 받음각 실험은 양의 받음각 시험과 달리 받음각 효과가 공동하강을 보이고 있다. 따라서 받음각 효과가 중력효과보다 영향이 큰 캐비테이터 인근에서는 공동중심선이 하강하였다. $x/D_n > 4$ 부터 받음각 효과와 중력효과 크기가 비슷하여 공동중심선이 수평인 구간이 존재한다. 수평구간 이후 중력효과가 커지기 시작하여 공동중심선은 다시 상승하는 결과를 보이고 있다. 이러한 공동중심선 하강, 수평, 상승은 해석결과와 실험결과 모두에서 관찰되었다. 공동중

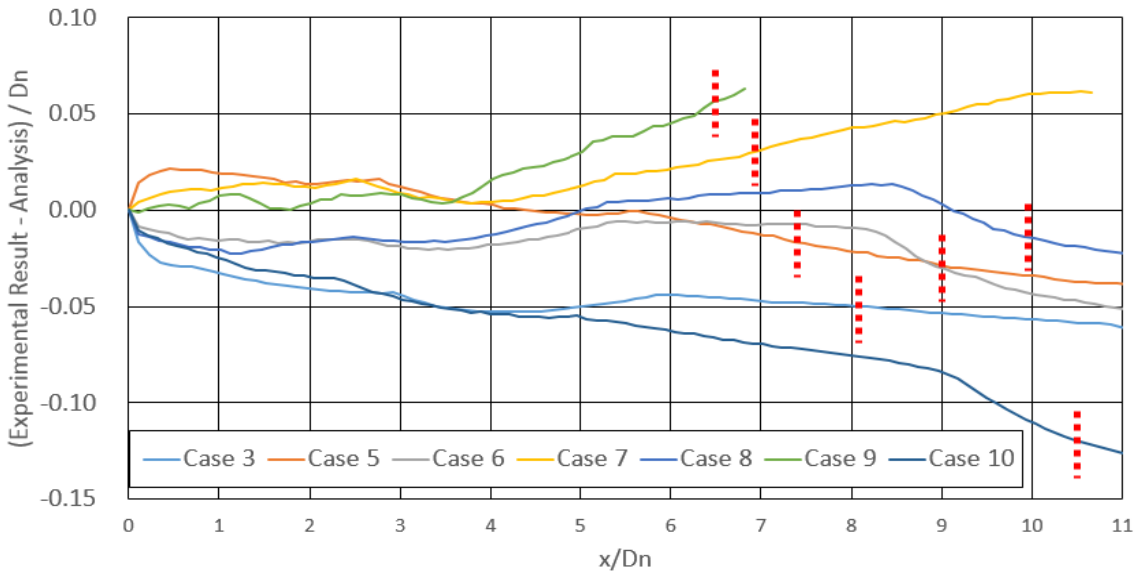


Fig. 9. The error comparison according to the angle of attack

심선이 수평으로 유지되기 위해서는 음의 받음각 효과가 중력효과와 비슷한 크기가 되어야 한다. 그러나 받음각 효과는 공동반경의 제곱에 반비례하고, 중력효과는 공동부피에 비례하기 때문에 공동중심선이 수평인 구간을 길게 유지할 수 없을 것으로 판단된다.

Fig. 8은 받음각 크기에 따른 해석결과와 실험결과를 비교한 그림이다. 실선은 양의 받음각 실험결과이고 점선은 음의 받음각 실험결과이다. Fig. 8(a)에서 받음각 각도가 증가할수록 공동중심선 상승/하강량이 증가하였다. 실험결과에서도 해석결과와 동일하게 받음각 각도 크기가 공동중심선 변화에 중요한 인자로 작용함을 보여주고 있다.

Fig. 9는 실험결과와 해석결과의 공동중심선 위치 차이를 캐비테이터 직경으로 무차원화한 결과이다. 전반적으로 $0 < x/D_n < \frac{2}{3}L_c$ 범위에서 중력효과만 고려한 결과(Case 1~4)보다 중력효과와 받음각 효과를 동시에 고려한 결과(Case 5~10) 오차수준이 작은 것으로 판단된다.

6. 결론

원형캐비테이터 직경 및 받음각을 변화시켜 환기초공동 형상계측실험을 실시하였다. 중력효과와 받음각효과는 공동중심선 변화에 영향을 미치는 현상을 확인하였다. 중력효과는 공동부피에 비례하기 때문에 공동 후류로 갈수록 효과가 크게 작용하였다. 그리고 중력효과는 공동수가 작을수록 공동유지시간이 짧아졌고, 공동이 상승하는 시간이 줄어들어 중력효과가 작아지는 것으로 판단된다.

받음각 효과는 주유동방향과의 관계에 따라 양의 받음각에서는 공동상승효과를 보이고, 음의 받음각에서는 공동하강효과를 보였다. 받음각 효과는 공동반경 제곱에 반비례하기 때문에 공동발생 초기인 캐비테이터 인근에서 받음각 효과가 크게 작용한 것으로 판단된다.

중력효과와 받음각 효과에 영향을 주는 인자가 서로 다르기 때문에 공동중심선의 수평구간을 길게 유지할 수 없을 것으로 판단된다.

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) Reichardt, H., 1946, "The Laws of cavitation bubbles at axially symmetric bodies in a flow", Ministry of Aircraft Production, Reports and Translations, No. 766
- 2) Garabedian P.R., 1956, "Calculation of axially symmetric cavities and jet", Pac. J. Math. Vol. 6, No. 4, pp. 611-684, 1956
- 3) Logvinovich, G. V., 1972, "Hydrodynamics of Free-Boundary flow", Tech. rep., U.S. Department of Commerce, Washington, DC, 1972, translated from the Russian(NASA-TT-F-658)
- 4) 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
- 5) Savchenko Yu. N, Vlasenko Yu. D., Semenenko V.N., 1999, "Experimental Studies of High Speed Cavitated Flows", International Journal of Fluid Mechanics Research, Vol. 26, No. 3, pp. 365-374
- 6) Ahn B.K., Lee C.S., Kim H.T., 2010, "Experimental and numerical studies on super-cavitating flow of axisymmetric cavitator", International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 2:39-44
- 7) Ahn B.K., Jeong S.W., Kim J.H., Siyao Shao, Jiarong Hong, Roger E.Arndt, An Experimental investigation of artificial supercavitation generated by air injection behind disk-shaped cavitators, International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering 9 (2017) 227-237
- 8) Siyao Shao, Ashish Karn, Ahn B.K., Roger E. 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
- 9) Lee S.J, Paik B.G., Kim K.Y., Jung Y.R., Kim M.J., Roger E. Arndt, 2018, "On axial deformation of ventilated supercavities in closed-wall tunnel experiments", Experimental Thermal and Fluid Science 96, 321-328
- 10) 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, No. 6, pp. 541-549
- 11) 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, No. 2, pp. 180-187
- 12) 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, No. 2, pp. 237-244
- 13) Yi, J.J., Kim, M.J., Paik, B.G., Kim, K.C., 2021, "The prediction of ventilated supercavitation shapes according to the angle of attack of a circular cavitator", Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 19, No. 3, pp. 22 ~ 30
- 14) 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, 1(4), pp.89-93