

# 2차원 초공동 유동의 중력과 자유표면 효과에 대한 수치해석

김형태<sup>†</sup> · 이현배  
충남대학교 선박해양공학과

## A Numerical Analysis of Gravity and Free Surface Effects on a Two-Dimensional Supercavitating Flow

Hyoung-Tae Kim<sup>†</sup> · Hyun-Bae Lee  
Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chungnam National University

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The effects of the gravity field and the free surface on the cavity shape and the drag are investigated through a numerical analysis for the steady supercavitating flow past a simple two-dimensional body underneath the free surface. The continuity and the RANS equations are numerically solved for an incompressible fluid using a  $k\epsilon$ - $\epsilon$  turbulence model and a mixture fluid model has been applied for calculating the multiphase flow of air, water and vapor using the method of volume of fluid and the Schnerr-Sauer cavitation model. Numerical solutions have been obtained for the supercavitating flow about a two-dimensional  $30^\circ$  wedge in wide range of depths of submergence and inflow velocities. The results are presented for the cavity shape, especially the length and the width, and the drag of the wedge in comparison with those of the case for the infinite fluid flow neglecting the gravity and the free surface. The influences of the gravity field and the free surface on the aforementioned quantities are discussed. The length and the width of the supercavity are reduced and the centerline of the cavity rises toward the free surface due to the effects of the gravity field and the free surface. The drag coefficient of the wedge, however, is about the same except for shallow depths of submergence. As the supercavitating wedge is approaching very close to the free surface, it is found the length and the width of a cavity are shorten even though the cavitation number is reduced. Also the present result suggests that, under the influence of the gravity field and the free surface, the length of the supercavity for a certain cavitation number varies and moreover is proportional to the inverse of the submergence depth Froude number.

**Keywords** : Supercavitating flows(초공동 유동), Free surface effect(자유표면효과), Froude No.(Froude 수), Cavity(공동), Drag(항력)

## 1. 서론

최근 들어, 통상적인 운항 속도의 한계를 극복하고 수중에서 고속으로 운항이 가능하도록 하는 기술이 러시아, 미국, 독일 등 국방기술 선진국을 중심으로 연구 개발되고 있으며, 그 대표적인 예로 초월공동 또는 초공동(supercavitation)을 이용하는 어뢰 기술을 들 수 있다. 초공동 어뢰는 수중로켓에 의해 추진되며 머리에 장착된 캐비테이터(cavitator)에서 의도적으로 초공동을 발생시켜 몸통 전체를 감싸서 어뢰 표면이 물과 접촉하는 면적을 줄이고, 표면 압력분포를 변화시킴으로써 전체 항력을 낮추어 매우 빠른 속도로 운항할 수 있다. 이미 개발되어 배치된 것으로 알려진 초공동 어뢰로는 러시아의 Shkval과 이를 개조한 이란의 Hoot가 있고, 연구개

발 중인 것으로는 독일의 Barracuda와 미국의 Supercav가 있다 (Kim & Nah, 2011). 이들 초공동 어뢰는 수중에서 200노트 이상으로 운항이 가능한 것으로 알려져, 일반 어뢰의 주행속도가 40노트 전후임을 감안하면, 매우 빠른 속도임을 알 수 있다.

초공동을 발생시키는 핵심부인 캐비테이터는 초공동 어뢰의 머리에 장착되어 어뢰 몸통 전체를 감싸는 초공동을 발생시키는 데, 자연 공동(natural cavity)이 발생하는 속도보다 낮은 속도에서 더 크고 안정된 초공동을 발생시키고 유지하기 위해 통상 캐비테이터 후방의 노즐을 통해 고압가스를 분사시키는 환기 공동(ventilated cavity) 발생 방식을 사용하며, Fig. 1과 같이 Shkval은 원판(disk) 형상, Barracuda는 원뿔(cone) 형상의 캐비테이터를 채택하고 있다. 초공동 발생장치인 캐비테이터의 초공동 발생 및 항력 특성을 파악하고 성능을 평가하는 것은 초공동 어뢰의 연

구 개발에서 핵심이 되는 기술로서 일찍부터 관련 연구가 이루어져 왔고, 최근까지도 지속되고 있다. 초공동 모델링에 대한 Riabouchinsky (1919)의 선도적인 연구를 필두로, 1940년대에는 Fisher (1944), Reichardt (1946), Eisenberg and Pond (1948), Plesset and Shaffer (1948) 등 주로 축대칭 또는 2차원 물체의 초공동 유동에 대한 실험을 중심으로 연구가 이루어졌고, 1950년대에는 Birkhoff, et al. (1950; 1952), Anderson (1953), Armstrong (1954), Self and Ripken (1955), Waid (1957a; 1957b), Wu (1957), Silberman (1958) 등 실험 및 포텐셜 유동 해석을 통한 연구가 수행되어 상당한 성과를 거두었다. 1960, 70년대에는 Schot (1962), Street (1963), Tulin (1964), Wu and Wang (1964), Street (1965), Gadd & Grant (1965), Klose and Acosta (1965), Brennen (1969), Logvinovich (1969), Wu, et al. (1971), May (1975) 등, 기초 연구는 물론 응용 연구가 활성화되었다. 1980년대 이후 20세기 말까지는 Epshtein and Laptin (1980), Delannoy and Kueny (1990), Kirschner, et al. (1995), Singhal, et al. (1997), Hrubes, et al. (1998), Kirschner (1997), Savchenko, et al. (1998) 등, 컴퓨터를 활용한 초공동 유동의 수치해석 연구를 중심으로 발전을 이루었고, 특히 러시아는 초공동 어뢰에 관한 응용 연구를 통해 큰 성과를 거두었다. 최근에는 Savchenko (2000), Kunz, et al. (2000), Ventikos and Tzabiras (2000), Vlasenko (2000), Hrubes (2001), Kunz, et al. (2001), Savchenko (2001), Singhal, et al. (2002), Alynak, et al. (2004), Schaffar, et al. (2005), Wosnik and Milosevic (2005), Wu, et al. (2005), Peng, et al. (2006), Karimi, et al. (2008), Passandideh-Farda & Roodi (2008), Nesteruk (2008), Ahn, et al. (2010), Petitpas, et al. (2011), Rabiee, et al. (2011), Ahn, et al. (2012), Lee, et al. (2013) 등, 실험 및 CFD 해석 그리고 기초 및 응용의 다양한 연구가 수행되고 있으며, 미국과 러시아 뿐 아니라 독일, 이란, 중국 등, 여러나라에서 관련 연구가 진행되고 있다.

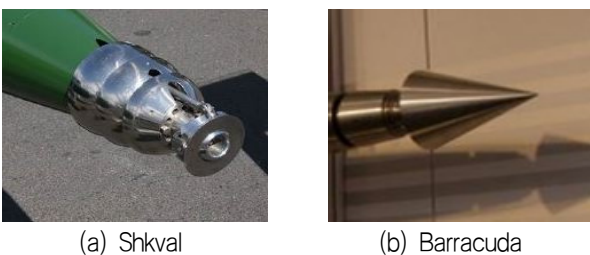


Fig. 1 Typical shapes of cavitators

이와 같이 오랫동안 수많은 연구가 수행되었음에도 불구하고 앞서 언급한 연구는 거의 모두가 무한유체 영역의 초공동을 대상으로 한 것으로서 수면이나 종력에 의한 영향을 제대로 고려하지 않고 있다. 단지, 캐비테이션 수를 정의할 때 운용 수심의 정수압을 포함시켜 고려하고 무한 Froude 수 가정을 사용하거나, 종력을 고려하지 않고 수면의 경계 조건만을 근사적으로 고려한 경우가 대부분이다. 그러나 초공동 어뢰가 운용되는 환경 조건은 균일한 압력의 무한유체 영역이 아니다. 끊임없이 운동하며 대기와 접촉하는 해수면이 가까이 존재하고, 종력과 수심에 따라 선형적

으로 증가하는 정수압이 작용하는 환경에서 고속으로 주행한다. 따라서 종력과 수면의 경계조건이 초공동에 미치는 효과에 대한 연구가 필요하며, 특히 초공동 어뢰가 수심 10 m 내외의 잠김 깊이(depth of submergence)에서 운용되는 경우에는 종력과 수면에서의 경계 조건을 포함시켜 잠김 깊이에 따른 초공동의 발생 및 캐비테이터에 작용하는 유체력을 파악하는 것이 중요하다.

한편, 초공동 어뢰가 실제 주행하는 환경 조건을 제대로 고려하여 실험을 수행하는 것은 현실적으로 거의 불가능하다. 특히 초공동 어뢰는 해수면 아래에서 고속으로 주행하기 때문에 원하는 수준의 낮은 캐비테이션 수에서 실험하기가 힘들고, 종력과 잠김 깊이의 영향과 대기압이 작용하는 수면의 경계조건을 포함시켜서 실험하기는 더욱더 어려운 실정이다.

CFD 기법과 컴퓨터의 발전과 함께 최근에는 캐비테이션 해석 모델과 수치해석해의 정도 향상을 위한 노력으로 인해 선박의 프로펠러와 타 등에서 발생하는 캐비테이션 유동에 대한 해석도 어느 정도 가능하게 되었다. 이 같은 CFD 기술의 현 수준은 초공동 유동에 대한 수치해석을 통해 초공동 어뢰의 성능 추정과 형상 설계에 필요한 초공동 발생 및 유체력 정보의 취득이 가능함을 시사한다. 따라서 CFD 기술을 적용하여 수중운동체의 초공동 유동과 유체력 특성에 대한 수치해석을 수행하는 것은 의미 있고 시의 적절하다고 판단된다.

본 논문에서는 2차원 단순 형상의 물체를 대상으로 종력장을 고려하고 대기와 수면을 포함시켜 초공동 유동에 대한 수치해석을 수행함으로써 종력과 자유표면이 초공동의 발생 및 항력에 미치는 효과에 대하여 조사하였다.

## 2. 수치해석 방법

수면 아래에서 고속으로 운동하는 물체의 초공동 유동에 대한 수치해석을 수행하기 위해서는 공기, 물, 수증기가 혼재된 유동에 대한 수치해석 방법이 필요하다. 본 연구에서는 혼합유체 모델을 이용하여 대기와 물의 경계인 수면과 물과 수증기의 경계인 공동표면을 유동해석 영역 내부에 포함시켜서 비정상 난류유동에 대한 수치해석을 실시하였다.

공기, 물, 수증기의 2상 3종 유체 유동에는 물과 공기 그리고 물과 수증기 사이의 2가지 계면이 존재할 수 있으며, 유체역학적 관점에서 이 두 계면은 모두 자유 표면으로 정의할 수 있다. 하지만 본 논문에서는 혼동을 피하기 위해 대기와 접촉하는 물의 계면을 ‘자유 표면(free surface)’으로, 수증기와 물의 계면은 ‘캐비티 표면(cavity surface)’으로 구별하였다. 본 연구에서는 수치해석을 통해 구한 혼합유체의 체적분율 분포로부터 공기와 물의 체적분율이 0.5인 면을 ‘자유 표면’으로, 수증기와 물의 체적분율이 0.5인 면을 ‘캐비티 표면’으로 정의하였음을 미리 밝혀둔다.

### 2.1 지배방정식

혼합유체 유동에 대한 지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식인 RANS (Reynolds averaged Navier-Stokes) 방정식이다.

자유수면 아래의 초공동 유동에 대한 수치해석을 위해 지배방정식에 혼합유체 모델(mixture fluid model)을 적용하면, 연속방정식과 RANS 방정식은 각각 식 (1), (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla(\rho_m U_i^m) = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\rho_m U_i^m) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho_m U_i^m U_j^m) \\ &= -\frac{\partial p_i}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_j} \left\{ \mu_m \left( \frac{\partial U_i^m}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^m}{\partial x_i} \right) - \overline{\rho_m u_i^m u_j^m} \right\} \\ & \quad + \rho_m g_i + \frac{\partial}{\partial x_j} \left( \sum_{q=1}^N \alpha_q \rho_l U_i^{dr,q} U_j^{dr,q} \right) \end{aligned} \quad (2)$$

위, 아래 첨자  $m$ 은 혼합유체(mixture fluid)를 의미하고,  $U_i^m$ 와  $u_i^m$ 는 각각 혼합유체의 질량평균 평균속도(mass averaged mean velocity)와 변동속도(mass averaged fluctuating velocity)이며,  $\rho_m$ 은 혼합 밀도(mixture density)이다. 여기서 질량평균 평균속도와 혼합 밀도는 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$U_i^m = \frac{\sum_{q=1}^N \alpha_q \rho_q U_i^q}{\rho_m} \quad (3)$$

$$\rho_m = \sum_{q=1}^N \alpha_q \rho_q, \quad \sum_{q=1}^N \alpha_q = 1 \quad (4)$$

앞에서  $q$ 는 혼합유체 내에 존재하는  $N$ 종의 유체를 구별하여 표시하며,  $\alpha_q$ 는 각 유체의 체적분율(volume fraction)이다. 또  $\mu_m$ 은 혼합유체의 점성으로 다음과 같이 표현된다.

$$\mu_m = \sum_{q=1}^N \alpha_q \mu_q \quad (5)$$

한편, 식 (2) 우변의  $U_i^{dr,q}$ 는 혼합유체 내에 존재하는 개별 유체( $q$ )의 혼합유체 평균속도( $U_i^m$ )에 대한 상대속도를 나타내고 또  $-\overline{\rho_m u_i^m u_j^m}$ 는 혼합유체 유동에 대한 Reynolds 응력이다.

본 연구에서는 Boussinesq 가정으로부터 식 (6)과 같이 Reynolds 응력을 가정하고, turbulent eddy viscosity  $\mu_t$ 는 2방정식 모델인 realizable  $k-\epsilon$  난류모델을 사용하였다. 여기서  $k$ 는 난류운동에너지로서  $(\overline{u^m u^m} + \overline{v^m v^m})/2$ 이며, 물체 벽면에서의 처리는 표준 벽함수(standard wall function)를 사용하였다.

$$-\overline{\rho_m u_i^m u_j^m} = \mu_t \left( \frac{\partial U_i^m}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j^m}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho_m k \delta_{ij} \quad (6)$$

체적분율 방정식(volume fraction equation)으로부터 공기와 수증기의 체적분율을 구하고, 식 (4)를 사용하여 물의 체적분율을 구한다. 공기와 수증기에 대한 체적분율 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p \rho_p U_i^m) \\ &= -\frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_p \rho_p U_i^{dr,p}) + \sum_{q=1}^3 (\dot{m}_{qp} - \dot{m}_{pq}) \end{aligned} \quad (7)$$

계산된 각 체적분율로부터 혼합 밀도, 혼합 점성, 혼합 속도를 결정하고 액체와 기체 사이 계면의 위치를 구한다.

또한 캐비테이션 해석을 위해서는 체적분율 방정식 뿐 아니라 증기에 대한 수송방정식도 함께 풀어야 한다.

## 2.2 캐비테이션 모델

본 논문에서는 Schnerr and Sauer 캐비테이션 모델 (Fluent Theory Guide, 2011)을 사용하였다. 캐비테이션 해석을 위한 증기 수송방정식은 식 (8)과 같고, 우변은 기화 압력에 대한 상대 압력에 따라서 기화(evaporation) 또는 응축(condensation)하는 상변화를 모델링한 소스(source) 항이다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\alpha_v \rho_v U_i^v) = R_e - R_c \quad (8)$$

여기서  $v$ 는 증기 상(vapor phase)을 나타내고,  $\alpha_v$ 는 증기의 체적분율,  $\rho_v$ 는 증기 밀도이며,  $U_i^v$ 는 증기의 속도이다.  $R_e$ 와  $R_c$ 는 캐비테이션 내부의 증기와 액체 사이에서 각각 기화와 응축을 나타내는 소스 항이며, 액체 내에서 하나의 기포 성장을 기초로 한 Rayleigh-Plesset 방정식을 기본으로 하고 있다 (Fluent Theory Guide, 2011). 기화와 응축 항은 유사한 방식으로 표현되고, 식 (9) 및 (10)과 같으며, 기화 압력(vapor pressure)  $P_v$ 를 기준으로 압력이 높고 낮음에 따라 적용 항이 판정된다.

$$\begin{aligned} & P_v \geq P \text{ 일 경우} \\ & R_e = \frac{\rho_l \rho_v \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho_m \mathfrak{R}_B} 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P_v - P)}{\rho_l}} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} & P_v < P \text{ 일 경우} \\ & R_c = \frac{\rho_l \rho_v \alpha_v (1 - \alpha_v)}{\rho_m \mathfrak{R}_B} 3 \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(P - P_v)}{\rho_l}} \end{aligned} \quad (10)$$

기포 반지름  $R_B = \left( \frac{\alpha_v}{1-\alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n} \right)^{\frac{1}{3}}$  과 같이 표현되고, 기화  
와 응축에 대한 계수는 동일하며, 증기 기포의 크기는 증기의 체  
적분율을 사용해서 식 (8)의 증기 수송방정식으로부터 구한다.

### 2.3 유동해석 코드

선체 주위 유동의 해석에 많이 사용하고 있는 유한체적법  
(FVM) 기반의 상용코드인 FLUENT(ver. 13)를 사용하였다. 지배  
방정식의 확산항은 2차 중심차분, 대류항은 QUICK(Quadratic  
Upwind Interpolation for Converctive Kinematics) 방법으로 이산  
화 하였고, 속도-압력 연성은 SIMPLEC(Semi Implicit Method for  
Pressure Linked Equation Consistent) 방법을 사용하였다.

### 2.4 주요 무차원수 및 해석 관점

캐비테이션이 발생하는 유동의 상사를 위한 기본 무차원수는  
캐비테이션 수로서 식 (11)과 같이 정의할 수 있다.

$$\sigma = \frac{2(P_0 - P_c)}{\rho U_0^2} \quad (11)$$

이 식에서  $P_0$ 는 무한원방의 압력,  $P_c$ 는 캐비티 압력,  $\rho$ 는  
액상 유체의 밀도, 그리고  $U_0$ 는 주 유동(또는 물체) 속도이다.

캐비티 유동의 상사를 엄밀하게 만족시키려면 캐비테이션 수  
이외에도 Froude 수, Reynolds 수, Weber 수가 동일해야 하지만  
(Savchenko, 2001), 이 3개의 무차원수가 캐비티 유동에 미치는  
영향은 무시할 수 있을 만큼 작은 경우가 대부분이기 때문에, 캐  
비테이션 수는 캐비티 유동의 특성을 규정하는 가장 중요한, 중  
종 유일한 무차원수로 인식되고 있다.

식 (11)로부터 알 수 있듯이 속도  $U_0$ 가 빨라지거나 또는 압력  
차  $P_0 - P_c$ 가 작아지면 캐비테이션 수는 감소한다. 캐비테이션  
수가 어떤 임계값 보다 작아지면 공동(cavitation)이 발생하고, 더  
작아질수록 캐비티의 크기가 증가한다. 초공동(super-cavitation)  
은 캐비티가 커져서 물체를 모두 감싸는 현상을 말하며, 종종 캐  
비테이션 수가 0.1 이하인 경우를 초공동 영역이라 한다. 자연  
초공동(natural super-cavitation)은, 캐비티 압력  $P_c$ 가 증기압  
(2350 Pascal)이고, 대략 속도  $U_0$ 가 50 m/s 이상일 때 발생하  
며, 원판 캐비테이터에 대한 실험을 통해 이같이 높은 속도에서  
는 점성의 영향이 거의 없는 것으로 알려져 있다 (Savchenko,  
2001; Semenenko, 2001).

한편, 수면 아래 가까운 곳에서 운동하는 물체에서 발생하는  
초공동에 대해서는 종력은 물론 대기와 물의 경계인 수면의 영향  
을 무시할 수 없으며, Froude 수는 초공동 유동의 특성을 규정하  
는 중요한 무차원수가 된다. Froude 수는 다음과 같이 정의할 수  
있으며,  $g$ 는 중력가속도를,  $l$ 은 물체의 특성 길이를 나타낸다.

$$Fr = \frac{U_0}{\sqrt{gl}} \quad (12)$$

물체에 의해 발생하는 수면파와 이에 따른 유동의 교란은  
Froude 수가 커지면 상대적으로 작아져서 Froude 수가 아주 큰  
경우에는 근사하여 처리할 수 있다. 초공동 물체의 경우에는 물  
체와 초공동을 포함한 전체 길이로 정의한 Froude 수를 사용하는  
것이 보다 합리적일겠지만, 초공동의 길이는 초공동 유동 문제의  
해로부터 정해지므로, 편의상 식 (12)와 같이 물체의 특성 길이로  
정의하여 사용하는 것이 보통이다. 따라서 물체에서 발생하는 초  
공동의 길이를 고려하지 않은 Froude 수를 사용하여 수면파 및  
관련 유동을 해석하는데 주의가 요구된다. 한편, 원판 캐비테이  
터의 초공동 유동에서는 통상 캐비테이터의 직경을 사용하여 정  
의한 Froude 수가 20~30 보다 큰 경우에 종력의 효과를 무시할  
수 있다고 알려져 있다 (Savchenko, 2001).

식 (11)에서 기준 압력  $P_0 = P_a + \rho gh$ 로 치환하고, 잠김  
깊이 Froude 수를 식 (13)과 같이 정의하면, 캐비테이션 수와 잠  
김 깊이 Froude 수의 관계를 식 (14)와 같이 표현할 수 있다.

$$Fr_h = \frac{U_0}{\sqrt{gh}} \quad (13)$$

$$\sigma = \frac{2}{Fr_h^2} + \frac{2(P_a - P_c)}{\rho U_0^2} = \frac{2}{Fr_h^2} \left\{ 1 + \frac{(P_a - P_c)}{\rho gh} \right\} \quad (14)$$

위에서  $P_a$ 는 대기 압력,  $h$ 는 수면 아래에서 운동하는 물체의  
잠김 깊이를 나타낸다. 대기압과 캐비티 압력이 일정하다면 (14)  
식 우변의 두 번째 항은 유입 속도의 제곱에 반비례하는 상수로  
볼 수 있고, 물체가 일정한 속도로 운동할 때 캐비테이션 수( $\sigma$ )  
가 잠김 깊이 Froude 수의 제곱( $Fr_h^2$ )에 반비례함을 보여준다.

수면 아래에서 운동하는 물체에서 초공동(super-cavity)이 발생  
하는 경우에는 물체의 속도가 매우 빨라져서 물체 주위의 압력이  
증기압보다 낮아지면서 자연 초공동(natural super-cavity)이 형성  
되는 경우와 공기 또는 불활성 가스를 주입함으로써 캐비티 압력  
이 기준 압력에 근접해서 환기 초공동(ventilated super-cavity)이  
형성되는 경우를 생각할 수 있으며, 본 연구에서는 수면 아래에  
서 발생하는 자연 초공동을 대상으로 고려한다.

실제 수중 환경에서 발생하는 초공동 유동에서 캐비테이션 수  
를 변화시키는 주요 변수는 유입 속도와 잠김 깊이이다. 잠김 깊  
이와 유입 속도가 달라지면 초공동 유동의 상사에 관계된 주요  
무차원수인 캐비테이션 수( $\sigma$ )와 Froude 수( $Fr$ )는 물론  
Reynolds 수( $Re$ )가 함께 변하기 때문에 각 무차원수의 영향을  
분리하여 분석하기 어려우며, 이는 실제 환경에 상사한 조건에서  
초공동 유동에 대한 모형실험을 수행하고 캐비티 형상 및 유체력  
자료를 표준화하는데 큰 장애 요인으로 작용한다.

Table 1은 하나의 변수를 고정할 때 주요 무차원수의 변화 여

부를 보여준다. 캐비테이션 수는 초공동 현상을 지배하는 가장 중요한 무차원수이지만 여기서는 초공동을 규정하는 변수로도 취급하였다. 잠김 깊이를 고정할 경우에는 유입 속도가 변하면 주요 무차원수가 모두 변하고, 유입 속도를 고정할 경우에는 잠김 깊이에 따라 캐비테이션 수와 잠김 깊이 Froude 수가 변한다. 또 캐비테이션 수가 동일하도록 잠김 깊이에 따라 유입 속도를 대응하여 변화시킬 경우에는 캐비테이션 수를 제외한 다른 무차원수가 함께 변한다. 한편, 어느 한 변수를 고정해도 잠김 깊이 Froude 수는 변한다.

Table 1 Variation of dimensionless parameters

constraint	$\sigma$	$Fr$	$Re$	$Fr_h$
$h=\text{constant}$	Variable	Variable	Variable	Variable
$U_0=\text{constant}$	Variable	Constant	Constant	Variable
$\sigma=\text{constant}$	Constant	Variable	Variable	Variable

### 3. 이차원 웨지 초공동 유동

캐비테이터의 기본 형상인 원뿔이나 원뿔에서 발생하는 초공동 유동은, 중력과 자유표면의 효과를 포함시키면, 축대칭성이 깨어져서 결과적으로 3차원 유동이 되므로, 본 연구에서는 우선 수치해석의 부담이 작은 웨지 각이 30°인 2차원 웨지를 대상으로 선택하여 중력과 자유표면 효과를 포함한 2차원 초공동 유동에 대한 수치해석을 수행하고, 그 결과를 무한유체 유동의 수치해 (Lee, et al., 2013)와 비교, 분석하였다. 참고로 원뿔형 캐비테이터의 원추각(cone angle)이 통상 30° 정도인 것도 고려하였다.

2차원 초공동 유동에 미치는 중력과 자유표면의 효과를 체계적으로 조사하기 위해 Table 1과 같이 첫째로, 잠김 깊이를 고정하고 유입 속도를 변화시킨 경우, 둘째로, 유입 속도를 고정하고 잠김 깊이를 변화시킨 경우, 마지막으로 캐비테이션 수가 동일하도록 잠김 깊이에 따라 유입속도를 대응하여 변화시킨 경우에 대한 수치해석 결과를 순차적으로 조사, 검토하였다.

#### 3.1 좌표계 및 격자계

수치해석을 위한 좌표계와 초공동 형상의 정의를 Fig. 2에 나타내었다. 웨지 뒷날(trailing edge)로부터 수직 방향으로 정수면과 만나는 곳을 원점으로 잡고, 하류 방향을  $x$  축의 양의 방향으로, 연직 상 방향을  $y$  축의 양의 방향으로 정하였다. 또한, 정수면에서 웨지 앞날(leading edge)까지의 수직 거리를 잠김 깊이( $h$ )로 정의하였다. 웨지 길이  $\ell_B$ 는 1m, 웨지 두께  $w_B$ 는 0.536m 이고, 웨지 각  $\beta$ 는 30°이며, 계산 영역의 유입 경계(균일류)는  $30\ell_B$ , 유출 경계(정수압)는  $60\ell_B$ , 상부 경계는 정수면으로부터  $20\ell_B$ , 하부 경계는 웨지 중심을 기준으로  $40\ell_B$ 이다(Fig. 3).

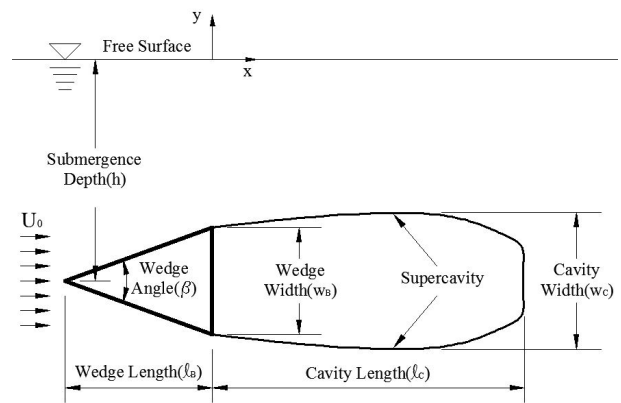


Fig. 2 Coordinates and definition of 30° wedge and supercavity

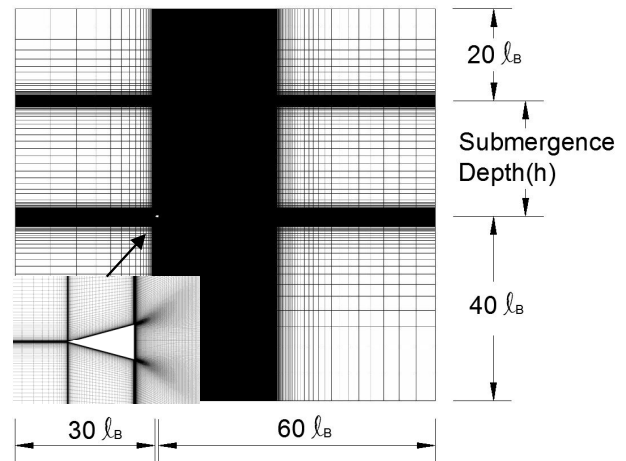


Fig. 3 Structured grids for 30° wedge under free surface

#### 3.2 잠김 깊이를 고정하고 유입 속도를 변화시킨 경우

2차원 웨지에서 발생하는 초공동의 수치해석을 위해서 먼저 잠김 깊이를 10 m로 고정하고, 캐비테이션 수는 0.15, 0.2, 0.3, 0.4로 4개를 선정하였다. 잠김 깊이 10 m는 초공동 어뢰의 운용 수심을 참조하여 선택하였고, 기준 압력은 2기압 정도이다. 각 캐비테이션 수에 대응되는 4개의 유입 속도는 31.4 ~ 51.3 m/s 이고, Froude 수( $Fr$ )는 13.69 ~ 22.36, Reynolds 수( $Re$ )는  $11.68 \times 10^7 \sim 2.75 \times 10^7$ , 잠김 깊이 Froude 수( $Fr_h$ )는 3.17 ~ 5.18 이며, Froude 수와 Reynolds 수는 웨지 폭을 특성 길이로 사용하여 정의하였다. 웨지 표면에서 떨어진 첫 격자점의  $y_1^+$ 는 240 ~ 330 이며 (Choi & Kim, 2010), 격자수는 약 180,000 개 이다. Table 2에 수치해석 조건을 정리하였다.

Fig. 4는 캐비테이션 수에 대응되는 유입 속도 및 다른 무차원수의 변화를 보여준다. 유입 속도가 빨라짐에 따라 캐비테이션 수는 유입 속도의 제곱에 반비례하여 감소하고, Froude 수, Reynolds 수, 잠김 깊이 Froude 수는 모두 유입 속도에 선형적

로 비례하여 증가한다. 여기서, 캐비테이션 수가 작을수록 Froude 수와 잠김 깊이 Froude 수는 빠르게 증가하여 커지는 것을 주목할 필요가 있다.

Table 2 Calculation conditions of cavity flow for 30° wedge under free surface ( $h=10m$ )

$h(m)$	$U_0(m/s)$	$\sigma$	$Fr$	$Re$	$Fr_h$
10	51.3	0.15	22.36	$2.75 \times 10^7$	5.18
	44.4	0.20	19.37	$2.38 \times 10^7$	4.48
	36.3	0.30	15.81	$1.94 \times 10^7$	3.66
	31.4	0.40	13.69	$1.68 \times 10^7$	3.17

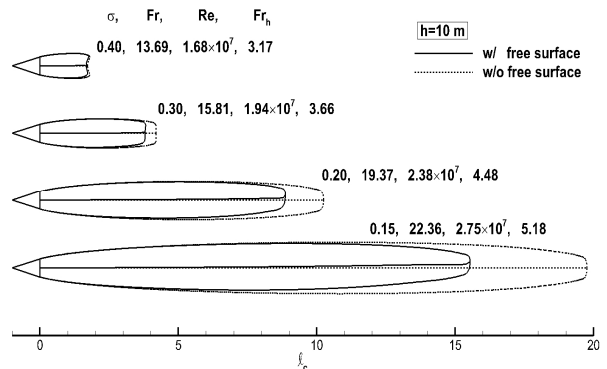


Fig. 6 Difference of cavity shape of 30° wedge due to gravity and free surface effects ( $h=10m$ )

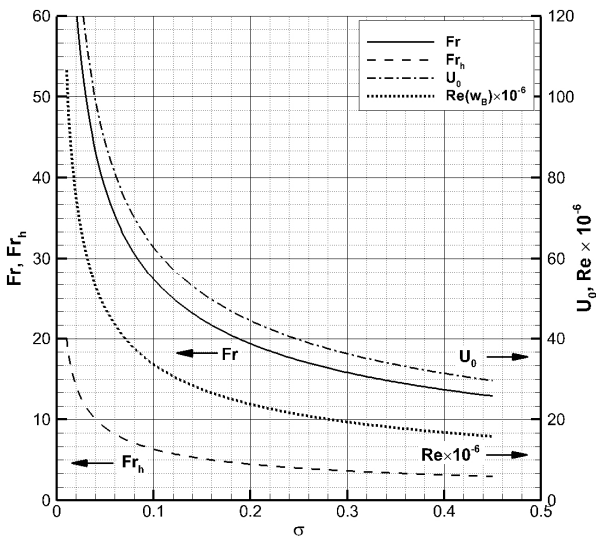


Fig. 4 Changes of parameters by inflow velocities for a fixed submergence depth ( $h=10m$ )

중력과 자유표면의 영향에서, 주로 부력에 의한 캐비티 형상의 변화를 나타내기 위해 동일한  $x$  위치에서 캐비티 위, 아래 표면의 중심점을 이은 선을 Fig. 5에 보인 것처럼 캐비티의 중심선으로 정의하였다.

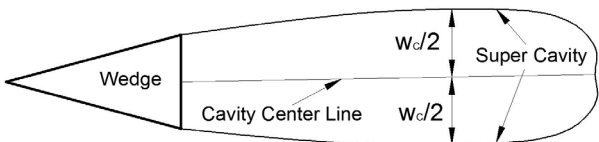


Fig. 5 Definition of cavity centerline

Fig. 6은 캐비테이션 수에 따른 캐비티 형상의 변화를 보여준다. 중력과 자유표면을 포함시킨 경우와 무한유체 유동의 경우에 발생한 캐비티 형상을 비교하고, 각 캐비티 형상 옆에는 유동 조건에 해당되는 무차원수를 표시하였다. 두 경우의 캐비테이션 수와 Reynolds 수는 동일하고, Froude 수는 중력과 자유표면이 포함된 경우에만 해당된다.

두 경우 모두 캐비테이션 수가 작아질수록 캐비티는 빠르게 커진다. 캐비티가 가장 작은 경우( $\sigma=0.4$ ), 캐비티 꼬리의 형상으로부터 캐비티 닫힘 과정에 비교적 강한 re-entrant jet가 발생함을 미루어 짐작할 수 있다. 또한, 두 경우의 차이로부터 동일한 캐비테이션 수에서 중력과 자유표면 효과 때문에 캐비티 크기, 특히 길이가 짧아지고, 캐비티 중심선이 꼬리 쪽으로 가면서 상승하는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7과 8에는 본 수치해의 캐비티 길이 및 두께를 무한유체 영역의 수치해 (Lee, et al., 2013) 및 선형이론해(Newman, 1977)와 비교하였다. 중력과 자유표면 효과 때문에 캐비테이션 수가 0.15일 때, 캐비티 길이는 20% 이상 줄어들고, 캐비티 두께는 10% 이내로 줄어든 것으로 나타났다. 캐비테이션 수가 작을수록 중력과 자유표면 효과로 인한 캐비티 길이와 폭의 감소율이 더 크다. 이 때, Froude 수는 증가하는 것을 고려하면, 캐비티 크기의 감소율이 더 커지는 본 연구의 결과는 Froude 수가 커질수록 중력과 자유표면의 효과가 상대적으로 작아진다는 통설과 맞지 않는다.

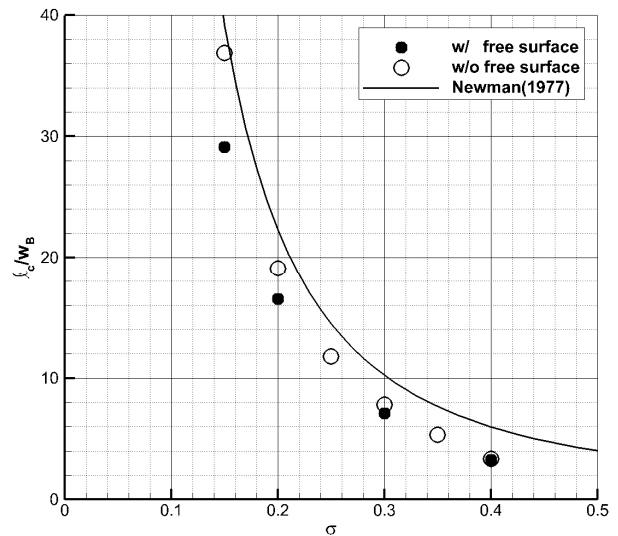


Fig. 7 Cavity length of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $h=10m$ )

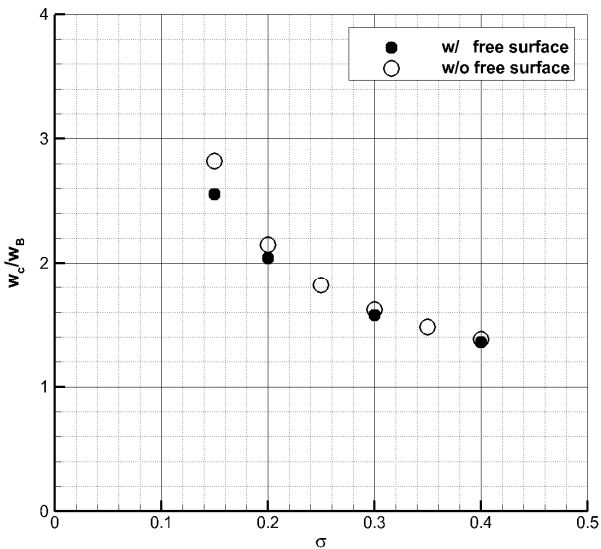


Fig. 8 Cavity width of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $h=10\text{ m}$ )

Fig. 9는 잠김 깊이가 10m로 일정할 때 초공동이 발생하는 웨지의 항력 계수를 보여준다. 항력 계수는 아래와 같이 정의하였으며, 이 식에서  $D$ 는 웨지 단면의 항력이다.

$$C_D = \frac{D}{\frac{1}{2}\rho U_0^2 w_B} \quad (15)$$

중력과 자유표면 효과 때문에 캐비티 크기가 눈에 띄게 줄어든 것과 달리, 항력 계수는 무한유체 유동의 경우보다 조금 크거나 차이가 거의 없어서 중력과 자유표면의 효과를 무시할 수 있음을 알 수 있다.

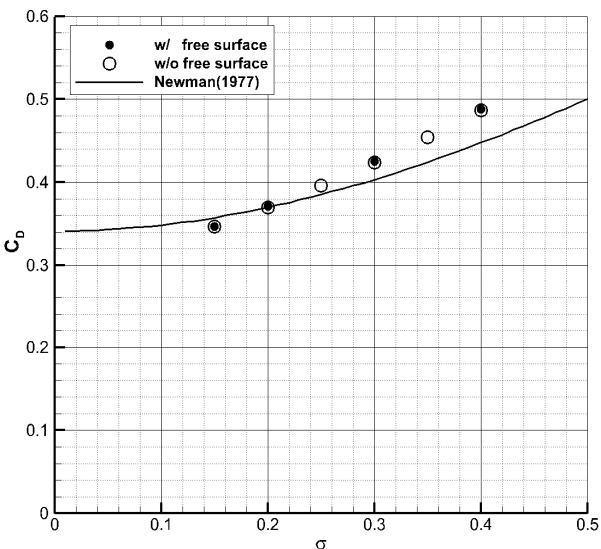


Fig. 9 Cavity drag of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $h=10\text{ m}$ )

### 3.3 유입 속도를 고정하고 잠김 깊이를 변화시킨 경우

Froude 수가 일정한 조건에서 발생하는 초공동에 대해 조사하기 위해 잠김 깊이 2 m 일 때 캐비테이션 수가 0.15 이도록 유입속도를 39.8 m/s로 고정하고 1 ~ 25 m에서 잠김 깊이 11개를 선정해서 초공동 유동에 대한 수치해석을 수행하였다.

Table 3 Calculation conditions of cavity flow for 30° wedge under free surface ( $U_0=39.8\text{ m/s}$ )

$h(m)$	$U_0 (m/s)$	$\sigma$	$Fr$	$Re$	$Fr_h$
0.2	39.8	0.128	17.35	$2.13 \times 10^7$	28.40
1.0		0.138			12.70
2.0		0.150			8.98
2.5		0.156			8.03
3.0		0.162			7.33
4.0		0.175			6.35
6.0		0.200			5.18
8.0		0.224			4.49
10.0		0.249			4.02
15.0		0.311			3.28
20.0		0.373			2.84
25.0	0.435	2.54			

Froude 수( $Fr$ )는 17.35 이고, 각 잠김 깊이에 대응되는 11개의 캐비테이션 수는 0.128 ~ 0.435 이며, 잠김 깊이 Froude 수( $Fr_h$ )는 2.54 ~ 28.4 이다. Reynolds수는  $1.87 \times 10^7$  이고, 웨지 표면에서 떨어진 첫 격자점의  $y_1^+$ 는 약 290 이며, 격자수는 약 195,000 ~ 235,000 이다. Table 3에 수치해석이 수행된 조건을 정리하였다.

Fig. 10은 잠김 깊이에 대응되는 캐비테이션 수와 잠김 깊이 Froude 수의 변화를 보여준다. 식 (11)과 (12) 그리고 (13)으로부터 알 수 있듯이 유입 속도를 고정한 본 경우에는 Froude 수가 일정하고, 잠김 깊이가 얕아짐에 따라서 기준 압력이 낮아져서 캐비테이션 수가 선형적으로 감소하며, 잠김 깊이 Froude 수는 잠김 깊이의 제곱근에 반비례해서 빠르게 증가한다.

Fig. 11은 잠김 깊이에 따라서 다르게 생성된 초공동 형상을 비교하여 보여주며, 각 잠김 깊이에 대응되는 캐비테이션 수와 잠김 깊이 Froude 수를 함께 표시하였다. 무한유체 유동의 경우에는 캐비테이션 수가 작아짐에 따라서 캐비티 길이와 두께가 빠르게 증가하는데, 유입 속도를 고정한 채 잠김 깊이를 변화시킨 본 경우에는 캐비테이션 수가 감소함에 따라서 캐비티의 길이와 두께가 증가하다가, 일정 깊이(3m) 이하에서는 캐비테이션 수가 작아짐에도 불구하고 캐비티 길이와 두께가 오히려 감소하는 ‘특이 양상’을 나타낸다.

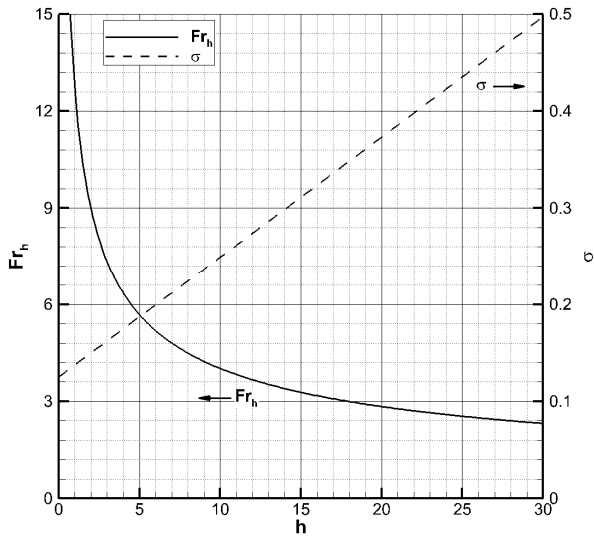


Fig. 10 Changes of non-dimensional parameters by submergence depth for a fixed inflow velocity ( $U_0=39.8m/s$ )

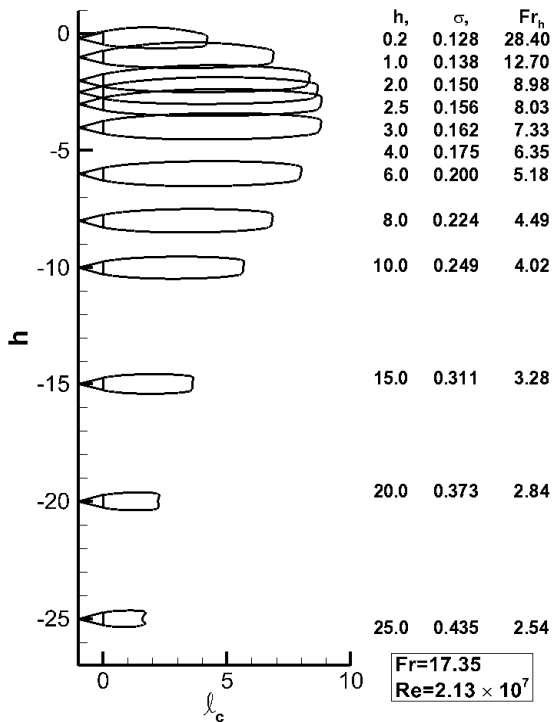


Fig. 11 Variation of cavity shape of 30° wedge by submergence depth for a fixed inflow velocity ( $U_0=39.8m/s$ )

Fig. 12와 Fig. 13을 살펴보면 중력과 자유표면의 효과 때문에 동일한 캐비테이션 수 조건에서 무한유체 유동의 경우에 비해서 캐비티 길이가 짧고 두께는 얇은 것을 알 수 있다. 잠김 깊이가 깊어짐에 따라서 캐비테이션 수가 증가하고 캐비티 크기는 무한 유체의 경우에 접근함을 확인할 수 있다. 잠김 깊이가 작아지면 캐비티 길이와 두께는 점점 더 커지고, 3.2절의 경우처럼 캐비테

이션 수가 작을수록 캐비티 크기의 감소율이 더 크게 나타난다. 하지만 이 경우에는 3.2절과 달리 Froude 수가 고정되어 더 이상 중요한 변수가 아님을 주목할 필요가 있다.

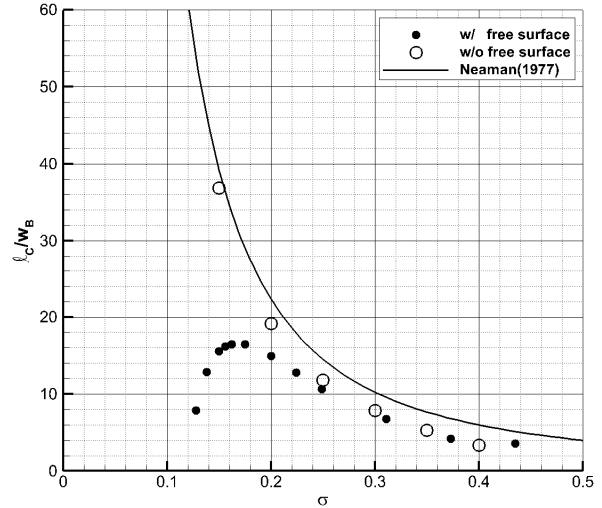


Fig. 12 Cavity length of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $U_0=39.8m/s$ )

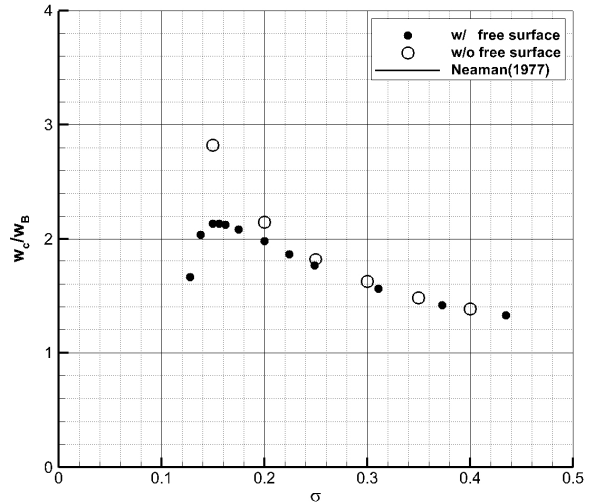


Fig. 13 Cavity width of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $U_0=39.8m/s$ )

잠김 깊이가 10m 이상에서는 무한유체 유동의 경우와 캐비티 크기의 차이가 10% 이내지만, 10m 이하( $\sigma \leq 0.25$ )가 되면 그 차이가 커져서, 잠김 깊이가 1m 일 때, 캐비티 길이는 70% 이상, 두께는 약 30% 작다. 한편, 잠김 깊이가 깊고 캐비테이션 수가 클 때, 캐비티 길이의 변화가 매끄럽지 못한 것은, 정상 상태로 수렴하지 않고 변동하는 수치해의 평균을 취하면서 발생한 문제이다. Fig. 11에서 잠김 깊이 25m 일 때, 캐비티의 비대칭 형상은 이러한 문제점을 간접적으로 보여준다.

잠김 깊이가 3m 이하( $\sigma \leq 0.16$ )로 작아지면 캐비테이션 수가 감소함에도 불구하고 캐비티 크기가 오히려 작아지는 현상



이 나타난다. 현재로서는 이러한 ‘특이 양상’이 발생하는 원인 또는 메커니즘을 명확하게 규명하기는 어렵지만, 3.4절로부터 그 단서를 찾을 수 있다. 3.4 절의 결과는 동일한 캐비테이션 수 조건에서 잠김 깊이가 얕아지면 잠김 깊이 Froude 수가 급격히 증가하고, 캐비티 길이는 잠김 깊이 Froude 수의 역수에 비례하여 감소하며, 특히 수면에 아주 가까이 근접함에 따라서 캐비티 길이가 급격하게 줄어든 것을 보여준다. 따라서 수면에 가까이 근접하여 잠김 깊이가 작을 때 나타난 ‘특이 양상’은 캐비테이션 수가 감소하여 캐비티 길이가 길어지는 효과보다 잠김 깊이가 얕아지면서 캐비티 길이가 짧아지는 효과가 더 강해서 결과적으로 캐비테이션 수가 감소함에도 불구하고 오히려 캐비티 길이가 줄어드는 현상으로 이해할 수 있다.

이와 같이 수면에 아주 가까이 근접하게 되면 캐비테이션 수가 감소함에도 불구하고 중력과 자유표면 효과로 인해 초공동의 크기가 급격히 작아지는 ‘특이 양상’은 캐비테이터의 성능 추정 및 형상 설계에서 중요한 의미를 갖는다.

Fig. 14는 웨지의 항력 계수를 보여준다. 자유표면이 없는 경우와 거의 동일한 값과 유사한 변화를 나타내다가, 캐비티 크기의 경우와 마찬가지로 일정한 잠김 깊이(3m) 이하가 되면 항력 계수가 빠르게 감소한다. 자유표면에 가까이 근접할 때 나타나는 이러한 항력 계수의 특징은 앞서 살펴본 캐비티의 ‘특이 양상’과 밀접하게 연관되며, 초공동의 길이 및 두께가 크게 줄어들고 캐비티 형상이 달라져 웨지 경사면의 압력이 낮아진 것을 의미한다. 조건은 다르지만, Fig. 22로부터 초공동 웨지가 수면에 가까이 근접할 때, 웨지 경사면의 압력이 낮아지는 것을 볼 수 있다.

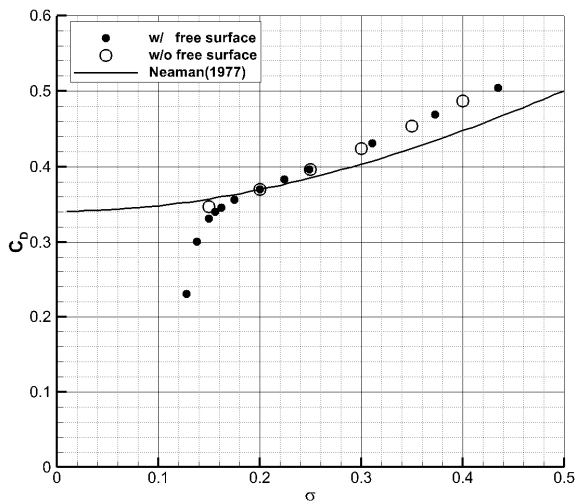


Fig. 14 Cavity drag of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $U_0=39.8m/s$ )

Fig. 15는 속도가 일정한 조건에서 잠김 깊이에 따른 자유수면의 변화를 보여준다. 잠김 깊이가 얕을수록 수면이 더 높이 상승하다가 잠김 깊이가 1m 이하로 매우 얕아지면 수면이 천천히 하강한다. 특히 잠김 깊이가 얇은 경우, 수면 상승은 캐비티 뒷면 형상과 거의 일치하며 그 최고점은 캐비티 길이 중앙 부근에 위치하고 수면에 근접함에 따라서 조금씩 앞쪽으로 이동한다.

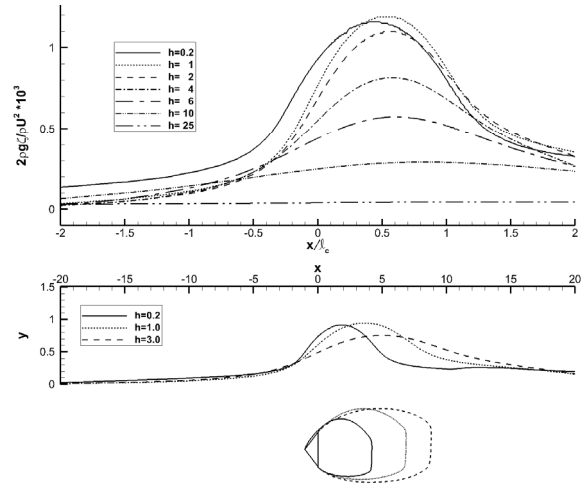


Fig. 15 Change of free-surface elevation with submergence depth for a fixed inflow velocity ( $U_0=39.8m/s$ )

### 3.4 캐비테이션 수를 고정하고 잠김 깊이를 변화시킨 경우

초공동 유동을 지배하는 가장 중요한 무차원수인 캐비테이션 수와 다른 무차원수의 영향을 분리하여 조사하기 위하여 0.2 ~ 100m 범위에서 잠김 깊이 14개를 선정하고, 잠김 깊이에 따라서 유입 속도를 36.7 ~ 120m/s로 변화시켜서 캐비테이션 수가 0.15로 고정되도록 하였다. 유입 속도에 따라서 Froude 수( $Fr$ )는 16.01 ~ 52.34 이고, 잠김 깊이 Froude 수( $Fr_h$ )는 3.83 ~ 26.2 이다. Reynolds수는  $1.73 \times 10^7 \sim 5.65 \times 10^7$ 이고, 웨지 표면에서 떨어진 첫 격자점의  $y_1^+$ 는 290 ~ 400이며, 격자수는 약 205,000 ~ 230,000개 이다. Table 4에 계산 조건을 정리하였다. 잠김 깊이가 깊을수록 고정된 캐비테이션 수에 대응되는 유입 속도는 빨라지고, Froude 수와 Reynolds 수는 증가한다.

Table 4 Calculation conditions of cavity flow for 30° wedge under free surface ( $\sigma=0.15$ )

$h(m)$	$U_0(m/s)$	$\sigma$	$Fr$	$Re$	$Fr_h$
0.20	36.7	0.15	16.01	$1.97 \times 10^7$	26.20
0.25	36.8		16.04	$1.97 \times 10^7$	23.49
0.30	36.9		16.08	$1.98 \times 10^7$	21.50
0.50	37.2		16.24	$2.00 \times 10^7$	16.81
1	38.1		16.62	$2.04 \times 10^7$	12.16
2	39.8		17.35	$2.13 \times 10^7$	8.98
4	42.9		18.73	$2.30 \times 10^7$	6.85
6	45.9		20.01	$2.46 \times 10^7$	5.98
8	48.7		21.22	$2.61 \times 10^7$	5.49
10	51.3		22.36	$2.75 \times 10^7$	5.18
15	57.3		24.99	$3.07 \times 10^7$	4.72
20	62.7		27.36	$3.36 \times 10^7$	4.48
25	67.8		29.55	$3.63 \times 10^7$	4.33
100	120.0		52.34	$6.43 \times 10^7$	3.83

Fig. 16은 잠김 깊이에 대응되는 유입 속도 및 주요 무차원수의 변화를 보여준다. 초공동 위치가 수면에 가까이 접근하여 잠김 깊이가 작을수록, 유입 속도, Froude 수, Reynolds 수가 더 빠르게 감소하고, 잠김 깊이 Froude 수는 잠김 깊이의 제곱근에 반비례하여 급격히 증가하는 것을 주목할 필요가 있다. 한편, 잠김 깊이가 깊어질수록 중력과 자유표면의 효과가 감소하여 초공동 유동이 무한유체 유동의 경우에 접근할 것이다.

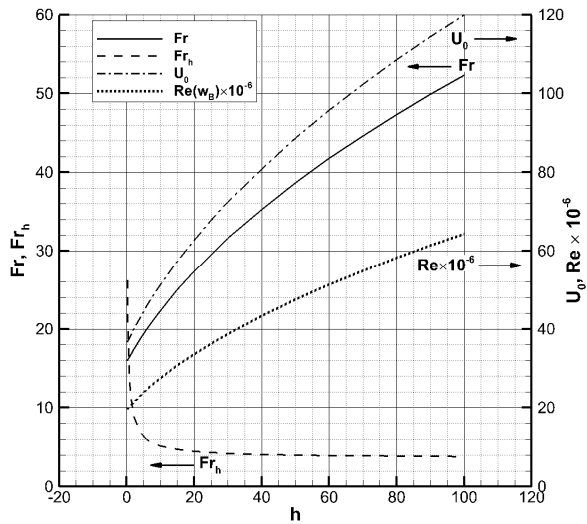


Fig. 16 Changes of parameters with submergence depths for a fixed cavitation number ( $\sigma=0.15$ )

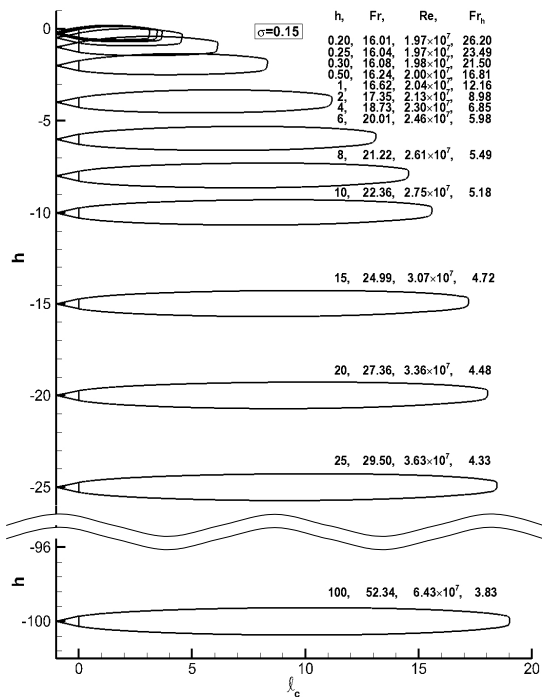


Fig. 17 Variation of cavity shape of 30° wedge with submergence depth for a fixed cavitation number ( $\sigma=0.15$ )

Fig. 17은 잠김 깊이 별로 생성된 초공동 형상을 비교하여 보

여준다. 잠김 깊이가 20m 이상, 즉 Froude 수가 대략 27 이상이면 잠김 깊이에 따른 캐비티 형상 및 크기의 변화가 매우 작다. 잠김 깊이가 얕아짐에 따라서 캐비티 길이와 두께가 감소하며, 자유표면에 가까워질수록 캐비티 길이 및 두께가 더 빠르게 감소하여 수면에 가장 가까운 잠김 깊이인 0.2m에서 초공동의 길이와 두께가 가장 짧고 얇다.

Fig. 18과 19를 살펴보면 중력과 자유표면의 영향으로 동일한 캐비테이션 수 조건에서 캐비티 길이와 두께는 무한유체 유동의 경우 보다 모두 짧고 얇아지며, 잠김 깊이가 깊어짐에 따라서 캐비티 길이와 두께는 무한유체 유동의 값에 접근한다.

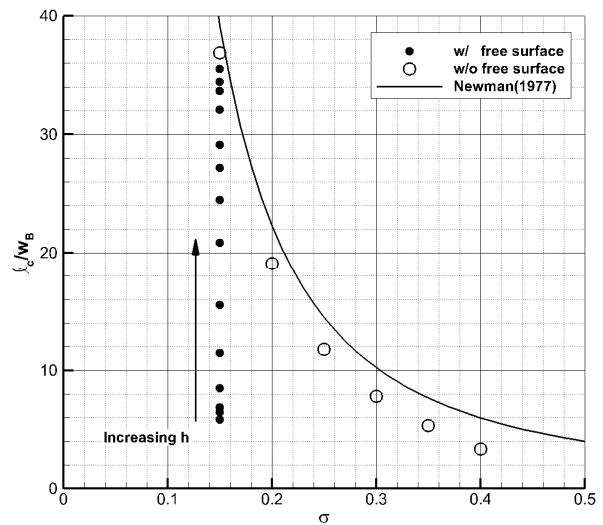


Fig. 18 Cavity length of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $\sigma=0.15$ )

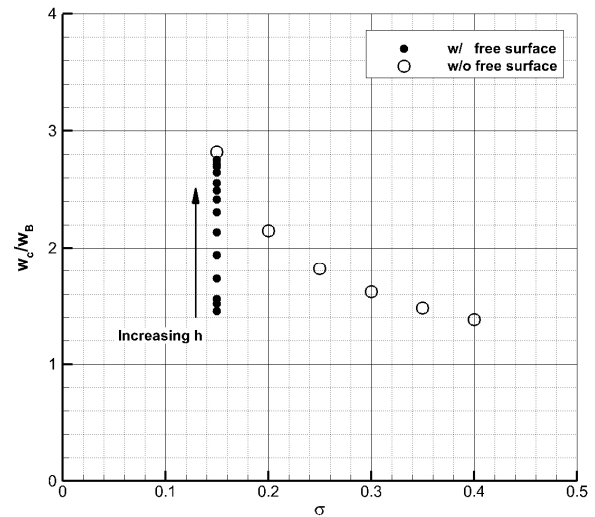


Fig. 19 Cavity width of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $\sigma=0.15$ )

잠김 깊이 10m에서는 캐비티 길이가 무한유체 유동에 비해 20% 이상 짧아지고, 두께는 약 10% 이상 얇아진다. 잠김 깊이가 얕아짐에 따라서 캐비티 길이와 두께가 빠르게 감소해서, 잠김 깊이 1m에서는 캐비티 길이는 무한유체 유동의 1/3, 캐비티 두

개는 2/3 수준으로 감소한다. 이로부터 수면에 가까이 근접한 경우에는 중력과 자유표면 효과를 반드시 고려해야만 캐비테이터의 성능을 제대로 추정할 수 있다는 것을 알 수 있다. 잠김 깊이가 20m 이상이면 캐비티 길이와 두께가 무한유체 유동의 값에 접근하며, 길이는 10% 이내, 두께는 5% 이내의 차이를 나타낸다.

Fig. 20은 동일한 캐비테이션 수 조건에서 중력과 자유표면의 효과 때문에 잠김 깊이가 얕아짐에 따라서 웨지의 항력 계수가 감소하는 것을 보여준다. 잠김 깊이가 10m 이상이면 항력 계수는 무한유체 유동의 경우와 거의 동일한 값을 갖는다.

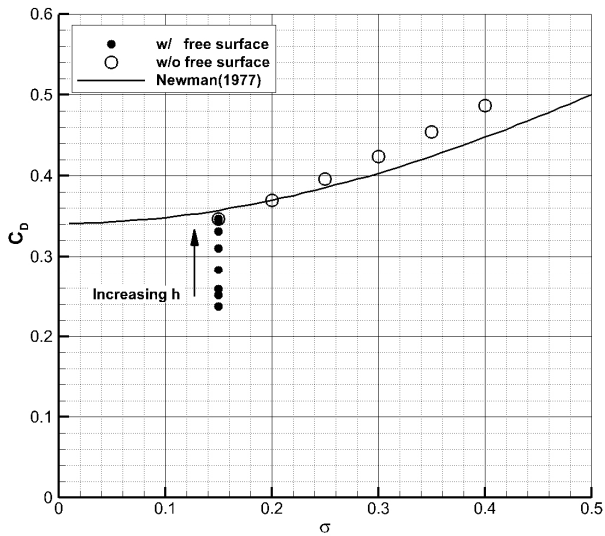


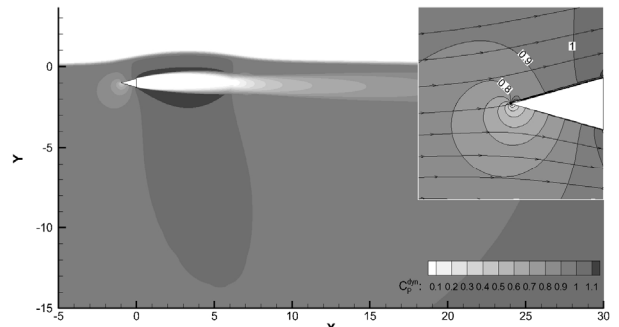
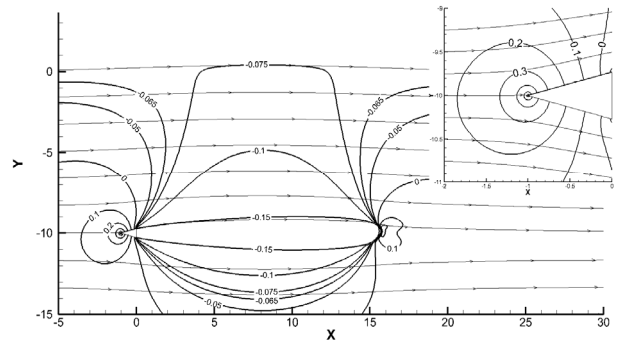
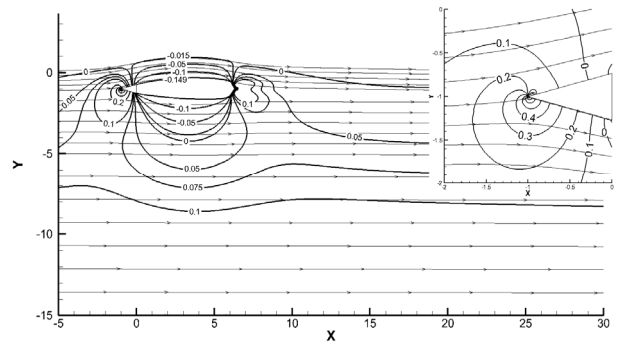
Fig. 20 Cavity drag of 30° wedge with gravity and free surface effects ( $\sigma=0.15$ )

Fig. 21은 잠김 깊이 1m와 10m일 때, 웨지 초공동 유동의 유선과 압력계수를 수면에 가까운 영역에 대해 가시화 한 것이며, 압력계수는 (16)과 같이 정의하였다.

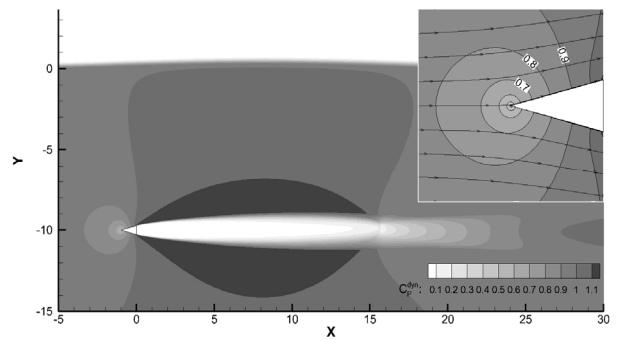
$$C_P = \frac{2(P - P_0)}{\rho U_0^2}, \quad C_P^{dyn} = \frac{\rho V^2}{\rho U_0^2} \quad (16)$$

잠김 깊이에 따라 수면과 초공동 사이 유선의 곡률과 수직방향 압력구배의 차이가 크다. 잠김 깊이가 1 m인 경우에는, 깊이 10 m에 비해 수면 쪽 웨지 경사면의 압력은 낮아지며, 아래쪽 경사면 압력은 높아지고 정체점이 머리 부근에 형성되어 양력과 head-up 모멘트가 발생한다.

현재로서는 수면에 가까이 접근함에 따라서 캐비티 길이가 급격히 짧아지는 현상의 메커니즘과 원인을 정확히 설명하기 어렵지만, 대기압이 작용하는 수면과 증기압이 작용하는 초공동 캐비티 윗면 사이 아치형 유선의 곡률이 커지고 유선의 수직 방향으로 큰 압력구배가 작용하여 캐비티 닫힘을 촉진시키기 때문에 판단된다. 이와 유사한 상황을 평판 초공동 유동에 대한 해석 결과 (Faltinsen & Semenov, 2008 의 Fig. 9)에서도 찾아 볼 수 있다.



(a) shallow submergence depth ( $h=1m$ )



(b) medium submergence depth ( $h=10m$ )

Fig. 21 Streamlines and pressures of cavity flow region under free surface ( $\sigma=0.15$ )

Fig. 22는 수면 상승을 보여준다. 잠김 깊이에 따라 유입 속도가 크게 다름에도 불구하고 수면의 변화는 속도가 일정한 경우인 Fig. 15와 매우 유사하다. 특히 잠김 깊이가 얕은 경우, 캐비티 윗면의 유선 형상과 거의 동일하게 수면이 상승하여 아치형 유관을 형성한다.

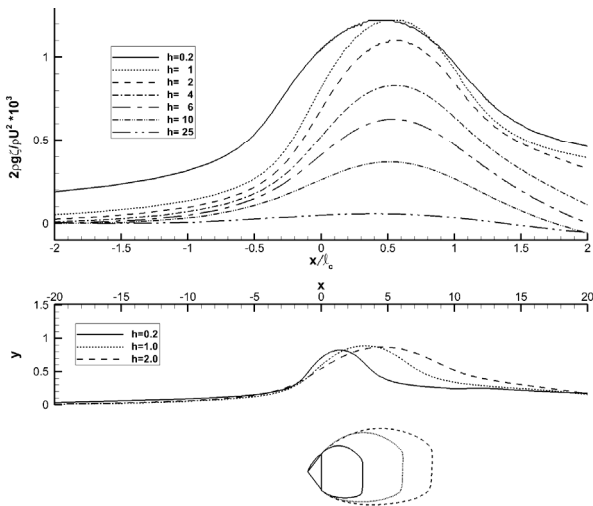


Fig. 22 Change of free-surface elevation with submergence depth for a fixed cavitation number ( $\sigma=0.15$ )

캐비테이션 수가 0.15로 고정된 조건에서 잠김 깊이에 따른 캐비티 길이와 두께 그리고 항력계수의 변화를 Froude 수를 변수로 하여 Fig. 23에 나타내었다. 또 잠김 깊이를 10m로 고정한 3.2절의 캐비티 길이도 함께 나타내었다.

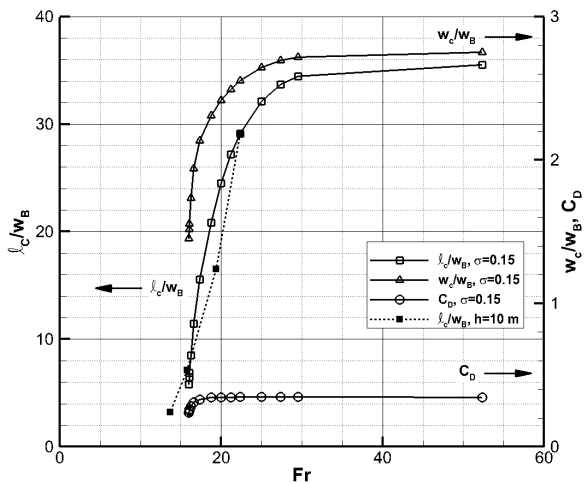


Fig. 23 Variation of cavity length with Froude number

Froude 수가 대략 30 보다 커지면 캐비티 길이와 두께는 무한 유체 유동의 값에 접근하며, 항력계수는 Froude 수가 20 이상이면 무한유체 유동의 값과 동일하다. 이는 원판 캐비테이터의 초공동에서 Froude 수가 20 ~ 30 이상 일 경우, 중력의 효과를 무시할 수 있다는 통설 (Savchenko, 2001)과 어느 정도 맥락을 같이 한다.

Froude 수가 30보다 작아짐에 따라서 캐비티 길이와 두께는 빠르게 감소한다. 한편, 잠김 깊이를 10 m로 고정한 경우에도 Froude 수가 작아지면서 캐비티 길이와 두께가 급격히 감소하는 것처럼 보이나, 실제로 이는 캐비테이션 수의 증가로 인하여 초

래된 것이다. 또한 유입 속도가 39.8m/s로 일정한, 즉 Froude 수가 17.35로 고정된 3.3절의 결과 역시 자유표면 가까이에서 발생한 초공동 캐비티의 길이와 두께의 변화를 Froude 수에 연관시키기에 적합하지 않다는 것을 시사하고 있다.

### 3.5 잠김 깊이 Froude 수

캐비테이션 수를 0.15로 고정시킨 경우의 캐비티 길이와 두께 그리고 Froude 수를 17.35로 고정시킨 경우의 캐비티 길이를 잠김 깊이 Froude 수를 변수로 하여 Fig. 24에 나타내었다. 수치해로부터 구한 캐비티 길이를 표시한 심볼 부근의 괄호 안 두 숫자는 전자의 경우, 잠김 깊이(m)와 Froude 수, 후자의 경우, 잠김 깊이(m)와 캐비테이션 수이다.

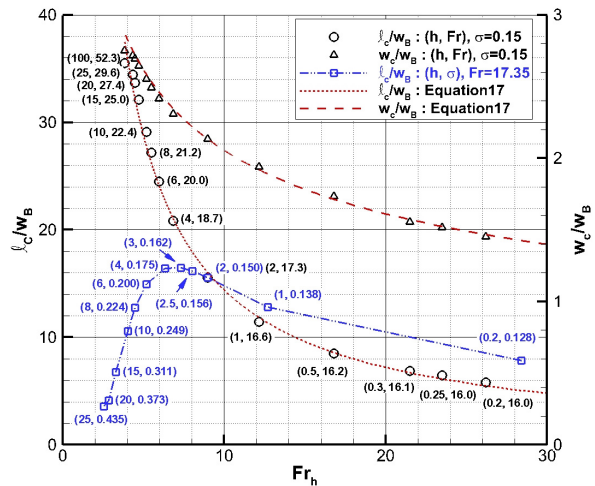


Fig. 24 Variation of cavity length with submergence-depth Froude number

Froude 수가 고정된 경우의 캐비티 길이가 잠김 깊이 Froude 수가 큰 영역에서 캐비테이션 수가 고정된 경우의 캐비티 길이와 유사한 경향으로 변하는 것으로부터, 수면에 가까이 근접하면 캐비티 길이가 잠김 깊이 Froude 수에 의해서 지배되는 것을 알 수 있다. 또 잠김 깊이가 3m 이하 일 때, 캐비테이션 수가 감소함에도 불구하고 캐비티 길이는 오히려 작아지는 ‘특이 양상’ 역시 잠김 깊이 Froude 수와 연관되어 있음을 시사한다.

캐비테이션 수가 0.15로 고정된 경우의 결과는 캐비티 길이와 두께가 잠김 깊이 Froude 수에 역비례하여 줄어드는 것을 보여준다. 캐비티 길이와 두께를 잠김 깊이 Froude 수의 함수로 근사하여 Fig. 24에 표시하였으며, 근사식은 다음과 같다.

$$\frac{l_c}{w_B} = \frac{144}{Fr_h}, \quad \frac{w_c}{w_B} = \frac{4.6}{Fr_h^{0.35}} \quad (17)$$

식 (17)은 웨지 각 30°인 2차원 웨지에 대해 캐비테이션 수가 0.15인 조건에서 도출된 근사식에 불과하지만, 더 큰 함의를 갖

는다. 즉, 초공동 영역의 캐비테이션 수 조건에서 성립하는 식 (17)과 같은 근사식을 도출한다면, 캐비테이션 수만을 변수로 하는 경험식을 사용해서 추정된 무한유체 유동에 대한 초공동 캐비티의 길이와 두께로부터, 중력과 자유수면의 효과를 고려한 잠김 깊이에 따른 초공동 길이와 두께를 잠김 깊이 Froude 수만을 변수로 하는 근사식을 사용하여 추정할 수 있는 것이다.

## 4. 결론

수면 아래에서 발생하는 초공동 유동에 미치는 중력과 자유표면의 효과를 조사하기 위해 30° 웨지에서 발생하는 2차원 초공동 유동에 대한 수치해석을 수행하였다. 잠김 깊이와 유입 속도를 변화시켜 계산된 캐비티의 길이와 두께 그리고 웨지 항력을 무한유체 유동의 결과와 비교함으로써 중력과 자유표면이 초공동 유동에 미치는 효과를 살펴보았으며, 그 결과는 다음과 같이 요약할 수 있다.

첫째, 중력과 자유표면의 효과 때문에, 동일한 캐비테이션 수 조건에서, 무한유체 유동의 경우에 비해 캐비티 길이는 짧아지고 두께는 얇아진다. 한편, 물체의 항력은 크게 달라지지 않는다.

둘째, Froude 수가 커질수록 중력과 자유표면의 효과는 감소하고, Froude 수가 어느 정도 이상 커지면 그 효과를 무시할 수 있으며, 결국에는 무한 Froude 수 또는 무한유체 유동의 경우로 접근한다.

셋째, 수면에 가까이 접근하여 잠김 깊이가 매우 얇아지면 캐비테이션 수가 감소함에도 불구하고 오히려 초공동 캐비티의 길이가 짧아지고 두께가 얇아지는 '특이 양상'이 나타난다.

마지막으로, 캐비테이션 수가 동일한 조건에서 초공동 캐비티의 길이는 잠김 깊이 Froude 수에 반비례하여 변한다.

본 연구를 통해 초공동 수중운동체가 수면 가까이에서 운용되는 경우에는 중력과 자유표면의 효과를 고려해야만 성능을 정확하게 추정할 수 있다는 것을 확인하였다. 향후, 원판 및 원뿔 캐비테이터 형상에 대한 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## 후 기

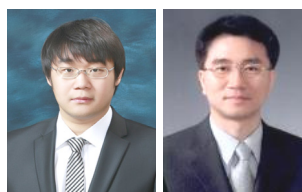
이 연구는 국방과학연구소 초공동 수중운동체 통합연구 (09-01-05-26)의 지원으로 수행된 연구임

## References

- Ahn, B.K. Lee, C.S. & Kim, H.T., 2010. Experimental and Numerical Studies on Super-Cavitating Flow of Axisymmetric Cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(1), pp.39-44.
- Ahn, B.K. Lee, T.K. Kim, H.T. & Lee, C.S., 2012. Experimental Investigation of Supercavitating Flows. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(2), pp.123-131.
- Alynak, E. Venkayya, V. Grandhi, R. & Penmesta, R., 2004. Variable shape cavitator design for a supercavitating torpedo. *10th AIAA/ISSMO Multi-disciplinary Analysis and Optimization Conference*, Albany, New York, USA, 30 August-1 September 2004, pp.1373-1398.
- Anderson, R.F., 1953. The correlation of axi-symmetric cavity data for design use. *NAVORD TM No. 1288*, July 1953.
- Armstrong, A. H. 1954 Drag coefficients of wedges and cones in cavity flow. *Armament Research Establishment, Report 21/54*. Ft. Halstead.
- Birkhoff, G. Plesset, M.S. & Simmons, N., 1950. Wall Effects in Cavity Flow. Part. I. *Quarterly of Applied Mathematics*, 8, pp.151-168.
- Birkhoff, G. Plesset, M.S. & Simmons, N., 1952. Wall effects in cavity flow. Part. II. *Quarterly of Applied Mathematics*, 9, pp.413-421.
- Brennen, C., 1969. A Numerical Solution of Axisymmetric Cavity Flows. *Journal of Fluid Mechanics*, 37, pp.671-688.
- Choi, J.K & Kim, H.T., 2010. A Study of using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulence Flow. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp.647-655.
- Delannoy, Y. & Kueny, J.L., 1990. Cavity flow predictions based on the Euler equations. *ASME Cavitation and Multiphase Flow Forum*, 109, New York, pp.153-158.
- Eisenberg, P. & Pond, H.L., 1948. *Water tunnel investigations of steady state cavities, David Taylor Model Basin Report 668*. United States Navy.
- Epshtein, L.A. & Laptin, V.M., 1980. Approximate Calculation of Influence of Flow Boundaries on Cavity Length in Two Dimensional Problem and Past the Axisymmetric Body. *Trudy Tsagi*, 2060, pp.3-24.
- Fisher, J.W., 1944. The Drag on a Circular Plate Generating a Cavity in Water. *Underwater Ballistics Resolution Communication*, 17.
- Fluent Theory Guide, 2011. *Fluent Theory Guide, Chapter 17*. ANSYS Inc.: Pennsylvania.
- Gadd, G. E. & Grant, S., 1965. Some experiments on cavities behind disks. *Journal of Fluid Mechanics*, 23, pp.645-656.
- Hrubes, J.D. Henocho, C.W. Kirschner, I.N. Curtis, C. M. & Corriveau, P.J., 1998. NUWC supercavitating

- high-speed bodies test range: description and test results. *Proceedings 1998 ITTC Conference*.
- Hrubes, J.D., 2001. High Speed Imaging of Supercavitating Underwater Projectiles. *Experiments in Fluids*, 30, pp.57–64.
- Karimi, H. Mohammadi, J. Arabi, H. Fesanghari, R. & Farhadzadeh, F., 2008. Design, production and experiment of small caliber supercavitating projectile. *SuperFAST '2008*, St. Petersburg, Russia.
- Kirschner, I.N. Uhlman, J.S. Varghese, A.N. & Kuria, I.M., 1995. Supercavitating Projectiles in Axisymmetric Subsonic Liquid Flows. *American Society of Mechanical Engineers, Fluids Engineering Division*, 210, pp.75–93.
- Kirschner, I.N., 1997. Supercavitating Projectile Experiments at Supersonic Speeds. *NATO/AGARD Fluid Dynamics Panel Workshop on High Speed Body Motion in Water, AGARD Report 827*. Kiev: AGARD.
- Klose, G.J. & Acosta, A.J., 1965. Some New Measurements on the Drag of Cavitating Disks. *Journal of Ship Research*. 9(2), pp.102–104.
- Kunz, R.F. Boger, D.A. Stinebring, D.R. Chyczewski, T.S. Lindau, J.W. & Gibeling, H.J., 2000. A Preconditioned Navier–Stokes Method for Two–Phase Flows with Application to Cavitation. *Computers and Fluids*, 29(8), pp.849–875.
- Kunz, R.F. Lindau, J.W. Billet, M.L. & Stinebring, D. R., 2001. Multiphase CFD modeling of developed and supercavitating flows. RTO AVT/VKI special course: supercavitating flows. *Von Karman Institute for Fluid Dynamics*, Rhode–Saint–Genese, Belgium, 12–16 February 2010.
- Lee, H.B. Choi J.K. & Kim, H.T., 2013. Numerical analysis of supercavitating flows of two–dimensional simple bodies. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(6), pp.436–449.
- Logvinovich, G.V., 1969. Hydrodynamics of flows with free boundaries. *Kiev (Ukraine), Naukova dumka, p. 208; also 1972 Israel Program for Scientific Translations*, Jerusalem, Israel.
- May, A., 1975. Water entry and the cavity–running behavior of missiles, Naval Sea Systems Command, *Hydroballistics Advisory Committee Technical Report 75–2*. Hydroballistics Advisory Committee.
- Nesteruk, I., 2008. Hull optimization for high–speed vehicles: supercavitating and unseparated shapes. *SuperFAST'2008*, St. Petersburg, Russia, July 2–4, 2008, pp.1–15
- Newman, J.N., 1977. *Marine Hydrodynamics*. M.I.T: Massachusetts.
- Passandideh–Farda, M. & Roohi, E., 2008. Transient Simulations of Cavitating Flows using a Modified Volume–of–Fluid (VOF) Technique. *International Journal of Computational Fluid Dynamics*, 22(1–2), pp.97–114.
- Peng, X. Wang, Z. Pan, S. & Yan, K., 2006. Generation Mechanism of Ventilated Supercavitation in an Axisymmetric Body with Cavitator. *6th Int'l Symposium on Cavitation, CAV2006*, Wageningen, Netherlands.
- Petitpas, F. Saurel, R. Ahn. B.K. & Ko, S., 2011. Modeling Cavitating Flow around Underwater Missiles. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 3(4), pp.263–273.
- Plesset, M.S. & Shaffer, Jr.P.A., 1948. Cavity Drag in Two and Three Dimensions. *Journal of Applied Physics*. 19, pp.934–939.
- Rabiee, A. Alishahi, M.M. Emdad, H. & Saranjam, B., 2011. Part A: Experimental Investigation of Unsteady Supercavitating Flows. *IJST, Transactions of Mechanical Engineering*, 35(M1), pp.15–29.
- Rabiee, A. Alishahi, M.M. Emdad, H. & Saranjam, B., 2011. Part B: Numerical Investigation of Unsteady Supercavitating Flows. *IJST, Transactions of Mechanical Engineering*, 35(M1), pp.31–46.
- Reichardt, H., 1946. *The laws of cavitation bubbles at axially symmetric bodies in a flow*. Ministry of Aircraft Production Volkenrode, MAP–VG, Reports and Translations 766. Office of Naval Research.
- Riabouchinsky, D., 1919. On Steady Fluid Motion with Free Surface. *Proceedings London Mathematical Society*. 19, pp.206–215.
- Savchenko, Yu.N. Vlasenko, Yu.D. & Semenenko, V.N., 1998. Experimental Study of High–Speed Cavitation Flows. *International Journal of Fluid Mechanics Research*, 26(3), 365–374.
- Savchenko, Yu.N., 2000. Modeling of Supercavitation Processes. *Applied Hydromechanics*, 2(3), pp.75–86.
- Savchenko, Yu.N., 2001. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies. *RTO AVT Lecture Series on "Supercavitating Flows"*, VKI in Brussels, Belgium, 12–16 February 2001.

- Schaffar, M. Rey, C. & Boeglen, G., 2005. Behavior of supercavitating underwater projectiles fired horizontally in a water tank: Theory and experiments. *35th AIAA Fluid Dynamics Conference and Exhibit*, Toronto, 6–9 June 2005.
- Schot, S.H., 1962. *Surface tension and free surface effects in steady two-dimensional cavity flow about slender bodies*. DTMB Hydromech Laboratory Research and Development Report 1566.
- Self, M.W. & Ripken, J.F., 1955. *Steady-state cavity studies in a free-jet water tunnel*. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Report No. 47.
- Singhal, A.K. Athavale, M.M. Li, H. & Jiang, Y., 2002. Mathematical Basis and Validation of the Full Cavitation Model. *Trans. ASME, Journal of Fluids Engineering*. 124, pp.617–624.
- Silberman, E., 1958. *Experimental Studies of Supercavitating Flow about Simple Two-Dimensional Bodies in a Jet*. St. Anthony Falls Hydraulic Laboratory, Report No. 59.
- Singhal, A.K. Vaidya, N. & Leonard, A.D., 1997. Multi-dimensional simulation of cavitating flows using a PDF model for phase change. *ASME Paper FEDSM97-3272, Proc. ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting*.
- Street, R.L., 1963. Supercavitating Flow about a Slender Wedge in a Transverse Gravity Field. *Journal of Ship Research*. 7(1), pp.14–23.
- Street, R.L., 1965. A Note on Gravity Effects in Supercavitating Flow. *Journal of Ship Research*. 8(4), pp.39–45.
- Tulin, M.P., 1964. Supercavitating Flows – Small Perturbation Theory. *Journal of Ship Research*. 7, pp.16–37.
- Ventikos, Y. & Tzabiras, G., 2000. A Numerical Method for the Simulation of Steady and Unsteady Cavitating Flows. *Computer and Fluids*, 29(1), pp.63–88.
- Vlasenko, Yu.D., 2000. Supercavitating Rocket Model Experiments. *Applied Hydromechanics*, 2(3), pp.26–39.
- Waid, R.L., 1957. *Cavity Shapes for Circular Disks at Angles of Attack*. California Institute of Technology. Hydrodynamics Laboratory. Report E-73.4.
- Waid, R.L., 1957. *Water tunnel investigation of two-dimensional cavities*. California Institute of Technology. Hydrodynamics Laboratory. Report. E-73.6.
- Wosnik, M. & Milosevic, I. 2005 Time-Resolved Particle Image Velocimetry (TR-PIV) in ventilated and naturally cavitating flows. *Sixth International Symposium on Particle Image Velocity*, Pasadena, California, USA, 21–23 September.
- Wu, T.Y., 1957. *A simple method for calculating the drag in the linear theory of cavity flows*. Caltech Engineering Division Report. 85–5.
- Wu, T.Y. & Wang, D.P., 1964. A Wake Model for Free-Streamline Flow Theory. Part 2. Cavity Flows Past Obstacles of Arbitrary Profile. *Journal of Fluid Mechanics*, 18, pp.65–93.
- Wu, T.Y. Whitney, A.K. & Brennen, C., 1971. Cavity-Flow Wall Effects and Correction Rules. *Journal of Fluid Mechanics*, 49(2), pp.223–256.
- Wu, J. Wang, G. & Shyy, W., 2005. Time-Dependent Turbulent Cavitating Flow Computations with Interfacial Transport and Filter-based Models. *International Journal for Numerical Methods in Fluids*, 49(7), pp.739–761.



이헌배

김형태