

점성 및 비점성 해석법을 이용한 초월공동 유동 수치해석

안병권^{*,1)} · 김지혜¹⁾ · 최정규¹⁾ · 김형태¹⁾ · 나영인²⁾ · 이도형³⁾

¹⁾ 충남대학교 선박해양공학과

²⁾ 국방과학연구소 정책기획부

³⁾ 국방과학연구소 제4기술연구본부

Numerical Analysis of Supercavitating Flows Based on Viscous/Inviscid Method

Byoung-Kwon Ahn^{*,1)} · Ji-Hye Kim¹⁾ · Jung-Kyu Choi¹⁾ · Hyoung-Tae Kim¹⁾ · Young-In Nah²⁾ · Do-Hyung Lee³⁾

¹⁾ Department of Naval Arch. & Ocean Eng, Chungnam University, Korea

²⁾ Technology Policy Division, Agency for Defense Development, Korea

³⁾ The 4th Research and Development Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 October 2013 / Revised 13 December 2013 / Accepted 20 December 2013)

ABSTRACT

Recently supercavitating torpedo has been studied because of its high-speed performance as the next generation of underwater weapon systems. In this study, we present a numerical method based on the potential flow. Characteristic features of the shape of supercavities and drag forces are investigated. In addition, we introduce a viscous-potential method to compensate for the effects of viscosity. The results are compared with viscous calculations using a commercial package, FLUENT V13.

Key Words : Cavitation(캐비테이션), Supercavitation(초월공동), Inviscid Flow(비점성 유동), Viscous Flow(점성유동), Viscous-Potential Flow(점성-포텐셜 유동)

1. 서론

최근 초월공동 현상을 바탕으로 수중에서 극초고속으로 이동할 수 있는 어뢰에 대한 연구가 시도되고 있다. 초월공동 어뢰의 방향을 제어하는 연구^[3]를 비롯하

여, 초월공동 어뢰의 추력^[10] 및 연소 특성 등 다양한 핵심기술에 대한 연구가 진행 중에 있다. 그 중 이와 같은 어뢰의 전면에서는 공동을 발생시키고 이를 초월공동으로 성장시키는 역할을 하는 다양한 형태의 캐비테이터(cavitator)가 존재하며, 이는 초월 공동 운동체의 핵심 요소 부품이라 할 수 있다. 이러한 캐비테이터의 개발을 위해 캐비테이션 터널을 이용한 실험적 연구^[1] 뿐만 아니라 비점성 유동해석법에 기초로 한 경계요소

* Corresponding author, E-mail: bkahn@cnu.ac.kr
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

법(boundary element method)을 바탕으로 3차원 축대칭 물체에서 발생하는 초월공동의 생성 메커니즘을 구현하고, 발생하는 초월공동의 크기와 작용하는 항력을 계산할 수 있는 해석법의 개발이 진행되고 있다^[2]. 현재 앞선 비점성 해석 방법은 캐비테이터 자체의 영향만을 고려하고 캐비테이터 뒤에 위치한 물체에 의해 발생하는 마찰 저항 및 압력 저항의 영향은 고려되지 못하고 있는 실정이다. 하지만 공동이 수중운동체의 물체를 모두 감싸지 않은 상태에서는 물과 직접적으로 접촉하는 면에 작용하는 마찰저항의 영향을 무시하기 힘들다고 판단하였고, 이러한 마찰 저항의 영향을 고려하기 위한 방법을 찾는 과정의 일환으로 본 연구에서는 점성을 고려하여 해석하는 기존 상용 프로그램의 해석 결과와 현 개발 중인 프로그램의 결과 값을 비교하여 향후 개발 방향을 모색하려고 한다.

2. 비점성 해석법의 정식화

2.1 지배 방정식 및 경계 조건

공동이 지배방정식을 Laplace 방정식으로 갖는 이상 유체의 무한 유동 중에서 발생한다고 가정하여 캐비테이터 주변의 유동을 유일하게 정의한다. 직교좌표 상에서 캐비테이터에 의해 발생한 초월공동은 3차원인 경우 x 축 방향을 후류 방향으로 하는 Fig. 1과 같은 형상으로 표현된다. 초월공동이 발생한 경우의 유동 해석을 위하여 캐비테이터 물체 부분은 S_B , 초월공동이 발생한 부분을 S_C 라고 한다. 여기서 \hat{n} 은 캐비테이터 표면에서 유체 영역을 향한 단위 법선 벡터이다.



Fig. 1. Geometric definition of cavitator and supercavity

2.2 적분방정식

경계면으로 둘러싸인 무한유체 영역에서 지배 방정식을 만족하는 유기 속도 포텐셜 ϕ 는 Green 정리를 만족한다. 캐비테이터의 표면과 공동 표면에 다이폴을 분포함으로써 양력을 표현할 수 있도록 하고, 쏘오스는 공동 발생 범위에만 분포시켜 공동의 두께 영향을 표현함으로써 경계치 문제를 정식화하였다. 이를 바탕으로

로 정리한 적분방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\phi = \int_{S_B \cup S_C} \mu(\underline{x}) \frac{\partial G}{\partial n} dS + \int_{S_C} q(\underline{x}) G dS \quad (1)$$

초월공동 표면에서의 속도 포텐셜의 변화는 선형적이며, 캐비테이터의 끝단의 위치를 $\underline{x}_{C.T.E}$, 접선방향 속도를 V_t 라고 하면, 포텐셜의 정의에 따라 전체 속도 포텐셜은 식 (2)와 같이 정의된다.

$$\Phi(\underline{x}) = \Phi(\underline{x}_{C.T.E}) + V_t \int_0^s ds \quad (2)$$

앞서 법선 다이폴의 세기는 포텐셜의 값으로 정의되었기 때문에 캐비테이터의 끝단에서의 속도 포텐셜 값을 알면 초월공동 표면에서의 법선 다이폴의 세기를 쉽게 계산할 수 있다. 이를 정리하면 식 (3)과 같다.

$$\Phi = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x} + \int_{S_B \cup S_C} \mu(\underline{x}) \frac{\partial G}{\partial n} dS + \int_{S_C} q(\underline{x}) G dS \quad (3)$$

2.3 공동 마감 모형

유한한 길이의 공동 문제를 해석하기 위해서는 공동의 끝부분을 마감하는 유동 모형이 필요하며, 본 연구에서는 선형 공동 마감 모형을 사용하였다^[7,8]. 선형 공동 마감 모형에서는 공동 표면에 법선 다이폴과 쏘오스를 분포시켰을 때, 공동의 모양은 오로지 쏘오스의 세기와 관계가 있으며 공동이 닫히기 위해서, 즉 유한한 공동 길이를 갖기 위해서는 공동 표면에 분포된 쏘오스의 합이 0이 되어야 한다. 이를 발생한 초월공동의 길이로 적분하여 나타낸 식이 다음과 같다.

$$\int_0^l q ds = 0 \quad (4)$$

실제 유동에 있어서는 공동의 뒷부분에서 압력 회복 구간이 존재한다^[9]. 본 연구에 의한 공동 문제 해석에 있어서는 이러한 압력 회복 구간을 인위적으로 주어서 문제를 해결할 수 있으나, 해석의 결과로서 이러한 압력 회복 구간을 구하기에는 많은 문제점이 존재한다. 따라서 이러한 압력 회복 구간의 존재를 무시하고 모든 공동 표면에서의 압력이 일정하다는 선형 마감 모형을 채택하였다. 또한 이는 전체 계산의 수렴

성의 정도를 판단하는 기준으로 사용되어 반복 계산의 종료 기준으로 사용되었다.

2.4 Kutta Condition

캐비테이터의 경우는 끝단에 정체점이 형성되므로 날개 위쪽과 아래쪽의 속도가 동일하다는 조건을 쓰기에는 곤란한 점이 있다. 그러나 실제 유동의 경우 이 범위는 아주 작아 무시할 정도이므로 아래 식과 같이 캐비테이터 끝단 양쪽의 접선 방향 속도가 동일하다는 조건을 써서 Kutta 조건을 만족시킬 수 있다.

$$\lim_{A \rightarrow C.T.E} \underline{V}_A = \lim_{B \rightarrow C.T.E} \underline{V}_B \quad (5)$$

이때 C.T.E는 캐비테이터의 끝단을 말하며, \underline{V}_A 와 \underline{V}_B 는 각각 캐비테이터의 끝단과 연결된 부분에서의 캐비테이터와 발생한 초월공동의 표면에서의 위치에서의 속도를 나타낸다.

2.5 적분방정식의 이산화

이산화된 캐비테이터와 초월공동의 표면의 각 패널 상에서의 쏘오스와 법선 다이폴의 세기는 일정하다고 가정한다. 캐비테이터와 초월공동 표면을 일정한 길이의 패널로 나눌 때 주의할 점은 캐비테이터의 끝단에 위치한 마지막 패널의 길이(l_B)와 초월공동이 시작하는 부분에 위치한 첫번째 패널의 길이(l_C)가 유사해야 한다는 것이다. 각각의 길이가 크게 다를 경우 수치 해석 과정에서의 오차가 발생하게 되어 정확한 결과 값을 얻기 어렵기 때문에 다음과 같은 비율을 유지하였다.

$$\frac{l_B}{l_C} \approx 1.0 \quad (6)$$

식 (3)을 이산화하여 다시 정리하면 i 번째 패널에서의 전체 포텐셜은 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi_i^- = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_i + \sum_{j=0}^{N^D-1} \mu_j \int_{S_B \cup S_C} \frac{\partial G}{\partial n} ds + \sum_{k=0}^{N^S-1} q_k \int_{S_C} G ds, \quad i=0, \dots, N^D-1 \quad (7)$$

이때 N^D , N^S 와 N^P 는 각각 법선 다이폴(즉, 전체 패널의 개수, $N^D = N^P + N^S$), 쏘오스, 캐비테이터에

분포된 법선 다이폴의 패널의 개수를 나타낸다. 또한 초월공동 표면에 있는 j 번째 제어점에서의 전체 속도 포텐셜은 식 (2), 그리고 속도 포텐셜과 다이폴과의 관계를 이용하여 다시 정리하면 다음과 같다.

$$-\mu_{N^P-1} + \mu_j + \underline{V}_i \cdot \underline{g}_j = 0 \quad (8)$$

이때, \underline{g}_j 는 공동발생 지점으로부터 j 번째 쏘오스 패널까지의 공동표면의 길이를 나타낸다.

$$\underline{g}_j = \sum_{j=N^P}^j \Delta s_j \quad (9)$$

$$\sum_{j=N^P}^{N^D-1} q_{j-N^P} \Delta s_j = 0 \quad (10)$$

식 (4)의 공동 마감조건을 이산화하면 다음 식 (10)과 같이 표현할 수 있다. 또한 i 번째 패널에 위치한 법선 다이폴에 의해 j 번째 패널에 유기되는 속도 포텐셜을 D_{ij} , i 번째 패널에 위치한 쏘오스에 의해 j 번째 패널에 유기되는 속도 포텐셜을 S_{ij} 라고 할 때, 각각은 다음과 같이 정의된다.

$$D_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2}, & i=j \\ \int_{C_j} \frac{\partial G}{\partial n_j} ds, & i \neq j \end{cases} \quad (11)$$

$$S_{ij} = \int_{C_j} G ds \quad (12)$$

$$0 = \Phi_i^- = \underline{U}_\infty \cdot \underline{x}_i + \sum_{j=0}^{N^D-1} \mu_j D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^S-1} q_k S_{ik} \quad (13)$$

식 (7)을 위의 식을 바탕으로 정리하면 위 식 (13)과 같다. 형상 정보를 이용하여 법선 다이폴과 쏘오스에 의해 유기되는 포텐셜의 값은 계산할 수 있고, 이 식에서의 미지수의 개수는 법선 다이폴의 세기 μ_j 와 q_k 의 개수가 된다. 이에 식 (8)을 이용하면 발생한 초월공동 표면 위의 법선 폴의 세기 값을 아래 식과 같이 알고 있는 값으로 치환하여 표현할 수 있으며, 이를 Matrix 형태로 변환하여 쉽게 계산하기 위해 다음과 같이 변환하였다.

$$\sum_{j=0}^{N^p-1} \mu_j D_{ij} + \mu_{C.T.E} \sum_{j=N^p}^{N^D-1} D_{ij} - \sum_{j=N^p}^{N^D-1} (V_i \cdot g_j) D_{ij} + \sum_{k=0}^{N^s-1} q_k S_{ik} = - \underline{U}_{\infty} \cdot \underline{x}_i \quad (14)$$

Matrix 형태로 표현하면 다음과 같이 표현되어 역행렬을 구하는 방식으로 미지수인 법선 다이폴의 세기 μ_j 와 쏘오스의 세기 q_j , 그리고 접선방향 속도 V_i 를 구할 수 있다. Matrix의 형태가 $[A_{ij}]\{X\}=\{b\}$ 일 때, 식 (14)는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} D_{00} & \dots & D_{0,N^p-1} & + \sum_{j=N^p}^{N^D-1} D_{0j} & S_{00} & \dots & S_{0,N^s-1} & \sum_{j=N^p}^{N^D-1} g_j \cdot D_{0j} \\ \vdots & & \vdots & & \vdots & & \vdots & \vdots \\ D_{N^p-1,0} & \dots & D_{N^p-1,N^p-1} & + \sum_{j=N^p}^{N^D-1} D_{N^p-1,j} & S_{N^p-1,0} & \dots & S_{N^p-1,N^s-1} & \sum_{j=N^p}^{N^D-1} g_j \cdot D_{N^p-1,j} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mu_0 \\ \vdots \\ \mu_{N^p-1} \\ q_0 \\ \vdots \\ q_{N^s-1} \\ V_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\underline{U}_{\infty} \cdot \underline{x}_0 \\ \vdots \\ -\underline{U}_{\infty} \cdot \underline{x} \end{bmatrix}$$

계산된 법선 다이폴의 세기 μ_j 로 캐비테이터에 분포한 속도 포텐셜 ϕ_j 값을 계산할 수 있으며, 초월공동 표면상에 분포된 법선 다이폴의 세기 또한 식 (8)을 사용하여 계산할 수 있다. 이렇게 구한 속도 포텐셜 값으로 각 패널에서의 접선방향 속도를 계산하고, 베르누이 방정식을 사용하여 압력, 그리고 패널에 작용하는 힘까지 계산이 가능하다. 또한, 계산된 쏘오스의 세기 q_j 는 초기 형상의 법선 방향으로 일정한 두께 값으로 더해지면, 반복 계산을 통해 공동 마감 모형으로 쓰인 식 (10)이 수렴하는 초월공동 형상을 찾는데 사용된다. 3차원 축대칭 형상의 경우 패널에 x 축 방향뿐만 아니라, 회전방향 성분으로도 존재하지만, 회전방향으로 법선 다이폴의 세기 μ_j 와 쏘오스의 세기 q_j 가 모두 동일하다는 가정 하에 전체 패널에 대해서는 형상 정보만을 계산하고, Matrix는 x 축 방향 패널의 개수만큼만 즉, 2차원 문제와 마찬가지로 Matrix의 좌변의 성분을 A , 우변의 성분을 X 라고 했을 때 각 Matrix의 Dimension은 각각 $N^D \times (N^D + 1)$, $(N^D + 1) \times 1$ 이며, 이때의 A Matrix 성분인 A_{ij} 는 $\sum_{k=0}^{N^R} D_{i,j,k}$ 와 $\sum_{k=0}^{N^R} S_{i,j,k}$ 의 성분으로 구성하여 계산한다. 이 때, N^R 은 회전방향으로의 패널의 개수이다.

$$\begin{bmatrix} \sum_{k=0}^{N^R} D_{0,0,k} & \dots & \sum_{k=0}^{N^R} (D_{0,N^p-1,k} + \sum_{j=N^p}^{N^D-1} D_{0j,k}) & S_{0,0} & \dots & S_{0,N^s-1} & \sum_{k=0}^{N^R} (\sum_{j=N^p}^{N^D-1} g_j \cdot D_{0j,k}) \\ \vdots & & \vdots & \vdots & & \vdots & \vdots \\ \sum_{k=0}^{N^R} D_{N^p-1,0,k} & \dots & \sum_{k=0}^{N^R} (D_{N^p-1,N^p-1,k} + \sum_{j=N^p}^{N^D-1} D_{N^p-1,j,k}) & S_{N^p-1,0} & \dots & S_{N^p-1,N^s-1} & \sum_{k=0}^{N^R} (\sum_{j=N^p}^{N^D-1} g_j \cdot D_{N^p-1,j,k}) \end{bmatrix}$$

3. 수치해석 방법

3.1 비점성 해석방법

본 연구에서는 앞서 언급하였듯이 이와 같은 초월공동 어뢰의 여러 형상의 캐비테이터에서 발생하는 공동을 예측하기 위해 비점성 유동해석법에 기초로 한 경계요소법을 바탕으로 3차원 축대칭 물체에서 발생하는 초월공동의 크기와 작용하는 항력을 계산할 수 있는 해석법을 이용한 경계치 문제의 해석을 위하여 경계면에 법선 다이폴과 쏘오스를 분포하였다. 캐비테이터의 표면과 공동 표면에 다이폴을 분포함으로써 양력을 표현할 수 있도록 하고, 쏘오스는 공동 발생 범위에만 분포시켜 공동의 두께 영향을 표현함으로써 경계치 문제를 정식화하였다. 주어진 경계조건을 적용하여 다이폴 및 쏘오스의 세기를 결정하고 이를 통해 공동의 형상 및 공동 주위의 유동을 해석하였다. 공동의 생성이 캐비테이터 주위 유동에 끼치는 영향에 대해 알아보기 위해 주어진 공동수를 만족하는 공동의 형상을 구하는 대신, 주어진 공동 길이를 만족하는 공동 형상 및 공동수를 반복적으로 계산하여 구하는 방법을 사용하였다. 또한 해석결과는 캐비테이터 뒤쪽에 위치한 물체에 의한 영향은 고려되지 않았고, 다만 캐비테이터 자체에 의한 영향만을 고려하였기 때문에 캐비테이터 뒤에 위치하는 물체 부분에 작용하는 마찰 저항의 영향을 고려하기 위한 방향을 모색하고 있다.

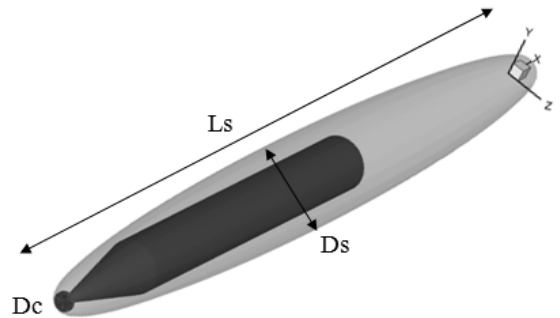


Fig. 2. Coordinates and surfaces

Fig. 3은 수심 1m 인 조건에서 발생하는 초월공동의 형상정보와 이에 대응하는 속도와 캐비테이션 수를 보여준다. 이를 통해 초월공동 어뢰를 충분히 덮을 수 있는 초월공동을 발생시키기 위해 필요한 속도를 알 수 있으며 그 때에 발생한 초월공동의 형상이 어떠한지 확인할 수 있다. 각 계산 결과에 대한 자세한

형상 정보 및 5장에서 자세히 다룬 점성 효과를 고려하여 계산한 항력 값을 Table 1에서 확인할 수 있다.

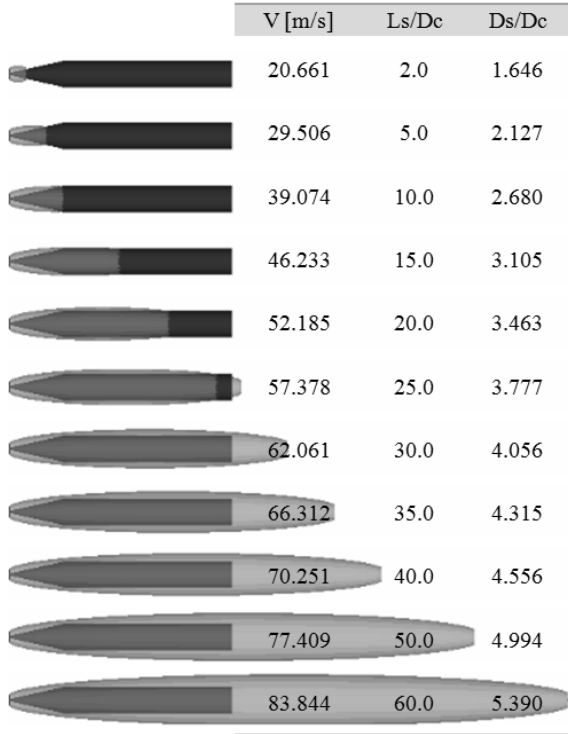


Fig. 3. Predicted supercavities

Table 1. Variation of characteristics of supercavitation

V(m/s)	σ	Potential Drag(N)	Viscous Drag(N)	L_s/D_C	D_s/D_C
20.46	0.511	496.93	1,012.9	2.0	1.65
29.21	0.251	832.89	1,828.2	5.0	2.13
38.70	0.143	1,331.2	2,945.4	10.0	2.68
45.80	0.102	1,795.3	3,312.7	15.0	3.10
51.71	0.080	2,240.6	3,330.5	20.0	3.46
56.87	0.066	2,673.3	3,003.8	25.0	3.78
61.50	0.057	3,098.6	3,104.4	30.0	4.06
65.73	0.050	3,513.7	3,520.2	35.0	4.32
69.65	0.044	3,922.7	3,930.0	40.0	4.56
76.78	0.036	4,726.5	4,735.4	50.0	5.01
83.19	0.031	5,515.7	5,526.2	60.0	5.40

3.2 점성 해석방법

본 연구의 개발 중인 해석법과 비교할 수치해석 방법으로 상용 프로그램인 Fluent v13을 사용하였다. 정상 혼상류(steady mixture flow)에 대해 연속방정식과 운동량방정식인 RANS 방정식을 지배방정식으로 하며, 유한체적법 기반의 이산화 과정을 거쳐 대수방정식을 푼다. 운동량방정식의 대류항은 QUICK 방법, 확산항은 2차 중심차분으로 이산화 하였으며, 난류모형은 Realizable $k-\epsilon$ 을 사용하였다. 표준벽함수를 사용하였으며, 속도-압력 연성은 SIMPLEC방법을 사용하였다. 캐비테이션 모델은 Schnerr & Sauer 모델을 사용하였다⁴⁾. 계산영역의 유입경계 및 외부경계는 대상물체로부터 4L 떨어져 있으며 균일류 조건(velocity inlet)을 주었고, 유출경계는 몸체 끝단으로부터 17L 떨어져 있으며, 정압력이 일정하다는 조건(pressure outlet)을 주었다(Fig. 4). 여기서 정압력 조건은 캐비테이션수(σ)에 의해 결정된다.

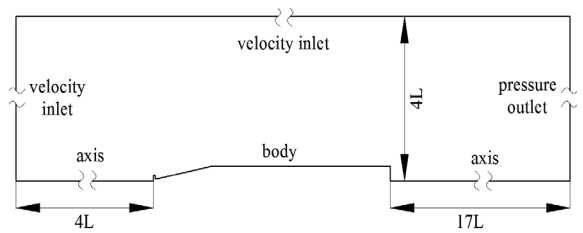


Fig. 4. Numerical domain

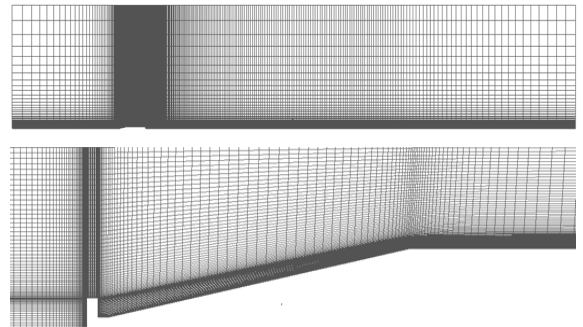


Fig. 5. Structured grid system and calculation domain (top : whole domain; bottom : near wall)

유동영역의 격자수는 약 76,500개이고, 2차원의 H형 정렬격자계로 생성하여 기준 축에서 축대칭 경계조건을 사용하였다(Fig. 5). 캐비테이션 유동을 고려하여 대상물체 주위 및 물체 끝으로부터 8L까지는 격자를

비교적 조밀하게 분포시켰다. 벽으로부터 떨어진 첫 격자점까지의 거리는 대상물체의 레이놀즈수가 속도에 따라 $1.2 \times 10^7 \sim 1.2 \times 10^8$ 임을 고려하여 전 길이에 걸쳐 $y_1^+ = 150 \sim 550$ 을 유지하였다^[5]. 수치해석은 주변 압력을 고정하고 유입속도(U_0) 변화에 따라 수행하였으며, 기화압력(vapor pressure)은 2.49kpa 이다. 수심 1m 조건 하에서 유입속도는 10m/s에서 100m/s 까지 10m/s 간격으로 10개의 조건이며, 속도 및 캐비테이션 수(σ) 조건을 Table 2에 나타내었다. 계산의 편의를 위해서 캐비테이션 모델을 사용하지 않고 계산을 수행하여 압력을 어느 정도 수렴시킨 후 캐비테이션 모델을 사용하여 계산을 수행하였다.

Table 2. Variations of velocity and cavitation number

V(m/s)	σ	V(m/s)	σ
10	2.177	60	0.060
20	0.544	70	0.044
30	0.242	80	0.034
40	0.136	90	0.027
50	0.087	100	0.022

4. 결과 비교 및 분석

3장에서 언급한 두 가지 해석방법을 사용하여 해석한 결과 값들을 비교해보았다. Fig. 6에 다양한 속도 조건에서 비점성 해석 방법과 상용프로그램을 이용하여 계산한 발생한 초월공동의 형상을 나열하였다. 아래 그림에서 수중 운동체의 몸체 부분이 흰색으로 표시된 것이 상용프로그램을 이용하여 계산한 발생한 초월공동의 형상이다. 비점성 해석방법에 의해 계산된 결과 값에는 수중운동체의 몸체에 의한 영향이 고려되지 않았다. 비점성 해석 방법을 사용한 결과 값에는 캐비테이터의 뒤에 위치한 수중운동체의 몸체에 작용하는 마찰 저항이 고려되지 않았기 때문에, 공동이 뒤 덮이지 않은 물과 직접적으로 접촉하는 부분에 대해서는 기존의 평판에 의한 마찰저항 공식을 사용하여 그 값을 예측하여 보았다. 이는 공학적 목적으로 사용하기 위한 잠정적인 해석법으로 정확한 마찰 저항 값을 계산하기보다는 점성을 고려했을 경우의 경향성이나

정도를 추측해 보기 위한 수단으로 사용되었음을 명시하는 바이다.

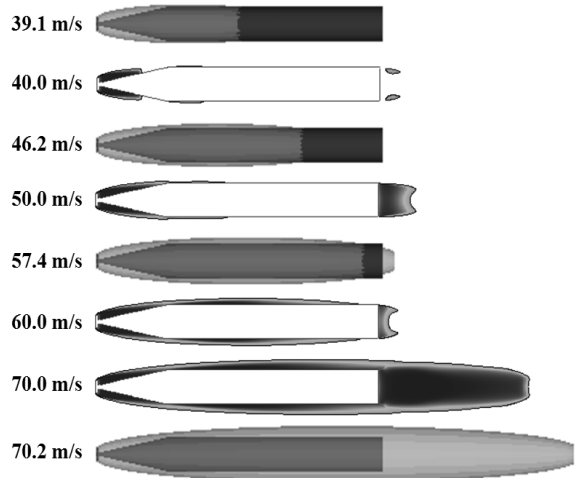


Fig. 6. Characteristics features of supercavitation according to different velocity condition and analysis methods 1m below sea level

이러한 평판의 마찰저항을 추정하는 많은 공식들 중에서 계산 모델의 레이놀즈수($1.91 \times 10^7 \sim 6.84 \times 10^7$)를 고려해보았을 때, ITTC 1957, Schoenherr, 그리고 Granville에 의한 평판 마찰저항 공식이 사용에 적합하다고 판단하였다. 세 개의 공식은 실제 매우 비슷한 결과 값을 주며 계산 시 어떤 공식을 이용하는 것이 정확한가에 대해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 그러나 난류유동의 경우는 표면조도로 인하여 마찰계수가 몇 배로 더 증가될 수 있고, 완전히 거친 난류영역에서 마찰계수는 위의 다른 공식들에서 주로 사용한 레이놀즈수와 상관없이 오직 표면조도에만 의존한다. 이 영역에서 평균마찰계수에 대한 실험식이 Schlichting에 의하여 다음과 같이 제시된 바 있다^[6].

$$C_f = \left(1.89 - 1.62 \log \frac{\epsilon}{L} \right)^{-2.5} \quad (15)$$

여기서 ϵ 은 표면조도, L 은 유동방향의 판의 길이이다. 본 연구는 기존 포텐셜 해석 방법에 점성 저항을 고려하기 위해 어떠한 공식을 사용할지를 결정하는 과정의 일환으로, 평판에 대한 마찰저항 계수를 구하

는 공식뿐만 아니라 점성 저항을 충분히 고려한다고 판단할 수 있는 적당한 표면조도 값을 찾고자 하였다. 3장에서 살펴본 형상에 대해 점성 저항을 고려하기 위한 여러 가지 방법 중 Schlichting의 표면조도를 고려한 마찰저항 계수를 구하는 공식을 사용하여, 포텐셜 해석 방법에 의한 결과로 공동이 물체를 모두 감싸지 않은 상태에서 물체와 공동이 만나는 부분부터 물과 직접적으로 접촉하는 부분의 면적을 계산하고, 그 면적에 따른 앞선 마찰저항 계수를 사용한 항력 값을 계산하여 기존 비점성 해석 결과에 더하였다. 그 결과 값을 상용프로그램의 해석 결과와 비교해보았다. 이때에 사용된 마찰저항계수는 0.005 이다.

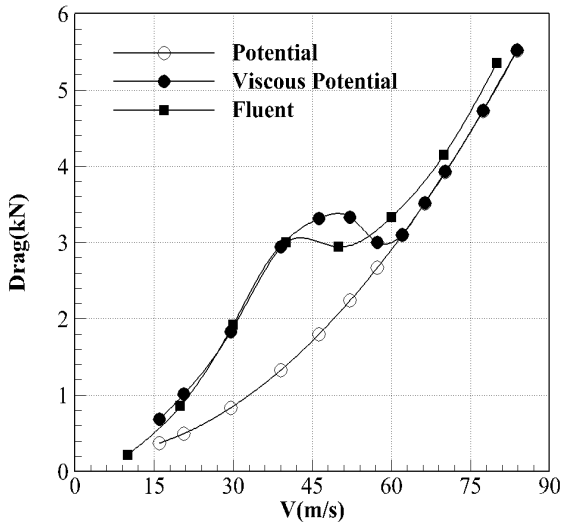


Fig. 7. Comparison of drag forces

Fig. 7은 속도 조건에 따른 항력을 비점성 해석법에 의한 결과(Potential), 비점성 해석법에 평판의 마찰저항 공식을 사용하여 마찰 저항에 의한 영향을 고려한 결과(Viscous Potential), 그리고 상용프로그램을 사용하여 점성과 수중운동체의 몸체에 의한 영향까지 고려된 결과(Fluent)를 비교하여 나타내었다. 또한 Fig. 8은 동일한 속도 조건에서의 항력계수를 나타낸 식으로 항력계수는 캐비테이터의 직경으로 무차원화 된 것이 아니라, 캐비테이터의 뒤에 위치한 수중운동체의 몸체의 최대 직경으로 무차원화하였다.

대체적으로 결과 값이 비슷한 경향을 보이는 것으로 보아 본 연구에서 사용한 물체의 표면에 대한 마찰저항을 평판의 마찰저항을 계산하는 기존의 공식으로

대체하여 계산하는 방법의 유용성을 확인할 수 있었다. 그러나 상용프로그램을 사용하여 점성과 수중운동체의 몸체에 의한 영향까지 고려된 결과 값(Fluent)에서 볼 수 있는 Hump 부분(속도영역 40~50m/s)의 위치가 다소 차이가 나는 것을 볼 수 있다.

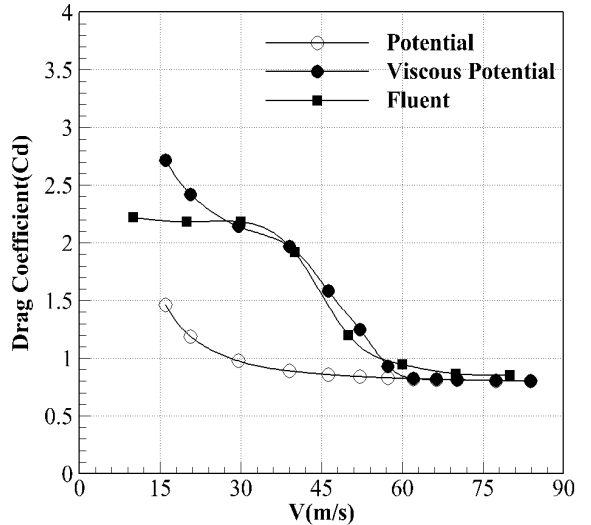


Fig. 8. Comparison of drag coefficients

마찰 저항이 고려되지 않은 비점성 해석 방법에 의한 결과 값과 상용프로그램을 사용하여 점성과 수중운동체의 몸체에 의한 영향까지 고려된 결과 값을 비교한 Fig. 6을 보면, Hump가 발생하는 속도영역에서 (40~50m/s) 수중운동체의 어깨부분이라고 칭하는, 즉 캐비테이터보다 더 큰 최대 직경을 갖는 부분과 수중운동체의 끝 부분에서 별도의 공동이 발생하는 현상을 확인할 수 있다.

앞서 언급하였듯이 포텐셜 해석방법은 몸체에 작용하는 압력저항의 영향을 고려하지 못하지만, Fluent를 통해 계산한 경우 캐비테이터에 의해 발생하는 공동 이외의 위와 같은 몸체에서 추가적으로 공동이 발생할 수 있음을 보이고 있으며, 해당 속도 영역에서 Fluent에 의해 계산된 항력의 크기는 추가적으로 발생하는 공동에 의한 압력 손실이 항력 감소의 이유인 것으로 판단된다.

따라서 이 부분에서의 차이는 점성저항의 영향보다는 몸체에 작용하는 압력저항을 상용 프로그램이 아닌 기존의 연구 방법으로는 계산하지 못하여 발생한 것으로 보인다.

5. 결론

기존의 비점성 해석법을 이용한 계산과 상용 프로그램을 이용한 점성을 고려한 해석 결과는 초월공동이 수중운동체의 몸체를 모두 뒤덮은 후에는 큰 차이를 보이지 않았다. 하지만 그 이전의 결과 값들에서는 어느 정도의 차이를 볼 수 있었는데, 이는 몸체의 영향이 모두 고려된 상용 프로그램의 해석 결과로 보았을 때, 마찰 저항에 의한 영향보다 캐비테이터보다 큰 직경을 갖는 수중운동체의 몸체부분에 작용하는 압력 저항의 영향이 큰 것으로 판단된다. 향후 수중운동체의 몸체에 의한 마찰 저항의 영향을 보다 정확히 고려하기 위해 어떤 공식을 이용하는 것이 정확한가에 대해서는 더 많은 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 몸체에 의한 압력저항의 영향도 고려할 수 있다면, 빠른 속도로 이동하는 수중운동체가 초월공동에 뒤덮였을 때의 운동 정보를 보다 더 정확히 계산할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 연구는 국방과학연구소 초공동 수중운동체 통합 연구(09010526)와 한국연구재단기초연구사업(2012R1A1A1012866)의 지원으로 수행되었음.

References

- [1] Ahn, B. K., Lee, T. K., Kim, H. T. and Lee, C. S., "Experimental Investigation of Supercavitating Flows," *Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 4(2), pp. 123-131, 2012.
- [2] Ahn, B. K., Jang, H. G., Kim, H. T. & Lee, C. S., "Numerical Analysis of Axisymmetric Supercavitating Flows," 8th Symposium on Cavitation, pp. 637-642, 2012.
- [3] Ahn, S. S., "An Integrated Approach to the Design of Supercavitating Underwater Vehicles," Georgia Institute of Technology, Ph.D. Thesis, August 2007.
- [4] ANSYS, ANSYS FLUENT Theory Guide, ANSYS Inc, 2010.
- [5] Choi, J. K. and Kim, H. T., "A Study of using Wall Function for Numerical Analysis of High Reynolds Number Turbulent Flow," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(5), pp. 647-655, 2010.
- [6] H. Schlichting, *Boundary Layer Theory*, 7th ed. New York, McGraw-Hill, 1979.
- [7] Kim, Y. G., "Prediction of Unsteady Performance of Marine Propellers with Cavitation using Surface Panel Method," College of Engineering, CNU, Daejon, Korea, 1995.
- [8] Kim, Y. G. & Lee, C. S., "Super-Cavitating Flow Problems about Two-Dimensional Symmetric Strut," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 27, No. 4, December 1990.
- [9] Knapp, R. T. Daily, J. W. and Hammit, F. G., *Cavitation*, McGraw-Hill, 1979.
- [10] Y. N. Sacchenko, "Supercavitating Object Propulsion," *Lecture Series on Supercavitating Flows*, Brussels, Belgium, pp. 387-415, 2001.