



수륙양용장갑차용 워터젯 추진기 캐비테이션 성능 평가

한재문^{1,†} · 김도준¹ · 서정일² · 김태형² · 김건도³ · 이진석¹
한화에어로스페이스(주) 수상체계연구센터¹
국방과학연구소²
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소³

Evaluation of Waterjet Cavitating Performances for a Amphibious Vehicle

Jaemoon Han^{1,†} · Dojun Kim¹ · Jeongil Seo² · Taehyung Kim² · Gundo Kim³ · Jinsuk Lee¹
Amphibious Systems R&D Center, Hanwha Aerospace Co., Ltd.¹
Agency for Defense Development²
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering³

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.

Cavitation tests for a waterjet propulsor of an amphibious vehicle are carried out in the Large Cavitation Tunnel. Waterjet pump performances and cavitation characteristics including thrust breakdown performances are investigated in the tests. In addition, cavitation characteristics for waterjet propulsors working inside the intake are calculated by using a commercial CFD code, Star-CCM+. Sliding mesh is implemented to a rotating impeller and the k-epsilon turbulence model is chosen. Cavitation bubble growth and collapse are estimated using the Schnerr-Sauer cavitation model based on Rayleigh-Plesset equation. Calculated results agree fairly well with experimental results. The re-design of the waterjet propulsor is performed to enhance waterjet cavitating performances and calculated results show that waterjet thrust breakdown characteristics are significantly improved.

Keywords : Waterjet propulsor(워터젯 추진기), Cavitation tests(캐비테이션 시험), Amphibious vehicle(수륙양용 장갑차)

1. 서론

최근, 상륙 작전의 효과를 극대화할 수 있는 '초수평선 상륙 작전'이라는 현대적 작전 개념이 도입되었고, 이를 구현할 수 있는 무기 체계의 핵심으로서 고속 수륙양용장갑차의 개발이 진행되고 있다. 수륙양용장갑차의 해상 기동성능을 확보하기 위하여 고속 조건에서의 추진효율 및 대용량 추력의 확보가 용이하며, 저수심 운용 측면에서의 장점이 있는 flush-intake 형태의 워터젯 추진기가 적용되고 있다.

수중에서 고속으로 회전하는 워터젯 추진기의 경우, 임펠러 및 스테이터 날개의 캐비테이션 발생에 의한 날개 침식 뿐만 아니라 차체 진동 및 소음 등의 문제가 발생할 수 있다. 특히, 수륙양용장갑차용 워터젯 추진기는 선박용 추진기와 비교 시 임펠러 회전수가 매우 빠르며 추진기 잠김 깊이가 상대적으로

낮기 때문에 캐비테이션 관점에서 가혹한 운용환경에서 작동할 수 밖에 없다. 따라서, 워터젯 추진기의 설계단계에서부터 캐비테이션 발생에 기인하여 추진기의 추력 또는 토크 특성이 일정량 이상으로 변동하는 추력붕괴(thrust breakdown) 현상을 포함한 캐비테이션 성능에 대한 세심한 평가가 필수적이다.

최근, 다양한 전산유체해석의 기법의 개발 및 컴퓨팅 파워의 급격한 발달에 힘입어 포텐셜 유동에 기반한 성능해석을 이용하여 주로 수행되던 추진기 캐비테이션 문제도 다양한 수치기법을 이용한 점성유동 해석으로 광범위하게 확대되고 있는 상황이다 (Kim et al., 2017). Vaz et al. (2015)는 균일유동 및 불균일 반류장 상태에서 작동하는 E779A 추진기에 대하여 10개 기관의 캐비테이션 점성유동 해석 결과를 축소모형시험 결과와 비교하여 정리하였다. Park et al. (2020)은 MR 탱커선을 대상으로 실선 및 모형선 추진기에 대한 캐비테이션 특성 및 변동압력 해석을 수행하고, 그 결과를 실선 계측 및 축소모형

시험 결과와 비교하여 정성적으로 좋은 일치를 보인 바 있다.

Lindau et al. (2005)는 균일 유동 중에 작동하는 P4381 추진기에 대하여 RANS 방정식에 기반하여 캐비테이션 유동해석 수행하고, 추력 붕괴 특성 예측 결과를 모형시험 결과와 비교하였다. Shin and Andersen (2019)은 E779A 추진기에 대하여 캐비테이션 수 변화에 따른 캐비테이션 특성 및 추력 붕괴 특성에 대해 해석을 수행하여 그 결과를 모형시험 결과와 비교하였으며, 일정 이하의 캐비테이션 수 조건에서는 수치해석 결과가 모형시험 결과 대비 캐비테이션 특성을 과도하게 예측하고 있음을 보인 바 있다.

한편, Ahn et al. (2005)은 해군 함정용 워터젯 추진기 개발을 위하여 중형 캐비테이션 터널에서 사류형 워터젯 펌프의 성능시험을 수행하였고, Ahn et al. (2010)은 유도관이 포함되어 있지 않은 균일류 상태에서 워터젯 추진기 캐비테이션 시험까지 포함하여 축소모형시험을 수행하였다. Dang et al. (2013)은 캐비테이션 터널 상부에 유도관을 포함한 워터젯 추진기 모형을 설치하고, 유량 계수 변화에 따른 워터젯 펌프 성능 계측 및 캐비테이션 관찰 시험을 수행한 바 있다.

최근, 고속 해상기동을 실시하는 수륙양용장갑차 주위의 유동해석과 관련한 다양한 연구들이 활발히 진행되고 있다. Kim (2021)은 RANS 방정식 기반 해석을 통하여 워터젯 추진기가 적용된 수륙양용장갑차의 저항 및 추진성을 수치적으로 분석하고, 그 결과를 축소모형시험 결과와 비교하였다. Kim et al. (2020)은 해상 기동속도에 따라 변화하는 차체 자세를 정확히 추정하기 위하여 차체 주위의 격자기법을 변경시키면서 유동해석을 수행하였다. 수륙양용장갑차용 워터젯 추진기 캐비테이션 해석을 위하여 Han et al. (2020)은 유도관 형상을 원통형으로 단순화하여 균일 유동 중의 작동하는 워터젯 추진기 캐비테이션 해석을 수행하였으며, Kim et al. (2021)은 차체 및 유도관을 포함한 캐비테이션 해석으로 확장한 바 있다.

본 연구에서는 수륙양용장갑차용 워터젯 추진기의 캐비테이션 성능을 평가하기 위하여 상용 CFD 코드인 Star-CCM+를 이용하여 점성유동 해석을 수행하였다. 그리고, 해석 결과를 검증하기 위하여 대형 캐비테이션 터널에서 축소모형시험 시험을 수행하였으며, 캐비테이션 수 변화에 따른 캐비테이션 관찰 결과 및 추력붕괴 특성을 수치해석 결과와 비교하였다. 상기의 수치해석 및 모형시험 결과를 바탕으로 워터젯 추진기의 형상 개선을 추가적으로 수행하고, 추력붕괴 특성을 포함한 캐비테이션을 성능을 함께 분석하였다.

2. 축소모형시험

2.1 축소모형

수륙양용장갑차용 워터젯 추진기의 펌프 성능 및 캐비테이션 성능을 평가하기 위하여 선박해양플랜트연구소가 보유한 대



Fig. 1 Vehicle model installed in the test section of LCT



Fig. 2 Waterjet propulsor model inside the vehicle model

형 캐비테이션 터널(Large Cavitation Tunnel, LCT)에서 축소 모형시험이 수행되었다.

워터젯 추진기의 실물(full-scale)과 모형 간의 크기 차이에서 발생할 수 있는 유체역학적 축척효과(scale effect)를 최소화하고, 시험부 대비 차체 모형 크기에 따른 폐쇄 영향(blockage effect), 계측장비 및 시험 설비의 계측 용량 등을 고려하여 가능한 축소모형이 크게 제작될 수 있도록 축척비($\lambda=2.72$)를 결정하여 모형 제작이 수행되었다.

차체 축소모형은 Fig. 1에 보인 바와 같이 시험모형 고정장치를 이용하여 LCT 시험부에 설치되었으며, 고속 유동 조건에서 모형시험이 수행되는 환경에서 발생할 수 있는 압력 변동, 충격, 진동 및 모형 자중에 의한 변형이 발생되지 않도록 구조 강도 안정성을 충분히 고려하여 제작하였다.

차체 축소모형 내부에는 유도관을 포함하여 임펠러, 스테이터 및 조향노즐로 구성된 워터젯 추진기 모형이 설치되었고, 워터젯 임펠러의 구동 및 임펠러 추력과 토크 특성을 계측하기 위한 수중모터와 대용량 동력계가 설치되었다. Fig. 2는 차체 모형 내부에 설치된 워터젯 추진기 모형을 보여주고 있다.

또한, 워터젯 추진기 캐비테이션 성능시험을 수행하기 위하여 차체 양쪽 측면 및 임펠러 하우징은 아크릴로 제작하여 차체 내부에 위치한 임펠러 날개에 발생하는 캐비테이션 관찰이 용이하도록 모형 제작을 수행하였다.

2.2 워터젯 추진기 성능 시험

워터젯 추진기 성능시험 수행을 위하여 유량 계수(flow rate coefficient, J_Q) 변화에 따른 워터젯 임펠러의 추력(T) 및 토크(Q)를 계측하였고, 유도관 전방, 임펠러 전방, 스테이터 후방 및 조향노즐 후방에 각각 다수의 압력 홀을 설치하여 압력 계측 결과를 이용하여 워터젯 유량(Q) 및 양정(H)을 계산하였다.

넓은 범위의 유량계수 영역이 결과에 포함될 수 있도록 시험부 유속과 임펠러 회전수를 조절하며 모형시험을 수행하였으며, 조향노즐 출구에서의 압력 계측 결과를 바탕으로 하여 유량을 계산하였다. 조향노즐 출구 주위의 유동 분포가 불균일하게 형성될 경우, 유량 산정에 필요한 축방향 속도성분 외에 회전방향의 속도성분까지 포함되기 때문에 정확한 유량 산정이 어려워진다. 이를 보완하기 위하여 LDV(Laser Doppler Velocimetry)를 이용하여 조향 노즐 출구 유동을 계측하여 압력 계측을 통한 유량 계측 결과를 추가로 보정하였다 (Ahn et al., 2005).

워터젯 양정은 임펠러 전방과 스테이터 후방에서 계측된 평균 압력 계측 결과를 바탕으로 식 (1)을 이용하여 계산되었다.

$$H = \frac{p_{sta} - p_{imp}}{\rho g} + \frac{Q^2}{2g} \left(\frac{1}{A_{sta}^2} - \frac{1}{A_{imp}^2} \right) \quad (1)$$

여기서, ρ 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, p_{imp} 는 임펠러 전방 압력, p_{sta} 는 스테이터 후방 압력, A 는 각 지점에서의 워터젯 단면적을 의미한다.

상기의 과정을 통하여 계측된 각각의 물리량은 식 (2)~(4)와 같이 임펠러 회전수(n) 및 임펠러 직경(D)을 이용하여 무차원화되었다.

$$J_Q = \frac{Q}{nD^3} \quad (2)$$

$$C_H = \frac{gH}{n^2 D^2} \quad K_T = \frac{T}{\rho n^2 D^4} \quad K_Q = \frac{Q_P}{\rho n^2 D^5} \quad (3)$$

$$\eta_P = \frac{J_Q C_H}{2\pi K_Q} \quad (4)$$

2.3 워터젯 추진기 캐비테이션 시험

해상 속도 변화에 따른 워터젯 추진기 캐비테이션 관찰시험 수행을 위한 하중 조건은 서울대학교 예인수조에서 수행된 자항시험 결과에 기반하여 토크일치법(torque identity method)을 적용하여 결정하였다. 워터젯 추진기에 작용하는 하중 조건을 만족하도록 시험부 유속과 임펠러 회전수를 결정 후, 식 (5)와 같이 정의된 캐비테이션 수(cavitation number, σ_n)를 변경시키면서 워터젯 추진기에 발생하는 캐비테이션 특성 변화를 관찰

하였다. 여기서, p_a 는 대기압, p_v 는 증기압을 의미한다.

$$\sigma_n = \frac{p_a + \rho gh - p_v}{0.5 \rho n^2 D^2} \quad (5)$$

3. 수치해석

3.1 지배방정식 및 난류모형

캐비테이션 터널 내부에서 작동하는 워터젯 추진기 주위의 유동장을 해석하기 위하여 비정상 3차원 비압축성 상태로 가정하여 상용 CFD 코드인 Star-CCM+ v13.06을 사용하여 수치해석을 수행하였다. 임펠러, 스테이터 및 유도관을 포함하는 워터젯 추진기의 내부 유동을 해석하기 위한 비압축성 연속방정식은 아래와 식 (6)과 같이 표현될 수 있다. 해석에 사용된 상(phase)은 물(water)과 증기(water-vapor)로 2개의 상으로 이루어져 있다.

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v}) = 0 \quad (6)$$

여기서, \vec{v} 는 혼합유체의 속도벡터이고 각각의 상이 동일한 속도를 갖는 균일속도(mass averaged mean velocity)이다. ρ_m 은 혼합밀도(mixture density)이며, 2상에 대한 질량평균 혼합 밀도의 식은 식 (7)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_m = \sum_{k=1}^2 \alpha_k \rho_k = \alpha_1 \rho_1 + \alpha_2 \rho_2, \quad \sum_{k=1}^2 \alpha_k = 1 \quad (7)$$

여기서, k 는 혼합유체 내의 존재하는 유체 상의 개수이며, α_k 는 k 상의 체적분율(volume fraction)이다.

Reynolds Average Navier-Stokes (RANS) 방정식의 미분형태는 식 (8)과 같다.

$$\nabla \cdot (\rho_m \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \mu_m \nabla^2 \vec{v} + \rho_m g_j \quad (8)$$

여기서, μ_m 은 혼합유체의 점성계수를 나타낸다.

난류모델은 Realizable k-epsilon 모델을 적용하였고, 워터젯 및 캐비테이션 터널의 벽면에 대한 경계조건 처리를 위하여 Star-CCM+에서 제공하는 Two-Layer all y+ wall treatment를 사용하였다. 지배방정식의 확산항 및 대류항, 그리고 시간 적분은 2차 정확도로 이산화하였고, 속도와 압력의 연성은 SIMPLE 알고리즘을 사용하여 해석하였다 (Ferziger and Peric, 2001).

3.2 캐비테이션 모델링

물과 증기로 구성된 다상유동(multiphase flow)해석을 위하여 상의 경계면을 추적하는 방법인 VOF(Volume of Fluid)법을

적용하였다. 상의 경계는 식 (10)과 같이 증기에 대한 체적분율을 2차 상(secondary phase)에 대한 체적분율 방정식을 통해 구하고 식 (7)을 이용하여 1차 상(primary phase)인 물의 체적분율을 구하였다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}) = - \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}_v) + \sum_{q=1}^2 (\dot{m}^- - \dot{m}^+) \quad (9)$$

여기서, 아래첨자 v 는 증기상(vapor phase), α_v 는 증기의 체적분율, ρ_v 는 증기밀도 그리고 \vec{v}_v 는 증기의 속도벡터이다.

캐비테이션 유동해석을 위해서는 체적분율 수송방정식을 풀어야 한다. 본 해석에서는 단순화된 Rayleigh-Plesset 방정식을 사용하는 Schnerr and Sauer (2001)에 의해 제안된 캐비테이션 모델을 활용하였으며, 캐비테이션 증기의 체적분율 수송 방정식은 식 (10)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_v \rho_v) + \nabla \cdot (\alpha_v \rho_v \vec{v}) = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha_v (1 - \alpha_v) \frac{3}{R} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{(p_v - p)}{\rho_l}} \quad (10)$$

이 때, R 은 증기기포의 반경을 나타내고, 다음의 식 (11)와 같이 표현된다.

$$R = \left(\frac{\alpha_v}{1 - \alpha_v} \frac{3}{4\pi} \frac{1}{n_b} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (11)$$

여기서, n_b 은 기포 개수의 밀도를 나타낸다.

본 연구에 사용된 수치해석 기법은 아래의 Table 1과 같다.

3.3 수치격자 및 해석 절차

워터젯의 캐비테이션 성능 분석을 위하여 축소모형시험이 수행된 대형캐비테이션 터널의 설치 환경과 동일하도록 전체 계산 영역을 구성하였다. Fig. 3은 대형 캐비테이션 터널의 시험부 내부에 설치된 차체 모형 주위의 격자 분포와 경계조건을 나타내고 있다. 워터젯의 노즐 출구 후방의 경우, 유동 특성을 세밀하게 포착하기 위하여 노즐 출구부와 그 후류영역은 공간 격자를 조밀하게 구성하였다. 임펠러 회전영역은 날개 앞날과 뒷날의 정밀한 형상을 모사하고 동시에 격자수를 감소시킬수 있는 다면체(polyhedral) 격자 체계를 사용하였고, 유동장 영역은 트리머(trimmer) 격자를 적용하였다. 해석을 위한 차체 표면 격자 체계를 Fig. 4에 나타내었으며 임펠러 끝단과 유도관 사이 간극의 격자 구성을 Fig. 5에 상세하게 도시하였다. 회전체 간극 사이의 유동 특성을 포착하기 조밀하게 경계층이 구성될 수 있도록 하였다.

Table 1 Numerical methods for the cavitation analysis

Flow	Incompressible turbulent flow Cavitation flow (two-phase)
Turbulence model	Realizable k-epsilon
Cavitation model	Schnerr-Sauer
Numerical methods	2nd order Finite Volume Method SIMPLE(Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) VOF (Volume Of Fluid) Sliding Mesh for Impeller's Rotation

유동 영역에 대한 경계 조건은 입구부의 속도 유입 경계 조건(velocity inlet)을 부여하고 차체와 터널 벽면은 점성해석을 위한 점착 벽면 조건(no-slip condition)을 지정하였으며 출구부는 압력 유출(Pressure outlet) 조건을 적용하여 해석을 수행하였다.

전체 유동장 영역은 차체 길이(L)를 기준으로 차체 상류로 $1.5L$, 하류 방향은 $3.5L$ 을 적용하였으며, 유속 단면은 대형 캐비테이션 터널의 시험부와 동일한 크기로 적용하였다. 수치해석에 사용된 전체 격자수는 약 560만개이며, 다면체 격자 분포가 적용된 임펠러 회전 영역의 격자수는 약 200만 개다.

캐비테이션 해석 절차는 우선 정상 유동 상태에서 임펠러 주위에 회전유동을 부여하는 방법인 이동 좌표계(Moving Reference Frame, MRF) 기법을 활용하여 충분히 유동을 수렴시킨 후, 회전 격자(sliding mesh) 기법을 이용하여 임펠러 날개를 2° 간격으로 비정상 유동해석을 수행하였다. 임펠러 날

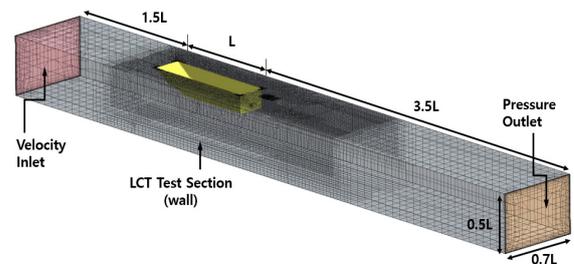


Fig. 3 Computational domain for the waterjet analysis

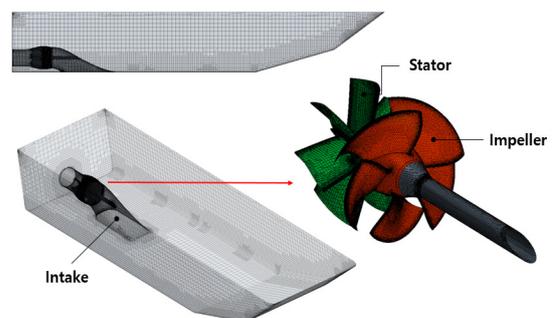


Fig. 4 Surface grid of the model vehicle and waterjet propulsor

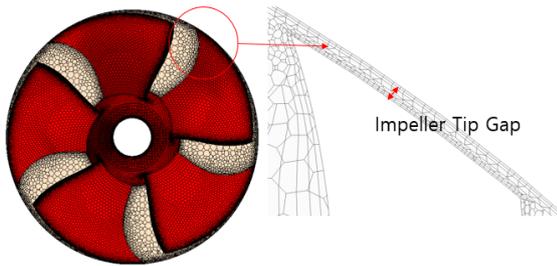


Fig. 5 Grid system around the waterjet impeller blade and tip region

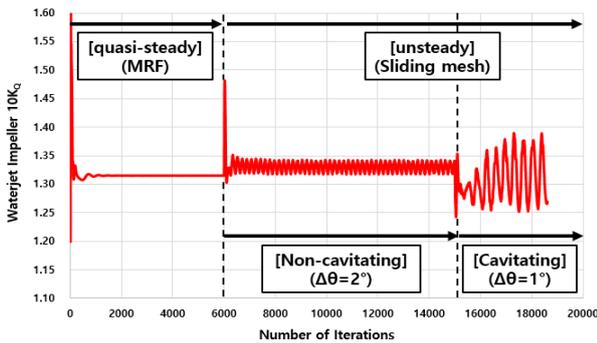


Fig. 6 Computing procedure for the waterjet cavitating flow

개를 총 10회전 시키면서 비정상 유동 해석 결과의 수렴성을 확보 후, 최종적으로 캐비테이션 모델을 활성화시켜 임펠러 날개를 1° 간격으로 총 3회전시킨 후 캐비테이션 해석 결과를 도출하였다. Fig. 6은 상기에서 언급한 3단계의 해석 과정에 따른 임펠러 토크의 시계열 변화를 보여주고 있다.

캐비테이션 모델에서 필요한 water quality에 대한 입력조건으로 seed density 및 seed diameter는 각각 $1 \times 10^{11} / m^3$ 및 $1 \times 10^{-6} m$ 으로 설정하였다. 또한, 임펠러 날개 회전에 따른 캐비테이션 발생 및 붕괴 특성에 대하여 수치해석 결과와 축소모형시험 결과를 비교 후, 정상적인 일치를 확보할 수 있도록 캐비테이션 해석 변수 중의 하나인 scaling factor의 값을 조정하여 해석을 수행하였다.

4. 워터젯 추진기 성능 평가

4.1 워터젯 추진기 형상 설계 (WJ-I)

일반적으로 선박용 추진기의 3차원 형상은 반경 별로 피치각, 스쿠, 레이크, 코드 길이, 날개단면 형상에 대한 값이 정의되면 원통 좌표계(cylindrical coordinate)에 대하여 용이하게 계산될 수 있다. 하지만, 워터젯 추진기의 경우 허브 및 유도관 형상의 변화 등으로 인하여 반경에 따른 피치각 등의 설계 변수 정의가 용이하지 않을 뿐만 아니라 반경 방향의 곡률 변화에 의한 유선 분포의 변화 특성을 감안할 수 없게 된다. 본 연구에서는 Neeley (1997)가 제안한 Constant Pitch Angle 방법

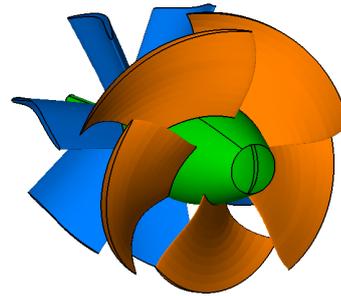


Fig. 7 3-dimensional shape of the waterjet propulsor (WJ-I)

을 이용하여 유도관 및 허브 형상 변화에 자유롭게 워터젯 임펠러 및 스테이터 날개의 3차원 형상이 구현될 수 있도록 하였다. 본 방법은 비원통 좌표계(non-cylindrical coordinate) 기반으로 특정 반경 지점에서 원주방향의 날개 좌표 변화 반복계산을 통하여 결정하는 방식이다.

수륙양용장갑차용 워터젯 추진기를 개발하기 위하여 서울대학교 예인수조에서 수행된 저항 및 자항시험 결과를 바탕으로 해상 속도별 요구 추력을 분석하여 설계 속도에서의 워터젯 추진기의 유량 및 양정을 계산하였다. 이를 바탕으로 워터젯 임펠러 날개의 형상을 변경시켜가면서 상용 CFD 코드를 활용하여 워터젯 추진기 추진성능 및 캐비테이션 성능을 평가하는 과정을 통하여 임펠러 및 스테이터 날개 형상 설계를 수행하였다.

또한, 노즐 직경이 증가할수록 제트 효율(jet efficiency)이 상승하게 되어 워터젯 추진효율 측면에서 유리하지만, 캐비테이션 특성이 반대로 불리해지게 되기 때문에 최적 노즐직경의 선정 과정은 워터젯 추진기 설계 과정에서 중요한 핵심 검토사항이다. Fig. 7은 상기의 과정을 통하여 결정된 워터젯 추진기 (WJ-I)의 3차원 형상을 보여주고 있다.

4.2 워터젯 추진기(WJ-I) 성능 평가

설계된 워터젯 추진기(WJ-I)의 펌프 성능 및 캐비테이션 성능을 평가하기 위하여 대형 캐비테이션 터널에서 수행된 축소모형시험 결과와 Star-CCM+를 이용하여 수행된 해석 결과를 비교, 분석하였다.

Fig. 8은 유량계수 변화에 따른 워터젯 추진기 성능 예측 결과를 보여주고 있으며, 정상 유동 상태에서 이동 좌표계(MRF) 기법을 이용한 계산 결과를 함께 비교하였다. 임펠러 추력계수 및 토크계수의 경우, 전반적인 계산 범위에서 축소모형시험 결과와 비교적 좋은 일치를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 그러나, 양정계수는 모형시험 결과 대비 수치해석 결과가 상대적으로 작게 계산되었으며, 이로 인하여 펌프 효율에 영향을 미쳤음을 알 수 있다. 이러한 차이의 원인으로 축소모형시험은 표면압력 계측을 통하여 양정을 도출 하였으나 수치해석은 계측 단면의 적분 평균압력을 이용한 방법의 차이에서 발생하는 것으로 판단된다.

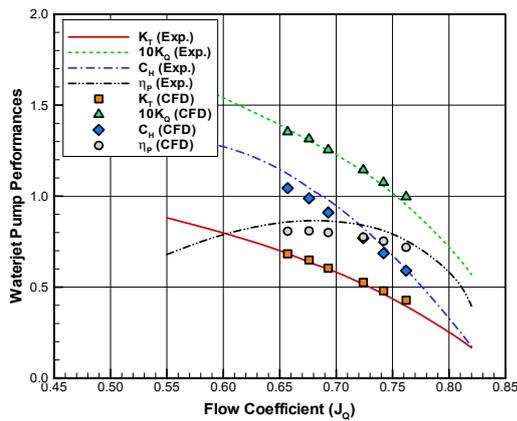
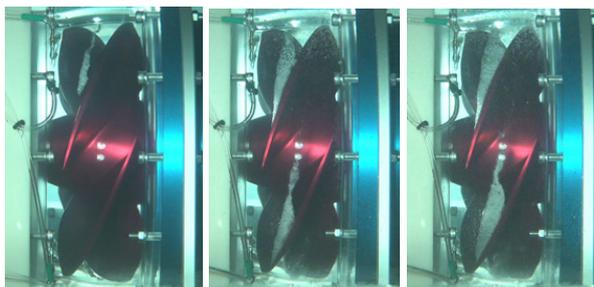


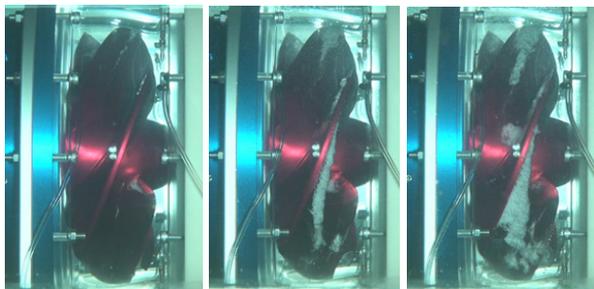
Fig. 8 Comparison of waterjet pump performances (WJ-I)

Fig. 9는 3가지의 캐비테이션 수 변화($\sigma_n = 2.5, 1.8, 1.6$)에 따른 임펠러 날개에서 발생하는 캐비테이션 관찰 결과를 보여주고 있다. 참고로 $\sigma_n=1.6$ 조건은 차량 설계 속도에 해당하는 캐비테이션 수이다.

캐비테이션 관찰 결과, 모형시험이 수행된 대부분 조건에서 흡입면 날개 앞날 캐비테이션(suction side leading edge cavitation)과 날개끝 보오텍스 캐비테이션(tip vortex, cavitation)이 주로 발생하였으며, 임펠러 날개끝과 하우징 사이에서 간극 캐비테이션(gap cavitation)이 함께 관찰되었다. 또한, 날개 회전 각도 0° 영역(12시 방향)에서는 유도관으로부터의 유입 유동과 수상축과 상호작용으로 인하여 생성된 반류 특성으로 인하여 날개 흡입면의 앞날로부터 얇은층 캐비테이션(leading edge sheet cavitation)이 발생함을 확인할 수 있었다.



(a) Port view



(b) Starboard view

Fig. 9 Observed cavitation patterns for the waterjet propulsor, WJ-I (Left: $\sigma_n=2.5$, Middle: $\sigma_n=1.8$, Right: $\sigma_n=1.6$)



(a) Port view



(b) Starboard view

Fig. 10 Calculated cavitation patterns for the waterjet propulsor, WJ-I (Left: $\sigma_n=2.5$, Middle: $\sigma_n=1.8$, Right: $\sigma_n=1.6$)

그리고, 날개 회전각도 -90° 영역에서 임펠러 날개 허브 근처의 낮은 반경 영역에서 압력면 날개의 앞날로부터 캐비테이션이 발생됨을 확인할 수 있다. 이는 차량 내부의 구성품 배치 문제로 인하여 선박용 워터젯 유도관보다 상대적으로 짧은 길이를 가진 유도관으로 설치되는 관계로 차체 바닥으로부터 임펠러 평면으로 유입되는 수직방향 속도 성분이 발생하고, 이로 인하여 접선방향 속도 성분이 증가되게 되어 해당 영역에서 날개 받음각 특성이 변화되었으리라고 예상된다. 따라서, 압력면 캐비테이션 발생 특성을 개선하기 위하여 임펠러 날개 반경 방향으로의 하중 분포 변경이 필요함을 알 수 있다.

전반적으로 캐비테이션 수의 감소에 따라 대부분 종류의 캐비테이션의 발생량 및 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 모든 시험 조건에서 유도관 립(lip) 부근에서의 유동 박리로 인한 공동성 유동(cavating flow)의 유입은 없는 것으로 확인되었다.

Fig. 10은 축소모형시험과 동일한 캐비테이션 수 조건에서 수행된 상용코드에 의한 캐비테이션 해석 결과를 보여주고 있다. 캐비테이션 수 감소에 따른 임펠러 날개 상의 캐비테이션 발생 면적 증가량은 전반적으로 모형시험 결과와 유사한 경향을 보이고 있다. 단, 임펠러 날개 흡입면에서 발생한 캐비테이션 분포 및 규모의 경우 수치해석 결과가 모형시험의 관찰 결과보다 더 크게 추정하고 있음을 확인할 수 있고, 이는 기존 문헌에서 언급된 바와 같이 캐비테이션 수가 낮은 영역에서는 대부분의 상용코드로 해석된 결과가 캐비테이션 발생량을 과도하게 예측하는 것과 유사한 경향이다 (Vaz et al., 2015, Shin and Andersen, 2019). 임펠러와 유도관 사이에서 발생하는 간극 캐비테이션(Gap cavitation) 및 날개끝 보오텍스 캐비테이

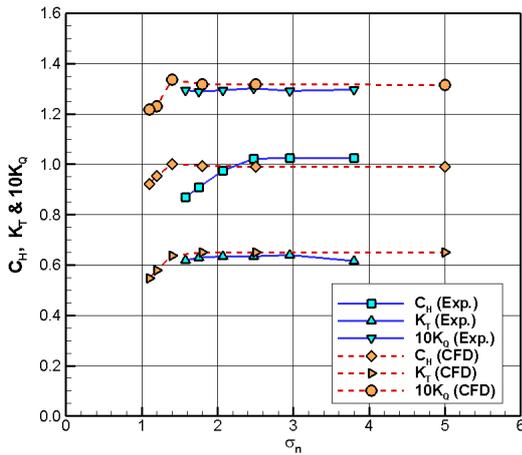


Fig. 11 Variation of head, thrust and torque coefficients with respect to cavitation number for the waterjet propulsor, WJ-I

선(Tip vortex cavitation)의 경우, 해당 영역에서의 격자수 증가 및 추가적인 수치기법(LES 및 DES 등)을 적용하면 추정 정도를 향상시킬 수 있으리라고 판단된다.

Fig. 11은 캐비테이션 수 변화에 따른 추력, 양정 및 토크계수의 변화에 대하여 축소모형시험을 통한 계측치와 수치해석 결과를 비교하여 보여주고 있다. 축소모형시험의 경우 터널 내부의 감압 용량 등의 시험 환경을 고려하여 설계 속도 조건 ($\sigma_n=1.6$)까지만 수행되었지만, 수치해석은 엔진 최대출력 조건 ($\sigma_n=1.2$)을 상회하는 범위까지 계산이 수행되었다. 축소모형시험 결과, 워터젯 임펠러 추력 및 토크계수는 설계속도 조건인 $\sigma_n=1.6$ 까지 캐비테이션 발생에 의한 값의 변동이 크지 않은 것을 확인할 수 있으나, 양정계수의 경우 $\sigma_n=2.5$ 이하의 영역에서 캐비테이션 수 감소에 따라 점진적으로 감소하는 것으로 나타났다. 이는 캐비테이션 수 조절을 위한 캐비테이션 터널 감압에 의하여 발생하는 시험부 내부의 기포가 압력 계측을 위한 비닐 튜브 안으로 유입되어 압력 신호의 감쇄 효과(damping effect)가 발생되었고, 이로 인한 양정 계측을 위한 압력 신호의 일부 왜곡이 발생되었으리라고 판단된다. 한편, 수치해석에 의해 예측된 워터젯 성능은 전반적으로 축소모형시험 결과와 좋은 일치를 보이고 있음을 확인할 수 있다. 수치해석 결과는 설계속도 조건($\sigma_n=1.6$)까지는 양정계수를 포함하여 캐비테이션 발생에 의한 유체역학적 성능 변동이 크게 발생하지 않고 있으나, 엔진 최대출력 조건($\sigma_n=1.2$) 영역에서는 계산된 모든 물리량의 크기가 급격하게 감소하는 추력 붕괴(thrust breakdown) 현상이 발생하는 것으로 예측되었다.

4.3 워터젯 추진기 형상 개선 (WJ-II)

상기에서 언급된 기존 워터젯 추진기 (WJ-I)에 대한 성능 평가 결과, 날개 회전각 변화에 따라 임펠러 날개 압력면의 캐비테이션 발생 및 엔진 최대출력 조건에서의 캐비테이션 수 감소

에 따른 임펠러 날개의 하중 감소 경향이 확인되었다. 따라서, 해상 최대속도 조건에서의 운용 성능을 고려하여 캐비테이션 성능 개선을 위한 워터젯 추진기 형상 개선을 수행하였다. 워터젯 추진효율의 변동 및 이에 따른 체계 해상속도 성능의 저하를 최대한 줄이기 위하여 임펠러 및 스테이터의 날개수와 노즐 직경은 기존 설계와 동일하게 유지한 상태에서 워터젯 형상 설계를 수행하였다. 최대 해상속도 조건에서 발생할 수 있는 추력 붕괴 발생 가능성을 최소화하기 위하여 워터젯 추진기의 허브 및 임펠러 날개 형상 변경을 수행하며 재설계를 수행하였다. 임펠러 날개의 코드 및 반경 방향으로의 최적 하중 분포 확보를 위하여 피치각 및 캠버 분포가 변경되었으며, 캐비테이션 완화를 위하여 임펠러 날개 면적도 함께 증가되었다. 스테이터 날개 형상은 변경된 임펠러 날개에 의한 회전유동의 정류작용을 고려하여 피치각을 조절시키면서 최종적으로 확정되었다. 또한, 임펠러 하우징과 날개 끝 사이의 간극 캐비테이션 성능을 개선시키기 위하여 날개 끝 형상을 추가적으로 변경시켰다. Fig. 12는 개선 설계가 적용된 워터젯 추진기(WJ-II)의 3차원 형상을 보여주고 있다.

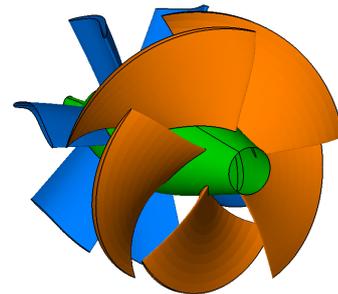


Fig. 12 3-dimensional shape of the re-designed waterjet propulsor (WJ-II)

4.4 워터젯 추진기(WJ-II) 캐비테이션 성능 예측

워터젯 추진기 형상 개선의 타당성을 검증하기 위하여 상용 코드를 이용한 수치해석을 통하여 2가지의 워터젯 추진기 성능을 상대적으로 비교, 평가하였다.

Fig. 13은 워터젯 추진기 형상 개선안(WJ-II)에 대하여 엔진 최대출력 조건($\sigma_n=1.2$)을 포함한 3종류의 캐비테이션 수 변화에 따른 캐비테이션 해석 결과를 기존 설계(WJ-I)의 해석 결과와 비교하여 보여주고 있다. 전반적으로 형상 개선안(WJ-II)의 캐비테이션 발생 면적이 기존 설계 결과 대비하여 감소됨을 확인할 수 있으며 공동 발생량은 최대출력조건에서 약15% 감소하였다. 또한, 임펠러 캐비테이션 발생 시작점(cavity detachment point)이 날개 앞날에 형성되고, 기존 설계의 해석결과에서 볼 수 있었던 날개 코드 중간 지점에서의 캐비테이션(mid-chord cavitation) 발생 특성도 사라졌음을 확인할 수 있으며, 이는 임펠러 날개 상의 하중 분포가 정상적으로 설계됨을 확인할 수 있는 반증이다.

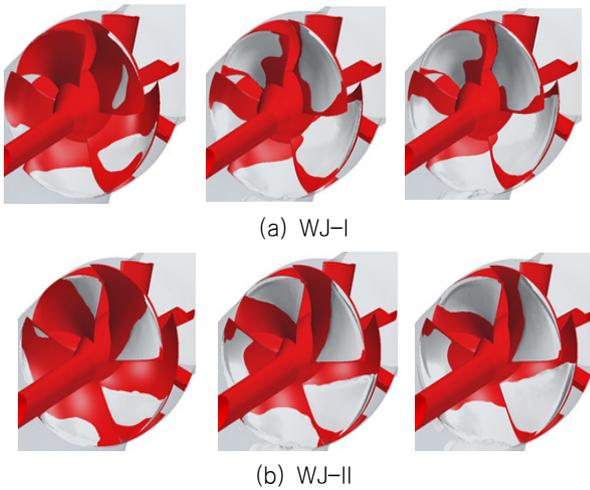


Fig. 13 Comparison of calculated cavity patterns on the waterjet impeller blade (Left: $\sigma_n=1.8$, Middle: $\sigma_n=1.4$, Right: $\sigma_n=1.2$)

Fig. 14는 워터젯 추진기 형상 개선안(WJ-II)에 대하여 캐비테이션 수 변화에 따른 추력, 양정 및 토크계수 특성을 보여주고 있다. 설계 속도 조건($\sigma_n=1.6$)보다 낮은 캐비테이션 수 조건에서 워터젯 추진기의 작용 하중이 급격하게 감소했던 기존 설계(WJ-I) 결과 대비 엔진 최대 출력 조건($\sigma_n=1.2$)보다 작은 캐비테이션 수 조건까지 워터젯 추진기의 양정, 추력, 토크 특성이 거의 일정하게 유지되고 있음을 볼 수 있고, 이로부터 캐비테이션에 기인한 추력 붕괴 특성이 현격하게 개선되었음을 확인할 수 있다.

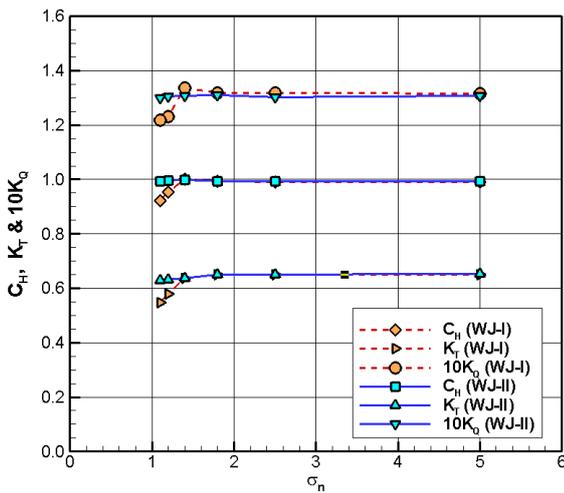


Fig. 14 Comparison of head, thrust and torque coefficients with respect to cavitation number for the waterjet propulsors, WJ-I and WJ-II

Fig. 15는 워터젯 추진기 형상 개선안(WJ-II)에 대하여 캐비테이션 주기 변동압력 해석 결과를 보여주고 있다. 변동압력 특성은 임펠러 날개 직상방 위치에서 전후 방향으로 각각 임펠

러 반경 대비 50% 떨어진 2지점에서 분석하였다. 캐비테이션 주기 변동압력은 임펠러 날개 전방에서 크게 발생되고 있음을 볼 수 있고, 1차 날개 주파수(blade frequency, BF) 성분 대비 고차 주파수에 해당하는 변동압력 크기는 일반적인 경향으로 감소하고 있음을 볼 수 있다. 또한, 임펠러 후방에서의 변동압력의 크기는 전방 대비하여 급격하게 감소됨을 알 수 있고, 이로부터 스테이터 날개의 피치각 설계의 타당성 및 정류 작용이 정상적으로 수행되고 있다고 판단된다.

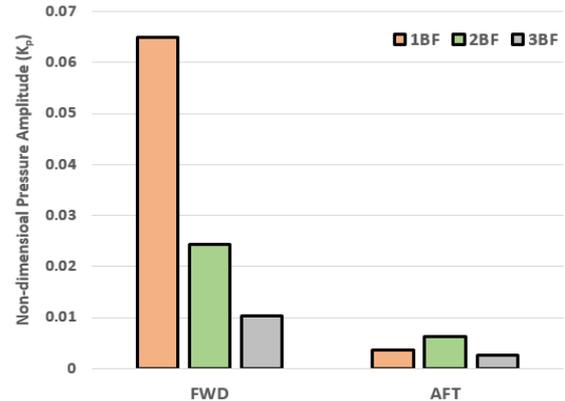


Fig. 15 Calculated non-dimensional fluctuating pressure amplitudes (WJ-II)

5. 결론

본 논문에서는 고속 해상기동을 위한 상륙동력장갑차용 워터젯 추진기의 캐비테이션 성능을 평가하기 위하여 대형 캐비테이션 터널에서 축소모형시험을 수행하였다. 임펠러 유입유동을 최대한 정확히 모사하기 위하여 유도관이 설치된 차체 모형을 시험부 내부에 장착하여 수행되었으며, 워터젯 유량 계수를 변화시키면서 워터젯 추진기의 유체역학적 성능을 계측하였다. 또한, 설계 속도 조건까지 캐비테이션 수를 변경시키면서 워터젯 추진기에 발생하는 캐비테이션 특성을 관찰하였으며, 추력 붕괴 특성의 발생 가능성도 함께 조사하였다.

그리고, RANS 방정식을 기반으로 한 상용 CFD 코드를 이용하여 수치 해석을 수행하고, 그 결과를 모형시험 결과와 비교하였다. 캐비테이션이 발생되지 않은 상태에서의 유량 변화에 따른 워터젯 추진기 성능 추정 결과는 모형시험 결과와 비교 시 전반적으로 좋은 일치성을 보임을 확인하였다. 캐비테이션 특성 해석 결과, 캐비테이션 수 변화에 따른 임펠러 날개 상의 캐비테이션 발생 면적 증가량은 전반적으로 모형시험 결과와 유사한 경향을 보이고 있으나, 임펠러 날개 흡입면 캐비테이션 발생 면적은 모형시험 대비 더 크게 추정하고 있었다.

추력붕괴(thrust breakdown) 특성 관점에서의 워터젯 성능을 향상하기 위한 워터젯 추진기 형상 개선이 수행되었고, 수치해석을 통하여 그 성능을 비교하였다. 개선 설계(WJ-II)에 대한 수치 해석 결과는 기존 설계(WJ-I) 대비 안정적인 캐비테이

선 거동을 보여줌을 확인할 수 있고, 최대 엔진출력 조건을 상회하는 영역에서도 추력 붕괴 특성이 발생하지 않으리라고 예상된다.

References

Ahn, J.W., Kim, K.S., Park, Y.H., Kim, K.Y. and Oh, H.W., 2005. Performance analysis of a mixed-flow pump for waterjet propulsion. *Journal of Ship & Ocean Technology*, 9(2), pp. 11–20.

Ahn, J.W., Kim, G.D., Kim, K.S. and Park, Y.H., 2010. Development of the weight reduction pump for waterjet propulsion. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(1), pp. 30–37.

Dang, J., Liu, R. and Pouw, C., 2013. Waterjet system performance and cavitation test procedures. *Third International Symposium on Marine Propulsors*, Tasmania, Australia.

Ferziger, J.H. and Peric, M., 2001. *Computational methods for fluid dynamics*. Springer-Verlag Berlin, Third Edition, pp. 188–196.

Han, J., Seo, J., Kim, T., Kim, D. and Lee, J., 2020. Analysis of waterjet cavitating performances for amphibious vehicles. *KIMST Annual Conference Proceedings*, Daejeon, Korea.

Kim, D., Seo, J., Kim, T., Han J. and Lee, J., 2020. Grid methodology for the analysis of hydrodynamic performances of amphibious assault vehicles. *KIMST Annual Conference Proceedings*, Daejeon, Korea.

Kim, J.I., Park, I.R., Kim, K.S. and Ahn, J.W., 2017. Numerical analysis of non-cavitating and cavitating performance of a SVA potsdam propeller. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 54(3), pp. 215–226.

Kim, T., 2021. Numerical analysis on the resistance and propulsion performances of high-speed amphibious assault vehicles. *Journal of the KIMST*, 24(1), pp. 84–98.

Kim, T., Seo, J., Han, J. and Kim, D., 2021. Cavitation performances evaluation results for a waterjet propulsion system with an amphibious vehicle hull. *The 11th International Symposium on Cavitation*, Daejeon, Korea.

Lindau, J.W., Boger, D.A., Medvitz, R.B. and Kunz, R.F., 2005. Propeller cavitation breakdown analysis. *Journal of Fluids Engineering*, 127, pp. 995–1002.

Neeley, S.K., 1997. Non-cylindrical blade geometry definition. *SNAME Propellers and Shafting Symposium*.

Park, I.R., Kim, K.S., Kim, J.I., Seol, H.S., Park, Y.H. and Ahn, J.W., 2020. Numerical study on propeller cavitation and pressure fluctuation of model and full scale ship for a MR tanker. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 57(1), pp. 35–44.

Schnerr, G.H. and Sauer, J., 2001. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics. *Fourth International Conference on Multiphase Flow*, New Orleans, LA, USA.

Shin, K.W. and Andersen, P., 2019. CFD analysis of ship propeller thrust breakdown. *Sixth International Symposium on Marine Propulsors*, Rome, Italy.

Vaz, G., Hally, D., Huuva, T., Bulten, N., Muller, P., Becchi, P., Herrer, J.L.R., Whitworth, S., Mace, R. and Korsstrom, A., 2015. Cavitating flow calculations for the E779A propeller in open water and behind conditions: code comparison and solution validation. *Fourth International Symposium on Marine Propulsors*, Houston, Texas, USA.

