

캐비테이션 침식 추정 방법 개발 및 추진기에의 적용

박 선 호,¹ 이 신 형*²

¹한국해양대학교 해양공학과

²서울대학교 조선해양공학과

DEVELOPMENT OF CAVITATION EROSION PREDICTION METHOD AND ITS APPLICATION FOR MARINE PROPELLER

S. Park¹ and S.H. Rhee*²

¹Dept. of Ocean Engineering, Korea Maritime and Ocean Univ.

²Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Seoul Nat'l Univ.

In the present study, a practical method to predict cavitation erosion, which caused a critical damage on hydraulic machineries, was developed. Impact and critical velocities were defined to develop a practical method for the prediction of cavitation erosion. To develop the practical method, the computational fluid dynamics (CFD) was introduced. Cavitating flows with erosion in a converging-diverging nozzle and around a hydrofoil were simulated by developed and validated code. Based on the CFD results, the cavitation erosion coefficient was derived by a curve fitting method. The cavitation erosion coefficient was formulated as the function of the cavitation and Reynolds numbers. A cavitating flow in an axisymmetric nozzle followed by radial divergence was simulated to validate the developed practical method. For the application to a propeller, a cavitating flow around a propeller was simulated. Predicted damage extent showed similar with damaged full-scale propeller blade.

Key Words : 캐비테이션(Cavitation), 캐비테이션 침식(Cavitation Erosion), 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics)

1. 서 론

비정상 캐비테이션은 기계 시스템의 진동, 소음을 유발하고 심지어 치명적인 결함을 초래하기도 한다. 특히 불안정한 기포의 붕괴 시 매우 큰 압력 충격파가 발생하고 이러한 압력 충격파는 표면에 침식을 유발하며 이를 “캐비테이션 침식”이라한다[1,2].

캐비테이션 침식 현상을 이해하기 위해 기포의 운동학에서부터 재료에 대한 연구까지 광범위한 연구가 진행되었다. 주로 실험을 이용한 방법이 많이 진행되었고 최근 전산유체역학의 발달과 컴퓨터 하드웨어의 발달로 수치적인 연구도 많이 이루어졌다. Fortes-Patella et al.[3]은 유한요소법을 이용하여 압력 충격파에 대한 재료의 반응 정도를 계산하였고,

Schnerr et al.[4]는 3차원 비틀어진 날개에서 기포가 붕괴될 때 발생하는 압력 충격파를 계산하였다. Sedler et al.[5]는 펌프의 임펠러에서 기포가 수축될 때 발생하는 충격파 에너지를 계산하였고, Dular and Coutier-Delgosha[6]는 계산된 침식 면적을 실험과 비교하였다. Ochiai et al.[7]은 캐비테이션 침식을 예측하기 위하여 Eulerian 방법과 Lagrangian 방법의 커플링 방법을 제시하였다.

캐비테이션 침식을 예측할 수 있는 모델에 대한 연구가 많이 진행되었다. Fortes-Patella et al.[3]은 압력 충격파와 재료의 침식량이 관계가 있음을 밝히고 알루미늄, 구리, 스테인리스강에 대한 실험을 통해 관계를 입증하였다. Berchiche et al.[8]는 재료의 응력과 변형률 관계를 이용하여 연성 물질의 캐비테이션 침식을 예측할 수 있는 방법을 제시하였다. Duler et al.[9]은 간단한 형상의 수중익형에 대해 실험을 하여 수치적으로 예측할 수 있는 모델을 제시하였다. Hattori and Kishimoto[10]는 Vickers 경도와 침식율에 대한 관계를 정립하였다. Szkodo[11]는 Weibull 분포를 이용하여 재료의 침식 정도를 수학적으로 모델링하였다. van Terwisga et al.[12]은 물리

Received: July 30, 2013, Revised: September 3, 2013,

Accepted: September 3, 2013.

* Corresponding author, E-mail: shr@snu.ac.kr

DOI <http://dx.doi.org/10.6112/kscfe.2013.18.3.094>

© KSCFE 2013

적인 침식과정과 캐비테이션 침식 모델을 정리하였다.

본 논문에서는 캐비테이션 침식을 예측할 수 있는 실용적인 기법을 제시하였다. 실용적인 기법을 정립하기 위해 노즐과 수중익형 주위에서 발생하는 캐비테이션에 대해 CFD 해석이 이루어졌다. CFD 해석에는 소스 공개코드를 이용하여 개발한 SNUFOAM-Cavitation[13-15]을 사용하였다. SNUFOAM-Cavitation은 얇은 층, 초, 구름형 캐비테이션에 대해 이미 검증되었기 때문에 본 논문에서는 검증절차 없이 사용하였다.

2. 실용적인 방법 개발

기포가 붕괴될 때 강한 압력 충격파가 발생하고 이 압력 충격파가 표면을 침식시킨다. 기포가 붕괴될 때 발생하는 충격파 속도가 재료를 침식시키는 특정한 임계 속도 이상이 되면 재료의 표면이 침식된다. 따라서 캐비테이션 침식 추정 방법을 개발하기 위하여 충격파 속도와 임계 속도를 정의하였고, 충격파 속도가 임계 속도보다 큰 경우 캐비테이션 침식이 발생한다고 판정하였다.

2.1 충격파 속도

Plesset and Chapman[16]과 Brennen[17]는 비압축성 유체에서 구형상의 기포가 붕괴될 때 발생하는 충격파 속도를 다음과 같이 정의하였다.

$$v = \gamma \sqrt{\frac{\Delta P}{\rho_l}} \quad (1)$$

여기서, ρ_l 은 액체의 밀도, ΔP 는 평형상태일 때와 기포가 붕괴될 때 멀리 떨어진 위치에서의 압력차이, γ 는 기포 중심에서 물체 표면까지의 무차원화 된 거리를 나타낸다. 일반적으로 관찰되는 캐비테이션은 기포 한 개라기보다는 기포의 집합체이다. 또한, 이상균질 모델을 이용하는 전산유체역학에서는 캐비테이션이 여러 개의 기포들로 표현되지 않고 한 개의 커다란 보오텍스 구조로 계산되는 것이 일반적이다. 따라서, 위의 식을 그대로 사용하지 않고 변형하여 사용하였다. 압력 변화는 캐비티가 붕괴하여 유체장에 전파되기 때문에 물체 표면에서의 최대값과 최소값의 차이로 계산하였다. 최대값과 최소값의 차이는 캐비티가 떨어져 나가는 한 주기 내에서의 값을 의미한다. 또한, 캐비티가 붕괴될 때의 압력 변동을 고려하기 위하여 변동 압력을 고려하였다. 본 계산에서는 RANS 기반의 계산을 하였기 때문에 평균화된 압력값이 계산되었고 압력 변동에 대해서는 다음과 같이 고려하였다[18].

$$P' = 0.39 \rho_m k \quad (2)$$

여기서, 아래첨자 m 은 혼합류(mixture)를 나타내고, k 는 난류 운동에너지를 나타낸다. 압력의 계산은 RANS 방정식에서 계산된 압력과 Hinze[18]가 제안한 압력변동을 고려하여 계산하였다. 위 식에서 밀도는 캐비티가 붕괴될 때의 물체 표면에서의 밀도를 나타낸다. 계산하는 시간마다 혼합류의 밀도와 난류 운동에너지를 계산하여 P' 이라는 별도의 변수로 출력하였다. 결과물을 분석할 때에는 계산된 평균화된 압력값에 P' 을 더하여 최종적인 압력을 고려하였다. 캐비티가 붕괴될 때 발생하는 충격파는 압축성 효과를 동반하기 때문에 Plesset and Chapman[16]과 Brennen[17]이 유도한 충격파 속도에서 밀도를 액체상의 밀도에서 혼합류의 밀도로 변경하였고, 압력만의 변화가 아닌 압력과 밀도의 변화를 동시에 고려하였다. 그리고 기포중심에서 물체 표면까지의 거리를 나타내는 변수인 γ 는 캐비테이션 침식 계수(C_{ce})를 도입하여 표현하였다. 새롭게 변경된 식은 다음과 같다.

$$v_{impact} = C_{ce} \sqrt{\Delta \left(\frac{P}{\rho_m} \right)} \quad (3)$$

여기서, 캐비테이션 침식 계수는 계산영역에 정의된 압력(reference pressure), 증기압력, 밀도, 점성, 속도, 길이, 캐비티 방출 주기와 관련지을 수 있다. Buckingham pi 이론을 적용하여 무차원화하면 3개의 무차원 수인 레이놀즈 수(Reynolds number), 캐비테이션 수(Cavitation number), Strouhal 수가 유도된다. 스토로우홀 수는 캐비티의 방출 주기와 관련이 있는데 본 논문에서는 이와 관련된 실험데이터가 부족하여 상수로 처리하였다. 레이놀즈 수와 캐비테이션 수에는 공통적으로 속도가 포함되어 있고, 속도는 대표적인 비선형적인 변수이기 때문에 레이놀즈 수를 포함한 함수와 캐비테이션 수를 포함한 함수를 더하거나 빼기의 형태 대신 곱하기의 형태로 아래와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} C_{ce} &= f(P_o, P_v, \rho, \mu, U, L, f) \\ &= f\left(\frac{P_o - P_v}{\frac{1}{2} \rho U^2}, \frac{\rho U L}{\mu}, \frac{f L}{U}\right) \\ &= f(\sigma, Re, St) \\ &= f(\sigma, Re) \\ &= f_1(\sigma) \times f_2(Re) \end{aligned} \quad (4)$$

레이놀즈 수에 포함되어 있는 길이에 대해서는 캐비티의 크기로 정의하는 것이 캐비테이션 유동장에서는 타당하나, 실

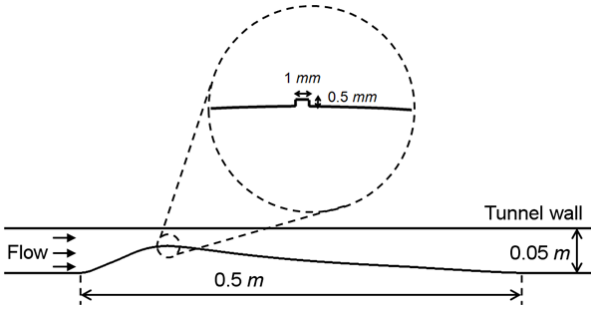


Fig. 1 Problem description of converging-diverging nozzle

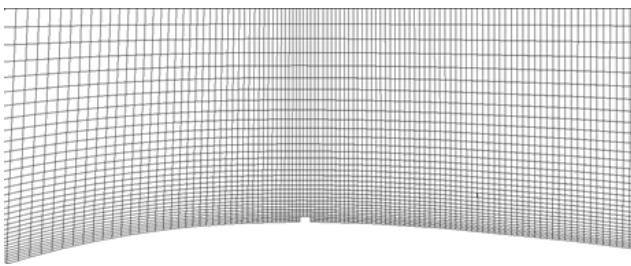


Fig. 2 Mesh for converging-diverging nozzle

용적인 방법을 개발하는 본 논문의 목적 상 캐비티의 크기가 아닌 대상 물체의 대표 길이를 사용하였다.

2.2 임계 속도

유체가 매우 빠르게 물체의 표면과 부딪힐 때 유체의 흐름과 반대 방향으로 충격파가 발생한다. 이때, 유체에 대해 비압축성, 등엔트로피 유동이라고 가정하면 임계속도를 정의할 때 온도를 배제할 수 있다. 물체를 소성 변형시키는 임계속도는 다음과 같이 유도할 수 있다[19].

$$v_{critical} = \left[\frac{P_Y}{\rho} \left(1 - \left(1 + \frac{P_Y}{B} \right)^{-1/n} \right) \right]^{1/2} \quad (5)$$

여기서 P_Y 는 재료의 항복강도이고, n 과 B 는 실험에서 얻어진 값으로 각각 7과 300 MPa를 사용하였다.

3. 계산결과

실용적인 방법에서 미지수는 캐비테이션 침식 계수로 수축-확대 노즐과 수증기에 대한 캐비테이션 침식 유동장 계산을 통해 결정하였다.

3.1 수축-확대 노즐

수축-확대 노즐의 형상은 다음과 같이 정의된다[20].

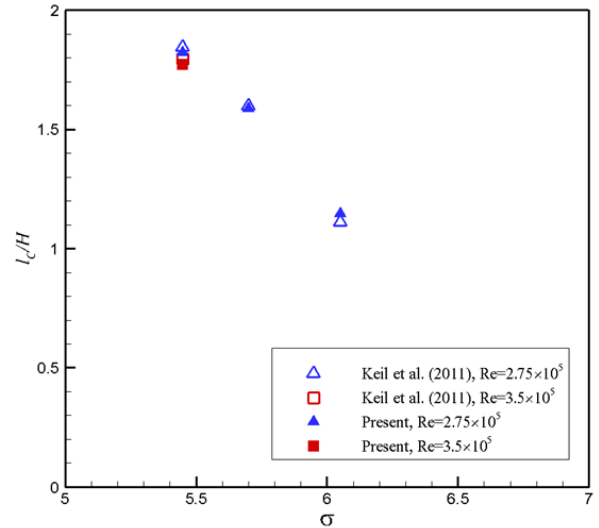


Fig. 3 Sheet cavity length of converging-diverging nozzle

$$h/H = \frac{const.}{e^{(x/0.3H)} + e^{(x/0.45H)}} \quad (6)$$

여기서 x 는 유동의 흐름방향을 나타내고, H 는 노즐의 높이인 0.05 m를 나타낸다. $x/H = 0.3$ 에서의 곡률 반경은 2.5로 정의된다. 곡률에는 Fig. 1과 같이 곡률반경이 가장 작은 곳($x/H = 0.3$)에 사각형의 돌기가 부착되어 있으며, 돌기의 크기는 길이와 높이방향으로 각각 1 mm, 0.5 mm로 정의된다. const. 값은 2.79961이며, 이 값은 $x/H = 0.3$ 에서 $h/H = 0.6$ 을 의미한다. 수축-확대 노즐에 대한 캐비테이션 침식 관찰 실험은 Darmstadt 대학의 캐비테이션 터널에서 이루어졌다[20].

계산영역의 크기는 $-10 \leq x/H \leq 20$, and $0 \leq y/H \leq 1$ 로 설정하였다. 입구에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구 경계면에서는 압력을 Dirichlet 조건으로 설정하여 캐비테이션 수를 설정하였다. 노즐 표면은 no-slip 조건으로 설정하였다. 터널의 벽면은 slip 조건으로 설정하였다. Fig. 2는 사각형 돌기 주위의 격자를 보여주고 있다. 길이방향으로는 450개, 높이 방향으로는 30개의 격자로 격자계를 구성하였고, 총 14,000개의 사면체 격자가 사용되었다. Fig. 3은 레이놀즈 수와 캐비테이션 수에 따른 얇은 층(sheet) 캐비테이션의 무차원화된 길이와 실험결과[20]을 나타낸다. 캐비테이션 수 6.05에서 실험보다 다소 길게 계산되었다. 전체적으로 실험과 비슷하게 계산된 것을 확인할 수 있다.

Fig. 4는 캐비테이션 수 5.45, 레이놀즈 수 3.5×10^5 에서의 노즐표면에서의 압력/밀도 변화를 나타낸다. 압력/밀도 변화에서 압력은 RANS 기반의 계산에서 얻어진 압력과 변동압력을 고려한 값을 나타낸다. 캐비테이션으로 인해 큰 압력변화가 관찰되었다. 얇은 층 캐비테이션이 관찰된 영역보다 넓은 영

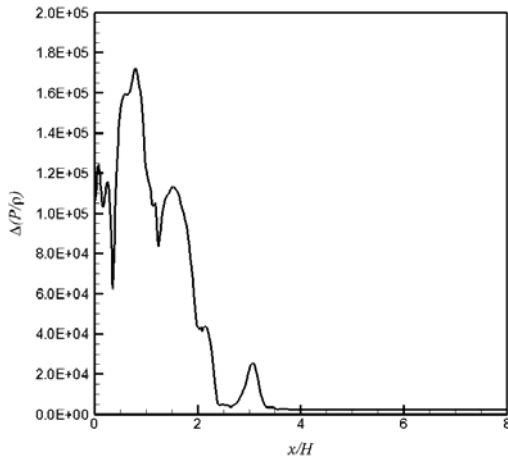


Fig. 4 Pressure/density difference of converging-diverging nozzle

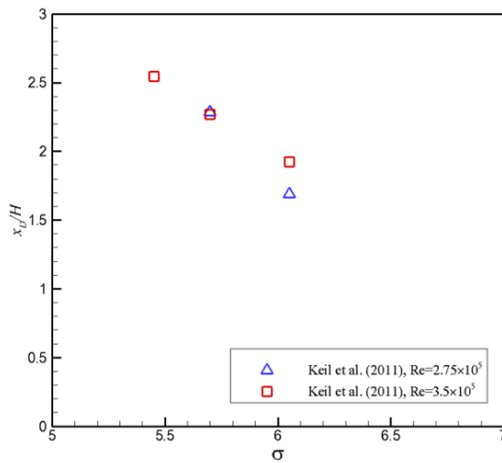


Fig. 5 Damage extent by cavitation erosion of converging-diverging nozzle[20]

역에서 압력/밀도 변화가 관찰되는 것을 알 수 있다. Fig. 5는 실험에서 관찰된 캐비테이션 침식 위치를 나타낸다[20]. 계산에서 유동장을 잘 구현했다는 가정을 통해 캐비테이션 침식이 관찰되는 압력/밀도 변화를 계산할 수 있다. 즉, 실험에서 측정한 Fig. 5의 캐비테이션 침식 발견위치를 이용하여 캐비테이션 침식이 발견되는 위치에서는 압력/밀도 변화를 Fig. 4를 이용하여 계산할 수 있다. 압력/밀도 변화값을 식 (3)에 대입하면 미지수인 캐비테이션 침식 계수를 계산할 수 있다. 본 계산을 통해 레이놀즈 수 2.75×10^5 , 3.5×10^5 와 캐비테이션 수 5.45, 5.7, 6.05에서 캐비테이션 침식 계수를 도출하였다.

3.2 수중익

Fig. 6과 같이 전연이 반원형상이고 후연은 삼각형 형상을 가지는 수중익 주위에서 발생하는 캐비테이션에 대해 캐비테

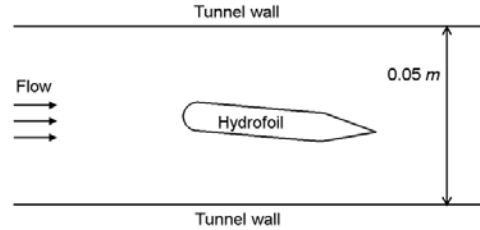


Fig. 6 Problem description of hydrofoil

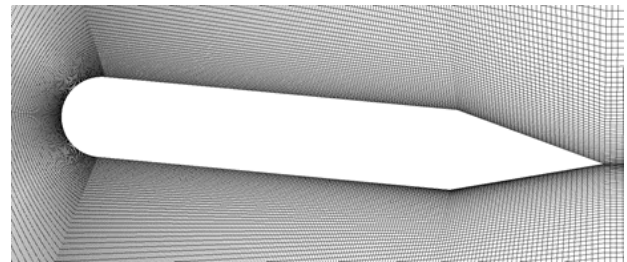


Fig. 7 Mesh for hydrofoil

이션 침식 유동장을 해석하였다. 받음각은 5° 이고 코드 길이는 0.1079 m , 스패의 길이는 0.05 m 이고 일정하게 유지되는 두께는 0.016 m 이다. 캐비테이션 침식 관찰 실험은 Darmstadt 대학의 캐비테이션 터널에서 이루어졌다[6].

계산영역의 크기는 $-10 \leq x/C \leq 10$, and $-0.5 \leq y/C \leq 0.5$ 로 설정하였다. 입구에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구 경계면에서는 압력을 Dirichlet 조건으로 설정하여 캐비테이션 수를 설정하였다. 수중익 표면은 no-slip 조건으로 설정하였다. 터널의 벽면은 slip 조건으로 설정하였다. Fig. 7은 수중익 주위의 격자를 보여주고 있다. 수중익 표면에서 길이방향으로는 250개의 격자로 이루어졌고, 수중익 표면의 수직방향으로는 60개의 격자가 사용되었다. 총 22,000개의 사면체 격자로 격자계를 구성하였다.

계산은 레이놀즈 수 1.04×10^6 , 캐비테이션 수 2.0에서 수행되었다. Fig. 8은 수중익 표면에서의 압력/밀도의 변화를 나타낸다. 압력의 변화에는 변동압력이 고려되었으며, 캐비티가 방출되는 1주기에서의 압력/밀도 변화를 보여주고 있다. 실험에서는 $x/C = 0.78$ 위치까지 캐비테이션 침식이 관찰되었다. 관찰된 캐비테이션 침식의 위치를 Fig. 8에 적용하면 캐비테이션 침식이 관찰되는 위치에서의 압력/밀도를 계산할 수 있다. 계산된 압력/밀도 변화를 식 (3)에 대입하면 미지수인 캐비테이션 침식 계수를 계산할 수 있다.

3.3 캐비테이션 침식 계수 결정

캐비테이션 침식 계수는 curve fitting 방법을 이용하여 레이놀즈 수와 캐비테이션 수의 함수로 유도하였다. 수축-확대

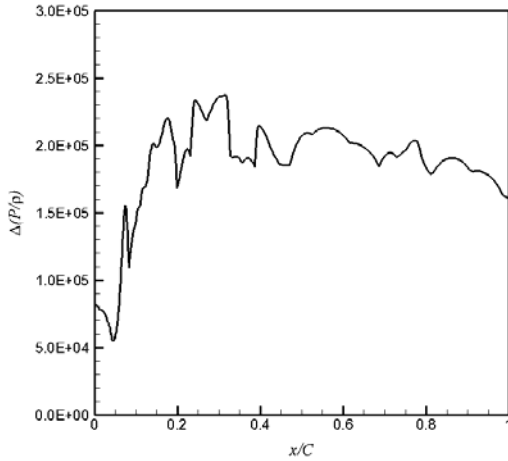


Fig. 8 Pressure/density difference on hydrofoil surface

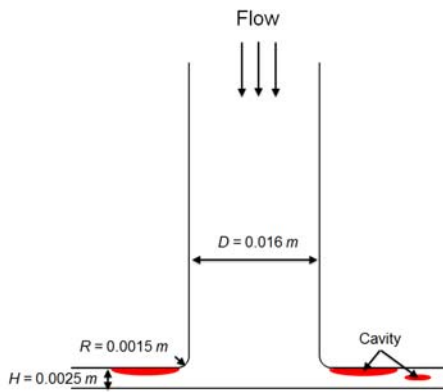


Fig. 9 Problem description of axisymmetric nozzle followed by radial divergence

노즐과 수중의 계산에서 캐비테이션 수에 따른 압력 변화가 지수함수와 같은 변화를 보이기 때문에 캐비테이션 수의 함수는 지수함수로 선정하였다. 수축-확대 노즐의 실험[20]에서 관찰된 캐비테이션 침식의 위치가 레이놀즈 수의 영향이 크지 않았고, 이로 인해 계산에서도 영향이 크게 나타나지 않았다. 또한, 캐비테이션 침식 계수를 결정하는데 있어서 많은 양의 자료를 사용하지 않았기 때문에 스케일 변화와 관련된 레이놀즈 수의 함수는 그 영향을 작게 하기 위해 로그함수를 사용하였다. curve fitting 방법을 이용하여 유도된 캐비테이션 침식 계수는 아래와 같다.

$$C_{\alpha} = f_1(\sigma) \times f_2(Re) \tag{7}$$

$$= (5.6e^{-0.5\sigma} - 10) \times (2.65 \ln(Re) - 10.6)$$

얻어진 추세선은 최소자승법을 이용하여 오차를 계산하였

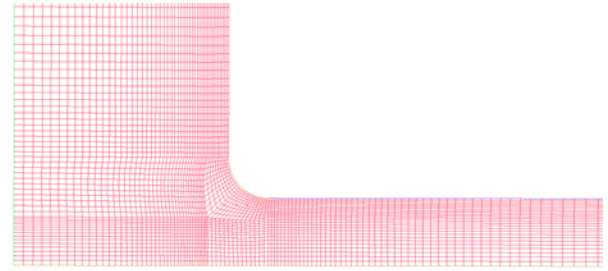


Fig. 10 Mesh for axisymmetric nozzle followed by radial divergence

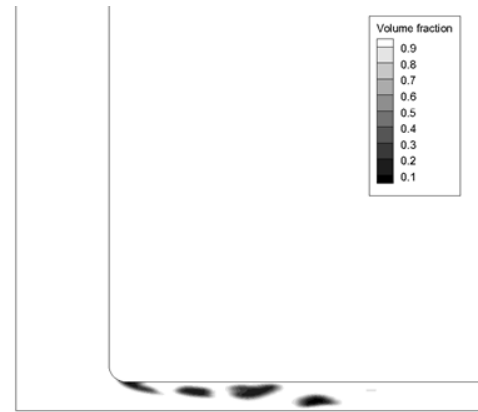


Fig. 11 Pressure coefficient contours of axisymmetric nozzle followed by radial divergence

으며, 계산된 오차는 0.999이다. 오차는 다음의 식으로 계산하였다.

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (Y_i - (X_i - X_m) - (Y_i - Y_m) X_i)^2}{\sum (Y_i - Y_m)^2} \tag{8}$$

위 식에서 아래첨자 m 은 평균값을 나타낸다.

3.4 개발된 추정방법의 검증

개발된 추정방법을 검증하기 위하여 Fig. 9와 같은 축대칭 노즐에 대해 캐비테이션 침식 유동장을 수치해석 하였다. 축대칭 노즐은 16 mm의 직경의 노즐을 위에서 아래로 유체가 흐르고 높이가 2.5 mm인 원판으로 유동이 꺾이는 형상으로 되어 있다. 캐비테이션은 꺾이는 부분에서 Fig. 9와 같이 발생한다.

계산영역의 크기는 $-0 \leq x/H \leq 40$, and $0 \leq y/H \leq 40$ 로 설정하였다. 입구에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구 경계면에서는 압력을 Dirichlet 조건으로 설정하여 캐비테이션 수를 설정하였다. 노즐 표면은 no-slip 조건으로 설정하였다. Fig. 10은 노즐의 유동이 꺾이는 부분에서의 격자를

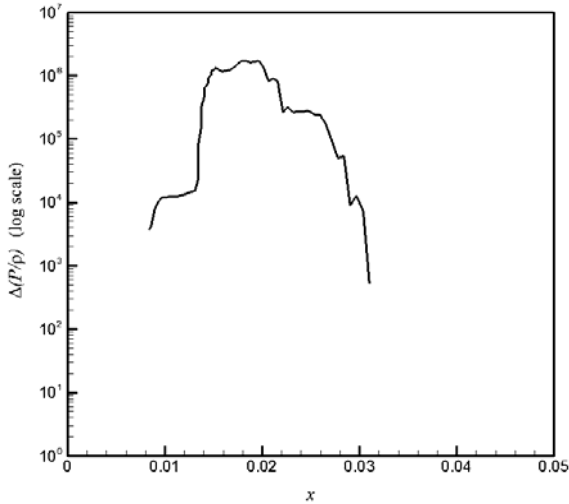


Fig. 12 Pressure/density difference of axisymmetric nozzle followed by radial divergence

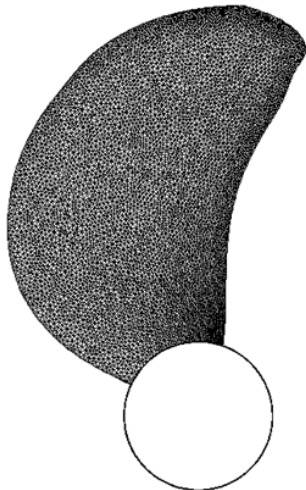


Fig. 13 Mesh for KP505 propeller

보여준다. 노즐의 높이방향으로는 40개의 격자가 사용되었고, 총 20,000개의 사면체 격자가 사용되었다. 레이놀즈 수는 7.75×10^5 , 캐비테이션 수 2.1에서 계산이 수행되었다. Fig. 11은 계산된 캐비티의 형상을 보여주고 있다. 노즐이 꺾이는 부분에서 캐비티가 발생하고 후류로 진행되는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 12는 노즐 표면에서의 압력/밀도 변화를 나타낸다. 계산된 압력/밀도 변화와 캐비테이션 침식 계수를 식 (3), (5), (7)에 대입하면 캐비테이션 침식 길이를 예측할 수 있다. 캐비테이션 침식이 0.03 m까지 발견되는 것으로 계산되었다. 실험에서는 캐비테이션 침식이 0.032 m까지 관찰[21]되었으며, 이는 계산결과와 유사한 것을 알 수 있다. 축대칭 노즐에 대한 계산을 통해 개발된 캐비테이션 침식 방법을 검증하였다.



Fig. 14 Cavity on KP505 propeller blade

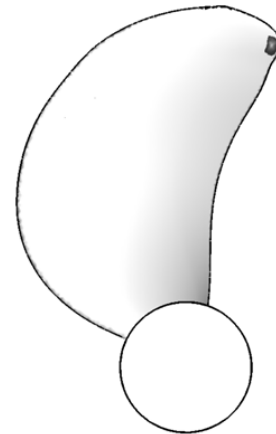


Fig. 15 Predicted cavitation erosion extent on KP505 propeller blade

3.5 개발된 추정방법의 적용

개발 및 검증된 캐비테이션 침식 추정 방법을 이용하여 추진기에서 발생하는 캐비테이션 침식을 해석하였다. 대상 추진기는 KCS 선박의 추진기인 KP505로 선정하였다. 전진비 0.3, 캐비테이션 수 1.5에서 계산하였다.

계산영역의 크기는 $-3 \leq x/D \leq 5$, and $0 \leq r/D \leq 3$ 로 설정하였다. 입구에는 속도를 Dirichlet 조건으로 설정하였고, 출구 경계면에서는 압력을 Dirichlet 조건으로 설정하여 캐비테이션 수를 설정하였다. 추진기 날개 표면은 no-slip 조건으로 설정하였다. Fig. 13은 추진기 날개 표면에서의 격자를 보여준다. 총 40,000개의 삼각형 격자가 날개 표면에 사용되었으며, 표면에 삼각기둥 격자가 5단 적층되어 있는 구조로 격자계가 구성되었다.

Fig. 14는 추진기 날개 표면에서 생성된 얇은 층 캐비테이션을 보여준다. Fig. 15는 개발한 침식 추정 방법을 이용하여



Fig. 16 Cavitation erosion on propeller blade[22]

계산한 캐비테이션 침식 위치이다. 계산된 위치가 Fig. 16과 같이 실험에서 발견된 캐비테이션 침식 위치와 유사한 것을 확인할 수 있다[22].

4. 결 론

캐비테이션 침식을 예측하는 실용적인 방법을 개발하기 위해 캐비티가 붕괴될 때의 충격파 속도와 표면의 침식이 유발되는 임계속도를 정의하였다. 충격파 속도의 미정계수를 결정하기 위해 전산유체역학 해석을 도입하였다. 개발한 전산유체역학 코드를 이용하여 축소·확대 노즐과 수중익 주위에서 발생하는 캐비테이션을 해석하여 미정계수인 캐비테이션 침식 계수를 레이놀즈 수와 캐비테이션 수의 함수로 유도하였다. 개발한 캐비테이션 침식 예측 방법을 검증하기 위해 축대칭 노즐에서 발생하는 캐비테이션 침식을 해석하였고, 실험과의 비교를 통해 정도를 검증하였다. 최종적으로 개발한 캐비테이션 침식 추정방법을 이용하여 추진기에서 발생하는 캐비테이션 침식을 추정하였으며, 실제 캐비테이션 침식이 발생한 모형 추진기와 유사한 위치에서 발견된 것을 확인하였다. 본 논문에서 개발한 캐비테이션 침식을 추정할 수 있는 실용적인 방법은 추진기, 펌프, 터빈, 노즐 등의 유체기계에서 발생하는 캐비테이션 침식을 예측하는데 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 국방과학연구소의 “초공동 수중운동체 통합연구

(09-01-05-26)”와 지식경제부의 “첨단 융합기술 개발사업 (2011-0020563)”의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

Note

This paper is a revised version of a paper presented at the KSCFE 2012 Spring Annual meeting, Jeju, May 15-16, 2012.

References

- [1] 1997, Stephanis, C.G., Hatiris, J.G. and Mourmouras, D.E., "The process (mechanism) of erosion of soluble brittle materials caused by cavitation," *Ultrasonics Sonochemistry*, Vol.4, pp.269-271.
- [2] 2009, Bark, G., Grekula, M., Bensow, R.E. and Berchiche, N., "On some physical to consider in numerical simulation of erosive cavitation," *7th International Symposium on Cavitation*, Ann Arbor, USA.
- [3] 2001, Fortes-Patella, R., Challier, G. and Rebound, J.L., "Cavitation erosion mechanism: numerical simulation of the interaction between pressure waves and solid boundaries," *4th International Symposium on Cavitation*, Pasadena, California, USA.
- [4] 2008, Schnerr, G.H., Sezal, I.H. and Schmidt, S.J., "Numerical investigation of three-dimensional cloud cavitation with special emphasis on collapse induced shock dynamics," *Physics of Fluids*, Vol.20, pp.040703.1-9.
- [5] 2009, Sedlar, M., Zima, P. and Muller, "CFD analysis of cavitation erosion potential in hydraulic machinery," *3rd IAHR International Meeting of the Workgroup on Cavitation and Dynamics Problems in Hydraulic Machinery and System*, Brno, Czech Republic.
- [6] 2009, Dular, M. and Coutier-Delgosha, O., "Numerical modeling of cavitation Erosion," *International Journal for Numerical Methods in Fluid*, Vol.61, pp.1388-1410.
- [7] 2009, Ochiai, N., Iga, Y., Nohmi, M. and Iko-hagi, T., "Numerical prediction of cavitation erosion in cavitating flow," *7th International Symposium on Cavitation*, Ann Arbor, Michigan, USA.
- [8] 2002, Berchiche, N., Franc, J.P. and Michel, J.M., "A cavitation erosion model for ductile materials," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.124, pp.601-606.
- [9] 2007, Dular, M., Stoffel, B. and Sirok, B., "Development of

- a cavitation erosion model," *WEAR*, Vol.261, pp.642-655.
- [10] 2008, Hattori, S. and Kishimoto, M., "Prediction of cavitation erosion on stainless steel components in centrifugal pumps," *WEAR*, Vol.265, pp.1870-1874.
- [11] 2008, Szkodo, M., "Mathematical description and evaluation of cavitation erosion resistance of materials," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol.164-165, pp.1631-1636.
- [12] 2009, van Terwisga, T.J.C., Fitzsimmons, P.A., Ziru, L. and Jan Foeth, E., "Cavitation erosion - a review of physical mechanisms and erosion risk models," *7th International Symposium on Cavitation*, Ahn Arbor, Michigan, USA.
- [13] 2012, Park, S. and Rhee, S.H., "Computational analysis of turbulent super-cavitating flow around a two-dimensional wedge-shaped cavitator geometry," *Computers & Fluids*, Vol.70, pp.73-85.
- [14] 2012, Park, S., Rhee, S.H. and Shin, B.R., "Pressure-based solver for incompressible and isothermal compressible flows with cavitation," *8th International Symposium on Cavitation*, Singapore.
- [15] 2013, Park, S. and Rhee, S.H., "Numerical analysis of the three-dimensional cloud cavitating flow around a twisted hydrofoil," *Fluid Dynamics Research*, Vol.45, No.1, pp.015502.1-20.
- [16] 1971, Plesset, M.S. and Chapman, R.B., "Collapse of an initially spherical vapor cavity in the neighborhood of a solid boundary," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.47, pp.283-290.
- [17] 1995, Brennen, C.E., *Cavitation and bubble dynamics*, 1st ed. Oxford University Press, Oxford, UK.
- [18] 1975, Hinze, J.O., *Turbulence*, 2nd Ed. McGraw Hill, New York, USA.
- [19] 1983, Lush, P.A., "Impact of a liquid mass on a perfectly plastic solid," *Journal of Fluid Mechanics*, Vol.135, pp.373-387.
- [20] 2011, Keil, T., Pelz, P.F., Cordes, U. and Ludwig, G., "Cloud cavitation and cavitation erosion in convergent divergent nozzle," *WIMRC 3rd International Cavitation Forum*, University of Warwick, UK.
- [21] 2009, Franc, J.P., "Incubation time and Cavitation erosion rate of work-hardening materials," *Journal of Fluids Engineering*, Vol.131, pp.021303.1-4.
- [22] 2009, Pfitsch, W., Gowing, S., Fry, D., Donnelly, M. and Jessup, S., "Development of measurement techniques for studying propeller erosion damage in severe wake fields," *9th International Symposium on Cavitation*, Ahn Arbor, Michigan, USA.