

# 수중익형 주변 유동장에서의 공동현상과 유동소음에 대한 수치적 연구

## Numerical Investigation of Cavitation Flow Around Hydrofoil and Its Flow Noise

김 상 현\* · 정 철 응† · 박 원 규\* · 설 한 신\*\*

Sanghyeon Kim, Cheolung Cheong, Warn-Gyu Park and Hanshin Seol

(Received November 11, 2015 ; Revised February 1, 2016 ; Accepted February 1, 2016)

**Key Words** : Cavitation(공동현상), Homogeneous Mixture Model(균질 혼합 모델), Hydrofoil(수중익형), Hydro-acoustics(수중소음)

### ABSTRACT

Underwater cavitation is one of the most important issues because it causes not only vibration and erosion of submerged bodies but also significant flow noise problems. In this paper, flow noise due to cavitation flows around the NACA66 MOD hydrofoil is numerically investigated. The cavitation flow simulation is conducted using the Reynolds-Averaged Navier-Stokes equations based on finite difference methods. To capture the cavitation phenomena accurately and effectively, the homogeneous mixture model with the Merkle's cavitation model is applied. The predicted results are compared with available experimental data in terms of pressure coefficients and volume fraction, which confirms the validity of numerical results. Based on flow field analysis results, hydro-acoustic noise field due to the cavitation flow is predicted using the Ffowcs-Williams and Hawkings equation derived from the Lighthill's acoustic analogy. The typical lift dipole propagation patterns are identified.

### 1. 서 론

유동장 내 물체의 이동이나 추진기의 회전에 의해 유체의 국부 압력이 증기압(vapor pressure) 이하로 내려가게 되면 유체의 상(phase)이 액체에서 기체로 변하게 되고, 이를 공동현상(cavitation)이라고 부른다. 이러한 공동현상은 추진기 등의 추력을 감소시키는 물론이고, 진동 및 파손을 발생시킨다. 또한 수중 추진기에서 발생하는 소음의 주요한 원인이 되기 때문에, 공동현상에 대한 물리적 이해는 필수

적이라 할 수 있다.

이를 위해 많은 연구자들은 수치적 방법과 실험적 방법을 통해 수중에서 발생하는 공동현상을 연구하고 있다. Ji 등<sup>(1)</sup>, Leroux 등<sup>(2)</sup>, Park 등<sup>(3)</sup>은 수치적방법을 통해 hydrofoil 주변에서 발생하는 공동현상에 대한 연구를 수행하였다. Subhas 등<sup>(4)</sup>, Soel 등<sup>(5)</sup>, Zhu<sup>(6)</sup>, Gaggero 등<sup>(7)</sup>은 선박추진기에서 발생하는 공동현상에 대한 수치적해석을 수행한 바 있다. Hejranfar 등<sup>(8)</sup>, Zhang 등<sup>(9)</sup>, Park 등<sup>(10)</sup>, Merkle 등<sup>(11)</sup>은 공동현상을 모사하기위한 공동모델에 대한 연구를 수행하였으며, Shen 등<sup>(12)</sup>, Arndt 등<sup>(13)</sup>은 실험적방법을 통해 공동현

† Corresponding Author ; Member, Pusan National University  
E-mail : ccheong@pusan.ac.kr

\* Pusan National University

\*\* Korea Research Institute of Ships & Ocean engineering

‡ Recommended by Editor Il Kwon Oh

© The Korean Society for Noise and Vibration Engineering

상에 대한 연구를 수행한 바 있다.

한편, 공동현상에 의해 발생하는 수중 유동소음에 관한 수치적 연구는 크게 Lighthill<sup>(14,15)</sup>의 음향상사법(acoustic analogy)에 기초한 Ffowcs-Williams and Hawkings(FW-H)방정식<sup>(16)</sup>을 적용한 연구와 Rayleigh-Plesset<sup>(17)</sup> 방정식에 기초한 bubble dynamics를 적용한 연구로 나눌 수 있다. 전자의 경우, Seol 등<sup>(18,19)</sup>, Ianniello 등<sup>(20,22)</sup>의 연구가 대표적이며, 후자의 경우 Hsiao 등<sup>(23-25)</sup>의 연구가 대표적이라 할 수 있다.

이 연구에서는 이러한 공동현상과 이로 인해 발생하는 수중 유동소음을 연구하기 위해, 먼저 3차원 비정상 비압축성 Reynolds-Averaged Navire-Stokes (RANS) 방정식을 이용한 수치적 기법을 적용하여 hydrofoil 주변의 유동장을 해석하고 음향상사법을 적용하였다. 유체의 상 변화를 모사하기 위해, Merkel 등<sup>(11)</sup>이 제안한 공동모델을 사용하였고 해석한 유동장정보를 바탕으로 Lighthill의 음향상사법<sup>(14,15)</sup>에 기초한 FH-W방정식을 이용하여 수중소음을 예측하였다<sup>(16)</sup>.

## 2. 연구 대상 및 지배방정식

### 2.1 대상 Hydrofoil

Hydrofoil 주변 유동장에서 발생하는 공동현상을 수치적으로 연구하기 위해, Leroux 등<sup>(2)</sup>의 연구를 참조하여 NACA66 MOD hydrofoil을 대상으로 선정하였으며, chord length, C는 0.15 m이다.

### 2.2 해석격자

Fig. 1은 해석에 사용된 계산 영역을 나타내고 있다. Hydrofoil 주변의 유동장을 해석하기 위해 3차원

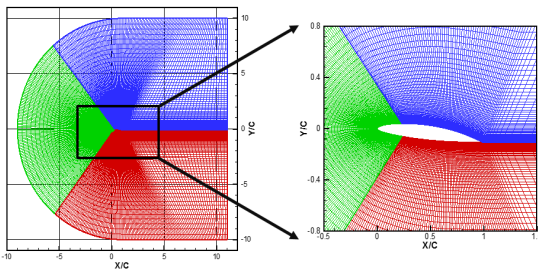


Fig. 1 Computational domain

유동장을 구성하였으며, C-type과 H-type의 정렬격자를 사용하였다. 해석에 사용된 격자의 개수는 hydrofoil의 chord 방향으로 360개, 수직방향으로 100개, span방향으로 15개를 사용하였다. 공동현상이 주로 발생하는 hydrofoil 주변에는 보다 조밀한 해석 격자를 생성하였으며, 첫 번째 격자의 크기는  $y^+ \approx 30$ 을 만족할 수 있도록 지정하였다.

### 2.3 지배방정식 및 경계조건

이 연구에서는 hydrofoil 주변 유동장에서 발생하는 공동현상을 수치적으로 연구하기 위해, 3차원 비정상 비압축성 RANS 방정식을 해석하였다. 아래 식은 일반화된 좌표계에서 나타낸 3차원 비정상 비압축성 RANS 방정식을 나타내고 있다.

$$\Gamma_e \frac{\partial \hat{Q}}{\partial t} + \Gamma \frac{\partial \hat{Q}}{\partial \tau} + \frac{\partial (\hat{E} - \hat{E}_v)}{\partial \xi} + \frac{\partial (\hat{F} - \hat{F}_v)}{\partial \eta} + \frac{\partial (\hat{G} - \hat{G}_v)}{\partial \zeta} = \hat{S} \quad (1)$$

$$\hat{Q} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} p \\ u \\ v \\ w \\ \alpha_l \\ \alpha_g \end{pmatrix}, \quad \hat{S} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \left( \frac{1}{\rho_l} - \frac{1}{\rho_v} \right) \\ \rho_m g_x \\ \rho_m g_y \\ \rho_m g_z \\ (\dot{m}^+ + \dot{m}^-) \frac{1}{\rho_l} \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{E} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} U \\ \rho_m uU + \xi_x p \\ \rho_m vU + \xi_y p \\ \rho_m wU + \xi_z p \\ \alpha_l U \\ \alpha_g U \end{pmatrix}, \quad \hat{E}_v = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ \xi_x^\tau \tau_{xx} + \xi_y^\tau \tau_{xy} + \xi_z^\tau \tau_{xz} \\ \xi_x^\tau \tau_{yx} + \xi_y^\tau \tau_{yy} + \xi_z^\tau \tau_{yz} \\ \xi_x^\tau \tau_{zx} + \xi_y^\tau \tau_{zy} + \xi_z^\tau \tau_{zz} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{F} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} V \\ \rho_m uV + \eta_x p \\ \rho_m vV + \eta_y p \\ \rho_m wV + \eta_z p \\ \alpha_l V \\ \alpha_g V \end{pmatrix}, \quad \hat{F}_v = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ \eta_x^\tau \tau_{xx} + \eta_y^\tau \tau_{xy} + \eta_z^\tau \tau_{xz} \\ \eta_x^\tau \tau_{yx} + \eta_y^\tau \tau_{yy} + \eta_z^\tau \tau_{yz} \\ \eta_x^\tau \tau_{zx} + \eta_y^\tau \tau_{zy} + \eta_z^\tau \tau_{zz} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{G} = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} W \\ \rho_m u W + \zeta_x p \\ \rho_m v W + \zeta_y p \\ \rho_m w W + \zeta_z p \\ \alpha_l W \\ \alpha_g W \end{pmatrix}, \quad \hat{G}_v = \frac{1}{J} \begin{pmatrix} 0 \\ \zeta_x \tau_{xx} + \zeta_y \tau_{xy} + \zeta_z \tau_{xz} \\ \zeta_x \tau_{yx} + \zeta_y \tau_{yy} + \zeta_z \tau_{yz} \\ \zeta_x \tau_{zx} + \zeta_y \tau_{zy} + \zeta_z \tau_{zz} \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}$$

여기에서,  $\hat{Q}$  는 유동벡터,  $\hat{S}$  는 소스(source),  $\hat{E}$ ,  $\hat{F}$ ,  $\hat{G}$  는 대류(convective flux),  $\hat{E}_v$ ,  $\hat{F}_v$ ,  $\hat{G}_v$  는 점성(viscous flux)을 나타내는 항이다. 또한  $p$ 는 압력,  $u, v, w$ 는 각각  $x, y, z$ 방향의 속도성분,  $\rho$ 는 밀도,  $\alpha$ 는 체적분율(volume fraction)을 나타낸다. 각 항의 하첨자  $m, l, v, g$ 는 각각 혼합상, 액체상, 증기상, 기체상을 나타낸다.

식 (1)의 우변  $\hat{S}$  항은 공동현상을 수치적으로 해석하기 위한 소스 항으로, 공동현상이 발생할 경우 상변화(phase change)에 의한 질량 전달(mass transfer)을 수치적으로 나타내기 위한 항이다. 이 연구에서는 이를 위해, 다음 식과 같은 Merkle 등<sup>(11)</sup>이 제안한 공동모델(cavitation model)을 사용하였다. 여기서,  $\dot{m}^+$ 는 기상에서 액상으로의 질량 전달(condensation)을,  $\dot{m}^-$ 는 액상에서 기상으로의 질량 전달(evaporation)을 나타내고 다음 식과 같이 모델링하였다.

$$\dot{m}^+ = \frac{C_{Pprod} \rho_v \alpha_v}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 t_\infty} \max[p - p_v, 0] \quad (2)$$

$$\dot{m}^- = \frac{C_{Pdest} \rho_l \alpha_l}{\frac{1}{2} \rho_\infty U_\infty^2 t_\infty} \min[p - p_v, 0] \quad (3)$$

지배방정식은 유한차분법(finite difference method)으로 이산화하였다. 시간 차분항의 계산을 위해 2nd order backward difference scheme을 사용하였으며, inviscid항은 MUSCL algorithm을 적용한 2nd order UPWIND scheme, viscous항은 2nd order central difference scheme을 적용해 계산하였다. 유동장의 입구에는 고정된 유속을 지정해주었으며, 그 외 다른 변수들은 외삽하여 사용하였다. 반면, 출구에는 고정된 압력을 지정해주었고, 입구와 마찬가지로 다른 변수들은 외삽하였다.

유동장 해석결과를 바탕으로 hydrofoil 주변에서 발생하는 수중소음을 예측하기 위해 FW-H 방정식을 사용하였다. FW-H 방정식은 Lighthill<sup>(14,15)</sup>의 음향상사(acoustic analogy)에 기초한 방정식으로 다음 식과 같다<sup>(16)</sup>.

$$4\pi c^2 \rho'(\vec{x}, t) = \frac{\partial}{\partial t} \int_S \frac{\rho_0 \vec{v} \cdot \vec{n}}{r|1-M_r|} dS(\vec{\eta}) - \frac{\partial}{\partial x_i} \int_S \frac{p_{ij} n_j}{r|1-M_r|} dS(\vec{\eta}) + \frac{\partial^2}{\partial x_i \partial x_j} \int_V \frac{T_{ij}}{r|1-M_r|} d^3\vec{\eta} \quad (4)$$

여기에서 우변의 세 항은 각각 소음원의 체적변화에 의한 monopole항, 소음원 표면 압력에 의한 dipole항, 유동장내 난류에 의한 quadrupole항을 나타낸다. 이 중, quadrupole항은 유속과 음속의 비로 정의되는 Mach 수가 매우 낮은 유동장에서는 그 영향을 무시할 수 있다. 또한 주요 소음원이라 생각되는 hydrofoil 주변 cavitation 체적이 시간에 따라 일정하게 유지되므로 monopole항 또한 무시하였다. 그러므로, hydrofoil 표면에서의 압력섭동에 의한 dipole항을 주요 소음원으로 판단하였고, hydrofoil 표면에서의 양력과 항력을 이용하여 모델링 하였다.

### 3. 해석 결과

#### 3.1 유동장 해석 결과

앞선 절에서 언급한 수치적 기법을 바탕으로 hydrofoil 주변 유동장에서 발생하는 cavitation 현상을 해석하였다. Fig. 2는  $\sigma$ (cavitation number)가 0.34이고, 받음각(angle of attack)이 1°일 때 나타나는 액체 체적분율(liquid volume fraction,  $\alpha_l$ )을 나타내고 있다.

$$\sigma = \frac{p_\infty - p_v}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (5)$$

$\alpha_l$ 은 0과 1사이의 값을 가지는 무차원수로, 그 값이 0일 경우 순수한 기체를 의미하고, 1일 경우

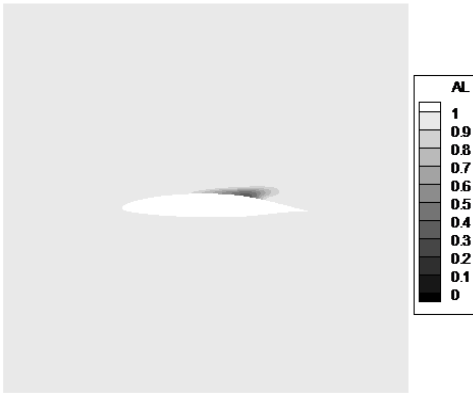


Fig. 2 Predicted liquid volume fraction contour

순수한 액체를 의미한다. 즉, 그 값이 1보다 낮은 값을 가지는 영역에서는 cavitation이 발생하였음을 나타내는 지표라 할 수 있다. Hydrofoil에서는 suction side에서 상대적인 저압 영역이 발생하게 되고, 포화 증기압 이하의 압력에서는 cavitation이 발생하게 된다. Fig. 2에서 확인할 수 있듯이 이 연구에서도 hydrofoil suction side에서 cavitation이 발생하였다.

물체의 표면에서 발생하는 cavitation을 확인하는 또 다른 값으로는 다음 식으로 정의되는 압력계수 (pressure coefficient,  $C_p$ )를 들 수 있다.

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2} \rho U_\infty^2} \quad (6)$$

일반적으로 cavitation이 발생하는 hydrofoil 표면에서는  $C_p$ 와  $\sigma$ 가 같은 값을 가진다. Fig. 3은 대상 NACA66 MOD hydrofoil에서 cavitation이 발생하였을 때, hydrofoil suction side에서 예측한  $C_p$  값을 Park 등<sup>(3)</sup>의 수치결과 및 Shen 등<sup>(12)</sup>의 실험결과와 함께 나타내었다. 그 결과,  $0.3 \leq x/C \leq 0.8$  영역에서 cavitation이 발생하고 있음을 확인할 수 있다. 위와 같은 결과를 통해, 이 연구에서 적용한 수치해석 기법이 hydrofoil 주변에서 cavitation이 발생하는 유동장을 정확히 예측하고 있는 것을 확인하였다.

3.2 수중소음 해석 결과

유동장 해석 결과를 바탕으로 hydrofoil 주변 유동장에서 발생하는 수중소음을 예측하였다. 먼저, 해당 해석기법의 검증을 위해, 원형 실린더를 고려하였다.

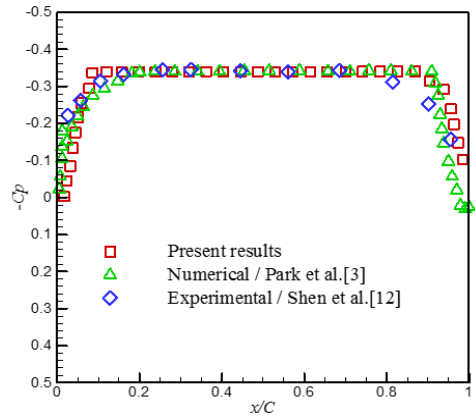


Fig. 3 Comparison of pressure coefficient distribution; □: present results, △: numerical results by Park et al.<sup>(3)</sup>, ◇: experimental results by Shen et al.<sup>(12)</sup>

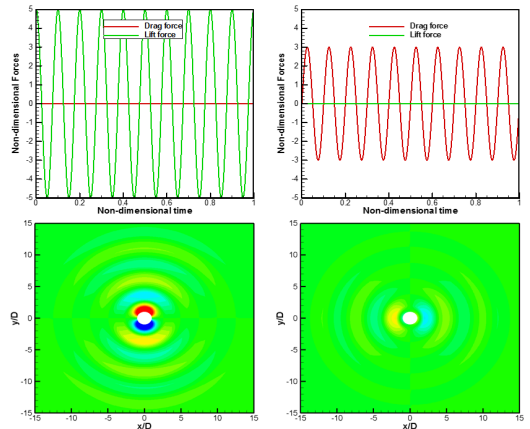


Fig. 4 Hydro-acoustic noise prediction for circular cylinder case

Fig. 4의 위쪽 그래프는 임의로 설정한 실린더 표면에서의 양력 및 항력을 나타내고 있으며, 아래 contour는 해당 힘을 사용하여 예측한 유동장내에서의 소음을 표시하였다. Contour에서 확인할 수 있듯이, 양력만 사용한 경우, 그리고 항력만 사용한 경우 모두에서 적합한 소음방사 패턴이 나타남을 확인할 수 있다.

다음으로, 실제 hydrofoil 표면에서 발생하는 양력 및 항력을 이용하여 수중소음을 예측하였다. Fig. 5는 hydrofoil로부터 10C 및 30C 거리에서 예측한 소음방사 방향성 및 패턴을 나타내고 있으며, Fig. 6은 특정 위치에서의 음압 스펙트럼을 나타내었다.

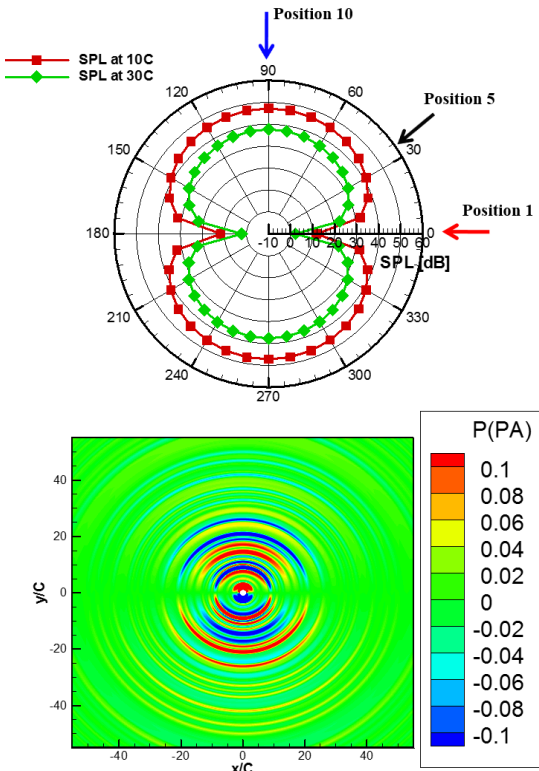


Fig. 5 Predicted noise directivity and propagating patterns

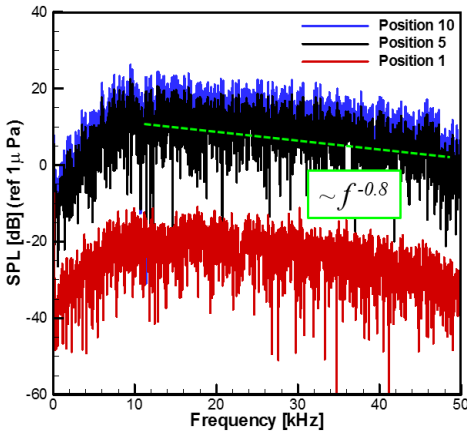


Fig. 6 Predicted noise spectrum at three points

먼저, 소음방사 방향성 및 패턴을 보면, 전형적인 lift dipole형태로 소음이 방사되는 것을 볼 수 있다. 이는 hydrofoil 표면에서의 양력에 항력에 비해 매우 크기 때문으로, Leroux 등<sup>(2)</sup>의 실험에서도 이와

비슷한 경향이 나타남을 확인할 수 있다. 다음으로, 소음장 내 특정 세 위치에서의 음압 스펙트럼을 예측하였다. 세 위치는 각각, 입사유동과 이루는 각도가 0°, 40°, 90°인 위치이다. 스펙트럼에서 볼 수 있듯이 약 10 kHz를 기준으로 소음레벨이 감소하는 것을 확인할 수 있다. Brennen<sup>(17)</sup>에 따르면, 많은 연구자들이 실험을 수행한 결과 cavitation이 발생하는 유동장의 경우  $f^{-0.5} \sim f^{-2}$ 의 경향을 보이며 소음이 줄어드는 것으로 확인되었다. 이 연구의 결과 또한 이와 비슷한 수준의 경향을 나타내는 것으로 보아, 소음 예측을 위해 적용한 해석 기법이 hydrofoil 주변 유동장에서의 소음을 정확히 예측하고 있다고 판단된다.

#### 4. 결 론

이 연구에서는 hydrofoil 주변에서 발생하는 cavitation과 그에 의한 수중유동소음에 대한 수치적 연구를 수행하였다. 이를 위해 3차원 RANS 방정식을 이용하여 유동장을 해석하였고, 그 결과 실험값과 유사한 압력계수 분포를 나타내었다. 유동장 결과를 바탕으로 FW-H 방정식을 사용하여 수중방사소음을 분석하였다. Hydrofoil 표면에서의 압력섭동을 주요한 소음원으로 선정하여 FW-H 방정식을 적용한 결과, 전형적인 lift dipole형상의 소음전파 패턴을 확인할 수 있었다. 음압 스펙트럼의 주파수에 따른 감소 또한 기존 연구들의 결과와 유사한 값을 나타내었다.

#### 후 기

이 연구는 산업통상자원부의 산업융합원천기술개발사업(10045337)에 의하여 지원되었습니다. 또한 이 연구는 국방과학연구소(ADD)의 지원을 받아 수행한 과제입니다.

#### References

(1) Ji, B., Luo, X. W., Roger, E. A. A., Peng, X. and Wu, Y., 2015, Large Eddy Simulation and Theoretical Investigations of the Transient Cavitating Vortical Flow Structure Around a NACA66 Hydrofoil,

International Journal of Multiphase Flow, Vol. 68, No. 1, pp. 121~134.

(2) Leroux, J., Astolfi, J. A. and Billard, J. Y., 2004, An Experimental Study of Unsteady Partial Cavitation, Trans. ASME, Vol. 126, No. 1, pp. 94~101.

(3) Park, S. and Rhee, S. H., 2013, Numerical Analysis of the Three-dimensional Cloud Cavitating Flow Around a Twisted Hydrofoil, Fluid Dyn. Res., Vol. 45, No. 1, pp. 015502(20pp).

(4) Subhas, S., Saji, V. F., Ramakrishna, S. and Das, H. N., 2012, CFD Analysis of a Propeller Flow and Cavitation, International Journal of Computer Applications, Vol. 55, No. 16, pp. 26~33.

(5) Seol, H., 2006, Numerical Prediction of Underwater Propeller Noise, Proceedings of the KSNVE Annual Spring Conference, pp. 314~317.

(6) Zhu, Z., 2015, Numerical Study on Characteristic Correlation between Cavitating Flow and Skew of Ship Propellers, Ocean Engineering, Vol. 99, No. 1, pp. 63~71.

(7) Gaggero, S., Tani, G. Viviani, M. and Conti, F., 2014, A Study on the Numerical Prediction of Propellers Cavitating Tip Vortex, Ocean Engineering, Vol. 92, No. 1, pp. 137~161.

(8) Hejranfar, K., Ezzatneshan, E. and Fattah-Hesari K., 2015, A Comparative Study of Two Cavitation Modeling Strategies for Simulation of Inviscid Cavitating Flows, Ocean Engineering, Vol. 108, No. 1, pp. 257~275.

(9) Zhang, X. B., Zhu, J. K., Qiu, L. M. and Zhang, X. J., 2015, Calculation and Verification of Dynamical Cavitation Model for Quasi-steady Cavitating Flow, International Journal of Heat and Mass Transfer, Vol. 86, No. 1, pp. 294~301.

(10) Park, S. and Rhee, S. H., 2010, Investigation for the Characteristics of Cavitation Modeling for Computational Fluid Dynamics, Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 47, No. 5, pp. 657~669.

(11) Merkle, C. L., Feng, J. Z. and Buelow, P. E. O., 1998, Computational Modeling of the Dynamics of Sheet Cavitation, Proceedings of the 3rd International Symposium on Cavitation, Vol. 2, pp. 307~311.

(12) Shen, Y. T. and Dimotakis, P. E., 1989, The

Influence of Surface Cavitation on Hydrodynamic Forces, 22nd American Towing Tank Conference.

(13) Arndt, R. E. A., Arakeri, V. H. and Higuchi, H., 1991, Some Observations of Tip-vortex Cavitation, Journal of Fluid Mechanics, Vol. 229, No. 1, pp. 269~289.

(14) Lighthill, M. J., 1952, On Sound Generated Aerodynamically. I. General theory, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 211, No. 1107, pp. 564~587.

(15) Lighthill, M. J., 1954, On Sound Generated Aerodynamically. II. Turbulence as a Source of Sound, Proceedings of the Royal Society of London. A. Mathematical and Physical Sciences, Vol. 222, No. 1148, pp. 1~32.

(16) Ffowcs Williams, J. E. and Hawkings, D. L., 1969, Sound Generation by Turbulence and Surfaces in Arbitrary Motion, Philosophical Transactions of the Royal Society, Vol. 264, No. 1151, pp. 321~342.

(17) Plesset, M. S., 1948, Dynamics of Cavitation Bubbles, Journal of Applied Mechanics, Vol. 16, No. 1, pp. 228~231.

(18) Seol, H., Suh, J. C. and Lee, S., 2005, Development of Hybrid Method for the Prediction of Underwater Propeller Noise, Journal of Sound and Vibration, Vol. 288, No. 1, pp. 345~360.

(19) Seol, H., 2013, Time Domain Method for the Prediction of Pressure Fluctuation Induced by Propeller Sheet Cavitation: Numerical Simulations and Experimental Validation, Ocean Engineering, Vol. 72, No. 1, pp. 287~296.

(20) Ianniello, S., Muscari, R. and Di Mascio, A., 2013, Ship Underwater Noise Assessment by the Acoustic Analogy, Part I: Nonlinear Analysis of a Marine Propeller in a Uniform Flow, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 18, No. 4, pp. 547~570.

(21) Ianniello, S., Muscari, R. and Di Mascio, A., 2014, Ship Underwater Noise Assessment by the Acoustic Analogy, Part II: Hydroacoustic Analysis of a Ship Scaled Model, Journal of Marine Science and Technology, Vol. 19, No. 1, pp. 52~74.

(22) Ianniello, S., Muscari, R. and Di Mascio, A., 2013, Ship Underwater Noise Assessment by the Acoustic Analogy, Part III: Measurements Versus

Numerical Predictions on a Full-scale Ship, *Journal of Marine Science and Technology*, Vol. 19, No. 2, pp. 125~142.

(23) Hsiao, C. T. and Chahine, G. L., 2005, Scaling of Tip Vortex Cavitation Inception Noise with a Bubble Dynamics Model Accounting for Nuclei Size Distribution, *Journal of Fluids Engineering*, Vol. 127, No. 1, pp. 55~65.

(24) Hsiao, C. T. and Chahine, G. L., 2012, Effect of a Propeller and Gas Diffusion on Bubble Nuclei Distribution in a Liquid, *Journal of Hydrodynamics*, Vol. 24, No. 6, pp. 809~822.

(25) Hsiao, C. T., Ma, J. and Chahine, G. L., 2015, Simulation of Sheet and Tip Vortex Cavitation on a Rotating Propeller using a Multiscale Two-phase Flow Model, *Forth International Symposium on Marine Propulsors*, pp. 1~11.

(26) Brennen, C. E., 2013, *Cavitation and Bubble Dynamics*, Cambridge University Press.



**Sanghyeon Kim** received his B.S and M.S degrees in Mechanical Engineering from Pusan National University in 2011 and 2013, respectively. He then continued his study as a Ph. D candidate in Pusan National University.



**Cheolung Cheong** received his B.S. in Aerospace Engineering from Seoul National University in 1997. He received his M.S. and Ph. D degrees in Mechanical and Aerospace Engineering from Seoul National University, Korea, in 1999 and 2003. He is now a professor at the School of Mechanical Engineering, Pusan National University in Busan, Korea. Dr. Cheong's current research interests include fan broadband noise, compressor noise, automobile wind noise, wind turbine noise, underwater cavitation noise and computational aeroacoustics.