한국음향학회지 제41권 제3호 pp. 268~277 (2022)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.41, No.3 (2022)
https://doi.org/10.7776/ASK.2022.41.3.268

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

선박 추진시스템 유동 소음원 상대적 기여도 분석

Investigation on relative contribution of flow noise sources of ship propulsion system

하준범,[1] 구가람,[1] 정철웅,[1†] 설한신,[2] 정홍석,[2] 정민석[2]

(Junbeom Ha,[1] Garam Ku,[1] Cheolung Cheong,[1†] Hanshin Seol,[2] Hongseok Jeong,[2] and Minseok Jung[2])

[1]부산대학교 기계공학부, [2]한국해양과학기술원부설 선박해양플랜트연구소

(Received March 7, 2022; accepted April 19, 2022)

초 록: 본 논문에서는 KVLCC2 선체 축소모형에 설치된 추진시스템의 세부 구성품별 유동 소음원을 분석하였으며, 각각의 소음원이 수중방사소음에 미치는 영향에 대해 정량적으로 분석하였다. 수치 해석 영역은 실험 결과와의 비교를 위하여 선박해양플랜트연구소 대형 캐비테이션 터널의 시험부와 동일하게 설정하였다. 먼저 유동장내 소음원을 정확하게 모사하기 위하여 고정밀 해석기법인 비압축성 다상 Delayed Detached Eddy Simulation 방법을 적용하였고, 유동해석 결과를 기반으로 Ffowcs Williams and Hawkings 적분방정식을 사용하여 수중방사소음을 예측하였으며, 터널 실험결과와의 비교를 통해 해석절차의 유효성을 확인하였다. 추진시스템의 유동 소음원별 영향을 정량적으로 비교하기 위하여 추진기 날개 끝-와류 공동, 날개 표면 그리고 방향타 표면을 소음원 영역으로 선정하였으며, 음압과 파워 스펙트럼 밀도, 음향 파워를 비교하였다. 공동에 의한 홀극 소음원의 기여도가 추진기 날개 및 방향타에 의한 쌍극 소음원에 비해 수중방사소음에 크게 기여하였으며, 추진기 후류의 영향으로 방향타에 의한 기여도가 추진기 보다 더 크게 발생함을 확인하였다.

핵심용어: 수중방사소음, 수중추진기 소음, 유동소음, 공동소음, 방향타

ABSTRACT: In this study, each component of flow noise source of underwater propeller installed to the scale model of the KVLCC2 is investigated and the effect of each noise source on underwater-radiated noise is quantitatively analyzed. The computation domain is set to be the same as the test section of the large cavitation tunnel in the Korea Research Institute of Ship and Ocean Engineering. First, for the high-resolution computation of flow field which is noise source region, the incompressible multiphase Delayed Detached Eddy Simulation is performed. Based on flow simulation results, the Ffowcs Williams and Hawkings integral equation is used to predict underwater-radiated noise and its validity is confirmed through the comparison with the tunnel experiment result. For the quantitative comparison on the contribution of each noise source, the spectral levels of sound pressure and power levels predicted using propeller tip-vortex cavitation, blade surface and rudder surface as the integral region of noise sources are investigated. It is confirmed that the cavitation which is monopole noise source significantly contributed to the underwater-radiated noise than propeller blades and rudder which is dipole noise source, and the rudder have more contribution than propeller blades due to the influence of the propeller wake.
Keywords: Underwater radiated noise, Underwater propeller noise, Flow noise, Cavitation noise, Rudder

PACS numbers: 43.35.Ei, 43.50.Lj

†**Corresponding author:** Cheolung Cheong (ccheong@pusan.ac.kr)
School of Mechanical Engineering Pusan National University, 2, Busandaehak-ro 63beon-gil, Geumjeong-gu, Busan 46241, Republic of Korea
(Tel: 82-51-510-2311, Fax: 82-51-514-7640)

Copyrightⓒ2022 The Acoustical Society of Korea. This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서 론

최근 활발한 국제무역으로 인해 선박을 이용한 해상 물류 운송이 급증하고 있으며, 군수 분야의 고성능 수중 추진체에 대한 수요와 맞물려 선박을 비롯한 잠수함의 대형화와 고속화가 지속되고 있다. 일반적으로 고속 회전을 통해 수중 추진기의 수력학적 성능을 향상시킬 수 있으나, 고속 회전에 따른 국부적인 압력 저하는 추진기 표면에 얇은 층 공동, 구름 공동, 날개 끝 와류공동(Tip Vortex Cavitation, TVC)과 같이 다양한 형태의 공동 현상을 유발한다. 특히 공동은 소음 관점에서는 강한 유동 소음원이므로 비공동 조건에 비해 수중으로 높은 수준의 소음을 방사시키며, 해양 생태계에 존재하는 자연적인 음향 신호를 교란시키는 주요 원인으로 인식되고 있다.[1,2] 이러한 인위적인 수중방사소음으로 인해 해양 포유류의 집단 폐사 및 기형 물고기 발생과 같은 해양 생태계 파괴 사례가 보고되고 있으며,[3,4] 이를 방지하기 위해 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)에서는 수중방사소음에 대한 규제 방안을 논의하고 있다.[5]

이러한 규제에 대응하기 위하여 고성능 저소음 선박 추진기에 대한 연구가 필수적이며, 추진기 소음을 실험적, 해석적으로 보다 정확하게 추정함으로써 설계단계에서부터 추진기의 저소음 설계를 달성하기 위한 시도가 활발히 진행되고 있다.

Ahn *et al*.[6]은 8800TEU 급 컨테이너선 모형을 대상으로 대형 캐비테이션 터널(Large Cavitation Tunnel, LCT)에서 추진기 성능 평가를 수행하였으며, 추진 및 공동 성능이 개선된 추진기를 개발하였다. Park *et al*.[7]은 대형 캐비테이션 터널에서 모형 시험을 통한 추진기 방사소음을 계측하였으며, 실험결과를 기반으로 실선의 수중방사소음을 추정한 바 있다.

모형 시험과 실선 계측이 지니는 경제적 한계를 해소하기 위하여 전산유체역학을 활용한 해석적 접근 방안들이 병행되고 있으며, 다양한 추진기 성능 예측 및 평가 방안들이 제시되고 있다.

Seol *et al*.[8]은 유동해석을 통해 공동 유동장을 모사하고 공동을 홀극 소음원으로 가정하는 음향상사식을 통해 얇은 층 공동에 의한 추진기 날개통과주파수(Blade Passing Frequency, BPF) 소음을 예측하였으며, 예측된 소음 결과를 중형 캐비테이션 터널에서의 실험결과와 비교 및 검증하였다. Park *et al*.[9]은 STAR CCM+ 상용코드를 활용하여 MR-Tanker 선을 대상으로 실선과 모형선 간의 반류장 계측결과를 비교하였으며, 추진기 공동 형상 및 변동압력 수준을 예측한 바 있다. Ku *et al*.[10]는 고스큐 추진기를 대상으로 날개 끝 와류 공동과 공동 소음을 정확하게 예측하기 위해 Eulerian - Lagrangian 단방향 연성 해석기법을 개발하였으며, 날개 끝 와류 공동을 기포동역학 기반의 구형 공동 기포로 모사함으로써 공동 소음을 예측하였다. Cho *et al*.[11]은 추진기의 날개 끝 와류 공동을 모사하기 위해 상용코드인 Ansys Fluent 를 활용하여 균일혼상류 가정의 비압축성 Delayed Detached Eddy Simulation(DDES)해석을 수행하였으며, 사중극자 보정 Ffowcs Williams and Hawkings(FW-H) 음향상사법[12]을 통해 수중방사소음을 모사한 바 있다.[13] Ha *et al*.[14]은 공동의 압축성을 반영하여 공동 유동장과 공동 소음을 예측하고 비압축성 해석 결과 및 실험과 비교함으로써 추진기 공동에 의한 수중방사소음 예측 시 공동 압축성 효과의 유효성을 고찰한 바 있다.

기존의 추진기 수중방사소음 예측 연구는 대부분 추진기만을 주요 대상으로 고려하고 있으나,[15,16] 실제 추진시스템에서는 추진기에 의해 형성된 유동장이 방향타와 같은 선체 부가물을 지나며 상호작용을 일으킨다. 방향타를 단순한 수중익형으로 근사하여 비압축성 Reynolds averaged Navier-Stokes(RANS) 방정식과 음향상사법을 적용함으로써 수중익형의 공동 소음을 예측하는 연구가 진행된 바 있으나,[17-24] 선박의 경우 추진기와 추진기 하류 방향에 위치한 방향타 간의 상호작용인 후류-익형 상호작용[25,26] 을 고려한 소음해석과 그 기여도 분석에 대한 연구는 전무한 수준이다.

따라서, 본 연구에서는 추진기와 방향타로 구성된 추진시스템에서 각각의 구조물이 수중방사소음에 미치는 기여도를 정량적으로 평가하였다. 먼저, 추진시스템에 의한 소음원을 보다 정확하게 모사하기 위해 고정밀 해석 기법인 비압축성 DDES 해석 기법과 균일혼상류 가정을 적용하였다. 유동해석 결과를 기반으로 FW-H 적분방정식을 사용하여 수중으로 방사되는 소음을 예측하고 실험결과와의 비교를 통

하여 그 유효성을 확인하였다. 각각의 구조물이 수중방사소음에 미치는 기여도를 분석하기 위하여 전체 소음도(Overall Sound Pressure Level, OASPL)와 음향파워 수준(Sound Power Level, PWL)을 정량적인 지표로 활용하였다.

II. 수치해석

2.1 해석 대상 및 경계 조건

연구대상은 선박해양플랜트연구소(Korea Research Institute of Ships and Ocean Engineering, KRISO)에서 수행한 모형 시험[27]과 동일한 크기의 KVLCC2 선체와 연구용으로 설계한 추진기이며, 전체 해석 영역은 대형 캐비테이션 터널의 시험부와 동일하게 설정하였다. Fig. 1에 해석 대상과 영역, 경계 조건을 나타내었으며, Table 1에 대상의 제원을 표시하였다. 수치해석에 적용된 경계조건은 입구에 속도 7 m/s, 출구에 0 Pa의 게이지 압력을 적용하였으며, 추진기의 회전수는 37.05 rps로 설정하여 공동 수 3.06에 해당하는 공동발생 조건으로 설정하였다. 또한 시험부 벽면과 선체 벽면에서의 유동 경계층을 모사하기 위해 점착 조건과 함께 프리즘 격자를 사용하였다. 또한 추진기로 유입되는 선미의 반류장을 정확히 예측하기 위해 선미쪽에 격자를 조밀하게 구성하였다. 전체적인 격자의 구성은 Fig. 2와 같으며, 무차원 벽면 거리 변수인 y^+는 터널 시험부와 선체에 30, 추진기는 5 이하가 되도록 구성하였다. 전체 격자 수는 1,400만개 수준이며, 프리즘 격자는 터널과 선체 영역에 17장, 회전 영역에 7장을 적용하였다.

2.2 지배방정식 및 수치해석기법

본 연구는 상용 프로그램인 Ansys Fluent를 사용하였으며, 균일혼상류 가정의 비압축성 기반 정상 상태 RANS 해석을 수행하여 초기값을 결정하고 이를 바탕으로 비정상 DDES 해석을 진행하였다. 균일혼상류 가정의 RANS 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho_m}{\partial t} + \nabla\left(\rho_m \vec{v}\right) = 0, \tag{1}$$

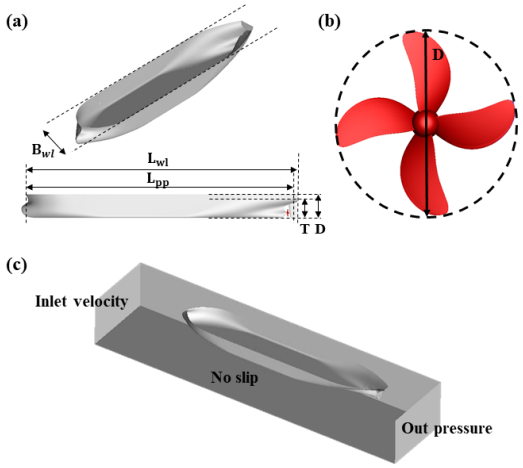

Fig. 1. (Color available online) Computational domain and geometries of KVLCC2 and propeller.

Table 1. Dimensions of LCT, KVLCC2 and propeller.

Parameter		
Test-section of LCT	Width (W)	2.8 m
	Length (L)	12.5 m
	Height (H)	1.8 m
KVLCC2	Length between perpendiculars (L_{pp})	8.114 m
	Length on waterline (L_{wl})	8.345 m
	Beam on waterline (B_{wl})	6.338 m
	Depth (D)	0.712 m
Propeller	Diameter (D)	0.250 m
	# of blade (N)	4

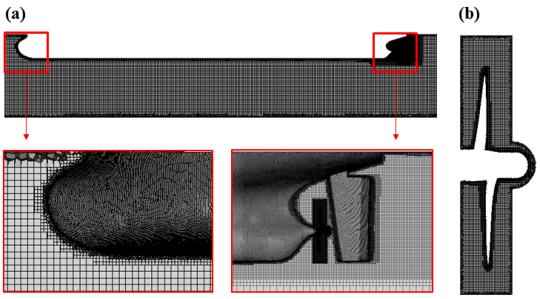

Fig. 2. (Color available online) Computational grids around (a) KVLCC2 body, (b) propeller in computation domain.

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\rho_m u_i\right) + \frac{\partial}{\partial x_j}\left(\rho u_i u_j\right) = \tag{2}$$
$$\rho_m g - \frac{\partial p}{\partial x_i} - \frac{\partial}{\partial x_i}\left(\rho_m \overline{u_i' u_j'}\right)$$
$$+ \frac{\partial}{\partial x_j}\left[\mu_m\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} - \frac{2}{3}\delta_{ij}\frac{\partial u_k}{\partial x_k}\right)\right],$$

$$\alpha_l + \alpha_v = 1, \tag{3}$$

$$\rho_m = \rho_v \alpha_v + \rho_l \alpha_l, \tag{4}$$

$$\mu_m = \mu_v \alpha_v + \mu_l \alpha_l, \tag{5}$$

여기서 아래 첨자 m은 혼상류, l은 액체, v는 증기를 의미하고, p, ρ, u, μ는 각각 압력, 밀도, 속도, 점성 계수, α는 각 상의 체적분율을 나타낸다. 공동 모델은 기포동역학에서 기포의 반경 변화 방정식인 Rayleigh-Plesset 방정식으로부터 유도되는 Schnerr -Sauer 공동 모델을 적용하였으며, 난류 모델은 *k-ω* Shear Stress Transport(SST)를 적용하였다. *k-ω* SST모델은 벽면에서는 *k-ω* 모델이 적용되어 경계층에서의 역압력 구배를 잘 예측하고, 그 외 영역은 *k-ε* 모델이 적용되어 박리된 유동 구조를 모사하며, 선행연구로부터 추진기 공동 소음 예측에 있어 해당 모델들의 타당성을 입증한 바 있다.[11,13,14]

SST-DDES는 벽면 근처의 경계층 내부는 RANS로 계산하고 경계층 외부 영역은 Large Eddy Simulation (LES)로 계산하는 복합 해석기법이며, SST-DDES의 이송방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \sigma_k \mu_t)\frac{\partial k}{\partial x_i}\right] + P_k - \frac{\rho\sqrt{k^3}}{l_{DDES}}, \tag{6}$$

$$\frac{\partial \rho \omega}{\partial t} + \frac{\partial \rho U_i \omega}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i}\left[(\mu + \sigma_k \mu_t)\frac{\partial \omega}{\partial x_i}\right] + 2(1-F_1)\rho\sigma_{\omega 2}\frac{1}{\omega}\frac{\partial k}{\partial x_i}\frac{\partial \omega}{\partial x_i} + \alpha\frac{\rho}{\mu_t}P_k - \beta\rho\omega^2, \tag{7}$$

$$l_{DDES} = l_{RANS} - f_d \max(0, l_{RANS} - l_{LES}), \tag{8}$$

$$f_d = 1 - \tanh[(C_{d1} r_d)]^{C_{d2}}, \tag{9}$$

$$r_d = \frac{\nu_T + \nu}{\kappa^2 d^2 \sqrt{0.5 \cdot (s^2 + \Omega^2)}}. \tag{10}$$

여기서 k와 ω, U는 각각 난류운동에너지, 비난류 소산율, 그리고 유속을 의미한다. l_{DDES}는 소산항의 길이 척도, f_d는 분포 함수, ν_T와 ν는 난류에 의한 동점성 계수와 매질의 동점성 계수, 그리고 κ는 Von Karman 상수를 의미한다.[28]

비정상 유동을 모사하기 위해 해석 시간 간격은 1.874344×10^{-5} 초로 설정하였으며, 추진기의 0.25° 회전 시간에 해당한다. 유체의 밀도는 물의 경우 998.2 kg/m^3, 증기의 경우 0.5542 kg/m^{3}으로 설정하였다.

2.3 FW-H 음향상사법

본 연구에서는 복합전산공력음향 해석기법을 사용하여 추진기 소음을 예측하였으며,[11-14] Lighthill의 음향상사법을 기반으로 한 FW-H 방정식은 다음과 같다.

$$4\pi p'(x,t) = \frac{\partial}{\partial t}\int_S \left[\frac{Q(y,\tau)}{r|1-M_r|}\right] dS(y) - \frac{\partial}{\partial x_i}\int_S \left[\frac{F_i(y,\tau)}{r|1-M_r|}\right] dS(y) + \frac{\partial^2}{\partial x_i x_j}\int_V \left[\frac{T_{ij}(y,\tau)}{r|1-M_r|}\right] dy. \tag{11}$$

$$where\ Q = [\rho(u_i' + U_i) - \rho_0 U_i]\hat{n}_i$$
$$F_i = [\rho u_i'(u_j' + U_j) + p\delta_{ij}]\hat{n}_i$$
$$T_{ij} = \rho u_i' u_j' + [(p - p_0) - c_0^2(\rho - \rho_0)]\delta_{ij},$$

여기서 x, y 는 각각 수음점과 소음원의 위치이며, $r = |x - y|$ 이다. t, τ 는 관찰자 시간과 지연시간이며, $\tau = t - r/c_0$이다. M_r은 소음원의 속도를 나타내며, ρ, u, p는 각각 매질의 밀도와 속도, 압력을 의미한다. 상첨자 "′ "는 섭동값, 하첨자 "$_0$"은 평균값을 의미하며, δ_{ij}는 Kronecker delta 함수, n은 적분면에서의 수직벡터, c는 음속이다.[29]

첫 번째 항은 유체 체적의 시간변화율을 소음원으로 하는 홀극 소음원을 의미하며, 두 번째 항은 유체가 물체 표면에 작용하는 압력 섭동에 의한 소음인 쌍극 소음원, 마지막 항은 난류에 의해 방사되는 사중극자 소음원이다. 저 마하수 유동에서는 사중극 소음원의 영향이 미미한 것으로 알려져 있어 본 연구에서는 홀극과 쌍극 소음원만을 고려하였다.[30]

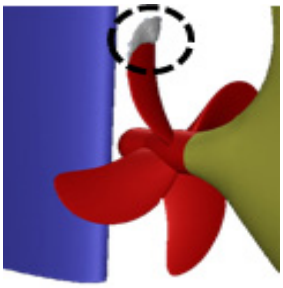

Fig. 3. (Color available online) Cavitation shape located at the tip of the propeller blade.

2.4 공동 소음 모델

본 연구에서는 추진기에서 발생하는 공동에 의한 소음 기여도를 평가하기 위해 시간에 따른 공동 체적 변화를 Compact 소음원으로 가정하여 공동 소음을 예측하였다.[31] Fig. 3에 나타낸 바와 같이 추진기 날개 끝에서 발생하는 공동 체적을 소음원 정보로 활용하였으며, 소음원은 날개 끝단에 고정되어 날개와 함께 회전한다고 가정하였다. 공동의 체적변화에 따른 수중방사소음 모델은 다음과 같다.

$$p'(\vec{x},t) = \frac{\partial}{\partial t}\left(\frac{\rho_0 \dot{Q}(t-r/c)}{4\pi r(1-M_r)}\right), \tag{12}$$

여기서 Q는 공동 체적이며, "·"은 시간 미분을 의미한다.

III. 수치해석 결과

3.1 유동해석 결과

본 연구에서 사용된 해석자원은 CPU 56코어이며, 총 10회전에 해당하는 0.27 s의 해석을 수행 후 마지막 1회전 데이터를 사용하여 결과를 분석하였다.

Fig. 4는 추진기에 유입되는 축방향 유동을 평균유속으로 무차원화하여 나타낸 반류장 분포이다. 실험은 예인 수조에서 계측되었으며, 수치 해석은 터널 영역에서 수행하였기 때문에 실험-해석 간 반류장 분포가 상이한 부분이 있으나 전체적으로 실험, 해석 모두 갈고리 형태의 유사한 분포를 보이고 있다. Fig. 5는 추진기에서 발생하는 공동을 체적분율 α= 0.1에 대해서 가시화하여 실험 결과와 비교한 그림

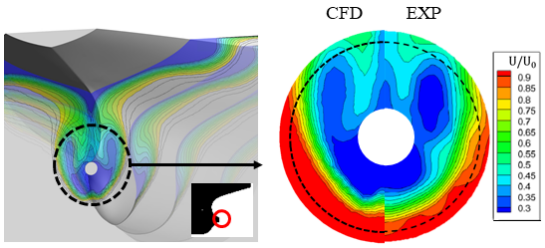

Fig. 4. (Color available online) KVLCC2 hull wake-field at propeller plane.

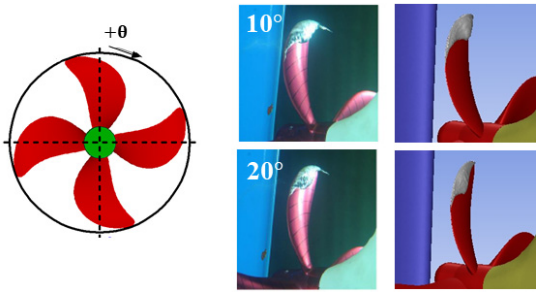

Fig. 5. (Color available online) Comparison of propeller cavitation shape between experimental and numerical results ($\alpha = 0.1$).

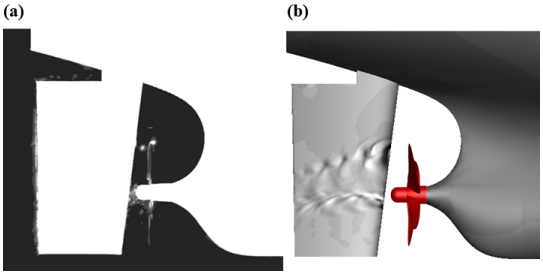

Fig. 6. (Color available online) (a) Vorticity at the propeller tip, (b) pressure perturbation on the rudder surface.

이다. 공동은 추진기 날개가 흡입면 관점에서 상단을 지날 때 날개 끝에서부터 생성되며, 각각 $\theta = 10^\circ$와 $\theta = 20^\circ$의 두 위치에 대해 실험과 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다. Fig. 6은 추진기 날개 끝에서 발생하는 와류가 평균 유동장을 따라 하류 방향으로 흘러가며 방향타에 부딪치는 것을 보여주며, 방향타 표면에서 와류 구조에 의한 압력 섭동이 발생하는 것을 알 수 있다. 이러한 추진기-방향타 간 상호작용에 의한 표면 압력 섭동은 유동 소음 관점에서 쌍극 소음원이 됨을 알 수 있다.

3.2 유동소음 해석 결과

비압축성 기반의 SST-DDES 유동해석 결과를 입력값으로 FW-H 적분방정식을 이용하여 소음해석을 수행하였다. 수음점의 위치는 대형 캐비테이션 터널 내 수중청음기의 위치와 동일한 Fig. 7(a)와 같이 설정하였다.[6,10,11] 소음원별 기여도를 분석하기 위하여 Fig. 7과 같이 소음원 데이터는 크게 4가지 영역으로 구분하여 추출하였으며, 각각 추진기와 방향타를 포함하는 투과성 적분면, 날개 끝 공동 체적 정보, 추진기 표면, 방향타 표면이다. Fig. 8은 공동 소음을 예측하기 위하여 활용된 시간에 따른 공동의 부피 변화 정보이며, 신호 처리 과정에서 발생하는 오차를 줄이기 위해 Hanning 창 함수를 적용하였다.

예측 결과의 유효성을 평가하기 위하여 파워 스펙트럼 밀도와 1/3옥타브 밴드에 대해 투과성 적분면에서의 수중방사소음 예측 결과와 실험 계측 결과를 비교하였으며, 각각 Figs. 9, 10과 같다. 실험과 해석 간 스펙트럼 경향과 에너지 수준이 잘 일치하는 것을 확인할 수 있으나, 2,000 Hz 이하의 순음성분이 해석과 시험 간에 차이가 나는 것 알 수 있으며, 이는 시험에서 추진기를 회전시키기 위한 모터의 소음과 시험과 수치해석간의 주파수 분해능(△f)에 따른 차이

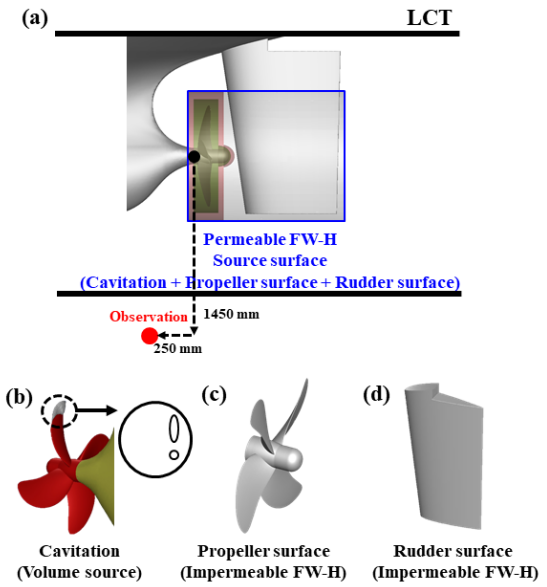

Fig. 7. (Color available online) Definition of noise source regions, (a) permeable FW-H including propeller and rudder, observer location, (b) cavitation volume, (c) propeller surface, (d) rudder surface.

때문으로 사료된다.

Fig. 9의 스펙트럼에 대해 전체 음압 수준(Overall Sound Pressure Level, OASPL)을 Table 2에 표시하였으며, 실험-해석 간 2 %의 오차 범위 내에서 잘 일치하였다.

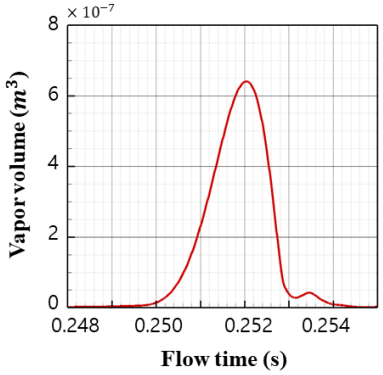

Fig. 8. (Color available online) Cavitation volume oscillation along the time variation.

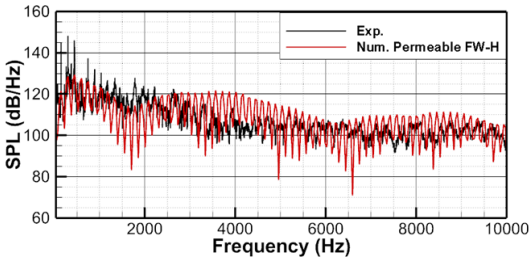

Fig. 9. (Color available online) Comparison of predicted power spectrum density using permeable integral surface with measured ones.

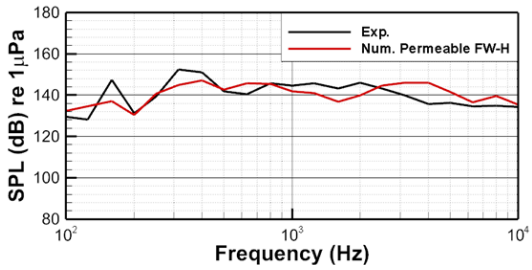

Fig. 10. (Color available online) Comparison of predicted one-third octave band spectrum using permeable integral surface with measured ones.

Table 2. Comparison of OASPLs between experimental and numerical results.

Exp.	Num.	Diff.
158.7 dB	155.7 dB	3.0 dB

Figs. 11과 12는 Fig. 7에서 정의된 각각의 소음원들에 대한 기여도를 파워 스펙트럼 밀도와 1/3옥타브 밴드로 비교한 그림이며, 전체 소음에서 공동 소음의 기여도가 가장 큰 것을 확인할 수 있다. 추진기 날개 표면의 쌍극 소음은 비공동의 경우 지배적이라 알려져 있지만, 공동 소음에 비해 낮은 것을 알 수 있으며, 방향타의 경우 후류의 상호작용으로 추진기 날개와 비슷한 기여도를 가지고 있음을 확인할 수 있다. 전 방향에서 추진시스템의 소음원별 기여도를 분석하기 위해 추진기의 정중앙을 중심으로 반경 1 m에서 10° 간격으로 소음 방향성을 도시하고 음향파워 수준을 계산하였으며, 소음 방향성을 Fig. 13, 음향파워 레벨을 Table 3에 나타내었다. Fig. 13으로부터 공동에 의한 소음이 모든 방향에 대해 가장 크게 방사되는 것을 확인할 수 있으며, 방향타에 의한 쌍극 소음은 표면적이 넓은 방향인 z축 방향을 따라 주로 방사되는 것을 알 수 있다. Table 3로부터 음향파워의 경우 추진기보다 방향타가 더 크게 나타나며, 이는 Fig. 6과 같이 추진기와 방향타 간의 상호작용으로 인한 압력 섭동이 주요 원인으로 판단된다.

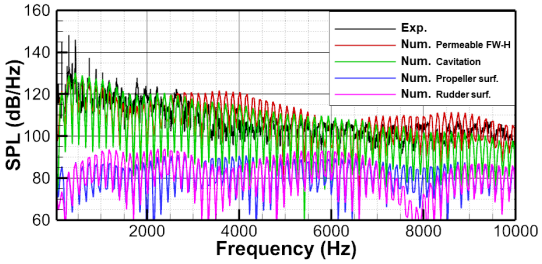

Fig. 11. (Color available online) Comparison of predicted power spectrum density for each noise source region defined by Fig. 7 with measured ones.

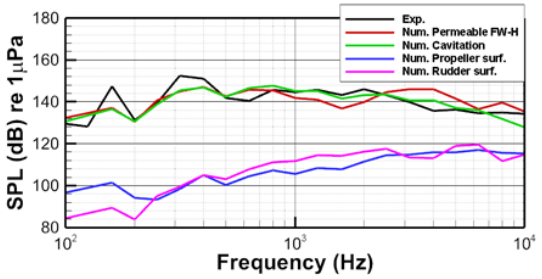

Fig. 12. (Color available online) Comparison of predicted one-third octave band spectrum for each noise source region defined by Fig. 7 with measured ones.

Table 3. Comparison of sound power level for each noise source region.

Noise source region	Sound power level
Integral surface (Permeable)	170.47 dB
Cavitation (Volume)	170.85 dB
Propeller (Impermeable)	140.45 dB
Rudder (Impermeable)	154.23 dB

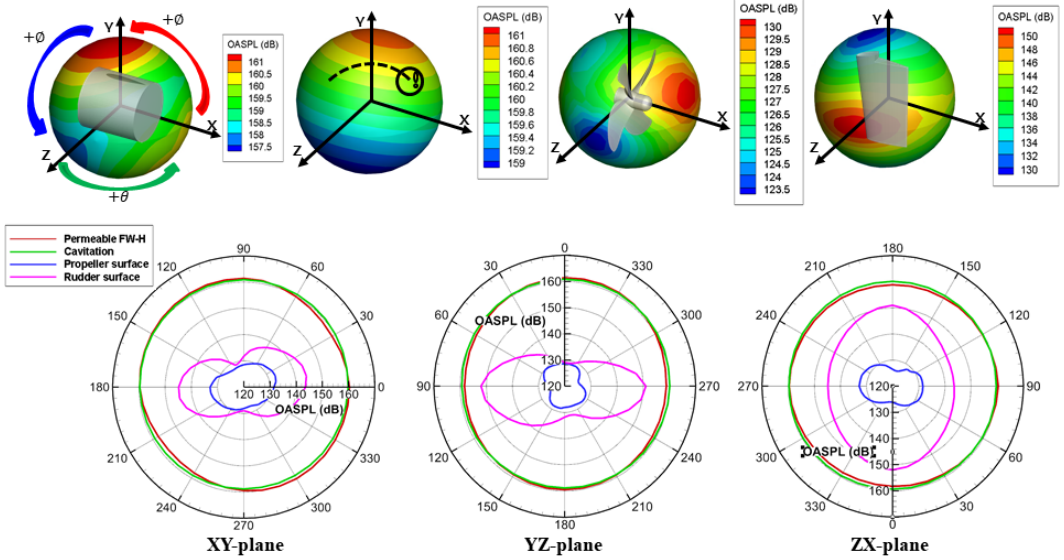

Fig. 13. (Color available online) Comparison of directivity for each noise source region defined by Fig. 7 along (a) xy-plane, (b) yz-plane, (c) zx-plane.

IV. 결 론

본 연구에서는 KVLCC2선체와 선박해양플랜트에서 설계된 추진기 날개를 대상으로 추진시스템의 각 소음원이 선박 수중방사소음에 미치는 기여도를 정량적으로 확인하였다. 비압축성 기반의 RANS해석을 통해 초기 유동장을 얻었으며, SST - DDES로 비정상 유동해석을 수행하여 추진기에서 발생하는 공동을 포함한 유동장을 모사하였다. 실험과 동일하게 추진기 날개 흡입면 상단 날개에서 공동이 생성되고 공동 형상도 실험과 잘 일치하는 것을 확인하였으며, 유동해석 결과를 기반으로 FW-H 적분 방정식 기반 소음해석을 진행하였다. 투과성 적분면은 추진기와 방향타를 모두 포함할 수 있도록 설정하였으며, 소음해석 결과를 실험 결과와 비교하여 경향이 잘 일치함을 확인하였다. 검증된 수치해석 방법을 적용하여 각 소음원별 소음해석을 진행하였고, 방향에 따른 소음 크기와 음향 파워를 통해 수치 비교를 진행하였다. 이를 통해 수중방사소음에 미치는 소음원별 기여도는 공동에 의한 기여도가 가장 크며, 다음으로 쌍극인 방향타와 추진기 날개에 의한 기여도가 큰 것을 확인하였다. 특히 방향타에 의한 영향이 추진기보다 더 크며, 이는 추진기와 방향타 간의 상호작용에 의해 방향타 표면의 압력 섭동이 크게 발생하기 때문으로 판단된다. 따라서 기존에 알려진 바와 같이 공동이 발생할 경우 가장 주요한 소음원은 공동의 체적변화이지만, 비공동 유동장일 경우 방향타를 반드시 포함하여 선박 수중방사소음을 해석해야 함을 알 수 있다.

감사의 글

본 논문은 산업통상자원부 지원 국가R&D사업 “IMO 해양환경보호 규제대응을 위한 선박 수중방사소음 모니터링 및 소음저감 기술개발”로 수행된 연구결과입니다(20012974).

References

1. A. J. Fuentes, M. Suchy, and P. B. Palomo, “The greatest challenge for URN reduction in the oceans by means of engineering,” Proc. OCEANS 2019 MTS/IEEE SEATTLE. IEEE, 1-8 (2019).
2. R. Williams, A. J. Wright, E. Ashe, L. K. Blight, R. Bruintjes, R. Canessa, and M. A. Wale, “Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management,” Ocean and Coastal Management, **115**, 17-24 (2015).
3. A. D. Hawkins and A. N. Popper, “A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates,” ICES J. of Marine Sci. **74,** 635-651 (2017).
4. C. Erbe, R. Dunlop, and S. Dolman, “Effects of noise on marine mammals,” in *Handbook of Effects of Anthropogenic Noise on Animals*, edited by H. Slabbekoorn, R. J. Dooling, A. N. Popper, R. R. Fay (Springer, New York, 2018).
5. IMO. M, *Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life*, MEPC, 2014.
6. J. Ahn, G. Kim, K. Kim, Y. Park, H. Ahn, Y. Jung, and J. Yoon, “Performance improvement study of propeller propulsion efficiency and cavitation for the 8800TEU class container” (in Korean), J. Soc. Nav. Arch. Kr. **54**, 453-460 (2017).
7. C. Park, G. Kim, G. Yim, Y. Park, and I. Moon, “A validation study of the model test method for propeller cavitation noise prediction,” Ocean Eng. **213**, 107655 (2020).
8. H. Seol, C. Park, and K. Kim, “Numerical prediction of marine propeller BPF noise using FW-H equation and its experimental validation” (in Korean), Trans. Kr. Soc. Noise Vib. Eng. **26**, 705-713 (2016).
9. I. Park, K. Kim, J. Kim, H. Seol, Y. Park, and J. Ahn, “Numerical study on propeller cavitation and pressure fluctuation of model and full scale ship for a MR tanker” (in Korean), J. Soc. Nav. Arch. Kr. **57**, 35-44 (2020).
10. G. Ku, C. Cheong, I. Park, and H. Seol, “Numerical investigation of tip vortex cavitation inception and noise of underwater propellers of submarine using sequential eulerian–lagrangian approaches,” Appl. Sci. 8721 (2020).
11. J. Cho, G. Ku, C. Cheong, and H. Seol, “Numerical investigation of cavitation noise of the submarine propellers using DDES technique and quadrupole corrected FW-H equation,” Proc. INTER-NOISE and NOISE-CON Cong. and Conf. 4376-4381 (2020).
12. G. Ku, S. Ryu, and C. Cheong, “Numerical investigation into cavitation flow noise of hydrofoil using quadrupole- corrected Ffowcs Williams and Hawkings

equation" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **37**, 263-270 (2018).
13. G. Ku, J. Cho, C.Cheong and H. Seol, "Numerical investigation of tip-vortex cavitation noise of submarine propellers using hybrid computational hydro-acoustic approach," Ocean Eng. **238**, 109693 (2021).
14. J. Ha, G. Ku, J. Cho, C. Cheong, and H. Seol, "Numerical comparative investigation on blade tip vortex cavitation and cavitation noise of underwater propeller with compressible and incompressible flow solvers" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **40**, 261-269 (2021).
15. J. Jeong, I. Kim, D. Yoon, S. Kim, and D. You, "Numerical analysis of underwater radiated noise over a marine propeller" (in Korean), J. Comput. Fluids Eng. **26**, 17-24 (2021).
16. K. Fujiyama and Y. Nakashima, "Numerical prediction of acoustic noise level induced by cavitation on ship propeller at behind-hull condition," Proceedings of the 5th Symposium on Marine Propulsors, SMP. **17**, 739-744 (2017).
17. S. Kim, C. Cheong, W. Park, and H. Seol, "Numerical investigation of cavitation flow around hydrofoil and its flow noise" (in Korean), Trans. Kr. Soc. Noise Vib. Eng. **26**, 141-147 (2016).
18. S. Kim, C. Cheong, and W. Park, "Numerical investigation into the effects of viscous flux on cavitation flow around hydrofoil" (in Korean), Trans. Kr. Soc. Noise Vib. Eng. 721-729 (2017).
19. S. Kim, C. Cheong, and W. Park, "Numerical investigation into effects of viscous flux vectors on hydrofoil cavitation flow and its radiated flow noise," Appl. Sci. **8**, 289 (2018).
20. M. Ha, C. Cheong, H. Seol, B. Paik, M. Kim, and Y. Jung, "Development of efficient and accurate parallel computation algorithm using moving overset grids on background multi-domains for complex two-phase flows," Appl. Sci. **8**, 1937 (2018).
21. S. Kim, C. Cheong, and W. Park, "Numerical investigation on cavitation flow of hydrofoil and its flow noise with emphasis on turbulence models," AIP Advances, **7,** 065114 (2017).
22. G. Ku, C. Cheong, S. Kim, Cong-Tu Ha, and W. Park, "Numerical study on cavitation flow and noise in the flow around a Clark-Y Hydrofoil" (in Korean), Trans. Kr. Soc. Mech. Eng. A **41**, 87-94 (2017).
23. S. Kim, C. Cheong, and W. Park, "Numerical investigation into effects of viscous flux vectors on hydrofoil cavitation flow and its radiated flow noise," Appl. Sci. **8**, 289 (2018).
24. G. Ku, C. Cheong, I. Park, and H. Seol, "Numerical investigation of blade tip vortex cavitation noise using Reynolds-averaged Navier-Stokes simulation and bubble dynamics model" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **39**, 77-86 (2020).
25. B. Paik, K. Kim, K. Kim, and Y. Park, "PIV Measurements of rudder inflow induced by propeller revolution in hull wake"(in Korean), J. Soc. Nav. Arch. Kr. **48**, 128-133 (2011).
26. A. Posa, R. Broglia, and E. Balaras, "The wake flow downstream of a propeller-rudder system," International J. Heat and Fluid Flow, **87**, 108765 (2021).
27. H. Jeong, J. Lee, Y. Kim, and H. Seol, "Estimation of the noise source level of a commercial ship using onboard pressure sensors," Appl. Sci. **11**, 1243 (2021).
28. M. S. Gritskevich, A. V. Garbaruk, J. Schütze, and F. R. Menter, "Development of DDES and IDDES formulations for the k-ω shear stress transport model." Flow, Turbulence and Combustion, **88**, 431-449 (2012).
29. T. Ikeda, S. Enomoto, K. Yamamoto, and K. Amemiya, "Quadrupole corrections for the permeable- surface Ffowcs Williams–Hawkings equation," AIAA J. **55**, 2307-2320 (2017).
30. L. V. Lopes, D. D. Boyd Jr, D. M. Nark, and K. E. Wiedemann, "Identification of spurious signals from permeable Ffowcs Williams and Hawkings surfaces," AHS. Int. Annual Forum and Technology Display, NF1676L-25336 (2017).
31. H. Seol, "Time domain method for the prediction of pressure fluctuation induced by propeller sheet cavitation: Numerical simulations and experimental validation", Ocean Eng. **72**, 287-296 (2013).

저자 약력

▸ 하 준 범 (Junbeom Ha)

2021년 2월 : 부산대학교 기계공학 학사
2021년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 기계공학 석사과정

▸ 구 가 람 (Garam Ku)

2015년 2월 : 부산대학교 항공우주공학 학사
2017년 2월 : 부산대학교 기계공학 석사
2022년 2월 : 부산대학교 기계공학 박사
2022년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 첨단냉동공조에너지센터 박사후 연구원

▸ 정 철 웅 (Cheolung Cheong)

1997년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 학사
1999년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 석사
2003년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 박사
2003년 3월 ~ 2004년 8월 : 서울대학교 BK21 박사후 연구원
2004년 9월 ~ 2005년 5월 : Research Associate, ISVR, University of Southampton
2005년 6월 ~ 2006년 2월 : 한국표준과학연구원, 선임연구원
2006년 3월 ~ 현재 : 부산대학교 기계공학부 교수

▸ 설 한 신 (Hanshin Seol)

1998년 2월 : 부산대학교 항공우주공학 학사
2001년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 석사
2005년 2월 : 서울대학교 기계항공공학 박사
2005년 3월 ~ 현재 : 선박해양플랜트연구소 책임연구원

▸ 정 홍 석 (Hongseok Jeong)

2012년 2월 : 서울대학교 항공우주공학 학사
2014년 2월 : 서울대학교 기계공학 석사
2019년 2월 : Ph.D. degree in Engineering and Physical Sciences at the University of Southampton
2019년 2월 ~ 현재 : 선박해양플랜트연구소 선임연구원

▸ 정 민 석 (Minseok Jung)

2014년 3월 : Kyushu University 기계항공공학 학사
2016년 3월 : Kyushu University 항공우주공학 석사
2018년 3월 : Kyushu University 항공우주공학 박사
2018년 4월 ~ 2020년 8월 : 파동에너지극한제어연구단 선임연구원
2020년 9월 ~ 2022년 5월 : 선박해양플랜트연구소 연구원