

## 해상 환경을 고려한 수상함 항적 모델 연구

배호석<sup>\*,1)</sup> · 김원기<sup>1)</sup> · 손수욱<sup>1)</sup> · 김우식<sup>1)</sup> · 박정수<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> 국방과학연구소 해양기술연구원

### A Study on the Ship Wake Model under the Ocean Environment

Ho Seuk Bae<sup>\*,1)</sup> · Won-Ki Kim<sup>1)</sup> · Su-Uk Son<sup>1)</sup> · Woo-Shik Kim<sup>1)</sup> · Joung-Soo Park<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup> Maritime Technology Research Institute, Agency for Defense Development, Korea

(Received 4 November 2020 / Revised 6 January 2021 / Accepted 15 January 2021)

#### Abstract

The ship wake generated by rotation of the propeller yields changes of characteristics of sound wave such as attenuation and scattering. To develop a battle field environment simulator for military purposes, it is very important to understand acoustical properties of ship wake. Existing research results have limitations in direct application because they performed under simple conditions or model ships were applied. In this study, we developed a ship wake generation model based on the ship's geometric wake distribution theory. The model can provide spatial distribution and void fraction with various marine environments as well as ship size. Through the developed model, geometric distribution features of ship wake according to the ship's maneuvering conditions were successfully simulated. In addition, changes of the bubble void fraction with time at any location within the battle field environment were identified. Therefore, the developed model is expected to be used in the development of a simulator to measure the acoustic characteristics of the ship wake.

Key Words : Ship Wake(수상함 항적), Bubble Void Fraction(기포분율), Ship Wake Generation(수상함 항적 생성)

#### 1. 서론

선박이 기동하게 되면 선박의 형상과 프로펠러의 회전에 의하여 항적이 필연적으로 발생된다. 선박에서 발생하는 항적은 소나장비의 음파신호를 감쇠시키는 차단효과를 함과 동시에, 음향신호에 대한 체적 산란

강도를 높이는 등 소나에서 획득되는 수신신호의 왜곡을 야기시킨다. 항적에 의한 음향신호의 왜곡은 군사적 목적 뿐만 아니라 민수적 목적의 소나장비에 지대한 영향을 미치는데, 이론적으로 기포 크기에 따른 공진주파수(Resonance frequency)에서 감쇠계수와 체적 산란계수가 상대적으로 높기 때문에, 항적 층을 투과하는 음파신호의 전달이 차단되거나, 강한 산란신호가 반향되어 유사 표적으로 오탐지되는 현상을 보인다. 따라서, 소나장비의 운용주파수 대역에 공진되는 크기

\* Corresponding author, E-mail: belfre@add.re.kr  
Copyright © The Korea Institute of Military Science and Technology

를 가지는 기포 분포량이 중요하며, 이를 정량적으로 측정하고 분석하기 위한 수상함 항적 분포 모델 개발이 선결적으로 요구된다.

수상함 항적 모델을 구축하는 가장 효과적인 방법은 실제 수상함을 대상으로 항적 분포를 측정하는 것인데, 이는 군사적인 이유로 극히 제한적이며 실 해상 환경에서 실험변수 및 해양조건을 통제할 수 없기 때문에 불가능한 것이 현실이다. 실제 수상함에서 발생하는 항적 분포모델은 거의 공개되어 있지 않지만, 1969년 미해군에서 출간된 자료<sup>[1]</sup>에서 USS Moale(DD 693)의 속도에 따른 항적 사진자료를 통해서 일부 짐작할 수 있는 상황이다.

실측자료의 한계를 해소하고자 미국 등 수중음향학 분야의 기술 선진국을 중심으로 수상함에 대한 항적 모델링 기술이 제시되었다. Carrica et al.(1998)는 RANS(Raynolds Averaged Navier-Stokes) 기법을 이용하여 미해군 전투함인 FF-1052 주위 2상에 대한 유체 유동장 해석을 수행하였으며<sup>[2]</sup>, Celik et al.(2005)은 LES(Large-Eddy Simulation)와 RFG(Random Flow Generation), 그리고 LPD(Lagrangian Particle Dynamics)을 복합적으로 활용하여 수상 및 수중 운동체 후류에서의 발생하는 기포를 모의하였는데<sup>[3]</sup>, 연산에 필요한 시간이 상당히 소요되기 때문에 군사적 목적의 전장환경 시뮬레이터 구성 모델로 탑재하기에는 여전히 제한적인 상황이다.

실험실 환경에서 모형선박 실험을 이용하여 취득한 항적 자료를 분석하여 이를 모델화하는 연구도 시도되었다. 국방과학연구소는 2006년부터 2008년까지 미국 Davidson Lab, Stevens Institute of Technology와 협업하여 수상함 항적 음파투과 손실 등의 음향특성을 측정하는 기포 분포를 추정하는 연구를 수행하였으며<sup>[4]</sup>, 2008년에는 연구용역을 통해 일본에 소재한 FEL(West Japan Fluid Engineering Laboratory Co. Ltd.)의 대형 회류수조에서 고속활주선을 축소시킨 모형선박을 대상으로 ABS(Acoustic Bubble Spectrometer) 장비를 이용한 단위체적당 기포의 체적비인 기포분율을 측정하였으며, 이를 토대로 3차원 기포분율 수치모델을 제안하였다<sup>[5]</sup>. 하지만 실제 해상 환경의 영향을 고려하지 않고, 특정 선박 크기에 제한된 계측자료로써, 일반적인 수상함으로 확장하기에는 한계를 보였다.

선박의 형상에 기인한 항적의 기하학적인 분포식을 이용하여 다양한 크기의 형상 및 다양한 기동조건에 대한 선박 항적 모델링을 수행하는 연구도 다양하게 제시되었는데, 최근 Yuehui and Wei(2015)가 제시한

모델<sup>[6]</sup>은 기포의 음향특성을 정확히 반영하기 위하여 Novarini가 제안한  $\gamma$ -plume 모델<sup>[7]</sup>을 반영시켰으며, 4~20 kHz 대역에서 실측한 음파손실 자료와의 비교를 통해 제안모델의 타당성을 검증하였다. Song et al. (2017)도 수상함 항적의 기하학적인 분포특성을 이용하여 수상함 항적 분포 모델을 제시하였는데<sup>[8]</sup>, 두 연구 모두 풍속 등에 의해 발생하는 자연발생 기포에 대한 고려는 없었다.

본 연구에서는 수상함의 크기에 따른 항적의 기하학적인 이론식을 바탕으로, 임의의 해상 환경, 임의의 수상함 크기 및 기동 조건에서의 항적 분포량 및 기포분율 분포를 추정하고자 시도하였다. 선박의 기하학적인 형상에 따른 항적 분포 모델을 제시한 Yuehui and Wei(2015)의 접근 방법<sup>[6]</sup>을 확장하여, 시간에 따른 항적 분포 모델을 구현하고 수상함의 기동 조건에 따른 3차원 항적 분포 모델을 구현하였다. 즉, 수상함의 항적 분포는 수상함의 기하학적인 크기로부터 항적의 길이, 폭, 깊이 등의 3차원 분포를 가정하였으며, 항적의 분포 스펙트럼은 Novarini에 의해 제안한  $\gamma$ -plume 모델을 사용하였다. 실제 해상 환경을 모사하기 위하여 풍속 등에 의하여 자연적으로 발생하는 기포 군에 대한 분포는 Hall-Novarini 모델<sup>[7]</sup>을 사용하여 실 해상 환경의 요소로 반영하였다.

본 논문에서는 자연발생 기포 모델과 수상함 항적 모델에 대하여 간단히 설명한 후, 환경 변수, 수상함 크기 및 기동 변수에 기인하는 간단한 수치예제를 수록하여 제안 모델이 군사적 목적의 전장 환경 시뮬레이터 구성모델로의 탑재 가능성을 타진하고자 한다.

## 2. 자연발생 기포 분포 모델

해상에서 바람 등의 영향으로 해수면 하부에 기포 군이 자연적으로 존재하는데, 이렇게 자연적으로 발생하여 분포하는 기포 모델은 많은 과학자들에 의해 연구되어 왔다. 대부분의 경우 풍속에 따라서 심도별로 측정된 기포 분포 측정치를 기반으로 경험식을 제안하였으며, 이는 기포의 측정기술이 발전함에 따라 경험식도 점차 보완되었다.

Hall(1989)은 해수면 하부에 존재하는 기포 층에 의한 음파의 감쇠 및 굴절 효과로 발생하는 전달손실을 모델링하기 위한 목적으로 자연 상태에서 해수면 하부에 발생하는 기포의 크기별 분포량을 심도의 함수로

나타내기 위한 모델을 개발하였는데<sup>[9]</sup>, 여기서 기포 크기별 분포량을 표현하는 방식으로 단위 부피 내에 존재하는 기포의 양을 의미하는 PDSL(Population Density Spectrum Level)을 정의하였다. 측정기술이 발전함에 따라 Hall이 제안한 PDSL 모델을 기반으로 Novarini and Norton에 의해 일부 보완된 Hall-Novarini Model이 제시되었으며, 그 외에도 Vossen and Ainslie 등 다양한 연구가들에 의해 수정된 모델을 제시되었다<sup>[10]</sup>. 본 논문에서는 가장 일반적인 Hall-Novarini 모델을 적용하여 자연발생 기포 분포 모델을 구현하였다.

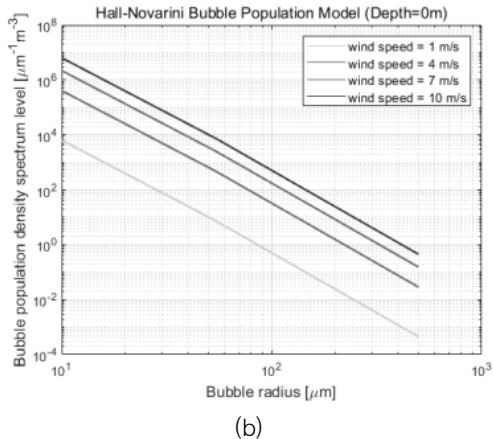
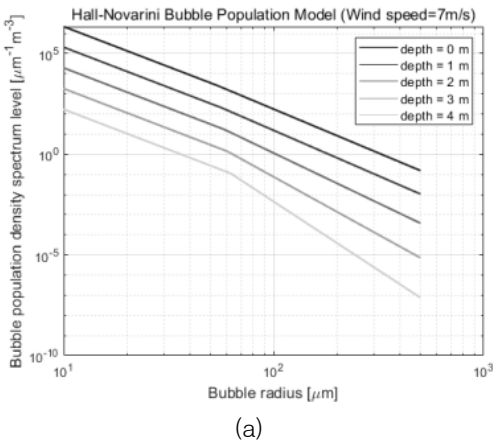


Fig. 1. The results of Hall-Novarini distribution model with (a) depth and (b) wind speed

Hall-Novarini 모델은 심도와 기포 크기에 따른 분포 모델과 풍속에 따른 상수, 특정 풍속에서 심도에 따른 변수의 곱으로 구성되는데, Fig. 1은 기포의 크기에

따른 자연발생 기포의 PDSL을 보여준다. Fig. 1(a)는 풍속 7 m/s일 때의 심도에 따른 기포 크기별 분포량을 보여주는데, 심도가 얕을수록 자연발생 기포의 수가 많으며, 크기가 작은 기포가 상대적으로 많이 존재한다는 것을 알 수 있다. Fig. 1(b)는 심도 0 m인 해수면 상에서 풍속에 따른 기포 크기별 분포량을 볼 수 있는데, 풍속이 강할수록 자연발생 기포 군의 수가 상대적으로 많아지는 것을 쉽게 확인할 수 있다. Fig. 2는 수상함 기동궤적 중심축 상(R = 0)에서의 풍속 7 m/s 조건인 Fig. 1(a) 기포 분포와 기포분율의 심도에 따른 변화를 보여준다.

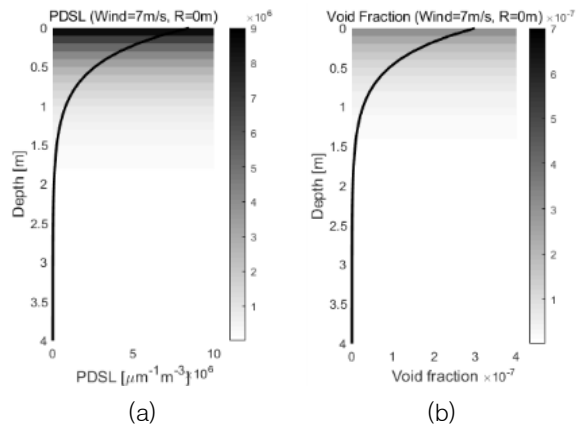


Fig. 2. Depth profiles of (a) PDSL and (b) void fraction(Wind = 7 m/s, On-top)

### 3. 수상함 항적 분포 모델

수상함 크기에 따른 항적의 기하학적 형상은 Yeuhui and Wei(2015)의 접근 방법<sup>[6]</sup>을 확장하여, 시간에 따른 항적 형상 모델로 전개하였다. 즉, 임의의 지점에서 수상함이 지나가는 시점을 기준으로 시간  $t$ 가 지난 후의 항적의 폭  $W(t)$ 와 깊이  $H(t)$ 는 다음 식과 같이 각각 가정하였다.

$$W(t) = \begin{cases} 2v_s t \tan(\alpha/2) + B_s/2 & (t \leq L_0/v_s) \\ W_0 + 2(v_s t - L_0) \tan(\beta/2) & (t > L_0/v_s) \end{cases} \quad (1)$$

$$H(t) = \begin{cases} (H_0 - D_s)v_s t/L_s + D_s & (t \leq L_s/v_s) \\ H_0 & (L_s/v_s < t \leq 10L_s/v_s) \\ H_0 - \tan\theta(v_s t - L_s) & (t > 10L_s/v_s) \end{cases} \quad (2)$$

여기서  $v_s$ 는 수상함의 속도를,  $L_s$ ,  $B_s$ ,  $D_s$ 는 수상함의 길이, 폭, 흘수를 각각 나타낸다.  $\alpha$ 와  $\beta$ 는 항적의 1차 및 2차 전과각도를 나타내며,  $L_0$ 와  $W_0$ 는 1차 전과각도  $\alpha$ 에 의해 발생하는 항적의 길이와 폭을 각각 의미한다. 한편,  $H_0$ 는 항적의 최대 깊이를 나타내며,  $\theta$ 는 시간에 따른 깊이 방향의 경사각을 의미한다.

Table 1. Modeling conditions

$v_s$	$L_s$	$B_s$	$D_s$	$L_0$	$H_0$	$\alpha$	$\beta$	$\theta$
5m/s	8.15m	2.12m	0.84m	60m	$2 \times D_s$	40°	1°	0.1°

Fig. 3은 식 (1)과 (2)에서 가정한 항적의 기하학적 분포식을 바탕으로 Table 1과 같은 특정 조건에서 구현한 항적 형상을 보여준다.

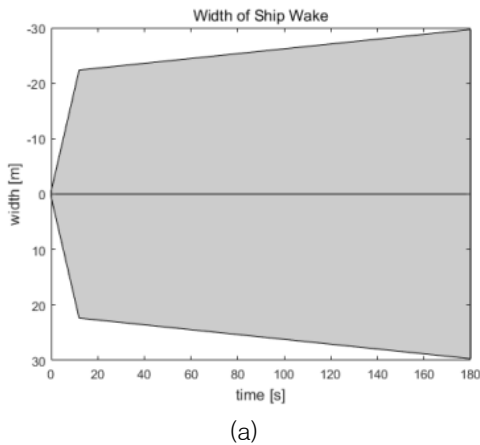


Fig. 3. Ship wake: (a) top and (b) side views

수상함에 의한 항적의 기포 크기에 따른 분포량은 기포 생성 후 성숙 단계의 특성을 대표하는 Novarini의  $\gamma$ -plume 모델을 가정하였는데, Fig. 4는 심도에 따른 기포 크기별  $\gamma$ -plume 분포량을 비교해서 보여주고 있다.

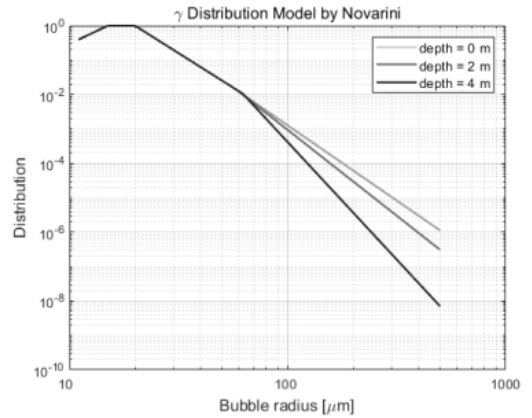


Fig. 4.  $\gamma$ -plume distribution curves with depth

수상함에 기인한 항적의 분포를 산정할 때, 기포의 상승 속도도 고려하였는데, 기포 상승 속도  $V(a)$ 는 다음 식 (3)과 같이 이론식과 경험식을 복합적으로 사용하였다. 즉, 측정이 상대적으로 어려운 작은 크기의 경우 Stokes' Law로부터 유도된 이론식<sup>[6]</sup>을 사용하였으며, 상대적으로 측정이 쉬운 큰 기포의 경우 경험식<sup>[11]</sup>을 사용하였다.

$$V(a) = \begin{cases} \frac{2}{9} a^2 g v^{-1} (\sqrt{\chi^2 + 2\chi} - \chi) & (a \leq 215 \mu\text{m}) \\ 210a - 0.01 & (a > 215 \mu\text{m}) \end{cases} \quad (3)$$

여기서  $a$ 는 기포의 반경을,  $\chi = 10.82v^2g^{-1}a^{-3}$ 이며, 물의 동점도(kinematic viscosity)  $v = 1.28e^{-6}$ 을 적용하였다. 이를 그림으로 도시한 결과는 Fig. 5와 같다.

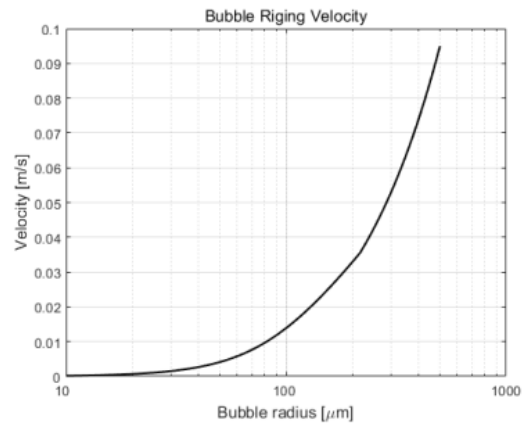


Fig. 5. Bubble rising velocity curve

시간에 따른 선박의 항적 분포 및 기포분율 모델을 계산하기 위하여 Yeuhui and Wei(2015)의 접근 방법과 유사하게 기포의 분포량  $N$ 은 식 (4)와 같이 가정하였다.

$$N(t,r,z,a) = N_0 N_t(t,a) N_r(t,r) N_z(t,z) G_\gamma(a,z) \quad (4)$$

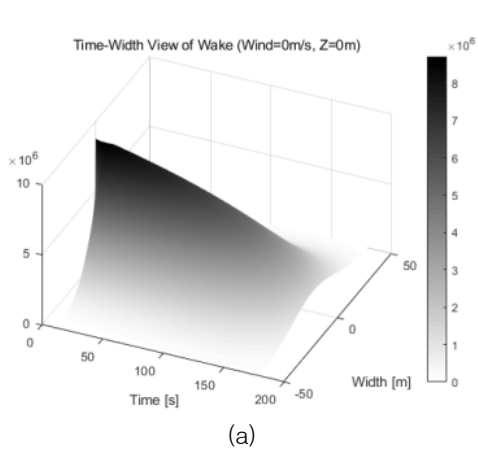
즉, 분포량  $N$ 은 스케일 상수  $N_0 = 6 \times 10^5 (\mu\text{m}^{-1} \text{m}^{-3})$ 와 시간에 대한 감쇠항  $N_t(t,a) = e^{-4.6t V(a)/H(t)}$ , 선박의 궤적과 범선방향의 감쇠항  $N_r(t,r) = e^{-(3r/\sqrt{2} W(t))^2}$ , 심도방향 감쇠항  $N_z(t,z) = e^{-2.3z/H(t)}$ , 그리고 기포 분포 특성항  $G_\gamma$  간의 곱으로 기포 분포량을 가정하였는데, 수상함의 프로펠러가 중앙축에 1개 위치한다고 가정하여 선박의 중심축으로부터 각 축 방향으로 멀어질

수록 기포 분포량이 지수적으로 감소하도록 모사하였다. 전술한 기하학적 항적 형상 모델, 기포 상승 속도 모델은 각 축 방향의 감쇠항 계산에 사용하였다.

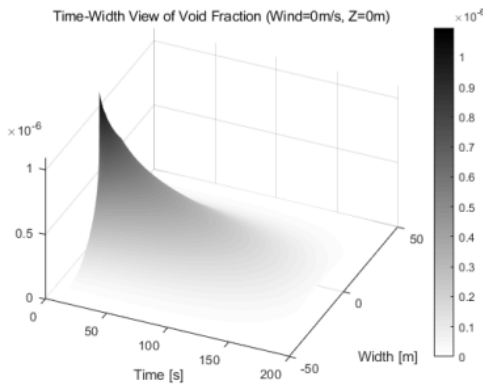
최종적으로 선박이 지난 후 임의의 시간  $t$ , 기동궤적으로부터 범선거리  $r$ 만큼 이격된 지점에서, 임의의 심도  $z$ 에서의 기포 크기  $a$ 에 따른 분포량  $N(t,r,z,a)$ 을 식 (5)와 같이 간단히 계산할 수 있으며, 기포가 구형이라는 가정을 추가하면 식 (6)과 같이 기포분율  $Vf(t,r,z)$ 을 쉽게 도출할 수 있다.

$$N = N_0 G_\gamma(a,z) e^{-4.6t V(a)/H(t) - (3r/\sqrt{2} W(t))^2 - 2.3z/H(t)} \quad (5)$$

$$Vf = \frac{4}{3} \pi a^3 N \quad (6)$$

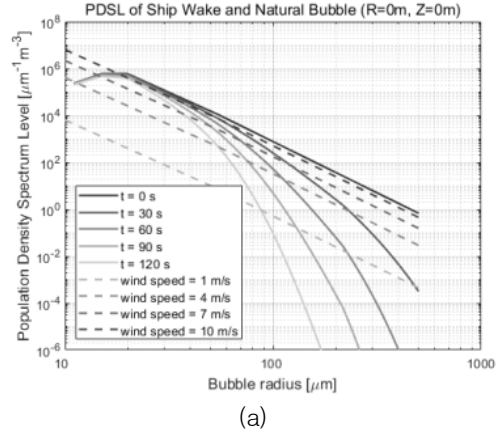


(a)

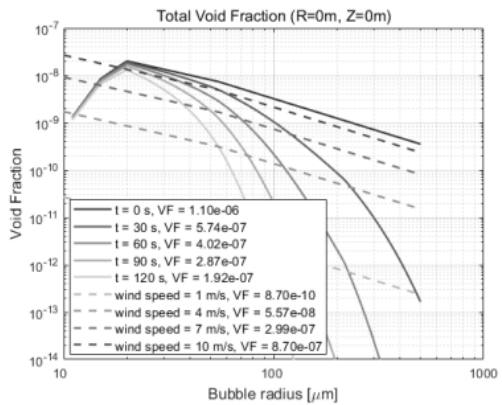


(b)

Fig. 6. Time-width views of ship wake: (a) PDSL and (b) void fraction



(a)



(b)

Fig. 7. (a) PDSL and (b) void fraction (solid lines: ship wakes, dotted lines: natural bubbles)

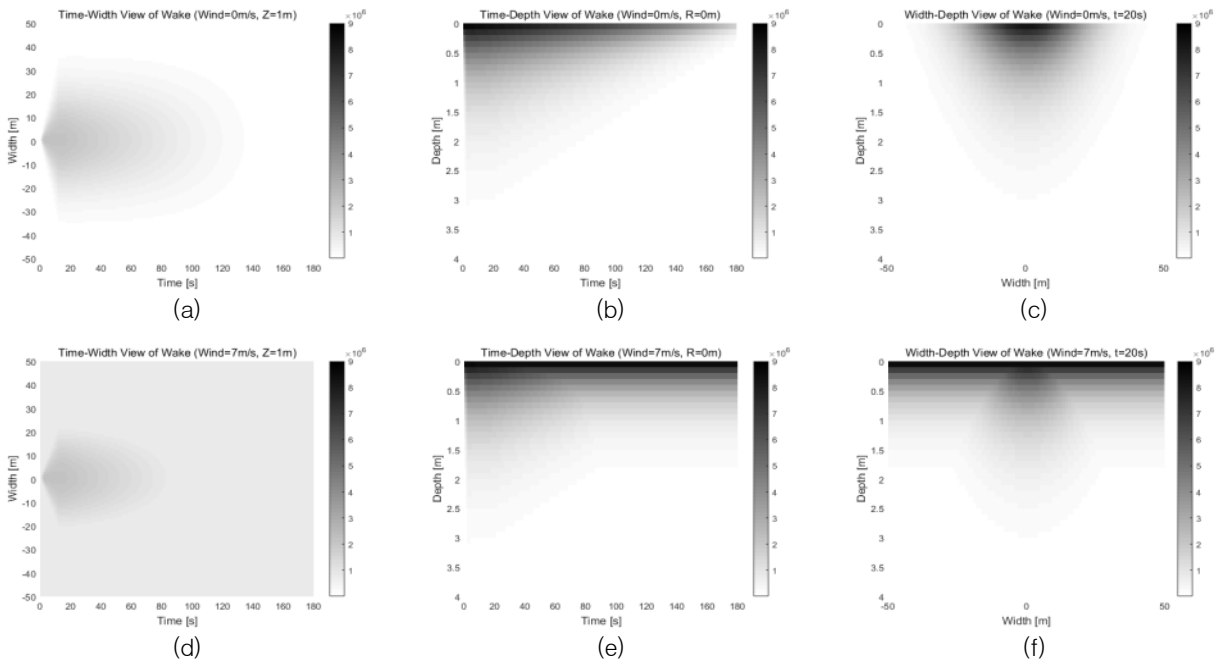


Fig. 8. PDSL distributions of (a~c) ship wake only, (d~f) ship wake and natural bubbles: (a, d) time-width, (b, e) time-depth, and (c, f) width-depth sections

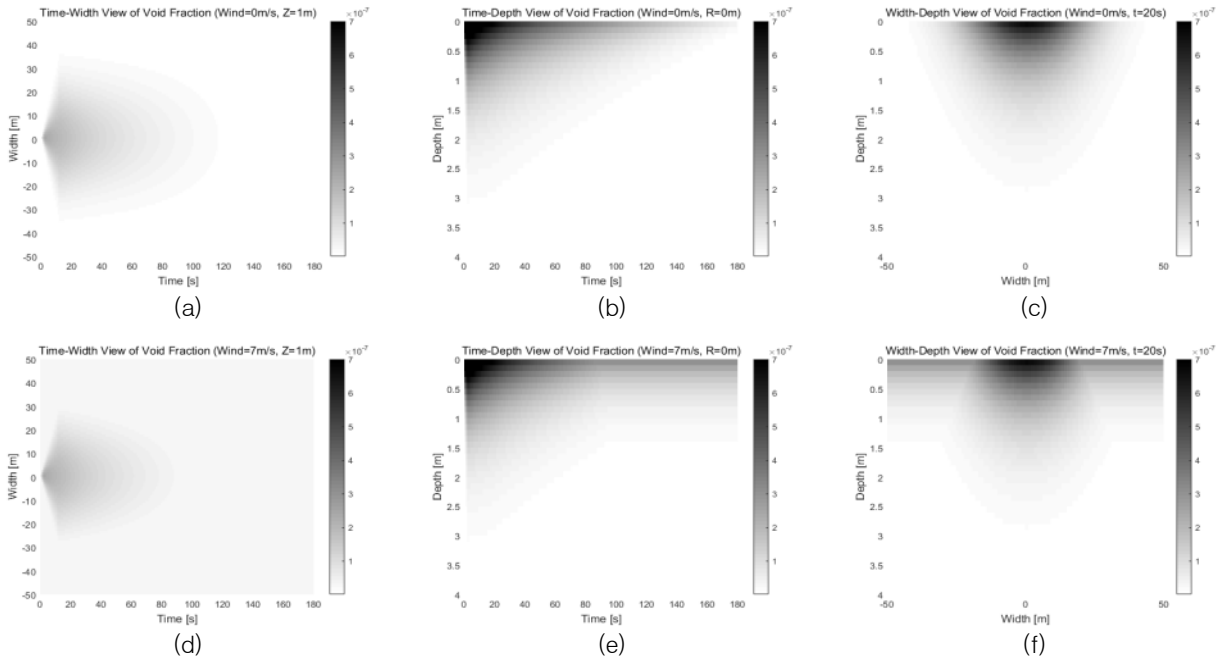


Fig. 9. Void fraction distributions of (a~c) ship wake only, (d~f) ship wake and natural bubbles: (a, d) time-width, (b, e) time-depth, and (c, f) width-depth sections

Fig. 6(a)와 (b)는 Table 1에서 가정한 조건에서의 수상함에서 발생하는 항적의 PDSL 및 기포분을 분포를 각각 보여준다. 여기서 풍속에 의한 자연발생 기포 군은 고려하지 않았으며, 심도 0 m인 해수면 상에서의 분포를 3차원적으로 전시하였다. 시간이 흐를수록 수상함 기동궤적을 중심으로 기포의 분포량이 수 분에 걸쳐 서서히 감소하는 반면, 기포분율은 발생초기부터 급격하게 감소하는 것을 볼 수 있다.

자연발생 기포 군을 고려하기 위하여 선박에서 기인한 항적과 자연발생 기포 군의 PDSL과 기포분율 분포를 Fig. 7(a)와 (b)에 각각 정량적으로 비교하여 나타내었다. 여기서 실선은 앞과 동일한 Table 1 조건을 가정한 수상함의 중심축 상( $R = 0$ )에서 발생하는 항적을 시간이 흐름에 따라 보여주고 있으며, 파선은 Hall-Novarini 모델에 따른 풍속 1, 4, 7, 10 m/s 조건에서 발생하는 자연발생 기포 군의 양상을 동시에 보여준다. 선박에서 발생하는 기포 군은 시간이 흐름에 따라 크기가 큰 기포를 중심으로 급격히 소멸되는 것을 관찰할 수 있으며, 자연발생 기포는 풍속이 강할수록 전체적인 기포의 밀도가 높아지는 것을 쉽게 확인할 수 있다. 또한, 풍속이 10 m/s에 근접할 경우 대부분의 수상함 기포가 수 초 이내에 자연발생 기포에 가려지는 것을 정량적으로 추정할 수 있다. 각 조건에서의 수치적으로 도출 가능한 기포분율은 Fig. 7(b)의 범례에 추가적으로 명기하여 조건 간에 정량적인 비교가 가능하도록 하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 독자들의 이해를 높이기 위하여 자연발생 기포 군의 유무에 따른 단위부피 당 기포의 개수와 기포분율을 2차원 단면으로 잘라 비교하는 그림을 각각 수록하였다. 여기서 계산의 편의를 위하여 수상함 기포 크기가 10  $\mu\text{m}$ 부터 500  $\mu\text{m}$  범위에 존재한다고 가정하여 계산을 수행하였다. Fig. 8(a-c)는 선박에 의한 항적의 기포량 단면을 보여주는 반면, Fig. 8(d-f)는 선박뿐만 아니라 풍속 7 m/s 조건에서의 자연발생 기포 군을 고려한 총 기포량 단면을 보여주고 있다. Fig. 9(a-c)는 PDSL 분포를 이용하여 기포가 구형이라는 가정 하에 식 (6)으로 도출된 선박에 의한 기포분율의 단면을 보여주며, Fig. 9(d-f)는 선박과 자연발생 기포 군을 동시에 고려한 기포분율 단면을 각각 보여준다. 두 개의 그림에서 (a)와 (d)는 심도 1 m에서의 시간-폭 단면을, (b)와 (e)는 기동궤적 상에서의 시간-깊이 단면을, (c)와 (f)는 기포 발생 후 20초 지난 시점에서의 폭-깊이 단면을 각각 보여준다. 앞

서 전술한 바와 같이 시간이 흐름에 따라 기포량이 점진적으로 감소하는 것을 확인할 수 있으며, 자연발생 기포 군이 존재하는 상황에서는 해수면 부근에 강한 기포 군이 위치하는 것을 직관적으로 확인할 수 있다.

본 논문에서 구현한 모델은 임의의 풍속에 의한 자연발생 기포 군과 함께, 임의의 크기를 가지는 수상함 및 기동조건에 따른 수상함 항적의 분포량과 기포분율 분포를 충실히 모사할 수 있으며, 임의의 시간  $t$ , 기동궤적으로부터 법선거리  $r$ 만큼 이격된 임의의 지점, 그리고 임의의 심도  $z$ 에서의 기포 분포량과 기포분율을 어렵지 않게 도출할 수 있기 때문에 시간 스텝에 따라 구동되는 시뮬레이터의 구성모델로의 적용성도 높을 것으로 추정된다.

#### 4. 시뮬레이션 예제

군사적 목적의 전장 환경 시뮬레이터 구성 모델로 탑재하기 위한 가능성을 타진하기 위하여 자연발생 기포 군을 포함하는 수상함 항적 모델 분포의 간단한 시뮬레이션을 수행하였다. 관심 범위 내 존재하는 모든 3차원 위치에서 수상함과의 이격 시간, 기동 궤적과의 이격된 거리, 심도 등에 해당되는 기포분율 데이터를 추출하여, 전장 영역 내에서의 모든 위치에서의 기포 분포량과 기포분율을 도출할 수 있으나, 여기서는 지면의 제약으로 풍속 등의 환경 변수, 수상함 크기 및 기동 변수에 따른 항적 분포 모델 결과 중 기포분율에 대한 몇 가지 예제만을 수록하였다. 수치 예제에 사용한 주요 변수는 Table 2에 정리하였으며, 그 외  $L_0$ ,  $H_0$ ,  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\theta$  등 항적 분포 모델링에 필요한 변수들은 Table. 1의 값을 사용하였다.

Table 2. Simulation conditions

	Env.	Vessel Size			Trajectory		
	<i>wind</i>	$L_s$	$B_s$	$D_s$	$v_s$	<i>Heading</i>	<i>Rot.</i>
Ex.1	0m/s	8.15m	2.12m	0.84m	5m/s	85°	-0.2°/s
Ex.2	7m/s						
Ex.3		40m	8.1m	1.5m			
Ex.4							
Ex.5		3m/s				~0.2°/s	

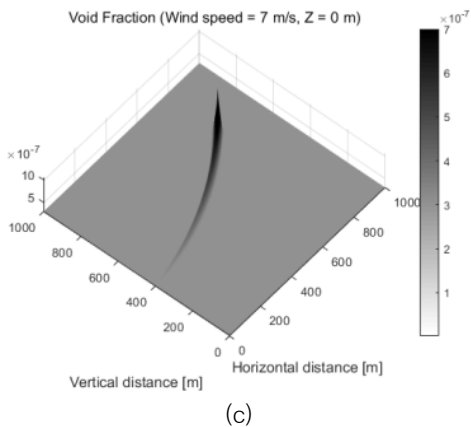
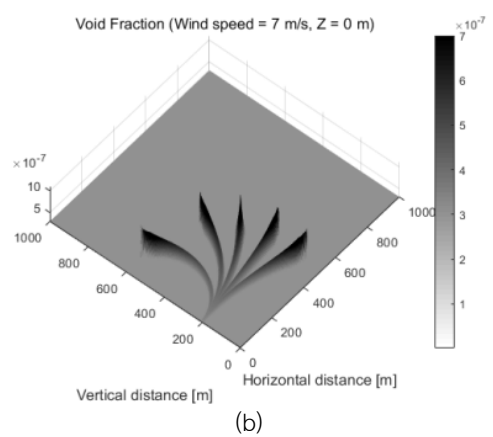
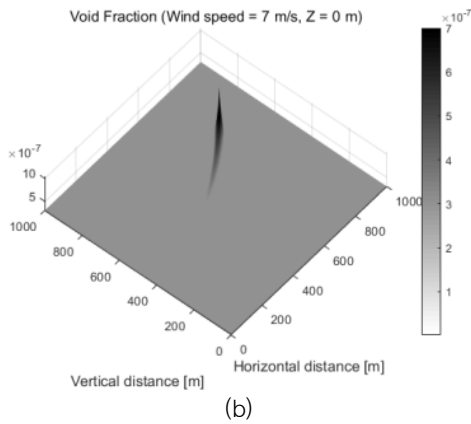
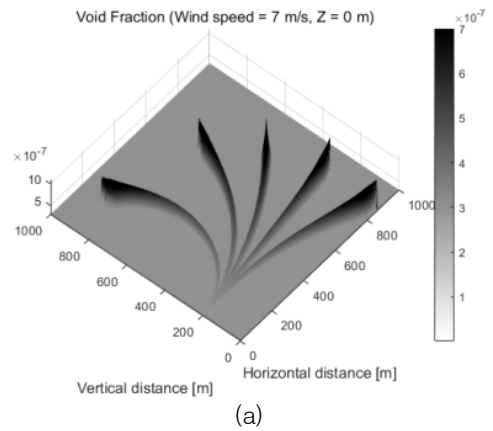
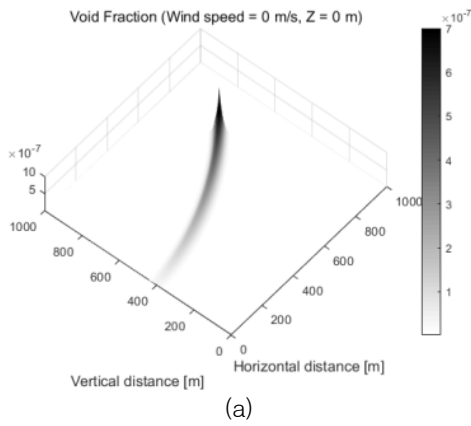


Fig. 10. Simulation results of void fraction: (a) wind = 0 m/s, small ship, (b) wind = 7 m/s, small ship, and (c) wind = 7 m/s, large ship

Fig. 10(a)와 (b)는 환경 변수인 풍속이 0과 7 m/s일 경우의 기포분율 분포의 차이를 보여준다. 시뮬레이션

Fig. 11. Simulation results of void fraction: ship's speed is (a) 5 m/s and (b) 3 m/s

에 사용한 구체적인 변수는 Table 2의 Ex. 1과 Ex. 2를 이용하였다. 두 경우에서 수상함 항적의 크기는 동일하지만, Fig. 10(b)의 경우 강한 풍속에 의해 수상함 항적의 후기 분포가 자연발생 기포 층에 가려지는 현상 등을 모사할 수 있음을 보여준다. Fig. 10(b)와 (c)는 수상함의 크기를  $8.15 \times 2.12 \times 0.84$  m로 작게 가정한 경우와  $40 \times 8.1 \times 1.5$  m로 상대적으로 크게 가정한 경우(Ex. 3)를 비교한 결과를 각각 보여준다. 수상함의 크기가 클수록 기포분율 역시 커지는 것을 명확히 관찰할 수 있다.

Fig. 11은 수상함의 기동 속도와 회전각에 따른 시뮬레이션 결과를 보여준다. Fig. 11(a)는 Ex. 4의 변수를 가정한 시뮬레이션 결과로, 수상함의 기동 속도 5 m/s, 회전각이  $-0.8^\circ/s$ ,  $-0.4^\circ/s$ ,  $-0.2^\circ/s$ ,  $0^\circ/s$ ,  $+0.2^\circ/s$ 의 경우를 각각 모사한 결과이며, Fig. 11(b)는 Ex. 5의 변



수를 가정한 시뮬레이션 결과로, 수상함의 기동 속도 3 m/s 외에는 앞과 동일한 조건으로 가정한 결과를 보여준다. 간단한 몇 가지 시뮬레이션 결과들로부터, 수상함의 임의 기동 속도 및 기동 궤적에 따른 자연 발생 기포 층과 수상함에 의한 항적 모델을 주어진 시나리오에 따라 충실히 모사가 가능한 것을 확인할 수 있었으며, 실 해상 환경을 고려한 수상함 항적의 음향특성 분석을 위한 구성 모델로써 활용 가치가 높을 것으로 기대된다.

## 5. 결론

본 논문에서는 풍속 등 실 해상 환경을 고려한 수상함 항적 분포 모델을 성공적으로 재현하였으며, 시간에 따른 기포 분포량 및 기포분율의 변화를 도출할 수 있었다. 본 연구에서 구현한 수상함 항적 모델은 시간의 함수로 전개하였기 때문에 시간 변화에 따라 구동되는 시뮬레이터의 구성모델로 쉽게 적용할 수 있을 것으로 추정된다. 제안 모델은 실 해상 환경을 고려한 수상함 항적의 음향특성 측정을 위한 시뮬레이션 틀로써 활용 가능할 것으로 기대되며, 최종적으로 군사적 목적의 전장 환경 시뮬레이터에 탑재 가능할 것으로 판단된다.

하지만, 수상함의 항적을 기하학적 분포를 가정하였기에 실제 수상함의 프로펠러 개수, 위치 등에 따라 분포를 획일화하는 한계를 가지며, 강우, 주변선박 등 실 해상 환경의 모든 요소를 반영하기는 현실적으로 어렵다. 후속 연구들을 통해 이러한 한계점들을 하나씩 해소해 나갈 계획이다.

## 후 기

본 연구는 (사)한국마린엔지니어링학회 2020 후기학술대회에서 발표하였던 초록을 확장한 논문임.

## References

[1] Research Analysis Group, "Physics of Sound in the Sea," Washington D. C., Department of the Navy, Headquarters Naval Material Command, 1969.

[2] P. M. Carrica, F. J. Bonetto, D. A. Drew and R. T. Lahey, Jr., "The Interaction of Background Ocean Air Bubbles with a Surface Ship," *International Journal of Numerical Method in Fluids* 28, 571-600, 1998.

[3] I. B. Celik, Y. Ibrahim and S. Andrei, "Large Eddy Simulation of Bubbly Ship Wakes," West Virginia University, Department of Mechanical and Aerospace Engineering, 2005.

[4] A. Benilov and A. Sutin, "Turbulent Bubble Wake Behind a Surface Ship," Stevens Institute of Technology Technical Report, SIT-07-6-2855, 2007.

[5] J. C. Park, "Report of Study on the Wake Modeling for Surface and Underwater Moving Vehicles," Agency of Defense Development, Technical Report, ADDR-115-080883, 2008.

[6] T. Yuehui and F. Wei, "A Bubble Distribution Model in Remote Ship Wake Construction and Simulation," 2015 Fifth International Conference on Instrumentation and Measurement, Computer, Communication and Control, 1734-1737, 2015.

[7] J. C. Novarini, R. S. Keiffer and G. V. Norton, "A Model for Variations in the Range and Depth Dependence of the Sound Speed and Attenuation Induced by Bubble Clouds under Wind-driven Sea Surfaces," *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 23(4), 423-438, 1998.

[8] J. Song, L. Bian, E. Yang and D. Su, "Bubble Density Gradient with Laser Detection: A Wake-homing Scheme for Supercavitating Vehicles," *Advances in Mechanical Engineering*, 10(6), 1-12, 2018.

[9] M. V. Hall, "A Comprehensive Model of Wind-generated Bubbles in the Ocean and Predictions of the Effects on Sound Propagation at Frequencies up to 40 kHz," *Journal of Acoustical Society of America*, 86(3), 1103-1117, 1989.

[10] R. Vossen and M. A. Ainslie, "The Effect of Wind-generated Bubbles on Sea-surface Backscattering at 940 kHz," *Journal of Acoustical Society of America*, 130(5), 3413-3420, 2003.

[11] E. R. Lewis and S. E. Schwartz, "Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements, and Models," American Geophysical Union, 2004.