

# 회류수조에서의 ABS에 의한 활주선 후류 기포항적계측

## Bubble Wake Measurement by Acoustic Bubble Spectrometer Generated by Planing Hull at Circulating Water Channel

신명수\*                      문일성\*                      나영인\*\*                      박종천\*\*\*  
 Myung-Soo Shin              Il-Sung Moon              Young-In Nah              Jong-Chun Park

### Abstract

This paper presents bubble wake measurement results generated by the planing hull. The bubble was generated by SNAME TMB model(No. 4876) with hard chine at the CWC(Circulating Water Channel). ABS(Acoustic Bubble Spectrometer) was used to measure bubble wake measurement. The manufactured model is one meter in length and uniform velocity to generate the bubble at CWC is 3m/s, relatively higher speed than conventional hull form. Measurements were performed successfully and measured results show well the general characteristics of bubble wake generated by planing hull. Furthermore, experimental equations are proposed for the practical use.

Keywords : Bubble Wake(기포항적), ABS(Acoustic Bubble Spectrometer, 음향기포계측장치), Void Fraction(기포율), CWC Experiments(Circulating Water Channel, 회류수조실험), Experimental Equation(실험식)

### 1. 서론

해양과의 자유표면에 발생된 기포를 계측하는 장치에 대하여 음향에 의한 장치가 개발되어 있으며, 계측에 많은 노력이 이루어지고 있다<sup>1,2)</sup>. 또한, 실선 주위 및 후류의 기포분포에 대하여서도 계측 및 연구가 이루어지고 있다<sup>3,4)</sup>.

이들의 연구는 음향에 의한 기포계측기인 ABS(Acoustic Bubble Spectrometer)에 의해 수행되고 있다.

그러나, 선박 후류에서 선체에 의해 발생된 기포, 선수파에 의한 기포의 상호간섭, 후류 기포 갯수 및 기포율의 계측결과, 발생 메커니즘에 관한 연구는 미비한 실정이다.

본 논문은 모형선에 의해 발생된 후류 기포항적의 일반적 특성을 조사하기 위해, 회류수조에서의 모형선 후류의 기포분포 계측 결과에 대하여 논한다. 계측시험은 회류수조에서 수행되었으며 활주모형선에 의해 발생된 기포를 ABS(Acoustic Bubble Spectrometer)로 계측하였다. 모형선의 선형은 SNAME TMB의 하드차인을 갖는 모델(No. 4876, Hard-chine Boat)이며 길이는 1.0m이고, 기포발생을 위하여, 상대적으로 고속인 유속 3.0m/s에서 계측하였다. 계측은 성공적으로 수행되었으며, 계측결과는 모형에 의해 발생된 기포분포(Bubble Distribution) 및 기포율(Void Fraction)의 일반적인 특성

† 2010년 11월 5일 접수~2011년 1월 20일 게재승인

\* 한국해양연구원(KORDI)

\*\* 국방과학연구소(ADD)

\*\*\* 부산대학교(Pusan National University)

책임저자 : 나영인(nyi1972@kornet.net)


을 잘 보여주고 있다.

## 2. 계측시스템

### 가. 모형시험 수조

모형시험 수조는 일본에 소재한 FEL(West Japan Fluid Engineering Laboratory Co., Ltd.)의 고속 중형 회류수조(CWC : Circulating Water Channel)에서 수행하였으며, 주요 제원 및 사진을 Table 1에 명시하였다.

Table 1. Principal dimensions of circulating water channel

최고 속도	6.0m/s	
관측부 사양(m)	길이×폭×깊이 7.0×1.5×1.2	
동력부	110kw×2	

### 나. 기포학적 시험 시스템

기포학적 계측을 위한 시스템은 Fig. 1에서와 같이 계측부, 이송시스템 및 ABS(Acoustic Bubble Spectrometer)로 구성되어 있다.

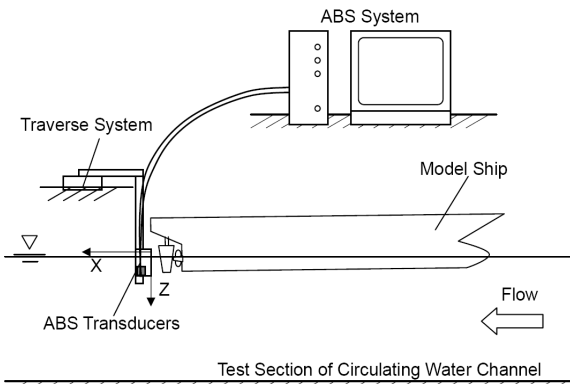
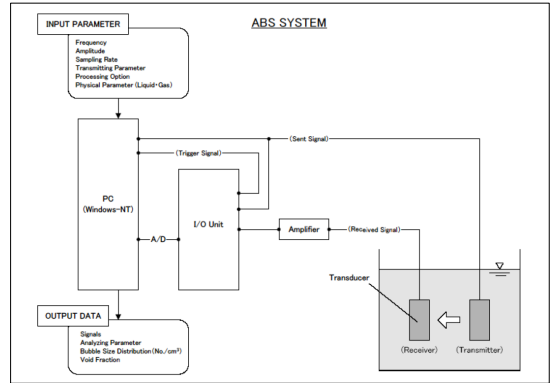


Fig. 1. Schematic diagram for bubble wake test

ABS는 기포의 크기 및 기포율을 계측하는 계측센서이며, 계측센서와 계측데이터 분석을 위한 컴퓨터로 이루어져 있다. ABS 계측 시스템의 개념도 및 사진을 Fig. 2에 도시한다.

Fig. 3은 ABS 계측정확도 측정을 위하여 챔버 내 주입된 기포의 양을 마이크로 카메라 계측결과와 비교한 것으로 정성적, 정량적으로 유사한 결과를 보이고 있다<sup>[5]</sup>.



ABS System

Fig. 2. Schematic diagram and photograph of ABS (Acoustic Bubble Spectrometer)

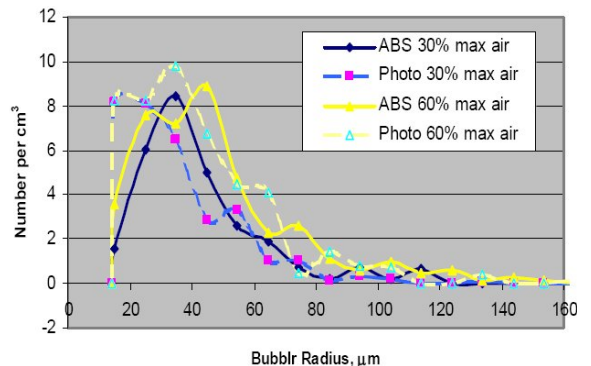


Fig. 3. Sensitivity of the bubble size distribution measurements(ABS and micro photography)

### 3. 기포항적시험

#### 가. 좌표계 및 기호

기포항적 실험을 위하여 사용한 기준 좌표계는 우수좌표계로서, Fig. 4와 같이 프로펠러 위치를 원점으로 하고, 횡방향을 y축으로 하였다. 따라서, z축은 수직방향이 되며, 수면 아래방향을 음으로 한다.

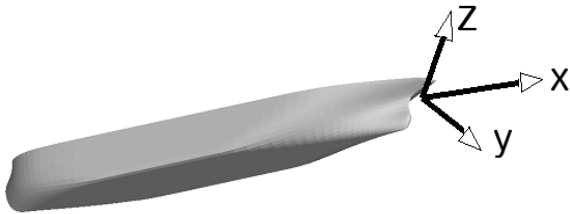


Fig. 4. Coordinate system for bubble wake distribution

계측된 기포항적의 기포율(VF : Void Fraction)은 다음과 같이 정의한다.

$$VF = \left( \frac{\text{volume of bubble}}{\text{volume of water} + \text{volume of bubble}} \right)$$

#### 나. 기포항적 실험

회류수조의 유속 및 선형에 따른 타당성을 파악하기 위하여, 몇 차례의 예비시험을 수행하였다. 보통의 중저속 선형에 의한 회류수조에서 기포발생은 VF가  $10^{-6}$ 의 크기로 ABS로 계측할 수 없는 영역으로 실패하였다. 이때의 무차원계수인 푸르드수(Froude Number)는 0.5 부근이며 1.0 이상의 고속역에서 기포가 발생하는 것을 확인하였다. 결론적으로, 고속선형인 활주선형으로, 모형선 길이 1미터에 3m/s 이상의 속도에서 기포가 발생하는 것을 확인되어, 이 영역에서 계측을 수행하였다.

계측을 수행한 고속 중형 회류수조의 제원 및 사진은 Table 1에서 전술하였으며, Fig. 5는 회류수조에서의 항적계측 시험장면을 나타내고 있다.

공시모형은 전술한 바와 같이, 고속 활주선으로서 제원은 다음과 같으며, Fig. 6은 이해를 돕기 위한 모형선의 정면선도(Body Plan)를 나타내고 있다.

#### ○ Ship Shape

- : high speed boat
- : SNAME, Small Craft No. 14,

TMB Model No. 4876

- Length( $L_{pp}$ ) : 1.0m
- Breadth : 0.294m
- Draft : 0.054m

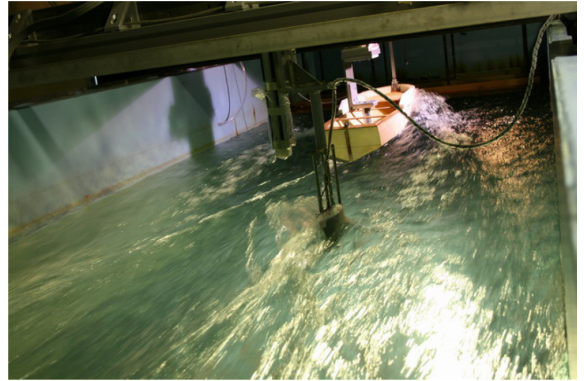


Fig. 5. Photographs of bubble wake measurement test in CWC

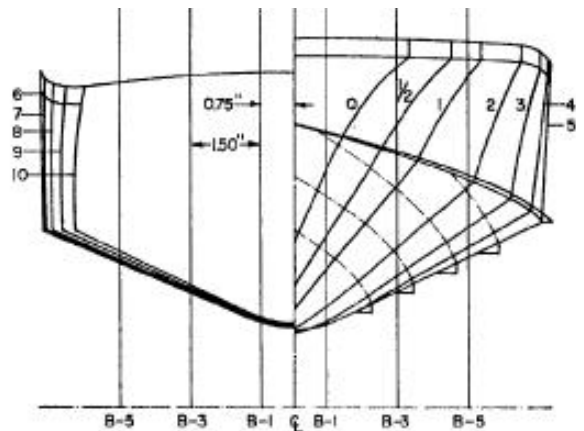


Fig. 6. TMB-4876 body plan

고속활주선은 항주속도에 따라 자세변화량이 매우 커서, 모형에 의한 상대적인 위치를 결정하는 것이 매우 어렵다. 후류분포의 특성을 파악하기 위한 시험목적은 위하여, 모형선의 트림(Trim) 및 Heave는 정지상태에서 고정하였다.

회류수조의 유속은 3.0m/s이며, 계측점은 Table 2와 같다.

Table 2. Measuring Point

• Stream-wise (x/L)	0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6, 0.8, 1.0, 1.5, 2.0, 3.0, 4.0
• Breadth-wise (y/L)	0, 0.074, 0.147, 0.221, 0.294, 0.441, 0.588
• Depth-wise (z/L)	-0.032, -0.043, -0.054, -0.065, -0.076, -0.086, -0.108

여기서,  $y/L = 0.147$ 은 모형선 반폭(B/2)에 해당하며,  $z/L = 0.054$ 는 모형선 흘수(D)에 해당한다.

계측점은 약 450개이며, 계측된 기포항적의 기포율(Void Fraction)을 Fig. 7에 도시하였다. 계측결과에 의하면, 배의 반폭정도 떨어진 위치( $y/L = 0.147$ )의 안쪽 (Inner Layer)과 바깥쪽(Outer Layer)에서 기포가 발생되고 있음을 알 수 있다.  $y/L$ 가 0.147 이하인 내부영역의 기포는 선체 경계층에 의해 발생된 기포이며,  $y/L$ 이 0.147보다 큰 외부영역은 선수파에 의해 발생된 기포로서,  $x/L=0.6$ 이후에서 확산되는 것을 알 수 있다. 또한, 외부영역의 VF값은  $10^{-6}$ 의 크기로 충분히 작아 계측정도는 만족할 만하다.

기포항적의 수직 분포 및 자유수면의 영향을 알아보기 위하여, 파고 계측을 수행하였다. 파고계에 의한 데이터는 50Hz의 A/D변환기를 이용하여 평균하였다. 계측점은 ABS와 동일한 위치에서 수행하였으며, 계측결과를 Fig. 8에 도시하였다. 선체에 의해 발생된 파도의 최저점은  $z/L = -0.03$ (30mm에 해당)이며, 이보다 낮은 위치(깊은 수심)에서 계측을 수행하였다.

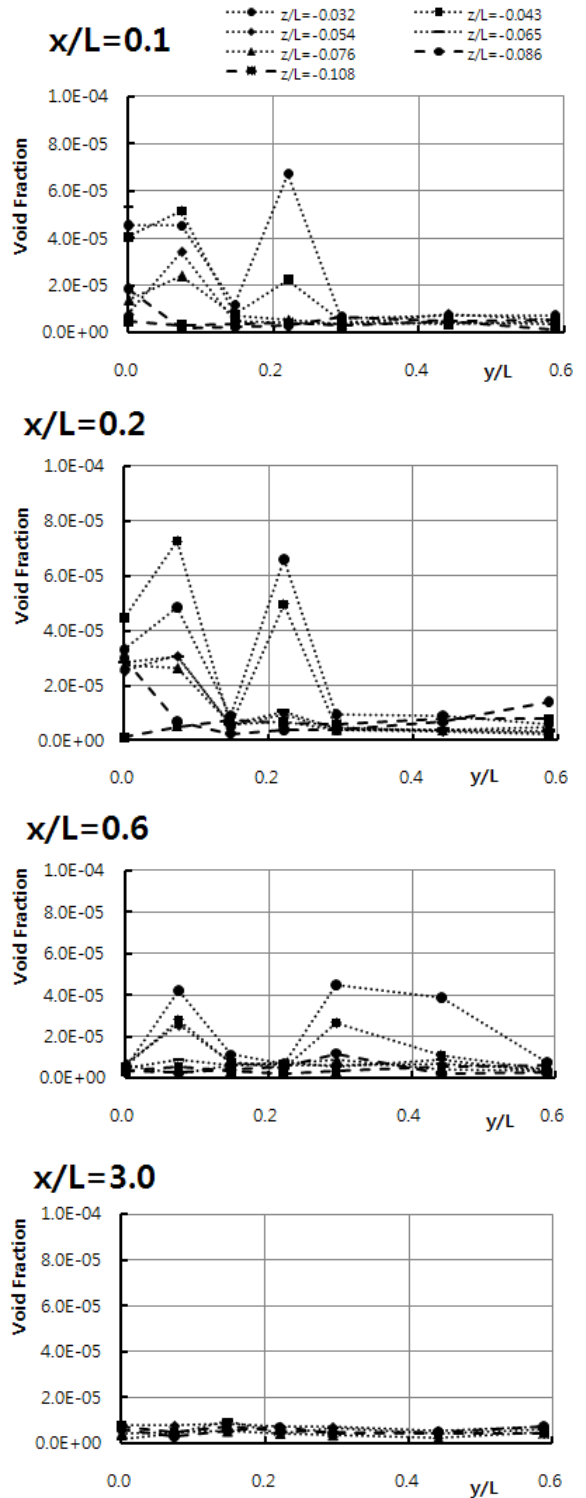


Fig. 7. Measured results of void fraction of bubble wake

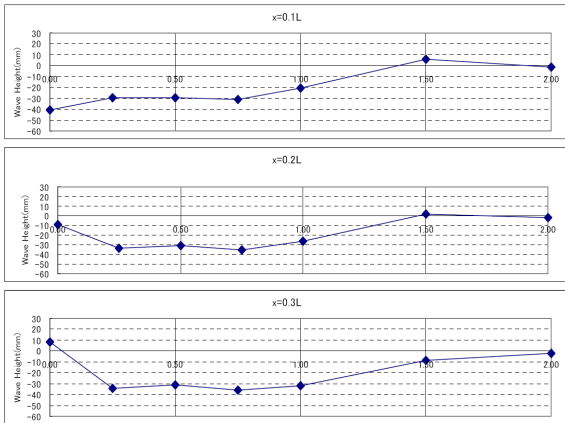


Fig. 8. Distribution of free-surface elevation

#### 4. 기포학적 결과분석 및 실험식 도출

##### 가. 좌표계 및 기호

기포학적 실험식을 도출하기 위하여 사용한 기준 좌표계는 Fig. 4와 동일하며, 수식 전개에 있어 각각의 기호는 다음과 같다.

- VF : Void Fraction
- $VF_{fs}$  : Void Fraction on Free-Surface
- $Z_{fs}$  : Vertical distance from free-surface [m]

또한, 모든 길이의 차원은 선박의 길이 L로 무차원화 하였으며, X/L, Y/L, Z/L로 표기 하였다.

##### 나. 결과 분석 및 실험식 도출

수상함에 의한 후류의 영역은 Fig. 9와 같이 알려져 있다<sup>6)</sup>.

본 연구의 시험 결과에 의하면 외부영역(Outer Layer)은 선수 쇄파(Wave-Breaking)현상에 의해 발생된 기포가 켈빈파(Kelvin Wave)와 유사한 각도로, 확산되어 전파됨을 알 수 있었다. 또한, 내부영역(Inner Layer)은 선체부 난류경계층과 자유표면의 교란, 추진기의 후류에 의해 선체 후방으로 전파됨을 알 수 있다.

##### 1) 자유표면 최대기포율 분포

Fig. 10은 측정결과로서 자유표면에서의 최대 기포율 분포이다. 결과에 의하면, 프로펠러 중심축에서 선체

반쪽인  $y/L = 0.147$ 까지 기포가 분포하고, 없어졌다가  $y/L = 0.2$ 보다 넓은 영역으로 전파되는 것을 알 수 있다. 여기서,  $y/L = 0.147$  내의 영역은 선체 난류경계층과 자유표면과의 교란에 의해 생성된 기포이고, 바깥 영역은 선수부와 자유표면과의 교란에 의한 확산이며, 켈빈파와 유사한 형태로 전파된다.

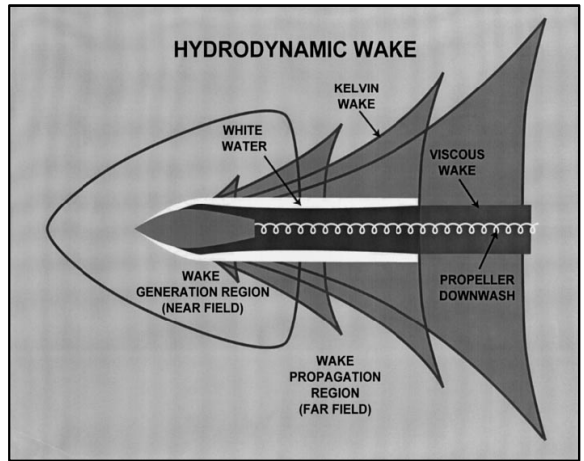


Fig. 9. Schematic diagram of hydrodynamic wake by conventional ship

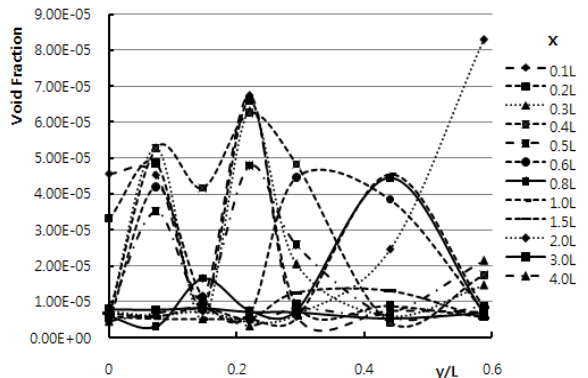


Fig. 10. Measured maximum void fraction distributions on free-surface

##### 2) 자유표면에서의 기포 존재영역

모형시험결과를 바탕으로 최대 기포율의 위치를 Fig. 11에 도시하였다. 켈빈파의 안쪽영역으로 측정된 결과로서, 자유표면에서 최대 기포가 존재하는 영역 y, 기포가 없어지는 영역인 바깥 경계층  $y_0$ 는 다음과 같이 식 (1), 식 (2)로 각각 표시 할 수 있다.



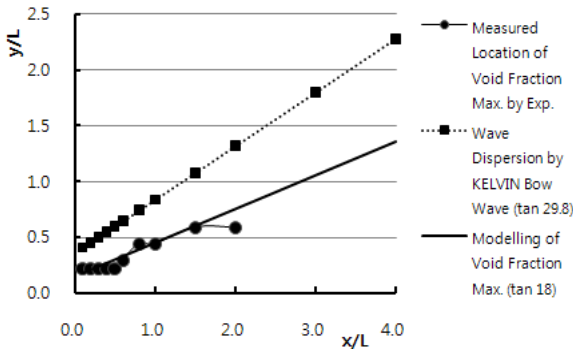


Fig. 11. Lateral location of maximum void fraction on free-surface

$$y/L = B/2 + \tan(18^\circ) \times x/L \quad (1)$$

$$= B/2 + 0.325 \cdot x/L$$

$$y_o/L = B/2 + \tan(29.8^\circ) \times x/L \quad (2)$$

$$= B/2 + 0.573 \cdot x/L$$

단,  $x \leq 2.0m$

3) 자유표면에서의 수평방향 기포율 분포

Fig. 12는 자유표면에서의 기포율로서, 켈빈파 내부영역(Inner Layer), 외부영역(Outer Layer)의 최대값과 평균값을 도시하였다. 내부영역의 기포는 선체에 의해 형성된 것으로 모형선의  $Rn$ (Reynolds Number)가 낮기 때문에, 바로 감쇄되는 경향을 보이고 있고, 선수파에 의한 외부영역(Outer Layer)의 기포는 매우 큰 값을 보여주고 있음을 알 수 있다.

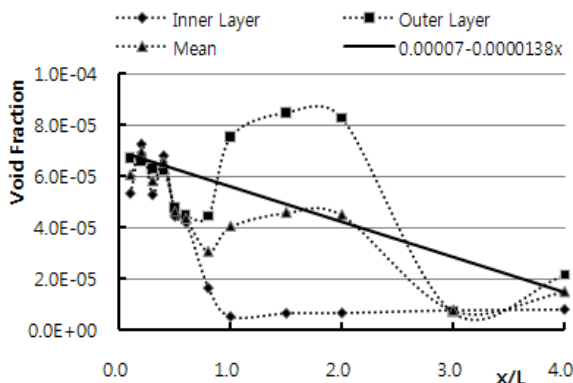


Fig. 12. Empirical formulation of maximum void fraction on free-surface

현재의 실험결과만으로는 선체에 의해 발생된 내부영역의 기포와 선수파에 의한 외부영역의 기포율을 고려하여, 정량적으로 정확한 실험식의 도출은 무리라고 판단된다. 따라서, 참고문헌[3]의 실선 항적에 의한 음향산란신호 계측 결과를 근거로, 자유표면의 기포율은 횡방향으로 최대기포가 존재하는 영역(식 1)까지 일정하다고 가정하였다. 그 양은 다음 식으로 결정하고, Fig. 12에 도시하였다.

$$VF_{fs}/L = 0.00007 - 0.0000138 \cdot x/L \quad (3)$$

단,  $0 \leq x/L \leq 2.0$

4) 자유표면에서의 수직방향 기포율 분포

수직방향 분포를 결정하기 위해, 자유표면 최대기포율에 대한 수직방향 기포율 비( $VF/VF_{fs}$ )를 계산하였다. 수직방향 기포율 비는 Fig. 13과 같다. 기울기는  $-11z$ 로서 자유표면 아래방향  $0.09m$ 부근에서  $0.0$ 이며, 이는 선체 홀수의 2배에 해당한다. 이것을 식으로 표현하면 식 (4)와 같으며, Fig. 13에 도시하였다.

$$VF = VF_{fs}(1.0 - 11 \cdot z_{fs}/L) \quad (4)$$

단,  $0 \leq z_{fs}/L \leq 0.09$

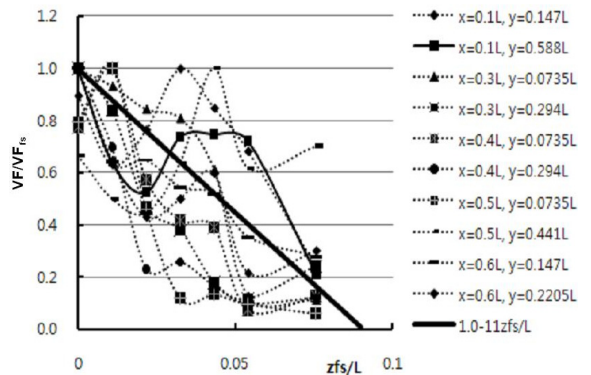


Fig. 13. vertical void fraction rate( $VF/VF_{fs}$ ) distribution below free-surface

전술한 식 (1)~(4)를 종합하여 자유표면의 기포율 분포는 Fig. 14에, 각 단면에서의 분포는 Fig. 15에 도시하였다. 이는 모형실험결과에 근거한 것으로 실선 적용을 위해서는 많은 노력이 요구된다.

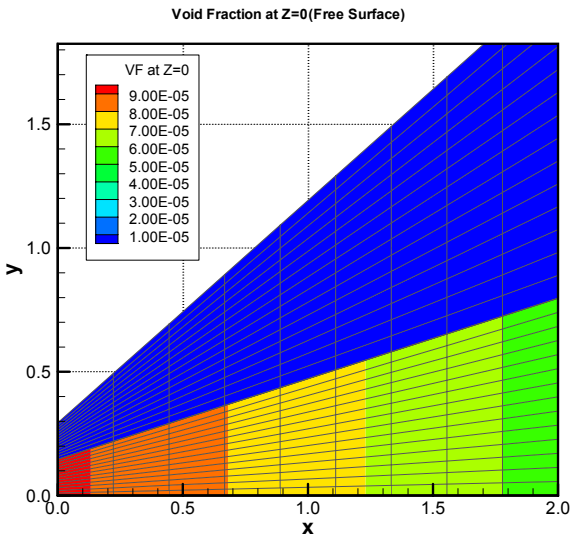


Fig. 14. Void fraction distribution on free-surface by empirical formulation

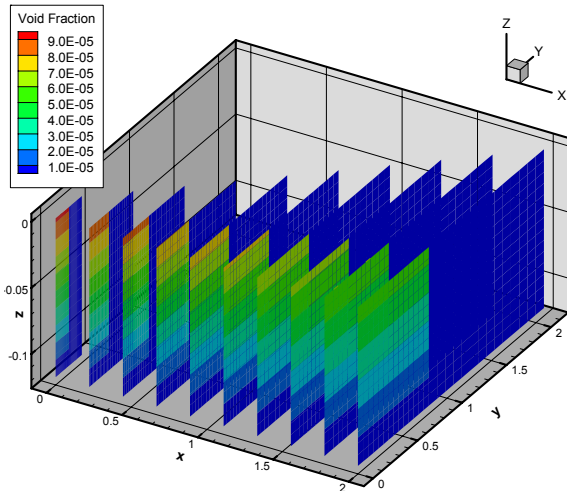


Fig. 15. Void fraction distribution of wake by empirical formulation

## 5. 결론

본 논문에서는 회류수조에서 ABS를 이용하여 활주

선형 후류의 기포분포를 계측하였으며, 이를 근거로 실험식을 도출하였다. 계측된 기포분포는 수상선에 의한 일반적인 특성을 정성적으로 잘 보여주고 있는 것으로 판단된다.

그러나, 선체에 의해 발생된 기포와 선수파에 의해 발생된 기포의 자유표면에서의 상호간섭, 수직방향의 정량적 분포 등의 명확한 메커니즘, 실선 상관관계 연구는 향후 과제이며 이를 위한 실선계측연구가 중요하다.

## 후 기

본 연구는 국방과학연구소의 핵심기술 응용연구 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## Reference

- [1] Vagle S., Farmer D. M., "A Comparison of Four Methods for Bubble Size and Void Fraction Measurements", *Ocean Engineering*, Vol. 23, No. 3., pp. 211~222, 1998.
- [2] Hoque A., Aoki S., "Distributions of Void Fraction Under Breaking Waves in the Surf Zone", *Ocean Engineering*, Vol. 12, pp. 1829~2840, 2005.
- [3] 이재훈, "항적에 의한 음향산란신호의 실험적 연구", 한국해양대학교 공학석사 학위논문, 2008.
- [4] Ikemoto, A., Kato H., Yoshida Y., "Development of Void Fraction Measuring Device for Full-scale Test", *일본조선학회논문집*, 제191호, pp. 43~50, 2002.
- [5] G. L. Chahine and K. M. Kalumuck, "Development of a Near Real-Time Instrument for Nuclei Measurement : The ABS Acoustics Bubble Spectrometer", 4th ASME JSME Joint Fluid Eng. Conf. 2003.
- [6] A. M. Reed and J. H. Milgram, "Ship Wakes and Their Radar Images", *Annual Review of Fluid Mechanics*, Vol. 34, pp. 469~502, 2002.