

# 공기윤활선 모사 실험에서의 공극률 및 마찰저항저감율 상관성 분석을 위한 실험적 연구

박승찬\* · 이인원†

## Experimental study on analysis of correlation between void fraction and drag reduction rate in air lubrication ship

Seungchan Park\*, Inwon Lee†

**Abstract** The reduction of CO<sub>2</sub> emissions has been a key target in the marine industry since the IMO's MEPC published its findings in 2009. Air lubrication method is one of the mature technologies for commercialization to reduce the frictional resistance and enhance fuel efficiency of ships. Since the air lubrication pattern varies according to the ship's standing position and injection flow rate, in order to effectively control the air lubrication system, it is necessary to be able to judge the air layer development state based on the information collected from the monitoring sensor. In this study, we performed the air lubrication ship simulation experiment to measure the void fraction and the frictional resistance. The void fraction was measured to confirm the behavior of the air. Through the measurement of the frictional resistance, the change in frictional resistance reduction rate from the injection point to the longitudinal direction of the ship was confirmed. Based on the measurement results, correlation analysis was performed on void fraction and frictional resistance reduction rate.

**Key Words** : Air Lubrication(공기윤활), Air lubrication ship(공기윤활선박), Void fraction(공극률), Frictional resistance(마찰저항), Monitoring sensor(감시 센서)

### 1. 서론

최근 산업화에 따른 화석연료의 사용은 지구 온난화, 오존층 파괴, 산성비 등을 유발하며 이는 전 세계적으로 환경 기후 변화와 화석연료의 고갈로

인한 자원위기에 동시에 직면해 있다. 이에 전 세계적으로 지구 환경 보호에 대한 문제가 대두되고 있다. 현재 배출되고 있는 CO<sub>2</sub> 배출량은 2007년 약 317억 톤으로 추정되며 이 중 선박에 의한 CO<sub>2</sub> 배출량은 약 10억 4천6백만 톤으로 전체 배출량의 약 3.3%를 차지하고 있다<sup>(1)</sup>. 이에 국제해사기구(IMO)에서는 선박의 에너지 설계 효율 지수(Energy Efficiency Design Index : EEDI)를 적용하였으며, Fig.1에 나와 있듯 2008년 배출량 기준으로 2016년부터 1단계 10% 저감, 2020년부터 2단계 20% 저감, 2025년부터 30% 저감을 목표로 하고 있다<sup>(2)</sup>. 그에 따른 에너지 저감 장치(Energy Saving

---

† Department of Naval Architect and Ocean Engineering, Pusan National University, Professor  
E-mail: inwon@pusan.ac.kr

\* Department of Naval Architect and Ocean Engineering, Pusan National University, M.S. Candidate

---

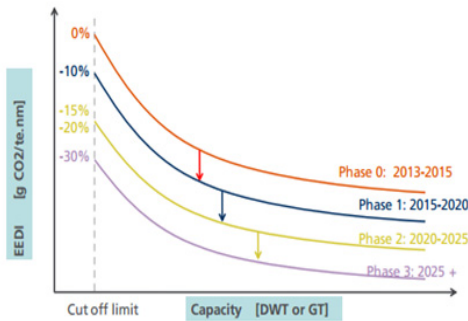


Fig. 1. Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines<sup>(2)</sup>

다. 그 중 선형 개발과 추진 효율을 향상시키는 에너지 저감 장치(ESD)에 대한 연구가 여러 기관에서 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 온실가스 배출량 감소를 위한 방안으로 에너지 저감 장치(ESD) 중 선박의 마찰저항을 감소시키는 기술인 공기운할 시스템에 관한 연구를 수행하였다.

공기운할시스템의 주요 구성 요소를 정리하면 아래 Fig. 2와 같다. 공기운할시스템은 적용 대상 선박의 특성에 맞도록 설계되어 필요한 양의 압축 공기를 생산하는 공기 공급기와 생산된 압축 공기를 이송하는 공기 공급 관로, 이송된 공기를 선체 표면으로 분사하는 공기 분사 장치, 각종 계측 센서로부터 수집된 데이터를 바탕으로 전체 시스템을 제어하는 제어기로 구성된다.

분사되는 공기의 거동 및 선체의 형태에 따른 공기운할기법이 다양하게 존재한다. 먼저 미소기포법(Micro-bubble lubrication)은 선박의 선체에 미소기포를 분사하여 유체의 Bulk density를 낮추거나 난류운동에너지전달을 방해하여 마찰저항저감을 이루는 방법으로 일본 NMRI(National Marine Research Institute)에 의하여 실선 적용이 시도되어 3-4%의 운항효율향상이 보고되고 있다<sup>(3)</sup>. 공기막운할(Air-layer lubrication)은 미소기포법보다 2배 이상의 공기를 분사하여 선체표면과 유체사이의 침수표면적을 줄여 마찰저항저감을 이루는 방법이다. 이외에도 선박의 선체에 공기포켓을 설치하여 적은 공기유량으로도 마찰저항저감을 이루는 Device : ESD)에 대한 많은 연구가 이루어지고 있



Fig. 2. Main components of air lubrication system

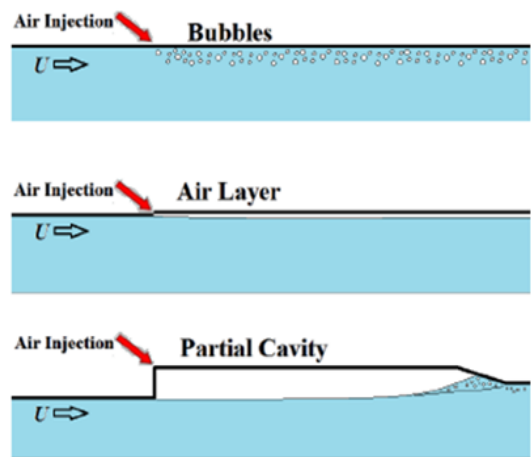


Fig. 3. Concept of BDR, ALDR and PCDR (Partial Cavity Drag Reduction)

방법도 있다<sup>(4)</sup>.

미국의 미시간대학교에서는 6m 평판에서 공기 분사유량에 따른 BDR(Bubble drag reduction)기법과 ALDR(Air layer drag reduction)기법의 변화에 대한 연구를 수행하였다<sup>(5)</sup>. Fig.4은 분사유량과 운할기법에 따른 마찰저항저감율을 나타낸 그래프이다. 초기 BDR기법에서의 공기분사유량을 약 2배 정도 늘려줄 경우 분사된 공기가 응집되어 공기층을 형성하면서 저항저감율은 4배 이상 증가하는 것을 확인 할 수 있었다<sup>(5)</sup>.

선박의 선저에서 공기층의 발달 상태를 직접 확인하는 방법은 현재까지 존재하지 않는다. 공기층의 발달 상태를 확인할 수 있다면 좀 더 효율적인 공기운할시스템 제어가 가능할 것이다. 이에 대해

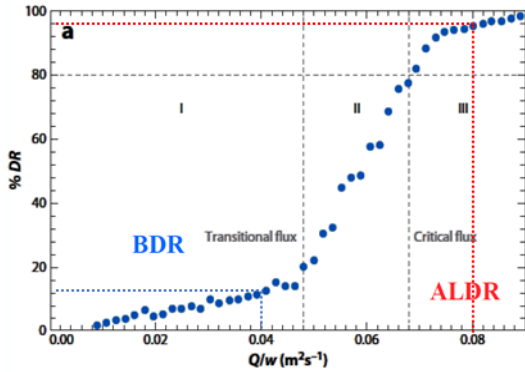


Fig. 4. Drag reduction efficiency as air flux<sup>(5)</sup>

부산대학교에서 선박공기기층 발달 상태 감시센서 개발에 대한 선행연구가 있었다. 선행연구에서 개발된 공기와 물의 공극률을 확인 할 수 있는 void fraction 센서를 이용하여 본 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 삼성중공업 공동수조에서 실선과 유사한 환경에서 void fraction과 마찰저항저감율에 대한 상관성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였다.

## 2. 실험 장비

### 2.1 대형 공동수조

시험은 (주)삼성중공업 대덕선박연구센터 대형 공동수조 (LCT, Large Cavitation Tunnel)의 소형 시험부에서 수행되었다. 소형 시험부의 제원은 Table. 1에 나와 있듯이 가로 3m, 세로 1.4m, 길이 12m이다. 터널의 최대 유속은 12m/s이며, 압력 조정 범위는 0.1-4.0bar이다.

Table. 1. Specification of Large Cavitation Tunnel(SSMB)

Test section(L×B×D)	12m×3m×1.4m
Max. Flow speed	12m/s
Pressure range	0.1 ~ 4.0 bar



Fig. 5. Large Cavitation Tunnel(SSMB)

### 2.2 계측 센서

본 연구에 사용된 계측 센서의 사양은 Table 2와 같으며, Fig. 6에 나와 있듯이 마찰저항측정을 위한 3개의 friction dynamometer와 공극률 측정을 위한 9개의 void fraction sensor와 90mm 공기분사 노즐을 이용하였다.

Table. 2. Specification of sensor & nozzle

Friction dynamometer	·Capacity : 5N
Void fraction sensor	·Diameter : 25mm
Air injection nozzle	·hole_90mm(dia)



Fig. 6. Measuring sensors & Air injection nozzle

### 2.3 공극률 Calibration

공극률 변화에 따른 calibration을 위해 진도성이 없는 공기를 MC Nylon으로 대신하였고, 공기와 물의 비율을 모사한 calibration block을 Fig. 7과 같이 물의 비율이 79%, 59%, 37% 차지하도록 제작하였다. Fig. 8은 calibration을 수행한 사진이고, Fig. 9는 Calibration curve이다. Calibration은 공극률

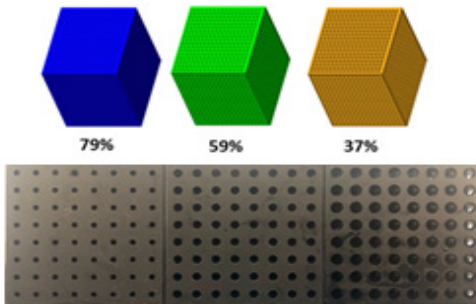


Fig. 7. Void fraction calibration block

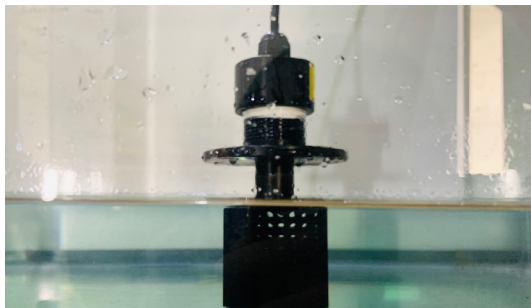


Fig. 8. Calibration of void fraction

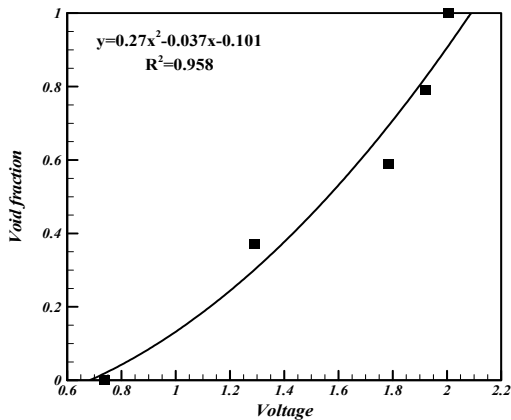


Fig. 9. Calibration curve of void fraction sensor

0, 0.37, 0.59, 0.79, 1.0의 5 point에서 실시하였고, 센서 출력과 공극률 사이의 상관계수  $R^2 = 0.958$ 의 비교적 합리적 수준의 결과가 도출되었다.

### 2.4 실험 평판

계측 센서의 설치를 위해 제작된 평판의 길이는 4.8m, 폭 1.2m 이고 마찰저항측정센서는 공기분사구로부터 길이 방향으로의 변화를 보기위해 평판의 중앙에 일렬로 설치하였다. Void fraction sensor는 폭 방향 3개씩 설치하였다.

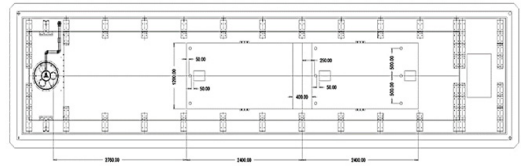


Fig. 10. Installation of sensors at flat plate (B×L : 1.2m×4.8m) inside large cavitation tunnel

## 3. 실험 방법 및 조건

### 3.1 실험 방법

본 연구의 공기유회 실험을 수행하기 위해 아래 Fig. 11과 같이 실험 set-up을 하였다. 압축기에서 생성된 공기는 MFC(Mass Flow Controller)를 통해 공기분사유량을 제어하고 분사된 공기는 유동흐름방향의 후방에 위치한 센서들에 의해 공극률 및 마찰저항 값을 계측한다. 화상분석을 위하여 4대의 Gopro와 2대의 고속카메라를 이용하여 유회상태를 기록하였다.

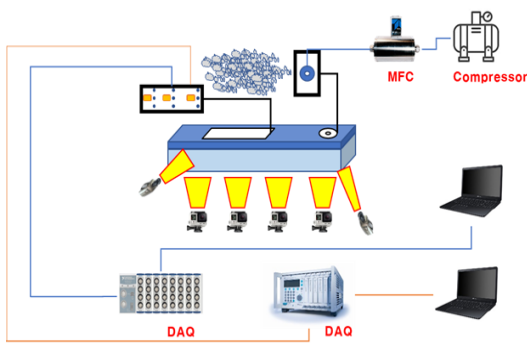


Fig. 11. Air lubrication Experimental schematic

### 3.2 실험 조건

공기분사 실험조건은 Table. 3에 나와 있듯이 50m<sup>3</sup>/h ~ 450m<sup>3</sup>/h 까지 100m<sup>3</sup>/h step으로 수행하였다. 여기서 KER(Kinetic Energy Ratio)은 분사되는 공기의 운동에너지와 물의 운동에너지 비를 나타낸다.

Table. 3 1hole\_90mm nozzle test case

Flow speed [m/s]	KER*(Kinetic Energy Ratio)				
	Air injection flow rate (m <sup>3</sup> /h)				
	50	150	250	350	450
2.0	1.5E-03	1.4E-02	3.8E-02	7.5E-02	1.2E-01
4.0	3.8E-04	3.5E-03	9.6E-03	1.9E-02	3.1E-02
6.0	1.7E-04	1.5E-03	4.3E-03	8.4E-03	1.4E-02
8.0	9.6E-05	8.7E-04	2.4E-03	4.7E-03	7.8E-03

$$* KER = (\rho_{air} \times v_{air}^2) / (\rho_{water} \times U_{NF}^2)$$

## 4. 실험결과 및 분석

### 4.1 공극률 실험결과

본 연구의 공극률 실험 결과에 대한 분석은 Fig. 12의 상단 그림과 같이 평판에 설치된 9개소의 공극률 센서 측정값을 보간하여 구한 공극률 contour (중간 그림)를 공기막 패턴 사진(하단사진) 과 비교분석하였다.

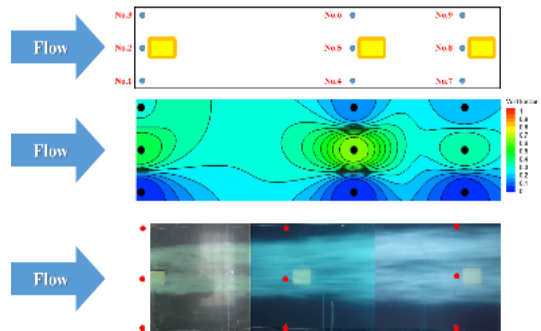


Fig. 12. Contour of void fraction

### 4.2 공극률과 마찰저항저감을 간 상관성 분석

본 연구의 마찰저항 실험 결과에 대한 분석은 평판의 중앙 후류방향으로 설치된 마찰저항검력계에서 측정된 데이터를 바탕으로 인접한 위치에 설치되어 있는 공극률 센서 측정값과의 상관성을 확인하였다.

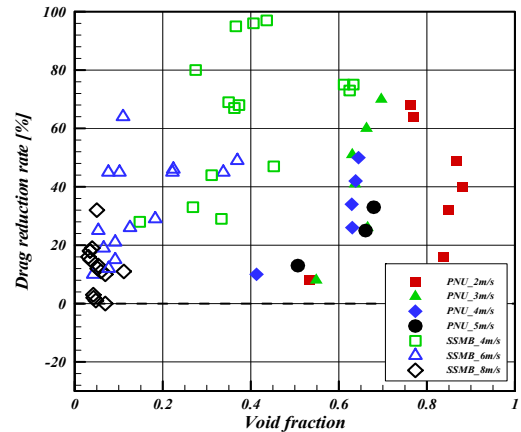


Fig. 13. Correlation of void fraction & drag reduction rate (1hole\_90mm)

Fig. 13은 부산대학교 고속회류수조 실험결과 (closed symbol)와 (주)삼성중공업 대형공동수조 실험결과 (open symbol)에서 나타난 마찰저항저감과 공극률 간의 상관성 분석을 위하여 작성한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 부산대학교에서 수행한 실험값과 (주)삼성중공업에서 수행한 실험값 간의 차이가 남을 확인 할 수 있다. 이는 실험 세팅에서 공기분사노즐과 계측 센서 간의 상대적 거리차이로 인한 것이라고 판단된다. 노즐과 센

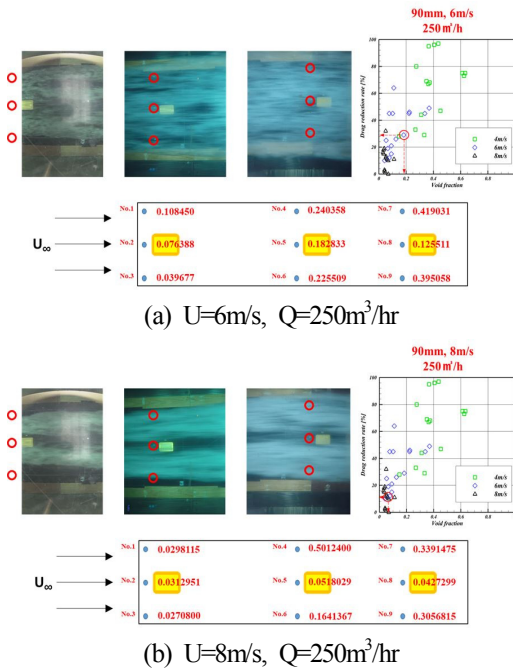


Fig. 14. Effect of flow speed on air layer

서 사이의 거리가 긴 (주)삼성중공업 대형수조 실험 결과는 부산대학교 실험 결과에 비해 낮은 공극률을 보이는데, 이는 분사된 공기가 노즐로부터 긴 거리를 흘러가면서 초기에 형성된 공기막이 기포로 쪼개지거나 경계층 두께 방향으로 확산되면서 마찰저항 저감효과가 저하되기 때문으로 판단된다. 공극률 센서의 경우 벽면에서의 저항값을 기반으로 측정되나 기포의 경계층 두께방향 분포에 따라 영향을 받는 것으로 추측된다.

Fig. 14는 동일한 공기분사 유량에서 유속이 증가했을 때의 공기유통패턴의 사진 및 공극률 센서 측정결과를 비교하고 있다. 유입유속이 증가할수록 공극률과 마찰저항 저감율이 함께 감소함을 볼 수 있는데, Fig. 14(b)에서처럼 분사된 공기가 ‘△’ 형태로 퍼져 나가지 않고 ‘∧’ 형태로 갈라져 나가는 분지현상 (branching) 이 나타나기 때문으로 분석된다.

5. 결론

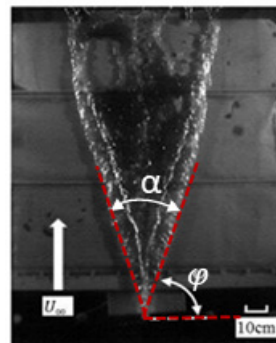
(주)삼성중공업 공동수조에서 실선과 유사한 환경에서 공극률 센서를 통하여 공기층 발달 상태를

가시화하였고 공극률과 마찰저항저감을 간 상관성 분석을 위한 실험적 연구를 수행하였다.

(1) 공극률 센서에서 출력되는 데이터를 가지고 공기의 거동을 확인 할 수 있었다.

(2) 동일한 유입유속에서 공기 분사유량이 증가함에 따라 공기의 분지현상이 선명하게 일어남을 확인 할 수 있었다. 이와 유사하게 동일한 공기분사유량에서 유입유속이 증가함에 따라 공기의 분지현상이 선명하게 일어남을 확인 할 수 있었다. 이를 통하여 공기의 분지현상은 공기분사속도, 유입유속의 영향을 확인 할 수 있었다.

(3) Park (2018)<sup>(6)</sup>은 Mäkiharju 등 (2017)<sup>(7)</sup>이 제안한 공기유통 확산각 추정식에서 고속영역과 여러 분사변수의 조건을 적용하여 공기유통 확산각 추정식을 새롭게 제안하였다. Fig. 15는 공기 분사 조건에 따른 유통확산각  $\varphi$ 를 정의하였다. Table. 5는 해당 추정식의 주요 변수를 정리한 것이다. 여기에서  $Q_i$ : 공기분사 유량,  $D$ : 분사구 직경,  $\delta$ : 경계층 두께,  $v_{air}$ : 분사공기유속이다.



$\varphi = \text{External angle}$   
 $\alpha = \text{Internal angle}$   
 $\varphi = 90 - \frac{\alpha}{2}$

Fig. 15. Definition of air diffusion angle according to air injection conditions

Table. 5. Non-dimensional parameters for diffusion angle correlation

Non-dimensional parameters	
$Fr_\delta$	$U_\infty / \sqrt{g\delta}$
$Re_\delta$	$U_\infty \delta / \nu_\infty$
$Q'^*$	$\sqrt{Q_i / U_\infty} / D$
$KER$	$(\rho_{air} \times v_{air}^2) / (\rho_{water} \times U_\infty^2)$

Table. 5의 변수들을 적용하여 Park (2018)<sup>(6)</sup>이 제안한 확산각 추정식은 다음과 같다.

$$\cos(\varphi) = 0.039(Re^{0.003}Fr^{-0.329}KER^{-0.129}Q^{*0.655})^{2.94} \quad (1)$$

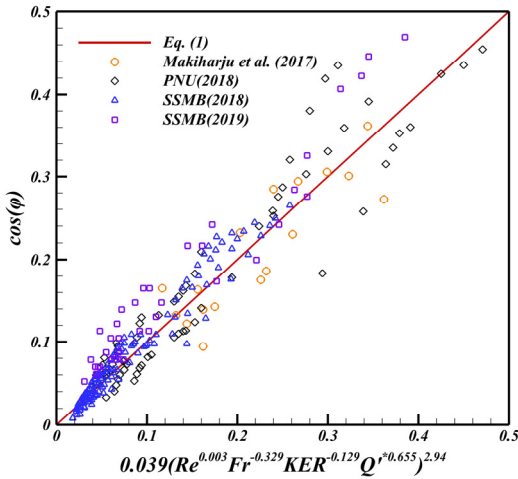


Fig. 16. Comparison of the diffusion angle correlation (Eq. 1) and experimental results

## 후 기

이 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국 연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

## Reference

- 1) International Maritime Organization (IMO) London, UK, April 2009, "Second IMO GHG Study 2009", pp.23-35
- 2) IMO Train the Trainer(TTT) course on Energy Efficient Ship Operation, Module 2 - Ship Energy Efficiency Regulations and Related Guidelines (2016), pp.12
- 3) Makoto Kawabuchi and Shinichi Takano 2011, "CFD Predictions of Bubbly Flow around an Energy-saving Ship with Mitsubishi Air Lubrication System", Misubishi Heavy Industries

Technical Review Vol. 48, No. 1 (March 2011), pp.53-57

- 4) Ceccio, S. L and Makiharju, S. A., 2012, Air lubrication drag reduction on Great Lakes Ships, Report of Great Lakes Maritime Research Institute, Michigan : Department of Naval Architecture and Marine Engineering, University of Michigan.
- 5) Elbing, B. R., Winkel, E. S., Lay, K. A., Ceccio, S. L., Dowling, D. R and Perlin, M., 2008, "Bubble-Induced Skin-Friction Drag Reduction and the Abrupt Transition to Air-Layer Drag Reduction.", Journal of Fluid Mechanics, Vol. 612, pp201-236.
- 6) Park, S. H., 2018, "A Study on the Optimization of Air Lubrication Method Using Flow Visualization Method and Application of Improving Ship Fuel Efficiency", PhD thesis, Pusan National University, Naval Architecture and Ocean Engineering, Busan, Korea.
- 7) Mäkiharju, S. A., Lee, I-H., Filip, G. P., Maki, K. J. and Ceccio, S. L., 2017, The topology of gas jets injected beneath a surface and subject to liquid cross-flow, J. Fluid Mech., vol. 818, pp.141-183