



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2011年 8月
博士學位論文

자유순환 공기유향을 이용한
고속선 저항성능 개선에 관한 연구

朝鮮大學校 大學院

尖端海上運送시스템工學科

金圭璇

자유순환 공기윤활을 이용한
고속선 저항성능 개선에 관한 연구

A Study on Improvement in the Resistance Performance
for High Speed Boat using Free-Ventilated Air Lubrication

2011年 8月 25日

朝鮮大學校 大學院

尖端海上運送시스템工學科

金圭璇

자유순환 공기유향을 이용한
고속선 저항성능 개선에 관한 연구

指導教授 朴 濟 雄

이 論文을 工學博士學位申請 論文으로 提出함.

2011年 4月 日

朝鮮大學校 大學院

尖端海上運送시스템工學科

金 圭 璇

金圭璇의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校

教授 權 寧



委員 韓國造船海洋機資材研究院 本部長

金 道 正



委員 船舶安全技術公團

室長

金 周 男



委員 仁荷工業專門大學

教授

鄭 宇 哲



委員 朝鮮大學校

教授

朴 濟 雄



2011年 6月 日

朝鮮大學校 大學院

2011年2月

博士學位論文

자유순환 공기유활을 이용한 고속선 저항성능 개선에 관한 연구

金圭璇

목 차

List of Tables	iii
List of Figures	iv
Nomenclatures	vii
Abstract	viii
제 1 장 서 론	1
1-1 개 요	1
1-2 활주형 고속선	4
1-3 공기윤활법	7
1-4 연구내용	11
제 2 장 연구방법 및 범위	13
제 3 장 2차원 모형시험을 통한 유동관찰	16
3-1 개 요	16
3-2 시험조건	17
3-3 시험결과	21
제 4 장 수치해석을 이용한 2차원 유동분석	26
4.1 개 요	26

4.2 지배방정식과 계산 알고리즘	27
4.3 수치해석 조건	34
4.3 수치해석 결과	34
제 5 장 3차원 모형에 대한 모형시험	53
5.1 시험조건	54
5.2 시험결과	58
제 6 장 토 론	73
6.2 모형시험에 대한 고찰	73
6.2 실선적용을 위한 고찰	74
제 7 장 결 론	75
참 고 문 헌	77
감사의 글	83

List of Tables

Table 3-1	Model test case for 2-D model	18
Table 4-1	Computed viscous drag, $V_w=1.5\text{m/s}$	36
Table 4-2	Computational case for step effect	37
Table 5-1	Principal dimensions for test model	53
Table 5-2	Test conditions for free-ventilated air lubrication	56

List of Figures

Fig. 1-1	Typical midship section shapes of planning boat	5
Fig. 1-2	Basic conception of air lubrication ship	9
Fig. 1-3	Schematic view of air cavity under stepped bottom	10
Fig. 2-1	Basic conception for free-ventilated air lubrication ..	13
Fig. 2-2	Schematic view of 2-D model	14
Fig. 3-1	Drawing of 2-D model	16
Fig. 3-2	Model test set-up and fan for wind generation	18
Fig. 3-3	2-D test models	20
Fig. 3-4	Comparison of air cavity at $V_w=1.5\text{m/s}$ & 2.2m/s	23
Fig. 3-5	Comparison of air cavity for water speed effect ($V_a=0.0\text{m/s}$)	24
Fig. 3-6	Comparison of air cavity for outlet position ($V_a=0.0\text{m/s}$)	25
Fig. 4-1	Segregated solver algorithm	33
Fig. 4-2	Boundary conditions	40
Fig. 4-3	Generated grid system	40
Fig. 4-4	Computed skin friction distributions at $V_w=1.5\text{ m/s}$	41
Fig. 4-5	Computational results for air cavity at $V_w=1.5\text{ m/s}$	42
Fig. 4-6	Computational results for velocity vectors above free surface at $V_w=1.5\text{ m/s}$	43
Fig. 4-7	Schematic view of original and stepped bottom	44

Fig. 4-8	Schematic view for numerical analysis	44
Fig. 4-9	Comparison of viscous drag due to air speed and stepped bottom	45
Fig. 4-10	Comparison of wave patterns	46
Fig. 4-11	Comparison of bow wave patterns due to the variation of air speed (Original hull form)	47
Fig. 4-12	Comparison of bow wave patterns due to the variation of air speed (New hull form)	48
Fig. 4-13	Comparison of wave patterns and air cavity on bottom ..	49
Fig. 4-14	Comparison of pressure coefficient	50
Fig. 4-15	Comparison of skin friction coefficient	51
Fig. 4-16	Comparison of air cavity on bottom	52
Fig. 5-1	Lines for test model	54
Fig. 5-2	Sketch of Side-fin	55
Fig. 5-3	Test models for Case-1 and Case-2	57
Fig. 5-4	Measured total resistance	58
Fig. 5-5	Wave patterns for Case-1, V=26 knots	61
Fig. 5-6	Wave patterns for Case-1, V=28 knots	62
Fig. 5-7	Wave patterns for Case-1, V=30 knots	63
Fig. 5-8	Wave patterns for Case-1, V=32 knots	64
Fig. 5-9	Wave patterns for Case-2, V=26 knots	65
Fig. 5-10	Wave patterns for Case-2, V=28 knots	66
Fig. 5-11	Wave patterns for Case-2, V=30 knots	67
Fig. 5-12	Wave patterns for Case-2, V=32 knots	68
Fig. 5-13	Wave patterns for Case-3, V=26 knots	69

Fig. 5-14	Wave patterns for Case-3, V=28 knots	70
Fig. 5-15	Wave patterns for Case-3, V=30 knots	71
Fig. 5-16	Wave patterns for Case-3, V=32 knots	72

Nomenclatures

L_{OA}	Length Over All (m)
L_{bp}, L_{pp}	Length Between Perpendiculars (m)
L_{WL}	Length of Designed Load Waterline (m)
B	Breadth Moulded (m)
B_c	Breadth of Chine at Midship (m)
D	Depth Moulded (m)
d	Draught Moulded (m)
∇	Displacement Volume (m^3)
\triangle, W	Displacement Weight (ton)
S	Wetted Surface Area with All Appendages (m^2)
V	Speed of Ship (knot)
V_a	Speed of air (m/s)
V_w	Speed of water (m/s)
R_t	Total Resistance (kg)
ρ	Density of Water ($kg \cdot sec^2 / m^4$)
ν	Coefficient of Kinematic Viscosity
g	Acceleration due to Gravity (m/sec^2)
F_n	Froude Number

Abstract

A Study on Improvement in the Resistance Performance for High Speed Boat using Free-Ventilated Air Lubrication

Kim, Kyu-Sun

Advisor : Prof. Park, Je-Woong, Ph. D.

Department of Advanced Marine Transportation

System Engineering

Graduate School of Chosun University

Recently, the concerns for instability of oil price and carbon dioxide regulation are increasing across the country and various countermeasures are being expanded to all industries. Especially, the amount of greenhouse gas emitted from vessels at every year is known to be about 600~800 million tons taking about 5% of the worldwide greenhouse gas emission which is about 2.5 times that of airplane.

The greenhouse gas from vessels is expected to be fully regulated soon. So it is time for Korea, as the number one in the world shipbuilding industry, needs to prepare various countermeasures to reduce greenhouse gas.

This study mentioned about the method to reduce frictional resistance by directly inducing the air coming to the bow of the ship during high speed running to the bottom of the ship and spraying an air film on the body of the ship for 30 knot class high speed small leisure boat.

Numerical analysis and model test for 2 dimensional model were carried out and the effects of the speed of the ship and the change of the air speed on the forming of the air film sprayed on the bottom of the ship and the resistance performance were analyzed through model test for 3 dimensional real ship model.

The conclusions derived through this study are as follows;

(1) As the air speed coming to the bow of the ship increases, the amount of the air flowing to the bottom of the ship increases.

(2) The assumption is supposed the speed of head wind is not changed, according to increase speed of ship inflow of air film is more prolonged toward the bottom of the ship. Especially, the assumption is given head wind is not existed, as the speed of the ship increases, the phenomenon in which the air film at the bottom of the ship spreading longer toward the stern of the ship. That is, according to principle of Bernoulli, as the water speed increase at the bottom of the ship the pressure is relatively lower. Then, it causes more inflow of the air from the atmosphere.

(3) For step installed at the exit of the air guide plate, there a large amount of reduction of frictional resistance. However, without air inflow, the resistance increases rather due to the turbulence occurred on the stairs. If the step is installed in the bottom of the ship, however, frictional resistance can be reduced as the air flew in from the bow forms air-cavity in the rear of the bottom stairs even at the lower speed.

(4) If there is no bottom step, the whole resistance can increase as the resistance by the air guide plate becomes bigger than the reduction of frictional resistance if the ship speed is relatively low.

(5) The air film is formed better if the exit of the air guide plate is extended to the after part of the ship. However, more studies are required to clarify to which extent of the bottom the intersection exit should be extended for better efficiency.

(6) For an application of the air guide plate to an actual ship, the enforced initial designed drag showed larger bow wave patterns by the air guide plate at a certain speed range compared to bare hull without an air guide plate but the resistance is reduced. The reason is that the reduction of frictional resistance by an air film became bigger than the increase of wave resistance. However, the ship doesn't glide well even at the high speed and there is a large trim by head because of the weight of the air guide plate and transformation of the bow. The resistance will rather increase if there is no enforced trim by stern.

제 1 장 서론

1-1 개요

선박의 저항을 감소시키거나 추진효율을 향상시키는 것은 선박의 고속화 및 운항동력 절감에 의한 에너지 효율 향상과 직결되는 문제로 지금까지 많은 연구가 수행되어 왔다. 또한, 최근 들어 유가의 불안정성과 이산화탄소 규제에 대한 범국가적 관심이 고조되면서 선박의 저항 감소뿐 아니라 새로운 추진시스템 개발을 통하여 온실가스를 감축시키고자 하는 관점에서의 다양한 시도가 활발하게 이루어지고 있다.

유엔의 기후변화협약 (UNFCC: United Nations Framework Convention on Climate Change)에서는 향후 지구 온난화를 방지하기 위해 대기 중의 이산화탄소 농도를 450~550 ppm으로 유지하려는 이산화탄소 안정화 정책을 추진하고 있다. 기후변화협약(Kyoto protocol)에 의거, 우리나라는 2차 공약기간 중 (2013~2017) 온실가스 감축의무 부담이 가시화될 전망이다. 현재 온실가스배출량 세계 10위권인 우리나라가 감축 의무 부담 시에는 국내 산업 및 경제에 미치는 영향이 클 것으로 예상된다.

특히, 매년 선박으로부터 배출되는 온실가스양이 약 6억~8억톤 정도로 전 세계 온실가스 배출량의 약 5% 정도를 차지한다고 알려져 있으며, 이는 항공기의 약 2.5배 수준이다. 머지않아 선박에 대한 온실가스 규제가 본격화 될 것으로 전망되므로 세계 조선산업 1위국인 우리나라에서도 온실가스 감축을 위한 다양한 대응책이 필요한 시점이다.

선박 성능을 향상시킬 수 있는 가장 보편적인 방법은 저항성능을 개선시키

거나 추진효율을 향상시키는 방법이고, 대형 상선에서는 이미 큰 성과를 거두고 있다. 그 중 저항성능을 향상시키고자 하는 연구는 지금까지 주로 선박의 선형개량을 통하여 조파저항 성분과 형상저항 성분을 감소시키는데 그 초점이 맞추어져 왔다. 이 중 조파저항을 줄이기 위한 연구들은 이미 상당한 성과를 올리고 있으며, 또한 실용화 되고 있다. 대표적인 예로 대형 상선의 구상선수는 주선체로부터 발생된 선수파를 감소시킴으로써 선박의 조파저항을 줄여주는 역할을 하게 된다.

그러나 선박 저항의 상당부분을 차지하는 마찰저항은 유체의 고유 특성인 점성으로 인하여 발생하는 현상으로서 침수표면적을 감소시키는 것 이외에는 마땅한 마찰저항 감소 수단이 없는 상황이 오랫동안 지속되어 왔다. 더욱이 배수량형 선박은 부력에 의해 선체를 지지하며, 이를 위해서 반드시 일정량의 배수량을 가져야 하는데 이러한 배수량형 선박의 선형 특성을 유지한 채로 침수표면적을 감소시키는 것은 한계가 있기 때문에 선박의 마찰저항 감소에 대한 연구는 연구자들의 별다른 주목을 받지 못했다.

최근 들어 효과적인 마찰저항 감소법을 개발하기 위한 연구가 점성 유동해석기법의 발전과 더불어 기계공학 분야에서 꾸준히 수행되어 다양한 방법들이 개발되었으며, 조선 공학 분야에서도 선박의 고도화가 운항 동력 절감에 의한 선박 운용 경제성 향상에 대한 요구가 점점 증대 되면서 지금까지 개발된 마찰저항 감소법들을 실제 선박에 적용하기 위한 연구가 점차 활성화 되고 있다.

이러한 마찰저항을 줄이고자 하는 방법 중 선저에 공기를 분사하여 선체를 부양시킴으로써 침수면적을 감소시켜 저항 저감의 효과를 얻는 ACV(Air Cushion Vehicle)가 군함과 같은 특수선 분야에서 오래 전부터 널리 활용되어 왔다. 그러나 ACV의 경우 공기를 공급하는데 있어 큰 동력이 소모되어 효율성

이 낮고 대형화가 어렵다는 단점을 갖고 있기 때문에 최근에는 공기를 직접 선체 주위의 유동에 주입하는 방식으로 마찰저항을 감소시키기 위한 연구들이 러시아를 비롯해서 미국과 일본 등에서 활발히 진행되어 왔고, 최근 들어 국내에서도 큰 관심을 받고 있다.

외부에서 공기를 주입하여 마찰저항을 감소하는 방법들은 점성이 큰 유체의 유동 내로 점성이 작은 공기나 혹은 다른 기체를 주입하여 마찰저항을 줄이기 때문에 액체 유동의 경우에만 사용할 수 있는 방안이며, 미소기포 주입법과 공기 유회법을 대표적인 예로 들 수 있다.

미소기포 주입법이란 200~600 μm 정도의 직경을 갖는 아주 미소한 기포를 경계층 내부로 주입시켜 미소기포에 의한 영향으로 난류 경계층 유동의 구조가 난류 응력이 감소하는 방향으로 변화하여 국부적으로 마찰저항이 감소하는 현상을 이용하는 방법이다[1].

이러한 미소기포 주입법의 경우에는 마찰저항을 줄이기 위해서는 다량의 미소 기포를 경계층 내부의 벽면에 근접한 위치로 유입시킬 수 있어야 한다는 기술적인 어려움이 있을 뿐만 아니라, 경계층 외부에서의 기포들은 선박의 형상 저항을 증가시킴으로써 오히려 전체 저항이 증가될 수 있다는 단점을 갖고 있다. 특히 선체 주위의 유동에 따라 국부적으로 기포의 거동이 확연히 달라지기 때문에 더 복잡한 문제들을 발생시킬 수 있고 이를 해결하기가 쉽지 않다[1][2][3].

공기 유회법은 물체 표면에 외부에너지를 이용하여 공기를 공급하여 물체 표면을 덮는 공기 막을 형성시켜 주는 방법으로, 물과 직접 접촉하는 부분이 밀도가 작은 공기와 접촉하게 되어 마찰 저항이 감소하게 된다. 공기 유회법에 대한 자세한 설명은 1-3장에서 다시 언급한다.

본 연구에서는 선저에 외부에너지를 이용하여 직접 공기를 분사하여 마찰저항을 감소시키고자 하는 기존의 공기 유힬법과는 달리 고속운항 중 선수에 부딪히는 공기를 선저로 직접 유도하여 공기막을 선체에 도포함으로서 마찰저항을 줄일 수 있는 방법에 대하여 언급하였다.

선수에 부딪히는 공기의 힘이 클수록 선저로 유입되는 공기량이 많아질 것으로 판단되어, 최근에 국내에서도 많은 연구가 수행되고 있는 30노트급 활주형 소형레저보트를 대상으로 연구를 수행하였다.

1-2 활주형 고속선

최근 들어 해양레저에 대한 국민적 관심이 증가하면서 레저장비, 특히 세일링요트나 고속보트에 대한 각종 연구가 활발히 수행되고 있다. 그 중 고속보트는 다수의 인원이 함께 속도감을 즐기면서 낚시와 같은 전통적인 레저활동을 함께 영위할 수 있는 관계로 큰 관심을 받고 있다.

소형 고속선에 대하여 많은 연구가 이루어진 일본의 경우 활주형 선박이 전체 고속선의 약 80% 이상을 차지하고 있을 정도로 대중화 되어 있다[4]. 이러한 활주형 선박은 선체와 수면 사이의 동적 압력에 의하여 선체가 부양됨으로써 물 위를 활주하여 저항을 감소시키고 고속성능을 향상시키도록 고안된 선형으로서, 설계 및 건조가 용이하고 흘수가 낮아서 항구 및 항로 개설이 용이하다는 등의 많은 장점을 가지고 있다.

그러나 악천후 시 선체의 동요가 심하여 내파성능이 불량하고, 일반적으로 프로펠러가 경사지게 설치되는 관계로 추진효율이 떨어지고 선체진동이 심해지는 단점이 있으나, 추진효율 향상을 위해 최근 널리 사용되고 있는 물분사

추진장치(Water-jet Propulsor)를 사용함으로써 어느 정도 해결되고 있다. 그러나 가장 큰 단점은 선박의 크기를 어느 한계 이상 증가시키면 활주성능이 급격히 나빠지는 관계로 추진효율 향상에 따른 경제성이 떨어져 오랜 역사를 가지고 있음에도 불구하고 오늘날까지 주로 특수선박에만 적용되고 있다.

활주선은 Fig. 1-1과 같이 단면은 크게 오목(Concave), 볼록(Convex), 직선(Straight), 오목 볼록(Inverted bell) 등 네 가지를 기본형상으로 하여 여기에 약간씩 수정을 가하여 사용하고 있으며[5],[6], 일반적인 배수량형 선박과는 달리 항주 시 그 부상 량이나 자세변화가 크고, 자유표면에 스프레이(Spray) 현상이 존재하는 관계로 이론적인 접근이 매우 어렵다. 따라서 지금까지는 주로 경험적인 방법이나 모형시험에 의존하여 선형개발이 수행되어 왔다.

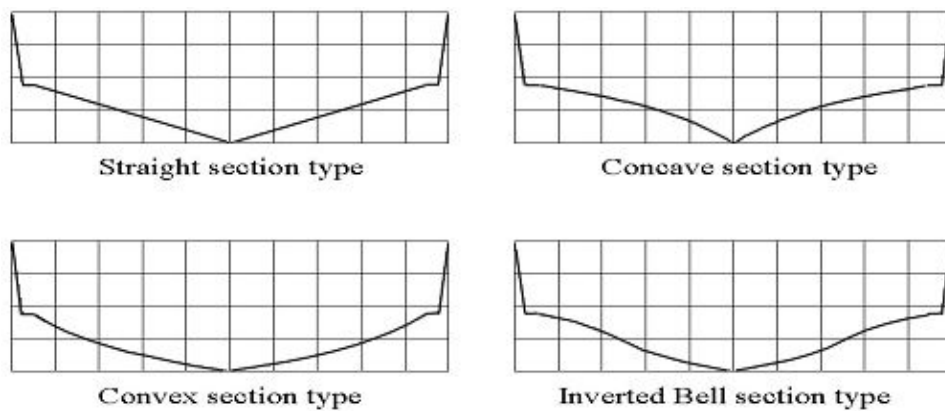


Fig. 1-1 Typical midship section shapes of planning boat

Niwa[4], Savitsky[7] 등은 고속선의 길이(L)와 선속(V)으로 대표 분류하여

길이-속도와 선형 특성과의 관계를 설명하였고, Tanaka[8]는 이를 최근의 선형특성을 고려하여 수정된 관계를 제안하여 초기선형 계획단계에서 널리 활용되고 있다.

Clement[9]는 고속으로 항주하는 활주선의 경우 선저로부터 발생된 급류를 선미에서 신속히 제거시키기 위한 방안으로 선미 트랜섬 폭을 최대 폭의 60% ~ 70%정도가 적합하다고 제안하였다. Kihara & Ishii[10]는 모형시험을 통하여 내항성능 관점에서 파랑 중 선수부 상하 가속도와 선저 경사각과의 관계를 설명하였다.

활주선의 차인(chine)은 고속에서 선체로부터 파도의 분리를 촉진시켜 충격 가속도를 감소시키는 역할을 할 수 있으며 최대 폭은 선미 끝단으로부터 전장의 60~65% 전방에 위치하는 것이 적합하고[9],[11], Spray rail은 고속에서의 저항감소와 파인딩 시 충격하중 감소, 운동성능 개선에 크게 도움이 되는 관계로 거의 모든 활주선에 이를 부착하고 있다[12].

국내에서도 고속 활주선에 대한 연구가 활발히 이루어져 왔다. 민계식 등[13], 이귀주 등[14, 15]은 길이(L)-폭(B) 비와 단면형상 변화에 따른 저항특성 변화를 모형시험을 통하여 조사하였고, 이광일[16]은 회류수조에서의 모형시험을 통하여 스프레이(Spray) 저항을 최소화하기 위한 선형개발 연구를 수행하였다.

구종도 등[17], 김경배 등[18], 최선웅 등[19], 최선웅[20], 제병렬[21]은 60노트급 초고속 소형 단동함정을 개발하기 위하여 역차인과 선측에 대형 날개를 부착하는 개념을 도입하여 활주선을 설계하였으며, 회류수조에서의 모형시험과 수치해석을 통하여 역차인 선형의 특성을 주장하였다.

박재웅 등[22]과 정우철 등[23]은 활주형 단면을 갖는 소형 고속연안어선의 모형시험을 통하여 선측날개(Side-Fin)와 선미부 연장선체가 저항성과 횡요 안정성을 크게 개선시킬 수 있음을 보였다.

박충환 등[24]은 모형시험을 통하여 Spray Rail이 고속영역에서 쇄파저항 감소에도 기여한다고 설명하였으며, 서관희 등[25]은 최근 파랑 중 고속성능 및 내항성능이 우수한 60m급 반활주선 개발을 위한 모형시험 및 수치계산 연구를 수행하여 Stern Wedge의 효과가 있음을 설명하였다.

정우철 등[26, 27]은 실적선 통계분석을 이용하여 고속레저보트와 연안 수시선의 초기선형을 설계하고 그 성능을 수조시험을 통하여 분석하였고, 활주선의 초기트림이 저항성능에 큰 영향을 준다는 것을 설명하였다.

김주남[28]은 전장 20m 이상, 50m 미만의 실적선 통계분석을 이용하여 100톤급 고속 경비정의 선형개발을 수행하고 그 성능을 모형시험과 수치해석을 통하여 분석하였다.

이상에서 간략히 살펴본 바와 같이 활주형 선박의 최적선형설계와 성능향상을 위한 연구는 최근까지도 활발히 수행되고 있다. 그러나 앞에서 언급한 바와 같이 고속활주선의 경우 고속에서의 급격한 운동 특성으로 인하여 마찰저항 감소를 위한 효과적인 방안이 크게 제시되어 있지 못한 실정이다.

1-3 공기 유탄법

공기 유탄법은 Fig. 1-2와 같이 물체 표면에 공기를 공급하여 물체 표면을 덮는 공기 막을 형성시켜 주는 방법이다. 공기 막으로 덮인 부분에서는 원래

액체와 접촉하고 있던 물체 표면이 공기와 접촉하게 되어 마찰 저항이 감소하게 된다. 이를 선박에 적용하는 경우에는 선박의 선저 표면을 얇은 공기 막으로 덮어줌으로써 물에 잠겨있는 선체 표면의 일부분이 물 대신에 공기와 접촉하게 하고 이를 통하여 침수 표면적이 감소하는 효과를 얻어서 선박의 마찰 저항을 감소시키게 된다[29][30].

이러한 공기 유힬법의 개념은 19세기 초 완성이 되었으나 본격적인 연구가 시작된 것은 1960년대 소련에서 저속 비대선의 선저 형상 개량을 통한 15-18%의 저항 감소가 보고된 이후이다[29]. 현재까지 Planning hull 경우 20-35%, semi-planning 타입의 경우 15-30% 마찰저항이 감소했다는 연구 결과가 보였고, 현재는 실선에 적용하기 위한 실험적 연구 이외에도 초발수성 코팅과 같은 다른 저항 저감법과의 연계를 통한 효과를 고찰 하고 있다[30].

그러나 선저 표면을 공기 막으로 덮는다는 공기 유힬법의 발상 자체는 일견 간단해 보이지만, 선체의 자세 변화 및 주위 유동으로부터의 교란과 공기층과 물과의 속도 차이로 인하여 공기 막이 불안정해 지고 심한 경우에는 공급된 공기가 선체 표면을 덮는 공기 막을 형성하지 못하고 이내 커다란 기포(Air bubble)로 쪼개져서 수면위로 떠오르거나 주위로 흩어져 버릴 수도 있다. 더욱이 밀도와 속도가 다른 두 종류의 유체가 밀도 경계면을 사이에 층을 이루어 흐르는 유동에 의하여 실선 속도 영역에서 효과적으로 선저 표면을 덮는 얇고 안정적인 공기 막을 형성시킬 수 없다면 실제 선박의 마찰 저항을 감소시키는데 있어서 별다른 도움이 되지 못한다.

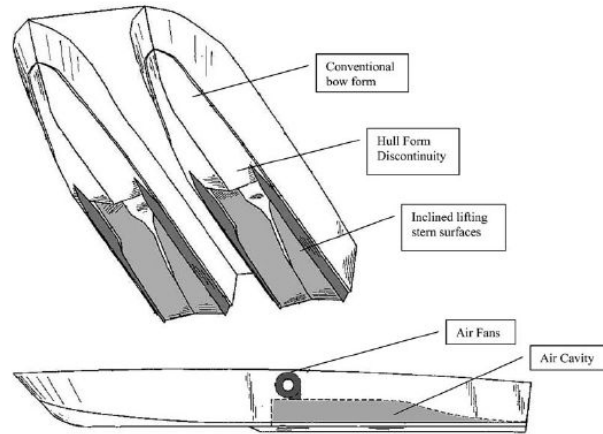


Fig. 1-2 Basic conception of air lubrication ship[31]

따라서 공기 윤활법의 효과를 높이기 위해서는 공기 공급에 소요되는 에너지와 저항 감소 효과를 고려할 때, 실선 속도 영역에서 공기 막을 효율적으로 형성시킬 수 있어야 하며 안정적인 상태로 유지시킬 수 있어야 한다.

효과적으로 선박의 선저표면을 덮을 수 있는 안정적인 공기 막을 얻기 위한 방법으로는 크게 나누어 공기와 물 사이의 표면 장력(Surface tension force)을 이용하기 위하여 선저 표면의 특성을 바꾸어 주는 방법과 후면 단(backward-facing step)의 후류(wake) 특성을 이용하는 방법의 있으며 이들을 함께 결합하여 사용하는 경우도 있다[30].

그 중 선저에 단을 만들어 후면 단의 후류 특성을 이용하는 방법은 이미 실제 공기 윤활선에 널리 적용되고 있다. 이 방법은 선저부에 설치된 단의 후방에 공기 공급이 이루어지면 Fig. 1-3과 같이 단 후방 표면에 부착된 대규모의 공기 공동을 생성시킬 수 있으며 이러한 공기 공동이 선저부에 설치된 단 후

방에서 선체 표면을 덮는 공기 막 역할을 함으로써 선박의 마찰 저항을 감소시킬 수 있게 된다[31][32].

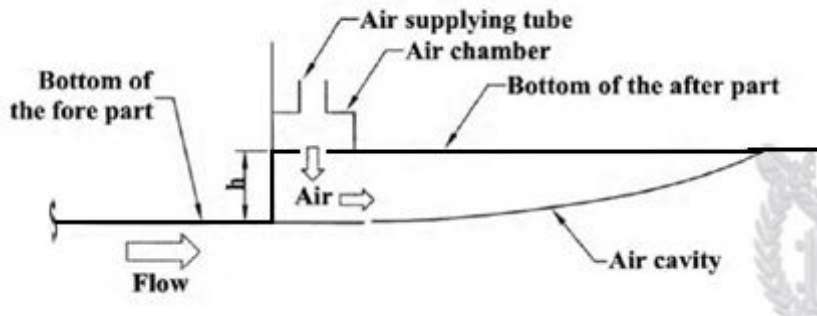


Fig. 1-3 Schematic view of air cavity under stepped bottom[31]

장진호와 김효철[31], 고석천과 김효철[34], 장진호[35], Kodama 등[36]은 비교적 폭이 넓은 비대선의 선저에 외부로부터 공기를 강제로 주입하여 마찰 저항을 줄이는 연구를 수행하였고, Fukuda 등[37]은 초강력 발수제를 모형선체에 도포하여 주입된 공기 기포가 선체표면에 잘 부착될 수 있도록 함으로써 저항감소 효과를 증대 시켰다고 보고하였다. Latorree 등[38]은 기존의 연구를 고속 SES에 적용하여 저항성능 개선을 보고한 바 있다. 최근 김종현[39]은 Wigley 선형을 기본으로 한 쌍동선형에 대하여 공기공급에 의한 저항성능 변화를 모형시험과 수치해석으로 분석하여 설계속도에서 약 10% 정도의 저항감소 효과를 얻었다고 보고하였다.

그러나 이들 대부분의 연구들은 저항성능 개선을 위하여 운항 중 지속적으로 외부에서 별도의 동력을 이용하여 강제로 공기를 주입하여야 하는 문제를

안고 있을 뿐만 아니라, 특히 계단식 선저전형의 경우 선저단의 계단만큼 실제 배수량이 감소한 것이기 때문에 줄어든 배수량만큼의 저항 감소를 고려해보면 실제 선저 단의 공기 막에 의한 마찰저항 감소는 발표된 것보다 더 작을 것이라고 판단된다.

그러나 공기 유힬법의 가장 큰 문제는 실선 속도 영역에서 넓은 면적에 안정적으로 공기 막을 유지하기가 어렵다는 문제가 있다. 하지만 기체 공급에 의한 공동 현상을 이용하는 공기 유힬법의 경우, 고정 캐비테이션에 의하여 발생하는 완전히 진전된 상태의 공동과 매우 유사한 특성을 보이기 때문에 공기 공동의 특성을 파악하고 영향 인자들을 규명하여 활용한다면 이러한 문제들을 충분히 개선하고 선박의 저항 감소에 활용할 수 있을 것으로 판단된다.

1-4 연구내용

본 연구에서는 고속으로 항주하는 레저보트의 선수에 부딪히는 공기를 외부 에너지를 사용하지 않고 공기유도판(Air guide plate)을 통하여 선저로 유도함으로써 마찰저항을 감소시키는 새로운 방안을 제시하였다. 이를 “**자유순환 공기 유힬법(Free-ventilated air lubrication method)**” 이라고 명명하였다.

먼저 고속선 단면을 갖는 2차원 모형에 대한 회류수조 모형시험을 수행하여 선속과 공기속도 변화에 따른 공기흡입 정도를 관찰하였고, 동일한 모형에 대한 수치해석을 통하여 모형시험에서 분석하기 어려웠던 유동특성을 자세히 분석하였다. 또한 계단식 선저전형과 공기유힬을 통한 마찰저항 변화와의 관계를 함께 분석하였다.

본 연구를 통하여 제안한 자유순환 공기 유힬법의 실선 적용 가능성은 3차

원 실제선박의 모형시험을 통하여 확인하였다.

본 논문의 제 2장에서는 본 연구의 자세한 연구 방법과 내용을 수록하였으며, 제 3장에서는 2차원 고속 활주선 모형에서 선저로 유입되는 공기흡입 유형에 대한 모형시험을 통한 유동관찰 결과를 설명하였다. 제 4장에서는 본 연구에서 사용된 수치해석 기법과 2차원 시험모형에 대한 수치해석 결과를 설명하였고, 제 5장에서는 3차원 모형에 대한 모형시험결과를 언급하였다. 제 6장과 7장에서는 본 연구의 종합적인 토론과 최종 결론을 각각 정리하였다.

제 2 장 연구방법 및 범위

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 고속으로 항주하는 선박의 선수에 부딪히는 공기를 외부 동력 없이 공기유도판을 통하여 선저로 유도함으로써 마찰저항을 감소시킬 수 있는 새로운 방법을 제시하였다(Fig. 2-1).

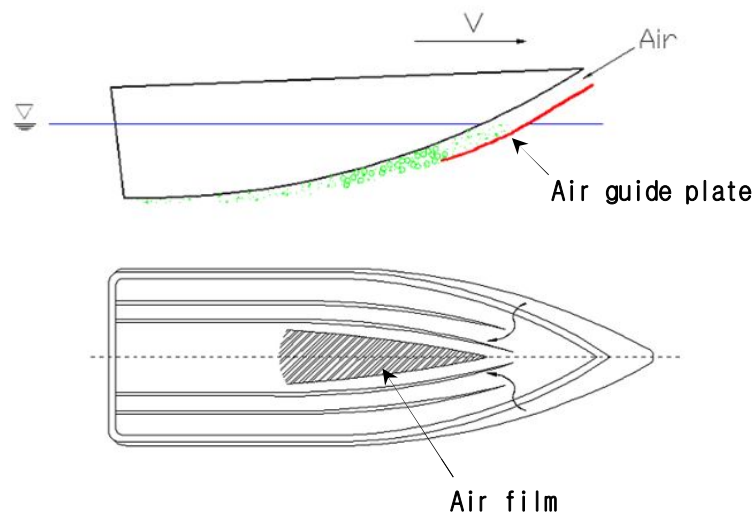


Fig. 2-1 Basic conception for free-ventilated air lubrication

초기연구 단계에서는 선속과 선수에 부딪히는 공기속도에 따라 선저로 공기가 유입되는 현상, 즉 유동특성을 관찰하는 것이 매우 중요하다. 그러나 3차원 실제 고속항주선에 대응하는 모형시험의 경우, 속도변화에 따라 자세 변화가 심한 관계로 일관성 있는 동일한 조건에서의 유동현상 관찰이 곤란해지게 된다. 따라서 일반적인 고속항주선의 종방향 중앙단면 형상과 유사한 형상의

2차원 모형을 제작하여 동일한 트림조건에서 선속과 풍속만의 영향을 분석하였다.

모형시험은 서일본유체기술연구소의 고속회류수조에서 수행하였다. 회류수조는 그 특성상 예인수조에서는 관찰하기 어려운 유동현상을 관측부 유리를 통하여 쉽게 관찰 할 수 있는 장점이 있다. 그러나 고속으로 물을 회전시키게 되면 발생하는 다량의 기포로 인하여 유동현상을 관찰하기가 어려워지는 문제가 있다. 따라서 본 2차원 모형시험에서는 기포 방해 없이 유동관찰이 가능한 최대 속도인 4.0m/s까지 모형시험을 수행하였다. 선수부에 투명아크릴로 제작한 공기유도판을 부착하였고, 속도조절이 가능한 송풍기를 설치하여 공기를 생성시키면서 모형시험을 수행하였다. 본 2차원 모형의 개념을 Fig. 2-2에 나타내었다.

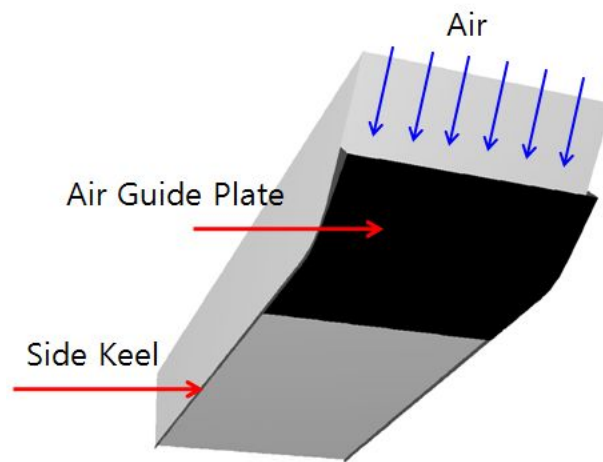


Fig. 2-2 Schematic view of 2-D model

일반적으로 모형시험은 물리량을 계측하거나 현상을 관찰하기에는 가장 적

합한 방법이지만, 그 세세한 원인을 규명하기에는 시간과 경비가 많이 소요되는 단점이 있다. 최근 들어 전산유체역학(CFD)이 이러한 분야를 대신할 수 있는 대안으로 많은 관심을 받고 있다. 본 연구에서는 상용 CFD S/W인 FLUENT를 이용하여 2차원 모형시험 결과를 자세히 분석하였다.

본 연구를 통하여 제시된 자유순환 공기유통기법의 실선적용 가능성을 확인하기 위하여 3차원 실제선박에 대한 모형시험을 수행하였다. 모형시험은 2차원 시험이 수행된 고속회류수조에서 동일한 방법으로 수행되었다. 공기흡입판의 무게를 고려하여 동일한 배수량 조건에서 시험을 수행하였고, 설계속도인 30노트에서 동일한 트림이 발생하도록 초기트림을 조절하면서 모형시험을 수행하여 선체 자세 변화에 따른 저항성능 차이를 최대한 배제시키면서 시험을 수행하였다.

제 3 장 2차원 모형시험을 통한 유동관찰

3-1 개 요

3차원 실제 고속선에서 자유순환 공기흡입에 의한 저항성능 개선(마찰저항 감소)에 대한 가능성을 확인하기 위하여 고속 활주형 단면형상을 갖는 2차원 모형에 대한 모형시험을 수행하여 선속과 풍속 변화에 따른 공기흡입 특성을 관찰하였다. 모형시험은 서일본유체기술연구소의 고속회류수조에서 수행되었으며, 선수부에 투명아크릴로 공기유도관을 부착하였고, 풍속 조절이 가능한 송풍기를 설치하여 동일한 트림조건에서 선속과 풍속의 영향만을 분석하였다.

본 모형시험에 사용된 2차원 모형선 형상은 Fig. 3-1과 같다.

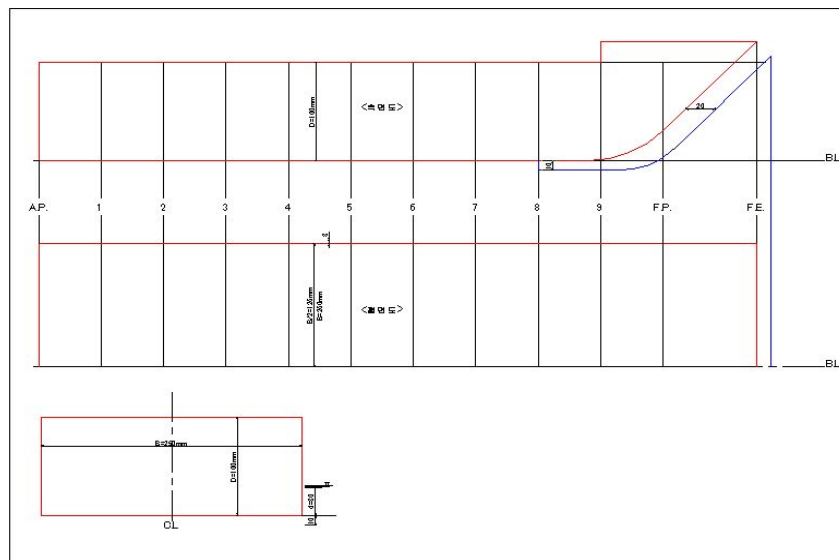


Fig. 3-1 Drawing of 2-D model

3-2 시험조건

모형시험은 Table 3-1에서 보는 바와 같이 모두 네 가지 경우에 대하여 수행하였다. 회류수조의 특성 상 고속이 되면 다량의 기포가 발생하여 유동현상을 관찰하기가 어렵게 된다. 따라서 본 모형시험에서는 기포로 인하여 공기막 관찰에 방해가 되지 않은 4.0m/s까지 시험을 수행하였다.

선수에 부딪히는 공기 유속의 영향을 함께 검토하기 위하여 맞바람을 받으면서 운항 할 때를 가정하여 공기 속도를 시험이 가능한 최대속도인 6.0m/s까지 다양하게 변화 시키면서 모형시험을 수행하였고, 모형선의 운항자세는 잘 설계된 고속선의 통상 운항조건인 4° 트림으로 고정하였다.

Table 3-1의 Case-1은 동일한 유속에서 풍속의 영향을 조사하기 위하여 유속(V_w)은 1.5m/s로 고정하고 풍속(V_a)을 0.0, 3.0, 6.0 m/s로 변화시킨 경우이다. 이 중 $V_a=0.0$ m/s인 경우는 선수에 부딪히는 공기가 없을 경우에도 선저로 공기가 유입되는지를 관찰하기 위한 조건이다.

Case-2는 유속(V_w)을 2.2m/s로 증가하였고, 풍속(V_a)은 Case-1과 동일한 조건이다. 즉, Case-1과 유속의 영향을 비교하기 위하여 시험을 수행한 경우이다.

Case-3은 유속(V_w)을 본 2차원 모형시험의 최대 속도인 4.0m/s로, 그리고 풍속(V_a)을 0.0m/s로 고정시킨 경우이다. Case-1, Case-2 중 공기속도가 없는 경우와 함께 비교함으로써 유속만의 영향을 비교할 수 있다.

Case-4는 공기 유출구의 위치를 5 Station까지 연장한 경우로, 유속(V_w)은 변화를 준 반면 풍속(V_a)은 0.0m/s로 고정하였다. 앞의 세 경우 중 풍속이

0.0m/s인 각각의 경우와 비교함으로써 선수에 부딪히는 공기가 없는 경우 선속과 공기 유출구의 위치변화에 따른 공기 유입현상을 비교할 수 있다.

Table 3-1 Model test case for 2-D model

Test case		유속(Vw) (m/s)	풍속(Va) (m/s)	비고
1	1-1	1.5	0.0	공기유출구 위치는 8번 St.으로 고정
	1-2		3.0	
	1-3		6.0	
2	2-1	2.2	0.0	
	2-2		3.0	
	2-3		6.0	
3	3-1	4.0	0.0	
4	4-1	1.5	0.0	공기유출구 위치를 5번 St.까지 연장
	4-2	2.2		
	4-4	4.0		

수면하부에서 선저면과 공기유출구의 간격이 클 경우, 흡입된 공기가 선저면을 덮지 못하고 수면으로 떠오르게 될 뿐만 아니라 공기유출구에서 발생하는 유동박리 현상으로 저항이 오히려 증가하는 문제가 발생 할 수 있다. 따라서 선저면과 공기유출구의 간격을 가능하면 작게 유지하는 것이 효과적이거나 [1][2][3], 본 2차원 모형시험의 주 목적이 공기 흡입 특성을 관찰하는 것인 관계로 모든 경우에 선저 바닥면과 공기유출구의 간격을 10mm로 고정시키고,

공기 유출구와 선수부 간격은 이것의 두 배인 20mm로 고정하여 모형시험을 수행하였다.

모형시험 시 선수부에 유속 조절이 가능한 송풍기를 설치하여 바람을 생성시켰다(Fig. 3-2). 각 경우에 대한 실험모형은 Fig. 3-3에 나타내었다.

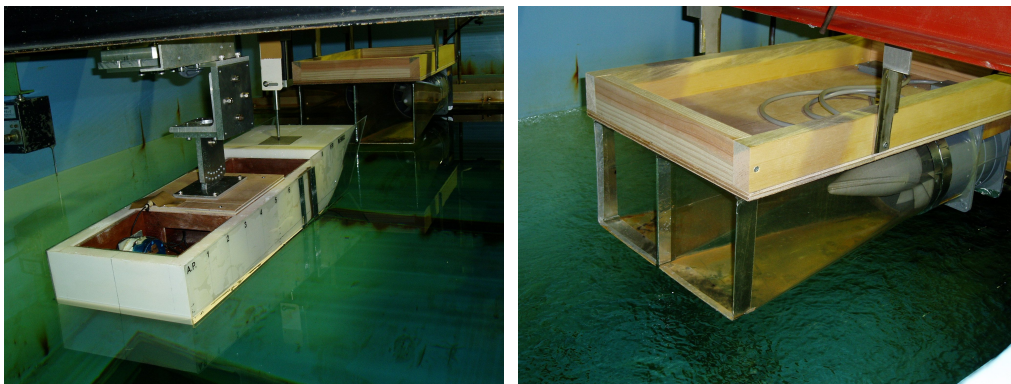
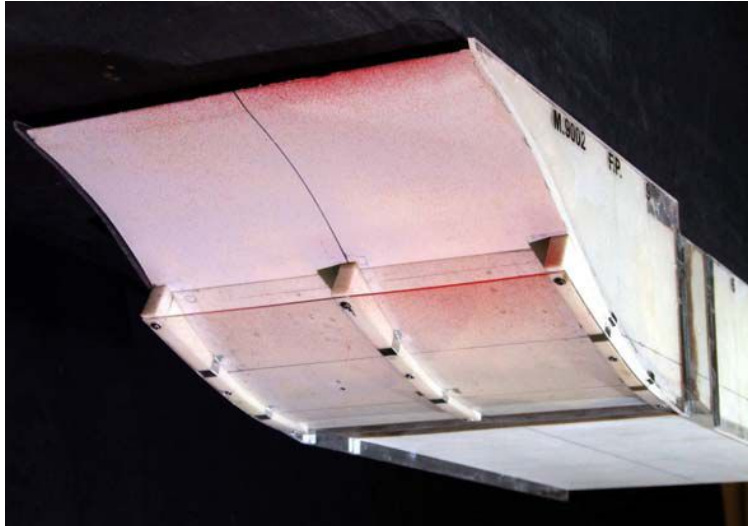


Fig. 3-2 Model test set-up and fan for wind generation



(a) Case-1, -2, -3



(b) Case-4

Fig. 3-3 2-D test models

3-3 시험결과

(1) 유속(V_w)과 풍속(V_a)의 영향

Fig. 3-4는 유속(V_w)이 1.5m/s, 2.2m/s일 경우 선수에 부딪히는 풍속(V_a)을 각각 0.0, 3.0, 6.0m/s로 바꾸었을 때의 결과이다(Case-1 & Case-2).

Case-1의 경우, $V_a=0\text{m/s}$ 일 때, 즉 선수에 부딪히는 공기가 없을 때, 약 7 Station 부근까지 공기막이 형성되고 있다. $V_a=3.0\text{m/s}$ 일 때의 공기막은 약 6.5 Station까지, 그리고 $V_a=6.0\text{m/s}$ 일 때는 약 5.5 Station까지 나아가고 있다. 즉, 선수에 부딪히는 공기속도가 빠를수록 선저로 공기가 잘 유입되고 있음을 알 수 있다.

유속이 1.5m/s(Case-1)에서 2.2m/s(Case-2)로 증가함에 따라 동일한 공기유속에서도 선저로 유입되는 공기막이 선미로 더 길게 퍼져가는 것을 볼 수 있다. 특히 공기유속이 없는 경우($V_a=0.0\text{m/s}$)에도 선속이 증가할수록 선저부 공기막이 선미로 더 길게 퍼지는 현상을 관찰할 수 있다. 이는 선저부 유속이 증가함에 따라 수면 상부의 공기가 선저로 더 많이 빨려 들어가는 것을 의미한다. 즉, Bernoulli 원리에 따라 선저부 유속이 빨라지면서 압력이 상대적으로 낮아지고 이로 인해 대기 중의 공기가 더 잘 유입되기 때문이다.

(2) 유속만의 영향 ($V_a=0.0\text{m/s}$)

Fig. 3-5는 Case-1, Case-2와 Case-3 세 경우에서 공기유속이 없는 경우만 비교하였다. 즉, 풍속이 없을 경우 유속만의 영향을 비교하였다.

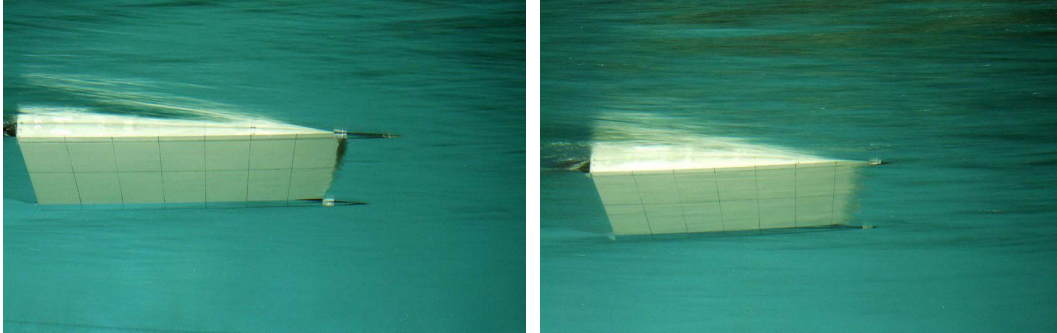
유속(V_w)=1.5m/s인 경우 공기막이 7 Station 부근까지, $V_w=2.2\text{m/s}$ 인 경우

6.5 Station까지 그리고 $V_w=4.0\text{m/s}$ 인 경우에는 5.5 Station 부근까지 공기막이 퍼져나가고 있다. 즉, 선수에 부딪히는 공기가 없을 경우라도 유속이 증가함에 따라 공기유입이 더욱 잘 일어나는 것을 보여준다. 이는 앞에서 언급한 Bernoulli 원리에 의하여 선저부 유속이 증가함에 따라 공기유출부 부근에서 압력이 감소함으로써 발생한 현상이라고 판단된다.

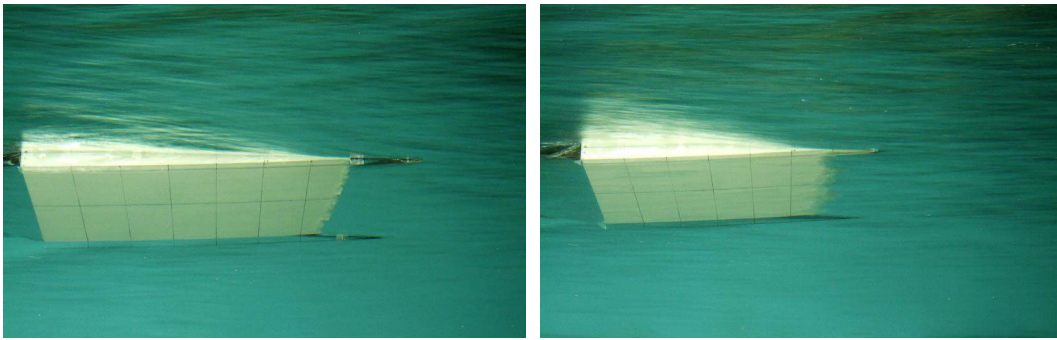
(3) 공기유출부 위치의 영향 (Case-4)

Case-4는 공기유출구를 Station 5번까지 연장하여 유속변화에 따른 공기막 형성을 조사한 경우이다. 풍속(V_a)은 0.0m/s 로 고정하였다.

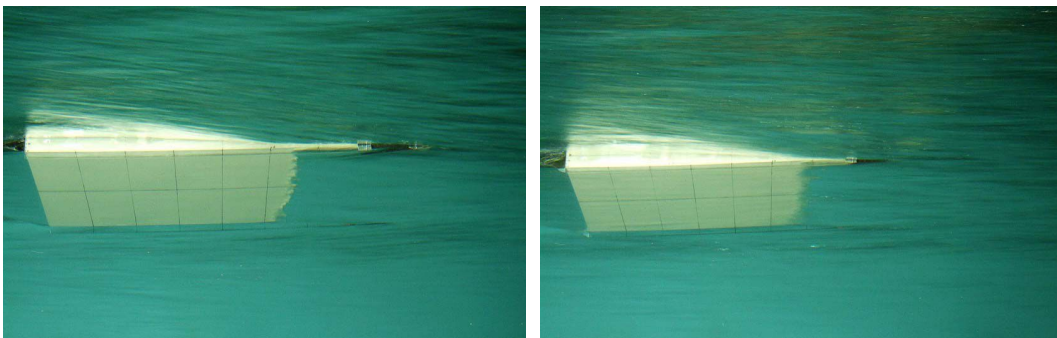
Fig. 3-6에서 보는 바와 같이 동일한 유속에서도 공기유출부 위치가 5번 Station까지 연장된 Case-4의 공기막이 더 길게 퍼져나가는 것을 볼 수 있다. 또한 공기유출부를 선미로 연장한 경우에도 유속이 증가함에 따라 공기막이 선미부로 길게 퍼져나가는 것을 알 수 있다. 이는 공기유출부를 선미부로 길게 연장함으로써 공기막을 선미로 더 길게 유도할 수 있다는 것을 의미하지만, 이 유출부를 선저부 어디까지 연장하는 것이 가장 효율적인 것에 대한 명확한 판단을 내리기에는 더욱 많은 연구가 필요하다.



(a) $V_a=0.0$ m/s



(b) $V_a=3.0$ m/s

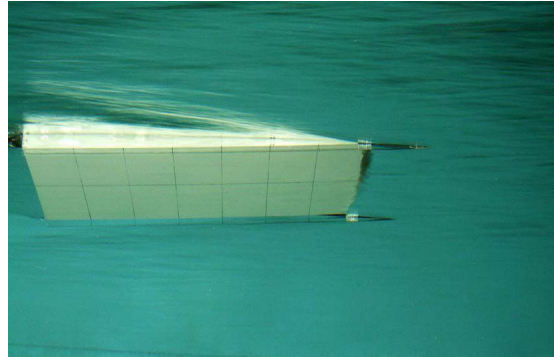


(c) $V_a=6.0$ m/s

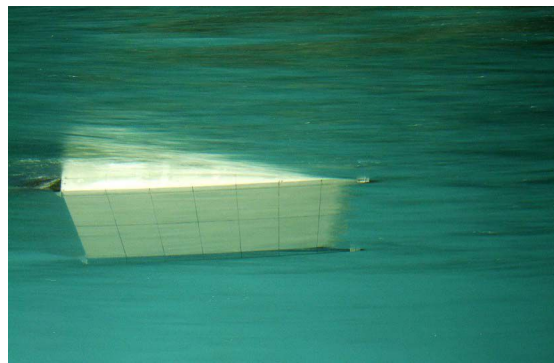
< $V_w=1.5\text{m/s}$ (Case-1) >

< $V_w=2.2\text{m/s}$ (Case-2) >

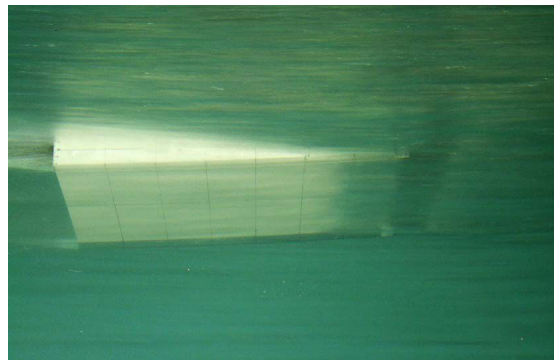
Fig. 3-4 Comparison of air cavity at $V_w=1.5\text{m/s}$ & 2.2m/s



(a) $V_w=1.5\text{m/s}$ (Case-1)

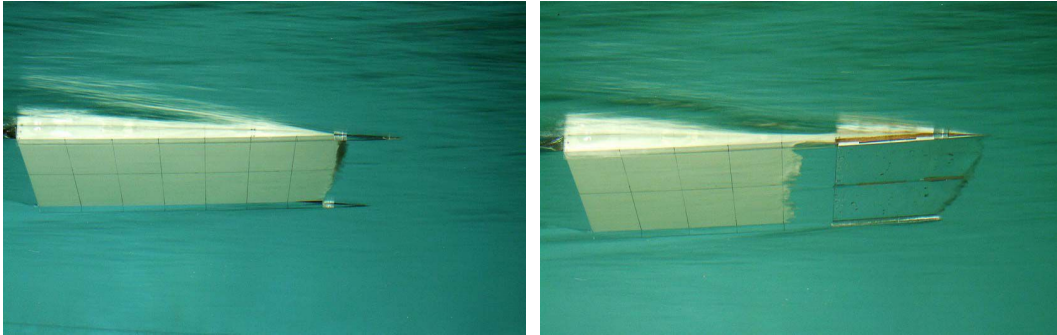


(b) $V_w=2.2\text{m/s}$ (Case-2)

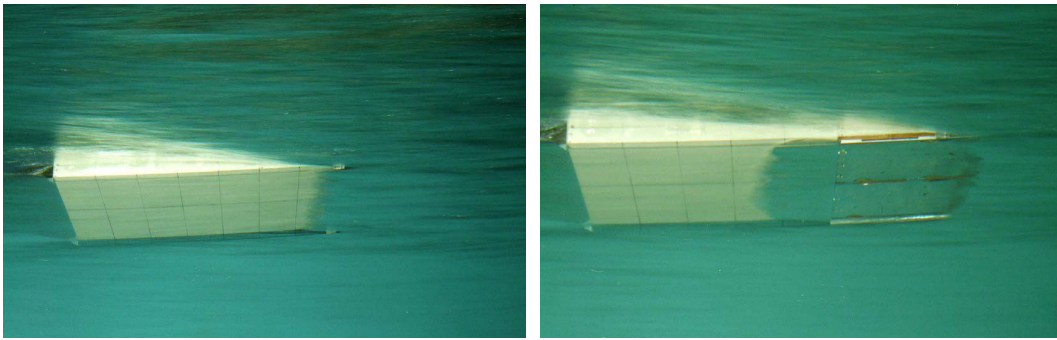


(c) $V_w=4.0\text{m/s}$ (Case-3)

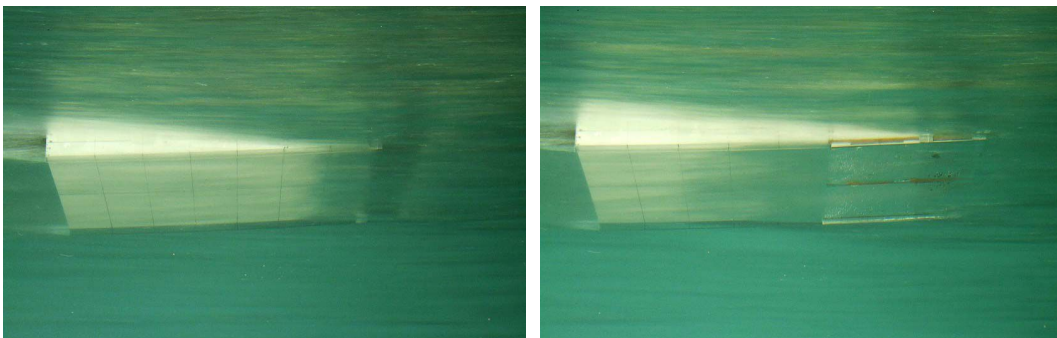
Fig. 3-5 Comparison of air cavity for water speed effect
($V_a=0.0\text{m/s}$)



(a) $V_w=1.5\text{m/s}$



(b) $V_w=2.2\text{m/s}$



(c) $V_w=4.0\text{m/s}$

< Case-1, 2 & 3 >

< Case-4 >

Fig. 3-6 Comparison of air cavity for outlet position ($V_a=0.0\text{m/s}$)

제 4 장 수치해석을 이용한 2차원 유동분석

4-1 개 요

일반적으로 모형시험은 물리량을 계측하거나 현상을 관찰하기에는 가장 적합한 방법이지만, 그 세세한 원인을 규명하기에는 시간과 경비가 많이 소요되는 단점이 있다. 최근 들어 전산유체역학(CFD)이 이러한 분야를 대신할 수 있는 대안으로 많은 관심을 받고 있다.

전산유체역학에서는 유체입자 하나하나를 추적하면서 문제의 해를 구하는 Lagrangian 관점으로는 유동해석이 어려운 때가 많으므로 보통 관심이 있는 영역을 정하고서 그 영역에 대해서 질량, 운동량, 에너지 등의 보존 법칙을 적용함으로써 밀도, 속도, 압력, 온도 등의 물리량들을 얻게 된다. 그러나 이러한 Eulerian 관점에 의해 방정식을 유도하면서 나타나는 비선형 항(Nonlinear term) 때문에, 형상이 아주 간단한 문제를 제외하고서는 해석적인 해(Analytic solution)를 얻기는 거의 불가능하다.

따라서 전산유체역학(Computational Fluid Dynamics) 방법에서는 관심 영역을 수많은 작은 영역으로 나누고, 각각의 작은 영역에 보존법칙들을 적용하여 근사적인 수치적인 해를 얻는 방법을 적용하고 있는데, 최근 컴퓨터 하드웨어/소프트웨어, 특히 비정렬 격자계(Unstructured grid)의 도입으로 인하여 산업체 현장에서의 적용이 매우 활발해지고 있는 분야이다.

본 연구에서는 앞에서 설명한 2차원 모형시험 결과를 자세히 분석하였다. 또한 선저계단의 영향을 조사하기 위하여 공기유출구가 끝나는 부분부터 선미단까지 10mm의 계단을 만들어 그 영향을 함께 분석하였다. 수치계산은 상용

CFD Code인 FLUENT를 사용하였으며, 공기흐름을 고려한 2층류에 대한 계산을 수행하였다.

4-2 지배방정식과 계산알고리즘

유체의 이동현상의 해석에 필요한 방정식은 질량, 운동량 보존법칙을 미소의 체적에 적용하여 얻어진 비선형 연립 편미분방정식이다. 운동량 해석에 있어서는 난류 유동의 해석을 위한 방정식을 포함하여야 하며 이를 정리하면 아래와 같다.

- 질량 보존방정식

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i) = S_m$$

(4-1)

S_m ; 화학반응에 의한 질량 Source항

- 운동량 보존방정식

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho u_i) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i u_j) = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{\partial \tau_{ij}}{\partial x_j} + \rho g_i + F_i$$

(4-2)

p ; 정압

τ_{ij} ; 응력 텐서 (stress tensor)

$$\tau_{ij} = \left[\mu \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right) \right] - \frac{2}{3} \mu \frac{\partial u_l}{\partial x_l} \delta_{ij}$$

g_i, F_i ; 중력과 Body force

● 난류 모델 (Standard k-ε 모델)

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + G_k + G_b - \rho \epsilon$$

(4-3)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \epsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{m_t}{\sigma_\epsilon} \frac{\partial \epsilon}{\partial x_i} \right) \\ &+ C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + (1 - C_{3\epsilon}) G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \end{aligned} \quad (4-4)$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, C_{2\epsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\epsilon = 1.3$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$G_b = -g_i \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)$$

● 난류 모델 (Realizable k-ε 모델)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i k) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_i} \right] \\ &+ G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k \end{aligned}$$

(4-5)

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho\varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho u_i \varepsilon) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right] \\ &+ \rho C_1 S_\varepsilon - \rho C_2 \frac{\varepsilon^2}{k + \sqrt{\nu \varepsilon}} + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} C_{3\varepsilon} G_b + S_\varepsilon \end{aligned}$$

(4-6)

$$C_{1\varepsilon} = 1.44, C_{2\varepsilon} = 1.92, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$$

$$C_1 = \max\left[0.43, \frac{\eta}{\eta + 5}\right], \eta = S \frac{k}{\varepsilon}, S = \sqrt{2S_{ij}S_{ij}}$$

$$G_k = \mu_t \left(\frac{\partial u_j}{\partial x_i} + \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right) \frac{\partial u_j}{\partial x_i}$$

$$G_b = -g_i \left(\frac{\mu_t}{\rho \sigma_h} \cdot \frac{\partial \rho}{\partial x_i} \right)$$

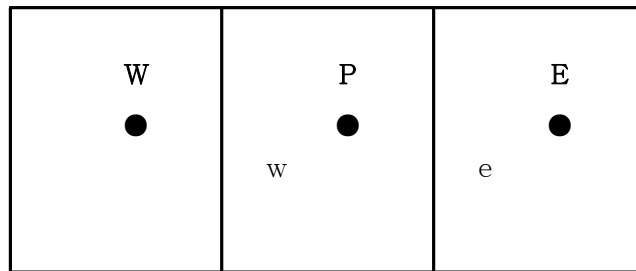
● Volume Fraction 방정식

$$\frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + \frac{\partial (u_j \alpha_q)}{\partial x_j} = \frac{S_{\alpha_q}}{\rho_q} \quad (4-7)$$

α_q : q번째 유체의 volume fraction ($0 \leq \alpha_q \leq 1$)

위의 방정식에 대하여, 앞에서 언급하였듯이, 계산 영역은 여러 개의 작은 영역으로 분할된다. 이 분할된 모양을 격자라고 하며, 각각의 작은 영역을 제어체적(Control volume 또는 Cell)이라고 한다. 3차원일 경우 제어체적들은

보통 육면체이거나 사면체의 형상을 가진다. 모든 물리량들은 이 제어체적들의 중심에 저장된다. 이렇게 각 제어체적에 보존법칙을 적용하기 때문에 이 방법을 유한체적법이라고 한다. 여기에서는 아래의 개략도와 같은 1차원 제어체적에 대하여 유한체적법을 이용해 방정식을 이산화하는 과정을 보이고자 한다.



위에서 보는 바와 같이 각 제어체적의 중심은 W, P, E이며 제어체적 사이의 인접면은 W와 E이다. 1차원, 정상상태(Steady state)일 경우 스칼라 ϕ 의 보존식은 다음과 같으며 질량, 운동량 등의 보존방정식은 모두 이 형태로 볼 수가 있다.

$$-\frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} = -\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_o \quad (4-8)$$

상기 식 (4-8)을 제어체적 P에 적용하여 적분하고 Divergence theorem을 적용한다. 왼쪽의 Convection term의 경우는 다음과 같이 된다.

$$\int_{Volume V} \frac{\partial(\rho u \phi)}{\partial x} dV = \int_{surface A} \rho u \phi dA$$

$$= (\rho u \phi A)_e - (\rho u \phi A)_w \quad (4-9)$$

오른쪽의 Diffusion term과 Source term은 다음과 같다.

$$\int_{Volume V} \left[\frac{\partial}{\partial x} \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) + S_\phi \right] dV =$$

$$\left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_e - \left(\Gamma \frac{\partial \phi}{\partial x} A \right)_w + S_\phi \Delta V \quad (4-10)$$

모든 변수는 제어체적의 중심인 P, W, 그리고 E에 저장되어 있기 때문에 ϕ 와 $\frac{\partial \phi}{\partial x}$ 의 E와 W에서의 값은 center 값으로부터 계산해야만 한다. 이 값들을 계산하는 방법으로 1) First order upwind scheme, 2) Power-law scheme, 3) Second order-scheme 등이 있다.

이렇게 만들어진 적분식을 각 제어체적에 대해 계산한 후 조합하면 다음과 같은 대수방정식으로 표현된다. 즉, 컴퓨터 또는 Matrix solver가 인식할 없는 편미분방정식에서 Matrix solver를 이용할 수 있는 대수방정식으로 변환된 것이다.

$$a_P \phi_P = \sum_{nb} a_{nb} \phi_{nb} + b \quad (4-11)$$

여기서 nb 는 제어체적 P 의 이웃 제어체적들을 나타낸다. 2차원 사각형 격자의 경우 P 의 이웃 셀은 모두 4개이며 3차원 육면체의 경우는 6개가 된다. 그리고 a_p 와 a_{nb} 가 ϕ 의 함수이므로, 즉 비선형 방정식이므로 반복계산법에 의해서 해를 얻어야만 한다.

본 연구에서 사용된 FLUENT 코드[40]의 경우 SIMPLE 계열의 알고리즘을 채택하고 있으며 속도항에서 각각의 성분을 따로 푸는 Segregated solver를 이용한다. 수치해석은 Fig. 4-1에서 보는 개략도와 같은 순서로 계산되고, 수치해석 방법은 다음과 같다.

- u, v, w 방향의 운동량 보존방정식을 각각 계산한다.
- 위에서 얻어진 속도는 질량보존을 만족하지 못할 수도 있어, 연속방정식으로부터 질량보존에 대한 계산을 수행한 후 속도성분을 update한다.
- 엔탈피와 각각의 species를 계산한다.
- 난류(turbulence kinetic energy, eddy dissipation rate)에 대한 계산을 수행한 후 속도 성분을 update한다.
- 유체의 property를 update한다.
- 수렴성을 판단하여 수렴하였으면 계산을 끝내고, 수렴하지 않았으면 다시 상기에서 반복 계산한다.

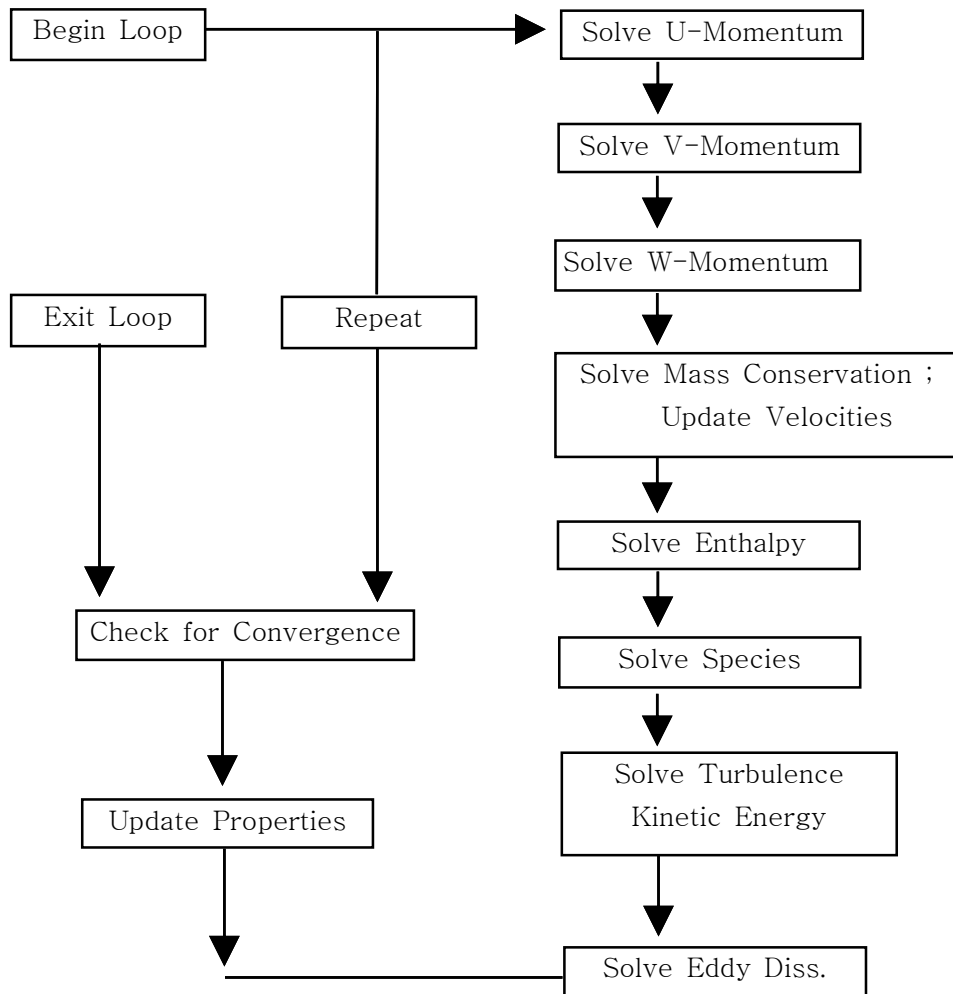


Fig. 4-1 Segregated solver algorithm

4-3 수치해석 조건

경계조건으로는 Fig. 4-2와 같이 유입면은 균일류 조건을, 유출면에서는 일정한 값의 정압력을 사용하였으며, 선체 표면에서는 No-Slip조건을 적용하였다. 공기 막이나 자유수면을 고려할 경우에는 다상유동의 해석을 위하여 VOF(Volume Of Fluid) Model을 사용하였다. 또한 선저의 공기 공동의 영향을 미치는 인자로 물과 공기의 표면장력에 대한 영향을 고려하기 위하여 표면장력 값으로 0.072N/m를 사용하였으며, 유체와 고체 표면이 이루는 접촉각은 정확히 알 수 없기 때문에 김종현[39]이 유사한 수치계산에 사용하여 큰 문제가 없다고 설명한 90°를 본 연구에서도 사용하였다. 또한 실험과 동일한 항주 자세인 4° 트림을 고려함으로써 좀 더 정확한 공기 공동의 형상을 예측하고자 하였다.

해석에 사용된 격자는 해석의 정도를 높이고 공기 막의 형상을 비교적 잘 예측하기 위하여 육면체 격자를 구성하였다. 해석 영역은 경계조건이 해의 정확도에 큰 영향을 주지 않도록 선체 길이를 기준으로 각 방향으로 3배 정도의 크기로 충분히 크게 정하였으며, 격자는 수면과 선체 주위로 최대한 밀집시켜 사용함으로써 대략 100만개 정도를 생성하였다. 또한 공기 막이 형성되는 부분에서는 Y_{min}^+ 가 거의 1에 가깝도록 하고 높이 방향으로 20개 정도의 격자수를 사용하였다(Fig. 4-3).

4-4 수치해석 결과

(1) 공기속도의 영향

동일한 유속($V_w=1.5\text{m/s}$)에서 공기속도가 서로 다를 때의 수치계산 결과를 Fig. 4-4와 Fig. 4-5에 나타내었다. Fig. 4-4는 표면마찰계수 분포이고, Fig.

4-5는 선저 공기막 분포이다.

공기속도가 증가할수록 선미에서의 마찰저항이 감소함을 알 수 있다. 그 이유는 Fig. 4-5에서 보는 바와 같이 공기속도가 증가할수록 선저로 유입되는 공기양이 증가하면서 선체표면이 물과 직접 접촉하는 면적을 감소시키기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4-6은 자유수면 상부, 공기흡입관 부근에서의 속도 Vector이다. 공기속도(V_a)가 증가함에 따라 유입구 부근에서 속도가 증가하고 있다. 즉, 공기가 많이 흡입됨을 알 수 있다.

Table 4-1에 각각의 경우에 대한 마찰저항 계산 값을 나타내었다. 공기속도가 3.0m/s일 경우에는 변화가 없지만, 6.0m/s로 증가하면서 마찰저항이 약 10%정도 감소하고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 공기속도가 증가할수록 선저로 유입되는 공기양이 증가하면서 선체표면이 물과 직접 접촉하는 면적을 감소시키기 때문이라고 판단된다. 그러나 공기속도가 3.0m/s일 때 마찰저항 값의 변화가 없는 이유는 선저를 덮는 공기막에 의한 마찰저항 감소와 공기유도판에서 발생하는 마찰저항 증가량이 거의 동일하기 때문인 것으로 판단된다.

Table 4-1 Computed viscous drag, $V_w=1.5\text{m/s}$

Va (m/s)	Viscous drag
0.0	0.169
3.0	0.169
6.0	0.158

(2) 계단식 선저의 영향

공기 유힬 방법에 의한 효과를 향상시키기 위하여 선저에 단을 만들어 후면 단의 후류 특성을 이용하는 방법은 이미 실제 공기 유힬선에 널리 적용되고 있다. 이 방법은 선저부에 설치된 단의 후방에 공기 공급이 이루어지면 단 후방 표면에 부착된 대규모의 공기 공동을 생성시킬 수 있으며 이러한 공기 공동이 선저부에 설치된 단 후방에서 선체 표면을 덮는 공기 막 역할을 함으로써 선박의 마찰 저항을 감소시킬 수 있게 된다[31][32].

본 2차원 활주형 선형의 공기 유힬에 대한 선저 계단 효과를 파악하기 위하여 아래 Table 4-2와 같이 두 가지 형상에 대하여 수치 Simulation을 수행하였다. 선저 계단이 없는 원래의 경우와 공기유도판의 출구 끝단에서 10mm의 선저계단이 있는 경우이다(Fig. 4-7). 두 경우 모두 선속은 1.5m/s로 고정하였고, 풍속을 1.5m/s, 3.0m/s, 6.0m/s로 변화 시키면서 풍속이 선저의 공기 막 생성에 어떠한 영향을 주는지 해석을 통하여 확인하고자 하였다. 표기 중 'OR-'은 실험 조건과 동일한 형상, 즉 선저 계단이 없는 경우이며, 'New-'는 선저계단이 있는 경우이다. 선저 바닥의 양쪽으로는 Keel을 부착하여 생성된 공기 막이 안정적

으로 유지될 수 있도록 하였다. 수치해석을 위한 계략적인 모델링 형상을 Fig. 4-8에 나타내었다.

Table 4-2 Computational case for step effect

Case	Original Case (선저 계단이 없는 경우)		Case	New Case (선저 계단이 있는 경우)	
	유속 (Vw)	풍속 (Va)		유속 (Vw)	풍속 (Va)
OR-W/0	1.5m/s	1.5m/s (W/0 plate)	New-W/0	1.5m/s	1.5m/s (W/0 plate)
OR-1.5		1.5m/s	New-1.5		1.5m/s
OR-3.0		3.0m/s	New-3.0		3.0m/s
OR-6.0		6.0m/s	New-6.0		6.0m/s

Fig. 4-9는 계산된 마찰저항 값 비교이다. 공기유도판이 없을 때, 계단이 있는 경우(NEW-W/0)의 점성저항이 계단이 없는 경우(OR-W/0)보다 크다. 이는 선저 계단에 공기막이 형성되지 않을 경우, 단에서 발생하는 유동박리에 의한 와류의 영향으로 점성저항이 증가하기 때문이라고 보인다.

공기유도판을 설치하고 선수에 바람을 부가하였을 경우, 즉 풍속을 주었을 때, 선저 계단이 없는 경우의 Va=1.5m/s에서 마찰저항이 증가하다가 풍속이 증가하면서 저항 값이 점차 감소하는 경향을 보인다. 이는 낮은 풍속에서는 공기막이 선저에 형성됨으로서 감소하는 마찰저항 값보다 공기유도판에서 발생하는

저항 증가가 더 크기 때문이다. 즉 선저 계단이 없는 경우에는 선수에 부딪히는 공기가 고속일 경우에만 자유순환 공기유통의 효과가 기대된다는 것을 설명한다.

그러나 선저에 계단을 설치한 경우에는 비교적 낮은 풍속에서도 마찰저항이 감소하고 있다. 즉, 선수로부터 유입된 공기가 선저계단 후면에 공기공동을 형성하면서 마찰저항이 줄어드는 효과로 판단된다. 이는 장진호[35], 김종현[39] 등의 최근의 연구결과와도 유사한 경향이다.

Fig. 4-10은 풍속(V_a)이 1.5m/s일 경우, 두 선형 주위로 발생하는 파형을 보여주고 있다. 전체적인 형태는 유사하게 나타나지만 계단이 있는 선형(NEW-1.5)에서 좀 더 낮은 파고가 나타나고 있다. 즉 선저계단으로 인하여 선저부에 공기가 잘 유입되고, 이 부분에서 압력이 낮아지기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4-11과 Fig. 4-12는 두 선형에 대한 선수파를 풍속 별로 보여주고 있다. 앞에서 언급한 바와 같이 기존의 원래 선형에서는 선수 쪽의 파가 크게 변화가 없거나 공기유도판 설치함으로써 파고가 더 높아지고 복잡해지는 특성을 보이고 있으며, 또한 풍속이 어느 일정 속도 이상(6m/s)이 되어야만 선수파가 줄어드는 결과를 보이고 있다. 이와는 달리 선저계단이 있는 새로운 선형에서는 공기유도판을 설치함으로써 파고가 높아지는 동일한 특성을 보이고 있지만 상대적으로 낮은 풍속에도 선수파가 크게 줄어드는 경향을 보이고 있다.

Fig. 4-13은 선체 주위의 파형뿐만 아니라 공기 막의 형상을 아래쪽에서 함께 보여주고 있다. 공기 막의 형상은 중앙 쪽으로 길게 나타나는 타원형을 보이고 있으며, 공기유도판이 없는 경우에는 선수나 선측에서 딸려 들어가는 공기가 많이 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 선형과 같이 활주형 선박의 경우 항주 자세나 자유수면이 이러한 비정상(Unsteady)적인 유동 특성을 보일 가능성이 크

며, 또한 저항 값의 변화에도 상당한 영향을 줄 수 있을 것으로 판단된다.

Fig. 4-14는 선체 표면에서의 압력 분포를 보여주고 있다. 거의 모든 경우 유사한 형태를 보이고 있는데, 선저부 압력이 더 크게 떨어지는 경향을 보인다. 이는 풍속의 영향으로 선저부에 공기가 더 많이 유입되기 때문이라고 판단된다.

Fig. 4-15는 선체 표면에서의 마찰 계수를 보여주고 있다. 풍속이 빨라지면서 공기 막이 없는 선체의 뒤쪽에서도 마찰 저항이 줄어드는 결과를 확인할 수 있다. 이는 공기 막의 길이가 더 이상 길어지지 않더라도 주위의 조파 특성이나 생성된 공기 막의 두께가 달라지면서 결국 선체의 형상을 바꾸게 되어 선미 쪽에서의 마찰저항도 줄어드는 효과를 보이는 것으로 보여진다. 선저계단이 있는 새로운 선형에서도 이러한 특성은 동일하게 나타나지만, 풍속이 3m/s일 경우에만 표면의 마찰 계수가 크게 줄어들지 않고 오히려 선체 표면에서는 좀 더 커지는 것을 알 수 있는데, 이는 공기 막이 앞쪽에서 두껍게 형성되긴 하지만 더 이상 안쪽으로 밀려들어가지 않으면서 앞의 1.5m/s일 때보다 오히려 공기 막이 끝나는 부분에서 더 얇아지게 되고 시간에 따라 막이 깨지고 다시 생성되는 비정상(Unsteady)적인 특성을 보임에 따라 나타나는 결과를 보여진다.

Fig. 4-16은 선저의 공기 막의 길이를 비교하여 보여주고 있다. 실제 기존에 연구되고 있는 공기의 분사를 통한 공기 유회법의 형태가 아니기 때문에 물 아래와 공기가 유입되는 쪽의 압력 관계에 의하여 공기 막이 유지됨에 따라 상부의 풍속에 관계없이 거의 균일한 공기 막의 길이를 보여주고 있다. 이는 공기를 분사하는 공기 유회법의 임계 유량과도 유사한 특성으로 볼 수 있는데[39], 유속의 증가가 없기 때문에 공기 막의 길이가 길어지거나 하는 특성들은 나타나지 않고 있으며, 그 형태만이 타원형에서 좀 더 사각형에 가까운 형상으로 바뀌는 결과를 보여주고 있다.

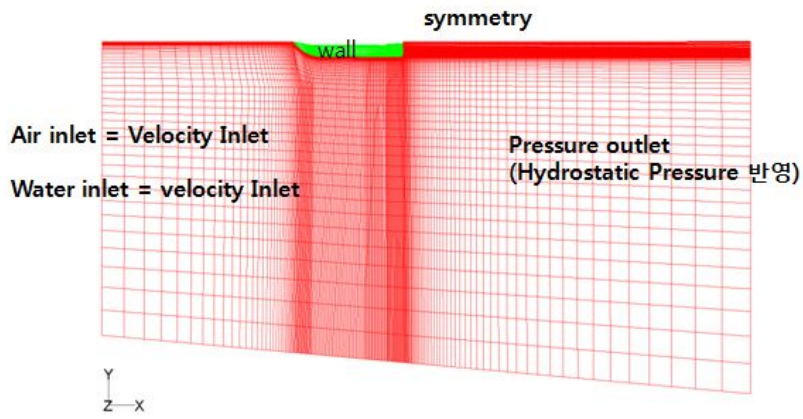


Fig. 4-2 Boundary conditions

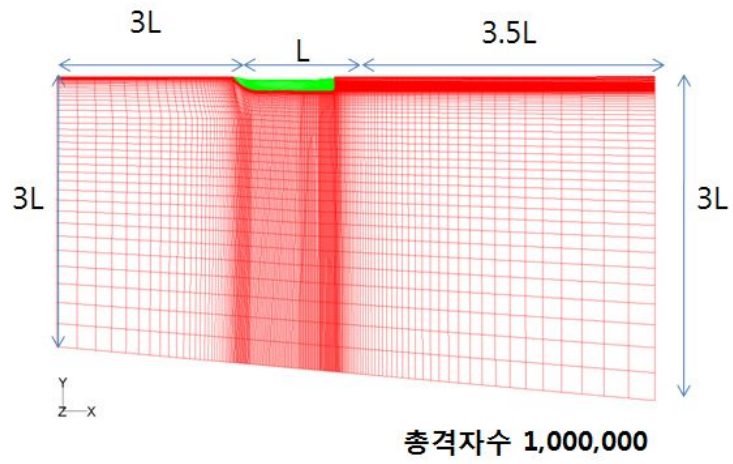
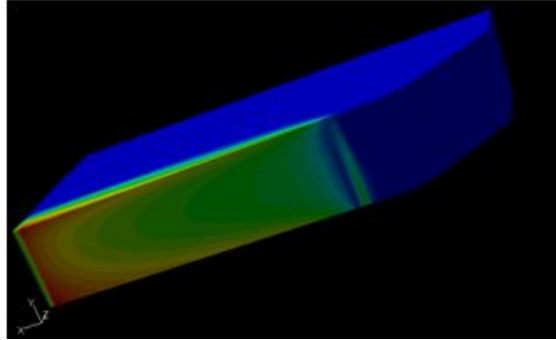
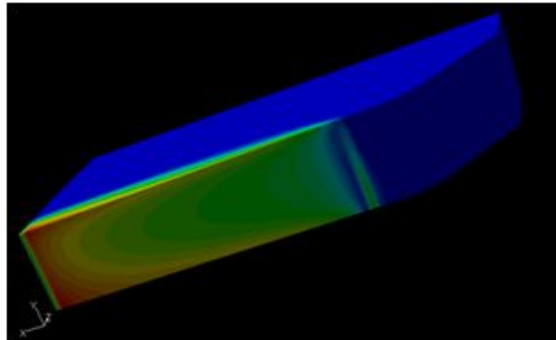


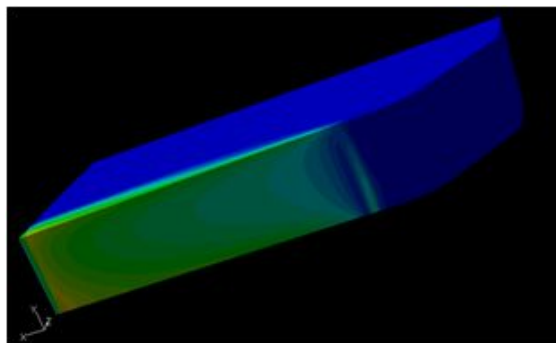
Fig. 4-3 Generated grid system



(a) $V_a=0.0$ m/s

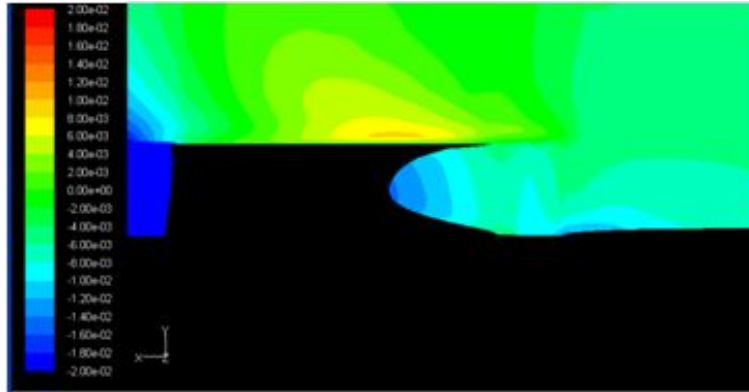


(b) $V_a=3.0$ m/s

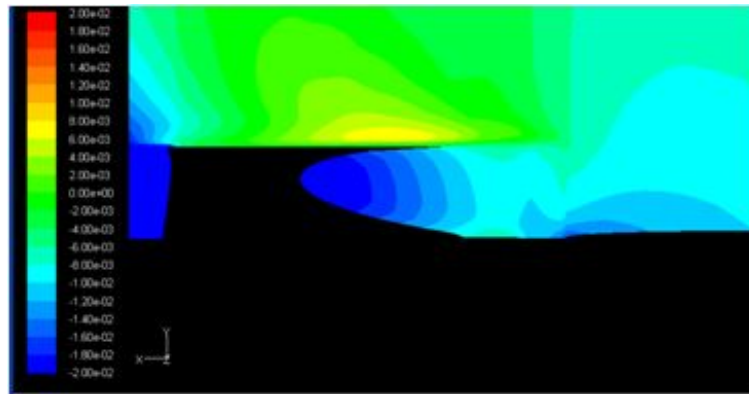


(c) $V_a=6.0$ m/s

Fig. 4-4 Computed skin friction distributions at $V_w=1.5$ m/s

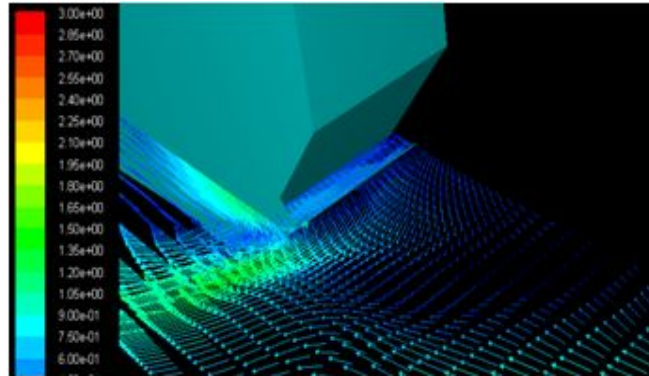


(a) $V_a=3.0$ m/s

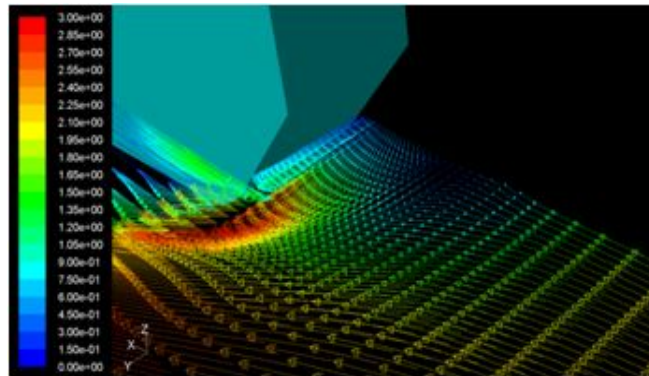


(b) $V_a=6.0$ m/s

Fig. 4-5 Computational results for air cavity at $V_w=1.5$ m/s

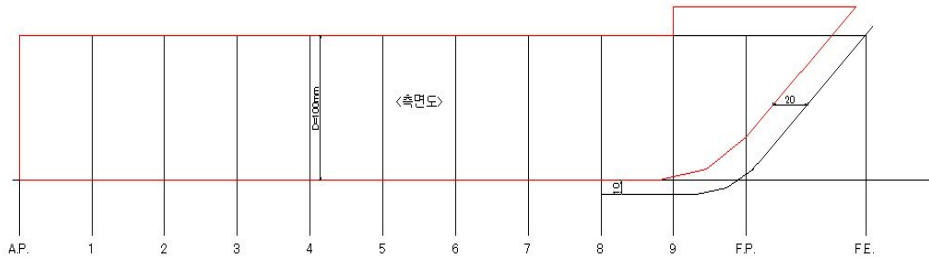


(a) $V_a=3.0$ m/s

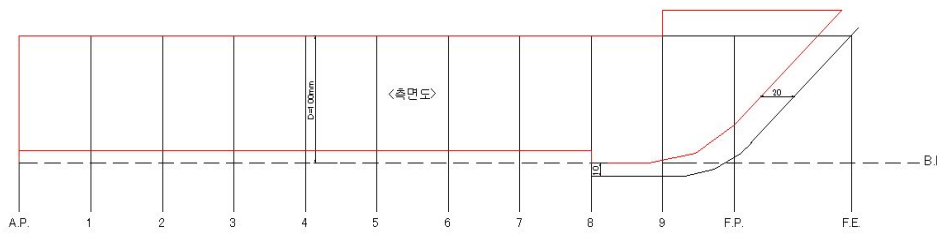


(b) $V_a=6.0$ m/s

Fig. 4-6 Computational results for velocity vectors above free surface at $V_w=1.5$ m/s



(a) Original



(b) Stepped bottom (New)

Fig. 4-7 Schematic view of original and stepped bottom

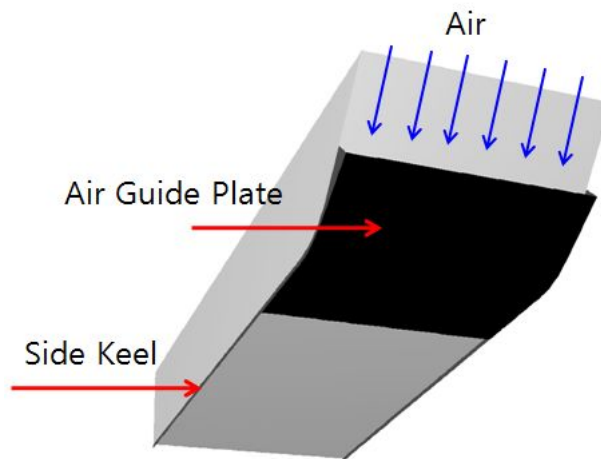


Fig. 4-8 Schematic view for numerical analysis

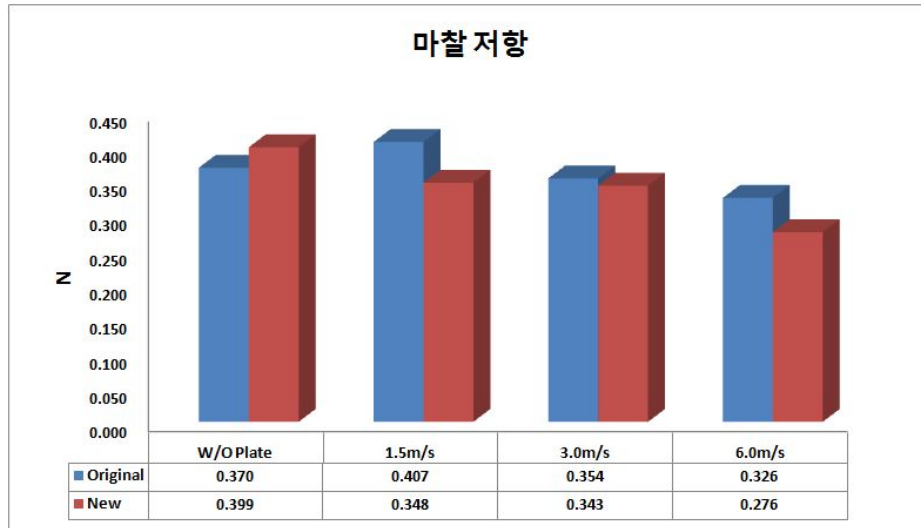


Fig. 4-9 Comparison of viscous drag due to air speed and stepped bottom

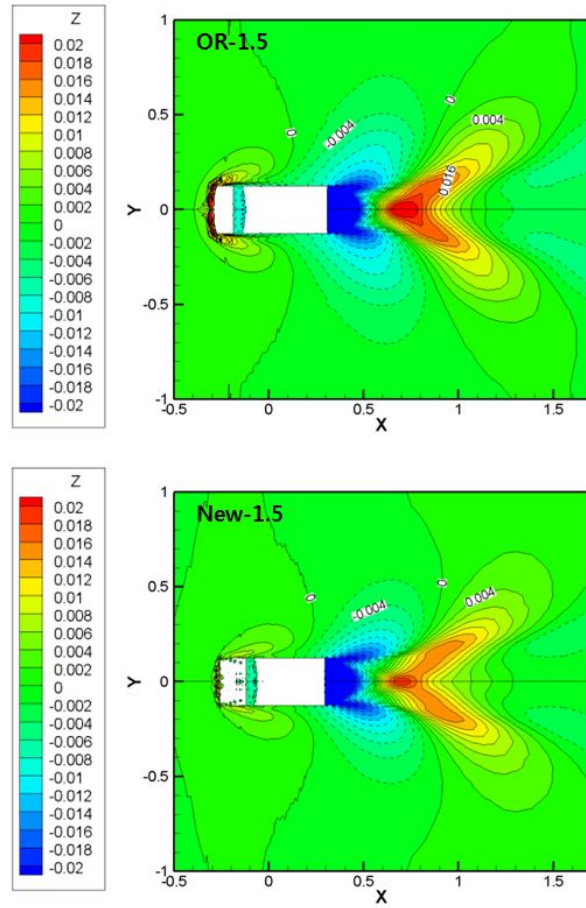


Fig. 4-10 Comparison of wave patterns

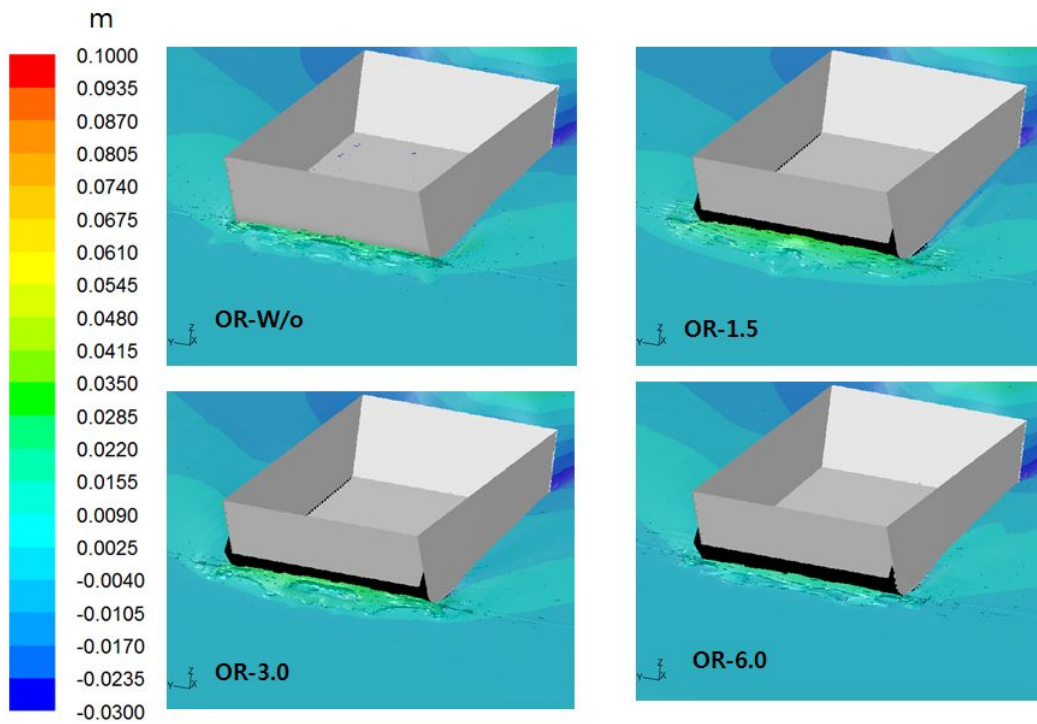


Fig. 4-11 Comparison of bow wave patterns due to the variation of air speed (Original hull form)

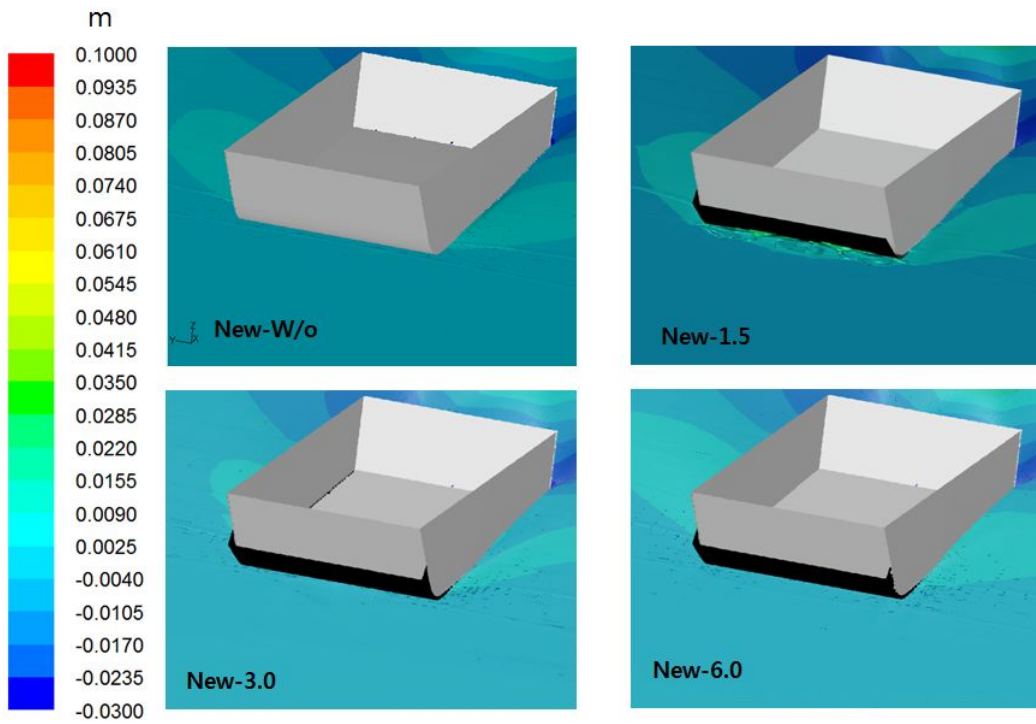


Fig. 4-12 Comparison of bow wave patterns due to the variation of air speed (New hull form)

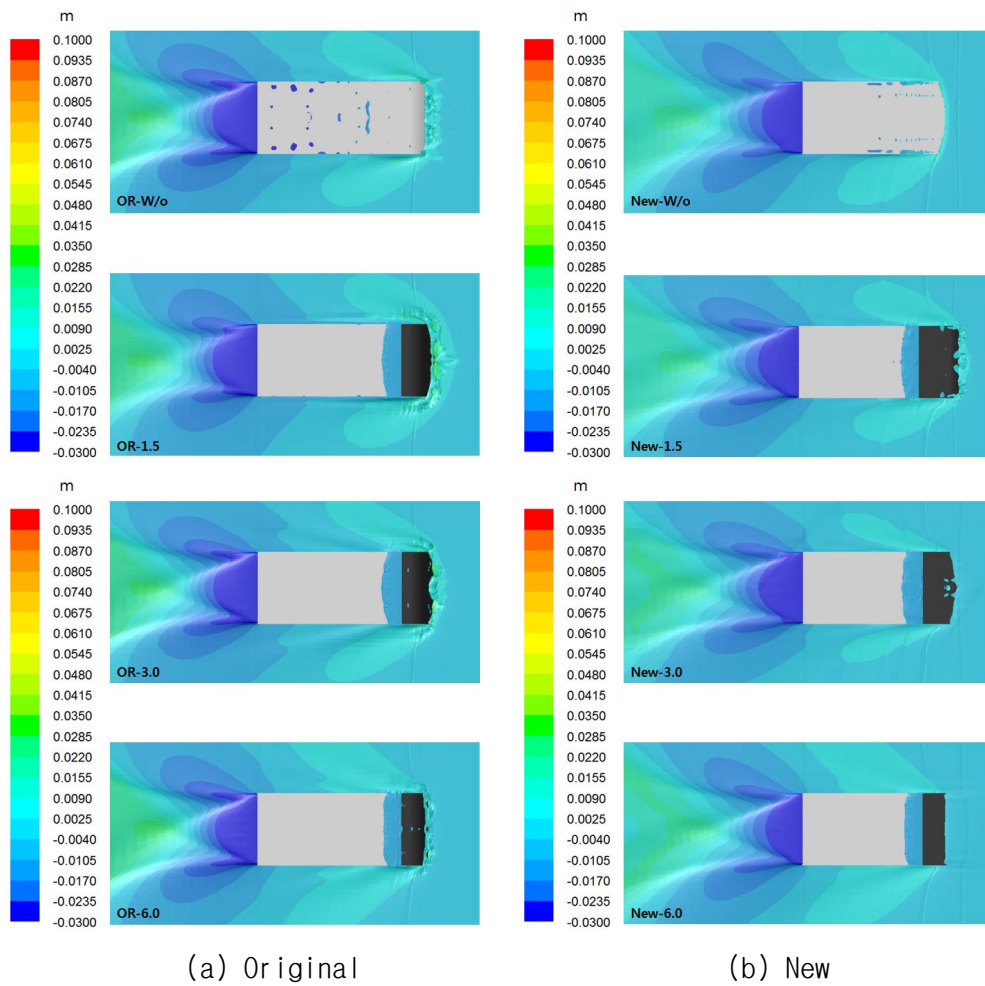


Fig. 4-13 Comparison of wave patterns and air cavity on bottom

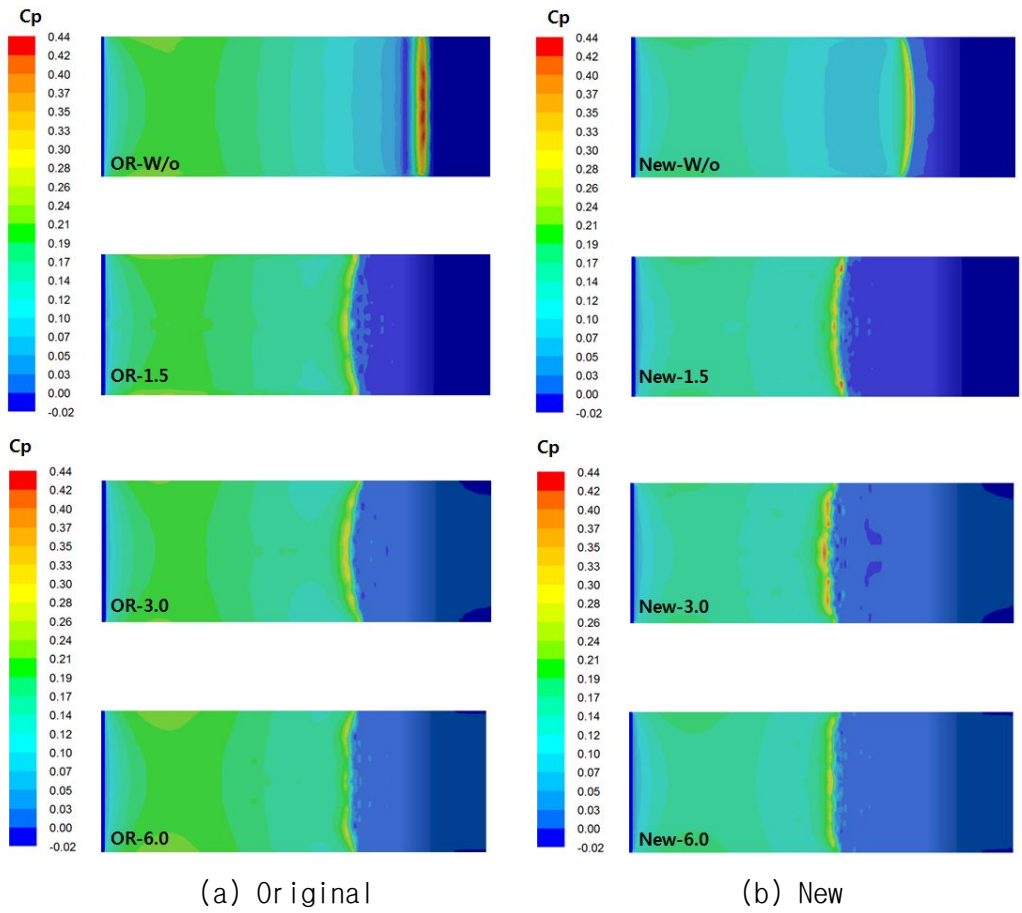


Fig. 4-14 Comparison of pressure coefficient

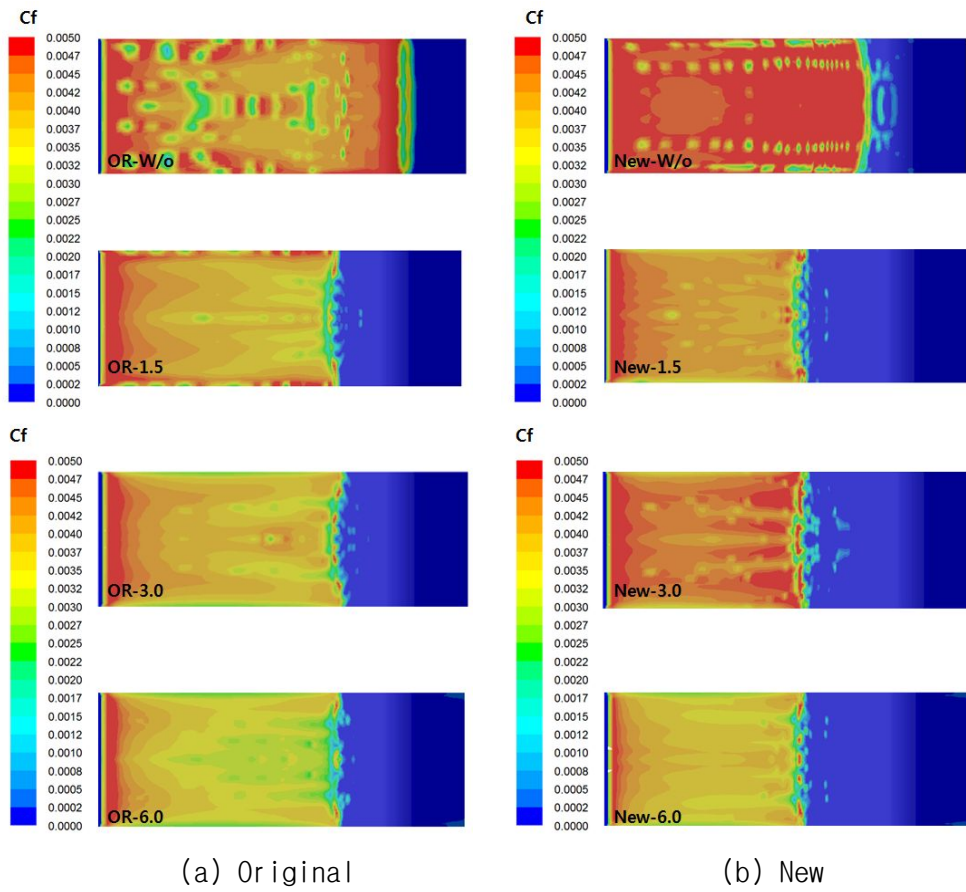
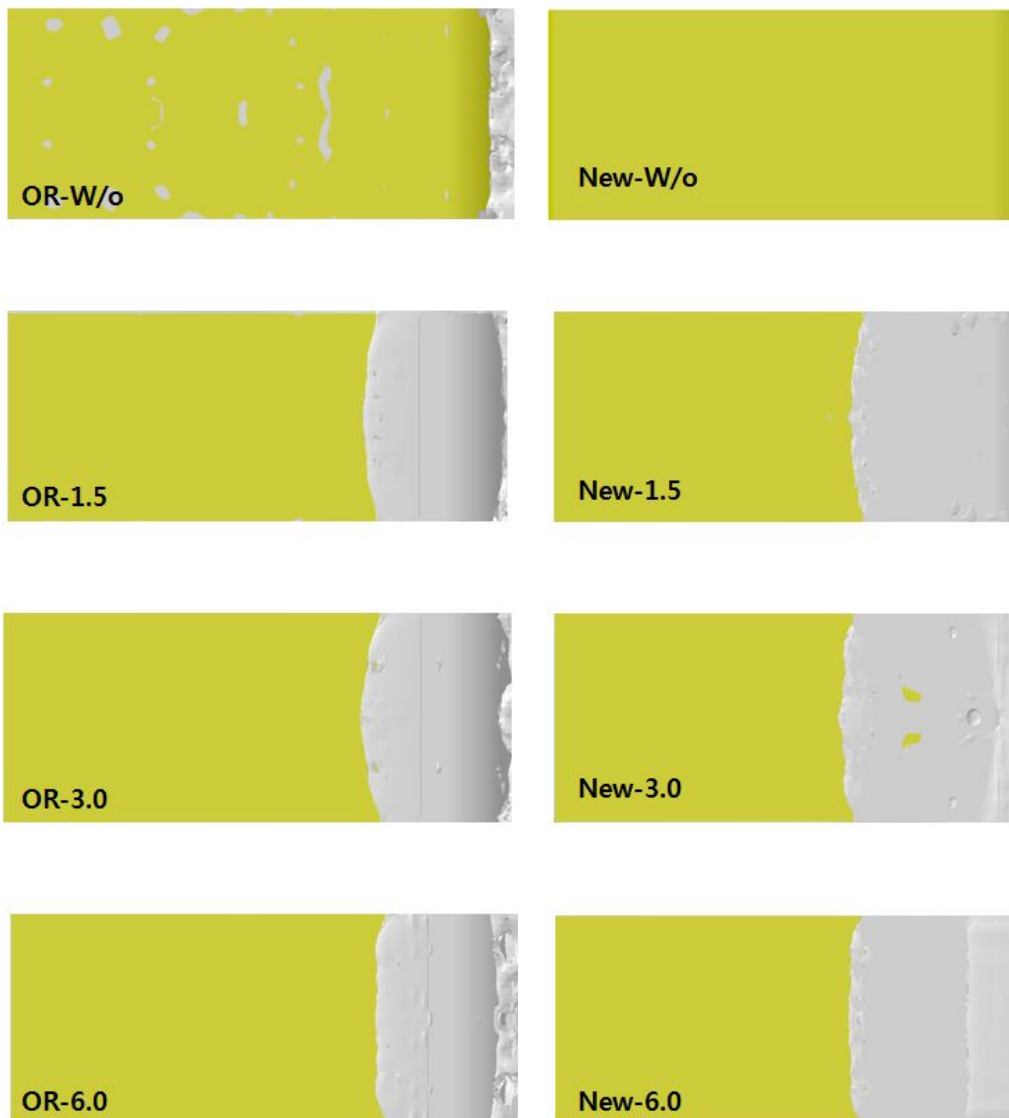


Fig. 4-15 Comparison of skin friction coefficient



(a) Original

(b) New

Fig. 4-16 Comparison of air cavity on bottom

제 5 장 3차원 모형에 대한 모형시험

본 장에서는 본 연구를 통하여 제시된 자유순환 공기유탈기법의 실선적용 가능성을 확인하기 위하여 3차원 실제선박에 대한 모형시험결과를 언급하였다. 모형시험은 서일본유체기술연구소 고속회류수조에서 앞의 2차원 모형시험과 동일한 방법으로 선수에 공기 유속 조절이 가능한 공기생성 송풍기를 설치하여 시험을 수행하였다.

본 연구의 대상선박은 32피트급의 고속 레저보트로 주요제원은 Table 5-1과 같고, 기본 형상은 Fig. 5-1과 같다.

Table 5-1 Principal dimensions for test model

	Dimensions
Loa	9.86
Lwl	7.65
B	2.5
D	1.2
d	0.58
Displacement (ton)	4.445

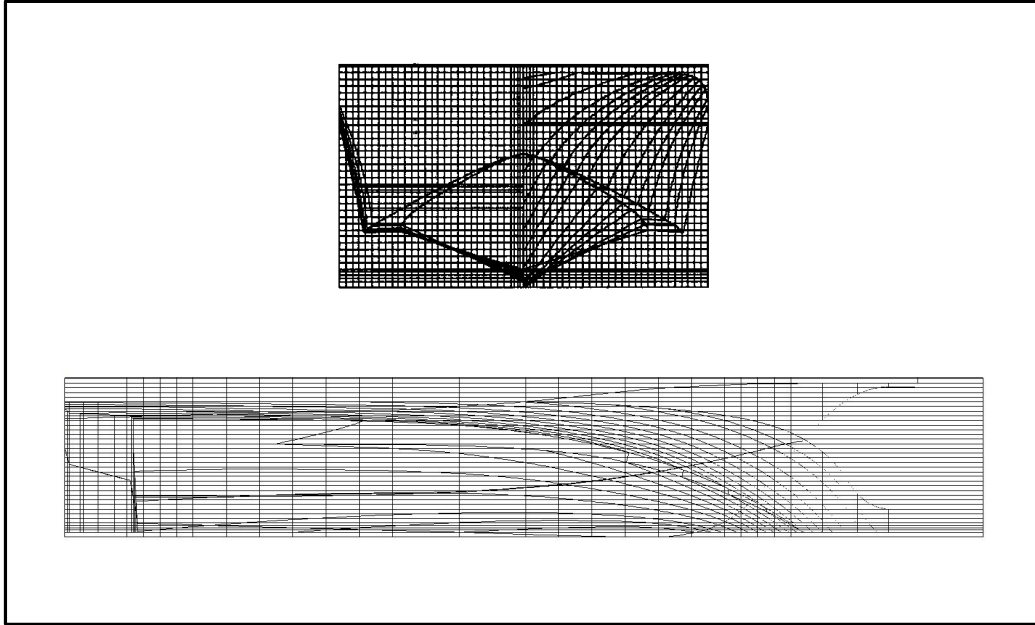


Fig. 5-1 Lines for test model

5-1 시험조건

소형 고속선의 선측 차인(Chine)을 따라 부착한 소형 날개는 일정 속도 범위에서 저항성과 항요 안정성을 향상시키는데 기여한다고 알려져 있다 [22, 23]. 본 연구에서는 Fig. 5-1의 대상선박에 Fig. 5-2와 같은 형상의 선측날개를 부착하여 이를 기본선으로 하고, 여기에 공기유도판 초기트림을 부여하여 성능 변화를 검토하였다.

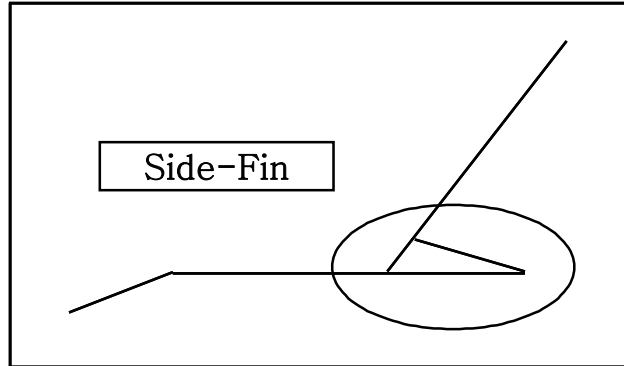


Fig. 5-2 Sketch of Side-fin

공기유도판은 투명아크릴로 제작하였으며, 공기 유출부 위치는 2차원 시험에서 상대적으로 효과가 크다고 나타난 5 Station으로 결정하였다. 또한 본 3차원 시험에서는 선저에 계단을 만들어 주지는 않고, 순수한 공기흡입에 의한 영향만을 검토하였다.

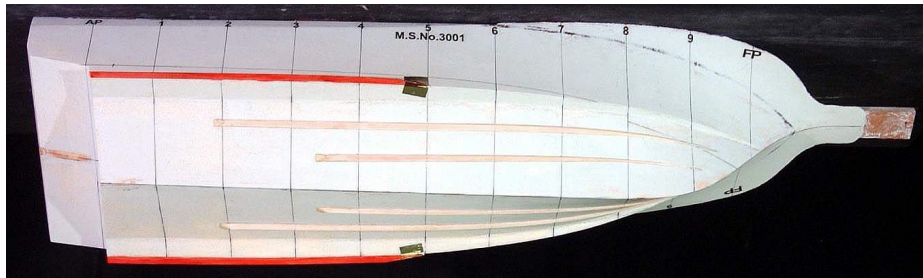
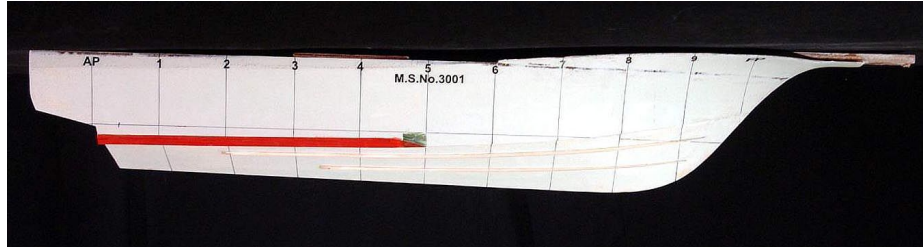
모형시험은 Table 5-2에서 보는 바와 같이 세 경우에 대하여 26노트~32노트 범위에서 수행하였다. 일반적으로 회류수조에서 저항시험을 할 경우, 공기 속도의 영향은 무시한다. 그러나 본 연구에서는 선수에 부딪히는 공기의 속도가 중요한 관계로 선수에 부딪히는 공기가 없는 경우와 매 속도별 선수에 부딪히는 풍속을 선속과 동일하게 만들어준 두 경우에 대하여 시험을 수행하였다.

모든 모형시험은 공기유도판의 무게를 고려하여 동일한 배수량 조건에서 수행하였고, 설계속도인 30노트에서 동일한 트림이 발생하도록 초기트림을 조절하면서 모형시험을 수행하여 선체 자세 변화에 따른 저항성능 차이를 최대한 배제시키면서 시험을 수행하였다.

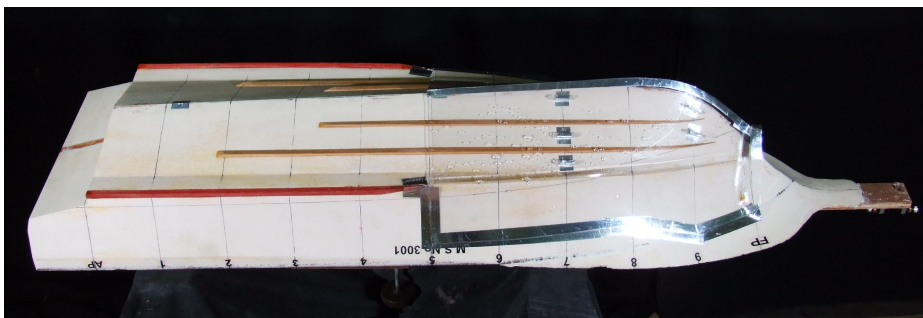
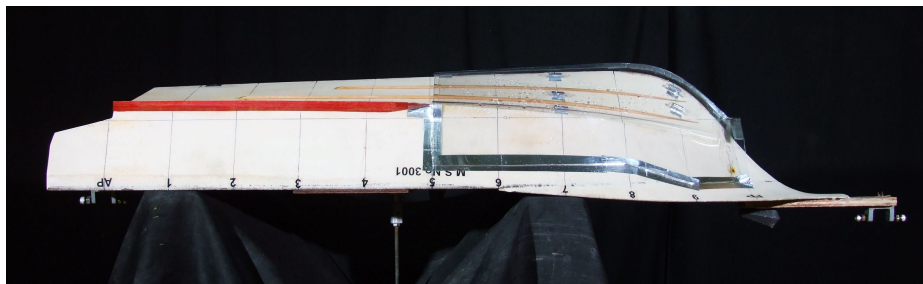
Case-1과 Case-2의 실험모형을 Fig. 5-3에 나타내었다.

Table 5-2 Test conditions for free-ventilated air lubrication

Test case	Remarks
Case-1	Original (Even trim)
Case-2	Case-1 + Air guide plate
Case-3	Case-2 + Initial trim 4°



(a) Case-1



(b) Case-2

Fig. 5-3 Test models for Case-1 and Case-2

5-2 시험결과

세 경우에 대한 저항계측결과를 Fig. 5-4에 나타내었다. 각각의 경우에 있어서 점선은 운항속도와 동일한 속도로 공기를 불어 넣었기 때문에 공기에 의하여 저항이 증가한 결과이다. Case-1에 비하여 Case-2의 경우, 급격하게 저항이 증가하는 경향을 보인다. 이는 공기유도판을 선수에 부착함으로써 무게 중심이 선수로 이동하였을 뿐만 아니라 공기유도판으로 인하여 선수형상이 변하였기 때문에 고속에서 활주상태가 발생하지 못하였기 때문으로 판단된다.

Case-3의 경우, 저항성능이 가장 우수하게 나타났다. 이는 공기유도판을 부착한 후 강제로 일반적인 활주상태인 약 4도의 초기트림을 부여하였기 때문에 나타난 현상이다. 유속이 증가할수록 저항 값 차이는 점차 증가하는 경향을 보인다. 이에 대한 자세한 설명은 뒤에서 다시 언급하기로 한다.

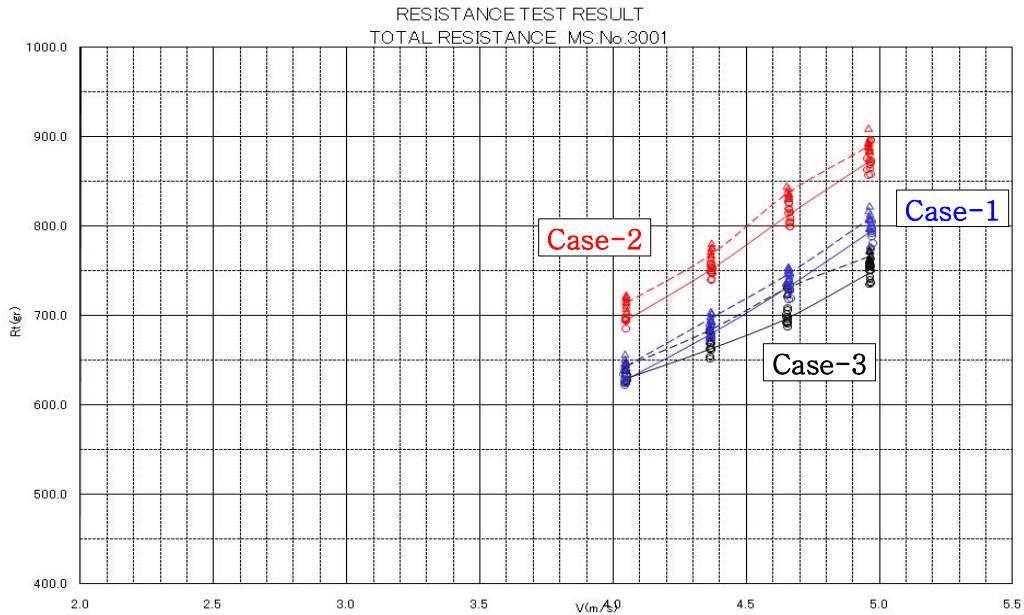


Fig. 5-4 Measured total resistance for case-1, case-2 and case-3

Case-1의 매 속도별 파형과 선저부 유동 형상을 Fig. 5-5 ~ Fig. 5-8에 나타내었다. 속도가 증가할수록 선측날개 주위에서 발생하는 파도가 점차 감소하는 경향을 보인다. 이는 고속 활주선의 일반적인 경향으로, 속도가 증가할수록 선체가 부상이 되는 관계로 차인이 수면 위에 놓이게 되기 때문이다. 또한 선저부 유동특성은 선수부에 작용하는 공기와는 상관이 없음을 알 수 있다.

설계속도(30노트, $F_n=1.8$)에서의 파형을 보면, 선체가 충분히 부상하여 선측날개가 수면 상부에 나타나고 있다. 이 날개 주위에서 Spray가 나타나고 있으나 이는 국부파(Local wave)로 저항성능에 크게 영향을 미치지 않는다.

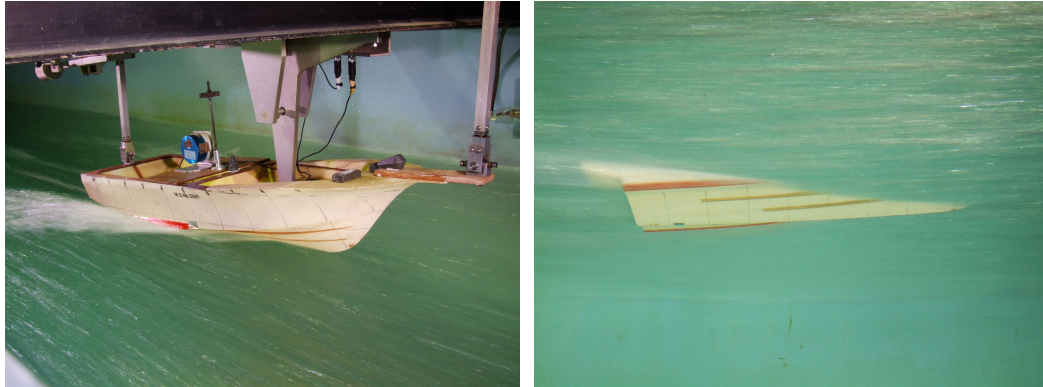
공기유도판이 부착된 Case-2의 매 속도별 파형과 선저 공기막 형상을 Fig. 5-9 ~ Fig. 5-12에 나타내었다. Case-2의 경우, Case-1에 비하여 선수파계가 크게 나타나고 있다. 또한 7 Station 부근인 선수부 쪽에서 선수파가 시작되고 있다. 이는 앞에서 언급한 바와 같이 공기흡입판을 선수에 부착함에 따라 무게중심이 선수부로 이동하였을 뿐만 아니라 공기유도판으로 인하여 선수부 형상이 변하였기 때문에 충분히 활주가 이루어 지지 않았기 때문이다. 전반적인 파형은 선수에 부딪히는 공기의 유무와는 상관없이 동일한 형상을 보인다.

Case-3의 경우(Fig. 5-13 ~ Fig. 5-16), 즉, Case-2의 문제점을 극복하기 위하여 강제로 4° 의 초기트림을 준 경우, Case-2 보다는 전체적인 파계가 줄어든 경향을 보이고 있으나, Case-1보다는 여전히 선수파가 크게 나타나고 있다. 즉 강제로 초기트림을 부여하였기 때문에 Case-2보다는 조파저항이 크게 줄어들었으나, Case-1 보다는 조파저항이 여전히 큰 것으로 판단된다. 그럼에도 불구하고 Fig. 5-4에서 보는 바와 같이 전체 저항 값이 줄어든 이유는 공기막에 따른 마찰저항 감소가 조파저항 증가보다 커졌기 때문이라고 판단된다. Case-3의 경우에도 Case-2와 마찬가지로 전반적인 파형은 선수에 부딪히

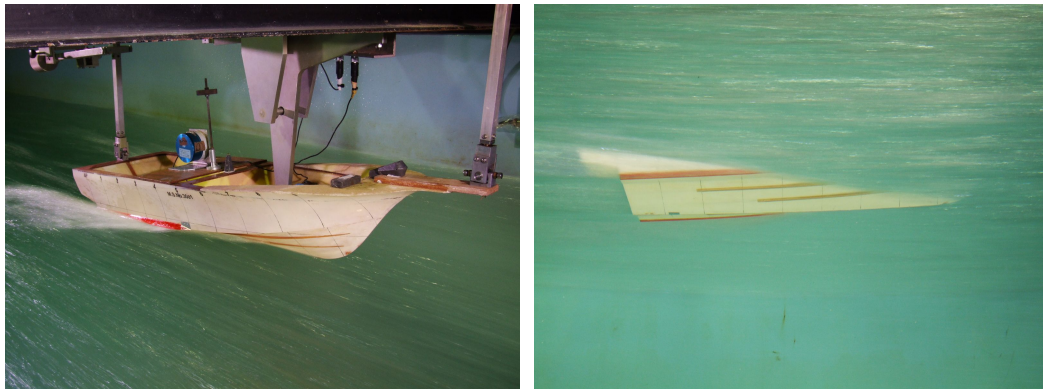
는 공기와는 상관없이 없는 것으로 보인다.

앞의 2차원 모형시험에서 언급한 바와 같이 동일한 선속에서 선수에 부딪히는 공기가 있을 경우, 공기가 없는 경우보다 공기막이 선미부로 더 길게 퍼져갈 것으로 예상되나 본 모형시험에서는 명확한 관찰이 곤란하였다. 그 이유는 30노트에 해당하는 유속이 약 5.5m/s 정도로 고속 회류수조의 특성상 다량의 기포가 발생하였기 때문이다.

공기유도판의 무게와 선수 형상변화로 인하여 강제로 선미트림을 크게 주지 않으면 오히려 저항이 증가하는 현상이 발생 할 수 있는 관계로 실선에 공기유도판을 부착할 경우, 공기유도판에 의한 선수부 형상변화, 공기유도판의 무게를 고려한 최적 배치 및 최적 운항조건 도출 등 더욱 면밀한 연구가 필요하다.

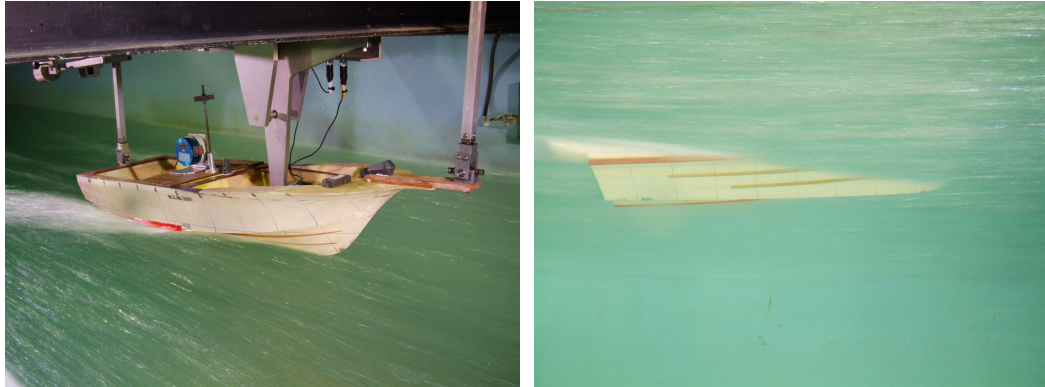


(a) No-wind condition

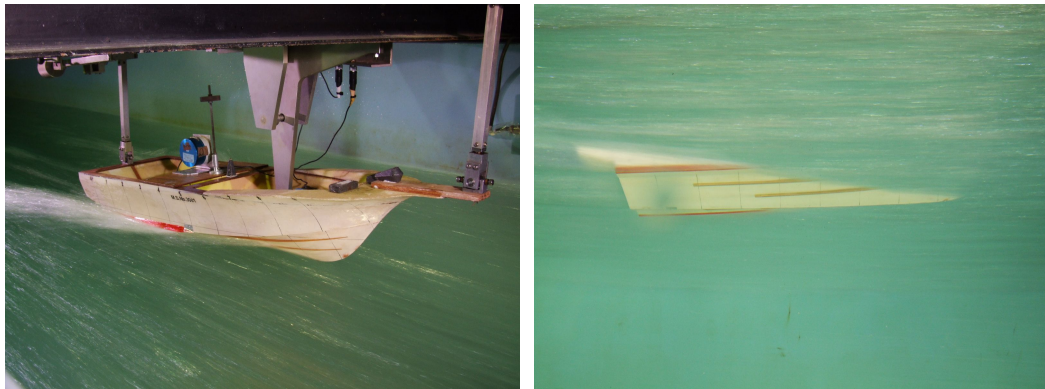


(b) Wind condition

Fig. 5-5 Wave patterns for Case-1, $V=26$ knots

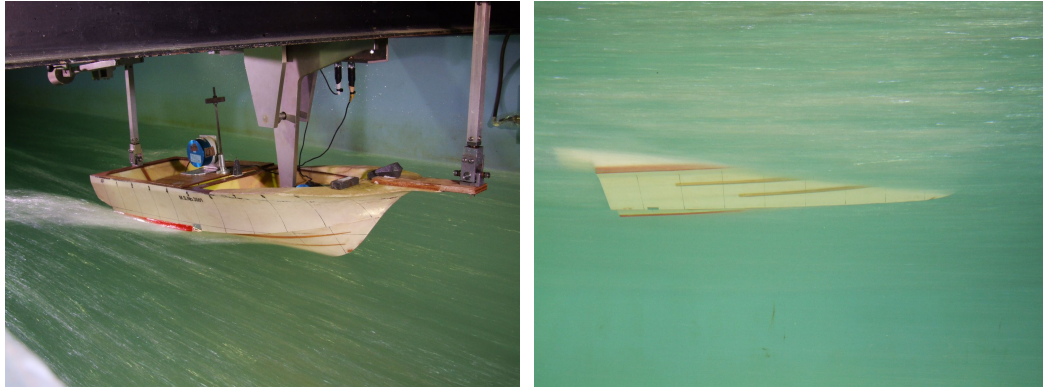


(a) No-wind condition

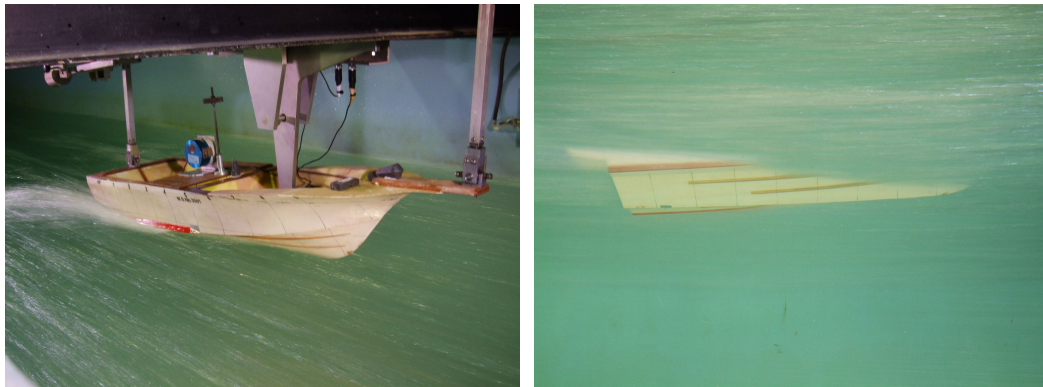


(b) Wind condition

Fig. 5-6 Wave patterns for Case-1, $V=28$ knots

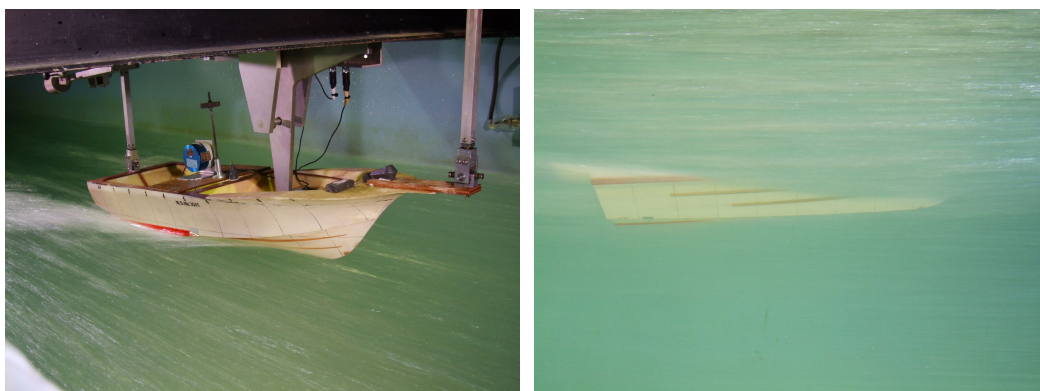


(a) No-wind condition

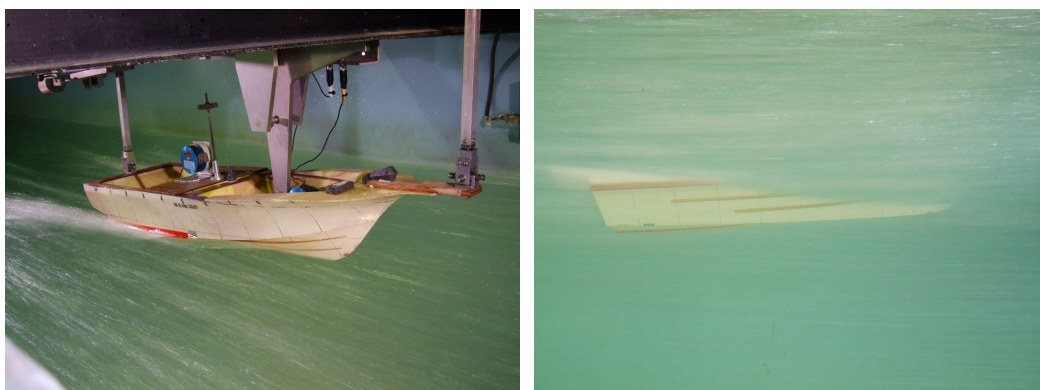


(b) Wind condition

Fig. 5-7 Wave patterns for Case-1, $V=30$ knots

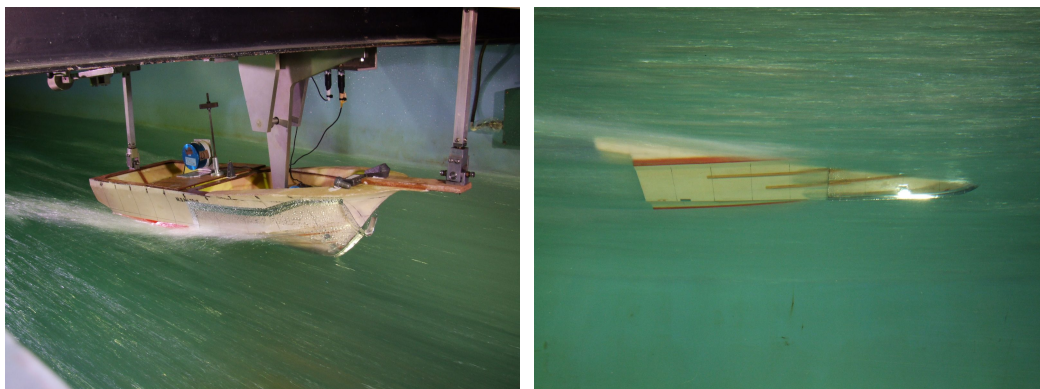


(a) No-wind condition

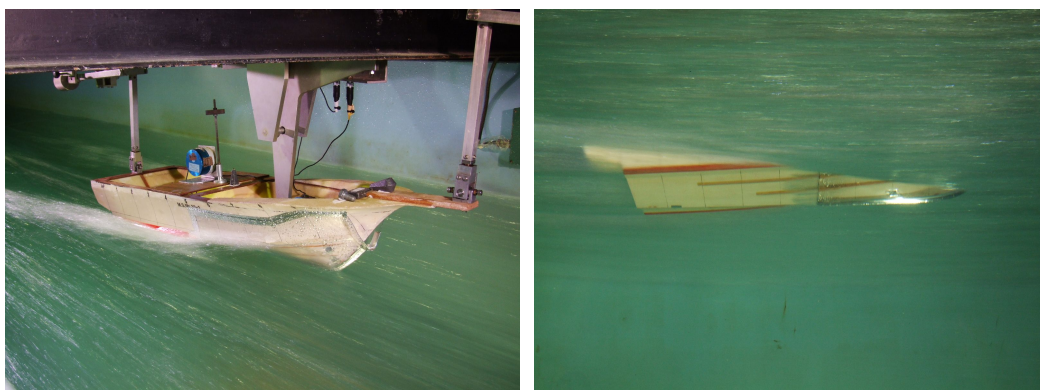


(b) Wind condition

Fig. 5-8 Wave patterns for Case-1, $V=32$ knots

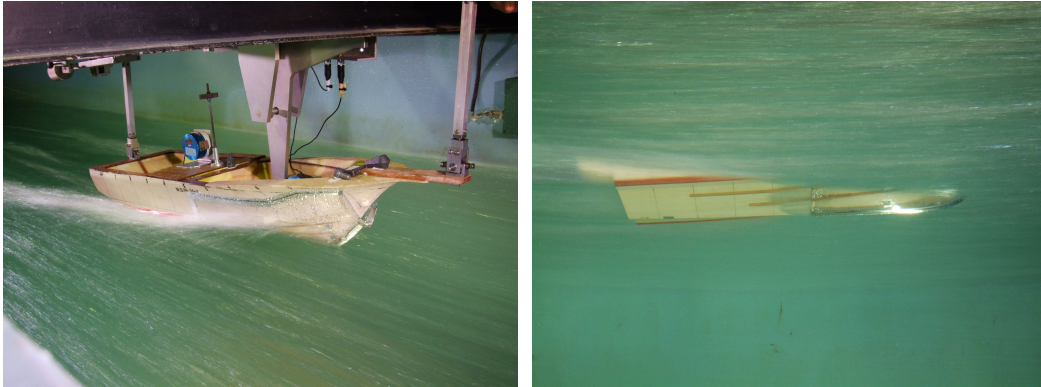


(a) No-wind condition

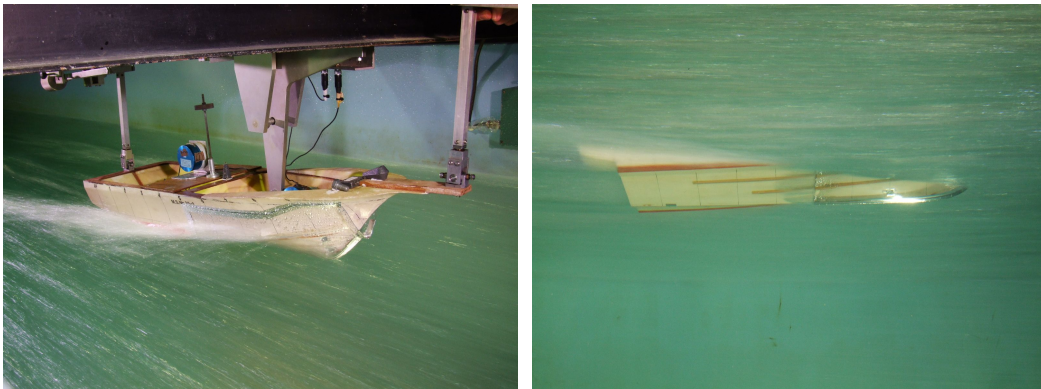


(b) Wind condition

Fig. 5-9 Wave patterns for Case-2, $V=26$ knots

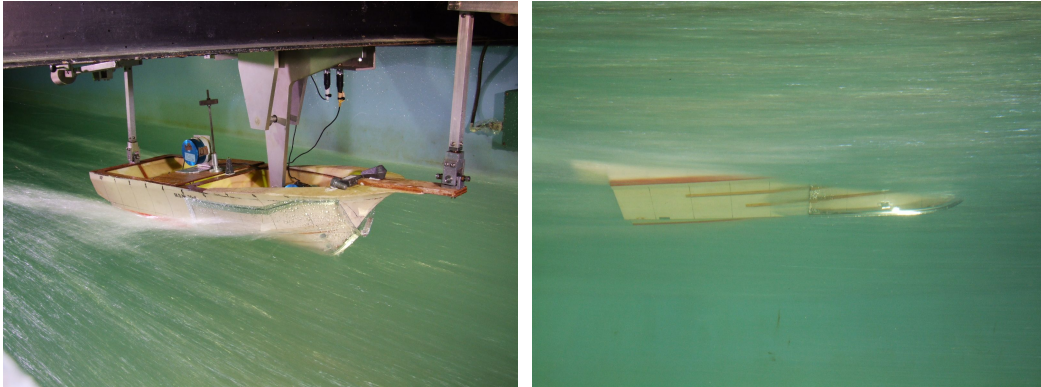


(a) No-wind condition

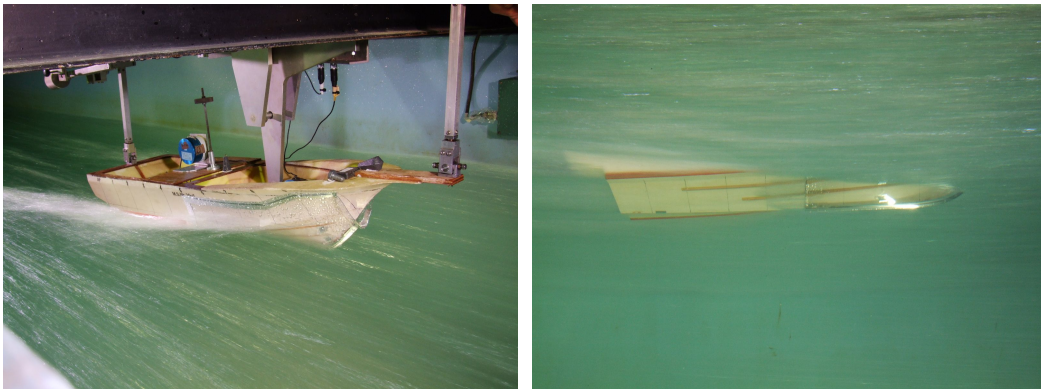


(b) Wind condition

Fig. 5-10 Wave patterns for Case-2, $V=28$ knots

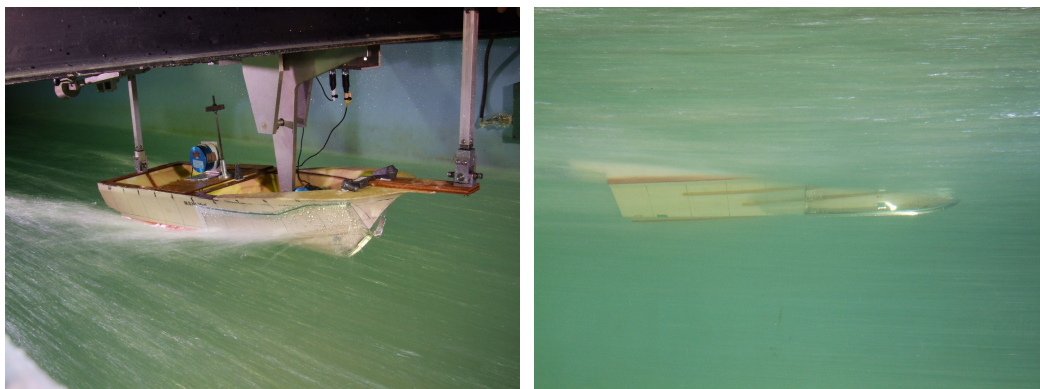


(a) No-wind condition

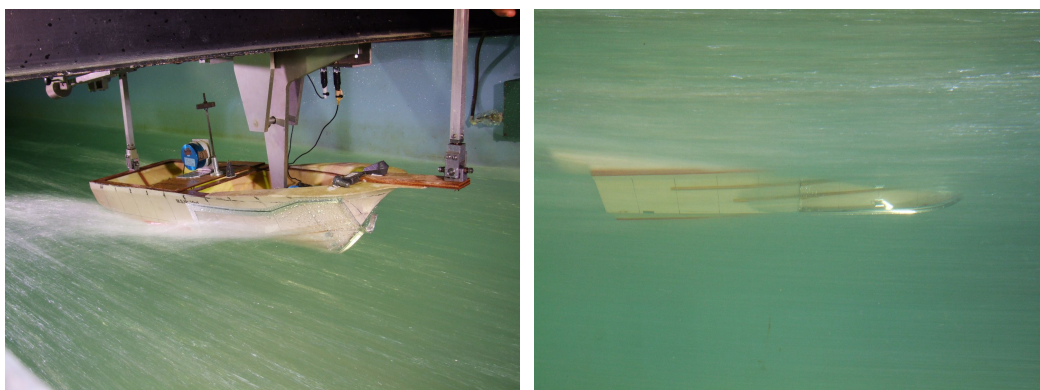


(b) Wind condition

Fig. 5-11 Wave patterns for Case-2, $V=30$ knots

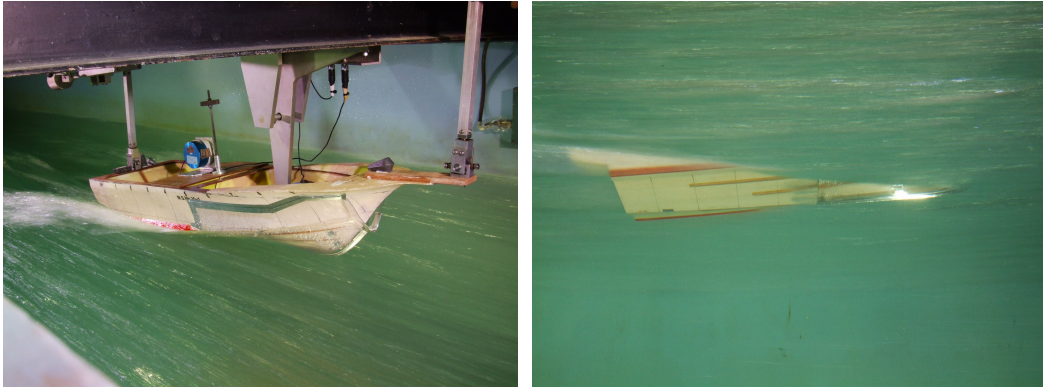


(a) No-wind condition

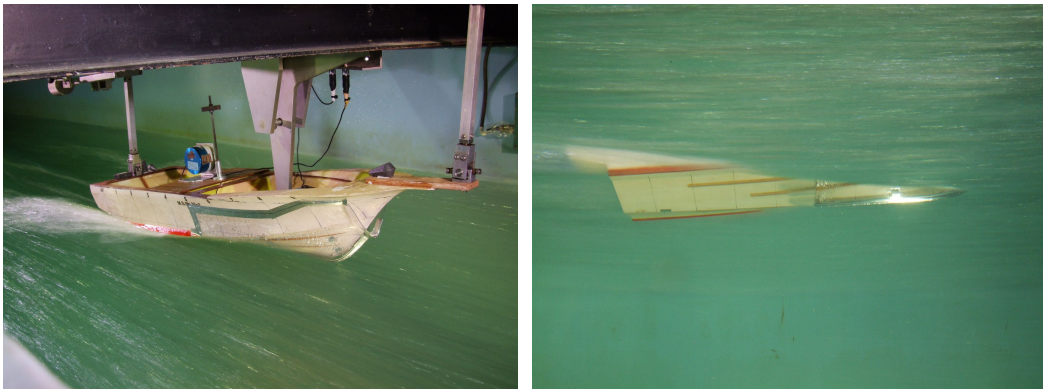


(b) Wind condition

Fig. 5-12 Wave patterns for Case-2, $V=32$ knots

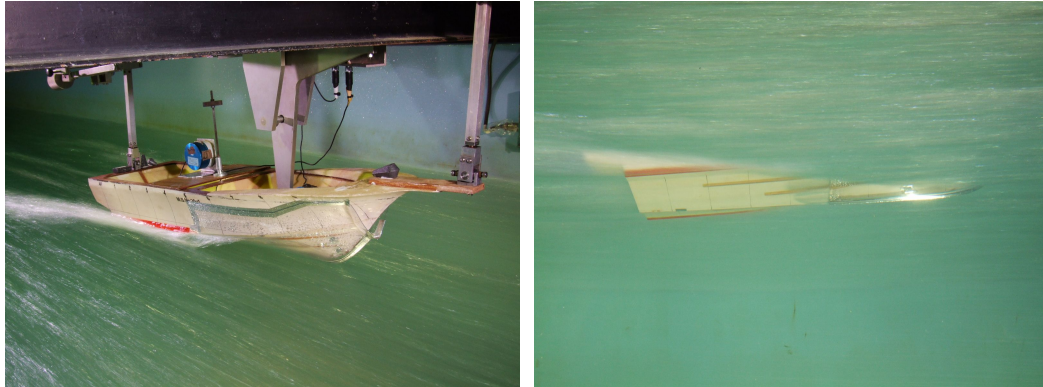


(a) No-wind condition

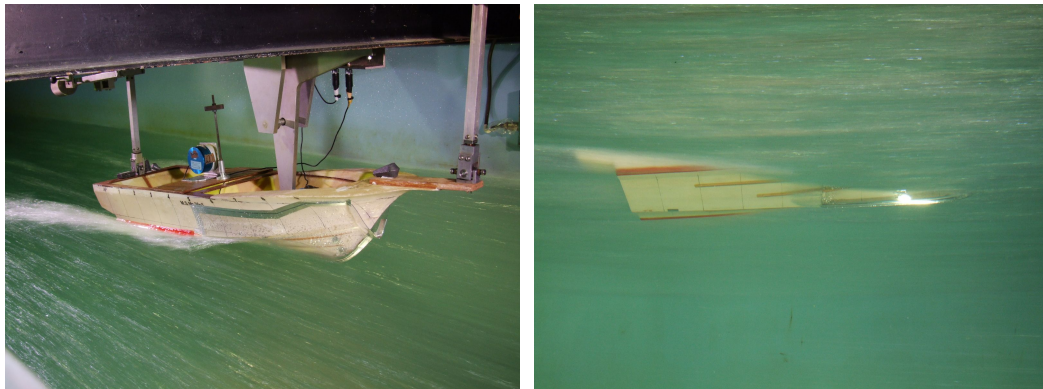


(b) Wind condition

Fig. 5-13 Wave patterns for Case-3, $V=26$ knots

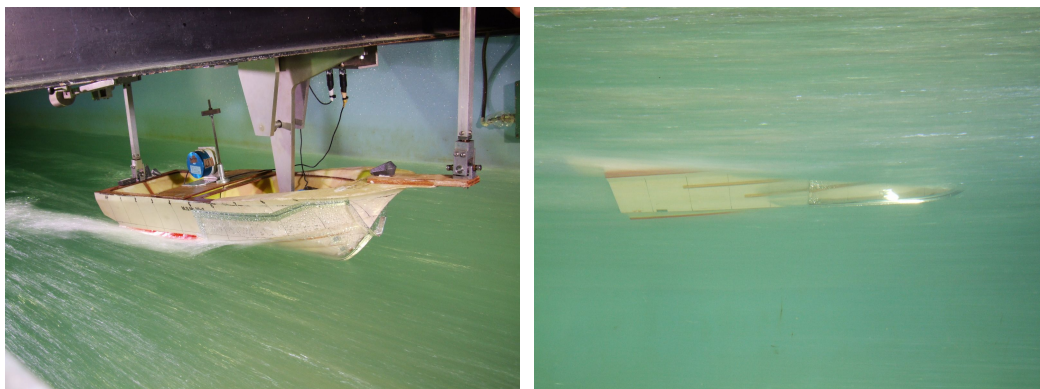


(a) No-wind condition

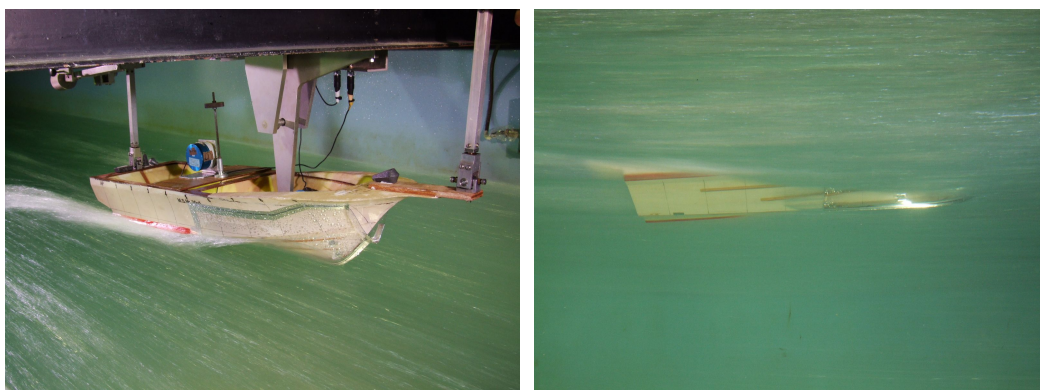


(b) Wind condition

Fig. 5-14 Wave patterns for Case-3, $V=28$ knots

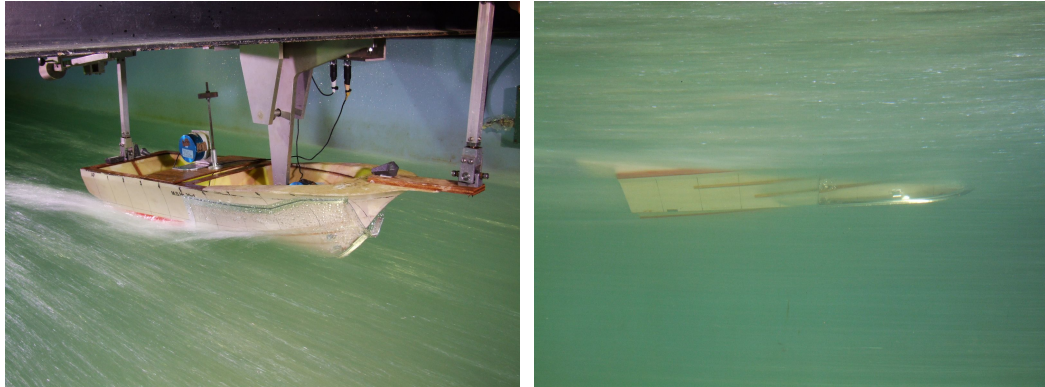


(a) No-wind condition

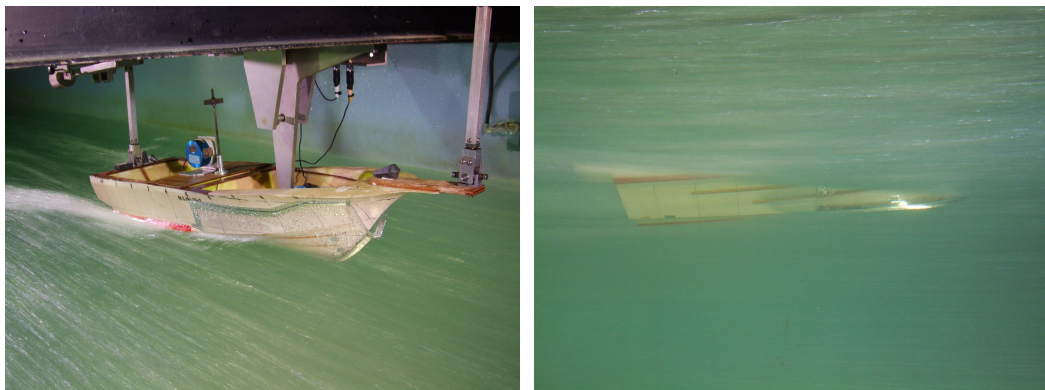


(b) Wind condition

Fig. 5-15 Wave patterns for Case-3, $V=30$ knots



(a) No-wind condition



(b) Wind condition

Fig. 5-16 Wave patterns for Case-3, $V=32$ knots

제 6 장 토 론

6-1 모형시험에 대한 고찰

통상 선박이 운항 할 때에는 항상 맞바람이 존재하고, 선속이 증가하면 이러한 맞바람도 함께 증가한다. 본 연구는 이러한 맞바람을 선저로 유도하여 마찰저항을 감소시킬 수 있는 방법을 도출하기 위하여 수행되었다.

그러나 본 연구가 수행된 회류수조는 선체는 고정시키고 물을 강제로 회전시키기 때문에 맞바람이 존재하지 않는 관계로 별도의 송풍기를 설치하여 시험을 수행하였다.

특히, 회류수조의 장점을 살려 맞바람이 없을 경우에도 공기가 유입되는지를 관찰하였다. 이는 실제 상황에서는 발생하지 않는 조건이지만, 본 연구방법의 유체역학적인 실현 가능성을 파악하기 위하여 시험을 수행하였다. 유속을 변화시키면서 선저로 유입되는 공기막 길이의 변화를 관찰하였고, 유속이 증가함에 따라 공기가 잘 유입되는 것을 관찰하였다. 즉, Bernoulli 원리에 따라 선저부 압력이 감소할수록 공기가 잘 유입되는 것을 확인하였다. 이러한 Bernoulli 원리는 모형시험 조건과 동일한 경우에 대한 수치계산을 통하여 다시 한 번 확인하였다.

그러나 3차원 실제선박에 대한 모형시험은 설계속도 30노트에 해당하는 유속이 약 5.5m/s인 관계로 회류수조에서 고속영역에서 발생하는 다량의 기포로 인하여 유동관찰이 불가능하였기 때문에 공기유도판 부착 유무에 따른 저항성능 변화만 조사하였고, 마찰저항 감소에 대한 가능성을 확인하였다.

6-2 실선적용을 위한 고찰

2차원 모형시험, 수치해석, 3차원 모형시험을 통하여 공기유도판을 부착할 경우, 선저로 더 많은 공기가 흡입되어 마찰저항을 줄여주지만 실선 적용 시에는 공기흡입판의 크기 및 부착위치, 형태 등에 대하여는 더 많은 연구가 필요하다. 뿐만 아니라 본 논문에서 2차원 모형시험 결과는 운항자세를 강제로 고정된 상태에서 도출된 결과이기 때문에 본 결과를 실선에 적용할 경우에는 운항자세 변화에 따른 공기막 형성에 대한 다양한 연구가 추가적으로 실시되어야 할 것이다.

공기유출부를 선미로 연장할 경우 공기 막이 선미로 더 길게 퍼져나감을 알 수 있지만, 이 공기유출부를 어디까지 연장하는 것이 가장 효과적인가에 대한 명확한 판단을 내리기에는 더욱 많은 연구가 필요하다.

선저에 계단을 설치할 경우에는 낮은 풍속에서도 마찰저항이 감소하고 있지만, 이는 선저계단만큼 실제 배수량이 감소한 것이기 때문에 줄어든 배수량만큼의 저항 감소를 고려해보면 실제 선저단의 공기막에 의한 마찰저항 감소는 다른 연구에서 발표된 것 보다는 작을 것으로 판단된다. 따라서 선저계단을 실선에 적용할 경우에는 줄어든 배수량을 어떻게 확보하는 것이 바람직한지에 대한 설계 단계에서의 검토가 필요하다.

본 모형시험에서는 모형시험 시 선수부에 유속 조절을 위하여 송풍기를 설치하여 바람을 생성하여 시험하였지만 이는 실선 운항 상태에서 선수에 부딪히는 공기의 유속 및 방향과는 많은 차이가 있을 것으로 생각된다. 따라서 본 연구결과를 실선에 적용할 경우, 선수에 부딪히는 공기를 공기유도판으로 많이 집중시킬 수 있는 방안에 대한 연구가 필요할 것이다.

제 7 장 결 론

본 연구에서는 고속으로 항주하는 선박의 선수에 부딪히는 공기를 외부에너지를 사용하지 않고 공기유도판(Air guide plate)을 통하여 선저로 유도함으로써 마찰저항을 감소시키는 새로운 방안을 제시하였다. 이를 “**자유순환 공기 유탈법(Free-ventilated air lubrication method)**” 이라고 명명하였다.

선수에 부딪히는 공기압이 클수록 선저로 유입되는 공기량이 많아질 것으로 판단되어 30노트급 활주형 소형레저보트를 대상으로 연구를 수행하였다.

먼저 고속선 단면을 갖는 2차원 모형에 대한 회류수조 모형시험을 수행하여 선속과 공기속도 변화에 따른 공기흡입 정도를 관찰하였고, 동일한 모형에 대한 수치해석을 통하여 모형시험에서 분석하기 어려웠던 유동특성을 자세히 분석하였다. 끝으로 실제선박에 적용 가능성을 확인하기 위하여 실선에 대응하는 모형시험을 수행하였다.

본 연구를 통하여 도출된 결론은 다음과 같다.

(1) 선수에 부딪히는 맞바람의 속도가 증가할수록 선저로 유입되는 공기 양은 증가한다.

(2) 선수에 부딪히는 맞바람의 속도가 변하지 않는다고 가정하여도 선속이 증가함에 따라 선저로 유입되는 공기막이 선미로 더 길게 퍼져나간다. 특히 맞바람이 없다고 가정한 경우에도 선속이 증가할수록 선저부 공기막이 선미로 더 길게 퍼져나간다. 즉, Bernoulli 원리에 따라 선저부 유속이 빨라지면서 압력이 상대적으로 낮아지고 이로 인해 대기 중의 공기가 더 잘 유입된다.

(3) 공기유도판의 출구에 선저계단을 설치한 경우, 마찰저항 감소효과가 크게 나타난다. 그러나 공기유입이 이루어지지 않을 경우에는 계단에서 발생하는 와류에 의하여 저항이 오히려 증가한다. 그러나 선저에 계단을 설치한 경우에는 비교적 낮은 속도에서도 선수로부터 유입된 공기가 선저계단 후면에 공기공동을 형성하면서 마찰저항이 감소할 수 있다.

(4) 선저계단이 없는 경우, 선속이 비교적 낮을 때에는 공기막이 형성되더라도 마찰저항 감소보다 공기유도판에 의한 저항증가가 오히려 더 커지기 때문에 전체 저항이 증가할 수 있다.

(5) 공기흡입판의 출구를 선저부로 더 길게 연장하였을 경우 공기막 형성이 더욱 잘 일어난다. 그러나 이 유출부를 선저부 어디까지 연장하는 것이 가장 효율적인 것에 대한 명확한 판단을 내리기에는 더욱 많은 연구가 필요하다.

(6) 공기유도판을 실선에 적용할 경우, 강제로 임의의 초기트림을 주면 특정 속도 영역에서 공기유도판을 설치하지 않은 Bare hull에 비하여 공기유도판에 의한 선수파는 크게 나타나고 있으나, 저항 값이 감소하는 경향을 보인다. 그 이유는 공기막에 따른 마찰저항 감소가 조파저항 증가보다 컸기 때문이다. 그러나 공기유도판의 무게와 선수부 형상변화로 인하여 고속에서도 활주가 잘 발생하지 않고 선수트림이 크게 발생하여, 강제로 선미트림을 크게 주지 않으면 오히려 저항이 증가하는 현상이 발생 할 수 있다.

[참 고 문 헌]

[1] Y. Doi, K. Mori and T. Hotta : “Friction Drag Reduction by Microbubbles” , J. SNAJ, Vol. 170, pp. 55-63, 1991.

[2] T. Takahashi, A. Kakugawa and Y. Kodama : “Streamwise Distribution of the Skin Friction Reduction by Microbubbles” , J. SNAJ, Vol. 182, pp. 241-254, 1997.

[3] 임근태, 김효철 : “구상선주위의 유동과 기포공급 효과에 관한 실험적 연구” , 대한조선학회 논문집, Vol. 33, No. 1, pp.54-64, 1996.

[4] S. Niwa : “高速艇工學” , 丹艇協會出版部, 1971.

[5] H. E. Saunders : “Hydrodynamics in Ship Design” , Vol. 2, SNAME, 1957.

[6] J. G. Koelbel : “Performance Prediction” , Small Craft Engineering Resistance, Propulsion and Sea keeping, SNAK, 1978.

[7] D. Savitsky : "A Re-evaluation of the Planing Hull Form", AIAA Report No. 2028, Advanced Marine Vehicles Conference, 1979.

[8] H. Tanaka : "Methodology of Research and Development of High-Speed Marine Craft", 高速艇과 性能 Symposium, 日本造船學會, 1989.

[9] E. P. Clement : "Development and Model Tests of an Efficient Planing Hull Design", DTNSRDC Report No. 1314, 1959.

[10] K. Kihara and T. Ishii : "A New Method of Initial Design for High Speed Craft(2)", Trans. of WJSNA, Vol. 72, pp 293-300, 1986.

[11] E. P. Clement : "Reduction of Planing Boat Resistance by Deflection of the Whisker Spray", DTNSRDC Report No. 1929, 1964.

[12] M. Komatsu and M. Yamaguchi : "Resistance and Propulsion of High Speed Craft", 高速艇과 性能 Symposium, 日本造船學會, pp 75-118, 1989.

[13] 민계식, 이귀주, 박만 : "활주형 선형의 단면형상 및 장/폭 비 변화에 따른 모형시험 결과", 현대중공업보고서, 1992.

[14] 이귀주 : "캐비테이션 현상을 이용한 고속활주형선의 저항성능 개선 가능성에 대한 연구", 기술현대, Vol. 14, No. 4, 1994.

[15] 이귀주, 이광일 : "활주선형 고속어선의 단면형상 및 장-폭 비와 성능과의 관계에 대한 연구", 한국어업기술학회지, 11권 3호, 1997.

[16] 이광일 : "활주형 선박의 선형특성과 저항성능과의 상관관계에 관한 실험적 연구", 조선대학교 석사학위논문, 1998.

[17] 구종도, 최선웅, 제병렬 : "고속정의 선형특성에 관한 연구", 대한조선학회 추계학술대회논문집, 1999.

- [18] 김경배, 박명규, 최선웅, 구종도 : “초고속 단동 개발 함형의 저항특성에 관한 연구” , 대한조선학회 추계학술대회논문집, 1999.
- [19] 최선웅, 구종도 : “초고속 단동 개발 선형의 운동특성에 관한 연구” , 대한조선학회 추계학술대회논문집, 1999.
- [20] 최선웅 : “초고속 단동 개발 함형의 운동특성에 관한 연구” , 군사과학대학원 석사학위논문, 2000.
- [21] 제병렬 : “초고속 단동 개발 함형의 선회성능에 관한 연구” , 군사과학대학원 석사학위논문, 2001.
- [22] 박제웅, 정우철, 박찬원, 김도정 : “저중속 영역에서 6.67G/T급 연안어선의 저항특성에 관한 고찰” , 한국해양공학회 추계학술대회 논문집, pp 89-93, 2002.
- [23] 정우철, 박찬원, 김도정, 김영준, S. Matsui : “소형 연안어선의 저항성능에 관한 실험적 연구” , 한국해양공학회 춘계학술대회 논문집, pp 251-256, 2002.
- [24] 박충환, 심상목, 진송환 : “활주형선의 Spray Strip 부착에 따른 저항특성 연구” , 대한조선학회 춘계학술대회 논문집, pp 60-64, 2004.
- [25] 서관희, 이정관, 서영남, 선지홍, 허재경 : “60M급 반활주 고속정의 선형설계와 부가물 부착에 따른 저항성능 고찰” , 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp 869-875, 2005.

[26] 정우철, 정석호, 박제웅 : “연안용 소형 고속 레저선 선형개발”, 한국해양공학회지, 제 18권, 1호, pp 80-84, 2004.

[27] 정우철, 정석호, 전호환 : “고속 연안 순시선 선형개발과 저항성능에 관한 연구”, 한국해양공학회지, 제 18권, 3호, pp 44-49, 2004.

[28] 김주남 : “50노트급 고속경비정의 선형개발에 관한 연구”, 조선대학교 대학원 박사학위 논문, 2006.

[29] R. Latorre : “Ship Hull Drag Reduction using Bottom Air Injection”, Ocean Engineering, Vol. 24, No. 2, pp. 161-175, 1997.

[30] K. Fukuda, J. Togunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki and Y. Kunitake : “Frictional Drag Reduction with Air Lubricant over Super-Water-Repellent Surface(2nd Report) - Resistance Test of Tanker and High Length-to Beam-Ratio Ship Model”, J. SNAJ, Vol. 186, pp. 73-81, 1999.

[31] 장진호, 김효철 : “선저에 부착된 공기공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제36권 제2호, pp. 1-8, 1999.

[32] D. M. Bushnell and J. N. Hefner (Editors) : “Viscous Drag Reduction in Boundary Layers”, Progress in Astronautics and Aeronautics, Vol. 123, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington DC. USA, 1990

[33] H. Chanson : “Air Bubble Entrainment in Free-Surface Turbulent

Shear Flows” , Academic Press, San Diego, California, USA, pp. 189-214, 1996.

[34] 고석천, 김효철 : “선저부 공기공동을 이용한 실선선형의 저항성능 개선을 위한 선저형상 개량연구” , 대한조선학회논문집, 제36권 제3호, pp. 1-7, 1999.

[35] 장진호 : “공기 유힬법을 이용한 선박의 저항감소” , 서울대학교 박사학위 논문, 2002.

[36] Y. Kodama, A. Kakugawa, T. Takahashi and H. Kawashima : “Experimental study on microbubbles and their applicability to ships for skin friction reduction” , Inter. J. of HEAT AND FLUID FLOW. No. 21, pp. 582-588., 2000.

[37] K. Fukuda, J. Tokunaga, T. Nobunaga, T. Nakatani, T. Iwasaki and Y. Kunitake : “Frictional drag reduction with air lubricant over a super-water-repellent surface” , J. of Marine Science Technology, No. 5, pp. 123-130., 2000.

[38] R. Latorre, A. Miller and R. Philips : “Micro-bubble resistance reduction on a model SES catamaran” , Ocean Eng., No. 30, pp. 2297-2309., 2003.

[39] 김중현 : “선박 저항성능 개선을 위한 공기 유힬법 적용 연구” , 인하대학교 대학원 박사학위 논문, 2010.

[40] FLUENT V6.1 User 's Manual, Fluent Inc., 2002.

감사의 글

이제 작은 결실이 맺히려고 합니다. 너무나 오랜 시간이 걸렸습니다. 너무나 먼 길을 걸어 왔습니다.

오늘이 있기까지 이끌어 주시고 베풀어 주신 박사과정 지도교수님이신 박재웅교수님께 진심으로 존경과 경의를 표합니다. 바쁘신 연구 활동 중에도 흔쾌히 시간을 배려하여 본 논문을 세심하게 지도 보완하여 알찬 논문이 될 수 있도록 애써 주셨던 심사위원장 권영섭교수님을 비롯한 김주남박사님, 김도정박사님, 정우철교수님 진심으로 경의와 감사를 드립니다. 특히, 처음부터 마지막까지 아낌없는 지도를 베푸신 정우철 교수님 너무너무 고맙습니다.

오늘이 있도록 물심양면 도와주신 인하공업전문대학 홍기섭교수님, 김성찬교수님, 김현수교수님 진심으로 감사드립니다. 늘 먼발치에서 묵묵히 지켜보시는 석사과장 지도교수님이신 원광대학교 김동현교수님, 생산공학연구실 동문 채왕석교수, 김우순박사, 박사과정의 오재국학우 및 주위의 모든 분들께 감사를 드립니다.

오늘이 있기까지 큰아들이 잘되길 기원하시며 일생을 희생하신 부모님께 본 학위를 바칩니다. 오래오래 무병장수하시길 진심으로 기원합니다.

부족한 남편을 믿고 따라주며 항상 사랑으로 감싸주고, 한집안의 장손며느리로, 두 아이의 엄마로 힘든 일 마다하지 않고 묵묵히 자기 자리를 지켜준 아내 오귀순에게 모든 영광을 바치며, 항상 최선을 다하는 사랑하는 아들 태준, 진현과 오늘의 영광을 작지만 사랑과 고마움으로 함께 나누고자 합니다.

늘 함께 생활하는 한창범사장님을 비롯한 우리 삼원그룹의 임직원들과 오늘
의 영광과 기쁨을 함께 나누겠습니다.

이제, 새롭게 태어나는 마음으로 세상이 필요로 하는 사람이 되도록 최선을
다할 것을 다짐합니다.

2011년 7월

김 규 선