

선저에 부착된 공기공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구

장진호*, 김효철**

On the Reduction of a Ship Resistance by Attaching an Air Cavity to Its Flat Bottom

by

Jinho Jang* and Hyochul Kim**

요 약

선저에 부착된 공기공동에 의한 실용 선박의 저항감소 효과를 조사하기 위하여 예인수조에서 충주호 유람선에 대한 저항실험을 수행하였다. 여러 가지 형상의 공기공급 노즐에 대해서 선저에 부착된 공기공동의 관측과 저항 계측이 수행되었으며 이로부터 적절한 공기공급 노즐의 형상을 결정하였다. 선박의 밑지부 근처에서의 공기누출을 억제하기 위하여 선박의 길이방향으로 공기유출막이 스트립을 공기공급 노즐의 양 측면에 부착하였다. 또한 두 개의 공기공급 노즐을 설치하여 두 개의 공기공동을 연속하여 발생시킬 수 있었으며 이로부터 더욱 큰 저항감소 효과를 얻을 수 있었다. 효율 측면에서는 공기공급에 필요한 에너지를 고려하더라도 설계속도에서 10% 이상의 에너지절감 효과를 얻을 수 있었다.

Abstract

Extensive resistance tests for a passenger boat(now in service at Chung-Ju lake) have been performed in a towing tank to investigate the effect of an artificial air cavity attached to the hull bottom on the reduction of the ship resistance. The attached air cavity has been observed at various air supply rates, from which we have determined a proper shape of an air supply device. In order to prevent the supplied air from leaking near the bilge of the ship, longitudinal barrier strips have been attached to both sides of the device. The investigation on their effectiveness reveals that a cascade system of the air supply device reduces the resistance of the ship furthermore. Energy saving of more than 10% is achieved at the design speed in spite of the additional power necessary for the air supply.

발 표 : 1998년도 대한조선학회 추계학술대회('98. 11. 14)

접수일자 : 1998년 12월 7일, 재접수일자 : 1999년 4월 14일

* 학생회원, 서울대학교 조선해양공학과 박사과정

** 정회원, 서울대학교 조선해양공학과 해양시스템공학연구소

1. 서론

근래에 선박의 마찰저항을 감소시키기 위한 연구가 여러 분야에서 폭넓게 수행되고 있다. 일부 연구에서는 가시적인 성과들이 보고되고 있으며 실선에도 적용되고 있다.

마찰저항을 감소시키기 위한 연구 가운데에서 미소기포를 경계층 내부에 공급하여 2상유체유동을 형성시키는 방법이 있다. 이 방법은 유동의 특성을 변화시킴으로써 표면마찰을 감소시키는 것으로서 환경오염의 우려가 없고 상대적으로 높은 저항감소 효과를 얻을 수 있다는 점에서 많은 주목을 받아왔다. 관로 내에 놓인 평판에 공기를 공급하면 조건에 따라서는 최대 80%까지 마찰저항을 감소시킬 수 있음이 보고된 바 있다[1][2].

만일 이와 같은 방법을 선박과 같은 3차원 물체에 적용하려면 경계층의 내부로 미소기포를 효과적으로 유입시킬 수 있어야 한다. 그러려면 물체 주위의 유동특성과 미소기포와의 상호작용에 대한 이해가 선행되어야 한다. 실제로 선체표면에 공기를 공급하면 경계층 내부로 유입된 미소기포는 마찰저항 감소에 유효하지만 경계층 내부로 유입되지 못한 채 선체 주위를 지나는 공기는 형상저항을 증가시키는 것으로 나타나고 있다[3][4].

단이 진 선저를 갖는 선형인 경우 단의 후방에 공기를 공급하면 대규모의 공기공동을 형성시킬 수 있다. 단 후방에 공기공동이 형성되면 단으로 인한 선박의 형상저항을 감소시킬 수 있으며 공기공동으로 덮인 부분에서는 침수표면적의 감소효과로 인한 국부적인 표면마찰 감소가 나타나 선박의 마찰저항성분을 감소시킬 수 있다[5][6][7][8][9][10][11]. 실제로 이를 이용하여 단이 진 반활주형 선박의 저항을 약 20%정도 감소시킨 연구결과[5]가 보고된 바 있다.

본 연구에서는 실제 선형을 대상으로 하여 선저에 부착된 공기공동을 발생시켜 저항감소를 이루고자 하였다. 먼저 저항감소에 적합한 선형을 선정하고 선저부에 공기공동을 형성시킬 수 있는 공기공급 노즐을 부착하였다. 노즐은 선저로 돌출하더라도 저항증가가 최소한이 되도록 완만한 경사

면을 이루며 선저와 연결되도록 하였고 동시에 적절한 높이를 가지도록 하여 노즐 후방에 공기공동이 쉽게 형성되도록 하였다. 또한, 공기공동으로 덮이는 면적을 증가시키기 위해서 공기공급 노즐을 반복해서 설치하여 연속적으로 공기공동이 형성되도록 하고 단일한 공기공동이 형성된 경우와 비교하여 저항감소에 미치는 영향을 검토하였다.

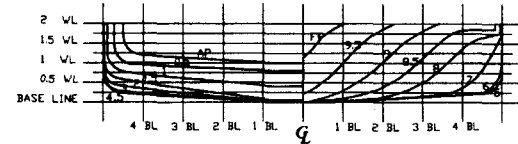


Fig. 1 Body plan of the ship (5 St. is the midship)

Table 1 Principal particulars of the ship

	Ship	Model
LOA (m)	55.0	2.2
LBP (m)	53.0	2.12
Breadth (m)	10.0	0.4
Depth (m)	2.0	0.08
Draft (m)	1.15	0.046
Disp. Vol. (m ³)	396.765	0.02539
C _b	0.6561	
Scale Ratio, λ	25	

2. 모형선

실제 운항중인 선박 가운데에서 아래의 조건들을 만족시키는 선형을 선정하였다.

- 1) 공기공급으로 상대적으로 큰 마찰저항 감소 효과를 얻을 수 있도록 흘수에 비하여 폭이 넓은 선형일 것
- 2) 규모가 크고 안정적인 공기공동이 형성되도록 자세 변화가 적은 선형일 것
- 3) 정상상태의 공기공동을 유지하기 위해서 운동응답이 작고 파랑이 심하지 않은 곳에서 운항되는 선형일 것

이와 같은 조건들을 고려하여 Fig. 1에 보인 선형을 선정하였으며 주요 항목은 Table 1에 표시하였다. 이 선형은 흘수에 비하여 폭이 커서 상대적

으로 선저 부분의 면적이 넓은 선형으로서 내수면에서 운항되고 있으며 6 St.부근에서부터 중앙평행부가 시작되고 있다.

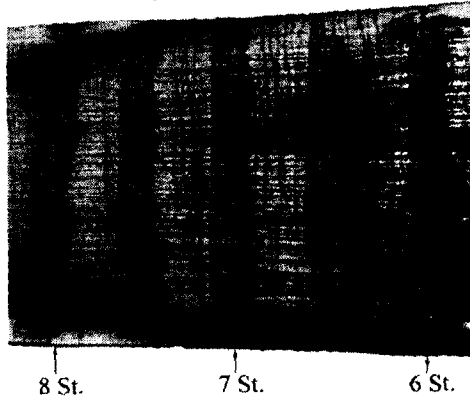


Fig. 2 Limiting streamlines along the fore part of the hull surface

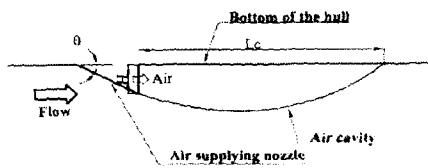


Fig. 3 Conceptual drawing of air supplying nozzle

3. 공기공급 노즐

3.1 공기공급 노즐의 위치

공기공급 노즐의 위치를 결정하기 위해서는 먼저 저항감소를 계획하고 있는 선형의 선체 주위 유동특성을 파악하는 것이 필요하다. 페인트 법으로 얻은 한계유선을 통하여 선체주위 유동에 대한 유용한 정보를 얻을 수 있을 것이다.

모형선의 예인속도가 실선의 운항속도인 15 노트에 대응하는 1.543 m/s일 때 관측된 선저부의 한계유선을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 의하면 8 St.부근에서 하류 방향으로 선박의 진행 방향과 평행한 한계유선이 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 이것은 8 St.이후로 노즐을 설치하면 노즐 주위를 지나는 유동이 상대적으로 균일하게 된다는 것을 의미한다. 안정된 공기공동을 형성시키기 위

해서는 균일한 유동이 유입되는 것이 바람직 할 것이다. 설치의 편의를 위하여 노즐의 위치를 중앙 평행부가 시작되고 있는 6 St.으로 결정하였다.

Table 2 Effect of the nozzle shape on resistance due to air cavity ($V_M=1.543$ m/s, $Q_{Air}=100$ liter/min)

device No.	H (mm)	θ (°)	$\frac{R_{TM,NA}}{R_{TM,B}}$	$\frac{R_{TM,A}}{R_{TM,NA}}$	$\frac{R_{TM,A}}{R_{TM,B}}$	L_C (mm)
I	10	30	1.24	0.92	1.14	130
II	10	16.6	1.18	0.92	1.08	130
III	10	11.5	1.12	0.95	1.06	110
IV	7	11.5	1.08	0.94	1.01	90
V	17	20	1.49	0.85	1.27	150
II+Strip			1.18	0.83	0.98	340

R_{TM} : Total resistance of a model ship
 B : Bare hull
 NA : w/ Air supplying nozzle & No air
 A : w/ Air supplying nozzle & Air

3.2 공기공급 노즐의 형상 결정

공기공급 노즐은 저항감소 효과를 얻기 위해서 가능한 한 큰 규모의 공기공동이 형성되는 동시에 형상저항의 증가를 최소한으로 억제할 수 있도록 설계되어야 한다.

공기공급 노즐의 개념적인 형상을 Fig. 3에 나타내었다. 노즐은 경사 진 단의 형상을 하고 있다. 돌출한 높이와 기울기가 각각 다른 공기공급 노즐들을 제작하여 각각 선저의 6 St.에 부착하였다. 그리고 이들에 공기를 공급하지 않은 경우와 공급하는 경우에 대하여 예인실험을 수행하여 모형선의 저항변화를 조사하였으며 공기공동의 길이도 함께 관측하였다.

Table 2에서 공기공급 노즐의 형상에 따른 영향을 조사, 비교하였다. I, II, III은 노즐의 높이를 일정하게 하고 경사각을 변화시킨 경우이고 III, IV는 각도를 일정하게 하고 높이를 변화시킨 경우이다. 공기를 공급하지 않은 상태에서 공기공급 노즐로 인한 저항증가는 노즐의 높이가 높을수록 크며 높이가 같은 상태에서는 노즐 경사면의 선저에 대한 기울기가 클수록 커진다. 공기를 공급하게 되면 공기공동이 형성되어 저항이 감소하게 되

는데 노즐의 높이가 높을수록 저항감소량은 커지는 것을 알 수 있다. 그러나 Table 2의 노즐들은 나선체의 저항으로부터 증가된 저항을 극복하기에 충분한 저항감소 효과를 주지 못하고 있다.

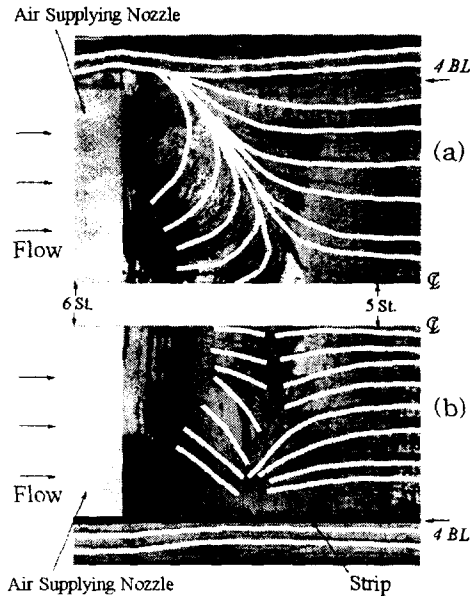


Fig. 4 Limiting streamlines on the rear of an air supplying nozzle
(a) w/o strip (b) w/ strip

공기공급 노즐을 지난 유선은 노즐 후방에서 선체에 다시 부착하게 된다. 노즐로부터 재부착 지점 사이에서는 순환유동이 형성되는데 이러한 순환유동이 이 구간에 유입된 공기에 의한 공동형성과 밀접한 관계가 있는 것으로 보인다. 단을 지나 는 유동에 대한 연구[12][13][14]에서 볼 수 있듯이 단의 높이가 높을수록 재부착 길이는 길어진다. 따라서 공기공동의 길이는 공기공급 노즐의 높이가 높을수록 길어질 것이 예상된다. Table 2의 결과로부터 이것을 확인할 수 있으며 공기공동의 길이가 길어질수록 저항감소량도 커짐을 확인할 수 있다.

단의 양 측면에서 3차원 효과를 억제하면 재부착 길이는 증가하는 반면 단 후방의 2차 보텍스는 약화된다[13]. Table 2의 II번 공기공급 노즐의 양 측면에 공기의 누출을 줄이고 3차원 효과를 억제

하기 위하여 유동 방향으로 6 St.에서 2 St.에 걸쳐 높이 15 mm의 스트립을 부착하였다. 페인트법으로 공기를 공급하지 않은 상태에서 스트립을 부착한 경우와 부착하지 않은 경우의 한계유선을 관측하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)와 Fig. 4(b)는 각각 스트립을 부착하지 않은 경우와 부착한 경우의 한계유선이다. Fig. 4에서 스트립을 부착하게 되면 3차원 영향이 억제되고 재부착 길이가 전체적으로 늘어나고 있음을 확인할 수 있다. Table 2의 II번 노즐에 대한 스트립 부착 실험결과에서도 확인할 수 있듯이 스트립을 부착하게 되면 공기공동의 길이는 2.5배 이상 증가하고 있고 저항감소 효과도 전저항 기준으로 약 10%정도 향상되고 있음을 확인할 수 있다.

공기공급 노즐은 충분한 길이의 공기공동이 형성되도록 적절한 높이를 가지면서 기울기는 최소가 되도록 설계되어야 한다. 이에 따라 최종적으로 높이가 10 mm이고 기울기는 3° 인 노즐을 제작하였다. 이 노즐을 선저부 6 St.에 선체 폭의 80%에 걸쳐 부착하고 노즐의 양 측면에 선체의 길이 방향으로 15 mm 높이의 스트립을 부착하였다.

4. 공기공동에 의한 저항감소 효과

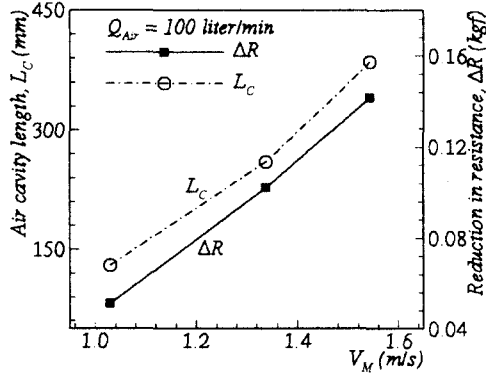
4.1 공동의 길이 변화와 저항감소 효과

Fig. 5(a)에 유량 100 liter/min로 공기를 공급하며 예인속도를 변화시켰을 때 공기공동의 길이와 저항의 변화를 조사하여 나타내었다. 모형선 예인속도가 커질수록 공동의 길이와 저항감소량은 증가하고 있다. 이로부터 공동의 길이와 저항감소량은 서로 밀접한 관계를 가지고 있음을 알 수 있다.

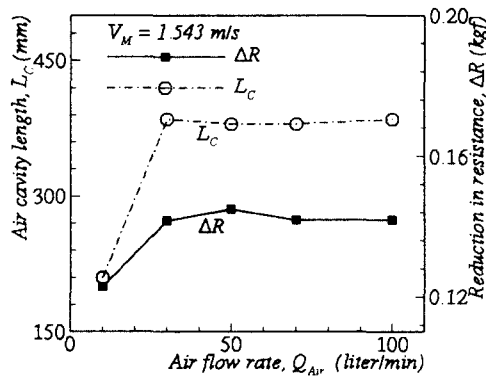
한편, Fig. 5(b)는 모형선 속도가 1.543 m/s일 때 공기공급유량을 변화시켜주고 공기공동의 길이와 저항의 변화를 측정한 결과이다. 공기공급유량이 30 liter/min 이상이 되면 공동의 길이와 저항감소량은 크게 변화하지 않으므로 공기공급량을 필요최소량으로 제한할 수 있을 것임이 확인된다.

4.2 저항감소에 의한 에너지 절감

저항감소에 의해 절감된 동력은 공기공급에 필요한 동력을 고려하면 아래 (1), (2)식과 같이 계산할 수 있다[7][8].



(a) Effect of the model ship speed



(b) Effect of the air flow rate

Fig. 5 Variation in the air cavity length and resistance reduction

$$\Delta E_{Net} = R_{TM,B} V_M - (R_{TM,A} V_M + P_{Air}) \quad (1)$$

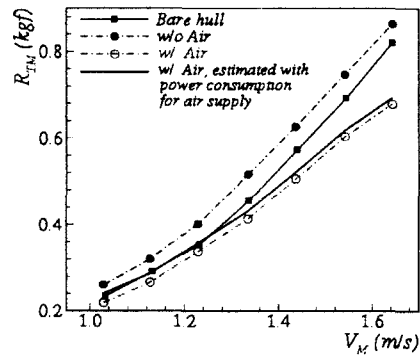
여기서, ΔE_{Net} 는 절감된 동력이고 P_{Air} 는 공기공급에 필요한 동력이다.

한편, 공기를 공급하는데 소요되는 동력은 (2)식과 같이 계산할 수 있다.

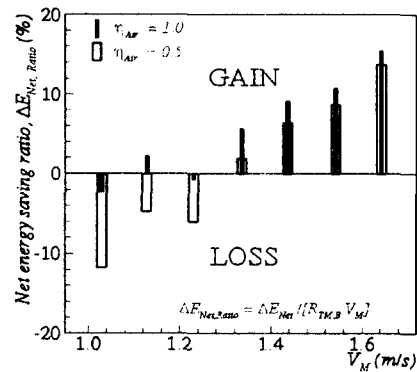
$$P_{Air} = \frac{\rho_w g T Q_{Air}}{\eta_{Air}} \quad (2)$$

여기서, ρ_w 는 물의 밀도, g 는 중력가속도, T 는 선박의 흘수, Q_{Air} 는 공기공급유량, η_{Air} 는 공기공급시스템의 공기공급효율이다.

Fig. 6에 공기공급유량을 필요최소량인 30 liter/min으로 하였을 때 모형선의 저항과 공기공급에 필요한 동력을 고려하여 평가된 저항 및 에너지 절감률을 나타내었다. Fig. 6(a)에서 확인할 수 있듯이 공기공급 노즐을 부착하면 그로 인하여 전저항이 증가하지만 공기공급에 필요한 동력을 고려하더라도 공기공동에 의하여 보다 큰 저항감소를 얻어서 실질적인 저항감소 효과를 얻을 수 있었다. 이 때 전저항의 감소량은 예인속도에 따라 4~17%에 이르고 있다.



(a) Resistance reduction



(b) Net energy saving

Fig. 6 Resistance reduction and net energy saving due to an air cavity

한편, Fig. 6(b)에 공기공급에 소요되는 동력을 고려하여 얻어지는 에너지 절감률을 나타내었다. 공기공급시스템의 효율, η_{Air} 를 각각 1.0일 때와 0.5인 두 가지 경우로 가정하여 계산된 결과를 표시하였다. 속도가 낮은 구간에서는 오히려 손해를 보고 있으나 속도가 높아질수록 동력절감이 증가하며 모형선 속도가 1.543 m/s일 때는 10% 내외의 동력절감 효과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

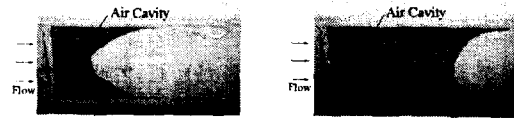
Table 3 Measured pressure coefficients and local skin friction coefficients ($V_M=1.543$ m/s, $Q_{Air}=30$ liter/min)

x (mm)	C_p		C_f	
	No Air	Air	No Air	Air
-107	-0.049	-0.058	2.969E-3	2.781E-3
13*	-0.115	-0.016	-	-
161*	0.016	-0.033	1.690E-3	2.508E-4
321*	0.033	-0.066	2.655E-3	2.508E-4
482	-0.082	0.082	3.466E-3	3.590E-3

x : distance from 6 St. (mm, downstream: +)

* : location inside air cavity ($L_c = 385$ mm)

선저부에 형성되는 공기공동을 자세히 살펴보면 공기공동이 부착된 선체표면은 물과 완전히 분리되는 것을 확인할 수 있다[11]. 또한, 공급된 공기는 조파저항에 별 영향을 주지 않는다[3][4]. 그러므로 저항감소는 주로 공기공동으로 덮인 부분의 침수표면적감소 효과에 의한 마찰저항의 감소에 기인한다고 생각되어진다. 이를 확인하기 위하여 선체중심선을 따라 배치된 압력 계측공에서 프레스턴 관을 이용하여 압력저항과 마찰저항을 계측하였으며 이를 Table 3에 나타내었다. Table 3에서 볼 수 있듯이 6 St.로부터 선수 쪽으로 107 mm 위치에서는 공기공급장치의 경사진 표면의 영향으로 압력저항과 마찰저항이 매우 적은 변화를 보이고 있으나 공기공급으로 공기공동이 형성된 곳에서는 두드러진 변화를 보이고 있다. 특히 마찰저항은 큰 폭으로 줄어들고 있어 저항감소의 주된 원인임을 보여주고 있다. 그리고 공기공동을 벗어난 하류 쪽에서는 공기공급이 저항에 별다른 영향을 주지 못하는 것으로 나타났다.



(a) $V_M = 1.029$ m/s (b) $V_M = 1.543$ m/s

Fig. 7 Typical shapes of air cavity

한편, Fig. 7에서는 공기공급량이 30 liter/min일 때 관측되는 대표적인 공기공동의 형상을 나타내었다. 이로부터 저항감소량은 공기공동의 규모와 직접적인 관계가 있음을 다시 한번 확인할 수 있다.

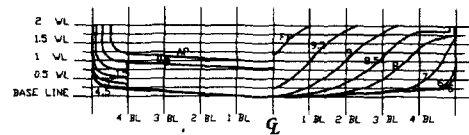


Fig. 8 Body plan of the modified ship

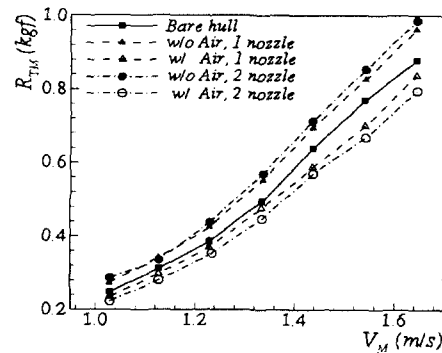


Fig. 9 Resistance reduction of the modified ship due to air cavities

4.3 복수의 공기공동의 형성

공기공동으로 덮이지 않은 선저부를 공동으로 덮어주면 보다 큰 저항감소 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단되므로 공기공급 노즐을 추가하여 부착하였다. 본 연구에서는 단일 공기공급장치를 부착했을 때와 두 개의 공기공급장치를 부착하였을 때의 저항성능을 비교해 보고자 하였다. 두 번째 공기공급 노즐을 설치하기 쉽고 공기공동의 형성이 용이하도록 하기 위해 Fig. 8과 같이 0.5~3 St. 사이의 선저 형상을 변형시켜 주었으며 7 St.과 4

St.의 선저부에 높이가 10 mm이고 기울기가 3°인 공기공급 노즐을 각각 설치하였다.

Fig. 9에서 볼 수 있듯이 공기공급 노즐이 하나일 때에 비하여 두 개일 때 저항감소가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 10에 보인 모형선 속도 1.543 m/s일 때의 공기공동의 형상을 살펴보면 두 번째 공기공급 노즐로부터 형성된 공동은 첫 번째 공기공동보다 규모가 작다는 것을 알 수 있다. 이는 첫 번째 공기공급 노즐의 후류 영역에서 교란된 불균일한 유동이 두 번째 공기공급 노즐로 유입되기 때문인 듯 하며 보다 자세한 연구가 필요하다.

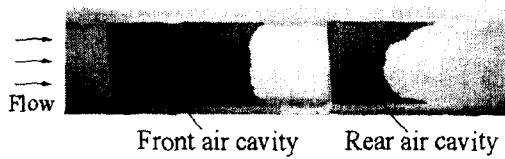


Fig. 10 Two air cavities attached on the bottom of the modified ship ($V_M = 1.543 \text{ m/s}$)

5. 결론

실용 선형의 선저에 공기공동을 부착시켜서 선박의 저항을 감소시키고자 하였으며 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

- 1) 약 4~17%의 저항감소 효과를 얻을 수 있었으나 공기공급에 필요한 동력을 고려하면 전체적으로 약 10%정도의 에너지절감 효과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.
- 2) 공기공동의 길이는 공기공급 노즐의 높이가 높을수록 증가하여 저항감소에 유효하지만 높이의 증가는 저항의 증가를 동반하므로 적절한 높이를 선택할 필요가 있다.
- 3) 선박의 속도가 빠를수록 공동의 길이도 증가한다. 즉, 공기공급 노즐 주위의 유동의 속도가 빠를수록 공동의 길이도 증가한다.
- 4) 공기공급 노즐의 양 측면에 길이 방향으로 스

트림을 부착하면 노즐 후류의 재 부착 길이가 늘어나고 공기의 누출이 억제되어 공기공동의 길이를 증가시킬 수 있다.

- 5) 선체의 보다 넓은 면적이 공동에 덮일 수 있도록 복수의 공기공급 노즐을 사용하면 공기공동을 연속해서 발생시킬 수 있으며 공동이 하나일 때에 비하여 더 큰 저항감소 효과를 얻을 수 있다.

이를 실제 선박에 적용하기 위해서는 공기공동이 선박의 저항성능 뿐만 아니라 운동, 조종, 추진 성능에도 영향을 주게 될 것이므로 이들에 대해 보다 자세한 연구가 이루어져야 할 것이다.

후 기

본 연구를 수행함에 있어서 연구비를 지원하여 주신 한국과학재단의 후의에 심심한 사의를 표하는 바입니다(KOSEF 971-1011-063-2).

참 고 문 헌

- [1] Madavan N. K., Deutsch S., Merkle C. L., "Measurement of Local Skin Friction in a Microbubble-Modified Turbulent Boundary Layer", *Journal of Fluid Mechanics*, Vol. 156, 1985
- [2] Guin M. M., Kato H., "Reduction of Skin Friction by Microbubbles and its Relation with Near-Wall Bubble Concentration in a Channel", *Journal of Marine Science and Technology*, 1996
- [3] Yim Guen-Tae, Kim Hyochul, "On the Variation of Resistance Components due to Air Bubble Blowing on Bulb Surface of a Ship", *Transaction of SNAK*, Vol. 33, No.1, 1996
- [4] Doi Y., Mori K., Hotta T., "Frictional Drag Reduction by Microbubbles", *Transaction of SNAJ*, Vol. 170, 1991
- [5] Kim Kyung-Hwan, Kim Hyochul, Lee Seung-Hee, "Effects of Air Injections on the

- Resistance Reduction of a Semi-Planing Hull", Proc. HSMV, Napoli, Italy, 1997
- [6] Butuzov A. A., "A Review of the State-of-the-Art in Air Lubricated Bottom Ship Development", Technical Report, KSRI/STEPI-03-F, Krylov SRI, 1997
- [7] Bushnell D. M., Hefner J. N., *Viscous Drag Reduction in Boundary Layers*, American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., 1990
- [8] Sato T., Nakata T., Takeshita M., Tsuchiya Y., Miyata H., "Experimental Study on Friction Reduction of a Model Ship by Air Lubrication", Transaction of SNAJ, Vol. 182, 1997
- [9] Jang Jinho, Go Seokcheon, Kim Hyochul, "An Experimental Study on the Formation of Air Cavities for the Resistance Reduction of Slow Flat Bottom Vessels", Proc. the Annual Spring Meeting, SNAK, Ulsan, 1998
- [10] Han Bumwoo, Kim Hyochul, "A Study on the Reduction of the Frictional Resistance of a Bottom Plate by Air Supply", Proc. the Annual Spring Meeting, SNAK, Ulsan, 1998
- [11] Go Seokcheon, Park Byung-Eun, Rhyu Hee-Seok, Kim Hyochul, "On the Optimum Shape of Bottom for the Application of Air Lubricated Technique to the Practical Hull Form", Proc. the Annual Autumn Meeting, SNAK, Incheon, 1998
- [12] Durst F., Tropea C., "Flows over Two Dimensional Backward Facing Steps", IUTAM Symposium, 1982
- [13] Papadopoulos G., Ötügen M. V., "Separating and Reattaching Flow Structure in a Suddenly Expanding Rectangular Duct", Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, 1995
- [14] Joo Y. S., Lee Seung-Hee, "A Study on the Air Cavity Formed around a Nozzle", Proc. the Annual Spring Meeting, SNAK, Ulsan, 1998