

선저부 공기공동을 이용한 실선선형의 저항성능 개선을 위한 선저형상 개량연구

고석천*, 김효철**

On the Suitable Shape of Bottom for the Application of Air Cavity on Hull Bottom to the Practical Hull Form

Seok Cheon Go*, Hyochul Kim**

요 약

본 논문에서는 충주호에서 유람선으로 사용되고 있는 광폭천홀수형 선박을 대상으로 선정하고, 공기를 공급하여 선저에 공동을 형성시켜 마찰저항을 감소시킬 수 있도록 선박의 선저형상을 개량하였다. 2차원 공동문제로 이상화하여 선저에 부착되는 공동을 이론적 방법으로 수치해석하여 공기공동의 형상과 내부압력을 추정하였고 공동현상을 지배하는 무차원수를 살펴보았다. 예인수조에서 모형선실험을 시행하고 단의 높이변화, 선측의 공기유출막이벽 등에 의한 공기공동의 형성과 저항감소효과를 조사하였다. 또한 투명한 아크릴로 제작된 선저부를 통해, 선저에 부착되는 공기공동의 발달과정을 관측하였다. 이러한 연구를 통하여, 실선선형의 선저부 형상을 적절히 개량하고 공기를 공급함으로써 설계속도 부근에서 원래선형의 전저항의 25%정도를 줄일 수 있음을 모형선에서 확인하였다.

Abstract

This paper describes the modification of hull bottom for the air lubrication technique to the passenger boat in service at the Chung-Ju lake, which has a large beam-draft ratio. From numerical analysis of 2-D cavity problem by potential theory, the cavity shape, length and the pressure in cavity are estimated for the simplified geometry of hull bottom, and the non-dimensional parameters affecting air cavity phenomena are investigated. Extensive resistance tests for the model ship which has variation of step height and side strip have been performed to investigate the formation of air cavity and the drag reduction effectiveness. And also, the development of attached cavity to the bottom were observed from the flat bottom made by transparent acrylic plate. From this survey on the modification of bottom shape and the air lubrication technique, the total resistance of model ship could be reduced by about 25% at the design speed compared to the proto type hull form.

접수일자: 1999년 3월 4일, 재접수일자: 1999년 6월 8일

*학생회원, 서울대학교 조선해양공학과 대학원

**정회원, 서울대학교 조선해양공학과, 해양시스템공학연구소

1. 서론

선박의 표면에 공기를 공급하여 선박의 마찰저항을 줄이고자 하는 개념은 오래 전에 제안되었으나, 그 동안 뚜렷한 성과는 얻어지지 못하였다. 이는 공기를 선체표면에 공급했을 때 얻어지는 저항감소의 메커니즘을 직관적으로 이해하는 차원에서 머물렀기 때문이다.

공기공급에 의하여 마찰저항을 감소시키려는 연구는 크게 두 방향으로 나뉘어 진행되었다. 그 첫 번째 방법은, 물체표면 근처의 경계층 내부로 미소기포를 주입하여 유동구조의 변화를 통해 저항을 줄이고자 하는 것으로, 평판과 같은 2차원 물체에 대해서는 마찰저항을 80%가량 줄인 연구결과가 있다[1]. 그러나, 선박과 같은 3차원 물체에서는 미소기포를 선체의 표면에 효과적으로 유입시키기 어려우며, 공급된 공기가 오히려 형상저항을 증가시켜 저항증가로 나타나기도 한다[2]. 단이진 선저를 가지는 선형에서 단의 후방에 공기를 공급하여 공기공동을 형성시켜주면, 물과 선체사이의 마찰저항이 물과 공기막사이의 저항으로 바뀌게 되어, 상당한 저항감소효과를 얻을 수 있음이 모형실험에서 확인된 바 있다[3].

최근에 이와 같은 공기공동에 의한 선박의 저항감소를 설명하기 위하여 공기공동의 생성을 수치해석하고 모형선실험으로 조사하거나, 실선에 적용하는 연구가 러시아에서 활발히 진행된 바 있다. 내수면용으로 실용화되어 사용되고 있는 선박들이 소개된 바 있으나 공기공급법에 의해 저항성능을 개선하는 것 못지 않게, 추진성능, 내항성능, 조종성능에 관련된 연구가 필요함이 확인되었다. [4]

국내에서는 공기공급에 의한 저항감소연구가 최근 여러 해에 걸쳐 서울대학교 선형시험수조에서 수행되었으며, 특히 공기공동을 형성시키는 방법으로 모형선 전저항을 17%정도까지 감소시킨 바 있다[5].

선체에 붙여진 공기공급장치의 후방에 형성되는 공기공동을 2차원 공동문제로 단순화시키고, 이상화된 조건하에서 수치해석함으로써 공기공동의 형태와 길이, 내부압력 등의 관계를 조사하였다.

본 논문에서는 선체에 부가된 공기공급장치로

인한 저항의 증가를 최소한으로 억제하기 위하여 실선선형의 선저형상을 국부적으로 변형시키고 공기를 공급하는 것을 연구대상으로 하였다. 즉 선형의 주요 제원을 변화시키지 않고, 공동에 관한 실험결과와 이론해석의 결과에 근거하여 저항감소에 유리하도록 선저를 국부적으로 변화시켜 개량하고 저항성능의 변화를 실험적으로 확인하였다.

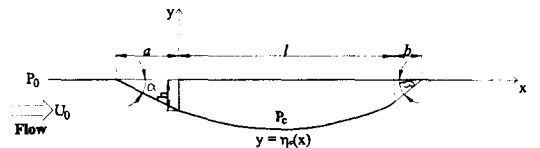


Fig.1 Schematic configuration of cavity model

2. 2차원 공동문제

2.1 문제의 정식화

2차원으로 이상화된 공기공동을 계산하기 위한 모델은 Fig.1과 같다. 이를 비점성, 비압축성 유체와 비회전성유동이라고 가정하면 속도포텐셜이 존재하며 (1),(2),(3)식과 같은 지배방정식과 경계조건을 얻을 수 있다.

· 지배방정식

$$\nabla^2 \phi = 0 \quad \left(\frac{\partial \phi}{\partial x} = u, \frac{\partial \phi}{\partial y} = v \right) \quad (1)$$

· 운동학적 경계조건

$$\eta'(x) = \frac{v}{U_0 + u} \quad \text{on } y = \eta(x), -a \leq x \leq b+l \quad (2)$$

· 동력학적 경계조건

$$p_0 + \frac{1}{2} \rho U_0^2 = p_c + \frac{1}{2} \rho [(U_0 + u)^2 + v^2] + \rho g \eta_c \quad (3)$$

on $y = \eta_c(x), 0 \leq x \leq l$

위의 경계조건을 선형화하고 복소 쏘오스 포텐셜을 도입하여 이로부터 얻어진 u, v 를 선형화된 경계조건에 대입하면, (4),(5)식과 같은, $\eta_c'(x), \sigma$ 에 대한 적분방정식을 얻게 된다.

$$\frac{1}{\pi} \int_0^l \frac{\eta_c'(\xi)}{\xi - x} d\xi + \frac{\sigma}{U_0^2} \int_0^x \eta_c'(\xi) d\xi - \frac{1}{2} \sigma + \frac{\beta}{\pi} \log \left[\frac{l+b-x}{l-x} \right] = \frac{\alpha}{\pi} \log \left[\frac{x}{x+a} \right] + \frac{g a \alpha}{U_0^2} \quad (4),$$

$$\sigma = \frac{p_0 - p_c}{\frac{1}{2} \rho U_0^2}, \quad 0 \leq x \leq l$$

$$\int_0^l \eta_c'(\xi) d\xi + \eta_c'(l) b = a \alpha \quad (5)$$

여기서 우리가 구할 수 있는 해는 $\eta_c'(x), \sigma$ 이므로 이로부터 공기공동 내부의 압력 p_c 와 공기공동의 형상을 나타내는 $y = \eta_c(x)$ 를 구할 수 있다.

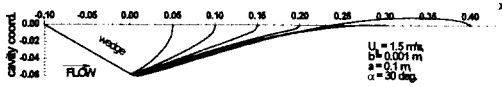


Fig.2 Estimated cavity shape corresponding to the given cavity length

2.2 계산결과

계산결과로부터 얻어진 공기공동의 형태를 살펴보면 Fig.2와 같다.

주어진 조건에 대응하는 공기공동의 형태는 길이가 짧은 경우는 볼록하고 길이가 긴 경우는 오목한 형태를 가지고 있다. 공동의 길이가 점점 증가함에 따라 공동의 뒷부분에서 가상판의 기울기 β 가 줄어들게 되며 기울기가 음의 값을 가질 수 없으므로, 형성될 수 있는 공동의 최대길이 존재하는 것으로 해석할 수 있다.

따라서, 공기공동을 이용하는 선박의 선저 단의 형상을 구하는 초기선형설계에서 간단히 사용하기 위하여 (6)식과 같이 공동의 끝에서의 기울기가 선저와 일치하게 되는 때의 길이를 공동의 길이로 하였다.

Maximum Length [$\eta_c'(l) \geq 0$] (6)

현재의 계산모델을 이용하여 공기공급장치의 형태변화가 공동의 길이와 형태, 내부압력에 미치는 영향을 살펴보기 위해서 다음과 같이 세가지 경우에 대해 유동의 속도는 1.0 m/s~2.0m/s, 기준압력 p_0 는 5.0 cm H₂O(계기압력)로 하여 계산을 수행하였다.

- (1)뿔기의 높이가 일정한 경우(h=0.015 m)
- (2)뿔기의 경사각이 일정한 경우($\alpha=5^\circ$)
- (3)뿔기의 밑변의 길이가 일정한 경우(a=0.5 m)

세가지 경우의 계산결과를 먼저 단의 높이를 기준으로 유동속도를 무차원화한 $Fn(=V/\sqrt{gh})$ 와 공동의 길이를 무차원하여 l/h 로 나타내면 Fig.3과

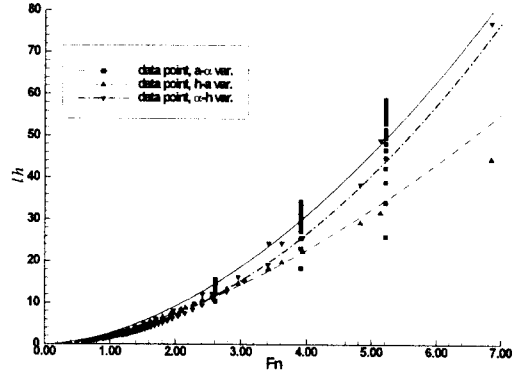


Fig.3 Relation between cavity length and flow speed

같다. Fig.3에서는 Fn 가 증가함에 따라 공동의 길이가 증가하는 것으로 나타나고 있으나 극히 낮은 속도범위를 제외하면 일정한 상관관계를 가지는 것으로 보기 어렵다. 그러나 계산된 공동내부압력 p_c 를 무차원화한 $-\sigma = 2(p_c - p_0)/\rho V^2$ 와 l/h 로 나타내면 Fig.4를 얻게 된다. 이에 따르면, 공동의 길이와 공동수 σ 사이에는 일정한 상관관계가 존재함을 확인할 수 있다.

Fig.4에 따라 모형선과 실선사이에서 형성되는 공기공동의 치수를 설명할 수 있을 것으로 기대된다. 즉 이론계산에 따르면 실험을 계획한 모형선에서 공동의 길이와 내부압력은 Fig.5의 관계를 갖게 되며 이로부터 Fig.4의 관계를 이용하면 실선의 공동에 대한 정보를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

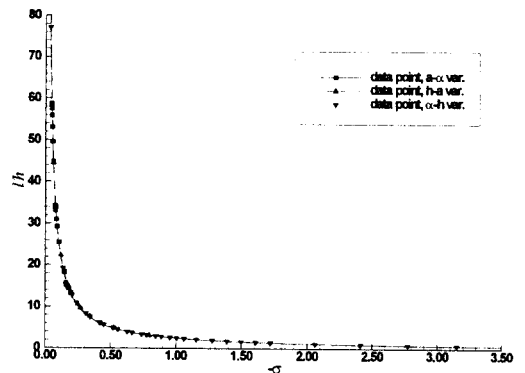


Fig.4 Relation between cavity length and cavitation number

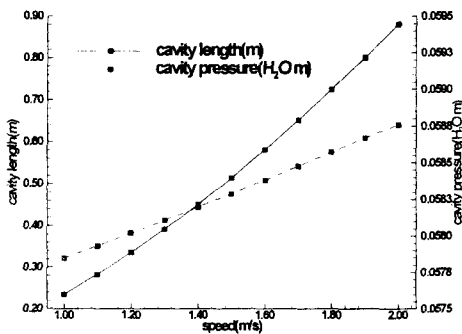


Fig.5 Cavity length, cavity pressure of model scale



Fig.6 Body plan of proto type hull form

3. 모형선실험

선저에 공기공동을 형성시켜 저항을 감소시키기 위하여 흘수에 비해 폭이 넓은 Fig.6에 보인 실제로 내수면에서 운용되고 있는 선형을 채택하였다. 주요 제원은 Table 1과 같다.

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
Draught (m)	1.15	0.046
Disp.Vol. (m ³)	396.765	0.02539
C _b	0.6561	
Scale Ratio, λ	25	

이 선형에 대해서는 선저형상을 변화시키지 않고 선저평행부 부근에 공기공급장치를 부가시킨 후 공기를 공급하고 저항감소효과를 조사한 연구가 수행된 바 있다.[5]

3.1 공기공동의 형성조건을 고려한 선형의 변환

원래의 선형이 공기공급방식을 채택할 것을 고

려하지 않고 설계된 선형이므로 충분한 저항감소 효과를 얻지 못하였다고 판단된다. 따라서 선형을 공기공동형성에 유리하도록 변형시킴으로써 공동에 의한 저항감소효과를 더욱 극대화하고자 하였다.

길이방향으로는 선저평행부가 시작되는 6 ST부터 2 ST까지, 폭방향으로는 선체중심선으로부터 4 BL까지의 배 폭의 80%에 해당하는 부분을 평판부로 만들어 주었다. 이 평판부를 2 ST의 4 BL에서의 높이로 keel line에 평행하게 놓으면 모형선 6 ST의 중심선에서는 높이 1.34 cm의 단이 지게 된다. 평판부와 원래의 선형이 매끄럽게 연결되도록 1 ST과 2 ST사이의 선저부 형상을 다듬어 주었다. 선형변환에서 원래 선형의 배수량이 유지되도록 하였다.

이러한 결과로 얻은 최종적인 선형은 Fig.7과 같고, 제작된 모형선의 선저부형상은 Fig.8과 같다.

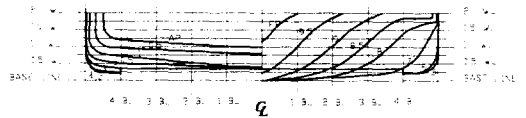


Fig.7 Body plan of modified hull form

평판부는 투명 아크릴로 제작하여 선저부에 발생하는 공동과 주위유동을 관찰할 수 있도록 하였다.

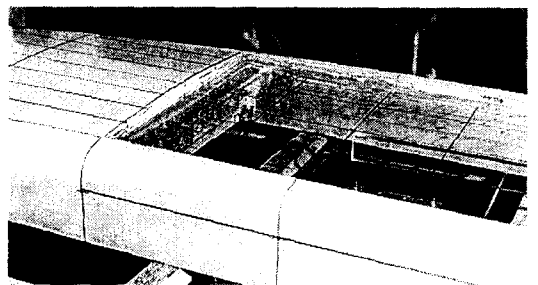


Fig.8 Photo of model ship

평판부의 높이방향위치를 Table 2와 같이 바꾸어 주면서 모형선예인실험을 수행하였다.

3.2 선형요소의 변화에 따른 저항감소효과

3.2.1 단높이의 변화

평판부를 keel line에 대해 평행을 유지하고 단 높이의 변화에 따른 공기공동의 성장과 저항감

Table 2. Experiment Set of bottom shape

Hull form	Δz of 6ST	Δz of 2ST	side strip
BA1	0.0 cm	0.0 cm	w/o
BA3	+0.5 cm	+0.5 cm	w/o
BA7	-0.5 cm	-0.5 cm	w/o
AA1	0.0 cm	0.0 cm	w/
AA2	-0.5 cm	-0.5 cm	w/

Δz : height variation wrt. BA1(as Fig.7)

소의 영향을 살펴보고자 하였다.

단높이의 변화에 따른 세가지 경우의 실험결과를 보면, Fig.9(a), Fig.9(b), Fig.9(c)에 보인 것처럼 같은 속도 ($V_m = 1.543 \text{ m/s}$)와 공기공급유량 ($Q_A = 100 \text{ l/min}$)에 대해 단의 높이가 커질수록 공기공동의 길이도 증가함이 확인된다.

한편, 이러한 공동길이를 앞의 계산결과와 비교하기 위해서 서로 다른 단높이를 가지고 있는 BA1, 3, 7선형에 대하여 13~16 knots 구간에서 선저부의 중심선을 따라 공동의 길이를 계측하여 횡축을 단의 높이를 기준으로 한 Fr_h 종축을 l/h 로 나타내면 Fig.10과 같다. 공기공동의 길이는 대체로 계산결과와 경향과 유사함을 알 수 있으나, 실제의 선저부유동은 양현측의 영향을 받는 3차원유동이므로, 어떤 속도이상에서는 다시 공동의 길이가 줄어드는 현상을 보여 주었다.

모형선의 저항실험결과는 Fig.11과 같다. 단의 높이가 커질수록 형상저항의 증가로 인해 공기를 공급하지 않은 상태에서 저항증가가 크게 나타나는 것을 알 수 있으나, 공동으로 인한 저항감소량

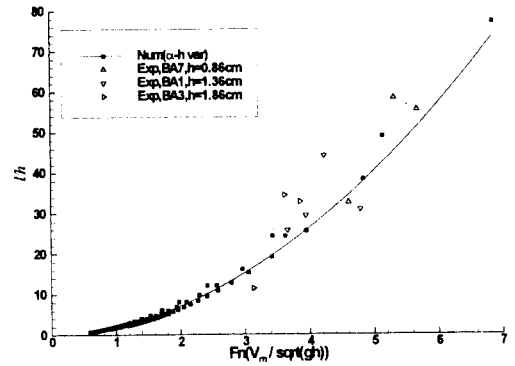


Fig.10 Cavity length (measured at center line)

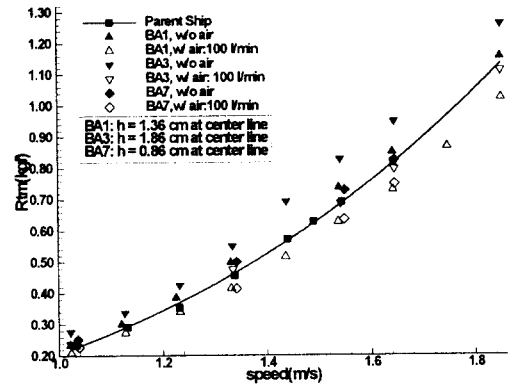


Fig.11 Comparison of step height effect on resistance

도 크게 나타나고 있으며, 이는 공동길이의 증가와도 일치하는 것을 확인할 수 있다.

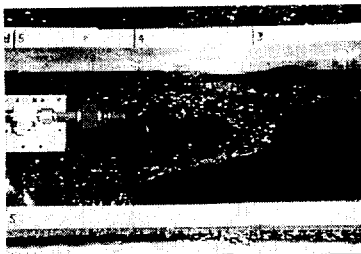


Fig.9(a) BA3 hull form, 1.86cm step at center line(mean cavity length=58cm)

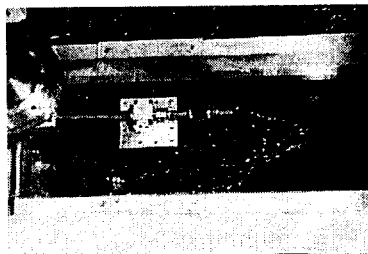


Fig.9(b) BA1 hull form, 1.36cm step at center line(mean cavity length=48cm)

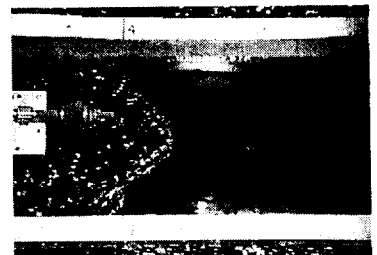


Fig.9(c) BA7 hull form, 0.86cm step at center line(mean cavity length=45cm)

단높이의 증가에 따라 저항의 증가가 나타나며 동시에 공동길이의 증가로 인한 저항감소가 나타나게 된다. 이들 사이의 차이로부터 원래선형에 대한 저항변화가 나타나며, Fig.12와 같이 현재의 실험범위에서 저항감소에 가장 유리한 단높이가 존재하며, 그 때의 저항감소율은 대체로 10%정도였다.

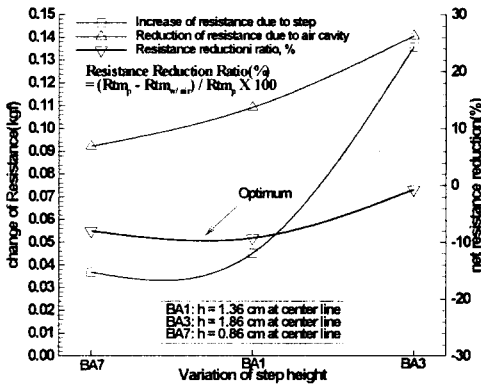


Fig.12 Comparison of resistance reduction effectiveness for three different step height

3.2.2 공기유출막이벽의 효과

선저로 공급된 공기중의 일부는 공기공동을 형성하는데 기여하지 못하고, 선측을 통해 빠져나가게 된다. 따라서, 운항중에 선저부의 공기공동을 유지시켜 주기 위해서는 계속 공기를 공급해 주어야 한다.

선측으로 유출되는 공기를 억제함으로써, 선저부에 유효한 공기공동을 유지하는데 기여할 수 있을 것으로 생각되며, 서로 다른 단높이를 가지는 BA1, BA7선형에 높이 1.0 cm의 공기유출막이벽 [이하 막이벽이라 한다]을 평판부길이전체에 걸쳐 4 BL을 따라 부착한 AA1, AA2선형에 대해 공기공급실험을 수행하였다.

한편, 단의 양측면에 벽이 있는 경우, 유선의 재부착길이가 늘어나고, 단후방의 2차 보오텍스는 약화되는 것으로 알려져 있다.[6] 따라서, 막이벽은 선저유동을 정류하는 효과를 주게 되며, 본 연구에서는 공기공동길이의 증가와 그에 따른 저항감소를 조사하고자 하였다.

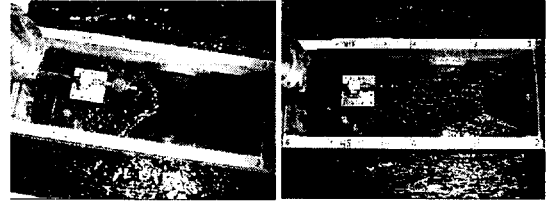


Fig.13(a) BA7 hull form, Fig.13(b) AA2 hull form, mean cavity length=45cm mean cavity length=74cm

막이벽에 의한 선저부 공기공동의 변화는 $V_m=1.646$ m/s, $Q_A=100$ l/min 조건에서 Fig.13과 같이 2배 가까이 길이가 증가하며, Fig.14에서 나타낸 바와 같이 전저항감소량은 $V_m=1.543$ m/s에서는 7%, $V_m=1.646$ m/s에서는 15%정도 증가하였다.

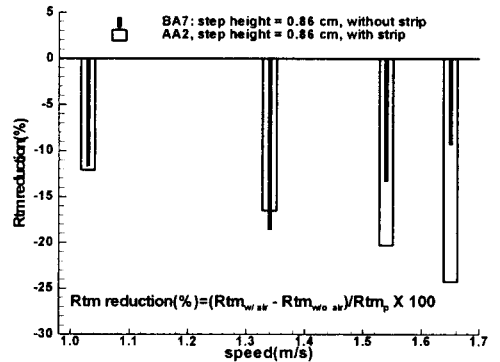


Fig.14 Resistance reduction effect of side strip

서로 다른 단높이를 가지는 선형에 각각 막이벽을 부착한 AA1, AA2선형의 공기공급시험에 의한 저항의 변화를 Fig.15에 나타내었다. AA1, AA2 두 선형 모두 공기를 공급했을 때의 저항감소량은 거의 비슷하게 나타났으며, 이는 선저부 공기공동의 길이가 거의 같다는 점에서도 확인할 수 있었다. 한편, 공기를 공급하지 않았을 때의 원래선형에 대한 저항증가는 단의 높이가 낮은 AA2선형이 AA1선형보다 작았다. 따라서, 이 둘의 차이로부터 원래선형에 대한 저항감소를 생각하면, AA2선형의 경우, 설계속도 부근인 $V_m=1.646$ m/s에서는 Fig.13(b)와 같이 모형선길이의 40%를 차지하는 평판부를 거의 덮는 공기공동을 얻을 수 있었으며,

원래선형의 전저항이 약 25%정도 감소됨을 확인할 수 있었다.

후 기

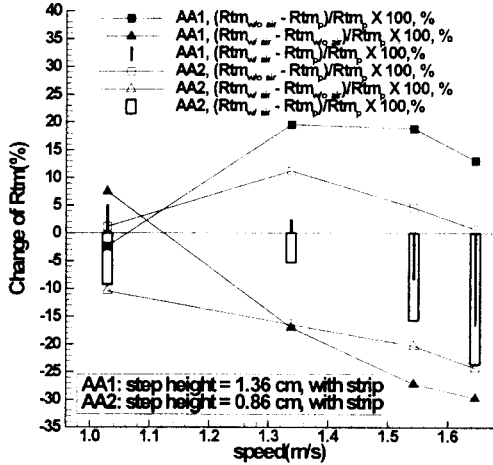


Fig.15 Effect of step height on resistance reduction for a model with side strip

4. 결론

간단한 2차원 공동문제라 해석하면, 단 후방에 형성되는 공기공동의 길이는 공동내부의 압력으로 정의되는 공동수에 따라서 정해진다. 따라서 공동수는 모형선-실선 사이에서 공기공동의 길이를 추정함에 있어 중요한 역할을 할 것으로 생각된다. 2차원문제라 이상화하여 예측된 공기공동의 길이를 사용하여 선저의 단높이를 결정하고 실험적으로 조사한 결과 저항감소에 적절한 단높이가 존재함이 확인되었다. 적절한 단높이에서 막이벽을 부착하면 원래선형의 전저항을 약 25% 감소시킬 수 있었다.

공기공급법에 의한 저항감소기법을 실선에 적용하기 위해서는 공동현상의 모형선-실선 상관관계에 관한 폭넓은 연구가 필요할 것으로 생각된다.

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", J. Fluid Mechanics, Vol.156, 1985
- [2] 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
- [3] 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
- [4] 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
- [5] Jinho Jang, Hyochul Kim, & Seung-Hee Lee, "Improvement in Resistance Performance of a Barge by Air Lubrication", Proc. of PRADS '98, the Hague, the Netherland, 1998
- [6] Papadopoulos, G., Ötügen, M.V., "Separating and reattaching flow structure in a suddenly expanding rectangular duct", Journal of Fluids Engineering, Vol. 117, 1995