

## 선체주위 기포거동에 관한 기초적 연구

김호은\*, 이영길\*\*

### A Basic Research of Air Bubble Locus around the Ship Hull

H.-E. Kim\* and Y.-G. Lee\*\*

#### 요 약

선박의 저항을 줄이기 위하여 발생시킨 기포의 거동을 알기 위해, 선체주위의 기포거동에 관한 기초적 연구를 수행하였다. 본 연구에서는 선체주위에 발생된 기포의 거동에 대하여, 기포의 크기와 발생위치를 변화시켜가며 수치계산 및 실험을 수행하여, 선체주위의 기포거동에 관한 특성을 연구하고자 하였다. 기포의 거동방정식은 기포의 부력을 고려한 Kawakita의 것을 사용하였다.

수치계산은 MAC(Marker And Cell)법을 기초로 한 유한차분법(Finite Difference Method)을 사용하였으며, 실험은 Series 60선형에 대하여 회류수조에서 수행되었다. 실험과 계산은 서로 비교하여 보았다.

#### Abstract

A basic research of air bubble locus around the ship hull is performed to know the bubble's behavior which is generated around the hull surface. In this paper, bubble's behavior around the ship hull is calculated and experimented with the variation of bubble size and the location of bubble generation. For the use of the equation for bubble locus, Kawakita's equation which include the effect of bubble buoyancy is adopted.

For the numerical simulation, a finite difference method based on the MAC method is used. Also experiments are performed about series 60 hull form at CWC. The results of calculation are compared with those of experiment.

---

접수일자: 2000년 4월 3일, 승인일자: 2000년 9월 6일

\* 학생회원, 인하대학교 대학원 선박공학과 석사과정( E-mail: jamm90@hanmail.net )

\*\* 정회원, 인하대학교 선박해양공학과 부교수( E-mail: younglee@inha.ac.kr )

1. 서 언

선박의 저항을 줄이기 위한 노력으로, 구상선수 등의 선수 선형설계에 의한 방법을 통하여 조파저항 감소라는 측면에서는 많은 성과를 거두어 왔다. 그러나, 선형설계를 통한 그 이상의 진전이 어려워짐에 따라, 점차 마찰저항을 줄이는 방법에 관심을 가지게 되었다. 그러나 최근까지, 마찰저항은 유체의 점성으로 인한 유체와 선체사이의 마찰에 의한 것이므로 불가피한 현상으로 여겨져 왔다. 마찰저항의 감소는 침수표면적의 감소, 선체주위 유동의 변화 등을 통하여 이루어질 수 있는데, 이를 위하여 polymer의 이용(McCarthy, 1970), 탄성 표면, 경계층내 미소기포 주입 등의 방법이 제안된 바 있으나, 그 효과와 실용성에 많은 문제를 안고 있다. 이러한 방법들 중에, 선체주위에 기포 또는 공기공동을 발생시켜 마찰저항을 감소시키는 기포법에 대한 연구가 국내외에서 활발히 진행되고 있다(고석천/김효철 1997, 장진호/김효철 1999, 한범우/김효철 1998, Doi 등 1991).

본 연구에서는 위와 같은 기포법을 이용한 저항 감소에 관한 기초적인 연구단계로서, 선체주위에서의 기포 거동에 관점을 두어 연구하였다. 이 연구의 목적은 기포거동의 예상레적 추적과 프로펠러 면으로의 기포유입을 관찰하는데 있다. 만약 저항을 감소시키기 위해 분사시킨 기포가 선미 쪽으로 흘러 들어가면서 프로펠러 면에 유입이 된다면, 오히려 선박의 추진성능감소와 진동 및 소음의 증가가 우려되기 때문이다(Robert T. Knapp 등 1970).

본 연구에서는 선체주위 기포거동에 관한 기초적 연구로, 쇄파현상시 발생하는 경우와 선저에서 주입하는 경우 등을 관찰하였다. 대상선형은 Series60( $C_B=0.6$ )선형 및 경인운하 연계수송용 바지(barge)를 선택하여 계산을 수행하였다.

2. 수치계산

본 연구에서는 수치계산을 이용하여, 기포의 궤

적을 추적하여 보았다. 우선, 선체주위의 유동장에 대한 계산을 수행한 후, Kawakita(1990)의 기포거동 방정식을 이용한 유선추적방법을 사용하여, 선체주위에 발생된 기포의 궤적을 추적하였다.

2.1 지배방정식

유동장을 비압축성, 비점성유동이라고 가정하였으며, 지배방정식들로는 보존형의 3차원 Euler 방정식과 연속방정식을 사용하였다.

2.2 유한차분법

선체주위 유동의 시물레이션을 위한 수치계산은 MAC(Marker And Cell)법을 기초로 한 직사각형격자계에서 수행되었다. 계산의 정도를 높이기 위하여 격자계의 형태에 있어서 교차격자계(staggered mesh system)와 가변격자계(variable mesh system)를 적용하여 계산의 정도를 높이고 계산시간의 효율성을 높이도록 하였다. 계산영역은 배의 반쪽만을 포함하는 유동장으로 구성하였으며, 중앙면에 대칭조건을 부가하여 유동장의 대칭성을 고려하였다. 지배방정식의 차분화에 있어서는, 대류항을 제외한 나머지 항들은 시간에 대하여 전진차분, 공간에 대하여 2차중심차분으로 정리하였다. 대류항의 차분기법으로는 2차중심차분과 Donor cell법을 조합한 hybrid 기법을 적용하였다.

2.3 경계조건

2.3.1 물체경계조건

물체경계에서는 free-slip 조건을 적용하였으며, 물체경계격자에서 다음 3조건을 만족하도록 하였다.

- (1) 물체 표면에 수직방향 속도성분은 0이다.
- (2) 물체 표면에 접한 속도는 물체표면 가까이에서 수직방향으로의 기울기를 갖지 않는다.
- (3) 물체 경계격자에서의 발산(divergence)은 0 이다.

2.3.2 자유표면조건

자유표면에서 점성응력(viscous stress)과 표면장력(surface tension)의 효과를 무시하고, 자유표면의 위치를  $z = \zeta$ 라 할 때, 이 위치에서 동역학적 조건과 운동학적 조건을 다음의 식(1), (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$P = P_0 \text{ on free surface} \quad (1)$$

$$\frac{D(Z-\zeta)}{Dt} = 0 \text{ on free surface} \quad (2)$$

여기서,  $P_0$  는 대기압이다.

2.3.3 기타 경계조건

유입경계면에서는 속도에 Dirichlet조건을, 압력에 Neumann조건을 적용하였고, 선체의 중앙면에서는 좌우 대칭조건을 적용하였다. 또한, 유출경계면에서는 속도, 압력 모두 Neumann조건을 주었다.

2.4 기포거동

2.4.1 기포거동의 가정

선체주위를 거동하는 기포에 대하여 아래와 같은 3가지의 가정을 한다(Kawakita 1990).

- (1) 관찰하고자 하는 기포의 형상은 구형으로 간주한다.
- (2) 미소기포에 의한 평균속도에 미치는 교란과 상호작용은 무시한다.
- (3) 선체주위의 기포거동은 지속시간이 짧다고 간주하여, 기포의 표면장력과 기체확산은 무시한다.

2.4.2 기포의 속도

앞에서와 같은 기포거동의 가정에 따라 구형기포의 부력, 항력, 중력 등을 고려하고, 무시 가능한 항을 생략하면, 기포의 속도를 나타내는 식(3)을 얻게된다(Kawakita 1990).

$$V_a = -\frac{r^2}{9\nu} g + V_l \quad (3)$$

여기서,  $V_a$ 는 기포의 속도 벡터,  $r$ 은 기포의 반경,  $\nu$ 는 동점성계수,  $g$ 는 중력가속도 벡터,  $V_l$ 은 유체의 속도 벡터를 각각 나타낸다.

2.4.3 기포거동의 방정식

직교좌표계하에서 기포거동의 미분방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{dx}{u} = \frac{dy}{v} = \frac{dz}{w + \frac{r^2 g}{9\nu}} \quad (4)$$

여기서  $u, v, w$ 는 선체주위의 속도성분이다. 따라서, 속도장이 계산되어 있다면, 기포거동은 식(4)에 의하여 계산될 수 있다.

2.4.4 기포의 상사법칙

실선과 모형선간의 기포거동에 관한 상사법칙을 고려하면, 식(4)에서 실선과 모형선간의  $x, y, z$ 방향에 대한 속도비가 항상 같아야 하므로, 다음과 같은 기포크기에 대한 상사식을 유도할 수 있다(Kawakita 1990).

$$r_m = \sqrt{\frac{V_m}{V_s}} r_s \quad (5)$$

여기서,  $V$ 와  $r$ 은 각각 선속과 기포의 반경이며, 첨자  $m$ 은 모형선을,  $s$ 는 실선을 나타낸다. 여기서,  $V_m$ 과  $V_s$ 는 Froude의 법칙을 따라야 하므로 다음과 같은 관계를 얻을 수 있다.

$$\frac{V_m}{V_s} = \sqrt{\frac{L_m}{L_s}} = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \quad (6)$$

여기서,  $L$ 은 선체 길이이고,  $\lambda$ 는 실선-모형선

축척비이다. 따라서, 모형선시험에서의 기포크기의 식 (5)는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$r_m = r_s / \lambda^{\frac{1}{4}} \quad (7)$$

### 3. 계산결과 및 고찰

본 연구에서는 Series60( $C_B=0.6$ )선형과 연안-운하 연계수송용 바지선에 대하여 기포의 궤적을 수치계산으로 추적해 보았다. 또한, Series60( $C_B=0.6$ )선형에 대하여는 실험을 수행하여, 계산 결과와 서로 비교하였다.

#### 3.1 Series60( $C_B=0.6$ )선형에 대한 수치계산과 실험

##### 3.1.1 계산조건

계산은  $Fn=0.15, 0.22, 0.25, 0.30$ 에 대하여 수행하였으며, 기포의 발생위치 및 크기는 실험과 일치하도록 하였다. 계산조건은 다음의 Table 1과 같다.

**Table 1** Computational conditions about Series60( $C_B=0.6$ ) hull

Condition	Ship	Series60( $C_B=0.6$ )			
Number of cell (Full domain)	X	125			
	Y	45			
	Z	25			
Computational domain	X	3.134 (2.09L)			
	Y	0.557 (5.57B)			
	Z	0.221 (2.76d)			
The minimum cell	$dx/L$	0.1154			
	$dy/B$	0.00408			
	$dz/d$	0.004			
$Fn$		0.15	0.22	0.25	0.30
Time steps for acceleration		800			
Time increment (t)		0.0014	0.0009	0.0008	0.0007
Total time step of computation		3000	4800	3000	3600

##### 3.1.2 실험결과

모형선 실험은 인하공업전문대학의 회류수조에서 수행되었다. 수조의 전체 제원은 길이 8.5m, 폭 1.5m, 높이 4m이며, 계측부의 제원은 길이 3.5m, 폭 1.2m, 높이 0.8m 이다.

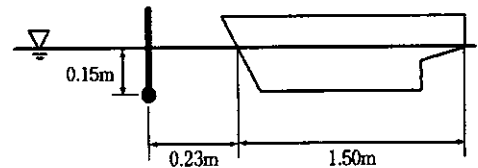
실험에 사용한 모형선은 Series60( $C_B=0.6$ )선형으로, 나무로 제작되었다. 모형선의 축척비는 1/81.28로,  $L_{BP}=1.5m, B=0.2m, d=0.08m$  이다.

기포발생장치는 정격압력 0.02MPa의 공기 압축장치를 사용하였다. 기포의 거동 추적을 용이하게 하기 위하여, 노란색상의 모형선 선체표면에 붉은 색의 아스테이저를 붙였으며, 기포의 거동추적은 디지털 카메라와 비디오 촬영기를 이용하여 선수부, 선체중앙부 및 선미부의 측면에서 촬영함으로써 수행되었다.

실험은  $Fn=0.15, 0.22, 0.25, 0.30$ 의 4가지의 조건에서 수행하였다. 기포의 발생위치 및 기포의 직경은 다음의 Table 2와 같으며, 실험에 대한 개략적인 그림은 Fig. 1과 같다.

**Table 2** Diameter and generation position of air bubbles

구분	$Fn$	0.15	0.22	0.25	0.30
기포직경 (mm)		1	1	1	1
기포 발생 위치	선수방향	0.23m	0.23m	0.23m	0.23m
	폭방향	중심	중심	중심	중심
	깊이방향	0.20m	0.15m	0.15m	0.09m



**Fig.1** Arrangement of experiment system at CWC

3.1.3 실험결과와 계산결과의 비교

Fig.2는 실험사전에 선체 표면에서의 기포거동이 보기 쉽도록, 이동궤적과 스테이션 및 수선을 그려 넣은 것이다. 사진들은 선수부와 선미부로 나뉘어져 각각의  $Fn$ 에서 보여주고 있다.

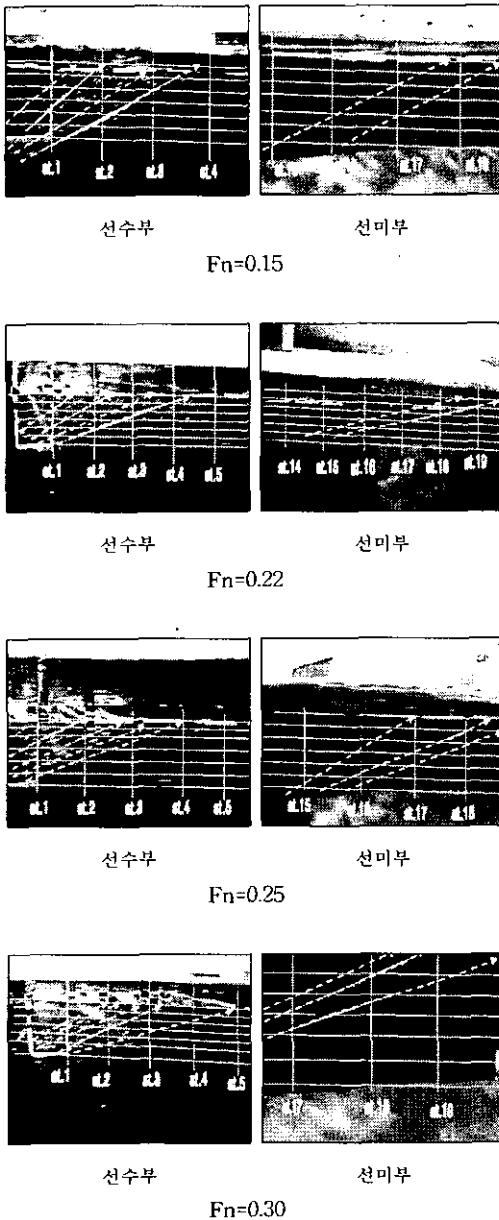


Fig.2 Photographs of experiment results

다음 Fig.3, 4, 5에서는 각각 실험과 계산결과를 Froude수에 따라 비교하고 있다. 선체표면의 점들은 실험에서 관찰되어진 기포의 위치를 나타내며, 화살표는 계산에 따른 결과로써 얻어진 기포궤적과 기포가 없는 경우의 유선을 나타내고 있다. 계산시의 기포크기는  $1100\mu m$ 이며, 발생위치는 가능한 범위내에서 실험치와 가깝게 되도록 설정하였다. 선수부에서의 기포와 선체 바닥가 선미부에서 상승하는 기포의 크기는  $1000\mu m$ 로 같게 하였으나, 선체중앙부에서의 기포들은 이보다 작은 것들로 실험에서 관찰되었으므로, 선수미부의 기포크기와  $700\sim 800\mu m$ 로 달리하여 그 궤적들을 추정하였으며, 그림에서 괄호 안에 표시하여 나타내었다.

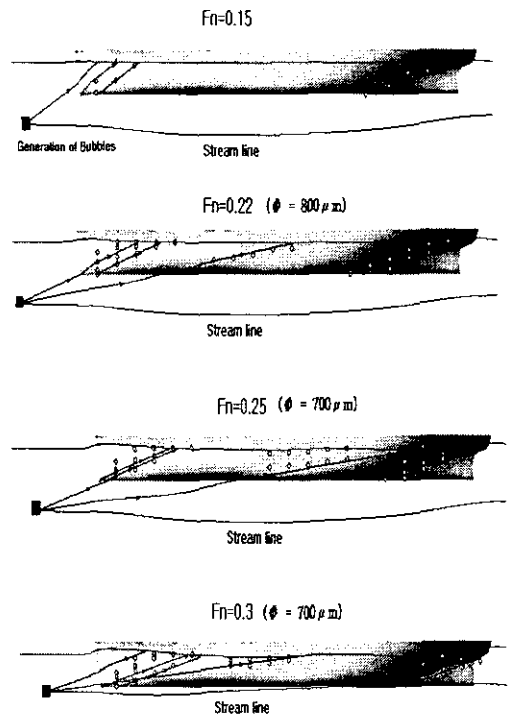


Fig.3 Comparison of computational and experimental bubble loci along the hull surface

Fig.3은 전체적인 기포거동을 보여주고 있으며, 기포에 의한 영향으로 기포의 궤적을 나타내는 선들이 기포가 없는 경우의 유선과 상당히 다른 모습을 보여주고 있다.  $Fn=0.15$ 에서는 유선과 기포발생위치에서  $1000\mu m$ 의 버블이 발생하였을 경우에 대한 그림이다.  $Fn=0.22, 0.25, 0.30$ 의 경우, 기포발생위치에서 생성되는 기포와 선수 및 선미를 지나는 기포는  $1000\mu m$ 이고, 기포 발생위치에서 생성되어서 선체 중앙부를 지나는 기포의 크기는 팔호 안에 나타내고 있다.

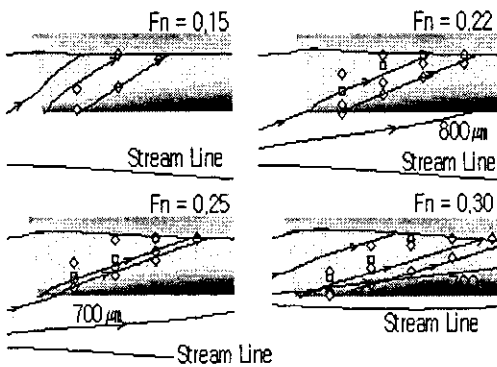


Fig.4 Comparison of computational and experimental bubbles locus on the surface of fore body

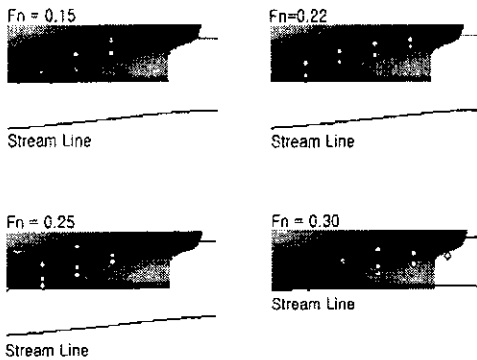


Fig.5 Comparison of computational and experimental bubbles locus on the surface of after body

Fig.4, 5는 각각 선수와 선미에서의 기포거동의 궤적을 부분적으로 나타내고 있다. 그림들에서 보듯이 계산에 의한 기포궤적들의 추정과 점으로 표시된 실험결과가 매우 근접함을 알 수 있다.

### 3.2 바지선 주위의 기포거동에 대한 수치 계산

#### 3.2.1 계산조건

연안과 경인운하간의 연계수송시스템 개발의 일환으로 설계된 바지선(김성용 등 1998)에 대하여 수치계산을 이용한 기포의 궤적을 추적하였다. 바지의 경우 기포의 발생위치는 선수 쇄파시의 기포 발생을 고려한 선수근처와 평저부가 시작되는 16st.에서 발생시켰다. 바지선의 주요제원은  $L_{BP}=53.5m, B=7.9m, d=2.7m$ 이며, 설계속도는 6knots이다.

다음의 Table 5에서는 계산조건을 나타내었다.

Table 5 Computational conditions

Condition	Ship	Barge
Number of Cell (Full domain)	X	130
	Y	57
	Z	30
Computational domain	X	165.62m ( 3.10 L)
	Y	100.66m (25.48 B)
	Z	13.98m ( 5.18 d)
The minimum cell	$dx/L$	0.0079
	$dy/B$	0.0194
	$dz/d$	0.0890
Fn		0.135
Time steps for acceleration		700
Time increment (t)		0.008
Total time step of computation		23000

#### 3.2.2 계산결과

Fig.6은 바지선의 경우 선수 쇄파현상시 기포의 발생을 가정하여 기포궤적을 추적한 그림이다. 기포가 없을 경우의 유선,  $250\mu m$ 의 기포가 발생

할 경우와 500 $\mu$ m의 기포가 발생할 경우의 기포케 적을 각각 나타내었다. 기포가 발생하지 않을 경우, 선미 끝까지 진행하며 치지는 유선이, 기포의 크기가 점점 커질수록 유선을 따르지 않고, 점차 떠오르면서 자유수면에서 소멸하는 모습을 볼 수 있다. 더욱이, 500 $\mu$ m의 경우 생성되자 바로 떠올라 소멸하는 것을 볼 수 있다.

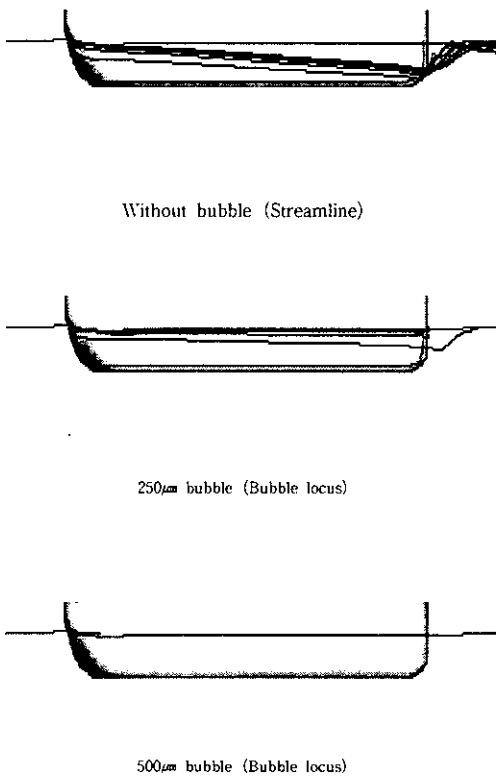


Fig.6 Streamlines and bubble loci along the hull surface of barge, generating position of bubbles : front of the bow

Fig.7은 선저평행부가 시작하는 16st.에서 기포가 발생할 경우를 나타내었다. 여기서도 앞에서와 같이 부력의 영향으로 점차 떠오르는 경향을 보이고 있다.

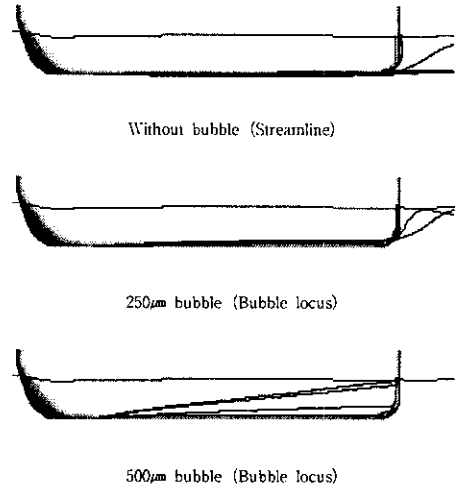


Fig.7 Streamlines and bubble loci along the hull surface of barge, generating position of bubbles : bottom of 16 st.

#### 4. 결론

수치계산에 의한 미소기포 거동의 궤적추정과 실험을 통한 궤적의 가시화에 대한 연구를 수행하였다. 수치계산에 있어서 기포의 거동은 선체주위의 속도장에 대한 계산결과를 바탕으로, 기포의 부력을 고려한 기포거동의 방정식을 적용하여 수행하였다. 수치계산 및 실험에 대한 결과 비교를 통하여, 계산결과가 실험치와 매우 근접함을 알 수 있었다. 따라서, 본 미소기포의 이동궤적 추정용 전산조직은 선체주위의 기포궤적 추정에 있어서, 속도장이 계산된 계산결과에 대하여 기포의 부력을 고려하여 주는 방법이기 때문에, 기포거동에 대한 응용이 비교적 쉽고, 근접하게 할 수 있다는 점에서 유용하다고 할 수 있다.

앞으로, 수치계산 및 실험에 있어서, 기포의 크기를 좀 더 작게 제어할 수 있는 장치를 개발하고, 기포의 가시화 방법에 대한 연구가 좀 더 필요하며, 계산에 있어서도 부력외의 요소를 고려한 전산조직의 개발에 대한 연구가 좀 더 필요하다고 생각된다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 특정연구과제(97-02-00-01-01-3)의 일부로 수행된 것으로, 위 기관의 후원에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- 고석천, 김효철, 1997 "단이 있는 반 활주형선의 선저 단부의 형상이 공기공동의 형성과 저항에 미치는 영향 연구", 대한조선학회 '97 춘계학술대회 논문집, pp. 213-217.
- 김성용, 이영길, 이승희, 이규열, 김호은, 1998 "연안 및 운하 연계수송용 Pusher-Barge System을 위한 선형 연구", 대한조선학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp. 52-56.
- 장진호, 김효철, 1999 "선저에 부착된 공기공동에 의한 선박의 저항감소에 관한 연구", 대한조선학회 국문논문집, Vol. 36, No. 2, pp. 1-8.
- 한범우, 김효철, 1998 "공기공급을 이용한 선저 외판의 마찰저항감소기법 연구", 대한조선학회 '98 춘계학술대회 논문집, pp. 221-225.
- Doi Yasuak, Mori Kazuhiro, Hotta Takio, 1991 "Frictional Drag Reduction by Microbubbles", Journal of the Society of Naval Architects of Japan, Vol. 170, pp. 55-63.
- Kawakita C., 1990 "A Calculation of Air Bubble Locus around Ship Hulls", 日本西部造船學會會報 第81號, pp. 1-10.
- Kim S.Y., Lee Y.-G., Kim H.-E., Lee S.H. and Lee K.Y., 1997 "A study on the Hull Form Development of 200 TEU class Sea-River Going Container Ship", Proceedings of China-Korea Marine Hydrodynamics Meeting, pp 366-375.
- McCarthy, 1970 "Flat-Plate Frictional - Drag Reduction with Polymer Injection", JSR
- Robert T. Knapp, James W. Daily, Fredrick G. Hammitt, 1970 "Cavitation", McGraw-Hill Book Co.



<김호은>



<이영길>