평판에 형성된 공기공동 특성에 관한 연구

김중현¹·오재용²·서대원³·이승희^{3,†}
플로윈테크(주)¹
해군본부 전력평가단 함정기술처²
인하대학교 조선해양공학과³

A Study on the Characteristics of an Air Cavity Attached Under a Flat Plate

Jong-Hyun Kim¹·Jae-Young Oh²·Dae-Won Seo³·Seung-Hee Lee^{3,†}
Flowin Tech Co., Ltd.¹
Naval Ship Engineering Center, Naval Force Analysis Test & Evaluation Group²
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Inha University³

Abstract

The concept of an air lubrication has long been an object of attention since it can be utilized to reduce the frictional resistance, and what is more, it is eco-friendly. The present study examines the basic characteristics of an air cavity with intention of applying the air lubrication technology to the reduction of the resistance of a ship without excessive power increment. For the purpose, an air cavity was created at the bottom of a flat plate by injecting air behind a backward step and the hydrodynamic properties of the air cavity and the surrounding flow has been investigated experimentally and numerically. The influence of the step height and the air flow rate have been more carefully studied since they are presumed to be the main parameters affecting the characteristics of an air cavity. The results indicates that the shapes of the air cavities attached on the flat plate become "U" or "V" type depending on the incoming flow velocity and air flow rate. The study also confirms that the length of the air cavity increases with increase in air flow rate but there is a certain critical limit in the flow rate above which increase in the air cavity length is no more evident.

Keywords : Air lubrication method(공기 윤활법), Air cavity(공기 공동), Flat plate(평판) Model experiment(모형시험), Numerical simulation(수치해석)

1. 서론

최근 선박의 고급화, 고속화 추세와 에너지 가격의 급등 및 CO₂, SO_x, NO_x 등 배기가스 감축 문제 등이 대두되면서, 에너지 절약의 관점에서 선박의 저항을 줄이려는 연구가 다양하게 진행되고 있다.

선박의 주요저항 성분으로는 마찰저항과 조파저항을 들 수 있다. 이 중에서 조파저항을 줄이기 위한 연구는 이미 상당한 성과를 올려 실용화 단계에 이르렀다. 대형 상선의 구상선수가 그 대표적인 예로서 선수파와 만곡부 와동(bilge vortex)을 감소시킴으로써 선박의 조파저항을 줄여주는 역할을 하게 된다.

마찰저항을 줄이기 위한 연구들도 활발하게 진행되어 왔는데, 그 대표적인 예로는 LEBU, RIBLET과 같은 장치나 탄성피막법, Polymer 주입법 등을 들 수 있다. 그러나 LEBU, RIBLET 등은 오손에 취약하고, 탄성피막법은 효과가 입증되지 않았으며, polymer 주입은 환경을 훼손하는 등의 여러가지 문제점 때문에

선박의 마찰저항 저감에 실용적으로 적용된 사례를 찾아보기 힘들다. 값싸고 환경을 해치지 않는 공기를 이용하여 마찰저항을 감소시키기 위한 연구들이 러시아를 비롯해서 미국과 일본 등에서 활발히 진행되고 있다. 공기를 이용하여 마찰저항을 줄여주기 위한 연구는 크게 두 가지가 있는데 점성이 낮은 미소기포를 선체표면 주위의 물 경계층에 주입하여 점성을 낮추거나 경계층 내부의 유동특성을 바꾸어 주기 위한 미소기포법이 일본을 중심으로 연구되어 왔으며 선체표면에 공기공동을 부착시켜 물과 선체가 만나는 침수표면적을 줄여줌으로써 마찰저항을 줄이기 위한 공기 윤활법이 러시아 등 유럽을 중심으로 연구되어 왔다.

미소 기포법이란 200~600μm 정도의 직경을 갖는 아주 미세한 기포를 경계층 내부에 주입하여 그 영향으로 난류 경계층 유동의 특성을 난류 응력이 감소하는 방향으로 변화시켜 국부적으로 마찰저항이 감소하는 현상을 이용하는 방법이다(Kim, et al., 2003a, b). 공기윤활법은 선박의 선체에 단을 설치하고 공기를 주입하여 물과 선체사이에 공기 막을 만들어 줌으로써 공기로 덮인 선체 표면이 받는 마찰저항을 줄이는 방법이다(Jang, 2002).

두 가지 방법 모두 마찰저항을 줄인다는 장점이 있기는 하지만 실제 선박에 적용하기에는 많은 어려움이 있다. 미소 기포법의 경우에는 마찰저항을 줄이기 위해서는 다량의 미소 기포를 경계 층 내부의 벽면에 아주 근접한 위치에 주입시킬 수 있어야 하며 그렇지 못하면, 즉, 예를 들어 벽면에서 $y=200$ 이상 떨어지면 주입된 미소기포들은 선박의 형상저항을 증가시킴으로써 오히려 전체 저항이 증가될 수 있다는 단점을 갖고 있다 (Bushnell & Hefner, 1990; Kim et al., 2003a). 특히 선체 주위의 유동특성에 따라 국부적인 기포의 거동이 확연히 달라지기 때문에 더 복잡한 문제들을 발생시킬 수 있고 이를 해결하기가 쉽지 않다. 공기 유힐법의 경우에도 실선 속도영역에서 침수표면에 부착된 넓은 공기 막을 경제적으로 생성하고 안정적으로 유지하기가 어렵다는 문제가 있다. 그러나 공기 공동의 특성을 파악하고 선저형상, 공기공급량 등의 영향 인자들을 규명하여 활용한다면 이러한 문제점들을 충분히 극복하고 선박의 저항 감소에 효율적으로 활용될 수 있을 것으로 보인다.

공기유힐법과 관련하여 Choi, et al. (2005)는 Wigly 및 쌍 동선 선형의 선저에 공기를 주입하여 마찰저항을 저감하기 위한 수치적인 연구를 수행하였고, Go and Kim (1999), Jang and Kim (1999), Oh (2006, 2010) 등은 선저 개량을 위한 연구를 일련의 모형시험을 통해 수행 한 바 있다. 또한 최근 Seo (2007)와 Kim (2010)등이 수치적인 방법을 통해 공기공동 특성에 영향을 미치는 주요 인자에 관한 연구를 수행한 바 있다.

본 연구에서는 공기공동을 이용하여 선박의 저항을 감소시키기 위한 기초연구로서 단이 있는 평판에 공기 유힐법을 적용할 때 나타나는 마찰저항 저감효과와 공기공동의 특성에 영향을 미치는 주요변수들의 역할을 모형시험과 수치계산으로 조사하였다.

2. 모형시험

2.1 대상 모형

대상 모형은 후면 단(backward step)이 있는 평판이며, 평판에 공기유힐법을 적용하기 위하여 공기공급량과 단의 높이 등에 따라 생성되는 공기 공동의 형상 및 길이 그리고 마찰저항 저감을 등을 알아보기 위하여 모형시험을 수행하였다. 실험 모형의 제원은 쌍 동선형에 적용이 가능하도록 1045mm(L) × 130mm(B) 로 결정하였다. 단의 높이는 공기공동의 형상에 관련된 주요 인자로 판단하여 단의 높이를 조절할 수 있도록 하였으며(Fig. 1), 유속과 공기 공급유량을 변화시켜 가면서 공기공동의 특성을 조사하였다.

실험모형은 공기 공동의 생성에 대한 관측이 용이하도록 아크릴 재질로 제작하였으며 크게 ①, ②, ③ 세부분으로 구성되어 있다. ② 부분이 실제로 공기공동을 형성하기 위한 평판부분이며 ①부분은 완전히 발달된 점성유동이 ②부분에 유입될 수 있도록 ③ 부분의 상류에 추가로 설치된 평판부분, ③부분은 자유수면의 간섭을 배제함으로써 공기공동과 관련된 주요변수들의 영향을 정확하게 확인하기 위하여 자유수면 막음 판을 평판의 양쪽 옆에 설치하였다.

Fig. 1 Schematic diagram of the experimental model

2.2 공기 공급 장치

본 실험을 위해서 단 후방으로 공기를 공급하는 장치는 아래 Fig. 2와 같이 구성하였다. 먼저 공기 압축기에서 압축된 공기의 수분을 제거하기 위하여 공기 정화기(Air filter)를 통과하게 된다. 공급되는 공기의 유량은 압력제어기와 컴퓨터와 연결된 유량 조절 장치에서 제어 할 수 있게 하였다. 필요한 양만큼을 공급된 압축 공기는 모형내부에 장착된 압력 챔버를 경유하도록 함으로써 선저 노출의 전체 구간에서 일정한 압력으로 분사 될 수 있도록 하였다.

즉, Fig. 3과 같이 설계 제작된 공기 분사노즐 상부의 압력실을 통과하도록 함으로써 공급된 압축공기가 평판의 전폭에 걸쳐있는 130mm × 2mm 크기의 직사각형 단면 노즐에서 균일하게 분사되도록 하였다. 분사 방향은 그림에서 보는 바와 같이 단과 평판이 만나는 곳에서 평판에 수직인 방향으로 주입되도록 설치하였다.

Fig. 2 Air injection system

Fig. 3 Air injection devices

실험결과를 정리함에 있어서 공급되는 공기의 유량은 아래식 (1)에 정의된 바와 같이 유속 및 단의 폭과 높이로 무차원화한 체적 유량 계수를 사용하였다.

$$C_{QV} = \frac{Q_{air}}{V_{\infty} \cdot B \cdot h} \quad (1)$$

여기에서 Q_{air} 는 공기 공급 유량이고, V_{∞} 는 유입 속도이며 B 는 단의 폭, h 는 단의 높이를 나타낸다.

또한 유속은 아래 식 (2)와 같이 무차원화한 Rn_h 로 정의하였다.

$$Rn_h = \frac{\rho \cdot V_{\infty} \cdot h}{\mu} \quad (2)$$

여기에서 μ 는 점성계수이다.

3. 수치 해석

3.1 수치계산

지배방정식은 연속방정식과 운동량 방정식으로 유한체적법 (Finite Volume Method)으로 차분화하였다. 지배방정식을 이산화 과정을 거쳐 대수방정식으로 변환하였으며 그 과정에서 확산 항에는 중심 차분법, 시간에 대한 미분항에는 1차 음해법을 사용하였다. 압력방정식으로는 Rhin/Chow방법을 수정한 FLUENT의 표준 방법을 사용하였으며(FLUENT, 2008), 속도-압력의 연성은 SIMPLE 법을 사용하였고, 자유수면의 형상은 VOF방법을 사용하여 결정하였다. 또한 완화계수 값으로 압력에 대해서는 0.3, 운동량에 대해서는 0.5, 난류에 대해서는 0.5를 주었다.

단의 높이 h 는 주요한 설계인자이므로 실험에서는 높이를 다양하게 바꾸어 가면서 그 영향을 파악하고자 하였으나 수치해석에서는 실험결과 중에서 높이가 14.5mm와 19.0mm인 경우만을 택하여 비교하였다. 또한 실험에서는 단 후방으로 공기를 공급하기 위하여 직경이 2mm인 공기 공급구들을 10mm 간격으로 설치하였는데, 수치 해석에서도 이를 동일하게 반영하였다.

3차원 평판의 경우 Fig. 4와 같이 Gridgen Ver 15를 이용하여 약 560,000개 정도로 구성하였다. 특히 공기 공동의 형상 및 재부착 위치를 정확하게 예측하기 위하여 단의 바닥면에서 $0.5 \leq y^+ \leq 40$ 되도록 하였으며, 단의 높이 방향으로는 15~20개의 격자를 주었다.

경계조건으로는 유입 면에서 유속과 평판 길이에 대한 레이놀즈수 Re_x 가 10^7 일 때의 경계층 두께를 고려하여, 1/7승 역법칙을 적용한 유속분포를 사용하였다. 또한 밀도 차이에 따른 부력의 영향을 고려하기 위하여 정수 압력을 포함시켰으며 이를 유입, 유출 면에도 동일하게 적용하였다. 단의 벽면에서는 No-Slip 조건을 적용하였으며, 난류 모델은 2차원 후면 단에 대한 해석 결과를 반영하여 Realizable $k-\epsilon$ 모델을, 그리고 벽 근처에서는 Enhanced Wall Function을 사용하였다.

Fig. 4 The grid system for analysis of the 3D flat plate

3.2 수치계산 유효성 검토

후면 단 후방의 공동에 대한 유동 특성을 파악하고 미찰저항과 관련된 거의 모든 유동 특성들이 난류영역에서 발생하기 때문에 공기공동에 대한 현상들을 잘 예측할 수 있는 난류모형을 선정하기 위하여 Driver and Seegmiller(1985)의 실험과 동일한 조건에서 2차원 후면 단 주위의 난류유동을 해석하고, 그 결과를 실험값과 비교하여 본 연구에 적합한 난류모형을 선정하였다. 비교대상 난류모형으로는 여러 개의 방정식을 풀어야하는 레이놀즈 응력모형 등을 제외하고 보편적으로 가장 많이 사용하는 Standard $k-\epsilon$ 모델과 Realizable $k-\epsilon$ 모델을 채택하였다.

Fig. 5는 수치해석에 사용된 후면 단의 형상을 보여주고 있다. 계산에 사용된 레이놀즈수 Rn_h 는 유입 유동의 유속(U_{ref}) 44.2m/s, 단의 높이 0.0127m를 기준으로 약 50,000이며, 이 때 유입되는 유동의 경계층 두께 δ 는 0.019m로 설정하였다.

또한 실제 실험에서는 상부 벽의 경사각 α 의 변화에 따른 영향을 검토하고 있지만 본 연구에서는 단순히 공기 유힐법의 효과를 확인하기 위한 수치해석법의 타당성을 검증하고 적합한 난류 모형을 선정하기 위한 것이므로 경사각 0° 에 대한 수치해석만을 수행하여 실험결과와 비교하였다. 경계조건으로 유입 면에서는 유속분포를 1/7승 법칙을 적용하여 정의하였으며, 유출 면에서는 정압력 p 가 일정하다는 조건을, 벽면에서는 $u = v = 0$ 인 No-Slip 조건을 적용하였다.

Fig. 5 Experimental geometry and inlet conditions of rearward-facing step-flow (Driver and Seegmiller, 1985)

본 연구는 선저에 효율적으로 공기공동을 형성하여 얻어지는 공기유힐 효과를 활용하기 위한 연구이므로 공기공동의 형상이나 특성을 확인하기 위한 수치해석법을 선정하는 기준은 경계층 유동 특성은 물론 공기공동이 형성되는 후면 단 후류에서의 재순환 유동 특성을 잘 예측할 수 있는지가 가장 중요하다. Table 1에서는 재 부착 지점을 단의 높이로 무차원화 한 값을 정량적으로 비교하고 있는데, Realizable $k-\epsilon$ 모형을 사용한 경우에는 실험과 잘 일치하는 결과를 나타내는 반면, Standard $k-\epsilon$ 모형을 사용한 경우에는 재 부착 위치가 실험결과 보다 약 10%정도 짧게 예측되고 있다.

Table 1 Comparison of reattachment length on the various turbulence model

	X_R/H
Experiment	6.3
Standard $k-\epsilon$ model	5.7
Realizable $k-\epsilon$ model	6.4

Fig. 6은 후면 단 바닥면에서의 난류모형의 차이에 따른 표면 마찰계수 및 압력계수의 차이를 실험값과 비교하고 있다(Driver and Seegmiller, 1985; Kim 1989). 표면 마찰계수의 경우 재순환 영역 내에서 유입 유동과 반대방향으로 마찰력이 작용하게 되어 음의 값을 가지며 이후 유동이 재 부착되면 그 위치를 기점으로 마찰력은 다시 유동방향으로 작용하게 되어 양의 값을 갖는다. 압력계수는 단의 모서리에서 박리된 유입유동이 재 부착되는 위치 부근에서 가장 큰 값을 갖게 되는데, 아래 그림에서 볼 수 있듯이 이러한 관점에서 Realizable $k-\epsilon$ 모형이 Standard $k-\epsilon$ 모형 보다 실험값과 잘 일치하는 경향을 보여주고 있다. 이와 같은 2차원 후면 단 유동해석 결과에 따라 본 연구에서 수행한 모든 수치해석에서는 Realizable $k-\epsilon$ 모형을 사용하였다.

(a) frictional coefficient(C_f) on the flat plate

(b) Pressure coefficient(C_p) on the flat plate

Fig. 6 Comparison of surface friction and pressure coefficients computed by Standard and Realizable $k-\epsilon$ models

4. 결 과

평판에 부착된 공기공동의 특성에 대한 모형시험은 인하대학교 회류수조에서 수행하였다. 실험조건들은 실제 공기유힐법을 적용할 쌍동선의 크기와 설계속도를 기준으로 선정하였다. 공기 주입방향, 평판의 세장비, 단의 높이, 공급되는 공기의 유량이나 유속에 따라 공기공동의 형상과 마찰저항 저감효과가 어떻게 달라지는지를 모형시험과 수치계산을 통하여 조사하였다. 공기공동의 형상 및 길이(L_c)는 Fig. 7과 같이 평판의 중심선 상에서 계속하였다.

Fig. 7 Definition of length of Air Cavity

4.1 공기 주입방향

단이 있는 평판에 공기를 주입하면 이 때 단의 후방에 형성되는 공기공동의 형상과 길이가 여러 주요인자들의 영향으로 어떻게 달라지는지를 확인하기 위하여 $Rn_h=1.63 \times 10^4$ ($V=1.64\text{m/s}$) 일 때 단의 높이는 10mm 로 고정된 후, Table 2와 같이 공기주입 방향이 공동길이에 어떤 영향을 미치는지를 여러 크기의 공기공급 유량조건에서 수치적인 방법을 통해 조사하였다.

Table 2 Conditions for the simulation on the influence of the injected air direction in the air cavity length

Direction of the air injection	Rn_h	U_{ref}	h	C_{QV}
<div>vertical direction</div>	1.63×10^4	1.64 m/s	10 mm	0.0008
				0.0039
				0.0133
				0.0203
				0.0266
<div>horizontal direction</div>				0.0008
				0.0039
				0.0133
				0.0203
				0.0266

Fig. 8은 공기 주입방향에 따른 공기공동의 길이와 형상의 변화를 비교하여 보여주고 있다. 검토한 모든 공기유량에서 평판에 접선방향으로 공기를 주입하는 경우가 수직 방향으로 공기를 주입한 경우보다 생성된 공기공동의 길이가 더 짧아지는 경향을 보여주고 있다. 물론 공기유량이 증가하면 접선방향으로 공기를 주입하는 경우에도 공기공동의 길이는 수직방향으로 주입한 경우와 비슷해지지만, 임계유량은 크게 증가하므로 평판에 수직방향으로 공기를 주입하는 경우가 유리한 것으로 보인다.

Fig. 8 Change of air cavity length due to the direction of the injected air ($Rn_h=1.64 \times 10^4$, $h=10\text{mm}$)

공기를 수직방향으로 주입하는 경우에는 후면 단 유동특성에서 볼 수 있듯이 단 후방에 형성된 하나의 큰 재순환 유동 영역에 공기공동이 형성되지만 접선방향으로 주입할 경우에는 유입된 공기가 재순환 유동을 교란시켜 재순환 영역이 두 개로 나뉘지면서 공기공동이 평판의 바닥에 부착되지 못하고 떨어져 나가게 되는 현상을 확인할 수 있었다. 따라서 공기주입 방향은 평판에 대해 수직하게 결정하였다.

4.2 단 높이

일반적으로 공기공동을 생성하기 위한 선저 단의 형상이나 크기는 공기공동이 형성되는 재순환 유동이 차지하는 영역을 크게 키울 수 있도록 결정하는 것이 바람직하지만 과도한 단 높이는 오히려 형상저항이나 압력저항의 증가를 가져오기 때문에 단의 높이를 최소화하면서도 안정적으로 큰 공기공동이 생성되도록 하는 것이 최상이 방안일 것이다. 따라서 단의 높이에 따른 공기공동의 특성변화를 확인하기 위하여 여러 유입속도(V)와 공기공급 유량(Q_{air})에서 단 높이(h)를 바꾸어 가며 모형시험을 수행하였다.

Fig. 9 Variation of the air cavity length due to the step height(h) and incoming velocity(V)

Fig. 9는 단 높이 10mm 와 20mm 일 때의 공기공동의 길이(L_c)를 비교하고 있다. 앞에서 이미 보인 바와 같이 공기공동의 길이가 수렴하는 한계유량이 나타나는 것을 다시 확인 할 수 있으며 단 높이나 유입속도는 이러한 한계유량의 크기에 큰 영향을 미치지 못함을 볼 수 있다. 또한 공동의 길이는 단의 높이 보다는 유입속도와 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다. 즉, 유입속도가 증가할수록 단의 높이에 상관없이 공기공동의 길이가 늘어나는 현상을 볼 수 있는데 그 이유는 공기의 분사가 없을 경우에는 후면 단의 높이에 따라 단 후방에 나타나는 박리유동의 재부착 위치가 달라지겠지만, 공기를 공급하여 공기공동이 생성된 경우에는 자유수면이 있는 다상유동의 특성이 함께 나타나기 때문에 공기공동의 형상과 길이는 자유수면의 안정성, 즉, 평판으로 유입되는 유동의 속도와 압력분포의 영향을 받는 것으로 추정된다.

유입속도를 증가시키면 상대적으로 적은 양의 공기공급으로도 공기공동의 길이가 길어지는 특성을 보이며 임계 공기공동 길이에도 일찍 도달할 수 있음을 확인할 수 있다. 따라서 선속이 높은 고속선 분야에서도 선저에 공기공동을 형성할 수 있는 공간만 확보된다면 공기유회법의 적용 가능성이 충분할 것으로 기대된다. 또한 이상의 결과를 종합해 보면 단 높이보다는 유입속도와 공기공급 유량이 공동길이의 변화에 미치는 영향이 더 큰 것으로 판단되므로 다음 절들에서는 유입속도와 공기공급유량의 영향을 더욱 상세히 살펴보았다.

4.3 공기공급 유량

Fig. 10은 $Rn_h=1.28 \times 10^4$ 에서 공기 공급유량에 따른 공기공동 형상의 변화를 관측한 실험 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 공기 공급유량을 증가시켜도 평판의 중심선에서의 공동 길이에 큰 변화가 생기지 않고 추가로 공급된 공기는 평판의 양단에 설치된 막음판(side keel)을 따라 빠져나감에 따라 양단에서의 공기공동의 폭이 두꺼워 진다. 이에 따라 아직 임계유량에 도달하지 않은 $C_{QV} = 0.005$ 인 경우에는 공기공동의 경계선이 'U'자 형태를 보이고 있으나 공기공급 유량이 임계유량보다 더 늘어나면 'V'자 형태로 바뀌는 것을 볼 수 있다. 이러한 경향은 공기유회법을 실선에 적용한 경우에도 나타난다고 알려져 있다 (Kim, 2010).

Fig. 10 Comparison of the air cavity shape for various C_{QV} ($Rn_h=1.28 \times 10^4$, $h=10\text{mm}$)

본 연구는 세장비가 큰 쌍둥선에 공기유회법을 적용하기 위하여 수행한 기초연구이므로 Table 3에는 쌍둥선의 설계속도인

$Rn_h=1.63 \times 10^4$ 에서 $C_{QV}=0.01$ 로 공기를 공급하였을 때의 저항 감소율이 어느 정도 되는지 확인하기 위하여 수행한 수치계산 결과를 보이고 있다. 유입 유동에 대하여 평판이 수평으로 놓여 있기 때문에 단의 설치로 인한 압력저항의 변화는 미미하며, 공기를 공급하면 평판의 마찰저항이 약 19.8%정도 감소하는 것으로 확인되었다.

Table 3 Reduction in the resistance of the flat plate with and with out air injection($Rn_h=1.63 \times 10^4$, $C_{QV}=0.01$)

	$C_T (\times 10^{-3})$	reduction rate (%)
w/o air	1.92	-
w/ air	1.54	19.8%

4.4 유입 속도

단 높이와 공기공급 유량이 일정할 때 유입속도 즉, 레이놀즈 수를 변화시킬 경우에 공기공동의 길이가 어떻게 변화하는지를 확인하기 위하여 모형시험과 수치계산을 수행하였다. 공기 공급 유량은 모든 유속조건에서 공기공급량을 늘려도 공동길이가 더 이상 증가하지 않는 임계유량보다 큰 $Q_{air}=1.1 \text{ L/min}$ 만큼의 유량을 공급하고 아래 Table 4과 같이 유입속도를 바꾸어 가면서 공동길이의 변화를 평판의 중심선을 따라 계속하였다.

Table 4 Test conditions (influence of incoming low velocity)

h	Rn_h	V	C_{QV}
10mm	7.96×10^3	0.8 m/s	0.0176
	1.05×10^4	1.05 m/s	0.0134
	1.28×10^4	1.29 m/s	0.0109
	1.63×10^4	1.64 m/s	0.0086
	1.88×10^4	1.89 m/s	0.0075

Fig. 11과 Fig. 12에는 모형시험과 수치계산을 통한 유입속도 증가에 따른 공기공동의 길이와 형상의 변화를 보여주고 있다.

Fig. 11 Increase in air cavity length with Rn_h ($h=10\text{mm}$)

Fig. 12 Air cavity shapes for various Rn_h ($Q_{air}=1.1\text{L/min}$, $h=10\text{mm}$)

위 그림들에서 확인할 수 있듯이 동일한 공기유량을 공급하더라도 유입류의 속도가 빨라지면 공기공동의 길이가 길어지는 특성을 보이고 있다. 유속의 증가에 따라 공기공동의 길이가 증가하는 정도는 Fig. 11에 보인 바와 같이 근사적으로 레이놀즈수의 제곱(2.2승)에 비례하고 있다. 따라서 단의 높이를 일정하게 유지한 것을 감안한다면 결국 공기공동의 길이는 유속의 제곱, 즉, 동압에 비례함을 알 수 있다.

Fig. 12에 보인 공기공동의 형상은 수치계산 결과로서 유속 변화에 따른 공기공동의 형상의 변화를 보여주고 있다. 앞의 실험 결과와 마찬가지로 유속이 빨라지면서 길이가 증가하는 결과를 정성적으로 잘 보여주고 있으며 유속 증가에 따라 공기공동의 형상이 'U'자형에서 'V'자 형으로 변화하는 것을 확인할 수 있다.

4.5 세장비

평판의 세장비에 따라 공기공동의 형상과 길이가 어떻게 달라지는지를 확인할 필요가 있으며, 또한 이러한 특성들을 잘 이용한다면 더 효율적인 선저 단의 설계가 가능하기 때문에 본 절에서는 평판모형의 폭(B)인 130mm외에도 Table 5와 같이 100mm, 170mm, 216mm 폭을 추가하여 세장비가 공기공동의 특성에 미치는 영향을 수치계산을 통하여 조사하였다.

Table 5 Computational conditions (influence of B/L)

Rn_h	U_{ref}	h	C_{QV}	B/L
1.63×10^4	1.64 (m/s)	10 (mm)	0.0266	10.5
				8.0
				6.1
				5.1

Fig. 13은 세장비의 변화에 따른 공기공동의 길이의 변화에 대한 수치계산 결과를 보여주고 있다. 공기공동의 길이는 세장비가 증가 할수록 증가하는 경향을 확인할 수 있으며 후면 단에서의 공기공동의 길이는 단 높이나 공급유량, 유입속도 등의 영향을 어느 정도 받겠지만 근사적으로 세장비의 제곱근에 비례하여 늘어나는 것을 알 수 있다.

Fig. 13 Air cavity length for various aspect ratios ($Rn_h=1.64 \times 10^4$, $C_{QV}=0.0266$, $h=10\text{mm}$)

또한 Fig. 14에는 폭이 늘어날수록 평판의 중심선 부근에서 공기공동의 길이가 거의 동일한 구간이 늘어나는 경향을 보이고 있는데 그 원인은 공기공급 유량이 일정하여도 평판의 폭이 좁을수록 평판 양측면에 설치된 막음판을 따라 빠져나가는 유동의 영향이 그 사이, 즉, 중심선 부근의 유동에 미치는 영향이 커지게 되기 때문으로 보인다. 이에 따라 평판의 폭이 좁을수록 공기공동의 형상이 'V'자형에 가깝게 되고 평판 폭이 넓어지면 'U'자형이 되는 것으로 판단된다.

Fig. 14 Air cavity shapes for various aspect ratios ($Rn_h=1.64 \times 10^4$, $C_{QV}=0.0266$, $h=10\text{mm}$)

5. 결 론

모형시험과 수치계산으로부터 자유수면의 영향을 배제하였을 때 후면 단을 설치한 평판에 부착된 공기공동의 특성에 대하여 다음과 같은 결과들을 얻었다.

- 1) 일정한 유속에서 공기공급 유량이 어느 한도 이상 증가할 경우 공기량이 더 증가하더라도 공기공동의 길이가 더 이상 증가하지 않고 수렴하는 임계치가 있음을 확인하였다.
- 2) 공기를 평판에 수직인 방향으로 분사하는 것이 접선방향으로 분사하는 것보다 효과적이다. 이 때 상대적으로 적은 공급유량으로도 공기공동의 임계 길이를 얻을 수 있다.
- 3) 공기공동의 형상은 유입속도가 느리거나 공기공급 유량이 적은 경우에는 'U'자 형을 보이는 반면, 유속이 빨라지거나 유량이 증가할수록 'V'자 형상에 가까워진다.
- 4) 공기의 공급량을 일정하게 유지하여도 공기공동의 길이는 유입 속도에 따라 증가한다. 이 때 단 높이 h 로 무차원화 된 공기공동의 길이 L_d/h 는 근사적으로 레이놀즈수(Re_h)의 약 2.2승, 즉, 대략 제곱에 비례하는 것으로 나타났다.
- 5) 세장비가 증가할수록 공기공동의 길이도 증가하며 이 때, 공기공동의 길이 L_d/h 는 근사적으로 세장비 B/L 의 제곱근에 비례한다.

후 기

이 연구는 국가지정연구실 사업 (No. ROA-2007-000-10028-0) 과 2008년 정부(교육과학기술부)의 지원(NRF-2008-005-J01603)으로 한국연구재단의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- Bushnell, D.M. & Hefner, J.N., 1990. Viscous Drag Reduction in Boundary Layer. *Progress in Astronautics and Aeronautics*, 123, The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc., Washington, DC, USA.
- Choi, J.K. Hsiao, C.-T. & Chahine, G.L., 2005. Design Trade-off Analysis for High Performance Ship Hull with Air Plenums. *2nd International Symposium on Seawater Drag Reduction*, Busan, Korea, 23-36 May 2005, pp. 1~16.
- Driver, D.M. & seegmiller, H.L., 1985. Features of a Reattaching Turbulent Shear Layer in Divergent Channel Flow. *AIAA Journal*, 23, pp.163-171.
- FLUENT 6.3 user's guide. 2008, *Fluent Inc.*
- Go, S.C. & Kim, H.C., 1999. On the Suitable Shape of Bottom for the Application of Air Cavity on Hull Bottom to the Practical Hull Form. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 36(1), pp.1~7.
- Jang, J.H. & Kim, H., 1999. On the Reduction of a Ship Resistance by Attaching an Air Cavity to Its Flat Bottom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 3(2), pp.1~8.
- Jang, J.H., 2002. *Reduction in ship resistance by using air lubrication*. Doctor thesis, Seoul National University, Seoul, Korea.
- Kim, J.H., 2010. *A study of an Air Lubrication Method for Improvement in the Resistance Performance of a ship*, Doctoral dissertation. Inha University, Incheon, Korea.
- Kim, S.-W., 1989. Calculation of reattaching shear layers in divergent channel with a multiple time-scale turbulence model. *NASA TM-102293*, ICOMP-89-18.
- Kim, D.-S. Kim, H.T. & Kim, W.-J., 2003a. Experimental Study of Friction Drag Reduction in Turbulent Flow with Microbubble Injection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(3), pp.1~8.
- Kim, H.T. Kim, D.-S. & Kim, W.-J., 2003b. Experimental Study on Frictional Drag Reduction of Turbulent Flow by Polymer Solution Injection. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 40(3), pp.9~15.
- Oh, S.H., 2006. *A Study for the Resistance Reduction of a Catamaran by Air Lubrication*, Master thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Oh, J.Y., 2010. *A Study an Air Lubrication Method for the Resistance Reduction of a Tanker Hull Form*, Master thesis, Inha University, Incheon, Korea.
- Seo, D.W., 2007. *A Numerical Study on Air Cavity and Cavitation on a Ship hull and Appendage*. Master thesis, Inha University, Incheon, Korea.

김 종 현

오 재 용

서 대 원

이 승 희