

타 간극 캐비테이션과 저감장치에 관한 2 차원 모형 실험

이창민*, 오정근†**, 이신형***

서울대학교 조선해양공학과*
인하대학교 정석물류통상연구원**
서울대학교 조선해양공학과 및 해양시스템공학 연구소***

Two-dimensional Model Tests for Rudder Gap Cavitation and Suppression Devices

Changmin Lee*, Jungkeun Oh†** and Shin Hyung Rhee***

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering, Seoul National University*
Jungseok Research Institute of International Logistics and Trade, Inha University**
Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering,
Research Institute of Marine Systems Engineering, Seoul National University***

Abstract

The increasing size and speed of cargo ships result in high speed flow in propeller slipstream, and thereby cavitation is frequently observed on and around a rudder system. Rudder gap cavitation is the most difficult one to control and suppress among various types of the cavitation on a rudder system. In the present study, experiments of the incipient cavitation and pressure measurement were carried out for typical cargo ship rudder sections with and without the suppression devices, which were suggested by the authors. Fundamental understanding of the rudder gap cavitation inception was obtained along with its relevance to the surface pressure distribution. It is confirmed that the gap flow blocking devices effectively suppress the rudder gap cavitation and, at the same time, augment lift.

※Keywords: Rudder gap cavitation(타 간극 캐비테이션), Suppression devices(캐비테이션 저감 장치), Semi-spade rudder(혼-타), Cavitation Tunnel Experiment(캐비테이션 터널 실험)

1. 서론

주지하는 바와 같이, 선박에서 타는 매우 중요한 역할을 한다. 전통적인 선박은 타에 의해 발생하는 힘과 모멘트에 의해서 조종된다. 조선공학에 있어서 적절한 타의 설계는 중요한 분야이며 다양한 종류의 타들이 고안되어 왔고 다양한 종류의 선박에 적용되고 있다. 그 중에, 규모가 큰 상업적 선박에 있어서 혼-타 타입의 타가 근래 많이 쓰이고 있고 지배적인 선택을 받고 있다. 전가동타와 비교하여 혼-타는 작은 토크와 제작 가격의 저렴함 등 많은 장점을 가지고 있다. 최근 몇 년간, 화물선의 크기와 스피드가 증가함에 따라 프로펠러 하중이 증가하게 되고 결국 높은 속도의 프로펠러 후류를 발생시키고 타가 위치한 곳의 압력이 낮아진다. 이런 저압 지역에 위치한 타 주변에 공동현상이 빈번하게 일어난다. 공동현상으로 인한 타의 손상은 대부분 leading edge 와 그리고 혼/핀틀과 가동하는 날개 사이의 틈새 부분에서 발견될 것이다. 이로 인한 수리 비용뿐만 아니라 선박운항 정지 시간은 선주에게 막대한 피해를 입히게 된다. Fig. 1 은 혼-타의 캐비테이션으로 인한 침식현상을 보여준다.

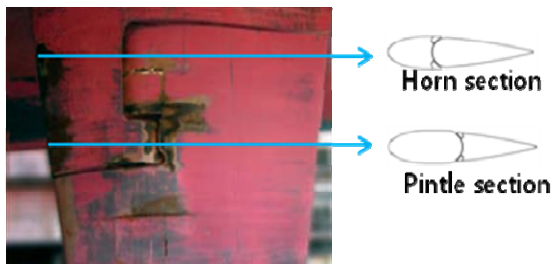


Fig. 1 Cavitation erosion of a semi-spade rudder

타 공동현상의 물리적 현상에 대한 몇몇의 연구가 진행되어 왔다. 선구적인 연구는 Shen et al. (1997a)에 보고되었는데 선체와 프로펠러의 항적에 있어서 타 공동현상의 실험에 관한 연구이다. Shen et al.(1997b)은 후에 leading edge 에 발생

하는 공동현상을 피하기 위해 비틀어진(twisted) 타를 제안한다. Paik et al.(2006)은 혼타의 간극부분을 1/10 척도로 제작하여 캐비테이션 관측 실험 및 캐비테이션 터널 안에서의 압력 측정을 하였다. Kim et al.(2006)은 간극 캐비테이션 억제를 위한 실험적 연구를 통해 새로운 혼-타 단면 형상을 개발하였다. Kinnas et al.(2007)는 오일러 방정식의 해와 보오텍스 격자 방법 코드(vortex lattice method code)의 쌍방향적인 접근을 이용하였다. 타 표면에 발생하는 leading edge 공동현상의 위치와 범위를 성공적으로 예견하였고, 초생 공동현상의 조건도 예견하였다. 그러나 비점성 유동 가정의 제한 때문에 생기는 틈새 공동현상은 설명하지 못했다. Rhee and Kim(2008)은 혼-타의 틈새 공동현상에 초점을 맞춰고 정적인 혼/핀틀과 가동하는 날개 사이의 유동을 막는 새로운 장치를 제안했다. Paik et al.(2008)은 PIV 가시화와 캐비테이션 터널 안에서의 압력 측정을 하였다. 타 틈새 주변 유동의 특징이 자세하게 보고되었고, 틈새간격 축소의 효과도 연구되었다.

본 연구에서는 두 가지의 모형시험이 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 하나는 공동현상의 가시화이고 다른 하나는 표면 압력의 측정이다. 공동현상의 가시화를 위해 캐비테이션 터널 안의 압력을 인위적으로 캐비테이션 수만큼 감소시켰다. 그런 다음 공동현상은 비디오 카메라에 기록되고 분석되었다. 모델 표면에 압력 홀을 만들었고 압력 신호는 스캐니밸브(scanivalve)에 연결된 압력계를 통해 얻어졌다.

2. 타 공동현상과 유동차단장치

앞 장에서 언급한 바와 같이 배의 타는 고속저압의 프로펠러 후류에 위치하게 된다. 유체의 압력이 증기압에 도달하면 물은 기화되기 시작하고 증기 공동이 발생한다. 그리고 나서 그 공동이 타를 따라 흐르다가 보다 높은 압력지점에서 붕괴된다. 공동이 터질 때 파열음이 발생하고 예리한 제트와 같은 유동이 발생한다. 이 유동은 타의 표면을 움푹하게 파고 결국에는 표면을 부식시킨다 (Brennen 1995). 혼-타에서 혼/핀틀과 가동부

(movable part)간의 틈새의 존재는 아주 빠른 틈새유동을 초래하고 이 유동은 흡입면의 틈새 출구 쪽에서 공동을 발생시킨다. Fig. 2 는 혼-타의 혼부 주위로 흐르는 유동을 간략히 나타내고 있다.

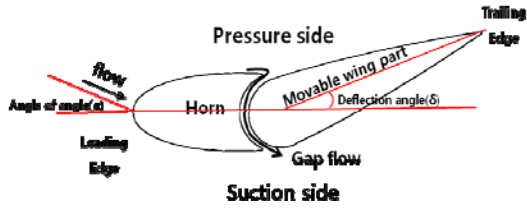


Fig. 2 Gap flow in the semi-spade rudder system

압력면으로부터 틈새로 유입되는 유동은 틈새를 통과하면서 더욱더 가속화되어 결국 흡입면의 출구에서 캐비테이션을 발생시킨다. 이러한 틈새유동을 차단하기 위해 Rhee and Kim(2008)은 갭 캐비테이션을 억제하는데 효과적인 것으로 밝혀진 두 종류의 갭 장치를 제안했다. 틈새유동을 차단함으로써, (1) 틈새 출구 근처에서 흡입압력의 최저점을 감소시켜 결국 캐비테이션 현상을 억제하게 된다. 그리고 (2) 정체된 혼/핀틀 면의 압력차를 증가시켜 양력의 증가를 가져온다.

본 연구에서는 모델들의 각 부분을 조립하기에 적절한 두께를 가지고 있고 전형적인 타 단면과 유사한 NACA0020 단면을 채택하였다. 2 차원단면의 실험을 위해 두 가지의 모델, 즉 핀틀부와 혼부(Fig. 3)를 제작하였다.

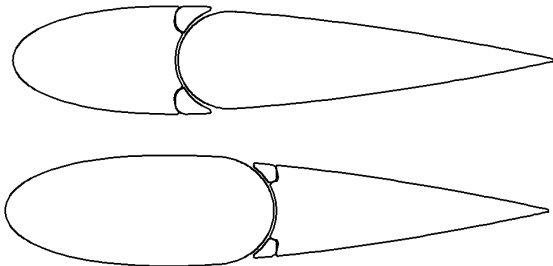


Fig. 3 2D sectional shapes of the model: horn section(upper) and pintle section(lower)

3. 실험 설비 및 방법

혼 단면 모델과 핀틀 단면 모델은 알루미늄 합금으로 만들어졌다. 전체 단면의 코드길이는 0.2m 이고 스패ンは 0.15m 이다. 혼/핀틀과 움직일 수 있는 플랩 사이에는 편향각(deflection angle)이 0도 일 때 1mm 의 간격이 유지된다. 갭 장치가 이 간격에 간극유동을 막기 위하여 삽입된다. 스패ん길이는 2 차원 실험을 위하여 캐비테이션 터널의 계측부의 폭과 동일하게 제작하였다.

Fig. 4 는 각각 캐비테이션을 가시화 하고 표면 압력을 계측하기 위해 사용된, 5도의 편향각을 가지는 핀틀부 모델의 실제 사진이다.



Fig. 4 Pintle section model for cavitation visualization(upper) and surface pressure measurement(lower)

혼부의 모델도 같은 방식으로 가공되었다. 주어진 편향각의 각 모델은 원형의 끝단판에 붙여져서, 끝단판을 간단히 회전시킴으로써 편향각을 조정한다. 혼부와 핀틀부에는 각각 37 개와 39 개의 압력 구멍이 있다. 구멍의 위치는 각 구멍들 사이의 간섭이 발생하지 않도록 주의하여 정하였다. 즉, 스펀의 중앙 주위에는 3mm 의 간격이고, 유동방향에서 약 5 도 정도의 기울기를 가지는 선을 따라 설치하였다. 각 구멍의 직경은 2mm 이다(Fig. 5).

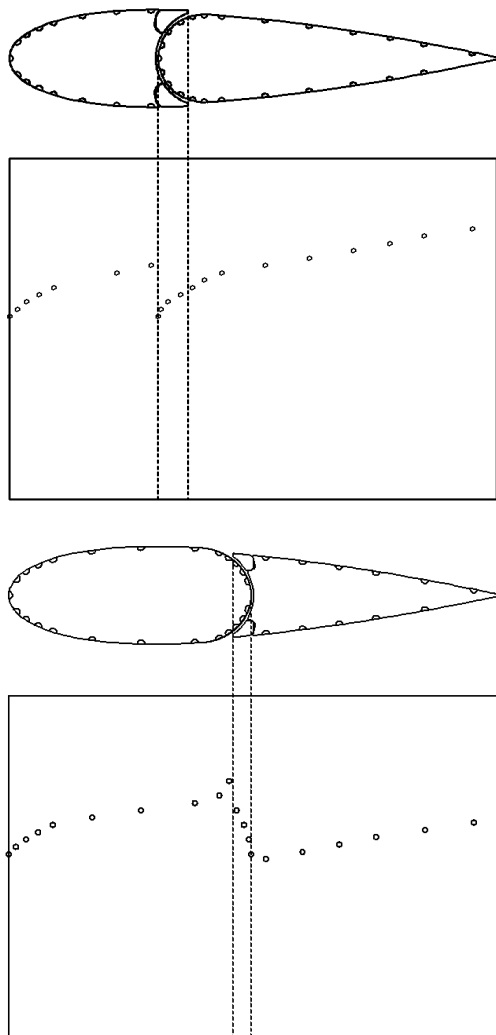


Fig. 5 Pressure measurement holes on the horn(upper) and pintle section(lower) models

모형시험은 길이 1m, 폭 0.15m, 높이 0.5m 의 계측부를 가진 캐비테이션 터널에서 수행되었다. 조절 가능한 압력의 범위는 15kPa 에서 300kPa 이고, 최고 유속은 16m/s 이다. 섭씨온도 22~26 도 사이의 일반적인 수돗물이 시험을 위해 사용되었다. Fig. 6 은 scanivalve 에 압력계가 부착된 캐비테이션 터널 시험의 개략도이다.

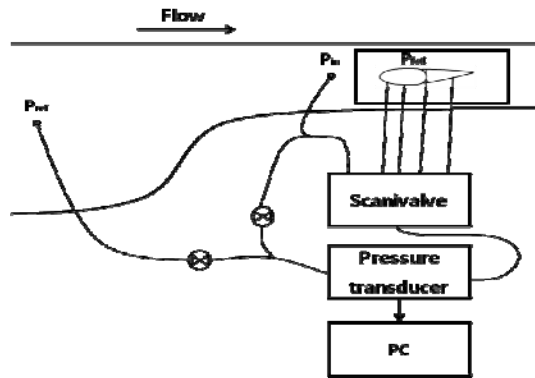


Fig. 6 Schematic diagram of cavitation tunnel tests

압력계측장비는 Validyne 사의 차압계(DP 15-46) 와 증폭기(CD15), Adventech 사의 아날로그 신호를 디지털 신호로 바꾸는 변환기(PCL-818HD)를 사용되었다. 본 연구에서, 캐비테이션 수와 음압력계수는 다음과 같이 정의하였다.

$$\sigma = \frac{P_{in} - P_v - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{in}^2} \quad (1)$$

$$-C_p = \frac{P_{in} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{in}^2} \quad (2)$$

여기서 P_{ref} 와 P_{in} 은 각각 모델의 leading edge 의 2.05m, 0.485m 상류에서 계측한 압력 값이다.

4. 불확실성 해석

계측값에 포함되어 있는 불확실성(uncertainty)과 각각의 측정에 대한 불확실성이 최종결과에 미치는 영향에 관하여 타당한 평가가 가능하도록 하기 위해 불확실성 해석은 필수적이다. 본 논문에서는 ASME(American Society of Mechanical Engineers, 미국기계학회 2005)에서 제시한 불확실성 해석의 일반적인 방법론을 통해 압력 계측 실험에 있어서의 95% 신뢰도를 갖는 불확실성 해석을 수행하였다. 실험 계측값의 불확실성은 표면의 압력 계측값에 대해 수행하였으며, Fig. 7 에서 보는 바와 같이 혼 부의 37 개의 압력구멍 중 대표적인 6 개의 지점을 선정하여 불확실성을 검토하였다.

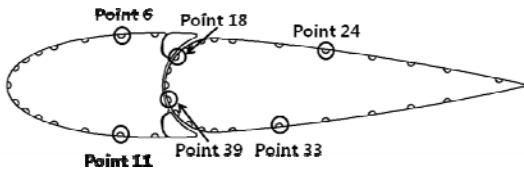


Fig. 7 Pressure hole locations selected for uncertainty assessment

불확실성에 영향을 미치는 여러 가지 항목을 편향 오차(bias error)와 우연오차(Random error)로 나누었으며, 편향오차의 요소로는 차압계, 스트레인 앰프, A-D 컨버터, 유속계, 물의 밀도가 있으며, 우연오차의 요소로는 교정시험 데이터 값, 실제 압력 계측 값이 있다.

최종적인 혼 부 표면의 6 지점에서의 압력 계측값 불확실성은 95%신뢰성을 기반으로 4.88%임을 알 수 있었다. 그리고 계측시스템에 기인하는 편향오차 값이 전체 불확실성 값의 96.5%로 대부분을 차지함을 알 수 있었다.

3. 결과 및 토의

모형시험은 움직일 수 있는 flap 의 세 개의 다른 편향각($\delta = 0^\circ, 3^\circ, 5^\circ$)과 0 도의 받음각(angle of attack)에서 수행되었다. 캠 장치에 의하여 고정부

와 타판사이의 틈새가 열리고 닫힌 두 경우에 대하여 실험을 수행하였다. 보통 순항 속도의 경로 유지를 위한 조종에서 틈새 캐비테이션이 발생하기 때문에 5° 보다 작은 편향각만 고려하였다. 관측부의 유입속도는 7m/s 로 하였으며 이때의 코드 길이를 기준으로 한 레이놀즈 수는 $Re = 1.4 \times 10^6$ 이다. Table 1 은 실험조건을 요약하여 보여준다.

Table 1 Experimental conditions

Inflow speed (V_{in})	7 m/s
Deflection angles (δ)	$0^\circ, 3^\circ$ and 5°

Table 2 와 Table 3 에 혼과 핀틀부에서의 초생 캐비테이션 수(σ)와 위치를 기재하였다. 본 연구에서 초생캐비테이션이라 함은 세밀한 관측, 즉 비디오 모니터 및 육안을 통하여 감압을 아주 천천히 하면서 캐비테이션이 보이기 시작하는 순간을 말한다. 먼저, 모델은 고정된 편향각으로 터널에 고정시킨 후 공동이 관찰되었을 때, 감압량을 기입하고 캐비테이션의 거동을 비디오 카메라로 기록하였다.

Table 2 Incipient cavitation numbers and locations at horn section

Deflection angle	Horn section	
	Open gap	Closed gap
0°	$\sigma = 1.66$	$\sigma = 1.17$
	$x/C = 0.38$	$x/C = 0.33$
3°	$\sigma = 1.48$	$\sigma = 1.40$
	$x/C = 0.38$	$x/C = 0.41$
5°	$\sigma = 1.70$	$\sigma = 1.43$
	$x/C = 0.35$	$x/C = 0.30$

Table 3 Incipient cavitation numbers and locations at pintle section

Deflection angle	Pintle section	
	Open gap	Closed gap
0°	$\sigma = 1.02$	$\sigma = 1.09$
	$x/C = 0.41$	$x/C = 0.41$
3°	$\sigma = 1.74$	$\sigma = 1.40$
	$x/C = 0.46$	$x/C = 0.33$
5°	$\sigma = 1.45$	$\sigma = 1.33$
	$x/C = 0.46$	$x/C = 0.41$

Table 2 와 Table 3 을 보면, 틈새유동을 막음으로써 캐비테이션 초생 발생시의 캐비테이션 수 (σ)가 감소한 것으로 보아 확실히 캐비테이션이 지연됨을 알 수 있다. 더불어 공동이 더 상류쪽으로 옮겨갔음을 알 수 있다. 핀틀부와 비교했을 때 혼부에서 큰 편향각의 경우 캐비테이션의 지연이 더 명확하게 나타났다. 가장 많이 지연된 경우는 편향각 3°이다. 이는 형상의 차이로 인하여 발생한 것으로 보여진다. 혼부에서 가동부 자체는 hydrofoil 과 같은 형상을 하고 있다. 그리고 혼부의 틈새를 흐르는 낮은 압력을 지닌 빠른 유동은 틈새 뒤쪽 흡입면에 캐비테이션을 발생시킨다. 반면에 핀틀부에서는 고정부가 혼부에 비해 크고 전체 타 부분이 하나의 hydrofoil 과 같이 거동한다. 이러한 특성에 의하여, 편향각 0 도일 때 틈새가 있을 경우와 없을 경우 모두 다 거의 동일한 초생 캐비테이션 거동을 보여주었다. 편향각 5 도일 때는 상대적으로 낮은 캐비테이션 수에서 박리 캐비테이션이 가동부의 앞쪽 팁 근처에서 관찰된다. 그리고 결과적으로 초생 캐비테이션이 조금 지연됨을 알 수 있었다.

Fig. 8 과 Fig. 9 는 Table 2 와 Table 3 조건에서의 초생 캐비테이션 형상을 보여준다. 캐비테

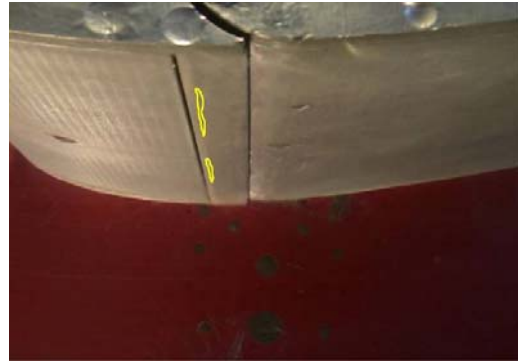
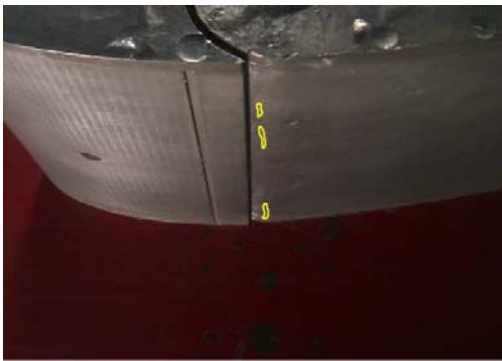
이션을 좀더 잘 보이게 하기 위하여 그림에서 공동을 노란색 선으로 표시하였다. 틈새가 있을 때에는 공동들이 틈새의 뒤쪽에서 발생한 반면, 틈새를 차단했을 때에는 보다 앞쪽 즉 틈새의 앞쪽에서 관찰되었다. 왜냐하면 닫힌 틈새에서 타단면의 중앙부로 유동의 흐름이 없고 보통의 흡입면에서 발생하는 캐비테이션이 날개의 최대 두께 근처나 뒤에서 발생하기 때문이다.

한편, 2 차원 실험이기 때문에 충분히 발달한 캐비테이션이라면 span 방향으로 균일하게 띠형상으로 생성되어야지만, 본 연구는 캐비테이션 초생 발생 관측이었기 때문에 터널 벽면의 wall 영향과 캐비테이션 터널의 상태 그리고 미세한 감압량의 변화에 의하여 초생 캐비테이션이 불안정(unstable)하게 생길 수 밖에 없었다. 따라서 이러한 특성을 갖는 초생 캐비테이션을 정지 영상만으로는 확실하게 보일 수 없었기 때문에 Fig. 8 과 Fig. 9 에 표시한 바와 같이 노란색의 보조선으로 초생 캐비테이션이 발생하는 영역들을 표시하였다. 그러므로 이러한 영역들이 중첩되어 초생캐비테이션이라고 하기에는 좀 큰 영역이라고 보여지고 있으나 실제로는 아주 작은 영역에서 초생 캐비테이션이 불안정하게 발생하고 있었다.

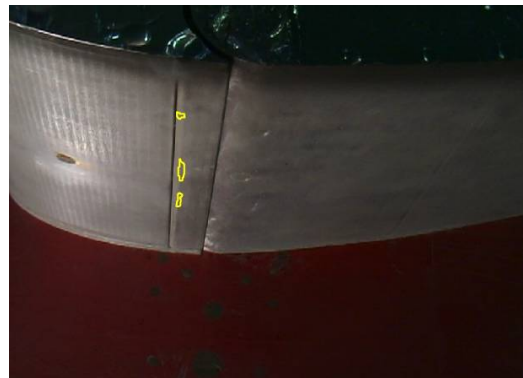
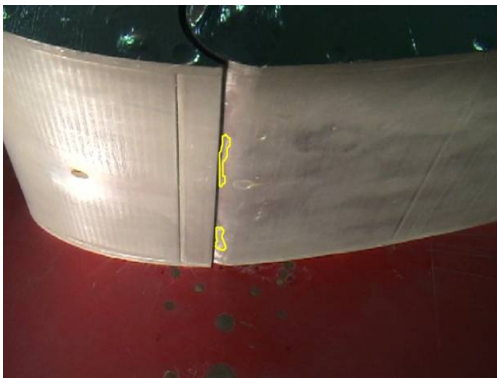
압력 측정은 감압만 하지 않았을 뿐 레이놀즈 수를 포함한 나머지 조건은 캐비테이션 관측 실험과 동일한 조건에서 수행하였다. Fig. 10 과 Fig. 11 은 혼과 핀틀부에서의 표면 압력 계수를 보여준다. 이 결과들로부터 편향각 3°와 5°인 경우에 두 가지 점이 확실하게 관찰되었다. 하나는 닫힌 틈새에서 음압력의 최고점이 틈새 근처에서 완화되었고 결과적으로 캐비테이션이 지연되었다는 점이고, 다른 하나는 닫힌 틈새에서 흡입면과 압력면에서의 압력 차가 더 커서 결과적으로 양력이 증가하였다는 점이다. 고정된 부분의 총 양력면이 큰 부분을 차지했을 때 고정된 부분에서 압력차가 큰, 즉 더 효과적인 양력 증가를 가져왔다. 실험결과를 통하여 틈새유동 차단장치가 캐비테이션의 억제와 양력의 증가와 같이 본래의 의도대로 잘 작동함을 알 수 있다.



(a) 0° deflection

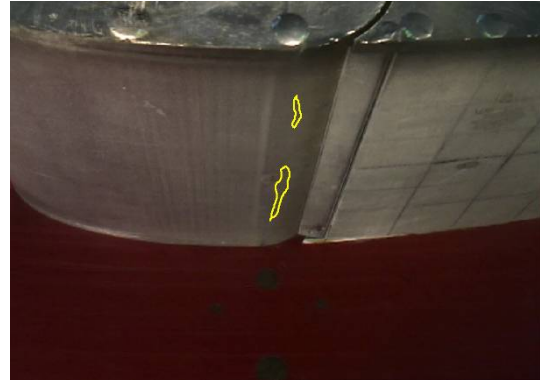
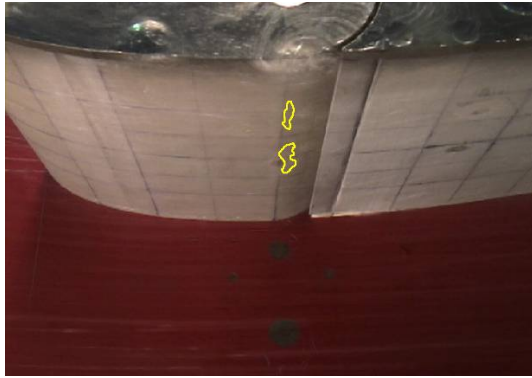


(b) 3° deflection

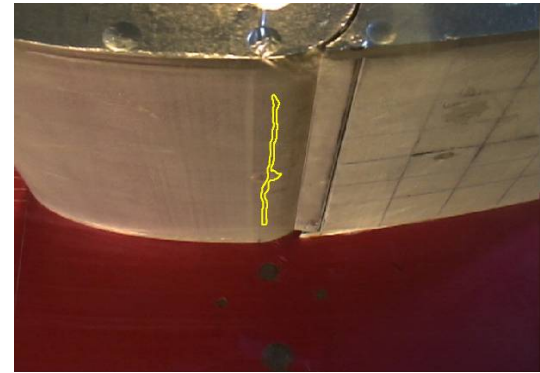
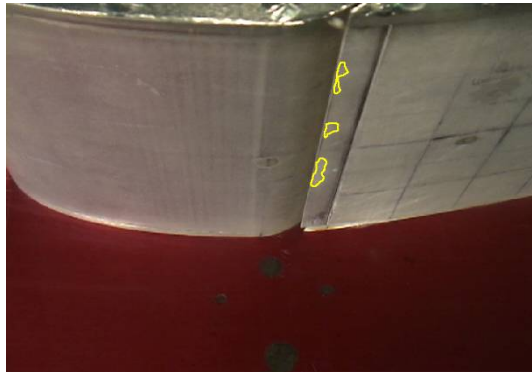


(c) 5° deflection

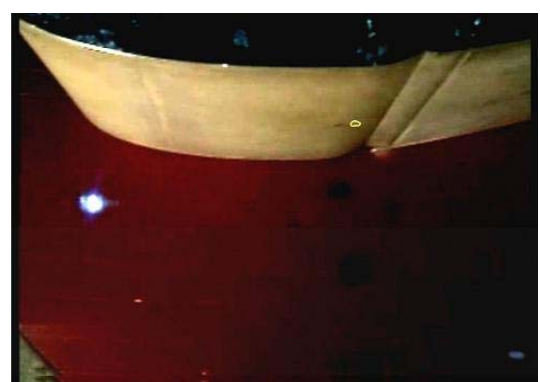
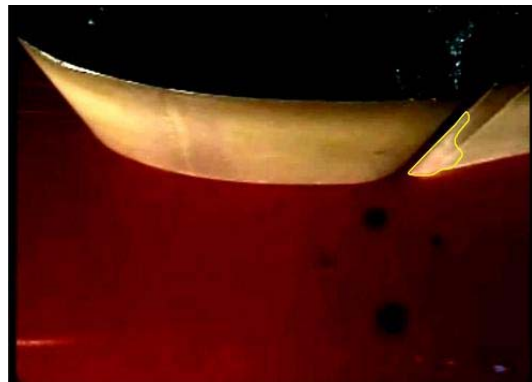
Fig. 8 Incipient cavitation at horn section: open gap (left) and closed gap (right)



(a) 0° deflection



(b) 3° deflection



(c) 5° deflection

Fig. 9 Incipient cavitation at pintle section: open gap(left) and closed gap(right)

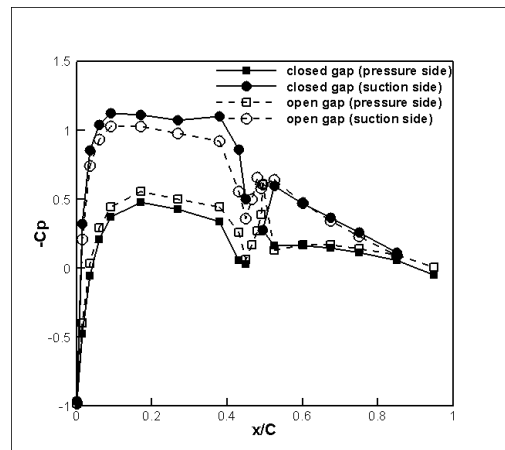
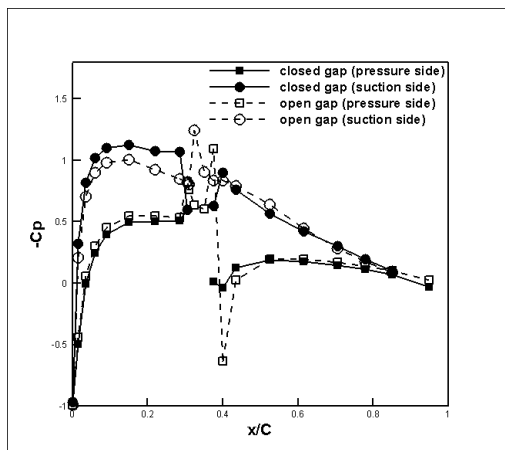
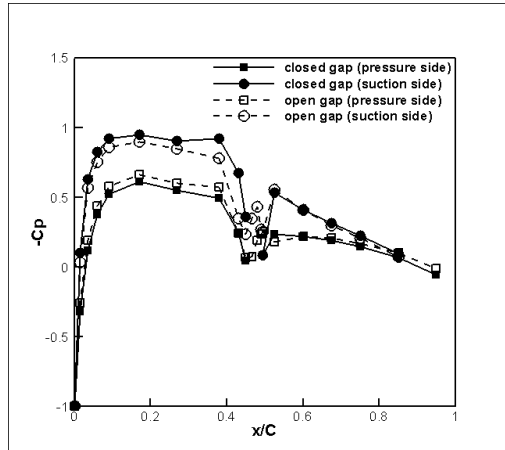
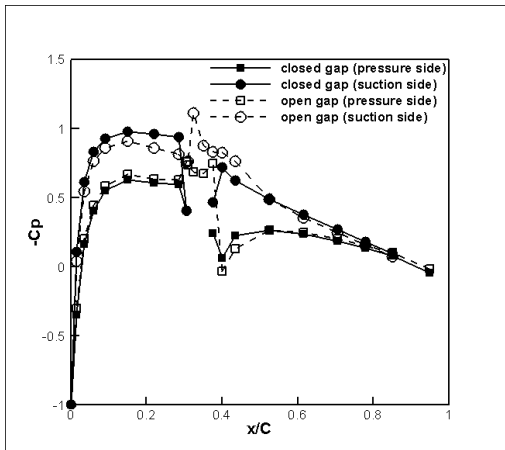
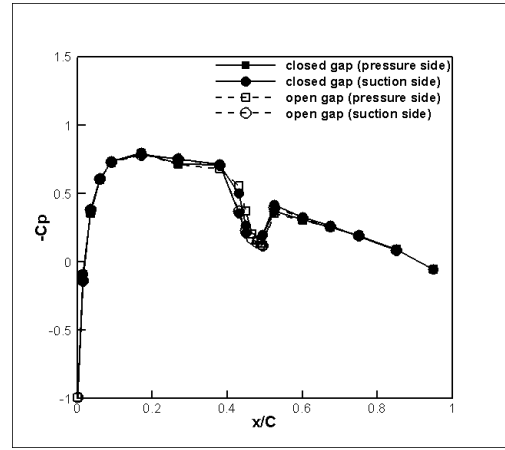
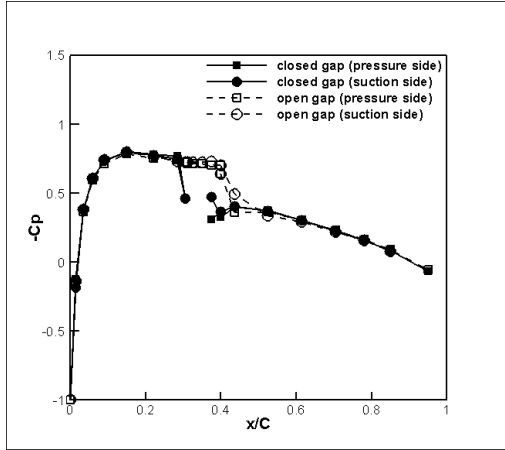


Fig. 10 Surface pressure coefficient at horn section: 0° deflection(top), 3° deflection (middle), and 5° deflection(bottom)

Fig. 11 Surface pressure coefficient at pintle section: 0° deflection(top), 3° deflection (middle), and 5° deflection(bottom)

4. 결론

캐비테이션은 요즘 해상에서 운항하는 상선의 타 기관의 표면 위나 주위에서 자주 관찰된다. 많은 종류의 캐비테이션 중에서 타의 갭 캐비테이션이 통제하고 억제하기가 가장 힘든 것으로 알려졌다. 본 논문에서는 타의 갭 캐비테이션과 틈새유동 차단장치의 효과에 대해서 실험을 수행하였다. 캐비테이션 터널의 감압을 통해서 갭 캐비테이션의 초생 캐비테이션 수를 알아냈다. 더불어 틈새유동 차단장치를 통해서 캐비테이션의 발생이 확실히 지연되었음을 알 수 있었다. 최저음압력값(Negative pressure peak)의 완화와 날개의 흡입면과 압력면 사이의 큰 압력 차로 인한 양력의 증가를 통하여 캐비테이션이 줄어드는 메커니즘을 볼 수 있었다.

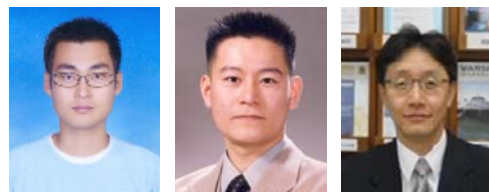
후 기

본 연구는 교육과학기술부의 국가지정연구실사업(ROA-2007-000-10028-0), 지식경제부의 신재생 에너지 기술개발사업(20093021070010) 및 BK21 해양기술인력양성사업단의 재정적 지원을 받아 수행된 연구결과임을 밝힙니다. 아울러 제 2 저자는 한국학술진흥재단(KRF-2008-005-J01603)의 지원을 받고 있음을 밝힙니다.

참 고 문 헌

- Brennen, C.E., 1995, Cavitation and Bubble Dynamics, Oxford University Press, New York.
- Kim, S.P., Park, J.J., Kim, Y.S., Jang, Y.H., Choi, Y.B. and Paik, B.G., 2006, "An Experimental Research on Gap Cavitation Erosion of Semi-spade Rudder," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 5, pp. 578-585.
- Kinnas, S.A., Lee, H., Gu, H. and Natarajan, S., 2007, "Prediction of Sheet Cavitation on

- a Rudder Subject to Propeller Flow," Journal of Ship Research, Vol. 51, No. 1, pp. 65-75.
- Paik, B.G., Kim, K.Y., Ahn, J.W., Kim, Y.S., Kim, S.P. and Park, J.J., 2006, "Experimental Investigation on the Gap Cavitation of Semi-spade Rudder," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 43, No. 4, pp. 422-430.
- Paik, B.G., Kim, K.Y., Ahn, J.W., Park, S.H., Heo, J.K. and Yu, B.S., 2008, "Cavitation Observation and Visualization of the Gap Flows on a Rudder Influenced by Propeller Slipstream and hull Wakes," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 45, No. 3, pp. 238-246.
- Rhee, S.H. and Kim, H., 2008, "A Suggestion of Gap Flow Control Devices for the Suppression of Rudder Cavitation," Journal of Marine Science and Technology, Vol. 13, No. 4, pp. 356-370.
- Shen, Y.T., Remmers, K.D. and Jiang, C.W., 1997a, "Effects of Ship Hull and Propeller on Rudder Cavitation," Journal of Ship Research, Vol. 41, No. 3, pp. 172-180.
- Shen, Y.T., Jiang, C.W. and Remmers, K.D., 1997b, "A Twisted Rudder for Reduced Cavitation," Journal of Ship Research, Vol. 41, No. 4, pp. 260-272.
- The American Society of Mechanical Engineers, 2005, PTC 19.1 - 2005 Test Uncertainty, ASME, New York.



< 이 창 민 > < 오 정 근 > < 이 신 형 >