유동가시화를 이용한 훈-타의 간극유동 차단장치 효과에 관한 실험적 검증

신광호^{1,†} · 서정찬² · 김효철² · 유극상² · 오정근³

해군 전력분석시험평가단 함정기술처¹

서울대학교 조선해양공학과 / 해양시스템공학연구소²

군산대학교 조선공학과³

Experimental Verification on the Effect of the Gap Flow Blocking Devices Attached on the Semi-Spade Rudder using Flow Visualization Technique

Kwangho Shin^{1,†} · Jung-Chun Suh² · Hyochul Kim² · Keuksang Ryu² · Jungkeun Oh³

Naval Engineering Division, Naval Force Analysis, Testing & Evaluation Group, R.O.K. Navy¹

Dept. of Naval Architecture & Ocean Engineering / Research Institute of Marine System Engineering, Seoul National University²

Dept. of Naval Architecture, Kunsan National University³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Recently, rudder erosion due to cavitation has been frequently reported on a semi-spade rudder of a high-speed large ship. This problem raises economic and safety issues when operating ships. The semi-spade rudders have a gap between the horn/pintle and the movable wing part. Due to this gap, a discontinuous surface, cavitation phenomenon arises and results in unresolved problems such as rudder erosion. In this study, we made a rudder model for 2-D experiments using the NACA0020 and also manufactured gap flow blocking devices to insert to the gap of the model. In order to study the gap flow characteristics at various rudder deflection angles(5°, 10°, 35°) and the effect of the gap flow blocking devices, we carried out the velocity measurements using PIV(Particle Image Velocimetry) techniques and cavitation observation using high speed camera in Seoul National University cavitation tunnel. To observe the gap cavitation on a semi-spade rudder, we slowly lowered the inside pressure of the cavitation tunnel until cavitation occurred near the gap and then captured it using high-speed camera with the frame rate of 4300 fps(frame per second). During this procedure, cavitation numbers and the generated location were recorded, and these experimental data were compared with CFD results calculated by commercial code, Fluent. When we use gap flow blocking device to block the gap, it showed a different flow character compared with previous observation without the device. With the device blocking the gap, the flow velocity increases on the suction side, while it decreases on the pressure side. Therefore, we can conclude that the gap flow blocking device results in a high lift-force effect. And we can also observe that the cavitation inception is delayed.

Keywords : Particle image velocimetry(입자영상속도계), Semi-spade rudder(훈-타), Gap flow(간극유동), Gap flow blocking device(간극 유동 차단장치), Cavitation(공동현상), Cavitation observation(공동현상 관찰)

1. 서론

1.1 연구배경 및 개요

오늘날 조선기술의 발전과 해상물동량의 증가로 인해 선박의 대형화고속화 추세가 두드러지게 나타나고 있다. 선박의 대형화 고속화는 선박운용 시 높은 소요마력을 필요로 하게 되는데, 이러한 고 마력은 선미 후류(wake)의 속도를 증가시킴으로 추진기

(propeller)와 타(rudder)가 있는 선미구조물 주위를 흐르는 유체의 압력강하를 일으킨다. 그리고 이런 압력강하는 공동현상(cavitation, 이하 캐비테이션) 발생인자인 nuclei에 영향을 미쳐 캐비테이션을 유발하게 되는데, 이렇게 생겨난 캐비테이션은 선미구조물에 소음, 진동, 침식, 효율감소 등의 악영향을 미친다(Lecoffre, 1999).

특히 최근에는 대형선박의 타로 널리 쓰이고 있는 훈-타(semi-spade rudder)의 캐비테이션으로 인한 침식사례가 지속적으로 보고되는 상황에서, 선박운용의 경제성과 안전성 측면에서

타에 발생하는 캐비테이션에 대한 관심이 커지고 있다. 타는 추진기에 의해 발생한 캐비테이션과 타 자체의 형상에 의해 유발된 캐비테이션의 영향을 받게 되는데, Fig. 1 은 혼-타에 발생하는 캐비테이션의 종류를 보여준다.

Fig. 1 The types of cavitation damage on semi-spade rudder

혼-타의 경우 전 가동타(full-spade rudder)와 달리 고정부(horn and pintle part)와 가동부(movable wing part) 사이에 불연속 표면이 존재하며 이로 인해 간극유동(gap flow)이라는 유동 특성을 나타낸다. Fig. 2 에서 볼 수 있듯이 타의 고정부와 가동부 사이에 간극(gap)이 존재하며, 가동부가 회전할 때 우현쪽(starboard)과 좌현쪽(portside) 중 한 쪽은 압력면(pressure side), 다른 쪽은 흡입면(suction side)이 되면서 압력면으로부터 흡입면 방향으로 간극사이를 통과하는 유동이 발생한다. 이런 간극유동은 Fig. 1 에서 볼 수 있듯이 타의 간극 주위에 Gap 캐비테이션을 유발시킨다.

Fig. 2 Principle of generating gap flow

혼-타에 발생하는 침식현상은 타의 표면보다 간극부분에서 발생하는 침식이 더욱 심각하며, 최근 들어 이러한 Gap 캐비테이션

에 관한 연구들이 많이 이루어지고 있다. 그 중 Friesch and Jungewitz (2005)는 혼-타의 Gap 캐비테이션에 의한 침식을 억제하는 몇 가지 방법들을 제시하였고, Lee, et al. (2010)는 Guide plates 형태로 혼-타의 간극에 설치할 수 있는 Fig. 3 과 같은 간극유동 차단장치(gap flow blocking devices)를 고안했다.

(a) 3-D views of rudder system : conventional (left) and new (right)

(b) 2-D model shape for horn section

Fig. 3 Gap flow blocking devices

1.2 실험장치 및 방법

실험모형

실험을 위해 제작한 모형(Fig. 4)은 혼-타의 Horn section이며, 재질은 두랄루민¹⁾이고, NACA 0020 단면을 사용했다. 타의 코드(chord)길이는 200mm, 스패ן(span)길이는 150mm, 고정부(horn)와 가동부(movable wing part) 사이의 간극(gap)은 1mm이다. 간극유동 차단장치(gap flow blocking device)는 Fig. 4 와 같이 캠²⁾을 이용하여 편향각(deflection angle)이 3° 이상이 되면 약 95%정도 간극을 차단하도록 설계·제작 하였다.

Fig. 4 Test model with gap flow blocking devices

1) 두랄루민(Duralumin) : 구리와 마그네슘 및 그 외 1~2종의 원소를 알루미늄에 첨가하여 시효경화성을 가지게 한 고강력 알루미늄 합금

2) 캠(Cam) : 회전운동 또는 왕복운동을 하는 특수한 윤곽이나 홈이 있는 판상(板狀)장치로 기계요소의 운동을 변환하는 요소로 쓰임

실험방법 및 조건

PIV 실험 및 캐비테이션 관찰실험 모두 간극유동 차단장치를 열거나 닫은 상태(open/closed)에서 실험하였고, 실제 선박조종 시 주로 사용되는 편향각은 5°, 10°, 35°로 각각 실험하였다.

PIV 실험을 위한 시스템은 일반적으로 촬영영역을 조명하는 레이저(laser), 유체유동에 따라 이동하는 추적 입자(tracer particle), 산란된 입자영상을 획득하는 영상기록장치인 CCD카메라, 레이저와 카메라를 통제하는 동기장치(synchronizer), 제어 및 계산용 컴퓨터로 구성되며, Fig. 5 은 실제 실험에 사용된 장비들의 대략적인 구성을 나타내고 있다.

Fig. 5 PIV experimental set-up in the cavitation tunnel

캐비테이션 터널에 모형타를 설치하고, 레이저코팅거울(coated mirror)-평면광을 만들어주는 렌즈(optic for laser sheet)를 이용해서 촬영영역에 레이저 평면광을 형성시켜, 유동에 따라 모형타 주위를 이동하는 입자들의 움직임을 촬영하였다. 레이저의 발광 및 카메라의 노출 시간은 동기 장치를 통해 통제되며, 카메라에 의해 촬영한 영상은 컴퓨터에 디지털 이미지로 저장된다.

본 연구에서는 1대의 카메라로 미소 시간간격으로 각각 한번의 노출을 통해 두 장의 영상을 얻어내는 이중프레임/단일노출(Double frame/Single exposure) PIV 방법을 사용했으며, 이렇게 획득한 영상은 Oh (2006)가 개발한 정규상호상관도를 이용한 2-D PIV 알고리즘으로 해석을 수행하였다.

속도 벡터를 구하는 알고리즘은 식(1)의 정규상호상관도(Normalized Cross-correlation)를 사용했다.

$$C_{II'}(x, y) = \frac{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i, j) - \mu_I] [I'(i+x, j+y) - \mu_{I'}(x, y)]}{\sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I(i, j) - \mu_I]^2} \sqrt{\sum_{i=0}^{M-1} \sum_{j=0}^{N-1} [I'(i+x, j+y) - \mu_{I'}(x, y)]^2}} \quad (1)$$

I : Pixel value of the Interrogation Window

I' : Pixel value of the Searching Window

μ_I : Average of the Interrogation Window

$\mu_{I'}$: Average of $M \times N$ pixels of the Searching Window at (x, y)

미소조사영역(Interrogation Window) 32×32 pixel, 탐색영역(Searching Window) 64×64 pixel, 50% overlap을 적용하여, 한 쌍의 영상으로부터 125×125 개의 속도벡터를 구했으며, 각 속도벡터 사이의 거리는 약 0.706mm 이다. 또한 해석 시간을 단축하기 위해 연속 덧셈 방법과 FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하였고, 픽셀 단위 이하의 속도벡터는 Gaussian peak fit 방법을 이용했다. 이렇게 구한 속도벡터는 통합히스토그램(Global histogram) 방법을 통해 에러벡터를 제거했고, 제거된 에러벡터 위치에서의 속도보간은 역거리 보간법(Inverse distance-weighted interpolation)을 이용했다. 실험의 각 Case 마다 획득한 600쌍의 영상을 위에서 언급한 알고리즘으로 해석했으며, 그 평균값을 구했다.

Fig. 6 Coordinate system and location of target plane

Fig. 6 은 본 연구에 사용된 좌표계와 촬영영역을 나타내고 있다. 평면광을 모형타의 밑부분에 형성시켜 간극을 중심으로 가로세로 각 $8.8 \times 8.8 \text{ cm}^2$ 크기의 촬영영역에서 속도장을 측정하였다. 획득한 영상은 x, y 축 모두 코드길이에 무차원화 하였고, 타의 간극유동 차단장치가 설치된 부분은 $x/C = 0.305 \sim 0.365$ 이다. 실험은 모형타의 가동부를 회전시켜 Table 1 과 같이 편향각에 따른 입력면과 흡입면을 각각 만들어 총 12 case의 실험을 수행하였다.

Table 1 Cases of PIV experiments

	Open - Gap		Closed - Gap	
	Suction side	Pressure side	Suction side	Pressure side
5°				
10°				
35°				

캐비테이션 관찰 실험의 대략적인 장비구성은 Fig. 7 과 같으며, 높은 시간 분해능을 갖는 고속카메라(Phantom v.5.1)를 사용하여 빠르게 변화하는 모형타의 캐비테이션을 관찰하였다. 실험에 적용된 카메라의 프레임 수는 4300fps(frame per second)이며, 해상도는 512×512 pixels이다.

Fig. 7 Cavitation observation set-up in the cavitation tunnel

캐비테이션 수는 식(2)과 같이 정의하고, P_{ref} 는 차압계(differential pressure transducer)를 사용하여 직접 측정하였다.

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

$$\sigma = \frac{P_{ref} - P_{vapor} - P_x}{\frac{1}{2}\rho V_{ref}^2} \quad (3)$$

P_{ref} : Absolute pressure at a reference point in the flow
 P_{vapor} : Vapor pressure of the liquid at the test temperature
 ρ : Density of the liquid
 V_{ref} : Velocity at the reference point

모형타에서 발생하는 캐비테이션을 관찰하기 위해 식(3)과 같이 터널내의 감압(P_x)을 통해서 캐비테이션 수를 점진적으로 낮췄고, 초생 캐비테이션이 발생한 순간을 촬영했다. 그리고 그 때의 감압량을 확인, 초생 캐비테이션 수를 알아냈다.

실험은 서울대학교 캐비테이션 터널에서 수행하였으며, 그 제원은 Table 2 와 같다.

PIV 실험 및 캐비테이션 관찰실험 시에 터널 내 관측부의 유속을 7 m/s 로 설정했으며, 터널내부 물의 온도는 22~25 °C, Reynolds 수는 $1.46 \times 10^6 \sim 1.57 \times 10^6$, 캐비테이션 수는 실선의 운항 조건과 유사하게 설정했다. 실선에서 타의 경우 추진기 후류에서 작동하므로 균일유동에서의 실험을 수행하는 것이 적절하지 않을 수도 있으나, ITTC (2008)에 타의 캐비테이션 비교 실험 시 균일 유동에서 할 수 있음을 제시하고 있다. 이에 따라 본 연구의 경우 간극유동 차단장치의 효과에 대한 비교실험이며, 연구의 중점사항이 간극유동 자체에 관한 것이므로 균일유동에서의 실험으로도 유용한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단했다.

Table 2 Specification of cavitation tunnel at Seoul National University

Size	Length	9.03 m
	Height	3.33 m
Material		Stainless steel
Capacity		8.6 ton
Max. velocity		16 m/s
Range of Pressure		0.15 ~ 3.0 bar
2-D Observation		1 ^L × 0.5 ^H × 0.15 ^W m ³

수치해석방법

캐비테이션 관찰 실험을 통해 알아낸 초생 캐비테이션 수와 모형타의 압력계수(pressure coefficient)를 비교하기 위해 수치해석(Numerical analysis)을 이용해서 모형타의 압력계수를 구했다. 수치해석을 위한 격자(mesh)생성은 Gambit 2.3.16을 사용했고, 이렇게 생성한 격자는 상용 CFD 프로그램인 Fluent 6.3.26을 사용해서 계산했다. 타의 Chord는 실제 모형타와 동일한 치수를 적용했고, 계산영역(2-D Computational domain)은 가로세로 각 1.5 m × 0.5 m 로 설정했다. 모형타의 좌표는 모형타 제작을 위해 작성한 CAD 파일을 이용했고, 격자는 편향각 5°, 10°에 대해 간극 유동 차단장치 열거나 닫은 상태(open/closed) 유무에 따라 총 4 case의 구조격자(structured grid)로 생성했다. 셀수는 Open-gap Case는 63,900개, Closed-gap Case는 58,900개 이다.

계산조건은 실험과 동일한 유체 상태량(온도, 밀도, 점도, 압력, 속도)을 적용했고, 비정상, 비압축성, single-phase 유동으로 가정했다. 지배 방정식으로 연속방정식 식(4) 과 RANS(Reynolds averaged Navier-Stokes eq.) 식(5)를 사용했다. 식(5)의 ν 는 동점성계수(kinematic viscosity), $\tau_{ij, turbulent}$ 는 Specific Reynolds stress tensor 이다. 난류모델은 Realizable $\kappa - \epsilon$ 모델에 Non-equilibrium wall function을 사용했고, 압력-속도 연성은 SIMPLEC의 방법을 사용했다.

$$\nabla \cdot \bar{V} = 0 \quad (4)$$

$$\frac{\partial \bar{V}}{\partial t} + (\bar{V} \cdot \nabla) \bar{V} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nu \nabla^2 \bar{V} + \nabla \cdot (\tau_{ij, turbulent}) \quad (5)$$

간극유동을 포함한 혼-타 주위의 유동은 층류(laminar), 난류(turbulent), 천이영역(transition)이 혼재되어 있는 복잡한 유동특성을 나타낸다. CFD계산 시, 캐비테이션의 주요인자이며, 타 주변의 압력변동(pressure fluctuation)에 영향을 미치는 nuclei에 대한 고려가 부족함으로, CFD를 통해 얻어낸 압력계수를 모형타의 정확한 값이라 할 수는 없다. 하지만 모형타의 형상에 따른 국부압력의 차이는 알 수 있으므로 CFD의 결과를 모형타의 압력계수로 간주하였다.

$$C_P = \frac{P_{model} - P_{ref}}{\frac{1}{2} \rho V_{ref}^2} \quad (6)$$

압력계수는 식(6)과 같이 나타내며, P_{model} 은 모형타의 국부 압력이다. 캐비테이션 관찰 실험을 통해 구한 캐비테이션 수와 CFD를 통해 계산한 결과를 비교분석하였다. 그리고 수치해석 시 모형타의 표면은 Fig. 8과 같이 Head pressure, Head suction, Tail pressure, Tail suction으로 구분하였다.

(a) Open-gap

(b) Closed-gap

Fig. 8 Division of model surface

2. 결과 및 고찰

2.1 PIV 실험결과

캐비테이션 터널에 모형타를 설치하기 전, 유속 7m/s에서 PIV

방법으로 관측영역의 속도장을 측정하였다. 촬영영역으로 유입되는 유동에서 부분적으로 속도 차이가 생기는 영역이 있으나, 그 속도 차이가 크지 않으며, 전반적으로 균일류(uniform flow)의 유입으로 생각할 수 있다. 그리고 촬영영역 전체의 속도크기(velocity magnitude, $|V| = \sqrt{V_x^2 + V_y^2}$)를 계산한 결과의 평균값과 유속 7m/s와의 오차는 대략 1%정도로 나타났다. 또한 V_y 의 크기(평균값)는 V_x 크기(평균값)의 1.4% 수준으로 미미하였다.

실험은 모형타의 흡입면(suction side)과 압력면(pressure side)에 대해서 편향각(deflection angle) 5°, 10°, 35°, 그리고 각 편향각에 따라 간극유동 차단장치의 열거나 닫은 상태(open/closed)에 대해 수행하였다. 그 결과는 각 실험 case마다 속도크기(velocity magnitude)의 contour로 Fig. 9 ~ Fig. 20으로 나타났다.

Suction side with open-gap

압력면에서 간극을 통과해 흡입면으로 유입되는 상대적으로 저속인 간극유동(Fig. 9, 13, 17)으로 인해 간극부분인 0.365C부터 T.E.3)방향으로 유동박리(Flow separation) 영역이 나타난다. 이러한 박리 영역은 편향각이 커질수록 넓은 영역을 나타낸다.

Suction side with closed-gap

차단장치가 작동된(간극이 차단된) 경우(Fig. 10, 14, 18)와 작동되지 않은 경우(Fig. 9, 13, 17)를 비교해 보면, 간극유동의 차단으로 인해 불연속적인 표면이 연속적으로 바뀌면서 간극 뒷 부분에 발생하던 유동박리영역이 작아짐을 보인다. 또한 간극이 닫히면서 상대적으로 빠른 유속을 보이는 영역이 L.E.4)방향에서 T.E.방향으로 확장됨을 보인다.

Pressure side with open-gap

L.E.방향에서 유입된 물이 타의 표면을 따라 빠른 속도로 이동하는 가운데, 간극주변을 지나면서 간극으로 유입되는 현상이 발생한다. 이런 현상 때문에 간극부분에서 V_x 는 감소하며, V_y 는 순간적으로 증가한다 (Shin, 2009).

Pressure side with closed-gap

간극유동이 있을 경우 압력면에서 V_y 가 가장 빠른 영역은 간극 입구부분이다. 하지만 간극유동이 차단되면, 간극의 앞부분으로 V_y 가 빠른 영역이 이동한다 (Shin, 2009).

또한 속도 크기를 살펴보면, 간극유동차단장치를 닫았을 경우, 흡입면은 촬영영역의 전체적인 속력이 증가했고(Fig. 9와 Fig. 10, Fig. 13과 Fig. 14, Fig. 17과 Fig. 18 비교), 압력면은 촬영영역의 전체적인 속력이 감소했다(Fig. 11과 Fig. 12, Fig. 15와 Fig. 16, Fig. 19와 Fig. 20 비교). 이를 통해 간극유동을 차단하면 본래의 목적인 캐비테이션 지연효과와 함께, 양력을 향상시키는 효과도 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

3) Trailing Edge

4) Leading Edge

Fig. 9 Suction side with open-gap at deflection angle 5°

Fig. 12 Pressure side with closed-gap at deflection angle 5°

Fig.10 Suction side with closed-gap at deflection angle

Fig. 13 Suction side with open-gap at deflection angle 10°

Fig. 11 Pressure side with open-gap at deflection angle 5°

Fig. 14 Suction side with closed-gap at deflection angle 10°

Fig. 15 Pressure side with open-gap at deflection angle 10°

Fig. 18 Suction side with closed-gap at deflection angle 35°

Fig. 16 Pressure side with closed-gap at deflection angle 10°

Fig. 19 Pressure side with open-gap at deflection angle 35°

Fig. 17 Suction side with open-gap at deflection angle 35°

Fig. 20 Pressure side with closed-gap at deflection angle 35°

Fig. 21 Cavitation number and location of model (experiments)

2.2 공동현상 관찰 실험결과

Fig. 21은 모형타의 간극유동 차단장치를 열고 닫았을 경우, 캐비테이션이 발생한 순서, 위치, 캐비테이션 수를 나타내고 있다. 간극유동이 있을 경우(Fig. 21의 (a), (c), (e)) 초생 캐비테이션이 발생한 위치는 압력면의 간극주변(0.365C)이었고, 간극유동이 차단되었을 경우(Fig. 21의 (b), (d), (f)) 초생 캐비테이션이 발생한 위치는 편향각 5°, 10°에서는 흡입면의 간극유동 차단장치 앞부분(0.305C)이었고, 편향각 35°에서는 흡입면 L.E.부분(0.050C)이었다.

(a) Pressure side with open-gap (b) Suction side with closed-gap
Fig. 22 Cavitation inception

Fig. 22는 편향각 5°에서 open/closed - gap 일 때 발생하는 초생 캐비테이션의 모습을 보여준다. 그리고 Fig. 23은 발달된 gap 캐비테이션의 모습을 보여주는데, (a)는 pressure side open-gap at deflection angle 5°, (b)는 suction side open-gap at deflection angle 5°, (c)는 Suction side closed-gap at deflection angle 5° 일 때의 모습이다.

모형타의 초생 캐비테이션을 관찰하고, 터널 내의 감압을 통해 캐비테이션 수를 더 낮춰서, 발달된 형태의 gap 캐비테이션을 관찰했다. Fig. 23 (a)는 간극으로 유입되는 유동에서 gap 캐비테이션의 발생모습이고, Fig. 23 (b)는 간극에서 유출되는 유동에서 gap 캐비테이션의 발생모습이다. 그리고 Fig. 23 (c)는 간극유동 차단장치 앞부분에서 부터 attached cavitation(sheet cavitation)의 발생모습이다.

(a) PS, open-gap (b) SS, open-gap (c) SS, closed-gap
Fig. 23 Developed gap cavitation at deflection angle 5°

Table 3 Cavitation inception number and location (experiments)

Deg.	Open-Gap		Closed-Gap	
	σ	Location	σ	Location
5	1.69	Pressure 0.365C	1.41	Suction 0.305C
10	2.08	Pressure 0.365C	1.84	Suction 0.305C
35	2.31	Pressure 0.365C	2.09	Suction 0.050C

Table 3 은 편향각에 따른 초생 캐비테이션 수와 발생위치를 보여준다. 간극유동이 존재할 경우 편향각 5°, 10°, 35° 모두 압력면 간극입구에서 가장 먼저 캐비테이션이 발생했다. 그리고 간극유동이 차단되었을 경우에는 편향각 5°, 10°, 35° 모두 흡입면에서 가장 먼저 캐비테이션이 발생했는데, 편향각 5°, 10° 일 때는 흡입면 간극유동 차단장치 앞부분(0.305C)에서 가장 먼저 발생했으며, 편향각 35° 일 때는 흡입면 L.E.부분(0.050C)에서 가장 먼저 캐비테이션이 발생했다. 또한 간극유동 차단장치를 닫았을 경우에 간극유동 차단장치가 열려 있을 경우보다 초생 캐비테이션 수가 낮게 나타났으며, 이는 간극유동 차단이 캐비테이션 발생 지연에 효과가 있음을 보여준다.

2.3 수치해석과 실험결과 비교

Fig. 24, Fig. 25, Fig. 26, Fig. 27은 수치해석으로 얻은 모형타의 $-C_p$ Curve이다. 수치해석 결과도 실험결과와 마찬가지로 간극유동이 있는 경우, 압력면 간극부근에서 가장 먼저 캐비테이션 발생이 예상되며, 간극유동 차단장치를 이용해서 간극유동을

Fig. 24 Surface pressure distribution for open-gap at deflection angle 5° (CFD)

차단했을 경우에는 흡입면에서 가장 먼저 캐비테이션 발생이 예상된다. 또한 간극부근에서 캐비테이션 발생의 주요한 원인이 되는 압력변동(Pressure fluctuation)이 심하게 나타남을 보여준다. Table 4 는 실험으로 확인한 초생 캐비테이션수 및 발생위치를 CFD 계산결과와 비교한 표이다. 편향각 5°, 10°에서 실험, CFD 모두 간극유동을 차단했을 경우 초생 캐비테이션 수가 더 낮음을 알 수 있다.

Fig. 25 Surface pressure distribution for closed-gap at deflection angle 5° (CFD)

Fig. 26 Surface pressure distribution for open-gap at deflection angle 10° (CFD)

3. 결 론

혼-타의 간극유동 특성, 간극유동과 캐비테이션간의 관계, 간극유동 차단장치의 효과에 대해 알아보기 위해 2-D PIV 기법을 이용한 간극유동 가시화와 고속카메라를 이용한 캐비테이션 관찰 실험을 수행하였고, 상용 CFD 프로그램인 Fluent를 사용하여 모형타의 압력분포를 계산하여 실험결과와 비교하였다.

Fig. 27 Surface pressure distribution for closed-gap at deflection angle 10° (CFD)

Table 4 Cavitation inception number and location (Comparison of experiments and CFD)

Deg.	Ex. / CFD	Open-Gap		Closed-Gap	
		σ	Location	σ	Location
5	Experiments	1.69	Pressure 0.365C	1.41	Suction 0.305C
	CFD	1.46	Pressure 0.366C	1.38	Suction 0.319C
10	Experiments	2.08	Pressure 0.365C	1.84	Suction 0.305C
	CFD	2.05	Pressure 0.366C	1.93	Suction 0.324C

간극유동 차단장치를 이용하여 간극을 차단했을 경우 간극유동이 있는 경우와 다른 양상의 유동 특성을 나타냈으며, 흡입면은 속력증가, 압력면은 속력감소를 일으켰고, 이를 통해 간극유동 차단장치가 고 양력 효과를 가져올 것으로 사료된다. 그리고 간극을 차단했을 경우, 모형타에 발생하는 초생 캐비테이션이 지연됨을 알 수 있었다. 또한 불연속 표면을 포함하는 혼-타 주위 유동의 경우 캐비테이션 발생의 주요한 환경을 제공하는 유동박리(flow separation)와 압력변동(pressure fluctuation)이 심하게 발생됨을 확인할 수 있었다. 본 실험결과를 토대로 bubble dynamic 관점에서 간극주위의 캐비테이션 발생원인에 대한 고찰과 캐비테이션 침식에 관한 연구가 필요할 것으로 생각된다.

이러한 고찰을 바탕으로 본 실제로 간극유동 차단장치를 선박에 설치할 경우, 본 연구가 간극유동 차단장치의 최적 형상을 제작하기 위한 이론적인 정보를 제공할 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 정부의 재원으로 한국과학재단의 NRL사업으로 지원을 받아 수행되었습니다.

References

- Friesch, J. & Junglewitz, A., 2005. Cavitation Induced Erosion on Rudders. *HANSA International Maritime Journal*, 142(12), pp.44-47.
- ITTC, 2008. *ITTC - Recommended Procedures and Guidelines*, 7.5-02 03-03.7.
- Lecoffre, Y., 1999. *Cavitation - Bubble Trackers*. Balkema.
- Lee, C.M. Oh, J.K. & Rhee, S.H., 2010. Two-Dimensional Model Tests for Rudder Gap Cavitation and Suppression Devices. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(2), pp.122-131.
- Oh, J.K., 2006. *Development of algorithm for stereoscopic PIV using normalized cross-correlation and its application*. Ph.D. Seoul National University.
- Shin, K.H., 2009. *A study on the flow visualization about the gap of semi-spade rudders and the effect of the gap flow blocking devices*. A master's thesis. Seoul National University.

신 광 호

서 정 천

김 효 철

유 극 상

오 정 근