2차원 쐐기형 제어핀 후류의 공동유동 특성에 대한 실험연구

정소원·안병권[†] 충남대학교 선박해양공학과

An Experimental Study on Wake Cavity Flow Characteristics of Two-dimensional Wedge Shaped Control Fins

So-Won Jeong · Byoung-Kwon Ahn[†] Chungnam National University

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.

As distinct from a slender body, the separation of the boundary layer on a bluff body give rise to complex wakes in which various kinds of vortices form, develop and interact with each other. In this paper, we investigate cavitation wake field behind wedge shaped two-dimensional fin models. Eight different models are tested at the Chungnam National University Cavitation Tunnel (CNU-CT). First, we measure wake cavity shapes and compare with numerical results, which shows the good agreement with each other. In addition, we demonstrate that wake flow characteristics of the control fin are clearly identified by the correlation analysis of high-speed camera images and pressure fluctuation measurements.

Keywords : Two-dimensional Wedge (2차원 쐐기), Control Fin (제어핀), Wake Flow (후류 유동), Cavitation (캐비테이션, 공동)

1. 서 론

수중에서 이동하는 운동체에서 발생하는 공동(cavitation) 현 상은 익히 잘 알려져 있는 물리적 현상이다. 공동이 발생하면 운 동체의 추진 효율이 감소되고 소음이 증가하며 표면이 침식되는 등의 폐해가 발생할 수 있기 때문에 그동안 이를 제어하기 위한 연구가 이루어져 왔다. 하지만 최근 들어 자연적 또는 인공적으 로 공동을 생성시켜 수중 운동체 전체를 감싸게 하여 항력을 감 소시킴으로써 고속 주행을 가능케 하는 초공동(supercavitation) 수중운동체 기술에 대한 관심이 높아지고 있으며 그에 대한 이론 및 실험 연구들(Ahn, et al., 2010; Ahn, et al., 2012)이 이루어지 고 있다. 초공동 수중운동체는 최소 200노트 이상의 고속으로 이 동하기 때문에 초공동을 생성시키고 유지시키는 기술과 함께, 고 속 수중운동체를 제어하는 기술이 핵심 요소라 할 수 있다. 일반 적으로 초공동 수중운동체의 심도 및 방향 제어를 위해 운동체의 전두부(forehead)에 위치한 캐비테이터(cavitator)와 뒤쪽에 상하 좌우로 위치한 네 개의 쐐기 형상을 갖는 제어핀이 사용된다. 이 때 운동체의 좌우 제어핀은 심도를 제어하며, 상하 제어핀은 방 향을 제어하는데 사용된다. 초공동이 발생한 상태에서 이들 제어핀 의 일부분은 공동 속에 있으며, 나머지 일부는 물과 접촉된 상태에 서 작동하게 된다. 따라서 접수 정도와 받음각의 변화에 따른 제어 핀 주위의 유동과 작용하는 하중 특성에 대한 연구가 필요하다.

본 논문은 초공동 수중운동체의 제어핀 주위 유동에 대한 기 초연구의 일환으로 수행된 2차원 쐐기형 제어핀 후류에서 발생 하는 공동유동 특성에 대한 실험결과를 다루고 있다. 일반적인 2 차원 쐐기 형상의 몰수체에서 발생하는 공동현상에 대한 실험 및 이론연구(Waid,1957; Plesset & Shaffer, 1948; Kim et al.,2013)는 오래 전부터 수행되어 왔지만 운동체 후류에서 발생 하는 공동유동의 특성에 대한 정량적인 실험 데이터는 상대적으 로 부족한 실정이다. 본 연구에서는 다양한 형상의 2차원 쐐기형 제어핀의 후류에서 발생하는 공동유동의 형성 과정을 초고속 카 메라를 이용하여 면밀하게 관측하였고, 유동장에서 발생하는 변 동압력을 계측하여 후류의 주기적인 와유동(periodic vortical flow) 특성을 평가하고자 하였다. 또한 초고속 영상 자료와 변동 압력 계측 값의 상관관계를 분석하여 2차원 쐐기형 제어핀의 후 류에서 발생하는 공동유동의 형성 과정을 정량적으로 평가하고 자 하였다.

2. 쐐기형 몰수체 후류의 유동 특성

잘 알려져 있는 것처럼 몰수체(submerged body)의 후류에서 는 Karman 와열(Karman vortex street)이라 불리는 주기적 특성 을 갖는 와류가 형성된다. 상대적으로 무딘 물체(blunt body)의 경우 경계층이 박리되어 넓은 범위의 와류가 생성되어 발달하며, 와류가 강해지면 그 중심에서의 압력강하(pressure drop)에 따라 공동이 형성되어 와류들의 상호간섭이 보다 명확하게 나타난다. Fig. 1은 쐐기 형상의 몰수체에서 발생하는 후류 공동유동 특성 을 보여준다. 박리된 공동유동은 가까운 후류(near wake) 영역에 서 닫힌 와류(bounded vortices)를 형성하며, 천이영역을 거쳐 상대적으로 먼 후류(far wake) 영역에서는 유동방향 와류 (streamwise vortices)와 횡방향 와류(spanwise vortices)의 주기 적 조합인 Karman 와열이 형성된다.



(b) Experimental observation (CNU-CT)Fig. 1 Characteristics of wake cavitation of a wedge shape submerged body

3. 실험 장치 및 모형

실험은 충남대학교 캐비테이션 터널(Fig. 2)에서 수행되었다. 시험부 단면은 100mm x 100mm, 길이는 1400mm 이며 최대 유 속은 20m/s이다. 가압 및 감압 장치를 통해 터널 내부의 압력은 최소 10kPa에서 최대 300kPa 까지 조절 가능하다.

2차원 제어핀 후류의 주기적 유동 특성을 파악하기 위해 Fig. 3에서와 같이 관측창 상부에 변동압력 센서(Kulite사의 XTM-190)를 설치하여 계측하였으며, 센서의 주요 제원은 Table 1에 나타내었다. 또한 후류 유동 특성과 공동의 생성 과정을 보 다 엄밀하게 관찰하기 위해 초고속 카메라(Photron사의 FASTCAM-UX100 800,000fps)를 사용하였다(Fig. 4). Fig. 5는 동일 조건에서 초고속 카메라와 일반 DSLR 카메라로 촬영한 이 미지로, DSLR 의 경우 육안으로 관찰할 수 있는 수준과 비슷하 지만, 초고속 카메라 이미지의 경우 공동의 발생 및 성장 과정을 보다 엄밀하게 관찰할 수 있음을 보여준다.



Fig. 2 CNU-CT specifications

	Pressure Fluctuation Sensor	-
+	, en <mark>la constanta de la consta</mark>	

Fig. 3 Pressure fluctuation sensor equipped on the top of the test section

Model	XTM-190 (Kulite)
Pressure Range	Rated pressure:3bar Maximum pressure:7bar
Operational Mode	Absolute
Pressure Media	Any Liquid or Gas
Accuracy (Non-Linearity, Hysteresis and Repeatability)	± 0.1 %



Fig. 4 High speed camera and lights system

Fig. 5 Typical cavitation images recorded by a high speed camera (Top) and a general DSLR camera (Bottom)

실험 모형은 제어핀 각(α)이 15°, 20°, 30°, 45°인 경 우에 대해 두께(d)와 코오드 길이(c)를 각각 20mm, 35mm로 고 정한 총 8종의 2차원 쐐기형 제어핀을 사용하였으며 모형의 폭

은 100mm로 터널의 양쪽 벽면에 고정시켜 2차원 유동을 구현하였다. 본 논문에서는 d = 20mm로 고정한 모형을 Group 1

(G1)로, c = 35mm로 고정한 모형을 Group 2 (G2)로 구분하 였다. Table 2는 각 모형의 두께와 길이를 나타내며, Fig. 6은 모

c [mm]

75.96

35

56.72

35

37.32

35

24.14

35

d/c

0.26

0.35

0.54

0.83

형의 형상을 비교하여 보여준다.

 α [deg]

15

20

30

45

Table 2 Size of the test models

d [mm]

20

9.22

20

12.34

20

18,76

20

28.99



Fig. 6 Shape of the test models (unit: mm)



4.1 제어핀 후류의 공동형상 특성

공동의 형상특성은 유동속도와 압력조건을 변화시켜가며 아래 와 같이 정의된 캐비테이션수(σ)에 따라 계측하였다.

$$\sigma = \frac{P_{\infty} - P_v}{\frac{1}{2}\rho V^2} \tag{1}$$



Fig. 7 Development of the wake cavity

여기서, P_{∞} 는 유입류의 압력, P_v 는 물의 증기압, V는 유 속 이다. Fig. 7은 제어핀의 가까운 후류에서 형성된 닫힌 공동 와류가 캐비테이션수가 낮아지면서 성장하여 완전한 공동으로 성장하는 과정을 보여준다. 이때 Fig. 8과 같이 정의한 공동 길 이(l)와 최대 두께(w)는 10,000fps로 촬영된 초고속 카메라 영 상을 분석하여 측정하였다.



Fig. 8 Cavity length(l) and maximum width(w)

Fig. 9와 Fig. 10은 계측한 공동의 길이(*l*)와 최대 두께(*w*)를 제어핀의 두께(*d*)로 무차원화하여 이론해석 결과와 함께 비교하였다. 제어핀의 각도(*α*)에 따라 캐비테이션수가 낮아질수록 발생하는 공동의 길이와 두께가 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 같은 캐비테이션수 조건에서 제어핀의 각도가 클수록 발생하는 공동의 길이와 두께가 커지는 것을 확인할 수 있다. 또한 제어핀 의 각도가 같은 경우 형상비(*d*/*c*)에 관계없이 후류 공동의 무차 원 형상은 동일하게 나타남을 확인할 수 있다.

본 연구 그룹에서는 비점성 유동해석법에 기반한 경계요소법 을 바탕으로 초월공동유동을 해석할 수 있는 수치해석법을 개발 하여 성능평가를 한 바 있으며(Kim et al, 2013), 본 해석법을 이 용한 계산 결과와 비교적 잘 일치함을 알 수 있다.

Fig. 10에 나타낸 공동의 최대 두께는 제어핀의 각도가 커짐 에 따라 일정하게 증가하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 제어핀 각도와 함께 σ/2α의 파라미터로 정리하여 Fig. 11과 같이 나타 내는 경우 다양한 제어핀의 형상비에 따라 발생하는 공동의 최대 두께를 보다 보편적으로 예측할 수 있음을 보여준다.



Fig. 9 Non-dimensional cavity length versus cavitation number according to different test models



Fig. 10 Non-dimensional cavity width versus cavitation number according to different test models



Fig. 11 Non-dimensional cavity width versus $\sigma/2\alpha$

4.2 제어핀 후류의 박리와류 특성

여러 형상의 시험 모형 중 d = 20mm, $\alpha = 20^{\circ}$ 제어핀을 사용하여 받음각과 레이놀즈수의 변화에 따른 제어핀 후류의 박 리와류 특성을 초고속 카메라 영상을 분석하여 계측하였다. 레이 놀즈수(Rn)는 다음과 같이 정의하며, 여기서 V는 유속, d는 제어핀의 두께이며 ν 는 동점성계수이다.

$$Rn = \frac{Vd}{\nu} \tag{2}$$

Fig. 12는 제어핀의 받음각(β)이 0도와 5도일 때 서로 동일한 캐비테이션수 조건에서 발생하는 공동을 보여주며, Fig. 13은 무 차원화한 공동의 길이를 비교하여 보여준다. 이를 통해 받음각 변화에 따른 공동의 성장 과정은 큰 차이가 없으며, 공동 길이 또한 차이가 없음을 확인할 수 있다. Fig. 14는 앞선 Fig. 1에 정 의된 닫힌 와류의 후류에서 박리되어 생성되는 Karman 와열의 수평방향 거리(A)와 수직방향 거리(B)의 비(B/A)를 계측하여 비 교한 결과로 캐비테이션수가 감소함에 따라 닫힌 와류의 크기가 커지며 결과적으로 와열의 거리 비는 비선형적으로 감소하는 것 을 확인할 수 있다. 또한 이러한 와열의 거리 비는 레이놀즈수 변화에 대해서는 큰 차이를 보이지 않음을 알 수 있다.



Fig. 12 Comparison of cavity shapes between two different angles of attack



Fig. 13 Non-dimensional cavity length versus cavitation number for different angles of attack



Fig. 14 Distance ratio (B/A) versus cavitation number

Fig. 3에서 설명한 바와 같이 관측창 상부에서 계측된 변동압 력을 통해 박리와류의 주기적인 특성을 평가하였다. 계측된 변동 압력 값은 고속 푸리에변환(Fast Fourier Transform, FFT)을 통 해 주파수영역의 소음수준(Sound Pressure Level, SPL)으로 변 환하여 비교, 분석하였다. Fig. 15는 d = 20mm, $\alpha = 20^{\circ}$ 인 제어핀의 받음각 0도에서 발생하는 공동형상과 해당 조건에 서의 소음특성을 나타낸다. 여기서 $\sigma = 7.04$ 는 공동이 발생하 지 않는 조건이며, 캐비테이션수가 낮아지면서 공동이 발달하여 $\sigma = 1.22$ 인 경우 닫힌 와류의 후류에서 강한 Karman 와열이 형성되며 전체 주파수 영역에서의 소음 수준이 증가하는 것을 확 인할 수 있다. 캐비테이션수가 더욱 낮아져 $\sigma = 0.60$ 인 경우와 같이 충분히 성장한 닫힌 와류의 후류에서는 Karman 와류의 세 기가 약해지며 소음수준 또한 감소하는 것을 알 수 있다. 즉, 제 어핀 후류에서 발생하는 소음수준은 닫힌 와류의 후류에서 발생 하는 Karman 와류의 영향이 지배적임을 알 수 있다.

닫힌 와류와 Karman 와류의 주기적인 특성을 보다 분명히 분 석하기 위해 $Rn = 1.6 \times 10^5$ 조건에서 캐비테이션수가 1.22 인 경우에 대해 한 주기 동안 발생하는 공동 형상을 Fig. 16과 17에 나타내었다. 이 때 닫힌 와류와 Karman 와류의 발생 주기 는 0.043초와 0.0077초로 주파수는 23Hz와 130Hz에 해당한다. 이러한 주파수 특성은 계측한 변동압력 특성(Fig. 18)을 통해서 도 그대로 나타나고 있음을 알 수 있다. 캐비테이션수가 낮어질 수록 닫힌 와류의 크기는 커지기 때문에 주파수는 낮아지는 반면 Karman 와류의 주파수는 높아지는 것을 알 수 있다. 또한 Karman 와류는 조화 주파수(harmonic frequency) 성분을 가지 고 있으며 1차와 2차 조화 성분이 나타나는 것을 확인할 수 있으 며, 2차 조화 성분은 Karman 와류가 소산됨에 따라 주파수 영역 이 폭넓게 나타남을 알 수 있다.



Fig. 15 Wake cavitation and induced noise characteristics



Fig. 16 Periodic motion of the bounded vortex



Fig. 17 Periodic motion of the Karman vortex



Fig. 18 SPL versus vortex frequency

다음으로 Karman 와류의 주파수 특성을 보다 명확히 파악하기 위해 Fig. 19와 같이 유속을 증가시켜 캐비테이션수를 낮췄을 때 받음각 0도와 5도 조건에서 발생하는 Karman 와류의 주파수 특 성을 살펴보았다. 여기서 실선은 V=7.6m/s까지의 계측 값을 회귀분석한 결과로 받음각 변화에 상관없이 유속과 박리 주파수 는 선형적인 관계임을 확인할 수 있다. 하지만 특정 유속 구간에 서, 특히 V=9m/s 근처에서는 박리 주파수가 최대로 증가하였 다가 이후 유속에서는 다시 줄어드는 것을 확인 할 수 있다. 이러 한 주파수 특성은 아래와 같이 정의되는 Strouhal(S_t)수로 무차원 화 하여 Fig. 20과 같이 비교하면 보다 명확히 이해 할 수 있다.

$$S_t = \frac{fd}{V} \tag{3}$$

여기서 f 는 Karman 와류의 박리 주파수, d는 제어핀 두께이며 V는 유속이다. 상대적으로 높은 캐비테이션수 영역에서 Karman 와류의 주파수는 일정한 값을 갖는다. 하지만 Fig. 20의 $\sigma = 1.22$ (Fig. 19의 V = 9.2m/s에 해당)인 경우 이때 발생한 닫힌 와류의 크기는 제어핀의 두께(d)와 같은 크기로 성장하게 되고 그에 따른 후류 유동장이 형성되어 Karman 와류의 주파수 가 최댓값을 나타낸다. 이후 공동이 성장함에 따라 Karman 와류 의 주파수가 다시 감소하는 것을 알 수 있으며, 받음각 5도의 경 우도 같은 특성이 나타니는 것을 알 수 있으며, 받음각 5도의 경 우도 같은 특성이 나타니는 것을 알 수 있으며, 받음각 5도의 경 도 조건에서 유입 유속을 각각 4m/s, 6m/s, 8m/s로 고정한 상 태, 즉 레이놀즈수를 고정시키고 터널 내부 압력을 낮춰 캐비테 이션수를 낮췄을 때의 주파수의 특성을 나타내며 이를 통해 확인 할 수 있는 바와 같이 캐비테이션수가 높은 조건에서 Strouhal수 는 일정한 값을 유지하다가 캐비테이션이 발생하는 구간에서는 약 15% 정도 증가하는 것을 알 수 있다.



Fig. 19 Shedding frequency versus flow speed



Fig. 20 Strouhal number versus cavitation number

정소원·안병권



Fig. 21 Strouhal number versus cavitation number according to different Reynolds numbers

4. 결 론

본 연구는 다양한 형상의 2차원 쐐기형 제어핀 모형을 대상으 로 캐비테이션터널 실험을 수행하여 후류에서 발생하는 공동유 동의 특성을 보다 정량적으로 계측하여 분석하고자 하였다. 이를 위해 초고속 카메라를 이용하여 유동을 면밀하게 관측하였고, 유 동장에서 발생하는 변동압력을 계측하여 후류 유동의 주기적인 특성을 계측하였다.

본 실험연구를 통해 먼저 제어핀 후류에서 발생하는 캐비테이 션의 형상을 계측하여 이론해석 결과와 비교 검증하였으며, 이를 바탕으로 제어핀의 형상비에 따라 발생하는 공동의 기하학적 특 성을 정량적으로 평가하였다. 또한 제어핀 후류의 주파수 특성을 파악하고 발생하는 소음수준과의 상관관계를 해석하였다. 이를 통해 제어핀 후류에서 발생하는 소음수준은 닫힌 와류와 Karman 와류의 영향이 지배적임을 규명하였으며, 아울러 다양한 유동 조 건에서 캐비테이션과 함께 발생하는 Karman 와류의 주파수 특성 을 평가하였다.

후 기

본 연구는 국방과학연구소 민군협력진흥원 민군기술협력센터 와 한국연구재단 원천기술개발사업(NRF-2014M3C1A9060786) 의 지원으로 수행되었다.

References

- Ahn, B. K. Lee, C. S. & Kim, H. T., 2010. Experimental and Numerical Studies on Super–Cavitating Flow of Axisymmetric Cavitators. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 2(1), pp.39–44.
- Ahn, B. K. Lee, T. K. Kim, H. T. & Lee, C. S., 2012. Experimental Investigation of Supercavitating Flows. International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering, 4(2), pp.123–131.
- Kim, J. H. Jang, H. K. Ahn, B. K. & Lee, C. S., 2013. A Numerical Analysis of the Supercavitating flow around Three–Dimensional Axisymmetric Cavitators. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 50(3), pp.160–166.
- Plesset, M. S. & Shaffer, P. A., 1948. Cavity Drag in Two and Three Dimensions. *Journal of Applied Physics*, 19(10), pp.934–939.
- Waid, R.L., 1957. Water Tunnel Investigation of Two-dimensional Cavities. The Hydrodynamics Laboratory of California Institute of Technology. Report. E-73.6

