한국해양공학회지 제33권 제1호, pp 26-32, 2019년 2월 / ISSN(print) 1225-0767 / ISSN(online) 2287-6715

Original Research Article

Journal of Ocean Engineering and Technology 33(1), 26-32 February, 2019
https://doi.org/10.26748/KSOE.2018.066

PIV Measurements of Non-cavitating and Cavitating Flow in Wake of Two-dimensional Wedge-shaped Submerged Body

Ji-Woo Hong*, So-Won Jeong* and Byong-Kwon Ahn*

*Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

PIV를 이용한 2차원 쐐기형 몰수체 후류의 비공동 및 공동 유동장 계측

홍지우* · 정소원* · 안병권*

*충남대학교 선박해양공학과

KEY WORDS: Particle image velocimetry 입자영상유속계, Wake flow 후류 유동, Cavitation 공동, Vortex street 와열

ABSTRACT: *The vortex flow behind a bluff body has been a subject of interest for a very long time because of its engineering applicability such as to vortex induced vibration. In the near wake of a bluff body, vortices are periodically shed in two shear layers, which originate in the trailing edges. The far wake is made up of the classical Karman vortices, which are connected together by streamwise and spanwise vortices. These vortex formations have been studied in many experimental and numerical ways. However, most of the studies considered non-cavitating flow. In this study, we investigated cavitating flow in the wake of a two-dimensional wedge. Experiments were conducted in a cavitation tunnel of Chungnam National University. Using a particle image velocimetry (PIV), we measured the velocity fields under two different flow conditions: non-cavitating and cavitating regimes. We also investigated the vortex shedding frequencies using an absolute pressure transducer mounted on the top of the test window. Throughout the experiments, it was found that the shedding frequency of the vortex was strongly affected by cavitation, and the Strouhal number could exceed its value in the non-cavitating regime.*

1. 서 론

대부분의 유체역학적 문제들을 해결하기 위해서는 유동의 속도장 변화에 대한 정확한 정보가 필요하다. 그러나 일반적으로 물과 공기와 같은 유체의 경우 특수한 장치를 사용하지 않고는 유동 특성을 육안으로 확인하기가 어렵다. 그렇기 때문에 유동장을 시각화하는 가시화 실험연구는 오래전부터 수행되어 왔으며 그에 필요한 계측장비들 또한 발전하고 있다. 그중 입자영상유속계(Particle image velocimetry, PIV)는 입자 추적법(Particle tracer method)의 하나로 유동장 내에 포함된 입자를 레이저와 카메라를 사용하여 특정 시간 동안 이동한 입자의 거리를 추적하여 유동장의 변화를 계측하는 방법으로, 다양한 유체 유동의 가시화 연구에 사용되고 있다. 수중 운동체 주위의 유동 가시화 연구로는 2차원 실린더(Ro et al., 2001; Park and Kwak, 2004; Jang and Lee, 2008)와 수중익(Hyun et al., 2000) 주위 유동에서부터 회류수조의 유속 분포 교정에 관한 연구(Suh and Kwang, 2011) 및 복잡한 선박 프로펠러의 반류 유동(Lee et al., 2009)에 이르기까지 광범위하게 사용되고 있으며, 이러한 연구 결과는 수치 및 이론해석 결과를 검증하는데 유용하게 사용되고 있다. 하지만 이전의 PIV 연구의 대부분은 공기 중이나 넓은 관측부내 저속 유동 상태에서 이루어진 실험 및 영상 데이터 처리에 관한 내용이 대부분이며, 고속 유동장에 놓인 몰수체에서 발생하는 공동유동(Cavitating flow)에 대한 PIV 연구는 부족한 실정이다.

본 연구에서는 2차원 쐐기형 모델을 대상으로 캐비테이션 터널 실험을 수행하였으며, 특히 동일한 유속 조건에서 터널 내부 압력을 조절하여 비공동 상태와 공동 상태를 구현하고 각각의 경우 몰수체 후류에서 생성되는 복잡한 유동장을 PIV로 계측하여 가시화하고, 유기되는 변동압력을 계측하여 박리 와류의 주기적 특성을 비교, 평가하고자 하였다.

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험 장치

실험은 충남대학교 캐비테이션 터널(Fig. 1)에서 수행되었으며,

Received 8 August 2018, revised 2 December 2018, accepted 13 December 2018
Corresponding author Byong-Kwon Ahn: +82-42-821-6625, bkahn@cnu.ac.kr ORCID: http://orcid.org/0000-0002-0339-6069

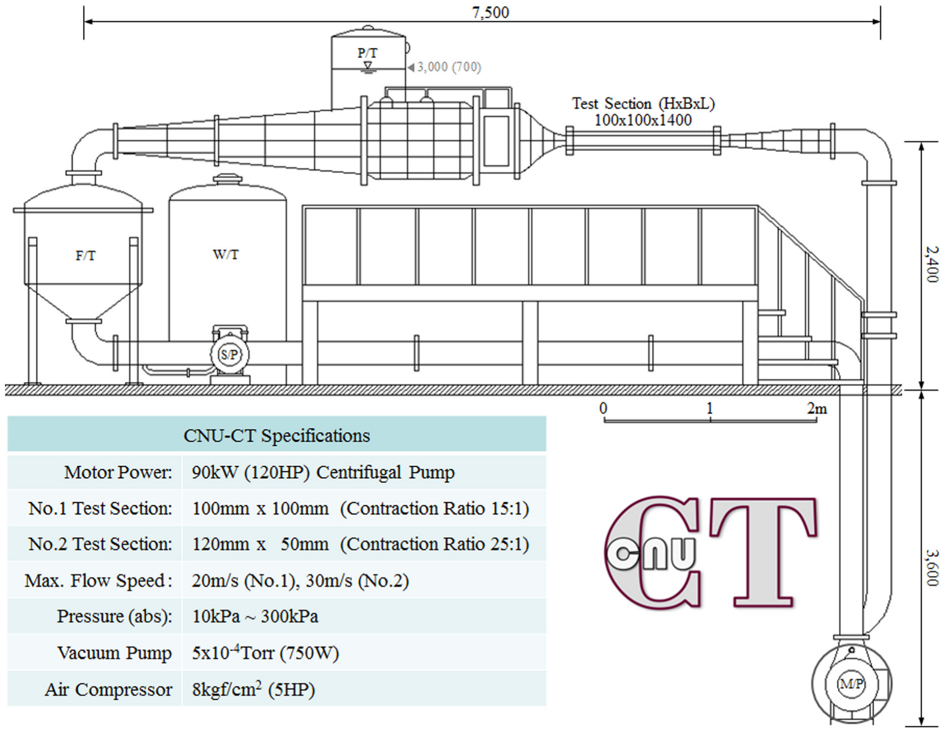


Fig. 1 CNU-CT and specifications

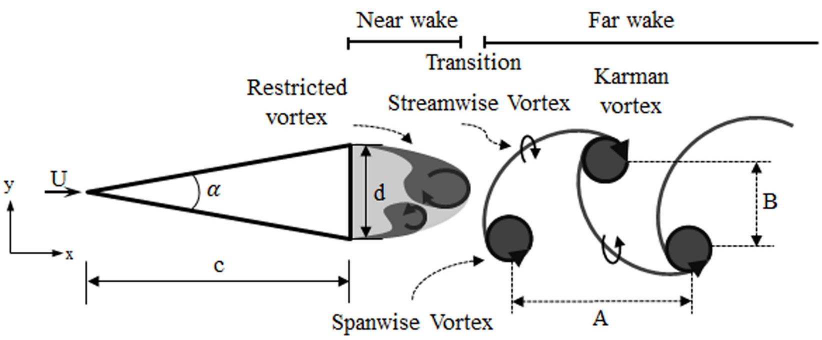


Fig. 2 Test model and schematic view of the wake flow of a wedge-shaped body

관측부의 크기는 100×100mm이며, 최대 유속은 20m/s, 터널 내부의 압력은 최소 0.1bar(10kPa)에서 최대 3bar(300kPa)까지 조절할 수 있다. Fig. 2와 같은 2차원 쐐기형 모델 ($\alpha=20^\circ$, d=20mm, c=56.7mm)을 대상으로 수행되었으며, 모델의 폭은 100mm이다. 유체역학적으로 잘 알려진 것처럼 무딘 물체(Blunt body)의 후류에서는 주기적으로 박리되어 발달하는 Karman 와열(Vortex street)이 형성된다. 유속이 증가할수록 박리되는 와류의 세기가 강해지면서 그 중심에서의 압력이 낮아져 공동이 형성되며 와류들의 상호간섭이 더욱 명확하게 가시적으로 나타난다. Fig. 2는 쐐기형 물수체의 후류에서 발생하여 성장하는 공동 유동의 일반적인 특성을 보여준다. 몰수체 끝단(Tip)에서 박리된 유동은 물체와 가까운 후류영역에서 구속된 와류(Restricted vortex)를 형성하며 이후 유동방향 와류(Streamwise vortices)와 횡방향 와류(Spanwise vortices)로 이루어진 주기적인 Karman 와열을 이룬다.

2.2 PIV 시스템 구성

본 실험에서는 이중 펄스 YAG(Yttrium-Aluminum-Garnet) 레이저인 Litron사의 Nano S 65-15 PIV를 사용하였으며, 그 재원은 Table 1과 같다. PIV 실험은 유동장을 가시화하고 얻어진 영상을 처리하여 짧은 시간 간격 내에 이동한 입자의 이동 거리를 분석하여 속도 벡터를 구하는 방식으로 진행된다. 각 프레임 내에 존재하는 수많은 입자 사이에서 영상을 통해 동일 입자로 인지하고 일정 시간 이후 고속으로 정확하게 식별해야 하며, 별도의 후처리 작업 또한 중요한 요소이다. 또한 레이저는 직진성을 가진 원형의 형태로 출력되기 때문에 특수 렌즈와 반사경을 사용해서 시트(Sheet)화 하여 관심 유동장에 투사하였다.

Table 1 Specifications of Nano S 65-15 PIV

Model	Nano S 65-15
Repetition rate per laser head [Hz]	0-15
Output energy at 532 nm per laser head [mJ]	65
Beam diameter [mm]	4
Pulse length @ 1064 nm [ns]	6-8

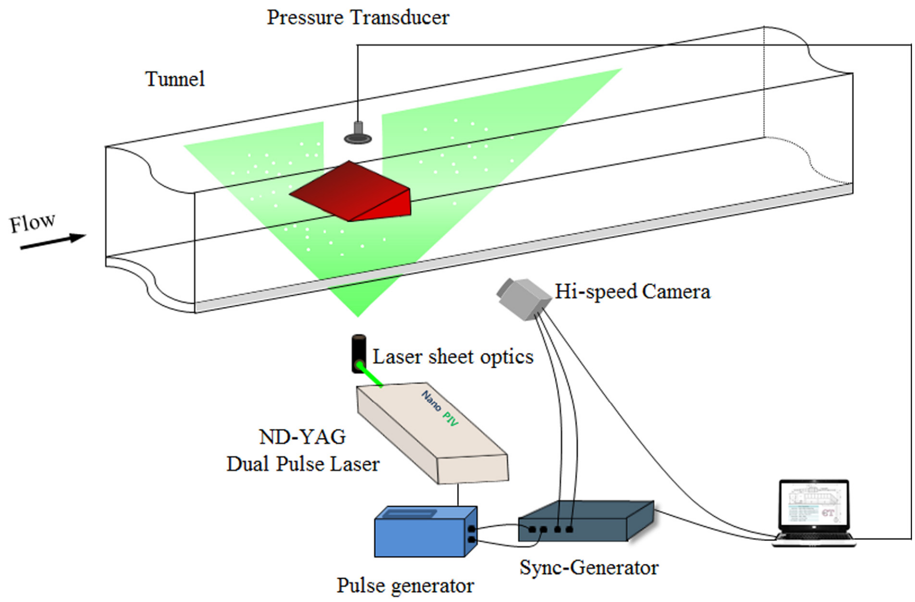


Fig. 3 Experimental setup

본 실험은 Fig. 3과 같이 캐비테이션 터널 관측부의 아랫면에서 레이저 시트를 투사하였으며, 추적 입자는 10㎛ 크기의 1.1g/cm^{3}의 밀도를 갖는 HGS(Hollow Glass Sphere)를 사용하였다. 특히, 공동 유동장의 고속 영상분석을 위해 80,000fps급의 초고속 카메라(Photron UX100)를 사용하여 별도의 동기화 장치를 통해 레이저가 투사되는 시간과 카메라로 촬영하는 시간을 일치시켜 주고, 해석에 사용할 사진 간의 시간 간격을 별도의 프로그램을 사용하여 유속에 따라 조절해주었다. 영상 후처리 과정에 따라 결과 값이 다를 수 있기 때문에 데이터 처리 과정 또한 굉장히 중요하다. Fig. 4는 PIV 해석과정을 나타낸 것으로 PIVTEC사의 PIVview2C를 사용하여 해석하였다. 전체 해석영역의 이미지 크기는 1280픽셀×312픽셀이며, 몰수체에 의하여 가려지는 영역은 해석 영역에서 제외하였다. 조사영역은 32픽셀×32픽셀로 하여 50%를 중첩하여 해석하였으며, 이 때 속도 벡터의 간격은 16픽셀로 이는 3.14mm에 해당한다.

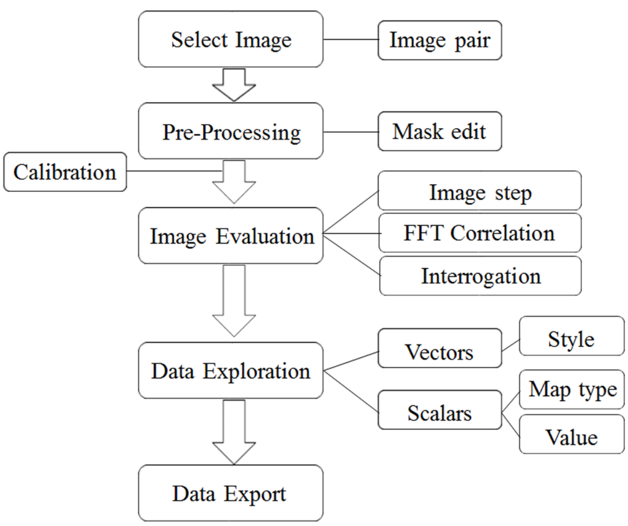


Fig. 4 PIV analysis procedure

3. 결과 및 분석

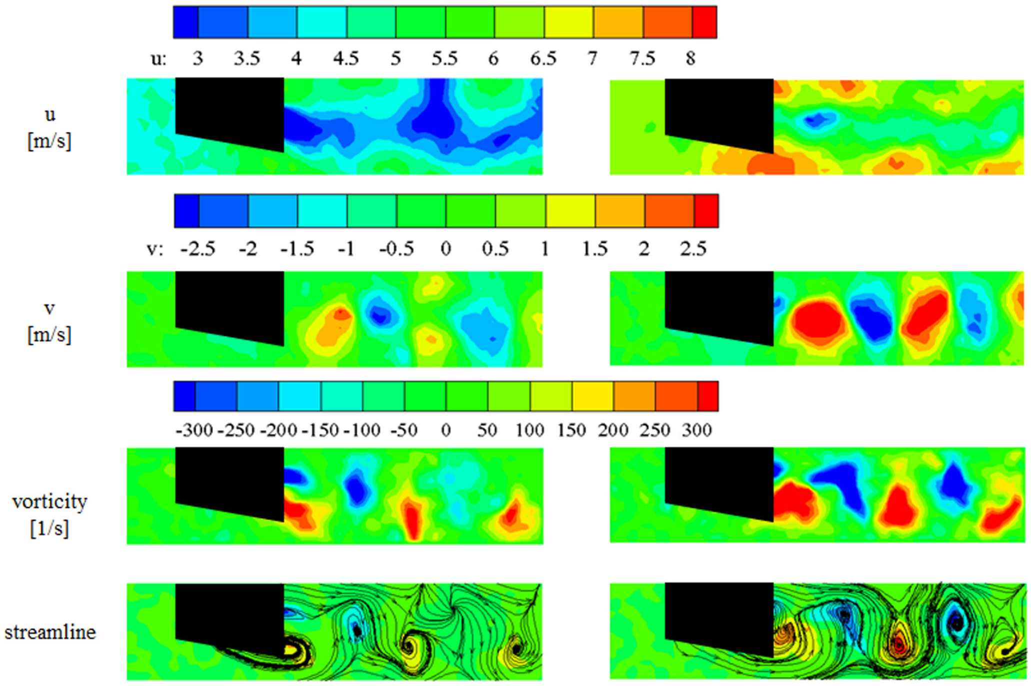
유동장 속에 위치한 물체의 후류에서는 주기적 특성을 갖는 와류가 발생한다. 특히, 쐐기형상을 갖는 몰수체의 경우 끝단으로부터 경계층이 박리되면서 상대적으로 넓은 범위의 와류가 생성되어 발달하며, 와류가 세기가 강해지면 그 중심에서의 압력강하(Pressure drop)에 따라 공동이 형성되어 주기적인 와류 특성이 더욱 명확하게 나타난다. 본 실험에서는 먼저 비공동 상태의 후류 유동장을 계측하고 그 특성을 분석하였으며, 동일 레이놀즈 수 상태에서, 즉 동일 유입 유속 상태에서 터널 내부의 압력을 조절하여 공동 상태를 모사하고 이때 몰수체 후류에서 발생하는 와류의 박리특성을 계측하여 비교, 분석하였다. 여기서 유동 및 공동 특성을 나타내는 무차원수인 레이놀즈 수(Rn)와 캐비테이션 수(σ)는 다음과 같이 정의된다.

$$Rn = \frac{Ud}{\nu} \tag{1}$$

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

여기서 U는 유입속도, d는 몰수체의 두께, ν는 동점성 계수, P_∞는 터널 내부 압력, P_v는 유체의 증기압이다.

Fig. 5는 상대적으로 낮은 속도(5m/s)와 높은 속도(7m/s) 조건인 레이놀즈 수 1.0×10^{5}과 1.4×10^{5}인 비공동 유동장의 u, v 속도 성분 분포, 와도(Vorticity), 그리고 유선을 보여준다. 유속변화에 따라 레이저 펄스 사이의 시간 간격을 조절하였으며, 동기화 장치를 통해 초고속 카메라의 촬영 간격 또한 마찬가지로 조절하였다. 본 터널에서는 LDV(Laser doppler velocimeter, 모델명 FlowExploer DPSS1501D)를 사용하여 유입속도를 계측하고 있으며, 각 조건에서의 유입유동의 난류강도는 0.7%로 동일하게 계측되었다. 레이



(a) $Rn = 1.0\times10^5$ (b) $Rn = 1.4\times10^5$

Fig. 5 Instantaneous flow field: u, v velocity, vorticity and streamlines

놀즈 수가 증가함에 따라 속도 성분과 와도가 강해는 것을 볼 수 있으며, 이는 유선 정보를 통해서도 확인할 수 있다.

Fig. 6은 각각의 x/c 위치에서 y/c 변화에 따라 유입속도로 무차원한 u속도 성분의 특성을 보여준다. 여기서 실선은 레이놀즈 수 1.0×10^5, 점선은 레이놀즈 수 1.4×10^5일 때의 값이다. 물체와 가까운 중심 영역($y/c = 0.0$)에서는 유입속도 대비 50% 이상 낮은 속도 분포를 보이고 있으며, 몰수체로부터 후류 방향으로 멀어질수록 상대적으로 높은 속도 분포를 보인다. 또한 몰수체와 가깝고 레이놀즈 수가 클수록 y/c에 따른 속도 성분 차이가 더 크게 나타나는 것을 확인할 수 있으며, 몰수체에서 후류 방향으로 멀어질수록 y/c 변화에 따른 속도 변화의 차이가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 7은 쐐기형 몰수체 후류에서의 무차원한 v속도 성분 분포를 보여주며, 각각의 y/c 위치에서 x/c 변화에 따른 무차원한

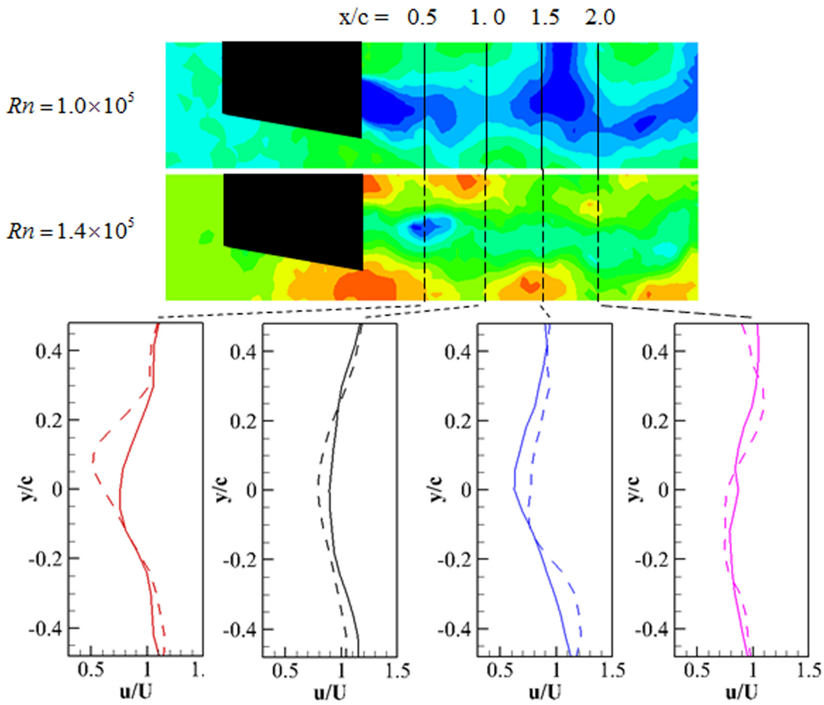
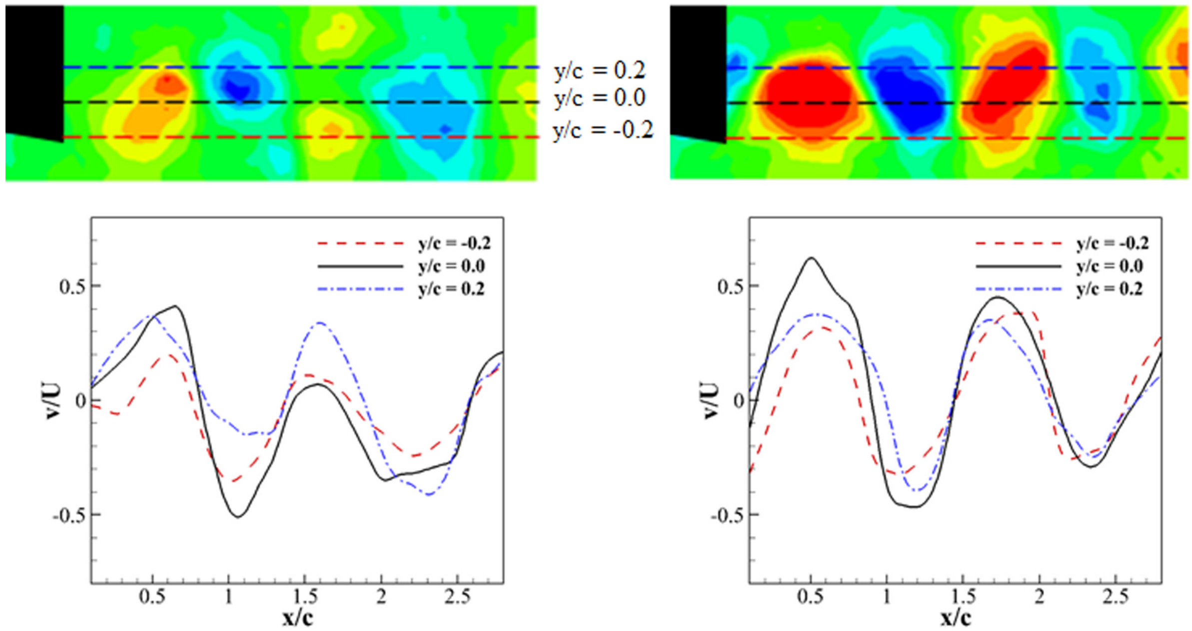


Fig 6. Comparison of u velocity components at different Reynolds numbers



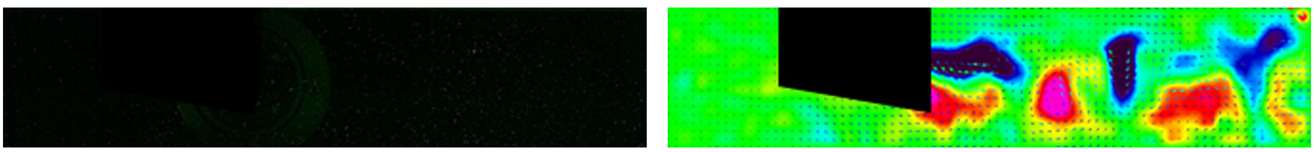
(a) $Rn = 1.0 \times 10^5$ (b) $Rn = 1.4 \times 10^5$

Fig. 7 Comparison of v velocity components at different Reynolds numbers

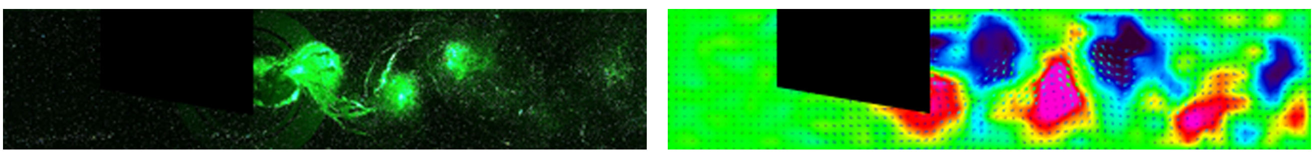
속도 변화를 보여준다. x/c에 따라 무차원한 v속도 성분은 양의 값과 음의 값으로 주기적 특성을 갖고 변화하는 것을 볼 수 있다. 이때 몰수체의 중심에 해당하는 $y/c = 0.0$에서는 다른 위치와 비교했을 때 v속도 성분 값의 차이가 상대적으로 크게 발생하지만 몰수체로부터 멀어질수록 그 차이가 줄어드는 것을 볼 수 있으며, 레이놀즈 수가 증가하여 박리 와류의 강도가 강해질수록 v속도 성분 값의 차이가 커지는 것을 확인할 수 있다. 비공동 상태에서 유속변화에 따른 박리 와류의 정량적인 주파수 특성은 유기되는 변동압력을 계측하여 정량적으로 분석하였으며, 공동상태의 특성과 함께 본 절의 후반부에 기술하였다.

수중 몰수체가 빠른 속도로 운동할 때 몰수체 주위의 압력이 낮아지면 캐비테이션 현상이 발생하게 된다. 캐비테이션 터널에서는 내부 압력을 조절하여 동일한 레이놀즈 수 조건, 즉 동일한 유속 조건에서 비공동과 공동 조건을 모사할 수 있으며, Fig. 8은 레이놀즈 수가 1.6×10^5인 동일한 유속 조건에서 비공동 상태(σ=5.16)와 공동 상태(σ=2.33)에서 촬영한 초고속 카메라 이미지와 와도 해석결과를 보여준다. 특히, 공동 상태의 경우 투사된 레이저 면에 공동의 형상이 선명하게 가시화 되며, 물과 공기가 섞여 있는 캐비테이션 상태에서도 입자 추적이 가능하여 정량적인 유동 특성에 대한 정보 획득이 가능함을 알 수 있다. Fig. 9는 공동 상태(σ=2.33)에서 일정한 시간 경과에 따라 발생하는 공동 와류에 대한 초고속 카메라 이미지와 와도 해석 결과를 보여준다.

비공동 상태와 공동 상태에서 박리되는 Karman 와열의 주기적 특성을 평가하기 위해 터널 시험부의 관측창 상부에 부착된 압력센서(Kulite XTM-190)를 이용하여 변동압력을 계측하였다. 계측된 시간 영역의 변동압력 값을 고속 푸리에 변환하여 박리되는 와류의 주파수를 획득하였다. Fig. 10은 유속 변화에 따른 Karman 와열의 주파수 특성을 보여주며, 이때 비공동 상태란 터널 내부 압력을 높여 고속에서도 공동이 발생하지 않는 조건을 의미하며, 공동 상태는 유속이 증가함에 따라 주위 압력이 낮아져 특정한 유속(본 실험의 경우 약 8m/s) 이상에서는 공동이 발생한 조건을 의미한다. 8m/s 미만의 영역에서는 비공동 및 공동 조건에서는 속도와 주파수의 관계가 선형적이지만 그



(a) $\sigma = 5.16$, $Rn = 1.6 \times 10^5$



(b) $\sigma = 2.33$, $Rn = 1.6 \times 10^5$

Fig. 8 Comparison of instantaneous high speed images and vorticity distributions at different cavitation numbers

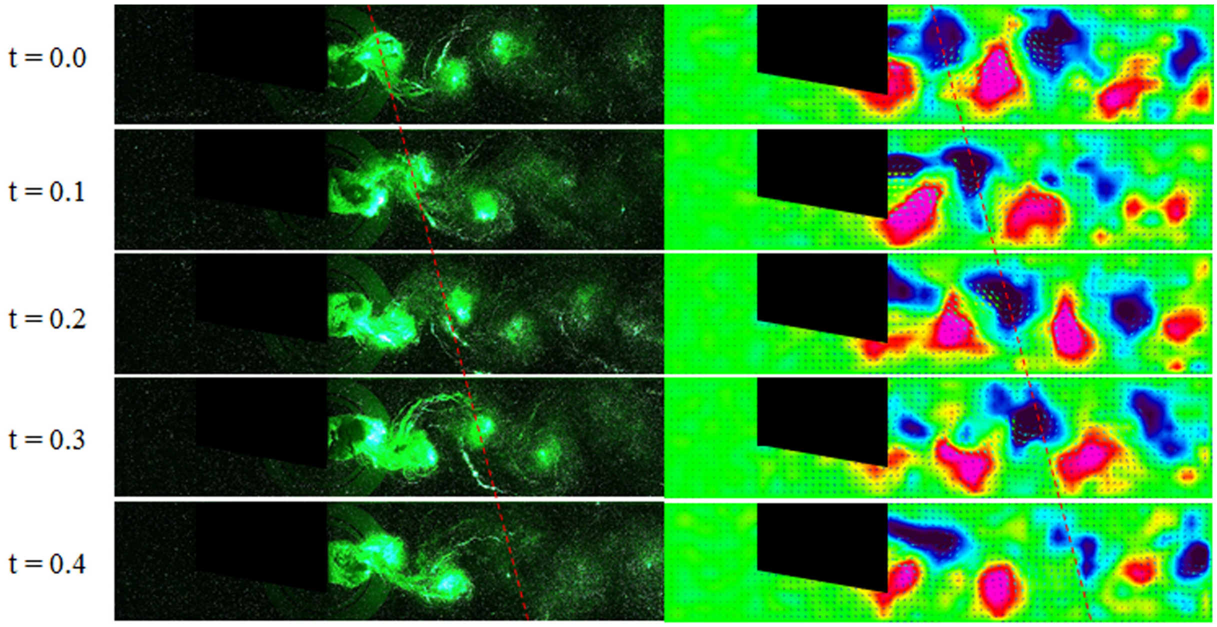


Fig. 9 Instantaneous high speed images and vorticity distributions at a time difference

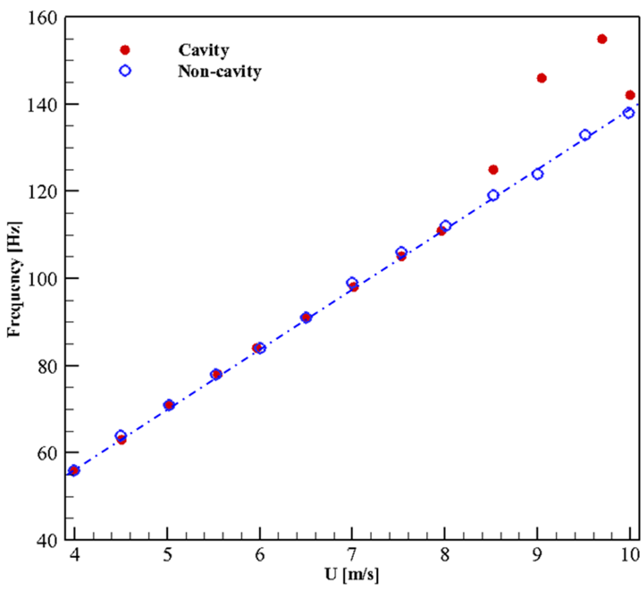


Fig. 10 Flow speed v.s. Vortex shedding frequency

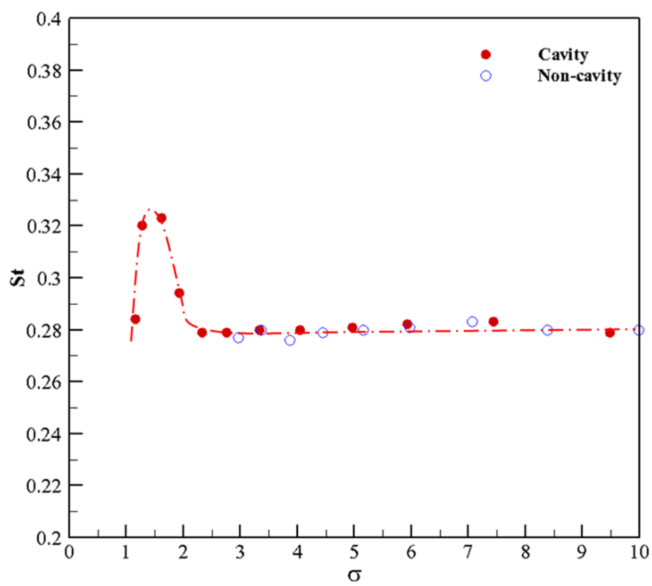


Fig. 11 Cavitation number v.s. Strouhal number

이상의 공동 조건인 경우 비선형적으로 변하는 것을 알 수 있다. Fig. 11은 몰수체 주변의 압력변화가 와류의 박리 주파수에 주는 영향을 확인하기 위하여 식 (2)로 정의되는 캐비테이션 수와 다음 식으로 정의되는 Strouhal 수(St)로 무차원화하여 표시하였다.

$$St = \frac{fd}{U} \tag{3}$$

여기서 f, d, U는 각각 박리 주파수, 몰수체의 두께, 유입 속도이다. 비공동 상태일 때의 Strouhal 수는 약 0.28로 일정하게 유지되다가 공동 상태에서는 캐비테이션 수(σ) 1.29에서 약 0.32까지 증가하였다가 다시 감소하는 것을 확인할 수 있다. 일반적으로 잘 알려져 있는 바와 같이 비공동 상태에서는 유속 변화에 상관없이 일정하게 나타나는 Karman 와류의 박리 특성이 공동이 발생하는 특정 구간에서는 다르게 나타난다는 것을 알 수 있다. 즉, Strouhal 수가 증가하는 것은 유동속도에 대한 박리 주파수의 비율이 증가한다는 것으로, 단위 시간당 박리되는 Karman 와열의 간격이 줄어든다는 것을 의미하며 이러한 사실은 Fig. 12의 와도 해석결과를 통해서 확인할 수 있다. 박리 주파수의 최대 값은 구속 와류(Restricted vortex)에서 생성된 공동의 길이가 쐐기의 두께(d)과 같은 크기로 성장한 조건에서 발생하며, 이후 캐비테이션수가 낮아져 구속 와류가 더 성장하게 되면 Karman 와류의 박리 주파수는 비공동 상태와 같아진다. 이러한 사실은 동일한 몰수체의 비정상 공동 와류에 대한 수치해석(Kim et al., 2018)을 통해서도 확인되었다.

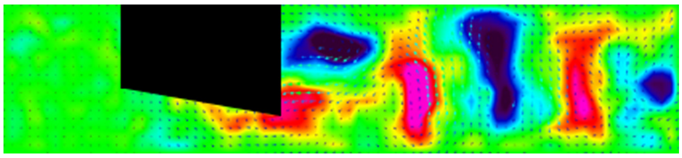
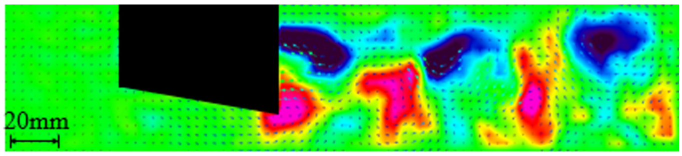
Rn	σ	St	vorticity
1.8×10^5	3.87	0.27	
1.8×10^5	1.61	0.33	

Fig. 12 Comparison of different cavitation numbers

4. 결　　론

본 연구는 캐비테이션 터널에서 2차원 쐐기형 몰수체를 대상으로 비공동 및 공동 상태를 모사하고 이 때 발생하는 후류 유동장을 PIV를 이용하여 가시화하였다. 또한 와류가 생성되어 발달하는 과정에서 발생하는 변동압을 계측하여 그 주파수 특성을 정량적으로 평가하였다. 일반적으로 잘 알려진 바와 같이 비공동 유동장의 무딘 몰수체에서 발생하는 Karman 와열의 박리 주파수는 유속 변화에 선형적으로 비례하여 증가하기 때문에 Strouhal 수는 일정한 값으로 나타난다. 그러나 본 연구를 통해 공동이 발생하는 상태에서의 Karman 와열의 박리 주파수는 비선형 특성이 나타남을 규명하였고, 공동 상태의 유동장을 PIV 계측을 통해 가시화 할 수 있음을 보였다.

후　　기

본 연구는 산업통상자원부의 산업융합원천기술개발사업(10045337)과 산업핵심기술개발사업(10062293)의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부임을 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

References

Hyun, B.S., Choi, K.S., Doh, D.H., 2000. Quantitative Measurements of Complex Flow Field Around a Hydrofoil Using Particle Image Velocimetry. Journal of the Society Naval Architects of Korea, 37(3), 37-44.

Jang, Y.I., Lee S.J., 2008. PIV Analysis of Near-wake behind a Sphere at a Subcritical Reynolds Number. Experiments in Fluids, 44(6), 905-914.

Kim, J.H., Jeong, S.W., Ahn, B.K., Park, C.S., Kim, G.D., 2018. Numerical Analysis of Unsteady Cavitating Vortex around Two-dimensional Wedge-shaped Submerged Body. Journal of Ocean Engineering and Technology, 32(1), 36-42. http://dx.doi.org/10.26748/KSOE.2018.2.32.1.036

Lee, J.Y., Paik, B.G., Lee, S.J., 2009. PIV Measurements of Hull Wake behind a Container Ship Model with Varying Loading Condition. Ocean Engineering, 36(5), 377-385.

Park, G.S., Kwak, Y.K., 2004. Flow Survey around Two-Dimensional Circular Cylinder using PIV Technique. Journal of Ocean Engineering and Technology, 18(3), 1-7.

Ro, K.D., Jang, D.H., Bae, H.S., Kim, W.C., 2001. The Visualization of the Flowfield around Three Circular Cylinders in the Tandem Arrangement by the PIV. Journal of the Korea Society of Marine Engineering, 35(2), 264-270.

Suh, S.B., Kwang, H.J., 2011. Calibration of Water Velocity Profile in Circular Water Channel Using Particle Image Velocimetry. Journal of Ocean Engineering and Technology, 25(4), 23-27.