

# Visualization of Turbulent Flow Fields Around a Circular Cylinder at Reynolds Number $1.4 \times 10^5$ Using PIV

Jun-Hee Lee<sup>1</sup>, Bu-Geun Paik<sup>2</sup>, Seok-Kyu Cho<sup>2</sup> and Jae-Hwan Jung<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Ph.D. Student, Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Inha University, Incheon, Korea

<sup>2</sup>Principal Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Daejeon, Korea

<sup>3</sup>Senior Researcher, Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Busan, Korea

## 레이놀즈 수 $1.4 \times 10^5$ 에서 PIV를 활용한 원형 실린더 주위 난류 유동장 가시화 연구

이준희<sup>1</sup>, 백부근<sup>2</sup>, 조석규<sup>2</sup>, 정재환<sup>3</sup>

<sup>1</sup>인하대학교 조선해양공학과 연구원

<sup>2</sup>선박해양플랜트연구소 친환경해양개발연구본부 책임연구원

<sup>3</sup>선박해양플랜트연구소 심해공학연구센터 선임연구원

**KEYWORDS:** Circular cylinder 원형실린더, Turbulent flow fields 난류유동장, PIV (Particle image velocimetry) 입자영상유속계, High Reynolds number 높은 레이놀즈 수, Cavitation tunnel 캐비테이션 터널

**ABSTRACT:** This study investigates the experimental parameters of particle image velocimetry (PIV) to enhance the measurement technique for turbulent flow fields around a circular cylinder at a Reynolds number ( $Re$ ) of  $1.4 \times 10^5$ . At the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO), we utilized the cavitation tunnel and PIV system to capture the instantaneous flow fields and statistically obtained the mean flow fields. An aspect ratio and blockage ratio of 16.7% and 6.0%, respectively, were considered to minimize the tunnel wall effect on the cylinder wakes. The optimal values of the pulse time and the number of flow fields were determined by comparing the contours of mean streamlines, velocities, Reynolds shear stresses, and turbulent kinetic energy under their different values to ensure accurate and converged results. Based on the findings, we recommend a pulse time of 45  $\mu$ s corresponding to a particle moving time of 3–4 pixels, and at least 3,000 instantaneous flow fields to accurately obtain the mean flow fields. The results of the present study agree well with those of previous studies that examined the end of the subcritical flow regime.

## 1. 서 론

몽투한 물체(Bluff body)를 대표하는 형상 중 하나인 원형 실린더는 공학 시스템의 유체 성능을 향상시키는데 가장 근본적인 물리적 통찰력을 제공하는 대상으로 1960년대부터 현재까지 실린더의 하중과 유동 특성 관점에서 많은 연구가 수행되어 왔다(Roshko, 1961; James et al., 1980; Schewe, 1983; Williamson, 1996; Zdravkovich, 1997; Chen, 2022).

실린더 주위 유동 특성 연구가 고전 문제임에도 불구하고 최근까지도 연구가 수행되고 있는 이유는 단순한 형상에 반해 유동 특성이 매우 복잡하며 레이놀즈 수(Reynolds number,  $Re$ )에 강한 의존성을 보이기 때문이다. 이러한 특성은 모형과 실선 사이에서 나타날 수 있는 척도효과(Scale effect)의 직접적인 원인이 되므로 실린더로 기본 형상을 이루는 해양구조물 또는 라이저의 유체 성능 평가에서도 매우 중요하다. 대부분의 선행연구들은 주로 물체 표면은 층류 경계층을, 후류는 난류 특성을 가지는 아임계 영역(Sub-critical regime)에 초점

Received 17 April 2023, revised 21 June 2023, accepted 19 July 2023

Corresponding author Jae Hwan Jung: +82-51-604-7828, jaehwan@kriso.re.kr

It is noted that this paper is revised edition based on 2018 Fall Conference of The Korean Society of Visualization in Pusan (Lee et al., 2018).

© 2023, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

을 두어  $10^3 \leq Re \leq 10^4$ 의 유동 특성을 고려하였으며 최근에 이르러  $Re \geq 10^5$  그리고 임계 및 초임계 영역을 다루는 연구(van Hinsberg, 2015; van Hinsberg et al., 2018)들이 발표되고 있다. 아임계 영역에서 가장 높은 레이놀즈 수,  $10^5$ 은 라이저 또는 해양구조물 칼럼 지지대를 특성 길이로 고려하였을 때 실선 기준에서 관측될 수 있는 값으로 공학적으로 중요한 의미를 가진다.

아임계 영역에서 스트롤 수가 0.2로 일관(Blevins, 1977)되게 유지되는데 그 이유는 속도 증가만큼 후류에서 난류 천이가 빨리 일어나 와홀림 주기가 감소하기 때문이다. 따라서 기존에 수행된  $10^3 \leq Re \leq 10^4$  범위내 유동장 계측 연구들을 통해 상대적으로 더 높은 레이놀즈 수인  $10^5$ 의 유동 특성이 예측 가능하나 실제 유동장 계측 연구는 후류에서 난류 천이의 위치 변화에 따른 유동 특성을 이해하는데 직접적인 단서가 될 뿐만 아니라, 최근 전산유체해석의 발전과 함께 검증용 실험 DB로서 매우 중요한 가치를 지닐 수 있다. 그러나 레이놀즈 수,  $10^5$  부근에서 수행된 대부분의 연구(Schewe, 1983, van Hinsberg, 2015, van Hinsberg et al., 2018)는 하중 특성 변화에 초점을 두었기 때문에 하중 변화의 근본적 원인이 되는 실린더 주위 유동 특성에 관한 실험 자료들은 매우 부족한 실정이다. 이러한 관점에서 입자영상 유속계(Particle image velocimetry, PIV)는 실린더 주위 유동장 계측에 매우 유용한 수단이며 해당 레이놀즈 수에서 관련 연구가 부족하여 정도 높은 실린더 후류 유동장 계측을 위해서 PIV 계측 기법에 관한 연구가 필요하다.

본 연구에서는 아임계 영역에서 가장 높은 레이놀즈 수에 해당하는  $10^5$ 에서의 유동장 DB 구축에 앞서 실린더 후류 유동장을 정도 높게 계측하기 위한 PIV 촬영 기법 및 가시화 연구를 수행하였다. 좀 더 상세하게는 유동장 정밀 계측을 위한 PIV 기법의 기본적인 특성을 파악하고자 실험 설정 변수인 입자영상의 계측시간과 평균유동장을 구하기 위해 사용되는 순간유동장의 개수에 따른 유동장 계측 특성 평가를 수행하였으며 이 연구를 통해 정립된 PIV 기법을 이용하여 동일한 레이놀즈 수의 선행연구와의 비교 분석하여 기법에 대한 신뢰성 및 검증을 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험이 수행된 Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering (KRISO)의 중형 캐비테이션 터널을 보여준다. 터널의 시험부 제원은  $0.6^W \times 0.6^H \times 2.6^L$  m<sup>3</sup>이다. 시험부에서 최대 유속은 12 m/s이며 시험부에서 정압을 10.1 kPa부터 202 kPa까지 가변을 할 수 있다. 본 연구에서 시험구간으로 유입되는 자유흐름에 대한 균일성(Uniformity)은 약 1% 이내의 오차율을 가진다.

실린더 직경( $D$ )은 36 mm로 종횡비(Aspect ratio,  $L/D$ ,  $L$ 는 실린더 스패ん길이)는 16.7이고 터널 시험부의 높이( $H$ )에 대한 수평으로 놓인 원형 실린더 직경의 비를 나타내는 폐쇄비(Blockage factor,  $D/H$ )는 6.0%이다. 먼저 PIV 기법에 대한 기본적인 특성을 파악하고 평균 속도장을 구하기 위해서 실린더 주위 유동장 특성에 적합한 레이저 펄스의 시간간격(Pulse time,  $\Delta t$ )과 순간 유동장의 계측 수의 파악이 필요하다. 따라서 Table 1에 PIV 기법에 대한 기본특성을 알아보기 위한 실험조건을 정리하였으며 입자영상의 계측 시간 간격, 순간 속도장의 개수의 변화가 고려된다.



Fig. 1 Schematic diagram of the cavitation tunnel.

Table 1 Test cases regarding the experiment parameters.

Test No.	$\Delta t$ ( $\mu s$ )	Number of velocity fields	Trigger rate (Hz)
1	11.25	3000	7
2	45.0	3000	
3	180.0	3000	
4	45.0	100	
5	45.0	500	
6	45.0	1000	

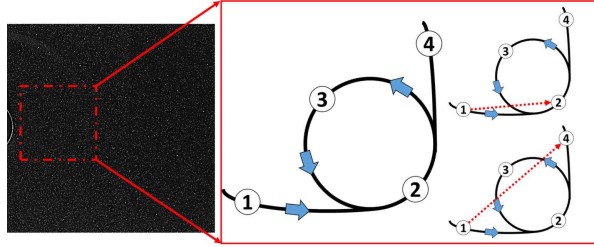


Fig. 2 Schematic of particle paths according to pulse time.

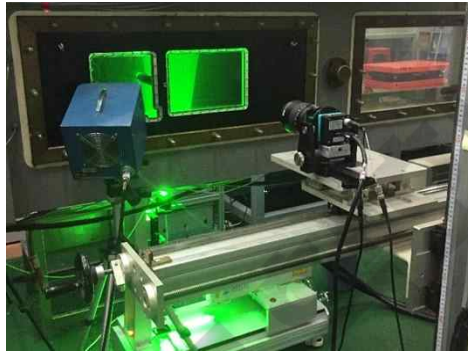


Fig. 3 Experimental setup of the PIV system.

PIV 기법의 원리는 두 개의 입자영상의 계측 시간( $\Delta t$ )과 산란입자 이동거리를 계산하여 속도벡터를 구하는 방식으로  $\Delta t$ 의 변화는 빠르게 움직이는 난류의 길이 및 시간 척도에 따른 입자의 속도벡터 계산의 정확도와 깊게 연관된다. 일반적으로 산란입자가 조사영역을 지나는 시간의 1/10 이하가 되는 시간간격을 채택하며 연구목적에 따라 실린더 후류에서의 계측 영역 내 어떤 산란입자를 선택함에 따라 유동장 계측에 영향을 준다(Park and Kwak, 2004; Paik et al., 2007; Paik et al., 2010). Fig. 2는 시간간격에 따른 속도벡터의 생성에 관한 간략도를 나타낸다. Fig. 2에서 나타난 바와 같이 유체입자가 1번에서 4번으로 흐른다고 가정했을 때 계측 시간 간격에 따른 유체입자의 이동 경로를 파악하고 정확한 속도벡터를 구할 수 있다. 본 연구에서 카르만 와열(Kármán vortex street)의 생성으로 속도가 느려지는 후류영역의 산란입자들을 선택하였으며 산란입자가 조사영역의 1/10 이하(3-4 pixel)로 이동하는 시간간격에 해당하며 그 값은  $45.0 \mu\text{s}$ 이다. 그리고 시간 간격  $45.0 \mu\text{s}$ 을 중심으로 동일한 비율로 0.25배와 4배에 해당하는 시간 간격( $11.25 \mu\text{s}$ 과  $180.0 \mu\text{s}$ )을 고려하여  $Re = 1.4 \times 10^5$  영역의 유동장 계측에 시간 간격 의존성을 검토하였다.

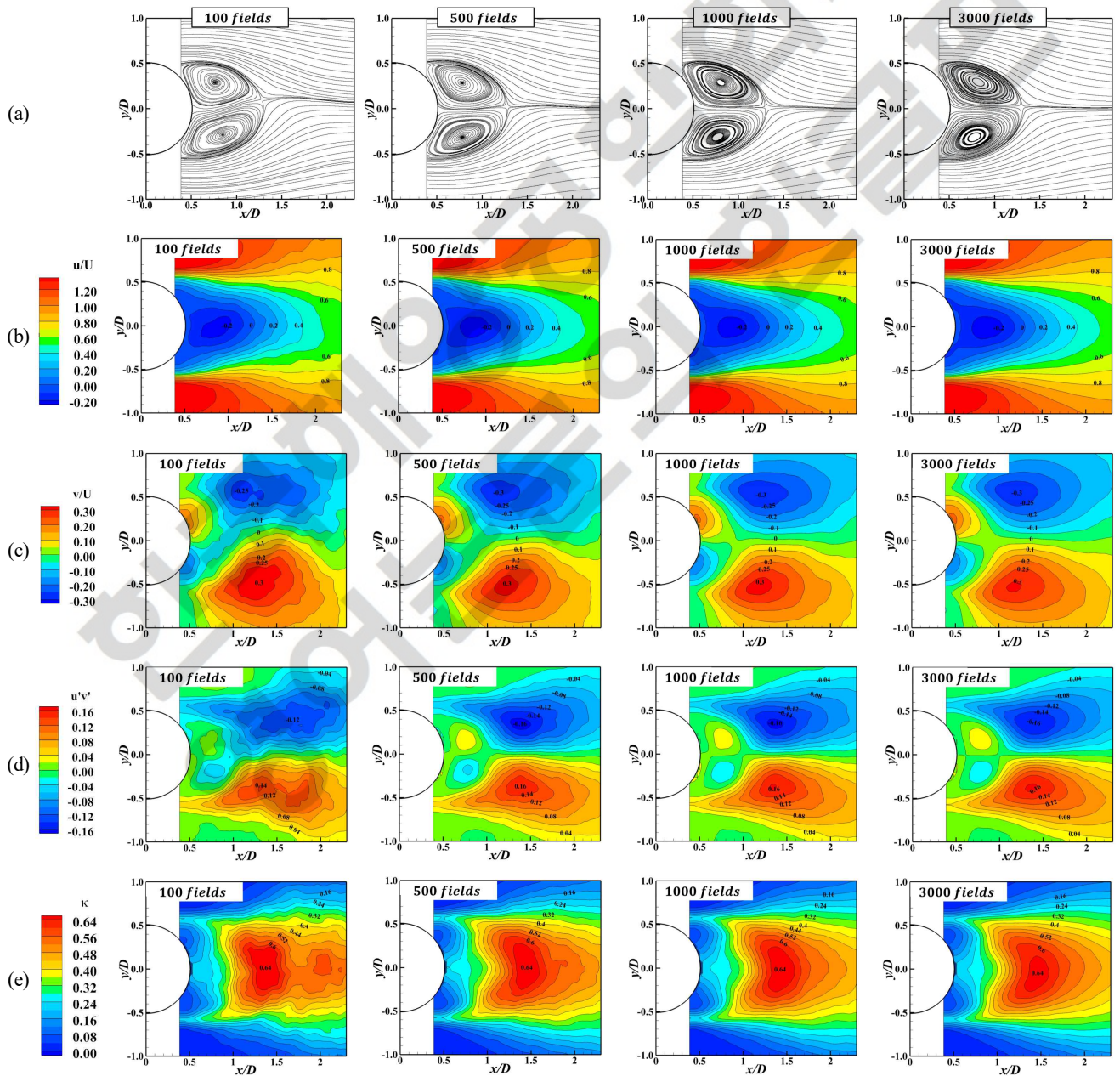
Fig. 3은 실린더의 후류를 측정하기 위하여 설치된 PIV의 실험장치를 보여주고 있다. 속도장의 측정을 위한 2차원 PIV 시스템은 Dantec사의 이중 펄스 방식의 Nd:Yag laser (200 mJ/pulse),  $2048 \times 2048$  pixel의 고해상도 CCD (Charge-coupled device) 카메라, 카메라 이송장치, 영상처리 장치, 제어 및 계산용 컴퓨터 등으로 이루어져 있다. 산란입자로  $\text{TiO}_2$  (Titanium dioxide)를 사용하였으며 레이저 평면광을 중형 캐비테이션 터널 아래에서 조사하고 터널의 왼편에 카메라를 배치하여  $140 \times 140 \text{ mm}^2$ 크기의 측정단면에서 입자 영상을 계측하였다(Fig. 3). PIV 알고리즘(Adaptive correlation)을 이용하여 계산된 속도장에 16,129개의 속도벡터들을 얻었으며 미소조사구간의 크기는  $32 \times 32$  pixels 이었으며 50% 겹침(Overlapping)기법을 사용하여 속도장의 공간분해능을 높였다. 유효공간해상도는  $0.907 \text{ mm}$ 이고 이는 속도벡터 간의 거리를 나타낸다. PIV 후처리 과정에서 오류 벡터는 대표적인 알고리즘인 Dynamic mean value operator를 이용하여 처리된다(Lee, 1999). Fig. 3과 같이 시험부 하단에서 레이저 평면광이 조사되므로 실린더 상부의 일부 영역은 평면광이 형성되지 않아 정확한 속도벡터의 계산이 어렵다. 따라서 터널 시험부 상판 창에 평면 거울을 설치하고 레이저 평면광의 반사를 유도하여 실린더 상부영역에 평면광이 형성되도록 하였다. 그 결과, 반사거울은 상부의 속도벡터의 계산이 가능하도록 해준다. 본 연구에서는 기존 선행연구와 비교하기 위해 레이놀즈 수를  $1.4 \times 10^5$ 으로 고정하였으며 해당 유동조건을 구현하기 위해 고려된 터널 유속은  $4.5 \text{ m/s}$ 이다.

### 3. 실험결과

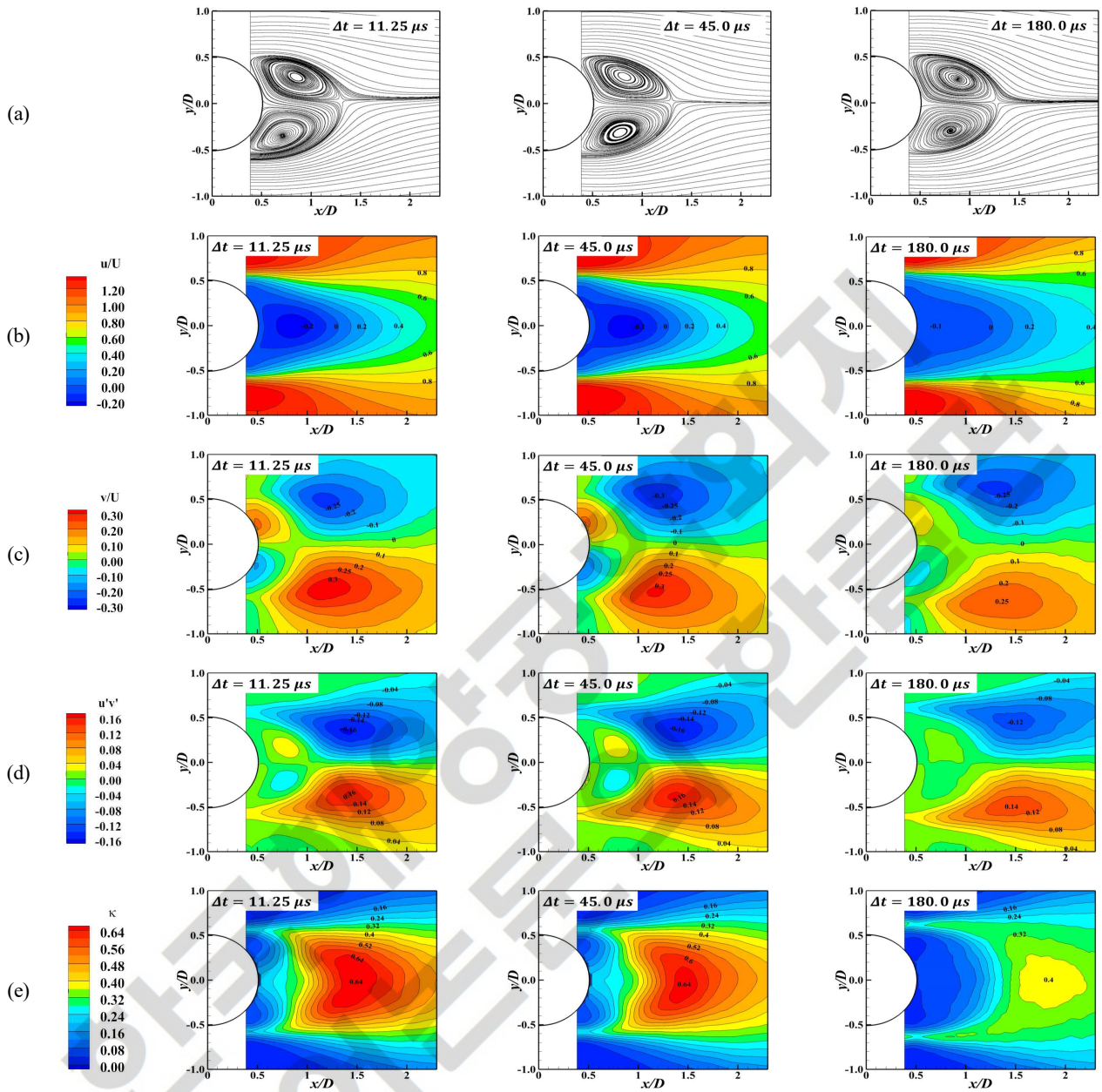
시간 간격,  $\Delta t$ 의 변화가 평균 유선, 주유동방향 및 법선방향 속도 그리고  $u'v'$  레이놀즈 전단응력과 난류 운동에너지 분포  $w$ 장의 계측에 미치는 영향을 확인하기 위해 Fig. 4에 시간 간격 별로 계측 결과들을 나타내었다. 여기서 언급된 물리량들은 3000개의 순간 속도장을 이용해 얻어졌으며 고려된 레이놀즈 수는  $1.4 \times 10^5$ 이다. Fig. 4(a)의 평균 유선 관찰을 통해 재순환 길이,  $l_c$ 는 시간 간격 변화와 관계없이 모두  $1.3D \pm 0.05D$  내외의 값을 가지지만 박리 거품(Separation bubble)의 상·하부 와류의 중심 위치는 시간 간격에 따라 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 특히  $\Delta t$ 가  $11.25 \mu\text{s}$ 과  $180 \mu\text{s}$ 일 때 상·하부 와류의 중심 위치는 비대칭적인 특성을 보이지만 시간 간격이  $45.0 \mu\text{s}$ 에서 그 차이가 감소하여 대칭된 경향을 보인다. 시간 간격 증가에 따른 일정한 경향이 관찰되지 않으므로 해당 결과에 대한 원인 분석을 위해서

시험 영역 내 유속의 공간 분포와 터널 상부에 반사거울 설치에 따른 실린더 상부영역 평면광 형성과 시간 간격의 관계 등의 추가적인 검토가 필요할 것으로 판단된다. 그리고 시간 간격,  $\Delta t$ 는 주유동방향 및 법선방향의 평균 속도 분포 특성에도 영향을 미치는 것을 Figs. 4(b)와 4(c)에서 확인할 수 있다. 박리 거품의 형성으로 인해 주유동방향의 음과 양의 속도 변화가 구분되어 관찰되는데 시간 간격, 11.25  $\mu s$ 과 45.0  $\mu s$ 의 결과에서 자유흐름유속의 25%에 당하는 음의 속도가 박리 거품 내부에서 계측되며 이는 선행연구인 Braza et al.(2006)의 결과와 일치한다. 그러나 180  $\mu s$ 의 경우 자유흐름유속의 약 10%에 해당하는 음의 속도가 계측된 것으로 보아, 해당 시간 간격에서 카르만 와열의 시간 평균의 결과로 얻어지는 박리 거품 내 속도 변화를 제대로 계측하지 못하는 것으로 판단된다. 법선방향 속도분포 변화에서도 시간 간격, 180  $\mu s$ 의 설정은 나머지 시간 간격의 결과에 비해  $-0.25 \leq v/U \leq 0.25$  범위의 급격한 속도 변화를 올바르게 계측 못하는 것을 Fig. 4(c)에서 관찰할 수 있다.

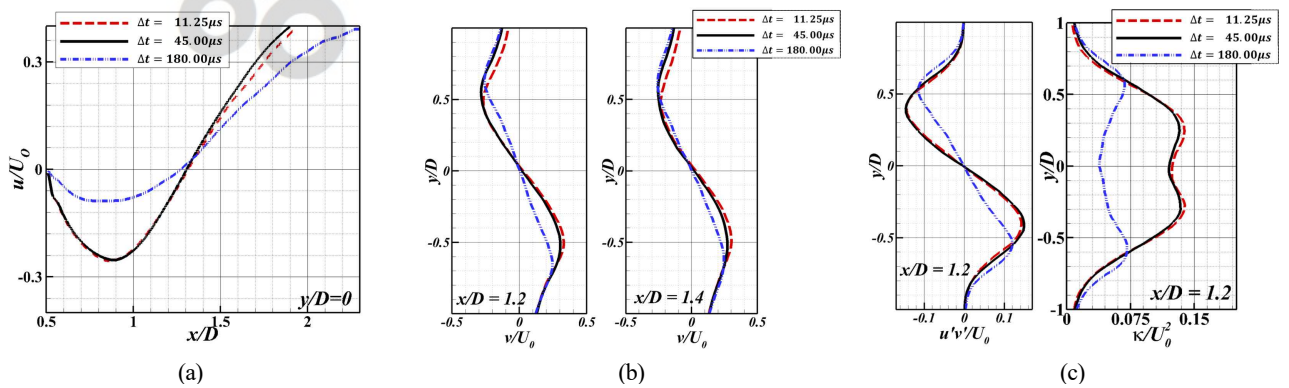
시간 평균 값이 중요한 주유동방향 및 법선방향 속도 분포와 달리  $u'v'$  레이놀즈 전단응력과 난류운동에너지는 난류 속도의 섭동에 의존하는데 시간 간격은 속도 섭동 정보가 반영된 평균 유동장에 영향을 미치는 것을 Figs. 4(d)와 4(e)를 통해 확인할 수 있다. 난류 특성을 동반한 카르만 와열의 발생은 시간 종속적 다중 스케일 와류들의 상호작용을 일으킴으로써 산란 입자들의 이동 경로는 매우 복잡해지는데 이 때, 시간 간격의 증가는 속도벡터의 계산 오차 증가와 짧은 시간에 발생하는 속도 섭동 변화를 정도



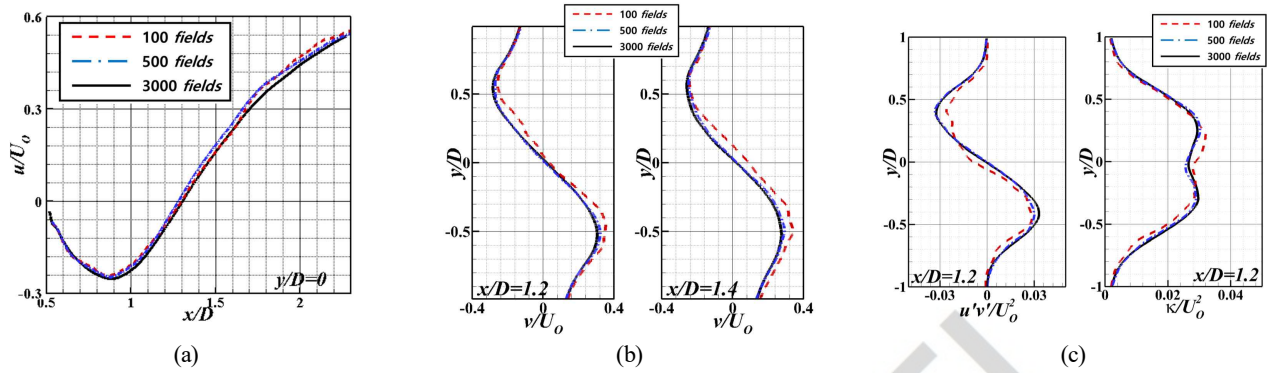
**Fig. 6** Comparison of flow fields for different averaging fields: (a) mean streamlines, (b) mean streamwise velocity, (c) mean crosswise velocity, (d)  $u'v'$  Reynolds shear stress, and (e) turbulent kinetic energy.



**Fig. 4** Comparison of flow fields for different pulse times: (a) mean streamlines, (b) mean streamwise velocity, (c) mean crosswise velocity, (d)  $u'v'$  Reynolds shear stress, and (e) turbulent kinetic energy.



**Fig. 5** Comparison of physical quantities for different pulse times: (a) mean streamwise velocity, (b) mean crosswise velocity, (c)  $u'v'$  Reynolds shear stress, and (d) turbulent kinetic energy



**Fig. 7** Comparison of physical quantities for different averaging fields: (a) mean streamwise velocity, (b) mean crosswise velocity, (c)  $u'v'$  Reynolds shear stress, and (d) turbulent kinetic energy.

높게 포착하지 못하는 원인이 된다. 특히 11.25  $\mu\text{s}$ 와 45.0  $\mu\text{s}$ 에 비해 약 16배 및 4배 각각 더 큰 시간 간격을 가지는 180.0  $\mu\text{s}$ 는 비등방성 와류들의 생성과 운동량 교환이 강하게 발생하는 카르만 와열 영역에서의 정확한 유동장 계측을 어렵게 한다. 이로 인해 3000장의 순간 유동장들의 평균을 통해 얻어지는 유동장 결과에서 양과 음의 평균 속도와 난류 운동에너지가 실제보다 낮게 계측되거나  $u'v'$  레이놀즈 전단응력 분포가 하류로 더 길어지는 결과가 관찰된다.

Fig. 5는 정상적인 비교를 위해 실린더 중심선에서의 주유동방향 및 법선방향 속도, 레이놀즈 전단응력 그리고 난류운동에너지 분포를 시간 간격별로 보여준다. 이 때 박리 거품의 경계 부근에 해당되는  $x/D$ 는 1.2와 1.4에서  $y/D$ 에 따른 물리량 변화를 고려하였다. 흥미로운 점은 물리량에 관계없이 시간 간격, 45  $\mu\text{s}$ 에서 수렴된 결과를 보이는 것을 Fig. 5의 결과 비교를 통해 확인할 수 있으며 이는 PIV 계측에 있어 시간 간격은 유동 특성을 고려한 적정 수준의 값이 필요함을 의미한다. Fig. 5(a)는 주유동방향 속도 분포를 보여주는데 실린더 중심에서 속도가 0으로 바뀌는 위치 사이의 거리인 재순환 길이는 시간 간격,  $\Delta t$ 에 관계없이 전반적으로 일치하지만 속도 분포에서 많은 차이를 보인다. 특히 시간 간격이 조사영역의 1/10 정도의 시간보다 낮은 경우 재순환 영역내 무차원 음의 속도는 0.25까지 증가하다가 재순환 영역을 벗어난,  $x = 1.3D$  이상에서 빠르게 양의 속도를 회복한다. 그러나 시간 간격, 180  $\mu\text{s}$ 에서는 상대적으로 적은 음과 양의 속도 분포가 관찰됨에 따라 올바른 속도 분포를 계측하지 못한 것을 Fig. 5(a)의 관찰을 통해 확인할 수 있다. 나머지 물리량에서도 180  $\mu\text{s}$ 가 가장 좋지 못한 결과를 보이며 특히 난류 운동에너지 분포에서 다른 시간 간격 결과들과 비교해서 많은 차이를 보인다. 반대로 수렴된 결과를 보이는 시간 간격, 45.0 $\mu\text{s}$ 는 산란입자의 이동속도를 픽셀 기준으로 본다면 조사영역의 1/10 이하(3-4 pixels)로 이동에 해당하는 시간이다. 결과적으로 선행연구들(Park and Kwak, 2004; Paik et al., 2007; Paik et al., 2010)에서 제안한 산란입자의 3-4 pixels 이동거리 기준이 본 연구에서도 잘 적용되는 것을 관찰하였다.

시간 간격을 45.0  $\mu\text{s}$ 로 고정시킨 뒤 시간 평균을 위한 순간 속도장 샘플링 수를 500, 1000, 2000장을 추가로 고려하여 유동장 계측 특성을 비교하였다. 먼저 정상적 비교를 위해 Fig. 4의 물리량과 동일하게 평균 유선, 주유동방향 및 법선방향 속도분포, 레이놀즈 응력 분포 그리고 난류 운동에너지를 Fig. 6에 샘플링 수에 따라 비교하였다. 샘플링 수가 100인 경우  $y/D = 0$  위치를 기준으로 계측된 모든 물리량의 공간 분포가 비대칭적이고 불균일하여 평균 유동장을 위해 충분히 더 많은 샘플 수가 필요함을 보인다. 그러나 샘플수가 500에서 1000으로 증가하게 되면 앞서 언급한 공간 분포가 개선되는데, 특히 레이놀즈 응력과 난류 운동에너지 보다 주유동방향 및 법선방향 속도장에서 결과가 상대적으로 더 빠르게 수렴되는 특징을 보인다. 그리고 샘플수가 3,000 이상이 되면 모든 물리량에 관계 없이 샘플 수 변화에 따른 결과가 차이가 발생하지 않는 것을 Fig. 6을 통해 확인할 수 있다. 정상적인 비교를 위해서  $x = 1.2D$  위치에서  $y/D$  변화에 따른 각 물리량을 Fig. 7에 비교하였다. Fig. 6을 통해 관찰된 물리적 경향들은 Fig. 7을 통해 명확히 확인할 수 있는데 즉, 샘플수가 증가할수록 그리고 3000에서 수렴되는 경향을 보인다. 주유동방향 및 법선방향 속도장은 최소 1000장 이상에서 수렴을 보이지만 난류 변동량과 관련된 레이놀즈 응력 및 난류 운동에너지 분포는 3000장에 이르렀을 때 수렴된 결과를 보이므로 일관된 결과 획득을 위해서 평균 유동장 획득을 위해 사용되는 샘플수는 3000으로 고려하였다.

본 연구에서 구축된 실험기법의 검증을 위해 Braza et al.(2006)의 결과를 본 연구의 결과와 비교하였다. 두 실험 조건은 Table 2에 나타내었으며 Braza et al.(2006)는 약 4600장의 순간 속도벡터장을, 본 연구에서는 3000장을 사용하여 평균 유동장을 획득하였다.

Fig. 8(a)에 평균 유선 분포를 비교하였으며  $y/D = 0$ 을 기준으로 위쪽은 Braza et al.(2006)의 연구결과를, 아래쪽은 본 연구 결과를 나타낸다. 박리 거품의 크기와 형상은 두 연구의 결과가 전반적으로 일치하는 것을 확인할 수 있으며 정상적인 비교를 위해 실린더 중심 위치와  $y/D = 0$ 에서 주유동방향 속도가 0이 되는 거리, 즉 재순환길이(Recirculation length,  $l_c$ )를 비교한 결과, Braza et al.(2006)는  $1.28D \pm 0.03D$ 이며 본 연구는  $1.29D \pm 0.005D$ 로 서로 큰 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. Fig. 8(b)와 Fig. 8(c)에서는 각각 주유동방향과 법선방향 속도분포를 비교하였다. 아이젠게 영역에서 카르만 와열의 주기적인 발생을 시간 평균하였을 때 통상적으로 관찰되는 속도 분포들이 두 연구결과에서 모두 동일하게 관찰되며 박리 거품으로 인한 주유동방향 속도의 음과 양의 전환 위치와 수직방향 속도의 최댓값 위치( $x/D = 1.2$ )를 비교하면 서로 잘 일치하는 것을 확인할 수 있다.

**Table 2** Experimental conditions of the present study and Braza et al. (2006).

	Present study	Braza et al. (2006)
Type of tunnel	Water tunnel	Wind tunnel
Reynolds number	$1.41 \times 10^5$	$1.41 \times 10^5$
$D$ (mm)	36	140
$L$ (mm)	600	670
$H$ (mm)	600	670
Turbulence intensity (%)	1.0	1.5
Blockage ratio (%)	6.0	20.8
Aspect ratio	16.7	4.8

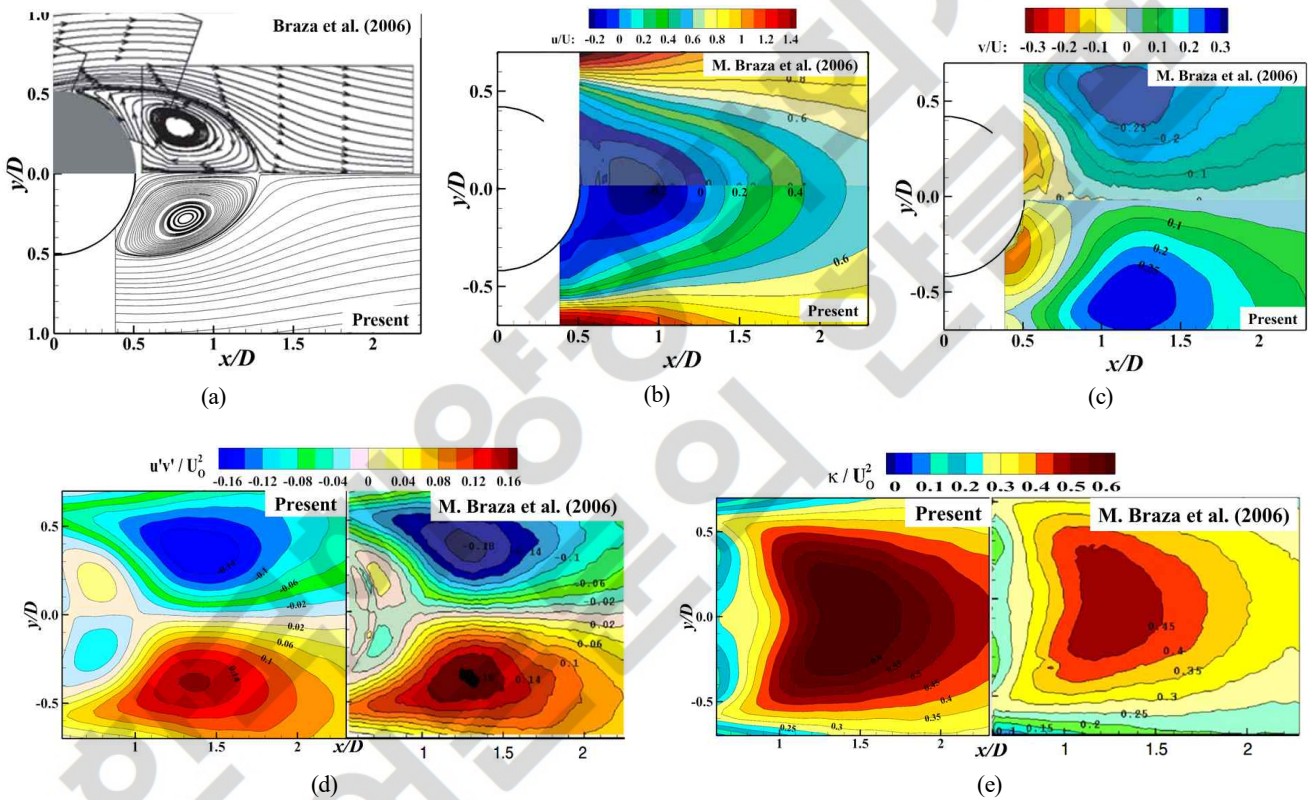

**Fig. 8** Comparison of flow fields between the present study and Braza et al. (2006): (a) mean streamwise velocity, (b) mean crosswise velocity, (c) Reynolds shear stress, and (d) turbulent kinetic energy.

Fig. 8(d)와 Fig. 8(e)는  $uv$  레이놀즈 전단응력 분포와 난류운동에너지를 보여준다. 먼저 카르만 와열의 유출로 발생하는 레이놀즈 전단응력의 최대 값이 발생하는 위치를 비교하면 Braza et al.(2006)는  $x/D = 1.4$ ,  $y/D = \pm 0.3$ , 본 연구는  $x/D = 1.388$ ,  $y/D = \pm 0.367$ 로  $y/D$  위치에서 다소 차이를 보이며 그 크기는 Braza et al.(2006)의 계측값을 기준으로 본 연구와 약 11% 차이가 나는 것을 확인하였다. 난류운동에너지의 경우 Braza et al.(2006)은  $x/D = 1.25$ 에서 본 연구의 경우  $x/D = 1.41$ 에서 최대값을 가진다. 선행연구와 본 연구에서 두 물리량 모두 정성적인 분포는 잘 일치하나 평균 속도 분포에 비해 정량적인 크기에서 다소 차이가 있음을 확인하였는데 이러한 이유는 Braza et al.(2006)과 본 연구의 서로 다른 난류 강도와 중형비 차이에 기인한 것으로 판단된다. 난류 강도에 대한 선행 연구를 먼저 살펴보면, Blackburn and Melbourne(1996)은  $1 \times 10^5$ 에서  $5 \times 10^5$ 의 레이놀즈 수 범위를 고려하여 난류강도 변화가 실린더 단면에 작용하는 양력의 특성을 관찰하였는데, 0.6% 와 4.2%의 난류강도에서 양력 계수의 표준 편차가 레이놀즈 수에 의존적이며 난류 강도가 낮을 때 더 증가하는 것을 확인하였다. Cheung and Melbourne(1980)은  $7 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5$ 의 레이놀즈 수에서 난류 강도가 0.4%~9.1%로 변화할 때 항력계수의 특성을 살펴보았는데, 레이놀즈 수가 임계영역에 이르기 전에는 난류 강도가 증가할수록 항력 계수가 감소하는 결과를 관찰하였다. 중형비의 경우 Achenbach and Heinecke(1981)는 중형비가 3.38일 때 관측되지 않은 와홀림이 6.75에서 확인하였으며 Blackburn and Melbourne(1996)은 중형비가 4.5일 때, 주기를 가지는 와홀림이 발생하지 않는다고 보고하였다. 즉, 중형비와 난류강도는 유동장의 특성과 밀접한 관계가 있는 양항력 계수에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. Table 2에서 Braza et al.(2006)의 실험조건은 폐쇄비 20.8%와 중형비 4.8이

며 본 연구의 실험조건은 폐쇄비 6.0%와 중횡비 16.7로 상대적으로 낮은 폐쇄비와 높은 중횡비가 고려되었다. 그리고 큰 차이는 아니나 본 연구의 난류 강도가 0.5% 더 작아, 터널 환경과 기하학적 조건 차이가 두 연구의 예측 결과의 차이를 일으키는 것으로 판단되며 Braza et al.(2006) 보다 본 연구의 시험 조건들이 실린더 고유의 유동을 관측하는데 더 유리한 조건이라고 판단된다.

## 4. 결 론

실린더는 해양구조물의 기본 형상으로 실선척도(Full-scale)의 유동 특성을 파악하는 것이 중요하다. 실선척도에 해당하는 높은 레이놀즈 수의 입계영역까지 유동 특성을 규명하고 정보를 얻기 위해서는 좀 더 명확하고 정확한 유동가시화 기법을 사용해야 된다. 그리하여 본 연구에서는 PIV기법의 기본특성을 파악하고 선행연구와 비교하였다. KRISO가 보유하고 있는 중형 캐비테이션 터널과 PIV장비를 활용하여 실린더 실험을 수행하였다. 입자영상을 취득하여 속도벡터를 구하는 방식을 사용하는 PIV 특성상 2장 입자영상의 시간간격과 순간유동장 개수가 중요한 매개변수로 작용하게 된다.

첫째, 시간간격에 대한 연구에서 실린더 후류영역에는 입자들의 유속이 느려지므로 레이저의 시간간격을 조절하여 2장의 입자영상에서 입자가 3-4pixel을 이동하는 시간을 채택하였다. 시간간격이 길 경우, 후류영역에서 일어나는 와류들을 제대로 예측하지 못하고 속도벡터 크기가 유동방향으로 과장되어 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

둘째, 순간유동장 개수에 따른 연구에서는 시간간격과 달리 큰 차이를 보이지 않았지만 좀 더 정확한 평균 유동장의 결과를 얻기 위해서 평균 속도는 최소 1000장을 레이놀즈 전단응력과 난류운동에너지 분포는 최소 3000장의 순간 유동장을 활용해야 된다.

결론적으로 실험 조건에 대응하는 유동특성에 따라 레이저의 시간간격을 선택할 필요가 있으며 입자가 3-4pixel의 거리를 가지는 시간간격을 채택하는 것이 좋은 결과를 낼 수 있다. 또한 순간속도장 개수의 경우 최소 3000장 이상을 취득하여 평균할 경우 난류물성치가 일정한 값을 가지는 것도 확인하였다.

이렇게 정립된 기법을 바탕으로 선행연구와 비교하였으며 만족스러운 결과를 확인하였으나 정량적으로 차이가 발생하였다. 이는 터널의 형태, 폐쇄비, 중횡비 등 실험환경의 차이로 인한 결과로 판단된다. 최종적으로 레이놀즈 수 변화에 따른 원형실린더 주위 유동장을 관찰하였으며 입계영역에서의 유동 변화를 좀 더 자세히 관찰하기 위해 후속 연구를 진행할 필요가 있을 것으로 판단된다.

## Conflict of Interest

We declare no potential conflict of interests relevant to this article.

## Funding

This work was supported by the Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering Project (“Development of CFD Technology for Global Performance Analysis of Offshore Structure”) funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (PES4780).

## References

- Achenbach, E., & Heinecke, E. (1981). On vortex shedding from smooth and rough cylinders in the range of Reynolds numbers  $6 \times 10^3$  to  $5 \times 10^6$ . *Journal of Fluid Mechanics*, 109, 239–251. <https://doi.org/10.1017/S002211208100102X>
- Blackburn, H. M., & Melbourne, W. H. (1996). The effect of free-stream turbulence on sectional lift forces on a circular cylinder. *Journal of Fluid Mechanics*, 306, 267–292. <https://doi.org/10.1017/S0022112096001309>
- Blevins, R. D. (1977). *Flow-Induced Vibration*. Van Nostrand Reinhold Company.
- Braza, M., Perrin, R., & Hoarau, Y. (2006). Turbulence properties in the cylinder wake at high Reynolds numbers. *Journal of Fluids and Structures*, 22(6–7), 757–771. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2006.04.021>
- Chen, W., Wang, S., Shi, X., Rheem, C. K., Lin, Y., & Liu, E. (2022). Numerical simulation of surface roughness effects on the vortex-induced vibration of a circular cylinder at a subcritical Reynolds number. *International Journal of Naval Architecture and Ocean Engineering*, 14, 100430. <https://doi.org/10.1016/j.ijnaoe.2021.100430>
- Cheung, C. K., & Melbourne, W.H. (1980). Wind tunnel blockage effect on a circular cylinder in turbulent flows. In *Proceedings of the 7th Australasian Hydraulics and Fluid Mechanics Conference, Brisbane, Australia*, 127–130. <https://search.informit.org/doi/10.3316/informit.558932646045391>



- James, W. D., Paris, S. W., & Malcolm, G. N. (1980). Study of viscous crossflow effects on circular cylinders at high Reynolds numbers. *AIAA paper*, 18(9), 1066. <https://doi.org/10.2514/3.50855>
- Lee, S. J. (1999). *PIV velocity field measurement*. POSTECH, 11–231.
- Lee, J. H., Paik, B. G., Kim, K. Y., Jung, J. H., Cho, S.K., & Sung, H. G. (2018). A study on visualization wake of circular cylinder wake using PIV method. *Proceedings of 2018 Fall Conference of The Korean Society of Visualization*, Pusan, Korea, 69-70.
- Paik, B. G., Kim, K. Y., Cho, S. R., & Ahn, J. W. (2007). Study on quantitative visualization using bubble tracer in a cavitation tunnel. *Journal of the Korean Society of Visualization*, 5(1), 19–26.
- Paik, B. G., Kim, K. Y., Kim, K. S., Lee, J. Y., & Lee, S.J. (2010). Analysis of the unstable propeller wake using POD method. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 47(1), 20–29. <https://doi.org/10.3744/SNAK.2010.47.1.020>
- 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.
- Roshko, A. (1961). Experiments on the flow past a circular cylinder at very high Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 10(3), 345–356. <https://doi.org/10.1017/S0022112061000950>
- Schewe, G. (1983). On the force fluctuations acting on a circular cylinder in crossflow from subcritical up to transcritical Reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 133, 265–285. <https://doi.org/10.1017/S0022112083001913>
- van Hinsberg, N. P. (2015). The Reynolds number dependency of the steady and unsteady loading on a slightly rough circular cylinder: From subcritical up to high transcritical flow state. *Journal of Fluids and Structures*, 55, 526–539. <https://doi.org/10.1016/j.jfluidstructs.2015.04.002>
- van Hinsberg, N. P., Schewe, G., & Jacobs, M. (2018). Experimental investigation on the combined effects of surface roughness and corner radius for square cylinders at high Reynolds numbers up to  $10^7$ . *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 173, 14–27. <https://doi.org/10.1016/j.jweia.2017.12.003>
- Williamson, C. H. K. (1996). Vortex dynamics in the cylinder wake. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 28, 477–539.
- Zdravkovich, M. M. (1997). *Flow around circular cylinders. Volume I: Fundamentals*. Oxford Science Publications.

#### Author ORCIDs

Author name	ORCID
Lee, Jun-Hee	0000-0002-0618-3739
Paik, Bu-Geun	0000-0002-1311-4854
Cho, Seok-Kyu	0000-0002-7821-4848
Jung, Jae-Hwan	0000-0001-9384-5720