

PIV와 LDV를 이용한 냉각수 토출구 주위의 와류 가시화 연구

홍지우* · 신수용** · 안병권†

Visualization of Vortex Flow around Coolant Outlets Using PIV and LDV

Ji-Woo Hong*, Su-Yong Shin**, Byoung-Kwon Ahn†

Abstract Submerged and semi-submerged vehicles expel cooling water through an outlet. In this process, induced noise and vibration by the flow around the outlet have been reported, and it may cause problems directly related to survivability of the navy vessels. The coolant outlet has a net-type structure and circular columns are mostly used. In this study, flow measurements using PIV and LDV were performed for different type outlets; conventional (flat plate with round bar) and improved (flat and flat plate) configurations. Experiments were conducted at a cavitation tunnel where pressure and steady flow rate conditions are ensured for sufficient time to measure the flow. The average velocity field of the outlets were measured and compared through LDV measurements, and instantaneous vorticities were evaluated through PIV measurements. The results show that the improved type of the outlet is advantageous in terms of flow stability compared to the conventional type of the outlet.

Key Words : Flow Visualization(유동 가시화), PIV(입자 영상 유속계), LDV(레이저 도플러 유속계), Vortex(와류), Coolant outlet(냉각수 토출구), Shedding frequency(박리 주파수)

1. 서론

수중방사소음(Underwater Radiated Noise, URN)은 선체 내부 기진력에 의한 진동과 추진기에서 발생하는 캐비테이션 등과 같은 원인으로 선체에서 발생하여 수중으로 전파되는 소음을 의미한다.

특히 함정의 경우 생존성과 밀접한 관련이 있으므로 이를 최소화하는 것이 매우 중요하다.

Jesse & Raymond(2017)는 선박에서 발생하는 소음들을 분류하여 원인과 감소를 위한 방법에 관한 연구를 진행하였으며, Kim et. al.(2007)은 선박 내부에서 발생하는 구조진동소음을 줄이기 위해 탄성마운트 거동에 대한 연구를 수행한 바 있다. Nicholas et. al.(1994)은 소음원 주변에 인위적으로 공기를 분사시켜 에어커튼을 형성함으로써 방사되는 소음을 줄이고자 하였다. Weichao et. al.(2016)은 선박의 프로펠러에 생체모방 디자인을 적용하여 소음을 감소시키는 방법에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 선박에서 발생하는 소음 중 냉각수 토출구에서 발생하는 소음을 연구 대상으로 결

† Department of Naval Architect and Ocean Engineering, Chungnam National University, Professor
E-mail: bkahn@cnu.ac.kr

* Department of Naval Architect and Ocean Engineering, Chungnam National University, Ph.D student

** Structure/Vibration & Noise, R&D Department, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering

정하였다. 냉각수 토출구에는 토출구 내부로 해양 생물이나 부유물이 유입되지 않도록 거름망 역할을 하는 장치가 있으며, 실선에 적용되고 있는 거름망은 원형 파이프와 평판의 조합으로 이루어져 있다. 냉각수 토출과정에서 특정 주파수 성분의 소음이 문제가 되는 실례가 보고되고 있으며, 이는 토출구 주위 유동의 특성과 직결되어 있다. 원형 실린더 후류에서는 Karman vortex와 같은 주기적으로 박리되는 와류 유동장이 발생하며, 이전의 많은 연구들을 통해 여러 가지 조건에서 연구된 바 있다(Kim et. al.(2020), Rajani et. al.(2016)). Jeong & Ahn(2016)은 2차원 췌기형 물수체에서 발생하는 주기적인 와류유동으로 인하여 발생하는 소음특성을 규명한 바 있으며, Lee & Lee(2010)는 풍력터빈 블레이드 끝단에서 발생하는 와류유동이 유동소음의 주요원인임을 확인하였다.

본 연구에서는 토출구 주위 와류유동을 엄밀하게 관찰하고 PIV와 LDV를 이용하여 정량적으로 예측하고자 하였다. 실선에 적용되고 있는 평판-원형기둥 (Flat plate with Round bar, FR)의 조합으로 구성된 토출구 모형과 유동특성 개선을 목적으로 제안된 평판-평판(Fat and Flat plate, FF)의 조합으로 구성된 토출구 모형을 대상으로 하였다. PIV 예측을 통해서 순간적인 유동장 특성을 평가하였으며, LDV 예측을 통해 유동의 평균 속도장을 비교 평가하였다.

2. 실험장치 및 방법

실험은 충남대학교 캐비테이션 터널(CNUCT)에서 수행되었으며, 관측부의 크기는 가로*세로*깊이가 100mm*100mm*1,400mm이다. 터널의 최대 유속은 20m/s이며, 압력은 감압 및 가압을 통해 0.1~3bar까지 조절 가능하다.

실험 유속은 냉각수 토출 속도에 대응되는 속도로 결정하였으며, 각각의 레이놀즈수(식 1)와 같이 Table 1에 정리하여 나타내었다.

$$Rn = \frac{U_{\infty} D}{\nu} \quad (1)$$

Table 1. Test conditions

Pressure [kPa]	1.1 bar
Velocity [m/s]	0.30, 0.57, 0.68, 0.95
Reynolds number	1,500, 2,850, 3,400, 4,750

여기서 U_{∞} , D , ν 는 유입속도, 원형 기둥의 직경, 물의 동점성계수이고, FF모형의 레이놀즈수는 FR모형의 레이놀즈수와 동일하게 설정하였다. PIV를 통한 유동 가시화를 위해 관측부 하단에 듀얼 펄스 레이저(Nano S 65-15 PIV)를 설치하고 평면거울과 원통거울을 사용하여 시험 모형 주위에 2mm 두께의 레이저 시트를 형성시켰다(Fig. 1). 이때 듀얼 펄스 레이저의 펄스 방사 시간 간격은 Calibration 결과로부터 얻은 입자의 평균 이동량을 고려하여 1000 μ s 전후로 결정하였고, 초고속 카메라(Fastcam mini UX100) 영상촬영시간과 듀얼 펄스 레이저의 방사 시간을 별도의 동기화장치를 사용하여 동기화시키고 촬영하였다. 또한 유동장의 평균 속도를 보다 정밀하게 예측하기 위해서 레이저시트를 조사한 면과 동일한 위치를 LDV(FlowExplorer DPSS 150 1D)를 사용하여 예측하였다. PIV 및 LDV의 원활한 예측을 위해서 추적입자로는 물과 밀도가 비슷한 직경 10 μ m의 Hollow Glass Sphere(HGS)를 사용하였다. PIV해석은 PIVTEC사의 상용프로그램인 PIVview2C를 사용하여 수행하였으며, 조사구역(Interrogation window)의 크기는 24 \times 24pixel이고, Overlap은 50%로 설정하였다. 해석방법으로는 Standard correlation, Multi-grid interrogation을 사용하였고, 에러 벡터 제거를 위해 Least squares Gaussian fit, Low-pass filter를 사용하였다. 또한 Data smoothing

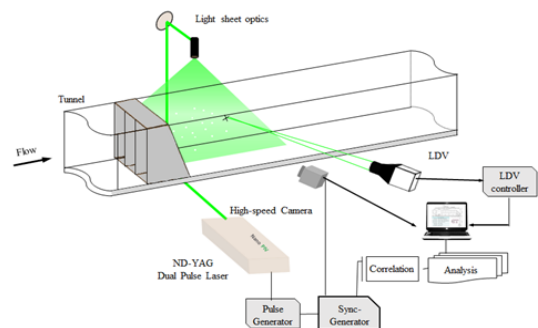


Fig. 1. Experimental set up

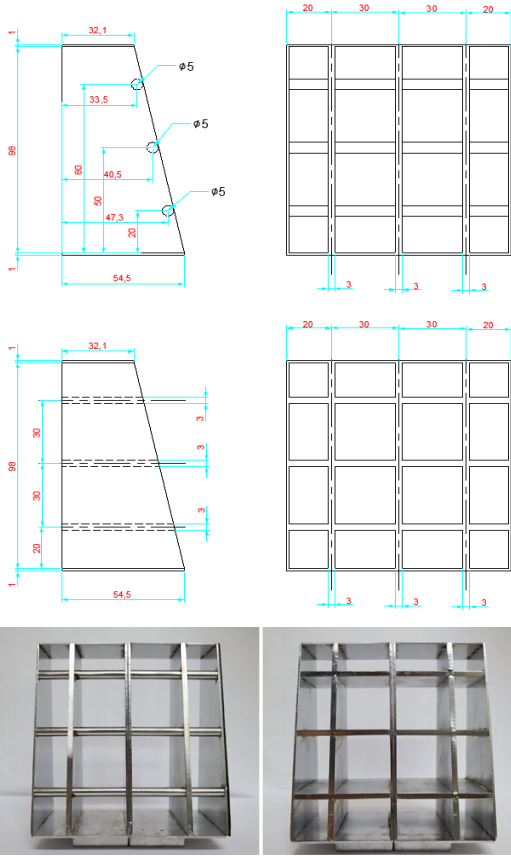


Fig. 2. Test models (up) Flat plate-Round bar (FR), (down) Flat-Flat plate (FF)

을 위하여 Median filtering 기능을 사용하였다. Fig. 2는 실험에 사용된 모형으로 각각 실선 토출구 축소모형(FR)과 유동개선 제안모형(FF)이다. 여기서 FR모형은 실선 토출구의 일부를 모사한 것으로 각

부재의 치수는 실선 토출구의 제원과 동일하며, Fig. 2에서 보이는 것과 같이 두께 3mm의 평판 수직부재와 직경 5mm의 원기둥 수평부재로 구성되어 있다. FF의 경우, FR의 유동 특성을 개선할 목적으로 고안된 토출구 형상으로 FR의 원형기둥 대신 수직부재와 동일하게 3mm 두께의 평판 수평부재로 구성하였다.

3. 결과 및 분석

Fig. 3은 LDV 계측 결과로 최소 유속조건과 최대 유속조건에서 계측한 것이며, 각 포인트당 1,000개의 데이터를 평균한 값으로 나타낸 것이다. 이때, 계측원점의 위치는 원기둥의 중심이다. 평균 속도장은 원형 기둥이나 평판 에 의하여 발생한 와류동의 영향을 크게 받아 유속이 내려간 상대적 저속영역과 그 이외인 상대적 고속영역으로 구분할 수 있다. 이 때, FF모형에서 발생한 저속영역은 평판의 두께와 동일한 크기로 발생한 것을 확인할 수 있고, FR모형으로 인하여 형성된 저속영역은 원형 기둥의 직경보다 더 큰 크기로 생성됨을 확인할 수 있다. Fig. 4와 Fig. 5는 Fig. 3의 점선으로 표시한 $x/D=2.0, 3.0$ 위치에서의 평균 유속을 비교하여 나타낸 것이다. 두 속도조건에서 모두 상대적 고속영역에서는 FR 모형의 유동 속도가 빠르게 나오지만, 저속영역에서의 유동속도는 뒤집힌 것으로 나온다. 이는 FR 모형에서 발생하는 와류동이 FF 모형에서 발생하는 와류동에 비하여 상대적으로 강하기 때문에 와류동에 의한 속도 감소가

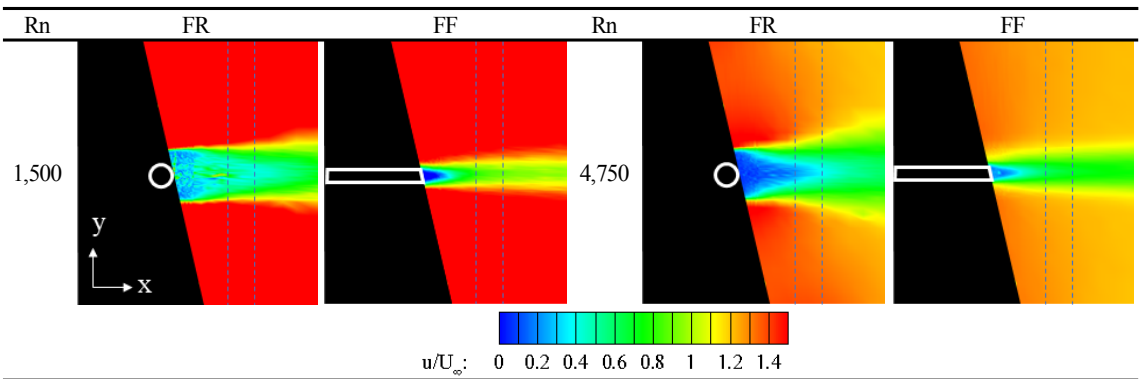


Fig. 3. Comparison of averaged velocity flow fields

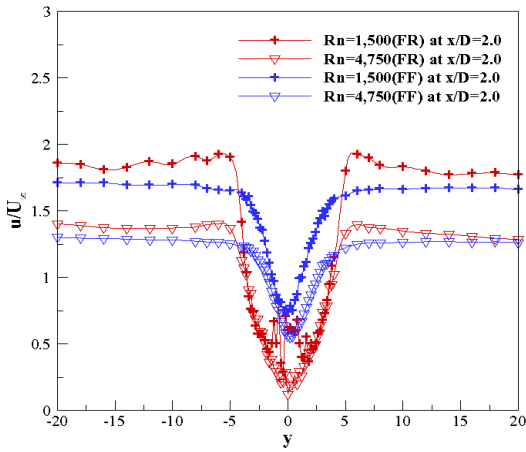


Fig. 4. Averaged u/U_∞ at $x/D=2.0$

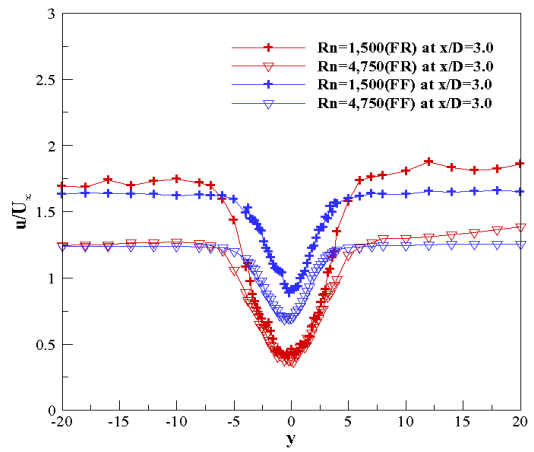


Fig. 5. Averaged u/U_∞ at $x/D=3.0$

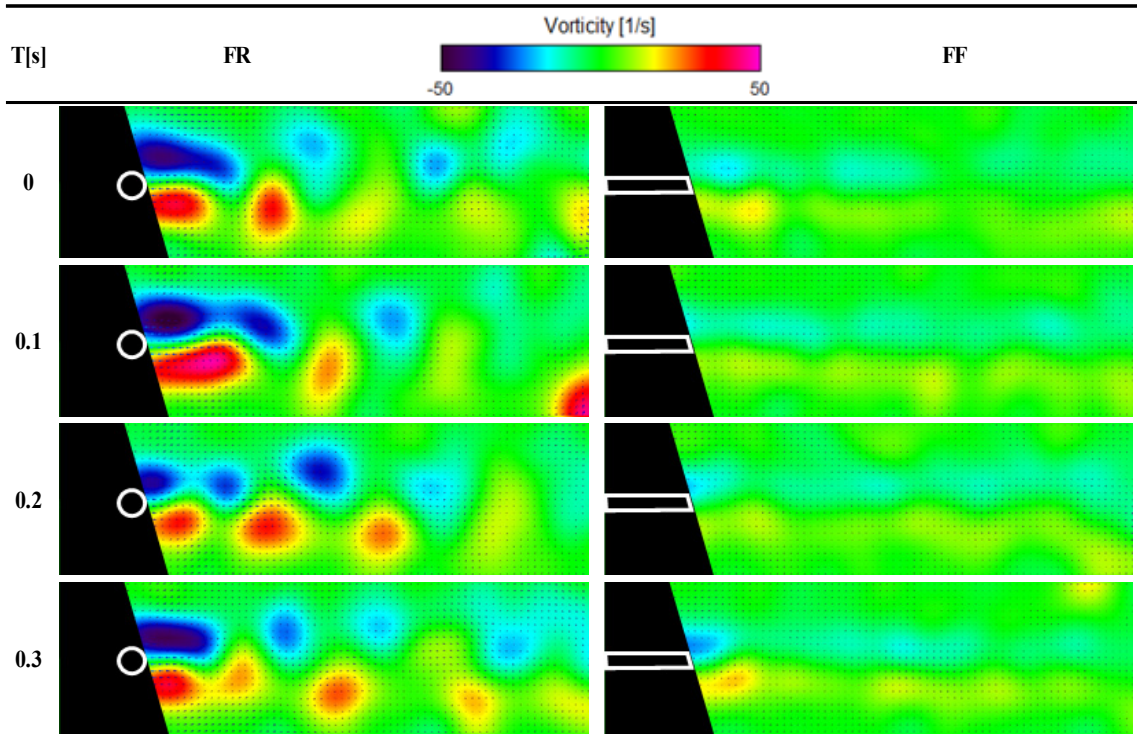


Fig. 6. Comparison of instantaneous vortex flow fields($Rn=1,500$)

더 크게 작용하는 것으로 생각할 수 있다. 또한 FR 모형의 경우 중심위치에서의 유속이 매우 불규칙한 특성을 지니고 있는 것도 확인할 수 있다. Fig. 6과 Fig. 7은 PIV 측정 결과로 각각 최소 유속조건과 최대 유속조건에서 측정한 것을 시계열에 따라 나타낸 것이다. LDV 유동가시화에서 확인한 것과

같이 FR 모형에서 발생하는 와류동이 FF 모형에서 발생하는 와류동에 비하여 상대적으로 강하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 또한 FR 모형의 경우 원형 기둥 뒤쪽에서 Spanwise vortex가 주기적으로 떨어져 나가는 Karman vortex를 형성시키는 것을 볼 수 있으며, 시간 변화에 상관없이 일정한

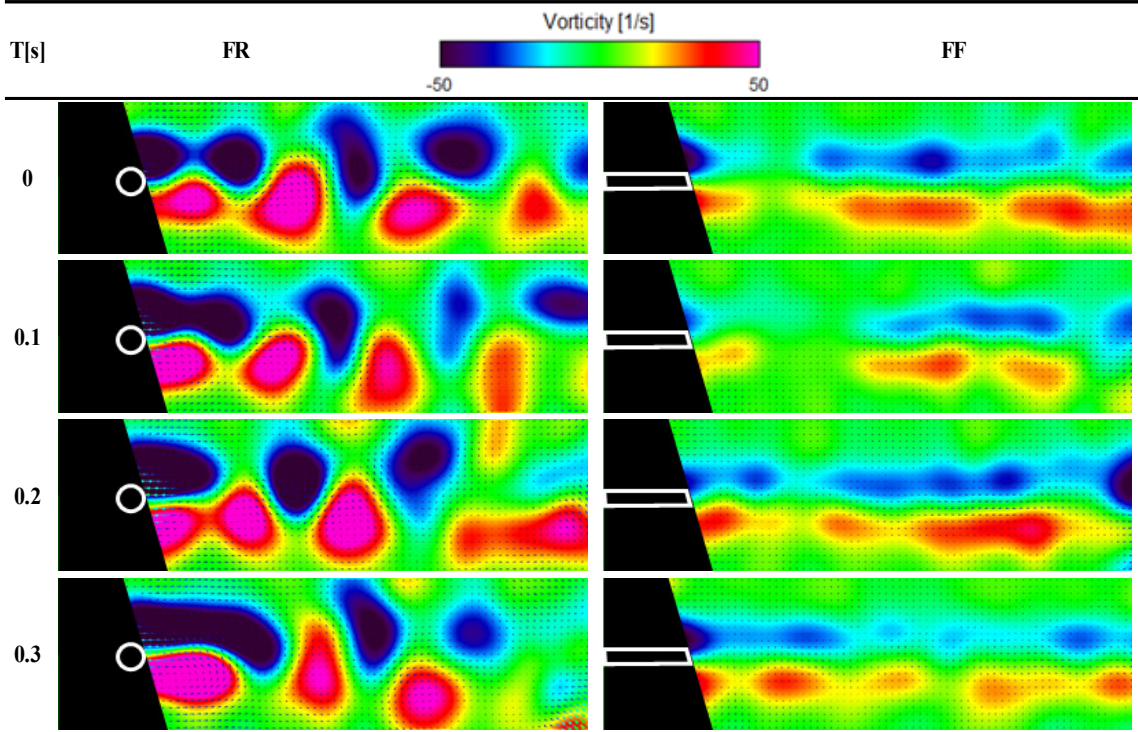


Fig. 7. Comparison of instantaneous vortex flow fields($Rn=4,750$)

간격을 가지는 것을 볼 수 있다. 또한 생성된 와유동은 유동방향으로 진행함에 따라 주변 유동으로 인하여 분산되어, 와도가 약해지는 것을 확인할 수 있다. 반대로 FF 모형 후류에 생기는 와유동은 와유동의 평균 강도가 낮을 뿐만 아니라, 시간 변화에 따라 불규칙적으로 형성되는 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 두 모형간의 와유동 형성패턴 비교를 통해 FR 모형에서는 FF 모형과는 다르게 주기적인 유동특성을 가지고 있는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 각각의 유속조건에서의 유동가시화 결과로부터 얻은 와유동의 최대강도를 정량적으로 비교한 그래프이다. 총 100초의 해석결과로부터 얻은 결과의 최댓값, 최솟값, 평균값을 나타내었다. 유속이 증가함에 따라 와유동의 최대강도가 변화하는 범위가 증가하는 것을 볼 수 있으며, 평균값은 선형적으로 증가하는 경향성을 갖는다. FF 모형의 경우, 유동가시화 결과로부터 확인한 와유동의 불규칙한 생성이 최대강도에도 영향을 주어 최대강도의 변동범위가 더 크게 나타나는 것을 확

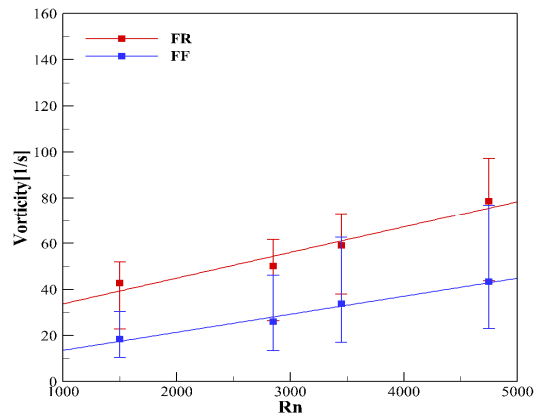


Fig. 8. Comparison of instantaneous maximum vorticity

인할 수 있으나, 최대강도의 평균은 FR 모형에 비하여 낮게 나오는 것을 확인할 수 있으며, 경향성 또한 선형적으로 동일하게 나오는 것을 확인할 수 있다. Vortex는 유입유속에 대응하여 이동하며, vortex의 거리(Fig. 9, Δx)와 유입유속의 관계식을 통해 와유동의 박리주파수(f)를 구할 수 있다.

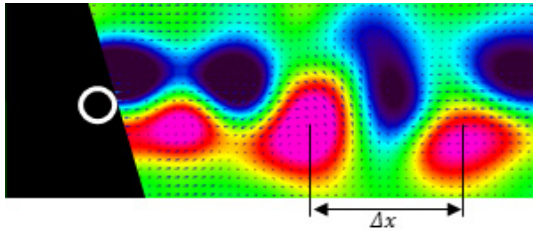


Fig. 9. Definition of vortex distance

$$U_{\infty} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (2)$$

$$f = \frac{U_{\infty}}{\Delta x} \quad (3)$$

$$St = \frac{fD}{U_{\infty}} \quad (4)$$

여기서, vortex의 거리는 완전 박리된 두 번째 vortex와 3번째 vortex의 거리로써 각 vortex의 와도 값이 최대인 지점간의 거리로 정의하였다. Fig. 10은 위의 식을 통하여 얻어낸 FR모형에서의 와유동의 박리주파수를 레이놀즈수에 따라 나타낸 것이다. 각 유속조건에서 발생하는 vortex의 거리가 일정하기 때문에 박리주파수 또한 유속에 비례하여 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있으며, 박리주파수를 무차원화한 Strouhal수(식 4) 또한 0.206으로 일정한 값을 갖는다. 반면, FF모형의 경우는

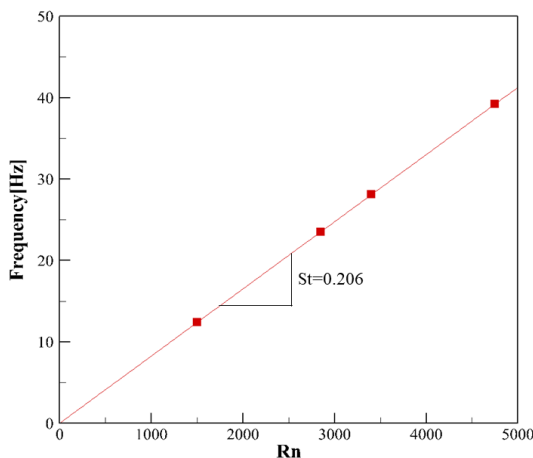


Fig. 10. Vortex shedding frequency of FR

와유동의 불규칙성으로 인하여 vortex의 거리가 일정하지 않기 때문에 특정한 박리주파수를 가지지 않을 것으로 예상할 수 있다.

4. 결론

본 연구는 수상 및 수중 운송체용 냉각수 토출구 주위에서 발생하는 와유동 특성을 PIV 및 LDV를 이용하여 엄밀하게 계측하여, 기존 토출구 형상에서 발생하는 유동 소음 및 진동 특성을 규명하고 이를 개선할 수 있는 토출구 형상을 도출할 목적으로 수행되었다. LDV 계측을 통해 서로 다른 토출부 주위의 평균 속도장을 비교 평가하였으며, PIV 계측을 통해 순간 와도장을 분석하였다. 평판-원형기둥(FR)의 조합으로 구성된 토출구에서는 잘 알려진 바와 같이 원형기둥을 지나면서 Strouhal수 0.2의 와류가 형성되며 이는 특정 주파수 성분의 소음과 진동 특성을 야기할 수 있음을 보였다. 이에 반해 평판-평판(FF)의 조합으로 새롭게 제안된 토출구의 경우 평균 속도장의 에너지 손실이 작고 특정 주파수 성분이 없이 상대적으로 안정적인 유동장이 형성됨을 보였다.

후 기

이 성과는 ㈜대우조선해양의 지원으로 수행된 연구임.

REFERENCE

- 1) Jesse H. S. and Raymond W. F., 2017, "Requirements for Reducing Underwater Noise From Ships," IEEE JOURNAL OF OCEANIC ENGINEERING, Vol. 42(2), pp.388~398.
- 2) Kim H. S., Kang H. J., Kim B. Ki. and Kim S. R., 2007, "A Study on Structure-Borne Noise Reduction for Resiliently Mounted Pumps for Ship," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44(5), pp.488~495.
- 3) Nicholas M., Roy R. A. and Crum L. A., 1994, "Sound emissions by a laboratory bubble cloud,"

- The Journal of the Acoustical Society of America, Vol. 95(6), pp.3171~3182.
- 4) Weichao S., Mehmet A., Roslyna R., Batuhan A. and Rosemary N., 2016, "Cavitation observations and noise measurements of horizontal axis tidal turbines with biomimetic blade leading-edge designs," Ocean Engineering, Vol. 121, pp.143-155.
 - 5) Kim J. H., Chae S. B. and Kim J. H., 2020, "Flow around a circular cylinder with axially arranged holes," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 18(1), pp.59~66.
 - 6) Rajani B. H., Kandasamy A. and Majumdar S., 2016, "LES of Flow past Circular Cylinder at $Re = 3900$," Journal of Applied Fluid Mechanics, Vol. 9(3), pp.1421~1435.
 - 7) Jeong S. W. and Ahn B. K., 2016, "An Experimental Study on Wake Cavity Flow Characteristics of Two-dimensional Wedge Shaped Control Fins," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 53(3), pp.180~187.
 - 8) Lee J. Y. and Lee S. J., 2010, "Experimental Analysis of Flow Characteristics around Wind-Turbine Blades," Journal of the Korean Society of Visualization, Vol. 7(2), pp.64~71.
 - 9) Blevins, R. D., 1977, Flow-induced vibration. New York.