

푸리에 변환을 활용한 유동 가시화 비교 분석

구본국¹, 박준모², 강용덕^{3*}

¹창원대학교 조선해양공학과, ²동명대학교 전자및의용공학부, ³동의대학교 조선해양공학과

Analysis of Flow Visualization Results Using Fourier Transform

Bon-guk Koo¹, Jun-mo Park², Yong-Duck Kang^{3*}

¹Department of Naval Architecture and Marine Engineering, Changwon National University,

²School of Electronic and Biomedical Engineering, Tongmyong University

³Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University

요약 경계층 내 측정된 유속은 변동 성분을 활용한 표준편차 혹은 배경 유속을 포함한 평균 속도로 해석되어 왔다. 하지만, 각각의 결과로 유동 상호작용을 설명하는데 한계가 있어 본 논문에서는 시간 영역의 유속을 푸리에 변환하여 주파수 분석으로 유동 현상을 규명하는 방법을 제안한다. 이를 위해 경계층 내 평판 위에 부착된 반구 내부로 염료를 주입시켜 후류 영역에서 생성되는 머리핀 와류를 가시화하여 발생 빈도를 계측하였다. 또한 반구 전방의 평판을 뚫어 흡입함으로써 후류 영역 내 유속 변화를 열선 유속계로 측정하였다. 제안된 주파수 분석의 평가를 위해 기존의 통계 해석법과 비교하였으며, 유동의 정성적인 결과에 부합하는 주파수 분석과정을 제시한다.

• 주제어 : 푸리에 변환, 주파수, 표준편차, 열선 유속계, 반구, 머리핀 와류

Abstract In the boundary layer, vortical system has been analyzed by the statistical methods to identify the vortex interaction. However, there are the limitations in explaining vortices by the mean velocity or the standard deviation. This paper proposed a method to establish a frequency analysis by Fourier transform in order to simultaneously investigate various scale vortices. For this purpose, the flow visualization conducted to reveal a standing vortex, a hairpin vortex and a wake region around a hemisphere attached on a flat plate in a water channel. In addition, the velocity where the hairpin vortex was being generated in the wake region was measured by a hot-film anemometer. To observe changes in the vortex interaction, suction was applied through a hole in front of the hemisphere. For the evaluation of the proposed frequency analysis, the existing statistical results were compared to the frequency analysis that corresponds to the qualitative results of the flow visualization.

• Key Words : Fourier Transform, Frequency, Standard Deviation, Hot-Film Anemometer, Hemisphere, Hairpin Vortex

Received 09 December 2019, Revised 24 December 2019, Accepted 30 December 2019

* Corresponding Author Yong Duck Kang, Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Dong-Eui University, Busan, Korea.
E-mail: ydkang@deu.ac.kr

I. 서론

경계층 내 유동의 상호작용은 소음 및 진동을 유발시키고 기계적 피로하중의 증가로 이어져 산업현장에서는 설계 단계부터 주요한 고려사항이다. 따라서 경계층 내 구조물(와류, 박리 혹은 후류 등)의 생성 및 성장의 시각화를 통해 발생 메커니즘을 규명하고 제어를 실시함으로써 유동 안정화를 시키는 연구가 활발히 진행되고 있다[1-6].

유동 가시화는 다양한 장비를 활용하여 경계층 내 유동현상을 드러내어 정성적으로 해석할 수 있는 효과적인 방법이다. 예를 들어, 유체 내 전기분해로 기포를 발생시켜 유체 거동을 입체적으로 드러낼 수 있지만, 설치물 자체의 유동 교란과 기포의 비중이 낮아 지속적으로 관찰이 어렵다[7]. 비간섭 레이저 광학 측정 기술을 활용한 입자 영상 유속계는 비용적인 측면과 특수 장비 설치로 실험에 제약이 따른다[8]. 따라서 본 논문에서는 염료를 활용하여 자체 교란을 최소화하여 유체 구조물을 가시화하고 열선 유속계로 구조물이 생성되는 평면에서 유속을 측정하였다.

유동 메커니즘 해석을 위해 층류 경계층 내 평판에 부착한 반구를 통해 염료를 흘려보내고 후류 영역과 머리핀 와류 발생을 가시화하였다. 역압력 구배에 의한 반구 전방에서 생성되는 정지 와류를 평판의 구멍으로 흡입하여 후류 영역 내 머리핀 와류가 생성되는 평면에서 유속 변화를 측정하였다.

경계층 내 유체 구조물의 변동 속도로 계산하는 표준편차(RMS), 비대칭도(Skewness) 및 첨도(Kurtosis)는 구조물이 속한 위치에 따른 평균 에너지 정보를 나타내지 못하고, 평균 유속은 구조물 상호작용에 대한 변동 정보를 나타내지 못한다[7]. 하지만 시간 영역의 유속에 퓨리에 변환[9]을 적용하여 주파수 분석으로 비교하면 유동 구조물이 갖는 평균 및 변동 성분에 대한 정보를 동시에 제공할 수 있다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 유동 가시화 및 유속 측정을 위한 실험 구성을 설명하고, III장에서는 유동제어 유무에 따른 머리핀 와류 빈도 주파수를 계측하고, 유속을 통계적 방법으로 분석하여 유동 가시화 결과와 비교한다. 마지막으로 IV장에서 본 논문의 결론 및 향후 연구에 대해 기술한다.

II. 실험 구성

2.1 회류수조

본 연구를 위해 Fig. 1에 보인 것과 같이 길이 7.3m, 폭 0.6m 및 깊이 0.3m의 수조가 사용되었다. 수조 하류의 유량은 펌프에 의해 외부 파이프로 상류 탱크에 보내진다. 상류 탱크 내에는 유동 안정화를 위해 디퓨저를 설치하였으며 열선유속계의 정확도를 높이기 위해 열교환기로 수온 변화를 최소화 하였다. 경계층 형성을 위해 바닥으로부터 0.1m 높이에 투명 아크릴 평판(가로 4.0m, 세로 0.6m, 두께 20mm)을 설치하였다. 평판 앞전에서 유동 박리가 상하 방향으로 균일하게 발생하도록 평판 끝에 길이 25cm의 플랩을 경첩으로 연결하여 17°로 고정하였다.

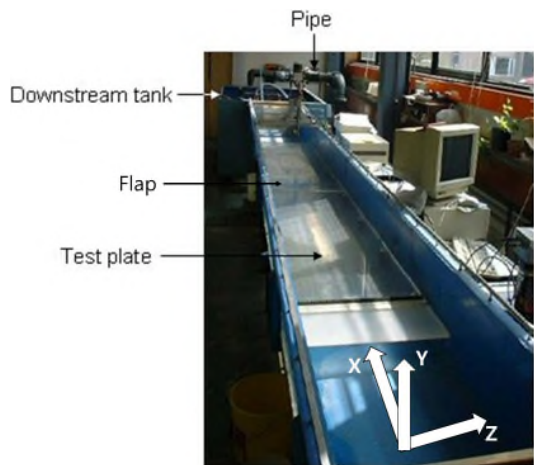


Fig. 1. Circulating water channel

2.2 반구 및 염료 시스템

경계층 내 평판 위 반구를 부착하여 하류 방향으로 후류 영역과 역류에 의한 머리핀 와류를 생성하였다. Fig. 2에는 평판, 반구 및 유동현상의 입체적 단면형상을 보여준다. 반구 중앙에는 직경 7.0mm의 구멍을 뚫어 튜브로 적색 염료를 주입시키고 반구 표면까지 직경 0.7mm의 구멍 5개를 통해 외부로 흘러 나간다. 또한, 반구 전방에는 역압력구배에 의해 생성된 정지와류는 반구 측면을 감싸며 후류 영역에 높은 운동량의 유동을 유입시킨다[8]. 머리핀 와류를 발생을 촉진시키는 정지와류를 제어하기 위해 반구 전방 가장자리로부터 4.0mm에 직경 2.5mm의 구멍을 뚫고 수로 외부로 튜브를 연결하여 중력에 의한 흡입제어를 적용하였다.

반구 주위 유동 가시화는 해상도 $1,488 \times 1,128$ 픽셀의 Cannon XM2 카메라를 사용하였으며, 촬영된 동영상으로부터 머리핀 와류 발생 주파수를 계측하였다.

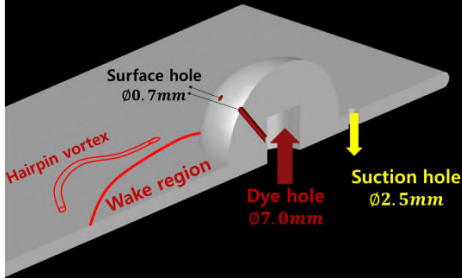


Fig. 2. Cross section of hemisphere and plate with dye system

2.3 유속 측정 시스템

후류 영역 내 유속 측정은 Dantec사의 정온도형 (Contant Temperature Anemometer, CTA) 열선유속계 (Hot-film sensor, 55R15)를 사용하였다. 열선유속계의 캘리브레이션은 로터 형태인 Nixon velocity meter를 사용하여 최소 유속인 5.0cm/s까지 측정하였다. 로터가 회전하지 않는 저속구간에서는 y축 방향의 이송 장치인 스텝모터가 정수 중 이동하는 속도에 대응시켜 진행하였다. 정수 중 측정된 흡입속도 (V_{suck})는 12.1cm/s로 측정되었다.

반구의 중심은 평판 앞면으로부터 $x=0.37m$ 에 부착하였으며, 자유유속(U_∞)은 7.4cm/s로 설정하여 계산한 레이놀즈 수($Re_x = x \cdot U_\infty / \nu$)는 2.7×10^4 으로 층류 경계층을 형성한다. 여기서, 동점성계수(ν)는 $1.01 \times 10^{-6} m^2/s$ 이다. Fig. 3은 층류 경계층 유속 분포를 나타내는 Blasius 실험식과 반구 전방에서 측정된 유속 분포를 비교하여 나타냈다.

열선 유속계는 머리핀 와류가 생성되는 후류 영역 내 $x=0.4m$ 에서 횡단(YZ)평면을 일정한 격자로 설정하여 총 294개 지점에서 유속을 측정하였다. 즉, 세로방향(Y축)은 평판으로부터 2.0mm까지 0.5mm간격으로 5개 지점과 1.0mm 간격으로 11.0mm까지 9개 지점으로 총 14개 위치를 선정하였다. 또한, 가로방향(Z축)은 $-20.0mm \leq Z \leq 20.0mm$ 구간을 2.0mm의 간격으로 총 21개 위치를 선정하였다. 이렇게 형성한 유속 측정 격자를 Fig. 4에 나타냈다.

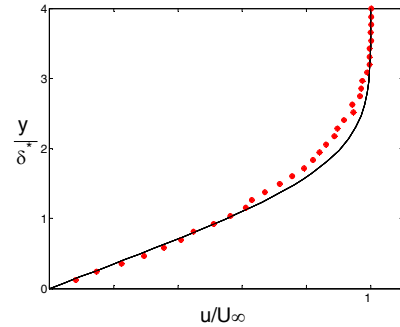


Fig. 3. Velocity profile (red circle) comparing to Blasius profile (black line)

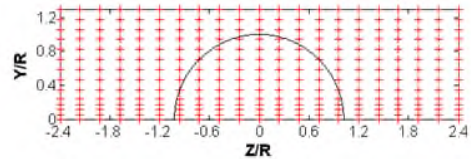


Fig. 4. Grid of velocity measurement $x=0.4m$ from leading edge

III. 실험 결과

3.1 유동가시화

반구 내부로 주입된 적색 염료는 반구 표면까지 뚫린 구멍을 통해 하류방향으로 흘러나온다. 이때 반구 전방의 유속은 역압력구배에 의해 정점 부근에서 박리되어 염료와 함께 후류 영역을 형성한다. Fig. 5에서 수직 상 방향에서 바라 본 상단 사진에는 후류 영역 내 $x=0.4m$ 에 위치한 열선유속계 및 반구 전방의 흡입 구멍에 연결된 적색 튜브가 보인다. 흡입제어를 할 경우에 적색 튜브는 수로 외부로 빼내 중력에 의한 흡입 제어를 할 수 있다. 비제어일 경우는 테이프로 덮어 구멍에 의한 영향을 최소화했다. 또한 측면에서 촬영된 사진은 0.15초 간격으로 후류 영역으로부터 머리핀 와류(흰색 화살표)가 생성되는 한 주기를 보여준다.

유동가시화를 촬영한 동영상으로부터 60초 동안 발생한 머리핀 와류 발생 빈도를 계측하였다. 자유유속 ($U_\infty = 7.4cm/s$)에서 흡입제어 유무에 따라 머리핀 와류 주파수 변화량을 Table 1에 정리하였다. 흡입비(Suction ratio)는 중력에 의한 흡입속도(V_{suck})에 대한 자유유속의 비율로 정의하여 1.62로 계산된다. 흡입제어를 실시함으로써 반구 전방의 유동에너지가 감소하여 반구 표

면으로부터 박리가 상류 쪽에서 발생한다. 따라서 반구 후류 영역은 하류 방향으로 길이가 증가하여 역류에 의한 머리핀 와류 생성 주기가 길어진다. 그 결과 흡입비가 1.62에서 머리핀 와류 주파수는 12.0% 감소했다.

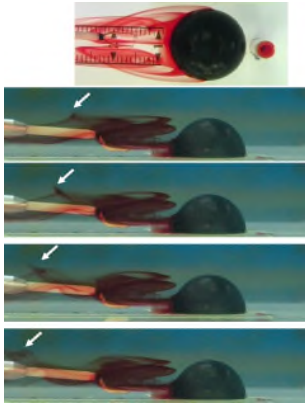


Fig. 5. Wake region and hairpin vortex development by red dye. Top view shows hot-film sensor at $x=0.4m$ and suction hole in front of hemisphere. Side views show one cycle of hairpin vortex during 0.6s

Table 1. Frequency change of hairpin vortex without and with suction control

| Suction ratio | Without suction | With suction | Reduction |
|---------------|-----------------|--------------|-----------|
| 1.62 | 1.7Hz | 1.5Hz | 12% |

3.2 유속의 통계적 해석

후류 영역 내 머리핀 와류가 생성되는 유속방향 위치에 설정한 횡단평면 격자의 각 지점 평균유속을 Fig. 6에 표시했다. 유동가시화의 결과(Fig. 5 흰색 화살표)에 따르면 반구의 정점 위치인 $Z=0mm$ 및 $Y=10.0mm$ 에서는 머리핀 와류에 의한 유속 변화가 예측되나 주위 유속이 상대적으로 높아 그 변화를 확인하기 어렵다. 또한, 흡입제어에 의한 그 변화량도 나타내지 못한다.

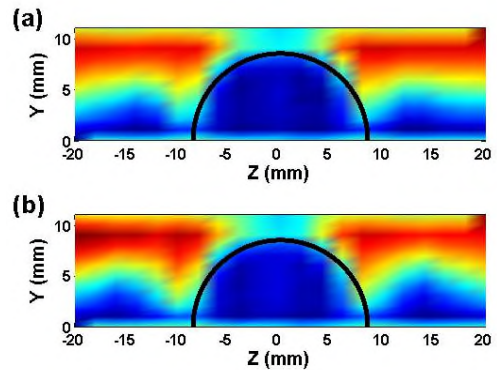


Fig. 6. Mean velocity at each grid point (a) without control (b) with control. Black line indicates hemisphere

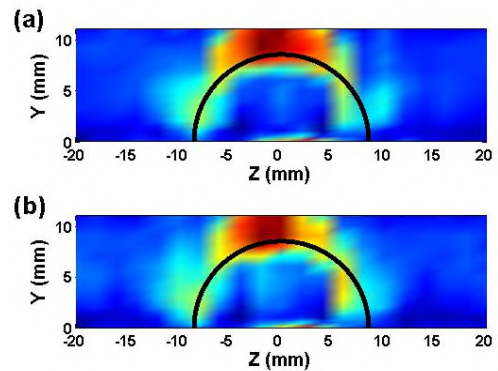


Fig. 7. Root mean square (RMS) at each grid point (a) without control (b) with control. Black line indicates hemisphere

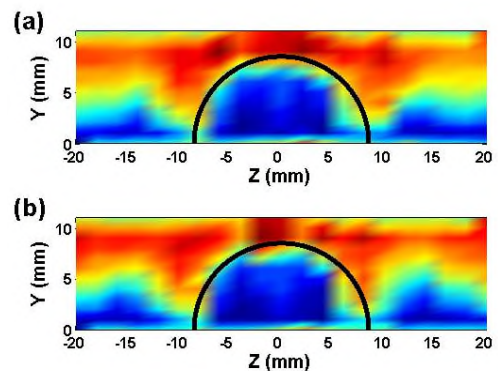


Fig. 8. Sum of frequency amplitude after FFT analysis at each grid point (a) without control (b) with control. Black line indicates hemisphere

따라서 주위 유속의 영향보다는 각 지점 유속 변동량을 표준편차(RMS)값으로 계산하여 Fig. 7에 나타냈다. 머리핀 와류가 생성되는 부근에서는 유동의 급격한 변화량에 의해 상대적으로 높은 값을 나타내고, 흡입제어를 통해 머리핀 와류 생성 빈도가 감소하여 유속 변동량도 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 하지만, 벽면 근처의 반구 측면에 존재하는 정지와류는 경계층 내 에너지 전달은 활발하나 유속 변동이 상대적으로 낮기 때문에 표준편차 값으로는 그 위치를 판별하기 어렵다. 즉, 반구 측면에 위치한 정지와류에 의한 낮은 유속은 평균 유속으로 나타낸 Fig. 6의 $Z=\pm 15.0\text{mm}$ 에 위치해 있다. 이처럼 평균유속과 속도 변동량으로는 경계층 내 다양한 형태의 와류를 동시에 표현할 수 없다.

와류는 경계층을 형성하고 유지하는 에너지 전달을 담당하기 때문에 각 지점에서 측정된 유속을 푸리에 변환 후 모든 주파수의 크기를 합산하여 Fig. 8에 나타냈다. 따라서 각 지점에서 에너지 변동에 관여하는 모든 와류성분의 영향을 보여준다. 층류 경계층이라도 반구라는 장애물 및 펌프 순환에 의한 저주파 성분이 유속에 측정되기 때문에 고주파 통과 필터(High Pass Filter)를 적용하여 푸리에 변환을 진행했다. 반구 정점에는 후류 영역으로부터 역류가 상승하고 박리된 유동이 만나 머리핀 와류가 생성된다. 즉, 유동 상호간 에너지 전달이 급격히 진행되어 다양한 주파수의 와류 에너지 집중이 상대적으로 높게 나타난다. 이에 더하여, 평판 표면의 반구 측면 $Z=\pm 15.0\text{mm}$ 에서는 정지와류에 의한 에너지 분포가 드러나 있다. 흡입제어를 실시한 경우, 반구 전방유동은 표면과 마찰에 의해 에너지가 소모되어 반구 정점에서 머리핀 와류 생성 빈도의 감소로 나타나며 해당 주파수의 에너지도 줄어든다.

IV. 결론 및 향후 연구

경계층을 유지하기 위해 다양한 형태의 와류는 끊임 없이 상호작용함으로써 에너지 전달을 한다. 이러한 와류의 생성 및 성장의 메커니즘을 규명하기 위해 통계적 방법(평균, 표준편차, 비대칭도 및 첨도 등)이 적용되고 있다. 하지만 각각의 방법 특성상 측정 위치에서 시간 영역의 유속 변동이 큰 대표적인 와류의 정보를 표현할 수는 있지만, 그 주위에 유발되는 초기 와

류의 영향을 드러내지는 못한다. 따라서 푸리에 변환을 통해 시간 영역의 정보를 주파수별 크기 정보로 변환하면 측정 지점을 통과하는 모든 와류의 영향을 파악할 수 있다. 즉, 성장한 와류 및 그 와류에 의해 유발되는 와류를 에너지 관점으로 해석함으로써 다양한 형태의 와류를 동시에 해석이 가능하다. 향후 연구를 통해 성장단계별 주파수 변화를 파악하는 매개변수 연구는 다양한 와류의 정량적 분석을 용이하게 할 것이다.

ACKNOWLEDGMENTS

이 논문은 2019~2020년도 창원대학교 자율연구과제 연구비 지원으로 수행된 연구결과임.

REFERENCES

- [1] S. J. Kline, W. C. Reynolds, F. A. Schraub, and P. W. Runstadler, "The Structure of Turbulent Boundary Layer," *J. Fluid Mech.*, vol. 30, pp. 741-773, 1967.
- [2] M. S. Acarlar and C. R. Smith, Report FM-5, Department of Mechanical Engineering & Mechanics, Lehigh University, USA, 1984.
- [3] Y. G. Guezennec, and H. M. Nagib, "Drag Reduction in Turbulent Boundary Layers," *AIAA J.*, vol. 28, no. 2, pp. 245-262, 1990.
- [4] Y.-D. Kang, K.-S. Choi, and H. H. Chun, "Direct intervention of hairpin structures for turbulent boundary-layer control," *Phys. Fluids*, vol. 20, no. 10, pp. 101517-1-101517-13, Oct. 2008.
- [5] A. K. Gupta, "Hydrodynamic Modification of the Horseshoe Vortex at a Vertical Pier Junction with Ground," *Phys. Fluids*, vol. 30, No. 4, pp. 1213-1215, 1987.
- [6] H. A. Zondag, "The Dynamics of Hairpin Vortices in a Laminar Boundary Layer," PhD dissertation, University of Eindhoven.
- [7] M. S. Acarlar, and C. R. Smith, "A Study of Hairpin Vortices in a Laminar Boundary Layer. Part 1. Hairpin Vortices Generated by a Hemisphere Protuberance," *Journal of Fluid Mechanics*, vol. 175, pp. 1-41, 1987.

[8] S.-Y. Shin, K.-H. Jung, Y.-D. Kang, S.-B. Suh, J. Kim, and N.-H. An, "A Study on the Effect of Large Coherent Structures to the Skin Friction by POD Analysis," *SNAK*, vol. 54, no. 5, pp. 406-414, Oct. 2017.

[9] J.-B. Lee, M.-H. Kim, and D.-S. Jang, "Feature Extraction in 3-Dimensional Object with Closed-surface using Fourier Transform," *SNAK*, vol. 4, no. 3, pp. 21-26, Jul. 2003.

강 용 덕 (Yong-Duck Kang)



1998년 2월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학사)
2003년 8월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학석사)
2009년 7월 : 노팅엄대학교
기계공학과(공학박사)
2016년 3월~현재 : 동의대학교

조선해양공학과 교수
관심분야 : 마찰저항/풍력발전기

저자 소개

구 본 국 (Bonguk Koo)



2002년 2월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학사)
2004년 2월 : 부산대학교
조선해양공학과(공학석사)
2006년 5월 : UCLA
기계공학과(공학석사)
2011년 5월 : Univ. of Iowa
기계공학과(공학박사)
2014년 3월~현재 : 창원대학교

조선해양공학과 교수
관심분야 : 유동해석/전산유체역학

박 준 모 (Jun Mo Park)



1993년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학사)
1996년 2월 : 인제대학교
의용공학과(공학석사)
2008년 8월 : 부산대학교
의공학협동과정(공학박사)
2018년 2월 ~현재 : 동명대학교

전자및의용공학부 교수
관심분야 : 신호처리, 뇌 신경계 신호 분석