

# 유체공학연구실

## Fluid Engineering Laboratory+

하호진<sup>†</sup>

강원대학교 기계의용·메카트로닉스공학과

### 1. 서론

강원대학교 기계의용·메카트로닉스공학과 유체공학연구실(Fluid Engineering Laboratory<sup>+</sup>, FEL<sup>+</sup>)은 2017년 9월에 창설되어, 혈류 및 유체역학에 대한 연구를 주된 목표로 하고 있습니다. 현재(2024년 3월) 연구실은 박사 후 연구원 2명, 박사과정 학생 3명, 석사과정 학생 3명, 그리고 학부연구생 1명으로 구성되어 있습니다.

본 연구실은 혈류역학과 수력 발전에서의 유체역학 등 다양한 유체역학 현상을 탐구하고 있습니다. 현재, 심혈관 질환 환자의 혈류역학 분석 및 발전 시스템의 안전성과 효율성 개선과 관련한 연구에 집중하고 있습니다.

심혈관 질환은 전 세계적으로 중대한 건강 문제로 인식되고 있으며, 혈류역학 분야에서의 연구는 그 중심에 위치하고 있습니다. 특히, 4D Flow MRI 데이터를 활용하여 혈류의 속도, 방향, 및 유동 패턴을 측정하는데 있어서 환자의 움직임, 호흡 등으로 인한 잡음과 불규칙성을 극복해야 하는 기술적 도전이 있습니다. 이를 해결함으로써, 심혈관 질환 환자의 혈류역학을 정확히 이해하고 진단에 도움을 줄 수 있습니다.

또한, 발전 시스템은 공동(cavitation) 및 공진(resonance)으로 인한 고장 발생 가능성이 높아 안전성과 성능 개선이 필요합니다. 이를 위해

본 연구실에서는 유체 가시화 기법을 활용하여 발전 시스템의 설계를 최적화하는 연구가 필요합니다. 특히, 공동이 발생하는 조건을 정확히 모델링하여 이를 사전에 예측하고 방지하는 기술적 접근이 필요합니다.

이러한 배경 아래서, 강원대학교 FEL<sup>+</sup>은 혈류역학과 수력 발전의 유체역학에 대한 연구를 통해 실질적인 문제 해결을 목표로 끊임없는 노력을 기울이고 있습니다. 본 연구실은 최첨단 기술과 인공지능을 활용하여 혈류역학 분석 및 발전 시스템 설계에 적극적으로 기여하고 있습니다. 이를 통해 의료 및 산업 분야에서의 혁신적인 기술 개발에 기여하고자 합니다.

현재 연구실에서 수행하고 있는 주요 연구 주제는 다음과 같습니다.

- 4D flow MRI
- AI-based Segmentation & Super-Resolution
- Hydroturbine

본 소개 글에서는 위에 나열된 연구 주제에 대해 간략하게 소개하고자 합니다.

### 2. 연구 내용 소개

#### 2.1 4D flow MRI

혈류의 특성은 심혈관 질환의 발달과 밀접하게 관련되어 있습니다. 혈액은 흐르면서 혈관

<sup>†</sup> Department of Mechanical Engineering, Kangwon National University  
E-mail: hojinha@kangwon.ac.kr

표면에 압력이나 마찰 등 다양한 유체역학적 힘을 가하며, 혈관벽 가장 안쪽에 위치한 내피세포는 외부에서 작용하는 혈류역학적 힘을 감지하여 형태와 증식을 조절합니다<sup>[2]</sup>. 이러한 비정상적인 혈류로부터 전달되는 기계적 힘의 변화는 내피세포로 전달되어 염증성 병변을 유발하고, 동맥 경화증, 대동맥 박리, 동맥류 등의 심혈관 질환을 촉진합니다<sup>[3-6]</sup>. 따라서 정상군과 환자군의 혈류 특징을 정량적으로 분석하고 이해한다면 심혈관 질환 위험을 조기 진단하고 예측하는 데 도움이 될 것입니다.

3차원 혈류 측정법인 4D PC-MRI 또는 4D flow MRI는 자기공명영상 (MRI)의 혈류에 대한 민감성을 이용하여 3차원 공간에서 시간에 따라 변화하는 혈류를 측정하기 위해 개발되었습니다<sup>[7-9]</sup>. 이 기술은 3차원 측정을 기반으로 하므로 전체 심혈관계를 측정할 수 있으며, 혈류의 속도와 양을 후향적으로 분석할 수 있습니다. 이는 기존의 2D PC-MRI와 달리 측정하려는 평면의 정확한 선택이 중요하지 않으며, 4D flow MRI는 전체 혈관시스템을 한꺼번에 측정한 후 원하는 분석이 가능하다는 장점이 있습니다.

4D flow MRI를 사용하여 3차원 혈류를 시각화 하여 기존의 정상적인 혈류와 비교하여 심혈관 질환으로 인한 혈류 구조적 변화를 직관적으로 시각화하고 분석할 수 있습니다. 이 결과의 시각화는 일반적으로 벡터장 (vector field), 유선 (streamline) 및 경로선 (pathline)을 사용합니다 (Fig. 1). 속도 벡터 필드는 각 복셀에서 나타나는 속도 벡터의 크기와 방향으로 혈류의 속도와

방향을 알려줍니다. 유선은 지정된 시간에 혈류 속도 벡터에 접하는 곡선의 모음으로 혈류의 진행 방향을 보여줍니다. 경로선은 가상의 혈류 입자들이 따르는 궤도를 보여주는 혈류 궤도의 집합입니다(Fig. 1).

4D flow MRI는 측정법, 전처리 및 후처리 기술 등의 발전으로 활용성이 증가하고 있습니다. 혈류 속도 및 혈류량 측정은 임상에서 유용한 분석을 가능하게 하며, 최근에는 속도만 아니라 유체 역학에 기반한 잠재적인 바이오 마커가 개발되고 있습니다. 이러한 바이오 마커는 다양한 임상 연구에서 검증되고 있습니다. 특히, 노이즈 문제와 관련된 측정 문제들이 신호 수집 및 처리 기술의 발전으로 극복되고 있으며, 향후 임상적 활용성이 확인되면 다양한 임상 환경에서 사용될 것으로 기대됩니다.

## 2.2 Segmentation and Super-Resolution

4D Flow MRI는 혈류역학적 특징을 분석하는데 유용한 도구입니다. 이 기술을 통해 시간과 공간적으로 속도 데이터를 얻어 혈류의 움직임을 자세하게 살펴볼 수 있습니다. 그러나, 이러한 기술은 여전히 몇 가지 어려움을 겪고 있습니다. 데이터 수집 과정에서 발생하는 잡음이나 저해상도로 인해 혈관의 세부적인 구조나 흐름 패턴을 정확하게 파악하는 것이 어려워지는 문제가 있습니다. 이러한 제한은 심혈관 질환과 같은 병변의 진단 및 치료에 있어서 제한적인 정보를 제공할 수 있으며, 정확한 진단과 개인 맞춤형 치료 계획 수립에 어려움을 초래할 수 있습니다. 본 연구실은 이러한 문제를 해결하기 위해 자동 분할 (Auto segmentation)과 PINN (Physics-Informed Neural Networks)을 연구하고 있습니다.

자동 분할은 4D Flow MRI의 위상 영상 (Phase image)과 진폭 영상 (Magnitude image)를 사용하여 PC-MRI로의 변환 없이 대동맥을 분할하는 것을 목표로 합니다. 이를 통해 Raw data를 입력으로 사용하고 Dixon data를 이용하여 얻은 라벨 데이터를 출력으로 설정하여 의료 영상 분할의 딥러닝 모델을 구축하여 검증 데이터에 대해

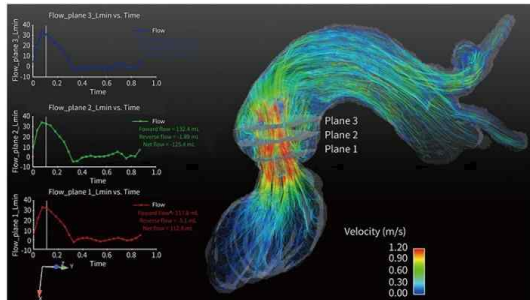


Fig. 1. Velocity visualization and quantification of the flow rate [1].

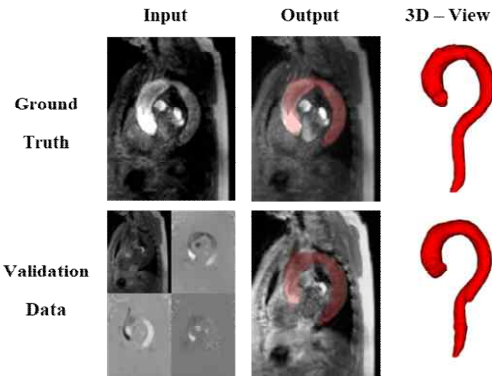


Fig. 2. Comparison of ground truth and predicted data using a pre-trained model on validation data

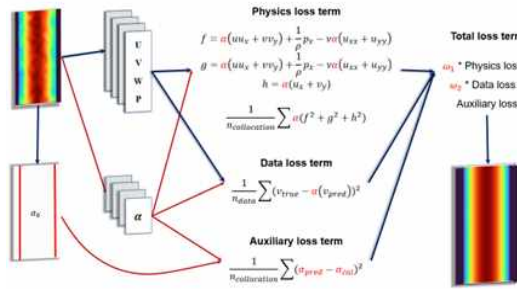


Fig. 3. PINN algorithm for pipe wall estimation

서도 분할을 확인했습니다 (Fig 2). 그리고 훈련된 모델이 정확한 대동맥 특징을 도출하고 의료 영상 분할의 딥러닝 모델인 UNet 기반의 지도 학습 (supervised-learning)을 통해 원본 데이터의 유효성을 입증했습니다<sup>[10]</sup>.

PINN은 물리화적인 지식을 신경망 구조에 통합하여 과학적인 문제를 해결하는 데 사용됩니다. 이를 통해 물리적 법칙에 기반하여 데이터를 처리하고, 현상을 모델링하여 해석하는 데 활용됩니다<sup>[11]</sup>. 본 연구실에서는 4D Flow MRI로부터 얻은 데이터를 나비에-스토크스 방정식을 기반으로 하는 물리학적 모델에 적합하게 학습시켜 혈류역학적 특성을 더 정확하게 분석하고자 합니다 (Fig 3).

본 연구실은 4D Flow MRI로 획득한 혈류 정보를 활용하여 데이터가 부족한 상황으로 인한 성능 저하를 해결하는 딥러닝 방법을 개발하고 있습니다. 이를 통해 사용자가 원하는 관심 영역

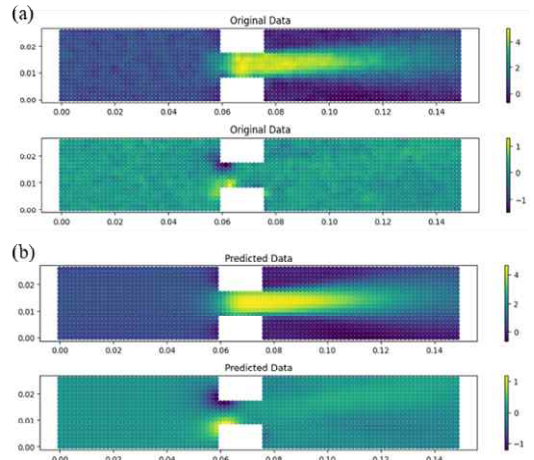


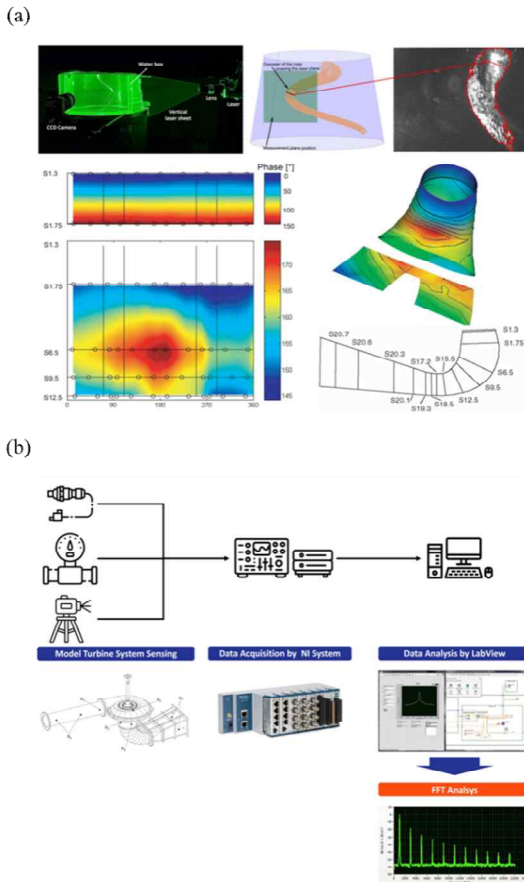
Fig. 4. Comparison of (a) *In-vitro* experimental data by 4D Flow MRI and (b) prediction by PINN

에 따라 자동 분할이 가능하며, 환자 개별에 맞는 심혈관 해석 방법을 발전시킬 수 있을 것으로 기대됩니다. 또한, PINN을 활용하여 부족한 데이터임에도 불구하고 물리정보를 기반으로 하여 정확한 예측 데이터를 얻음으로써, 4D Flow MRI로부터 얻은 속도 데이터의 잡음을 제거하고 고해상도로 복원하며, 이를 통해 혈관 벽을 추정하는 연구를 진행하고 있습니다 (Fig 4).

본 연구는 4D Flow MRI 데이터의 자동 분할과 PINN 기술을 통해 혈류역학적 정보를 정확하게 분석하고, 이를 통해 정확한 진단과 개인화된 치료 계획을 제시하여 환자의 치료 효과를 향상시키는데 도움이 될 것이라 기대됩니다. 또한, 이 연구는 의료 영상 처리의 효율성을 향상시키고 환자 경험을 향상시키는 동시에 의료 기술 발전과 연구 및 의료 협력을 강화할 것으로 기대됩니다.

### 2.3 Hydroturbine

국제 사회는 기후변화에 대응해 탄소 중 (carbon neutrality)의 중요성이 대두됨에 따라 2050년까지 기업 전력을 100% 신재생에너지로 공급하는 RE100이 화두입니다. RE100에서 인정하는 재생에너지는 풍력, 태양광, 지열, 지속가능한 바이오매스 및 수력입니다. 이 중, 발전 비중이 낮은



**Fig. 5.** (a) Schematic of the PIV based draft tube flow and cavitation visualization<sup>[12-14]</sup>, and (b) Multiscale coherent structures in wall turbulence

지열과 바이오매스를 제외하면 외부 환경의 변화에 따라 불안정한 출력을 보이는 풍력 및 태양광 발전의 변동성을 보완할 재생에너지원은 수력발전이 유일합니다.

따라서 수력 발전은 과거 기동과 정지를 최소화하고 설계점에서의 정격 발전을 통해 기저 부하 (base load)를 담당하는 역할에서 벗어나 재생 에너지로 인해 증대된 전력망 불안정성에 대응, 전력 안정성을 보충하는 탈 설계점 (off-design)에서의 유연화 운전을 요구받고 있습니다. 이러한 탈 설계점에서의 운전은 수차 각 부에 대한 급격한 응력 집중, 반복 하중, 공동 및 공진을 야기, 수력 발전 설비의 수명을 급격하게 감소 시킵니다.

특히 저부하 (part load) 운전 시 수차 내부에서 발생하는 공동과 드래프트 튜브 내부에서 발생하는 볼텍스 로프는 수차 전체 시스템의 유동에 압축성을 발생, 고유진동수 (natural frequency) 및 공진 특성을 변화시킵니다.

따라서 본 연구실에서는 Fig 5에 도시된 바와 같이 실험을 수행, PIV (Particle Image Velocimetry) 기법을 활용하여 공동 및 볼텍스 로프에 대한 유동 가시화를 실시하는 한편, 압력계, 로드셀 등의 센서 시스템을 활용하여 시스템의 진동을 측정, FFT (Fast Fourier Transform)를 실시하여 향후 수력 현대화 및 탈 설계점에서의 유연화 운전에 대비하고 있습니다.

### 3. 맺음말

강원대학교 기계의용·메카트로닉스공학과 유체공학연구소 (Fluid Engineering Laboratory<sup>+</sup>; FEL<sup>+</sup>)에서는 4D Flow MRI를 활용한 혈류시스템 분석, 인공지능을 이용한 자동 분할 및 혈관 벽 추정, 그리고 수력 발전과 관련한 연구를 수행하고 있습니다. 4D Flow MRI는 혈관 시스템을 비침습적으로 분석하고 직관적으로 가시화합니다. 이는 임상적 활용성이 매우 높을 것으로 예상됩니다. 그러나 잡음 및 저해상도의 문제로 인해 현재는 정확한 분석에 제약이 있습니다. 본 연구실은 이러한 문제를 해결하기 위해 인공지능을 활용하여 데이터의 잡음을 제거하고 고해상도로 복원하는 기술을 개발하고 있습니다. 특히, 자동 분할 및 PINN 기술을 적용하여 혈관 벽을 정확하게 추정하는 것을 목표로 하고 있습니다. 또한, 본 연구실은 한국수력원자력과의 협업을 통해 수력 발전 현대화를 목표로 하고 있습니다. 이를 통해 수력 발전 시스템의 효율성과 안정성을 향상시킬 수 있으며, 환경 친화적인 에너지 생산에 기여할 것으로 기대됩니다. 이러한 연구들은 의료 및 수력 발전 분야에서의 혁신적인 기술 발전과 사회적 가치 창출에 기여할 것으로 기대됩니다. 마지막으로, 유체공학연구소에 대한 자세한 정보와 연구 성과들은 연구실 홈페이지 (<https://fel.kangwon.ac.kr>)에서 확인할 수 있습니다.

## REFERENCES

- 1) H. Ha, H. Huh, D.-H. YANG and N. Kim, Quantification of hemodynamic parameters using four-dimensional flow MRI. *Journal of the Korean Radiological Society*, (2019) 239-258.
- 2) A.B. Fisher, S. Chien, A.I. Barakat and R.M. Nerem, Endothelial cellular response to altered shear stress. *American Journal of Physiology-Lung Cellular and Molecular Physiology*, 281 (2001) L529-L533.
- 3) D.N. Ku, D.P. Giddens, C.K. Zarins and S. Glagov, Pulsatile flow and atherosclerosis in the human carotid bifurcation. Positive correlation between plaque location and low oscillating shear stress. *Arteriosclerosis: An Official Journal of the American Heart Association, Inc.*, 5 (1985) 293-302.
- 4) A.J. Barker, M. Markl, J. Bürk, R. Lorenz, J. Bock, S. Bauer, J. Schulz-Menger and F. von Knobelsdorff-Brenkenhoff, Bicuspid aortic valve is associated with altered wall shear stress in the ascending aorta. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 5 (2012) 457-466.
- 5) M.M. Bissell, A.T. Hess, L. Biasioli, S.J. Glaze, M. Loudon, A. Pitcher, A. Davis, B. Prendergast, M. Markl and A.J. Barker, Aortic dilation in bicuspid aortic valve disease: flow pattern is a major contributor and differs with valve fusion type. *Circulation: Cardiovascular Imaging*, 6 (2013) 499-507.
- 6) M.E.T.A.H. May, Nature Versus Nurture in Bicuspid Aortic Valve Aortopathy. *Circulation*, 129 (2014) 622-624.
- 7) M. Markl, P.J. Kilner and T. Ebbers, Comprehensive 4D velocity mapping of the heart and great vessels by cardiovascular magnetic resonance. *Journal of Cardiovascular Magnetic Resonance*, 13 (2011) 7.
- 8) A. Harloff, A. Nußbaumer, S. Bauer, A.F. Stalder, A. Frydrychowicz, C. Weiller, J. Hennig and M. Markl, In vivo assessment of wall shear stress in the atherosclerotic aorta using flow-sensitive 4D MRI. *Magnetic Resonance in Medicine: An Official Journal of the International Society for Magnetic Resonance in Medicine*, 63 (2010) 1529-1536.
- 9) H. Ha, G.B. Kim, J. Kweon, S.J. Lee, Y.-H. Kim, D.H. Lee, D.H. Yang and N. Kim, Hemodynamic measurement using four-dimensional phase-contrast MRI: quantification of hemodynamic parameters and clinical applications. *Korean journal of radiology*, 17 (2016) 445.
- 10) O. Ronneberger, P. Fischer and T. Brox, U-net: Convolutional networks for biomedical image segmentation. *Medical image computing and computer-assisted intervention—MICCAI 2015*, (2015) 234-241.
- 11) M. Raissi, P. Perdikaris and G.E. Karniadakis, Physics-informed neural networks: A deep learning framework for solving forward and inverse problems involving nonlinear partial differential equations. *Journal of Computational physics*, 378 (2019) 686-707.
- 12) A. Amini, E. Vagnoni, A. Favrel, K. Yamaishi, A. Müller and F. Avellan, Upper part-load instability in a reduced-scale Francis turbine: an experimental study. *Experiments in Fluids*, 64 (2023) 110.
- 13) M.S. Iliescu, G.D. Ciocan and F. Avellan, Analysis of the cavitating draft tube vortex in a Francis turbine using particle image velocimetry measurements in two-phase flow. (2008).
- 14) C. Nicolet, *Hydroacoustic modelling and numerical simulation of unsteady operation of hydroelectric systems*. 2007, Epfl.