

바이오실험유체공학 연구실

(Bio & Experimental Fluid Engineering Laboratory)

박철우

경북대학교 기계공학부

1. 서 론

현대사회에 들어오면서 현대인의 생활 패턴과 식습관의 급격한 변화로 인해 최근 들면서 심혈관계 질환이 크게 증가하고 있으며 혈류 속의 콜레스테롤 및 심혈관계 질환을 유발하는 물질에 관한 원인분석 및 임상적 치료법의 개발 등이 사회적 주요 이슈가 되어오고 있다. 이러한 사회적 현상과 관련하여 심혈관계 질환에 관한 연구가 지속적으로 이루어져 오고 있는데 특히, 의학 분야에서뿐만 아니라 공학적 기법과 의학적 요법을 융합한 의공학 연구도 활발히 이루어지고 있는 실정이다.

경북대학교 바이오실험유체공학연구실에서는 혈류역학(bio-fluid dynamics) 분야에 중점을 둔 실험적 계측 연구 및 해석에 대한 연구를 수행하고 있다. 특히, 혈관 협착구조물 주위의 유동장에 대한 정량적 유동가시화 연구도 활발하게 진행되고 있다. 또한 혈관 내부를 흐르는 혈액의 거동 특성 및 혈관 내부에 생기는 혈전 구조 등을 포함하여 유동장의 변화를 전산유체역학 해석 기법을 활용하여 분석하는 연구도 수행하고 있다. 이러한 생체유체역학 분야의 실험적 연구를 위하여 현재 연구실에서는 Nd:Yag 레이저, CCD 카메라, 초음파 이미징 시스템, 광도플러단층촬영(ODT) 시스템, 초고속 카메라 등과 같은 다양한 영상 측정 장비들을 보유하고 있으며 이를 활용하여 정량적 유동가시화 연구를 수행해 오고 있다. 또한 계측된 실험 데이터는 수치해석 연구에 활용되는 물리량 값의 유효성 검증에도 중요하게 활용되고 있으며, 마이크로 채널 유동장과 같은 미세 구조물 내부의 생체 외 조건의 혈류 유동장을 분석함으로써 모세혈관에서 나타나는 유동 특성을 모사하고 있다. 그리고 고체-유체 상호작용(FSI)을 포함한 수치해석 기법을 기반으로 혈관벽 형상

및 협착 구조물 형상 변화에 따른 혈류 유동장 해석 연구를 수행하고 있다.

또한 복잡하고 극한의 유동장 내부 계측 및 제어에 활용될 수 있는 새로운 유동가시화 기법의 개발을 위하여 수중 이동형 유동장 계측 시스템의 개발을 수행하고 있다. 이는 수중내 자세제어 모듈을 탑재하여 생체모방 유동장을 계측할 수 있도록 구성하고 수중에서 유동가시화 장비가 활용될 수 있도록 연구를 진행하고 있다. 부유체의 수중 자세제어 성능 평가를 위하여 수중 깊이 변화에 따른 무선 송수신 특성 분석 연구도 수행하고 있다. 그 이외에 수지원 설비와 관련되어 활용되고 있는 자동제진기의 설계 분석 및 레이크 구조 최적화 연구 및 자동차 부품 생산공정의 다이캐스팅 금형 내부 유동장 해석 등과 같은 복잡한 산업체 유동장 관련 연구를 수행해 오고 있다.

2. 연구 내용 소개

2.1 협착 구조물 주위 유동장 해석 및 혈관벽 변형 특성에 관한 연구

혈관 내에서 협착의 주된 원인은 혈관벽의 저밀도 지질 단백질인 콜레스테롤 등과 같은 단백질이 축적되는 연유로 인해 혈관의 직경이 점점 줄어 들게 되고 이러한 협착 혈관 부위를 통과하는 혈류 유동의 거동도 중대한 영향을 받게 된다. 본 연구실에서는 초탄성적(hyperelastic) 혈관벽 재질 모델을 적용하여 마이크로 스케일의 모세혈관 구조에서 협착의 정도에 따른 유동장 및 벽면 변형의 영향에 관하여 수치해석적 연구를 수행하고 있다. 혈류가 혈관 벽에 미치는 상관 관계를 도출하기 위하여 유체 및 고체 구조 상호 작용(FSI; fluid structure interaction)을 고려한 모세혈관의 삼차원 형상을 설정하고 협착률 변화와

혈관벽 주위 근육의 존재 유무에 따른 혈관벽 변화 특성에 대하여 연구를 수행하였다.

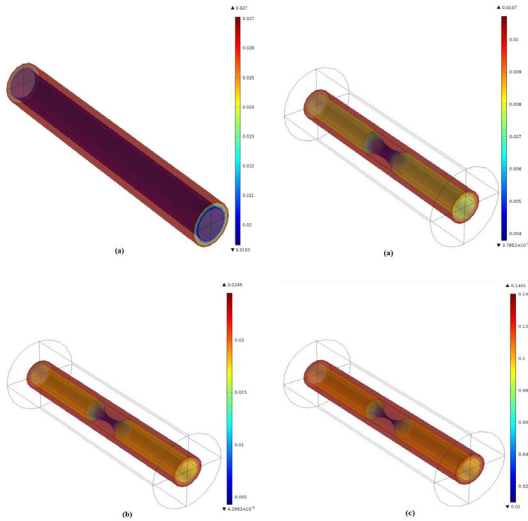


Fig. 1. 협착률 변화에 따른 혈관벽의 압력분포 변화

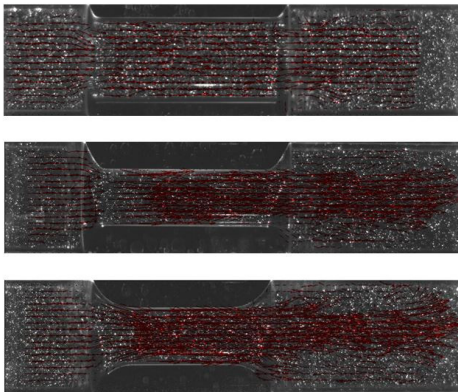


Fig. 2. 원형관 내부의 다양한 협착 구조물 주위 유동장 가시화

협착 구조물 주위 유동은 협착부를 지나면서 큰 압력분포의 변화를 나타내며 이러한 상호작용의 효과로 혈관 벽 두께의 변화가 발생하는 원인이 된다. 또한 혈관주위에 근육이 존재하게 될 경우는 혈관의 강도가 근육이 없을 때보다 상대적으로 높으므로 혈관변형의 중요한 변수가 될 수 있음을 알 수 있다. 그리고, 협착률의 변화는 혈관 내부의 단면적 차이인 종횡비(aspect ratio) 변화를 의미하게 되며 이에 따른 유동의 특성 평가도 매우 중요성을

가질 수 있다. 이러한 혈류역학적 특성은 혈관 질환의 외과적 진단이나 수술시 혈관 벽 주위에 관한 거동 특성에 주요한 인자로 취급되어야 하고 심혈관계 질환 진단시 미세혈관의 경우 벽면의 초탄성 변화에도 염두를 두어야 함을 의미한다.

2.2 공초점레이저주사현미경(CLSM) 활용 마이크로 채널 내부 유동가시화 및 세포공핍층 측정 연구

혈액은 생명체가 살아가는데 매우 중요한 역할을 하는 대표적 바이오 유체이지만 유동장 계측의 관점에서는 혈액 유동은 비뉴턴 유체 특성과 탄성적 부유체 특성을 함께 가지고 있으며, 또한 심장을 통한 맥동구조를 가지고 있어 정량적 특성의 파악 및 계측이 매우 어렵다. 그러나 혈액(blood)에 포함된 혈구들이 가지는 혈유변학적 특성 값의 측정 및 해석은 심혈관계 질환의 심각성과 상관관계 도출의 중요성으로 인해 지속적인 연구가 이루어져 오고 있다. 최근까지 형광을 이용한 micro-PIV 시스템과 같은 가시화 기법이 일조를 하고 있으나, 제한된 신호강도와 투명 탐색 장이 필수적으로 요구되고 있고, 생체 외(in-vitro) 조건에 제한되어 실제 특성 값 해석에 많은 어려움이 따른다. 특히, 형광입자의 경우 표면에 약한 전하를 띠고 있어 바이오 유체내에 삽입되었을 경우 단백질과의 반응 및 점착 등으로 인해 추적입자로서 기능이 많이 저하되는 단점도 있다. 이러한 어려움과 정확한 측정값의 신뢰도 향상을 위하여 본 연구실에서는 공초점 레이저 주사 현미경 시스템을 활용하여 혈류 유동장의 정량적 가시화 연구를 수행하였다.

공초점 레이저 주사 현미경 방식의 바이오 광학 이미징 장치는 혈액 내에 포함된 적혈구와 조직 자체를 직접 가시화할 수 있도록 구성하였고, 혈액의 유체 특성을 고려한 상태에서 적혈구의 유동을 측정하였다. 본 공초점 레이저 주사현미경 시스템을 활용하여 혈류유동장에서 혈구의 비 반사광 특성을 극복하고 생체 외 상태의 마이크로 튜브 내 혈류 유동을 추적입자 없이 적혈구를 직접 촬영하여 영상을 취득하고 이를 입자영상유속계 계산방식을 통하여 속도장을 추출하는 연구를 수행하였다. 또한 혈구의 미세채널 내 이동 특성인 벽면 주위에 발생하는 세포공핍층(cell depleted layer)의 두께 측정에도 취득한 혈류유동 영상을 활용하여 결과 값을 도출하였다. 그리고 본 연구에서 개발된 공초점 레이저 주사 현미경 시스템을 활용하여 마우스의 미세혈관에 대하여 생체 내 혈액 유동의 속도장 계측 연구에도 활용하였다.

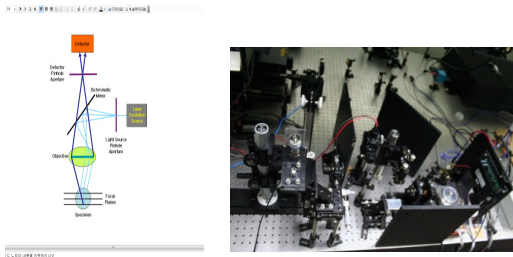


Fig. 3. 공초점레이저주사현미경의 원리 및 광경로 배치

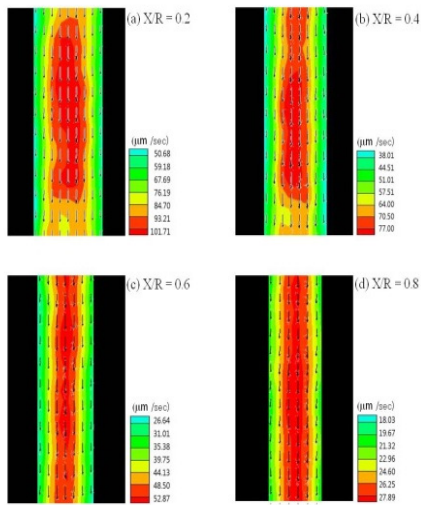


Fig. 4. 공초점레이저주사현미경 활용 적혈구 유동 가시화

2.3 마이크로 유체렌즈를 이용한 마이크로 PIV 측정 및 응용 연구

본 연구에서는 마이크로전자기계시스템(MEMS) 제작 기술을 활용한 응용기술의 하나로 작동 유체의 가압 변화를 통하여 초점 가변이 가능한 마이크로 유체렌즈를 제작하고 이를 미세 유동장 측정에 활용한 연구를 수행하였다. 일반적으로 광학 렌즈는 제작 시에 주로 고체의 형태로 제작 되어지기 때문에 각 렌즈의 고유 설계에 따라 고정된 초점 특성을 가지고 있다. 고체렌즈는 설치의 용이성과 특성적인 면에서 우수한 장점을 가지고 있는 것은 사실이지만, 만일 실험 조건의 변화 및 렌즈 초점거리의 변화와 같은 경계조건이 변화될 시에는 그에 해당하는 초점거리를 가진 렌즈의 신규 구입이 불가피하게 발생되게 된다. 따라서, 이처럼 단순한 미량의 경계조건 변화에 다소 유연하게 적용될 수 있도록 유체가압을 활용하여 초점

거리의 가변이 가능한 마이크로 유체렌즈를 제작하고, 이를 마이크로 채널 내부를 흐르는 유동의 속도장 측정의 직접 단면 조명 장치로서의 활용성을 평가해 보았다.

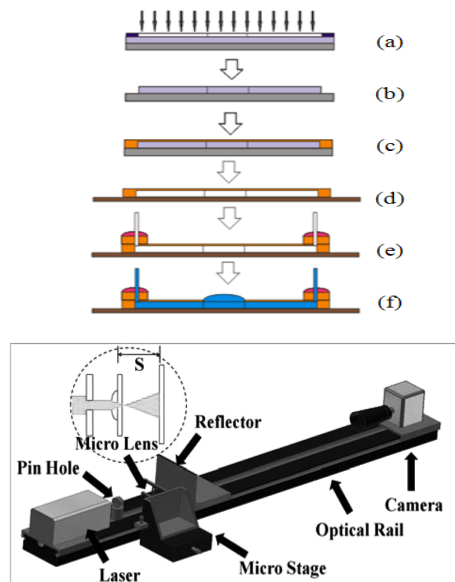


Fig. 5. 마이크로 유체렌즈 제작 및 스캐닝 특성 평가

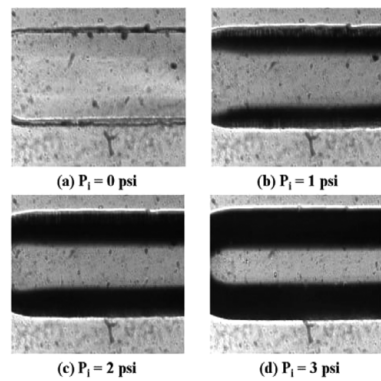


Fig. 6. 작동유체 압력변화에 따른 마이크로 유체 렌즈의 굴절도 변화

속도장을 계측하는 방법으로는 유체역학 분야에 널리 활용되고 있는 입자영상유속계 방법을 적용하여 유동장을 측정하였다. 특히, 마이크로 입자영상유속계 계측 방법의 경우에는 미세한 조명장치의 제한으로 인해 추적입자의 일반적 산란광을 활용하지 않고 미세 채널 내부 전체의 체적조명을 통한 입자의 형광 계측을 활용하고 있으므로 신호비(S/N)가 다소 낮을 수 있다.

본 연구에서는 렌즈를 마이크로 스케일의 초점 가변형

유체렌즈의 형태로 제작하여 수백 마이크로 크기의 직접적 레이저 단면 광을 확보하여 마이크로채널 내부를 조명함으로써 추적입자의 산란광이 이미징 될 수 있도록 구현하였다. 이렇게 취득된 산란 입자의 영상에 대하여 입자영상유속계 알고리즘을 적용하여 마이크로 채널 내부의 속도장 측정을 통하여 유체렌즈의 활용 가능성 및 성능 특성을 평가하였다.

2.4 PIV기법을 활용한 전시용 냉장기기 내부 유동장 측정 연구

최근 생활 수준의 향상과 더불어 에너지 소비가 폭발적으로 증가되고 있으며 이에 따라 에너지 소비에 대한 제품의 규제도 전세계적으로 매우 강화되고 있는 실정이다. 특히, 가정에서 많이 사용되는 생활필수품인 냉장고와 같은 냉장기기의 경우에 있어서도 에너지 소비전력 저감을 위한 구조 및 성능개선 등에 관한 연구들의 필요성이 대두되고 있다. 냉장기기의 연구들은 주로 냉동사이클 효율 향상 관점에서 많은 연구가 이루어져 오고 있으며 특히 냉장기기 내부 유동장과의 상관관계 분석도 반드시 필요한 중요 설계 인자가 될 수 있을 것이다.

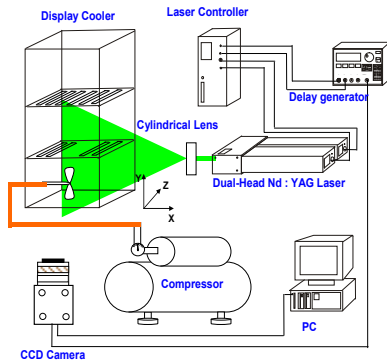


Fig. 6. 전시용 냉장기기 내부 유동장 측정을 위한 PIV 속도장 측정시스템

본 연구에서는 산업체에서 직접 활용되고 있는 전시용 냉장기기의 내부 유동장 구조 및 온도분포를 파악하기 위하여 축소모형에 대한 입자영상유속계를 활용하여 속도장을 계측하고 수치해석을 통한 온도장 모델링 분석 연구를 수행함으로써 보다 효율적인 냉기 유동분포를 이룰 수 있도록 체계적인 연구를 수행하였다. 특히, 냉장기기 내부

유동 특성 비교를 위하여 냉장실 중앙부에 선반을 설치하고 음료수 캔의 적치 유무에 따른 유동장 변화를 정량적으로 규명하였다. 연구 결과 냉장실 내부유동은 하부 바닥면의 우측 출구에서 나오는 토출유동에 의해 반시계 방향으로 회전하는 큰 규모의 와류가 발생하게 되며 이러한 와류의 중앙부의 냉각 효과는 상대적으로 낮게 나타난다.

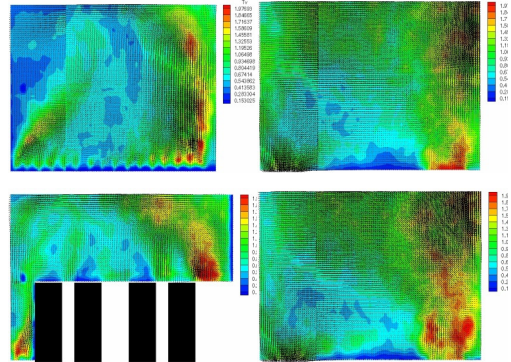


Fig. 7. 전시형 냉장기기 내부 평균유속 및 난류강도 분포

특히, 음료수가 중앙선반 위에 적치될 경우, 냉장실 상부의 와류가 소실되며 전체적인 유동구조가 크게 변화되어짐을 알 수 있다.

2.5 마이크로 채널 내부 등속전기영동 유동가시화 및 운동성 평가 연구

본 연구에서는 마이크로 채널 내에서 전기장 내부에서 대전된 입자들의 운동성의 차이를 활용하여 분자량이 서로 다른 입자들이 혼합된 부유 솔루션을 단일 채널을 통하여 분리할 수 있는 등속전기영동 기법 활용 연구를 수행하였다. 등속전기영동 특성은 전기장의 세기, pH, 그리고 이온 용액의 농도 변화에 따라 달라지게 되며, 이를 활용하여 부유 입자들의 적체층(stacking zone)을 가시화 하였으며 입자의 운동성(mobility) 특성 평가를 위해서 측정된 입자영상을 활용하여 입자의 속도를 PIV 기법을 이용하여 측정하였다. 등속전기영동 조건에서 대전된 입자의 운동성과 관련된 이온 입자의 이동속도는 적용 전압에 따라 선형적으로 증가하였다.

또한 입자 이동속도는 솔루션 용액의 pH에 의해서도 영향을 받을 수 있었다. 이러한 결과는 향후 등속전기영동 기법을 활용한 셀 분리와 같은 바이오 기술 접목 연구에 적극 활용될 수 있을 것이다.

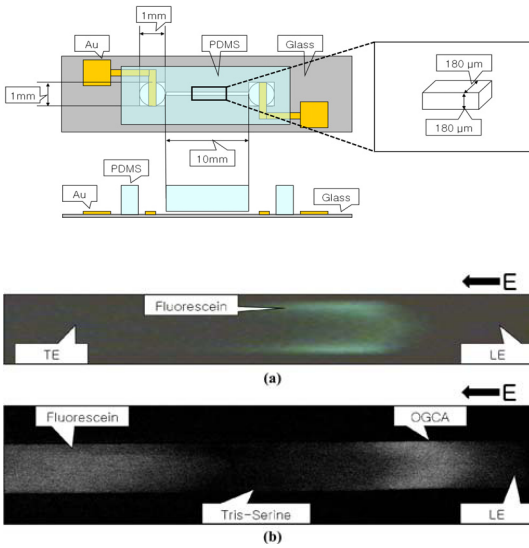


Fig. 8. 등속전기영동 시스템 구성도 및 입자 분리 가시화

3. 맺음말

경북대학교 기계공학부의 바이오실험유체공학 연구실에서는 대표적 바이오 유체인 혈류 유동에 대하여 다양한 계측 기법 활용을 통한 정량적 유동가시화 및 유동장 해석 연구를 진행하고 있다. 실험적 연구를 통한 바이오 유동 및 유체공학 문제 해결의 주요 특성을 찾아내고 해석하여 이를 바탕으로 수치해석 연구의 주요 경계조건을 제시하여 줌으로써 보다 효과적이고 완성도 높은 연구를 수행함을 목표로 하고 있다. 또한, 경북대학교 대학원 의공학과 및 수학과와도 혈류역학 분야 연구 협업을 통하여 더욱 발전적인 혈류 유동 해석 연구를 구현하고자 노력하고 있다. 아울러 산학협력 연구를 통한 유동가시화 기법의 실제 산업체 유동 적용에도 많은 관심과 노력을 기울

여 기업의 제품 질적 향상과 응용 기반 기술 지원에도 도움을 주고 있다.

참고문헌

- 1) An, J. H., Cheema, T. A., Jeong, S. R., Lee, C. Y., Kim, G. M., Park, C. W., 2012, "Measurement of fluid dynamic characteristics around stenotic obstruction in a circular channel," J. Marine Eng., Vol. 35(7), pp.921~929.
- 2) Choi, S. M., Kim, W. H., Cote, D., Park, C. W., Lee, H., 2011, "Blood cell assisted in vivo particle image velocimetry using the confocal laser scanning microscope," Optics express, Vol. 19(5), pp.4357~4368.
- 3) Jeong, S. R., Dang, T. D., Choi, J. H., Kim, G. M. and Park, C. W., 2010, "Experimental study on micro PIV measurement using a micro liquid lens," KSVI Journal, Vol. 8(3), pp.22~28.
- 4) Park, C. W. and Baek, I. J., 2007, "An experimental study on flow structure inside a display cooler using PIV techniques," KSVI Journal, Vol. 5(2), pp.48~55.
- 5) An, J. H., Joo, Y. H., Lee, C. Y., Lee, Y. J. and Park, C. W., 2011, "Evaluation of electrokinetic flow mobility using isotacho-electrophoresis techniques," JOM, Vol. 16(4), pp.444~448.
- 6) Lim, S. H., Kim, W. H., Lee, C. Y. and Park, C. W., 2010, "Flow visualization of blood cell and detection of cell depleted layer using a confocal laser scanning microscope," KSVI Journal, Vol. 8(1), pp.46~52.