

마이크로/바이오 유동시스템 실험실

유정열

서울대학교 기계항공공학부 교수

1. 서론

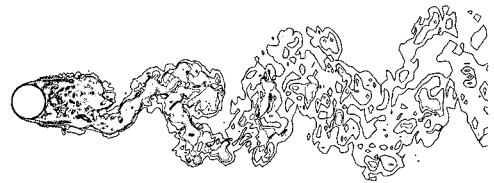
1978년 유체공학실험실로 시작한 본 실험실은 1995년 유동시스템실험실로 명칭변경을 하였고, 2000년에는 마이크로/바이오유동시스템실험실로 명칭변경을 하여 오늘에 이르고 있으며, 여기서는 주로 최근의 연구활동에 대하여 소개한다. 본 연구실은 현재 2명의 박사후 연구원, 10명의 박사과정 및 7명의 석사과정 대학원생들로 구성되어 있으며, 전산유체역학팀과 실험유체역학팀으로 나누어 연구를 수행하고 있다. 최근에는 전산유체역학팀에서는 Direct Numerical Simulation (DNS)과 Large Eddy Simulation (LES)을 기반으로 한 난류 유동 구조 해석, 병렬컴퓨터와 유한요소법을 이용한 대규모 유동 해석 코드 개발이 진행되고 있다. 실험유체역학팀에서는 Particle Image Velocimetry (PIV)와 μ PIV 기법을 적용하는 난류유동 및 마이크로채널 유동 계측, Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy (TIRFM) 등의 광학 기법을 적용한 생체 관련 유동 계측이 이루어지고 있다.

2. DNS와 LES를 기반으로 한 난류 유동 구조 해석

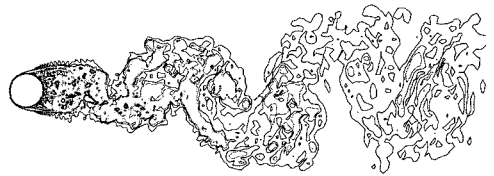
본 연구실에서는 DNS와 LES를 기반으로 하여 난류 구조에 대한 기초연구를 수행할 뿐만 아니라, 이에 관련된 수치해의 정확도 및 효율성을 높이기 위한 수치 기법에 대한 연구를 병행함으로써 현재 다양한 분야에 적용하고 있다.

2.1 폴리머 첨가제에 의한 점탄성 유체의 난류 항력 감소 메커니즘에 대한 연구

FENE-P 및 Oldroyd-B 모델과 같은 점탄성유체에 적용할 수 있는 고해상도 수치기법을 개발하여 완전



COM4 (with SGS model)



COM4 (without SGS model)



CUDZ (with SGS model)

Fig. 1. LES of cylinder wakes at $Re = 3900$ with compact central difference and upwind schemes.

발달된 채널 유동에서 폴리머 첨가제에 의한 난류 항력 감소는 난류 속도 스케일이 폴리머의 속도 스케일보다 큰 경우에만 발생함을 처음으로 규명함으로써 많은 연구자들의 주목을 받고 있으며, 이 분야의 연구에 큰 기여를 하였다.

2.2 LES에서의 중심 및 상류 컴팩트 차분기법의 적합성에 관한 연구

본 연구에서는 DNS와는 달리 비교적 성긴 격자를 사용할 수 있는 LES에서 발생하는 모델링 오차 및 차분 오차에 대하여 수치실험 및 이론적 해석을 통하여 대류항을 엇대칭형으로 처리한 고해상도 컴팩트 중심 차분기법이 복잡한 난류 유동 해석을 위한 LES에 성공적으로 적용될 수 있음을 규명하였으며, 또한 LES에 대한 체계적인 수치 및 모델링 오차해석 방법론을 제시하였다. 현재는 이와 같은 수치기법을 DNS에도 적용하여 실린더 후류에서의 와류 공진현상에 대한 물리적 메커니즘을 규명하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다.

2.3 초임계압 유체의 난류 열전달 특성에 대한 직접 수치모사 (DNS)

본 연구에서는 Low-Mach-Number Navier-Stokes 방정식을 채택하여 초임계압 유체(Supercritical Pressure Fluid)의 난류 열전달 현상 및 이에 따른 난류 구조 변화에 대한 DNS를 수행하였으며, 또한 이를 효과적으로 풀기 위한 수치기법을 개발하였다. 이를 통해 초임계압 유체와 같이 매우 큰 폭의 밀도 변화를 수반하는 경우에는 부력에 의한 자연 대류 효과가 증폭되어 밀도 섭동에 의한 부력 생성항이 난류 구조의 변경 및 에너지 전달 현상을 결정하는 매우 중요한 역할을 함을 규명하였으며, 이에 따라 국부적인 열전달 저하 및 증가 현상과 같은 특이 열전달 현상이 발생함을 증명하였다. 현재는 IBM (Immersed Boundary Method)을 적용하여 보다 복잡한 단면 형상을 갖는 관내 유동 해석에 대한 연구가 진행중이다.

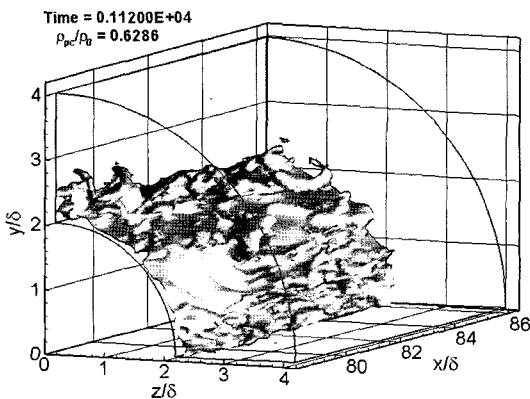


Fig. 2. Visualization of iso-density surface fluctuations in a heated supercritical annular flow.

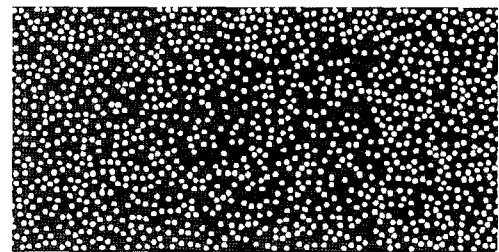
3. 유한요소법을 이용한 병렬 유동해석 코드 개발

3.1 효율적인 유한요소기법 개발

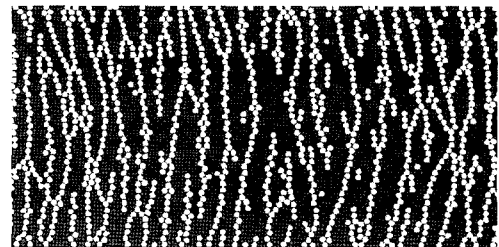
본 연구실에서는 효율적인 유한요소 해석 기법 개발을 위한 연구를 수행하고 있다. 예를 들면, 2차원 충돌 제트 해석에서 유선상류도식을 도입한 코드 개발 연구, 수렴을 가속화하기 위하여 3차원 비정렬격자계를 이용한 Navier-Stokes 해의 예조건화 기법에 대한 연구, 이산화된 Navier-Stokes 방정식의 영역 분할법을 위한 병렬 예조건화 기법과 P1P1 / P2P1 유한요소 공식을 이용한 분리해법에 대한 연구 등이 있다. 현재, 2상유동에서 정확도가 높은 Level-Set 방법에 기반한 유한요소 이산화 기법을 개발하고 있으며 개발된 수치해석 코드를 이용하여 자동차 냉각수 충전 문제 해석 연구를 수행하고 있다.

3.2 유체와 구조물의 상호작용 연구

본 연구실에서는 그동안 축적된 유한요소 해석 능력을 바탕으로 동적 유체-구조물 상호작용에 대한 Navier-Stokes 방정식을 활용한 수치해석 기법을 개발 중이며, 자유낙하하는 원형 실린더 주위 유동 및 판구조물로 나뉘어진 채널 유동을 해석하였고, 유체와 유체 내부에 포함된 입자들과의 상호작용을 해석



(a) no electric field



(b) under electric field

Fig. 3. Finite element simulation of chain structure formation of ER particles.

하여 입자들의 운동 및 분포에 대한 연구를 수행하였으며 나아가 마이크로 입자가 포함된 전기변성유체 같은 특수 유체의 유동 해석에 응용하고 있다.

3.3 소음장 해석을 위한 고차정확도 유한요소기법 개발

자동차 주위 및 내부의 소음장을 해석하기 위하여 비정렬격자계에서 고차정확도의 이산화기법이 적용된 Discontinuous Galerkin FEM에 기반한 병렬화된 압축성 유동 해석 코드를 개발하고자 노력하고 있으며, 현재 실린더나 공동 주위의 층류 유동으로부터 발생하는 소음 해석 및 자동차 선루프 유동 소음 해석 연구가 진행 중이다.

4. PIV와 μ PIV 기법을 이용한 유동 가시화

4.1 PIV 기법을 이용한 유동 가시화

본 연구실에서는 PIV 기법을 이용하여 실린더 후류의 2차 와류를 측정함으로써 실린더 근접 후류의 위상

학적 구조와 2차 와류의 상호관계에 대하여 연구를 수행하였으며, 나아가 진동 유동장에서 유동공진에 의한 실린더 후류의 와류 특성 변화에 대한 연구를 수행하였다. 또한 2상유동의 속도장을 측정하기 위하여 단일 카메라의 영상분리를 이용하여 자유 상승 기포의 고속 2상유동을 PIV로 측정하는 기법을 개발 하였다.

4.2 μ PIV 및 TIRFM 등을 이용한 마이크로채널 내 유동 가시화

열모세관 펌프 등 마이크로 장치에서의 유동 및 열 전달 현상을 규명하기 위한 연구로서 μ PIV 를 이용한 Meniscus(계면) 주위의 유동 관찰, 전반사형광현미경(TIRFM, Total Internal Reflection Fluorescence Microscopy) 기술을 이용한 마이크로 스케일에서의 경계조건 검증 (To slip or not to slip)이 수행되었으며, Two-color LIF 와 PTV를 이용한 마이크로채널에서의 온도장과 속도장 동시 측정 기법(온도장은 Rhodamine-B와 Rhodamine-110의 형광신호로부터 측정할 수 있으며, 속도장은 형광 입자를 이용하여 계

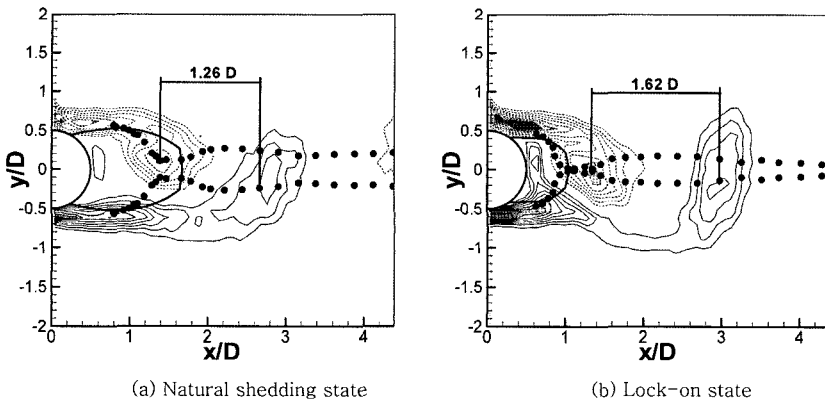


Fig. 4. Visualization of lock-on phenomenon of a circular cylinder wake using PIV.

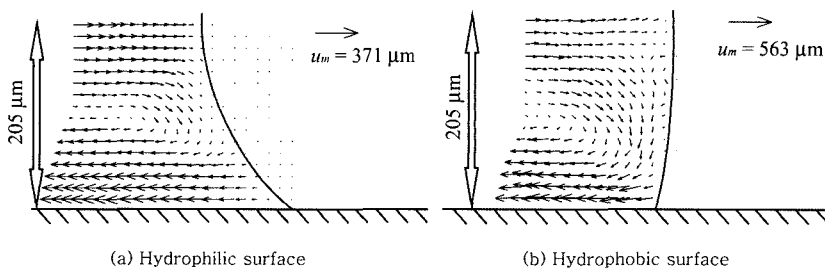


Fig. 5. μ PIV measurement of fluid motions near the meniscus with different surface wettability.

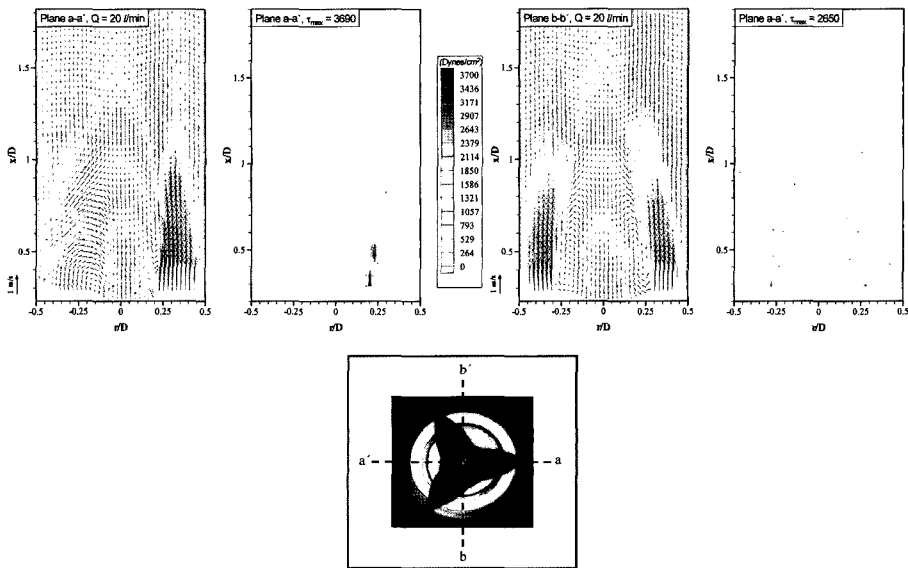


Fig. 6. PIV measurement for polyurethane artificial valve.

산할 수 있다)의 개발이 진행되고 있다.

4.3 PIV를 이용한 인공심장용 폴리우레탄 인공판막 하류의 유동 측정: 정상 및 맥동 유동실험

본 연구실에서는 서울대학교병원 의공학과에서 개발한 폴리우레탄 인공심장 판막 주위 유동특성을 평가하고자 정상유동과 맥동유동 조건에서 열림판의 주기적 개폐에 따라 변화하는 판막 하류의 순간 속도 분포와 레이놀즈 전단응력분포를 PIV로 측정하는 연구를 수행하였다.

5. 마이크로 및 생체유동 계측 기법 개발

5.1 부착성 및 미부착성 세포의 벽면 근방 운동 계측

현재, 본 실험실에서는 유동 내에서 살아 움직이는 생체 물질의 운동 계측을 위하여 부착성 세포(Human Kidney Cell)와 미부착성 세포(e-Coli Cell)의 거동을 관측하고 정량화하는 연구가 활발하게 진행 중에 있다. 부착성 세포의 운동을 관찰하기 위해서는 세포와 결합하는 바닥 근처의 영상만을 선택적으로 가시화하는 기법이 필요하여 TIRFM 기술을 이용하여 바닥으로부터 수백 nm 영역의 형광만을 가시화 하고 있으며 이를 통해서 이른바 부착성 세포의 발이라고 할 수 있는 근접점 (Close Contact)과 접착반 (Focal Contact)의 운동을 관찰하고 정량화하고 있다. 한편, 운동성이 매우 강한 미부착성 세포의 연구는 세포의 운동이 유동장 내부와 벽면 근처에서 전혀 다른 양상을 띄는 현상에 주목하여 수백 nm의 바닥근처 영역

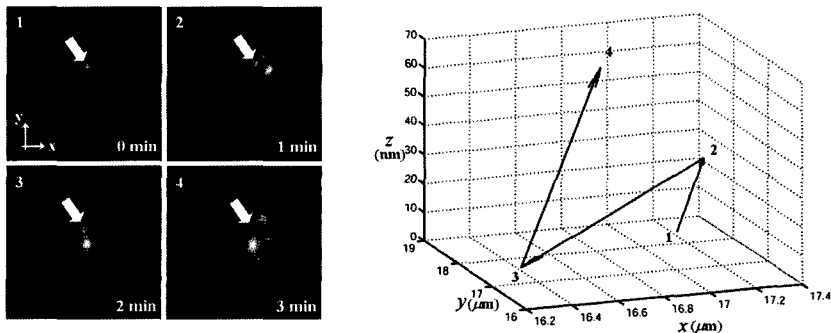


Fig. 7. Motion analysis of live cell contacts using TIRFM.

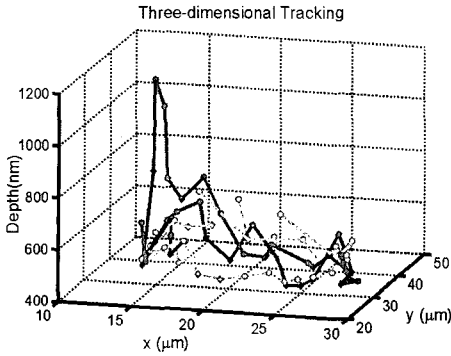
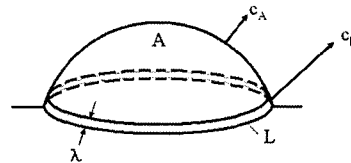
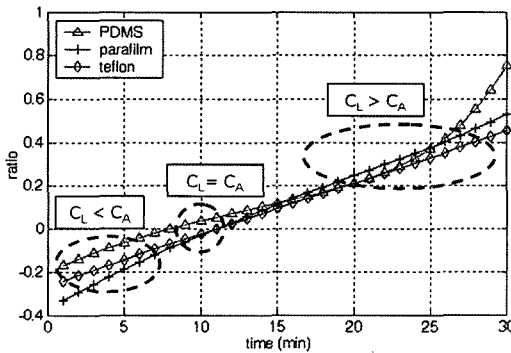


Fig. 8. Three-dimensional tracking of bacterial motions near the solid surface using TIRFM.

을 TIRFM을 이용하여 관찰하고 있으며 그 3차원 운동을 모델링하는 연구가 진행 중이다.

5.2 미세 유동 제어를 통한 액적 제어 및 미세 채널 내 농도 구배 장치

생체 물질의 배양 환경을 제어하기 위하여 본 실험실에서는 두 가지 시도가 진행되고 있다. 첫째로 미세 액적을 이용하여 다양한 배양 환경을 만들어냄으로써 다양한 액적 안에서 반응하는 세포의 양상을 관찰하여 최적의 배양 조건을 찾아 낼 수 있는 연구가 진행 중이다. 이는 향후 신약개발을 위한 고효율처리 검색 (HTS, High Throughput Screening) 장치의 소형화를 위한 핵심 기술이 될 수 있다. 두 번째로는 수력학적 집속 효과(Hydrodynamic Focusing)와 확산을 이용하여 미세 채널 내에 화학 물질을 일정한 농도 구배로 유지하는 기술이다. 이 기술을 통하여 박테리아의 주화성(Chemotaxis)을 속도의 측면에서 분석하는 정밀한 연구가 가능해졌다.



$$\gamma_{edge} = \frac{(c_L - c_A) \cdot \lambda \cdot L}{c_A \cdot S + (c_L - c_A) \cdot \lambda \cdot L}$$

Fig. 9. Effects of droplet shape on the evaporation rates.

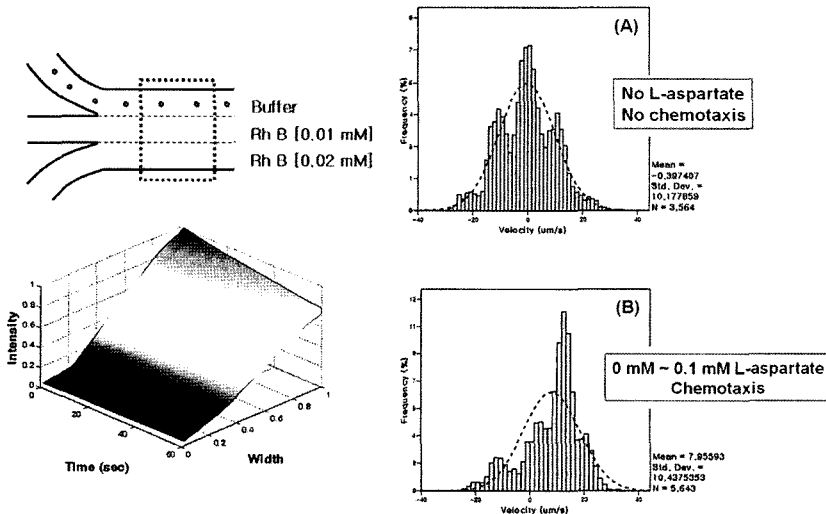


Fig. 10. Single bacterial chemotaxis analysis in microchip using hydrodynamic focusing.

6. 결 론

유동의 측정 및 해석을 통한 정량적인 가시화 연구는 최근 공학적으로 매우 중요한 비중을 차지하고 있으며 산업 기술 발달에도 많은 기여를 하고 있다. 본 마이크로/바이오유동시스템 실험실에서는 수치해석

코드 개발과 유동 계측 기법 개발 분야에서 지금까지 다양한 연구를 수행하였으며, 국내에서 관련 기술 연구 개발의 선도적인 역할을 해왔다. 앞으로 보다 성실하고 열성적인 창조적 연구를 통하여 국제적인 발전 추세에 뒤떨어지지 않는 유체공학 분야의 수월성을 갖춘 실험실로 거듭나고자 한다.