

# 생체유동의 정량적 가시화

· 김성균 | 건국대학교 기계공학과, 교수  
e-mail : sungkim@konkuk.ac.kr

이 글에서는 앞서 거론된 PIV, PTV, LSV 등 정량적 가시화 기술들과 CT, MRI 등 의료기기를 이용한 가시화 기술들의 생체 유동장에 대한 최근의 응용 예들과 앞으로의 발전 방향에 대해 살펴보려고 한다.

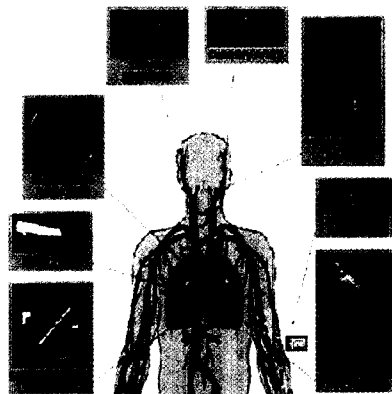
흔히 7T라 불리는 21세기를 선도할 산업기술 분야 중 하나인 생체기술(BT : Bio-technology)은 공학과 의학분야의 협동을 바탕으로 인체를 포함한 생체 시스템을 이해하여, 인간의 질병의 예방 및 치료, 손상 및 상실된 기능의 회복을 도와 삶의 질을 향상시키는 것을 그 목표로 한다. 인간의 건강과 생명을 대상으로 하는 기술 분야인 만큼 무한한 수요와 그에 따른 대규모 투자가 잠재되어 있으며, 높은 신뢰도가 전제되는 분야이다. 생체유동(biofluid flow)은 생체역학(biomechanics)의 기초가 된 혈류역학을 근간으로 하여, 순환계, 호흡계 등 생체 내의 유동, 인공장기 및 의료기기 내부유동 그리고 DNA/단백질 칩 내부의 미세유동 등으로 그 응용영역이 확대되고 있는 생체기술의 주요한 분야이다.

17세기 이래 심장의 기능과 순환계의 존재를 제시한 Galilei, Harvey, 덕트 유동 연구와 혈압 측정기기 발명의 의사이자 공학

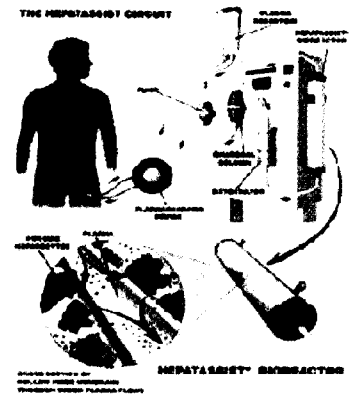
자인 Poiseuille 등에 의해 의학과 공학의 기술적 접목을 바탕으로 생체유동에 대한 연구가 발전되어 왔다. 그러나 임상의학계가 보다 진지하게 생체유동의 유체역학적 해석 필요성을 받아들인 것은 인공혈관의 개발과 접합기술, 정맥 및 림프계 질환에 대한 연구가 활성화된 1970년대 이후이다.

생체 역학자들 또한 1980년대에 와서야 생물학, 해부학, 생리학, 유전학 등의 기초 위에 생체유동에 대한 연구를 본격화하였

다. 생체유동에 대한 유동가시화 연구의 문제점은 인체의 장기 내부의 유동들은 기하학적으로 매우 복잡하여 가시화 실험을 위한 투명한 실험모델 제작이 어려우며, 생체 내(in vivo) 유동의 경우 조명과 이미지 획득이 어렵기 때문이다. 이러한 어려운 점들을 극복해 가며, 이 분야에 PIV, LSV 등 정량적 전유동장 가시화 기법이 본격적으로 도입된 것은 1990년대 후반에 이르러서다. 이 글에서는 최근에 발표된 몇몇 결과들을 위주로 하여 정량적 가시



인체 내의 혈류유동 요소



인공간과 담즙관 유동



MRA에 의한 경동맥 이미지

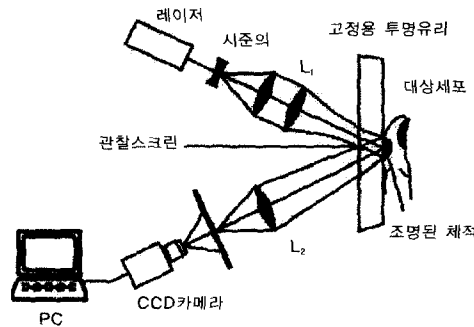
화 기법들의 생체유동의 응용 예들을 소개하고자 한다.

### 혈관 및 순환계

순환계는 심장, 동맥, 모세혈관 및 정맥으로 이루어져 있으며, 최근에는 림프관도 순환시스템의 일환임이 밝혀졌다. 심장은 시스템에 있어서 펌프에 해당하며, 동맥 및 정맥은 혈액의 이동 통로, 모세혈관은 혈액과 조직과의 산소, 영양분, 노폐물 등을 교환하는 역할을 수행한다. 혈류의 유동은 혈관계 질환의 발생과 진행에 영향을 미치며, 인공장기나 의료기기의 성능에 영향을 미치므로 지난 40년에 걸쳐 이에 관한 연구가 진행되고 있다.

혈류 유동이 영향을 미친다고 알려져 있는 혈관계 질환은 동맥경화, 동맥류, 내막 거식증,

혈전, 동,정맥 이형 등으로 주로 동맥계 질환은 상대적으로 많이 알려져 있으나 정맥, 림프계의 질환에 대해서는 알려진 바가 많지 않으며, 향후 이 부분에 대한 연구가 요망된다. 혈관 및 순환계



피하 모세혈관의 혈류유동 가시화 실험장치

에 대한 정량적 유동가시화는 복부대동맥 분지관, 혈관-인조혈관 접합부 등 기하학적으로 단순화된 문제에 대해 PIV 유동 해석들이 국내외에서 행해졌으며, 기하학적으로 복잡한 일반적 모델에

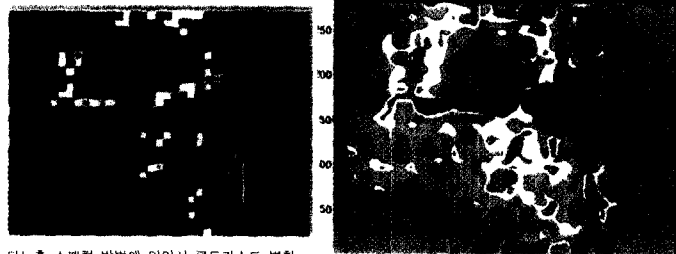
의해 산란된 Speckle 이미지들에 상호상관관계 해석을 적용하여 유량분포를 정량적으로 구하였다. 이때 적혈구(RBC)가 산란 유발 입자로 사용되었으며, 레이저에 의한 반투명 티슈의 침투깊이는 200~1,000 $\mu$ m로 얇은 피하혈관 유동해석이 가능하였다.

### 코 기도 등 호흡계

호흡계 공기유동의 경우, 코와 기도 등 이비인후과에 속한영역과 기관지, 폐포 등 흉부의과에 속한 두 분야가 있으며, 실제로 유동가시화에 있어서도 두 분야 모델의 길이 척도는 크게 차이가 난다. 현재 정량적 유동가시화가



레이저에 의해 산란된 스페클의 연속 패턴

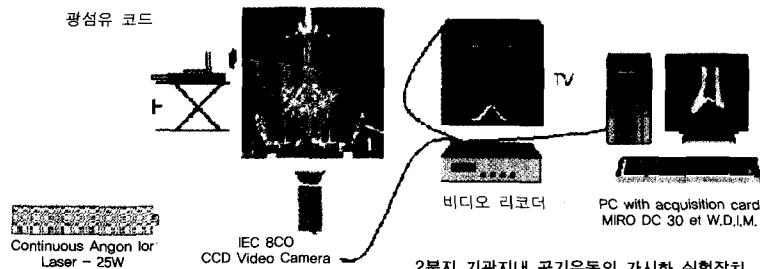
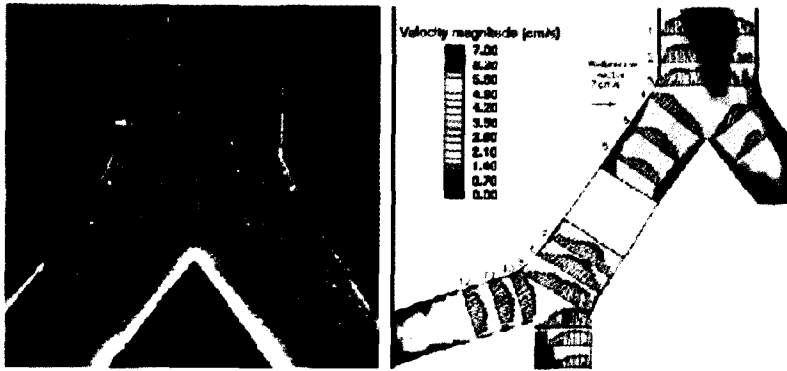


다노출 스페클 방법에 있어서 콘트라스트 변화에 의해 재현된 피하 혈관내 혈류량의 세기분포를 실시간으로 보여 주고 있다.

왼쪽 그림의 혈류량의 등가선들

적용된 예는 흔치 않다. 동맥류, 경동맥 분지관 등에 대한 MRA 등 의료장비를 이용한 혈류유동 가시화에 이어 최근 S. Nishio 등은 실험용 쥐의 신픽줄 생체유동(in vivo)을 CCD 현미경 영상데이터에 PIV기법을 적용하였고, 손가락의 피하혈관 내의 생체유동을 손가락에 조사된 레이저에

적용되기 시작한 분야는 이비인후과 영역의 코와 상부기도에서의 유동 해석이다. 기관지의 경우, 16회의 분지를 거쳐 폐포에 이르게 되는데, 현재 가시화 연구가 적용되는 분야는 분지가 시작되는 상기도 부분에 집중되고 있다. 최근의 Ramuzat 등(2001)은 3차원 2분지 모델에 대한 가



2분지 기관지내 공기유동의 가시화 실험장치

시화 영상에 PIV기법을 적용하여 유동해석을 하였다. Re수 400에서 2,000 사이의 유동에 대해 2.5W 아르곤 이온 레이저와 이미지 강화 CCD를 사용하였고, 3차원 다분지 모델 실험 방법론을 확립하였다.

폐포에서의 호흡은 생각보다 까다로운 조건 하에 이루어진다. 이를 만족하기 위해, 코 구멍으로부터 약 3cm 정도의 비강을 통과한 공기는 33°C 내외의 온도와 99%의 습도를 가져야 한다. 4계절의 변화나 사막, 극지방 등의 경우를 생각해 보면 코는 아주 뛰어난 열 교환기이자 효율적인 가습기이다. 코 호흡에 있어서 비강 내의 공기유동에 대한 가시화 연구는 Scherer(1989)가 열선 풍속계(HWA)에 의한 측정결과를 토대로 가시화한 이래, Hess 등(1992)은 사체로부터 모

델을 성형하여 잉크 스트리크기법으로 가시화 실험결과를 보고하였으며, 이후 Hopkins 등(2000)은 C.T 스캔 데이터로부터 투명한 용기 내에 복잡한 유로를 형성하는 방법론을 확립하여 그 적용 예로 단순화된 서양인의 비강 내의 공기유동을 PIV해석 하였고,

Kim(2001)은 한국인의 비강 모델을 이비인후과 전문의의 도움을 받아 정교하게 만들어 PIV 해석을 수행하였다. 속도장과 압

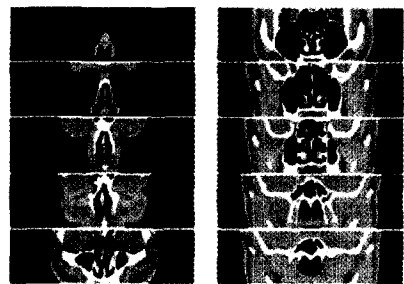
력장하 측정실험결과 비강 유로는 nasal보다 들숨에 적합한 구조를 갖고 있으며, 흡입량의 큰 증가는 비강 상부에 큰 소형동이를 일으켜 후각 세포를 자극함을 알 수 있었다. 또한 이 방법은 부비동 등 복잡한 비강 내의 형상을 갖춤으로 해서 아데노이드 비대증이나 비후성 비염, 부비강염 등 질병이나 외상에 의한 변형된 비강의 유동해석을 통하여 비 질환의 진단, 치료, 수술 등 임상에 즉각 도움이 될 수 있음을 예측할 수 있어, 현재 이비인후과 전문의들과 협동연구가 모색되고 있다. 아래 그림은 Kim의 결과를 나타내었다.

### 생물 및 미생물에 의한 유동의 응용

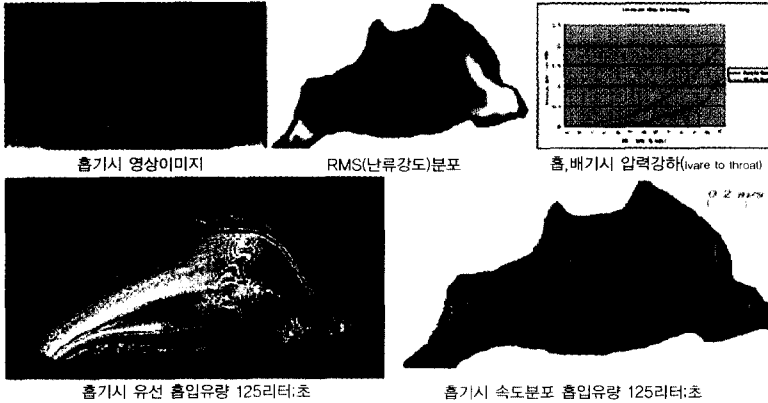
이전부터 생체역학자들의 관심을 끌여온 분야로서 새의 비행, 물고기나 돌고래의 수영, 곤충이나 벌새의 하버링 등 생물의 운동에 의해 야기되는 유동을 관찰하고 모사하는 분야가 있어 왔다. 학문적 흥미에서 비롯된 경우가 많았으나, 최근 NASA에서 발주한 극소형 비행체(MFV : Micro-



비강의 측면 해부도



한국인 성인 비강의 CT 스캔 데이터의 일부



하고 디자인하는 연구에도 확장된 MPIV 기법이 적극적 역할을 하게 될 것이다.

### 인공장기 내의 유동

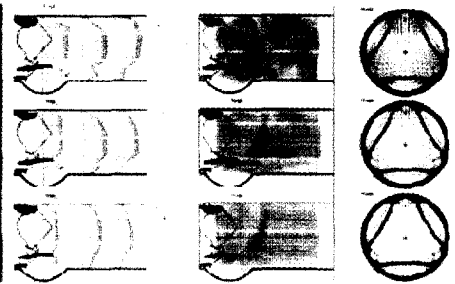
생체유동은 인공 장기들의 개발과 성능개선에도 중요한 역할을 담당하고 있다. 혈류 유동과 연관된 인공심장, 심실 보조기, 혈액펌프, 인공판막, 혈액 산화기, 인조혈관 등을 비롯하여, 인공체장, 인슐린 펌프에 이르기까지 많은 종류의 인공장기와 의료

Flight Vehicle)에서는 새로운 형태의 양력과 추진력을 위해 곤충의 운동과 이에 의한 유동에 주목하고 있다. 또한, 마이크로 스케일의 적혈구 주위의 유동장 해석을 위한 Micro-PIV 기법의 개발과 한걸음 더 나아가 마이크로 캡슐의 혈관 내 이동에 대한 연구를 통하여, 항생제나 암 치료제를 인체 면역시스템의 감시를 피해서 환부에 도달하게 하는

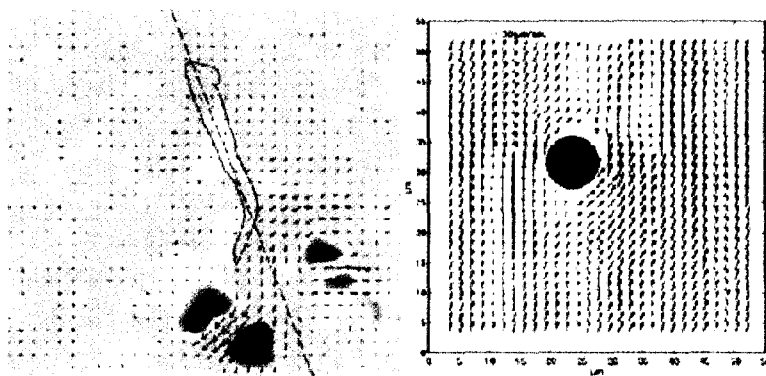
스텔스 계획이 추진되고 있으며, 궁극적으로 혈관 이동 가능한 수



Opening phase에서의 인공 심판막 유동 이미지  
수술 로봇 또는 운반체를 고안



수축기 인공심판막 유동의 위상평균 유속



Flounder 치어의 유영에 의한 유동      Micro-PIV에 의한 적혈구주위의 혈류유동

기기가 있다. 최근에는 인공심장, 심실 보기기, 혈액펌프 내부 유동에 대한 가시화 실험들이 나타나고 있으며, 아래 그림에 나타난 Brucker 등의 인공 심판막에 대한 DPIV 유동해석은 단지 유동가시화의 예를 보여주는 단계를 넘어, 여러 종류의 인공 심판막 모델에 대한 DPIV를 통한 성능비교를 통한 디자인 선택과 개선에 이르고 있다.