

순환기질환의공학회
2002년도 춘계학술강연회

임상의의 이해를 위한 혈류역학 관련용어 소개

2002. 5. 4.

승실대학교 기계공학과 서상호

목 차

- 혈류역학의 세계와 역사
- 혈류역학적 해석을 통한 혈관질환연구
- 혈류역학의 이론
- 혈류역학의 연구방법
- 연구결과 소개

혈류역학의 세계

- 의용생체공학(**Bio-medical Engineering**)
생물뿐만 아니라 인체세포의 변이, 종의 개량, 새로운 미세조직의 개발에 관련된 기초 연구활동을 포함하는 의학과 공학이 연계된 학문분야
- 생체조직공학(**Tissue Engineering**)
생명과학과 공학의 기본개념과 기술을 통합·응용하여 생체조직의 구조와 기능사이의 상관관계에 대한 이해를 증진시키고 나아가서 생체조직의 대용품을 만들어 이식함으로써 생체의 기능을 유지 또는 복원하는 학제간 응용 학문분야

- 혈류역학(**Hemodynamics**)
의용생체공학의 세부연구분야이면서 생체조직공학과 연계, 혈액과 혈관계를 다루는 유체역학의 한 분야
- 혈류역학 연구의 관심분야
 - Bio-rheology 분야
 - 거시유동 분야
 - 미시유동 분야
 - 임상적용 분야

혈류역학의 역사

Galileo Galilei : 역학의 시대

William Harvey(1628년)
De Motu Cordis et Sanguinis
(심장과 혈액의 운동에 관해)

Issac Newton의 구성방정식,
Stephan Hales의 Windkessel 이론

Leonhart. Euler, Daniel Bernoulli의
유체유동에 대한 기본 방정식

J. P. Poiseuille의 유량과 압력에 관한 실험식

Thomas Young, Moens-Korteweg, Fourier

Wetterer, Kolin, Greig

현대혈류역학의 기초정립

혈류역학적 해석을 통한 혈관질환 연구

- 혈관질환
 - 동맥경화성 질환
 - 비동맥경화성 질환
- 동맥경화증의 발생원인
 - 혈류속도의 증감
 - 혈관벽의 이상 전단응력분포
 - 유동박리, 난류, ...
- 혈관질환 연구
 - 심폐순환계, 말초순환계, 뇌순환계

혈류역학의 이론

- 혈류역학적 연구정보
 - 혈관벽에 미치는 힘
 - 거시 및 미소 혈액유동의 특성
 - 혈관벽의 특성
 - 혈관내피세포의 신호전달체계
 -
- 혈류역학적 변수
 - 혈류속도 및 압력, 전단응력, 점도, Compliance
 -

- 혈류역학적 연구정보의 획득방법
 - 해석적 방법(Theoretical Method)
 - In-vitro 및 In-vivo 실험
 - Computer simulation
- 혈류역학의 해석적 방법과 **Computer simulation**
 - 역학(mechanics)과 수학기용
 - 역학: 물체의 정지상태나 운동상태를 다루는 물리학의 한 분야
 - 수학: 실제적인 문제의 해를 얻기 위해 수학적 모델링을 거쳐 지배방정식의 도출

- 혈류역학적 정보의 획득을 위한 물리적 법칙
 - 질량보존의 법칙 : 연속방정식(continuity equation)
 - 운동량보존의 법칙 : 운동량방정식(momentum equation)
 - Bernoulli 방정식
 - Navier-Stokes 방정식
 - 뉴턴의 점성법칙과 혈액의 구성방정식
- 지배방정식의 유도
 - 미분적 접근법 → 미분방정식
 - 적분적 접근법 → 적분방정식
- 혈액유동방정식의 특성
 - 비압축성, 3차원, 비뉴턴, 비정상 유동, 부분적 난류유동, Wall motion,

○ 기본방정식

- 적분형방정식(Integral equation)

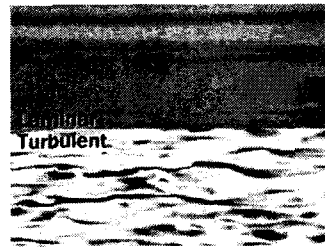
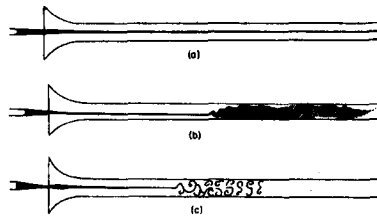
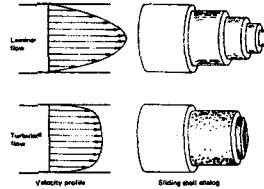
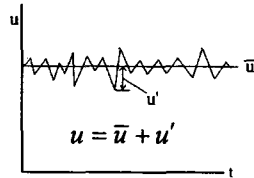
$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \rho dV + \int_{CS} \rho \vec{v} \cdot \vec{dA} & Q &= AV \\
 \Sigma \vec{F} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} \vec{v} \rho dV + \int_{CS} \vec{v} \rho \vec{v} \cdot \vec{dA} & F &= \rho Q (v_2 - v_1) \\
 \dot{Q} - \dot{W} &= \frac{\partial}{\partial t} \int_{CV} e \rho dV + \int_{CS} e \rho \vec{v} \cdot \vec{dA} & \frac{p}{\rho} + \frac{V^2}{2} + gz &= \text{일정}
 \end{aligned}$$

- 미분형방정식(Differential equation)

$$\begin{aligned}
 0 &= \frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \vec{v}) \\
 \rho \vec{a} &= -\nabla p + \rho \vec{g} + \mu \nabla^2 \vec{v}
 \end{aligned}$$

혈류역학적 용어

○ 층류(Laminar flow)와 난류(Turbulent flow)



- 난류유동

벽면에서 마찰효과와 서로 다른 속도로 움직이는 유동의 상호작용으로 발생,
시간과 공간에 대한 불규칙성,
3차원적 와동, 확산 및 급속혼합, 고 레이놀즈 수

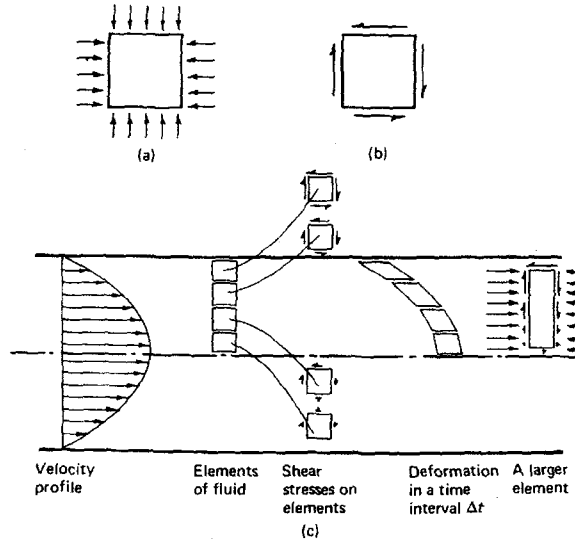
- 고(High) 레이놀즈수 유동 ($Re > 2000$)

$$Re = \frac{\rho V d}{\eta} \leftarrow \frac{\rho V^2 l^2}{\eta V l} = \frac{m \bar{a}}{F_s} = \frac{\text{관성력}}{\text{점성력}}$$

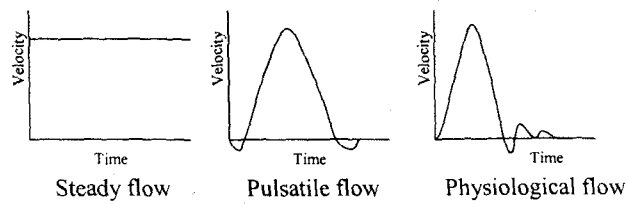
- Womersley 수

$$\alpha = \frac{R^2 \omega \rho}{\mu}$$

○ 전단응력(shear stress) 및 전단율(shear rate)

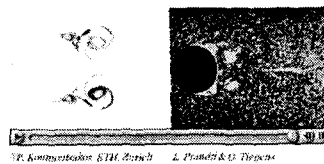


○ 혈액유동의 특성



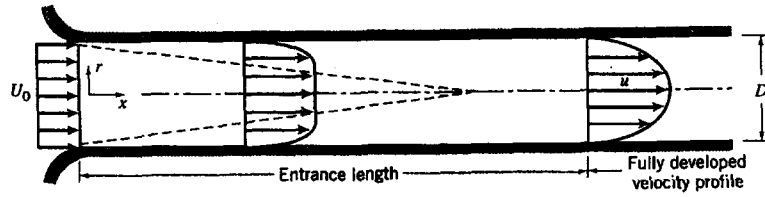
○ 순환(circulation)과 와도(vorticity)

- 순환 : 유동장내에 고정된 폐곡선에 대한 접선속도성분의 선적분
- 와도 : 유동장 내에서 운동하고 있는 유체요소의 회전척도



○ 완전히 발달된 유동(Fully developed flow)

$$\frac{\partial u}{\partial x} = 0, \quad v = 0, \quad \frac{\partial p}{\partial x} = 0$$

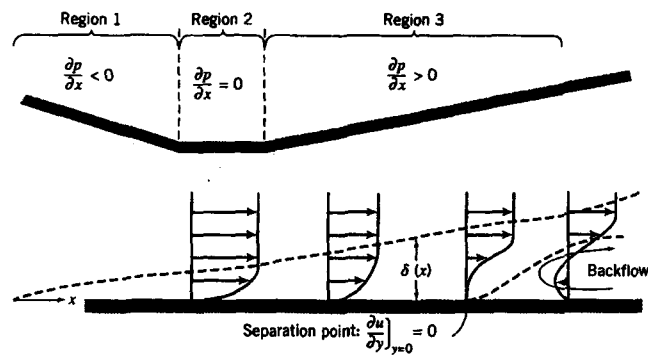


$$\frac{l_e}{D} \cong 0.06 Re \quad \text{층류}$$

$$\cong 25 - 40 \quad \text{난류}$$

cf) $Re = 2000, \quad \frac{l_e}{D} \cong 0.06 Re = 120$

○ 혈액유동의 관성력과 압력력 및 점성력의 영향



혈류역학의 연구방법

- 해석적 방법
- 실험 : In-vitro 유동실험
In-vivo 유동실험
유동가시화
- 컴퓨터시뮬레이션
: Lab-made Program
Commercial Program
CFX, FIDAP, Fluent, Star-CD, CFD-ACE, ...

○ 해석적 방법

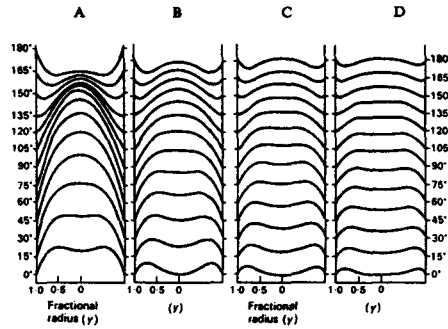
○ Poiseuille 모델

$$Q \propto \frac{pr^4}{L}, \quad Q = \frac{\Delta p \pi d^4}{128 \mu L}$$

- Poiseuille 법칙의 생체적용의 한계
 - 비압축성
 - 뉴턴유체
 - 층류유동
 - 혈관벽에서의 No-slip
 - 정상유동
 - Cylindrical Shape & Rigid wall

○ Womersley 모델

- Navier-Stokes 방정식의 선형화
- Rigid, elastic and viscoelastic wall motion
- Womersley 모델의 생체적용시의 가정
뉴턴유체, 층류유동, 입구효과의 무시,
Reflection-free system, 지름이 일정한 원형관



○ Navier-Stokes 모델

- 뉴턴유체 및 비뉴턴유체
- 비압축성유동 압축성유동
(Incompressible & Compressible flow)

○ Other Models

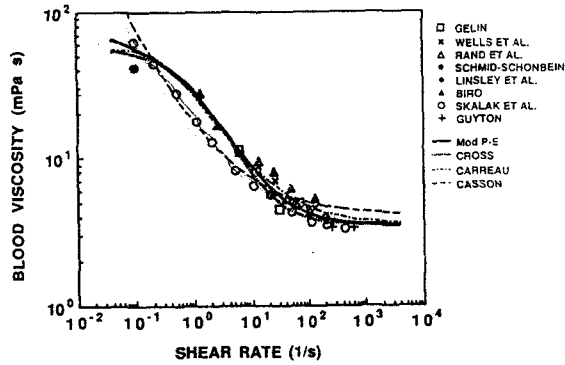
- Modified Navier-Stokes models
- Non-linear models
- Models of vascular beds
-

○ In-vitro 유동실험

- 점도, 점성계수(Viscosity)

- 절대점성계수 : $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ (Pa·s, Poise, cP)

- 동점성계수 : $\nu = \frac{\eta}{\rho}$ (m²/s, Stokes, centistokes)



- 혈액의 구성방정식(Constitutive equation)

- Power-Law Model : $\tau = m\dot{\gamma}^n$

- Carreau Model : $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda\dot{\gamma})^2]^{\frac{n-1}{2}}$

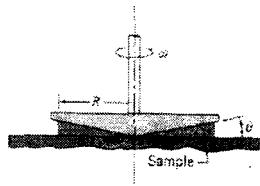
- Carreau-Yasuda Model : $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) [1 + (\lambda\dot{\gamma})^a]^{\frac{n-1}{a}}$

- Cross Model : $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left(\frac{1}{1 + (\lambda\dot{\gamma})^m} \right)$

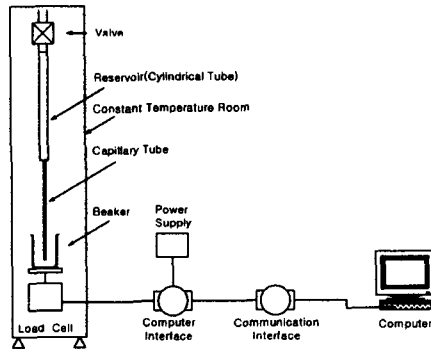
- Powell-Eyring Model : $\eta = \eta_{\infty} + (\eta_0 - \eta_{\infty}) \left(\frac{\sinh^{-1} \lambda\dot{\gamma}}{\lambda\dot{\gamma}} \right)$

- Casson Model : $\sqrt{\tau} = \sqrt{k_0} + \sqrt{k_1\dot{\gamma}}$

- 점도의 측정



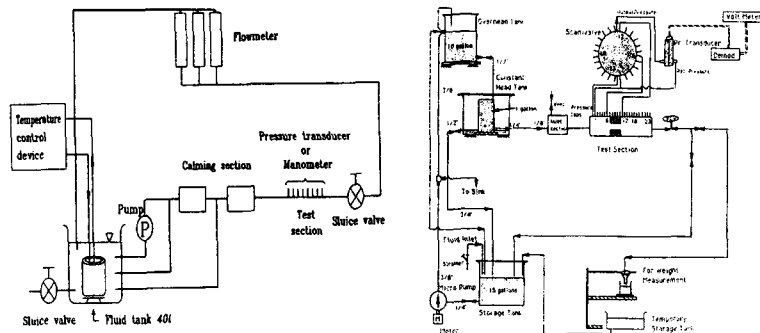
Cone/plate 점도계



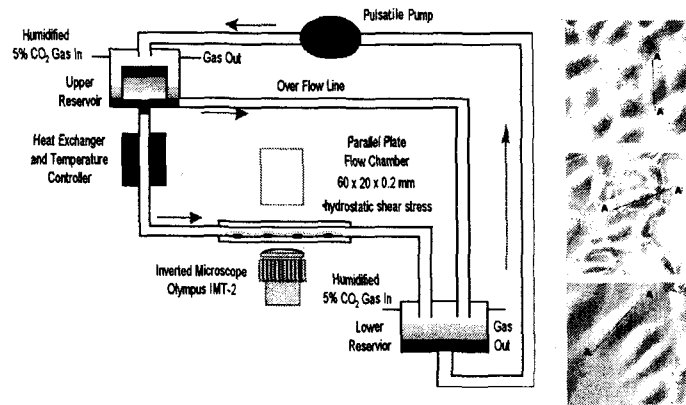
모세관 점도계

- 유동실험

: 압력분포, 유량, 전단응력, 속도 등의 측정



- 혈관내피세포 실험
: 내피세포의 형태변화, 이동, 점착 등의 실험

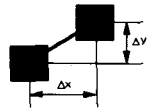
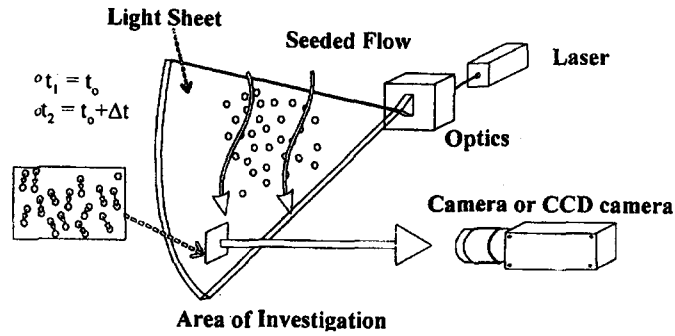


○ 유동가시화

: 유동정보들, 즉 속도장, 온도장, 밀도장 및 압력장을 관심대상의 시간과 공간의 범위 안에서 눈에 보이도록 하는 것

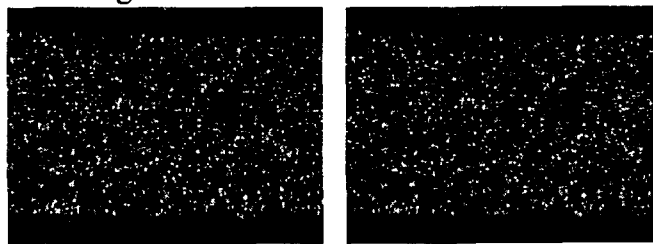
- 유막법
- Tuft법
- Direct Injection법
- Particle Tracking법
- 수소기포법
- 입자영상유속계(Particle Imaging Velocimetry)

- PIV 및 PTV



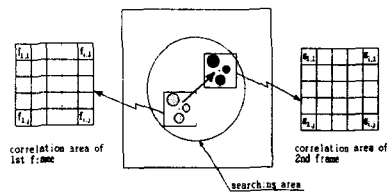
$$u = \frac{M\Delta x}{\Delta t} \quad v = \frac{M\Delta y}{\Delta t}$$

- Low Images

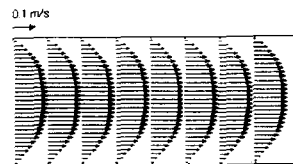


- Grey Level Cross-Correlation

- : image of 1st frame
- : image of 2nd frame



- Velocity Vectors



- Macro-PIV & Micro-PIV

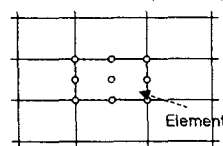
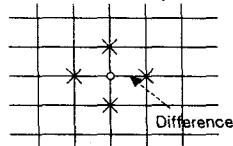
	Macro-PIV	Micro-PIV
Lighting	Sheet beam	Volume lighting
입자의 크기	~ 1 μm	1 μm 미만
공간분해능	~ 1 mm	10 μm 미만
영역의 크기	~ 10x10 mm	~ 50x50 μm
속도의 범위	수 mm/s ~ 400 m/s	50 $\mu\text{m/s}$ ~ 400 m/s

○ Computer Simulation

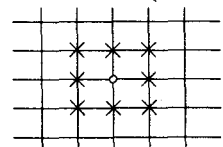
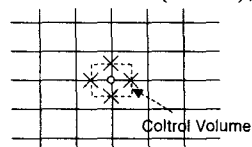
- 유동을 지배하는 미분방정식을 근사적인 대수방정식으로 바꾸고 대수방정식의 해를 수치해석으로 풀어 유동장의 정보를 획득하는 방법

- 수치해석 방법

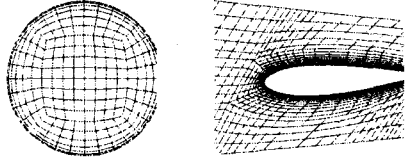
유한차분법(FDM), 유한요소법(FEM),



유한체적법(FVM), 유한해석법(FAM)



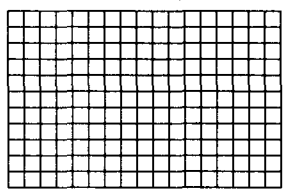
- 혈액유동에 대한 지배방정식의 이산화
 - 유한체적법(FVM)을 많이 사용
 - 경계밀착좌표계



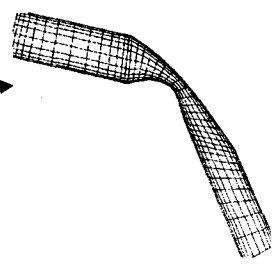
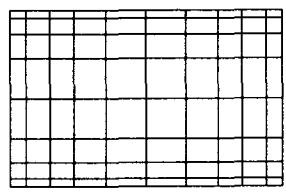
- 적절한 구성방정식
- 적합한 입구 및 출구경계조건
 - Cauchy B.C. : 경계에서 변수값과 변화율이 주어질 때
 - Dirichlet B.C. : 경계에서 변수값이 주어질 때
 - Neumann B.C. : 경계에서 변수의 변화율이 주어질 때

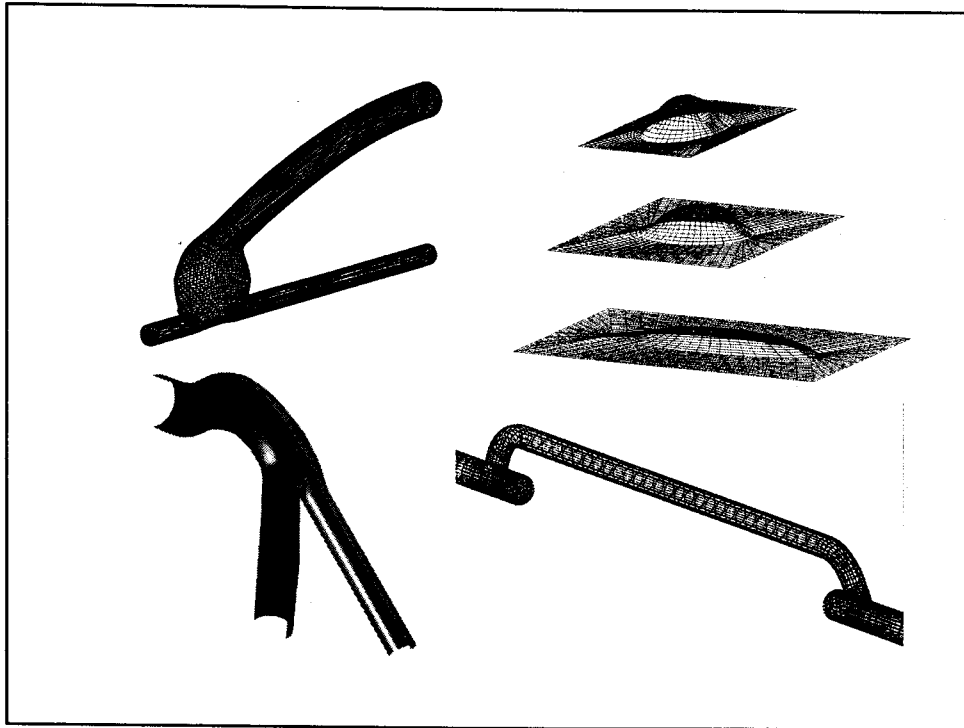
- 격자계

균일격자계



비균일 격자계

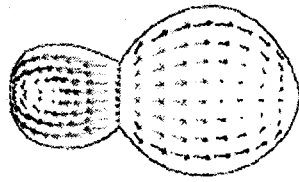




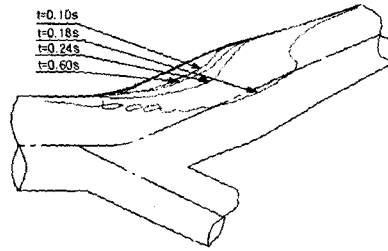
- 지배방정식 : 연속방정식, Navier-Stokes 방정식
- 이산화방정식 : 편미분방정식 → 대수방정식
- 비정상항 처리 : Backward difference, Forward difference, Crank-Nicolson
- 대류항 처리 : Hybrid scheme, Upwind differencing, Central differencing, QUICK scheme,
- 압력항 처리 : SIMPLE, SIMPLEC, PISO,
- 반복계산 : STONE, Algebraic Multi-grid, Line Solver,

연구결과 소개

- Computer Simulation

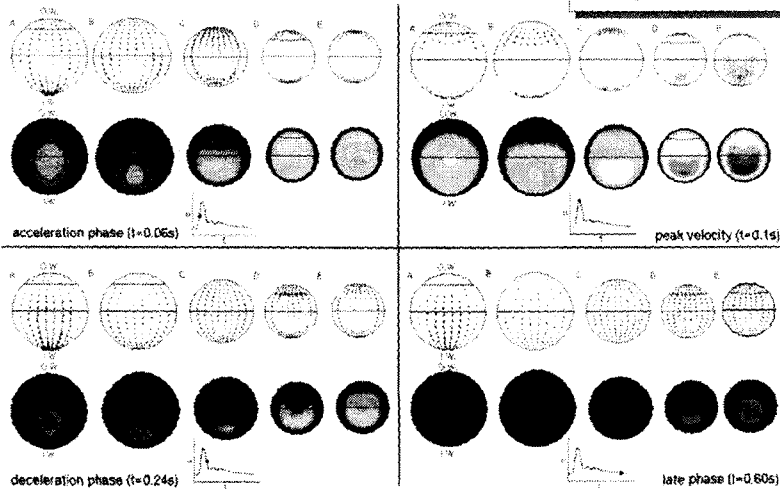
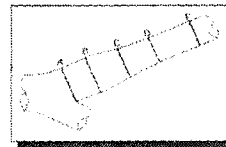


Velocity vectors

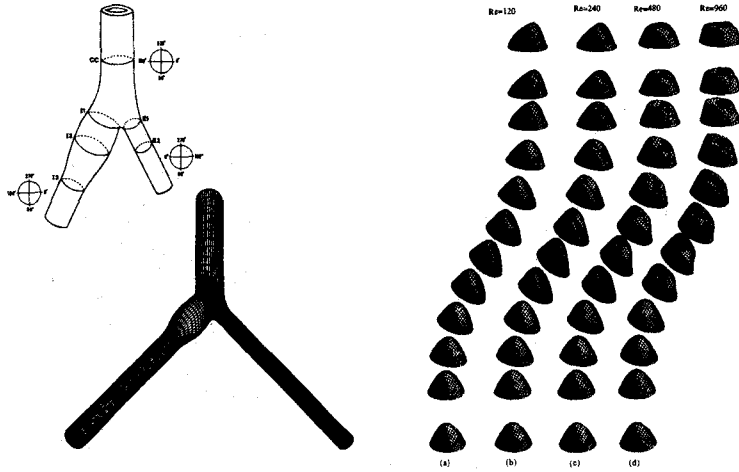


Recirculation zones

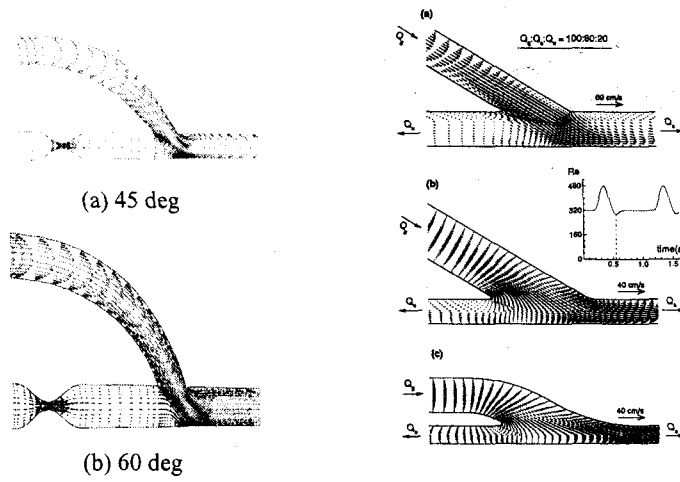
- Computer Simulation



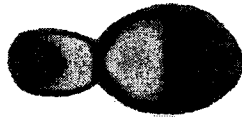
- Computer Simulations



- Computer Simulations



- In-vitro Experiment

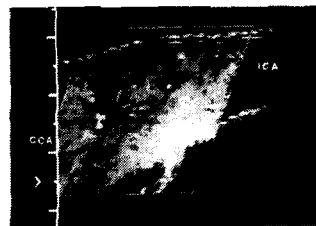
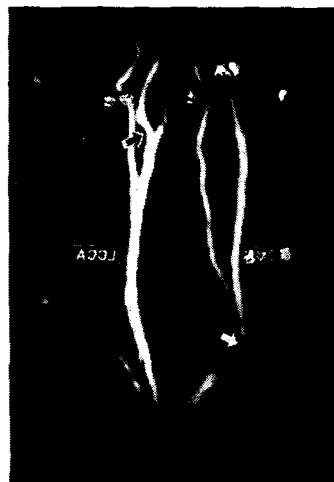


Velocity shadow contour

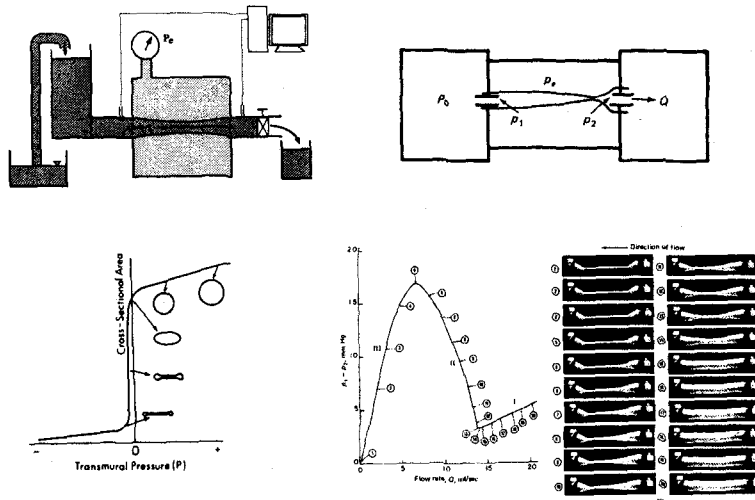


MRA image

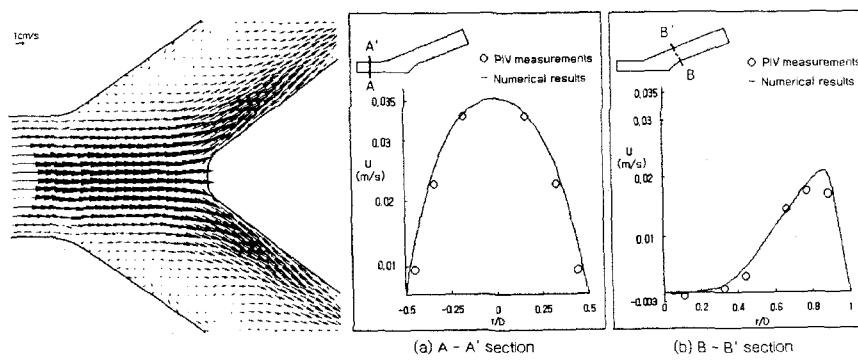
- M.R.I. 및 Color Doppler Image



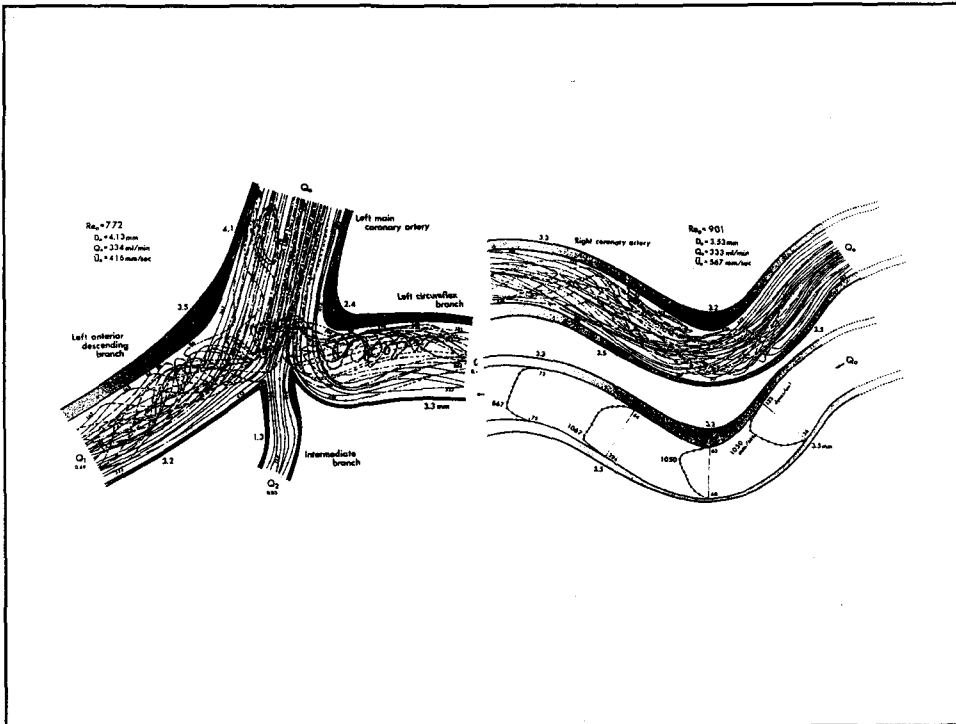
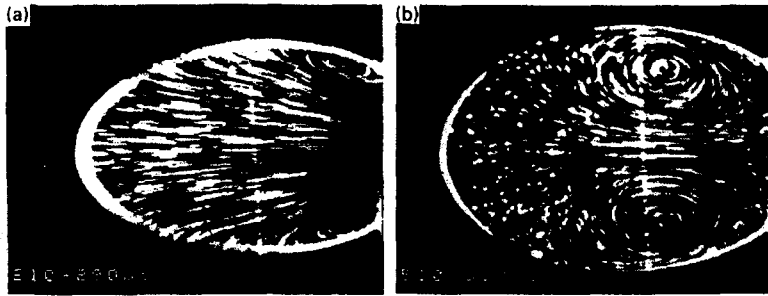
- In-vitro Experiment

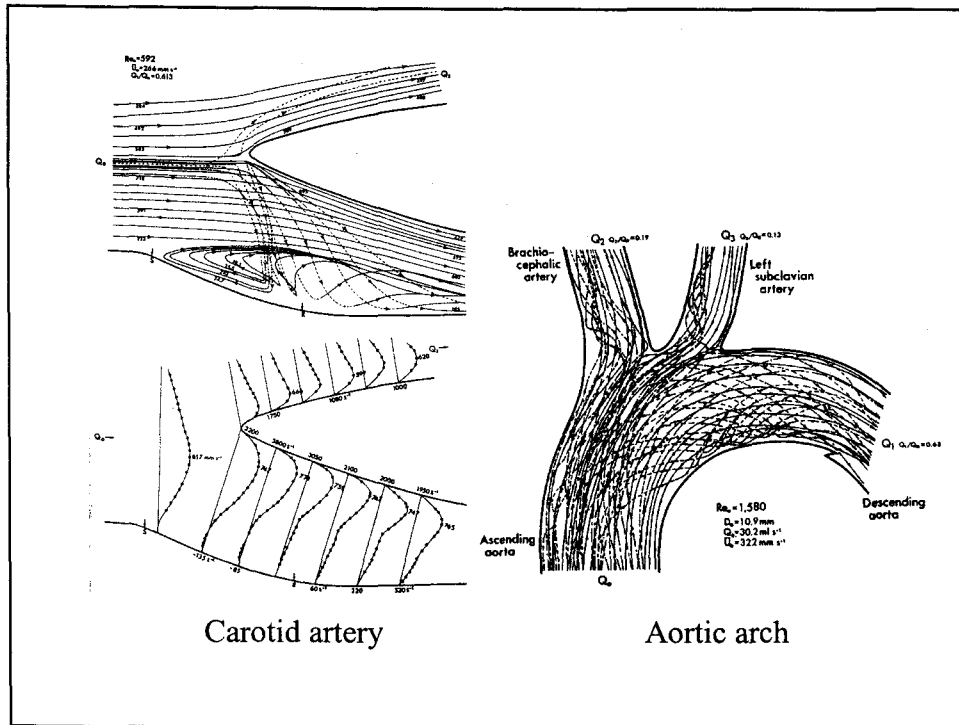


- Flow Visualization

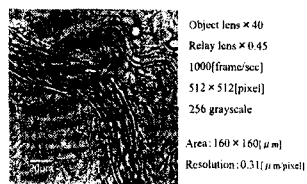


- Particle Tracking Method

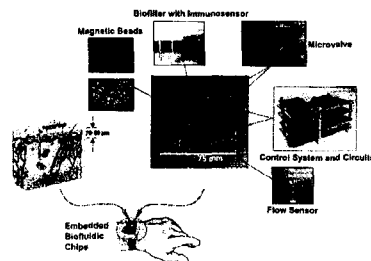




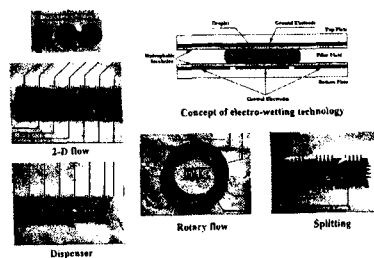
- Micro-PIV



Micro-PIV(K.C.Kim, Pusan Univ.)



Micro-PIV(C.H.Ahn, Univ. of Cincinnati)



Micro-PIV(S.J.Lee, POSTECH)