

PIV를 이용한 혈관내피세포의 형태변화와 유동특성에 관한 연구

윤재열* · 서상호* · 노형운** · 김재수**

1. 서 론

혈관질환의 병리학적 특성을 이해하기 위해 혈관내 혈액유동과 관련하여 가장 중요시되는 부분은 혈관내 피세포 주위의 미소유동특성이다. 혈관내피세포층은 유동장을 형성하는 혈액과 혈관계사이에서 이들을 연결시켜 주는 역할을 하고 있으므로, 유동장 속에 노출된 혈관내피세포는 혈류역학적인 힘에 의해 구조적인 혹은 동적인 특성이 변화되기 쉽다. 특히, 혈액유동에 의한 압력과 전단응력에 반응하는 혈관내피세포의 생리적 변화는 신체에 이식된 인조혈관 등의 혈액 및 생체적 합성을 파악하는데 가장 기본이 된다고 할 수 있다. 혈관내에서 혈관내피세포는 유동방향으로 일렬로 정렬하지만 유동장의 교란으로 인해 혈관내피세포는 형태학적 변화를 나타낸다. 이러한 형태학적인 변화는 혈관질환과 관련이 있는 것으로 발표되고 있다.^(1,2) 본 연구에서는 혈관내피세포 주위의 유동장을 PIV 실험을 통해 가시화하여 혈류역학과 혈관내피세포의 상관관계를 파악하고자 한다. PIV 실험을 위한 혈관내피세포는 실제형상을 1000배정도 확대하여 촬출으로 제작한 후 유동장을 형성시켜 주었다. 본 연구에서는 미소시간간격동안 CCD 카메라로 두 장의 영상을 획득하여 계조치상호상관법(grey level cross correlation method)을 이용하여 유동장내의 속도벡터를 구하였다. 이로부터 혈관내피세포 주위의 압력분포와 전단율 분포를 구하였다.

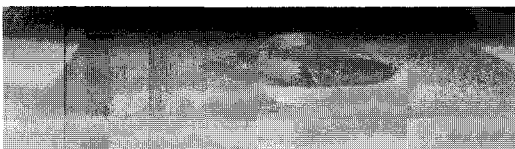


Fig. 1 The endothelial cell model and the reference scale

* 숭실대학교 기계공학과

** 조선대학교 항공조선공학부

2. 혈관내피세포 모델

혈관내피세포 주위의 유동장 가시화를 위한 혈관내피세포 모델의 형상은 식 (1)을 이용하여 Fig. 1와 같이 촬출으로 혈관내피세포 모형을 제작할 수 있었다.

$$y_{shape} = 0.00423 \left[1 - \cos\left(\frac{2\pi x}{0.025}\right) \right] mm \quad (1)$$

본 연구에서 사용된 PIV 실험장치에서 평면광을 만드는 원통형 렌즈의 시트빔 최소두께가 5mm이므로 유동가시화를 할 수 없는 어려운 문제가 위해 발생을 하여 부득히 하게 혈관내피세포의 높이를 1cm로 정하였다. 이는 실제 혈관내피세포의 평균 높이인 10 μ m의 약 1000배이다.

3. PIV 실험장치 및 실험방법

혈관내피세포 주위의 유동특성을 가시화하기 위한 실험장치의 개략도는 Fig. 2와 같다. 실험장치는 유동순환장치와 PIV장치로 구성되어 있다. PIV에 사용했을 추종 입자는 천연상태의 송화가루를 채택하였다. 혈관내피세포의 중심축 단면을 가로지르는 시트빔을 만들 수 있다. 본 연구에서는 미소 시간간격을 주고 이 시간간격 사이에서 CCD 카메라로 두 장의 영상을 획득하여 계조치상호상관법을 이용하여 유동장내의 속도벡터를 구하였다.

4. 결과 및 검토

혈관내피세포 주위의 유동장을 가시화하기 위하여 혈관내피세포 모형을 이용하여 PIV 실험을 수행하였다. 계조치 상호상관 PIV 방법으로 계산한 속도벡터를 Fig. 3에 나타내었다. 해석영역은 CCD 카메라 초점거리의 제약으로 인하여 혈관내피세포의 후류영역으로 한정하였다. 계조치 상호상관법을 적용하기 위하여 격자의 크기는 40 \times 40으로 하였고, 2장의 영상시간 간격을 1/15초로 하였다.

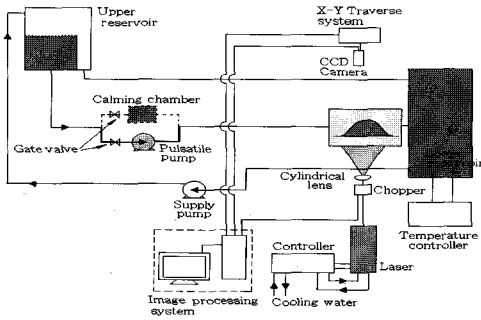


Fig. 2 Schematic diagram of the experimental setup

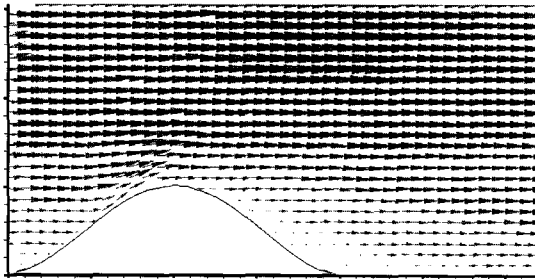


Fig. 3 Velocity vector maps around the endothelial cell model (Re=220)

Fig. 3의 경우는 레이놀즈수가 220으로 복부대동맥과 대퇴동맥내 혈류의 평균 레이놀즈 수(Re)는 300~500이고 내피세포주위 혈류의 평균 레이놀즈 수는 약 15이다. 본 연구에서 적용된 혈관내피세포 주위 유동의 레이놀즈 수는 모세혈관내 혈류보다는 15배 크지만, 관상동맥내 혈관내피세포 주위의 혈류 유동과 유사함을 알 수 있다. 혈관내피세포 전면에 부딪힌 유동장은 혈관내피세포표면을 따라 흘러가고 있음을 알 수 있다. 이러한 유동현상은 Fig. 3과 같이 유동장이 빨라짐에 따라 내피세포 전면에서 강한 속도구배의 영향을 받음을 알 수 있다. 즉 유동장이 저레이놀즈수이더라도 세포의 전면에는 계속적인 전단응력과 압력을 받게 된다. 이 때문에 내피세포는 유동장에 노출된 시간이 증가함에 따라 평균항력을 낮추는 방향으로 형태를 변화시키게 된다. Fig. 3에서 구한 속도장으로 부터 프아송 방정식을 적용하여 혈관내피세포에 작용하는 압력장을 수치적인 방법으로 구하였다. 수치적인 방법으로 구한 압력 분포장과 전단응력분포장을 Fig. 4에 각각 나타내었다.

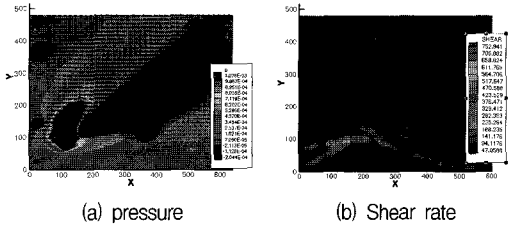


Fig. 4 Pressure and shear rate maps around the endothelial cell model (Re=220)

PIV 실험에서는 2차원 속도장만을 구할 수 있다. Fig. 4에서 볼 수 있는 바와 같이 혈관내피세포의 전면에서 높은 압력이 작용하며, 전면에서 압력과 전단응력이 크게 작용하면 혈관내피세포는 이를 감지하여 항력을 줄이는 방향으로 핵이 움직여 점점 높이가 낮아지고 길이가 길어지게 됨을 알 수 있는 기존 연구결과와 잘 일치하고 있음을 알 수 있다.⁽¹⁾

5. 결론

본 연구에서는 혈관내피세포 모형주위의 유동장을 PIV 실험으로 가시화하였다. 혈관내피세포 모형 주위의 유동장은 혈관내피세포 표면주위 서브레이어 영역에서는 역압력 구배가 발생하여 얇은 재순환영역이 발생되고 서브레이어 영역 위부분에서는 정체가 되고 있음을 알 수 있다. 이러한 유동현상은 유동장이 빨라짐에 따라 내피세포 전면에서 강한 속도구배의 영향을 받음을 알 수 있다. 또한, 레이놀즈수가 높을 수록 더 높은 압력과 전단응력이 혈관내피세포에 작용하고 있으며, 주로 세포의 전면에서 크게 작용함을 알 수 있다.

참고 문헌

- (1) 서상호, 유상신, 민병구, 장준근, 1998, "혈액유동이 혈관내피세포의 형태변화에 미치는 영향", 대한기계학회논문집 B권, 제22권, 제 11호, pp.1521~1529.
- (2) Shuichiro, F., Ai, Nagatsu, Magato Kaibara, Kptaro, O., and Kazuo, T., 1999, "Wall Shear Stress Distribution on the Surface of Realistic Endothelial Cell Model", Advanced in Bioengineering, ASME, BED-Vol. 43.