

흐름에 의해 유도된 마이크로채널 내부의 적혈구 변형

김난주* · 이성식* · 이상국* · 안경현* · 이승중*

1. 서론

혈류는 혈관의 크기와 형태에 따라 전단 흐름과 신장 흐름이 혼합되어 있는 복합 흐름이다. 적혈구는 가운데가 오목한 원판 형태를 띄고 있으며, 혈류 내에서 쉽게 변형됨으로써 물질 전달을 용이하게 한다¹⁾.

인공 심장과 인공 폐에서는 체내에 존재하지 않는 과도한 응력이 혈류 내에 부분적으로 존재하여 적혈구의 기계적 용혈 현상이 발생한다. 따라서 인공 장치의 실용화를 위하여 흐름에 의한 적혈구의 변형과 파괴 현상에 관한 연구가 지속적으로 진행되어 왔다²⁻⁵⁾. 그러나 이러한 연구들은 대부분 전단 응력만을 고려하여, 실제 적혈구의 변형에 더 큰 영향을 끼칠 것으로 예상되는 신장 응력에 의한 효과를 고려하지 못하였다.

본 연구에서는 고분자 용액에 분산시킨 적혈구를 신장 흐름이 지배적인 마이크로채널 흐름 내부에서 관찰하여 신장 응력이 적혈구의 변형에 미치는 효과를 알아보았다.

2. 본론

2.1. 실험 장치

실험에 사용한 마이크로채널은 replica molding으로 주조한 PDMS chip을 슬라이드 글라스에 부착하여 제작하였다. 마이크로채널 흐름을 미세하게 조절하기 위해 주사기 펌프(KD Scientific KDS210)를 사용하였으며 광학 현미경(Olympus BX-51) 위에서 채널 내부의 흐름과 적혈구의 변형을 직접 관찰하였다.

2.2. 실험 방법

혈액은 채혈 직후 K₃EDTA 튜브에 넣어 응고를 방지하고, Polyvinyl pyrrolidone을 PBS에 녹인 접도가 40cp인 고분자 용액에 분산시켰다.

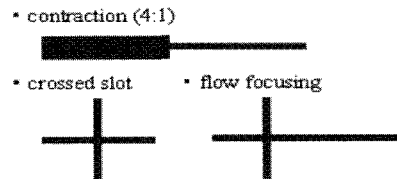


그림 1 실험에 사용된 마이크로채널의 구조

현미경을 통해 얻은 영상은 image-pro plus™ software를 이용하여 처리하였다. 마이크로채널 구조에 따라 격자를 그려 사진에 부착한 후 관심 있는 특정 영역 안에 들어오는 적혈구를 선택하여 신장비(EI, Elongational Index)를 측정하였다. 신장비는 타원형의 장축과 단축의 차를 장축과 단축의 합으로 나눈 값으로 정의하였다.

2.3. 실험 결과

마이크로채널 흐름 또한 전단 흐름과 신장 흐름이 혼합되어 있는 복합 흐름이다. 채널 구조 내의 위치에 따라 전단 흐름이 지배적인 영역과 신장 흐름이 지배적인 영역으로 나눌 수 있다. 따라서 본 연구를 위해 신장 흐름을 극대화할 수 있는 구조를 고려하여 채널 형상을 결정하였다(그림 1).

crossed slot 채널의 경우 채널의 중심선에서 신장 흐름이 우세하며, 특히 두 중심선이 교차하는 중심점에는 정체 지점이 형성되어 적혈구가 머무르면서 흐름 방향으로 점점 변형된다. 따라서 중심선을 기준으로 채널 내부에 격자를 설정하여 적혈구의 위치와 그에 따른 신장비를 측정하였다. 그 결과, 채널의 중심선을 따라 흐르는 적혈구가 중심점을 향해가며 신장비가 점점 증가하다가 중심점을 통과한 뒤 신장비가 다시 감소하는 것을 관찰할 수 있었다(그림 2).

flow focusing 채널의 경우에는 중심 흐름과 곁 흐름의 흐름 속도 비에 따라 두 흐름 간 경계면의 위치가 결정된다. 이때, 두 흐름의 경계면에서는 두 흐름의 속도 차이에 의하여 전단 흐름이 우세하고, 중심 흐름이 좁아지는 영역 부근의 중심 선에서는 신장

* 서울대학교 응용화학부

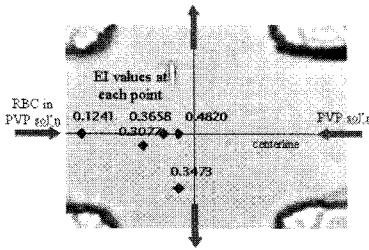


그림 2 cross slot 채널 내부에서의 적혈구의 변형

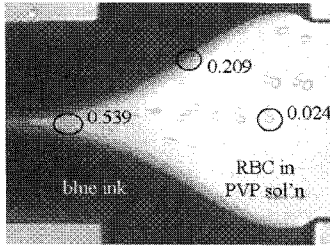


그림 3 flow focusing 채널 내부에서의 적혈구의 변형

흐름이 우세하다. 중심 흐름과 곁 흐름을 구분하기 위하여 중심 흐름에는 적혈구를 분산시킨 고분자 용액을 투입하고 곁 흐름에는 색깔이 있는 수용성 잉크를 투입하였다. 그 결과 두 흐름의 경계에서 적혈구가 신장되는 정도보다 중심선 부근에서 적혈구가 신장되는 정도가 더 큰 것이 관찰되었다(그림 3).

4:1 contraction 채널 또한 채널 벽 근처에서는 전단 응력이, 채널의 중심선에서는 신장 응력이 우세하다. 채널 중심선을 기준으로 격자를 설정한 뒤, 정상 상태의 적혈구 지름의 약 두 배에 해당하는 영역을 contraction 지점과 그 전후에 설정하여(그림 4.(a)) 각 영역을 통과하는 적혈구의 신장비를 측정하였다. 그 결과 contraction 부근에서 적혈구가 크게 늘어나는 것이 관찰되었으며, 이때의 신장비는 전단 흐름 내에서 얻을 수 있는 신장비의 한계 값을 초과하는 매우 큰 값이었다(그림 4.(b), (c)).

또, contraction 지점을 통과한 뒤 벽과 중심선 부근의 신장비를 각각 비교했을 때, 같은 흐름 속

도 하에서도 신장 응력의 지배를 받는 중심선 부근의 신장비가 더 크게 나타났다. 또 흐름이 contraction 지점을 통과하여 진행함에 따라 전단 응력의 지배를 받는 벽 근처에서는 신장비가 크게 변하지 않는 반면, 중심선 부근에서는 end effect가 감소하면서 변형되었던 적혈구가 이완되는 것을 관찰할 수 있었다.

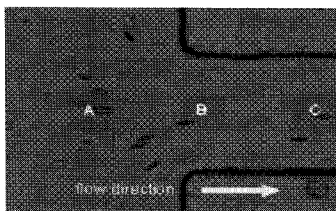
3. 결론

본 연구에서는 복합 흐름계인 마이크로채널 내부에서 신장 흐름이 지배적인 영역에서의 적혈구의 신장비를 측정함으로써 신장 흐름이 적혈구의 변형에 미치는 영향을 알아보았다.

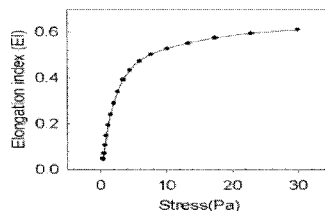
그 결과 순수한 전단 응력만이 존재하는 경우에 비해 신장 응력이 지배적인 경우에 적혈구가 더 쉽게 변형되는 것을 확인하였다. 따라서 그 동안 흐름에 의한 적혈구의 변형과 파괴 현상을 연구하는데 있어서 간과되어왔던 신장 응력이 전단 응력과 함께 중요하게 고려되어야 함을 제시하였다.

참고문헌

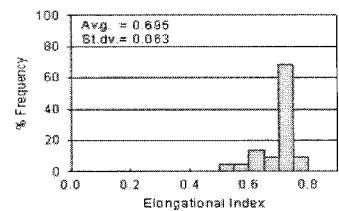
- (1) Fung, Y.C., 1993, Biomechanics: mechanical properties of living tissues 2nd ed., SpringerVerlag, pp.121
- (2) Tamagawa, M. et al, 2000, Predictions of index of hemolysis in shear blood flow, JSME International B, 43, pp.225
- (3) Sharp, M.K., et al, 1998, Scaling of hemolysis in needles and catheters, Ann biomedical engineering, 26, pp.788
- (4) Evans, E.A. et al, 1979, Mechanics and thermodynamics of biomembranes, CRC critical reviews in bioengineering, CRC Press
- (5) Grigioni, M. et al, 2001, A discussion on the threshold limit for hemolysis related to Reynolds shear stress, J.Biomechanics, 34, pp.1361



(a)



(b)



(c)

그림 4 (a) contraction 채널에 적용된 격자 (b) 순수한 전단 흐름에 의해 유도된 적혈구의 변형 (c) contraction 채널 내부의 신장 흐름에 의해 유도된 적혈구의 변형