

초음파 영상을 이용한 박동흐름하의 편심협착에 의한 혈류 교란 연구

팽동국^{1,2}, 최민주^{2,3}

제주대학교 해양산업공학¹, 의공학협동과정², 의학과³

A study of blood disturbance by an eccentric stenosis under pulsatile flow using ultrasound imaging

Dong-Guk Paeng^{1,2}, Min Joo Choi^{2,3}

Marine Industrial Engineering¹, Interdisciplinary Postgraduate Program in Biomedical Engineering²,

Department of Medicine³, Cheju National University,

paeng@cheju.ac.kr

요약

혈관의 협착으로 인한 혈류의 교란과 그로 인한 초음파 반향의 영향을 튜브에 편심 협착 (eccentric stenosis)을 부착하고 돼지 혈액을 이용해 실험실에서 연구했다. 상용화된 GE LOGIQ 700 Expert 시스템과 M12L 의 선형 트랜스듀서를 이용해 B-모드 영상을 얻은 후 편심 협착 상류 지점과 하류 지점의 초음파 영상을 비교하여 분석하였다. 분당 20 회와 40 회의 박동율과 혈류속도를 바꿔가며 혈류의 교란에 따른 혈액에서의 초음파 영상을 분석한 결과, 편심 협착으로 인한 혈류의 교란으로 적혈구 응집현상이 달라져 복잡한 초음파 반향 분포가 형성되었다. 비침습적 실시간 초음파 영상은 편심 협착으로 인한 혈류의 교란과 그로 인한 혈액의 적혈구 응집 현상을 이해하고 연구하는데 도움이 된다.

혈액 가시화와 혈류역학을 연구하는데 초음파가 유용한 방법이 될 수 있음이 알려졌다[1]. 시공간적으로 변하는 박동흐름 하에서 혈관의 편심 협착으로 인해 형성되는 혈류의 교란에 대한 연구는 실시간 영상이 가능한 초음파가 매우 유용하게 사용되어 왔다[2-4]. 단적인 예로 혈관내 초음파 영상(IVUS)은 편심 협착을 진단하고 협착으로 인한 혈류역학을 연구하는데 많이 사용되고 있다. 그러나 혈관내 초음파 영상을 위해서는 혈관 내로 초음파 트랜스듀서를 삽입해야 하는 수술을 해야 될 뿐만 아니라, 삽입된 트랜스듀서로 인해서 혈류가 영향을 받는다는 단점이 있다. 편심 협착은 중년층으로 연령이 높아지면서 발생하는 혈관 벽에 플라그(Plaque)가 형성되는 혈관질환으로 동맥경화나 뇌졸중, 심근경색증을 비롯한 심장질환 등 치명적인 질병들과의 관련성 때문에 매우 중요하다. 이러한 편심 협착과 그로 인한 혈류의 교란 등을 혈관 내에 초음파

1. 서론

트랜스듀서를 삽입하지 않고, 이미 상용화되어 있는 초음파 장비와 영상을 이용한다면 비침습적 방법으로 혈류의 흐름을 방해하지 않고 또한 수술 없이 혈류의 교란을 측정하고 연구할 수 있다는 장점이 있다. 특히 최근에 고감도 고주파를 사용하는 초음파 장비의 사용으로 생체조직 안의 혈관 속 혈액에서의 초음파 반향이 B-모드 영상이나 하모닉 영상에서 관찰되기도 한다는 점을 감안하면, 비침습적 방법으로 혈액을 가시화 하고 편심 협착으로 인한 혈류 역학을 연구한다면 이와 관련된 질병을 이해하고 연구하는데 기여할 수 있다[2].

이 논문에서는 상용화된 GE LOGIQ 700 Expert 초음파 장비를 이용해 실험실 내에서 심장순환 시스템을 박동호름 펌프와 튜브 등을 통해 구축하였으며 편심 협착은 실리콘을 이용해서 튜브 내에 간단한 방법으로 구현했다. 이렇게 만든 혈액 순환계에 사람의 혈액 성질과 유사한 돼지 혈액을 넣고 혈류의 흐름과 박동율을 실험실에서 제어하면서 혈액의 교란으로 인한 초음파 반향을 연구하였다.

2. 실험 방법

Fig. 1 은 혈액순환계와 실험장비를 나타낸 그림이다. 혈액 순환계의 구성과 편심 협착을 제작하는 법과 돼지 혈액 준비, 그리고 영상 저장법과 영상 처리 방법에 대한 자세한 설명은 다른 논문에서 참조할 수 있다[2].

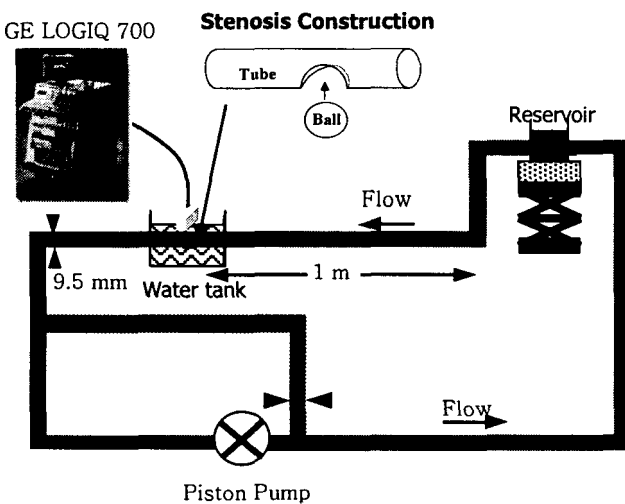


Fig. 1 Experimental Setups

5-7]. 대략 70% 정도의 편심 협착을 실리콘을 이용해서 비교적 간단하게 구현하였다. 박동율은 분당 20 회와 40 회로 변화하였고, 박동호름 하에서 혈류 속도 제어는 지류를 만들어 측정 장소에서의 혈류 속도를 제어했다. 혈류에서의 반향신호는 상용화된 GE LOGIQ 700 Expert 시스템과 M12L 의 선형 트랜스듀서의 13 MHz 를 이용해서 얻었다. B-모드, 하모닉 (harmonic) 모드, 파워 도플러, 컬러 도플러 영상을 도플러 스펙트럼과 함께 저장하였으나 주로 B-모드 영상을 비디오 테이프에 저장하고 영상 편집 시스템을 통해 개인용 컴퓨터에서 MATLAB 을 이용해서 영상 처리를 하여 자료를 분석하였다.

3. 결과 및 토의

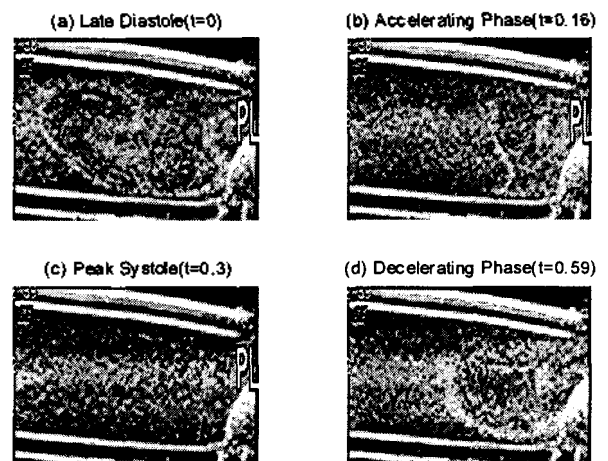


Fig. 2 Snap shots of ultrasonic echo image over a pulsatile cycle (20 beats/min), where t is normalized by a period of one stroke.

Fig. 2 은 분당 20 회의 박동율로 박동하는 주기 내에서 시간에 따른 초음파 반향 영상이다. 편심협착으로 인해서 이완기(diastole)에서는 역흐름이 발생하고 혈류는 교란이 된다. (a)에서 보이는 복잡한 와류형태의 패턴은 이완기 때 혈류의 교란으로 인해 생성된 것이나 혈류 분포 자체가 가시화 된 것이 아니라 혈류의 교란으로 달라진 적혈구 응집 현상, 즉

롤로(rouleau)가 이렇게 복잡하게 분포되었다고 볼 수 있다. 왜냐하면 편심 협착으로 인한 혈류 정체(stasis)는 주로 협착 아래 부분에 근접해서 형성되는 반면 [9], 와류 형태의 밝은 영상은 상당히 떨어져 있는 튜브 위쪽까지 분포되기 때문이다. 또한 혈액에서의 반향은 적혈구 응집으로 인한 롤로(rouleau)의 분포에 따라서 주로 달라진다고 알려져 있다[5]. 난류(turbulence)가 발생시 초음파 반향이 증가 되기는 하나 적혈구 응집 현상의 영향만큼 크지는 않다. (b)에서 보면 수축기(systole) 때에는 롤로 분포가 안정화 되기 때문에 와류 분포가 편심 협착 지점으로 이동해 사라진다. 평균 비틀림율이 커지기 때문에 롤로는 깨지고 전반적인 반향은 영상은 어둡다. (c)에서 보듯이 최대 수축기에서는 전혀 와류 분포가 보이지 않고 중심부에서 밝게 보이는데 이는 롤로가 주로 흐름의 중앙 부분에 형성되어 있고 튜브 벽 가까이 근처에서는 비틀림율(shear rate)로 인해서 롤로가 깨져서 어둡게 영상화 된다. (d)의 이완기 때에는 다시 복잡한 반향신호 분포가 형성되고 매 박동주기에 따라 반복해서 Fig. 1 과 같이 영상이 변한다.

편심 협착을 지난 혈액은 좁은 면적의 입구를 통해 빠른 흐름이 형성되는데 최대 수축기 때에 이 빠른 흐름을 따라 초음파 영상이 밝아져서 백색 띠가 형성되어 흐름에 따라 이동하며 이완기 때에는 튜브 중앙에 반향이 최소가 되는 '흑점(Black Hole)' 현상[7,10]이 흐름과 평행하게 튜브 중앙에서 협착 입구가 있는 위쪽으로 약간 치우쳐서 형성된다. 협착 하류지점 4D 이상 떨어진 지점에서도 '흑점' 현상은 계속되고 주기적 변화와 공간적 변화는 많이 약화되어 나타난다. 속도를 높였을 때에도 전체적인 반향 신호는 감소하는 반면 거의 유사한 패턴을 보여 속도에 따른 반향분포는 큰 차이가 없다. 반면 박동율을 분당 40 회로 바꾸었을 때는 신호도 전반적으로 약해질 뿐만

아니라 반향신호가 훨씬 더 복잡해진다. 편심 협착으로 인한 혈류의 교란으로 인한 반향 신호는 혈류 속도보다 박동율의 영향을 더 많이 받는다. 그리고 단면 영상(cross-sectional view)을 보면 편심 협착 상류 3D 지점에서 '백색환(Bright Ring)'[6-8]이 중앙에서부터 튜브 벽을 향해 확장되는 것을 볼 수 있다. 이는 편심협착이 없는 경우 박동흐름 하에서 관찰된 '백색환' 현상과 유사하나[6-7] 벽 부분에서 시작되어 축소되는 것이 아니라 중앙에서 시작되어 확장된다는 면에서 현상이 다르게 관찰될 뿐만 아니라 이는 혈류의 역흐름으로 인한 혈류 교란에서 비롯된다는 면에서 그 기작이 다르다고 할 수 있다. 이러한 '백색환' 현상의 확장은 편심 협착이 없는 Oscillatory flow 에서 역흐름 발생시에도 관측이 되었다[8]. 단면영상과 흐름 방향의 영상(longitudinal view)을 잘 조합하면 3 차원적 반향신호의 분포와 그에 따른 롤로의 분포도 추정이 가능하다.

보다 자세한 결과는 학회 발표시 동영상 자료를 통해 제시될 것이다.

4. 결론

실험실에서 혈액 순환계 내에 편심 협착을 모의하고 돼지혈액을 이용해 박동흐름 하에서 편심 협착으로 인한 혈류의 교란이 초음파 반향에 미치는 영향을 연구하였다. 이러한 연구가 바탕이 되어 상용화된 초음파 장비를 통해서 실시간으로 복잡한 혈류 교란을 모니터링하고 분석할 뿐만 아니라 혈류 교란으로 인한 혈액의 생리학적 반응을 연구하여, 동맥경화나 뇌졸중 등의 편심 협착 관련된 질병들을 초음파로 진단하는데 활용될 수 있다. 특히 최근에 여러 영상 모드가 개발되고 장비가 점점 고주파를 이용하여 고감도화 되기 때문에 종종 혈액에서의 반향 신호들이 관측되기 때문에 이러한 연구가 더욱 중요하다고 할 수 있다.

참고문헌

1. K. Kirk Shung, Dong-Guk Paeng, Ultrasound: an unexplored tool for blood flow visualization and hemodynamic measurements, *Jpn J Appl Phys*, Vol 42, Part 1, No. 5B, p2901-2908, 2003.
2. Dong-Guk Paeng, Pei-Jie Cao, MinJoo Choi, K. Kirk Shung, Ultrasonic backscatter response to blood flow disturbance by a severe eccentric stenosis, *Key Engineering Materials*, Vols 270-273, p2036-2041, 2004.
3. G. Cloutier, L. Allard, L.G. Durand, Changes in ultrasonic Doppler backscattered power downstream of concentric and eccentric stenoses under pulsatile flow, *Ultrasound Med Biol*, Vol 21, p59-70, 1995.
4. P.A.J. Bascom, K.W. Johnston, R.S.C. Cobbole, J. Ojha, Relations of the flow field distal to a moderate stenosis to the Doppler power, *Ultrasound Med Biol*, Vol 23, p25-39, 1997
5. Dong-Guk Paeng, Pei-Jie Cao, K. Kirk Shung, Doppler power variation from porcine blood under steady and pulsatile flow, *Ultrasound Med Biol*, Vol 27, p1245-1254, 2001.
6. Dong-Guk Paeng, K. Kirk Shung, Cyclic and radial variation of the Doppler power from porcine whole blood, *IEEE Trans Ultrason, Ferroelect Freq Contr*, Vol 50, p614-622, 2003.
7. Dong-Guk Paeng, Richard Y. Chiao, K. Kirk Shung, Echogenicity variations from porcine blood I: 'The Bright Collapsing Ring' under pulsatile flow, *Ultrasound Med Biol*, Vol 30 (1), p45-55, 2004.
8. Dong-Guk Paeng, Richard Y. Chiao, K. Kirk Shung, Echogenicity variations from porcine blood II: 'The Bright Ring' under oscillatory flow, *Ultrasound Med Biol*, Vol 30 (6), p815-825, 2004.
9. J.R. Buchanan Jr., C. Kleinstreuer, J.K. Corner, Rheological effects on pulsatile hemodynamics in a stenosed tube, *Computers & Fluids*, Vol 29, p695-724, 2000.
10. Y.W. Yuan, K. Kirk Shung, Ultrasonic backscatter from flowing whole blood I: dependence on shear rate and hematocrit. *J Acoust Soc Am*, Vol 84, p52-58, 1988.