

# 좌심실 보조기를 이용한 3 단계 박동성 혈류 모의

◦이동혁, 최재순, 정혜원\*\*, 정명진\*\*, 김종효\*\*, 박재형\*\*, 한만청\*\*,민병구\*  
서울대학교 공과대학 협동과정 의용생체공학 전공, \*서울대학교 의과대학 의공학 교실  
\*\*서울대학교 의과대학 방사선학 교실

## Emulation of Tri-Phasic Pulsatile Flow Using LVAD

◦D.H.Lee, J.S.Choi, H.W.Chung\*\*, M.J.Chung\*\*, J.H.Kim\*\*, J.H.Park\*\*, M.C.Han\*\*, B.G.Min\*  
Department of Biomedical Engineering, College of Engineering, Seoul National University.  
\*Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Seoul National University.  
\*\*Department of Radiology, College of Medicine, Seoul National University.

### ABSTRACT

To emulate tri-phasic pulsatile flow of human circulatory system, we have selected control parameters and examined the changing effect of each parameter by using Doppler ultrasound. In this experiment, it was shown that the distal compliance and the break time were the major factors to form tri-phasic flow.

### 서론

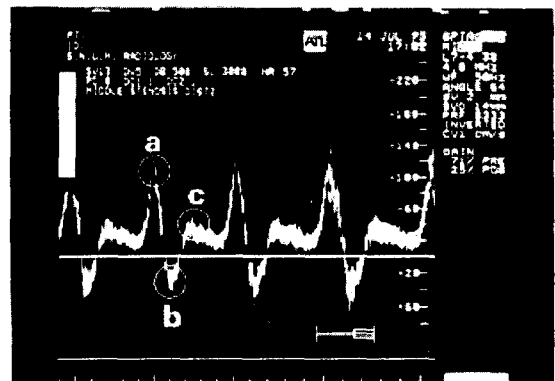
생체 혈류의 모의는 심혈관계의 특성을 규명하는 실험에 필수적이다. 이러한 생체혈류의 모의는 혈액의 점성 및 입자 모의, 혈류의 파형 모의, 혈관의 탄성 및 저항 모의라는 세 범주에서 이루어지고 있다.

혈류 파형의 모의는 CFD (Computational Fluid Dynamics) 로 해석하기 어려운 박동성 혈류의 특성을 분석하는 데 유용하다. 현재까지 주로 이루어진 혈류 파형의 모의는 Spiral Pump 를 사용하여 혈류의 모양만을 그리듯이 모의하는 시스템이다.[1,2] 이는 혈관의 탄성과 저항을 무시하고 소량의 혈류에 대해서만 모의한다는 단점이 있어 Aorta 와 같은 심장에서 가까이 있는 혈관의 혈류를 모의할 수 없다.

3 단계 박동(Tri-Phasic Pulsatile Flow)는 심혈관계의 일반적인 혈류로 Systole-Diastole 한 주기 동안에 그림 1 과 같이 3 단계의 혈류의 방향 변화를 일으키는 파형이다. 각 Phase 의 모양 변화는 혈관 협착(Stenosis)이나

동맥류(Aneurysm)와 같은 이상을 진단할 수 있게 해준다.[3]

본 논문에서는 이러한 3 단계 박동을 좌심실 보조기를 이용하여 모의하고 각 제어변수들이 박동의 모양에 미치는 영향을 고찰하였다.



[그림 1] 3 단계 박동파형 :

a, b, c 의 속도를 각각  $v_1, v_2, v_3$ 라 한다.

[Fig.1] Tri-Phasic Pulsatile Flow :

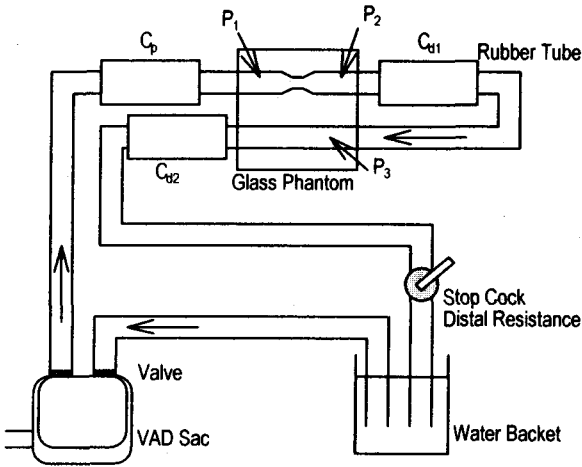
$v_1$  = velocity at a,  $v_2$  = velocity at b,  $v_3$  = velocity at c

### 방법

혈관을 모의한 Vascular Phantom 과 Compliance - Resistance Unit 그리고 좌심실 보조기로 이루어진 실험 장치의 모식도는 그림 2 와 같다.

Vascular Phantom 은 외경 10mm, 내경 7mm 인 유리관의 중간부에 내경 4mm 협착을 만든 것으로 약 43%

의 stenosis 를 모의하였다. Compliance 는 외경 20mm, 내경 14mm 의 고무관을 사용하여 저항은 원위부탄성 후부에 stop cock 을 연결하여 모의하였다. 좌심실 보조기는 본 실험실에서 개발 중인 전기유압식 좌심실보조기를 사용하였다.[4]



[그림 2] 실험 장치의 모식도 [Fig.2] Experiment Setup

혈류의 점성 및 입자 모의를 위해 25% 글리세린 용액에 1g/L 의 전분을 섞은 용액을 이용하였으며 파형을 측정할 초음파기기 Ultramark 9 ( Advanced Technology Laboratories, Bothell, Wash) 였다.

실험에 사용된 가변수는 좌심실보조기의 4 가지 제어변수와 순환회로의 3 가지 탄성값이다.(표 1) 심박동수를 일정하게 유지하면서 좌심실 보조기의 SD Ratio 와 Break Time 을 조절하였을 때의 파형과 3 가지 탄성값을 몇 가지 조합으로 변화를 주었을 때의 파형을 관찰하였다.(표 2) 도플러 측정은 그림 1 과 같 이 근위부(P1), 협착직후부 (P2) 그리고 협착원위부 (P3)에서 이루어졌다.

Category	Abbr.	Contents	Unit	Etc
VAD	SV	Systole Velocity		
	DV	Diastole Velocity		
Control Parameter	SL	Stroke Length		
	BT	Break Time	mSec	
Compliance	Cp	Proximal Compliance	meter	근위부
	Cd1	Poststenotic Comp.	meter	협착직후부
	Cd2	Far Distal Comp.	meter	협착원위부
	Cd	Cd1 + Cd2	meter	협착후부

[표 1] 실험에 사용된 제어변수

[Table 1] Control Parameters used in this experiment

Case	Cp	Cd1	Cd2
1	0	0	1
2	0	0	0
3	0.5	0	1
4	0.5	0	0
5	1	0	1
6	1	0	0
7	0	1	1
8	0	1	0
9	0.5	1	1
10	0.5	1	0
11	1	1	1
12	1	1	0

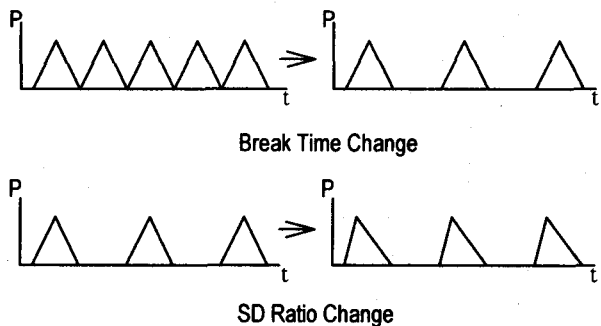
[표 2] 실험에 적용된 탄성의 조합

[Table 2] Combination of compliances applied to this experiment

결과 및 고찰

Break Time 을 충분히 주지 않았을 때는 2,3 번째 상이 나오지 않았으며, systole-diastole 한 주기의 30%이 상의 Break Time 이 설정되었을 때 3 단계 파형을 얻을 수 있었다. SV 와 DV 의 크기 비율인 SD Ratio 를 크게 할 수록 초기 수축 속도가 빠른 인체의 전형적인 3 단계 파형의 모양에 근사할 수 있었다.

(그림 3)



[그림 3] Break Time 과 SD Ratio 변화에 따른 Time-Position 그래프의 변화

[Fig.3] Chang of Break Time & SD Ratio

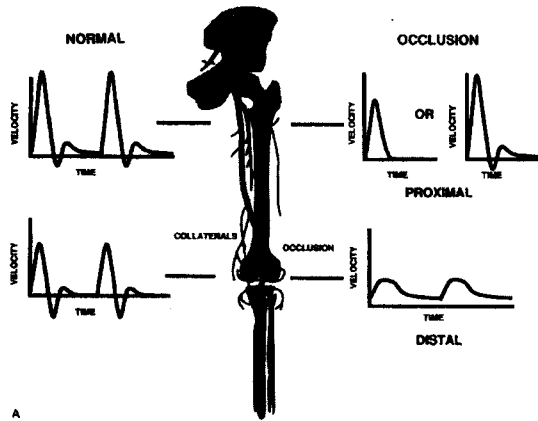
좌심실 보조기를 이용한 3단계 박동성 혈류 모의

탄성값은 근위부 탄성( $C_p$ )을 0, 0.5, 1로, 협착직후부 탄성( $C_{d1}$ )을 0, 1로 그리고 협착원위부 탄성( $C_{d2}$ )를 0, 1로 변화 시켜가며 그 모양을 관찰한 결과는 다음과 같다. 1단계 정점 속도를  $v_1$ , 2단계 정점 속도를  $v_2$ , 3단계 정점 속도를  $v_3$ 라 하고 1단계 가속시간은  $t_1$ 이라 한다. 이때 좌심실보조기의 제어변수는 SV 13, DV 5, BT 500, HR 58, SL 3000으로 고정시켜 놓아 탄성간의 관계만을 고찰할 수 있도록 하였다.

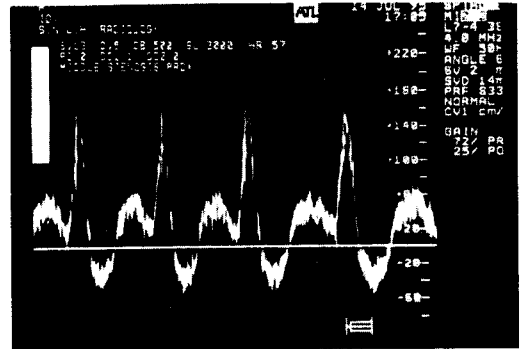
근위부 탄성( $C_p$ )의 증가는 전체 파형의 모양에는 영향을 미치지 못했으나, 수축기 최고속도  $v_1$ 을 감소시켰고  $P_3$ 에서의 소맥 형성에 영향을 미쳤다.

협착직후부 탄성( $C_{d1}$ )의 증가는 파형 진폭의 감소를 가져왔고 특히 수축기 최고점 파형이 완만하게 만든다. 특히,  $C_p = C_{d2} = 0$ 인 경우  $C$ 의 증가는 파형의 모양을 삼상에서 이상으로 전이 시켜 소지맥(pulsus tardus and parvus) 현상을 만드는 것을 관찰할 수 있다. [그림 4]  $C_{d1} = 0$ 인 경우에는 협착직후부( $P_2$ )와 협착원위부( $P_3$ )에서 관찰한 파형의 모양 변화가 일어나지 않고 소지맥 현상도 관찰할 수 없다. (그림 5)

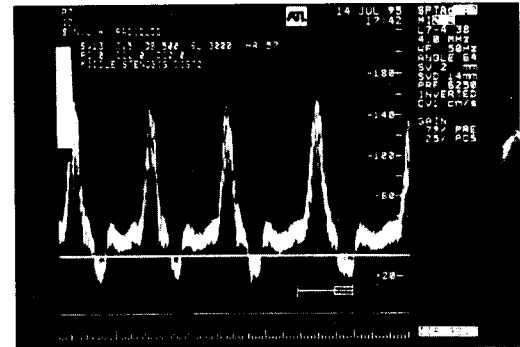
협착원위부 탄성( $C_{d2}$ )가 증가되어  $C_{d1} = C_{d2} = 1$ 이 되면 다시 3상 파형이 관찰된다.



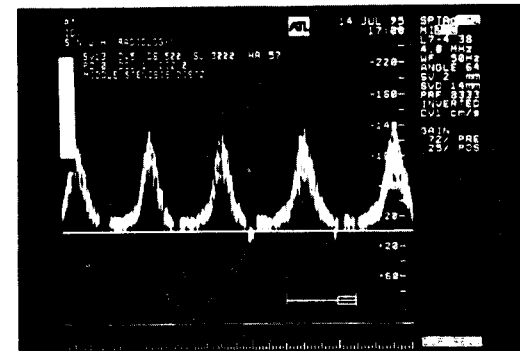
[그림 4] 협착에 따른 소지맥 형성에 관한 모식도  
[Fig.4] Stenosis and 'Pulsus Tardus and Parvus'



(a)



(b)

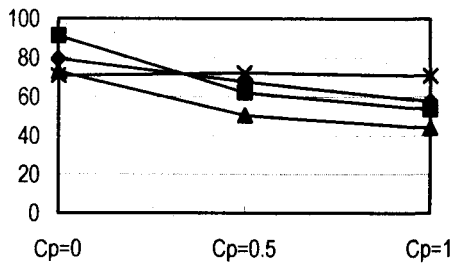


(c)

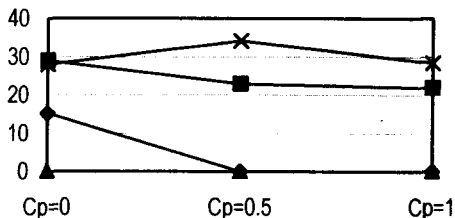
[그림 5] Case 8( $C_p=0, C_{d1}=1, C_{d2}=0$ )의 조건하에서  $P_1$ (a),  $P_2$ (b),  $P_3$ (c)의 위치에서 측정된 도플러 파형.

[Fig.5] Doppler Waveform at  $P_1$ (a),  $P_2$ (b),  $P_3$ (c) in the condition of Case 8 ( $C_p=0, C_{d1}=1, C_{d2}=0$ )

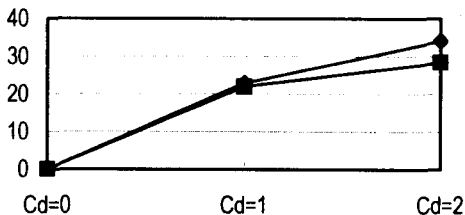
$V_1$ 는 근위부 탄성이 증가할 수록 감소하고 협착후부의 탄성들과는 별 상관성이 없는 것으로 밝혀졌다.  $V_2$ 는 협착후부 탄성( $C_d = C_{d1} + C_{d2}$ )이 증가함에 따라 크게 증가하고 근위부 탄성의 증가에 완만한 감소를 보인다.  $V_3$ 는 협착후부 탄성에 따라 증가하고 근위부 탄성과는 상관성이 없다.  $P_3$ 에서 관찰한 1단계 가속 시간( $t_1$ )은 협착직후부 탄성( $C_{d1}$ )이 증가함에 따라 감소하였고, 협착원후부 탄성과 근위부 탄성과는 상관성이 없다. 또한,  $P_1, P_2$ 에서는  $t_1$ 의 변화를 관찰할 수 없다. (그림 6)



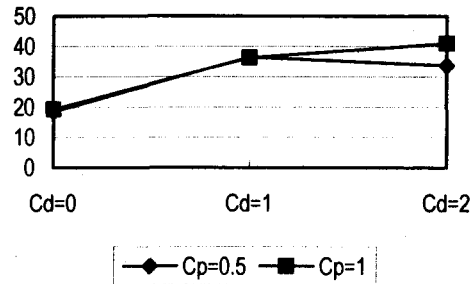
(a)  $C_p$ 의 변화에 따른  $V_1$ 의 변화



(b)  $C_p$ 의 변화에 따른  $V_2$ 의 변화



(c)  $C_d$ 의 변화에 따른  $V_2$ 의 변화

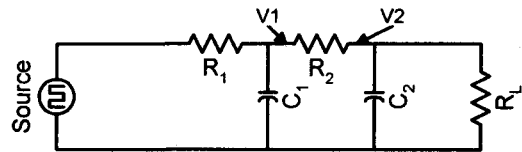


(d)  $C_d$ 의 변화에 따른  $V_3$ 의 변화

[그림 6] 탄성과  $P_3$ 에서 관찰한 파형과의 관계  
[Fig.6] Relationship of Compliance and Waveform absorbed at  $P_3$

토 의

본 연구의 결과 인체와 유사한 3상 파형을 만드는 데 중요하게 작용하는 변수는 제어변수 중 Break Time의 길이와 협착후위부 탄성의 크기이다. 근위부 탄성은 1단계 정점 속도에 영향을 미쳤고 협착후위부 탄성은 2, 3단계 모양에 영향을 미쳤다. 그리고 협착직후부 탄성은 협착원위부에서 관찰되는 소맥 현상에 영향을 미쳤다. 고찰된 바로 가장 이상적인 3상 파형은 협착후위부 탄성이 전위부 탄성보다 크고 다음 박동이 이전 박동의 영향을 받지 않도록 충분한 Break Time을 주었을 때 얻어질 수 있었다. 생체에서 관찰되는 1단계의 빠른 가속 시간은 SD Ratio를 크게해 증으로써 모의할 수 있었다. 본 실험에서 나타나는 현상을 정량적으로 규명하고자 실험 장치를 다음과 같은 회로로 Modeling 하여 Simulation 하였다.



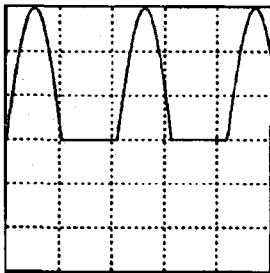
- $R_1$  : Proximal Resistance
- $R_2$  : Stenosis Resistance
- $R_L$  : After Load Resistance
- $C_p$  : Proximal Compliance
- $C_d$  : Distal Compliance
- Source : Half Sinusoidal Function

좌심실 보조기를 이용한 3단계 박동성 혈류 모의

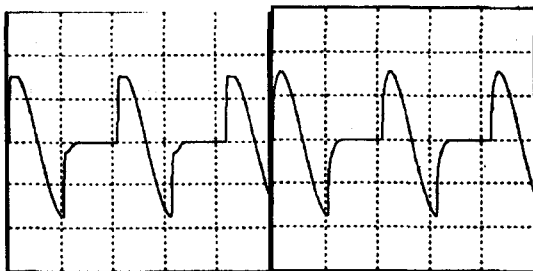
$$R_{Total} = R_1 + \left( \frac{1}{sC_p} // \left( R_2 + \frac{1}{sC_d} // R_L \right) \right)$$

$$V_2 = \frac{\frac{1}{sC_d} // R_L}{R_{Total}}, \quad V_1 = \frac{R_2 + \frac{1}{sC_d} // R_L}{R_{Total}}$$

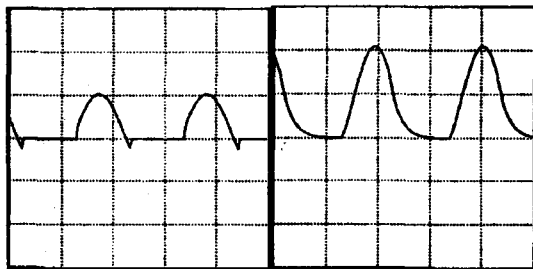
	R <sub>1</sub>	R <sub>2</sub>	R <sub>L</sub>	C <sub>p</sub>	C <sub>d</sub>	TF at V <sub>2</sub>
Condition 1	1	1	1	1	1	(2s <sup>3</sup> +2s <sup>2</sup> +s)/(2s <sup>3</sup> +6s <sup>2</sup> +6s+2)
Condition 2	1	1	1	0.5	1	(2s <sup>3</sup> +3s <sup>2</sup> +s)/(2s <sup>3</sup> +9s <sup>2</sup> +11s+4)
Condition 3	1	1	1	0	1	1/(2s+3)
Condition 4	1	2	1	0	2	1/(3s+4)
Condition 5	1	2	1	1	0	(3s+1)/(3s+6)
Condition 6	1	2	1	2	0	(6s+4)/(6s+1)



(a) 입력 파형



(b) 조건 1의 파형 (c) 조건 2의 파형



(d) 조건 3의 파형 (e) 조건 6의 파형

(b),(c),(d),(e)은 V<sub>2</sub>를 시간에 따라 Plot 한 결과

[그림 7] 모델을 MathLab으로 시뮬레이션한 결과  
[Fig.7] Result of Simulation with MathLab

시뮬레이션 결과 C<sub>p</sub>를 작게 하고 C<sub>d</sub>를 크게 한 경우 3상 파형을 형성하는 것을 관찰할 수 있다.

그림 7의 (c)가 (b)보다 1단계 파형의 경사가 심한 것과 (e)에서 Distal Compliance가 적을 경우에 소지맥이 형성되는 것은 본 실험의 결과와 일치한다.

결론

본 연구의 결과로 인체와 유사한 3단계 박동을 유압식 좌심실보조기를 이용하여 모의할 수 있음을 알 수 있었고 각 근위부 탄성과 협착 후위부 탄성이 파의 모양에 미치는 영향을 고찰할 수 있었다.

이 결과는 심혈관계의 여러현상을 설명하는 유용한 도구가 되고 다양한 혈류 유동을 모의할 수 있게 해 준다는 면에서 기여하는 바가 크다고 하겠다.

또한, 좌심실보조기가 생체 혈류 파형을 모의할 수 있다는 점에서 이 기기가 생체에 무리를 주지 않으면서 심박동을 도와줄 수 있는 좌심실보조기 제어 프로토콜에 대한 기초작업을 이루었다는 면에서도 큰 의미가 있다고 할 수 있다.

참고 자료

[1] Jeffrey L. Duerk, Steve M. Teague, and Brian Lawler, "A Physical Regurgitant Cardiac Valve Phantom for Magnetic Resonance Imaging or Color Doppler Ultrasound Study", IEEE BME Vol 39, No.11, Nov 1992

[2] Ilmar A. Hein, William D. O'Brein, "A Flexible Blood Flow Phantom Capable of Independent Producing Constant and Pulsatile Flow with a Predictable Spatial Flow Profile for Ultrasound Flow Measurement Validations", IEEE BME Vol.39, No.11, Nov 1992

[3] Joseph F. Polak, "Peripheral Arterial Disease : Evaluation with Color Flow and Duplex Sonography", The Radiologic Clinics of North America Vol 33, No.1, Jan 1995

[4] 최진욱, "전기 유압식 좌심실 보조기에 관한 연구", 서울대학교 대학원 의학 박사 논문, 1993년 2월

[5] 정혜원, "박동성 혈류 모델을 이용한 도플러 파형에 관한 연구", 서울대학교 대학원 의학 석사 논문, 1996년 2월

[6] Bude RO, Rubin JM, Platt JF, et al, "Pulsus tardus: Its cause and potential limitations in detection of arterial stenosis", Radiology 1994;190:779-784