

전기유압식 심실보조장치의 동물실험 연구

백완기* · 심상석* · 진성훈* · 원용순** · 김원곤*** · 노준량*** · 박성근**** · 민병구****

=Abstract=

An Animal Study on Electrohydraulic Type Ventricular Assist Device

Wan Ki Baek, M.D.* , Sang Suk Shim, M.D.* , Sung Hoon Jin, M.D.* , Yong Soon Won, M.D.** ,
Won Kon Kim, M.D.*** , Joon Ryang Rho, M.D.*** , Sung Keun Park, M.D.**** , Byoung Goo Min, Ph.D.****

An animal experiment was designed for the evaluation of in vivo performance of the newly developed electrohydraulic type ventricular assist device and its influence on the left ventricular function during pulsatile left ventricular assist.

Eight adult sheep were incorporated into the study and data were collected from seven sheep. Total assist time ranged from 69 minutes to 7 days. The performance of the device was satisfactory both in asynchronous and synchronous mode within the range of given native heart rate. More than 4 liters of device output could be reached within the range of normal left atral pressure without development of negative pressure in the left atrium.

Moderate to severe degree of hemolysis was noted as evidenced by significant increase of plasma free hemoglobin level after 3 days of left ventricular support along with the presence of the small amount of thrombi around the floating disc type polymer valve apparatus reflecting that further study and refinement of the device need to be done in regard of biocompatibility and thromboresistance.

The hemodynamics showed increase in heart rate ($p < 0.05$), cardiac output and left ventricular minute work ($p < 0.05$) after placement of the device at the flow rate of 2.0~2.5 L/min. The left atrial pressure, left ventricular pressure and LV dP/dt were decreased after the device placement ($p < 0.05$). The endocardial viability ratio and oxygen contents of the mixed venous blood and coronary venous blood were all increased ($p < 0.05$) after the device placement suggesting effective unloading of the left ventricle was accomplished.

The myocardial perfusion was thought improved in synchronous counterpulsation as suggested by significant increase in endocardial viability ratio and coronary venous blood oxygen content in synchronous assist mode comparing with asynchronous mode.

* 인하대학교 의과대학 흉부외과학교실

* Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery, College of Medicine, Inha University

** 이화여자대학교 의과대학 흉부외과학교실

** Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery, College of Medicine, Ewha Woman's University

*** 서울대학교 의과대학 흉부외과학교실

*** Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery, College of Medicine, Seoul National University

**** 서울대학교 의과대학 의공학교실

**** Department of Biomedical Engineering, College of Medicine, Seoul National University

위 논문은 95년도 인하대학교 교내연구비 일부보조에 의함

위 논문은 95년도 추계 흉부외과학회에서 구연되었음

논문접수일: 96년 2월 2일 심사통과일: 96년 3월 20일

통신저자: 백완기, (461-194) 경기도 성남시 수정구 태평 4동 7336. Tel. (0342) 720-5348, Fax. (0342) 755-2812

This data suggests synchronous counterpulsation might be advantageous for the recovery of the heart from an ischemic yet potentially reversible myocardial injury.

(Korean J Thorac Cardiovasc Surg 1996; 29: 689-99)

Key words : 1. Heart assist device
2. Heart ventricle function, Left
3. Counterpulsation

서 론

심실보조의 성패는 심장이식이 전제되지 않는 한 자연 심장의 심근회복 여부에 좌우되어진다. 확장기 반박동(diastolic counterpulsation)은 심실의 후부하를 감소시키는 동시에 혈액의 심근관류량을 증가시킴으로써 손상된 심근의 회복을 도모하는 효과적인 방법들 중의 하나로 일찌기 대동맥내 풍선펌프로부터 그 유용성이 입증되어 왔다¹⁾. 동일한 원리를 박동성 심실보조장치에 적용하면, 즉 보조장치의 박동시기를 자연심장의 확장기에 일치시키면 심근의 회복이 보다 효과적으로 이루어질 수 있으리라고 쉽게 생각할 수 있으나 현재 심실보조에 있어 이러한 보조장치의 박동에 의한 확장기 반박동의 잇점은 확실히 증명되고 있지 못하고 있는 실정으로, 여기에는 여러가지 이유가 있겠으나 저자들은 기존에 사용하고 있는 공압식(pneumatic) 형태의 심실보조장치가 그 구조상, 압축률이 높은 공기를 압력 전달물질로 사용하고 있기 때문에 자연 심장의 박동에 따라 정확히, 그리고 효과적으로 반박동을 구현하기가 용이하지 않기 때문이 아닌가 하고 가정하였다.

서울대병원 의공학과에서 신개발한 전기유압식 심실보조장치는 기존의 공압식 심실보조장치와는 달리 압력 전달 물질로 압축률이 적은 물을 사용하기 때문에 상대적으로 정확한 보조박동시기의 제어가 가능하다는 이론적인 장점을 가진다²⁾.

본 연구의 목적은 동물실험을 통하여 상기 전기유압식 심실보조장치의 기계적 완성도 및 생체 적합성을 테스트 하는 동시에 작동방식에 따른 혈액학적 특성의 관찰을 통하여 상기 기술한 전기유압식 심실보조장치의 이론적 장점을 입증하는데 두었다.

연구재료 및 방법

1. 연구재료

본 연구에서 사용되어진 심실보조장치는 서울대병원

의공학과에서 개발한 전기유압식 심실보조장치로 자세한 구조 및 작동 방식에 대해서는 이미 서술된 바 있으며^{2, 3)} 이를 간략히 정리하면 다음과 같다.

1.1. 심실보조장치의 구조

본 연구에 사용되어진 심실 보조장치는 혈액펌프와 압력펌프 및 제어기의 세부분으로 구성되어진다(Fig. 1). 혈액펌프는 유입관(inflow tubing)을 통하여 들어오는 혈액을 받아 다시 혈액낭의 수축을 통해 유출관(outflow tubing)으로 내뿜는 심장의 심실과 같은 역할을 담당한다. 혈액펌프는 다시 혈액과 직접 접촉하는 혈액낭(blood sac)과 혈액펌프와 혈액유입관 및 혈액유출관 사이에 위치하여 혈액낭의 수축 및 이완에 의해 발생하는 혈행의 역류를 막는 두 개의 판막과, 혈액낭을 둘러싸고 있으며 압력펌프로부터의 에너지를 매질을 통해 전달받아 혈액낭을 수축 및 이완시키는 혈액펌프 용기(case)로 나뉘어진다.

혈액낭은 폴리우레탄으로 제작되었으며 본 실험에서 사용된 혈액낭의 용량은 50 cc로 보조박출량을 2~3 L/min 정도 유지하는 것을 목표로 하였다. 유입 및 유출관과 혈액펌프 사이에 각각 위치하는 판막은 부동 원반 형태(floating disc type)의 고분자판막(polymer valve)으로 폴리우레탄으로 내경 19 mm의 지지대(stent)를 만들고 중앙에 isoplast봉을 접합하여 Pellethane막으로 만든 두께 2 mm의 원형 판침(leaflet)이 isoplast봉을 중심으로 부동할 수 있도록 하였다. 특히 Pellethane막으로 만든 판침은 흔히 부동 원반 형태의 판막에서 이용되어지는 판침과는 달리 유연성이 강해 판막 개구시 혈류에 의해 중심부 쪽으로 휘게되어, 유체역학적인 장점이 있을 것으로 기대되었다.

혈액펌프 용기는 아크릴 몸체와 두랄루민 덮개로 구성되어 있으며 혈액낭과 고분자판막 및 유출입관을 혈액낭에 연결시켜 주는 접속기(connector)가 밀착되도록 고안되었다.

압력펌프는 압력전달용 물이 들어있는 벨로우즈와 전동기(Sanyo, 106-60001-1, 24 Volt, Japan), 그리고 벨로우즈와 혈액펌프를 연결하는 길이 약 1m의 1/2 inch Tygon tu-

bing으로 이루어진다. 전동기의 회전운동은 볼스크류(THK, lead 2 mm, Japan)를 통하여 밑대의 왕복운동으로 바뀌어 물이 들어있는 벨로우즈의 압축 및 팽창을 유도하게 되며, 이에 따라 물을 매질로하여 압력이 혈액펌프와 연결된 튜브를 통하여 혈액펌프로 전달되어 혈액량이 수축 이완을 반복하게 되는 것이 그 작동 메카니즘으로, 본 실험에서는 벨로우즈의 용량은 135ml, 행정거리는 40mm로 고안하였다.

제어기(controller)는 전동기 구동부, 주제어기 및 제어 콘솔의 세부분으로 구성되어 있다. 전동기 구동부는 신호기(금성 encoder S-30-200K0)를 사용하여 직류전동기에 대한 속도제어 및 위치제어를 할 수 있도록 하였으며 주 제어기로부터 회전방향, 속도제어 신호, 정지 및 운전개시 신호를 받아 이에 따라 전동기에 적절한 전류를 공급하여 전동기를 구동하도록 하였다. 주 제어기는 16 비트 마이크로 컨트롤러(Intel 8097)를 사용하였으며 심실보조 장치의 동작상태의 감시 및 전동기 구동에 필요한 명령의 출력, 제어콘솔로부터의 명령입력 등의 기능을 수행하도록 프로그램되었다. 제어콘솔은 IBM 386 PC를 사용하였으며 사용자로부터 명령을 받아 주제어기와 대화할 수 있으며 각종 동작상태를 화면에 표시하도록 프로그램되었다.

1.2. 작동방식

심실보조의 전반적인 제어는 행정거리와 수축기 속도 및 이완기 속도의 조절에 의해 이루어진다. 행정거리란 모터의 회전운동을 받아 왕복운동을 하게되는 볼스크류가 움직이는 거리를 의미하며 수축기 및 이완기 속도란 각각 볼스크류가 벨로우즈를 압축 및 팽창시키는 속도를 의미한다. 즉, 심실보조장치의 분당 박동수, 박출량 및 수축이완기비(SD ratio; systolic diastolic ratio)는 제어콘솔에서 직접 변화시킬 수 없으며 위의 세 변수의 제어에 따라 수동적으로 변화하게 된다. 행정거리는 0~1400, 수축기 및 이완기 속도는 40~220 사이의 임의 숫자에서 조절이 가능하도록 하였다. 수축기 속도와 이완기 속도의 조절은 펄스폭변조방식(pulse width modulation)을 채택하였다. 본 연구에서 사용되어진 심실보조장치는 최대 행정거리가 약 20mm로 최대 행정거리에서 분당 80회까지의 1:1 동기식 박동이 가능하도록 고안되었다.

심실보조의 동기화(synchronization)는 심전도에 나타나는 R파를 감지하여 이루어지도록 설계되었다(EKG R wave trigger mode). 지연시간(delay time)이란 R파를 감지 후 심실보조장치의 박동이 이루어지기까지의 시간을 의미하며 0에서 200 msec까지의 범위 내에서 조절할 수 있도록

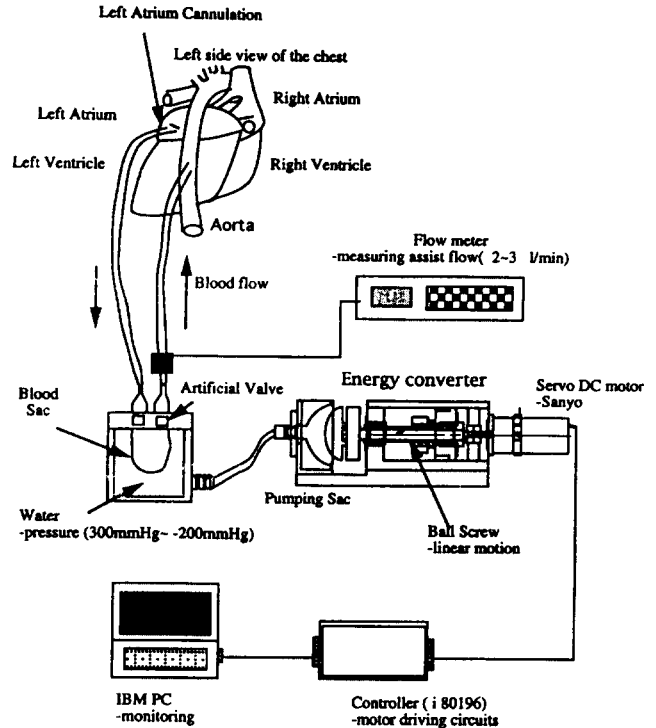


Fig. 1. Schematic drawing of the configuration of electrohydraulic VAD and its circuit.

되어있어 조절여하에 따라 자연심장의 수축기 때에 심실보조장치의 박동이 이루어지는 협박동(copulsation)이나 반대로 자연심장의 이완기 때에 보조박동이 이루어지는 반박동(counterpulsation) 모두가 가능하게 하였다. 또한 상황에 따라 심실보조장치와 자연심장의 박동수의 비율인 동기율(synchronization rate)을 1:1, 2:1, 3:1로 조절이 가능하도록 하였다.

2. 실험동물의 선택

체중 40~50kg 사이의 성숙 면양을 대상으로 하였으며(평균 45.1 ± 3.3kg), 총 8회의 실험 중 7번째 면양을 제외하고는 모두 암컷이었다. 성숙 면양을 대상으로 한 이유는 크기 및 체중이 사람과 비슷하며 송아지보다 가격이 저렴하고 성질이 온순하여 다루기가 쉽기 때문이다. 또한 면양의 경우 다른 동물과 비교하여 생체재료(biomaterial)에 대한 석회화(calcification)가 비교적 덜 생기는 것으로 알려져 있다⁴⁾.

3. 실험방법

실험동물은 실험시작 18시간 전부터 금식시켰다. 실험 당일 체중을 측정 후 2% Xylazine hydrochloride를 kg당

1ml 근육주사하여 마취를 유도하였다. 앞 다리에 수액 및 주사제 주입을 위한 말초정맥 경로(peripheral IV route)를 확보 후 실험동물을 수술대 위에 옆으로 눕힌 다음, 사지에 심전도 전극을 붙이고 심전도 모니터를 시작하였다. 역시 앞 다리의 말초정맥에 카테터를 삽입하여 말초정맥압의 모니터를 시작한 후 Atropine 0.5mg을 근육주사하고 특별히 제작한 마스크를 통해 Halothane-N₂O 흡입마취를 시작하였다. 기관삽관 후 마취는 Halothane 0.5~1.0 vol % 내에서 유지하였으며 근육 이완제는 별도로 사용하지 아니하였다. 또한 목 부분에 소절개를 가하여 정맥맥을 노출시킨 다음 Swan-Ganz 카테터를 삽입하여 폐동맥압을 모니터하면서 수술 전의 심박출량 및 폐동맥 췌기압을 측정하였다.

수술은 전과정에서 평균상태를 유지한 채 진행하였다. 심장보조장치 카놀라 삽관을 위한 심장 및 대혈관으로의 접근은 첫번째 실험에서만 좌측 측방개흉술을 사용하였을 뿐 나머지는 모두 우측 측방개흉술을 사용하였다. 5번째 늑간을 통해 늑막강을 노출시켰으며 경우에 따라 5번째 늑골을 일부 절제하기도 하였다. 늑막강이 노출되면 심낭을 심장의 장축을 따라 종으로 절개 후 좌심방과 좌심실에 압력측정을 위해 도자(catheter)를 위치시켰다. 면양에서는 반기정맥(hemiazygous vein)이 관상정맥동으로 개구된다는 사실에 착안하여 반기정맥을 하행 대동맥과 만나는 지점에서 결찰 및 절단 후 근위부에 도자를 넣어 도자의 끝이 관상정맥동에 위치하도록 함으로써 관상정맥혈의 채혈이 가능하도록 하였다.

헤파린을 5,000 unit 정맥투여 후 먼저 좌심방부속지(left atrial appendage)를 통하여 좌심방에 34 Fr 크기의 강선으로 강화시킨 정맥 카놀라(wire reinforced venous cannula, USCI)를 위치시킨 다음 하행 대동맥에 역시 강선으로 강화된(wire reinforced) 내경 7mm의 동맥 카놀라(arterial cannula, 3M Sarns)를 끝의 방향이 대동맥 근위부를 향하도록 위치시켰다(Fig. 1). 카놀라의 고정용 실타래(pursestring suture)를 통해 이루어졌는데 여섯번째 실험부터는 심실 보조장치의 유출부 저항을 줄이고자 동맥 카놀라 대신 심실보조장치의 회로에 사용되는 1/2 inch 관(tubing)에 폴리우레탄으로 자가 제작한 직경 12mm의 수관(sleeve)을 달아 수관을 5-0 Prolene 봉합사로 하행 대동맥에 단측문합하였다. 또한 심실보조장치 구조의 일부 개량이 이루어져 혈액량의 용적을 80cc로 늘렸으며 벨로우즈 역시 좀 더 크게 만들어 보조 혈류량을 늘릴 수 있도록 하였다.

각 카놀라들은 절개선 하방 늑간에 따로 소절개를 넣어

몸 바깥으로 빼낸 후 바로 혈액펌프와 연결하여 심실보조 회로를 가능한 한 짧게 함으로써 불필요한 저항 및 혈액의 손상을 최소화 하고자 노력하였다. 모든 회로 부분의 연결을 완료 후 심실 보조장치를 작동하였다.

먼저 비동기 방식(asynchronous mode)로 시작하여 심실 보조장치의 박출 횟수를 분당 60회에서 고정된 체로 보조 순환의 양을 2.0~2.5L/min까지 서서히 올린 후 이 상태를 20분간 유지한 다음, 동기방식(synchronous mode)로 바꾸어 효과적인 반박동(counterpulsation)이 이루어지게끔 지연시간을 맞춘 후 다시 20분간을 같은 상태로 유지하였다. 이때까지의 모든 혈액학적 데이터(심박수, 대동맥압, 좌심실압, 좌심방압, 폐동맥압, 중심정맥압)들은 동시기록기(polygraph; Fukuda Denshi MCS-5000, Japan)를 통하여 연속 기록하였으며 또한 계수형 변환기(digital converter: Sony Magnescale PC-108M, Japan)를 이용하여 상기 데이터들의 계수형 기록(digital recording)을 병행함으로써 이로부터 최대 및 최소 좌심실압 변화율(dP/dtmax, dP/dtmin), 장력시간지수(TTI; tension time index), 확장기 압력시간지수(DPTI; diastolic pressure time index)와 심내막 생육력비(EVR; endocardial viability ratio)를 구할 수 있도록 하였다.

혈액 가스분석검사(blood gas analysis)를 위한 채혈은 심실보조장치 작동 시작 전(과정 1), 비동기방식으로 작동 20분 후(과정 2), 동기방식으로 작동 20분 후(과정 3)에 각각 동맥혈, 혼합정맥혈 및 관상정맥혈로부터 하였으며 이와 동시에 Swan Ganz 카테터를 통해 심박출량을 측정하였다. 측정된 심박출량 및 혈액학적 변수들로부터 좌심실 분당작업량(LVMW; left ventricular minute work)과 좌심실 구혈작업지수(LVSWI; left ventricular stroke work index)를 다음 공식에 의거하여 계산하였다⁶⁾: $LVMW = CO \cdot (mAoP - LVEDP) \cdot 0.0136$; $LVSWI = SV/Bwt \cdot (mAoP - LVEDP) \cdot 0.0136$; (CO = cardiac output; mAoP = mean aortic pressure; LVEDP = left ventricular end diastolic pressure; SV = stroke volume; Bwt = body weight).

이상의 혈액 가스분석검사의 측정치와 혈액학적 변수들은 상기 과정 1, 2, 3의 3군으로 나누어 통계처리 후 비교하였으며 비모수적 통계분석법인 윌콕슨의 부호화 순위검정(Wilcoxon's signed rank test)을 이용하여 $p < 0.05$ 수준에서 각 군간의 유의성을 검정하였다. 통계처리에는 PC SAS 6.0 package를 사용하였다.

상기 실험과정 3까지 완료 후 다시 심실 보조방식을 비동기식으로 전환한 상태에서 흉관을 삽입한 다음 절개 부

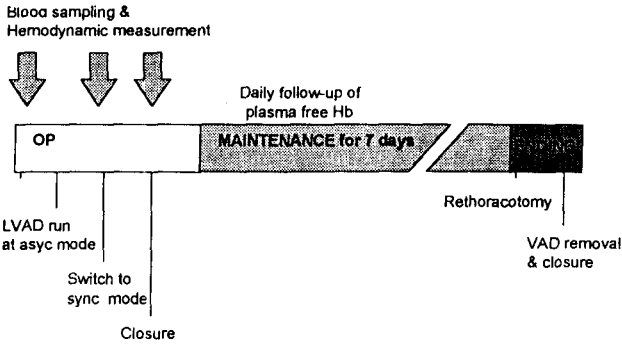


Fig. 2. Time frame of the experiment. OP; operation, LVAD; left ventricular assist device, VAD; ventricular assist device, sync; synchronous, async; asynchronous, Hb; hemoglobin

위를 봉합하였다. 마취를 깨우고 기관내 튜브를 제거한 후 면양을 미리 준비한 우리로 옮기고 심실 보조상태를 유지한 상태에서 일주일을 관찰하여 1) 심실보조장치의 기계적 완성도 및 제어장치의 효율성을 점검하며, 또한 일정한 간격으로 혈장 유리혈색소(plasma free hemoglobin)치를 측정함으로써 2) 심실보조장치의 혈액 적합성 등을 평가하고자 계획하였으며 일주일 경과 후 다시 멸균 상태에서 동일한 방법으로 마취를 유도한 후 심실보조로부터 이탈시킨 다음 심실보조장치를 제거하고 혈액펌프 내부를 검사하여 혈전 등의 생성여부 및 판막이나 혈액낭 내부의 폐손여부 등을 점검하고자 계획하였다. 심실보조장치의 혈액펌프는 자가제작한 주머니에 넣어 면양의 측복부에 부착하였으며 혈액펌프와 압력펌프를 연결하는 관의 길이 범위 안에서(1.0~1.5m 정도) 비교적 실험 면양의 움직임이 자유로울 수 있도록 하였다.

이상의 실험과정을 도식화하면 Fig. 2와 같다.

결 과

1994년 8월부터 1995년 6월까지 총 8회의 동물실험이 행하여졌는데 실제로 심실보조장치를 동작시켜 자료를 받은 것은 모두 7례였다. 제외된 1례는 첫번째 실험으로, 좌측 측방개흉술 후 보조장치의 유입관은 우상폐정맥을 통하여 우심방내에, 유출관은 상행대동맥에 위치시키고자 계획하였으나 사람과 달리 면양에서는 좌측 측방개흉술을 통한 우상폐정맥 및 좌심방의 노출이 매우 불량하여 유입관의 거치가 불가능하였던 경우로 이후의 실험은 우측 측방개흉술을 통하여 이루어지도록 수정되었다.

상기 7례의 좌심실 보조시간은 69분에서 7일 사이로, 예정된 대로 일주일간의 좌심실 보조 후 보조장치의 이탈 및

Table 1. Outcome of VAD experiments

No.	Duration of support	Outcome	Cause of death	Major modification / Events
1	-	dead	bleeding	Rt. thoracotomy
2	195 min	dead	respiratory accident	-
3	69 min	dead	arrhythmia	coronary ligation
4	86 min	dead	bleeding	cannula dislodge
5	7 days	survive	-	-
6	1 day	dead	unknown	sudden death
7	175 min	dead	bleeding	sutureline disruption
8	2 days	dead	bleeding	LA tear

VAD; ventricular assist device, Rt; right, LA; left atrium

제거를 마치고 실험 면양이 생존한 상태에서 실험을 종료하였던 경우는 1례였으며 나머지 6례는 좌심실 보조 사망하였다. 주요 사망원인은 Table 1과 같아 수술 후 실험 면양이 몸부림을 칠 때 유출입관들이 잡아당겨져 좌심방이나 대동맥에 위치시킨 카눌라가 빠지거나 또는 카눌라를 고정시킨 부분의 조직이 찢어지거나 또는 심실보조장치 회로의 연결관이 빠지거나 하여 발생한 출혈이 대부분을 차지하였으며 그의 인공호흡기의 동작불량 및, 원인을 알 수 없었던 경우가 각 1례씩이었다. 또한 세번째 실험은 실험과정 3까지 마친 후 인위적으로 관상동맥 좌전하행지 근위부를 결찰하였는데 결찰 약 20여분 후 발생한 심실성 빈맥으로 실험 동물은 사망하였다.

심실보조장치는 특별한 문제없이 비동기식 및 동기식 방식 모두에서 양호하게 작동하였고, 특히 주어진 자연심장의 박동수 범위 안에서 만족스러운 확장기 반박동을 구현할 수 있었다(Fig. 6). 또한 별다른 좌심방의 음압의 발생 없이 분당 최대 4리터 이상의 보조박출량을 얻을 수 있었다.

심실보조 후 혈액낭 내부를 검사하였을 때, 헤파린을 투여하였음에도 불구하고 2례에서 동일 장소인 혈액낭 유입부판막의 판침지지봉 끝에 소량의 혈전을 발견할 수 있었다. 혈장 유리혈색소치는 1례에서 좌심실 보조기간 동안 매일 측정 가능하였는데 그 변화 양상은 Fig. 3과 같아 심실보조 3일째 부터 급격히 상승되는 소견을 보였다.

상기 총 7례의 동물실험으로부터 1) 심실보조 시작 전, 2) 비동기 방식으로 심실보조 20분 후, 3) 동기 방식으로 보조 20분 후의 시점에서 기록한 혈액학적 변수인 분당 심박동수, 평균 대동맥압, 수축기 좌심실압, 평균 좌심방압 및 심박출량의 평균 및 편차는 Table 2와 같아 심박동수와 평균 대동맥압 및 심박출량은 심실보조 시작 후 증

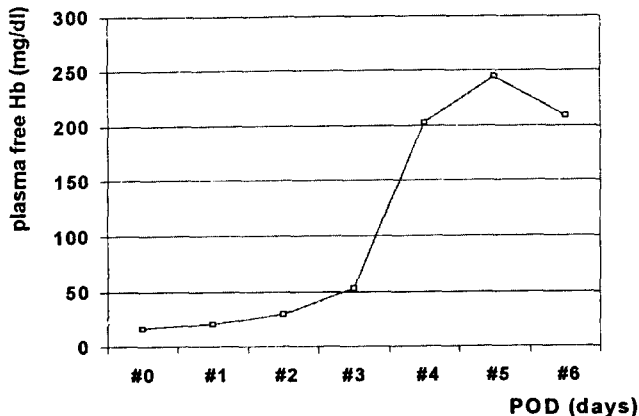


Fig. 3. Change of the plasma free hemoglobin level in the 5th experiment. Hb; hemoglobin, POD; postoperative day.

가하는 경향을 보였으며 반대로 좌심실압 및 좌심방압은 감소하는 경향을 보였다. 이 중 심실보조 시작 전과 비동기방식으로 보조 20분 후 시점의 좌심방압 및 좌심실압의 차이와, 심실보조 시작전의 심박동수와 동기방식으로 보조 20분 후 시점의 심박동수의 차이는 통계적으로 유의하였다($p < 0.05$).

혈역학적 변수들로부터 계산을 통해 산출해낸 상기 시점 1), 2), 3)에서의 좌심실 분당작업량(LVMW; left ventricular minute work)과 좌심실 구혈작업지수(LVSWI; left ventricular stroke work index), 그리고 계수형 변환기(digital converter)를 이용한 혈역학적 변수의 계수형 변환(digital converter)을 통하여 얻어낸 최대 및 최소 좌심실 압력변화율(LV dP/dt_{max}, dP/dt_{min})과 장력시간지수(TTI; tension time index) 및 확장기 압력시간지수(DPTI; diastolic pressure time index)의 측정으로부터 산출한 심내막 생육력비(EVR; endocardial viability ratio; $EVR = DPTI / TTI$)는 Table 2와 같아 최대 및 최소 좌심실 압력변화율의 절대값은 감소하는 소견을 보였으며 좌심실 분당작업량과 심내막 생육력비는 증가하는 소견을 보였다. 통계적으로 유의한 차이는 좌심실보조 시작을 전후하여 좌심실 압력변화율과 심내막 생육력비, 그리고 좌심실보조 전과 동기식 작동 20분 후 시점의 좌심실 분당작업량에서 볼 수 있었다. 특히 심내막 생육력비는 비동기방식으로 보조시보다 동기시 보조시 통계적으로 유의한 증가를 나타내었다. 좌심실 구혈작업지수는 비동기방식으로 보조시 증가하다가 다시 동기식으로 보조시 감소하였는데 통계적 의미는 없었다.

동일 시점에서 중심정맥 및 관상정맥으로부터 측정된 혈중 산소량(O_2 content)은 Table 2와 같아 심실보조 시작

Table 2. Outcome of VAD experiments

	Baseline	VAD support	
		Async	Sync
Heart rate (bpm) ^b	79.4 ± 10.2	90.4 ± 13.6	94.7 ± 8.2
mAo pressure (mmHg)	77.1 ± 13.8	77.9 ± 14.1	82.7 ± 9.8
LV pressure (mmHg) ^a	106.9 ± 14.4	85.9 ± 10.1	92.6 ± 8.9
LA pressure (mmHg) ^a	6.3 ± 4.3	3.6 ± 3.7	4.1 ± 2.7
Cardiac output (L/min)	4.61 ± 1.06	4.78 ± 1.04	4.89 ± 1.06
LV dP/dt _{max} (mmHg/s) ^{a,b}	1029 ± 243	743 ± 159	679 ± 185
LV dP/dt _{min} (mmHg/s) ^{a,b}	729 ± 200	549 ± 151	529 ± 144
LVMW (m.kgf/min)	4.36 ± 0.94	4.72 ± 0.80	5.24 ± 1.35
LVSWI (m.gf/kg)	1.22 ± 0.20	1.18 ± 0.18	1.27 ± 0.46
EVR ^{a,b,c}	0.92 ± 0.41	1.19 ± 0.33	1.31 ± 0.23
CvO ₂ (ml/dl) ^{a,b}	16.2 ± 2.7	18.8 ± 1.3	18.2 ± 1.9
CcvO ₂ (ml/dl) ^{a,b,c}	15.8 ± 3.2	16.5 ± 4.1	18.3 ± 1.6

* Data are shown as mean ± standard deviation.

^a $p < 0.05$ between baseline and async data.

^b $p < 0.05$ between baseline and sync data.

^c $p < 0.05$ between async and sync data.

VAD; ventricular assist device, async; asynchronous mode, sync; synchronous mode, mAo; mean aorta, LV; left ventricle, LA; left atrium, LV dP/dt_{max}, LV dP/dt_{min}; maximal or minimal rate of change of left ventricular pressure, LVMW; left ventricular minute work, LVSWI; left ventricular stroke work index, EVR; endocardial viability ratio, CvO₂; mixed venous oxygen content, CcvO₂; coronary venous blood oxygen content.

후 모두 통계적으로 유의한 증가를 보였는데 특히 관상정맥혈의 혈중 산소량은 비동기방식의 심실 보조시보다 동기방식의 심실보조시 통계적으로 유의한 증가를 나타내었다.

고 찰

심실보조장치의 궁극적인 역할은 1) 혈역학을 개선시켜 혈액순환을 원활히 하여 생명을 유지시키며 2) 간이나 신장 등의 최종장기(end organ)의 회복을 도모하고 3) 나아가서는 심장의 일의 양을 줄여주는 동시에 관상동맥의 관류량을 증가시켜 심근의 허혈상태를 완화시키어 심장기능의 회복을 도모하는데 있다. 심실보조장치의 적응증은 1) 심장이식을 기다리고 있는 말기 심부전증 환자들과 2) 가역성 심인성 속(reversible cardiogenic shock)에 빠진 환자들로 개심술후의 심인성 속(postcardiotomy cardiogenic shock)이 그 대표적인 경우라 하겠다. 심실보조장치가 개심술후의 심인성 속 환자에게서 먼저 사용되기 시작하였음에도 불구하고 일반적으로 심실 보조의 성공률은 심장

이식을 기다리고 있는 환자들에서보다 개심술 후 심인성 속에 빠진 환자들에서 훨씬 불량한데, 이는 개심술 후 심인성 속에 빠진 환자들의 회복은 심실보조장치에 의한 효과적인 순환의 개선에 달려있다고 보다는 심인성 속을 야기시킨 심근의 손상정도 및 그 가역성(reversability) 여부에 좌우되기 때문이다⁹⁾. 따라서 손상된 심장 기능의 회복에 대한 심실보조장치의 역할에 좀 더 많은 관심이 모아지고 있는 것이 최근의 추세이다.

자연심장의 이완기에 맞추어 대동맥내압(intraaortic pressure)을 증가시키는 반박동(counterpulsation)이 자연심장의 후부하를 효과적으로 감소시켜주는 동시에 자연심장의 관상동맥 혈류를 증강시켜 심근의 회복에 유리하다는 사실은 이미 대동맥내 풍선펌프의 사용을 통하여 잘 입증되어 있는 사실이다¹⁾.

허혈성 변화가 진행되고 있는 심장에서 심실보조장치의 조기사용이 심근의 회복에 도움을 주고 심근경색의 크기를 줄여준다는 보고들이 다수 발표되고 있는 바^{7,8)}, 좌심실 보조시 박동성 보조장치의 박동시간을 자연심장의 이완기에 맞추었을 때 대동맥내 풍선펌프 사용시와 같은 원리에 의해 심근회복이 보다 효과적으로 이루어질 것으로 쉽게 예측할 수 있으나 실제로 임상적용에 있어 그 효과는 아직 확실히 규명되어 있지 않다. 본 연구에서 시행한 박동성 좌심실보조시의 혈역학적 지수의 측정을 통한 좌심실 기능의 평가는 주로 상기 내용의 규명에 중점을 두었다.

본 실험에서 심실보조 시작 후 보인 자연심장의 심박동수의 증가는 심실보조로 야기된 전부하의 감소에 의한 반사작용으로 생각되며 여기에 수술과정상 별 수 없이 동반되는 심장의 잦은 기계적인 자극도 영향을 미쳤을 것으로 생각된다.

심실보조 시작 후 평균 대동맥압 및 심박출량의 증가분은 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다. 이는 심부전 없는 정상기능을 가진 심장에서 심실보조로 인한 전부하(preload) 감소가 주요 원인으로 생각되어지는데 실제로 좌심실압은 심실보조 시작 후 통계적으로 유의한 감소를 보였다.

심박동수와 수축기 부하(systolic load) 및 수축력(contractile state)은 심근의 산소 소모량을 결정하는 주요인자들이며 좌심장 작업량(LCW; left cardiac work)과 좌심실 구혈작업지수(LVSWI; left ventricular stroke work index)는 심근의 산소 소모량을 잘 반영하는 지표로 알려져 있다^{9, 10)}. 일반적으로 좌심실 보조는 정상 심장에서 심근의 산소 소모량을 줄이고^{11, 12)} 좌심실 확장기말압(left diastolic pressure)을 낮추어 주며¹³⁾, 좌심실 작업량(left ventricular

work) 및 좌심실벽 응력(left ventricular wall stress)을 줄여주는 것으로 알려져 있다¹⁴⁾. 본 연구의 결과, Sukehiro 등의 보고와는 반대로⁶⁾ 오히려 심실보조 시작 후 좌심실 분당작업량(left ventricular minute work)은 증가하는 경향을 보인 반면, 좌심실 구혈작업지수(LVSWI; left ventricular stroke work index)는 각 시간대에서 두드러진 차이를 보이지 못하였는데 이는 심실보조 후에 보인 심박동수의 증가와 전부하의 감소에서 그 원인을 찾을 수 있겠다.

비동기식 작동방식에서의 좌심실압은 몹시 불규칙한 변화를 보여주었는데 (Fig. 4) 이는 심실보조장치의 작동 주기에 따라 좌심실에 걸리는 전부하(preload) 및 후부하(afterload)의 양이 변화하는데 기인하는 것으로 대체적으로 심실보조장치의 박동이 자연심장의 박동 바로 앞에 놓이게 되면 좌심실의 전부하는 감소하며 후부하는 증가하게 되어 좌심실압의 감소를 보이게 되며 그 반대로 심실보조장치의 박동이 자연심장의 바로 뒤에 놓이게 되면 좌심실의 전부하는 증가하고 후부하는 감소하게 되어 좌심실압의 증가를 보였으며 이는 수축기 대동맥압에도 영향을 미쳐 수축기 대동맥압과 수축기 좌심실압은 우리가 자연심장의 경우에서 보게되는 것과 같이 동일하지 않았다. 마찬가지로 심실보조장치의 박동에 의해 만들어지는 대동맥 압력곡선의 정점(peak)의 높이도 자연심장의 박동에 영향을 받아 매우 불규칙하게 변하는 양상을 보였다. 결국 이러한 압력파형의 박동간의 심한 변화(beat to beat variation) 때문에 비동기식 심실보조상태에서 좌심실 압력변화량(LV dP/dt)를 포함하는 혈역학적 변수들의 고른 측정값 및 계산값을 얻기가 용이하지 않았으며 이점이 비동기식 심실보조상태에서 얻은 혈역학적 변수들과 다른 상태(심실보조장치 작동전과 동기식 심실보조시)에서 얻은 변수들과의 비교의 신빙도를 떨어뜨리는 큰 요인으로 작용했으리라 생각된다.

심실보조장치의 동기식 작동은 자연심장의 박동수 범위 내에서 지연시간 및 수축기와 확장기의 속도조절 여하에 따라 협박동(copulsation)부터 반박동(counterpulsation)까지 만족스럽게 동작하였으며 반박동 시는 효과적인 확장기 혈압증강(diastolic augmentation)을 이룰 수 있었다 (Fig. 5, 6).

일반적으로 유입부 카놀라를 좌심방 내에 거치시킬 때 보다 좌심실 내에 거치시킬 때, 보다 효과적인 혈액의 혈액낭으로의 유입이 이루어지며 따라서 보다 완전한 좌심실의 감압(decompression) 및 심실보조장치의 박출량의 증가를 이룰 수 있는 것으로 알려져 있다¹⁵⁾. 좌심실 내에 카놀라를 거치시키는 방법은 심첨부를 통하는 방법과 좌

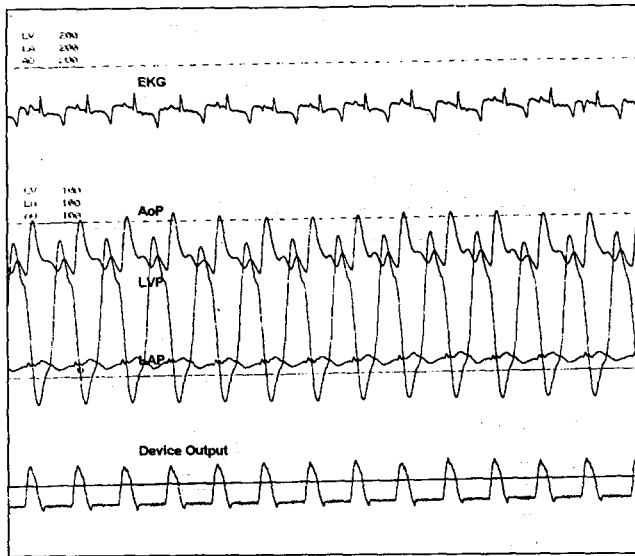


Fig. 4. Left ventricular assist at asynchronous mode. Note beat to beat variation of LVP according to pulsation of the device. EKG; electrocardiogram, AoP; aortic pressure, LVP; left ventricular pressure, LAP; left atrial pressure.

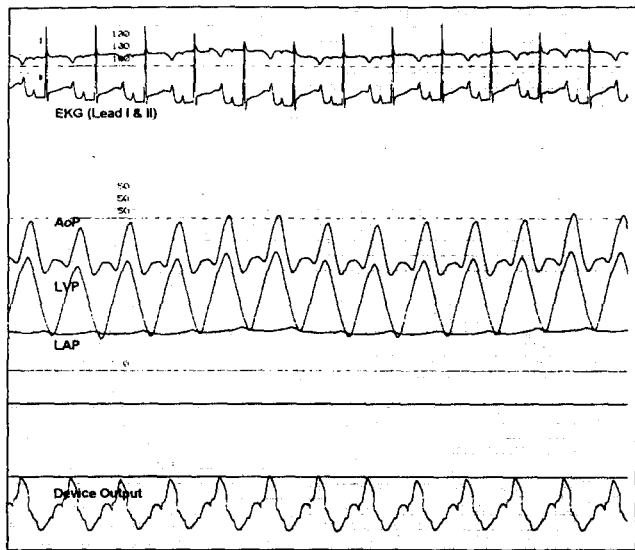


Fig. 5. Left ventricular assist at synchronous mode. The copulsation is well demonstrated as assist pulses fall on systole of the native heart. EKG; electrocardiogram, AoP; aortic pressure, LVP; left ventricular pressure, LAP; left atrial pressure.

심방을 통해 승모판을 지나 위치시키는 두가지 방법으로 나뉘어진다. 먼저 심첨부를 통하는 방법은 좌심실의 감압 측면에서 볼 때는 가장 효과적인 방법이기도 하나, 대부분

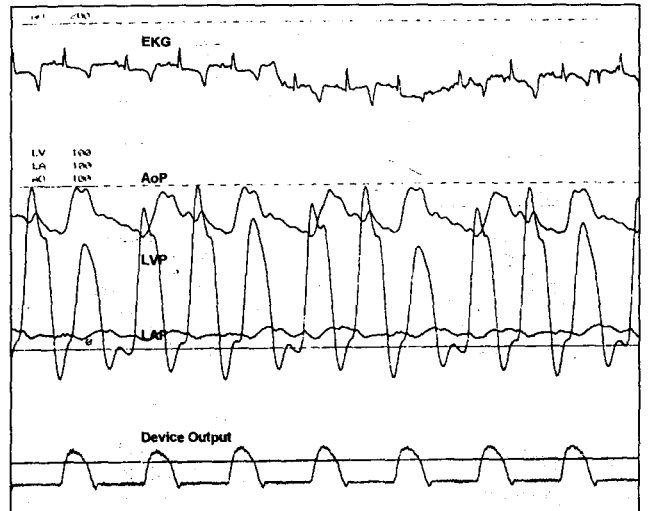


Fig. 6. Left ventricular assist at synchronous mode. The counterpulsation is well demonstrated as the device pulses fall on diastole of the native heart. EKG; electrocardiogram, AoP; aortic pressure, LVP; left ventricular pressure, LAP; left atrial pressure.

의 경우 체외순환을 필요로 하고 필연적으로 좌심실 근육에 손상을 초래하며 카놀라 제거 후 좌심실의 재건이 용이하지 않아 주로 심장이식을 기다리는 말기 심부전환자에서 사용되며 자연심장의 회복을 전제로 하는 개심술 후의 심인성 속 환자에게는 별로 쓰이지 않는 방법이다. 승모판을 통하여 카놀라를 좌심실 내에 거치시키는 방법은 거치가 용이하며 좌심실 근육에 손상을 주지 않는다는 장점을 가지고 있으나 심실보조장치가 담당하는 혈류량이 많지 않은 경우 필연적으로 승모판 역류현상을 초래하게 되며 따라서 심실보조장치의 점진적인 이탈(waning)은 이 방법으로는 곤란하다 하겠다. 또한 동기식 심실보조의 경우 심실보조장치가 담당하는 혈류량이 충분히 많아 좌심방의 완전한 감압이 이루어지는 상태에서도 심실 기외수축 등의 부정맥으로 인하여, 또는 다른 어떤 이유에서건 심전도 R 파를 감지하지 못하여 동기식 심실보조가 이루어지지 못하는 경우 비록 짧은 시간이나마 승모판을 통한 혈액의 역류는, 심실기능이 현저히 저하되어 있는 심장에서는 심실의 급격한 확장을 유발하여 심각한 결과를 초래할 수 있으므로 카놀라가 승모판을 통하여 좌심실 내에 위치해 있을 때의 동기식 작동방식의 적용은 세심한 주의가 요망된다 하겠다.

본 연구에서는 좌심방에의 카놀라 거치만으로도 정상 좌심방 압력 하에서 좌심방내의 음압 발생 없이 분당 4 리터 이상의 보조혈류량을 얻을 수 있었으므로 유입부 카놀

라를 꼭 좌심실까지 집어넣어 승모판 역류의 위험을 무릅쓸 필요가 없다는 것이 본 저자들의 생각이다.

좌심실압과 최대 및 최소 좌심실압력변화율(LV dP/dtmax, dP/dtmin)의 절대값은 모두 심실보조 시작 후 통계적으로 유의한 감소를 보여 효과적인 좌심실 부하의 감소가 이루어지고 있음을 시사하였으며 이는 Rose 등과 Fukuda 등의 보고와 일치하였다^{14, 16}. 그러나 비동기식 심실보조시와 동기식 심실보조시의 작동방식에 따른 유의한 차이를 이루지는 못하였다.

중심 정맥혈의 산소량은 심실보조 시작 후 통계적으로 유의한 증가를 보여 조직 수준에서의 혈류량의 증가가 이루어지고 있음을 시사하였다¹⁷. 그러나 역시 비동기식 보조와 동기식 보조간의 유의한 차이는 관찰되지 아니하였다.

심내막 생육력비(endocardial viability ratio)와 관상정맥혈의 산소량은 심실보조에 따라 일반적으로 증가하는 상황을 보였는데 특히 두 변수 모두 비동기식 보조로부터 동기식 보조로 심실 보조장치의 작동방식을 바꾼 후 통계적으로 유의한 증가를 보여 동기식 보조가 관상동맥 혈류량과 심근의 산소공급 측면에 있어 유리한 위치에 있음을 시사하였다.

실험 5 및 6에서 동맥 카눌라와 혈액낭의 크기가 소폭 변화하였기 때문에 실제로 상기 여러 변수들의 측정치에 영향을 미치고 따라서 통계처리 및 상호간의 비교가 용이하지 않을 것으로 생각할 수도 있으나 모든 실험이 관류량을 분당 2.0~2.5 리터 사이로 고정시킨 상태로 실험이 진행되었음을 고려할 때, 전체적인 혈액학적 변수들에는 커다란 영향을 미치지 않았으리라는 것이 본 저자들의 생각이다. 다만 혈전형성이나 용혈에 대하여는 확실히 차이가 나겠으나 이 점에 대하여는 상기 기술한대로 충분한 연구가 본 실험에서 이루어지지 못하였다.

동물실험에서 인위적인 심부전을 유발시키는 방법은 대동맥의 잠정적인 차단, 관상동맥의 선별적 결찰, 관상동맥 내 입자(particle)의 주입 등 여러가지가 있으나^{18, 19}, 가장 손쉽게 적용하여 선택적인 심부전을 유발할 수 있는 방법은 관상동맥의 선별적 결찰이 되겠다. 심부전의 정도 및 가역성(reversibility)은 주로 결찰의 위치와, 얼마나 오랫동안 묶어 둘 것이냐에 따라 결정될 것이나 현재 면양에서 우리가 얻고자 하는 내용에 대한 정보는 매우 빈약한 실정이다. 위의 실험 3에서 일단 관상동맥의 결찰을 통해 심부전을 유발하는 데는 성공하였으나 그 정도가 지나쳐 심실보조를 시행함에도 불구하고 동기식 방식으로 바꾼 후 얼마 지나지 않아 심실세동이 나타나 회복되지 못하였다. 우

리가 원하는 만큼의 일관된 정도의 심부전을 만들기 위하여는 반복된 실험에 의한 어느정도의 시행착오가 요망된다 하겠다.

용혈 및 혈전의 형성은 제반 심실보조장치 사용 후 나타나는 주요 합병증들 중의 하나이다. 혈장 유리혈색소로 표현되어지는 용혈의 정도가 심실보조 3일 이후부터 상당량에 이르는 결과가 비록 1례에서 밖에 증명되지 못하였지만 이는 간과할 수 없는 사실로 충분히 현재 상기 심실보조장치의 장기 사용을 가로막는 장애물로 생각되어진다. 확실하지는 않으나 현재 대부분의 용혈은 혈액 펌프에 내장되어 있는 부동형 고분자판막을 혈액이 통과시 발생하는 와류(turbulent flow)로부터 기인하는 것으로 생각되어지는 바 상기 판막의 재질 및 구조에 향후 더 많은 연구 및 개선이 이루어져야 할 것으로 생각된다. 혈전 형성 역시 소량이라는 하나, 3례에서 동일한 장소인 Pellethane 막으로 만든 고분자판막 판침과 판막지지봉 사이에서 검출되어 적절한 항응고요법의 고안 및 판막 구조 개선의 여지가 있음을 시사하였다. 만약 현재 시판되고 있는 인공판막을 고분자판막 대신 내장시킨다면 임상적용시 혈액적합성(hemocompatibility) 및 혈전저항성(thromboresistance)에 있어서는 큰 무리가 없지 않을까 생각해 본다.

결 론

이상의 동물실험을 통하여 얻은 결론은 다음과 같다.

1. 면양에 있어 사람에서와 같이 우측 폐정맥을 통한 유입부 카눌라의 거치는 기술적으로 용이하지 않았다.
2. 심실보조장치는 자연심장의 박동수 범위 내에서 동기식 및 비동기식 방식 모두에서 만족스럽게 작동하였으며 좌심방내의 함입 현상없이 주어진 정상 좌심방압의 범위 내에서 분당 4 리터 이상의 보조 혈류량을 얻을 수 있었다.
3. 좌심실 보조 3일 이후부터 혈중 유리혈색소의 급격한 증가를 보여 상당량의 용혈이 진행되고 있음을 시사하였다. 또한 심실보조 후 혈액낭의 부동형 고분자판막(floating polymer valve)에 소량의 혈전이 발견되어 혈액적합성 및 혈전저항성 면에 있어 보다 많은 연구 및 개선의 여지가 있음을 시사하였다.
4. 좌심실 보조 시작 후 혈액학의 변화는 혈류 보조량 분당 2.0~2.5 리터 사이에서 자연심장의 박동수 및 박출량과 좌심실 작업량(left cardiac work), 심내막 생육력비(endocardial viability ratio), 혼합 정맥혈 및 관상동맥 정맥혈 산소량은 증가하는 소견을 보인 반면 좌심실압

및 좌심방압 과 좌심실압 변화율(left ventricular dP/dt)은 감소하는 소견을 보였는데 이중 심박출량의 변화 외에는 모두 통계적으로 유의한 차이를 보여 효과적인 좌심실의 탈부하가 이루어지고 있음을 입증하였다.

5. 동기식 심실보조시 심내막 생육력비 및 관상정맥혈의 산소량은 비동기식 심실보조시와 비교할 때 역시 통계적으로 유의한 차이를 보여 동기식 심실보조에 의한 반박동(counterpulsation)이 심근의 관류량을 증가시키며 나아가서는 손상된 심근의 회복에 유리함을 시사하였다.

참 고 문 헌

1. Cresswell LL, Rosenbloom M, Cox JL, et al. *Intraaortic ballon counterpulsation: Patterns of usage and outcome in cardiac surgical patients.* Ann Thorac Surg 1992;54:11-20
2. 최진욱. 전기유압식 좌심실 보조기 개발에 관한 연구. 서울대학교 대학원 의공학과 박사학위논문. 1992.
3. 원용순. 전기유압식 심실보조기의 동물실험 연구. 서울대학교 대학원 흉부외과 박사학위논문, 1994.
4. Sawyer DC. *Factors governing choice of animals for chronic instrumentation studies.* In: McCutcheon EP, ed. *Research animals in medicine.* NIH publication, 1973;417-28
5. Sukehiro S, Flameng W. *Effects of left ventricular assist for cardiogenic shock on cardiac function and organ flow distribution.* Ann Thorac Surg 1990;50:374-83
6. Pae WE, Miller CA, Matthews Y, Pierce WS. *Ventricular assist devices for postcardiotomy cardiogenic shock: A combined registry experience.* J Thorac Cardiovasc Surg 1992;104:541-53
7. Zumbro GL, Kichens WR, Shearer G, et al. *Mechanical assistance for cardiogenic shock following cardiac surgery, myocardial infarction, and cardiac transplantation.* Ann Thorac Surg 1987;44:11-3
8. Pierce WS, Rosenberg GG, Donarchy JH, et al. *Postoperative cardiac support with a pulsatile assist pump: Techniques and results.* Artif Organs 1987;11:247-51
9. McDonald RH, Taylor RR, Cingolani HE. *Measurement of myocardial developed tension and its relation to oxygen consumption.* Am J Physiol 1977;233:H421-30
10. Braunwald E. *Control of myocardial oxygen consumption.* Am J Cardiol 1971;27:416-32
11. Miller DR. *Comparative effects of left atrial or left ventricular bypass on coronary sinus flow and oxygen utilization in dogs.* Ann Thorac Surg 1973;179:830-5
12. Pennock JL, Pierce WS, Prophet GA, Waldhausen JA. *Myocardial oxygen utilization during left heart bypass.* Ann Surg 1974;109:635-41
13. Chiu C, Dennis C, Harris B. *Responses of myocardial fiber length to left heart bypass.* J Surg Res 1969;9:241-5
14. Rose DM, Marrin CAS, Bregman D, Spotnitz HM. *Left ventricular mechanics of counterpulsation and left heart bypass, individually and in combination.* J Thorac Cardiovasc Surg 1979;77:127-37
15. Lohmann DP, Swartz MT, Pennington DG, et al. *Left ventricular versus left atrial cannulation for the Thoratec assist device.* ASAIO Trans 1990;36:545-8
16. Fukuda S, Takano H, Nakatani T, et al. *Effects of LVAD on the right ventricular function of normal heart.* Jpn J Artif Organs 1986;15:563-6
17. Magilligan DJ, Teasdall R, Eisenmenger R, Peterson E. *Mixed venous oxygen saturation as a predictor of cardiac output in the postoperative cardiac surgical patient.* Ann Thorac Surg 1987;44:260-2
18. Magovern GJ Jr, Christlieb IY, Kao RL, et al. *Recovery of failing canine heart with biventricular support in a previously fatal experimental model.* J Thorac Cardiovasc Surg 1987;94:656-63
19. Maroko PR, Klekhus JK, Sobel BE, et al. *Factors influencing infarct size following experimental coronary artery occlusion.* Circulation 1971;43:67-82

=국문초록=

신개발한 전기유압식 심실 보조장치의 생체 내 성능 테스트와 상기 심실보조장치를 이용한 좌심실 보조가 자연심장 좌심실의 기능에 미치는 영향을 평가하기 위한 동물실험을 고안하였다.

총 성숙 면양 8마리가 실험에 사용되었으며 이중 7마리로부터 자료 수집이 가능하였다. 심실 보조시간은 69분부터 7일 사이로 심실보조장치는 자연심장의 박동수 범위 내에서 동기식 및 비동기식 방식 모두 만족스럽게 작동하였으며, 좌심방 내의 음압의 발생 없이 주어진 정상 좌심방압 내에서 분당 4리터 이상의 보조 혈류량을 얻을 수 있었다.

심실보조 개시 3일 이후부터 혈중 유리혈색소의 급격한 증가를 보여 상당량의 용혈이 진행되고 있음을 시사하였다. 또한 심실보조 후 혈액당의 부동형 고분자판막 (floating type polymer valve)에 소량의 혈전이 발견되어 혈액적합성 및 혈전저항성 면에 있어 보다 많은 연구 및 개선의 여지가 있음을 시사하였다.

심실보조 시작 후의 혈액학의 변화는 혈류 보조량 분당 2.0~2.5 리터 사이에서 자연심장의 박동수 및 박출량과 좌심실 분당작업량 (left ventricular minute work), 심내막 생육력비 (endocardial viability ratio), 혼합 정맥혈 및 관상동맥 정맥혈 산소량은 증가하는 소견을 보였으며, 반대로 좌심실압 및 좌심방압과 좌심실압 변화율 (left ventricular dP/dt)은 감소하는 소견을 보였다. 이중 심박출량의 변화 외에는 모두 통계적으로 유의한 차이를 보여 효과적인 좌심실의 탈부하가 이루어지고 있음을 입증하였다.

또한 동기식 심실보조시 심내막 생육력비 및 관상정맥혈의 산소량은 비동기식 심실보조시와 비교할 때 역시 통계적으로 유의한 차이를 보여 동기식 심실보조에 의한 반박동 (counterpulsation)이 심근의 관류량을 증가시키며 따라서 손상된 심근의 회복에 유리함을 시사하였다.

- 중심단어:** 1. 전기유압식 심실보조장치
2. 박동성 좌심실 보조
3. 좌심실 기능
4. 동기식 반박동