

MUSIC 을 이용한 기계식 심장 판막의 음향 신호 특성 연구

이서우, 최민주*, 민병구**

서울대학교 대학원 협동과정 의용생체공학전공, *제주대학교 의과대학 의학과,

**서울대학교 의과대학 의공학교실

A Study of the Acoustical Properties of the Mechanical Heart Valve Using MUSIC

S. W. Yi, M. J. Choi* and B. G. Min**

Interdisciplinary Program in Biomedical Engineering Major, Seoul National University

Department of Medicine, Medical School, Cheju National University

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

email: yiseowoo@shinbiro.com

Abstract

This paper considers the acoustical characteristics of the mechanical valve employed in the Korean type Artificial Heart. Björk- Shiley tilting disc valve was chosen for the study and acoustic measurements were performed for the artificial heart operated in a mock circulation system as well as implanted to an animal as a Bi Ventricular Assist Device (BVAD). In the mock system, three different conditions of the valve were examined which were normal, damaged (torn off), pseudo-thrombus attached. Microphone measurements for the BVAD were carried out at a regular time interval for 5 days after the implantation operation. Of the recorded acoustic emissions from the artificial heart, click sounds mainly originated from the valves were further analyzed using Multiple Signal Classification (MUSIC) for estimating their spectral properties. It was shown that the spectral peaks below 4 kHz and the optimal order number for MUSIC, equivalent to the number of the spectral component, might be the key parameters which were highly correlated to the physiological states of the valve like the mechanical damage of the valve or the formation of thrombus on the valves.

서론

인공 심장에서 발생하는 음향 신호는 인공 심장의 진단과 감시에 관련된 유용한 정보를 포함하고 있다. 따라서 인공 심장의 음향 신호를 측정하고 적절한 신호 처리 과정을 거치면, 비침습적인 방법으로 생체 내에 이식된 인공 심장의 동작 상태에 관한 정보를 얻을 수 있다. 그 동안 인공 판막에 대한 음향 신호 분석이 수행된 적이 있지만, 인공 심장 내에 채워진 인공 판막을 대상으로 한 경우는 별로 없다. 본 논문에서는 한국형 인공 심장에 채워진 기계식 심장 판막의 생리적인 상태에 대한 음향학적인 특성을 살펴 보았다. 특히 대동맥 판막의 closing click 소리에 대한 주파수 특성을 관찰하였다. 판막의 closing click 소리는 역학적으로 판막 상태를 평가하는 중요한 부분이라 할 수 있다. 혈전이 판막 ring 이나 strut 에 형성됨에 따라 occluder 의 적절한 접촉을 방해하고, 따라서 음향 신호의 고주파 성분의 에너지 감소를 초래하는 등의 여러 변화를 유발하게 된다[2]. 판막 주위의 혈전 형성, 물리적 손상과 같은 판막 이상에 관한 예측과 진단을 위해서 음향 신호의 적절한 분석이 필요하다. 본 연구에서는 모의 순환계에서 동작하는 인공 심장과 동물에 이식된 인공 심장으로부터 측정된 음향 신호를 주파수 추정 방법인 MUSIC

(Multiple Signal Classification)을 사용하여 주파수 특성을 살펴 보았다.

재료 및 방법

1. 실험 장치

기계식 판막 (Björk- Shiley tilting disc valve)을 장착한 본 연구실에서 개발한 인공 심장을 사용하였다. 인공 심장에서 소리를 측정하기 위하여 horn type coupler 가 씌어진 고감도 마이크로폰 (Audio Technica, ATM-15a)을 사용하여 음향 신호 측정 시스템을 구성하였다. 측정된 마이크로폰 신호는 실험실에서 제작된 증폭기를 거쳐 A/D 변환기 (Wavebook, IO tech, USA)에서 50 kHz 로 샘플링 하였다. 입수된 디지털 신호의 분석은 PC (Compaq Celeron330)에서 Matlab 5.3 (The Math Works Inc., 1999, USA)을 이용하여 수행했다. 본 연구에서는 4 개의 기계식 판막 중 대동맥 판막(직경 25mm)의 closing click 소리에 대해 주로 관심을 두고 분석하였다.

2. *in vitro* 및 *in vivo* 실험

음향 신호 측정은 인공 심장이 모의 순환계에서 작동하는 *in vitro* 상태와 동물에 양심실 보조 장치 (Bi Ventricular Assist Device: BVAD) 형태로 이식하여 작동하는 *in vivo* 상태에서 수행하였다. 모의 순환계에서는 세 가지 상태의 기계식 심장 판막 (Björk- Shiley tilting disc valve)을 장착하여 음향 신호를 측정하였다. 즉 정상적인 판막 (normal valve), disk 의 끝 부분이 손상된 판막 (damaged or torn off valve) 그리고 손상된 판막에 아교를 붙여 모의로 혈전을 붙인 판막 (pseudo-thrombus attached valve)을 인공 심장에 채용하여 판막에서 나오는 소리를 비교하였다.

in vivo 실험은 정상적인 판막을 장착한 인공 심장을 BVAD 용도로 양에 이식하여 수행하였다. BVAD 이식 후 동물이 어느 정도 안정된 시기라고 간주할 수 있는 때인 이식 후 하루 이후에 2 - 3 시간 간격으로 BVAD 에서 발생하는 음향 신호를 측정하였다

3. MUSIC 과 최적 차수

측정된 신호의 주파수 추정을 위해 MUSIC 을 사용하였다. MUSIC 은 아래의 식 (1)로 표현된다.

$$P_{music}(f) = \frac{1}{e^H(f) \left(\sum_{k=p+1}^N v_k v_k^H \right) e(f)} = \frac{1}{\sum_{k=p+1}^N |v_k^H e(f)|^2} \quad (1)$$

$$e(f) = \begin{bmatrix} [1 \exp(j2\pi f) \exp(j2\pi f \cdot 2) \exp(j2\pi f \cdot 4) \dots \exp(j2\pi f \cdot (n-1))]^H \end{bmatrix}$$

여기서 N 은 eigenvector 크기, e(f)는 complex sinusoid vector, v 는 입력 신호 correlation matrix 의 eigenvector, H 는 conjugate transpose operator, p 는 signal subspace 의 크기이다. eigenvector v 는 가장 작은 eigenvalue 에 해당하고 noise subspace 에 걸친다. MUSIC 은 noise subspace 에 바탕을 둔 주파수 추정 방법으로 잡음에 대한 영향을 줄이고, 낮은 신호 대 잡음 비(SNR)에서 더 나은 결과를 제공하는 것으로 알려져 있다. 그러나 계산 값이 모델 차수와 데이터 길이에 의존하므로 이를 미리 설정해야 한다. 또 잡음만으로 된 eigenvalues 에서 신호와 noise eigenvalues 를 얼마나 잘 구별할 수 있는가와 같은 문제점이 있다[3]. 본 연구에서는 적절한 차수 결정을 위해 BAIC (Bayesian Akaike Information Criterion)[1] 방법과 MDL (Minimum Description Length)[4] 방법을 이용하여 최적 차수를 결정하였다[5]. Spectral peak 개수는 차수(order)와 밀접한 관련이 있으며, 따라서 최적 차수의 값은 신호의 주파수 특성을 반영하는 변수로 간주할 수 있다.

실험 결과

1. *in vitro* test

모의 순환계에서 작동하는 인공 심장에서부터 측정된 전형적인 음향 신호는 그림 1 에서 보여주고 있다. 그림 1 은 2 개의 기계식 판막에서 나오는 소리이며, Heart Rate 에 따라 각각 2 - 3 개의 비주기적이고 지속 시간이 짧은 closing click 소리 (그림 1 에서 화살표로 표시된 부분)을 포함하고 있다. 판막의 closing click 소리에 대한 주파수 특성은 MUSIC 을 이용하여 계산하였으며, 그

결과는 그림 2 에 제시하였다. 판막의 closing click 소리는 전체 data 에서 0.02 초 동안을 windowing 하여 분석하였다. 여기서 MUSIC 의 모델 차수는 8 로 하였다. 그림 2 에서 (a) 선은 정상 판막의 경우이고, (b) 선은 손상된 판막에 모의로 혈전을 붙인 판막, (c) 선은 disk 부분이 손상된 판막에 해당한다. 정상 판막의 경우 2 kHz 에서 가장 큰 spectral peak 가 나타났고, 5 - 6 kHz 와 8 kHz 부근에서 peaks 를 보여주고 있다. 손상된 판막의 경우 1.5 kHz 와 2 kHz 사이에서 가장 큰 spectral peak 가 나타났고, 3 kHz 부근과 7 kHz 부근에서도 peaks 를 보였다. 모의로 혈전을 붙인 판막에서는 3.2 kHz 부근에서 가장 큰 spectral peak 가 나타났고, 1.6 kHz 와 7 kHz 에서 peaks 를 보였다. BAIC 와 MDL 방법을 이용하여 계산한 최적 차수의 값은 5 에서 30 사이의 값을 보였는데 손상 판막과 혈전 판막은 대부분 정상보다 높은 값을 가지고 있음을 보였다. BAIC 와 MDL 방법에 의해 계산된 값들은 대부분 유사하였으며, 간혹 BAIC 보다 MDL 에 의한 값이 약간 더 높은 값을 보였다.

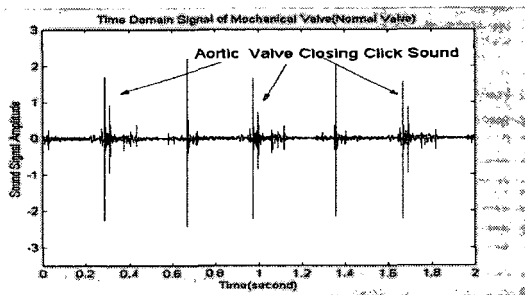


그림 1. 모의 순환계에서 동작중인 인공 심장에서 측정된 음향 신호.

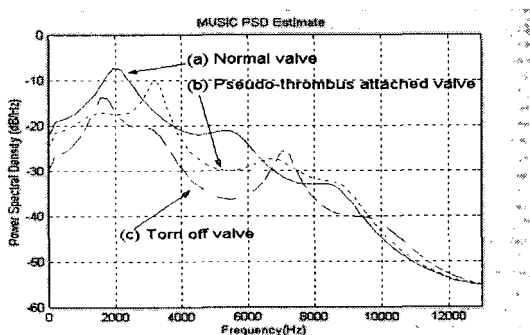
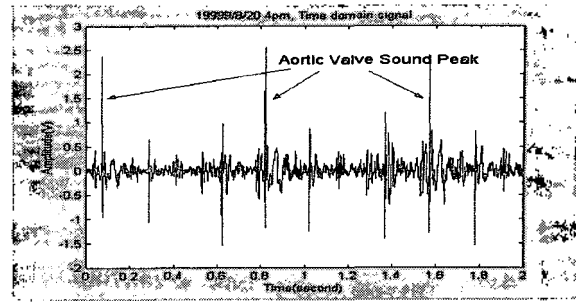
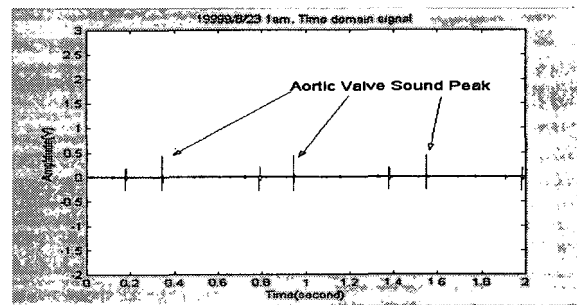


그림 2. 모의 순환계에서 동작중인 인공 심장에서 측정된 판막 closing click 소리의 주파수 특성. (a) 정상 판막, (b) 모의로 혈전을 붙인 판막, (c) disk 가 손상된 판막



(a)



(b)

그림 3. 양에 이식된 BVAD 로부터 측정된 판막음 신호.

(a) 이식 후 1일 경과, (b) 이식 후 4일 경과

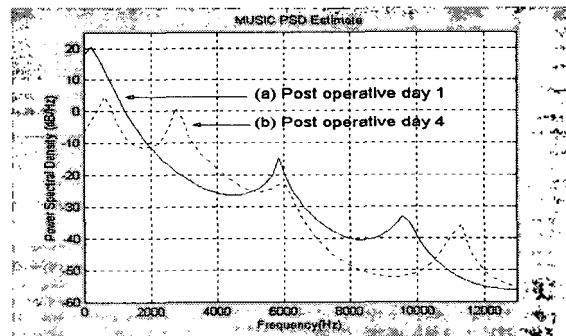


그림 4. MUSIC 을 이용하여 계산한 BVAD 로부터 측정된 판막 closing click 소리의 주파수 특성. (a) 이식 후 1일 경과, (b) 이식 후 4일 경과

2. in vivo test

동물에 이식된 BVAD 에서 측정된 전형적인 음향 신호는 그림 3 에서 보여 주고 있다. 그림 1 과 유사하게 음향 신호는 Heart Rate 에 따라 2-3 개의 대동맥 판막 closing click 소리를 포함하고 있으며 이들은 지속 기간이 짧고 비주기적인 특성을 보이고 있다. 그림 3a 는 이식 후 하루가 지났을 때의 경우이고, 그림 3b 는 이식

후 4 일이 경과한 후 측정된 신호이다. 이식 후 시간이 경과하면서 측정 신호의 진폭이 점차 작아 졌으며, 4 일 정도가 경과하면 약 1/5 이상 크기가 감소하였다. 각 신호에서 판막의 closing click 소리에 대한 주파수 특성을 MUSIC 을 이용하여 예측한 결과는 그림 4 에 제시하였다. 여기서 MUSIC 의 모델 차수는 10 으로 하였다. 그림 4 로부터, 판막음의 spectral peak 의 크기는 주파수가 증가함에 따라 감소하고 있음을 볼 수 있다. BVAD 이식 후 하루가 지난 경우, 측정된 판막음 신호에는 1 kHz 이하에서 불규칙적으로 spectral peak 가 나타났고, 6 kHz 와 9 - 10 kHz 부근에서 dominant spectral peaks 가 존재하는 것으로 나타났다. 하지만 BVAD 이식 후 시간이 경과하면서 0.6-1 kHz 부근과 2.7-3 kHz 부근에서는 새로운 spectral peaks 가 출현하고 있음을 보이고 있다. 이는 이식 후 4 일이 경과한 경우인 그림 4 의 (b)선에서 잘 보여주고 있다. 참고로 BAIC 를 이용한 모델 차수 값은 BVAD 이식 후 초기에는 대부분 10 이하였지만, 시간이 증가함에 따라 점차 증가하다가, 4 일이 지나면서 20 부근의 값을 보였다. 그림 5 에서는 BVAD 이식 후 4 일 동안 수술 후 경과한 날짜 (POD: Post Operative Day)가 지나감에 따라 측정된 음향 신호를 MUSIC 을 사용하여 주파수 특성의 변화를 보여주고 있다. 그림으로부터 시간이 지남에 따라 4 kHz 이하의 영역에서 spectral peaks 의 변화를 쉽게 확인 할 수 있다.

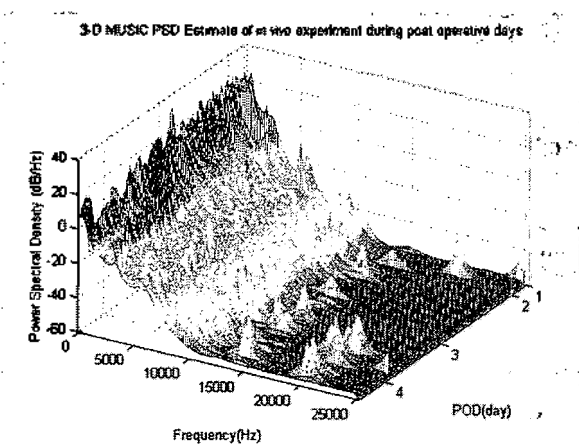


그림 5. BVAD 이식 후 시간에 따라 측정된 판막음 신호의 주파수 특성 곡선의 변화.

토론

본 연구에서는 기계식 판막 (Björk- Shiley tilting disc valve)을 장착한 인공 심장에서 발생하는 판막음의 주파수 특성을 분석하였다. MUSIC 을 사용하여 FFT 방식의 Power Spectral Density 보다 쉽게 판막음 신호의 주요한 spectral peaks (or harmonics)를 찾을 수 있었다. *in vitro* 실험에서 정상 판막과 비정상 판막에서 spectral peaks 성분의 이동과 차수의 변화를 확인하였다. 동물 실험에서 측정된 판막음의 spectral peaks 는 시간이 지남에 따라, 즉, 혈전 현상이 진행됨에 따라, 특히 4 kHz 이하에서 심한 변화를 보이고 있음을 발견하였다. 또한 *in vitro* test 경우와는 달리 동물 실험에서 측정된 판막음 신호는 2 kHz 미만에서 많은 에너지 분포를 보이고 있으며, 이는 생체 내 여러 잡음으로 인한 결과로 추정된다. 본 실험으로부터 4 kHz 이하의 spectral peaks 와 BAIC 또는 MDL 차수의 값은 판막의 혈전 현상과 밀접한 관련이 있을 것으로 여겨진다. 음향 신호에 포함된 spectral peak 개수의 정보를 표현하는 최적 모델 차수 값은 이식 후 시간이 증가함에 따라 그리고 손상된 판막의 경우 증가하는 것으로 나타났다. 따라서 생체 내 이식 후 인공 심장의 동작에 큰 영향을 미치는 판막의 혈전 형성 정도 및 판막의 물리적 손상 정도는 판막음의 spectral peak 와 모델 차수를 특성 변수로 하여 평가가 가능할 것으로 예상된다. 향후 추가적인 동물 실험을 통하여 이 특성 변수에 대한 혈전과의 상관성 평가를 추진할 예정이다.

참고문헌

- [1] H. Akaike, "Likelihood and the Bayesian procedure", in *Bayesian Statistics*, eds. J.M. Bernardo et al, Univ. Press, p143-166, 1980.
- [2] Naoshi Sato et al, "Real Time Sound Spectral Analysis for Diagnosis of Thrombosed Prosthetic Valves", *Trans Am Soc Artif Intern Organs*, Vol 34, pp.831-834, 1988
- [3] J. Saniie and X. M. Jin, "Spectral analysis for ultrasonic nondestructive evaluation applications using autoregressive, Prony, and multiple signal classification methods", *J. Acoust. Soc. Am.* 100(5), pp.3165-3171, November, 1996.
- [4] S.L. Marple, Jr. *Digital Spectral Analysis with applications*, Prentice Hall, 1987.
- [5] Steven M. Kay, *Modern Spectral Estimation: Theory and Application*, Prentice Hall, 1988