

64채널 심장전기도 시스템 구현에 관한 연구

장병철* · 김남현** · 정성현** · 라상원** · 김성순*** · 조범구*

=Abstract=

64 channels computerized cardiac mapping system

Byung Chul Chang*, Nam Hyun Kim**, Sung Hun Jung**, Sang Weon Ra**
Sung Soon Kim***, Bum Koo Cho*

It is well known that multipoint and computerized intraoperative mapping systems improve the results of surgery for Wolff-Parkinson-White syndrome and show tremendous potential for opening an entirely new era of surgical intervention for the more common and lethal types of supraventricular tachyarrhythmias such as atrial flutter and atrial fibrillation. In addition, the ability to map and ablate the sometimes fleeting automatic atrial tachycardia is greatly enhanced by computerized mapping systems.

In this study, we have developed 64 channel computerized data analysis system using microcomputer (Macintosh IIx) for basic research of electrophysiology and electrical propagation. The bipolar electrogram information is acquired from 64 cardiac sites simultaneously at a sampling rate of 1 ksamples/sec with continuous and total data storage of up to 30 seconds. When the reference electrogram is selected and reference point is picked up, delay time from the reference point is displayed on two dimensional diagram of the heart. System design permits easy expansion to almost 256 simultaneous sites. This system is expected to enable us to study pathophysiology of cardiac arrhythmia and to improve the result of diagnosis and surgical treatment for cardiac arrhythmia.

Key words: 심장부정맥, 심장전기도, 다중형판전극, Wolff-Parkinson-White(WPW)증후군, 64채널

서 론

심장부정맥의 기전을 연구하기 위하여 20세기 초부터 동물심장에서의 전기생리에 대하여 연구가 되어왔다. 1914년 Lewis 등은 심방에서의 전기전파를 연구하고자 동

물심장을 노출시키고 이 심장의 심외막에 몇 개의 전극을 부착하여 전기전파에 소요되는 시간을 측정함으로써 심방 조동(atrial flutter) 및 심방세동(atrial fibrillation)의 기전을 규명하고자 많은 노력을 하였다¹⁾. 그 후 여러 학자들이 심장에서의 전기전파를 연구하고, 심장부정맥의 기전을

* 연세대학교 의과대학 흉부외과학교실

** Department of Thoracic and Cardiovascular Surgery, Yonsei Cardiovascular Research Institute

*** 연세대학교 의과대학 의용공학교실

*** Department of Biomedical Engineering, Yonsei University College of Medicine

*** 연세대학교 의과대학 심장내과

*** Division of Cardiology, Yonsei University College of Medicine

이 연구는 연세대학교 91년도 정책과제지원 연구비에 의해 이루어졌음.

통신저자: 장병철, (120-752) 서울특별시 서대문구 신촌동 314, Tel. (02) 361-7284, Fax. 393-2041

연구하여 왔으나, 1970년대까지는 그 연구방법이 몇 개의 전극을 심장에 부착하거나, 한 개의 전극을 이곳 저곳으로 옮겨가면서 전기신호를 각각 받아 분석하여 각 조직으로 전기가 전파되는데 소요되는 시간을 측정하였기 때문에 불안정한 일과성 심장부정맥의 기전을 연구하는데는 충분치 못하였다^{2,3)}.

1970년대에 들어와 컴퓨터 산업의 발달과 함께 심장전기도 검사에도 컴퓨터가 이용되기 시작하였다. 1978년 Boineau 등은 FM tape 기록장치에 전기신호를 기록하고 이 신호를 컴퓨터를 이용하여 분석하므로써 동방결절에서 발생하는 전기는 다중심성(multicentric)인 것으로 보고하여 주목을 받았다⁴⁾. 그 후 Allessie, Witkowski 등과 Kramer 등도 미니 컴퓨터를 이용한 심장전기도 시스템을 개발하여 심장의 전기전파 경로를 정확하게 알 수 있도록 하였고, 여러가지 심장부정맥의 자세한 기전을 연구하고 이에 대한 치료를 모색하며, 외과적 치료의 결과를 향상시켜왔다⁵⁻⁷⁾.

특히 최근에는 다중형판전극(multiple electrode template)이 개발되어 이것을 심장에 부착시켜 전기신호를 분석함으로써 아직 잘 알려져 있지 않은 심장부정맥의 기전을 연구하고, 원인되는 우회로(bypass tract)나 이소성 병소(ectopic focus)를 외과적으로 절제하고 있다^{8,9)}.

이와 같이 심장부정맥의 기전 연구 및 Wolff-Parkinson-White 증후군의 환자에게서 나타나는 방실 회귀성 빈맥을 수술할 경우에는 짧은 시간(최소 1m/sec)내에 일어나는 심장전기전파 신호를 심장의 각 부위로부터 획득하여 종합적으로 분석하는 시스템이 필수적이다.

본 연구에서는 퍼스널 컴퓨터를 이용하여 64채널의 전기신호를 동시에 받아 분석하고 나타내는 심장전기도 시스템을 개발하고 이를 실제로 심장 수술시에 적용하므로써, 심장의 전기전파경로 및 심장부정맥의 원인이 되는 우회로(bypass tract)나 이소성 병소(ectopic focus)의 정확한 위치에 대한 정보를 알 수 있을 뿐만 아니라, 수술시 분석되는 시간도 감소되도록 하였다.

심장전기도(cardiac activation map)

심장전기도는 심장의 전기적 전달 신호를 전극(electrode)을 통해 받아 돌리고 이를 처리하여 시간 지연(time delay)이 같은 위치를 연결하여 나타내므로써 심장의 전기생리적 활동을 입체적으로 알기 쉽게 인식하도록 하는 시스템을 말한다. 이는 신호를 받는 방법에 따라 몸의 겉표면에 전극을 부착하여 처리하는 BSPM (Body Surface Po-

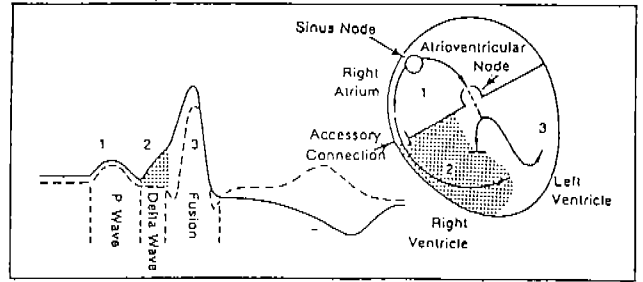


그림 1. WPW증후군의 sinus rhythm시 심전도 및 심장 전기 전파 경로

tential Mapping)과 수술시에 심장 표면에서 직접 신호를 받아들여 처리하는 EM (Epicardial Mapping)으로 나눌 수 있는데 본 연구에서는 64개의 양극성(bipolar) 전극을 심장표면에 직접 부착하여 신호를 받아 저장하였다.

심장의 전기전파(electrical propagation)에 대한 심장전기도는 WPW(Wolff-Parkinson-White) 증후군에 따른 방실회귀성(atrio ventricular reentry)에 의한 상심실성 빈맥(supraventricular tachycardia) 환자를 외과적으로 수술할 때 중요한 정보를 준다. 즉 심장의 일정 부위에 기준이 되는 전기적 자극을 줄 때 이 신호가 심장 각 부위에 전파되는 시간을 계산하여 나타냄으로써 비정상적으로 전파 시간이 빠른 우회로(bypass tract)의 위치를 알게 되는 것이다. 그림 1은 WPW증후군에 따른 심전도 및 우회로의 경로를 나타내고 있으며 본 연구에서는 심실측에 전극들을 부착, 신호 도달 시간을 측정하고 심장전기도를 구성하여 수술시 제거해야 할 우회로의 위치를 입체적으로 정확하게 파악하는 것을 목표로 하고 있다.

시스템 구성

64채널 심장전기도 시스템은 심장의 표면으로부터 전기신호를 얻는 다중 채널전극(스타킹 전극)으로부터 신호를 받아 이를 전처리하여 컴퓨터에 입력하는 신호입력단 및 심장전기도를 나타내는 소프트웨어 부분으로 구성하였으며, 마이크로 컴퓨터로는 그래픽 기능이 뛰어난 매킨토시를 택하였다(Macintosh IIx).

1. 다중채널 전극

스타킹 전극(Stocking 또는 Sock electrode) : 스타킹 전극은 주로 심실외막전기도를 위하여 사용되며 본 연구에서는 직접 제작하여 사용하였다. 이것은 사쓰단추 모양의

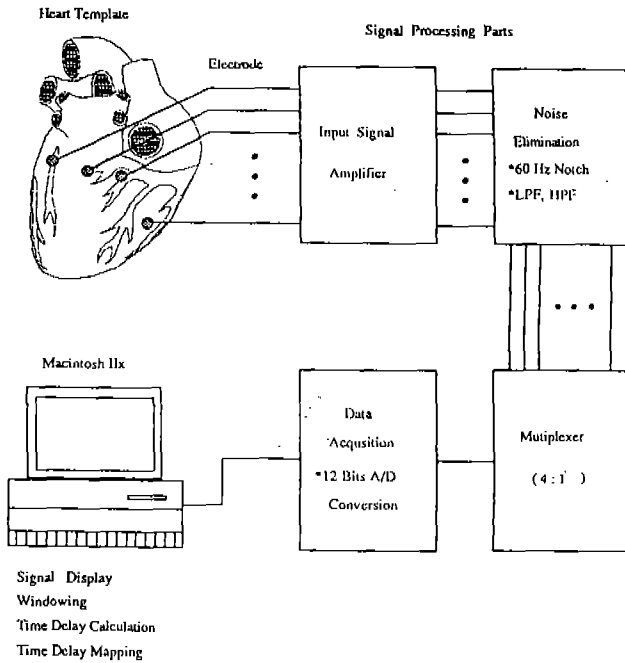


그림 2. 64채널 심장 전기도 시스템 구성도

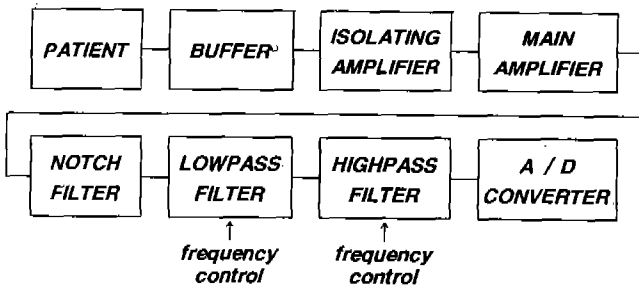


그림 3. 64채널 신호 입력단의 전처리 과정별 구성도

테플론(teflon)단추에 약 1.5mm간격으로 구슬 모양의 은(silver)을 부착하고 테플론(teflon)이 코팅된 전선에 부착하여 이것을 그물모양의 신축성이 있는 스타킹에 일정한 간격으로 부착하였다. 다른 한쪽 끝은 25핀의 컴퓨터 커넥터에 연결하여 신호입력단으로 연결하였다.

2. 신호 입력단

전극을 통해 들어오는 심장 전기전파신호는 수 mV에서 수십 mV로서, 전처리 과정을 통해 일정 범위 이상으로 증폭되고, 전선에 야기되는 잡음 및 전원 잡음에 대한 영향을 제거하게 된다. 전처리 과정을 거친 신호를 멀티플렉싱

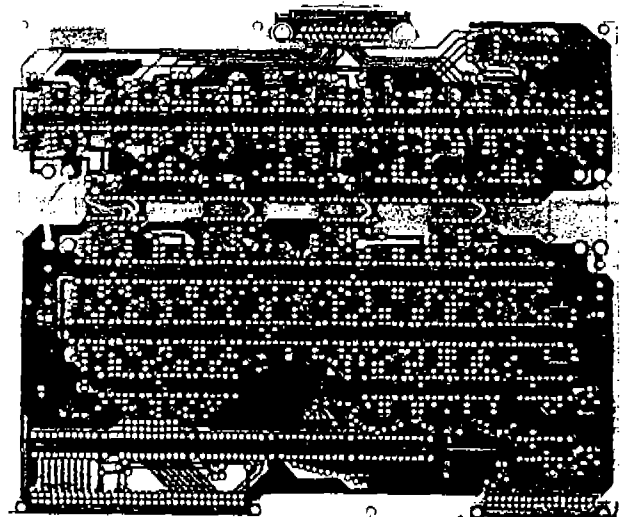
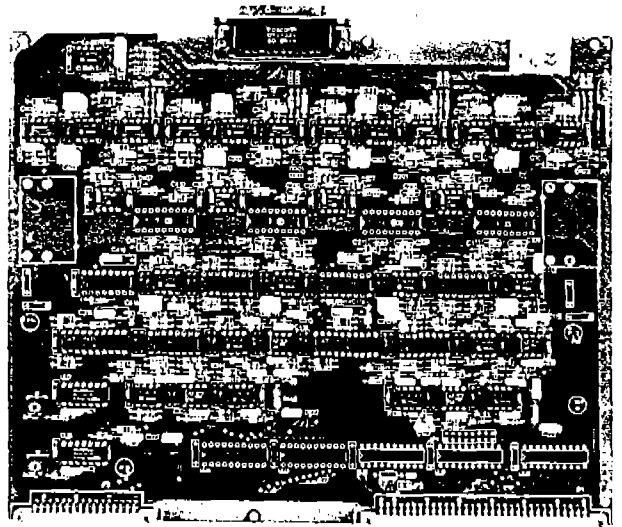


사진 1. 4채널 보드(PCB board)의 전면과 후면

(multiplexing)한 후 1KHz로 샘플링(sampling)을 하여 컴퓨터에 입력하였다. 제작된 신호 입력단의 전처리 과정별 구성도는 그림 3과 같다.

먼저 피검자로부터, 전극형판을 통해 심장 전파 신호 및 reference로 사용될 심전도 신호가 들어오면 1차로 차동증폭(differential amplifying)을 하게 된다.

이때 피검자의 심장을 전기 쇼크로부터 보호하기 위해 신호 추출 부분과 처리 부분을 분리하는 isolation부분을 두는데 변압기로 구성하였다. 1차 증폭된 신호를 다시 주 증폭단에서 수 Volts 크기의 신호로 증폭시켰다.

증폭된 신호는 60 Hz notch filter를 통해 전력선의 간섭

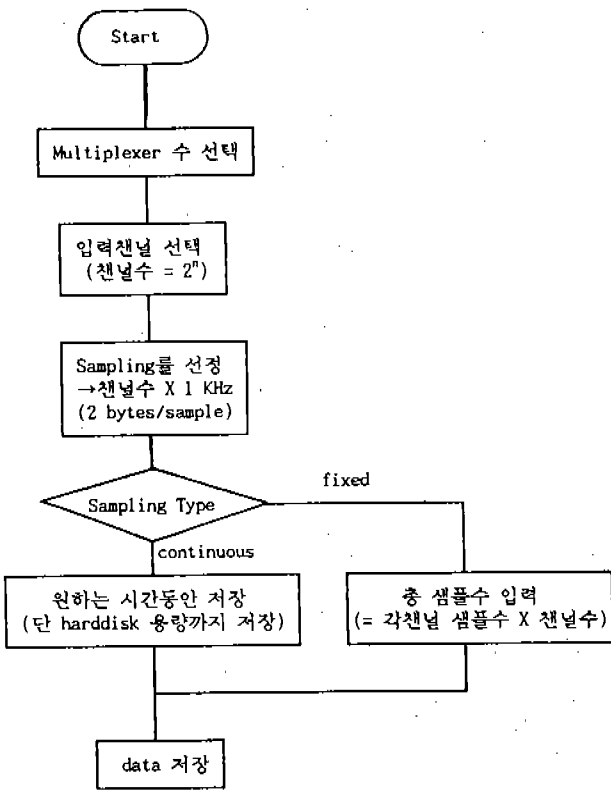


그림 4. 신호입력 제어용 소프트웨어의 순서도

이 제거된다. 이어서 심장 전파 신호를 추출할 때 혼입되는 고주파 성분 제거 및 A/D 변환을 위한 대역 제한 필터는 SCF(Switched Capacitor Filter)로 구성하였으며 컴퓨터의 제어신호에 의하여 Cutoff Frequency를 300, 600, 2400, 4800 Hz 중에서 선택할 수 있도록 하였다. 또한 DC 성분 및 혼입되는 저주파 성분을 제거하기 위한 고역 통과 필터도 SCF로 구성하였으며 19, 38, 67.5, 150 Hz 중에서 선택할 수 있다. 마지막으로 이득 조절부(Gain Controller)에서 심장 전파 신호의 크기에 따라 0.5, 1, 2, 4 배로 증폭도를 조절할 수 있도록 설계하였다. 이와 같은 전처리 과정을 거친 64채널의 신호는 4:1 멀티플렉싱을 한 후 입력 레벨 +5V인 12비트 A/D변환기에서 채널당 1KHz로 샘플링하여 매킨토시에 입력시켰다. 이에 대해 제작된 PCB는 사진 1과 같다.

3. 소프트웨어

본 시스템의 소프트웨어는 신호 입력 제어, 입력 데이터 디스플레이, 분석 구간 선택, 전파 시간 지연 계산 및 심장 전기도 작성 등으로 구성하였다(그림 4, 5).

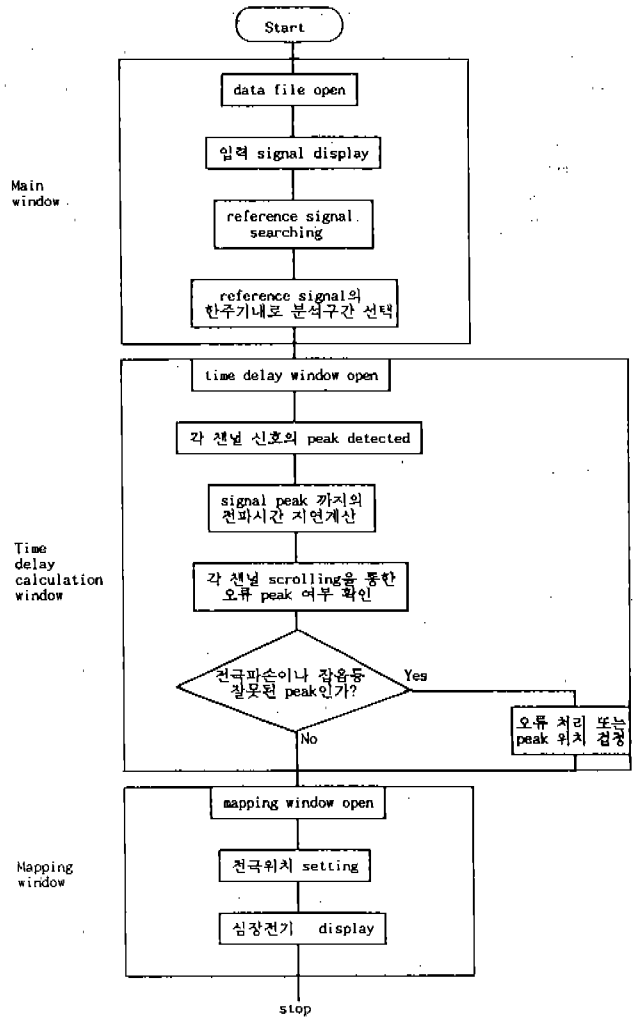


그림 5. 신호처리용 소프트웨어의 순서도

1) 신호 입력제어

전처리 과정을 거친 64채널의 신호의 멀티플렉싱과 샘플링을 제어, 최종 이득 조절 및 입력 데이터량을 조절하여 하드디스크에 저장하는 기능을 한다.

2) 입력 데이터 디스플레이

저장된 64채널 신호들 중에서 분석이 필요한 구간을 찾기 위해 기준이 되는 신호, 즉 심전도 신호 및 atrial reference 신호, ventricular reference 신호 등을 화면에 나타낸다.

3) 심장전파 지연시간 계산

계산기준 신호의 검색을 통해 분석이 필요한 구간이 정해지면 그 구간에 해당하는 64채널 신호를 디스플레이하고 기준점으로부터 펄스가 나오는 곳까지의 지연시간을 계산하여 그 위치를 표시했다. 이때 육안으로 확인하여 잡

음에 의해 잘못된 신호이거나 위치를 변경해야 하는 경우에는 제거 또는 정정 가능하도록 하였다.

4) 심장전기도 작성

위와 같이 하여 최종적으로 얻은 시간 지연을 심장 도식에 색조를 이용하여 나타냄으로써 우회로의 위치를 시각적으로 쉽게 알 수 있도록 했다.

여기서 전기전파의 지연시간을 도식으로 나타내주는 맵핑을 위한 보간(interpolation)은 Distance-weighted least-square approximation 방법을 사용하였다(보충설명 참조)¹⁴⁾.

그리고 컴퓨터에서 구현하기 위한 행렬계산에는 LU-Decomposition 방법을 이용하였다¹⁵⁾.

또, 모든 값에 대하여 이와 같은 방법을 쓰면 계산량이 많아서 처리속도가 느려지게 되므로 한칸씩 뛰어넘어 보간한 후에 계산되지 않은 위치에서는 주위의 값을 평균한 값으로 정해 주어 처리속도를 개선하였다.

임상 실험 및 결과 고찰

본 연구에서 제작된 64채널 심장 전기도 시스템을 이용해 심장 부정맥으로 외과적 요법이 필요한 환자나, 심방중격결손증 등 심근수축력이 정상으로 심외막전기도 검사로 환자 회복에 지장이 없는 환자를 대상으로 임상에 적용하였다. 임상 실험 결과와 과정은 다음과 같다. 먼저 수술전 환자에게 연구에 대한 동의를 받은 다음 전신 마취를 하였다. 개흉하여 심장을 노출시킨 다음 스타킹 심외막 전극을 심실에 덮어 싸우고 전극들의 위치를 확인한 다음 동성 울동시의 심외막 전기도 검사를 하여 정상에서의 심실 외막 전기도를 작성하였다. 심외막 전기신호가 입력되면 스타킹 전극의 기준이 되는 전극들과 심장의 관상동맥 해부학적 구조와 대조하여 이차원 심외막도식에 표시된 전극 위치가 일치하도록 하며 부정맥 환자의 경우 외과적 절제술에 필요한 부정맥의 원인을 조사한다. 헤파린(3mg/kg)을 정맥에 투여한 다음 대동맥관을 상행대동맥의 원위부에 삽관하고, 상공정맥과 하공정맥에 직접 정맥관을 삽관하여 완전체외순환을 시작한다.

PES(Programmed electrical stimulation)로 심방조동을 유발시켜 유발되는 환자를 대상으로 우심방 및 우측 심방 중격의 심내막 전기도 검사를 했다. 즉 우심방이(right atrial appendage)에 약 3cm의 우심방 절개를 한 다음 이곳을 통하여 미리 준비한 심내막 형판전극(64채널)을 삽입하였다. 형판전극이 해부학적 구조와 잘 일치되도록 한 다음 PES을 이용하여 심장을 자극하여 심방조동을 유발하면서 심장 전기도를 검사하였다.

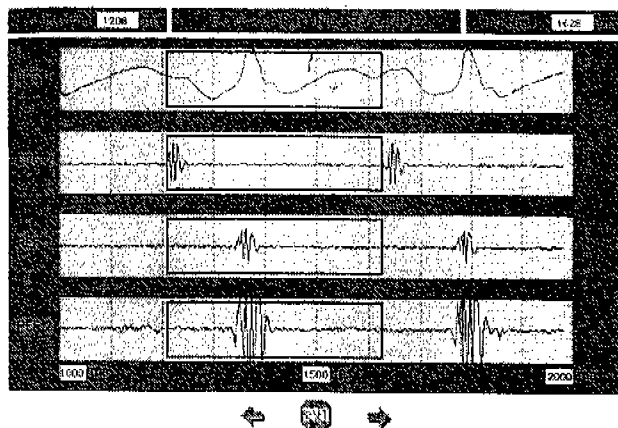


그림 6. 분석구간을 정하는 주화면

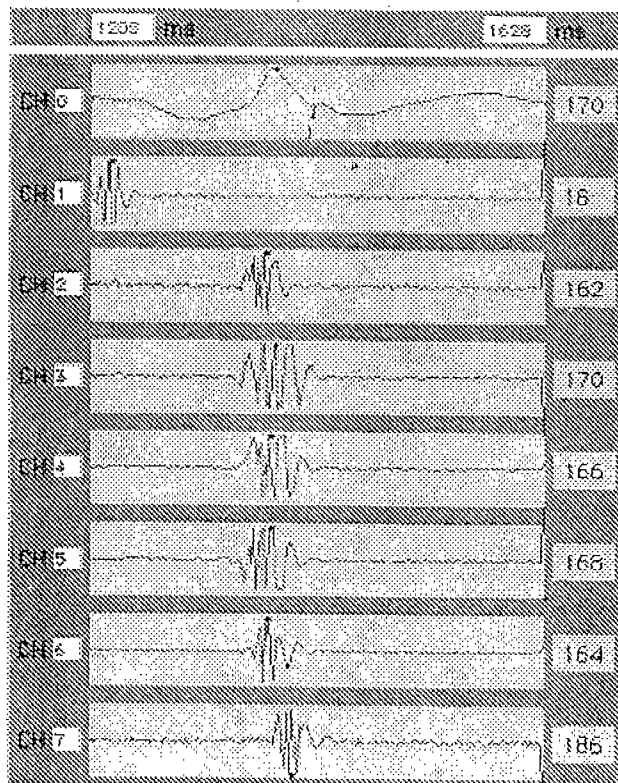


그림 7. 분석구간 내 각 채널별 심장전기전파 시간지연 계산

그림 6은 분석 구간을 찾기 위한 기준 신호를 나타낸 주화면으로서 심전도 신호 및 atrial reference 또는 ventricle reference신호를 통해 분석구간을 정하는 과정을 보여준다. 그림 7은 정해진 분석 구간내 모든 채널의 신호파형을 나타낸 화면으로서 기준점으로부터 각 전극에 도달된 심

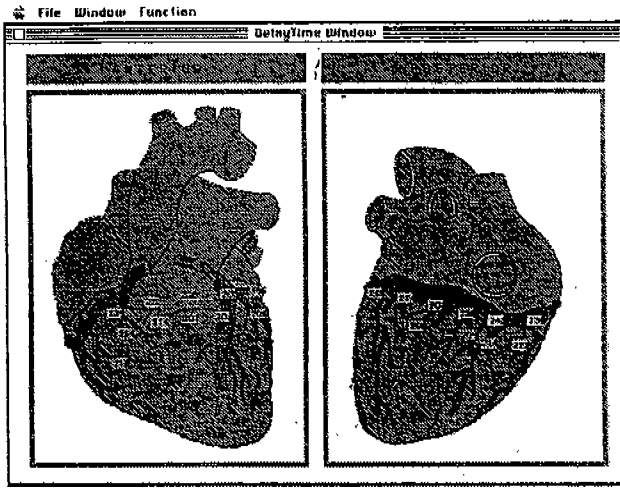


그림 8. 심장 전기도

장전과시간 지연값을 계산하여 표시하며, 도달시간 위치에 “*” 표시를 함으로써 혹시 잘못 계산된 지연값인지를 알 수 있도록 하였다. 그림 8은 계산된 심장전과시간 지연값을 심장 도식 위에 전극 위치에 맞게 나타낸 심장 전기도 (coclor epicardial map)이다. 임상실험에서는 WPW증후군의 환자를 대상으로 실험하지 못하여 그림에서는 우회로가 나타나지 않고 있다.

결 론

본 연구에서는 심장 기전 연구 및 심장 수술시 부정맥의 원인이 되는 우회로의 위치를 찾는 데 필요한 64채널 심장 전기도 시스템을 구현하였으며, 임상에 적용하여 sinus thym 시에 발생하는 전기 신호가 각 부위에 도달하는 시간을 계산하고 이를 심장전기도로 구성함으로써 수술 부위를 단시간내에 정확하게 알 수 있도록 하였다.

제작된 시스템을 통해 얻은 결론은 다음과 같다. 첫째, 심장 전기전파 및 심장 부정맥의 자세하고 정확한 전기적 활동 상태를 연구할 수 있다. 둘째, 심장 부정맥의 외과적 치료시 부정맥의 원인이 되는 이소성 병소나 회귀성 우회로에 대한 정확한 위치를 단시간내에 찾아냄으로써 치료 성공률을 높이고 환자의 수술시 수반되는 위험들을 감소 시킨다. 셋째, 카테타 삽입에 의한 심장활동 전위를 조사할 수 있게 된다. 넷째, 본 연구에서는 WPW증후군의 진단 및 치료를 기준으로 연구가 시행되었지만 심장의 전기생리 연구이외에도 다중 채널의 신호분석을 요구하는 중추

신경 전달 체계의 연구 및 말초신경 등의 전기생리를 연구하는데에도 적용될 수 있을 것이다. 또한 막대한 비용이 요구되는 외국장비를 국산화함으로써 수입대체효과를 거둘 수 있으며 지속적인 기술축적을 통하여 향후 128채널, 256채널 등으로 발전시켜 나갈 수 있게 되었다.

보충 설명

Distance-weighted least-square approximation (거리가중 최소자승법)

각각 값을 가지고 있는 n개의 데이터 점이 있다고 할 때 임의의 점 (a, b)에서의 값을 추정하기 위해

$$P(x, y) = c_{00} + c_{10}x + c_{01}y + c_{20}x^2 + c_{11}xy + c_{02}y^2$$

와 같은 일반적인 2차 다항식을 만들고, 이를 풀면 된다. 일반적인 최소자승법과 이 방법의 차이점은 가까운 데이터 점에 보다 더 많은 가중치를 준다는 것이다. 다시 말하자면, 다음과 같은 2차식

$$Q = \sum_{i=1}^n (P(x_i, y_i) - z_i)^2 \cdot w((x_i - a)^2 + y_i - b)^2$$

을 최소로 하는 계수 Crs들을

$$\frac{\partial Q}{\partial Crs} = 0$$

으로 하여 구한다.

그런 후, 이 계수들을 위의 식에 다시 대입하게 되면 임의의 점에서의 값을 알 수 있게 된다.

여기서 w는 weight function,

$$\text{즉 } w(d^2) = 1/d^2 \text{ 이다.}$$

참고 문헌

1. Lewis T, Meakins J, White PD: *The Excitatory Process in the dog's Heart*. Philosophical Transactions Royal Society of London 205: 375-420, 1914.
2. Puech P, Esclavissat M, Pallares DS, Cisneros F: *Normal auricular activation in the dog's heart*. Am Heart J 4:174-191, 1953.
3. Goodman D, Van Der Steen ABM, Van Dam RT: *Endocardial and epicardial activation pathways of the canine right atrium*. Am J. Physiol, 220:1-11, 1971.
4. Boineau JP, Schuessler RB, Mooney CR, Wylds AC, Miller

- CB, Hudson RD, Borremans JM, Brockus CW: *Multicentric Origin of the Atrial Depolarization Wave the Pacemaker Complex Relation to Dynamics of atrial conduction P-Wave changes and heart rate control.* Circulation 58:1036-1048, 1978.
5. Allesie MA, Lammers WJEP, Bonke IM, Hollen J: *Intra-atrial reentry as a mechanism for atrial flutter induced by acetylcholine and rapid pacing in the dog.* Circulation 70:123-135, 1984.
6. Witkowski JB, Corr PB: *An automated simultaneous transmural cardiac mapping system.* Am J Physiol 247:H661-668, 1984.
7. Kramer JB, Corr PB, Cox JL, Witkowski FX, Cain ME: *Simultaneous computer mapping to facilitate intraoperative localization of accessory pathways in patients with Wolff-Parkinson-White Syndrome.* Am J Cardiol 56:571-576, 1985.
8. Cox JL: *The status of surgery for cardiac arrhythmias.* Circulation 71:413-417, 1985.
9. Cox JL: *Intraoperative computerized mapping techniques do they treat our patients better surgically?* in Brugada P, Wellens HJJ, eds. Cardiac arrhythmias: where to go from here: New York: Futura, 1987:613-37.
10. McLain D. H: *Drawing Contours from arbitrary data points.* The ComputerJournal 17(4):318-324, 1974.
11. Press W. H, Flannery B. P, Teukolsky S. A, Vetterling W. T: *Numerical Recipes in C,* Cambridge CALA, 28-45, 1990.