

신호 평균화 심전도(Signal-Averaged Electrocardiogram)의 이해와 임상적 이용

가톨릭대학교 의과대학 소아과학교실

이 순 주

Signal Averaged Electrocardiogram and Clinical Application

Soon Ju Lee, M.D.

Department of Pediatrics, College of Medicine, The Catholic University of Korea, Seoul, Korea

서 론

심전도란 심박동과 관련되어 나타나는 전위변화를 심전계(electrocardiograph)에 의해 그림으로 기록하는 것으로, 비관혈적 검사이며 간단하고, 재현성 있게 기록되며, 반복하여 기록할 수 있고, 검사비용도 비싸지 않아 심장검사 중 가장 널리 이용된다. 그러나 일반적으로 널리 사용되는 심전도기계는 고주파를 가지며 낮은 진폭을 갖는 파형을 검사 할 수 없는 단점이 있다.

Signal-averaged ECG(SAECG)는 각각의 심박동에서 오는 전기적 신호들을 열을 맞춰 기록한 다음 여러 개의 심박동에서 오는 전기적 신호들을 합한 후 평균을 내어 심전도 검사에 필요치 않은 잡음들은 진폭을 감소시키고, 분석에 필요한 신호들만 증폭시킨 후 QRS파나 P파의 분석에 맞는 부분만 선택하여 적절한 여과방법을 이용하여 고주파, 저 진폭대의 신호부분을 심전도기로 기록하는 방법을 일컫는다. 이러한 심전도를 얻을 수 있게 된 것은 레이더와 통신기술에 널리 이용되는 복잡한 기술들, 즉 signal averaging, filtering, fast Fourier transform 등이 심전도 분석에 이용되면서 가능하게 되었다¹⁾. 신호 평균화 심전도 검사는 QRS파의 후전압(late potential)을 기록하는 것과 고주파 저 진폭의 부분까지 포함하는 P파 신호평균화 심전도의 크게 두 가지 검사방법으로 나눌 수 있다.

작은 신호(small signals)를 분석할 때의 문제점들과 해결방법

심전도 신호들을 마이크로 볼트(microvolts) 수준에서 기록하고 분석하는 것은 보통 사용하는 일반적인 심전도 기계에 비해서 신호들을 100배 이상 증폭하면서 원하는 부위만 기록해야 하기 때문에 용이한 일이 아니다. 이런 수준에서 정확히 기록하기 위해서는 근육의 움직임, 증폭기, 기구에서 발생하는 잡음들과 전력주파수(power frequency)와 그것의 고조파(harmonics), 조직-전극 접점 등이 전기적인 심장 사이클(cycle)을 기록하는데 방해할 수 있다. 특히 후전압(late potential)의 작은 신호들은 소음과 크면서 작은 주파수를 갖는 신호들(예, ST분절)에 의해서 주로 영향을 받는다. 조직-전극도자 접점에서 야기되는 방해요인은 피부를 가는 사포(sand paper)로 문지른 후 알코올로 닦고 silver-silver chloride 전극도자를 이용함으로써 최소화할 수 있다. 또한 전력이 들어오는 케이블을 감싸주고 비틀어 줌으로써 전력주파수에서 야기되는 소음을 감소시키며, 근육에서 발생하는 소음들은 근육이완제를 사용하거나 spatial averaging technique을 사용함으로써 감소시킬 수가 있다.

Signal averaging

Signal averaging의 목적은 심전도의 신호들을 오염시키는 소음들을 감소시키는 데 목적이 있다. Sig-

nal averaging은 spatial averaging과 ensemble averaging의 두 방법이 있는데 각각 장단점을 갖고 있다. 각각은 소음이 일정한 패턴이 없이 서로 간섭한다는 가정 하에 작동한다. 동일 사건을 기록하는 신호들이 동시에 첨가될 때 간섭성의 신호들(coherent signal)은 강화되는 반면에 소음들은 스스로 제거되게 된다. 이 때 얻어지는 소음의 감소는 평균화되는 입력 파형 숫자의 제곱근에 비례하게 된다. 중요한 사항은 소음을 최소화하면서 원하는 부위만 증폭하기 위해서는 상당한 다수의 신호 입력이 필요하다는 것이다.

Spatial averaging

Spatial averaging을 할 때는 다수의 전극들이 하나의 심전도 군(complex)위에서 평균화되는 것이다. Spatial averaging의 장점은 단일 심박동에서 신호 평균화 심전도를 구할 수 있다는 것이며, 따라서 일시적인 이벤트나 복잡한 형태의 부정맥의 심박동마다의 분석에 용이하다. Spatial averaging에서는 필요한 만큼의 신호 입력을 얻기 위해선 4-16개의 전극들이 필요하며 이들이 평균화되어서 소음을 감소시키게 된다²⁾.

Ensemble averaging(signal averaging)

Signal averaging을 위해서는 많은 신호입력이 필요한데 표준적인 양극성(bipolar) X, Y, Z 전극들로 심전도 사이클을 연속적으로 측정하여 평균화하는 것이 필요하다. 평균화가 많은 수의 심박동에 걸쳐서 이루어지는데, 이렇게 함으로써 소음이 10승에 비례해서 감소하게 된다. Signal averaging은 컴퓨터 작업으로 각각의 전극에서 얻은 신호입력을 증폭시킨 다음 여기에서 얻은 전압을 측정된 후 디지털 숫자로 변환시킨다. 이렇게 함으로써 아날로그 입력을 파형에서 일련의 디지털 숫자로 변환하게 되며 적어도 100개 이상의 QRS군에 걸쳐서 이러한 과정이 이루어지게 된다. 이들 디지털화된 QRS군들이 원형 심전도(template)와 비교된 후 이것과 동떨어진 이소성 심박동이나 소음이 심한 박동들은 제거되는 채로 평균화 된다. 이렇게 함으로써 신호 평균화된(signal averaged) 데이터는 시간 도메인(domain)이나 주파수 도메인으로 제시되고 분석될 수 있게 된다.

신호 활성화 심전도의 시간 도메인 분석

시간 도메인 분석은 high-pass filtering으로도 알려져 있으며 심전도들을 시간 개념의 바탕 위에서 분석한다. 각각의 전극에서 나오는 신호들을 평균화하고 여과를 한 후 여러 개를 합하여 복합적인 신호 활성화 심전도가 형성된다. 여과라는 것은 작은 진폭을 갖고 고주파를 갖는 후전압을 모호하게 할 수 있는 큰 진폭의 작은 주파수를 갖는 요소들을 제거시키는 것이다. 여과의 방법에는 다음과 같은 두가지 방법이 있다.

1. High-pass filters

고주파를 강조하면서 저 주파수대를 약화시키는 방법

2. Band-pass filters

중등도와 고주파수대를 강조하면서 저주파수대와 아주 높은 고주파수대를 약화시키는 여과 방법

High-pass filter는 25-40 Hz 미만의 저주파수들을 제거하는 반면에 band-pass filter는 25-40 Hz 미만과 250 Hz 이상의 주파수들을 제거한다³⁾. 각각의 X, Y, Z 축들의 값이 평균화된 후 벡터 방법으로 합쳐져 복합적인 신호 평균화 심전도가 형성되며 또한 각각의 여과된 X, Y, Z 축 값들도 구할 수가 있다.

시간 도메인 신호 활성화 심전도의 해석

후전압을 나타내기 위해서는 매우 gain을 높여야 하기 때문에 신호 활성화 심전도군의 주요 부분이 수직축안에서 나타낼 수 있는 범위를 초과하게 되며 이 부분은 잘려나가게 된다. 신호 평균화 심전도에서 연구대상이 되는 주요 부분은 다음과 같다(Fig. 1).

1. 여과된 QRS군의 기간(Duration of QRS complex, QRSD)

QRS군이 후전압에 의해서 얼마나 지연되는지를 나타낸다.

2. 후전압의 에너지 양(Root mean square voltage of terminal 40 ms of QRS complex, RMS40)

QRS군의 최종 40 ms안에서의 root mean square voltage에 의해서 표현된다.

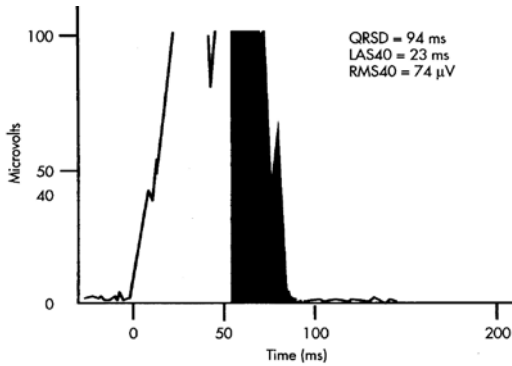


Fig. 1. Signal-averaged ECG depicting a normal subject. QRSD, duration of the high frequency QRS complex; LAS40, duration of low-amplitude signals less than 40 μV ; RMS40, the root mean square voltage of the last 40 ms of the complex(shaded area).

3. 후전압의 기간(Duration of the low amplitude signals less than 40 μV , LAS40)

QRS군 끝 부위의 전압이 40 μV 이하인 부위의 기간

LAS40의 기간은 y축에서 40 μV 를 자르는 선에서부터 여과된 QRS군의 마지막까지의 기간을 말하는 것으로, 만일 심근경색을 앓은 후 심실빈맥이 나타난 환자에서 신호 평균화 심전도 검사를 하면 상당수에서 비정상적인 후전압을 보이는 것을 관찰할 수 있다(Fig. 2). Fig. 2에서 보면 서서히 사라지는 작은 진폭을 가진 후전압에 의해서 QRSD가 증가하고 LAS40 또한 증가하며, 반면에 RMS40의 크기가 정상에 비해 현저하게 작은 것을 알 수 있다.

임상적 적응

QRS군 뒤에 나타나는 고주파를 가지면서 낮은 진폭을 보이는 부분을 후전압(late potential)이라 하는데 이것은 섬유화된 반흔조직과 정상 조직 사이의 경계부분에 있는 심근층에서 발생한다. Simson⁴⁾이 심근경색 후 심실빈맥이 병발한 환자들에서 신호 평균화 심전도의 QRS군의 끝 부위에서 후전압이 존재함을 처음으로 밝혔으며, 이 후전압은 지연 심근 활성화(delayed cardiac activation)와 시간적으로 동일하게 출현하며 재입성 심실빈맥의 기질(substrate)의 존재를 암시한다는 보고들이 있다⁵⁻⁸⁾. 또한 QRS군의 후전압은 심장전기생리 검사에서 전기적으로 유도가 가능

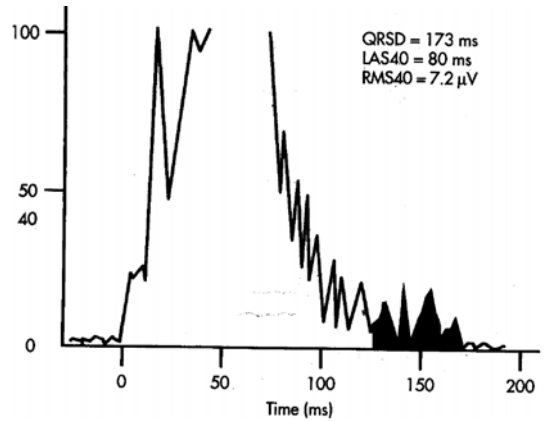


Fig. 2. Signal-averaged ECG depicting late potentials. The late potentials cause the QRSD to be lengthened, with a substantial portion of the increase caused by the slowly decaying low-level signals in LAS40. QRSD, Duration of the high-frequency QRS complex; LAS40, duration of low-amplitude signals less than 40 μV ; RMS 40, the root square voltage of the last 40 ms of the complex(shaded area).

한 심실빈맥의 발생을 미리 예측할 수 있는 지표가 되기도 한다⁹⁻¹¹⁾.

신호 평균화 심전도는 다음의 두 경우에 지속적인 심실성부정맥의 발생위험도를 측정하는데 도움이 된다.

첫째: 정상 동율동 리듬을 갖으면서 각별록이나 심실내 전도지연의 심전도 리듬이 아닌 심근경색을 앓고 난 후의 환자.

둘째: 심허혈성 심질환이 있으면서 원인을 모르는 실신 환자

이 외에 비허혈성 심근증 환자와 심실빈맥의 수술 후 수술성공 여부의 검사에도 이용될 수 있다.

P파 신호 평균화 심전도(P-wave SAECG)

심전도의 P파를 표면 심전도로부터 정확하게 측정하려면 심실의 QRS파의 후전압을 측정할 때와 같은 signal-averaging technique이 필요하다. Signal averaging시는 X, Y, Z의 각각의 축의 전극에서 얻은 값을 증폭하고 디지털화한 다음 기본 P파를 설정하고, 설정된 기본 P파에 맞추어서 정렬시킨 후 High-pass filter로 여과한다. 그 이후에는 vector magnitude로 조합시킨 후 연구에 필요한 파라미터들을 얻는다. P-파 신호 활성화 심전도 검사에서 얻을 수 있는 파라미터들로는 filtered P-wave duration,

root-mean square(RMS) voltage of the terminal 40 msec(RMS40), 30 msec(RMS30), 20 msec(RMS20), P integral 등이 있다(Fig. 3).

심방세동은 다수의 회귀 회로가 작동하여 발생하며 이 회귀 회로가 시작되고 계속되기 위해서는 심방 내에 전도가 서서히 진행되는 부위가 필요하다¹²⁻¹⁴. P-파 신호 평균화 심전도는 심질환이 있는 환자의 수술 후에 심방세동의 발생 위험도를 미리 예측 할 수 있는 검사방법으로 알려져 있다¹⁵. 예를 들면 Stafford 등¹⁶이 한 연구에 의하면 심방세동이 있었던 환자들에서 P파의 기간이 그렇지 않았던 사람들에 비해서 현저히 증가되어 있음을 밝히며, P-파 신호 평균화 심전도 검사가 발작적 심방세동의 위험성을 예측할 수 있는 검사로 이용될 수 있다 하였다. 소아 연령에서는 발작적인 심방세동이 흔하지 않으나 선천성 심질환의 수술 후에는 심방세동의 기전과 비슷한 기전으로 발생하는 심방조동은 비교적 흔하게 관찰할 수 있으며, 특히 머스타드나 폰탄씨 수술 후에 흔히 발생

하는데¹⁷ 수술 후 나타나는 심방조동은 수술 후의 급사의 중요한 원인이 된다. 그러나 선천성 심질환의 수술 특히 머스타드나 폰탄씨 수술 후에 미리 심방조동의 발생을 예측할 수 있는 뚜렷한 검사나 지표가 아직은 없는 실정이다. 따라서 저자들은 복잡 심기형으로 머스타드나 폰탄씨 수술을 받은 환자들에서 심방조동이 나타났던 환아들과 그렇지 않았던 군에서 P파 신호 평균화 심전도 검사를 시행하여 차이가 있는지를 조사하였다. 26명의 환아들을 대상으로 Signal-averaged high resolution P-wave 분석이 가능한 Marquette 심전도기(GE medical system Co., Milwaukee, WI, USA)로 P-파 신호 활성화 심전도 검사를 하였는데 26명 중 7명이 심방조동을 보였던 환자군이었다. 검사는 소음이 없는 조용한 독립된 검사실에서 환자에게 X, Y, Z 축의 심전도가 검사될 수 있도록 16개의 전극도자를 부착한 후 소음 수준이 0.6 μ V가 될 때까지 검사를 하였으며 평균 소요시간은 20분 미만이었다. 검사결과는 심방조동이 있었던 환자

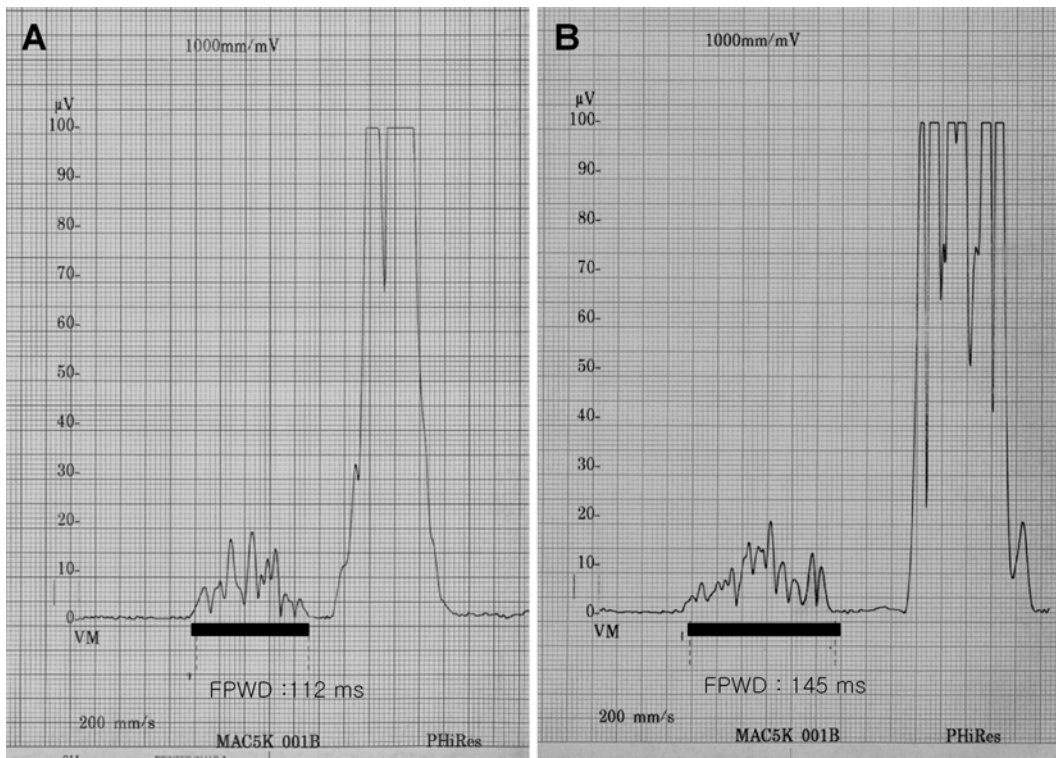


Fig. 3. Examples of signal-averaged P wave. **(A)** P wave signal averaged electrocardiogram from a control subject. **(B)** Recording from a postoperative Fontan patients with history of atrial flutter. The P wave in panel B has a much longer duration compared with that in panel A. FPWD: Filtered P wave duration.

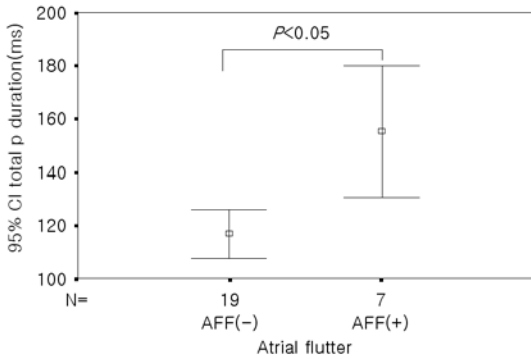


Fig. 4. Error plots with 95% confidence intervals of filtered P wave durations from study group patients with atrial flutter and patients without atrial flutter.

군에서 여과된 총 P파 기간이 유의하게 증가됨을 알 수 있었다($P < 0.05$, Fig. 4). 따라서 저자들은 P-파 신호 평균화 심전도 검사가 선천성 심질환의 수술 특히 머스타드나 폰탄씨 수술 후의 심방조동 등의 심방 부정맥의 발생을 미리 예측할 수 있는 예민한 검사방법으로 사용될 수 있음을 확인할 수 있었다.

다시 한번 P파 신호 평균화 심전도의 임상에서의 응용 영역을 살펴보면, 발작적 심방세동의 발생위험성 분석¹⁶⁾, 심장수술 후의 심방세동 위험성 분석¹⁵⁾ 발작적 심방세동의 만성형으로의 이행 위험성¹⁸⁾, 심방세동의 치료효과 예견 등에 사용될 수 있으며 관상동맥 우회로 수술 후의 심방세동의 발생 위험성 검사에도 이용될 수 있다¹⁹⁾.

결 론

레이다나 통신 기술에 이용되는 원리들을 심전도 분석에 응용하여 전에는 소음이나 기계음 등에 의하여 분석이 되지 않았던 고주파, 저진폭을 갖는 신호 부분들의 분석이 신호 평균화 심전도에 의해 가능하게 되었다. 따라서 이들 신호 평균화 심전도를 사용하여 심근경색 후 심실빈맥이 있는 환자들에서 흔히 나타나는 후전압을 기록함으로써, 심근경색 후 심실빈맥이나 급사의 위험성이 있는 환자군을 미리 예측하여, 사전에 적절한 치료를 하여 사망률을 감소시키는 데 이바지 할 수 있다.

심실세동은 소아 연령에서도 심장수술 후에 드물지 않게 볼 수 있는 예후에 중대한 영향을 미치는 부정맥이다. P-파 신호 평균화 심전도를 이용하여 일반

심전도로는 기록이 되지 않는 고주파, 저진폭 범위까지 포함하는 총 P파의 기간의 분석이 가능하게 되어, 심장수술 후 심방세동을 포함한 심방부정맥의 발생 위험도를 비관혈적이며, 재현성 있는 비교적 간단한 방법으로 가능하게 되었다. 근래에는 선천성 복잡 심질환의 수술 방법이 개선되어 수술 후 생존율이 상당히 높아졌으나, 수술 후 발생하는 부정맥이 예후에 중요한 영향을 끼치는 요인이 되고 있다. 따라서 국내에서도 머스타드나 폰탄씨 등의 수술 후 P-파 신호 평균화 검사를 시행하여, 심장수술 후에 오는 심방세동이나 심방조동 등의 심방부정맥의 발생 위험성을 조기에 파악하여 후기 사망률을 감소시킬 수 있기를 기대한다.

참 고 문 헌

- 1) Conover EL. Signal-averaged ECG. In : Marriot HJL, Conover MB, editors. Advanced concepts in arrhythmias. 3rd ed. St. Lois : Mosby Co, 1998: 367-78.
- 2) Flowers NC, Shvartsman V, Kennelly BM, et al. Surface recording of His-Purkinje activity on an every-beat basis without digital averaging. Circulation 1981;63:948-952.
- 3) Breithardt G, Cain ME, El-Sherif N, Flowers NC, Hombach V, Janse M, Simson MB, Steinbeck G. Standards for analysis of ventricular late potentials using high-resolution or signal averaged electrocardiography : a statement from a task force committee of the European Society of Cardiology, the American Heart Association, and the American College of Cardiology. J Am Coll Cardiol 1991;17:999-1006.
- 4) Simson MB. Use of signals in terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction. Circulation 1982;64:235-42.
- 5) Breithardt G, Borggreffe M, Karbenn QU, Abendroth RR, Yeh H-L, Seipel L. Prevalence of late potentials in patients with and without ventricular tachycardia : correlation with angiographic findings. Am J Cardiol 1982;49:1932-7.
- 6) Kanovsky MS, Falcone LA, Dresden CA, Josephson ME, Simson MB. Identification of patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction : signal-averaged electrocardiogram, Holter monitoring, and cardiac catheterization. Circulation 1984;70:264-70.

- 7) Kuchar DL, Thorburn CW, Sammel NL. Prediction of serious arrhythmic events after myocardial infarction: signal-averaged electrocardiogram, Holter monitoring and radionuclide ventriculography. *J Am Coll Cardiol* 1987;9:531-8.
- 8) Steinberg JS, Regan A, Sciacca RR, Bigger JT Jr, Feiss JL. Predicting arrhythmic events after myocardial infarction using the signal-averaged electrocardiogram. *Am J Cardiol* 1992;69:13-21.
- 9) Freedman RA, Gills AM, Keren A, Soderholm-Difatte V, Mason JW. Signal-averaged electrocardiographic late potentials in patients with ventricular fibrillation or ventricular tachycardia: correlation with clinical arrhythmia and electrophysiologic study. *Am J Cardiol* 1985;55:1350-3.
- 10) Lindsay BD, Ambos HD, Schechtman KB, Cain ME. Improved selection of patients for programmed ventricular stimulation by frequency analysis of signal-averaged electrocardiograms. *Circulation* 1986;73:675-83.
- 11) Nalos P, Gang E, Mandel W, Lass Y, Peter T. The signal-averaged electrocardiograms as a screening test for inducibility of sustained ventricular tachycardia in high risk patients: a prospective study. *J Am Coll Cardiol* 1987;9:539-48.
- 12) Wit AL, Canfield PF. Reentrant excitation as a cause of cardiac arrhythmias. *Am J Physiol* 1978;235:112-7.
- 13) Moe GK. Evidence of reentry as mechanism for cardiac arrhythmias. *Rev Physiol Biochem Pharmacol* 1975;32:56-66.
- 14) Allesie MA, Lammers WJ, Bonke FI, Hollen J. Experimental evaluation of Moe's multiple wavelet hypothesis of atrial fibrillation. In: Zipes D. *Cardiac electrophysiology and arrhythmias*. New York: Grune Stratton, 1985:265-75.
- 15) Steinberg JS, Zelenkofske S, Wong SC, Gelernt M, Sciacca R, Menchavez E, et al. The Value of the P-wave signal-averaged ECG for predicting atrial fibrillation after cardiac surgery. *Circulation* 1993;88:2618-22.
- 16) Stafford PJ, Turner I, Vincent R. Quantitative analysis of signal-averaged P waves in idiopathic atrial fibrillation. *Am J Cardiol* 1991;68:751-5.
- 17) Gelatt M, Hamilton RM, McCrindle BW, Connely M, Davis A, Harris L, Gow RM, Williams WG, Trusler GA, Freedom RM. Arrhythmia and mortality after the Mustard procedure: a 30-year single-center experience. *J Am Coll Cardiol* 1997; 29:194-201.
- 18) Abe Y, Fukunami M, Yamada T, Ohmori M, Shimonagata T, Kumagai K, Kim J, Sanada S, Hori M, Hoki N. Prediction of transition to chronic atrial fibrillation in patients with paroxysmal atrial fibrillation by signal-averaged electrocardiography: a prospective study. *Circulation* 1997;96:2612-6.
- 19) Stafford PJ, Kolvekar S, Cooper J, Fothergill J, Schlindwein F, deBono DP, Spyt TJ, Garratt CJ. Signal averaged P wave compared with standard electrocardiography or echocardiography for prediction of atrial fibrillation after coronary bypass grafting. *Heart* 1997;77:417-22.