

소아에서 연령에 따른 Signal Averaged ECG의 Time Domain 변수들에 대한 연구

울산대학교 서울중앙병원 소아과학교실
박성종 · 고재곤

= Abstract =

Age-related variations in time domain variables of signal averaged electrocardiography in children

Sung Jong Park, M.D. and Jae Kon Ko, M.D.

Department of Pediatrics, College of Medicine, University of Ulsan

Signal averaged electrocardiography (SAECG) is a computerized processing technique that greatly enhances the resolution of the surface electrogram so that low amplitude cardiac potentials can be recorded from body surface.

Ventricular late potential is low amplitude high frequency signal located at the end of the QRS complex and can be detected on the surface using SAECG.

The purpose of this study is to examine age-related differences of SAECG parameters in children. SAECGs were obtained in 59 children with normal hearts on physical examinations, 12-lead ECGs, and chest roentgenograms. They were divided into 4 groups depending on age (group 1: 1day to < 1year; group 2: 1year to < 6years; group 3: 6years to < 10years; group 4: 10years to < 15years). The root mean square voltage (RMS), the filtered QRS duration and the duration of the low amplitude signal (LAS) were measured using 40 Hz filters.

The results showed that filtered QRS duration correlated with original QRS duration and was lowest in infancy and increased thereafter with age. RMS inversely correlated with filtered QRS duration and was higher in infancy compared with older age group ($p < 0.05$). RMS was not significantly different in group 2 and 3, but RMS of group 4 was significantly lower compared with younger group ($p < 0.01$). The age related normative data of RMS could not be determined due to wide variation of raw data. LAS showed increasing tendency with age but was not statistically significant between groups.

The age-related difference of each parameter on SAECG should be considered for ventricular late potentials and normative data for all variables of SAECG should be determined in larger number of children.

Key words : signal averaged electrocardiography, children

I. 서 론

Signal averaged electrocardiography(SAECG)는 컴퓨터를 이용하여 심전도의 정보를 처리함으로써 해상도를 향상시켜 일반 심전도로는 기록할 수 없는 전위 크기가 작은 전기 신호(low amplitude potential)까지 체표면에서 기록할 수 있도록 하는 기술이다. 이는 처음 방실전도에 대한 평가를 위하여 His-Purkinje potential을 기록하려고 고안되었으나^{1,2)} 현재는 심실성 빈맥의 발생 가능성을 가진 환자를 미리 식별하기 위해서 ventricular late potential 유무를 확인하는데 많은 연구가 이루어 지고 있다.

Ventricular late potential은 QRS complex 뒤에 나타나게 되는, 전위는 낮고 주파수는 높은 전기신호로서 이는 직접 심장 표면에서 심전도를 기록한 동물실험을 통하여 처음 그 존재를 알게 되었고, 심장내 허혈성 부위에서의 국소적인 전기적 활성이 QRS complex 이후에도 지속됨으로써 나타나게 된다는 것이 알려지게 되었다^{3,4,5)}. Berbari등⁶⁾은 SAECG를 이용하여 QRS complex 이후에 나타나는, 동물모델에서 심장 표면에서의 심전도 기록에서 보였던 허혈성 부위에서의 지연된 전기적 활성에 해당되는 낮은 전위의 심장내 전기 신호, 즉 late potential을 최초로 체표면에서 기록하였고 Simson등⁷⁾이 변수들을 정량화함으로써 임상적인 적용이 시도되었다.

Late potential에서 나타나는 지연되고 분절화된 전기파(fragmented electrogram)는 심근 손상후 생긴 섬유조직에 의하여 심근다발이 분리되고 무질서해짐으로써 이 부위에서 활동전위가 지연되고 불균일해져 나타나게 되는 것으로 회귀성 빈맥 발생의 가능성을 시사해 줄 뿐만 아니라 심근 손상이 있다는 간접적인 증거가 되고 있다⁸⁾. 따라서 심근 손상의 여부를 알아 낼 수 있는 한 척도로써 이용될 수 있어서 확장형 심근증에서 심근 손상의 정도나⁹⁾ 심장 이식후 거부반응의 여부를 알아내는데 유용하다

는 보고들이 있고^{10,11)} 또한 심근 손상 부위는 심실성 빈맥의 원인점이 될 수도 있어 심근경색이나 심근증이 있는 환자에서 악성 심실성 빈맥이나 돌연사의 가능성을 예측할 수도 있음이 보고되고 있다^{7,12-15)}. 실제로 많은 연구자들에 의하여 late potential은 지속적인 심실성 빈맥이나 심실세동의 병력을 가진 환자의 60 내지 70%에서 기록되는 것으로 알려져 있다.

Late potential은 보통 $10\mu V$ 이하의 낮은 전위로 병원내 여러 전력 공급원, 전극과 피부사이의 간극, 근육에서 발생하는 potential 등으로 인한 noise와 구별이 안되므로 일반 심전도로는 구분하여 기록할 수 없다. SAECG는 cardiac signal에 비하여 이러한 noise의 무질서성을 이용하여 cardiac signal 대 noise의 비를 향상시키고 late potential이 noise에 비해서 높은 주파수를 가지므로 적절한 band pass filtering을 통해서 기록하게 된다. 그 방법으로 반복되는 QRS파를 계속적으로 받아들여 이들의 analog 신호를 digital 신호로 전환시킨후 이들을 합하고 평균하는 방식을 통하여 noise를 감소시키고 high-pass filter를 통해서 낮은 주파수의 noise를 걸러내어 low amplitude, high frequency signal인 ventricular late potential을 기록할 수 있다. Simson등은 bipolar orthogonal X,Y,Z 유도로 심전도를 기록하여 QRS end points, amplitudes, durations, background noise level 등을 나타내는데 있어서 computer algorithm을 기초로 시간 영역(time domain)에서의 양적인 접근을 소개하여서 현재는 이러한 분석 방법이 널리 사용되고 있다⁷⁾. 즉 걸러진 X,Y,Z 유도의 심전도를 computer algorithm을 이용하여 처리하여 filtered QRS를 그려내고 여기서 filtered QRS의 시간, 마지막 40 milliseconds(ms)동안의 전위(root-mean-square voltage: RMS-40), filtered QRS의 끝에 40 μV 이하의 전위가 지속되는 시간(low amplitude signal: LAS)을 측정하여 late potential 유무를 판정하

는데 사용하고 있다. 그러나 이러한 변수들은 기록하는 유도의 위치, 사용하는 filter의 특성, band pass의 정도등 여러 요인들에 의해 영향을 받는다¹⁶⁻¹⁹.

따라서 late potential 유무를 판정하는 기준을 정하는 것이 쉽지 않으며 이러한 영향을 주는 요인들을 고려한 정상치의 기준이 각각 필요할 가능성도 있으므로 변수들의 수치를 비교할 때는 이러한 요인들에 대해서 명기하고 또 확인할 필요가 있다. 이외에도 filtered QRS에서 구해지는 변수들은 심장의 질량, 심장 내에서의 전도 시간 등에 의해서도 영향을 받을 수 있기 때문에 소아에서는 연령에 따라서 변수들의 수치에 변화가 있을 것으로 짐작할 수 있다^{20, 21}.

최근에는 소아에서도 심근증, 수술 전후의 선천성 심질환 환아들에서 late potential의 기록의 유용성에 대한 보고들이 나오고 있다^{22, 23}. 그러나 성인에서의 ventricular late potential의 기준치들을 기초로 하고 있어서 소아들에서도 적용될 수 있을지는 의문이며, 소아에서의 기준치에 대한 보고가 거의 없는 상태에 대한 연구가 필요한 실정이라 하겠다. 이에 저자들은 우선 정상 소아에서 SAECG 기록을 하여 시간영역에서의 변수들이 나이에 따라서 어떤 변화를 보이는지 알아보고 나아가서 late potential 유무를 판단할 수 있는 소아에서의 기준치를 추정해 보고자 하였다.

II. 연구 대상 및 방법

1. 대상

1994년 6월부터 1996년 10월까지 서울중앙병원의 소아과 외래를 방문하거나 입원한 소아중에서 이학적 검사, 흉부 X-선 사진, 12 유도 심전도등에서 이상이 없이 정상심장을 가졌다고 판단된 환아 59명을 대상으로 하였다. 이들중 남자는 각각 30명, 29명이었고 나이는 생후 1일에서 14.9세 까지였다. 이들을 연령에 따라 4개의 군(1군: 15명, 생후 1일부터 1세미만; 2군: 18명, 1세부터 6세미만; 3군: 13명, 6세부터 10세미만; 4군: 13명, 10세부터 15세미만)으로 나누어 각군별로 시간영역의 SAECG의 변수들을 비교 분석하였다.

2. 방법

SAECG 기록은 MAC^R AU(Marquette electronics)를 사용하였고, Frank X,Y,Z 유도로부터 기록하였다. 협조가 안되는 소아들은 chloral hydrate를 사용하여 재웠다. X 유도는 양 겨드랑이 중양선에서 4번째 늑간에 전극을 부착하였고 Y 유도는 manubrium 상부와 좌측 iliac crest에, Z 유도는 흉부 유도 V₂ 위치와 정반대의 등쪽 척추에 전극을 부착하였다. 전극은 silver chloride 전극을 사용하였고 저항을 최대한 줄이기 위해 피부를 알콜솜으로 닦고 부착할 때도 접촉이 잘 되도록 주의하였다. 40 Hz의 bandpass filter로 filtering하였고, QRS는 최소한 200박동이상 채취하도록 하였다. 잘 알려진 방식대로 computer processing을 통하여 filtered QRS complex를 만들고 time domain 분석으로 duration of the filtered QRS complex(f-QRS), the duration of low amplitude signals below 40 μ V in the terminal part of the QRS complex(LAS), the root mean square voltage of the last 40 ms of the QRS complex(RMS40)을 측정하였으며 filtered QRS complex는 측정된 noise 기준치의 각각 2배와 3배가 되는 점을 시작과 끝점으로 하여 변수들의 값들이 측정되었다(Fig. 1). noise level이 0.7 μ V 이상일 때는 수치

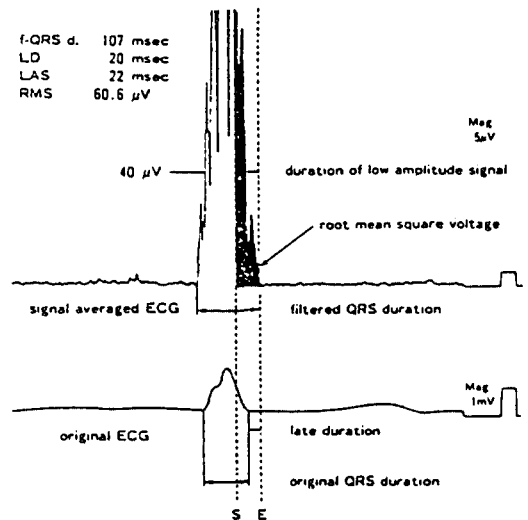


Fig. 1. Measurement of each SA-ECG parameter. The signal-averaged filtered ECG (SA-ECG) is shown at the top and the nonfiltered original QRS on the bottom.

들을 분석에서 제외시켰다. 모든 환아에서 일반 12 유도 심전도를 같이 기록하였다.

각 변수들은 연령군별로 mean \pm standard deviation으로 표시하였고 각 군들의 비교에는 Student's t-test를 이용하였다.

III. 결 과

1. 12 유도 심전도

모든 대상 소아의 12 유도 심전도상에서 각차단이나 심실내 전도지연의 소견은 보이지 않았다. QRS 시간은 연령이 증가함에 따라서 길어지는 경향을 보였다.

2. Signal averaged electrocardiograms

62명의 대상 소아중에서 noise level이 $0.7\mu V$ 이상

이었던 3명을 제외하고 59명의 SAEKG 변수들을 분석하였다.

filtered QRS duration은 1세 이하군에서 90 ± 6 ms로 가장 짧았고 이후 연령이 증가함에 따라서 12 유도 심전도상에서의 QRS 시간과 마찬가지로 점차 길어지는 양상을 나타냈다(Table 1, Fig. 2).

RMS는 1세 이하의 연령군에서 $147 \pm 26\mu V$ 로 가장 높은 수치를 보이고 이후에는 연령이 증가함에 따라서 점차 감소하는 것을 알 수 있었다. 1세 이하의 연령군과 그 이상의 연령군과는 감소되는 정도가 통계적으로 의미가 있었으나($p < 0.05$), 1세부터 10세 미만사이에서는 통계적인 의미가 없이 비슷한 정도의 수치를 보였다. 그러나 10세 이상군에서는 그 이하 연령군에 비해서 통계적으로 의미가 있게 낮은 값을 나타내었다($p < 0.01$)(Table 1, Fig. 3).

Table 1. SAEKG values for each age group

Group No.	Age (yr)	No of Subjects	Mean age (yr)	std QRS (ms)	Signal-averaged ECG		
					f-QRS (ms)	RMS (μV)	LAS (ms)
1	<1	15	0.12	54 ± 7 (44-72)	90 ± 6 (81-104)	147 ± 26 (100-178)	20 ± 3 (12-24)
2	>1-<6	18	3.6	72 ± 8 (57-86)	99 ± 6 (84-111)	91 ± 38 (42-168)	19 ± 5 (13-29)
3	>6-<10	13	7.7	76 ± 5 (69-84)	106 ± 7 (97-119)	73 ± 32 (30-122)	24 ± 5 (17-33)
4	>10-<15	13	12.7	83 ± 6 (72-94)	109 ± 9 (100-135)	40 ± 10 (24-54)	26 ± 7 (15-37)

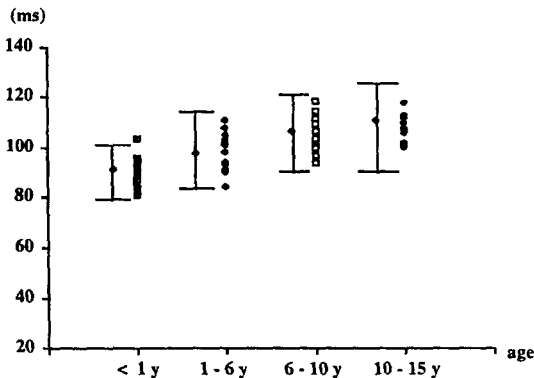


Fig. 2. Filtered QRS values in each group

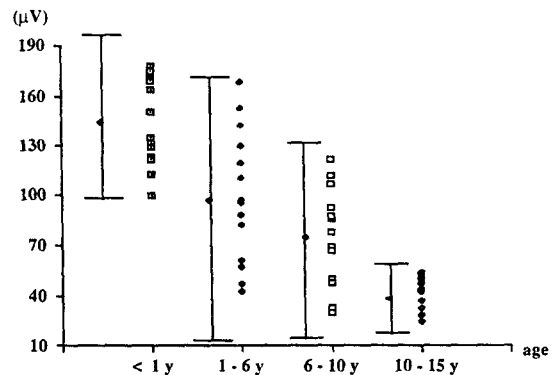


Fig. 3. RMS values in each group

LAS는 1세이하의 연령군과 1세에서 6세사이의 연령군 사이에는 비슷한 수치를 보였고 이후 연령에 따라 증가되는 경향을 보였다(Table 1, Fig. 4).

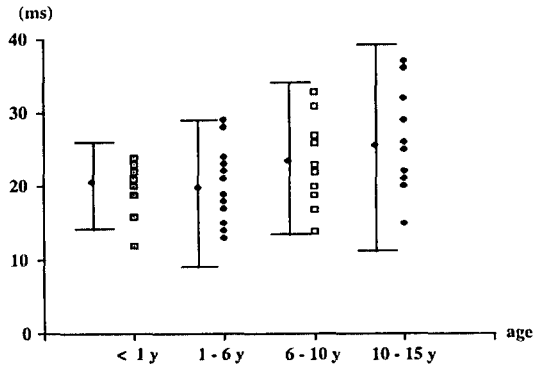


Fig. 4. LAS values in each group

3. 각 변수들의 상관관계

filtered QRS duration은 12 유도 QRS 시간과 비례적인 상관 관계를 보였고 RMS와 filtered QRS duration은 서로 역상관 관계를 나타내었다(Fig. 5, 6).

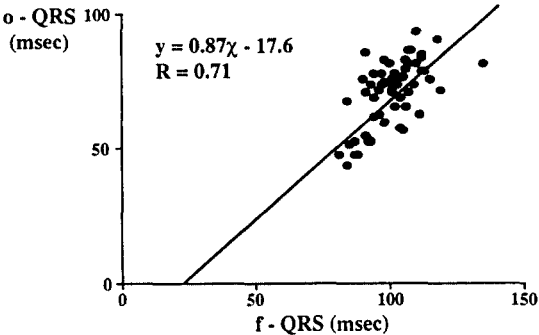


Fig. 5. Correlation between original QRS duration and filtered QRS duration

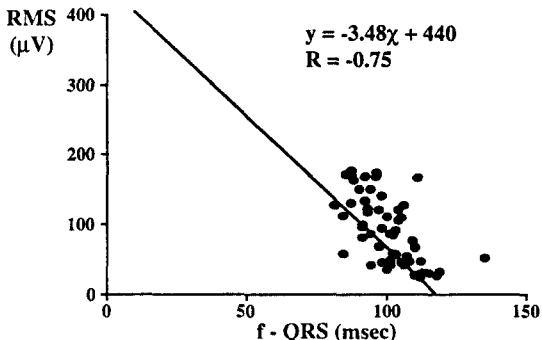


Fig. 6. Correlation between RMS and filtered QRS duration

IV. 고 찰

Ventricular late potential은 심근 손상이 있을 때 섬유조직이 정상 심근조직과 섞이게 되어 심근의 전기적 활성이 불균일해지고 전기 전도도 일정치 않게 되어 국소적으로 지연되고 분절화(fragmented)된 electrogram으로 나타나게 된다. 이러한 분절화된 electrogram은 QRS complex 뒤에 나타나며 전위가 낮고 주파수는 높은 전기신호이다. Late potential의 전위는 $10\mu V$ 이하로 일반 심전도에서 나타나는 noise의 $8-10\mu V$ 와 유사하여 일반 심전도 기록방식으로는 구분하여 기록할 수 없어서 낮은 주파수를 가지면서 불규칙적으로 나타나는 noise와 비교적 규칙성을 가지면서 높은 주파수인 late potential을 구분하여 기록하기 위하여 지난 15년동안 signal 대 noise 비를 개선시키려는 기술이 개발되어 최근 들어서는 computer processing을 통한 signal averaging technique을 이용하여 이를 체표면에서도 비교적 쉽게 비관혈적으로 기록할 수 있게 되었다.

Late potential의 존재는 국소적으로 전기적 활성이 지연되고 전도 지연이 있음을 확인시킴으로써 회귀 회로(reentry circuit)를 형성하여 회귀성 빈맥이 일어날 수 있음을 시사하고 있다. 따라서 late potential의 기록은 지금까지 주로 성인 심근경색 환자에서 향후 심실성 빈맥으로 인한 급사의 가능성을 예측하는데 주로 초점을 맞추어 많은 연구들이 있어 왔으나²⁴⁻³⁰⁾ 점차 그 적용이 넓어져 가고 있는 추세이다. 허혈성 심질환 뿐아니라 좌심실 비대^{20), 31), 32)} arrhythmogenic right ventricular dysplasia³³⁾, 특발성 심실 빈맥³⁴⁾, Duchenne-type muscular dystrophy³⁵⁾, myotonic muscular dystrophy³⁶⁾, systemic sclerosis³⁷⁾, mitral valve prolapse³⁸⁾, mitoxantane cardiotoxicity³⁹⁾, human immunodeficiency virus infection⁴⁰⁾, 선천성 심질환 특히 tetralogy of Fallot의 수술후^{22), 23)}, 실신^{41), 42)}, 부정맥 수술의 성공 여부⁴³⁾, 항부정맥제의 효과 판정^{45), 46)}, 심장이식후 거부반응의 여부^{10), 11)} 등에서 SAEKG의 유용성에 대한 보고들이 점차 늘어 가고 있다. 소아에서도 SAEKG는 이제까지는 주로 개심술을 시행받은 환아에서 향후 심실성 빈맥 발생에 대한 가능성을 예측해 보려는

연구들이 있었으며 앞으로는 심근증, 특발성 심실 빈맥, 선천성 관상동맥 이상, 이식 심장의 거부반응, 실신, Kawasaki disease 등 부정맥과 심근 손상을 초래할 수 있는 상태에 대한 진단 및 예후의 지표로서 사용될 수 있으리라 예상된다.

Late potential을 찾아내는데 사용되는 시간영역에서의 변수들로는 각 유도의 averaged filtered signal을 vector magnitude(square root of $X^2+Y^2+Z^2$)로 표시한 것이 filtered QRS이고 late potential이 존재하면 filtered QRS의 끝부분에 나타나게 됨으로써 filtered QRS 시간이 길어지게 되며, late potential로 인하여 지연된 filtered QRS의 끝부분에 $40\mu V$ 이하의 전위가 나타나는 시간 즉 the duration of the low amplitude signal(LAS)이 길어지게 된다. 또한 filtered QRS 끝 40 ms동안의 전위를 root-mean square voltage(RMS)로 나타내어 끝부분의 전위의 크기를 정량화하여 분석하게 된다. 이러한 SAECG 변수들의 분석에는 noise를 적절히 감소시키는 것이 제일 중요한 문제이다. 심전도를 기록하는 유도의 위치, filter 방법의 종류, 그리고 band pass의 정도 등에 따라서 SAECG의 여러 변수들이 영향을 받게 되고 이러한 요소들이 달라지면 정상치에 대한 기준도 달라질 수 있음이 당연하다. 지금까지 주로 성인을 대상으로 이러한 요소들을 고려하여 여러 기준치들에 대한 연구들이 보고되어 있으나 소아에서의 연구는 미흡한 실정이다. 또한 QRS 시간은 심장의 질량이나 심장 내에서의 전도시간 등에 의해서 달라지므로 소아와 성인에서는 같은 기록 방법과 분석을 해도 정상치에 해당하는 변수들의 값에는 차이가 있을 수 있다.

실제 Hayabuchi 등의 보고⁴⁷⁾에 의하면 소아에서의 SAECG 변수들은 연령에 따라 차이를 보이고 있으며, 그는 그 원인으로 연령에 따른 심실 근육의 두께의 차이로 인한 전도시간에의 영향, 전도속도 및 전기전도의 불균일성에서의 차이 등으로 추정하고 있다. 본 연구의 결과도 filtered QRS와 LAS는 연령이 증가함에 따라서 연장되었고 RMS는 낮아지는 것을 볼 수 있었다. 그러나 본 연구에서의 RMS 측정치는 10세 이상군의 $40 \pm 10\mu V$ 에서 1세 이하군이 $147 \pm 26\mu V$ 로 Hayabuchi 등이 측정한 RMS 값인 각각 $49 \pm 13\mu V$ 및 $69 \pm 8\mu V$ 와는 차이를 보

였는데 이는 서로 다른 기종의 심전도를 사용하였고 연령군당 대상수가 서로 많지 않았기 때문이 아닌가 생각된다. Fallah-Najmabadi 등의 보고⁴⁸⁾는 본 연구에서와 유사한 기종으로 같은 방식으로 SAECG를 기록하였는데 본 연구에서와 같이 band filter로 40 Hz를 사용하였을 때의 RMS의 정상치로 6세 이상군에서 $23\mu V$ 이하, 1세에서 5세군에서는 $40\mu V$ 이하, 1세 미만군에서는 $125\mu V$ 이하를 제시하고 있다. 반면에 Hayabuchi 등의 보고에서는 1세 미만군에서는 $40\mu V$ 이하, 그리고 그이후 20세까지는 $20\mu V$ 이하를 정상치로 제시하고 있다. 그러나 Fallah-Najmabadi 등의 연구에서는 연령군에서의 측정치의 범위와 평균치 등을 제시하지 않아서 수치의 자세한 비교가 어려웠다. 이들은 나이가 어린 소아에서는 QRS 시간이 상대적으로 짧기 때문에 RMS 값이 성인에서의 기준인 40 ms를 사용할 때는 높아질 가능성이 있으므로 filtered QRS 끝부분의 기준시간을 성인의 40 ms에 비해서 영아에서는 30 ms, 6세 이하에서는 35 ms로 짧게 할 것을 주장하였다. 또한 자동적으로 컴퓨터가 측정된 filtered QRS의 end point에 잘못이 있을 때는 각 변수들의 측정치는 믿을 수가 없게 되므로 확인이 필요하다고 하였다. 특히 RMS치에 영향이 많아서 본 연구에서 RMS의 측정치들의 분포가 많이 벌어져 있는 것의 한 원인으로 이 점을 고려해야 할 것으로 생각되며 SAECG 기록시에 확인하여 교정한 값을 구해야 할 것으로 판단된다. 이처럼 소아에서 SAECG 변수들의 기준치에 대한 보고는 거의 없기도 하지만, 소아들에게 어떤 한 보고의 결과를 기준치로 또는 성인에서의 기준값을 그대로 적용할 수 있을지에 대해서는 부정적이다.

따라서 본 연구에서는 소아에서 SAECG의 변수들이 나이에 따라서 어떠한 변화를 보이는지 알아보고 나아가서 late potential 유무를 판단할 수 있는 기준치를 추정해 보고자 하였으나 변수들의 나이에 따른 변화 양상은 다른 보고들과 같은 결과를 얻었으나 측정된 수치의 분포가 넓어서 기준치는 설정할 수 없었다. 이는 우선 각 연령군의 대상수가 많지 않았고 SAECG를 분석하는데 컴퓨터 분석에만 의존하여 자동 분석에서 나올 수 있는 filtered QRS의 end point 설정의 잘못에 대한 검토가 불충분했기 때문이라고 생각된다.

따라서 최근 비관혈적으로 심장내의 지연되고 분절된 electrogram을 기록하여 심실 빈맥의 가능성을 예측할 수 있고 나아가서 심근 손상의 간접적인 증거를 보여주는 ventricular late potential의 유무를 확인할 수 있는 기준치를 확립하는데에는 더 많은 수를 대상으로 한 연구가 진행되어야 하며 filtered QRS의 end point 설정에 대한 직접적인 검토와 filtered QRS 끝부분의 기준 기간을 성인에 비해서 짧게 할 것인지등 기록하는 면에서도 더 세심한 고려가 필요하다 하겠다.

V. 결 론

SAECG 변수들의 값은 연령에 따라 차이를 보였으며, 이는 연령에 따른 심실근육 두께의 차이와 심실 전도시간의 차이로 인한 것으로 생각된다. 따라서 소아에서는 성인과는 달리 ventricular late potential의 기준값을 연령에 따라서 달리 사용하여야 하며 향후 많은 수의 소아를 대상으로 정상치를 구해야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. Berbari EJ, Lazzara R, Samet P, et al: Noninvasive technique for detection of electrical activity during the P-R segment. *Circulation* 1973;48:1005-1013
2. Flowers NC, Horan LG: His bundle and bundle-branch recordings from the body surface. *Circulation* 1973(abst);48:IV-102
3. Boineau JP, Cox JL: Slow ventricular activation in acute myocardial infarction: A source of re-entrant premature ventricular contractions. *Circulation* 1973;48:702-713
4. Waldo AL, Kaiser GA: A study of ventricular arrhythmias associated with acute myocardial infarction in the canine heart. *Circulation* 1973;47:1222-1228
5. El-Sherif N, Scherlag BJ, Lazzara P, et al: Re-entrant ventricular arrhythmias in the late myocardial infarction period: Conduction char-

- acteristics in the infarction zone. *Circulation* 1977;55:686-702
6. Berbari EJ, Scherlag BJ, Hope RR, et al: Recording from the body surface of arrhythmic ventricular activity during the ST segment. *Am J Cardiol* 1978;41:697-702
7. Simson MB: Use of signals in the terminal QRS complex to identify patients with ventricular tachycardia after myocardial infarction. *Circulation* 1981;64:235-242
8. Gardner PI, Ursell PC, Fenoglio JJ, et al: Electrophysiologic and anatomic basis for fractionated electrograms recorded from healed myocardial infarcts. *Circulation* 1985;72:596-611
9. Yamada T, Fukunami M, Ohmori M, et al: New approach to the estimation of the extent of myocardial fibrosis in patients with dilated cardiomyopathy: use of signal-averaged electrocardiography. *Am Heart J* 1993;126:626-631
10. Keren A, Gillis AM, Freedman RA, et al: Heart transplant rejection monitored by signal-averaged electrocardiography in patients receiving cyclosporine. *Circulation* 1984;70:1-124-129
11. Vlentino VA, Ventura HO, Abi-Samra FM, Van Meter C, Price HL: The signal-averaged electrocardiogram in cardiac transplantation. *Transplantation* 1992;53:124-127
12. Cain ME, Ambos HD, Markham J, Lindsay BD, Arthur RM: Diagnostic implications of spectral and temporal analysis of the entire cardiac cycle in patients with ventricular tachycardia. *Circulation* 1991;83:1637-1648
13. Freedman RA, Gillis AM, Keren A, Soderholm DV, 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;55:1350-1353

14. Pollak SJ, Kertes PJ, Bredlau CE, Walter PF: Influence of left ventricular function on signal averaged late potentials in patients with coronary artery disease with and without ventricular tachycardia. *Am Heart J* 1985;110:747-752
15. Rozanski JJ, Mortara D, Myerburg RJ, Castellanos A: Body surface detection of delayed depolarizations in patients with recurrent ventricular tachycardia and left ventricular aneurysm. *Circulation* 1981;63:1172-1178
16. Atwood JE, Myers JJ, Forbes S, et al: High-frequency electrocardiography: An evaluation of lead placement and measurements. *Am Heart J* 1988;116:733-739
17. Breithardt G, Cain ME, El-Sherif N, et al: Standard for analysis of ventricular late potentials using high-resolution or signal-averaged electrocardiography. *Circulation* 1991;83:1481-1488
18. Gomes JA, Winters SL, Stewart D, et al: Optimal bandpass filters for time domain analysis of the signal-averaged electrocardiogram. *Am J Cardiol* 1987;60:1290-1298
19. Caref EB, Turitto G, Ibramin BB, et al: Role of bandpass filters in optimizing the value of the signal-averaged electrocardiogram as a predictor of the results of programmed stimulation. *Am J Cardiol* 1989;64: 16-26
20. Raineri AA, Traina M, Lombardo RMR, Rotolo A: Relation between late potentials and electrocardiographically determined left ventricular mass in healthy subjects. *Am J Cardiol* 1991;67:425-427
21. Spach MS, Dolber PC: Relating extracellular potentials and their derivatives to anisotropic propagation at a microscopic level in human cardiac muscle: evidence for electrical coupling of side-to-side fiber connections with increasing age. *Circ Res* 1985;58:356-371
22. Stelling JA, Danford DA, Kugler JD, et al: Late potentials and inducible ventricular tachycardia in surgically repaired congenital heart disease. *Circulation* 1990;82:1690-1696
23. Zimmerman M, Friedli B, Adamec R, Oehansli I: Frequency of ventricular late potentials and fractionated right ventricular electrograms after operative repair of tetralogy of Fallot. *Am J Cardiol* 1987;59:448-453
24. Kuchar DL, Thorburn CW, Sammel NL: Late potentials detected after myocardial infarction: natural history and prognostic significance. *Circulation* 1986;74:1280-1289
25. Denniss AR, Richards DA, Cody DV, et al: Prognostic significance of ventricular tachycardia and fibrillation induced at programmed stimulation and delayed potentials detected on the signal-averaged electrocardiograms of survivors of acute myocardial infarction. *Circulation* 1986;74:731-745
26. Cripps T, Bennett D, Camm J, Ward D: Prospective evaluation of clinical assessment, exercise testing and signal-averaged electrocardiogram in predicting outcome after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1988;62:995-999
27. Breihardt G, Schwartzmaier J, Borggreffe M, Haerten K, Seipel L: Prognostic significance of late ventricular potentials after acute myocardial infarction. *Eur Heart J* 1983;4:487-495
28. Rodriguez LM, Krijne R, van den Dool A, et al: Time course and prognostic significance of serial signal-averaged electrocardiograms after a first acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1990;66:1199-1202
29. Steinberg JS, Regan A, Sciacca RR, Bigger JT Jr, Fleiss JL: Predicting arrhythmic events after acute myocardial infarction using the signal-averaged electrocardiogram. *Am J Cardiol* 1992;69:13-21
30. Pedretti R, Etro MD, Laporta A, Braga SS, Caru B: Prediction of late arrhythmic events after acute myocardial infarction from com-

- bined use of noninvasive prognostic variables and inducibility of sustained monomorphic ventricular tachycardia. *Am J Cardiol* 1993;71: 1131-1141
31. Vacek JL, Wilson DB, Botteron GW, Dobbins J: Techniques for the determination of the left ventricular mass by signal-averaged electrocardiography. *Am Heart J* 1990;120:958-963
 32. Pringle SD, Dunn FG, MacFarlane PW, et al: Significance of ventricular arrhythmias in systemic hypertension with left ventricular hypertrophy. *Am J Cardiol* 1992;69:913-917
 33. Blostrom-Lundqvist C, Hirsch I, Olsson SB, Edvardsson N: Quantitative analysis of the signal-averaged QRS in patients with arrhythmogenic right ventricular dysplasia. *Eur Heart J* 1988;9:301-312
 34. Kinoshita O, Kamakura S, Ohe T, et al: Spectral analysis of signal-averaged electrocardiograms in patients with idiopathic ventricular tachycardia of left ventricular origin: Circulation 1992;85:2054-2059
 35. Yotsukura M, Isizuka T, Shimada T, Ishikawa K; Late potentials in progressive muscular dystrophy of the Duchenne type. *Am Heart J* 1991;121:1137-1142
 36. Milner MR, Hawley RJ, Jachim M, Lindsay J Jr, Fletcher RD: Ventricular late potentials in myotonic dystrophy. *Ann Intern Med* 1991; 115:607-613.
 37. Moser DK, Stevenson WG, Woo MA, et al: Frequency of late potentials in systemic sclerosis. *Am J Cardiol* 1991;67:541-543
 38. Jabi H, Burger AJ, Orawiec B, Touchon RC: Late potentials in mitral valve prolapse. *Am Heart J* 1991;122:1340-1345
 39. de Leonardis V, Bartalucci S, Cinelli P, et al: Ventricular late potentials in the assessment of mitoxantrone cardiotoxicity. *Cardiology* 1991; 79:110-115
 40. Hsia J, Colan SD, Adams S, Ross AM: Late potentials and their relation to ventricular function in human immunodeficiency virus infection. *Am J Cardiol* 1991;68:1216-1220
 41. Gang ES, Peter T, Rosenthal ME, Mandel WJ, Lass Y: Detection of late potentials in surface electrocardiograms in unexplained syncope. *Am J Cardiol* 1986;58:1014-1020
 42. Kuchar DL, Thorburn CW, Sammel NL: Signal-averaged electrocardiogram for evaluation of recurrent syncope. *Am J Cardiol* 1986;58: 949-953
 43. Breithardt G, Seipel, Ostermyer J, et al: Effects of antiarrhythmic surgery on late ventricular potentials recorded by precordial signal averaging in patients with ventricular tachycardia. *Am Heart J* 1982;104:996-1003
 44. Dennis AR, Johnson DC, Richards DA, Ross DL, Uther JB: Effect of excision of ventricular myocardium on delayed potentials detected by the signal-averaged electrocardiogram in patients with ventricular tachycardia. *Am J Cardiol* 1987;59:591-595
 45. Dennis AR, Ross DL, Richards DA, et al: Effect of antiarrhythmic therapy on delayed potentials detected by the signal-averaged electrocardiogram in patients with ventricular tachycardia after acute myocardial infarction. *Am J Cardiol* 1986;58:261-265
 46. Hopson JR, Kienzle MG, Aschoff AM, Shirkey DR: Noninvasive prediction of efficacy of type IA antiarrhythmic drugs by the signal-averaged electrocardiogram in patients with coronary artery disease and sustained ventricular tachycardia. *Am J Cardiol* 1993;72:288-293
 47. Hayabuchi Y, Matsuoka S, Kubo M, Akita H, Kuroda Y: Age-related criteria for signal-averaged electrocardiographic late potentials in children. *Pediatr Cardiol* 1994;15:107-111
 48. Hessameddin FN, Nagib SD, Molly P, Sudhir KM: Normal values and methodologic reco-

Recommendations for signal-averaged electrocardiography in children and adolescents. Am J

Cardiol 1996;77:408-412