

논문 2012-49-9-38

도플러 초음파 신호에서의 태아 심박 검출 개선

(Improvement of Fetal Heart Rate Extraction from Doppler Ultrasound Signal)

권자영*, 이유빈*, 조주현*, 이유킨*, 최영득**, 남기창***

(Ja Young Kwon, Yu Bin Lee, Ju Hyun Cho, Yoo Jin Lee and,
Young Deuk Choi, and Ki Chang Nam)

요약

산전 및 분만 중 연속적인 태아감시는 임상의에게 태아의 안녕 평가하는데 필요하다. 또한 태아의 심장박동은 임신 중 태아의 건강을 평가하는 중요한 파라미터이다. 초음파 도플러는 태아 심박을 비관혈적으로 측정할 수 있는 방법으로 매우 유용하다. 그러나 현재 임상에서 널리 쓰이고 있음에도 불구하고, 태아 심박을 검출하는데 있어서 제한적인 정보만 제공할 뿐만 아니라 검출 오류에 대한 문제가 완전히 해결되지 못하고 있다. 본 연구의 목적은 태아의 초음파 도플러 신호로부터 태아 심박을 검출하는 알고리즘을 간단한 방법으로 개선하고자 한다. 신호 주기를 검출하는데 가장 널리 쓰이는 자기상관함수의 수정된 함수를 제안하고, 신호의 주기를 찾기 위해 설정하는 데이터 분석 구간의 크기와 이동 간격을 가변하도록 하였다. 제안된 방법은 실제 산모에게서 측정된 데이터에 적용하여 태아 심박의 beat-to-beat 검출이 가능함을 확인하였으며, 태아 심전도 신호와도 비교하였다. 제안하는 방법은 간단하면서도 효과가 있으므로 실제 장비에 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

Abstract

Continuous fetal heart beat monitoring has assisted clinicians in assuring fetal well-being during antepartum and intrapartum. Fetal heart rate (FHR) is an important parameter of fetal health during pregnancy. The Doppler ultrasound is one of very useful methods that can non-invasively measure FHR. Although it has been commonly used in clinic, inaccurate heart rate reading has not been completely resolved. The objective of this study is to improve detection algorithm of FHR from Doppler ultrasound signal with simple method. We modified autocorrelation function to enhance signal periodicity and adopted adaptive window size and shifted for data segment to be analysed. The proposed method was applied to real measured data, and it was verified that beat-to-beat FHR estimation result was comparable with the reference fetal ECG data. This simple and effective method is expected to be implemented in the embedded system.

Keywords : Fetal monitor, Fetal Heart Rate, Doppler, Ultrasound

* 정회원, 연세대학교 의과대학 산부인과학교실
(Department of Obstetrics and Gynecology, Yonsei University College of Medicine)

** 정회원, 연세대학교 의과대학 비뇨기과학교실
(Department of Urology, Yonsei University College of Medicine)

*** 평생회원-교신저자, 연세대학교 의과대학 의학공학교실
(Department of Medical Engineering, Yonsei University College of Medicine)

※ 본 연구는 서울시 산학연 협력사업 (JP100111) 및 보건복지부 보건의료기술연구개발사업 (A084120)의 지원에 의하여 수행되었음.

접수일자: 2012년8월27일, 수정완료일: 2012년9월3일

I. 서 론

임신기간 중과 분만시 즉각적인 처치나 태아 곤란증을 파악하기 위하여 태아 진단을 수행하는 것은 중요하다. 태아감시장치 (Fetal Monitor)는 임신 중 비침습적으로 산모의 자궁 수축도, 태아의 심박을 측정하여 태아의 안녕을 평가하는 필수 장비이다. 태아의 심박을 측정하는 방법에는 초음파 도플러를 이용하는 방법과 태아 심전도를 측정하는 방법이 있다. 태아 심전도를 측정하는 경우 전극을 삽입하여 태아의 두피에 전극을 부착하는 방법과 산모 복부 신호로부터 태아의 심전도를 분리하는 방법이 있다. 태아의 두피에 전극을 부착하는 방법은 관혈적으로 반드시 검사가 필요한 경우를 제외하고는 일반적인 태아 모니터링에 임상적으로 유용성이 떨어진다. 따라서 현재까지 임상에서는 일반적으로 초음파 도플러를 이용한 태아 심박 측정 방법이 태아감시장치에 적용되고 있다. 이 방법은 초음파를 산모의 복부에 조사하여 태아의 심장에서 반사되어 돌아오는 도플러 효과를 이용하여 태아 심박수를 검출한다^[1]. 그러나 도플러에 의한 태아 심박 검출은 임신 초기 태아 심박 검출에는 적합하나 심박 변이도를 나타낼 만큼 민감하지 못하다. 뿐만 아니라, 현존하는 도플러 방식의 태아심박수 검출기는 태아 심박수가 반 또는 두배로 측정되거나, 산모의 심박수와 교차 측정되거나, 심음과 계산된 심박수와의 오차 등의 오류가 보고된 바 있다^[2]. 이러한 태아 심박수 측정의 오류를 일으키는 원인으로 태아의 위치, 자궁수축, 산모의 움직임, 초음파 트랜스듀서의 위치 등 다양한 원인이 있을 수 있다. 그러나 한편으로는 초음파 도플러 신호로부터 태아 심박 주기를 검출하는 과정에서 오류 또한 예측 가능하다.

본 연구에서는 초음파 도플러 신호에서 태아 심박수 검출에 일반적으로 사용되는 자기상관법 (autocorrelation)을 적용하는데 있어서 데이터 분석 윈도우와 분석 구간 이동의 가변에 따른 검출결과를 비교하였다. 또한 자기상관법에 AMDF(average magnitude difference function)에 의한 가중치를 적용하여 태아 심박 검출의 오류를 줄이는 방법을 제안한다. 제안된 알고리즘은 실제 장비에서 측정된 결과에 적용되어 오류를 줄일 수 있음을 확인하였다.

II. 본 론

1. 자기상관법에 의한 신호 주기 검출

신호의 주기를 검출하기 위한 방법으로는 자기상관법, AMDF, 캡스트럼법(cepstrum), 고조파 피크 검출법 (harmonic peak detection), 스펙트럼 유사도법 (spectrum similarity) 등이 있다^[3]. 그 중 자기상관법은 음성신호에서의 피치(pitch) 및 태아 심박수를 검출하는데 널리 채택되고 있다. 자기상관법을 적용하여 연속적으로 신호의 주기를 찾는 과정은 그림 1과 같이 데이터 분석구간을 설정하여 자기상관함수를 통해 신호의 주기를 검출하고, 일정 구간 이동을 하여 다음 구간에서 주기를 찾는다.

일반적으로 데이터 분석 구간의 크기는 찾고자 하는 주기의 최소 2배 이상을 설정하여 하나의 신호 주기를 찾게 된다. 분석 구간이 크면 구간 내에 존재하는 여러 주기를 검출하지 못하고, 신호의 주기를 포함하지 못할 정도로 작게 설정되면 주기 검출에 실패한다. 따라서 피크 검출의 정확도를 높이기 위해 최소 주기와 최대 주기를 적절히 설정하여 윈도우 크기를 지정해 주어야 한다. 또한 분석 구간을 크게 설정할 경우 잡음신호에 영향을 덜 받을 수 있지만 계산량이 많아지는 단점이 있다^[4~5]. 또한 분석 데이터의 이동 간격 마다 신호의 주기를 나타내기 때문에 실제 beat-to-beat으로 주기를 검출하기 어렵다^[4]. 분석 구간의 이동 간격을 줄이면 주기 검출결과의 해상도를 높일 수 있으나 계산량이 많아지는 단점이 있다. 따라서 분석 구간의 크기와 이동 간격은 계산량과 심박변이도의 민감도를 고려하여 가변될 필요가 있다.

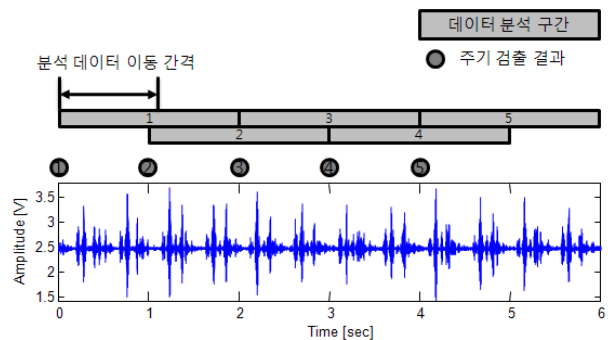


그림 1. 신호주기 검출을 위한 분석구간 크기 및 이동
Fig. 1. Window length and shift for extraction of signal period.

2. 자기상관법과 AMDF 혼합

그림 2의 (a)는 분석 구간을 1.5 sec로 했을 때 자기상관함수를 나타낸다. 신호의 기본주기 (T_0)는 파형에서 첫 번째 피크에 해당되는 시간이 된다. 일반적으로 피크 검출을 적용하게 되면 기본주기 전에 보이는 피크나 $2T_0$ 에서 피크가 검출되어 주기가 절반이 되거나 두 배가 되는 오류가 발생한다. 반면에 자기상관함수와 유사하나 AMDF는 그림 2(b)와 같이 파형이 반대로 나와 노치(notch)를 찾아 주기를 검출한다. Shimamura와 Kobayashi는 AMDF의 역수를 취하여 자기상관함수에 가중치를 주는 방법으로 자기상관함수에서 피크를 명확하게 하는 방법을 제안하였다^[6]. 그러나 그림 2(c)에서 보는 바와 같이 AMDF의 함수 값이 작은 값으로 감소할 경우 가중치가 커지므로 상대적으로 $2T_0$ 를 두드러지게 하는 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 그림 2(d)

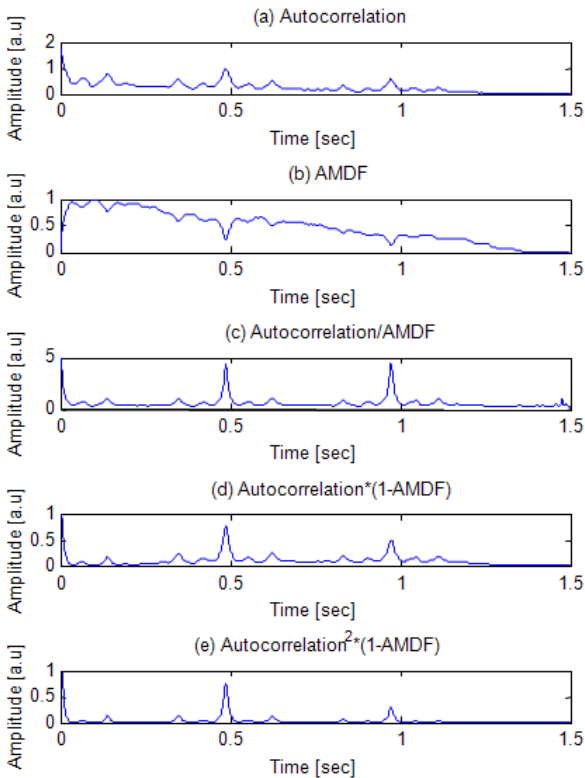


그림 2. AMDF를 이용한 자기상관함수 (AUTOCO)의 수정 (a) AUTOCO, (b) AMDF, (c) AUTOCO/AMDF, (d) AUTOCO*(1-AMDF), (e) AUTOCO²*(1-AMDF)

Fig. 2. Modified autocorrelation function using AMDF. (a) AUTOCO, (b) AMDF, (c) AUTOCO/AMDF, (d) AUTOCO*(1-AMDF), (e) AUTOCO²*(1-AMDF)

와 같이 AMDF 함수를 정규화한 후 1의 보수를 취한 함수로 가중치를 두어 T_0 가 유력한 피크가 되는 방법을 제안한다. 또한 자기상관함수의 자승을 한 후 가중치를 주어 신호의 피크를 더욱 명확하게 할 수 있다.

3. 분석구간 크기의 가변 및 이동 간격의 가변

일반적으로 태아 심박수의 측정범위는 약 100 - 200 bpm으로, 주파수는 1.67-3.33 Hz이며, 주기는 약 0.3 - 0.6 sec의 범위이다. 비정상적인 경우를 고려하여 최대 50 - 240 bpm 까지 본다면, 주기는 0.25 - 1.2 sec를 갖는다. 본 연구에서는 상기 1절에서 기술된 바와 같이 신호주기를 검출하는 데이터 분석 구간의 크기를 가변하고 이동간격을 가변하는 방법으로 연속적으로 beat-to-beat 주기 검출이 가능한 방법을 적용하였다^[7-8].

그림 3과 같이 신호의 전처리는 밴드통과필터(100-475 Hz)와 힐버트 변환을 통한 포락선 검출을 하였다. 최초로 설정된 데이터 분석 구간의 길이와 이동간격은 각각 신호의 최대 범위를 고려하여 2.0 sec와 0.5 sec로 시작되며, 태아 심박이 검출되지 않을 경우 다시 초기화 된다. 신호 주기의 검출은 2절 그림 2(e)에서 제안된 방법을 적용하여 이전 태아심박 주기의 2배 길이로 선택하였다. 또한 분석 구간의 이동간격은 이전 신호 주기 길이만큼 이동한다. Jezewski et al. 또한 이전 주기의 태아심박에 따라 데이터 분석 구간의 크기의 이동간격의 가변 방법을 적용한 바 있다^[4]. 그 결과 분석 구간의 크기는 1.5배 또는 4배로 설정하고

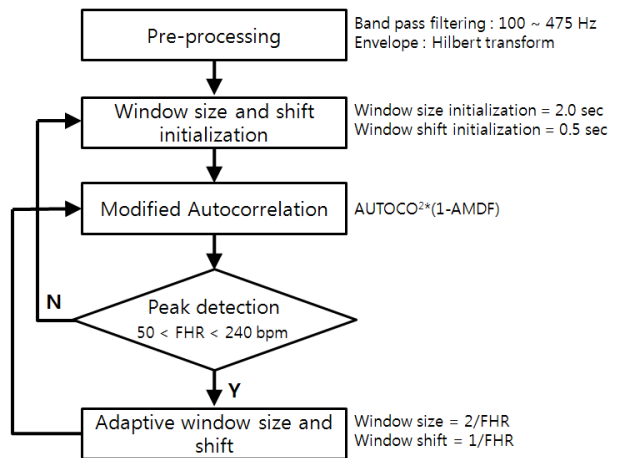


그림 3. 분석 구간 크기 및 이동간격의 가변을 이용한 태아 심박주기 검출

Fig. 3. Adaptive window size and shift for fetal heart rate extraction.

있으나, 신호 주기의 2배 이상의 분석 구간을 설정할 필요가 없음을 밝혔다. 또한 분석 구간의 이동간격에 대해서는 이전 주기의 1/15 또는 1/2로 설정하고 있는데, 이는 태아 심박 결과의 해상도를 높일 수는 있으나 전반적인 계산량을 증가시킬 뿐만 아니라 분석구간의 시작점에 따라 영향을 받을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 이전 주기의 길이만큼만 이동하여 분석하는 방법을 적용하였다.

3. 데이터 측정

분만을 위해 입원한 유도분만환자를 대상으로 분만 직전까지 초음파 도플러 신호를 측정하였다. 초음파 도플러 신호를 측정하기 위해서 태아감시장치 BT-350 (Bistos, Korea)를 이용하였고, 0.985 MHz의 프로브를 태아의 심장 위치에 해당하는 산모 복부에 위치시켰다. 또한 산모 복부 심전도를 측정하여 태아 심전도를 추출하여 기준 신호로 비교하고자 하였다. 신호는 3.2 kHz의 샘플링 주파수로 총 20분간 측정하였으며, NI-DAQ USB-6009 (National Instruments, USA)을 통해 노트북으로 실시간 전송되었다. 본 연구는 세브란스 병원 임상연구심의위원회의 승인(1-2010-0064)을 받았으며, 피험자의 사전 동의를 받아 진행되었다.

III. 실험

1. 수정된 자기상관함수의 적용

그림 4는 자기상관함수를 사용하여 신호 주기 검출 시 분석 구간 크기에 따른 영향을 보여준다. 분석 구간의 이동 간격은 0.5 초로 고정을 하였다. 분석된 30초간의 샘플 데이터에서의 태아심박은 약 12.46 Hz (평균 주기 약 0.48 sec)이다. 따라서 신호 주기보다 작게 설정되거나 주기와 유사한 분석 구간의 크기인 그림 4(a)와 4(b)에서는 검출이 매우 떨어진다. 반면 주기의 1.5 배 이상 되는 경우 (그림 4(c))에서 검출이 되기 시작하면서 2배 이상이 될 경우 (그림 4(d)와 4(e)) 검출 오류가 줄어든다.

그림 5는 그림 4와 동일한 데이터에 분석 구간 크기 (0.75 sec)와 이동간격 (0.5 sec)을 동일한 조건으로 했을 때의 태아 심박 검출 결과이다. 데이터 분석 구간의 크기가 동일한 경우 AMDF에 의해 가중치를 준 수정된 함수가 검출 오류를 줄일 수 있음을 확인할 수 있다.

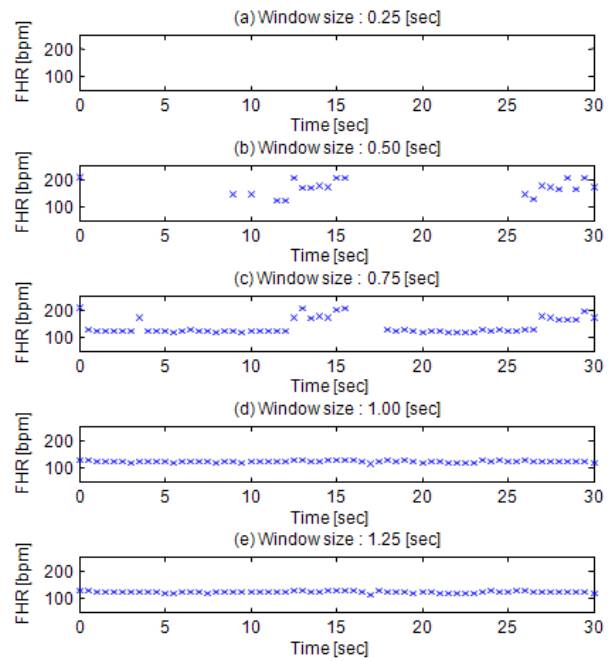


그림 4. 자기상관함수를 이용한 주기 검출 시 분석 구간 크기의 영향 ; (a) 0.25 sec, (b) 0.5 sec, (c) 0.75 sec, (d) 1.0 sec, (e) 1.25 sec

Fig. 4. Effect of window size for extraction of signal periodicity using autocorrelation function ; (a) 0.25 sec, (b) 0.5 sec, (c) 0.75 sec, (d) 1.0 sec, (e) 1.25 sec.

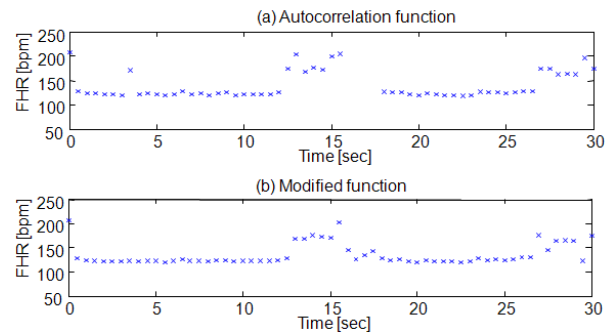


그림 5. (a) 자기상관함수 및 (b) AMDF에 의해 가중치를 준 수정된 함수를 이용한 태아 심박 검출

Fig. 5. Fetal heart rate from (a) autocorrelation and (b) modified function by weighting using AMDF.

2. 가변 분석 구간 크기 및 이동간격 적용

그림 6(a)는 초음파 도플러 원신호이며, 그림 6(b)는 6(a)의 전처리과정 후 포락선을 검출한 결과와 포락선에서 제 1심음의 피크를 수작업으로 찾아 표기한 태아 심박이다. 그림 6(c)는 포락선 검출이후 그림 3에 따라 본 논문에서 제안하는 방법으로 분석 구간 크기 및 이

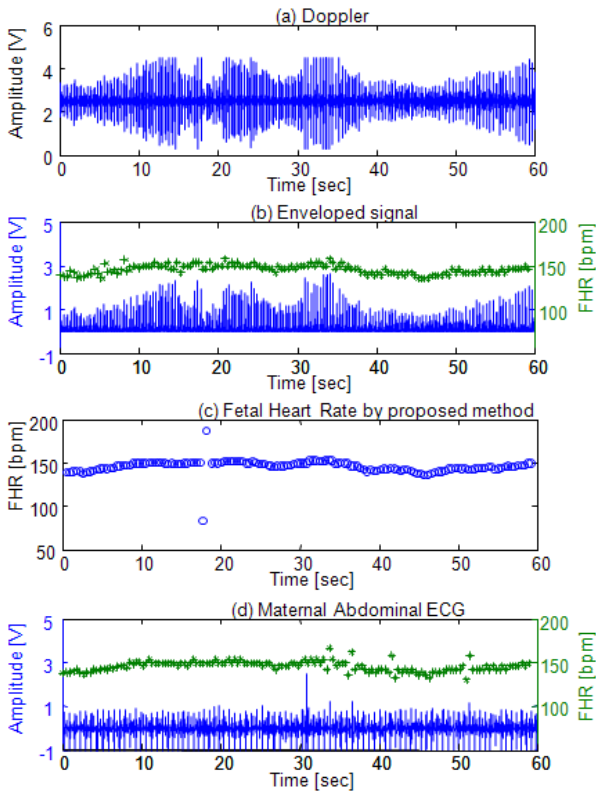


그림 6. 태아 심박 검출 ; (a) 초음파 도플러 원신호, (b) 포락선 검출결과 및 제 1심음에 의한 태아 심박 (*), (c) 제안하는 방법에 의한 태아 심박 검출결과, (d) 산모복부심전도에서 확인된 태아심전도에서의 태아 심박 (*)

Fig. 6. Fetal heart rate extraction ; (a) Doppler ultrasound signal, (b) Enveloped signal and fetal rate from 1st heart sound (*), (c) Fetal heart rate by proposed method, (d) Fetal heart rate from fetal ECG (*) measured with maternal abdominal signal.

동간격을 가변하여 태아 심박을 주기마다 검출한 결과이다. 그림 6(d)는 산모의 복부 심전도 신호이다. 이 중 태아 심전도의 QRS를 수작업으로 표기하여 태아 심박을 계산하였다.

그림 6에서 보여주는 샘플 데이터에 대하여 제안하는 방법에 의한 태아 심박 결과를 기준 신호 (태아심전도 및 도플러 신호)와 비교한 결과는 표 1과 같다. 앞서 기술된 바와 같이 초음파 도플러 신호와 태아 심전도에서의 태아 심박은 각각의 신호에서 주기를 수기로 검출한 것이다. 그 결과 제안하는 방법에 의해 측정된 태아 심박의 평균이 도플러 신호의 포락선에 직접 검출한 결과와 다소 다르게 나타났지만 태아 심전도에 의한 결과와 0.4 bpm 정도의 오차를 보였다. 태아 심박의 표준편

차는 전체적인 평균을 내는 것 보다 구간별 변이도를 보는 것이 중요하므로 의미가 크지는 않다. 다만 태아 심전도에서 확인한 매 주기마다 차이를 계산한 결과 8.6 msec 정도의 차이가 났다.

3. 기존 장비에서의 오류 보정

태아감시장치에서는 서론에서 기술한 바와 같이 다양한 형태의 원인이 실제 태아 심박 검출에 영향을 준다. 그림 7(a)은 본 연구에 사용된 태아감시장치에서 실제로 측정 중 태아 심박이 두 배가 되는 오류를 보인 예이다.

이와 같은 오류는 본 논문에서 제안하는 방법으로 그림 7(b)에서 보는 바와 같이 보정이 가능하다. 그러나 약 21 - 23 sec 구간에서 여전히 오류를 보이고 있는데, 이 구간은 실제 심음 청취 시 태아 심음 외에 추가적인 노이즈가 혼입된 것으로 확인 되었다. 짧은 시간 안에

표 1. 태아 심박 검출 결과의 비교
Table 1. Comparison of fetal heart rate extraction result.

	제안하는 방법	초음파 도플러 신호에서 추출	태아 심전도에서 추출
평균 태아 심박 [bpm]	145.9	146.3	146.3
태아 심박 표준편차 [bpm]	7.6	5.0	5.5
태아 심전도에 의한 주기와의 차이 평균 (ΔT) [msec]	8.6	7.2	0

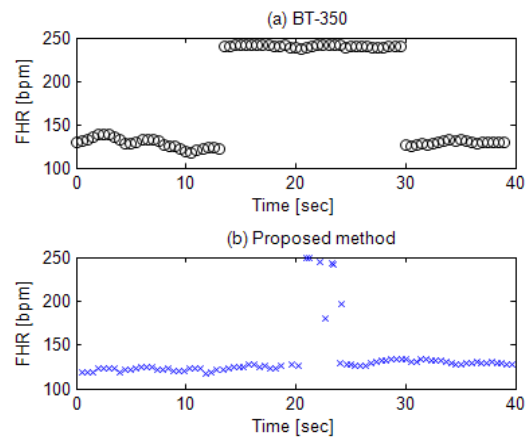


그림 7. 기존 상용 태아감시장치에서의 태아 심박 측정 오류 (a) 및 제안하는 방법에 의한 수정 (b)

Fig. 7. Fetal heart rate estimation error from conventional device (a) and its correction using the proposed method (b).

태아 심박이 두 배가 되거나 반이 되는 경우는 측정 상 오류일 가능성이 높아 예외 처리를 할 수 있으나 왜곡된 태아심박 정보는 자궁수축도와 함께 관찰해야 하는 태아 감시 전반에 영향을 줄 수 있으므로 주의할 필요가 있다.

IV. 결 론

태아 심박수는 태아 모니터링에서 중요한 지표로 태아 심박 검출 알고리즘 개선은 필수적이며 보다 정확한 검출을 위한 연구가 진행되어 왔다. 본 연구는 자기상관법을 이용할 때, AMDF에 의한 수정된 함수와 분석 크기 및 이동 간격을 가변하여 태아 심박수 검출 개선 결과를 제시하였다. 자기상관법 등 신호 주기를 검출하기 위한 알고리즘의 적용 시 고정된 분석구간의 크기는 사전에 신호의 특성에 맞게 윈도우 크기를 제대로 설정하지 않으면 피크를 검출하지 못할 수도 있기 때문에 이를 보완하기 위해 가변 알고리즘을 제안하였다. 개선된 알고리즘은 beat-to-beat 태아 심박수 검출이 가능함을 확인하였다.

제안하는 알고리즘은 제한된 실제 데이터에 적용되었기 때문에 본 논문의 결과로 그 성능을 평가할 수는 없다. 향후 연구에서는 다양한 실제 데이터를 알고리즘에 적용하여 태아 심박 검사를 위한 정량적 평가를 하는 것과 태아감시장치에 적용될 수 있도록 임베디드형 알고리즘으로 최적화 할 예정이다.

참 고 문 헌

[1] M. Peters, J. Crowe, J. F. Piéri, H. Quartero, B. Hayes-Gill, D. James, J. Stinstra and S. Shakespeare, "Monitoring the fetal heart non-invasively: a review of methods", *J Perinat Med*, Vol. 29, pp. 408-416, 2001.

[2] [http://www.fda.gov/MedicalDevices/Safety/Alerts andNotices/ucm181503.htm](http://www.fda.gov/MedicalDevices/Safety/AlertsandNotices/ucm181503.htm)

[3] 김동준, 강동기, "포노그램을 이용한 태아 심박률 검출 알고리즘의 개발", *전기학회논문지*, 제51권, 제4호, pp. 167-174, 2002년 4월

[4] J. Jezewski, D. Roj, J. Wrobel and K. Horoba, "A novel technique for fetal heart rate estimation from Doppler ultrasound signal", *Biomedical Engineering OnLine*, Vol. 10, no. 92, Oct. 2011

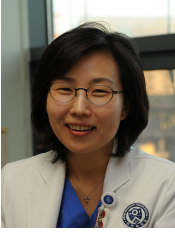
[5] 이응구, 이두수, "태아심음주기 검출을 위한 고해상 피치 검출 알고리즘", *전자공학회 논문지 B편*, 제31권, 제2호, 80-87쪽, 1994년 2월

[6] T. Shimamura and H. Kobayshi, "Weighted autocorrelation for pitch extraction of noisy speech", *IEEE Trans. Speech and Audio Processing*, Vol. 9, no. 7, pp. 727-730, Oct. 2001

[7] 남기창, 음성, 성문 및 호흡의 통합 검사 장치 개발, 연세대학교 학위논문, 2004.

[8] 남기창, 권자영, 조희영, 윤보현, 김봉수, 최영득, "도플러 심음에서의 Beat-to-Beat 태아 심박수 검출", *대한전자공학회 하계학술대회*, Vol. 5, no. 1, pp. 1478-1481, 2012년 7월

— 저 자 소 개 —



권 자 영(정회원)
 1999년 연세대학교 의과대학 학사 졸업.
 2003년 연세대학교 의과대학 석사 졸업.
 2008년 연세대학교 의과대학 박사 졸업.

2008년~현재 연세대학교 의과대학 산부인과학교실 조교수
 <주관심분야 : 태아초음파, 산과, 고위험 산모>



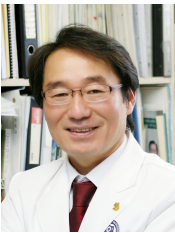
이 유 빈(정회원)
 2009년 고려대학교 의과대학 학사 졸업.
 2010년~현재 세브란스병원 산부인과 전공의
 <주관심분야 : 산부인과학>



조 주 현(정회원)
 2008년 경희대학교 의과대학 학사 졸업.
 2010년~현재 세브란스병원 산부인과 전공의
 <주관심분야 : 산부인과학>



이 유 진(정회원)
 2009년 단국대학교 의과대학 학사 졸업.
 2010년~현재 세브란스병원 산부인과 전공의
 <주관심분야 : 산부인과학>



최 영 득(정회원)
 1986년 연세대학교 의과대학 학사 졸업.
 1993년 연세대학교 의과대학 석사 졸업.
 1998년 연세대학교 의과대학 박사 졸업.

1998년~현재 연세대학교 의과대학 비뇨기과학교실 조교수, 부교수, 교수
 2008년~현재 세브란스병원 의료기기임상시험센터 센터장
 <주관심분야 : 의료기기임상시험, 로봇수술, 전립선암, 방광암>

남 기 창(평생회원)-교신저자
 대한전자공학회 논문지 제 48권 SC편 제 2호 참조