



Electronic Fetal Monitoring: Past, Present and Future

Yun Ji Jung, MD, PhD,
Yeonseong Jeong, MD,
Young-Han Kim, MD, PhD

Division of Maternal-Fetal Medicine,
Department of Obstetrics and
Gynecology, Institute of Women's
Life Medical Science, Yonsei
University Health System, Yonsei
University College of Medicine,
Seoul, Korea

Received: 24 June 2021
Revised: 19 September 2021
Accepted: 20 October 2021

Correspondence to
Young-Han Kim, MD, PhD
Division of Maternal-Fetal Medicine,
Department of Obstetrics and
Gynecology, Institute of Women's
Life Medical Science, Yonsei
University Health System, Yonsei
University College of Medicine, 50
Yonsei-ro, Seodaemun-gu, Seoul
03722, Korea

Tel: +82-2-2228-2243
Fax: +82-2-313-8357
E-mail: YHKIM522@yuhs.ac

Copyright© 2021 by The Korean Society
of Perinatology

This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>), which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided that the original work is properly cited.

Electronic fetal monitoring was introduced in 1957 and has been used clinically to assess fetal well-being and uterine contractions throughout pregnancy. The electronic fetal monitoring can detect fetal distress early during labor and has significantly contributed to reduce fetal morbidity and mortality. Currently, electric fetal monitoring has been accepted worldwide, at every delivery unit and outpatient clinic in most medical centers. Although electronic fetal monitoring using Doppler ultrasound and tocodynamometry has many advantages such as non-invasiveness and simplicity, the accuracy of measurement varies according to maternal movement and band-holding devices give discomfort to women during the examination. Recently, devices for intrauterine pressure measurement are seldom used because of the risks of uterine rupture, infection, and placental abruption in spite of its high accuracy. Nowadays, wireless fetal monitoring has been developed and commercially available to compensate these limitations. Electrohysterography and fetal electrocardiogram consist of the wireless fetal monitoring device. The device is handy and helpful in the management of high-risk pregnancy by enabling fetal monitoring outside the hospital, even at home. It is expected that the birth environment may become safer through the development of a monitoring system based on artificial intelligence by improving the predictability of complicated high-risk pregnancies. This review summarizes the past and present of electronic fetal monitoring and suggests future directions of fetal monitoring.

Key Words: Cardiotocography, Wireless technology, Artificial intelligence

서론

현재 임상에서 사용 중인 전자태아감시(electronic fetal monitoring)는 1957년에 도입되었으며, 1970년대부터 지금까지 임신기간 및 진통 중 태아의 안녕과 자궁수축을 평가하는데 주로 사용되고 있다.

태아 심장박동수의 분석은 태아의 산소교환의 적절성을 평가할 수 있는 기본적인 방법이다. 태아의 뇌는 중추와 말초 신경의 교감, 부교감 경로를 통하여 태아 심장으로 신호를 전달하고, 이것이 태아 심박수에 반영된다. 따라서 태아 심장박동수의 감시를 통해 태아의 뇌를 감시하고, 태아에게 산소 공급이 적절히 이루어지고 있는지 평가할 수 있다. 현재 사용 중인 지속적인 전자태아감시는 태아 저산소증에 의한 주산기 이환율을 감소시킬 수 있고, 태아 저산소증에 의한 신생아 사망을 60% 감소시킬 수 있다고 보고되었다.¹ 특히 조산의 경우에서 전자태아감시가 신생아 사망률을 감소시켰다는 결과들이 있다.² 하지만 전자태아감시가 널리 사용된 후 태아곤란증의 진단 하에 제왕절개 분만율이 증가하는 경향이 있고, 주산기 사망률과 신생아 경련 및 뇌성마비의 감소는 큰 차이가 없었다.³ 지속적인 전자태아감시는 태아 심장박동수의 측정뿐만 아니라 자궁수축 기록도 함께 포함된다. 임상적으로 태아 심장박동수의 양상을 평가하기 위해서는 자궁수축 상태와 함께 평가하는 것이 유용하다. 또한 10분에 6회 이상의 자궁의 과다한 수축은 태아 심장박동수 감소와 관련이 있기 때문에, 자궁수축의 감시도 함께 평가되고 있다.

그러나 임상에서 사용 중인 태아감시장치는 임신부의 복벽에 탐촉자를 부착하고 탄력띠

(elastic band)로 고정하는 방식으로, 산모와 태아의 불편감이 크다는 단점이 있다. 또한 검사자의 경험과 지식에 따라 태아 심장박동수의 양상과 자궁수축 정도가 포함된 결과의 해석에 차이가 크다. 이에 현재 사용 중인 태아감시장치에 대한 정확한 이해가 필요하고, 한계점을 극복하기 위한 노력이 필요하다.

본 중설에서는 태아 모니터링 시스템 개발의 과거 역사부터 현재 사용 중인 방법을 검토하고, 더불어 많은 제한점을 극복하고자 새롭게 개발되고 있는 기술을 소개하며, 앞으로 나아가야 할 방향에 대해 고찰하고자 한다.

본론

1. 태아 모니터링의 역사

현재 사용 중인 모니터링 시스템이 개발되기까지, 태아 심장박동수의 모니터링을 위한 산과 의사들의 노력은 300년 전으로 거슬러 올라간다. 산모의 복부에 직접 귀를 대고 태아 심박동을 확인하는 것에서 시작하여, 태아 심음 청진기의 개발, 이후 전자식 태아감시 측정방식이 만들어져, 화면과 인쇄를 통하여 시각화하기까지 많은 발전이 이루어졌다. 이 역사는 1600년대부터 시작되며, 1970년대 말이 되어서야 태아 건강을 측정하는 주요한 방법으로 자리잡았다.^{4,5}

1818년 Mayor가 최초로 임신부의 복벽을 통해, 그의 귀로 직접 태아 심음을 청취하였다.⁶ 이처럼 1800년대부터 태아 심장박동을 확인하여 태아의 생존 여부를 확인하였고, 태아 심장박동을 청취하여 분당 160회 이상 혹은 분당 100회 미만일 때 태아의 가사상태를 의심하는 등 태아 건강 평가의 도구로 이용하게 되었다. 이후 1900년대에 진입하면서 태아 심박동 모니터링에 비약적인 발전이 이루어졌다. 1917년 Delee-Hillis의 태아 심장박동 청진기가 세상에 소개되었고, 이후 Henly가 청진기로 확인한 태아의 심박을 증폭시킬 수 있는 전자식 태아 심음도 검사(electronic fetal phonocardiography)를 발명하였다.^{7,8} Hon⁹이 현재 사용하는 전자태아감시 모니터링의 전신이 된 기기를 소개하기 전까지 산과 의사 또는 간호사는 청진기를 이용하여 진통 중인 산모의 태아 심음을 청취하였다. 이후, Callagan이 도플러를 이용한 태아 심장박동 모니터링을 발명하면서 발전에 더욱 박차를 가했고, 종이 및 모니터로 태아 심장박동 패턴을 가시화할 수 있게 되었다.⁵ 또한 1958년 Hon에 의하여 태아 두피에 직접 부착하여 자궁 내에서 직접 태아 모니터링을 할 수 있는 전극이 개발되었다.⁸⁻¹⁰

자궁근수축을 측정하기 위하여 1872년 Schatz가 최초로 자궁 내에 풍선을 넣어 자궁내압을 측정하는 시도를 하였다.⁵ 세

계2차대전 이후, 자궁근수축계(tocodynamometry)와 탐촉자를 이용한 최초의 자궁내압측정도관(internal uterine pressure catheter)이 소개되었다. 이후 1970년대에 전자태아감시가 본격적으로 등장하면서 태아 심장박동수와 자궁수축을 지속적으로 확인할 수 있게 되어, 태아의 위험신호를 조기에 감지하고 적절한 조치를 취하여 신생아 이환률과 사망률을 낮출 수 있게 되었다.⁸ 1990년대 이후 진통과 분만을 경험하는 산모의 3/4에서 전자태아감시를 사용하게 되었다. 현재는 미국의 생존 출생아의 85% 이상에서 분만 중 전자태아감시를 사용하고 있으며, 한국에서도 대부분의 임상에서 전자태아감시를 사용하고 있다.¹¹

2. 태아 심장박동수 감시(Fetal heart rate monitoring)

태아 심장박동수의 감시 방법은 주기적인 청진(intermittent auscultation)과 전자태아감시 방식으로 나눌 수 있다. 주기적인 청진은 Pinard fetoscope, DeLee fetoscope, hand-held Doppler device를 임신부의 복부에 직접 적용하여 짧은 시간 동안 심박수를 간단히 측정하는 방식이다. 전자태아감시장치는 흔히 태아심음자궁수축검사(cardiotocography)를 이용한 태아 심박동의 변이도(variability)를 통해 태아 가사(fetal distress) 여부를 평가하는 방식이다.

1) 태아 심음도(Fetal phonocardiogram)

Pinard fetoscope, DeLee fetoscope 등을 개량한 방식으로, 간헐적인 청진 방식으로 임신부의 복부에 직접 적용하며, 짧은 시간 동안 심박수를 간단히 측정한다.⁵ 심장 판막의 소리도 구분할 수 있지만, 주변 환경의 소음, 태아의 움직임, 임신부의 혈액순환 등에 영향을 많이 받는다.

2) 태아 도플러(Doppler ultrasound)

임산부의 복부에 초음파를 부착하여 초음파 빔을 조사하고, 태아의 심장에서 반사되어 돌아온 신호 중 태아의 심박주기에 따른 도플러 주파수를 추출하여 태아의 심장박동 변화를 출력하고 이 신호를 분석하여 태아의 심박수를 수치로 표현하는 방식이다.^{10,12} 태아심박동 도플러는 태아감시장치와 휴대용 장치에 가장 흔히 적용된 방법으로, 비침습적이고 간단하게 적용할 수 있어 현재 사용 중인 전자태아감시장치의 구성요소 중 하나이다. 하지만 측정치의 누락(dropout)이 자주 발생하고, 임신부의 심박동과 혼선이 있을 수 있어 잘못된 해석의 요인이 있으므로 주의가 필요하다. 또한 임신부의 자궁 복벽에 부착하는 모니터링 방식이므로 비만의 경우 검사가 잘 되지 않을 수 있다.¹³

3) 태아 심전도(Fetal electrocardiogram)

태아 심전도는 태아 심장의 복잡한 전기 활동을 기록하는 방식이다. 형태학적으로 태아와 성인은 동일한 기본파를 포함하는 유사한 심전도 신호를 보여, P, Q, R, S, T wave로 구성되어 있다. 태아의 두피에 전극을 직접 부착하여 신호를 기록하는 침습적인 방법과, 임신부의 복부에 전극을 부착하여 측정하는 비침습적인 방법이 있다. 태아의 두피에 직접 전극을 부착할 시 비침습적인 방식보다 정확하지만, 양막이 파열되어 있는 경우에만 적용 가능하여 제한적으로 사용된다.¹⁴⁻¹⁹

그 중 비침습적인 태아 심전도는 1900년도 초기부터 개발된 기술로, 이전에는 전리생리학적 신호를 획득하고 처리하는 방식이 없어 개발이 제한되었으나, 지난 수년 동안 기술적 개선을 통해 비침습적 태아 심전도를 임신 중 태아 모니터링의 대안으로 제시하는 많은 연구가 진행되었다. 비침습적 복부 태아 심전도 신호는 복부에 부착한 전극뿐만 아니라 태아의 위치에 따라 달라져, 항상 정확히 예측할 수 있는 것은 아니다. 이를 극복하기 위하여, 4-8개 또는 8개 이상의 전극 리드를 사용하여 신호를 측정하는 방식이 이용된다. 태아의 심전도는 전극 리드를 이용하여 획득한 심전도 신호 내에서 임신부의 심전도 신호와 노이즈를 제거하고 정제하여 획득한다. 태아 심전도의 전압은 5-20 μV 이고 신호 진폭(signal amplitude)은 산모 심전도의 1/50로 매우 낮은 노이즈를 제거하고 신호를 획득하는 것이 중요하다. 따라서 복벽을 통한 태아 심전도의 측정은 약 18-20주 이후부터 측정 가능하나, 임신 6개월 후반부터 생성되는 태지(vernix caseosa)로 인해 임신 중기(약 28-33주)에는 전도율(conductivity)이 낮아져 해당 시기의 태아 심전도 측정은 아직까지 제한점이 있다.^{20,21} 현재까지 태아 심전도 측정 시기에 대한 명확한 가이드라인은 없고, 주로 임신 3삼분기의 임신부를 대상으로 한 보고가 다수이며, 특히 분만 과정 중의 모니터링에 관한 연구에 많이 이용되고 있다. 현재까지 진행된 연구들에서는 심장박동수뿐만 아니라 변이도를 구분할 수 있으며, 분만 진행 중 심전도 리드에서 ST 분절(segment)을 분석하여 대사성 산증(metabolic acidosis)과 수술적 분만을 감소시킬 수 있다고 평가되고 있다.^{22,23}

3. 그 외의 태아 평가 방법(Adjunctive methods for evaluation the fetus)

1) 태아 두피혈액 채취를 통한 말초혈액 가스값의 측정(Fetal scalp blood sampling for blood gas value)

태아 두피혈액을 채취하여 말초혈액 가스값을 측정하는 방법은 전자태아감시장치가 상용화되기 전인 1962년 독일의 Saling

이 소개한 방식이다. 태아의 산증을 직접적으로 평가하기 위한 방법으로 개발되었으나, 두피혈액의 pH값만으로는 분만 과정 중 태아의 산증(acidosis)의 양성예측도(positive predictive value)가 현저히 낮고, 수술의 위험을 낮추는 데 도움이 되지 않았다.^{24,25} 이후 혈액 내 lactate를 측정함으로써 태아의 산증을 평가하고자 하였으나, Cochrane Review에서 lactate의 측정이 pH보다 유용하나 제왕절개를 포함한 수술적 분만을 낮추거나 신생아의 예후에 도움이 되지 않는다는 결론을 얻었다.²⁶ 이에 두피혈액 가스값(pH, PO_2 , PCO_2 , lactate)의 단독 분석보다는 continuous cardiotocography 검사의 위양성을 줄이기 위한 보조적인 검사로 고려되고 있다.²⁵

단점으로는, 혈중 산성도 검사를 위해 채취해야 하는 혈액량이 30 mL이며, PCO_2 등을 검사하기 위해서는 70 mL의 다량의 혈액이 필요하다는 점이다. 태아의 두정부 피부에 작은 칼날이 부착된 기다란 관을 삽입하여 획득하는 검사방식이므로 침습적이고, 드물게 출혈(hemorrhage), 두피의 농(abscess), 뇌척수액의 배액(drainage) 등의 심각한 합병증이 발생할 수 있다.²⁴ 또한 채취할 당시 태아의 두피에 산류(caput succedaneum)가 있는 부위에서 채취하게 되면 상대적으로 산성도가 정상에 비하여 높게 측정될 수 있다.²⁴ 더불어 이 방법은 혈액 가스를 분석 가능한 point-of-care 장비가 있으면 2분 만에도 결과를 분석할 수 있지만, 그렇지 않은 경우 결과 확인까지 약 18분의 소요시간이 있어 많은 시간이 소요되는 방식이고, 현장에서 즉각적인 시행이 어려울 수 있다.²⁷ 결론적으로 유럽 일부에서 주로 제한적으로 사용되고 있는 방식이며, 미국에서는 전자태아감시장치와 비교했을 때 태아 예후의 예측에서 큰 차이가 없어 거의 적용되지 않고 있는 실정이다.²⁷

2) 컴퓨터 분석을 통한 태아 심음 패턴 분석(Computer analysis of fetal monitoring signals)

기존의 전자태아감시장치는 태아 심음 패턴의 해석에 있어 판독자 간의 일치도(interobserver agreement)가 낮다. 또한 변이도는 미세하게 변하는 경우가 많아 시각적으로 해석이 어려운 경우가 많다.²⁷ 경험이 적은 의료진의 경우 비정상적인 심음 패턴을 발견하지 못하거나 결과를 잘못 판독할 수 있어 이를 보완할 수 있는 기술이 필요하게 되었다.²⁸ 이에 해석하기 어려운 전자태아감시장치 결과를 객관적으로 평가할 수 있도록 돕기 위해 컴퓨터 분석을 이용한 방식(computerized cardiotocography)이 개발되었다. 지난 20-30년 사이 분만 중 태아감시 신호를 컴퓨터 분석하는 시스템과 이와 연관된 중앙감시시스템(central monitoring station)이 다수 개발되었다.²⁹ 이 시스템은 태아 심음을 모니터에 그래픽과 출력의 형태로 나타내며, 태아

심음의 패턴을 수치화하여 데이터베이스에 저장할 수 있다. 이를 통하여 태아 심음에 영향을 주는 다양한 매개 변수를 통계적으로 평가할 수 있으며, 또한 태아 심음의 특정 신호패턴이나 재평가가 필요한 상황이 발생 시 경고음을 보내 의료진에게 주의를 상기시킨다. 따라서 진통 중 태아 심음 감시로 궁극적으로 더 나은 태아 예후를 예측하는 데 이용 가능한 장점이 있다. 실제로 Steyn과 Odendaal³⁰, Bracero 등³¹의 연구에서 고위험군 임신부들을 대상으로 이전의 전자태아감시방식과 컴퓨터 분석을 통한 태아감시방식을 적용한 후 태아의 예후를 평가한 결과, 컴퓨터 분석을 통한 태아감시방식을 이용했을 때 출생 후 태아의 예후가 더 좋은 것으로 확인되었다.

특히 자궁 내 성장지연과 같은 고위험 임신에서 컴퓨터 분석을 통한 전자태아감시장치는 의료진에게 변이도 분석을 통해 객관적인 데이터를 제공해준다. 조기 자궁 내 성장지연 관련 연구인 TRUFFLE (The trial of Randomized umbilical and fetal flow in Europe) 연구에서는 컴퓨터 분석을 통한 단기 변이도의 변화, 정맥관 도플러 파형(ductus venosus Doppler waveform) 변화 등을 이용하여 분만 시점을 예측하는 데 도움이 되는지 살펴봐왔다. 그 결과, 임신 29주 이상에서 분만 시점을 결정하는 모니터링 방식으로서 컴퓨터 분석을 통한 단기 변이도의 감소를 이용할 때, 정맥관 도플러 파형 패턴 변화 방식과 비교하여 신경학적 결손(neurological impairment)이 없는 출생 비율이 큰 차이가 없어 충분히 유용한 방식으로 생각되었다. 더불어 임신 29주 미만의 경우 단기 변이도의 감소뿐만 아니라 정맥관 도플러 파형의 변화를 고려하여 분만 시점을 결정할 시 신경학적 결손이 없는 출생아의 비율이 높고 출생 2년째 신경학적 손상의 비율을 상대적으로 낮출 수 있다고 확인되었다.³²

하지만 분만 과정에서 컴퓨터 분석을 이용한 태아감시방식은 다른 이전의 결과들에 비하여 상당한 수에서 비정상적인 태아 심음 패턴을 감지하지 못하는 결과가 확인되었고, 이전의 고전적인 방식에 비해 신생아 예후에서 큰 차이가 없었다.²⁸ 또한 컴퓨터 분석을 이용하더라도 고전적인 전자태아감시방식에 비하여 만삭 및 후기 조기분만의 분만 과정에서 태아의 대사성 산증 또는 수술적 분만의 비율에 차이가 없어 분만 과정에서 해당 방식을 적용할 때는 주의가 필요하므로, 이를 개선할 수 있는 지속적인 연구가 필요하다.³³

4. 자궁근수축의 평가

임상에서 자궁근의 수축을 평가할 수 있는 방법으로는 수기 촉진(manual palpation), 자궁내압 측정(intrauterine pressure measurement), 자궁근수축계를 통한 측정(external tocodynamometry), 자궁근전도(electrohysterography) 방식을 통한

측정법이 있다.

1) 수기 촉진

경험이 많은 임상가가 임신부의 복벽의 자궁 저부 근처를 직접 촉진하여 자궁수축을 확인하는 방식이다. 직접 촉진하는 방식은 비용이 들지 않고, 특수한 기계가 필요하지 않아 간단하며, 감염이나 상처가 생길 위험이 없다. 하지만 수축 강도의 평가가 개인차가 있고 모호하며, 비만인 임신부의 경우 측정이 어려워 한계가 있다. 또한 검사하는 동안 전문인력이 함께 있어야 하므로 검사의 효율이 낮다.

2) 자궁내압 측정

자궁내압을 직접 측정하기 위해서는 측정도관의 끝이 태아 선진부보다 상위의 양수 내에 있어야 하기 때문에 자궁경부가 유도관의 삽입이 가능한 정도로 개대(약 2 cm 이상)되고, 양막이 파열되어 있는 경우에 시행이 가능하다. 부드럽고 끝이 열려 있거나, 생리식염수로 채워진 풍선이나, 탐촉자가 붙어 있는 플라스틱 유도관을 자궁경부를 통해 밀어 넣어 태아 선진부 위쪽 양수 내에 그 끝이 위치하도록 장치한 뒤 도관의 끝을 압력감지기에 연결한다.^{34,35} 복벽에서 탐촉자를 위치시키기 어려운 경우 인 비만 산모나 혹은 같은 자세를 유지할 수 없는 산모의 경우에서 자궁내압 측정을 통하여 좀 더 일관된 모니터링을 할 수 있다. 그러나 이 신호는 조심스럽게 해석되어야 한다는 의견도 존재한다.^{36,37}

임신부의 복벽을 촉진하여 자궁수축이 없을 때의 기초긴장도를 15-20 mmHg로 조절한 후 태아 심장박동수 기록 속도에 맞춰 자궁수축의 양상을 기록한다. 자궁내압을 직접적으로 측정할 수 있어 산모의 비만에 영향을 받지 않으며, 수축 정도를 명확히 확인할 수 있다. 하지만 양막이 파열되어야 하므로 감염의 위험이 높고, 자궁경부가 2 cm 이상 충분히 개대되어야 장치를 넣을 수 있어 사용의 제한이 많다. 또한 최대 30%에서 도관으로 인한 태반 박리, 자궁 파열 등의 합병증이 발생할 수 있다.³⁸⁻⁴¹

Caldeyro-Barcia와 Poseiro⁴²는 분만 진통 전후의 자궁수축을 정량적으로 기록하기 위해 자궁내압 측정을 위한 4개의 풍선이 달린 도관을 양수 내에 삽입하고 전자기록하여, 자궁수축능에 몬테비데오 단위(Montevidео unit) 개념을 처음으로 도입했다. 몬테비데오 단위는 자궁수축능을 자궁의 기초긴장도(baseline tone) 수준 이상으로 증가된 자궁수축 강도의 발생을 수은주압(mmHg)으로 표시하여 10분당 나타난 자궁수축 횟수를 곱한 수치로 나타낸 것이다. 이 방법의 문제점으로는 수축의 지속시간을 확인할 수 없고, 수축 사이의 휴지기를 정확히 평가할 수 없다는 것이다. 하지만 이러한 제한점에도 불구하고, 몬테

비디오 단위를 대체할만한 더 나은 시각적, 컴퓨터 기반의 분석 방법은 이전까지 개발되지 못했다.⁴²

3) 자궁근수축계

임산부 복벽의 자궁 저부 근처에 자궁수축 탐촉자를 부착시켜 전기적 신호를 기록지에 기록하는 방식이다.^{43,44} 탄력띠로 탐촉자를 임산부의 복벽에 적절하게 고정시킨 뒤, 전자태아감시장치를 조정하여 자궁수축이 없을 때 기록지에 기록되는 기초 긴장도를 15-20 mmHg로 맞추고, 자궁수축이 있을 때 탐촉자에 전달되는 상대강도를 태아 심장박동수의 기록 속도에 맞추어 기록하게 된다.⁴⁵ 이 방법은 실제 자궁내압을 정확히 측정할 수는 없지만, 자궁수축의 시작과 끝, 최고점과 10분당 자궁수축 횟수를 간편하게 알아낼 수 있다. 그러나 해당 방식은 임신부가 수평위로 있으면서 거의 움직이지 않아야 정확한 자궁수축 정도를 측정할 수 있으므로 산모와 태아의 불편감이 초래될 수 있으며 분만의 진행에 방해가 될 수 있다. 또한 탐촉자의 위치에 영향을 많이 받기 때문에, 비만한 경우나 분만 진통 중 산모의 움직임으로 인해 정확하게 측정되지 않을 수 있다. 하지만 비침습적이고 간단하게 적용하고 제거할 수 있으며, 감염이나 상처가 생길 위험이 없어 현재 전 세계적으로 주로 사용되고 있다. 보고된 무작위 임상시험에서 자궁내압의 측정과 자궁근수축계 측정방법은 제왕절개술이나 신생아 예후에 있어서 차이가 없었다.^{37,46}

4) 자궁근전도

자궁근전도는 비침습적으로 전극을 임산부의 복부에 부착하여 자궁근육의 전기 활성을 측정하는 대표적인 방법이다. 자궁의 전기 활성은 수천 개의 자궁 평활근세포들의 탈분극(depolarization)과 재분극(repolarization)으로 만들어지며, 그 결과 자궁상방에서 하방으로 전기 활성이 만들어져 근수축이 발생하게 된다.⁴⁷ 임신 초기의 자궁은 전기 활성이 낮지만, 분만이 가까워질수록 자궁의 전기 활성도는 증가하게 된다.⁴⁸ 따라서 임신 후반기의 자궁근전도는 자궁근수축계에 못지 않게 자궁근수축을 감지할 수 있으며, 비침습적으로 비교적 사용이 간단하나 현재 국내에서 실용화되지는 않았다.^{48,49} 특히 비만 임산부에서 자궁근수축계에 비하여 수축 감지 기능이 더 나은 것으로 보고되었고, 분만으로 이어질 수 있는 자궁수축이 모두 감지되는 경향을 보였다. 또한, 만삭과 조산 임산부에서 진진통(true labor)과 가진통(false labor)을 구분할 수 있는 자궁근전도 패턴이 관찰된다는 보고가 많았다.⁵⁰⁻⁵³ 이에 자궁근전도는 현재 사용 중인 자궁수축계에 비하여 분만까지 진행할 수 있는 진통을 구분할 수 있을 것으로 생각된다.⁵⁰

5. 태아 모니터링의 발전과 미래

1) 무선 모니터링 기기의 개발과 도입

현재까지 개발된 무선 태아감시장치는 두 가지 타입으로 나눌 수 있다. 기존의 자궁근수축계와 태아 심음 도플러 탐촉자를 선만 제거하고 동일하게 벨트로 고정하는 타입이 있고, 태아 심전도와 근전도 측정 전극을 붙이는 패치 타입의 부착형 타입으로 나눌 수 있다. 무선 탐촉자를 벨트로 고정하는 타입은 기존 모니터링 기기들과 사용법이 차이가 없고 연결선은 없다는 장점이 있지만, 두 개의 탐촉자의 무게는 여전히 존재하고 기존 기기와 동일하게 산모와 태아의 움직임 등에 영향을 받는다. 이에 최근에는 주로 패치형 전극 타입 태아 모니터링이 주목받는다.

현재 해외에서 시판 중인 GE Healthcare의 Novii Wireless Patch System (General Electric Company, Milwaukee, WI, USA)과 Philips의 Avalon Beltless Fetal Monitoring Solution (Philips Healthcare, Amsterdam, The Netherlands)은 블루투스 방식을 이용한 비침습적 태아감시장치로, 태아 심전도와 자궁근전도를 기반으로 개발되었다. 해당 기기는 산모의 복부에 5개 이상의 전극으로 이루어진 패치를 붙여 심전도를 이용한 태아와 임산부의 심박수 측정과 자궁근전도를 통한 수축 신호 획득을 동시에 할 수 있다. 이 기기의 장점은 기존의 자궁근수축계가 산모의 비만에 많은 영향을 받는 것에 비하여, 높은 체질량 지수를 보이는 비만한 임산부에서도 객관적으로 신뢰할 수 있는 데이터를 획득할 수 있다는 점이다. 또한 여러 개의 전극 패치를 이용하여, 임산부나 태아가 움직이더라도 모니터링 중 가장 강한 신호를 자동으로 감지하기 때문에 데이터 획득에 유리하다. 그리고 무선 기기이므로 검사 중 임산부의 활동이 자유롭다는 장점도 있다.⁵⁴

NICE (National Institute for Health and Care Excellence) 가이드라인에 따르면, Novii system에 대한 6개 이상의 연구들에서 만삭이거나 진통 중인 487명의 임산부들을 대상으로 분석한 결과, 기존 표준 모니터링 방식과 비교하였을 때 충분히 효과적인 것이 확인되었고, 특히 체질량지수가 높은 임산부들을 대상으로 더 효과적인 모니터링이 가능함이 확인되었다.⁵⁵ 그리고 분만 2기 과정에서 임산부의 심박동수와 태아의 심박동수의 혼동이 상대적으로 적었다. 일반적인 자궁근수축계 검사 시 약 €30 정도의 벨트나 기타 비용(초음파 젤 등)이 들게 되는데, 일회용 전극 패치 사용 비용은 약 €35 정도로 비용적인 측면에서 큰 차이가 없다. 그러나 현재 임신 37주 이상의 단태 임산부만을 대상으로 사용하도록 되어 있어 모든 임산부들에게 사용하기에는 제한점이 있다.⁵⁵ 2020년 코로나바이러스감염증-19의 유행으로 병원 내원이 힘들어짐에 따라, 미국식품의약국에서는

현재까지 개발된 무선 모니터링 기기의 사용에 대한 시행 방침을 발표한 바 있어 무선 모니터링 기기의 사용이 증가할 것으로 생각된다.⁵⁶

2) 인공지능 기반 판독 시스템 개발

지금까지는 임상가가 여러 외부 요인을 고려하면서 실시간 태아 모니터링을 하여 태아 심박수 패턴과 자궁수축을 해석해야 했다. 하지만 의료진의 경험과 지식에 따른 해석의 차이가 발생할 수 있고 이로 인하여 판독의 위양성률이 높아, 이를 극복하기 위해서는 태아 모니터링의 판독을 자동화하여 해석의 표준화가 이루어져야 한다. 현재까지 이러한 자동 판독 관련 시스템은 지속적으로 개발되어 왔지만 여전히 출생아의 예후를 판단하는 데에는 제한적이다. 현재 개발이 진행되고 있는 차세대 자동화시스템은 인공지능과 머신 러닝(machine learning)을 태아 모니터링에 적용하는 것을 목표로 하고 있다.⁵⁴

획득한 태아 심음 패턴과 자궁근수축의 평가에 대한 연구는 인공 신경망(artificial neural network), 서포트 벡터 머신(support vector machine), 익스트림 러닝 머신(extreme learning machine), 방사형 기저 함수 네트워크(radial basis functional network) 및 랜덤 포레스트(random forest)와 같은 널리 사용되고 있고 실용적인 머신 러닝 기술을 중심으로 이루어졌다.⁵⁷ 현재 획득한 태아 모니터링 결과를 기반으로 태아의 위험도(태아 가사 등)를 평가하는 머신 러닝 알고리즘의 개발이 주로 연구되고 있다. 실제로 여러 연구에서 다양한 모델과 알고리즘을 통해 태아 모니터링 패턴 분석 시, 비정상적인 태아 상태의 평가(태아 저산소증의 예측 등)를 92%-96% 이상 예측할 수 있다고 보고되었다.⁵⁸ 또한 머신 러닝을 통하여 자궁수축을 분석하여 조기 진통 및 조산을 예측하고자 하는 노력도 이루어졌다.⁵⁹ 머신 러닝을 위한 임신부에서 획득한 자궁근전도 데이터셋은 PhysioNet의 TPEHG DB (Term-Preterm Electro-HysteroGram DataBase)를 비롯하여 여러 연구들에서 구축된 바 있다.^{51,60} 자궁근수축계에 그려지는 패턴을 참조하여 자궁근전도의 분절을 평가하게 되며, 자궁근수축계에 비하여 자궁근전도의 측정 결과는 자궁수축의 시작과 끝을 보다 식별하기 쉬워 머신 러닝을 이용한 자궁수축 평가에 적합하다. 실제로 머신 러닝을 이용한 자궁근전도 분석을 통한 조산의 예측을 평가한 연구에서, 최대 97%의 정확도를 보였다.^{61,62} 뿐만 아니라, 분만 방법을 예측하고, 자연 진통의 발생 여부를 예측할 수 있는지에 대한 연구도 이루어지고 있다.^{49,63}

Ogasawara 등⁶⁴의 연구에 따르면, 전자태아감시장치 결과를 머신 러닝을 이용하여 분석한 결과 출산 전 마지막 30분 동안 측정된 태아 심음과 자궁수축패턴을 심층 신경망 모델(deep

neural network model)로 분석 시 출생아의 예후의 진단 정확도(area under the curve)를 최대 0.77까지 증가시킬 수 있었지만, 아직 100%에 가까운 결과를 얻기 어렵다고 보고하고 있다. 저자들은 현재 개발되고 있는 인공지능을 통한 진단을 돕는 자동화시스템이 임상에 도입이 된다면 (1) 사람의 눈으로 쉽게 인지하기 힘든 미세한 비정상적인 패턴을 감지함으로써 태아 저산소증 및 합병증 발생을 줄이고, (2) 개개인의 해석 사이의 간극을 줄이고, 정상과 비정상적인 케이스들을 후향적으로 분석할 수 있는 시스템을 구축할 수 있을 것으로 생각하였다. 더불어 (3) 정상 태아의 상태도 한번 더 자동화시스템으로 재확인함으로써, 의료진의 과도한 업무를 덜 수 있을 것으로 기대하였다.

일반적으로 사람들은 인공지능 기술을 이용하면 인공지능이 의사보다 더 정확하게 질병 발생을 예측할 수 있을 것이므로 의사의 판단이 줄어들 것으로 기대하기 쉽다. 하지만 아직까지 개발되고 연구되는 데이터들을 볼 때, 의료현장에서 보조적으로 적용될 수는 있겠으나 상황에 따라 다양한 요소(환경적, 사회적, 임상부와 태아의 의학적 요소)들이 복합적으로 작용하고 있어 최종적으로는 의료진의 종합적인 판단이 가장 중요하다.

결론

임상에서 사용중인 전자태아감시는 태아 심장박동수와 자궁수축을 지속적으로 평가할 수 있어 고위험 임신에서 매우 유용하나, 제왕절개 및 수술적 분만의 비율이 높아지는 경향이 있어 해석에 주의를 요한다. 이에 전자태아감시장치 모니터링을 쉽게 적용할 수 있는 환경과, 그 결과를 잘 해석할 수 있는 전문가의 존재가 중요해지고 있다.

현재 우리나라는 출산율이 저하하고 산부인과가 비인기과로 전락하면서 산과 전문의의 배출이 감소하고 있는 추세이다. 특히 고령 임신 및 시험관 시술이 증가하면서 고위험 임신이 증가하는 데 비하여 산과 전문 인력의 배출은 매우 적은 편이다. 전자태아감시는 고위험 임신을 관리하는 데 있어 필수요소이나, 기계를 구비하고 있는 병원에 내원해야 시행할 수 있다. 여러 가지 이유로 비대면 상황이 많아지는 현 시국에서 고위험 임신을 잘 관리하기 위해서는 병원 외에서도 쉽게 적용할 수 있는 기기 개발이 필요하며, 먼저 태아감시장치의 무선화와 간편화가 필수적이다. 무선 전극을 통한 태아 심전도와 자궁근전도 기술은 현재 상용화되기 시작하였으며, 추가적으로 스마트기와 연동하여 사용할 수 있는 환경이 마련된다면 고위험 임신의 관리에 매우 도움이 될 것으로 생각된다.

또한 전자태아감시의 결과를 정확하게 해석할 수 있는 전문

인력의 수가 줄고 있으므로, 이를 대체할 수 있는 인공지능 알고리즘의 개발이 매우 중요하다. 기기를 간편화하더라도 그 결과를 해석하지 못하면 무용지물이다. 무선 모니터링 기술의 개발 뿐만 아니라, 비숙련자도 결과 해석 시 도움을 받을 수 있는 인공지능 진단 알고리즘(조기 진통의 진단, 태아 저산소증을 시사하는 태아 심박동 변동 패턴 판단 등)을 개발하여 안전한 출산 환경을 확보하여 산모와 출생아의 건강을 향상시킬 필요성이 있다.

ORCID

Yun Ji Jung, <https://orcid.org/0000-0001-6615-6401>

Yeonseong Jeong, <https://orcid.org/0000-0002-9978-6212>

Young-Han Kim, <https://orcid.org/0000-0003-0645-6028>

Conflict of Interest

No potential conflict of interest relevant to this article was reported.

Acknowledgments

This report was supported by Namyang award and a grant of the Korea Health Technology R&D Project through the Korea Health Industry Development Institute (KHIDI), funded by the Ministry of Health & Welfare, Republic of Korea (grant number: HI18C2016).

Authors' Contributions

Conceptualization: YJJ, YHK; Investigation: YJJ, YJ; Project administration: YJJ, YJ; Resources: YJJ, YJ; Writing—original draft: YJJ, YJ; Writing—review & editing: all authors.

References

- 1) Vintzileos AM, Nochimson DJ, Guzman ER, Knuppel RA, Lake M, Schiffrin BS. Intrapartum electronic fetal heart rate monitoring versus intermittent auscultation: a meta-analysis. *Obstet Gynecol* 1995;85:149-55.
- 2) Ananth CV, Chauhan SP, Chen HY, D'Alton ME, Vintzileos AM. Electronic fetal monitoring in the United States: temporal trends and adverse perinatal outcomes. *Obstet Gynecol* 2013;121:927-33.
- 3) Alfirevic Z, Devane D, Gyte GM, Cuthbert A. Continuous cardiotocography (CTG) as a form of electronic fetal monitoring (EFM) for fetal assessment during labour. *Cochrane Database Syst Rev* 2017;2: CD006066.
- 4) Bailey RE. Intrapartum fetal monitoring. *Am Fam Physician* 2009;80: 1388-96.
- 5) Goodlin RC. History of fetal monitoring. *Am J Obstet Gynecol* 1979;133: 323-52.
- 6) Obladen M. From "apparent death" to "birth asphyxia": a history of blame. *Pediatr Res* 2018;83:403-11.
- 7) Lewis D, Downe S; FIGO Intrapartum Fetal Monitoring Expert Consensus Panel. FIGO consensus guidelines on intrapartum fetal monitoring: intermittent auscultation. *Int J Gynaecol Obstet* 2015;131:9-12.
- 8) Chez BF, Harvey MG, Harvey CJ. Intrapartum fetal monitoring: past, present, and future. *J Perinat Neonatal Nurs* 2000;14:1-18.
- 9) Hon EH. The electronic evaluation of the fetal heart rate: preliminary report. *Am J Obstet Gynecol* 1958;75:1215-30.
- 10) Hutson JM, Mueller-Heubach E. Diagnosis and management of intrapartum reflex fetal heart rate changes. *Clin Perinatol* 1982;9:325-37.
- 11) Martin JA, Hamilton BE, Sutton PD, Ventura SJ, Menacker F, Munson ML. Births: final data for 2002. *Natl Vital Stat Rep* 2003;52:1-113.
- 12) Hon EH, Petrie RH. Clinical value of fetal heart rate monitoring. *Clin Obstet Gynecol* 1975;18:1-23.
- 13) Liston R, Sawchuck D, Young D; Society of Obstetrics and Gynaecologists of Canada; British Columbia Perinatal Health Program. Fetal health surveillance: antepartum and intrapartum consensus guideline. *J Obstet Gynaecol Can* 2007;29(9 Suppl 4):S3-56.
- 14) Lee ST, Hon EH. The fetal electrocardiogram. IV. Unusual variations in the QRS complex during labor. *Am J Obstet Gynecol* 1965;92:1140-8.
- 15) Symonds EM. On-line processing of the fetal electrocardiogram. A new direction for fetal monitoring. *J Reprod Med* 1987;32:509-12.
- 16) van Wijngaarden WJ, James DK, Symonds EM. The fetal electrocardiogram. *Baillieres Clin Obstet Gynaecol* 1996;10:273-94.
- 17) Hon EH, Paul RH, Hon RW. Electronic evaluation of fetal heart rate. XI. Description of a spiral electrode. *Obstet Gynecol* 1972;40:362-5.
- 18) Neilson JP. Fetal electrocardiogram (ECG) for fetal monitoring during labour. *Cochrane Database Syst Rev* 2015;2015:CD000116.
- 19) Vayssiere C, Haberstick R, Sebahoun V, David E, Roth E, Langer B. Fetal electrocardiogram ST-segment analysis and prediction of neonatal acidosis. *Int J Gynaecol Obstet* 2007;97:110-4.
- 20) Wakai RT, Lengle JM, Leuthold AC. Transmission of electric and magnetic foetal cardiac signals in a case of ectopia cordis: the dominant role of the vernix caseosa. *Phys Med Biol* 2000;45:1989-95.
- 21) Huhn EA, Muller MI, Meyer AH, Manegold-Brauer G, Holzgreve W, Hoesli I, et al. Quality predictors of abdominal fetal electrocardiography recording in antenatal ambulatory and bedside settings. *Fetal Diagn Ther* 2017;41:283-92.
- 22) Van Leeuwen P, Werner L, Hilal Z, Schiermeier S, Hatzmann W, Gron-

- meyer D. Fetal electrocardiographic measurements in the assessment of fetal heart rate variability in the antepartum period. *Physiol Meas* 2014;35:441-54.
- 23) Belfort MA, Saade GR, Thom E, Blackwell SC, Reddy UM, Thorp JM Jr, et al. A randomized trial of intrapartum fetal ECG ST-segment analysis. *N Engl J Med* 2015;373:632-41.
 - 24) Chandrachan E. Fetal scalp blood sampling during labour: is it a useful diagnostic test or a historical test that no longer has a place in modern clinical obstetrics? *BJOG* 2014;121:1056-60.
 - 25) Jorgensen JS, Weber T. Fetal scalp blood sampling in labor: a review. *Acta Obstet Gynecol Scand* 2014;93:548-55.
 - 26) East CE, Leader LR, Sheehan P, Henshall NE, Colditz PB, Lau R. Intrapartum fetal scalp lactate sampling for fetal assessment in the presence of a non-reassuring fetal heart rate trace. *Cochrane Database Syst Rev* 2015;(5):CD006174.
 - 27) Visser GH, Ayres-de-Campos D; FIGO Intrapartum Fetal Monitoring Expert Consensus Panel. FIGO consensus guidelines on intrapartum fetal monitoring: adjunctive technologies. *Int J Gynaecol Obstet* 2015; 131:25-9.
 - 28) Steer PJ, Kovar I, McKenzie C, Griffin M, Linsell L. Computerised analysis of intrapartum fetal heart rate patterns and adverse outcomes in the INFANT trial. *BJOG* 2019;126:1354-61.
 - 29) Nunes I, Ayres-de-Campos D. Computer analysis of foetal monitoring signals. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol* 2016;30:68-78.
 - 30) Steyn DW, Odendaal HJ. Routine or computerized cardiocography in severe preeclampsia? A randomized controlled trial. *J Matern Fetal Investig* 1997;7:166-71.
 - 31) Bracero LA, Morgan S, Byrne DW. Comparison of visual and computerized interpretation of nonstress test results in a randomized controlled trial. *Am J Obstet Gynecol* 1999;181(5 Pt 1):1254-8.
 - 32) Lees CC, Marlow N, van Wassenaer-Leemhuis A, Arabin B, Bilardo CM, Brezinka C, et al. 2 year neurodevelopmental and intermediate perinatal outcomes in infants with very preterm fetal growth restriction (TRUFFLE): a randomised trial. *Lancet* 2015;385:2162-72.
 - 33) Campanile M, D'Alessandro P, Della Corte L, Saccone G, Tagliaferri S, Arduino B, et al. Intrapartum cardiocography with and without computer analysis: a systematic review and meta-analysis of randomized controlled trials. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2020;33:2284-90.
 - 34) Parer JT, King T, Flanders S, Fox M, Kilpatrick SJ. Fetal acidemia and electronic fetal heart rate patterns: is there evidence of an association? *J Matern Fetal Neonatal Med* 2006;19:289-94.
 - 35) Macones GA, Hankins GD, Spong CY, Hauth J, Moore T. The 2008 National Institute of Child Health and Human Development workshop report on electronic fetal monitoring: update on definitions, interpretation, and research guidelines. *Obstet Gynecol* 2008;112:661-6.
 - 36) Lucidi RS, Chez RA, Creasy RK. The clinical use of intrauterine pressure catheters. *J Matern Fetal Med* 2001;10:420-2.
 - 37) Bakker JJ, Verhoeven CJ, Janssen PF, van Lith JM, van Oudgaarden ED, Bloemenkamp KW, et al. Outcomes after internal versus external tocodynamometry for monitoring labor. *N Engl J Med* 2010;362:306-13.
 - 38) Smith RP. A brief history of intrauterine pressure measurement. *Acta Obstet Gynecol Scand Suppl* 1984;129:1-24.
 - 39) Huber C, Shazly SA, Ruano R. Potential use of electrohysterography in obstetrics: a review article. *J Matern Fetal Neonatal Med* 2021;34:1666-72.
 - 40) Buhimschi CS, Buhimschi IA, Malinow AM, Weiner CP. Intrauterine pressure during the second stage of labor in obese women. *Obstet Gynecol* 2004;103:225-30.
 - 41) Odendaal HJ, Neves Dos Santos LM, Henry MJ. Experiments in the measurement of intrauterine pressure. *Br J Obstet Gynaecol* 1976;83: 221-4.
 - 42) Caldeyro-Barcia R, Poseiro JJ. Physiology of the uterine contraction. *Clin Obstet Gynecol* 1960;3:386-410.
 - 43) Mendez-Bauer C, Arroyo J, Garcia Ramos C, Menendez A, Lavilla M, Izquierdo F, et al. Effects of standing position on spontaneous uterine contractility and other aspects of labor. *J Perinat Med* 1975;3:89-100.
 - 44) Arroyo J, Mendez-Bauer C. The maintenance of a stable baseline in intra-uterine pressure with varying maternal position: a practical approach. *J Perinat Med* 1975;3:129-31.
 - 45) Thijssen K, Vlemminx M, Westerhuis M, Dieleman JP, Van der Hout-Van der Jagt MB, Oei SG. Uterine monitoring techniques from patients' and users' perspectives. *AJP Rep* 2018;8:e184-91.
 - 46) Bakker PC, Zikkenheimer M, van Geijn HP. The quality of intrapartum uterine activity monitoring. *J Perinat Med* 2008;36:197-201.
 - 47) Garfield RE, Maner WL. Physiology and electrical activity of uterine contractions. *Semin Cell Dev Biol* 2007;18:289-95.
 - 48) Lucovnik M, Kuon RJ, Chambliss LR, Maner WL, Shi SQ, Shi L, et al. Use of uterine electromyography to diagnose term and preterm labor. *Acta Obstet Gynecol Scand* 2011;90:150-7.
 - 49) Garcia-Casado J, Ye-Lin Y, Prats-Boluda G, Mas-Cabo J, Alberola-Rubio J, Perales A. Electrohysterography in the diagnosis of preterm birth: a review. *Physiol Meas* 2018;39:02TR01.
 - 50) Euliano TY, Nguyen MT, Marossero D, Edwards RK. Monitoring contractions in obese parturients: electrohysterography compared with traditional monitoring. *Obstet Gynecol* 2007;109:1136-40.
 - 51) Fele-Zorz G, Kavsek G, Novak-Antolic Z, Jager F. A comparison of various linear and non-linear signal processing techniques to separate uterine EMG records of term and pre-term delivery groups. *Med Biol Eng Comput* 2008;46:911-22.
 - 52) Schlembach D, Maner WL, Garfield RE, Maul H. Monitoring the progress of pregnancy and labor using electromyography. *Eur J Obstet Gynecol Reprod Biol* 2009;144 Suppl 1:S33-9.
 - 53) Sikora J, Matonia A, Czabanski R, Horoba K, Jezewski J, Kupka T. Recognition of premature threatening labour symptoms from bioelectrical uterine activity signals. *Arch Perinat Med* 2011;17:97-103.
 - 54) Knupp RJ, Andrews WW, Tita A. The future of electronic fetal monitoring. *Best Pract Res Clin Obstet Gynaecol* 2020;67:44-52.
 - 55) National Institute for Health and Care Excellence (NICE). Novii Wireless Patch System for maternal and fetal monitoring. NICE Medtech innovation briefing [Internet]. NICE; 2020 Sep 23 [cited 2020 Sep 23]. Available from: <https://www.nice.org.uk/advice/mib228/resources/novii-wireless-patch-system-for-maternal-and-fetal-monitoring-pdf-22859655187>

- 32997.
- 56) U.S. Food and Drug Administration (FDA). Enforcement policy for non-invasive fetal and maternal monitoring devices used to support patient monitoring during the coronavirus disease 2019 (COVID-19) public health emergency [Internet]. Rockville: FDA; 2020 Jun 17 [cited 2020 Jun 17]. Available from: <https://www.fda.gov/regulatory-information/search-fda-guidance-documents/enforcement-policy-non-invasive-fetal-and-maternal-monitoring-devices-used-support-patient>.
- 57) Comert Z, Kocamaz A. Comparison of machine learning techniques for fetal heart rate classification. *Acta Phys Pol A* 2017;132:451-4.
- 58) Hoodbhoy Z, Noman M, Shafique A, Nasim A, Chowdhury D, Hasan B. Use of machine learning algorithms for prediction of fetal risk using cardiotocographic data. *Int J Appl Basic Med Res* 2019;9:226-30.
- 59) Iftikhar P, Kuijpers MV, Khayyat A, Iftikhar A, DeGouvia De Sa M. Artificial intelligence: a new paradigm in obstetrics and gynecology research and clinical practice. *Cureus* 2020;12:e7124.
- 60) Goldberger AL, Amaral LA, Glass L, Hausdorff JM, Ivanov PC, Mark RG, et al. PhysioBank, PhysioToolkit, and PhysioNet: components of a new research resource for complex physiologic signals. *Circulation* 2000;101:E215-20.
- 61) Fergus P, Cheung P, Hussain A, Al-Jumeily D, Dobbins C, Iram S. Prediction of preterm deliveries from EHG signals using machine learning. *PLoS One* 2013;8:e77154.
- 62) Delanerolle G, Yang X, Shetty S, Raymont V, Shetty A, Phiri P, et al. Artificial intelligence: a rapid case for advancement in the personalization of Gynaecology/Obstetric and Mental Health care. *Womens Health (Lond)* 2021;17:17455065211018111.
- 63) Fergus P, Selvaraj M, Chalmers C. Machine learning ensemble modelling to classify caesarean section and vaginal delivery types using Cardiotocography traces. *Comput Biol Med* 2018;93:7-16.
- 64) Ogasawara J, Ikenoue S, Yamamoto H, Sato M, Kasuga Y, Mitsukura Y, et al. Deep neural network-based classification of cardiotocograms outperformed conventional algorithms. *Sci Rep* 2021;11:13367.