

Automated Analysis of fetal Myocardial Performance Index of Doppler Waveform in Normal Pregnancy

Su-min Kim,¹ Soo-young Ye^{3,*}

¹Department of Radiology, Busan Well-High Woman's Hospital

²Department of Radiological Science, College of Health Sciences, Catholico University of Pusan

Received: October 19, 2020. Revised: November 27, 2020. Accepted: November 30, 2020

ABSTRACT

Ultrasonography is widely used to evaluate the function of fetal heart, but due to the subjective nature of the test, there are differences in measurement methods for each examiner, and especially the myocardial performance index has no reference index to date. Therefore, in this study, we wanted to analyze pulse Doppler waveforms of normal fetuses and develop an automatic measurement program to make objective measurements. One hundred and thirty-three pregnant women who visited the hospital for prenatal examinations were studied, myocardial performance index was measured after acquiring a pulse doppler image of the left ventricle. As a result, the early, mid and late pregnancy myocardial performance index, measured by the automatic measurement program conducted in this study, was found to increase as pregnancy continued.

Keywords: Fetal Echocardiography, Myocardial Performance Index, Pulse Doppler, Automated Measurement

I. INTRODUCTION

심장 초음파 검사에서 좌심실의 기능을 평가하기 위한 고전적인 지표들은 심장이 구 모양을 이루고 있다는 점을 고려하면 많은 오류를 발생시킨다는 것을 알 수 있다. 이를 보완하여 Tei et al.^[1]에 의해 고안된 심근 성능 지수(MPI; myocardial performance index)는 수축기 장애 시 등용성 수축기 시간(IVCT; isovolumetric contraction time)이 늘어나고 박출 시간(ET; ejection time)이 짧아지며, 수축기 장애와 이완기 장애 시 심근 이완 장애로 등용성 이완 시간(IVRT; isovolumetric relaxation time)이 증가하는 사실에 착안하여 만들어졌다. Tei index(TI)라고도 불리는 MPI는 IVCT와 IVRT를 더한 값을 ET로 나눔으로써 산출되는데 심장의 수축 기능과 이완기능을 조합하여 전반적인 심기능을 양적으로 쉽게 평가할 수 있으며 기하학적인 가정

에 의존하지 않는다. 심장 기능에 이상이 있으면 등용성 시간이 길어지고 박출 시간이 감소하여 결국 MPI가 증가하게 된다.^[1,2]

그러나 태아의 심장은 성인의 것과 비교하여 현저히 작은 크기를 가지고 있으며 자궁 내에 고정되어 있지 않으므로 기존의 방법으로 측정하기에는 어려움이 있다. Friedman et al.^[3]은 MPI를 태아에게 적용하기 위한 변형된 측정법을 고안했으며 측정 위치를 심실 유입부와 유출부의 중간에 위치시키는 방식으로 하나의 단면에서 심장의 유출혈류와 유입혈류를 동시에 획득이 가능하도록 했다. 이러한 변형된 심근 성능 지수(Modified MPI)는 여러 연구자에 의해서 임상적 유효성을 검증하였으며 자궁 내 태아 발육 지연, 전자간증, 임신성 당뇨, 쌍태아간수혈증후군 등에서 심장의 기능을 평가하는데 널리 이용된다.^[4-7] 현재까지 다수의 저자가 태아 MPI에 대한 연구 결과를 발표해왔으나 연구마다

* Corresponding Author: Soo Young Ye E-mail: syye@cup.ac.kr Tel: +82-51-510-0586

결과값에 많은 차이를 보였다.^[7,8] 일반적으로 임신 중기부터 말기 초(임신 18주~31주)까지는 0.53 ± 0.31 이지만 기준치에 대한 보고는 아직 없는 실정이다.^[3] 이는 검사자의 주관적인 판단에 따라 측정을 해야 하는 초음파 검사의 특성 때문이며 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 MPI를 자동으로 측정하는 다양한 방식의 프로그램을 개발하고 있다.^[9-11] 하지만 성인이나 소아의 심장과는 달리 태아는 자궁 내에 고정되어 있지 않고, 모체를 통해 간접적으로 측정을 하므로 실제 태아의 판막 신호가 정확하게 획득되지 않으므로 심장의 기능적 평가가 어렵다.

따라서 본 연구에서는 영상처리 및 프로그래밍 환경을 제공하는 MATLAB을 이용하여 임신 중 초음파검사로 얻어진 태아 좌심실의 간헐과 도플러 파형을 분석하고 심근 성능 지수를 측정하는 자동화 프로그램을 개발하여 임신 분기별 심장 시간 간격(cardiac time intervals) 및 MPI를 측정하고자 한다. 그리고 자동 검출로 측정한 값과 실제 검사 중 측정된 실측값과 비교하고 최종적으로 자동 측정법에 기반한 임신 분기 별 변화에 대한 심근 성능 지수의 기준치를 제시하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

1. Subjects

본 연구는 2019년 4월부터 2020년 2월까지 산전 초음파 검사를 위해 내원한 임산부 133명을 대상으로 시행한 전향적 단면 연구이다. 대상자는 임신성 당뇨, 임신성 고혈압 등의 합병증이 동반되지 않은 건강한 단태 임신부로 하였으며 12주에 내원한 산모 47명을 임신 초기, 24주에 내원한 산모 54명을 임신 중기, 30주 이후에 내원한 산모 32명을 임신 말기로 정하였다. 또한, 산전 검사상 고위험군에 속한 산모이거나 자궁 내 태아발육지연을 산부인과 전문의가 진단한 경우에는 연구대상에서 제외하였으며 영상의 화질이 떨어지거나 심실 유입혈류와 유출혈류가 충분히 포함되지 못한 경우에도 제외하였다. 초음파 검사는 경력 5년 이상의 숙련된 초음파사가 시행하였으며 태아의 움직임이 가장 적

은 안정적인 상태에서 도플러 파형을 획득하였다. 모든 검사는 산모의 자율적인 참여하에 이루어졌다.

2. Data acquisition

임신 중 초음파검사를 시행한 산모를 대상으로 좌심실의 도플러 영상을 획득하였다. 총 133개의 파형을 분석하였으며 임신 초기에 해당하는 47명, 임신 중기에 해당하는 54명, 임신 말기에 32명의 혈류 파형을 분석하였다.

MPI를 측정하기 위한 도플러 파형의 획득 방법은 다음과 같다. 먼저 태아의 심첨사방단면도에서 탐촉자를 태아의 어깨 방향으로 약간 회전시켜 대동맥 기시부를 확인한다. 다음으로 펄스 도플러 모드를 시행하고 샘플 체적을 대동맥관과 승모관이 근접한 곳에 위치시키고 혈류 파형을 획득한다. 검사 중 Invert기능을 이용하여 좌심실 유입혈류는 양의 방향, 유출혈류는 음의 방향을 향하도록 설정하고 Sweep speed는 5, 샘플 체적의 크기는 2mm로 고정하였다. PRF는 8.3kHz, wall motion filter는 60Hz로, low Doppler gain으로 설정하였으며 모든 검사에서 입사각은 20도 이내, thermal index는 0.4, mechanical index는 0.7이하로 유지한 채 검사를 시행하였다. 검사 장비는 Voluson E10(GE, USA)이며 3.5MHz Convex array probe(C2-9-D)를 사용하였다. 태아 당 4개 이상의 주기가 포함되도록 하였다. 측정을 위한 2D영상과 도플러 파형은 Fig 1과 같다.

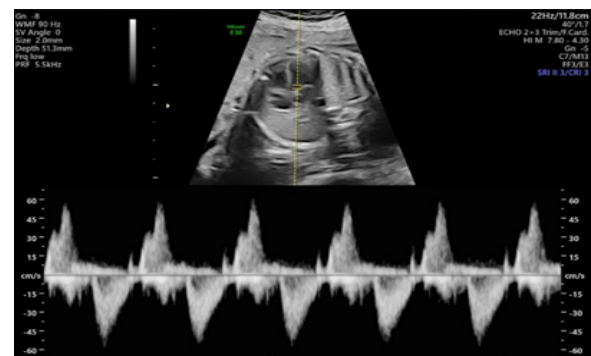


Fig. 1. Two-dimensional (2D) images and Doppler waveforms of the measurements.

3. 도플러 신호 획득

가장 먼저 Time intervals의 원활한 측정을 위해 데이터의 잡음을 제거하는 과정을 거친다. 기존의 윤곽선은 미세한 변동이나 불연속성을 포함하고 있기 때문에 이를 감소시키거나 제외하여 과형 신호를 단순화시킨다. 획득한 최초의 도플러 과형은 이진화를 통하여 0과1의 영상으로 변환하고 윤곽선을 따라 Fig 2와 같이 단순 그래프 영상으로 만들어준 후 저역 통과 필터를 적용하여 신호의 미세한 변동을 제거하였다.

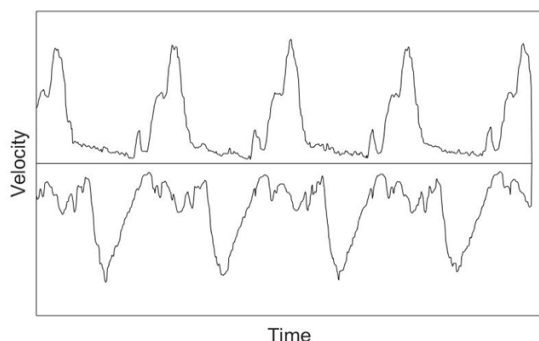


Fig. 2. The image with binary and low - pass filters.

저역 통과 필터를 이용하여 그래프의 고주파 신호를 감소시킨 후에는, 심장 주기에 따른 그래프의 규칙성을 찾기 위해 피크 검출 알고리즘을 적용하였다.^[12] 좌심실에 유입되는 혈류는 조기 이완기 승모판 유입 혈류 속도(E wave)와 후기 이완기 승모판 유입 혈류 속도(A wave)로 이루어져 있으며 태아는 성인과 달리 A wave가 더 우세하므로 그래프에서 가장 두드러지는 값은 A wave이다^[13-15].

따라서 본 연구에서는 A wave의 최대값을 기준으로 각각의 cardiac intervals와 MPI를 구하고자 하며 이를 자동으로 측정하기 위해 피크 검출 알고리즘이 이용되었다.

Fig. 3은 도플러 과형 그래프에서 피크 검출을 시행하는 과정을 보여준다. 알고리즘을 이용하여 4개의 주기를 찾은 후 각각 주기에 해당하는 고 신호 통해 cardiac intervals의 timing 신호의 위치정보를 검출할 수 있다.

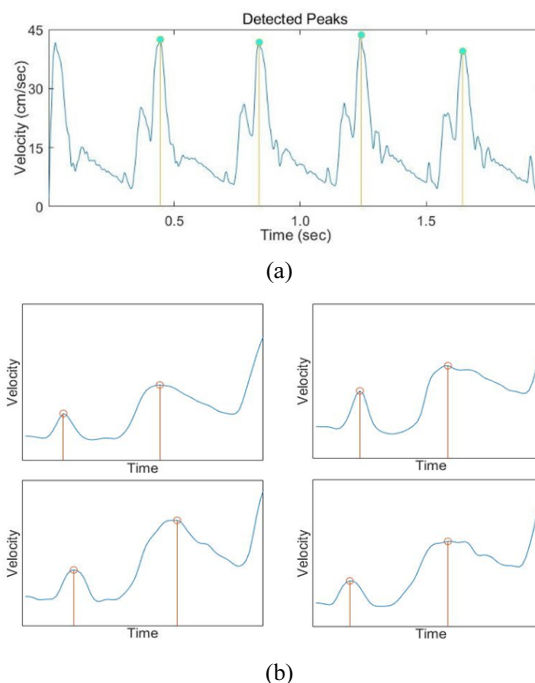


Fig. 3. The result of performing the peak detection algorithm (a) and local peak detection in the Doppler waveform graphs (b).

4. Calculation of MPI

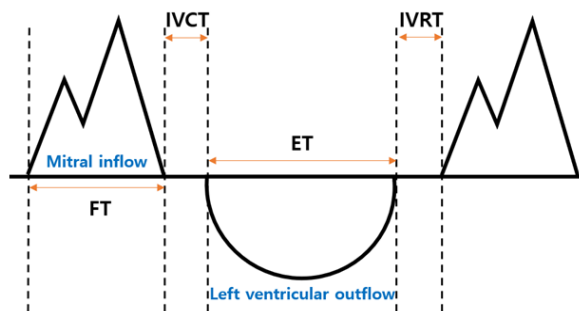


Fig. 4. Schematic representation of the measurement of the cardiac time intervals. FT, filling time; IVCT, isovolumetric contraction time; ET, ejection time; IVRT, isovolumetric relaxation time.

Fig. 4는 획득한 도플러 과형에서 각 심장의 주기에 해당하는 cardiac time intervals를 단순 모식도로 나타낸 것이다. 도플러 그래프로부터 획득한 데이터들은 각각 ET의 시작과 끝, FT의 시작과 끝의 신호이며, 이를 이용해 ET, FT, IVCT, IVRT를 구하고 MPI를 계산할 수 있다. 좌심실의 수축 기능에 초점을 맞춘 MPI는 Tei가 고안하였으므로 Tei index(TI)

라고도 하며 식 (1)과 같이 계산된다.

$$TI = \frac{IVCT + IVRT}{ET} \quad (1)$$

5. Statistical analysis

자동 검출 시스템으로 측정된 값과 검사 중 실제 측정된 값이 임신 분기별로 차이가 있는지 알아보기 위해 일원 배치 분산분석을 실시하였다. 자료의 모든 통계학적 유의수준(p)은 0.05 이하로 검정하였으며, 통계분석은 SPSS/PC windows, 25를 사용하였다.

III. RESULT

1. Results of the Doppler Signal Processing

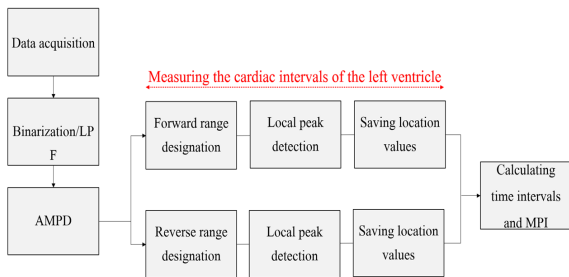


Fig. 5. Flowchart of image processing conducted in this study. LPF, low-pass filter; AMPD, automatic multiscale-based peak detection; MPI, myocardial performance index.

MPI 자동 측정 프로그램은 MATLAB R2016b 환경을 바탕으로 작성하였다. MATLAB 프로그램은 많은 분야에서 자료를 보다 쉽게 분석할 수 있도록 다양한 함수를 제공하며 정교한 영상처리를 수행할 수 있다. 본 연구에서의 프로그램 개발 과정을 정리하면 Fig. 5와 같다.

앞서 얻은 정보를 원본 신호와 매칭 시킨 후 그 그래프에서 각각의 타이밍을 입력한 결과는 Fig. 6에 나타났다. 그래프에서 파란색으로 표시된 부분은 좌심실 이완기의 혈류를 나타내며 붉은 색으로 표시된 부분은 좌심실 수축기의 혈류를 나타낸다.

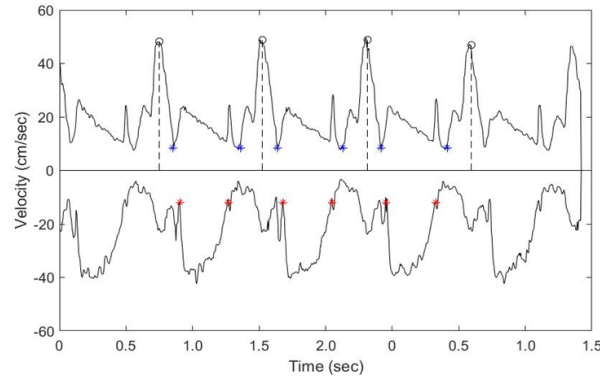


Fig. 6. The results matched with the measured values.

2. 측정 결과

본 연구에서는 임신 초기에 해당하는 태아 47명과 임신 중기에 해당하는 태아 54명, 임신 말기에 해당하는 태아 32명, 총 133명을 대상으로 데이터를 얻었다. 획득한 데이터는 자동 프로그램을 이용하여 IVRT, IVCT, ET, FT를 검출하고 MPI를 계산하였다. 비교를 위해 동일한 태아를 대상으로 각 time intervals와 MPI를 측정하였다. 임신 분기별 측정치의 평균값과 표준편차를 계산하였으며, Shapiro-Wilk test를 통해 정규성 검정을 시행하였다. 임신 전 분기에서 자동 측정값과 실제 측정값을 포함한 모든 측정치의 p값이 0.05보다 높았으므로 측정된 전체 데이터는 정규분포를 따른다.

자동 검출 시스템으로 측정된 값이 임신 분기별로 유의한 차이가 있는지 알아보기 위해 정규성 검정을 시행한 후 일원 배치 분산분석을 실시하였다 (Table 1). 임신 분기에 따라 IVCT, IVRT, ET, FT, TI에는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났다. 사후 검정에서는 IVCT와 IVRT, ET의 경우, 임신 초기보다 임신 중기와 말기에서 증가하는 모습을 보였으나 임신 중기와 말기 간에는 유의한 차이가 없었다. FT의 경우 임신 전 분기마다 유의한 차이가 나타났다으며 임신 초기에서 말기로 갈수록 측정값이 증가하는 것을 확인하였다. TI는 임신 초기보다 임신 중기와 임신 말기에서 증가하였으나 임신 중기와 말기 간에는 유의한 차이가 없었다.

검사 중 실제 측정된 값이 임신 분기별로 차이가 있는지 알아보기 위해 정규성 검정을 시행한 후 일

원 배치 분산분석을 실시하였다(Table 2). 임신 분기에 따라 IVCT, IVRT, FT, TI에는 유의한 차이가 있는 것으로 나타났으나 ET는 p값이 0.07으로 분기에 따른 평균 차이를 확인할 수 없었다. 사후 검정에서는 IVCT와 FT의 경우, 임신 초기보다 임신 중기와 말기에서 증가하는 모습을 보였으나 임신 중기와 말기 간에는 유의한 차이가 없었다. IVRT와 TI의 경우 임신 전 분기마다 유의한 차이가 나타났으며 임신 초기에서 말기로 갈수록 측정값이 증가하는 것을 확인하였다.

IV. DISCUSSION

심근 성능 지수는 측정에 적절한 파형만 얻어진다면 심장의 박출 시간과 이완 시간을 조합한 공식을 이용해 간단하게 구해질 수 있다. MPI가 처음으로 안된 1995년 이후로, 종래의 연구자들이 도플러

를 이용해 태아 심근 성능 지수를 측정하여 기준치를 제시하려 했으나 검사 장비에 따라, 획득한 영상의 품질에 따라, 검사자의 숙련도에 따라 결과값이 차이를 보였다.^{17,8)} 이는 초음파검사가 반 정량적인 평가방법이라는 제한점에 기인한 것이므로 이전 보다 정량적이고 객관적인 측정의 필요성에 대해 끊임없이 언급되었다. 따라서 본 저자는 이러한 초음파검사의 한계를 극복하기 위해 자동화된 프로그램을 이용하여 실제 임상에 적용 가능한 알고리즘을 개발하고자 연구를 시행하였다. MPI를 구하기 위해서는 심실 수축 시간 및 심실 이완 시간을 비롯하여 등용성 수축기 시간과 등용성 이완기 시간이 먼저 측정되어야 하며 본 연구에서는 혈류 파형의 특성을 분석하고 그래프의 각 주기에서 time intervals를 자동으로 측정한 후에 MPI를 계산하는 방식을 적용하였다.

Table 1. One-way analysis of variance of the cardiac intervals and the MPI according to the fetal trimester of the automatical measurement

Variable	Trimester	Mean	SD	F (p-Value)	Post-Hoc
IVCT	1st (a)	28.17	5.86	32.85 (0.00)	b,c > a*
	2nd (b)	36.91	7.47		
	3rd (c)	39.00	5.92		
IVRT	1st (a)	42.89	5.42	11.39 (0.00)	b,c > a*
	2nd (b)	48.07	6.88		
	3rd (c)	47.97	4.85		
ET	1st (a)	159.89	6.36	12.23 (0.00)	b,c > a**
	2nd (b)	167.04	8.27		
	3rd (c)	167.44	10.04		
FT	1st (a)	140.23	12.44	65.02 (0.00)	b,c > a c > a**
	2nd (b)	162.17	17.68		
	3rd (c)	179.31	14.56		
MPI	1st (a)	0.45	0.05	19.68 (0.00)	b,c > a**
	2nd (b)	0.51	0.07		
	3rd (c)	0.52	0.06		

Table 2. One-way analysis of variance of the cardiac intervals and the MPI according to the fetal trimester of the manual measurement

Variable	Trimester	Mean	SD	F (p-Value)	Post-Hoc
IVCT	1st (a)	25.32	10.29	24.01 (0.00)	b,c > a*
	2nd (b)	36.35	9.93		
	3rd (c)	41.72	13.24		
IVRT	1st (a)	36.57	12.72	18.27 (0.00)	b,c > a c > b**
	2nd (b)	44.26	10.19		
	3rd (c)	51.56	9.09		
ET	1st (a)	169.21	17.96	2.76 (0.07)	
	2nd (b)	162.67	9.39		
	3rd (c)	166.72	14.40		
FT	1st (a)	142.15	15.56	35.49 (0.00)	b,c > a**
	2nd (b)	176.69	27.79		
	3rd (c)	175.97	20.72		
MPII	1st (a)	0.38	0.14	24.53 (0.00)	b,c > a c > b**
	2nd (b)	0.50	0.11		
	3rd (c)	0.56	0.11		

심근 성능 지수를 Tei가 최초로 고안한 이래 Friedman^[3]은 한 번의 검사로 유입 혈류와 유출 혈류를 동시에 측정하는 새로운 방식을 제안하였고 이는 현재까지 심근 성능 지수를 태아에게 적용하는 경우에 기본적으로 이용되고 있으며 본 연구에서도 그의 방식을 따라 도플러 파형을 획득하였다. Friedman의 연구에서 임신 18주에서 임신 31주까지 74명의 태아를 대상으로 측정한 MPI는 0.53이었으며 임신 주수가 증가함에 따라 MPI도 유의하게 증가하였다. 판막 신호를 기반으로 심장 주기를 측정했던 Hernandez^[16]는 임신 중기(19주)와 임신 말기(39주)에 해당하는 557명의 태아를 대상으로 MPI를 측정하였으며 각 0.35, 0.37로 마찬가지로 임신이 지속될수록 증가하는 것을 관찰하였다. 이후의 수많은 연구에서 MPI를 측정하였고 같은 경향성을 나타낸 것을 확인할 수 있었으나 측정값에는 변동에 많았다.^[3,7-8,10,16-20] 이는 주관적인 판단으로 측정을 해야 하는 초음파 검사의 특성에서 기인한 것이며 이러한 문제를 극복하기 위해 MPI를 컴퓨터를 이용하여 자동으로 측정하고자 하는 시도가 최근까지 진행되고 있다. Ashan^[11]의 경우 검사 중 태아의 심전도 신호를 기반으로 MPI를 측정하였고 총 55명의 태아에게서 0.75의 결과값을 얻었으나 임신

주수에 따라 유의한 차이를 보이지는 않았다. 그러나 태아가 성장할수록 MPI도 함께 증가하는 것은 이미 여러 연구를 통해 밝혀진 사실인데다 실제 태아의 심전도 신호를 추출하기 위해서는 특정한 장비와 복잡한 과정이 필요하므로 임상에 적용하기에는 여러가지 불편함을 감수해야 한다. 이후 Lee^[12]의 연구에서 판막의 신호를 기반으로 TI를 측정하는 프로그램을 개발하였으며 222명의 태아를 대상으로 측정한 MPI가 임신 초기에는 0.33, 임신 중기부터 말기에는 0.50이었으며 임신이 지속될수록 MPI도 같이 증가하는 것을 관찰할 수 있었다. 본 연구에서는 133명의 태아를 대상으로 MPI를 측정하였고 임신 초기, 중기, 말기 각 0.45, 0.51, 0.52로 임신이 지속될수록 MPI도 같이 증가하였으므로 선행 연구된 결과값과 같은 경향성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 비교를 위해 같은 태아를 대상으로 검사 중 실제로 MPI를 측정하였는데 임신 초기, 중기, 말기 각 0.38, 0.50, 0.56으로 마찬가지로 임신이 증가할수록 MPI도 함께 증가하는 양상을 관찰하였다. 기존의 방식으로 측정한 MPI는 임신 초기, 중기, 말기에 각 0.38, 0.50, 0.56으로 측정되었으며 임신이 진행됨에 따라 증가하는 경향을 보였으나 자동 측정법에 비하여 높은 분산을 보였

다. 동일한 검사자가 측정함에도 결과에 분산이 높다는 것은 초음파 검사가 주관적이라는 특성상 측정에 변동이 있다는 것을 의미하며 본 연구의 자동 측정법을 통하여 이를 극복할 수 있었다.

임신한 기간 동안에는 태아의 심장이 성장 및 변화함에 따라 time intervals와 MPI도 변하게 되는데 본 연구의 결과를 보면 임신 기간 동안 IVCT와 IVRT이 주수가 증가 함에 따라 증가하였으며 임신이 지속될수록 MPI의 값을 증가함을 볼 수 있었다. 이같이 임신 기간에 따른 각 주기들의 변화는 임신 중 태아 심장의 발달 변화로 설명할 수 있다. 태아의 심장은 임신이 지속됨에 따라 심장 근육의 수축비가 증가하고 심근의 두께도 증가하게 되는데 이에 따라 태아 심실 탄성이 증가하게 된다. 이러한 이완능력의 증가로 인하여 E파가 커지게 되고 결과적으로 MPI의 값이 임신이 진행될수록 증가하게 되는 것이다.

본 연구는 질병 이력이 없는 건강한 산모와 정상 태아만을 대상으로 평가하였다. 이는 본 연구의 가장 큰 제한점이며, 추후 이상 태아 또는 고위험 산모와의 비교 분석을 통해 자동화 프로그램의 임상적 유효성을 확보하여야 한다. 그러나 기존에 발표된 여러 선행 연구들은 심근 성능 지수를 임신을 두 시기로만 나누어 비교하였으며 각 임신 분기에 대한 자료가 없었고, 검사자의 주관적인 판단에 의존하는 측정 방식으로 인해 연구마다 결과가 달랐다. 본 연구는 임신 전체 분기의 심근 성능 지수를 측정하였다는 점과 자체 개발한 자동화 프로그램으로 임신 분기에 따른 태아 좌심실 심근 성능 지수의 정상 참고치를 제시하였다는 점에서 의미가 있다고 할 수 있다. 본 연구를 통해 향후 태아의 심장 기능 평가 뿐만 아니라 초음파 검사의 정량적인 평가를 위한 기초자료로 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

V. CONCLUSION

본 연구는 초음파 도플러를 이용한 태아의 좌심실 심근 성능 지수를 정량적이고 객관적으로 측정하기 위해 MATLAB을 이용한 자동화프로그램을 개발하여 IVCT, IVRT, ET, FT를 검출하고 MPI를

계산하였다. 데이터 수집을 제외한 모든 과정을 자동화하였으며 각 측정값의 임상적 유용성을 알아보기 위해 동일한 태아를 대상으로 검사 중 실제 측정된 값과 비교하였다. 프로그램을 이용하여 측정한 MPI는 TI의 경우, 임신 1삼분기에서 0.45, 임신 2삼분기에서 0.51, 임신 3삼분기에서 0.52로 임신이 지속될수록 함께 증가하였으며 검사 중 실제 측정된 MPI도 각 0.38, 0.50, 0.56으로 증가하였다. 이는 본 연구에서 구현한 자동 측정 프로그램이 임상에서 유효하게 사용될 수 있다는 것으로 판단되며 선천적 심질환의 정확한 평가와 조기 진단에 도움을 줄 것으로 기대된다.

Acknowledgement

본 연구는 2020년 부산가톨릭대학교 교내학술연구과제로 수행되었음.

Reference

- [1] C. Tei, K. S. Dujardin, D. O. Hodge, R. A. Kyle, A. J. Tajik, J. B. Seward, "Doppler index combining systolic and diastolic myocardial performance: Clinical value in cardiac amyloidosis," *Journal of the American College of Cardiology*, Vol. 28, No. 3, pp. 658-664, 1996.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0735-1097\(96\)00202-1](http://dx.doi.org/10.1016/S0735-1097(96)00202-1)
- [2] C. Tei, L. H. Ling, D. O. Hodge, K. R. Bailey, J. K. Oh, R. J. Rodeheffer, A. J. Tajik, J. B. Seward. "New index of combined systolic and diastolic myocardial performance: A simple and reproducible measure of cardiac function—A study in normals and dilated cardiomyopathy," *Journal of Cardiology*, Vol. 26, No. 6, pp. 357-366, 1995.
- [3] D. Friedman, J. Buyon, M. Kim, J. S. Glickstein, "Fetal cardiac function assessed by Doppler myocardial performance index (Tei Index)," *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 21, No. 1, pp. 33-36, 2003.
<http://dx.doi.org/10.1002/uog.11>
- [4] K. Ichizuka, R. Matsuoka, J. Hasegawa, N. Shirato, M. Jimbo, K. Otsuki, A. Sekizawa, A. Farina, Y. Okai, "The Tei index for evaluation of fetal myocardial performance in sick fetuses," *Early*

- Human Development, Vol. 81, No. 3, pp. 273-279, 2005.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.earlhumdev.2004.07.003>
- [5] R. Cruz-Martinez, F. Figueras, A. Benavides-Serralde, F. Crispi, E. Hernandez-Andrade, E. Gratacos, "Sequence of changes in myocardial performance index in relation to aortic isthmus and ductus venosus Doppler in fetuses with early-onset intrauterine growth restriction," *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 38, No. 2, pp. 179-184, 2011. <http://dx.doi.org/10.1002/uog.8903>
- [6] H. Figueroa, M. C. Silva, C. Kottmann, S. Viguera, I. Valenzuela, A. E. Hernandez, E. Gratacos, A. Antonio, S. E. Illanes, "Fetal evaluation of the modified-myocardial performance index in pregnancies complicated by diabetes," *Prenatal diagnosis*, Vol. 32, No. 10, pp. 943-948, 2012.
<http://dx.doi.org/10.1002/pd.3937>
- [7] N. Meriki, A. Izurieta, A. W. Welsh, "Fetal left modified myocardial performance index: Technical refinements in obtaining pulsed-Doppler waveforms," *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 39, No. 4, pp. 421-429, 2011.
<http://dx.doi.org/10.1002/uog.9090>
- [8] T. Van Mieghem, L. Gucciardo, P. Lewi, L. Lewi, D. Van Schoubroeck, R. Devlieger, L. De Catte, J. Verhaeghe, J. Deprest, "Validation of the fetal myocardial performance index in the second and third trimesters of gestation," *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 33, No. 1, pp. 58-63, 2009.
<http://dx.doi.org/10.1002/uog.6238>
- [9] A. H. Khandoker, Y. Kimura, M. Palaniswami, "Automated identification of abnormal fetuses using fetal ECG and doppler ultrasound signals," In *Proceedings of the 2009 36th Annual Computers in Cardiology Conference (CinC)*, Park City, UT, USA, 13-16, pp. 709-712, 2009.
- [10] M. Y. Lee, H. S. Won, E. J. Jeon, H. C. Yoon, J. Y. Choi, S. J. Hong, M. J. Kim, "Feasibility of using Auto Mod-MPI system, a novel technique for automated measurement of fetal modified myocardial performance index," *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 43, No. 6, pp. 640-645, 2014.
<http://dx.doi.org/10.1002/uog.13247>
- [11] Kozák-Bárány Andrea, Jokinen Eero, Saraste Markku, Tuominen Juhani, Välimäki Ilkka, "Development of left ventricular systolic and diastolic function in preterm infants during the first month of life: A prospective follow-up study," *The Journal of Pediatrics*, Vol. 139, No. 4, pp. 539-545, 2001. <http://dx.doi.org/10.1067/mpd.2001.118199>
- [12] H. K. Ahsan, F. Marzbanrad, T. Kimura, A. N. Saeed, M. Palaniswami, "Assessing the development of fetal myocardial function by a novel Doppler myocardial performance index," In *Proceedings of the 2016 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society (EMBC)*, Orlando, FL, USA, 16-20 August 2016.
- [13] Felix Scholkmann, Martin Wolf, Jens Boss, "An efficient algorithm for automatic peak detection in noisy periodic and quasi-periodic signals," *Algorithms*, Vol. 5, No. 4, pp. 588-603, 2012.
<http://dx.doi.org/10.3390/a5040588>
- [14] Kozák-Bárány Andrea, Jokinen Eero, Saraste Markku, Tuominen Juhani, Välimäki Ilkka, "Development of left ventricular systolic and diastolic function in preterm infants during the first month of life: A prospective follow-up study," *The Journal of Pediatrics*, Vol. 139, No. 4, pp. 539-545, 2001. <http://dx.doi.org/10.1067/mpd.2001.118199>
- [15] A. Kozak-Barany, E. Jokinen, T. Rantonen, M. Sarate, J. Tuominen, J. Jalonen, I. Valimaki, "Efficiency of left ventricular diastolic function increases in healthy full-term infants during the first months of life: A prospective follow-up study," *Early Human Development*, Vol. 57, No. 1, pp. 49-59, 2000.
[https://doi.org/10.1016/s0378-3782\(99\)00057-2](https://doi.org/10.1016/s0378-3782(99)00057-2)
- [16] Harada Kenji, Takahashi Yasushi, Tamura Masamichi, Orino Tomomi, Takada Goro, "Serial echocardiographic and Doppler evaluation of left ventricular systolic performance and diastolic filling in premature infants," *Early Human Development*, Vol. 54, No. 2, pp. 169-180, 1999.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3782\(98\)00093-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0378-3782(98)00093-0)
- [17] T. Tsutsumi, M. Ishii, G. Eto, M. Hota, H. Kato, "Serial evaluation for myocardial performance in fetuses and neonates using a new Doppler index," *Pediatrics International*, Vol. 41, No. 6, pp. 722-727, 1999.

<http://dx.doi.org/10.1046/j.1442-200x.1999.01155.x>

- [18] N. Meriki, A.W. Welsh, "Development of Australian reference ranges for the left fetal modified myocardial performance index and the influence of caliper location on time interval measurement," *Fetal Diagnosis and Therapy*. Vol. 32, No. 1-2, pp. 87-95, 2012. <http://dx.doi.org/10.1159/000334133>
- [19] R. Cruz-Martíne, F. Figueras, M. Bennasar, R. García-Posadas, F. Crispi, A.E. Hernández, E. Gratacos, "Normal Reference Ranges from 11 to 41 Weeks' Gestation of Fetal Left Modified Myocardial Performance Index by Conventional Doppler with the Use of Stringent Criteria for Delimitation of the Time Periods," *Fetal Diagnosis and Therapy*, Vol. 32, No. 1-2, pp. 79-86, 2012. <http://dx.doi.org/10.1159/000330798>
- [20] T. Van-Mieghem, L. Gucciardo, P. Lewi, L. Lewi, D. Van-Schoubroeck, R. Devlieger, L. De-Catte, J. Verhaeghe, J. Deprest, "Validation of the fetal myocardial performance index in the second and third trimesters of gestation," *Ultrasound in Obstetrics and Gynecology*, Vol. 33, No. 1, pp. 58-63, 2009. <http://dx.doi.org/10.1002/uog.6238>

정상 태아의 임신 분기별 좌심실 도플러 신호 자동 분석

김수민,¹ 예수영^{2,*}

¹웰하이여성아동병원 영상의학과

²부산가톨릭대학교 보건과학대학 방사선학과

요 약

태아 심장의 기능을 평가하기 위해 초음파 검사가 널리 이용되고 있으나 주관적이라는 검사의 특성으로 인해 검사자마다 측정 방식에 차이가 있으며 특히 심근 성능 지수는 현재까지 기준치가 없는 실정이다. 이에 본 연구에서는 정상 태아의 펄스 도플러 파형을 분석하여 자동 측정 프로그램을 개발하여 객관적인 측정을 하고자 하였다. 2019년 4월부터 2020년 2월까지 부산에 위치한 W병원에 내원한 산모 133명을 대상으로 태아 심장 초음파검사를 시행하였으며 좌심실의 펄스 도플러 영상을 획득 후 각 심근 성능 지수를 측정하였다. 본 연구에서 구현한 자동 측정 프로그램을 이용한 임신 초기, 중기, 말기의 심장 성능 지수와 기존의 측정 방식을 이용한 심장 성능 지수를 비교한 결과, 두 수치에는 차이가 있었으나 같은 경향성을 보였다.

중심단어: 태아 심장 초음파, 심근 성능 지수, 펄스 도플러, 자동 측정

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(제1저자)	김수민	웰하이여성아동병원 영상의학과	방사선사
(교신저자)	예수영	부산가톨릭대학교 방사선학	교수