

급성 심근경색증에서 Myocardial Strain을 이용한 국소벽운동장애 평가

한림대학교 의과대학 순환기내과학교실

조구영 · 박우정 · 한성우 · 한상진 · 최승혁 · 최영진 · 두영철
한규록 · 이남호 · 오동진 · 유규형 · 임종윤 · 이 영

Quantification of Regional Wall Motion Abnormality Using Myocardial Strain in Acute Myocardial Infarction

Goo-Yeong Cho, MD, Woo-Jung Park, MD, Sung Woo Han, MD, Sang-Jin Han, MD, Seung-Hyuk Choi, MD, Yung-Jin Choi, MD, Young-Cheoul Doo, MD, Kyoo-Rok Han, MD, Nam-Ho Lee, MD, Dong-Jin Oh, MD, Kyu-Hyung Ryu, MD, Chong-Yun Rhim, MD and Yung Lee, MD

Division of Cardiology, Department of Internal Medicine, College of Medicine, Hallym University, Seoul, Korea

ABSTRACT

Background and Objectives : Several echocardiographic methods, such as ejection fraction, fractional shortening, and Doppler tissue imaging (DTI), have been developed to quantify systolic function but all had several important limitations. The purpose of this study was to quantify the regional wall motion abnormality, using strain, in an acute myocardial infarction, compared with a visual estimation. **Subjects and Methods** : Forty-five patients, with acute anterior (n=28) and inferior myocardial (n=17) infarctions, who underwent color DTI, were examined using longitudinal strain and standard echocardiography, and the results were compared with 54 normal controls. A total of 594 segments [3 segments (apical, mid and basal portion) of septum and inferior wall \times 99 patients] were evaluated. **Results** : In the normal control group, the strain was uniformly distributed in all segments (-20%~-23%). In the infarction groups, the strain was negatively related with the wall motion score. The strain of the apical segments and mid-septum was decreased in the anterior wall infarctions, and the strain of basal septum and mid to basal inferior wall was decreased in the inferior wall infarctions. The dyskinetic segments showed positive strain. **Conclusion** : This study validates strain as a superior method for the quantification of the regional wall motion abnormality in an acute myocardial infarction than visual estimation. (Korean Circulation J 2003;33(7):583-589)

KEY WORDS : Strain ; Myocardial infarction.

서론

심근기능의 정확하고 재현성있는 지표를 얻고자 심초음파의 많은 기술적 향상을 가져왔다. 특히 심근경색증에서 심초음파는 좌심실의 수축 및 이완기능의 평가에 주된 역할을 하나 심초음파를 이용한 국소벽운동장애 평가

음파의 많은 기술적 향상을 가져왔다. 특히 심근경색증에서 심초음파는 좌심실의 수축 및 이완기능의 평가에 주된 역할을 하나 심초음파를 이용한 국소벽운동장애 평가

논문접수일 : 2003년 4월 23일

심사완료일 : 2003년 5월 14일

교신저자 : 조구영, 150-719 서울 영등포구 영등포동 94-200 한림대학교 의과대학 순환기내과학교실

전화 : (02) 2639-5613 · 전송 : (02) 2639-5628 · E-mail : cardioch@medimail.co.kr

가는 주관적이기 때문에 관찰자간의 변이(interobserver variability)가 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해서 최근 도플러 조직 영상(DTI : Doppler Tissue Image),¹⁻⁶⁾ 심근 속도 기울기(Myocardial velocity gradient),⁷⁻⁹⁾ strain 혹은 strain rate¹⁰⁻¹⁶⁾ 등을 이용해 좌심실을 좀 더 객관적이고 정량적으로 분석하기 위해 많이 이용되어지고 있다. 최근에 많이 이용되어지고 있는 DTI를 이용한 각 분절의 조직속도 측정은 국소적 심근 수축기능을 쉽게 객관적이고 정량화 할 수 있는 장점이 있지만 능동적으로 수축하는 심근과 심근경색으로 인해 수동적으로 움직이는 심근 사이의 'tethering' 혹은 'translation' 효과때문에 정확하게 감별할 수 없는 단점이 있다.¹⁷⁻¹⁹⁾ 하지만 strain은 심근의 변형정도를 나타내는 것으로서 심근의 수축 및 이완을 직접적으로 평가할 수 있다.¹²⁾¹³⁾ 또한 strain은 두 지점의 속도 기울기(local velocity gradient)를 측정하기 때문에 tethering 효과가 없이 정량화 할 수 있는 장점이 있다. 본 연구는 심근경색증 환자에서 국소벽운동 장애의 평가를 strain을 이용하여 정량화 하고자 하였으며 이를 육안적 평가와 비교 분석하여 실제 임상에서 쉽게 이용할 수 있는지를 알아보고자 하였다.

대상 및 방법

Strain 혹은 strain rate

Strain이란 물체의 원 형태에서 변형된 정도를 의미하는 것으로써 예를 들어 1차원적인 물체의 길이가 2 cm 인 것이 2초 동안에 2.4 cm로 증가하면 strain(Lagrangian strain)은 20%가 되며 strain rate는 초당 10%가 변하는 것이므로 0.1sec^{-1} 이 된다. 심근에서의 strain의 측정은 한 분절의 이완기 말의 기준상태(L)에서 수축기말의 변형된 상태(ΔL)의 변화된 정도를 의미하는 것으로써(Fig. 1A), 만약 주어진 두 부위의 도플러 조직 속도를 이용하여 속도 기울기(velocity gradient)를 측정할 수 있다면 이를 일정거리를 두고 있는 두 지점(Δr)의 속도 차이로서 strain(ϵ) 혹은 strain rate (SR)를 구할 수 있다(Fig. 1B).²⁰⁾

$$\epsilon = \frac{\Delta L}{L} \textcircled{\bullet} \frac{v(r) - v(\Delta r + r)}{\Delta r} \Delta t = \text{SR} \Delta t$$

일반적으로 정상 심근에서는 기저부의 조직속도가 심

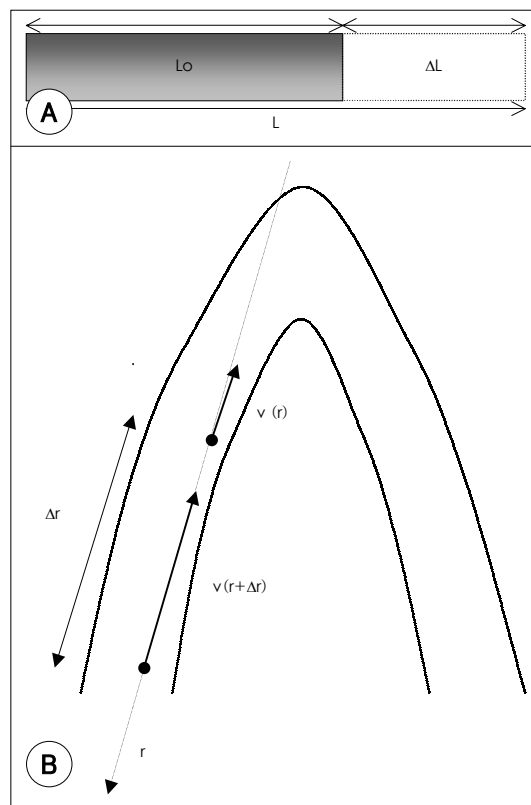


Fig. 1. A : strain is the deformation of an object relative to its original shape. Deformation (strain) of a one-dimensional object is limited to lengthening or shortening. L : the length of the object after deformation. L₀ : its original length. B : schematic illustration of estimation of strain rate of tissue segment (Δr) from tissue velocity (v). The strain rate is calculated by subtracting $v(r + \Delta r)$ from $v(r)$ over the distance (Δr) between these two points.

첨부의 조직속도 보다 빠르기 때문에, 음의(-) strain은 심근의 수축, 양의(+) strain은 심근의 이완을 의미한다.

Strain rate 영상

Vivid V(GE Vingmed) 2.5 MHz 탐촉자를 이용하였으며 color DTI로 연속적으로 3주기를 디지털로 저장하였다. 이를 research software인 EchoPac으로 전송하여 off-line으로 strain을 분석하였다. 모든 color DTI는 90 frame이상으로 저장하였으며(99~133 frame/sec), strain는 3번의 연속적인 심주기 동안의 평균값을 구하였고, 모든 측정은 도플러 선과 심근수축방향의 각도가 30° 미만인 경우에서만 시행하였다.

도플러 선상에 있는 두 지점의 속도의 차이를 구하고 자 심첨 4방 및 2방 단면도에서 기저부부터 심첨부까지 각 분절의 속도기울기를 구하였다. 속도 기울기를 측정 하기 위한 두 지점간의 거리는 신호대잡음비(signal-to-noise ratio)가 가장 적은 8~10 mm를 이용하였으며, 심첨부 분절의 측정은 도플러와 심근 수축방향의 각 도를 최소화 할 수 있는 곳 중에서 가장 심첨부에 가까운 부분에서 구하였다.

국소벽운동장애는 육안으로 평가하였으며 심첨 4방 및 2방 단면도에서 중격과 하벽의 분절을 정상에서 운동이상증(dyskinesia)으로 1~4까지 분류하여 이를 strain과 비교 분석하였다.

대상 환자

2000년 7월부터 2001년 6월까지 급성 심근경색증으로 입원한 환자 45명(전벽경색증 : 28명, 하벽경색증 : 17명)을 대상으로 하였으며, 이를 심부전이나 허혈성 질환이 없고 심초음파상 국소벽운동 장애가 없는 정상 대조군 54명과 비교 분석하였다. 급성 심근경색증의 정의는 심근의 효소가 증가되어 있고 심초음파상 국소벽운동장애가 관찰되는 경우로 국한하였다. 심방세동, 의미있는 판막질환이 있는 경우, 심혈관조영시 좌전하행지와 우관동맥협착이 육안적 평가로 60%이상 동시에 있는 경우, 도플러 각도와 심근수축방향의 각도가 30° 이상인 경우는 제외하였다.

각 분절의 국소벽운동점수(regional wall motion score)와 strain을 구하기 위해 중격과 하벽의 3분절(기저부, 중간부, 심첨부)로 총 594분절(99명×(중격 3분절+하벽 3분절))를 분석하였다

통계처리

모든 결과는 평균 및 표준편차로 표시하였고, 통계처리는 SPSS 7.5를 이용하였으며 p값이 0.05미만일 경우 유의한 수준으로 하였다. 각 군간의 비교는 t-test 및 ANOVA를 이용하여 분석하였다. 관찰자내 변이를 구하기 위해 Pearson correlation을 구하였다.

결 과

심근경색증 환자의 평균나이는 61 ± 10 이었으며 남자는 35명이었다. 좌심실 구혈률 및 수축기시 중격 부

Table 1. Baseline characteristics

	Normal	Myocardial infarction	
		Anterior	Inferior
Age	$50 \pm 16^*$	60 ± 8	62 ± 12
Heart rate	68 ± 13	72 ± 16	69 ± 17
LVEF (%)	$64 \pm 6^*$	43 ± 10	47 ± 11
Wall thickness (mm)	$9.8 \pm 1.7^*$	11.6 ± 1.8	11.9 ± 1.9
Annulus DTI of septum			
Systole velocity (cm/sec)	$6.0 \pm 1.3^*$	4.3 ± 1.4	4.4 ± 1.4
Systolic duration (msec)	$291 \pm 35^\dagger$	261 ± 34	287 ± 44

LVEF : left ventricle ejection fraction, DTI : Doppler tissue image. Wall thickness=(septum+posterior wall)/2.

* : $p < 0.05$ normal vs anterior or inferior myocardial infarction, † : $p < 0.05$ normal vs anterior myocardial infarction

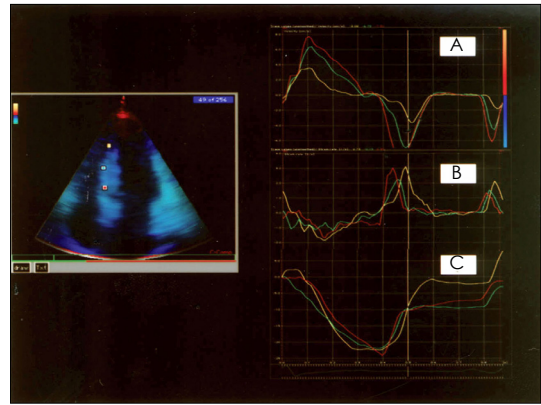


Fig. 2. Color tissue Doppler echocardiography in normal septum. A : quantitative Doppler tissue velocity, B : strain rate, C : strain. Red color : basal septum, blue color : mid septum, yellow color : apical septum.

위의 판류속도는 심근경색증군이 대조군에 비해 적었다 (Table 1) .

정상 대조군에서 심실 중격에서의 심근 수축 시 조직 속도는 기저부에서 심첨부로 갈수록 감소하였으나 strain이나 strain rate는 동일한 수치를 보였다(Fig. 2). 즉 strain은 국소벽운동 장애가 없는 경우에는 중앙중격 분절을 제외한 모든 분절에서 균등하게 측정되었으며, 분절부위에 관계없이 벽운동장애점수가 증가할수록 strain은 감소하였다($p < 0.05$). 또한 운동이상을 보인 분절에서는 양(+)의 strain을 보였다(Table 2) (Fig. 3, 4).

정상 대조군에 비해 전벽 심근경색증에서는 심첨부 중격, 중앙중격, 심첨부하벽에서 strain이 감소하였으며 ($p < 0.05$), 하벽 심근경색증에서는 기저중격, 중앙하벽,

Table 2. Strain (%) according to wall motion score in myocardial infarction group

WMS	Septum			Inferior wall		
	Apical*	Mid*	Basal*	Apical*	Mid*	Basal*
1	-22.6±8.2	-18.9±6.6	-21.7±7.7	-23.1±5.2	-20.5±7.0	-21.6±6.6
2	-8.3±4.3	-10.5±5.0	-11.0±6.7	-10.4±3.7	-10.6±5.4	-9.9±3.2
3	-1.9±7.9	-4.1±0.6	-4.4±9.8	-0.4±5.1	-5.7±2.6	-1.2±7.3
4 [†]	12.2±0.4		10.9			7.3

WMS : wall motion score, * : $p<0.05$ WMS 1 vs WMS 2 vs WMS 3, † : statistical test of WMS 4 can not be validated due to small sample size

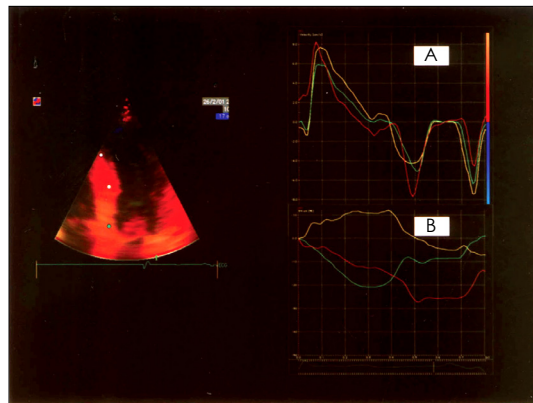


Fig. 3. Quantitative Doppler tissue velocity (A) and Strain (B) in acute inferior myocardial infarction. Basal septum showed dyskinetic movement. Yellow color : basal septum, blue color : mid septum, red color : apical septum. Doppler tissue velocity of basal septum shows normal, but strain shows positive.

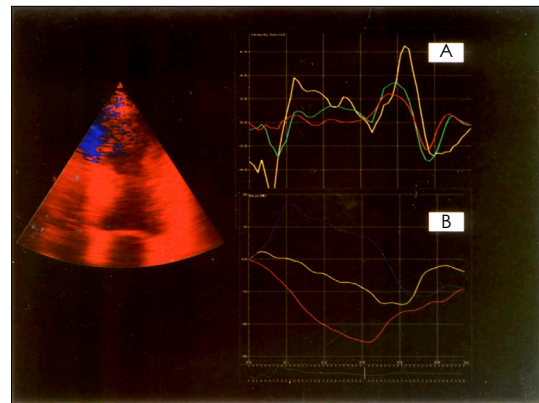


Fig. 4. Quantitative Doppler tissue velocity (A) and strain (B) in anterior myocardial infarction. Apical septum showed dyskinetic movement. Doppler tissue velocity of apical segment shows 0 (red color), but strain shows positive (blue color).

기저하벽에서 감소하였다($p<0.05$) (Table 3).

재현성

재현성의 평가는 동일 검사자에 의해 시행되었으며, 저장된 영상에서 30명을 무작위 추출하여 중격과 하벽의 각각 3분절씩 모두 180분절에 대해 처음 측정시점부터 1개월 뒤 다시 strain을 측정하여 관찰자내 변이 (intraobserver variability)를 구하였다. 측정된 두 strain 대한 평균차이는 12%였으며, 상관계수는 $r=0.91$ 이었다.

고 찰

심근색색증 환자에서 국소 벽운동장애를 평가하기 위해 심내막연 운동(endocardial motion)과 벽운동 비후 (wall thickening)을 실시간으로 육안적 평가에 많이 의

존하기 때문에 주관적인 단점이 있다. 이러한 문제를 극복하고자 객관적이고 국소 벽운동장애를 정량화 하기 위해 DTI,¹⁻⁶⁾ color kinesis,²¹⁾²²⁾ 심근속도기울기⁷⁻⁹⁾ 등이 이용되고 있다. 최근에 많이 이용되고 있는 DTI는 심근 조직의 속도를 측정하여 국소 심근 기능을 정량화 할 수 있는 새로운 방법으로, 많은 연구에서 국소 심근 기능을 비침습적으로 평가하는데 육안적 평가에 비해 어느 정도 향상을 가져왔다. Gorcsan 등⁴⁾은 DTI로 측정된 좌심실의 수축기시 속도가 최대 탄력(maximal elastance, Emax)와 밀접한 관계가 있어 심실 수축 상태를 평가하는데 이용될 수 있음을 보였다. Yamada 등¹⁷⁾은 좌심실기능을 측정하는 수단으로 심도자로 측정된 좌심실의 최대 dP/dt 와 비교하여 간헐파형 DTI로 측정된 수축기 심근속도와 밀접한 연관($r=0.75$)이 있음을 보여주었지만, 중요한 제한 점으로 심근수축시 심근의 translation으로 한 부위에서 정확한 속도를 측정하기 어려운 점이 있었다. 즉, DTI로 측정된 한 부

Table 3. Segmental strain (ϵ , %) in myocardial infarction group

	Normal	Anterior MI	Inferior MI		
	ϵ (%)	ϵ (%)	WMS	ϵ (%)	WMS
Septum					
Apical	-22.6 ± 8.6	$-2.7 \pm 8.2^*$	2.8	-20.6 ± 8.6	1.1
Mid	-20.5 ± 6.5	$-11.7 \pm 7.6^*$	1.6	$-14.7 \pm 4.2^*$	1.2
Basal	-22.0 ± 6.6	-21.1 ± 9.3	1.1	$-4.8 \pm 9.2^*$	2.7
Inferior wall					
Apical	-23.4 ± 5.4	$-2.9 \pm 9.3^*$	2.7	-20.6 ± 5.5	1.1
Mid	-20.7 ± 7.4	-18.6 ± 7.0	1.1	$-12.9 \pm 7.8^*$	2
Basal	-22.4 ± 7.2	-19.2 ± 5.9	1.1	$-1.9 \pm 7.8^*$	2.9

MI : myocardial infarction, WMS : wall motion score, * : $p < 0.05$ vs normal

위의 심근 조직속도는 주위 조직의 운동에 의해 영향을 받아 능동적으로 수축하는 조직과 수동적으로 움직이는 조직을 정확히 감별하지 못하는 단점이 있다.

이외에도 심내막 운동과 심근비후로 측정되는 color kinesis 등이 있지만, 이 역시 심근의 translation 때문에 심내막 운동이 심근 비후를 정확하게 반응하지 못하는 단점이 있다.²¹⁾²²⁾ 또한 심근속도기울기는 color TDI로 translation 효과 없이 심실수축을 측정할 수 있으나 방사형으로 수축하는 심근분절만 평가할 수 있어 심근의 모든 분절에서 측정할 수 없는 단점이 있다.⁷⁻⁹⁾²³⁾

최근 임상에서 많이 이용되고 있는 strain은 이러한 단점을 많이 개선하여 좀 더 객관적으로 심실기능을 평가하는데 많이 이용되어지고 있다. 본 연구는 strain이 국소벽운동장애 평가에 임상적으로 쉽고 객관적으로 정량화 할 수 있는 지표로 이용될 수 있음을 보여 주었다.

Strain이라는 개념은 심근의 elastic stiffness를 이해하기 위해 Mirsky and Parmley 등²⁴⁾이 처음으로 사용하였다. 그들은 1차원적인 물체가 안정된 상태에서 어떠한 힘 혹은 스트레스에 의해 변형되는 정도를 strain이라 정하였다. 즉 strain은 주어진 힘에 대한 조직의 상대적인 변형 정도를 의미하는 것으로써 음(-)의 strain은 조직의 수축(compression 혹은 shortening), 양(+)의 strain은 조직의 이완(lengthening 혹은 expansion)을 나타낸다. Strain rate는 단위 섬유길이에 대한 수축 속도(rate of shortening velocity)를 나타내는 것으로써, 기초 심근 생리실험에서 국소적 수축상태를 나타내는 'instantaneous force velocity length relations'를 대치할 수 있을 것으로 보인다.²⁵⁾²⁶⁾ 즉 Strain rate는 만약 특정 섬유길이의 변화가 천천히 일어난다면

strain rate는 감소하게 된다. 하지만 이러한 strain의 측정은 침습적인 방법으로 임상적 응용에 제한이 많았다. 1988년 Zerhouni 등²⁷⁾은 자기공명영상을 이용하여 처음으로 비침습적으로 방사형(radial), 원주형(circumferential), 종축(longitudinal) 방향의 strain을 측정하였다. 이후 심초음파의 발달로 조직에서의 속도를 직접측정할 수 있는 기술이 임상에서 적용되었다.¹⁻³⁾ 심초음파로 측정되는 strain은 심근의 종축 변형을 알 수 있는 지표로 사용된다. 이후 strain은 DTI에 비해 좌심실 기능 평가에 진단적 가치를 많이 향상시켰다.¹¹⁾ Heimdal 등¹²⁾은 심근경색증 환자에서 strain rate가 정상인에 비해 감소한다는 것을 보여주었다. 또한 심근국소벽운동장애 평가에 DTI와 비교하였는데 DTI는 65% 환자에서 측정이 가능하였지만 strain은 94%에서 벽운동장애를 평가할 수 있었다.¹¹⁾

본 연구에서도 비록 모든 분절에서 DTI를 측정하지 않았지만 일부 예에서는 운동이상(dyskinesia)이 보인 분절에서 DTI로 측정된 조직 속도는 정상 및 0으로 관찰되었지만 strain은 양성(+)을 보여 국소벽운동장애에 좀 더 정확하게 정량화 할 수 있었던 경우가 있었다(Fig. 3, 4). 이는 다른 연구와 비슷한 소견을 보였는데 Heimdal 등¹²⁾은 일부 운동불능의 심근경색에서는 양(+)의 조직속도를 보였지만 strain은 0을 보였다. 이는 운동불능분절의 조직속도가 주위의 정상조직에 의한 수동적인 운동때문으로 여겨진다. 또한 Greenberg 등¹⁵⁾은 동물실험을 통해 E_{max} 기준으로 하였을 때 최대 strain($r=0.94$)이 TDI로 측정된 심근 속도($r=0.75$)와 비교하여 좌심실 수축을 더 잘 반영할 수 있는 강력한 지표로 사용될 수 있음을 보여 주었다.

본 연구에서 정상인의 strain은 DTI로 측정된 조직의 속도와는 달리 분절부위와 관계없이 균등하게 분포한 것을 보여 주었는데 이는 기저부에서 심첨부로 갈수록 조직 속도의 감소가 일정하게 감소하는 것을 의미하며 이는 Edvardsen 등¹¹⁾의 연구와 같은 결과를 보였다. 정상 인에서 심근 전 부위에서 균등하게 strain이 관찰되는데 반해 심근경색증 환자에서 strain의 국소적 변화가 관찰된다. 동물실험에서 strain의 감소는 허혈성 변화를 유도하는 동안에 수축시의 심근의 두께 감소와 일치한다. 즉, 심근경색증 환자에서 strain은 육안적 평가에 비해 정상조직과 비정상적인 수축상태를 보이는 조직을 더 정확하게 감별하였으며 또한 관류가 감소된 분절의 발견에 훨씬 우수하였다.¹⁰⁾ 본 연구에서도 전벽경색증 환자에서 중격 중간분절이 육안적 측정에 비해 strain이 상대적으로 적게 나타났는데(Table 2), 이는 strain에 비해 육안적 측정이 상대적으로 운동기능감소(hypokinesia)를 정상으로 판명한 경우가 많았기 때문일 것으로 여겨진다.

본 연구의 제한점으로는 흉골연 단축단면도로 관찰되는 분절, 즉 방사형 수축은 측정할 수 없었으며, 또한 도플러 각도와 심근수축방향과의 각도 때문에 중격과 측벽 또는 하벽과 전벽의 strain을 동시에 측정할 수 없었다.

요 약

배경 및 목적 :

심근경색증에서 국소 벽운동장애를 객관적이고 정량화 하기 위해 많은 심초음파적 기법이 발달되었으나 많은 제한점이 있었다. 두 지점의 속도기울기를 측정하여 얻어지는 strain 혹은 strain rate는 부하정도나 tethering 효과 없이 좌심실의 수축정도를 평가할 수 있다. 본 연구는 strain을 이용하여 심근경색증에서 국소벽운동장애를 정량화 하고자 하였으며, 또한 이를 육안적 평가와 비교하여 실제 임상에서 쉽게 이용할 수 있는지를 알아보고자 하였다.

방 법 :

심근경색증환자 45명(전벽경색증 28명, 하벽경색증 17명)과 정상대조군 54명을 대상으로 중격과 하벽의 각각 3분절(기저부, 중간부, 심첨부)로 모두 594분절에 대해 각각 strain을 측정하였다. Strain은 도플러조직영

상을 이용하여 3주기를 디지털로 저장한 다음 off-line으로 분석하였다.

결 과 :

정상대조군에서는 strain이 분절 부위에 관계없이 -20~-23%의 동일한 수치를 보였으며, 심근경색증군에서는 벽운동장애 점수가 높을수록 strain이 감소하는 경향을 보였다. 전벽경색증에서는 심첨부중격, 중앙중격, 심첨부하벽에서 strain이 감소하였으며, 하벽 심근경색증에서는 기저중격, 중앙하벽, 기저하벽에서 감소하였다

결 론 :

심근경색증에서 국소벽운동장애에 평가에 strain을 이용하여 정량화 할 수 있었다. 하지만 도플러 각도가 일치하지 않은 분절에서는 측정할 수 없는 제한점이 있어 향후 이를 극복해야 할 것으로 여겨진다.

중심 단어 : Strain ; 심근경색증.

REFERENCES

- 1) Sutherland GR, Stewart MJ, Groundstroem KW, Moran CM, Fleming A, Guell-Peris FJ, Riemersma RA, Fenn LN, Fox KA, McDicken WN. *Color Doppler myocardial imaging: a new technique for the assessment of myocardial function. J Am Soc Echocardiogr* 1994;7:441-58.
- 2) Miyatake K, Yamagishi M, Tanaka N, Uematsu M, Yamazaki N, Mine Y, Sano A, Hirama M. *New method for evaluating left ventricular wall motion by color-coded tissue Doppler imaging: in vitro and in vivo studies. J Am Coll Cardiol* 1995;25:717-24.
- 3) Palka P, Lange A, Fleming AD, Sutherland GR, Fenn LN, McDicken WN. *Doppler tissue imaging: myocardial wall motion velocities in normal subjects. J Am Soc Echocardiogr* 1995;8:659-68.
- 4) Gorcsan J 3rd, Strum DP, Mandarino WA, Gulati VK, Pinsky MR. *Quantitative assessment of alterations in regional left ventricular contractility with color-coded tissue Doppler echocardiography: comparison with nonmicrometry and pressure-volume relations. Circulation* 1997;95:2423-33.
- 5) Kass DA, Maughan WL, Guo ZM, Kono A, Sunagawa K, Sagawa K. *Comparative influence of load versus inotropic states on indexes of ventricular contractility: experimental and theoretical analysis based on pressure-volume relationship. Circulation* 1987;76:1422-36.
- 6) Prinzen FW, Augustijn CH, Arts T, Allessie MA, Reneman RS. *Redistribution of myocardial fiber strain and blood flow by asynchronous activation. Am J Physiol* 1990;259:H300-8.
- 7) Garot J, Derumeaux GA, Monin JL, Duva-Moulin AM, Simon M, Pascal D, Castaigne A, Dubis-Rande JL, Diebold B, Gueret P. *Quantitative systolic and diastolic transmyocardial velocity gradients assessed by M-mode colour Doppler tissue imaging as reliable indicators of regional left ventricular function after acute myocardial infarction. Eur Heart J* 1999;20:593-603.

- 8) Tsutsui H, Uematsu M, Shimizu H, Yamagishi M, Tanake N, Matsuda H, Miyatake K. Comparative usefulness of myocardial velocity gradient in detecting ischemic myocardium by a dobutamine challenge. *J Am Coll Cardiol* 1998;31:89-93.
- 9) Ueno Y, Nakamura Y, Ohbayashi Y, Kinoshita M. Evaluation of left ventricular systolic and diastolic global function: peak positive and negative myocardial velocity gradients in M-mode Doppler tissue imaging. *Echocardiography* 2002;19:15-25.
- 10) Gotte MJ, van Rossum AC, Twisk JW, Kuijter JP, Marcus JT, Visser CA. Quantification of regional contractile function after infarction: strain analysis superior to wall thickening analysis in discriminating infarct from remote myocardium. *J Am Coll Cardiol* 2001;37:808-17.
- 11) Edvardsen T, Skulstad H, Aakhus S, Urheim S, Ihlen H. Regional myocardial systolic function during acute myocardial ischemia assessed by strain Doppler echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2001;37:726-30.
- 12) Heimdal A, Stoylen A, Torp H, Skjaerpe T. Real-time strain rate imaging of the left ventricle by ultrasound. *J Am Soc Echocardiogr* 1998;11:1013-9.
- 13) Stoylen A, Heimdal A, Bjornstad K, Torp HG, Skjaerpe T. Strain rate imaging by ultrasound in the diagnosis of regional dysfunction of the left ventricle. *Echocardiography* 1999;16:321-9.
- 14) Weidemann F, Eyskens B, Jamal F, Mertens L, Kowalski M, D'hooge J, Bijnens B, Gewillig M, Rademakers F, Hatle L, Sutherland GR. Quantification of regional left and right ventricular radial and longitudinal function in healthy children using ultrasound-based strain rate and strain imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2002;15:20-8.
- 15) Greenberg NL, Firstenberg MS, Castro PL, Main M, Travaglini A, Odabashian JA, Drinko JK, Rodriguez LL, Thomas JD, Garcia MJ. Doppler-derived myocardial systolic strain rate is a strong index of left ventricular contractility. *Circulation* 2002;105:99-105.
- 16) Jamal F, Strotmann J, Weidemann F, Kukulski T, D'hooge J, Bijnens B, van de Werf F, de Scheerder I, Sutherland GR. Noninvasive quantification of the contractile reserve of stunned myocardium by ultrasonic strain rate and strain. *Circulation* 2001;104:1059-65.
- 17) Yamada H, Oki T, Tabata T, Iuchi A, Ito S. Assessment of left ventricular systolic wall motion velocity with pulsed tissue Doppler imaging: comparison with peak dp/dt of the left ventricular pressure curve. *J Am Soc Echocardiogr* 1998;11:442-9.
- 18) Hatle L, Sutherland GR. Regional myocardial function: a new approach. *Eur Heart J* 2000;21:1337-57.
- 19) Wilkenshoff UM, Sovani A, Wigstrom L, Olstad B, Lindstrom L, Engvall J, Janerot-Sjoberg B, Wrane B, Hatle L, Sutherland GR. Regional mean systolic myocardial velocity estimation by real-time color Doppler myocardial imaging: a new technique for quantifying regional systolic function. *J Am Soc Echocardiogr* 1998;11:683-92.
- 20) D'hooge J, Heimdal A, Jamal F, Kukulski T, Bijnens B, Rademakers F, Hatle L, Suetens P, Sutherland GR. Regional strain and strain rate measurement by cardiac ultrasound: principles, implementation and limitations. *Eur J Echocardiogr* 2000;1:154-70.
- 21) Vitarelli A, Sciomer S, Penco M, Dagianti A, Pugliese M. Assessment of left ventricular dyssynergy by color kinesis. *Am J Cardiol* 1998;81:86G-90G.
- 22) Perez JE, Waggoner AD, Barzilai B, Melton HE Jr, Miller JG, Sobel BE. On-line assessment of ventricular function by automatic boundary detection and ultrasonic backscatter imaging. *J Am Coll Cardiol* 1992;19:313-20.
- 23) Uematsu M, Nakatani S, Yamagishi M, Matsuda H, Miyatake K. Usefulness of myocardial velocity gradient derived from two-dimensional tissue Doppler imaging as an indicator of regional myocardial contraction independent of translational motion assessed in atrial septal defect. *Am J Cardiol* 1997;79:237-41.
- 24) Mirsky I, Parmley WW. Assessment of passive elastic stiffness for isolated heart muscle and the intact heart. *Circ Res* 1973;33:233-43.
- 25) Sonnenblick EH. Instantaneous force velocity length determinants in the contraction of heart muscle. *Circ Res* 1965;16:441-51.
- 26) Weber KT, Janicki JS. Instantaneous force-velocity-length relations in isolated dog heart. *Am J Physiol* 1977;232:H241-9.
- 27) Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, Yang A, Shapiro EP. Human heart: tagging with MR imaging—a method for noninvasive assessment of myocardial motion. *Radiology* 1988;169:59-63.