MRI를 이용한 허혈성 심질환의 One-stop 진단

One-stop Diagnosis of Ischemic Heart Disease Using Cardiac MRI

김 양 민
세종병원 방사선과
경기 부천시 소사구 소사본2동 91 - 121
Yang Min Kim, M.D
Department of Radiology
Sejong General Hospital
E-mail : ymkim11@be.md

Abstract

Recently, MRI has achieved many technical advances in the spatial resolution, temporal resolution, signal-to-noise ratio, and postprocessing software. As a result, cardiac MRI has made a sudden rise from old obscurity in the diagnosis of coronary artery disease. Cardiac MRI may be a one-stop-shop solution for the assessment of systolic dysfunction, perfusion impairment and myocardial viability, and for the imaging of stenosed artery. The evaluation of myocardial ischemia and viability are very important in the decision of therapeutic strategy and the anticipation of the prognosis of the patients with ischemic heart disease. At one session of examination, MRI can provide combined information on myocardial contractile function and myocardial perfusion, and unique information on the transmural extent of delayed hyperenhancement. Delayed hyperenhancement on contrast-enhanced MRI is highly reproducible irrespective of the scanning procedure and the operator, which is used for the interpretation of myocardial viability in the patients with myocardial infarction. Cardiac MRI is a very accurate and cost-effective modality for the evaluation of ischemic heart disease.

Keywords : Cardiac MRI; Coronary artery disease; Myocardial infarction; Viability
핵 심 용 어 : 심장 MRI; 관상동맥질환; 심근경색; 생존심근

서 론

MRI는 1980년대에 도입 초기부터 혈류와 심벽 사이에 대조가 잘되고 심전도 동기화로 심장의 움직임을 없앤 영상을 얻을 수 있어서 심질환의 해부학적 이상을 진단하기 위한 영상진단으로 꾸준히 이용되어 왔다. 그러나 90년대 중반까지의 MRI는 영상획득 속도가 느려서 심질환에 동반된 기능 이상을 평가하기에는 부적절하여 심질환 환자에서 MRI의 이용이 제한적일 수 밖에 없었다. 이후 MRI 기기는 속도가 빨라지고 공간해상도와 시간해상도가 획기적으로 향상되어 심장 환자, 특히 허혈성 심질환 환자에서의 이용이 급속히 늘고 있다. 심장 MRI는 허혈성 심질환에 동반된 관상동맥의 협착, 이로 인한 관류의 감소, 수축 기능의 저하와 심근 생존능을 동시에 정확하게 평가할 수 있어서 허혈성 심질환의 진단에 대해서 다른 검사법과는 비교할 수 없는 One-Stop-Diagnosis의 면모를 갖추게 되었다.

심장 MRI의 장점과 특징

심장 초음파는 우수한 공간해상도와 시간해상도로 다양한 해부학적인 진단과 기능적인 분석을 할 수 있으며

매우 편리하여 심장 질환의 진단에 기본적이고 보편적으로 이용되고 있다. 심장 초음파는 초음파가 통과할 수 없는 심장 주위의 흉골, 늑골이나 폐를 피해서 영상을 얻어야 하므로 심장의 장축이나 단축면으로 정확히 영상을 얻을 수 없는 경우가 있고, 용적 측정을 위한 연속적인 단면 영상을 얻을 수 없는 경우가 많다. 따라서 심초음파로 용적을 측정하기 의해서는 심장을 총탄과 같은 대칭적인 포물선 모양으로 가정을 한 후, 심실 내강의 장축면이나 단축면의 면적과 길이를 측정하여 이를 부피로 환산하는 식에 대입하여 계산을 한다. 경색 등에 의해서 심장의 모양이 불규칙해지거나 초음파창의 제한 때문에 장축면이 정확히 얻어지지 않을 때는 심실 용적이 부정확해지고, 따라서 이를 이용한 기능 분석은 부정확해질 수밖에 없다.

반면 MRI는 초음파창의 제한이 전혀 없으므로 정확하게 심장의 장축이나 단축면을 얻을 수 있고, 기하학적인 가정 없이 직접 용적을 측정하므로 정확하게 심장 기능을 평가할 수 있다. MRI를 이용하여 일정한 간격으로 연속적으로 심장의 단축면 영상을 얻어 각 단축면의 부피를 합하여 심실 용적을 측정하므로 매우 정확하다. 각 주기별로 심장의 용적을 구한 후 이를 그래프로 그리면 용적의 변화를 볼 수 있으며, 확장기말 용적과 수축기말 용적으로부터 좌심실 박출계수(ejection fraction)를 구할 수 있다(1~3). MRI를 이용한 용적 지표의 측정은 심근과 심내강 사이의 대조가 매우 좋으며 재현성이 매우 우수하고 정확도가 높아서 3차원 심초음파와 같은 다른 영상기법의 연구시 기준치로써 비교되고 있다(4).

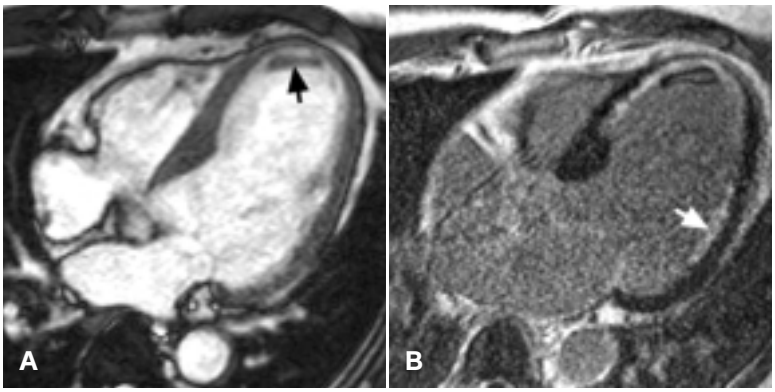
형태학적인 평가

허혈성 심질환에 동반된 심장의 형태적인 변화를 MRI로 정확히 평가할 수 있다. 형태적인 분석에는 주로 혈류를 검게 나타나게 하여 심벽과 대조가 되게 하는 소위 " Black blood technique "들을 이용하여 영상을 얻는다. 그 적응증으로는 심근 경색에 의한 심벽 두께의 감소, 좌심실의 재형성, 심실류 형성, 심실중격 파열과 이에 동반된 심낭삼출의 진단을 들 수 있다(5, 6). 좌심실 심첨에 있는 심실류에 동반된 혈전증은 심초음파로 진단이 어려운 경우가 있는데 MRI를 이용하면 이를 정확히 진단할 수 있다(7)(그림 1).

수축기능의 평가

허혈성 심질환 환자에서 전반적인 심장 기능을 평가하려면 좌심실의 용적이나 박출계수를 측정해야 한다. 앞에서 언급했듯이 MRI를 이용하면 정확한 심실 용적의 측정과 이를 이용한 좌심실 박출계수의 계산이 가능하므로 허혈성 심질환에 동반된 좌심실 기능이상에 대해 질병의 자연적인 경과나 수술 또는 시술 후의 비교, 약물치료에 대한 반응 등을 정확히 평가할 수 있다(1~3).

국소적인 심장기능은 심벽 두께, 수축기 심근 두꺼워짐과 심벽 운동을 분절별로 측정하여 평가한다. MRI는 공간해상도가 높고 심근과 내강의 혈류, 그리고 심근과 심외막의 지방 사이의 대조가 매우 좋아서(그림 1A) 심근의 내외측 경계를 쉽게 찾을 수 있다. 단축면 영상에서 얻어진 결과를 심첨부터 심기저까지 동심원상에 나타내어(Bull 's eye or Polar map) 심실의 분절별로 확장기말의 심근 두께, 수축기의 심근 두꺼워짐, 수축시 심벽 운동을 정량적으로 분석할 수 있다. 심벽 두께의 감소는 심근 괴사에 의한 반흔조직을 시사하는 소견일 수 있다. PET와 도부타민 부하 초음파와 비교한 MRI 연구에서 5.5 mm 이하의 확장기말 심벽 두께와 2 mm 미만의 수



A) Cine MRI 수평 장축 영상에서 좌심실의 심첨이 확장되어 심실류를 보이고 이 부위의 심근이 얇아져 있다. 심실류의 안쪽을 따라 선형의 혈전(화살표)가 형성되어 있다.
B) 지연 조영증강 영상에서 좌심실의 심내막에 연해있는 조영증강이 보인다. 심첨을 중심으로 거의 통벽성으로 조영증강이 되고 중격쪽으로 가면서 통벽성이 감소한다. 외측벽(화살표)은 심내막하형으로 조영증강이 되었다.

그림 1. 45세 남자 : 급성 심근경색 환자

축기 심근 두꺼워짐을 보이는 심근 분절은 생존능이 낮은 것으로 보고되고 있다(8~10).

도부타민 부하 MRI

도부타민은 심근의 수축력과 심박동을 증가시켜서 협착이 있는 관상동맥 영역에 심근허혈을 유발시킨다. 도부타민 부하 MRI는 도부타민 부하 초음파와 같은 기전으로 영상을 얻어서 이를 진단에 이용한다. 10 μg/kg/min의 저용양 도부타민을 이용하여 수축 예비능이 남아있는 생존 심근, 즉 동면 심근을 찾을 수 있고, 40 μg/kg/min의 고용양 도부타민을 이용하여 관상동맥 협착과 이로 인한 심근 허혈을 진단할 수 있다(11). 도부타민의 양을 증가시키면서 계속해서 영상을 얻어서 수축기능의 변화를 평가하여 진단한다. 심초음파는 계속해서 똑같은 부위에서 영상을 얻는 것이 어려우며, 심초음파창의 제한 때문에 원하는 장축면이나 단축면 영상을 얻을 수 없다. 따라서 도부타민 부하 초음파는 영상의 질이 낮아서 검사가 불충분한 경우가 많으며 재현성이 낮은 단점이 있다(12). MRI는 정확하게 장축면이나 단축면 영상을 얻을 수 있고 표준화된 방법, 즉 승모판의 륜(annulus)에서 시작하여 이에 평행한 단축면을 일정한 간격으로 얻는 방법을 사용하므로 한 검사 내에서 또는 추적검사시에 정확히 같은 부위에서 영상을 얻을 수 있어서 검사가 객관적이며 재현성이 매우 높아진다(9, 11).

도부타민 부하 심초음파로 진단이 어려웠던 환자만을 대상으로 한 MRI 연구에서 도부타민에 의해서 유발된 심근 허혈과 40% 이하의 박출계수는 미래의 심근경색과 심장사 등 주요한 심장 사건을 예견하는 독립적인 지표로 보고하고 있다(13). MRI 심근 표지기법(myocardial tagging)을 이용하여 심장주기에 따른 심근 변형을 측정하여 지금까지 할 수 없었던 인체 내의 심근 수축의 생리에 관한 연구가 활발이 진행되고 있다(14). 도부타민 부하 심근표지 MRI 연구에서 약물치료 후에 심근운동이 개선되는 효과를 측정할 수 있고, 심근경색 후의 운동변화를 평가할 수 있다. 도부타민 부하 MRI에 심근표지를 추가하면 흉통을 가진 환자에서 심근허혈의 진단율이 증가하며, 심근 허혈이 유발되지 않은 환자에서는 심혈관 사건 없는 생존율이 높은 것으로 보고하고 있다(15). 심장 수술 이외의 수술에 대해 중등도의 위험도가 있으며 도부타민 부하 초음파검사가 부적절한 환자를 대상으로 한 도부타민 부하 MRI 연구에서 양성인 환자는 20%에서, 그리고 음성인 환자는 2%에서 심장 사건이 생겨서 이런 환자군

에서 위험도를 분류하는 데 이용할 수 있는 것으로 주장하였다(16).

심근관류의 평가

휴식기에는 85% 정도의 관상동맥 협착이 있어도 관상동맥 예비능으로 혈관이 확장되어 증상이 없으나 운동과 같은 부하상태에서는 이보다 적은 협착에서도 심근 허혈이 유발된다. 심근 허혈의 진단율을 높이기 위해서 심장부하를 해야하는데, MRI 심근 관류 검사에서는 디피리다몰이나 아데노신과 같은 혈관 확장제를 주로 이용한다. 현재 MRI 관류 검사에서 사용되는 조영제는 간질성 조영제이므로 최초 순환 동안에 심근의 관류상태를 평가하여야 된다. 또한 좌심의 많은 부분을 평가하기 위해서는 동시에 여러 면의 영상을 얻어야 하기 때문에 아주 빠른 영상기법을 이용한다(17). 첫번째 순환 동안에 정상 심근은 점차 조영증강이 진행되어 밝게 보이나 혈류 공급이 감소된 부위에서는 조영증강이 되지 않아서 관류결손으로 나타나게 된다(18). 심근의 특정 부위에서 시간에 따른 밝기(신호강도)의 기울기로서 혈류의 상태를 평가할 수 있으며 휴식기와 부하기의 기울기의 비로서 심근 관류 예비능을 평가할 수 있다.

심근 관류 예비능 지수을 이용한 MRI 연구 결과 단일 혈관 관상동맥질환의 진단 예민도는 90%, 특이도는 83%로 보고되고 있다(19). MRI 심근 관류 검사의 메타분석 결과는 관상동맥질환의 진단 정확도에 대한 예민도는 82%, 특이도는 88%로 보고되었다(20). MRI 관류 검사는 급성 심근경색증에 동반된 microvascular obstruction(no−reflow phenomenon)의 진단이나 재관류요법 후 추적검사에도 이용되고 있다(21, 22). MRI 관류 검사는 공간해상도가 매우 높아서 심내막하 결손을 구분해 낼 수 있는데, 이는 SPECT나 PET 검사로는 얻을 수 없는 결과이다. syndrome−X 환자를 대상으로 한 MRI 연구에서는 심내막하 관류결손과 이 부위의 예비능의 저하를 정량적으로 분석하고, 이 결과에서 syndrome−X가 미세혈관의 이상에 의한 것임을 주장하였다(23).

심근 생존능의 평가

관상동맥질환에 의한 좌심실의 이상기능을 가진 환자 중에서 시술이나 수술과 같은 재관류요법에 의해서 기능이 호전되는 환자를 찾는 것은 임상적으로 가장 중요한 관심사항일 것이다. 허혈성 심근증에 동반된 심근은 반흔조직, 동면심근과 기절심근이 섞여 있으며, 반흔 조직 내에서 생존 심근이 부분적으로 존재할 수 있다. MRI를 이용하면 세가지 유형의 조직들을 정확히 구분해 낼 수 있어서 심장 MRI가 심근 생존능의 평가에 있어서 중추적인 역할을 할 수 있으리라 기대된다. 심근 생존능 평가를 위해서는 도부타민 부하 MRI의 수축 예비능과 조영증강 MRI의 지연 조영증강 소견(delayed hyperenhancement)이 이용되고 있다.

도부타민 부하 MRI로 심실용적과 심근의 두꺼워짐을 측정하여 심근 허혈과 심근 생존능 여부를 정확히 진단할 수 있다. 만성 심근경색 환자에서 저용량 도부타민 부하 MRI와 FDG−PET와 비교한 연구에서는 6 mm 미만의 확장기말 심벽 두께와 1mm 미만의 수축기 심근 두꺼워짐을 생존능이 없는 것으로 판단해서 MRI가 생존능 진단에 우수함을 보고하고 있다(10, 24). 저용량의 도부타민을 이용한 심근지표 MRI의 정량적 연구상 재관류 후의 기능회복에 대한 예민도 89%, 특이도 93%, 음성 예측 82%, 양성 예측 96%를 보고하고 있다(25).

조영제를 주입한 후 10~20분 후 지난 시점에서 지연

영상을 얻으면 괴사심근이 있는 부분이 조영증강된다(그림 1B). MRI로 많은 임상실험과 동물실험을 한 결과 지연 조영증강이 되어 "밝게 보이는 부분은 괴사 심근이다(Bright is dead)"라는 사실이 확인되었다. 조영증강이 된 부분의 신호강도(밝기)는 정상 심근의 신호강도와 비교하여 600배 정도로 큰 차이가 난다. 따라서 이 영상법은 MRI 기기의 종류, 검사과정, 또는 관찰자에 크게 영향을 받지 않아서 재현성이 아주 높으며, 지연 조영증강 소견으로 괴사 심근을 정확히 진단할 수 있어서 이에 대한 관심이 고조되고 있다(26~30). PET와 MRI의 비교실험 결과 조영증강 MRI상 지연 조영증강을 보이는 부분은 관류와 대사를 이용한 PET에서 반흔조직으로 보였던 부분과 일치하였고, 대부분의 증례에서 동면심근을 정확히 진단하였다(31).

MRI는 공간해상도가 매우 높아서 심내막하 경색과 통벽성 경색을 구분할 수 있을 뿐만 아니라 전체 심근 두께의 몇 % 정도를 침범했는지도 알 수 있다. 동물 모델을 이용한 SPECT와 MRI의 비교연구 결과 통벽성 경색의 발견에는 두 검사가 비슷했으나 심내막하 경색은 SPECT로는 발견이 안된 경우가 많아서 발견 예민도는 MRI가 95%, SPECT가 28%로서 MRI가 월등이 우수하였다(32). 환자를 대상으로 한 연구에서도 심내막하 경색을 찾는 데 MRI의 예민도가 우수한 것으로 보고되고 있다.

MRI의 지연 조영증강 소견을 이용하여 재관류 요법 후에 기능회복을 예측하는 보고가 많다. 각 분절에서 지연 조영증강의 통벽성 정도(transmural extent of hyperenhancement, 전체 심근에 대한 조영증강 부위의 두께나 면적의 비)가 재관류 치료 후에 기능 회복과 역상관 관계가 있는 것으로 보고되고 있다(26, 32). 즉, 만성 심근경색 환자에서 조영증강이 심내막하에 국한되어 통벽성이 낮은 군은 통벽성이 높은 군보다 재관류 후에 수축기능이 회복되는 경우가 많았다(26). 무운동이나 이상운동(dysfunction)를 보이는 분절에서도 같은 현상을 보여서 심내막하 조영증강을 보이는 분절이 많으면 운동이상과 상관없이 적극적인 재관류 치료로 좌심실 기능의 회복에 도움을 줄 수 있다는 점을 시사한다.

One-Stop-Diagnosis

심장 MRI는 심장의 수축기능, 심근 관류와 심근 생존능 검사를 한번에 시행하여 여기에서 얻어진 소견들을 조합하여 분석을 하면 다양한 정보를 얻을 수 있다. 다혈관 관상동맥질환 환자에서 도부타민 부하 검사, 심근 관류와 지연 조영증강 MRI를 함께 시행한 연구에서 생존심근 진단의 예민도와 특이도가 각각 97%와 96%로 매우 높은 정확도를 보여서 이 검사법이 심근의 생존능을 평가하는 가장 좋은 방법으로 주장하고 있다(9). 흉통으로 응급실을 내원한 환자를 대상으로 심근 기능, 심근 관류와 지연조영증강을 이용한 MRI 연구에서 급성 관상동맥 증후군을 진단하는데 84%의 예민도와 85%의 특이도를 보고하였다(34). 이러한 예민도는 Troponine—I의 최대치와 TIMI 점수를 포함한 지표를 이용한 예민도보다 높게 나왔다. 심장의 수축기능, 심근 관류와 심근 생존능 검사법들은 환자의 임상상황과 목적에 따라 다양한 조합으로 검사를 할 수 있으며 1시간 이내에 검사를 마칠 수 있다(35).

MRI 관상동맥 조영술

MRI를 이용한 관상동맥 조영술은 공간해상도와 신호대 잡음비가 향상되고, 숨을 쉬면서 영상을 얻을 수 있는 방법이 개발되어 획기적으로 발전을 하였다. 관상동맥 내강의 변화로 협착을 진단할 수 있고, 혈관벽의 변화로 경

화반의 영상을 얻을 수 있다. 109명 환자를 대상으로 한 다기관 연구에서 MRI 관상동맥 조영술은 근위부와 중간부까지의 관상동맥 분절 중 84%의 분절이 판독 가능하였고, 관상동맥질환의 진단에 대한 정확도는 72%였다. 좌 주관상동맥과 3혈관 질환에 대한 민감도, 특이도와 정확도는 각각 100%, 85%, 87%였으며, 음성 예측도는 100%였다. 아직까지는 원위부 관상동맥의 진단은 어려우나 근위부의 협착의 진단이나 관상동맥의 기시 이상을 진단하는 데는 정확하다(36)(그림 2).

과거에는 관상동맥 조영술과 같이 주로 혈류를 감소시키는 혈관 내강의 협착을 주로 평가하였다. 그러나 최근 연구결과는 동맥 경화반의 구성이나 모양이 심혈관 질환의 위험도, 동맥경화증의 진행, 치료에 대한 반응을 반영하는 것으로 확인되어 동맥 경화반의 영상에 관심을 갖게 되었다. 경동맥의 MRI는 동맥경화반의 조직을 감별하는 능력이 뛰어난 것으로 보고되고 있다(37). 관상동맥은 그 크기가 작아서 아직까지는 동맥 경화반의 두께를 측정한 연구 정도에 그치고 있으나(38), 점차 영상이 좋아져서 급성 관상동맥 증후군을 일으킬 수 있는 연성 혹은 취약한 경화반의 선별에 중요한 검사방법이 될 전망이다.

그림 2. MR 관상동맥 조영술 : 우관상동맥 이상기시
좌측의 관상동맥동의 교련(commissure) 근처에서 좌, 우 관상동맥이 모두 기시하고 있다. 우관상동맥이 대동맥과 폐동맥 사이를 지나면서 좁아져 있다(화살표).

심장 환자의 MRI 검사시 주의사항

심장의 인공 판막, 혈관을 막기 위한 코일, 동맥관 개존증이나 심방 결손증을 치료하기 위한 기구, 관상동맥 스텐트 등은 수술이나 시술 후 4~6주 정도 지나면 안정화되어 문제가 없으므로 금기증이 아니다. MRI 영상에서 금속성 물질은 주위의 영상신호를 없애므로 금속 근처에 검은색의 인공물을 일으킨다. 경험에 의하면 최근에 개발되어 시술되는 인공 판막이나 관상동맥 스텐트는 MRI 검사에 적합한 합금을 사용하여 자장에 의한 문제가 적으므로 인공물을 거의 발생시키지 않고, 따라서 시술/수술 후 MRI 검사가 가능한 시간까지의 간격도 줄일 수 있다. 반면 혈관을 막기 위한 코일과 수술시 지혈을 위한 클립은 주위에 광범위한 " Black-hole "과 같은 인공물을 일으키므로 인접한 조직의 진단이 어려워진다. MRI 검사 중 심전도 동조화를 통해서 영상을 얻는 경우에는 부정맥이 있는 환자에서 영상의 질이 떨어지고 영상획득시간도 길어진다. 주지하듯이 전기적인 회로장치가 있는 심장 박동기나 뇌혈관 동맥류 치료에 사용된 기구(클립)는 MRI의 절대적인 금기증으로 삽입된 경우에는 절대 검사를 해서는 안된다.

결 론

심장 MRI로 허혈성 심질환 환자에서 심실 용적과 박

출계수와 같은 전반적인 기능 지표를 정확히 측정할 수 있고 심벽 두께, 심근 두꺼워짐과 심벽 운동과 같은 국소적인 심근기능을 평가할 수 있다. 이를 이용하여 치료방침의 결정과 치료에 대한 반응을 판단할 수 있다. 도부타민 부하 MRI는 도부타민 부하 초음파에 비해 매우 재현성이 높은 결과를 얻을 수 있으며, 심근 허혈의 진단과 동면 심근을 찾는 데 이용된다. MRI 관류검사는 심근 허혈과 microvascular obstruction을 정확히 진단할 수 있으며, 심근 관류 예비능 지수를 구하여 진단에 이용할 수 있다. 이 검사는 공간해상도가 매우 높아서 심내막하 결손을 구분할 수 있다. 조영증강 MRI에서 지연 조영증강을 보이는 심근은 괴사 심근이다. 지연 조영증강 소견은 재현성이 매우 높고 이를 이용하여 생존 심근을 찾을 수 있다. 이 검사는 공간해상도가 뛰어나 통벽성 정도를 정량화할 수 있으며 통벽성이 낮으면 재관류 요법 후에 수축기능이 회복될 가능성이 높다. 이러한 검사들을 조합하면 1시간 정도에 한번의 검사로서 허혈성 심질환 진단에 필수적인 소견들을 얻을 수 있다는 점에서 심장 MRI는 비용대비 효과가 매우 높다 할 수 있다.

참 고 문 헌

1. Bogaert JG, Bosmans H, Rademakers F, et al. Left ventricular quantification with breath－hold MR imaging : comparison with echocardiography. MAGMA 1995 ; 3 : 5 - 12
2. Lee VS, Resnick D, Bundy JM, Simonetti OP, Lee P, Weinreb JC. Cardiac function : MR evaluation in one breath hold with real－time true fast imaging with steady－state precession. Radiology 2002 ; 222 : 835 - 42
3. Barkhausen J, Goyen M, Ruhm SG, Eggebrecht H, Debatin JF, Ladd ME. Assessment of ventricular function with single breath－hold real－time steady－state free precession cine MR Imaging. AJR 2002 ; 178 : 731 - 5
4. Mannaerts HF, Van Der Heide JA, Kamp O, et al. Quantification of left ventricular volumes and ejection fraction using freehand transthoracic three－dimensional echocardiography : comparison with magnetic resonance imaging. J Am Soc Echocardiogr 2003 ; 16 : 101 - 9
5. Higgins CB, Byrd BFd, McNamara MT, et al. Magnetic resonance imaging of the heart : a review of the experience in 172 subjects. Radiology 1985 ; 155 : 671 - 9
6. Zoni A, Arisi A, Corradi D, Ardissino D. Images in cardiovascular medicine. Magnetic resonance imaging of impending left ventricular rupture after acute myocardial infarction. Circulation 2003 ; 108 : 498 - 9
7. Mollet NR, Dymarkowski S, Volders W, et al. Visualization of ventricular thrombi with contrast－enhanced magnetic resonance imaging in patients with ischemic heart disease. Circulation 2002 ; 106 : 2873 - 6
8. Baer FM, Voth E, LaRosee K, et al. Comparison of dobutamine transesophageal echocardiography and dobutamine magnetic resonance imaging for detection of residual myocardial viability. Am J Cardiol 1996 ; 78 : 415 - 9
9. Lauerma K, Niemi P, Hanninen H, et al. Multimodality MR imaging assessment of myocardial viability : combination of first－pass and late contrast enhancement to wall motion dynamics and comparison with FDG PET－initial experience. Radiology 2000 ; 217 : 729 - 36
10. Baer FM, Voth E, Schneider CA, et al. Comparison of low-dose dobutamine－gradient－echo magnetic resonance imaging and positron emission tomography with [18F]fluorodeoxyglucose in patients with chronic coronary artery disease. Circulation 1995 ; 91 : 1006 - 15
11. Nagel E, Lehmkuhl HB, Bocksch W, et al. Noninvasive diagnosis of ischemia-induced wall motion abnormalities with the use of high－dose dobutamine stress echocardiography. Comparison with dobutamine stress echocardiography. Circu-

lation 1999 ; 99 : 763 - 70
12. Martin ET, Fuisz AR, Pohost GM. Imaging cardiac structure and pump function. Cardiol Clin 1998 ; 16 : 135 - 60
13. Hundley WG, Morgan TM, Neagle CM, et al. Magnetic resonance imaging determination of cardiac prognosis. Circulation 2002 ; 106 : 2328 - 33
14. Zerhouni EA, Parish DM, Rogers WJ, et al. Human heart : tagging with MR imaging: a method for noninvasive assessment of myocardial motion. Radiology 1988 ; 169 : 59 - 63
15. Kuijpers D, Ho KYJAM, van Dijkman PRM, et al. Dobutamine cardiovascular magnetic resonance for the detection of myocardial ischemia with the use of myocardial tagging. Circulation 2003 ; 107 : 1592 - 7
16. Rerkpattanapipat P, Morgan TM, Neagle CM, et al. Assessment of preoperative cardiac risk with magnetic resonance imaging. Am J Cardiol 2002 ; 90 : 416 - 9
17. Slavin GS, Wolff SD, Gupta SN, Foo TK. First—pass myocardial perfusion MR imaging with interleaved notched saturation : feasibility study. Radiology 2001 ; 219 : 258 - 63
18. Gould K. Noninvasive assessment of coronary stenosis by myocardial perfusion imaging during pharmacologic coronary vasodilatation. I. Physiologic basis and experimental validation. Am J Cardiol 1978 ; 41 : 267 - 78
19. Al—Saadi N, Nagel E, Gross M, et al. Noninvasive detection of myocardial ischemia from perfusion reserve based on cardiovascular magnetic resonance. Circulation 2000 ; 101 : 1379 - 83
20. Wilke NM, Jerosch—Herold M, Zenovich A, Stillman AE. Magnetic resonance first—pass myocardial perfusion imaging : clinical validation and future applications. J Magn Reson Imaging 1999 ; 10 : 676 - 85
21. Gerber BL, Garot J, Bluemke DA, et al. Accuracy of contrast—enhanced magnetic resonance imaging in predicting improvement of regional myocardial function in patients after acute myocardial infarction. Circulation 2002 ; 106 : 1083 - 89
22. Al—Saadi N, Nagel E, Gross M, et al. Improvement of myocardial perfusion reserve early after coronary intervention : assessment with cardiac magnetic resonance imaging. J Am Coll Cardiol 2000 ; 36 : 1557 - 64
23. Panting JR, Gatehouse PD, Yang G—Z, et al. Abnormal subendocardial perfusion in cardiac syndrome X detected by cardiovascular magnetic resonance imaging. N Engl J Med 2002 ; 346 : 1948 - 53
24. Baer FM, Thiessen P, Schneider CA, et al. Dobutamine magnetic resonance imaging predicts contractile recovery of chronically dysfunctional myocardium after successful revascularization. J Am Coll Cardiol 1998 ; 31 : 1040 - 8
25. Sayad DE, Willett DL, Hundley WG, et al. Dobutamine magnetic resonance imaging with myocardial tagging quantitatively predicts improvement in regional function after revascularization. Am J Cardiol 1998 ; 82 : 1149 - 51
26. Kim RJ, Wu E, Rafael A, et al. The use of contrast—enhanced magnetic resonance imaging to identify reversible myocardial dysfunction. N Engl J Med 2000 ; 343 : 1445 - 53
27. Kim RJ, Fiens DS, Parrish TB. Relationship of MRI delayed contrast enhancement to irreversible injury, infarct age, and contractile function. Circulation 1999 ; 100 : 1992 - 2002
28. Fieno DS, Kim RJ, Chen E—L, et al. Contrast—enhanced magnetic resonance imaging of myocardium at risk. Distinction between reversible and irreversible injury through infarct healing. J Am Coll Cardiol 2000 ; 36 : 1985 - 991
29. Wu E, Judd RM, Vargas JD, et al. Visualisation of presence, location, and transmural extent of healed Q—wave and non-Q—wave myocardial infarction. Lancet 2001 ; 357 : 21 - 8
30. Ramani K, Judd RM, Holly TA, et al. Contrast magnetic resonance imaging in the assessment of myocardial viability in patients with stable coronary artery disease and left ventricular dysfunction. Circulation 1998 ; 98 : 2687 - 94
31. Klein C, Nekolla SG, Bengel FM, et al. Assessment of myocardial viability with contrast—enhanced magnetic resonance

imaging. Comparison with positron emission tomography. Circulation 2002 ; 105 : 162 - 7

32. Wagner A, Mahrholdt H, Holly TA, et al. Contrast—enhanced MRI and routine single photon emission computed tomography(SPECT) perfusion imaging for detection of subendocardial myocardial infarcts : an imaging study. Lancet 2003 ; 361 : 374 - 9
33. Choi KM, Kim RJ, Gubernikoff G, Vargas JD, Parker M, Judd RM. Transmural Extent of Acute Myocardial Infarction Predicts Long—Term Improvement in Contractile Function. Circulation 2001 ; 104 : 1101 - 7
34. Kwong RY, Schussheim AE, Rekhraj S, et al. Detecting acute coronary syndrome in emergency department with cardiac magnetic resonance imaging. Circulation 2003 ; 107 : 531 - 7
35. Sensky PR, Jivan A, Hudson NM, et al. Coronary artery disease : combined stress MR imaging protocol—one—stop evaluation of myocardial perfusion and function. Radiology 2000 ; 215 : 608 - 14
36. Danias PG, Stuber M, McConnell MV, Manning WJ. The diagnosis of congenital coronary anomalies with magnetic resonance imaging. Coron Artery Dis 2001 ; 12 : 621 - 6
37. Yuan C, Zhang SX, Polissar NL, et al. Identification of fibrous cap rupture with magnetic resonance imaging is highly associated with recent transient ischemic attack or stroke. Circulation 2002 ; 105 : 181 - 5
38. Botnar RM, Stuber M, Kissinger KV, Kim WY, Spuentrup E, Manning WJ. Noninvasive coronary vessel wall and plaque imaging with magnetic resonance imaging. Circulation 2000 ; 102 : 2582 - 7