

단축 유방 자기공명영상검사를 이용한 유방암 검진

김 수 연

서울대학교병원 영상의학과

서론

현재 BRCA 유전자 변이 또는 유방암의 가족력이 있는 유방암 고위험군에 대해서 미국과 유럽에서는 표준 프로토콜을 이용한 검진 MRI를 권고하고 있다 (1, 2). 우리나라의 검진 권고안에서 고위험군은 임상적 판단에 따라 추가적인 조치를 취할 수 있다고 되어 있으나 검진 MRI에 관해서 구체적인 고려는 없었다 (3). 최근 단축 (abbreviated) 유방 MRI가 평균 위험도 (average risk) 여성에 대한 유방암 검진 검사 방법으로 각광을 받고 있다. 그 이유는 표준 프로토콜 MRI에 비해서 검사시간과 판독시간이 짧고 그에 따른 검사 비용의 감소가 기대될 뿐 아니라 유방촬영술보다 고등급 침윤암에 대한 민감도가 높기 때문이다. 본 종설에서는 단축 유방 MRI를 이용한 유방암 검진의 등장 배경과 관련 임상연구 결과에 대해서 살펴보고자 한다.

단축 유방 MRI 검진의 등장 배경

전통적으로 현재까지 유방암 검진의 일차적인 진단 검사방법은 유방촬영술이다. 유방촬영검진은 조기에 유방암을 발견함으로써 유방암으로 인한 사망률을 감소시킨다 (4). 하지만 유방촬영술의 잘 알려진 제한점은 고위험군 여성과 치밀유방을 가진 여성에서 민감도가 감소한다는 것이다 (5, 6). 조영증강 MRI는 유방진단검사방법 중 가장 높은 민감도를 가진 진단방법으로, 민감도는 평균적으로 90~100%로 보고되고 있다. 유방촬영술은 저등급 관상피내암 또는 에스트로겐 양성 저등급 침윤암에 대한 민

감도는 높은 반면, 고등급 침윤암에 대한 민감도는 감소하는 경향을 보인다. 반면 MRI는 생물학적으로 더 공격적이고 나쁜 예후와 연관되어 있는 고등급 침윤암에 대한 민감도가 유방촬영술보다 높다. 따라서 아직까지 MRI 검진이 유방암으로 인한 사망률을 감소시키는데 대한 연구는 없지만, MRI의 높은 민감도와 함께 MRI와 유방촬영술 간에 이러한 민감도 프로파일 (profile)의 차이를 고려해보았을 때 MRI 검진이 사망률을 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다 (7).

MRI의 높은 민감도에 기반하여 고위험군 여성과 치밀유방을 가진 여성에서 MRI 검진의 유용성에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 연구결과를 종합하면, 고위험군 여성에 대한 표준프로토콜 MRI는 비용-효과적이라고 평가되고 있다. 고위험군 여성에서 MRI의 민감도는 유방촬영술보다 평균 2배 이상 높은 것으로 보고되었다 (8-10). 또한 정상 유방촬영 후 보충 (supplemental) 검진으로 이용할 때, MRI는 유방 초음파에 비해서 3배 이상의 암을 더 찾을 수 있는 것으로 보고되었다 (11). 이러한 연구 결과에 근거하여 미국 암 학회 (American Cancer Society)와 유럽유방영상학회 (EUSOBI)에서는 2007년부터 고위험군 여성 (lifetime risk > 20%)에 대하여 매년 유방촬영과 함께 MRI를 권고하고 있다 (1, 2). 표준 프로토콜을 이용한 MRI 검진은 비싸고 검사시간이 길다는 단점이 있으나, 고위험군, 특히 BRCA 변이를 가지는 여성에서는 유방암의 유병률이 높고 유방촬영술에서 암을 놓칠 위험이 높으므로 MRI 검진이 비용-효과적이라고 평가되고 있다 (12).

최근에는 고위험군 뿐 아니라 평균 위험도를 가진 여성에서도 MRI 검진이 조기 암을 추가로 발견하고 간격암 (interval cancer)을 줄인다는 우호적인 결과가 발표되었다. 2017년에 발표된 Kuhl의 연구에 따르면, 평균 위험 여성에서 정상 유방촬영 후 MRI 검사는 1,000건당 15.5개의 암을 더 발견하였고 간격암은 없었다 (13). 이는 기존에

통신저자: 김수연
(03080) 서울시 종로구 대학로 101, 서울대학교병원 영상의학과
Tel. (02) 2072-2433, Fax. (02) 743-6385
E-mail: sooyeonkim41@gmail.com

보고되었던 디지털 유방 토모신테시스 (1,000건당 1.2개의 추가암 발견) 및 유방 초음파 (1,000건당 3.5-4.4개의 추가암 발견)보다 상당히 높은 성적이다 (14-16). 2019년에 발표된 네덜란드의 DENSE trial에서는 극도치밀유방 (extremely dense breast)을 가진 여성을 유방촬영 단독군과 MRI 병용군의 두 군으로 무작위배정하였다 (17). 그 결과, 유방촬영 단독군에서 간격암은 1,000건당 5건이고 MRI 병용군에서 간격암은 1,000건당 2.5건으로, 유방촬영 단독군에 비해서 MRI 병용군에서 간격암이 절반으로 감소하였다 (17). 이러한 우호적인 임상연구 결과들이 있지만 치밀유방을 가진 평균 위험도 여성에게 표준 프로토콜을 이용한 MRI 검진을 시행하는 것은 아직까지는 비용-효과적이지 않다고 평가되고 있다 (18, 19). MRI 검사 비용이 비싸고 접근성이 낮은 뿐 아니라 검진 연령대에서 치밀유방을 가진 여성이 전체의 절반 이상이고, 평균 위험도 여성에서는 고위험군 여성에 비해서 유방암의 유병률이 낮기 때문이다 (18). 이러한 배경에서 기존의 표준 프로토콜에 비해서 검사시간과 판독시간, 비용이 절감되는 단축 MRI는 평균 위험도 여성을 포함하는 보다 많은 여성들을 위해서 MRI 검진에 대한 접근성을 높일 수 있는 방법이 될 것으로 기대되고 있다. 최근 발표된 ECOG/ACRIN EA 1141 연구는 바로 이러한 평균 위험도 여성에서 단축 MRI의 성적을 디지털 토모신테시스와 비교한 연구로 단축 MRI의 장점과 단점을 고르게 보여주었으며 뒤 단락에서 다시 소개하고자 한다.

단축 유방 MRI에 관한 임상 연구 결과

표준 유방 MRI 프로토콜은 기본적으로 T2 강조영상과 조영제 주입 전 1번과 조영제 주입 후 4-6번의 T1 강조 역동적 조영증강영상이 포함되고, 검사시간은 추가되는 시퀀스에 따라 달라지나 평균 30분~40분으로 보고된다. 단축 MRI 프로토콜은 기본적으로 조영제 주입 전 1번과 조영제 주입 후 1번의 T1 강조 영상으로 구성되고, 획득한 두 영상을 후-처리하여 감산 (subtraction) 영상과 최대강도투사 (maximum intensity projection, MIP) 영상을 만든다. 기관에 따라서 단축 MRI 프로토콜에 T2 강조영상과 조영제 주입 후 2번 이상의 T1 강조 영상을 포함하기도 한다. 단축 MRI 프로토콜의 검사시간은 10분 이내로 할 것이 권고된다.

단축 유방 MRI를 최초로 임상에 적용한 Kuhl의 연구에서, 단축 MRI 프로토콜은 조영제 주입 전 1번과 조영제 주입 후 1번의 T1 강조영상으로 구성되었다 (20). 조영제

주입 전과 주입 후 영상을 촬영하는데 각각 1분씩 소요되었고, 조영제를 주입하고 나서 1분을 기다린 후에 영상을 촬영하였기 때문에, 검사시간은 총 3분이었다. 판독시간은 MIP 영상만 판독할 때는 평균 3초 이내였고, 전체 영상을 같이 판독할 때는 평균 28초였다. 단축 프로토콜의 민감도는 MIP만 판독했을 때는 91 %였고, 전체 영상을 판독했을 때는 100%였다. 특이도는 95%, 음성 예측도는 99%로 높은 성적을 보였다.

Kuhl의 연구 이후로, 많은 연구들이 단축 프로토콜과 표준 프로토콜의 성적을 비교하였다 (표 1) (21-32). 모든 프로토콜은 조영제 주입 전 1번과 조영제 주입 후 1번의 T1 강조영상을 공통적으로 포함하였다. 연구에 따라서 T2 강조영상, 조영제 주입 후 2번 이상의 T1 강조영상, 확산 강조영상을 포함하기도 하였다. 검사시간은 포함하는 영상의 종류에 따라서 결정되고 3분에서 23분까지 다양하였다. 연구 결과를 종합하면, 모든 연구에서 단축 프로토콜의 민감도는 표준프로토콜의 민감도와 차이가 없었다. 그러나 단축 프로토콜의 특이도 성적은 다양한 양상을 보였는데, 대부분의 연구에서는 표준 프로토콜과 차이를 보이지 않았으나, 일부 연구에서 특이도가 약간 감소하는 양상을 보였다.

우리나라에서도 유방암으로 수술을 시행 받은 과거력이 있는 여성을 대상으로 단축 유방 MRI의 성적을 평가한 두 편의 연구가 발표되었는데, 다른 나라의 연구결과와 일치하였다 (31, 32) (그림 1). 최 등은 725명의 유방암 수술 과거력이 있는 환자에서 단축 MRI (T2 강조영상, 조영제 주입 전과 주입 후 1회의 T1 강조영상, 검사시간 8.5분)의 성적을 평가하였고 민감도 100%, 특이도 89%의 높은 성적을 보고하였다 (31). 박 등은 유방암 수술 과거력이 있는 여성에서 단축 프로토콜과 표준 프로토콜 MRI간에 환자의 나이와 일차 유방암의 병기를 두 군간 매칭 한 후 각각 656건의 MRI의 성적을 평가하였다 (32). 단축 MRI는 T2 강조영상과 조영제 주입 전 1회와 주입 후 2회의 T1 강조영상으로 검사시간은 9분이 소요되었다. 단축 MRI의 민감도는 70%, 특이도는 98% 였고, 표준 MRI의 민감도는 100%, 특이도는 97%로 단축 프로토콜과 표준 프로토콜 성적 간에는 유의한 차이가 없었다.

단축 유방 MRI의 특이도를 높이는 방법

단축 프로토콜의 특이도를 높이기 위해서는 이론적으로 네 가지 방법을 고려 해 볼 수 있다. 첫번째는 T2 강조영상을 포함하는 것이다. 경계가 좋고 (circumscribed) 환

형 (rim) 조영증강을 보이지 않으면서 T2 강조영상에서 높은 신호 강도를 보이는 종괴는 대부분 양성으로 내릴 수 있다. Heacock 등은 T2 강조영상을 추가했을 때 악성 유방 병변의 conspicuity가 향상된다고 보고하였다 (24). 두 번째는 확산강조영상을 포함하는 것이다. 경계가 좋고 환형조영증강을 보이지 않으면서 확산강조영상에서 높은 신호강도를 보이지 않을 때 양성 또는 양성추정으로 내린다면 특이도를 높일 수 있다. Chen 등은 기본 단축 프로토콜에 확산강조영상을 추가했을 때 특이도가 높아진다고 보고하였다 (28). 세 번째는 조영제 주입 후 지연 영상을 얻는 것이다. 조영제 주입 후 1번만 촬영하는 방식으로는

병변의 kinetics 정보를 알 수 없으나, 조영제 주입 후 초기와 지연기에 2번 이상 촬영하면 병변의 kinetics 정보를 알 수 있다. 병변의 kinetics 정보는 지속형 (persistent), 고원형 (plateau), 유실형 (washout)으로 나뉘며 지속형일 경우 보다 양성을, 유실형일 경우 보다 악성을 시사하는 정보로 유용하게 이용될 수 있다. 그러나 Grimm 등의 보고에 따르면 단축 프로토콜에서 지연영상을 추가했을 때 지연영상을 추가하지 않은 경우와 비교시 특이도와 민감도에 차이는 없는 결과를 보였으므로 후속 연구로 검증이 필요하겠다 (22). 네 번째로 ultrafast 영상을 추가하는 것이다. Ultrafast 영상은 조영제를 주입하기 시작한 직후

표 1. 단축 유방 MRI와 표준 유방 MRI의 성적 비교

저자 연도	단축 MRI 구성	단축 MRI 검사 시간 (분)	단축 MRI 민감도 (%)	단축 MRI 특이도 (%)	표준 MRI 민감도 (%)	표준 MRI 특이도 (%)
Kuhl 2014 (20)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	3	100	94	100	93
Mango 2015 (21)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	10-15	93-98	NA	95-98	NA
Grimm 2015* (22)	T2 강조영상, 조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	21	86	52	95	52
Grimm 2015* (22)	T2 강조영상, 조영제 주입 전 1회와 주입 후 2회 T1 강조영상	23	89	45	95	52
Harvey 2016 (23)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	4.4	100	94	100	96
Heacock 2016* (24)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	7	98	NA	99	NA
Heacock 2016* (24)	T2 강조영상, 조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	12	99	NA	99	NA
Moschetta 2016 (25)	T2 강조영상, 조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	10	89	91	92	92
Chen 2017 (26)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	3	94	88	100	95
Petrillo 2017 (27)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	3	99	75	99	77
Chen 2017* (28)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	3	93	87	100	97
Chen 2017* (28)	확산강조영상, 조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	6	100	95	100	97
Romeo 2017 (29)	조영제 주입 전 1회와 주입 후 3회의 T1 강조영상	7	99	93	97	95
Panigrahi 2017 (30)	조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	3	82	97	82	97
Choi 2018 (31)	T2 강조영상, 조영제 주입 전과 주입 후 1회 T1 강조영상	8.5	100	89	NR	NR
Park 2020 (32)	T2 강조영상, 조영제 주입 전 1회와 주입 후 2회의 T1 강조영상	9	70	98	100	97

* 한 연구에서 두 종류의 단축 프로토콜을 제시함.

NA: not applicable. 유방암으로 진단받은 케이스만을 대상으로 한 연구라서 특이도 계산이 불가능하였음.

NR: not reported. 단축프로토콜의 성적만 제시하였음.

얻는 것으로써, 기존의 표준 프로토콜에서 조영제 주입 후 유방병변을 관찰하는데 충분한 수준으로 조영증강이 되기 전까지 스캔 없이 기다렸던 시간 동안에 ultrafast 영상이 얻어지기 때문에, ultrafast 영상을 추가한다고 해도 전체 검사시간은 연장되지 않는 장점이 있다. 또한 ultrafast

영상에서 얻어진 초기 역동기 영상 정보를 이용하여 양성 과 악성을 감별하는데 도움을 받을 수 있다 (33, 34). 그러나 아직까지 단축 프로토콜에서 ultrafast 영상을 추가했을 때의 추가적인 가치 평가에 대한 연구는 없었으므로 관련 연구가 필요하겠다.

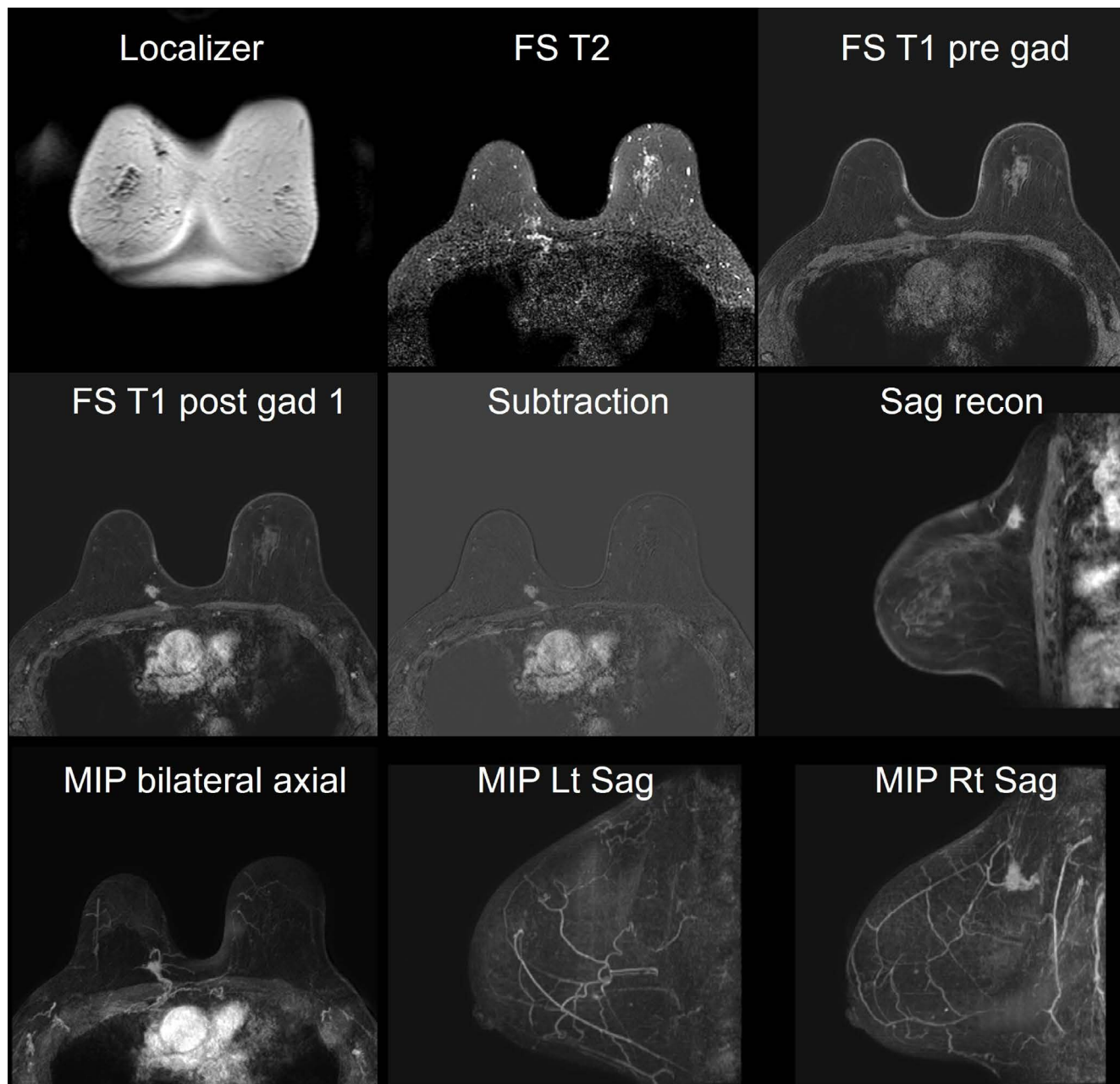


그림 1. 단축 프로토콜을 이용한 수술 후 검진 유방 MRI에서 발견된 재발암.

59세 여성으로 3년전 ER 음성 HER2 양성 pT1 (2 cm) N0 침윤성관암에 대해서 우측 유방보존술 후 방사선과 항암, Herceptin 치료를 받았다. 단축 프로토콜을 이용한 유방 MRI에서 수술 부위 1 cm 상방에서 1.2 cm 크기의 조영증강되는 종괴가 새롭게 보였고 불규칙한 모양과 침상형 경계를 보여 BI-RADS 4C로 판단되었다. MRI 촬영 6개월 전에 시행한 유방촬영술과 초음파는 정상 소견이었다. 초음파 유도 하 조직검사를 하여 ER 음성 HER2 양성 침윤성관암으로 진단되었다.

EA 1141 연구 결과

최근 2020년 2월 ECOG/ACRIN EA 1141 다기관 전향 연구 결과가 JAMA에 발표되었다 (35). 이 연구는 치밀 유방을 가진 40세에서 75세까지의 평균위험도 여성에 대한 검진에서 단축 MRI와 디지털 유방 토모신테시스의 성적을 비교하는 것이었다. 모든 여성에서 단축 MRI와 디지털 유방 토모신테시스를 무작위 순서로 시행하였고, 두 개의 영상기법을 독립적으로 리뷰하여 성적을 평가하였다. 연구의 일차평가변수는 침윤암 발견율 (invasive cancer detection rate)이었다. 단축 MRI의 침윤암 발견율은 1,000명당 11.8이었고, 디지털 유방 토모신테시스의 침윤암 발견율은 1,000명당 4.8로 유의한 차이가 있었다. 3개의 고등급 침윤암이 발견되었는데, 이 암들은 단축 MRI에서는 모두 발견되었으나, 디지털 유방 토모신테시스에서는 모두 발견되지 않았다. 이러한 결과는 단축 MRI에 우호적인 결과였다.

그러나 단축 MRI의 특이도와 양성예측도는 디지털 유방 토모신테시스에 비해서 낮은 경향을 보였다. 단축 MRI의 특이도는 86.7%로 디지털 유방 토모신테시스의 97.4%에 비해서 유의하게 낮았다. 단축 MRI의 양성예측도는 19.6%로 디지털 유방 토모신테시스의 31 %에 비해서 낮았지만 통계학적으로 유의한 수준은 아니었다. 따라서 단축 MRI를 검진으로 이용한다면 디지털 유방 토모신테시스에 비해서 위양성 조직검사와 단기추적 MRI 검사가 늘어날 위험이 있다. 그러나 EA 1141 연구에서 디지털 유방 토모신테시스는 모두 incidence screening이어서 과거 사진이 있었던 반면, 단축 MRI는 모두 prevalence screening이어서 비교할 수 있는 과거사진이 없었기 때문에, 이러한 차이가 단축 MRI의 특이도와 양성예측도를 낮추었을 가능성이 고려되어야 한다.

ECOG/ACRIN EA 1141 연구의 단기 결과는 치밀유방을 가진 평균위험도 여성에 대한 단축 MRI 검진의 득 (침윤암 발견율 증가)과 실 (상대적으로 낮은 특이도와 양성예측도)을 모두 보여주었다. 앞으로 비용-효과 분석 및 장기 추적 결과에서 단축 MRI가 갖는 예측적인 측면에서의 임상적인 가치에 대한 평가가 필요할 것으로 생각된다.

결 론

ECOG/ACRIN EA 1141 결과의 발표로 단축 MRI는 더욱 각광 받을 것으로 생각된다. 현재까지의 임상연구결과를 종합하면, 단축 MRI의 성적은 표준프로토콜 MRI의 성

적과 비슷하고 검사시간과 판독시간, 비용이 감소하는 효과가 있기 때문에 검진 목적에 부합하여 쓰일 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 유방촬영술에 비해서 특이도와 양성예측도가 낮아서 위양성 조직검사와 단기추적 MRI 검사가 증가하는 위험이 발생할 가능성이 있다. MRI를 검진 목적으로 시행하고자 하는 여성들에게 이러한 득과 실을 사전에 충분히 설명하여 정보에 입각한 의사결정을 내릴 수 있도록 돕는 역할이 요구된다. 마지막으로 단축 MRI를 광범위한 검진목적으로 이용하기 전에 좀 더 해결해야 할 이슈들이 있다 (18). 검진 연령대에서 치밀유방을 가진 여성이 전체 여성의 절반 이상이고 평균 위험도 여성에서 상대적으로 낮은 유방암 유병율을 고려한다면 해당 여성들 모두에게 단축 MRI 검진을 시행하는 것은 비용-효과적으로 실용적인 제안은 아닐 것이다. 따라서 개별 환자의 위험도에 근거하여 MRI 검진으로 이득을 볼 수 있는 여성군을 보다 세분화하는 것이 필요하다. 단축 MRI는 검사시간과 판독시간이 감소되고 이는 비용의 감소로 이어질 것으로 기대되나, 유방촬영술이나 초음파에 비해서는 고가의 검사이며, 가돌리늄 조영제를 이용하는 문제도 여전히 남아있다. 또한 MRI를 검진으로 이용한다면 현재보다 훨씬 많은 MRI 장비의 확보와 함께 MRI 유도하 조직검사에 대한 접근성이 높아져야 한다. 따라서 광범위한 검진 목적으로 이용하기 전에 MRI 검진의 비용-효과 분석과 접근성에 대한 이슈에 대한 고려가 선행되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

1. Saslow D, Boetes C, Burke W, et al. American Cancer Society guidelines for breast screening with MRI as an adjunct to mammography. CA: a cancer journal for clinicians 2007;57:75-89
2. Mann RM, Kuhl CK, Kinkel K, Boetes C. Breast MRI: guidelines from the European society of breast imaging. European radiology 2008;18:1307-1318
3. Lee EH, Park B, Kim N-S, et al. The Korean guideline for breast cancer screening. Journal of the Korean Medical Association 2015;58:408-419
4. Paap E, Verbeek AL, Botterweck AA, et al. Breast cancer screening halves the risk of breast cancer death: a case-referent study. The Breast 2014;23:439-444
5. Kriege M, Brekelmans CT, Boetes C, et al. Efficacy of MRI and mammography for breast-cancer screening in women with a familial or genetic predisposition. New

- England Journal of Medicine 2004;351:427-437
6. Group MS. Screening with magnetic resonance imaging and mammography of a UK population at high familial risk of breast cancer: a prospective multicentre cohort study (MARIBS). *The Lancet* 2005;365:1769-1778
7. Kuhl CK. Abbreviated magnetic resonance imaging (MRI) for breast cancer screening: rationale, concept, and transfer to clinical practice. *Annual review of medicine* 2019;70:501-519
8. Warner E, Plewes DB, Hill KA, et al. Surveillance of BRCA1 and BRCA2 mutation carriers with magnetic resonance imaging, ultrasound, mammography, and clinical breast examination. *JAMA* 2004;292:1317-1325
9. Sardanelli F, Podo F, Santoro F, et al. Multicenter surveillance of women at high genetic breast cancer risk using mammography, ultrasonography, and contrast-enhanced magnetic resonance imaging (the high breast cancer risk italian 1 study): final results. *Investigative radiology* 2011;46:94-105
10. Kuhl C, Weigel S, Schrading S, et al. Prospective multicenter cohort study to refine management recommendations for women at elevated familial risk of breast cancer: the EVA trial. *J Clin Oncol* 2010;28:1450-1457
11. Berg WA, Zhang Z, Lehrer D, et al. Detection of breast cancer with addition of annual screening ultrasound or a single screening MRI to mammography in women with elevated breast cancer risk. *JAMA* 2012;307:1394-1404
12. Griebisch I, Brown J, Boggis C, et al. Cost-effectiveness of screening with contrast enhanced magnetic resonance imaging vs X-ray mammography of women at a high familial risk of breast cancer. *British journal of cancer* 2006;95:801-810
13. Kuhl CK, Strobil K, Bieling H, Leutner C, Schild HH, Schrading S. Supplemental breast MR imaging screening of women with average risk of breast cancer. *Radiology* 2017;283:361-370
14. Friedewald SM, Rafferty EA, Rose SL, et al. Breast cancer screening using tomosynthesis in combination with digital mammography. *JAMA* 2014;311:2499-2507
15. Scheel JR, Lee JM, Sprague BL, Lee CI, Lehman CD. Screening ultrasound as an adjunct to mammography in women with mammographically dense breasts. *American journal of obstetrics and gynecology* 2015;212:9-17
16. Berg WA, Blume JD, Cormack JB, et al. Combined screening with ultrasound and mammography vs mammography alone in women at elevated risk of breast cancer. *JAMA* 2008;299:2151-2163
17. Bakker MF, de Lange SV, Pijnappel RM, et al. Supplemental MRI Screening for Women with Extremely Dense Breast Tissue. *New England Journal of Medicine* 2019;381:2091-2102
18. Tosteson AN. An Abbreviated MRI Protocol for Breast Cancer Screening in Women With Dense Breasts: Promising Results, but Further Evaluation Required Prior to Widespread Implementation. *JAMA* 2020;323:719-721
19. Mann RM, van Zelst JC, Vreemann S, Mus RD. Is ultrafast or abbreviated breast MRI ready for prime time? *Current Breast Cancer Reports* 2019;11:9-16
20. Kuhl CK, Schrading S, Strobil K, Schild HH, Hilgers R-D, Bieling HB. Abbreviated breast magnetic resonance imaging (MRI): first postcontrast subtracted images and maximum-intensity projection? a novel approach to breast cancer screening with MRI. *Journal of Clinical Oncology* 2014;32:2304-2310
21. Mango VL, Morris EA, Dershaw DD, et al. Abbreviated protocol for breast MRI: are multiple sequences needed for cancer detection? *European journal of radiology* 2015;84:65-70
22. Grimm LJ, Soo MS, Yoon S, Kim C, Ghate SV, Johnson KS. Abbreviated screening protocol for breast MRI: a feasibility study. *Academic radiology* 2015;22:1157-1162
23. Harvey SC, Di Carlo PA, Lee B, Obadina E, Sippo D, Mullen L. An abbreviated protocol for high-risk screening breast MRI saves time and resources. *Journal of the American College of Radiology* 2016;13:R74-R80
24. Heacock L, Melsaether AN, Heller SL, et al. Evaluation of a known breast cancer using an abbreviated breast MRI protocol: correlation of imaging characteristics and pathology with lesion detection and conspicuity. *European journal of radiology* 2016;85:815-823
25. Moschetta M, Telegrafo M, Rella L, Ianora AAS, Angelelli G. Abbreviated combined MR protocol: a new faster strategy for characterizing breast lesions. *Clinical breast cancer* 2016;16:207-211
26. Chen S-Q, Huang M, Shen Y-Y, Liu C-L, Xu C-X. Application of abbreviated protocol of magnetic resonance imaging for breast cancer screening in dense

- breast tissue. *Academic radiology* 2017;24:316-320
27. Petrillo A, Fusco R, Sansone M, et al. Abbreviated breast dynamic contrast-enhanced MR imaging for lesion detection and characterization: the experience of an Italian oncologic center. *Breast cancer research and treatment* 2017;164:401-410
28. Chen S-Q, Huang M, Shen Y-Y, Liu C-L, Xu C-X. Abbreviated MRI protocols for detecting breast cancer in women with dense breasts. *Korean journal of radiology* 2017;18:470-475
29. Romeo V, Cuocolo R, Liuzzi R, et al. Preliminary results of a simplified breast MRI protocol to characterize breast lesions: comparison with a full diagnostic protocol and a review of the current literature. *Academic radiology* 2017;24:1387-1394
30. Panigrahi B, Mullen L, Falomo E, Panigrahi B, Harvey S. An abbreviated protocol for high-risk screening breast magnetic resonance imaging: impact on performance metrics and BI-RADS assessment. *Academic radiology* 2017;24:1132-1138
31. Choi BH, Choi N, Kim MY, Yang J-H, Yoo YB, Jung HK. Usefulness of abbreviated breast MRI screening for women with a history of breast cancer surgery. *Breast cancer research and treatment* 2018;167:495-502
32. Park KW, Han SB, Han B-K, et al. MRI surveillance for women with a personal history of breast cancer: comparison between abbreviated and full diagnostic protocol. *The British Journal of Radiology* 2020;93:20190733
33. Mann RM, Mus RD, van Zelst J, Geppert C, Karssemeijer N, Platel B. A novel approach to contrast-enhanced breast magnetic resonance imaging for screening: high-resolution ultrafast dynamic imaging. *Investigative radiology* 2014;49:579-585
34. Mus RD, Borelli C, Bult P, et al. Time to enhancement derived from ultrafast breast MRI as a novel parameter to discriminate benign from malignant breast lesions. *European journal of radiology* 2017;89:90-96
35. Comstock CE, Gatsonis C, Newstead GM, et al. Comparison of Abbreviated Breast MRI vs Digital Breast Tomosynthesis for Breast Cancer Detection Among Women With Dense Breasts Undergoing Screening. *JAMA* 2020;323:746-756