

Original Article

전신 뼈 검사에서 Wide Beam Reconstruction 기법의 유용성

연세의료원 세브란스병원 핵의학과

김정열 · 강청구 · 박민수 · 박훈희 · 임한상 · 김재삼 · 이창호

Utility of Wide Beam Reconstruction in Whole Body Bone Scan

Jung Yul Kim, Chung Koo Kang, Hoon Hee Park, Min Soo Park, Han Sang Lim,
Jae Sam Kim and Chang Ho Lee

Department of Nuclear Medicine, Severance hospital, Yonsei University Health System, Korea

Purpose: The Wide Beam Reconstruction (WBR) algorithms that UltraSPECT, Ltd. (U.S) has provides solutions which improved image resolution by eliminating the effect of the line spread function by collimator and suppression of the noise. It controls the resolution and noise level automatically and yields unsurpassed image quality. The aim of this study is WBR of whole body bone scan in usefulness of clinical application. **Materials and Methods:** The standard line source and single photon emission computed tomography (SPECT) reconstructed spatial resolution measurements were performed on an INFINA (GE, Milwaukee, WI) gamma camera, equipped with low energy high resolution (LEHR) collimators. The total counts of line source measurements with 200 kcps and 300 kcps. The SPECT phantoms analyzed spatial resolution by the changing matrix size. Also a clinical evaluation study was performed with forty three patients, referred for bone scans. First group altered scan speed with 20 and 30 cm/min and dosage of 740 MBq (20 mCi) of ^{99m}Tc -HDP administered but second group altered dosage of ^{99m}Tc -HDP with 740 and 1,110 MBq (20 mCi and 30 mCi) in same scan speed. The acquired data was reconstructed using the typical clinical protocol in use and the WBR protocol. The patient's information was removed and a blind reading was done on each reconstruction method. For each reading, a questionnaire was completed in which the reader was asked to evaluate, on a scale of 1-5 point. **Results:** The result of planar WBR data improved resolution more than 10%. The Full-Width at Half-Maximum (FWHM) of WBR data improved about 16% (Standard: 8.45, WBR: 7.09). SPECT WBR data improved resolution more than about 50% and evaluate FWHM of WBR data (Standard: 3.52, WBR: 1.65). A clinical evaluation study, there was no statistically significant difference between the two method, which includes improvement of the bone to soft tissue ratio and the image resolution (first group $p=0.07$, second group $p=0.458$). **Conclusion:** The WBR method allows to shorten the acquisition time of bone scans while simultaneously providing improved image quality and to reduce the dosage of radiopharmaceuticals reducing radiation dose. Therefore, the WBR method can be applied to a wide range of clinical applications to provide clinical values as well as image quality. (*Korean J Nucl Med Technol* 2010;14(1):83-89)

Key Words : Wide Beam Reconstruction (WBR), Xpress.BoneTM, Whole body bone scan

서론

단일광자단층촬영과 평면 촬영의 영상의 질은 방사성의약품 섭취(병소 대 주변 집적율), 생리학적 요소(환자의 나이, 키, 몸무게 등), 영상획득시간, 주사량 그리고 시스템 특징에 의한 해상도를 포함한 많은 매개변수에 의존한다.¹⁾ 특히 감마카메라의 시스템 해상도는 여러 가지 요인에 의해 결정되

• Received: December 1, 2009, Accepted: December 15, 2009.
• Corresponding author: Chung Koo Kang
Department of Nuclear Medicine, Yonsei University Health System
134 Shinchon-Dong, Sedaemun-Gu, Seoul, 120-749, Korea
Tel: +82-2-2228-6053, Fax: +82-2-2227-7062
E-mail: 1009Kang@yuhs.ac

는데 검출기에 의한 고유 분해능과 조준기(collimator)와 방출 선원과의 거리에 의해 결정되는 선 확산 함수(line spread function), 감마카메라의 기계적 안정성과 인체에서의 감약, 광자 산란 등이 있다. 감마카메라는 약 4 mm의 고유 분해능을 가지고 있지만 평면과 단일광자단층촬영 재구성 해상도를 결정하기 위한 주요한 요소는 조준기의 선 확산 함수이다.²⁾ 선 확산 함수는 방출 선원과 조준기의 거리뿐만 아니라 조준기의 기하학적 매개변수에 의해 결정되며, 현재 이용되고 있는 재구성 알고리즘인 여과 후 역 투사 방법(Filtered Back Projection)과 배열된 부분집합 기대 값 최대화 방법(Ordered Subsets Expectation Maximization)은 선 확산 함수에 의한 제한점들을 보상하지 못한다.³⁾ 또한 조준기는 검출 광자 수를 제한하고 낮은 통계량으로 영상에서 잡음 정도에 영향을 준다. 그러므로 재구성 과정에서 사용되는 여과기는 잡음 수준을 낮게 할 수도 있지만 영상 해상도를 저하시킬 수 있다. 조준기의 선 확산 함수에 의한 해상도 제한을 제거하는 것은 단일 광자 단층촬영 영상 영역에서 중요한 과제이다. 이러한 감마카메라에서 조준기의 사용은 높은 해상도의 영상을 얻을 수 있지만 상대적으로 낮은 임상적 민감도를 가진다는 것이다. 낮은 민감도를 보상하기 위해 영상 획득 시간을 길게 하고 있다. 반대로 민감도를 최대로 할 경우에는 격자 간섭현상으로 인해 해상도의 저하를 가져 오게 된다. 이러한 민감도와 해상도의 상충관계(contradiction relation)를 적절히 조절이 가능한 것으로 알려진 Ultra SPECT (US)에서 개발한 Wide Beam Reconstruction (WBR) 기법은 조준기에 의한 선 확산 함수의 영향을 제거하고 잡음을 억제하여 영상 해상도를 향상시킬 수 있고 해상도와 잡음 수준을 자동으로 조절하고 사용자 개입을 필요로 하지 않으며 영상 획득 시간을 짧게 할 수 있어 상당한 영상 질 향상에 도움을 준다고 보고되고 있다.⁴⁻⁵⁾ 이에 본 연

구에서는 핵의학 분야에서 가장 흔히 이용되는 전신 뼈 촬영에서 WBR 기법의 임상적 적용과 그 유용성을 알아 보고자 한다.

실험재료 및 방법

1. 성능 실험

본 연구에서는 선 선원과 SPECT 팬텀(Phantom)을 이용하여 National Electrical Manufacturers Association (NEMA) 성능 평가 방법에 따라 WBR 기법의 공간 분해능을 측정하였다. 평면 영상의 분해능을 평가하기 위하여 내경이 0.5 mm, 외경이 1.6 mm, 길이가 40 cm인 2개의 테플론 모세관을 이용하였다. 이 모세관을 ^{99m}Tc 수용액으로 채우고 양 끝을 밀봉하여 선 선원을 제작하였다. 두 개의 선 선원을 중심 간 거리가 10 cm가 되도록 고정하였고 총 계수치를 200 kcps와 300 kcps로 변화시켜 측정하였다. 에너지 창은 140 keV에 대해 20%로 설정하였고 매트릭스 크기는 512×512로 설정하였다. 이렇게 얻어진 영상에서 선 선원에 직교하는 프로파일을 구하였다. 이 프로파일에서 중앙 선 선원에 대한 반치폭(Full Width at Half Maximum; FWHM)을 측정하였다. 단층 영상의 분해능을 평가하기 위하여 직경이 1 mm이고 선 선원의 간격이 7.5 cm, 유효길이 18.4 cm인 세 개의 선 선원 관을 가진 SPECT 팬텀(NEMA SPECT Triple Line Source PhantomTM)을 이용하였다. 선 선원 관에 ^{99m}Tc 수용액으로 채웠다. 프레임은 60프레임으로 설정하였고 매트릭스 크기를 64×64와 128×128로 각각 변화시켜 영상을 획득하였다 (Fig. 1).

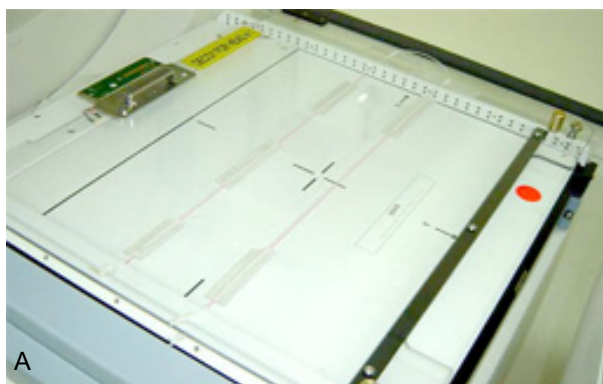


Fig. 1. (A) Line source setup of detector (B) SPECT phantom NEMA tests with scatter

2. 임상적 적용

2009년 1월부터 9월까지 본원을 내원하여 전신 뼈 스캔을 시행받은 환자 43명을 대상으로 하였다. 전체 환자 연령 범위는 33세에서 63세였고 평균 44.8 ± 8.6 세였다. 남성이 25명, 여성이 18명이었다. 영상 획득 시간과 해상도를 평가하기 위해 두 군으로 나누어 연구를 시행하였다. 첫번째 군은 13명의 환자들을 대상으로 ^{99m}Tc -HDP를 740 MBq (20 mCi) 투여하고 3~4시간이 지난 후 20 cm/min의 검사 속도로 영상을 획득하고 바로 30 cm/min로 검사속도로 변경하여 전신 뼈 영상을 획득하였다. 두번째 군은 30명의 환자들을 대상으로 하였으며 15명은 ^{99m}Tc -HDP를 740 MBq (20 mCi) 투여하였고 나머지 15명은 1,110 MBq (30 mCi)의 방사성의약품을 투여하였다. 그리고 25 cm/min의 검사속도에서 전신 뼈 영상을 획득하였다.

3. 검사 장비 및 영상 처리 과정

본 연구에 사용된 장비로는 GE사의 Dual head 감마카메라인 INFINIA (GE, Milwaukee, WI)를 사용하였다. 조준기는

저에너지 고해상도 조준기(Low Energy High Resolution; LEHR)를 사용하였고 에너지 창은 140 keV에 대해 20%로 설정하였다. 또한 매트릭스 크기는 $256 \times 1,024$ 로 설정하였고 확대(Zoom)는 1로 설정하였다. 획득된 영상의 처리는 INFINIA 감마카메라 packages인 Xeleris 워크스테이션을 이용하였다. UltraSPECT사의 Xpress.BoneTM 하드웨어 플랫폼을 이용하였으며 획득된 영상 중 비교 영상을 WBR 기법으로 재구성하였다. UltraSPECT.gate 소프트웨어(버전 3.31.1.2)에서 제공하고 있는 Planar & Bone processing parameter의 processing strength를 0.4, gamma를 1.0, saturation은 0.6으로 설정하였다. WBR 영상 획득 과정은 감마카메라에서 데이터를 획득하고 획득된 데이터를 Xeleris 워크스테이션으로 전송한다. 전송된 데이터는 다시 검사자에 의해 Xpress.Bone & Xact.BoneTM 하드웨어 플랫폼으로 전송하여 WBR 기법으로 재구성된다. 재구성된 WBR영상은 자동적으로 Xeleris 워크스테이션으로 다시 전송된다(Fig. 2).

4. 영상 분석 및 통계적 분석

영상 분석 방법은 획득된 전신 뼈 영상 전면 영상에서 대

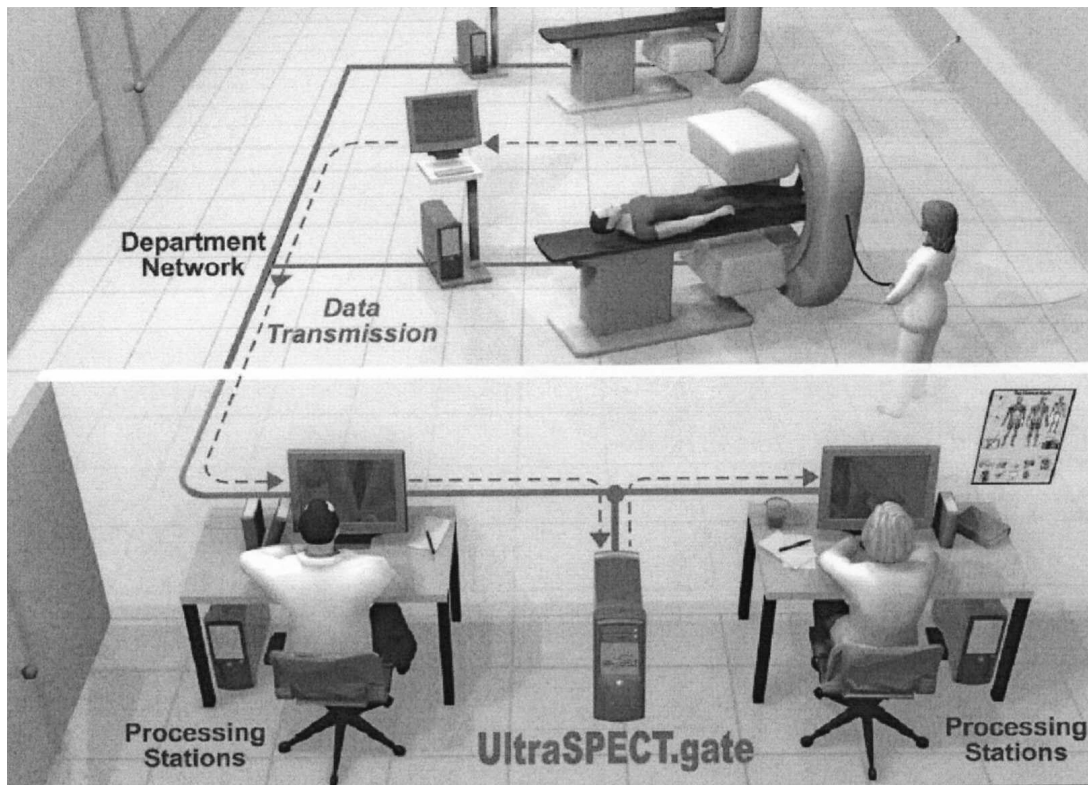


Fig. 2. UltraSPECT.gate computer is connected to the NM camera and workstation network intended of reconstruction or enhancing data acquired by a NM gamma camera. The reconstructed data is sent to a NM workstation for final processing and physician review.

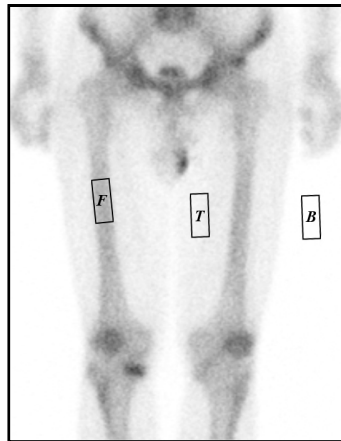


Fig. 3. Positioning of the bone and soft tissue ROI.

Femur to soft tissue ratio (FTR)

$$= \frac{F - B}{T - B}$$

F : Femur regions of interest

T : Soft tissue regions of interest

B : Background regions of interest

퇴골 체부와 연부조직 부위에 동일한 직사각형의 관심영역을 설정하여 뼈 대비 연부조직 섭취 비(Femur to soft tissue ratio: FTR)를 측정하였다(Fig. 3). 첫번째 군에서 20 cm/min의 기존 영상과 30 cm/min의 WBR영상을 비교하여 영상 획득 시간 감소에 따른 뼈 대비 연부조직 섭취 비를 평가하였다. 두번째 군에서는 1,110 MBq (30 mCi)의 방사성의약품을 투여받은 군의 기존 영상과 740 MBq (20mCi)의 방사성의약품 투여량 감소에 따른 뼈 대비 연부조직 섭취 비에 대한 평가를 하였다. 또한 육안적 영상 해상도의 평가로 핵의학과 판독의와 5년 이상의 실무경험을 가진 방사선사가 각각 5점 척도로 하여 영상을 blind test 방법으로 비교 평가하였다.

통계적 분석은 SPSS, Ver. 17을 이용하여 정규성 검정을

하였고 모수적 방법으로 첫번째 군은 paired *t*-test로 분석하였고 두번째 군은 independent *t*-test로 분석하여 *p*-value가 0.05 이하인 것을 통계적으로 의미있는 것으로 하였다.

결 과

성능 실험에서 선 선원을 이용하여 평면 영상의 반치폭을 분석한 결과 WBR 데이터는 기존 데이터에 비하여 분해능이 약 10% 향상되었으며, 반치폭은 16% 향상되었다(Standard: 8.45, WBR: 7.09) (Fig. 4, Table 1). SPECT 팬텀을 이용한 단층 영상의 결과는 WBR 데이터에서 약 50%의 분해능이 향상되었으며, 반치폭 또한 50% 향상되었다(Standard: 3.52, WBR: 1.65) (Fig. 5, Table 2).

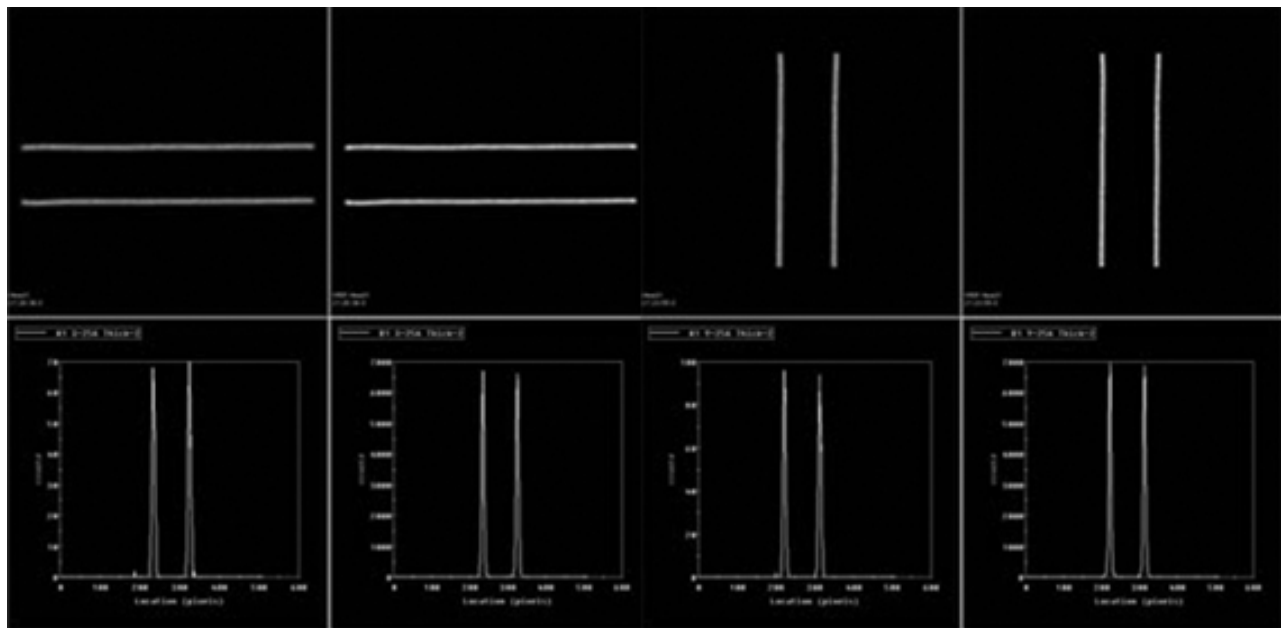


Fig. 4. Reconstruction of a simulated line source

Table 1. Line source reconstructed spatial resolution NEMA tests with scatter

	X	Y	Ave	Total CPS	Matrix size	Distance
Standard	8.25	8.02	8.14	200kcps	512×512	D1 13 cm
WBR	7.31	6.5	6.91	200kcps	512×512	D1 13 cm
Standard	8.94	7.95	8.45	300kcps	512×512	D1 13 cm
WBR	7.36	6.81	7.09	300kcps	512×512	D1 13 cm

방사성의약품의 투여량을 고정시키고 검사 속도를 변화시킨 첫번째 군의 결과에서는 Standard 영상과 WBR영상의 뼈 대비 연부조직 섭취 비는 p -value가 0.07로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다(Standard: 3.74 ± 1.2 , WBR: 3.96 ± 1.1). 육안적 영상 분석 결과에서도 유의한 차이를 보이지 않았다(Standard: 3.4 ± 0.7 , WBR: 3.2 ± 0.9). 검사 속도를 고정시키고 방사성의약품의 투여량을 변화시킨 두번째 군의 결과에서는 Standard 영상과 WBR영상의 뼈 대비 연부조직 섭취 비는 p -value가 0.458로 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았으며(Standard: 3.68 ± 0.2 , WBR: 4.0 ± 0.3), 육안적 영상 분석 결과 역시 두 영상 간 유의한 차이를 보이지 않았다(Standard: 3.8 ± 0.9 , WBR: 3.2 ± 0.8) (Table 3).

고찰 및 결론

본 연구는 핵의학 감마카메라의 본질적인 문제로 조준기를 사용하면서 생길 수 있는 영상 해상도 및 민감도의 상충 관계를 해결하고 영상 획득 시간 단축과 방사성의약품 투여량 감소에도 해상도와 민감도가 저하되지 않고 기존의 영상 품질과 같은 영상을 획득하기 위한 방안으로 연구되었다. UltraSPECT사의 WBR 기법은 이러한 해상도와 민감도의 상충관계를 보완하고 영상획득 시간 단축과 방사성의약품 투여량의 저감에도 높은 해상도와 신호 대 잡음 비를 가진 영상을 획득할 수 있도록 설계되었다. 현재 WBR기법의 이용은 전신 뼈 검사에서뿐만 아니라 Xpress.CardiacTM을 이용

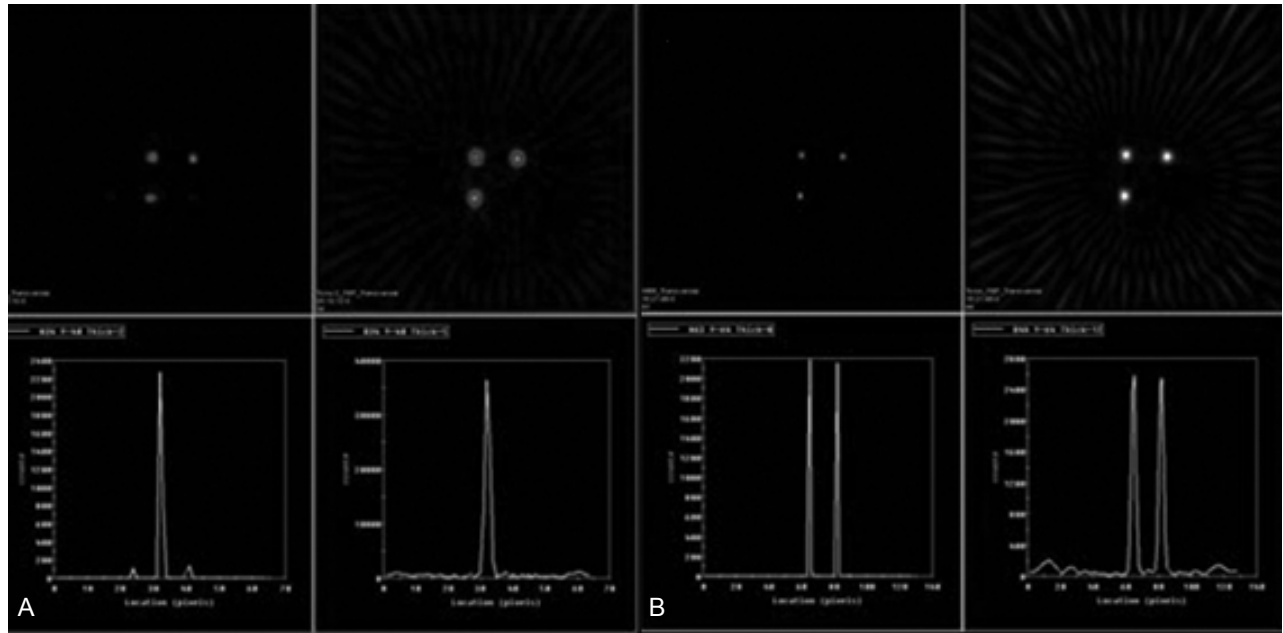

Fig. 5. Reconstruction of a simulated SPECT phantom A: Filtered back projection method B: WBR method.

Table 2. SPECT reconstructed spatial resolution NEMA tests with scatter

	Central	Peripheral Radial	Peripheral Tangential	Time of Frame	Angle	Matrix size
Standard	3.52	3.59	3.39	5	6	128×128
WBR	1.65	1.82	1.43	5	6	128×128
Standard	2.26	1.99	2.03	5	6	64×64
WBR	1.75	1.04	1.17	5	6	64×64

Table 3. Patient study of compared standard and WBR data in I and II group

Group	Method	^{99m}Tc -HDP (mCi)	Scan speed (cm/min)	FTR [*]	p-value	VQE [*]	p-value
I [*]	Standard	20	20	3.74±1.2	0.07	3.4±0.7	0.15
	WBR	20	30	3.96±1.1		3.2±0.9	
II [*]	Standard	30	25	3.68±0.2	0.458	3.8±0.9	0.256
	WBR	20	25	4.0±0.3		3.2±0.8	

I^{*} : Injection of fixed dose and change in the scan speed, first group

II^{*} : Fixed scan speed and change in the injection dose, second group

FTR^{*} : Femur to soft tissue ratio

VQE^{*} : Visual quality estimation

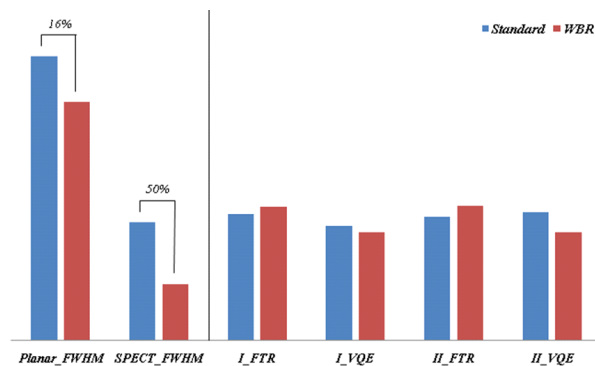


Fig. 6. Comparison of the WBR with Standard reconstruction. The results show that WBR improved more than Standard data in FWHM (Planar FWHM: 16%, SPECT FWHM: 50%). The WBR applied to data in more shortening of the standard scan time and more reducing of the injection dose is compared with Standard reconstruction of data. The results show no statistically significant difference in all evaluated parameters.

하여 심장 단층촬영에서도 활발히 연구되고 이용되고 있다. DePuey가 보고한 연구에서는 quarter-time WBR과 full-time OSEM 비교에서 동일한 품질의 영상을 획득 할 수 있다고 보고되었다.⁶⁾ 본 연구에서의 첫번째 군의 결과를 보면 영상 획득 시간을 약 25% 감소시킬 수 있었으며 뼈 대비 연부조직 섭취 비가 5.8% 향상된 영상을 획득할 수 있었다. 두번째 군의 결과에서도 방사성의약품의 투여량을 약 33% 감량시킬 수 있었으며 뼈 대비 연부조직 섭취 비가 11.1% 향상된 영상을 획득할 수 있었다(Fig. 6). 다음 연구에서는 영상 획득 시간을 절반 혹은 1/4로 감소시킨 것과 방사성의약품의 투여량을 절반으로 감량시켜 임상적 유용성에 대한 내용으로 연구해 볼 여지가 있을 것으로 사료된다. 또한 방사성의약품 투여 후 지연된 시간, 가슴 부위 방사능 계수치, 골밀도, 신장 기능 상태에 따른 다양한 조건들에 따른 WBR의 매개변수 설정과 표준화된 프로토콜의 확립에 대한 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

본 연구를 통해 성능실험에서 분해능이 향상되는 결과를

나타내었고, 임상적용 실험에서는 기존 재구성 방법에서의 동일한 해상도를 가지면서도 영상 획득 시간을 단축시킬 수 있었으며 방사성의약품의 투여량도 줄일 수 있었다. 이를 통하여 WBR 기법은 영상 획득 시간을 줄일 수 있어 핵의학 감마카메라 검사의 생산성 증대와 수신자의 피폭선량 경감 등 임상 현장에서 유용하게 이용되리라 사료된다.

요 약

UltraSPECT사의 Wide Beam Reconstruction (WBR)은 노이즈(Noise)와 조준기의 광속 확산 함수 효과(Beam spread function effect)를 제거하고 환자와의 거리를 자동적으로 보상하여 높은 해상도와 대조도를 제공할 수 있어 영상 획득 시간을 짧게 할 수 있고 상당한 영상 질 향상에 도움을 준다고 보고되고 있다. 이에 본 연구에서는 핵의학 분야에서 가장 흔히 이용되는 전신 뼈 스캔에 대해 WBR의 임상적 적용에 대한 유용성을 알아보고자 한다. XpressBone (WBR)의 성능 실험을 위하여 NEMA에서 제공하는 방법에 의하여 선원(Line source)과 SPECT Phantom을 이용하여 공간 분해능을 측정 분석하였다. 실험방법은 선원의 총 계수치를 200 kcps에서 300 kcps로 변화시켜 측정하였으며, SPECT Phantom은 매트릭스 크기를 변화시켜 측정하여 공간분해능에 대한 분석을 하였다. 또한 2009년 1월부터 2009년 9월까지 본원을 내원하여 뼈 스캔을 시행 받은 환자 40명을 두 군으로 나누어 임상 연구를 시행하였다. 1군은 ^{99m}Tc -HDP 740 MBq (20 mCi)를 투여하고 검사속도(20, 30 cm/min)를 변화시켰고, 2군은 동일한 검사속도에서 ^{99m}Tc -HDP의 투여량을 변화시켜 영상을 획득하여 Standard data와 WBR기법으로 재구성한 영상을 비교 평가하였다. 분석방법은 대퇴골체부에서 뼈와 연부조직간 섭취비(Femur to tissue ratio: FTR)를 측정한 정량적인 분석과 핵의학과 전문의와 5년 이상의 실무경험을 가진 방사선사가 육안적인 분석을 하여 비교 평가하였다. 성

능 실험에서 선원을 사용하여 실험한 결과 Planar WBR data는 Standard data에 비하여 분해능이 약 10% 향상되었으며, WBR 반치폭(Full-Width at Half-Maximum)은 16% 향상되었다(Standard data 8.45, WBR data 7.09). SPECT Phantom에서는 약 50%의 분해능이 향상되었으며, WBR 반치폭은 50% 향상되었다(Standard data 3.52, WBR data 1.65). 임상 연구에서는 ^{99m}Tc -HDP 투여량을 고정시키고 검사속도를 20 cm/min과 30 cm/min로 변화시킨 1군에서 Standard data와 WBR data의 전신 뼈 스캔 전면 영상에서 뼈 대비 연부조직 간 섭취비는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p=0.07$). 검사속도를 고정하고 ^{99m}Tc -HDP 투여량을 변화시킨 2군에서는 Standard data와 WBR data간의 전신 뼈 스캔 전면 영상에서는 통계적으로 유의한 차이를 보이지 않았다($p=0.458$). 영상의 육안적 분석에서도 두 군 간 유의한 차이를 보이지 않았다($p>0.05$). NEMA test 결과 WBR 기법의 영상에서 분해능이 향상되는 결과를 나타내었고, 임상 실험에서는 기존 재구성 방법에서의 동일한 해상도를 가지면서도 검사시간을 단축시킬 수 있었으며 방사성의약품의 투여량도 줄일 수 있었다. 이미 알려진 바와 같이 WBR은 노이즈를 감소시켜 신호 대 잡음비를 증강시키는 새로운 영상 재구성

방법임을 확인 할 수 있으며 동일한 검사속도에서 투여량을 감소시킬 수 있어 수신자의 피폭선량 경감과 검사시간을 단축할 수 있었으며 임상 현장에서 유용하게 이용되리라 사료된다.

REFERENCES

1. UltraSPECT R&D team, Haifa, Israel. Wide beam reconstruction: Breaking the limitation of the line spread function (white paper) 2008. www.ultraspect.com.
2. C.E. Metz, F.B. Atkins and R.N. Beck, The Geometric transfer function component for scintillation camera collimators with straight parallel holes, *Phys Med Biol* 1980;25:1059-70.
3. H.M. Hudson, R.S Larkin, Accelerated Image Reconstruction Using Ordered Subsets of Projection Data, *IEEE Transactions on Medical Imaging* 1994;13:601-9.
4. UltraSPECT R&D team, Haifa, Israel. Wide beam reconstruction: Technology and applications (white paper) 2008. www.ultraspect.com.
5. M. Bocher, B. Bakunin, R. Chisin, Expedited planar bone scan acquisition using wide beam reconstruction. *EANM* 2005.
6. DePuey G, Bommireddipalli S, Belesky I, Clark J, Leykekhman A, Thompson L, et al. Quarter-time myocardial perfusion SPECT wide beam reconstruction. *J Nucl Cardiol* 2008;15:S2.