

영상 자료 획득시의 오류가 전자토모그래피 결과에 미치는 영향 고찰-모델 시뮬레이션을 중심으로

주형태, 이수정^{1,*}, 김윤중², 석봉출

한국해양연구원 해양환경연구본부, ¹한국지질자원연구원 자원활용소재연구부
²한국기초과학지원연구원 전자현미경연구부

Model Simulation for Assessment of Image Acquisition Errors Affecting Electron Tomography

Hyeong-Tae Jou, Sujeong Lee^{1,*}, Youn-Joong Kim² and Bong-Chool Suk

Marine Environment Research Department of Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan 426-744, Korea

¹Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea

²Division of Electron Microscopic Research, Korea Basic Science Institute, Daejeon 350-333, Korea
(Received March 5, 2008; Accepted March 17, 2008)

ABSTRACT

This simulation study examined the effect of data acquisition error including the data type of TEM image, and incident beam intensity of the tilt series on 3D tomograms. Simulation was performed with the 3D head phantom model of Kak and Slaney, and the slightly modified 3D head phantom model with enhanced difference in absorption coefficients. Reconstructed tomogram for the original head phantom model using 8-bit gray-scale image was distorted with extremely high level of noise, while an acceptable result was obtained for the modified model. The results for the original model using wrong formulation for the transmitted beam intensity was proved to be incorrect. The high level of noise along the z direction was found in case of the modified model. On the other hand, the wrong value of incident beam intensity in both models gave distorted results. In order to reconstruct an artifacts-free 3D structure from the projections with invisible features in electron tomography, the 16-bit projection images should be used with the correct incident beam intensity which is applied to Beer's law.

Keywords : Electron tomography, Model simulation, 3D head phantom, Acquisition error

서론

토모그래피는 1970년대 의학 분야에서 X선 단층촬영으로 폭발적인 관심을 끌기 시작했다. 지진학이나 지구물리학 분

야에서의 토모그래피는 지하 암층의 경계면 규명이나 대규모 절리의 발달 상태 규명 등의 목적으로 널리 사용되고 있다(Nolet, 1987; Menke, 1989; Reynolds, 1997). 1960년대 시작된 전자 토모그래피는 시료를 여러 방향에서 관찰한 자료를 컴퓨터로 재구성하여 3차원 구조 정보를 얻는 분석법으

* Correspondence should be addressed to Dr. Sujeong Lee, Minerals and Materials Processing Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources, Daejeon 305-350, Korea. Ph.: (042) 868-3125, Fax: (042) 868-3418, E-mail: crystal2@kigam.re.kr

로 의생물 분야에서 시작된 이후 재료과학 분야에서도 활용되고 있다. 명시야상을 이용한 전자 토모그래피는 상용화된 S/W를 사용하는 것이 대부분으로, 연구자는 빠른 시간 내에 편리하게 시료의 삼차원 구조 정보를 얻을 수 있는 반면, 그 결과의 신뢰성에 대한 고려는 매우 드문 실정이다. 현재까지 널리 사용되고 있는 전자 토모그래피는 다음 네 단계를 거쳐 완성된다. 첫째, 시료를 일정 범위 내에서 연속적으로 기울인 2차원 투사영상의 획득; 둘째, 얻어진 영상의 정렬; 셋째, 3차원 영상으로의 재구성; 넷째, 시각화 과정이다(De Rosier & Klug, 1968). 토모그래피 수행 시 이러한 일련의 과정에서 만들어진 잡음들은 시스템 방정식의 오차를 유발, 해의 정확도를 낮추게 됨으로써 3차원 영상에 작위적인 결과(artifacts)를 만들거나 토모그램의 분해능 저하를 초래한다.

본 연구에서는 첫 번째 단계인 2차원 투사영상의 획득 과정에서 발생하는 잡음 중 입사빔 값과 영상형식의 선택이 토모그램에 미치는 영향을 모델 시뮬레이션을 통해 평가하고자 하였다. 보다 객관적인 평가를 위해 X선 단층촬영과 MRI 등의 시뮬레이션에 널리 사용되고 있는 3D head phantom 모델 및 이의 수정 모델 등 2가지 모델을 선택하여 투과전자현미경 영상 획득 시 잡음을 일으키는 요인에 대해 시뮬레이션을 실시하였다.

비어의 법칙 (Beer's Law)

광학에서 X-선의 강도가 통과하는 물체와 상호작용을 한 결과 지수 함수적으로 감소되는 현상을 흔히 비어의 법칙이라는 경험식으로 설명한다. 전자빔을 이용하는 전자토모그래피 역시 투과 토모그래피의 한 종류로, 입사빔 강도의 감쇠가 있는 투사영상을 모아 적정한 처리를 거쳐 3차원적으로 재구성하게 된다. 이 때 감쇠되는 입사빔의 강도는 시편이 얇은 경우 비어의 법칙에 따르며, 경험적으로 Ti, Ge, Au 등 두께 200 nm 이하의 금속시편에서도 유효한 것으로 알려져 있다(Pozsgai, 1997).

빛이 매질의 특성에 따라 흡수되는 관계를 나타내는 비어의 법칙은, 매질이 용액이거나 기체인 경우에도 성립된다. 분광학에서 균질한 매질에 대하여 입사 강도 I_0 에 대한 투과 강도 I_r 는

$$I_r = I_0 \exp(-uh), \quad \text{즉} \quad -\ln(I_r/I_0) = uh \quad (1)$$

으로 표현할 수 있다(Steppe et al., 2004). 이때 u 는 매질의 흡수계수, h 는 빛이 매질을 통과하는 길이를 나타낸다(Fig. 1(a)). 흡수계수가 서로 다른 종류의 매질을 통과하는 경우(Fig. 1(b))는

$$I_r = I_0 \exp\left(-\sum_i u_i h_i\right) \quad (2)$$

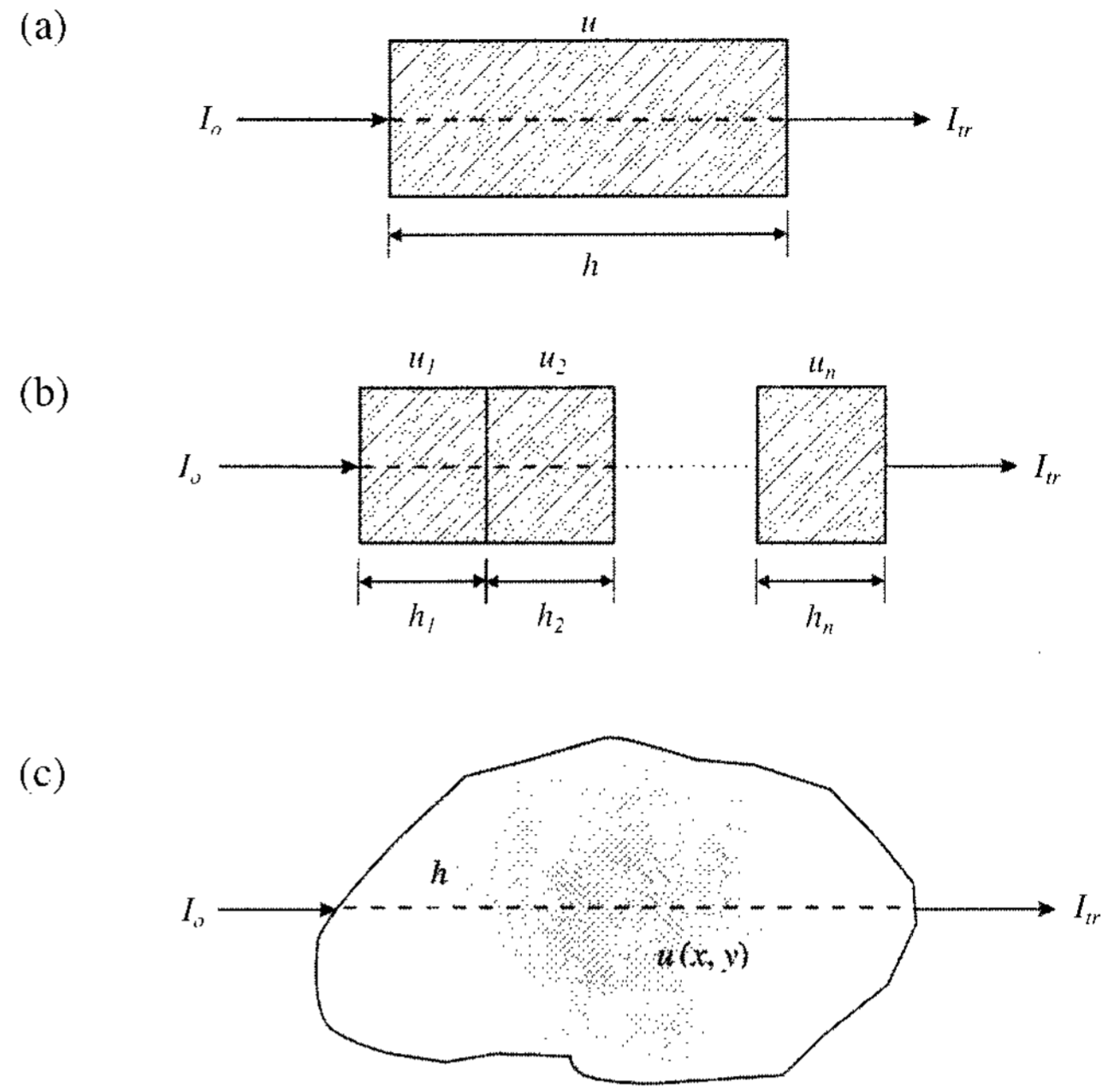


Fig. 1. The schematic diagram describing Beer's law. The intensity of transmitted beam (I_r) after passing through an object with thickness h and absorption coefficient u is related with incoming intensity (I_0).

로 표현된다. 이때 첨자 i 는 빔이 통과하는 각 매질의 종류에 대응한다. 위의 식(2)를 흡수계수가 서로 다른 다양한 매질인 경우(Fig. 1(c))로 일반화시켜 적용하면,

$$p = -\ln\left(\frac{I_r}{I_0}\right) = \int_C u(x, y) dh \quad (3)$$

로 나타낼 수 있다.

3D head phantom 모델

3D head phantom 모델 (Shepp & Logan, 1974; Shepp, 1980)은 X-ray, MRI, 그리고 전자 토모그래피에서 모델링 시뮬레이션을 위해 널리 사용되는 3차원 모델이다. 이 모델은 수학적으로 계산이 쉬운 여러 종류의 타원체로 이루어진, 인간의 머리 및 그 내부를 형상화한 것이다. Shepp (1980)이 제시한 원래의 모델은 17개의 타원체로 구성되어 있으며, Kak & Roberts (1986), Kak & Slaney (1988) 등은 보다 단순화된 3D head phantom 모델을 제시하였다.

본 연구에서는 Kak & Slaney (1988)의 3D head phantom 모델을 사용하였는데, 내부 매질의 흡수계수의 차이가 너무 적어 전자현미경 영상에서는 명암대비가 거의 없는 경우로 볼 수 있다. 실제로는 영상의 명암대비가 적은 시료는 염색 등을 통해 명암대비를 증가시켜 관찰하는 것이 일반적이므로, 내부 매질의 흡수계수의 차이를 크게 증가시킨 수정된

Table 1. Specification of the two 3D head phantoms*

Ellipsoid	Coordinates of the center	Axis length	Rotation angle	Absorption difference 1	Absorption difference 2
(a)	(0, 0, 0)	(0.69, 0.92, 0.9)	0.0	2.0	1.0
(b)	(0, 0, 0)	(0.6624, 0.874, 0.88)	0.0	-0.98	-0.50
(c)	(-0.22, 0.0, -0.25)	(0.41, 0.16, 0.21)	3n/5	-0.02	-0.25
(d)	(0.22, 0.0, -0.25)	(0.31, 0.11, 0.22)	2n/5	-0.02	-0.25
(e)	(0.0, 0.35, -0.25)	(0.21, 0.25, 0.50)	0	0.02	0.25
(f)	(0, 0.1, -0.25)	(0.046, 0.046, 0.046)	0	0.02	0.25
(g)	(-0.08, -0.65, -0.25)	(0.046, 0.023, 0.02)	0	0.01	0.15
(h)	(0.06, -0.65, -0.25)	(0.046, 0.023, 0.02)	n/2	0.01	0.15
(i)	(0.06, -0.105, 0.625)	(0.056, 0.04, 0.1)	n/2	0.02	0.25
(j)	(0, 0.1, 0.625)	(0.056, 0.056, 0.1)	0	-0.02	-0.25

* Absorption difference 1 in Kak & Roberts (1988), absorption difference 2 in the modified model

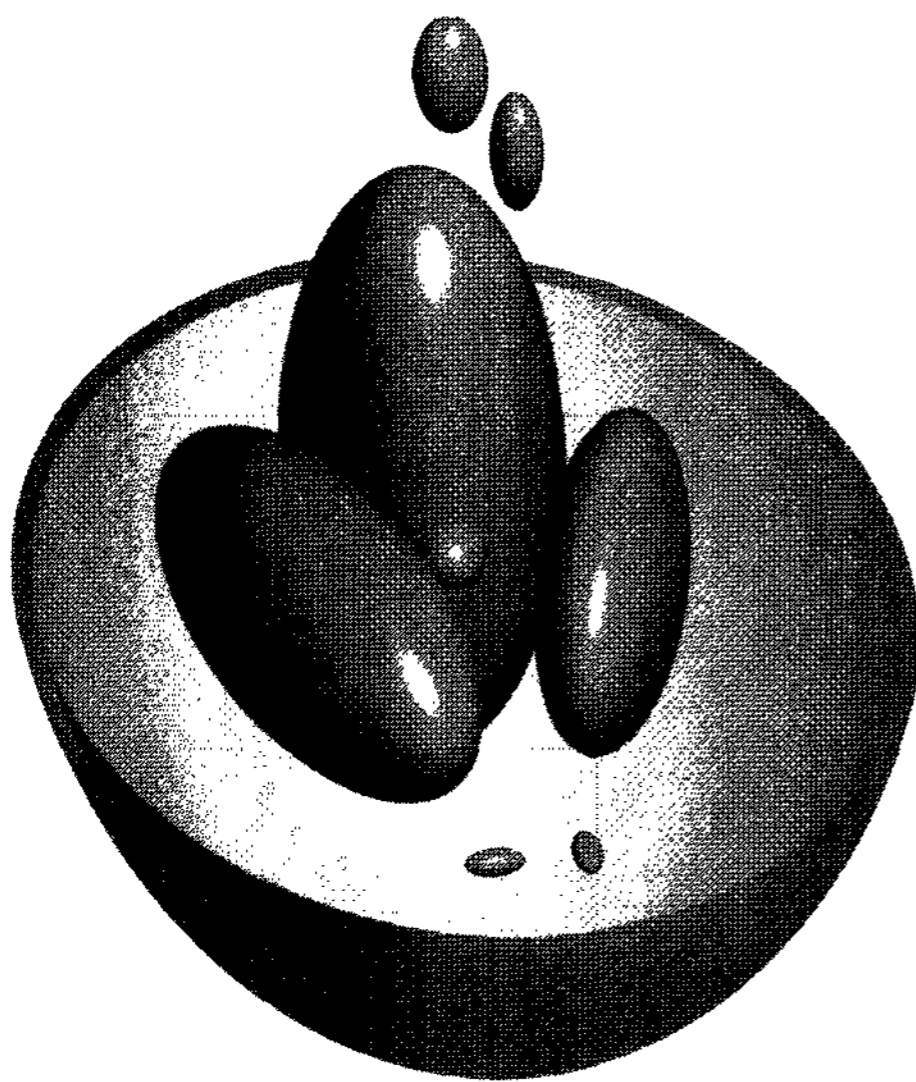


Fig. 2. A 3D rendering of the 3D version of Shepp and Logan head phantom.

3D head phantom 모델을 함께 시뮬레이션하였다. 두 모델을 이루는 타원체의 형상 및 흡수 계수와 관계된 구체적인 사항은 Table 1에 나타내었다. 이 모델의 모식도를 Fig. 2에 나타내었으며, Koay et al. (2007)을 참조하였다. Fig. 2는 Kak & Slaney (1988)의 3D head phantom 모델에 대한 3차원 입체모식도이며, 모델의 내부를 보이기 위해 외피 상부 부분을 잘라낸 것이다.

Fig. 3(a)는 Kak & Slaney 모델의 $z = -0.25$ 에서의 $x-y$ 단면을, Fig. 3(b)는 $y = 0.125$ 에서의 $x-z$ 단면을 보여주고 있으며, Fig. 3(c), (d)는 Fig. 3(b)에서의 각 타원체 단면의, 원래 모델 및 수정 모델에 대한 흡수계수를 각각 보여주고 있다. Kak & Slaney 모델(Fig. 3(c))은 흡수계수가 상대적으로 매우 큰 2.0 정도의 얇은 외피가 있고, 이 외피의 흡수계수의 1/2 정도(1.02) 되는 매질로 채워져 있으며, 이 안쪽의 매질 곳곳에 흡수계수가 다른 여러 개의 타원체가 존재한다. 안

쪽 매질에 존재하는 여러 개의 타원체들의 흡수계수가 안쪽 매질과 4% 이하의 차이를 보이고 있으며, 외피의 흡수계수 값에 비해서는 2% 내로 변하고 있는 등 매질 내 이상 타원체들의 흡수계수의 차이가 매우 적다. 이러한 성질의 시료는 영상의 명암대비가 거의 없어 전자 토모그래피 적용을 위한 실제 시료의 형태로는 거의 존재하지 않지만, 이 모델은 토모그래피의 분해능 한계를 시험하기 위해 많이 사용된다. Fig. 3(d)의 수정된 3D head phantom 모델의 흡수계수를 살펴보면, 내부 매질에 존재하는 이상 타원체들의 흡수계수는 내부 매질의 흡수 계수에 비해 40% 이상의 차이를 가지는 값들로 이루어져 있다.

모델 시뮬레이션

1. 투과전자현미경 영상 시뮬레이션

투과전자현미경 영상에서 전자빔 강도는 검출기인 CCD 카메라의 각 픽셀 값으로 표현되며 이는 CCD 카메라에 감지되는 전자의 양에 비례한다. 16-bit의 CCD 카메라가 나타낼 수 있는 최대값은 65,535로 보통 현미경 영상 픽셀의 값은 CCD 카메라가 허용하는 값보다 작은 값을 갖도록 빔 전류 및 노출시간 등이 조절된다. 시험 모델의 현미경 투사 영상을 얻기 위해 사용된 빔 강도는 CCD 카메라로 얻은 영상에서 20,000이 되도록 하였다. 기울임은 -70° 에서 70° 까지 2도씩 증가시키면서 총 71개의 투사영상을 계산하였으며, 이 때 픽셀 사이즈는 256×256 으로 하였다. 각 타원체에 대한 투사영상을 구하는 과정은 Kak & Slaney (1988)를 참조하였다. 투사영상을 얻기 위해 한국과학기술정보연구원 슈퍼컴퓨터 IBM SMP 시스템을 사용하였으며, 하나의 모델링에 대해 10개의 CPU를 병렬로 사용하여 약 8분 정도의 시간이 소요되었다.

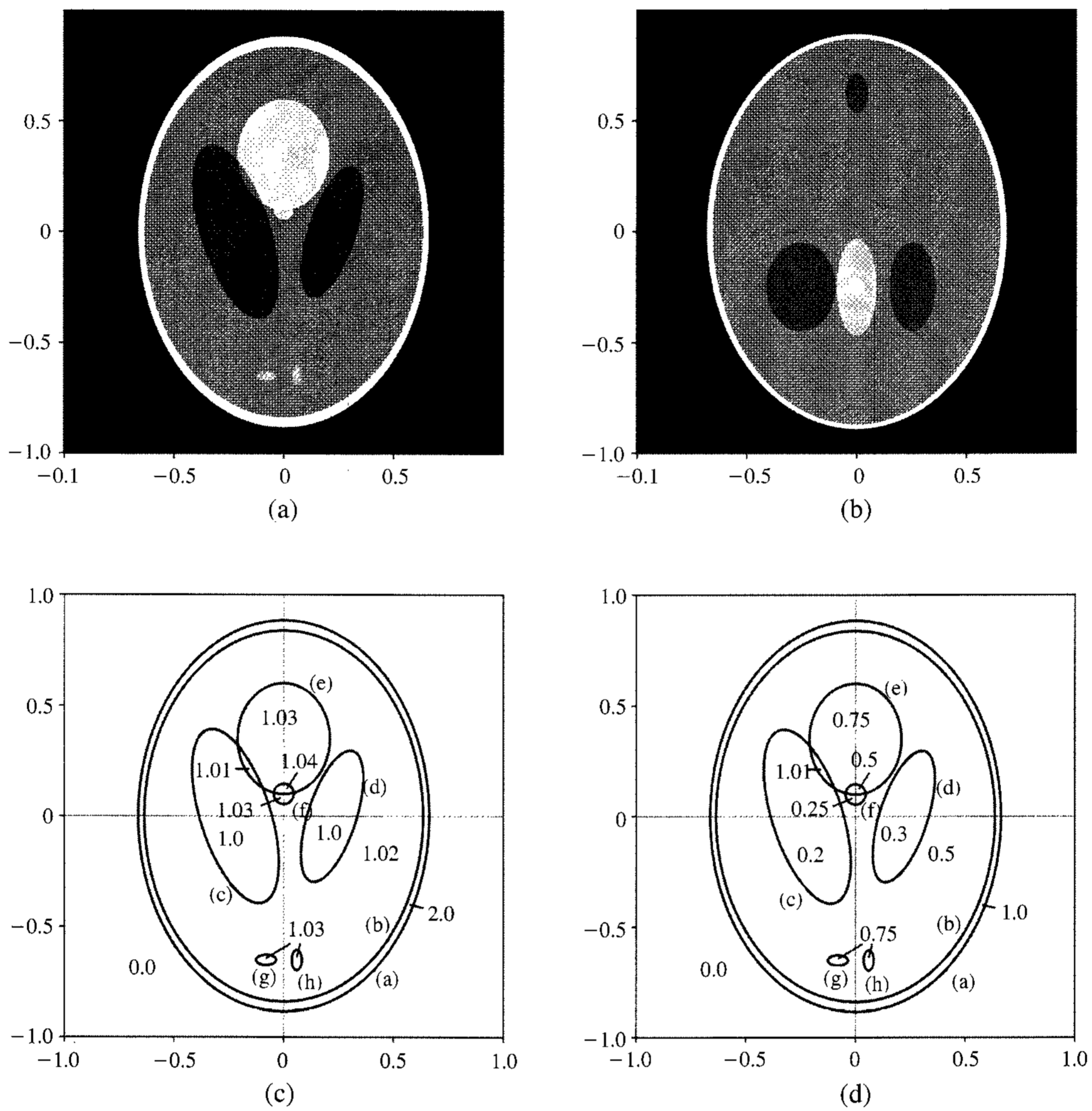


Fig. 3. (a) x-y plane cross section at $z=-0.25$, and (b) x-z plane cross section at $y=0.125$ of the 3D version of Shepp and Logan head phantom. The absorption coefficients of the ellipsoids in x-y cross section in (a) is illustrated in (c) for the original 3D Shepp and Logan head phantom and (d) for the modified one.

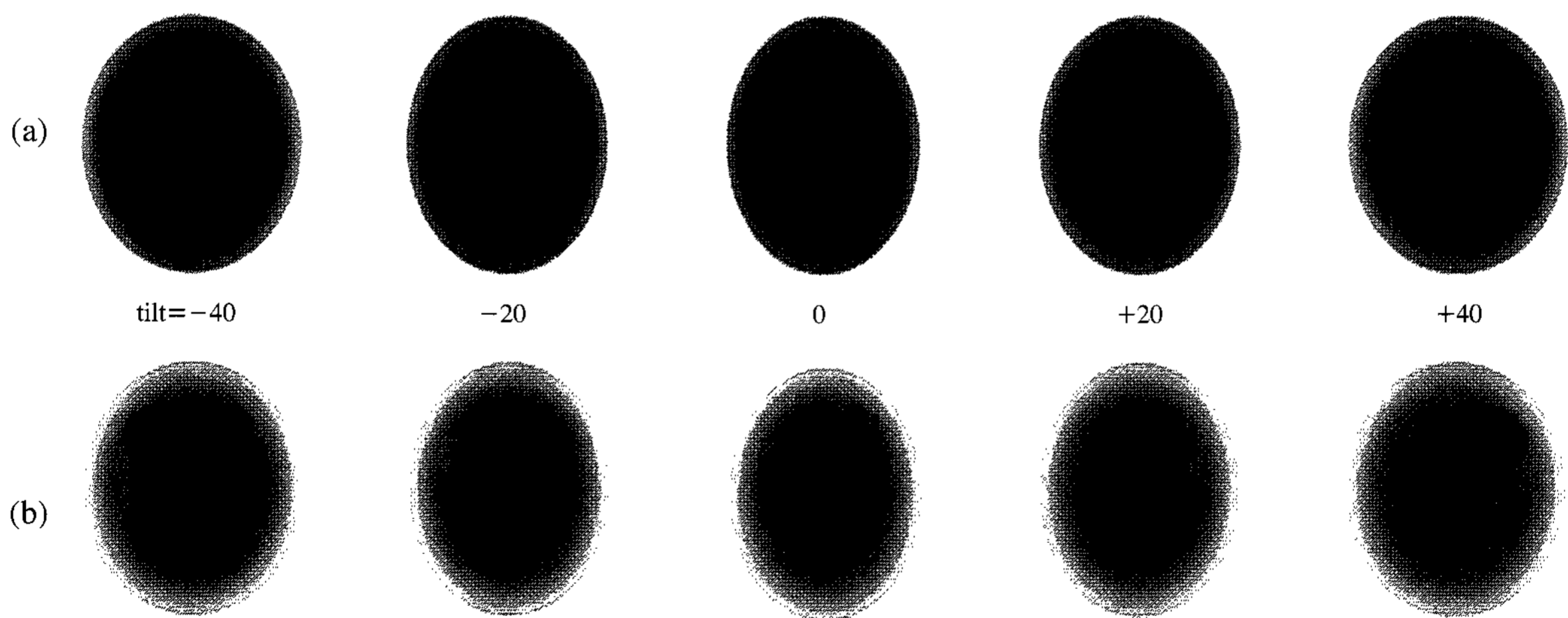


Fig. 4. Simulated tilt series for (a) the 3D head phantom model of Kak & Slaney (1988) and (b) the modified 3D head phantom model.

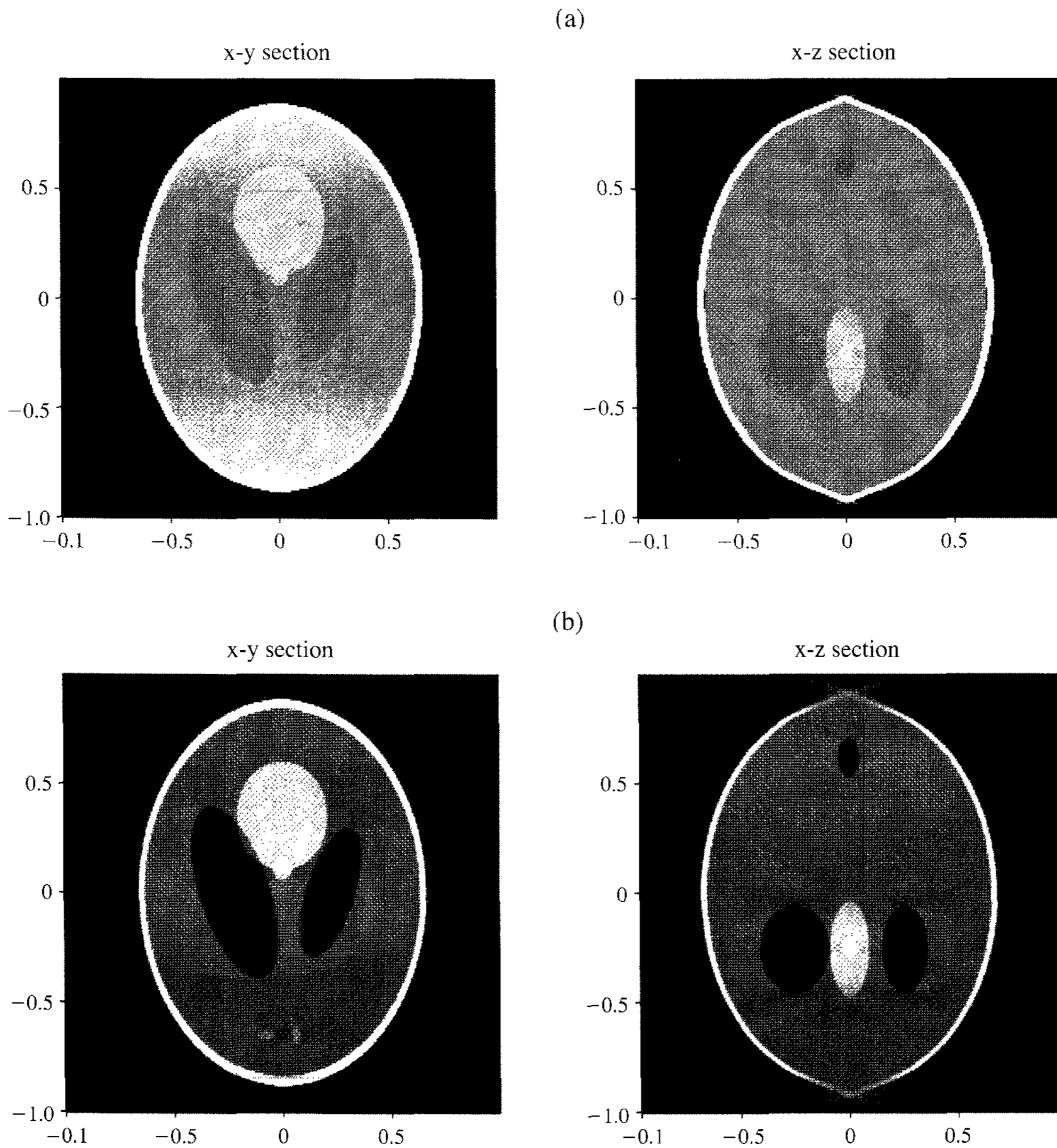


Fig. 5. Cross sections of the reconstructed tomogram of (a) the model of Kak & Slaney (1988) and (b) the modified model in case of using exact values for transmitted beam.

2. 토모그래피 과정

토모그래피 수행을 위해 현미경 투사영상의 각 픽셀 값을 구하여 투과 빔의 강도로 가정하였다. 토모그래피기법을 이용한 복원은 FFT를 이용한 WBP (Weighted Back Projection) 방법을 사용하였다. 이 방법은 현재 가정 널리 쓰이는 방법으로 쉽게 공식화시켜 결과를 빨리 얻을 수 있는 장점이 있다. 현재 전자 토모그래피 기법은 식(3)의 라돈 변환(radon transform) 형태를 기본 식으로 사용하고 있으며, WBP법 또한 식(3)으로부터 유도된다(Nolet, 1987). 토모그래피를 위한 첫 번째 단계는 투과빔 대 입사빔의 비율에 자연 로그를 취한 값을 구하는 것으로, 토모그래피를 사용하기 위해 입사빔 값에 대한 정보가 중요한 이유가 여기에 있다. WBP법에서 전체 기울임 각도에 대한 적분과정이 있는데 이 연구에서 사용된 기울임 각도는 -70도에서 70도 사

이로 일부 적분구간의 값을 얻을 수 없게 된다. 이로 인해 얻어진 복원 값은 원래 모델의 실제 흡수계수와는 차이가 나며, 이 때문에 얻어진 흡수계수는 상대적인 값의 개념으로만 해석해야 한다.

먼저 투과빔 자료인 전체 투사영상 자료를 입사빔 값으로 나눈 뒤 자연 로그를 취하여 새로운 자료를 얻었으며, 이 자료를 각각 y에 대하여 2차원 WBP을 적용시켜 3차원 복원 자료를 얻었다. 토모그래피 과정은 IBM 64-bit 리눅스 시스템에서 수행하였으며, 하나의 복원과정에 약 15분 정도의 시간이 소요되었다.

3. 영상 형식

CCD 카메라로 검출되는 빔 강도값은 사용되는 A/D 컨버터의 특성에 따라 결정되는 어떤 최대 값 이하의 정수로 얻

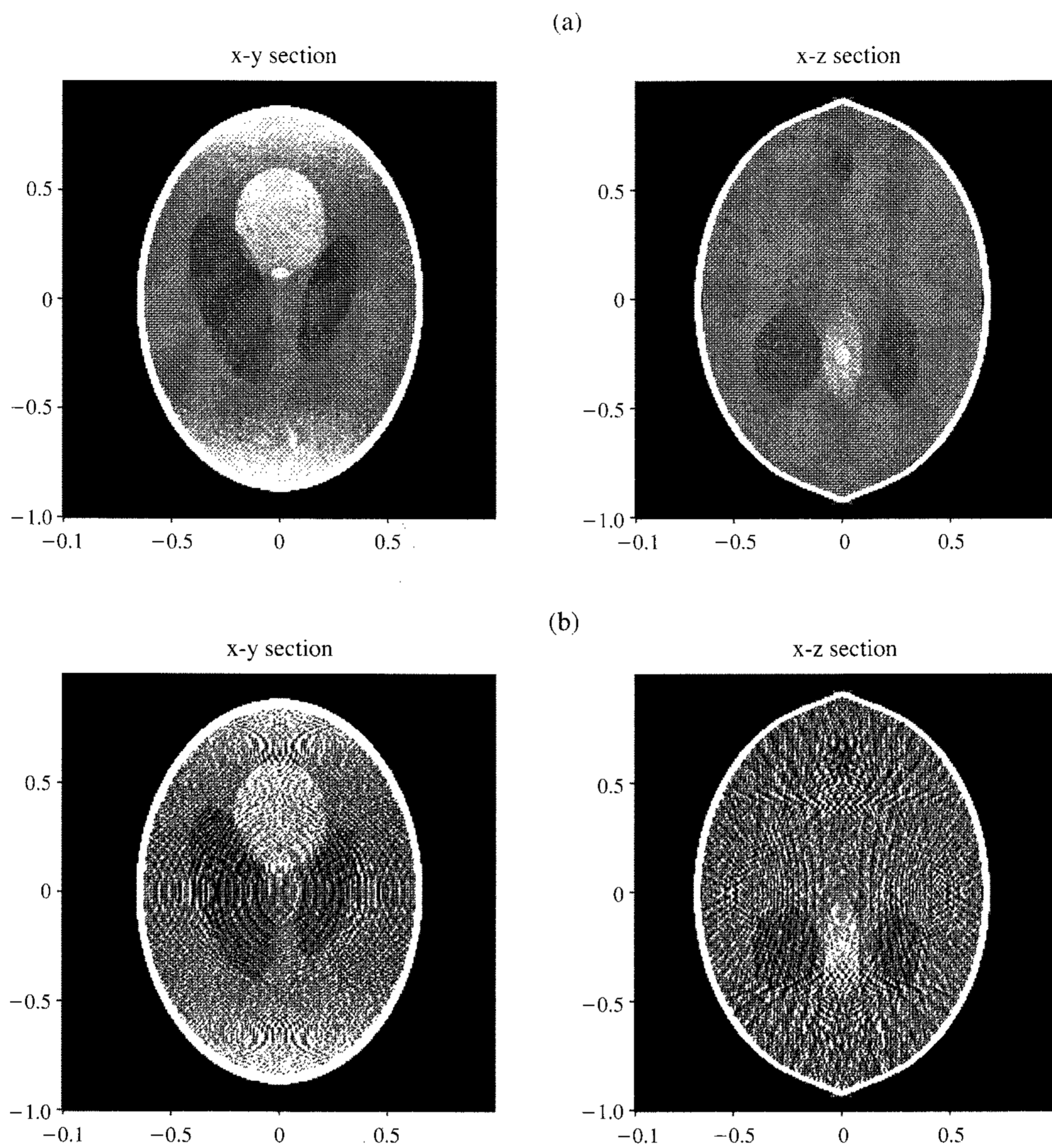


Fig. 6. Cross sections of the reconstructed tomogram of the model of Kak & Slaney (1988) using (a) the 16-bit images, and (b) the 8-bit images for transmitted beam.

어진다. 이때 실제 값을 정수로 변환시키는 과정에서 피할 수 없는 오차가 존재하게 되며, 이의 오차를 최소화하기 위해 충분히 큰 값을 가질 수 있는 A/D 컨버터를 사용하는 것이 좋다. 이 실험에서 가정한 입사빔 값 20,000 정도의 값은 최소 15-bit 이상의 A/D 컨버터를 갖는 CCD 카메라에서 얻어진다. 이렇게 CCD 카메라에서 얻어진 투과 빔의 값을 흑백스케일 영상으로 저장하려면 16-bit 포맷 형식을 사용해야 한다. 그러나 16-bit 형식을 다룰 수 있는 프로그램이 흔치 않고, 육안으로는 이러한 차이를 느끼지 못하기 때문에 많은 사용자들이 8-bit 형식을 사용하고 있으며, 토모그래피 적용 시에도 8-bit 형식을 사용하는 경우가 많이 있다. 이러한 영상 형식에 의한 왜곡을 살피기 위해 CCD 카메라를 통해 16-bit 흑백 스케일의 영상이 얻어진 경우와 8-bit 흑백 스케일의 영상이 얻어진 두 가지 경우에 대하여 토모

그래피 복원을 시도하였다. 8-bit 형식의 이미지 포맷의 경우 최대 값이 255를 넘지 않아야 하므로 얻어진 투과빔의 값을 적당한 값으로 나누어 다시 범위를 잡아야 하며, 여기서는 투과빔의 최대 값인 20,000이 255가 되게 하였다.

4. 입사빔 값

앞에서 기술하였듯이 입사 강도는 투과빔대 입사빔의 비에 자연 로그를 취한 값을 입력자료로 사용해야 한다. 실제로 입사빔 값을 추정하기 힘든 이유로 여러 가지 입사빔 값을 사용한 다음 가장 좋은 결과를 취하는 경우가 대부분이며, 종종 많은 전자 토모그래피 사용자들이 입사빔에 대한 정보를 고려하지 않은 채 투과전자현미경 영상에서 얻은 투과빔 값을 직접 사용하고 있다. 실제로 많은 논문에서의

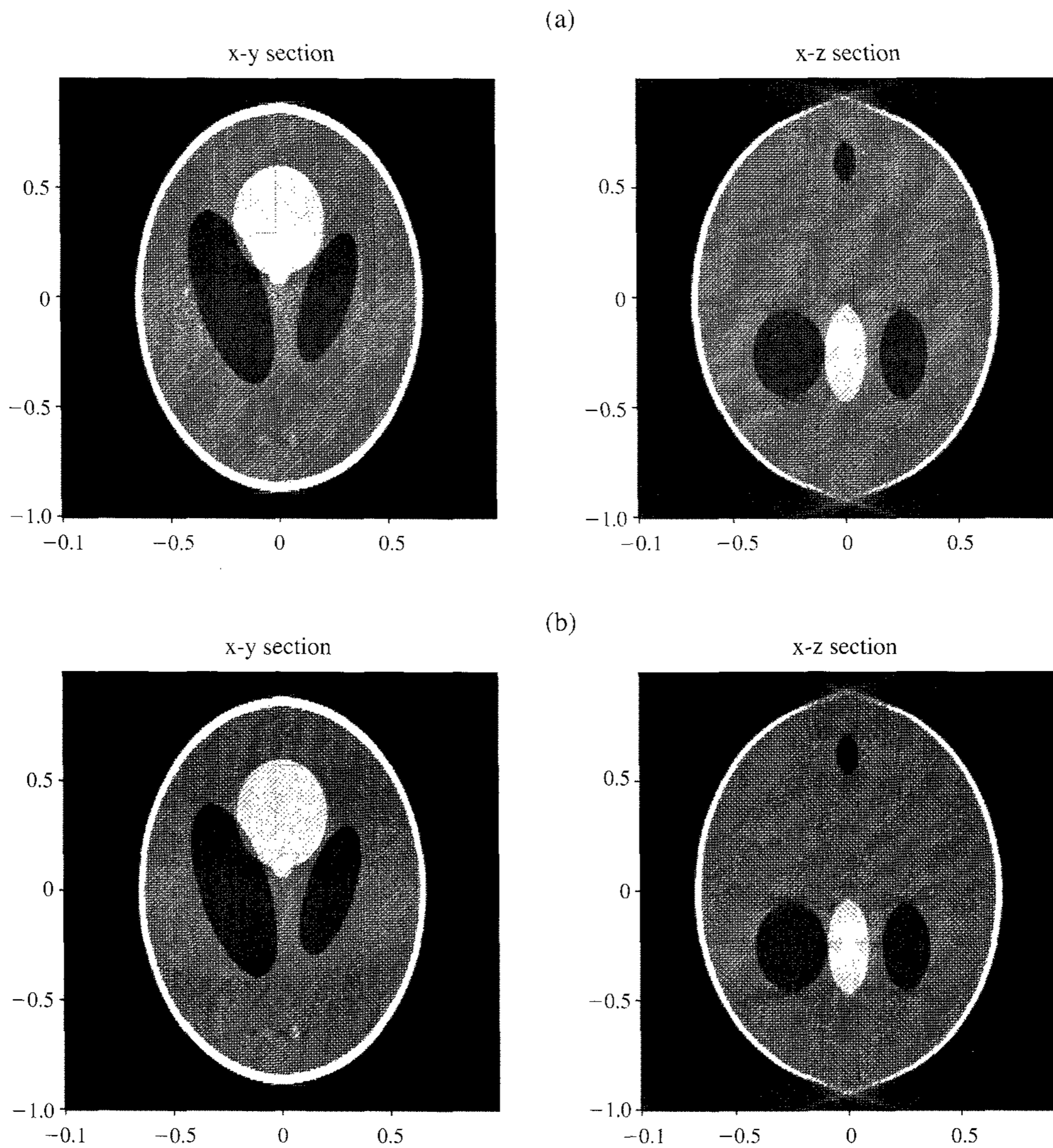


Fig. 7. Cross sections of the reconstructed tomogram of the modified model in case of using (a) the 16-bit images, and (b) the 8-bit images for the transmitted beam. Different ellipsoids with a big difference of absorption coefficients are recognized in both the 16-bit and the 8-bit data.

전자 토모그래피 결과는 이러한 과정에 대해 상세히 설명되어 있지 않으며, 입사빔의 왜곡에 의한 토모그래피 결과의 영향을 제대로 고찰한 경우도 드물다.

입사빔 값을 어떻게 취하느냐에 따라 토모그램이 달라지는 효과를 알아보기 위해 첫째, 입사빔을 전혀 고려하지 않고 투과빔 값을 그대로 사용한 경우, 둘째 잘못된 입사빔 값을 사용한 경우를 예로 하여 그 토모그래피 결과를 비교하였다. 이 경우 다른 요인의 영향을 없애주기 위해 모든 영상은 16-bit 형식으로 사용하였다.

결과 및 고찰

Fig. 4(a), (b)에 원래 3D head phantom 모델과 수정된 모

델에 대한 2차원 투사영상의 일부(tilt=-40, -20, 0, +20, +40)를 각각 나타내었다. Fig. 3을 살펴보면 원래의 모델의 경우 외피의 흡수계수가 매우 큰 관계로 해서 내부에 존재하는 타원 이상체에 대한 현미경 영상의 명암대비는 눈으로 거의 관찰할 수 없을 정도로 적다. 현미경 영상은 픽셀 2,000의 값을 충분히 저장할 수 있는 16-bit tiff 형식을 사용하였다.

검출기에 신호(연속적인 실수 값)가 도달하게 되면 실수 값은 정수로 되어 16-bit나 8-bit 등의 어떤 범위내의 값으로 변환된다. Fig. 5(a), (b)는 앞에서 제시한 두 가지 모델에 대하여 구해진 투과빔 자료 및 입사빔 값을 아무런 왜곡없이 그대로, 즉 연속적인 실수 값을 사용하여 토모그래피 복원을 시도한 결과를 각각 나타낸 그림이다. 기울임 각도의 변화에 따른 영상의 변화를 통해 타원 이상체의 존재를 확

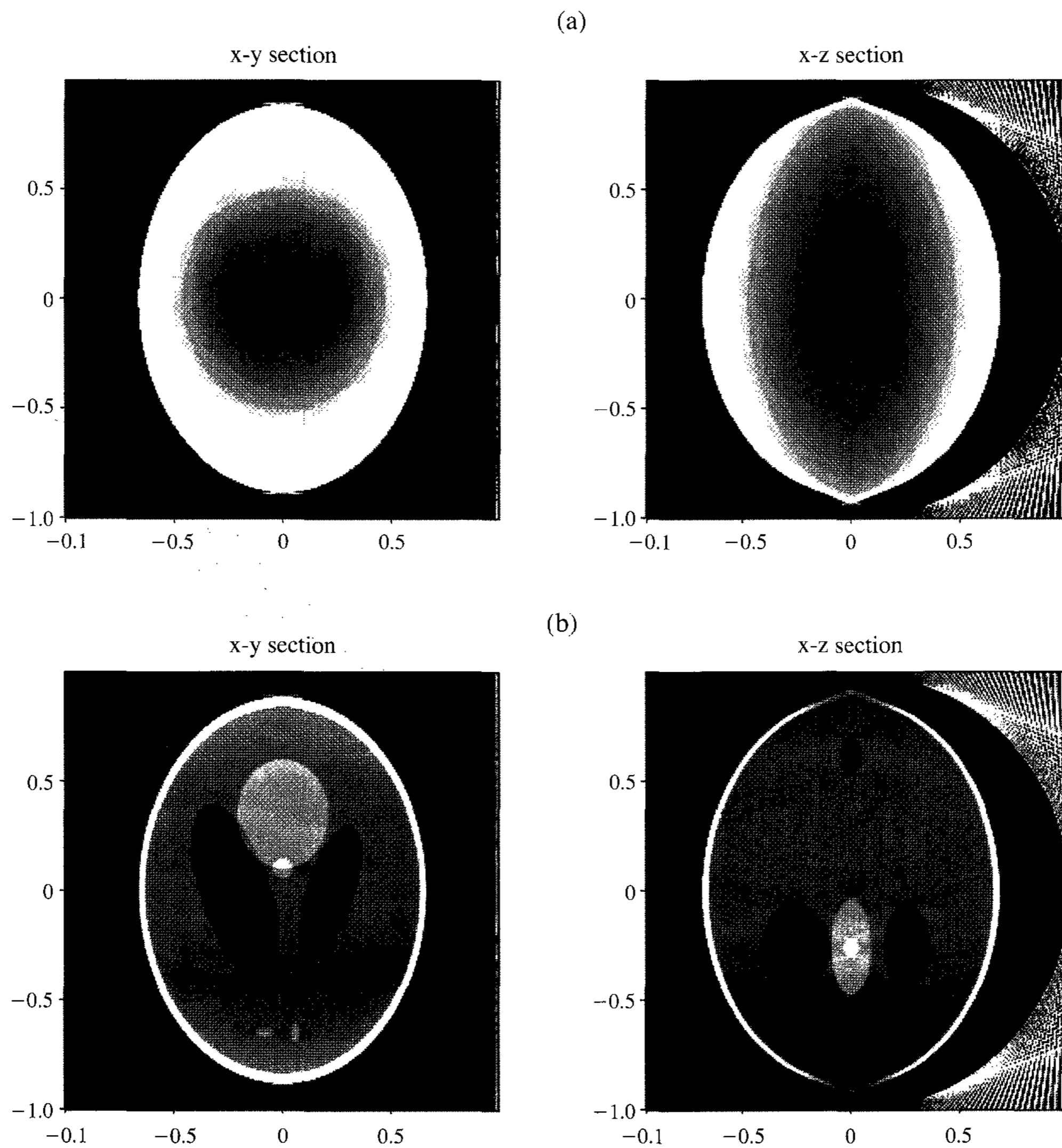


Fig. 8. Cross sections of the reconstructed tomogram of (a) the model of Kak & Slaney (1988) and (b) the modified model in case of not using, $-\ln\left(\frac{I_r}{I_0}\right)$ but I_r for the equation (3) in text. Different ellipsoids with a big difference of absorption coefficients are recognized, but severe noise is shown along the z-axis in x-z section.

인 할 수 있다. 3-D 복원의 정확성을 확인하기 위해 Fig. 3 과 같이 구해진 복원 결과의 x-y 단면 및 x-z 단면을 나타 내었다. 원래 자료와 비교해 보면 두 가지 모델이 모두 매우 좋은 결과를 나타내고 있으며, 제한된 기울임 각에 의한 유실 영역 (missing wedge) 효과로 인해 다소의 잡음이 존재 하지만 원래의 모델을 충분히 근사시킨 결과를 보여주고 있다. 즉, 영상의 명암대비가 작더라도 원래의 실수값을 사용하게 되면 얻어지는 토모그램은 Fig. 5(a)에서 보여지는 바와 같이 신뢰성있는 결과를 나타냄을 알 수 있다. Fig. 5 의 결과는 편의상 밝기와 명암 등을 조절해 상대적으로 나타 낸 것이다. Fig. 5의 토모그램은 실제 값에 가장 가까운 참고 값으로서, 영상 획득 시의 잡음에 의한 효과를 검증할 때 비교기준으로 삼았다.

1. 영상 형식에 의한 효과

Fig. 6(a), (b)는 CCD 카메라로 얻은 영상의 형식이 만드는 차이, 즉 16-bit와 8-bit 영상 형식의 경우 토모그램 결과를 각각 보여주고 있다. Kak & Slaney의 head phantom 모델의 결과를 살펴보면, 16-bit 결과의 경우 Fig. 5(a)에 나타 낸 실제 값 자료와 거의 유사한 결과를 보여주고 있는 반면 8-bit 영상의 경우는 매우 큰 타원체의 형태만 인식할 수 있으며, 그 경우도 매우 많은 잡음들에 의해 뚜렷한 판독이 어렵다. Kak & Slaney 모델은 외피 속의 타원 이상체들의 흡수 계수의 차이가 미세한 관계로 토모그램을 복원하기 위해서는 매우 높은 정밀도의 측정치를 요구하기 때문이다. 16-bit 이미지의 경우 실제 측정 값을 정수만으로 근사하는

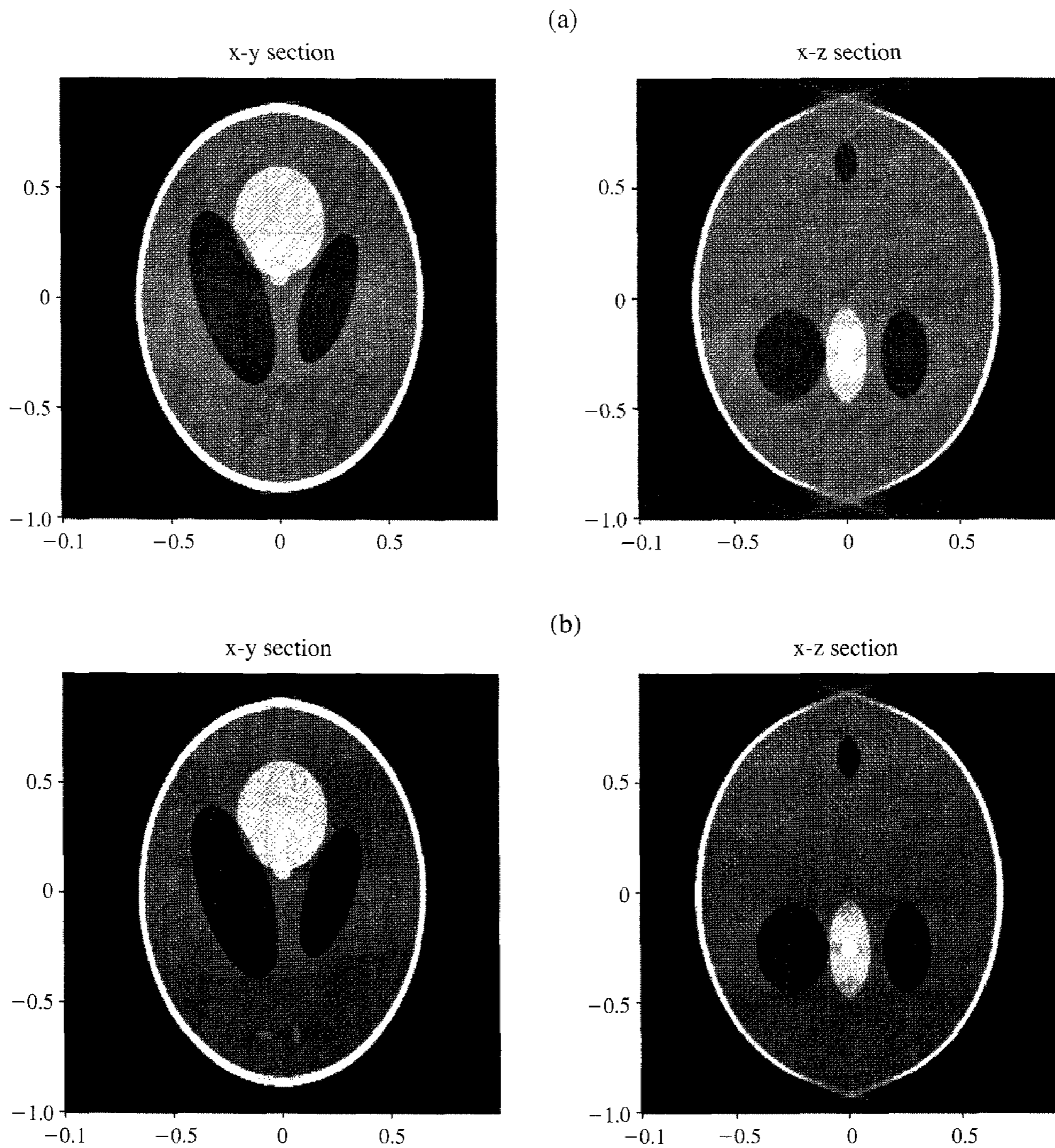


Fig. 9. Cross sections of the reconstructed tomogram of (a) the model of Kak & Slaney (1988) and (b) the modified model in case of using wrong I_o in equation (3). Different ellipsoids are distinguished, but lots of noise is also shown in all sections.

왜곡이 존재하지만 사용된 대역폭이 20,000 (대역 최대치는 65,535)으로 충분히 크기 때문에 실제 값에 유사한 값으로 근사된 반면, 8-bit 이미지의 경우 0~255의 매우 좁은 폭인 256 단계의 값만을 사용하기 때문에 정밀도가 매우 떨어진 측정치가 사용되었다. 이러한 이유가 결과의 차이로 나타난 것이다. 다음으로 수정된 head phantom 모델에 대한 결과 (Fig. 7)를 살펴보면, 약간의 미세한 잡음들을 제외하곤 16-bit 결과 (Fig. 7(a))와 8-bit 결과 (Fig. 7(b))는 거의 차이가 없는 좋은 추정치를 얻은 것을 알 수 있다. 이 경우는 외피속의 타원 이상체의 흡수계수의 차이가 매우 큰 관계로 낮은 정밀도의 측정만으로도 각 타원 이상체를 충분히 복원할 수 있음을 지시한다. 이는 Fig. 4의 투사영상 판독에서도 이미 예상할 수 있었으며, 수정된 모델의 경우는 투과빔 자료

만으로도 이상체의 추정이 가능하였다.

2. 입사빔 값 획득방식에 의한 효과

전자 토모그래피에서 비어의 법칙이 성립하기 때문에 투과빔 값은 입사빔 값으로 나누고 자연 로그를 취하여 얻을 수 있다(식(1)). 그러나 일반적으로 연구자들은 비어의 법칙을 고려하지 않고 투과빔 값을 직접 사용하여 토모그래피를 수행하고 있다. Fig. 8은 비어의 법칙을 고려하지 않은 토모그램 결과를 보여주고 있다. 입사빔을 전혀 고려하지 않고 투과빔 값을 그대로 사용한 경우 영상의 명암대비가 적은 경우 (Fig. 8(a)), 타원체가 희미하게 구분되기는 하나 외피와 내부의 구분이 모호하고 심하게 왜곡되어 타원체의 경계부분을 명확히 구분할 수 없으며, 가장 작은 타원 이상

체를 전혀 확인할 수 없는 토모그램을 얻게 되었다. 틀린 식에 의해 잘못된 해가 구해진 경우라도 영상의 명암대비가 큰 경우(Fig. 8(b))에는 본래의 구조에 가까운 토모그램을 얻는 것처럼 보인다. 그러나 x-z 단면의 경우 바깥쪽에 심한 잡음이 보이고 있고, 또한 Fig. 5(b) 토모그램에 나타난 각 타원체들의 명암대비와는 다른 값-예를 들어 Fig. 8(b)의 외피는 Fig. 5(b)의 외피보다 훨씬 밝게 보임-들이 구해졌다. 이는 모델링과는 다른 식을 이용하여 토모그래피를 수행한 결과이다. x-z 단면에서 모델의 중심부에서 위쪽과 아래쪽으로 멀어질수록 잡음이 매우 심하게 발생하는 것은 근본적으로 제한된 기울임 때문에 일어나는 미싱 웨지의 영향으로 생각되며, 입사빔의 값을 제대로 고려하지 않았을 경우 그 영향이 매우 심하게 일어나는 것이 확인되었다. 이러한 잡음은, 3차원 토모그램에서 잡음처럼 희미하게 나타나는 구조들이 신뢰할 수 없는 결과임을 의미하는 것이다.

한편 Fig. 8(a)의 결과는, 토모그래피 본래의 목적과 연관지어 영상 획득 시의 잡음을 정밀하게 제거해야 함을 보여준다고 할 수 있다. 즉, 2차원 투사영상이 시편이 어떤 3차원적 구조를 갖고 있는지 충분히 예상할 수 있을 만큼 뚜렷하다면, 실제로 토모그램은 별로 새로운 정보를 주지 않는다. 토모그래피의 목적은, 인체 내부나 지구 내부 구조와 같이 2차원 투사영상에서 잘 구분되지 않는 구조를, 3차원으로 재구성하여 보여주는 데에 있다. 따라서 Fig. 8(a)에서와 같이 영상의 명암대비가 적은 2차 투사영상으로 토모그램을 만들었을 때 3차원적으로 구조가 완벽하게 복원하는 것이 토모그래피라 할 수 있는 것이다. 이런 점에서 Fig. 8(b)의 토모그램은 큰 의미가 없으며, Fig. 8(a)로부터 입사빔 값을 어떻게 취하느냐가 토모그램에서 얼마나 중요한 의미를 가지는지 알 수 있다고 하겠다.

3. 입사빔 값의 정확도에 의한 효과

전자빔이 시편을 통과하는 투과전자현미경에서는 입사빔(I_0)이 회절, 흡수되거나 2차전자, 특성 X-선 등으로 손실된 나머지 투과빔 또는 회절빔(I_n) 강도가 기록되게 된다. 전자 토모그래피에서 입사빔의 강도를 정확하고 엄밀하게 정의하기는 쉽지 않다. 전자빔의 빔 전류 값으로부터 전자의 수를 계산할 수 있는데, 기기에서 읽어지는 방출전류(emission current) 값은 빔 전류 값이 아닌 전자총 크로스오버에서의 전류 값이기 때문이다. 전자총에서 방출되는 전자빔의 공간 간섭성(spatial coherency)이 완벽하지 않거나, 전자빔이 완벽하게 평행하지 않은 것, 초점 값의 변화 등도 정확한 입사빔 값을 알 수 없게 하는 요인들이다. 입사빔 값을 비어의 법칙에 맞도록 취하더라도, 잘못된 입사빔 값을 사용하게 되면 토모그램에 어떤 영향을 주는지 Fig. 9에 나타내었다. 입사빔의 값을 20,000이 아닌, 50,000으로 하여 자

연 로그를 취했을 때 계산한 결과, Kak & Slaney 모델의 결과(Fig. 9(a))는 정확한 값을 사용했을 때(Fig. 5(a))에 비해 다소 잡음이 존재하고 Fig. 5(a)에 비해 명암대비가 달라졌지만, 양쪽 모델 모두 대부분의 타원체를 확인할 수 있었으며, 앞에서 x-z 단면에서 확인된 심한 잡음은 여전히 관찰되었다. z방향 중심부에서 멀어질수록 심해지는 이러한 잡음은 근본적으로 제한된 기울임 때문에 일어나는 미싱 웨지의 영향으로 생각되며, 입사빔의 값을 제대로 고려하지 않았을 경우 그 영향이 매우 심하게 일어나는 것이 확인되었다. 대표적인 상용 전자 토모그래피 S/W인 IMOD의 경우 입사빔 값을 최적의 토모그램 결과를 도출하도록 선택하게 되어있다. 본 연구에서 보였듯이, 흡수계수의 차가 커서 영상의 명암대비가 큰 경우에는 잘못된 입사빔 값을 사용하더라도 토모그램이 참값에 근사한 것처럼 보인다. 그러나 흡수계수의 차이가 매우 적어 영상의 명암대비가 적은 경우의 결과(Fig. 8(a))에서 보듯이, 잘못된 입사빔 값은 실제와는 다른 명암대비를 주어 미세한 구조는 구분되지 않을 수도 있다.

사 사

이 연구는 기초기술연구회 협동연구과제 “나노·바이오 융합소재의 EM분석법 개발”, 한국해양연구원 기본연구사업 “해양영토내 해저기인 자연재해 및 환경자료 구축” 및 한국지질자원연구원 기본연구사업 “천연 나노광물 활용기술 개발: 스마트 나노컨테이너 제조” “광물자원으로부터 나노소재의 원료물질 제조기술 개발” 등의 지원을 받았습니다.

참 고 문 헌

- De Rosier DJ, Klug A: Reconstruction of three dimensional structures from electron micrographs. Nature 217: 130-134, 1968.
- Kak AC, Roberts B: Image reconstruction from projections. In: Young TY, Fu KS, ed, handbook of pattern recognition and image processing, Academic Press, New York, 1986.
- Kak AC, Slaney M: Principles of computerized tomographic imaging. IEEE Press, New York, 1988.
- Koay CG, Sarlls JE, Özarlan E: Three-dimensional analytical magnetic resonance imaging phantom in the fourier domain. Magn Reson Med 58 : 430-436, 2007.
- Menke W: Geophysical data analysis: discrete inverse theory. Academic Press, p. 289, 1989.
- Nolet G: Seismic tomography, with applications in global seismology and exploration geophysics. D. Reidel Publishing Company, p. 386, 1987.

- Pozsgai I: Thickness determination by measuring in the TEM at 200 kV. *Ultramicroscopy* 68 : 69-75, 1997.
- Reynolds JM: An introduction to applied and environmental geophysics. John Wiley & Sons, p. 796, 1997.
- Shepp LA: Computerized tomography and nuclear magnetic resonance. *J Comput Assist Tomogr* 4 : 94-107, 1980.
- Shepp LA, Logan BF: The Fourier reconstruction of a head section. *IEEE Trans Nucl Sci NS-21* : 21-43, 1974.
- Steppe K, Cnudde V, Girard C, Lemeur R, Cnudde J-P, Jacobs P: Use of X-ray computed microtomography for non-invasive determination of wood anatomical characteristics. *J Struct Biol* 148 : 11-21, 2004.

< 국문초록 >

전자 토모그래피의 첫 단계인 2차원 투시영상의 획득 과정에서 발생하는 잡음 중 영상형식과 입사빔 값의 영향이 토모그램에 미치는 영향을 모델링 시뮬레이션을 통해 평가하였다. 사용

된 두 가지의 모델은 타원체의 흡수계수 차이가 매우 적은 원래의 3D head phantom 모델과, 흡수계수의 차이가 40% 이상인 수정된 3D head phantom 모델이다. 흡수계수의 차이가 매우 적은 모델에서 8-bit 영상형식을 사용한 토모그램 결과가 매우 큰 잡음들로 인해 심하게 왜곡되어 나타났으며, 흡수계수의 차이가 큰 모델에서는 영상 형식의 차이가 큰 영향을 주지 않았다. 비어의 법칙을 무시하고 투과빔 값을 그대로 사용한 경우는 흡수계수의 차이가 매우 적은 경우 토모그램은 심각하게 왜곡되었다. 흡수계수가 큰 경우에도 z축 방향을 따라 바깥쪽에 잡음이 심하게 나타났다. 비어의 법칙에 따라 입사빔 값을 취하더라도 잘못된 값을 넣게 되면 흡수계수의 차이가 매우 적을 경우 다소 왜곡된 토모그램을 얻었으며, 흡수계수의 차이가 큰 경우에도 심한 잡음을 유발하는 것으로 확인되었다. 따라서 구별이 힘든 내부 구조를 3차원적으로 재구성하는 토모그래피 본래의 특성을 최대한 살리기 위해서는 정확한 입사빔 값을 비어의 법칙에 따라 취하되, 가능한 한 16-bit 영상 형식으로 처리하여야 영상의 왜곡이나 작위적인 결과를 만들지 않고 토모그램의 분해능을 저하시키는 잡음도 감소시킬 수 있다.