

모형물을 이용한 전산화 단층 촬영에서 3차원적 부피측정의 정확성 평가

김현수 · 왕지환 · 임일혁 · 박기태 · 연성찬 · 이희천¹

경상대학교 생명과학연구원

(게재승인: 2013년 4월 4일)

Three-Dimensional Volume Assessment Accuracy in Computed Tomography Using a Phantom

Hyun-su Kim, Ji-hwan Wang, Il-hyuk Lim, Ki-tae Park, Seong-chan Yeon and Hee-chun Lee¹

Research Institute of Life Sciences, Gyeongsang National University, Jinju, Korea

Abstract : The purpose of this study was to assess the effects of reconstruction kernel, and slice thickness on the accuracy of spiral CT-based volume assessment over a range of object sizes typical of synthetic simulated tumor. Spiral CT scanning was performed at various reconstruction kernels (soft tissue, standard, bone), and slice thickness (1, 2, 3 mm) using a phantom made of gelatin and 10 synthetic simulated tumors of different sizes (diameter 3.0-12.0 mm). Three-dimensional volume assessments were obtained using an automated software tool. Results were compared with the reference volume by calculating the percentage error. Statistical analysis was performed using ANOVA and setting statistical significance at $P < 0.05$. In general, smaller slice thickness and larger sphere diameters produced more accurate volume assessment than larger slice thickness and smaller sphere diameter. The measured volumes were larger than the actual volumes by a common factor depending on slice thickness; in 100HU simulated tumors that had statistically significant, 1 mm slice thickness produced on average 27.41%, 2 mm slice thickness produced 45.61%, 3 mm slice thickness produced 93.36% overestimates of volume. However, there was no statistically significant difference in volume error for spiral CT scans taken with techniques where only reconstruction kernel was changed. These results supported that synthetic simulated tumor size, slice thickness were significant parameters in determining volume measurement errors. For an accurate volumetric measurement of an object, it is critical to select an appropriate slice thickness and to consider the size of an object.

Key words : slice thickness, three dimensional volume, CT, synthetic simulated tumor.

서 론

장기 혹은 병변의 부피 측정은 임상적으로 여러 분야에 적용될 수 있다. 예를 들어 비장의 부피의 측정은 문맥압항진증(portal hypertension), 글리코겐 축적 질환(glycogen storage disease), 백혈병, 임파종, 흑색종, 만성 소화장애증(celiac disease) 그리고 다른 혈액학적 질환의 진단에 도움을 주며(6,16), 정형외과에서 나선형 CT 자료를 이용한 입체영상 및 이와 함께 얻을 수 있는 부피의 측정이 외과적인 치료 계획을 세우는 데에 많은 도움을 주고 있다(1,17). 그 외에도 종양학 분야에서 종양의 진단, 치료, 예후를 판단하는데 있어 나선형 CT를 이용한 부피 측정의 유용성이 여러 문헌에서 보고되고 있다. 예를 들어, 다채널전산화단층촬영(multi-slice

computed tomography)과 저선량전산화단층촬영(low-dose computed tomography)을 이용한 폐암 검진이 증가함에 따라 폐결절의 발견이 증가하고 있으며 특히 직경 1 cm 미만의 소결절에서 양성과 악성 결절을 감별 진단하는 것이 중요하지만, 불규칙하거나 침상의 모양을 보이지 않는 경우가 많아 모양만으로 진단이 어려우므로 주기적인 추적 검사를 하여 폐결절의 성장 속도, 즉 부피가 두 배로 되는 기간을 아는 것이 가장 믿을 만한 소견이다(7). 또한 방사선 치료를 실시할 때 치료 계획과 정확한 용량을 정하기 위해 종양의 정확한 부피가 절대적으로 필요하며 항암제 혹은 방사선 치료 후 종양의 예후를 판단할 때 종양의 부피 측정이 도움이 된다(12,14).

나선형 CT는 1989년 임상적으로 이용을 시작하였으며(11), 이는 scan 시 X선관과 detector가 연속적인 회전을 하는 동안 환자 테이블도 연속적으로 z-축으로 움직이면서 영상을 얻는다(5). 나선형 CT는 짧은 시간 내 장기의 체적(volume) 영상을 얻을 수 있어 환자의 1회 호흡간에도 쉽게 동적영상

¹Corresponding author.
E-mail : lhc@gnu.ac.kr

단면의 기록이 가능해졌으며, 부분체적효과(partial volume effect)도 감쇄시킬 수 있다(11). 또 체적 데이터를 이용하여 환자에 대한 추가적 X선 조사가 없이도 절편 간의 간격을 중복시킨 영상으로 재구성이 가능하고(11), 이것은 3차원 영상으로의 재구성 영상의 질을 향상시킬 수 있다.

나선형 CT를 이용한 3차원 입체영상을 만드는 데에는 자료의 획득, 재구성(reconstruction)을 포함하는 단면 영상의 형성, 그리고 이러한 단면 영상을 이용한 3차원 입체 영상의 구성 등의 여러 과정이 있고 이러한 여러 과정 중에서 데이터를 얻는 과정이 마지막의 영상 질이나 입체 영상 및 부피 측정값의 정확도에 가장 큰 영향을 미칠 수 있다. 데이터를 얻는 스캔 과정에 있어서 영향을 미칠 수 있는 인자로 절편 두께(slice thickness), 테이블 속도, 재구성 간격(reconstruction interval), 에너지(kVp, mAs) 등이 보고 되고 있다(9). 이러한 인자들에 의하여 영상들이 영향을 받지만, 과연 이러한 인자들이 부피의 측정에 어느 정도의 영향을 미치는지, 어떤 인자가 가장 많은 영향을 미치는지에 대하여는 별로 연구된 적이 없다.

본 연구는 다양한 크기의 인공 종양을 사용하여 여러 인자들 중 절편 두께, 재구성 kernel이 3차원 부피 측정의 정확도에 대하여 미치는 영향을 알아보고자 실시하였다.

재료 및 방법

모형물의 제작

12 cm × 12 cm × 8.7 cm 크기의 플라스틱 용기(Lock&Lock Co., Ltd., Seoul, Korea)와 젤라틴(Daejung chemicals&metals Co., Ltd., gyeonggi-do, Korea), 그리고 직경과 부피를 아는 10개의 인공 결절(synthetic simulated tumor. Kyoto Kagaku, Japan)을 사용하여 모형물을 제작하였다. 5개의 인공 결절은 100 HU 값을 가지며 나머지 5개는 -800 HU 값을 가진다. 100 HU 값과 -800 HU 값의 인공 결절의 직경과 부피는 같으며, 각 결절의 직경은 3 mm, 5 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm 였으며 부피는 각각 14.13 mm³, 65.42 mm³, 267.95 mm³, 267.95 mm³, 523.33 mm³, 904.32 mm³ 이었다. 인공 결절은 모두 평활하고 경계가 잘 그려지는 구의 형태를 지

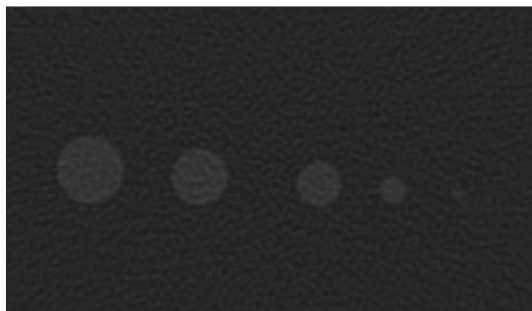


Fig 1. CT scan of phantom. Two-dimensional (2D) axial slice through phantom demonstrating synthetic simulated tumors embedded in gelatin. Image was taken from 100 HU synthetic simulated tumors at 1 mm slice thickness.

났다.

젤라틴과 이차 증류수를 147.9 g/L의 농도로 혼합하여 젤라틴이 충분히 녹을 때까지 가열했으며, 액체화 된 젤라틴을 플라스틱 용기에 3 cm 높이까지 붓고, 젤라틴이 완전히 굳을 때까지 냉장 보관하였다. 이후 인공 결절을 고체화 된 젤라틴 위에 고정시킨 후 다시 액체화 된 젤라틴을 플라스틱 용기 내에 부었으며 모형물이 완전히 굳을 때까지 냉장 보관하였다. 모형물의 단면 영상의 예는 Fig 1과 같다.

나선형 CT 촬영

영상획득을 위하여 Somatom Emotion (Siemens Medical system, Erlangen, Germany) 나선형 CT를 이용하여 CT 촬영을 시행하였다. CT 촬영 조건은 1 mm beam collimation, 1:1 pitch, 110 kVp, 100 mA, FOV 100 mm 이었으며, 각 촬영 시 절편 두께와 재구성 kernel을 제외한 모든 조건은 같도록 하였다. 100 HU 모형물과 -800 HU 모형물의 절편 두께를 1 mm, 2 mm, 3 mm로 하고, 각 절편 두께 당 3가지 재구성 kernel (soft tissue, standard, bone)을 적용하여 한 모형 당 각각 9회의 촬영을 시행하였다. 촬영한 영상은 DICOM 형식의 디지털 데이터로 저장하였다.

부피의 측정

임상적으로 사용되고 있는 PC-based 3D software인 Lucion[®](Infinit Technology, Seoul, Korea)의 3차원 재구성 기법을 이용하여 인공 결절의 3차원 영상을 얻었다.

소프트웨어에서는 'GROW'을 이용하여 인공 결절을 선택한 함으로써 부피가 자동적으로 계산되게 하였다.

통계 분석

측정값과 실제값 간의 오차를 측정하고자 Percent error를 다음 식으로 계산하였다. Percent error는 측정값에서 실제값을 뺀 값을 실제값으로 나누고 이 값에 100을 곱한 값으로 하였다.

본 연구에서 얻어진 자료에 대한 통계학적 처리는 SPSS version 14.0을 이용하여 one-way ANOVA를 적용하였으며 통계학적으로 유의한 범위를 P value 0.05 이하로 하였다.

결 과

100 HU 값과 -800 HU 값의 인공 결절 직경이 감소할수록 Percent error는 증가하는 경향이 나타났다. 특히 3 mm 직경과 5, 8, 10, 12 mm 직경 사이에서 통계학적으로 유의적인 상관 관계를 확인할 수 있었다($P < 0.05$) (Table 1).

절편 두께를 변화시켰을 시, 100 HU 값의 인공 결절에서 절편 두께가 감소할수록 Percent error가 감소하였다. 특히 1 mm 절편두께와 3 mm 절편 두께 사이에서 통계학적으로 유의적인 상관 관계를 확인할 수 있었다($P < 0.05$) (Table 2).

재구성 kernel의 변화에 따른 부피 측정의 정확도는 통계학적으로 유의적인 상관관계가 나타나지는 않았다(Table 3).

Table 1. A comparison of percent error according to different diameters of simulated tumors (n = 9)

	3 mm	5 mm	8 mm	10 mm	12 mm
HU 100	136.38 ± 30.59 ^A	50.03 ± 8.73 ^a	32.90 ± 6.20 ^a	31.77 ± 5.22 ^a	26.20 ± 4.77 ^a
HU -800	490.99 ± 97.56 ^A	219.60 ± 30.45 ^a	112.83 ± 13.25 ^a	88.11 ± 11.22 ^a	79.12 ± 22.86 ^a

^{A,a}There is statistical significance between A and a within rows (*p* < 0.05). All data represent mean ± SE

Table 2. A comparison of percent error according to different kernels (n = 15)

	Soft tissue kernel	Standard kernel	Bone kernel
HU 100	69.56 ± 14.64	46.62 ± 17.55	50.19 ± 14.05
HU -800	177.35 ± 33.55	211.59 ± 56.02	205.45 ± 68.45

All data represent mean ± SE.

Table 3. A comparison of percent error according to different slice thickness (n = 15)

	1 mm slice thickness	2 mm slice thickness	3 mm slice thickness
HU 100	27.41 ± 6.88 ^A	45.61 ± 8.96	93.36 ± 21.17 ^a
HU -800	106.52 ± 21.90	224.10 ± 53.92	263.76 ± 68.22

^{A,a}There is statistical significance between A and a within rows (*p* < 0.05). All data represent mean ± SE

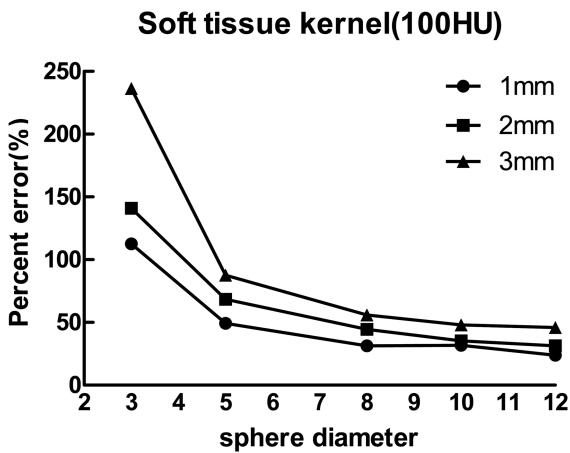


Fig 2. The effect of slice thickness on percent error at soft tissue kernel. At each slice thickness, percent error increased consistently with a decrease in nodule size.

3 가지의 다른 절편 두께와 3가지의 다른 재구성 kernel에서 100 HU 값의 인공 결절의 직경과 Percent error의 상관 관계를 나타내는 도표는 Figs 2, 3, 4와 같다.

고찰

자동 부피 계산은 2차원 부피 측정법과 3차원 부피 측정법이 존재한다. 2차원 부피 측정법은 단면 영상에서 결절이 구(sphere)라는 가정하에 최장경을 측정하거나 타원형이라는

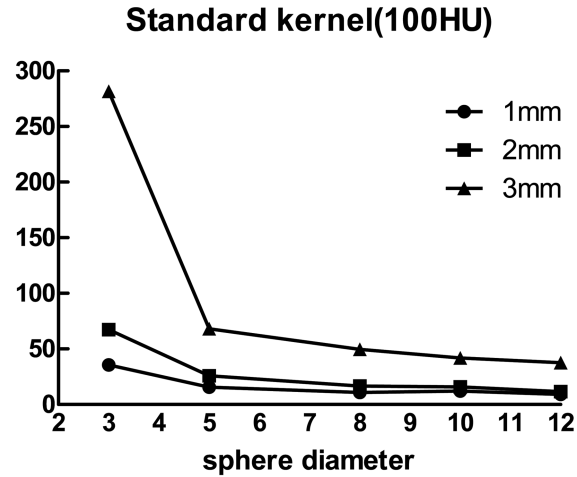


Fig 3. The effect of slice thickness on percent error at standard kernel. At each slice thickness, percent error increased consistently with a decrease in nodule size.

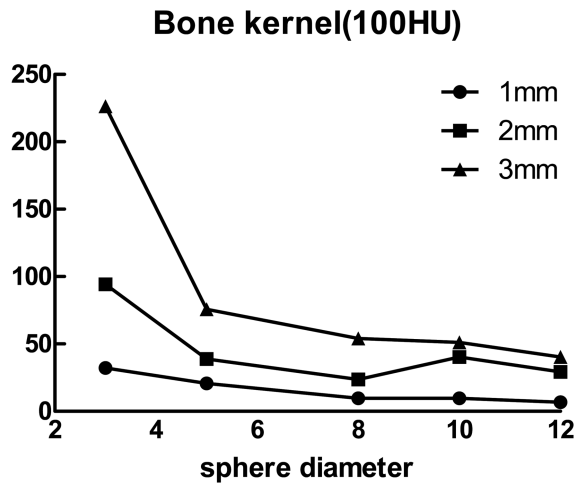


Fig 4. The effect of slice thickness on percent error at bone kernel. At each slice thickness, except for 10 mm nodule at slice thickness of 2 mm, percent error increased consistently with a decrease in nodule size.

가정하에 두 방향의 직경을 측정하여 단면적을 알아낸 후 외삽법(extrapolation)으로 부피를 계산할 수 있다. 3차원 부피 측정법은 화소의 감쇄(pixel attenuation)을 기준으로 하는 방법으로 불규칙한 모양의 물체의 경우에 Z-axis의 폐결절 데이터를 포함하므로 2차원 부피 측정법에 비해 부피를 더 정확하게 측정할 수 있다. Yankelevitz 등(20)은 모형물 실험으로, 3차원 영상 추출(3D image extraction)을 이용하여 ±3%

의 오차를 보일 정도로 매우 높은 정확도를 보여 주었으며 3차원 부피 측정법이 2차원 부피 측정법보다 더 정확하다고 보고 하였다. 본 연구에서는 3차원 부피 측정법에서의 결과와 2차원 부피 측정법에서의 결과를 직접적으로 비교하지는 않았지만, 3차원 부피 측정법이 2차원 부피 측정법보다 더 정확하다는 가정 하에 3차원 부피 측정법을 선택하여 실험 하였다.

일반적으로 CT 검사 시 임상적인 유의성을 지니는 폐결절의 크기는 직경 3-30 mm이며, 직경 10 mm 이하의 결절은 주기적인 CT 추적 검사가 추천된다(4,10,19). 이러한 이유로 본 연구에서는 직경 3-12 mm 크기의 인공 결절을 선택하였다.

본 연구에서 100 HU 값과 -800 HU 값의 인공 결절 직경이 감소할수록 부피 측정의 정확도는 감소하는 경향을 나타냈으며 이러한 결과는 다른 연구와 비교하여 유사한 결과를 보였다(3,13,19). 직경이 감소할수록 정확도가 감소하는 이유는 부분 체적 효과와 blurry 혹은 irregular edge와 같은 재구성 인공물(artifact)로 인하여 발생하는 경계면의 불확실성이 인공 결절의 직경이 감소할수록 증가하기 때문이다(19). 이러한 부피의 실제값과 측정값의 미묘한 차이는 인공 결절의 직경이 작아질수록 상당한 Percent error를 야기한다(19).

나선형 CT를 이용한 부피 측정에서 창폭 및 창높이, 절편 두께, CT 음영의 역치값, FOV, 촬영성량과 같은 다양한 CT 촬영 및 재구성 인자들이 부피 측정 정확도에 영향을 준다고 보고된 바 있다(8,15,18,19). 이러한 인자들 중 절편 두께와 같이 공간 해상도에 영향을 미치는 인자는 정확한 부피를 측정하기 위한 중요한 인자라고 보고하였다(3). 본 연구에서도 절편 두께 1 mm, 100 HU 값의 인공 결절의 경우 Percent error가 27.41%, 절편 두께 2mm, 100 HU 값의 인공 결절에서는 45.61%, 절편 두께 3 mm, 100 HU 값의 인공 결절은 93.36%의 결과를 보여 이전 연구와 유사한 결과를 보였다(3,13,19). 이러한 결과는 부분용적평균화(partial volume averaging)에 의한 흐릿한 경계면 때문에 발생한다(19).

본 연구에서, 절편 두께를 고정시킨 상태에서 재구성 kernel만을 변화 시켰을 때, 100 HU 값과 -800 HU 값의 인공 결절에서 부피 측정의 정확도는 통계학적으로 유의성을 확인할 수 없었다. 본 연구에서는 soft tissue, standard, bone의 3가지 재구성 kernel만을 변화 시킨 후 결과를 분석 하였지만 추후 더 다양한 kernel을 이용하여 실시한 추가 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서 -800 HU 값의 인공 결절의 부피가 100 HU 값의 인공 결절의 부피에 비해 월등히 크게 측정 된 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과가 발생한 원인은 명확하게 규명할 수는 없으나, -800 HU 인공 결절 주위에 존재하는 미세 공기 음영까지도 계산되었기 때문이라 판단된다. 여러 연구에서 자동 부피 계산에 있어 폐결절의 분리가 영향을 미치며 특히 혈관과 붙어 있는 결절의 경우 혈관과 분리가 안되거나 혈관을 포함하여 부피를 계산하게 된다고 보고하였다(2,7). 본 연구에서 사용된 부피 계산 프로그램도 -800 HU 값의 인공 결절과 그 주위에 존재하는 미세 공기를 분리

(segmentation)하는데 실패하였으며 향후 이에 대한 알고리즘의 수정 보완이 필요하다고 사료된다.

본 연구의 목적은 3차원 부피를 자동으로 계산할 수 있는 프로그램을 이용하여 인공 결절 부피의 정확도를 평가하는데 있어 절편 두께와 재구성 kernel이 미치는 영향에 대하여 알아보고자 하였다. 비록 환자의 실제 결절에서 측정된 부피와 실험에 사용된 인공 결절에서 측정된 부피의 절대적인 수치는 다르지만, 다양한 CT 촬영 조건에 따른 다양한 부피 측정 결과와 부피 측정 정확성의 경향을 본 실험에서 확인할 수 있었다. 본 연구의 결과는 정기적인 CT 검사로 결절의 부피 변화를 평가하는데 있어 중요한 지침을 제공할 수 있을 것이다.

결 론

다양한 크기의 인공 종양을 사용하여 여러 인자들 중 절편 두께, 재구성 kernel이 3차원 부피 측정의 정확도에 대하여 미치는 영향을 알아보고자 본 연구를 실시하였다.

인공 결절이 포함된 모형물을 사용하여 standard, soft tissue, bone의 재구성 kernel과 1 mm, 2 mm, 3 mm의 절편 두께를 변화시켜 나선형 CT를 촬영하였다. 촬영 후 획득한 data를 소프트웨어를 이용하여 3차원 영상으로 만들었고 인공 결절의 부피를 측정하였다.

그 결과 인공종양의 크기와 절편 두께가 부피측정의 정확도를 결정하는데 있어 통계학적으로 유의성을 가지는 요인이라는 것을 확인할 수 있었으며 특히 본 연구에서는 1 mm 절편 두께, 인공 결절 5 mm 직경 이상에서의 부피측정이 가장 정확하였다. 따라서 CT를 사용하여 어떤 물체의 정확한 부피를 측정하기 위해서는 물체의 크기를 고려해야 하며 적절한 절편두께를 선택하는 것이 필요하리라 생각된다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0007394).

참 고 문 헌

1. Fishman EK, Derbin B, Magid D, Scott WW Jr, Ney DR, Brooker AF Jr, Riley LH Jr, St Ville JA, Zerhouni EA, Siegelman SS. Volumetric rendering techniques: applications for three-dimensional imaging of the hip. *Radiology* 1987; 163: 737-738.
2. Gietema HA, Schaefer-Prokop CM, Mali WP, Groenewegen G, Prokop M. Pulmonary nodules: interscan variability of semiautomated volume measurements with multisection CT-influence of inspiration level, nodule size, and segmentation performance. *Radiology* 2007; 245: 888-894.
3. Goo JM, Tongdee T, Tongdee R, Yeo K, Hildebolt CF, Bae KT. Volumetric measurement of synthetic lung nodules with

- multi-detector row CT: effect of various image reconstruction parameters and segmentation thresholds on measurement accuracy. *Radiology* 2005; 235: 850-856.
4. Henschke CI, McCauley DI, Yankelevitz DF, Naidich DP, McGuinness G, Miettinen OS, Libby DM, Pasmantier MW, Koizumi J, Altorki NK, Smith JP. Early lung cancer action project: overall design and findings from baseline screening. *The Lancet* 1999; 354: 99-105.
 5. Kalender WA, Seissler W, Klotz E, Vock P. Spiral volumetric CT with single-breath-hold technique, continuous transport, and continuous scanner rotation. *Radiology* 1990; 176: 181-183.
 6. Koga T, Morikawa Y. Ultrasonographic determination of the splenic size and its clinical usefulness in various liver diseases. *Radiology* 1975; 115: 157-161.
 7. Ko JP, Marcus R, Bomsztyk E, Babb JS, Stefanescu C, Kaur M, Naidich DP, Rusinek H. Effect of blood vessels on measurement of nodule volume in a chest phantom. *Radiology* 2006; 239: 79-85.
 8. Larici AR, Storto ML, Torge M, Mereu M, Molinari F, Maggi F, Bonomo L. Automated volumetry of pulmonary nodules on multidetector CT: influence of slice thickness, reconstruction algorithm and tube current. Preliminary results. *Radiol Med* 2008; 113: 29-42.
 9. Ney DR, Fishman EK, Magid D, Robertson DD, Kawashima A. Three-dimensional volumetric display of CT data: Effect of scan parameters upon image quality. *J Comput Assist Tomogr* 1991; 15: 875-885.
 10. Ost D, Fein AM, Feinsilver SH. Clinical practice. The solitary pulmonary nodule. *N Engl J Med* 2003; 348: 2535-2542.
 11. Polacin A, Kalender WA, Marchal G. Evaluation of section sensitivity profiles and image noise in spiral CT. *Radiology* 1992; 185: 29-35.
 12. Prabhakar R, Ganesh T, Rath GK, Julka PK, Sridhar PS, Joshi RC, Thulker S. Impact of different CT slice thickness on clinical target volume for 3D conformal radiation therapy. *Med Dosim* 2009; 34: 36-41.
 13. Prionas ND, Ray S, Boone JM. Volume assessment accuracy in computed tomography: a phantom study. *J Appl Clin Med Phys* 2010; 11: 3037-3051.
 14. Poesken M, Buerke B, Fortkamp R, Koch R, Seifarth H, Heindel W, Wessling J. Liver lesion segmentation in MSCT: effect of slice thickness on segmentation quality, measurement precision and interobserver variability. *Rofo* 2011; 183: 372-380.
 15. Ravenel JG, Leue WM, Nietert PJ, Miller JV, Taylor KK, Silvestri GA. Pulmonary nodule volume: effects of reconstruction parameters on automated measurements - a phantom study. *Radiology* 2008; 247: 400-408.
 16. Robinson DR, Bullen AW, Hall R, Brown RC, Baxter P, Losowsky MS. Splenic size and function in adult coeliac disease. *Br J Radiol* 1980; 53: 532-537.
 17. Vannier MW, Marsh JL, Warren JO. Three dimensional CT reconstruction images for craniofacial surgical planning and evaluation. *Radiology* 1984; 150: 179-184.
 18. Van Hoe L, Haven F, Bellon E, Baert AL, Bosmans H, Feron M, Suetens P, Marchal G. Factors influencing the accuracy of volume measurements in spiral CT: a phantom study. *J Comput Assist Tomogr* 1997; 21: 332-338.
 19. Way TW, Chan HP, Goodsitt MM, Sahiner B, Hadjiiski LM, Zhou C, Chughtai A. Effect of CT scanning parameters on volumetric measurements of pulmonary nodules by 3D active contour segmentation: a phantom study. *Phys Med Biol* 2008; 53: 1295-1312.
 20. Yankelevitz DF, Reeves AP, Kostis WJ, Zhao B, Henschke CI. Small pulmonary nodules: volumetrically determined growth rates based on CT evaluation. *Radiology* 2000; 217: 251-256.