

Determination of Effective Energy of CT X-ray beams

Jong Eon Kim

Department of Radiological Science, Kaya University

Received: August 05, 2019. Revised: August 28, 2019. Accepted: August 31, 2019

ABSTRACT

The purpose of this study is to determine the effective energy of CT X-ray beams by using the CT slice images of a CT number calibration insert part in the AAPM CT performance phantom. The CT number calibration insert part in the AAPM CT performance phantom was scanned five times by using a CT scanner for 80, 100 and 120 kVp X-ray beams. The average value of CT numbers of each pin were measured for each CT slice image. The correlation coefficients were obtained by linear fit between the average value of CT numbers measured and linear attenuation coefficient under different energy at each pin calculated from data of NIST. A photon energy corresponding to the maximum value of the obtained correlation coefficient was determined as an effective energy. As a result, the effective energy was 56, 62 and 66~67 keV, respectively, for 80, 100 and 120 kVp X-ray beams.

Keywords: Tube voltage, CT number, Linear attenuation coefficient, Correlation coefficient, Effective energy.

I. INTRODUCTION

컴퓨터단층촬영 스캐너(computed tomography scanner(CT scanner))에서 생성된 X-선 빔은 다중에너지 X-선 빔(polyenergetic X-ray beam)이다. 다중에너지 X-선 빔의 유효에너지(effective energy)는 물질 투과의 관점에서 반가층(또는 선감약계수, 질량감약계수)이 같은 단일에너지 X-선 빔의 에너지를 의미한다.^[1-3] 사용자가 이용하는 다중에너지 X-선 빔의 유효에너지를 알고 있을 경우, 어떤 물질의 질량감약계수 자료는 미국표준기술연구소(NIST, National Institute of Standards and Technology)의 웹사이트 검색으로 사용할 수 있다.^[4]

CT 스캐너에서 생성된 다중에너지 X-선 빔의 유효에너지는 반가층 측정으로부터 유도될 수 있다. 그러나 CT 스캐너에서 반가층 측정은 기하학적 실험적 배치와 정확한 측정이 매우 어려울 뿐만 아니라 시간이 많이 소비된다. 이러한 문제를 해결하기 위한 유효에너지의 측정 방법이 필요성이 제기된

다. 따라서 이 연구는 CT 스캔으로 얻어진 AAPM CT 성능 팬텀(AAPM CT Performance Phantom) 안에 있는 CT 수 교정 삽입부(CT number calibration insert part)^[5]의 CT 슬라이스 영상(CT slice image)에서 측정된 각 핀(pin)의 CT 수와 각각의 광자에너지에 대응하는 각 핀의 선감약계수를 선형정합(linear fit)하여 얻은 상관계수로부터 유효에너지를 쉽게 결정^[6-9]하는 데 목적이 있다.

본 연구는 AAPM CT 성능 팬텀 안에 있는 CT수 교정 삽입부를 CT 스캔한 후, 얻어진 CT 슬라이스 영상으로부터 각 핀의 CT 수의 평균값을 측정하고, 각 핀의 CT 수의 평균값과 NIST로부터 얻어진 각각의 광자에너지에서 각 핀의 선감약계수를 선형정합한 후 상관계수를 구한다. 구하여진 상관계수들 중 최대값에 대응하는 광자에너지를 유효에너지로 결정하고자 한다.

II. MATERIAL AND METHODS

실험에는 AAPM CT 성능 팬텀(AAPM CT Perfor

mance Phantom, Nuclear Associates 76-410, Fluke co., USA)에서 CT 수 교정 삽입부(CT number calibration insert part)의 CT 슬라이스 영상을 얻기 위해서 CT 스캐너(Somatom sensation 16, Siemens co., Germany)를 사용하였다. 얻어진 CT 슬라이스 영상에서 각각의 핀에 대한 CT 수를 측정하기 위해 의료영상저장전송시스템(INFINITT STARPACS, PiviewSTATTM, Infinity co., Korea)을 사용하였다.

1. CT수 교정 삽입부의 CT 스캔

AAPM CT 성능 팬텀의 CT 수 교정 삽입부의 CT 슬라이스 영상을 얻기 위하여, CT 스캐너의 내부 레이저는 테이블 위에 놓여진 AAPM CT 성능 팬텀의 CT 수 교정 삽입부 중심과 일치하도록 Fig. 1과 같이 배치하였다. 이 위치는 스캔 영상의 원점으로 사용된다.



Fig. 1. Experimental setup of the AAPM CT performance phantom.

CT 스캔 데이터는 CT 스캐너에 관전류량 250 mAs, 10 mm 빔 콜리메이션과 50 cm의 스캔 시야(FOV, field of view)를 공통으로 설정한 후 관전압 80, 100 그리고 120 kVp 각각에 대하여 5번의 single slice conventional scan을 실시하여 얻었다. 얻어진 CT 스캔 데이터에 표준 재구성 연산식(standard reconstruction algorithm)을 적용하여 CT 슬라이스 영상들을 얻었다.

2. CT 슬라이스 영상들로부터 CT 수 측정

관전압 80, 100, 120 kVp 각각에 대하여 5번 스캔으로 얻어진 AAPM CT 성능 팬텀의 CT 수 교정 삽입부 중심에 해당하는 CT 슬라이스 영상들은 CT 스캐너 제어 컴퓨터로부터 다이콤 파일(.dcm) 내보내기 하여 얻었다.

얻어진 다이콤 파일의 CT 슬라이스 영상들을 의료영상저장전송시스템에 불러온 후 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 물질에 해당되는 5개 핀과 바탕 이루고 있는 물에 대하여 관심영역(546.03 mm)을 설정하여 CT수를 측정하였다. 측정되어진 CT수로부터 평균값과 표준편차를 산출하였다.

3. 물질에서 광자에너지에 대한 선감약계수

폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 물, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 등의 물질에 대하여, 광자에너지 40~80 keV 범위에서 질량감약계수(Mass attenuation coefficients) 자료는 NIST 웹사이트 검색으로 얻었다. 얻어진 질량감약계수 자료는 다시 Origin pro 8.0 통계 프로그램의 cubic spline 내삽법에 의해서 광자에너지 1 keV 간격에 대한 질량감약계수로 산출되었다. 산출된 질량감약계수에 물리적 밀도를 곱하여 선감약계수로 유도하였다.

4. 관전압 별 X-선 빔의 유효에너지 결정

폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 물, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 등의 물질에 대하여, 측정된 CT 수 평균값에 대한 다른 광자에너지 하에 선감약계수를 각각 선형정합하여 얻은 선형상관계수가 최대값을 가질 때, 선형상관계수의 최대값에 대응하는 광자에너지가 유효에너지에 해당된다.

각각의 설정 관전압에서 발생한 X-선 빔의 유효에너지는 Origin pro 7.5 통계 프로그램 상에서 측정된 CT 수의 평균값에 대한 다른 광자에너지 하에 선감약계수를 선형정합하여 상관계수들을 얻었다. 얻어진 상관계수의 최대값에 대응하는 광자에너지를 유효에너지로 결정하였다.

III. RESULT

관전압 80, 100, 120 kVp에서 얻어진 AAPM CT 성능 팬텀의 구성 블록인 CT 수 교정 삽입부의 CT 슬라이스 영상으로부터 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 물, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 물질 등에 대하여 측정되어진 CT 수의 평균값과 표준편차는 Table 1에서 보여준다.

Table 1. Measured CT numbers for each material at CT slice images of a CT number calibration insert part in the AAPM CT performance phantom.

Material (Density(g/cm ³))	80 kVp CT number	100 kVp CT number	120 kVp CT number
	Mean Value±SD	Mean Value±SD	Mean Value±SD
Polyethylene (0.95)	-130.23±0.20	-109.04±0.30	-96.23±0.07
polystyrene (1.05)	-64.54±0.24	-44.04±0.64	-31.95±0.02
Water (1.00)	-3.84±0.22	-3.3±0.03	-2.97±0.04
Nylon (1.10)	61.49±0.22	79.85±0.64	89.65±0.10
Acrylic (1.19)	73.91±0.10	91.11±0.23	100.13±0.08
Polycarbonate (1.20)	106.67±0.40	120.93±0.23	127.37±0.01

NIST의 웹사이트로부터 얻어진 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 물, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 물질 등에 대한 질량감약계수는 Table 2에서 보여준다. Table 2에서 보여주는 질량감약계수에 물리적 밀도를 곱하여 얻은 선감약계수는 Table 3에서 보여준다.

폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 물, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 물질 등에 대하여, 측정된 CT 수의 평균값에 대한 다른 광자에너지 하에 선감약계수를 각각 선형정합하여 얻은 상관계수들은 Table 4에서 보여준다. 이 표는 관전압 80, 100, 120 kVp X-선 빔에서 상관계수의 최대값에 대응하는 광자 에너지를 각각 56, 62, 66~67 keV를 나타내었다. 이 에너지가 유효에너지로 결정되었다.

Table 2. Mass attenuation coefficients for polyethylene, polystyrene, water, nylon, polycarbonate and acrylic.

Photon energy (keV)	Mass attenuation coefficient(g/cm ²)					
	Polyethy lene	polystyr ene	Water	Nylon	Polycar bonate	Acrylic
40	0.228	0.218	0.268	0.231	0.220	0.235
41	0.226	0.216	0.264	0.228	0.218	0.232
42	0.224	0.214	0.259	0.226	0.215	0.229
43	0.222	0.212	0.254	0.223	0.213	0.226
44	0.220	0.210	0.250	0.220	0.211	0.223
45	0.218	0.208	0.246	0.218	0.208	0.220
46	0.216	0.206	0.242	0.215	0.206	0.217
47	0.214	0.204	0.238	0.213	0.204	0.215
48	0.212	0.202	0.234	0.211	0.202	0.212
49	0.210	0.200	0.230	0.209	0.200	0.210
50	0.208	0.199	0.227	0.207	0.198	0.207
51	0.207	0.197	0.225	0.205	0.197	0.206
52	0.206	0.196	0.222	0.204	0.196	0.204
53	0.205	0.195	0.220	0.202	0.194	0.203
54	0.204	0.194	0.218	0.201	0.193	0.201
55	0.203	0.193	0.216	0.200	0.192	0.200
56	0.201	0.192	0.214	0.198	0.191	0.198
57	0.200	0.190	0.212	0.197	0.189	0.197
58	0.199	0.189	0.210	0.196	0.188	0.195
59	0.198	0.188	0.208	0.194	0.187	0.194
60	0.197	0.187	0.206	0.193	0.186	0.192
61	0.196	0.186	0.205	0.192	0.185	0.191
62	0.195	0.185	0.203	0.191	0.184	0.190
63	0.194	0.184	0.201	0.190	0.183	0.189
64	0.193	0.183	0.200	0.189	0.182	0.188
65	0.192	0.182	0.198	0.188	0.181	0.187
66	0.192	0.182	0.197	0.187	0.180	0.186
67	0.191	0.181	0.196	0.186	0.180	0.185
68	0.190	0.180	0.194	0.186	0.179	0.184
69	0.189	0.179	0.193	0.184	0.178	0.183
70	0.189	0.179	0.192	0.184	0.177	0.182
71	0.188	0.178	0.191	0.183	0.177	0.181
72	0.187	0.177	0.190	0.182	0.176	0.181
73	0.187	0.177	0.189	0.182	0.175	0.180
74	0.186	0.176	0.189	0.181	0.175	0.179
75	0.185	0.175	0.188	0.180	0.174	0.178
76	0.185	0.175	0.187	0.179	0.173	0.178
77	0.184	0.174	0.186	0.179	0.173	0.177
78	0.184	0.174	0.186	0.178	0.172	0.176
79	0.183	0.173	0.184	0.177	0.171	0.176
80	0.182	0.173	0.184	0.177	0.171	0.175

Table 3. Linear attenuation coefficients for polyethylene, polystyrene, water, nylon, polycarbonate and acrylic.

Photon energy (keV)	Linear attenuation coefficient(cm ⁻¹)					
	Polyethylene	polystyrene	Water	Nylon	Polycarbonate	Acrylic
40	0.217	0.229	0.268	0.266	0.264	0.280
41	0.215	0.227	0.264	0.263	0.261	0.276
42	0.213	0.225	0.259	0.259	0.258	0.272
43	0.211	0.223	0.254	0.256	0.256	0.269
44	0.209	0.221	0.250	0.253	0.253	0.265
45	0.207	0.219	0.246	0.251	0.251	0.262
46	0.205	0.217	0.242	0.248	0.247	0.259
47	0.203	0.214	0.238	0.245	0.245	0.255
48	0.201	0.212	0.234	0.242	0.242	0.252
49	0.200	0.210	0.230	0.240	0.240	0.249
50	0.198	0.209	0.227	0.238	0.238	0.247
51	0.197	0.207	0.225	0.236	0.236	0.245
52	0.196	0.206	0.222	0.234	0.235	0.243
53	0.195	0.205	0.220	0.233	0.233	0.241
54	0.194	0.204	0.218	0.231	0.232	0.239
55	0.193	0.203	0.216	0.229	0.231	0.237
56	0.191	0.202	0.214	0.228	0.229	0.236
57	0.19	0.200	0.212	0.226	0.227	0.234
58	0.189	0.199	0.210	0.225	0.226	0.232
59	0.188	0.197	0.208	0.223	0.225	0.231
60	0.187	0.196	0.206	0.222	0.223	0.229
61	0.186	0.195	0.205	0.221	0.222	0.227
62	0.185	0.194	0.203	0.219	0.221	0.226
63	0.184	0.193	0.201	0.218	0.220	0.225
64	0.183	0.192	0.200	0.217	0.218	0.223
65	0.182	0.191	0.198	0.216	0.217	0.222
66	0.182	0.191	0.197	0.215	0.216	0.221
67	0.181	0.190	0.196	0.214	0.215	0.220
68	0.181	0.189	0.194	0.213	0.214	0.219
69	0.180	0.188	0.193	0.212	0.214	0.218
70	0.180	0.188	0.192	0.211	0.213	0.217
71	0.179	0.187	0.191	0.210	0.212	0.216
72	0.178	0.186	0.190	0.209	0.211	0.215
73	0.178	0.186	0.189	0.209	0.210	0.214
74	0.177	0.185	0.189	0.208	0.209	0.213
75	0.176	0.184	0.188	0.207	0.209	0.212
76	0.176	0.184	0.187	0.206	0.208	0.212
77	0.175	0.1827	0.186	0.206	0.207	0.211
78	0.175	0.183	0.186	0.205	0.207	0.210
79	0.174	0.182	0.184	0.204	0.206	0.209
80	0.173	0.182	0.184	0.203	0.205	0.208

Table 4. Correlation coefficients acquired from experiment for each tube voltage.

Photon energy(keV)	Correlation coefficient(r)		
	80 kVp	100 kVp	120 kVp
54	0.99831		
55	0.99882		
56	0.99911		
57	0.99844		
58	0.99776		
59		0.99746	
60		0.99778	
61		0.99756	
62		0.99819	
63		0.99774	
64		0.99777	0.99784
65		0.99687	0.99811
66			0.99832
67			0.99832
68			0.99613
69			0.99585

IV. DISCUSSION

관전압 80, 100, 120 kVp X-선 빔에서 얻어진 AAPM CT 성능 팬텀의 구성 블록인 CT 수 교정 삽입부의 CT 슬라이스 영상들로부터 폴리에틸렌, 폴리스틸렌, 물, 나일론, 아크릴과 폴리카보네이트 물질 등에 대하여 측정된 CT 수의 평균값과 다른 광자에너지 하에 선감약계수 사이의 관계를 선형 정합하여 얻은 상관계수들은 각각 0.99911, 0.99819, 0.99832로서 1에 아주 근사적인 상관계수를 나타내었다.

실험으로부터 80, 100, 120 kVp X-선 빔의 유효 에너지는 상관계수의 최대값에 대응하는 광자에너지로서 각각 56, 62, 66~67 keV를 나타내었다. 여기서 120 kVp X-선 빔의 유효에너지는 AAPM 보고서^[10]에서 보고된 약 70 keV의 유효에너지에 비하여 6% 작게 측정되었다.

X-선 빔의 유효에너지에서 알려진 물질들의 선감약계수와 측정된 CT 수 사이에는 선형관계가 존재한다. 유효에너지는 물질들에 대하여 다른 광자 에너지 하에 얻어진 선감약계수와 측정된 CT 수 사이에서 가장 좋은 선형관계를 나타내는 상관계

수로서 결정된다.^[6]

V. CONCLUSION

CT 스캐너로 AAPM CT 성능 팬텀의 CT 수 교정 삽입부를 CT 스캔하였다. 얻어진 CT 슬라이스 영상으로부터 각 핀의 CT 수를 측정하여 평균값을 산출하였다. 산출된 각 핀의 CT 수의 평균값과 각각의 광자에너지에서 각 핀의 선감약계수를 선형 정합하여 상관계수들을 얻었다. 얻어진 상관계수들 중 최대값에 대응하는 광자에너지를 유효에너지로 결정하였다. 결과로서, 관전압 80, 100, 120 kVp X-선 빔의 유효에너지는 각각 56, 62, 66~67 keV로 나타내었다.

결론적으로, 이 연구는 CT 스캐너에서 생성된 X-선 빔의 유효에너지를 적은 시간 소비와 정확하게 결정하는 방법 및 자료를 제시한다.

Reference

- [1] S. C. Chen, W. L. Jong, A. Z. Harun, "Evaluation of x-ray beam quality based on measurements and estimations using SpekCalc and Ipem 78 models," Malaysian Journal of Medical Sciences, Vol. 19, No. 3, pp. 22-28, 2012.
- [2] National Institute of Standards and Technology, "NIST measurement services: calibration of x-ray and gamma-ray measuring instruments," NIST Special Publication 250-58, pp. 1-96, 2001.
- [3] J. E. Kim, S. h. Lee, "Determination of the effective energy of an X-ray beam using optically stimulated luminescent nanoDot dosimeters," Journal of Korean Society of Radiology, Vol. 9, No. 6, pp. 375-379, 2015.
- [4] NIST: XCOM:Photon Cross Sections Database, Available in: <http://physics.nist.gov/PhysRefData/Xcom/html/xcom1.html/>
- [5] Users Manual, "Nuclear Associates 76-410-4130 and 76-411 AAPM CT Performance Phantom," Fluke corporation. 2005.
- [6] M. R. Millner, W. H. Payne, R. G. Waggener, W. D. McDavid, M. J. Dennis, V. J. Sank, "Determination of effective energies in CT calibration," Medical Physics, Vol. 5, No. 6, pp. 543-545, 1978.
- [7] P. Ni, W. Zhang, Z. Guo, X. Xu, X. Wang, "Research on the method to obtain effective energy in materials density test using X-ray CT," 18th World conference on nondestructive testing, 16-20 april 2012, durban, south africa, pp. 1-6,
- [8] P. F. Judy, "Comparison of equivalent photon energy calibration methods on computed tomography," Medical Physics, Vol. 7, No. 6, pp. 685-691, 1980.
- [9] AAPM report No. 1, "Phantoms for performance evaluation and quality assurance of CT scanners," American Association of Physicists in Medicine, pp. 1-23, 1977.
- [10] AAPM report No. 39, "Specification and acceptance testing of computed tomography scanners," American Association of Physicists in Medicine, pp. 1-95, 1993.

CT X-선 빔들의 유효에너지 결정

김종언

가야대학교 방사선학과

요 약

이 연구의 목적은 AAPM CT 성능 팬텀 안에 있는 CT 수 교정 삽입부의 CT 슬라이스 영상들을 사용하여 CT X-선 빔들의 유효에너지를 결정하는데 있다. AAPM CT 성능 팬텀의 CT 수 교정 삽입부는 80, 100, 120 kVp X-선 빔에 대하여 CT 스캐너로 5번 스캔되었다. 각 핀의 CT 수는 각각의 CT 슬라이스 영상에 대하여 측정되었다. 상관계수들은 각 핀에서 측정된 CT 수의 평균값과 미국표준기술연구소의 자료로부터 계산된 다른 광자에너지 하에 선감약계수를 선형정합하여 얻었다. 얻어진 상관계수의 최대값에 대응하는 광자에너지는 유효에너지로 결정하였다. 결과로서, 유효에너지는 80, 100, 120 kVp X-선 빔들에 대하여 각각 56, 62, 66~67 keV이다.

중심단어: 관전압, CT 수, 선감약계수, 상관계수, 유효에너지

연구자 정보 이력

	성명	소속	직위
(단독저자)	김종언	가야대학교 방사선학과	교수