

나선식 정량적 CT: 폐절제후 폐기능 예측에의 유용성¹

정명진 · 임정기 · 구진모 · 조인철 · 연경모

목 적: 폐절제후 폐기능의 예측에 있어서 나선식 정량적 CT의 유용성을 평가하고자 하였다.

대상 및 방법: 폐절제를 시행받은 환자들중 수술전에 나선식 CT를 시행받았으며, 수술전에 폐관류스캔을 시행받았거나(10명) 수술후 추적 폐기능검사를 시행받은(6명) 14명의 환자를 대상으로 하였다. CT의 영상에서 각각 전체 폐야와 절제 대상인 폐엽을 포함하는 관심영역들을 그친후 연속화소방법(contiguous pixel method)을 이용, 관심영역 내에서 -910HU(Hounsfield Unit)로부터 -500HU 사이의 화소에 대응하는 면적을 구하였다. 전체의 단면적을 누적하여 폐부피를 계산하였으며 전체 폐부피와 절제대상 폐부피의 비로부터 절제후 예측 폐기능치를 계산하였다. {수술후 예측 폐기능치=수술전 측정 폐기능치 \times (1-절제대상폐의 기능가능한 부피/전 폐의 기능가능한 부피)}. 정량적 CT로부터 얻어진 예측 폐기능치와 폐관류스캔에서 얻어진 예측치 및 수술후 실측된 폐기능치를 비교하였다.

결 과: 정량적 CT 예측치와 추적 실측치($n=6$)를 비교하였을때 매우 근접한 수치로서 유의한 상호관계가 있었으며(FVC: $r=0.988$, $p<0.001$; FEV1: $r=0.994$, $p<0.001$), 정량적 CT 예측치와 폐관류스캔 예측치($n=10$)를 비교하였을때 역시 근접한 수치로서 유의한 상호관계가 있었다(FVC: $r=0.976$, $p<0.001$; FEV1: $r=0.974$, $p<0.001$).

결 론: 정량적 CT는 폐절제 대상 환자의 폐절제후 폐기능의 정확한 예측에 유용한 지표가 될 수 있으며 폐관류스캔을 대체할 수 있는 효과적인 수단으로 사료된다.

폐절제술은 수술후 폐용적과 폐환기량의 손실을 필연적으로 동반하므로 수술전 폐질환으로 인해 폐기능이 감소되어 있던 환자에게는 폐절제술후의 폐기능 소실로 인해 심각한 환기장애가 유발될 수 있다. 임상적으로 수술후 1초간 강제호기량(FEV1)이 0.8-1L 이하일 경우 환기장애가 일어날 가능성이 유의하게 높다고 알려져 있다(1). 그러므로 폐절제술 시행 이전에 절제후 폐기능 특히 1초간 강제호기량의 변화의 예측은 수술 가능성 여부를 결정하는 중요한 지표가 된다.

폐절제후 폐기능의 예측은 절제되는 폐엽의 기능분율(function ratio)이 수술후 폐기능 손실과 비례한다는 전제에서 비롯된다(2). 현재 절제 대상 폐의 기능분율을 측정하기 위하여 대부분의 경우 동위원소를 이용한 폐관류스캔이 이용되고 있다. 폐관류스캔을 이용한 폐기능의 예측은 폐구역별의 폐관류량의 비로부터 구하며, 이는 폐관류량이 폐환기량과 비례한다는 원리에서 응용된 것이다(3, 4). 폐절제 이전에 대부분의 환자는 폐암 및 기타 질환의 평가를 위해 흉부 CT를 시행한다. 흉부 CT의 영상에서 폐

단면적을 계산할 수 있으며 이로부터 총 폐부피를 구할 수 있고 또한 원하는 각 구역의 부피를 계산할 수 있다. CT의 영상에서 폐관류스캔에서와 마찬가지로 각 폐엽의 부피분율을 구할 수 있다면 폐절제후 폐기능을 예측하는데 응용될 수 있고, 폐관류스캔을 이용한 방법보다 환자에게 편리하며 정확한 예측이 가능할 수 있을 것으로 사료된다.

그러나 과거에는 상용으로 지원되는 hardware 및 software의 제한으로 말미암아 CT를 이용한 폐부피의 계산은 많은 시간과 노력이 필요하여 실용화되지 못하였는데 최근 상용의 hardware 및 software가 비약적으로 개선되어 위의 노력을 줄일 수 있게 되었다. 이에 저자들은 정량적 CT를 이용하여 폐절제후 폐기능을 예측하는 방법의 유용성을 평가하고자 하였다.

대상 및 방법

1993년 11월부터 1994년 4월 사이의 6개월 간에 폐엽 또는 일측폐 절제를 시행받은 환자들중 수술전에 나선식 CT를 이용한 흉부 CT를 시행받은 환자중 수술전에 폐관류스캔을 시행받았거나 수술후 추적 폐기능검사를 시행받은 14명의 환자를 대상으로 하였다. 이중 6명의 환자는 추적

¹서울대학교 의과대학 진단방사선과학교실

본 연구는 1995년도 서울대학교 병원 지정연구비의 지원을 받은 것이며 논문은 1995년 6월 29일 접수하여 1995년 9월 19일에 채택되었음

폐기능검사가 가능하였고 10명의 환자는 수술전에 시행된 폐관류스캔과 CT의 비교가 가능하였다. 원인 질환은 12명에서 폐암이었으며 2명에서는 말기 기관지확장증이었다. 평균 연령은 51세였으며 남녀비는 10:4였다. 8명은 폐엽절제술을 받았으며 6명은 일측 폐절제술(pneumonectomy)을 시행받았다.

나선식 CT는 Somatome plus S(Siemens Medical System, Erlangen, Germany)를 사용하였다. 종양의 발견 또는 병기진단에 도움을 주기위해 80cc의 68% meglumine ioglicate(Rayvist 300; Shering AG, Germany)를 전완부의 정맥에 주사한후 120kVp, 165mAs의 조건과 1.0cm의 절편 두께와 초당 1.2cm의 테이블 이동 속도로 스캔을 시

Table 1. Comparison of Preoperative Spirometric, RI-predicted and CT-predicted, and Postoperative Spirometric Pulmonary Function Data.

Patient Number	Age/ Sex	Operation Name	Preoperative		CT-predicted		RI-predicted		Postoperative	
			FVC	FEV ₁	FVC	FEV ₁	FVC	FEV ₁	FVC	FEV ₁
1	M/38	LLL Lobectomy	4.03	3.55	3.29	2.9	—	—	3.05	2.79
2	M/49	LUL Lobectomy	3.01	2.53	2.97	2.5	—	—	3.06	2.4
3	M/58	Rt Pneumonectomy	3.02	2.36	1.42	1.11	—	—	1.52	1.22
4	F/39	Rt M&LL Lobectomy	4.19	3.35	2.53	2.02	—	—	2.41	2.03
5	F/54	Rt Pneumonectomy	2.89	2.11	1.38	1.01	1.41	1.03	1.32	1.28
6	M/64	RML Lobectomy	2.34	1.96	1.98	1.45	1.77	1.48	1.74	1.46
7	M/56	Rt Pneumonectomy	1.74	1.22	1.44	1.01	1.51	1.06	—	—
8	M/42	RUL Lobectomy	4.15	3.41	3.37	2.77	3.77	3.1	—	—
9	M/64	RLL Lobectomy	3.22	2.3	2.73	1.95	2.92	2.09	—	—
10	M/46	RUL Lobectomy	4.06	3.41	3.33	2.8	3.35	2.81	—	—
11	F/53	Lt Pneumonectomy	2.06	1.74	1.94	1.64	1.89	1.6	—	—
12	M/45	Rt Pneumonectomy	4.56	3.4	2.44	1.82	2.66	1.98	—	—
13	F/40	Rt U&ML Lobectomy	3.29	2.92	2.47	2.19	2.75	2.44	—	—
14	M/67	Rt Pneumonectomy	2.55	2.03	1.62	1.29	2.11	1.68	—	—

Abbreviation : FVC : forced vital capacity, FEV₁ : forced expiratory volume at 1 second,

RI : radioisotope, — : data not obtained

All numerics indicate litter.

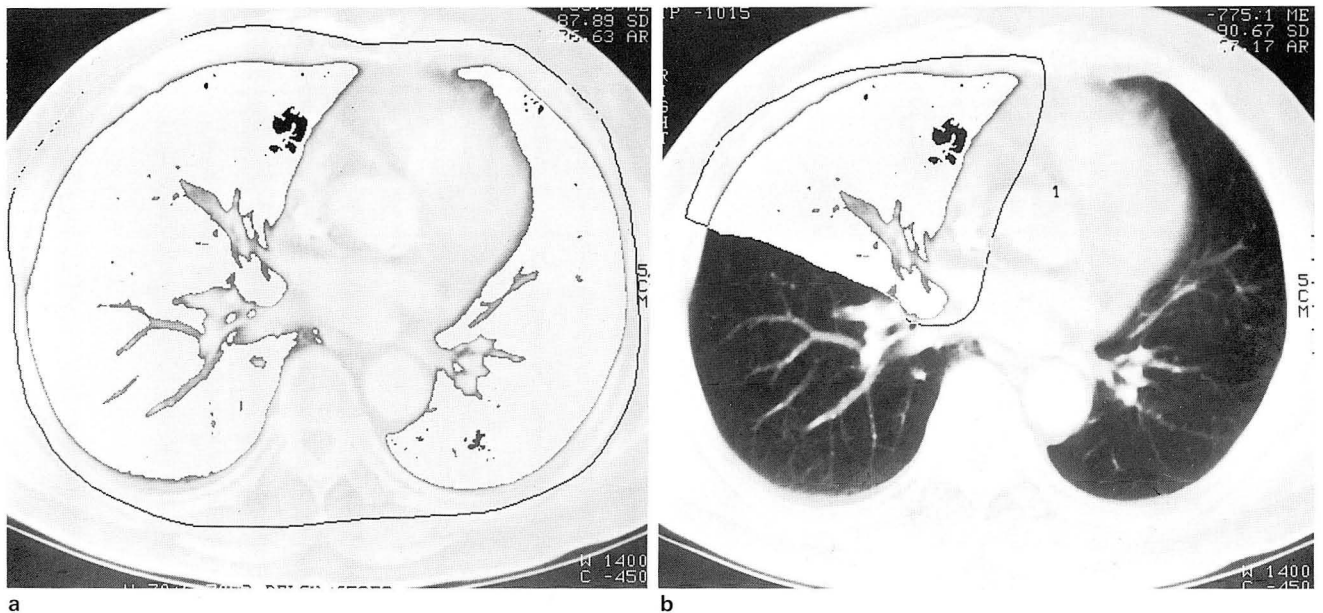


Fig. 1. Quantitation of total functioning lung volume (TFLV) and regional functioning lung volume (RFLV).

a. TFLV is determined by a region of interest (ROI) which includes whole lung field. Pixels with attenuation value greater than -500HU (soft tissue) and less than -910HU (emphysema) were excluded.

b. RFLV is determined by a ROI which includes the lobe that will be resected.

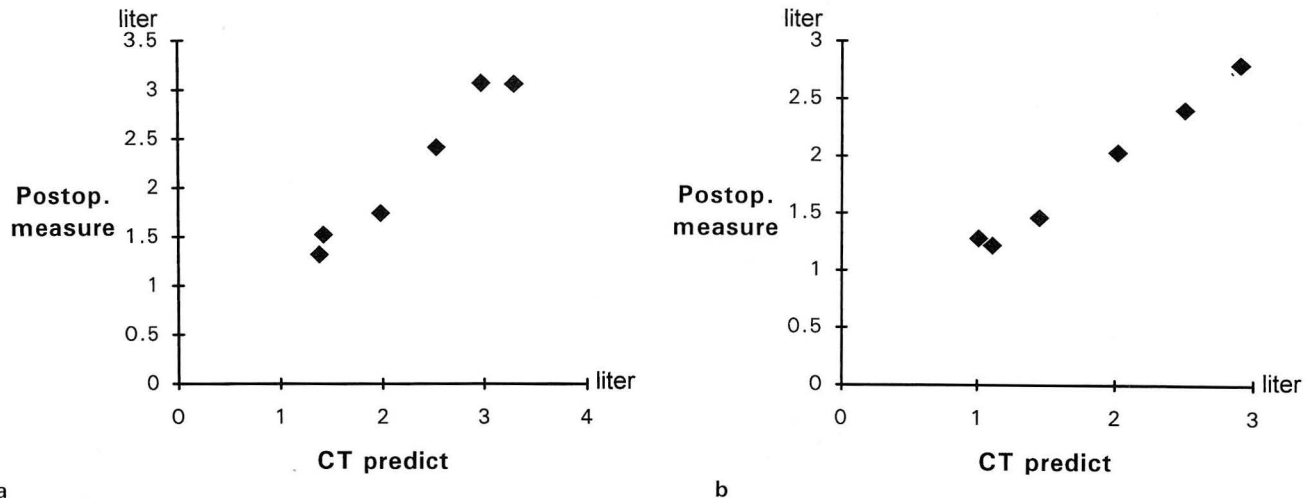


Fig. 2. Simple regression analysis of CT predicted versus postoperatively measured lung function.

a. For forced vital capacity, two variables are correlated linearly ($r=0.988$, $p<0.001$).

b. For forced expiratory volume at 1 second, two variables are correlated linearly ($r=0.994$, $p<0.001$).

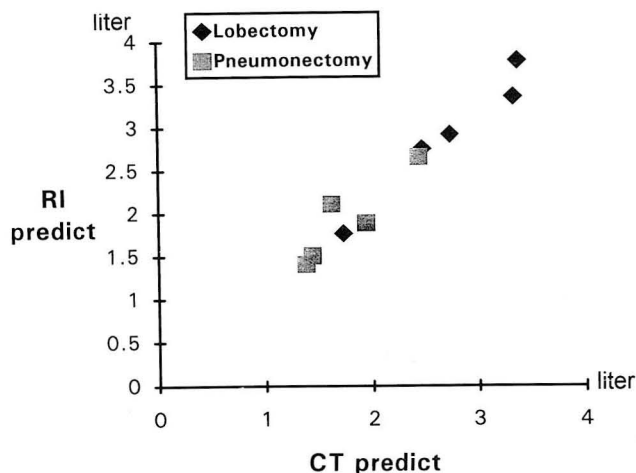


Fig. 3. Simple regression analysis of CT predicted versus RI predicted lung function for forced vital capacity. Note linear correlation between the two variables ($r=0.976$, $p<0.001$).

행하였다. 고공간해상도 연산 재구성(high spatial-frequency reconstruction algorithm)을 이용하여 1.2cm 간격으로 단면영상을 재구성하였다. 재구성된 단면 영상에서 전체 폐야를 포함하는 관심영역(region of interest)과 절제 대상인 폐엽만을 포함하는 관심영역을 그린후 연속화소 방법(contiguous pixel method)을 이용, 관심영역 내에서 통기되는 정상적 폐실질의 감쇠계수에 해당하는 -910 Hounsfield Unit(이하 HU로 약함)부터 -500 HU 사이의 pixel에 해당하는 면적을 구하였다(5-8) (Fig. 1). 각 단면 영상에서 구한 면적을 전체 폐에서 누적하여 부피를 계산하였다.

수술후 예측 폐기능치는 수술전 측정 폐기능치에 절제 대상 폐의 기능 가능한 부피를 전체 폐의 기능 가능한 부피로 나눈 값을 1에서 감한 치를 곱하여 계산하였다. (수술후

예측 폐기능치=수술전 측정 폐기능치 \times (1-절제대상폐의 기능가능한 부피/전 폐의 기능 가능한 부피))

정량적 CT로부터 얻어진 예측 폐기능치와 폐관류스캔에서 얻어진 예측치, 그리고 수술후 추적 검사로 실측된 폐기능치를 비교하여 상관계수를 구하였으며 이의 통계적 유의성을 검증하였다.

결 과

직선회귀분석법을 이용하여 정량적 CT로부터 얻어진 예측 폐기능치와 폐관류스캔에서 얻어진 예측치 또는 수술후 추적 검사로 실측된 폐기능치 간의 상관계수를 구하였다. 정량적 CT 예측치와 추적 실측치는 매우 근접된 치를 보였으며 유의한 상호 관계가 있었다(FVC : $r=0.988$, $p<0.001$; FEV1 : $r=0.994$, $p<0.001$) (Fig. 2). 또한 정량적 CT 예측치와 폐관류스캔 예측치를 비교하였을때 역시 매우 근접된 치로서 유의한 상호 관계가 있었으며(FVC : $r=0.976$, $p<0.001$; FEV1 : $r=0.974$, $p<0.001$) 이를 일측 폐절제(pneumonectomy)를 받은 환자군(FVC : $r=0.876$, $p<0.01$; FEV1 : $r=0.877$, $p<0.01$)과 폐엽절제(lobectomy)를 받은 환자군(FVC : $r=0.980$, $p<0.001$; FEV1 : $r=0.979$, $p<0.001$)으로 구분하였을때에도 양 군 모두에서 폐관류 스캔과 비교하여 유의한 상호 관계가 유지되었다(Fig. 3).

고 찰

폐절제술전의 절제후 폐기능 평가는 매우 중요한데, 이의 평가 원리는 수술후 폐기능 감소의 정도는 절제대상인 폐의 전체 폐에 대한 용적 혹은 폐혈관 관류량 분율에 해당한다는데 기초하고 있다(2, 4).

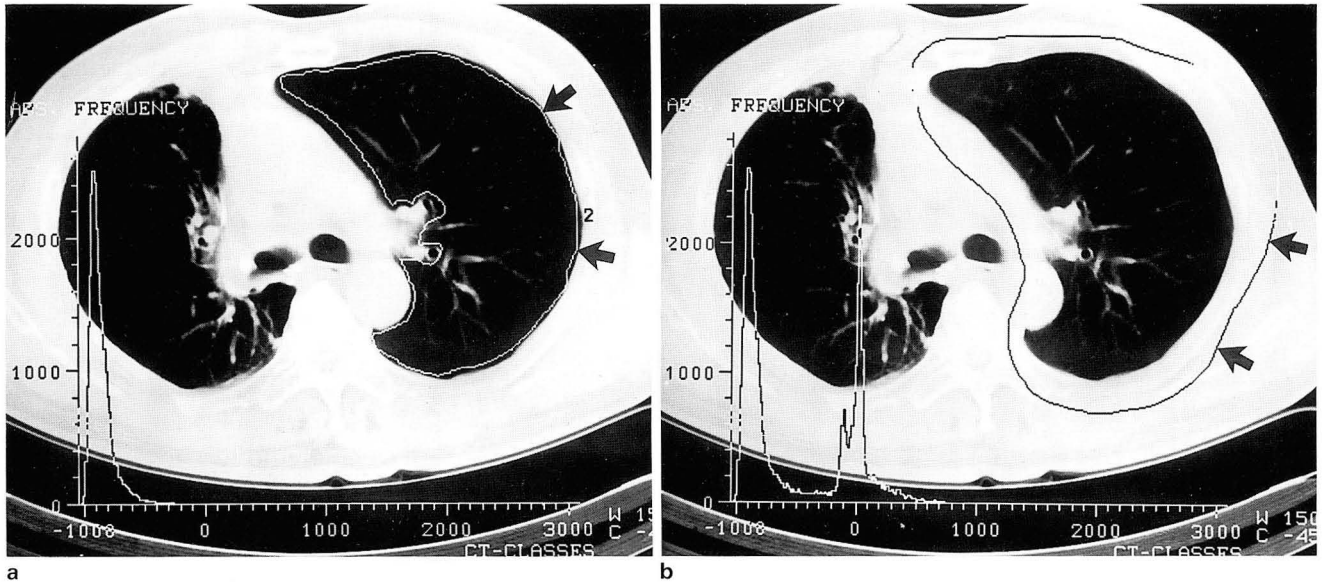


Fig. 4. Methods for isolation of the functioning lung parenchyma.

- a. CT scan shows region of interest (ROI) determined by drawing a line manually along the pleura (left lung, arrows). Histogram of the ROI shows single peak at $-900\text{HU} \sim -500\text{HU}$.
- b. CT scan shows ROI determined by drawing a line in outer perimeter of the lung (left hemithorax, arrows). Histogram of the ROI shows double peak at $-900\text{HU} \sim -500\text{HU}$ and at $-200\text{HU} \sim 100\text{HU}$.

CT에서 폐 실질의 X선 감쇠(attenuation)도는 일차적으로 혈액, 공기, 체액, 그리고 폐조직의 상대적 비율에 의해 결정된다. Hedlund 등 (9)의 연구에 의하면 CT에서의 감쇠도는 OHU 이하에서 대상의 밀도와 비례한다. 즉 $1000\text{mg}/\text{mL}$ 의 밀도를 가진 물은 0HU 로 표현되며 거의 $0\text{mg}/\text{mL}$ 의 밀도인 공기는 -1000HU 로 표현되며 이 사이의 밀도를 갖는 물질들은 밀도와 감쇠도간에 직선적인 비례관계가 있다. 동일한 가정을 폐에 적용하면 폐실질의 감쇠도가 폐밀도 즉 공기를 포함한 정도를 반영한다고 사료된다. 정상인에서 측정된 폐 감쇠계수는 비교적 좁은 범위 내에 국한된다. 또한 환자의 호흡 상태에 따라 폐내 공기분율이 변하므로 감쇠계수도 변화한다. Kalender 등 (10)에 의하면 정상인의 폐 감쇠계수는 폐활량(vital capacity)의 80% 흡기 상태에서 -862.1HU , 20% 흡기상태에서 -763.2HU 이었다.

폐실질의 정량화를 위해서는 관심영역에서 종격동이나 흉벽을 제외하여 폐실질만을 분리하는 과정이 필요한데 이를 수작업으로 관심영역을 설정하여 계산하는 방법은 대단히 힘들며 동시에 부정확할 것이다. 컴퓨터를 이용하여 폐실질을 분리하는 방법은 변연추적법(edge tracking method)과 연속화소법이 있다(11). 변연추적법은 폐와 주변 조직간의 경계를 이루는 감쇠계수의 급격한 변화를 컴퓨터가 인식하여 경계를 연속적인 선으로 이어서 관심영역으로 설정하는 방법으로 처리속도가 빠르고 사용이 간편한 장점이 있으나 폐실질내에 고립되어 있는 병변(기포, 종괴, 부분적 경화 등)을 배제할 수 없는 단점이 있다. 연속화소법은 대략 설정된 관심영역 내에서 지정된 감쇠계수 범위내

에 속한 화소만을 선별하는 방법으로 변연추적법과 비교하여 상대적으로 처리속도가 늦고 수작업이 많은 단점이 있으나 고립된 폐내의 상태를 모두 평가할 수 있는 장점이 있다. 이러한 장점이 기능가능한 폐용적의 정량화의 정확성에 중요한 역할을 하므로 저자들은 후자의 방법을 사용하였다.

폐환기의 변화를 유발하는 다양한 질환에서 CT상 폐 감쇠도의 변화를 동반한다. 폐기종 환자의 경우, 폐실질중 많은 부분이 -900HU 내지 -910HU 이하의 감쇠계수를 나타내며 이보다 낮은 감쇠계수로 나타나는 pixel들은 병리적으로 확인된 폐기종과 일치하였다(5, 6). 또한 CT에서 보이는 폐기종의 범위는 폐기능검사의 수치와 상호 관계가 있다(7). 저자들의 경우와 같이 조영제를 사용한 경우 폐실질의 감쇠계수도 증가하나 폐기종은 정상실질에 비해 감쇠의 증가도 미약하므로 상기의 기준이 변화될 필요는 없을 것이다(5). 미만성 간질성 폐질환 환자에서 -699HU 이상의 감쇠를 보이는 범위의 비율도 폐기능검사 수치와 상호 관련이 있다(8). 이러한 연구 결과들로부터 폐기능의 대부분이 -910HU 에서 -699HU 사이의, 정상인의 호기 및 흡기시 감쇠계수 사이에 속하는 폐실질에 의해 이루어진다고 인정할 수 있다.

CT의 도수분포도(histogram)에서 흉곽을 포함한 관심영역의 화소 분포를 보면 대략 -400HU 에 최저점이 위치하며 수작업으로 폐실질만을 선택한 관심영역의 화소 분포는 -400HU 이하의 곡선과 매우 유사하다(Fig. 4). 그러므로 -400HU 를 상한으로 하여 화소를 헤아린다면 가장 정확한 면적을 구할 수 있을 것이다. 또한 CT에서 보여

지는 대조되는 두 조직간의 경계는 두 조직의 감쇠의 중간 값을 보이는점이 가장 실제로 근사하므로 폐와 주변 연부 조직의 경계는 -350 HU에서 -400 HU사이가 될 것이다. 이러한 결과와 Rienmuller 등 (8)의 결과를 고려하여 -500 HU를 기준으로 정상 폐실질을 구분하였다.

저자들의 연구에서 정량적 CT를 이용한 절제후 폐기능 예측치는 술후 추적 실측치와 매우 좋은 상호관계가 있었으며 이는 폐관류 스캔을 이용한 여러 연구(3, 4)의 결과와 비교하여 우월하였다. 또한 폐관류 스캔과 CT를 직접 비교하였을때 두 방법간에도 유의한 상호 관계가 있었다. 그러므로 절제후 폐기능을 예측하는데 있어 정량적 CT가 폐관류 스캔과 비교하여 우수하거나 적어도 동등한 수준의 정확도를 갖는다고 사료된다. 또한 Wu 등 (12)의 연구와 비교하여서도 좀더 우수한 결과를 얻을 수 있었으며, 이는 저자들이 나선식 CT를 이용하므로써 Wu 등 (12)의 연구에서 제한점으로 지적되었던 스캔간의 호흡상태의 불일치로 인한 오차를 극복할 수 있었던 점에 기인하는 것으로 사료된다.

결론적으로, 정량적 CT는 비교적 쉽게 사용할 수 있으며, 폐절제후 폐기능의 정확한 예측과 동시에 병변의 발견 및 병기 결정에도 도움이 되므로 폐절제 대상 환자의 평가에 유용한 지표가 될 수 있으며 폐관류 스캔을 대체할 수 있는 효과적인 수단으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. Burrows B, Strauss RH, Niden AH. Chronic obstructive lung disease. III. Inter-relationships of pulmonary function data. *Am Rev Respir Dis* 1965; 91: 861-868
2. Ali MK, Mountain CF, Ewer MS, Jonston D, Haynie TP. Predicting loss of pulmonary function after pulmonary resection for bronchogenic carcinoma. *Chest* 1980; 77: 337-342
3. Wernly JA, DeMeester TR, Kirchner PT, et al. Clinical value of quantitative ventilation-perfusion lung scans in the surgical management of bronchogenic carcinoma. *J Thorac Cardiovasc Surg* 1980; 80: 535-543
4. Olsen GN, Block AJ, Tobias JA. Prediction of postpneumectomy pulmonary function using quantitative macroaggregate lung scanning. *Chest* 1974; 66: 13-16
5. Muller NL, Staples CA, Miller RR, Abboud RT. "Density mask": an objective method to quantitate emphysema using computed tomography. *Chest* 1988; 94: 782-787
6. Gould GA, MacNee W, Mclean A, et al. CT measurements of lung density in life can quantitate distal airspace enlargement: an essential defining feature of human emphysema. *Am Rev Respir Dis* 1988; 137: 380-392
7. Kinsella M, Muller NL, Abboud RT, Morison NJ, DyBuncio A. Quantitation of emphysema by computed tomography using a "density mask" program and correlation with pulmonary function tests. *Chest* 1990; 97: 315-321
8. Rienmuller RK, Behr J, Kalender WA, et al. Standardized quantitative high-resolution CT in lung disease. *J Comput Assist Tomogr* 1991; 15: 742-749
9. Hedlund LW, Vock P, Effmann EL. Computed tomography of the lung: densitometric studies. *Radiol Clin North Am* 1983; 21: 775-788
10. Kalender WA, Rienmuller R, Seissler W, et al. Measurement of pulmonary parenchymal attenuation: use of spirometric gating with quantitative CT. *Radiology* 1990; 175: 265-268
11. Hedlund LW, Anderson RF, Goulding PL, Beck JW, Effman EL, Putman CE. Two methods for isolating the lung area of a CT scan for density information. *Radiology* 1982; 144: 353-357
12. Wu MT, Chang JM, Chiang AA, et al. Use of quantitative CT to predict postoperative lung function in patient with lung cancer. *Radiology* 1994; 191: 257-262

Quantitative Spiral CT: Clinical Usefulness in Prediction of Postoperative Lung Function in Patients with Pulmonary Resection¹

Myung Jin Chung, M.D., Jung-Gi Im, M.D., Jin Mo Goo, M.D.,
In Cheol Jo, M.D., Kyung Mo Yeon, M.D.

¹ Department of Radiology, Seoul National University College of Medicine

Purpose: We evaluated the usefulness of quantitative spiral CT to predict postoperative lung function in patients undergoing pulmonary resection.

Materials and Methods: Fourteen patients in whom pneumonectomy or segmentectomy were performed underwent preoperative chest spiral CT and pulmonary function test(PFT). Six patients underwent postoperative follow-up PFT. Ten patients underwent preoperative radioisotope(RI) lung perfusion scan. Preoperative CT data were postprocessed with contiguous pixel method ranged from -9107 HU to -500 HU to quantify total functional lung volume(TFLV) and regional volume to be resected(RFLV). Postoperative lung function was predicted by following formula; Predicted postoperative PFT value = preoperative PFT \times (1 - RFLV/TFLV). CT predicted value was compared with postoperative measured PFT value and those value of RI perfusion scan.

Results: CT predicted values were very close to postoperative measured value and RI predicted value, and were correlated well with postoperative measured values (FVC : $r=0.988$, $P<0.001$; FEV1 : $r=0.994$, $P<0.001$) and RI predicted values (FVC : $r=0.976$, $P<0.001$; FEV1 : $r=0.974$, $p<0.001$).

Conclusion: Quantitative spiral CT was useful to predict postoperative lung function and could be an effective alternative to RI perfusion scan.

Index Words: Lung, CT
Lung, surgery
Computed tomography(CT), helical

Address reprint requests to : Jung-Gi Im, M.D., Department of Radiology, Seoul National University, College of Medicine
28, Yongon-dong, Chongro-gu, Seoul 110-744 Korea. Tel. 82-2-760-2584 Fax. 82-2-743-6385