

나선식 CT에 의한 폐용적 측정 : 폐기능검사와 비교¹

강호영 · 곽병국 · 이상윤 · 김수란 · 이신형 · 이창준 · 박인원²

목 적 : 나선식 정량적 CT에 의한 폐용적 측정의 유용성을 알고자 한다.

대상 및 방법 : 20-30대 정상 자원자 15명 (남:여=8:7, 평균나이:30세)에 대하여 나선식 정량적 CT와 폐기능검사에 의한 폐용적을 비교하였다. 최대흡기와 최대호기에 나선식 CT를 폐첨부터 하부폐야가 다 보일 때까지 조영증강 없이 촬영 (collimation 10mm, pitch 1, kVp/ mA=130/ 150)하여 3D (SSD)영상을 얻은 후 폐기능검사에서 구한 총폐용량 (TLC), 폐용량 (VC)와 잔류용적 (RV)에 해당하는 window범위를 정하고 통계학적 의미를 구하였다 (paired t-test).

결 과 : TLC는 최대흡기 CT의 window범위 -1000HU~-150HU에서 평균 5771ml로 폐기능검사의 결과 (5846ml)와 상응하였다 ($p=0.279$, $r=0.986$). VC는 최대흡기 CT의 window범위 -910HU~-800HU에서 평균 3965ml로 폐기능검사의 평균치 (4062ml)와 상응하였다 ($p=0.366$, $r=0.954$). RV는 최대호기 CT의 window범위 -1000HU~-450HU에서 결과 (CT/ PFT=1831ml/ 1784ml)가 상응하였다 ($p=0.757$, $r=0.777$). 최대흡기 CT에서의 RV 평균치는 1801ml이고 이는 폐기능검사의 RV와 상응하였다 ($p=0.843$, $r=0.847$).

결 론 : 최대호기 상태의 나선식 CT는 TLC, VC 와 RV의 정량적 측정에 유용하다.

서 론

폐용적 측정은 임상에서 유용한 생리적인 부피로써 일반적으로 널리 이용되는 폐기능검사(Spirometry)로 측정하고 있다. 1930년대에 Hurtado 등에 의하여 단순흉부 촬영에서 TLC (total lung capacity)의 측정을 시도하여 형태학적인 정보에 추가하여 기능적 정보를 얻으려 하였다(1). 1960년대에는 Loyd 등과 Barnhard 등이 흉부 측면사진을 추가하여 여러 수학적 방법으로 좀 더 정확한 방법으로 TLC 측정을 시도하였다(2, 3). 이후 컴퓨터공학의 비약적인 발전으로 인체의 CT영상을 얻게 되었고 짧은 시간에 연속적인 영상을 얻을 수 있는 나선식 CT가 이미 실용화되었다. 나선식 CT는 한 번 숨을 멈출 때 연속적으로 특정 부위를 촬영할 수 있어 보다 많은 형태학적인 정보와 더불어 기능적인 정보도 제공한다. 과거에는 CT를 이용한 폐부피의 계산에 많은 시간과 노력이 필요하여 상용화되지 못하였으나, 최근 soft ware의 발전으로 여러 부피들을 쉽게 얻을 수 있게 되었다. 이에 저자들은 나선식 정량적 CT

에서 얻을 수 있는 기능적 정보에 관심을 두어 그 중 측정 가능한 폐용적을 구하고자 하였다.

대상 및 방법

20-30대 자원자로서 8명의 남자와 7명의 여자로 총 15명을 대상으로 하였다. 평균 나이는 30세 (21-39), 평균 키는 167.9cm (158-182)이고, 평균 몸무게는 59.7Kg (50-77)이었다. 모두 심혈관질환, 고혈압, 당뇨병 또는 신장질환 등이 없는 정상인이었다. 대상자들에 대하여 폐기능검사 (6200 AutoboxDL, SensorMedics, Yorba Linda, USA)로 TLC, VC (vital capacity)와 RV (residual volume)를 측정하고 같은 날에 나선식 CT를 촬영하였다. 폐첨부에서부터 하부폐야가 다 보일 때까지 조영증강 없이 최대호기 상태와 최대흡기 상태에서 촬영하였다. 사용한 기기는 PQ2000 (Picker International, Ohio, USA)이고, 촬영조건은 collimation 10mm, pitch 1, kVp/ mA=130/150, matrix 512×512, FOV 300mm이었으며 standard algorithm으로 하였다.

나선식 CT에서 얻은 데이터를 보조컴퓨터인 Voxel Q (Picker International, Ohio, USA)에서 SSD (shaded surface display)방법으로 window level -575HU, width 850으로 하여 3차원영상을 얻었다. TLC는 최대흡기 CT에

¹국립의료원 진단방사선과

²중앙대학병원 내과

이 논문은 1996년 6월 5일 접수하여 1996년 8월 21일에 채택되었음

서 최소감쇠계수를 -1000HU (Housefield Unit)로 정하였고 최대감쇠계수는 -400HU부터 -150HU까지 50HU 간격으로 window범위를 정하여 그 사이의 pixel에 해당하는 각각의 부피를 구하였다 (Fig. 1). VC는 최대흡기 CT에서 window범위를, 최소감쇠계수는 -910HU로 하였고 최대감쇠계수는 -850HU부터 -600HU까지 50HU의 간격으로하여 그 사이의 pixel에 해당하는 각각의 부피를 구하였다. RV는 2가지 방법으로 구하여 비교하였는데 첫째는 최대호기 CT에서 최소감쇠계수는 -1000HU로 하고 최대감쇠계수는 -600HU에서 -200HU까지 50HU간격의 window범위로 하여 역시 각각의 부피들을 구하였다. 두번째 방법은 최대흡기 CT로 얻은 TLC에서 VC를 빼는 방법으로 구하였다. 각각 구한 값들을 폐기능검사로 얻은 수치들과 비교하여 TLC, VC와 RV의 평균치와 통계학적 분석을 통하여 상관관계가 가장 큰 window범위를 결정하였다. 그리고, Paired t-test를 이용하여 두가지 방법에 의한 결과들을 검정하였다.

결 과

TLC는 최대흡기 CT의 window범위 -1000HU ~ -150HU에서 평균 5771ml로 폐기능검사에서 얻은 평균치 5846ml와 가장 가까웠고, 통계학적 검정에서 두 검사방법은 유의한 차이가 없었다 ($p=0.279$, $r=0.986$). VC는 최대흡기 CT의 -910HU ~ -800HU의 window범위에서 3965ml로 폐기능검사의 VC 평균치 4062ml와 가장 근접하였고, 통계학적 검정에서 두 검사방법은 유의한 차이가 없었다 ($p=0.366$, $r=0.954$). 최대호기 CT의 window범위 -1000HU ~ -450HU에서의 평균치는 1831ml이고 폐기능검사로 얻

은 RV의 평균치는 1784ml로 이 두 방법은 통계학적으로 유의한 차이가 없었다 ($p=0.757$, $r=0.777$). 또한 최대호기 CT에서 구한 RV (TLC-VC)의 평균치는 1801ml였고 폐기능검사에서 얻은 결과와 통계학적 검정에서 유의한 차이가 없었다 ($p=0.843$, $r=0.847$). 폐기능검사와 비교할 때 최대흡기 CT에서 얻은 RV가 최대호기 CT의 결과보다 상관관계가 더 크게 나타났다 (Table 1, Fig. 2).

고 찰

CT에서 폐실질의 X선 감쇠(attenuation)도는 일차적으로 혈액, 공기, 체액 그리고, 폐조직의 상대적 비율에 의해 결정된다. Hedlund 등의 연구에 의하면 CT에서의 감쇠도는 phantom의 물리적 농도 $0 \sim 1,045 \text{ mg/cm}^3$ 범위에서 직선적 비례관계가 있다고 하였다(4). 이러한 사실은 폐실질의 감쇠도가 폐의 공기를 포함한 정도를 반영한다. 따라서 전체 폐실질의 감쇠도의 어떤 범위 내에서 합을 구한다면 폐용적을 구할 수 있으리라 생각된다. 실제로 이러한 정량적 CT로 얻은 폐용적은 폐기능검사와 비교하여 높은 상관관계가 있음이 잘 알려져 있다. 더구나 최근 고도로 발달된 컴퓨터공학은 나선식 정량적 CT로 간단하게 용적을 구할 수 있게 하였다. 나선식 CT로 얻은 데이터를 보조적 컴퓨터시스템인 workstation에서 SSD (shaded surface display)로 3-D 영상을 만든 후 원하는 CT 감쇠도 범위를 정하여 pixel의 수에 해당하는 용적을 단번에 얻을 수 있다. 이것은 이전의 폐실질 정량화를 위한 과정인 변연추적법(edge tracking method)과 연속화소법(contiguous pixel method)보다(5) 처리속도가 빠르고 수작업이 적어 훨씬 단순화된 방법이다. 이에 저자들은 CT의 형태학적 정보와

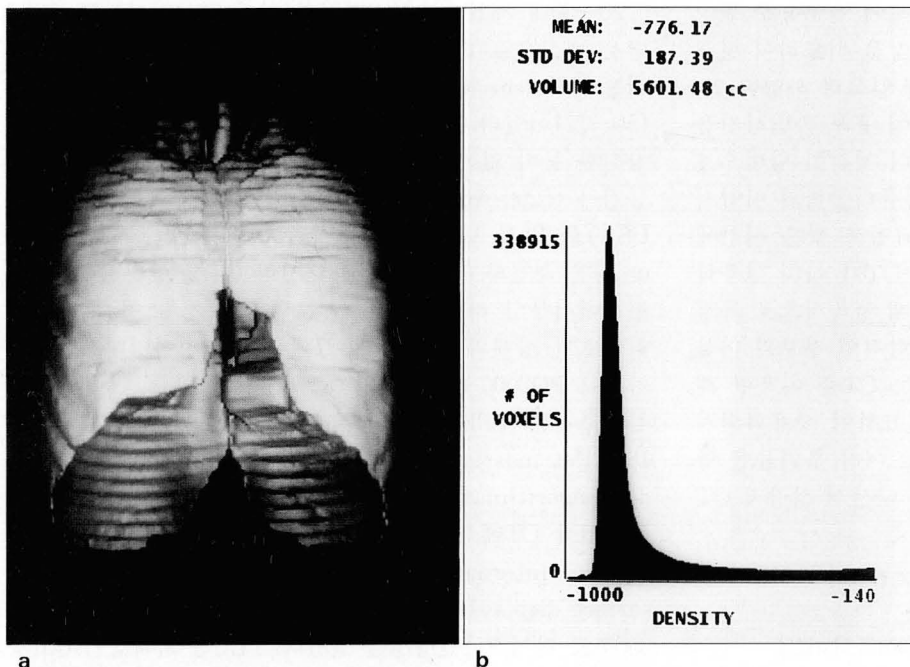


Fig. 1. Methods for measurement of the lung volume.

a. 3D image is reconstructed from full-inspiratory spiral CT at a window range of -1000 HU ~ -150 HU, and then isolation of the lung parenchyma is obtained by shaded surface display (SSD) method.

b. A histogram displaying the lung volume measured by automatic calculation performed on the workstation.

Table 1. Total Lung Capacity, Vital Capacity & Residual Volume : PFT vs Spiral CT

Patient Number	TLC(ml)		VC(ml)		RV(ml)		
	PFT	FI-CT	PFT	FI-CT	PFT	FI-CT	FE-CT
1	6310	6916	4350	4885	1960	2031	2633
2	5420	5601	4080	3940	1340	1661	1068
3	7090	6781	4180	4454	2910	2327	1683
4	7380	7162	4760	5343	2620	1819	3619
5	8790	8715	6290	6197	2500	2518	2477
6	6130	6131	4750	4392	1380	1739	1396
7	7410	7440	5020	5328	2390	2112	3254
8	6480	6282	4900	4433	1586	1849	1541
9	6150	6104	3950	3905	2200	2199	2833
10	4560	4435	3320	2907	1240	1528	934
11	3930	3362	2620	1944	1310	1428	975
12	5200	5294	3530	3797	1670	1497	1638
13	4240	4078	2900	2496	1340	1528	803
14	4390	4194	3090	2828	1300	1366	1429
15	4220	4076	3200	2629	1020	1447	1145
mean	5846	5771	4062	3965	1784	1801	1831
		p=0.279		p=0.366		p=0.843	p=0.757
		r=0.986		r=0.954		r=0.847	r=0.777

PFT: pulmonary function test, TLC: total lung capacity, VC: vital capacity,
FI-CT: full-inspiratory CT, FE-CT: full-expiratory CT.

더불어 기능적인 정보에 대하여 알고자 폐기능검사와 나선식 CT로 얻은 폐용적을 비교하여 나선식 CT의 정량적 측정이 실제로 유용성이 있는지를 알고자 하였다. 또한 이것으로 폐절제 대상환자의 폐절제 후 폐기능치를 수술 전에 예측하는 작업(6, 7)을 단순화할 수 있다. 그리고, 정상인에 대한 연구 결과는 폐절제 환자 연구의 기초자료로써 중요한 의미를 갖는다.

한편 나선식 정량적 CT로 폐용적을 측정 비교하는데 있어서 몇 가지 한계점이 있다. 먼저 동시에 시행하지 않은 CT 촬영과 폐기능검사에서의 피검자가 똑같은 정도로 숨을 들이쉬고 내릴 수 없다는 점이다. 이는 실제로 높은 수치의 차이를 가져왔을 것으로 생각된다. 또한 동일한 피검자가 누워 있을 때와 서 있을 때에 TLC의 변동이 최고 500 ml까지 올 수 있다. 누워 있을 때는 VC는 증가하고 TLC와 RV는 감소하는 것으로 알려져 있다. 이것은 누워 있을 때 복부장기가 횡경막을 머리쪽으로 압박하는 것과 정맥혈 환류의 증가 등으로 폐혈관에 울혈이 와서 상대적으로 폐용적이 감소되기 때문인 것으로 추측하고 있다(8). 저자들의 검사과정에서는 폐기능검사는 앉은 자세에서, 나선식 CT는 누운 자세에서 시행하였기 때문에 두가지 방법으로 얻은 자료의 차이가 있을 수 있다.

Rienmuller 등은 조정할 수 있는 폐기능검사기(controlled spirometry)를 이용하여 VC의 50% 상태에서 정상인, 제한성(restrictive), 폐쇄성(obstructive), 제한성 및 폐쇄성(restrictive and obstructive) 환기장애 환자를

대상으로 고해상 CT를 촬영하여 폐실질의 CT감쇠계수와 폐기능지표(lung function parameter)와의 관계를 알아보았다. VC, diffusing capacity, exercise PaO₂ 등 폐의 기능적인 수치가 -899HU ~ -800HU 범위에서의 도수와 비례관계가 있으며, -699HU보다 높은 감쇠도에 속하는 범위에서는 비례관계가 없었다. 이것은 VC의 50% 상태에서 -699HU이상의 감쇠계수를 보이는 폐실질은 기체교환이 없거나 매우 적어 기능이 없다고 생각해도 무방하다고 하였다(9). 이들의 연구는 VC의 50% 상태에서 측정한 감쇠계수였고 저자들은 100%에 가까운 최대흡기 상태에서 측정하였으므로 기능이 없는 폐실질 감쇠계수와 기능이 있는 감쇠계수 범위는 달라진다. 여러 저자들의 연구에 의하면 폐실질 감쇠계수의 평균치는 흡기상태가 증가될수록 도수 분포도에서 점점 좌측으로 이동되어 더 낮은 평균치의 감쇠계수를 보인다고 하였다(10, 11). 또한 Wu 등은 -910HU ~ -500HU 범위를 total functional lung volume (TFLV)이라 하여 기체교환이 되는 범위라고 하였다(6). 이러한 연구들로 볼 때 기체교환에 관여하는 부피인 VC는, 최대흡기 CT에서 기체 교환이 있는 폐실질의 감쇠계수 범위를 정할 수 있고 또 그 부피를 측정할 수 있을 것이다.

한편 폐기종의 CT 감쇠계수는 많은 연구에 의해 -1000HU와 -900HU사이가 될 것이라 하였고, 최근에 density mask program 등으로 폐기능검사와 비교하여 발표한 -910HU이하가 적절한 경계로 알려져 있다(12-14).

감쇠계수 $-1000\text{HU} \sim -910\text{HU}$ 범위를 배제하면 폐기종과 기관내의 기체를 제외시킬 수 있다. 따라서 저자들은 VC를 측정하는데 있어서 기관내의 공기나 폐기종에 포함되는 공기부분을 제외시키기 위해 최소감쇠계수를 -910HU 를 기준으로 하였다. 최대감쇠계수를 -850HU 부터 -600HU 까지 50HU 단위로 하여 구하고 폐기능 검사와 비교하여 평균치 및 통계학적 의미가 큰 -800HU 를 최대감쇠계수로 정하였다. 대상자 중 다수가 $-910\text{HU} \sim -800\text{HU}$ 사이에서 도수분포가 single peak에 해당되고 폐기능 검사의 VC와 비슷한 수치이지만 $-910\text{HU} \sim -750\text{HU}$ 또는 $-910\text{HU} \sim -700\text{HU}$ 사이의 범위에서 single peak에 해당되고 폐기능 수치와 일치하는 대상자도 있었다. 그러므로, 최대감쇠계수는 개인차가 있을 것이고 그 경계는 -800HU 와 -700HU 사이가 될 것으로 생각된다.

폐기능검사에서 잔류용적은 최대로 숨을 내쉬 후에도 폐 내에 남아 있는 기체량으로 정의하고 있고 이는 기체교환에 관여하지 않는 부피이다. 최대흡기 CT의 TLC에서 VC

를 빼어 구한 RV를 최대호가 CT에서의 RV와 비교하여 보면 최대흡기 CT로 측정된 것이 폐기능검사의 평균치와 더 가까운 수치이고 상관계수도 더 크게 나타났다 (Fig. 2). 최대호가 상태의 CT촬영은 약 25-35초 동안 최대호가 상태에서 숨을 멈추어야 하므로 흡기 CT보다 피검자가 참기가 더욱 힘들며, 방사선 노출도 늘어나고 비용도 증가한다. 또한 누운 상태에서 호기CT를 촬영할 경우 폐의 dependent portion에 울혈이 증가되어 공기가 배출되면서 RV가 더욱 더 줄어들게 된다. 그리고, 최대흡기 CT에서 TLC, VC와 RV를 측정할 수 있으므로 최대호가 CT를 생략할 수 있다.

결론적으로 최대흡기 상태에서의 나선식 CT촬영은 정량적 도구로서 TLC, VC와 RV의 측정에 이용할 수 있다. 그 부피에 해당하는 window범위들은 TLC가 $-1000\text{HU} \sim -150\text{HU}$, VC는 $-910\text{HU} \sim -800\text{HU}$ 이고 RV는 TLC-VC로 측정할 수 있다.

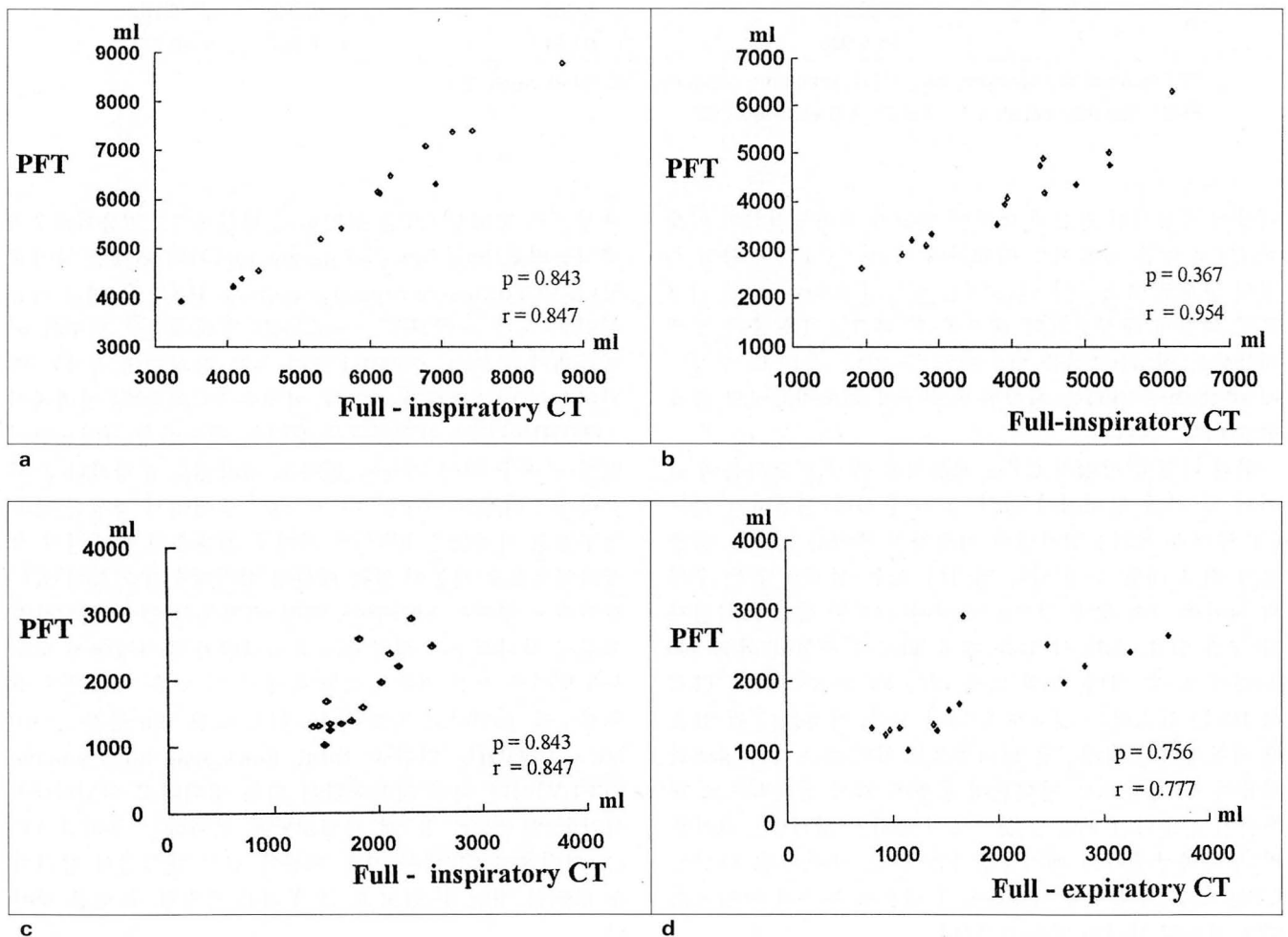


Fig. 2. Scattergrams comparing the lung volume between the spiral CT and the pulmonary function test (PFT).

- a. Total lung capacity
- b. Vital capacity
- c. Residual volume (PFT vs full-inspiratory CT)
- d. Residual volume (PFT vs full-expiratory CT)

참 고 문 헌

- Hurtado A, Fray WW. Studies of total pulmonary capacity and its subdivisions II. Correlation with physical and radiologic measurement. *J Clin Invest* **1933**;12:807-816
- Barnhard HJ, Pierce JA, Joyce JW, Bates JH. Roentgenographic determination of the total lung capacity. A new method evaluated in health, emphysema and congestive heart failure. *Am J Med* **1960**;28:51-60
- Loyd HM, String ST, DuBois AB. Radiographic and plethysmographic determination of total lung capacity. *Radiology* **1966**;86:7-14
- Hedlund LW, Vock P, Effmann EL. Computed tomography of the lung; densitometric studies. *Radiol Clin North Am* **1983**;21:775-788
- 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
- Wu MT, Chang JM, Chiang AA, et al. Use of quantitative CT to predict postoperative lung cancer. *Radiology* **1994**;191:257-262
- 정명진. 임정기. 구건모. 조인철. 연경모. 나선식 정량적 CT: 폐절제 후 폐기능 예측에의 유용성. *대한방사선의학회지* **1995**;33(4):559-564
- 강두희. 생리학. 호흡생리. 개정 4판. 서울:신광, **1992**:3-7
- Rienmuller RK, Behr J, Kalender WA, et al. Standardized quantitative high resolution CT in lung disease. *J Comput Assist Tomogr* **1991**;15:742-749
- Kalender WA, Rienmuller RK, Seissler W, et al. Measurement of pulmonary parenchymal attenuation: use of spirometric gating with quantitative CT. *Radiology* **1990**;175:265-268
- Wegener OH, Koeppel P, Oeser H. Measurement of lung density by computed tomography. *J Comput Assist Tomogr* **1978**;2:263-273
- Muller NL, Staples CA, Miller RR, Abboud RT. "Density mask": an objective method to quantitative emphysema using computed tomography. *Chest* **1988**;94:782-747
- 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
- Kinsella M, Muller NL, Abboud RT, Morison NJ, DaBuncio A. Quantitation of emphysema by computed tomography using a "density mask" program and correlation with pulmonary function tests. *Chest* **1990**;97:315-321

Measurement of Lung Volumes: Usefulness of Spiral CT¹

Ho Yeong Kang, M.D., Byung Kook Kwak, M.D., Sang Yoon Lee, M.D.
Soo Ran Kim, M.D., Shin Hyung Lee, M.D., Chang Joon Lee, M.D., In Won Park, M.D.²

¹Department of Diagnostic Radiology, National Medical Center

²Department of Internal Medicine, Chung-Ang University, College of Medicine

Purpose: To evaluate the usefulness of spiral CT in the measurement of lung volumes.

Materials and Methods: Fifteen healthy volunteers were studied by both spirometer and spiral CT at full inspiration and expiration in order to correlate their results, including total lung capacity (TLC), vital capacity (VC) and residual volume (RV). 3-D images were reconstructed from spiral CT, and we measured lung volumes at a corresponding CT window range; their volumes were compared with the pulmonary function test (paired *t*-test).

Results: The window range corresponding to TLC was from -1000HU to -150HU ($p=0.279$, $r=0.986$), and for VC from -910HU to -800HU ($p=0.366$, $r=0.954$) in full-inspiratory CT. The optimal window range for RV in full-expiratory CT was from -1000HU to -450HU ($p=0.757$, $r=0.777$), and TLC-VC in full-inspiratory CT was also calculated ($p=0.843$, $r=0.847$).

Conclusion: Spiral CT at full inspiration can be used to measure lung volumes such as TLC, VC and RV.

Index Words: Lung, CT

Lung, ventilation

Computed tomography (CT), helical

Address reprint requests to: Ho Yeong Kang, M.D., Department of Radiology, National Medical Center,
18-79, Ulchi-Ro 6 Ga Chung Gu, Seoul 100-196, Korea. Tel. 82-2-260-7324 Fax 82-2-265-3502