

## 만성폐쇄성폐질환에서 흉부 CT의 임상적 이용

아주대학교 의과대학 영상의학교실

박 경 주

### Clinical use of chest CT in chronic obstructive pulmonary diseases

Kyung Joo Park, M.D., Ph.D.

Department of Radiology, Ajou University School of Medicine, Suwon, Korea

Chronic obstructive pulmonary disease (COPD) is commonly a combination of pulmonary emphysema and chronic bronchitis. Emphysema is a pathologically defined disease that can be accurately diagnosed using CT. Furthermore, CT is useful for determination of the subtypes, extent and distribution of emphysema. Objective quantification of emphysema is feasible using CT densitometry of lung parenchyma, that can be used for selection of adequate candidates and monitoring clinical results of various therapeutic measures for severe emphysema. Imaging parameters in CT densitometry should be kept constant in follow up examination for an effective comparison of the results. Chronic bronchitis is diagnosed by symptomatic criteria with nonspecific CT findings. Airway dimensions can be objectively measured using CT, enabling further understanding of pathophysiology of COPD. (Korean J Med 77:407-414, 2009)

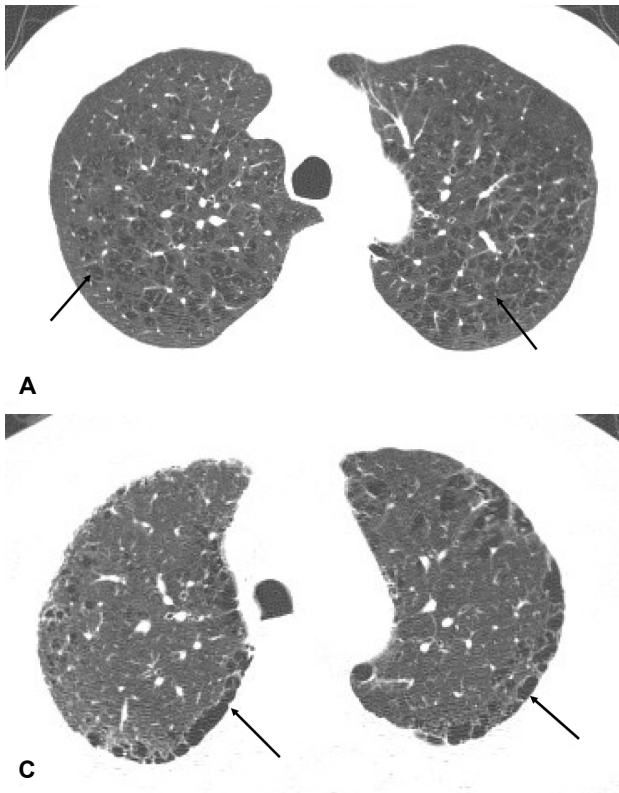
**Key Words:** Pulmonary disease, Chronic obstructive; Pulmonary emphysema; Bronchitis, Chronic; Tomography, X-ray computed; Image processing; Computer-Assisted

만성폐쇄성폐질환(Chronic obstructive pulmonary disease; COPD)은 기침과 가래, 호흡곤란 등의 임상증상이 있는 환자에서 폐기능 검사 소견이 기류폐쇄(airflow obstruction)를 보일 때 진단된다<sup>1)</sup>. COPD는 이와 같이 폐의 기능적인 이상으로 정의되는 질환이나, 병리적으로는 주로 폐기종(emphysema)과 만성기관지염(chronic bronchitis)으로 이루어지며, 이 두 소견이 COPD의 증상발현에 기여하는 정도는 매우 다양하다. CT는 흉부 X선 촬영과 더불어 해부학적인 변화를 보여주는 영상검사이다. 따라서 이 글에서는 COPD의 CT 영상 진단에 대해 알아보기 위해서 병리적 요소인 폐기종과 만성기관지염의 두 가지로 나누어 접근하고자 한다.

### 폐기종

폐기종은 ‘종말세기관지 이하 말초부위의 공기공간이 분명한 섬유화가 없이 폐포벽 파괴를 동반하여 비정상적으로 영구적인 확장’을 보이는 병리 소견으로 정의되는 폐질환이다<sup>2)</sup>. 폐기종은 폐용적의 증가, 환기감소, 일산화탄소확산능의 감소 등을 가져온다. 그러나 폐기능 검사는 폐경기증의 진단에 민감도가 높지 않은 것으로 알려져 있다. 폐기능검사의 측정치는 조직병리에서 폐기종의 해부학적 범위와 상관관계가 높지 않으며, 전체 폐실질의 약 30%까지 폐기종이 차지하고 있어도 폐기능 검사에서 폐쇄성 소견을 보이지 않고, 정상범위로 나타날 수 있다고 한다<sup>3)</sup>.

폐기종의 주된 흉부 X선 소견은 폐의 과도팽창(hyperinflation)과 폐조직파괴이다. 가로막의 위치가 낮고 모양이



**Figure 1.** In patients with emphysema, areas of abnormally low attenuation are shown without visible walls on CT scans. Centrilobular emphysema (A) is characterized by multiple small focal areas of low attenuation with centrilobular location (arrows), containing central dot representing centrilobular core. In patients with panlobular emphysema (B), CT shows confluent areas of homogenous lower attenuation that involve lower lung zones more severely. Note decrease in diameter and number of pulmonary vessels in severely involved areas. Paraseptal emphysema (C) involves periphery of secondary lobule, most severely in a subpleural location (arrows).

납작하게 되며, 갈비가로막각(costophrenic angle)이 둔탁해지고, 흉골뒤공간이 넓고, 심장 음영이 좁고 길게 나타나는 변화가 과도팽창의 소견이다. 큰공기집(bullae)이 보이거나 폐혈관의 수가 감소하고 가늘어지는 소견은 폐조직파괴를 나타낸다<sup>4,6)</sup>. 이와 같은 이상소견이 흉부 X-선 사진에서 확연하게 나타나는 경우도 있으나 경미하거나 중등도의 폐기종은 흉부 X-선에서 진단되기가 무척 어려우며 그 정확도도 낮다. 또한 흉부 X-선 소견은 폐기종 검사와도 잘 호응이 되지 않는 경우가 많다<sup>3,6)</sup>.

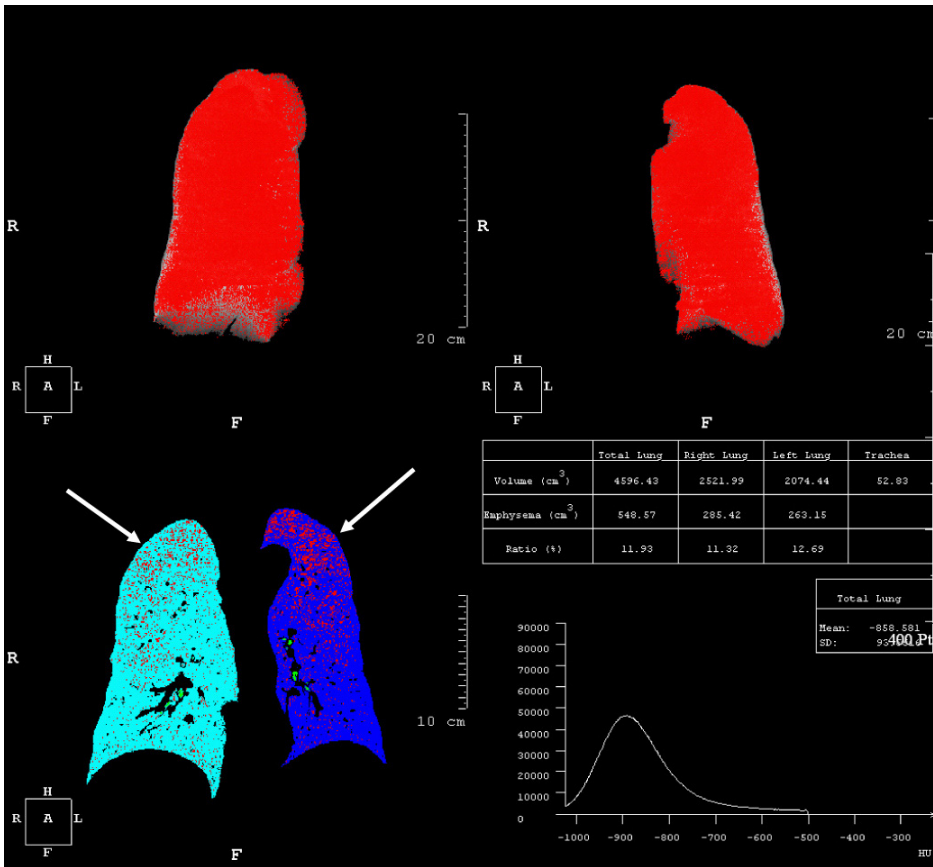
### 1. 폐기종의 CT 진단

CT는 폐기종의 진단에 가장 민감도가 높은 영상 검사이다. 폐기종을 가진 부위는 정상폐실질에 비해 낮은 음영(low density)으로 나타나고 폐혈관의 굵기와 수가 감소하며 폐용적의 증가를 보인다<sup>6,7)</sup>. 흔히 고해상 CT라고 하는 1.5 mm 이하의 얇은 절편을 사용해서 검사를 하면 낮은 음영이 더 뚜렷하게 나타나고 더 정확한 진단이 가능하다(그림 1). CT는 폐기능 검사에 비해 폐기종의 진단에 더 정확하다. CT를 사용해서 폐기종이 있는지와 어느 정도 심한지를 평가하면

폐기능 검사보다 병리 소견과의 연관성이 더 높게 나타난다<sup>8)</sup>. 또한 증상이 없거나 임상적으로 폐기종으로 진단되지 않은 환자의 상당수에서도 CT에서는 확실한 폐기종을 보이는 경우가 많다<sup>9)</sup>.

CT는 폐기종의 종류를 평가하는 데도 유용하다. 중심소엽형(centrilobular type)은 수 mm에서 1 cm 크기에 이르는 원형모양의 저음영(low density) 영역이 소엽(lobule) 중심에 다발성으로 나타난다. 이 저음영의 중심에는 흔히 세동맥(arteriole)이 미세한 점으로 나타나 특징적인 모양을 이룬다(그림 1A). 범소엽형(panlobular type)은 소엽 전체를 침범하는 저음영으로 나타나고 폐 전체에 분포하거나 하엽에 심한 분포를 보인다(그림 1B). 소엽간막주변형(paraseptal type)은 2차 소엽(secondary lobule)의 주변부 또는 흉막하부위(subpleural area)를 침범하고 상엽에 분포한다(그림 1C).

CT는 기관지천식이나 폐쇄성기관지염(obstructive bronchiolitis) 등 다른 원인의 폐쇄성폐질환과 폐기종을 구별하는데도 유용하다<sup>10)</sup>. 최근에는 얇은 절편 CT를 사용하여 폐의 자동적인 구조분석(textural analysis)을 통해 여러 가지의 다양한 폐쇄성폐질환의 감별이 가능하다는 보고도 있다<sup>11)</sup>.



**Figure 2.** A diagram is generated for CT quantification of emphysema. Two images in upper row are separately segmented right and left lungs. Highlighted pixels representing low attenuation areas (arrows) are shown in left lower image. Results of histogram analysis are shown in right lower image.

## 2. CT를 이용한 폐기종의 정량화

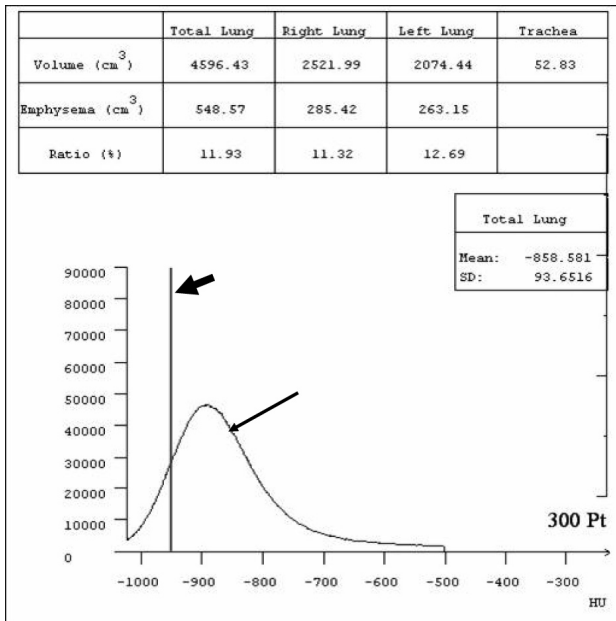
최근 심한 폐기종 환자의 치료에 새로운 방법, 즉 폐이식이나 폐절제술,  $\alpha$ 1-antitrypsin 결핍에 동반된 폐기종의 증강 치료법(augmentation therapy) 등이 적용되고 있다. 이러한 치료방법은 환자의 선택이나 치료효과의 판단 등을 위해 폐기종의 정량화를 필요로 한다. 위에 언급했듯이 CT는 폐기종의 진단에 가장 정확한 검사이므로 폐기종의 정량화에도 효과적일 것으로 기대할 수 있을 것이다.

초기에는 CT영상에서 나타나는 저음영 영역의 범위를 판독자가 점수화하는 시각적 방법(visual scoring method)이 이용되었다. Goddard 등<sup>12)</sup>은 각 절편영상에서 폐기종 영역이 폐에서 차지하는 비율에 따라 25% 미만을 1, 25~50%를 2, 50~75%를 3, 75% 이상을 4로 점수화한 다음 각 절편영상에서 양측 폐의 점수를 합산한 값이 최대로 가능한 수치에서 차지하는 비율을 폐기종 지수로 하였다. 이렇게 하여 얻은 결과는 폐기능 검사나 병리소견과 높은 상관관계를 보여 폐기종 정량화에 정확한 방법으로 보고되었으나<sup>8,12,13)</sup>, 이러한 시각적 방법은 판독자에 따른 변화가 불가피하기 때문에 좀

더 객관적인 방법을 필요로 하게 되었다.

컴퓨터를 이용한 정량화는 CT 영상을 이루는 각 화소(pixel)의 하우스필드 값(Hounsfield Unit, HU)을 측정함으로써 이루어진다. 폐기종을 가진 폐는 CT영상에서 저음영 영역으로 나타나고 일정한 HU보다 낮은 값을 가질 것이라는 것이다. Hayhurst 등<sup>14)</sup>이 최초로 이러한 방법을 시도하여 폐기종을 가진 환자는 -900 HU에서 -1,000 HU 범위의 화소수가 정상인보다 더 많다고 보고하였다. Müller 등은 일정한 범위의 HU에 해당되는 화소를 색깔을 다르게 하여 나타내주는 'Density Mask' 프로그램을 사용하여 폐기종을 정량화하였고, 이렇게 하여 얻은 값이 병리 소견에서 얻은 값과 높은 상관관계가 있으며<sup>15)</sup>, 이 방법이 폐기능 검사의 결과와도 상관관계가 높음을 보여주었다<sup>16)</sup>.

현재는 컴퓨터를 이용하여 자동화된 다양한 방법들이 폐기종의 정량화에 사용되고 있다<sup>17,22)</sup>. 이러한 컴퓨터 프로그램은 최근의 CT 장비에서는 함께 제공되는 워크스테이션에 내장 되어있는 경우가 많아 추가비용 없이 쉽게 이용할 수가 있다. CT 정량화는 대개 세 가지 단계로 이루어지는데, 1)



**Figure 3.** A histogram of pixel values of the lungs (thin arrow) is generated for calculation of parameters of emphysema quantification. Total and each lung volumes, emphysema volume, ratio, mean lung density are displayed. Emphysema volume is calculated using a low density threshold, -950 HU in this particular case (thick arrow in histogram).

-200 HU부터 -500 HU까지의 역치값(threshold)을 사용하여 흉벽이나 종격 등으로부터 폐를 분할하고 2) 폐를 구성하는 모든 화소의 HU 값의 분포에 따른 히스토그램을 얻고 3) 폐기종을 정량화하는 파라미터를 계산하는 순서이다(그림 2). 가장 흔하게 사용되는 파라미터는 폐기종의 ‘상대적 면적(relative area)’으로서 전체 폐면적에서 일정 역치 이하의 저음영 영역의 면적이 차지하는 비율을 나타내는 수치이다(그림 3). 폐기종을 나타내는 저음영 영역을 정상 폐와 구분하는 역치는 -900 HU에서 -980 HU까지 다양하게 사용된다. 과거에 10 mm 두께의 CT영상을 이용했을 때 저음영 역치는 흔히 -900 또는 -910 HU가 사용되었다. 1 mm 두께의 얇은 절편 영상에서는 -950 HU를 사용하는 것이 병리 소견과 가장 연관성이 높다고 하였으나<sup>22,23)</sup>, 최근의 다절편 CT를 사용했을 때는 -960 또는 -970, -980 HU가 정확하다고 하며<sup>24,25)</sup>, -950과 -960 HU가 폐기능 검사 결과와 호응도가 높다고 한다<sup>26)</sup>. 백분위점(percentile point)도 정량화에 사용되는 파라미터인데 특별히 지정된 백분위(%)의 범위에 포함되는 폐의 화소가 그보다 낮은 HU를 보이고 나머지 화소는 그보다 높은 HU를 가지는 경계의 HU 값을 나타내는 것으로 15% 또는 1% 백분위점이 많이 사용된다.

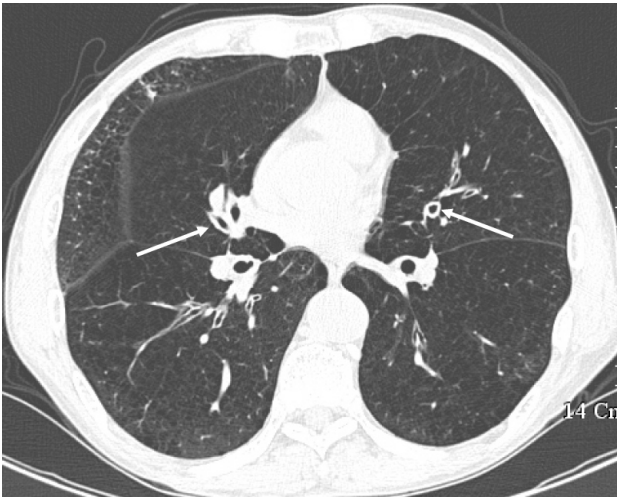
폐실질의 음영도 측정(densitometry)에는 CT 촬영 기술상의 여러 요인이 결과에 영향을 줄 수 있다. CT 장비의 종류, kVp, mA, 절편두께, 영상재구성 연산법(reconstruction algorithm), 정맥조영제 사용 여부 등이 폐실질의 음영에 영향을 준다. 따라서 CT를 이용하여 폐기종의 정량화를 시도할 때는 이러한 모든 기술적인 요인들을 일정하게 유지하여야 한다. CT 장비는 제조사나 모델에 따라 HU가 다양하게 변화할 수 있으므로 물이나 공기 팬텀을 사용하여 주기적으로 정도관리가 이루어져야 일관된 값을 얻을 수 있다<sup>27,28)</sup>.

CT를 시행할 때는 환자의 방사선 피폭량을 되도록 낮추는 것이 좋을 것이다. 그러나 방사선량이 적으면 영상의 잡음(noise)이 증가되어 폐실질의 음영도에 영향을 주게 된다. 일반적으로 흉부 CT 촬영은 100 mA 이상을 사용한다. 그러나 20-40 mA까지의 저선량 CT로도 폐기종의 정량화가 가능하다고 알려져 있고<sup>25)</sup>, 이런 경우에 주의할 점은 이러한 촬영기법을 일정하게 유지해야만 비교가 가능하다는 것이다. 저선량의 CT에서 얻은 결과를 일반적인 방법을 사용한 경우와 비교할 수는 없다.

절편두께는 얇을수록 폐실질의 음영이 감소된다. 또한 서로 다른 재구성연산법을 사용하면 폐공기종의 범위가 15%까지 차이가 날 수 있다고 한다<sup>29)</sup>. 정맥조영증강을 시행하면 폐음영의 증가가 있고 따라서 저음영 영역이 감소된다. 그러나 폐기종이 있는 폐영역은 정상부위보다 조영증강의 정도가 더 낮다고 알려져 있다<sup>19)</sup>.

환자의 환기용적도 폐음영에 영향을 준다. 흡기 때보다 호기 때에 폐음영은 증가되고 정상폐와 폐기종 영역의 대조가 심해진다<sup>20)</sup>. 따라서 CT 촬영을 할 때 폐활량을 측정하면서 일정한 환기용적을 유지하는 방법이 사용되기도 하나 절차가 번거롭기 때문에 폐활량 측정 없이 최대 흡기 때에 촬영하는 방법을 일반적으로 사용한다. Gierada 등<sup>22)</sup>은 최대흡기 때에 촬영된 CT로 폐기종을 정량화하면 결과가 일관되게 나오고, 폐활량 측정을 하면서 CT를 시행하더라도 큰 이점이 없었다고 보고하였다. 호기 때 촬영의 역할에 대해서는 아직도 논란이 있다. Gevenois 등<sup>23)</sup>은 병리 소견과 비교했을 때 흡기 때의 CT가 호기 때의 CT보다 폐기종의 정량화에 더 정확한 결과를 보였다고 하였고, 호기 때의 저음영 영역은 폐포벽의 파괴보다는 공기포획(air-trapping)을 반영할 것이라고 보았다. 그러나 호기 때의 영상을 이용한 정량화가 폐기능 검사와 연관성이 더 높다는 보고도 있다<sup>30,31)</sup>.

폐기종의 CT 정량화는 폐용적감소술(lung volume reduction surgery, LVRS)에서 대상 환자의 선택이나 평가, 임상적



**Figure 4.** Thin section CT image in a COPD patient shows bronchial wall thickening (arrows) and low attenuation areas in lungs.

결과를 판정하는 데도 이용될 수 있다. Gierada 등<sup>32)</sup>은 양측 폐의 LVRS를 시행한 46명의 환자에서 CT 정량화의 다양한 파라미터가 임상적 결과와 연관성이 높았고, 폐기종의 분포와 심한 정도가 LVRS의 결과를 예측하는 데 도움을 준다고 하였다. 폐의 상부나 하부에 심한 분포를 가지는 폐기종 환자의 경우에 미만성 분포를 가지는 경우보다 LVRS에 의한 성과가 더 좋은 것으로 알려져 있다<sup>33)</sup>.

CT 정량화는  $\alpha 1$ -antitrypsin 결핍에 동반된 폐기종의 증강 치료법(augmentation therapy)의 효과를 평가하는 데도 이용되었는데, Dirksen 등<sup>34)</sup>은 히스토그램분석을 통해 15% 백분위점을 얻어 이 방법이 폐기종의 진행을 찾아내는 데 폐기능검사보다 두 배가 민감하다고 하였다.

폐종양으로 폐절제가 시행되는 환자에서 수술 후 폐기능을 예측하는 데도 CT 정량화가 이용될 수 있다. 수술 전 폐기종의 정량화로 계산된 FEV<sub>1</sub>을 수술 후의 결과와 비교했을 때 높은 정확도를 보였고, 관류스캔이나 관류 MRI의 결과와도 호응도가 높다고 보고되었다<sup>35,36)</sup>.

### 만성기관지염

만성기관지염은 만성적이고 과도한 기침 가래를 가지는 임상증상에 의해 진단되는 질환으로 병리 소견에서는 기관지벽 비후, 평활근증식, 염증, 점액선 비대, 염증과 섬유화에 의한 소기도 폐쇄 등을 보인다<sup>37)</sup>. 그러나 방사선 영상에서 뚜렷한 이상 소견을 보이는 경우는 드물며 폐기종이 동반되

지 않은 환자는 대부분 정상 흉부 X-선 소견을 보인다. 간혹 기관지벽 비후와 소위 ‘dirty chest’라고 하는 폐실질의 음영 증가 소견이 있을 수 있으나 비특이적이고 미세한 변화인 경우가 많다.

#### 1. 만성기관지염의 CT 진단

만성기관지염은 CT에서도 비특이적 소견을 보인다. 병리 소견과 같이 기관지벽의 비후가 나타나고 세기관지의 이상을 보여주는 ‘tree-in-bud’ 양상의 중심소엽 음영을 보일 수 있다(그림 4). 폐기종이 주된 소견으로 나타나거나 호기 시 촬영에서 공기포획이 보일 수도 있다. 그러나 이러한 소견은 모두 비특이적이며 만성기관지염이 CT로 진단되기는 어렵다. CT 또한 흉부 X-선과 같이 만성기침 가래가 있는 환자에서 다른 원인의 질환을 감별하는 데 더 큰 역할이 있다고 할 수 있을 것이다<sup>5)</sup>.

#### 2. 기도 크기의 CT 측정

앞에서 기술한 바와 같이 폐기종은 폐기능 검사의 결과와 잘 호응되지 않으며, COPD 환자에서의 기류제한(airflow limitation)에 소기도(small airway) 질환이 더 의미있는 영향을 준다고 알려져 있다. 따라서 CT를 사용하여 기도벽 비후(airway wall thickening)를 측정하려는 연구들이 있었고, 초기에는 CT 영상에서 판독자가 직접 수기적으로 측정하는 방법이 사용되었다. Remy-Jardin 등<sup>38)</sup>은 이러한 방법으로 정상 폐기능 검사 소견을 가진 건강한 흡연자의 33%에서 CT상 기관지벽 비후를 발견할 수 있었다고 한다. 그러나 이러한 수기적인 방법은 판독자 간에 변이도가 크고 오차가 많은 단점이 있다.

컴퓨터 프로그램을 이용하여 CT 영상에서 더 객관적으로 기도벽의 두께를 측정하는 방법이 연구되어 많은 성과가 보고되었다<sup>39,43)</sup>. 가장 흔히 사용되는 것은 ‘full-width-at-half-maximum’ 방법이다<sup>39)</sup>. 이것은 네 단계의 작업이 필요한데 먼저 -500 HU 정도의 역치를 사용하여 기도의 내강(lumen)을 구분하고 단경과 장경을 측정하여 내강의 중심점을 정한다. 다음으로는 이 중심점에서 360도를 돌려가며 다수의 부챗살 모양의 선을 설정한 다음 이 선상의 X-선 감쇄값을 측정하고 선이 기도벽을 횡단하는 부위에서 ‘full-width-at-half-maximum’ 법을 사용하여 기도벽 두께를 측정한다. 이 방법은 기도벽의 두께가 크게, 기도 내강은 작게 측정되는 경향이 있는 것으로 보고되었고, 이외에도 다른 다양한 기도 측정방법들이 사용되고 있다<sup>40,41)</sup>.

Nakano 등<sup>39)</sup>은 114명의 흡연자에서 우상엽의 꼭대기 구역(apical segment)에서 기관지벽의 두께를 측정하였다. 위에 기술한 방법을 사용하여 측정된 기관지벽의 두께는 FEV<sub>1</sub>의 감소와 높은 연관성을 보였으며, 기관지벽의 두께는 COPD 환자 중에서 만성 기관지염의 증상을 가진 환자에서 그런 증상이 없는 환자보다 더 심하게 두껍다고 보고하였다.

COPD에서의 기도협착은 2 mm 미만의 내측직경을 가진 막성기도(membranous airway)에서 주로 일어난다고 알려져 있다. 그러나 이와 같이 작은 기도를 CT에서 측정하려면 오차가 크기 때문에 정확한 측정이 어렵다. Nakano 등은 CT를 사용하여 큰 크기의 기도에서 측정된 벽면적의 비율이 같은 환자의 조직소견에서 측정된 세기관지 벽면적의 비율과 의미 있는 상관관계가 있다고 보고하였다<sup>42)</sup>. 따라서 CT로 두께 측정이 가능한 큰 기도의 벽비후나 협착 정도가 소기도의 염증 정도를 정량화할 수 있는 지표로 사용할 수 있음을 보여주었다.

MDCT를 사용하면 흉부전체에서 얇은 절편의 영상을 얻을 수 있고 상하방향에서도 축(axial) 방향과 같은 해상도를 가지는 등방성 복셀(isotropic voxel)이 얻어진다. Hasegawa 등<sup>43)</sup>은 곡면다면영상(curved multiplanar reformat)을 사용하여 폐의 부위나 기도의 방향에 상관없이 2 mm 크기까지의 기도의 단면영상을 얻어 벽두께를 측정할 수 있었고, 기도의 크기가 작을수록 FEV<sub>1</sub>과의 상관관계가 높았다고 보고하였다.

최근의 보고에서는 CT를 사용하여 폐기종과 기도변화의 범위를 모두 정량화하면 폐실질의 파괴가 주요 요인인 COPD 환자와 기도질환이 주요 원인인 환자를 구분할 수 있다고 한다<sup>44)</sup>. 또한 이러한 CT 정량화 수치를 객담 내의 호중구 수(neutrophil count)와 비교했을 때 말단기도의 변화가 폐기종보다 더 높은 상관관계를 보였다고 하여<sup>45)</sup>, COPD 환자에서 CT를 사용하여 기류제한의 병리적인 변화를 측정할 수 있는 방법을 제시하고 있다.

## 요 약

COPD는 흔히 폐공기증과 만성 기관지염이 혼합되어 나타난다. 폐기종은 병리적으로 정의되는 질환으로서 CT를 사용하여 정확한 진단이 가능하다. 또한 폐기종의 종류, 범위와 분포 등의 특성을 파악하는 데도 유용하다. CT를 이용하여 폐실질의 음영도 측정을 시행하면 객관적인 폐기종의 정량화가 가능하며, 중증의 폐기종에 대한 다양한 치료방법을 적용하기 위한 환자의 선택이나 치료결과를 추적하기 위한

정보를 얻을 수 있다. 검사결과의 의미 있는 비교를 위해서는 추적 CT를 시행할 때 항상 같은 영상 파라미터를 사용해야 한다. 만성기관지염은 임상증상으로 진단되며 CT 소견은 비특이적이다. CT를 사용하여 기도벽 비후를 객관적으로 측정할 수 있고, 이를 통해 COPD 환자에서 병태생리의 더 깊은 이해가 가능하리라고 기대된다.

**중심 단어:** 만성폐쇄성폐질환; 폐기종; 만성기관지염; X선컴퓨터단층촬영; 컴퓨터를 이용한 영상처리

## REFERENCES

- 1) American Thoracic Society / European Respiratory Society Task Force. *Standards for the diagnosis and management of patients with COPD [Internet]. Version 1.2. New York: American Thoracic Society; 2004 [updated 2005 September 8]. Available from: <http://www.thoracic.org/go/copd>.*
- 2) National Heart, Lung, and Blood Institute. *The definition of emphysema. Report of a National Heart, Lung, and Blood Institute. Division of Lung Diseases Workshop. Am Rev Respir Dis 132:182-185, 1985*
- 3) Pratt PC. *Role of conventional chest radiography in diagnosis and exclusion of emphysema. Am J Med 82:998-1006, 1987*
- 4) Kazerooni EA, Whyte RI, Flint A, Martinez FJ. *Imaging of emphysema and lung volume reduction surgery. Radiographics 17:1023-1036, 1997*
- 5) Webb WR. *Radiology of obstructive pulmonary disease. AJR Am J Roentgenol 169:637-647, 1997*
- 6) Thurlbeck WM, Müller NL. *Emphysema: definition, imaging, quantification. AJR Am J Roentgenol 163:1017-1025, 1994*
- 7) Stern EJ, Frank MS. *CT of the lung in patients with pulmonary emphysema: diagnosis, quantification, and correlation with pathologic and physiologic findings. AJR Am J Roentgenol 162:791-798, 1994*
- 8) Bergin CJ, Muller NL, Nichols DM, Lillington G, Hogg JC, Mullen B, Grymaloski MR, Osborne S, Paré PD. *The diagnosis of emphysema: a computed tomographic pathologic correlation. Am Rev Respir Dis 133:541-546, 1986*
- 9) Sashidhar K, Gulati M, Gupta D, Monga S, Suri S. *Emphysema in heavy smoker with normal chest radiography: detection and quantification by HRCT. Acta Radiol 43:60-65, 2002*
- 10) Copley SJ, Wells AU, Muller NL, Rubens MB, Hollings NP, Cleverley JR, Milne DG, Hansell DM. *Thin-section CT in obstructive pulmonary disease: discretionary value. Radiology 223:812-819, 2002*
- 11) Chabat F, Yang GZ, Hansell DM. *Obstructive lung diseases: texture classification for differentiation at CT. Radiology 228:871-877, 2003*

- 12) Goddard PR, Nicholson EM, Laszlo G, Watt I. *Computed tomography in pulmonary emphysema. Clin Radiol* 33:379-387, 1982
- 13) Sakai F, Gamsu G, Im JG, Ray CS. *Pulmonary function abnormalities in patients with CT-determined emphysema. J Comput Assist Tomogr* 11:963-968, 1987
- 14) Hayhurst MD, McNee W, Flenley DC, Wright D, McLean A, Lamb D, Wightman AJ, Best J. *Diagnosis of pulmonary emphysema by computerized tomography. Lancet* 2:320-322, 1984
- 15) Müller NL, Staples CA, Miller RR, Abboud RT. "Density mask": an objective method to quantitate emphysema using computed tomography. *Chest* 94:782-787, 1988
- 16) Kinsella M, Müller NL, Abboud RT, Morrison NJ, DyBuncio A. *Quantitation of emphysema by computed tomography using a "density mask" program and correlation with pulmonary function test. Chest* 97:315-321, 1990
- 17) Park KJ, Bergin CJ, Clausen JL. *Quantification of emphysema with three-dimensional CT densitometry: comparison with two-dimensional analysis, visual emphysema scores, and pulmonary function test results. Radiology* 211:541-547, 1999
- 18) Kemerink GJ, Lamers RJ, Thelissen GR, van Engelshoven JM. *Scanner conformity in CT densitometry of the lungs. Radiology* 197:749-752, 1995
- 19) Adams H, Bernard MS, McConnochie K. *An appraisal of CT pulmonary density mapping in normal subjects. Clin Radiol* 43:238-242, 1991
- 20) Lamers RJ, Thelissen GR, Kessels AG, Wouters EF, van Engelshoven JM. *Chronic obstructive pulmonary disease: evaluation with spirometrically controlled CT lung densitometry. Radiology* 193:109-113, 1994
- 21) Knudson RJ, Standen JR, Kaltenborn WT, Knudson DE, Rehm K, Habib MP, Newell JD. *Expiratory computed tomography for assessment of suspected pulmonary emphysema. Chest* 99:1357-1366, 1991
- 22) Gierada DS, Yusen RD, Pilgram TK, Crouch L, Slone RM, Bae KT, Lefrak SS, Cooper JD. *Repeatability of quantitative CT indexes of emphysema in patients evaluated for lung volume reduction surgery. Radiology* 220:448-454, 2001
- 23) Gevenois PA, De Vuyst P, Sy M, Scillia P, Chaminade L, de Maertelaer V, Zanen J, Yernault JC. *Pulmonary emphysema: quantitative CT during expiration. Radiology* 199:825-829, 1996
- 24) Madani A, Zanen J, de Maertelaer V, Gevenois PA. *Pulmonary emphysema: objective quantification at multi-detector row CT-comparison with macroscopic and microscopic morphometry. Radiology* 238:1036-1043, 2006
- 25) Madani A, De Maertelaer V, Zanen J, Gevenois PA. *Pulmonary emphysema: radiation dose and section thickness at multidetector CT quantification-comparison with macroscopic and microscopic morphometry. Radiology* 243:250-257, 2007
- 26) 이현주, 이영경, 서준범, 김남국, 오연목, 이상도. 만성폐쇄성 폐질환 환자를 대상으로 흡기와 호기 시에 시행된 전산화단층촬영에서 폐기종지수를 구하기 위한 역치에 대한 연구: 폐기능검사와의 연관도에의 영향. *대한영상의학학회지* 59:99-108, 2008
- 27) Parr DG, Stoel BC, Stolk J, Nightingale PG, Stockley RA. *Influence of calibration on densitometric studies of emphysema progression using computed tomography. Am J Respir Crit Care Med* 170:883-890, 2004
- 28) Newell JD Jr. *Quantitative computed tomography of lung parenchyma in chronic obstructive pulmonary disease: an overview. Proc Am Thorac Soc* 5:915-918, 2008
- 29) Boedeker KL, McNitt-gray MF, Rogers SR, Truong DA, Brown MS, Gjertson DW, Goldin JG. *Emphysema: effect of reconstruction algorithm on CT imaging measures. Radiology* 232:295-301, 2004
- 30) Camiciottoli G, Bartolucci M, Maluccio NM, Moroni C, Mascalchi M, Giuntini C, Pistolesi M. *Spirometrically gated high-resolution CT findings in COPD: lung attenuation versus lung function and dyspnea severity. Chest* 129:558-564, 2006
- 31) Zaporozhan J, Ley S, Eberhardt R, Weinheimer O, Iliyushenko S, Herth F, Kauczor HU. *Paired inspiratory/expiratory volumetric thin-slice CT scan for emphysema analysis: comparison of different quantitative evaluations and pulmonary function test. Chest* 128:3212-3220, 2005
- 32) Gierada DS, Slone RM, Bae KT, Yusen RD, Lefrak SS, Cooper JD. *Pulmonary emphysema: comparison of preoperative quantitative CT and physiologic index values with clinical outcome after lung volume reduction surgery. Radiology* 205:235-242, 1997
- 33) Kazerooni EA. *Radiologic evaluation of emphysema for lung volume reduction surgery. Clin Chest Med* 20:845-861, 1999
- 34) Dirksen A, Dijkman JH, Madsen F, Stoel B, Hutchison DC, Ulrik CS, Skovgaard LT, Kok-Jensen A, Rudolphus A, Seersholm N, Vrooman HA, Reiber JH, Hansen NC, Heckscher T, Viskum K, Stolk J. *A randomized clinical trial of alpha(1)-antitrypsin augmentation therapy. Am J Respir Crit Care Med* 160:1468-1472, 1999
- 35) Wu MT, Chang JM, Chiang AA, Lu JY, Hsu HK, Hsu WH, Yang CF. *Use of quantitative CT to predict postoperative lung function in patients with lung cancer. Radiology* 191:257-262, 1994
- 36) Ohno Y, Koyama H, Nogami M, Takenaka D, Matsumoto S, Yoshimura M, Kotani Y, Sugimura K. *Postoperative lung function in lung cancer patients: comparative analysis of predictive capability of MRI, CT, and SPECT. AJR Am J Roentgen* 189:400-408, 2007
- 37) Shaker SB, Dirksen A, Bach KS, Mortensen J. *Imaging in chronic obstructive pulmonary disease. COPD* 4:143-161, 2007
- 38) Remy-Jardin M, Edme JL, Boulenguez C, Sobaszek A, Edme JL, Furon D. *Morphologic effects of cigarette smoking on airways and pulmonary parenchyma in healthy adult volunteers: CT evaluation and correlation with pulmonary function tests. Radiology* 186:107-115, 1993

- 39) Nakano Y, Muro S, Sakai H, Hirai T, Chin K, Tsukino M, Nishimura K, Itoh H, Paré PD, Hogg JC, Mishima M. *Computed tomographic measurements of airway dimensions and emphysema in smokers: correlation with lung function. Am J Respir Crit Care Med* 162:1102-1108, 2000
- 40) King GG, Muller NL, Whittall KP, Xiang QS, Pare PD. *An analysis algorithm for measuring airway lumen and wall areas from high-resolution computed tomographic data. Am J Respir Crit Care Med* 161:574-580, 2000
- 41) Berger P, Perot V, Desbarats P, Tunon-de-Lara JM, Marthan R, Laurent F. *Airway wall thickness in cigarette smokers: quantitative thin-section CT assessment. Radiology* 235:1055-1064, 2005
- 42) Nakano Y, Wong JC, de Jong PA, Buzatu L, Nagao T, Coxson HO, Elliott WM, Hogg JC, Paré PD. *The prediction of small airway dimensions using computed tomography. Am J Respir Crit Care Med* 171:142-146, 2005
- 43) Hasegawa M, Nasuhara Y, Onodera Y, Makita H, Nagai K, Fuke S, Ito Y, Betsuyaku T, Nishimura M. *Airflow limitation and airway dimensions in chronic obstructive pulmonary disease. Am J Respir Crit Care Med* 173:1309-1315, 2006
- 44) Orlandi I, Moroni C, Camiciottoli G, Bartolucci M, Pistolesi M, Villari N, Mascalchi M. *Chronic obstructive pulmonary disease: thin-section CT measurement of airway wall thickness and lung attenuation. Radiology* 234:604-610, 2005
- 45) O'Donnell RA, Peebles C, Ward JA, Daraker A, Angco G, Broberg P, Pierrou S, Lund J, Holgate ST, Davies DE, Delany DJ, Wilson SJ, Djukanovic R. *Relationship between peripheral airway dysfunction, airway obstruction, and neutrophilic inflammation in COPD. Thorax* 59:837-842, 2004