

현장 적용이 가능한 X선 CT 시스템 개발 II* - 밀도분포를 이용한 목재의 CT영상 구성 -

김 광 모*² · 이 상 준*² · 이 전 제*^{2†}

Development of Portable X-ray CT System II* - CT Image Reconstruction of Wood using Density Distribution -

Kwang-Mo Kim*² · Sang-Joon Lee*² · Jun-Jae Lee*^{2†}

요 약

X선은 강한 투과성과 직진성으로 인하여 비파괴 검사법으로써 다양한 분야에서 활용되고 있다. 본 연구에서는 고건축물과 같은 목조 건축물에 사용되고 있는 구조부재의 열화를 현장에서 탐지할 수 있는 비파괴 검사법을 개발할 목적으로 X선 CT시스템의 적용가능성을 검토하였다. 먼저 이전 연구의 결과를 바탕으로 CT영상을 구성하는 체계를 확립하고, 얻어진 CT영상을 실제 부재의 단면 형태와 비교함으로써 개발된 시스템의 적용가능성을 확인하였다. 개발된 X선 CT시스템의 적용을 통해 결함의 형태와 크기, 위치뿐만 아니라 결함에서의 밀도 또한 비교적 정확하게 탐지할 수 있음이 확인되었다. 이러한 결과는 건축물에서 사용되고 있는 목재 부재에 열화가 발생하였을 경우에, 열화 발생의 원인을 파악하고 그에 따른 효과적인 대처방안을 수립하는데 있어서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 현재의 시스템은 개발 초기단계로 측정에 따른 소요시간이나 측정회수, 측정 정밀도에 있어서 여러 제약을 받는다. 따라서 이러한 제약을 극복하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

ABSTRACT

X-ray transit materials with straight path and the its intensity is proportional to the density of materials. Therefore, X-ray has been extensively used as a nondestructive evaluation (NDE) method in various fields. This study was carried out for development of a portable X-ray CT (computed-

*¹ 접수 2005년 10월 11일, 채택 2005년 12월 5일

*² 서울대학교 산림과학부 환경재료과학전공 목구조연구실, Timber Engineering Lab., Major in Environmental Materials Science, Department of Forest Science, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

† 주저자(corresponding author) : 이진계(e-mail: junjae@snu.ac.kr)

tomography) system to detect deteriorations of wood members in buildings. Based on the results of our previous study, a procedure of CT image reconstruction was established. In order to verify the applicability of developed system, CT images of three wood disks were reconstructed by newly developed procedure and compared with the prototypes. From the results of this study, it was shown that the newly developed system could be used not only to determine the shape, size, and position of defects, but also to find the density distribution in cross section of wood structure members. The density distribution may be utilized to clarify the reason of wood deterioration and to provide the preventive method on how to treat or repair wood buildings. Because it was initial stage of system development, there were some limitations concerned with measuring equipment and image reconstruction algorithm. Especially, measuring time including equipment setup time was longer and measuring accuracy was lower than we expected. Therefore, we planned some additional studies on improvement of equipment and algorithm to enhance the capability of X-ray CT system.

Keywords: X-ray CT system, soft X-ray, wood deterioration, non-destructive evaluation, density distribution, Filtered back-projection

1. 서 론

재료를 통과한 X선의 강도와 재료의 밀도 사이에 나타나는 높은 상관관계로 인하여 X선은 비파괴 검사 방법으로써 의료분야를 포함하여 여러 분야에서 광범위하게 사용되어 왔다. 특히 근래 들어 X선을 이용한 CT는 다양한 산업분야에서 그 활용 가능성을 인정받고 있다. X선 CT는 X선의 강한 직진성으로 인하여 비교적 단순한 알고리즘을 사용하여서도 CT영상의 구성이 가능하며, 따라서 빠른 속도로 정확한 단면 영상을 얻을 수 있다는 장점을 가지고 있다(구와 신, 2000).

목재에 X선 CT를 적용하기 위한 연구도 최근 몇몇 연구자들에 의해 진행된 바 있는데, 주로 부가가치가 높은 활엽수 원목을 대상으로 내부에 존재하는 결함의 위치를 파악함으로써 제재위치를 보다 효율적으로 결정하는데 그 목적을 두었다(Taylor *et al.*, 1984; Funt and Bryant, 1987). 최근에는 제재공장의 생산 속도에 맞도록 CT장치의 측정 및 영상구성 속도를 향상시키거나 얻어진 CT영상을 바탕으로 제재위치를 결정하는 공정을 컴퓨터를 이용하여 자동화하는 방향으로 연구의 초점이 맞춰지고 있다(McMillin, 1982; Wagner *et al.*, 1989; Schmoltdt *et al.*, 1993, 1999; Bhandarkar *et al.*, 2002).

그러나 이러한 연구에서는 대부분 기존에 의료분야

나 다른 산업에 적용할 목적으로 개발된 CT장치들이 사용되었는데, 이러한 장치들은 병원이나 공장과 같이 실내에서 사용할 목적으로 개발되었기 때문에 장비의 크기에 있어서는 크게 제약을 받지 않았다. 따라서 측정속도 및 정밀도를 향상시키기 위하여 매우 강한 강도의 X선을 사용하고 위험방지를 위한 차폐설비와 함께 고정식으로 설계되었다. 즉 X선 CT장치는 고정되어 설치된 상태에서 검사하고자 하는 대상체를 장치 내부로 통과시키면서 측정이 진행되도록 장치가 제작되었다. 이러한 장치는 벌채된 원목이나 생산된 목제품과 같이 이동이 가능한 재료에 대해서는 적용이 가능하지만 건축물에 고정된 상태로 사용되고 있는 구조부재를 대상으로 적용하는 것은 불가능하다.

김 등(2006)은 이전의 연구에서 현장적용이 가능한 X선 CT 시스템을 개발할 목적으로 soft-X선 장치를 이용하여 목재 부재의 X선 촬영을 실시하고, 재료의 밀도, 연륜각, 두께 등의 인자가 재료의 질량감쇠계수에 미치는 영향을 확인하였다. 이러한 연구를 통해 soft-X선을 사용할 경우에 시험편의 두께에 따라 목재의 질량감쇠계수가 다르게 나타나는 것을 확인하였으며, 최종적으로 얻어진 결과를 Beer의 법칙에 적용하여 X선강도로부터 재료의 밀도를 산출하는 식을 아래와 같이 제시하였다(식 1).

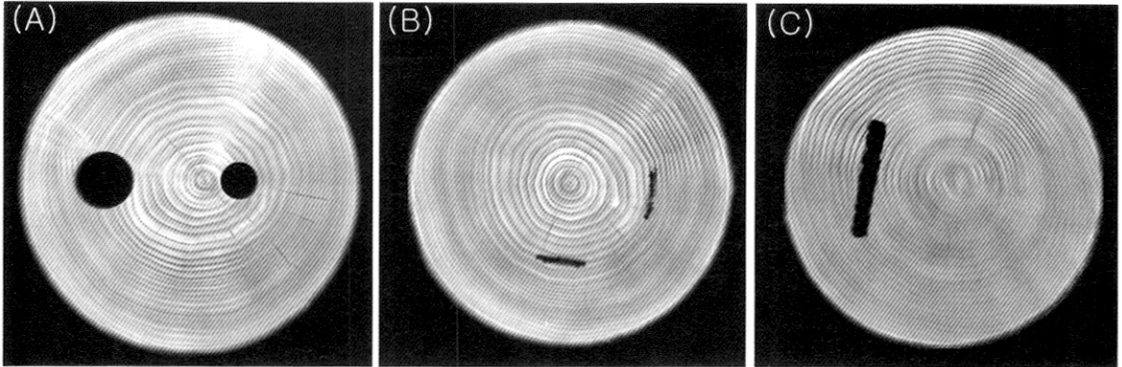


Fig. 1. Test specimens with artificial defects.

$$\rho = \frac{\log(I_0/I)}{K - 0.0075 \times \log(t) + 0.0622} \quad (1)$$

여기서, ρ = 시편의 밀도

I = 시편을 통과한 X선의 강도

I_0 = 초기 X선의 강도(시편이 없는 상태에서 공기층만을 통과한 X선의 강도)

t = 시편의 두께를 각각 의미한다.

본 연구는 고건축물과 같은 목조 건축물에 사용되고 있는 구조부재의 열화를 현장에서 탐지할 수 있는 X선 CT시스템을 개발하기 위한 연구의 일환으로 진행되었다. 먼저 이전의 연구에서 제시된 식 (1)을 이용하여 목재부재의 밀도분포를 측정하고, 그 결과를 이용하여 CT영상을 구성하는 체계를 확립하였다. 또한 이렇게 얻어진 CT영상을 실제 부재의 단면 형태와 비교함으로써 soft-X선을 이용한 X선 CT시스템의 적용가능성을 확인하였으며, 현 시스템의 문제점 및 개선방안을 모색하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

실험은 국내 주요 활엽수종의 하나인 아까시나무 (*Robinia pseudoacacia* L.)를 대상으로 진행되었다.

지름 200 mm, 두께 30 mm인 세 개의 원판형 시편을 준비하고, 건조과정에서 할렬이나 뒤틀림 등의 건조 결함이 발생하는 것을 줄이기 위하여 고주파 진공 건조 방식을 사용하여 기건함수율까지 건조하였다.

X선 촬영에 앞서 각각의 시편에 다음과 같은 인위적인 결함을 생성하였다: (A)시편 - 지름이 각각 33 mm와 20 mm인 두 개의 원형결함, (B)시편 - 두께 3 mm, 길이 33 mm의 두 개의 직사각형 결함, (C)시편 - 두께 10 mm, 길이 80 mm의 직사각형 결함. 시편상태 및 정확한 결함의 형태와 위치를 확인하기 위하여 각 원판의 두께방향(섬유방향)으로 X선이 통과하도록 X선 촬영을 실시하고 그 결과를 Fig. 1에 나타내었다. X선 필름을 통해 인위적인 결함 이외에도 각각의 시편에 웅이와 미세한 할렬이 존재하는 것을 확인할 수 있었는데 이러한 결함은 표면에서 시편을 육안으로 관찰하였을 경우에는 확인이 불가능하였다.

2.2. 측정 장치

Fig. 2에는 X-ray 촬영에 사용된 장치(Softex : K-4, Japan)의 모식도를 나타내었다. 장치에 대한 자세한 사양 및 작동 원리는 이전의 논문에 설명되어 있다 (김 등, 2006). 본 연구에서는 X선의 전압과 전류, 방사시간을 각각 50 kVp/5 mAs/320초로 고정된 상태에서 실험을 진행하였다.

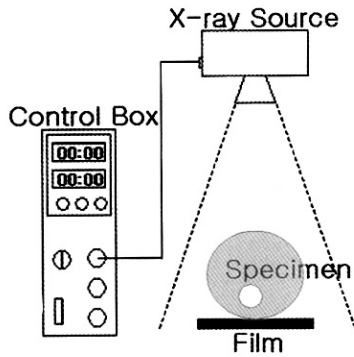


Fig. 2. Device for X-ray radiography.

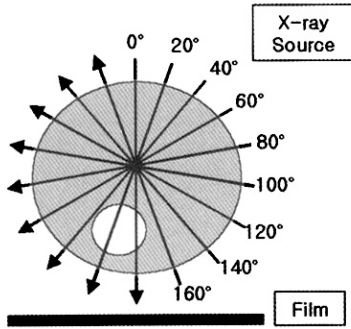


Fig. 3. Measuring procedure of X-ray radiography for wood disks.

2.3. X선 촬영 및 밀도분포 측정

2.3.1. X선 촬영

Fig. 3에서와 같이 원형시편을 회전시키면서 0~160°까지 20° 간격으로 총 9회의 X선 촬영을 실시하였다. 감광된 필름을 필름스캐너(UMax : Power Look 2100XL)를 이용하여 스캔하고, 전체 지름을 400개의 픽셀로 나누어 명도를 측정하였다. 따라서 각각의 명도는 0.5 mm의 폭을 가지는 X선 투과경로에 대한 결과를 나타낸다.

2.3.2. 초기 X선의 강도 결정

초기 X선 강도는 김 등(2006)의 이전 연구에서 전

압(10~60 kVp)과 전류(1~5 mAs)를 변화시키면서 측정된 X선 강도에 기초하여 결정하였다. 5 mAs의 전류를 사용한 경우에 30~40 kVp의 전압 범위에서 X선 강도가 전압과 비례하고, 이외의 구간에서는 비례관계를 벗어나서 나타났다. 이는 X선 강도를 필름의 명도를 이용하여 측정하는 과정에서 X선 강도가 너무 높거나 낮은 경우에는 강도가 필름의 명도에 정확하게 반영되지 못하기 때문인 것으로 판단되었다. 따라서 30~40 kVp의 전압 범위를 기초로 전압과 X선강도의 상관관계를 식 (2)와 같이 얻었다.

$$I_0 = 6.61 \times V_T + 156 \quad (2)$$

여기서, I_0 = 초기 X선의 강도

V_T = 전압(mVp)

식 2에 본 연구에서 사용한 전압 50 mVp를 대입하면, 초기 X선의 강도는 486.5로 결정된다. 이때 X선의 강도는 40 kVp, 2 mAs, 80 sec를 기준(100)으로 결정된 상대강도를 나타내며, 따라서 단위가 없는 무차원의 값으로 표시된다.

이전의 연구에서 방사시간은 40초를 기준으로 측정하였는데, 본 연구에서는 320초의 방사시간을 사용하였다. X선의 강도는 방사시간에 비례하므로 앞에서 구한 X선 강도에 두 방사시간 사이의 비율(320/40=8)을 곱하여 최종적으로 초기 X선의 강도, I_0 (=3890)를 산출하였다.

2.3.3. 밀도분포 측정

2.3.1에서 측정된 각 픽셀의 명도를 이용하여 시편을 통과한 X선의 강도를 산출하였다. X선 강도의 산출에는 이전의 연구에서 제시한 식 (3)이 사용되었다.

$$I_X = -34.8 \times \log(B) + 188 \quad (3)$$

여기서, I_X = 40 kVp, 2 mAs, 80 sec를 기준으로 결정된 X선의 상대강도,

B = X선 필름의 명도 (0~255).

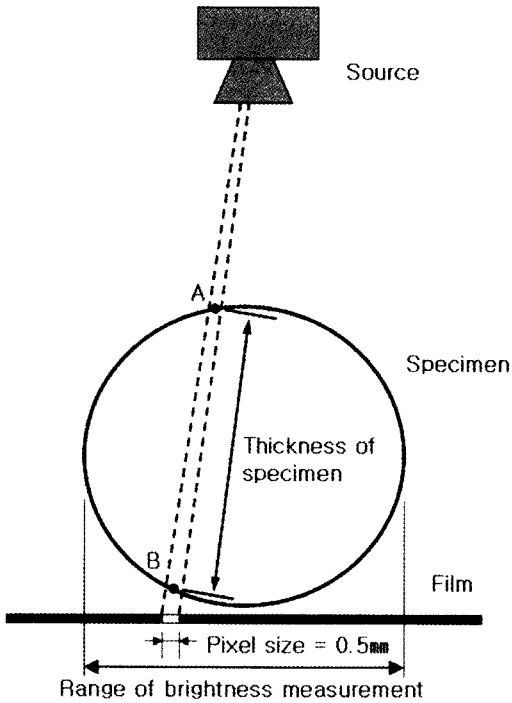


Fig. 4. Calculating the thickness of specimen for each pixel.

X선 강도와는 별도로 각각의 픽셀에 대하여 X선이 통과한 시편의 두께(Fig. 4)를 계산하였다. 본 연구에서는 지름이 200 mm인 원판형의 시편을 사용하였기 때문에 계산에 의해 쉽게 시편의 두께를 얻을 수 있었다. 부정형의 단면을 가진 시편의 경우에는 재료의 단면형태를 정확하게 측정된 후에 그 결과로부터 각 픽셀에 대한 시편두께를 산출하여야 할 것으로 판단된다.

이렇게 얻어진 각 픽셀에서의 X선 강도와 시편두께를 2.3.2에서 구한 초기 X선 강도와 함께 식 (1)에 대입하여 각 픽셀에 해당하는 시편부분에 대한 평균밀도를 산출하였다.

2.4. CT영상 구성

얻어진 밀도는 각 측정 위치의 좌표와 함께 CT 영상 구성에 이용되었다. 측정 위치의 좌표는 X선이 시편을 통과하는 과정에서 시편의 표면과 교차하는 점

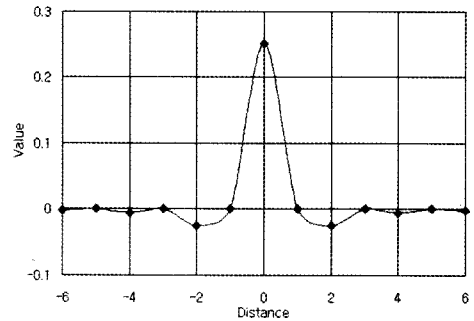


Fig. 5. Lowpass cosine filter.

의 좌표를 의미한다(Fig. 4의 A, B점). 따라서 각각의 픽셀에 대하여 하나의 밀도와 두 개의 측정위치 좌표가 계산되고, 이 결과를 이용하여 CT영상을 구성하였다. 최종적으로 얻어지는 CT영상에서 각 픽셀의 크기는 2×2 mm로 결정하였으며, 따라서 전체 영상의 크기는 100×100 픽셀로 구성되었다.

CT영상 구성에는 대표적인 CT영상구성 알고리즘의 하나인 역투영법을 사용하였는데, 이 방법은 의료분야에서 진단을 목적으로 개발된 CT시스템에서 주로 적용되고 있는 방법이다(Lo and Inderwiesen, 1994). 역투영법에서는 영상에서 나타나는 이질층간의 경계를 명확하게 하고, 픽셀의 밀도를 실제와 유사하게 나타나도록 하기 위하여 여러 가지 필터가 사용된다. 본 연구에서는 lowpass cosine filter, Shepp-Logan filter, generalized hamming filter의 세가지 종류를 적용하고 그 효과를 확인하였는데, 필터의 종류에 따라서는 큰 차이를 나타내지 않았기 때문에 본 논문에서는 lowpass cosine filter를 사용한 결과만을 제시하였다. Lowpass cosine filter에서 측정을 통해 얻어진 밀도로부터 새로운 밀도를 계산하는 함수를 Fig. 5에 나타내었다(Jain, 2003).

3. 결과 및 고찰

3.1. X선 촬영

Fig. 6에는 X선 촬영 결과의 예로써 (A)시편을 0°

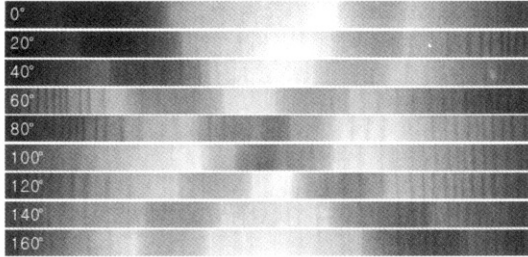


Fig. 6. The X-ray films of specimen (A) with nine different measuring directions.

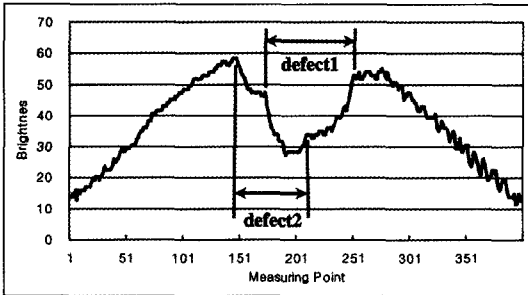


Fig. 7. The brightness of X-ray film for specimen (A) with 100° measuring direction.

에서 160°까지 20° 간격으로 9개의 방향에서 X선 촬영한 결과를 나타내었다. X선 필름상에 인위적으로 생성한 결함이 비교적 명확하게 나타나는 것으로 확인할 수 있으며, 80°와 100°의 경우에서와 같이 두 결함이 겹쳐져 있는 경우에도 결함간의 경계를 식별할 수 있음을 확인할 수 있다. 결함의 위치를 제외하고는 전체적으로 중심이 밝고(명도가 높고) 가장자리로 갈수록 어두워지는(명도가 낮아지는) 경향을 나타내었다. 이는 시편의 형태에 따른 시편두께(X선의 시편 투과 길이)의 차이에 기인하는 것으로 판단된다. 시편두께가 클 경우에 X선이 시편을 투과하는 과정에서 X선 에너지의 감쇠가 크게 일어나고, 따라서 X선 필름의 감광 정도가 감소하기 때문에 필름이 명도가 높게 나타난다.

3.2. 밀도 계산

Fig. 7에는 (A)시편을 100° 방향에서 측정된 X선

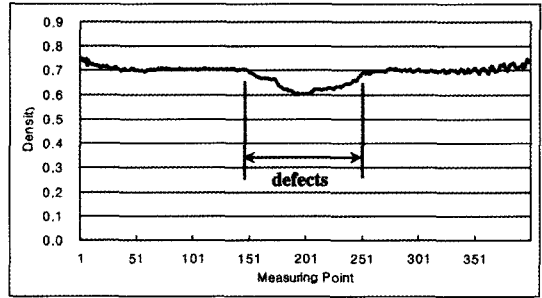


Fig. 8. The distribution of density for specimen (A) with 100° measuring direction.

필름을 명도로 환산한 결과를 나타내었다. Fig. 6에서와 같이 두 개의 인위적인 결함의 위치가 비교적 명확하게 확인되며, 또한 시편의 가장자리로 갈수록 점차 명도가 낮게 나타나는 경향을 확인할 수 있다.

Fig. 7의 명도는 식 (3)을 이용하여 X선 강도로 환산되고, 이 값을 다시 식 (1)에 의해 각 픽셀에서의 밀도로 변환된다. 앞에서 설명한 바와 같이 밀도의 계산에는 시편 두께와 초기 X선강도가 함께 사용되었다. Fig. 8에는 Fig. 7에서 얻어진 명도분포를 밀도분포로 변환시킨 결과를 나타내었다. 밀도의 계산과정에서 두께의 영향이 반영되므로 Fig. 8에서는 결함이 존재하는 약 151~251의 구간을 제외하고는 전체적으로 밀도가 일정하게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그러나 시편의 가장자리 부분에서는 밀도가 조금 증가하는 경향을 나타내었는데, 이는 이 구간에서 X선의 강도가 높기 때문에 필름을 이용하여 X선의 강도를 측정하는 과정에서 발생하는 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 김 등(2006)은 필름에 도달하는 X선의 강도가 증가할수록 필름의 명도를 이용하여 측정되는 X선 강도의 오차가 증가한다고 보고하였다.

3.3. CT 영상 구성

세 개의 원형시편에 대하여 필터를 사용하지 않고 얻은 X선 CT 영상을 Fig. 9에 나타내었다. 지름이 각각 33과 20 mm인 두개의 원형 인공결함이 있는 (A) 시편의 경우 CT영상을 통해 지름 33 mm인 결함의 크기 및 형태, 위치는 정확하게 확인할 수 있으나, 지름이

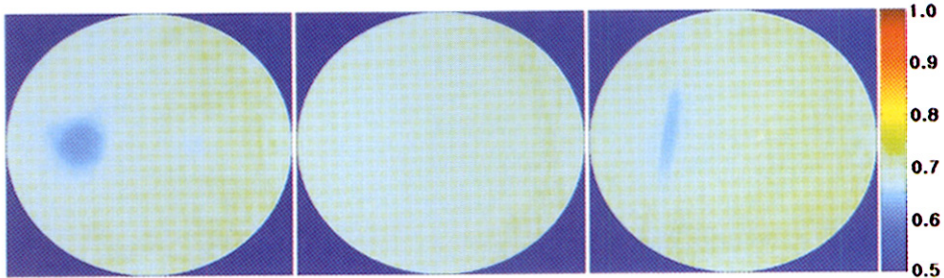


Fig. 9. X-ray CT images of specimens with various defects.

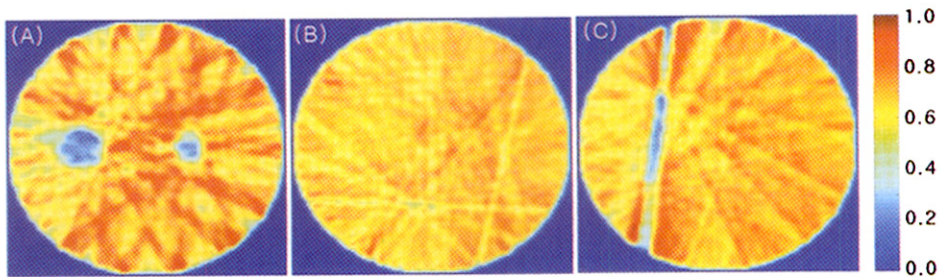


Fig. 10. Reconstructed X-ray CT images by using the back-projection method with lowpass cosine filter.

작은 20 mm의 결함은 매우 흐리게 나타나기 때문에 식별이 매우 어렵다. (A)시편의 결과와 유사하게 큰 직사각형 결함(10×80 mm)을 가지는 (C)시편의 경우에는 결함을 정확하게 탐지할 수 있으나, 결함의 크기가 작은(3×33 mm) (B)시편의 경우에는 결함의 탐지가 매우 어렵다는 것을 확인할 수 있다.

또한, 인공결함 위치에서는 실제 복질이 존재하지 않기 때문에 밀도가 0으로 나타나야 하지만, CT영상에서는 밀도가 건전한 부위(약 0.7~0.75)와 큰 차이가 없는 약 0.6~0.65의 범위에서 나타났다. 반면에 인공결함의 주변에서는 전체적으로 비중이 다른 건전한 부위에 비해 다소 낮게 나타나는 경향을 보였다. 이는 역투영법이 가지는 근본적인 문제점으로 해당 픽셀에 대한 평균값으로 결정되기 때문에 주변 픽셀의 상태에 따라 크게 영향을 받게 된다. 반대로 결함주위의 건전한 부위에서도 결함의 영향을 받기 때문에 밀도가 조금 낮게 나타나며, 따라서 결함의 경계가 명확하게 나타나지 못하였다.

이러한 문제를 해결하기 위해서는 측정결과에 필터를 적용하여 보정하고, 보정된 결과를 이용하여 CT영상을 구성하게 된다. Fig. 10에는 lowpass cosine filter를 사용한 이후에 CT영상을 구성한 결과를 나타내었다. 필터를 사용하지 않은 결과(Fig. 9)와 비교하였을 때 전체적으로 앞에서 언급한 문제점들이 많이 해결되었음을 확인할 수 있다. (A)와 (C)시편의 경우 결함 위치에서의 밀도가 약 0.2 정도로 실제와 많이 근접하였으며, 결함 주위에서 밀도가 다소 낮게 나타났던 부분들이 상당부분 제거되었음을 확인할 수 있다. 특히, 필터를 사용하지 않은 경우 결함의 탐지가 불가능하였던 (B)시편의 경우에, 다른 시편과 같이 선명하지는 않지만 다소나마 결함의 존재가 영상에 반영되었음을 확인할 수 있다.

이전에 초음파를 이용하여 유사한 부재의 CT영상을 구성한 결과와 비교하였을 때, 결함의 형태와 크기가 매우 정확하게 탐지됨을 확인할 수 있다. 초음파는 목재 내에서 결함을 만날 경우에 결함을 우회하여 통과하기 때문에 결함의 탐지는 가능하지만 결함의 크

기와 형태를 정확하게 탐지하는데 있어서는 한계를 나타내었다(Kim and Lee, 2005a, 2005b). 그러나 X선은 강한 직진성으로 인하여 결함을 통과하여 전달되고 그 과정에서 결함의 특성이 최종 결과에 정확하게 반영되기 때문에 비교적 정확하게 결함을 탐지할 수 있는 것으로 판단된다.

특히 필터를 적용함에 따라 결함에서의 밀도가 실제와 매우 유사하게 탐지되었는데, 이러한 결과를 바탕으로 초음파 CT에서는 거의 불가능하였던 결함 원인의 판단 또한 가능할 것으로 예상된다. 충해의 경우에는 목질부분이 완전히 제거된 형태로 결함이 나타나기 때문에 밀도가 0에 가깝게 나타나지만, 부후의 경우에는 중량감소가 나타나더라도 목질부분이 잔류하기 때문에 일정 정도의 밀도를 가지게 된다. 이러한 특징과 함께 결함의 형태를 함께 고려하면 결함 원인의 판단이 가능할 것으로 생각된다. 건축물에 사용되는 부재에 있어서 결함의 유무와 함께 결함의 원인을 알아내는 것은 그에 따른 효과적인 대처방안을 수립하는데 있어서 매우 중요하게 활용될 수 있을 것이다.

필터를 사용할 경우 여러 가지 측면에서 영상의 품질이 향상되는 것을 확인할 수 있었으나 그에 따른 몇 가지 문제점도 함께 나타났다. (C)시편의 경우, 인공 결함의 장축을 따라 영상의 왜곡이 매우 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이러한 왜곡은 CT영상을 구성하는데 있어 너무 적은 회수의 측정결과(본 연구에서는 9회의 측정을 통해 CT영상을 구성)가 사용되기 때문에 나타나는 문제점으로 판단된다. 필터를 사용하지 않은 경우(Fig. 9)에는 왜곡의 정도가 매우 약하였기 때문에 크게 문제점으로 파악되지 못하였으나, 필터를 사용하는 과정에서 이러한 왜곡이 증가하였다. 또한, 결함이 없는 건전한 위치에서 밀도의 편차가 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

본 연구에서 개발하고자 하는 X선 CT시스템은 현장 적용을 목적으로 하기 때문에 측정 회수나 측정 정밀도에 있어서 일정 정도의 제약을 받는다. 따라서 개발된 시스템의 현장 적용성을 떨어뜨리지 않는 범위에서 CT영상의 품질을 향상시킴으로써 결함을 보다 정확하게 탐지하기 위한 추가적인 연구가 지속적으로 진행되어야 할 것이다.

4. 결 론

본 연구는 고건축물과 같은 목조 건축물에 사용되고 있는 구조부재의 열화를 현장에서 탐지할 수 있는 X선 CT시스템을 개발할 목적으로 이전 연구에서 얻은 결과를 바탕으로 CT영상을 구성하는 체계를 확립하였다. 또한 이렇게 얻어진 CT영상을 실제 부재의 단면 형태와 비교함으로써 X선 CT 시스템의 적용 가능성이 확인하였다.

X선 촬영에는 현장적용이 가능한 soft-X선 장비가 이용되었다. 촬영된 필름의 명도를 부재의 형태로부터 얻어진 좌표와 함께 반영하여 부재의 밀도를 산출하고, 그 결과를 이용하여 CT영상을 구성하였다. CT영상의 구성에는 역투영법이 사용되었는데, 필터를 함께 적용함으로써 결함탐지에 있어서의 정확성을 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

X선 CT 시스템은 결함의 형태와 크기, 위치뿐만 아니라 결함에서의 밀도 또한 비교적 정확하게 탐지할 수 있었다. 이러한 결과를 바탕으로 결함의 원인을 파악함으로써 건축물에서 사용되고 있는 목재 부재에 열화가 발생하였을 경우에 그에 따른 효과적인 대처방안을 수립하는데 크게 기여할 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 현재의 시스템은 측정회수나 측정 정밀도에 있어서 제약을 받으며, 따라서 이러한 제약을 극복하기 위한 추가적인 연구가 요구된다.

사 사

본 연구는 농림부 농림기술개발사업의 지원에 의해 이루어진 것임. 또한 연구를 수행함에 있어서 김광모와 이상준은 두뇌한국 21사업에 의한 장학지원을 받아 수행하였음.

참 고 문 헌

1. 구양모, 신남수. 2000. X-선 과학과 응용. 도서출판 아진. 490p.
2. 김광모, 이상준, 이전제. 2006. 현장 적용이 가능한 X선

- CT시스템 개발 I - X선 촬영법을 이용한 목재의 밀도 측정. 목재공학. 34(1): 15~22
3. Bhandarkar, S. M., T. D. Faust, and M. Tang. 2002. Design and prototype development of a computer vision-based lumber production planning system. *Image and Vision Computing*, 20: 167~189.
 4. Bucur, V. 2003. *Nondestructive Characterization and Imaging of Wood*. Springer, Germany. pp. 13~74.
 5. Funt, B. B. and E. C. Bryant. 1987. Detection of internal log defects by automatic interpretation of computer tomography images, *Forest Prod. J.* 37(1): 56~62.
 6. Jain, A. K. 2003. *Fundamentals of Digital Image Processing*. Prentice Hall. Korea. pp. 431~475.
 7. Kim, K. M. and J. J. Lee. 2005a. CT image reconstruction of wood using ultrasound velocities I - Effects of reconstruction algorithms and wood characteristics. *J. of the Korean Wood Science and Technology*. 33(5): 21-28.
 8. Kim, K. M. and J. J. Lee. 2005b. CT image reconstruction of wood using ultrasound velocities II - Determination of the initial model function of the SIRT method. *J. of the Korean Wood Science and Technology*. 33(5): 29-37.
 9. Lo, T. and P. L. Inderwiesen. 1994. *Fundamentals of Seismic Tomography*. Society of Exploration Geophysicists. USA. pp. 9~43.
 10. McMillin, C. W. 1982. Application of Automatic Image Analysis to Wood Science. *Wood Sci.* 14(3): 97~105.
 11. Schmoldt, D. L., D. Zhu, and R. W. Conners. 1993. *Nondestructive evaluation of hardwood log using automated interpretation of CT images*. Review of Progress in Quantitative Nondestructive Evaluation, Vol. 12. Plenum Press, New York.
 12. Schmoldt, D. L., L. G. Occena, A. L. Abbott, and N. K. Gupta. 1999. *Nondestructive evaluation of hardwood logs: CT scanning, machine vision and data utilization*. *Nondestr. Test. Eval.* 15: 279~309.
 13. Taylor, F. W., F. G. Wagner, Jr., C. W. McMillin, I. L. Morgan, and F. F. Hopkins. 1984. *Location knots by industrial tomography- A feasibility study*, *Forest Prod. J.* 34(5): 42~46.
 14. Wagner, F. G., F. W. Taylor, D. S. Ladd, C. W. McMillin, and F. L. Roder. 1989. *Ultrafast CT scanning of and oak log for internal defects*. *Forest Prod. J.* 39(11/12): 62~64.