

현장 적용이 가능한 X선 CT 시스템 개발 I*1 - X선 촬영법을 이용한 목재의 밀도 측정 -

김 광 모*2 · 이 상 준*2 · 이 전 제*2†

Development of Portable X-ray CT System I*1 - Evaluation of Wood Density using X-ray Radiography -

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

요 약

국내에서 문화재로 지정되어 관리되고 있는 많은 목조 고건축물들의 효과적인 보존 및 관리를 위해서는 목재의 내부 상태를 정확하게 평가할 수 있는 비파괴 검사법이 요구된다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 적용 가능한 X선 CT 시스템을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 먼저 휴대형 soft-X선 촬영 장치를 사용한 목재의 밀도 측정 방법을 확립하고 그 적용 가능성을 확인하고자 하였다. 먼저 측정방법을 확립하기 위하여 X선 강도와 필름명도 사이의 상관관계를 분석하였으며, 또한 관전류와 관전압의 변화에 따른 X선 초기강도의 변화를 확인하여 정량화 하였다. 다음으로 목재의 밀도와 연륜각, 두께가 질량감쇠계수에 미치는 영향을 확인하고, 목재의 질량감쇠계수를 결정하여 Beer의 법칙에 적용함으로써 X선 측정결과로부터 목재의 밀도를 계산할 수 있는 식을 제시하였다. 마지막으로 X선 촬영법을 통해 측정된 밀도를 기존의 치수법에 의한 측정결과와 비교함으로써 앞에서 결정된 밀도측정 방법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 이상의 결과는 앞으로 개발하고자 하는 X선 CT 시스템에서 입력값으로 요구되는 밀도를 측정하는 방법을 확립하는데 있어서 효과적으로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

ABSTRACT

In order to manage efficiently many ancient wooden buildings, which have been preserved as cultural properties in Korea, the internal state of wood members should be evaluated exactly and

* 1 접수 2005년 8월 8일, 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) : 이전제(e-mail: junjae@snu.ac.kr)

periodically by a NDE (non-destructive evaluation) method. A research project was planned to develop an X-ray CT (computed tomography) system as a NDE method for wood, which could be easily applied in field. This paper includes the first part of this project. First of all, to establish a measuring procedure of wood density using X-ray radiography, the correlation between X-ray intensity and the film brightness was evaluated. Also, initial X-ray intensity was quantified with various radiate conditions controlled by the tube voltage and tube current. And then, the effects of density, annual ring angle, and thickness on the mass attenuation coefficient of wood were examined. Finally, Beer's law was modified with the above results and adopted to calculate the density of wood. As a result of this study, the measuring procedure of wood density was established using a portable soft X-ray device and this procedure was verified with some small wood specimens. This results will be used valuably for the following researches to develop a portable X-ray CT system.

Keywords: X-ray radiography, wood density, beer's law, mass attenuation coefficient, X-ray CT, ancient wooden building, NDE (Non-destructive evaluation)

1. 서 론

국내에서는 많은 목조 고건축물들이 국보, 보물 또는 지방문화재 등으로 지정되어 관리되고 있다. 이러한 고건축물들을 적절하게 관리하고 보존하기 위해서는 구조물에 사용된 주요 부재들의 내부 상태를 현장에서 정확하게 평가할 수 있는 비파괴 평가 기술이 무엇보다 요구된다. 지금까지 많은 연구자들에 의해 목재의 비파괴 평가 기술에 관한 연구가 이루어져 왔으나 대부분의 방법이 생산된 목제품의 품질이나 물리적 특성, 접합부 및 접착층 성능을 평가하는 방법에 초점이 맞춰져 왔으며, 건축물에 사용된 구조부재를 현장에서 직접 평가하기 위한 연구는 미비한 실정이다. 고건축물에 사용된 부재의 경우에는 그 형태와 치수가 매우 다양하고, 부재를 측정하는데 있어 여러 가지 제약을 받게 된다. 특히 고정된 상태에서 부재를 측정하여야 하므로 장비의 부피가 작고 가벼워 쉽게 이동이 가능하여야 하며, 현장에서 쉽게 사용할 수 있도록 조작성이 간단하여야 한다.

X선은 1895년 W. K. 뢰트겐에 의해 처음 발견된 이후로 여러 분야에서 응용되어 사용되고 있다. 특히 투과성이 강하고, 투과되는 재료의 밀도에 따라 투과된 X선의 강도가 다르게 나타난다는 원리를 이용한 밀도측정법(radiation densitometry)은 X선의 활용분야 중에서 가장 널리 보급되어 사용되고 있는 방법

중의 하나이다(구와 신, 2000). 목재 분야에 있어서도 방사선을 이용한 밀도측정법을 연륜연대학이나 목질 복합재의 밀도분포 측정에 이용한 여러 연구들이 수행되어 왔다(Nearn and Bassett, 1968; Echols, 1973; Heger *et al.*, 1974; Cown and Clement, 1983). 근래에는 제재목의 등급구분, 판재 생산과정에서의 품질검사, 재료의 미시적 분석 등 보다 다양한 목적으로 X선을 목재에 활용하기 위한 연구가 수행된 바 있으며, 이외에도 의료용이나 산업용 목적으로 개발된 CT장치를 도입하여 원목 내부에 존재하는 결함의 위치를 파악하고 제재위치를 보다 효율적으로 결정하기 위한 연구도 몇몇 연구자들에 의해 수행되었다(Gureyev and Evans, 1999; Lu and Lam, 1999; Schmoltd *et al.*, 1999; Schajer, 2001; Bhandarkar *et al.*, 2002).

그러나 이러한 연구에서 사용된 방법들을 현장에서 건축물에 직접 적용하는 데에는 대상 재료의 크기나 장비의 이동성 등에서 여러 가지 제약을 받는다. 따라서 본 연구에서는 현장에서 적용 가능한 X선 CT 시스템을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 먼저 휴대형 X선 촬영 장치를 사용하여 목재의 밀도측정 방법을 확립하고 그 적용 가능성을 확인하고자 하였다.

X선을 이용한 밀도 측정에는 식(1)과 같은 Beer의 법칙이 사용된다(Bergsten *et al.*, 2001).

Table 1. Air-dried density of specimens measured by dimension method

	Annual ring angle (°)					Total
	0	10	20	30	40	
Quantity (piece)	130	18	10	10	10	178
Average (g/cm ³)	0.533	0.528	0.573	0.564	0.554	0.537
Standard Deviation	0.052	0.039	0.044	0.043	0.048	0.051

$$I = I_0 \times e^{-\mu \rho t} \quad (1)$$

여기서, I = 시편을 통과한 X선의 강도,

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

μ = 시편의 질량감쇠계수(mass attenuation coefficient),

ρ = 시편의 밀도,

t = 시편의 두께를 각각 의미한다.

식(1)을 밀도에 대해서 다시 정리하면 다음과 같이 식(2)를 얻을 수 있다.

$$\rho = \frac{\log(I_0/I)}{\mu t} \quad (2)$$

공기층만을 통과한 X선의 강도(I_0)는 X선 발생 장치의 초기 입력값에 따라 결정되는 값이다. 따라서 재료의 고유한 값으로 알려져 있는 질량감쇠계수를 알면 시편을 통과한 X선의 강도만을 측정함으로써 재료 밀도의 결정이 가능함을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서는 목재의 질량감쇠계수에 미치는 영향인자를 확인하고, 정확한 질량감쇠계수를 결정하기 위하여 다양한 밀도 및 연륜각에 따른 목재의 질량감쇠계수를 측정하여 비교하였다. 특히 현장에서 구조부재를 대상으로 X선 촬영을 실시하는 경우, 위치에 따라 부재의 두께가 매우 다양하게 나타날 수 있으므로 두께가 질량감쇠계수에 미치는 영향도 함께 검토하였다.

결정된 질량감쇠계수를 이용하여 각 시편의 밀도를 계산하고 치수법(dimension method)에 의해 측정된 밀도와 비교함으로써 X선 촬영법을 이용한 밀도 측정

법의 적용 가능성을 평가하였다. 이렇게 얻어진 결과는 이후의 연구에서 현장에서 사용 가능한 X선 CT 시스템을 개발하는데 있어서 기본 자료로 활용될 예정이다.

2. 재료 및 방법

2.1. 재료

실험을 위하여 총 178개의 무결점 소시편이 준비되었다. 시편의 제작에는 국산 소나무(*Pinus Densiflora* Sieb.)를 사용하였으며, 시편의 단면치수는 2×2 cm, 길이는 5 cm로 하였다. 비중 및 연륜각에 따른 영향을 검토하기 위하여 일부 시편에는 수가 포함되도록 제작하였으며, 일정한 연륜각을 가지는 시편도 함께 제작하였다. 제작된 시편은 실험에 앞서 20°C, 65% 항온항습실에서 충분한 기간 보관하여 기건상태에서 평형에 도달할 수 있도록 하였으며, 평형에 도달한 이후에 치수법을 이용하여 부피와 무게를 각각 측정하고 기건밀도를 계산하였다(Table 1).

2.2. X선 측정

2.2.1. 측정 장치

X선 촬영에는 앞에서 언급한 바와 같이 휴대형 X선 장치(Softex : K-4, Japan)가 사용되었다. 본 장비에서는 일반적으로 투과시험용 X선관에서 사용되는 텅스텐(W)이 표적물질(targer material)로 사용되며, anode각은 19도이다. 전압과 전류의 방사범위는 각 0~62.5 kVp, 0~5 mAs이며, 방사시간은 자유롭게

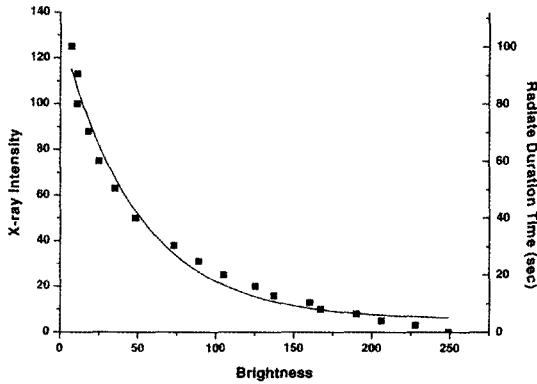


Fig. 1. The relationship between film brightness and X-ray intensity (40 kVp, 2 mAs).

조절이 가능하다. 방사선원은 일반적인 fan beam 타입이며, 별도의 집속기(collimator) 등은 사용하지 않았다.

X선원으로부터 471 mm의 거리에 필름(Fuji: Ix-Fr)을 설치하고, 선원과 필름 사이에 시편을 위치시킴으로써 시편을 통과한 X선에 의해 필름이 감광되도록 하였다. 이때 시편은 한쪽면이 필름과 접하도록 위치시켰다. 감광된 필름은 자동현상기(Max-Rhein: MR-PA, Japan)와 필름스캐너(UMax : Power Look 2100 XL)를 이용하여 디지털값으로 전환하였다.

2.2.2. X선 강도 측정

식(2)를 이용하여 X선이 투과한 재료의 밀도를 계산하기 위해서는 투과된 X선의 강도를 알아야 한다. X선의 강도에 따라 감광된 필름의 명도가 다르게 나타나며, 따라서 먼저 실험시편이 없는 상태에서 X선의 강도와 필름 명도(黑化度) 사이의 관계를 정량적으로 결정하기 위한 실험을 실시하였다.

X선의 강도를 인위적으로 조정하기 위하여 전압을 40 kVp, 전류를 2 mAs로 각각 고정시킨 상태에서 방사시간을 0초에서 100초 사이에서 18단계로 조절하면서 X선 촬영을 실시하였다(Fig. 1). 다른 조건이 고정된 상태에서 X선 강도는 방사시간에 비례하므로, 2 × 2 cm의 단면을 가지는 시편의 최적 촬영조건을 찾는 예비실험을 통해 결정된 방사시간 80초일 때의 X

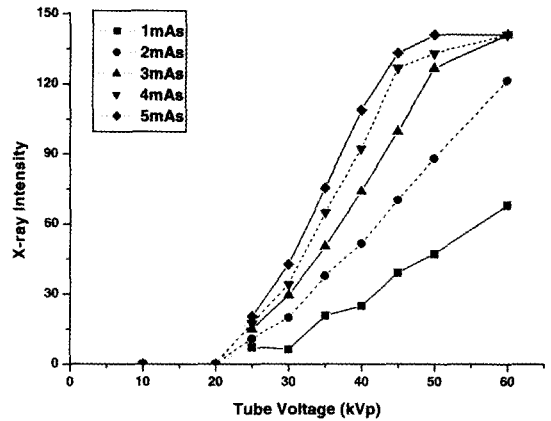


Fig. 2. Determination of initial X-ray intensity.

선 강도를 100으로 결정하고 각 방사시간에 따른 상대적인 X선 강도를 계산하였다.

두 변수 사이의 관계를 식(3)과 같이 로그함수의 형태로 나타내었는데, 이때의 R^2 값이 0.995로 두 변수 사이의 관계를 매우 잘 표현하고 있음을 알 수 있다. 따라서 X선 촬영이 끝난 필름의 각 점에서의 명도를 측정하여 식(3)에 대입함으로써 해당 위치에 도달한 X선 강도의 측정이 가능하다. 그러나 필름의 명도가 너무 높거나 낮은 경우에는 상대적으로 오차가 증가하게 되므로 실제 적용에 있어서 주의가 필요할 것으로 생각된다.

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

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

$$B = \text{X선 필름의 명도}(0 \sim 255).$$

2.2.3. 초기 X선 강도(I_0) 결정

X선의 초기강도는 발생장치에서의 전압과 전류, 방사시간에 따라 영향 받는다. 전압과 전류가 초기 X선 강도에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위하여 시편이 없는 상태에서 방사시간을 40초로 고정하고 전압을 9단계(10~60 kVp), 전류를 5단계(1~5 mAs)

로 변화시키면서 X선 촬영을 실시하였다. 촬영된 필름의 명도를 측정하고 식(3)에 대입하여 X선의 상대 강도를 측정된 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

30 kVp 이상의 전압에서 전압이 증가함에 따라 X선의 강도가 선형적으로 증가하고 있음을 알 수 있다. 그러나 30 kVp보다 낮은 전압이 사용되는 경우에는 다소 기울기가 감소하고, 20 kVp 이하에서는 필름을 통한 X선 강도의 탐지가 불가능함을 확인할 수 있다. 이는 필름의 명도가 높을 때 발생하는 오차에 의한 영향인 것으로 생각된다. 또한 X선강도가 120을 넘는 경우에도 그래프의 기울기가 감소하는 경향을 나타내었다. 식(3)에 최소 명도인 0을 대입하면 X선 강도는 153.2로 계산된다. 즉, X선 강도가 일정이상 증가하여도 필름으로 측정하는 방법의 한계 때문에 측정되는 강도는 더 이상 증가하지 못하고 약 150정도의 값으로 수렴하는 경향을 나타내게 된다. 그러나 실제 X선 강도는 선형적으로 증가할 것으로 예상되므로, 이 구간에서는 직선 구간의 값을 이용하여 외삽법을 통해 초기 X선의 강도를 산출하여 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

2.3. 목재 질량감쇠계수의 측정

식(1)을 질량감쇠계수에 대해서 정리하면 식(4)와 같다. 식에서 I 와 t 는 측정을 통해, I_0 는 Fig. 2로부터 결정될 수 있으므로, 재료의 밀도(ρ)로부터 해당 재료의 질량감쇠계수를 얻을 수 있다. 본 연구에서는 목재시편의 질량감쇠계수를 결정하기 위하여 먼저 치수법을 이용하여 재료의 기건밀도를 측정하고 X선 촬영을 통해 얻어진 I 와 I_0 를 식(4)에 대입하여 해당 재료의 질량감쇠계수를 측정하였다.

$$\mu = \frac{\log(I_0/I)}{\rho t} \quad (4)$$

2.3.1. 밀도의 영향

밀도와 질량감쇠계수 사이의 관계를 확인하기 위하여 0°의 연륜각을 가지는 130개의 시편에서 50개의

Table 2. Distribution of air-dried density (g/cm³, 0° annual ring angle)

Range of density	No. of specimens	Average Density
~0.46	6	0.439
0.46~0.48	14	0.471
0.48~0.50	14	0.489
0.50~0.52	28	0.510
0.52~0.54	20	0.530
0.54~0.56	13	0.551
0.56~0.58	9	0.570
0.58~0.60	5	0.590
0.60~0.62	10	0.611
0.62~	11	0.631
Total	130	0.533

시편을 선택하여 실험을 실시하였다. 먼저 치수법에 의해 측정된 기건밀도를 기준으로 전체 시편을 10개의 그룹으로 구분하고(Table 2), 각 그룹에서 임의로 5개의 시편을 선정하였다. 선정된 시편을 대상으로 X선 측정을 실시한 후에 식(4)를 이용하여 질량감쇠계수를 계산하고 기건밀도와 비교하였다. X-ray 촬영시의 촬영 조건은 40 kVp/2 mAs/80 sec로 하였다.

2.3.2. 연륜각의 영향

목재의 이방성이 질량감쇠계수에 미치는 영향을 확인하기 위하여 Table 1의 연륜각에 따른 시편 그룹에서 각각 5개의 시편을 선정하여 실험에 이용하였다. 시편의 선정과정에서 밀도에 의한 영향을 줄이기 위하여 각 연륜각에 대한 평균 밀도(0.551 g/cm³)가 일정하도록 하였다. 먼저, 각 시편에 대한 X선 촬영을 통해 질량감쇠계수를 측정하고, 측정이 끝난 시편은 길이방향 축을 중심으로 90° 회전시켜 다시 한번 측정을 실시하였다. 0°, 10°, 20°, 30°, 40°시편에 대해, 90° 회전된 시편의 연륜각은 각각 90°, 80°, 70°, 60°, 50°를 나타내게 되며, 따라서 0~90°의 연륜각 범위에서 10° 간격으로 총 10개의 그룹에 대한 질량감쇠계수의 측정이 가능하였다. X선 촬영 조건은 밀도의 경우와 동일한 조건을 사용하였다.

2.3.3. 두께의 영향

Table 2의 시편 중에서 총 55개의 시편을 선정하고, 그룹 내의 시편 개수가 1개인 것부터 10개인 것까지 총 10가지 그룹으로 분류하였다. 이때 시편을 선정하고 분류하는 과정에서 각 그룹의 평균밀도($0.540 \sim 0.545 \text{ g/cm}^3$)가 유사하도록 주의하였다. 각 그룹 내의 모든 시편을 시편의 접선단면이 서로 마주보도록 일렬로 쌓은 후에(즉, 두께를 20 mm에서 200mm 까지 변화) X선 촬영을 실시하고 질량감쇠계수를 계산하였다. 앞서서와 동일한 촬영조건을 사용할 경우에 시편의 두께가 증가함에 따라 필름의 명도가 높아지며 전체적인 측정오차가 증가하게 된다. 따라서 모든 두께 범위에서 좋은 필름영상을 얻을 수 있도록 X선 촬영 조건을 60 kVp/4 mAs/80 sec로 조정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 목재 질량감쇠계수의 결정

X선 측정을 통해 구한 목재의 질량감쇠계수와 밀도, 연륜각 사이의 관계를 각각 Fig. 3과 4에 나타내었다. 결과를 보면 비중 및 연륜각은 재료의 질량감쇠계수에 거의 영향하지 않으며, 시편의 두께가 20 mm 일 때 약 0.04 정도의 값을 가지는 것으로 확인되었다.

그러나 두 경우에 대한 변이계수가 각각 0.082와 0.097로 측정 결과의 편차가 비교적 크게 나타나는 것을 확인할 수 있는데, 이는 필름을 이용한 X선 강도의 측정과정에서 발생하는 오차에 기인하는 것으로 판단된다. 필름의 명도는 촬영, 현상, 스캔 과정에서 필름이나 현상액의 상태, 현상 및 스캔시의 조건 등 다양한 요인에 의해 영향 받는다. 따라서 보다 정확하게 X선 강도를 측정하기 위해서는 각 단계에서 발생할 수 있는 문제점을 파악하고 이를 개선하기 위한 노력이 필요할 것으로 생각된다. 이외에도 촬영, 현상, 스캔 등의 복잡한 단계를 거치지 않고도 보다 간단하게 X선 강도를 측정할 수 있는 측정 방법 및 장치에 대한 개선이 요구된다.

목재의 질량감쇠계수와 시편 두께 사이의 관계를

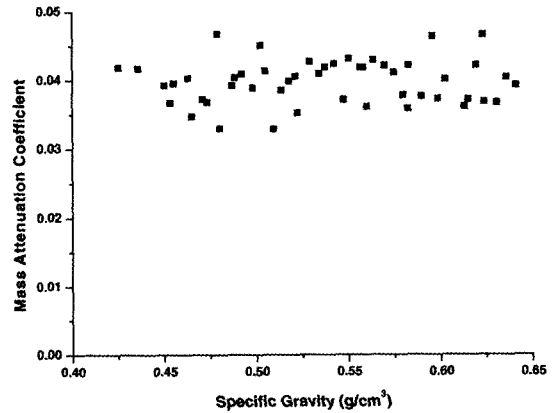


Fig. 3. The effect of density on the mass attenuation coefficient.

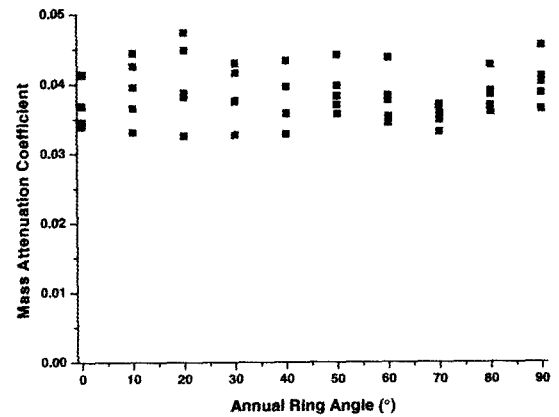


Fig. 4. The effect of annual ring angle on the mass attenuation coefficient.

Fig. 5에 나타내었는데, 두께가 증가함에 따라 질량감쇠계수가 감소하는 경향을 나타내었다. 질량감쇠계수는 재료의 구성물질과 방사되는 에너지에 의해 영향 받으며, 에너지가 클수록 감쇠계수는 작아지는 것으로 알려져 있다(Olson and Arganbright, 1981; Suryatmono *et al.*, 1993; Bergsten *et al.*, 2001). 방사선원과 필름의 거리가 고정된 상태에서 시편의 두께가 증가하면 시편 표면에 도달하는 에너지의 양도 함께 증가하기 때문에 질량감쇠계수가 감소하는 것으로 생각된다. 본 연구에서는 X선 측정의 현장적용을 위하여 상대적으로 약한 soft-X선을 사용하였는

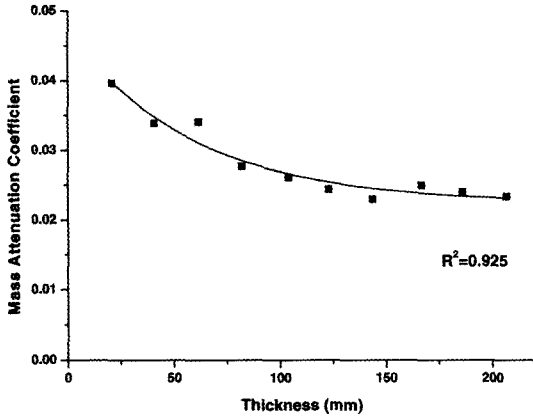


Fig. 5. The effect of specimen thickness on the mass attenuation coefficient.

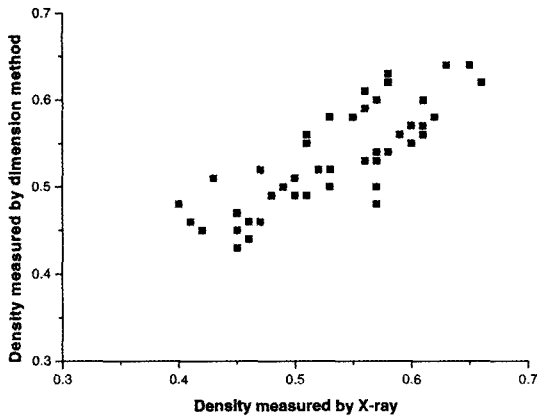


Fig. 6. Comparison of densities measured by X-ray and dimension method.

데, 이러한 경우 공기층에서의 X선 에너지의 감쇠가 더 크게 일어나기 때문에 시편 두께에 의한 영향이 더 크게 나타날 것으로 판단된다.

시편의 두께와 질량감쇠계수 사이의 관계를 로그함수를 이용하여 식(5)에 나타내었다.

$$\mu = -0.0075 \times \log(t) + 0.0622 \quad (5)$$

식(5)를 식(2)에 대입하면 식(6)을 얻을 수 있고, 이 식을 이용하여 X선 측정값을 통해 얻어진 결과로부터 터 국산 소나무 목재의 밀도를 결정할 수 있을 것으로

기대된다.

$$\rho = \frac{\log(I_0/I)}{t(-0.0075 \times \log(t) + 0.0622)} \quad (6)$$

3.2. X선을 이용한 밀도 측정

X선을 이용한 목재의 밀도측정방법을 검증하기 위하여 치수법으로 측정된 기건밀도와 X선 측정결과를 식(6)에 대입하여 얻은 밀도를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 측정에는 2.3.1절에서 사용된 50개의 시편이 사용되었다. 이 결과를 통해 X선을 이용한 목재의 밀도측정이 가능함을 확인할 수 있었다. 그러나 동일한 시편의 밀도를 측정하였음에도 불구하고 두 값 사이의 상관관계가 비교적 낮게 나타났는데($R^2=0.554$), 이는 앞에서 설명한 바와 같이 X선의 강도를 필름의 명도를 이용하여 측정하는 과정에서 발생하는 오차에 기인하는 것으로 생각된다. 따라서 X선을 이용하여 목재의 밀도를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 측정 방법이나 장치에 있어서의 개선이 필요할 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 현장에서 적용 가능한 X선 CT 시스템을 개발하기 위한 연구의 일환으로, 먼저 휴대형 soft-X선 촬영 장치를 사용한 목재의 밀도측정 방법을 확립하고 그 가능성을 확인하고자 하였다.

먼저 X선 필름을 이용한 정확한 X선 강도의 측정을 위하여 필름 명도와 X선 강도 사이의 상관관계를 측정하고 두 변수 사이의 관계를 로그함수를 이용하여 표현하였다. 다음으로 전류와 전압을 변화시키면서 초기에 발생하는 X선 강도의 변화를 관찰하였는데, 30 kVp 이상의 전압에서 전압이 증가함에 따라 X선의 강도가 비례하여 증가하는 것을 확인하였다. X선의 강도가 너무 높은 경우에는 필름을 이용한 X선강도 측정방법의 한계 때문에 정확한 강도의 측정이 어려웠는데, 이 경우에는 보간법을 사용하여 초기 X선 강도의 예측이 가능할 것으로 생각되었다.

두 번째로 목재의 밀도, 연륜각, 두께가 질량감쇠계수에 미치는 영향을 확인하고 목재의 정확한 질량감쇠계수를 결정하였다. 밀도와 연륜각은 질량감쇠계수에 영향하지 않으며, 두께가 증가함에 따라 질량감쇠계수가 지수적으로 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 이 관계를 Beer의 법칙에 적용함으로써 X선 측정결과로부터 국산 소나무 목재의 밀도를 계산할 수 있는 식을 아래와 같이 제시하였다.

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

마지막으로 X선 촬영법을 통해 측정된 밀도를 기존의 치수법에 의한 측정결과와 비교함으로써 앞에서 결정된 밀도측정 방법의 적용 가능성을 확인할 수 있었다. 이상의 결과는 목조 고건축물 구조부재의 내부 상태를 평가하기 위한 비파괴 검사법으로써 현장 적용이 가능한 X선 CT 시스템을 개발하는데 있어서 기초 자료로써 효과적으로 사용될 수 있을 것으로 기대된다. 그러나 X선을 통해 측정된 밀도에 있어서는 측정과정에서 발생하는 오차로 인하여 편차가 다소 크게 나타나는 것이 확인되었다. 휴대형 X선 장치를 이용하여 목재의 밀도를 보다 정확하게 측정하기 위해서는 측정 방법이나 장치를 개선하기 위한 보다 많은 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. Bhandarkar, S. M., Faust, T. D., and Tang, M. 2002. Design and prototype development of a computer vision-based lumber production planning system. *Image and Vision Computing*. 20: 167~189.
3. Bergsten, U., J. Lindberg, A. Rindby, and R. Evans. 2001. Batch measurements of wood density on intact or prepared drill dores using x-ray microdensitometry. *Wood Science and Technology*. 35: 435~452.
4. Cown, D. J. and B. C. Clement. 1983. A Wood Densitometer Using Direct Scanning with X-Rays. *Wood Sci. Technol*. 17: 91~99.
5. Echols, R. M. 1973. Uniformity of Wood Density Assessed from X-Rays of Increment Cores. *Wood Science and Technology* 7: 34~44.
6. Gureyev, T. E. and R. Evans. 1999. A method for measuring vessel-free density distribution in hardwoods. *Wood Science and Technology*. 33: 31~42.
7. Heger, L., M. L. Parker, and R. W. Kennedy. 1974. X-Ray Densitometry: A Technique and An Example of Application. *Wood Science* 7(2): 140~148.
8. Lu, C. and F. Lam. 1999. Study on the X-ray calibration and overlap measurements in robot formed flakeboard mats. *Wood Science and Technology*. 33: 85~95.
9. Nearn, W. T. and K. Bassett. 1968. X-Ray Determination and Use of Surface-to-Surface Density Profile in Fiberboard. *Forest Prod. J.* 18(1): 73~74.
10. Olson, J. R. and D. G. Arganbright. 1981. Prediction of Mass Attenuation Coefficients of Wood. *Wood Sci.* 14(2): 86~90.
11. Schajer, G. S. 2001. Lumber Strength Grading Using X-Ray Scanning. *Forest Products Journal*. 51(1): 43~50.
12. Schmoldt, D. L., Occena, L. G., Abbott, A. L., and Gupta, N. K. 1999. Nondestructive evaluation of hardwood logs: CT scanning, machine vision and data utilization. *Nondestr. Test. Eval*. 15: 279-309.
13. Suryatmono, B., S. Cramer, Y. Shi, and K. A. McDonald. 1993. Within-board lumber density variations from digital X-ray images. Proc. of 9th International Symposium on Nondestructive Testing of Wood. Madison, WI. pp.168~175.