

Computed Radiography (CR)를 통한 목재 수종별 X선 투과 이미지 해석을 위한 기초연구 (1)

Preliminary Study (1) for Development of Computed Radiography (CR) Image Analysis according to X-ray Non-destructive Test by Wood Species

송정일*, 김한솔

국립문화재연구소 문화재보존과학센터

Jung Il Song*, Han Seul Kim

Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of Cultural Heritage, Daejeon 34122, Korea

Received March 30, 2021

Revised April 13, 2021

Accepted April 26, 2021

*Corresponding author

E-mail: ssong85@korea.kr

Phone: +82-41-860-9387

Journal of Conservation Science
2021;37(3):220-231

<https://doi.org/10.12654/JCS.2021.37.3.03>

pISSN: 1225-5459, eISSN: 2287-9781

© The Korean Society of
Conservation Science for Cultural
Heritage

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

초 록 문화재 방사선 비파괴 투과 조사 방식은 이미지플레이트(Image Plate, IP)를 사용하는 디지털 방사선영상시스템(Computed Radiography, CR)이 도입되면서 필름방식의 아날로그 이미지에서 점차 디지털 이미지로 교체되고 있다. 방사선 비파괴 투과 조사의 이미지 품질은 촬영 조건(관전압, 관전류, 노출시간), 영상 획득 매체, 촬영 거리, 유물의 두께 등이 영향을 미친다. 이 논문에서는 목재 문화재에 주로 사용되는 수종(소나무, 밤나무, 은행나무, 상수리나무)에 X선 선원의 투과 특성을 GE社의 CR 영상 시스템을 통해 획득된 이미지의 그레이 스케일(Gray Scale)을 분석한 후 신호 대 잡음비(signal to noise ratio) 및 대조도를 평가하고, 이중-선 상질계(Duplex-wire image quality indicator), 구형과 차트(line-pair gauges), 선형 식별계(Image Quality Indicator)를 이용하여 이미지를 분석하였다.

중심어 목재 디지털 X선 투과시험, 식별계 투과실험, 이중-선 상질계

ABSTRACT The use of digital copies of film-based analog images and the introduction of digital radiographic imaging systems using image plates gradually replace the non-destructive radiation-irradiation method of Cultural Heritage. The quality of images obtained from this technique is affected by conditions such as tube voltage, tube current, and exposure time, type of image acquisition medium, distance of the artifacts from the image acquisition medium, and thickness of artifacts. In this study, we evaluated the grayscale image obtained using GE's Computed Radiography (CR) imaging system, the transmission characteristics of the X-ray source for each tree type (pine, chestnut, sawtooth oak, ginkgo) used in wooden Cultural Heritage, and the signal-to-noise ratio (SNR) and contrast. The GE's CR imaging were analyzed using the Duplex wire image quality indicator, line-pair gauges.

Key Words Wood X-ray, Non-destructive testing, Computed Radiography(CR), Duplex wire image quality indicator

1. 서 론

X선을 이용한 문화재 비파괴 투과 조사는 매장 출토 유물이나 형태가 복잡한 유물을 조사하는 대표적인 방법으로, 문화재의 손상 없이 내부 구조에 대한 정보를 파악하고 기록하는 데 매우 유용하다. X선은 유물의 내부를 투과하면서 구조, 결함, 형상에 따라 X선 투과량이 감소되고, 이러한 X선 투과량의 변화가 필름이나 이미지플레이트를 통해 이미지화된다.

기존의 문화재 비파괴 투과 조사에서 이미지 획득 방식은 감광된 필름(Film)을 디지털 카메라로 촬영하는 간접 촬영 방식이었다. 그러나 최근 국립문화재연구소를 중심으로 디지털 촬영 장비(Computed Radiography, CR)를 사용하는 디지털 방식으로 변화하고 있다. 대표적으로 고려 나전국화넝쿨무늬함, 나주 복암리 정촌 고분 금동신발, 함안 말이산 동물형 토기 등의 주요 유물에 CR 방식의 비파괴 투과 조사에 적용되었다(Figure 1). CR 방식은 필름의 디지털화 과정에서 발생하는 이미지 변형이나 화

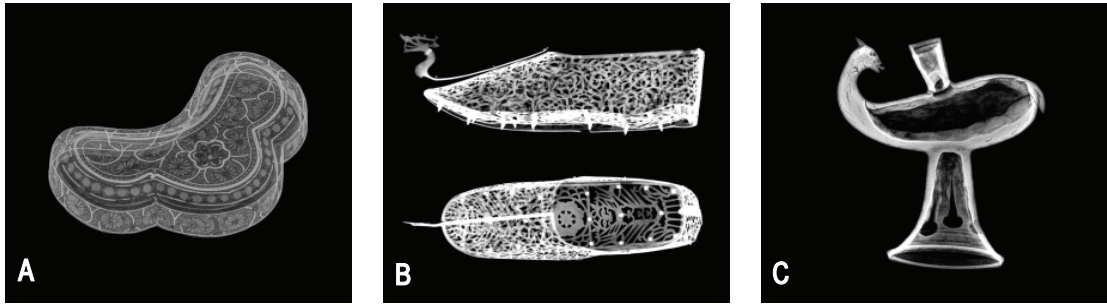


Figure 1. X-ray radiography of CR image (Cultural Heritage Conservation Science Center, 2020). (A) Goryeo Lacquered Box. (B) Gilt-bronze shoe. (C) Deer-shaped pottery.

소 저화 등의 문제점을 보완한 방식으로 이미지플레이트 (Image Plate, IP)를 스캐닝하여 고해상의 디지털 이미지 데이터로 변환한다. 이 방식은 촬영 시간이 단축되기 때문에 필름을 이용할 때보다 5~20%의 더 낮은 방사선 조사선량으로 촬영이 가능하여 유물에 조사되는 방사선량을 줄일 수 있다는 장점이 있다.

CR 방식의 방사선 투과 조사는 이미 산업 분야에서 한국 산업규격(KS A4054)이나 미국재료시험협회(American society for testing materials, ASTM) E 747 등의 이미지 품질 규격을 통해 이미지 품질을 검증하고 관리하고 있다 (Nondestructive Testing Standard Vol. 03.03 ASTM, 2007). 하지만 산업 분야의 이미지 품질 규격을 다양한 재질과 형태의 문화재 X선 투과 조사에 그대로 적용하기 어렵다. 또한 현재 문화재에 대한 비파괴 투과 조사 방법 및 이미지 품질 규격화에 대한 기초 실험 및 연구는 매우 부족한 실정이다.

목재 문화재는 금속 문화재에 비해 구성 재질의 밀도가 낮고 X선의 투과력이 높아 이미지가 선명한 장점이 있다. 하지만 목재 문화재는 목재 조직의 방향성, 목재 표면에 처리된 단청이나 옷칠 등의 표면 마감, 목재 문화재에 조사되는 X선의 방향성 등 다양한 요소에 의해 투과 이미지의 상질이 영향을 받는다. 특히 목재 유물의 X선 투과 조사에서는 목재 유물에 대한 제작 기법 및 사용 흔적, 결합 위치 등을 확인하는 것이 중요하기 때문에 조사 과정에서 X선의 조사 방향이 일정하지 않다. 따라서 이러한 목재 유물의 투과 조사 특성에 적합한 X선 투과 조사 이미지 및 촬영 방법의 표준화에 대한 기초 실험이 필요하다.

이 논문에서는 목재 유물에 주로 사용되는 소나무, 밤나무, 상수리나무, 은행나무 4개의 목재의 종단면으로 절단된 시편에 대한 X선 투과 조사 조건과 이미지의 상질 해석에 대한 비교를 실시하였다. 실험 방법은 관전압 (kVp), 관전류(mA)와 노출 시간(s)의 관계인 관전류량 (mAs), 종단면으로 절단된 시편의 두께(mm)에 따라 이미

지 해상도, 선형 식별도, Gray Scale, 대조도, 신호 대 잡음비(signal to noise ratio, SNR)를 분석하여 목재 시편들의 투과 특성을 평가하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

목재 수종별 X선 투과 조사 실험 장비는 연X선 장비인 Softex社(JAPAN)의 M-150 (150 kVp, 3 mA) 방사선발생장비와 국제 규격의 상질계를 사용하였다. 또한 디지털 이미지의 획득을 위해 GE社(USA)의 CR^X Vision 스캐닝 장비와 이미지플레이트(Image Plate, IP)를 활용하였으며, 이미지 분석을 위해 CR^X Vision의 Rhythm Review를 사용하였다.

2.2. 연구방법

2.2.1. 실험방법

이 실험은 소나무, 밤나무, 은행나무, 상수리나무의 두께(15 mm, 45 mm)에 따라 관전압(15~30 kVp)과 관전류

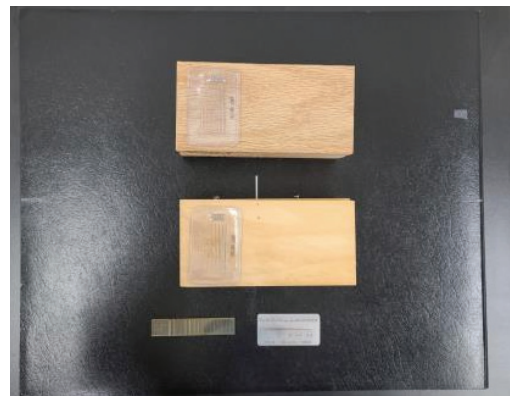


Figure 2. Diagram of test.

량(관전류(mA) · 노출시간(s): mAs)을 조절하여 투과된 목재 시편의 이미지를 평가하였다.

실험에 사용된 시편은 나이트 종방향으로 절단된 형태로, 120×50 mm이며, 두께를 15 mm와 45 mm로 조절하며 실험을 진행하였다. 또한 이미지플레이트(IP)는 14×17 in size, GE, CR^X Vision, IPS 타입을 사용하였고, 상질계는 Fe 재질의 KS A4054규격 바늘형 02 F를 사용하였다. 또한 이중 선형 상질계(Duplex-wire image quality indicator, DW IQI)는 0.032~0.8 mm의 이중 금속 15 D형을 사용하였다.

시편의 배치는 Figure 2와 같이 X선 선원-이미지플레이트의 조사거리를 700 mm로 일정하게 설정하였다. 목재 시료의 좌측 상단과 우측 바닥면에 식별계(02F)를 배치하고, 이미지플레이트 하단에 이중 선형 상질계(DW IQI)와 구형과 차트를 배치하였다(Figure 2).

실험 평가 방법은 목재 시편의 두께에 따라 관전압(kVp)과 관전류량(mAs)의 변화에 따른 목재 수종별 투과 조사 이미지를 이미지 분석 소프트웨어(GE, Rhythm Review, USA), 이중 상질계, 선형 식별계를 통해 평가하였다.

2.2.2. 이미지의 해상도 측정

X선 투과 이미지의 해상도 파악을 위해 ASTM E2002 규격의 이중 선형 상질계(DW IQI)와 Convergent Line Pair Gauge를 사용하여 X선 투과 조사 이미지의 해상도를 측정하였다(Park *et al.*, 2011). DW IQI는 2개의 가는 1쌍의 텅스텐 선으로 구성되어 있으며, 불선명도와 공간분해능을 측정하는 데 사용된다(Han, 2008a). Line Pair Gauge는 게이지 한 쪽 끝에 있는 선이 넓은 간격을 두고 반대쪽 끝에 수렴하는 형태이며, 실제 식별 가능한 최소 수준의 이미지 해상도를 확인하는 데 사용된다.

DW IQI의 측정은 X선 투과 조사 이미지의 Gray Scale 데이터에서 Rhythm Review Line Profile을 통해 확인하였다. Line Pair Gauge는 투과 이미지에서 확인되는 1 mm 너비에서 식별할 수 있는 line의 개수를 통해 공간 분해능 lp/mm를 확인하였다.

2.2.3. 금속선 선지름 식별 평가

시편 상단과 하단에 Fe 재질의 KS A4054규격의 선형 식별계 02 F를 부착하여 금속선 식별률에 따른 투과 조사 이미지의 품질을 판별하였다. 금속선 식별률은 동일한 두께에서 식별 가능한 최소 선지름이 낮을수록 품질이 좋은 것으로 평가한다(Kang *et al.*, 2010). 이 실험에서는 X선 조사 조건에 따른 수종별 최소 식별 선의 개수와 식별률을 확인하였다.

$$\text{식별률}(\%) = \frac{\text{투과도계 식별 최소선지름}(mm)}{\text{시험편투과두께}(mm)} \times 100$$

2.2.4. Gray Scale 평가

CR^X Vision의 스캐너에서 16 bit의 X선 디지털 화소값으로 0~65,233단계 명도 범위로 X선의 투과 선량을 디지털화하여 Gray Scale을 측정하였다(Figure 3). 실험에 사용된 이미지플레이트의 크기는 14×17 in이며, 스캐닝 속도는 45 plates/hour, 픽셀 피치(pixel pitch)인 인접화소 사이 간격은 70 μm로 이미지플레이트를 스캔하였다.

2.2.5. 신호 대 잡음비(SNR) 평가

신호 대 잡음비(SNR)는 신호에 동반하는 잡음 성분의 양을 수치적으로 표시한 것으로 정보를 지닌 신호의 세기를 잡음의 세기로 나눈 값을 말한다. SNR 값이 클수록 영상의 품질이 우수하고 결함 등을 확실히 검출할 수 있다(Han, 2008b). 신호 대 잡음비의 측정은 CR^X Vision의

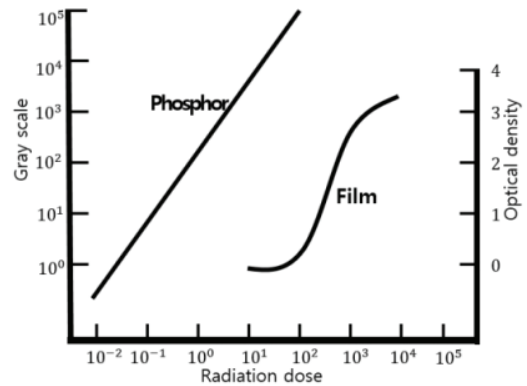


Figure 3. Compare phosphor and film(Obuchowski, 2003).

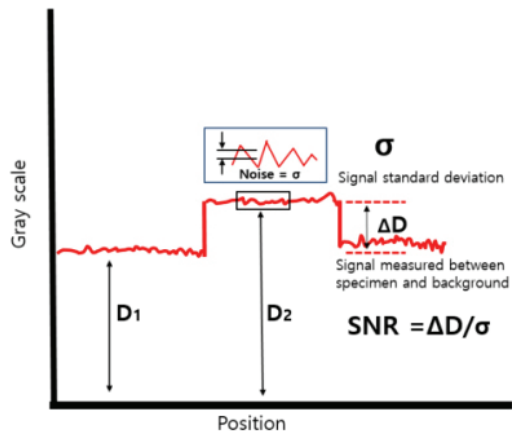


Figure 4. Definition of signal to noise ratio (SNR) (Kang *et al.*, 2010).

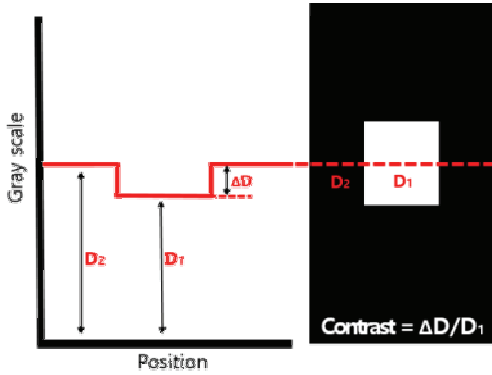


Figure 5. Definition of X-ray image contrast (Kang *et al.*, 2010).

Rhythm Review 프로그램에서 SNR 측정 기능을 활용하여 총 3회 측정된 값의 평균을 사용하였다(Figure 4).

2.2.6. 디지털 이미지 대조도(Contrast) 평가

실험 시편(D1)과 이미지플레이트 백그라운드(D2)의 Gray Scale을 CR^X Vision의 Rhythm Review 프로그램으로 측정하여 대조도를 평가하였다(Figure 5).

3. 결론 및 고찰

3.1. 이미지플레이트 해상도의 평가 (Resolution of IP image)

해상도는 X선의 관전압, 관전류량에 따라 소나무-밤나무 그룹, 상수리나무-은행나무 그룹의 DW IQI의 Line Profile과 Convergent Line Pair Gauge 이미지 판독 결과를 확인하였다(Table 1).

해상도 평가 결과, 관전압 30 kVp과 관전류량 60 mAs

(1 mA, 60 s)의 촬영 조건에서 DW IQI의 Line Profile는 소나무-밤나무 그룹의 경우 12 D이고, 상수리나무-은행나무 그룹은 10 D로, 2.0 D의 가장 큰 편차 범위가 나타났다. 하지만 이것은 IP의 X선 조사 위치에 따른 이미지의 Gray Scale 측정 오차 범위인 15% 이내로 확인되었다(Carestream Health, NDT Solutions Rochester, 2007). 또한 해상도 평가 결과, 관전압 15 kVp과 관전류량 60 mAs (1 mA, 60 s)의 촬영 조건에서 DW IQI의 Line profile는 11 D로 동일하였으나 Line Pair Gauge의 측정 결과는 소나무-밤나무 그룹은 14.5 lp/mm이고, 상수리나무-은행나무 그룹은 12 lp/mm로 2.5의 편차가 확인되었다. 이는 Convergent Line Pair Gauge의 X선 투과 조사 위치가 목재 실험 시편의 하단에 동일한 위치에 배치되지 않아 해상도의 편차가 발생된 것으로 판단된다. 따라서 향후 목재 및 다른 재질의 비파괴 투과 조사 및 표준화 이미지 평가 추가 실험에서는 목재 실험 시편과 동일한 위치에 DW IQI과 Convergent Line Pair Gauge를 배치하여 오차 범위를 줄일 필요가 있다.

3.2. 목재 수종별 X선 투과 이미지 분석

목재 수종별 X선 투과 이미지 분석결과는 Table 2~5이다.

3.3. 수종별 이미지 분석 결과

3.3.1. Gray Scale 평가

Gray Scale은 목재 시편을 투과한 X선의 감쇄 정도를 0~65,233의 단계 명암으로 구분하여 이미지화된 측정 결과이다. X선의 투과력이 높을수록 65,233의 단계에 가깝고, 이미지의 명암이 어둡다(Table 6).

Table 1. Resolution of IP image

Tube voltage (kVp)	Tube current · time (mAs)	Pine tree/Chestnut tree		Sawtooth oak/Ginkgo	
		DW IQI	(l p/mm)	DW IQI	(l p/mm)
15	30 (1 mA, 30 s)	11 D	14.5	11 D	14
	60 (1 mA, 60 s)	11 D	14.5	11 D	12
	60 (2 mA, 30 s)	11 D	14.5	10 D	14
	120 (2 mA, 60 s)	11 D	14.5	11 D	14.5
30	30 (1 mA, 30 s)	11 D	14.5	11 D	12
	60 (1 mA, 60 s)	12 D	12	10 D	12
	60 (2 mA, 30 s)	11 D	14	10 D	14.5
	120 (2 mA, 60 s)	12 D	12.5	11 D	14

Table 2. X-ray image of wood species (Tube voltage 15 kVp, Woods 15 mm)

















Tube voltage	Wood species	Tube current · time (mAs)			
		30 (1 mA, 30 s)	60 (1 mA, 60 s)	60 (2 mA, 30 s)	120 (2 mA, 60 s)
	Pine tree				
	Chestnut tree				
	Sawtooth oak				
	Ginkgo				

Table 3. X-ray image of wood species (Tube voltage 30 kVp, Woods 15 mm)

















Tube voltage	Wood species	Tube current · time (mAs)			
		30 (1 mA, 30 s)	60 (1 mA, 60 s)	60 (2 mA, 30 s)	120 (2 mA, 60 s)
	Pine tree				
	Chestnut tree				
	Sawtooth oak				
	Ginkgo				

Table 4. X-ray image of wood species (Tube voltage 15 kVp, Woods 45 mm)

Tube voltage	Wood species	Tube current · time (mAs)			
		30 (1 mA, 30 s)	60 (1 mA, 60 s)	60 (2 mA, 30 s)	120 (2 mA, 60 s)
	Pine tree				
	Chestnut tree				
	Sawtooth oak				
	Ginkgo				

Table 5. X-ray image of wood species (Tube voltage 30 kVp, Woods 45 mm)

















Tube voltage	Wood species	Tube current • time (mAs)			
		30 (1 mA, 30 s)	60 (1 mA, 60 s)	60 (2 mA, 30 s)	120 (2 mA, 60 s)
	Pine tree				
	Chestnut tree				
	Sawtooth oak				
	Ginkgo				

Table 6. Image analysis of wood species

kVp	Tube current-time (mAs)	Thick-ness (mm)	Pine tree			Chestnut tree			Sawtooth oak			Ginkgo			
			Gray scale	SNR	Contrast	Gray scale	SNR	Contrast	Gray scale	SNR	Contrast	Gray scale	SNR	Contrast	
15	30	15	974	7.67	66.28	743	3.07	87.20	199	7.84	328.31	695	13.3	93.29	
			(1 mA, 30 s)	119	11.2	549.70	101	27.36	647.84	90	17.37	727.14	92	19.91	711.32
	60	15	1910	8.38	33.31	1471	3.12	43.55	483	10.21	134.68	1456	13.42	44.01	
			(1 mA, 60 s)	242	6.87	269.80	129	4.62	507.01	90	17.64	727.14	188	15.2	347.58
	60	15	1682	7.85	37.96	1293	3.15	49.68	274	7.29	238.17	1068	12.46	60.36	
			(2 mA, 30 s)	200	8.61	326.67	120	2.93	545.11	90	17.34	727.14	127	14.76	515.01
	120	15	3431	8.16	18.10	2627	3.1	23.95	588	7.52	110.45	2250	12.96	28.13	
			(2 mA, 60 s)	470	6.72	138.43	243	3.99	268.68	90	17.83	727.14	265	26.6	246.29
	30	30	15	13411	17.07	3.89	11888	7.58	4.51	14428	8.38	3.54	24372	27.12	1.69
				(1 mA, 30 s)	5344	20.14	11.26	4283	9.39	14.30	1670	19.65	38.24	5072	29.01
		60	15	26973	17.34	1.43	23989	7.58	1.73	13942	9.95	3.70	23716	25.66	1.76
				(1 mA, 60 s)	10648	26.21	5.15	8680	13.23	6.55	3273	19.58	19.02	10130	30.2
60		15	24460	17.04	1.68	21808	7.49	2.00	12463	10.38	4.26	21370	22.54	2.07	
			(2 mA, 30 s)	9680	18.09	5.77	8533	8.37	6.68	2895	19.64	21.64	9071	23.91	6.22
120		15	49028	17.53	0.34	43138	7.2	0.52	26224	9.79	1.50	44169	27.47	0.48	
			(2 mA, 60 s)	17862	20.44	2.67	15187	11.37	3.32	6112	6.74	9.72	18698	26.23	2.50

Table 7. Discrimination of wood species

kVp	Expose time (S)	Thickness (mm)	Pine tree						Chestnut tree						Sawtooth oak						Ginkgo						
			Number of IQI line		Discrimination (%)		Number of IQI line		Discrimination (%)		Number of IQI line		Discrimination (%)		Number of IQI line		Discrimination (%)		Number of IQI line		Discrimination (%)		Number of IQI line		Discrimination (%)		
			Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	Top	Bottom	
15	30	15	6	6	0.42	0.42	6	6	0.42	0.42	0	0	-	-	0	0	-	-	7	7	0.42	0.42	7	7	0.42	0.42	
			0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	
	60	15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	4	4	0.67	0.67	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	
			0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	
	60	15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	0	0	-	-	5	5	0.53	0.53	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	
			0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	
	120	15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	6	6	0.42	0.42	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	
			0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	0	0	-	-	
	30	30	15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33
				7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	1	1	0.44	0.44	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11
		60	15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33
				7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	6	6	0.14	0.14	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11
60		15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	
			7	7	0.11	0.11	6	6	0.14	0.14	1	1	0.44	0.44	6	6	0.14	0.14	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	
120		15	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	7	7	0.33	0.33	
			7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	5	5	0.18	0.18	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	7	7	0.11	0.11	

관전류량이 동일하고 관전압의 변화가 있는 경우, 15 kVp의 관전압보다 30 kVp일 때 소나무 13.76~14.28배, 밤나무 16~16.42배, 상수리나무 28.86~72.50배, 은행나무 16.28~35.06배로 Gray Scale의 차이가 확인되었다. 특히 상수리나무는 다른 수종에 비해 X선 조사량이 적을 경우 Gray Scale의 편차가 커짐이 확인되었다.

관전압이 같고 관전류량의 변화가 있는 경우, 모든 수종에서 2 mA, 30 s의 관전류량 조건보다 1 mA, 60 s의 관전류량 조건에서 1.07~1.13배의 비율로 Gray Scale이 더 높게 측정되었다. 이를 통해 동일한 관전압의 조건일 때, X선의 투과력에 미치는 영향은 관전류보다 노출시간이 미치는 영향이 크다. 관전압, 관전류, 노출 시간의 총량이 증가할수록 모든 수종에서 Gray Scale의 측정값은 Figure 3과 같은 선형(Linearity) 특성이 확인되었다.

3.3.2. 신호 대 잡음비(SNR) 평가

SNR을 통한 영상의 품질은 SNR이 클수록 획득한 신호가 잡음에 비해서 뚜렷한 영상을 나타내며 SNR이 작을수록 신호와 잡음의 구별이 어려워 영상의 질이 저하된다.

SNR 실험결과 관전압이 15 kVp일 때보다 30 kVp일 때 SNR 측정 결과는 소나무 2.35배, 밤나무 1.41배, 상수리나무 1.01배, 은행나무 1.65배로 전압이 클수록 영상이 더 뚜렷한 것으로 관찰되었다. 실험 시편의 두께에 따른 SNR 측정 결과, 시편의 두께가 45 mm일 때 소나무 1.22배, 밤나무 1.42배, 상수리나무 1.72배, 은행나무 1.06배로 시편의 두께 증가함에 따라 SNR이 증가하였다.

이러한 SNR의 측정 결과 은행나무, 소나무, 밤나무, 상수리나무의 순서로 SNR 값이 높은 것으로 확인되었다. 은행나무의 평균 SNR은 15 mm에서 19.37, 45 mm에서 23.23로 나타났다. 소나무의 경우 15 mm에서 12.63, 45 mm에서 14.79의 SNR 값 평균을 보이며, 상수리나무는 15 mm에서 8.92, 45 mm에서 16.97의 평균값을 보였다. 밤나무의 경우 15 mm에서 5.26, 45 mm에서 10.16의 SNR 평균값을 보였다.

실험 결과 SNR은 관전압 30 kVp일 때와 투과 두께가 45 mm 이상일 때 가장 높은 것으로 나타났으며, 관전압이 증가할수록 SNR 값이 높은 것으로 확인되었다. 또한 관전류량의 변화에 따른 영향은 확인되지 않았으나 수종의 재질에 따른 SNR의 변화는 확인되었다(Table 6).

3.3.3. 대조도(Contrast) 평가

대조도 평가는 다른 두 영역 간 명암 차이를 평가하는 기준으로 물질과 주변 농도차가 클수록 쉽게 영상을 인식할 수 있다. 대조도가 좋다는 것은 물질의 밀도 및 두께

가 유사한 물체를 촬영하였을 경우, 이 두 가지를 잘 구별할 수 있음을 의미한다(Kang, 2011). 대조도는 기록 매체(Image Plate)의 차이, 조사 선원의 차이, 조사 선원의 산란 방사선 존재의 유무 등 다양한 인자들에 의해 영향을 받는다(Kang *et al.*, 2010). 대조도 실험 결과 관전압에 따른 평균 대조도는 상수리나무 15 kVp에서 465.02, 30 kVp에서 12.70, 밤나무의 경우 15 kVp에서 271.63, 30 kVp에서 4.95로 나타났다. 또한 은행나무는 15 kVp에서 255.75, 30 kVp에서 4.01, 소나무는 15 kVp에서 180.03, 30 kVp에서 4.02로 확인되었다. 이를 통해 대조도는 관전압의 변화에 따른 평균 대조도의 편차가 매우 큰 것으로 나타났다. 또한 투과 두께에 따른 대조도 평가는 15 mm일 때보다 45 mm의 두께일 때 밤나무가 7.24배, 소나무 6.30배, 은행나무 6.40배, 상수리나무 5.59배로 두꺼울수록 대조도가 큰 것으로 확인되었다. 육안 관찰에서도 관전압이 낮고 투과 두께가 두꺼울수록 투과가 잘 되지 않아 목재의 조직 방향 등에 대한 관찰이 어려웠다. 또한 실험 결과 대조도는 관전압과 관전류량이 같은 촬영조건일 때 노출 시간(s)보다는 관전류(mA)를 높게 할수록 대조도 편차에 미치는 영향이 큰 것이 확인되었다(Table 6).

3.3.4. 수종별 식별률(Discrimination of wood species)

식별률은 목재 시편의 투과 이미지에서 관찰되는 식별계의 선형 개수와 식별률을 측정하였다. 식별률 실험 결과 관전압과 투과 두께에 따라 수종에 따라 관찰되는 선형 개수와 식별률의 차이가 확인되었다. 15 kVp의 관전압과 45 mm의 투과 두께의 조건일 때 모든 목재 시편에서 식별계의 선형이 판별되지 않았다. 하지만 30 kVp의 관전압과 투과 두께가 15 mm의 조건에서는 모든 수종의 시편에서 상단과 하단의 7개 식별선이 모두 판별되었다(Tables 2~5). 수종별 식별률은 투과 두께 45 mm에서 상수리나무의 식별률이 가장 낮은 것으로 나타났고, 소나무의 식별률이 가장 우수한 것으로 나타났다. 또한 식별률 및 식별선은 관전압과 관전류량이 동일한 촬영 조건일 경우 노출 시간(s)보다는 관전류(mA)가 높을수록 식별률과 식별선 개수가 증가하였다(Table 7).

4. 결론 및 고찰

목재 문화재의 주요 소재로 사용되는 소나무, 밤나무, 상수리나무, 은행나무의 X선 CR 투과 조사 이미지를 관전압(kVp), 관전류량(관전류(mA) · 노출 시간(s))에 따라 평가하였다.

연구 결과, 식별률 및 식별선 구분 실험에서는 두께 45

mm에서 15 kVp의 관전압 조건일 때 소나무, 밤나무, 은행나무는 유사한 식별률과 식별선의 구분이 관찰되었다. 하지만 상수리나무의 경우 30 kVp의 관전압 조건에서 식별되었다. 이를 통해 상수리나무가 다른 수종보다 X선의 투과력이 상당히 낮은 것으로 판단된다. 또한 동일한 관전압 조건에서 관전류보다는 노출시간이 길수록 식별률과 식별선의 구분에 미치는 영향이 높았다.

수종에 따라 Gray Scale은 조사선량에 비례하여 직선적으로 증가하는 선형(Linearity)의 특성이 확인된다(Park et al., 2011). 수종별 X선 투과력은 상수리나무, 소나무, 은행나무, 밤나무의 순서로 Gray Scale의 변화에 따른 X선의 투과력의 차이가 확인되었다. 또한 목재 시편의 투과 두께가 커질수록 Gray Scale은 낮아졌다. 또한 상수리나무의 Gray Scale은 함께 실험한 다른 수종들보다 45~50% 정도로 작은 것으로 나타났다. 이는 상수리나무가 다른 목재 시편들보다 치밀한 구성과 밀도(상수리나무 0.82, 소나무 0.45, 밤나무 0.60 은행나무 0.55)를 가지고 있기 때문으로 판단된다. 따라서 재질이 상수리나무인 목조 문화재의 X선 비파괴 투과 조사는 소나무, 밤나무, 은행나무 재질보다 관전압과 관전류량을 높여 X선을 조사하면 투과 이미지 상질을 높일 수 있다.

SNR의 측정 범위는 모든 목재 시편에서 관전압이 높아질수록 SNR 측정값이 높아졌다. 이는 관전압이 높을수록 X선의 광자의 양이 증가하여 영상의 부정확도가 줄어들기 때문에 노이즈가 감소된 것으로 판단된다(Kang, 2011). 일부 SNR 측정 수치의 편차가 발생하는 원인은 측정 방법에서 관심영역(region of interest, ROI) 영역의 오차 발생과 수종별 조직 방향(나이테 방향) 차이로 판단되며, 향후 관심영역(ROI) 설정 및 방사면, 접선단면 등 목재의 조직 방향에 따른 비교 실험을 추가하여 촬영 기준에 대한 개선 연구가 필요하다.

대조도 실험에서 목재 수종과 백그라운드의 대조도 편차가 발생한 원인은 15 kVp의 관전압 조건에서는 45 mm 두께의 시편을 투과할 만큼 X선 조사선량이 충분하지 않기 때문으로 판단된다. 따라서 목재 문화재에 적합한 대조도를 얻기 위해서는 목재 문화재의 투과 두께를 고려한 관전압의 조절이 필요하며, 투과 두께에 따른 추가 실험이 필요하다.

수종별 CR 촬영의 기초 실험을 통해 수종에 따른 투과 이미지의 특성을 파악할 수 있었다. 향후 접선단면 및 활

엽수, 침엽수 등 다양한 수종에 대한 추가 실험을 통해 목재의 X선 촬영 및 이미지 상질의 기초 실험 연구가 필요할 것으로 판단된다. 또한 목재 문화재의 X선 투과 조사 이미지 표준화에 대한 기초 자료 구축도 함께 진행되어야 할 것으로 판단된다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소 문화유산조사연구(R&D) 사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 감사한다.

REFERENCES

- Carestream Health, NDT Solutions Rochester, 2007, How to evaluate the radiographic performance and long-term stability of a computed radiography system, 122.
- Cultural Heritage Conservation Science Center, 2020, Guidebook for non-destructive penetration investigation of cultural heritage using radiation, 7-12.
- Han, K.S., 2008a, Dictionary of Nondestructive Testing, Nodemedia, Duplex Wire Type Image Quality Indicator. (in Korean)
- Han, K.S., 2008b, Dictionary of Nondestructive Testing, Nodemedia, Signal to Noise Ratio. (in Korean)
- Kang, T.W., 2011, Performance evaluation of indirect digital radiography system, Graduate School Korea University of Bio-medical Sciences.
- Kang, S.M., Choi, C.I., Lee, S.K. and Kim, Y.K., 2010, Comparison of non-destructive testing images using ^{192}Ir and ^{75}Se with computed radiography system. Journal of Radiation Protection and Research, 35(1), 26-33. (in Korean with English abstract)
- Obuchowski, N.A., 2003, Receiver operating characteristic curves and their use in radiology. Radiology, 229(1), 3-8.
- Nondestructive Testing Standard Vol. 03.03 ASTM, 2007, Standard Practice for Classification of Computed radiology System, USA, 1296-1300.
- Park, S.K., Ahn, Y.S. and Gil, D.S., 2011, Study on the image quality comparison between in digital RT and film RT, Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 31(4), 391-397. (in Korean with English abstract)