

문화재 방사선 조사에서 발생하는 산란 방사선의 특성과 영향

송정일¹ | 박영환 | 유지혜
국립문화재연구소 문화재보존과학센터

Characteristics and Influence of Scattering Radiation in Cultural Heritage Radiography

Jung Il Song¹ | Young Hwan Park | Ji Hye Yu
Cultural Heritage Conservation Science Center, National Research Institute of
Cultural Heritage, Daejeon, 34122, Korea

¹Corresponding Author: ssong85@korea.kr, +82-42-860-9387

초록 본 연구는 문화재 방사선 조사에서 고려하지 않았던 산란 방사선의 영향을 확인하기 위해 관전압 (kVp) 과 필름-바닥 거리 (film-floor-distance: FFD) 납스크린 배치를 달리하여 평가하였다. 연구결과, 실험시편의 투과농도와 산란 방사선의 투과 농도는 관전압에 따라 증가되었다. 실험시편의 투과농도는 평균 1.4 D의 편차를 보이며, 60 kVp에서 0.17 D, 160 kVp에서 1.54 D, 220 kVp에서 2.97 D로 확인되었다. 산란 방사선의 평균 투과농도는 60 kVp에서 0.10 D, 160 kVp에서 0.40 D, 220 kVp에서 0.46 D로 확인되었다. FFD 거리가 바닥면과 멀어질수록 관전압(60 kVp-160 kVp)구간의 경우 투과농도 (D)가 커지는 경향을 보였으나, 고전압(160 kVp-220 kVp)구간은 FFD 거리 증가에 따른 투과농도 변화가 확인되지 않았다. 납스크린 없는 조건과 바닥면(floor)을 납스크린으로 대체한 경우는 FFD 50 mm, 100 mm, 200 mm 거리에서 산란 방사선이 확인되었고, FFD 0 mm 거리는 확인되지 않았다. 식별률은 관전압 160 kVp에서 FFD에 따라 2.08~2.67% 범위이며, 관전압 220 kVp에서는 2.67~3.33% 범위로 측정되었다.

중심어: 문화재 방사선 비파괴조사, 산란 방사선, 후방 산란, X 선원, 투과농도

ABSTRACT This study was conducted to evaluate the effects of scattering radiation, which was not considered in the cultural Heritage radiography, by evaluating the relationship between the tube voltage (unit: kVp), film-floor-distance(FFD), and lead screen layout. The density (unit: D) of the test specimens and the scattered radiation increased with the tube voltage. The density of the test specimens showed an average deviation of 1.4 D; it was 0.17 D at 60 kVp, 1.54 D at 160 kVp, and 2.97 D at 220 kVp. The mean density of the scattered radiation was 0.10 D at 60 kVp, 0.40 D at 160 kVp, and 0.46 D at 220 kVp. The density tended to increase when the tube voltage ranged between 60 kVp and 160 kVp, as the FFD distance increased. However, a change in the permeation density was not observed for high voltages(160 kVp-220 kVp). Scattered radiation was observed when FFD was 50 mm, 100 mm, and 200 mm and no lead screen was used and the bottom surface was replaced with the lead screen. No scattered radiation was observed when FFD was 0 mm. The identification rate ranged from 2.08% to 2.67%, according to the FFD, for a 160 kVp tube voltage, and from 2.67% to 3.33% for a 220 kVp tube voltage

Key Words: Cultural heritage radiography, Scattered radiation, Back-scattering, X-ray, Density

1. 서론

국내에서는 1960년대에 문화재에 대한 방사선 조사기 처음 촬영되었고, 1980년대부터 국립문화재연구소로 중심으로 사용되었다(Cultural Heritage Conservation Science Center, 2012). 육안으로 확인할 수 없는 유물 내부 균열, 형태, 부식 정도 등 유물의 구조 및 상태를 파악하는 비파괴 조사법으로 보존처리 상태 조사에 활용되고 있다. 현재까지 문화재 방사선 조사는 주로 필름(film)을 사용하는 아날로그 방식을 사용하고 있으나, 비파괴검사 산업 현장에서는 Digital radiography가 보급되어 Film법을 대체하고 있는 상황이다(The Korean Society for Nondestructive Testing, 2018).

X선은 진공관에서 음극선 방출 실험 중 음극선의 전자기장에 반사되거나 굴절되지 않는 현상에서 발견되었고 형광 작용, 전리 작용, 사진 작용 등의 특성이 있다(Figure 1). 또한 X선의 파장은 0.01 nm에서 10 nm 사이로 그 경계가 불분명하여 파장이 짧은 쪽은 감마선과 겹치고 파장이 긴 쪽은 자외선과 겹치며, 투과력이 강한 특성이 있다(Lee et al., 2002). 따라서 방사선 조사에 사용되는 X선은 다양한 영역대의 파장을 X선 필터를 통해 일정한 파장 영역으로 변화시킨 연속 X선을 이용한다(Joo, 2012).

방사선 조사는 시험체를 방사선원(source)과 필름(film)의 사이에 놓고, 시험체의 밀도와 두께에 따라 관전압(kVp), 관전류(mA), 노출시간(s)을 조절하여 필름을 방사선으로 감광시키는 원리를 이용한다(Kang et al., 2010). 이때 필름의 흑색도(검은 정도)는 X선의 강도에 따라 변화하게 된다. 방사선투과사진의 필름 상에 검게 나타난 부분은 시험체 중 더 많은 방사선이 투과된 부분이며, 흰 부분은 방사선이 적게 투과된 것을 나타낸다. 투과강도의 차이는 필름 상에 흑색도(검은 농도)의 차이를 나타내게 되며 방사

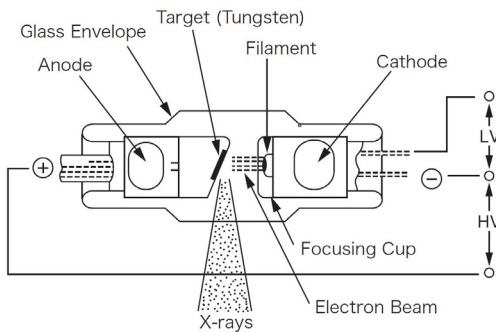


Figure 1. Diagram of an X-ray tube.

선투과사진의 콘트라스트를 형성하게 되어 결함을 검출할 수 있게 한다(Park and Lee, 2014). X선은 물질을 통과하는 동안 물질과 상호작용으로 X선의 강도는 지수 함수적으로 감쇠한다. 이는 광전효과, 콤프턴 산란, 전자쌍 생성 등의 현상을 일으키면서 에너지를 잃는다(Kang et al., 2010).

두께(x, cm)의 물질에 입사하기 전의 방사선의 강도(선량률)를 I_0 , 방사선 선흡수계수를 μ (cm^{-1})라 하면, 물질을 투과한 후의 방사선의 세기 I는 다음과 같다.

$$I = I_0 e^{-\mu x}$$

위 식은 X선이 매질을 통과할 때, 산란선이 포함되지 않은 ‘가는 평행선속’인 방사선의 경우에 한하여 성립된다(Figure 2). 그러나 실제 방사선 조사 ‘넓은 선속’의 경우로 콤프턴 산란이 발생하여 에너지가 낮아진 산란 방사선과 물질을 투과한 방사선이 합쳐지는 바 축적효과(build up)가 일어난다(Figure 3). 바 축적효과를 고려한 방사선의 강도는 다음과 같다.

$$I = I_0 B e^{-\mu x}$$

B는 축적 계수로, 산란 방사선의 증가를 나타낸다. 그러나 축적계수 B는 차폐재료, 두께, 입사 방사선 에너지, 조사

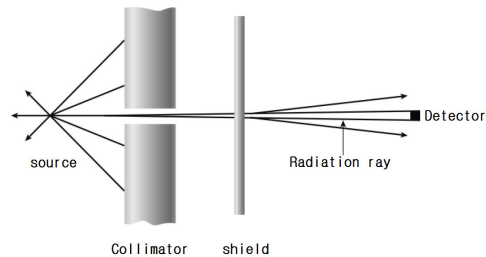


Figure 2. X-ray absorption of a narrow beam.

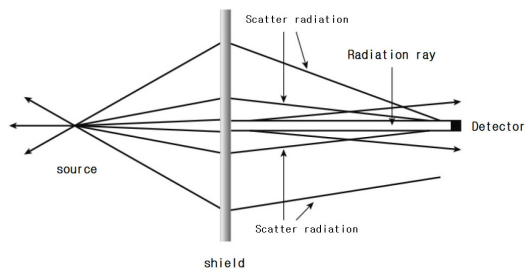


Figure 3. X-ray absorption of a broad beam.

거리 등의 다양한 요인으로 계산이 복잡하여 실험을 통해 결정된다(Korea Foundation of Nuclear Safety, 2018). 이와 같이 산란 방사선의 영향은 방사선 조사에 잠재적으로 포함되어 있다. 문화재 방사선 조사에서 산란 방사선은 방사선발생장치의 내부 및 방사선 조사방법에 의해 내부 산란선, 측면 산란선, 후방 산란선 등으로 발생되어 필름의 상질 저하를 일으킨다. 그러나 현재까지 산란 방사선에 의한 필름 상질 저하에 대해 고려하지 않았다. 산란 방사선의 발생 원인은 방사선발생장치의 차폐 구조물과 유물의 방사선 조사 방법 등이 있다.

방사선 차폐 구조물은 방사선에 대한 작업종사자의 피폭 방지와 방사선 투과 조사 공간으로 방사선발생장치의 주요 구성이다. 문화재 보존과학 분야의 사용 장비는 신고 사용 용량의 법적 장비로 챔버 구조의 방사선 차폐물이 설치되어 있다. 이러한 챔버 구조는 방사선 선원과 유물 받침이 일체형 구조로 내부 공간이 좁아 철재판과 납 재질의 바닥면과 벽면에서 산란 방사선이 쉽게 발생된다.

문화재 방사선 조사는 유물 재질, 크기 등이 다양하여 유물의 크기와 밀도가 클 경우에 방사선 선원과 필름 간의 조사거리를 줄여 투과 강도를 높이는 조사 방법이 사용된다. 이때 방사선원과 필름간의 거리가 줄어든 만큼 필름과 바닥면의 이격거리(film-floor-distance: FFD)가 발생하게 된다. 이러한 필름과 바닥면의 공간은 유물을 투과한 방사선에 의해 여기되는 산란 방사선을 유발하게 된다.

본 연구는 문화재 방사선 조사에서 고려하지 않았던 산란 방사선의 영향을 확인하기 위해 관전압 (kVp)과 필름-바닥 이격 거리(FFD), 납스크린 배치 조건 달리하여 실험을 하였다. 본 연구를 바탕으로 문화재 방사선 조사의 표준화를 위한 기초 연구로서 활용하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구방법

2.1.1. 실험 방법

본 실험에서는 관전압 (kVp), 필름-바닥 거리(FFD), 납스크린 배치 조건에 따른 산란 방사선의 발생과 그 영향을 평가하기 위하여 KS B 0845 강용접이음의 방사선투과시험방법을 참조하여 실험을 실시하였다(Figure 5).

실험 시편의 재질은 Fe 이며, Specimen 1과 Specimen 3의 크기 및 두께는 120 × 50 × 8 mm, Specimen 2의 크기 및 두께는 300 × 200 × 6 mm이다(Figure 4).

실험 시편의 배치는 Figure 5와 같이 필름 상단에 Specimen 1과 Specimen 2, 투과도계, 스텝 웨지(step wedge)를 배치하고, 필름 하단에 Specimen 3과 투과도계를 배치하였다. 납스크린의 위치는 Specimen 3의 하단과 바닥면(floor)이다.

실험 조건에서 X선 선원-필름 조사거리(source-film-distance: SFD)는 600 mm이고, 관전류는 5 mA, 노출시간은 180 s으로 고정하였다. 관전압의 조건은 저관전압(60 kVp)과 고관전압(160 kVp, 220 kVp)이며, 필름-바닥 이격거리(film-floor-distance: FFD)의 조건은 0 mm, 50 mm, 100 mm, 200 mm으로 하였다. 납스크린의 배치는 납스크린 없는 조건, 1장, 4장, 바닥면(floor)으로 하였다. FFD가 0 mm, 50 mm에서는 납스크린 없이 실험을 진행하고, FFD 100 mm과 200 mm에서 납스크린 없는 조건, 1장, 4장, 바닥면(floor) 조건으로 실시하였다.

본 실험에서는 FFD의 이격 거리에 대한 산란 방사선의 간섭을 최소화하기 위해 공기등가물질(air equivalent material)인 폴리에틸렌(polyethylene)이 주재료인 토이론을 사용하여 FFD의 이격조정을 하였다. 공기등가물질은 방사선 흡



Figure 4. Placement of test specimens.

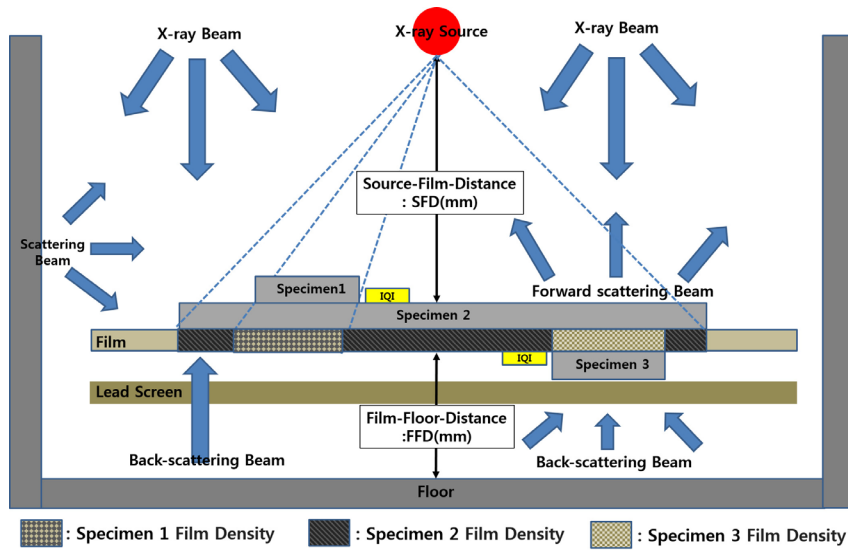


Figure 5. Diagram of scattering radiation test.

수 능력이 공기(air)와 같은 재료로 공기와 똑같은 실효 원자번호를 가져 방사선에 대해서 똑같은 전리효과를 나타내는 물질이다(Korea Nuclear Industry Conference, 2001).

산란 방사선은 관전압, FFD, 납스크린의 배치 조건에 따라 Specimen 3을 투과하여 필름에 기록된다. 따라서 관전압, FFD, 납스크린의 배치 조건은 산란 방사선을 평가하는 중요한 인자이다. 산란 방사선 영향 평가는 Specimen 3의 필름의 현상, 투과 농도 (D), 식별률 (%)등을 필름판독기와 필름 투과 농도계로 측정하여 산란 방사선 영향을 확인하였다(Figure 5).

2.1.2. 투과농도(density)평가

방사선 투과 농도는 X선의 투과 정도에 따라 필름에 맺힌 상의 농도변화 (D)가 생기는 현상이다. X선이 조사되면 재질, 두께에 따라 투과 후의 선량(線量)에 변화가 생긴다. 필름은 각 선량에 대응된 투과 농도가 표현된다. 방사선투과 필름의 농도 변화는 필름의 흑색도로 나타나며 투과농도의 불투명도의 대수로 표현된다. 필름에 투과(입사광)의 빛의 강도를 I_0 , 필름을 통과 한 후의 빛의 강도를 I 라고 하면 다음의 식이 성립한다.(Radiographic photograph, 2004).

$$D = \log \frac{I_0}{I}$$

방사선 필름의 투과 농도 (D)는 필름이 받는 X-선 선량이 클수록 높다(Yeo, 2000). 따라서 X선의 조사선량이 커

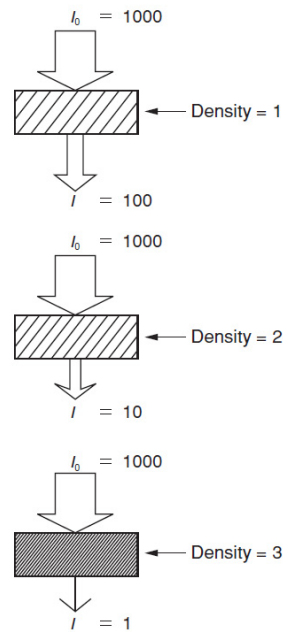


Figure 6. Film density.

질수록 방사선투과 필름의 흑색도가 높아진다(Figure 6).

본 실험에서는 Figure 5와 같이 실험 시편을 배치하고 실험시편의 투과 두께는 Specimen 1의 경우 Specimen 1의 두께 8 mm와 Specimen 2의 두께 6 mm를 합계한 14 mm이며, Specimen 2은 6 mm, Specimen 3은 8 mm이다. 투과농

도의 측정은 Specimen 1, Specimen 2, Specimen 3의 중앙 부분을 3회씩 필름농도측정기(densitometer)로 필름의 흑색도를 측정하였다. 앞에 언급한 바와 같이 Specimen 3의 투과 농도 (D)는 산란 방사선에 의해 결정되나 Specimen 2의 투과농도가 중첩되기 때문에 Specimen 2과 Specimen 3의 투과 농도 (D) 편차로 산란 방사선을 평가하였다(Figure 7).

2.2. 연구재료

방사선 선원은 방사선발생장치(EX-220GH-3, TOSHIBA, Japan)(220 KV, 5 mA)를 사용하였고, 방사선투과필름(MX125, Carestream, Canada)은 12 × 10 inch이고, 필름의 현상방법은 자동필름현상기(Structurix M Eco, GE Measurement & Control, USA)를 사용하였다. 필름판독은 필름판독기(NRF-14U, NAWOO, Korea), 필름투과농도계(PDA-100, KONICA, Janpan)를 사용하였다.

2.2.1. X-선 발생장치(X-ray generator)

문화재 방사선비파괴조사에서 사용되는 방사선발생장치는 원자력 안전법에 따라 신고사용 장비와 허가사용 장비로 구분된다. 유물의 방사선 조사는 주로 신고 사용 장비가 사용된다. 신고사용 장비의 용량은 자체 차폐 구조물(방사선 조사시설), 관전압 170 kVp이하, 표면방사선량률 10 μSv/h이하이고, 그 이상의 용량은 허가 사용 장비로 구분된다. 허가 사용 장비는 방사선 안전관리자가 선임된 일부 국공립연구소와 국립박물관에서만 사용되고 있다.

본 연구에서 X-선 발생장치는 허가 사용 장비로 방사선 안전관리자가 선임된 장비이다. 장비는 EX-220GH-3 (TOSHIBA, Japan)로 관전압은 60~220 kVp 범위이며, 관전류는 5 mA 고정형 장비이다. 실험방법은 저전압(60 kVp)과 고전압(160, 220 kVp)으로 조사하여 산란 방사선 발생을 확인하였다.

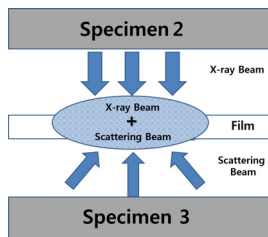


Figure 7. Density(D) of Specimen 3.

2.2.2. 자동필름현상기(Auto film developer)

필름의 현상, 정착, 세척 및 건조의 과정에 대한 자동화 장비로 균일한 필름 현상 품질을 유지하게 한다. 본 연구에서는 자동필름현상기(Structurix M Eco, Ge Measurement & Control, USA)를 사용하였다.

2.2.3. 방사선투과 검사 필름(Radiography test film)

방사선투과 검사에 사용된 필름은 방사선투과필름(MX125, Carestream, Canada) 12 × 10 inch이며, ASTM (미국재료시험협회) E1815 Class I로 분류되는 고감도 필름이다.

방사선조사에 사용되는 필름의 구조는 Figure 8과 같다. 필름은 빛에 직접 노출되거나 방사선에 노출되면 감광되는데 이는 필름에 도포된 할로겐화은이 미립자상의 은으로 환원되기 때문이다. 일반적으로 방사선 투과 필름은 아세테이트로 이루어진 얇은 막 양면에 할로겐화은의 미세한 입자가 도포되어 있는 구조이다(Figure 8)(FUJIFILM Corporation, 2009).

2.2.4. 납스크린(Lead screen)

방사선은 투과력이 매우 커서 필름에 투과시 1% 미만의 에너지만 흡수되기 때문에 납스크린은 외부에서 투과되는 산란 방사선을 차폐하고 내부에서는 필름의 감광속도를 높이는 목적으로 사용한다. 납스크린의 증감지면은 2차 전자를 방출하는 물질을 입혀 X선에 의한 감광 속도를 증감시킨다. 납스크린의 외부면은 필름으로 투과되는 산란 방사선을 차폐하는 목적으로 사용된다(Han, 2008).

본 연구에서는 FFD에 따라 Specimen 3 하단에 납스크린(연박납 0.125 mm) 배치조건을 달리하여 산란 방사선 영향을 확인하였다.

2.2.5. 필름판독기(High intensity illuminator)

필름판독기는 NAWOO, NRF-14U 장비로 방위산업체, 원자력분야에 사용되며 방사선 투과된 필름의 결함을 관찰

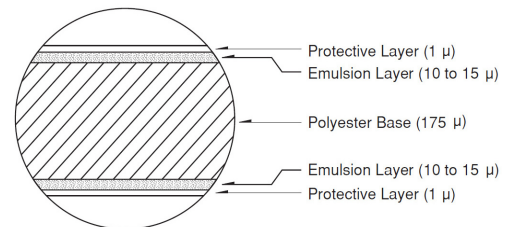


Figure 8. X-ray Film Structure.

하는 고감도 장비이다. 휘도 300-25,000 cd/m² 범위, KS 규격의 D35형급으로 판정 농도 범위는 1.0~4.0 D이다. 본 연구에서는 실험시편의 투과 형상을 관찰하고 산란 방사선에 의한 필름에 현상된 Specimen 3의 형태를 확인하였다.

2.2.6. 필름농도측정기(Densitometer)

필름농도측정기는 방사선투과필름의 투과 농도를 수치화하여 디지털 측정하는 장비이다. 장치는 KONICA MINOLTA (Japan)의 PDA-100으로 0.0~4.0 D 측정하며, 정밀도는 ±0.03 D 범위이다. 본 연구에서는 필름판독기의 광원에서 필름농도측정기를 Zero 세팅한 후 현상된 실험 시편의 투과 농도를 측정하였다.

2.2.7. 투과도계(Penereameter, Image quality indicator, IQI)

투과도계 또는 상질계(像質計)로 방사선조사 사진의 상질을 평가하기 위한 측정 게이지이다. 투과도계는 시험체와 같은 재질이며, 시험체의 표면에 부착하여 방사선 조사

를 실시한다. KS 규격은 침금(선, 바늘)형 투과도계이고, 침금(針金)의 지름이 등비급수 또는 등차급수로 변화하는 일련의 침금을 플라스틱 틀에 넣은 구조로 되어 있다 (Figure 9)(Korean Agency for Technology and Standards, 2013). 본 연구에서는 Fe 재질의 KS A4054규격 침금(선형)형 투과도계 02F와 04F를 사용하였고, 방사선 투과 필름의 품질을 판별하기 위해 식별률을 측정하였다, 식별률은 동일한 두께에 대해서는 식별 가능 최소 선지름이 낮을수록 필름 화질 품질이 좋은 것으로 평가 한다(Kang *et al.*, 2010)(Table 1).

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

3. 결과 및 고찰

3.1. 산란 방사선 평가

3.1.1. 관전압에 따른 산란 방사선 영향

저전압(60 kVp)의 경우, X선 투과 강도가 낮아 Specimen 2을 투과하지 못하였으나, Specimen 3에 의해 발생한 산란

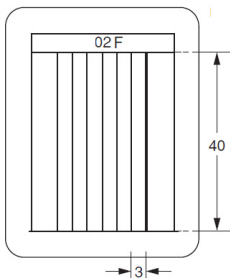


Figure 9. Image quality indicator(IQI).

Table 1. Image quality indicator line diameter and line series

		Line diameter and line series						
02F	0.05	0.063	0.08	0.10	0.125	0.16	0.20	
04F	0.10	0.125	0.16	0.20	0.25	0.32	0.40	

Unit : mm

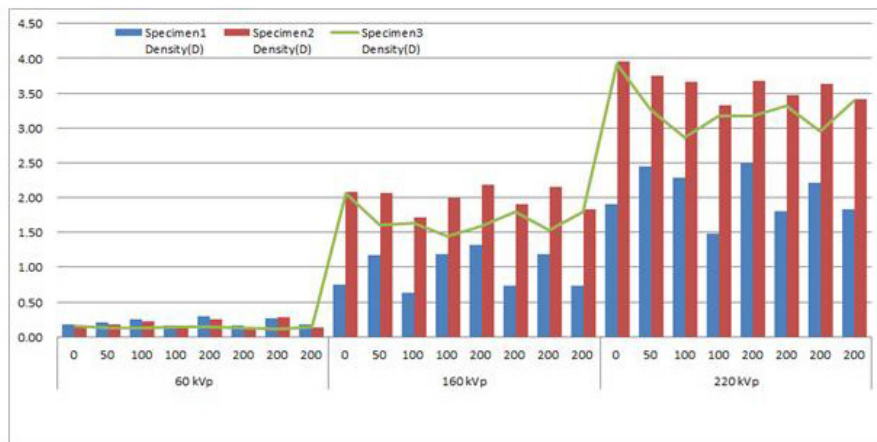


Figure 10. Density(D) according to tube voltage (kVp).

Table 2. Density (D), Discrimination (%) change according to tube voltage (kVp), FFD (mm) and Screen (Pb) (blank: unable to measure)

Tube voltage (kVp)	FFD (mm)	Screen (Pb)	Specimen1 density (D)	Specimen2 density (D)	Specimen3 density (D)	Scattered radiation density (D)	Discrimination (%)
60 kVp	0	x	0.17	0.13	0.15	0.02	-
	50	x	0.21	0.18	0.13	0.05	-
	100	x	0.25	0.22	0.12	0.10	-
	100	1	0.17	0.12	0.14	-0.02	-
	200	x	0.29	0.25	0.14	0.12	-
	200	1	0.16	0.12	0.12	0.00	-
	200	Floor	0.26	0.28	0.12	0.16	-
	200	4	0.17	0.13	0.14	-0.01	-
160 kVp	0	x	0.75	2.08	2.06	0.02	2.08
	50	x	1.18	2.06	1.60	0.46	2.08
	100	1	0.64	1.72	1.63	0.09	2.08
	100	x	1.19	1.99	1.44	0.55	2.67
	200	x	1.32	2.19	1.60	0.59	2.67
	200	1	0.74	1.91	1.79	0.12	2.08
	200	Floor	1.19	2.16	1.54	0.62	2.08
	200	4	0.73	1.83	1.80	0.03	2.08
220 kVp	0	x	1.90	3.95	3.92	0.03	3.33
	50	x	2.45	3.75	3.26	0.49	3.33
	100	x	2.29	3.66	2.86	0.80	3.33
	100	1	1.49	3.32	3.17	0.15	2.67
	200	x	2.49	3.67	3.17	0.50	3.33
	200	1	1.81	3.47	3.31	0.15	2.67
	200	Floor	2.22	3.64	2.95	0.69	3.33
	200	4	1.84	3.41	3.39	0.02	2.67

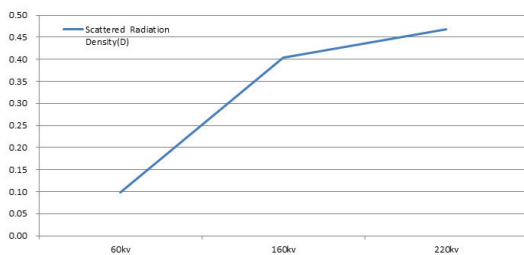


Figure 11. Scattered radiation density (D) according to tube voltage (kVp).

방사선이 필름 판독기에서 식별되었고, 투과 농도 (D)는 0.05~0.16 D로 확인 되었다(Table 2, 3). 고전압(160 kVp)의 경우, 산란 방사선의 투과농도는 0.09~0.62 D 범위이며, 고전압 220 kVp은 0.15~0.69 D로 확인되었다(Table 2). 관전압이 증가함에 따라 실험시편의 투과농도와 산란 방사선의 투과 농도는 증가하였다(Figure 10, 11).

실험시편의 투과농도는 평균 1.4 D의 편차이며, 60 kVp에서 0.17 D, 160 kVp에서 1.54 D, 220 kVp에서 2.97 D로 확인되었다(Figure 10). 산란 방사선의 평균 투과농도는 60 kVp에서 0.10 D, 160 kVp에서 0.40 D, 220 kVp에서 0.46 D로 확인되었다. 또한 산란 방사선의 투과 농도 상승폭은 저전압-고전압 구간(60-160 kVp)에서 0.3 D이나 고전압 구간(160~220 kVp)에서 0.06 D로 상승폭이 작아지는 것으로 확인되었다(Figure 11).

3.1.2. FFD에 따른 산란 방사선 영향

FFD 거리 0 mm 경우, 관전압 60 kVp, 160 kVp, 220 kVp 조건에서 산란 방사선의 영향이 확인되지 않았다. 필름판독기에서 육안 식별이 불가하였고, 필름 농도측정 결과 0.02~0.03 D로 농도측정 장비의 오차 범위(0.03 D) 이내로 측정되어 산란 방사선이 차폐된 것으로 판단된다(Table 2, 3).

Table 3. X-ray radiography of test specimens

FFD (mm)	Screen	60 kVp	160 kVp	220 kVp
0	No screen			
50	No screen			
100	No screen			
100	1			
200	No screen			
200	1			
200	Floor			
200	4			

FFD에 따른 바닥면과의 거리가 클수록 관전압(60 kVp-160 kVp)구간의 경우 투과 농도 (D)가 커지는 경향을 보였으나, 고전압(160 kVp-220 kVp)구간은 FFD 거리 증가에 따른 투과농도 변화가 확인되지 않았다(Table 2).

3.1.3. 납스크린 배치에 따른 산란 방사선 영향

납스크린 없는 조건과 바닥면(floor)을 납스크린 대체한 조건 일 때, FFD 50 mm, 100 mm, 200 mm 경우에서 산란 방사선이 확인되었고, FFD 0 mm 에서는 산란 방사선이 확인되지 않았다(Table 3). 바닥면(floor)을 납스크린 대체한 조건의 산란 방사선 투과농도는 0.03~0.19 D의 편차로 기존 바닥면 Fe일 때 보다 높게 확인되었다(Table 2). 이러한 현상의 원인이 납스크린의 증감지에 의한 2차 전자 발생으로 인한 것인지 추가 실험이 필요하다(Han, 2008). 납스크린 1장 조건은 저전압(60 kVp)경우에는 산란 방사선이 확인되지 않았고, 고전압(160 kVp-220 kVp)구간에서 산란 방사선이 식별되었다. 투과농도 (D)는 0.09~0.15 D범위로 확인되었다(Table 2). 납스크린 4장 조건은 관전압 60 kVp, 160 kVp, 220 kVp 모든 조건에서 산란 방사선이 발생되지 않았다(Table 3).

3.1.4. 식별률 평가

식별률(discrimination)(%)은 보통 시험재료의 두께 2%로 제작되기 때문에 식별률 값이 2%이내 일수록 필름의 상질이 우수한 것으로 평가한다(Han, 2008). Specimen 2의 두께인 6 mm를 기준으로 02F와 04F의 투과도계의 최소 지름을 평가했을 때, 저전압(60 kVp)은 실험 시편을 투과할 정도의 투과 강도가 발생하지 않아 식별률 측정이 불가하였다. 관전압 160 kVp의 식별률은 FFD에 따라 2.08~2.67% 범위이며, 관전압 220 kVp의 식별률은 2.67~3.33% 범위로 측정되었다(Table 2). 실험결과 관전압이 높을수록 투과농도 (D)는 증가하지만 필름의 상질 저하 현상이 확인되었다(Table 2, 3).

3.1.5. 투과 두께에 따른 투과농도 특성

투과 두께에 따른 투과농도는 저전압(60 kVp) 경우, Specimen 1과 Specimen 2의 투과농도의 편차가 유사하다. 이는 낮은 관전압으로 투과 강도가 낮아 Specimen 1과 Specimen 2를 투과하지 못하기 때문에 투과 농도가 유사한 것으로 판단된다. 고관전압 구간(160 kVp-220 kVp)에서 투과농도는 Specimen 2가 가장 높고, Specimen 3, Specimen

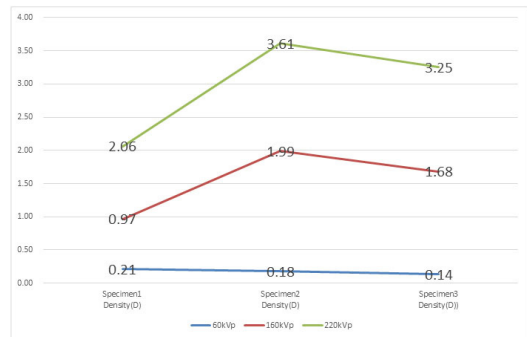


Figure 12. Density (D) according to test specimen.

1 순서로 확인되었다(Figure 12).

Specimen 2의 투과 농도는 X선의 투과 두께가 6 mm로 실험시편 중에 가장 얇기 때문에 투과되는 X선 선량이 많아져 투과농도가 높게 측정되었다. Specimen 3의 투과 농도는 X선의 조사과정 중에 Specimen 2를 직접 투과하고 일부 여기된 산란 방사선에 의해 발생되기 때문에 Specimen 2의 투과 농도보다 낮은 것으로 판단된다. Specimen 1의 투과 농도는 Specimen 2와 Specimen 1의 두께를 투과하기 때문에 투과 농도가 가장 낮은 것으로 판단된다.

4. 결론

본 실험에서는 문화재 방사선 조사에서 산란 방사선의 발생과 영향을 관전압, FFD, 납스크린 배치 조건에 따라 실험 조건을 선정하여 산란 방사선 발생과 차폐, 영향을 평가하였다.

연구 결과, 산란 방사선의 차폐 효과는 모든 실험 관전압에서 FFD 거리 0 mm과 납스크린 4장 배치 조건에서 확인되었다. FFD 거리 0 mm는 필름과 바닥면 사이 공간이 없는 밀착상태로 산란 방사선이 발생하지 못한 것으로 판단된다. 납스크린 4장 배치조건은 납스크린의 차폐 효과가 발생한 것으로 판단된다. 따라서 문화재 방사선 조사의 산란 방사선 차폐 방법은 다음과 같다.

1. 유물의 밀도와 크기가 클 경우, 투과강도를 높이기 위해 SFD의 조사거리를 줄이면 FFD의 이격이 발생되어 산란 방사선을 유발한다. 따라서 필름의 하단면에 납스크린을 배치하여 산란 방사선을 차단한다.

2. 유물의 밀도와 크기가 작을 경우, SFD의 조사거리 조절이 필요 없기 때문에 유물과 필름을 바닥면(Floor)에 밀착시켜 FFD이격에 의해 발생하는 산란 방사선을 방지한다.

산란 방사선의 발생은 150-400 kv 고전압 범위에서 주로 발생한다고 알려졌으나(Yeo, 2017), 저전압(60 kVp)의 경우에서도 산란 방사선의 발생이 확인되었다. 따라서 문화재 방사선 조사 시, 저전압의 방사선 조사가 실시되는 유기물 재질이나 골각류에서도 산란 방사선을 차폐할 필요가 있다.

FFD에 따른 산란 방사선 투과농도는 저전압에서 고전압으로 전압 강도가 높아질수록 투과농도가 증가하는 경향이 있지만 고전압 범위는 전압 상수에 따른 투과 농도의 변화가 관찰되지 않았다. 이에 대한 관전압의 강도를 세분화한 추가 실험과 관전류 (mA)와 선원-필름 거리(SFD)등에 대한 산란 방사선 실험 필요하다.

바닥면(floor)을 기존 Fe에서 Pb가 포함된 납스크린으로 대체했을 때 관전압에 따라 투과농도가 증가하는 것이 확인되었다. 이는 납스크린의 Pb의 방사선 차단 효과 보다 납스크린의 증감지에 의한 2차 전자 발생 효과가 더 큰 것으로 판단된다.

식별률 (%) 평가 결과, 식별률은 관전압 160 kVp가 220 kVp보다 2.08%로 우수한 것으로 확인되었다. 본 연구의 식별률 평가와 같이 재질 두께, SFD, 관전류, 노출시간 등의 일정한 조건에서 추가적인 실험이 종합되면 필름의 화질 개선에 대한 문화재 방사선 표준화 검사법을 개발하는데 기초 자료가 될 수 있을 것으로 생각된다.

투과 두께에 따른 투과 농도는 저전압의 경우 실험시편을 투과하지 못하여 투과 두께 차이에 의한 투과농도가 유사하게 확인되었다. 고전압은 실험시편의 두께에 따라 투과농도 변화가 확인되었고, 두께가 두꺼울수록 투과농도가 낮아짐이 확인되었다.

본 연구에서는 기존에 산란 방사선을 고려하지 않았던 방사선 조사에서 산란 방사선의 특성을 실험적으로 평가하고자 하였으며, 그 결과 관전압, FFD, 납스크린 배치 조건에 따른 산란 방사선의 특성에 대한 결과를 제공 할 수 있었다. 향후 재질에 따른 산란 방사선 영향 및 식별률 (%) 평가 실험 등이 추가적으로 수행된다면 문화재 방사선 조사의 표준화하는데 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

사 사

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

REFERENCES

- Cultural Heritage Conservation Science Center, 2012, Cultural heritage and x-ray film. 7-17. (in Korean)
- FUJIFILM Corporation, 2009, The fundamentals of industrial radiography. 7.
- Han, K.S., 2008, Dictionary of nondestructive testing. Nodemedia, 152, 201. (in Korean)
- Joo, G.T., 2012, A Principle of radiographic contrast. Journal of the Korean Society for Nondestructive Testing, 32(1), 71-77. (in Korean)
- Kang, S.M., Choi, C.I., Lee, S.K., Park, S.K. and Kim, Y.K., 2010, Comparison of non-destructive testing images using 192Ir and 75Se with computed radiography system. Journal of Radiation Protection and Research, 35(1), 26-33. (in Korean with English abstract)
- Korea Foundation of Nuclear Safety, 2018, Basic teaching materials for radiation workers (industrial sector). 49-50. (in Korean)
- Korea Nuclear Industry Conference, 2001, Nuclear terminology dictionary. Korea Nuclear Industry Conference, 120. (in Korean)
- Korean Agency for Technology and Standards, 2013, Radiographic image quality indicators for non-destructive testing -Principles and identification(KS A4054).
- Lee, S.W., Jeon, M.S. and Kim, M.G., 2002, Radiography test. Intervision, 12, 23. (in Korean)
- Park, J.W. and Lee, C.K., 2014, Welding process of clad steel on pressure vessel for railway vehicle and its reliability assessment. Journal of Korean Society for Urban Railway, 2(4), 287-293. (in Korean with English abstract)
- Radiographic photograph, 2004, Industrial safety dictionary. GOLD, 30-31. (in Korean)
- The Korean Society for Nondestructive Testing, 2018, Digital radiography/computer tomography workshop. Iksan, October 18-19. (in Korean)
- Yeo, H.Y., 2000, A study on the analysis and film image processing of radiographic testing. Master's thesis, Chosun University, Gwangju, 35-37. (in Korean with English abstract)
- Yeo, H.Y., 2017, Radiation nondestructive inspection. ILJINSA, Seoul, 388. (in Korean)