Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 91-99, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.91

Technical article

재난 대응 침수 문화유산 대규모 감마선 소독 처리 공정 개발 및 진균 제어 효과

곽영혁[1,2] · 조경서[1,3] · 정래동[2] · 박해준[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소, [2]전남대학교 응용생물학과, [3]전북대학교 농화학과

Development of a Large-Scale Gamma Irradiation Disinfection Process for Fungal Control in Waterlogged Cultural Heritage

Yeong-Hyeok Kwak[1,2], Gyeong-Seo Jo[1,3], Rae-Dong Jeong[2], and Hae-Jun Park[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 56212, Republic of Korea
[2]Department of Applied Biology, Chonnam National University, Gwangju 61186, Republic of Korea
[3]Department of Agricultural Chemistry, Jeonbuk National University, Jeonju 54896, Republic of Korea

ABSTRACT We has been preparing for large-scale disinfection treatment to preserve organic cultural heritages such as woodblocks, books, and paintings from biological damage under disasters caused by earthquakes, floods, wars, and climate changes. In this study, we designed and reviewed the process to evaluate the large-scale applicability of gamma-ray disinfection treatment in a commercial facility that can accommodate a large volume on the basis of previous study. For the test, we prepared a standard test box (63.2(W) × 43.7(D) × 15.6(H) cm^3) with rock wool submerged in tap water and with agar medium plates cultured with Cladosporium sp. (freshwater target), and *Epicoccum nigrum* (seawater target). 18 standard boxes were loaded of in a cabinet for gamma radiation disinfection. The fungi were perfectly controlled within 20 kGy (3 kGy h^{-1}) in the test. In addition, the results of the dose deviation according to the loading positions of 18 boxes in the cabinet showed that the attenuation was greater in the middle than at the side edges. Six cabinets were irradiated simultaneously for the test. It was confirmed that the dose deviation between the cabinets placed non-sequentially was minimal, within 1-2 kGy, suggesting the stable application for large-scale gamma-ray disinfection processes.

Key words: Disaster Response, Fungal Disinfection, Gamma Irradiation Process, Waterlogged Cultural Heritage

1. 서 론

기후변화로 인한 극단적 기상 현상은 전 세계적으로 재난의 빈도를 증가시키고 있으며, 국가유산 보존에도 심각한 위협을 가하고 있다. 한국의 국가유산은 문화유산, 자연유산, 무형유산 등으로 구분되며 각각 고유의 역사적, 문화적 및 환경적 가치를 지니고 있다. 이 중 문화유산은 인류의 역사와 문화를 기록하며, 재료적 특성에 따라 보존 및 복원 과정에서 세심한 관리가 요구된다. 국립문화유산연구원의 보고서에 따르면 2008년부터 2024년 9월까지 총 1,091건의 국가지정문화유산 피해 중 약 89%인 969건이 풍수해로 인한 것이며, 이 중 약 60%는 최근 6년 사이에 집중적으로 발생하였다[1]. 이러한 통계는 기후변화가 국가유산, 특히 문화유산의 보존 환경에 중대한 영향을 미치며, 침수된 문화유산의 체계적인 보존 및 복원 대책 마련의 필요성을 시사한다.

우리나라 국가유산 중 유기질 문화유산은 섬유, 종이, 한지 및 목재 등으로 이루어지며, 전체 유산에서 가장 많은 비중을 차지한다[2]. 그러나 유기질 소재는 고온·다습한 환경에서 발생하는 생물학적 손상에 매우 취약하다[3-6]. 진균(fungi)은 공기 중에 포자를 방출하여 먼지 입자와 결합하거나 다양한 표면에 부착되어 확산되며, 환기가 부족한 환경에서 급격히 번식할 수 있다[7-9]. 특히, *Aspergillus*, *Cladosporium*, *Penicillium* 등의 진균 속은 국내외 도서관이나 박물관 및 보존시설에서 주요한 생물학적 손상 원인으로 보고되고 있으며[10-12], 낮은 수분 함량

ISSN 1976-2402 **http://www.ksri.kr/**

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Hae-Jun Park
Tel: +82-63-570-3190, Fax: +82-63-570-3195, E-mail: hjpark@kaeri.re.kr

Received 22 January 2025 **Revised** 27 February 2025 **Accepted** 17 March 2025

에서도 발생 가능하다. 이러한 진균은 셀룰라아제와 단백질 분해 효소를 분비하여 유기질 소재를 손상시키며, 복원 작업자에게 알레르기 반응을 포함한 다양한 건강 문제를 유발할 수 있다[7,11,13]. 특히 침수된 문화유산은 48시간 이내로 신속히 대응하지 않을 경우, 진균 균사의 급속한 확산으로 인해 색소 침착 및 섬유소 분해와 같은 2차 피해가 발생하며, 이는 문화유산의 원형 보존을 더욱 어렵게 한다[14]. 따라서 침수된 문화유산의 효과적인 보존을 위해 신속하고 대규모의 소독 처리가 요구된다.

기존의 화학적 훈증 처리는 진균 및 해충 제거에 효과적이었으나, 에틸렌옥사이드(Ethylene Oxide, EO) 및 메틸 브로마이드(Methyl Bromide, MB)와 같은 훈증제는 발암성과 환경 유해성으로 인해 사용이 제한되었다. 특히 침수된 문화유산의 경우 훈증 가스가 내부까지 침투하지 못해 소독 효율이 저하되는 한계도 존재한다. 이 외의 방법인 자외선(UV-C) 소독은 표면 처리에는 효과적이지만 재료 내부로 침투하지 못하며[15], 열처리는 유기질 소재의 물리적 변형 및 비가역적 손상을 초래할 가능성이 있다[16]. 현재 국내 문화유산기관에서 사용하고 있는 동결 건조법도 일부 곰팡이 포자가 가역적 휴면 상태로 들어가 재활성화될 가능성을 배제할 수 없으므로 완전한 생물학적 제어에는 한계가 있다. 이러한 한계로 인해 친환경적이고 효과적인 대안 기술로 방사선을 활용한 소독 처리가 주목받고 있다.

방사선 소독은 감마선, 전자선 및 엑스선을 사용하여 생물학적 제어를 통해 문화유산을 보존 처리하는 방식이다[17-21]. 이 중 감마선은 높은 투과력과 균일한 에너지 분포를 제공하며, 방사능 잔류나 독성 물질을 남기지 않아 환경 및 인체에 안전하다. 또한, 두꺼운 재료 내부까지 효과적으로 소독할 수 있어 대규모 처리에 적합하다. 따라서 감마선 소독은 신속하고 대량의 소독 처리가 필요한 침수 문화유산 보존 처리에 가장 적합한 소독 기술로 평가된다. 감마선을 활용한 소독 기술은 문화유산 보존 및 복원을 위해 오래전부터 선호되어 왔으며[22], 유럽을 중심으로 아시아권까지 응용이 확대되고 있다. 프랑스 ARC-Nucleart 연구소는 람세스 2세 미라에 감마선을 적용하여 성공적으로 소독한 바 있으며, 이는 감마선의 높은 효율성을 입증한 대표적 사례로 꼽힌다[23].

최근 일본에서는 침수된 전통 종이에 13-16 kGy 감마선을 적용하여 진균 제어에 성공한 연구가 보고되었다[24]. 특히 해수에서 자생하나 극한 환경에서도 잘 성장하고 방사선 저항성이 높은 것으로 알려진 *Epicoccum nigrum*은 15 kGy 선량에서 제어 가능한 것으로 나타났다[25]. 이는 5 kGy 내로 제어되는 일반적인 진균과 비교할 때, 극한 환경에서 내성이 높은 진균에도 감마선 효과가 탁월함을 입증한다. 이러한 결과는 감마선 소독 기술이 다양한 방사선 저항성을 지닌 생물학적 오염원에 대처할 수 있음을 시사한다.

본 연구는 침수된 문화유산의 대규모 감마선 소독 공정을 개발하고 그 효과를 평가하고자 한다. Co-60 감마선원 자동횡전조사가 가능한 감마선 조사 시설을 활용하여 수행되었으며, 3 kGy h^{-1}의 선량률을 기준으로, 선행 연구 결과[25-27]를 바탕으로 다양한 멸균 임계 선량 조건에서 *Cldosporium* sp., *Epicoccum nigrum*의 진균 제어 효과를 평가하였다. 또한 [28]의 방사선 감쇠 연구 결과를 고려하여 캐비닛 내부에 적재한 공시 상자의 외곽 및 중앙에 선량계를 배치하고 흡수선량 분석과 살·멸균 검정 평가를 수행하였다. 이를 기반으로 대규모 소독 공정의 적용 가능성을 검증하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 소독 상자 구성

공시 상자는 Polypropylene 재질로 구성된 제품(Neo box (270), ㈜코멕스산업)을 사용하였으며, 기본 무게는 2.6 kg, 용량은 약 27 L를 수용할 수 있는 63.2(W)×43.7(D)×15.6(H) cm^3 크기로 선정하였다. 또한 장시간 수분을 보유할 수 있는 특성을 가진 암면을 문화유산 모의 공시 시료로 선정하였다. 상자 내부에는 침수 문화유산을 가정하여 수돗물 6 L로 완전히 침수시킨 암면을 높이가 8.5 cm가 되도록 팽창시켰으며 상자 무게를 포함한 최종 무게는 9-10 kg으로 조정하였다.

2.2. 멸균 검정 평가

실험에 사용된 공시 균주 2종은 모두 선행 연구에서 분리된 문화유산 손상 유발 진균으로, 방사선 저항성이 높은 *Epicoccum nigrum* (KCTC 56839)은 강릉 동해안 해수에서 분리 및 동정되었다. 또한 방사선 저항성이 중간 수준인 *Cladosporium* sp.은 문화유산에 흔히 발생하는 진균으로 알려져 있다. 각각의 균주는 PDA 배지 중앙에 agar block (2.5 mm)을 접종한 후, 24°C에서 7일간 배양하였으며, 배양된 plate는 공시 상자 내부에 고정하여 감마선 소독 처리를 진행하였다. 감마선 조사 후 멸균 검정 평가는 [25]의 실험 방법을 참고하여 한 달 동안 일주일 간격으로 사진을 촬영하고 균사체 직경을 측정하여 분석하였다. 모든 실험은 3반복으로 수행하였다.

2.3. 감마선 조사

본 연구는 경기도 여주에 위치한 그린피아기술(주)의 Co-60 감마선원 자동 팔렛트 타입 모델(Nordion, 캐나다)을 사용하여 감마선 소독 처리를 수행하였다(Fig. 1). 소독 공정에서 각 캐비닛의 3개 구획 중, 중앙에 위치한 캐비닛의 중간 2번째 구획(65(W)×120(D)×160(H) cm^3)을 사용하였다. 이는 방사선 감쇠에 따른 선량 편차를 최소화하고 흡수선량의 균일성을 확보함으로써 완전한 생물 사멸을 위한 효과적인 소독 조건을 검증하기 위함이었다. 또한 조사 설비의 캐비닛 규격과 공시 상자 크기를 고려하여 최적의 적재 조건을 설계하였다. 공시 상자는 팔레트 위에 배치한 뒤, 수직 9단, 수평 2단으로 적층하여 총 18개를 적

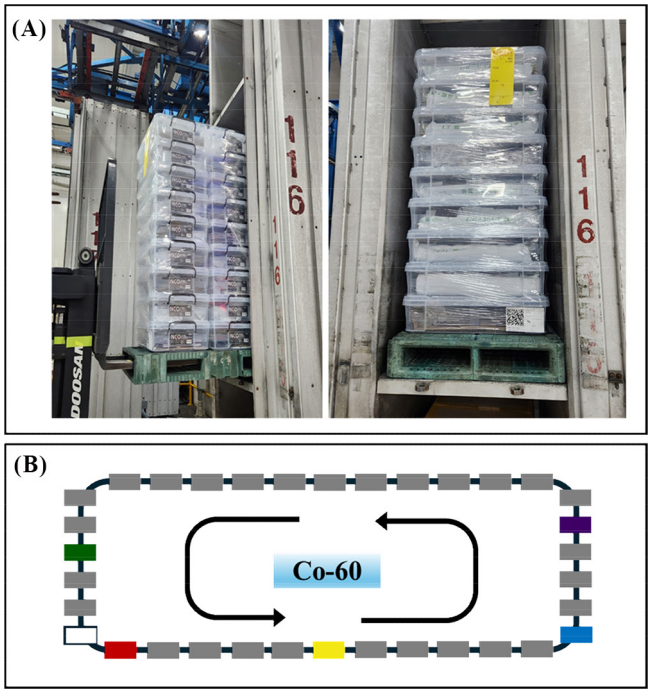

Fig. 1. Preparation of optimal stacking radiation system for disinfection. (A) The eighteen standard boxes loaded in a cabinet. (B) Design of randomized placement of 6 (white, red, yellow, blue, purple and green) out of 34 cabinets for gamma irradiation.

재하였다(Fig. 1A). 해당 설계를 통해 공정 효율성을 극대화하고 상자 이동 및 흔들림을 방지하기 위해 전체 상자를 필름으로 랩핑(wrapping)하여 고정하였다. 랩핑 과정은 이동과 보관의 편리성을 높이는 동시에 2차 오염을 방지하기 위한 필수 절차로 수행되었다.

특히, 해당 설비는 양면횡전조사 방식으로 설계된 34대의 캐비닛을 보유하고 있으며(Fig. 1B), 24시간 연속 가동과 평균 20°C의 온도 유지가 가능하여 온도에 민감한 유기질 문화유산 소독에 적합하다. 선행 연구에서 도출된 진균류의 멸균 임계 선량을 기반으로 목표 선량 범위를 설정하여[25-27], 대규모 감마선 소독 공정의 적용 가능성을 검토하였다. 모든 실험은 3 kGy h^{-1}의 선량률에서 수행되었다.

2.4. 선량계 배치 설계 및 분석 평가

선량계 배치는 1대의 캐비닛에 최대 18개 공시 상자를 적재한 경우, 양면횡전조사가 가능한 설비의 특성을 활용하여, 모든 상자에 부착하지 않고 Fig. 2와 같이 9개 상자의 외곽(Side edge)과 중앙(Middle)에 선량계를 각 위치의 부착함으로써 효율성을 높였다. 또한 침수 조건에서 발생하는 수분이 흡수선량 측정에 영향을 미치지 않도록 선량계는 이중 밀봉하여 부착하였으며, Labelling은 외곽을 S1-S9으로 중앙 M1-M9으로 구분하였다(Fig. 2). 한 캐비넷을 한 그룹으로 하여 총 6개 그룹을 setting 하

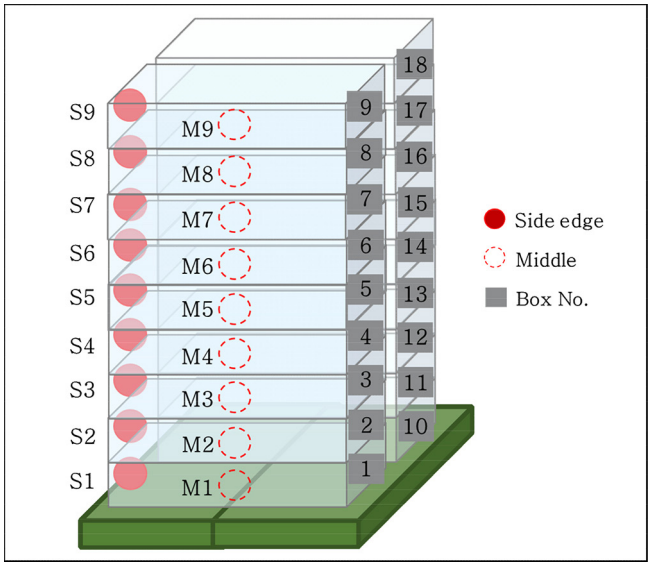

Fig. 2. Dosimeter labelling corresponding to the specific positions of the 18 standard boxes loaded in the cabinet. The placement positions of the dosimeters were categorized into side edge and middle.

였으며, 각각 같은 위치의 선량을 분석하여 통계처리를 하였다. 선량계 분석은 그린피아기술(주)의 ISO 11137-2에 따른 분석 시스템을 이용하여 수행하였으며, 해당 시험은 Alanine pellet 선량계를 사용하여 분석을 진행하였다.

2.5. 통계 분석

실험 결과에서 수집된 데이터는 평균표준편차(mean±SD)로 나타내었다. 실험군 간 차이를 검증하기 위해 분산분석을 수행하였으며, $p<0.05$ 수준에서 Tukey's test를 사용하여 사후 분석을 진행하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 감마선 소독 공정에 따른 흡수선량 분석 평가

침수 모의 문화유산 소독을 위하여 선량률은 3 kGy h^{-1}, 목표 한 선량 범위는 15 kGy로 설정하여 감마선 소독 공정을 수행하였다. 캐비닛 내에 배치된 18개의 공시 상자를 기준으로, 외곽에 부착된 선량계에서 측정된 흡수선량 평균은 13.3±0.36 kGy로 나타났다. 반면, 중앙에 부착된 선량계에서 측정된 흡수선량 평균은 9.81±0.89 kGy로 확인되었다(Table 1). 이러한 결과는 외곽 대비 중앙에서 약 26.22%의 상대적인 차이를 보여, 수분이 다량 함유된 침수 조건일수록 흡수선량 감소폭이 높아지는 것으로 확인하였다.

2차 실증 공정에서는 비연속적으로 6대 캐비닛을 배치하여 선량률 3 kGy h^{-1}, 목표 선량 범위는 20 kGy로 상향 설정한 후 수행되었다. 비연속적 공정을 통한 각 6대 캐비닛을 기준으로, 외

Table 1. Absorbed dose distribution in side edge and middle positions for waterlogged samples after gamma-ray irradiation within 15 kGy

Sample condition	Dosimeter position	Labelling	Absorbed Dose (kGy)
Water-logged	Side edge	S1	12.75
		S2	12.92
		S3	13.54
		S4	13.62
		S5	13.60
		S6	13.54
		S7	13.62
		S8	13.26
		S9	12.88
		mean±SD	13.30±0.36
	Middle	M1	7.77
		M2	9.20
		M3	9.46
		M4	10.45
		M5	10.44
		M6	10.38
		M7	10.41
		M8	10.24
		M9	9.93
		mean±SD	9.81±0.89

Table 2. Absorbed dose distribution in side edge and middle positions for waterlogged samples after gamma-ray irradiation within 20 kGy

Sample condition	Cabinet No.	Dosimeter position	Labelling	Absorbed Dose (kGy)
Water-logged	No.1 - No.6	Side edge	S1	19.56±0.56
			S2	20.76±0.41
			S3	21.53±0.48
			S4	22.44±0.47
			S5	22.55±0.38
			S6	22.02±0.38
			S7	21.97±0.61
			S8	21.31±0.36
			S9	20.67±0.41
			mean±SD	21.42±0.97
		Middle	M1	12.11±0.28
			M2	14.45±0.22
			M3	15.97±0.35
			M4	16.49±0.29
			M5	18.37±1.00
			M6	18.00±0.59
			M7	17.04±0.60
			M8	16.76±0.22
			M9	16.62±0.83
			mean±SD	16.20±1.90

곽에 부착된 선량계에서 측정된 흡수선량 평균은 21.42±0.97 kGy로 분석되었으며, 중앙에 부착된 선량계에서 측정된 흡수선량 평균은 16.20±1.90 kGy로 분석되었다(Table 2). 해당 결과는 외곽 대비 중앙에서 약 24.30% 상대적인 차이를 보였으며, 중앙 흡수선량이 진균 제어 효과를 평가하는 핵심 기준으로 작용함과 동시에 진균 균사를 완전히 제어하기 위한 필수 요소임을 시사한다. 또한 6대 캐비닛 간의 선량 차이는 최대 1-2 kGy로 경미한 편차를 보여주어 대규모 적용 가능성을 입증하였다(Tables 3 and 4). 이는 방사선 처리 과정에서 대상 물질에 따라 처리 효율에 큰 변화를 일으키지 않는 것으로 간주되며[29], 방사선 살·멸균 처리에 크게 영향을 미치지 않는 수준으로 해석될 수 있다.

3.2. 멸균 검정 평가

침수 조건에서의 *Cladosporium* sp.는 15 kGy 이내의 목표 선량 범위에서 효과적으로 억제된 것으로 확인되었다. Figs. 3, 4에 따르면 감마선 소독 처리된 모든 처리구에서는 28일 동안 균사 성장 활성 양상이 전혀 관찰되지 않았다. 반면, *Epicoccum nigrum*은 캐비닛 내 비교적 중앙에 위치한 상자(Box 6 and 12)에 배치된 Plate는 효과적으로 제어되었지만, 하단부(Box 1)와 상단부(Box 18)에 배치된 Plate는 전혀 제어되지 못한 것으로 확인되었다. 결과적으로 캐비닛 내부에 적재된 18개 상자에서 중앙에 배치될수록 목표 선량에 근접한 흡수선량이 측정되었으며, 중앙에서 멀어질수록 흡수선량이 감소하였다. 이에 따라 *E. nigrum*을 완전히 제어하기 위해서는 더 높은 선량이 필요함을 시사하였다(Figs. 3 and 4).

이에 20 kGy 목표 선량 범위에서 연속적이지 않게 배치하여 공정 수행한 6대 캐비닛에서 각 상자 내부에 배치한 두 종류의 공시균주(*Cladosporium* sp., *Epicoccum nigrum*)를 4주 동안 관찰하였다. 담수 오염 대상 공시 균주인 *Cladosporium* sp.는 상대적으로 높았던 2차 공정 목표 선량으로 인해 28일 동안 완전히 제어되었다(Figs. 5 and 6). 이에 따라 일반적으로 흔히 발견되지만 중간 내방사선을 가진 진균류는 침수되었을 때 9.81 kGy 미만의 흡수선량에서 제어된 것으로 사료되며, 해당 시설에서 적용한 선량 범위는 15 kGy 이내로 도출되었다. 해수오염 대상 공시 균주인 *Epicoccum nigrum* 은 2차 공정 목표 선량에서 *E. nigrum*이 28일 동안 성장 활성이 관찰되지 않았다(Figs. 5 and 6). 이에 따라 해수 조건에서 자생하나 담수나 극한 조건에서도 잘 성장하며 높은 내방사선

Table 3. Evaluation and comparison of the average absorbed dose at the side edges of six randomly positioned cabinets in waterlogged conditions after gamma-ray irradiation within 20 kGy

Sample condition	Cabinet No.	Dosimeter position	Absorbed Dose (kGy)
Waterlogged	No.1 (White)	Side edge	21.78±0.92
	No.2 (Red)		21.35±1.37
	No.3 (Yellow)		21.62±0.99
	No.4 (Green)		21.75±0.94
	No.5 (Blue)		20.92±0.89
	No.6 (purple)		21.12±0.93

Table 4. Evaluation and comparison of the average absorbed dose at the middle of six randomly positioned cabinets in waterlogged conditions after gamma-ray irradiation within 20 kGy

Sample condition	Cabinet No.	Dosimeter position	Absorbed Dose (kGy)
Waterlogged	No.1 (White)	Middle	16.31±2.05
	No.2 (Red)		16.06±1.88
	No.3 (Yellow)		16.59±2.11
	No.4 (Green)		16.40±1.96
	No.5 (Blue)		15.77±1.79
	No.6 (purple)		16.07±1.95

을 가진 진균류는 침수되었을 때 16.20 kGy 미만의 흡수선량에서 제어된 것으로 사료되며[25], 해당 시설에서 적용한 선량 범위는 20 kGy 이내로 도출되었다.

한편 유기 문화유산의 소재 재질은 25 kGy 이내 선량에서는 변성이 발생하지 않는 것으로 보고된 바 있다[30]. 따라서 본 연구 결과는 실증 공정에서 설정된 목표 선량이 침수된 진균 제어에 적합하며, 이로부터 효과적인 선량 범위가 20 kGy 이내임을 시사한다.

향후 연구에서는 본 연구에 시행된 육안 관찰 기반의 멸균 평가에 더하여, 방사선에 의한 곰팡이 살·멸균 기작을 규명하고 균주의 멸균 임계 선량을 명확히 확인할 수 있는 심층적인 후속 연구가 필요할 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 실증 공정(15 kGy 이내, 20 kGy 이내)을 통한 감마선 소독 처리에 따른 신속 대규모 적용 가능성을 평가하였다. 방사선 조사에 따라 발생하는 선량 감쇠를 고려하여 공시 상자의 외곽 및 중앙에 선량계를 부착하여 흡수선량을 분석하였으며, 특히 중앙값을 평가 기준으로 적용하였다. 선량 편차를 최소화하고 확실한 생물학적 제어 소독을 하기 위해 3개의 구획으로 되어있는 1대 캐비닛에서 중앙 2번째 구획(65(W)×120(D)×160(H) cm^3)만을 사용하였으며, 문화유산을 가해하는 균주 중 분리된 공시 균주 2종을 공시 상자 내부에 배치하여 멸균 검정 평가를 수행하였다. 침수 조건에서 *Cladosporium* sp.가 15 kGy 이내의 방사선 선량 범위에서 완전히 소독되었으며, 실제로 흡수된 중앙 흡수선량 평균은 9.81±0.89 kGy로 분석되었다. 그러나 방사선 저항성이 강한 *Epicoccum nigrum*은 일부만 소독되는 결과를 나타내어 완전한 제어의 한계 지점으로 간주되었다. 이러한 점을 고려하여, 2차 실증 공정에서는 목표 선량을 증대시켜 20 kGy 선량 범위를 설정함으로서 *E. nigrum*의 저항성을 극복하였으며, 실제로 흡수된 중앙 흡수선량 평균

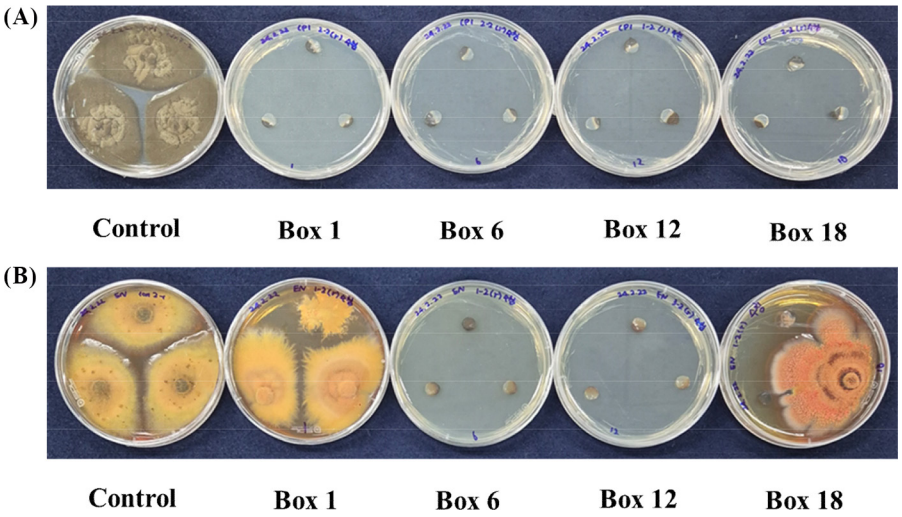

Fig. 3. Detection of fungal growth after gamma-ray irradiation within 15 kGy in a cabinet. (A) Cladosporium sp. and (B) Epicoccum nigrum: Under waterlogged condition in box, The plates inoculated with the fungi placed in boxes(Box 1, Box 6, Box 12, and Box 18) were disinfected within the 15 kGy irradiation range, excluding the control group that non treated with gamma-ray irradiation.

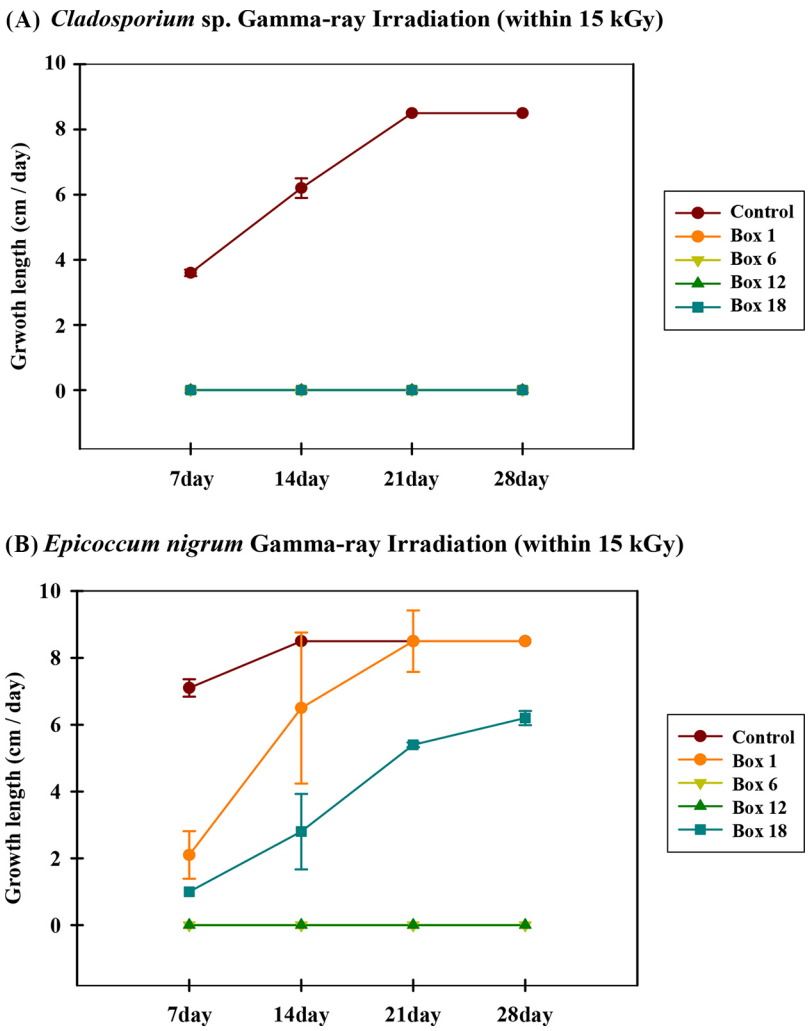

Fig. 4. The mycelial growth length after gamma-ray irradiation within 15 kGy in the waterlogged condition boxes. (A) *Cladosporium* sp. and (B) *Epicoccum nigrum* were observed for the 28 day.

은 16.20±1.90 kGy로 분석됨에 따라 해당 진균을 효과적인 소독에 도달한 점에서 중요한 의의를 지닌다. 또한 34대 중 일부 6대를 무작위로 배치하여 조사한 캐비닛 간의 선량 편차는 1-2 kGy 이내로 미미한 결과를 나타내어 대규모 적용 가능성을 입증하였다. 해당 결과는 본 시설에서 48시간 이내 30톤 규모의 감마선 소독 처리 공정이 가능함을 시사하며, 향후 연구에서 기계적 결함이나 오작동 문제에 대해 실증 연구를 통해 대안을 마련한다면 긴급 수해 재난 상황에서 문화유산을 대상으로 방사선 기술을 이용한 다양한 응용 분야로 확장해 나갈 수 있을 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 국가유산청 및 국립문화유산연구원의 2024년도 문화유산 스마트 보존·활용 기술 개발 사업으로 수행되었습니다(과제명: 동산문화유산 재해재난 대응 응급 보존처리를 위한 방사선 활용 훈증 대체기술 개발; 연구개발과제번호: RS-2021-NC100701). 저자들은 대규모 감마선 소독 처리 공정 운전과 선량 측정을 도와주신 그린피아기술(주) 김상철 이사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. National Cultural Heritage Research Institute. 2024. Cultural Heritage Flood Damage and Response Technology. National Heritage Administration. https://portal.nrich.go.kr/kor/originalUsrView.do?info_idx=9016&menuIdx=1046.
2. National Heritage Administration. 2024. National Heritage in Statistics 2023. National Heritage Administration. https://www.khs.go.kr/cop/bbs/selectBoardArticle.do?nttId=87827&bbsId=BBSMSTR_1020&pageIndex=1&mn=NS_03_07_04.
3. Nittérus M. 2000. Fungi in Archives and Libraries. *Restaur* **21**(1):25-

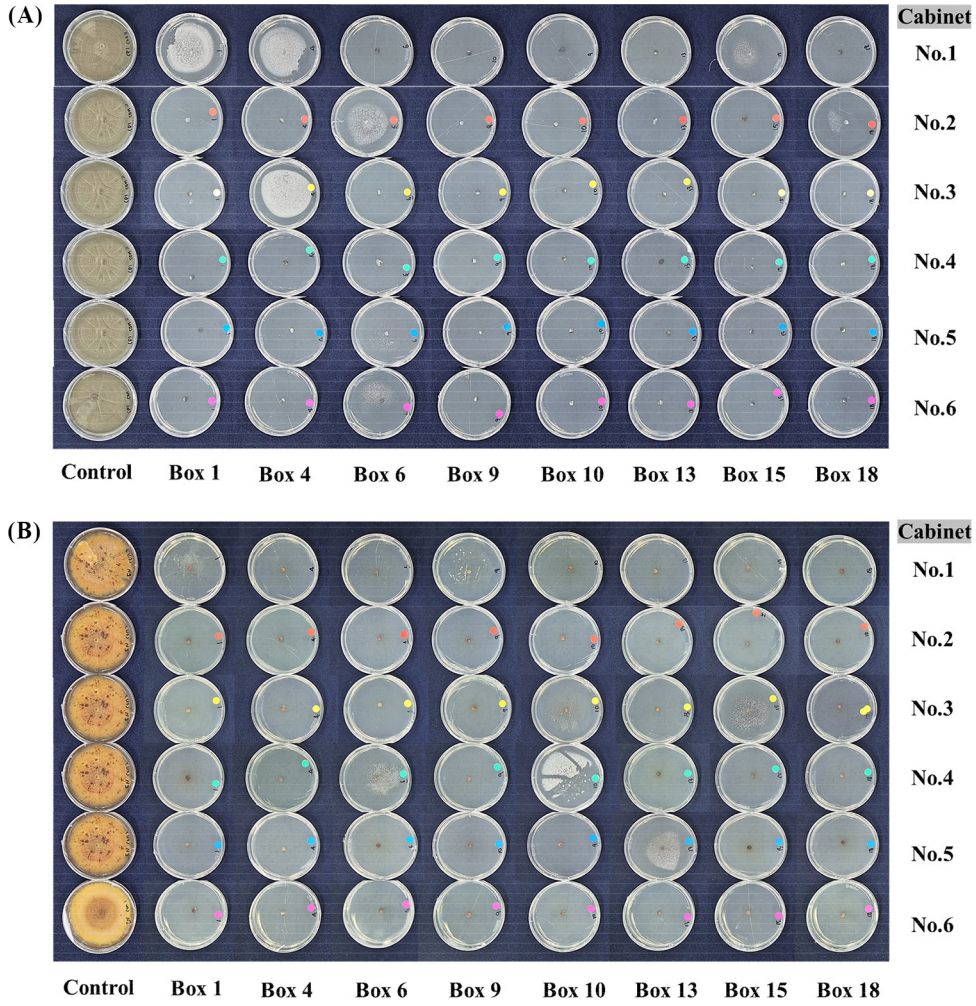

Fig. 5. Detection of fungal growth after gamma-ray irradiation within 20 kGy in cabinets. (A) *Cladosporium* sp. and (B) *Epicoccum nigrum* were treated with gamma-ray irradiation for disinfection. The plates inoculated with the fungi placed in boxes (Box 1, 4, 6, 9, 10, 13, 15, and 18) were disinfected within the 20 kGy irradiation range, excluding the control group that was not treated with gamma-ray irradiation.

40. https://doi.org/10.1515/REST.2000.25.
4. Santos A, Cerrada A, García S, San Andrés M, Abrusci C and Marquina D. 2009. Application of molecular techniques to the elucidation of the microbial community structure of antique paintings. *Microb. Ecol* **58**:692-702.
5. Sterflinger K. 2010. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biol. Rev* **24**(1-2):47-55. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2010.03.003.
6. Sterflinger K and Piñar G. 2013. Microbial deterioration of cultural heritage and works of art — tilting at windmills? *Appl. Microbiol. Biotechnol* **97**(22):9637-9646. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5283-1.
7. Mandrioli P, Caneva G and Sabbioni C. 2003. Cultural heritage and aerobiology: Methods and measurement techniques for biodeterioration monitoring. *Kluwer Acad. Publ*, Dordrecht. https://doi.org/10.1007/978-94-017-0185-3.
8. Kaarakainen P, Rintala H, Vepsäläinen A, Hyvärinen A, Nevalainen A and Meklin T. 2009. Microbial content of house dust samples determined with qPCR. *Sci. Total Environ* **407**(16):4673-4680. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.04.046.
9. Pasquarella C, Balocco C, Pasquariello G, Petrone G, Saccani E, Manotti P, Ugolotti M, Palla F, Maggi O and Albertini R. 2015. A multidisciplinary approach to the study of cultural heritage environments: Experience at the Palatina Library in Parma. *Sci. Total Environ* **536**:557-567. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.105.
10. Mesquita N, Portugal A, Videira S, Rodríguez-Echeverría S, Bandeira AML, Santos MJA and Freitas H. 2009. Fungal diversity in ancient documents: A case study on the Archive of the University of Coimbra. *Int. Biodeterior. Biodegrad* **63**(5):626-629. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2009.03.010.
11. Pinzari, F., Montanari, M. 2011. Mould Growth on Library Materials Stored in Compactus-Type Shelving Units. pp. 193-206. In: Abdul-Wahab, S. (eds) Sick Building Syndrome. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-642-17919-8_11.
12. Okpalanozie OE, Adebusoye SA, Troiano F, Cattò C, Ilori MO and Cappitelli F. 2018. Assessment of indoor air environment of a Nigerian museum library and its biodeteriorated books using culture-dependent and independent techniques. *Int. Biodeterior. Biodegrad*

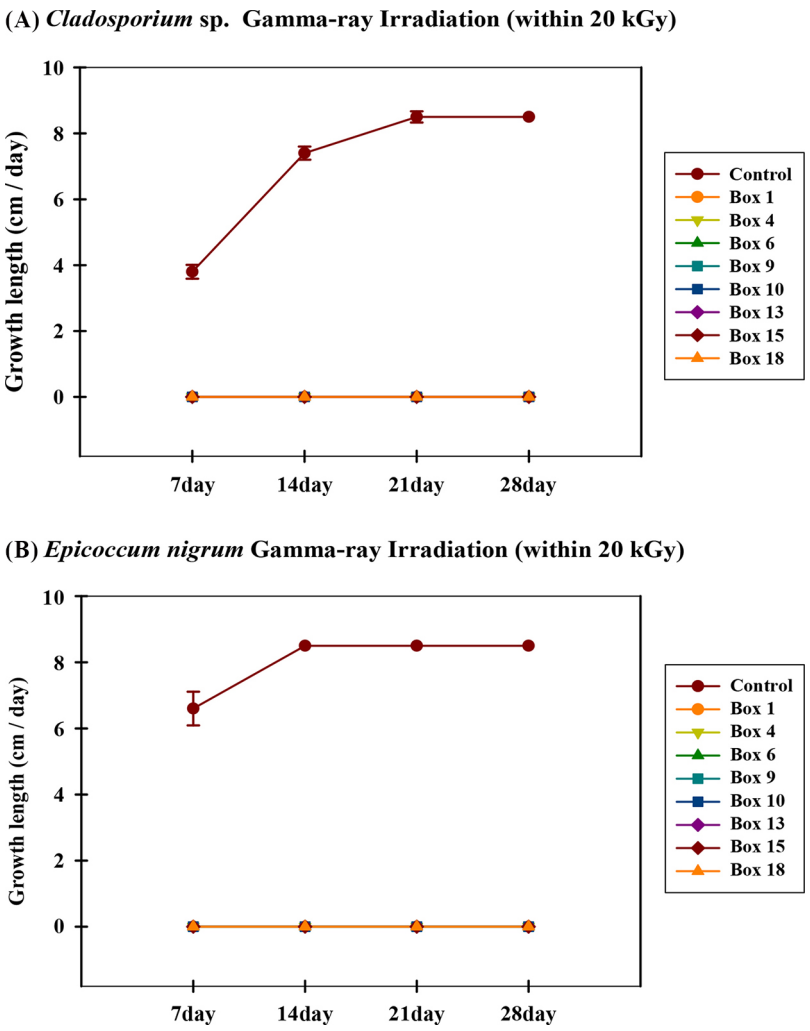

Fig. 6. The mycelial growth length after gamma-ray irradiation within 20 kGy in the waterlogged condition boxes. (A) *Cladosporium* sp. and (B) *Epicoccum nigrum* were observed for the 28 day.

132:139-149. https://doi.org/10.1016/j.ibi 132:139-149. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2018.03.003.

13. Terr AI. 2004. Are indoor molds causing a new disease? *J. Allergy Clin. Immunol* **113**(2):221-226. https://doi.org/10.1016/j.jaci.2003.11.014.
14. Lech T. 2015. Molecular biology methods to assess microbiological hazard concerning objects of cultural heritage. *Microbiol. Res. J. Int* **9**(6):1-9. https://doi.org/10.9734/BMRJ/2015/19535.
15. Borderie F, Alaoui-Sossé B and Aleya L. 2015. Heritage materials and biofouling mitigation through UV-C irradiation in show caves: State-of-the-art practices and future challenges. *Environ. Sci. Pollut. Res* **22**:4144-4172. https://doi.org/10.1007/s11356-014-4001-6.
16. Mauro T, Tretiach M, Bertuzzi S and Carniel F. 2012. Heat shock treatments: A new safe approach against lichen growth on outdoor stone surfaces. *Environ. Sci. Technol* **46**(12):6851-6859. https://doi.org/10.1021/es3006755.
17. Silva M, Moraes AML, Nishikawa MM, Gatti MJA, de Alencar MV, Brandão LE and Nóbrega A. 2006. Inactivation of fungi from deteriorated paper materials by radiation. *Int. Biodeterior. Biodegrad* **57**(3):163-167. https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2006.02.003.
18. Katušin-Ražem B, Ražem D and Braun M. 2009. Irradiation treatment for the protection and conservation of cultural heritage artefacts in Croatia. *Radiat. Phys. Chem* **78**(7-8):729-731. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2009.03.048.
19. Bratu E, Moise IV, Cutrubinis M and Virgolici M. 2009. Archives decontamination by gamma irradiation. *Nukleonika* **54**(2):77-84.
20. McEvoy B, Maksimovic A, Howell D, Reppert P, Ryan D, Rowan N and Michel H. 2023. Studies on the comparative effectiveness of X-rays, gamma rays and electron beams to inactivate microorganisms at different dose rates in industrial sterilization of medical devices. *Radiat. Phys. Chem* 208:Article 110915. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2023.110915.
21. Jo GS, Kwak YH, Lee MJ, Jeong RD and Park HJ. 2023. Comparison of the Effectiveness of Disinfection According to the Permanence of X-ray Irradiation for Preservation of Water-logged Cultural Heritages. *J. Radiat. Ind* **17**(4):533-542. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.533.
22. Sinco P. 2000. The use of gamma rays in book conservation. *Nucl. News* April:38-40.
23. Tassigny CD and Brouqui M. 1978. Adaptation à la désinfection de

la momie de Ramsès II du procédé de radio-stérilisation gamma. In: Preprints of the 5th ICOM Triennial Meeting, Zagreb, 1-8 October, 1978. *Int. Counc. Mus. (ICOM) Comm. Conserv*, pp. 16-16.

24. Linh NTT, Kumeda Y, Matsushita M, Amano M, Sakai K, Yoshikawa K, Fujita K, Uchida T and Furuta M. 2020. Effect of gamma radiation on fungal growth stages and mechanical properties of traditional Japanese paper. *J. Cult. Herit* **46**:148-154. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.07.007.
25. Park HJ and Oh JH. 2023. Gamma and electron beam irradiation use in the control of a radiation-resistant fungus (Epicoccum nigrum) for preservation of contaminated organic artefacts of traditional heritage. *Radiat. Phys. Chem* 205:Article 110723. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110723.
26. Jo GS, Kwak YH, Park MG and Park HJ. in press-a. Gamma radiation dose rate in control fungi to preserve contaminated organic artefacts of cultural heritage. *Radiat. Phys. Chem*.
27. Jo GS, Kwak YH, Park MG and Park HJ. in press-b. Disinfection of fungus using X-ray irradiation for the preservation of contaminated organic artifacts of traditional heritage. *Appl. Radiat. Isot*.
28. Hong CY, Lee MJ and Park HJ. 2021. Comparison of Absorbed Dose Reduction to Flooded Paper by Water Qualities with Gamma Ray Irradiation. *J. Radiat. Ind* **15**(4):335-340. https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.335.
29. Nelson Labs. 2019. ISO 11137: Guidance for Radiation Sterilization Validation. Nelson Labs ISO 11137 Guide.
30. Park HJ, Choi JS, Hong CY, Lee NR, Youn DY, Oh SM and Chung YJ. 2022. Changes of physico-chemical properties of the raw and degummed silk under the wet conditions by gamma-ray irradiation. *J. Radiat. Ind* **16**(3):261-269. https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.261.