JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Technical article

17(4) : 533-542 (2023)
https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.533

수침 문화재 보존 처리에 있어 엑스선 조사의 연속성에 따른 살균력 효과 비교

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

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

Comparison of the Effectiveness of Disinfection According to the Permanence of X-ray Irradiation for Preservation of Water-logged Cultural Heritages

GyeongSeo Jo[1,3], YeongHyeok Kwak[1,2], MyeonJu Lee[1], Rea-Dong Jeong[2] and Hae-Jun Park[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea
[2]Department of Applied Biology, Chonnam National University, 300 Yongbongro 77, Gwangju 59626, Republic of Korea
[3]Department of Agricultural Chemistry, Jenbuk National University, 567 Baekje-daero, Deokjin-gu, Jeonju 54895, Rebublic of Korea

Abstract We developed an emergency national manual for preservation of cultural heritage using irradiation disinfection technic under flood disaster. And we examined its practicality with a critical radiation dose on fungi that occur at water-logged event in order to prevent fungal damage that occurs during submersion. The X-ray irradiation for this experiment was conducted at the Production Technology Research Institute located in Yeongcheon, Gyeongsangbuk-do. A disinfection critical dose of 12 kGy was selected for two types of fungi known to spread rapidly and are resistant to radiation to submerged cultural properties, and this experiments were conducted by setting a target dose of 12 kGy at 8.37 mA at 5 MeV. Under the above conditions, only continuity of irradiated samples were completely disinfected. This suggests that continuity of irradiation is important for fungal disinfection.

Key words: Dosemeters analysis, Lethal sterilzation dose, X-ray irradiation, , X-ray examination process

1. 서 론

최근 기후변화로 인해 홍수와 태풍이 자주 발생하여 우리 문화유산의 수침 피해가 우려된다[1-4]. 우리 전통 문화유산에는 목판, 서적 등 유기질로 구성된 기록물들이 많으므로 수침되었을 경우 48시간 이내로 보존처리가 되지 않으면, 곰팡이 발생 등으로 인해 귀중한 기록유산들이 소실될 수 있다. 이에 대한 대응 방법으로서는 현재 동결건조하여 복원하는 방법과 방사선으로 소독하는 방법이 있다. 일반환경에서 보존 중인 문화유산의 경우 가스 훈증소독에 의한 소독처리가 가능하나 재난재해에 의한 수침 문화유산에 대해서는 수침이라는 물리적 특성상 소독 대상물의 내부에 가스약제의 침투가 어려워 그 처리 효과의 한계가 있다[5,6]. 동결건조하는 방법으로서는 오염물을 동반한 수침으로 인하여 진균의 균사 또는 포자를 그대로 보유한 상태로 동결건조되므로 복원 시 2차적 감염과 복원 기술자의 건강을 해칠 우려가 있다. 홍수 등 피해 문화유산 보존처리를 위한 방사선 조사는 1968년 프랑스에서 세

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2023 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 1 November 2023 Revised 12 December 2023 Accepted 13 December 2023

느강 홍수 때 피해 입은 문화유산 보존을 위해 처음 시도되었으며 그 후 유럽에서는 홍수 피해 시 문화유산 보존을 소독처리 방법으로서 널리 사용되고 있다[5-9].

최근 들어 전기기동 방사선 멸균처리 상용화 시설이 늘어나면서 코발트-60 선원을 기반으로 하는 감마선 조사 대량 상용화 멸균시스템을 급속도로 대체하기 시작하였다. 그러나 전기기동 방사선으로 주로 사용되는 전자선은 투과 깊이가 깊지 못해 수침된 대상물에 멸균 처리용으로 사용하기에는 그 한계가 있었다. 그러나 2010년대부터 감마선 레벨의 두께를 멸균 처리할 수 있는 엑스선의 신기술이 전기기동 방사선 시설에 장착되면서 다양한 방사선 멸균 소독처리를 할 수 있게 되었으며 특히 수침된 문화재의 보존처리도 가능하게 되었다[10-12]. 이에 수침된 목판 서적 등 기록물 문화재 소재의 엑스선 조사 시 기존에 목표한 선량만큼 적절하게 조사하기 위한 공정과 조사시료의 특성과 이에 따른 선량분포에 대한 연구가 요구되었으며 최종적으로 현재 가장 효율적 신속 대용량 소독처리 방법을 찾기 위한 실증시험 단계에 이르렀다[12].

우리나라 환경에서 수침재난 시 생물학적 피해를 발생시키는 가해생물들을 조사하였다. 그중에서 곰팡이균에 의해 발생하는 피해가 제일 크고 대부분이었다. 이때 발생하는 곰팡이균 피해를 방사선으로 방제하기 위하여 각각의 곰팡이균에 대한 방사선(감마선) 멸균치사 선량을 구하였고 그중에 해수 유래의 *Epicoccum nigrum*이 방사선에 대해 내성이 제일 강하였다[6,13,14].

*Epicoccum nigrum*의 엑스선에 대한 치사선량은 12 kGy 전후였다. *Epicoccum nigrum*은 우리나라에서 통기와 환기가 잘 되지 않는 고분군과 관리가 허술한 수장고에서 종종 발견되었다[6,15,16]. 그러나 현재까지 건조하거나 잘 보존된 수장환경에서 문화유산 훼손 사례는 보고되지 않았다. 다만 일반 주변 생활환경에서도 자주 발견되며 자연 서식생태에서 홍수나 재난으로 외부의 오염물, 특히 해일 등에 의한 해수유입은 유기문화재에 충분히 영향을 미칠 수 있다[4,17-19].

최근 재난 중에 수침된 문화재를 대상으로 한 응급보존처리에 최적의 엑스선 멸균법을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다[19]. 전기기동 엑스선의 경우 정전, 부품 고장으로 인한 사고 시 멸균 조사를 일시 정지해야 할 경우가 발생한다. 척박한 환경에 강한 *Epicoccum nigrum* 또는 *Cladosporium*속의 경우 비교적 빠른 시간에 회복할 수 있다[20-25]. 그러므로 실제 공정처리 상황에서 일정시간 조사가 정지하였을 경우 살균력에 어떠한 영향을 미치는지를 조사할 필요가 있다. 따라서 실제 모의 실증시험을 시행하여 정전 등으로 한동안 설비가 가동되지 않고 있다가 재가동되었을 경우를 가상하여 실증 실험을 계획하여 진행하고자 한다. 재난 시 수침된 가상 문화재를 가정하여, 원예용 암면을 수침상태로 하여 공시표준상자에 장착한 다음 엑스선 보존처리 공정을 이행하고 이때 암면 사이에 균을 접종한 배양기를 삽입하여 멸균 유무를 측정함으로써 본 연구를 통해 시설이 정지되었을 경우 살균력의 차이가 나타나는지 확인하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시료준비

수침 문화재 장기 포장용 케이스 최적 사이즈 설정된 포장용 PP 재질 폴리머 소재를 이용한 케이스(630 mm × 430 mm × 160 mm)에 침수된 원예용 암면(한국유알암면)을 넣고 12상자를 1 set로 하였다. 각 상자의 암면에 수돗물(6 L)를 넣어 수침시킨 후 8.5~9 kg 부풀어 오른 시료의 높이가 8.5 cm가 되도록 설계하였다(Fig. 1).

2.2. 살균력 검정

공시균으로서 *Epicoccum nigrum*과 *Cladosporium* sp.을 선정하였다. *Epicoccum nigrum*은 침수 문화재를 대상으로 빠르게 퍼지며, 해수배양조건에서 방사선에 대한 강한 내성을 가지고 있다. 감마선에서 15 kGy에서 멸균치사 임계선

Fig. 1. Properties of samples.

Fig. 2. Korea Institute of Science and Technology Bio-Medical Center RF - Linear Accelerator.

량을 갖는다[6]. 한편 *Cladosporium* sp.는 대기 중에 널리 존재하며, 실내 환경에서도 발견되는 균주로 방사선에 대해 감수성이 높아 일반적으로 재난 소독의 시험균주로 이용하고 있으므로 선정하였다. 배양조건은 각각의 시험균주를 PDA agar plate에 7일 동안 25°C에서 성장시켰다. 그 후 시험균주의 가장자리부터 4 mm로 punching하여 새로운 PDA 배지 위에 치상하여 위와 같은 방법으로 성장시킨 후 실증실험에 사용하였다. 고방사선 환경하에 균사가 포자에 비해 월등한 방사선 내성을 가지는 것으로 보고되어 있다[6,12,13,15,19]. 따라서 엑스선 조사 후 균사의 살균 유무 검정에 대한 구체적인 방법은 [6]에 따라 수행하였다.

2.3. 엑스선 조사

본 연구의 엑스선 조사는 영천에 소재해 있는 한국생산기술연구원 바이오메디컬센터 (E-bean irradiation facility-RF 선형가속기)를 이용하여 실증시험을 진행하였다. 해당 시설은 엑스선 & 전자선을 이용한 대량 메디컬 디바이스 멸균전용시설이다. 재난 발생 시 다량의 수침 문화재가 발생하여 이를 멸균 처리하는 상황을 가정하여 시험을 진행하였다. 엑스선은 5 MeV, 50 KW, 8.35 mA로 양면조사로 설정하였다. 표준 공시상자 12개를 1 set로 반복 회전조사를 하였다. 12 kGy를 흡수 목표선량으로 하였다(Fig. 2).

2.4. 선량 측정 및 분석 방법

엑스선 흡수선량 평가를 위하여 Alanine pellet dosimeters (ES 200-2106, Bruker, USA)를 시료의 표면에 테이프를 이용하여 부착하였다. 조사처리과정에서 엑스선 흡수선량 평가를 위한 선량계를 상자의 위, 중간, 아래에 부착하여, 선정된 박스에 Fig. 3과 같이 부착하였다. 해당 선량계는 광선과 수분에 취약하므로 시료에 부착하는 과정

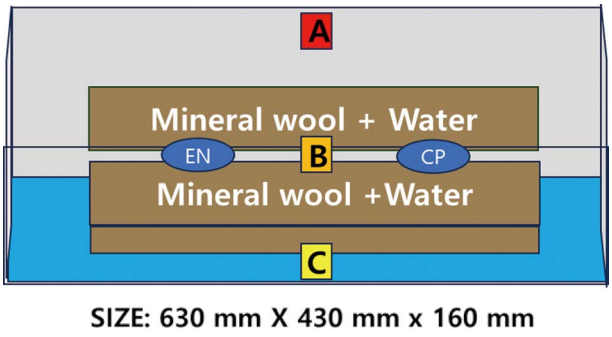

Fig. 3. Alanin pellt dosemeters (B3000-GEX Corporation, USA) and fungal strains positioned; A: Inside the box lid, B: Middle, C: Box floor; EN: 7 days of incubation of *Epicoccum nigrum* inoculation location; CP: 7 days of incubation of *Cladosporium* sp. inoculation location.

에서 방수봉투에 각각 1개씩 담아 밀봉하였으며, 엑스선 조사 직후 회수하여 한국방사선진흥협회에 의뢰하여 흡수선량분석을 의뢰하였다.

3. 결과 및 고찰

Set 1에서는 3분 이내를 제외한 총 10회의 stop issue가 발생하였으며, Alanin 선량계 분석 결과 5.09~9.91 kGy로 10 kGy가 넘지 않았다(Tables 1 and 5). 양면조사가 진행되지 못함에 따라 위쪽에 부착한 Alanin 선량계의 흡수선량이 높은 경향을 보였다. 바닥에 부착한 선량계가 그 다음이며, 중간에 위치한 선량계가 흡수선량이 낮았다. Set 1은 목표로 하였던 48시간 이내에 조사는 되었지만, 시험균주인 *Epicoccum nigrum*과 *Cladosporium* sp.의 치사선량에 도달하지 못하는 선량이 조사됨에 따라 멸균이 진행되지 않았을 것이라 판단하였다(Fig. 4).

엑스선 조사 이후 시료를 회수하여 Box 1번에 접종하였

던 시험균주들을 PDA 배지에 접종하여 4주간 균주 활성을 검토하였다. 결과적으로 예상했던 것처럼 균주들은 멸균처리되지 않았다(Fig. 4). 균주는 암면 시료의 가운데 지점에 접종되어 있고 추후 선량측정 결과에서의 흡수선량이 6.18 kGy로 측정된 것으로 보아 멸균 선량 12 kGy에 충족되지 않은 것으로 확인되었다(Table 5).

Set 2에서는 3분 이상의 stop issue가 13회 이상 발생하였지만 양면조사는 끝까지 진행됨에 따라 5.65~15.66 kGy의 고르지 못한 흡수선량이 나타났다. 최장 stop issue는 4시간 30분이었으며 물리적으로 시설 부품이 파손되어 일반적인 수리교체시간에 상응한다. 2 Set의 경우 양면조사를 수행함으로써, 위아래 흡수선량이 거의 동일한 경향을 보였다. 중간에 부착한 선량계의 흡수선량이 낮은 경향을 보였다.

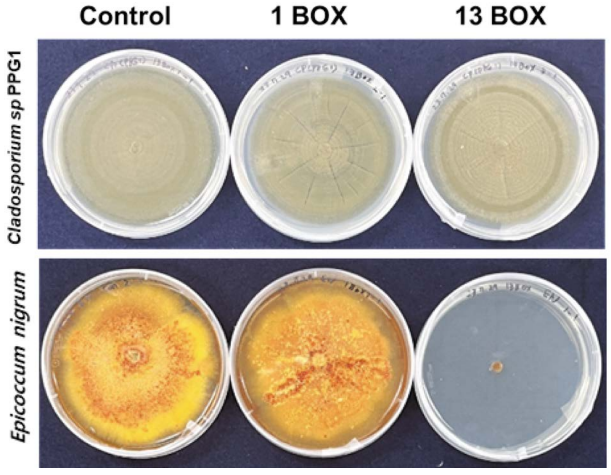

Fig. 4. X-ray examination of mold samples (*Cladosporium* sp., *Epicoccum nigrum*) from Sets 1 to 2 after 28 days.

Set 2에서 시험균주(*Epicoccum nigrum*, *Cladosporium* sp.)를 접종했던 13 Box는 위쪽 10.95 kGy, 중간 8.18 kGy, 아래 11.65 kGy로 시험균주들이 치사선량에 근접하게 도달하였지만 연속적인 조사는 진행되지 않았다(Tables 2 and 5). 시험균주는 *Cladosporium* sp.는 전혀 멸균이 되지 않았으며 *Epicoccum nigrum*은 멸균처리되었다(Fig. 4). 이와 같은 결과는 연속적인 조사가 되지 않고 중단과 재가동을 반복하였을 경우 시험균주의 회복활성 및 방사선 저항성에 의해 멸균이 진행되지 않음을 시사한다[21-24].

Set 3의 경우 3분 이내를 제외한 총 6회의 stop issue가 발생하였으며, 9.87~15.33 kGy로, 목표 흡수선량에 근접하게 조사되었다(Tables 3 and 5).

3 Set의 시료들은 양면조사가 수행되었으며, 시험균주들은 치사선량에 도달하였지만 연속적인 조사되지 않았다. 이후 Set 3에서 시험균주가 접종되었던 Box 25번의 경우 케이스 위쪽 15.33 kGy, 아래쪽 9.20 kGy로 위쪽은 목표한 선량보다 흡수선량이 3 kGy가량 높게 측정되었으며, 중간에 있던 dosimeter와 36 Box의 dosimeter는 수침에 의해 부피가 커짐에 따라 측정에 어려움이 따라 측정에서 제외되었다. 시료를 회수하여 PDA에 접종 후 28일 동안 활성을 관찰하였을 때 *Epicoccum nigrum*의 경우에는 멸균처리되었으나, *Cladosporium* sp.의 경우에는 멸균처리되지 않음을 확인하였다(Fig. 5). 이는 연속적 조사가 되지 않고 중단과

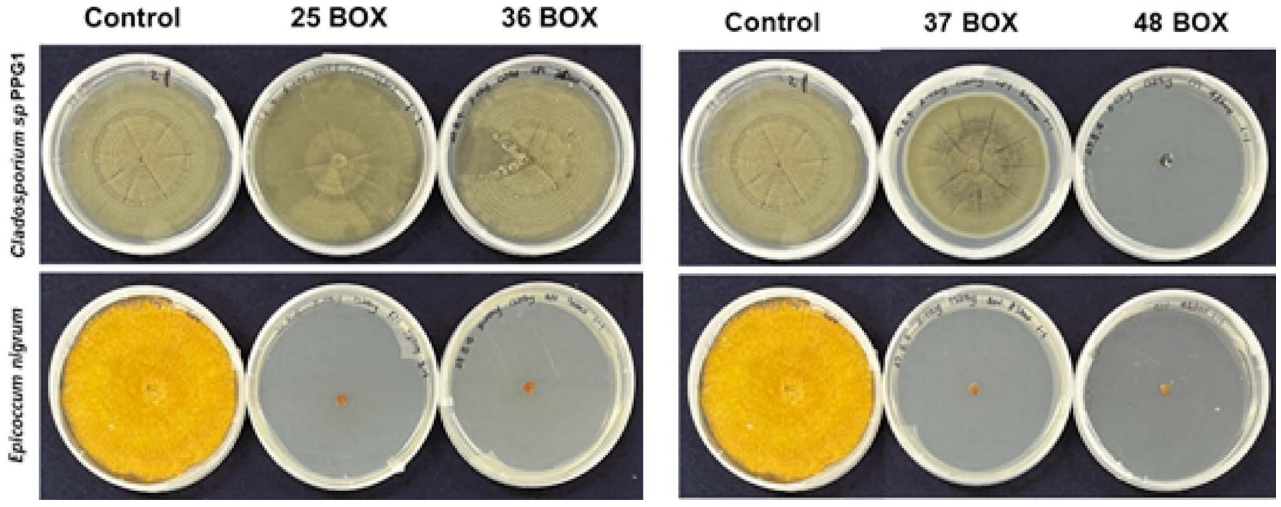

Fig. 5. X-ray examination of mold samples (*Cladosporium* sp., *Epicoccum nigrum*) from Sets 3 to 4 after 28 days.

Table 1. The table represents data and information about the operational stop issue during the X-ray examination at 12 kGy for Set 1 samples on July 27th

Start/Stop	Energy	AV.Cur	P.Cur	Fr	Power	Speed	Ua	Ia	Tube1	Inj	Panovs	Vacum	Tnak	CurRef	Tube 2	Water temp	Rect	Rline V	Axia L	Stop reason
ConPoint 11:06:16	4.59	0.05	55	2	0.26	0	24.2	132.7	431	17.5	3.522	0.905	9641	3610	440	21.2	564	1.41	3.11	Start Working
ConPoint 11:28:02	5	8.31	388	42	41.5	0	28.5	216.3	435	17.5	3.511	0.82	13858	5656	447	21	522	1.65	3.12	Working
11:21:50 11:41:27	0.29	1.9	89	2	0.02	0	0.07	0.07	428	17.6	3.522	0.939	12435	5810	440	21.5	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 11:45:58	0.29	0	0	42	0	0	0	0	426	17.6	3.499	0.957	11689	5810	440	21	15	0	3.11	Working
11:48:06 11:51:53	0.29	0	0	2	0	0	0.07	0.01	431	17.6	3.522	0.957	12481	5679	440	21.2	17	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 11:57:06	0.29	0	0	42	0	0	0	0.17	431	17.6	3.499	0.939	11732	5679	447	21.2	15	0	3.11	Working
11:57:06 12:31:21	4.95	8.39	391	2	1.99	0	28.2	0	133	17.6	3.522	2.99	13686	5851	447	22.4	493	1.57	3.09	Stop by oper
ConPoint 12:35:22	0.29	0	0	42	0	0	0	0.02	431	17.6	3.511	0.683	128565	5851	447	21	15	0	3.12	Working
15:31:04 15:35:19	0.29	1.89	88	2	0.02	0.3	0.02	0	442	17.6	3.534	0.717	12807	5778	447	22	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 15:39:35	0.29	0	0	42	0	0	28.4	35	437	17.6	3.522	0.854	12039	5778	447	21	15	0	3.09	Working
13:16:39 13:46:34	5	8.34	389	2	1.98	1.98	28.4	0	435	17.5	3.499	3.041	13713	5845	447	21.2	513	513	3.11	Stop by oper
ConPoint 13:50:50	0.29	0	0	42	0	0	0	0.07	431	17.6	3.499	0.751	125890	5848	440	21	14	0	3.11	Working
15:42:33 15:42:46	0.29	0	0	2	0	0	0.07	0	428	17.6	3.522	0.734	11209	5650	440	21.5	7	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 15:49:58	0.29	0	0	2	0	0	0	0.02	422	17.6	3.522	0.837	10536	5650	440	21	14	0	3.11	Working
15:49:58 15:52:38	0.29	1.89	88	0.02	0.3	0.3	0.02	0	424	17.6	3.522	0.734	12610	5641	440	22.7	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 16:02:20	0.29	0	0	0	0	0	0	0.02	422	17.6	3.499	0.803	11853	5641	434	21.5	558	0	3.11	Working
16:08:21 16:08:45	0.29	0	0	0	0	0.3	0.02	0	424	17.6	3.511	0.717	11849	5618	434	21	16	0	3.11	Rect. OFF
ConPoint 16:13:32	0.29	0	0	0	0	0	0	0.02	422	17.6	3.499	0.82	11138	5618	434	21.2	15	0	3.11	Working
16:16:09 16:16:26	0.29	1.25	58	0.01	0.01	0	0.07	0	428	17.6	3.522	0.734	11226	5618	440	21.5	16	0	3.11	Rect. OFF
ConPoint 16:30:16	0.29	0	0	0	0	0	0.07	0.07	424	17.6	3.511	0.82	35070	100	440	22	14	0	3.11	Working
16:34:19 16:34:30	0.29	0	0	0	0	0	0.07	0.07	428	17.6	3.522	0.905	8937	7482	440	21	17	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 16:43:34	0.29	0	0	0	0	0	0.07	0.07	424	17.6	3.534	0.871	3500	100	447	21.5	15	0	3.11	Working
16:43:33 16:43:55	0.29	0	0	0	0	0	0.07	0.7	428	17.6	3.534	0.854	8586	2440	440	22	17	0	3.09	Rect. OFF

Table 2. The summary represents data and information about the operational stop issue during the X-ray examination at 12 kGy for Set 2 samples on July 28th

Start/Stop	Energy	AV.Cur	P.Cur	Fr	Power	Speed	Ua	Ia	Tube1	Inj	Panovs	Vacum	Tnak	CurRef	Tube 2	Water temp	Rect	Rline V	Axia L	Stop reason
ConPoint 10:52:48	0.29	0	0	2	0	0.3	0.02	0.02	422	17.6	3.511	1.059	3500	100	440	21.2	14	0	3.12	Start Working
ConPoint 11:15:09	5	8.31	387	42	41.5	0.3	28.8	215.3	133	17.6	3.522	1.025	13563	5708	440	22.2	511	1.65	3.12	Working
10:52:48 11:55:01	5	8.33	388	2	1.98	0	28.5	213.2	431	17.6	3.522	1.435	13319	5840	440	21.5	510	1.65	3.09	Stop by oper
ConPoint11:57:26	0.29	0	0	42	0	0	0	30.24	428	17.6	3.511	1.059	12520	5840	440	21	14	0	3.11	Working
11:57:25 12:20:00	5	8.33	389	2	1.98	0	28.3	212.7	431	17.6	3.522	1.623	13319	5850	440	21.2	522	1.65	3.08	Stop by oper
ConPoint 12:23:27	0.29	0	0	42	0	0.3	0	0	428	17.6	3.499	1.059	12520	5850	440	21.5	15	0	3.09	Working
12:23:26 12:39:30	4.98	8.32	388	2	1.97	0	28.4	212.2	431	17.6	3.511	1.606	13319	5859	447	21.5	523	1.65	3.11	Stop by oper
ConPoint 12:44:17	0.29	0	0	42	0	0.3	0	0	426	17.6	3.499	1.059	12519	5859	440	21.5	14	0	3.08	Working
12:44:16 12:58:28	5	8.32	388	2	1.98	0	28.5	212.7	431	17.6	3.511	1.3538	13415	5834	447	21	522	1.65	3.12	Stop by oper
ConPoint 13:04:54	0.29	0	0	42	0	0.3	0	0	426	17.6	3.511	0.666	12610	5834	440	21.5	14	0	3.11	Working
13:59:25 14:13:23	5	8.31	387	2	1.97	0	28.5	214.3	437	17.6	3.522	1.555	13610	5814	440	21	508	1.65	3.11	Stop by oper
ConPoint 14:17:24	0.29	0	0	42	0	0	0	0.214	428	17.6	3.511	1.3042	12793	5814	440	22	14	0	3.11	Working
14:17:23 14:33:18	5	8.32	388	2	1.98	0	0.02	0.0.02	435	17.6	3.522	1.982	13802	5833	440	21	534	1.65	3.11	Stop by oper
ConPoint 14:36:49	0.29	0	0	42	0	0.3	4.64	0	433	17.6	3.511	0.803	12974	5833	440	21.2	14	0	3.09	Working
14:44:40 14:48:38	0.29	0	0	2	0	0	0.06	0.06	435	17.6	3.534	0.632	13736	5769	447	22.4	16	0	3.11	Rect. OFF
ConPoint 14:51:07	0.29	0	0	42	0	0	0	0	431	17.6	3.522	0.598	12912	5769	440	21	14	0	3.11	Working
14:51:07 14:58:44	0.29	1.88	87	2	1.02	0	0.06	0.06	435	17.6	3.511	0.683	12814	5811	440	21	15	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 15:03:29	0.29	0	0	42	0	0	0.02	0.02	431	17.6	3.51	0.666	12045	5811	440	21.5	15	0	3.09	Working
15:03:29 15:16:02	0.29	1.9	88	2	0.02	0	0.02	0.02	435	17.6	3.522	0.649	12674	5861	447	22.4	16	0	0.09	Rect. OFF
ConPoint 15:24:22	0.29	0	0	42	0	0.3	0	0	433	17.6	3.522	0.717	11913	5861	447	21.2	14	0	3.12	Working
15:24:22 15:24:50	0.29	1.87	87	2	0.02	0.3	0.02	0.02	433	17.6	3.511	0.734	12863	5861	447	21.7	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 15:27:36	0.29	0	0	39	0	0	0	0	433	17.6	3.511	0.598	11851	5861	447	21.5	555	0	3.11	Working
17:02:27 17:10:29	0.29	1.89	88	2	0.02	0.3	0.02	0.02	437	17.6	3.522	1.042	12497	5910	447	22.2	15	0	3.11	Rect. OFF
ConPoint 17:11:31	0.29	0	0	42	0	0	0	0	433	17.6	3.499	0.991	11747	5910	440	22	14	0	3.09	Working
17:21:41 17:28:32	0.29	1.87	87	2	0.02	15	0.08	0.08	439	17.6	3.522	0.992	12526	5844	447	22.9	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 18:12:26	0.29	0	0	2	0	1.8	0.02	0.02	437	17.6	3.511	0.974	3500	100	453	21.2	14	0	3.11	Working
18:12:25 18:20:38	5	5.68	359	2	1.83	1.9	29	213.2	442	17.6	3.522	0.992	13745	5603	447	21.7	516	1.73	3.11	Stop by oper

Table 3. The summary represents data and information regarding the operational stop issue during the X-ray examination at 12 kGy for Set 3 samples on August 2nd

Start/Stop	Energy	AV.Cur	P.Cur	Fr	Power	Speed	Ua	Ia	Tube1	Inj	Panovs	Vacum	Tnak	CurRef	Tube 2	Water temp	Rect	Rline V	Axia L	Stop reason
ConPoint13:21:19	4.6	0.06	64	2	0.3	0.3	24	131.2	419	17.6	3.511	0.991	9694	3610	428	21.7	556	1.57	3.12	Start Working
ConPoint13:33:38	4.97	8.34	389	42	41.4	0	27.2	213.7	435	17.6	3.522	0.871	13821	5701	440	21.2	513	1.57	3.11	Working
14:27:56 14:35:43	0.29	1.89	88	2	0.02	0	0.06	0.06	435	17.6	3.522	0.991	13872	5796	440	22.9	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint14:49:49	0.29	0	0	42	0	0	0	0	431	17.6	3.511	0.922	12100	5796	440	21	15	0	3.11	Working
15:02:15 15:07:42	0.29	1.88	88	2	0.02	0	0.06	0.06	435	17.6	3.511	0.922	12736	5821	440	23.4	16	0	3.11	Rect. OFF
ConPoint15:14:14	0.29	0	0	42	0	0	0	0	433	17.6	3.499	0.974	11972	5821	440	21	14	0	3.11	Working
15:14:14 16:06:06	5	8.33	389	2	1.98	0	27.3	213.7	435	17.6	3.522	1.914	13771	5862	440	22	507	1.65	3.11	Stop by oper
ConPoint16:12:53	0.29	0	0	42	0	0	0	0	431	17.6	3.522	0.939	12944	5862	440	21.7	14	0	3.11	Working
16:12:53 16:16:43	0.29	0	0	2	0	0	0.07	0.07	437	17.6	3.511	0.751	12443	5828	440	23.2	16	0	3.09	Rect. OFF
ConPoint 16:19:42	0.29	0	0	42	0	0	0	0	433	17.6	3.511	0.871	11697	5828	440	21	14	0	3.11	Working
16:26:42 16:43:37	0.29	1.88	88	2	0.02	0	0.06	0.06	435	17.6	3.511	0.837	12676	5881	440	21.2	16	0	3.08	Rect. OFF
ConPoint 16:49:45	0.29	0	0	42	0	0	0	0	431	17.6	3.499	0.786	11915	5881	440	21	15	0	3.09	Working
16:49:44 17:13:54	0.29	1.88	88	2	0.023	0	0.06	0.06	437	17.6	3.522	0.905	12691	5881	440	21.2	15	0	3.11	Rect. OFF
ConPoint 17:23:04	0.29	0	0	42	0	0	0	0	433	17.6	3.522	0.854	11929	5881	440	22.4	14	0	3.11	Working
19:42:56 20:07:01	5	8.37	390	2	1.99	0.3	27.1	27.09	435	17.6	3.522	0.854	13888	5896	440	21.2	512	1.65	3.09	Stop by oper

Table 4. The summary represents data and information regarding the operational stop issue during the X-ray examination at 12 kGy for Set 4 samples on August 3nd

Start/Stop	Energy	AV.Cur	P.Cur	Fr	Power	Speed	Ua	Ia	Tube1	Inj	Panovs	Vacum	Tnak	CurRef	Tube 2	Water temp	Rect	Rline V	Axia L	Stop reason
ConPoint 12:34:47	4.367	0	0	2	0	0	23.9	132.2	439	17.6	3.534	0.991	9470	3610	3610	447	21	1.41	3.11	Start Working
ConPoint 13:12:33	5	8.3	387	42	41.52	0.3	27.5	214.3	435	17.6	3.534	0.974	13968	5838	5838	440	27.5	1.57	3.211	Working
ConPoint 17:18:22	5	8.41	402	2	2.02	10	27.4	212.7	435	17.6	3.511	0.837	14041	14041	5923	440	21.7	1.65	3.12	Stop by oper

Table 5. Analysis results of randomly attached Alanine dosimeters on Sets 1 to 4 sample boxes

ID No.	Response ($1\ mg^{-1}$)	Proton (kGy)
230727_X-ray_12kGy_1-1	463.69469	9.91
230727_X-ray_12kGy_1-2	396.09920	8.38
230727_X-ray_12kGy_1-3	325.37929	6.81
230727_X-ray_12kGy_6-2	335.64443	7.03
230727_X-ray_12kGy_6-3	246.79563	5.09
230727_X-ray_12kGy_12-2	332.48126	6.96
230727_X-ray_12kGy_12-3	272.54683	5.65
230728_X-ray_12kGy_13-1	508.80098	10.95
230728_X-ray_12kGy_13-3	387.33711	8.18
230728_X-ray_12kGy_18-1	538.73543	11.65
230728_X-ray_12kGy_18-2	576.94397	12.55
230728_X-ray_12kGy_18-3	389.17983	8.22
230728_X-ray_12kGy_24-1	561.97434	12.20
230728_X-ray_12kGy_24-2	576.24180	12.54
230728_X-ray_12kGy_24-3	365.38242	7.69
230727_X-ray-12kGy_25-1	691.61898	15.33
230727_X-ray-12kGy_25-3	432.53996	9.20
230802_X-ray-12kGy_30-1	663.74316	14.64
230802_X-ray-12kGy_30-3	461.74541	9.87
230803_X-ray_12kGy_37-1	812.94929	18.39
230803_X-ray_12kGy_37-3	552.20035	11.97
230803_X-ray_12kGy_42-1	697.15856	15.46
230803_X-ray_12kGy_42-2	548.08292	11.87
230803_X-ray_12kGy_42-3	445.04195	9.48
230803_X-ray_12kGy_48-1	847.45766	19.29
230803_X-ray_12kGy_48-2	726.83805	16.20
230803_X-ray_12kGy_48-3	573.66392	12.47

재가동을 반복하였을 경우 위에서 기술하였던 시험균주의 회복활성 및 방사선 저항성에 따라 멸균이 진행되지 않음을 시사한다.

Set 4의 경우 stop issue가 일어나지 않고 정상적으로 9.29~19.33 kGy로 양면조사되었다(Tables 4 and 5). 1차 실험과 동일하게 dosemeters 위>아래>중간 위치에 따라 약 5~7 kGy 정도 흡수선량에 차이가 발생하였다(Table 5). 시험균주들의 경우 중간 선량에 고르게 맞는지를 확인하기 위해 선량계와 동일하게 중간 지점에 위치하였다. 대부분의 중간지점 선량이 9 kGy였으며, 마지막 48번 Set의 중간지점은 12.47 kGy로 목표했던 흡수선량에 도달한 것을 확인하였다. Set 4에서는 12.47 kGy로 균의 성장이 관찰되지 않았다(Fig. 5). *Epicoccum nigrum*의 경우 25~48 Box 까지 균의 성장을 관찰할 수 없었으며, 9.20~12.47 kGy에서 치사 임계선량인 것을 확인하였다. 따라서 엑스선 조사 시 치사 임계에 당도하기 목표선량을 13 kGy로 하여 조사하는 것이 적당하다고 판단된다.

4. 결 론

1 Set에서는 정지 3분 이내를 제외한 총 10회의 stop issue가 발생하였으며, 선량분석 결과 5.09~9.91 kGy로 10kGy가 넘지 않았다. 양면조사가 진행되지 못함에 따라 위쪽에 부착한 선량계의 흡수선량이 높은 경향을 보였다. 바닥에 부착한 선량계가 그 다음이며, 중간에 위치한 선량계가 흡수선량이 낮았다. 2 Set에서는 3분 이상의 stop issue가 13회 이상 발생하였으며, 양면조사는 끝까지 진행하였으나 5.65~15.66 kGy의 고르지 못한 흡수선량이 나타났다. 또한 2 Set에서 양면조사가 진행됨에 따라 위쪽과 바닥면에 부착한 선량계의 흡수선량이 거의 동일한 경향을 보였다. 3 Set의 경우 3분 이내를 제외한 총 6회의 stop issue가 발생하였으며, 선량분석 결과 9.87~15.33 kGy로 목표 흡수선량에 근접하게 조사되었다. 4 Set의 경우 stop issue가 일어나지 않고 정상적으로 양면조사가 완료되었으며, 선량분석 결과 9.29~19.33 kGy로 조사되었다. 결과적으로 선량계의 위치에 대한 차이는 위쪽>아래>중간 위치에 따라 5~7 kGy 사이의 흡수선량에 차이가 발생하는 것으로 나타났다. 또한 4가지 이상의 조건에서 4 Set의 경우만 완벽한 멸균이 이루어졌다. 따라서 진균 멸균을 위하여는 엑스선 조사의 연속성이 중요함을 시사하였다.

사 사

본 연구는 문화재청 및 국립문화재연구원의 2023년도 문화유산 스마트 보존·활용 기술 개발 사업 수행되었음(과제명: 동산문화재 재해·재난 대응 응급 보존처리를 위한 방사선 활용 훈증 대체기술 개발 - 1세부 재난대응 수침문화재 방사선이용 보존 처리 기술과 공정개발 및 실증연구, 과제번호; 2023A01D07-001, 기여율 80%). 또한 한국원자력연구원 연구운영비지원(R&D) (주요사업비) 첨단방사선연구기반 구축 사업 중 전자선실증연구시설 운영 과

제(과제고유번호: 1711174161, 기여율 20%)의 지원을 받아 수행되었습니다. 저자들은 선량측정을 도와주신 (재)한국방사선진흥협회 한기택 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Cemmi A, Di Sarcina I and D'Orsi B. 2023. Gamma radiation-induced effectson paper irradiated at absorbed doses common for cultural heritage preservation. *Radiat. Phys. Chem.* **202**:110452. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110452.
2. Lee H, Kim JS and Jung S. 2014. Flood risk analysis of cultural heritage sites: Changgyeong Palace, Korea. *Arab. J. Sci. Eng.* **39**:3617-3631. https://doi.org/10.1007/s13369-014-1009-7.
3. Koo W, Shin H and Baek M. 2018. An analysis on cultural heritage damages due to disasters in the past 30 years (1984-2013). *J. Korean Soc. Hazard Mitig.* **18**(4):73-78. https://doi.org/10.9798/kosham.2018.18.4.73.
4. Kim JS. 2023. A Study on the Impacts and Challenges of Climate Change and Conservation of Paper and Textile Heritage. *Journal of the Society of Cultural Heritage Disaster Prevention* **8**(2):113-126. https://www.earticle.net/Article/A434811.
5. Cortella L, Albino C, Tran QK and Froment K. 2020. 50 years of French experience in using gamma rays as a tool for cultural heritage remedial conservation. *Radiat. Phys. Chem.* **171**:108726. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2020.108726.
6. Park HJ and Oh J. 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**:110723. https://doi.org/10.2139/ssrn.4224113.
7. Mazur P. 1968. Survival of fungi after freezing and desiccation. *In*: The Fungal Population. pp. 325-394. Academic Press. https://doi.org/10.1016/b978-1-4832-2744-3.50020-1.
8. Argentine National Atomic Energy Commission: Past, Present, and Future del Carmen Calvo AM, Docters A, Miranda MV and Saparrat MCN. 2017. The Use of Gamma Radiation for the Treatment of Cultural Heritage in the Argentine National Atomic Energy Commission: Past, Present, and Future. *In*: Venturi M and D'Angelantonio M. (eds.), Applications of Radiation Chemistry in the Fields of Industry, Biotechnology and Environment. Topics in Current Chemistry Collections. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54145-7_8.
9. Moise IV, Ene M, Negut CD, Cutrubinis M and Manea MM. 2017. Radiation processing for cultural heritage preservation: Romanian experience. *Nukleonika* **62**(4):253-260. https://doi.org/10.1515/nuka-2017-0037.
10. Silindir M and Özer AY. 2009. Sterilization methods and the comparison of E-beam sterilization with gamma radiation sterilization. *J.FABAD* **34**(1):43. http://dergi.fabad.org.tr/pdf/volum34/issue1/43-53.pdf.
11. Chmielewski AG, Sadat T and Zimek Z. 2008. Electron accelerators for radiation sterilization. Trends in radiation sterilization of health care products. pp. 27-45. IAEA. http://www-pub.iaea.org.
12. Luo M, Bo P, Shao Y, Liu Z, Xu D and Ma L. 2023. Study on the Influence of Electron Beam Radiation Sterilization Method on Chinese Mural Pigment. *Processes* **11**(5):1403. https://doi.org/10.3390/pr11051403.
13. Yoon MC, Chung YJ, Kang DI, Kim IJ, Kim GH, Lee YJ, Lee J-W and Choi J-l. 2011. Study of Optimal Gamma Irradiation using Monte Carlo Simulations for the Control of Fungi on Wooden Cultural Property. *J. Conserv. Sci.* **27**(2):127-134. https://doi.org/10.1016/j.apradiso.2012.07.004.
14. Salama AM, Ali MI, El-Kirdassy ZHM and Ali TM. 1977. A Study on Fungal Radioresistance and Sensitivity. *Zentralbl. Bakteriol. Parasitenkd. Infektionskr. Hyg.* **132**(1):1-13. https://doi.org/10.1016/s0044-4057(77)80030-0.
15. Lee MY, Kim DW and Chung YJ. 2014. Conservation environmental assessment and microbial distribution of the Songsan-ri ancient tombs, Gongju, Korea. *J. Conserv. Sci.* **30**(2):169-179. https://doi.org/10.12654/jcs.2014.30.2.06.
16. Hong JY, Seo MS, Kim SJ, Kim YH, Jo CW and Lee JM. 2015. A survey for distribution of airborne microorganisms in storage of movable cultural properties. Korea. *J. Conserv. Sci.* **31**(1):64-73. https://doi.org/10.4489/KJM.20180016.
17. Sesana E, Gagnon AS, Ciantelli C, Cassar J and Hughes JJ. 2021. Climate change impacts on cultural heritage: A literature review. *Wiley Interdiscip. Rev. Clim. Change* **12**(4):e710. https://doi.org/10.1002/wcc.710.
18. Ezcurra P and Rivera-Collazo IC. 2018. An assessment of the impacts of climate change on Puerto Rico's Cultural Heritage with a case study on sea-level rise. *J. Cult. Herit.* **32**:198-209. https://doi.org/10.1016/j.culher.2018.01.016.
19. Linh NT. 2020. Application of gamma radiations and X-rays for disinfection of fungi in historical archives (Doctoral dissertation, Osaka Prefecture University). https://www.osakafu-u.ac.jp/omu-content/uploads/sites/1162/k2009.pdf.
20. Zhdanova NN, Tugay T, Dighton J, Zheltonozhsky V and Mcdermott P. 2004. Ionizing radiation attracts soil fungi. *Mycol. Res.* **108**(9):1089-1096. https://doi.org/10.1017/s0953756204000966.
21. Dighton J, Tugay T, Zhdanova N. 2008. Interactions of Fungi and Radionuclides in Soil. *In*: Dion P, Nautiyal CS (eds.), Microbiology of Extreme Soils. Soil Biology, vol 13. Springer, Berlin, Heidelberg. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74231-9_16.
22. Brown AJ, Budge S, Kaloriti D, Tillmann A, Jacobsen MD, Yin Z, Ene IV, Bohovych I, Sandai D, Kastora S, Potrykus J, Ballou ER, Childers DS, Shahana S and Leach MD. 2014. Stress adaptation in a pathogenic fungus. *J. Exp. Biol.* **217**(1):144-155. https://doi.org/10.1242/jeb.088930.
23. Chapelle E, Mendes R, Bakker PAH and Raaijmakers JM. 2016. Fungal invasion of the rhizosphere microbiome. *ISME j.*

10(1):265-268. https://doi.org/10.1038/ismej.2015.82.

24. Tkavc R, Matrosova VY, Grichenko OE, Gostinčar C, Volpe RP, Klimenkova P and Daly MJ. 2018. Prospects for fungal bioremediation of acidic radioactive waste sites: characterization and genome sequence of *Rhodotorula taiwanensis* MD1149. *Front Microbiol*. **8**:2528. https://doi.org/10.3389/fmicb.2017.02528.
25. Shuryak I, Tkavc R, Matrosova VY, Volpe RP, Grichenko O, Klimenkova P and Daly MJ. 2019. Chronic gamma radiation resistance in fungi correlates with resistance to chromium and elevated temperatures, but not with resistance to acute irradiation. *Sci rep*. **9**(1):11361. https://doi.org/10.1038/s41598-019-47007-9.