

목재 유물 돈계의 미생물 제어를 위한 몬테카를로 방법을 이용한 감마선 조사 연구

윤민철* | 정용재** | 강대일** | 김익주*** | 김광훈**** | 이윤종* | 이주운* | 최종일*¹
*한국원자력연구원, **한국전통문화대학교 보존과학과, ***경남연구소, ****공주대학교 생물학과

Study of Optimal Gamma Irradiation using Monte Carlo Simulations for the Control of Fungi on Wooden Cultural Property

Minchul Yoon* | Yong Jae Chung** | Dai Ill Kang** | Ik-Joo Kim*** |
Gwang Hoon Kim**** | Yun Jong Lee* | Ju-Woon Lee* | Jong-il Choi*¹

*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongup, 580-185, Korea
**Department of Conservation Science, Korean National University of Cultural Heritage, Buyeo, 323-812, Korea
***Gyeong-Dam Conservation Laboratory, Gwangju, 503-839, Korea
****Department of Biology, Kongju National University, Gongju, 314-701, Korea

¹Corresponding Author: choiji@kaeri.re.kr, +82-63-570-3204

초 록 본 논문은 목조문화재의 생물학적 제어를 위하여 몬테카를로(Monte Carlo) 방법을 이용한 감마선 조사선량의 예측과 실증에 관한 연구이다. 박물관 수장고에 보관되어 있는 목재 유물 돈계의 미생물 오염을 조사한 결과 채집된 곰팡이들은 대부분 *Aureobasidium pullulans*로 동정되었으며 돈계를 20 kGy의 감마선 조사한 결과 모두 불활성화 되었다. 몬테카를로 방법을 이용하여 돈계의 방사선 조사선량 분포를 예측하였으며, alanin dosimeter를 이용하여 돈계의 앞, 뒷면에 각각 7 지점에 대한 방사선 조사선량 분포를 실측하였다. 그 결과 몬테카를로 모사값과 실험값을 비교해 보았을 때 좋은 일치도를 보였다. 이러한 결과는 감마선의 높은 투과력과 모사 예측을 통하여 최적 방사선 조사선량으로 목조 유물의 미생물학적 제어를 제공할 수 있다는 사실을 보여준다.

중심어: 감마선, 돈계, 생물학적 제어, 몬테카를로 방법

ABSTRACT In this study, there has been investigated the simulation of irradiation dose using Monte Carlo methodology and experimental substantiation for the biological control of wooden cultural property. In the evaluation of fungal contamination on wooden cultural property, Donggyae, from exhibition storage, *Aureobasidium pullulans* was mainly identified. But these microorganisms were completely inactivated by 20 kGy gamma irradiation. For dosimetry simulation of Donggyae, Monte Carlo methodology with MCNP was used. The real dosimetry was measured using alanin dosimeters (at 7 different points on the front plan and 7 points on the back plan). Simulated and experimental results are compared and good agreement is observed. These result shows that irradiation can offer biologic control of wooden cultural property by optimal irradiation dose through high penetration power and Monte Carlo simulation.

Key Words: Gamma radiation, Wooden cultural property, Biological control, Monte Carlo simulation

1. 서 론

문화재의 성분은 주로 목재, 섬유, 종이, 석재, 금속 등의 다양한 재료로 구성되어 있다. 이들은 자연 환경에서 태양 광선, 우·풍, 오염물질, 온도, pH 등의 물리·화학적 영향에 의한 손상과 미생물 등에 의한 생물학적 손상을 받고 있으며 특히 유기질 문화재의 경우 생물학적 손상이 심각한 상태이다. 따라서 문화재의 적합한 보존을 위해서는 생물학적 손상에 의한 문화재의 피해조사와 생물학적 피해 제어 기술의 개발 등이 매우 중요하다.¹

문화재의 보존·복원 분석 기술 개발 시, 문화재가 지닌 가치와 희소성 때문에 비파괴적 기술 적용이 필수적이다. 유기 문화재의 생물학적 제어를 위하여 현재까지 메틸 브로마이드(Methyl Bromide)를 이용한 훈증제가 사용되었지만 1992년 몬트리올 의정서 체결에 따라 사용이 금지되어 메틸 브로마이드를 대체할 친환경적인 방제기술 연구가 필요하다. 새로운 훈증제의 개발과 함께 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 기술이 방사선 기술이다.

방사선의 주요 특성이 비파괴적이고 정성적이며 정량적이고 고감도의 검출효율을 나타내므로 시료채취가 어려운 문화재의 재질상태, 제작기술의 추정, 화학성분의 분석평가, 연대 측정 등에 있어서 많은 활용이 이루어져 왔다.² 우리나라의 경우, 이 등(2000)에 의한 목조문화재의 생물피해에 따른 손상 연구³ 이후 최근 김(2009)등에 의해 목조문화재의 생물학적 손상 평가 및 방사선을 이용한 살충·살균 효과에 대해 보고하였으며 방사선 조사에 의한 해충 및 미생물의 살균 영향 평가가 수행되었다.⁴ 하지만 실제 목조문화재의 생물학적 손상 제어를 위한 방사선 조사 기술 적용사례는 수행된 바 없다.

방사선 조사 기술은 방사선 동위원소에서 발생하는 방사선의 높은 투과력과⁵ 살균력을 이용하여 문화재의 생물학적 손상을 야기하는 충류와 곰팡이들을 제어하는 기술이다. 방사선 조사 기술을 이용한 문화재 보존연구는 이미 외국에서는 활용되고 있으며, 프랑스 ARC-Nucleart에서는 1977년 이집트 람세스 2세 미라 보존을 위해 생물학적 손상 제어 기술로 방사선을 사용하였다.⁶ 또한 방사선 조사를 통한 유기질의 기계·물리학적 손상 평가와 유기질로부터 유래한 곰팡이들에 대한 살균력 평가 연구가 수행된 바 있다.^{7,8,9,10} 이와 같이 방사선은 높은 투과력으로 내부에 있는 미생물이나 해충의 제어에 사용될 수 있지만, 효과적인 활용을 위해서는 조사 대상의 기하학적인 형태 및 투과 깊이에 따른 선량 예측이 필요하다. 너무 낮은 선량은 생물학적

제어를 이룰 수 없고, 너무 높은 선량은 재질에 영향을 줄 수 있다. 다양한 유기재질인 종이, 나무 그리고 흙으로부터 유래한 곰팡이들은 6-15 kGy의 방사선 조사에 의해 효과적으로 제어가 가능하지만 일부 연구에서 책으로부터 분리한 곰팡이의 경우 20 kGy의 선량에서 완벽하게 사멸되지 않는 것으로 보고하였다.^{11,12,13} 또한 나무에 대한 방사선의 기계·물리학적 손상평가에서 100 kGy 이상의 방사선 조사에 의해 유의한 영향을 받는 것으로 보고되었다.¹⁴ 방사선의 투과력과 분포 예측은 여러 종류의 몬테카를로 모사코드들이 사용된다. 몬테카를로 방법은 통계적 문제를 난수(random number)를 사용한 무작위적인 표본 추출을 이용하여 해결하는 방법으로 실험적 측정이 불가능한 복잡한 문제에 대하여 확률적 접근에 의한 해석에 유용하다.^{15,16} 몬테카를로 방법을 이용하여 방사선원으로 부터 방출 및 수송되는 방사선의 분포를 예측하여 방사선 차폐물질을 선택하며 방사선 조사 시설의 구조를 결정할 수 있으며 특정 인체 조직의 형태에 따른 방사선 흡수선량과 주변 조직의 영향을 예측하여 방사선 치료 시 조사되는 방사선의 선량을 결정할 수 있다.^{17,18,19}

따라서 본 연구에서는 수장고 내에 보관되어 있던 소형 목조문화재인 돈궤를 이용해 방사선 조사 기술을 현장 적용하였다. 목조문화재 부후균 동정을 위해 돈궤 내 미생물을 18s rRNA 유전자 서열 분석을 수행하였고 방사선 조사를 통해 미생물의 불활성도를 측정하였다. 생물학적 손상 제어를 위한 최적 조사선량 평가를 위해 몬테카를로 방법을 이용해 방사선 흡수선량 분포를 예측하고 실측값과 비교하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험 재료

2.1.1. 목조문화재

목조문화재는 완도 수목원에 위치한 산림박물관 내의 수장고에 보관되어 있던 돈궤를 대여 받아 실험에 사용되었다. 대여 받은 돈궤는 육안 관찰을 통해 오염상태와 손상 상태를 확인 하였고 길이(90cm), 폭(40cm), 높이(40cm), 두께(2cm)를 측정하였다(Figure 1).

2.2. 실험 방법

2.2.1. 돈궤 내 곰팡이 동정

돈궤로부터 채집된 균주의 동정을 위해 PDA(Potato

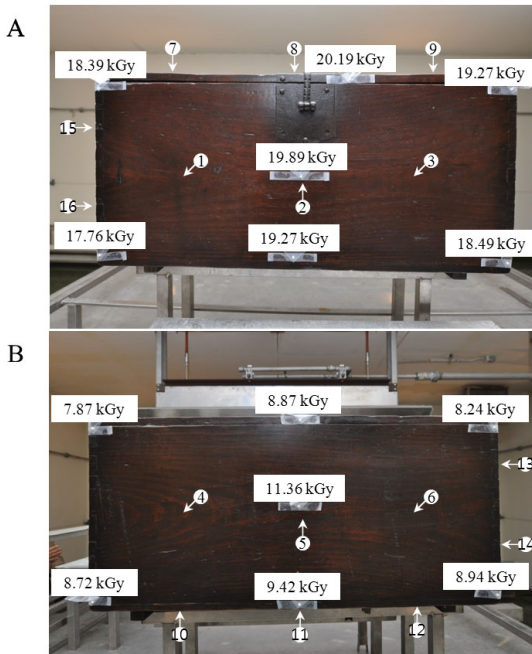


Figure 1. The shape of irradiated object and experimental absorption dose on wooden cultural property. Alanin dosimeter was used to measure the absorption dose. (A) Front of wooden cultural property. (B) Back of wooden cultural property. Collection points of fungus are shown.

dextrose agar)배지에 28℃로 배양한 후 genomic DNA를 분리(MP Biomedicals LLC, Irvine, CA, USA)하여 18s rRNA primer(ITS1; TCC GTA GGT GAA CCT GCG G, ITS4; TCC TCC GCT TAT TGA TAT GC)로 PCR을 수행 하였다. PCR 산물은 서열분석을 통해 18s rRNA 유전자 서열을 얻어 미국생물정보센터(NCBI) blat search (<http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi>)를 통해 동정하였다.

2.2.2. 감마선 조사 후 돈궤 내 곰팡이 활성도 측정

감마선을 이용한 살균처리의 효과를 측정하기 하기 위해 곰팡이의 활성도를 감마선 조사 전과 조사 후로 측정하였다. 곰팡이는 멸균된 증류수와 면봉을 사용하여 채집한 후 PDA배지에 28℃로 배양하면서 활성도를 측정하였다.

2.2.3. 몬테카를로 방법을 이용한 흡수선량 계산

몬테카를로 방법은 방사선원의 종류, 선원과의 거리, 방사선 조사 대상의 밀도, 형태 그리고 화학적 조성에 따른 방사선의 수송 및 흡수를 컴퓨터를 이용하여 확률적으로

계산하는 방법으로 그 결과를 확률적 모형으로 제공하는 통계적 분석기법이다. 본 연구에서 목조문화재 돈궤의 감마선 흡수선량 분포를 모사를 위해 MCNP 코드를 이용하였다. MCNP는 몬테카를로 모사 코드의 하나이며 Los Alamos National Laboratory의 Monte Carlo group에서 개발되었으며 핵의학, 방사선 치료, 진단엑스선, 방사선 방호 등에 널리 사용되고 있는 파워풀한 코드이다. 본 실험에서 MCNPx 2.5.0을 사용하였으며 MCNP 입력 구문은 Ultra-edit professional text/HEX editor(version 14. 20. 0. 10. 35)로 작성하였다. 돈궤의 주요 재질인 목재의 밀도는 평균 0.5 g/cm³이며 구성 원소는 수소(6%), 탄소(55%), 산소(44%)로 계산하였다. 목조문화재의 구성도는 Figure 3에 나타냈으며 MCNP visual editor(version 8E; vised22)통해 지오메트리(geometry)를 확인하였다. 방사선 선원은 Co-60, 230,000Ci, 100×100cm, 평판으로 계산하였으며 감마선은 x축에 평행하게 진행하며 감마선 선원으로부터 돈궤까지의 거리는 125cm로 계산하였다. Tally는 mesh tally(1mm×1mm×1mm)를 적용했으며 kGy로 환산하여 나타냈다. 분석은 5×10⁷번 실행하였다.

2.2.4. 돈궤에 대한 감마선 흡수선량 실측

몬테카를로 방법을 통한 돈궤 내부의 감마선 흡수선량 분포 예측의 안정성을 확인하기 위해 돈궤에 대한 감마선 흡수선량의 실측이 필요하다. 이 실측된 값과 코드 분석 값의 비교를 통해 실제적용 여부를 판단하게 된다. 감마선 흡수선량은 alanine dosimeter(5mm, Bruker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 이용하여 돈궤의 앞면에 7개, 뒷면에 평행한 위치에 7개를 이용하여 측정하였다. 돈궤의 감마선 조사는 한국원자력연구원 방사선과학연구소(Jeongup, ARTI, KAERI, KOREA) 내 선원 11.1 PBq, Co-60 감마선 조사시설(AECL, IR-79, Nordion, Canada)에서 수행되었다.

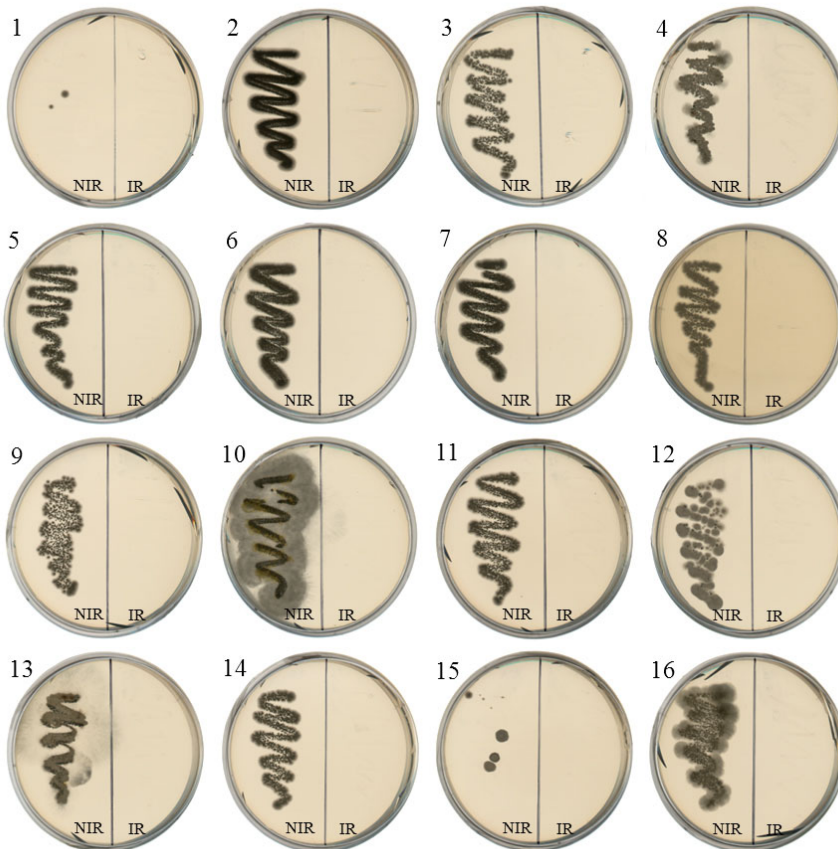
3. 결과 및 고찰

3.1. 돈궤 내 곰팡이 동정

돈궤에 오염된 미생물의 동정을 위하여 Figure 1과 같이 돈궤 16개 위치에서 균을 채집하였으며, 채집된 곰팡이를 18s rRNA 유전자 서열 분석을 통해 동정하였다. 그 결과 *Aureobasidium pullulans*가 우점하는 것으로 나타났다(Table 1). *A. pullulans*는 습기가 가득 찬 창문 등에서 쉽게 찾아볼 수 있는 균이다. 이 균류는 30℃에 최적 성장을 보이며, 10

Table 1. Identification of fungus collected from wooden cultural property using 18s rRNA gene sequencing analysis.

Collection Point		Closest Blast match	Sequence identity (%)
Front	1	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
	2	<i>Aureobasidium pullulans</i>	87
	3	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
Back	4	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
	5	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
	6	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
Top	7	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
	8	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
	9	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
Bottom	10	<i>Trichoderma longibrachiatum</i> C294	96
	11	<i>Chaetomium</i> sp.	98
	12	<i>Phialophora</i> sp.	95
Left	13	<i>Pestalotiopsis sydowiana</i>	93
	14	<i>Aureobasidium pullulans</i>	99
Right	15	ND*	-
	16	Uncultured ascomycete clone	99

**Figure 2.** Inactivation of fungus collected from wooden cultural property after gamma irradiation. Numbers mean collection point. NIR is non-irradiated. IR is irradiated.

-35°C에도 성장하며 가습기, 에어컨 등을 통해 만성노출을 통해 과민증, 과민성 폐렴 등 폐쪽에 침투하여 병을 발생시킬 수 있다. 이 균류는 유기물에 대하여 셀룰로스 분해 활성이 없는 것으로 알려져 왔으나 목조물에 성장함으로써 도로를 훼손시키고²⁰ 최근에는 나뭇잎, 나무, 곡식들을 분해시키는 것으로 알려졌다.²¹ 돈궤의 바닥 판에서는 *Trichoderma longibrachiatum*, *Chaetomium* sp., *Phialophora* sp.이 동정되었다. 특히 *T. longibrachiatum*는 자일라나제(xylanase), 셀룰라제(cellulase)를 생산하는 종으로²² 목조문화재뿐만 아니라 다른 유기질 문화재에 큰 해를 입히는 종이다. 또한 *Chaetomium* sp. *Phialophora* sp. 역시 셀룰라제를 생산하는 것으로 알려졌으며²³ 주요 성분이 셀룰로스인 목재나 한지 등과 같은 유기질 문화재의 경우 이들 균류가 심각한 피해를 입힐 것이다.

3.2. 감마선 조사 후 돈궤 내 곰팡이 활성도 측정

실제 목조문화재에 대한 감마선 살균 효과를 알아보기 위하여 감마선 조사 전과 20 kGy 선량으로 조사 후로 나누어 Figure 1과 같은 위치에서 곰팡이를 채집하여 그들의 활성도를 측정해 보았다(Figure 2). 감마선 조사 전 돈궤로부터 채집된 곰팡이는 배양 2일 후 급격하게 성장하는 것을 알 수 있었으며 감마선 조사 후 같은 위치에서 채집한 곰팡이는 모두 사멸하는 것을 확인 할 수 있었다.

감마선은 선원으로부터 나오는 전자기 복사의 강력한 형태로, 높은 에너지를 가지며 조사체에 대하여 어떠한 형태로든 독성물질을 잔류시키지 않는다. 따라서 감마선 조사는 목조문화재를 훼손시키는 균류를 효과적으로 사멸시키며 문화재에는 어떠한 독성물질도 잔류시키지 않는 친환경

경적이며 비파괴적인 방제기술로 그 활용 가치가 높다.

3.3. 몬테카를로 방법을 통한 흡수선량 분포 예측

감마선의 흡수선량은 선원으로부터의 거리와 투과력에 따라 변하게 된다. 따라서 조사된 돈궤의 각 위치에 따른 조사선량을 예측하기 위하여 몬테카를로 방법을 이용한 흡수선량 분포를 예측하였다.

돈궤에 대한 감마선 조사에 따른 선량예측을 위한 모식도는 Figure 3과 같으며 x축은 돈궤의 폭(40cm), y축은 길이(90cm), z축은 높이(40cm) 방향으로 나타냈다. 감마선의 진행 방향은 x축에 평행하며 흡수선량 분포의 예측 위치를 나타냈다(Figure 3A, B, C). 돈궤의 몬테카를로 모사 코드를 적용하여 돈궤의 위(A), 중간(B), 바닥면(C)에 대한 흡수선량 분포를 예측 한 결과, 최초로 감마선이 흡수되는 위치(선원에서 125cm 거리)의 선량 분포는 17.6-23.7 kGy로 예측되었으며 돈궤의 윗판과 바닥판의 선량은 방사형으로 유사하게 분포하는 것으로 알 수 있었다 (Figure 4A, C). 돈궤 뒷면의 흡수선량 분포는 5.0-11.8 kGy로 예측되었으며 돈궤 뒷면의 중간은 윗판과 바닥판에 비해 더 높은 흡수선량 분포를 나타냈다(Figure 4B). 이것은 돈궤의 중앙이 공기로 채워져 있어 윗판과 바닥판에 비해 흡수선량 감쇄율이 낮은 것으로 생각된다.

3.4. 감마선 흡수선량의 예측 값과 실측값의 비교

소형 목조문화재인 돈궤를 이용하여 감마선의 흡수선량을 alanine dosimeter로 실측(Experimental) 하였으며(Figure 1) 그 결과를 몬테카를로 방법을 통해 계산(Calculated)된 흡수선량과 비교하였다. 돈궤 앞면의 실측된 감마선 흡수선량 분포는 윗판 18.5 ± 0.8 kGy, 중간 19.9 kGy, 바닥판 19.6 ± 0.5 kGy로 나타났으며(Figure 1A), 40 cm 두께의 돈궤를 통과하면서 흡수선량 분포는 윗판 8.3 ± 0.5 kGy, 중간 11.36 kGy, 바닥판 9.02 ± 0.35 kGy로 감쇄하였다(Figure 1B). 마찬가지로 몬테카를로 방법을 통해 계산된 흡수선량 분포는 윗판은 19.62 ± 1.2 kGy에서 7.7 ± 0.9 , 중간은 20.32 ± 1.37 kGy에서 10.61 ± 0.9 kGy, 바닥판은 19.51 ± 1.27 kGy에서 8.8 ± 0.9 kGy로 감쇄하는 것으로 나타났다(Figure 5). 이상의 결과를 비교해 보았을 때, 실측된 값과 계산된 값이 오차범위 이내에 분포하는 것으로 보아 유사한 값을 나타내는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 본 연구에서 수행된 돈궤에 대한 흡수선량 분포 예측은 매우 신뢰

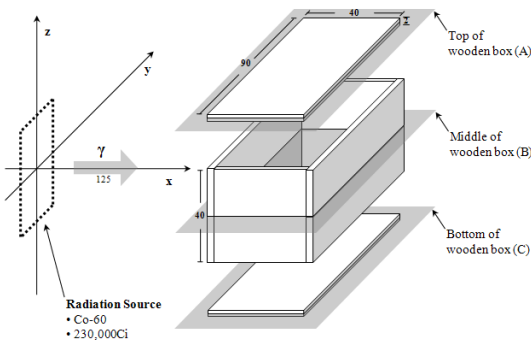


Figure 3. Schematic view of the wooden cultural property's geometry and methodology considered. Gamma ray direction and simulated positions are shown.

할 수 있으며 돈궤 이외의 목조문화재에 적용 가능 할 것으로 사료된다.

이와 같은 결과는 문화재의 다양한 형태, 재질이 흡수선량 분포에 매우 중요함을 제시하는 것이다. 따라서 앞으로 문화재의 다양하고 복잡한 형태에 대한 흡수선량 분포 예측이 수행되어야 할 것이며 문화재의 다양한 재질과 장식재의 재질에 따른 흡수선량 예측 역시 수행되어야 할 것이다.

4. 결론

방사선은 특성상 투과력이 매우 높으며 직진운동을 하기 때문에 살아있는 세포의 DNA에 직·간접적으로 피해를 주며 이로 인해 세포는 사멸하게 된다. 본 연구 결과 방사선에 조사된 돈궤의 곰팡이들이 모두 사멸(Figure 2)하는 것으로 보아 위의 사실을 입증하였으며 목조문화재의 현장

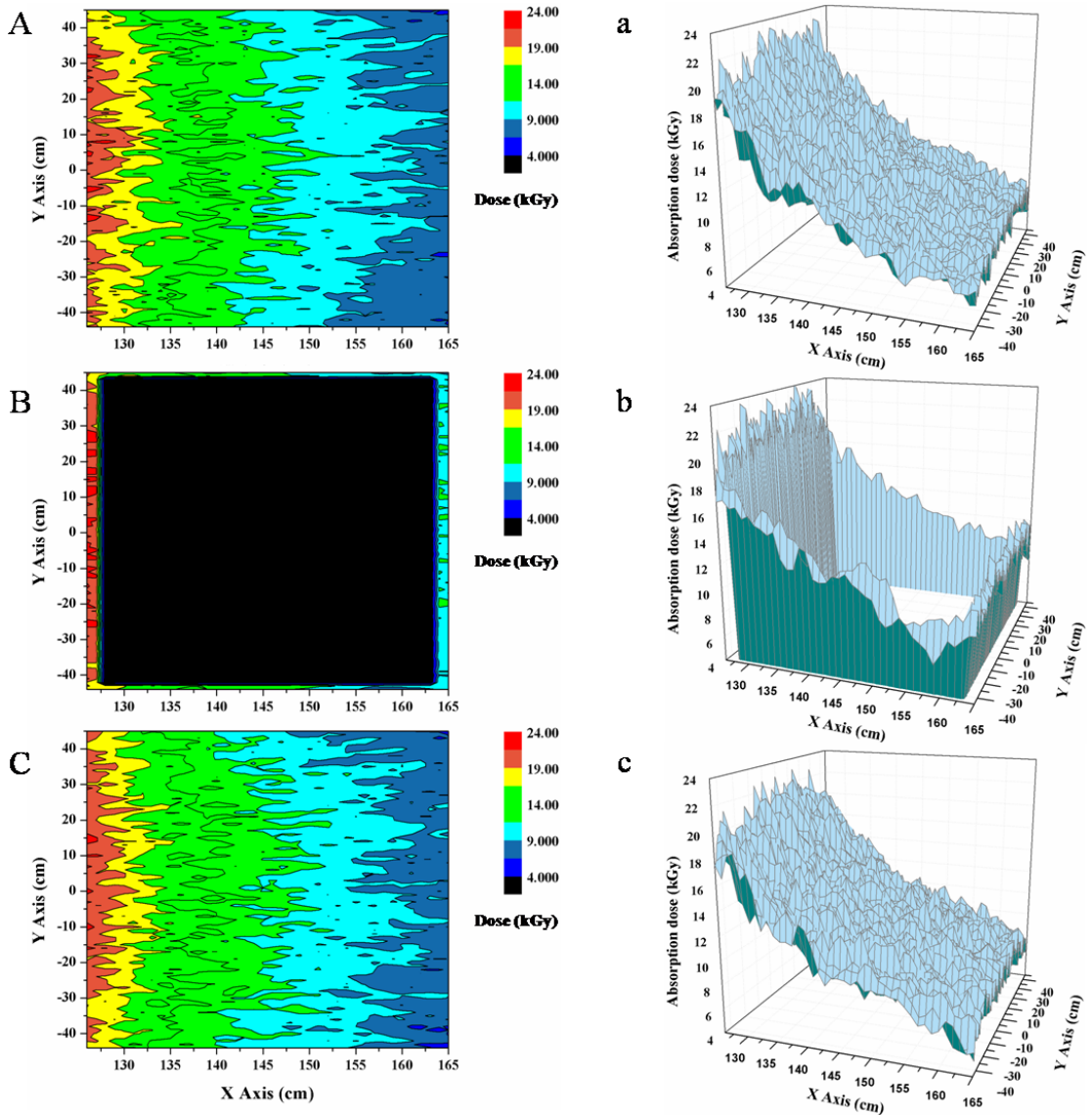


Figure 4. Absorption dose distribution on wooden cultural property. (A-C) Simulated absorption dose distribution with MCNPx. (a-c) Simulated absorption dose rate with MCNPx. (A, a) Top of wooden box. (B, b) Middle of wooden box. (C, c) Bottom of wooden box.

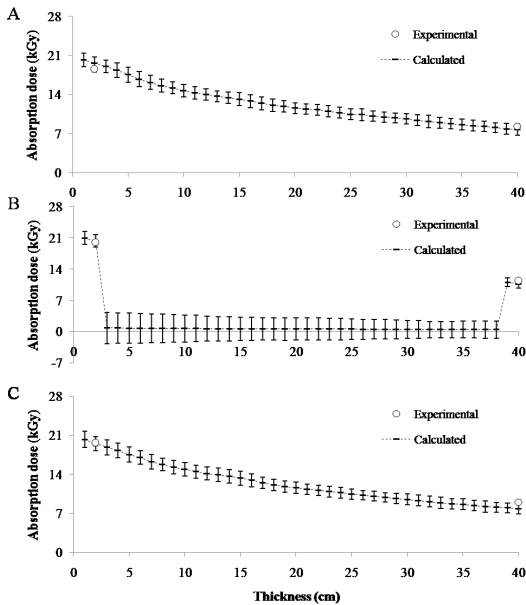


Figure 5. Comparisons of experimental and calculated absorption dose of gamma rays on wooden cultural property. (A) Top of wooden box. (B) Middle of wooden box. (C) Bottom of wooden box.

적용이 가능함을 시사한다.

방사선의 투과력은 매질의 밀도, 형태, 구성 성분에 따라 큰 차이가 나타나는데 이는 중성자들이 무작위로 충돌하며 분열하기 때문이다. 또한 문화재를 구성하는 구성 성분은 매우 다양하며 이에 따른 재질의 밀도 차이가 나타난다. 목조문화재의 경우 주요 구성 원소가 수소, 탄소, 산소이기 때문에 문화재에 대한 방사선 조사 기술 적용을 위해 방사선 투과력과 분포의 예측이 매우 중요하다.

방사선의 투과력과 분포를 예측하기 위해서는 MCNP코드를 이용하며 MCNP코드는 물질들의 다양한 3차원 구조에서의 중성자, 광자, 전자의 거동을 모사한다. 광자에 대해서는 비 간섭상 산란과 간섭성 산란, 광전효과, 소멸 방사선, 제동 방사선, 전자쌍 생성, 양전자 소멸 등의 모사가 가능하다. MCNP 코드가 다양하게 응용될 수 있는 이유는 많은 일반 선원, 임계 선원, 면 선원, 기하학적 구조와 출력 텔리(tally)의 플로터, 다양한 분산감소 기법, 다양한 단면적 계수 데이터를 포함하기 때문이다.²⁴

몬테카를로 방법의 가치는 예측된 데이터가 실측값과 얼마나 높은 일치도를 보이느냐에 의존한다. 본 연구 결과에서 예측된 방사선 선량분포와 실측값에 비교에서 높은 일치도를 보였다. 따라서 돈궤에 대하여 MCNP 코드를 이

용한 방사선 흡수선량 분포예측은 매우 신뢰할 수 있으며 다른 목조문화재에 대한 적용이 가능함을 시사한다.

본 연구를 통해 목조 유물 돈궤에 대한 방사선 조사 기술을 현장 적용하여 생물학적 손상에 대한 제어가 가능함을 시사했으며 몬테카를로 방법을 통해 흡수선량 분포 예측을 통한 방사선 최적 조사선량 선정이 가능하게 되었다. 따라서 본 연구 결과를 통해 더 다양한 목조문화재에 대한 현장 적용이 가능하며 더 나아가 더 다양한 재질을 문화재에 대한 현장 적용을 위한 지침을 제공할 것이다. 앞으로 유물에 대한 방사선 조사의 실용화를 위해 유물의 표준화가 필요하며 이를 위해 목재의 수종, 함수율, 유물의 크기, 두께 등과 적정선량의 상관관계를 만들어야 할 것이며 방사선 조사의 지속효과에 대한 연구가 수행되어야 할 것이다.

사 사

본 연구는 국립문화재연구소 2010년도 동산문화재복원 기술개발 연구 R&D 「친환경성 유기질 문화재 생물방제 처리기술 개발」 사업의 일환으로 수행되었으며, 본 연구를 도와주신 한국전통문화학교 보존과학과, 공주대학교 생물학과 그리고 경담연구소에 감사드립니다.

참고문헌

1. 민경희, "미생물이 문화재에 미치는 영향". *문화재보존 과학연구교재*, p349-262, (1993).
2. 강동태, "문화재의 방사선 적용(파괴실험)". *보존과학 연구*, (1983).
3. 이규식, 정소영, 정용재, "목조문화재의 원형보존을 위한 층해 방제방안". *보존과학연구*, (2000).
4. 김광훈, "목조문화재의 생물피해 방제기술 개발". *국립 문화재연구소 용역연구사업 연구결과 보고서*, (2009).
5. Postma, H., Blaauw, M., Bode, P., Mutti, P., Corvi, F., Siegler, P., "Neutron-resonance capture analysis of materials". *J. Radioanal. Nucl. Chem.*, p115-120, (2001).
6. 자크 뒤션, "Arc-nucleart연구소의 보존, 복원, 멸균작업". *한국문화재보존과학회*, (2002).
7. Adamo, M., Brizzi, M., Magaudo, G., Martinelli, G., Plossi-Zappala, M., Rocchetti, F., Savagnone, F., "Gamma radiation treatment of paper in different environmental conditions". *Restaurator*, **22**, p107-131, (2001).

8. Gonzalez, M.E., Calvo, A.M., Kairiyama, E., "Gamma radiation for preservation of biologically damaged paper". *Radiation Physics and Chemistry*, **63**, p263- 265, (2002).
 9. McNamara, N.P., Black, H.I.J., Beresford, N.A., Parekh, N.R., "Effects of acute gamma irradiation on chemical, physical and biological properties of soils". *Applied Soil Ecology*, **24**, p117-132, (2003).
 10. Adamo, M., Giovannotti, M., Magaudda, G., Plossi-Zappala, M., Rocchetti, F., Rossi, G., "Effect of gamma rays on pure cellulose paper as a model for the study of a treatment of biological recovery of biodeteriorated books". *Restaurator*, **19**, p41-59, (1998).
 11. Rocchetti, F., Adamo, M., Magaudda, G., "Fastness of printing inks subjected to gamma-ray irradiation and accelerated ageing". *Restaurator*, **23**, p15-26, (2002).
 12. Hanus, J., "Gamma radiation for use in archives and libraries". *Abbey Newsletter.*, **9**, p34-36, (1985).
 13. Tomazello, M.G.C., Wiendl, F.M., "The applicability of gamma radiation to the control of fungi in naturally contaminated paper". *Restaurator*, **16**, p83-99, (1995).
 14. Pointing, S.B., Jones, E.B.G., Jones, A.M., "Decay prevention in water logged archaeological wood using gamma irradiation". *International Biodeterioration & Biodegradation*, **42**, p17-24, (1998).
 15. 정용현, 백철하, 이승재, "핵의학 영상연구를 위한 몬테칼로 모사코드". *Nucl. Med. Mol. Imaging.*, (2008).
 16. McCracken, D.D., "The Monte Carlo method". *Sci. Am.*, p90-96, (1955).
 17. Raeside, D.E., "Monte Carlo principles and applications". *Phys. Med. Biol.*, p181-97, (1976).
 18. Andreo, P., "Monte Carlo techniques in medical radiation physics". *Phys. Med. Biol.*, p861-920, (1991).
 19. Turner, J.E., Wright, H.A., Hamm, R.N., "A Monte Carlo primer for health physicists". *Health. Phys.*, p717-33, (1985).
 20. Horvath, R.S., Brent, M. M., Cropper, D. G., "Paint deterioration as a result of the growth of *Aureobasidium pullulan* on wood". *Appl. Environ. Microbiol.*, **32**, p505-507, (1976).
 21. Pouliot, J.M. et al. "Adhesion of *Aureobasidium pullulans* is controlled by uronic acid based polymers and pullulan". *Biomacromolecules*, **6**, p1122-1131, (2005).
 22. Royer, J.C., Nakas J.P., "Interrelationship of xylanase induction and cellulase induction of *Trichoderma longibrachiatum*". *Appl. Environ. Microbiol.*, **56**, p2535-2539, (1990).
 23. Kappor, N. et al., "Production of cellulase enzyme by *Chaetomium* sp. using wheat straw in solidstate fermentation". *Res. J. Microbiol.*, **5**, p1199-1206, (2010).
 24. Briesmeister, J.F., "MCNP-A general Monte Carlo code for neutron and photon transport", Version 3A, *Los Alamos National Laboratory*, LA-12625-M, (1997).
-