Journal of Radiation Industry 6 (1) : 95~100 (2012)

목재 유물 김젖개의 몬테카를로 방법을 이용한 감마선 조사

윤민철 · 최종일* · 이윤종 · 임길성 · 이주운

한국원자력연구원

Optimal Gamma Irradiation Using Monte Carlo Simulations on Wooden Cultural Properties, *Gimjeotgae*

Minchul Yoon, Jong-il Choi*, Yun Jong Lee, Kil-Sung Lim and Ju-Woon Lee

Korea Atomic Energy Research Institute, Korea

Abstract - In this study, there has been investigated the simulation of irradiation dose using Monte Carlo methodology for the biological control of wooden cultural property. In the evaluation of fungal contamination on wooden cultural properties, *Cladosporium tenuissimum, Aspergillus versicolor, Penicillium* sp. were mainly identified from the *Gimjeotgae*. But these microorganisms were completely inactivated by 20 kGy gamma-rays. For dosimetry simulation of wooden cultural properties, Monte Carlo methodology with MCNP was used. The radiation absorbed dose distribution was predicted at 8.2～18.9 kGy. These results show that irradiation is effective for biologic control of wooden cultural properties and Monte Carlo methodology is useful for non-destructive conservation and preservation of wooden cultural properties.

Key words : Gamma radiation, *Gimjeotgae*, Wooden cultural properties, Biological control, Monte Carlo simulation

서 론

문화재의 성분은 주로 목재, 섬유, 종이, 석재, 금속 등의 다양한 재료로 구성되어 있다. 이들은 자연 환경에서 태양광선, 우 · 풍, 오염물질, 온도, pH 등의 물리 · 화학적인 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.

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 어

* Corresponding author: Jong-il Choi, Tel. +82-63-570-3210, Fax. +82-63-570-3207, E-mail. choiji@kaeri.re.kr

려운 문화재의 재질상태, 제작기술의 추정, 화학성분의 분석평가, 연대측정 등에 있어서 많은 활용이 이루어져 왔다. 우리나라의 경우, 목조문화재의 생물피해에 따른 손상 연구 이후 목조문화재의 생물학적 손상 평가 및 방사선을 이용한 살충·살균 효과에 대해 보고하였으며, 방사선 조사에 의한 해충 및 미생물의 살균 영향 평가가 수행되었다. 하지만 실제 목조문화재의 생물학적 손상 제어를 위한 방사선 조사 기술 적용사례는 수행된 바 없다.

방사선 조사 기술은 방사선 동위원소에서 발생하는 방사선의 높은 투과력과 살균력을 이용하여 문화재의 생물학적 손상을 야기하는 충류와 곰팡이들을 제어하는 기술이다 (Postma *et al.* 2001). 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. 또한 방사선 조사를 통한 유기질의 기계·물리학적 손상 평가와 유기질로부터 유래한 곰팡이들에 대한 살균력 평가 연구가 수행된 바 있다 (Adamo *et al*. 1998; Adamo *et al*. 2001; Gonzalez *et al*. 2002; McNamara *et al.* 2003). 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 (Hanus 1985; Rocchetti *et al.* 2002). 또한 나무에 대한 방사선의 기계·물리학적 손상평가에서 100 kGy 이상의 방사선 조사에 의해 유의한 영향을 받는 것으로 보고되었다 (Pointing *et al.* 1998). 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 불가한 복잡한 문제에 대하여 확률적 접근에 의한 해석에 유용하다 (McCracken 1995). 몬테카를로 방법을 이용하여 방사선원으로부터 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 (Raeside 1976; Turner *et al.* 1985).

따라서 본 연구에서는 수장고 내에 보관되어 있던 목조문화재를 이용해 방사선 조사 기술을 현장 적용하였다. 목조문화재 부후균 동정을 위해 김젖개 내 미생물을 18s rRNA 유전자 서열 분석을 수행하였고, 감마선 조사에 의한 미생물의 오염도를 측정하였다. 생물학적 손상 제어를 위한 최적 조사선량 평가를 위해 몬테카를로 방법을 이용해 방사선 흡수선량 분포를 예측하고 토의하였다.

재료 및 방법

1. 실험 재료

1) 목조문화재

본 연구의 목조문화재는 완도 수목원에 위치한 산림박물관 내의 수장고에 보관되어 있던 김젖개를 사용하였다 (Fig. 1). 목조문화재는 육안 관찰을 통해 오염상태와 손상상태를 확인하였고 규격을 측정하였다.

2. 실험 방법

1) 김젖개 내 곰팡이 동정

목조문화재로부터 채집된 균주의 동정을 위해 Potato dextrose agar (PDA; BD Difco, Franklin Lakes, NJ, USA) 배지에 28°C로 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 수행하였다. PCR 산

Fig. 1. Wooden cultural properties, *Gimgeotgae*, exhibited in storage in the Wando forest museum.

물은 서열분석을 통해 18s rRNA 유전자 서열을 얻어 미국생물정보센터 (NCBI) blast search (http://blast.ncbi.nlm.nih.gov/Blast.cgi)를 통해 동정하였다.

2) 감마선 조사 후 김젖개 내 곰팡이 오염도 측정

감마선을 이용한 살균처리의 효과를 측정하기 위해 목재 유물에 오염된 곰팡이의 오염도를 감마선 조사 전과 20 kGy 조사 후로 측정하였다. 곰팡이는 멸균된 증류수와 면봉을 사용하여 채집한 후 PDA배지에 28°C로 배양하면서 오염도를 측정하였다. 감마선 흡수선량은 alanine dosimeter (5 mm, Bruker Instruments, Rheinstetten, Germany)를 이용하여 측정하였다.

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 목조문화재의 감마선 흡수선량 분포를 모사를 위해 몬테카를로 모사 코드 중 MCNP 4B 코드를 사용하였으며 Intel (R) Core (TM)2 CPU 2.40 GHz 컴퓨터, Window XP OS 환경에서 실행하였다. 목조문화재의 주요 재질인 목재의 밀도는 평균 0.5 g cm^{-3}이며 구성 원소는 수소 (6%), 탄소 (55%), 산소 (44%)로 계산하였다. 방사선 선원은 Co-60, 230,000 Ci, 100 × 100 cm 평판 형으로 계산하였으며 감마선은 x축에 평행하게 진행하며 감마선 선원으로부터 목조문화재까지의 거리는 125 cm로 계산하였다. 복잡한 형태의 목조문화재에 대해 용이한 감마선 흡수선량 계산을 위해 규브 (cube)형태로 단순화하여 계산하였으며 계산된 결과는 kGy로 환산하여 나타냈다. 분석은 5 × 10^7번 실행하였다.

결과 및 논의

1. 김젖개 내 곰팡이 동정

목조문화재로부터 오염된 곰팡이의 동정을 위하여 Fig. 2와 같이 3곳에서 각각 곰팡이를 채집하여, PDA배지에 배양 후 18s rRNA 유전자 서열 분석을 통해 동정하였다. 그 결과는 Table 1과 같이 *Cladosporium tenuissimum*, *Aspergillus versicolor* 및 *Penicillium* sp. 종이 동정되었으며 이들은 98～100%의 높은 서열 동일성 (sequence identity)을 보였다. 동정된 대부분의 곰팡이는 지류・섬유질 유물과 목재 유물의 재질에 부착하여 재질을 오염시키는 균이며 이 중 *Aspergillus*, 그리고 *Penicillium* 섬유소 분해효소를 분비하는 사상균으로 알려져 있다 (Horvath *et al.* 1976). *Cladosporium*, *Aspergillus*, 그리고 *Penicillium*는 고대 가죽 유물에 피해를 주는 것으로 알려져 있으며 심지어는 석조 기념비에서도 발견되는 것으로 보고되었다 (Royer and Nakas 1990).

Fig. 2. Gamma-ray irradiation of wooden cultural properties, *Gimgeotgae*, in irradiation facilities.

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

Collecting point		Closest blast match	Sequence identity (%)
Gimjeotgae	1	*Cladosporium tenuissimum*	100
	2	*Aspergillus versicolor*	98
	3	*Penicillium* sp.	98

곰팡이는 섬유소를 분해할 수 있는 cellulase를 가지고 있으며 cellulase는 단일 효소가 아닌 서로 다른 섬유소 분해 기능을 가진 복합효소이다. 대부분의 섬유소 분해균에 있어서, 이들은 몇 개의 cellulase components를 함께 가지고 있으며 섬유소를 환원당으로 변형시킴으로써, 결국 문화재의 재질을 분해하여 치명적인 손상을 주게 된다. 본 연구에 사용된 목재 유물 김젖개 역시 섬유소를 분해하는 곰팡이들에 의해 오염된 상태이며, 비록 보관되어 있던 수장고 내의 환경이 곰팡이가 활성화되기 힘든 조건일지라도 장기간의 보관에 의한 잠재적 생물학적 위험에 노출된 상태이다. 따라서 생물학적 제어를 통한 문화재의 장기간의 보존대책이 필요할 것으로 사료된다.

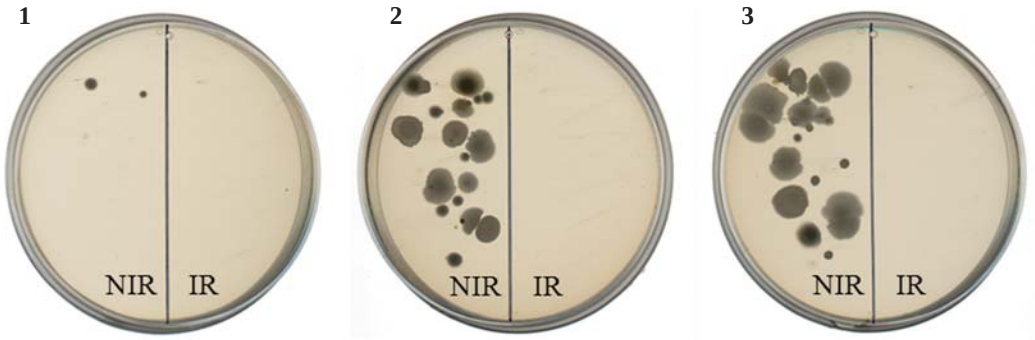

Fig. 3. Inactivation of fungus collected from wooden cultural properties after gamma irradiation. Numbers mean collection point. NIR is non-irradiated. IR is irradiated.

2. 감마선 조사 후 김젖개 내 곰팡이 오염도 측정

목조문화재에 대한 감마선 살균 효과를 알아보기 위하여, 감마선 조사 전과 20 kGy 조사 후로 나누어 Fig. 2와 같은 위치에서 곰팡이를 채집하여 그들의 오염도를 측정해 보았다. 감마선 조사 전 목조문화재로부터 채집된 곰팡이는 배양 2일 후 급격하게 생장하는 것을 알 수 있었으며 감마선 조사 후 같은 위치에서 채집한 곰팡이는 모두 사멸하는 것을 확인할 수 있었다(Fig. 3).

감마선은 선원으로부터 나오는 전자기 복사의 강력한 형태로, 높은 투과력과 에너지를 가지며 조사체에 대하여 어떠한 형태로든 독성물질을 잔류시키지 않으며, 이러한 특징 때문에 20세기 중반부터 방사선을 이용한 미생물 제어연구가 활발하게 진행되어 왔다. 특히 식품과 동물 사료에 오염된 미생물을 제어하기 위한 10 kGy 이하의 방사선 조사 연구가 수행되었다(Ley 1979; EI-Zawahry *et al.* 1991). Blank and Corrigan (1995)은 *Penicillium*과 *Aspergirius*속의 포자에 대한 감마선 저항성 실험을 수행하였으며 그들의 결과에서 D_{10}(초기 군집의 90%가 사멸하는데 필요한 감마선 선량) 값은 각각 0.236～0.416과 0.209～0.319 kGy로 보고하였다. 문화재에 대해 생물학적 제어를 위한 감마선 조사연구에서 다양한 재질(종이, 나무, 흙)로부터 유래한 곰팡이들은 6～15 kGy의 감마선 조사를 통해 성공적으로 불활성화되었다(Pointing *et al.* 1998; McNamara *et al.* 2003; Magaudda 2004).

비록 본 연구에서 20 kGy의 감마선을 목재 유물에 조사함으로써 오염된 곰팡이들을 제어했지만, 다양한 형태와 서로 다른 재질로 구성된 문화재가 균일하게 20 kGy의 감마선이 흡수되었다고 할 수 없다. 왜냐하면 감마선은 선원의 종류, 선원과의 거리, 조사 대상의 밀도, 형태 그리고 화학적 조성에 따라 흡수되는 선량이 다르기 때문이다. 따라서 문화재에 대하여 정밀한 감마선 조사를 위해서는 이러한 요소들을 고려하여 흡수선량 분포를 예측하고 적정 조사선량 선정이 중요하다.

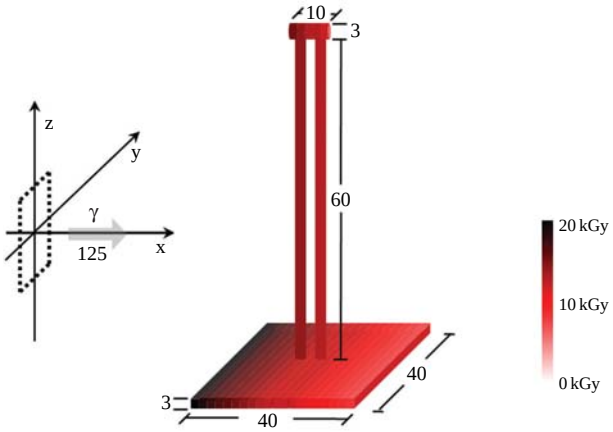

Fig. 4. Simulated absorption dose distribution by MCNP code on wooden cultural properties. X, Y and Z axis were mean width, length and height of cultural properties. Direction of gamma-ray is X axis. All units are cm.

3. 몬테카를로 방법을 통한 흡수선량 분포 예측

감마선 흡수율에 영향을 주는 요소들을 고려하여 몬테카를로 방법을 이용하여, 다양한 형태의 목재 유물에 대한 흡수선량 분포를 예측하였다.

지오메트리(Geometry)상에서 X, Y 그리고 Z축은 목재 유물의 가로, 세로 그리고 높이로 구성하였으며, 감마선의 진행 방향은 선원으로부터 125 cm 거리에서 X축에 평행하게 진행하도록 구성하였다. 김젖개의 선량예측을 위해, 복잡한 형태를 작은 규브(가로 3 cm × 세로 40 cm × 높이 3 cm)형태로 단순화하여 선량을 예측하였다. 그 결과, 김젖개의 상부는 12.3～14 kGy, 바닥판은 8.21～

18.9 kGy로 예측되었다 (Fig. 4). 따라서 감마선 조사를 통한 문화재의 생물학적 방제기술 적용을 위해서는 감마선 흡수율에 영향을 주는 요소들을 고려하여 감마선 흡수선량을 예측한 후 적정 조사선량 선정하여 조사해야 할 것으로 사료된다.

결 론

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 목재 유물의 곰팡이들이 모두 사멸 (Fig. 3)하는 것으로 보아 위의 사실을 입증하였으며 목재 유물의 현장 적용이 가능함을 시사한다.

방사선 흡수선량은 조사체의 밀도, 형태, 화학 조성에 따라 큰 차이가 나타나는데 이는 중성자들이 무작위로 충돌하며 분열하기 때문이다. 또한 문화재를 구성하는 구성성분은 매우 다양하며 이에 따른 재질의 밀도 차이가 나타난다. 따라서 문화재에 대한 방사선 조사를 위해서는 방사선 흡수선량 분포예측을 통한 적정 조사선량 선정이 필요하다.

방사선의 투과력과 흡수선량 분포를 확인하기 위해서는 alanine과 선량계 등을 이용한 직접적인 방법과 몬테카를로 방법을 이용한 간접적인 방법이 있다. 직접적인 선량 예측 방법은 조사체를 직접 조사해야 하는 위험을 감수해야 하지만, 몬테카를로 방법을 이용하면 방사선 조사에 의한 잠정적 손상을 피할 수 있다. 몬테카를로 방법은 감마선의 흡수와 투과에 영향을 주는 요소들을 입력해주면 컴퓨터가 그 데이터를 확률적으로 계산하여 시각화해 준다. Fig. 4와 같이 목재 유물의 형태와 재질에 따른 흡수선량 분포를 눈으로 쉽게 확인할 수 있다.

본 연구를 통해 목조 유물에 대한 생물학적 손상 제어가 가능하며 형태와 재질에 따른 흡수선량 분포 예측이 가능함을 확인하였다. 따라서 본 연구 결과는, 더 다양한 유물에 대한 적용 가능성을 시사하며, 지속적인 표준화 연구를 통한 비파괴적·친환경적 문화재의 보존·복원·분석 기술 개발에 적용할 수 있을 것이다.

사 사

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

참 고 문 헌

Adamo M, Brizzi M, Magaudda G, Martinelli G, Plossi-Zappalà M, Rocchetti F and Savagnone F. 2001. Gamma radiation treatment of paper in different environmental conditions. *Restaurator* **22**:107-131.

Adamo M, Giovannotti M, Magaudda G, Plossi-Zappalà M, Rocchetti F and Rossi G. 1998. 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**:41-59.

Blank G and Corrigan D. 1995. Comparison of resistance of fungal spores to gamma and electron beam radiation. *Int. J. Food Microbiology* **26**:269-277.

EI-Zawahry YA, Aziz NH and E1-Fouly MZ. 1991. Incidence of toxic and pathogenic microorganisms in different Egyptian and Saudi Arabian commodities and their decontamination by gamma-irradiation. *Egypt J. M. Microbiol.* **26**:267-282.

Gonzalez ME, Calvo AM and Kairiyama E. 2002. Gamma radiation for preservation of biologically damaged paper. *Radiat. Phys. Chem.* **63**:263-265.

Hanus J. 1985. Gamma radiation for use in archives and libraries. *Abbey. Newsletter* **9**:34-36.

Horvath RS, Brent MM and Cropper DG. 1976. Paint deterioration as a result of the growth of *Aureobasidium pullulan* on wood. *Appl. Environ. Microbiol.* **32**:505-507.

Ley FJ. 1979. Radiation processing of laboratory animal diet. *Radiat. Phys. Chem.* **14**:677-682.

Magaudda G. 2004. The recovery of biodeteriorated books and archive documents through gamma radiation: some considerations on the results achieved. *J. Cult. Herit.* **5**:113-118.

McCracken DD. 1955. The Monte Carlo method. *Sci. Am.* **192**: 90-96.

McNamara NP, Black HIJ, Beresford NA and Parekh NR. 2003. Effects of acute gamma irradiation on chemical, physical and biological properties of soils. *Appl. Soil Ecol.* **24**:117-132.

Pointing SB, Jones EBG and Jones AM. 1998. Decay prevention in water logged archaeological wood using gamma irradiation. *Int. Biodeterior. Biodegrad.* **42**:17-24.

Postma H, Blaauw M, Bode P, Mutti P, Corvi F and Siegler P. 2001. Neutron-resonance capture analysis of materials. *J. Radioanal. Nucl. Chem.* 115-120.

Raeside DE. 1976. Monte Carlo principles and applications. *Phys. Med. Biol*. **21**:181-197.

Rocchetti F, Adamo M and Magaudda G. 2002. Fastness of printing inks subjected to gamma-ray irradiation and accelerated ageing. *Restaurator* **23**:15-26.

Royer JC and Nakas JP. 1990. Interrelationship of xylanase induction and cellulase induction of *Trichoderma longibrachiaturm. Appl. Environ. Microbiol.* **56**:2535-2539.

Turner JE, Wright HA and Hamm RN. 1985. A Monte Carlo primer for health physicists. *Health. Phys*. **48**:717-733.

Manuscript Received: February 23, 2012
Revised: March 5, 2012
Revision Accepted: March 10, 2012