Journal of RADIATION INDUSTRY
Vol. 19, No. 1, pp. 69-74, 2025
https://doi.org/10.23042/radin.2025.19.1.69

Technical article

침수된 문화유산 보존 응급 보호를 위한 NSS 하이드로겔 필름 제조 및 방균 평가

곽영혁[1] · 박해준[1] · 이면주[1] · 조경서[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소

Formulation and Antifungal Evaluation of NSS Hydrogel Films for Emergency Preservation of Waterlogged Cultural Heritage

Yeong-Hyeok Kwak[1], Hae-Jun Park[1], and Gyeong-Seo Jo[1,*]

[1]Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, Jeongeup 56212, Republic of Korea

ABSTRACT Waterlogging caused by climate change poses a critical threat to the preservation of cultural heritage. If preservation measures are not implemented within 48 hours of a disaster, biological degradation in waterlogged environments can result in secondary damage to cultural assets, including discoloration, record loss, and structural deterioration. This study developed and evaluated antifungal hydrogel films for emergency preservation using Nanosized Silica-Silver (NSS). NSS hydrogel films were synthesized through two distinct fabrication techniques and tested for antifungal activity against three fungal strains: *Epicoccum nigrum*, *Cladosporium* sp., and *Alternaria porri* KACC 42999. Experimental results showed that pigmentation caused by fungal growth was observed at the contact surfaces of the NSS hydrogel films; however, the hyphae could not completely infiltrate the hydrogel structure. Consequently, at NSS concentrations of 3 and 5%, the hyphae exhibited upward growth, demonstrating antifungal effects and suggesting potential applicability under diverse environmental conditions. This study verifies the antifungal efficacy of NSS hydrogel films for the emergency preservation of waterlogged cultural heritage and highlights their potential applicability in future cultural heritage-related applications.

Key words: Antifungal, NSS hydrogel, Waterlogged Cultural Heritage

1. 서 론

문화유산은 인류의 역사와 문화를 담은 중요한 자산으로, 그 보존과 관리의 중요성이 날로 부각되고 있다. 특히 유기질 기반 문화유산은 생물학적 요인에 의해 구조적 손상이 유발될 수 있으며, 이는 문화유산의 보존을 위협하는 중요한 문제로 작용한다. 기후변화로 인한 고온·다습한 환경과 지속적인 침수 피해는 진균 성장에 유리한 조건을 조성하여, 유기질 기반 문화유산의 열화 및 구조적 안정성 저하를 가속화할 수 있다[1,2]. 특히 국내 박물관이나 수장고와 같은 문화유산 보존 시설에서 진균에 의한 생물학적 손상이 빈번하게 보고되고 있으며[3-6], 이를 최소화하기 위한 효과적인 소독 및 보존 처리가 필요한 실정이다.

*Epicoccum nigrum*은 해수 유래 진균으로 수장고 환경에서 검출되며 높은 내방사성을 보이는 것으로 알려져 있다[7]. 이러한 특성으로 인해 침수된 문화유산 환경에서 주요 오염원으로 작용할 가능성이 크다. 또한 *Cladosporium* sp., *Alternaria* sp.는 문화유산 보존 시설에서 빈번히 검출되는 대표적인 진균으로 높은 습도 및 환기 부족 상태에서 쉽게 증식할 수 있다[3-6,8].

이에 따라 방사선을 이용한 친환경적 소독 및 보존처리가 효과적인 대안으로 주목받고 있으나[9-12], 침수된 문화유산의 경우 2차 오염을 완전히 제어하기 어려우며, 수분에 의한 장기적인 보호 차원의 추가적인 방안이 필요하다. 따라서 침수된 문화유산의 생물학적 손상을 제어하고 보존 효과를 극대화할 수 있는 새로운 기술적 접근이 요구되는 바이다.

하이드로겔은 우수한 고흡수성과 생체적합성을 갖춘 고분자소재로, 의료분야에서 널리 활용되고 있다[13-15]. 특히, 방사선 가교법으로 제조된 하이드로겔은 화학적 가교제를 사용하지 않고도 멸균과 가교를 동시에 구현할 수 있어 이를 이용한 다양한 연

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

Copyright© 2025 by Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author:** Gyeong-Seo Jo
Tel: +82-63-570-3191, Fax: +82-63-570-3195, E-mail: rudtj44@kaeri.re.kr

Received 14 February 2025 **Revised** 17 March 2025 **Accepted** 18 March 2025

구가 보고된 바 있다[16-20]. 또한 하이드로겔은 수소결합과 같은 인터모렉션을 통해 물 분자를 결합하여 고정된 형태를 유지하면서도 높은 수분 흡수율을 가지는 특성을 가지고 있으며 특히 의료 분야에서서 요구되는 멸균성이 뛰어나 의료 분야에서 각광받는 소재이다. 또한 방사선 멸균법으로 제조된 하이드로겔은 물리적 특성뿐만 아니라 생체 적합성에도 우수하여 조직과 접촉할 때 부식이나 반응이 거의 일어나지 않는 점을 검토하여, 본 연구팀에서는 선행연구에서 소나무 나무토막을 침수시킨 후 의료용 겔을 적용한 사례를 통해, 하이드로겔이 수분 제거에 탁월한 성능을 보이는 결과를 나타냈다. 그러나 하이드로겔을 장기간 상온 적용하였을 때, 필름 표면에 발생하는 진균을 완전히 억제하지 못한다는 한계를 확인하였다. 이는 기존 하이드로겔이 특정 미생물에 대한 장기적인 방어 효과가 제한적인 것을 추측한다.

이러한 한계를 극복하기 위해 본 연구에서는 Nanosized Silica-silver (NSS)를 하이드로겔에 복합화하여 항진균 특성을 부여하고자 하였다. NSS는 은 나노입자의 활성산소 생성 효과와 실리카의 물리적 안정성을 결합한 복합 소재로, 진균의 세포 구조를 손상시키고 대사 활동을 억제하는 강력한 항균 특성을 지닌다[21-24]. 특히 NSS는 포자와 균사를 포함하여 광범위한 항균 활성을 나타냈으며, 농도에 따라 선택적으로 미생물을 제어할 수 있다는 결과가 보고된 바 있다[25,26]. 또한, NSS는 화학적 손상 유발의 위험이 적고, 제조 공정이 간단하여 비용 효율적인 장점을 지니고 있다[24,26]. 이러한 특성은 NSS와 하이드로겔의 복합화를 통해 기존 하이드로겔의 고흡수성과 NSS의 우수한 항진균 효과를 결합함으로써, 침수된 문화유산의 방사선 보존소독처리를 위한 랩핑에 적합한 신소재 개발의 가능성을 제시한다. 본 연구에서는 NSS 하이드로겔 필름을 두 가지 제조 기법으로 합성하고, 주요 병원성 진균에 대한 방균 활성을 다양한 NSS 농도(0, 3, 5%)에서 평가하였다. 이를 통해 NSS 하이드로겔 필름이 침수된 문화유산의 보존을 위한 방사선 조사 후 응급 보호 소재로 잠재력을 가지고 있으며, 다양한 환경 조건에서 실질적인 적용 가능성을 제공할 수 있음을 검토하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 시약

NSS 제조를 위해 제시된 참고문헌[26] 따라 Sodium silicate solution (Na_2SiO_3)은 Showa Chemical Co., Inc. (Tokyo, Japan) 제품을 사용하였으며 Silver Nitrate ($AgNO_3$, 순도 99%, EP 등급)은 DUKSAN Chemical (Ansan, Korea)에서 구입하여 사용하였다. Poly (vinyl pyrrolidone, PVP, Mw 50,000)은 ACROS Organics (Geel, Belgium)에서 구입하여 사용하였으며, 기타 실험에 사용된 시약 및 용매는 별도의 정제 과정 없이 사용하였다. 모든 실험은 3차 증류수(DIW)를 이용하여 수행하였다.

Table 1. Reagents and conditions for NSS + Hydrogel preparation

Reagent	Amount (%)		
NSS	0	3	5
PVP	10	10	10
PVA	2	2	2
Carrageenan	2	2	2

2.2. 감마선을 이용한 NSS 제조

Nanosized Silica-Silver (NSS) 복합체 제조는 [24]의 방법을 참고하여 수행되었다. 실험은 총 부피를 200 mL로 조정한 후, 질소(N_2) 가스를 이용한 버블링을 15분간 실시하여 산소를 제거하였다. 이후, 감마선(30 kGy, 6 kGy/h)으로 조사하여 최종적으로 NSS 복합체를 확보하였다.

2.3. 전자선을 이용한 NSS+하이드로겔 제조

500 mL 비커에 70°C로 가열된 물을 넣고 PVP 1 g을 첨가한 후, T.K. Homo Mixer Merk II를 사용하여 완전히 용해될 때까지 혼합하였다. Poly (vinyl alcohol, PVA)를 추가로 혼합한 뒤, NSS를 0, 3, 5% 농도로 제조하고 Carrageenan을 첨가하여 점성이 증가할 때까지 혼합하였다. 혼합된 용액은 비커를 알루미늄 호일로 덮어 water base 조건(80°C)에서 2-3시간 탈포하였다. 탈포된 용액은 square dish (125×125×20 mm)에 분주하여 냉각시킨 뒤, 전자선 조사(2.5 MeV, 25 kGy)를 수행하였으며, 기타 조건은 학계에 보고 된 제조방법에 따라 수행하였다[19-20]. 조사가 완료된 시료는 냉장 보관하여 최종 NSS 하이드로겔을 확보하였다. 모든 제조 조건은 200 mL 기준으로 진행하였다(Table 1).

2.4. 침수 목재를 활용한 의료용 하이드로겔의 수분 방출 평가

초기 무게를 측정한 각각 소나무 나무토막을 증류수에 3일간 침지한 후 표면을 닦아내고 무게를 측정하였다. 처리군은 방사선 가교법으로 제조된 하이드로겔 필름으로 시료를 감쌌으며, 대조군은 가정용 랩 필름을 사용하였다. 모든 시료는 그늘진 실온(25°C)인 환경에서 10일간 방치하였다.

2.5. NSS 하이드로겔 방균 활성 평가

무균 조건의 clean bench에서 NSS 하이드로겔(NSS 농도: 0, 3, 5%)을 5×5 cm 크기로 절단하였다. 각 하이드로겔 조각은 멸균된 petri dish (8.5×8.5 cm)에 배치되었으며, petri dish 내부에 멸균 paper를 먼저 깔아 하이드로겔의 고정성을 확보하였다. 이후, PDA 배지에서 배양된 3종의 진균(*Epicoccum nigrum*, *Cladosporium* sp., *Alternaria porri* KACC 42999)의 2.5 mm agar block을 NSS 하이드로겔 필름 표면에 접종하였다. NSS 하이드

Table 2. Assessment of moisture release from waterlogged wood using hydrogel films

Wood species	Types of film	WWBW	WWAW (75H)	WWAWF (10 Days)	Content (g)	Release (g)	Residual (g)	Residual Rate (%)
Pinus densiflora	Hydrogel film 1	21.26	28.78	22.03	7.52	6.75	0.77	10.23936
	Hydrogel film 2	20.43	31.91	21.1	11.48	10.81	0.67	5.836237
	Hydrogel film 3	20.97	28.79	21.62	7.82	7.17	0.65	8.31202
	Wrap film 1	16.97	24.03	23.44	7.06	0.59	6.47	91.64306
	Wrap film 2	24.06	32.92	31.69	8.86	1.23	7.63	86.11738
	Wrap film 3	20.69	28.41	27.94	7.72	0.47	7.25	93.91192

*WWBW: Weight of Wood Before Waterlogging
*WWAW: Weight of Wood After Waterlogging
*WWAWF: Weight of Wood After waterlogging Film Wrapping (10 Days)

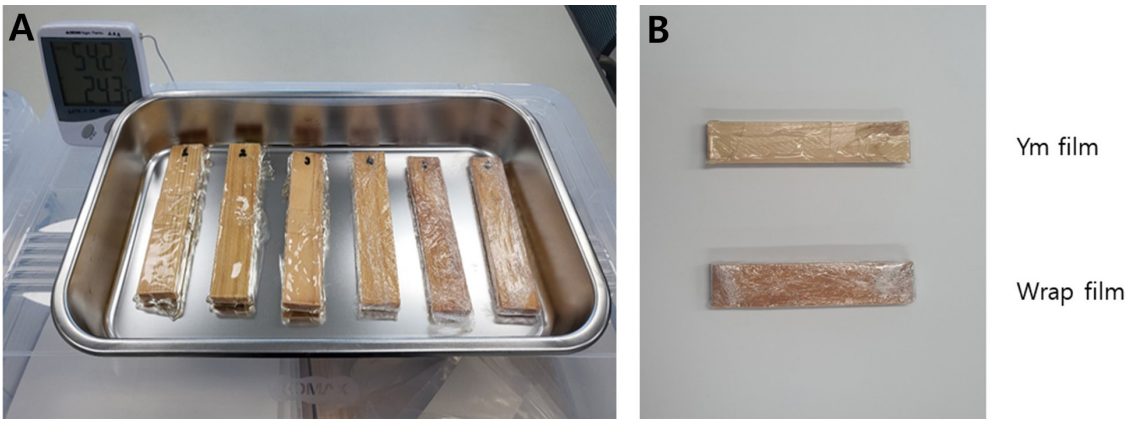

Fig. 1. State after moisture release from medical hydrogel film. (A) Pine wood samples were submerged in distilled water for 3 days and subsequently wrapped with two different types of films (Ym film and wrap film). (B) After 10 days, the Ym film demonstrated over 90% moisture removal, whereas the wrap film retained approximately 90% of the moisture, showing contrasting results.

로겔 방균 활성은 접종 후 실온(24°C)에서 4주간 7일 간격으로 평가하였다. 모든 실험은 3반복으로 수행되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 침수 목재를 활용한 의료용 하이드로겔의 수분 방출 평가 결과

하이드로겔 필름의 수분 방출 평가 결과, 처리군은 3-4일 후 표면이 점차 딱딱한 상태로 변하기 시작하였으며, 최종적으로 10일 후 소나무에 침지한 하이드로겔 처리구의 90% 이상의 수분을 제거하였다. 반면, 대조군인 일반 wrap film은 90% 이상의 수분을 유지하였다(Table 2, Fig 1). 이러한 결과는 하이드로겔 필름이 침수된 문화유산 수분 제거에 효과적임을 나타내며, 하이드로겔의 친수성 고분자 구조가 높은 수분 흡수 능력을 제공하고 내부 망상 구조를 통해 수분을 효과적으로 포획하고 방출한 결과로 판단된다. 또한, 하이드로겔 필름의 경화 과정에서 내부 수분이 증발하면서 필름이 딱딱해져 물리적 안정성이 증가함에 따라 문화유산 표면에 적용 시 추가적인 보호막 역할로서 기여할 수 있을 것으로 보인다.

3.2. NSS 하이드로겔 방균 활성 평가 결과

3, 5% NSS 농도의 NSS 하이드로겔 필름 처리군 모두에서 *Epicoccum nigrum, Cladosporium* sp., *Alternaria porri* KACC 42999의 균사 성장 억제 효과는 유사하게 나타났다. 이는 두 농도 모두 진균의 성장 패턴과 활성을 유의미한 영향을 미치며, 농도 증가에 따른 추가적인 방균 효과의 증가는 관찰되지 않았음을 시사한다(Fig. 2). 균사가 내부 침투하지 않고 생존하여 겔표면 내부와 반대방향으로 성장하려는 시도가 보인다. 일반적으로 NSS 입자는 30-50 nm 사이즈로 하이드로겔의 망목구조 밖으로 나오지 못한다. 다만 균사가 망목구조 속으로 침투되어 나노입자를 흡수했을 경우 살균 효과가 나타나는 메커니즘을 갖고 있다. 그러나 수분이 있을 경우, NSS 입자로 부터 은이온은 나노입자로부터 미량으로 나올 가능성이 있다. 이를 균사가 감지하여 하이드로겔 표면과 반대방향으로 균사생장을 시도할 수 있다 이때 균사

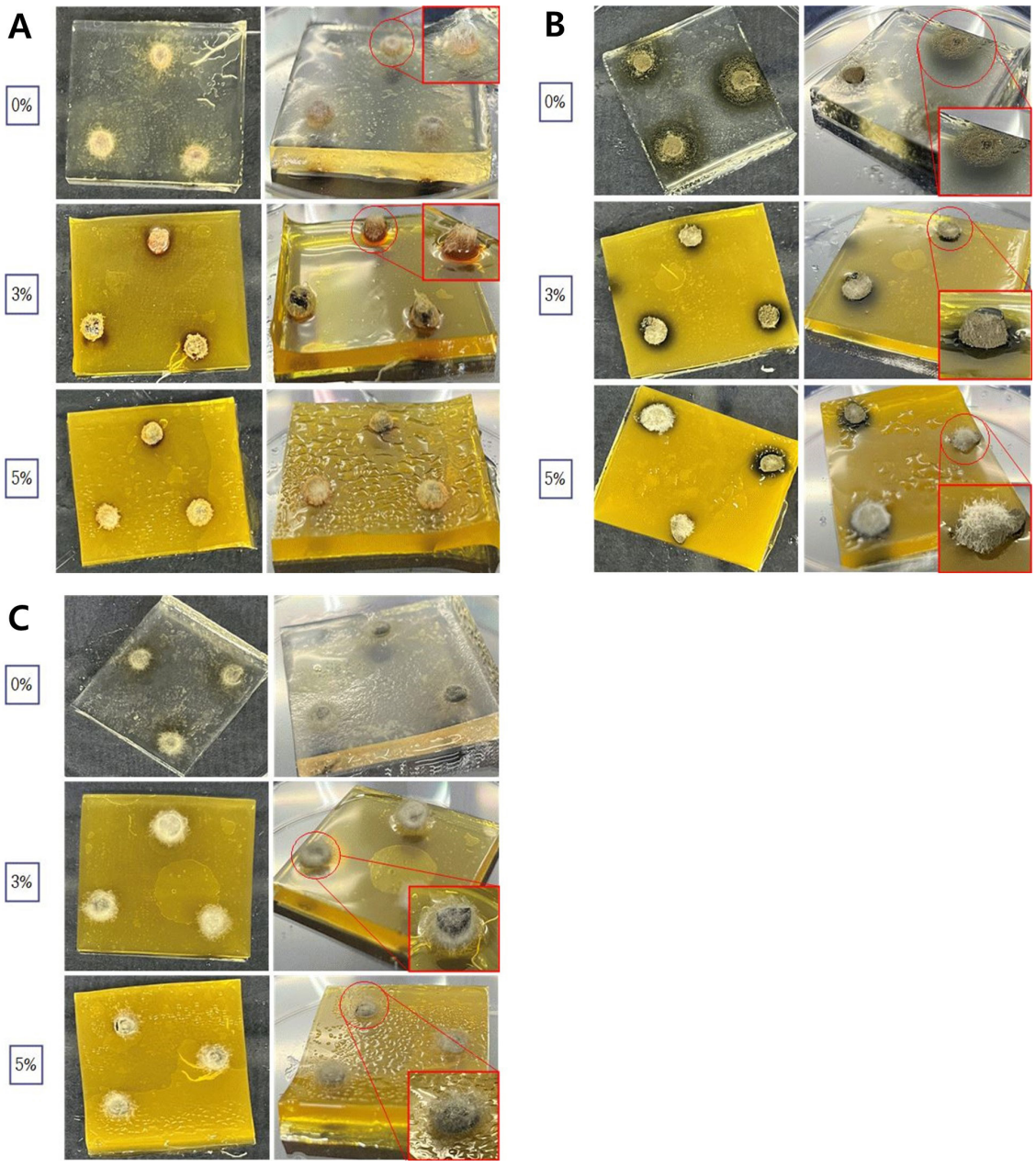

Fig. 2. Evaluation of antifungal activity of 0, 3, and 5% NSS hydrogel films against fungal strains over 28 days. (A) *Epicoccum nigrum*, (B) *Cladosporium* sp., and (C) *Alternaria porri* KACC 42999. Compared to the control group (0%), the 3 and 5% NSS hydrogel films demonstrated significant antifungal activity, with fungal hyphae exhibiting upward growth patterns and reduced growth rates.

가 인지하는 임계농도가 존재하여 더 이상의 유의미한 효가가 없었던 것으로 추측한다. 향후 여기에 대한 연구가 더 이루어져야 한다고 생각한다.

NSS 하이드로겔의 방균 메커니즘은 주로 실리카와 은 나노 입자에 의해 생성되는 활성산소종(ROS)에 기인한다. 활성산소종은 진균 세포벽의 구조적 무결성을 손상시키며, 핵산과 단백질의 기능을 저해하여 세포의 사멸을 촉진한다[27-30]. 이러한 작용은 진균의 성장 방향성과 활성도에 직접적인 영향을 미쳐, 균사의 비정상적인 성장 패턴과 활력 저하를 초래한 것으로 판단된다. 또한 3종의 진균 모두 색소 침착이 관찰되었으며, 이는 스트레스 환경에서 방어 메커니즘으로 대사산물을 분비한 결과로 판단된다. NSS 하이드로겔의 실리카와 은 나노 입자가 생성한 활성산소종이 진균의 세포 구조를 손상시키고 대사 과정을 방해하여 이러한 스트레스 반응을 유도한 것으로 보인다.

4. 결 론

선행 연구로 진행된 의료용 하이드로겔 필름은 우수한 수분 제거 능력을 보이며, 침수된 문화유산의 보존에 효과적이었으나, 방사선 소독후 장기적인 보존을 위해서는 미생물 제어 능력의 향상이 필요함을 시사하였다. 이에 본 연구에서는 하이드로겔의 수분 제거 능력에 방균 효과를 더하기 위해 NSS를 첨가한 하이드로겔을 제조한 후, *Epicoccum nigrum, Cladosporium* sp., *Alternaria porri* KACC 42999의 3종 진균을 대상으로 방균 효과를 평가하였다. 연구 결과, 3, 5% 농도의 NSS 하이드로겔 처리군 모두에서 진균의 성장 방향성과 활성도가 유의미하게 억제되었으며, 두 농도 간의 방균 효과는 유사하였다. 특히, 균사의 성장 방향이 겔표면과 반대인 위쪽으로 전환되는 현상이 관찰되어, NSS 하이드로겔이 진균의 침투를 저해하고 방균 특성을 발휘하는 소재로서의 잠재력을 확인하였다. 이러한 결과는 NSS 하이드로겔이 진균의 환경 적응성을 저해하고 침수된 문화유산 보존 환경에서 발생할 수 있는 생물학적 오염원을 효과적으로 방지할 수 있음을 시사한다. 또한 경제성과 효율성을 고려할 때, 3% 농도의 NSS 하이드로겔이 실용적이고 친환경적인 방균 필름으로서 적합할 것으로 판단된다. 이는 낮은 농도로도 충분한 방균 효과를 발휘하여 자원 절약과 비용 절감에 기여할 수 있으며, 대량 생산 및 실제 적용 시 중요한 이점으로 작용할 것으로 사료된다. 향후 연구에서는 다양한 진균 종과 복합적인 환경 조건에서의 NSS 하이드로겔의 효능을 추가 검증하고, 실제 적용 시 안정성과 지속성을 평가하여 문화유산 보존 분야에서의 활용도를 높일 수 있을 것으로 기대된다.

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 하이드로겔 제작을 도와주신 한국원자력연구원 첨단방사선연구소의 임윤묵 박사님께 감사드립니다.

참고문헌

1. Sterflinger K. 2010. Fungi: Their role in deterioration of cultural heritage. *Fungal Biology Reviews* **24**(1-2):47-55. https://doi.org/10.1016/j.fbr.2010.03.003.
2. Sterflinger K and Piñar G. 2013. Microbial deterioration of cultural heritage and works of art — tilting at windmills? *Applied Microbiology and Biotechnology* **97**(22):9637-9646. https://doi.org/10.1007/s00253-013-5283-1.
3. Seo MS, Lee SM and Hong JY. 2013. The characteristic study of the microbial habitat in the Muwisa Museum, Gangjin. *Journal of Conservation Science* **29**(4):333-343. https://doi.org/10.12654/JCS.2013.29.4.04.
4. Lee MY, Kim DW and Chung YJ. 2014. Conservation environmental assessment and microbial distribution of the Songsan-ri Ancient Tombs, Gongju, Korea. *Journal of Conservation Science* **30**(2):169-179. https://doi.org/10.12654/JCS.2014.30.2.06.
5. Hong JY, Seo MS, Kim YH, Jo CW and Lee JM. 2015. A survey for distribution of airborne microorganisms in storage of movable cultural properties. *Conservation Studies* no.**36**:64-73.
6. Hong JY, Kim YH, Lee JM, Kim SJ, Jo CW and Park JH. 2018. Seasonal distribution and diversity of airborne fungi in a wooden cultural heritage site: A case study of the Seonamsa Temple, Suncheon. *The Korean Journal of Mycology* **46**(2):122-133. https://doi.org/10.4489/KJM.20180016.
7. 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. *Radiation Physics and Chemistry* **205**:Article 110723. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2022.110723.
8. 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. *Science of the Total Environment* **536**:557-567. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.105.
9. 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. *Journal of Radiation Industry* **17**(4):533-542. https://doi.org/10.23042/radin.2023.17.4.533.
10. 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. *Journal of Cultural Heritage* **46**:148-154. https://doi.org/10.1016/j.culher.2020.07.007.
11. Jo GS, Kwak YH, Park MG and Park HJ. Gamma radiation dose rate in control fungi to preserve contaminated organic artifacte of cultural heritage. *Radiation Physics and Chemistry* (in press).
12. Jo GS, Kwak YH, Park MG and Park HJ. Disinfection of fungus using X-ray irradiation for the preservation of contaminated organic artifacts of traditional heritage. *Applied Radiation and Isotopes* (in press).
13. Lee OJ, Kim JH, Ju HW, Moon BM, Park HJ, Sheikh FA and Park CH. 2013. Fabrication and characterization of silk/PVA hydrogels by sonication and freezing-thawing technique. *Polymer (Korea)* **37**(6):717-721. http://journal.polymer-korea.or.kr/journal//doi.html?vol=037&no=06&page=717.
14. Qiao K, Guo S, Zheng Y, Xu X, Meng H, Peng J, Fang Z and Xie Y. 2018. Effects of graphene on the structure, properties, electro-response behaviors of GO/PAA composite hydrogels and influence of electro-mechanical coupling on BMSC differentiation. *Materials Science and Engineering: C* **93**:853-863.
15. Pranantyo D, Yeo CK, Wu Y, Fan C, Xu X, Yip YS, Vos MIG, Mahadevegowda SH, Lim PLK, Yang L, Hammond PT, Leavesley DI, Tan NS and Chan-Park MB. 2024. Hydrogel dressings with intrinsic antibiofilm and antioxidative dual functionalities accelerate infected diabetic wound healing. *Nature Communications* **15**(1):954. https://doi.org/10.1038/s41467-024-44968-y.
16. Park JS, Kim HA, Choi JB, Gwon HJ, Lim YM and Nho YC. 2011. Preparation and characterization of poly (vinyl alcohol)/poly (acrylic

acid) hydrogel by radiation. *Journal of Radiation Industry* **5**(4):377-382.
17. Hwang SH, Ahn SJ, Park JS, Jeong SI, Gwon HJ, Lee DY and Lim YM. 2015. Characterization and preparation of the hydrogel has excellent release effect of the active ingredients using a radiation cross-linking technology. *Journal of Radiation Industry* **9**(4):199-207.
18. Baik J, Park JS, Jeong JO, Jeong SI, Gwon HJ, Ahn SJ and Lim YM. 2016. Preparation and characterization of poly (vinyl alcohol) hydrogel containing metronidazole by irradiation. *Journal of Radiation Industry* **10**(1):21-27.
19. Park JS, Jeong JO, Gwon HJ, Jeong SI and Lim YM. 2019. Mechanical and electrical characterization of silicone/poly (acrylic acid) hydrogel by radiation. *Journal of Radiation Industry* **13**(1):25-30.
20. Park JS, Jeong JO, Kim YA, Jeong SI and Lim YM. 2020. Effect of the type and content of additives on the physical characterization of poly (acrylic acid)/silicone hydrogel prepared by electron-beam irradiation. *Journal of Radiation Industry* **14**(4):327-333.
21. Kim TN, Feng QL, Kim JO, Wu J, Wang H, Chen GC and Cui FZ. 1998. Antimicrobial effects of metal ions (Ag^{+}, Cu^{2+}, Zn^{2+}) in hydroxyapatite. Journal of Materials Science: *Materials in Medicine* **9**(3):129-134. https://doi.org/10.1023/a:1008811501734.
22. O'Neill MA, Vine GJ, Beezer AE, Bishop AH, Hadgraft J, Labetoulle C, Walker M and Bowler PG. 2003. Antimicrobial properties of silver-containing wound dressings: A microcalorimetric study. *International Journal of Pharmaceutics* **263**(1-2):61-68. https://doi.org/10.1016/s0378-5173(03)00361-2.
23. Mirzajani F, Ghassempour A, Aliahmadi A and Esmaeili MA. 2011. Antibacterial effect of silver nanoparticles on *Staphylococcus aureus*. *Research in Microbiology* **162**(5):542-549. https://doi.org/10.1016/j.resmic.2011.04.009.
24. Kim HJ, Choi SH and Park HJ. 2012. Nano-Ag complexes prepared by γ-radiolysis and their structures and physical properties. *Radiation Physics and Chemistry* **81**(10):1612-1620. https://doi.org/10.1016/j.radphyschem.2012.04.013.
25. Oh SD, Lee SH, Choi SH, Lee IS, Lee YM, Chun JH and Park HJ. 2006. Synthesis of Ag and Ag-SiO_2 nanoparticles by γ-irradiation and their antibacterial and antifungal efficiency against Salmonella enterica serovar Typhimurium and Botrytis cinerea. *Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects* **275**(1-3):228-233. https://doi.org/10.1016/j.colsurfa.2005.11.039.
26. Park HJ, Kim SH, Kim HJ and Choi SH. 2006. A new composition of nanosized silica-silver for control of various plant diseases. *The Plant Pathology Journal* **22**(3):295-302.
27. Kowaltowski AJ and Vercesi AE. 1999. Mitochondrial damage induced by conditions of oxidative stress. *Free Radical Biology and Medicine* **26**(3-4):463-471. https://doi.org/10.1016/S0891-5849(98)00216-0.
28. Kannan K and Jain SK. 2000. Oxidative stress and apoptosis. *Pathophysiology* **7**(3):153-163. https://doi.org/10.1016/S0928-4680(00)00053-5.
29. Aguirre J, Hansberg W and Navarro R. 2006. Fungal responses to reactive oxygen species. *Medical Mycology* **4**(Suppl 1):S101-S107. https://doi.org/10.1080/13693780600900080.
30. Schieber M and Chandel NS. 2014. ROS Function in Redox Signaling and Oxidative Stress. *Current Biology* **24**(10):R453-R462. https://doi.org/10.1016/j.cub.2014.03.034.