JOURNAL OF RADIATION INDUSTRY

Original article

16(3) : 261-269 (2022)
https://doi.org/10.23042/radin.2022.16.3.261

수해로 침수된 견직물의 감마선 조사에 따른 이화학적 변화

박혜진[1], 최지선[2], 홍창용[2], 이누리[2], 윤다영[2], 오성민[2], 정용재[2,*]

[1]한국전통문화대학교 문화재예방보존연구소, [2]한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과

Changes of Physico-chemical Properties of the Raw and Degummed Silk under the Wet Conditions by Gamma-ray Irradiation

Hae Jin Park[1], Ji Sun Choi[2], Changyong Hong[2], Nu Ri Lee[2], Da Young Youn[2], Seong Min Oh[2] and Yong Jae Chung[2,*]

[1]Institute of Preventive Conservation for Cultural Property, Korea National University of Cultural Heritage, 367, Baekjemun-ro, Gyuam-myeon, Buyeo-gun, Chungcheongnam-do 33115, Republic of Korea
[2]Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, 367, Baekjemun-ro, Gyuam-myeon, Buyeo-gun, Chungcheongnam-do 33115, Republic of Korea

Abstract This study attempted to evaluate visually and quantitatively the degree of physico-chemical changes with raw silk and degummed silk irradiated with gamma-ray under the dry and wet condition assuming an flood emergency situation. The morphological change was not definitely observed on both raw silk and degummed silk in dry and wet condition according to dose of the gamma-ray irradiation. The color change value (△Eab*) of wet raw silk was measured the highest (7.1) at 100 kGy while the color difference was the lowest (1.5) for dry degummed silk at 50 kGy irradiation. Overall, the absorbance of degummed silk was seen to be relatively higher than that of raw silk in the infrared spectroscopy spectrum. As for the dry raw silk, the absorbance in the spectrum partially decreased as the gamma-ray irradiation dose increased, but no specific difference was confirmed by irradiation dose. The ratio of Amide I and II showed a slight increase as the irradiation dose increased; however, no great change in the primary structure of the polypeptide was observed. Therefore, in this study, it was possible to confirm the possibility of expanding the gamma-ray irradiation area that can be subjected to massive biological control for silk materials in a field of conservation science.

Key words: Gamma-ray radiation, Silk textiles, Dry condition, Wet condition, Material stability assessment

1. 서 론

견섬유는 누에가 만든 고치에서 풀어낸 견사로 만들며, 천연섬유 중에서 유일한 동물성 필라멘트 장섬유이다. 생견은 두 가닥의 피브로인이 세리신으로 둘러싸고 있는 형태로 피브로인은 결정화도가 높고, 세리신은 무작위적인 구조를 가진 친수성 단백질이다. 세리신을 포함한 불순물은 견사를 뻣뻣하게 하고 광택이 좋지 않아 알칼리 처리를 통해 세리신을 제거하는데, 이 과정을 정련이라고 한다. 이렇게 처리한 견을 정련견이라 하며, 매끄러운 측면과 삼각형의 단면이 명확하게 관찰되며, 유연성과 광택이 우수한 특징이 있다[8,9].

http://www.ksri.kr/
Copyright © 2022 by
Korean Society of Radiation Industry

***Corresponding author.** Yong Jae Chung
Tel. +82-41-830-7365 Fax. +82-41-830-4786 E-mail. iamchung@nuch.ac.kr
Received 8 September 2022 **Revised** 22 September 2022 **Accepted** 26 September 2022

견섬유와 같은 유기재료는 고온다습한 환경에서 곤충류와 미생물 등으로부터 변색이나 유실 등과 같은 피해가 급속도로 발생할 수 있다. 최근 지구의 급격한 이상 기온 변화로 인하여 산불, 가뭄, 폭염, 홍수, 태풍 등 지속되는 이상기후가 발생하고 있다. 국내에서는 지난 2020년 발생한 기록적인 폭우로 인해 수장고 내부로 빗물이 침투되어 회화작품과 고문서, 신문, 영인본, 악보, 사진 등 침수피해가 발생한 사례가 있다. 최근 급격한 기후변화로 인해 세계 각국에서 문화재 피해가 심각해짐에 따라, 국내에서도 문화유산을 보존하기 위해 기후변화에 대한 즉각적인 대응 방안에 대한 필요성이 대두되고 있다. 수해를 입은 응급상황에서 다량의 문화재를 단시간 내 소독하여 응급보존처리를 진행하기 위한 노력과 추후 야기될 생물학적 손상을 최소화하기 위한 방안이 필요하다. 응급 수해상황이 발생하면, 생물학적 손상가능성을 조기에 발견하고 적절하게 대처하는 것은 문화재의 수명을 결정하는 데에 매우 중요한 역할을 한다. 수해를 입은 문화재는 물리적·화학적 손상이 야기될 뿐만 아니라, 48시간 이후로 생물학적 손상 발생확률이 급증하게 되므로 2차적으로 발생할 수 있는 생물제어가 최우선 과제이다.

약제를 사용하지 않는 생물방제 기술 중 투과력이 뛰어난 감마선을 이용한 처리법은 많은 연구자들에 의해 활발하게 연구되어 왔다[1,2,4,5,7,11]. Yao *et al*.은 감마선 선량이 증가함에 따라 건전 상태의 정련견은 미세 섬유 사이의 균열과 파편이 크게 형성되며 파단강도와 연신율이 감소하는데 이는 피브로인의 펩타이드 사슬에서 펩타이드 결합, 분자 간 결합, 분자 방향의 약화에 의한 결과로 판단된다고 발표하였다[11]. Geba *et al*.은 견직물을 대상으로 가속열화(40°C, 65%RH, 120시간)를 수행한 후, 0 kGy, 10 kGy, 20 kGy로 감마선을 조사하여 영향평가하는 연구를 진행하였다[4]. 감마선 조사선량이 25 kGy일 때, 파단강도와 연신율이 감소하는 것을 확인하였고, 가속열화 조건과 감마선 조사가 삼중 나선 구조 수준에서 피브로인과 케라틴의 열화를 촉진한다고 보고하였다. Vujcic *et al*.은 염색되지 않은 견직물의 경우, 0 kGy에서 5 kGy 사이에서만 차이를 보이지만 염색 후에는 조사량에 따라 변색 정도가 비례하며, 감마선 25 kGy에서 조사된 시편은 전반적으로 명도 값이 감소하는 결과를 보고하였다[10].

그러나 앞선 선행연구에서 홍수나 침수 등의 자연재해가 발생하였을 때, 침수된 견직물을 대상으로 생물학적 손상을 최소화하기 위한 목적으로 감마선 조사 기술을 적용한 연구는 부족한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 수해 상황을 고려하여 건전 및 수침상태의 생견과 정련견을 대상으로 감마선 조사 기술을 적용하기 전·후 이화학적인 변화를 관찰하고, 감마선 조사선량에 따라 재질 영향평가를 수행하고자 하였다.

2. 재료 및 방법

2.1. 연구재료

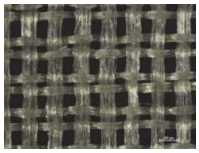
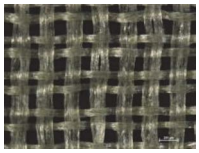
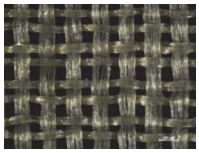
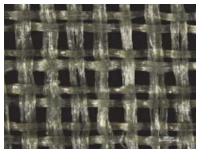
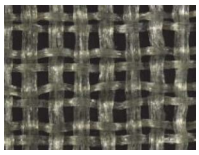
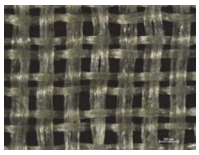
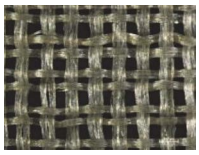
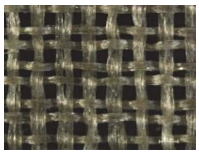
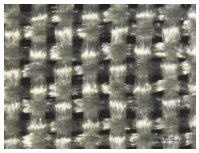
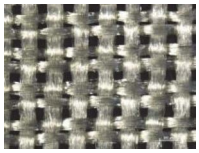
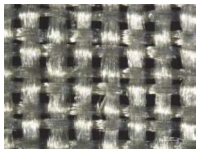
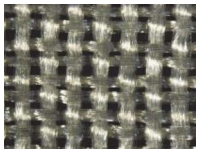
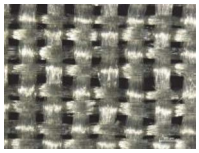
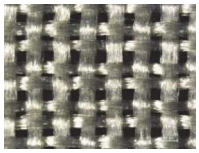
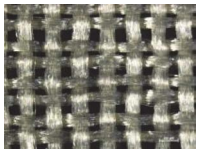
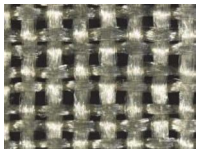
본 연구에서는 국내산 표준 견직물을 대상으로 하였으며, 사용된 표준 직물시편으로는 생견(raw silk)과 정련견(degummed silk)을 사용하였다. 표준 직물은 상주명주(경북 상주시 함창읍 애기비 1길 35)에서 2A 명주생초와 6~10번 정련무젯물명주를 구입하여 일정 규격으로 재단하여 사용하였다. 실험에 사용하기 전, 생견과 정련견은 각각 항온수조(BW3-20G, Jeiotech, KOR)에 24시간 침지하여 불순물을 제거하고, 직물 표면에 존재하는 오염물을 제거하여 직물의 균일도를 높였다. 전처리가 완료된 생견과 정련견은 23°C, RH50% 환경조건에서 24시간 건조하였다. 건전시편은 전처리를 진행한 직물을 23°C, RH50% 환경조건에서 7일 동안 안정화한 후 사용하였고, 수침시편은 감마선 조사 24시간 전 HPLC 등급의 H_2O (Fisher Chemical, USA)를 이용하여 약 3분간 완전 침지 후 감마선을 조사하였다.

2.2. 연구방법

감마선에 의한 재질의 영향평가는 고선량으로 조사하지 않는 한 그 차이를 확연하게 확인하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수해상황에서 감마선 생물방제 기술을 적용하기 위해 견직물(생견과 정련견)의 이화학적 분해 정도를 가시적 및 정량적으로 파악하였다. 감마선 조사는 Greenpia Technology에서 수행하였으며, 조사선량에 따른 차이를 비교하기 위해 0 kGy, 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy의 선량으로 조사하여 비교하였다. 감마선 조사 전·후 실체현미경과 주사전자현미경을 이용한 표면관찰, 색상분석, 적외선분광분석을 이용한 이화학적 성분분석을 실시하였다.

표면상태 변화를 관찰에서 시편 중앙부위를 30배, 60배

Table 1. Result of microscopic surface observation of raw silk and degummed silk before and after gamma-ray radiation (×60)

No.	Sample		Irradiation dose			
			0 kGy	25 kGy	50 kGy	100 kGy
1	Raw silk	Dry condition				
2	Raw silk	Wet condition				
3	Degummed silk	Dry condition				
4	Degummed silk	Wet condition				

의 비율로 촬영하여 실체현미경(SMZ18, Nikon, JPN)을 활용하여 관찰하였다. 또한, 고배율로 섬유 표면의 형태학적 변화를 확인하고자 주사전자현미경(SU3800, Hitachi, JPN)을 이용하여 1000배 확대하여 관찰하여 섬유소의 미세한 변화를 관찰하였다.

색도분석은 분광측색계(Colormate, Scinco, KOR)를 이용하여 측정하였다. 측정조건은 반사모드로 D65 광원, 관찰각도 10°, SCI 모드로 조건을 설정하고, 시편을 대각선을 기준으로 상, 중, 하로 구획하여 10회씩 측정하여 평균을 구하였다. 측정값은 L*, a*, b*값으로 나타내고, 백색도는 ASTM E313, 황색도는 ASTM D1925-70에 따라 구하여 비교하였다.

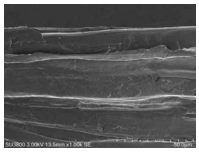
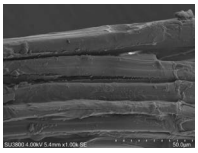
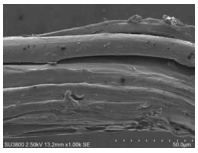
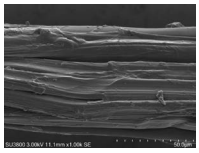
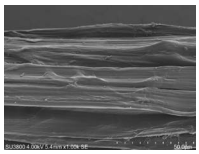
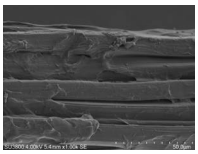
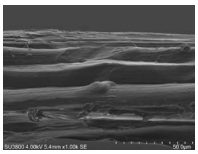
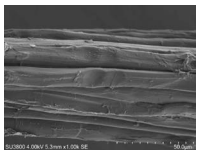
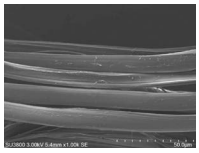
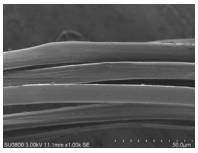
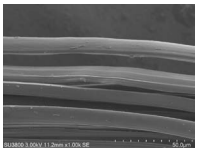
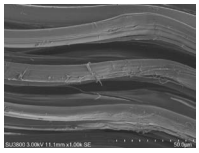
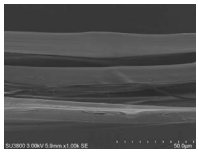
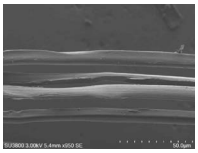
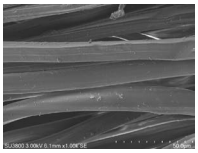
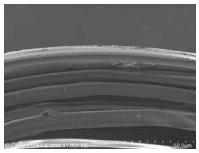
이화학적인 성분분석을 위해 푸리에변환적외선분광분석기(Alpha, Brucker Optics, GER)를 통한 스펙트럼의 주요 흡수대와 특성 진동수를 비교분석을 실시하였다. ATR 조건으로 32회 수캔, 분해능 4.0 cm^{-1}, 분석 범위는 4000~400 cm^{-1}로 실시하였으며, 분석은 직물의 좌, 중, 우 위치별 3포인트에 3배수로 측정하여 총 9회 측정하고 평균을 계산하였다. 견을 구성하는 Amide I은 단백질 내에서 볼 수 있는 가장 큰 파장으로 1700~1600 cm^{-1} 사이에서 관찰될 수 있으며, C=O 신축진동 및 C-N 결합의 영향을 받는다. Amide II는 주로 1580~1510 cm^{-1}에서 관찰되며 주로 N-H 결합에 따라 나타나므로 두 피크의 흡광도의 비를 비교하여 폴리펩타이드 1차 구조의 변화를 확인하였다[3].

3. 결과 및 고찰

3.1. 표면관찰

감마선 조사 전·후 육안관찰 및 실체현미경(×60) 관찰 결과, 건전과 수침조건에서 감마선을 조사한 생견과 정련견 모두 조사선량에 따른 섬유의 형태학적 변화는 관찰되지 않았다(Table 1). 주사전자현미경을 이용하여 고배율(×1000)로 섬유소의 변화 여부를 세밀하게 관찰한 결과, 생견보다 정련견은 정련과정으로 더 매끄러운 측면이

Table 2. Result of microscopic surface fiber observation of raw silk and degummed silk before and after gamma-ray radiation (×60)

No.	Sample		Irradiation dose			
			0 kGy	25 kGy	50 kGy	100 kGy
1	Raw silk	Dry condition				
2	Raw silk	Wet condition				
3	Degummed silk	Dry condition				
4	Degummed silk	Wet condition				

확인되었으나 감마선 조사선량에 따른 눈에 띄게 절단되거나 균열이 발생하는 등의 표면변화는 확인되지 않았다(Table 2).

3.2. 색상분석

감마선 조사 전·후, 건전과 수침조건에서 감마선을 조사한 생견과 정련견은 모두 선량이 증가할수록 a*값과 b*값이 증가하는 경향을 보였다. 생견 건전시편의 a*값을 대조군과 비교하였을 때, 25 kGy 조사 후 붉은색을 의미하는 +방향으로 0.6 증가하였으며, 50 kGy와 100 kGy 조사 후 1.8 증가하였다. 100 kGy 조사 후 정련견의 a*값을 대조군과 비교한 결과, 건전조건에서는 +방향으로 1.2 증가하였으며 수침조건에서는 +방향으로 3.1 증가하였다. 대조군 대비 a*값의 증가 폭은 건전조건보다는 수침조건에서, 정련견보다는 생견에서 더 크게 나타났다. 감마선 조사선량이 증가할수록 b*값은 +방향으로 노란색으로 색상이 변화하는 경향을 보였으며, 수침상태로 100 kGy 조사한 생견의 b*값의 측정값(1.7)과 대조군 대비 증가폭(2.3)이 가장 높았다(Fig. 1).

색상변화값(△Eab*)에서 1.5 미만은 색채 관리에 통용되는 범위이며, 색차 1.5 이상 3.0 미만은 사람 눈으로 구별할 수 없는 근소한 차이, 3.0 이상부터는 감지할 수 있을 정도의 색차로 일반적으로 분류된다. 대조군과 비교하였을 때, 감마선 25 kGy에서 증가된 명도변화값(△L*)은 전체적으로 50 kGy 조사 후 최소 1.0에서 최대 1.8까지 감소하다가 100 kGy 조사선량에서 증가하는 경향을 확인하였다. 감마선 25 kGy 조사선량에서 색상변화값(△Eab*)은 수침 생견>수침 정련견>건전 정련견>건전 생견 순으로 컸으며, 감마선 50 kGy에서는 수침 생견>수침 정련견>건전 생견>건전 정련견 순으로 큰 변화가 확인되었다. 감마선 100 kGy를 조사한 수침조건의 생견 시편이 7.1로 가장 높았으며, 감마선 50 kGy 선량에서 건전조건의 정련견 시편은 1.5로 가장 낮았다(Fig. 2 and Table 3).

감마선 조사 후 생견과 정련견 모두 건전 또는 수침조건에서 감마선 조사선량이 증가함에 따라 백색도(whiteness)는 감소하고, 황색도(yellowness)가 증가하였

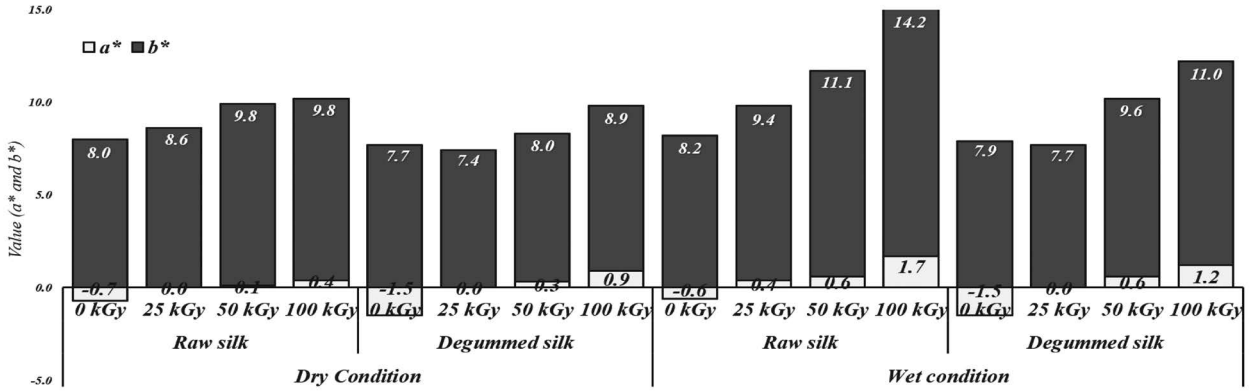


Fig. 1. Result of color change measurement before and after gamma-ray radiation (a* and b*).

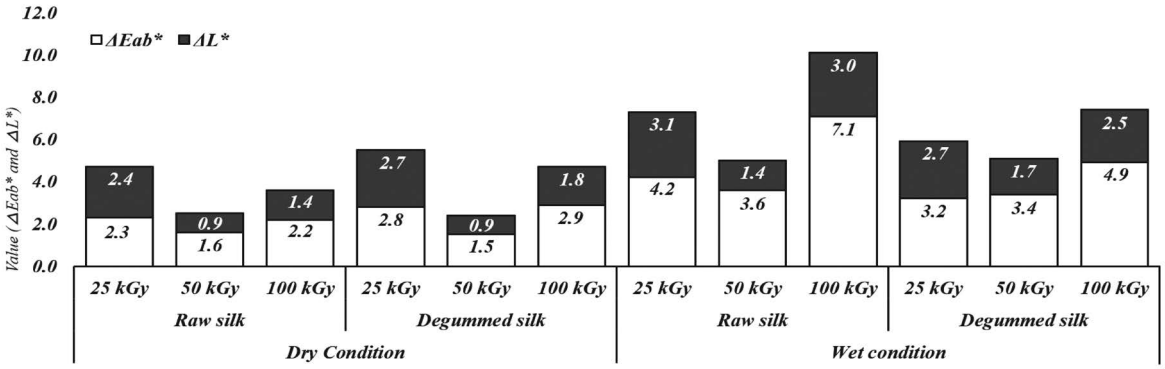


Fig. 2. Result of color change measurement before and after gamma-ray radiation (△Eab* and △L*).

Table 3. Result of the color change (△Eab*) of the raw silk and degummed silk under the dry and wet condition

No.	Sample		Irradiation dose			
			0 kGy	25 kGy	50 kGy	100 kGy
1	Dry condition	Raw silk	−	++	++	++
2	Dry condition	Degummed silk	−	++	++	++
3	Wet condition	Raw silk	−	+++	+++	++++
4	Wet condition	Degummed silk	−	+++	+++	+++

−: trace, +: slight, ++: noticeable, +++: appreciable, ++++: much, +++++: very much

다. 조사선량별 증가하거나 감소하는 경향은 건전 조건에 비해 습윤 조건에서 더 크게 나타났다. 특히, 수침상태에서 감마선을 100 kGy 조사한 생견의 백색도는 대조군에 비해 29.3 감소하였으며, 황색도는 12.2 증가하여 변화폭이 가장 컸다. 반대로 건전상태에서 100 kGy로 조사한 정련견의 경우, 백색도는 8.4 감소하였으며, 황색도는 4.2 증가하였다(Figs. 3 to 4).

3.3. 적외선분광분석

견 섬유의 특징적인 피크인 Amide I과 Amide II를 관찰할 수 있는 1800~800 cm^{-1} 범위 내에서 스펙트럼을 산출하여 비교한 결과는 다음과 같다. Amide I 밴드에서 α 형태인 folded chain 상태의 C=O stretching은 1700~1680 cm^{-1}에서, β 형태인 C=O 신축진동은 1660~1650 cm^{-1}에서 관찰된다. Amide II 밴드에서 α형태의 N-H는

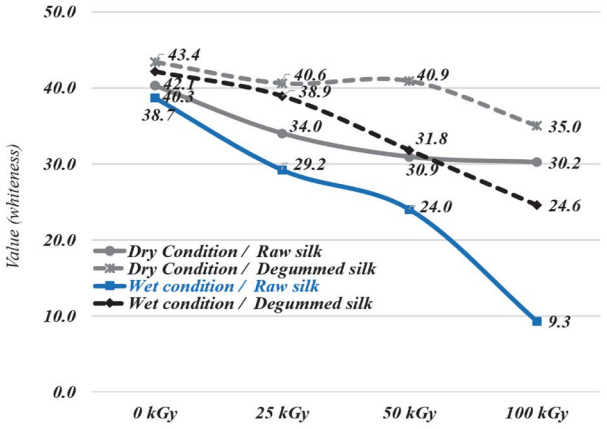


Fig. 3. Result of whiteness measurement before and after gamma-ray radiation.

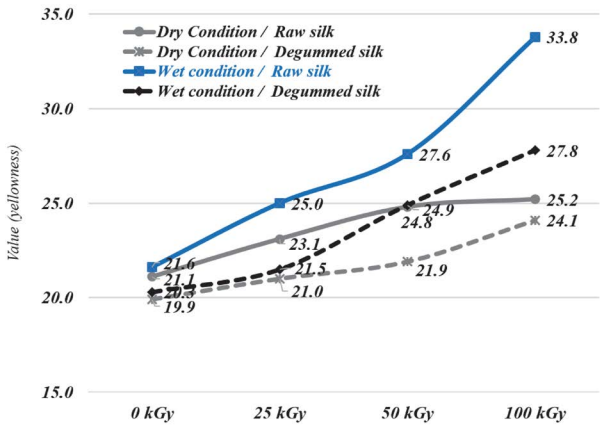


Fig. 4. Result of yellowness measurement before and after gamma-ray radiation.

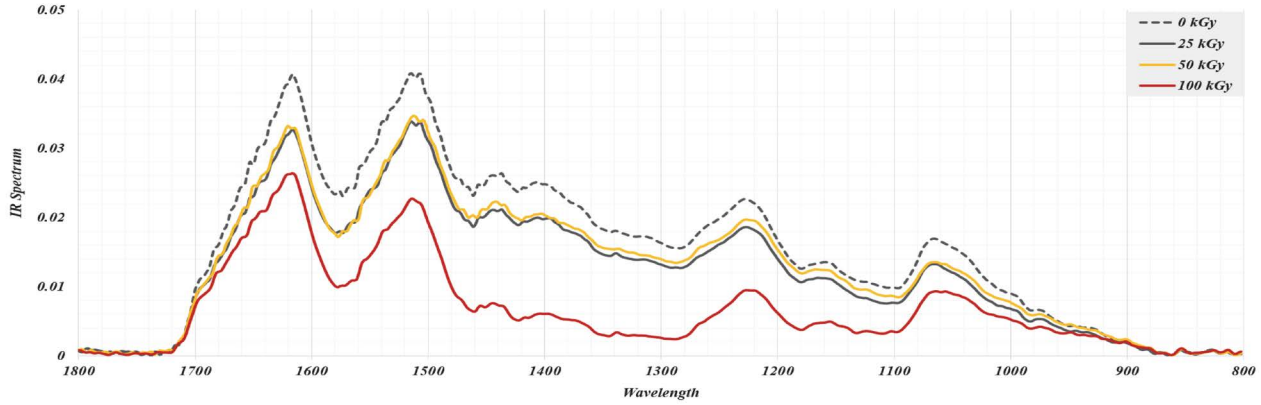


Fig. 5. Result of fourier-transform infrared spectroscopy of raw silk under the dry condition after gamma-ray radiation.

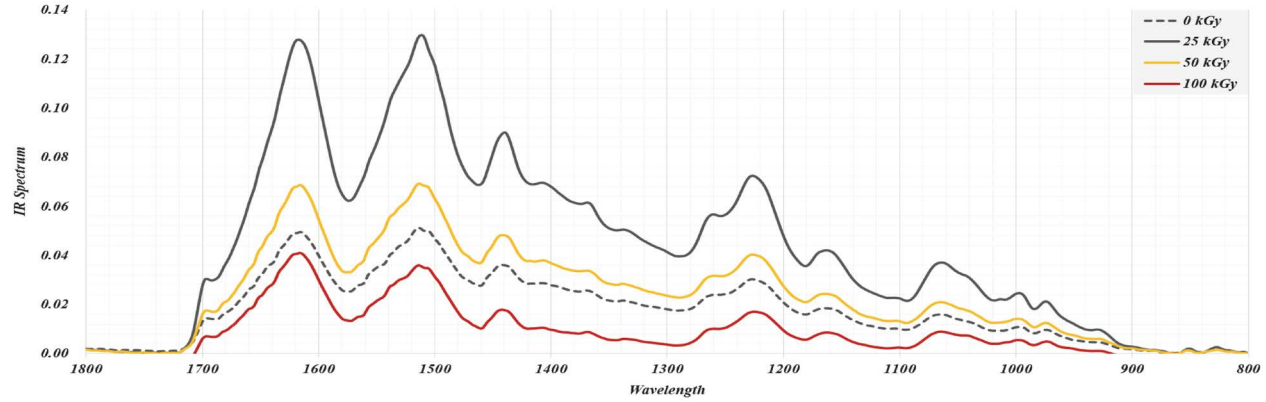


Fig. 6. Result of fourier-transform infrared spectroscopy of degummed silk under the dry condition after gamma-ray radiation.

1680~1620 cm^{-1} 부근에서, β 형태의 N-H는 1550~1540 cm^{-1}에서 확인되었다. 전체적으로 생견보다 정련견의 스펙트럼 내 흡광도가 비교적 높게 측정되었으며, 건전상태에서 감마선을 조사한 생견은 대조군(0 kGy)보다 조사선량이 증가할수록 스펙트럼 내 흡광도가 감소하였으며, 선량에 따른 차이는 확인되지 않았다(Figs. 5 to 8).

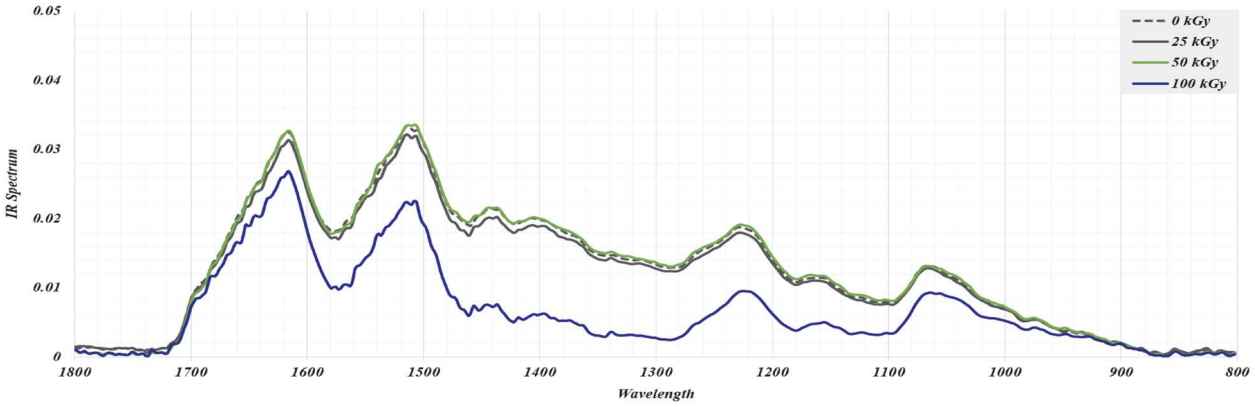


Fig. 7. Result of fourier-transform infrared spectroscopy of raw silk under the wet condition after gamma-ray radiation.

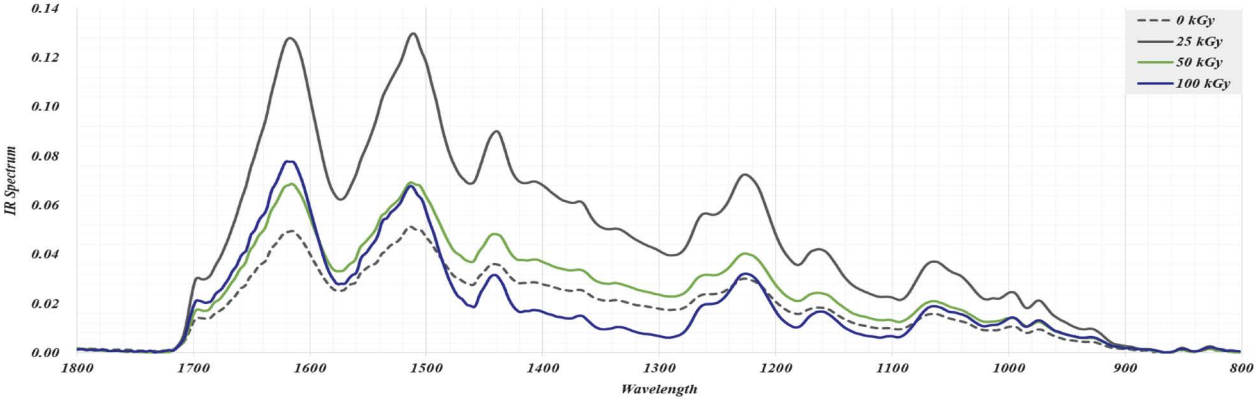


Fig. 8. Result of fourier-transform infrared spectroscopy of degummed silk under the wet condition after gamma-ray radiation.

Table 4. Result of the Amide I / Amide II calculation of the raw silk and degummed silk under the dry and wet condition before and after gamma-ray irradiation

No.	Sample		Irradiation dose			
			0 kGy	25 kGy	50 kGy	100 kGy
1	Raw silk	Dry condition	1.00	0.97	0.96	1.16
2	Raw silk	Wet condition	0.97	0.97	0.98	1.20
3	Degummed silk	Dry condition	0.97	0.99	0.99	1.14
4	Degummed silk	Wet condition	0.97	0.99	0.99	1.15

감마선 조사선량에 따른 생견과 정련견의 Amide I/Amide II 값을 계산한 결과는 다음 Table 4와 Fig. 9와 같다. 흡광도의 비는 최소 0.97부터 최대 1.20 사이로 대조군에 비해 조사선량이 증가할수록 미세하게 증가하였다. 특히, 100 kGy 조사선량에서 가장 높았으나 흡광도의 조건별 최대 차이는 0.23으로 확인되었다. 이는 감마선 조사선량에 따른 폴리펩타이드 1차 구조의 변화가 미세하게 증가하였으나 변화는 거의 없음을 의미한다.

4. 결 론

최근 급격한 기후변화로 인해 세계 각국에서 문화재 피해가 심각해짐에 따라, 국내에서도 문화재를 보존하기 위

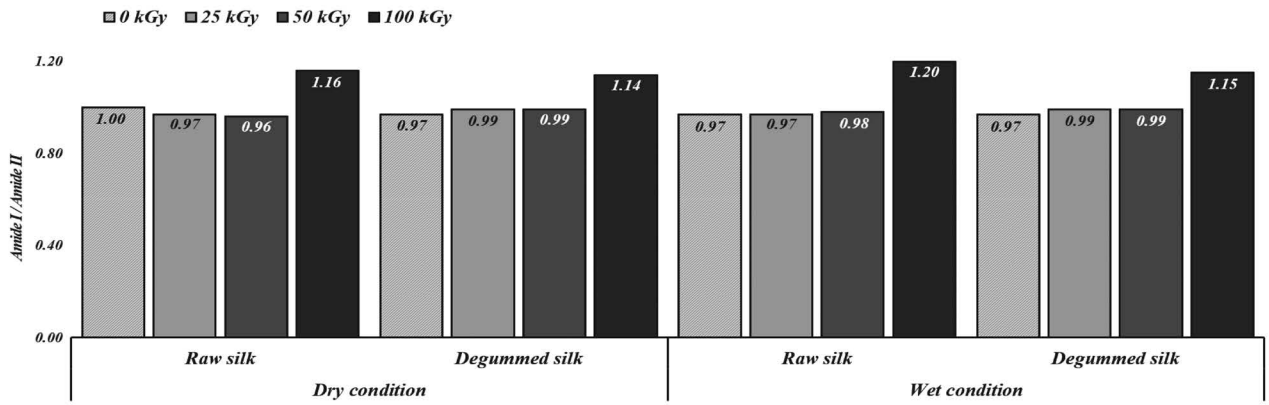


Fig. 9. Result of the Amide I / Amide II index of the raw silk and degummed silk under the dry and wet condition by amounts of gamma-ray irradiation.

해 기후변화에 대한 즉각적인 응급 대응 방안이 필요해 왔다. 근래 지진, 홍수, 전쟁, 화재 및 이상기후 발생으로 인하여 침수 재난 발생 시 생물학적 피해로부터 골든타임 이내로 유기질 문화재의 대용량 소독처리를 위한 매뉴얼에 대한 필요성이 대두되어 왔다. 유럽 문화재 보존 관련 기관을 중심으로 수행되어 온 감마선 방제기술은 대용량 처리가 신속하게 가능하며, 특히 긴급을 요구하는 침수된 문화재에 아주 효과적인 장점이 있다.

Vujcic *et al*.은 0.5~2 kGy에서는 곤충의 사멸되고, 4~10 kGy에서는 곰팡이가 사멸되고, 5~25 kGy의 조사선량에서는 완전하게 오염이 제거된다고 보고하였다[10]. 그러나 일반적으로 감마선에 의한 재질의 영향평가는 1차적으로 고선량으로 조사하지 않는 한 그 차이를 확연하게 확인하기가 쉽지 않다. 따라서 본 연구에서는 수해상황에서 견직물을 대상으로 감마선 생물방제 기술을 적용하기 위해 생견과 정련견의 이화학적 분해 정도를 가시적 및 정량적으로 파악하고자 감마선 조사선량을 0 kGy, 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy로 설정하여 건전과 수침상태로 감마선을 조사한 생견과 정련견의 재질영향 평가를 수행하였다.

육안관찰과 표면관찰 결과, 생견과 정련견은 건전과 수침상태에서 모두 감마선의 선량에 따른 섬유표면과 섬유소의 측면에서 나타나는 형태학적 변화는 관찰되지 않았다. 색상분석 결과, 100 kGy 조사선량에서 수침조건의 생견의 색상변화값(△Eab*)는 7.1로 가장 높게 측정되었고, 50 kGy으로 조사한 건전상태의 정련견의 색차는 1.5로 가장 낮았다. 감마선 조사 후 건전과 수침조건에서 생견과 정련견은 모두 선량이 증가할수록 a*값과 b*값이 증가하는 경향을 보였다. a*값의 증가폭은 건전조건보다는 수침조건에서, 정련견보다는 생견시편에서 더 크게 나타났으며, b*값의 변화폭은 수침상태로 100 kGy로 조사한 생견에서 가장 높게 측정되었다. 조사선량이 증가할수록 b*값이 +방향으로 더 크게 이동하면서 생견과 정련견 모두 감마선 조사에 의해 황변현상이 관찰되었다.

Vujcic *et al*.은 양모, 린넨, 면, 견직물을 염색하지 않거나 천연염료 또는 합성염료로 염색하여 0.5 kGy, 1 kGy, 2 kGy, 3 kGy, 5 kGy, 7 kGy, 10 kGy, 15 kGy, 20 kGy, 25 kGy로 조사하였고, 조사선량이 증가할수록 시편은 전체적으로 어둡게 변색된 결과를 보고하였다[10]. 건전상태로 감마선을 조사한 염색하지 않은 견섬유는 저선량인 5 kGy에서 변화폭이 크다가 5 kGy에서 25 kGy까지 선량이 증가할수록 거의 색상변화값(△Eab*)의 변화가 거의 없었다. 이는 본 논문의 연구 결과 중 건전상태에서 25 kGy로 조사한 생견과 정련견의 색상변화가 2.3, 2.8에서 50 kGy에서는 일부 감소하다가 다시 100 kGy에서 증가되는 경향과 일치하였다. Kavkler *et al*.에 의한 선행연구에서는 열화되지 않은 현대 견섬유를 감마선 6 kGy로 조사한 결과 대조군과 비교하였을 때 색상변화가 확인되지 않았다고 보고하였다[6].

적외선분광분석을 통해 이화학적 구조의 변화를 확인한 결과, 전체적으로 감마선을 조사한 생견보다 정련견의 스펙트럼 내 흡광도가 비교적 높게 측정되었으며, 건전상태에서 감마선을 조사한 생견은 조사선량이 증가할수록 스펙트럼 내 흡광도가 감소하였으며, 선량에 따른 특이적인 차이는 확인되지 않았다. Amide I과 Amide II의 비를 확인한 결과, 선량증가에 따라 미세한 증가폭을 보였으나

폴리펩타이드 1차 구조의 특이적인 변화는 거의 없었다. 이를 통해 견직물을 대상으로 대량 살충살균처리가 가능한 감마선 조사영역의 확대 가능성을 확인할 수 있었다.

본 연구는 감사선 조사선량에 따른 수침된 견직물의 특성변화를 분석함으로써 문화재가 수해로 인해 수침되었을 때 감마선을 이용한 생물방제처리 기준을 수립하는데 기초자료로 활용될 것으로 기대된다. 향후 담수 및 해수에 따른 재질영향 평가를 수행함으로써 생물방제를 위한 감마선 기술의 표준처리 절차가 수립될 것으로 기대한다.

사 사

본 연구는 문화재청 및 국립문화재연구소의 2021년도 문화유산 스마트 보존·활용 기술 개발 사업에 의해 수행되었음(과제명: 동산문화재 재해·재난 대응 응급 보존처리를 위한 방사선 활용 훈증 대체기술 개발- 2세부 방사선 조사에 따른 수침 직물 문화재 영향 연구, 과제번호; 2021A01D07-001, 기여율 100%).

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. Amornthep K, Prateep M, Boonya S, Lertyot T, Rachanee U and Bovornlak O. 2008. Effects of gamma radiation on biodegradation of Bombyx mori silk fibroin. *International Biodeterioration & Biodgradation* **62**(4):487-490.
4. Geba M, Lisa G, Ursescu CM, Olaru A, Spiridon I, Leon AL and Stanculescu I. 2014. Gamma irradiation of protein-based textiles for historical collections decontamination. *J. Therm. Anal. Calorim*. **118**:977-985.
5. Gonzalez ME, Calvo AM and Kairiyama E. 2002. Gamma radiation for preservation of biologically damaged paper. *Radiat. Phys. Chem*. **63**:263-265.
6. Kavkler K, Pucić I, Zalar P, Demšar A and Mihaljević B. 2018. Is it safe to irradiate historic silk textile against fungi?. *Radiat. Phys. Chem*. **150**:101-110.
7. McNamara NP, Black HI, Beresford NA and Parekh NR. 2003. Effects of acute gamma irradiation on chemical, physical and biological properties of soils. *Applied Soil Ecology* **24**:117-132.
8. Sim YO. 2002. 5,000 Years of Korean Textiles. ISAT. 15-18.
9. The National Folk Museum of Korea. 2005. Identification of natural fiber & fur. 61-72.
10. Vujcic I, Masic S, Medic M, Milićević B and Dramicanin M. 2018. The Influence of Gamma Irradiation on the Color Change of Wool, Linen, Silk, and Cotton Fabrics Used in Cultural Heritage Artefact. *Radiat. Phys. Chem*. **156**:307-313.
11. Yao W, Liu Z, Yi H and Wang J. 2011. Structure and mechanical property of silk fiber under gamma radiation. *Adv. Mater. Res*. **175-176**:85-89.