

(뒷면)

(측면)

(앞면)

주 의 (주 의 내 용 기 재) (한글 14 point 고딕체)	재난 피해 종이 기록물의 방사선 소독 처리 적용 연구 및 체계 구축 연구 2 0 2 5 국 가 기 록 원	연구결과 보고서 재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 및 체계 구축 연구 A Study on the Application of Radiation Disinfection Treatment for Disaster-Damaged Paper Records and the Establishment of a System 주관연구기관 : 한국원자력연구원 국가기록원
---	---	--

주 의

1. 이 보고서는 국가기록원에서 시행한 용역연구개발사업의 연구 결과보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 국가기록원에서 시행한 용역연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 아니 됩니다.

제 출 문

국가기록원장 귀하

이 보고서를 “재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 및 체계 구축 연구(한국원자력연구원/박해준)” 과제의 연구결과보고서로 제출합니다.

2025. 11. 28

주관연구기관명 : 한국원자력연구원

주관연구책임자 : 박 해 준

목 차

I. 연구개발결과 요약문

1. 재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 및 체계 구축 연구	1
2. A Study on the Application of Radiation Disinfection Treatment for Disaster-Damaged Paper Records and the Establishment of a System	2

II. 총괄연구개발과제 연구결과

제1장 총괄연구개발과제의 최종 연구개발 목표	3
1. 총괄연구개발과제의 목표	3
2. 연구개발과제의 목표 및 내용	4
제2장 총괄연구개발과제의 최종 연구개발 내용 및 방법	6
제3장 총괄연구개발과제의 최종 연구개발 결과	9
1. 시료 준비	9
2. 시험분석 방법.....	13
3. 방사선 조사에 따른 화학적 조성 변화 확인	16
4. 방사선 조사에 따른 물리적 성질 변화 확인	22
5. 방사선 조사에 따른 색상 변화 확인	33
6. 방사선 조사에 따른 라디칼 생성 확인.....	46
7. 방사선 조사에 따른 소독 효과 확인	50
8. 수침 모의 기록물의 방사선 조사에 따른 소독 효과 확인	58
9. 추가 검토 요청 사항	60
제4장 총괄연구개발과제의 연구결과 고찰 및 결론	67
제5장 총괄연구개발과제의 연구성과	70
제6장 기타 중요 변경사항	72
제7장 참고문헌	73
제8장 첨부서류	73

연구결과보고서 요약문

연구과제명	재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 및 체계 구축 연구		
중심단어	종이기록물, 방사선, 재난대응, 소독처리, 수침		
주관연구기관	한국원자력연구원	주관연구책임자	박 해 준
연구기간	2025. 6. 05 - 2025. 11.30		
기후 위기로 인한 지진, 해일, 홍수 등 대규모 자연재해 시, 생물학적 피해로부터 골든 타임 이내로 기록 문화유산의 긴급 방제 및 보존 처리는 매우 중요한 사안이다. 본 연구에서는 생물학적 제어를 위해 방사선원 3종(감마선, X선, 전자선)을 활용한 방사선 조사 보존 처리를 적용하기에 앞서 종이 기록물에 방사선 조사 시, 그 영향을 확인하고, 실제 방제 효과를 확인하고자 하였다. 시험을 위하여 기록에 주로 사용되는 종이 4종(백상지, 갠지, 한지, 박엽지)을 건조 및 증류수에 모의 수침하여 준비하였으며, 주요 인쇄물 (프린터 토너, 잉크, 스탬프 3종, 인주)를 백상지에 인쇄한 후 표준시험상자 (63.2(W) x 43.7(D) x 15.6(H) cm)에 적재하고 선원 3종을 10, 15, 25 kGy 조사하였다. 방사선 조사 처리 한 종이 샘플의 물리적 변화를 확인하기 위하여 FT-IR, ESR 및 인장강도를 조사하였으며, 인쇄물의 변화를 확인하기 위하여 색차분석을 진행하였다. 한국원자력 연구원의 감마선 이용 수장고 실증시험 (2024.05.29.) 등, 선행 연구 결과에 따라, 곰팡이 2종(<i>Epicoccum nigrum</i>, <i>Cladosporium Sp.</i>)을 임계선량 15 kGy로 설정하여 방제 효과를 확인하였다. 조사 처리한 건조 및 모의 수침 종이 4종의 FT-IR 분석 결과, 화학적 결합 변화는 발생하지 않았다. 인장강도의 경우, 조사선량이 증가함에 따라 인장강도가 감소하는 경향성을 나타내었으나, 25 kGy 이하의 경우 신장율, 최대 하중 등의 변화가 크지 않았다. ESR의 경우, 종이 4종에서 라디칼 발생이 확인되었으나, 박엽지의 경우 라디칼의 발생이 다른 종이 대비 크지 않음을 확인 할 수 있었다. 라디칼에 대한 영향은 향후 장기 추적이 필요할 것으로 생각된다. 모의 수침 인쇄물의 경우, 색차 변화가 거의 나타나지 않았다. 건조 인쇄물의 경우 컨트롤 대비, 조사시에 10 kGy 선량에서 검정을 제외한 컬러 색상의 색차 변화가 확인되었으며, 이는 프린터 토너가 프린터 잉크 대비 더욱 크게 나타났다. 방사선 조사 처리가 완료된 곰팡이 발생 종이를 PDA 배지에 접종한 결과, Control의 경우 곰팡이 2종의 생장이 확인되었으나 방사선 소독처리 된 종이 샘플에서는 곰팡이 발생이 확인되지 않았다. 실험결과, 종이 기록물에 대한 방사선 조사처리의 영향성은 통상 상업 운전 영역인 15-25kGy 이하에서는 거의 없음을 확인 할 수 있었으며, 선원에 따른 차이성도 확인할 수 없었다. 또한 선행 연구 결과와 동일하게 곰팡이 2종에 대한 방제효과를 확인 할 수 있었다. 따라서 수침시 긴급방제를 위한 방사선 조사 처리는 효과적일 것으로 판단된다.			

Summary

Title of Project	A Study on the Application of Radiation Disinfection Treatment for Disaster-Damaged Paper Records and the Establishment of a System		
Key Words	national record, radiation, disaster response, disinfection, water-logged		
Institute	KAERI	Project Leader	Park, Hae-Jun
Project Period	2025. 6. 05 – 2025. 11.30		
Large-scale natural disasters such as earthquakes, tsunamis, and floods pose a substantial risk to documentary cultural heritage. Accordingly, the implementation of emergency disinfection and preservation measures is critical to minimize deterioration. This study aimed to assess the applicability of radiation-based sterilization using three different radiation sources—gamma rays, X-rays, and electron beams—by evaluating the effects of irradiation on paper-based archives and verifying its disinfection efficacy. Four types of paper typically used for archival records (wood-free paper, newsprint, hanji, and tissue paper) were prepared under both dry and simulated water-soaked conditions. Major printing media (printer toner, ink, three stamp types, and stamp-pad ink) were applied to wood-free paper, which was subsequently loaded into a standardized test container (63.2(W) × 43.7(D) × 15.6(H) cm) and irradiated at doses of 10, 15, and 25 kGy using each radiation source. Physical and chemical changes in the irradiated paper samples were examined through FT-IR spectroscopy, ESR spectroscopy, and tensile strength testing. Color-difference analysis was additionally conducted to investigate potential discoloration of printed materials. Based on results from previous studies, two fungal species (<i>Epicoccum nigrum</i> and <i>Cladosporium</i> sp.) were used to evaluate sterilization performance at the threshold dose of 15 kGy. The FT-IR analysis confirmed that no significant chemical bond alterations occurred in any paper type, regardless of water-damage conditions. Tensile strength showed a general decreasing tendency with increasing irradiation dose; however, changes in elongation and maximum load were minor at doses up to 25 kGy. ESR analysis demonstrated the generation of radicals across all paper types, although radical formation was less pronounced in tissue paper compared to the others. Long-term monitoring is recommended to assess potential radical-induced degradation. Color-difference measurements indicated visible changes beginning at 10 kGy, with printed toner exhibiting greater sensitivity than ink. In fungal inactivation testing, growth of both fungal species was clearly observed in non-irradiated controls, whereas no growth occurred in irradiated samples. In conclusion, radiation treatment at commercially utilized dose ranges (≤25 kGy) exhibited negligible adverse effects on paper-based archival materials, and no significant performance variation was observed among the three radiation sources tested. Consistent with prior findings, effective sterilization of the two fungal species was confirmed. Therefore, radiation sterilization is deemed a viable and efficient option for emergency treatment of water-damaged documentary heritage.			

총괄연구개발과제 연구결과

제1장 총괄연구개발과제의 최종 연구개발 목표

1. 총괄연구개발과제의 목표

1.1 연구개발과제의 필요성

- (생물피해 방제책 마련) 현재 기록물 소독은 해충 방제 목적의 저산소법과 IPM법을 통한 모니터링으로 관리되고 있음
 - 일상적인 해충의 보존서고 내 침입 저지는 가능하나 재난 피해와 시스템 고장 등에 의한 생물가해(곰팡이 등 균)에 대한 대응책 부재(침수 시 골든타임 48시간 이내 방제처리 요구됨)
 - 특히 재난 등으로 인한 수침 피해시 곰팡이류 피해 대응책 부재(훈증가스, 저산소법 방제 효과 없음)
- (지속가능성 확보) 1987년 몬트리올 의정서 발효에 따라 2018년부터 메틸브로마이드 훈증제 사용금지
 - 메틸브로마이드 사용금지에 따른 대체 소독제 부재 → 방사선을 이용한 소독처리가 대안 기술로 부상
- (중대재해 대비) 또한 곰팡이 균에 의한 산재(우리나라는 중대재해 해당) 등 중대재해 관련 대책 마련 필요
- (기록물의 보존성 제고) 대형화되고 있는 재난 피해에 국가 차원의 생물피해 방제책을 마련하여 기록물의 보존성 제고
- (해외사례) 프랑스 ARC-Nucleart 연구소는 1970년대부터 감마선 기술을 이용한 고서적 문화재의 보존·복원·멸균처리를 수행해왔으며 이 기술을 바탕으로 이탈리아, 스페인, 포르투갈, 스위스 등 유럽 내의 문화재 보존처리작업 수행 중
 - ※ 이탈리아 도서병리연구소 등에서는 고서적 보존을 위하여 감마선 방제 처리함
 - ※ 프랑스의 ARC-Nucleart는 감마선 기술을 이용하여 람세스 2세 미이라, 지중해 중세 목조선박, 시베리아 매머드 보존처리를 성공적으로 수행함
 - 일본은 쿠마모토 지진 수해와 태풍에 의한 홍수로 인한 종이 기록물 문화유산 곰팡이 가해 발생
 - 감마선 곰팡이 방제처리로 보존 성공
 - ※ 수침 시 전자선 사용 불가(투과력 미약)
 - 48시간 이내(곰팡이 가해 전)대량 진공 동결건조 방법을 통해 기록물을 구조
 - ※ 1972년 미국 뉴욕주에 홍수가 발생하였을 당시 코닝 유리 박물관이 침수되어 진공 동결건조 후 1974년 12월까지 침수 기록물 약 6,500권이 복구
 - ※ 1972년 필라델피아 템플대학교 건물 화재 시 5일간 약 3,500권을 동시에 진공 동결건조 처리 후 복구

2. 연구개발과제의 목표 및 내용

2.1. 연구개발과제의 최종 목표

재난 피해를 입은 종이기록물의 곰팡이 피해를 최소화하기 위하여 48시간 이내 메디컬 디바이스 소독에 널리 사용되고 있는 방사선 소독처리 기술의 도입과 적용성 검토

2.2. 연구개발과제의 내용

- 방사선 소독처리 적용을 위한 수침 피해 종이기록물(백상지, 갠지, 박엽지, 한지 등) 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가
 - 방사선 조사 전후 인장강도 분석, FT-IR분석, 색차도 분석, ESR 분석 수행
 - 수침 종이기록물은 홍수 재난을 가정 완전 수침 상태였던 샘플을 방사선을 조사하며 건조 후 상기 영향평가 각 분석을 진행한다. 이때 침수 전 샘플도 대조군으로 방사선 조사 후 같은 분석을 진행한다.
- 종이기록물에 사용된 인쇄 잉크, 스탬프 잉크, 인주, 접착제 등 인쇄매체에 대한 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가
 - 모사종이 기록물에 잉크, 스탬프 잉크, 인주, 접착제 각각 처리 후 방사선 전후 색차도 분석
- 수침 환경별(뽕, 해수 등 오염 상태별) 종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증
 - 종이기록물에 실제 공시 곰팡이(최소 2종)접종 후 방사선 감염 제어 효과 검증
- 수침된 종이기록물의 생물피해 제어 최적 방사선 Dosimetry algorithm 도출
 - 곰팡이는 선행 연구에서 가장 방사선 내성이 강한 *Cladosporium* 속균 과 *Eppicoco nigram* 균에 대해서 진행
 - 포자보다 균사가 방사선에 대해 강함, 균사를 표준으로 하여 임계선량 설정
 - 공식 Dosimetry 선량계를 이용하여 정량

2.3. 연구개발과제 수행일정 및 주요 결과물

- 수행일정: 계약일로부터 210일
- 주요결과물
 - 한국학술진흥재단 등재지 또는 동급 학술지 등재 논문 1편 이상을 당해 연도까지 투고 완료하고, 2년 이내에 1편 이상 게재

2.4. 총괄연구개발과제의 목표 달성도

당초목표	달성내용	달성도(%)
1. 수침 피해 종이기록물(백상지, 갠지, 박엽지, 한지 등) 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가	● 재난대응 수침 피해 종이류 4종에 대한 평가 완료	• 100
2. 인쇄매체에 대한 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가	● 재난대응 수침 피해 프린트 토너 4종(색상), 잉크 4종(색상), 스탬프 3종, 인주, 먹지에 대한 평가 완료	• 100
3. 종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증	● 곰팡이 감염 제어 효과 확인	• 100
3. 수침 환경별 곰팡이 감염제어 효과 검증	● 증류수, 해수 담수 환경별 제어효과 확인	• 100

[과제 달성 진도 현황]

세부 과제	달성율 (%)										비고
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	
수침 피해 종이기록물(백상지, 갠지, 박엽지, 한지 등) 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가											조사 진행 3 건 검사 진행 3 건
인쇄매체에 대한 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가											조사 진행 3 건 검사 진행 3 건
종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증											조사 진행 2 건 검사 진행 2 건
수침 환경별(땀, 해수 등 오염 상태별) 종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증											조사 진행 2 건 검사 진행 2 건

제2장 총괄연구개발과제의 최종 연구개발 내용 및 방법

1. 연구개발 내용

- 본 연구는 수침 종이 기록물의 방사선 활용 긴급 방제를 위한 선행 연구이다.
- 보존 중인 종이기록물과 같은 모의 샘플을 대상으로 방사선 영향 임계 평가를 진행(감마선, 엑스선 조사)
 - 조사 후 인장강도, 색차, FT-IR, ESR분석을 수행하여 방사선 영향 임계평가
 - 잉크 등 인쇄 매체는 인쇄 후 조사한 다음 색차 분석을 통한 인쇄물 영향 임계 평가
- 이를 기반으로 종이기록물 유해균 모의 집종을 통한 소독 조건 확인한다.
- 구해진 소독 조건을 기반으로 차년도에 권역별 방사선 시설(전국 5개/정읍, 대전, 여주, 음성, 영천)을 활용한 실증시험 방안 및 계획 제시

연구개발 추진내용	연구개발 연차											
	1차년											
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
수침 피해 종이기록물(백상지, 갠지, 박엽지, 한지 등) 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가												
인쇄매체에 대한 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가												
종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증												
수침 환경별(땀, 해수 등 오염 상태별) 종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증												

2. 연구개발 방법

2.1 방사선 임계 평가를 위한 조사 샘플 선정

- 종이 기록물의 종류는 사용율 및 기록물의 특성에 따라, 아래와 같이 설정하였다.
 - 백상지(A4)는 관공서 및 일반 환경에서 가장 많이 사용되는 표준용지로써 기록물을 대표하는 용지로써 샘플로 활용하였다.
 - 갠지는 근현대 서류, 신문 및 관공서에서 주로 활용하는 표준용지로써 근현대 기록물의 특성을 확인하기 위하여 샘플로 활용하였다.
 - 한지 및 박엽지는 상장, 포장, 기록지 등에 다양하게 활용되는 특수 용지로써 특수지의 변화를 확인하기 위하여 샘플로 활용하였다.
 - 모의 수침을 위해 종이 4종을 증류수를 활용하여 처리하였다.
- 인쇄물 조사를 위해 사용률이 높은 인쇄 매체를 아래와 같이 설정하였다.

- 프린터 토너 4종 (CMYK), 프린터 잉크 4종 (CMYK), 스탬프 3종 (흑, 적, 청), 먹지, 인주
- 프린터 토너 및 잉크는 기계식 인쇄물을 확인하기 위하여 선정하였으며, 프린터 장비의 특성상, 원색 잉크를 조합하여 색상을 표현하므로 원색 4종에 대한 색차 평가를 진행하였다.
- 근현대 수기 복사 기록물의 특성을 확인하기 위하여 먹지를 샘플로 선정하였으며, 도장 등의 기록물의 변질을 확인하기 위하여 인주 및 스탬프 잉크 3종을 샘플로 선정하였다.
- 공시균으로서 *Epicoccum nigrum* 과 *Cladosporium sp.*을 선정하였다. *Epicoccum nigrum*은 침수 문화유산을 대상으로 빠르게 퍼지며, 해수 배양 조건에서 방사선에 대한 강한 내성을 가지고 있고, 색소를 분비함으로서 문화유산에 색소 침착을 일으키는 것으로 알려져 있다. 감마선에서 15 kGy에서 멸균치사 임계선량을 갖는다 (Park *et al.* 2023). 한편 *Cladosporium sp.*는 대기 중에 널리 존재하며, 실내 환경에서도 발견되는 균주로 방사선 감수성이 높고 일반적으로 재난 소독의 시험균주로 이용하고 있으므로 선정하였다.

2.2 방사선 임계 평가를 위한 조사 조건 선정

- 건조시료/모의 수침 시료 조건에 해당하는 목표 선량 범위는 아래와 같이 선정하였다.
 - 시료 목표 선량 범위 (min) 10kGy - (max) 100kGy
- 선행 연구로 진행되었던, 감마선 이용 수장고 실증시험 (2024.05.29.) 및 감마선 및 전자선을 이용한 방사선 저항성 곰팡이 제어에 대한 연구 (Radiation Physics and Chemistry, 205 (2023) 110723)에서 *Cladosporium sp.*, 및 *Epicoccum nigrum* 의 사멸 목표 선량인 10 - 25 kGy를 주요 목표 선량으로 설정하였으며, 고선량 하의 영향성을 평가하기 위하여 선량을 50, 100 kGy를 추가 설정하였다.
- 선원에 따른 물리 특성 변화를 확인하기 위하여 2종의 선원 (감마선, x선)을 선정하였다.
 - 감마선 및 X선은 대표적인 전자기파 방사선으로 투과율이 높고, 전리화 반응성이 약하여 안정적으로 사용되는 대표적인 방사선이다. 특히 투과율이 높은 특성으로 인하여 수침된 기록물을 효과적으로 방제할 수 있다. 앞선 선행 연구들의 결과 역시, 감마선 및 X선을 위주로 진행되었으며, 본 연구에서도 표준 방사선으로 사용하였다.
 - 전자선은 입자선의 특징으로 인하여 투과 깊이가 얇기 (밀도 1g/cm³의 물질의 경우 약 5 cm 깊이) 때문에, 수침 환경하에서는 충분히 투과되지 못한다. 그로 인해 수침기록물의 표면만을 살균할 수 있다. 하지만, 전자선 특징으로 인한 물리, 화학적 반응 등 종이에 가하는 영향이 다를 것으로 추정되어 추가 실험을 진행하였다.

2.3 방사선 임계 평가를 위한 검사 방법 설정

○ 방사선 조사 후 종이 및 인쇄물의 물성 변화를 확인하기 아래와 같이 검사 방법을 설정하였다.

- 라디칼 발생 및 잔존 여부를 확인하기 위하여 ESR 분석을 진행
- 방사선 조사로 인한 화학 구조 변화를 확인하기 위하여 FT-IR 분석을 진행
- 방사선 조사로 인한 물리적 강도 변화를 확인하기 위하여 인장강도 분석을 진행

이때 인장강도는 국제 표준 시험법인 TAPPI T 494(펄프 및 종이의 인장강도)에 따라 시료 준비 및 검사를 진행하였다.

- 방사선 조사로 인한 인쇄물의 변색을 확인하기 위하여 색차계 분석을 진행하였다.

○ 방사선 조사 처리를 통한 소독효과 검증을 위하여 *Cladosporium* sp., 및 *Epicoccum nigrum*을 수침 종이에 접종하여 모의 오염 샘플을 준비하였다. 수침 환경에 의한 영향성을 확인하기 위하여 증류수(3차 증류수), 담수(정읍, 용산호), 해수(속초)를 사용하여 수침을 진행하였다. 이때 변수 통제를 위하여 각각의 용수는 멸균하여 사용하였다.

제3장 총괄연구개발과제의 최종 연구개발 결과

1. 시료 준비

1.1 시험 용지

- 1) 백상지 - 제조사 : 한국제지, 평량 : 85 g/m², Lot No. : 5AKR-00145
 - 2) 갱지 - 제조사 : 전주페이퍼, 평량 : 54 g/m², Lot No. : 7530-056-0232
 - 3) 박엽지 - 제조사 : 임성지업사, 평량 : 14 g/m², Lot No. : 추적불가 (해외수입)
 - 4) 한지 - 제조사 : 오성지업사, 평량 : 80 g/m², Lot No. : 2025.02.15. (생산일자)
- ※ 박엽지 및 한지의 경우, 제조 및 유통사에 확인하였으나, 별도의 Lot. 관리를 하지 않아 확인 불가함.
한지의 경우 생산 일자 확인 후, 해당 일자를 기록함

1.2 방사선 조사 및 조사 시료 준비

- 감마선 조사는 한국그린피아기술에서 감마선을 조사하였다. 그린피아기술은 자동형조사가 가능한 캐비닛을 34대 보유하였으며, 감마선 이용 수장고 실증시험 (2024.05.29.) 선행연구를 통해 안정적인 대용량 조사가 확인된 조사 시설이다(Fig 6.). 선행 연구 결과 형조사 1회 당 5 kGy의 선량 조사가 확인되었다. 전자선 및 X-선은 한국원자력연구원 첨단방사선연구소 내 전자선 조사 시설에서 조사하였다. (Fig 1). 정읍 전자선 실증 시설의 경우, 10 Mev 선원 출력을 통한 전자선 조사를 진행 할 수 있으며, X-선 컨버터를 통해 최대 7.5 Mev, 12 kGy/h의 출력으로 조사 가능한 시설이다. 동산문화유산 재해·재난 대응 응급 보존처리를 위한 방사선 활용 훈증 대체기술 개발 선행 연구 결과, 전자선의 경우 30 kGy/h로 선량이 확인되었으며, X-선의 경우 12.5 kGy/h의 선량이 확인되었다.
- 각 종이 샘플은 지퍼백에 담아 밀봉하고, 모의 수침 샘플에는 증류수를 30 mL 투입하여 모의 수침을 진행하였다(Fig 2).
- 인장강도 측정용 샘플의 경우 TAPPI T 494 (펄프 및 제지의 인장강도)시험 규격에 따라 25.4 x 254 mm 크기로 절편으로 절단한 후, 각 5매씩 지퍼백에 넣고 종이 샘플과 동일하게 처리하였다(도 3).
- 인쇄 매체의 영향을 측정하기 위하여 2 x 2 cm의 표를 작성한 후, 프린터 및 스텝프를 사용하여 각 칸에 샘플을 인쇄하였다(Fig 4).
- 안정적인 조사를 위하여, 표준 상자 하단에 건조 샘플 및 모의 수침 샘플을 적재하고, 그 위로 인쇄물 샘플 및 곰팡이 샘플을 적재한 후, 목표 선량에 맞추어 방사선 조사를 실시하였다(Fig 5, 6).



Fig 1. 한국원자력연구원 내 전자선 및 X-선 조사 시설



Fig 2. 건조 및 모의 수침 종이 샘플

Fig 3. 인장강도 측정용 종이 절편



Fig 4. 인쇄 매체 시험용지

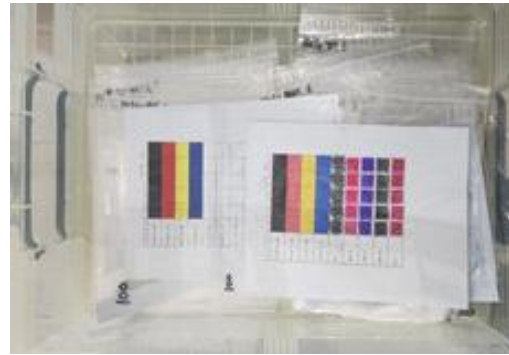
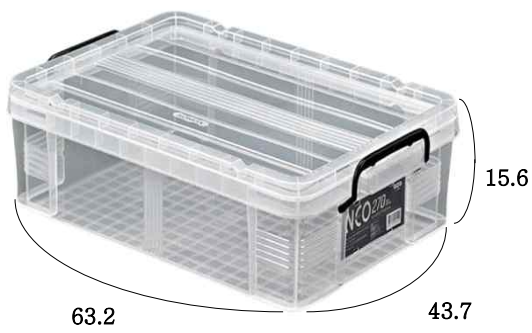


Fig 5. 표준상자 규격 및 샘플 적재



Fig 6. 그린피아기술(주) 방사선 조사 시설 및 조사 샘플

1.3. 샘플 건조

- 조사가 완료된 모의 수침 샘플의 지퍼백을 열고 내부 여액을 버린 후, 건조기에 넣어 완전히 건조하였다(도 7).
- 건조가 완료된 종이 샘플을 한 장씩 떼어낸 후 ESR, FT-IR 및 인장강도 시험을 진행하였다.



Fig 7. 종이 샘플 건조

1.4. 방사선 소독 효과 검증용 샘플 제작

- 선행연구에 따라 공시 곰팡이 균주로 *Cladosporium* sp., 및 *Epicoccum nigrum*을 선택하였다.
- 종이의 모의 수침 상태를 재현하기 위하여, 증류수, 담수, 해수를 준비한 뒤, 다른 균의 영향을 제거하기 위하여 멸균하였다.
- 종이 4종을 5 x 5 cm 크기로 자른 후, Petri dish에 넣고 증류수, 담수, 해수를 10 mL 가하여 수침하였다.
- 활성화된 *Cladosporium* sp., 및 *Epicoccum nigrum*의 배지를 일부 채취하여 수침된 종이 위에 얹고 일주일간 활성화 시켰다(Fig 8, 9).
- 활성화된 *Cladosporium* sp.의 경우, 검정 군사에 의한 오염 및 포자에 의한 오염이 확인 되었으며, *Epicoccum nigrum*의 경우, 색소 침착으로 인한 종이의 변색 및 수침수의 오염이 확인되었다.

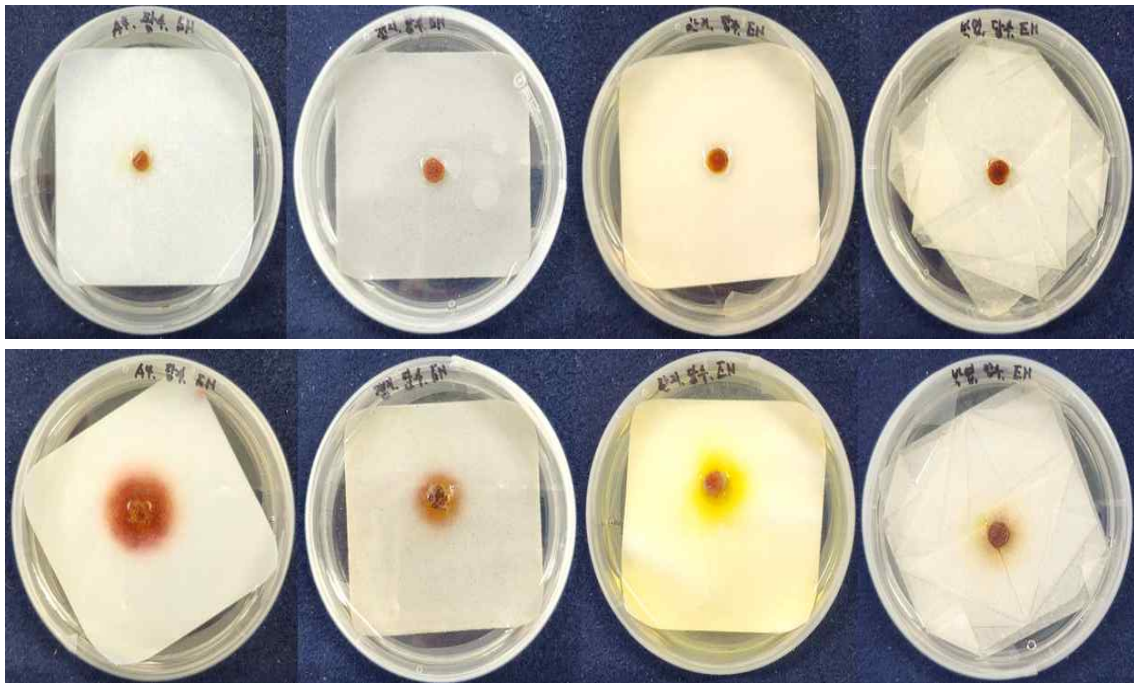


Fig 8. *Epicoccum nigrum* 접종 직후 및 접종 7일 후

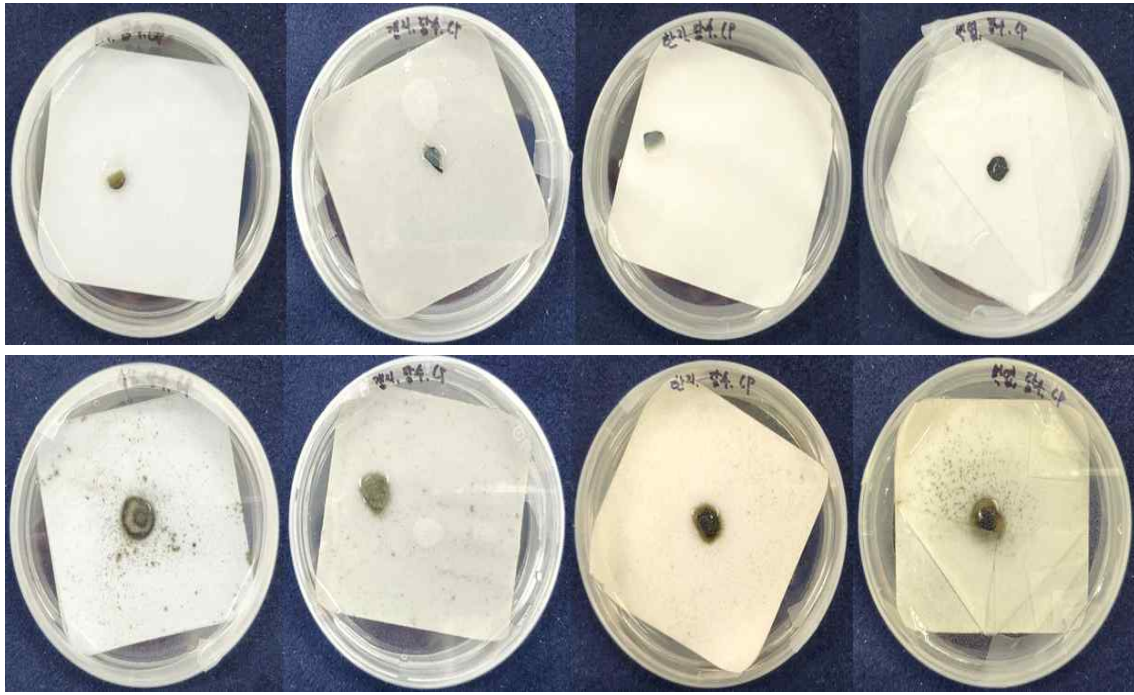


Fig 9. *CCladosporium* sp. 접종 직후 및 접종 7일 후

2. 시험 방법

2.1. FT-IR 분석

1) 분석 장비 : VARIAN 640-IR, Agilent, USA

2) 분석 방법

- 적외선 분광분석(Fourier Transform Infrared Spectroscopy)을 통한 성분분석법은 스펙트럼의 주요 흡수대와 특성 진동수를 비교하여 화학적 특성을 확인할수 있는 방법이다.
- IR Source에서 발생한 적외선 레이저가 샘플에 반사되며 감소된 흡광도를 측정한다.
- IR의 흡광도는 화학 구조에 따른 고유한 흡광 패턴을 보인다. 이를 통하여 방사선 조사처리된 종이를 IR로 분석 시, 화학 구조가 변하였다면 흡광 Peak의 변화가 발생하게 된다.
- 흡광 Peak 패턴의 변화 여부를 확인하여 화학적 조성 변화가 발생하는지를 확인한다.

3) 분석 조건

- Spectrum Range : 500 - 4000cm⁻¹
- Scan time : 32회

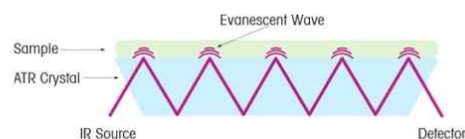


Fig 10. FT-IR ZnSe 샘플 로더 및 분석 원리

2.2. 인장강도 분석

- 1) 분석 장비 : 마이크로 재료시험기(INSTRON 5848, INSTRON, UK)
- 2) 분석 방법
 - 인장 강도를 테스트하고 싶은 샘플을 테스터기에 걸고 일정 속도로 한쪽 끝을 당겨가며 샘플에 걸리는 힘 (N)을 측정한다.
 - 샘플의 파괴 시점까지의 하중, 신장 길이를 측정하고, 파괴 시점에서 최대 하중, 인장강도, 탄성율 등을 측정한다.
 - 인장강도의 각 수치 변동을 확인하여 방사선 조사 전, 후의 차이를 확인한다.
- 3) 분석 조건
 - TAPPI T494 조건에 따라 시험
 - 신장 속도 : 20 mm/min

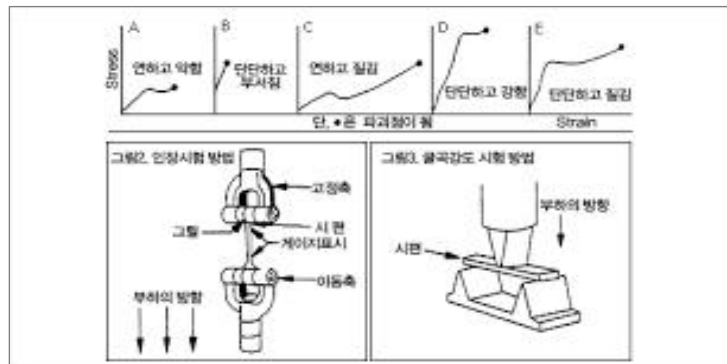


Fig 11. 만능인장강도기를 활용한 인장 강도 측정

2.3. 색차 분석

- 1) 분석 장비 : 색차분석계 (CM-3600A, Konica Minolta sensing, JPN)
- 2) 분석 방법
 - 색차계에 Control 샘플의 색도($L^*a^*b^*$) 값을 측정 한 뒤, 기준점으로 설정하며, 측정 값은 명도지수 L^* , 색좌표 지수 a^* , b^* 값으로 나타내었다
 - 조사 완료된 샘플의 L^*, a^*, b^* 값을 측정 한 뒤 변화된 ΔL , Δa , Δb 값을 확인한다.
 - CIE 2000 색차계 기준에 따라, 색차(ΔE) 값을 측정한다.

$$\Delta E = \sqrt{(L^*_1 - L^*_2)^2 + (a^*_1 - a^*_2)^2 + (b^*_1 - b^*_2)^2}$$

(이때, L^*_1 , a^*_1 , b^*_1 은 초기 L^* , a^* , b^* 의 값, L^*_2 , a^*_2 , b^*_2 의 값은 변화된 L^* , a^* , b^* 의 값)

- 3) 분석 조건
 - 측정 Mode : Reflection, SCI mod (반사광 측정)

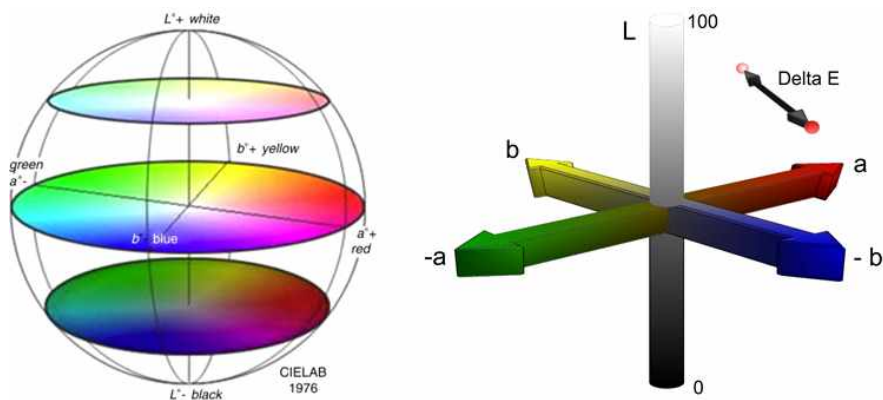


Fig 12. CIELAB 색차공간 및 ΔE 측정 방법

2.4. ESR 분석

1) 분석 장비 : FA-200 (Jeol, Japan)

2) 분석 방법

- ESR 분석을 통하여 방사선 조사 후 종이 내 라디칼 발생을 확인하고자 하였다.
- 라디칼은 높은 반응성으로 인하여 고분자 결합을 분해하는 등 장기적인 영향성을 가할 수 있다.
- 라디칼을 검출 할 수 있는 ESR 분석을 통해 방사선 조사 전 후, Peak 변화를 통해 라디칼 발생 여부 및 그 강도를 확인한다.

3) 분석 조건

- Power : 1 mW
- Scan time : 2 min, Time constant : 0.1



Fig 13. ESR(Electron Spin Resonance analysis equipment)

2.5. 방사선 소독 효과 검증 분석 방법

- 멸균된 용수 3종 (증류수, 담수, 해수)으로 모의 수침한 종이 4종에 미리 활성화 시킨 곰팡이 2종 (*Cladosporium* sp. 및 *Epicoccum nigrum*)을 접종한 후, 일주일간 상온에서 배양하여 활성화시킨다.
- 활성화한 배지를 감마선 및 X선 15 kGy로 소독처리를 진행한다.
- 소독처리를 하지 않은 Control 샘플 및 소독처리를 진행한 샘플에서 종이 시료를 채취한 뒤, PDA 배지에 재접종 한다.
- PDA 배지 위의 샘플에서 곰팡이의 발생 여부를 육안으로 확인한다.

3. 방사선 조사에 따른 화학적 조성 변화 확인

3.1 감마선 조사 종이의 FT-IR 분석 결과

- FT-IR 분석 결과 선량에 관계 없이, 흡광 패턴의 차이가 발생하지 않았다. 이는 종이의 셀룰로오스 분자구조가 방사선 조사에 안정적이기 때문으로 추정된다.
- 감마선 조사 후에도 종이의 적외선 흡광 패턴의 차이가 발생하지 않았다. 선원의 차이는 종이에 유의미한 영향을 주지 않은 것으로 판단된다.
- 각 선량 및 선원 별, 건조 종지와 모의 수침 종지의 흡광 패턴에는 변화가 발생하지 않았다. 수침의 유무에 따른 방사선 감응도 차이는 없는 것으로 판단되며, 수침된 종지의 방사선 조사는 안정적인 것으로 판단된다.
- 감마선 조사 백상지 및 박엽지, 전자선 조사 종이 4종의 FT-IR 데이터에서 2369cm^{-1} 의 위치에서 Peak이 확인되었으나, 이는 대기 중의 이산화탄소로 인하여 생긴 일시적인 Peak으로 판단된다.
- 선량 및 선원과 무관하게 흡광율의 변화가 발생하였으나, Peak의 패턴에는 변화는 확인되지 않았다. 이는 종이의 두께, 건조 상태 등에 따라 적외선의 흡광 정도가 변하였기 때문으로 판단된다.

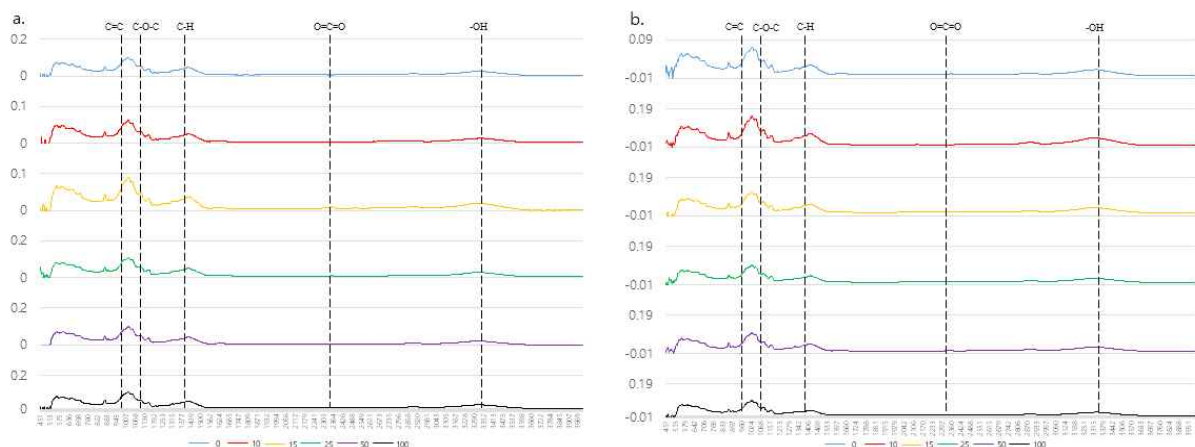


Fig 14. 감마선 조사 백상지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조 b. 모의 수침)

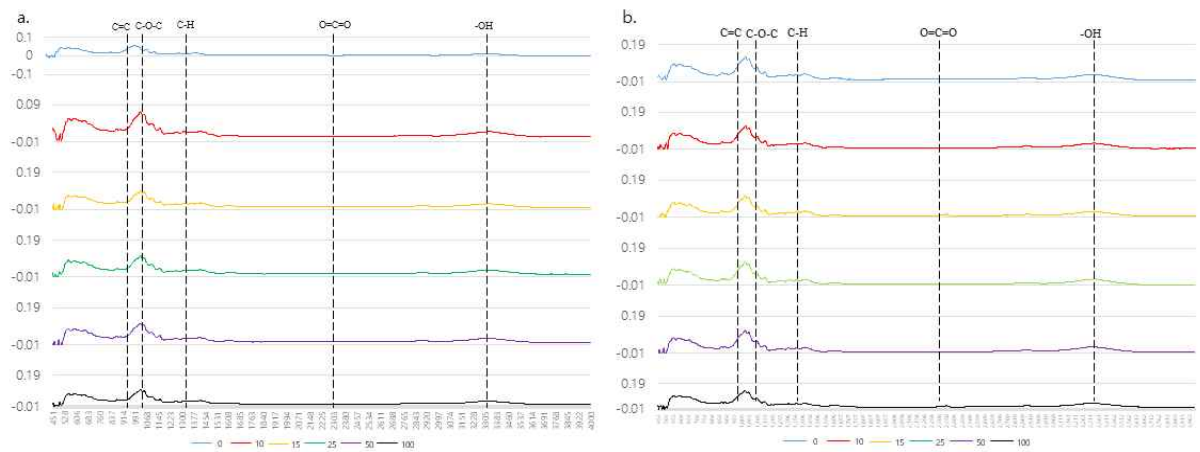


Fig 15. 감마선 조사 갱지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조 b. 모의 수침)

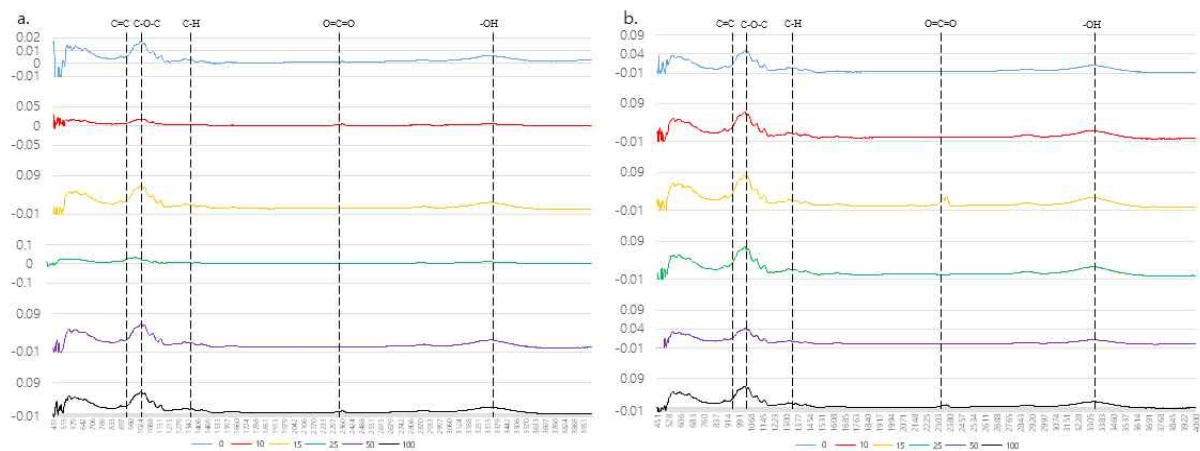


Fig 16. 감마선 조사 박엽지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조 b. 모의 수침)

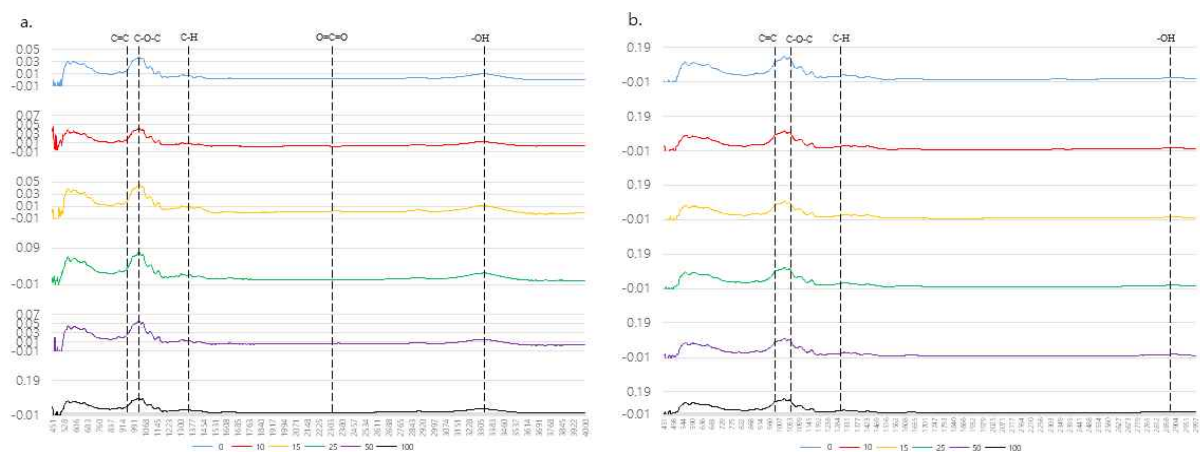


Fig 17. 감마선 조사 한지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조 b. 모의 수침)

3.2 전자선 조사 종이의 FT-IR 분석 결과

- 전자선 조사 샘플의 분석 결과 선량에 관계 없이, 흡광 패턴의 차이가 발생하지 않았다. 이는 종이의 셀룰로오스 분자구조가 방사선 조사에 안정적이기 때문으로 추정된다.
- 감마선과 비교 결과, 선원간의 유의미한 흡광 패턴 차이는 확인할 수 없었다. 이는 감마선과 동일하게 전자선 또한 종이의 화학 구조를 변화시키지 않았기 때문으로 판단된다.

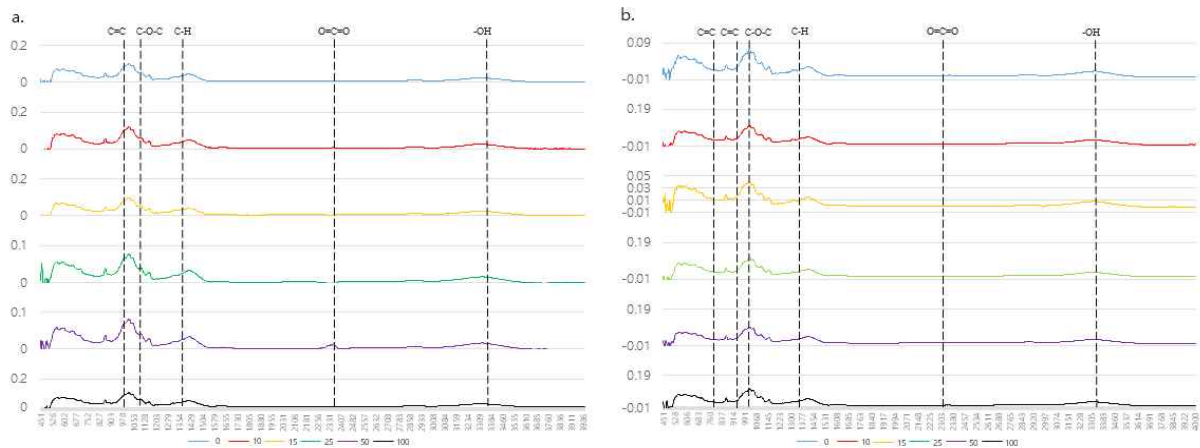


Fig 18. 전자선 조사 백상지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

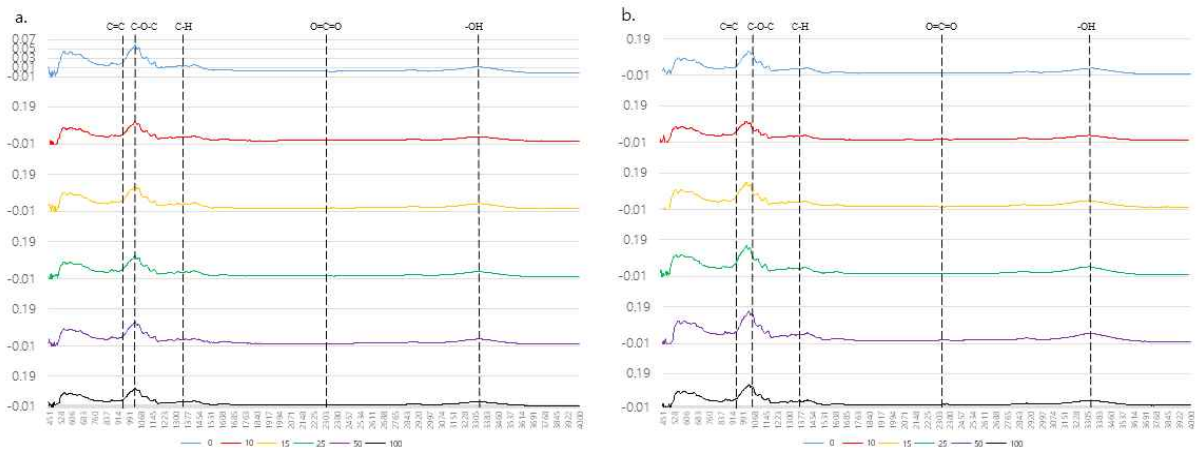


Fig 19. 전자선 조사 갱지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

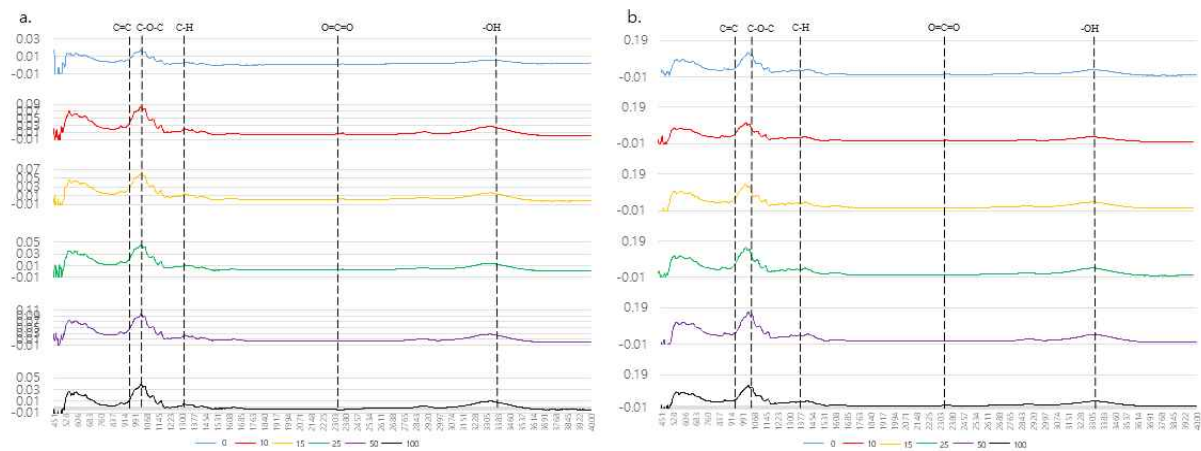


Fig 20. 전자선 조사 박엽지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

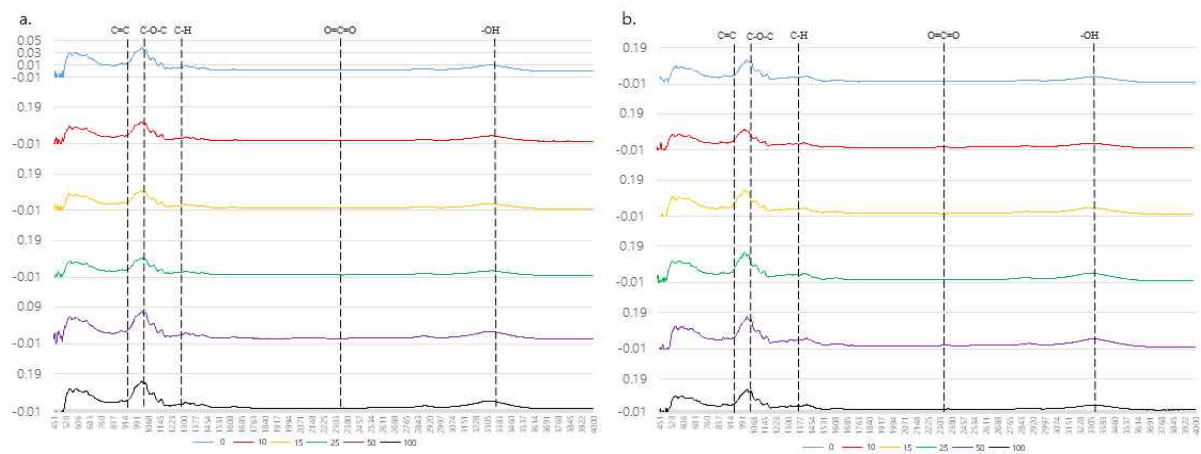


Fig 21. 전자선 조사 한지 FT-IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

3.3 X-선 조사 종이의 FT-IR 분석 결과

○ X선 조사 결과, 감마선 및 전자선과 동일하게 별도의 흡광 패턴에 변화는 확인되지 않았다. 결론적으로 방사선의 선원 및 선량은 종이의 화학 구조에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

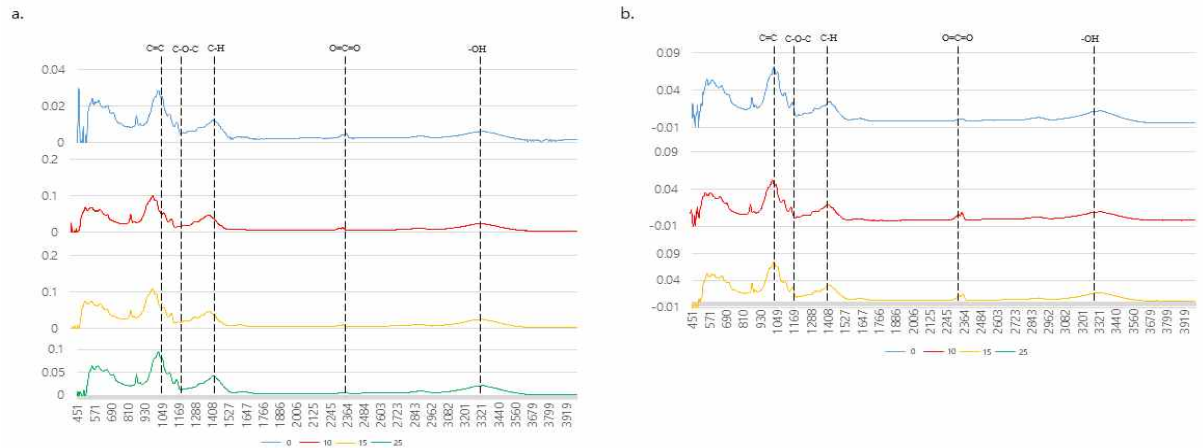


Fig 22. X-선 조사 백상지 FT_IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

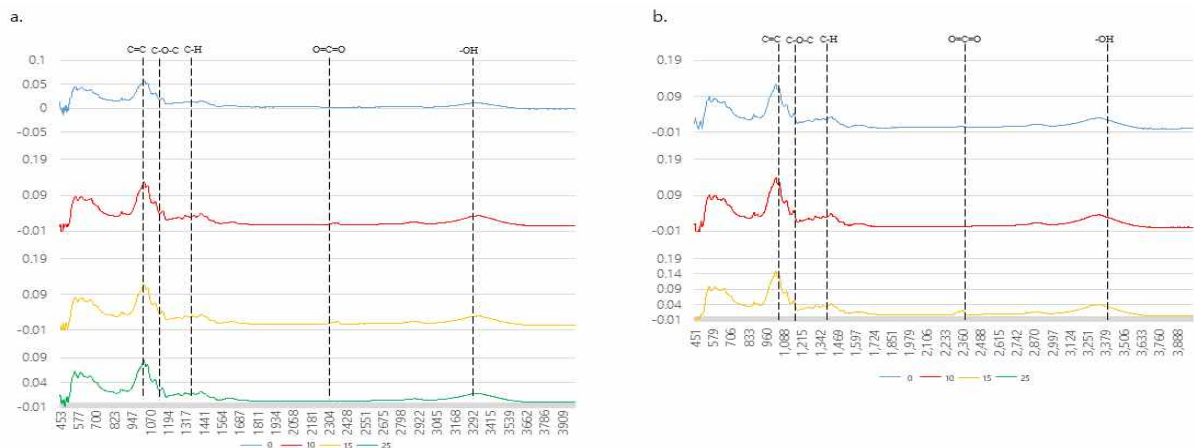


Fig 23. X-선 조사 갱지 FT_IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

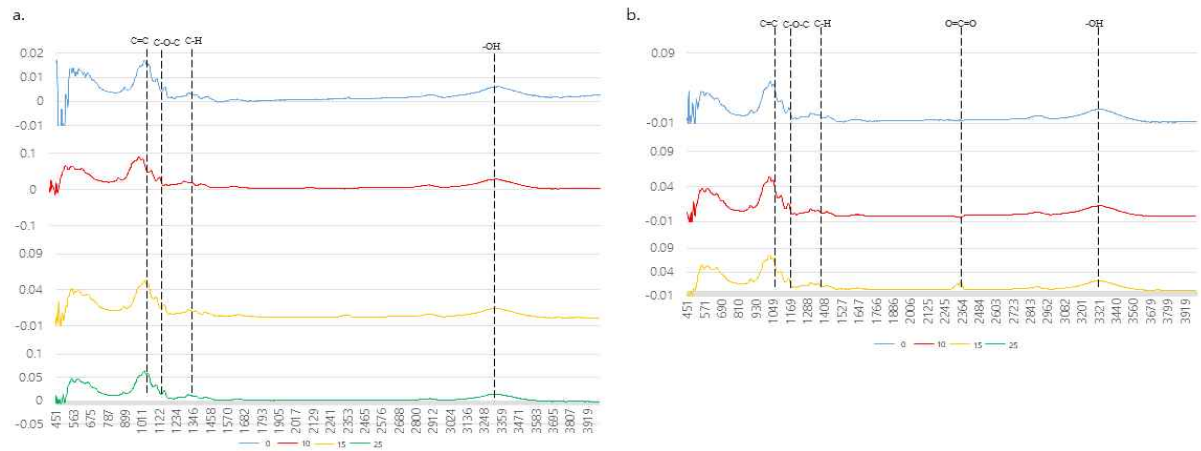


Fig 24. X-선 조사 박엽지 FT_IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

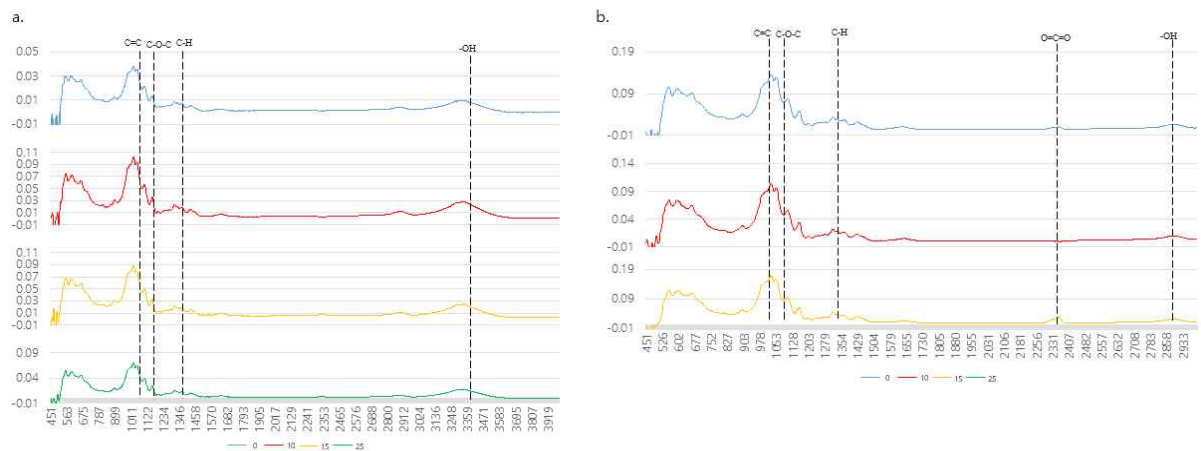


Fig 25. X-선 조사 한지 FT_IR 분석 결과 (a. 건조, b. 모의 수침)

- 위의 결과를 검토하였을 때, 선원 및 선량에 관계 없이 방사선 조사로 인한 종이 샘플의 화학 구조의 변화는 발생하지 않는 것을 확인하였으며, 방사선 조사로 인한 화학 구조의 변화는 없는 것으로 판단된다.
- 모의 수침된 종이에 방사선을 조사한 경우에도 건조 상태와 동일한 FT-IR 흡광 패턴을 확인 할 수 있었다. 이를 통해 실제 수침된 종이에 방사선 조사를 진행하는 경우에도 종이의 화학 구조 자체에 영향을 주지 않을 것으로 판단된다.

4. 방사선 조사에 따른 물리적 성질 변화 확인

4.1 감마선 조사 샘플의 인장강도 변화

- 시편의 제조 및 시험 방법은 TIPPA T 494 시험법에 따라 진행하였으며, 종이 결은 MD(Machine Direction) 방향으로 진행하였다.
- 감마선 조사 건조 종이 샘플은 선량에 따라 최대 하중, 응력, 신장률, 파괴 시 최대신장률이 감소하는 것을 확인 할 수 있었으며, 25 kGy 이하에서는 10% 이하의 감소율을 보였으며, 50 kGy 이상에서는 20 - 30%의 감소율을 보였다.
- 조사선량에 따른 건조 종이의 인장강도 감소 폭은 박엽지, 한지, 갱지, 백상지 순으로 높게 나타났다.

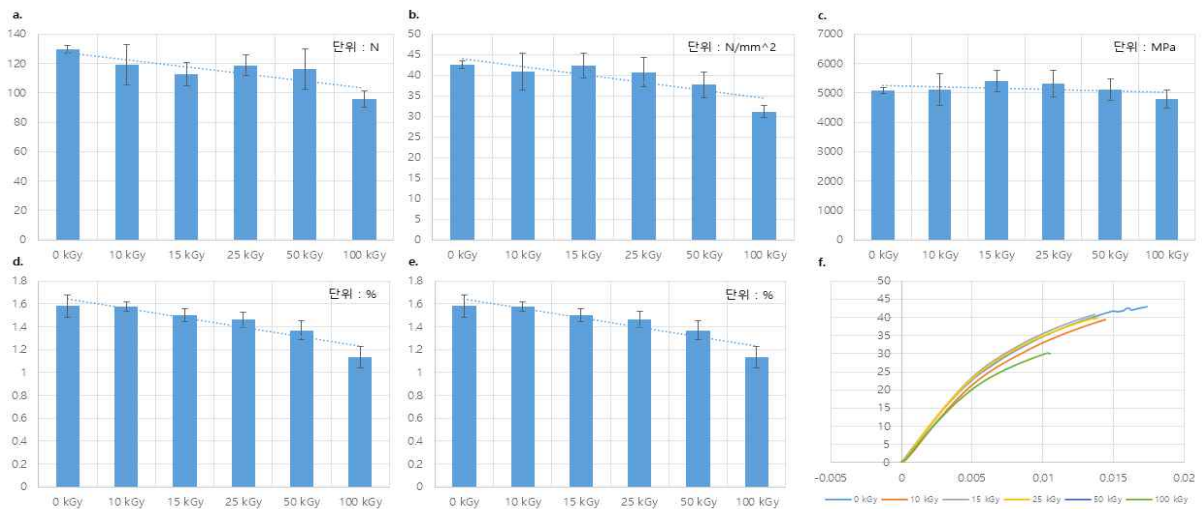


Fig 26. 감마선 조사 건조 백상지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

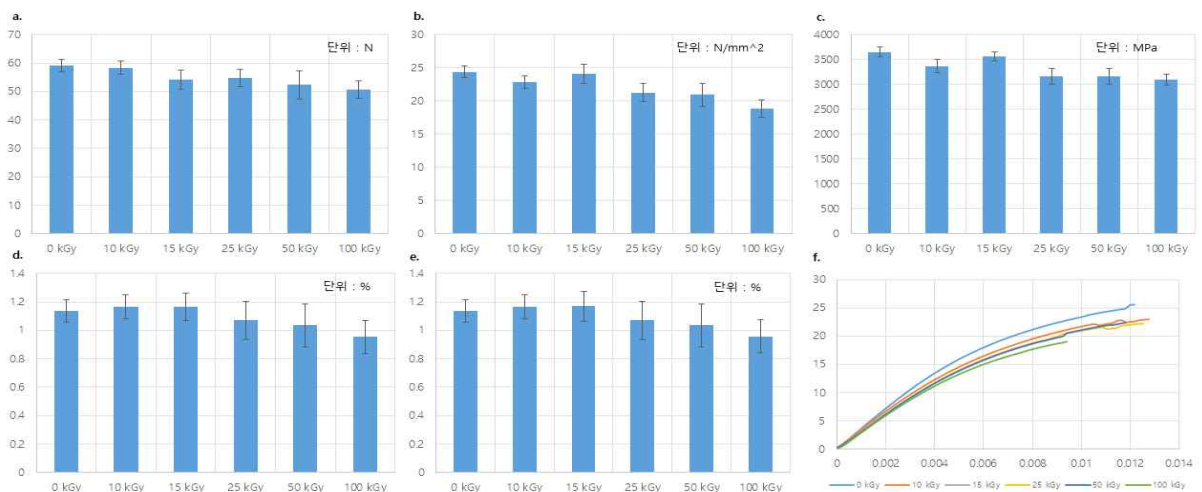


Fig 27. 감마선 조사 건조 갱지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

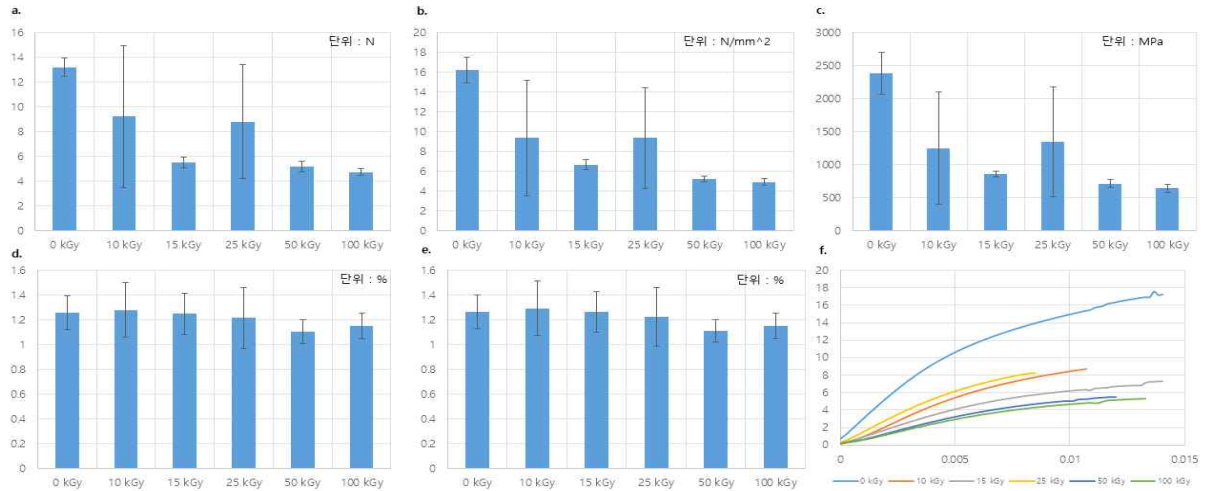


Fig 28. 감마선 조사 건조 박엽지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

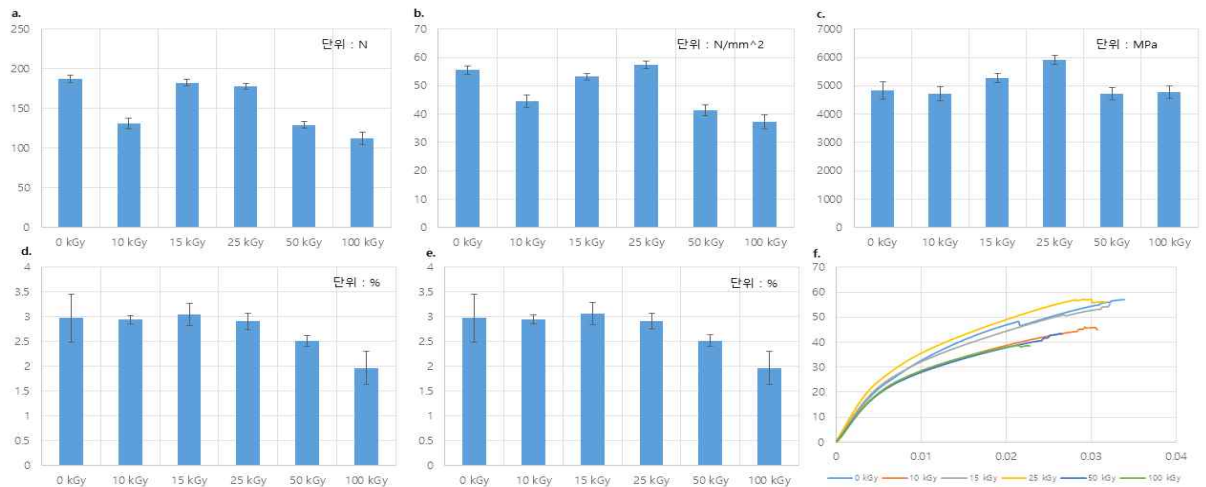


Fig 29. 감마선 조사 건조 한지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

- 감마선 조사 모의 수침 백상지 및 모의 수침 갱지의 경우, 건조 백상지 및 건조 갱지 대비 인장강도가 약 30% 감소하였으나, 모의 수침 한지의 경우 건조 한지 대비 인장강도의 감소는 없었다.
- 모의 수침 백상지의 경우 10 kGy 조사 시, 인장강도가 급격히 감소하는 경향성을 보였으며, 15 kGy 이상에서는 추가 인장강도의 감소는 없었다.
- 모의 수침 갱지의 경우 0 kGy 대비 25 kGy까지 인장강도가 증가 되었으나, 50 kGy 이후 15%까지 인장강도가 감소됨을 확인하였다.

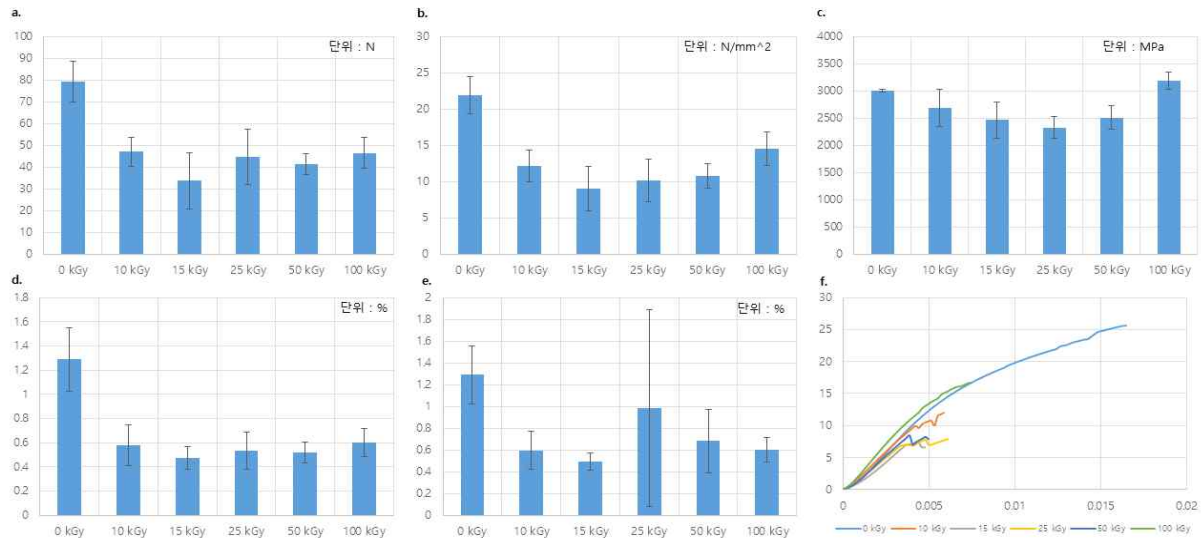


Fig 30. 감마선 조사 모의 수침 백상지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

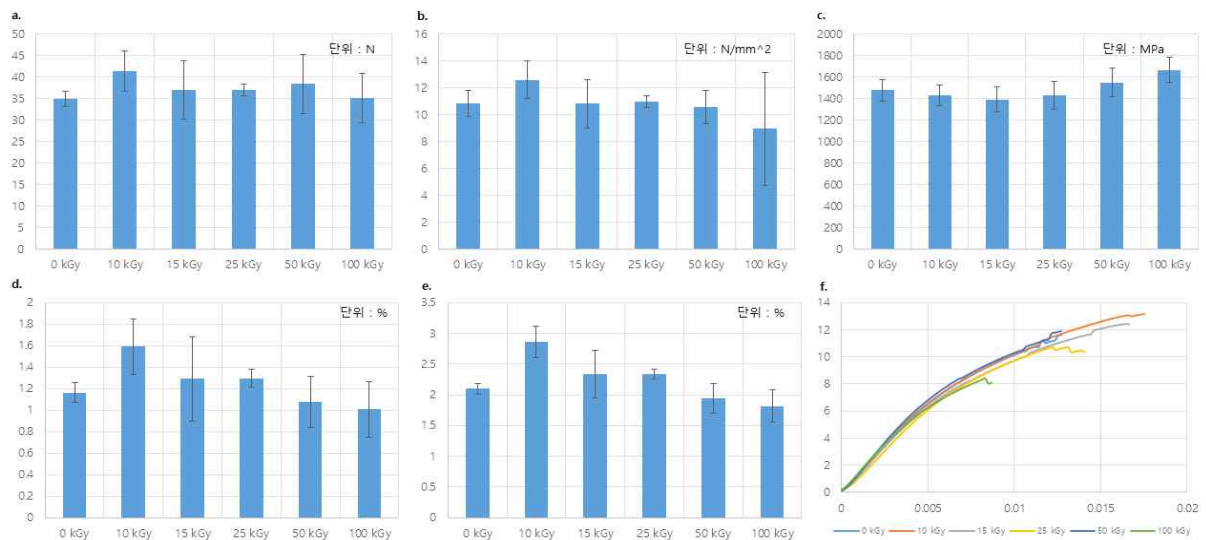


Fig 31. 감마선 조사 모의 수침 갱지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

○ 모의 수침 한지의 경우 건조 한지와 동일하게 50 kGy 이상 방사선을 조사하였을 때 인장강도가 감소하는 경향성을 보였다.

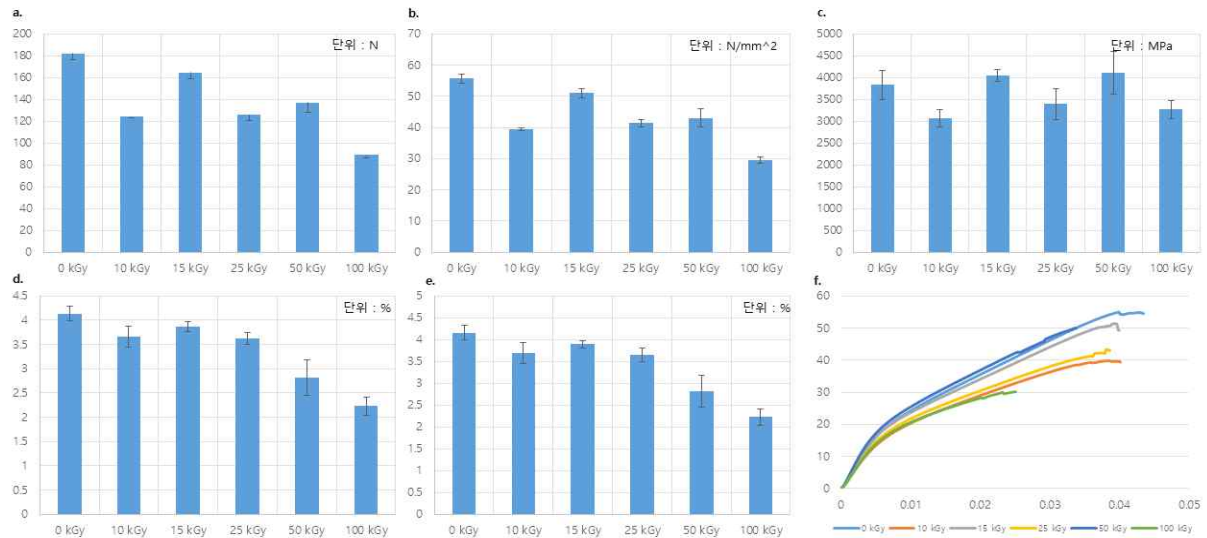


Fig 32. 감마선 조사 모의 수침 한지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

○ 모의 수침 박엽지의 경우, 조사 후, 인장강도가 50% 감소하는 경향성을 보였다.

○ 신장율 및 응력의 경우 0 kGy 대비 15 kGy까지 인장강도가 증가 되었다가 이후 감소하는 경향성을 보였다. 이는 일부 성분의 중합으로 인하여 발생하는 현상으로 판단된다.

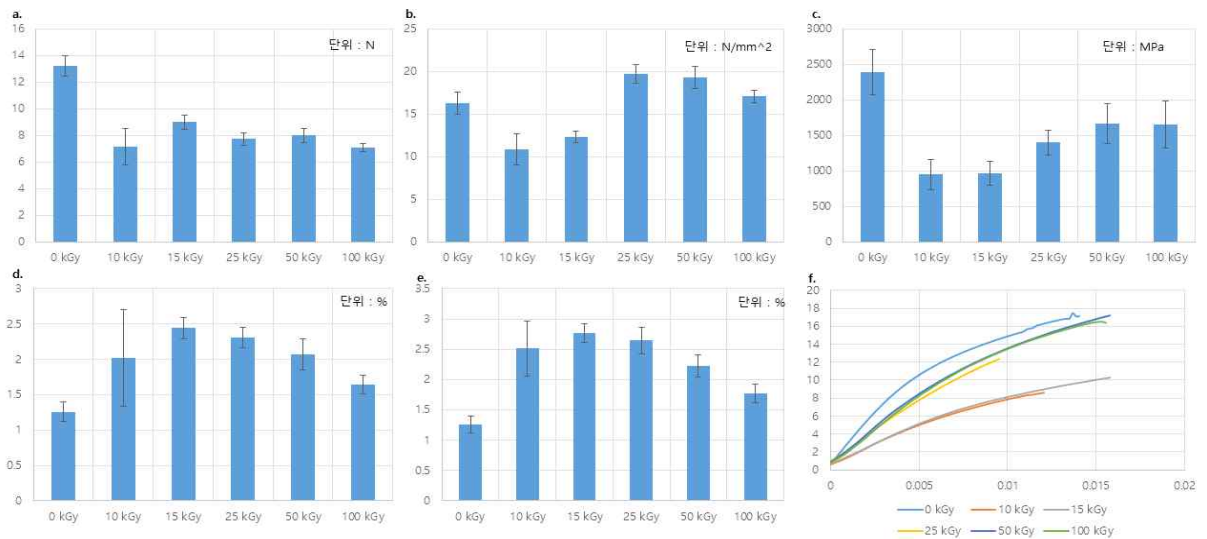


Fig 33. 감마선 조사 모의 수침 박엽지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

4.2 전자선 조사 샘플의 인장강도 변화

○ 전자선 조사 건조 종이 샘플의 경우, 백상지 및 한지에서는 50 kGy 이상 선량에서 강도가 15% 이상 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 박엽지의 경우 10~50 kGy에서 인장강도가 10% 정도 증가하다가, 100 kGy에서 30%의 인장강도 감소를 확인할 수 있었다. 갯지의 경우, 선량에 관계 없이 인장강도가 거의 변화하지 않았다. 이러한 결과는 전자선 조사로 인한 중합반응이 인장강도를 보강한 것으로 판단된다.

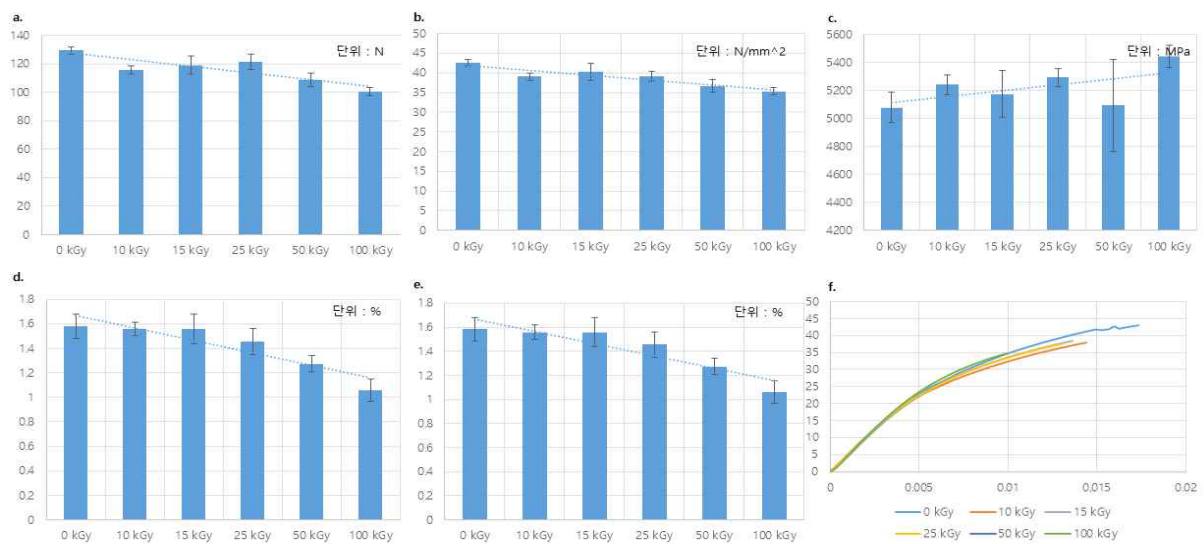


Fig 34. 전자선 조사 건조 백상지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

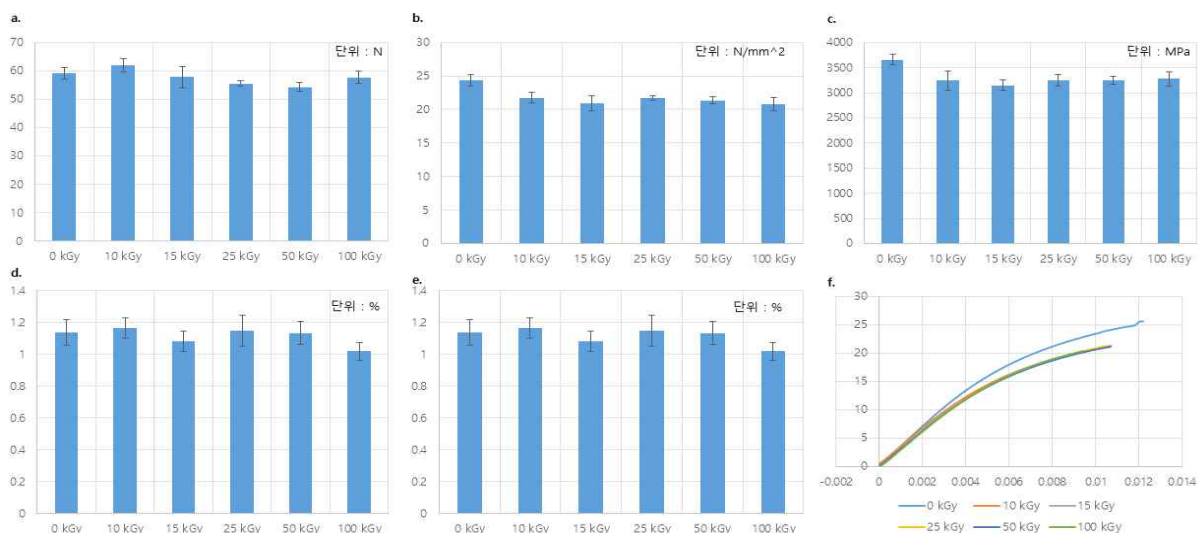


Fig 35. 전자선 조사 건조 갯지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

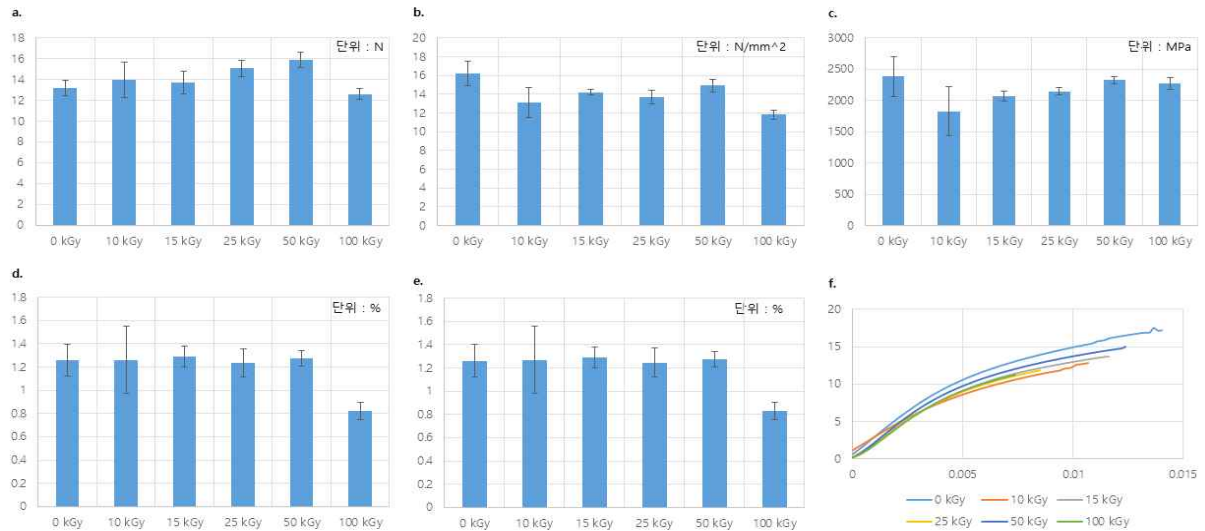


Fig 36. 전자선 조사 건조 박엽지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

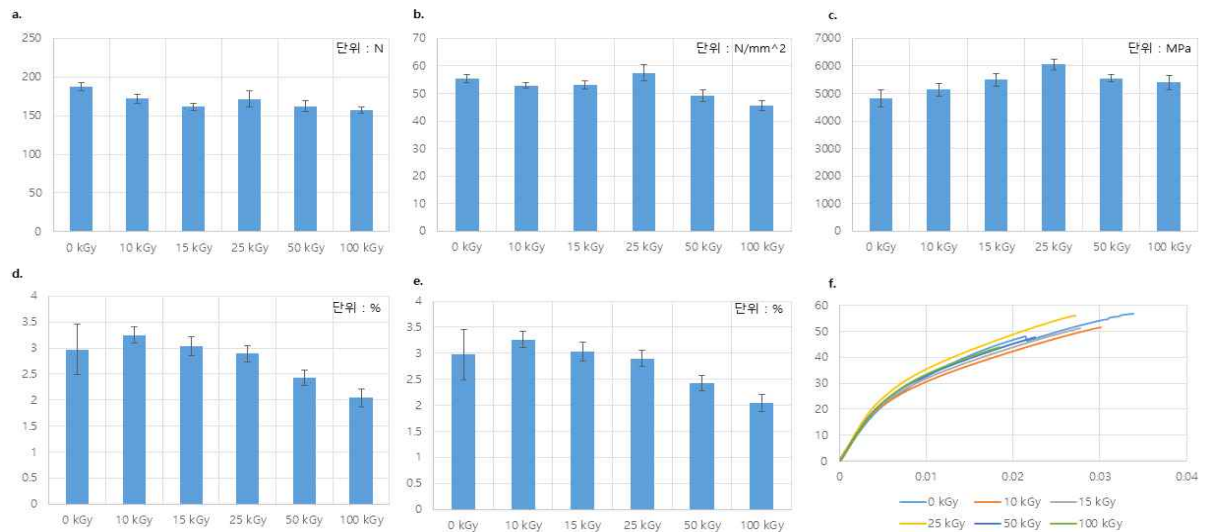


Fig 37. 전자선 조사 건조 한지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

- 전자선 조사 모의 수침 종이 샘플의 경우, 감마선과 동일하게 Control 샘플의 강도가 약 30% 감소함을 확인 할 수 있었으며, 한지의 경우 수침에도 강도가 감소되지 않았다.
- 모의 수침 백상지의 경우, 감마선 및 x선과 달리 인장강도가 최소 45%에서 최대 90% 감소함을 확인할 수 있었다. 이에 대한 원인은 추가 실험을 통해 추가 확인이 필요할 것으로 판단된다.
- 모의 수침 갠지 및 박엽지의 경우 방사선 조사 이후 신장율 및 최대 하중이 최대 18% 하는 경향성을 확인 할 수 있었다. 이는 입자선인 전자선의 특성으로 인하여, 일부 물질이 중합되며 강도가 증가한 것으로 추정된다.
- 모의 수침 한지의 경우 수침 전후 인장강도는 10% 미만으로 감소하였으며, 조사 선량이에 따른 인장강도는 20% 미만으로 감소하여 수침 및 선량의 영향성은 낮은 것으로 판단된다.

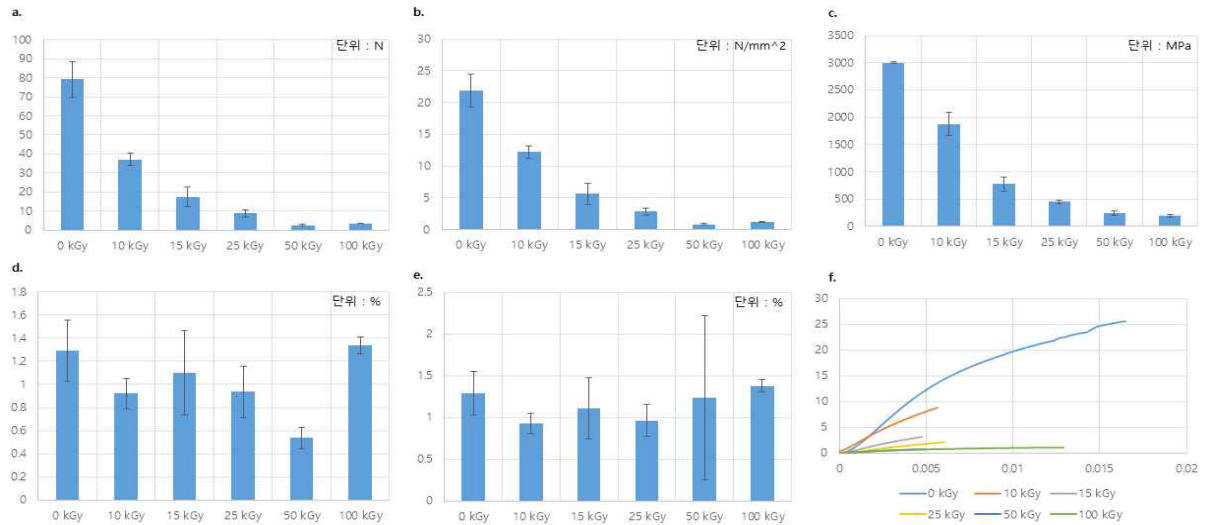


Fig 38. 전자선 조사 모의 수침 백상지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

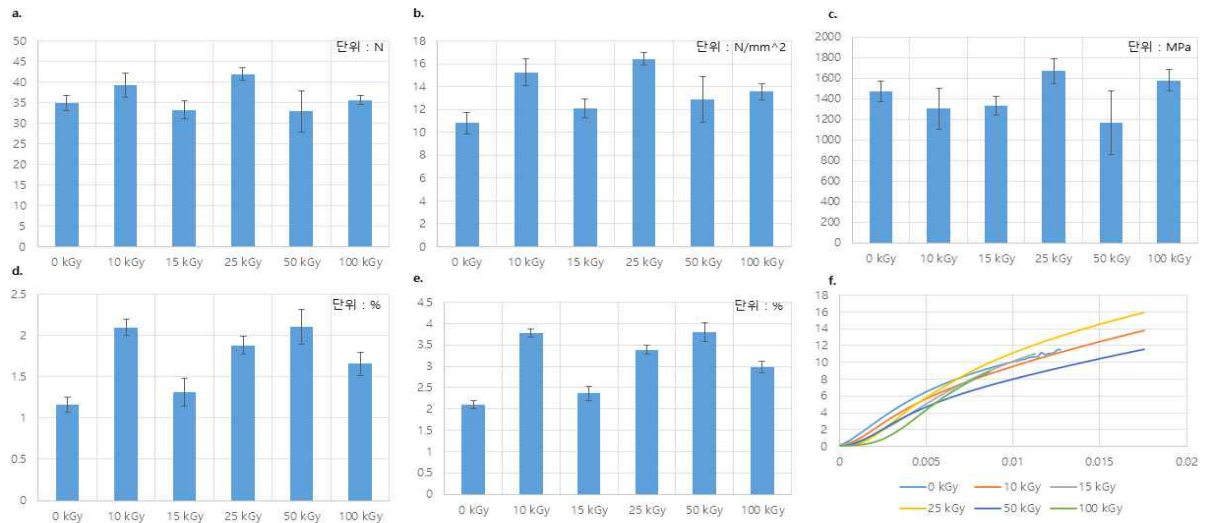


Fig 39. 전자선 조사 모의 수침 갯지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

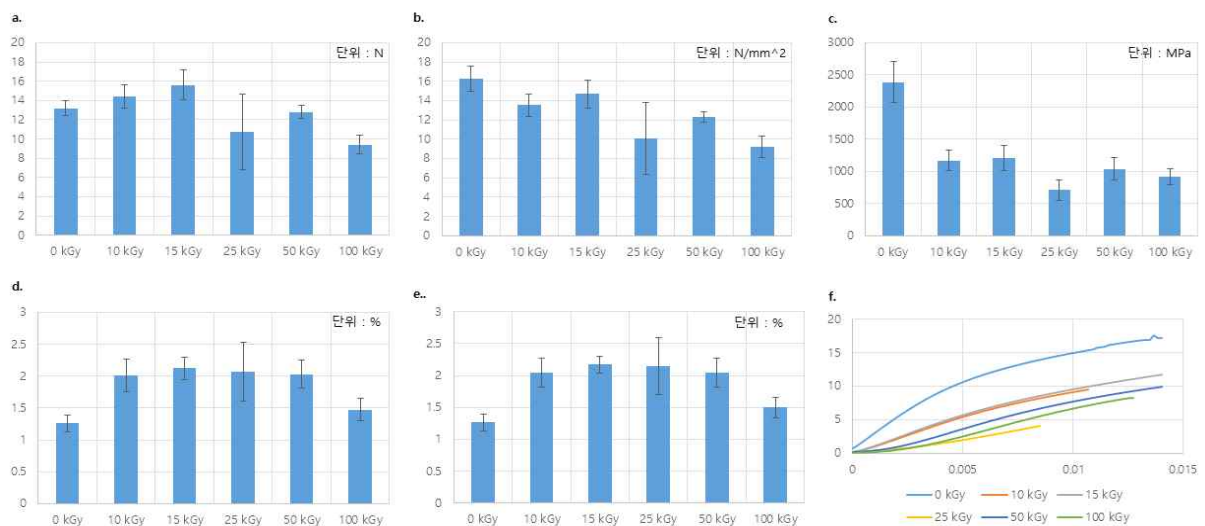


Fig 40. 전자선 조사 모의 수침 박엽지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

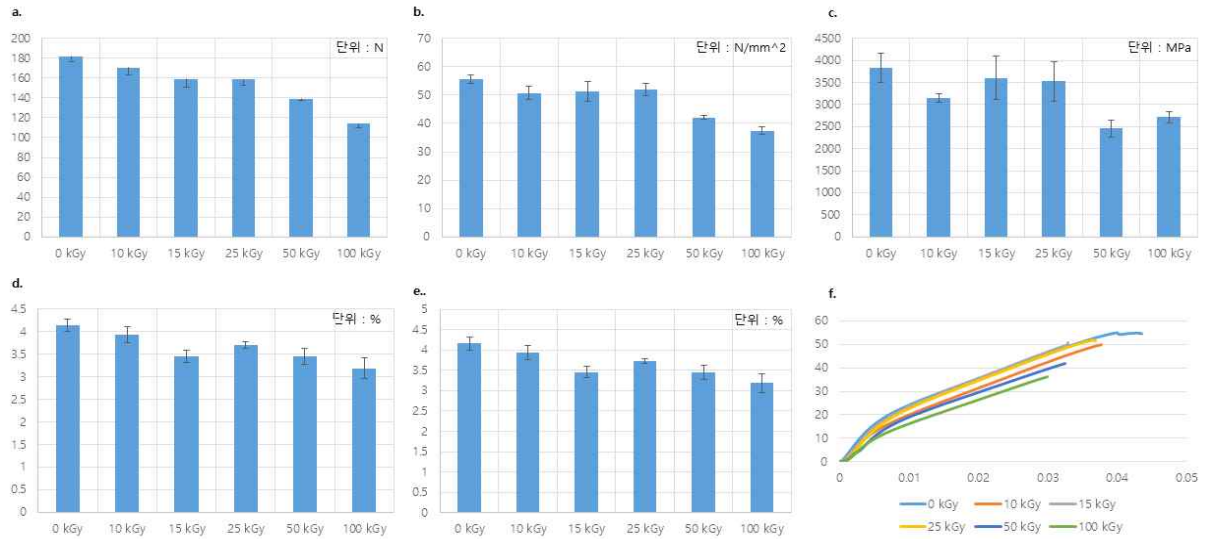


Fig 41. 전자선 조사 모의 수침 한지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

4.3 X-선 조사 샘플의 인장강도 변화

○ X선의 경우, 장비 특성으로 인하여 최대 조사 선량이 25 kGy로 제한되었다. 이로 인하여 건조 중 이 샘플의 전체적인 인장강도는 크게 변하지 않음을 확인 할 수 있었다.

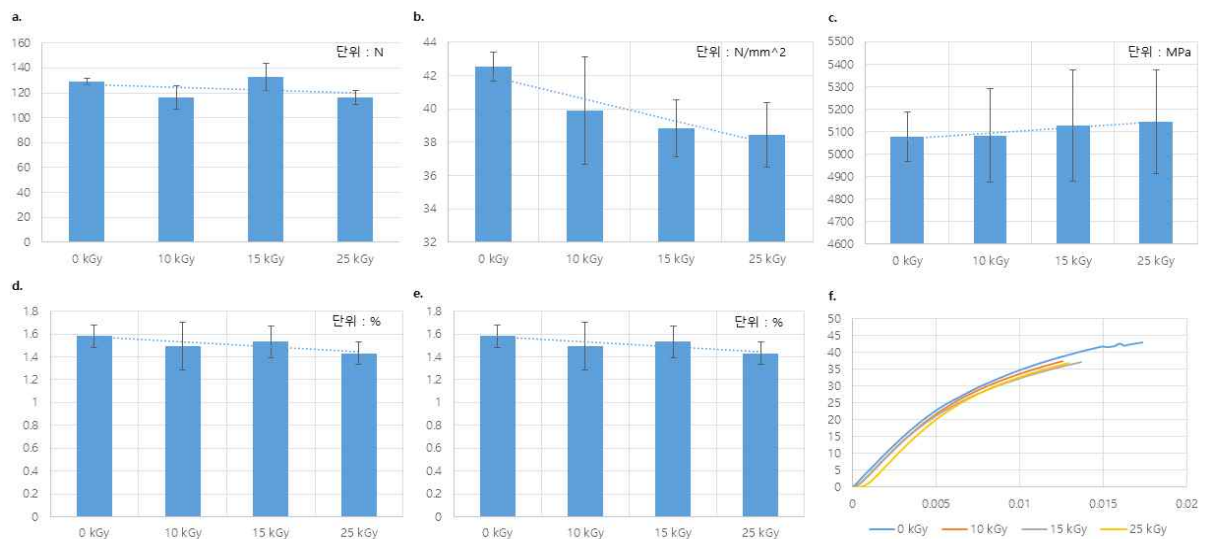


Fig 42. X-선 조사 건조 백상지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

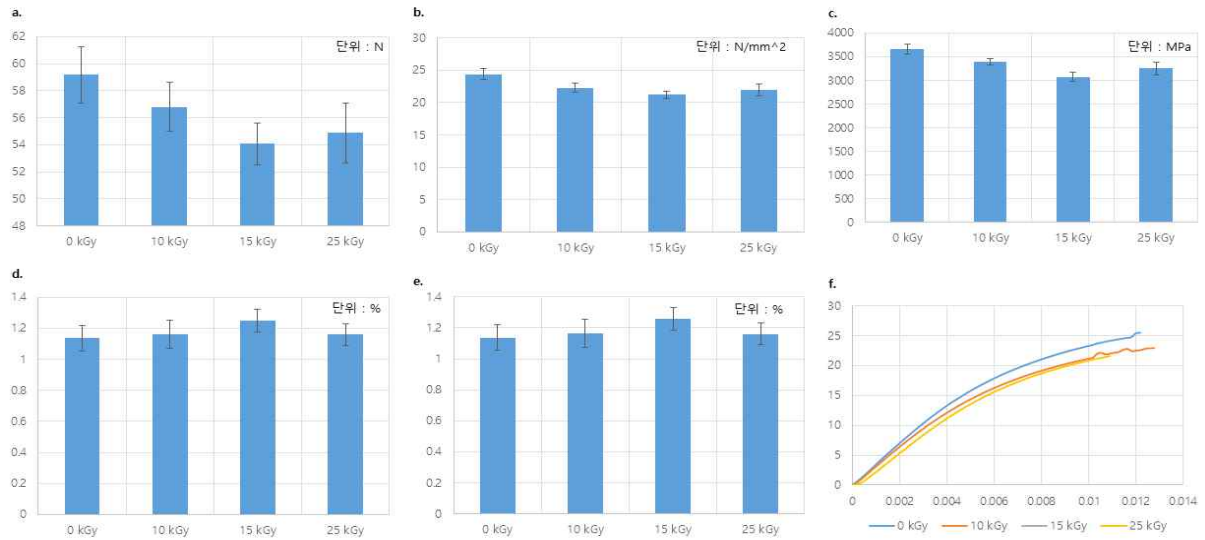


Fig 43. X-선 조사 건조 갱지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

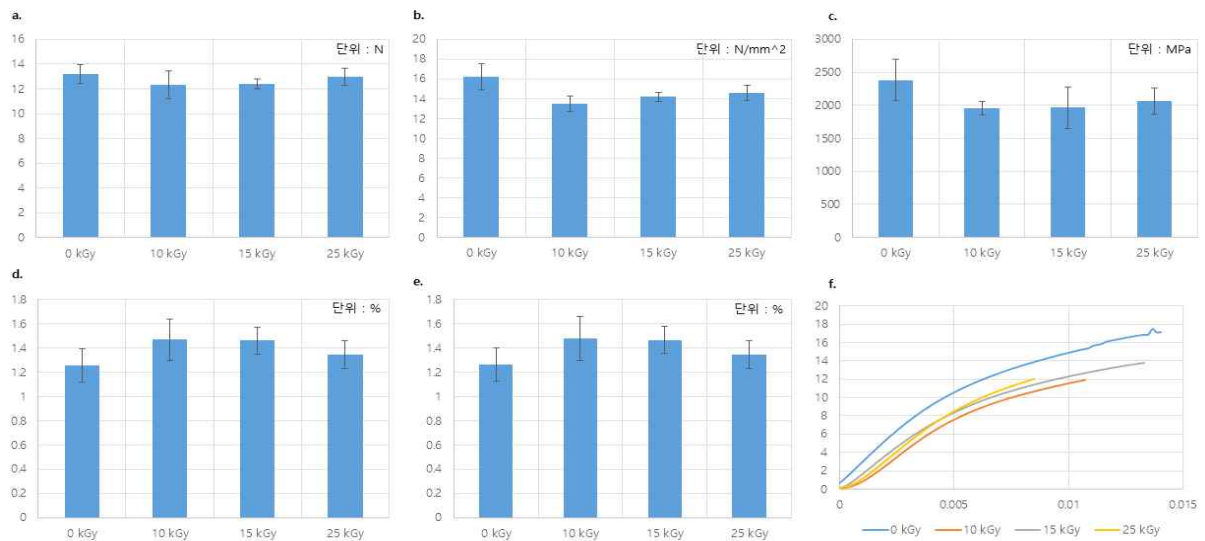


Fig 44. X-선 조사 건조 박엽지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

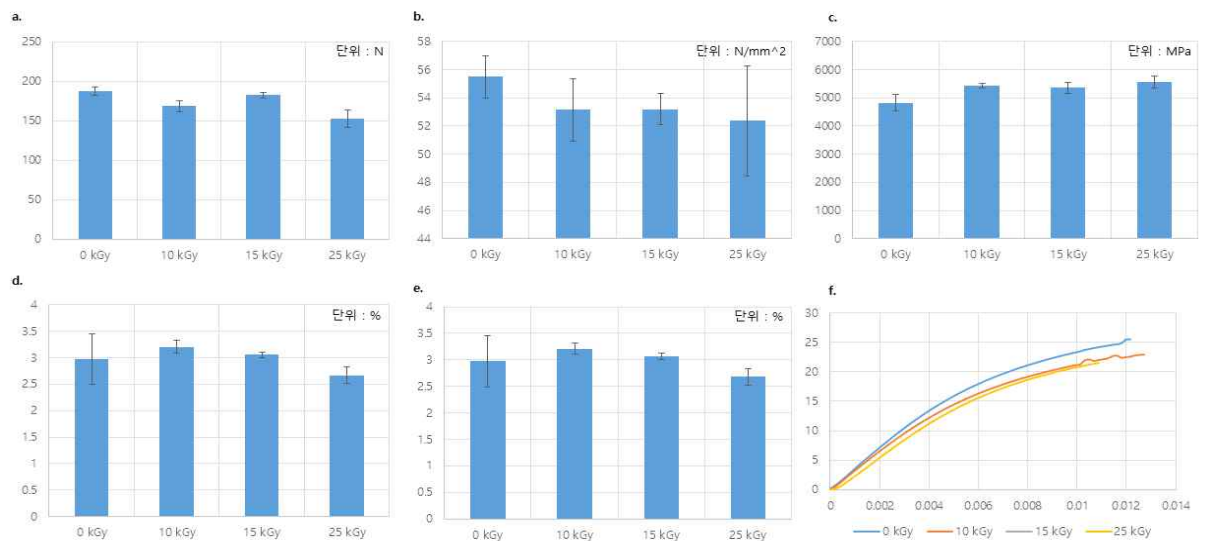


Fig 45. X-선 조사 건조 한지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

- 모의 수침 종이 샘플의 경우, X선 조사 이후 신장율, 최대 하중 등의 인장강도가 최소10% ~ 최대 30% 증가하는 경향성을 확인 할 수 있었다. 다만 박엽지의 경우, 10 kGy 조사 후 최대 30% 감소 되는 경향성을 확인 할 수 있었다.
- 감마선 대비 높은 시간당 선량으로 인하여 라디칼에 의한 중합효과가 발생하여 인장강도가 일부 증가하는 것으로 판단된다.

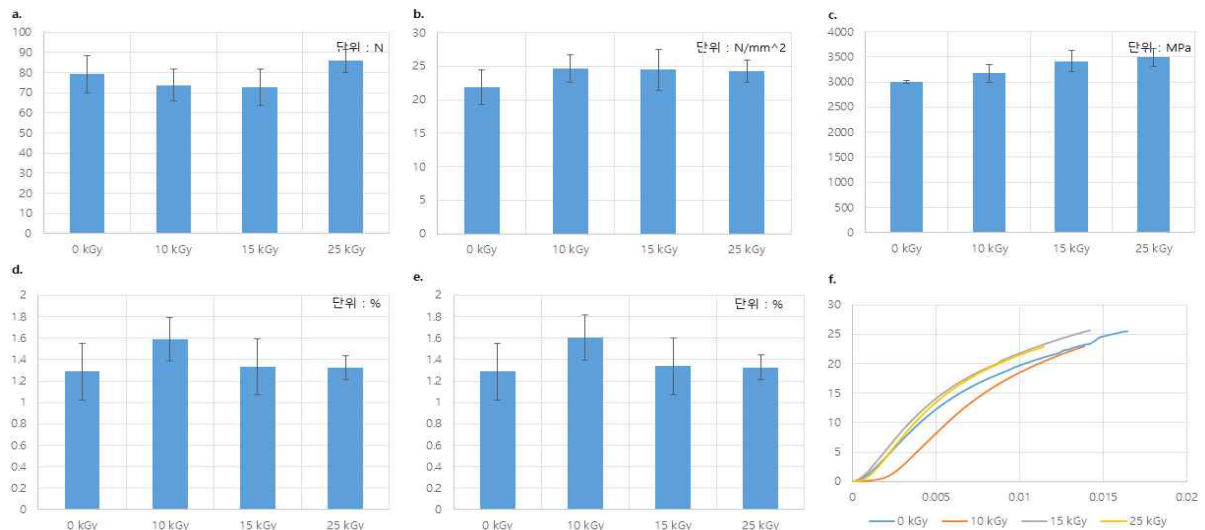


Fig 46. X-선 조사 모의 수침 백상지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

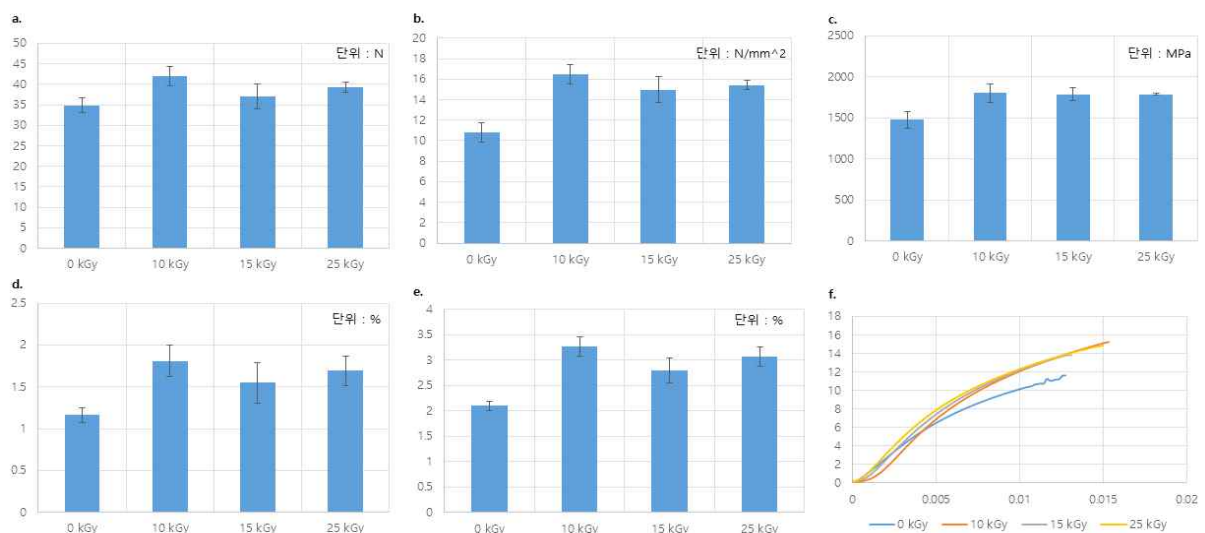


Fig 47. X-선 조사 모의 수침 갯지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

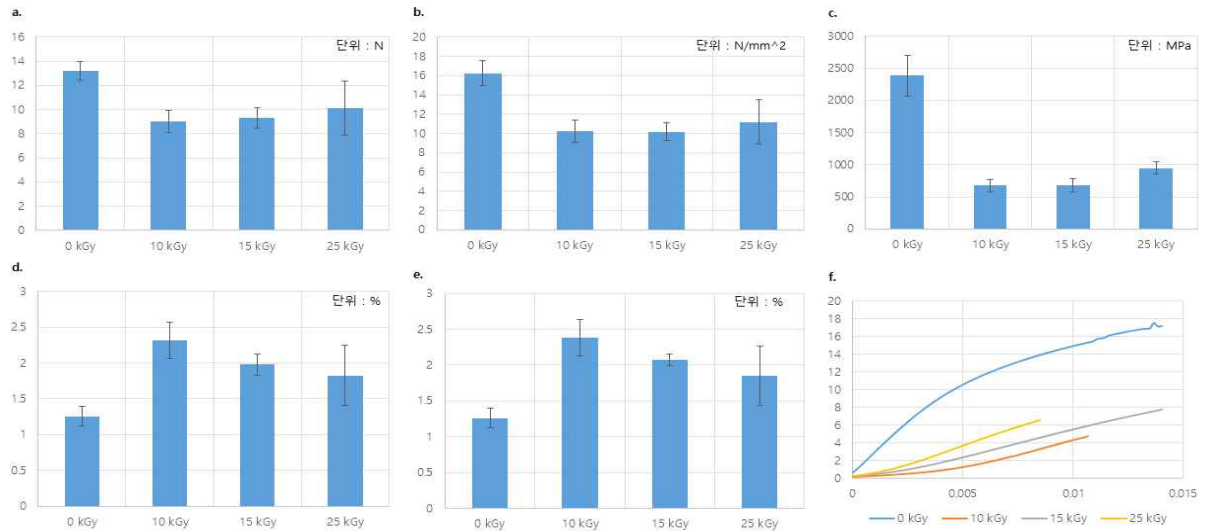


Fig 48. X-선 조사 모의 수침 박엽지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

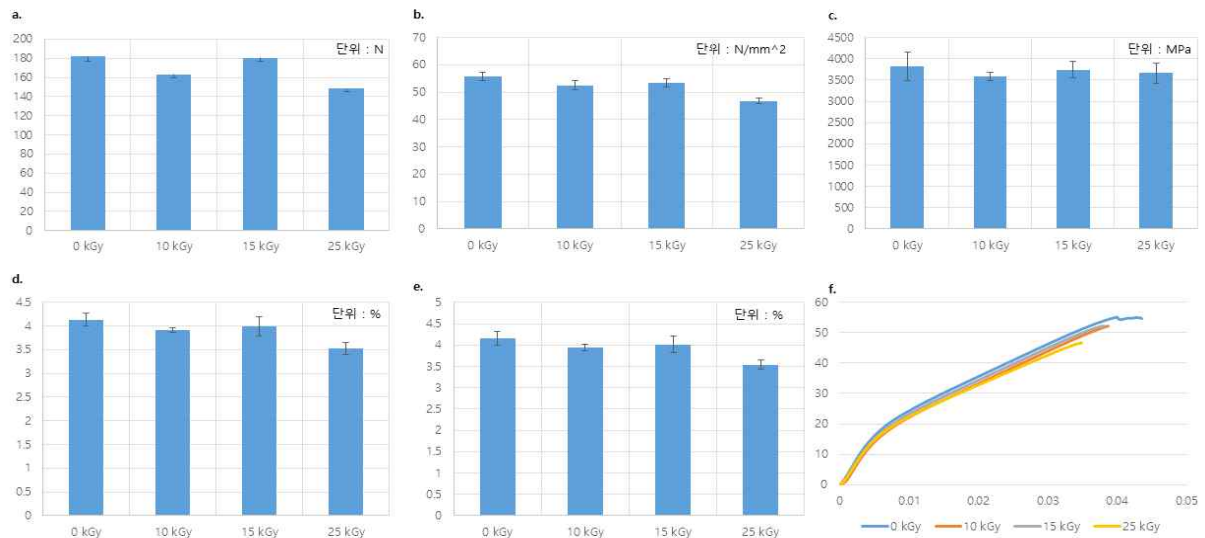


Fig 49. X-선 조사 모의 수침 한지 인장강도 분석 결과

(a. Maximum Load, b. Tensile stress at Maximum Load, c. Tensile strain at Maximum Load, d. Tensile strain at Break, e. Modulus, f. Load-Displacement plot)

- 종합적으로, 방사선 선원의 종류와는 상관없이, 25 kGy 이하로 조사를 진행하였을 시, 인장강도의 변화는 10% 이하로 확인되었으며, 50 kGy 이상에서 인장강도는 최대 30% 이상 감소되는 것을 확인할 수 있었다.
- 모의 수침 샘플의 경우, 건조 샘플 대비 인장강도가 30% 이하로 크게 하락하였으나, 이는 방사선 조사의 영향보다는 수침으로 인한 영향이 크게 작용하는 것으로 판단된다.
- 갯지, 박엽지 등 재생지의 경우 신장율 등 일부 인장강도가 증가한 것을 확인할 수 있었다. ESR 데이터와 함께 생각할 때, 50 kGy의 선량에서는 라디칼에 의한 중합효과가 분해효과보다 크게 작용하여 인장강도가 증가한 것으로 판단된다.

5. 방사선 조사에 따른 색상 변화 확인

5.1 감마선 조사 인쇄물의 색상 변화

○ 감마선 조사를 진행한 후 배경지의 색상 변화를 확인한 결과, 15 kGy 까지 ΔE 의 변화는 3 이하로, 변색의 정도가 크지 않았으나, 100 kGy에서 ΔE 의 변화는 10.12로 변색이 확인되었다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
종이 0 kGy	-----	90.76	2.03	-13.3	-----	-----	-----	-----	
종이 10 kGy	1.63	89.46	1.44	-11.62	-1.3	-0.59	1.68	2.21	
종이 15 kGy	2.2	89.36	1.25	-10.8	-1.4	-0.77	2.5	2.97	
종이 25 kGy	2.96	89.64	0.98	-9.63	-1.12	-1.05	3.67	3.98	
종이 50 kGy	4.74	89.53	0.34	-7.33	-1.23	-1.68	5.98	6.33	
종이 100 kGy	7.61	90.59	-0.36	-3.47	-0.17	-2.39	9.83	10.12	

Fig 50. 감마선 조사 백상지 색차 변화

- 프린터 토너의 경우, 검정은 ΔE 의 변화가 3 미만으로 차이가 적었다. 컬러 색상은 10 kGy에서 ΔE 가 3 이상으로 변색되었으며, 노랑, 파랑, 빨강 순으로 변화 폭이 컸다. 하지만 10 kGy에서 변색 이후, 조사 선량이 증가하여도 색상의 변화는 추가 발생하지 않았다.

Data Name	CMC(lc)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_검정 0 kGy	-----	29.33	0.79	-0.77	-----	-----	-----	-----	
토너_검정 10 kGy	4.726	31.92	-0.53	-2.77	2.59	-1.32	-2.00	3.53	
토너_검정 15 kGy	3.99	31.22	-0.56	-2.57	1.89	-1.35	-1.80	2.94	
토너_검정 25 kGy	3.734	31.05	-0.59	-2.37	1.73	-1.39	-1.60	2.75	
토너_검정 50 kGy	3.67	31.26	-0.73	-1.94	1.93	-1.52	-1.17	2.73	
토너_검정 100 kGy	3.21	30.89	-0.86	-1.33	1.56	-1.65	-0.56	2.37	
Data Name	CMC(lc)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_빨강 0 kGy	-----	49.36	47.37	27.27	-----	-----	-----	-----	
토너_빨강 10 kGy	4.62	44.38	46.55	26.80	-4.98	-0.82	-0.47	5.07	
토너_빨강 15 kGy	4.46	44.61	45.64	26.89	-4.75	-1.73	-0.38	5.08	
토너_빨강 25 kGy	4.47	44.63	45.57	27.12	-4.73	-1.80	-0.15	5.10	
토너_빨강 50 kGy	4.35	44.76	45.70	27.33	-4.60	-1.67	0.06	4.92	
토너_빨강 100 kGy	4.47	44.59	45.80	27.12	-4.76	-1.57	-0.15	5.03	
Data Name	CMC(lc)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_노랑 0 kGy	-----	85.94	-12.74	72.1	-----	-----	-----	-----	
토너_노랑 10 kGy	5.27	82.60	-7.93	83.18	-3.34	4.81	11.08	12.54	
토너_노랑 15 kGy	4.47	82.26	-8.96	80.46	-3.68	3.78	8.36	9.89	
토너_노랑 25 kGy	4.66	82.16	-8.73	80.87	-3.79	4.01	8.78	10.37	
토너_노랑 50 kGy	4.73	82.44	-8.60	81.53	-3.50	4.14	9.43	10.88	
토너_노랑 100 kGy	4.84	82.45	-8.53	81.88	-3.49	4.21	9.78	11.21	
Data Name	CMC(lc)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_파랑 0 kGy	-----	40.72	4.81	-42.49	-----	-----	-----	-----	
토너_파랑 10 kGy	5.53	38.03	-0.39	-34.87	-2.69	-5.20	7.62	9.61	
토너_파랑 15 kGy	3.94	38.76	1.13	-37.06	-1.96	-3.68	5.43	6.87	
토너_파랑 25 kGy	4.15	38.56	1.04	-36.76	-2.16	-3.77	5.72	7.21	
토너_파랑 50 kGy	4.21	38.62	0.95	-36.55	-2.10	-3.86	5.94	7.41	
토너_파랑 100 kGy	4.66	38.43	0.55	-35.81	-2.29	-4.26	6.68	8.26	

Fig 51. 감마선 조사 프린터 토너 색차 변화

○ 프린터 잉크의 경우, 파랑, 빨강, 노랑, 검정 순으로 변화 폭이 컸다. 파랑색의 경우, ΔE 값이 최대 7, 평균 ΔE 값이 3으로 크게 변화하였으나, 검정, 빨강, 노랑 색상의 경우, ΔE 값이 3 이하로 육안으로 변색을 판정하기 어려울 것으로 판단된다. 또한, 프린터 토너와 같이, 조사 선량이 증가하여도 색상의 변화는 추가로 발생하지 않았다.

Data Name	CMC(l _c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_검정 0 kGy	-----	35.84	12	0.63	-----	-----	-----	-----	
잉크_검정 10 kGy	1.896	35.396	0.88	1.9	-0.44	-0.316	1.266	1.382	
잉크_검정 15 kGy	0.612	35.606	1.088	0.942	-0.234	-0.112	0.31	0.488	
잉크_검정 25 kGy	0.554	35.782	1.078	0.998	-0.056	-0.12	0.368	0.396	
잉크_검정 50 kGy	0.944	35.378	1.06	1.162	-0.458	-0.136	0.532	0.73	
잉크_검정 100 kGy	1.178	35.51	0.974	1.368	-0.328	-0.226	0.734	0.874	
Data Name	CMC(l _c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_빨강 0 kGy	-----	61.43	36.39	13.72	-----	-----	-----	-----	
잉크_빨강 10 kGy	2.366	62.036	34.65	16.314	0.612	-1.74	2.592	3.192	
잉크_빨강 15 kGy	0.85	61.302	36.464	14.916	-0.126	0.074	1.194	1.208	
잉크_빨강 25 kGy	1.408	60.984	36.302	15.6	-0.444	-0.088	1.88	1.944	
잉크_빨강 50 kGy	0.416	61.162	36.476	14.228	-0.266	0.086	0.504	0.578	
잉크_빨강 100 kGy	1.214	61.506	35.844	15.248	0.076	-0.546	1.524	1.626	
Data Name	CMC(l _c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_노랑 0 kGy	-----	82.29	1.26	57.21	-----	-----	-----	-----	
잉크_노랑 10 kGy	1.282	82.078	2.354	60.176	-0.214	1.098	2.964	3.168	
잉크_노랑 15 kGy	1.064	81.898	1.492	59.984	-0.392	0.232	2.77	2.81	
잉크_노랑 25 kGy	0.57	82.126	1.556	58.644	-0.166	0.298	1.432	1.474	
잉크_노랑 50 kGy	0.586	81.978	1.782	58.388	-0.312	0.526	1.178	1.326	
잉크_노랑 100 kGy	0.864	82.212	1.726	59.424	-0.078	0.466	2.21	2.264	
Data Name	CMC(l _c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_파랑 0 kGy	-----	53.51	2.88	-43.5	-----	-----	-----	-----	
잉크_파랑 10 kGy	4.366	53.56	-2.352	-37.838	0.05	-5.224	5.656	7.704	
잉크_파랑 15 kGy	1.038	52.7	2.14	-42.128	-0.81	-0.734	1.37	1.756	
잉크_파랑 25 kGy	1.078	53.162	1.674	-41.984	-0.348	-1.2	1.51	1.968	
잉크_파랑 50 kGy	1.488	52.938	1.248	-41.478	-0.572	-1.628	2.018	2.664	
잉크_파랑 100 kGy	2.486	53.306	-0.126	-40.212	-0.204	-3	3.282	4.454	

Fig 52. 감마선 조사 프린터 잉크 색차 변화

○ 스템프 잉크 및 인주의 경우, 인쇄 상태에 따라 색상 편차가 크게 나타났다. 스템프 잉크의 경우, ΔE 의 최소값이 2 이하로 확인되었으며, 육안으로 변색을 판단할 수 어려운 정도였으나, 인주의 경우 ΔE 의 최소값이 6으로 육안으로 변색을 판단할 수 있는 수준의 변색이 발생하였다. 스템프 잉크 및 인주 또한 조사 선량이 증가하여도 색상의 변화는 추가로 발생하지 않았다.

Data Name	CMC (l _x)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
먹지 0 kGy	-----	48.21	1.34	-3.78	-----	-----	-----	-----	
먹지 10 kGy	33.206	83.586	0.042	-2.904	35.376	-1.302	0.876	35.412	
먹지 15 kGy	8.884	57.126	1.156	-4.406	8.916	-0.186	-0.632	9.352	
먹지 25 kGy	18.774	67.912	1.388	-6.61	19.702	0.044	-2.836	19.926	
먹지 50 kGy	22.35	71.994	1.004	-4.882	23.784	-0.338	-1.108	23.828	
먹지 100 kGy	13.26	62.238	0.788	-2.586	14.028	-0.552	1.188	14.114	
Data Name	CMC (l _x)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
스템프 적 0 kGy	-----	59.51	55.66	-2.37	-----	-----	-----	-----	
스템프 적 10 kGy	9.028	69.134	45.136	-3.55	9.624	-10.522	-1.174	14.316	
스템프 적 15 kGy	1.166	60.398	56.37	-3.67	0.892	0.712	-1.296	1.92	
스템프 적 25 kGy	1.594	58.53	55.242	-4.8	-0.978	-0.416	-2.43	2.708	
스템프 적 50 kGy	5.092	63.874	47.424	-5.002	4.364	-8.23	-2.624	9.76	
스템프_적 100 kGy	2.128	58.192	55.072	-5.032	-1.316	-0.584	-2.658	3.374	
Data Name	CMC (l _x)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
스템프 청 0 kGy	-----	46.81	29.71	-48.35	-----	-----	-----	-----	
스템프 청 10 kGy	0.548	46.926	29.76	-48.358	0.12	0.054	-0.006	0.758	
스템프 청 15 kGy	3.202	48.826	26.048	-50.522	2.016	-3.658	-2.17	4.834	
스템프 청 25 kGy	2.492	45.356	30.372	-53.192	-1.448	0.666	-4.838	5.154	
스템프 청 50 kGy	2.09	46.064	29.716	-52.398	-0.74	0.012	-4.046	4.294	
스템프 청 100 kGy	3.29	48.852	24.542	-46.404	2.046	-5.162	1.948	5.94	
Data Name	CMC (l _x)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
스템프 흑 0 kGy	-----	48.11	1.72	-3.72	-----	-----	-----	-----	
스템프 흑 10 kGy	5.662	44.4	0.962	-0.534	-3.708	-0.762	3.19	5.492	
스템프 흑 15 kGy	3.994	45.212	1.394	-2.754	-2.896	-0.328	0.968	4.19	
스템프 흑 25 kGy	4.118	45.156	1.264	-2.246	-2.954	-0.462	1.476	4.25	
스템프 흑 50 kGy	1.93	48.438	1.26	-2.9	0.328	-0.462	0.828	1.94	
스템프 흑 100 kGy	3.148	46.566	1.056	-1.748	-1.544	-0.666	1.972	3.016	
Data Name	CMC (l _x)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
인주 0 kGy	-----	56.34	40.07	-6.19	-----	-----	-----	-----	
인주 10 kGy	6.906	51.746	42.162	2.94	-4.594	2.094	9.13	10.6	
인주 15 kGy	4.32	52.792	40.57	-1.52	-3.55	0.502	4.67	6.26	
인주 25 kGy	9.29	48.096	45.58	2.856	-8.244	5.512	9.046	13.438	
인주 50 kGy	6.466	50.52	44.06	-0.172	-5.822	3.992	6.014	9.284	
인주 100 kGy	4.81	53.184	40.68	0.124	-3.156	0.612	6.314	7.384	

Fig 53. 감마선 조사 먹지, 스템프 잉크 및 인주 색차 변화paper

5.2 전자선 조사 인쇄물의 색상 변화

- 전자선 조사 시료의 경우, 배경지 색상의 변화는 25 kGy 까지 ΔE 의 변화가 3 이하로 변색의 정도가 매우 적었으나, 100 kGy에서 ΔE 의 변화는 8.1로 변색이 확인되었다.
- 감마선 대비 전자선 배경지의 ΔE 값의 변화는 2정도 적었다. 이는 전자선 특성 상, 짧은 시간의 조사로 인하여 오존 등 열화 요소에 영향을 적게 받았기 때문으로 판단된다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
종이 0 kGy	-----	90.76	2.03	-13.3	-----	-----	-----	-----	
종이 10 kGy	1.09	90.41	1.55	-11.99	-0.34	-0.48	1.32	1.44	
종이 15 kGy	1.22	90.3	1.39	-11.96	-0.46	-0.64	1.34	1.55	
종이 25 kGy	2.2	90.43	1.03	-10.63	-0.33	-0.99	2.67	2.87	
종이 50 kGy	3.75	90.54	0.55	-8.56	-0.22	-1.47	4.74	4.97	
종이 100 kGy	6.22	90.45	-0.29	-5.48	-0.3	-2.31	7.82	8.16	

Fig 54. 전자선 조사 백상지 색차 변화

○ 프린터 토너의 경우, 감마선 조사 샘플과 달리 ΔE 의 변화가 3 이하로 육안으로 변색을 판단하기 어려운 정도였다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
종이 0 kGy	-----	90.76	2.03	-13.3	-----	-----	-----	-----	
종이 10 kGy	1.09	90.41	1.55	-11.99	-0.34	-0.48	1.32	1.44	
종이 15 kGy	1.22	90.3	1.39	-11.96	-0.46	-0.64	1.34	1.55	
종이 25 kGy	2.2	90.43	1.03	-10.63	-0.33	-0.99	2.67	2.87	
종이 50 kGy	3.75	90.54	0.55	-8.56	-0.22	-1.47	4.74	4.97	
종이 100 kGy	6.22	90.45	-0.29	-5.48	-0.3	-2.31	7.82	8.16	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_검정 0 kGy	-----	29.33	0.79	-0.77	-----	-----	-----	-----	
토너_검정 10 kGy	1.094	29.594	0.706	-0.358	0.266	-0.086	0.412	0.832	
토너_검정 15 kGy	1.126	29.3	0.676	-0.242	-0.026	-0.118	0.53	0.844	
토너_검정 25 kGy	1.156	29.722	0.672	-0.162	0.396	-0.124	0.608	0.858	
토너_검정 50 kGy	1.59	29.862	0.626	0.036	0.534	-0.166	0.808	1.176	
토너_검정 100 kGy	3.358	30.604	0.656	1.132	1.274	-0.134	1.904	2.464	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_빨강 0kGy	-----	49.36	47.37	27.27	-----	-----	-----	-----	
토너_빨강 10 kGy	0.932	48.654	48.188	26.878	-0.702	0.816	-0.392	1.276	
토너_빨강 15 kGy	0.764	48.794	47.89	27.004	-0.562	0.516	-0.266	1.032	
토너_빨강 25 kGy	0.79	48.832	48.202	26.96	-0.528	0.826	-0.31	1.164	
토너_빨강 50 kGy	0.496	49.156	48.014	27.728	-0.202	0.644	0.458	0.966	
토너_빨강 100 kGy	0.432	49.458	47.93	27.504	0.098	0.56	0.234	0.83	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_노랑 0 kGy	-----	85.94	-12.74	72.1	-----	-----	-----	-----	
토너_노랑 10 kGy	0.8	85.99	-12.63	74.424	0.05	0.11	2.33	2.332	
토너_노랑 15 kGy	0.538	85.89	-12.794	73.692	-0.05	-0.054	1.592	1.598	
토너_노랑 25 kGy	1.04	86.144	-12.686	75.124	0.202	0.058	3.03	3.038	
토너_노랑 50 kGy	1.152	86.28	-12.374	75.296	0.338	0.368	3.198	3.24	
토너_노랑 100 kGy	1.078	86.526	-12.288	74.846	0.584	0.454	2.746	2.85	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_파랑 0 kGy	-----	40.72	4.81	-42.49	-----	-----	-----	-----	
토너_파랑 10 kGy	0.872	40.342	4.792	-41.51	-0.382	-0.018	0.978	1.27	
토너_파랑 15 kGy	1.092	39.994	4.942	-41.416	-0.726	0.122	1.074	1.496	
토너_파랑 25 kGy	1.044	40	4.664	-41.124	-0.722	-0.15	1.36	1.642	
토너_파랑 50 kGy	1.176	40.474	3.936	-40.51	-0.246	-0.878	1.974	2.27	
토너_파랑 100 kGy	1.674	40.316	3.33	-39.67	-0.408	-1.486	2.818	3.278	

Fig 55. 전자선 조사 프린터 토너 색차 변화

○ 프린터 잉크의 경우, 토너와 마찬가지로 ΔE 의 변화가 3 이하로 육안으로 변색을 판단하기 어려운 정도였다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_검정 0 kGy	-----	35.84	1.2	0.63	-----	-----	-----	-----	
잉크_검정 10 kGy	0.468	35.996	1.174	0.866	0.158	-0.026	0.232	0.364	
잉크_검정 15 kGy	0.53	35.902	1.154	0.968	0.066	-0.044	0.336	0.398	
잉크_검정 25 kGy	0.786	35.974	1.088	1.154	0.136	-0.11	0.524	0.572	
잉크_검정 50 kGy	1.168	36.212	1.006	1.362	0.372	-0.194	0.73	0.872	
잉크_검정 100 kGy	1.658	35.678	0.924	1.774	-0.16	-0.272	1.138	1.192	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_빨강 0 kGy	-----	61.43	36.39	13.72	-----	-----	-----	-----	
잉크_빨강 10 kGy	0.662	61.24	36.508	14.614	-0.19	0.116	0.888	0.95	
잉크_빨강 15 kGy	0.878	61.214	36.348	14.912	-0.216	-0.042	1.188	1.216	
잉크_빨강 25 kGy	1.186	61.538	36.412	15.368	0.11	0.02	1.642	1.672	
잉크_빨강 50 kGy	1.272	61.938	35.73	15.17	0.51	-0.662	1.448	1.69	
잉크_빨강 100 kGy	1.246	61.704	35.462	15.066	0.278	-0.928	1.344	1.712	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_노랑 0 kGy	-----	82.29	1.26	57.21	-----	-----	-----	-----	
잉크_노랑 10 kGy	0.424	82.13	1.314	58.31	-0.16	0.058	1.1	1.116	
잉크_노랑 15 kGy	0.714	82.08	1.312	59.102	-0.212	0.052	1.89	1.904	
잉크_노랑 25 kGy	0.844	82.39	1.404	59.482	0.1	0.148	2.272	2.278	
잉크_노랑 50 kGy	0.884	82.696	1.408	59.466	0.404	0.152	2.254	2.298	
잉크_노랑 100 kGy	0.87	82.082	2.02	59.144	-0.208	0.76	1.93	2.094	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_파랑 0 kGy	-----	53.51	2.88	-43.5	-----	-----	-----	-----	
잉크_파랑 10 kGy	0.446	53.256	2.582	-42.814	-0.254	-0.294	0.686	0.816	
잉크_파랑 15 kGy	0.526	53.292	2.314	-42.808	-0.218	-0.564	0.684	0.93	
잉크_파랑 25 kGy	1.194	53.498	1.458	-41.824	-0.012	-1.418	1.672	2.198	
잉크_파랑 50 kGy	2.002	53.562	0.472	-40.778	0.054	-2.402	2.716	3.632	
잉크_파랑 100 kGy	3.272	53.1	-0.986	-39.09	-0.408	-3.86	4.402	5.88	

Fig 56. 전자선 조사 프린터 잉크 색차 변화

- 스템프 잉크 경우, 감마선과 동일하게 인쇄 상태에 따른 색상 편차가 크게 발생하였으며, ΔE 의 최소값이 3 이하로 육안으로 변색을 판단하기 어려운 수준의 변색이 확인되었다.
- 인주의 경우, ΔE 의 최소값이 6으로 육안으로 변색을 확인할 수 있었다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
먹지 0 kGy	-----	48.21	1.34	-3.78	-----	-----	-----	-----	
먹지 10 kGy	4.278	52.64	1.196	-4.056	4.43	-0.146	-0.28	4.522	
먹지 15 kGy	3.45	50.282	0.96	-3.372	2.072	-0.384	0.402	3.556	
먹지 25 kGy	5.396	53.218	1.106	-3.43	5.008	-0.236	0.348	5.522	
먹지 50 kGy	3.886	49.984	0.678	-1.4	1.774	-0.664	2.374	3.712	
먹지 100 kGy	8.916	40.718	0.742	0.524	-7.492	-0.602	4.298	8.728	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
스템프 적 0 kGy	-----	59.51	55.66	-2.37	-----	-----	-----	-----	
스템프 적 10 kGy	2.208	57.81	56.438	-3.538	-1.7	0.784	-1.164	3.308	
스템프 적 15 kGy	1.528	58.862	54.946	-4.596	-0.646	-0.708	-2.226	2.636	
스템프 적 25 kGy	1.514	59.782	54.156	-4.82	0.272	-1.496	-2.442	2.96	
스템프 적 50 kGy	2.854	61.228	51.35	-4.842	1.72	-4.3	-2.466	5.496	
스템프_적 100 kGy	3.834	61.314	50.488	-7.604	1.804	-5.17	-5.234	7.592	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
스템프 청 0 kGy	-----	46.81	29.71	-48.35	-----	-----	-----	-----	
스템프 청 10 kGy	3.424	44.778	31.792	-54.56	-2.026	2.086	-6.21	7.084	
스템프 청 15 kGy	2.298	46.806	29.81	-53.05	0.002	0.1	-4.698	4.876	
스템프 청 25 kGy	2.334	47.354	29.072	-52.656	0.552	-0.638	-4.304	4.556	
스템프 청 50 kGy	2.324	47.012	27.524	-50.122	0.206	-2.18	-1.77	3.602	
스템프 청 100 kGy	2.31	45.348	27.144	-49.21	-1.462	-2.56	-0.858	3.398	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
스템프 흑 0 kGy	-----	48.11	1.72	-3.72	-----	-----	-----	-----	
스템프 흑 10 kGy	5.662	44.4	0.962	-0.534	-3.708	-0.762	3.19	5.492	
스템프 흑 15 kGy	3.994	45.212	1.394	-2.754	-2.896	-0.328	0.968	4.19	
스템프 흑 25 kGy	4.118	45.156	1.264	-2.246	-2.954	-0.462	1.476	4.25	
스템프 흑 50 kGy	1.93	48.438	1.26	-2.9	0.328	-0.462	0.828	1.94	
스템프 흑 100 kGy	3.148	46.566	1.056	-1.748	-1.544	-0.666	1.972	3.016	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
인주 0 kGy	-----	56.34	40.07	-6.19	-----	-----	-----	-----	
인주 10 kGy	6.906	51.746	42.162	2.94	-4.594	2.094	9.13	10.6	
인주 15 kGy	4.32	52.792	40.57	-1.52	-3.55	0.502	4.67	6.26	
인주 25 kGy	9.29	48.096	45.58	2.856	-8.244	5.512	9.046	13.438	
인주 50 kGy	6.466	50.52	44.06	-0.172	-5.822	3.992	6.014	9.284	
인주 100 kGy	4.81	53.184	40.68	0.124	-3.156	0.612	6.314	7.384	

Fig 57. 전자선 조사 먹지, 스템프 잉크 및 인주 색차 변화

5.3 X-선 조사 인쇄물의 색상 변화

- X선 조사를 한 배경지의 ΔE 의 변화는 최대 3으로 육안상으로 구분이 어려운 정도였다. X선 조사 또한 감마선 및 전자선의 25 kGy 조사와 비슷한 경향성을 보이는 것으로 판단된다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
종이 0 kGy	-----	90.76	2.03	-13.3	-----	-----	-----	-----	
종이 10 kGy	1.36	89.1	1.82	-12.37	-1.66	-0.2	0.93	1.91	
종이 15 kGy	1.72	89.35	1.44	-11.53	-1.41	-0.59	1.77	2.33	
종이 25 kGy	2.32	89.36	1.28	-10.57	-1.4	-0.75	2.74	3.16	

Fig 58. X-선 조사 배경지 색차 변화

- X선을 조사한 프린터 토너의 경우, 검정은 별 변화가 없었으며 컬러 색상은 10 kGy에서 ΔE 가 3 이상으로 변색되었으며, 노랑, 파랑, 빨강 순으로 변화 폭이 컸다. X선 또한 감마선과 동일한 경향성을 나타내었다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_검정 0 kGy	-----	29.33	0.79	-0.77	-----	-----	-----	-----	
토너_검정 10 kGy	5.124	32.194	-0.46	-2.98	2.864	-1.254	-2.21	3.84	
토너_검정 15 kGy	4.31	31.332	-0.472	-2.828	2.004	-1.264	-2.056	3.178	
토너_검정 25 kGy	4.574	31.864	-0.524	-2.618	2.538	-1.322	-1.848	3.424	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_빨강 0kGy	-----	49.36	47.37	27.27	-----	-----	-----	-----	
토너_빨강 10 kGy	4.514	44.692	45.076	27.774	-4.668	-2.296	0.504	5.234	
토너_빨강 15 kGy	4.582	44.616	45.02	27.616	-4.744	-2.35	0.346	5.332	
토너_빨강 25 kGy	4.45	44.734	45.244	27.754	-4.624	-2.126	0.484	5.118	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_노랑 0 kGy	-----	85.94	-12.74	72.1	-----	-----	-----	-----	
토너_노랑 10 kGy	5.054	81.954	-8.492	81.954	-3.986	4.248	9.856	11.45	
토너_노랑 15 kGy	5.106	81.86	-8.436	81.942	-4.08	4.304	9.844	11.498	
토너_노랑 25 kGy	4.984	82.086	-8.364	81.734	-3.854	4.376	9.636	11.262	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
토너_파랑 0 kGy	-----	40.72	4.81	-42.49	-----	-----	-----	-----	
토너_파랑 10 kGy	4.158	38.312	1.19	-37.104	-2.412	-3.62	5.382	6.936	
토너_파랑 15 kGy	4.196	38.448	1.012	-36.918	-2.278	-3.802	5.564	7.13	
토너_파랑 25 kGy	4.388	38.278	0.932	-36.654	-2.444	-3.882	5.83	7.434	

Fig 59. X-선 조사 프린터 토너 색차 변화

○ 프린터 잉크의 경우, 10 kGy에서 ΔE 가 평균 0.7로 변색되었으며, 파랑, 빨강, 노랑, 검정 순으로 변화 폭이 컸다. 감마선 대비 ΔE 의 최대 변화값이 상대적으로 적은 것을 확인할 수 있었다. 이는 감마선 대비 조사 시간이 상대적으로 짧기 때문으로 판단된다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_검정 0 kGy	-----	35.84	1.2	0.63	-----	-----	-----	-----	
잉크_검정 10 kGy	0.89	36.59	1.25	0.716	0.754	0.054	0.084	0.784	
잉크_검정 15 kGy	1.212	36.832	1.22	0.938	0.992	0.022	0.306	1.056	
잉크_검정 25 kGy	1.422	37	1.178	1.036	1.16	-0.02	0.402	1.24	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_빨강 0 kGy	-----	61.43	36.39	13.72	-----	-----	-----	-----	
잉크_빨강 10 kGy	0.44	61.204	35.97	13.728	-0.224	-0.42	0.004	0.724	
잉크_빨강 15 kGy	0.556	61.392	36.074	14.348	-0.038	-0.316	0.628	0.784	
잉크_빨강 25 kGy	0.422	61.356	35.772	13.588	-0.072	-0.618	-0.134	0.78	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_노랑 0 kGy	-----	82.29	1.26	57.21	-----	-----	-----	-----	
잉크_노랑 10 kGy	0.488	81.68	1.546	57.254	-0.612	0.292	0.042	0.72	
잉크_노랑 15 kGy	0.294	82.044	1.3	57.834	-0.246	0.044	0.624	0.676	
잉크_노랑 25 kGy	0.374	81.962	1.152	57.954	-0.328	-0.104	0.744	0.824	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
잉크_파랑 0 kGy	-----	53.51	2.88	-43.5	-----	-----	-----	-----	
잉크_파랑 10 kGy	0.446	53.256	2.582	-42.814	-0.254	-0.294	0.686	0.816	
잉크_파랑 15 kGy	0.526	53.292	2.314	-42.808	-0.218	-0.564	0.684	0.93	
잉크_파랑 25 kGy	1.194	53.498	1.458	-41.824	-0.012	-1.418	1.672	2.198	

Fig 60. X-선 조사 프린터 잉크 색차 변화

○ 스탬프 잉크의 경우 인쇄 상태에 따른 편차가 발생함을 확인하였다. 먹지 및 검정 스탬프의 경우, ΔE 의 변화가 3 이하로 육안으로 변색을 판단하기 어려울 것으로 생각되나, 스탬프 적, 청, 인주의 경우 ΔE 의 변화가 4 이상으로 육안으로 변색을 판단 할 수 있을 것으로 판단된다.

Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*a b(D65)	RGB 변환
먹지 0 kGy	-----	48.21	1.34	-3.78	-----	-----	-----	-----	
먹지 10 kGy	5.672	45.972	1.218	-2.648	-2.238	-0.124	1.128	5.85	
먹지 15 kGy	3.24	45.39	1.086	-2.408	-2.82	-0.258	1.37	3.302	
먹지 25 kGy	2.114	46.856	1.028	-2.824	-1.354	-0.314	0.952	2.122	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*a b(D65)	RGB 변환
스탬프 적 0 kGy	-----	59.51	55.66	-2.37	-----	-----	-----	-----	
스탬프 적 10 kGy	3.242	56.366	55.188	-5.066	-3.144	-0.47	-2.692	4.686	
스탬프 적 15 kGy	3.684	55.166	56.392	-2.866	-4.344	0.736	-0.492	4.476	
스탬프 적 25 kGy	2.68	60.504	50.566	-5.13	0.994	-5.09	-2.756	5.946	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*a b(D65)	RGB 변환
스탬프 청 0 kGy	-----	46.81	29.71	-48.35	-----	-----	-----	-----	
스탬프 청 10 kGy	4.264	43.658	33.844	-55.378	-3.15	4.142	-7.026	8.76	
스탬프 청 15 kGy	3.654	43.966	32.366	-54.242	-2.842	2.662	-5.89	7.1	
스탬프 청 25 kGy	1.096	46.404	29.092	-49.82	-0.402	-0.612	-1.468	1.786	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*a b(D65)	RGB 변환
스탬프 흑 0 kGy	-----	48.11	1.72	-3.72	-----	-----	-----	-----	
스탬프 흑 10 kGy	5.662	44.4	0.962	-0.534	-3.708	-0.762	3.19	1.6	
스탬프 흑 15 kGy	3.994	45.212	1.394	-2.754	-2.896	-0.328	0.968	2.03	
스탬프 흑 25 kGy	4.118	45.156	1.264	-2.246	-2.954	-0.462	1.476	3.15	
Data Name	CMC(l:c)(D65)	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*a b(D65)	RGB 변환
인주 0 kGy	-----	56.34	40.07	-6.19	-----	-----	-----	-----	
인주 10 kGy	6.172	50.29	39.218	-0.722	-6.05	-0.852	5.468	8.246	
인주 15 kGy	7.478	49.248	40.942	0.782	-7.092	0.88	6.972	10.222	
인주 25 kGy	2.59	54.376	38.24	-3.668	-1.964	-1.83	2.522	4.09	

Fig 61. X-선 조사 먹지, 스탬프 잉크 및 인주 색차 변화

5.4 모의 수침에 의한 인쇄물의 색상 변화

- 모의 수침 시, 인쇄물의 변화를 확인하기 위하여 감마선 15 kGy를 프린터 토너에 인쇄하여 영향성을 판단하였다.
- 방사선을 조사하지 않고 모의 수침을 진행한 모의 수침 Control의 경우, ΔE 값은 0.5로 거의 차이가 나지 않았다.
- 방사선을 조사한 건조 배경지와 모의 수침 배경지의 경우, 모두 ΔE 값이 3 이하로 육안으로 판단하기 어려운 수준의 변색을 확인 할 수 있었으며, 모의 수침 샘플의 ΔE 값이 건조 샘플 대비 1.2 정도 낮아 수침 시, 배경지의 변색이 더 적게 발생함을 확인 할 수 있었다. 이는 변색을 유도하는 오존, 라디칼 등의 성분이 물에 의해 일부 분해 및 용해 되기 때문으로 판단된다.

Data Name	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
종이 control	90.62	2.37	-13.53	-----	-----	-----	-----	
수침 Control	91	2.47	-13.93	0.39	0.1	-0.39	0.56	
건조 15 kGy	90.6	1.57	-11.23	-0.02	-0.8	2.3	2.43	
수침control 15 kGy	90.77	1.8	-12.48	0.15	-0.56	1.05	1.2	

Fig 62. 감마선 15 kGy 조사 후 모의 수침 배경지의 색상 변화

- 모의 수침을 진행한 프린터 토너의 경우, 검정의 변화는 ΔE 값이 1 이하로 변화된 것을 확인 할 수 있었으며, 육안으로 판단이 불가능한 수준이었다. 컬러 색상은 ΔE 가 1 정도로 육안으로 확인하기 어려운 수준이었다. 노랑색의 경우에만 모의 수침 샘플에서 ΔE 값이 약 4로 육안으로 확인할 수 있는 수준으로 변색되었다. 노랑색을 제외하고는 수침 여부는 변색에 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 판단된다.

Data Name	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
검정색 컨트롤	26.24	-0.24	-1.31	-----	-----	-----	-----	
수침 검정 컨트롤	26.014	-0.196	-1.114	-0.226	0.042	0.2	0.404	
검정 건조 15 kGy	26.022	-0.236	-1.056	-0.216	-0.004	0.256	0.474	
수침 검정 15 kGy	25.31	-0.172	-1.306	-0.93	0.064	0.006	0.936	

Data Name	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
파랑색 컨트롤	41.54	-1.58	-38.17	-----	-----	-----	-----	
수침 파랑 컨트롤	41.866	-2.294	-37.998	0.326	-0.714	0.172	0.874	
건조 파랑 15 kGy	42.058	-2.728	-37.664	0.518	-1.142	0.506	1.436	
수침 파랑 15 kGy	41.422	-2.1	-37.896	-0.118	-0.518	0.272	0.8	

Data Name	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
노랑색 컨트롤	84.26	-7.75	68.17	-----	-----	-----	-----	
수침 노랑 컨트롤	84.686	-7.562	68.12	0.428	0.194	-0.05	1.074	
건조 노랑 15 kGy	84.55	-7.898	67.946	0.29	-0.148	-0.224	0.992	
수침 노랑 15 kGy	83.698	-7.766	64.26	-0.56	-0.012	-3.908	3.97	

Data Name	L*(D65)	a*(D65)	b*(D65)	dL*(D65)	da*(D65)	db*(D65)	dE*ab(D65)	RGB 변환
빨강색 컨트롤	84.26	-7.75	68.17	-----	-----	-----	-----	
수침 빨강 컨트롤	47.476	46.21	18.47	-0.324	0.41	0.388	0.928	
건조 빨강 15 kGy	47.452	45.912	18.728	-0.348	0.116	0.646	0.854	
수침 빨강 15 kGy	47.02	45.374	18.226	-0.78	-0.424	0.146	1.108	

Fig 63. 감마선 15 kGy 조사 후 모의 수침 프린터 토너의 색상 변화

- 프린터 잉크 및 스템프 잉크의 경우 토너 및 인주와 비교하여 상대적으로 변색 정도가 적은 것을 확인 할 수 있었다. 이는 잉크 용제에 포함된 유기용매 성분이 우선 산화되며 잉크의 변색을 막은 것으로 유추된다.
- 감마선 및 X선 대비 전자선의 변색이 상대적으로 적은 것을 확인하였다. 이는 입자선인 전자선의 특성으로 인하여 색소 구조를 상대적으로 적게 파괴하기 때문으로 추정된다.
- 전체적인 변색 정도를 검토하였을 때, 흑백 인쇄물의 경우 선원 및 선량에 큰 영향을 받지 않을 것으로 판단되며, 컬러 인쇄물의 경우 전자선 조사를 통해 감마선 및 X선 대비 열화 정도를 낮출 수 있을 것으로 판단된다. 또한, 10 kGy 조사 이후 추가적인 변색 정도가 ΔE 값이 1 이하로 적으므로, 종이의 변색이 크지 않는 25 kGy 이하로 조사를 진행해야 할 것으로 판단된다.

6. 방사선 조사에 따른 라디칼 생성 확인

6.1 감마선 조사 종이 샘플의 ESR 결과

- ESR 분석 결과, 샘플 종이 4종에서 셀룰로오스 라디칼로 확인되는 특징적인 Peak이 발생함을 확인할 수 있었다.
- 라디칼 발생 강도는 백상지 > 갯지 > 한지 > 박엽지 순으로 확인되었다.
- 박엽지의 경우 다른 종이 대비 라디칼 발생이 적은 것을 확인할 수 있었다. 이는 상대적으로 평량이 적고 펄프 함량이 낮아, 라디칼의 발생이 적고, 소거가 빠르기 때문으로 판단 된다.
- 선량이 증가함에 따라 라디칼 Peak의 강도가 강해짐을 확인 할 수 있었다. 이는 선량이 강해짐에 따라, 셀룰로오스의 분해 및 라디칼화가 가속되기 때문으로 판단된다.
- 건조 종이 및 모의 수침 종이의 라디칼 Peak의 패턴에는 변화가 없었다. 이는 수침 여부는 라디칼 형성에 유의미한 영향을 끼치지 않으며, 건조 후에도 라디칼이 잔류함을 의미한다.

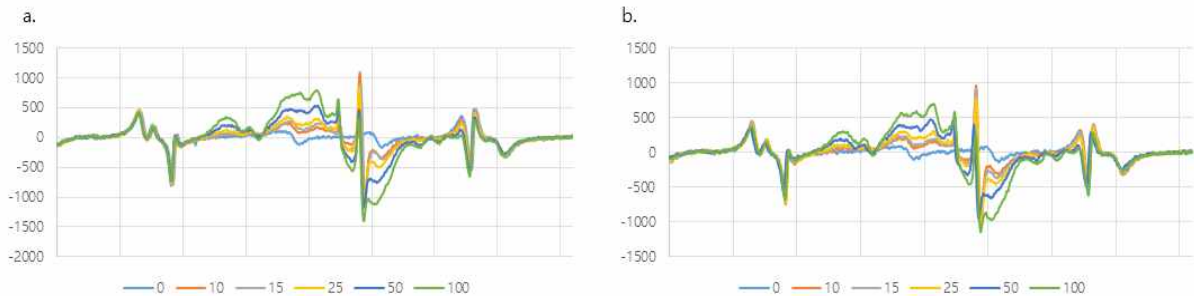


Fig 64. 감마선 조사 백상지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

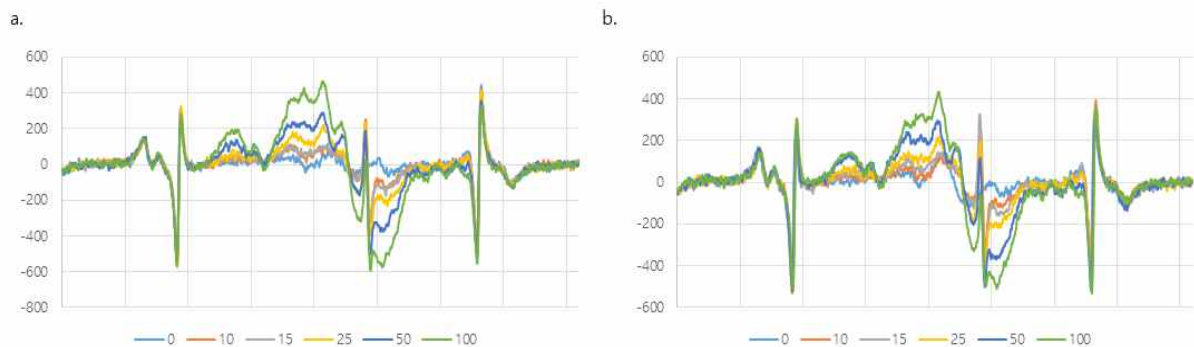


Fig 65. 감마선 조사 갯지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

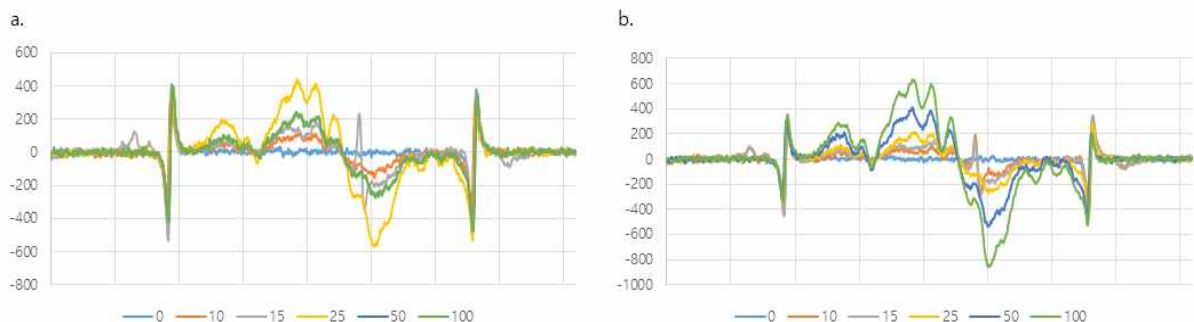


Fig 66. 감마선 조사 한지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

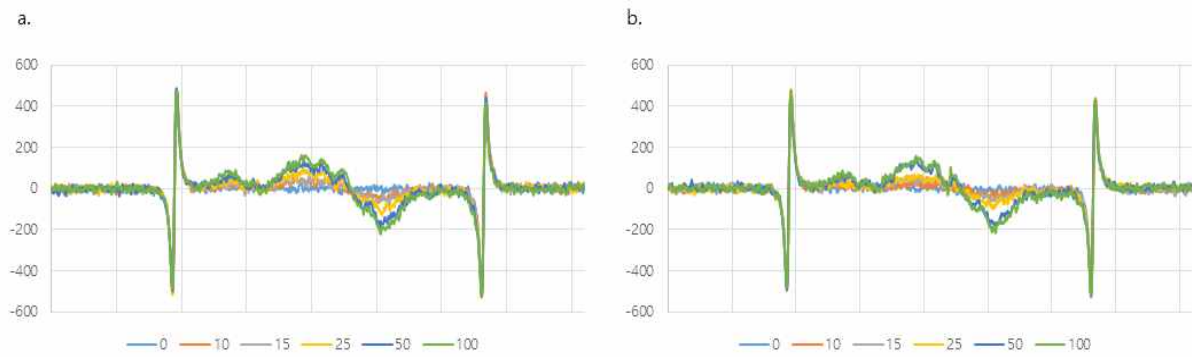


Fig 67. 감마선 조사 박엽지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

6.2 전자선 조사 종이 샘플의 ESR 결과

- 전자선의 경우 감마선과 같이, 셀룰로오스 라디칼 Peak이 발생함을 확인할 수 있었다.
- 선량이 증가함에 따라 라디칼의 Peak이 증가함을 확인 할 수 있었으며, 수침 여부는 라디칼 발생에 영향을 미치지 않았다.
- 감마선과 동일하게 백상지>갱지>한지>박엽지 순으로 라디칼이 발생함을 확인 할 수 있었다.
- 감마선 대비 전자선 조사 건조 샘플의 라디칼 발생이 10%정도 높게 발생함을 확인하였다. 이는 전자를 직접 방사하는 전자선의 특성으로 인하여 라디칼 형성이 가속된 영향으로 판단된다.

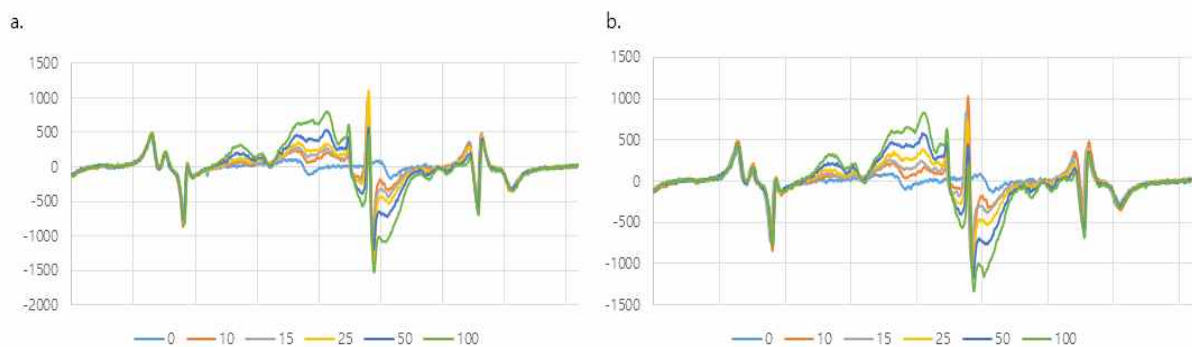


Fig 68. 전자선 조사 백상지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

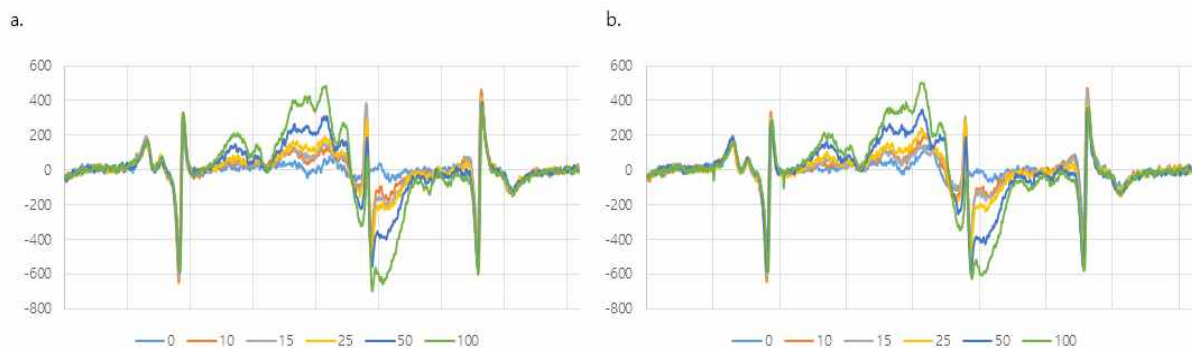


Fig 69. 전자선 조사 갱지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

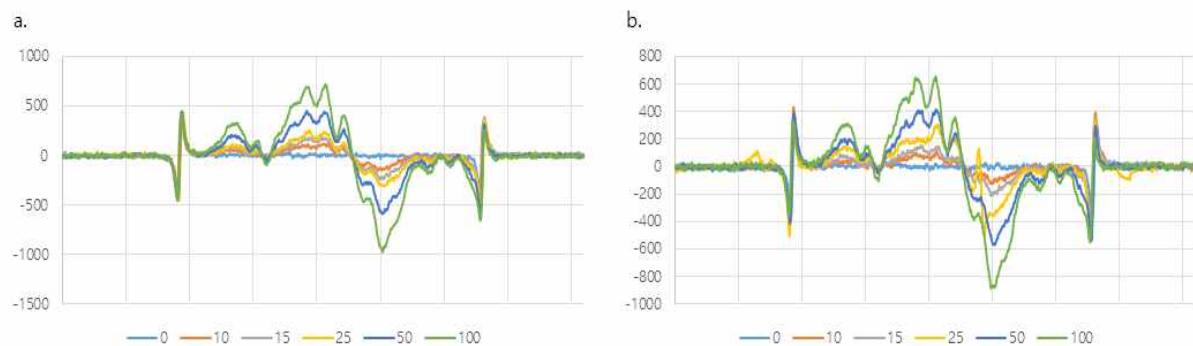


Fig 70. 전자선 조사 한지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

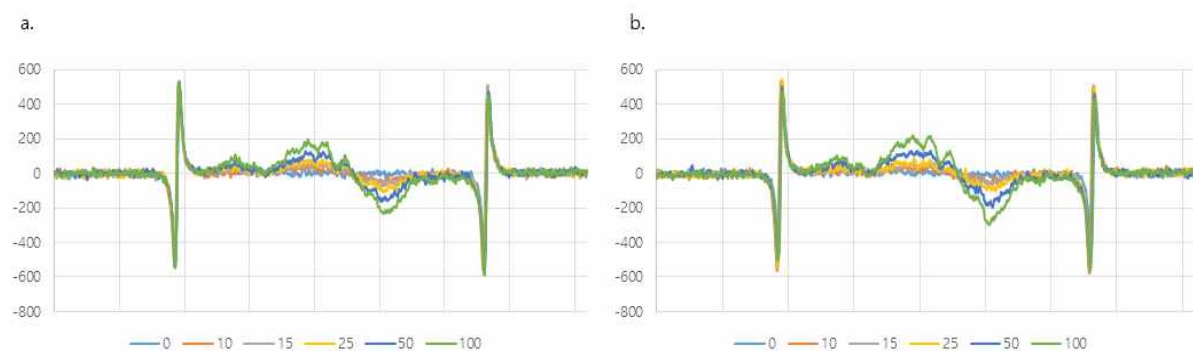


Fig 71. 전자선 조사 박엽지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

6.2 X-선 조사 종이 샘플의 ESR 결과

- X-선의 경우 앞선 감마선 및 전자선과 같이, 셀룰로오스 라디칼 Peak이 발생함을 확인할 수 있었다.
- 선량이 증가함에 따라 라디칼의 Peak이 증가함을 확인 할 수 있었으며, 수침 여부는 라디칼 발생에 영향을 미치지 않았다.
- 백상지>갯지>한지>박엽지 순으로 라디칼이 발생함을 확인 할 수 있었다.

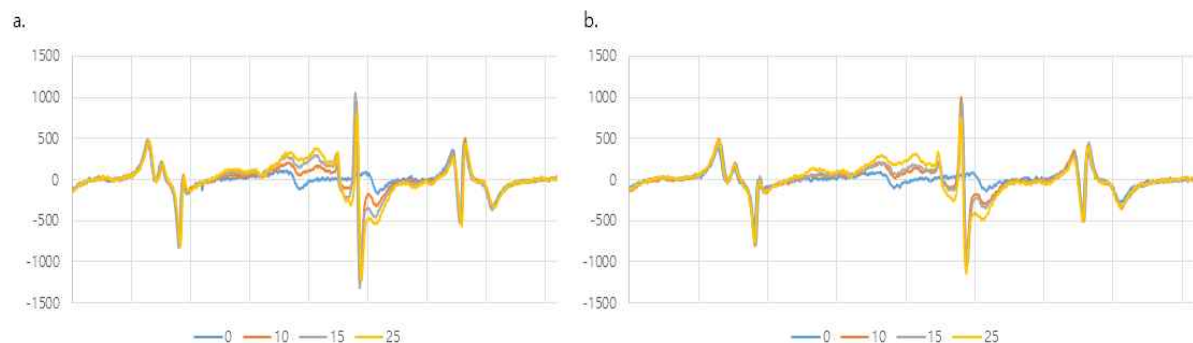


Fig 72. X-선 조사 백상지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

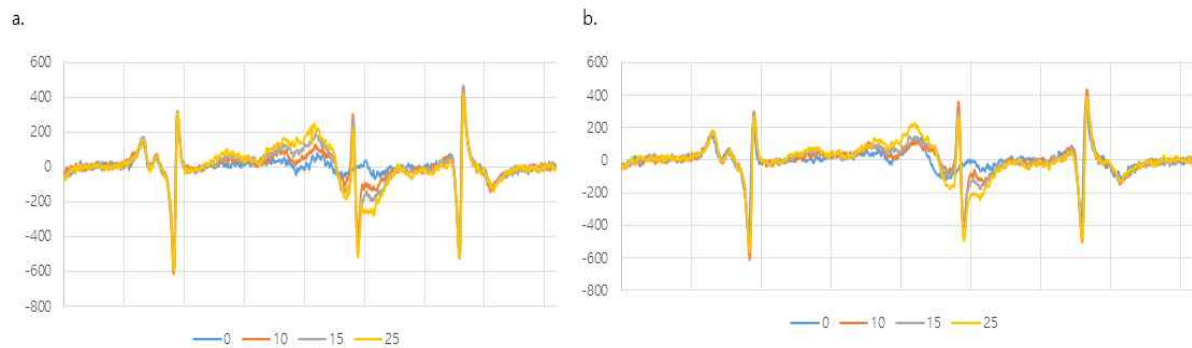


Fig 73. X-선 조사 갯지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

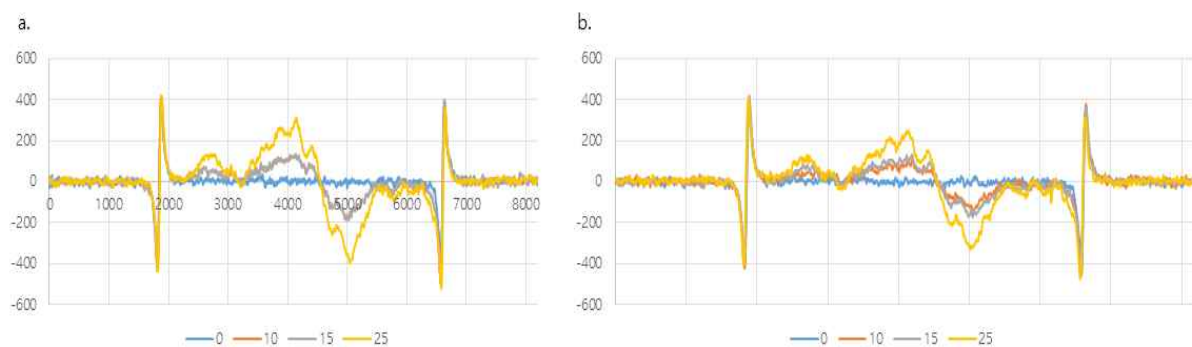


Fig 74. X-선 조사 한지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

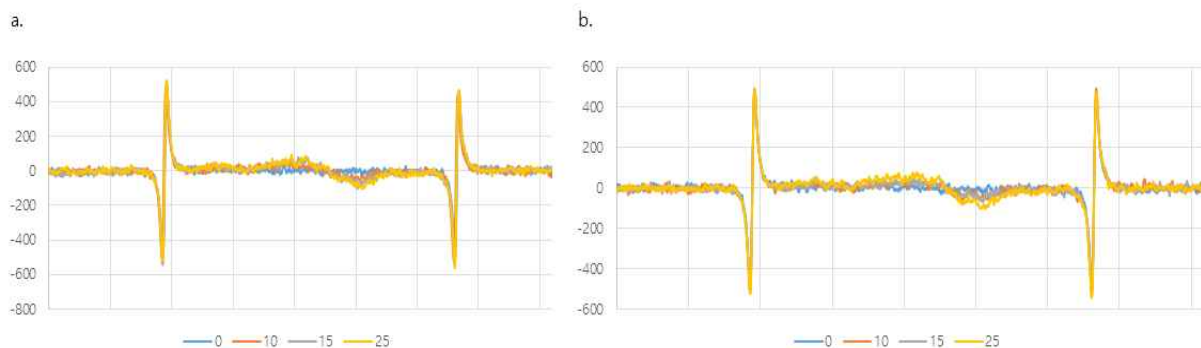


Fig 75. X-선 조사 박엽지 ESR spectrum (a.건조, b.습윤)

- 선량이 증가함에 따라 라디칼 발생이 강해지는 것을 확인 할 수 있었다. 이로 인하여 저선량 (10~15 kGy)에서 중합반응을 촉진될 것으로 예상되며, 고선량으로 갈수록 라디칼에 의한 분해 반응이 촉진될 것으로 예상된다. 이는 갯지, 박엽지 등의 인장강도 증감에서 동일한 경향성을 확인 할 수 있었다.
- 시험 용지의 장기 보관을 통해 라디칼의 소멸 여부 및 장기적인 물리 강도 변화에 관하여 추가 테스트가 필요할 것으로 판단된다.

7. 방사선 조사에 따른 소독 효과 확인

7.1 곰팡이 감염을 위한 전배양

1) *Epicoccum nigrum* 전배양 결과

- 선행 연구에 따라 *Cladosporium* sp., 및 *Epicoccum nigrum*을 접종하여 배양한 결과, 종이 4종 및 용수 3종에 상관없이 종이의 오염이 발생하는 것을 확인 할 수 있었다.
- *Epicoccum nigrum*을 접종한 종이에서는 백상지>깻지>한지>박엽지 순으로 균사가 크게 발달함을 확인 할 수 있었다. 박엽지의 경우, 균사 발생이 거의 없는 것을 확인 할 수 있었으며, 이는 박엽지에 균사 생장에 필요한 무기질이 부족하기 때문일 것으로 판단된다.
- 용수에 의한 영향을 확인해볼 때, 담수>증류수>해수 순으로 생장이 촉진됨을 확인 할 수 있었다. 이는 담수의 경우 생장에 필요한 무기질을 다량 포함하고 있기 때문일 것으로 판단되며, 해수의 경우 염분으로 인하여 균사 생장이 억제 되었을 것으로 판단된다.
- *Epicoccum nigrum*의 경우, 색소 발생으로 인한 2차 피해가 발생하는 곰팡이로 잘 알려져 있는 것과 같이, 생장이 진행됨에 따라 용지 및 용수에 색소로 인한 변색이 발생됨을 확인 할 수 있었다.

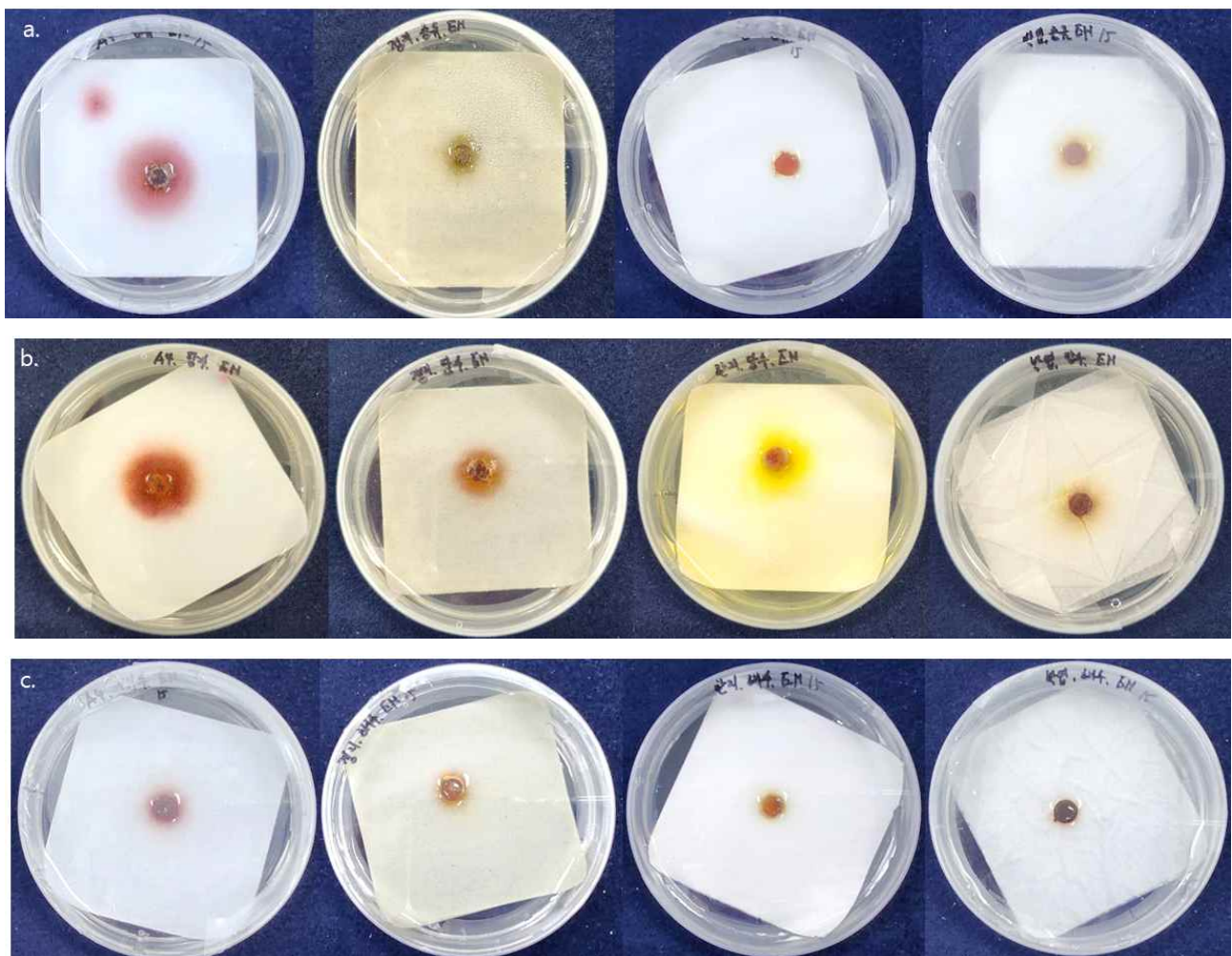


Fig 76. *Epicoccum nigrum* 접종 후 배양 7일 (a.증류수, b.담수, c.해수)

2) *Cladosporium* sp. 전배양 결과

- *Cladosporium* sp.을 접종한 종이에서는 백상지>깁지>한지>박엽지 순으로 균사가 크게 발달함을 확인 할 수 있었다.
- 용수에 의한 영향을 확인해볼 때, 담수>증류수>해수 순으로 생장이 촉진됨을 확인 할 수 있었다.
- *Cladosporium* sp. 의 경우 종이의 색소 침착 등의 변색을 유발하지는 아니하였으나, 포자 형성을 통하여 종이를 넓게 오염시키는 것을 확인 할 수 있었다. 효과적인 접종을 위하여 이식한 배지 조각인 Plaque를 중심으로 생장을 진행했던 *Epicoccum nigrum* 과는 다르게 포자를 통해 종이 전체에서 산발적인 생장을 확인 할 수 있었다.

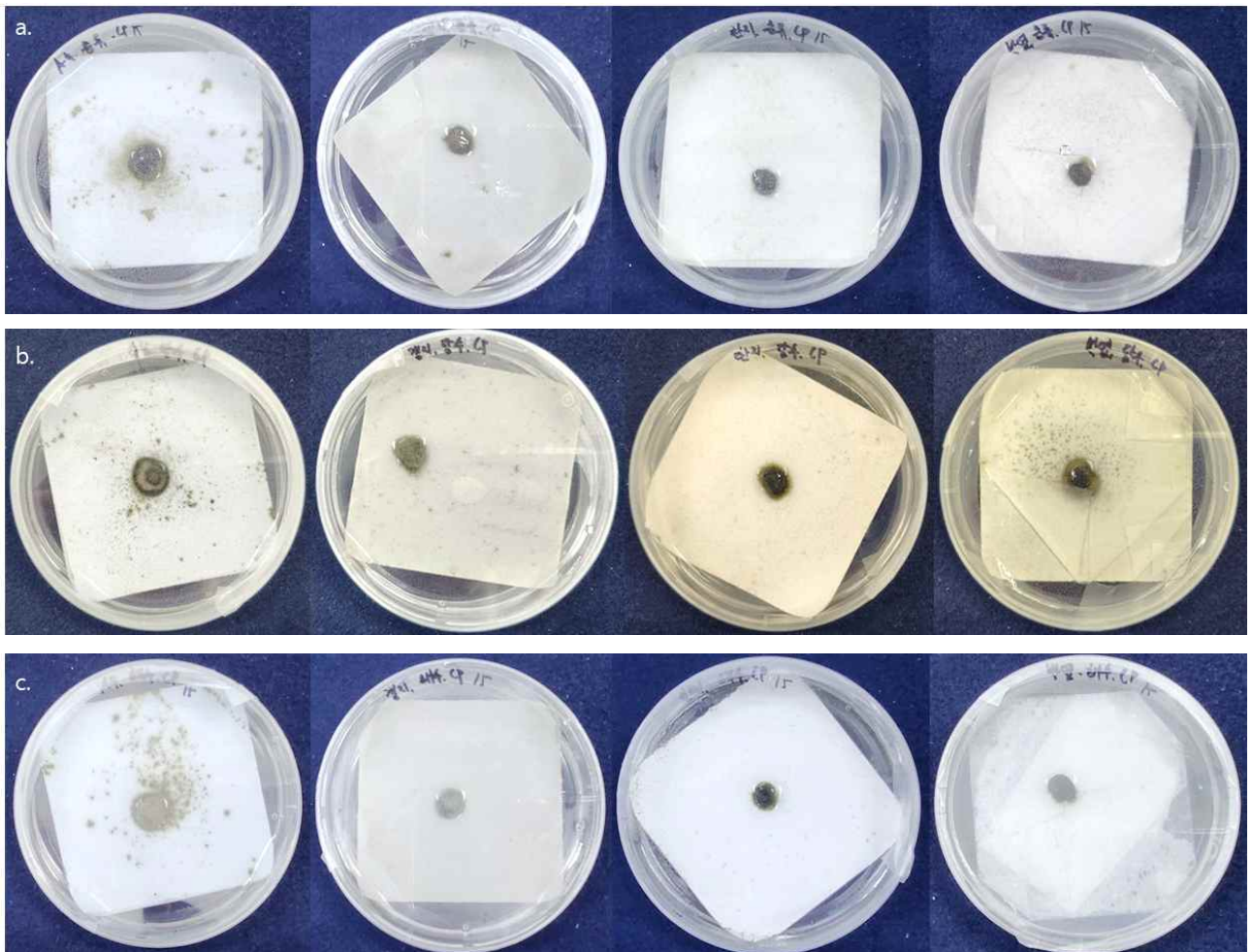


Fig 77. *Cladosporium* sp. 접종 후 배양 7일 (a.증류수, b.담수, c.해수)

7.2 Control 샘플 배양 결과

- 시험 방법에 따라, 조사가 완료된 전배양 샘플에서, 감염 중심인 Plaque 및 종이 샘플을 채취하여 PDA 배지에 이식하였다.
- 방사선을 조사하지 않은 Control 샘플의 경우, Plaque 및 오염 종이를 PDA에 배양했을 시, 곰팡이가 성장하는 것을 확인할 수 있었다.
- 상대적으로 생장이 약했던 증류수 및 해수에서도 곰팡이 2종이 모두 정상 성장함을 확인할 수 있었다. 이를 통해 해수 및 증류수 등에 오염 시, 육안으로 확인되는 오염 대비 더 많은 오염이 발생했을 가능성이 있음을 시사한다.
- 공시균 2종의 경우, 종이 종류에 관계 없이 정상적인 성장을 함을 확인 할 수 있었다. 이는 모든 종류의 종이에 공시균 2종에 의한 오염이 발생 할 수 있음을 시사한다.

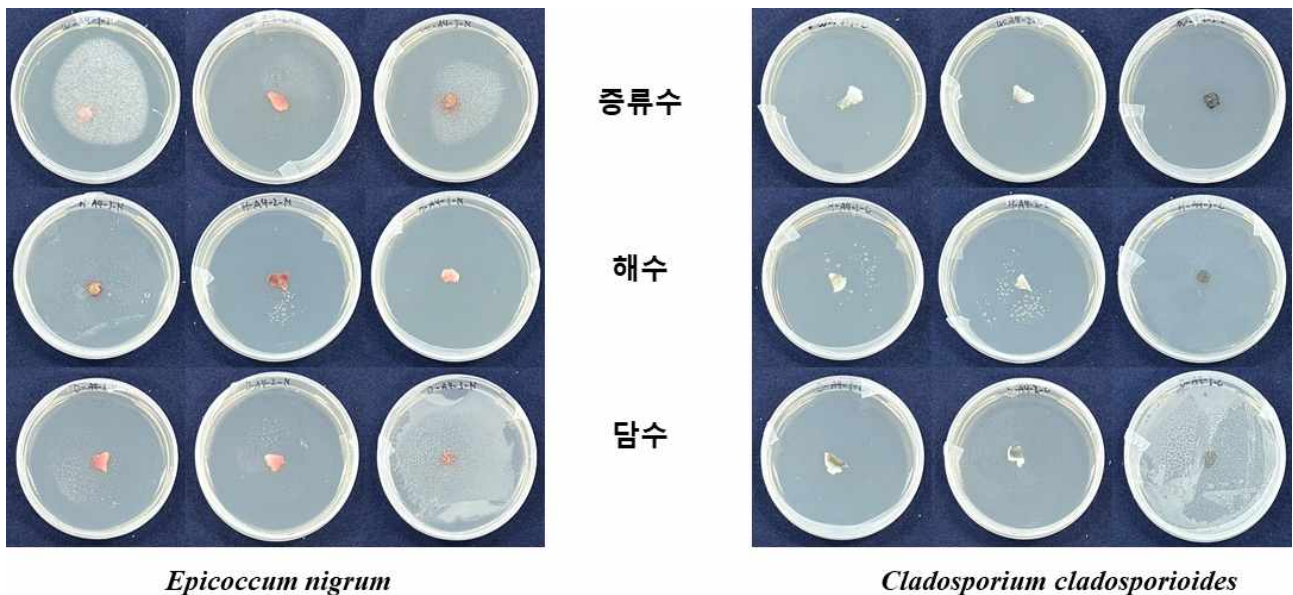


Fig 78. Control 백상지 접종 직후

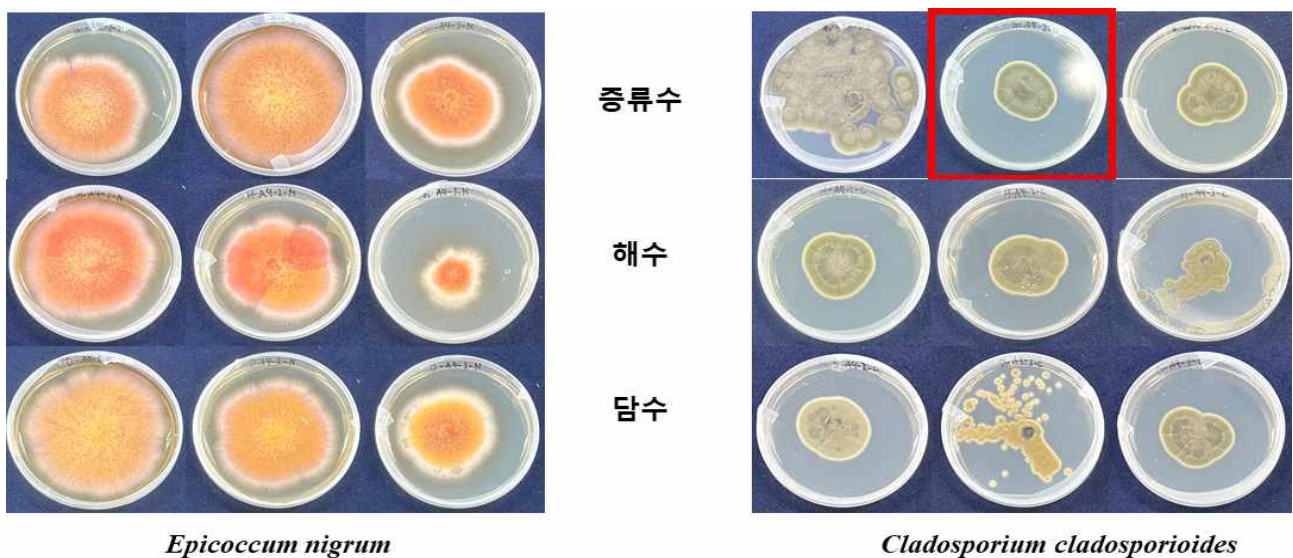
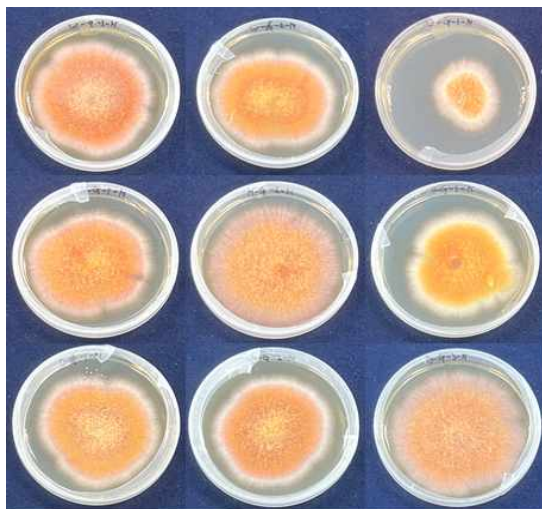


Fig 79. Control 백상지, 배양 8일



Epicoccum nigrum

증류수

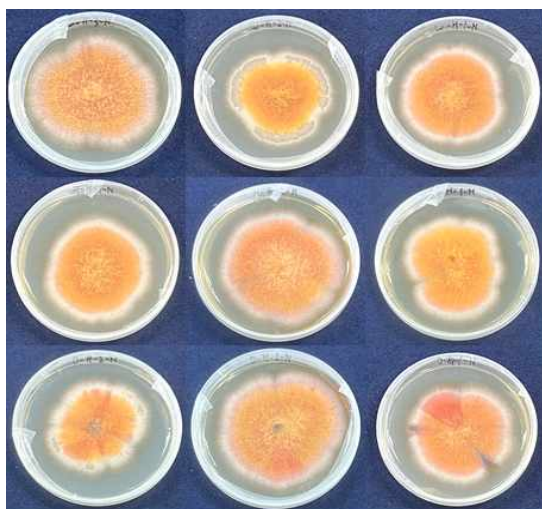
해수

담수



Cladosporium cladosporioides

Fig 80. Control 갯지, 배양 8일

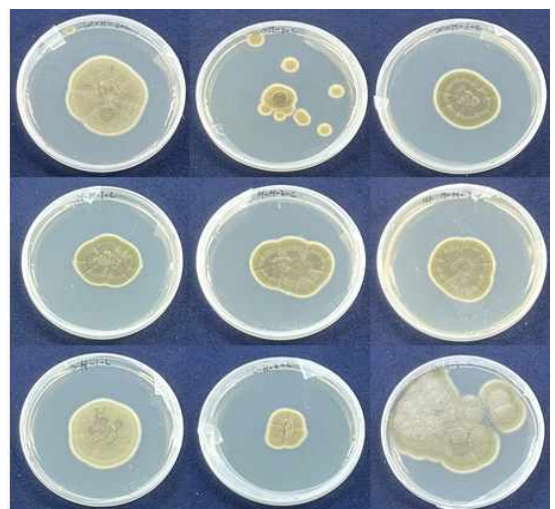


Epicoccum nigrum

증류수

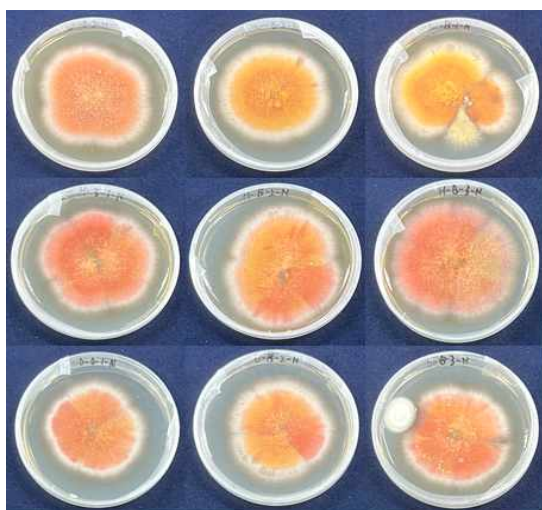
해수

담수



Cladosporium cladosporioides

Fig 81. Control 한지, 배양 8일



Epicoccum nigrum

증류수

해수

담수



Cladosporium cladosporioides

Fig 82. Control 박엽지, 배양 8일

7.3 X-선 15 kGy 조사 샘플 배양 결과

- X-선 15 kGy를 조사한 샘플을 Plaque 및 오염 종이를 PDA에 배양했을 시, 공시균의 생장이 없음을 확인할 수 있었다.
- X-선 15 kGy를 조사할 경우, 공시균 2종에 대한 완벽한 성장 억제 및 소독이 가능할 것으로 판단 된다.
- 배양 8일까지 공시균의 생장은 확인되지 않았으며, 향후 30일까지의 지속 관찰을 통하여, 추가 성장 여부를 확인하고자 한다.

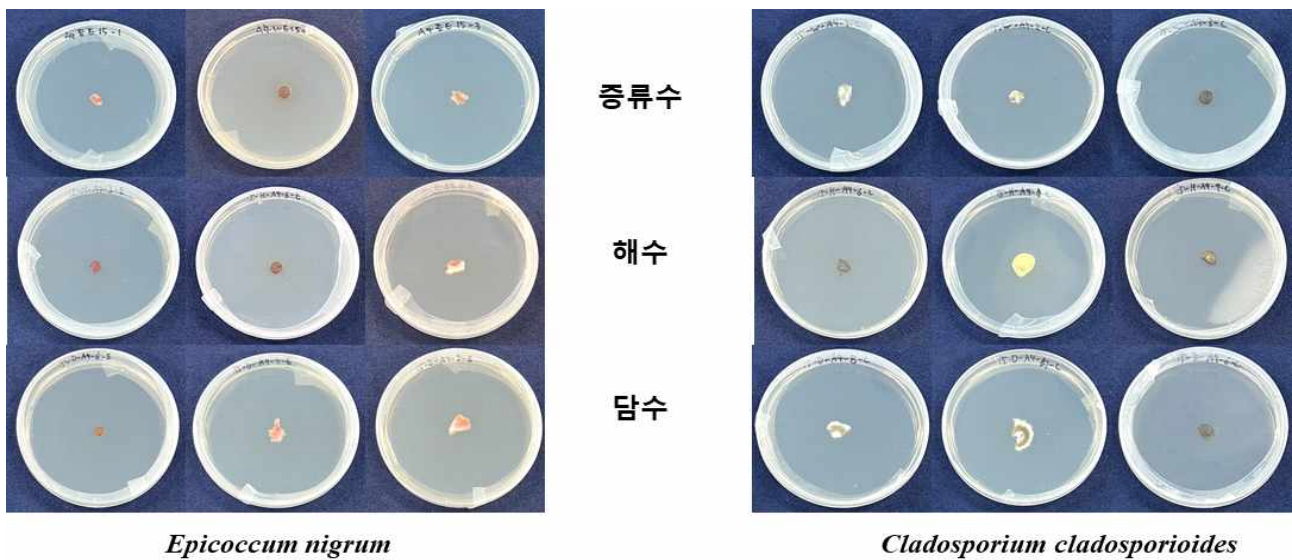


Fig 83. X-선 15 kGy 조사 백상지 배양 8일

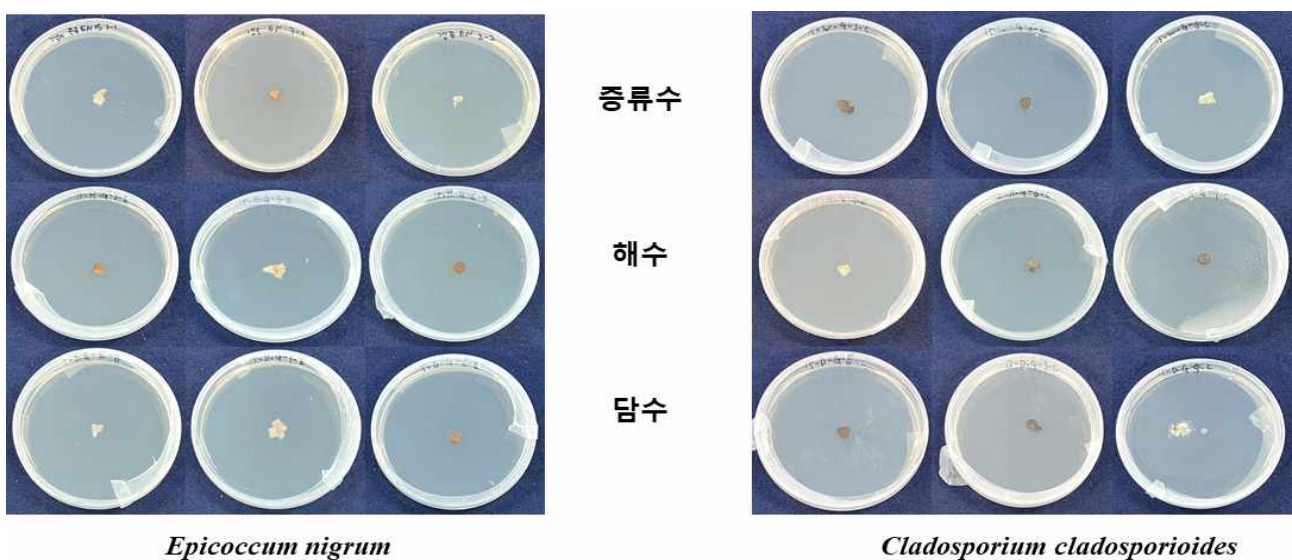
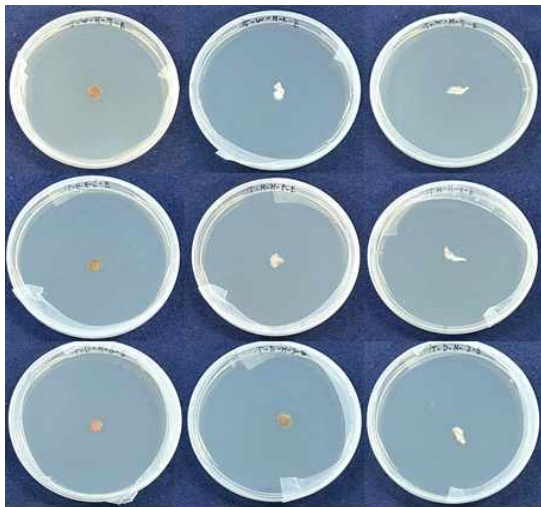


Fig 84. X-선 15 kGy 조사 갯지 배양 8일

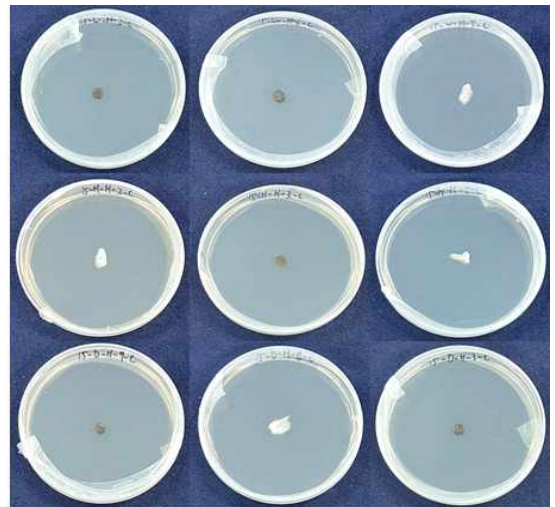


Epicoccum nigrum

증류수

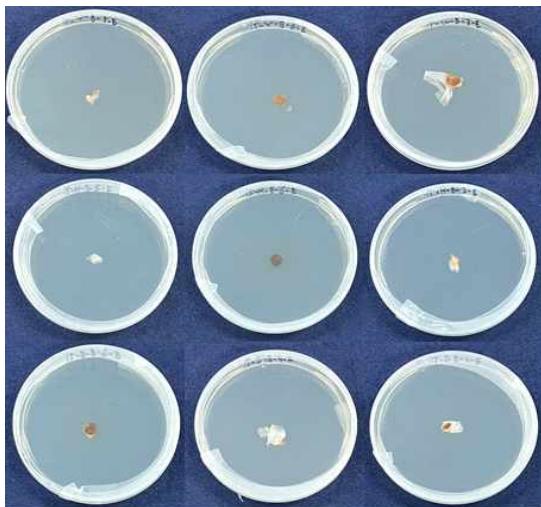
해수

담수



Cladosporium cladosporioides

Fig 85. X-선 15 kGy 조사 한지 배양 8일

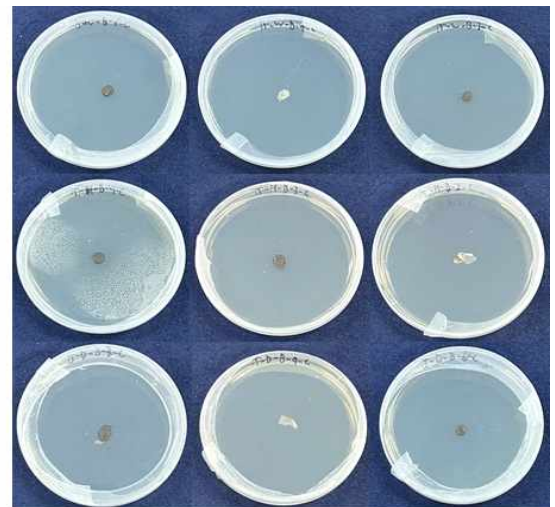


Epicoccum nigrum

증류수

해수

담수



Cladosporium cladosporioides

Fig 86. X-선 15 kGy 조사 박엽지 배양 8일

7.4 감마선 15 kGy 조사 샘플 배양 결과

○ 감마선 15 kGy를 조사한 샘플의 Plaque 및 오염 종이를 PDA에 배양했을 시, 공시균의 생장이 없음을 확인할 수 있었다.

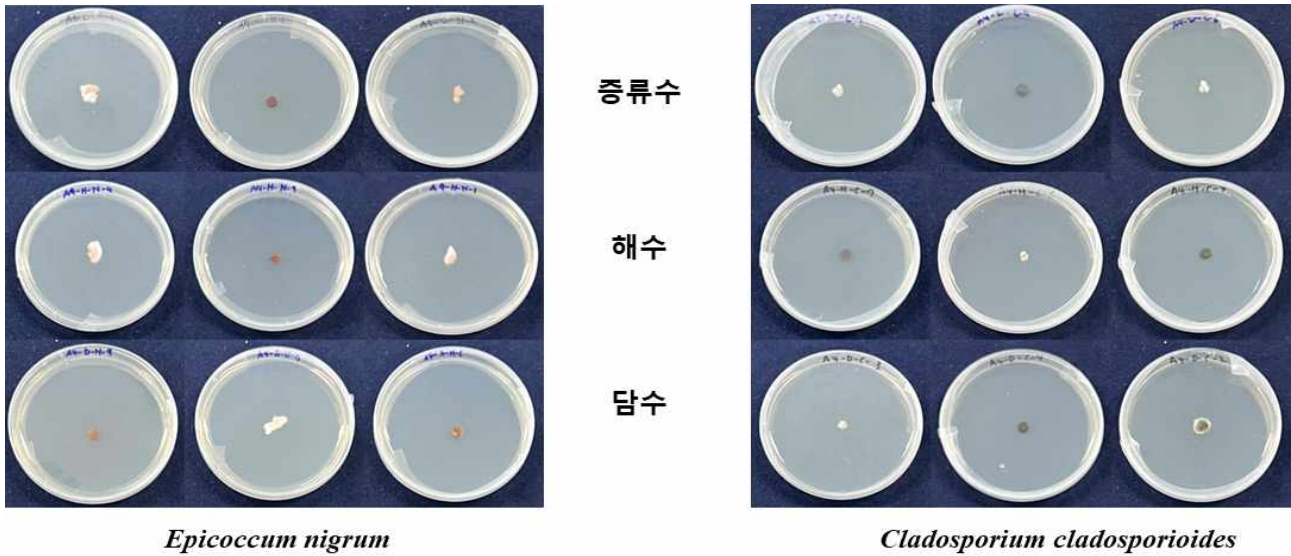


Fig 87. 감마선 15 kGy 조사 백상지 배양 8일

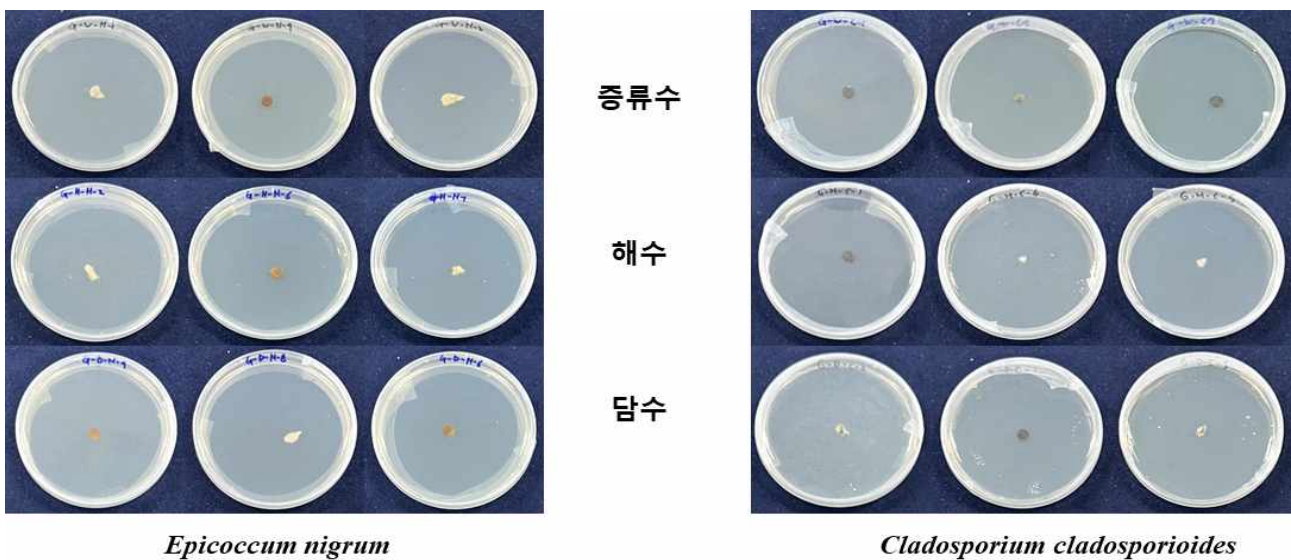


Fig 88. 감마선 15 kGy 조사 갯지 배양 8일

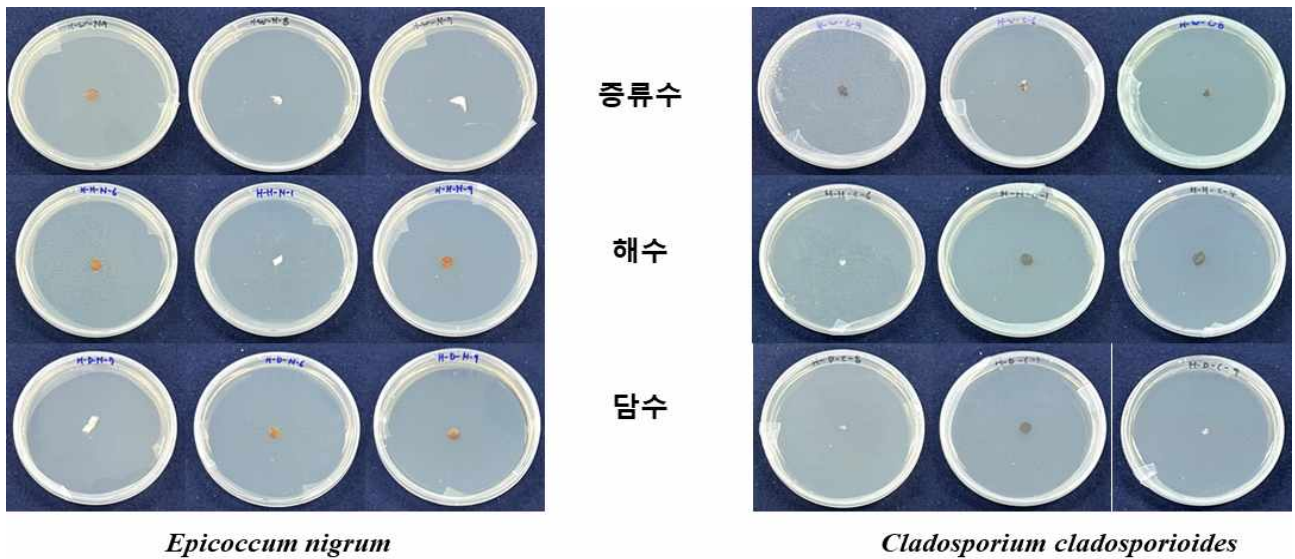


Fig 89. 감마선 15 kGy 조사 한지 배양 8일

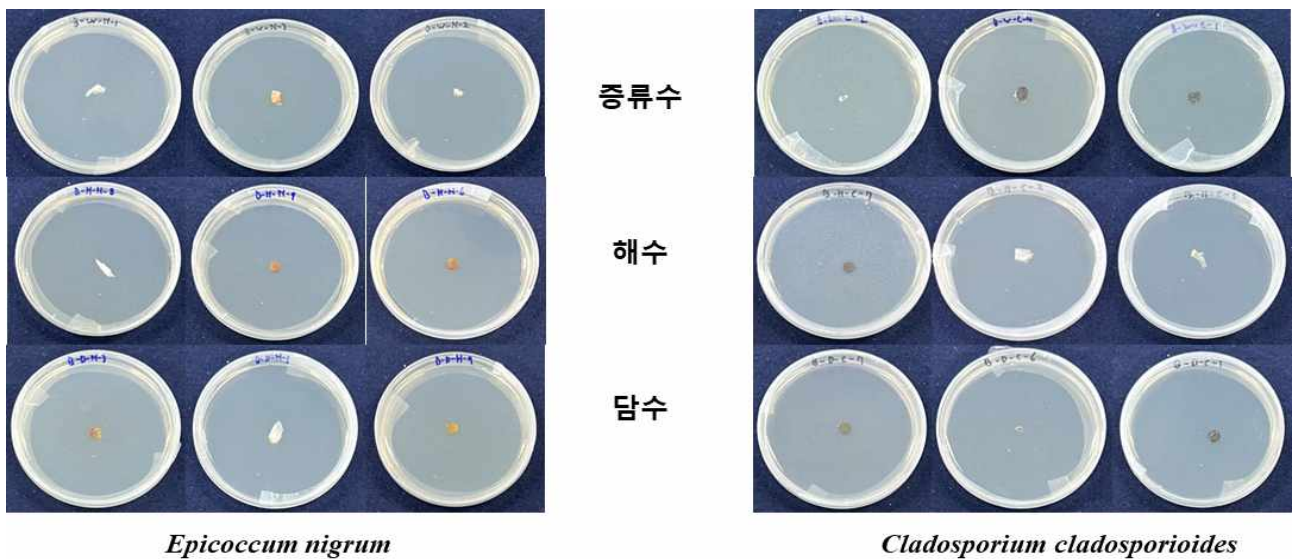


Fig 90. 감마선 15 kGy 조사 박엽지 배양 8일

- X-선 조사 샘플의 경우, 10월 31일 현재 접종 후 28일까지 곰팡이 생장이 확인되지 않았으며, 마 선 조사 샘플의 경우 10월 31일 현재 접종 후 10일까지 곰팡이 생장이 확인되지 않았다.
- 선행 연구에서 확인된 것과 같이, *Cladosporium* sp., 및 *Epicoccum nigrum*의 경우 15 kGy에서 충분히 사멸됨을 확인 할 수 있었으며, 앞선 물리, 화학적 변화와 함께 생각할 경우, 종이에 영향을 미치는 25 kGy 이하의 선량으로 방사선을 조사할 경우, 충분한 소독 효과를 얻을 수 있을 것으로 판단된다.
- 최종적인 소독 효과 확인을 위해 접종 30일까지 추적 관찰을 지속할 예정이다.

8. 수침 모의 기록물의 방사선 조사에 따른 소독 효과 확인

8.1 용수별 소독 효과

- 실제 기록물의 경우, 문서철 형태로 생산 및 보관되기 때문에, 방사선 소독 효과를 확인하기 위하여, 종이 4종을 각 100매씩 묶어 모의 기록물을 준비하였다. 모의 기록물을 증류수, 담수, 해수에 모의 수침을 진행한 후, 표준상자에 넣어 Control 샘플은 상온에서 7일간 보관하고, 대조군 샘플은 감마선 15 kGy로 조사하여 소독 효과를 확인하였다.
- 조사를 하지 않은 Control의 경우, 백상지에서 곰팡이 발생이 확인되었으며, 갯지 및 한지에서 열은 갈색으로 변색이 확인되었다. 또한, 부패로 인한 악취가 발생함을 확인할 수 있었다.
- 소독처리를 한 샘플의 경우, 별도 곰팡이 및 균 발생이 확인되지 않았으며, 종이의 변색이 확인되지 않았다. 또한, 부패로 인한 악취 등의 이상 징후가 발견되지 않았다.
- 별도의 공시균 접종 없이 상온에서 방치한 샘플에서는 자연 유래 균에 의한 변질 및 악취가 발생함을 확인할 수 있었으나, 방사선 조사한 샘플에서는 변질 및 악취 발생이 없음을 확인할 수 있었다. 이를 통하여 방사선 조사를 통한 균 성장 억제 및 살균은 충분히 효과적인 것으로 판단된다. 해당 샘플을 장기보관하며, 소독 효과를 장기 관찰할 필요성이 있는 것으로 판단된다.

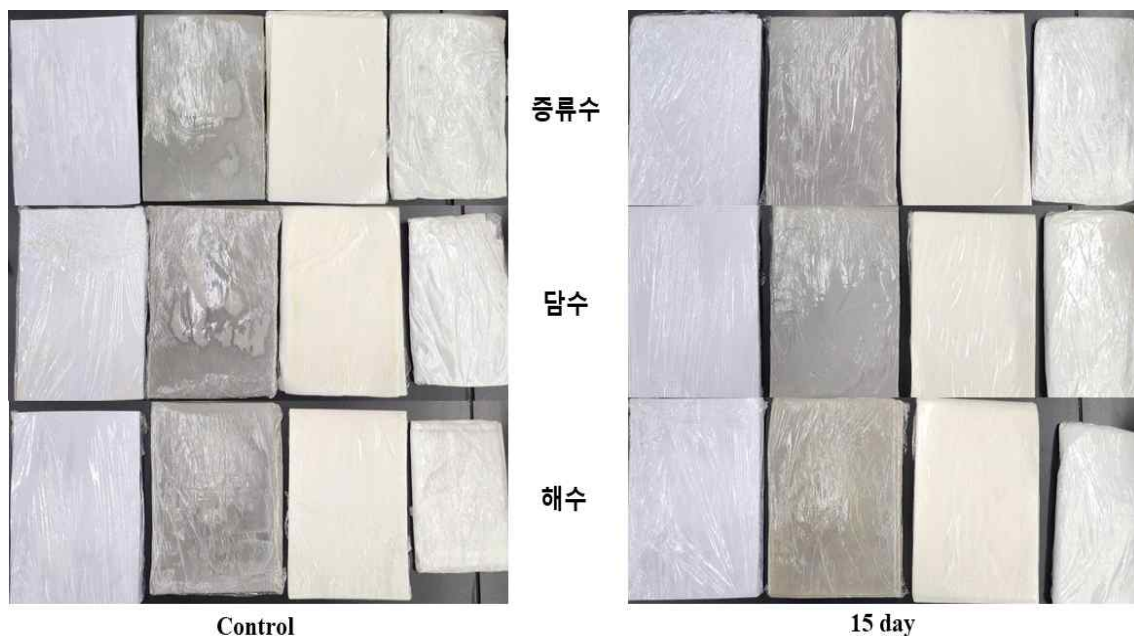


Fig 91. 감마선 15 kGy 조사 대용량 종이 샘플, 배양 14일 후

8.2 뽕 오염 소독 효과

- 쓰나미 등 해수 및 뽕 오염 시, 방사선 소독 효과를 확인하기 위하여, 모의 기록물을 뽕 (전북 부안 채취) 100 g 에 물 10 L를 섞어 오염수를 만든 후 모의 수침을 진행하였다. 모의 수침된 뽕 오염 샘플을 표준상자에 적재한 뒤, Control 샘플은 상온에서 7일간 보관하고, 대조군 샘플은 감마선 15 kGy로 조사하여 소독 효과를 확인하였다.
- 조사를 하지 않은 Control의 경우, 균 발생은 확인되지 않았으나, 한지에서 열린 갈색으로 변색이 확인되었다. 또한, 부패로 인한 악취가 발생함을 확인할 수 있었다.
- 소독처리를 한 샘플의 경우, 균 발생이 확인되지 않았으며, 종이의 변색이 확인되지 않았다. 또한, 부패로 인한 악취 등의 이상 징후가 발견되지 않았다.
- 별도의 공시균 접종 없이 상온에서 방치한 샘플에서는 자연 유래 균에 의한 변질 및 악취가 발생함을 확인할 수 있었으나, 방사선 조사한 샘플에서는 변질 및 악취 발생이 없음을 확인할 수 있었다. 이를 통해 오염물을 포함한 해수의 오염 시, 방사선을 통한 긴급 방제가 효과적일 것으로 판단된다.



Control



8 Day

Fig 92. 감마선 15 kGy 조사 뽕 오염 샘플, 배양 8일 후

9. 추가 검토 요청 사항 :

국가기록원 종이기록물 보존환경 미생물 분리·동정 및 유해성 평가

9.1 연구 목적

본 연구는 국가기록원이 소장 중인 수침 피해 종이기록물에서 검출된 진균류의 분리·동정 및 유해성 평가를 수행함으로써, 기록물 복원·보존 작업자의 안전관리 체계를 강화하고 방사선 기반 비접촉 소독기술의 적용 타당성을 검증하고자 수행되었다. 또한 분리·동정된 균주의 유해성을 평가하기 위해 국제 생물안전기준(Biosafety Level, BSL)에 따라 각 균주의 위험도를 분류하였다. BSL은 미생물의 감염 가능성과 유해성에 따라 1단계(BSL-1)부터 4단계(BSL-4)까지 구분되며, 각 단계는 요구되는 실험환경, 보호장비, 작업자 안전조치 수준을 포함한다(CDC, 2020).

수침 피해 종이기록물에서 채취된 혼합 미생물 시료로부터 단일 진균 콜로니를 확보하고, 이를 기반으로 형태학적 및 분자생물학적 동정을 수행하여 각 균주의 유해성을 과학적으로 평가하였으며, 검출된 미생물의 동정 정확도를 향상시키고, 종이기록물 훼손 및 작업자 건강 유해성을 평가하여 향후 국가기록원의 보존·복원 안전체계 구축에 필요한 기초자료를 제공하는 것을 목적으로 한다.

[미생물의 인체 감염 위험만 기준으로 나누는 체계]

등급	위해성 수준	주요 특징	요구되는 안전조치	예시 미생물	기록물 보존환경에서의 의미
BSL-1	매우 낮음	바병원성 환경미생물, 감염 거의 없음	기본 PPE(장갑·마스크), 손 소독	<i>Streptomyces spp.</i> , <i>Talaromyces spp.</i>	기록물 손상·작업자 위험 모두 낮음. 알레르기 가능성 정도.
BSL-2	중간	감염 가능성 있음, 알레르기·부비동염·피부염 유발	보호구(N95·장갑), 국소배기, 생물안전캐비닛(BSC)	<i>Chaetomium globosum</i> , <i>Aspergillus</i> , <i>Byssoschlamys</i> , <i>Penicillium chrysogenum/rubens</i>	기록물 훼손·작업자 위험성이 모두 높은 핵심 관리 대상균
BSL-3	높음	공기전파 감염, 중증 질환 유발	음압실, BSC-II/III, 고급 PPE	<i>Mycobacterium tuberculosis</i> , <i>Histoplasma capsulatum</i>	기록물 환경에서는 등장 가능성 거의 없음
BSL-4	최고위험	치명률 매우 높고 치료법 없음	밀폐실, 양압보호복, 전용 시설	에볼라, 마버그 바이러스	문화재 분야와는 무관

표 1. BSL (Biosafety Level) 분류기준 및 기록물 보존환경과의 연관성

○ 연구의 필요성

1) 보존환경 미생물 오염의 실체 규명 필요

- 현재까지 종이기록물에서 검출된 진균류 종류, 위험도, 손상기전이 체계적으로 정리된 자료가 부족함

2) 작업자 안전 확보를 위한 과학적 근거 필요

- 일부 진균은 알레르기, 호흡기 자극, 독소 생성 등 작업자 건강을 위협

- 고위험균(*Chaetomium*, *Aspergillus*) 식별은 안전장비(PPE)·작업지침 강화를 위해 필수

3) 방사선 소독기술 도입의 필요성 검증

-화학 소독의 구조적 한계를 극복할 비접촉·비파괴 방식 필요

-방선균 등 비위험균은 소독 대상에서 제외, 선량 최적화 가능

9.2 연구 내용

○ 연구방법

1. 시료 채취 및 전처리

국가기록원 기록물 보관상자 내부 표면, 복원 처리 중인 기록물의 표면, 작업공간 주변 등에서 먼봉, 멸균 스왑을 사용하여 시료를 수집하였다. 채취한 시료는 멸균 증류수에 균일하게 현탁하여 PDA (Potato Dextrose Agar) 또는 LB(Luria-Bertani Agar) 평판배지에 고르게 도말(spread)하여 25°C 암 조건에서 5-7일간 배양하였다. 배양 후 나타난 다양한 콜로니 중 구별 가능한 콜로니를 선별하여 1차 분리균주로 확보하였다.

2. 순수분리를 위한 반복도말과정 (Purification by Serial Streaking)

진균류는 포자와 균사체가 쉽게 섞여 오염되고, 각기 다른 균주의 성장속도의 차이를 고려하여 단일 균주 확보를 위해 5-14일 간격으로 5회 연속적인 순수분리 과정을 수행하였다.

(1) 1차 도말 (Streaking 1)

1차 분리된 콜로니에서 멸균 니들(loop)을 이용하여 PDA 평판에 4분면 도말을 실시하여 단일 콜로니 형성이 용이하도록 하였다. 25°C에서 5-7일 배양 후 형태가 균일한 콜로니를 선택하였다.

(2) 2차 도말 (Streaking 2)

1차 도말에서 얻은 균일 콜로니 중 형태가 명확히 구분되는 콜로니를 다시 이식하여 동일한 4분면 도말법으로 반복하였다.

(3) 3·4·5차 도말 (Streaking 3 - 5)

정확한 단일 균주 확보를 위해 **총 5회 반복 도말을 수행**하였으며,

각 단계마다 형성된 콜로니의 크기, 색조, 표면 구조, reverse 색 변화 등을 확인하여 순수성을 평가하였다.

3 형태학적 특성 관찰 (Morphology Characterization)

순수분리가 완료된 균주는 PDA 배지에서 25°C 조건으로 7-14일 배양한 뒤 Plate의 앞면, 뒷면의 색과 질감, 공중균사의 형성, 및 분생 포자 형태 등의 형태학적 관찰을 통해 하나의 균주로 최종 분류하였다.

4. 분자동정(Molecular Identification)

더불어 분자생물학적 동정(molecular identification)을 실시하였다. 순수 분리된 균주에 대해서는 형태학적 관찰과 더불어 분자생물학적 동정(molecular identification)을 실시하였다. 곰팡이 ITS 영역(ITS1 - 5.8S - ITS2)의 증폭에는 ITS5(5'-GGAAGTAAAAGTCGTAACAAGG-3')과 ITS4(5'-TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') 프라이머를 사용하였다. 방선균을 포함한 세균 16S rRNA 영역의 증폭에는 27F(5'-AGAGTTTGAATCM TGGCTCAG-3') 및 1492R(5'-TACGGYTACCTTGTTACGACTT-3') 프라이머 세트를 사용하였다. 모든 시료는 마크로젠(Macrogen)에 의뢰하여 Sanger 방식으로 염기서열 분석을 진행하였고, 얻어진 염기서열은 NCBI BLAST를 사용하여 종 수준의 상동성 분석을 실시하였으며, 형태학적 특징과 비교하여 최종 동정 결과를 확정하였다. 이러한 두 단계(형태학적 - 분자학적) 접근 방식을 통합함으로써, 기록물 보존 환경에서 검출된 진균류의 신뢰도 높은 동정이 가능하였다(99% ~ 100%).

9.3 연구 결과

○ 기록물 환경에서 분리된 진균류의 특성 및 유해성 검증에 대한 고찰

- 분리된 곰팡이 중 *Chaetomium globosum*, *Aspergillus/Byssoschlamys* 계열, *Penicillium chrysogenum*/*P. rubens complex*가 기록물 훼손 및 인체 위해성 측면에서 가장 중요한 고위험균으로 확인되었다. *C. globosum*은 강력한 셀룰로오스 분해효소를 생산하는 내습성 균주로, 종이·목재 기반 기록물을 직접적으로 분해하여 구조적 안정성을 저해할 뿐 아니라 chaetoglobosin 등을 포함한 세포독성·유전독성 마이코톡신을 생성하는 것으로 알려졌다 (Li et al., 2014). *C. globosum*은 고습 환경에서 빠르게 증식하며, 실내 공기질 악화·작업자 호흡기 자극·피부염 등을 유발할 수 있어, 보존 환경에서 가장 우선적으로 관리해야 할 균종으로 평가된다 (Andersson et al., 1997).
- *C. globosum*은 chaetoglobosins(A - F), chaetomugilins, cochliodones, sterigmatocystin 유사 polyketides 등 다양한 cytotoxic·genotoxic secondary metabolites를 생산할 수 있는 것으로 알려져 있으며, 인체 위해성 측면에서는 일반 건강인에게는 주로 알레르기성 호흡기 증상, 천식 악화, 피부염을 유발할 수 있으며, 면역저하 환자에서는 폐·부비동·피부·손발톱 감염(phaeohyphomycosis)이 드물게 보고된다. 또한 *C. globosum*은 공기 중 포자밀도가 높을 경우 건축물 곰팡이 오염(indoor mold contamination)의 지표로 간주될 정도로 실내 환경에서의 문제성이 크다 (Fogle et al., 2007). 이러한 점에서 *C. globosum*은 일반 실험실 생물안전등급(BSL-1~2)에 해당하나, 고농도 노출은 호흡기·피부 자극을 유발할 수 있으며, 생성 독소는 배양액·원균체에 접촉하거나 에어로졸화될 경우 세포독성 위험이 있어 적절한 PPE 착용이 필요함에 따라 기록물 보존환경과의 연관 위험도 Levle 3에 해당한다.
- *Aspergillus* 및 *Byssoschlamys* 계열은 건조·고열·산성 조건에서도 생존할 수 있는 강한 내환경성을 지닌 곰팡이로, 포자 확산력이 매우 높아 서고 전반의 광범위한 오염으로 이어질 가능성이 크다. 일부 균주는 patulin 등 독성 대사산물을 생성하여 인체 호흡기 질환을 유발할 수 있으며, 기록

- 물 표면의 변색, 기질 약화 등 구조적 손상을 초래한다. *Penicillium chrysogenum*/*P. rubens*는 상대적으로 저독성균이지만 포자 발생량이 많고 확산성이 뛰어나 보존환경에서 흔하게 검출되며, 지속적인 알레르기성 호흡기 증상의 원인이 될 수 있다 (Puel et al., 2010). 실내 환경 연구에서는 *P. chrysogenum* 노출이 천식 및 기도 과민반응을 유발할 수 있는 것으로 보고되었다(Ward et al., 2010).
- 한편, *Talaromyces ruber* 및 *T. purpureogenus*는 토양·식품·실내 환경에서 발견되는 색소생성 진균으로, azaphilone·anthraquinone 계열의 강한 적색·자색 색소(예: mitorubrin, purpuride, sclerotiorin)를 생산하는 것이 특징이다 (Fischer et al., 2022; Mapari et al., 2009). 일반적으로 병원성은 낮으나, 강한 색소균 특성상 기록물에 확산되어 시각적 손상을 초래할 수 있어 주기적 모니터링이 요구된다. 같은 속의 *T. pinophilus* 역시 병원성은 낮으나 색소 생성 및 배지 확산 특성을 고려할 때 관리 대상에 포함된다.
 - 방선균인 *Streptomyces cavourensis*, *S. parvus*, *S. griseoplanus*, *S. argenteolus*는 모두 BSL-1 저위험균으로 분류되며, 기록물의 구조적 분해 능력은 제한적이다. 기록물의 보존환경에서 나타나는 구조적 손상·기질 분해·색소 침착 등 주요 훼손 기전에 관여하지 않는 균주들로 확인되었다. 또한 방선균은 기록물 훼손 위험이 매우 낮고, 독성 대사산물 생성이나 셀룰로오스 분해 활성 또한 제한적이며 (Locci, 1989), 작업자 위해성 역시 알레르기성 과민반응 수준에 국한되는 것으로 알려져 있다. 따라서 보존환경 관리 관점에서 방선균의 생존 여부는 종이기록물의 안전성에 직접적인 위협을 가하지 않는 비핵심 요인으로 판단된다. 종이기록물 오염 현장에서 분리된 *Streptomyces* spp.는 γ-방사선 처리 시 20 - 25 kGy에서 사멸이 보고되었지만(Sakr et al., 2013), 고위험 곰팡이와 달리 기록물 훼손 기여도가 낮아 우선 관리 대상은 아니다. 이에 따라 본 연구에서는 서고 방사선 소독의 주요 타깃을 곰팡이류로 한정하였으며, *Chaetomium*, *Aspergillus*/*Byssoschlamys*, *Penicillium* 등 기록물 훼손·독소 생성·포자 확산의 세 기전을 모두 갖춘 고위험 곰팡이군만을 정밀 제어 대상으로 설정하였다.
 - 종합하면, 본 연구에서 확인된 진균류는 효소적 기질 분해, 색소 생성에 의한 시각적 손상, 포자 확산에 따른 2차 오염 등 세 가지 주요 기전을 통해 기록물을 훼손하는 것으로 나타났으며, 특히 *Chaetomium globosum*, *Aspergillus*/*Byssoschlamys* 계열은 이러한 기전을 동시에 보유한 대표적 고위험균으로 평가된다. 또한 기존의 화학적 소독법은 잔류성, 비균일 처리, 재질 변성 가능성 등 여러 한계로 인해 서고 전반의 고위험 곰팡이를 효과적으로 억제하기 어렵다. 문헌 분석 및 본 연구의 균주 구성에 근거할 때, 고위험 곰팡이의 효과적 사멸을 위해 필요한 방사선 선량은 7 Gy 이상, 일반 곰팡이는 4-6kGy 범위가 적절한 것으로 확인되었다(Marušić et al., 2022; Calvo et al., 2017; Choi et al., 2020). 따라서 혼합오염 상황을 고려할 때 서고 전체 소독에는 7-10 kGy 수준이 가장 효과적인 것으로 판단되며, 색 변화·강도 저하 등 기록물 손상은 허용 범위 내에 머무르는 것으로 보고되어 있다. 반면 방사선 소독은 비접촉·비파괴·고투과성 특성을 바탕으로 포자·균사·독성 대사산물 전반에 대해 균일한 비활성화 효과를 확보할 수 있어 보존환경에 가장 적합한 소독 기술로 평가된다.

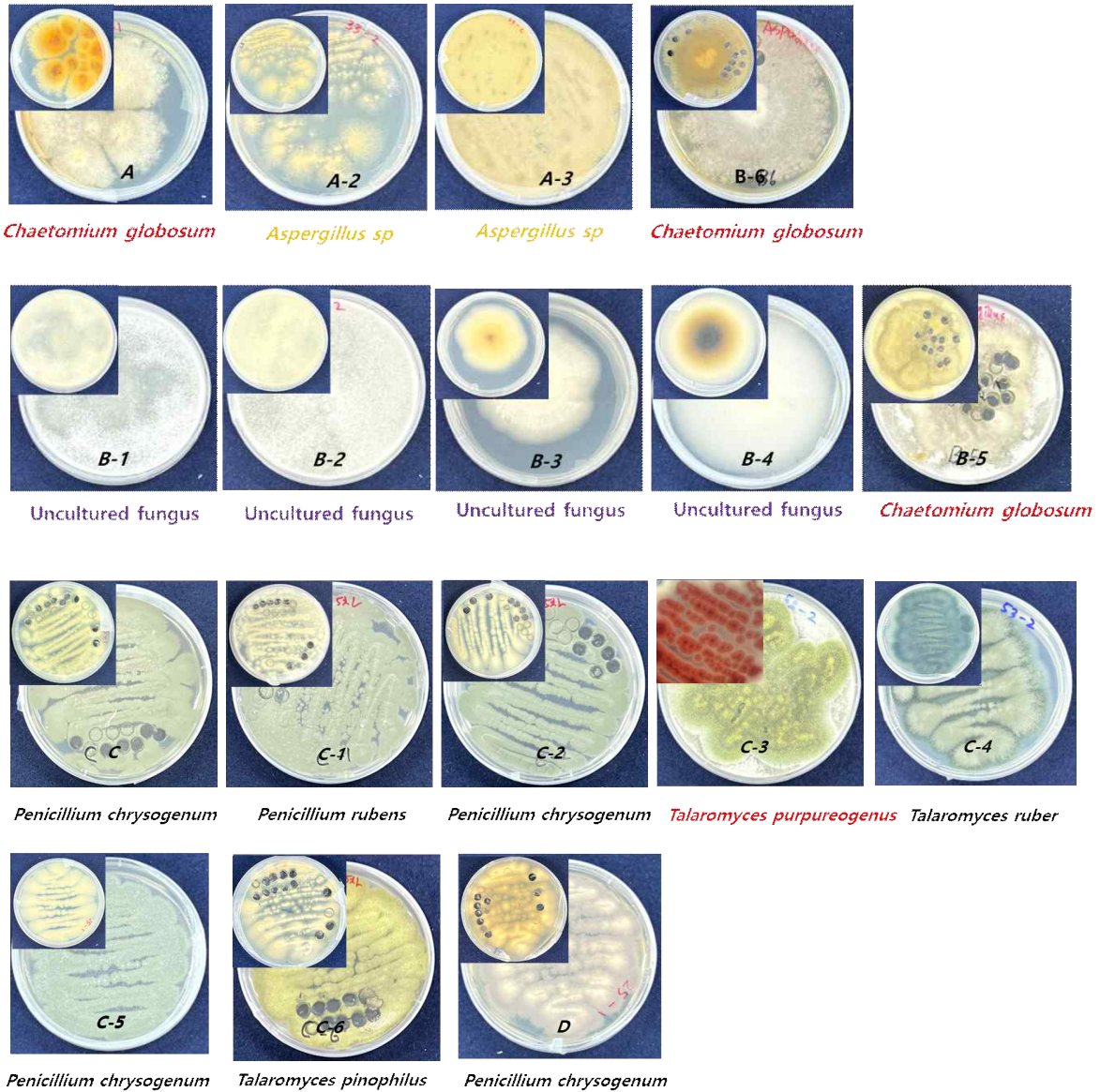


Fig 93. 기록물 보존환경에서 분리된 진균류의 PDA 배지 상 형태 비교
(전면 및 후면 모습). A-1 ~ A-5, B5, B6 ,C~C-6, D : ITS 분석으로 동정된 곰팡이류
B-1 ~ B-5 : ITS 염기서열 불충분(Uncultured fungus)

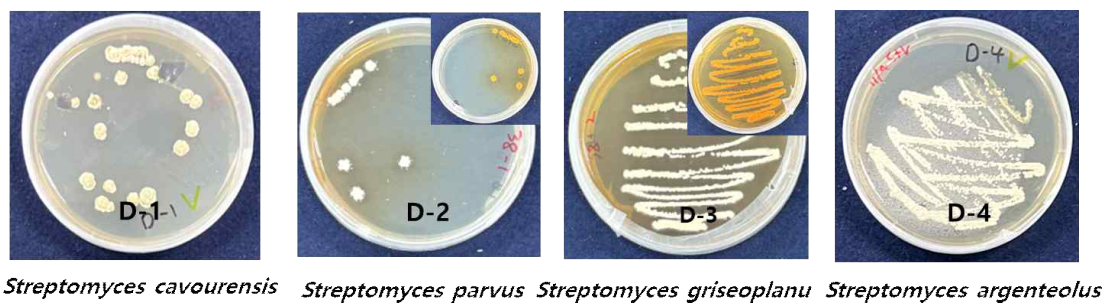


Fig 94.. 기록물 보존환경에서 분리된 Streptomyces sp 4종에 대한 형태학적 특징 및 분자생물학적 동정결과

○ 동정된 유해성 곰팡이가 작업 환경 및 인체 건강에 미치는 영향에 대한 고찰

동정 결과 가장 높은 비중을 차지한 균주는 *Penicillium chrysogenum/rubens* complex로, 저습 환경에서도 안정적으로 증식하며 공기 중 부유포자로 확산되는 전형적 실내 오염균이다. 해당 균주들은 roquefortine C 등 저독성 mycotoxin을 생성하나, 장기 노출 시 작업자에게 알레르기성 비염, 천식 악화 등의 호흡기 증상을 유발할 수 있다. 또한 기록물에서 *Chaetomium globosum*이 확인된 점은 높은 경고 신호로 해석된다. *Chaetomium* 속은 강력한 셀룰로오스 분해효소군을 보유하며, 종이·섬유 기반 기록매체를 직접적으로 손상시키는 대표적 고위험균이다. 특히 chaetoglobosin A와 같은 세포독성 secondary metabolite를 생산하여, 작업자 피부 접촉 시 염증반응을 유발하거나 면역저하자에서 감염 사례가 보고된 바 있다. 본 균주의 존재는 기록물 구조적 안정성 저해뿐 아니라 실내 환경 전체의 생물학적 위해성 증가로 이어질 수 있다. 또 다른 고위험균인 *Aspergillus/Byssochlamys* 계열은 열·산·건조에 대한 내성이 뛰어나 반건조 종이나 접착제, 표면 오염층에서도 장기간 생존이 가능하다. 일부 균주는 patulin 등을 생성할 수 있으며, 폐질환 유발 가능성도 존재한다. 반면 *Talaromyces ruber*, *T. pinophilus*, *T. purpureogenus* 등은 전체적으로 병원성은 낮으나, *T. purpureogenus*의 경우 강한 적색 azaphilone 색소를 생성하여 기록물의 시각적 훼손 및 복원 난이도를 상승시킬 수 있다. *Streptomyces* 계열(4종)은 대부분 비병원성 BSL-1 균주로 판단되며, 기록물 손상 가능성도 낮다. 그러나 고농도 포자 흡입 시 작업자에게 알레르기성 폐염(Hypersensitivity pneumonitis)을 유발할 수 있어 공기 중 포자 누적 관리는 필수적이다.

9.4 결론

본 연구에서는 국가기록원 수집 피해 종이기록물 및 보존환경에서 분리된 진균류 총 11종(곰팡이 7종, 방선균 4종)을 형태학적·분자생물학적으로 동정하고, 이들 균주가 기록물에 미치는 손상 가능성과 작업자에게 미칠 수 있는 인체 위해성을 종합적으로 평가하였다. 기록물 보관상자 내부, 복원처리 중인 기록물의 표면 및 주변 작업 환경 등 다양한 오염 가능 지점에서 시료를 채취하고, 총 5회에 걸친 순수분리 과정을 통해 단일 균주들을 확보하였다. 확보된 균주에 대하여 colony의 전면 및 후면 형태, 색조 변화, 분생포자 구조 등 형태학적 특성을 상세히 관찰하였다. 이러한 형태학적 평가는 ITS 및 16S rRNA 분석을 통한 분자동정 이전 단계에서 *Aspergillus*와 *Byssochlamys spectabilis*와 같이 형태가 유사한 속 간의 구분 가능성을 예비적으로 판단하기 위한 중요한 절차로 활용되었다. 확보된 균주는 형태학적 분류기준에 따라 1차 분리·동정한 후 ITS 및 16S rRNA 염기서열 분석을 병행하여 정확한 종 수준의 분자동정을 실시하였고, 그 결과 총 11종의 미생물(곰팡이 7종, 방선균 4종)이 확인되었다.

조사 결과, *Chaetomium globosum*, *Aspergillus/Byssochlamys*, *Penicillium chrysogenum/rubens*와 같은 고위험 곰팡이가 주요 오염균으로 확인되었으며, 기록물의 셀룰로오스 분해·색소침착·포자 확산 등을 통하여 구조적·시각적 손상 및 작업자 건강 위해를 유발할 수 있음을 확인하였다.

본 연구에서 수행된 시료 채취는 보존환경 전체가 아닌, 복원 처리 중인 기록물 및 작업 테이블 주변

이라는 제한된 영역에서 약 1시간 동안 이루어져, 전체 서고 환경을 대표하기에는 다소 제한적이었다. 실제 보존서고는 보존상자 내부, 상·하단 서가, 장기 미개봉 기록물, 고습·저환기 구역 등 각기 다른 미생물 생태계를 형성하는 다수의 잠재적 오염 지점을 포함하고 있으며, 이러한 공간들은 작업 중 접근이 어려워 조사 대상에서 제외되었다.

본 연구에서 확인된 진균류 11종은 현재 오염의 “최소치(minimum detection set)”에 해당하며, 실제 서고 전체에는 보다 다양한 종류의 고위험 진균류가 존재할 가능성이 높다는 점을 고려해야 한다. 특히, *Chaetomium*, *Aspergillus*, *Penicillium*과 같이 습도·공기흐름·광노출 차이에 따라 군집 분포가 크게 달라지는 균류의 특성을 감안할 때, 이번 조사 범위에 포함되지 않은 구역에서는 보다 높은 농도의 포자 축적 또는 다른 독성 균주가 공존할 위험성이 존재한다.

이와 같은 제한된 시료 채취 범위는 본 조사 결과가 오염 현황을 과소평가할 가능성을 의미하며, 실제 보존환경의 미생물 위험도는 본 연구에서 확인된 수준보다 더 클 가능성이 높다. 따라서 추가적으로 제시한 기록물 보존환경과의 연관 위험도(Level 1 - 4) 표 2는 국제 생물안전기준(BSL)의 감염위해성 외에도, 기록물 기질 분해력·독성 대사산물 생성·색소 확산·포자 이동성 등 기록물 훼손과 직결되는 요인을 통합하여 평가한 기록물 보존환경 맞춤형 위험도 체계이다. 따라서 BSL 등급과 본 연구의 위험도 등급은 동일한 기준이 아니며, 일부 균주에서 상이한 수준으로 나타날 수 있다. 향후 서고 전역을 대상으로 한 정기적·전면적 모니터링(full-scale microbial survey)이 반드시 필요하며, 고위험 진균류에 대한 선제적 관리와 비접촉 방사선 소독기술의 도입이 더욱 중요한 것으로 판단된다. 이러한 위험성을 고려할 때, 기존 화학적 소독 방식만으로는 충분한 제어가 어려우며, 8 - 10 kGy 범위의 방사선 소독이 기록물의 물리적 안전성을 유지하면서 고위험 진균류를 효과적으로 제거할 수 있는 최적의 비접촉 소독기술로 판단한다.

균주	주요 독소 / 대사산물	인체 위험성	위험등급	특징 요약
<i>Aspergillus sp.</i>	patulin, byssotoxin 가능성	호흡기 질환·알레르기·식품 오염	3	열저항성·산성 환경 생존·식품부패 혼합
<i>Chaetomium globosum</i>	chaetoglobosin, cochliodone	알레르기·피부/부비동 감염 사례	3	실내 오염 지표, 강한 세포독성 secondary metabolites
<i>Penicillium chrysogenum</i>	roquefortine C, meleagrins	알레르기·저위험 독성	2	가장 흔한 실내 <i>Penicillium</i> , 독성은 낮은 편
<i>Penicillium rubens</i> / <i>Penicillium sp.</i>	동일 (위와 동일)	동일	2	ITS로 종 구별 모호하지만 무해성 동일
<i>Talaromyces ruber</i>	mitorubrin 계열 pigment	비병원성 알레르기 정도	1-2	청녹색 pigment, 배양 안정적
<i>Talaromyces purpureogenus</i> (red pigment)	azaphilone red pigments	저독성·항산화·알레르기	1-2	붉은 색소 생산, 스트레스 반응 강화
<i>Talaromyces pinophilus</i>	pinophilin, talaromycin	비병원성	1	효소 생산성 높고 환경 유래 안전종

표 2. 기록물 보존환경에서 분리된 균주 연관 위험도

Level 1: 거의 비병원성, 알레르기 외 위험 낮음

Level 2: 저독성 대사산물/알레르기/면역저하 감염 가능성

Level 3: 중등도 독성(독소 생산)·인체 병원성 보고

Level 4: 고독성·강한 병원성(본 목록에는 없음)

*문화 유산 손상 위험이 높지만, 인체 위해성이 낮은 경우도 있어 BSL 등급보다 폭 넓게 고려한 것

제4장 총괄연구개발과제의 연구결과 고찰 및 결론

- 본 연구는 기록문화유산의 긴급 방제를 위한 방사선 조사 시, 종이 기록물에 가해지는 영향성의 평가 및 소독 효과를 확인하기 위하여 실시하였다.
- 선행 연구로 진행되었던, 감마선 이용 수장고 실증시험(2024.05.29.) 및 감마선 및 전자선을 이용한 방사선 저항성 곰팡이 제어에 대한 연구 (Radiation Physics and Chemistry, 205 (2023) 110723)에서 *Cladosporium* sp. 및 *Epicoccum nigrum* 의 사멸 목표 선량을 참고하여 조사 선량은 10 - 100 kGy로 설정하였으며, 건조 종이, 모의 수침 종이 및 인쇄물의 선원에 따른 차이를 확인하기 위하여 감마선, 전자선 및 X선 조사를 진행하였다. 물리적, 화학적, 색상 변화를 확인하기 위하여 ESR, FT-IR, 인장강도 및 색차계를 이용하여 변화를 확인하였다. 또한, 방사선 소독 효과를 확인하기 위하여 감마선 및 X선 15 kGy를 모의 수침 샘플에 *Cladosporium* sp. 및 *Epicoccum nigrum* 접종하였다. 모의감염 샘플에 감마선 및 X-선 15 kGy을 조사한 후, PDA 배지 접종하여 생장 여부를 확인하였다.
- **FT-IR 분석 결과**, 선원 및 선량에 따른 FT-IR의 흡광도 패턴에 변화가 없음을 확인하였다. 또한 건조 및 모의 수침 샘플간의 흡광도 패턴에 차이가 없음을 확인하였다. 이를 고려할 때, 방사선 조사를 진행하였을 시, 종이의 화학적 구조는 안정적인 것으로 판단된다. 100 kGy 조사시에도 흡광도 패턴의 변화가 없음을 확인한 결과, 고선량 하에서도 종이의 화학적 구조는 안정하다고 사료된다.
- **인장강도 시험 결과**, 건조 종이의 경우 25 kGy 이하의 선량에서는 10% 이하의 강도 하락을 보였으며, 50 kGy 이상의 선량에서 30%의 강도 하락을 보였다. 또한, 모의 수침 종이의 경우, 건조 종이 대비 인장강도가 30% 감소하였으며, 선량에 따른 영향이 건조 종이 대비 크게 나타났다.
- 감마선 및 X-선의 인장강도 감소 차이는 10% 미만으로 비슷하게 나타났으나, 전자선의 경우 모의 수침 백상지에서 인장강도 감소가 50%이상 크게 나타났다. 이는 전자기파와 입자선의 차이로 인해 발생하는 현상으로 판단되나, 자세한 이유에 대한 시험은 추가로 진행해야 할 필요성이 있는 것으로 판단된다.
- 갠지 및 박엽지의 경우, 10, 15 kGy 저선량에서 인장강도가 증가하는 경향성이 나타났다. 이는 방사선 조사로 인한 라디칼 생성으로 촉발되는 고분자 중합으로 인하여 발생하는 현상으로 추정된다. 또한 한지의 경우 건조 샘플 및 수침샘플간 인장강도 차이가 크지 않았다. 이는 한지를 구성하는 섬유질의 길이가 길고, 분자량이 커 상대적으로 결합 강도가 강하기 때문으로 추정된다.
- **모의 수침 인쇄물의 색차 변화**는 건조 샘플 대비 배경지와 토너 모두에서 건조 샘플 대비 낮게 나타났으며, ΔE 의 변화는 최대 3 이하로 육안으로 판단하기 어려운 수준이었다. 이는 수침 조건에 포함된 물에 라디칼 및 오존 등의 색상변화를 유발 할 수 있는 성분들이 용해되거나 분해되기 때문일 것으로 판단된다.

- **건조 인쇄물 색차 분석 결과**, 방사선 조사 시 종이 및 인쇄물의 색상 변화가 발생하는 것을 확인하였다. 선원과는 관계 없이, 배경지(백상지)의 경우, 25 kGy까지는 ΔE 값이 3 이하로 육안으로 색상 변화를 확인하기 어려운 수준의 변화가 있었으나, 50 kGy부터는 ΔE 값이 5 이상으로 열화됨을 확인 할 수 있었다.
- 조사 선량 10 kGy에서 ΔE 의 값이 0.5 - 12까지 변화하는 것을 확인 할 수 있었다. 색상에 따른 변화의 경우, 검정은 별 변화가 없었으며 컬러 색상은 노랑, 파랑, 빨강 순으로 변화 폭이 컸다. 노랑색 및 파랑색의 변색 폭이 검정 및 빨강색 대비 높은 것을 확인할 수 있었다. 또한 15 kGy 이상의 색상 변화는 10 kGy와 거의 차이 나지 않았다. 프린터 토너 및 인주가 프린터 잉크 및 스탬프 잉크 대비 ΔE 의 변화가 큰 것을 확인할 수 있었으며, 이는 잉크의 안정화를 위해 포함되어 있는 유기용매가 우선 산화되어 색상이 안정적으로 유지되는 것으로 사료된다.
- **전자선 조사 시**, 감마선 및 X선 대비 색상 변화가 약 80% 적게 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 전자선의 특성으로 인하여 색상을 표현하는 원자 구조 파괴가 감마선 및 X-선에 비하여 상대적으로 적게 발생하기 때문일 것으로 추정된다.
- **ESR 분석 결과**, 선원 및 선량과 관계없이 종이의 라디칼 발생을 확인 할 수 있었으며, 선량이 증가함에 따라 라디칼 Peak이 증가함을 확인할 수 있었다. 박엽지의 경우, 타 종이류 대비 라디칼이 상대적으로 적게 발생함을 확인할 수 있었다. 이는 박엽지의 평량이 적고, 종이 두께가 얇아 라디칼이 상대적으로 적게 발생하고 쉽게 빠져나가기 때문일 것으로 추정된다. 라디칼이 장기적으로 종이에 미치는 영향을 확인하기 위하여 추가적인 추적 관찰이 필요할 것으로 판단된다.
- **방사선 소독 효과 확인 결과**, 선행 연구의 결과와 같이 15 kGy 조사 조건 하에서 *Cladosporium* sp., 및 *Epicoccum nigrum*이 효과적으로 방제됨을 확인할 수 있었다. 또한 공시균 접종 없이 공기 중에 보관한 대용량 샘플을 통하여, 방사선 조사를 통해 균 생장의 억제 및 살균에 효과성이 있는 것으로 확인되었다. 이는 방사선 조사를 통한 균의 직접적인 파괴 및 산소 전리화를 통한 오존 발생으로 인한 살균 효과가 함께 발생하기 때문일 것으로 판단된다.
- **위 결과를 종합할 때**, 방사선 조사 시, 공시균 2종 및 일반 미생물의 생장 억제 및 살균을 위해 최대 15 kGy의 방사선 조사는 효과가 있음을 확인하였다. 종이의 화학적 구조는 매우 안정적인 것이 확인되었으므로 방사선 조사시 화학적인 구조의 변화를 고려할 필요성은 낮아보인다. 인장강도를 감안 할 때에는 15 kGy 이하의 저선량에서 인장강도 향상 효과가 일부 발생함이 확인 되었으므로, 15 kGy 이하의 감마선 및 X-선 조사를 진행하는 것이 종이의 구조적 안정성을 확보할 수 있는 최적의 선량일 것으로 판단된다. 컬러 인쇄물의 경우 색상 변화를 억제하기 위해서는 전자선을 15 kGy 이하의 선량으로 조사하는 것이 최적일 것으로 판단된다. 다만, 변색을 고려할 필요성이 없는 흑백 인쇄물 또는 수침 인쇄물의 경우 전자선 대비 투과력이 높은 감마선 및 X-선을 조사하는 것이 더 효과적일 것으로 판단된다. ESR을 통한 라디칼 분석을 통해 25 kGy 이하의 방사선 조사 시, 장기적인 열화 영향성은 낮을 것으로 판단된다.

- 결론적으로, 수침된 종이 기록물의 경우, 투과성인 높고 살균성이 확인된 감마선 및 X-선을 15-25 kGy 이하로 조사하는 경우 종이의 보존 및 살균에 효과적이며, 건조 상태의 컬러 인쇄물의 보존을 위한 방사선 조사의 경우 전자선 15 kGy 이하로 조사하는 경우 효과적일 것으로 판단된다.
- 추가 시험 요청사항으로 진행된 해당 서고 내 진균류 동정을 통해 확인된 진균류는 효소적 기질 분해, 색소 생성에 의한 시각적 손상, 포자 확산에 따른 2차 오염 등 다양한 주요 기전을 통해 기록물을 훼손하는 것으로 나타났다. 특히 *Chaetomium globosum*, *Aspergillus*/*Byssochlamys* 계열은 고습 환경에서 빠르게 증식하며, 실내 공기질 악화·작업자 호흡기 자극·피부염 등을 유발할 수 있어, 보존환경에서 가장 우선적으로 관리해야 할 대표적 고위험균종으로 보고된 바 있다 (Andersson et al., 1997). 기록물 훼손 및 인체 위해성 측면에서, 현재 서고 내, 서고에 들어가는 문서는 가능한 한 사전 소독을 권장하는 바이다. 방사선을 이용한 소독을 진행할 경우, 고위험 곰팡이의 효과적 사멸을 위해 필요한 방사선 선량은 8-10 kGy, 일반 곰팡이는 4-6kGy 범위가 적절한 것으로 확인되었다. 따라서 혼합 오염 상황을 고려할 때 서고 전체 소독에는 7-10 kGy 수준이 가장 효과적인 것으로 판단된다.

제5장 총괄연구개발과제의 연구성과

1. 활용성과

총괄과제명	재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 및 체계 구축
총괄과제책임자	박해준/ 한국원자력연구원/ 책임연구원

가. 연구논문 2025년 11월 23일 투고 예정

번호	논문제목	저자명	저널명	집(권)	페이지	Impact factor	국내/국외	SCI여부
1	재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 (예정)	이형민 외 6명	한국방사선 산업학회					
2								

나. 학술발표

번호	발표제목	발표형태	발표자	학회명	연월일	발표지	국내/국제
1	방사선 조사처리가 근현대 기록물에 미치는 영향 평가	포스터	이형민 외 4명	한국방사선 산업학회	2025.09.25	한국방사선산업학회 정기 학술총회 및 학술대회	국내
2	재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 (예정)	포스터	이형민 외 6명	한국문화유산보존 과학회	2025.11.28. (예정)	한국문화재보존 과학회지 (예정)	국내

다. 지적재산권

번호	출원/등록	특허명	출원(등록)인	출원(등록)국	출원(등록)번호	IPC분류
1						
2						

라. 정책활용

※ 기타 관련정책에 활용 예를 구체적으로 기술함.

마. 타연구/차기연구에 활용

※ 타연구 및 차기연구에 활용된 예를 구체적으로 기술함.

바. 언론홍보 및 대국민교육

※ 언론홍보 및 대국민교육 내용, 일자 등을 간략히 기술함.

사. 기타

※ 임상시험, 관련 DB구축, 워크숍 또는 심포지움 개최 등의 경우 구체적으로 기술함.

2. 활용계획

- 기록물관리기관의 권역별 재난 피해 기록물 응급대응 방제 체계 구축 및 소독처리시 쿤에 대한 방제 기술 확보 및 보급
- 「공공기록물 관리에 관한 법률」 상 기록물관리기관의 재난관리는 의무사항(법률 제30조 기록물 보안 및 재난대책, 시행령 제62조 기록물의 재난·보안대책)
- 「공공기록물 관리에 관한 법률」 시행규칙 제30조(기록물의 보존처리) 기록물의 서고 입고 시 소독처리 의무

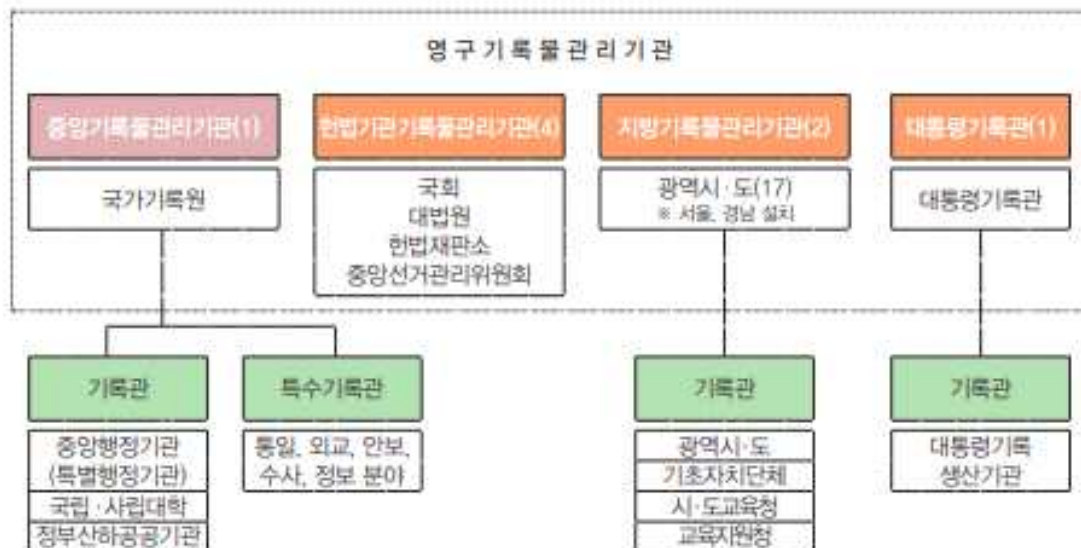


Fig 29. 기록물 관리기관(출처 2022 국가기록원 주요통계연보)

3. 연구개발성과의 기대효과

- 기록물 복원 골든타임(48시간) 확보로 세계기록유산을 비롯한 국가중요기록물의 훼손 방지 및 보존성 확보
- 기록물 응급 대응 방재 기술 선도를 통한 해외 기록관리 분야 기술 보급 및 협력 국가 장비 수출 등에 기여
- 근현대 문화유산 보존범위의 확대에 대한 경제적이며 신속 정확한 방재 시스템을 통해 근현대문화유산 보존역량 강화
 - 방사선 기술을 이용한 문화유산에 대한 과학적 진단으로, 보다 신속 정확하고 적절한 보존 복원 방법 도출이 가능
 - 원자력 기술을 통한 국가유산 대국민 원자력 기술 수용성 확대
- 화학적 훈증소독기술에 대한 대체 및 효율적이며 친환경적인 대안을 제시
 - 문화유산 방역용으로 쓰이고 있는 MeBr, PH₃, HCN 의 경우에는 인체에 유해
 - MeBr out에 따른 대체 약재 부재에 따른 효과적 대응
- 응급케이스, 필름 키트 활용 매몰 혹은 발굴시 유물의 효과적인 보존에 활용
- 미술관과 도서관 등에 응급처리시스템 응용 적용
- 문화유산 보존측면 뿐만 아니라 고가예술품(미술, 공예 등)에 적용
- 방사선 처리기술은 문화유산 맞춤형 열화보수소재 개발에 활용되어 다양한 재질의 문화유산 보존처리 및 복원 분야로 활용 확대
- 방사선 보존 기술 협력 및 아시아 중심 기록물 보존처리 기술 교류를 위한 국제협력 구축
- 국가기록원 소장 기록물뿐만 아니라 영세한 지자체, 소형 및 사립박물관 등 다양한 재질의 유기를 보존하고 있는 기관에 적용 확대 가능

제6장 기타 중요변경사항

- 연구개발비 변경; 추가 샘플 실험 요청에 따른 방사선 조사료 등 시험분석료의 증액이 필요하여 발주기관의 승인을 받아 연구재료비를 감액하여 시험분석료의 비목인 연구활동비를 증액하였음

제7장 참고문헌

1. 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.
2. Jo, K. S., Gwak, Y. H., & Kim, S. H. (2023). Comparison of the Effectiveness of Disinfection According to the Permanence of X-ray Irradiation for Preservation of Water-logged Cultural Heritages. *Journal of the Korean Society of Radiation Industry*, 17(4), 415-424.
3. Gwak, Y. H., Jo, K. S., Jeong, R. D., & Park, H. J. (2025). Development of a large-scale gamma irradiation disinfection process for fungal control in waterlogged cultural heritage. *Journal of the Korean Society of Radiation Industry*, 19(1).
4. Korea Atomic Energy Research Institute (KAERI). (2016). Development of Radiation Application Technology for Conservation of Organic Cultural Properties (KAERI/RR-4148/2016). Daejeon, Republic of Korea: Korea Atomic Energy Research Institute.

제8장 첨부서류

해당없음

총괄 연구과제 요약

과제 고유번호	자동부여		공개가능여부	
사업명	25년 국가기록관리 활용기술 연구개발			
과제명	재난 피해 종이기록물의 방사선 소독처리 적용 연구 및 체계 구축			
연구책임자	성 명	박해준		
	소속 기관명	한국원자력연구원		

○ 연구목표 (400 ~ 600자)

재난 피해를 입은 종이기록물의 곰팡이 피해를 최소화하기 위하여 48시간 이내 메디컬 디바이스 소독에 널리 사용되고 있는 방사선 소독처리 기술의 도입과 적용성 검토

○ 연구내용 (1000 ~ 1200자)

- 방사선 소독처리 적용을 위한 수침 피해 종이기록물(백상지, 갠지, 박엽지, 한지 등) 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가
- 종이기록물에 사용된 인쇄 잉크, 스탬프 잉크, 인주, 점착제 등 인쇄매체에 대한 방사선(감마선, 엑스선) 영향평가
- 수침 환경별(뽕, 해수 등 오염 상태별) 종이기록물에 대한 곰팡이 감염제어 효과 검증
 - 종이기록물에 실제 공시 곰팡이(최소 2종)접종 후 방사선 감염 제어 효과 검증
- 수침된 종이기록물의 생물피해 제어 최적 방사선 Dosimetry algorithm 도출

○ 연구성과(응용분야 및 활용범위포함) (400 ~ 600자)

- 재난/사고로 인한 수침 종이기록물의 곰팡이 방제 시스템 구축
- 종이기록물의 저탄소 정책 부응 상온 장기 보존으로 예산 절감
- 보존·복원처리 작업자의 건강 보호

○ 총괄 참여연구원

성명	소속	성명	소속/직위
박해준	한국원자력연구원		
조경서	한국원자력연구원		
이형민	한국원자력연구원		

Keywords (5개 내외)	한글	종이기록물	방사선	재난대응	소독처리	수침
	영문	national record	radiation	disaster response	disinfectiont	water-logged

- 주1) 연구목표, 연구내용, 연구성과를 서술형으로 기재
- 2) 국가연구개발사업 DB를 통한 공개를 희망하지 않는 경우 공개가능여부란에 “공개불가”로 표시
- 3) 연구성과는 그간의 연구결과 및 기대성과를 서술