*Journal of Radiation Industry* 15(4) : 329~334(2021) https://doi.org/10.23042/radin.2021.15.4.329

Technical Paper

# 전자선 조사에 따른 수질별 수온변화 비교

홍 창 용[1,2] · 김 희 수[1] · 박 해 준[1,*]

[1]한국원자력연구원 첨단방사선연구소,
[2]한국전통문화대학교 문화유산전문대학원 문화재수리기술학과

# Comparison of Water Temperature Change by Water Qualities with Electron Beam Irradiation

Changyong Hong[1,2], Hui-Su Kim[1] and Hae-Jun Park[1,*]

[1]*Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute, 29 Geumgu-gil, Jeongeup-si, Jeollabuk-do 56212, Republic of Korea*
[2]*Department of Heritage Conservation and Restoration, Graduate School of Cultural Heritage, Korea National University of Cultural Heritage, 367 Baekjemun-ro, Buyeo-gun, Chungcheongnam-do 33115, Republic of Korea*

**Abstract - Some field cases showed that electron beams irradiated samples showed high temperature increases compared to gamma rays irradiated samples. These cases of temperature changes were also estimated to be affected by various water qualities. The aims of this study were to evaluate demonstratively about temperature changes of electron beams irradiated water samples and to compare these changes by various water qualities. Sea water samples, fresh water samples and distilled water samples were evaluated in this study, and electron beams were irradiated with 10 kGy, 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy absorbed dose. As a result, high increases of water temperature were observed by absorbed dose increases, but were not significantly observed these increases by various water qualities. Therefore, the stability of the electron beam irradiation for the moisture-saturated sample, like flooded cultural heritage, should be evaluated with water temperature increase. Furthermore, variables such as water qualities and irradiation speeds should be carefully considered in subsequent studies.**

**Key words : Electron beam, Water quality, Water temperature change**

## 서 론

방사선은 높은 에너지로 조사물질과 반응해 여기, 전리를 일으켜 물질의 특성을 변화시킬 수 있다. 이때 전자기파인 감마선과 엑스선과는 달리 하전입자인 전자선 등은 감쇠계수가 높고 물질에 입사하면 빠르게 에너지를 소모하며 반응을 일으키는 차이가 있다(Kang *et al*. 2019). 실제 방사선 조사현장에서는 감마선 조사 직후 시료의 경우 온도 변화가 미미하였으나, 전자선 조사 직후 시료의 경우 다소 높은 온도 상승을 관측한 사례가 존재해 왔다. 그리고 이러한 변화는 조사전류, 조사속도, 흡수선량 등의 조사조건의 영향을 받아 나타날 것으로 추정되어 왔다.

전자선 조사 시 온도변화율은 시료의 종류에 따라서도 차이가 발생할 수 있다. 특히 물 시료의 경우 바다에서 채취하

* Corresponding author: Hae-Jun Park, Tel. +82-63-570-3190, Fax. +82-63-570-3195, E-mail. hjpark@kaeri.re.kr

는 해수, 호수나 하천 혹은 비를 채취하는 담수, 실험실 상에서 정제하여 제조한 증류수 등으로 크게 구분할 수 있는데, 이 또한 채취 장소 및 시기에 따라서도 다양한 특징이 나타나므로 이러한 수질 차이는 전자선 조사 시 온도변화율에 영향을 줄 수 있다.

물의 밀도는 염분, 수온, 압력에 따라 변화하며, 이로 인해 일반적으로 20°C에서 해수(약 1,025 $kg \cdot m^{-3}$)>담수(약 1,000 $kg \cdot m^{-3}$)>증류수(약 998 $kg \cdot m^{-3}$) 순으로 밀도가 높은 것으로 알려져 있다. 그리고 대한민국의 바다 위치상 서해>남해>동해 순으로 염분이 높은 것으로 확인되고 있다(Oh and Im 2017). 또한 해수와 담수에는 정제된 증류수에 비해 간섭물질이 더 많이 함유되어 있을 것으로 사료된다. 이러한 요인들로 인해 물 종류에 따라 전자선 조사 시 온도변화율의 차이가 발생할 가능성이 있을 것으로 추정된다. 이와 더불어 수분을 다량 포함한 고분자는 물의 높은 온도변화 등에도 민감하게 영향을 받을 수 있다. 일반적으로 방사선 조사온도가 증가하면 고분자의 가교 또는 분해가 가속화되는 것으로 알려져 있으며, 이는 크게 라디칼의 유동성과 방사선 조사 시 생성되는 물질의 확산성에 의한 것으로 추정되고 있다(Park 1990). 따라서 수분을 다량 포함한 시료를 대상으로 전자선 조사 기술을 활용하기 위해서는 관련 기초조사가 선행되어야 한다.

전자선을 포함한 방사선은 피조사체에 오염된 미생물, 해충, 기생충 등을 효과적으로 불활성화시킬 수 있어 농식품, 의약학 등 다양한 분야에서 활용되고 있다(Gwon 2017). 이러한 방사선멸균법을 문화재의 생물피해 제어에도 적용하기 위해 National Research Institute of Cultural Heritage (2009)를 포함해 국내 문화재 주요 재질을 대상으로 한 선행 연구들이 진행되어 왔다. 현재 재난 중에 수침된 문화재를 대상으로 한 응급보존처리에 방사선멸균법을 적용하기 위한 연구가 진행되고 있는데, 이때 문화재 재질에 포화된 수분은 전자선 조사 시 투과율, 온도상승, 화학적 변화 등에 영향을 주는 강한 변수로 작용할 수 있다. 문화재는 시간의 흐름에 따라 열화가 진행된 상태인 고분자 재료이며, 이와 동시에 약화된 원형을 최대한 보존해야 하는 목적성을 가진다. 따라서 문화재에 특성변화를 야기할 수 있는 기술을 적용하기 위해서는 사전에 신중하게 안정성을 검증할 필요성이 있다. 따라서 수분이 포화된 수침문화재에 방사선멸균법을 적용하기에 앞서 먼저 방사선 조사 시 물 자체에 나타나는 다양한 영향에 대해 평가할 필요성이 있다.

따라서 위의 배경지식 및 가설들을 바탕으로 전자선 조사 및 물 시료에 대한 실증평가를 계획하여 진행하고자 한다. 먼저 전자선을 물 시료에 조사하여, 흡수선량 증가에 따라 물 시료의 온도가 가시적으로 증가하는지 검증하고자 한다. 또한 가시적인 온도증가가 나타날 경우, 물 종류에 따른 온도증가율의 차이 관측되는지 확인하고자 한다.

## 재료 및 방법

### 1. 연구 재료

본 예비실험에 사용할 시료는 사전에 채취하여 냉장보관한 해수(Ws)와 담수(Wf), 당일 채취한 증류수(Wd)로 선정하였다. 해수는 강원도 강릉 해안로에서, 담수는 전라북도 정읍시 내장산 용산저수지에서 채취하였다. 증류수는 전자선실증연구동 물질제어실험실의 초순수제조기(Direct-Q 5 UV Ultrapure water purification system, Merck Milli-Q, DEU)를 통해 제조되었다. 시료는 플라스틱 용기(75 $cm^2$ Rectangular Canted Neck Cell Culture Flask, Corning, USA)에 175 mL씩 분주하였으며, 흡수선량별(10 kGy, 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy)로 3

**Table 1.** Properties of water samples ($mg \cdot L^{-1}$)

| Sample | $Cl^-$ | Mg | Ca | COD[a)] | TOC[b)] |
|---|---|---|---|---|---|
| Ws | 17700.0 | 1232.0 | 366.0 | 1.0 | 4.2 |
| Wf | 6.0 | 1.6 | 6.6 | 3.6 | 2.2 |

[a)]COD: chemical oxygen demand
[b)]TOC: total organic carbon

**Fig. 1.** Electron beam scanning process.

배수 준비하였다. 본 연구에서 사용한 해수와 담수의 성분 특성을 수질 공인분석 기관인 한국품질시험원에 Cl, Mg, Ca, COD, TOC 항목을 분석 의뢰하였으며 해당 결과는 Table 1과 같다. 해수와 담수의 경우 부패 방지를 위해 냉장보관 중이던 시료를 사용하였으며, 증류수의 경우 당일 제조하여 사용하였다.

## 2. 전자선 조사

전자선 조사는 한국원자력연구원 첨단방사선연구소 전자선실증연구동의 10 MeV 전자선 조사설비(MB10-30/3000, Mevex, CAN)를 통해 진행하였다. 해당 설비는 10 MeV 에너지, 최대 30 kW 출력, 최대 3 mA 전류 정격으로 구동할 수 있는 전자가속기와 더불어 중/소형 제품용(폭 1 m 이하, 연속식 조사 공정 가능) 및 대형 제품용(폭 3 m, 길이 10 m) 컨베이어 자동화 시스템을 갖춘 설비다. 조사 시 전류는 3.00 mA로 설정하였으며 이에 따른 초당 평균 선량은 0.533 kGy·s$^{-1}$이었다. 목표 흡수선량은 10 kGy, 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy 총 4개로 설정하였다. 본 설비 선량 계산치는 아래와 같으며(Tables 2, 3), 설비 내부에서의 조사과정은 모니터링 화면을 통해 확인할 수 있었다(Fig. 1).

**Table 2.** Absorbed dose by various currents of 10 MeV electron radiation accelerator

| E-beam spot size on UBC[a)] (m) | Current (mA) | Average absorbed dose (kGy·s$^{-1}$) |
|---|---|---|
| 0.3407 | 3.00 | 0.533 |
| 0.3407 | 0.60 | 0.093 |
| 0.3407 | 0.20 | 0.034 |
| 0.3407 | 0.15 | 0.022 |
| 0.3407 | 0.10 | 0.018 |

[a)]UBC: under beam conveyor

**Table 3.** Absorbed dose by various currents and UBC speeds of 10 MeV electron radiation accelerator

| E-beam spot size on UBC (m) | Current (mA) | UBC speed (m·s$^{-1}$) | Average absorbed dose (kGy) |
|---|---|---|---|
| 0.3407 | 3.00 | 0.0018 | 100.000 |
| 0.3407 | 0.60 | 0.0318 | 1.000 |
| 0.3407 | 0.20 | 0.0395 | 0.200 |
| 0.3407 | 0.15 | 0.0250 | 0.300 |
| 0.3407 | 0.10 | 0.0113 | 0.559 |

**Table 4.** Temperature change of sea water (Gangneung) samples by various absorbed dose

| Sample | No. | Temp. before irradiation (°C) | Temp. after irradiation (°C) | Temp. change (Δ°C) | Temp. change ratio (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Ws-10 kGy | 1 | 15.2 | 21.5 | 6.3 | 41.4 |
| | 2 | 14.6 | 21.0 | 6.4 | 43.8 |
| | 3 | 15.1 | 20.7 | 5.6 | 37.1 |
| | Av. | 15.0 | 21.1 | 6.1 | 40.8 |
| | Std. Dev. | 0.3 | 0.3 | 0.4 | 2.8 |
| Ws-25 kGy | 1 | 15.2 | 27.9 | 12.7 | 83.6 |
| | 2 | 14.6 | 27.5 | 12.9 | 88.4 |
| | 3 | 15.1 | 27.3 | 12.2 | 80.8 |
| | Av. | 15.0 | 27.6 | 12.6 | 84.2 |
| | Std. Dev. | 0.3 | 0.2 | 0.3 | 3.1 |
| Ws-50 kGy | 1 | 16.9 | 37.1 | 20.2 | 119.5 |
| | 2 | 15.5 | 37.0 | 21.5 | 138.7 |
| | 3 | 16.6 | 36.7 | 20.1 | 121.1 |
| | Av. | 16.3 | 36.9 | 20.6 | 126.4 |
| | Std. Dev. | 0.6 | 0.2 | 0.6 | 8.7 |
| Ws-100 kGy | 1 | 13.9 | 52.1 | 38.2 | 274.8 |
| | 2 | 15.1 | 52.0 | 36.9 | 244.4 |
| | 3 | 15.3 | 51.3 | 36.0 | 235.3 |
| | Av. | 14.8 | 51.8 | 37.0 | 251.5 |
| | Std. Dev. | 0.6 | 0.4 | 0.9 | 16.9 |

### 3. 온도 측정

전자선 조사 직후 디지털온도계(Thermometer Pocket Hanger −50∼+300°C, Daihan scientific, KOR)를 사용하여 물 시료의 온도를 측정하였다. 증류수>해수>담수>증류수 순으로 온도측정을 진행하였으며, 증류수의 경우 처음과 마지막 순서로 두 번 실시하여 온도측정 시간편차에 따른 온도 차이를 확인하였다. 이때 온도측정 3분 간격당 수온이 평균 0.3°C 감소함을 확인하였다.

## 결 과

전자선 조사 직후 온도 측정 결과 조사 전에 비해 모든 시료의 온도가 증가하였다. 또한 조사선량의 증가에 따라 온도 증가량 또한 가시적으로 상승함을 확인하였다. 해수의 경우 10 kGy<25 kGy<50 kGy<100 kGy로 전자선을 조사함에 따라 온도가 평균 15.0°C로부터 21.1°C<27.6°C<36.9°C<51.8°C로 상승함을 확인하였다(Table 4). 담수의 경우 10 kGy<25 kGy<50 kGy<100 kGy로 전자선을 조사함에 따라 온도가 평균 15.0°C로부터 20.8°C<31.1°C<36.5°C<51.2°C로 상승함을 확인하였다(Table 5). 증류수의 경우 10 kGy<25 kGy<50 kGy<100 kGy로 전자선을 조사함에 따라 온도가 평균 25.0°C로부터 28.9°C<33.3°C<40.4°C<54.2°C로 상승함을 확인하였다(Table 6).

15°C 저온 상태의 해수와 담수 모두 전자선 100 kGy 조사 시 37°C가량 높은 수치로 수온이 상승하며 전자선 흡수선량과 수온변화가 밀접한 관계가 있음을 확인할 수 있었다. 다만 두 시료는 수질성분의 차이가 있고 특히 염분에서 수치상 높은 차이를 확인했음에도, 수온변화에서는 유의미한 변화율의 차이가 나타나지는 않았다.

25°C 상온 상태의 증류수 또한 전자선 100 kGy 조사 시 54°C가량 높은 수치로 수온이 상승하며 마찬가지로 전자선 흡수선량에 수온변화가 밀접하게 영향을 주는 양상을 확인할 수 있었다.

앞선 해수와 담수 시료는 채취 후 부패 방지를 위해 냉장보관 중이던 시료에 전자선 조사를 진행하였으므로, 상온과 수온이 유사했던 증류수와는 직접적인 일대일 비교가 어려운 점이 고려되어야 한다. 다만 이러한 조사 전 수온 차이가 있음에도 수질에 관계없이 흡수선량 증가에 따라 수온이 크게 상승하는 양상은 공통적으로 나타났다.

## 고 찰

본 연구를 통해 기존 연구과정에서 전자선 조사 시 시료의

**Table 5.** Temperature change of fresh water (Jeongeup) samples by various absorbed dose

| Sample | No. | Temp. before irradiation (°C) | Temp. after irradiation (°C) | Temp. change (Δ°C) | Temp. change ratio (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Wf-10 kGy | 1 | 15.1 | 21.2 | 6.1 | 40.4 |
| | 2 | 15.0 | 20.8 | 5.8 | 38.7 |
| | 3 | 14.6 | 20.4 | 5.8 | 39.7 |
| | Av. | 14.9 | 20.8 | 5.9 | 39.6 |
| | Std. Dev. | 0.2 | 0.3 | 0.1 | 0.7 |
| Wf-25 kGy | 1 | 15.1 | 31.6 | 16.5 | 109.3 |
| | 2 | 15.0 | 30.8 | 15.8 | 105.3 |
| | 3 | 14.6 | 31.0 | 16.4 | 112.3 |
| | Av. | 14.9 | 31.1 | 16.2 | 109.0 |
| | Std. Dev. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 |
| Wf-50 kGy | 1 | 17.0 | 37.0 | 20.0 | 117.6 |
| | 2 | 15.7 | 36.3 | 20.6 | 131.2 |
| | 3 | 16.9 | 36.3 | 19.4 | 114.8 |
| | Av. | 16.5 | 36.5 | 20.0 | 121.2 |
| | Std. Dev. | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.9 |
| Wf-100 kGy | 1 | 13.8 | 50.6 | 36.8 | 266.7 |
| | 2 | 13.7 | 51.4 | 37.7 | 275.2 |
| | 3 | 13.9 | 51.6 | 37.7 | 271.2 |
| | Av. | 13.8 | 51.2 | 37.4 | 271.0 |
| | Std. Dev. | 0.0 | 0.9 | 0.8 | 3.0 |

**Table 6.** Temperature change of distilled water samples by various absorbed dose

| Sample | No. | Temp. before irradiation (°C) | Temp. after irradiation (°C) | Temp. change (Δ°C) | Temp. change ratio (%) |
|---|---|---|---|---|---|
| Wd-10 kGy | 1 | 24.8 | 28.9 | 4.1 | 16.5 |
| | 2 | 25.1 | 28.9 | 3.8 | 15.1 |
| | 3 | 24.8 | 28.9 | 4.1 | 16.5 |
| | Av. | 24.9 | 28.9 | 4.0 | 16.1 |
| | Std. Dev. | 0.1 | 0.0 | 0.1 | 0.7 |
| Wd-25 kGy | 1 | 24.8 | 33.3 | 8.5 | 34.3 |
| | 2 | 25.1 | 33.4 | 8.3 | 33.1 |
| | 3 | 24.8 | 33.1 | 8.3 | 33.5 |
| | Av. | 24.9 | 33.3 | 8.4 | 33.6 |
| | Std. Dev. | 0.1 | 0.1 | 0.1 | 0.5 |
| Wd-50 kGy | 1 | 24.6 | 40.6 | 16.0 | 65.0 |
| | 2 | 24.7 | 40.3 | 15.6 | 63.2 |
| | 3 | 24.5 | 40.4 | 15.9 | 64.9 |
| | Av. | 24.6 | 40.4 | 15.8 | 64.4 |
| | Std. Dev. | 0.1 | 0.1 | 0.2 | 0.9 |
| Wd-100 kGy | 1 | 25.8 | 55.3 | 29.5 | 114.3 |
| | 2 | 25.7 | 53.2 | 27.5 | 107.0 |
| | 3 | 25.7 | 54.0 | 28.3 | 110.1 |
| | Av. | 25.7 | 54.2 | 28.4 | 110.5 |
| | Std. Dev. | 0.0 | 0.9 | 0.8 | 3.0 |

온도가 증가했던 사례들을 실증적으로 확인하고자 하였다. 이를 위해 흡수선량을 10 kGy, 25 kGy, 50 kGy, 100 kGy로 단계별로 설정하여 전자선 조사를 진행하였고, 해수, 담수, 증류수로 수질에 따라 시료를 선정하고 시료별로 온도변화 양상을 확인하였다.

실험 결과 흡수선량 증가에 따라 모든 물 시료의 온도가 가시적으로 상승하였다. 그중 본 실험의 선정 흡수선량 중에서는 가장 낮은 선량이나, 선행 연구 결과를 바탕으로 유효한 살균력이 증명되어 실제 현장에서 멸균을 위해 선정될 것으로 예상되는 흡수선량 10 kGy에서 또한 15°C 저온의 해수와 담수는 약 6°C만큼, 25°C 상온의 증류수는 약 4°C만큼 상승하는 결과가 나타났다. 다른 흡수선량에 비해 온도증가량이 낮으나, 이러한 온도증가 또한 전자선과 시료의 화학적 상호작용과 맞물려 시료의 특성을 변화시킬 수 있는 요인으로 작용할 수 있으므로 이에 따른 추가적인 분석과 함께 면밀한 후속 연구가 요구된다. 전자선 조사 시에 타겟물질의 온도변화는 타켓물질의 열용량과 연관이 있다.

$$D = c \times \Delta T$$

D = Dose, c = thermal capacity, ΔT = 온도변화

물의 비열은 1 cal·g$^{-1}$이나 평균 염 농도(35%) 해수의 비열은 0.94 cal·g$^{-1}$이다. 전자선 조사 시 실시간으로 정확한 비열측정은 어려우나 상대적으로 증류수보다 염이 함유되어 있는 담수나 해수의 비열이 더 낮다. 전자선 조사로 평균 염 농도 해수의 1°C를 올리는 데 3.95 kGy가 예측된다. 그러나 모든 수질샘플에 있어 현재의 계산된 측정 예상치보다 2~3°C 상회하는 결과가 나와 전자선 조사영향 외에 수온을 상승시키는 별도의 요인이 있을 것으로 추찰한다. 지역별로 해수의 염 농도가 다르고 또한 같은 지역의 담수 또는 해수의 경우라도 기상 환경조건에 따라 달라지므로 본 연구를 기반으로 염과 유기물의 함량의 조합에 따른 수질별 비열 실증연구가 진행되어야 할 것으로 생각한다.

본 연구에서 확인된 높은 온도증가율을 낮추기 위한 방법으로는 조사전류를 3 mA가 아닌 그 이하로 설정하고 조사속도를 느리게 조정하는 방법이 고려된다. 또한 조사 시의 이러한 높은 온도변화가 조사시료의 특성 및 안정성에 미치는 영향을 검증하기 위해서는 흡수선량은 동일하지만 Dose rate를 조사해 이화학적인 분석을 진행해야 할 것이다.

수질별로 온도변화율에 차이가 발생하는지 비교하고자 하였다. 해수와 담수는 각 흡수선량에 따라 온도증가율에 일부 관찰되기는 하나 유의미한 차이로 나타나지는 않았다. 증류수의 경우 해수, 담수와 조사 전 온도가 달라 직접적인 비교

는 어려웠다. 물 종류에 따른 비교를 위해서는 추후 후속 연구 실험에서 시료의 온도를 동일하게 맞추는 컨디셔닝 단계를 거친 후 진행해야 할 것으로 사료된다.

## 결 론

본 연구를 통해 전자선 조사 시 흡수선량 증가에 따른 물 시료의 높은 온도상승을 확인하였다. 수침문화재와 같이 수분이 포화된 시료에 전자선 조사 시 온도상승 등의 영향을 함께 고려해 안정성을 검증할 필요성이 있으며, 조사속도 및 수질에 따른 차이 등 다양한 변수를 고려한 후속 연구가 진행되어야할 것으로 사료된다.

## 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- 1세부 재난대응 수침문화재 방사선이용 보존 처리 기술과 공정개발 및 실증연구, 과제번호; 2021A01D07-001, 기여율 100%). 또한 저자들은 전자선 조사 사용을 도와주신 첨단방사선연구소 전자선이용운영팀 윤진문 박사님께 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

Kang HY, Jang GU and Kang HS. 2019. Radiation shielding/absorbing material. Korea Institute of Materials Science. 1-3.

Oh GW and Im SH. 2017. Corrosion of the Gas-Turbine Engine According to the Environment of the Korean Seas. *J. Aerospace Sys. Engin.* **11**(2):43-50.

Gwon JH. 2017. Radioactivity, radiation, and agrifood safety. *Food Preser. & Proce. Ind.* **16**(1):55-87.

Park JS. 1990. Chemorheological Aspects in polymer Irradiation. *Korea-Australia Rheology J.* **2**(1):18-26.

National Research Institute of Cultural Heritage. 2009. Development of conservation system for protection of wooden cultural properties.

Received: 8 December 2021
Revised: 20 December 2021
Revision accepted: 20 December 2021