

감마선 조사가 휴민산 염소화에 의한 THMs 생성능 및 수질특성에 미치는 영향

강철호 · 임현우 · 정성운 · 최종혁 · 김종훈* · 최용욱*† · 이면주**

전주대학교 환경보건학과

*전주대학교 환경보건 전문연구소

**한국원자력연구원 방사선과학연구소

Effect of γ -ray Irradiation on THMs Formation and Water Quality Characteristics in the Chlorination of Humic Acid Contaming Water

Chul-ho Kang · Hyun-woo Lim · Sung-woon Jung · Jong-hyuk Choi · Jong-hoon Kim* · Yong-wook Choi*† · Myun-joo Lee**

Department of Environmental Science, Jeonju University, Jeonju, 560-759, South Korea

*Specialized Institute of Environmental Health Science

**Radiation Research Center of Industry & Environment, Advanced Radiation Technology Institute, Korea Atomic Energy Research Institute

(Received 27 September 2010, Revised 3 November 2010, Accepted 4 November 2010)

Abstract

Variation of formation potential of THM (THMFP) by chlorination of humic acid and characteristics of water quality with γ -ray irradiation were investigated, which were divided into two categories by the order of γ -ray irradiation and chlorination in water treatment process. The group A consisted of the γ -ray irradiation followed by chlorination process of humic acid, and the group B consisted of the chlorination followed by γ -ray irradiation process. The pH, ORP, UV_{254} , and DOC decreased rapidly with an increase in γ -ray irradiation of 3 kGy. while conductivity was little changed. Maximum degradation ratio of chloroform in THMs of group A was 82%, while that in group B was 69%. No brominated THMs were detected at high irradiation (>3 kGy). We found that group A water treatment process was more effective in lowering the THMFP than that of group B.

keywords : Chlorination, THMFP, Water quality characterization, γ -ray irradiation

1. 서론

최근 산업 활동의 고도화, 생활양식의 변화에 따른 환경 오염으로 원수 중에 존재할 수 있는 미량의 유해물질 종류가 많아지고 그 농도도 높아질 우려가 있다. 세계보건기구(WHO)에 의하면 물 중에는 2000여 가지의 화학물질이 존재하며, 750여 가지의 물질이 먹는물에서 검출되고 있다고 보고되었다(국립환경과학원, 2007). 현재 우리나라 대부분의 정수처리장에서는 원수 중 천연유기물질(Natural Organic Matter, NOM) 존재 하에서 미생물의 사멸을 목적으로 염소소독을 행하고 있으며, 이는 미량으로 발암성, 변이원성 및 독성을 유발시키는 소독부산물(disinfection by-products, DBPs)을 발생시킨다(Ashblt, 2004). 염소처리에 의해서 발생하는 소독부산물들은 trihalomethanes(THMs), haloacetic acid(HAAs), haloacetonitriles(HANs), halo ketones(HKs) 및 chloral hydrate 등이 있다(Krasner, 1999; Singer et al., 1995). 그 중 대표적인 소독부산물인 THMs은 Chloroform, Bromodichloromethane, Dibromochloromethane, Bromoform

등의 4가지 물질로 대별되고 있으며(최규철, 1995), 잠재적 발암성 물질로 여러 동물실험에서 직장, 신장, 방광, 결장 등에서 암을 유발함이 확인되었다(Doull et al., 1997). 최근에는 염소처리에 의해 강한 돌연변이성을 가지는 MX(3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(H)-furanone)라는 새로운 소독부산물이 생성된다는 연구보고도 있으며(Chen et al., 2001; Kronberg, 1999; Xu et al., 1997), 이러한 유해성으로 대체 소독제로써 이산화염소, 클로라민, 오존, UV살균 등을 사용하였으나 이산화염소는 신경계 독성물질인 chlorite(ClO_2^-), chlorate(ClO_3^-)를 생성시키는 것으로 보고되고 있으며 안정화 이산화염소 파동이후 이용되지 않고 있다(이윤진 등, 2002). 클로라민의 경우 유리염소에 비하여 소독력이 약하고 반응시간이 길며 경우에 따라 암모니아성 질소의 존재로 이미 관내에 형성되어 있는 생물 막에 의해 질산화가 일어날 수 있다(김평청 등, 1998). 오존은 반감기가 약 25분으로써 매우 불안정한 가스이기 때문에 살균현장에서 제조 공급되어야 하고, BrO_3^- , 알데하이드, 저분자 유기산 등과 같은 부산물을 발생시킨다. 잔류성이 없기 때문에 사용자에게 공급되는 수도관에서 미생물에 의한 이차오염을 방지할 수가 없다(오현제, 1998; 이윤진 등, 2002). UV 살균은 대규모 처리장에 설치 시 램프의 주기적인 교

† To whom correspondence should be addressed.

cyw411@jj.ac.kr

체가 필요하고 처리수내 탁도나 색도 등이 존재할 경우 소독효율이 떨어지는 문제점이 있다고 보고되었다(김유리 등, 2004; 이오미 등, 2009). 이러한 문제점을 보완하고자 방사선기술과 환경기술을 융합하여 수처리 분야에 다양한 연구가 진행되었다. 감마선을 사용할 경우 기존의 수처리방법에 비해 유기물에 대한 산화성, 오염물의 분해, 색도제거 그리고 미생물의 멸균 등이 뛰어난 장점이 있으며(Akihisa and Hidehiko, 1985; Takeda, 1988), 감마선을 용액에 조사하게 되면 용액내에 반응성이 매우 높은 $\cdot\text{OH}$, e_{aq}^- , H_2O_2 등이 생성되어, 이들에 의해 대부분의 무기 양·음이온, 그리고 방향족 화합물중 벤젠고리, 불포화 탄소결합과 잘 반응하는 특징으로 오염물질이 쉽게 분해된다(이민주 등, 1998; 한국원자력연구원, 2007). 감마선을 이용한 염색폐수제거 및 지하수를 오염시키는 미량 오염물질의 분해를 연구하였는데 방사선 조사로 생성된 강력한 산화물질인 tert-butyl alcohol과 같은 오염물질의 분해에 매우 효과적임을 규명하였다(과학기술부, 2003, 2006). 본 연구에서는 방사선에 의한 Humic acid의 제거 효율 및 소독부산물 생성능을 알아보기 위하여 γ -ray의 조사량에 따른 SUVA, pH, 산화·환원전위(ORP), 전기전도도를 측정하여 수질특성을 조사하였고, 조사량에 따라 염소처리 시 발생하는 THMs과 같은 소독부산물의 저감능력을 조사하였다.

2. 연구방법

2.1. 시약

본 연구에서 사용된 표준물질은 chloroform, bromodichloromethane, dibromochloromethane 및 bromoform이 포함된 표준물 혼합액 100 $\mu\text{g}/\text{mL}$ (SUPELCO)과 내부표준물질로서 fluorobenzene 2,000 $\mu\text{g}/\text{mL}$ (SUPELCO) 제품을 사용하였다. 시약으로 dichloromethane (Fisher, HPLC Grade), humic acid (Fluka), sodium hydroxide (Fluka), sodium chloride (Aldrich), sodium sulfate (Aldrich), sodium dihydrogenphosphate (Aldrich)를 사용하였고, DOC측정을 위해 potassium hydrogen phthalate (Nacalai tesque), sodium carbonate anhydrous (Nacalai tesque), sodium hydrogen carbonate (Nacalai tesque)를 사용하였으며, 염소처리를 위해 sodium hypochlorite (12%, Junsei)를 사용하였고, 브롬화이온은 potassium bromide (Kanto)를 사용하였다.

2.1.1. Humic acid 저장용액 제조

Humic acid 0.065 g을 정확히 달아 0.1 M NaOH 13 mL에 녹인 후 30분간 sonication(Ultrasonic cleaner, Branson)시킨 후 3500 rpm으로 하여 원심분리(Centrifuge HA-12, Hanil science) 후 상등액의 일부를 취하여 0.45 μm syringe filter로 여과한 여액을 5000 mg/L Stock solution으로 하였다. 이 용액 10 mL를 취하여 0.03 M NaH_2PO_4 용액을 첨가하여 pH 7로 조절하여 최종부피를 5000 mL로 희석한 용액을 10 mg/L Humic acid로 하였다.

Table 1. Analytical conditions of GC/MS used in this study

Instrument	Analytical conditions
GC/MS (Shimadzu)	GC-2010/ GCMS-QP2010 plus
Injecion volume	2 μL
Flow control mode	Linear velocity
Column flow	1.1 mL/min
Split ratio	1 : 10
Temp. program	From 40°C(2min) to 225°C(3.5min) at 10°C/min
Interface temp.	250°C
Ion source temp.	200°C
Ionization energy	70 eV
Mass scan range	35 ~ 350 amu

2.1.2. TC 및 IC 표준용액 제조

Potassium hydrogen phthalate를 증류수에 용해시켜 1000 mg/L이 되도록 제조하여 이 용액을 TC(Total Carbon) 저장용액으로 사용하였고, sodium carbonate anhydrous와 sodium hydrogen carbonate를 증류수에 용해시켜 1000 mg/L이 되도록 제조하여 IC(Inorganic Carbon) 저장용액으로 사용하였다. 각각의 TC, IC 저장용액을 희석하여 표준용액으로 사용하였다.

2.1.3. THMs 표준용액 제조

THMs 표준물질이 95% methanol에 용해된 100 mg/L 저장용액과 내부 표준물질로 사용된 fluorobenzene은 methanol에 용해된 2000 mg/L 저장용액을 syringe(Hemilton)를 이용하여 중량법으로 다이클로로메탄으로 희석하여 표준용액으로 사용하였다.

2.2. 시료 염소 처리

Chlorination Group A는 제조된 10 mg/L의 humic acid를 300 mL 용량의 BOD병에 채우고 Br-THMs 생성을 위하여 인위적으로 NaClO와 KBr을 잔류염소의 농도가 20 mg/L, 브롬화 이온의 농도가 1 mg/L이 되도록 주입하였다. 기포가 들어가지 않도록 밀폐하고 4일 동안 20°C BOD incubator에 보관하였다가 감마선을 조사하여 시료중 THMs을 Fig. 1의 과정으로 추출하여 GC-MS로 정량하였고, pH, ORP, 전도도, DOC와 같은 수질특성을 조사하였다. Chlorination Group B도 300 mL BOD병에 제조된 10 mg/L humic acid를 채우고 감마선을 조사 후 잔류염소의 농도가 20 mg/L, 브롬화 이온의 농도가 1 mg/L이 되도록 주입한 뒤 4일 동안 20 °C BOD incubator에 보관하였다가 Group A와 동일한 방법으로 측정하였다. 감마선 조사는 한국원자력연구원 방사선과학연구소에서 ^{60}Co source를 이용하여 1, 3, 7, 12 kGy의 흡수선량을 조사하였다. 1 kGy는 물질 1 kg당 방사선으로부터 1 kJ의 에너지가 흡수되었을 때의 선량을 뜻하고, 물질에 따라 흡수방사선량이 다른데, 따라서 Parathion의 경우 1 kGy는 6.24×10^{21} eV kg^{-1} 인 것으로 보고되었다(Luchini et al., 1998). alanin-EPR dosimetry system(ISO/ ASTM 5160: 2003)으로 흡수선량을 확인하였다.

2.3. 시료 추출

저장용액 2000 mg/L의 THMs 표준물질을 syringe를 이용

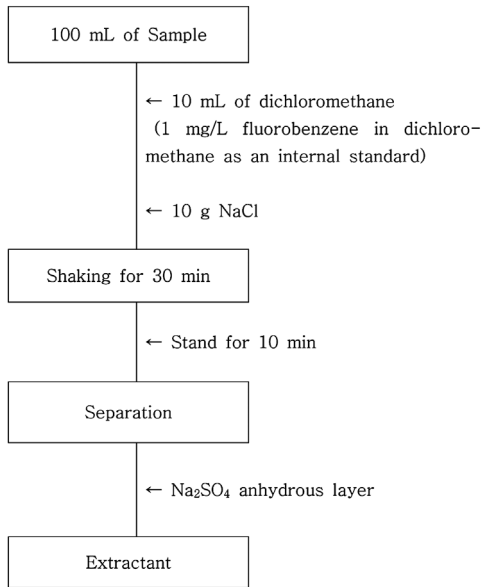


Fig. 1. Analytical procedure for measuring THMs in the sample.

하여 0~300 ug/L 범위에서 검정곡선을 작성하였다. THMs 측정법을 Fig. 1에 나타내었다.

2.4. 기기 및 분석조건

본 연구에서 사용된 GC/MS는 Shimadzu사의 GC-2010과 GCMS-QP2010 plus로 구성된 것을 사용하였다. 분석물질을 분리하기 위해 사용한 모세관 컬럼은 ZB-624(6%-Cyanopropylphenyl 94%-Dimethylpolysiloxane fused-silica, 60 m, 0.25 mm I.D., 1.4 μm film thickness, Phenomenex, USA)을 사용하였다.

DOC(dissolved organic carbon)는 Shimadzu의 TOC-5000A, pH는 Mettler Delta 350, ORP는 HORIBA의 D-23, 전도도 측정은 HANNA의 HI, UV₂₅₄ 측정은 VARIAN의 Carry100을 각각 사용하여 측정하였다. SUVA는 시료의 UV₂₅₄를 DOC 값으로 나눈 다음 100을 곱하여 계산하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 감마선 조사량에 따른 Humic acid 용액의 특성변화

3.1.1. 감마선 조사량에 따른 시료용액 pH 변화특성

감마선 조사량에 따른 pH 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 감마선 조사 전 염소와 브롬화 이온을 첨가하여 반응시킨 Group A와 감마선 조사 후 염소와 브롬화 이온을 첨가하여 반응시킨 Group B 모두 3 kGy까지 감마선 조사 후 초기 pH가 각각 7.0과 6.9에서 6.4까지 급속히 감소하였으나 그 이상의 감마선 조사량에 따라 거의 일정한 pH를 나타내었다. 하수처리장의 방류수를 방사선을 이용하여 처리한 이면주 등(1998)은 감마선에 의해 -COOH, -OH, 페놀-OH로 이루어져 있는 유기물이 분해되어 발생하는 OH로 인해 pH가 증가한다고 보고하였다. 하지만 본 연구에서는 pH가

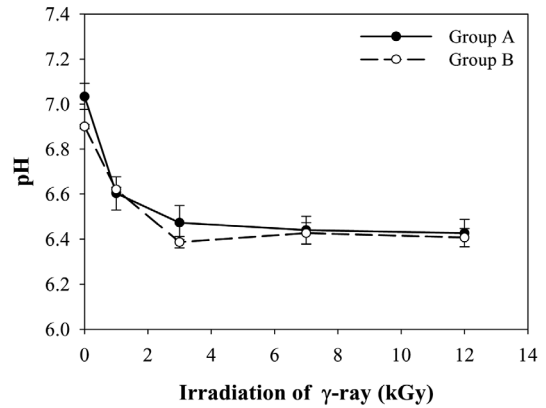
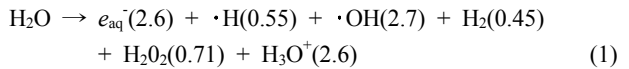


Fig. 2. Variation of pH with γ-ray irradiation.

약 0.6정도 감소되는 것으로 측정되었다. 이는 식 (1)에서 나타내는 것과 같이 물에 조사된 감마선에 의해 발생된 이온 중 상당한 비중을 차지하는 H₃O⁺이온 때문인 것으로 사료되며, 감마선이 Humic acid에 미치는 영향을 연구한 da Silva 등(1997)이 감마선에 의해 Humic acid에서 CO₂가 분리된다는 사실을 IR Spectroscopy와 GC/TCD를 이용하여 규명하였다. 다른 한가지 요인으로는 Humic acid에서 분리되는 CO₂가 수중에서 H⁺이온을 발생시키기 때문에 pH가 감소되었다고 사료된다.



여기서 괄호 안의 숫자는 100 eV당 생성된 라디칼의 양을 의미한다(Zhang et al., 2008).

3.1.2. 감마선 조사량에 따른 ORP 변화특성

Fig. 3에서와 같이 감마선을 조사하지 않은 초기 ORP 값은 Group A와 B에서 각각 771 mV 및 290 mV로 측정되었다. Group A가 B보다 높은 초기상태 ORP 값을 나타내는 이유는 잔류염소로 인해 시료액의 산화전위를 높여준 것으로 사료된다. 두 Group A, B 모두 1 kGy의 조사량으로 산화전위는 급격히 감소하여 환원성 분위기를 나타내었고, 3 kGy 이후의 조사량부터 ORP는 거의 일정한 경향을

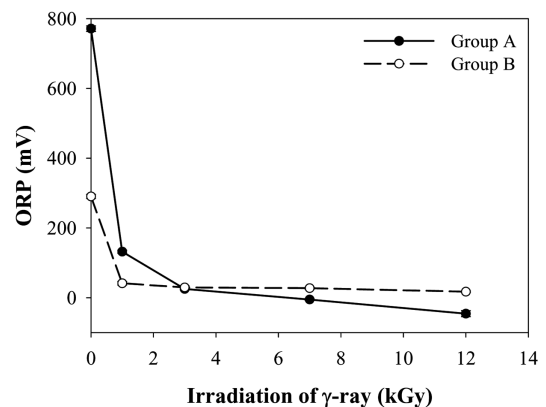


Fig. 3. Variation of ORP with γ-ray irradiation.

나타내었다. THMs을 생성한 후 감마선을 조사한 Group A의 경우 Group B의 경우보다 ORP 변화 폭이 큰 것을 보여주었다. 이러한 현상은 감마선 조사에 의해서 잔류염소가 분해되어 소실됨으로써 ORP값을 감소시키는 것으로 판단된다.

3.1.3. 감마선 조사량에 따른 전도도 변화특성

감마선 조사가 전기전도도에 미치는 영향을 Fig. 4에 나타내었다. Group A의 초기 전도도 값 110.3 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 감마선 조사량에 따라 최대 107.2 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1 kGy)에서 최소 105.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (7 kGy)까지 약간 감소되었으며, Group B는 초기 48.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 에서 감마선 조사량에 따라 최대 46.6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (1 kGy)에서 최소 44.4 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (3 kGy)까지 측정되었다. 감마선에 의해 전도도는 큰 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 하지만 염소처리 후 감마선을 조사한 Group A보다 감마선 조사 후 염소처리를 한 Group B의 평균 전도도 값은 낮게 측정되었다. 그 이유는 휴민산과 차아염소산(HOCl)의 반응으로 생성된 염소치환화합물과 감마선과의 반응력이 뛰어나 염소치환화합물을 이온화시켜 생성된 유기이온 및 염화이온으로 인한 전도도의 증가인 것으로 사료된다. 반면에 휴민산에 먼저 감마선을 조사한 다음 차아염소산과 반응되어 생성된 염소치환화합물(THMs)은 비이온성이기 때문에 상대적으로 낮은 전도도를 나타낸 것으로 사료된다. 이러한 결과는 3-3에서 언급될 THMs의 생성량을 비교해보면 Group A보다 Group B에서 THMs 생성량이 더 많은 것으로도 알 수 있다.

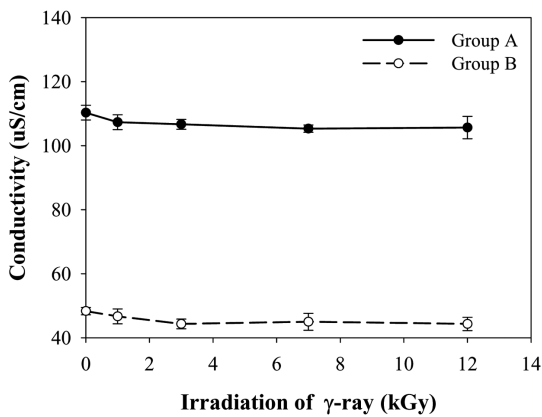


Fig. 4. Variation of Conductivity with γ -ray irradiation.

3.2. 감마선 조사량에 따른 Specific UV Absorbance 특성조사

UV_{254} 와 DOC를 이용하여 계산된 SUVA는 수중 유기물 중 휴믹물질의 특징을 나타내거나 DBPs 생성반응을 평가하기 위한 지표로 이용된다. 감마선 조사량에 따른 UV_{254} 의 흡광도 변화를 Fig. 5에 나타내었다. 감마선 조사량에 따른 UV_{254} 최대 제거율을 알아본 결과 Group A에서는 3 kGy에서 90.0%의 최대제거율을 나타낸 반면 Group B에서는 12 kGy에서 90.2%의 최대제거율을 나타내었다. 그러나 Group A 및 B 모두 1 kGy에서 80%이상의 UV_{254} 제거율을

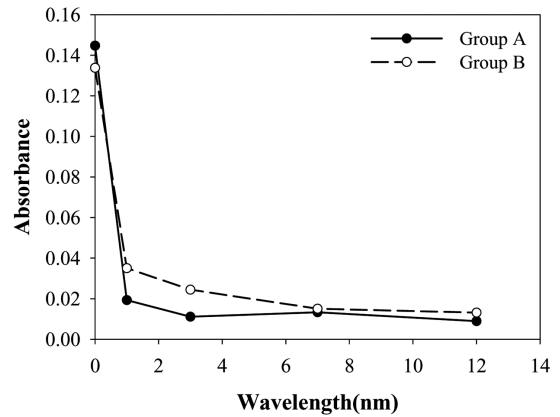


Fig. 5. Variation of UV_{254} with γ -ray irradiation.

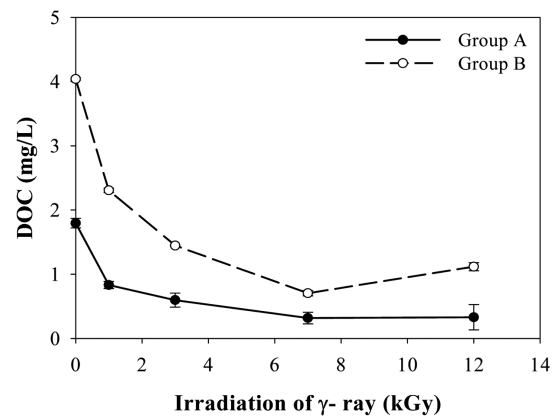


Fig. 6. Variation of DOC concentration with γ -ray irradiation.

나타내었다. 이 결과는 감마선이 증가할수록 흡광도는 감소한다는 Goraczko and Slawinski(2008)의 연구와 동일한 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 감마선 조사량에 따른 Group A와 B의 DOC를 측정된 결과이다. Group A에서 감마선 조사량을 12 kGy까지 증가시킨 결과 DOC의 초기농도 1.8 mg/L에서 0.33 mg/L까지 감소되었고, Group B의 경우에는 DOC의 초기농도 4 mg/L에서 0.7 mg/L까지 감소되었다. 이것은 감마선에 의해 고분자 유기물질인 humic acid가 H_2O 와 CO_2 로 산화되어 DOC를 감소시킨 것으로 생각되며(한국원자력연구원, 2000), Humic acid에 감마선을 조사한 Group B는 CO_2 로 제거되어 Group A 보다 DOC가 많이 발생하는 것으로 사료된다. 3.1.1절에서 언급했던 바와 같이 Humic acid에 감마선을 조사하여 발생된 CO_2 를 GC/TCD로 검출하여 보고된 바 있으며, 감마선 조사량이 증가할수록 DOC의 농도가 감소하는 경향은 Zhang 등(2008)의 연구에서 감마선의 조사량에 따라 TOC의 감소율이 증가하는 경향과 일치하였다. 또 DOC와 THMs 생성의 상관관계를 규명한 손희종 등(2007)과 Buchanan 등(2006)의 연구에 따라 DOC 제거율이 큰 Group A가 Group B보다 THMs 생성이 적을 것을 예상할 수 있었다.

이와 같은 결과를 이용하여 휴믹물질의 물리화학적 특성을 나타내는 SUVA를 Fig. 7에 나타내었다. 감마선이 조사

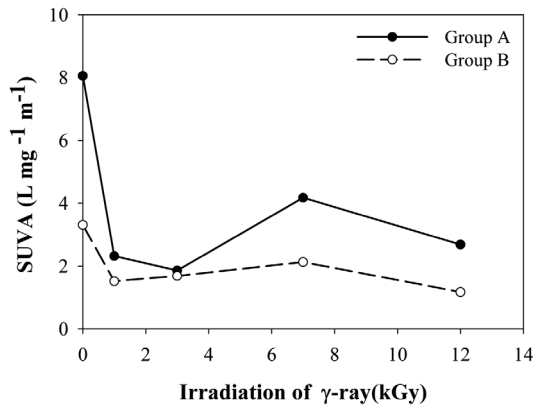


Fig. 7. Variation of SUVA with γ-ray irradiation.

되지 않은 초기 SUVA 값이 Group A는 8.1, Group B는 3.3으로 높은 방향성을 띠고 있었고 감마선에 의해 Group A와 B는 최대 1.9에서 1.2까지 감소되었다. 이것은 감마선에 의해 상당부분의 방향족고리가 개열되어 포화 지방족 화합물로 분해되었음을 의미하고, 분해된 유기탄소 생분해 가능성이 크다고 볼 수 있다(김미숙과 김철규, 2001).

3.3. 감마선 조사량에 따른 THMs 생성 효과

10 mg/L의 Humic acid가 존재하는 시료에 현재 먹는물 수질기준인 4 mg/L 이상인 20 mg/L의 과량의 잔류염소와 1 mg/L의 브롬화 이온을 첨가한 후 Group A, B의 감마선에 따른 THMs 생성 결과를 Fig. 8과 9에 나타내었다. 감마선을 조사하지 않은 Group A의 초기 THMs의 농도는 CHCl₃ 110.9 ppb, CHBrCl₂ 160.4 ppb, CHBr₂Cl 206.5 ppb, CHBr₃ 62 ppb로 측정되었으며, 감마선 조사 후 염소와 브롬화 이온을 첨가하여 4일동안 반응 시킨 Group B의 초기 THMs의 농도는 CHCl₃ 131.2 ppb, CHBrCl₂ 192.9 ppb, CHBr₂Cl 230.5 ppb, CHBr₃ 75.1 ppb로 측정되었다. 감마선 조사에 따라 CHCl₃은 Group A가 7 kGy에서 최대 분해율인 82.1%로 측정되었고, Group B는 3 kGy에서 최대 분해율인 69.4%로 측정되었다. 1 kGy의 감마선을 조사받은 TTHMs는 Group A가 162.1 ppb, Group B가 301.5 ppb로 측정되었다. Group A가 Group B에 비해 CHCl₃의 생성량이 약 46% 적은 이유는 감마선 조사에 의해 CHCl₃이 더 많이 분해된 것이라 사료된다. 1 kGy 이상에서 불검출된 Group A의 CHBr₃을 제외한 Br-THM은 3 kGy이상에서 모두 불검출되었다. 원수를 이용하여 염소 소독부산물 생성특성을 연구한 손희종 등(2004b)의 연구결과와 다르게 전체 THM 중 CHCl₃보다 Br-THM이 과량 생성되었다. 이것은 손희종 등(2007)의 연구에서 실험한 50 μg/L보다 과량인 50 mg/L 브롬화 이온에 의한 과량의 브롬화 첨가반응 때문인 것으로 사료된다. 생성된 THM 중 감마선에 의해 쉽게 분해되는 Br-THM은 CHCl₃에 비해 결합길이가 길고 결합 세기가 작기 때문인 것으로 생각되며, Group B가 Group A에 비해 THM이 더 많이 생성되는 것은 Humic acid에 직접 조사된 Group B가 감마선에 영향으로 방향족 탄소가 산화분해되어 분자량 크기가 감소되기 때문인 것으로 사료된다

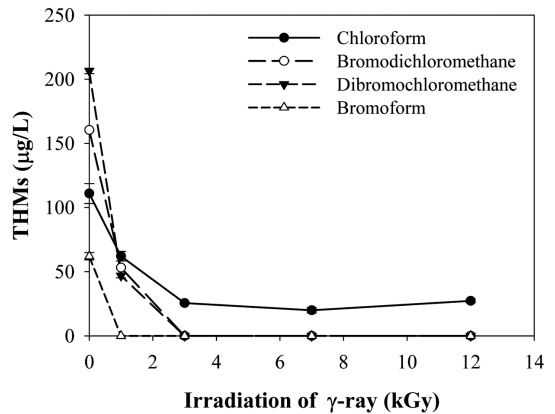


Fig. 8. Variation of concentration in THMs with γ-ray irradiation (Group A).

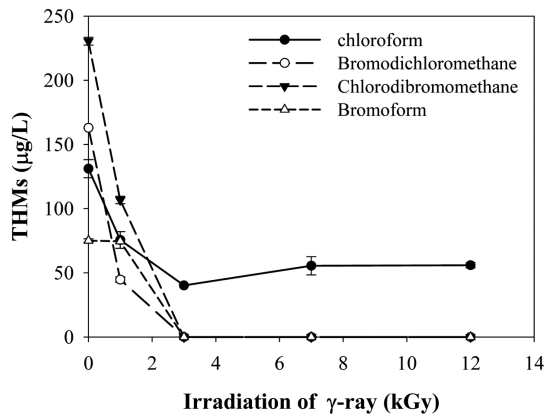


Fig. 9. Variation of concentration in THMs with γ-ray irradiation (Group B).

(이동석, 2002; Goraczko and Slawinski, 2008). 손희종 등(2004a)의 연구에서 저분자 유기물이 고분자 유기물보다 THM 생성능이 높다고 보고된 바 본 연구의 결과와 일치하는 것으로 해석된다.

4. 결론

휴민산의 염소화에 의한 THMs 생성에 미치는 감마선 조사의 영향 및 수질특성에 관한 연구의 결론은 다음과 같다.

- 1) Group A, B의 초기 pH는 7.0과 6.9로 큰 차이는 없었으나 감마선 조사량에 따라 pH 6.4정도까지 약산성으로 감소된 후 더 이상 변화없이 일정하였다.
- 2) Group A의 초기 ORP값 771 mV에서 1 kGy의 조사량에 의해 83%가 감소된 132 mV로 측정되었고 3 kGy 조사된 후부터 감소율이 완만해진 경향을 나타내었다. Group B는 Group A 보다 낮은 산화성 분위기로 초기 ORP값 290 mV에서 1 kGy의 조사량에 의해 86%가 감소된 41 mV로 측정되었고 1 kGy 이후부터 완만한 감소율을 보였다.
- 3) 전도도는 감마선 조사량에 따라 Group A는 110.3 μS/cm, Group B는 48.4 μS/cm로 측정되었고, 감마선 조

사랑을 증가시키에 따라 Group A는 평균 107.1(±1.99) μS/cm, Group B는 평균 45.7(±1.73) μS/cm로 거의 일정한 값을 나타내었다.

- 4) UV₂₅₄는 Group A, B 모두 1kGy 감마선 조사량으로 80% 이상 감소하였고 조사량 증가에 따라 거의 일정한 값을 나타내었다. DOC는 감마선 조사량에 따라 Group A가 초기농도 1.8 mg/L에서 0.33 mg/L까지 감소되었고, Group B는 초기농도 4 mg/L에서 0.7 mg/L까지 감소되었다. Humic acid에 직접 감마선 조사를 받은 Group B 보다 생성된 THMs에 감마선 조사를 받은 Group A가 약 2.5배 낮은 DOC 값을 나타내었고, THMs 또한 Group B보다 낮게 생성되었다.
- 5) 휴믹물질의 물리화학적 특성을 나타내는 SUVA의 초기 값은 Group A는 8.1, Group B는 3.3으로 높은 방향성을 띠고 있었고 감마선에 의해 Group A와 B는 각각 1.9와 1.2로 감소되었다. 그러나 SUVA 값이 높게 측정된 Group A 보다 Group B의 경우가 더 높은 THMs 생성능을 보였다.
- 6) 감마선 조사에 따라 CHCl₃은 Group A가 7 kGy에서 최대 분해율인 82.1%로 측정되었고, Group B는 3 kGy에서 최대 분해율인 69.4%로 측정되었다. 1 kGy 이상에서 불검출 된 Group A의 CHBr₃를 제외한 Br-THM은 3 kGy이상에서 모두 불검출되었다. 생성된 THMs에 직접 감마선이 조사된 Group A가 humic acid에 조사된 Group B보다 THMs 생성율이 낮게 측정되었다. 감마선을 상수 소독공정에 도입할 경우 본 연구의 결과에 따라 염소 소독 후 3 kGy 이상의 조사량으로 감마선을 조사한다면 염소 소독 전에 조사된 원수보다 소독부산물 생성이 더 낮을 것으로 사료된다.

참고문헌

과학기술부(2003). 방사선이용 환경처리 기술개발.
 과학기술부(2006). 전자가속기 이용 염색폐수 처리시설 구축.
 국립환경과학원(2007). 수돗물에서의 미량유해물질 관리방안연구.
 김미숙, 김철규(2001). 대청호 수중 퇴적물로부터 분리된 Humic Substance의 특성 연구. *한국수처리기술연구회지*, **9**(4), pp. 45-54.
 김유리, 한범수, 김진규, 강호(2004). 전자선을 이용한 하수처리장 방류수내 대장균군 살균. *수질보전 한국물환경학회지*, **20**(4), pp. 376-381.
 김평청, 최용일, 우달식, 남상호(1998). 클로라민 소독특성에 관한 연구. *춘계학술발표회논문집, 대한환경공학회*, pp. 127-130.
 손희중, 노재순, 배상대, 최영익, 정철우(2007). 낙동강 원수에서 추출한 Humic Acid에서의 염소처리에 의한 THM 생성 특성 평가. *대한환경공학회지*, **29**(4), pp. 412-418.
 손희중, 노재순, 정철우, 이철우, 강입석(2004a). 상수원수중에 함유된 천연유기물질 분자량 크기가 염소 소독부산물 생성에 미치는 영향. *대한환경공학회지*, **26**(11), pp. 1278-1290.
 손희중, 정철우, 강입석(2004b). 상수원수중의 천연유기물질 특성과 염소 소독부산물 생성의 관계. *대한환경공학회지*, **26**(4), pp. 457-466.
 오현재(1998). 우리나라 실정에 적합한 고도정수처리기술의 개발과 활용. 한국건설기술연구원.

이동석(2002). 수질계의 Humic Acid와 Fulvic Acid의 분리 및 특성. *분석과학회지*, **15**(1), pp. 36-42.
 이면주, 정영도, 박순달(1998). 감마선 조사를 이용한 하수처리장 방류수 처리에 관한 연구. *대한위생학회지*, **13**(2), pp. 106-114.
 이오미, 김해연, 김태훈, 이면주, 유승호(2009). UV-C, VUV, Ozone 및 Gamma ray에 의한 병원성 미생물의 불활성화. *Applied Chemistry*, **13**(1), pp. 109-112.
 이윤진, 이선종, 이동찬, 김현, 이환, 이철효, 남상호(2002). 정수소독공정에 이용되는 염소, 이산화염소, 오존 소독제의 비교, 고찰에 관한 연구. *한국환경위생학회지*, **28**(3), pp. 1-8.
 최규철(1995). 수질오염공정시험법, 동화기술.
 한국원자력연구원(2000). 방사선의 공업적 이용기술개발, 과학기술부.
 한국원자력연구원(2007). 방사선이용 환경처리 기술개발, 과학기술부.
 Akihisa, S. and Hidehiko, A. (1985). Development of techniques in radiation treatment of water. *Radioisotopes*, **34**, pp. 570-590.
 Ashbolt, N. J. (2004). Risk analysis of drinking water microbial contamination versus disinfection by-products(DBPs). *Toxicology*, **198**(1-3), pp. 255-262.
 Buchanan, W., Roddick, F., and Porter, N. (2006). Formation of hazardous by-products resulting from the irradiation of natural organic matter : Comparison between UV and VUV irradiation. *Chemosphere*, **63**, pp. 1130-1141.
 Chen, Z., Yang, C., Lu, J., Zou, H., and Zhang, J. (2001). Factors on the formation of disinfection by-products MX, DCA and TCA by chlorination of fulvic acid from lake sediments. *Chemosphere*, **45**, pp. 379-385.
 da Silva, W. T. L., da Silva, S. C., and de Oliveira Rezende, M. O. (1997). Influence of gamma-radiation on the behavior of humic acids from peat and tropical soil. *J. Radioanal Nucl. Chem.*, **222**, pp. 29-34.
 Doull, J., Klaassen, C. D., and Amdur, M. O. (1997). *Toxicology. 8th ed.* Macmillan publishing Co., New York, U.S.A.
 Goraczko, W. and Slawinski, J. (2008). Luminescence from γ-irradiated humic acid. *J. Luminescence*, **128**(7), pp. 1155-1161.
 Krasner, S. W. (1999). Chemistry of disinfection by-product formation, formation and control of disinfection by-products in drinking water, P. C. Singer (ed.), *AWWA*, pp. 27-52.
 Kronberg, L. (1999). Water treatment practice and the formation of genotoxic chlorohydroxyfuranones. *Water Sci. & Technol.*, **40**(9), pp. 31-36.
 Luchini, L. C., Peres, T. B., and Rezende, M. O. (1998). Degradation of the insecticide parathion in methanol by gamma-irradiation. *J. Radioanal Nucl. Chem.*, **241**(1), pp. 191-194.
 Singer, P. C., Obolensky, A., and Greiner, A. (1995). DBPs in chlorinated North Carolina drinking waters. *J. AWWA*, **87**(10), pp. 83.
 Takeda, A. (1988). Utilization of radiation on treatment of raw water. *Radioisotopes*, **37**, pp. 416-422.
 Xu, X., Zou, H., and Zhang, J. (1997). Formation of strong mutagen [3-chloro-4-(dichloromethyl)-5-hydroxy-2(5H)-furanone] MX by chlorination of fractions of lake water. *Water Research*, **31**(15), pp. 1021-1026.
 Zhang, J., Zheng, Z., Zhao, Y., Wang, L., Zhong, Y., and Xua, Y. (2008). Radiation-induced reduction of diuron by gamma-ray irradiation. *J. Hazardous Materials*, **151**, pp. 465-472.