

전자빔 공정을 적용한 1,4-dioxane의 제거특성 및 독성평가

Decomposition Characteristics of 1,4-dioxane in an E-beam Process and Toxicity Assessment

황 헤 영¹⁾ · 장 순 응[†]

Hwang, Haeyoung · Chang, Soonwoong

ABSTRACT : The aim of this study was 1,4-dioxane's degradation efficiency and toxicity test applying E-beam. The experiments were shows that the degradation efficiency in the initial concentration of 1,4-dioxane and the irradiation capacity of E-beam and the degree of mineralization based on a change of scavenger gas. The biological toxicity test by using on of green algae, *Pseudokirchneriella Subcapitata* was conducted to lead the reducing toxicity. Degradation efficiency of 1,4-dioxane was improved when E-beam irradiation intensity was higher and the efficiency of TOC removal using Radical scavenger gas was increased by N₂O, O₂ and N₂ in order. In 4 days(96hrs), toxicity test results indicated that toxicity effect was decreased by increase of E-beam irradiation intensity.

Keywords : 1,4-dioxane, GC/FID, E-beam, Toxicity assessment

요 지 : 본 연구의 목표는 전자빔 공정을 적용하여 1,4-dioxane의 제거효율 및 독성평가를 하는 것이다. 이 실험에서는 전자빔 선량과 1,4-dioxane의 초기 농도에 따른 저감 효율 및 scavenger gas에 따른 무기화의 정도를 알아보았다. 또한 녹조류 중 하나인 *Pseudokirchneriella Subcapitata*를 이용하여 생물독성과 위해성 평가를 통한 독성저감기술을 확립하였다. 그 결과 1,4-dioxane은 전자빔 조사량이 증가할수록 분해 효율이 향상되었고, Radical Scavenger gas에 의한 TOC 제거는 N₂O나 O₂를 용해시켰을 때 효율이 증가되었다. 4일(96hrs) 후 독성평가 결과 전자빔 조사 강도의 증가에 따라 독성 영향이 저감되는 것을 알 수 있었다.

주요어 : 1,4-dioxane, GC/FID, 전자빔, 독성평가

1. 서 론

1,4-dioxane은 자연계로부터의 산물이 아니라 용제, 세정제 안정제로 사용되는 유기합성화합물로서 폴리옥시에틸렌(polyoxyethylene)계 비이온계면활성제 및 황산에스테르 등의 제조공정에서 부생하는 것으로 알려져 있다(임재립 등, 2004). 최근의 연구들에 의하면 일본, 캐나다, 그리고 미국 등지의 지표수와 지하수에서의 1,4-dioxane의 검출에 관한 보고를 하고 있으며 이에 의한 수질 오염 가능성을 심각하게 우려하고 있다(손현석 등, 2005).

1,4-dioxane은 2009년 1월 낙동강 수계 정수장에서 검출된 미량 독성물질로 인체 및 수생태계에 유해성이 높아 지난 2008년 10월 특정수질유해물질로 지정되는 등 최근 사회적 이슈화되고 있는 물질로 환경부의 자료에 따르면 먹는 물 수질 기준은 50 μ g/L로 규제되어 있으며(환경부, 2010), 국제암협회(International Agency for Research on Cancer; IARC)에서 동물에서는 발암성이지만 인간에게는 아직 확

인되지 않은 매우 유력한 인체 발암가능성인 B2 등급의 화합물로 분류하고 있다(이상미 등, 2007). 급성독성은 낮지만 쥐의 비강암과 간암, 기니 돼지의 담낭암의 사례가 있고 인간과 동물에게 눈의 염증과 호흡기 질환을 유발하고 짧은 시간동안 고농도로 노출 시 신장과 간에 심각한 손상을 입히는 것으로 알려져 있다(Stefan, 1998).

1,4-dioxane의 제거 방법 중 고급산화공정(Advanced Oxidation Processes, AOPs)이 가장 효율적인 것으로(이상미 등, 2007) 각 공법의 처리효율은 활성탄공법 10~60%(V.Maurino, 1997), UV/H₂O₂ 공법은 85~95%(이병렬 등, 2003), UV/TiO₂ 공법은 70~90%(Roger R.Hill, 1997)로 보고되고 있다. 표 1에 나타난 처리기술을 살펴보면 물리적 처리에 의한 처리 효율이 50% 이하로 낮은 것을 확인할 수 있었으며, 두 개의 에테르기를 가진 헤테로사이클(heterocycle) 구조 때문에 미생물에 의한 분해가 어려워 생물학 처리효율도 높지 않았다.

일반적으로 알려진 AOPs는 난분해성 유기물질을 생물학적으로 분해 가능한 물질로 전환시키기는 하나 완전 무기화

1) 비회원, 경기대학교 환경에너지시스템공학과 석사과정

† 정회원, 경기대학교 환경에너지시스템공학과 교수(E-mail : swchang@kyonggi.ac.kr)

표 1. 처리방법에 따른 1,4-dioxane 처리효율

처리공정		1,4-dioxane 농도	처리 시간	제거율 (%)
화학적처리 (AOPs)	UV/H ₂ O ₂ 산화	1mM(88 mg/L)	1hr	88~94
		3.4mM(299 mg/L)	2hr	96
	UV/Fenton 산화	100 mg/L	8hr	90
	O ₃ /H ₂ O ₂ 산화	UV/H ₂ O ₂ 산화와 유사하나 Fenton에 의한 pH 조정, 침전물 형성이 우려됨		
	UV/TiO ₂ 산화		10~20hr	70~90
	초음파/Fenton 산화	1mM(88mg/L)	50min	95
	Fenton 단독 산화	100mg/L	8hr	90
물리적 처리	활성탄필터, 폭기	거의 제거되지 않음		
	미생물부착활성탄필터	50% 이하 제거율		
생물학적 처리	일반활성슬러지	0~62%(일본 실제 하수처리장의 경우)		
	순응활성슬러지 (Bac-Terra, 미국)	1mM(88mg/L)	15day	90

시키기가 쉽지 않고, 또한 산화된 부산물이 원물질보다 더 강한 독성을 나타내는 경향이 있다. 또한 제거율을 높이기 위하여 긴 처리 시간과 첨가제의 사용으로 인한 경제적 문제가 발생되었다. 이로 인하여 기존의 고도산화처리공정보다 강력한 산화력을 지니고 경제성이 뛰어나며 대용량 처리가 가능한 방사선이용기술을 이용하여 난분해성 독성오염 물질을 완전 무기화시키거나 생물학적 독성이 없는 형태로 변환하고자 하였다.

따라서 본 연구에서는 1,4-dioxane의 처리에 전자빔공정을 적용하여 다양한 인자를 설정하여 실험하였고 radical scavenger gas(N₂, O₂, N₂O)의 첨가에 따른 제거 특성을 연구하였다. 또한 1,4-dioxane의 분해특성과 처리과정에서 발생하는 잔류 물질에 대한 유해성을 파악하기 위하여 조류를 이용한 생물 독성평가를 수립함으로써 전자빔 처리의 안정성을 평가하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1 전자빔 이론

전자빔 조사를 이용한 1,4-dioxane과 같은 난분해성 오염물질을 처리하는 것으로 전자빔 가속기는 진공상태(vacuum state)에서 전자총(cathode)으로부터 방출되는 전자(electron)를 고전압을 이용하여 빛의 속도에 가깝게 가속시켜 높은 에너지의 전자빔을 생성하는 장치로서 가속된 전자가 물질과 반응하여 형성된 이온 및 들뜬(excited) 상태의 분자들이 물이나 유기물질에서 형성된 자유 라디칼과 연속적인 화학반응을 일으키는 1

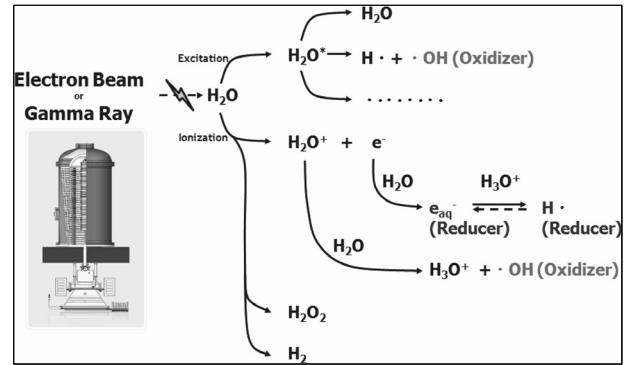
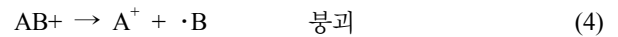
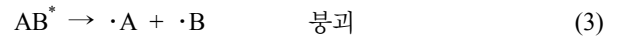
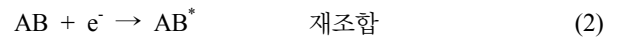
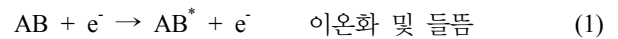
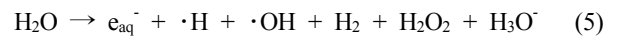


그림 1. 물의 방사분해

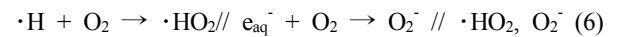
차 산물(primary species or primary products)로 작용하게 된다. 전자빔 가속기에 의해 가속된 전자빔이 분자나 화합물 혼합체에 방사될 때 그 혼합물은 에너지를 흡수한다. 이런 이온 혼합물의 상호작용으로부터 들뜬 상태의 분자, 자유 라디칼들이 생성된다. 전자빔 조사로 유도된 반응 메커니즘은 식 (1)에서 식 (4)와 같다.



전자빔에 의한 수용액 중의 유기화합물의 방사분해는 일차적으로 물의 방사분해에 의해서 생성된 각종의 라디칼들에 의해 진행되며, 탈산소 하에서 전자빔에 의한 물의 방사분해(water radiolysis)는 식 (5)와 같다(그림 1).



또한 산소 존재하에서는 식 (6)과 같은 반응성이 높은 퍼옥시 라디칼(Peroxy radical)이 생성된다.



산소 존재하에서 수용액 중의 유기물질들은 산화성이 높은 OH, ·HO₂, O₂⁻와 일차적으로 반응하여 퍼옥시 라디칼(Peroxy radical) 형태의 중간생성물질로 변환되며, 이와 같은 중간생성물질들은 불안정하여 산소와 쉽게 결합하고 새로운 라디칼 형태의 저분자 유기물질들로 파괴되며 연쇄적으로 산화분해 반응이 진행되어 최종적으로 CO₂와 H₂O로 무기화 된다(유승호 등, 2008; 구정은, 2009).

2.2 시약 및 기기

1,4-dioxane은 무색의 부드러운 에테르 향을 지닌 액체로

표 2. 1,4-dioxane의 물질 특징

특징	값	출처
분자식	C ₄ H ₈ O ₂	Budavari et al. 1989
분자량	88.1	Budavari et al. 1989
녹는점	11.8°C	Budavari et al. 1989
끓는점	101.1°C at 760mmHg	Budavari et al. 1989
밀도	1.0329g/mL at 20°C	Keith and Walters 1985
Koc	1.23	Howard 1990
증기압	30mmHg at 20°C	Verschueren 1983
헨리 상수	4.88×10 ⁻⁶ atm m ³ /mol	Howard 1990

표 2의 물질 특성에 나타난 것과 같이 녹는점, 끓는점, 밀도가 물과 유사하여 물에 용해가 잘되므로 물과 섞일 경우 분리제거가 곤란한 성질을 가지고 있으며 매우 낮은 Henry's Law constant와 토양흡착계수(soil-sorption coefficient, Koc)로 토양 및 부유물질에 잘 흡착되지 않아 지하수 등에 높은 농도로 존재한다(이상미 등, 2007).

본 실험에 사용된 시약은 분해 대상물인 1,4-dioxane와 1,4-dioxane의 추출을 위해 사용한 Methylene Chloride로 99.8%의 고순도 시약을 Aldrich Chemical Co. U.S.A.로부터 구매하였으며 실험에 사용된 방사선원은 한국원자력연구소에서 보유하고 있는 Cobalt-60(방사능; 270 Ci, Paranomic, UK)을 이용하였다. 방사선 조사량은 한국원자력연구소에서 제작된 Co-60 방사선 동위원소 반감기에 따른 조사량 대비 조사기간, 거리표 근거로 조사기간 및 그에 따른 거리를 정하여 실험하였으며 방사선 조사는 120mL amber serum bottle을 이용하여 headspace 없이 시료를 채운 후 수행하였다.

2.3 1,4-dioxane 및 TOC 분석 방법

본 연구에서 1,4-dioxane의 검출을 위해 사용된 기기인 기체 크로마토그래피(GC)는 Agilent 7890N Gas Chromatography system을 사용하였으며, 검출기로는 FID(Flame Ionization Detector)를 사용하였다. 분석에 사용된 column은 Agilent사의 HP-5를 사용하였고, 컬럼의 길이는 30m이며 내경은 0.32mm이고 column의 두께는 0.33µm를 사용하였다.

1,4-dioxane에 대한 전자빔 조사 후 무기화(mineralization)의 정도를 평가하기 위하여 용액의 TOC(Total Organic Carbon)을 측정하였다. 이의 측정은 Shimadzu사의 TOC-5000AFMF 이용하여 시료수 중에 함유된 물질 중 산화하여 얻을 수 있는 유기물의 전량을 CO₂로 산화시킨 다음 적외선 흡수법으로 정량분석하였다.

2.4 조류독성평가

생물 독성 분석은 화학적 분석으로는 평가될 수 없는 미

지의 독성물질을 감지하고, 물질 간의 상호 작용으로 발생하는 독성 상승효과를 측정할 수 있다. 또한 유해 물질이 생물에 미치는 영향을 직접적으로 평가할 수 있다는 장점이 있어 화학적 분석과 상호 보완적으로 이용되는 독성 평가 방법이다(박경수 등, 2005).

본 연구에서는 잔류물질의 유해성을 평가하기 위하여 배양이 쉽고, 세대시간이 짧아 단시간 내에 여러 세대에 걸쳐 나타나는 독성을 평가할 수 있으며(정해영 등, 2005), 생태계의 먹이사슬에서 하위단계의 수용체로 OECD 및 US EPA에서 독성영향평가에 사용되고 있으며 특히 영양단계를 구성하는 수많은 생물종들 중 가장 민감한 종인 녹조류 *Pseudokirchneriella Subcapitata*를 분양받아 ISO 8692(수질-담수 조류 성장 억제 시험방법)에 따라 실험하였다(박연기 등, 2009).

배양은 shaking incubator를 사용하여 75rpm으로 교반하며 조도 5,000 Lux, 온도 22±1°C로 고정하였다. 마지막으로 접종밀도는 1×10⁵ cells/mL가 되도록 하여 성장 저해 억제율에 대한 평가를 96hr간 실시하였으며 성장의 측정은 inverted microscope를 이용하여 조류계수판으로 cell counting을 통해 산출하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 전자빔 조사량에 따른 1,4-dioxane의 제거효율 비교

1,4-dioxane의 제거를 전자빔 공정에 적용하기 위하여 1,4-dioxane의 농도를 1mg/L~20mg/L의 범위로 다양한 조사선량(0.2kGy~5kGy)을 통한 수계에 존재하는 미량유해물질인 1,4-dioxane의 제거효율을 조사하였다. 그림 2에서 저농도(1mg/L와 3mg/L)에서는 조사량이 2kGy의 조사만으로도 거

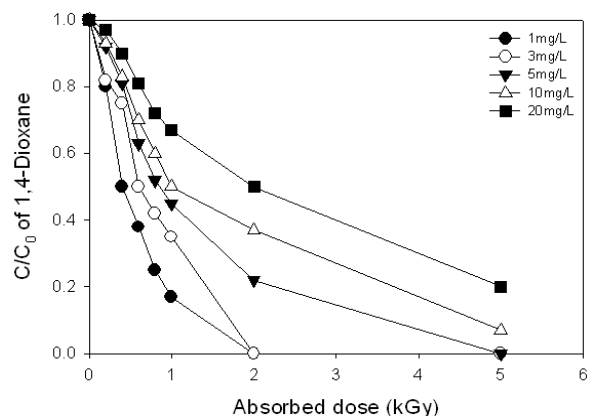


그림 2. 다양한 초기 농도와 조사강도에 따른 제거율

의 대부분 제거되었음을 확인하였고, 5mg/L에서는 5kGy의 조사로 거의 제거되었으며, 고농도(10mg/L와 20mg/L)의 완전한 제거를 필요로 할 때에는 5kGy 이상이 조사되어야 할 것으로 사료된다.

본 실험을 초기 농도를 100µg/L로 하여 오존 투입 농도를 증가시키며 1,4-dioxane의 제거효율을 확인한 기존 연구(손희중 등, 2007)와 비교해 보면 오존의 농도를 1~5mg/L로 증가시켰을 때 제거효율이 38%~87%로 증가되는 것을 확인할 수 있었다. 본 연구에서는 기존 연구의 10배 이상의 농도(1mg/L과 3mg/L)임에도 불구하고 2kGy의 조사만으로도 100%의 제거효율을 보여 오존에 의한 AOPs 보다 전자빔의 조사에 따른 1,4-dioxane의 제거효율이 더 높은 것을 알 수 있었다.

3.2 1,4-dioxane 분해에 관한 동역학적 연구

방사선 처리 기술은 다양한 난분해성 오염물질을 제거하는데 사용되고 있으며, 1,4-dioxane의 완전한 제거를 위해 요구되는 선량을 예측하여 현장에서 유용하게 이용하기 위해서는 분해에 관한 동역학적 연구가 필요하다.

본 연구에서는 G-value와 dose-constant를 이용하여(Yu 등, 2008), 1,4-dioxane의 분해특성을 살펴보았다. G-value는 100eV의 에너지를 흡수할 때 생성되거나 소멸되는 라디칼, 이온, 분자의 수를 의미하며 식 (7)에 의해 계산되어진다.

$$G = \frac{R \times (6.023 \times 10^{23})}{D \times (6.24 \times 10^{16})} \quad (7)$$

여기서 R은 주어진 선량에서 용질의 농도변화(M), D는 흡수선량(Gy), 6.023×10^{23} 은 아보가드로 수, 6.24×10^{16} 은 100eV/L에서 Gy로 변환하는 변환계수를 의미한다.

그림 3은 초기 농도가 20mg/L이었을 때 1,4-dioxane의 제거율과 G-value 사이의 관계를 조사선량에 따라 나타낸 것

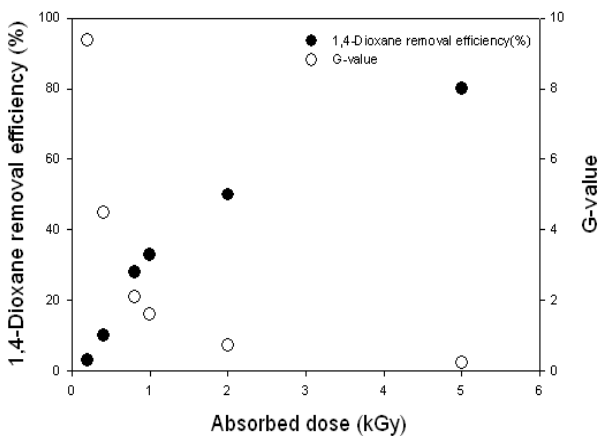


그림 3. G-value와 1,4-dioxane의 제거율의 비교

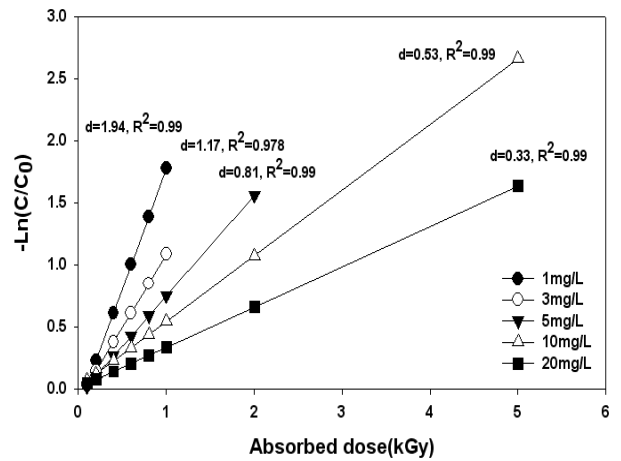


그림 4. 1,4-dioxane의 초기 농도와 조사선에 따른 dose-constant

이다. G-value는 흡수선량의 증가에 따라 9.36에서 0.24의 범위로 변화하는 감소함을 확인할 수 있었다.

이와 관련된 몇몇 다른 연구에서는 물의 방사분해로 생성된 활성과 라디칼과 1,4-dioxane 용질분자의 길항 작용과 (Mak 등, 1997) ·OH, e_{aq}⁻, ·H와 같은 라디칼의 재결합반응에 의해(Lin 등, 1995) 방사선량이 증가할 때 활성화된 라디칼이 생성되고 결과적으로 G-value를 낮춘다고 알려져 있으며 본 연구에서도 유사한 경향을 나타내었다.

Dose-constant는 방사선 기술에서 난분해성오염물질을 제거하는데 요구되는 선량을 나타내는 대표적인 방법 중 하나로 식 (8)에 의하여 계산되었다.

$$C = C_0 e^{-dD} \quad (8)$$

여기서, C는 방사선 조사 후 오염물질의 농도(mg/L), C₀는 초기 오염물질의 농도(mg/L), d는 dose-constant 그리고 D(kGy)는 흡수선량을 의미한다.

Dose-constant는 오염물질의 초기 농도와, 수용액의 pH, 오염물질의 분자구조와 radical scavenger의 첨가 등에 영향을 받는다(Mincher 등, 2000; Getoff, 2002; Mincher 등, 2002; Lee 등, 2005). 1,4-dioxane의 dose-constant를 식 (8)을 이용하여 살펴본 결과, 초기 1,4-dioxane농도에 의해 dose-constant가 좌우되는 것을 확인할 수 있었으며, R²는 최하 0.98로 1차 반응모델인 식 (8)에 부합하는 것으로 나타났다. 1,4-dioxane 20mg/L에서의 d는 0.33kGy⁻¹로 1mg/L의 1.94kGy⁻¹에 비하여 약 6배 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 Radical scavenger gases와 전자빔 조사량에 따른 TOC 제거효율비교

Radical scavenger gas의 종류와 조사선량이 TOC 제거에 미치는 영향을 조사하기 위하여 1,4-dioxane의 초기 농도를

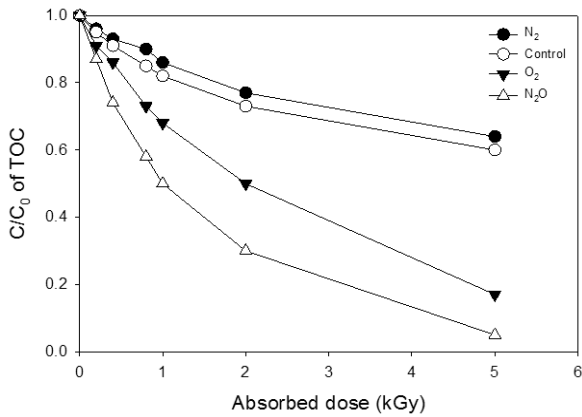


그림 5. Radical scavenger gas에 따른 1,4-dioxane(20mg/L)의 TOC 제거율

20mg/L로 고정하고 대기상태(atmospheric)와 고순도(99.9%)의 N₂, O₂, N₂O 가스로 30분간 포화시킨 시료를 전자빔 조사량을 0.2kGy에서 5kGy까지 변화시켜 실험을 실시하였다.

그림 2에서 10mg/L과 20mg/L의 고농도에서는 5kGy까지 조사선량을 증가시켰지만 완전한 제거를 이루지 못하였기 때문에 산화율을 증가시켜 제거 효율을 증가시키기 위하여 다양한(N₂, O₂, N₂O) scavenger gas를 purging 하여 TOC를 통한 1,4-dioxane의 무기화를 확인해 보고자 하였다.

N₂O 가스를 포화시킨 경우 5kGy 조사 시 95% 이상의 무기화가 나타났으며 N₂ 가스에 의해 포화되었을 때는 36%로 낮은 TOC 제거효율을 보였다. 이를 통하여 N₂ gas가 산화를 방해하는 scavenger gas임이 확인되었다. 1,4-dioxane 수용액에서 N₂O > O₂ > 대기상태 > N₂의 순서대로 제거효율을 보였으며, 본 연구를 Alachlor를 감마선 조사하여 Control (대기상태)와 O₂, N₂O gas를 포화시켜 TOC의 제거 효율을 살펴본 기존 연구(Choi 등, 2009)와 비교해 보았을 때 같은 제거 순서를 나타냈다. 이는 water radiolysis로부터 생성된 수용성 전자(e_{aq}⁻)와 N₂O 가스의 반응에 의해 생성된 ·OH의 강한 산화작용에 의해 1,4-dioxane의 분해가 촉진되었을 것으로 사료된다.

3.4 전자빔 조사량에 따른 1,4-dioxane의 독성평가

전자빔 조사량에 따른 조류 독성 영향의 정도를 측정하기 위하여 1,4-dioxane의 농도를 1mg/L, 10mg/L, 20mg/L 일 때 전자빔 조사량을 0kGy, 1kGy, 5kGy로 하여 실험을 실시하였다.

우선 전자빔 조사를 통한 조류 독성저감에 관하여 유승호 등(2008)이 Benomyl의 독성저감 연구와 본 연구를 비교하여 독성저감에 효과를 비교하였다. Benomyl은 1mg/L에서 전자빔 조사 전에는 20.14%의 inhibition이 발생하였지만

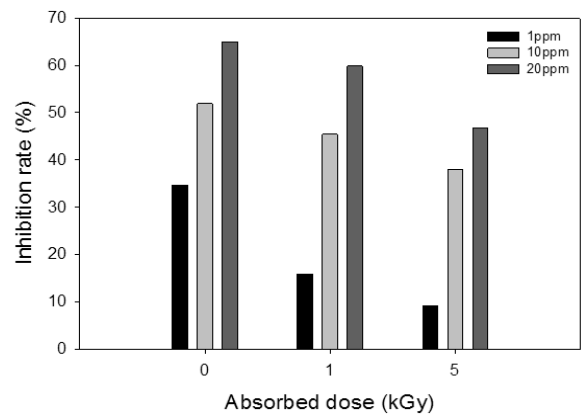


그림 6. 조류 *P. kirchneriella*를 이용한 1,4-dioxane의 독성평가

표 3. 조사선량과 초기 1,4-dioxane의 농도에 따른 독성 저감

Item	Absorbed dose(kGy)			
	0	1	5	
Inhibition (%)	1mg/L	34.7	15.9	9.2
	10mg/L	51.9	45.4	37.9
	20mg/L	65.0	59.8	46.7

0.1kGy에서 1kGy의 전자빔 조사한 후에는 생물독성에 대한 inhibition이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었지만(유승호 등, 2008), 본 연구에선 1,4-dioxane의 1mg/L을 5kGy로 조사한 후에도 나타났지만 10% 미만에서도 inhibition이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이는 Benomyl의 LD₅₀은 5g/Kg~10g/kg, 1,4-dioxane은 3.9g/kg~5.7g/kg으로 1,4-dioxane의 독성 영향이 Benomyl에 비하여 2배 정도 독성이 큰 물질로써 전자빔 조사 후에도 10% 미만의 생장저해가 일어나는 것으로 판단된다. 하지만 전자빔 조사전의 inhibition인 34.7%에서 조사선량 1kGy와 5kGy에서 15.9%와 9.2%로 조사선량이 증가할수록 생물학적 저해는 급격히 감소하는 것으로 확인되었다.

조사선량 농도에 따른 독성영향은 1,4-dioxane의 초기 농도가 1mg/L과 20mg/L에서 5kGy의 조사 후에 inhibition %는 9.2%와 46.7%로 약 5배 더 높은 것으로 확인되었다(표 3). 이는 1,4-dioxane의 초기 농도에 따른 독성효과와 전자빔 조사에 따른 1,4-dioxane의 중간생성물에 독성이 생물학적 저해를 일으키는 것으로 판단된다. 따라서 향후 전자빔 조사에 따른 1,4-dioxane의 중간생성물의 생성기작과 저감기작에 대한 연구가 필요하다.

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 고도산화처리법보다 더 강력한 산

화력을 지닌 방사선(전자빔)을 이용하여 1,4-dioxane의 무기화 및 무해화를 위한 분해반응을 살펴보았으며, 잔류물질의 안정성을 검증하고자 독성실험을 실시하였다.

전자빔 조사량에 따른 1,4-dioxane의 제거효율을 비교하기 위하여 농도별로 조사선량을 변화시켜가며 실험하였다. 그 결과 저농도(1mg/L)에서는 조사량이 2kGy이하에서 거의 대부분 분해가 일어났다. 이는 고도산화처리법 중 오존을 이용한 1,4-dioxane의 분해 연구와 비교해 보았을 때 제거율이 더 뛰어난 것으로 확인되었다.

Radical scavenger gas와 전자빔 조사에 따른 TOC의 제거효율을 비교하기 위하여 초기 농도를 20mg/L로 고정한 후 대기상태와 N₂, O₂, N₂O gas를 purging 시킨 후 전자빔 조사 후에 TOC제거 효율을 살펴보았다. 그 결과 N₂O > O₂ > 대기상태 > N₂의 순서대로 제거효율을 보였다. 이는 N₂O 및 O₂ 가스와 e_{aq}⁻와 ·H의 반응으로부터 생성되어진 산화라디칼에 의해 1,4-dioxane의 분해가 촉진됨을 설명할 수 있다.

전자빔 조사에 따른 1,4-dioxane의 독성 영향 정도를 측정하기 위하여 녹조류 중 *Pseudokirchneriella Subcapitata*를 배양시켜 조류 독성시험을 실시하였다. 4일(96hrs)동안 관찰한 결과 전자빔 조사를 한 시료는 그렇지 않은 시료에 비하여 조류 성장 저해를 덜 받는 것을 확인할 수 있었다. 전자빔 조사를 통한 1,4-dioxane의 분해 및 오염물질의 독성저감도 기대할 수 있는 공정으로 추후 보다 다양한 적용 및 실험을 통한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 구정은(2009), 폐물 제거를 위한 전자빔과 활성섬유탄소 결합 공정의 적용, 석사학위논문, 금오공과대학교. pp. 16~20.
2. 박연기, 배철한, 김병석, 이재봉, 유아선, 홍순성, 박경훈, 신진섭, 홍무기, 이규승, 이정호(2009), Butachor의 수서생물에 대한 위해성 평가, *한국농약과학회지*, Vol. 13, No. 1, pp. 1~12.
3. 손현석, 최석봉, Eakalak Khan, 조경덕(2005), 초음파를 이용한 1,4-dioxane의 처리에서 OH 라디칼의 기여와 산화제 첨가의 효과, *대한환경공학회지*, Vol. 27, No. 6, pp. 642~650.
4. 유승호, 조일형, 장순용, 이시진, 천석영, 김한래(2008), 전자빔 공정에서 실험계획법을 이용한 살균제 Benomyl의 제거특성 및 독성평가, *대한환경공학회지*, Vol. 30, No. 9, pp. 955~960.
5. 이병렬, 김창균, 서형준(2003), 1,4-dioxane의 고도 산화 및 생화학적 분해 특성 연구, *대한환경공학회지*, Vol. 25, No. 2, pp. 240~247.
6. 이상미, 한인섭, 김상은(2007), 전기분해/UV를 이용한 1,4-dioxane의 제거효율 비교 평가, *대한환경공학회지*, Vol. 29, No. 10, pp. 1131~1137.
7. 임재림, 이경혁, 채선하, 김순홍, 안효원(2004), 정수처리시스템에서 1,4-dioxane의 제거방안, *대한환경공학회지*, Vol. 26, No. 11, pp. 1238~1243.

8. 환경부(2010), *먹는물 수질기준 및 검사 등에 관한 규칙*, 제 2 조, 별표 1.
9. Budavari, S., O'Neil M. J., Smith, A., Hecklman, P. E.(1989), *The Merck Index, 11th ed*, Merck & Co., Inc., Rahway, N.J, p. 954.
10. Choi, D., Lee, M., Yu, S.(2009), Radiolytic Decomposition of Alachlor with Reducing Radical Scavenger Gases, *Applied Chemistry*, Vol 13, No. 1, pp. 117~120.
11. Getoff, N.(2002), Factors Influencing the Efficiency of Radiation-induced Degradation of Water Pollutants, *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 65, No. 4~5, pp. 437~446.
12. Hil, R. R., Jeffs, G. E., Roberts, D. R.(1997), Photocatalytic Degradation of 1,4-dioxane in Aqueous Solution, *Journal of Photochemistry and Photobiology*, Vol. 108, No. 1, pp. 55~58.
13. Howard, P. H.(1990), *Handbook of Environmental Fate and Exposure Data for Organic Chemicals*, Lewis Publishers, Inc., Chelsea, MI, pp. 216~221.
14. Keith L. H., Walters D. B.(1985), *Compendium of Safety Data Sheets for Research and Industrial Chemicals. Part II*, VCH Publishers, Deerfield Beach, p. 726.
15. Lee, B., Lee, M.(2005), Decomposition of 2, 4, 6-trinitrotoluene (TNT) by Gamma Irradiation, *Environmental Science & Technology*, Vol. 39, No. 23, pp. 9278~9285.
16. Lin, K., Cooper, W. J., Nickelsen, M. G., Kurucz, C. N., Waite, T. D.(1995), Decomposition of Aqueous Solutions of Phenol using High Energy Electron Beam Irradiation-a Large scale study, *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 46, No. 12, pp. 1307~1316.
17. Mak, F. T., Zele, S. R., Cooper, W. J., Kurucz, C. N., Waite, T. D., Nickelsen, M. G.(1997), Kinetic Modeling of Carbon Tetrachloride, Chloroform, and Methylene Chloride Removal from Aqueous Solution using the Electron Beam Process, *Water Research*, Vol. 31, No. 2, pp. 219~228.
18. Maurino, V., Calza, P., Minero, C., Pelizzetti, E., Vincenti, M. (1997), Light-Assisted 1,4-dioxane Degradation, *Chemosphere*, Vol. 35, No. 11, pp. 2675~2688.
19. Mincher, B. J., Brey, R. R., Rodriguez, R. G., Pristupa, S., Ruhter, A.(2002), Increasing PCB Radiolysis Rates in Transformer Oil. *Radiation Physics and Chemistry*, Vol. 65, No. 4~5, pp. 461~465.
20. Mincher, B. J., Curry, R. D.(2000), Considerations for Choice of a Kinetic Fig. of Merit in Process Radiation Chemistry for Waste Treatment. *Applied Radiation and Isotopes*, Vol. 52, No. 2, pp. 189~193.
21. Stefan, M. I., Bolton, J. R.(1998), Mechanism of the Degradation of 1,4-dioxane in Dilute Aqueous Solution using the UV/hydrogen Peroxide Process, *Environmental Science & Technology*, Vol. 32, No. 11, pp. 1588~1595.
22. Verschuere, K.(1983). *Handbook of Environmental Data on Organic Chemicals, 2nd Ed*, Van Nostrand Reinhold Co., New York, pp. 578~580.
23. Yu, S., Lee, B., Lee, M., Cho, I. H., Chang, S. W.(2008), Decomposition and Mineralization of Cefaclor by Ionizing Radiation: Kinetics and Effects of the Radical Scavengers, *Chemosphere*, Vol. 71, No. 11, pp. 2106~2112.

(접수일: 2010. 12. 6 심사일: 2010. 12. 15 심사완료일: 2011. 1. 18)