

감마선 처리를 이용한 고무공장 폐수의 생물독성 저감

박은주 · 조훈제 · 조기종 · 김정규 · 정진호[†]

고려대학교 환경생태공학부

Toxicity Reduction of Wastewater from a Rubber Products Manufacturing Factory by Gamma-ray Treatment

Eun-Joo Park · Hun-Je Jo · Kijong Cho · Jeong-Gyu Kim · Jinho Jung[†]

Division of Environmental Science & Ecological Engineering, Korea University

(Received 14 June 2006, Accepted 4 August 2006)

Abstract

Both raw wastewater and effluent from a rubber products manufacturing factory were found to be toxic to *Daphnia magna* though the effluent satisfied current water quality standards. Thus, in order to reduce toxicity, advanced oxidation processes (AOPs) such as gamma-ray (γ -ray) treatment and ozonation (O_3) were applied. A combined γ -rays/ O_3 treatment at 20 kGy after coagulation significantly reduced toxicity of raw wastewater, changing 48-h toxic unit (TU) value from 201.21 to 23.92. However, toxicity of treated water was higher than that of effluent (TU = 12.15). This shows limitation of gamma-ray treatment to remove toxicity of raw wastewater. In case of effluent, the combined γ -rays/ O_3 treatment at 20 kGy efficiently decomposed toxic compounds down to non toxic level. This work strongly supports the necessity of toxicity reduction evaluation as well as toxicity-based effluent management.

keywords : Acute toxicity, *Daphnia magna*, Gamma-rays, Ozone, Wastewater

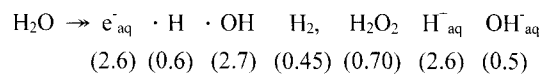
1. 서론

산업화가 급속하게 진행됨에 따라 현재 약 36,000 종류의 다양한 화학물질이 국내에 유통되고 있으며, 이와 더불어 산업폐수에 포함되어 있는 유해물질의 수도 점차적으로 증가하고 있다. 그러나 국내의 경우 생화학적 산소요구량(BOD₅), 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS), 페놀류, 시안 등 28개의 개별 항목만으로 배출허용기준을 설정하고 있어, 수계로 유입되는 유해한 화학물질을 관리하는데 한계가 있다. 특히 산업폐수가 기존의 배출허용기준에 맞게 처리되어 방류되더라도 수생태계에서 유해한 영향을 줄 수 있다고 알려져 있다(김 등, 2006). 이런 이유로 최근에는 개별항목에 의한 규제를 보완할 수 있는 새로운 방법으로 생물을 이용한 통합독성 평가가 적극 검토되고 있다(김 등, 2005; 이 등, 2005). 생물독성평가는 폐수의 유해성을 통합적으로 평가할 수 있는 유용한 기법으로, 물리화학적 지표만으로는 파악할 수 없는 폐수 내 화학물질간의 상호작용, 생물학적 영향, 생물 유효도 등을 포함하는 총괄적 영향을 평가할 수 있다(김 등, 2005; Choi et al., 2004; Hernando et al., 2005).

라텍스를 주원료로 사용하는 고무 공장에서 배출되는 폐수는 일반적으로 유해 화학물질을 다량 포함하고 있으며, 생태계에 독성을 유발하는 대표적인 폐수로 알려져 있다.

이런 이유로, 미국의 경우에는 라텍스와 같은 물질을 포함하는 OCPSF(Organic Chemicals, Plastic and Synthetic Fibers) 관련 산업은 반드시 공정 과정 자체에서 전처리 평가 기준을 만족시킨 뒤 도시 하수처리장으로 방류수를 배출하여야 한다는 규정이 있다(Ersu et al., 2004). 현재 한국에서는 고무의 소비량이 증가함에 따라 다량의 유기물을 포함하고 있는 고무공장 폐수의 배출량은 증가하고 있으나, 생물독성을 바탕으로 한 방류수 관리는 이루어지지 않고 있다(오 등, 2006). 따라서, 산업폐수의 생물독성관리에 대한 연구가 시급한 실정이며, 이와 더불어 생물독성을 저감할 수 있는 폐수처리 공정개발도 이루어져야 한다.

감마선 처리는 고급산화공정의 일종으로 산업폐수에 포함되어 있는 난분해성 또는 독성 유기물질을 처리하는데 활발하게 이용되고 있다(이 등, 2004; 조 등, 2004). 이것은 감마선을 물에 조사하였을 때 발생하는 강력한 반응성 물질들을 이용하여 폐수를 처리하는 방법으로, 특히, 수산화전자(e_{aq}^-)와 수산화라디칼($\cdot OH$)은 각각 주요한 환원제와 산화제로 작용하게 된다(Getoff, 1996).



여기서, 괄호 속의 숫자는 G 값으로 100 eV의 흡수선량에서 발생하는 분자수이다. 특히, 용존 산소의 존재 하에서

[†] To whom correspondence should be addressed.
jjung@korea.ac.kr

는 수화전자가 산소와 반응하여 산화제인 $\cdot O_2$ 를 생성한다. 따라서 산화적 조건에서는 강력한 산화제인 $\cdot OH$ 와 $\cdot O_2$ 에 의한 독성 유기오염물질의 분해제거가 이루어지며, 이로 인하여 고무공장 폐수의 독성이 감소될 수 있다 (Puig et al., 1996). 그러나 기존의 감마선 처리 연구는 폐수처리 효율에만 집중되어 있으며, 처리 후 방류되는 방류수의 생물독성 저감에 대한 연구는 매우 부족한 실정이다 (김 등, 2006; Moraes et al., 2004). 따라서, 본 연구에서는 먼저, 고무공장 폐수의 생물독성을 물벼룩의 급성독성시험을 이용하여 평가하고, 감마선 조사를 포함한 오존 및 응집 처리를 이용하여 고무공장 폐수의 생물독성을 저감할 수 있는 최적의 공정을 개발하고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시료채취

고무공장 폐수는 경기도 시흥시에 위치한 반월·시화국가산업단지의 고무제품 제조공장에서 채취하였는데, 자체 처리시설로 유입되는 원폐수(raw wastewater)와 다단계의 처리 공정(Fig. 1)을 거쳐 최종 침전조에서 방류되는 방류수(effluent)를 사용하여 실험하였다. 시료 채취는 총 5번(2005년 1월 2회, 5월 1회, 6월 1회, 7월 1회) 실시하였으며, 각 시료의 초기 독성시험은 채취 후 48 시간 이내에 수행되었다. 연구가 진행되는 동안 각 시료는 갈색 유리병에 담아 4°C의 저온실에서 보관하였다.

고무공장 폐수 처리로 인한 물리화학적 특성 변화는 다음과 같이 분석하였다. 총유기탄소(TOC)는 Shimazu TOC-5000A(Japan)로 분석하였고, 5일간 생물화학적산소요구량(BOD₅)은 수질오염공정시험방법에 준하여 분석하였다(환경부, 2004a). 집중용 미생물은 중앙물재생센터에서 채취한 슬러지를 유리섬유로 거른 후 상징액을 사용하였다. 크롬법에 의한 화학적 산소요구량(COD)은 시료 2 mL를 COD분석용 시약(Humas, Korea)에 넣고 150°C에서 2시간 반응시킨 후 색도계(Thermo Orion AQ2040, USA)로 측정하였다.

2.2. 감마선 처리

고무공장 폐수의 감마선 처리는 감마선 단독공정(γ -rays alone)과 감마선/오존 병용공정(γ -rays/O₃)으로 실시하였다. 원폐수의 경우에는 감마선 처리의 효율을 높이기 위하여 전처리로서 응집 공정(γ -rays after Coag. or γ -rays/O₃ after Coag.)을 사용하였다. 감마선 조사는 한국원자력연구

소에서 보유하고 있는 고준위 ⁶⁰Co 선원(AECL IR79, Canada)을 이용하여 실온에서 이루어졌다. 시료는 pyrex 재질로 된 반회분식 반응기에 500 mL씩 넣고 선원으로부터의 거리를 달리하여 0-20 kGy 범위(1, 5, 10, 20 kGy)에서 일정시간 조사하였다. 오존은 고순도 산소의 무성방전을 이용하는 오존 발생장치(Ozonotech LAB-2, Korea)로 생산하였다. 오존 발생장치의 조건은 전류 0.775 A, 전압 218 V, 압력 0.05 MPa로 조절하여 시간당 11.48 g의 오존 가스가 발생하도록 고정하였다. 발생된 오존은 반회분식 반응기의 하단에 설치된 산기관을 통하여 0.5 L/min으로 감마선 조사 시간 동안 주입하였다. 일정 시간 후에 오존 반응을 정지시키기 위하여 thiosulfate를 사용하였다(강 등, 2002).

응집 공정에서 사용된 무기 응집제는 폐수 처리 과정에서 일반적으로 많이 이용되고 있는 황산알루미늄($Al_2(SO_4)_3 \cdot 18H_2O$, Junsei, Japan)이었다. 응집 보조제로는 유기 응집제인 이양화학의 양이온계 polymer C-300P를 사용하였다. 황산알루미늄의 주입량은 80 mg/L as M⁺로 조절하였고, 유기 응집제는 3% 용액상으로 조제하여 사용하였다. 응집 실험은 표준형 Jar test 장치를 이용하여 회분식으로 수행하였다. 급속 및 완속 혼합의 교반 조건은 각각 200 rpm에서 5분, 50 rpm에서 15분으로 하였으며, 완속 교반 후 침전시간은 60분으로 하였다.

2.3. 생물 독성 시험

고무공장 폐수의 생물독성은 OECD Guideline 202 (OECD, 2000)에 준하여 물벼룩(*Daphnia magna*)을 이용한 급성독성시험으로 평가하였다. 독성시험은 태어난 지 24시간 이내의 물벼룩을 이용하여 5개의 희석농도와 대조구를 사용하여 실시하였다. 각 농도별로 4회 반복하였으며, 각 반복 시험마다 10 mL의 시료와 5마리의 개체를 사용하였다. 광주기는 16h : 8h (light : dark)의 비율로 조절하였으며, 온도는 20°C를 유지하였다. EC₅₀ 값은 immobilization의 유형에 따라 Graphical, Trimmed Spearman-Kärber, Probit method를 사용하여 산정하였다. EC₅₀ 값 산정 후 이 값을 독성단위(TU = 100%/EC₅₀)로 환산하여 감마선 처리에 의한 산업폐수의 독성 저감수준을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 고무공장 폐수의 생물 독성

본 연구에서 사용된 고무제품 생산공장의 원폐수와 방류

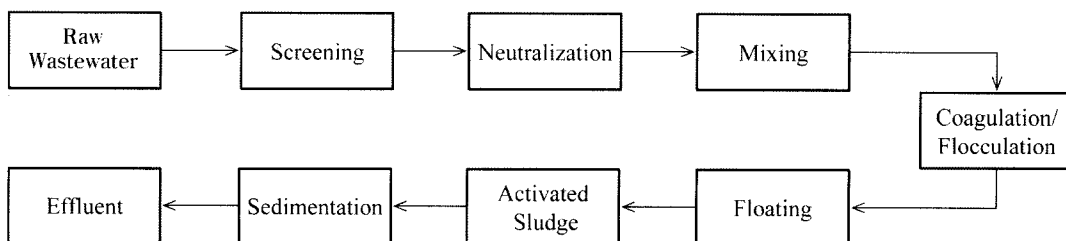


Fig. 1. A flow sheet for wastewater treatment in a rubber products manufacturing factory.

수는 모두 물벼룩에 대한 급성독성을 유발하였다(Table 1, 2). 일반적으로 고무공장 폐수의 주요 독성원인물질은 가황 보조제나 촉진제로 사용되는 무극성 유기화합물과 아연으로 알려져 있다(Wik et al., 2005, 2006). 원폐수의 경우, 2005년 1월부터 7월 사이에 채취한 5개 시료의 TU가 모두 95% 신뢰 구간에서 동일하게 측정되어 채취 시기에 따른 TU의 영향이 크지 않다는 것을 알 수 있었다. 그러나 방류수의 경우 낮은 독성값으로 인하여 채취 시기에 따라 3배 정도 차이가 나는 것으로 나타났다. 이것은 방류수의 생물독성 허용기준을 설정하는데 시료 채취의 시기와 횟수 및 방법이 매우 중요하다는 것을 보여준다. 본 연구는 감마선 처리를 이용하여 고무 폐수의 독성 저감을 목적으로 하고 있기 때문에 방류수의 48시간 물벼룩 급성독성값이 가장 높게 검출된 7월 시료를 대상으로 실험을 수행하였다.

Table 3은 7월에 채취한 원폐수와 방류수의 물리·화학적 특성을 분석한 결과이다. 이 공장에서는 zinc dibutyl-dithiocarbamate를 가황 촉진제로 사용하고 있기 때문에 아연을 포함한 중금속 분석도 실시하였다. 방류수의 경우, 공장에서 대행업체를 통하여 자체적으로 측정된 결과와 마찬가지로 기존의 배출허용기준(환경부, 2004b)을 만족시키고 있지만, Table 2에 나타난 것과 같이 물벼룩에 대한 급성독성을 유발하고 있다. 이것은 방류수의 개별물질 규제와 더불어 생물을 이용한 통합독성 관리가 필요하다는 것을 단적으로 보여준다.

3.2. 감마선 처리에 따른 생물 독성 변화

감마선 처리에 의한 고무공장 폐수의 생물 독성 변화를 관찰하기 위하여 원폐수 및 방류수에 대하여 처리 전후의 물벼룩 급성독성 평가를 실시하였다. 원폐수의 감마선 단독공정의 경우, 처리 전 24시간 TU가 103.31로 측정되었으나(Table 4), 감마선 조사 후 20 kGy에서 TU는 33.18로 독성이 현저히 감소하는 경향을 보였다. 응집 처리 후 감마선

Table 3. Physicochemical property of wastewater samples from a rubber products manufacturing factory

Samples	Raw wastewater	Effluent
pH	5.47	7.90
BOD ₅	424	4.22
COD	1141	52
TOC	213	39
Cd	< 0.01	< 0.01
Cu	1.19	0.08
Cr	0.24	0.15
Fe	4.72	2.80
Pb	0.25	0.90
Zn	39.01	10.42

Units in mg/L unless otherwise noted.

Table 4. Acute toxicity (24-h) change of raw wastewater from a rubber products manufacturing factory

Treatment	Absorbed dose (kGy)	EC ₅₀ (%)*	TU
γ - rays alone	0	0.97 (0.78-1.18)	103.31
	1	1.26 (1.04-1.52)	79.37
	5	1.39 (1.20-1.61)	71.94
	10	1.50 (1.25-1.80)	66.89
	20	3.01 (2.50-3.65)	33.18
γ - rays after Coag.	0	1.08 (0.81-1.30)	92.68
	1	1.20 (1.00-1.45)	83.19
	5	1.24 (1.03-1.50)	80.65
	10	1.30 (0.18-9.73)	76.86
	20	3.63 (2.84-5.18)	27.58
γ - rays/O ₃ after Coag.	0	2.69 (2.27-3.20)	37.20
	1	7.07 (-)	14.14
	5	6.83 (6.38-7.31)	14.64
	10	6.60 (6.01-7.24)	15.15
	20	7.07 (-)	14.14

* 50% effective concentration with 95% confidence limits

Table 1. Initial acute toxicity of raw wastewater from a rubber products manufacturing factory

Sampling time	24-h exposure		48-h exposure	
	EC ₅₀ (%)*	TU	EC ₅₀ (%)	TU
Jan. 2005	0.95 (0.86-1.04)	105.26	0.41 (0.30-0.51)	242.72
Jan. 2005	0.84 (0.74-0.96)	119.05	0.45 (0.37-0.54)	224.72
May 2005	0.97 (0.79-1.19)	102.77	0.48 (0.37-0.59)	208.33
June 2005	1.08 (0.91-1.29)	92.00	0.45 (0.35-0.55)	222.22
July 2005	0.97 (0.78-1.18)	103.31	0.50 (0.14-0.69)	201.21

* 50% effective concentration with 95% confidence limits

Table 2. Initial acute toxicity of effluent from a rubber products manufacturing factory

Sampling time	24-h exposure		48-h exposure	
	EC ₅₀ (%)*	TU	EC ₅₀ (%)	TU
Jan. 2005	31.86 (28.53-35.59)	3.14	26.10 (21.86-31.01)	3.83
Jan. 2005	22.21 (17.06-28.73)	4.50	12.84 (10.31-15.82)	7.79
May 2005	71.61 (58.77-90.79)	1.40	11.08 (7.81-14.45)	9.03
June 2005	76.01 (64.07-90.87)	1.41	19.60 (15.02-22.99)	5.10
July 2005	71.06 (59.05-87.18)	1.41	8.23 (6.00-10.27)	12.15

* 50% effective concentration with 95% confidence limits

Table 5. Acute toxicity (48-h) change of raw wastewater from a rubber products manufacturing factory

Treatment	Absorbed dose (kGy)	EC ₅₀ (%)*	TU
γ - rays alone	0	0.50 (0.14-0.69)	201.21
	1	0.76 (-)	131.58
	5	0.88 (0.74-1.05)	113.25
	10	0.74 (0.48-0.95)	135.50
	20	1.44 (1.11-1.84)	69.35
γ - rays after Coag.	0	0.77 (0.68-0.87)	129.87
	1	0.85 (0.80-0.91)	117.65
	5	0.85 (0.80-0.91)	117.65
	10	0.88 (-)	113.64
	20	1.71 (1.60-1.83)	58.48
γ - rays/O ₃ after Coag.	0	1.49 (1.27-1.76)	67.11
	1	3.54 (3.02-4.14)	28.28
	5	3.30 (3.01-3.62)	30.30
	10	3.92 (3.29-4.67)	25.50
	20	4.18 (3.49-5.02)	23.92

* 50% effective concentration with 95% confidence limits

조사를 실시한 결과, 감마선 단독 처리와 비교하여 TU가 유의한 차이를 보이지 않았다. 그러나 응집 공정 후에 감마선과 오존을 병용하여 처리하였을 때에는 1 kGy에서도 큰 폭의 독성 감소를 보여주어 TU가 14.14로 나타났다. 이는 폐수 내에 존재하는 고분자 유기물이 감마선 단독처리에 의해서는 충분히 산화되지 못하였으나, 감마선과 오존의 상승작용에 의하여 저분자 유기물로 완전히 산화되어 독성을 유발하는 물질이 감소한 것으로 판단된다(Drzewicz et al., 2004; Jung et al., 2003). 48시간 TU는 24시간 TU보다 증가하였으며, 감마선 조사에 따른 독성 증감은 24시간 TU와 동일한 경향을 보여 주었다(Table 5).

원폐수에 대한 응집 공정 후 감마선/오존 병용처리를 실시한 후에도 생물독성이 유발되어 TU가 14.14로 나타났다. 이것은 공장의 자체 처리시설을 거친 방류수의 TU인 1.41(Table 6) 보다 높은 값으로, 원폐수의 감마선 처리로는 생물독성 저감에 한계가 있음을 알 수 있다. 이는 원폐수 내에 고급산화공정에 의해서 제거될 수 있는 난분해성 유기물뿐만 아니라, 중금속과 같이 감마선이나 오존 처리로는 제거되지 않는 독성물질이 존재하고 있음을 나타낸다. 원폐수의 중금속 함량을 측정된 결과(Table 3), 다른 중금속에 비해 아연의 농도가 10배 이상 높다는 것을 확인할 수 있었으며, 특히, 아연은 *Ceriodaphnia dubia*를 이용한 고무공장 폐수의 생물독성 연구에서도 독성원인물질로 보고된 사례가 있다(Nelson et al., 1994).

감마선 처리에 의하여 원폐수의 독성을 완전히 제거할 수 없었기 때문에, 방류수에 대하여 감마선 처리를 실시하고 생물독성 저감을 평가하였다. 방류수의 감마선 단독공정의 경우, 흡수선량이 증가함에 따라 TU는 급격히 감소하여 20 kGy에서는 1.00으로 줄어들었다(Table 6). 오존 단독 처리에 의해서는 TU가 1.00 이하로 나타나 독성이 측정되지 않았다. 그러나 감마선/오존 병용처리의 경우 감마선 선량

Table 6. Acute toxicity (24-h) change of effluent from a rubber products manufacturing factory

Treatment	Absorbed dose (kGy)	EC ₅₀ (%)*	TU
γ - rays alone	0	71.06 (59.05-87.18)	1.41
	1	73.43 (61.42-89.11)	1.36
	5	81.81 (68.20-102.43)	1.22
	10	95.17 (78.98-132.16)	1.05
	20	99.90 (82.03-153.30)	1.00
γ - rays/O ₃	0	n.d.**	n.d.
	1	n.d.	n.d.
	5	n.d.	n.d.
	10	n.d.	n.d.
	20	n.t.***	n.t.

* 50% effective concentration with 95% confidence limits

** not determined

*** with no toxicity response

Table 7. Acute toxicity (48-h) change of effluent from a rubber products manufacturing factory

Treatment	Absorbed dose (kGy)	EC ₅₀ (%)*	TU
γ - rays alone	0	8.23 (6.00-10.27)	12.15
	1	14.92 (11.13-19.29)	6.70
	5	15.98 (12.69-19.95)	6.26
	10	16.28 (13.14-20.12)	6.14
	20	23.46 (18.32-30.03)	4.26
γ - rays/O ₃	0	50.78 (38.90-70.87)	1.97
	1	n.d.**	n.d.
	5	n.d.	n.d.
	10	n.d.	n.d.
	20	n.d.	n.d.

* 50% effective concentration with 95% confidence limits

** not determined

이 증가함에 따라 물벼룩에 대한 급성독성이 현격하게 감소되어 20 kGy에서는 치사가 전혀 관찰되지 않았다. 특히, 48시간 물벼룩 급성독성을 측정하였을 경우, 감마선이나 오존 단독 처리 시에는 TU가 각각 12.15와 1.97로 독성이 감지되었으나, 감마선/오존 병용 처리 시에는 20 kGy에서 독성이 전혀 측정되지 않았다(Table 7).

감마선과 오존의 병용 처리에 의하여 방류수의 독성이 완전히 제거되었다는 것은 방류수의 주 독성물질이 유기물이라는 것을 간접적으로 나타낸다. 원폐수와 방류수의 GC/MS 정성분석 결과, 가황 보조제나 촉진제로 사용되는 benzothiazole, 2-mercaptobenzothiazole, 2-(methylthio)benzothiazole, 2(3H)-benzothiazolone 등이 검출되었다. 이들은 환경 유해물질로 분류되어 있으며, 수생태계에 독성을 유발한다고 알려져 있다(Reemtsma et al., 1995; Sarasa et al., 2006). 그러나 아연을 포함한 중금속도 독성을 유발할 수 있는 농도로 존재하고 있기 때문에 구체적인 독성동정평가가 수행되어야 한다고 생각한다.

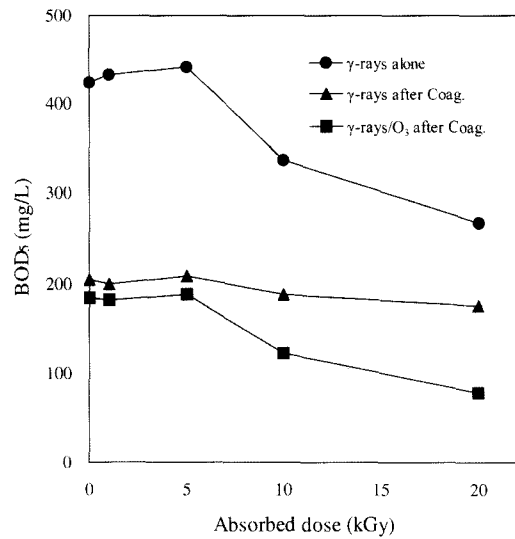
3.3. 생물 독성과 수질 특성간의 상관관계

감마선 처리로 인한 생물독성 변화가 뚜렷한 원폐수에 대하여 물리·화학적 인자의 변화를 조사하였다. 원폐수의 BOD₅는 처리 전에 424.34 mg/L 이었으나, 감마선 조사에 의해 10 kGy부터 급격히 제거되어 20 kGy에서는 약 37% 정도 감소된 267.84 mg/L로 분석되었다(Fig. 2(a)). 전 처리로 응집공정을 사용한 경우, 초기에 52%의 원폐수 BOD₅가 제거되었으며, 이 후 감마선 흡수선량에 따른 제거는 미비하였다. 그러나 응집 처리 후 감마선/오존 병용공정에서는 10 kGy부터 BOD₅ 값이 급격히 줄어들어 20 kGy에서는 78.1 mg/L로 82% 감소하였다. 이것은 “나” 지역의 BOD₅ 배출 허용 기준인 120 mg/L 보다 작은 값으로(환경부, 2004b), 감마선/오존 병용공정이 BOD₅ 제거에 매우 효과적이라는 것을 알 수 있다. 그러나 물벼룩을 이용하여 생물독성 평가를 하였을 때(Table 4), 처리 전보다 24시간 TU값이 103.31에서 14.14로 감소하였지만 여전히 독성이 감지되었다. 따라서 현행의 배출허용기준 이하로 처리가 되더라도 생물독성이 유발될 수 있으므로 수질유해물질의 농도관리와 더불어 통합독성 관리가 필요함을 알 수 있다.

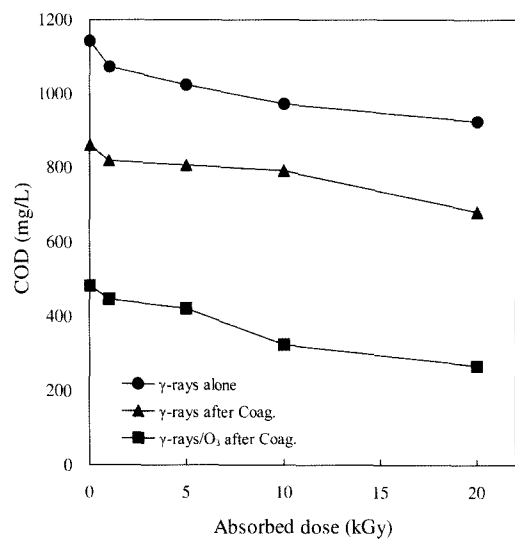
감마선 처리에 따른 원폐수의 COD와 TOC 변화는 유사한 경향을 보여 주었다. 응집과 오존 처리에 의하여 초기 농도는 크게 감소하였지만, 이후 감마선 흡수선량이 증가함에 따라 일정하게 감소하였다(Fig. 2(b), 2(c)). Fig. 3은 원폐수의 물리·화학적 특성과 생물 독성간의 상관관계를 보여주고 있다. COD와 TOC는 생물 독성과 높은 상관관계를 보여준 반면, BOD₅는 무관한 것으로 나타났다. 다양한 종류의 폐수를 대상으로 실시한 결과, 기존의 배출허용항목(BOD₅, COD 등)과 생물 독성간의 상관관계는 매우 낮은 것으로 나타난 바 있다(이 등, 2005). 그러나 본 연구에서는 한 종류의 폐수만을 대상으로 하였으며, 주 독성원인 물질이 난분해성 유기물이었기 때문에 COD 및 TOC와 높은 상관성을 보여주었다고 생각한다(Zoh et al., 2006).

4. 결론

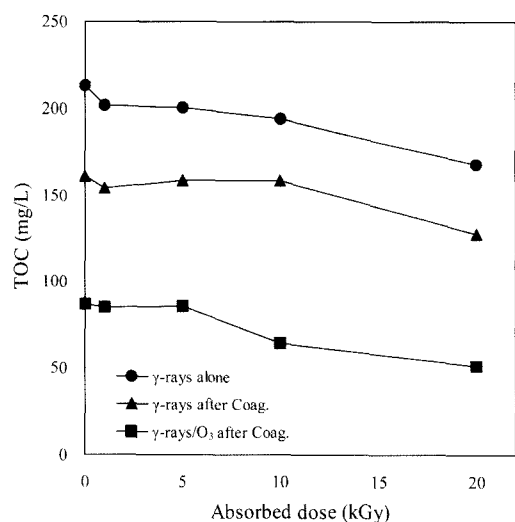
고무공장 폐수의 48시간 물벼룩 급성독성 시험 결과, 원폐수와 방류수의 TU는 각각 201.21과 12.15로 나타났다. 특히, 방류수는 현재의 배출허용기준을 만족하고 있지만, 물벼룩에 대한 생물 독성을 보여주었다. 이것으로부터 생물독성을 바탕으로 한 방류수 관리가 필요하며 이를 위한 공정시험방법의 개발도 시급하다는 것을 알 수 있다. 본 연구에서 도입한 응집 처리 후 감마선/오존 병용공정에 의하여 원폐수의 독성을 약 86% 정도 감소시킬 수 있었지만, 기존 방류수의 수준까지는 도달할 수 없었다. 그러나 방류수에 대하여 감마선/오존 병용공정을 도입한 결과, 물벼룩에 대한 급성독성을 완전히 제거할 수 있었다. 따라서 방류수의 생물 독성 관리를 위하여 본 연구에서 사용한 것과 같은 고급산화공정의 도입이 필요하다고 생각한다. 현재 원폐수와 방류수의 독성 유발물질에 대한 동정평가가 깊이 있게 수행되고 있으며, 이러한 결과가 더해진다면 좀 더 효과적인 독성 저감 기술을 개발할 수 있을 것으로 기대한다.



(a)



(b)



(c)

Fig. 2. Change of physicochemical property of raw wastewater from a rubber products manufacturing factory by gamma-ray treatment: (a) BOD₅ (b) COD (c) TOC.

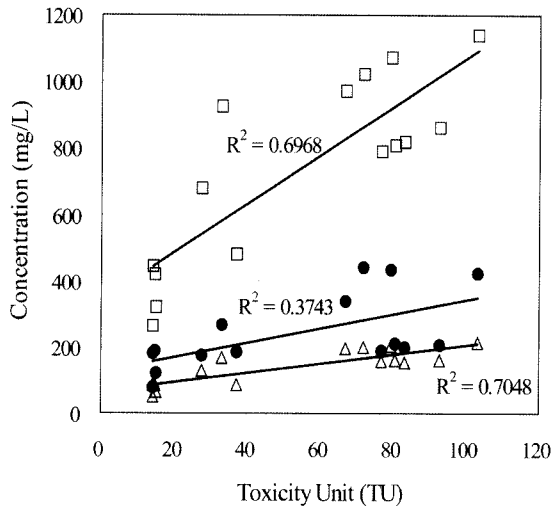


Fig. 3. Correlation of physicochemical property and toxicity of raw wastewater from a rubber products manufacturing factory: □ COD; ● BOD₅; △ TOC.

사 사

본 연구는 한국과학재단의 특정기초연구(R01-2005-000-10317-0)와 원자력연구기반확충사업의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

강준원, 구자용, 최승일, 정재춘, 육운수, 오존을 이용한 수처리기술, 동화기술, 서울, pp. 223-240 (2002).
 김상훈, 천세억, 신기식, 정동일, 산업폐수의 생물독성 발현에 관한 연구, 한국물환경학회지, 21(3), pp. 274-276 (2005).
 김영희, 이민정, 어수미, 유남종, 이흥근, 최경호, 물벼룩을 이용한 일부 염색폐수의 만성 수질독성 특성 연구, 한국환경보전학회지, 23(2), pp. 146-151 (2005).
 김은애, 조훈제, 박은주, 김효진, 김정규, 정진호, 감마선 처리가 섬유와 안료폐수의 생물독성에 미치는 영향, 한국물환경학회지, 22(1), pp. 145-149 (2006).
 오경택, 김지원, 김우근, 이순애, 윤홍길, 이성규, 산업폐수 방류수의 생태독성 평가, 한국물환경학회지, 22(1), pp. 37-44 (2006).
 이선미, 조훈제, 김정규, 정진호, 감마선을 이용한 테레프탈산과 에틸렌글리콜의 방사선처리, 한국물환경학회지, 20(5), pp. 452-456 (2004).
 이성규, 오경택, 김우근, 김수연, 김지원, 이순애, 수질유해물질의 통합독성 관리제도 도입방안 연구(III), 한국화학연구원 부설 안전성평가 연구소, 대전, pp. 22-23 (2005).
 조훈제, 이선미, 김정규, 정진호, 감마선 처리에 의한 폐놀과 2,4,6-트리클로로페놀의 분해제거 비교 연구, 대한환경공학회지, 26(9), pp. 966-969 (2004).
 환경부, 수질오염공정시험법 (2004a).
 환경부, 수질환경보전법 (2004b).
 Choi, K., Meier, P. and Zong, M., Relationship o Chemical-

based Effluent Regulations of Korea to Aquatic Toxicities to Microbes, macroinvertebrates and fish, Bull. Environ. Contam. Toxicol., 72, pp. 1067-1074 (2004).
 Drzewicz, P., Trojanowicz, M., Zona, R., Solar, S. and Gehringer, P., Decomposition of 2,4-dichlorophenoxyacetic Acid by Ozonation, ionizing Radiation as well as Ozonation Combined with Ionizing Radiation, Radiat. Phys. Chem., 69, pp. 281-287 (2004).
 Ersu, C. B., Braida, W., Chao, K. P. and Ong, S. K., Ultrafiltration of Ink Latex Wastewaters using Cellulose Membranes, Desalination, 164, pp. 63-70 (2004).
 Getoff, N., Radiation-induced Degradation of Water Pollutant-State of Art, Radiat. Phys. Chem., 47, pp. 581-593 (1996).
 Hernando, M. D., Fernandez-Alba, A. R., Tauler, R. and Barcelo, D., Toxicity Assays Applied to Wastewater Treatment, Talanta, 65, pp. 358-366 (2005).
 Jung, J., Yoon, J. H., Chung, H. H. and Lee, M. J., Comparative Study of H₂O₂ and O₃ Effects on Radiation Treatment of TCE and PCE, Chemosphere, 51, pp. 881-885 (2003).
 Kim, T., Kim, J. and Choi, K., Degradation Mechanism and the Toxicity Assessment in TiO₂ Photocatalysis and Photolysis of Parathion, Chemosphere, 62, pp. 926-933 (2006).
 Moraes, M. C. F., Romanelli, M. F., Sena, H. C., da Silva, P., Sampa, M. H. O. and Borrelly, S. I., Whole Acute Toxicity Removal from Industrial and Domestic Effluents Treated by Electron Beam Radiation: Emphasis on Anionic Surfactants, Rad. Phys. Chem., 71, pp. 461-463 (2004).
 Nelson, S. M., Muller, G. and Hemphill, D. C., Identification of Tire Leachate Toxicants and a Risk Assessment of Water Quality Effects using Rire Reefs and Canals, Bull. Environ. Contam. Toxicol., 52, pp. 574-581 (1994).
 OECD, Guideline for Testing of Chemicals No. 202, OECD, Paris (2000).
 Puig, A., Ormad, P., Roche, P., Sarasa, J., Gimeno, E. and Ovelleiro, J. L., Wastewater from the Manufacture of Rubber Vulcanization Accelerators: Characterization, Downstream Monitoring and Chemical Treatment, J. Chromatogr., 733, pp. 511-522 (1996).
 Reemtsma, T., Fiehn, O., Kalnowski, G. and Jekel, M., Microbial Transformations and Biological Effects of Fungicide-derived Benzothiazoles Determined in Industrial Wastewater, Environ. Sci. Technol., 29(2), pp. 478-485 (1995).
 Sarasa, J., Llabres, T., Ormad, P., Mosteo, R. and Ovelleiro, J. L., Characterization and Photo-Fenton Treatment of used Tires Leachate, J. Hazard. Mater., in Press (2006).
 Wik, A. and Dave, G., Environmental Labeling of Car Tires-toxicity to Daphnia magna can be used as a Screening Method, Chemosphere, 58, pp. 645-651 (2005).
 Wik, A. and Dave, G., Acute Toxicity of Leachates of Tire Wear Material to Daphnia magna-variability and Toxic Components, Chemosphere, in press (2006).
 Zoh, K. D., Kim, T. S., Kim, J. K., Choi, K. and Yi, S. M., Parathion Degradation and Toxicity Reduction in Solar Photocatalysis and Photolysis, Wat. Sci. Tech., 53, pp. 1-8 (2006).