입상활성탄 공정에서의 nitrosamine류 흡착 특성 Adsorption Characteristics for Nitrosamines in Granular Activated Carbon Process

김경아 · 손희종*[†] · 이상원 · 빈재훈 · 김창원**

Kyung-A Kim · Hee-Jong Son*[†] · Sang-Won Lee · Jae-Hoon Bin · Chang-Won Kim**

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소 · *부산광역시 상수도사업본부 · **부산대학교 환경공학과

Water Quality Institute, Busan Water Authority · *Busan Water Authority

**Department of Environment System Engineering, Pusan National University

(2011년 2월 24일 접수, 2012년 10월 30일 채택)

Abstract : This study accessed the adsorption characteristics of the nine nitrosamine species on coal-based granular activated carbon (GAC). The breakthrough appeared first for NDMA and sequentially for NMOR, NPYR, NMEA, NDPA, NDEA, and NPIP. On the other hand, NDBA and NDPHA were not detected in the treated effluent for the operation period. The maximum adsorption capacity (X/M) for the seven nitrosamine species with apparent breakthrough points ranged from 27.5 $\mu\text{g/g}$ (for NDMA) to 671.0 $\mu\text{g/g}$ (for NPIP). Carbon usage rate (CUR) for NDMA was 1.07 g/day, 13.4 times higher than that for NPIP (0.08 g/day). The X/M values for the seven nitrosamine species were fitted well with a linear regression ($r^2 = 0.94$) by their octanol-water partitioning coefficient (K_{ow}).

Key Words : Nitrosamines, NDMA, Granular Activated Carbon, Adsorption, Carbon Usage Rate, Octanol-Water Partitioning Coefficient

요약 : 본 연구에서는 석탄계 활성탄 신탄을 이용하여 입상활성탄 흡착공정에서의 nitrosamine류 9종의 흡착특성을 평가해 본 결과, nitrosamine류 9종의 물질별 파과 순서는 NDMA가 가장 빨리 파과에 도달하였고, 다음으로 NMOR, NPYR, NMEA, NDPA, NDEA, NPIP 순으로 나타났고, NDBA와 NDPHA의 경우는 운전 기간 동안 활성탄 처리수에서 검출되지 않았다. 석탄계 활성탄 신탄을 이용한 입상활성탄 흡착공정에서의 nitrosamine류 9종의 최대 흡착량(X/M)은 파과에 도달한 nitrosamine류 7종 중에서 NDMA가 27.5 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮게 나타났으며, NPIP가 671.0 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 높은 최대 흡착량을 나타내었고, NDBA와 NDPHA의 경우는 실험기간 동안 활성탄 흡착컬럼의 처리수에서 검출되지 않아 최대 흡착량을 구할 수가 없었다. 또한, 7종의 nitrosamine류에 대한 CUR의 경우는 NDMA가 1.07 g/day로 나타나 NPIP의 0.08 g/day 보다 13.4배 정도 높은 활성탄 사용률을 나타내었다. 석탄계 활성탄 신탄을 이용한 입상활성탄 흡착공정에서 파과에 도달한 7종의 nitrosamine류에 대해 최대 흡착량(X/M)과 K_{ow} 값과의 상관성을 평가해 본 결과, 상관계수(r^2)가 0.94로 나타나 양호한 상관성을 나타내었다.

주제어 : 니트로사민류, NDMA, 입상활성탄, 흡착, 활성탄 사용률, 물-옥탄올 분배계수

1. 서론

각종 산업의 발달과 생활수준의 향상으로 인해 강과 하천으로 많은 종류의 오염물질들이 배출된다. 특히, 최근에는 각종 의약품질과 개인 위생용품 등을 비롯한 다양한 오염물질들이 우리 주변의 강과 하천에서 검출된다.¹⁾ 이들 물질들은 대부분이 난분해성이며, 저농도에서도 인체에 위해성을 나타낸다.¹⁾ 최근 낙동강 수계의 주요 지천들과 그 주변의 하수처리장 방류수를 조사한 한 연구결과에서 발암성을 나타내는 물질인 nitrosamine류가 검출된다는 연구결과가 보고되었다.²⁾ 이들은 N-Nitrosodimethylamine (NDMA), N-nitrosodi-n-propylamine (NDPA), N-nitrosodiphenylamine (NDPHA), N-Nitrosomethylethylamine (NMEA), N-Nitrosodiethylamine (NDEA), N-Nitrosopyrrolidine (NPYR), N-Nitrosopiperidine (NPIP), N-Nitrosodi-n-butylamine (NDBA), N-Nitrosomorpholine (NMOR) 등 9종으로 9종 모두 US EPA에서는 인간에게 발암가능성이 있는 B2그룹으로 지정하고 있

으며, 이들 중 NDMA의 경우, 백만분의 일 확률(10^{-6} cancer risk level)로 암을 발생시킬 수 있는 농도를 0.7×10^{-6} mg/L로 규정하였고 있으며, 음용수 오염물질 후보목록에도 포함되어 있다.³⁾ 특히, NDMA는 1990년대부터 미국과 캐나다의 상수원에서 검출이 되어 새로운 오염물질로 주목받기 시작했으며, 캐나다의 일부 상수원에서 1,000 ng/L 이상의 농도로 검출이 되어 문제시된 경우도 있다.^{4,5)}

Nitrosamine류는 dimethylamine (DMA)나 2차 또는 3차 amine들과 염소계 소독제가 반응하여 생성된다고 알려져 있으며,^{6,7)} 또한 최근의 여러 연구결과에서는 질소를 함유한 유기화합물과 dimethyl기를 포함하는 물질들도 nitrosamine류의 생성에 기여하는 것으로 보고되었다.⁸⁾ 또한, Gerecke와 Sedlak은 천연유기물질(Natural Organic Matter, NOM)이 nitrosamine류의 생성에 많은 기여를 한다고 보고하고 있으며,⁹⁾ 염소뿐만 아니라 이산화염소, 오존, 과망간산칼륨, 과산화수소 및 UV 광조사와 같은 산화제에 의해서도 nitrosamine류가 생성되는 것으로 알려져 있다.¹⁰⁻¹⁴⁾

[†] Corresponding author E-mail: menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4469 Fax: 051-669-4635

Table 1. Properties of nine nitrosamines

Compound	Molecular weight	Formula	CAS No.	$K_{OW}^{(18)}$	Water solubility (mg/L) ⁽¹⁸⁾
N-Nitrosodimethylamine (NDMA)	74.1	C ₂ H ₆ N ₂ O	62-75-9	0.27	1,000,000
N-Nitrosomethylethylamine (NMEA)	88.1	C ₃ H ₈ N ₂ O	10595-95-6	1.10	300,000
N-Nitrosodiethylamine (NDEA)	102.1	C ₄ H ₁₀ N ₂ O	55-18-5	3.02	106,000
N-Nitrosopyrrolidine (NPYR)	100.1	C ₄ H ₈ N ₂ O	930-55-2	0.65	1,000,000
N-Nitrosodi-n-propylamine (NDPA)	130.2	C ₆ H ₁₄ N ₂ O	621-64-7	2.29	13,000
N-Nitrosomorpholine (NMOR)	116.1	C ₄ H ₈ N ₂ O	59-89-2	0.36	861,527.5
N-Nitrosopiperidine (NPIP)	114.2	C ₅ H ₁₀ N ₂ O	100-75-4	22.9	76,480
N-Nitrosodi-n-butylamine (NDBA)	158.3	C ₈ H ₁₈ N ₂ O	924-16-3	427	1,270
N-Nitrosodiphenylamine (NDPHA)	198.2	C ₁₂ H ₁₀ N ₂ O	86-30-6	1349	35

또한 NDMA는 고무산업, 피혁산업, 기계산업, 화학산업 등과 같이 다양한 산업현장에서 사용되기 때문에 주변의 환경중에서도 검출되어지며,¹⁵⁾ 미국과 캐나다의 경우는 염소 소독한 하수 방류수에서 다량의 nitrosamine류가 함유되어 상수원으로 유출되어 사회적으로 큰 관심을 불러온 경우도 있다.^{4,5)}

Nitrosamine류의 제거를 위해서는 기존의 정수처리 방식으로는 제거가 어렵기 때문에 오존/과산화수소 공정 또는 UV 처리 공정과 같은 고도산화 공정을 많이 이용한다.^{16,17)} 하지만 국내 정수장의 경우는 아직까지 고도산화 공정을 채택하여 운영중인 곳이 없으며, 대부분의 정수장에서 수중의 미량 오염물질 제거를 위해서 활성탄 공정을 운영중이다.

따라서 본 연구에서는 활성탄 흡착공정을 이용하여 9종의 nitrosamine류에 대하여 각각의 흡착 특성을 평가하여 향후 nitrosamine류가 정수공정으로 유입될 경우 활성탄 흡착공정 운영을 위한 기초자료로 활용하고자 하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 실험재료

2.1.1. Nitrosamine류 9종 및 활성탄

실험에 사용된 nitrosamine류 9종은 standard급 물질을 Dr. Ehrenstorfer사에서 구입하여 사용하였으며, Table 1에 nitrosamine류 9종의 특성을 나타내었다. 또한, Nitrosamine류 9종의 흡착실험에 사용된 활성탄은 석탄계 재질의 F-400 (Calgon, USA) 신탄을 사용하였으며, F-400의 특성을 Table 2에 나타내었다.

2.1.2. 유입수

유입수는 전염소 처리가 배제된 300 m³/일 처리규모의 파 일로트 플랜트 후오존 처리수를 사용하였으며, 후오존 처리

Table 2. Characteristics of coal-based virgin GAC

Item		F-400
Specific surface area	(m ² /g)	1070
Total pore volume	(cm ³ /g)	0.61

Table 3. Characteristics of influent at the continuous column adsorption test

Parameters	pH	Turbidity	DOC	Temp.
	(-)	(NTU)	(mg/L)	(°C)
Value	6.8~7.3	0.05~0.08	1.42~1.77	10~25

수에 nitrosamine류 9종을 각각 15 µg/L의 농도로 희석하여 실험에 사용하였다. 후오존 처리수를 유입수로 사용한 이유는 실제 정수장의 활성탄 여과지와 동일한 수질 조건에서 운전하기 위해서이며, 연속 흡착컬럼의 유입수로 사용된 후 오존 처리수의 성상을 Table 3에 나타내었다.

2.2. 실험방법

2.2.1. 연속 흡착컬럼 운전

본 실험에 사용된 연속 흡착컬럼은 내경 20 mm의 아크릴 재질로 컬럼 내부에 F-400 신탄을 40 mL 충전한 후 정량 펌프를 사용하여 연속 흡착컬럼으로 유입되는 유량을 4 mL/min으로 조절하여 공탑 체류시간(Empty Bed Contact Time, EBCT)이 10분이 되도록 설계하였다. 운전은 하향류식으로 하였고, 역세척은 주 1회 실시하였으며, 공세는 실시하지 않았다. 연속 흡착컬럼 세트의 모식도를 Fig. 1에 나타내었다.

Fig. 1. Schematic diagram of continuous adsorption column system.

2.2.2. Nitrosamine류 분석

시료의 전처리에는 Supelco사의 SPE 장치인 Visiprep™ Large Volume Sampler를 이용하여 농축 및 추출하였으며, SPE cartridge는 restek사의 coconut charcoal cartridge (Cat. No. 26032, USA)를 사용하였다.¹⁹⁾ SPE cartridge는 디클로로메탄으로 컨디셔닝한 후 메탄올과 증류수로 세척한 후 사용하였다. 시료수 1 L를 8~10 mL/min의 유량으로 SPE cartridge에 주입하여 농축하였고, 시료의 농축과정이 끝난 후에는 고 진공 하에서 공기를 흡입시켜 1시간 동안 SPE cartridge를 건조시켰다. 건조과정을 거친 후 저 진공 하에서 디클로로메탄을 사용하여 3 mL씩 4번 추출하는 과정을 거쳤다. 농축은 질소농축기(TurboVapsLV Concentration Workstation, Zymark, USA)를 이용하여 12 mL의 디클로로메탄을 250 µL까지 농축시켰다.

Nitrosamine류 9종의 분석²⁾은 GC/MSD (Agilent 6890N/5973, Agilent Technologies, USA)를 사용하였으며, 컬럼은 restek사의 Rtx 5SIL MS (30 m × 0.25 mm I.D. × 1.0 µm film thickness)를 이용하였다. GC/MSD의 분석조건을 Table 4에

Table 4. Analytical conditions of GC/MSD for nitrosamines

Column	Rtx 5SIL MS (30 m x 0.25 mm x 1.0 µm)
Column flow rate	He at 1.0 mL/min.
Split ratio	Splitless
Injection port temp.	250°C
Transfer line temp.	280°C
Oven temp. program	35°C for 6 min, 4°C/min to 90°C, 2°C/min to 130°C, 10°C/min to 260°C post run : 290°C for 2 min
Run Time	52.75 min.
Acq. Mode	- SIM mode - Selected ions : NDMA (74, 42, 44), NMEA (88), NDEA (102), NPYR (100, 42), NDPA (70, 42), NMOR (56, 86, 116), NPIP (114, 42), NDBA (84, 57), NDPHA (169, 168, 167)
solvent delay	10 min

나타내었다. 9종의 nitrosamine류의 정량은 SIM mode로 정량하였으며, 각 물질들은 머무름시간(RT), 참고 스펙트럼과 실제 생성된 스펙트럼의 이온들을 비교하여 확인하였다. 8개의 nitrosamine류는 동시에 분석되었으나 NMOR은 다른 물질과의 분리가 원활하지 않아 따로 injection한 후 분석하였다.

실험에 사용된 F-400 활성탄의 비표면적(specific surface area)과 세공용적(total pore volume)은 활성탄 세공용적 측정기(AUTOSORB-1 MP, Quantachrome, USA)로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. Nitrosamine류 9종의 파과 특성

석탄계 재질의 신탄에서의 nitrosamine류 9종에 대한 파과 특성을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 NDMA의 경우는 Bed Volume (BV) 2157 부근에서 파과에 도달하였고, 다음으로 NMOR의 파과시점(BV_{breakthrough})은 BV 2876 부근으로 나타났으며, NPYR이 BV 3883, NMEA가 BV 5896, NDPA가 BV 17112, NDEA가 BV 20420, NPIP가 BV 29767로 나타났으며, NDBA와 NDPHA의 경우는 실험 기간 중(BV 30,000)에는 처리수에서 검출이 되지 않았다. 또한, 이들 각각의 물질들의 BV_{breakthrough}는 Table 1에 나타난 이들 물질들의 K_{ow}값에 비례하여 증가하는 경향을 나타내었다. 일반적으로 K_{ow}값은 각각의 물질들의 소수성 정도를 나타내는 지표로 활용되며, K_{ow}값이 높을수록 소수성이 커지는 것을 의미한다. 활성탄 흡착의 경우는 소수성이 큰 물질들이 수중에서 활성탄의 흡착점에서의 이동이 훨씬 용이하기 때문이다.

3.2. Nitrosamine류 9종의 흡착능 평가

석탄계 재질의 신탄에서의 9종의 nitrosamine류에 대한 흡착능을 평가하기 위하여 nitrosamine류 9종에 대한 파과시점(BV)까지의 유입농도와 유출농도를 가지고, 식 (1)에 나

Fig. 2. Breakthrough curves of coal-based virgin GAC for nine nitrosamines.

Table 5. BV_{breakthrough} and bed life of coal-based virgin GAC for nine nitrosamines

Item	Unit	Nitrosamines								
		NDMA	NMOR	NPYR	NMEA	NDPA	NDEA	NPIP	NDBA	NDPHA
BV _{breakthrough}	(-)	2157	2876	3883	5896	17112	20420	29767	-	-
Bed life (Y)	(day)	15	20	27	41	119	142	207	-	-

Fig. 3. Adsorption isotherm for seven nitrosamines of coal-based virgin GAC.

타낸 Freundlich 등온흡착식을 이용하여 X/M 과 C_e 를 구하여 그 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 이를 회귀분석하여 k 와 $1/n$ 을 구하였다. Nitrosamine류 9종중 NDBA와 NDPHA의 경우는 운전기간 동안 파과에 도달하지 않아 Freundlich 등온흡착식을 이용할 수 없어 Fig. 3에서 제외시켰다.

$$X/M = k \cdot C_e^{1/n} \quad (1)$$

X : the amount of solute adsorbed (μg)

M : the weight of adsorbent (g)

C_e : the solute equilibrium concentration ($\mu\text{g/L}$)

$k, 1/n$: constants characteristic of the system

7종의 nitrosamine류에 대하여 실험에 사용된 석탄계 재질 신탄의 흡착용량(adsorption capacity)을 평가하기 위하여 Snoeyink의 연구²⁰⁾에서 사용한 활성탄 사용률(carbon usage rate, CUR)과 활성탄 수명(bed life, Y)에 관한 식 (2)와 식 (3)을 사용하였다.

$$CUR(\text{g/day}) = \frac{(C_0 - C_1)F}{(q_e)_0} \quad (2)$$

C_e : equilibrium concentration ($\mu\text{g/L}$)

C_0 : influent concentration ($\mu\text{g/L}$)

C_1 : desired effluent concentration ($\mu\text{g/L}$)

F : volumetric flowrate of contaminated liquid treated (L/day)

$(q_e)_0$: amount adsorbed per unit mass of carbon at C_0

$$Y(\text{day}) = (V) \cdot \rho_{GAC} \frac{(q_e)_0}{(C_0 - C_1)F} = \frac{(V) \cdot \rho_{GAC}}{CUR} \quad (3)$$

V : volume of adsorber (L)

ρ_{GAC} : apparent density (g/L)

식 (3)은 $C_e = C_0$ 를 가정할 때 구해지며, $(q_e)_0$ 를 구하기 위해서 식 (1)에서 구한 7종의 nitrosamine류 각각에 대한 활성탄 종류별 k 와 $1/n$ 을 적용하였다. 일반적으로 평형 흡착 실험은 분말활성탄(Powder Activated Carbon, PAC)을 이용하여 batch식으로 수행하지만 이러한 조건은 실제 정수장의 활성탄 흡착조에서 활성탄과 물과의 접촉면적과 흡착시간과 같은 흡착조건이 크게 바뀐 상태이고, 또한 모든 활성탄이 평형상태를 이루지 않는 실제 정수장에서 그 값의 적용은 큰 차이가 있을 수 있다. 따라서 본 연구에서는 식 (2)를 연속 흡착칼럼에서의 파라미터를 적용하기 위하여 식 (4)로 변형하였다.²¹⁾

$$CUR(\text{g/day}) = \frac{\rho_{GAC} F}{BV_{\text{breakthrough}}} \quad (4)$$

F : volumetric flowrate of contaminated liquid treated (L/day)

$BV_{\text{breakthrough}}$: bed volumes to breakthrough (-)

CUR의 계산은 식 (2)와 (4) 모두 사용이 가능하며, $(q_e)_0$ 또는 $BV_{\text{breakthrough}}$ 값은 연속 흡착칼럼 실험에서 파과 직전까지의 결과를 사용하여 k 와 $1/n$ 을 도출하였고, CUR과 bed life는 파과시점의 BV를 이용하여 식 (4)에서 도출하였다. 이렇게 도출된 $k, 1/n, CUR$ 및 bed life와 같은 흡착특성을 파악할 수 있는 지표들을 Table 6에 나타내었다.

석탄계 신탄에서 7종의 nitrosamine류에 대한 최대 흡착량(X/M)은 NDMA가 27.5 $\mu\text{g/g}$ 으로 가장 낮게 나타났으며, NPIP가 671.0 $\mu\text{g/g}$ 으로 파과에 도달한 nitrosamine류 7종 중에서 가장 높은 흡착량을 나타내었으며, NDBA와 NDPHA의 경우는 실험기간 동안 활성탄 흡착칼럼의 처리수에서 검출되지 않아 최대 흡착량을 계산할 수가 없었다.

Table 6. Adsorption capacity data of coal-based virgin GAC for seven nitrosamines

Item	Unit	Nitrosamines							
		NDMA	NMOR	NPYR	NMEA	NDPA	NDEA	NPIP	NDBA
Max. adsorption (X/M)	($\mu\text{g/g}$)	27.5	55.5	78.6	120.9	333.1	421.2	671.0	-
CUR	(g/day)	1.07	0.80	0.59	0.39	0.13	0.11	0.08	-
k	($\mu\text{g/g})(\text{L}/\mu\text{g})^{1/n}$)	11.52	19.34	26.33	32.34	65.99	115.63	159.06	-
$1/n$	(-)	0.315	0.405	0.418	0.495	0.689	0.539	0.592	-

Fig. 4. Evaluation of correlations between X/M and K_{ow} .

석탄계 신탄에서의 7종의 nitrosamine류에 대한 CUR의 경우는 NDMA가 1.07 g/day로 나타나 NPIP의 0.08 g/day 보다 13.4배 정도 높은 활성탄 사용률을 나타내었으며, 본 실험에 사용된 흡착컬럼을 10,000 m³/일 처리용량 정수장의 활성탄 흡착지로 가정하였을 경우 NDMA의 경우는 1,857.6 kg/day의 CUR을 나타내었으며, NPIP의 CUR은 138.9 kg/day로 나타났다.

석탄계 신탄에서 파과에 도달한 7종의 nitrosamine류에 대해 최대 흡착량(X/M)과 K_{ow} 값과의 상관관계를 평가한 것을 Fig. 4에 나타내었다. Nitrosamine류 7종의 X/M과 K_{ow} 값과의 상관계수(r^2)는 0.94로 매우 양호하게 나타났으며, 분말활성탄을 이용하여 미량오염물질들의 흡착 제거에 대해 연구한 Westerhoff 등의 연구결과²²⁾에서도 K_{ow} 값과 활성탄의 흡착능과는 양호한 상관성을 나타내었다고 보고하였다.

4. 결론

석탄계 활성탄 신탄을 이용하여 입상활성탄 흡착공정에서의 nitrosamine류 9종의 흡착특성에 대해 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

석탄계 활성탄 신탄을 이용한 입상활성탄 흡착공정에서의 nitrosamine류 9종의 파과 순서는 NDMA가 가장 빨리 파과에 도달하였고, 다음으로 NMOR, NPYR, NMEA, NDPA, NDEA, NPIP 순으로 나타났고, NDBA와 NDPHA의 경우는 운전 기간 동안 활성탄 처리수에서 검출되지 않았다.

석탄계 활성탄 신탄을 이용한 입상활성탄 흡착공정에서의 nitrosamine류 9종의 최대 흡착량(X/M)은 파과에 도달한 nitrosamine류 7종 중에서 NDMA가 27.5 µg/g으로 가장 낮게 나타났으며, NPIP가 671.0 µg/g으로 가장 높은 최대 흡착량을 나타내었고, NDBA와 NDPHA의 경우는 실험기간 동안 활성탄 흡착컬럼의 처리수에서 검출되지 않아 최대 흡

착량을 구할 수가 없었다. 또한, 7종의 nitrosamine류에 대한 활성탄 사용률(CUR)의 경우는 NDMA가 1.07 g/day로 나타나 NPIP의 0.08 g/day 보다 13.4배 정도 높은 활성탄 사용률을 나타내었다.

석탄계 활성탄 신탄을 이용한 입상활성탄 흡착공정에서 파과에 도달한 7종의 nitrosamine류에 대해 최대 흡착량(X/M)과 K_{ow} 값과의 상관성을 평가해 본 결과, r^2 가 0.94로 나타나 양호한 상관성을 나타내었다.

KSEE

참고문헌

1. Murray, K. E., Thomas, S. M. and Bodour, A. A., "Prioritizing research for trace pollutants and emerging contaminants in the fresh water environment," *Environ. Pollut.*, **158**, 3462~3471(2010).
2. 김경아, 노재순, 빈재훈, 김창원, "하천수 및 상하수도처리 공정에서의 니트로사민류 조사," *한국물환경학회지*, **26**(3), 446~453(2010).
3. <http://www.epa.gov/iris/subst/0045.htm>
4. 김승현, 유이중, "NDMA; 새로운 도전," *대한환경공학회지*, **24**(4), 743~746(2002).
5. 김종오, 김동수, "N-Nitrosodimethylamine (NDMA) 생성에 관한 예측과 비교연구," *대한환경공학회지*, **28**(4), 402~406(2006).
6. Mitch, W. A. and Sedlak, D. L., "Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from dimethylamine during chlorination," *Environ. Sci. Technol.*, **36**, 588~595(2002).
7. Choi, J. and Valentine, R. L., "Formation of N-nitrosodimethylamine (NDMA) from reaction of monochloramine: a new disinfection by-product," *Water Res.*, **36**(4), 817~824(2002).
8. Lee, C., Schmidt, C., Yoon, J. and von Gunten, U., "Oxidation of N-nitrosodimethylamine precursors with ozone and chlorine dioxide: kinetics and effect on NDMA formation potential," *Environ. Sci. Technol.*, **41**, 2056~2063(2007).
9. Gerecke, A. C. and Sedlak, D. L., "Precursors of N-nitrosodimethylamine in natural waters," *Environ. Sci. Technol.*, **37**, 1331~1336(2003).
10. Andrzejewski, P., Kasprzyk-Hordern, B. and Nawrocki, J., "The hazard of N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during water disinfection with strong oxidants," *Desalination*, **176**, 37~45(2005).
11. Andrzejewski, P., Kasprzyk-Hordern, B. and Nawrocki, J., "N-nitrosodimethylamine (NDMA) formation during ozonation of dimethylamine-containing water," *Water Res.*, **42**, 863~870(2008).
12. Andrzejewski, P. and Nawrocki, J., "N-nitrosodimethylamine (NDMA) as a product of potassium permanganate reaction with aqueous solutions of dimethylamine (DMA)," *Water Res.*, **43**, 1219~1228(2009).
13. Andrzejewski, P. and Kulik, N. (2007). The hazard of N-nitrosamines formation during short chain secondary amines (DMA, MEA and DEA) reactions with catalyzed and non-

- catalyzed hydrogenperoxide. Proc. of 10th International Conference on Environmental Science and Technology (10CEST 2007)
14. Lee, C. and Yoon, J., "UV-A induced photochemical formation of N-nitrosodimethylamine in presence of nitrite and dimethylamine," *J. Photochem. Photobiol. A: Chem.*, **189**, 128~134(2007).
15. Tricker, A. R., Spiegelhalder, B. and Preussmann, R., "Environmental exposure to preformed nitroso compounds," *Cancer Surv.*, **8**, 207~239(1989).
16. Lee, C., Yoon, J. and von Gunten, U., "Oxidative degradation of N-nitrosodimethylamine by conventional ozonation and the advanced oxidation process ozone/hydrogen peroxide," *Water Res.*, **41**, 581~590(2007).
17. Plumlee, M. H., López-Mesas, M., Heidelberger, A., Ishida, K. P. and Reinhard, M., "N-nitrosodimethylamine (NDMA) removal by reverse osmosis and UV treatment and analysis via LC-MS/MS," *Water Res.*, **42**, 347~355(2008).
18. Zhao, Y. Y., Boyd, J. M., Woodbeck, M. andrews, R. C., Qin, F., Hrudey, S. E. and Li, X. F., "Formation of N-nitrosamines from eleven disinfection treatments of seven different surface waters," *Environ. Sci. Technol.*, **42**(13), 4857~4862(2008).
19. http://www.epa.gov/nerlcwww/m_521.pdf
20. Snoeyink, V. L., "Adsorption of organic compounds," In *Water Quality and Treatment: a Handbook of Community Water Supplies*, 4th Ed., Edited by Pontius, F. W., McGraw-Hill Inc., New York, pp. 781~855(1990).
21. Choi, K. J., Kim, S. G., Kim, C. W. and Kim, S. H., "Effects of activated carbon types and service life on removal of endocrine disrupting chemicals: amitrol, nonylphenol and bisphenol-A," *Chemosphere*, **58**(11), 1535~1545(2005).
22. Westerhoff, P., Yoon, Y., Snyder, S. and Wert, E., "Fate of endocrine-disruptor, pharmaceutical and personal care product chemicals during simulated drinking water treatment processes," *Environ. Sci. Technol.*, **39**, 6649~6663(2005).