LC-OCD-OND를 이용한 정수처리 공정에서의 용존 유기물질 분획들의 생물분해에 대한 통찰

Insight into Biodegradation of Dissolved Organic Matter Fractions using LC-OCD-OND in Drinking Water Treatment Processes

손희종[†] · 김용순^{*} · 김상구 · 황영도 · 황인성^{**}

Hee-Jong Son[†] · Yong-Soon Kim^{*} · Sang-Goo Kim · Young-Do Hwang · In-Seong Hwang^{**}

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

*부산광역시 보건환경연구원

**부산대학교 사회환경시스템공학과

Water Quality Institute, Busan Water Authority

*Institute of Health and Environment, Busan Metropolitan City

**Department of Civil & Environmental Engineering, Pusan National University

(Received December 7, 2018; Revised January 7, 2019; Accepted January 15, 2019)

Abstract : The purpose of this study was to assess biodegradability of the dissolved organic matter (DOM) fractions of different composition and origin and to understand how these DOM fractions are removed during the full scale drinking water treatment process (DWTP). This study provides an important insight into biodegradations of DOM fractions by LC-OCD-OND analysis methods. Biopolymers (BP) were biodegradable most easily and quickly compared to other fractions, followed by low molecular weight-neutrals (LMW-neu), and building blocks (BB) and humic substances (HS) showed a very similar biodegradation rate. Biodegradation or production of BDOC and BDON were observed in the HS fraction. Most of the BDOC and BDON were removed by coagulation/sedimentation process in DWTP. These results highlight the importance of an optimised coagulation process to remove as much biodegradable high molecular weight (MW) dissolved organic matter (DOM) as possible. BDOC incubation test results showed microbial catabolism of all DOM fractions regardless of the MW of DOM fractions. Therefore, to minimize the risk of microbial growth and proliferation in the drinking water distribution systems, it is pointed out the need to control all possible DOM fractions in the DWTP.

Key Words : Biodegradation, Dissolved Organic Matter (DOM), Biodegradable Dissolved Organic Carbon (BDOC), Biodegradable Dissolved Organic Nitrogen (BDON), LC-OCD-OND, Drinking Water Treatment Process

요약 : 본 연구의 목적은 다양한 기원과 조성을 가지는 수중의 용존유기물질(dissolved organic matter, DOM)의 생물분해성을 평가하고, 정수처리 공정에서 이러한 DOM 분획들의 제거 메커니즘을 이해하는 것이다. 호소수를 사용하는 실제 정수장의 정수처리 공정별 처리수들을 대상으로 수행하였으며, LC-OCD-OND 분석방법에 의한 DOM 분획들의 생물분해에 대한 중요한 통찰을 제공한다. Biopolymers는 다른 분획들에 비해 가장 용이하고 빠르게 생물분해되었고, 다음으로는 LMW-neu였으며, building blocks과 humic substances는 유사한 생물분해율을 나타내었다. Humic substances 분획에서 BDOC (biodegradable dissolved organic carbon)와 BDON (biodegradable dissolved organic nitrogen)의 농도 감소(분해) 또는 농도 증가(생성)가 관찰되었다. 대부분의 BDOC와 BDON은 응집·침전공정에서 제거되었으며, 이는 생물분해성 고분자 유기물질을 최대한 많이 제거하기 위해서는 응집공정 최적화의 필요성을 의미한다. BDOC 배양실험 결과에서 DOM 분획들의 분자량 크기에 관계없이 모든 DOM 분획들은 박테리아에 의한 분해대사가 가능하였다. 따라서 배·급수관망에서 미생물 성장 및 급격한 증식에 대한 위험을 최소화하기 위해서는 정수처리 공정에서 가능한 한 모든 DOM 분획들을 제어해야 할 필요성이 있었다.

주제어 : 생물분해, 용존유기물질, 생물분해성 유기탄소, 생물분해성 유기질소, LC-OCD-OND, 정수처리공정

1. 서론

상수원수 중에 함유된 천연유기물질(natural organic matter, NOM)은 정수처리 공정에서 여러 문제점들을 야기한다. 정수장에서 소독제로 사용되는 염소와 NOM이 반응해서 생성되는 발암성의 염소 소독부산물들 뿐만 아니라 처리수에 잔존하는 NOM이 배·급수관로 내에서 에너지원으로 제공되어 박테리아 재성장, 생물막 형성 및 생물부식을 유발한다.^{1,2)} 또한, 배·급수관망에서의 박테리아 증식은 수질기준 초과를

비롯한 탁도, 색도 및 이취미 물질을 생성하여 심미적으로 불쾌감을 유발한다.^{3,4)}

배·급수관망에서 생물막의 형성에 영향을 미치는 요소 중 하나는 생물분해성 유기물질(biodegradable organic matter, BOM)의 농도이다.³⁾ BOM은 생물학적으로 이용이 가능하여 종속 영양세균의 증식을 위한 에너지 및 탄소 공급원으로 사용될 수 있는 NOM 분율을 나타낸다.⁵⁾ 박테리아가 NOM을 에너지 및 탄소원으로 이용시 NOM의 분자량 또한 영향을 미치는 중요한 요인이다.²⁾ 박테리아의 NOM에 대한 생

[†] Corresponding author menuturk@hanmail.net Tel: 051-669-4624 Fax: 051-669-4669

물 반응성 또는 생물학적 이용성은 분자량이 작을수록 소수도(hydrophobicity)가 낮을수록 증가하며,²⁾ 일반적으로 1,000 Da 이상의 고분자 NOM의 경우 생물 반응성이 낮은 반면 1,000 Da 이하의 저분자 NOM은 이와 상반되는 경향을 나타낸다.⁶⁾

배·급수관망에서 박테리아의 재성장능은 최종 처리수에 대한 염소 처리만으로는 완전히 억제할 수 없기 때문에 생물학적으로 안전한 물을 공급하기 위해서는 정수처리 공정에서 NOM에 포함되어 있는 BOM을 가능한 많이 제거해야 한다. 정수처리 공정상에서 NOM의 제거율은 정수처리 공정의 운영인자들을 비롯하여 수중에 함유되어 있는 NOM의 분자량 분포와 물리·화학적 특성에 따라 많은 차이를 나타낸다.^{2,7,8)}

따라서, 본 연구는 NOM에 함유되어 있는 각각의 조성과 기원에 따른 유기탄소와 유기질소의 생물분해능을 평가하고, 또한 실제 정수장의 정수처리 공정상에서 이러한 NOM 구성물질들의 거동을 평가하여 제거 메커니즘을 이해하는 것이 목적이다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 정수장

본 연구에 이용된 정수장은 호소수를 취수하여 수돗물을 생산하는 M-정수장이며, 2017년 1년간 유입원수와 정수공정별 시료를 월 4회 채수하여 분석하였다. 정수처리 공정은 전염소, 전오존, 응집·침전, 급속 모래여과, 후오존 및 2년 정도 사용된 생물활성탄(biological activated carbon, BAC) 공정으로 구성되어 있으며, 생산용량은 18만톤/일이다.

2.2. NOM 분석

NOM 분석용 시료는 공극이 0.2 µm인 멤브레인 필터(Millipore, USA)로 여과하여 분석에 사용하였다. NOM 농도 및 특성 분석에는 LC-OCD-OND (Model 8, DOC-Labor, Germany) 시스템을 사용하였다. LC-OCD-OND는 size exclusion chromatography (SEC) 컬럼(Toyopearl TSK HW-50S, 250 × 20 mm) 및 ultraviolet detector (UVD), organic nitrogen

detector (OND)와 organic carbon detector (OCD)가 장착되어 있다. 분석시 시료수 1 mL를 주입하였고, 이동상으로는 phosphate buffer를 사용하였으며, 유량은 1.1 mL/min이었다. 산화제(4 mL phosphoric acid (Sigma, USA) + 0.5 g potassium peroxodisulfate (Sigma, USA) to 1 L DW)를 주입하여 Grätzel thin film reactor에서 유기물질을 완전히 산화시키는 원리이며, 정량한계는 10 µg-C/L이다.⁹⁾

LC-OCD-OND는 DOC (dissolved organic carbon)와 DON (dissolved organic nitrogen)을 겔보기 분자량에 따라 biopolymers (BP), humic substances (HS), building blocks (BB), low molecular weight acid (LMW-acid)와 low molecular weight neutrals (LMW-neu)의 5개 그룹으로 분류한다.⁹⁾ DON의 경우는 질산염 peak의 간섭으로 인해 BP와 HS 그룹에 함유된 DON만 정량할 수 있어 총 DON 농도는 이 두 그룹에 함유된 DON의 합이며, 소프트웨어(ChromCALC)에서 자동적으로 유기탄소와 유기질소 농도가 산정된다.⁹⁾

2.3. BOM 분석

원수나 정수장 공정별 시료수 중의 생물분해성 유기물질의 농도는 Servais 등¹⁰⁾이 제안한 BDOC 측정법을 이용하였다. 시료수는 공극이 0.2 µm인 멤브레인 필터(Millipore, USA)로 여과한 여액 200 mL를 BOD병에 투입한 후 BAC에서 탈리시킨 부착 박테리아 탈리액을 원심분리 후 공극 2 µm 멤브레인 필터(Millipore, USA)로 여과한 여액 2 mL를 식중하였다. 또한, 시료수 중의 유기탄소와 유기질소가 종속 영양 박테리아 대사의 제한인자로 작용되도록 무기영양염 농축액¹¹⁾을 주입한 후 20°C 항온배양기에서 28일간 배양하였다. 배양 후, 시료수 중의 DOC 및 DON을 분석하였으며, 생물분해성 용존 유기탄소(biodegradable dissolved organic carbon, BDOC) 및 생물분해성 용존 유기질소(biodegradable dissolved organic nitrogen, BDON) 농도는 배양 전 시료수의 DOC 및 DON 농도에서 배양 28일 후의 DOC 및 DON 농도를 제한값으로 결정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 원수의 용존 유기물질 특성

실험기간 동안 M-정수장 상수원수에 대한 용존 유기물질의 농도변화를 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)에 나타낸 평균 DOC 농도와 평균 BDOC 농도는 각각 2.93 mg/L 및 0.42 mg/L였으며, 최대 및 최소 DOC 농도는 각각 3.60 mg/L와 2.07 mg/L로 조사되었다. 또한, Fig. 1(b)에 나타낸 평균 DON 농도와 평균 BDON 농도는 각각 0.084 mg/L 및 0.025 mg/L였으며, 최대 및 최소 DON 농도는 각각 0.110 mg/L와 0.058 mg/L로 조사되었다. DOC에서의 평균 BDOC 함량은 13.7%로 나타났고, DON에서의 평균 BDON 함량은 25.1%로 나타났다.

Table 1. The studied drinking water treatment plant and treatment steps

Process	Operating conditions
Raw water	Lake water
Pre-Chlorination	Cl ₂ conc. : 0~4 mg/L
Pre-Ozonation	O ₃ conc. : 1.5~2.5 mg/L
Coagulation	Alum : 20~50 mg/L, PACS II : 10~50 mg/L
Sedimentation	Clarifier type, 3.3 Hr
Sand Filtration	Sand, 158 m/day
Post-Ozonation	O ₃ conc. : 0.5 mg/L
BAC Filtration	Coal-based GAC, EBCT : 20 min.

Fig. 1. Variation of DOM concentrations of raw water during experimental periods.

Table 2. Composition ratio by DOM fractions for raw water during experimental periods

		Min. (%)	Max. (%)	Aver. (%)
DOC	BP	13.4	24.3	17.5
	HS	40.3	57.5	50.4
	BB	14.4	19.8	17.1
	LMW-neu	12.2	26.2	14.9
	LMW-acid	0	2.8	0.2
DON	BP	20.8	47.1	35.0
	HS	52.9	79.2	65.0

실험기간 동안 M-정수장의 상수원수에 대한 용존 유기물질 분획별 구성비율을 조사한 결과를 Table 2에 나타내었다. Table 2에서 볼 수 있듯이 DOC의 경우, HS가 평균 50.4%를 차지하여 가장 높은 구성비율을 나타내었으며, 다음으로 생체고분자 물질인 BP가 평균 17.5%, BB가 17.1%, 저분자 물질군이 평균 15.1%의 구성비를 나타내었다. 또

한, DOC/DON 비율은 평균 35.5 mgC/mgN으로 나타났다.

3.2. 용존 유기물질 분획들의 생물분해 특성

실험기간 동안 정수처리 공정별 처리수에 함유된 DOM 분획들에 대한 생물분해 특성평가 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 것은 각 DOM 분획들의 초기 DOC(또는 DON) 농도와 초기 DOC(또는 DON) 농도에서 BDOC(또는 BDON)가 차지하는 비율을 평가한 것이며, 이것으로 초기 DOC(또는 DON) 농도에서 BDOC(또는 BDON)를 구성하는 물질의 생성율과 분해율을 평가하였다.

정수처리 공정별 처리수에 함유된 DOM 분획들의 생물분해능은 다양한 DOC 농도분포대에서 다양한 생성율과 분해율을 나타내어 배양 전 초기 농도와는 무관한 것으로 나타났다. 특히, DOM 분획들 중에서 생체 고분자물질인 BP (biopolymers)는 가장 쉽게 생물분해되었으며, Fig. 2(a)와 Fig. 2(b)에서 볼 수 있듯이 DOC와 DON에 대해 0~100%의 생물분해율을 나타내었다. Fig. 2에는 나타내지는 않았으나 BP를 구성하는 다당류성 DOC (polysaccharide-like DOC)가 단백질성 DOC (proteinaceous-like DOC) 보다 비교적 높은 생물분해율을 나타내었다. Fig. 2(c)에 나타난 저분자 물질군에 속하는 BB (building blocks)와 LMW-neu의 경우, BP에 비해 비교적 낮은 생물분해능을 보였으며, 몇몇 시료에서는 오히려 생성되는 것으로 나타났다. 저분자 물질들인 BB 및 LMW-neu의 생성(production)은 박테리아의 분해대사에 의한 고분자 유기물질의 저분자화 또는 박테리아의 증식이나 사멸에서 생성된 유기성 물질에 의한 결과일 수 있다. 마지막으로 HS (humic substances)의 경우, DOC와 DON에서 각각 25% 미만 및 50% 미만의 생물분해능을 나타내었으나 일부 시료들에서는 오히려 DOC와 DON의 증가(production)가 관찰되었다(Fig. 2(a), (b)). 이러한 HS의 농도증가(production)는 유기성 저분자 화합물의 중합 또는 미생물에 의한 humic 유사구조 물질의 생성에 의한 것으로 판단되었다.

Fig. 2. Relationship between the biodegradable (BDOC) and DOC and DON of the respective DOM fractions in waters sampled after each treatment step.

3.3. 용존 유기물질 분획들의 생물분해 동력학

정수처리 공정별 처리수 중의 DOM 분획별 생물분해 동력학을 평가한 것을 Fig. 3에 나타내었다. 각각의 분획들에 대한 생물분해 동력학은 총 3회 수행한 결과를 평균하여 표준편차와 함께 나타내었다.

Fig. 3(a)에 나타난 biopolymers (BP)의 결과에서 원수(Raw)의 경우는 배양 초기부터 매우 빠른 생물분해율을 나타내었고, 배양 초기 7일 동안 생물분해된 농도는 평균 0.30 mgC/L로 전체 배양기간 28일 동안 생물분해된 농도 0.42 mgC/L의 71% 정도에 해당되었으며, 생물분해된 BP의 대부분이 앞에서 언급한 다당류성 DOC (polysaccharide-like DOC)가 차지하였다.

또한, 응집·침전공정 처리수의 배양 초기 7일 동안 생물분해된 BP의 농도(평균 0.01 mgC/L)가 원수(평균 0.30 mgC/L)에 비해 매우 낮았는데 이는 응집·침전공정에서 매우 빠른 생물분해율 나타내는 BP 성분(다당류성 DOC (polysaccharide-like DOC))의 제거가 가능함을 보여주는 결과이다.

Fig. 3(b)에 나타난 humic substances (HS)의 결과를 살펴보면, 원수에 함유되어 있는 HS 중 20% (0.30 mgC/L) 정도가 전체 배양기간 동안 생분해되었으며, 초기 7일 동안의 생물분해율이 전체 생물분해율의 30% (0.10 mgC/L) 정도로 매우 빠른 것으로 나타나 식종 박테리아 개체군의 효소 활성이 상당한 양의 HS에 매우 빠르게 반응한다는 것을 보여준다. 이전의 연구결과에 따르면 HS에는 종속 영양성 박테리아의 기질로 이용가능하며, HS의 구조내에 결합력이 약한 펩타이드와 탄수화물과 같은 생물분해성 생체 분자가 함유되어 있으며, 만약 HS의 구조가 생물분해 가능한 생체분자와 유사한 물질조성을 가진다고 가정할 경우에는 박테리아에 의해 최대 30%까지 사용(생물분해)될 수 있다고 보고하고 있다.¹²⁾ 또한, 정수처리 공정별 처리수에 대한 28일 배양 후의 생물분해율이 각각 응집·침전 처리수 18%, 후오존 처리수 18% 및 BAC 처리수 12%로 나타났으며, 배양기간에 따른 생물분해 경향도 매우 유사하게 나타났다.

HS의 가수분해 부산물로 간주되는 building blocks (BB)에 대해 배양기간에 따른 생물분해율을 평가한 것을 Fig. 3(c)에 나타내었다. 공정별 시료수들에서의 전체 배양기간 동안의 평균 생물분해율은 원수 16%, 응집·침전수 12%, 후오존 처리수 6% 및 BAC 처리수가 12% 정도로 나타났으며, BB의 초기 농도가 0.4~0.6 mgC/L로 매우 낮기 때문에 생물분해된 농도는 0.05~0.1 mgC/L였다. 그리고 배양기간 초기에 BB의 농도가 증가하였다가 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이는 HS의 초기 생물분해 단계에서 일부 생물분해 중간물질들이 영향을 미친 것으로 판단된다.

Fig. 3(d)에 나타난 저분자 물질인 LMW-neu의 생물분해 결과에서는 시료수의 종류에 따라 매우 다양한 결과가 나타났다. 원수, 후오존 및 BAC 처리수에 대한 전체 배양기간 동안의 평균 생물분해율은 28%~44% 정도로 매우 높았으나 응집·침전 처리수의 경우는 4% 정도로 비교적 낮게 나타났다. LMW-neu의 생물분해된 농도는 BB의 경우에서처럼 초기 농도가 매우 낮기 때문에 0.02~0.17 mgC/L의 농도 범위로 나타났으며, LMW-neu 성분들은 알코올, 알데히드, 케톤, 아미노산과 같은 친수성 저분자 물질들로 구성되며,⁹⁾ 이들 물질들은 생물분해가 가능한 물질들로 평가된다. 샘플들에서 LMW-neu의 증가현상이 나타나는 것은 고분자 분획들의 생물분해 생성물 영향으로 판단된다.

원수의 DOM 분획들 중 BP에 함유된 다당류 유래-DON (polysaccharide-DON)과 단백질 유래-DON (protein-DON)에 대한 생물분해 동력학 평가결과를 Fig. 4에 나타내었다. BP에 함유된 다당류 유래-DON의 경우 단백질 유래-DON에 비해 초기 농도가 3배 정도 높게 나타났으며, 배양 초기부터 현저하게 높은 생물분해율을 나타내었다. 그러나 단백질 유래-DON의 경우는 전체 배양기간 동안 점진적으로 농도가 감소하고 있어 배양기간 동안 유기질소원으로 지속적으로 사용되는 것으로 나타났으나 다당류 유래-DON은 배양기간 7일 이내에 거의 50% 이상 생물분해되어 종속 영양 박테리아가 기질로 용이하게 이용할 수 있는 물질로 평

Fig. 3. Kinetics of microbial biodegradation of DOM fractions from different treatment processes (28 days incubation).

Fig. 4. Microbial biodegradation rate of polysaccharide-DON and protein-DON of the biopolymer fraction in raw water (28 days incubation).

가되었다. 따라서 배·급수관망 내에서 미생물 재성장 및 생물막 형성을 억제하기 위해서는 정수처리 공정에서 다당류

유래-DON의 제어가 필수적인 것으로 조사되었다.

정수처리 공정별 BDOC와 BDON의 제거경향을 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 전오존 처리수에 함유되어 있는 BDOC와 BDON의 약 56%와 약 85% 정도가 응집·침전공정에서 제거되었다. BDOC의 경우 DOM 분획별 평균 제거율을 살펴보면 BP가 약 80%의 높은 제거율을 나타내었으며, 다음으로 HS가 평균 57% 정도로 나타났고, BB와 LMW-neu에 함유된 BDOC 제거율은 무의미한 수준으로 평가되었다. BDON의 경우는 BP와 HS 모두 함유된 BDON의 약 85% 정도가 응집·침전으로 제거되어 BP 함유 BDON 제거율의 경우도 응집·침전공정에서의 BDOC 제거율과 밀접한 상관성이 있었다.

후오존 처리수에 대한 BAC 공정에서의 BDOC와 BDON 제거율은 평균적으로 각각 46%와 52%로 나타나 응집·침전공정에 비해 낮았다. 이러한 결과는 앞의 Fig. 3(a)에서 볼 수 있듯이 가장 용이하게 생물분해되는 BP의 농도가 0.003 mgN/L 정도로 후오존 처리수에 낮게 함유되어 있어 BAC 공정에서의 전체적인 BDON의 제거율이 낮게 나타났다. BP와 HS에 함유되어 있는 BDON의 평균 제거율은 각각 55%와 38% 정도로 조사되었다. 또한, BB와 LMW-neu에 대한 BAC 공정에서의 제거율은 각각 평균 28%와 57% 정

Fig. 5. Distribution of BDOC concentrations in DOM fractions according to drinking water treatment processes.

Fig. 6. Distribution of BDON concentrations in DOM fractions according to drinking water treatment processes.

도로 나타났다.

전 정수처리 공정을 통한 평균적인 유기물질 제거율을 살펴보면 총 DOC와 총 DON의 평균 55%와 69% 정도가 제거된 반면 BDOC와 BDON의 평균 제거율은 각각 74%와 91% 정도의 높은 제거율을 나타내었다. 처리수에서 BDOC는 평균 0.1 mgC/L였고, BDON의 경우는 정수처리를 거치는 동안 거의 제거되고 평균적으로 0.002 mgN/L 정도 최종 처리수에 잔존하였다. 최종 처리수에 잔류하는 BP 성분은 주로 다당류였으며, 단백질류는 완전히 제거되었다. 또한, HS와 BP에 함유되어 있는 DON은 최종적으로 처리수에서 90% 정도의 높은 제거율을 나타내었다.

4. 결론

본 연구는 LC-OCD-OND 분석방법에 의한 용존유기물질 분획들의 생물분해에 대한 중요한 통찰을 제공한다. BDOC 및 BDON을 구성하는 분획들의 생물분해성은 초기 농도와 무관한 것으로 나타났다. Biopolymers는 다른 분획들에 비해 가장 용이하고 빠르게 생물분해되었으며, 다음으로는 LMW-neu였으며, building blocks과 humic substances는 매우 유사한 생물분해율을 나타내었다. Humic substances 분획에서 BDOC와 BDON의 생물분해 또는 생성이 관찰되었으며, 이는 biopolymer의 분해 또는 박테리아가 생성하는 SMP (soluble microbial product)에서 기인된 변형 생성물에 의한 것으로 추측된다.

대부분의 BDOC와 BDON은 응집·침전공정에서 제거되었다. 이러한 결과는 생물분해성 고분자 유기물질을 최대한 많이 제거하기 위해서는 최적화된 응집공정의 중요성을 부각시킨다. BDOC 배양실험 결과에서 용존유기물질 분획들의 분자량에 관계없이 모든 용존유기물질 분획들에서 박테리아에 의한 분해대사가 가능하였다. 따라서 배·급수관망에서 미생물 증식의 위험을 최소화하기 위해서는 정수처리 공정에서 가능한 모든 DOM 분획들을 제어해야 할 필요성이 있었다.

KSEE

References

1. Jung, C. W. and Son, H. J., "The relationship between disinfection by-products formation and characteristics of natural organic matter in raw water," *Korean J. Chem. Eng.*, **24**(4), 714~720(2008).
2. Roh, J. S., Son, H. J., Park, H. G., Hwang, Y. D., Ryu, D. C., Kang, L. S. and Joo, G. J., "Changes in characteristics of biodegradable organic matter removal by advanced water treatment processes," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **25**(7), 909~920(2003).
3. Servais, P., Laurent, P. and Randon, G., "Comparison of the bacterial dynamics in various french distribution systems," *J. Water Suppl.: Res. Technol.-Aqua*, **44**(1), 10~17(1995).
4. Ndiongue, S., Huck, P. M. and Slawson, R. M., "Effects of temperature and biodegradable organic matter on control of biofilms by free chlorine in a model drinking water distribution system," *Water Res.*, **39**, 953~964(2005).
5. Van der Kooij, D., Visser, A. and Hijnen, W. A. M., "Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water," *J. Am. Water Works Assoc.*, **74**(10), 540~545(1982).
6. Amon, R. M. W. and Benner, R., "Bacterial utilization of different size classes of dissolved organic matter," *Limnol. Oceanogr.*, **41**(1), 41~51(1996).
7. Matilainen, A., Lindqvist, N., Korhonen, S. and Tuhkanen, T., "Removal of NOM in different stages of the water treatment process," *Environ. Int.*, **28**, 457~465(2002).
8. Bagtho, S., Sharma, S., Guitard, M., Heim, V., Croué, J. P. and Amy, G., "Removal of NOM-constituents as characterized by LC-OCD and F-EEM during drinking water treatment," *J. Water Suppl.: Res. Technol.-Aqua*, **60**(7), 412~423(2011).
9. Huber, S. A., Balz, A., Abert, M. and Pronk, W., "Characterisation of aquatic humic and non-humic matter with size-exclusion chromatography-organic carbon detection-organic nitrogen detection (LC-OCD-OND)," *Water Res.*, **45**, 879~885(2011).
10. Servais, P., Billen, G. and Hascoët, M. C., "Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters," *Water Res.*, **21**, 445~450(1987).
11. Goel, S., Hozalski, R. M. and Bouwer, E. J., "Biodegradation of NOM: effect of NOM source and ozone dose," *J. Am. Water Works Assoc.*, **87**(1), 90~105(1995).
12. Steinberg, C. E., *Ecology of Humic Substances in Freshwaters*, Berlin, Springer, (2001).