

희분식 생물반응기를 이용한 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow} 결정

손희종^{*} · 노재순 · 강임석^{*}

부산광역시 상수도사업본부 수질연구소

^{*}부경대학교 환경공학과

Determination of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} using Batch Bio-reactor

Hee-Jong Son^{*} · Jae-Soon Roh · Lim-Seok Kang^{*}

Water Quality Research Institute, Waterworks Headquarter, Busan

^{*}Dept. of Environmental Engineering, Pukyong National University

(Received 14 April 2004, Accepted 28 May 2004)

Abstract : In this study, biodegradable organic matter was divided into a rapidly biodegradable fraction(BDOC_{rapid}) and a slowly biodegradable fraction(BDOC_{slow}) for various waters with different types of DOC. These fractions(BDOC_{rapid} and BDOC_{slow}) were defined by using a shaking incubation method modified from Carlson's method. Also, in this study, optimum incubation time and accuracy were investigated to determine BDOC_{rapid} and BDOC_{slow}.

When suspended bacteria obtained from raw water and BAC effluent, or attached bacteria from BAC was respectively used as an inoculum, the difference in total BDOC(BDOC_{total}) was minimal. Therefore, total BDOC was determined in 7~8 days by the shaking method, which is comparable with Servais's method by which BDOC was determined in 28 days. In addition, the difference of BDOC between these two methods was within 7%.

Although BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} were effectively determined by a method defined by Klevens, the difference in optimal incubation time was significant for different water samples. However, when using the shaking method, optimal incubation time for BDOC_{rapid} was found to be 3 days, therefore, the BDOC_{rapid} was defined as the difference between DOC₀ and DOC_{3days}, and BDOC_{slow} was defined as the difference between BDOC_{total} and BDOC_{rapid}. As a conclusion, for determining the fraction of BDOC using the shaking method, the concentrations of an inoculums and optimal incubation times used in this study were very effective.

keywords : Biofiltration, BDOC fraction, BDOC_{rapid}, BDOC_{slow}, Optimal incubation time

1. 서 론

상수원수나 정수처리 공정의 처리수에 잔존하는 생분해 가능한 유기물질(biodegradable organic matter: BOM)은 배급수관망에서 생물막 형성과 같은 미생물 재성장 유발 및 수중의 잔류염소 손실과 같은 수질에 악영향을 미치기 때문에 정수처리에 있어서 이들의 제거는 주요한 관심사로 지속되어 오고 있으며(LeChevallier et al., 1987; LeChevallier, et al., 1988), 최근에는 수중 용존 유기물질(dissolved organic matter: DOM) 중의 생분해 가능한 부분의 측정에 대한 관심이 지속적으로 증대되고 있다(Servais et al., 1987; Block et al., 1992; Kahn et al., 1999; Volk and LeChevallier, 2000).

수중에 존재하는 용존성 유기물질들은 그 종류가 아주 많고, 그 구조도 매우 복잡하기 때문에 수중에 존재하는 모든 용존 유기화합물들을 각각 정성, 정량하기란 거의 불

가능하다고 알려져 있다(Hama and Handa, 1980).

현재까지 수중의 생분해 가능한 유기물질(biodegradable organic matter: BOM)을 측정하는 방법으로는 박테리아에 의해 쉽게 동화가능한 유기탄소(assimilable organic carbon: AOC)를 측정하는 방법(Van der Kooij et al., 1982; Kemmy et al., 1989; Rice et al., 1991)과 생분해되는 유기탄소(biodegradable dissolved organic carbon: BDOC)를 측정하는 방법이 있다(Joret and Lévi, 1986; Servais et al., 1987; Ribas et al., 1991). 정수처리에서 AOC와 BDOC는 배급수관망에서 이들 물질들이 종속영양 박테리아들에 대해 성장의 제한인자로 작용하기 때문에 이들의 측정은 매우 중요하다(Bourbigot et al., 1984). BDOC는 종속영양 박테리아에 의해 무기화(mineralization)되는 DOC의 한 부분을 나타내는 것으로 정수처리 공정에서 생물학적으로 산화되어질 수 있는 유기탄소를 측정하는 것이며(Huck, 1990), AOC는 BDOC 중에서 종속영양 박테리아들의 생체량(biomass)으로 전환되는 한 부분을 나타내는 것으로 박테리아의 재성장 잠재성을 측정하는 것이기 때문에 AOC와 BDOC는 근본적으로 차이가 있다(Huck, 1990).

^{*} To whom correspondence should be addressed.
menuturk@hanmail.net

BDOC의 측정은 초기 DOC 농도와 박테리아 식종 (inoculation) 후 일정기간 배양하여 DOC가 최소농도에 도달하였을 때와의 차이를 측정하는 원리이며(Frias et al., 1992), 최근에는 BDOC를 더욱 세분화시켜 빠르게 생분해되는 부분과 느리게 생분해되는 부분으로 분류하여(Langlas et al., 1991) 정수처리 공정에서 aldehyde와 같은 유기 오존부산물, BDOC 및 염소 소독부산물 전구물질의 제거에 효과적인 공정으로 알려져 있는 생물활성탄(biological activated carbon: BAC)과 같은 biofiltration 공정에서의 유기물질 제거능을 최적화하고자 하는 목적으로 이용하고 있다(Huck et al., 1994; Hozalski et al., 1995; Wang et al., 1995; Carlson and Amy, 2001).

Biofiltration 공정을 최적의 조건으로 설계하거나 운전하고자 할 때, 수중의 DOC와 같은 유기물질 제거능은 오존처리 공정 동안 생성되어지는 BDOC의 형성에 의해 제한되어진다(Carlson and Amy, 1995). 즉, 빠르게 생분해되는 BDOC 부분을 biofiltration 공정에 의해서 실제로 제거되어질 수 있는 BDOC, 느리게 생분해되는 부분은 biofiltration 공정에서 제거되지 않고 배급수관망으로 유출될 가능성이 있는 BDOC로 평가하여(Wang and Summers, 1994; Carlson et al., 1996), 오존-biofiltration 공정에서 NOM 제거능을 최대로 높이면서 오존 부산물이나 관망으로 유출될 가능성이 있는 BOM을 최대로 줄이는 것으로 biofiltration 공정에서 제거되어질 수 있는 BOM(BDOC_{rapid})의 최대 생성 및 배급수관망으로 유출될 수 있는 BOM(BDOC_{slow})의 최소 생성이다. 하지만 현재까지의 연구에서 오존-BAC 공정의 효율을 평가하면서 DOC와 BDOC 같은 총량적인 개념에서의 접근만 있었고, 이런 분류를 통한 접근은 거의 없었으며, 몇몇 외국의 연구자들에 의해서 기초적인 연구가 진행되어 오고 있다(Allgeier et al., 1996; Carlson and Amy, 1997).

외국의 연구자들에 의한 이전의 연구에서는 BDOC를 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류시 biofilm이 형성된 모래를 시료수가 들어있는 유리병에 식중하여 배양하거나 biofilm이 형성된 모래를 컬럼에 충전하여 시료수를 컬럼속으로 통과시키면서 DOC 제거율을 평가하여 BDOC를 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류하였다(Allgeier et al., 1996; Carlson and Amy, 1997). 이런 방법들은 빠른 시간내에 결과를 얻을 수 있는 이점은 있지만 모래를 식중하는 경우는 완속 사여과지를 항상 구비한 경우가 아니고는 식중에 많은 어려움이 있고, 전처리 과정인 모래 세척이 번거로운 단점이 있으며, 컬럼을 사용하는 경우는 컬럼의 유지관리가 매우 번거롭다는 단점이 있다.

따라서 본 연구에서는 모래 식중이나 컬럼을 사용하는 방법이 아닌 원수나 BAC 유출수와 같이 수중에 존재하는 박테리아를 식중·배양하는 방법을 사용하여 실험의 번거로움을 줄이고자 하였고, 비교적 간단한 식중과 배양법으로 BDOC를 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류함과 동시에 부유성 박테리아를 식중하여 기존의 28일 정도의 배양기간을 단축하여 8일이라는 비교적 짧은 배양기간내에 총 BDOC

(BDOC_{total})를 결정하고자 하였다. 실험에 사용한 시료수는 성상이 다른 호소수와 하천수 및 유기물 농도가 높은 원수부터 비교적 저농도인 급속 사여과 처리수나 후오존 처리수 및 하수처리장의 2차 방류수까지 실험방법의 검증에 사용하였으며, 원수나 BAC 유출수 중의 부유성 박테리아를 식중 후 배양시간에 따른 DOC 농도를 평가하여 BDOC_{total} 결정 및 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}를 분류하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1. 원수 성상

본 실험에 사용된 시료수는 낙동강 하류 매리취수장에서 취수한 매리원수(MR), 매리원수를 농축한 농축수(CMR), 회동수원지에서 취수한 원수(HD), 매리원수를 정수처리하는 1일 100 m³ 처리규모 정수처리용 pilot-plant 공정 중의 급속 사여과 처리수(SF)와 후오존 처리수(PO) 및 부산의 장림 하수처리장의 2차 방류수(SE)이며, 매리 원수의 농축은 rotary evaporator(RotaVapor R-205, Büchi, Germany)를 사용하여 40°C에서 4배 농축하였다. 실험에 사용된 시료수의 성상을 Table 1에 나타내었다.

Table 1. BOM Fraction Experiments: Water Sources and Quality

Raw water source	Water quality		
	DOC (mg/L)	SUVA (m ⁻¹ · L/mg)	pH (-)
Hoidong raw water(HD)	2.11	1.67	7.2
Maeri raw water(MR)	3.16	2.16	7.6
Maeri concentrated water(CMR)	9.26	-	7.8
Plant sand filtered water(SF)	1.58	1.86	7.2
Plant post-O3 treated water(PO)	1.40	0.80	7.3
Secondary effluent water(SE)	2.51	2.50	6.8

2.2. 회분식 생물반응기

본 실험에 사용된 회분식 생물반응기는 300 mL 용량의 BOD병을 사용하였으며, 실험 전에 300 mL BOD병을 세제로 여러 번 세척하고, 질산으로 세정한 후 3차 증류수로 3번 이상 헹군 다음, 회화로에서 550°C로 5시간 이상 회화한 후 실험에 사용하였다. 또한, 회분식 생물반응기는 shaking 배양기(HB201SF, 한백과학)내에서 22.5°C, 150 rpm으로 운전되었다.

2.3. Biofilter 반응기

본 실험에 사용된 biofilter 반응기는 직경 30 cm, 총높이 250 cm의 파일릿 규모의 아크릴 컬럼과 직경 10 cm, 총높이 80 cm인 실험실 규모의 아크릴 컬럼을 사용하였으며, 컬럼 내에 흡착능이 없는 anthracite(한국안트라사이트(주), 8~35 mesh)를 충전시켜 12개월 간 운전하여 미생물을 충분히 부착시켜 실험에 사용하였다. 두 biofilter의 역세는 잔류염소가 존재하지 않는 BAC 처리수를 사용하여 공세와

수세를 병행하였으며, 역세주기는 주 1회 정도로 하였다.

Biofilter의 운전은 Carlson 등(1995)의 연구에서와 같이 BOM에 대한 최대의 제거율을 나타내는 공탑체류시간(empty bed contact time: EBCT) 20분, 수리학적 부하율(hydraulic loading rate: HLR) 10 m³/m²·hr로 운전하였다.

2.4. 미생물 식종 및 배양

미생물의 접종은 Allgeier 등(1996)과 Carlson 등(1997)이 사용한 biofilm이 형성된 모래를 접종하는 방법을 변형시킨 방법으로 낙동강 원수와 1일 100 m³ 처리규모의 pilot-plant BAC 공정에서 2년 이상 사용한 BAC 유출수에 부유하는 부유성 박테리아(suspended bacteria) 및 BAC 공정의 활성탄 내에 부착하여 서식하는 미생물(fixed bacteria)을 인위적으로 탈리시켜 실험에 사용하였다. BAC 내의 미생물 탈리는 BAC 표층의 활성탄을 채취하여 증류수로 여러 번 행군 다음 불순물을 제거하고, 실온 상태에서 3~4시간 정도 건조시킨 후, 활성탄 1 g을 생리식염수(0.85% NaCl/L) 10 mL에 넣고, 3분간 sonication한 후 활성탄을 제거하고, 2 μm polycarbonate 필터(Millipore, U.S.A.)로 여과하여 수중에 존재하는 큰 유·무기물 입자 및 원생동물 등을 제거(Servais et al., 1989)한 후 증류수에 희석하여 박테리아의 농도를 10⁴~10⁵ CFU/mL 범위로 한 후 식종액으로 사용하였다.

원수와 BAC 유출수에 부유하는 부유성 박테리아 및 BAC 부착 박테리아를 탈리시킨 식종액의 식종은 시료 100 mL 당 2 μm polycarbonate 필터(Millipore, U.S.A.)로 여과한 식종액 1 mL를 식종하였다. 또한, 시료수 중에 존재하는 유기탄소가 미생물의 대사에 제한인자로 작용되도록 하기 위해서 시료 200 mL에 KH₂PO₄ 8.5 mg/L, K₂HPO₄ 21.75 mg/L, Na₂HPO₄ 33.4 mg/L, FeCl₃ 6H₂O 0.25 mg/L, MgSO₄ 22.5 mg/L, CaCl₂ 27.5 mg/L의 농도가 되도록 농축된 무기영양염 용액을 주입(Goel et al., 1995)한 후 22.5°C에서 20분 이상 고순도 산소(99.999%)를 산기하여 수중의 용존산소 농도를 포화상태로 만든 후 shaking 배양기에서 22.5°C, 150 rpm으로 배양하였으며, 배양시간에 따른 시료수 중의 DOC 농도 변화를 조사하였다.

2.5. BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow} 결정

BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 분류는 Carlson 등(1997)의 방법을 변형한 방법과 Klevens(1996)의 방법을 사용하였다. Carlson 등의 방법은 미생물 활성이 정상상태(steady-state)에 도달한 biofilter를 사용하여 실제로 biofilter에서 제거되는 DOC의 농도를 구한 후, biofilm이 형성된 모래를 biofilter로 유입되는 유입수와 같은 시료에 식종하여 배양하면서 biofilter에서 제거되는 DOC 농도만큼 모래를 식종한 배양기에서 DOC 농도가 감소하는 배양시간을 구하여 이를 최적 배양시간으로 결정하는 방법이며, Klevens의 방법은 배양시간 별로 감소되는 DOC 농도를 구한 후, 이를 그래프로 나타낸 DOC 농도 감소곡선을 사용하여 그래프 상에서 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류하는 방법이다. 본 실험

에서 사용한 Carlson 등(1997)의 방법을 변형한 shaking 배양법(shaking 배양법)은 Carlson 등의 방법과 마찬가지로 미생물의 활성이 정상상태에 도달한 biofilter를 사용하여 biofilter에서 제거되는 DOC 농도를 구한 후, biofilm이 형성된 모래를 식종하지 않고, 비교적 간단한 식종법인 부유성 박테리아를 식종하여 최적 배양시간을 도출하여 BDOC를 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류하였으며, 실험에 사용된 각각의 시료에 대한 biofilter에서 제거되는 BOM 농도의 도출은 미생물의 부착이 충분히 이루어진 실험실 및 파일럿 규모의 biofilter를 이용하여 biofilter에서의 BOM에 대한 평균제거율을 구하여 회분식 생물반응기에서 실제 biofilter에서의 제거율과 동일한 배양시간을 도출하였다. 후 오존수의 경우는 파일럿 규모의 biofilter를 이용하여 실제로 biofilter에서 제거되는 BDOC(BDOC_{rapid}) 분율을 구하였으며, 그 외 다른 시료수들에 대해서는 실험실 규모의 biofilter를 사용하여 실제로 biofilter에서 제거되는 BDOC_{rapid}의 분율을 도출하였다.

Klevens가 이용한 그래프를 사용하여 BDOC를 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류하는 방법은 Fig. 1과 같다. 배양기간 동안 생분해되고 남은 유기탄소 농도를 그래프의 y축, 배양기간을 x축으로 하여 유기물 농도 감소곡선을 나타낸 후 유기물 농도가 배양 초기에 빠르게 감소되는 곡선의 접선과 배양 중기부터 후기 사이에 느리게 감소되는 곡선의 접선이 만나는 점의 두 직선의 내각을 2등분하는 직선을 그어서 그 직선이 유기물 농도 감소곡선과 만나는 점에서 x축과 평행한 직선(α)을 그어서 y축과 만나는 점(a)과의 초기 유기물 농도와의 차를 BDOC_{rapid}로 정의하였고, 직선 α와 유기물 농도 감소곡선의 더 이상 생분해가 되지 않아 유기물 농도가 줄어들지 않는 점과 x축과 평행한 직선(β)을 그어서 y축과 만나는 점(b)과의 점(a)와의 차이를 BDOC_{slow}로 정의하였으며, 또한, 초기농도에서 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 합을 뺀 것을 더 이상 생분해되지 않는 BDOC(non BDOC)로 정의하였다. 그리고 유기물 농도 감소곡선의 두 접선의 교점에서 y축과 평행하게 그은 직선과 x축과의 교점(A)가 최적의 배양시간이라고 정의하였다.

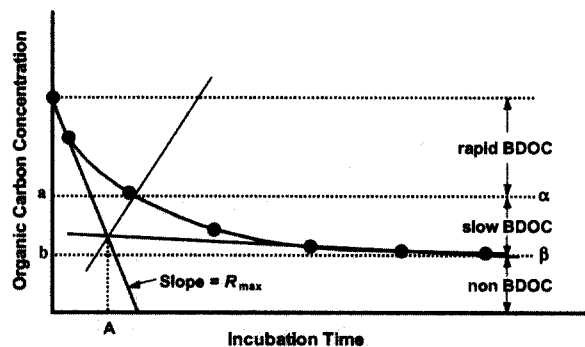


Fig. 1. Biodegradable and non-biodegradable fractions of NOM.

2.6. 분석방법

시료수로 사용된 원수 및 pilot-plant 공정수의 DOC 측정

은 0.2 μm 멤브레인 필터(Sartorius, Germany)로 여과한 후 그 여액을 사용하여 TOC analyzer(Sievers 820, Sievers, U.S.A.)로 분석하였으며, 배양시간에 따른 DOC 감소실험에서도 배양 후 0.2 μm 멤브레인 필터로 여과한 후 TOC analyzer(Sievers 820, Sievers, U.S.A.)로 DOC 농도를 측정하였다.

또한, 총 BDOC(BDOC_{total}) 결정실험에서는 부유성 미생물을 접종하여 shaking 배양기에서 배양하는 방법과 비교하기 위하여 원수중의 부유성 박테리아를 접종하여 28일간 배양하는 Servais 등(1987)의 방법을 사용하였으며, 항온배양기(KB400, Binder, Germany)에서 20°C로 배양하여, 배양 21일 후부터 매일 배양액의 DOC 농도를 측정(Servais et al., 1989)하여 초기 DOC 농도와 배양기간 동안 측정되는 최소 DOC 농도와의 차이로 총 BDOC 농도를 결정하였다(Servais et al., 1987; Mogren et al., 1990).

3. 결과 및 고찰

3.1. 식종액 종류에 따른 DOC 농도변화

Shaking 배양법에 의한 식종액 종류에 따른 배양기간 동안의 DOC 농도변화를 Fig. 2에 나타내었다. 시료수는 매리원수(a)와 pilot-plant의 후오존 처리수(b)를 대상으로 하여 shaking 배양기에서 배양하면서 배양시간대별로 DOC 농도변화를 조사하였다. Fig. 2에서 볼 수 있듯이 원수와 BAC 처리수의 부유성 박테리아 및 BAC 내에 부착된 박테리아

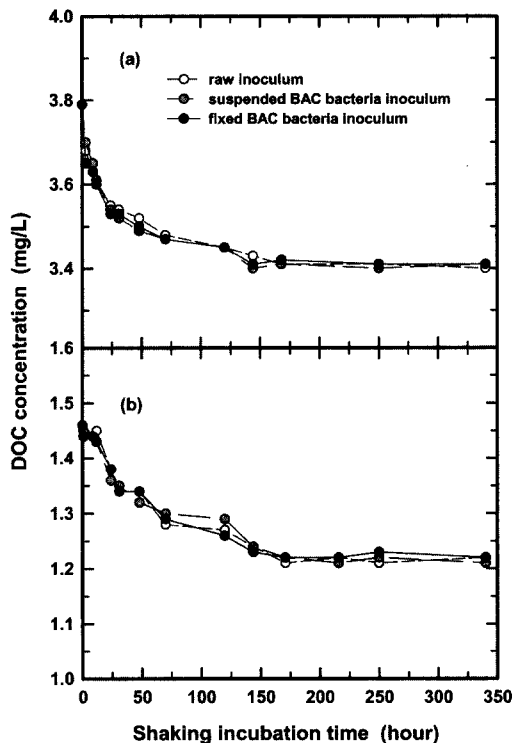


Fig. 2. The variation of DOC concentration according to the different inoculums for Maeri raw water & post-O₃ treated water during shaking incubation time.

를 동일한 시료에 식종하고 배양기간에 따른 DOC 농도변화를 살펴본 결과 식종액 차이에 따른 배양 시간대별 DOC 농도변화는 거의 동일하게 나타났으며, 서로의 농도차 범위는 2% 이내로 나타나 본 실험에 사용된 3가지 식종액의 차이에 따른 유기물질의 생분해능은 거의 영향을 받지 않는 것으로 나타났다. 따라서, 이후의 실험에서는 BAC 공정을 구비하지 않았더라도 쉽게 구할 수 있는 원수를 식종액으로 사용하여 실험하였다.

3.2. 배양 기간에 따른 BDOC 농도변화 및 BDOC_{total} 결정

원수중의 부유성 박테리아를 식종하는 shaking 배양법을 이용하여 총 BDOC(BDOC_{total}) 농도 결정을 위한 배양시간의 도출을 위해 부유성 미생물을 식종하여 정지상태의 암소에서 28일간 배양하는 Servais 등(1987)의 방법과 같이 병행하여 BDOC_{total}에 대한 DOC 농도변화를 실험한 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

28일간 배양하는 Servais 등의 방법에 따른 총 BDOC 농도는 매리원수를 대상으로 한 (a)의 경우 0.40 mg/L, 후오존 처리수를 대상으로 한 (b)의 경우 0.27 mg/L로 나타났고, (c)의 매리원수를 농축한 농축수의 경우는 1.42 mg/L로 나타났으며, shaking 배양법에 의한 총 BDOC 농도는 매리원수와 후오존 처리수를 대상으로 한 (a)와 (b)의 경우에는 배양 7일만에 각각 0.38, 0.25 mg/L로 나타났으며, 매리원

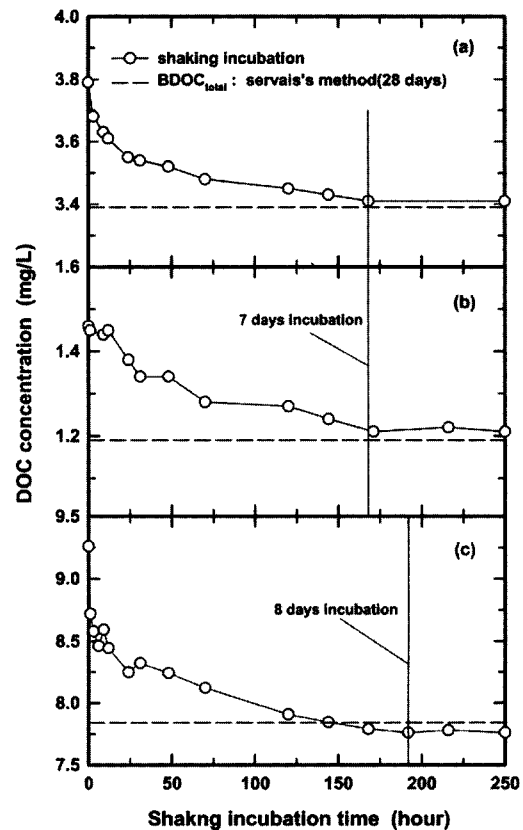


Fig. 3. Comparison of Servais's method & shaking incubation method for BDOC_{total}.

수를 농축한 농축수를 대상으로 한 (c)의 경우에는 배양 8 일 후에 잔존 DOC 농도가 7.76 mg/L로 가장 낮게 나타나 수중의 BDOC 농도가 높을 경우에는 7일 이상의 배양시간이 필요한 것으로 조사되었으며, 총 BDOC 농도는 1.50 mg/L로 조사되었다. 두 배양법에 의한 총 BDOC 농도 차이는 거의 TOC 분석기의 분석오차 범위내인 20~80 µg/L 정도의 농도 차이를 보였으며, 이는 전체 BDOC 농도의 5~7% 정도로 나타났다. 따라서, shaking 배양법에 의한 총 BDOC 농도는 배양 7일에서 8일 사이에 결정되는 것으로 조사되었으며, Fig. 3에는 나타내지는 않았지만 낙동강 원수와는 성상이 다른 회동 원수, 하수처리장의 2차 방류수 및 정수처리 공정중의 사여과수 및 BAC 처리수의 경우 배양 7일만에 BDOC가 모두 생분해되는 것으로 나타나 shaking 배양법에 의한 최적 배양시간은 BDOC 농도가 높은 시료의 경우를 고려하여 8일로 정하였다.

따라서, 총 BDOC(BDOC_{total}) 농도는 초기 DOC 농도(DOC₀)에서 8일간 shaking하면서 생분해되고 남은 DOC 농도(DOC_{8days})를 뺀 값이며, 이를 식으로 나타내면 식 (1)과 같다.

$$BDOC_{total} = BDOC_{8days} = DOC_0 - DOC_{8days} \quad (1)$$

3.3. 배양 기간에 따른 BDOC_{rapid} 및 BDOC_{slow} 결정

Shaking 배양법에 의한 BDOC_{rapid} 및 BDOC_{slow}를 결정하기 위하여 배양기간에 따른 DOC의 변화를 Fig. 4에 나타내었으며, BDOC_{rapid} 및 BDOC_{slow}의 결정은 shaking 배양법과 Klevens(1996)의 방법을 사용하였다. 매리원수를 사용한 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow} 결정 실험에서 Klevens 방법에 의한 BDOC_{rapid}는 0.23 mg/L로 전체 BDOC 농도의 61%를 차지하는 것으로 나타났고, BDOC_{slow}의 경우는 0.15 mg/L로 BDOC의 39%를 차지하는 것으로 나타났으며, shaking 배양법에 의한 BDOC_{rapid}의 경우는 0.25 mg/L로 전체 BDOC 농도의 66%를 차지하는 것으로 나타났고, BDOC_{slow}의 경우는 0.13 mg/L로 BDOC의 34%를 차지하는 것으로 나타나 shaking 배양법과 Klevens의 방법 모두 매리원수를 사용한 실험에서 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 농도가 거의 동일하게 나타나는 것으로 조사되었으나, 최적 배양시간 결정에서는 Klevens 방법에 의해서는 38시간, shaking 배양법에 의해서는 67시간으로 나타나 최적 배양시간에서는 다소 차이가 있었다.

후오존 처리수를 이용한 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow} 결정 실험의 결과를 Fig. 5에 나타내었다. Shaking 배양법과 Klevens의 방법에 의해서 도출된 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}는 BDOC_{rapid}의 경우 각각 0.17, 0.19 mg/L로 나타났으며, BDOC_{slow}의 경우에는 0.08, 0.06 mg/L로 나타났으며, 최적 배양시간은 각각 69시간 및 65시간으로 나타나 거의 동일한 것으로 나타났다. 또한, 비교적 BDOC 농도가 낮은 모래여과수를 대상으로 한 shaking 배양법과 Klevens의 방법에 의한 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow} 결정 실험의 경우도 Fig. 6

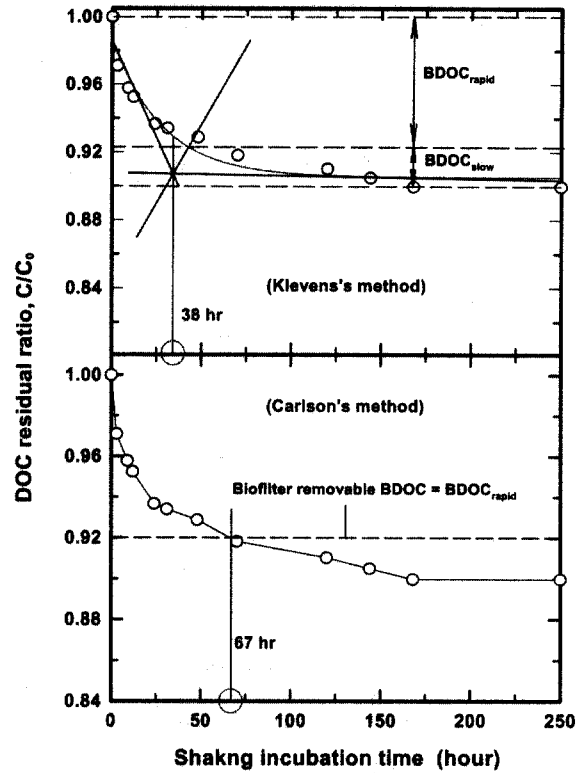


Fig. 4. Determination of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} using Klevens's method and Carlson's method for maeri raw water.

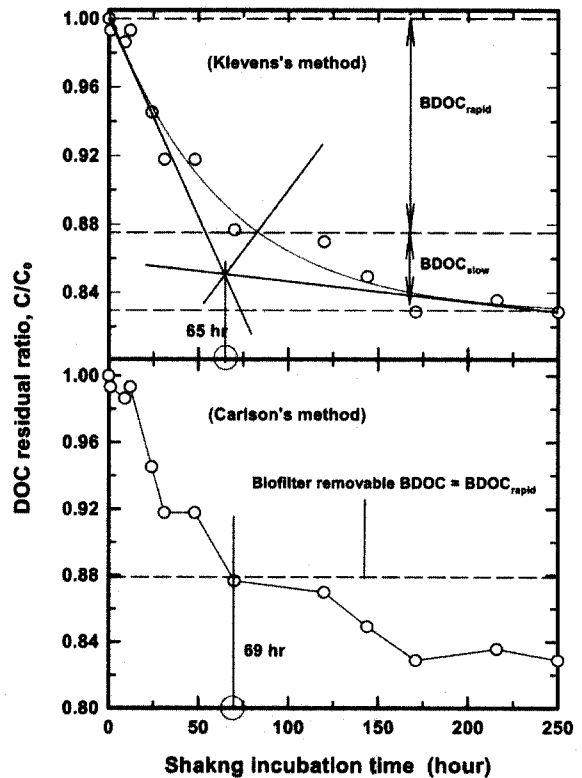


Fig. 5. Determination of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} using Klevens's method and Carlson's method for post-ozone treated water.

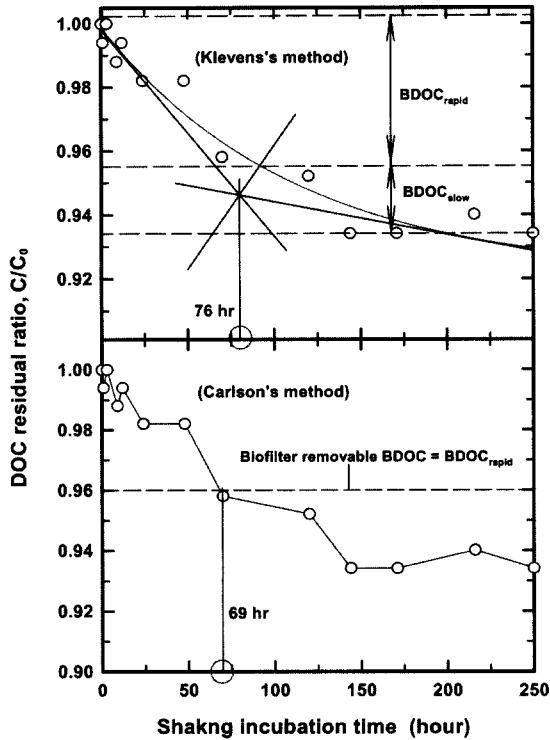


Fig. 6. Determination of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} using Klevens's method and Carlson's method for sand filtered water.

에 나타난 바와 같이 BDOC_{rapid}의 경우 각각 0.06, 0.07 mg/L, BDOC_{slow}의 경우 0.05, 0.04 mg/L로 나타나 shaking 배양법과 Klevens의 방법에 의한 결과가 거의 유사한 결과를 보였으며, 최적 배양시간 도출에서도 69시간 및 76시간으로 조사되어 어느 정도 유사한 결과를 보이는 것으로 나타났다.

또한, 하수처리장의 2차 방류수를 대상으로 한 실험결과를 나타낸 Fig. 7의 경우에도 shaking 배양법과 Klevens의 방법에 의한 BDOC_{rapid}의 경우 각각 0.53, 0.46 mg/L,

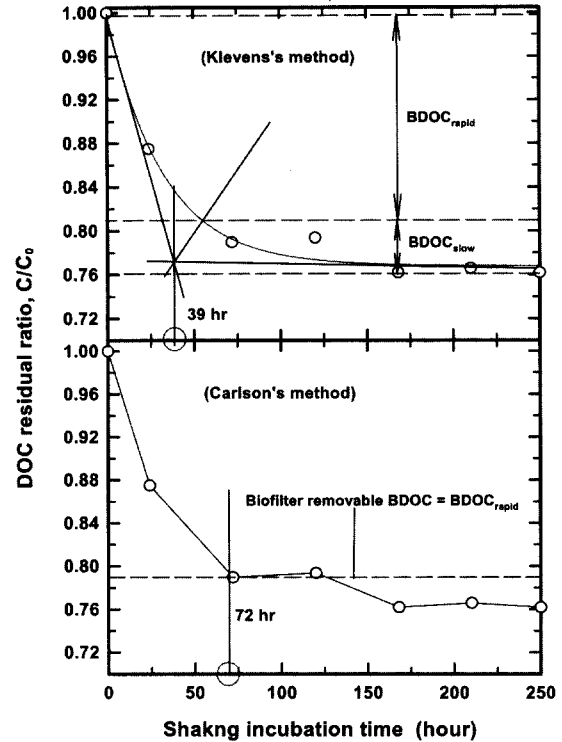


Fig. 7. Determination of BDOC_{rapid} and BDOC_{slow} using Klevens's method and Carlson's method for secondary effluent water.

BDOC_{slow}의 경우 0.15, 0.22 mg/L로 나타나 다른 시료들에 비해서 농도 차이가 다소 나타나고 있으며, 최적 배양시간의 경우에도 각각 72, 39시간으로 나타나 많은 차이가 있음을 알 수 있었다.

또한, 회동원수와 매리원수 농축수에 대한 결과와 위의 내용을 정리하여 Table 2에 요약하여 나타내었다. 회동원수와 매리원수 농축수의 경우에는 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 농도가 거의 일치하며, 최적 배양시간의 경우에도 거의 일치하는 것으로 나타났다.

Table 2. Comparison of the various sample waters for BDOC fraction and optimal incubation time.

Sample	BDOC _{total} (mg/L)		BDOC _{rapid} (mg/L)		BDOC _{slow} (mg/L)	
	A, C method	B method	A method	C method	A method	C method
Maeri raw water	0.38 (168)	0.40	0.25 (67)	0.23 (38)	0.13	0.15
Concentrated Maeri raw water	1.50 (192)	1.42	1.04 (72)	1.02 (70)	0.22	0.24
Hoidong raw water	0.19 (164)	0.21	0.16 (68)	0.14 (71)	0.03	0.04
Plat sand filtered water	0.11 (144)	0.10	0.06 (69)	0.07 (76)	0.05	0.04
Plant post-O ₃ treated water	0.25 (171)	0.27	0.17 (69)	0.19 (65)	0.08	0.06
Secondary effluent water	0.68 (168)	0.65	0.53 (72)	0.46 (39)	0.15	0.22

- A is shaking incubation method, B is Servais's method for BDOC_{total} and C is Klevens's method
 - Parentheses is shown optimal shaking incubation time.

위의 내용을 종합해 보면 Klevens의 방법에 의한 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 분류는 각각의 농도를 결정하기에는 유효한 것으로 판단되어지나 최적 배양시간의 도출에서는 시료에 따라 배양시간에 많은 차이를 보이는 것으로 나타났으며, shaking 배양법에 의한 BDOC 분류법의 경우, BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 농도 및 최적 배양시간 도출에서 일관성 있는 결과를 나타내었으며, shaking 배양법에 의한 BDOC_{rapid}의 최적 배양시간은 3일로 나타났다.

따라서, Carlson 등의 방법을 기초로 한 shaking 배양법을 사용하여 최적 배양시간을 도출하였을 경우, biofilter에서 제거 가능한 BDOC(BDOC_{rapid})는 초기 DOC 농도(DOC₀)에서 3일간 shaking하면서 생분해되고 남은 DOC(DOC_{3days}) 농도를 뺀 값이며, 이를 식으로 나타내면 식 (2)와 같고, 배급수관망으로 유출될 가능성이 있는 BDOC(BDOC_{slow})는 총 BDOC 농도(BDOC_{total})에서 biofilter에서 제거 가능한 BDOC(BDOC_{rapid}) 농도를 뺀 값이며, 이를 식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$BDOC_{rapid} = BDOC_{3days} = DOC_0 - DOC_{3days} \quad (2)$$

$$BDOC_{slow} = BDOC_{total} - BDOC_{rapid} = DOC_{3days} - DOC_{8days} \quad (3)$$

4. 결론

본 연구에서는 성상이 다른 여러 가지 원수, 하수처리장의 2차 방류수 및 정수처리 공정중의 공정수를 대상으로 하여 원수중의 부유성 박테리아를 식종하여 BDOC를 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}로 분류한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 원수와 BAC 처리수의 부유성 박테리아 및 BAC 내에 부착된 박테리아를 각각 식종하였을 경우 배양기간 동안 잔존하는 DOC 농도 차이는 전체 농도의 2% 범위 이내로 나타나 식종액에 따른 총 BDOC 차이는 없는 것으로 나타났다.
2. 부유성 박테리아를 식종하여 shaking 배양법으로 총 BDOC를 결정하기 위하여 28일간 배양하는 Servais 등의 방법과 병행하여 실험한 결과 7~8일만에 총 BDOC 농도가 결정되며, Servais 등의 방법에 의한 총 BDOC 농도와의 차이는 전체 BDOC 농도에 대하여 7% 이내의 차이를 나타내었다.
3. BDOC_{rapid} 및 BDOC_{slow} 결정에서 Klevens의 방법에 의한 분류의 경우 BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow} 각각의 농도를 결정하기에는 유효한 것으로 판단되어지나 최적 배양시간의 도출에서는 시료에 따라 배양시간에 많은 차이를 보이는 것으로 나타났으며, shaking 배양법에 의한 BDOC 분류법의 경우, BDOC_{rapid}와 BDOC_{slow}의 농도 및 최적 배양시간 도출에서 일관성 있는 결과를 나타내었고, shaking 배양법에 의한 BDOC_{rapid}의 최적 배양시간은 3일로 나타났다.

4. 부유성 박테리아를 식종하여 shaking 배양법에 의한 총 BDOC, BDOC_{rapid} 및 BDOC_{slow}는 아래 식 (1)~(3)으로 부터 구할 수 있었다.

$$BDOC_{total} = BDOC_{8days} = DOC_0 - DOC_{8days} \quad (1)$$

$$BDOC_{rapid} = BDOC_{3days} = DOC_0 - DOC_{3days} \quad (2)$$

$$BDOC_{slow} = BDOC_{total} - BDOC_{rapid} = DOC_{3days} - DOC_{8days} \quad (3)$$

참고문헌

1. Allgeier, S. A., Simmers, R. S. and Jacangelo, J. G., Determination of the BDOC of natural and treated waters using a scaled batch reactor, *Proceeding of 1996 American Water Works Association Water Quality Technology Conference*, Boston (1996).
2. Block, J. C., Mathieu, L., Servais, P., Fontvieille, D. and Werner, P., Indigenous bacterial inocula for measuring the biodegradable dissolved organic carbon(BDOC) in waters, *Water Research*, **26**(4), pp. 481-486 (1992).
3. Bourbigot, M. M., Dodin, A. and Lheritier, R., La flore bactérienne dans un réseau de distribution, *Water Research*, **18**, pp. 585-591 (1984).
4. Carlson, K. H. and Amy, G. L., The relative importance of HLR and EBCT in biofiltration, *Proceeding of American Water Works Association Water Quality Technology Conference*, New Orleans (1995).
5. Carlson, K. H. and Amy, G. L., Ozone and biofiltration optimization for multiple objective, *J. American Water Works Association*, **93**(1), pp. 88-98 (2001).
6. Carlson, K. H. and Amy, G. L., The formation of filter removable biodegradable organic matter during ozonation, *Ozone Science & Engineering*, **19**(2), pp. 179-199 (1997).
7. Carlson, K. H., Amy, G. L., Garside, J. and Blais, G., Ozone induced biodegradation and removal of NOM and ozonation by-products in biological filters, in *Alternative Biological filtration*, Collins M. R. and Graham N. J. D.(eds.), John Wiley & Sons, New York (1996).
8. Frias, J., Ribas, F. and Lucena, F., A method for the measurement of biodegradable organic carbon in waters, *Water Research*, **26**, pp. 255-258 (1992).
9. Goel, S., Hozalski, R. M. and Bouwer, E. J., Biodegradation of NOM: effect of NOM source and ozone dose, *Jour. American Water Works Association*, **87**(1), pp. 90-105 (1995).
10. Hama, T. and Handa, N., Molecular weight distribution and characterization of dissolved organic matter from lake waters, *Archiv für Hydrobiologie*, **90**, pp. 106-120 (1980).
11. Hozalski, R. M., Goel, S. and Bouwer, E. J., TOC removal in biological filters, *J. American Water Works Association*, **87**(12), p. 40 (1995).
12. Huck, P. M., Measurement of biodegradable organic matter and bacterial growth potential in drinking water, *J.*

- American Water Works Association*, **82**(7), pp. 78-86 (1990).
13. Huck, P. M., Zhang, S. and Price, M. L., BOM removal during biological treatment: a first-order model, *J. American Water Works Association*, **86**(6), p. 61 (1994).
 14. Joret, J. C. and Lévi, Y., Méthode rapide d'évaluation du carbone éliminable des eaux par voie biologique, *Tribune du Cebedeau*, **39**, pp. 3-9 (1986).
 15. Kahn, E., King, S., Babcock, R. W. and Stenstrom, M. K., Factors influencing biodegradable dissolved organic carbon measurement, *Environmental Engineering*, **125**(6), pp. 514-521 (1999).
 16. Kemmy, F. A., Fry, J. C. and Breach, R. A., Development and operational implementation of a modified and simplified method for determination of assimilable organic carbon(AOC) in drinking water, *Water Science & Technology*, **21**, pp. 155-159 (1989).
 17. Klevens, C. M., Natural organic matter characterization and treatability by biological activated carbon filtration, *Proceeding of ACS Symposium on Disinfection By-products and NOM Precursors*, Washington (1996).
 18. Langlas, B., Reckhow, D. A. and Brink, D. R., Practical application of ozone, In *Ozone in Water Treatment: Applications and Engineering*, Lewis Publisher, Chelsea, Mich. (1991).
 19. LeChevallier, M. W., Babcock, T. M. and Lee, R. G., Examination and characterization of distribution system biofilms, *Applied & Environmental Microbiology*, **53**(12), p. 2714 (1987).
 20. LeChevallier, M. W., Cawthon, C. D. and Lee, R. G., Inactivation of biofilm bacteria, *Applied & Environmental Microbiology*, **54**, p. 2492 (1988).
 21. Mogren, E. M., Scarpino, P., and Summers, R. S., Measurement of biodegradable dissolved organic carbon in drinking water, *Proceeding of American Water Works Association Annual Conference*, Cincinnati (1990).
 22. Ribas, F., Frias, J. and Lucena, F., A new dynamic method for the rapid determination of the biodegradable dissolved organic carbon in drinking water, *J. Applied Bacteriology*, **71**, pp. 371-378 (1991).
 23. Rice, E. W., Scarpino, P. V., Reasoner, D. J., Logsdon, G. S. and Wild, D. K., Correlation of coliform growth response with other water quality parameters, *J. American Water Works Association*, **83**(7), pp. 98-102 (1991).
 24. Servais, P., Billen, G. and Hascoët, M. C., Determination of the biodegradable fraction of dissolved organic matter in waters, *Water Research*, **21**(4), pp. 445-450 (1987).
 25. Servais, P., Anzil, A. and Ventresque, C., A simple method for the determination of biodegradable dissolved organic carbon in waters, *Applied & Environmental Microbiology*, **55**, pp. 2732-2734 (1989).
 26. Van der Kooij, D., Visser, A. and Hijnen, W. A. M., Determining the concentration of easily assimilable organic carbon in drinking water, *J. American Water Works Association*, **74**(10), pp. 540-545 (1982).
 27. Volk, C. J. and LeChevallier, M. W., Assessing biodegradable organic matter, *J. American Water Works Association*, **92**(5), pp. 64-76 (2000).
 28. Wang, J. Z. and Summers, R. S., Modeling of biofiltration of natural organic matter in drinking water treatment, *Proc. 1994 ASCE Environmental Engineering Conference*, Boulder (1994).
 29. Wang, J. Z., Summers, R. S. and Miltner, R. J., Biofiltration performance: part 1, relationship to biomass, *J. American Water Works Association*, **87**(12), p. 55 (1995).