

지표수 수질관리를 위한 적정 유기물질지표 선정

한대호 · 최지용*

Selection of the Optimum Organic Matter Index for Surface Water Quality Management

Dae Ho Han and Ji-Yong Choi

한국환경정책·평가연구원(Korea Environment Institute)

제출: 2011년 9월 9일 수정: 2011년 11월 25일 승인: 2011년 12월 8일

국문 요약

생분해성 물질 지표인 BOD 중심의 환경규제와 환경기초시설의 집중 투자로 인하여 전국적인 BOD 오염도는 지속적으로 개선되었다. 그러나 COD 등의 난분해성 물질은 주요 상수원을 포함하여 전국적으로 정체 또는 증가 추세를 보임에 따라 BOD 관리체계의 한계를 드러냄과 동시에 정체수역 증가와 같은 수체 특성변화의 반영 등 달라진 환경여건을 반영할 수 있는 지표의 필요성이 끊임없이 제기되고 있다. 따라서 본 논문에서는 수체의 변화된 유기물질 오염상태를 적절히 관리할 수 있는 유기물질 관리지표를 선정하였다. 지표전환의 항목으로 COD_{Cr}와 TOC를 검토해 본 결과 COD_{Cr}보다는 TOC를 향후 유기물질 관리지표로 선정함이 적절한 것으로 나타났다. TOC는 유기물질표로서 대표성, 국제적 통용성, 모니터링 프로그램의 용이성, 분석기술의 유무, 정밀도 및 정확도, 분석에 소요되는 시간, 운전의 용이성, 소독부산물의 관리, 기준정책과의 연계성, 외국사례여부, 국내적용사례, 수생태계와의 상관성 등에 대한 평가 결과 타당한 것으로 나타났다.

■ 주제어 ■ 수질관리, 난분해성유기물질, 수질지표, 총유기탄소

Abstract

Through concentrated investments in environmental regulations centered around BOD, which is a biodegradable matter index, and basic environmental infrastructures, national BOD pollution level has continuously improved. Nonetheless, limitations of BOD management system has become evident through nation-wide stagnation and/or increases of refractory organic matters, such as COD, at main drinking water sources, and the need for a new index, which can easily indicate different environmental conditions, has increased. Therefore, this study suggests a new organic management index for a proper management of surface water.

COD_{Cr} and TOC were examined as candidates for surface water quality management index, and it was found that TOC was more appropriate than COD_{Cr} as an organic matter management index. Through this study, it was found that TOC possesses following qualities: a more representative index;

* 교신저자 : jychoi@kei.re.kr

** 본 연구는 한국환경정책평가연구원 연구과제(과제번호 2010-066)에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다.

international acceptability; monitoring program is easier; better availability of analysis techniques; better accuracy and precision of analysis; less time required for analysis; ease of operation; management of disinfection byproducts; connection with present policies; existence of foreign and domestic application case studies; and correlation with water ecosystem

■ **Keywords** ■ Water Quality Management, Refractory Organic Matters, Water Quality Index, Total Organic Carbon

I. 서론

유기물질이란 보통 유기화합물(organic compounds)을 말하며 탄소가 주성분인 탄소화합물로 모든 생명체를 구성하는 가장 기본적인 화합물이다. 유기화합물은 탄소골격의 길이 또는 분기의 다양성에 제한이 없어 무기화합물에 비해 복잡한 구조를 가진다. 또한 탄소에 질소, 산소, 황, 인 등이 결합되어 생성하는 작용기도 다양하여 각각 독특한 특성을 가짐으로써 무한한 다양성을 보여준다. 그 다양성 때문에 유기화합물은 생물을 구성하는 요소로 필수불가결한 존재이다(Sawyer et al., 2003). 그러나 수중 유기물질은 탄수화물, 아미노산, 탄화수소, 지방산, 페놀, 자연 고분자, 콜로이드, 하수/폐수 입자, 토양 유기물, 식물 플랑크톤, 식물 구성 물질의 혼합물로서 수체에 다량 존재할 때, 박테리아 등과 같은 미생물의 급속한 증식을 돕는 한편 분해 과정에서 수중에 존재하는 산소를 소비시킨다. 이런 용존산소의 감소는 결국 물이 가지고 있는 자정능력을 악화시켜 수생생태계의 환경변화를 야기함과 동시에 악취와 부패, 미생물의 증식에 따른 수질오염을 유발하게 된다.

수체 내로 유입되는 유기물질은 인간의 경제·사회적 활동 등 인위적인 원인에 의한 것과 자연 발생적인 유기물질로 구분되며 그 중 인위적인 영향의 비중이 크다. 또한 유기물질은 미생물에 의한 분해 가능 여부에 따라 생분해성, 난분해성으로 나눌 수가 있다. 생분해성 유기물질은 주로 BOD(Biochemical Oxygen Demand)로 COD(Chemical Oxygen Demand), TOC(Total Organic Carbon) 등은 생분해성 유기물질을 포함한 난분해성 유기물질을 나타낼 수 있는 관리지표이다(환경부, 2008).

그동안 BOD 중심의 수질관리 정책으로 수체 내 생분해성 유기물질의 감소, 유지 추세가 뚜렷하나 최근에 COD, TOC로 대변되는 난분해성 유기물질은 과거에 비해서 증가추세가 나타나고 있어 이를 제어하기 위해서는 난분해성 유기물질에 대한 체계적인 관리

의 필요성이 제기되고 있다(국립환경과학원, 2011; 국립환경과학원, 2009; 환경부, 2008).

COD, TOC로 나타나는 난분해성 유기물질의 기원은 크게 수체 외부에서 기원하는 외부 생성 유기물질과 수체에 유입된 유기물질이 수체 내에서 조류의 증식 및 사멸, 미생물, 수생식물에 이용됨에 따라 발생하는 내부 생성유기물질로 구분할 수가 있다. 수계로 유입된 외부기원 유기물질은 수체 내의 조류, 수생식물에 의해 내부 생성유기물질로 전환되며, 침전에 의한 퇴적과 재용출이 일어난다. 특히 외부 및 내부생성 유기물질 중 일부가 휴믹화를 거쳐 난분해성 물질로 전환될 수 있으며 이런 유기물질은 BOD보다 COD, TOC 농도의 증가를 가져오게 된다. 증가된 난분해성 유기물질은 염소소독 정수과정에서의 소독부산물 생성의 증가를 가져와 지표수를 주요 취수원으로 하는 국내 염소소독 정수시스템을 통해 생산되는 정수의 위해성에 커다란 영향을 준다(손희중 외, 2004).

지금까지는 생분해성 유기물질에 의한 수질악화가 주요 관심대상이었으나 유입되는 난분해성유기물질이 증가하고 난분해성물질이 수체 내에서 분해, 변화, 침전, 결합되면서 지속적인 오염원 역할을 함에 따라 이에 대한 관심이 증가하게 되었다.

따라서 본 연구에서는 공공수역의 변화된 유기물질 오염상태를 적절히 관리할 수 있는 유기물질 관리지표를 선정하여 제시하고자 한다.

II. 연구방법

본 연구에서는 최근 난분해성물질 증가 등 수체 내의 특성변화를 적절하게 반영할 수 있는 유기물질 관리지표 선정을 위해서 측정의 용이성, 기존지표와의 연계성, 생태 지표로서의 활용성 등을 바탕으로 비교·분석을 통해 종합적인 결론을 제시하였다.

우선 유기물질의 측정 용이성 분석에서는 현재 유기물질지표로 사용되고 있는 BOD, COD, TOC 분석방법에 대한 특성과 장·단점을 비교하고 최근 나타나고 있는 수체의 특성변화 분석의 가장 적절한 방법이 무엇인가를 파악하였다.

기존지표와의 상관성 분석은 국가 수질측정망 자료를 분석하여 지표들의 상관성과 다른 항목들의 상관성을 비교함으로써 새로운 지표를 적용할 때 다른 항목에 미치는 영향 정도를 살펴보고 기존 지표와의 연계성 부문을 판단하였다. 상관성 분석에 앞서 유기물질 수질측정 자료는 대부분 낮은 농도에 많이 분포하는 right tail을 보이고 있어

정규분포를 나타내지 않는 특징이 파악되었다. 따라서 상관성 분석은 비모수 방법인 Spearman 상관분석법을 사용하여 분석하는데 그 이유는 첫째, 자료의 분포에 있어서 대칭분포보다는 왜도(skewness)를 가지며 이상점(outliers)이 자주 발생한다는 점. 둘째, 계절성을 가지며 항목 간에 상관성을 가진다는 점. 셋째, 측정 및 분석 여건에 따라 결측치가 발생하여 자료가 누락되거나 측정 수가 적어지는 경우가 발생한다는 점 때문이다(Lettenmaier, 1988). 따라서 비모수 방법은 최소한의 가정을 전제로 하므로 가정이 만족하지 않음으로써 발생할 수 있는 오류를 줄일 수 있고 수질측정값의 계절성, 결측값 발생의 문제에 대한 해결이 가능하여 적용하였다. 또한 분석 시 측정 자료가 많아질수록 통계적 유효성이 커져서 실제 상관성이 크지 않음에도 불구하고 상관성이 있는 것으로 나타나는 한계를 가지기 때문에(원태연과 정성원, 2010) 최적의 통계적 경향성을 가질 수 있는 기간(10년)을 정하여 자료를 새롭게 정리하고 통계 분석을 하였다. 상관성 분석에 사용된 자료는 국가수질측정망, 총량측정망, 하천·호소 대표 및 주요지점 측정 자료이며 분석 기간은 국가수질측정망 자료는 2000~2009(10년) 기간, 총량측정망 자료는 2007~2010(4년), 대표 및 주요지점은 2008~2010(3년) 기간 중에 측정된 자료를 이용하였다. 분석은 SAS 9.1과 SPSS 18.0을 이용하여 상호 비교, 분석하였다.

새로이 제안된 유기물질지표의 생태지표로서의 효용성은 외국 사례를 통해 정성적인 측면에서 검토하였다. 그리고 유기물질의 증가에 따른 상수원 영향 정도를 파악하기 위해 실제 가동 중인 정수장에서의 연구결과와 외국의 관련 법령 조사를 통해 상수원수에서의 유기물질 관리의 중요성을 검토함으로써 가정 적합한 평가지표를 판단하였다. 최종적으로 종합평가는 지표로서의 대표성, 분석방법의 적절성, 오염관리 적절성 등을 모두 고려한 종합평가를 통해 적절한 지표를 제시하였다.

III. 결과 및 고찰

1. 유기물질 특성 및 분석방법 비교

유기물질은 생물학적으로 분해 가능한 유기물질과 난분해성물질로 구분되며 난분해성물질의 경우에도 시간의 경과, 산화력 정도에 따라 분해가 일부 가능한 유기물질과 거의 분해가 불가능한 고난분해성 물질로 구분할 수가 있다. 각 유기물질 특성은 <표 1>과 같다(환경부, 2008).

표 1 유기물질의 특성 비교

구 분	총 유기물질		
	생분해성 물질	난분해성 물질	고난분해성 물질
특성 및 종류	- 미생물이 쉽게 분해 가능한 저분자 화합물	- 미생물의 분해가 쉽지 않고 오래 걸리는 고분자 화합물·미생물이 분해하고 남은 식물의 섬유조직(셀룰로오스, 리그닌 등)	
주요 배출원	- 생활하수, 축산, 분뇨 - 음식료품 폐수 등 유기성 폐수 - 조류 발생·성장 및 사멸 등	- 생활하수, 축산, 분뇨 - 산업폐수(섬유, 제지, 피혁, 제약, 석유화학, 금속) - 산림, 농경지, 도시지역 등의 비점오염원 - 생물학적 하·폐수처리 후 남은 유기물질 - 조류 발생·성장 및 사멸에 의한 생성물 등	
수질영향	- 산소고갈, 어류폐사 - 부패성 악취 발생 - 수돗물 염소소독 부산물 THM 생성	- 잠재적 산소 고갈 - 수돗물 냄새 및 맛 유발 - 부식질은 저분자 생분해성물질(BOD)보다 THM 2~3배 생성	
측정방법 및 적용	BOD	COD _{Mn}	COD _{Cr} /TOC
	- 유기물질의 20~40% 측정 · 세제, 농약 등 유기물질 측정 불가 - 분석시간: 5일	- 유기물질의 평균 30~60% 정도 측정 - BOD보다 0.5~2배 높음 - 분석시간: 1시간 이내	- 유기물질의 90%이상 측정 - BOD보다 2.5~5배 높음 - COD _{Cr} 분석시간: 3시간 이내 - TOC 분석시간: 30분 이내
	- 하천 환경기준, 배출허용기준, 총량제 목표수질	- 호소 환경기준, 배출허용기준	- COD _{Cr} 매립지 침출수 적용

현행 유기물질을 분석하기 위한 대표적인 방법으로서 BOD, COD, TOC가 있으며 BOD는 미생물을 이용하여 유기물질의 함량을 간접적으로 측정하고 COD의 경우에는 화학적 산화제의 소요량을 이용한 간접적인 측정, TOC의 경우에는 산화를 통한 최종 물질 생성물의 양을 측정한다. 따라서 분석방법에 따라 분석결과에 차이를 보이게 되는데 같은 시료를 분석방법에 따라 측정하였을 때는 보통 COD_{Cr} > COD_{Mn} > BOD₅ > TOC 또는 COD_{Cr} > COD_{Mn} > TOC > BOD₅ 순으로 값이 측정되는 것으로 알려져 있다(Metcalf & Eddy, 2003). 현행 국내 수계의 경우 COD_{Mn} > TOC > BOD₅ 의 경향을 나타내고 있으나 실제적으로 TOC의 경우에는 산소소비량이 아닌 탄소량으로 단위가 표시되기 때문에 수치만으로 비교해서는 안된다.

1) BOD

BOD는 수중에 존재하는 분해 가능한 유기물질의 간접적인 정량지표로 하천수, 호소수, 하수 및 폐수의 유기오염 강도를 주로 나타낸다. BOD는 유기성 오염물질의 잠재적 산소 소비 능력을 판별할 수 있고 미생물에 의한 유기오염물질 제거 정도 및 폐수처리 가능성을 탐지할 수 있다. 따라서 BOD는 하천, 호수 등 공공수역을 위한 모니터링 항목으로 대부분의 나라에서 채택하고 있으며 폐수처리에서 BOD 실험결과 값은 ① 유기물질의 생물학적 분해에 필요한 산소량을 구할 수 있으며 ② 하수처리시설 규모를 결정하는데 필요하고 ③ 처리공정의 처리효율을 측정하기 위해서 필요하며 ④ 처리된 방류수의 수질이 법적 규제를 충족시키는지의 여부를 판단하는 기준 등으로 널리 사용되고 있다(Metcalf & Eddy, 2003). 이런 많은 장점과 특성을 가진 BOD 측정은 5일이라는 시간이 소요되고 분석 대상수체에 포함된 성분에 따라 분석결과 값의 변동이 발생하며 독성물질이 함유된 폐수나 해수에는 적용할 수가 없는 단점이 있다.

이외에 BOD는 생물학적인 작용을 이용하기 때문에 수중의 식물성 플랑크톤 및 질산화박테리아의 작용, 생분해성 및 생물독성의 정도에 따라 측정치의 변동이 심하고 또한 난분해성 유기물질의 측정이 불가능하여 수중 유기오염물질을 대표하기에는 일부 한계점을 가지고 있다(국립환경과학원, 2011).

2) COD

COD는 수중에 존재하는 피산화물의 간접적인 오염 정량지표로 미생물에 의해 분해 불가능한 유기물질의 분석이 가능하여 BOD 시험의 보완효과를 가지고 산업폐수, 호소수, 해수의 유기오염강도 측정에 이용될 수 있다. COD의 가장 큰 장점은 크롬법의 경우에는 산화력이 매우 강하여 대부분의 유기물질의 양을 정확하게 분석할 수 있다는 점이며 분석시간도 BOD에 비해 매우 짧다는 장점을 가진다. COD는 수중의 환원성 물질, 금속이온, 아황산이온 등에 영향을 받기 때문에 수중 오염물질의 성상에 따라 측정값의 오차가 발생할 수 있는 단점을 가진다(국립환경과학원, 2011).

(1) CODMn

국내 수질환경기준인 CODMn법은 COD_{Cr}법에 비해 측정시간이 빠르고, 실험이 간단하며 측정 후 폐기물 중 오염물질이 환경에 비교적 적게 영향을 주는 방법(COD_{Cr}법

은 사용 시약 중에 크롬, 수은 등이 유출됨)이다. 또한 기존의 하천, 호소 등에서 환경 기준으로 장기간 사용되어왔기 때문에 과거 수질과의 연계성 파악이 용이하고 유기물질 오염정도의 대표성을 충분히 나타내는 것으로 입증된 상태이다. 그러나 과거에는 유기오염물질의 성상이 난분해성 유기물질의 비중이 상대적으로 적어 CODMn법의 문제점이 제기되지 않았으나 최근 들어 하수 및 폐수의 고도처리가 보편화되면서 난분해성 유기물질의 부하가 상대적으로 커져 CODMn법으로 측정할 수 없는 유기물질에 대한 문제점이 부각되었다. CODMn법의 경우 COD_{Cr}법에 비해 분해율, 재현성, 범용성 등이 다소 떨어진다고 지적되고 있다(국립환경과학원, 2011).

(2) COD_{Cr}

COD_{Cr}법의 가장 큰 특징은 유기화합물에 대해서 90~100% 정도의 산화력을 가지고 있어 정확한 유기물질 오염도를 판단할 수 있다는 점이다. 또한 대부분의 국가에서 COD_{Cr}법을 공인법으로 사용하고 있고 국제학술교류 자료로 활용되고 있어 범용성에서 CODMn법보다 우수하다(CODMn법의 경우 우리나라와 일본 등 몇 개의 국가에서 측정되고 있음).

COD_{Cr}법의 경우 고농도인 경우에는 그 재현성이 매우 탁월하지만 저농도인 경우에는 그 재현도가 다소 낮아지는 특징이 있어 공공수역 등 측정 농도 값이 낮은 곳에서의 적용은 쉽지 않다. 이외에 COD_{Cr}법의 경우 CODMn법에 비해 실험방법이 다소 복잡하고 시약 사용량이 많으며 실험 소요시간이 4시간 정도 소요됨으로써 CODMn법에 비해 상대적으로 인력 및 경비가 추가 소요되고 실험과정에서 나오는 황산수은, 크롬 등으로 인한 이차적인 환경오염유발 가능성이 상대적으로 높다. 또한 COD_{Cr}법을 환경 기준으로 선정할 경우 시료특성에 따른 산화율 차이로 기존 망간법의 측정자료와의 연계성 단절 및 수질환경기준의 대폭적인 재조정으로 큰 혼란의 야기가 제기되기도 한다(국립환경과학원, 2011).

3) TOC

TOC는 수용액 시료의 총유기탄소를 측정하는데 이용되며 BOD, COD와 다르게 기기를 이용한다는 특성이 있다. TOC의 가장 큰 장점은 분석시간이 BOD, COD 보다 매우 짧다는데 있으며 기기 분석을 함으로써 측정시 발생하는 오차가 BOD와 COD에 비해 매우 적다. 또한 BOD, COD와 다르게 유기물질의 총량을 측정함으로써 근본적인

유기물질관리가 이루어질 수가 있으며 난분해성물질 측정이 가능하다. 그러나 TOC의 경우 기기를 사용하다 보니 기기를 마련하는데 초기 도입 비용이 필요하며 기기분석방법에 따른 시료성상 특성에 영향을 받는 단점을 가진다. TOC는 유기오염지표의 대표성, 분석 소요시간, 연속성, 정밀도 측면에서 다른 항목에 비해 적합하지만 각종 수질 관련법과의 연계성이 현재까지는 마련되어 있지 않았고 실측자료 및 오염원단위 관련 자료가 부족하여 도입 시 개선의 여지를 가지고 있다.

TOC의 장점은 BOD, COD보다 신속하게 측정가능하며, 측정 오차가 상대적으로 적고 자동화하기가 쉽다는 것이다. Standard Methods 측정분석에 따르면 BOD 10~20%, COD 7~10%, TOC 5%의 오차를 가지며(APHA, 1998) TOC분석의 정확도가 높아 소수점 이하 분석이 가능하여 현행 소수점에 따라 달성 정도를 판별하는 평가방법 개선이 이루어질 수가 있다(국립환경과학원, 2011). 이와 함께 TOC 분석은 기존의 수 분석법에서 발생하는 중금속에 의한 2차 오염이 없다는 가장 큰 장점을 가진다.

표 2 유기물질 분석법의 특성 비교

구 분	BOD	COD		TOC
		COD _{Mn}	COD _{Cr}	
개 요	하천, 호수수를 20℃에서 5일간 저장하여 두었을 때 수중에 있는 호기성 미생물의 증식과 호흡작용에 의해서 소비되는 용존산소의 양을 측정	산화제로 KMnO ₄ 를 이용하여 유기물질을 산화시키며 이 때 소요되는 산화제의 양을 산소요구량으로 환산하여 측정	산화제로 K ₂ Cr ₂ O ₇ 을 이용하여 유기물질을 산화시키며, 이 때 소요된 산화제의 양을 산소요구량으로 환산하여 측정	수중에 함유된 유기물질을 고온/UV에서 완전히 산화 반응시켜 발생하는 이산화탄소량을 분석 장치로 측정하여 함유탄소량을 측정
측정방법	BOD병에 BOD용 희석수 또는 BOD용 식중희석수를 사용하여 채우고 적당량의 시료를 넣고 완전히 채운 다음 초기 DO를 측정하고 20℃ 어두운 곳에서 5일간 배양 후 DO를 측정하여 이 두 개 값의 차이를 계산함	시료에 산화제와 황산용액을 넣고 수증조에서 30분간 반응시킨 후 수산화나트륨을 첨가하고 과망간산칼륨으로 역적정하여 산화에 소비된 산화제의 양을 계산하여 산소의 양으로 환산	시료에 산화제와 황산을 넣고 2시간 가열 반응시킨 후 황산제일철암모늄으로 적정하고 산화에 소비된 산화제의 양을 계산하여 산소량으로 환산	시료를 무기탄소 발생장치에 유입 CO ₂ 를 발생시켜 무기탄소를 측정후, 무기탄소 발생장치를 통과시키지 않고 측정된 총탄소에서 무기탄소를 빼준 값으로 유기탄소 측정
특 징	- 측정결과 값이 나오는데 오랜 시간이 걸림 - 미생물에 영향을 주는 성분이 들어있을 경우 결과값의 신뢰도가 감소함 - 방해물에 영향을 많이 받음	- 측정이 간단 - 산화율 낮음 - 측정 조건에 따라 재현성 불량	- COD _{Mn} 법 보다 측정기에 장시간 소요 - 측정후 실험 폐액에 유해 물질 존재 - 저농도에서 재현성 불량 - 산화율이 매우 높음	- 저농도 재현성이 우수 - 짧은 분석시간 - 다량의 시료를 동시에 분석가능 - 자동화로 인건비 절감 - 다양한 오염물질, 난분해성에 대응이 높음

구 분	BOD	COD		TOC
		COD _{Mn}	COD _{Cr}	
	- 미생물이 분해하지 못하는 시료의 경우에는 측정이 불가능함			- 생물학적 분해 가능한 유기물의 정량화가 어려움 - 기기비용이 고가
측정기간	5 ~ 20일	40 ~ 50 분	3 ~ 4 시간	5 ~ 20분
사용국가	한국, 일본, 영국, 호주 등	한국, 일본 등	미국, 유럽 등	미국, 독일, 스위스, 캐나다, 대만 등

2. 항목간 상관성 분석

유기물질이 다른 항목에 미치는 영향 정도를 살펴보기 위해 공공수역의 수질 현황 파악과 주요 정책사업의 효과분석을 위해서 하천과 호소를 대상으로 운영되고 있는 “국가수질측정망”(TOC자료 제공하지 않음), 오염총량관리 시행대상 지역의 총량제 이행사항 평가를 위해서 운영되는 “총량측정망”(TOC자료 제공, 하천), 그리고 국가수질 측정망 중 하천 권역대표·주요지점, 호소주요지점(TOC자료 제공)에 운영되는 측정망으로 구분하여 상관성 분석한 결과는 다음과 같다.

1) 국가수질측정망 분석 결과

국가수질측정망 자료의 경우에는 현재 TOC 측정값이 제공되지 않고 있다. 그러나 1989년부터 정기적인 측정이 이루어지고 있어 장기적인 수질경향성 및 항목간의 상관성을 살펴볼 수 있는 중요한 자료이다. <표 3>은 2000~2009(10년)에 측정된 9개 항목, 89,393개 측정 자료에 대한 분석결과이다. BOD와 COD는 유효수준($p \leq 0.05$) 내에서 상관계수 0.797의 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났으며 SS, TP, PO₄-P, Chl-a 모두 BOD보다 COD와 상관성이 더 있는 것으로 나타났다.

이는 외부 및 내부 원인에 의해서 유입되거나 생성된 SS, TP, Chl-a는 BOD 보다는 COD를 증가시키는 물질이 더 많이 유입, 생성될 가능성이 높다는 것을 나타낸다. 이는 TP의 증가로 인한 Chl-a의 성장 가능성 또는 Chl-a 증가에 따른 내부생성 유기물질 증가 가능성을 BOD보다는 COD가 더 잘 평가할 수 있다고 할 수 있다. 따라서 수체 내로 들어오는 외부유입 오염원, 조류성장 등의 제어를 위해서는 BOD로 나타나는 생

분해성 유기물질 외 COD로 측정되는 난분해성 유기물질을 관리할 필요가 있다는 것을 나타낸다.

표 3 국가수질측정망 상관성 분석 결과

항목	pH	DO	BOD	COD	SS	TN	TP	PO ₄ -P	Chl-a
pH	1	0.230	0.082	0.085	0.049	0.028	0.008	-0.021	0.184
	89,393	89,283	89,390	89,392	89,337	89,391	88,665	58,198	68,220
DO		1	-0.097	-0.182	-0.252	0.00531	-0.154	-0.125	-0.073
BOD			1	0.797	0.568	0.486	0.646	0.551	0.514
COD				1	0.679	0.461	0.703	0.588	0.579
SS					1	0.356	0.596	0.452	0.514
TN						1	0.649	0.649	0.191
TP							1	0.860	0.403
PO ₄ -P								1	0.257

2) 수질오염총량측정망 분석 결과

총량자료 15,320개에 대한 자료를 분석한 결과 유효수준 내에서 BOD(0.83), COD(0.92) 모두 TOC와 높은 상관성을 가지는 것으로 나타났다. 특히 COD가 TOC에 더 높은 상관성을 가지는 것으로 나타나 생분해성물질을 제외한 난분해성 유기물질을 측정할 지표로 TOC의 적용가능성을 보여준다. 또한 TP와도 상관성이 높고(0.79), SS(0.66)와도 경향성을 가지는 것으로 나타나 국가측정망 자료와 유사한 경향을 보였다. 따라서 TOC가 COD를 대체할 수 있다는 것을 보여준다.

표 4 수질오염총량측정망 상관성 분석 결과

항목	pH	DO	BOD	COD	SS	TN	TP	TOC	유량
pH	1.00	0.21	-0.05	-0.07	-0.06	-0.17	-0.15	-0.1	0.04
	15,320	15,320	15,318	15,320	15,320	15,320	15,320	15,320	15,152
DO		1.00	-0.14	-0.22	-0.34	0.04	-0.24	-0.22	-0.2
BOD			1.00	0.88	0.67	0.57	0.78	0.83	0.05
COD				1.00	0.72	0.56	0.82	0.92	0.11
SS					1.00	0.36	0.68	0.66	0.33
TN						1.00	0.67	0.54	-0.01
TP							1.00	0.79	0.12
TOC								1.00	0.07

3) 하천 대표지점 및 주요지점 측정망 분석 결과

<표 5>는 2010년 하천 수계 대표지점 및 주요지점에서 측정된 수질자료에 대한 상관성 분석결과이다. 분석결과 TOC는 BOD, COD와 매우 상관성이 높은 것으로 나타났으며 BOD보다는 COD가 TOC에 더 상관성이 높은 것으로 나타났다. 다른 측정망 결과와도 동일한 것으로 파악되었다.

표 5 대표 및 주요지점 측정망 상관성 분석 결과

항목	TOC	BOD	COD	SS	TP	Chl-a
TOC	1.00	0.73	0.81	0.58	0.70	0.49
	10,204	11,418	11,422	10,204	11,377	8,658
BOD		1.00	0.82	0.63	0.72	0.64
COD			1.00	0.69	0.76	0.61
SS				1.00	0.73	0.58
TP					1.00	0.52

4) 주요 호소지점 측정망 분석 결과

2008~2010년간 TOC 측정이 이루어진 주요 호소 2,165개 측정값에 대한 항목간의 비교 결과, 하천의 측정결과와 달리 BOD, COD 항목간의 상관성은 높은 반면에 TOC와는 상관성이 낮은 것으로 나타났다. 이런 현상은 호소 내 조류, 탁도의 유무와 TOC 분석 시 전처리에 따라 편차가 크게 발생한 것으로 판단되나 실제 측정 자료에 대한 명확한 현장현황이 제공되지 않아 그 원인을 정확하게 판단하기 어려운 문제점이 있었다. 또한 현재 측정된 호소자료의 경우 3년간 한 달에 한 번을 측정한 결과이기에 신뢰성을 나타내기에는 축적된 자료가 부족하다. 또한 측정된 호소의 경우 대부분 수질이 양호하여 낮은 농도에 집중되어 있으며 수질 값의 이상치가 많이 존재하여 상관성이 낮아지는 현상이 있는 것으로 판단된다.

표 6 호소 측정항 상관성 분석 결과

항목	pH	TOC	BOD	COD	SS	TN	TP	PO ₄ -P	Chl-a
pH	1.00	0.19	0.35	0.28	0.29	0.23	0.27	0.00	0.45
	2,165	2,165	2,165	2,165	2,165	2,165	2,165	2,165	2,165
TOC		1.00	0.35	0.35	0.27	0.21	0.26	0.05	0.28
BOD			1.00	0.77	0.65	0.15	0.59	0.30	0.67
COD				1.00	0.70	0.13	0.67	0.36	0.59
SS					1.00	0.27	0.73	0.38	0.58
TN						1.00	0.39	0.30	0.18
TP							1.00	0.55	0.49
PO ₄ -P								1.00	0.19

3. 생태관리지표 적용성

수체 내 유기물질은 여러 과정을 거쳐 생태계 순환을 하며 다양한 환경에 영향을 받고 있다. 최근 기후변화, 토지이용의 확대, 도시화와 산업화 등의 영향으로 수체 내 난분해성 유기물질이 증가하고 있으나, 기존의 이화학적 지표인 BOD, COD의 단편적인 측정결과만으로는 이에 대한 정확한 원인을 규명하는 데 어려움이 있다(국립환경과학원, 2009). 또한 난분해성물질 측정이 가능한 COD_C 측정분석방법에 있어서 크롬, 수은 등의 시약을 사용하게 되어 중금속 폐수 발생에 대한 부담 및 2차 오염 유발 가능성이 증대되고 인간을 포함한 수생태계에 치명적인 영향을 미칠 수 있다. 이는 TOC 사용국가인 스위스, 독일의 경우 가장 큰 고려사항으로 조사되었다(국립환경과학원, 2011). 수생태계와 관련하여, 독일의 경우 <표 7>과 같이 수생생물이 살 수 있는 환경을 조성하기 위한 화학적 조건으로서 기존의 BOD 대신 TOC를 측정하고 있는 상황이다(UBA, 2001). 따라서 향후 수생태계의 건강성 확보가 결국 사람의 건강의 지속가능성을 보장할 수 있다는 측면에서 이화학적 지표와 수생태계 지표가 서로 연계성을 가질 수 있는 지표 선정이 필수적이다. 이런 연계성을 가질 수 있는 유기물질 지표로는 TOC가 가장 가능성이 높은 것으로 파악되었다.

표 7 독일의 수생태계 및 물리화학적 평가 기준

수질 등급	유기오염도	오수생물계열	오수생물지수1)	BOD (mg/L)	TOC2) (C mg/L)	DO최소 (mg/L)
I	청정 내지 극경미 오염	빈부수성	1.0~1.5	1	≤2	>8
I-II	경미한 오염	반-β부수성 천이구역	1.5~1.8	1~2	≤3	>8
II	보통 오염	β-중부수성	1.8~2.3	2~6	≤5	>6
II-III	상당한 오염	β-α중부수성 천이구역	2.3~2.7	5~10	≤10	>5
III	강한 오염	α-중부수성	2.7~3.2	7~13	≤20	>4
III-IV	매우 강한 오염	α-중부수성 내지 강부수성 천이구역	3.2~3.5	10~20	≤40	>2
IV	지나친 오염	강부수성	3.5~4.0	15이상	>40	≤2

주: 1) 오수생물지수(saprobic index)는 DIN 38410의 규정에 의거하여 산출함.

2) 독일은 2000년 이전까지는 BOD가 분류항목에 들어 있었으나 그 이후는 TOC로 대체됨.

자료: Umwelt Bundes Amt(2001), *Environmental policy, water resources management in germany.*

4. 먹는 물 위해성지표 적용성

하천, 호소수를 상수원으로 이용하는 우리나라 현실을 고려할 때, 소독부산물 관리 등 안전적 정수관리를 위해서는 상수원수에 대하여 유기물질 관리가 필요하다. 미국, 일본, 대만, 캐나다 등도 소독부산물의 전구물질 관리를 위해서 상수원수 관리기준으로 TOC를 이용하고 있다. 특히 대만의 상수원수 TOC 도입을 위한 연구(Chang, et al., 2005)에 따르면 염소소독을 40분간 접촉했을 경우, TOC 3mg/L에서 4mg/L 증가시 THM 농도가 2배로 증가하는 것으로 나타나 유입수 내 TOC 농도의 감소는 궁극적으로 정수처리장에서의 건강의 안전성을 높일 수 있는 방법이다.

2000~2009년까지 낙동강 수계 내 M, H, D 정수처리장의 각 처리 단계에서 측정된 DOC의 농도는 <표 8>과 같다. 정수장의 처리효율 평가는 통상 DOC 값을 사용하는데 이는 원수와 달리 정수처리 과정의 물의 경우 농도가 일정하고 분해율이 낮아 분석이 되지 않아서 기기에 의한 오류가 생길 가능성이 낮기 때문이다. 처리장별 DOC의 평균

제거율은 M정수장 49.0%, H정수장 46.9%, D정수장 56.6%로 높지 않은 DOC 제거율을 보였다(부산광역시 수질연구소, 2009).

표 8 정수공정에 따른 DOC 농도 변화

연도	M정수장				H정수장				D정수장			
	원수	전염소	정수	제거율 (%)	원수	전염소	정수	제거율 (%)	원수	전염소	정수	제거율 (%)
	mg/L				mg/L				mg/L			
2000	2.53	2.65	1.38	45.5	2.92	3.25	1.85	36.6	2.80	3.11	1.20	57.1
2001	2.80	2.80	1.50	46.4	3.00	3.50	1.80	40.0	3.10	3.40	1.50	51.6
2002	2.51	2.63	1.08	57.0	3.17	3.28	1.68	47.0	3.13	3.40	1.26	59.7
2003	1.98	1.98	0.96	51.5	2.60	2.75	1.40	46.2	2.58	2.73	1.03	60.1
2004	2.36	2.68	1.27	46.2	2.95	3.18	1.90	35.6	3.02	3.28	1.51	50.0
2006	2.70	2.76	1.41	47.8	3.11	3.29	1.48	52.4	3.19	3.53	1.40	56.1
2007	2.87	3.08	1.44	49.8	3.03	3.41	1.33	56.1	3.17	3.34	1.39	56.2
2008	2.98	3.06	1.38	53.7	2.94	3.18	1.28	56.5	2.98	3.15	1.15	61.4
2009	2.94	3.22	1.66	43.5	3.55	3.79	1.70	52.1	3.41	3.58	1.47	56.9
평균	2.63	2.76	1.32	49.0	3.03	3.29	1.63	46.9	3.04	3.28	1.30	56.6

자료: 부산광역시 수질연구소(2009), 「상수도연구보」 Vol.11.

특히, 세 처리장 모두 전염소, 전오존, 침전, 여과, 후오존, 입성탄의 공정(고도처리)을 거쳐 정수를 처리함에도 불구하고 한 번 유입된 DOC는 각 처리 공정을 거쳐도 그 제거율이 높지 않았다. 특히 염소 처리 후의 DOC 농도는 세 곳의 정수장 모두에서 증가함을 알 수 있는데 처리장별로 원수의 DOC보다 M정수장 5%, H정수장 9%, D정수장 8%가 증가하였다. 이는 DOC와 염소 이온이 반응하여 소독부산물 중 하나인 THMs 생성에 의한 것임을 <표 9>를 통해 알 수 있다. 더욱이 THMs의 경우, 정수처리 공정을 거칠수록 그 농도가 오히려 증가하는 것을 보이므로 THMs의 생성을 미연에 방지하기 위해서는 원수 내 TOC 관리가 매우 중요하다.

표 9 정수공정에 따른 THMs 농도 변화

연도	M정수장				H정수장				D정수장			
	원수	전염소	정수	제거율	원수	전염소	정수	제거율	원수	전염소	정수	제거율
	mg/L			(%)	mg/L			(%)	mg/L			(%)
2000	-	0.006	0.006	0.0	-	0.021	0.027	-28.6	-	0.023	0.015	34.8
2001	-	0.006	0.007	-16.7	-	0.026	0.027	-3.9	-	0.024	0.014	41.7
2002	-	0.004	0.006	-50.0	-	0.022	0.029	-31.8	-	0.022	0.023	-4.6
2003	-	0.004	0.009	-125.0	-	0.018	0.023	-27.8	-	0.024	0.024	0.0
2004	-	0.003	0.007	-133.3	-	0.026	0.024	7.7	-	0.026	0.017	34.6
2006	-	0.015	0.020	-33.3	-	0.024	0.028	-16.7	-	0.030	0.031	-3.3
2007	-	0.018	0.023	-27.8	-	0.034	0.034	0.0	-	0.029	0.030	-3.5
2008	-	0.015	0.022	-46.7	-	0.033	0.034	-3.0	-	0.032	0.033	-3.1
2009	-	0.010	0.016	-60.0	-	0.032	0.036	-12.5	-	0.031	0.032	-3.2
평균	-	0.009	0.013	-54.8	-	0.026	0.029	-13.0	-	0.027	0.024	10.4

자료: 부산광역시 수질연구소(2009), 「상수도연구보」 Vol.11.

대부분의 국가에서는 <표 10>과 같이 정수처리에서 발생될 수 있는 소독부산물의 예방을 위해서 원수 내 TOC 기준을 마련하고 있다. TOC의 경우 현행 BOD 및 CODMn가 다르게 자연유기물질에서부터 부유물질, 콜로이드, 용존 유기물질 등 유기물질의 총량을 나타낼 수 있기 때문에 기존의 오염원 관리 외에 먹는물의 관리가 동시에 종합적으로 이루어지기 위해서는 TOC로의 지표선정이 바람직하다.

표 10 소독부산물 제거기준

원수 TOC (mg/L)	원수의 알카리도(mg/L CaCO ₃)			
	0~60	61~120	121~	
미국 ¹⁾	2.0~4.0	35.0%	25.0%	15.0%
	4.1~8.0	45.0%	35.0%	25.0%
	8.1~	50.0%	40.0%	30.0%
일본 ²⁾	3	-	-	-
대만 ³⁾	2	-	-	-
캐나다 ⁴⁾	4	-	-	-

자료: 1) USEPA(1998), *Disinfectants and Disinfection Byproducts: Final Rule*.

2) MHLW(2010), *Drinking Water Quality Standards in Japan*.

3) Chang et al.(2005), *Evaluation of Source Water Quality Standards for Total Coliforms, TOC, and COD in Taiwan*.

4) MWLAP(1999), *Ambient Water Quality Criteria for Organic Carbon*.

5 공공수역 유기물질지표 선정

1) 대상지표의 비교

현행 BOD의 경우 공공수역의 목표기준으로 설정되어 있고 수질오염총량제도, 규제 기준 등 모든 수질정책에서 사용되고 있어 향후에도 계속 영향을 줄 수밖에 없다. BOD는 생분해성의 유기물질의 양을 파악하고 유기물질의 원인을 규명하기 위해서는 필수적인 항목이며 오랜 기간 자료가 축적되어 있어 향후에도 그 필요성이 상실되기 전까지는 유지가 되는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 이와 다르게 난분해성 유기물질을 평가할 수 있는 항목으로 판단되는 CODMn의 경우 하천과 호소 기준 모두에 적용되고 있음에도 불구하고 기준으로서의 역할이 크지 않다. 이는 CODMn가 호소의 평가기준임에도 불구하고 호소의 특성과 오염상황을 정확하게 평가하지 못하고 있는 것으로 파악되어 기준으로서의 타당성과 적정성에 많은 논란이 지속되고 있다.

향후 BOD 외 난분해성 물질을 평가하고 제어하기 위한 지표로서 TOC, COD_{Cr}을 선정하고 TOC, COD_{Cr}으로의 변경에 따른 장·단점을 나타내면 다음 <표 11>와 같다.

COD_{Cr}의 가장 큰 장점은 유기물질 분해도가 높아 재현성이 우수하다는 점과, 배출수에 대한 자료가 많고 관리가 용이하다는 점이며 단점은 크롬 및 수은과 같은 중금속이 발생된다는 점과 낮은 농도에서 오차범위가 커서 공공수역 내 수질측정이 어렵다는 점이다. 이에 반해 TOC의 경우에는 측정의 신속성이 크고 자동화가 용이하며 유기물질의 총량을 측정할 수 있다는 점이 있으나 전처리 및 기기분석 방식에 따른 차이발생과 고가의 장비 비용이 단점으로 지적되고 있다(국립환경과학원, 2011).

표 11 유기물질 지표 변경에 따른 장단점 비교

구 분	COD _{Cr} 사용	TOC 사용
검토조건	- BOD는 유지	- BOD는 유지, CODMn는 일정기간 유지
장 점	- BOD의 한계를 보완할 수 있는 난분해성 유기물질 측정가능 - 유기물질 분해도가 높아 재현성 우수함 - 유기물질 총량을 정확하게 표현가능 - 다양한 처리공법 존재 - 처리시설 설계 및 효율 검토에 매우 효율적임	- BOD, COD에 비해 난분해성 유기물 측정에 효과적이고 정확함 - 측정의 신속성으로 인해 오염원에 대한 통제와 방지시설 운영관리가 가능 - 자동화가 용이 - 상수도 소독부산물 전구물질의 양 측정 및 관리가 가능함

지표수 수질관리를 위한 적정 유기물질지표 선정

구 분	COD _{Cr} 사용	TOC 사용
	<ul style="list-style-type: none"> - 배출수에 대한 자료가 많고 관리가 용이함 	<ul style="list-style-type: none"> - 수돗물 원수의 질을 평가할 수 있음 - 하천과 호소의 구별 없이 사용가능 - 사고 등 응급대처 능력이 뛰어나고 실시간 모니터링 가능 - 내부생성 유기물질의 측정가능 - 유기물질의 전체량 관리가 가능함
단 점	<ul style="list-style-type: none"> - 전국적인 측정망 자료와 축적 자료가 적음 - 시료성상에 따라 분석치 상이함 - 크롬 및 수은과 같은 중금속 발생 (2차 오염발생 우려) - 수질모델링 변형 필요 - 낮은 농도에서 오차범위가 큼 - 법적, 제도적 마련 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> - 배출경로별 기초자료 미흡, 연속적인 자료 축적 필요 - 법적, 제도적 마련 미흡 - 수질 모델링 변형 필요 - 분석기기가 고가 - 분석운영비의 지속적 필요 및 분석 전문인력 확보가 필요 - 부유물질에 의한 오차발생

2) 종합평가

난분해성 유기물질 측정이 가능한 TOC와 COD_{Cr} 항목에 대한 수질기준인 대표성, 오염관리측면, 분석기술 측면을 기준으로 국내외 논문, 보고서 등 30여 편의 다양한 문헌 비교와 유기물질 관련 전문가, 분석자, 관리자, 기기판매자 등 20여 명의 의견 수렴을 토대로 두 가지 지표에 대한 우열을 비교한 결과 <표 12>에서 나타났듯이 유기물질로서의 대표성은 두 항목 모두 높은 것으로 조사되었다. 물리·화학적 측면에서 COD_{Cr}이 유해물질을 많이 배출하여 기준으로서의 대표성이 낮으며 생태학적 측면에서는 문헌과 의견수렴 결과 TOC가 더 대표성을 가지고 있는 것으로 나타났다. 자동측정가능성, 소독부산물연계관리 등에서 문헌 및 의견 모두 TOC가 더 우수하다는 의견이 많았으며 배출원 등 오염원 관리에서는 COD_{Cr}이 더 높은 점수를 받았다. 분석기법에 대해서는 정확성, 소요시간, 용이성 등 모든 부분에서 TOC가 문헌자료와 의견이 높았다. 따라서 TOC를 지표항목으로 선정하는 것이 더 타당한 것으로 조사되었다. 본 평가 방법은 의견 제시자의 주관적인 성향이 강하기 때문에 Chang et al.(2005)이 대만의 유기물질 지표 선정을 위해 수행한 방식을 근거로 항목과 배점을 동일하게 설정하여 의견들을 정량화시켰다.

표 12 수질환경기준의 유기물 지표로서의 대표성 평가

구분	수질기준으로서 대표성			오염원 관리			분석기법			계
	유기물질	물리·화학적	생태학적	모니터링	처리기술	소독부산물연계	정확성	소요시간	용이성	
COD _{Cr}	3	2	2	2	4	2	2	2	2	21
TOC	4	3	4	4	3	4	4	4	4	34

주: 1) 낮음, 2) 조금 낮음, 3) 높음, 4) 매우 높음

한편 향후 수질오염총량관리제 장래 대상 항목 개선 및 확대(국립환경과학원, 2010) 등을 고려해볼 때 <표 13>과 같이 유기물질 대표항목으로의 관리 여건 분석결과 다른 유기물질보다 TOC가 가장 여건이 좋은 것으로 나타났다.

표 13 유기물질 대표항목의 관리 여건 분석

구분	항목	BOD ₅	COD		TOC
			CODMn	COD _{Cr}	
분석 여건	난분해성 유기물질 측정 가능성	×	△	○	○
	분석시간	×	△	△	○
	분석오차	×	△	△	○
	재현성	×	△	△	○
총량제 시행 여건	법적·제도적 기반	○	○	×	×
	자료 축적도 및 연계성	○	○	×	×
	원단위	○	×	×	×
	부하량 할당	○	○	○	○
	모델링	○	△	×	△
	향후 물관리정책과의 연계성	×	×	△	○
합계		30	32	26	36

주: ○) 양호 5점, △) 보통 3점, ×) 미흡 1점

자료: 국립환경과학원(2010), 「금강수계 제3단계 오염총량관리 대상물질(안) 설정」.

또한 TOC의 경우 DO의 소비율을 측정하는 것이 아닌 유기물질의 총량을 측정함에 따라서 탄소순환에 따른 유기물질의 변화를 빠르게 실시간으로 측정할 수 있음에 따라

향후 기후변화에 따른 유기물질의 변화를 감시할 수 있는 항목으로의 사용이 가능하다. 따라서 TOC 및 COD_{Cr} 적용시 발생하는 문제점 분석과 국내외 문헌 그리고 전문가의 의견을 종합해볼 때 공공수역의 난분해성 유기물질 관리지표로 적합한 지표는 TOC인 것으로 나타났다.

IV. 결론

국내에서 유기물질 기준은 1963년 공해안전기준 내 방류수 및 폐수 수질기준으로 BOD가 도입되고 1978년 수질환경기준 설정에 따라 BOD, COD 기준으로 확대 후 현재까지 적용되고 있으나 실제 환경 여건을 제대로 평가할 수 있는가에 대해서는 논란이 지속되어왔다. 특히 최근 기후변화감시 여부, 실시간 모니터링 가능성, 수생태계의 관리지표 역할 수행, 크롬·수은 등 유해화학물질 발생 및 2차 오염 발생 여부, 유기물질의 총량 측정·평가·관리 가능성, 정확도와 정밀도의 우수성, 분석의 용이함, 음용수의 소독부산물 원인물질 관리 가능성 등에 대한 관리지표의 가능성 여부를 판단할 수 있는 유기물질 지표가 필요하다.

지표로서의 대표성, 국제적 통용성, 모니터링 프로그램의 용이성, 분석기술의 유무, 정밀도 및 정확도, 분석에 소요되는 시간, 운전의 용이성, 기존정책과의 연계성, 외국사례 여부, 국내적용사례, 오염원단위 연구 등에 대한 평가 및 유기물질 분석방법의 실제 수체특성 반영여부, 항목간의 상관성 분석결과, 생태관리지표 및 먹는 물 위해성지표 적용성에 대한 종합적인 판단을 통해 TOC를 유기물질 관리지표로 선정하는 것에 대한 타당성이 있음이 나타났다.

유기물질 지표항목으로 TOC는 ① 분석시 크롬, 수은 등 유해화학물질의 발생이 없음(공공수역의 치명적인 오염 유발) ② 유기물질의 총량을 측정할 수 있음에 따라 전체적인 관리가 용이 ③ 수생태계 기준의 보완적 항목으로 화학적 평가 ④ 신속한 모니터링 및 자료 제공 ⑤ 정확도와 정밀도가 매우 높음 ⑥ 음용수의 소독부산물 원인물질 관리 가능 등 전반적인 유기물질 관리지표로서 적정함이 확인되었다.

참고 문헌

- 국립환경과학원. 2011. 「공공수역의 유기물질 환경기준 지표전환 및 관리 정책방향 연구」.
_____. 2010. 「금강수계 제3단계 오염총량관리 대상물질(안) 설정」.
- 부산광역시 수질연구소. 2009. 「상수도연구보」. Vol.11.
- 손희중, 정철우, 강임석. 2004. “상수원수중의 천연유기물질 특성과 염소 소독부산물 생성의 관계”. 「대한환경공학회지」 26(4): 457-466.
- 원태연, 정성원. 2010. 「통계조사분석: SPSS PASW Statistics 18.0」. 한나래아카데미.
- 환경부, 국립환경과학원. 2004. 「물환경종합평가방법개발 조사연구(I)」.
- 환경부. 2008. 「공공수역 유기물질 평가 및 관리 정책방향 연구」.
- APHA. 1998. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 20th*.
- Chang, E. E. et al. 2005. "Evaluation of Source Water Quality Standards for Total Coliforms, TOC, and COD in Taiwan". *ASCE*, 3(193): 193-203.
- Department of Water Affairs and Forestry. 2006. *South African Water Quality Guidelines, Volume 1. Domestic Use*.
- Lettenmaier, D. P. 1998. “Mutivariate nonparametric tests for trend in water quality”. *Water Resources Bulletin*, 24(3): 505-512.
- Metcalf & Eddy. 2003. *Wastewater Engineering: Treatment and Reuse*.
- Ministry of Health, Labour and Welfare(MHLW). 2010. *Drinking Water Quality Standards in Japan*.
- Ministry of Water, Land and Air Protection(MWLAP). 1999. *Ambient Water Quality Criteria for Organic Carbon*.
- Sawyer, C. N., P. L. McCarty, and G. Parkin. 2003. *Chemistry for Environmental Engineering and Science*, McGraw-Hill.
- Umwelt Bundes Amt(UBA). 2001. *Environmental policy, water resources management in germany*.
- USEPA. 2006. *Treatment technique for control of disinfection byproduct(DBP), Final Rule. 40 CFR 141.135*.
- _____. 1998. *Disinfectants and Disinfection Byproducts: Final Rule*.
- Wetzel, R. G. 2001. *Limnology, lake and River Ecosystems, 3rd Ed.*, AP.