



## 상하수도시설에 대한 전과정관리(LCM)시스템 구축방안 연구 Establishment of Life Cycle Management(LCM) System for Water Supply and Sewerage Systems

박지형<sup>1</sup> · 황용우<sup>1\*</sup> · 김영운<sup>1</sup> · 박광호<sup>2</sup>

Jihyoung Park<sup>1</sup> · Youngwoo Hwang<sup>1\*</sup> · Youngwoon Kim<sup>1</sup> · Kwangho Park<sup>2</sup>

1 인하대학교 환경공학과 2 (주)에스오알지

(2012년 3월 8일 접수; 2012년 4월 13일 수정; 2012년 4월 14일 채택)

### Abstract

Water supply and sewerage systems are the large-scale urban infrastructure ejecting large amount of environmental load over the life-cycle. Therefore, it is important not only to optimize in the aspect of economical superiority and process efficiency but also to consider earth scale environmental impact. This study aimed to suggest the establishment of life cycle management(LCM) system as an integrated management solution in urban water supply and sewerage systems. As a result, the methodology for LCM system consisting of life cycle assessment(LCA), life cycle cost(LCC), life cycle CO<sub>2</sub>(LCCO<sub>2</sub>) and life cycle energy(LCE) was developed. Also, several case studies using the latest statistics data of water supply and sewerage systems were carried out to investigate the field applicability of LCM.

**Key words** : LCM, LCA, LCC, Water Supply, Sewerage

**주제어** : 전과정관리, 전과정평가, 생애주기비용, 상수도, 하수도

### 1. 서론

상하수도시설은 현 인간사회에 있어 에너지공급 시설과 더불어 도시를 지탱하는 가장 중요한 인프라 시설을 구성하고 있다. 일반적으로 사회기반시설을 계획 및 설치하는 경우에는 사전에 환경영향평가, 처리성능 및 투자의 경제성 평가 등 몇 가지 대안에 대한 비교를 통하여 최종안을 선정하는 방식으로 결정을 하며, 상하수도시설 역시 시설의 성능, 건설비, 유지관리비, 설치 면적 등의 기능적 요인과 시설의 환경성 검토 등을 수행하여 설치 및

운영을 결정하고 있다(Park, 2007)(환경부 2011). 그러나 이러한 기존의 평가 방식은 다분히 개별적인 항목, 사후적인 관리 요소로 이루어져 있어 현 시대의 사회기반시설이 요구하는 글로벌 환경성, 호환성, IT화 등 관리의 다 측면 선진화를 구현하기에는 한계가 있다. 일례로 처리대상인 '물' 뿐만 아니라 시설자체의 환경성을 평가한다든지, 비용분석을 단순한 유지관리비의 수준이 아니고 모든 비용 항목의 주기성이 고려된 생애주기비용으로 평가한다든지(Kang, 2011), 국제기준에 부합되는 관리시스

\* Corresponding author Tel:+82-32-860-7501, Fax:+82-32-872-8756, E-mail: [hwangyw@inha.ac.kr](mailto:hwangyw@inha.ac.kr)(Y. W. Hwang)

템으로 개선 한다든지의 목적으로는 현재의 관리방식으로는 실현이 어렵다. 그렇기 때문에 시설의 수명 종료 후 개조나 재설치 시에 기존 처리시설의 장단점을 명확히 분석하기가 어렵고 새로운 시설도 입 시 판단의 근거를 준비하지 못하는 반복적인 오류가 현재도 범해지고 있다. 따라서 이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 시설의 계획, 설계 시공, 운영, 해체 및 개조 등의 전 단계에서 기존보다 대폭 확장된 개념의 기능성, 경제성, 환경성을 고려할 수 있는 관리시스템이 필요하다. 이러한 요구는 상하수도 분야뿐만 아니라 전 분야에서 대두되고 있으며(Bae 2011), 이에 대한 효과적인 접근방식으로 최근에 부각되고 있는 것이 전과정관리(LCM, Life Cycle Management)이다(환경부 2010).

LCM의 정의에 있어서, LCA(Life Cycle Assessment) 관련 세계적 권위기관인 SETAC(Society of Environmental Toxicology and Chemistry)에서는 LCM은 제품의 환경적, 경제적, 기술적, 사회적 측면을 다루는 개념, 기술 및 그 진보과정과 관점을 통하여 지속적인 환경성 향상을 이루기 위해 조직된 기관 및 문서들의 통합체계라 하고 있으며(Joe, 2011), UNEP(United Nations Environment Program)에서는 조직의 제품과 서비스의 전과정을 조직적으로 관리할 목적으로 전과정 사고를 경영활동에 적용하는 것이라 정의하고 있다. 실행적인 측면에서 LCM에 적용되는 도구로서는 LCA, LCC(Life Cycle Cost)분석, LCCO<sub>2</sub>(Life Cycle CO<sub>2</sub>)분석, LCE(Life Cycle Energy)분석, DfE(Design for the Environment), MFA(Material Flow Analysis), RM(Risk Management) 등이 거론되고 있다(Jung, 2008).

현재 LCM은 주로 제조업 분야에서 적용되고 있으며 그 결과를 제품환경선언, 지속가능보고서, 환경성과평가 등에 활용하고 있다. 상하수도시설의 경우, LCA, LCC 등의 LCM 도구를 개별적으로 시설의 설계 단계에 일부 적용하고 있으나(환경부 2010) 적용범위가 일부 단계에 한정적이며, 방법론의 부재로 상하수도시설 전체 단계에 LCM을 적용하기 위

해서는 개념의 정립 등의 기초 연구가 필요하다. 이에 본 연구에서는 상하수도 시설의 계획, 설계 시공, 운영, 해체 및 개조의 전과정에 걸친 환경성, 경제성, 기능성 등의 통합 개념의 LCM 시스템 구축 방안을 제시하였다.

## 2. 연구방법

본 연구에서는 LCA, LCCO<sub>2</sub>, LCE 및 LCC 등의 분석을 상하수도 LCM 도구로 구성하여 상하수도시설에 대한 LCM(이하 상하수도LCM)시스템의 구축방안 연구를 수행하였으며, 그 개념도를 Fig. 1에 나타내었다.

현재 운영 중에 있는 상하수도 시설의 운영실태를 파악하기 위하여, 기존 문헌자료, 통계자료, 운영 지침 등을 조사하였으며(환경관리공단, 2003), (국토해양부, 2010), 현장방문 및 설문조사를 통하여 시설의 관리 실태를 파악하였다. 이 조사결과를 바탕으로 상하수도 시설 관리측면의 누락인자 도출 및 그에 대한 환경성, 경제성, 기능적 측면의 LCM 도구를 도출하였다. 최종적으로 상하수도 시설의 전과정에 적용할 수 있는 LCM 방법론을 제시하였고, 그에 따른 의사결정 활용 가능성을 검토하기 위하여 기존 통계자료를 바탕으로 LCM 적용 및 분석을 실시하였다.

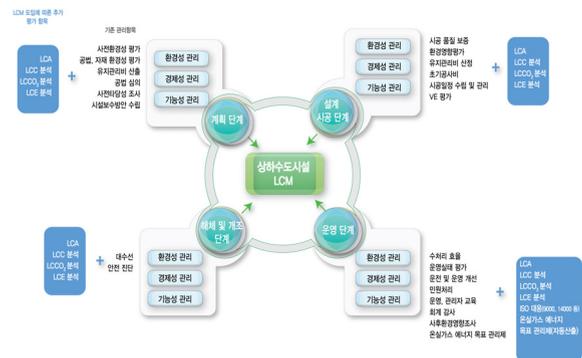


Fig. 1. Conceptual diagram of LCM system for water supply and sewerage systems

### 2.1 상하수도 시설의 관리실태 조사

Table 1. Selected water purification plants for data surveying in this study

취수원	처리공법	소재지	시설용량(m <sup>3</sup> /d)	취수원	처리공법	소재지	시설용량(m <sup>3</sup> /d)
하천 표류수	완속여과	경기 Y군	33,000	기타 저수지	완속여과	전남 K군	3,000
	급속여과	서울 K구	1,600,000		급속여과	경기 S시	50,000
	고도처리	경남 K시	1,555,000		고도처리	경남 J시	70,000
하천 복류수	완속여과	경북 M시	35,000	지하수	소독	제주 I군	99,900
	급속여과	광주 D구	240,000		완속여과	제주 H동	35,000
	막여과	경기 Y군	1,000		급속여과	제주 O동	15,000
	고도처리	경남 Y시	55,000		막여과	경기 P시	1,500
댐	완속여과	부산 K구	8,000		기타(직접여과)	충북 G군	600
	급속여과	대전 S구	600,000	-	-	-	
	고도처리	부산 D구	280,000	-	-	-	

Table 2. Selected sewage treatment plants for data surveying in this study

구분	처리공법	소재지	시설용량(m <sup>3</sup> /d)	구분	처리공법	소재지	시설용량(m <sup>3</sup> /d)
A <sup>2</sup> /O	DNR	경북 K시	330,000	특수미생물 계열	B3	울산 D구	100,000
	A <sup>2</sup> /O	서울 S구	1,710,000		HBR-II	경기 D시	86,000
	MLE	인천 Y구	275,000		HBR	경기 K시	25,000
	4 stage BNR	경기 S시	520,000	산화구 계열	산화구법	경기 K시	23,000
	HDF	경기 P시	27,000		간헐포기접촉산화	충남 A시	63,000
SBR	CSBR	경기 N시	80,000	Azenit-P_R	경기 I시	70,000	
	MSBR	전남 Y시	110,000	생물막 계열	섬모상 생물막	경기 G시	160,000
	KIDEA	전북 I시	30,000	활성 슬러지 계열	표준 활성슬러지법	서울 K구	1,000,000
DeNiPho	경기 B시	900,000	1,100,000				
CNR	전북 J시	403,000	2,000,000				
NPR	대전 Y시	900,000	550,000				
BioFOR	부산 S구	120,000	회전원판접촉		부산 D구	14,000	
Bio-SACBNR	경북 P시	232,000	-	-	-	-	

기본적인 LCM 요소를 도출하기 위하여 현재 운영되고 있는 상하수도 시설을 대상으로 관리실태를 조사하였다. 조사 대상 상수도 시설을 Table 1에, 하수도 시설을 Table 2에 나타내었으며, 상수도 시설의 경우 2010 상수도 통계를 바탕으로 하수도 시설의 경우 2009 하수도 통계를 바탕으로 선정하였다. 시설의 선정에 있어, 운영항목 범위가 넓고 공법에 대한 대표성 및 범용성 확보가 보다 용이하다는 점을 고려하여 공법별로 가능한 대규모 시설로 선정하였다.

조사대상으로 선정된 시설에 대해 관리 실태조사를 수행하였고, 조사 방식과 조사 항목을 Table 3에 나타내었다.

Table 3. Survey method applied for each treatment plant

구분	내용
조사 기간	• 2011. 03. ~ 2011. 11. (8개월)
조사 방식	• 이메일을 통한 설문지 배포, 유선 연락, 방문조사
조사 항목	• 기록 중인 법적 기록 양식(양식지 목록, 양식지 첨부) • 운영 중 기록 등의 전산화 여부 • 각 담당부서 별 관리중인 문서 양식 및 항목 • 각 지방단체장 등에게 제출되는 문서 양식 및 항목과 제출 주기

대상 상하수도 시설에 대한 환경성, 경제성, 기능성 측면의 관리 실태에 대하여 조사한 결과를 Table 4에 나타내었다. 환경성 측면에서는 주로 오염물질 위주의 관리 및 사후처리 관점의 환경성 관리가 이루어짐으로써 처리과정에서 발생하는 잠재적인 환경성에 대한 평가 및 관리에 대한 보완이 필요한 것으로 나타났고, 경제성 측면에서는 운영단계에서 발생하는 단가 위주로 경제성을 관리하고 있어 생애주기비용을 통한 포괄적 경제성 관리가 보완되어야 할 것으로 판단되었다. 기능성 측면에서는 일부 설비에 대한 보수이력 관리만을 하고 있어, 시설 단위의 통합관리 수준을 비용과 연계하여 파악할 수 있는 기능성 관련 지표 등의 보완이 필요한 것으로 나타났다.

Table 4. Survey results of the management status in water supply and sewerage systems

구분	기존 관리 수준	보완이 필요한 사항
환경성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설의 운영으로 인해 배출되고 있는 오염물질 위주의 관리(배출 허용기준 만족 여부)</li> <li>• 사후처리(end of pipe)에 초점을 맞춰 환경성 관리</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 사후관리의 개념이 아닌 처리과정에 투입되는 약품, 전력 연료의 투입을 통해 유발되는 잠재적인 환경성 평가 등 환경오염 유발방지의 원천적인 관리가 가능한 분석도구의 도출이 필요함</li> </ul>
경제성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 처리시설에서 발생하는 수익 및 지출 비용에 대해 발생 시점 이후로 파악 가능</li> <li>- 전력 사용량, 약품 사용량 등 기록</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설계 및 시공, 운영, 폐기 전과정을 고려한 경제성 평가가 어려우며, 전과정을 고려한 비용 평가가 필요함</li> </ul>
기능성	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 수처리 주요 관리 지표 및 일부 주요 설비의 보수이력 등 관리</li> <li>- 주요부품 보수내역, 보수기간 등</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 설비보수이력 등의 관리로 설비 등의 개별적 기능성의 관리 가능하나, 시설 단위의 기능성의 통합관리가 필요 (시설 보수비용 및 보수의 발생 빈도 등 시설의 기능성 통합 관리를 위한 대표 관리 지표 도출 필요)</li> </ul>

## 2.2 상하수도 LCM 도구 제시

시설의 관리 실태 조사 결과를 바탕으로 상하수도 LCM을 수행하기 위한 도구 및 구성요소를 도출하였으며 그 결과를 Table 5에 나타내었다. 시설의

포괄적인 환경성 관리를 위한 도구로는 LCA를, 시설의 운영단계를 포함한 전과정에 대한 에너지 및 온실가스 관리를 위한 도구로는 LCCO<sub>2</sub>분석 및 LCE분석을 선정하였다. 경제성 관리를 위한 도구로는 미래 발생 비용 예측 등이 가능한 LCC분석을 선정하였다.

Table 5. Major LCM sub-tools for water supply and sewerage systems

구분	도구	운영 내용
환경성 (환경영향)	LCA	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설 시공, 운영으로 인해 발생하는 환경영향을 시설의 Life cycle 전 단계에서 의사결정 인자로 활용 가능</li> <li>• LCA 결과의 도출을 통한 시설의 환경관리 수준 향상(사후관리 -&gt; 사전 관리)</li> </ul>
환경성 (온실가스)	LCCO <sub>2</sub>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설 시공, 운영 단계 등 Life Cycle 전 단계에 걸쳐 발생하는 온실가스 배출량 통합 관리 가능</li> <li>• 시설 시공단계의 경우 온실가스 배출량 산정 방법론의 부재로 현재 온실가스 관리 대상에서 누락되어 있었으나, LCM 도구로 LCCO<sub>2</sub> 분석의 도입을 통해 시공단계의 탄소배출량 평가 가능(현재 관리의 취약부분 보완)</li> <li>• LCM 시스템 구축을 통한 시설의 탄소배출량 인벤토리 자동 구축 가능(Jung, 2008)</li> </ul>
환경성 (에너지)	LCE	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 시설 시공, 운영 단계 등 Life Cycle 전 단계에 걸쳐 소비되는 에너지 통합 관리 가능</li> </ul>
경제성/기능성	LCC	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Life cycle 각 단계에 걸쳐 발생하는 비용을 동일시점(현재가치)으로 환산하여 시간적 차이(Gap)를 두고 발생한 비용항목에 대한 비교, 평가 가능</li> <li>• 경제 효율성 측정 도구로 활용 가능</li> </ul>

## 2.3 상하수도 LCM 방법론

본 연구의 LCM 방법론에서는 상하수도시설의 관리자 및 운전자 각각에 대한 life Cycle 전과정에 걸친 LCM 도구의 적용 시점, 분석주체, 분석결과의 성과지표 활용 및 의사결정 지원 방법 등을 제시하였다. 상하수도시설에서 관리자는 상하수도 서비스와 관련된 정책, 계획 등을 결정하는 최고 의사결정권자로, 환경부, 지자체, 한국환경공단 등을 의미



하며, 운전자는 상하수도 서비스를 제공하는데 필요한 프로세스나 설비 등의 운전 등을 수행하는 사람 또는 조직으로, 상하수도시설의 운영, 관리를 전문으로 하는 관리 대행업체 등을 포함한다.

(1) 계획, 설계 · 시공단계 LCM 방법론

운전자의 경우 life cycle 전과정 중 계획, 설계 · 시공 단계 등의 해당단계에 대하여 직접적인 영향을 끼치지 못하므로, 운영단계의 상하수도 LCM 도구 분석자료를 관리자의 의사결정을 위해 제공하는 것으로 설정하였다.

관리자의 경우 기존 상하수도시설별 운영단계에서 도출된 LCM 도구 즉, LCA, LCCO<sub>2</sub>, LCE 및 LCC 분석결과를 처리공법, 용량 등의 조건별 비교를 실시하여 새로운 시설의 계획단계 의사결정 자료로 활용하도록 하였다. 설계 · 시공단계에서는 LCM 방법론 및 처리공법별 도구 원단위 등을 시설 설계 · 시공기준으로 적용하여 시공관리가 가능하도록 하였으며, 설계 단계의 경우, 설계 시 최종 산출되는 내역서를 기준으로, 시공 단계는 시설의 실시설계내역서를 기준으로 LCM 도구의 분석을 수행하도록 하였다. 계획, 설계 · 시공단계에서의 LCM을 통한 의사결정 활용 방안을 Table 6에 정리하여 나타내었다.

Table 6. Performance indicators in plan, design, and construction stage

의사결정 활용 방안	Tool
<ul style="list-style-type: none"> <li>LCM 시스템 구축 시설의 LCC 분석결과 모니터링을 통해 시설 기획단계 의사 결정 자료로 활용</li> </ul>	LCC 분석
<ul style="list-style-type: none"> <li>설계 및 시공단계 LCC 분석결과(분석주체 : 시공 및 설계사)의 제출 요구 및 제시된 운영비용 예측값과 실제 운영비용의 비교를 통한 시공 관리 실시(입찰 제한 등)</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>LCM 시스템 구축 시설의 LCA, LCE 분석결과 모니터링을 통해 시설 기획단계 의사결정 자료로 활용</li> </ul>	LCA
<ul style="list-style-type: none"> <li>설계 및 시공단계 LCA 분석결과와 제출(분석주체 : 시공 및 설계사)요구를 통해 시공단계 자원고갈에 대한 관리 실시</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>LCM 시스템 구축 시설의 LCA, LCE, LCCO<sub>2</sub> 분석결과 모니터링을 통한 환경영향 감시 및 분석결과 DB를 통해 기획단계 의사결정 자료로 활용</li> </ul>	LCA, LCE, LCCO <sub>2</sub> 분석

(2) 운영단계 LCM 방법론

LCM 방법론의 운영단계에서 운전자의 경우, LCM을 통한 의사결정을 수행토록 하였다. 시설 운영 시 투입되는 자재,약품, 에너지원에 대한 LCM 도구의 분석 실시 및 분석결과와 모니터링을 통해 시설의 잠재적 환경성, 온실가스 발생, 에너지 소비, 경제성(LCC 분석결과)의 이상시점을 파악토록 하였으며 이상시점 발생 시 기여도 분석을 실시하도록 하여 이상의 원인을 파악하도록 하였다. 또한 웹 기반의 LCM 구축을 통해 유사 공법, 유사 용량의 타 시설 중 LCM 도구 분석결과와 우수시설 운전방식 등을 벤치마킹 하도록 하여, 시설 운영의 효율성 증진을 도모하였다.

관리자는 운영단계에서 단위 시설의 관련 법규 준수 여부에 대한 관리와 기술 진단 등을 통한 최적화 방안 등을 제시하는 역할을 수행하였다. 따라서 웹 상의 LCM 구축 시, 단위시설의 기능성, 경제성, 환경성에 대한 모니터링을 실시토록 하여 상하수도시설의 중앙관리의 구현이 가능하도록 하였다. 운영 단계에서의 LCM을 통한 의사결정 활용 방안을 Table 7에 정리하여 나타내었다.

Table 7. Performance indicators in operation stage

의사결정 활용 방안	Tool
<ul style="list-style-type: none"> <li>일별, 월별 모니터링을 통한 이상시점 파악</li> </ul>	LCC 분석
<ul style="list-style-type: none"> <li>설비 및 자재 구입 시 대안별 LCC 분석 결과를 의사 결정에 반영</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>유사 공법 및 규모의 경제성 우수 시설의 운전 방식 등 참고 가능</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>설비 및 자재 구입 시 대안별 LCA 결과를 의사결정에 반영</li> </ul>	LCA
<ul style="list-style-type: none"> <li>일별, 월별 LCA, LCE, LCCO<sub>2</sub> 결과 모니터링을 통한 이상시점 파악</li> </ul>	LCA, LCE, LCCO <sub>2</sub> 분석
<ul style="list-style-type: none"> <li>LCA, LCE, LCCO<sub>2</sub> 분석을 통한 시설의 환경성, 온실 가스 에너지 사용량 관리 및 목표 설정</li> </ul>	
<ul style="list-style-type: none"> <li>유사 공법 및 규모의 환경영향 저감 우수 시설의 운전 방식 참고</li> </ul>	

(3) 해체 및 개조 단계 LCM 방법론

상하수도시설은 일반 제품 등과 달리 긴 수명을 가지며, 시설의 기능적, 사회적 수요가 변화하여 더

이상의 설계 시 의도된 기능을 수행하지 못할 경우, 일반적으로 해체 및 폐기가 아닌 시설의 개조 등의 방식을 통해 기능의 보완을 하는 형태가 일반적이다. 따라서 LCM 방법론을 통해 해체 및 개조(대보수 및 증설 공사 포함)시점 결정에 대한 의사결정을 수행토록 하였다. 시설의 운영단계에 대한 LCA, LCCO<sub>2</sub>, LCE 및 LCC 분석결과를 모니터링 하여 년 단위의 분석결과가 일정추세를 벗어나 급증한 시점을 시설의 환경성 및 경제성 이상 발생 시점으로 판단하여 추가적인 기술 진단을 통해 해체 및 개조 시점을 결정하도록 하였다.

#### (4) LCM 시스템 사후관리 방안

웹 상의 LCM 시스템 구축 시, 구축 당시의 LCM 도구의 분석기준이 시설을 운영하는 과정에서 개정되는 등의 변동사항이 생길 수 있다. 따라서 LCM 방법론에 LCM 도구의 분석기준의 변동 등으로 인한 사후관리가 필요할 경우 변경된 사항이 시스템으로의 반영이 수반되어야 함을 명시하였으며, 시스템의 지속적인 업그레이드 등을 통한 LCM 시스템의 사후관리를 수행하도록 하였다.

### 3. 상하수도 LCM 적용 및 분석

#### 3.1 일반사항

##### (1) 검토방법 및 분석대상 선정

상하수도 LCM 방법론을 통한 의사결정으로의 연계 가능성을 검토하기 위하여 기존 통계자료인 '2009 하수도 통계(환경부, 2010)', '2010 상수도 통계(환경부, 2011)'를 활용하여 LCM 적용 및 분석을 실시하였다. 도출된 도구의 분석 결과를 상하수도 LCM 방법론을 적용하여 처리공법 간 경제성 및 환경성 비교 분석을 수행하였다.

상수도시설의 경우 '2010 상수도 통계'의 현재 운영 중인 506개 시설을 대상으로 사례 분석을 실시하였다. 상수도 통계의 경우 시공 및 운영비용을

지자체 단위로 산정하여 통계자료를 공표하였기 때문에 단위 시설 및 처리 공법에 대한 LCC 분석을 수행하지 못하였다. LCCO<sub>2</sub> 분석의 경우, 수처리 과정으로 인해 발생하는 공정배출의 산정이 불가능하여, 분석대상에서 제외하였다. 하수도시설의 경우 '2009 하수도 통계'의 현재 운영 중인 470개 시설 중 자료가 누락되어 있는 일부 시설 등을 제외한 시설에 대하여 분석을 실시하였다. LCA, LCE 분석은 433개 시설, LCCO<sub>2</sub> 분석은 339개 시설, LCC 분석은 시공단계에서 432개 시설, 운영단계에서 434개 시설에 대하여 각각 분석을 수행하였다.

##### (2) 분석조건

기존 통계자료의 경우 비용을 제외한 나머지 항목의 경우 운영단계에 대한 통계만을 구축하고 있어, LCA, LCE 분석, LCCO<sub>2</sub> 분석의 경우 운영단계만을 고려하였으며, LCC 분석의 경우 시공 단계 및 운영단계를 고려하여 분석하였다. 상하수도시설의 LCA, LCE 분석, LCCO<sub>2</sub> 분석을 수행하기 위해서는 처리공정과 관련된 전력사용량, 약품사용량 등의 투입물 자료가 필요하지만, 통계자료 중 LCM 도구의 분석자료로 적용 가능한 운영단계의 전력 사용량만을 고려하였다. LCC분석은 LCM 방법론에 따른 실질할인율 및 분석기간 등을 적용하여 사례 분석을 실시하였다. 운영단계 LCC 분석을 위한 할인율은 최근 10년간(2001년~2010년) 실질할인율의 평균값인 1.28%를 적용 하였으며, 분석기간은 건축물 등의 내용연수표(지방공기업법 시행규칙)를 따라 30년으로 분석하였다.

#### 3.2 LCM 적용 및 분석결과

##### (1) LCA

상하수도시설별 운영단계에서의 전력사용으로 인한 환경영향을 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타내었다. 운영단계에서 소비된 전력 사용량에 전력의 LCI DB를 적용하여(www.klciidb.or.kr), 목록분석을 실시한

후, 자원고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 오존층 파괴 및 광화학산화물의 6대 영향범주에 대한 영향 평가를 수행하였다(인광역시도시개발공사, 2010).

상수도 시설의 LCA 분석결과 특·광역시 인구 30만 이상 규모의 시설에서는 급속여과 공법이 7.2E-05 Eco-point/ton으로 가장 낮게 나타났으며, 인구 5만 이상 30만 미만 규모 및 인구 5만 미만 규모의 시설에서는 고도처리 공법, 수자원공사가 관리하는 시설에서는 급속여과공법이 가장 낮게 분석되었다.

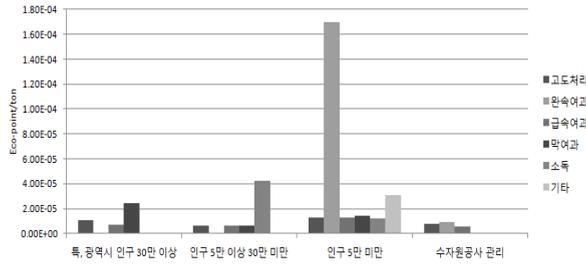


Fig. 2 LCA results of water purification processes in various population scales

하수도 시설의 LCA 분석결과, 고도처리 공법계열 중 시설용량 500kt/d이상에서는 A<sup>2</sup>/O 공법이 1.1E-05 Eco-point/ton으로 가장 낮게 나타났으며, 시설용량 100kt/d이상 500 kt/d미만 및 시설용량 50kt/d이상 100kt/d미만에서는 기타(담체) 공법, 10kt/d 이상 50 kt/d미만에서는 SBR 공법, 10 kt/d 미만 시설에서는 기타(미생물) 공법이 낮은 것으로 분석되었다.

2차 처리 공법 계열의 경우, 시설용량 50kt/d이상 10kt/d미만에서는 표준활성슬러지공법이 8.7E-06 Eco-point/ton이며, 10kt/d 미만 시설에서는 회전원판 공법이 2.0E-05 Eco-point/ton으로 가장 낮게 나타난 것으로 분석되었다.

LCA 분석결과, 2차 처리 시설에 비해 공정 구성 설비가 많고, 에너지 소비가 높은 고도처리 공법의 LCA 결과가 상대적으로 높게 나타났다. 또한 대규모 시설에 비해, 소규모 시설에서 LCA 결과가 평균적으로 높게 나타났다.

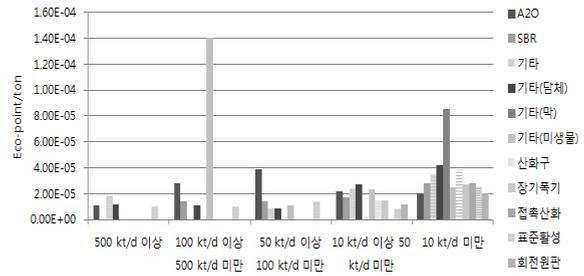


Fig. 3 LCA results of sewage treatment processes in various scales

(2) LCE 분석

상하수도시설의 LCE 분석결과를 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다. 상수도 시설의 LCE 분석결과를 살펴보면, 특·광역시 및 인구 30만 이상 지역과 인구 5만 이상 30만 미만 지역의 정수시설에서는 막여과 공법의 LCE분석결과가 가장 낮게 나타났으며, 인구 5만 미만 지역의 정수시설에서는 기타(직접여과 등) 공법, 한국수자원공사에서 관리하는 대상 시설에서는 완속여과 공법이 가장 낮게 나타났다.

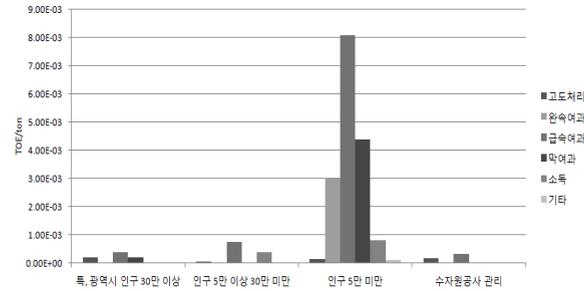


Fig. 4 LCE results of water purification processes in various population scales

하수도 시설을 살펴보면, 고도처리 공법계열 중 시설용량 500 kt/d이상에서는 A<sup>2</sup>/O 공법이 2.1 E-05 TOE/ton으로 가장 낮게 나타났다. 각 시설용량별 에너지 소비가 적은 공법은 시설용량 100 kt/d이상 500kt/d 미만, 50kt/d이상 100kt/d 미만에서는 기타(담체) 공법, 10kt/d 이상 50kt/d 미만에서는 SBR 공법, 10kt/d 미만 시설에서는 A<sup>2</sup>/O 공법으로 나타났다.

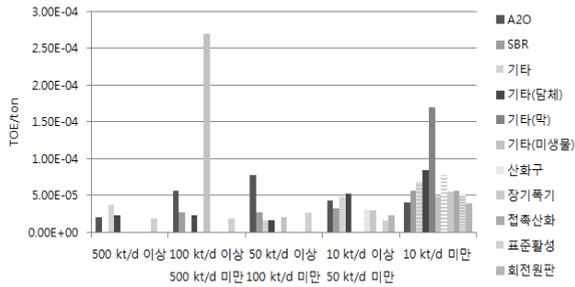


Fig. 5 LCE results of sewage treatment processes in various scales

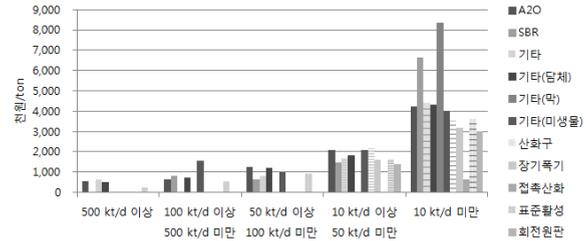


Fig. 7. The result of LCC in the construction stage of each sewage treatment process

### (3) LCCO<sub>2</sub> 분석

LCCO<sub>2</sub> 분석의 경우 하수도 시설의 전력 사용량에 따른 운영단계 온실가스 배출량을 산정하였다 (IPCC, 2006). 하수도시설에 대해 공법계열별, 시설 규모별로 구분하여 분석한 LCCO<sub>2</sub>결과를 Fig. 6에 나타내었다. 기타(막)공법이 1.4E-03 tCO<sub>2</sub>/ton으로 가장 높게 나타났으며, 표준활성슬러지공법이 2.5E-04 tCO<sub>2</sub>/ton으로 가장 낮게 나타났다.

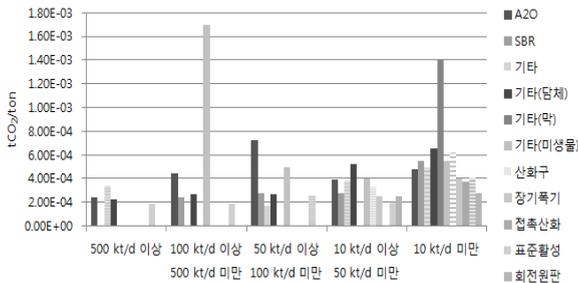


Fig. 6 LCCO<sub>2</sub> results of sewage treatment processes in various scales

### (4) LCC 분석

하수도시설의 공법계열별, 시설규모별 시공단계 및 운영단계의 LCC 분석 결과를 각각 Fig. 7 및 Fig. 8에 나타내었다. 시공단계에서는 표준활성슬러지공법의 LCC 분석결과가 평균 339천원/ton으로 가장 낮게 나타났으며, 산화구공법이 2,784천원/ton으로 가장 높게 나타났다. 운영단계에서는 표준활성슬러지공법이 평균 80원/ton으로 가장 낮게 나타났으며, 기타(막)공법이 914원/ton으로 가장 높게 나타났다.

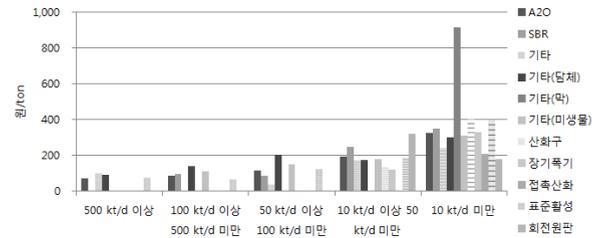


Fig. 8. The result of LCC in the operation process of each sewage treatment process

### 3.3 적용가능성 검토

상하수도시설 관련 기 구축 통계자료를 이용한 사례 분석을 통해, 상하수도 LCM 적용 시 공법 및 시설용량 등의 비교에 따른 의사결정 방안으로의 연계 가능성을 검토하였다. 상하수도 LCM 적용 및 분석 결과, 시설 운영으로 인한 잠재적 환경영향, 온실가스, 에너지 및 경제성에 대한 정량화된 수치가 도출되었으며, 이를 통해 시설 공법별 처리용량 간 비교가 가능하였다. 공법 및 처리용량 간 비교를 통해, 시설 및 공법의 장단점에 대한 명확한 분석이 가능하여, 시설 도입 시 의사결정의 근거로 활용이 가능할 것으로 판단된다. 다만 앞서 도출된 상하수도 공법별 비교는 상하수도 LCM 도구를 분석하기 위한 기초자료가 충분치 않은 통계자료를 이용한 결과로서 비교결과의 의미는 없다. 상하수도 LCM의 정착을 위해서는 LCM 도구의 기초 데이터가 되는 기록 및 운영 항목 등이 단위시설에서부터 일지 형태의 기록을 통해 관리되어야 할 것으로 판단된다. LCC 분석의 경우 시설 설비별 보수비용 및

보수주기 등에 대한 자료가 관리되어야 하며, LCA, LCCO<sub>2</sub> 및 LCE 분석의 경우, 시설의 각 단위 설비로 투입되는 약품의 량, 설비별 전력 및 에너지원의 소비량 등의 자료가 관리된다면, 설비에 따른 투입물질별 기여도 분석 등이 가능하며, 공법 간 비교 및 그에 따른 원인 분석 등이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 상하수도시설의 관리 실태 조사를 통해 기존 시설의 관리수준을 파악하여, 현재 누락되어 있는 관리 인자를 도출하였으며, 이를 바탕으로 LCM 도구를 제시하였다. 또한 시설의 관리자 및 운전자별 LCM 방법론을 제시하였으며, 기 구축되어 있는 통계자료를 이용해 LCM 적용 및 분석을 실시하여, 공법 및 처리용량 간 비교 및 그에 따른 의사결정 방안으로의 연계 가능성을 검토하였다. 본 연구를 통해서 얻어진 결론은 다음과 같다.

(1) 상하수도 LCM 도구로 LCA, LCCO<sub>2</sub> 및 LCE 분석 등을 제시하였으며, 제시된 LCM 도구를 통해 전과정에 대한 환경성 관리가 가능하게 되어, 발생 후 처리가 아닌 발생의 방지 개념의 적극적인 환경성 관리가 가능할 것으로 판단된다. 경제성과 관리를 위한 LCM 도구로 LCC 분석을 제시하여, 시설의 비용분석을 단순한 유지관리비의 수준이 아닌 모든 비용항목의 주기성이 고려된 생애주기비용으로 평가 가능할 것으로 판단된다.

(2) 상하수도 LCM 방법론을 life cycle 전단계에 걸쳐 제시하였으며, 시설의 계획 단계의 경우 운영 단계의 정량화된 상하수도시설별 운영단계에서 도출된 LCM 도구 즉, LCA, LCCO<sub>2</sub>, LCE 및 LCC 분석결과를 처리공법, 용량 등의 조건별 비교를 실시하여 새로운 시설의 계획단계 의사결정 자료로 활용하도록 하였다. LCM 방법론의 운영단계에서 운전자의 경우, LCM을 통한 의사결정을 수행토록 하였다.

다. 시설 운영 시 투입되는 자재, 약품, 에너지원에 대한 LCM 도구의 분석 실시 및 분석결과 모니터링을 통해 시설의 잠재적 환경성, 온실가스 발생, 에너지 소비, 경제성(LCC 분석결과)의 이상시점을 파악토록 하였으며 이상시점 발생 시 기여도 분석을 실시하도록 하여 이상의 원인을 파악하도록 하였다. 또한 웹 기반의 LCM 구축을 통해 유사 공법, 유사용량의 타시설 중 LCM 도구의 분석결과 우수 시설의 운전방식 등을 벤치마킹 하도록 하였다. 해체 및 개조 단계의 역시, LCM 도구의 분석결과를 모니터링 하여 해체 및 개조 시점의 결정이 가능하도록 방법론을 제시하였다.

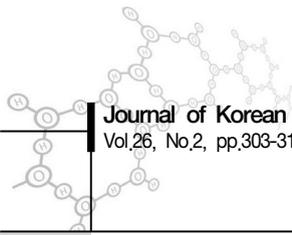
(3) 상하수도 LCM 적용 및 분석 결과 LCM 도구를 통해 시설 운영으로 인한 잠재적 환경영향, 온실가스, 에너지 및 경제성에 대한 정량화된 수치가 도출되었으며, 이를 통해 시설 공법별 처리용량간 비교가 가능하였다. 공법 및 처리용량간 비교를 통해, 시설 및 공법의 장단점에 대한 명확한 분석이 가능하여, 시설 도입 시 의사결정의 근거로 활용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 사 사

본 연구는 환경부의 환경정책기반 공공기술개발 사업의 지원에 의하여 수행되었습니다.

#### 참고문헌

- 강현, 박기학, 황윤빈, 김준범 (2011) 이산화탄소 포집, 수송 및 저장(CCS; Carbon Capture and Storage)의 전과정평가(LCA; Life Cycle Assessment) 및 전과정비용평가(LCC; Life Cycle Costing)에 대한 연구, *한국전과정평가학회지*, **12**(1), pp. 40-51.
- 국토해양부(2010) *시설물별 탄소배출량 산정 가이드라인*, pp. 7-24.
- 박승호, 김병주, 배재호, 이철모, 김용호 (2007) 국내 공공하수도 시설의 에너지 사용 및 자원화실태 조사연구, *상하수도학회지*, **21**(5), pp. 539-549.
- 배철호, 박홍조, 황용우 (2011) 폐기물 소각시설에 대한 전과



- 정 관리시스템 구축방안 연구, *한국폐기물자원순환학회지*, **28**(2), pp. 121-133.
- 정경화 외 8명(2008) 기후변화협약 대응 국가온실가스 IPCC 신규 가이드라인 적용을 위한 기획연구, *에너지경제연구원* pp, 81-99.
- 조현정, 송장환, 황용우, 박지형 (2011), LCA기법을 활용한 합류식 하수도 월류수 사업의 잠재적 환경영향 저감 효과 분석, *상하수도학회지*, **25**(6), pp, 885-892.
- 지방공기업법 시행규칙 [별표 2], 건축물 등의 내용연수표
- 환경부 (2010) *상하수도시설 전과정관리(LCM) 도입방안 연구*, pp. 1~79.
- 환경관리공단(2003) *하수도시설 효율성 향상을 위한 LCA기법 및 성과분석·관리시스템 개발*,
- 환경부 (2010) *폐기물 처리시설 전과정 관리(LCM) 시범사업 적용방안 연구*, pp. 67~221.
- 환경부 (2011) *온실가스·에너지 목표관리 운영 등에 관한 지침*, pp. 163~179.
- 환경부 (2010) 2009 하수도 통계
- 환경부 (2011) *10년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석 결과*, pp. 7~10.
- 환경부 (2011) *2010 상수도 통계*
- IPCC(2006) *2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories*