

전과정평가를 이용한 정수장의 환경부하 저감방안에 관한 연구

A Study on an Environmental-Load Reduction Plan for a Purification Plant Using Life-Cycle Assessment

정도환* · 김성근**

Jung, Do Hwan* and Kim, Sung-Keun**

Abstract

In this study, a life cycle assessment (LCA) that quantitatively calculates environmental loads, is performed for a water treatment plant (purification plant), and a method for reducing environmental loads for the plant is proposed. The environmental loading substances according to the six impact categories of the environmental declaration of products (EDP) are quantitatively calculated. The results indicated that 98.9% of all environmental loading substances are generated in the global warming impact category. CO₂ accounts for 97.2% of the total emissions, and with regards to each stage of the entire life-cycle, 99.9% of environmental loads occurs in the construction stage, while 0.1% occurs in the operation, deconstruction, and recycling stages. The results from the purification facility are compared with those obtained from a wastewater reuse facility to examine any similarities and differences. Moreover, four scenarios are proposed as methods for reducing environmental loads, in order to verify the reduction of environmental loads at the purification plant. Furthermore, reduction effects are confirmed by applying the developed reduction method to a practical case, and conducting an LCA analysis.

Key words : Purification plant, Life cycle assessment (LCA), Environmental declaration of products (EDP), Reduction of environmental loads, CO₂

요 지

본 연구에서는 환경부하를 정량적으로 산출하는 LCA 분석기법을 사용하여 정수처리시설을 대상으로 환경부하를 평가하고 저감방안을 제시하였다. 정수처리시설의 전과정에 대한 LCA 분석을 수행하여 환경성적표시제도의 6가지 영향범주에 대한 환경부하물질의 정량적 산출을 수행하였다. 분석 결과 전체 환경부하물질 중 98.9%가 지구온난화 영향범주에서 발생하였다. CO₂가 전체 배출의 97.2%를 차지하였으며 전과정 단계별로 살펴보면 건설단계에서 99.9%, 운영, 해체 및 재활용단계에서 0.1%의 환경부하가 발생하는 것으로 나타났다. 결과를 바탕으로 하수처리수 재이용시설과의 비교를 통하여 LCA 분석 시 고려한 유사점 및 차이점을 분석하였다. 그리고, 정수처리시설의 환경부하 저감을 검증하기 위해 4가지의 시나리오를 환경부하 저감방안으로 제시하였다. 또한, 구축된 저감방안을 본 사례에 적용한 후 LCA 분석을 수행하여 저감효과를 확인하였다.

핵심용어 : 정수장, 전과정평가, 환경성적표시제도, 환경부하저감, 이산화탄소

1. 서 론

최근에 빈번하게 발생하는 범지구적 환경재해의 가장 큰 원인으로 지목받는 기후변화에 대응하기 위하여 우리나라를 포함한 많은 국가들이 온실가스 관리에 상당한 노력을 기울이고 있다. 이러한 노력은 2005년 발효된 교토의정서(Kyoto

Protocol)에서는 지구온난화의 주범으로 이산화탄소(CO₂)를 규정하고, 이에 대한 감축을 위해 노력할 것을 유럽연합(EU)의 주도하에 현재까지 계속 이어지고 있다. 우리나라도 제조업을 중심으로 관련 법령에 맞춰 온실가스 감축을 위한 노력을 하고 있으며 건설업 또한 관련 법령의 본격적 시행에 대비하고 있다.

*정회원. (주)CMIT 과장(bluebloodh@cmit.co.kr)
Member. Manager, CMIT

**교신저자. 정회원. 서울과학기술대학교 건설시스템공학과 교수(Tel: +82-2-970-6503, Fax: +82-2-948-0043, Email: cem@seoultech.ac.kr)
Corresponding Author: Member. Prof., Dept. of Civil Eng., Seoul National University of Science & Technology

또한, 경제 위주의 성장을 위해 무분별하게 사용된 막대한 양의 자원으로 인해 물 부족과 생태계 고갈 문제는 세계 정치와 인류 문명을 좌우하는 결정적 요소로 급격히 부상하고 있고, 특히 인간이 주로 사용하는 지표 유출수인 물자원의 부족 문제는 물부족 국가를 중심으로 매우 큰 파급효과를 미치게 되었다(Steven Solomon, 2013). 이미 대한민국은 20년 전에 국제인구행동연구소(PAI)에 의해 물 부족 국가로 분류되었으며 2012년 OECD가 발간한 ‘2050 환경 전망’ 보고서에서도 물 부족 국가로 평가되었다.

물자원은 앞서 언급한 생태계 고갈 문제와 더불어 오염도가 증가하는 문제를 동시에 지니고 있어 사용가능한 담수를 인간에게 제공하기 위한 물의 정수처리 기술개발이 전 세계적으로 연구되고 있다. 일반적으로 정수처리는 물리적, 화학적, 생물학적 처리과정으로 구성되고, 이를 위한 기반시설의 건설이 수반된다. 최근 들어 지속가능한 개발에 대한 논의가 글로벌 이슈가 됨에 따라 물의 정수처리 기술에 대한 환경측면을 고려하고자 하는 연구가 다양하게 진행되고 있을 뿐만 아니라, 친환경적인 기반시설 건설에 대한 요구가 증가하고 있다.

본 연구에서는 교토의정서 체제에 직접적 영향과 탄소배출권 거래제도의 시행에 대비하고, 지속 가능한 물자원 관리를 위한 사회기반시설의 하나인 정수처리시설의 전과정에서 발생하는 온실가스를 비롯한 환경부하 배출물을 정량적으로 산출함으로써, 기존 연구에서 그 사례를 찾아보기 힘든 정수처리시설의 건설로 인한 지구환경문제의 영향과 기여도를 파악할 수 있는 기초자료를 제시하고, 유사시설물을 분석한 기존 연구와의 비교를 통해 LCA 분석시 유사점과 차이점을 분석하고자 한다.

또한 기존연구 및 사례에 따른 환경부하 저감방안을 구축하고, 구축된 저감방안을 본 시설물에 적용하여 그 효용성을 검증하고자 한다.

2. 연구의 방법 및 범위

본 연구는 LCA(Life Cycle Assessment) 기법을 정수처리 시설에 적용하여 합리적인 LCA 분석 방법을 모색하고, 건설 초기단계인 설계·시공단계부터, 운영단계, 해체 및 재활용단계에 이르는 전생애주기 동안의 환경부하를 평가하고, 그 결과를 바탕으로 유사시설물과의 비교를 통하여 LCA 분석 시 고려한 유사점 및 차이점을 분석하고자 한다. 또한, 기존연구를 활용하여 환경부하 저감방안의 구축과 저감효과의 검증은 연구의 범위로 설정하였다. 이에 따라 정수처리시설의 전과정에 대한 LCA 분석을 통하여 환경부하물질의 정량적 산출을 수행하고, 수도운영개선사례 및 기존연구를 바탕으로 LCA 분석을 수행한다.

LCA 분석에 사용되는 데이터는 민간투자사업으로 진행된 P시의 OO정수장의 설계내역서와 수도운영개선사례 및 기존

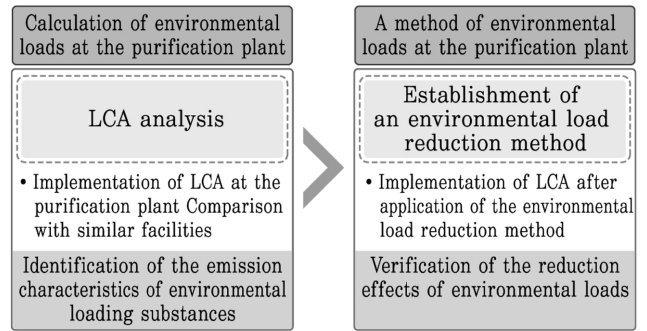


Fig. 1. Research scope and objectives.

연구 자료를 활용하여 LCA 분석을 위한 관련 자료의 신뢰도를 높일 수 있도록 하였다. 정수처리시설의 LCA 분석을 통해 전생애주기 동안의 환경부하를 도출하고, 기존 연구에서 도출된 저감방안을 실제 데이터에 적용하여 LCA 분석을 바탕으로 그 저감효과를 확인하는 것을 범위로 한다(Fig. 1).

3. 이론적 배경

본 장에서는 본 연구와 관련된 LCA 분석의 이론적 고찰과 선행연구 분석을 수행하고, 정수처리시설의 필요성, 정수처리 시설 등에 대한 이론적 정리하였다.

3.1 LCA의 이론적 고찰

LCA 기법은 제품의 전과정 동안에 제품(서비스 포함)에서 야기된 환경부하물질의 명확한 규명과 배출량에 대한 정량적 산출하고 환경에 미치는 영향을 평가하는 의사결정 도구이다. 또한, 환경부하물질이 일으키는 환경오염의 범위를 지구온난화, 오존층고갈, 자원소모 등의 국부적 문제까지 모두 포함하는 범지구적 규모의 환경부하로 확대하였고 이에 기존에 고려하지 못했던 환경오염의 원인을 파악하고 다양한 환경부하물질에 대한 환경부하를 종합적으로 분석할 수 있는 의사결정을 지원한다. LCA 분석에 의해 산출된 결과는 환경에 관련된 정책관련자 및 제품생산자, 소비자들의 친환경적 의사결정을 하는데 중요한 정보를 제공한다(Min, 2013).

국제표준화기구(ISO)의 14040 series 중 ISO 14040 (LCA-Principles and Framework)에 의하면 LCA 분석은 제품시스템의 전과정에서 관련투입물과 산출물에 대한 목록을 작성하고 이들과 연관된 잠재적인 환경부하를 평가하며, 목록분석결과와 환경부하를 평가하기 위한 기법으로 정의하고 전과정 평가의 구성은 목적 및 범위정의(Goal and Scope Definition), 전과정 목록분석(Life-Cycle Inventory Analysis), 전과정 영향평가(Life-Cycle Impact Assessment) 및 전과정 해석(Life-Cycle Interpretation)의 단계로 구성된다. 각각의 단계는 상호 밀접한 관계를 가지고 있으며 LCA 분석에 의해 산출되는 결과는 제품 개발 및 개선전략, 공공정책 수립, 기업의 마케팅

등 여러 가지 분야에 의사결정에 사용된다. 이때 전과정이란 원료의 추출과 가공, 제조, 수송, 유통, 사용, 재사용, 유지보수, 재활용, 폐기에 이르기까지의 제품이나 공정, 서비스 활동 등을 포함한다(Lee, 2010).

3.2 건설분야 LCA 선행연구 분석

제조업분야와 달리 긴 생애주기와 다양한 투입물과 산출물을 포함하는 복잡한 공정으로 구성된 건설분야에 LCA를 수행하는 일은 쉽지 않아 LCA 연구 차제가 미진한 상황이지만 건축분야를 중심으로 의미 있는 소수의 연구결과가 발표되었다. 국내·외에서 불고 있는 저탄소 녹색성장의 바람과 정부의 온실가스 중기감축 목표(2020년)에 맞춰 토목분야도 활발한 연구가 수행되고 있다. 다음 Table 1은 최근 몇 년간 수행되었

Table 1. Recent researches on the LCA in construction industry

| Author | Application | Results |
|--------------------|--|--|
| Min (2013) | Airport pavement | · Environmental load - Construction 38.03% - Operation/Maintenance 61.96% - Destruction 0.01% · Main impact result GWP: 98.4%(1.10E+08kg) |
| Park (2011) | Highway construction | · Environmental load - Construction 61.6% - Operation/Maintenance 30.9% - Destruction 7.5% · Main impact result GWP: 99.07%(2.13E+05kg) |
| Lee (2008) | Steel box and PSC girder bridge | · Main impact result - Steel box bridge GWP: 9.68E+03kg (per 100m ²) - PSC box bridge GWP: 2.34E+04kg (per 100m ²) |
| Kim et al. (2010) | Sand filtration method and membrane filtration | · Main impact result - Sand filtration method GWP: 3.49E+07kg - Membrane filtration method GWP: 2.90E+07kg |
| Lee (2010) | Reuse facility | · Environmental load - Construction 8.7% - Operation/Maintenance 90.7% - Destruction 0.6% · Main impact result GWP: 82.8%(1.01E+08kg) |
| Kang et al. (2008) | Pipe construction | · Main impact result - Urea type GWP: 2.31E+04kg - Epoxy type GWP: 9.07E+03kg |
| Kim et al. (2007) | Water supply system | · Environmental load - Sludge transportation 88.29% |

*GWP: Global Warming Potentials

던 대표적인 건설분야 LCA 관련 연구를 보여주고 있다.

사회기반시설의 전과정에 대한 대부분의 연구결과에서는 건설자재의 생산과 시공단계에서 사용되는 장비에 의한 환경부하가 많이 발생하는 것으로 분석되었다. 또한 수명주기가 긴 사회기반시설의 특성상 유지관리 단계에서도 다량의 환경부하가 발생하는 것으로 분석되었으나, 연구결과 도출을 위해 사용된 데이터가 실측데이터에 기반을 두지 못하고 대부분 추정치의 데이터를 사용하여 그 결과에 대한 신뢰성을 높일 수 있는 방법의 개발이 필요하고 제한된 DB와 분석 시나리오 구성의 문제 등으로 사회기반시설의 전과정에 대한 심도 있는 연구가 추가로 필요한 실정이다.

그 중 정수처리시설의 경우 설계·건설단계, 운영단계 그리고 해체 및 재활용단계 등 전과정에 대한 LCA를 기반으로 한 환경부하량 산출 관련 연구가 미진하여 그 사례를 찾아보기 힘들며, 시설의 주된 기능을 수행하기 위한 건설 활동 중 건설자재의 제조 및 현장까지의 수송을 포함한 구조물의 건설과 유지보수에 관련된 에너지소비량 및 각종 환경오염물질 등을 고려하면 본 정수처리시설 건설로 인한 환경부하는 실로 상당할 것으로 예상된다.

이에 따라 전과정에서 발생하는 환경부하 배출물을 정량적으로 산출하여 지구환경문제의 영향과 기여도를 파악할 수 있는 기초자료로 활용하고 정수처리시설의 시공 및 운영단계에서 발생될 환경부하물질의 정량적 파악을 통한 종합적인 환경부하 저감방안 수립에 관한 연구도 필요할 것으로 판단된다. 또한 본 연구와 유사한 산출과정으로 진행된 기존 연구와의 비교를 통해 기존 LCA 연구에서 산출된 단계별 환경부하의 상이함에 관한 비교분석도 필요할 것으로 판단된다.

3.3 정수처리시설 개요

정수처리시설은 수도시설의 중추시설로 아주 작은 오차도 허용치 않으며 소요 수질의 물을 필요량만큼 안정적으로 공급하는 것이 기본이다. 단 한 번의 정수처리사고가 발생 할 경우 그 파급 효과는 매우 커, 정수처리의 사고를 미연에 방지하기 위해 철저히 운전·관리하여 수돗물을 안전하게 생산·공급하여야 한다. 정수처리시설은 수질기준에 적합하고 안전하며 쾌적하게 이용할 수 있는 수돗물을 생산하기 위한 시설로, 상수도시설 전체 중에서 정수처리기능을 이루는 시설로 특히 중요한 위치를 차지하고 있다. 정수시설관리가 충분하지 않는 경우는 적정한 처리수량과 처리수질을 얻을 수 없으며 그 결과로 인해 상수도 전반에 걸쳐 중대한 영향을 미치게 된다(KECO, 2012).

모든 정수장은 원수에 따라 처리공정이 달라져야 하고 원수의 수질은 주로 BOD5농도에 따라 분류하고 있다. 원수는 크게 지표수, 지표수에 영향을 받는 지하수, 또는 지하수로 나눌 수 있다. 지표수는 하천과 호소수로 나누어질 수 있으며 크기에 따라 수질도 매우 다르다. 하천수는 장마나 갈수기에 수질

이 악화되며 주기적으로 조류의 번식 때문에 이취미 문제가 발생하고 있다(KECO, 2012).

정수시설은 크게 취수시설, 예비침전지, 착수정, 약품주입 설비, 혼화, 응집, 침전, 여과, 소독, 정수지 및 배출수 처리 시설로 구성되어 있다. 고도정수처리의 경우 전 오존 및 중·후 오존방식을 사용하고 후단에 입상활성탄을 설치하고 있다. 정수방법에는 크게 간이처리방식, 완속·급속여과방식, 고도처리 및 특수처리로 구별할 수 있으나 우리나라에서 가장 보편적으로 운영되고 있는 방식은 급속여과방식이다(KECO, 2012).

4. 정수처리시설의 LCA분석

본 장에서는 정수처리시설의 전과정에 대한 LCA 분석을 수행하는 단계로서 목적 및 범위 설정, 목록분석, 영향평가 그리고 결과해석 순으로 진행한다. 또한, 정수처리시설과 유사한 재이용시설의 LCA 분석의 특성과 유사성, 차별성 등을 비교한다.

4.1 대상시설물 개요

본 정수장은 일일 총용량 15만2천ton으로 2021년까지 1단계(9만t/일), 2단계(6만2천t/일)로 추진되고 있다. 본 연구는 민간투자사업으로 진행된 P시의 'OOO정수장'의 1단계 공사를 대상으로 하고 있다. 대상시설물의 개요는 다음 Table 2와 같다.

4.2 목적 및 범위 설정

4.2.1 목적 및 범위 설정

본 연구는 정수장을 시공하고 사용하는 각 단계들은 물론 일정시간 동안 운영하고 시설 노후화 및 기능 손실로 인해 해

Table 3. Function, functional unit, and reference flow

| Division | Contents |
|------------------------------------|---|
| Function | Appropriate treatment of raw water for drinking purposes |
| Functional unit/ Reference flow | Capable of treating 1 m ³ of raw water per day |

제하여 처분하거나 재활용하는 전과정을 고려한 환경부하를 정량화하여, 종합적인 환경부하를 평가하기 위한 기초자료를 제시하고, 설계·계획, 시공 및 운영단계에서 친환경적인 설계를 위한 환경부하 저감방안을 위한 의사결정시 판단자료로 활용할 수 있는 평가방법을 제시하는데 목적을 두고 있다. 본 연구의 범위는 정수처리시설의 전과정, 즉 건설단계, 운영단계, 해체 및 재활용단계 전체로 설정한다.

4.2.2 기능단위

정수처리시설의 기능은 “원수를 음용에 적합하게 정수처리하는 기능”으로 정의하였다. 기능단위와 기준흐름을 별도로 분리하여 고려하지 않고 본 연구에는 일반적으로 정수처리시설에 대한 분석 시 기준으로 활용되는 생산량 기준으로 산정하였다. 따라서 기능단위와 기준흐름은 “1인당 1 m³을 정수처리하는 능력”으로 산정하였다(Table 3).

4.2.3 시스템 경계

시스템경계 설정의 가장 큰 목적은 데이터를 수집하는 범위를 결정하고 데이터 수집이 용이하도록 단위공정화를 하는 것이다. 본 연구에서는 대상시설물인 정수처리시설에서도 도·배수관로와 정수처리시설의 각 처리공정을 포함시키는 것으로 시스템경계를 설정하였다(Table 4). 단, 시설물의 전과

Table 2. Description of the purification plant

| Division | Facility description | |
|-----------------------------|----------------------------------|---|
| Water purification facility | Capacity | 90,000 m ³ /day(Stage1) |
| | Water treatment process | Powder activated carbon contact unit → Mixture → Flocculation and sedimentation basins → Rapid filtration → Water distribution reservoir → Clean water supply |
| | Effluent water treatment process | Effluent sludge facility → Sludge thickener → Effluent water sedimentation basin → Discharge |
| Water-intake facility | OO water intake station | Q = 14,000 m ³ /day: reformed |
| | OO booster station | Q = 76,000 m ³ /day: newly-built |
| Conduct pipe | D = 450 mm, L=1.2 km | D = 1,200 mm, L=1.1 km |
| Drain pipe | D = 1,350 mm, L=2.3 km | D = 800-900 mm, L=6.4 km |
| Structure | Building area | 12,000 m ² |
| | Total ground area | 7,800 m ² |
| | Main facility | Management area, filter basin area, installation area, etc. |
| Landscape facility | Cultivation | Oriental chestnut oak, sawleaf zelkova, tulip tree (<i>Liriodendron tulipifera</i>), Mongolian oak, etc. |

Table 4. System boundary of the target facility

| Division | Contents | Consideration | |
|---------------------------|---|--------------------------|--|
| Construction | All aspects of purification plant construction, including civil engineering, construction, machinery, electricity, instrumentation and control, and landscape gardening | Input materials | All materials, such as cement and ready-mixed concrete (RMC) |
| | | Construction equipment | All equipment, such as bulldozers and dump trucks |
| | | Utilities | Electricity, added water, water for use, etc. |
| Operation | · Utilities used · Materials to be repaired or replaced for maintenance | Utilities | Chemicals, electricity, gas, water for use, etc. |
| | | Repair/Replacement | Input materials, construction equipment |
| Destruction and Recycling | · Utilities used for deconstruction and recycling · Use of equipment for transporting waste | Utilities | Electricity, diesel oil, etc. |
| | | Transportation equipment | Dump trucks, etc. |

정에 사용되는 기계 및 건설장비의 가공 및 운송과정은 시스템 경계에서 제외한다.

4.2.4 데이터 범주 및 품질요건

LCA를 수행하기 위해서는 데이터가 수집되어야 하는데 연구 목적에 따라서 필요한 데이터 범주를 사전에 규명하는 것이 필요하다. 본 연구에서는 전과정 동안의 사용자재와 에너지에 관련된 투입물과 산출물을 포함하였다. 또한 대기배출물(CO₂, NO_x, PM, CO 등 대기오염물질), 수계배출물(BOD, COD, TSS 등 수질오염물질), 폐기물(고형폐기물, 탈수케이크, 슬러지 등)이 모두 필요한 데이터 범주이다.

필수적인 데이터 품질요건은 시간적 범위, 지역적 범위, 기술적 범위의 세가지 항목을 꼽을 수가 있으며, 본 연구의 시간적 범위는 2013년도 상반기의 설계데이터로 설정하였으며, 지역적 범위는 P시의 정수처리시설이며, 기술적 범위는 현재 통용되는 대표기술을 기준으로 하였다.

4.2.5 가정 및 제한사항

본 연구에서는 민간투자사업으로 진행된 P시의 “OOOO정수장”의 설계내역서와 관련 설계도서를 기반으로 목록구성을 하였고, 상기 자료에서 언급하지 않는 일반적 내용과 누락내용에 대해서는 2013년 건설공사 표준품셈과 건설기계경비 산출표를 참고하여 LCA를 수행하였다.

① 건설 및 해체·재활용 단계는 설계내역서 및 설계도서를 기반으로 주요 자재, 장비 등의 물량을 구성하였고, 정확한 재질이 명시되지 않은 경우에는 같은 기능을 수행하는 일반적 자재를 적용하였다.

② 원료 및 원부자재의 정확한 재질을 파악하지 못한 경우에는 가능한 조성정보를 취합하였다.

③ 수송과정에 대한 고려 시 도시 간 최단거리를 산출하여 적용하였다.

4.3 전과정 목록분석

정수처리시설의 LCA 분석을 수행하기 위해 대상시설물의

전과정을 건설단계, 운영단계, 해체 및 재활용단계로 구분하여 각 단계별로 데이터를 수집하였다. 데이터의 시스템에 투입되는 원료 물질은 내역서의 자재를 사용하여 구성하였고, 시스템에 투입되는 에너지는 건설장비에 투입되는 휘발유 및 경유, 중유의 사용량으로 구성하였다.

4.3.1 건설단계 목록분석

건설단계에서는 정수처리시설 건설에 따른 건설자재 및 장비에 대하여 설계내역서에 구성된 물량을 기반으로 목록분석을 수행하였다. 건설단계의 데이터 목록을 정리하면 다음 Table 5와 같다.

4.3.2 운영단계 목록분석

운영단계에서는 정수처리시설 운영에 따른 보수자재, 전력 및 정수처리 시 사용되는 약품에 대하여 목록분석을 수행하였다. 본 연구에서는 ‘지방공기업법 시행규칙 별표 2 - 내용연수표’을 참조하여 상하수도사업에 해당되는 ‘토목시설 및 그 밖의 수도시설: 30년(취수·도수·정수·배수시설비시설 등)’을 기준으로 내구연한을 30년으로 설정하였다(Table 6).

4.3.3 해체 및 재활용단계 목록분석

해체 및 재활용단계에서는 건설폐기물에 대한 종류별 처리비율을 전국폐기물통계조사(2013)에 따라 매립, 소각, 재활용비율을 산출하였으며, 해체 시 발생하는 폐기물을 처리방법별로 수송하여 최종 처분하는 것으로 가정하였다(Table 7).

4.4 전과정 영향평가

전과정 영향평가 단계는 전과정 목록분석의 결과를 환경적인 측면에서 평가하여 중요한 환경부하를 규명할 수 있는 단계이다. 목록분석 결과를 활용하여 정수처리시설의 전과정에서 발생하는 환경부하를 평가하기 위해 환경성적표지제도 활성화를 위하여 환경부의 지원하에 한국환경산업기술원에서 개발한 환경성적표지 전용 LCA 소프트웨어 TOTAL(Tool for Type III Labelling and LCA) Ver.4.1.1을 사용하였다.

Table 5. Inventory data list in the construction stage

| Division | Data list | |
|--------------------------------|--|--|
| Construction materials | Civil works | PHC files, steel pipes, cement, rebar, wood, sand, aggregate, rebar, RMC, pipe types, waterproofing agents, interior and exterior materials, asphalt, concrete, etc. |
| | Architectural works | |
| | Machinery | Fixed anchors, wire and cable types, metal support types, pump types, tank types, fire extinguishing and construction equipment types, etc. |
| | Electricity, and instrumentation and control | |
| Landscape gardening | Aggregate, block, decomposed granite, etc. | |
| Construction equipment | Construction equipment | Excavators, cranes, forklifts, bulldozers, generators, pump cars, water pumps, RMC cars, welding machines, paving equipment, etc. |
| | Transportation equipment | Dump trucks, etc. |
| Amount of principal list usage | Input materials | · Remicon: 86,949 m ³ · Cement: 5,041 tons |
| | Construction equipment | · Diesel oil: 806,353 L · Gasoline oil: 522 L |
| | Utilities | Electricity: 2,027 MWh |

Table 6. Inventory data list in the operational stage

| Division | Data list | |
|--------------------------------|--|--|
| Repair materials | Civil works | Pipe types, water proofing agents, interior and exterior materials, asphalt, concrete, etc. |
| | Architectural works | |
| | Machinery | Wire and cable types, metal support types, pump types, tank types, fire extinguishing and construction equipment types, etc. |
| | Electricity, and instrumentation and control | |
| Landscape gardening | Block, decomposed granite, etc. | |
| Electricity | Collection of essential energy data for use in calculating operating expenses | |
| Chemical | Collection of essential chemical quantity data for use in calculating operating expenses | |
| Amount of principal list usage | Utilities | · Electricity: 237,973 MWh · PACS: 15,144 tons · Cl ₂ : 2,102 tons |
| | Repair/replacement | · Asphalt: 49,387 tons · Paint: 11,304 tons |

Table 7. Life cycle inventory analysis in the destruction and recycling stages

| Division | Data list | | |
|-------------------------------|---------------------------|--|-----------------------------|
| Generation of waste materials | Construction waste | Waste concrete, waste asphalt concrete, waste brick, etc. | |
| | Incombustible waste | Construction sludge, waste glass, waste tile, waste metal, etc. | |
| | Combustible waste | Waste wallpaper, waste fiber, waste wood, etc. | |
| | Mixed waste | Waste panel, waste board, mixed construction waste, etc. | |
| Primary equipment | Deconstruction | · Backhoe shovel (1 m ³) · Breaker (1 m ³) · Hydraulic breaker (1 m ³) | |
| | Collection/transportation | Dump trucks (15 tons) | |
| | Final processing | Reclamation | Loaders (5 m ³) |
| | | Incineration | Incinerators |
| Recycling | | Crushers (150 tons) | |
| Amount of list usage | Construction equipment | · Diesel oil: 1,298,909 L · Gasoline oil: 2,498 L · Electricity: 211 KWh | |

Table 8. Impact assessment results by the impact category

| Division | Construction | Operation | Deconstruction/ Recycling | Life cycle | |
|---|--------------|-----------|------------------------------|------------|------------|
| | | | | Load value | Percentage |
| ADP[kg antimony eq./] | 5.81E+12 | 2.90E+06 | 2.82E+04 | 5.81E+12 | 0.63% |
| GWP[kg CO ₂ eq./] | 9.12E+14 | 2.60E+08 | 8.88E+04 | 9.12E+14 | 98.92% |
| ODP[kg CFC11 eq./] | 2.17E+07 | 1.11E+01 | 1.64E+04 | 2.17E+07 | 0.01% |
| AP[kg SO ₂ eq./] | 2.92E+12 | 1.23E+06 | 1.82E+02 | 2.92E+12 | 0.32% |
| EP[kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 3.73E+11 | 1.58E+05 | 1.25E+01 | 3.73E+11 | 0.04% |
| POCP[kg C ₂ H ₄ eq./] | 7.11E+11 | 4.20E+05 | 1.54E+01 | 7.11E+11 | 0.08% |

*ADP: Abiotic resource Depletion Potentials, GWP: Global Warming Potentials, ODP: Ozone Depletin Potentials, AP: Acidification Potentials, EP: Eutrophication Potentials, POCP: Photochemical Oxidants Creation Potentials

LCI DB는 국가데이터베이스(지식경제부, 국토해양부, 환경부의 LCI DB)를 기본으로 적용하였고, 영향평가방법은 영향평가의 필수단계인 특성화 분석을 수행하는 환경성적표지 제도의 6가지 영향범주를 고려하여 정수처리시설의 전과정, 즉, 건설단계, 운영단계, 해체 및 재활용단계별 LCA 분석을 수행하였다. 전과정 단계별 환경부하물질 배출비율은 다음 Table 8과 같다.

정수처리시설의 전과정에서 발생하는 환경부하물질의 총 발생량 9.22E+14 kg 중 9.12E+14 kg, 98.9%가 지구온난화(GWP) 범주에서 발생하였다. 이는 건설단계에서 건설자재를 생산하는 공정과 장비의 사용에 따른 경유의 투입량이 목록 구성의 대부분을 차지하는 원유관련 에너지 투입의 결과로 볼 수 있다. 전과정의 환경부하물질 발생량을 보면 자원소모(ADP)는 전체에서 0.63%, 산성화(AP)는 0.32%, 광화학적산화물생성(POCP)는 0.08%, 그 외 오존층영향(ODP), 부영양화(EP)에서 0.05% 정도 환경부하 발생을 보였다.

운영단계에는 정수처리시설 운영을 위한 전력과 정수처리를 위한 다양한 약품투입 및 자재 개·보수 물량을 내구연한 30년으로 설정하여 작업하였지만 건설단계에 비하면 적은 환경부하 발생률을 보였고, 해체 및 재활용단계는 원자재의 투입은 없이 장비의 사용에 따른 경유 투입량으로만 고려되어 분석하였기 때문에 환경부하의 발생이 건설단계에 집중적으로 발생하는 것으로 판단된다.

4.5 유사 시설물과의 LCA 분석 결과 비교

개념적으로 사회기반시설의 평가범위는 건설용 자재 및 설비의 제조로부터 시공, 시설의 운영 및 유지, 구조물의 최종폐기에 이르기까지의 전과정에서 발생하는 환경부하를 대상으로 하게 된다. 그러나, 공장에서 일률적으로 생산되는 공업제품에 대한 환경영향을 단일수치로 정량화하는 영향평가 방법은 이미 많은 연구를 통하여 제시되고 있지만, 데이터의 일반화, 규격화 등이 요구되는 LCA 분석의 특성상 복합시스템을 분석해야 하는 LCA 분석에서는 현재 목록분석을 통한 영향평가 단계까지만 연구범위로 설정하는 수준에 머물러 있다. 이러한 목록분석을 통한 영향평가까지만 평가하더라도 각 단계의 환경부하량을 정량화하고 환경영향을 비교분석할 수 있으므로, 본 정수처리시설과 유사하게 전과정에 대한 LCA 분석을 시도한 유사 상하수도시설 기존 연구사례를 선정하여 LCA 분석 결과를 비교분석을 하여 그 유사점과 차이점을 알아보고자 한다.

4.5.1 유사 시설물 비교

① 연구 대상

본 정수처리시설과 유사한 선정한 기존연구는 “전과정평가를 이용한 하수처리수 재이용시설의 환경영향 평가”이며, 하수처리수 재이용시설을 대상으로 건설단계, 운영단계, 해체·폐기 단계에 대한 LCA를 수행하였다(Lee, 2010).

Table 9. Comparison with the wastewater reuse facility

| Division | Purification plant | Wastewater reuse facility |
|-------------------|--|---|
| Facility capacity | 90,000 m ³ /day | 100,000 m ³ /day |
| Main facility | Water treatment facility, pipeline facility, effluent water treatment facility | Wastewater reuse facility, pipeline facility, effluent water treatment facility |
| Treatment process | Water treatment process | Wastewater retreatment process |
| Impact evaluation | Characterization | Characterization, normalization, weighting |
| Impact category | Six categories of EDP | Ten categories established by the Ministry of Trade, Industry, and Energy |
| S/W | TOTAL | PASS |

② 기능단위 및 분석범위

정수처리시설의 기능은 “원수를 음용에 적합하게 정수처리하는 기능”이며, 하수처리수 재이용시설의 기능은 “하수를 재처리하는 기능”이다. 기준흐름은 별도로 분리하여 고려하지 않고 분석 시 기준으로 정수처리시설은 활용되는 생산량 기준으로 산정하였고 재이용시설은 활용되는 유입량 기준으로 산정하였다.

③ 분석 대상 시스템 경계

정수처리시설에서는 도·배수관로와 정수처리시설의 각 처리공정을 포함시키는 것으로 시스템경계를 설정하였고, 하수처리수 재이용시설에서는 공급관로와 재이용시설의 각 처리공정을 포함시키는 것으로 시스템경계를 설정하였다(Table 11).

④ 전과정 목록분석

LCA 분석을 수행하기 위해 시설물의 전과정을 구분하여 각 단계별로 데이터를 수집하였다.

⑤ 전과정 영향평가

정수처리시설의 영향평가방법은 영향평가의 필수단계인 특성화 분석을 수행하는 환경성적표지제도의 6가지 영향범주를 고려한 방법을 사용하여 환경부하 평가를 수행하였고, 하수처리수 재이용시설의 영향평가방법은 산업통상자원부 10가지 영향범주를 바탕으로 특성화, 정규화, 가중화를 수행하였다. 본 영향평가는 본 시설물이 특성화 분석을 수행하는 환경성적표지제도를 바탕으로 분석을 실시하였기에 특성화를 기준으로 비교하고자 한다(Table 13).

정수처리시설의 전과정에서 발생하는 환경부하물질의 총 발생량 9.22E+14 kg 중 9.12E+14 kg, 98.9%가 지구온난화(GWP) 범주에서 발생하였다. 전과정 단계별로 살펴보았을 때 건설단계, 운영단계, 해체 및 재활용단계 중 건설단계에서 99.9%로 가장 큰 영향이 미치는 것으로 나타났다. 이는 건설단계에서 건설자재를 생산하는 공정과 장비의 사용에 따른 경우의 투입량이 목록구성의 대부분을 차지하는 원유관련 에너지 투입의 결과로 볼 수 있다.

하수처리수 재이용시설의 전과정에서 발생하는 환경부하의

Table 10. Comparison of the function and analysis scope

| Division | Purification plant | Wastewater reuse facility |
|----------|---|---|
| Function | Appropriate treatment of raw water | Retreatment of wastewater |
| Scope | Capable of treating 1 m ³ of raw water per day | Capable of treating 1 ton of wastewater per day |

Table 11. Comparison of the system boundary

| Division | Purification plant | Wastewater reuse facility |
|--------------|--|--|
| Construction | All aspects of purification plant construction | All aspects of wastewater reuse facility construction |
| Operation | · Utilities used for operation (chemical, electricity) · Materials to be repaired or replaced for maintenance | · Amount of electricity used · Amount of chemicals used · Amount of material input for maintenance |
| Destruction | · Utilities used for deconstruction and recycling · Equipment for transporting waste | Energy consumption according to deconstruction, waste transportation, reclamation, incineration, and reuse |

Table 12. Comparison of the inventory list

| Division | Purification plant | Wastewater reuse facility |
|--------------|--|--|
| Construction | · Amount of material used by construction work types: civil engineering, construction, machinery and electricity, instrumentation and control, and landscape gardening – (from a detailed design) · Energy consumption: Diesel oil (by the type of equipment & the quantity of equipment) | · Amount of material used by construction work types: civil engineering, construction, and machinery and electricity (from a detailed design) · Energy consumption: Diesel oil (by the type of equipment & the quantity of equipment) |
| Operation | · Amount of repair materials: Considering Repair/replacement rates and periods · Energy and chemical consumption, essential data: Operating expenses calculation | · Amount of repair materials: Considering durable period · Energy consumption, annual electricity data · Chemical consumption: data on the amount of UF, RO, and process chemicals |
| Destruction | Process data: Destruction, waste transportation and treatment method | Process data: Destruction, waste transportation and retreatment method |

Table 13. Comparison of environmental load by impact category

| Division | Purification plant | | | Waste water reuse facility | | |
|---|--------------------|-----------|-------------|----------------------------|-----------|-------------|
| | Construction | Operation | Destruction | Construction | Operation | Destruction |
| ADP[kg antimony eq./] | 5.81E+12 | 2.90E+06 | 2.82E+04 | 3.62E+04 | 2.91E+05 | 2.01E+05 |
| GWP[kg CO ₂ eq./] | 9.12E+14 | 2.60E+08 | 8.88E+04 | 8.73E+06 | 9.17E+07 | 5.41E+05 |
| ODP[kg CFC11 eq./] | 2.17E+07 | 1.11E+01 | 1.64E-04 | 7.21E-01 | 3.35E+01 | 8.98E-04 |
| AP[kg SO ₂ eq./] | 2.92E+12 | 1.23E+06 | 1.82E+02 | 2.06E+04 | 5.41E+05 | 1.11E+03 |
| EP[kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 3.73E+11 | 1.58E+05 | 1.25E+01 | 8.62E+03 | 5.56E+04 | 7.57E+01 |
| POCP[kg C ₂ H ₄ eq./] | 7.11E+11 | 4.20E+05 | 1.54E+01 | 1.40E+04 | 2.48E+04 | 4.05E+01 |

대부분은 지구온난화(GWP)가 1.02E+08 kg 중 1.01E+08 kg (98.8%)로 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 전과정 단계별로 살펴보았을 때 운영단계에서 90.7%로 가장 큰 영향이 미치는 것으로 나타났다.

4.5.2 유사 시설물과의 LCA 분석 결과 비교

① 유사점

전과정 영향평가 결과를 종합해 보면 전과정(Life-Cycle)에서 발생하는 환경부하물질의 대부분이 지구온난화(GWP) 범주에서 정수처리시설은 98.9%, 하수처리수 재이용시설은 98.8%가 영향을 미쳤다. 이는 비교하는 두 시설물이 물이라는 지구자원을 처리공정을 통하여 우리가 필요로 하는 물을 생산하기 위함이고 처리공정의 유사점으로 인해 주요시설 구성이 비슷하고 시스템 경계 및 전과정 목록분석 시 고려한 LCI 목록이 유사함을 보여주고 있다.

② 차이점

전과정 영향평가 결과를 종합해 보면 정수처리시설의 전과정에서 발생하는 환경부하물질의 대부분은 건설단계(99.9%)에서 발생이 되고 재이용시설은 운영단계(90.7%)에서 발생되는 것으로 분석되었다.

두 시설물의 기본적인 주요시설은 비슷하지만 처리공정으로 들어오는 수질, 처리용량 및 처리공법 등에 따라 시설물의 규모가 결정이 되고 이에 따라 전과정에 적용되는 자재의 수량 및 건설장비의 유류소모량이 결정된다. 또한 운영단계 시 적용되는 전력소모량 및 약품의 종류 및 수량도 결정이 되며, 시설물의 내구연한에 따라서 소비되는 에너지소모량도 결정이 된다.

우선 건설 및 해체단계에서의 차이로는 목록분석 방법을 들 수 있다. 두 시설물은 개별적산법을 적용함으로써 프로세스 범위 및 개인적 성향에 따라 산출결과 변동이 크기 때문에 그 차이가 크다고 볼 수 있으며, 자재의 목록분석이 누락될 시 전과정을 고려한 운영단계의 보수자재 물량에서도 누락되고 해체 및 재활용단계에서도 누락되어 환경부하 산출에 영향을 주는 것을 보여주고 있다.

운영단계에서의 차이는 재이용시설에 들어오는 하수의 재

처리공정을 통한 약품투입으로 인한 환경부하가 정수처리공정에 비해 많고 더 긴 운영기간을 가짐에도 불구하고 환경부하가 적게 나온 것은 보수자재의 물량이 상대적으로 적게 목록분석이 되었음을 알 수 있다.

5. 환경부하 저감방안 도출 및 적용

본 장에서는 정수처리시설의 환경부하 저감방안을 시나리오 구성하여 어느 정도의 환경부하 저감이 발생하는지 예측하였다.

5.1 정수처리시설 환경부하 저감방안

5.1.1 시나리오 1 - 레미콘의 시멘트 치환

고로슬래그 미분말은 용광로의 선철 제조과정에서 발생하는 용융 고로슬래그를 급랭시켜 얻어진 입상의 고로 수쇄 슬래그를 미분쇄한 것으로서, 그 자체가 경화되는 성질은 미약하지만 시멘트 수화물 중 알칼리 자극에 경화하는 잠재수경성을 가지고 있어, 콘크리트용 혼화재로 사용할 경우 콘크리트의 수화발열속도저감, 온도상승 억제, 장기강도 향상, 수밀성 증대에 의한 내구성 향상 및 염화물 이온 침투억제에 의한 철근의 발청 억제 등의 다양한 효과를 기대할 수 있다.

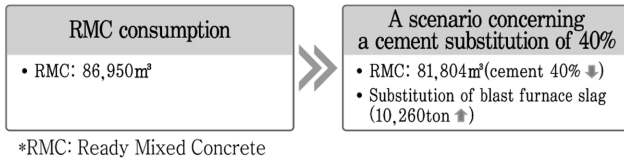
또한, 고로슬래그 미분말을 사용함으로써 보통포틀랜드시멘트 원료인 석회석을 약 40% 절약할 수 있으며, 석회석 및 에너지의 소비가 적기 때문에 석회석의 열분해나 연료의 연소에 따른 이산화탄소의 배출량 저감과 산업부산물의 재이용이 가능하며 환경부하 저감 및 경제적 효과를 기대할 수 있다.

① 기능단위 및 분석범위

본 시나리오는 전체 레미콘량은 계획과 동일하게 보고 시멘트 일부를 고로슬래그로 치환하는 경우에 의한 건설단계의 LCA 분석을 수행한다.

② 분석 대상 시스템 경계

전과정 중 건설단계를 시스템 경계로 하는 LCA 분석을 수행하였으며, 나머지 경계조건은 본 정수처리시설의 시스템 경계조건과 동일하다.



*RMC: Ready Mixed Concrete

Fig. 2. A scenario concerning cement substitution.

③ 전과정 목록분석

고로슬래그 치환율에 따른 콘크리트의 경화특성을 평가하기 위해 W/B는 53.0%, S/a는 48.8%로 설정하고 고로슬래그 미분말의 치환율은 0, 40, 70, 100%로 가정하여 계획을 수립하였고, 본 연구에서는 기존 연구를 바탕으로 시멘트의 40%를 고로슬래그로 치환하는 시나리오를 구성하였다(Lee, 2013). 단, 건설단계의 자재사용량 이외의 목록은 본 정수처리시설과 동일하게 구성하였다(Fig. 2).

④ 전과정 영향평가

전과정 영향평가 결과를 비교하면 Table 13과 같으며 건설단계의 자재소모량 대비 96.0% 수준으로 감소하였으며, 영향범주별로 비교해 보면 자원소모(ADP)에서 3.99% 저감, 지구온난화(GWP)에서 4.00%, 오존층영향(ODP), 산성화(AP), 광화학적산화물생성(POCP)에서 4.01% 저감, 부영양화(EP)에서 4.02% 저감하였다. 이러한 환경부하 저감은 시멘트를 산업부산물인 고로슬래그 미분말로 치환하여 자재생산과정에서 소비되는 에너지소모량에 따라 발생하는 PAHs, Benzene, Halon Gas 등의 발생이 감소하였기 때문이다.

5.1.2 시나리오 II - 신재생에너지 활용

운영단계에서 전력사용(취수+처리공정)에 의한 환경부하는

Table 14. Environmental load in terms of material replacement in the construction stage

| Division | Material consumption in the construction stage | Material consumption after cement substitution of 40% | Reduction rate (%) |
|--|--|---|--------------------|
| ADP [kg antimony eq./] | 5.81E+12 | 5.58E+12 | 3.99% |
| GWP [kg CO ₂ eq./] | 9.12E+14 | 8.76E+14 | 4.00% |
| ODP [kg CFC11 eq./] | 2.17E+07 | 2.08E+07 | 4.01% |
| AP [kg SO ₂ eq./] | 2.92E+12 | 2.80E+12 | 4.01% |
| EP [kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 3.73E+11 | 3.58E+11 | 4.02% |
| POCP [kg C ₂ H ₄ eq./] | 7.11E+11 | 6.82E+11 | 4.01% |

운영단계 전체 환경부하의 15.4%를 차지할 정도로 많은 환경부하가 발생되고 있고, 전력생산을 위한 화석연료 사용에 의한 자원소모(ADP), 지구온난화(GWP) 범주에서 큰 영향을 보이고 있다.

정수장 내에서 자연을 통해 생산된 전력을 활용할 경우 화석연료를 사용하지 않기 때문에 자원소모나 대기오염물질 배출이 없는 신재생에너지로, 친환경 발전량을 증가시켜 전력사용에 의한 환경부하를 줄일 수 있다.

① 기능단위 및 분석범위

본 시나리오는 운영단계의 에너지소모량은 계획과 동일하게 보고 전력생산을 통한 운영단계의 에너지소모량의 저감에 대한 LCA 분석을 수행한다.

② 분석 대상 시스템 경계

전과정 중 운영단계를 시스템 경계로 하는 LCA 분석을 수행하였으며, 나머지 경계조건은 본 정수처리시설의 시스템 경계조건과 동일하다.

③ 전과정 목록분석

본 정수처리시설에서는 실제 태양광설비(24 kW 1대, 21 kW 1대), 태양열 급탕설비(12 m² 1대), 광덕트(2 set), 태양광 블록(0.003 kW 60대)를 설치하여 전력 60,954(kWh/년)을 생산하여 전력사용량 저감계획을 수립하였다. 단, 신재생에너지시설의 생산 및 설치를 위한 과정은 본 시나리오에서 제외하고 이외의 목록은 본 정수처리시설과 동일하게 구성하였다(Fig. 3).

④ 전과정 영향평가

전과정 영향평가 결과를 비교하면 Table 14과 같으며 운영단계의 에너지소모량 대비 99.2% 수준으로 약간 감소하였으며, 영향범주별로 비교해 보면 자원소모(ADP), 지구온난화(GWP), 광화학적산화물생성(POCP)에서 0.76% 저감, 오존층영향(ODP)에서 0.77% 저감, 산성화(AP)에서는 0.75% 저감하였다.

이러한 환경부하 저감은 전력 생산과정에서 발생하는 자원소모나 대기오염 물질이 감소하였기 때문이다.

5.1.3 시나리오 III - 화학약품 사용량 저감

화학약품 사용량에 의한 환경부하는 운영단계 전체 환경부하의 9.2%를 차지하는 수준으로, 특히 화학약품 생산에 의한

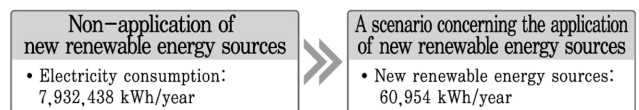


Fig. 3. A scenario concerning the utilization of new renewable energy types.

Table 15. Environmental load in terms of energy consumption in the operational stage

| Division | Energy consumption in the operational stage | Energy consumption after application of new renewable energy types | Reduction rate (%) |
|---|---|--|--------------------|
| ADP [kg antimony eq./] | 7.64E+05 | 7.59.E+05 | 0.76% |
| GWP [kg CO ₂ eq./] | 1.18E+08 | 1.17.E+08 | 0.76% |
| ODP [kg CFC11 eq./] | 3.26E-03 | 3.23.E-03 | 0.77% |
| AP [kg SO ₂ eq./] | 1.99E+05 | 1.98.E+05 | 0.75% |
| EP [kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 3.71E+04 | 3.68.E+04 | 0.76% |
| POCP [kg C ₂ H ₄ eq./] | 9.12E+04 | 9.05.E+04 | 0.77% |

PAHs, 중금속류의 영향으로 산성화(AP), 광화학적산화물생성(POCP) 범주에서 큰 영향을 나타내고 있다.

기준에 조건표를 의존하여 투입하던 응집제 투입을 산정방식을 Streaming Current Detector(SCD)를 활용한 피드백 제어방식으로 개선하게 되면 실제 응집제가 필요한 주입량이 가깝게 주입이 가능하여 화학약품 주입량을 감소시킬 수 있다.

① 기능단위 및 분석범위

본 시나리오는 운영단계의 약품소모량은 계획과 동일하게 보고 응집제 투입방식의 변경을 통한 운영단계의 약품소모량의 저감에 대한 LCA 분석을 수행한다.

② 분석 대상 시스템 경계

전과정 중 운영단계를 시스템 경계로 하는 LCA 분석을 수행하였으며, 나머지 경계조건은 본 정수처리시설의 시스템 경계조건과 동일하다.

③ 전과정 목록분석

응집제 사용량 20% 감소로 시나리오를 구성하였고, 응집제 사용량의 감소는 화학약품 생산에 의한 환경부하 뿐만 아니라, 화학약품 수송에 의한 환경부하를 줄이는 효과도 얻을 수

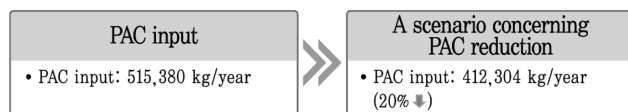


Fig. 4. A scenario concerning the reduction of utilized chemicals.

있다. 단, 운영단계의 약품투입량 변경 이외의 목록은 본 정수처리시설과 동일하게 구성하였다(Fig. 4).

④ 전과정 영향평가

전과정 영향평가 결과를 비교하면 Table 15과 같으며 운영단계의 약품소모량 대비 82.7% 수준으로 감소하였으며, 영향범주별로 비교해 보면 자원소모(ADP)에서 16.96%, 지구온난화에서 17.32% 저감, 산성화(AP)에서 16.11% 저감, 광화학적산화물생성(POCP)에서 16.65% 저감하였다. 그 밖에 부영양화(EP)에서 14.64% 저감, 오존층영향(ODP)에서 7.27% 저감하였다.

이러한 환경부하 저감은 약품 생산 및 수송 시 발생하는 NOx, SOx, PAHs, 중금속류 등이 감소하였기 때문이다.

5.1.4 시나리오 IV - 무방류시스템 도입

방류수와 수계배출물은 폐수배출허용기준 및 방류수수질기준 이내로 처리하여 방류 목표를 설정하여 방류수에 의한 환경부하는 극히 미비하다.

본 정수처리시설은 생활용수 생산라인만 운영중에 있어 배출되는 방류수와 수계배출물은 인근 하천으로 방류하게 된다. 이에 방류수와 수계배출물을 공업용수 생산라인의 원수로 재활용하여 사용하는 것이 가능하리라 판단된다.

① 기능단위 및 분석범위

본 시나리오는 운영단계의 에너지소모량은 계획과 동일하게 보고 방류수량의 재활용을 통한 운영단계의 에너지소모량의 저감에 대한 LCA 분석을 수행한다.

② 분석 대상 시스템 경계

전과정 중 운영단계를 시스템 경계로 하는 LCA 분석을 수

Table 16. Environmental load in terms of chemical consumption in the operational stage

| Division | Chemical consumption in the operational stage | Chemical consumption after 20% reduction of coagulant | Reduction rate (%) |
|---|---|---|--------------------|
| ADP [kg antimony eq./] | 1.10E+05 | 9.13.E+04 | 16.96% |
| GWP [kg CO ₂ eq./] | 1.56E+07 | 1.29.E+07 | 17.32% |
| ODP [kg CFC11 eq./] | 7.27E-01 | 6.74.E-01 | 7.27% |
| AP [kg SO ₂ eq./] | 1.25E+05 | 1.05.E+05 | 16.11% |
| EP [kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 6.20E+03 | 5.29.E+03 | 14.64% |
| POCP [kg C ₂ H ₄ eq./] | 1.67E+04 | 1.39.E+04 | 16.65% |

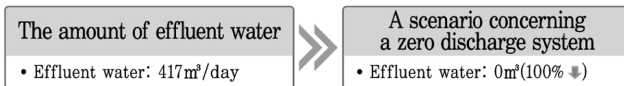


Fig. 5. A scenario concerning the implementation of the zero discharge system.

행하였으며, 나머지 경제조건은 본 정수처리시설의 시스템 경제조건과 동일하다.

③ 전과정 목록분석

무방류시스템 도입에 의해 417 m³/일의 방류수를 공업용수 원수로 재활용하여 사용하는 것으로 시나리오를 구성하였다. 단, 방류수 배출배관과 공업용수 라인 연결배관의 시공물량은 같다는 조건하에 이를 포함한 목록은 본 정수처리시설과 동일하게 구성하였다(Fig. 5).

④ 전과정 영향평가

전과정 영향평가 결과를 비교하면 Table 16과 같으며 운영 단계의 에너지소모량 대비 99.6% 수준으로 약간 감소하였으며, 영향범주별로 비교해 보면 자원소모(ADP), 오존층영향(ODP), 부영양화(EP), 광화학적산화물생성(POCP)에서 0.46% 저감하였고, 산성화(AP)에서 0.45% 저감하였다. 그 밖에 지구온난화(GWP)에서 0.42% 저감하였다.

이러한 환경부하 저감은 취수량이 저감되고 추가적으로 공업용수 생산에 대한 환경부하 감소도 예측된다.

5.2 정수처리시설 환경부하 저감 검증

정수처리시설의 환경부하 저감을 검증하기 위해 전과정평가와 저감 시나리오를 이행한 이후, 정수처리시설 전과정 동

Table 17. Environmental load in terms of energy consumption in the operational stage

| Division | Energy consumption in the operational stage | Energy consumption after application of the zero discharge system | Reduction rate (%) |
|--|---|---|--------------------|
| ADP [kg antimony eq./] | 7.64.E+05 | 7.61.E+05 | 0.46% |
| GWP [kg CO ₂ eq./] | 1.18.E+08 | 1.17.E+08 | 0.42% |
| ODP [kg CFC11 eq./] | 3.26.E-03 | 3.24.E-03 | 0.46% |
| AP [kg SO ₂ eq./] | 1.99.E+05 | 1.98.E+05 | 0.45% |
| EP [kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 3.71.E+04 | 3.69.E+04 | 0.46% |
| POCP [kg C ₂ H ₄ eq./] | 9.12.E+04 | 9.08.E+04 | 0.46% |

Table 18. Environmental load analysis of the life cycle of the purification plant

| Division | Reduction amounts in the construction stage | Reduction amounts in the operational stage | Reduction amounts over the entire life cycle |
|--|---|--|--|
| ADP [kg antimony eq./] | 2.32E+11 | 2.80E+04 | 2.32E+11 |
| GWP [kg CO ₂ eq./] | 3.65E+13 | 4.20E+06 | 3.65E+13 |
| ODP [kg CFC11 eq./] | 8.70E+05 | 6.00E-02 | 8.70E+05 |
| AP [kg SO ₂ eq./] | 1.17E+11 | 2.30E+04 | 1.17E+11 |
| EP [kg PO ₄ ³⁻ eq./] | 1.50E+10 | 1.40E+03 | 1.50E+10 |
| POCP [kg C ₂ H ₄ eq./] | 2.85E+10 | 3.90E+03 | 2.85E+10 |

안의 환경부하 저감 가능성을 비교·분석하였다.

정수처리시설에 적용가능한 환경부하 저감방안 사례 중 4가지 시나리오 구성 후 전과정 영향평가 결과는 건설단계에서는 환경부하가 3.69E+13 kg 저감되었고 운영단계에서는 환경부하가 2.60E+08 kg 저감되는 것으로 분석되었다.

건설단계 전체 환경부하에서 시나리오 I의 적용으로 저감되는 환경부하는 4.0%로 분석되었고, 운영단계 전체 환경부하에서 시나리오 II, III, IV의 적용으로 저감되는 환경부하는 1.6%로 분석되었다.

본 시설물에 4가지 시나리오를 적용하여 비교해 본 결과 그 저감량은 전과정 단계 대비 그 수치상으로는 미미하여 보이나 실로 엄청난 환경부하 저감효과가 나타났다. 이와 같은 시나리오를 다양하게 적용한다면 더 나은 환경부하 저감효과를 얻을 수 있을 것이라 판단된다.

6. 결 론

본 연구에서는 정수처리시설의 전과정(Life-Cycle) 단계별 환경부하 발생량을 정량적으로 산출하고, 수도운영개선사례 및 기존연구를 활용하여 본 시설물에 적용가능한 대표 시나리오를 바탕으로 환경부하 저감방안을 구축하여 그동안 미진했던 환경성 측면의 연구를 수행하였고 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

환경성적표지제도의 6가지 영향범주 자원소모를 고려하여 정수처리시설의 전과정, 즉, 건설단계, 운영단계, 해체 및 재활용단계별 환경부하평가를 산출하였다. 전과정에서 발생하는 환경부하물질의 총 발생량 9.22E+14 kg 중 9.12E+14 kg, 98.99%가 지구온난화(GWP) 범주에서 발생하였다. CO₂가 전체 배출의 97.2%를 차지하고 메탄이 2.67%를 차지하는 것으

로 나타났다. 전과정 단계별로 살펴보았을 때 건설단계에서 99.9%, 운영, 해체 및 재활용단계에서 0.1%의 영향을 미치는 것으로 나타났다.

하수처리수 재이용시설과의 비교를 통하여 LCA 분석 시 유사점 및 차이점을 분석하였다. 주요시설 구성이 비슷하고 시스템 경계 및 전과정 목록분석 시 고려한 LCI 목록이 유사하면 전과정에서 발생하는 환경부하물질이 유사하게 산출된다는 것과 목록분석 시 개별적산법을 적용함으로써 프로세스 범위 및 개인적 성향에 따라 산출결과 변동이 크기 바뀐다는 것을 나타냈다.

정수처리시설의 환경부하 저감을 검증하기 위해 4가지 환경부하 시나리오를 이행한 이후, 전과정 동안의 환경부하 저감 가능성을 비교·분석하였다. 전과정 영향평가 결과는 건설단계에서는 환경부하가 3.69E+13 kg 저감되었고 운영단계에서는 환경부하가 2.60E+08 kg 저감되는 것으로 분석되었다.

이상과 같이 본 연구에서는 사회기반시설 중 하나인 정수처리시설에 대하여 건설, 운영, 해체 및 재활용단계에서 발생하는 환경부하와 CO₂ 배출량을 정량적으로 산출하였다. 결과적으로 정수처리시설의 전과정에서 가장 큰 영향을 미치는 단계는 건설단계로, 이는 토목공사의 자재소모량에 의한 환경영향이 가장 큰 것으로 분석되었다. 또한 유사 시설물과의 비교를 통하여 목록분석 방법의 중요성을 알아보았고 추후 건설 부문에 적합한 체계적인 목록분석 방법 개발이 필요할 것으로 판단된다.

환경영향을 개선하기 위해서는 건설공사의 자재를 친환경 자재로의 대처가 가장 시급하고 운영 시에는 약품처리를 최적화해야 할 것으로 판단된다. 정수처리시설의 환경부하의 정량적 평가를 수행하여 상하수도분야의 환경부하 저감을 위한 자료구축의 기초자료로 활용할 수 있고, 특성화를 통한 각 환경부하물질의 배출량의 정량적 산출은 수행했으나 가중화와 정규화는 향후 연구에서 추가적으로 수행해야 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 서울과학기술대학교 교내 학술연구비 지원(2014년)으로 수행되었습니다.

References

- Jeong, Y.S. (2010) *A Study on Prediction Model of Carbon Dioxide Emission in Life Cycle for Residential Buildings*, University of Seoul, (in Korean).
- Kang, I.S., Kim, C.H., Choi, H.R., and Moon, H.S. (2008) *A Case Study on the Application of the Life Cycle Assessment in the Water Supply Pipes*, Korean Society of Civil Engineers, 2008, Vol. 10, pp. 1891-1894, (in Korean).
- KECO (2012). *Water intake plant and water treatment plant operations management manual*, Korea Environment Corporation (KECO).
- Kim, H.S., Cha, K.H., Hong, J.S., Namkung, E., and Hur, T. (2010) *A comparison study on physical water treatment facilities using LCA*, The Korea Society for Life Cycle Assessment, Vol. 11, pp. 77-89, (in Korean).
- Kim, Y.Y., Oh, G.S., and Park, D.H. (2007) Life cycle assessment of drinking water treatment process, The Korea Society for Life Cycle Assessment, Vol. 8, No. 5, pp. 77-89, (in Korean).
- Lee, S.B. (2013) *Hardening Properties of Concrete according to the Substitution of Blast Furnace Slag*, Chungnam National University (in Korean).
- Lee, S.Y. (2010) *An Environment Impact Assessment of a Wastewater Reuse Facility Using Life-Cycle Cost Analysis (LCA)*, Seoul National University of Science and Technology (in Korean).
- Lee, T.K. (2008) *(A) study on environmental load assessment of bridge using LCA method*, Yonsei University, (in Korean).
- Min, S.K. (2013) *(A)study on the establishment of an environmental-load reduction plan for airport pavement*, Seoul National University of Science and Technology (in Korean).
- Park, G.H. and Hwang, Y.W. (2005) Environmental Impact Assessment of Wastewater Treatment Plant Using Life Cycle Assessment, The Korea Society of Water and Wastewater, Vol. 19, No. 6, pp. 809-818, (in Korean).
- Park, J.M. (2011) *A case study on the Environmental Assessment of Highway Construction by using LCA*, Gyeongnam National University of Science and Technology, (in Korean).
- Steven Solomon (2013) *Water: the epic struggle for wealth power and civilization*, Mineumsa.

Received ■ December 1, 2014

Revised ■ December 11, 2014

Accepted ■ December 24, 2014