

고도 하수처리장의 전과정평가에 따른 환경성 및 경제성 평가

표세희 · 김민정 · 이승철 · 유창규[†]

경희대학교 환경공학과
446-701 경기 용인시 기흥구 서천동 1
(2014년 1월 4일 접수, 2014년 2월 5일 수정본 접수, 2014년 2월 20일 채택)

Evaluation of Environmental and Economic Impacts of Advanced Wastewater Treatment Plants with Life Cycle Assessment

SeHee Pyo, MinJeong Kim, SeungChul Lee and ChangKyo Yoo[†]

Department of Environmental Science and Engineering, Center for Environmental Studies, College of Engineering,
Kyung Hee University, Seocheon-dong 1, Giheung-gu, Yongin-si, Gyeonggi 446-701, Korea
(Received 4 January 2014; Received in revised form 5 February 2014; accepted 20 February 2014)

요 약

최근 하수처리장의 질소 및 인 방류수 수질기준이 강화되고 슬러지의 해양투기가 금지됨에 따라 기존 표준활성슬러지공법의 고도처리공법으로의 증설 및 새로운 하수슬러지 처리공법에 대한 환경성, 경제성 평가의 필요성이 증가하고 있다. 이러한 고도처리 및 슬러지 처리공법은 운영 단계뿐만 아니라 건설, 폐기를 포함한 전과정에 걸쳐 환경 전반에 영향을 미치며 경제적 비용을 소모하므로, 본 연구에서는 건설에서부터 폐기까지의 전과정을 고려하여 고도처리공법 및 슬러지 처리 공법의 환경성, 경제성을 평가하고자 한다. 고도처리공법으로 Anaerobic/Anoxic/Oxic (A₂O), Bamard Denitrification Phosphate (Bardenpho), Virginia Initiative Plant (VIP), Modified University of Cape Town (MUCT) 공법을, 슬러지 처리공법으로는 매립, 소각, 퇴비화를 선정하였다. 각 공법에 따른 환경성, 경제성 평가를 위하여 International organization for standardization (ISO)에서 제시하는 가이드라인을 따라 전과정평가를 수행하였으며, 전생애비용을 산정·비교하였다. 각 고도처리 공법에 대한 평가 결과, 환경영향 측면에서는 운영 단계에서의 생물학적 처리로 인한 온실가스 배출이, 경제성 측면에서는 운영 단계에서의 전력소모가 가장 많은 영향을 미치는 것으로 나타났다. 또한 가장 친환경적인 하수처리 및 슬러지 처리공법은 A₂O 공법과 퇴비화로 환경에 가장 큰 영향을 미치는 CAS 공법과 매립에 비해 환경영향을 52% 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 경제적인 측면에서는 가장 많은 비용을 소요하는 CAS 공법과 매립 적용 시에 비해 MUCT 공법과 퇴비화가 전생애비용을 62% 절약할 수 있음을 알 수 있었다. 본 연구를 통해 고도처리 공법으로의 증설 및 슬러지 처리에 대한 전과정을 고려하여 친환경적이며 경제적인 공법을 선정하기 위해 전과정평가를 수행하고 전생애비용을 산출하여 각 공법을 비교 및 평가하였으며, 전과정평가의 환경성 및 경제성에 중요한 영향인자를 분석하였다. 따라서 본 연구의 방법론을 통하여 환경부하 및 경비 절감을 고려한 고도처리공법의 개보수 공정 및 슬러지 공정 선택이 가능할 것으로 예상된다.

Abstract – A lot of existing wastewater treatment plants (WWTPs) are rebuilt or retrofitted for advanced wastewater treatment processes to cope with reinforced effluent criteria of nitrogen and phosphorous. Moreover, how to treat the wasted sludge from WWTPs has been also issued since the discharge of the wasted sludge into ocean is impossible from 2011 due to the London Convention 97 protocol. These trend changes of WWTPs get a motivation to assess environmental and economic impacts from the construction stage to the waste stage in WWTPs. Therefore, this study focuses on evaluation of environmental and economic impacts of the advanced wastewater treatment processes and waste sludge treatment process by using life cycle assessment. Four advanced wastewater treatment processes of Anaerobic/Anoxic/Oxic (A₂O), 5 stages-Bamard Denitrification Phosphate (Bardenpho), Virginia Initiative Plant (VIP), and Modified University of Cape Town (MUCT) are chosen to compare the conventional activated sludge (CAS) and three waste sludge treatment methods of land fill, incineration, and composting are used. To evaluate environmental and economic impacts

[†]To whom correspondence should be addressed.

E-mail: ckyoo@khu.ac.kr

‡이 논문은 서울대학교 윤인섭 교수님의 정년을 기념하여 투고되었습니다.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

of each advanced wastewater treatment processes, life cycle assessment (LCA) and life cycle cost (LCC) are conducted based on International organization for standardization (ISO) guidelines. The results clearly represent that the A_2O process with composting shows 52% reduction in the environmental impact than the CAS process with landfill. On the other hand, the MUCT process with composting is able to save 62% of the life cycle cost comparing with the CAS process with landfill. This result suggested the qualitative and quantitative criteria for evaluating eco-environmental and economic technologies of advanced treatment processes and also sludge treatment method, where their main influence factors on environmental and economic impacts are analyzed, respectively. The proposed method could be useful for selecting the most efficient and eco-friendly wastewater treatment process and sludge treatment method when retrofitting the existing WWTPs to advanced treatments.

Key words: Advanced Wastewater Treatment, Sludge Treatment, Life Cycle Assessment (LCA), Life Cycle Cost (LCC), Environmental Impact

1. 서 론

산업 발전과 그에 따른 도시화로 도시하수 및 산업폐수 배출량이 증가하여 이로 인한 오염물질의 부하량이 증가하고 있다. 이에 수계로 배출되는 인과 질소 등의 영양물질이 증가하면서 호수의 부영양화 빈도 또한 높아져 안정적인 용수원 확보에 큰 문제가 되고 있다. 이에 정부는 1996년부터 질소와 인의 방류수 수질기준을 수질환경보전법에 명시하여 규제하기 시작하였으며, 방류수 수질 기준을 점차적으로 강화하고 있다. 현재 많은 하수처리장이 방류수 수질 기준을 맞추기 위해 기존의 탄소처리 중심의 표준활성슬러지공법(Conventional Activated Sludge process, CAS)에서 영양염류 처리 중심의 고도처리 공법으로 전환되는 추세이다. 이러한 일반공정에서 고도처리 공정으로의 효율적인 개·보수를 위해서는 각 고도처리공정의 특징에 따른 환경성 및 경제성 변화에 대한 평가가 필요하다[1-4]. 따라서, 이러한 필요성으로 인해 최근 일반공정 및 고도처리 공정에 대한 경제성 및 환경성 평가 연구가 증가하고 있다. 또한 기존의 하수 슬러지 처리방법 중 32%를 차지했던 해양투기가 2011년부터 폐기물 관리법에 의해서 금지되면서 매립, 소각, 자원화와 같은 대안들이 제안됨과 동시에 다양한 하수 슬러지 처리 방법에 대한 환경성 및 경제성 평가가 필요하게 되었다[5].

하수처리를 위한 다양한 공법 및 하수 슬러지 처리 방법에 대한 환경성 및 경제성 평가에 대한 많은 연구들이 진행되고 있다. 김민한 등은[1] 하수처리장 공정모사 프로그램(General Purpose Simulator, GPS-X)을 이용하여 네 가지 고도처리 공정에 대해 방류수 수질 기준을 맞추면서 공정 별 반응조 사이즈 및 운전조건을 최적화한 뒤, 각 공정에 대한 환경성 및 경제성 평가를 실시하였다. 환경성 지표로는 유출수 수질(Effluent Quality Index, EQI)을 이용하였으며, 경제성 지표로는 운영과정 중의 펌프 동력, 폭기량, 하수 슬러지 생산량을 이용하였다. 오태석 등은[2] 최근 하수처리장이 새로운 온실가스 배출원으로 대두됨에 따라 유출수 수질뿐만 아니라 생물학적 하수처리에 의해 배출되는 온실가스(Green House Gas, GHG) 배출량을 고려하여 하수처리 공정의 환경성을 평가하였다. 또한 다양한 하수 슬러지 처리방법에 대한 온실가스 배출량을 계산함으로써 하수 슬러지 처리에 따른 환경성과 경제성을 평가하였다.

그러나 기존 선행 연구들은 하수 및 하수 슬러지 처리공정의 운영에 대한 경제성과 환경성을 평가하였을 뿐, 하수처리장 운영을 위한 자원 및 에너지의 채취, 사용, 하수 슬러지 폐기까지 하수처리장의 전과정을 고려한 평가를 하지 못했다는 한계를 갖는다. 또한 기존의 하수처리장 환경성 평가 시, 평가 지표의 영향범주는 지구온난화, 부영양화에 국한되어 있으므로 자원·생태계·보건 등 환경 전반에 걸친 환

영향을 고려할 수 없었다. 따라서 하수처리장의 전과정을 고려할 뿐만 아니라 여러 영향범주에서 영향을 평가하기 위해서 최근 전과정평가(Life Cycle Assessment, LCA)를 이용한 하수 및 하수 슬러지 처리공정의 환경성 평가가 이루어지고 있다. 전과정평가란 원료 채취, 운송, 제조, 사용 및 폐기에 걸친 전 과정에서 발생하는 잠재적인 환경영향을 평가할 수 있는 도구로써 평가 결과를 통해 효과적으로 환경영향을 줄일 수 있는 유용한 방법이다[6,7]. 이에 최근 전과정평가를 이용하여 하수처리 공정 및 하수 슬러지 처리 공법에 대한 환경성 및 경제성을 평가하는 연구가 많은 관심을 받고 있다[2,5,8-10].

본 연구에서는 전과정평가 및 전생애비용을 이용하여 고도처리 하수처리장 및 슬러지처리 공법의 환경성 및 경제성 평가를 수행하고자 한다. 하수처리장의 각 과정에 따른 평가를 위해 하수처리장의 전과정은 크게 건설, 운영, 하수 슬러지 처리로 나뉘었으며, 하수 운영 단계에서는 대표적인 고도처리공정인 Anaerobic/Anoxic/Oxic (A_2O), Bamard Denitrification Phosphate (Bardenpho), Virginia Initiative Plant (VIP), Modified University of Cape Town (MUCT) 공법에 대하여 평가하였고 각각의 공법의 하수 슬러지 처리 단계에서는 매립, 소각, 퇴비화의 세 가지 처리방법을 평가하였다.

2. 연구방법

Fig. 1에 본 연구에서 제안된 전과정평가를 이용한 고도처리공법으로의 증축 및 하수 슬러지 처리 방법 선정에 따른 환경영향과 경제성 비교·평가의 개략도가 나타나있다. 첫째, 평가의 대상이 될 고도처리 공법 및 하수 슬러지 처리공정을 선택하였다. 둘째, 전과정평가 수행을 위한 목록 및 범위를 설정하고 목록 분석을 실시하였으며, 이를 바탕으로 환경부와 한국환경산업기술원에서 개발한 전과정평가 프로그램인 TOTAL(Tool for Type III labeling & LCA)을 사용하여 각 공법에 대한 영향평가를 수행하였다. 세 번째로 하수처리장 및 하수 슬러지 처리의 전과정에서 사용되는 자원 및 에너지를 비용으로 환산하여 각 공법의 경제성을 평가하였으며, 마지막 단계에서는 환경성과 경제성 지표를 고려하여 각 하수처리공법 및 하수 슬러지 처리 방법을 평가·비교하였다.

2-1. 대상공정 및 슬러지 처리공정 선정

본 연구에서는 질소와 인의 처리 효율 향상을 위해 기존의 표준활성슬러지공법(Carbon Activated Sludge process, CAS)에서 네 가지 고도처리 공정(A_2O , Bardenpho, VIP, MUCT)으로의 증축을 고려하였으며, 해당 공정에 대한 설명은 Table 1과 같다. 전과정평가의 대상이 되는 하수처리 공정의 모델링을 위하여 유입 유량, 수질 및 유

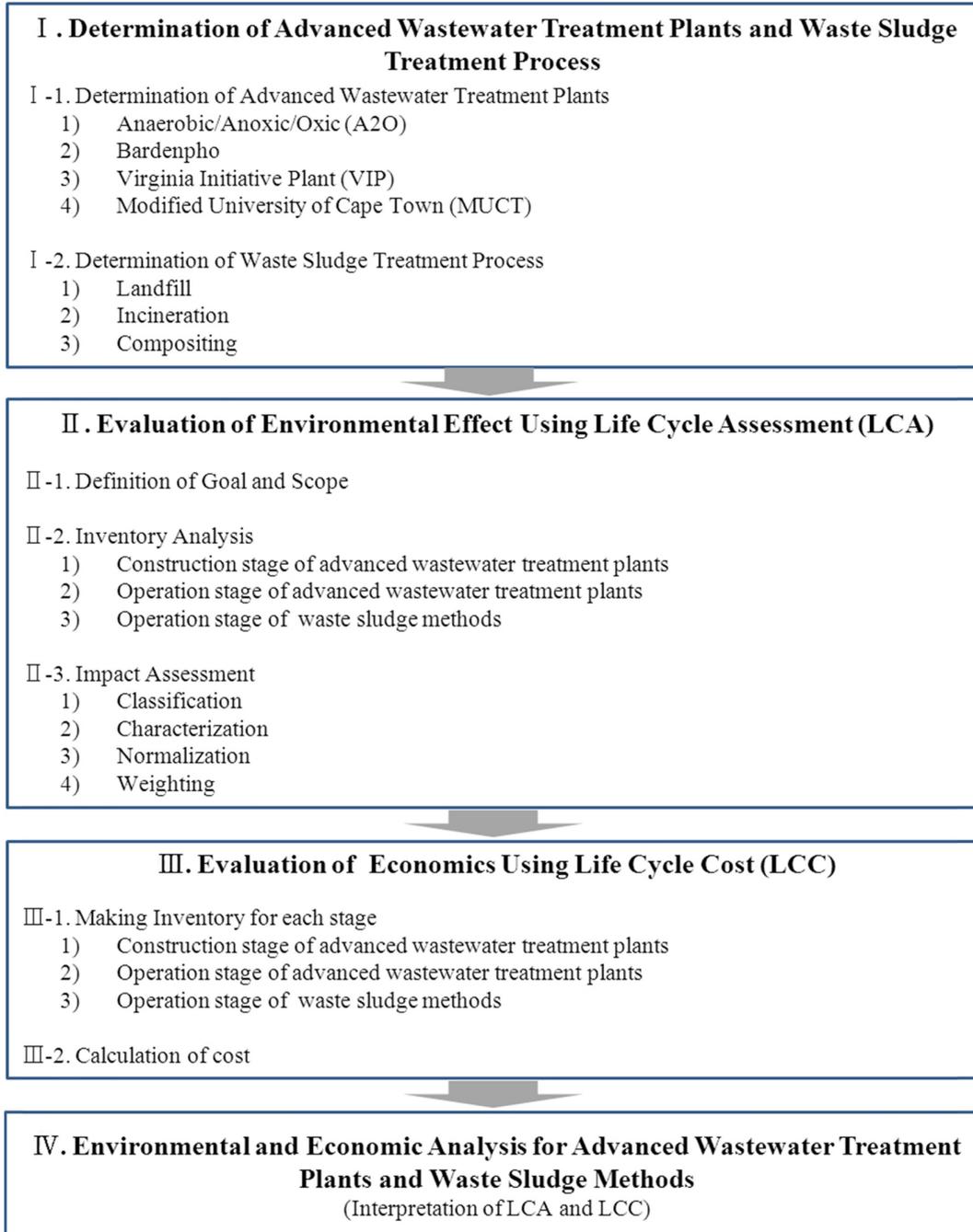


Fig. 1. The framework for evaluation of environmental and economic impacts of WWTP.

출수 기준을 Table 2과 같이 설정하였다[1].

또한 하수처리의 부산물인 하수 슬러지에 대한 처리방법을 평가하기 위해 하수 슬러지의 소각, 매립, 퇴비화를 대표 방법으로 선정하였다. 하수 슬러지 처리방법에 대한 환경성·경제성 평가를 위해서는 하수 슬러지 처리량, 처리 장소까지의 운송거리 등을 고려해야 하며, Table 3에 본 연구에서 평가하는 해당 하수 슬러지 처리방법에 대한 설명 및 가정된 상세 조건을 나타내었다. 하수처리장으로부터 처리 장소까지의 운송거리는 지도상의 최단거리를 이용하였다.

남양주시에 위치하는 H-하수처리장이 고도처리 공정의 증설 및 슬러지 처리량이 급증할 가능성이 있어 이를 연구 대상으로 선정하였다. H-하수처리장은 현재 1일 43,000 m³ 처리 규모의 하수처리장

을 중심으로 소규모 하수처리장, 분뇨처리장 등을 운영하며 수도권 상수원의 수질 개선을 도모하고 있다. 하지만 최근 들어 하수처리장 내로 유입되는 유입수가 많아지면서 처리에 문제가 되고 있어 유입수의 양을 제재하는 실정이다. 이러한 해결책은 단기적인 방편에 불과하기 때문에 최근 하수처리장의 노후 시설 개선 및 증설을 통하여 처리 능력을 늘이는 추세이며, 이에 증설 후 H-하수처리장이 하루 유입 유량 100,000 m³ 규모의 하수 및 발생 하수 슬러지를 처리한다는 가정 하에 본 연구를 수행하였다.

2-2. 하수처리 공법 및 하수 슬러지 처리방법에 대한 환경성 평가 전과정평가를 통한 환경영향 평가는 국지적인 환경오염물의 배출

Table 1. Description of the four advanced wastewater treatment processes

Process	Nitrogen removal mechanism	Phosphorus removal mechanism	Characteristics
Anoxic/Anaerobic/Oxic (A ₂ O)	- Nitrification in oxic reactor. - Denitrification by internal recycling of wastewater from oxic reactor to anoxic reactor.	- Release of phosphorus in anaerobic reactor. - Hyperingestion of phosphorus in an oxic reactor (Luxury uptake).	- Easy to convert from conventional activated sludge (CAS).
Barnard Denitrification Phosphate (Bardenpho) (5-stages)	- Same with A ₂ O. - Uses 2 anoxic & 2 oxic to increase the efficiency.	- Same with A ₂ O.	- Has a lot of reactors comparing to the others. - Suitable for low BOD loading rate.
Modified University of Cape Town (MUCT)	- Same with A ₂ O. - Uses 2 anoxic reactors to increase the efficiency.	- Same with A ₂ O. - Avoid the bad effects of nitric nitrogen by internal recycling of wastewater from settler to anoxic reactor.	- Same with A ₂ O. - Increases the cost for operation due to the 2 internal recycling.
Virginia Initiative Plant (VIP)	- Same with A ₂ O.	- Same with MUCT.	- Same with MUCT.

Table 2. Influent and effluent conditions of WWTP [1]

	Influent	Effluent
Flow[m ³ /day]	100,000	
BOD ₅ [mg/l]	220	10
COD[mg/l]	250	40
TSS[mg/l]	220	15
T-N[mg/l]	40	20
T-P[mg/l]	4	2
Alkalinity[mole/m ³]	5	

Table 3. Description of the three different sludge treatment processes [5]

Waste sludge treatment method	Percentage of contribution to total waste sludge treatment	Distance
Landfill	20%	82 km
Incineration	49%	Incineration: 24 km landfill: 17 km
Resource recovery (Composting)	28%	10 km

뿐만 아니라 자원, 에너지의 소비 또는 인간의 건강에 대한 영향까지 포함하기 때문에 보다 넓은 측면에서 제품 및 서비스의 환경성을 평가하는 데에 유용하게 쓰이고 있다. 전과정평가의 구조와 절차에 대한 일반적인 가이드라인은 Fig. 1의 2번째 단계인 ‘전과정평가에 의한 환경성평가’에 제시되어 있으며, 목적 및 범위설정(Goal and scope definition), 목록 분석(Inventory analysis), 영향평가(Impact assessment), 해석(Interpretation)의 네 단계로 구분되어 수행한다[6,7]. 이러한 전과정평가를 통하여 각 공정에서 발생하는 환경부하량을 정량적으로 비교하고 이를 최소화하는 공정을 선택함으로써 제품 및 서비스의 환경성을 보다 효율적으로 개선할 수 있는 장점을 갖는다[5-7].

2-2-1. 목적 및 범위 설정(Goal and scope definition)

대상 공법에 대한 정확한 전과정평가를 위해서는 연구 및 평가 목적을 분명히 설정해야 한다. 본 연구에서는 네 가지 고도 하수처리공법(A₂O, Bardenpho, VIP, MUCT) 및 세 가지 하수 슬러지 처리공법(매립, 소각, 퇴비화)에 따른 환경성을 평가하는 것을 목적으로 하였다.

연구의 범위는 연구의 목적을 충분히 달성할 수 있도록 선정되어야 한다. 일반적으로 연구의 범위 설정은 기능 단위 설정, 시스템 영역 설정, 분배, 데이터 질적 요구정도 결정의 4단계로 나뉜다. 기능 단위란 여러 공법간의 양적인 비교를 공정하게 해주는 정량화한 단위를 의미하며, 이 때에 기능이란 해당 시스템이 제공하는 서비스를 말

한다. 하수처리장의 목적 및 기능이 하수를 처리하는 것이므로 본 연구에서 기능 단위는 처리되는 하수의 양 1 m³으로 선택하였다[8-10].

시스템 영역 설정에서는 전과정평가의 대상이 되는 단위 공정의 범위를 설정한다. 모든 공정을 포함할 경우 더 정확한 결과를 얻을 수 있지만 많은 시간이 소요되기 때문에 적절한 시스템 영역의 설정이 필요하다[6,7]. 이에 본 연구에서는 하수처리장의 건설, 사용, 하수 슬러지 처리 및 이러한 과정 중 사용되는 자원의 생산까지를 범위로 선정하였다. 건설 시 하수처리장의 수명은 20년으로 가정하였으며, 하수처리시설의 폐기는 고려하지 않았다.

분배 단계에서는 시스템에서의 부산물(목표로 삼은 물질 이외에 배출되는 물질)을 파악하여 환경에 대한 공정의 직접영향뿐만 아니라 간접영향도 평가하도록 해준다. 본 연구에서는 하수 처리 시 생물학적 공정에 따른 온실가스 및 슬러지가 부산물에 해당한다.

데이터 질적 요구정도 결정 단계에서는 데이터의 품질 요건을 사전에 설정함으로써 결과의 신뢰성을 보장하는 단계이다. ISO 가이드라인에서 요구하는 필수요건은 시간적 범위, 지역적 범위, 기술적 범위로 이루어져 있다. 시간적 범위는 데이터가 수집된 시점을 의미하며 본 연구에서는 최근 5년 이내로 설정하였다. 지역적 범위는 데이터가 최초로 수집된 또는 구축된 지역을 의미하며, 하수처리장의 증설 및 하수 슬러지 처리 시 이용되는 자원에 관한 데이터는 남양주시를 가정하여 수집되었으며, 국내 전력 및 수송 데이터베이스를 사용하여 전기 및 수송 연료에 대한 데이터를 얻었다. 기술적 범위는 해당 물질 및 제조에 있어서 사용되는 기술에 따라 발생하는 환경영향의 다름을 고려하기 위해 기술 수준을 반영하는 것으로, 선정된 하수처리 및 하수 슬러지 처리 공정은 우리 나라에서도 충분히 이용 가능하며, 현재 실정에 맞는 것으로 선정되었다.

본 연구에서 H-하수처리장을 기준으로 설정된 슬러지 처리 방법에 대한 가정은 다음과 같다. 소각의 경우에는 인근에 있는 구리시의 소각처리장에서 소각된 뒤, 남양주시와 구리시의 소각잔재물을 위생적으로 처리하기 위하여 설립된 에코랜드에 매립된다고 가정되었다. 매립의 경우에는 수도권 하수 슬러지 매립 시 가장 많은 슬러지를 처리하는 수도권매립지를 처리 장소로 선정하였다. 또한 현재 H-하수처리장이 슬러지를 전량 위탁 처리하는 것을 고려하여 민간위탁 의존도를 줄이고 자체 처리 능력을 높이기 위해 퇴비화 시설이 H-하수처리장 내에 증축될 것이라고 가정하였다.

2-2-2. 목록 분석(Inventory Analysis)

목록 분석이란 대상 시스템의 전과정에 걸쳐서 투입되는 에너지,

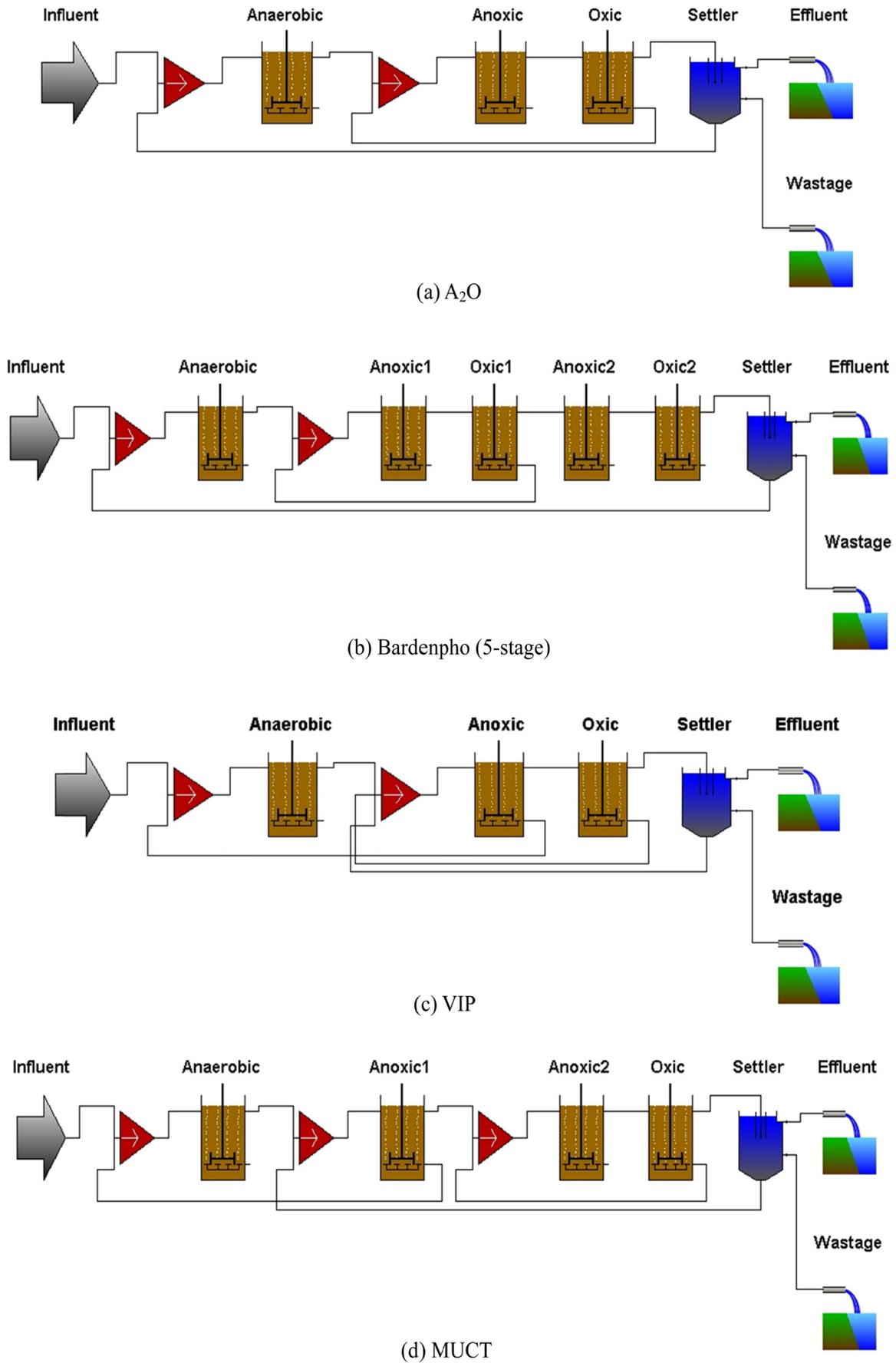


Fig. 2. Layout of four different advanced wastewater treatment processes: (a) A₂O, (b) Bardenpho (5-stage), (c) VIP, and (d) MUCT.

원료 및 자원과 배출되는 제품, 부산물 및 환경오염 배출물의 정성적, 정량적 데이터를 수집하고 이를 목록화하여 시스템의 환경부하를 계산하는 과정이다. 이는 전과정평가에서 가장 핵심적임과 동시에 가장 많은 시간이 소요되는 과정이다. 따라서 국가 및 해당제품의 생산 기업에서는 투입 및 배출 목록에 대한 데이터베이스(database, DB)를 제공하고 있다[6,7].

정확한 목록 분석을 위해서는 현장 운영으로부터의 정확한 데이터가 수집되어야 한다. 그러나 현재 국내의 경우 A₂O 공법을 제외한 다른 고도처리 공법에 대한 현장 운영이 미비하므로, 본 연구에서는 하수처리장 공정모사 프로그램인 GPS-X (General Purpose Simulator, Hydromantis)를 이용하여 네 가지 고도처리 공법에 대한 유출수 수질 데이터를 수집하였다. 하수처리장 공정모사 프로그램을 통한 모델링에 대한 상세설명은 김민한[1], 김민정[11], 오태석[3]에 제시되어 있다. 또한 생물학적 하수처리 중 발생하는 온실가스 발생량에 대한 데이터는 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC)에서 제시한 2.2.2절에 제시된 경험식(식 (1), 식 (2))을 이용하여 계산하였다[12]. 고도처리공법으로의 증설에 대한 데이터는 Foley (2010) 등이 산출한 하수처리장 반응조의 건설, 펌프, 모터 및 파이프의 생산 시 사용되는 투입물에 대한 정성·정량적 데이터를 통하여 얻었다[10]. 슬러지 처리를 위한 소각, 매립 및 퇴비화 시 처리되는 슬러지 톤당 사용되는 투입물 및 산출물에 대한 데이터는 실측데이터의 획득이 어려워 Hong (2009) 등의 논문을 참고하였다[8]. 기타 전력 에너지 및 수송 데이터는 한국환경산업기술원 국가 Life Cycle Inventory (LCI) 데이터베이스정보망을 통해 수집하였다.

2-2-2-1. GPS-X를 이용한 하수처리 공법 별 목록 수집

본 연구에서는 네 가지 공법의 유출수 및 화학약품 사용량에 관한 데이터를 얻기 위해 하수처리 공정모사 프로그램인 GPS-X (General Purpose Simulator, Hydromantis)를 이용한 모델링을 수행하였다. Fig. 2은 GPS-X를 통해 그려진 네 가지 고도처리공법의 레이아웃을 나타내며, 각 단위의 공정에 대한 설계기준은 선행 연구[1,11,13]를 참조하여 설정하였다(Table 4). 각 하수처리 공법에 대해 얻어진 유출수 수질을 Table 5에 나타내었다. 각 공법의 생물학적 처리 성능에 따라 유출수 수질 만족여부에 차이가 났으며, CAS 공법의 경우 대부분의 유출 수질을 만족하지 못한 것으로 나타나 고도처리 공법으로의 필요성이 부각되었다. 고도처리 공법의 경우 유기탄소보다는 영양염류의 제거에 큰 비중을 두었기 때문에, 모델링 시 T-N과 T-P 제거에 초점을 맞춰 반응조의 크기 및 운전 조건이 최적화되었다. 이에

Table 5. Effluent results of five wastewater treatment processes

(mg/l)	CAS	A ₂ O	Bardenpho	VIP	MUCT
BOD	11.30	5.46	4.59	8.08	4.38
COD	54.50	42.60	42.54	49.40	40.90
TSS	28.80	14.40	14.81	22.90	12.80
T-N	26.14	11.90	6.73	11.50	14.20
T-P	0.871	0.48	0.66	0.76	0.44

상대적으로 영양염류에 비해 유기물질(TSS, COD)의 제거 효율이 낮아 COD 유출 수질을 만족하지 못한 것으로 판단된다.

2-2-2-2. 생물학적 하수처리에 의한 온실가스 배출 목록 수집

본 연구에서는 하수처리 중 발생하는 온실가스를 고려하기 위해 i) 질산화 및 탈질화 과정에 의한 아산화질소(N₂O) 발생량과 ii) 혐기성 반응조에서 발생하는 메탄가스(CH₄) 발생량을 산정하였다[12].

N₂O은 질산화 및 탈질화 과정의 중간산물로 하수로부터 발생하는 직접배출과 수계로 방출된 유출수로부터 발생하는 간접배출로 나눌 수 있다. 대부분은 하수처리공법의 경우 N₂O의 간접배출량이 직접배출보다 많은 것으로 알려져 있으며, 공법에 따라 최소 2배, 최대 15배 많은 것으로 나타나 본 연구에서는 유출수 처리 후 발생할 수 있는 간접 배출량만을 산정하였다[12,14]. N₂O 가스의 간접 배출량(kg N₂O/d) 산정을 위해 사용된 식은 아래와 같다 [12].

$$N_2O_{\text{배출량}}(\text{kg N}_2\text{O/d}) = N_{\text{유출수}} \times EF_{\text{유출수}} \times \frac{44}{28} \quad (1)$$

본 식에서 N_{유출수}는 수환경으로 방류된 유출수 내 질소의 양을(kg N/d), EF_{유출수}는 유출수로부터 배출된 N₂O의 배출계수(kg N₂O-N/kg N)를 나타낸다. 본 연구에서의 배출계수는 IPCC 보고서에서 제시된 0.005가 이용되었다.

CH₄는 하수처리의 혐기성 반응을 통해 생성되며 호기성 반응조에 유입되는 유기물의 과부하로 하수처리 운영이 제대로 이루어지지 않을 때 생성되기도 한다. IPCC 보고서가 제시한 CH₄ 배출 계수 계산식은 아래와 같으며 호기성 반응조가 정상 운영된다는 가정하에 혐기성 반응조에서의 배출만을 고려하였다[12].

$$EF(\text{kg CH}_4/\text{kg BOD}) = B_o \times MCF \quad (2)$$

본 식에서 EF는 CH₄의 배출 계수를(kg CH₄/kg BOD), B_o는 CH₄ 최대 생산량(kg CH₄/kg BOD)이며 MCF는 메탄 보정 계수를 나타

Table 4. Operational conditions in five major wastewater treatment processes

	CAS	A ₂ O	Bardenpho	VIP	MUCT
Anaerobic	-	5,500	4,170	4,170	4,170
Anoxic 1	-	3,000	8,330	4,170	8,330
Oxic 1	25,000	19,500	16,700	12,500	25,000
Anoxic 2	-	-	8,330	-	8,330
Oxic 2	-	-	2,080	-	-
Settler	6,000	15,000	13,500	14,700	15,000
Total	31,000	43,000	53,110	35,540	60,830
Waste sludge (m ³ /d)	3,000	1,550	2,000	1,775	2,000
Recycle (m ³ /d)	50,000	34,000	80,000	100,000	50,000
Internal 1 (m ³ /d)	-	230,000	400,000	200,000	100,000
Internal 2 (m ³ /d)	-	-	-	200,000	100,000
Settler surface area (m ²)	2,000	5,000	4,500	4,900	5,000

낸다. 본 연구에서 각 계수는 IPCC 보고서에서 제시한 기본값을 사용하였다($B_0 = 0.6 \text{ kg CH}_4/\text{kg BOD}$, $\text{MCF} = 0.8$).

2-2-3. 영향 평가(Impact assessment)

영향평가란 목록분석 결과를 근거로 각 영향범주에 대한 해당공정의 환경영향을 분석 및 평가하는 단계를 의미한다. 영향평가의 단계는 분류화(classification), 특성화(characterization), 정규화(normalization), 가중치 부여(weighting)의 4단계로 구성되며, 분류화 및 특성화는 필수적인 단계이지만 정규화 및 가중치는 선택적으로 수행할 수 있는 단계이다. 각 영향평가 단계에 따른 목적 및 방법은 아래와 같이 정리될 수 있다[6,7].

- 분류화 : 목록데이터를 해당 영향범주 별로 나누는 단계

- 특성화 : 영향범주에 따라 분류된 데이터의 값을 하나의 범주 단위 지표로 변환하여 환경영향을 정량화하는 단계

- 정규화 : 영향범주 별 환경영향을 정규화 인자로 나누어 특정 상황(특정 기간, 특정 지역 및 인구수에 기능한 영향범주의 환경영향을 제시하는 단계

- 가중치 부여 : 영향 범주간의 상대적인 중요도를 사회적, 도덕적, 과학적인 기준을 중심으로 정량적·정성적으로 해석하는 단계

본 연구에서는 분류화를 통하여 네 가지 하수처리공정의 투입물 및 산출물들을 각 영향범주에 따라 나누고 특성화를 통해 하나의 단위로 통일시킨 뒤, 공정간의 환경성 비교를 위하여 정규화 및 가중치 부여를 수행하였다. 전과정평가 시 사용된 환경 영향범주 및 가중치는 산업통상자원부에 의해 제시되었으며, 특성화 인자 및 정규화 인자는 품질 및 환경경영시스템 인증을 관리하는 한국인정원이 기존 해외의 환경영향평가지수를 한국 환경에 맞추어 개발하였다. 목록데이터 분류 시, 이용되는 영향범주는 각 나라별로 약간의 차이가 있으며 우리나라의 경우, 자원 고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 인간 독성, 오존층 고갈, 광화학물 생성, 육상생태계 독성, 총 8가지 범주를 일반적으로 사용한다. 특성화 단계에서 계산되는 영향범주 별 환경영향은 [목록인자 i 의 환경부하량($\text{kg/functional unit}$) \times 목록인자 i 의 특성화 인자(equivalency factor, kg-eq/kg)]의 총합으로 나타난다. 예를 들면, 지구온난화 범주의 환경영향 단위는 이산화탄소의 총량($\text{kg CO}_2\text{-eq/functional unit}$)이며, CH_4 와 N_2O 의 특성화 인자는 25와 298이다. 따라서 10 kg의 CH_4 와 0.1 kg의 N_2O 가 하수처리장의 기능단위(functional unit, f.u)인 1 m^3 의 하수를 처리할 때에 발생된다고 하면 이 때에 지구온난화 범주에서의 환경영향은 $(10 \text{ kg/1 m}^3 \text{ of treated water}) \times (25 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg CH}_4) + (0.1 \text{ kg/1 m}^3 \text{ of treated water}) \times (298 \text{ kg CO}_2\text{-eq/kg N}_2\text{O}) = 279.8 \text{ kg CO}_2\text{-eq/1 m}^3 \text{ of treated water}$ 으로 계산된다. 정규화 단계에서는 특성화에서 계산된 환경영향을 특정 상황에 대한 정규화 인자로 나누어 주는데, 고려하고자 하는 설정 상황이 기간이라면 정규화 인자는 영향범주 i 가 영향을 미치는 지역에서 일년 동안 배출되는 모든 목록 항목들이 기여하는 잠재적인 환경영향을 의미한다. 특정 기간 및 인구를 고려한 정규화 인자가 본 연구에서 이용되었으며, 지구온난화의 정규화 인자는 5.53×10^3 으로 위 예시의 특성화 값을 통해 계산하면, 정규화 값은 $279.8 / 5.53 \times 10^3 = 0.050$ 이고 단위는 $\text{kg CO}_2\text{-eq/person-year}$ 이다. 공정간의 총 환경영향을 비교하기 위해 가중화가 수행되었으며, 총 영향은 (영향범주 i 의 가중치) \times (영향범주 i 의 정규화 값)의 합으로 나타났다. 이에 하수처리 공정 및 하수 슬러지 처리 공정이 환경에 미치는 전반적인 영향을 파악하고자 위의 총 8가지 영향범주에 대해 분류화,

Table 6. Units and weighting factors according to the impact categories suggested by ministry of trade, industry & energy (MOTIE)

Impact category	Unified unit	Weighting factor
Abiotic depletion (ADP [*])	1/yr	0.231
Acidification (AP)	kg SO ₂ -eq/kg	0.036
Eutrophication (EP)	kg PO ₄ ³⁻ -eq/kg	0.038
Global warming (GWP)	kg CO ₂ -eq/kg	0.288
Human toxicity (HTP)	kg 1,4 DCBeq/kg	0.105
Ozone depletion (ODP)	kg CFC11-eq/kg	0.292
Photochemical oxidant formation (POCF)	kg ethylene eq/kg	0.065
Terrestrial Ecotoxicity (TETP)	kg 1,4 DCBeq/kg	0.216

*P: potential

특성화, 정규화 및 가중화를 수행하고 총 환경영향을 구하여 각 공정들을 비교·평가하였다. 본 연구에서 사용된 8개의 영향범주와 특성화 시 영향범주 단위 및 영향범주 별 가중치가 Table 6에 나타나있다.

2-2-4. 해석(Interpretation)

해석 단계는 연구 목적을 바탕으로 해당 공정의 환경영향평가 결과를 해석하는 단계이다. 결과해석 시에는 적용된 가정 및 제한사항 등을 고려하여 해석해야 하며, 가능할 경우 결과의 타당성 및 정확성을 판단하기 위하여 일관성, 완전성, 민감도 분석을 수행하도록 한다. 최종적으로 이 단계에서는 LCA 수행 결과를 연구 목적에 맞게 세부적으로 어떻게 활용할 것인가에 대하여 논의한다. 본 연구에서는 영향평가를 통하여 얻어진 각 영향범주 별 가중화된 값들의 합을 통하여 각 공정 별 비교를 위한 단일지표를 만든 뒤, 총 환경영향을 비교 및 평가하였다. 뿐만 아니라 가중화된 값을 통하여 총 환경영향 중 가장 큰 영향을 미치는 영향범주 세 가지를 선정 후, 각 투입물 및 산출물의 특성화 값을 이용하여 해당 영향범주에 가장 큰 영향을 미치는 요소를 분석하였다[6,7].

2-3. 하수처리 공법 및 하수 슬러지 처리방법에 따른 경제성 평가

전과정평가는 제품 및 공정의 환경적인 측면을 평가하기 때문에 경제적인 측면을 고려하지 못한다는 한계를 갖는다. 이에 최근 환경성 및 경제성을 동시에 고려하기 위해 전과정평가 및 생애주기비용(Life cycle cost, LCC)을 통합적으로 평가하는 연구가 수행되고 있다[15-18]. 생애주기 비용 평가란 건물의 기획 설계부터 시공, 운용, 보전, 철거까지에 드는 건물의 일생(유효 기간)에 소요되는 총 비용을 평가하는 방법을 말한다[15].

하수처리장에서의 생애주기비용 평가 중 운용단계에서는 운전 시 사용되는 폭기, 펌프, 혼합에너지 비용과 인건비용, 토지비용, 화학약품 비용 및 세금 등 폭넓은 측면을 고려해야 한다[3]. 그러나 본 연구에서는 환경성 평가와 연구 범위를 일정하게 하기 위해 인건비와 토지비는 고려하지 않았으며, 건설 자재 비용, 하수 슬러지 처리비용, 펌프 및 폭기 동력 비용, 화학약품 구매 비용, 운송 비용을 고려하여 각 하수처리 공정 및 하수 슬러지 처리 방법에 대한 경제성을 평가 및 비교하고자 하였다.

2-3-1. 건설 단계

본 단계에서는 표준활성슬러지 공법을 고도처리 공법으로 증설하는데 필요한 자재 및 수송에 대한 경제성 평가를 수행하였다. 증설 시 필요한 자재의 양은 기존 하수처리장의 수명이 끝나 철거 후, 고

Table 7. Price and distance for evaluating input materials of construction stage

Material	Price(won/ton)	Distance (km)
Steel reinforcement	710,000	1.8
LDPE	1,700,000	49.9
EPDM	-	37.6
HDPE	-	26.4
Stainless steel	-	28.7

Table 8. Inventory analysis in construction stage [10]

(Units: 1 m ³ concrete)			
	Material	Units	Constructi on stage
Energy consumption	Electricity	kWh/m ³	0.04
	Reinforce steel	kg/m ³	77.58
Resource consumption	Water	kg/m ³	121.98
	Aluminium	kg/m ³	0.87
	Limestone	kg/m ³	21.45
	Stainless steel	kg/m ³	6.23
	Fiberglass	kg/m ³	1.96
	Copper	kg/m ³	0.92
	Synthetic rubber (EPDM)	kg/m ³	0.88
	Low density polyethylene (LDPE)	kg/m ³	0.02
	High density polyethylene (HDPE)	kg/m ³	2.44
	Polyethylene terephthalate (PET)	kg/m ³	2.46

도처리 하수처리장이 신설되는 것을 가정하여 산정되었다. 본 연구에서 건설 시 이용되는 총 자재는 Table 8의 반응조 1 m³ 건설을 기준으로 필요한 평균 자재의 양과 반응조 총 면적의 곱으로 계산하였으며, 자재에 따른 톤당 가격과 수송거리는 Table 7에 나타나 있다 [10]. 원자재에 대한 비용산정 시 EPDM 및 스테인리스 강은 실제 펌프나 파이프의 길이 및 크기에 따라 맞춤 제작되기 때문에 투입물 양에 따른 가격산정에 대한 정확도가 떨어져 이에 대한 비용은 고려하지 않았다.

2-3-2. 운전 단계

운전 단계에 대한 경제성 평가를 위해 하수처리장 운전 중 소비한 전기에너지 비용, 인 처리를 위한 화학약품의 비용, 유출 수질 기준 초과시 부과되는 벌금을 고려하였다. 하수처리장 운전 에너지에는 펌프 동력과 폭기 동력이 고려되었는데, 이는 두 에너지가 운전 에너지의 대부분을 차지하기 때문이다[1,3]. 펌프 동력은 식 (3)을 통해 계산되었으며, 본 식에서 Q_{ir} 은 하수 슬러지 내부 반송 유량(m³/d)을, Q_r 은 하수 슬러지 반송 유량(m³/d)을, Q_w 는 최종 침전지에서의 하수 슬러지 유량(m³/d)을 의미한다[1,3].

$$PE(kWh/d) = 0.04 \times (Q_{ir} + Q_r + Q_w) \quad (3)$$

호기성 반응조의 폭기를 위해 소요되는 에너지는 아래의 식을 통해 계산되었다.

$$AE(kWh/d) = 0.4023 \times K_{La}^2 + 7.8408 \times K_{La} \quad (4)$$

여기에서, K_{La} (h⁻¹)는 호기성조에서의 시간당 산소전달계수를 의미한다.

본 연구에서는 화학적 인 제거를 위해 폴리염화알루미늄(poly

aluminum chloride, PAC)의 사용을 가정하였다. 해당 약품의 구입은 화학약품 수송으로 발생하는 환경영향을 최소화하기 위해 해당 하수처리장에서 가장 인근에 위치한 회사에서 이루어지는 것으로 가정하였으며, PAC 가격은 톤당 23만원으로 계산되었다.

하수처리장으로부터 수계로 배출될 방류수의 수질이 Table 2의 기준을 초과한 경우 [수질보전법] 제41조에 의해서 배출 부과금을 부과하게 된다. 배출부과금은 방류수 내의 유기물질(BOD, COD)과 부유물질(SS) 농도에 따라 결정되며, 배출부과금 산정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{산출금액} &= (\text{오염물질 배출량}) \times (\text{오염물질 1kg 당 부과금액}) \times \\ &(\text{연도별 부과금 산정지수}) \times (\text{사업장 별 부과계수}) \times (\text{지역별 부과계수}) \\ &\times (\text{방류수 수질기준 초과율 별 부과계수}) \\ &= (\text{오염물질 배출량}) \times (250\text{원/kg}) \times (5.6751) \times (1.8) \times (1.0) \times (1.0) \end{aligned} \quad (5)$$

본 식에서 각 계의 값은 환경부령이 고시하는 기준 및 값에 근거하여 선정되었다.

2-3-3. 하수 슬러지 처리 단계

하수 슬러지 처리 단계의 경제성 평가를 위해, 네 가지 공정의 모델링 결과를 통해 하수 슬러지 발생량을 구하고, 구해진 하수 슬러지 지량에 ton당 처리비용을 곱하여, 각 공법 별 하수 슬러지 처리비용을 계산하였다. 하수처리장에서 하루에 생산되는 하수 슬러지 발생량은 최종 침전지에서 버려지는 폐 유량과 부유물질의 농도를 측정함으로써 계산할 수 있다[1,3].

$$SP(kg/d) = TSS_w \times Q_w \quad (6)$$

여기에서, SP는 하루에 생산되는 하수 슬러지 발생량(kg/d)이고, TSS_w은 폐 유량 1 m³당 부유물질의 양(kg TSS/m³), Q_w은 최종 침전지에서의 폐 유량(m³/d)을 의미한다.

하수 슬러지 처리 방법은 매립, 소각, 퇴비화로 3가지로 구분되며, 각 처리 방법에 따른 처리비용은 매립의 경우, 수도권매립지관리공사에서 지정한 하수 슬러지 반입수수료 5.6만원/ton으로 책정되었다. 소각의 경우, 실제 구리시 소각장에서 소각 시 사용되는 슬러지 톤당 비용인 5만원/ton을, 평균 처리 비용인 3만원/ton을 슬러지 처리 가격 산정을 위해 사용하였다[19].

2-3-4. 운송 비용

하수처리장에서 발생하는 운송비용은 건설 시 필요한 자재운송, 화학적 인 제거를 위해 사용되는 화학약품의 운송, 하수 슬러지 운송으로 나눌 수 있으며, 모든 운송은 11.5 ton 트럭에 의해서 수송되는 것으로 가정하였다. 운송 시, 국가데이터베이스에 근거하여 고속도로를 이용하여 80 km/h로 정속 주행할 경우와 일반도로에서 60 km/h로 정속 주행할 경우에 따라 디젤 소비량이 계산되었다. 각 경우에 따른 디젤 소비량(y)은 식 (7)-(8)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{고속도로로 80 km/h 정속 주행 시,} \\ y = (x \times 0.217) + (x \times z \times 0.00594) \end{aligned} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} \text{일반도로로 60 km/h 정속 주행 시,} \\ y = (x \times 0.161) + (x \times z \times 0.00620) \end{aligned} \quad (8)$$

y는 디젤 소비량(L), x는 수송거리(km) 그리고 z는 수송무게(ton)를 의미한다.

3. 결 과

3-1. 고도 하수처리 및 슬러지 처리공법에 대한 환경성 평가

3-1-1. 하수처리공법에 대한 평가

기존 하수처리공법의 고도처리 공법으로의 증설 및 운영에 대한 환경성 평가를 위해 각 단계별 투입물 및 산출물을 Table 8, 9와 같이 정량화하였다(분류화). 이를 이용하여 고도처리 공법 증설 및 운영의 전과정에서 발생하는 자원 고갈, 산성화, 부영양화, 지구온난화, 인체독성, 오존층 고갈, 광화학물 생성 및 육상생태계독성의 총 8가지 영향범주에 대한 환경영향을 산정하였다(특성화). 다음으로 정규화 및 가중화를 수행하여, 총 환경영향에 있어 각 영향범주가 미치는 영향을 비교했다.

고도처리 공법으로의 증설을 위해 사용된 콘크리트 양은 건설 단계에서 어떤 공법이 많은 자원을 필요로 하는가에 대한 유용한 지표이다. Fig. 3은 건설 단계에서의 각 공법 별 환경에 대한 영향을 나타낸다. 자원 고갈, 지구온난화, 인체독성의 주요 세 가지 영향범주를 제외한 산성화, 부영양화 등의 기타범주에서의 환경영향은 미비하였기 때문에 하나의 범주로 묶어 주었다. Fig. 3에서 증설단계의 각 공법 별 총 환경영향은 MUCT (9.74×10^{-7}), Bardenpho (8.50×10^{-7}), A₂O (6.88×10^{-7}), VIP (5.69×10^{-7}), CAS (4.96×10^{-7}) 순으로 큰 것으로 나타났으며, 이는 Table 4의 하수처리장 용적 크기 순서와 일치하였다. 또한 Fig. 3에서 보듯이 고도처리공법으로의 증설 단계에서 가장 많은 영향을 받는 환경범주는 자원고갈(31%), 지구온난화(28%), 인체 독성(22%)인 것으로 나타났다. 자원 고갈에 기여하는 상세 항목에 대한 분석 결과, 자원 고갈의 경우 하수처리장 증설 시 반응조 건설과 펌프, 모터 및 송풍기 생산에 이용되는 철근 생산 공정에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 철근 생산공정은 용해, 정련, 주조, 압연, 정정의 공정을 포함하며 석탄을 주 열원으로 사용한다. 이 때 석탄은 대표적인 비순환자원으로써 이를 사용할수록 자원이 고갈됨을 의미하므로, 석탄 사용이 하수처리장 증설 시 자원 고갈 범주에서 가장 큰 영향을 미친 것으로 사료된다. 뿐만 아니라 철근 생산 공정 중에는 많은 양의 이산화탄소가 발생하므로 지구온난화에도 큰 영향을 미치는 것으로 보인다. 한편, 인체 독성은 하수 이동을 위해 사용되는 파이프 제작 공정에 의해 큰 영향을 받는 것으로 나타났다. 하수처리공정의 파이프는 주로 스테인리스 강을 이용하여 제작되는데, 이 때 발암물질인 다환방향족탄화수소(Polynuclear Aromatic Hydrocarbons, PAHs)가 상당량 발생되어 인체 독성 범주에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

Fig. 4은 각 공법 별 운영 중 하수 1 m³를 처리할 때 발생하는 환

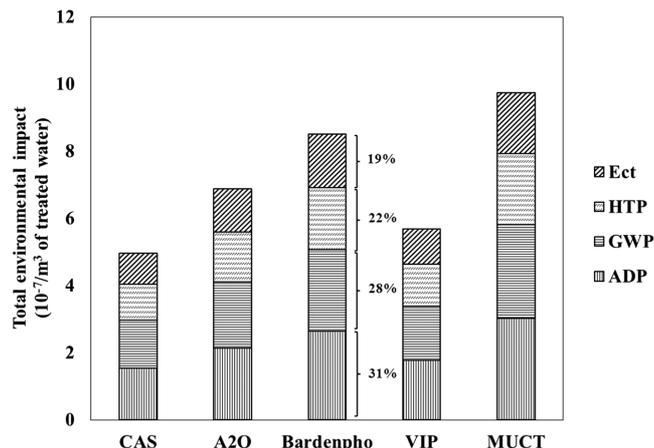


Fig. 3. Impacts of five different wastewater treatment plants on the environmental during the construction stage.

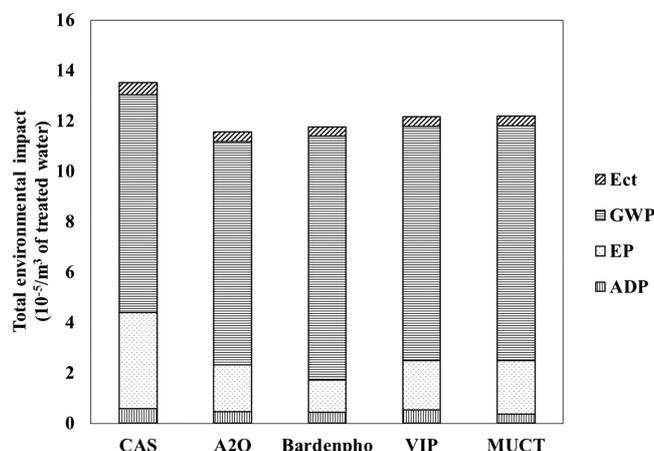


Fig. 4. Impacts of five different wastewater treatment plants on the environmental during the operation stage.

경영향을 나타낸다. 총 환경영향은 CAS (1.35×10^{-4}), MUCT (1.218×10^{-4}), VIP (1.216×10^{-4}), Bardenpho (1.18×10^{-4}), A₂O (1.16×10^{-4}) 순으로 큰 것으로 나타났으며, 지구온난화, 부영양화, 자원 고갈 순으로 영향이 큰 환경범주로 나타났다. 한편 지구온난화에 대한 영향은 Bardenpho (9.67×10^{-5}), MUCT (9.31×10^{-5}), VIP (9.29×10^{-5}), A₂O (8.85×10^{-5}), CAS (8.65×10^{-5}) 순으로 높게 나타났으며, Table 9의 생물학적 처리로 인해 발생하는 CH₄ 배출량이 큰 순서와 일치하였다. 특성화를 통한 지구온난화 범주에 대한 영향 산정 시, 각기 다른 온

Table 9. Inventory analysis in operation stage

	Material	Units	CAS	A ₂ O	Bardenpho	VIP	MUCT
<Input>							
Energy consumption	Electricity	kWh/d	2174	10693	19441	20199	10139
Resource consumption	PAC	ton/d	14.074	4.963	0	3.478	2.870
<Output>							
Emission to air	CH ₄	kg/d	6292	6805	7642	7103	7345
	N ₂ O	kg/d	20.5	9.3	5.3	9.0	11.2
	TSS	kg/d	2880	1440	1481	2290	1280
Emission to water (Effluent quality)	BOD ₅	kg/d	1130	546	459	808	438
	T-N	kg/d	2614	1190	673	1150	1420
	T-P	kg/d	871	48	66	76	44
Waste product	Sludge	ton/d	11.8	11.5	11.3	10.9	11

실가스의 양에 CO₂를 기준으로 지구온난화에 상대적으로 영향을 미치는 정도를 나타내는 global warming potential (GWP) 값을 곱하여 kg CO₂-eq/kg 단위로 각 온실가스 배출량을 통일하였다. GWP 값은 100년을 기준으로 했을 때, CH₄의 경우 25이고 N₂O의 경우, CH₄의 약 12배인 298에 해당한다[11]. 따라서 같은 양의 N₂O와 CH₄가 존재할 경우, N₂O가 지구온난화에 더 큰 영향을 미치지만, 본 연구에서 추정된 온실 가스 양은 CH₄는 평균 7037 kg/d, N₂O는 11 kg/d로 약 600배 이상 CH₄가 많이 배출된다(Table 9). 따라서 생물학적 처리로 인해 발생하는 CH₄가 지구온난화에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 일반적으로 생물학적 반응으로 인해 처리되는 유기물 및 영양염류의 양이 많을수록 그에 따른 부산물로 CH₄는 배출량이 증가하게 된다[12]. CAS 공법의 경우에는 단일 호기성 반응조만을 이용하기 때문에 고도처리 공법이 혐기성 및 무산소 환경에서 인 섭취 미생물(Phosphorus accumulating organism, PAO) 및 탈질화 미생물을 이용하여 영양염류를 효율적으로 제거하는 것에 비해 처리효율이 높지 않다[20]. 따라서, CAS 공법에서는 생물학적 처리에 의해 분해되는 유기물 및 영양염류의 양이 다른 고도처리 공법들에 비해 적어 배출되는 온실가스의 양도 가장 적은 것으로 사료된다. 반면 N₂O 가스는 가장 많이 배출하였는데(Table 9), 이는 온실가스인 N₂O의 양을 추정하기 위해 유출수 내 영양염류 농도가 증가할수록 N₂O 발생량도 증가한다는 경험식 (1)을 사용했기 때문으로 사료된다. CAS 공법은 다른 공법에 비해 유출수 내 높은 T-N 농도를 보이기 때문에(Table 5), 이로 인한 N₂O의 배출량도 높게 나타났다. 뿐만 아니라 다른 고도처리공법에 비해 유출수 내 높은 영양염류 농도로 인해 부영양화에 대한 영향이 공법들 중 최대 3배 가량으로 가장 큰 것으로 나타났다. 한편, 자원고갈에 대한 영향은 CAS (5.81×10⁻⁶), VIP (5.43×10⁻⁶), A₂O (4.54×10⁻⁶), Bardenpho (4.30×10⁻⁶), MUCT (3.65×10⁻⁶) 순으로 높게 나타났으며, 특성화 분석 결과 하수처리공법 운영 시 사용되는 전기 및 화학약품 사용이 자원고갈의 주요한 원인인 것으로 나타났다. VIP, A₂O, MUCT 공정의 경우 인 응집제거를 위한 화학약품 사용량이 비슷하여 전기소모 양이 증가할수록 자원 고갈에 대한 영향이 커지는 것을 확인하였다(Table 9, Fig. 4). CAS 공정의 경우에는 단위 반응조로 구성되어 있어 내부순환을 위한 펌프 동력이 필요하지 않아 다른 공정에 비해 낮은 전기를 소모하였으나, 화학약품의 사용이 다른 공정에 비하여 많았기 때문에 자원 고갈에 대한 전체적인 영향은 가장 큰 것으로 나타났다. Bardenpho 공정의 경우 다른 공정들과는 달리 화학약품을 주입하지 않아도 유출수가 방류수 수질을 만족하였으므로, 화학약품을 사용하지 않았다. 하수처리공법 별 운전 시 발생하는 각 범주에 따른 영향을 종합하여 보았을 때, CAS가 환경에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 나타났으며 A₂O 공법이 다른 고도처리 공법들에 비해서 상당히 적은 온실가스를 배출하여 가장 영향이 작은 공법임을 알 수 있었다.

고도처리공법으로의 증설 및 운영 중 발생하는 환경영향을 비교한 결과 운영 단계에서의 환경영향이 증설단계의 영향에 비해 큰 것으로 나타났다. 이는 하수처리장은 한번 완공하면 20년 동안 유지된다고 가정하여 20년을 기준으로 평가하였을 때 증설단계의 영향이 매우 미미하기 때문으로 사료된다. 따라서 본 연구에서는 운영 단계에서 환경영향이 큰 CAS 공법을 건설 및 운영단계에 걸쳐 환경영향이 가장 큰 공법으로 선택하였으며, 가장 영향이 작았던 A₂O 공법을 친환경적인 공법으로 선택하였다. 뿐만 아니라 A₂O, Bardenpho, MUCT, VIP의 고도처리공법의 경우 운영단계에서의 환경영향을

CAS 공법 대비 평균 12% 이상 낮출 수 있는 것으로 분석되었다. 따라서, 부영양화뿐만 아니라 전체적인 환경범주에 대한 부하를 저감시키기 위하여 CAS 공법에서 고도처리공법으로의 전환이 필요할 것으로 사료되며 추후 운영 시 발생하는 메탄가스를 에너지로 이용하여 지구온난화에 대한 영향을 줄인다면 고도처리 공법 이용에 따른 환경부하를 더욱 저감할 수 있을 것으로 기대된다.

3-1-2. 하수 슬러지 처리에 대한 평가

하수 슬러지 처리에 대한 환경성 평가를 위해 각 처리공법에 이용되는 자원과 산출물을 Table 10-12와 같이 정량화하고 슬러지 최종 처리장소까지의 운송거리를 측정하였다(Table 3). 이를 통하여 슬러지 처리 및 운송 중 발생하는 환경영향을 산정하여 총 8가지 환경범주에 대한 영향을 평가하였다.

Table 10. Inventory analysis in case of landfill [8]

(Units: 1ton dry solids/day)			
	Material	Units	Landfill stage
<Input>			
Energy consumption	Electricity	kWh/d	58.5
<Output>			
Emission to air	CH ₄	kg/d	3.2
	Cr	kg/d	0.1
	Cu	kg/d	0.2
	Pb	g/d	330
	Zn	kg/d	1.5
Emission to soil			

Table 11. Inventory analysis in case of incineration [8]

(Units: 1ton dry solids/day)			
	Material	Units	Incineration stage
<Input>			
Energy consumption	Electricity	kWh/d	304.8
<Output>			
Energy generation	Electricity	kWh/d	928.5
	N ₂ O	g/d	892
Emission to air	Cr	g/d	2.37
	Pb	g/d	0.23
	Hg	g/d	0.08
	Zn	g/d	0.98
	Dioxin and furan	g-TEQ/d	0.000008
Waste	Ash	ton/d	0.08

Table 12. Inventory analysis in case of composting [8]

	Material	Units	Composting stage
<Input>			
Energy consumption	Electricity	kWh/d	304.8
<Output>			
Energy generation	Electricity	kWh/d	928.5
	N ₂ O	g/d	-190
Emission to air	CH ₄	kg/d	-21.3
	CO ₂	kg/d	17.2
	Hg	g/d	0.08
	Zn	g/d	0.98
	Dioxin and furan	g-TEQ/d	0.000008
Waste	Ash	ton/d	0.08

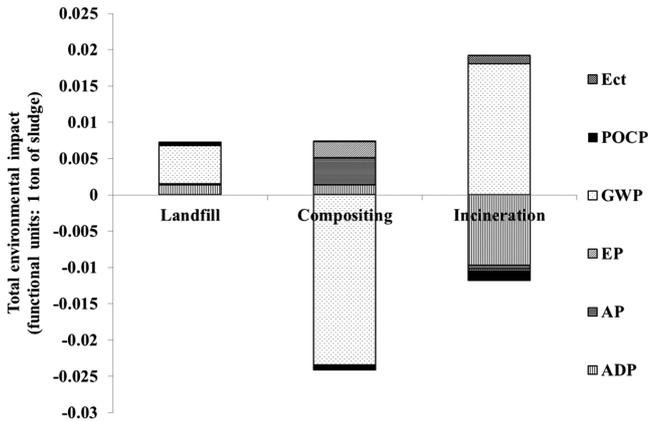


Fig. 5. Impacts of three sludge treatment method on the environmental during the sludge treatment stage.

Fig. 5은 하수 슬러지 처리공법에 따른 하수 슬러지 1 ton 당 총 환경영향을 나타내며, 환경에 대한 영향은 소각(7.43×10^{-3}), 매립(7.25×10^{-3}), 퇴비화(-1.68×10^{-2}) 순으로 큰 것으로 나타났다. 슬러지 처리공법의 경우 각 공법 별로 가장 큰 영향을 미치는 범주가 대체적으로 달랐으나, 공통적으로 지구온난화가 큰 비중을 차지하는 것으로 나타났다. 슬러지 소각의 경우 소각 시 발생하는 N_2O 가스가 지구온난화 범주에 큰 영향을 미친 것으로 판단되며, 슬러지 매립의 경우에는 매립 후 산소가 원활하게 공급되지 못해 하수 슬러지의 혐기성 소화가 이루어져 메탄 가스가 발생되어 지구온난화에 영향을 미치는 것으로 사료된다. 한편 슬러지 퇴비화의 경우에는 화학비료 대신 퇴비를 사용함으로써 질소비료 생산 시 발생하는 아산화질소 및 메탄에 의한 영향을 줄임으로써 지구온난화에 대한 영향을 감소시키는 것으로 나타났다[8].

특히 슬러지 퇴비화의 경우 음의 값의 환경영향을 갖는 것을 확인할 수 있는데(Fig. 5), 이는 슬러지 퇴비가 화학비료를 대체함으로써 얻는 지구온난화 측면의 환경적 이득이 퇴비화 공정의 운영 및 수송에서 발생하는 부정적 환경영향을 상쇄하여 전반적으로는 환경에 긍정적인 영향을 미쳤기 때문으로 나타났다. 슬러지 소각의 경우 소각 시 발생하는 CO_2 , N_2O 에 의해 지구온난화에 대한 영향이 컸으나 이 때 발생하는 열에너지의 재이용을 통해 전기 사용을 줄임으로써 전기 사용에 의한 자원고갈과 부영양화에 대한 환경영향은 감소함을 알 수 있었다(Fig. 6). 한편, 슬러지 최종처리 장소까지의 운송 시 발생하는 환경영향은 슬러지 처리 시 발생하는 환경영향에 비해 매우 미비하여 하수 슬러지 처리 단계에서의 총 환경영향에 영향이 거의 없음을 확인할 수 있었다.

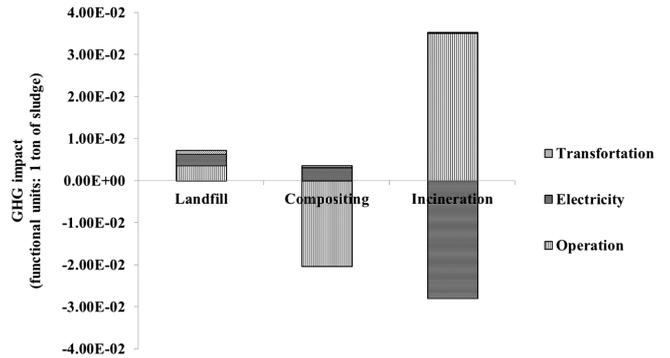


Fig. 6. Effect of each process on GHG impact according to the sludge treatment process.

3-2. 고도하수처리 및 슬러지 처리공법에 대한 경제성 평가

3-2-1. 하수처리공법에 대한 평가

기존 하수처리 공법의 고도처리 공법으로의 증설 및 운영에 필요한 투입물의 양(Table 8, 9)에 건축자재의 톤당 가격(Table 7), 톤당 PAC 소요비용 및 전력당 전기요금을 곱하여 증설 및 운영에 소비되는 자원 및 에너지비용을 산출하였으며, 운송 비용은 운송거리(Table 7) 및 자재 양을 이용하여 식 (7)과 (8)에서 얻어진 디젤 소비량에 1630원/L의 비용인자를 곱하여 얻었다. 각 고도처리공정 별 증설 및 운영을 위하여 하루에 소요되는 비용은 Table 13과 같다.

고도처리 공법으로의 증설을 위한 경제성 평가를 위해 각 공법에 필요한 원자재 및 운송 비용은 $1 m^3$ 의 반응조 당 각각 55,000원, 41,000원으로, $1 m^3$ 반응조를 증설하는데 총 96,000원이 소요되는 것으로 나타났다. 고도처리 공법으로의 초기 증설 비용은 20년 동안 유지된다는 가정하에 공법 별 총 용량의 곱과 $1 m^3$ 의 반응조를 증설하는데 소요되는 96,000원의 곱으로 나타났으며, 하수 및 슬러지 처리에 소요되는 비용과 단위를 통일시키기 위하여 ($365 \text{일} \times 20 \text{년}$)으로 나누어 하루 소요비용을 산정하였다. 이에 총 용적이 큰 MUCT, Bardenpho, A_2O , VIP, CAS 순으로 비용이 높게 산정되었다(Table 4, 13).

각 하수처리 공법에 대한 경제성 평가를 위해서는 운영에 따른 전력 소모, 인 제거를 위한 화학약품 사용, 방류 수질 초과 시 부과되는 벌금에 대한 비용을 고려했다. 각 공법에 대한 총 운영비용(천원)은 CAS (13,639), VIP (11,440), Bardenpho (7,000), A_2O (6,521), MUCT (5,281) 순으로 높게 나타났다. CAS 공법의 경우에는 단일반응조로 구성되며 슬러지순환 pipe가 하나이므로 다른 고도처리 공법에 비해 펌핑 및 폭기 동력에 대한 비용은 적었으나 영양염류가 제대로 처리되지 않아 추가적인 인 제거를 위한 화학약품 사용이 다른 공법에 비하여 평균 80% 정도 많아 전반적인 운영 비용은 가장 높은 것으로

Table 13. Estimated cost in construction and operation stages of five treatment processes

(Units: 1,000 won/day)

		CAS	A_2O	Bardenpho	VIP	MUCT
Construction	Material	190	211	299	157	346
	Transportation	140	158	223	118	258
	Total	330	369	522	275	604
Operation	Electricity	1,898	3,223	4,600	4,670	3,072
	Chemical usage	3,237	1,141	0	800	660
	Effluent fine	8,504	1,788	1,877	5,695	945
	Total	13,639	6,152	6,477	11,165	4,677
Total		13,969	6,521	7,000	11,440	5,281

나타났다. 또한 인 제거를 위한 화학약품 사용에도 불구하고 방류수 수질이 수질기준을 초과하여 이에 대한 벌금이 전체 비용의 절반 이상을 차지하였다. MUCT 공법의 경우에는 두 번의 내부반송을 하지만 반송시키는 슬러지의 양이 같은 횟수의 내부반송을 하는 Bardenpho, VIP 공법에 비해 적어 전기 사용에 의한 비용이 적고, 공법에 의해서 처리되는 유출수 수질이 양호한 편으로 공법 중 수질 초과로 인한 벌금이 가장 낮고 다른 공법들에 비해 적은 양의 화학약품을 소모하여 비용이 가장 적은 것으로 사료된다(Table 9, 13). 반면 Bardenpho 공법의 경우에는 두 개의 호기 반응조와 두 번의 내부순환을 가져 펌프 및 폭기를 위한 전력 사용비용이 두 번째로 컸지만, 추가적인 약품 사용이 필요하지 않을 뿐만 아니라 영양염류에 대한 방류수 수질을 만족하여 운전에서 소비되는 비용이 세 번째로 낮은 것으로 나타났다. 이를 정리하자면 고도처리 공법은 기존 CAS 공법에 비해 높은 전력소비 비용, 낮은 화학약품 사용비용을 보였다. 특히 방류수 수질 초과에 따른 벌금 감소에 의한 총 운영비용 변화가 93%인 것으로 나타나, 유출수 수질이 운영 비용에 중요한 영향을 미치는 것으로 사료된다.

고도처리공법으로의 증설 및 운영 중 소요되는 비용을 비교한 결과 환경성 평가와 유사하게 운영단계에서의 비용이 전반적인 경제성에 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다. 따라서, 각 공법의 증설 후 20년동안 운영할 수 있다는 본 연구의 가정에 근거하였을 때 UCT 공정이 큰 용적으로 인하여 건설 비용은 가장 높지만, 운영 단계에서 가장 낮은 비용을 소모하였으므로 가장 경제적인 공법으로 사료된다.

3-2-2. 하수 슬러지 처리에 대한 평가

하수 슬러지 처리에 대한 경제성 평가를 위해 각 공법 별 처리 및 운송 비용을 이용하여 Table 14에 있는 총 비용을 산정하였다. 슬러지 1톤당 처리 비용은 매립의 경우에는 최종처리장소에서 요구하는 슬러지 반입료를, 소각 및 퇴비화의 경우엔 슬러지 처리 시 이용되는 전기 및 화학약품 비용을 기준으로 하였으며 매립(56,000원), 소각(50,000원), 퇴비화(30,000원) 순으로 높게 나타났다[19]. 운송 비용은 하수처리장과 최종 슬러지 처리장소 간의 거리에 따라 결정되어(Table 3), 소각, 매립, 퇴비화 순으로 높게 나타났다. 운송 및 처리 비용을 모두 고려하였을 때, 하수 슬러지 처리 공법 중 매립이 가장 많은 비용을 소모하는 것으로 나타났다. 또한 각 하수처리 공법에 매립을 적용하였을 경우, 가장 많은 하수 슬러지를 배출하는 CAS 공법이 하루 690,000원의 하수 슬러지 처리 비용을 소모하는 것을 알 수 있었다. 한편 이 중 운송비용은 31,000원으로 처리 비용에 비해 20분의 1가량으로 하수 슬러지 처리 단계에서의 총 비용의 대부분은 처리 비용이 차지한다는 것으로 나타났다. 따라서, 가장 경제적인 공정으로는 처리 비용이 가장 낮은 퇴비화가 선택되었다. 또한, 환경성과 경제성을 모두 고려한 경우 퇴비화 공정이 나머지 두 공정에 비하여 모든 측면에서의 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있었다.

Table 14. Estimated cost for three sludge treatment methods

	(Units: won/ton)		
	Landfill	Incineration	Compositing
Sludge treatment	56,000	50,000	30,000
Transportation	2,700	1,300	300
Total	58,700	51,300	30,300

4. 결 론

본 연구에서는 친환경적이고 경제적인 하수처리 공정 및 하수 슬러지 처리 방식 선정을 위하여 하수처리장의 전과정에 따른 환경성 및 경제성 평가를 실시하였다. 하수처리장의 전과정은 하수처리장의 증설, 운영, 하수 슬러지 처리 단계로 이루어졌으며, 기존의 활성슬러지 공법인 CAS와 네 가지 고도처리 공법(A₂O, Bardenpho, MUCT, VIP) 및 세 가지 슬러지 처리 방법(매립, 소각, 퇴비화)에 대한 평가가 이루어졌다. 각 하수처리공법 및 슬러지 처리 방법 별 환경성 및 경제성 평가 방법으로는 전과정평가와 생애주기비용을 이용하였다. 본 연구를 통한 환경성 평가 결과, 하수처리 공법에서는 A₂O 공법이, 슬러지 처리 방법에서는 퇴비화가 가장 친환경적인 것으로 나타났다. 또한 경제성 결과를 통해 하수처리 공법에서는 MUCT 공법이, 슬러지 처리 방법에서는 퇴비화가 가장 경제적인 공정성능을 보여줄 수 있었다. 본 연구에서는 전과정평가 및 생애주기비용을 이용하여 하수처리장의 전과정에 따른 환경성 및 경제성을 평가하는 방법을 제시하였으며, 본 연구에서 제안된 방법에 입각하여 하수처리장의 고도처리공법으로의 증설 및 하수 슬러지 처리 방법 선정 시 친환경적이고 경제적인 공법 및 방법을 제시할 수 있을 것이다.

감 사

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구로 이에 감사를 드립니다(No. 2012-001400).

References

- Kim, M. H. and Yoo, C. K., "Design and Environmental/Economic Performance Evaluation of Wastewater Treatment Plants Using Modeling Methodology," *Korean Chem. Eng. Res.*, **46**(3), 610-618(2008).
- Jung, Y. L., "Application of LCA for the Operation Phase Between Standard Activated Sludge and A₂O process," Ph. M. thesis, the Univ. of Seoul, Korea(2007).
- Oh, T. S., Kim, M. J., Lim, J. J., Kim, Y. S. and Yoo, C. K., "Estimate and Environmental Assessment of Greenhouse Gas(GHG) Emissions and Sludge Emissions in Wastewater Treatment Processes for Climate Change," *Korean Chem. Eng. Res.*, **49**(2), 187-194(2011).
- Zhou, Z., Wu, Z., Wang, Z., Tang, S., Gu, G., Wang, L., Wang, Y. and Xin, Z., "Simulation and Performance Evaluation of the Anoxic/anaerobic/aerobic Process for Biological Nutrient Removal," *Korean J. Chem. Eng.*, **28**(5), 1233-1240(2011).
- Han, J. Y., Cho, H. C. and Kim, D. K., "Life Cycle Assessment (LCA) Study of Wastewater Sludge Treatment Systems: Incineration, Composting, Solidification," *J. Korean Inst. Resource Recycling*, **11**(4), 17-26(2002).
- International Standards Organization, *Environmental Management- Life Cycle Assessment- Principle and Frameworks*, ISO 14040(2006).
- Small and Medium Business Administration, *Green Management*, <http://www.greenbiz.go.kr/Ind01020000.action>(2010).
- Hong, J., Hong, J., Otaki, M. and Jolliet, O., "Environmental

- and Economic Life Cycle Assessment for Sewage Sludge Treatment Processes in Japan," *Waste Manage.*, **29**, 696-703(2009).
9. Pasqualino, J. C., Meneses, M., Abella, M. and Castells, F., "LCA as a Decision Support Tool for the Environmental Improvement of the Operation of a Municipal Wastewater Treatment Plant," *Environ. Sci. Technol.*, **43**, 3300-3307(2009).
 10. Foley, J., Haas, D. D., Hartley, K. and Lant, P., "Comprehensive Life Cycle Inventories of Alternative Wastewater Treatment Systems," *Wat. Res.*, **44**, 1654-1666(2010).
 11. Kim, M. J., Kim, M. H., Kim, Y. S. and Yoo, C. K., "Design of a Wastewater Treatment Plant Upgrading to Advanced Nutrient Removal Treatment Using Modeling Methodology and Multivariate Statistical Analysis for Process Optimization," *Korean Chem. Eng. Res.*, **48**(5), 589-597(2010).
 12. IPCC, IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories(2006).
 13. Choi, T. H., "Waste Water Treatment Technology Using Adjuvants Coagulation," Ph. M. thesis, Seoul National Univ. of Science and Technology, Korea(2011).
 14. Thomsen, M. and Lyck, E., Emission of CH₄ and N₂O from Wastewater Treatment Plants (6B), *NERI Technical Note No.208*, Ministry of the Environment, Denmark(2005).
 15. Ristimäki, M., Saynajakari, A., Heinonen, J. and Junnila, S., "Combining Life Cycle Costing and Life Cycle Assessment for an Analysis of a New Residential District Energy System Design," *Energy*, **63**, 168-179(2013).
 16. Kloeffer, W., "Life Cycle Sustainability Assessment of Products," *Int J LCA*, **13**(2), 89-95(2008).
 17. Finkbeiner, M., Schau, E. M., Lehmann, A. and Traverso, M., "Towards Life Cycle Sustainability Assessment," *Sustainability*, **2**(10), 3309-3322(2010).
 18. Carlsson Reich, M., "Economic Assessment of Municipal Waste Management Systems-case Studies Using a Combination of Life Cycle Assessment (LCA) and Life Cycle Costing (LCC)," *Journal of Cleaner Production*, **13**, 253-263(2005).
 19. Lee, J. I., Lee, K. Y. and Yoo, Y. S., *Inhibition of waste overseas dump and project*, Gyeonggi Research Institute(2013).
 20. Lee, H. K., "The study of Change of Operating Factors with Traditional Activated Sludge and Attached Microorganism Process for the Nitrogen and Phosphorus Removal," Ph. M. thesis, Seoul National Univ. of Science and Technology, Korea(2009).