

## LCA기법을 이용한 하수처리장의 환경영향 평가

# Environmental Impact Assessment of Wastewater Treatment Plant Using Life Cycle Assessment

박광호 · 황용우\*

Kwang-Ho Park · Yong-Woo Hwang\*

인하대학교 환경토목공학부

(2005년 11월 1일 논문 접수: 2005년 11월 30일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

Comprehensive environmental impact of wastewater treatment plant (WWTP) was evaluated with life cycle assessment (LCA) methodology based on ISO 14040. As environmental impact assessment method, Eco-indicator 95 and Eco-indicator 99 were used. The studied WWTP had a capacity of 100,000 m<sup>3</sup>/d, and its life span of civil structure and main machinery was designed to 40 years and 20 years, respectively. As the results, more than 95% of environmental impact was produced by using electricity and chemical use in operation stage. In construction stage, temporary shoring facility was the major reason of environmental load, however, its impact was much less than those by operation utilities.

**Key words:** Wastewater Treatment Plant, Life Cycle Assessment, ISO 14040

**주제어:** 하수처리장, Life Cycle Assessment, ISO 14040

## 1. 서 론

정수, 하수 및 폐수 등을 포함하는 상하수도시설은 사회기반시설 중 에너지공급 시설과 더불어 도시를 지탱하는 가장 중요한 인프라시설이라 할 수 있다. 특히, 하수도시설은 인간 생활의 최종 산물을 자연으로 환원시키는 접점이라는 점에서 그 기능과 역할, 그리고 친환경성의 중요성이 강조되고 있다. 현재까지 하수 및 슬러지 처리, 관거시설 등 전체 하수도 시

스템에 대해서 여러 가지 원리에 기초를 둔 다양한 프로세스가 개발되어 실용화되어 왔다. 이러한 프로세스들은 단순히 기술적인 요인뿐 아니라 시설계획, 부지면적과 최종처분의 개념 등의 지역적, 사회적 요소에 의해 결정되는 경우가 많으며, 최근에는 여기에 환경적 요소를 추가로 고려하는 추세라고 할 수 있다.

수처리 시스템은 수질, 대기, 폐기물의 3대 사후처리(end of pipe) 중의 하나로서 수중의 오염물질을 제거하기 위한 수환경 관련 도시 인프라시설이며, 건

\*Corresponding author Tel: +82-32-860-7501, Fax: +82-32-863-4267, E-mail: hwangyw@inha.ac.kr (Hwang Y.W.)

설, 운영, 해체 및 폐기시 대량의 자재 및 에너지를 사용하고 이로 인하여 환경부하를 발생시킨다. 따라서 수처리 시스템에서의 환경부하 저감은 급수, 하수도처리, 수질정화의 원단위로서의 환경부하 저감의 파급 효과가 있으나, 수처리 시스템에 대한 환경성 평가시 수질오염물질의 제거량이나 제거효율 등의 단편적인 측면이 아닌 지구환경적 측면을 포함한 종합적 평가가 필요하다. 즉 사회전체에서 환경조화성을 얼마나 유지하고 있으며, 각 단위 프로세스를 구성하기 위한 각종 설비, 자재, 에너지로 인한 자원, 에너지 소비 및 환경오염부하를 정량화할 필요가 있으며, 여기서 사용되는 것이 LCA(Life Cycle Assessment)이다.

최근 TK(Turn-Key) 건설사업, SOC(Social Overhead Capital) 민간투자사업, BTL(Build Transfer Lease) 사업 등에서 환경성 평가방법으로 LCA기법이 일부 적용되고 있는데, 이를 수행하기위한 가이드라인과 목록분석(Life Cycle Inventory, LCI) DB 등은 충분히 마련되지 않은 상태이다. 이에 본 연구에서는 사회기반시설 중 중요한 비중을 차지하고 있는 하수처리장에 대한 LCA기법 적용방법론을 제시하고 사례분석을 수행하였다. LCA 수행으로 수질오염물질의 처리뿐만 아니라 이와 관련한 다른 여러 환경적인 결과를 전체적인 시스템으로서 파악하고, 계획 및 설계단계에서 전과정에 걸친 환경부하 예측과 환경 개선의 기회를 사전에 규명할 수 있는 방안을 제시하였다.

## 2. 평가방법

본래 LCA는 제품의 제조, 사용, 폐기 등 전체적인 life cycle로부터 발생하는 환경부하를 평가하기 위해 국제표준화기구(International Organization for Standardization, ISO)에서 채택한 방법이지만, 현재 그 대상 및 내용은 개별 제품뿐만 아니라 건축물이나 사회기반시설과 같은 복합 시스템으로 광범위하게 확대되고 있다. 하수처리장과 같은 사회기반시설은 대규모이며 복합적이면서, 시설의 수명이 20~30년 또는 그 이상으로 장기간 지속된다는 점에서 기존의 제품 LCA와는 다른 개념의 LCA를 적용해야 한다.

개념적으로 이러한 사회기반시설의 평가범위는 건

설용 자재 및 설비의 제조로부터 시공, 시설의 유지, 운영, 구조물의 최종 해체 폐기에 이르기까지의 전과정에서 발생하는 환경부하를 대상으로 하게 된다. 또한, LCA 전반의 구성요소로서, 각종 자원 및 에너지의 소비와 그로부터 야기되는 환경오염물질의 목록분석이 필요하고, 다음에 목록분석 결과가 환경에 어느 정도 영향을 미칠 것인가를 정량화하는 영향평가(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)를 하게 된다. 그러나, 공장에서 일률적으로 생산되는 공업제품에 대한 환경영향을 단일수치로 정량화하는 영향평가 방법론은 이미 많은 연구를 통하여 제시되고 있지만, 데이터의 일반화, 규격화 등이 요구되는 LCA기법의 특성상 복합시스템을 분석해야 하는 ILCA(Infrastructure Life Cycle Assessment)에 대한 연구는 아직 각국에서 활발히 진행되고 있는 상황은 아니다.

기존의 수많은 제품 LCA 연구와는 다르게, 현재 장기간의 시설 수명이 있는 사회기반시설에 대한 LCA 연구는 시작단계이며, 이러한 이유로 수처리 시스템에 대한 LCA 수행 사례는 많지 않다. 우리나라의 경우 2002년 환경부 '기존 하수처리장 고도처리시설 설치사업 업무처리일반지침'에 LCA 수행 권고를 통하여 하수도관련 건설업체 및 엔지니어링업체에서 2003년도부터 대형 관거, 수처리 시설 공사를 중심으로 적용되기 시작하였고, 현재 대부분의 하수도시설 설계시 대안비교를 수행하는 과정에서 친환경설계를 목적으로 LCA가 적용되고 있는 상황이다.

현재 환경부에서는 상하수도시설의 확충과 고도처리시설 도입, 하수관거 정비사업 등 국가차원의 상하수도 인프라를 확충 및 재건하는 등의 시설확충과 신기술도입에 초점을 맞추고 있다. 이런 점을 고려한다면 앞으로 상하수도시설과 관련한 대형 공사는 계속적으로 이루어 질 것이며, 이에 따라 LCA의 수요도 증가할 것으로 예상된다.

국외의 경우에도 학계나 연구소에서 하수처리장에 대한 LCA를 활발히 적용, 평가하고 있다. 오스트리아의 경우 도시하수처리 시스템의 대안 선정을 위한 의사결정방법론에 LCA를 활용하는 방안에 대하여, 호주의 경우 WaterPlan 21의 성공을 위하여 처리시스템별로 시나리오를 선정하여 LCA를 수행하였다. 프랑스의 사례에서는 슬러지 발생 저감을 위한 처리시스템에 대한 LCA를 수행하여 환경영향을 분석하였

다. 일본의 경우 경제산업성에서 1998년부터 2002년까지 정부가 주도하여 수처리시스템의 각 단위 공정에 대한 LCA 수행 모델과 원단위를 작성하여 상하수도 시설의 친환경설계 기반을 마련하고 있다.

### 3. 하수처리장에 대한 LCA 수행

하수처리장은 건설해 놓은 상태로 보수나 보강, 교체와 같은 유지보수의 개념이 아닌, 처리장을 운영함으로써 수질오염물질을 제거하는 기능을 가지고 있다. 이것은 건설사업의 life cycle 단계를 고려한 LCA에서 확연히 다른 결과를 초래하게 된다. 구체적으로 일반 토목구조물의 경우 유지보수단계는 건설단계에 비하여 미비한 환경영향을 발생하는데 비해, 하수처리장의 경우 운영시, 즉 운전시 지속적인 전력사용 및 약품사용으로 인하여 오히려 건설단계보다 높은 환경영향을 나타내게 된다. 이러한 특성들이 반영된 ILCA 가이드라인은 아직 세계적으로 마련되지 않은 상황이며, 본 연구에서는 하수처리장의 LCA를 Fig. 1과 같이 ISO 14040에서 제시하고 있는 목적 및 범위 설정(Goal and Scope Definition), 목록분석(Life Cycle Inventory Analysis), 영향평가(Life Cycle Impact Assessment), 결과해석(Interpretation) 등 4단계로 나누어 수행하였다. 수행하는 과정에서 국내외 LCI DB, 각 건설구조물의 설계자료, 운영관리 실적자료 등의 자료조사 및 분석과 건설 설계용 적산 프로그램 EBS(Event Breakdown System for Construction), LCA 연산 프로그램 TEAMTM(Tool for Environmental Analysis and Management)과 PASS(Product Assessment for Sustainable Solutions) 등을 이용하였다.

#### 3.1. 목적 및 범위설정

분석대상 하수처리장은 BNR계열의 고도처리공정을 적용한 처리 용량 100,000m<sup>3</sup>/day의 실제 A하수처리장으로 설정하였다. 하수처리장에 대한 LCA의 기능단위는(Functional Unit; F.U.) 단위 처리용량 1m<sup>3</sup>으로 설정하였고, 분석기간은 하수처리장의 토목구조물인 경우 40년을, 기계 및 설비의 경우 20년으로 적용하였다. 본 연구에 있어 LCA 수행목적은 하수처리장의 주 life cycle이라 할 수 있는 건설단계, 운영단계에서 어느 정도의 환경영향이 발생하는지 정량 평가

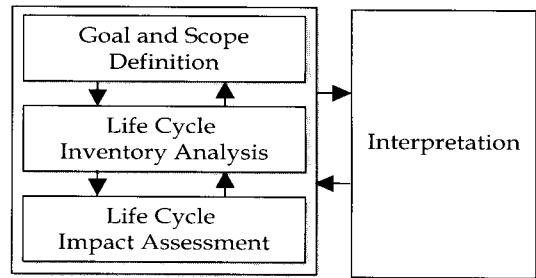


Fig. 1. LCA Framework based on ISO 14040.

하고, 사전에 환경적 대안을 설계에 적용하여 개선을 도모하는 것에 두었다. 하수처리장의 건설단계는 수질균등조 및 유량조정조, 침사지, 반응조 등의 건설이, 운영단계의 경우 하수처리장 내의 각 공정별 사용되는 에너지와 화학약품 등이 고려되었다.

#### 3.2. 목록분석

평가대상 하수처리장의 건설 및 운영단계에서 투입되는 물질과 에너지를 정량화하고, 이에 인하여 발생하는 각 환경오염물질들에 대하여 목록분석을 수행하였다. 건설단계에서는 하수처리장의 각 단계별로 투입되는 건설자재 및 건설장비의 사용량을 조사하였으며, 각 건설자재 및 건설장비의 에너지 소비량에 목록분석을 위하여 국내에서 개발된 환경부, 산업자원부의 국가 LCI DB와 국외의 Simapro, Gabi, Team 등의 LCI DB를 이용하였다. 다음에 각 단계별 분석 방법을 설명하였다.

건설단계의 각 공정별로 투입되는 건설자재와 사용량을 건설 적산 프로그램인 EBS 프로그램을 이용하여 파악하였으며, 이를 정리하여 Table 1에 나타내었다. 또한, 각 단위공정별 건설시 사용되는 건설장비별 에너지소비량은 각 건설공정별 투입장비의 작업 능력과(Q) 실제 작업한 수량(Q<sub>R</sub>), 그리고 각 건설장비별 연료사용량을 이용하여 산정하였다. Q<sub>R</sub>과 Q는 기본설계보고서를 이용하여 산정하였고, 장비별 연료사용량은 일위대가와 건설 표준품셈을 참조하였다. 각 건설공정별 건설장비 사용에 따른 에너지 소비량을 Table 2에 나타내었다.

운영단계에서는 하수처리장의 운영시 사용되는 에너지와 화학약품 등에 대하여 고려하였고, 이를 Table 3에 정리하였다. 하수처리장의 운영시 약품사

**Table 1.** Construction Materials Requirement for Construction Stage of A WWTP

Process	Materials	Quantity	LCI DB	Process	Materials	Quantity	LCI DB	
Water equalization tank and flux regulation tank	PVC pipe(φ150mm)	30.00 m	MOCIE	Sharing tank of final sedimentation tank	Binding wire	38.64 kg	SimaPro	
	PVC pipe(φ30mm)	38.50 m			STS plate	5.71 kg	MOE	
	Welding rod(PVC,φ3.2)	9.45 kg			Mixed hardware setting	0.11 ton		
	Ready mixed concrete	692.57 m <sup>3</sup>	STS pipe (φ31.8*1.2t)		50.65 m			
	Mixed hardware setting	384.00 kg	STS pipe (φ50.8*1.5t)		32.68 m			
	STS angle	148.28 kg	Ready-mixed		34.97 m <sup>3</sup>	MOCIE		
	STS rounded bar (φ13.1~25.4)	14.08 kg	Oxygen		16.58 ℓ	MOE		
	STS rounded bar (φ7.0~13)	6.72 kg	Acetylene		5.61 kg	SimaPro		
	STS plate	398.19 kg	Steel pipe		213.22 m	SimaPro		
	STS pipe	1.08 m	Concrete paste		22.38 kg	SimaPro		
	Banding wire	884.07 kg	Reinforcement work		5.95 ton	MOCIE		
	Iron nail	3.38 kg	Plywood form		191.23 m <sup>2</sup>	SimaPro		
	Iron wire	52.15 kg	Binding wire		425.84 kg	SimaPro		
	Square lumber	0.64 m <sup>3</sup>	Iron wire		1.61 kg	Final sedimentation tank		
	Plywood	17.43 m <sup>2</sup>	Welding rod(PVC,φ3.2)		0.28 kg		MOCIE	
Copper plate	103.62 kg	Ready-mixed	302.73 m <sup>3</sup>	MOE				
Steel pipe	660.37 m	Ready-mixed (reinforcement)	6.90 m <sup>3</sup>					
Welding rod	9.45 kg	Ready-mixed (plain)	0.49 m <sup>3</sup>					
Iron wire	0.27 kg	Acetylene	27.45 kg		SimaPro			
Ready-mixed (reinforcement)	1.20 m <sup>3</sup>	Concrete paste	414.24 kg		MOE			
Ready-mixed (plain)	0.24 m <sup>3</sup>	Oxygen	81.14 ℓ					
Plywood form	7.93 m <sup>2</sup>	Reinforcement	1.17 ton	MOCIE				
Reinforcement work	0.20 ton	Reinforcement work	51.46 ton					
Binding wire	17.90 kg	Steel pipe	774.87 m	SimaPro				
Influent manhole repair work of grit chamber	Ready-mixed	13.16 m <sup>3</sup>	MOCIE	Effluent channel BOX	Binding wire		3.75 kg	SimaPro
	Cement	38.25 kg	MOE		Oxygen		2.50 ℓ	MOE
	Acetylene	2.56 kg	SimaPro		Ready-mixed		80.96 m <sup>3</sup>	MOCIE
	Oxygen	7.55 ℓ	MOE		Ready-mixed (reinforcement)		2.76 m <sup>3</sup>	
	Concrete paste	8.92 kg	SimaPro		Acetylene	0.62 kg	SimaPro	
	Steel pipe	63.58 m	SimaPro		Concrete paste	362.21 kg	SimaPro	
	Plywood form	41.12 m <sup>2</sup>	SimaPro		Reinforcement work	0.47 ton	MOCIE	
	Reinforcement work	2.24 ton	MOCIE		Sludge thickener	Steel pipe	63.18 m	SimaPro
	Mixed hardware setting	259.00 kg	MOE			Digester	Steel pipe	425.51 m
	STS reinforcement	10.28 kg			Binding wire		1,903.46 kg	SimaPro
STS plate	261.69 kg	Primary sedimentation tank		Iron wire	160.97 kg	MOE		
STS rounded bar (φ13.1~25.4)	12.04 kg			STS plate	487.96 kg			
Set up of mixed hardware	0.80 ton			Utility-pipe conduit	Copper plate	318.40 kg	SimaPro	
STS plate	0.05 ton				Ready-mixed	1,619.93 m <sup>3</sup>	MOCIE	
Acetylene	12.43 kg				Welding rod	32.15 kg	MOCIE	
Concrete paste	31.43 kg				PVC pipe	125.30 m		
Re-mi-con	125.65 kg				Steel pipe	915.15 m		SimaPro
Oxygen	36.75 ℓ				Reinforcement work	237.93 ton		MOCIE
Steel pipe	380.44 m		Plywood form		1,247.86 m <sup>2</sup>	SimaPro		
Primary sedimentation tank	Plywood form		32.16 m <sup>2</sup>		SimaPro	Drainage work of rainfall	Reinforcement work	15.48 ton
	Reinforcement work	21.36 ton	MOCIE		Ready-mixed(plain)		38.33 m <sup>3</sup>	MOCIE
Reactor	Binding wire	438.04 kg	SimaPro		Ready-mixed(reinforcement)		118.20 m <sup>3</sup>	
	Ready-mixed	336.87 m <sup>3</sup>	MOCIE	Plywood form	1,108.15 m <sup>2</sup>	SimaPro		
	Welding rod	282.78 kg	MOE	Reinforcement work	43.09 ton	MOCIE		
	Mixed hardware setting	6.71 ton		Drainage work	Ready-mixed(plain)	7.45 m <sup>3</sup>	MOCIE	
	STS reinforcement	318.24 kg			Ready-mixed(reinforcement)	117.30 m <sup>3</sup>		
	STS plate	6,487.92 kg			Plywood form	82.14 m <sup>2</sup>	SimaPro	
	STS rounded bar(φ13.1~25.4)	297.60 kg			Temporary shoring facility work	Plate	64,416.72 kg	SimaPro
	STS rounded bar(φ7.0~13)	40.38 kg				Reactor	Circular bar steel	1187.21 kg
	STS plate	17,035.88 kg		Steel pipe			2,464.55 m	SimaPro
	Oxygen	30.59 ℓ		Concrete paste			460.50 kg	SimaPro
Acetylene	10.35 kg	Reinforcement work		54.76 ton			MOCIE	

MOE : Ministry of Environment, Korea  
 MOCIE : Ministry of Commerce, Industry and Energy, Korea

**Table 2.** Construction Machinery and Energy Consumption for Construction Stage of A WWTP

Process		Construction Machinery	Q <sub>R</sub> (m <sup>3</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /hr)	Energy (L/hr)	Energy Consumption (L)
Earth work	Digging the earth	Dozer(19ton)	10,284	55	23.8	4,450.17
	Pit excavation : sediment	Backhoe	14,180 m <sup>3</sup>	56.16	10.5	2,651.18
			17,794 m <sup>3</sup>	64.8	10.5	2,883.29
	Removal of surplus soil	Backhoe	17,794 m <sup>3</sup>	87.54	10.5	802.07
Dump truck(15ton)			50.26	21.1	2,807.74	
Water equalization tank and flux regulation tank	Pump Car Placing (25-160-12)	Concrete pump car	42.52m <sup>3</sup>	80	18	9.57
	Pump Car Placing (25-240-15)		288.18 m <sup>3</sup>	80	18	65.07
	Pump Car Placing (25-300-15)		361.87 m <sup>3</sup>	80	18	81.65
Sharing tank of primary sedimentation tank	Pump Car Placing (25-300-15)	Concrete pump car	13.16 m <sup>3</sup>	80	18	3.19
Primary sedimentation tank	Pump Car Placing (25-300-15)	Concrete pump car	125.65 m <sup>3</sup>	80	18	28.50
Reactor	Pump Car Placing (25-180-12)	Concrete pump car	14.78 m <sup>3</sup>	80	18	3.55
	Pump Car Placing (25-300-15)		322.09 m <sup>3</sup>	80	18	72.70
Sharing tank of final sedimentation tank	Pump Car Placing (25-300-15)	Concrete pump car	34.97 m <sup>3</sup>	80	18	8.09
Final sedimentation tank	Pump Car Placing (25-300-15)	Concrete pump car	302.73 m <sup>3</sup>	80	18	68.34
Effluent channel BOX	Pump Car Placing (25-180-12)	Concrete pump car	80.96 m <sup>3</sup>	80	18	18.44
Utility-pipe conduit	Pump Car Placing (25-160-12)	Concrete pump car	132.88 m <sup>3</sup>	80	18	30.12
	Pump Car Placing (25-180-12)		86.63 m <sup>3</sup>	80	18	19.72
	Pump Car Placing (25-300-15)		1,400.42 m <sup>3</sup>	80	18	315.32
Temporary shoring facility work	Sheet pile driving and Extraction (400×150×13, H=5.3)	Crane truck(20ton)	84 EA	5.13	6.8	112.67
		Generator(150kw)		5.13	34.9	585.07
		Crane truck(20ton)		7.35	6.8	81.41
		Generator(150kw)		7.35	34.9	422.60
	Sheet pile driving and Extraction (400×150×13, H=8.1)	Crane truck(20ton)	155 EA	3.83	6.8	276.97
		Generator(150kw)		3.83	34.9	1,430.63
		Crane truck(20ton)		5.71	6.8	189.35
		Generator(150kw)		5.71	34.9	977.93
	H-PILE Sand)	Engine(35HP)	63.8 m	3.13	3.8	78.67
	H-PILE setting, pile driving	Crane truck(25ton)	8 EA	1.46	7.7	42.08
		Crane truck(35ton)		3.92	13.8	35.204
		Generator(100kw)		3.92	26.4	74.08
	H-PILE Extraction (300×200, H=7.6m)	Crane truck(35ton)	5 EA	5.76	13.8	14.38
		Generator(100kw)		5.76	26.4	32.08
	Wale setting, remove	Crane truck(25ton)	280 m	1.36	7.7	1,580.65
		Crane truck(25ton)		1.8	7.7	1,202.06
	Strut setting, remove(L=9~11)	Crane truck(25ton)	78 EA	1.36	7.7	440.32
		Crane truck(25ton)		1.8	7.7	337.94
	Strut setting, remove(L=6~8)	Crane truck(25ton)	2 EA	1.46	7.7	10.52
		Crane truck(25ton)		1.96	7.7	11.81
	Wale joint	Crane truck(25ton)	58 EA	1.36	7.7	327.42
	Channel setting, remove	Crane truck(25ton)	228 m	0.58	7.7	3,026.90
	Angle setting, remove	Crane truck(25ton)	538 m	0.58	7.7	7,142.41
	Stiffener carriage	Crane truck(10ton)	314.42 ton	0.04	4.8	43,120.46
Trailer(20ton)		0.90		20.8	7,289.71	
Simple sheeting	Backhoe	1848 EA	18	10.5	226.80	
	Crane truck(10ton)		15	4.8	124.42	
	Crane truck(10ton)		2.91	4.8	641.32	
Strut setting, remove	Crane truck(25ton)	66 EA	1.71	7.7	920.95	
Radial joint	Crane truck(25ton)	205 EA	2.13	7.7	1,482.02	
Wale setting, remove	Crane truck(25ton)	818 EA	1.36	7.7	4,617.74	
	Crane truck(25ton)		1.8	7.7	3,503.50	
Wale joint	Crane truck(26ton)	54 EA	1.8	7.7	231.00	
Stiffener carriage	Crane truck(25ton)	1,102.16 ton	0.04	4.8	151,153.65	
	Trailer(20ton)		0.90	20.8	1,670,616.73	

**Table 3.** Materials and Energy Requirement for Operation stage in A WWTP

Section	Material	Quantity
Energy	Electricity	405,959.48 MW
Chemicals	Polymer(powder)	693,600 kg
	Polymer(liquid)	120,000 ton
	Sodium hypochlorite	664,400 kg
	Alum	5,960,000 kg

용량 및 전력 사용량은 현재 운영중인 하수처리장의 평균 약품 사용실적 및 전력사용실적을 조사하여 이용하였다.

### 3.3. 영향평가

하수처리장의 종합적 환경성을 평가하기 위해서 국내의 LCA 분야에서 환경성 평가방법론(Life Cycle Impact Assessment, LCIA)으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 Eco-indicator 95(EI 95) 방법과 Eco-indicator 99(EI 99) 방법을 이용하였다. 이들 방법론은 환경에 대한 영향을 어느 수준까지 고려하느냐에 달라진 것인데, 후자는 발생된 환경영향이 최종적으로 어떠한 대상에 영향을 미치는지를 정량화한 것으로 End-Point LCIA로, 전자는 Mid-Point LCIA로 불려진다. 전자는 EI 95는 목록분석 결과가 8가지 환경영향범주에 미치는 영향을 각 영향범주별 특성화 인자, 정규화 인자 및 가중인자를 적용하여 정량화한다. 평가하는 8가지 환경영향범주는 자원고갈(Abiotic Resources Depletion; ARD), 지구온난화(Global Warming; GW), 오존층파괴(Ozone Depletion; OD), 광화학산화물생성(Photochemical Oxidant Creation; POC), 산성화(Acidification; AC), 부영양화(Eutrophication; EU), 생태독성(Eco-Toxicity; ET), 인간독성(Human Toxicity; HT)이다. EI 99는 네덜란드에서 개발된 방법론으로, 환경오염을 야기시키는 배출물질로부터 수용체(인간, 동물, 생태계 등)가 받는 환경 위해성을 크게 인간건강영향, 생태계영향, 자원사용영향으로 나누어 분석하고, 이를 하나의 환경지수(Pt: Eco-Point)로 통합하여 나타내는 방법이다. 각 영향범주는 세부 영향범주로 구성되어 있으며, 인간건강의 경우, 발암물질영향, 호흡으로 인한 영향, 기후변화로 인한 영향, 방사능에 의한 영

향 및 오존층 고갈로 인한 영향으로 구성되고, 생태계의 경우 생태 독성물질로 인한 영향, 산성화 및 부영양화로 인한 영향으로 구성된다. 마지막으로 자원의 경우, 광물자원 고갈로 인한 영향과 화석자원 고갈로 인한 영향이 포함된다.

앞절에서 수행한 목록분석 결과를 바탕으로 하수처리장의 각 단계별로 Mid-Point LCIA와 End-Point LCIA를 수행하였다. Mid-Point LCIA를 이용한 하수처리장의 건설단계의 각 공정별 영향평가 결과를 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타낸 바와 같이 평가결과에서 가시설공에서 차지하는 환경영향이 77.0%로 가장 크게 나타났으며, 다음으로는 반응조 건설이 12.1%인 것으로 나타났다. 그리고 가시설공의 환경영향의 주 원인으로는 반응조 등의 주요 구조물 시공시 sheet pile의 항타 및 항발에 사용되는 장비의 연료 소모인 것으로 나타났다.

영향범주별로는 생태독성이 전체의 56.7%로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 자원고갈에 대한 영향이 17.0%인 것으로 나타났다.

하수처리장 운영단계의 각 구성요소에 대한 영향평가 결과를 Fig. 3에 나타내었다. 평가결과, Fig. 3에 나타낸 바와 같이 전력사용에 의한 환경영향이 67.2%로 가장 크게 나타났으며, 다음으로는 알람 사용이 32.2%인 것으로 나타났다. 영향범주별로는 자원고갈에 대한 영향이 전체의 45.0%로 가장 크게 나타났으며, 다음으로 생태독성에 대한 영향이 19.4%인 것으로 나타났다.

전체 하수처리장에 대한 life cycle별 Mid-Point 영향평가 종합 결과를 Table 4에 나타내었다. 평가결과는 운영단계의 비중이 95.7%로 건설단계의 결과보다 월등한 것을 나타냈으며, 영향범주별로는 자원고갈에 대한 영향이 43.8%로 가장 큰 비중을 나타냈으며, 다음으로 인간독성에 대한 영향이 18.9% 차지하는 것으로 나타났다.

다음으로 End-Point LCIA에 따른 영향평가에서는 인간건강, 생태계영향, 자원에 대한 보호대상을 고려하였으며, life cycle별 End-Point LCIA 결과를 Table 5에 나타내었다. 평가결과는 Fig. 4에 나타낸 바와 같이 대부분의 영향은 건설단계(5.6%)보다는 운영단계(94.4%)에서 많이 나타났으며, 보호대상별로는 자원에 대한 영향(52.4%)과 생태계영향에 대한 영향

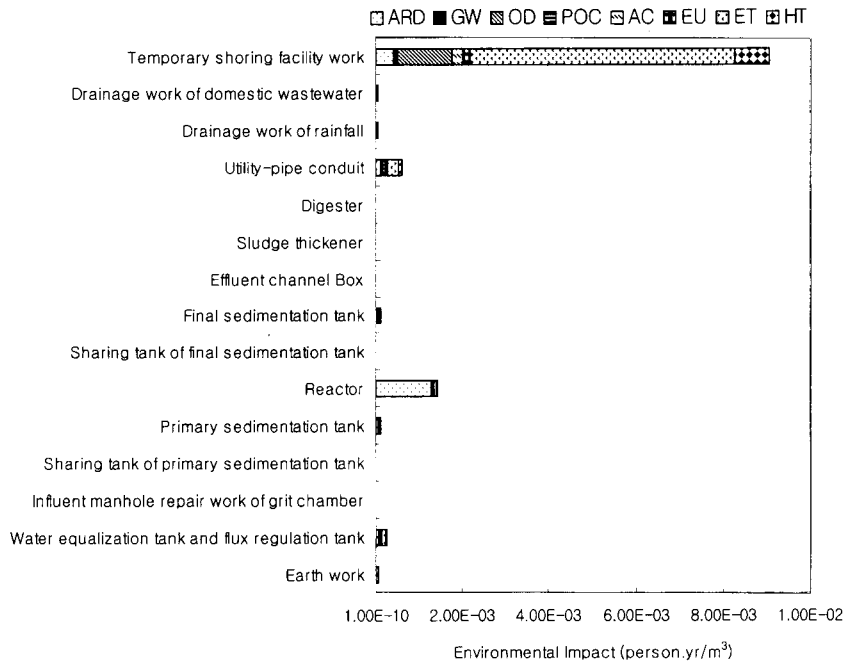


Fig. 2. Contribution of Environmental Impact in Construction stage of A WWTP Using Mid-Point LCIA.

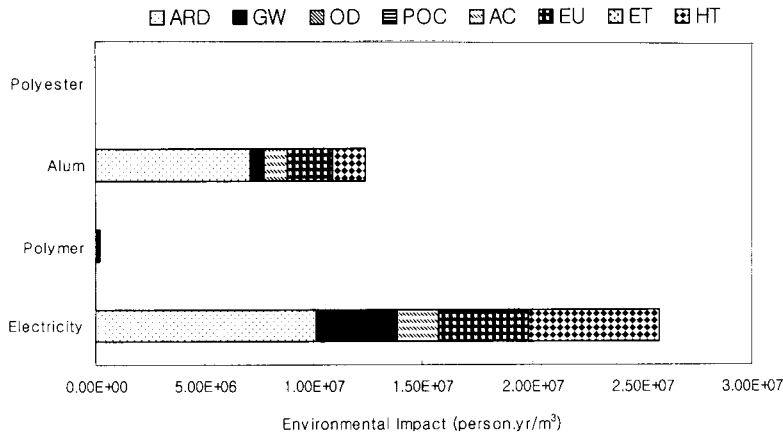


Fig. 3. Contribution of Environmental Impact in Operation stage of A WWTP Using Mid-Point LCIA.

(47.6%)이 비슷한 결과로 높게 나타났다.

### 3.4. 결과해석

Mid-Point LCIA를 이용하여 하수처리장의 영향평가 결과에 영향을 미치는 원인물질에 대하여 파악하여 그 결과를 Table 6에 나타내었다. 건설단계에서는 가시설공에 대한 환경영향이 가장 큰 비중을 차지하

였으며, 가시설공에서 사용하는 건설장비가 환경영향에 주원인인 것으로 나타났다.

다음으로 End-Point LCIA에 의한 하수처리장의 평가결과에 영향을 미치는 원인물질을 파악하고, Table 7에 나타내었다. Mid-Point LCIA와 마찬가지로 가시설공 부분이 가장 큰 영향을 차지하고 있었으며, 그 중 전기(84.5%)가 주 원인인 것으로 나타났다.

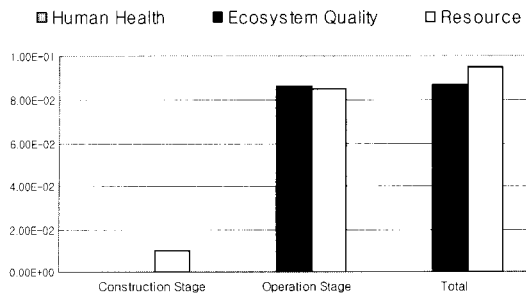
**Table 4.** Results of Impact Assessment for Life Cycle of A WWTP using Mid-Point LCIA

Unit: person · yr/m<sup>3</sup>

Impact Category	Construction stage	Operation stage	Total
ARD	2.92E+05	1.73E+07	1.76E+07
GW	2.97E+04	4.35E+06	4.38E+06
OD	2.02E+05	5.44E+03	2.07E+05
POC	1.59E+03	2.88E+04	3.04E+04
AC	4.15E+04	2.96E+06	3.00E+06
EU	4.35E+04	6.24E+06	6.28E+06
ET	9.77E+05	6.24E+04	1.04E+06
HT	1.37E+05	7.44E+06	7.58E+06
Total	1.72E+06	3.84E+07	4.01E+07

**Table 5.** Results of Impact Assessment for Life Cycle of A WWTP Using End-Point LCIA

Category	Construction Stage	Operation Stage	Total
Human Health (DALY/km)	2.05E-09	2.28E-07	2.30E-07
Ecosystem Quality (PDF · m <sup>2</sup> · yr/km)	5.36E-05	8.64E-02	8.65E-02
Resources (MJ/km)	1.02E-02	8.50E-02	9.52E-02



**Fig. 4.** Contribution of Environmental Impact for Life Cycle of A WWTP Using End-Point LCIA.

위의 결과로부터, 가시설공에서의 공정개선이 건설단계 전체의 환경영향을 줄이는데 가장 큰 기여를 할 수 있으며, 또한 운영단계에서의 전력절감, 기기의 운전효율 향상이 하수처리장의 전 life cycle에서 운영비 절감뿐만 아니라 환경부하 저감에 가장 큰 효과를 거둘 수 있는 요인임을 알 수 있다.

이와 같이 LCA를 수행하면 하수처리장의 환경영향에 가장 큰 비중을 차지하는 공정이나 시설, 원인 등 추적과약이 가능하며, 이를 설계 단계에 수행하면 사전에 환경영향이 보다 적은 대안을 적용할 수 있어, 친환경 설계 제안에 큰 기여를 할 수 있을 것이다. 이것이 하수처리시설의 LCA 적용의 궁극적인 목적이라 할 수 있다.

#### 4. 결 론

처리용량 100,000m<sup>3</sup>/d A하수처리장을 대상으로 life cycle에서 발생하는 환경영향의 평가결과, 운영단계의 비중이 95.7%로 건설단계의 결과보다 월등한 것으로 나타났으며, 운영단계 중 전력과 약품사용으로 인하여 대부분의 환경영향이 발생하는 것으로 나타났다. 건설단계에서는 가시설공에 대한 환경영향이 가장 큰 비중을 차지하였으며, 가시설공에서 사용하는 건설장비가 환경영향에 주요 원인인 것으로 나타났다. 하수처리장의 경우, 일반 토목구조물과 달리 LCA 결과가 유지관리단계에 많은 비중을 차지하는 것은 하수 또는 폐수를 처리하기 위하여 분석기간 40년 동안 지속적으로 전력과 약품을 사용하기 때문이다. 즉, 일반 토목구조물의 보수 및 교체 개념이 하수처리장에서는 운영(운전)의 개념으로 해석되기 때문이다.

하수처리장에 관한 종래의 평가는 장치의 성능, 건설비, 유지관리비, 설치면적을 중심으로 이루어져 왔으나, 서론에서도 언급한 바와 같이 최근에 대두되고 있는 지구환경문제를 고려한 포괄적인 분석이 이제는 필요하다. 또한 향후 21세기에는 상하수도 등의 환경성을 평가함에 있어서 LCA적 접근 외에도, 사회적



**Table 6.** Key Issue and Process of Environmental Impact in A WWTP Using Mid-Point LCIA

Stage and process		Key Issue
Construction stage	Earth work (0.51%)	· Machinery (0.51%)
	Water equalization tank and flux regulation tank (2.22%)	· Ready mixed concrete (1.65%)
	Sharing tank of primary sedimentation tank (0.04%)	· Ready mixed concrete (0.03%)
	Primary sedimentation tank (0.88%)	· Ready mixed concrete (0.31%)
	Reactor (12.36%)	· Mixed hardware making and setting (2.28%)
		· STS plate (6.05%)
	Sharing tank of final sedimentation tank (0.20%)	· Mixed hardware making and setting (2.39%)
		· Mixed hardware making and setting (0.04%)
	Final sedimentation tank (0.94%)	· Ready mixed concrete (0.08%)
		· Ready mixed concrete (0.74%)
	Effluent channel BOX (0.21%)	· Reinforcement (0.13%)
		· Ready mixed concrete (0.21%)
	Digester (0.02%)	· Steel pipe (0.02%)
	Utility-pipe conduit (5.23%)	· Ready mixed concrete (3.87%)
	Drainage work of rainfall (0.48%)	· Ready mixed concrete (0.37%)
Drainage work of domestic wastewater (0.41%)	· Ready mixed concrete (0.30%)	
Temporary shoring facility work (76.50%)	· Machinery (71.75%)	
Operation stage		· Waste sludge (94.28%) · Electricity (4.87%)

**Table 7.** Key Issue and Process of Environmental Impact in A WWTP Using End-Point LCIA

Stage and process		Key Issue
Construction stage	Earth work (0.06%)	· Machinery (0.50%)
	Water equalization tank and flux regulation tank (2.06%)	· Ready mixed concrete (1.31%)
	Sharing tank of primary sedimentation tank (0.03%)	· Ready mixed concrete (0.02%)
	Primary sedimentation tank (1.06%)	· Mixed hardware making and setting (0.43%)
	Reactor (18.10%)	· Ready mixed concrete (0.24%)
		· STS PLATE(9.22%)
	Sharing tank of final sedimentation tank (0.21%)	· Mixed hardware making and setting (3.63%)
		· Ready mixed concrete (0.07%)
	Final sedimentation tank (0.84%)	· Mixed hardware making and setting (0.06%)
		· Ready mixed concrete (0.59%)
	Effluent channel BOX (0.29%)	· Concrete paste (0.14%)
		· Ready mixed concrete (0.16%)
	Utility-pipe conduit (4.34%)	· Concrete paste (0.13%)
		· Ready mixed concrete (3.06%)
	Drainage work of rainfall (0.33%)	· Ready mixed concrete (0.30%)
Drainage work of domestic wastewater(0.31%)	· Ready mixed concrete (0.24%)	
Temporary shoring facility work (72.37%)	· Electricity (84.46%)	
Operation stage		· Waste sludge (84.43%) · Alum (7.05%)

본, 노동, 타 산업 등과 연관된 동적이며 유기체적인 해석이 필요하다. 이로써 상하수도구조물 뿐만 아니라 이를 둘러싼 도시로부터 발생하는 환경부하, 그리

고 자원, 에너지의 투입을 가장 효과적으로 저감하기 위한 종합적인 환경부하평가가 가능하게 될 것이다.

## 사 사

이 논문은 2002년도 한국학술진흥재단의 지원에 의하여 연구되었음(KRF-2002-041-D00322).

## 참고문헌

- 건설연구원 (2004) 건설공사표준품셈.  
박광호, 건설사업의 환경적, 경제적, 사회적 평가를 위한 TBL 통합모델의 개발, 인하대학교 박사학위논문.  
산업자원부 (2003) 환경친화적 산업기반구축을 위한 환경영표준화 사업.  
적산연구회 (2004) 토목공사일위대가표, 대건사.  
환경부 (2002) 하수 67712-350(2002. 4. 16)호, 기존 하수처리장 고도처리시설 설치사업 업무처리 일반지침.  
황용우 (2000) 21세기 친환경 개념과 상하수도, 상하수도학회지, **14**(4), pp. 291-292.  
황용우 (2002) 하수처리시설에 대한 LCA분석 기법 도입 연구, 대한상하수도학회 차세대 하수관거정비 특별 심포지엄.  
황용우, 남궁은, 박광호 (2004) LCA를 도입한 친환경 수처리 시스템 구축 - 국내외 적용 사례를 중심으로 -, 2004 대한상하수도학회 · 한국물환경학회 공동포럼, pp. 149-154.  
황용우 (2004) 건설환경과 LCA 필요성, 건설환경신문(2004년 4월 6일).  
經濟産業省 (2002) 環境調和型水處理技術ガイドライン調査報告書.  
中嶋芳紀 外 (1996) LCA를考慮した社會資本整備による綜合的環境評價に關する研究, 環境システム研究, **24**, pp. 435-441.  
鶴卷峰夫, 野池達也 (1996) ライフサイクルアセスメントを適用した排水處理の評價に關する研究, 環境システム研究, **24**, pp. 272-281.  
Hugues Vanden Bossche, Jean Marc Audic (2004) Relevance and limitations of LCA to assessment environmental impacts of reduction of sludge production, 4<sup>th</sup> IWA world water congress and exhibition.  
ISO(International Organization for Standardization) 14040, Environmental management - Life cycle assessment - Principles and framework, 1997.  
Starkl, M., Brunner N., Grasser, U. (2004) Analysis and evaluation of methodologies to assess technical urban water systems, 4<sup>th</sup> IWA world water congress and exhibition.  
Sven Lundie, Gregory Peters, Paul Beavis (2004) Quantitative systems analysis as a strategic planning approach for metropolitan water service providers, 4<sup>th</sup> IWA world water congress and exhibition.  
Yongwoo Hwang, Seongwon Seo and Kwangho Park (2000) Environmental Life Cycle Assessment of Water Treatment System (1st World Water Congress of the International Water Association (Paris 2000), CD-ROM, NP 109.  
Internet website: [http://www.koeco.or.kr/intro/record04\\_01.asp?search=2\\_4](http://www.koeco.or.kr/intro/record04_01.asp?search=2_4).  
Internet website: <http://www.kncpc.re.kr/lci/index.asp>.