

전과정평가를 이용한 석유화학 폐수처리슬러지의 매립처리에 대한 환경영향평가 Environmental Impact Evaluation on Landfill Treatment of Petro-Chemical Wastewater Sludge by Life Cycle Assessment

김형우 · 박흥석*[†]

Hyeong-Woo Kim · Hung-Suck Park*[†]

울산대학교 BK사업단 · *울산대학교 건설환경공학부

BK 21 Plus Team, University of Ulsan

*Department of Civil & Environmental Engineering, University of Ulsan

(Received August 8, 2016; Revised October 13, 2016; Accepted November 1, 2016)

Abstract : This study evaluated the environmental impacts for landfill treatment of the wastewater treatment sludge (WTS) from petrochemical firms by life cycle assessment (LCA) and reviewed the impact reduction by landfill gas (LFG) utilization. The functional unit was ‘landfill of 1 ton of WTS’, and the system boundary included the process of input and treatment for WTS in landfill site. The impacts were high at landfill process (LP) and leachate treatment process (LTP). Global warming (GWP) and photochemical oxidants creation (POCP) were high at LP, while abiotic depletion (ADP), acidification (AP), eutrophication (EP), ozone depletion (ODP) were high at LTP. The major substances of various impact categories were crude oil (ADP), NO_x (AP, EP), CH₄ (GWP, POCP), Cl₂ (ODP), respectively. The major factor of ADP, AP, EP was attributed from the generation of electricity used in LTP, and the methane within uncollected LFG was main factor of GWP and POCP. Therefore, electricity consumption reduction is identified to be an impact improvement option, and the flaring system installation or enhanced LFG recovery could be an alternative to reduce impacts. Among the various categories, GWP accounted the highest impact (≥ 90%) followed by ADP, POCP. In the avoidance impact resulted from the utilization of LFG, to substitute B-C oil or LNG showed the impact reduction of 32.7% and 12.0%, respectively.

Key Words : Petrochemical, Sludge, Landfill, Environmental Impact Assessment, Life Cycle Assessment

요약 : 본 연구는 전과정평가 기법으로 석유화학업체에서 발생하는 폐수처리슬러지의 매립처리에 대한 잠재적인 환경영향을 평가하고 매립가스 활용에 의한 환경영향의 저감을 평가하였다. 본 연구의 기능단위는 ‘폐수처리슬러지 1 ton의 매립’이며, 시스템경계는 폐수처리슬러지가 매립장으로 투입·처리되는 과정을 포함하며 외부에너지 생산 및 이용까지 확장하였다. 환경영향은 매립과정 및 침출수처리과정에서 높게 나타났으며, 지구온난화 및 광화학적산화물생성은 매립과정에서, 자원고갈, 산성화, 부영양화, 오존층파괴는 침출수처리과정에서 높게 나타났다. 영향범주별 주요원인물질은 Crude oil(자원고갈), NO_x(산성화, 부영양화), CH₄(지구온난화, 광화학적산화물생성), Cl₂(오존층파괴) 이었다. 자원고갈, 산성화, 부영양화는 침출수처리과정 중 사용되는 전기의 생산에 의한 부하가 주원인으로 나타났으며, 지구온난화, 광화학적산화물생성은 포집되지 않는 매립가스에 포함된 메탄이 주원인이었다. 이에 매립가스에 의한 전기 생산, 공정개선 등으로 전기사용량을 저감하거나 메탄가스 회수율 향상, Flaring system, 매립가스의 연료대체 등으로 메탄배출량을 저감하는 것이 환경영향을 저감하는 방안이 될 수 있다. 한편, 영향범주별 환경영향은 지구온난화-자원고갈-광화학적산화물생성 순으로 나타나 지구온난화가 약 90% 이상의 절대적 환경영향을 미치는 것으로 나타났다. 이에 환경영향을 줄이는데 메탄의 배출량을 저감하는 것이 전기사용량을 저감하는 것보다 우선순위가 높은 것으로 나타났다. 매립가스의 연료대체에 의한 회피효과를 검토한 결과, B-C유 또는 LNG를 대체할 경우 각각 32.7%, 12.0%의 환경영향을 저감할 수 있는 것으로 나타났다.

주제어 : 석유화학, 슬러지, 매립, 환경영향평가, 전과정평가

1. 서론

슬러지는 대부분 단순 매립이나 해양배출로 처리되었으나, 2003년 7월 유기성슬러지의 직매립이 금지되면서 경제적 논리로 인해 유해폐기물로 분류된 일부를 제외한 대부분은 처리비용이 저렴한 해양배출로 처리되었다.¹⁾ 그러나 폐기물 해양투기를 관리하는 국제조약인 런던협약 및 96의정서의 발효로 인해 해양수산부는 2012년 하수오니 및 가축분뇨, 2013년 음폐수 및 분뇨와 분뇨오니, 2014년 산업폐수 및 폐수오니의 해양배출을 금지하였으며,²⁾ 이에 따라 친환경

경적이고 경제적이면서 지속가능한 슬러지의 육상처리 방안을 마련하기 위하여 정부 및 지자체에서는 다양한 관련 법규, 정책, 제도, 지침 등을 제정 및 발표하고 있다.³⁻⁵⁾ 그리고 유기성슬러지는 자원빈국인 우리나라의 여건상 매우 중요한 자원으로 쓰일 수 있고 신·재생에너지분야에 초점을 두고 있는 국가정책으로 인하여 유기성슬러지의 재활용 및 자원화기술에 대한 연구 활동이 활발하게 진행 중이다.

2014년 기준,⁶⁾ 국내 사업장배출시설계폐기물 중 유기성오니류의 발생량은 16,725.5톤/일로 사업장배출시설계폐기물 전체 발생량의 11%이고, 이는 재활용(49.3%), 소각(23.8

[†] Corresponding author E-mail: parkhs@ulsan.ac.kr Tel: 052-259-1050 Fax: 052-221-0152

%), 매립(19.3%), 해역배출(7.6%) 순으로 처리되고 있다. 울산광역시 지역의 경우, 유기성오니류의 발생량이 972.8톤/일로 사업장배출시설계폐기물 전체 발생량의 17%로 국내기준보다 높아 타 지역에 비해 유기성오니류의 처리에 대한 중요도가 높다. 발생한 유기성오니류는 해역배출(32.0%), 매립(32.0%), 소각(24.0%), 재활용(12.0%) 순으로 처리되어 재활용에 의하여 처리하는 국내 상황과는 달리 해역배출에 대한 의존도가 높게 나타났으며, 이에 유기성오니류의 육상처리 방안 에 대한 필요성이 타 지역에 비해 높게 나타났다.

정부 또는 지자체의 관리 책임으로 되어 있어 정부차원의 대비책이 있는 하수오니, 가축분뇨 및 음폐수와는 달리 산업 단지 내 개별기업에서 배출되는 폐수오니는 정부차원의 대비가 매우 미흡하며, 이에 업체 스스로가 해양투기 금지에 대비해 처리시설을 설치·확충해야 하고, 자체 처리시설이 없는 경우는 폐기물 처리업체를 확보해야 하는 등 개별기업이 부담해야한다.⁷⁾ 울산시에 조성된 국가산업단지에는 석유화학업체가 가장 많이 가동 중이며, 이에 석유화학 폐수 처리슬러지에 대한 중요도가 높은 상황이다. 석유화학 폐수 처리슬러지는 하수슬러지와는 달리 개별기업에 따라 그 특성이 상이하며, 이에 처리방법의 다변화와 함께 자원순환 및 에너지 이용 등의 부가적인 가치 창출이 필요하다.

다양한 육상처리방안 중에서 매립에 의한 매립가스 회수는 슬러지의 최종처리 및 에너지회수 기능을 가진 매력적인 대안이다. 매립가스 성분인 메탄가스는 유용한 대체에너지이자 청정에너지의 하나로, 열량은 타 연료에 비해 다소 낮으나 완전연소가 가능하고 화석연료의 사용을 대체하여 온실가스 발생을 줄임이 가능하게 하는 장점을 지니고 있다. 그리고 매립은 체류시간에 크게 영향을 받지 않으며, 매립가스는 매립완료 후 약 15~20년 또는 그 이상 이용이 가능하다. 이에 선진국에서는 매립가스를 통한 에너지 생산기술이 오래 전부터 이미 상용화되어 대체에너지로 사용되고 있다.

본 연구에서는 슬러지의 육상처리방안 중 매립처리와 매립가스 회수에 대한 환경영향을 평가하기 위하여 전과정평가기법을 이용하여 울산의 국가산업단지 입주기업 중 석유

화학업체에서 발생하는 폐수처리슬러지의 매립처리에 대한 잠재적인 환경영향 및 회수한 매립가스의 활용에 의한 환경영향의 저감을 평가하고자 한다.

2. 연구방법

전과정평가는 제품 또는 시스템의 원료채취부터 폐기까지 전과정에 걸쳐 자원 및 에너지의 사용과 대기, 수계 및 토양으로의 환경부하량을 정량화하고 이들이 환경에 미치는 잠재적 영향을 규명하며, 환경부하가 환경에 미치는 영향을 평가하여 이를 저감, 개선하고자 하는 기법이다.⁸⁾ 본 연구는 석유화학 폐수처리슬러지의 매립처리에 대한 환경영향 및 매립가스의 회수에 의한 환경영향의 변화를 파악하여, 주요 영향과정 및 영향요소를 규명하고 환경영향의 개선방안의 모색을 위하여 전과정평가기법을 적용하였다.

2.1. 기능단위 및 시스템경계

본 연구의 대상시스템은 ‘폐수처리슬러지의 매립공정’으로 ‘폐수처리슬러지 처리’와 ‘매립가스 생산’이라는 두 가지 기능을 가지고 있으며, 본 연구에서는 ‘매립가스 생산’ 기능은 제외하였다. 이에 ‘매립가스 생산’ 기능에 의한 환경적인 영향을 차감하였으며, 이를 위해 매립가스가 화석연료를 대체하는 것으로 고려하여 열량을 기준으로 화석연료의 대체량을 산정한 후 화석연료의 생산 및 사용에 대한 환경영향을 차감하여 산정하였다. 울산의 에너지원별 사용량에 따르면, B-C유와 LNG가 에너지원으로 가장 많이 사용되고 있어 본 연구에서는 매립가스가 B-C유 및 LNG를 대체하는 것으로 설정하였다. 폐기공정의 기능단위는 시스템 투입물인 폐기물에 의해서 정의되며, 본 연구에서의 기능단위는 ‘폐수처리슬러지 1 ton의 매립’으로 정하였으며, 기준흐름은 ‘폐수처리슬러지 1 ton’이다.

폐기물의 매립처리에 대한 일반적인 공정은 폐기물의 매립공정, 침출수처리공정, 매립가스회수공정으로 나타낼 수

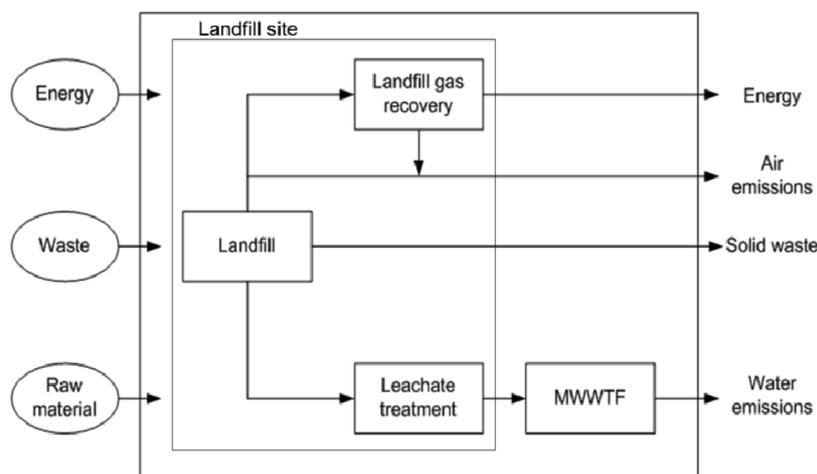


Fig. 1. Process diagram and system boundary corresponding to the landfilling system.

있으며, 본 연구에서는 Fig. 1과 같이 처리된 일반공정에 침출수를 처리하는 하수처리공정까지 포함하여 고려하였다. 이때 대상슬러지가 매립장으로 투입·처리되는 과정을 포함하며, 슬러지의 이용과 수송공정은 제외하였다.

2.2. 인벤토리 구축

본 연구에서 매립공정에 대한 데이터는 울산광역시에 위치하고 사업장폐기물을 매립처리하는 ‘E’매립장의 현장을 직접 방문하여 1년간 데이터를 수집하였으며, 부족한 부분은 설문조사를 통하여 데이터를 수집하였다. ‘E’매립장의 경우 매립처리공정에 침출수처리공정이 포함되어 있지 않아 이에 대한 데이터가 존재하지 않으며, 슬러지의 매립처리에 대한 환경영향을 평가하는 본 연구의 목적을 고려하여 국내상황을 가장 잘 반영하고 있는 인천광역시 ‘S’매립지에서 운영 중에 있는 침출수처리공정의 현장데이터를 수집하여 이용하였다. 그리고 하수처리공정에 대한 데이터는 ‘E’매립장이 위치하고 있는 지역의 ‘O’하수처리장의 데이터를 수집하여 이용하였다. 수집한 자료는 시나리오와 가정사항을 적용하여 연구목적에 맞게 계산하여 산출하였다. 그리고 시스템 외부데이터는 기술계로 투입되거나 산출되는 상·하위흐름 데이터베이스로 지식경제부와 환경부에서 구축한 국내 데이터베이스⁹⁾를 적용하였고 국내 데이터베이스가 존재하지 않는 것은 국외 데이터베이스¹⁰⁾를 적용하였다. 특히 외부대체연료인 B-C유 및 LNG에 대해서도 지식경제부의 데이터베이스를 연결하여 회피영향을 고려하였으며, 회피영향은 음(-)의 값을 가지고 환경영향을 저감하게 된다.

전과정평가를 수행하기 위한 시스템경계 내의 현실적 여건을 고려하여 다음과 같은 가정을 하였다. 우선 매립지의 건축, 토목, 장비 및 인프라에 대한 환경부하는 고려하지 않았으며, 공정데이터들 중에서 상위 및 하위흐름 데이터베이스가 없는 경우 기본흐름으로 가정하였다. 울산 국가산업단지에서 발생하는 석유화학 폐수처리슬러지만 매립된다고 고려하였으며, 침출수 발생량은 슬러지가 보유하고 있는 수분함량이 전량 유출된다고 가정하여 산정하였다. 침출수처

리공정은 ‘S’매립지의 침출수처리공정을 적용하였으며, 침출수 성상은 ‘S’매립지의 침출수 성상과 같다고 가정하였다. 경유, B-C유, LNG 사용에 의한 대기배출물은 2006 IPCC 가이드라인¹¹⁾에서 제공한 off-load mobile source의 산업분야 배출계수와 에너지관리공단¹²⁾에서 제공한 배출계수를 적용하였으며, 경유, B-C유, LNG의 발열량 및 밀도는 에너지관리공단¹³⁾에서 제공한 자료를 적용하였다. 이론적 메탄발생량은 슬러지에 대한 원소조성을 통하여 산정하였으며, 매립가스 발생량은 이론적 메탄발생량의 60%로 가정하였다. 매립가스의 포집률은 60%로 고려하였으며, 40%는 그대로 대기 중으로 배출된다고 가정하였다. 매립가스의 주요구성 성분 및 미량가스물질은 전국 12개 광역매립지 매립가스 실측결과¹⁴⁾를 적용하였으며, 매립가스 대체로 인한 환경영향 회피효과는 B-C유 및 LNG의 생산 및 사용단계까지 적용하였다.

Table 2. Inventory of ‘gate to gate’ system for landfill treatment of sludges (/functional unit)

Inputs		Outputs					
Group	Name	Unit	Amount	Group	Name	Unit	Amount
Raw material	Waste	kg	1,00E+3	Co-Product	LFG	kg	2,19E+1
Energy	Diesel	kg	5,18E-1	Air emission	CH ₄	kg	8,46E+0
Energy	Electricity	kVh	2,30E+1	Air emission	CO ₂	kg	7,39E+0
Utility	Industrial water	kg	3,56E-1	Air emission	O ₂	kg	8,76E-2
Chemical	Sodium hydroxide	kg	1,72E+0	Air emission	N ₂	kg	3,07E-1
Chemical	Hydrogen peroxide	kg	2,70E-1	Air emission	N ₂ O	kg	6,32E-4
Chemical	Active carbon	kg	1,59E-1	Air emission	NO _x	kg	4,98E-3
Chemical	PAC(-)	kg	3,19E-2	Air emission	SO _x	kg	3,58E-3
Chemical	PAC(+)	kg	1,49E-2	Air emission	NH ₃	kg	1,72E-4
Chemical	Antifoaming agent	kg	8,88E-2	Air emission	H ₂ S	kg	1,75E-3
Chemical	PAA (Liquid)	kg	2,56E-3	Air emission	VOC	kg	5,02E-5
Chemical	Sulfuric acid	kg	4,46E-1	Water emission	BOD	kg	6,13E-3
Chemical	Iron sulfate	kg	6,92E+0	Water emission	COD	kg	1,74E-2
				Water emission	SS	kg	5,98E-3
				Water emission	T-N	kg	1,55E-2
				Water emission	T-P	kg	1,80E-4
				Water emission	<i>E. coli</i>	-	1,08E+0
				Waste	sludge	kg	1,33E+3

Table 1. Applied databases for upstream and downstream

Module	Source	Year
Iron sulfate	Ecoinvent	2008
Sodium hydroxide	MoE*	2003
Sulfuric acid, 98%	MoE*	2003
Hydrogen peroxide	Ecoinvent	2008
Active carbon	MoE*	2003
Antifoaming agent	Not DB	-
Poly aluminum chloride	MoE*	2003
Poly acryl amide	MoE*	2003
Electricity	MKE**	2000
Diesel	MKE**	2003
Industrial water	MoE*	2003

* MoE: Ministry of Environment

** MoKE: Ministry of Knowledge and Economy

수집한 데이터를 기초로 투입·산출물 목록을 작성한 후 기준흐름인 폐수처리슬러지 1 ton을 기준으로 환산하여 폐수처리슬러지 매립공정에 대한 gate-to-gate 목록표를 작성하여 Table 2에 나타내었다. 폐수처리슬러지 1 ton을 매립처리 시 경우 5.18E - 01 kg, 전기 2.30E + 01 kWh, 공업용수 3.56E - 01 kg, 각종 화학약품 9.56E + 00 kg이 투입되고, 메탄 8.46.E + 00 kg, 이산화탄소 7.39.E + 00 kg, 각종 대기배출물 4.06E - 01 kg, BOD 6.13.E - 03 kg, COD 1.74.E - 02 kg, 각종 수계배출물 2.17E - 02 kg, 탈수슬러지 1.33E + 03 kg 등이 배출되는 것으로 나타났다. 또한, 회수된 매립가스 2.19E + 01 kg의 열량으로 8.01E + 00 kg의 B - C유 및 6.46E + 00 kg의 LNG를 대체하여 외부로 공급될 수 있는 것으로 추정되었다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 전과정 영향평가

본 연구에서는 ISO14042¹⁵⁾에서 명시한 절차에 따라 전과정평가를 수행하였으며, 영향평가를 위하여 적용한 방법론은 국내 상황에 맞게 개발되었고 국내의 제품과 시스템 관련 전과정평가 연구에 많이 사용되고 있는 지식경제부에서 정의한 방법론을 적용하였다. 고려된 영향범주는 자원고갈(ADP), 산성화(AP), 부영양화(EP), 지구온난화(GWP), 오존층파괴(ODP), 광화학산화물생성(POCP) 등 6가지이며, 영향평가는 가중화 단계까지 수행하였다.

본 연구에서는 환경부하와 환경이득으로 구분하여 영향평가를 실시하였으며 환경부하는 슬러지의 매립과 침출수처리, 하수처리과정 중에 발생하는 공정부하가 환경에 미치는 영향을 나타내는 것이며, 환경이득은 회수한 매립가스가 동일한 열량만큼의 B-C유나 LNG를 대체하여 B-C유나 LNG를 생산하기 위한 화석연료 채취부터 생산에 이르기까지의 투입·산출물에 의한 환경부하의 발생과 사용에 의한 환경부하의 발생을 방지하는 효과를 갖게 됨을 의미하며 회피효과는 (-)값으로 처리하였다.

3.1.1. 특성화 결과

특성화 단계는 영향범주별로 분류된 목록항목들이 각 영향범주에 미치는 기여 정도를 정량화하는 단계이며, 환경부하에 대응하는 지식경제부의 상응인자를 곱하여 산정하였다.¹⁶⁾ 대상시스템을 통하여 매립 처리되는 석유화학 폐수처리슬러지 1 ton에 대한 각 영향범주별 특성화 결과를 Table 3에 나타내었다. 전반적으로 매립공정, 침출수처리공정의 환경영향이 높기 기여하는 것으로 나타났으며, 하수처리공정의 환경영향은 미미한 것으로 나타났다. 특히 지구온난화 및 광화학산화물생성은 매립공정에서, 자원고갈, 산성화, 부영양화, 오존층파괴는 침출수처리공정에서 높게 나타났다.

Table 3. Characterization of environmental impacts with respect to various impact categories

Impact categories	Landfilling	Leachate treatment	Sewage treatment	Total
ADP (l/yr)	1.72,E-02 (31,4%)	3.72,E-02 (68,0%)	3.49,E-04 (0,6%)	5.48E-02 (100%)
AP (kg SO ₂ eq.)	9.07,E-03 (20,5%)	3.48,E-02 (78,8%)	2.97,E-04 (0,7%)	4.42E-02 (100%)
EP (kg PO ₄ ⁻³ eq.)	1.14,E-03 (18,5%)	4.58,E-03 (74,4)	4.36,E-04 (7,1%)	6.15E-03 (100%)
GWP (kg CO ₂ eq.)	1.86,E+02 (93,3%)	1.32,E+01 (6,6%)	1.22,E-01 (0,1%)	1.99E+02 (100%)
ODP (kg CFC-11 eq.)	5.53,E-07 (21,6%)	2.00,E-06 (78,3%)	1.06,E-09 (0,1%)	2.56E-06 (100%)
POCP (kg C ₂ H ₄ eq.)	5.08,E-02 (98,6%)	7.41,E-04 (1,4%)	1.48,E-06 (0,0%)	5.15E-02 (100%)

Table 4. Weighted environmental impacts under different impact categories (unit: person-yr)

Impact categories	Weighting factor	Weighted impact value	Ratio
ADP	0,231	5,08E-04	4,50%
AP	0,036	4,00E-05	0,35%
EP	0,038	1,78E-05	0,16%
GWP	0,288	1,04E-02	91,94%
ODP	0,292	1,84E-05	0,16%
POCP	0,065	3,25E-04	2,88%

3.1.2. 가중화 결과

특성화 값은 영향범주별로 단위가 다르므로 서로간의 환경영향을 비교하는 것이 불가능하며, 이에 영향범주별 영향평가단위를 일치시켜 항목 간의 환경영향을 비교할 수 있는 정규화 및 가중화 단계를 수행하였다. 정규화 값은 특성화에서 구한 영향범주별 환경영향결과를 지식경제부의 정규화 인자로 나누어 산정하였고, 가중화 값은 정규화된 환경영향에 영향범주들의 상대적 중요성인 가중치를 곱하여 산정하였다.¹⁶⁾ 이 때 지식경제부에서 국내 여건을 반영하여 개발한 가중치를 적용하여 잠재적 환경영향 결과를 산출하였다. 대상시스템으로 매립 처리되는 석유화학 폐수처리슬러지 1 ton에 대한 가중화된 영향평가 결과를 Table 4에 영향범주별로 나타내었다. 회피영향을 고려하지 않은 매립처리공정에서의 가중화된 환경영향은 1.13E - 02이었으며, 영향범주별 환경영향은 지구온난화 91.9%, 자원고갈 4.5%, 광화학산화물생성 2.9% 등의 순으로 나타나 지구온난화의 환경영향이 압도적으로 높았다. 이에 석유화학 폐수처리슬러지의 매립처리 시 발생하는 지구온난화 물질에 대한 제어방안이 마련되어야 하는 것으로 나타났다.

3.2. 전과정 해석

3.2.1. 주요원인물질

주요원인물질의 기여도는 영향범주의 총 환경영향에 대한 각 목록항목의 비율로 해당 영향범주 내에서의 차지비율을

Table 5. Major cause substances of environmental impacts with respect to various impact categories

Impact categories	Major substances	Contribution	Processes	Cause
ADP (l/yr)	Coal	30.7	L,T	Electricity generation
	Crude oil	26.1	L,F	Diesel production
	Crude oil	20.5	L,T	Electricity generation
AP (kg SO ₂ eq.)	NO _x	39.2	L,T	Electricity generation
	SO ₂	10.0	L,T	Ferric sulfate production
	NO _x	7.4	L,F	Diesel utilization
EP (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	NO _x	52.4	L,T	Electricity generation
	NO _x	9.9	L,F	Diesel utilization
	NO _x	8.0	L,T	NaOH production
GWP (kg CO ₂ eq.)	CH ₄	89.1	L,F	LFG leakage
	CO ₂	5.1	L,T	Electricity generation
	CO ₂	2.9	L,F	LFG leakage
ODP (kg CFC-11 eq.)	Cl ₂	57.5	L,T	Ferric sulfate production
	Halon-1301	21.6	L,F	Diesel production
	Halon-1301	5.4	L,T	NaOH production
POCP (kg C ₂ H ₄ eq.)	CH ₄	98.4	L,F	LFG leakage

*L,T.: Leachate treatment, L,F.: Landfill

표시하며, 이를 통해 각 영향범주의 주요원인물질을 도출하였다. 대상시스템을 통하여 매립 처리되는 폐수처리슬러지 1 ton에 대한 각 영향범주별 주요원인물질을 Table 5에 나타내었다.

환경영향에 대한 각 영향범주별 주요원인물질을 살펴보면, 자원고갈 영향범주에서 Crude oil이 주요원인물질로 나타났으며, 전체 환경부하에 대한 기여도가 약 63%이었다. 기여도가 가장 높은 단일원인물질은 침출수처리공정에서 사용되는 전기를 생산하는 과정에서 사용된 coal이었으며, 이 때 기여도가 약 30.7%이었다. 산성화 및 부영양화 영향범주의 경우, 전체 환경부하 중 약 67% 및 89%를 차지하는 Nitrogen oxides (NO_x)가 주요원인물질로 나타났다. 산성화의 경우, NO_x에 의한 환경부하 중 약 58%는 침출수처리공정에서 사용되는 전기를 생산하는 과정에서 발생하는 것으로 나타났고 전체 환경부하 중 약 39%를 차지하였다. 부영양화의 경우, NO_x에 의한 환경부하 중 약 58%는 침출수처리공정에서 사용되는 전기의 생산 시 발생되며, 이는 전체 환경부하 중 약 52%를 차지하였다. 지구온난화와 광화학적 산화물생성 영향범주에서는 Methane (CH₄)이 주요원인물질로 나타났으며, 전체 환경부하에 대한 기여도는 각각 약 89%, 약 98%이었다. 지구온난화의 경우, 메탄에 의한 환경부하 중 거의 대부분은 매립공정에서 발생하는 공정부하로 포집되지 못한 매립가스에 의한 환경부하이다. 폐기물의 매립으로 인하여 발생하는 이산화탄소 배출량은 온실가스 배출량 계산에 포함시키지 않으며, 이에 따라 메탄에 의한 영향은 더 높아진다. 광화학적산화물생성의 경우, 메탄에 의한 환경부하 중 거의 대부분은 매립공정에서 발생하는 공정부하

로 포집되지 못한 매립가스에 의한 환경부하이었다. 오존층파괴는 전체 환경부하 중 약 68%를 차지하는 Chlorine (Cl₂)이 주요원인물질이었으며, 단일원인물질로는 침출수처리공정에서 황산제2철의 생산 시 발생하는 Chlorine (Cl₂)으로 약 58%를 차지하는 것으로 나타났다.

영향범주별 주요원인물질은 Crude oil(자원고갈), NO_x(산성화, 부영양화), CH₄(지구온난화, 광화학적산화물생성), Cl₂(오존층파괴)이었으며, 주원인은 침출수처리과정 중 사용되는 전기의 생산에 의한 부하(자원고갈, 산성화, 부영양화) 및 포집되지 않는 매립가스에 포함된 메탄(지구온난화, 광화학적산화물생성)이었다. 따라서 매립가스에 의한 전기 생산, 공정개선 등으로 전기사용량을 저감하거나 메탄가스 회수율 향상, Flaring system, 매립가스의 연료대체 등으로 메탄배출량을 저감하는 것이 환경영향을 저감하는 방안이 될 수 있다. 한편, 가중화를 고려한 환경영향을 살펴보면, 지구온난화가 약 90% 이상의 절대적 환경영향을 미치는 것으로 나타나, 환경영향을 줄이는데 메탄의 배출량을 저감하는 것이 전기사용량을 저감하는 것보다 우선순위가 높은 것으로 나타났다.

3.2.2. 매립가스 활용에 의한 환경적 및 경제적 영향

폐수처리슬러지의 매립으로 발생하는 매립가스는 정제과정을 거친 후 인근기업에 공급되어 화석연료를 대체할 수 있으며, 이를 통하여 기존의 화석연료 연소과정에서 발생하던 환경영향을 저감하는 회피효과가 발생한다. 이에 본 연구에서는 매립가스 활용에 의한 환경영향을 살펴보기 위하여 매립가스가 B-C유 또는 LNG를 대체하는 것에 대한 회피효과를 지식경제부에서 구축한 B-C유 및 LNG 생산 데이터베이스를 활용하여 평가하였으며(Fig. 2), 이를 Table 6에 나타내었다.

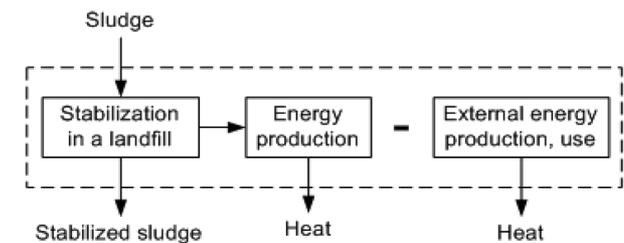


Fig. 2. Application method of avoided impact.

Table 6. Avoided Impact under different categories by B-C oil or LNG substitution from landfill gas

Impact categories	Process impact	Avoided impact	
		B-C oil	LNG
ADP (l/yr)	5.48E-02	2.05,E-01	8.44,E-03
AP (kg SO ₂ eq.)	4.42E-02	7.84,E-02	3.10,E-02
EP (kg PO ₄ ³⁻ eq.)	6.15E-03	8.44,E-03	3.08,E-03
GWP (kg CO ₂ eq.)	1.99E+02	3.21,E+01	2.36,E+01
ODP (kg CFC-11 eq.)	2.56E-06	1.16,E-07	2.25,E-08
POCP (kg C ₂ H ₄ eq.)	5.15E-02	2.86,E-03	7.83,E-04

폐수처리슬러지 1 ton의 매립 시 발생하는 매립가스로 8.01E+00 kg의 B-C유를 대체할 수 있는 것으로 나타났다. 자원고갈, 산성화, 그리고 부영양화 영향범주에서는 매립 가스회수에 의한 회피영향이 매립공정에 의한 환경영향보다 높았으며, 지구온난화, 오존층파괴, 광화학적산화물생성 영향범주에서는 이와 반대의 결과가 나타났다. 가중화를 거친 후의 회피영향이 3.69E-03 person-yr로 나타나 매립공정에 의한 환경영향 기준으로 회피영향이 32.7%이었고 전체영향은 매립처리영향 대비 67.3%를 나타내었다. 한편, LNG의 경우, 6.46E+00 kg의 LNG를 대체할 수 있는 것으로 나타났으며, 모든 영향범주에서 매립공정에 의한 환경부하가 회피영향보다 더 높은 것으로 나타났다. LNG 대체에 의한 회피영향의 가중화 값이 1.13E-03 person-yr로 나타나 매립공정에 의한 환경영향 기준으로 회피영향이 12.0%이었고, 전체영향은 매립처리영향 대비 88.0%로 회피영향이 B-C유 대체에 의한 회피영향보다 작게 나타났다. 즉, 회수된 매립가스의 활용에 대한 환경영향을 비교하면, 매립가스로 B-C유를 대체하는 것이 LNG를 대체하는 것보다 회피효과가 더 큰 것으로 나타났다.

한편, 회수한 매립가스를 활용은 경제적 효과 또한 얻을 수 있으며, 매립가스의 B-C유 및 LNG 대체에 의한 연료구매 저감효과는 Table 7과 같다. 우선, 밀도와 총발열량을 고려하여 슬러지 1 ton의 매립 시 발생하는 매립가스로 대체 가능한 연료의 양을 산정하면, B-C유와 LNG가 각각 8.44 L, 347.29 MJ이다. 산정된 양에 연료의 가격을 고려하면 B-C유 또는 LNG 대체 시 각각 5,102원/ton, 6,654원/ton의 비용 절감이 발생하며, 처리되는 총 슬러지량(182,903 ton)을 고려하면 B-C유 또는 LNG 대체 시 각각 9.33억 원, 12.17억 원의 연료구매비용 절감효과가 발생한다. 따라서 회수된 매립가스의 활용에 대한 경제적 효과를 비교하면, 환경영향과 달리 매립가스로 LNG를 대체하는 것이 B-C유를 대체하는 것보다 연료구매비용 절감효과가 더 큰 것으로 나타났다. 이는 MJ 당 연료가격이 B-C유가 14.4248원으로 19.1593원인 LNG보다 낮기 때문이다. 하지만 연료구매비용 절감효과는 연료의 가격에 직접적인 영향을 받으며, B-C유와 LNG에 대한 가격은 국내의 정세에 따라 변동이 심하므로 두 연료의 가격변동에 따라 본 연구결과와 반대의 결과를 나타낼 수 있다.

Table 7. Cost reduction by B-C oil or LNG substitution from landfill gas

Categories	B-C oil	LNG
Density (kg/L or kg/Nm ³) ¹⁸⁾	0.9487	0.811
Gross calorific Value(MJ/L or MJ/Nm ³) ¹³⁾	41.6	43.6
Substitution amount for LFG (L or MJ)	8.44	347.29
Price (KRW/L ¹⁹⁾ or KRW/MJ ²⁰⁾	604.23*	19,1593**
Cost reduction (KRW/ton)	5,102	6,654
Total cost reduction (100 million KRW)	9.33	12.17

* on agency price in 2015

** on average price for industry in 2015 (Kyung Dong City Gas)

3.3. 결과에 대한 고찰

슬러지의 혐기성 분해를 통한 메탄가스회수는 많은 에너지를 필요로 하는 수분제거과정이 없는 에너지자원화 방안이며, 매립시설 또는 혐기성 소화조에 의해 슬러지의 혐기성 분해가 이루어진다. 혐기성 소화조는 소화조의 규모가 일정규모 이상 되어야 가능하기에 발생량에 한계가 있는 석유화학 폐수처리슬러지뿐만 아니라 다른 업종의 슬러지를 혼합하여야 하며, 이에 슬러지 혼합에 의한 혐기성 분해의 방해를 최소화하기 위한 사전 기초조사 및 검토가 이루어져야 한다. 매립시설을 통한 유기성슬러지의 처리는 2003년 7월부터 슬러지의 수분함량 여부에 관계없이 직접적인 매립이 금지되고 있으나, 2007년도부터 매립가스 회수시설이 설치된 매립시설에서는 직매립금지 조치에도 불구하고 수분함량 75% 이하로 처리하여 매립할 수 있도록 하였다 (500톤/일 이하).¹⁷⁾ 국제사회에서는 이미 매립시설에 Bioreactor (생물반응기) 개념을 도입하여 매립지로부터 매립가스를 추출하여 활용하는 사례가 증가하고 있다. 이에 매립시설을 생물반응기로 활용하면 혐기성 소화조에 비해 처리비용 및 기존의 매립부지와 시설의 활용에 의한 건설비를 절감할 수 있으며, 또한 해양투기를 대체함으로써 환경적으로도 보다 이롭다고 할 수 있다.

슬러지의 매립과정에 발생하는 매립가스로 화석연료의 사용을 대체하면 회피효과로 인하여 환경영향을 크게 저감시킬 수 있기 때문에 매립가스를 회수하여 적절하게 활용하는 것이 환경영향을 개선하기 위해 매우 필요함을 확인할 수 있었다. 회수한 매립가스로 B-C유를 대체하는 것이 LNG보다 더 바람직한 것으로 나타나, 에너지 수요가 많은 산업단지 또는 에너지원으로 B-C유의 수요가 많은 울산 산업단지에서 폐수처리슬러지를 매립하여 발생한 매립가스로 B-C유의 사용을 대체하는 것이 환경적으로나 경제적으로 바람직한 방법으로 판단된다. 또한 폐기물매립시설의 경우 일반적으로 혐오시설로 인식되고 있어 도시지역과 멀리 떨어진 곳에 위치하고 있으며, 에너지원으로 대부분 도시가스인 LNG를 사용하고 있는 도시지역에서 매립가스로 LNG의 사용을 대체하는 것에 어려움이 있다. 매립가스를 산업단지 내에서 사용하고자 할 경우 주변 기업체와 열 활용방안을 고려하여 하는 것이 필요하며, 이를 위해 폐기물의 매립시설을 산업단지 지원시설로 지정하여 에너지 기반시설로 활용하기 위한 제도개선이 필요한 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 폐수처리슬러지의 매립처리에 대한 잠재적인 환경영향을 평가하고, 매립가스 활용에 의한 환경영향의 저감을 평가하여 개선방안을 검토하고자 하였다. 이를 위해 울산 국가산업단지 내 석유화학업체에서 발생하는 폐수처리슬러지의 매립처리에 따른 환경영향을 전과정기법으로 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

본 연구의 기능단위는 ‘폐수처리슬러지 1 ton의 매립’이며, 시스템 경계는 폐수처리슬러지가 매립장으로 투입·처리되는 과정을 포함하며 외부에너지 생산 및 이용까지 확장하였다. 폐수처리슬러지의 매립처리에 의한 잠재적인 환경영향은 $1.13E-02$ 로 나타났으며, 매립공정과 침출수처리 공정에서 환경영향이 높게 나타났다. 특히, 지구온난화 및 광화학적산화물생성은 매립공정에서, 자원고갈, 산성화, 부영양화, 오존층파괴는 침출수처리공정에서 높게 나타났다. 영향범주별 주요원인물질은 Crude oil(자원고갈), NO_x (산성화, 부영양화), CH_4 (지구온난화, 광화학적산화물생성), Cl_2 (오존층파괴)이었으며, 주원인은 침출수처리과정 중 사용되는 전기의 생산에 의한 부하(자원고갈, 산성화, 부영양화)와 포집되지 않은 매립가스에 포함된 메탄에 의한 부하(지구온난화, 광화학적산화물생성)이었다. 이에 매립가스에 의한 전기생산, 공정개선 등으로 전기사용량을 저감하거나 메탄가스 회수율 향상, Flaring system, 매립가스의 연료대체 등으로 메탄배출량을 저감하는 것이 환경영향을 저감하는 방안이 될 수 있다.

가중화를 고려한 환경영향은 지구온난화(91.9%)-자원고갈(4.5%)-광화학적산화물생성(2.9%) 순으로 나타났으며, 지구온난화가 약 90% 이상의 절대적 환경영향을 미치는 것으로 나타났다. 지구온난화의 주요 원인물질은 메탄으로 매립지 내에서 슬러지의 분해로 발생되어 포집되지 않고 대기 중으로 배출되는 매립가스로부터 발생되었다. 따라서 매립가스의 포집율을 높이고, 에너지원으로 재활용하는 것이 지구온난화의 영향을 저감하기 위한 방안을 알 수 있다. 회수된 매립가스의 B-C유 또는 LNG 대체에 대한 회피영향을 검토한 결과, 각각 32.67%, 12.0%의 환경영향이 감소되는 것을 수치적으로 확인할 수 있어, 환경영향 개선을 위한 전과정평가 기법의 실효성을 보여주었다. 그러나, 가정과 유사공정의 인벤토리 데이터 활용 등 한계도 있어, 추가연구가 필요한 것으로 판단된다.

Acknowledgement

본 논문은 울산대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

KSEE

References

1. Ko, J. Y., Phae, C. G. and Park, J. S., “Effect of moisture content on direct landfilling prohibition of organic sludge,” *Korean J. Environ. Health*, **33**(5), 470-477(2007).
2. Lee, J. I., Lee, G. Y. and So, H. J., “A study on waste management for prohibiting ocean dumping,” Gyeonggi Research Institute(2012).
3. Ministry of Oceans and Fisheries, “Comprehensive measure for ocean dumping of land-based wastes,” Ministry of Oceans and Fisheries(2006).
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport, “Plan to promote ocean dumping zero of land-based wastes,” Ministry of Land, Infrastructure and Transport(2013).
5. Ministry of Oceans and Fisheries, “Enforcement rule of the prevention of marine pollution act,” Ordinance of the Prime Minister No 194(2012).
6. Ministry of Environment, “Generation and treatment status of national waste in 2014,” Ministry of Environment(2015).
7. Ministry of Environment, “Comprehensive measure for treatment of organic sludge,” Ministry of Environment(2006).
8. Lee, K. M., Hur, T. and Kim, S. D., “Theory and guideline of environmental life cycle assessment,” Korea Accreditation Board(1998).
9. Korea National Cleaner Production Center Home Page, https://www.kncpc.or.kr/resource/lci_pass.asp, May(2016).
10. Swiss centre for life cycle inventories, “Ecoinvent databases data V2.01”(2007).
11. Intergovernmental Panel on Climate Change, “2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories,” Intergovernmental Panel on Climate Change(2006).
12. Korea Energy Agency, “Conversion factor on air pollutants emission by energy sources,” Korea Energy Agency(2002).
13. Korea Energy Agency, “Application manual on energy conversion standard,” Korea Energy Agency(2006).
14. Korea Environment Corporation, “Development of optimal model and installation-operation manual for energy of food waste and wastewater,” Ministry of Environment(2008).
15. ISO14042, “Environmental management-life cycle assessment-life cycle impact assessment,” International Organization for Standardization: Geneva, Switzerland(2000).
16. Kim, H. W., Kim, K. H. and Park, H. S., “Environmental impact evaluation and improvement measure of incineration plant by life cycle assessment,” *J. Korea Organic Resour. Recycling Assoc.*, **21**(4), 86-98(2013).
17. Phae, C. G., “Trend of treatment and resource for sludge,” The 25th Anniversary of Korea Society of Waste Management, pp. 134-157(2008).
18. Ministry of Trade, Industry and Energy, “Energy conversion standard,” Enforcement rule of energy act(2011).
19. Petronet, “Domestic oil information-Domestic product price,” <http://www.petronet.co.kr/main2.jsp>, Oct(2016).
20. Korea city gas association, “City gas price table,” <http://www.citygas.or.kr/>, Oct(2016).