매립가스 발전시설의 가동률 및 발전량에 미치는 주요 영향요소 분석

The Analysis of Main Factors Which Impact on Operation Rate and Power Production of Landfill Gas Power Plant

천 승 규
Seung-Kyu Chun

서울과학기술대학교 에너지환경대학원

Graduate School of Energy & Environment, Seoul National University of Science & Technology

(Received February 10, 2016; Revised March 2, 2016; Accepted March 7, 2016)

Abstract : An analysis of the main factors and its degree of impact on power production is performed against the landfill gas power plant in S landfill site. The number of normal operation (50 MWh & 24 hr) days was 70.9% to the total number of operation days from 2007 to 2014, and the percentage of the actual power production was 79.3% of 3,428,400 MW which is the theoretical maximum estimation. The ratio of factors that accounted for the efficiency of power production are: 44.0% of repairing of the defect and regular servicing, 37.4% of cut-down operation due to hydrogen sulfide, and 18.6% of air pre-heater washing, respectively. Yet, considering that the cut-down operation due to hydrogen sulfide was carried out for only two years, the high concentration of hydrogen sulfide was the most influential factors on landfill gas power production. The long-term power production was analyzed as 35.9 MWh in 2018, and the constant drop is anticipated, resulting in 16.6 MWh by 2028, and under 8.4 MWh in 2038.

Key Words : Landfill Gas, Power Plant, Power Production, Hydrogen Sulfide, First Order Decay Model

요약 : S 매립장 매립가스 발전시설을 대상으로 발전량에 미치는 주요 요소와 그 영향도를 분석하였다. 50 MWh 24시간의 정상가동 일수는 2007년부터 2014년까지의 총 운전기간 일수대비 70.9%이었으며, 실제 생산한 전력은 이론적인 최대 발전 가능량 3,428,400 MW의 79.3%이었다. 발전효율에 영향을 미치는 주요 요소는 정기점검 등이 44.0%, 황화수소로 인한 압축 운전이 37.4% 그리고 공기예열기 세정 18.6% 순이었다. 그러나 황화수소 감축운전 기간이 2년인 점을 감안하면 고농도 황화수소 발생이 매립가스 발전에 가장 큰 영향을 미치고 있었다. 장기적인 발전 가능량 분석결과 매립종료 해인 2018년 35.9 MWh이었으며 이후 지속적으로 감소하여 2028년 16.6 MWh, 2038년에는 8.4 MWh 이하가 될 것으로 예측되었다.

주제어 : 매립가스, 발전시설, 전력생산, 황화수소, 일차분해모델

1. 서론

폐기물 매립지에서 발생하는 매립가스(LFG)는 일반적으로 45~60%의 메탄(CH_4)과 40~55%의 이산화탄소(CO_2), 이외에 소량의 황화수소, 암모니아, 휘발성 유기물질 등을 포함하고 있다.¹⁾ 매립가스 중 메탄은 GWP 21의 주된 지구온난화 기여물질이며 동시에 에너지원으로서의 활용이 가능하기 때문에 메탄을 활용한 발전 등 에너지 회수는 기후변화 대응, 신재생에너지 확보,²⁾ 분산형 발전시스템 확충,³⁾ 매립장의 환경개선 및 경제적인 매립장 운영을 위하여 매우 중요한 사업이다.

매립가스 발전시설은 발전설비와 운영원리 자체가 천연가스 발전시설과 유사하지만 실제 매립가스 발전시설의 적정 규모를 결정하고 운영함에 있어서는 여러 가지 어려운 점이 많다. 매립가스는 천연가스와 달리 실록산^{4,5)} 등 불순물이 많기 때문에 전처리 설비의 설치·운영에도 불구하고 주기적인 보수 및 점검에 따른 가동중단 횟수와 기간도 천연가스 발전시설에 비하여 상대적으로 클 뿐만 아니라 전처리에 따른 폐수의 발생이나 부산물의 처분문제 역시 부가

적으로 발생할 수밖에 없다. 아울러 원료인 1차 에너지원 자체가 천연가스와 달리 인위적인 조절이 불가능하고 매립장에서의 발생량에 수동적으로 의존해야 하는 문제가 있다. 결국 이러한 문제들은 기본적으로 발전설비로서의 경제성 확보와 안정적 운영에 큰 걸림돌이 되고 있다.

매립가스의 양과 질은 사회·경제적 여건 그리고 폐기물 관련 제도변경 등에 따라 변화가 심하고, 매립지 운영방식이 변화되면 이 또한 매립가스의 포집량과 포집가스내 메탄 농도에 큰 영향을 주게 된다. 아울러 매립이 종료된 이후에는 매립가스량 자체가 급감하므로 발전시설의 가동률이 빠른 시간내에 저하되는 문제가 있다. 이러한 매립가스 절대량과 메탄의 함량 변화 외에 매립폐기물의 종류에 따라서는 고농도의 황화수소가 발생할 수 있고,⁶⁾ 이는 전처리 설비의 설치에 따른 부담⁷⁾과 경우에 따라서는 발전시설의 가동률 저하의 문제로 연결될 수 있다. 따라서 신규 매립장의 조성 또는 운영중인 매립장에 매립가스 발전설비를 도입하기 위해서는 각 매립장의 구조적 특성과 매립폐기물의 양과 종류 그리고 매립장이 위치한 지역의 법적 규제조건 등을 모두 고려하여 이에 맞는 발전형식과 규모 그리고

운영계획을 수립하는 일이 중요하다.

본 연구는 매립가스 발전사업이 가지는 이러한 문제와 관련하여 국내 최대 매립가스 발전시설의 실 운영자료를 바탕으로 가동률과 발전량에 미치는 제 요소와 그 영향도를 분석하였고, 매립종료 이후 장기적인 발전 가능량을 추정하였다. 이를 통해 매립가스 발전사업시 사전에 고려해야 할 사항들과 그 중요도를 제시함으로써 안정적이고 경제적인 매립가스 발전사업 추진에 기여하고자 하였다.

2. 연구방법

2.1. 연구대상 현장 및 발전시설

연구대상 매립지는 S 매립지로서 동 매립지에는 1992년 4월부터 폐기물이 매립되어 2000년 10월 매립이 종료된 매립장(LS1)과 2000년 10월부터 매립이 진행중인 매립장(LS2)이 있다. LS1은 $3,084 \times 10^3 \text{ m}^2$ 의 면적에 총 $64.0 \times 10^6 \text{ t}$, 그리고 LS2는 $3,559 \times 10^3 \text{ m}^2$ 의 면적에 2014년말까지 $62.2 \times 10^6 \text{ t}$ 의 생활 및 건설폐기물 등이 매립되었다. 두 개의 매립장에서 발생하는 매립가스는 1,088개의 수직정⁸⁾과 87개의 수평포집관에 의해 포집되어 2007년 3월부터 50 MWh 규모의 스팀터빈 방식의 매립가스 발전시설(발전소)에 활용되고 있다. 연구를 위하여 S 매립지의 폐기물 성상별 매립량, 매립가스 발생량, 매립가스 모니터링 자료 그리고 발전소의 2007년 3월 7일부터 2014년 12월 31일까지의 일일 운영 자료를 활용하였다. 또한 매립가스 실측자료를 활용한 보정과 검정을 통해 모델링을 수행함으로써 장기적인 발전 가능량을 추정하였다.

2.2. 발전량과 운영효율 계산

매립가스를 이용한 발전시설의 이론적 최대 발전 가능량은 식 (1)과 같이 매립 폐기물의 혐기성 생물화학적 분해에 의해 발생한 매립가스를 1차 에너지원으로 하고, 여기에 발전설비의 열효율과 열소모율을 반영함으로써 산출할 수 있다.

$$EG_{LP} = \frac{Q_{meth} \cdot f_{coll} \cdot f_{oxi} \cdot C_{meth} \cdot E_b}{R_e \times 365 \times 24 \times 1000} \quad (1)$$

여기에서 EG_{LP} 는 전력생산량(MWh), Q_{meth} 는 매립가스 발생속도(Nm^3/year), f_{coll} 는 매립가스 포집율, f_{oxi} 는 외기유입에 의한 메탄산화 후 잔존 메탄비율, C_{meth} 는 메탄의 저위 발열량($8,570 \text{ kcal}/\text{Nm}^3$), E_b 는 보일러의 연소효율, R_e 는 발전시설의 열소비율(kcal/kWh)이다.

실제 발전시설을 운영할 때에는 시설의 점검이나 보수 그리고 여타 다른 요인들로 인해 가동이 중단되거나 발전량을 줄여야 하는 상황이 발생한다. 이러한 상황은 특히 매립가스를 이용한 발전시설의 경우 가스발전에 있어서의 일반적인 요인 외에도 매립장 마다 다른 매립가스 공급량 변동, 메탄의 함량, 황화수소나 실록산⁹⁾과 같은 불순물 등이 추

가적인 영향을 미치기 때문이다. 따라서 매립가스 발전시설의 발전효율은 식 (1)에 의한 발전 가능량과 실제 발전량을 비교함으로써 평가할 수 있다.

2.3. 매립가스 공급량 계산

매립 폐기물에 의해 발생된 매립가스 중 일부는 매립장 복토층을 통해 외부로 배출되며 이를 표면발산량^{10,11)}이라 한다. 매립가스의 포집량¹²⁾은 총 매립가스 발생량에서 표면발산량을 제외한 실제 포집되는 양이다. 식 (1)에서 매립가스 중 메탄이 포집시스템을 통해 실제 발전시설에 공급되는 양은 Q_{meth} , f_{coll} , f_{oxi} 를 곱한 양이다. 따라서 과거 공급량은 매립가스 모니터링 자료를 통한 포집량과 포집된 매립가스내 메탄의 농도 측정자료를 통해 산정이 가능하다. 동 연구에서도 2014년 이전의 경우 실 포집 매립가스의 양과 메탄의 농도 측정자료를 적용하였다. 그러나 장래 공급 가능량은 폐기물 매립에 따른 메탄의 발생량, 포집율 및 산화율을 추정한 뒤 산정하여야 한다. 이 때 Q_{meth} 는 매립가스 발생모형을 통해 추정할 수 있다.

식 (2)는 매립가스 발생모형으로 가장 보편적으로 적용되고 있는 일차분해모델^{13,14)}이다. 식 (2)의 매립가스 누적발생량은 식 (3)의 특정연도의 발생량으로 전환할 수 있으며, 이는 식 (1)에 대입되어 특정연도에 있어서 매립가스 발전시설의 평균적인 발전 가능량이 된다.

$$q_{cm} = LW(1 - e^{-k(t-t_2)}) \quad (2)$$

$$q_m = LW(e^{-k_i(t-t_2-1)} - e^{-k_i(t-t_2)}) \quad (3)$$

여기에서 q_{cm} 은 매립 폐기물에 의한 누적 메탄 발생량(Nm^3), q_m 은 매립 폐기물에 의한 메탄 발생 속도(Nm^3/year), L 은 매립 폐기물의 최대 메탄발생 잠재력(Nm^3/t), W 는 폐기물 매립량 (t/year), k 는 폐기물의 생물화학적 분해 속도(year^{-1}), t 는 매립 경과 년수(year), t_2 는 매립 후 메탄발생 전까지의 지연시간 (year)이다.

식 (3)은 단일 폐기물의 경우이며 실제 매립장에는 복합성분의 폐기물이 매년 매립되므로 매립가스 총 발생속도는 식 (4)와 같다.

$$Q_{meth} = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m L_i W_{ij} (e^{-k_i(t-t_2-1)} - e^{-k_i(t-t_2)}) \quad (4)$$

여기에서 m 은 매립폐기물의 종류, n 은 매립 연차이다.

Q_{meth} 을 구하는데 있어서 매립시설을 처음 건설할 때에는 예상 되는 W 를 정하고 L , k ^{15,16)}에 대한 실험^{17,18)} 또는 차용 가능한 데이터를 사용하게 된다. 반면, 이미 어느 정도 운영 중인 매립장에 대해서는 해당 매립장의 매립가스 모니터링 자료를 통해 모델의 보정과 검정을 수행함으로써 보다 정확한 Q_{meth} 을 도출할 수 있다.

본 연구에서는 S 매립지에 대하여 생활계 폐기물은 음식물류, 종이류, 목재류, 섬유류, 기타 가연물, 건설폐기물은 종이류, 목재류, 섬유류, 기타 가연물 그리고 고화슬러지 각각에 대한 W , k , L 을 S 매립지 자체 분석자료 및 연구결과¹⁹⁾와 IPCC²⁰⁾ 값을 토대로 모델링하였다. 2015년부터 2018년까지 매립폐기물의 성상별 양은 LS2에 2000년부터 2014년까지 매립된 폐기물의 각 성상별 양의 계량자료를 토대로 추이분석을 하여 적용하였다. 이와 같이 하여 일차 모델링한 결과와 S 매립지에서 자체 측정한 표면발산량을 포함한 메탄 발생량 모니터링 값(2005-2014)과의 오차를 최소화하기 위하여 몬테카를로법^{21,22)}을 적용하였다. 몬테카를로법은 컴퓨터의 빠른 연산능력을 이용하여 근사적으로 해를 찾아가는 방법으로서 매우 복잡한 풀이 조건 또는 해를 구하는데 필요한 정보들이 부족한 상황에서 유용하게 사용될 수 있다. 본 연구에서도 이 방법을 적용하여 최적 k , L 을 도출한 뒤 이를 토대로 모델링을 함으로써 장기적인 Q_{meth} 예측 값을 구하였다. 한편 LS1의 경우에는 모델링을 위한 기본 자료인 폐기물 성상별 매립량과 매립가스 모니터링 자료가 부족하여 장래 발생량 예측은 추이분석에 의하여 수행하였다.

2.4. 매립가스 발전시설 공급량 계산

포집율(f_{coll})은 매립장의 구조, 포집시스템, 운영방식 등에 따라 달라진다. 포집율을 높일 경우 발전설비의 매립가스 공급량이 많아지고 악취방지에 유리하나, 반면 외기의 유입가능성도 커지게 된다. 외기 유입정도는 매립장의 복토상태와 포집을 위한 부압의 크기에 의해 결정된다. 장래의 포집율은 이와 같이 매립장 운영계획에 연동되기 때문에 일정한 것은 아니다. 다만, 안정적이고 최대의 포집율을 보이는 시기의 값을 장래의 포집율로 적용할 수 있을 것이다.

매립가스 포집시 유입되는 산소는 매립장 내부 환경의 국지적인 호기화 그리고 메탄 산화 등을 통해 매립가스내 메탄의 농도를 저감시키고 이산화탄소를 증가시킨다.^{23,24)} f_{oxi} 는 식 (5)와 같이 개략적으로 추정할 수 있으며 이를 식 (1)에 반영함으로써 장래 매립가스 발전시설에 공급되는 포집 메탄의 양을 보정할 수 있다.

$$f_{oxi} = \frac{C_{CH_4}}{\left(\frac{21}{78} \cdot C_{N_2} - C_{O_2}\right) + C_{CH_4}} \quad (5)$$

여기에서 C_{N_2} , C_{O_2} , C_{CH_4} 는 포집 매립가스내 질소, 이산화탄소, 메탄의 비율 (%)이다.

본 연구에서는 연구 대상 매립장인 LS1과 LS2 각각에 대하여 연간 모니터링 값과 매립가스의 농도 측정결과를 활용하여 f_{coll} 와 f_{oxi} 를 산정하였으며, 가스포집시스템 운영방식이 고정화되어 비교적 일정한 수준을 보이기 시작한 시기의 값을 2015년 이후의 예측 부문에 대해서 적용하였다. 즉, LS1은 2008-2014년의 f_{coll} 0.86, f_{oxi} 0.93 그리고 LS2는 2012-2014 시기의 평균값인 f_{coll} 0.96, f_{oxi} 0.97을 적용하였다. 그리고 연구대상 발전소의 설계 및 운영기준인 보일러 열

효율과 터빈 열소비율을 적용하였다. 즉, 식 (1)에서 E_b 는 0.824 그리고 R_e 는 2,231.6 kcal/kWh이다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 발전시설 가동율

Fig. 1(a), (b)는 발전소의 총 운영기간인 2007년 3월 7일부터 2014년 12월 31일까지 일별 가동시간과 생산한 전력량을 나타낸 것이다. 운전기간은 운전개시일로부터 날수로 2,857일이었으나 실제 발전일수는 2,529일로서, 328일은 정비 등의 사유로 인해 가동되지 못하였다. 이 가운데 일 24시간 그리고 50 MWh 규모의 발전을 한 날 수는 2,027일로서 총 발전일 수의 70.9%에 해당하였다. 동 기간 중 생산된 전

Fig. 1. Daily analysis of power plant operation and power production efficiency.

Fig. 2. Annual analysis of operation day ratio and power production loss.

력은 총 2,718,999 MW로서 식 (1)에 의한 이론적인 최대 발전 가능량 3,428,400 MW의 79.3%에 해당하였다. 발전소의 경우 자체 전력소모량이 있기 때문에 총 생산 전력량과 매전량은 다르다. Fig. 1(c)는 발전을 위하여 포집한 매립가스 단위 열량당 총 발전량 및 자체 소모량을 제외한 순 매전량을 나타낸 것이다. 총 발전량으로는 평균 2.17 KW/MJ이었고 자체 소모량을 제외할 경우 1.93 KW/MJ이었다. 이는 77.68 kw/Nm³_CH₄에 해당한다. 매립가스의 메탄농도를 평균 50%로 가정한다면 매립가스 1 Nm³당 38.84 kw를 생산한 셈이다.

Fig. 2는 2007년부터 2014년까지 50 MWh 및 24시간 정상가동한 일수를 연간 사업대상 일수의 비율(2007년의 경우 300일) 그리고 동 조건에서 생산 가능한 최대 전력량에서 실제 생산한 전력을 뺀 전력량(발전 손실량)을 나타낸 것이다. 2007년도의 경우 사업 첫 해로서 시험가동 및 하자보수 등으로 정상가동 비율이 낮았다. 연 365일 중 정상가동한 날의 비율은 2008년에 가장 높았으나 이후 점차 하락하고 있고, 2013년부터 급격히 낮아져 2014년에는 하루도 없었다. 이에 따라 발전량은 2008년부터 2011년 사이에 비교적 안정적이었으나 2011년 이후 급격히 감소하고 있고, 발전 손실량도 Fig. 2에서와 같이 2013년부터 급증하고 있었다.

3.2. 주요 전력생산 영향인자 분석

매립가스 발전시설의 경우 천연가스와 달리 연료의 공급 변동, 매립가스내 불순물 등 발전여건이 불리하며, 발전에 영향을 미치는 예측불가능한 상황도 많을 수밖에 없다. Table 1은 이론 손실량에 대한 주요 원인과 각 원인별 발전량에 미친 영향을 분석한 결과이다. 분석결과 2007년부터 2014년까지 정기점검, 공기에열기 세정, 황화수소로 인한 가동정지 또는 감축운전이 3대 원인이었다. 발전설비의 하자보수와 정기점검 등이 44.0%로서 가장 큰 요인이었고 황화수소로 인한 감축운전이 두 번째였다. 그러나 하자보수로 인한 요인이 컸던 가동 첫해인 2007년을 제외할 경우 황화수소가 44.3%로 가장 컸다.

Fig. 3은 이들 3대 주요 발전영향 요인의 연도별 분석결과이다. 가동 개시년도인 2007년에는 하자보수 등에 의한

Table 1. Main impact factors on operation and power production loss

Content		Abnormal operation (day, %)	Power loss (MW, %)
Regular servicing	A grade	105 (12.7)	122,200 (19.9)
	B grade	115 (13.9)	88,135 (14.4)
	C grade	63 (7.6)	59,620 (9.7)
Sub total		283 (34.2)	269,956 (44.0)
Air pre-heater washing		138 (16.7)	114,077 (18.6)
H ₂ S		407 (49.2)	229,132 (37.4)
Total		828 (100.0)	613,165 (100.0)

Fig. 3. Annual analysis results of impact factors on power production loss.

발전정지 요인이 단일 요인이었고, 이후 발전소가 가동됨에 따라 공기에열기 세정에 의한 요인들이 주기적으로 그리고 비교적 일정한 수준으로 나타나고 있다. 발전소 정기점검 등에 의한 발전소 운영 정지 등은 특히 2014년에 급증하였다. 이는 발전기간 증가 외에 황화수소 증가와도 관련이 있는 것으로 판단된다. 황화수소로 인한 문제는 2013년부터 나타나고 있었으며 이때부터 발전을 저하문제의 대부분을 차지하기 시작하였다. 전체 분석기간 8년 중 황화수소로 인한 발전손실이 2013년, 2014년 2년에 불과한 점을 감안하면 그 영향은 지대하였다.

3.3. 매립가스 발생 및 포집량의 영향분석

매립가스 발전량에 영향을 미치는 가장 기본적인 요소는 매립가스의 발생량이다. 매립량에 급격한 변화만 없다면 매립가스 발전량은 매립기간 중에는 큰 폭의 변화는 없는 것이 정상이다. 향후 자원회수가 되지 않은 폐기물의 직매립을 원칙적으로 금지하는 관련 법안이 현재 입법과정에 있으며, 이는 매립가스 발생량에 있어서 매립종료와 유사한 영향을 미치게 된다. 그러나 동 법안의 시행시기를 감안하면 2018년 매립종료시까지 LS2에 직접 영향을 미치지 않는 것이다. LS2의 경우 표면발산량, 간이소각기 소각량, 포집량을 모두 포함한 메탄가스 총 발생량은 2005년도에 348 m³/min로 최대를 기록한 이후 점차 감소하여 2014년에는 261 m³/min이었으나 복토강화와 포집율 증가를 통해 매립가스 발전

Fig. 4. The estimation of methane generation and collection quantity from LS1 and LS2.

소에 공급되는 양을 조절함으로써 매립가스 발전량을 설계 용량에 준하도록 운영하고 있다. 그러나 매립이 종료된 이후에는 매립가스 발생량의 급감을 피할 수 없고 이는 매립가스 발전에 근본적으로 큰 영향을 미칠 수밖에 없다.

Fig. 4는 LS1의 추이분석 결과와 LS2의 모델링 결과를 통해 발전소 가동 후 약 30년 후까지의 이론적인 최대 포집 가능량과 발전 가능량을 나타낸 것이다. 즉, 앞에서 설명한 대로 LS1는 f_{coll} 0.86, f_{oxi} 0.93, LS2는 f_{coll} 0.96, f_{oxi} 0.97을 적용한 뒤 식 (1)에 의하여 생산전력으로 전환하였고, 황화수소나 정기점검 등에 따른 영향이 전혀 없을 경우를 가정한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 메탄 포집량은 2018년 217.5 Nm³/min, 2028년 100.0 Nm³/min 그리고 2038년이 되면 2014년 248.2 Nm³/min의 20.5% 수준인 50.8 Nm³/min까지 감소할 것으로 예상되었다. 이에 따라 전력생산도 2018년 41.3 MWh, 2028년 19.0 MWh 그리고 2038년에는 9.7 MWh로 크게 감소하는 것으로 나타났다.

3.4. 황화수소의 영향 분석

황화수소는 매립폐기물 중의 시멘트와 석고성분에 포함된 황산염이온이 황산염 환원미생물에 의하여 환원되어 발생하게 된다.^{25,26)} 황산염 환원미생물은 수소, 아세트산 등 전자 공여체를 놓고 메탄생성균과 경쟁을 벌이기 때문에^{27,28)} 메탄발생량에도 영향을 미칠 수 있다.

현재 매립이 진행 중인 LS2의 경우 석고성분이 함유된 건설폐기물 매립량이 연간 기준으로 50%가 넘고 있고, 특히, 생활폐기물과의 혼합매립에 의해 고농도 황화수소가 발생하고 있다. 매립초기 수년간 비교적 일정하던 황화수소 농도는 2006년경부터 급증하면서 2014년에 연평균 11,531 ppm에 도달하였고, 2015년은 8월까지 13,195 ppm으로 상승하였다. 황화수소는 현재도 지속적으로 상승하고 있으며, 매립종료 해인 2018년에는 Fig. 5와 같이 연평균 약 20,000 ppm에 달할 것으로 예상된다. 반면 LS1의 황화수소 농도는 매립종료 14개월 이후부터 측정이 시작되었으나 측정자료를 토대로 보면 매립기간 중 수천 ppm 수준이었을 것으로 추정되며 매립종료 이후 급격히 감소하여 2014년 평균 69.0 ppm

Fig. 5. Hydrogen sulfide generation trends of LS1 and LS2.

이었다. 이는 매립종료시 매립 폐기물을 통한 유기탄소와 황산염이온의 공급이 중단되기 때문이다. 이에 따라 추이분석으로 보면 2018년에는 50 ppm 미만으로 낮아질 것으로 보인다. 더욱이 LS1의 매립가스 발생량 자체도 매립종료이후 지속적으로 감소하여 2014년에는 LS2의 13.1%에 불과하였다. 따라서 황 부하량으로는 2014년 기준 LS1은 LS2의 0.08%에 불과하기 때문에 2007년부터 시작된 매립가스 발전에 있어서 황화수소 문제는 LS2의 문제라고 할 수 있다.

매립가스내 황화수소 농도증가는 발전시설 전 부분에 대하여 부식 등의 영향을 미칠 뿐만 아니라 발전 후 배출되는 연소가스내 아황산가스의 농도증가 때문에 배출허용기준과 사업장 대기오염물질 총량관리제도의 제재를 받게 된다. 매립가스를 보일러에서 연소하는 경우 연소용 공기에 의하여 배가스가 증가되므로 전처리시설을 통해 황화수소를 제거한 후 발전하는 것이 유리하다. 이 때 전처리 설비의 시설용량이 충분하지 못할 경우 발전시설 가동을 제대로 할 수 없는 문제가 발생한다. Fig. 6은 황화수소 농도가 급증한 2006년부터의 측정값을 토대로 2018년의 포집 매립가스 내 황화수소의 양을 추정한 것이다. 황의 양을 기준으로 2014년 11.2 t/day에서 2018년에는 약 15.6 t/day로 증가할 것으로 예상된다. 황화수소 전처리시설은 시간에 따른 매립가스 양의 변화 그리고 매립가스 내 황화수소의 농도에 따

Fig. 6. Increasing trend of sulfur quantity in LFG of LS2.

른 황의 부하량에 따라 그 처리시설의 규모가 결정되게 된다. 현재 발전소에서는 Thiopaq Process 공법²⁹⁾에 의하여 황화수소를 2013년부터 처리하고 있으며, 처리용량은 황부하량 기준으로 평균 7.1 t/day, 최대 10.8 t/day이다. 아울러 지속적으로 증가되는 황화수소를 처리하기 위해 동일 공법의 제2시설을 설치중이며 제2시설 처리용량은 최대 12.3 t/day이다. 제2시설은 2016년말경 정상 운전될 것으로 보이며, 이 경우 두 시설의 시설용량은 15.2 t/day이고 최대 부하는 23.1 t/day이다. 일 평균 시설용량 기준으로 보면 2018년이 되면 처리해야 할 황부하량은 시설용량을 다소 초과할 것으로 보이나 두 시설의 최대 허용부하량 23.1 t/day를 초과하지는 않을 것으로 판단된다. 다만, 황화수소는 수개월간 연평균 농도나 부하량을 초과하는 특성이 있으므로 수 개월간 연평균 농도를 초과하는 시기에는 발전소 가동율을 낮춰야 할 가능성은 충분히 있다.

LS2가 2018년 말에 종료될 경우 폐기물을 통한 유기탄소와 황산염이온의 공급이 중단되기 때문에 LS1과 같이 황화수소 농도는 감소할 것으로 예상된다. 다만 유기탄소 매립량에 있어서 LS1은 음식물류 등 이분해성이 많고 LS2는 건설폐기물내 종이와 목재 등 중분해성 비율이 큰 점을 감안하면 LS2의 황화수소의 감소세는 LS1 보다는 완만할 수 있다. 그렇다 하여도 매립가스량의 감소와 황화수소 농도의 감소는 거의 확실할 것으로 보이기 때문에 2019년 이후에는 두 개의 전처리 시설로 황화수소를 충분히 처리 가능할 것으로 보이며, 수년 후에는 한 개의 전처리시설은 가동이 필요 없을 것으로 판단된다. 즉, 2016년까지는 황화수소로 인한 감축운전이 불가피할 것으로 판단된다. 이에 따라 2016년까지는 발전소 가동률 저하의 가장 큰 원인이 될 것으로 보이며, 2017년 이후에는 황화수소로 인한 문제 보다는 정기점검과 매립가스 감소가 발전량 감소의 주된 요인이 될 것으로 예상된다.

3.5. 실 발전 가능량 전망

향후 매립가스를 이용한 최대 발전 가능량을 산정하기 위해서는 매립가스 포집가능량, 황화수소의 영향 그리고 정기적인 점검과 보수에 따른 영향을 모두 고려하여야 한다. 정기점검 및 보수의 빈도나 기간을 미리 추정하는 것은 어려우므로 발전소 운영이 시작된 2007년부터 2014년까지의 정기점검 등에 따른 평균 발전 손실율을 2015년 이후 동일하게 적용하였다. 다만, 이러한 점검 및 보수에 따른 손실율은 시간이 갈수록 커질 수 있다는 점을 감안해야 할 것이다. 앞에서 언급한 대로 제2전처리 시설이 본격적으로 가동되는 2017년부터는 황화수소에 의한 감축운전은 거의 없을 것으로 판단된다. 따라서 2013년 12월 27일부터 평균 33 MWh로 감축운전을 지속하고 있기 때문에 2015, 2016년 두 해는 33 MWh 감축 운전을 적용하였다. 그리고 여기에 정기점검 9.1%, 공기에열기 세정 3.9%에 의한 손실율 13.0%를 적용하였다. 이상과 같이 연도에 따른 매립가스 발생량 및 포집량, 메탄산화율, 정기점검과 황화수소에 의한

Fig. 7. Maximum power production expectation considering methane generation, collection ratio, hydrogen sulfide and regular servicing.

감축 운전을 모두 적용하여 2037년까지 예측한 최대 발전량은 Fig. 7과 같다.

Fig. 7에서 보듯 2015, 2016년 두 해는 황화수소로 인한 감축운전과 정기점검 등으로 29.9 MWh의 낮은 발전율이 예상되었다. 매립종료 해인 2018년에는 메탄 포집량은 LS1 16.4 Nm³/min, LS2 201.1 Nm³/min으로서 2014년 LS1 26.6 Nm³/min, LS2 221.4 Nm³/min에 비하여 87.7% 수준으로 감소하고 여기에 정기점검 등에 의한 감축운전을 고려하면 발전량은 35.9 MWh로 낮아질 것으로 추정되었다. 또한 최근 3년간 포집율은 96.0%수준이므로 과거와 같이 포집량 조절을 통한 발전을 개선은 더 이상은 어려울 것으로 판단된다. 매립종료 이후에는 매립가스의 발생량이 급감하기 시작하므로 매립가스 포집량과 정기점검 등을 고려한 실 발전 가능량도 급하게 감소하여 매립종료 후 약 10년 후인 2028년에는 16.6 MWh 그리고 발전소 가동 이후 약 30년 뒤인 2038년에는 8.4 MWh로 감소될 것으로 추정되었다. 그러나 실제 발전소 운영에서는 시간이 경과할수록 시설 노후화에 따른 점검 횟수와 기간이 늘어날 수밖에 없다. 따라서 이러한 부분까지 감안하면 실제 발전율은 이보다 낮을 것으로 예상된다.

4. 결론

S 매립지 매립가스 발전소를 대상으로 발전량에 미치는 주요 요소를 분석하였으며 연구결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) 50 MWh로 24시간 가동한 일수는 발전사업 전 기간 총 일수의 70.9%이었으며, 발전량은 2,718,999 MW로서 이론적인 총 발전가능량 3,428,400 MW의 79.3%이었다.
- 2) 발전효율에 영향을 미치는 주요 요소는 정기점검 등이 44.0%, 황화수소로 인한 감축운전이 37.4% 그리고 공기에열기 세정이 18.6%이었다.
- 3) 2013년부터 시작된 황화수소로 인한 감축운전은 2016

년까지 지속될 것으로 판단되며, 황화수소 연평균 농도는 2018년 최대 2만 ppm에 도달하고, 포집 매립가스내 처리대상 황부하량은 15.6톤/일로 증가할 것으로 예상되었다.

4) 장기적인 발전소의 최대 발전 가능량은 2018년 35.9 MWh, 2028년 16.6 MWh 그리고 발전시설 가동 후 약 30년 후인 2038년에는 8.4 MWh 이하로 감소할 것으로 추정되었다.

KSEE

References

- Feng, S. J. and Zheng, Q. T., "A two-dimensional gas flow model for layered municipal solid waste Landfills," *Computers and Geotech.*, **63**, 135(2015).
- Chun, S. K., "Research on the Methane Recovery from Landfill Gas by Applying Nitrogen Gas Separator Membrane," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **35**(8), 586~591(2013).
- Hur, K. B., Park, J. K. and Lee, J. B., "Development of Land Fill Gas(LFG)-MGT Power Generation and Green House Design Technology," *J. Energy Eng.*, **20**(1), 14(2011).
- Kim, N. J., Choi, J. M. and Ji, E. J., "Solvent Selection for the Detection of Siloxanes in Landfill Gas," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **29**(8), 915~916(2007).
- Seo, D. C., Song, S. S. and Won, J. C., "Removal of Volatile Silicon Compounds (Siloxanes) from Landfill Gas by Adsorbents," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **31**(9), 793~794(2009).
- Takuwa, Y., Matsumoto, T., Oshita, K., Takaoka, M., Morisawa, S. and Takeda, N., "Characterization of trace constituents in landfill gas and a comparison of sites in Asia," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **11**(4), 305~311(2009).
- Cha, J. M. and Lee, I. W., "Removal of Hydrogen sulfide by Immobilized *Thiobacillus* sp. IW. on Polyvinylpyridine in a Bubble column reactor," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **17**(2), 145~155(1995).
- Yu, L., Batllea, F., Carrera, J. and Lloret, A., "Gas flow to a vertical gas extraction well in deformable MSW landfills," *J. Hazard. Mater.*, **168**(2-3), 1404~1416(2009).
- Ajhara, M., Travasset, M., Yüce, S. and Melina, T., "Siloxane removal from landfill and digester gas - A technology overview," *Bioresour. Technol.*, **101**(9), 2913~2915(2010).
- Trapani, D. D., Bella, G. D. and Viviani, G., "Uncontrolled methane emissions from a MSW landfill surface: Influence of landfill features and side slopes," *Waste Manag.*, **33**(10), 2109~2114(2013).
- Park, J. W. and Shin, H. C., "Surface emission of landfill gas from solid waste landfill," *Atmos. Environ.*, **35**(20), 3445~3451(2001).
- Amini, H. R. and Reinhart, D. R., "Regional prediction of long-term landfill gas to energy potential," *Waste Manag.*, **31**(9-10), 2021(2011).
- Meraz, R. L., Vidales, A. M. and Domínguez, A., "A fractal-like kinetics equation to calculate landfill methane production," *Fuel*, **83**(1), 75(2004).
- Faour, A. A., Reinhart, D. R. and You, H., "First-order kinetic gas generation model parameters for wet landfills," *Waste Manag.*, **27**(7), 948~953(2007).
- Zheng, W., Phoungthong, K., L. F., Shao, L. M. and He, P. J., "Evaluation of a classification method for biodegradable solid wastes using anaerobic degradation parameters," *Waste Manag.*, **33**(12), 2635~2637(2013).
- Trzcinski, A. P. and Stuckey, D. C., "Determination of the Hydrolysis Constant in the Biochemical Methane Potential Test of Municipal Solid Waste," *Environ. Eng. Sci.*, **29**(9), 849(2012).
- Sanphotia, N., Towprayoon, S., Chaiprasert, P. and Nophratanad, A., "The effects of leachate recirculation with supplemental water addition on methane production and waste decomposition in a simulated tropical landfill," *J. Environ. Manag.*, **81**(1), 29(2006).
- Sudokwon Landfill Site Management Corp., A Study on The Monitoring & Prediction System Building Measures for LFG and Leachate of Sudokwon Landfill Site, 210(2004).
- Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. 3.17, (2007).
- Guillarda, V., Guillaumea, C. and Destercke, S., "Parameter uncertainties and error propagation in modified atmosphere packaging modeling," *Postharvest Biol. Technol.*, **67**, 164~165(2012).
- Taylor, C. D. and Liu, X. Y., "Investigation of structure and composition control over active dissolution of Fe-Tc binary metallic waste forms by off-lattice kinetic Monte Carlo simulation," *J. Nucl. Mater.*, **434**(1-3), 385(2013).
- Chun, S. K., "The influence of air inflow on CH₄ composition ratio in landfill gas," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, **16**(1), 172~177(2014).
- Nair, D. N. K., Zachariah, E. J. and Vinod, P., "Investigations on enhanced in situ biooxidation of methane from landfill gas (LFG) in a lab-scale model," *J. Mater. Cycles Waste Manag.*, DOI 10.1007/s10163-015-0397-4(2015).
- He, R., Xia, F. F., Bai, Y., Wang, J. and Shen, D. S., "Mechanism of H₂S removal during landfill stabilization in waste biocover soil, an alternative landfill cover," *J. Hazard. Mater.*, **67**, 217~218(2012).
- Sirisawat, L., Saengsoy, W., Baingam, L. and Krammart, P., Tangtermsirikul, S., "Durability and testing of mortar with interground fly ash and limestone cements in sulfate solutions," *Constr. Build. Mater.*, **64**, 40(2014).
- Shin, H. S., Oh, S. E. and Kwon, J. C., "Activity of SRB and MPB at Thermophilic Condition in Anaerobic Digester Treating Wastewater with High Sulfate Concentration," *J. Korean Soc. Environ. Eng.*, **19**(3), 2(1997).
- Bharati, B., and Pranab, K. G., "Sulfate bioreduction and elemental sulfur formation in a packed bed reactor," *J. Environ. Chem. Eng.*, **2**(3), 1287~1288(2014).
- Ferguson, S., Skinner, G., Schieke, J., Lee, K. C. and Dorst, E. V., "High Efficiency Integrated Gasification Combined Cycle with Carbon Capture via technology advancements and improved heat integration," *Energy Procedia*, **37**, 2248~2249 (2013).