

# 미생물제재를 이용한 혐기성소화조의 효율개선사례

김석순 \_ 부산광역시 환경시설공단 환경연구센터

## 서론

### 1. 연구배경 및 목적

생활수준의 향상으로 환경문제에 대한 관심이 높아지면서 환경질의 개선에 관한 요구가 증가하게 되었다. 이와 관련한 시설 중 하수처리장은 가장 시급한 사업으로서 대도시와 중소규모 이상의 도시를 중심으로 막대한 예산투자를 통해 수처리시설이 증가하고 있다.

하수처리장이 가동됨에 따라 부수적으로 발생하는 슬러지는 하수처리장의 증가로 인해 하수슬러지 발생량도 점차 증가추세에 있다. 더욱이 최근에는 차집관거의 확충, 생활하수의 유입량 증가 및 인근 신규 APT의 분뇨 직유입으로 인해 유입 총고형물량이 증가됨에 따라 기존 소화조의 용량이 부족할 것으로 예상하고 있다.

하수슬러지 발생량은 2001년 1,901천톤/년, 2002년 2,072천톤/년, 2003년에 2,266천톤/년으로 매년 증가하고 있으나, 2000년 7월부터 시행된 하수슬러지 육상매립 금지(시설용량 1만톤/일 이상인 하수처리장)로 발생량의 72%를 해양투기에 의존하고 있는 실정이다.

그러나 향후 해양투기의 규제강화 및 금지가 예상되므로 하수슬러지 처분의 근본적인 해결책인 슬러지 발생량 감소가 절실히 요구되고 있는 상황에서 혐기성소화조 효율 향상을 위한 개선사업이 시급히 요구되고 있다. 환경부의 조사에 따르면, 전국 268개 하수처리장 중 소화조가 설치된 처리장이 68개소이며, 이중 58개소가 운영중이다.

혐기성소화공정은 다른 물리·화학적 처리와 비교할 때 2차 오염문제가 적고, 동시에 메탄가스 발생 등의 장점에도 불구하고 긴 처리시간, 악취발생 등의 단점을 가지고 있으며, 최근 저농도 하수 유입 및 고도처리 등으로 인한 하수슬러지 내 유기성분이 적어 소화조 유지관리비용 측면에서 경제성이 떨어진다는 이유로 소화조 설치를 기피하는 실정에 있다.

현재 널리 사용되고 있는 소화조는 Anglo-American이라 불리는 저유탱크 형태의 소화조와 최근 사용이 급격히 늘고 있는 Egg-shaped이라 불리는 계란형태의 소화조가 있는데, 장기적 운영에 따른 소화효율의 감소원인을 직접적으로 파악하기 힘들며, 이러한 이유로 사각지대 및 스킴 발생이 증가하여 교반효율의 감소와 열손실 증가를 동반하기도 한다. 환경부의 조사에 따르면, 소화조 운영 처리장 10개소를 선정하여 소화조 운영 유무에 따른 슬러지 발생량 및 유지관리비를 비교한 결과 소화조 운영시 슬러지 발생량 및 처리비용이 35%정도 감소하였다고 보고하였다.

따라서 본 개선사례는 기존 혐기성소화조의 문제점 보완 및 효율개선을 위해 미생물제제의 소화조 적용을 통한 소화효율을 극대화시키고, 이를 통한 소화조 내 사각지대 및 스킴 발생을 최소화시키며, 나아가 최종 하수슬러지 발생량 감소로 인한 슬러지 처분비 등 유지관리비 절감과 부생가스 발생량 증대로 인하여 냉·난방용 및 산업용 전력생산 등 대체에너지 활용을 확대하고자 한다.

## 본 론

### 1. 혐기성소화조 내 투입된 미생물제제의 특성

미생물제제의 미생물종은 모두 공지의 균주로서, 단백질과 지질을 분해하는 미생물로 바실러스 속(*Bacillus* sp.), 황화수소( $H_2S$ ) 또는 황(S)을 산화시켜 악취를 제거하는 산생성미생물로 홍색 유황세균(Purple sulfur bacteria), 알칼리제네스 속(*Alcaligenes* sp.), 플라보박테리움 속(*Flavobacterium* sp.), 탄수화물 및 ABS, 헥산(Hexane), 페놀(Phenol), 탄화수소(Hydrocarbon) 등의 유기화합물과 난분해성 물질을 분해하는 미생물로 홍색 비유황세균(Purple non-sulfur bacteria), 슈도모나스 속(*Pseudomonas* sp.), 코마모나스 속(*Comamonas* sp.), 질화미생물로는 나이트로소모나스 속(*Nitrosomonas* sp.), 나이트로코쿠스 속(*Nitrococcus* sp.) 등 10속 27여종의 천연미생물로 구성되어 있다.

### 2. 혐기성소화조의 소화효율개선 실험

#### (1) 슬러지처리시설 현황 및 실험장치

본 개선사례는 회분식(Lab-scale)실험, 모형(Pilot-scale)실험, 실증(Full-scale)실험으로 단계별로 실시하였으며, 실증실험의 경우 부산광역시 소재 수영하수처리장의 혐기성소화조를 대상으로 하였다. 수영하수처리장은 처리용량 550천 $m^3$ /일(1단계 286천 $m^3$ /일, 2단계 264천 $m^3$ /일)을 처리하고 있으며, 수처리방법으로 표준활성슬러지법을, 슬러지처리방법으로 중온혐기성소화법을 채택하고 있다.

부산광역시 수영하수처리장의 혐기성소화조 효율개선을 위한 회분식실험장치(a), 모형실험장치(b) 및 실증실험장치(c)를 [그림 1]에 나타내었다.

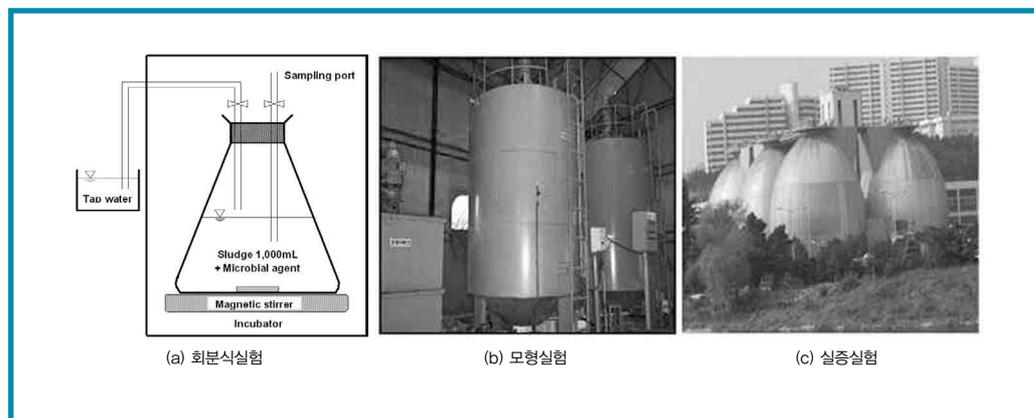


그림 1 혐기성소화 실험장치

(2) 실험방법

1) 회분식실험

회분식실험으로 유효용량 2L의 mass flask에 하수슬러지 1,000ml와 미생물제제 10ml를 주입한 다음 반응조 상단은 실리콘 마개로 밀봉하여 혐기성 상태를 유지하였으며, 발생하는 가스는 물에 포화시켜 제거하였다. Magnetic stirrer를 이용하여 3~4회/일 정도 교반을 실시하였다. 중온 소화조건인 35±1℃를 일정하게 유지하기 위해 Incubator에 넣어 두었으며, 20일 동안 실험을 행하였다.

2) 모형실험

실제 하수슬러지를 처리하고 있는 부산광역시 수영하수처리장의 소화조 장치와 동일한 2단혐기성소화조 형태로 설치하였으며, 유효용량이 1.3m³인 혼합저류조에 하수슬러지와 미생물제제를 주입하여 실험을 실시하였다. 모형실험에서 1단 및 2단소화조 본체의 규격은 내경 2.2m, 높이 3.2m, 유효용량 9.5m³인 원형탱크로 재질은 철판을 이용하여 제작하였으며, 소화방식은 중온성혐기성소화조로서 35±1℃를 유지하였다.

3) 실증실험

실증실험의 경우 부산광역시 소재 수영하수처리장의 혐기성소화조를 대상으로 실험을 실시하였으며, 소화조는 Egg-shaped(계란형)의 2단혐기성소화조로 소화용량 7,000m³의 4조(1단 : 3조, 2단 : 1조)로 구성되어 있다. 또한 소화조 진단을 위해 추적자로 사용된 방사성동위원소 Sc-46(50mCi)은 한국원자력연구소의 연구용 원자로 HANARO에서 중성자 조사하여 <sup>46</sup>Sc(n, γ)<sup>46</sup>Sc 반응으로 생산하였으며, 소화조 내 슬러지의 유체거동과 동일한 거동형태를 모사하기 위하여 EDTA와 착화합물(complex compound) 용액형태로 제조하여 실험에 사용하였다.

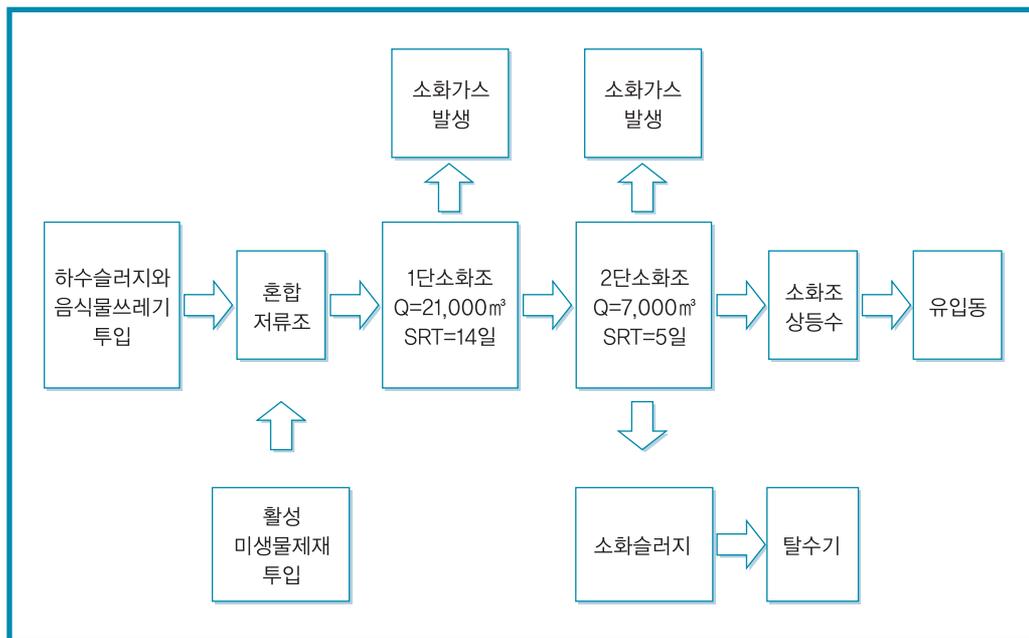


그림 2 혐기성소화조 효율개선을 위한 대상시설 공정도

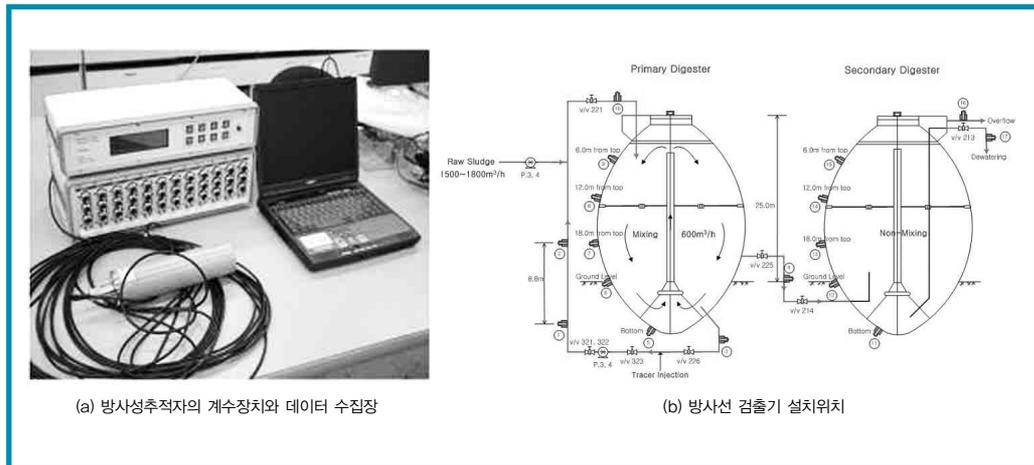


그림 3 소화조 내 사각지대 조사를 위한 방사성추적자의 실험장비와 설치위치

#### 4) 운전조건

혐기성소화조 효율개선을 위한 회분식실험, 모형실험 및 실증실험의 운전조건을 [표 1]에 나타내었다.

항목	회분식실험	모형실험	실증실험	
			기존운영	개선운영 (미생물제제 투입)
소화일수	1단소화조	20일	9일	10일
	2단소화조		9일	10일
소화온도	35±2℃	35±2℃	35±2℃	35±2℃
하수슬러지 유입량	1L	0.65m³/일	1,562m³/일	1,403m³/일
하수슬러지 인발량	-	-	1,428m³/일	1,205m³/일
미생물제제 주입량	10mL	0.5L/일	-	7.2L/일
1단소화조의 교반속도	-	120rpm	595rpm	595rpm

표 1 운전조건

### 실험결과

#### 1. 회분식실험

하수슬러지에 대한 미생물제제의 적정주입량을 결정하기 위해 미생물제제의 주입량을 달리하면서 회분식 실험을 수행한 결과를 [표 2]에 나타내었으며, 실험결과 미생물제제/하수슬러지는 1/1,250에서 소화효율

미생물제제/하수슬러지의 주입비율(scale)	분석항목			미생물제제/ 하수슬러지의 주입량
	TS(%)	VS/TS(%)	소화효율(%)	
1/2,000	3.75	56.1	43.7	1.0mL/2L
1/1,500	3.86	54.2	47.8	1.3mL/2L
1/1,250	4.03	52.8	50.7	1.6mL/2L
1/1,000	3.98	53.7	48.9	2.0mL/2L
1/500	3.86	54.8	46.5	4.0mL/2L

표 2 하수슬러지에 대한 미생물제제의 적정 주입량 결정

이 50.7%로 가장 높게 나타나, 이후 모형실험에서는 미생물제제의 주입량을 하수슬러지 2L당 1.6mL를 주입하여 실험하였다.

### 2. 모형실험

혐기성소화조에 미생물제제를 투입한 경우, 투입하지 않은 경우에 비해 소화효율은 약 5.6%, 가스발생량은 약 47.4% 정도 더 증가한 것으로 나타났으며, 소화조 상등수의 수질 또한 유기물 분해 증가를 통해 더 낮은 농도를 보였다.

구분	기존운영	개선운영 (미생물제제 투입)	비 고
pH	6.9~7.2 (7.0)	7.0~7.3 (7.1)	운전양호
알칼리도 (mg/L as CaCO <sub>3</sub> )	2,385~2,520 (2,443)	2,710~3,025 (2,884)	운전양호
소화효율(%)	46.0~50.9 (48.6)	52.8~57.3 (54.2)	5.6% 증가
소화가스 발생량(m <sup>3</sup> /d)	0.08~0.28 (0.19)	0.24~0.30 (0.28)	47.4% 증가
상등수의 COD <sub>Mn</sub> 농도(mg/L)	1,232~2,450 (1,639)	537~1,390 (859)	780mg/L 감소
상등수의 SS 농도(mg/L)	3,960~6,040 (4,888)	976~3,850 (2,405)	2,483mg/L 감소
소화슬러지 발생량(m <sup>3</sup> /d)	0.50	0.45	9.0% 감소

주) 최저값~최고값, ( )는 운전기간동안의 평균치임.

표 3 모형실험 결과

### 3. 실증실험

부산광역시 수영하수처리장 혐기성소화조에 미생물제제를 투입한 경우 투입하지 않은 경우에 비해 소화효율은 약 4.6%, 소화가스 발생량은 약 26.7% 정도 더 증가한 것으로 나타났다. 또한, 1단소화조의 경우 dead space의 양이 소화조 용적비율로 22%에서 13%로 감소하였으며, 2단소화조의 경우에는 9%에서

구분	기존운영	개선운영 (미생물제제 투입)	비 고
소화효율(%)	56.1	60.7	4.6% 증가
소화가스 발생량(m <sup>3</sup> /d)	11,160	14,140	26.7% 증가
소화가스 발전량(kWh)	2,098	4,164	98.5% 증가
탈수슬러지량(m <sup>3</sup> /d)	1,418	1,242	8.8% 감소
탈수 Cake량(ton/d)	154.6	140.5	9.1% 감소
응집제투입량(kg/d)	230	222	9.7% 감소

주) 기존운영의 경우 2002년 7월~2003년 6월, 개선운영의 경우 2004년 1월~12월의 실험결과임.

표 4 실증실험 결과

26%로 증가하였다.

1단소화조의 사용 용적효율의 증가는 2001년도 추적자 실험 이후에 소화조에 미생물제제를 투입하여 소화효율이 증가하고 바닥의 dead space에 해당되는 부분을 미생물이 분해하여 나타난 결과로 판단된다. 하지만 2단소화조의 경우에는 오히려 dead space가 증가하였는데, 이는 2005년도 현재 하수슬러지와 음식물쓰레기의 병합처리로 인해 2단소화조에 투입되는 음식물 슬러지가 2001년에 비해 약 20% 가량 증가하였고, 소화슬러지로부터 분리된 상등수의 월류량이 감소하여 상부에 정체현상이 두드러졌기 때문에 부동층이 증가된 것으로 판단된다.

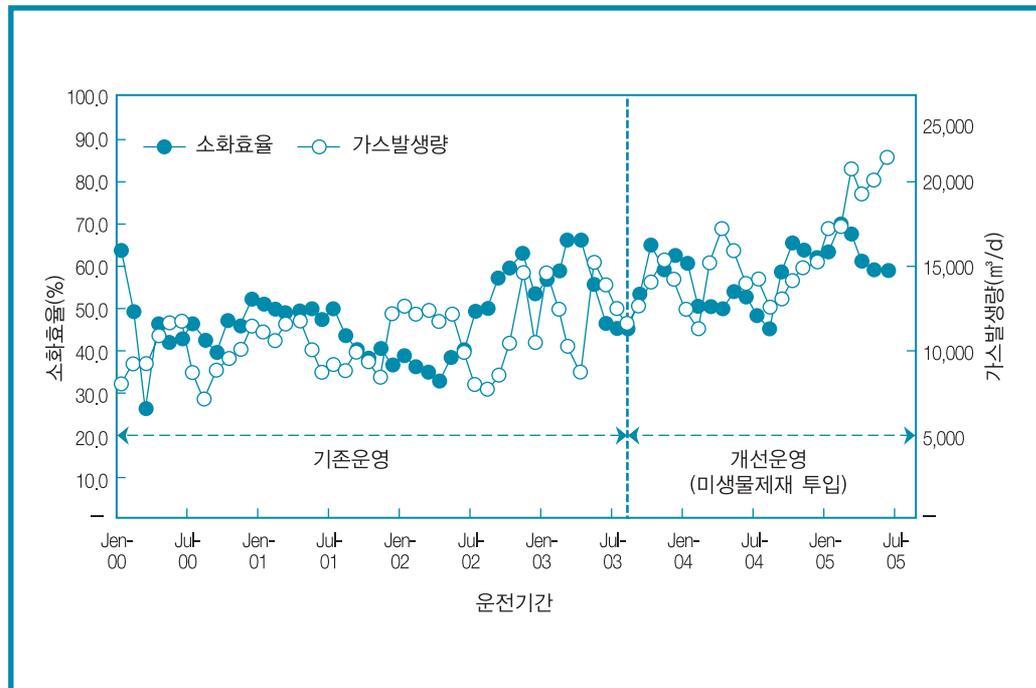


그림 4 수영하수처리장 혐기성소화조 운전기간동안의 소화효율 및 가스발생량 변화

구분	소화조 수 (개)	평균체류시간 (이론치)	평균체류시간 (실측치)	실제 소화조 용량	사각지대	
기존운영 (2001년)	1단소화조	1.0	8.5일	7.4일	87%	13%
	2단소화조	1.3	8.5일	6.3일	74%	26%
개선운영 (2005년)	1단소화조	1.0	12.8일	10.0일	78%	22%
	2단소화조	1.0	4.3일	3.9일	91%	9%

표 5 실증실험기간동안의 소화조 내 사각지대 제거효과

#### 4. 경제성 검토

종합적으로 경제성을 검토해 본 결과를 [표 6]에 나타내었으며, 탈수cake 발생량 증가 및 처리비 단가 감소에 따른 탈수cake 처리비 절감액 감소로 인해 수영하수처리장의 혐기성소화시설의 경우 소화조에 미생

구분	처리비 절감내역							미생물제재 투입비용	순절감액
	탈수Cake 처리비 절감액	고분자응집제 절감액	가스증가량 대비 전력비 산출액	상등수 COD처리 절감액	탈수기 단축 운전 전력비 절감액	소화슬러지 이송 펌프 전력비 절감액	합계		
모형실험 (천원/일)	1,101.4	216.9	709.0	23.5	21.6	2.1	2,074.5	558.7	1,515.9
실증실험 (천원/년)	102,604	9,047	161,368	-	15,122	1,648	289,789	48,502	241,287

표 6 경제성 검토

물제재를 투입으로 인하여 탈수Cake 발생량 감소와 소화가스 발생량대비 전력비 산출액 증가로 인해 연 총절감액은 289,789천원이며, 미생물제재 비용을 감안 순 절감액은 연간 241,287천원으로 나타났다. 절감액 중 소화가스에 의한 전력비 산출액이 차지하는 비중은 55.7%, 탈수Cake 처리비의 비중은 35.4%, 고분자응집제 등 그 외 항목이 차지하는 비중은 8.9%로 조사되었다.

### 5. 종합적 검토

기존기술과 미생물제재가 투입된 개선기술의 결과를 종합적으로 비교·검토하여 [표 7]에 나타내었다.

구분	기존 운영	개선 운영(미생물제재 투입)
장·단점	○ 낮은 소화효율	○ 높은 소화효율
	○ 사각지대 형성 증가로 인한 소화조 용량 감소	○ 사각지대 제거효과로 인한 소화조 용량 증대
	○ 가스발생량이 적어 동력비의 과다원인이 됨	○ 가스발생량 증가를 통한 소화가스의 재이용 증대
	○ 높은 소화조 상등수질로 인한 처리비용의 증가	○ 낮은 상등수질로 인한 처리비용의 감소
	○ 최종 슬러지 발생량이 많아 처분비용의 과다	○ 최종 슬러지 발생량 감소로 인한 처분비용의 절감
	○ 악취 발생	○ 악취 제거효과
	○ 긴 처리시간이 요구	○ 처리시간의 단축
	○ 유기물 분해가 적어 탈수성 불량	○ 유기물 분해 증가를 통한 탈수성 증대
	○ 고분자응집제 사용량이 많음	○ 고분자응집제 사용량 감소
공정의 차이	○ 미생물제재 투입시설 필요 없음	○ 미생물제재 투입시설 필요

표 7 기존기술과 개선기술의 종합적 비교·검토

### 결론

혐기성소화에 대한 많은 연구가 진행되어 왔으나, 미생물제재의 혐기성소화조 내 적용은 이번이 처음이라고 할 수 있으며, 기존의 혐기성소화공정에 미생물제재를 투입한 결과 소화조 내 사각지대 제거효과, 유기물 및 소화효율 향상에 따른 가스발생량 증가, 2단소화조의 침전성 향상, 소화조 상등수의 COD 및 SS 농도감소에 따른 수질개선효과, 탈취효과, 하수슬러지의 탈수성 증대 및 고분자응집제 사용량 절감효과와 최종 슬러지 처분비용 절감효과 등 많은 장점을 나타내었다.

종합적으로 경제성을 검토해 본 결과 탈수cake 발생량 증가 및 처리비 단가 감소에 따른 탈수cake 처리비 절감액 감소로 인해 수영하수처리장의 혐기성소화시설의 경우 소화조에 미생물제제를 투입으로 인하여 탈수Cake 발생량 감소와 소화가스 발생량대비 전력비 산출액 증가로 인해 연간 총절감액은 289,789천원이며, 미생물제제 비용을 감한 순 절감액은 연간 241,287천원으로 나타났다.

상기 계량화·계수화된 예산절감 외에도 미생물제제를 투입함으로써 도출될 수 있는 비계량화 효과는 현장 부대설비(탈수기, 슬러지 및 약품펌프, 약품탱크 등)의 사용년한 연장 및 소화조의 사각지대(Dead Zone) 해소방안효과 등으로 인한 저비용·고효율의 동시효과를 기대할 수 있을 것으로 보여진다.

본 개선사례는 기존시설의 개·보수 및 별도의 설치공간이 필요치 않으며, 기존의 여유공간 내에서 미생물제제 투입 저장조와 펌프1대로 현장에 즉시 적용할 수 있다는 장점을 가지고 있다.

또한 미생물제제를 이용한 생물학적 처리방법을 사용하기 때문에 화학적 처리와는 달리 2차적인 환경오염문제를 유발시키지 않으며, 기존에 문제시 되었던 악취문제를 미생물제제 투입으로 인해 확실히 저감시킬 수 있어 민원문제에 손쉽게 대처할 수 있을 것으로 기대된다. ㉠