

## 복합발효미생물을 이용한 하천유수지 오염토의 현장적용성 평가

# Field Applicability Evaluation Using Effective Microorganism Brewing Cycle for Contaminated Soil in Water Retention Basin

신은철<sup>1)</sup> · 정민교<sup>1)</sup> · 김경식<sup>2)</sup> · 강정구<sup>†</sup>

Eunchul Shin · Minkyoo Jung · Kyeongsig Kim · Jeongku Kang

Received: August 22<sup>nd</sup>, 2016; Revised: September 9<sup>th</sup>, 2016; Accepted: September 30<sup>th</sup>, 2016

**ABSTRACT** : In this study, by using a Effective Microorganisms Brewing Cycle, it confirmed the purification effect of pollutants that are adsorbed on the basins stench removal and retarding soil. On the basis of on-site application test, a soil decontamination system will be suggested. Using a Effective Microorganisms Brewing Cycle, the odor concentration is reduced 2.5 times than that of natural purification treatment method. It was measured and found that the quality of the pore water discharged from the soil is improved. In addition, it was found that a composite of copper and lead with the fermentation microorganisms adsorbed on soil particles from the surface of the stirred experiments lagoon mixed soil is reduced to 65% and 66%, respectively, The TPH organic component was confirmed that the reduction effect of 85%. Restoration of reservoir contaminated soils using the effective microorganism brewing cycle needs to be more developed and implemented as a long-term purification system. This study may be a good reference of developing more complete microorganism brewing system which will efficiently reduce the odor and soil contamination based on optimal stirring and mixing ratio of the compound solutions and contaminated soils in reservoir.

**Keywords** : Reservoir soil, Micro-organisms brewing cycle material, Biological remediation, Heavy metal, Odor reduction

**요지** : 이 연구는 복합발효미생물을 이용하여 유수지 악취 제거와 유수지 토양에 흡착된 오염물질의 정화효과를 확인하고, 현장 적용성 시험을 바탕으로 토양오염 정화시스템을 개발하기 위한 것이다. 토양 내에 침전된 유기오염물질을 분석하여 악취유발 원인과 토양오염 물질을 확인하였다. 개발된 복합발효미생물과의 혼합발효를 이용하여 악취와 오염물질을 분해하는 것이 가능함을 확인하였으며, 유수지 오염토의 물리 화학적 구성과 토양에 흡착된 오염물질을 확인하여 악취의 원인을 규명하였다. 또한, 복합발효미생물과 유수지토의 혼합실험을 통해 혼합방법에 따른 오염물질 제거효율을 분석하였다. 아울러, 복합미생물을 이용한 악취 제거 방법은 한 종류의 미생물을 이용하는 것보다 오염 제거에 효과적임을 확인하였다. 복합발효미생물을 이용한 방법은 자연정화처리 방법에 비해 악취농도가 2.5배 저감하는 것으로 측정되었으며, 토양으로부터 배출된 간극수의 수질이 개선된 것으로 나타났다. 또한, 복합발효미생물과 유수지 혼합토의 교반실험에서 토양입자 표면에 흡착된 구리와 납이 각각 65%와 66%로 저감되는 것을 확인하였으며, 유기물인 TPH 성분은 85%의 저감 효과가 있는 것을 확인하였다. 복합미생물을 이용한 유수지 오염토의 복원은 교반과 혼합비에 대한 기초자료 축적을 통해 악취와 토양오염을 효율적으로 저감시킬 수 있는 장기적인 정화시스템을 개발하고 적용할 필요가 있다.

**주요어** : 유수지토, 복합발효미생물, 생물학적처리, 중금속제거, 악취저감

## 1. 서론

산업사회가 된 이래 인구의 증가는 재화의 생산 및 소비의 증가를 초래하였으며 이로 인한 폐기물의 발생량도 점차 증가되어 왔다. 소비의 증가로 인해 천연자원이 점차 폐기물화 되어 가면서 환경파괴가 가속화되고 있다. 이러한 순환고리는 기후변화를 초래하고 자연복원 한계를 넘어 도심 지역에서 오염문제가 점차 가중되고 있는 원인이 되고 있다 (Meadows et al., 2004). 특히 도시주변의 하천과 홍수대비

를 위해 조성한 하천 하류지역의 유수지는 도시생활폐기물과 공장폐수 등으로 인해 오염이 심화되면서 주변악취가 생활에 지장을 초래할 정도로 발생하고 있다. 유수지는 방류된 하수가 조수의 영향으로 역류하는 것을 방지하기 위해 설치한 홍수피해방지시설이며, 정수처리장에서 처리된 하수가 1차적으로 방류되는 곳이기도 하다. 전국 도시 중 가장 넓은 유수지 면적을 보유하고 있는 인천광역시의 경우 전체면적의 43%를 유수지가 차지하고 있다(KOSIS, 2015). 인천광역시는 지정학적 위치상 상류부의 각종 오염물질이

1) Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University

2) Won Il Industrial Development Company

† Department of Civil and Environmental Engineering, Incheon National University (Corresponding Author : jeong99k@inu.ac.kr)

최종적으로 퇴적되는 불리한 지역에 위치하고 있다. 하폐수 처리시설, 쓰레기매립시설 등이 밀집하여 정화되지 못한 잉여 오염물질이 계속 누적되고 있으며, 재해가 발생하면 상류지역의 쓰레기가 내려와 쌓이게 된다. 또한, 오래전부터 산업도시로 성장하였기 때문에 공장지역을 중심으로 하천 및 우수지의 오염이 심화되어 왔다. 우수지 퇴적토의 경우 다양한 유기오염물질로 오염되어 있기 때문에 재활용이 쉽지 않으며 우수지 준설토에 대한 재활용 방법들이 제시되지 못하여 왔다. 따라서, 우수지 퇴적토에 대한 체계적인 관리를 위해 우수지 오염에 관한 기초조사와 우수지 오염토에 대한 적절한 정화처리 방법에 관한 체계적인 연구가 진행되어야 한다. 이 연구는 다양한 미생물이 군집된 복합발효미생물로 하상의 유기물 제거에 적합한 처리방법을 도출하고자 하였으며, 복합발효미생물액의 최적주입량에 관한 기초적인 연구를 수행함으로써 우수지에 침전된 유기질 오니를 친환경적으로 처리하는 정화방법을 제시하고자 하였다.

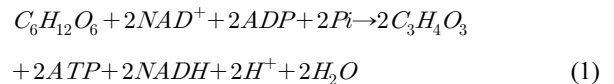
## 2. 이론적 배경

### 2.1 복합발효미생물의 구성 및 특징

EMBC(Effective Micro-organisms Brewing Cycle)란 다카시마 야스히데(Takashima Yasuhide) 박사가 개발한 복합미생물 군집체로서 다양한 발효를 일으키는 미생물들이 연동작용을 통해 유기적인 공생관계를 유지할 수 있도록 하는 미생물 혼합 발효물을 의미한다. Micro-organisms는 모든 미생물군을 지칭하며 brewing cycle은 복합미생물의 발효합성 사이클 상태를 의미하며, 단일발효에 의한 효과에서 탈피하여 병행발효를 통해 미생물 간의 순환적인 촉매작용과 길항작용으로 미생물들이 상생할 수 있도록 한다는 개념이다. 이 연구에서는 야스히데가 개발한 복합발효물질(EMBC 모ルト)를 사용하였으며, 국내에서는 복합발효미생물로 알려져 있다. 자연계에는 다종류의 미생물이 공생하기 때문에 단일배양으로 배양된 미생물이 투입되면 침입 미생물의 세기가 약할 경우 사멸하게 된다. 이 점에 착안하여 복합발효미생물은 다양한 미생물의 공생관계를 통해 발효, 분해, 합성, 재발효의 순환사이클을 반복함으로써 유기성오니를 가스 및 물로 변환시키는 작용을 한다. 복합발효미생물은 방선균, 효모균, 질소고정균, 광합성균, 화학광합성미생물 등의 미생물을 포함한다고 알려져 있으며, 유산균 효모 등의 발효미생물계와 광합성균, 조균류, 질소고정균 등의 합성형 미생물계가 강하게 연동하면서 발효가 이루어져 부패, 변패, 산화 등에 따른 미생물의 유해작용을 유효작용으로 바꾸는 역

할을 한다. 복합발효법(effective micro-organisms brewing cycle fermentation technology)으로 야부시에서 상업화된 바 있다(Yabu city, 2009).

미생물에 의한 호흡 및 발효는 해당과정, TCA회로, 산화적인 산화과정으로 이루어진다. 복합미생물에 의한 발효는 유기산과 아미노산, 당류, 비타민 등의 항산화 물질 생성을 통해 유기물의 부패를 방지하며, 생성된 아미노산, 유기산 등은 식물에 바로 흡수되어 단백질 및 당으로 전환되므로 무기질소, 이산화탄소와 같은 무기영양성분이 식물에 흡수되거나 합성될 때 요구되는 추가에너지가 필요하지 않게 된다. Eq. (1)은 미생물에 의한 포도당의 해당과정을 나타낸 것으로, Pi는 인산이온, NAD는 반응 중 생성된 전자를 나타낸다. 해당과정에서 생성된 피루브산(C<sub>3</sub>H<sub>4</sub>O<sub>3</sub>)은 산소나 다른 전자수용체가 있어 호기성 호흡이 이루어질 경우 발효 산화물로 산화되지 않고 카르복시기가 제거되어 이산화탄소 형태로 산화된다(Gerba & Gentry, 2015).



복합발효미생물은 일반 배양조에서 호기성 미생물에 의해 10<sup>7</sup>개의 생체균수를 가진 일반 배양조에서 증식과정을 거쳐 십만배 이상의 호기성과 혐기성균이 성장하게 되어 도시하수, 산업폐수 및 슬러지에서 발생하는 악취 및 슬러지를 제거하는 기능을 한다.

### 2.2 복합발효미생물에 의한 악취물질의 분해

악취는 황화수소, 메르캅탄, 아민류, 기타 자극성 있는 기체 상의 물질이 사람의 후각을 자극하여 불쾌감과 혐오감을 주는 냄새로 사람에게 특정냄새 자체로 심리적 정신적 피해를 주는 감각오염의 한 형태이다(Kim et al., 2005). 악취를 유발하는 특정악취물질은 암모니아, 황화합물, 트라이메틸아민, 스티렌, 휘발성악취물질(VOCs)류, 알데히드류로 나눌 수 있다(환경부, 2010). 대표적인 악취물질의 특성은 Table 1과 같다.

환경오염 물질은 대부분 산화성을 띠고 있으며, 산화되는 과정에서 활성산소를 생성하게 되고 이러한 산화 과정에서 악취가 유발된다. 생물적 탈취는 주로 그 물질을 분해 혹은 변환시키는 미생물을 이용하는데 황화합물 제거는 탄소를 에너지원으로 하는 미생물을 이용한다. 암모니아, 황화수소 등은 황화합물을 산화시켜 에너지를 얻는 화학합성 독립영양세균에 의한 것으로 악취제거 시 한 종류의 미생물을 사용하여 제거하지 않고 미생물집단(consortia)을 이용하

게 된다. 악취유발물질은 분자량이 작고 휘발성이 높으며 환원적인 화합물로 되어있기 때문에 이러한 화합물이 미생물에 의해 산화되면 물에 녹기 쉬워 악취를 발생하지 않는 황산과 질산이 생성된다(이창희와 유혜진, 2000).

발효(fermentation)는 미생물에 의한 변질현상으로 냄새를 유발하지만, 그 변화가 인체에 유익한 경우에 해당한다. 발효에 의한 부산물이 주축으로 구성된 복합발효미생물 수용액은 발효 과정에서 폴리페놀, 유기산 등 생성된 다량의 항산화 물질을 포함하고 있어 악취발생원과의 신속한 결합을 통해 악취를 유발하는 가스상 물질의 분자구조 변화로 악취를 소멸시키는 역할을 한다. 발효과정에서 발생하는 각종 유기산은 이온화되어 글리오키알( $\text{CHO}=\text{CHO}$ )과 같은 작용기는 냄새를 유발하는 물질의 알데히드기, 아민기 등의 작용기와 화학반응을 일으켜 냄새가 없는 물질이 된다. 또한, 발효부산물에 의해 약산성을 띄게 되어 아민류 등의 악취원이 가용성이 되어 무취의 물질로 전환되며 용해된 악취물질은 이온화되어 2차적인 생성물을 생성한다. Fig. 1은 주요 악취물질의 화학분자식이다(Tangerman, 2009).

### 3. 적용현장의 오염현황

인천의 남동공단 지역에 위치한 유수지는 EL-3.8m까지 실트층으로 형성되어 있으며, 그 하부에 점토층이 약 13m 정도로 구성된 연약지반이다. 점토층 하부는 약 4m 두께의 모래층이 존재하고 이후부터는 연암층을 이룬다. 유수지 해수 저면에 형성된 오염토는 1.7m~2.2m의 두께를 형성하고 있으며, 조수간만에 따라 간조 시 지표면이 노출되어 악취가 발생하고 있다. 유기물 퇴적층은 지표면으로부터 0.7m~1.0m까지이며, 초연약층을 이루고 있어 장비의 진입이나 일반적인 지반조사에 의한 시료채취가 불가능한 상태이다.

#### 3.1 유수지 오염토의 특성

유수지토의 오염 특성을 파악하기 위해 해수 저면에 형성된 자연 시료를 채취하여 물리적 특성을 분석하였다. 채취된 시료의 입도는 대부분 실트와 점토로 구성되어 있으며, 입도 분포 분석 결과 균등계수가 6.0 이상이고 곡률계수가 1~3을 벗어나 입도분포가 불량한 것으로 나타났다. No. 200번 체 80% 이상이 넘는 점토 및 실트질 재료로 입경이 대체로

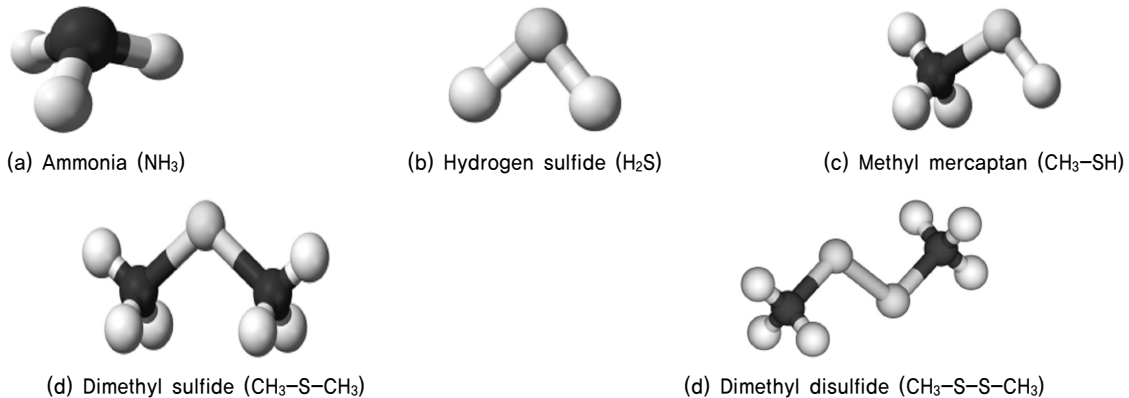


Fig. 1. Chemical molecular formula of industrial odor

Table 1. Chemical property of malodor material

Material	Chemical formula	Molecular weight	Gravity (L : liquid)	Melting point (°C)	Boiling point (°C)	Solubility	AAGIH* allowable (ppm)
Ammonia	$\text{NH}_3$	17	0.817 (L)	-77.7	-33.4	Water (520 g/L)**, alcohol ether	25
Methyl mercaptan	$\text{CH}_3\text{SH}$	48	0.806	-123.0	5.95	Water (24 g/L)*	0.5
Sulfuric hydrate	$\text{H}_2\text{S}$	34	0.96 (L)	-85.0	-60.1	Water (4 g/L)*	10
Sulfuric methyl	$(\text{CH}_3)_2\text{S}$	62	0.846	-98.3	37.3	Water (20 g/L)*	-
Dimethyldisulfide	$(\text{CH}_3)_2\text{S}_2$	94	1.057	-85.0	110.0	-	-
Trimethylamine	$(\text{CH}_3)_3\text{N}$	59	0.662	-117.0	2.0	Water, Alcohol	-
Acetaldehyde	$\text{CH}_3\text{CHO}$	44	0.788	-123.5	21.0	Water, Alcohol	100
Styrene	$\text{C}_8\text{H}_8$	104	0.909	-31.0	145.5	Alcohol, Ether, Acetone	100

\* AAGIH (American Association of Governmental Industrial Hygienists)

\*\* Solubility in water at 20°C

Table 2. Physical property for soil in water retention basin

No.	USCS	Wn (%)	Gs	Atterberg limits (%)		Grain size distribution %, finer than				COD (mg/L)	DO (mg/L)
				LL	PI	0.002 mm	0.075 mm	0.425 mm	2.00 mm		
1	ML	128.2	2.47	37.4	11.40	12.4	83.5	100	100	41.1	7.5
2	ML	136.4	2.45	43.5	13.25	13.3	85.0	99.5	100		

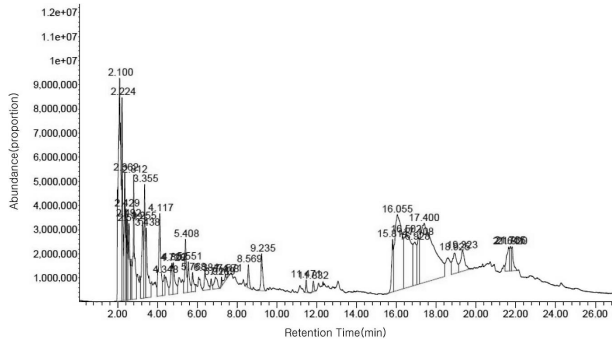


Fig. 2. TD-GC/MS test result for soil in water retention basin

균일한 상태로 확인되었으며, 통일분류법에 의한 분류상 ML로 분류되었다. 물리적 특성 분석결과 비중이 일반적인 실트나 점토질보다 낮게 나온 것이 특징이며 이는 시료 내에 유기물을 많이 함유하고 있기 때문인 것으로 판단된다. 우수지 시료의 물리적 특성결과는 Table 2와 같이 요약하였다.

우수지에 퇴적된 오염도 주변의 2개 지점에서 시료를 채취하여 수질을 분석한 결과 화학적 산소요구량은 40.4mg/L ~ 43.6mg/L의 범위에서 나타났으며 평균 용존산소량은 7.5 mg/L로 나타났다. 이는 인접 하천의 수질과 비교하였을 때 수질의 용존산소량은 유사한 것으로 나타나며 우수지의 수질상태는 과거에 비해 크게 변하지 않은 것으로 확인되었다.

채취한 우수지토를 대상으로 유기화합물의 구성을 분석하여 악취를 유발시키는 물질을 확인하고자 하였다. 분석방법은 열탈착-기체크로마토그래프/질량분석(Thermal Desorption-Gas Chromatography/Mass Spectrometry, TD-GC/MS)방법을 적용하였으며 분석장비는 PerkinElmer TurboMatrix Automated Thermal Desorber 350 + Agilent 7890 GC System with 5975 MSD를 사용하였다. 기체포집분석은 우수지에서 샘플링된 시료에서 1g~2g을 취하여 350°C에서 10분간 가열해 발생한 기체성분을 포집하여 분석자료로 활용하였다. 검출빈도는 메탄에틸 성분 86%, 디메틸이황화물 93%, 디메틸삼황화물이 96%의 검출빈도를 보였다. 검출빈도는 GC/MS Library 상에서 가장 유사한 화합물에 대한 빈도이며 분석결과는 명시된 화합물에 대한 가장 확률이 높은 상태의 추정값을 나타낸다(Davoli et al., 2003). Table 3은 주요성분 검출결과이다.

시료는 분석 전 blank test를 통해 시료 미주입 시 다른 성분이 검출되지 않는 것을 확인하였다. 검출성분별 분석결과는 2분~22분 범위에서 일정한 간격으로 고른 분포를 보

Table 3. Expected chemical compound for the soil in water retention basin sample

No.	Retention time (min)	Expected chemical compound	Probability (%)	Area (%)
1	2.23	Methanethiol	86	4.16
2	2.43	Methane, Thiobis	74	1.49
3	2.49	Carbon disulfide	72	1.28
4	3.44	Thiophene	93	2.68
5	4.80	Dimethyl disulfide	93	1.40
6	11.47	Dimethyl trisulfide	96	0.30

Table 4. Heavy metal contained of soil in water retention basin

Contaminant	Concentration (mg/L)			Criteria* (river, reservoir, mg/L)
	Site 1	Site 2	Site 3	
Cu	16.61	595	415.177	500
Zn	2,148	1,740	6,626	600
Ni	689	148	921	200
Cd	5.38	3.58	12.71	10
Pb	0.380	364	3.101	400
Hg	9.143	0.59	2.189	10
As	0.004	5.57	0.002	50
TPH	11,024	22	5,874	800

\* The worrisome level of soil contamination prescribed in article 1-5 of the soil environmental conservation enforcement rule, 2<sup>nd</sup> area

인다. Fig. 2는 시간에 따른 성분검출결과이다. 초기시간에는 메탄에틸 성분 86%가 검출되었으며, 시간이 경과함에 따라 이황화탄소 및 디메틸이황화물이 검출되었으며, 디메틸삼황화물이 국부적인 범위에서 검출되었다.

간조 시에 흙 입자 사이에서 유류성분이 유출되는 것을 육안으로 확인할 수 있을 정도로 휘발성 유기오염물질이 발견되었으며, 토양분석 결과 TPH(Total Petroleum Hydrocarbon)가 기준치의 13배를 초과하는 것으로 나타났다. TPH는 석유계총탄화수소로 유류에 속하는 항공유, 등유, 경유, 중유, 윤활유, 원유 등에 대한 토양오염도 검사항목으로 우수지토가 고농도의 유류성분으로 오염되어 있음을 확인하였다. 시료분석은 3개 지점의 토양성분을 샘플링한 후 중금속과 무기염류, 그리고 휘발성 유기화합물에 대해 수질과 토질을 대상으로 기준값과 비교하였다. 수질의 경우 기준치 이내로 검출되었으며, 구리, 아연, 니켈, 납 등이 기준치를 초과하는 것으로 나타났다. Table 4는 조사지역 우수지의 중금속과 TPH 물질에 대한 분석결과이다.

## 4. 복합발효미생물의 현장적용성 평가

복합발효미생물은 1차 효소가 오염물을 저분자화 시킨 후 세포질 내의 대사작용에 의해 이산화탄소와 물로 최종 분해되는 과정을 거치며 증식배양의 의한 처리효과는 현장의 날씨, 온도, 습도와 퇴적물의 상태에 따라 반응 정도가 상이하게 나타난다. 복합발효미생물의 현장적용성 평가를 위해 우수지로 유입되는 하천 주변의 공기를 포집하여 적용 전후의 복합악취를 측정하였으며, COD를 이용하여 하천유수지 저니토에 존재하는 유기물 제거효과를 비교분석하였다.

### 4.1 복합발효미생물의 배양

복합발효미생물은 액상바이오 또는 고형바이오 형태로 제조가 이루어진다. 액상바이오를 이용한 경우, 복합발효미생물은 호기성 및 혐기성 미생물로 이루어진 단일계 미생물 액체로서 미생물 수는  $10^7$ 개/mL의 미생물이 존재한다. 일반적으로 발효 시  $10^8$ 개/mL~ $10^{13}$ 개/mL 이상으로 증식하는 특징을 지닌다. 배양방법은 혐기 발효는 37°C 이상의 물 1,000mL로 교반하면서 당밀 30mL를 교반 혼합한 후 효소수 15mL, 고형미생물 5g을 혼합한 후 혐기성 발효가 되도록 한다(한해경, 2013).

증식배양 시 발효조 내에는 미생물과 톱밥을 넣어 혐기 발효를 2일간 20°C~25°C에서 배양한 후 호기발효로 단계로 전환하여 혐기상태의 미생물과 호기상태의 미생물이 공존할 수 있도록 하고, 배양된 복합발효물은 20°C 내외의 온도를 유지하면서 약 2주간 발효물을 주기적으로 통기시키면서 배양 증식하였다. 현장 적용을 위한 복합발효미생물 배양과정은 혐기발효조, 호기발효조 및 통성혐기조를 설치한 후 최종발효물과 EMBC원액을 이용하여 연속적인 배양이 이루어지도록 하였다.

### 4.2 하천주변의 악취 감소 효과

하천의 정화효과에 대한 검사는 2개 지점을 대상으로 조사하였으며 조사지역의 복합발효미생물 적용 전과 적용 후의 복합악취농도를 측정하여 악취개선 정도를 파악하였다. Table 5는 복합발효미생물을 현장에 적용한 시범구역의 복합악취 저감효과를 분석한 것이다.

1 지점의 경우 4회의 실험을 실시하였으며 복합발효미생물을 적용하기 전에는 복합악취가 20~44배 사이의 악취농도를 나타내었지만 복합발효미생물을 투입한 후 약 24일이 경과된 지점에서 재측정을 한 결과 악취농도는 4~5배의 악취농도로 감소하였다.

2 지점의 경우 동일한 횟수로 복합악취측정을 한 결과, 복합발효미생물을 적용하기 전 초기조건은 10~14배 정도의 복합악취강도가 검출되었으나 복합발효미생물이 투입된 후 20일 이후부터는 3~5배의 복합악취 농도를 나타내었다. 복합발효미생물 배양액을 투입하기 전과 투입한 이후의 악취농도를 비교하면 20%~40%인 지역의 악취농도가 4%~5%로 약 85% 저감되었으며 10%~14%인 지역은 3%~4%로 70.8% 감소되어 악취저감 효과가 있는 것으로 나타났다.

### 4.3 하천 저니토의 오염정화 효과

복합발효미생물 적용 시범구역에서 일정한 시간 간격으로 화학적 산소요구량을 측정하였다. 1지역은 초기 COD가 5.5mg/L에서 3개월 경과 후 1.05mg/L로 COD가 저감되었으며, 2지역의 경우 2.27mg/L인 상태에서 0.7mg/L인 상태까지 저감되었다. 측정 시간에 따라 약간의 변화를 보이고 있으나 5개월 이후의 평균값을 비교하면 COD가 약 2.5배 정도로 개선되었다. 호소수의 경우 화학적 산소요구량이 2mg/L 이하일 때 매우 좋은 상태이므로 적용성 분석을 위한 시범구역의 COD 상태를 비교하였을 때, 복합발효미생물 적용 초기에 5mg/L 이상의 보통 수질에서 3개월 이상이 경과한 후 2mg/L 이하의 매우 좋은 상태의 수질을 유지하는 것으

Table 5. Reduction effect of odor after treatment with using EMBC in the stream

Situation	Complex odor (time)		Reduction ratio (%)	Remark
	Before mixing	After mixing		
Site 1	1-1	20	5	Monitoring after 24 days
	1-2	20	4	
	1-3	44	5	
	1-4	28	5	
Site 2	2-1	14	5	Monitoring after 20 days
	2-2	10	3	
	2-3	10	4	
	2-4	11	4	

로 나타났다.

이 지역의 하천은 건천으로서 평상 시 하천바닥에 형성된 슬러지가 악취의 원인으로 작용하여 왔다. 하천바닥에 형성된 저니토의 경우 복합발효미생물을 투입하기 전에 바닥의 자갈이나 모래가 보이지 않을 정도로 유기물이 퇴적되어 있었으나, 복합발효미생물을 투입하고 6개월이 경과된 후에는 하천바닥의 모래가 드러날 정도로 슬러지가 제거되었다. 공기포집에 의한 복합악취측정 결과, 복합발효미생물 적용 전에 비해 악취농도가 10배 이상 개선된 것으로 나타났다. 이는 복합발효미생물이 투입된 이후 발생한 현상으로 미생물에 의한 정화가 효율적으로 이루어진 것으로 판단된다. 배양수조에서 증식과정을 거친 복합미생물이 하천에 잘 적응하였기 때문이며, 이로 인해 정화효과도 빠르게 나타난 것으로 확인되었다. Fig. 3은 1지역 하천을 대상으로 3개 지점을 선정하여 복합발효미생물을 하천에 투입한 이후 시간경과에 따른 COD의 감소경향을 확인한 그래프이다. 초기부터 24일 사이에 감소폭이 가장 크게 나타나며 시간경과에 따른 COD 값이 점차적으로 감소하는 것으로 나타났다. 140일 경과시점의 측정값이 다시 상승한 것으로 나타났으나 COD의 측정 시 농도가 시료의 상태, 계절, 시간 등 다양한 요소에 따라 오차범위가 크게 나타남을 감안할 때 채취 당시 일시적인 조건이 불리해진 상태에서 측정하였기 때문인 것으로 판단된다.

#### 4.4 중금속 및 TPH 제거 효과

공단이 위치한 전국 우수지 지역을 중심으로 오염도를

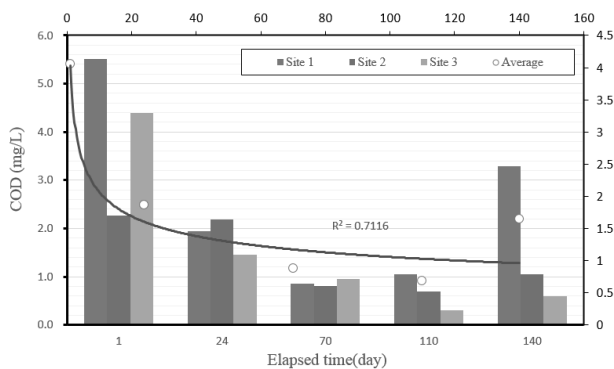


Fig. 3. Reduction of COD using the compound enzyme by elapsed time

조사한 결과에 따르면 우수지 내 저니토가 각종 중금속 성분이 많이 누적되어 있는 것으로 확인되고 있다. 이 연구에서는 우수지 내 퇴적된 저니토를 복합미생물과 혼합하여 중금속의 오염도 변화를 측정하였다. 조사대상인 1지역의 우수지토는 구리, 아연, 납, 니켈 등이 토양오염우려기준 2지역에 해당하는 농도를 초과하는 것으로 나타났다. Table 6은 토양환경보전시행규칙에 따른 토양오염 우려기준을 나타낸다.

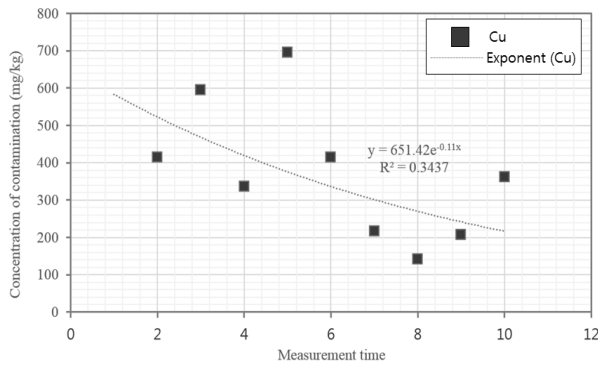
배양된 복합발효미생물액을 저니토와 100:10의 증량비율로 혼합하여 중금속의 농도를 측정하였다. 구리성분은 415mg/kg~685mg/kg의 농도에서 364mg/kg~414mg/kg의 범위로 감소하였으며, 아연성분은 1,660mg/kg~6,626mg/kg의 범위에서 399mg/kg~1,540mg/kg의 범위로 감소하여 3지역의 중금속 우려기준 농도로 감소하였다. 니켈함유량은 148mg/kg~921mg/kg의 농도에서 복합발효미생물을 적용한 결과 니켈성분은 83mg/kg~148mg/kg로 감소하는 것으로 나타났다. 납의 경우 121mg/kg~364mg/kg의 농도에서 17mg/kg~63mg/kg으로 감소하는 것으로 나타나 1지역에 해당하는 우려기준을 만족하는 것으로 나타났다.

복합발효미생물에 의한 중금속의 제거는 물질변화, 증발, 킬레이트화 등의 기작이 존재한다. 단기간의 실험과정에서 중금속이 감소된 주요 원인은 발효과정에서 중금속이온의 결합능력 향상에 따른 킬레이트화로 판단된다. 킬레이트는 중심금속 원자가 리간드라고 하는 큰 분자에 달라붙어 고리구조를 이루는 착화합물로서 킬레이트 효과에 의해 흡착상태에서 안정된 화합물로 분리된다. 연구문헌에 따르면 EM 등과 같은 많은 생물학적 물질이 킬레이트화합물을 형성하는 것으로 보고되고 있다(Kim & Song, 2007). Fig. 4는 복합발효미생물 적용 후의 시간경과에 따른 우수지의 주요 중금속 함유량과 미생물처리 후의 중금속 변화량을 나타낸다.

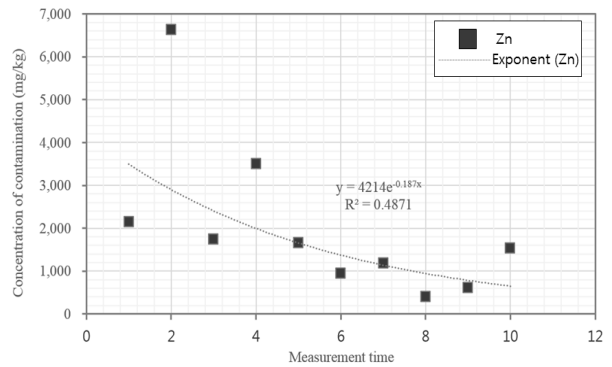
본 대상연구지역의 TPH 농도는 710mg/kg~11,024mg/kg의 농도를 보이며 일부지역에서 위해성이 매우 높은 것으로 나타난다. 지렁이를 이용하여 등유, 경유, 병커C유로 오염된 토양을 대상으로 실험한 결과, TPH의 위해성은 노출 14일간의 반수치사농도(L50)가 1,000mg/kg인 것으로 보고된 바 있다(Moon, 2012). 복합발효미생물을 적용한 이후 시료의 TPH 농도는 250mg/kg~3,030mg/kg으로 급격히 떨어져

Table 6. Worrysome level of heavy metals by soil environmental conservation enforcement rule (Ministry of Environment, 2015)

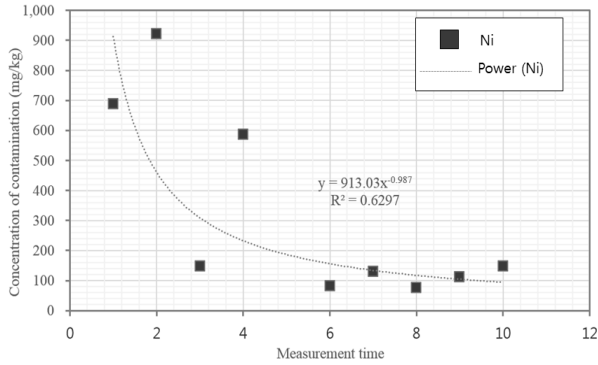
Level	Concentration of heavy metals and TPH (mg/kg)					Remark
	Cu	ZN	Ni	Pb	TPH	
1 <sup>st</sup> area	150	300	100	200	1,000	Farmland
2 <sup>nd</sup> area	500	600	200	400	1,000	River, Reservoir
3 <sup>rd</sup> area	2,000	2,000	500	700	1,000	Factory



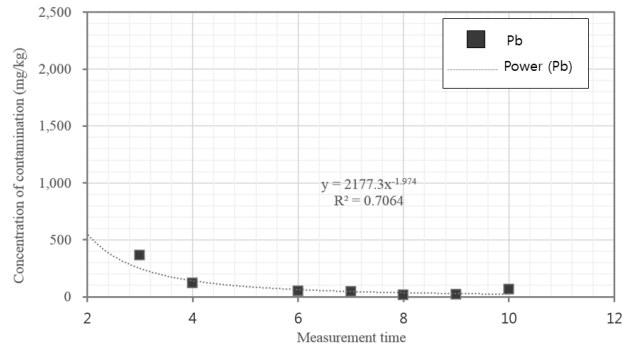
(a) Cu



(b) Zn



(c) Ni



(d) Pb

Fig. 4. Reduction of heavy metal by treatment using EMBC

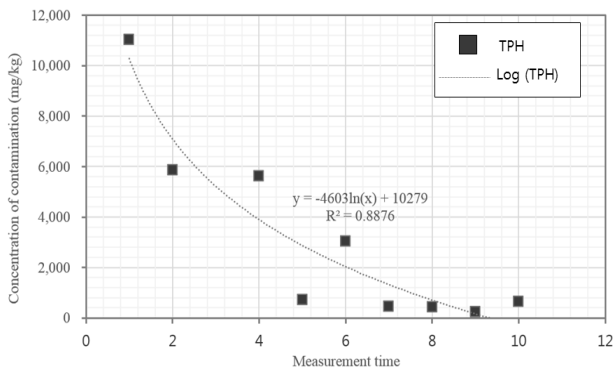


Fig. 5. Reduction of total petroleum hydrocarbon by treatment using EMBC

치사율을 하회하는 것으로 나타났다. 시간경과에 따른 복합 발효미생물에 의한 효과가 있는 것으로 나타났다. 다만, 초기농도가 초반에 급격히 감소하므로 자연증발에 의한 농도 감소의 영향도 고려할 필요가 있다.

## 5. 복합발효미생물의 현장 적용에 따른 경제성 분석

유수지(약 600m<sup>2</sup> 규모)의 오염토를 준설 처리하기 위한 폐기물 처리 비용은 처리단가 35,000원/톤을 기준으로 할 경

우 수백억이 소요되는 것으로 추산되며, 폐기물 반입기준 함수비 85%를 충족하기 위한 대체 부지 확보도 쉽지 않은 실정이다(인천광역시, 2009).

중금속제거는 주로 지상처리(ex-situ)방식이 적용되어 왔다. 토양세척방법은 중금속으로 오염된 토양을 복원하는데 자주 사용되는 화학적 처리기술이다. 토양세척은 고정화/안정화에 비해 경제적이고 환경적 관점에서 효과적인 기술로서 고농도로 오염된 토양에 대해 비교적 빠르고 영구적으로 중금속을 제거할 수 있는 장점을 가지고 있다. 주변의 영향과 중금속의 결합상태 등 다양한 환경요소에 의해 복원효율이 결정되므로 소량의 토양정화에 적합하다(한국지하수토양환경학회, 2007). 화학적 처리방법인 용매추출법은 화학약품(아미노산, 염화수소 용액) 등을 사용하여 토양으로부터 중금속을 분리해낸다. 중금속의 화학종과 어떠한 토양에 중금속이 결합하고 있는지 어떤 형태로 존재하는지가 화학적 처리과정에서 중금속의 제거효율과 밀접한 관계를 가지고 있다. 그러나 토양이 쉽게 산성화될 우려가 있기 때문에 광범위한 지역의 적용은 부적합하다. 복합발효미생물에 의한 지상처리방식은 고형바이오를 이용한 퇴비화법을 적용할 수 있다. 고형바이오제품 혼합 시 중량이 크게 증가하지 않으면서 유기물과 수분을 제거할 수 있으므로 고정화처리방법에 비해 반출되는 처리량을 25% 감소시킬 수 있으나 복합미생물

Table 7. Cost for manufacture of complete ferment

Division	Mixing ratio (L)	Unit cost (KRW)	Remark
Complete ferment	1.0	1,500	15,000~20,000 won/m <sup>3</sup>
Supply water	20.0	870	

혼합을 위한 별도의 처리장소가 필요하다. 따라서 지상처리 방식이 처리효과는 우수하나 우수지 주변의 협소한 부지, 처리규모, 초연약지반에 형성된 유기질 토양의 성상, 처리단가를 감안할 때 광범위한 지역의 오염정화를 위해서는 원위치 처리(In-situ)방법이 처리비용면에서 경제적이다.

하천유기물 제거를 위해 현장에 적용된 복합발효미생물의 경우 배양 효소수는 1m<sup>3</sup>당 0.3m<sup>3</sup>정도 소요되었으며, 희석된 복합발효물의 제조단가는 Table 7에서 보는 바와 같이 1m<sup>3</sup>당 15,000~20,000원으로 산출되었다(인천광역시, 2013). 현재 시판되는 가격(6,000원/kg)을 기준으로 할 때 고행바이오를 오염물 퇴적이 많은 펌프장 주변에 적용할 경우 소요되는 비용은 약 14,000원/ton의 비용이 소요될 것으로 추산된다. 복합발효미생물을 이용한 정화에 필요한 재료는 복합발효미생물 원액 외에도 당밀 그리고 공급수가 필요하며 정화처리를 위한 장비설치 비용을 감안할 때 준설매립 비용 대비 50% 정도의 비용절감 효과가 있을 것으로 예상된다. 고행바이오제품을 이용할 경우 당밀은 필요 없으며, 정화할 토양기준 무게의 약 1% 정도 소요되는 것으로 나타났다.

상기내용은 기초연구에 의한 조사결과로서 복합발효미생물의 재료비 및 준설처리비용을 기준으로 산출하였으며 교반장비 설치 및 운용비용 등 부대비용은 제외한 값이다. 복합발효미생물은 계절과 날씨에 영향을 받으며 효과적인 배양과 정화가 이루어지기 위해서는 적절한 온도를 유지하는 것이 가장 중요하다. 또한, 우수지의 퇴적물 상태에 따라 미생물의 배양이 상이하므로 현장여건 및 처리기간이 달라질 수 있다.

## 6. 결 론

이 연구는 우수지의 토양오염 정도를 확인하고 정화결과를 확인하기 위해 표면에 퇴적된 저니토를 대상으로 폐기물 오염공정시험과 토양오염공정시험을 이용하여 분석하였다. 이 연구에서 제안한 정화방법은 발효미생물군과 합성미생물군을 이용한 것으로 복합적인 발효를 통해 토양을 정화하는 미생물 처리방법이다. 이를 실용적인 정화기술로서 적용하기 위해 물리 화학적 실내실험과 현장적용으로 정화효과를 검토하였으며 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 토양오염공정시험 결과 구리, 아연, 니켈이 우수지 지역

의 토양오염 우려기준을 초과하며 폐기물오염공정시험법에 따른 시험결과 기준치 이하에 해당한 값으로 검출되었다. 우수지토에 복합발효미생물을 혼합 적용 후 원시료의 구리 및 납의 농도가 기존 농도 대비 각각 65%, 66% 정도 감소한 것으로 나타났다. 따라서, 매립처리보다는 중금속 성분의 변화를 통해 재활용이 가능하도록 정화 시스템 개발이 필요하다.

- (2) 우수지토는 총석유계탄화수소(TPH)에 의한 오염이 토양오염 우려기준 보다 13배 높게 나타났다. TPH 중에 휘발성유기오염물(VOC) 성분은 배양된 복합발효미생물과 혼합처리 하였을 때 단기간 내에 85%까지 감소하는 경향을 나타내어 유류의 제거에 효과적인 것으로 나타났다.
- (3) 우수지 주변에서 포집된 악취의 주요 원인물질은 암모니아, 황화수소, 메틸메르캡탄, 황화메틸, 이황화메틸로 분석되었다. 이는 우수지토의 부영양화가 진행되면서 발생하는 것으로 하천 저면에 형성된 유기질이 제거되면서 악취도 감소하는 것으로 나타났다. 복합발효미생물에 의한 COD의 농도는 10배 이상 개선되었으며, 악취는 4배 정도 농도가 감소하여 복합발효미생물에 의한 정화효과가 있음을 확인하였다.
- (4) 중금속과 유류성분의 제거방법은 일반적으로 지상처리 방식인 토양세척이나 화학적인 추출방법이 효과적이다. 그러나 우수지 지역의 협소한 주변부지, 처리규모, 초연약지반 내 유기질토의 성상, 처리단가 등의 특성을 감안할 때 원위치 처리방식이 경제적으로 유리하며, 복합미생물을 이용한 생물학적 방법이 광범위한 지역을 처리하는 데 적합하다고 판단된다.

우수지 내 저니토를 대상으로 한 정화결과는 복합발효물의 배양여건에 따라 다르게 나타나며, 대상물질이 가지는 악취, 유기고형물, 중금속 성분을 제거하는데 대상 환경에 적용한 미생물의 효율적인 배양여부가 가장 핵심적인 요소로 작용하였다. 따라서, 현장여건, 즉 적용대상 물질의 물리 화학적 요인, 복합발효미생물의 배양조건, 대상지의 환경적 요인 그리고 기후적 요인 등에 따른 최적의 배양조건과 배양시스템이 개발되어야 한다. 향후 연구에서는 다양한 오염조건을 대상으로 복합발효미생물의 배양을 정량화 할 수 있는 방법적인 연구를 지속할 필요가 있다.



## 감사의 글

이 연구는 인천녹색환경지원센터의 2015년도 연구지원으로 수행되는 과제인 “생물학적 방법을 이용한 인천지역 하천유수지 오염토의 정화기술 개발”을 통하여 연구되었으며, 연구비 지원에 대하여 감사드립니다.

## References

1. 이창희, 유혜진 (2000), 수저퇴적물 환경기준 개발에 관한 연구, 한국환경정책평가연구원, pp. 1~148.
2. 인천광역시 (2009), 남동유수지 환경친화적 수환경 조성을 위한 타당성조사, 인천광역시, pp. 164.
3. 인천광역시 (2013), 생태하천 복원 및 관리 시범사업, pp. 29~38.
4. 한국지하수토양환경학회 (2007), 토양환경공학, 향문사, pp. 254
5. 한혜경 (2013), 복합발효미생물을 이용한 생분해성 액상폐기물 처리공법, 특허 제 10-1346752호.
6. 환경부 (2010), 악취방지법시행령, 대통령령 제 25613호.
7. 환경부 (2015), 토양환경보전법, 법률 제 12522호.
8. Davoli, E., Gangai, M. L., Morselli, L. and Tonelli, D. (2003), Characterization of odorants emissions from landfills by SPME and GC/MS, Chemosphere, Vol. 51, pp. 357~368.
9. Gerba, C. P. and Gentry, T. J. (2015), Environmental microbiology, 3<sup>rd</sup> edition, Elsevier Inc, pp. 583~621.
10. Kim, K. H., Choi, Y. J., Jeon, E. C. and Sunwoo, Y. (2005), Characterization of malodorous sulfur compounds in landfill gas, Atmospheric Environment, Vol. 39, No. 6, pp. 1103~1112.
11. Kim, Y. K. and Song, J. H. (2007), Mineral combination capacity through the effective microorganism fermentation, Korea Organic Resource Recycling Association, Symposium and Oral Presentation, pp. 154~158.
12. KOSIS (2015), <http://kosis.kr/wnsearch/totalSearch.jsp>.
13. Meadows, D., Randers, J. and Meadows, D. (2004), Limits to growth: the 30-year global update, Chelsea Green Publishing.
14. Ministry of Environment (2015), Soil environment conservation ACT No. 13533.
15. Moon, Y. Y. (2012), Toxicity test and risk assessment of contaminated soils with different petroleum using *Esienia fetida*, Master's thesis, Pusan National University, pp. 34~43 (in Korean).
16. Tangerman, A. (2009), Measurement and biological significance of the volatile sulfur compounds hydrogen sulfide, methanethiol and dimethyl sulfide in various biological matrices, Journal of Chromatography B, Vol. 887, No. 28, pp. 3366~3377.
17. Yabu city (2009), 自然回帰を 實現した 汚水處理技術 複合發酵増殖プラント, pp. 1~5.