

폐슬러지 감량화 및 재활용을 위한 오존 처리시 하수슬러지내의 미생물 군집구조의 변화

Change of Microbial Community on Ozonation of Sewage Sludge to Reduce Excess Sludge Production

홍준석 · 임병란* · 안규홍 · 맹승규

Hong, Jun-Seok · Lim, Byung-Ran* · Ahn, Kyu-Hong · Maeng, Sung-Kyu

한국과학기술연구원 수질환경 및 복원연구센터

(2003년 10월 22일 접수; 2004년 1월 12일 최종수정논문 채택)

Abstract

The change of the microbial community structure in excess sludge of different sewage treatment plants by ozone treatment was investigated by quinone profiles. The resulting ozone dosage ranged from 0.1 to 0.4 gO₃/gTS. In terms of overall sludge reduction, more than 50% reduction of the total sludge mass could be achieved by ozone treatment at 0.4 gO₃/gTS. Quinone concentration and type in sludge of different treatment plants were remarkably decreases with increasing ozone dose. Ubiquinones(UQs)-8, -10 and MK-8 were still remained in the ozonized sludge at 0.4 gO₃/gTS. The results of this study showed that the remaining microorganisms belong to UQs-8, -10 and MK-8 were difficult to destruct cell membrane or wall by ozonation. Fecal Streptococci and *Salmonella* were not detected at ozone dose of 0.2 gO₃/gTS, but Fecal Coliform was not detected at ozone dose of 0.4 gO₃/gTS.

Key words: Sludge reduction, ozonation, quinone profiles, pathogens, Microbial community

주제어: 슬러지 감량화, 오존처리, 퀴논프로파일, 병원성 미생물, 미생물 군집구조

1. 서론

하수종말 처리시설이나 폐수종말처리시설에서 배출되는 폐슬러지의 발생량은 계속적으로 증가할 것으로 예측되나, 2000년 7월에 개정된 폐기물관리법 시행규칙에 의해 1일 처리용량 10,000m³ 이상의 하수종

말 처리시설 및 폐수종말처리시설에서 배출되는 유기성 슬러지(고형물중 유기성물질의 함량이 40% 이상)의 함수율이 75%를 넘는 경우에 직매립이 금지되었고(환경부, 2002), 2003년 7월 이후로는 유기성 슬러지의 직매립이 일체 금지되고 있다. 따라서 유기성 슬러지의 지속인 발생과 규제에 의해 처분방법 등이

*Corresponding author Tel: +82-2-958-6860, Fax: +82-2-958-6854, E-mail: limbr@kist.re.kr (Lim, B.R.)

제한되고 있는 실정에서 폐슬러지를 처리하는 방안으로 감량화와 재활용이 슬러지 처리의 중요한 대안으로 평가되고 있다. 일반적으로 하수슬러지의 처리 방법으로 혐기성 소화 성능을 향상시키기 위한 방법으로 연구되어 왔으나 혐기성 소화에 의한 슬러지내 유기물질의 안정화 효율은 폐슬러지 자체의 낮은 생분해성 때문에 20-30일간의 긴 처리시간으로 30-40%에 불과하다. 그리고, 고분자응집제로 슬러지를 개량한 후에 벨트프레스나 원심분리기에 의한 탈수 공정으로 배출되는 탈수케이크의 함수율은 대개 80% 이상 정도이다. 즉, 폴리머 개량은 가장 일반적인 탈수성 개선 전처리법이지만 여과성을 향상시킬 뿐이지 최종 슬러지 케이크의 함수율에 긍정적인 영향을 미치지 못하는 것인 것이다(권재현 등, 2002). 따라서, 최근에는 세포구성물질들의 가수분해를 촉진시키고 슬러지 생분해성을 높이기 위한 전처리법으로 오존처리, 불일처리, 고압처리, 초음파처리, 알칼리처리, 열처리, 효소첨가 등의 단일처리나 위의 방법을 복합적으로 처리하는 방법들이 제시되고 있다(Weemass et al., 2000; Muller et al., 1998). 특히 오존처리는 슬러지의 가용화를 통한 고형물량의 감량화와 세포분해에 의한 고액분리성 향상을 동시에 이룰 수 있음을 확인하였고 이를 통해 슬러지 발생량을 약 70% 이상 감소시킬 수 있었으며, 감량화 및 안정화에도 효과가 있음이 제시되어 왔다(Ahn et al., 2002a; 2002b).

그러나 폐슬러지를 토지개량제 등으로 재활용할 경우 유기물의 안정화뿐만 아니라 악취 및 병원성 미생물을 제거하도록 되어 있다. 미국 EPA에서는 슬러지를 토지개량제등으로 재활용할 경우 병원성 미생물에 대한 규제치를 규정하고 있으며 이 규제에 맞출 수 있는 기본적인 처리 방법을 제시하고 있다(EPA, 1995). 폐활성슬러지의 안정화는 오존처리로 대부분 안정화 할 수 있다는 것은 입증되었으나(권재현 등, 2002), 악취 및 병원성 미생물 그리고 오존주입량에 따른 미생물 군집의 변화에 대한 연구는 거의 없다.

활성슬러지내 미생물 군집구조의 해석을 위해서 최근 사용되고 있는 접근방법에는 미생물 군체의 구성성분(세포막, 세포벽의 지질, 퀴논, 다당류, 아미노산 등)을 지표로 하는 화학적 분류법(Hiraishi, 1988; Fujie et al., 1994; 임병란 등, 2002)과 더불어 최근에

는 분자 생물학적 방법, 예를 들어 DNA probe법, DNA hybridization법, in situ hybridization, 유전자증폭-hybridization법, 16S rDNA profile법 등이 미생물 생태계의 해석에 많이 적용되고 있다(Amann et al., 1995).

따라서 본 연구에서는 오존처리를 이용한 하수처리장 폐활성슬러지의 감량화 및 재활용에 있어서 슬러지를 구성하고 있는 미생물군집에 어떠한 영향을 미치는가에 대하여 화학분류법중에 하나인 퀴논프로파일법을 이용하여 검토하였다. 또한, 미국 EPA에서 규정하고 있는(EPA, 1995) 병원성 미생물인 *Salmonella*와, Fecal Coliform, Fecal Streptococci를 선정하여 슬러지내 균수를 측정하여 병원성미생물과 퀴논종의 변화를 비교검토 하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 대상 슬러지 및 실험 장치

경기도 G시에 위치하고 있는 서로 다른 하수처리 공법을 도입한 하수처리장으로부터 슬러지를 채취하여 실험에 사용하였다. 공법별로 산화구법(Sludge #1), 표준활성슬러지법(Sludge #2), 단일반응조 간헐 방류식 장기포기공정에 의한 하수고도처리시설(Kumho and KIST Intermittently Decanted Extended Aeration Process, KIDEA) 공법(Sludge #3) 등으로 처리하고 있는 하수처리장을 선택하여 반응 슬러지를 채취하였고, KIDEA 공법을 이용하고 있는 하수처리장의 경우는 반응 슬러지가 없기 때문에 반응조내에서 포기 시간에 슬러지를 채취하였다. 본 연구에 사용된 슬러지의 특성은 Table 1과 같다.

슬러지의 오존처리는 산소발생기(에노텍(주), Korea)와 오존 발생기 TXO-20(에노텍(주), Korea)를 이용하여 송기량 4L/min에 오존주입량 100mgO₃/min으로 고정하여 하부직경 5cm(H40cm), 상부직경 15cm(H60cm), 총 높이 100cm의 아크릴 원통형 반응조에 시료 2L를 채워 반응 시켰다. 슬러지의 오존흡수율은 오존점촉시간을 늘리면서 주입오존 농도와 배오존농도를 측정된 결과를 바탕으로 오존주입량율 식 (1)과 같이 계산하여 0.1, 0.2, 0.4 gO₃/gTS 로 주입하였다.

Table 1. Characteristics of recycled and activated sludge for different sewage treatment plants

Items (mg/L)	Sludge #1	Sludge #2	Sludge #3
TS	6,880	4,710	3,320
VS	5,180	3,810	2,480
TSS	6,479	4,683	3,067
VSS	5,033	3,917	2,433
TCOD	10,920	7,620	5,220
SCOD	90	240	90

$$\begin{aligned} \text{오존주입량 (gO}_3\text{/g TS)} = & \frac{\text{송기량(L air/min)}}{\text{SS(g/L)} \times \text{슬러지부피(L)}} \times \text{오존주입농도(gO}_3\text{/L air)} \\ & \times \text{접촉시간(min)} \times \frac{\text{흡수율(\%)}}{100} \end{aligned} \quad (1)$$

부유물질농도(SS)와 COD는 Standard Method (APHA, 1998)에 준하여 측정하였다.

2.2. 분석

각 하수처리장의 반송슬러지 및 활성슬러지와 오존처리후 슬러지 내의 미생물 균집 해석은 Hu 등 (1999a)이 개량한 퀴논분석 방법을 이용하였다. 각 하수처리장의 오존처리전후 슬러지를 일정한 양 채취한 후 원심분리기를 이용하여 고형물만 채취하였다. 이 고형물에 클로로포름과 메탄올을 혼합한 용액(2:1, v/v%)을 첨가하여 퀴논을 추출하였으며, 이 추출물을 n-Hexane으로 정제하였다. 유비퀴논(Ubiquinone, UQ)과 메나퀴논(Menaquinone, MK)

으로 분리하기 위해 Sep-Pak® Plus Silica cartridges를 이용하였고 HPLC (SPD-M10A, Shimadzu Co., Japan)와 ODS 컬럼 (Mightysil RP-10, 4.6(I.D.)×250 mm, Kanto Chemical Co., Japan)을 이용하여 분석하였다. Ubiquinone-10과 vitamin K1은 유비퀴논과 메나퀴논을 각각 정량하기 위한 표준물질로 사용하였다.

병원성 미생물 중 *Salmonella*는 BBL의 SS Agar, Fecal Coliform은 bioMérieux의 COLI ID, Fecal Streptococcus는 DIFCO의 Azide Dextrose Broth와 SIGMA사의 Agar를 혼합한 배지를 사용하여 35°C에서 22-24시간 배양한 후 Standard plating Techniques로 계수하였다(APHA, 1998).

3. 결과 및 고찰

3.1. 오존처리에 의한 슬러지 SS 및 COD의 변화
오존처리에 따른 각 하수처리장 슬러지의 TSS, VSS, TCOD와 SCOD의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 오존의 산화력에 의해 슬러지 세포는 분해되어 오존주입량 0.4gO₃/gTS에서 TSS 및 VSS는 최고 50%까지 감소하였다. 또한 오존에 의한 슬러지 세포의 파괴로 세포내 고분자물질이 용출되어 가용화됨으로써 SCOD는 20-50배 증가하는 현상을 나타내었다. 그리고 슬러지내 유기물이 무기화되어 오존주입량 0.4gO₃/gTS에서 TCOD는 Sludge #1은 15%, Sludge #2는 10%, Sludge #3은 6.5%의 제거율을 나타내었다.

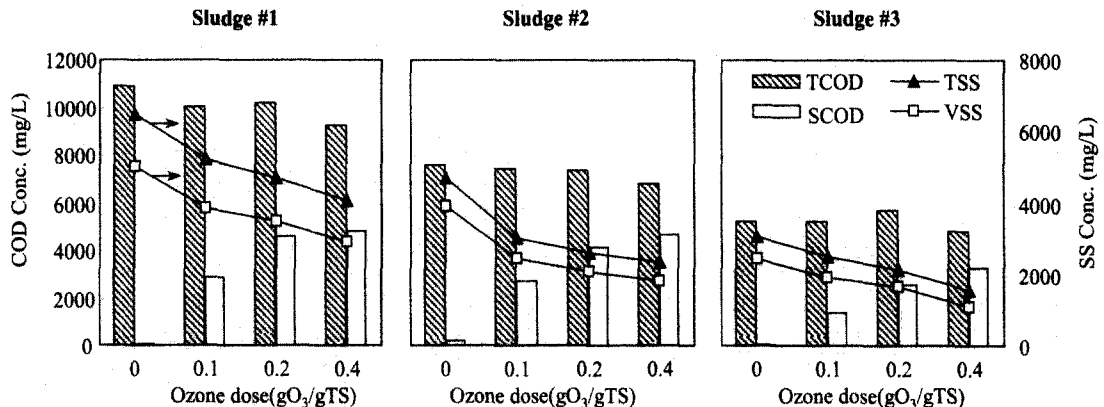


Fig. 1. Reduction of excess sludge due to mineralization and solubilization of the sludge treated by ozonation (0-0.4 gO₃/gTS).

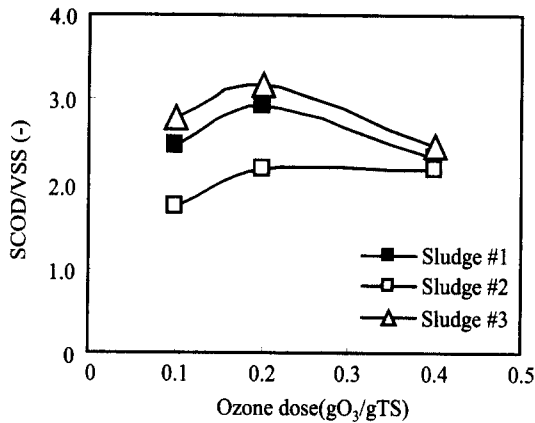


Fig. 2. Effect of ozone treatment on the SCOD/VSS of different sludges.

상기의 결과를 바탕으로 오존주입량에 대한 오존 처리후 슬러지의 SCOD의 증가분과 VSS 감소분에 대한 비를 Fig. 2에 나타내었다. 오존처리후 슬러지내

의 SCOD/VSS 비는 오존주입량이 0.2gO₃/gTS까지는 증가하는 경향을 나타내었으나, 높은 오존주입량에서는 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 오존주입량이 증가됨에 따라 오존에 의한 슬러지의 분해로 생성된 용존 탄소원의 일부가 무기화되었기 때문인 것으로 사료된다. 그러므로 기존연구에서 오존산화에 의해 가용화되어 증가된 SCOD는 생물학적 탈질공정에 탄소원으로 활용이 가능한 것으로 확인되었으므로(안규홍 등, 2002a; 2002b), 본 연구의 결과로부터 폐슬러지 오존처리 후 상등액을 생물학적 질소제거 공정의 탄소원으로 이용한다면 오존주입량을 0.2gO₃/gTS로 주입하는 것이 효과적인 것으로 사료된다.

3.2. 오존처리에 의한 슬러지내 미생물군집구조의 변화

본 연구에서 사용한 각 하수처리장 반송 및 활성 슬러지에 대해 오존주입량 변화에 따른 슬러지내 미

Table 2. Composition and concentration (nmol/gTS) of quinone

Quinone type	Sludge #1				Sludge #2				Sludge #3			
	0*	0.1	0.2	0.4	0	0.1	0.2	0.4	0	0.1	0.2	0.4
Ubiquinones												
UQ-7	16.0**	-***	-	-	18.7	3.5	-	-	-	-	-	-
UQ-8	164.8	12.5	1.0	0.2	304.3	71.2	31.5	2.4	172.9	58.9	23.2	1.0
UQ-9	45.9	5.9	2.5	2.0	42.3	8.6	3.3	0.4	31.3	8.3	3.5	0.5
UQ-10	95.1	4.8	0.9	0.3	145.6	32.4	12.1	1.1	68.0	21.3	7.3	0.3
Menaquinones												
MK-6	30.4	2.0	0.2	-	78.8	14.9	5.0	-	41.0	14.1	5.3	0.2
MK-7	65.3	1.5	0.2	-	83.1	8.5	2.8	-	50.4	11.8	4.1	0.1
MK-8	31.3	2.0	0.4	-	26.7	5.4	2.5	0.2	27.5	9.9	4.5	0.1
MK-9	8.1	0.5	0.2	-	3.5	0.6	0.3	-	3.6	1.0	0.5	-
MK-10	6.7	0.1	-	-	-	-	-	-	15.8	2.4	0.8	-
MK-11	7.3	0.3	-	-	13.7	0.5	-	-	10.7	1.5	0.8	-
MK-6(H2)	-	-	-	-	16.8	6.8	-	-	-	-	-	-
MK-7(H2)	9.3	0.7	-	-	26.3	2.9	-	-	-	-	-	-
MK-8(H2)	32.7	2.6	0.3	-	33.8	8.5	3.7	-	16.6	6.5	0.3	-
MK-9(H2)	11.1	1.0	-	-	15.0	3.8	1.7	-	8.6	4.1	1.0	-
MK-10(H2)	2.1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MK-11(H2)	2.1	0.4	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MK-12(H2)	5.2	0.8	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
MK-8(H4)	39.5	3.3	0.3	-	57.0	9.1	3.8	-	60.1	21.2	7.6	-
MK-9(H4)	11.0	1.3	0.4	-	33.0	6.6	2.5	0.2	22.8	9.6	2.3	-
MK-10(H4)	26.4	0.9	-	-	59.7	9.5	3.8	0.3	47.6	8.8	4.0	-
UQ/MK	1.12	1.34	2.20	-	1.14	1.50	1.81	6.39	0.89	0.98	1.09	4.64

*: Ozone dose (gO₃/gTS), **: nmol/gTS, ***: not detected

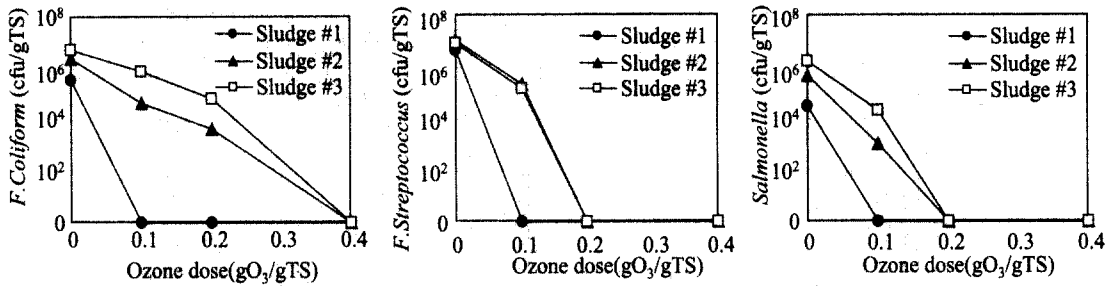


Fig. 3. Variations of Salmonella, Fecal Coliform & Fecal Streptococci at different ozone dose

생물군집구조의 변화에 대하여 조사하였다. 하수처리 공법별 채취한 슬러지의 오존처리전과 오존처리후 퀴논을 분석하여 그 결과를 Table 2에 나타내었다. 여기서 퀴논이란 미생물 호흡쇄의 구성물질로서 미생물의 호흡동안 전자전달체내에서 중요한 역할을 한다. 퀴논은 모든 미생물에 존재하며 박테리아의 하나의 종 또는 genes는 하나의 우점퀴논을 가지고 있다 (Collins and Jones, 1981). 그러므로 퀴논프로파일은 각 퀴논type의 mole fraction으로 나타내며, 혼합배양계에 있어서 미생물 군집구조의 변화를 효과적으로 정량화 할 수 있다.

각 하수처리장의 슬러지내 유비퀴논종은 UQ-8과 UQ-10이 가장 많이 검출되었고, 메나퀴논종으로는 MK-7 및 MK-8(H₄) 등이 많이 검출되었다. 활성슬러지내 UQ-8을 함유하고 있는 미생물은 *Comamonas* sp.와 *Pseudomonas* sp.이며, UQ-10에는 *Paracoccus* sp., *Protomonas* sp., 등이 함유되어 있으며, MK-7에는 *Bacillus* sp.와 *Staphylococcus* 등이 함유되어 있는 것으로 보고 되어 있다 (Hiraishi et al., 1988; Collins and Jones, 1981). 앞에 서술한 미생물종들은 하수처리 프로세스내 미생물군집에 우점을 띠고 있는 type이라고 할 수 있다. UQ/MK비는 Sludge #1과 Sludge #2의 경우 1 이상으로 유비퀴논의 비율이 높게 나타났고 Sludge #3의 경우 0.89로 메나퀴논의 비율이 높은 것으로 나타났다. 여기서, ubiquinone과 menaquinone은 각각 호기성호흡과 혐기성호흡과정 동안에 함유하고 있으므로 호기성박테리아와 혐기성박테리아를 나타내고 있다. 그러므로 Sludge #3의 경우 유기물 제거 및 질산화를 위해 포기하는 시간이 짧기 때문에 호기 상태보다는 대부분 무산소 및 혐기 상태로 유지가 되어 메나퀴논의 비율이 약간 높은 것으로 사료된다.

또한, 각 하수처리장의 오존처리 전 슬러지내 퀴논 총량은 Fig. 1에 나타낸 VSS 농도와 유사한 경향을 나타내었으며, 오존처리전 슬러지내 퀴논종의 다양성 (Hu et al., 1999b), 즉 미생물의 다양성은 Sludge #1 > #2 > #3의 순으로 나타났다. 이와 같이 처리프로세스의 운전조건에 따라 반응조내에 퀴논양 및 미생물의 다양성에 차이가 있는 것을 알 수 있었다.

3.3. 오존주입량에 따른 하수슬러지내 병원성 미생물의 변화

유비퀴논과 메나퀴논종의 변화와 대응하여 오존처리후 하수슬러지를 재활용할 경우 슬러지내 병원성미생물을 고려해야 하므로 본 연구에서는 미국 EPA에서 규정하고 있는 매립채내의 병원성 미생물인 *Salmonella*와 Fecal Coliform 그리고 Fecal Streptococci에 대하여 조사하였다.

오존처리 후 슬러지내 병원성 미생물군인 *Salmonella*와 Fecal Coliform 그리고 Fecal Streptococci의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 그림에 나타낸 바와 같이 오존주입량에 따라 대상 병원성 미생물군은 감소하는 경향을 나타내었다. 오존을 0.2gO₃/gTS까지 주입하였을 경우 *Salmonella*와 Fecal Streptococci은 검출되지 않았으나, Fecal Coliform은 미량 검출 되었다. 그러나 Fecal Coliform은 Sludge #1 이외에 오존을 0.4gO₃/gTS까지 주입을 해야만 모두 사멸되는 것을 알 수 있었으며 다른 *Salmonella*나 Fecal Streptococci는 0.2gO₃/gTS 이상으로 주입하면 모두 사멸되는 것으로 관찰되었다. *Salmonella*의 Quinone database가 없는 관계로 Fecal Coliform과 Fecal Streptococci의 결과와 퀴논프로파일과의 관계를 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. Fecal Coliform은 그림음성균으로 UQ-8을 우점

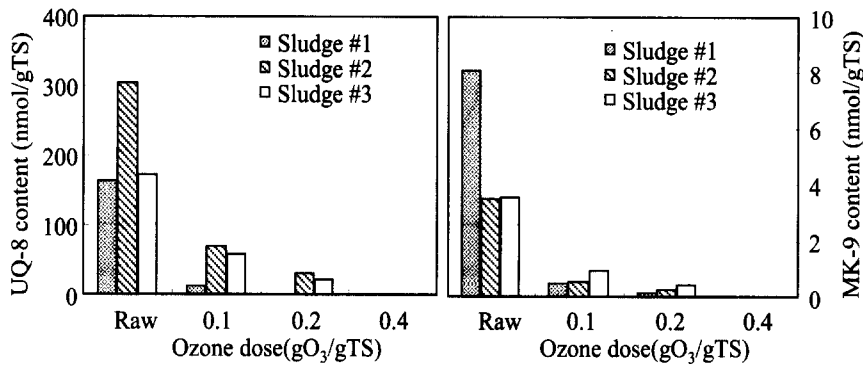


Fig. 4. Variations of UQ-8 and MK-9 contents at different ozone dose.

으로 함유하고 있으며, Fecal Streptococci는 MK-9를 우점으로 함유하고 있다(Collins and Jones, 1981). 모든 하수처리장의 슬러지에 오존을 0.4gO₃/gTS까지 주입 하였을 때 Fecal Coliform은 검출되지 않았으나, UQ-8의 경우는 오존주입량이 높음에도 불구하고 미량 검출되었다. 반면 Fecal Streptococci는 오존 주입량 0.2gO₃/gTS 이상에서는 전혀 검출되지 않았으나, 이를 함유하는 MK-9의 경우 오존주입량에 따라 감소하는 경향은 유사하였으나 오존을 0.4gO₃/gTS까지 주입할 경우에 전혀 검출되지 않는 것으로 나타났다. 이는 MK-9이나 UQ-8에는 상기의 균 이외에도 다량의 미생물군들이 존재하므로 오존이 충분히 접촉되지 않아 세포벽이 파괴되지 않았거나 세포벽이 두꺼워 세포벽이 잘 파괴되지 않는 미생물종들이 일부 존재하기 때문인 것으로 사료된다.

4. 결론

주요 전처리 방법중에 하나인 오존처리를 이용한 슬러지 감량화 및 재활용에 있어서 오존처리 전과 후의 슬러지내 미생물군집구조의 변화를 검토하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 처리공법이 다른 하수처리장의 슬러지를 이용한 오존처리에 있어서 슬러지 세포는 분해되어 가용화 되었으며, 오존주입량 0.4gO₃/gTS에서 최고 50%의 TSS 감량 효과를 얻을 수 있었다.

2) 오존주입량이 증가함에 따라 슬러지내 미생물 농도 및 종이 감소하는 경향을 나타내었으며, 유비퀴논보다는 메나퀴논을 함유하고 있는 미생물들의 사멸

및 가용화 비율이 높은 것으로 나타났다.

3) 오존을 0.2gO₃/gTS까지 주입하였을 경우 *Salmonella*와 Fecal Streptococci는 대부분 사멸되었으나, Fecal Coliform은 슬러지에 따라 다소 차이는 나타났으나, 0.4gO₃/gTS까지 주입할 경우 대부분 사멸되는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학기술연구원의 금수강산 21 프로젝트와 한국과학재단 목적기초연구(과제번호: R03-2001-000-00036-0) 지원으로 수행되었기에 감사를 표합니다.

참고문헌

- 권재현, 류성호, 박기영, 안규홍, 염익태, 이용훈 (2002) 오존처리에 의한 하수슬러지의 감량화, *상하수도학회지*, 16(2), pp. 156-160.
- Ahn K.-H., Park K.-Y., Maeng S.K., Hwang J.H., Lee J.W., Song K.-G. and Choi S. (2002a) Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling, *Wat. Sci. Tech.*, 46(10), pp. 71-77.
- Ahn K.-H., Yeom I.-T., Park K.-Y., Maeng S.-K., Lee Y., Song K.-G. and Hwang J.-H. (2002b) Reduction of sludge by ozone treatment and production of carbon source for denitrification, *Wat. Sci. Tech.*, 46(11-12), pp. 121-125.
- Amann R.I., Ludwig W., and Schleifer K.-H. (1995) Phylogenetic identification and in situ detection of individual microbial cells without cultivation, *Microbiol. Rev.*, 59(1), pp. 143-169.

- APHA (1998) Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 20th edn. American Public Health Association, Washington, D.C.
- Collins M.D. and Jones D. (1981) Distribution of isoprenoid quinone structural types in bacteria and their taxonomic implications, *Microbiol. Rev.*, **45**, pp.316-354.
- Fujie K., Hu H.-Y., Tanaka H., and Urano K. (1994) Ecological studies of aerobic submerged biofilter on the basis of respiratory quinone profiles, *Wat. Sci. Technol.*, **29**, pp. 373-376.
- Hiraishi A. (1988) Respiratory quinone profiles as tool for identifying different bacterial populations in activated sludge, *J. Gen. Appl. Microbiol.*, **34**, pp.39-56.
- Hu H.-Y., Fujie K. and Urano K. (1999a) Development of a novel solid phase extraction method for the analysis of bacterial quinones in activated sludge with a higher reliability, *J. Biosci. Bioeng.*, **87**(3), pp.378-382.
- Hu H.-Y., Fujie K., Nakagome H., Urano K., and Katayama A. (1999b) Quantitative analyses of the change in microbial diversity in a bioreactor for wastewater treatment based on respiratory quinones, *Wat. Res.*, **33**(15), pp.3263-3270.
- Müller J., Lehne G., Schwedes J., Battenberg S., Naveke R., Kopp J., Dichtl N., Scheminski A., Krull R. and Hempel D.C. (1998) Disintegration of sewage sludge and influence on anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **38**(8-9), pp. 425-433.
- 임병란, 안규홍 (2002) 간헐포기 MBR 공정에서의 하수처리 성능과 미생물군집해석, *상하수도학회지*, **16**(6), pp. 679-685.
- 환경부 (2002) 폐기물관리법 시행규칙, 별표 4. Process Design Manual, Surface disposal of sewage sludge and domestic septage, (1995) U.S. EPA, pp.21-31.
- Weemaes M., Grootaerd H., Simoons F. and Verstraete W. (2000) Anaerobic digestion of ozonized biosolids, *Wat. Res.*, **34**(8), pp. 2330-2336.