

저온 플라즈마와 활성슬러지 복합 공정에서 체류시간 변화가 악취 저감 및 슬러지 가용화에 미치는 영향

Effects of Retention Time on the Simultaneous of Odor Removal and Sludge Solubilization Using a Non-Thermal Plasma System

남궁형규 · 황현정 · 송지현*

Hyeonggyu Namgung · Hyunjung Hwang · JiHyeon Song*

세종대학교 건설환경공학과

(2011년 7월20일 접수; 2011년 10월26일 수정; 2011년 11월7 채택)

Abstract

In this study, a non-thermal plasma system was employed to simultaneously remove odorous compounds and organic sludge. The system consisted of two reactors; the first one was the non-thermal plasma reactor where ozone was produced by the plasma reaction and the ozone oxidized hydrogen sulfide, the model odorous compound, and then the ozone-laden gas stream was introduced to the second reactor where wasted sludge was disintegrated and solubilized by ozone oxidation. In this study, the gas retention time (GRT) and the hydraulic retention time (HRT) were changed in the two-reactor system, and the effects of GRT and HRT on reduction efficiencies of odor and sludge were determined. As the GRT increased, the ozone concentration increased resulting in an increasing efficiency of hydrogen sulfide removal. However, the overall ozone loading rate to the second sludge reactor was the same at any GRT, which resulted in an insignificant change in sludge reduction rate. When HRTs in the sludge reactor were 1, 2, 4 hours, the sludge reduction rates were approximately 30% during the four-hour operation, while the rate increased to 70% at the HRT of 6 hours. Nevertheless, at HRTs greater than 4 hours, the solubilization efficiency was not proportionally increased with increasing specific input energy, indicating that an appropriate sludge retention time needs to be applied to achieve effective solubilization efficiencies at a minimal power consumption for the non-thermal plasma reaction.

Keyword : Odor, Sludge, Non-Thermal Plasma, Ozone, Gas Retention Time, Hydraulic Retention Time, Solubilization

주제어 : 무기악취, 유기성슬러지, 저온플라즈마, 오존, 기상체류시간, 액상체류시간, 가용화, 감량화

1. 서론

인구의 밀집화와 도시화가 급속히 진행되면서 하폐수 처리장과 같은 기초 환경기반시설의 역할이 증대되고 있다. 그럼에도 불구하고 하폐수 처리장 유지관리 상의 여러 가지 환경문제가 현안으로 대두되고 있는데, 특히 해양투기 및 직매립이 단계적으로 금지되면서 하폐수 처리장에서 발생하는 슬러지 처리/처분 문제가 주요 환경이슈가 되고 있다. 또한 슬러지 농

축, 소화, 탈수 등의 처리 과정에서 발생하는 악취는 하폐수 처리장 주변 지역에서 민원을 야기하고 지역 주민과 처리장 운영주체 사이에 갈등을 초래하고 있다. 따라서 하폐수 처리장에서 발생하는 슬러지와 악취를 효과적으로 처리하여 환경문제를 최소화할 필요성이 있다.

하폐수 처리시설에서 발생하는 슬러지는 2009년 기준 전국 432개 하수처리장에서 연간 302만톤이 폐기된다.(남영우, 2010; 환경부, 2011) 그러나 2003년 7월

*Corresponding author Tel:+82-2-3408-3819, Fax:+82-2-3408-3819, E-mail: songjh@sejong.ac.kr(Song, J.H)

부터 1일 처리용량이 10,000 m³ 이상인 하폐수 처리 시설에서 발생하는 슬러지는 직매립이 법적으로 금지되었고, 가장 큰 비중을 차지하는 해양배출 역시 런던 덤핑조약 등에 의해 규제가 강화되었다. 따라서 환경부는 2011년 말까지 해양배출을 완전 금지하는 것을 목표로 하고 있으며 하수 슬러지의 보다 효율적인 처리 대안이 필요한 실정이다.(환경부, 2011) 대부분의 하폐수 슬러지는 혐기성 또는 호기성 소화조를 거쳐 농축, 탈수 등의 과정을 통해 폐기 처분되는데, 소화 과정 중 슬러지의 성상이 복잡하고 불균일하다는 점 때문에 소화조의 용량이 대형화되는 문제를 가지고 있다.(이명주, 2008) 따라서 슬러지를 미생물이 분해하기 쉬운 용존성 물질로 전환시키는 가용화(solubilization) 기술은 소화조의 규모를 축소할 수 있어 다양한 방법들이 연구 개발되고 있다.

슬러지 전처리 및 가용화 기술은 크게 물리적 처리 방법(Muller, 2000), 열 가수분해법(Balindhaug, 1992), 화학적 가수분해법(Tanaka, 1997), 산화처리법(Song, 1992) 등으로 나눌 수 있다. 화학적 처리 방법 중 오존처리는 발생된 가스상 오존이 슬러지 액상에 용존된 후 산화작용에 의해 슬러지 세포벽을 파괴하여 슬러지의 감량화·가용화를 유도하는 기술이다.(전관수, 2011) 이러한 오존 처리는 비용당 처리효율이 높고 부가적으로 슬러지의 침전률과 벌킹(bulking)문제 개선 등의 장점이 있어 널리 사용되고 있다.(Chu, 2009)

하폐수 처리시설의 슬러지 처리 과정에서 발생하는 또 다른 문제는 악취와 주변 지역의 민원이다. 악취는 신체적으로는 큰 악영향을 미치지 않으나 특유의 불쾌한 냄새로 인하여 심리적·정신적 피해를 유발한다.(Van Langenhove, 1988) 하폐수 처리시설에서 발생하는 악취물질은 주로 환원된 휘발성 황화합물(황화수소, 메틸머캅탄, 다이메틸 설파이드, 다이메틸 다이설파이드 등), 휘발성 질소화합물(암모니아, 트리메틸아 등), 휘발성 지방산과 알데히드 등의 물질들이 혼합되어 있고, 하수 성분에 따라 악취물질의 성분과 농도의 변화가 큰 특징을 가지고 있다.(팽종인, 2004; 박귀환, 2005; 김정웅, 2006)

하폐수 처리장에서 발생하는 악취 제어기술은 생물학적 처리와 물리화학적 처리방법으로 크게 분류할 수 있으며, 발생하는 악취 구성이나 농도 및 발생량에 따라 적용 기술을 달리한다. 바이오필터와 같은 생물학적 처리법은 유지관리비가 저렴한 장점을 가지고

있으나, 배출되는 악취의 유입부하 및 운전조건이 크게 변화하는 경우 안정적인 악취제거 효율을 얻기 어렵다는 단점이 지적된다.(Kinney, 1999) 물리화학적 처리방법은 생물학적 처리법에 비해 유지관리비가 높은 단점이 있으나, 상대적으로 안정적이며 고효율을 얻을 수 있다.(김대승, 2000) 물리화학적 처리법 중에서도 저온 플라즈마법(non-thermal plasma)은 전기장 내에서 전자가 강력한 에너지를 가지고 가속되어 산소 또는 수증기로부터 산화력이 높은 오존을 생성하여 악취 물질을 산화시키는 기술이다. 저온 플라즈마는 주로 대기 오염물질 처리에 주로 이용되어 왔으며, 대기 중 NO_x, SO_x, VOCs 처리에 응용한 연구 결과가 있다.(Oda, 2003; Moreau, 2008) 저온플라즈마 기술을 저농도 악취물질 산화 제거에 적용하는 경우 상온 대기압에서 운전이 가능하고, 악취 농도에 따라 운전조건을 쉽게 변화시킬 수 있으며, 타 기술과 접목이 용이하여 다양한 하이브리드 기술을 시도할 수 있다는 장점이 있다.(김현하, 2006; Yamamoto, 1992; Hayashi, 2001)

최근에는 오존 산화법을 하폐수 슬러지의 감량 가용화와 악취 처리에 동시에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.(황현정, 2009; 이순화, 2011) 제안된 기술은 발생한 오존을 일차적으로 악취발생원에 적용하여 악취물질 산화 제거를 유도하고, 오존이 함유된 배가스는 슬러지 반응조에 투입하여 슬러지 감량 가용화를 도모하는 방식이다. 본 연구에서는 저온 플라즈마 방식으로 고농도 오존가스를 생성하고, 오존을 이용하여 슬러지 농축조에서 발생하는 악취 제거와 잉여 슬러지의 전처리 및 가용화를 알아보고자 하였다. 본 연구의 주요 실험 변수로는 저온 플라즈마 시스템의 기상 체류시간(GRT, gas retention time)과 슬러지 농축조의 액상 체류시간(HRT, hydraulic retention time)을 설정하고, GRT와 HRT 변화에 따른 악취 제거 효율과 슬러지 감량 및 가용화 효율을 상온(room temperature)에서 확인하였다.

2. 실험 재료 및 방법

2.1 대상 슬러지 특성

본 실험에서는 서울 중랑 물 재생 센터의 2차 침전지 반송슬러지를 채취하여 농축한 후, 각 실험 조건별 재현성을 위해서 같은 물 재생 센터 배출수를 이용

하여 실험 직전에 농도를 조절하여 사용하였다. 실험에 사용한 슬러지의 최종 성상은 TCOD (total chemical oxygen demand) 4,420 mg/L, SCOD (soluble chemical oxygen demand) 120 mg/L, SS (suspended solid) 4,200 mg/L이었다.

2.2 실험장치 및 구성

하폐수 처리장에서 발생하는 악취와 폐슬러지 감량화를 동시에 수행하기 위해 구성된 저온 플라즈마 시스템의 모식도는 Fig. 1과 같다. 전체 시스템은 발생 악취를 처리하는 전단 저온 플라즈마 반응조(non-thermal plasma reactor)와 발생한 오존 함유 가스를 적용할 후단 활성슬러지 반응조(activated sludge reactor)가 직렬로 배치되어 있다. 저온 플라즈마 반응기는 DBD(dielectric barrier discharge) 방식으로 총 32개의 세라믹 유전체와 금속선으로 구성되었으며, 직류 전원공급장치(DC power supply)를 통하여 반응기 내에 전력을 공급하였다. 투입된 소비전력(W)은 인가전압(kV)과 전류(mA)의 곱으로 계산되며, 플라즈마 반응기의 제거효율이 일정해지는 시점인 13 W에 고정하여 실험을 진행하였다.

처리 대상 무기악취 물질로는 황화수소(H₂S)를 채택하였으며, 슬러지 최종분해 산물인 이산화탄소(CO₂)의 정확한 측정을 위하여 이산화탄소가 배제된 고순도 공기와 표준 황화수소 가스를 혼합하여 최종 황화수소 10 ppm의 농도로 반응기에 유입하였다. 플라즈마 산화 반응에서 발생하는 오존(ozone)의 경우 유입되는 기체 내의 습도에 의한 농도 변화의 가능성이 있어 mixing chamber 전단에 가습장치를 설치하여 유입기체의 습도가 포화되어 반응기 내에 유입되게 하였다.

전단 저온 플라즈마 반응기에서 발생한 오존이 포함된 배가스는 후단 슬러지 반응조 하단의 산기석을 통해 컬럼 형태의 반응조 내에 유입되도록 하였다. 슬러지 반응조 내에는 대상 슬러지 1.2 L를 투입하였으며, 슬러지와 오존이 접촉하여 분해되는 과정에서 발생하는 거품이 반응기 외부로 유출되는 것을 막기 위한 컬럼 중간과 상부에 노즐을 설치하여 water pump를 통해 슬러지가 내부 순환·혼합되게 하였다.

2.3 체류시간 변경 조건

전체 반응 시스템을 통과하는 오염기체의 체류시간(GRT) 변화에 따른 악취물질 제거효율 변화와 오존

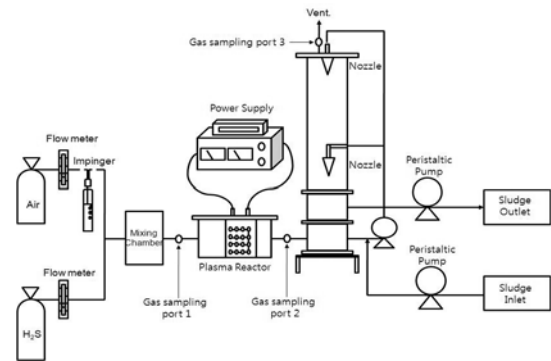


Fig 1. Schematic diagram of the non-thermal plasma system

발생량의 변화에 따른 슬러지 감량화 효과를 알아보기고자 일련의 실험을 진행하였다. 실험 조건은 저온 플라즈마 반응기 유효 부피인 0.5 L를 기준으로 GRT 5초 (6 L/min), 10초 (3 L/min), 15초 (2 L/min)의 세 가지 조건을 사용하였으며, 저온 플라즈마에 적용되는 전류량 및 슬러지 농도 등의 다른 실험 조건은 동일하게 유지하였다.

GRT 변화실험 이후에 후단(슬러지 반응조) 내의 슬러지 교환에 따른 슬러지의 가용화·감량화 효과를 확인하기 위하여 전체 반응조를 통과하는 기체유량을 3 L/min으로 고정하고, 슬러지 체류시간(HRT)을 변화시키면서 유사한 실험을 진행하였다. HRT 변경 실험의 경우 연동펌프를 설치하여 시간당 균일한 양의 슬러지가 슬러지 반응조에 유출입되게 함으로써 반응조 내의 전체 슬러지 부피를 1.2 L로 일정하게 유지하였다. 본 연구에 사용한 HRT 조건은 1시간, 2시간, 4시간, 6시간이었으며, 실험결과의 비교를 위해 슬러지 유출입이 없는 회분실험 조건을 기준조건(reference condition)으로 설정하였다.

2.4 분석 방법

실험분석은 기상 측정항목과 액상 측정항목으로 구분되며, 기상에서 H₂S는 화학산화법을 적용한 연속측정장치인 multiRAE Plus (RAE system, USA)를 사용하여 측정하였다. 기상 오존농도는 50~1,000 ppm 범위의 검지관 (KITAGAWA, JAPAN)을 사용하여 측정하였으며, 슬러지 내 유기물이 최종 분해되어 생성되는 이산화탄소는 CO₂ Analyser(Li-COR, USA)를 사용하여 슬러지가 오존에 의해 분해되어 생성되는 이산화탄소 농도를 정량화 하였다. 활성 슬러지의 TCOD와 SCOD는 HACH사의 COD 측정 kit를 사용하였고, SS

는 GF/C 필터(Whatman®)를 이용한 건조중량법으로 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 기상 체류시간 변화에 따른 악취제거 효율과 슬러지 성장 변화

기상 체류시간(GRT) 변화에서 의한 저온 플라즈마 반응기에서의 악취 제거 효율과 플라즈마 반응에서 발생하는 기체상 오존의 농도를 측정하였다. 플라즈마 반응을 유도하기 위하여 투입되는 전력은 13 W(전압 13 kV, 전류 1 mA)를 직류 전원공급장치로 일정하게 공급하였으며, 기체 유량만을 변경하여 실험을 진행하였다. Fig. 2 에 플라즈마 반응조를 통과한 후의 기체상 황화수소 농도를 나타내었다. 반응기에 유입되는 황화수소 농도는 10 ± 1 ppm으로 4시간 동안 일정 수준으로 주입하였다. 플라즈마 반응기를 거친 황화수소의 제거율은 GRT 5초에서 65%, GRT 10초에서 76%, GRT 15초에서는 황화수소가 검출되지 않았다. 기상 체류시간이 길어질수록 황화수소 처리효율은 높게 나타났다. 또한, 최종적으로 슬러지 반응조를 거친 황화수소는 더 이상 검출되지 않아 슬러지에 의한 악취 제거 효과가 있음을 확인하였으며 저온 플라즈마와 슬러지 복합 반응조에 의한 악취물질 제거가 효과적일 것으로 판단된다.

황화수소 제거효율과 마찬가지로 기상 체류시간에 비례하여 저온 플라즈마 반응기에서 생성되는 오존 농도가 증가하였는데, GRT 5초에서 100 ppm, GRT 10초에서 200 ppm, GRT 15초에서 400 ppm이 검출되었다. 이를 시간당 발생하는 오존의 양(ozone loading)로 나타낸 결과 평균 98 mg/hour로 체류시간에 관계없이 유사하게 나타나, 실험에 사용한 조건 수준에서 투입 전력이 일정하면 발생 오존의 총량 자체는 동일하다는 점을 확인하였다. 한편 황화수소 유입 없이 동일 소비전력 조건에서 측정한 플라즈마 반응조에서 생성된 오존의 최대 농도는 약 600 ppm 수준이었다.

플라즈마에서 발생한 오존을 포함한 배출 가스를 슬러지 반응조에 공급한 후 슬러지 반응조 내에서 4시간 동안의 유기물 성장 변화를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)는 기상 체류시간 변화에 따른 TCOD 농도변화를 보여주며, 이는 오존에 의한 슬러지의 감량

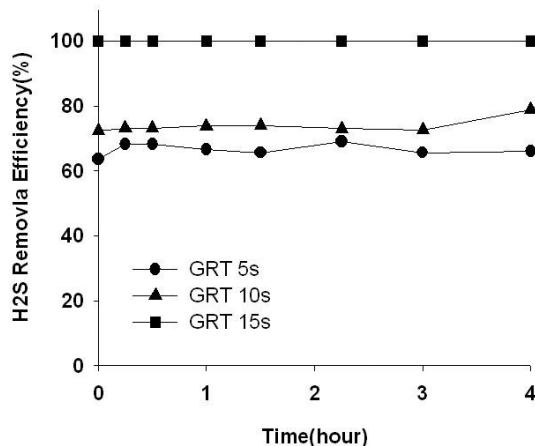


Fig. 2. Changes of hydrogen sulfide removal efficiency in the non-thermal plasma reactor as function of various gas retention times.

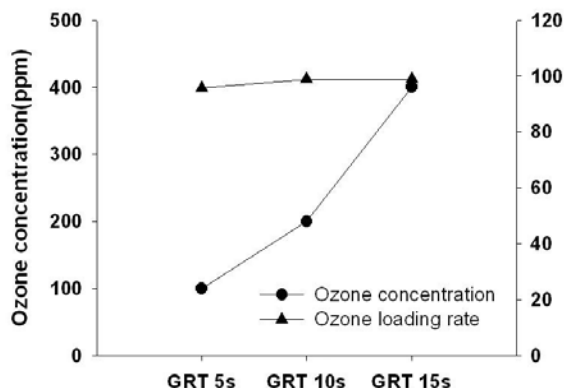


Fig. 3. Ozone concentrations and ozone loading rates depending on the gas retention time

화 효율을 확인하기 위한 것이다. TCOD를 통해 측정된 슬러지의 유기물 감량 효율은 총 운전시간 4시간 동안 초기농도 5781 ± 402 mg/L 대비 평균적으로 약 60%를 나타내었다. TCOD 감량 효과는 기체 체류시간과 오존 농도에 무관하였으며, Fig. 3에 제시한 바와 같이 슬러지 반응조에 유입되는 오존량과 관련됨을 확인하였다.

기체 체류시간에 따른 SCOD의 변화를 측정한 결과가 Fig.4(b)에 제시되었다. SCOD 변화량은 활성슬러지의 오존 처리에 있어 용존성 유기물의 농도 증가와 가용화의 척도가 된다. GRT 5초와 10초의 SCOD 변화율은 운전 4시간 경과 후 초기 농도 105 ± 10 mg/L 대비 각각 4.6배, 4.7배 증가하였다. GRT 15초 조건에서의 SCOD 증가율은 5.7배로 나타나 다른 조건에 비

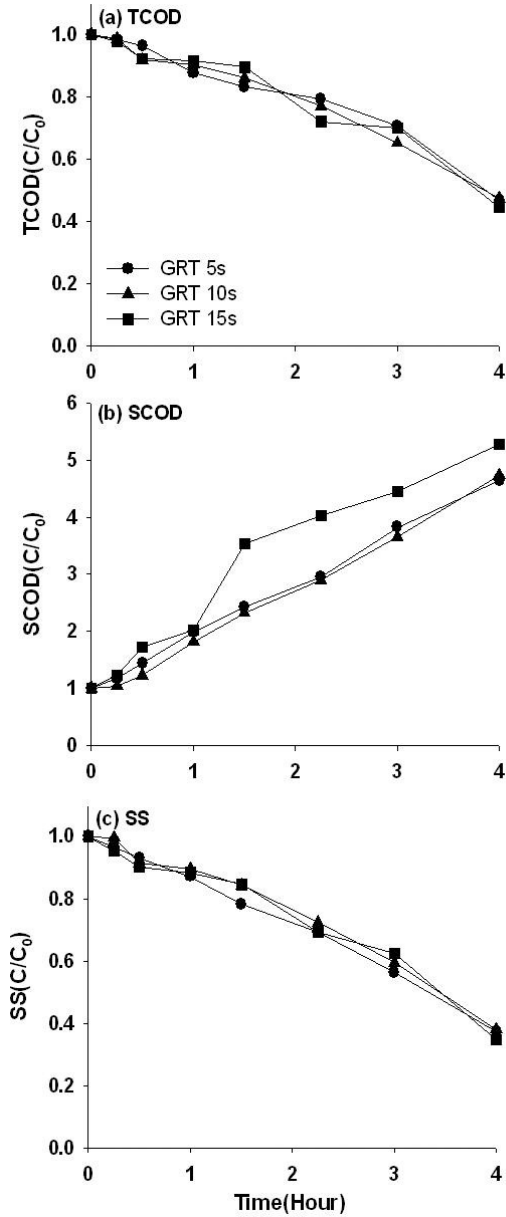


Fig. 4. Changes of (a) TCOD (b) SCOD and (c) SS in the sludge reactor as a function of the gas retention time

해 접촉시간 증가에 따른 슬러지 가용화 효율이 증가한 것으로 보이지만, 그 효과는 매우 적어 오존에 의한 활성슬러지 가용화 효율 변화는 본 연구에서 적용한 체류시간 내에서는 크게 차이가 나지 않는다고 판단된다. 슬러지 반응조의 고형물(SS) 측정 결과 (Fig.4(c) 초기농도 5540 ± 424 mg/L) 역시 TCOD 결과와 비슷한 경향을 나타내었고, 고형물 당 오존 접촉량을 계산해보면 평균 0.083 g-O₃/g-SS로 모든 조건에

서 비슷한 처리 효율을 보였다. 본 연구의 오존 접촉량과 TCOD감소량은 슬러지 감량화에 오존 발생기를 적용한 다른 연구에 비해 상대적으로 다소 높은 경향을 보이고 있다(이창근, 2004). 이는 대상 슬러지 성상에 따라 다소 차이를 나타낼 수 있는 것으로 판단되며, 또한 플라즈마 반응기를 통과하면서 생성된 오존 이외의 O, O⁺, O²⁺, H⁺, OH같은 활성기에 의해 추가적인 유기물 분해가 촉진되어 나타난 결과로 판단된다(이해완, 2003).

플라즈마 반응기를 거친 기체상 오존과 미처리된 황화수소가 포함된 배출 가스를 슬러지 반응조에 연속적으로 유입시킨 결과, 슬러지 액상 내의 pH 변화 (Fig.5(a))는 초기 7.3 수준에서 6.5 수준으로 세 조건 모두 비슷한 수준으로 감소하였다. 이는 오존과 반응한 황화수소에 의한 액상 황산이온 증가와 잉여분의 오존이 액상 내 유기물 또는 질소원과 반응하여 발생한 현상으로 판단된다. (Deleris, 2002)

슬러지와 오존이 반응하여 유기물이 분해되면서 최종적으로 발생하는 이산화탄소 농도 검출결과는 Fig. 5(b)에 나타내었다. 초기 이산화탄소 농도는 약 1800

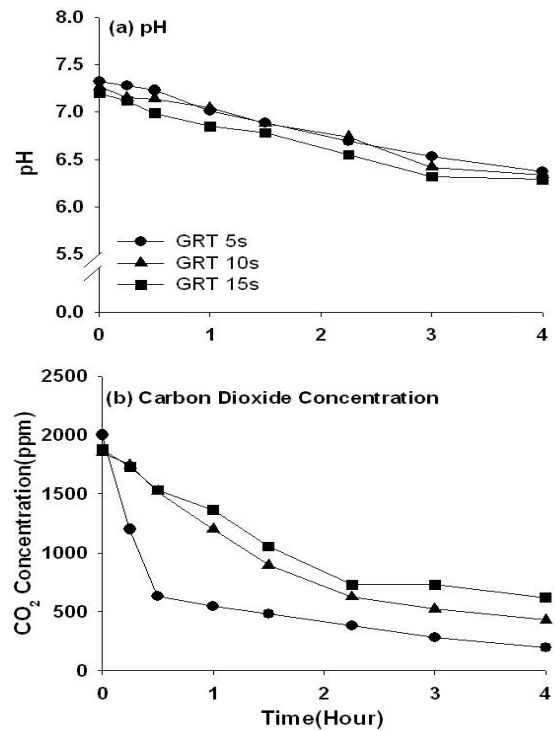


Fig. 5 Change of (a) pH and (b) CO₂ concentration in the sludge reactor as a function of the gas retention time

~2000 ppm 수준으로 나타났으며, 운전 시간이 지속될수록 점차 감소하여 GRT 5초의 경우 약 30분 이후 안정화되어 약 500 ppm 수준 이하로 검출되었다. GRT 10초와 15초의 경우 운전시간 2시간 이후 안정화되어 약 700 ppm 수준으로 검출되었다. 이는 산화되기 쉬운 유기물(readily-biodegradable Organics)이 오존과 빠르게 반응하여 분해되고, 나머지 난분해성 유기물이 지속적으로 산화 과정을 통해 분해되면서 일정한 농도로 검출되는 것으로 보인다. 이를 통해 플라즈마에 의해 발생한 오존에 의해 슬러지 내 유기물이 효과적으로 산화되고 있음을 확인할 수 있었다.

3.2 액상 체류시간 변화에 따른 슬러지 성상 변화

액상 체류시간(HRT) 변화 실험에서는 저온 플라즈마 반응기 내에 투입되는 전력량은 13 W(13 kV×1 mA), 유량은 3 L/min 조건으로 운전하였으며, 이에 따라 슬러지 반응조 내에 유입되는 오존 농도는 200 ppm 수준으로 4시간의 반응시간 동안 일정하게 유지되었다. 또한 액상 교환의 효과를 판단하기 위하여 동일한 실험조건에서 액상 교환 없이 진행한 실험결과를 기준조건(reference condition)으로 설정하여 연속 운전한 결과를 비교하였다. 슬러지 반응조 내 액상 체류시간은 HRT 1시간, 2시간, 4시간 그리고 6시간 조건으로 변경하여 실험을 진행하였다.

슬러지 반응조에서 HRT 변화에 따른 슬러지 내 총 유기물(TCOD) 변화를 Fig. 6(a)에 나타내었다. HRT 6시간의 조건에서 4시간 운전 후 TCOD는 초기 농도 5335 ± 145 mg/L 대비 약 70% 감소하여 액상 교환이 일어나지 않은 기준조건과 유사한 유기물 감량 효과를 보였다. HRT 1, 2, 4시간 조건에서는 초기 TCOD 대비 각각 29%, 32%, 33% 감소하여 기준조건보다는 낮은 감량화를 보였으나, HRT가 가장 빠른 1시간 조건에서도 약 30%의 안정적인 감량화 효율을 보이는 것으로 나타났다. HRT 6시간의 조건에서는 적절한 수준의 분해가 쉬운 유기물질이 지속적으로 슬러지 반응조 내에 공급되어, 오존에 의한 슬러지의 분해 효율이 더 향상된 것으로 보인다. HRT 1, 2, 4시간의 경우 주입 오존에 비해 액상의 교환 속도가 빨라 유기물질이 충분히 처리되지 못하고 배출되어 상대적으로 낮은 효율을 보인 것으로 생각된다. 운전 시간 총 4시간 동안 액상 교환에 의한 총 슬러지 양과 접촉한 오

존 농도를 계산하여 슬러지 부피 당 접촉한 오존량($g-O_3/L$)으로 환산하여 나타낸 결과, HRT 1, 2, 4, 6시간에서 각각 0.06, 0.12, 0.24, 0.36 $g-O_3/L$ 로 체류시간이 길수록 접촉 오존량은 높아졌다. 따라서 슬러지의 감량화 효율 역시 체류시간에 비례하여 높게 나타난 것으로 보인다.

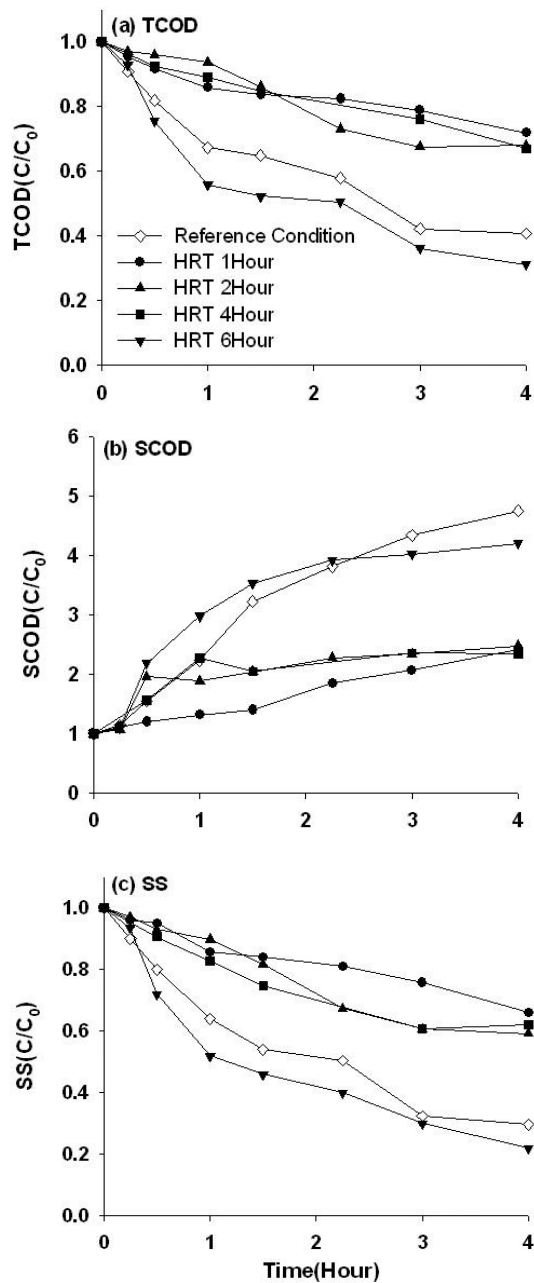


Fig. 6. Changes of (a) TCOD (b) SCOD and (c) SS in the sludge reactor as a function of the hydraulic retention time

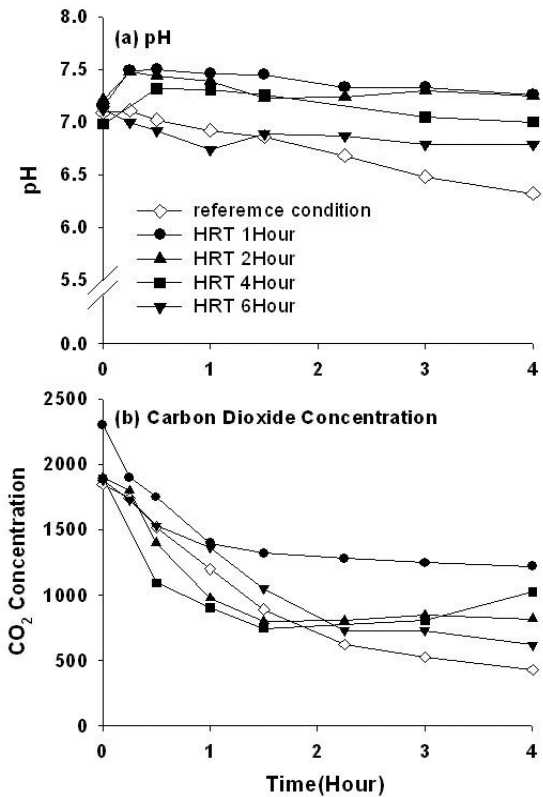


Fig. 7. Change of (a) pH and (b) CO₂ concentration in the sludge reactor as a function of the hydraulic retention time

HRT 변화에 따른 SCOD의 변화를 Fig. 6(b)에 나타내었다. SCOD 증가 역시 HRT 6시간의 경우 액상 교환이 없는 기준조건과 비슷하게 초기 농도 166 ± 37 mg/L 대비 약 4~4.5배의 유사한 증가율을 보였으며, 보다 빠른 액상 교환율을 보이는 HRT 1, 2, 4시간 경우 초기 대비 약 2배의 증가율을 보였다. 이를 통하여 액상 교환이 있는 상태에서 오존에 의한 슬러지의 가용화 효과를 확인하였으며, 그 효율은 액상 교환이 없을 때보다 다소 낮게 나타났으나 운전 시간 동안 안정적인 효율을 나타내어 연속운전 적용가능성을 확인하였다.

액상 체류시간을 변경하였을 때의 pH 변화를 Fig. 7(a)에 나타내었다. Fig. 5(a)에 제시한 기상 체류시간을 변화시키는 경우, 슬러지 반응조에서 오존이 유입됨에 따라 액상의 pH는 운전 시간과 비례하여 감소하였다. 액상 교환이 일어나지 않는 기준조건과 HRT 6시간 조건에서는 pH가 감소하였으나, HRT 1, 2, 4시간의 경우에는 pH가 약간 상승하거나 일정한 상태를

유지하는 현상이 관찰되었다. 이는 산화반응과 황화수소 유입으로 pH가 감소되는 속도보다 새로운 슬러지가 유입되는 속도가 빠르기 때문에 pH의 변화가 작게 나타나는 것으로 판단된다.

슬러지의 최종 분해 산물인 이산화탄소의 농도 측정 결과 (Fig. 7(b)), 대부분의 운전조건에서 기준조건과 유사하게 이산화탄소의 농도가 초기 1시간 이내에 급격하게 감소하고 그 이후는 일정 농도를 유지하는 형태를 취하고 있다. 그러나 이산화탄소의 최종 농도는 기준조건이 가장 낮게 나타나, 액상 교환에 이루어지는 경우 슬러지 반응조 내에 슬러지가 교환되고 분해가 용이한 유기물이 지속적으로 투입되기 때문으로 판단된다.

3.3 비에너지 투입량에 따른 악취물질 제거효율과 슬러지 감량화를 변화

체류시간에 의한 악취물질 제거효율 변화와 슬러지 감량화를 공학적으로 판단하기 위하여, 부피당 비에너지 투입량(specific input energy)에 따른 황화수소 제거효율, 오존 발생량, 오존에 의한 슬러지 가용화율(solubilization)을 비교하였다. 기상 체류시간(GRT) 체 유량(L_{air})에 따라 달라지므로 실험 진행 4시간 동안을 기준으로 하여 비에너지를 계산하였으며, 액상 체류시간(HRT)의 경우 기상 체류시간은 일정하나 슬러지의 유입·유출에 따라 달라지므로, 교환되는 슬러지의 부피(L_{sludge})를 기준으로 비에너지를 계산하였다. 또한 슬러지 가용화율을 보다 명확히 나타내기 위하여 초기 TCOD와 SCOD 차이와 산화반응에 의하여 생성되는 SCOD의 농도를 백분율로 나타낸 공식을 이용하여 계산하였다.

$$\text{Solubilization Efficiency (\%)} = \frac{SCOD_t - SCOD_0}{TCOD_0 - SCOD_0} \times 100 \quad (1)$$

황화수소 제거율은 비에너지 투입률이 증가할수록 발생 오존농도에 비례하여 증가하였다 (Fig. 8(a)). 이는 시간당 공급되는 에너지가 일정할 때, 적용되는 기체 유량이 적을수록 산화 과정에 필요한 접촉시간과 에너지를 충분히 공급받기 때문으로 생각된다. 이를 슬러지 반응조의 유기물 산화에 적용할 경우 슬러지의 가용화율은 비에너지에 따라 비례적으로 증가하였다 (Fig. 8(b)). 하지만 적정 유량 이하의 기체가 슬러지 반응조 내에 공급될 경우 슬러지의 혼합·순환 효과

가 낮아져 슬러지의 가용화율이 지속적으로 증가하지 못할 가능성이 높으므로, 높은 수준의 가용화율을 얻기 위해서는 유입기체와 슬러지가 충분히 혼합 접촉할 수 있을 수준의 기체 유량을 적용하여야 할 것이다.

액상 체류시간 변화에 따른 비에너지(J/L_{sludge})의 경우(Fig. 9), 액상 교환 속도가 유입되는 오존 접촉량에 비해 빠르게 되면 감량화 효율이 상대적으로 낮아지는 현상을 확인하였다. 그러나 액상 체류시간 4시간(비에너지 $156,000 J/L_{sludge}$) 이상의 조건에서는 감량화 효율이 더 증가하지 않고 일정하게 나타났다. 이는 오존 접촉량에 따른 적절한 수준의 액상 체류시간은 4시간 정도인 것을 의미하며, 실제 현장 적용 시에는 비에너지당 가용화율이 안정적으로 나타나는 체류시간을 선택하여 운전하는 것이 바람직하다고 생각된다.

4. 결론

본 연구에서는 하폐수처리장에서 발생하는 주요 환경현안인 악취와 슬러지 처리 처분 문제를 동시에 해결하기 위하여, 저온 플라즈마 오존 산화시스템을 도입하였다. 실험 조건으로는 기상 체류시간과 액상 체류시간을 변경하여 그에 따른 악취 제거 효율과 슬러지 감량화 효율을 알아보려고 하였다. 저온 플라즈마에 일정 인가전력(13 W)을 공급하는 조건에서 기체 유량을 변경하여 실험을 진행한 결과, 기체 체류시간이 길어질수록 높은 오존농도와 그로 인한 황화수소 처리 효율의 상승을 확인하였다. 플라즈마에서 발생한 오존 발생량에 의한 슬러지 성장 변화를 측정된 결과 기상 체류시간에 의한 차이는 운전시간 4시간 동안 3% 이내로 큰 차이를 보이지 않았는데, 이는 공기유량이 다른 경우에도 투입되는 오존 총량이 같으면 동일한 슬러지 감량화 효과를 얻을 수 있음을 보여준다. 동일한 조건에서 슬러지 반응조 내 액상 체류시간을 변경한 실험의 결과, 액상 교환이 없는 조건과 비교하였을 때 슬러지 감량화·가용화율은 상대적으로 낮게 나타났으나 30% 수준의 안정적인 감량화 효율을 보였다. 일정 체류시간(HRT 4시간) 이상 운전조건에서는 비에너지 투입량이 증가하여도 가용화율이 더 이상 상승하지 않아, 저온플라즈마 산화시스템의 에너지 소모량을 줄이고 고형물 가용화율을 높게 유지하기 위한 적정 체류시간을 선택할 필요가 있다.

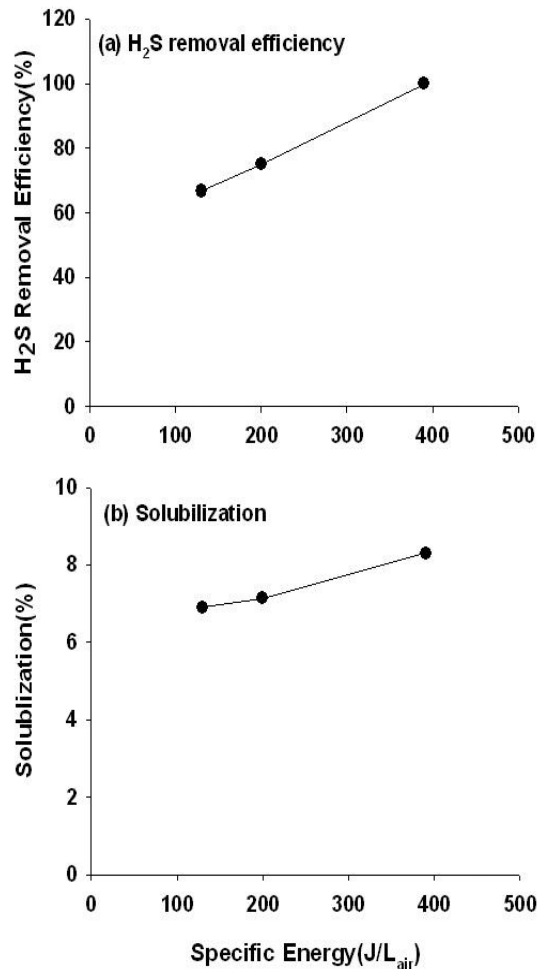


Fig. 8. Changes of (a) hydrogen sulfide removal efficiencies and (b) solubilization efficiencies with respect to specific input energy by air volume

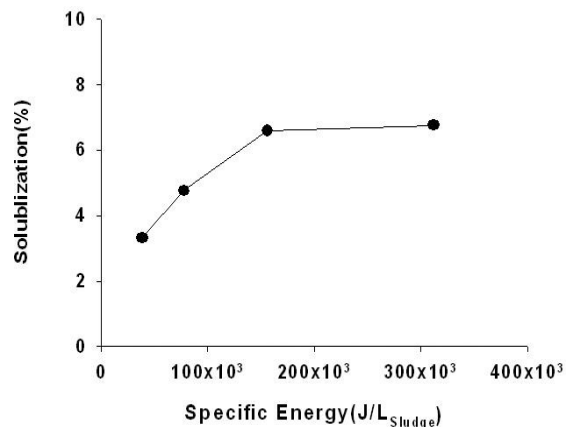


Fig. 9. Change of solubilization efficiencies respect to specific input energy by sludge volume

사 사

본 연구는 2009년도 정부(교육과학기술부)의 한국연구재단의 지원으로 수행된 연구입니다(No. 2009-0071114).

참고문헌

- 김대승, 2000, "산업현장의 악취 제거 기술과 최근동향," 한국공업화 학회 환경기술심포지엄, 111-134.
- 김정웅, KweKu SeKyama, 이도원, 김현욱, 2006, "하수 및 하수처리장에서 발생하는 악취에 대한 고찰", 한국냄새환경학회지, Vol.5, No.3, pp.180-192.
- 김현하, 오가타 아쓰시, 후타무라 시게루, 2006, "저온플라즈마 구동 촉매 반응기를 이용한 벤젠과 톨루엔의 처리", 한국대기환경학회지, Vol. 22, No. 1, pp. 43-51.
- 남영우, 한금석, 2011, "국내 하수슬러지 처리현황 및 개선방안", 한국폐기물자원순환학회, Vol. 28, No. 1, pp. 103-109
- 박귀환, 오길영, 이지현, 정경훈, 정선용, 2005, "3개 유형의 하수처리장에서 발생하는 악취물질의 비교", 한국냄새환경학회지, vol. 4, No. 4, pp. 196-206.
- 이명주, 김태형, 정미영, 김진성, 이연행, 황선진, 2008, "균질기 및 금속촉매/오존산화에 의한 가용화 처리가 호기성처리에 의한 하수슬러지 감량화에 미치는 영향", 한국폐기물학회지, Vol. 25, No. 7, pp. 619-625.
- 이순화, 정계주, 권진하, 이세환, 2011, "마이크로버블오존을 이용한 잉여슬러지 가용화 처리가 생물반응조의 성능에 미치는 영향", 대한환경공학회지, Vol. 33, No. 2, pp. 113-119.
- 이창근, 황은주, 강성재, 빈정인, 이병현, 2004, "오존을 이용한 하수슬러지의 감량화와 안정화", 한국물환경학회지, Vol. 20, No. 3, 290-295.
- 이해완, 류삼곤, 박명규, 박현배, 황경창, 2003 "유전체 충전형 플라즈마 반응기를 이용한 Trichloroethylene의 분해반응", 한국화학공학회, Vol. 41, No. 3, 368-376.
- 전관수, 양봉호, 전창훈, 2011, "오존과 초음파 동시처리에 의한 하수슬러지 가용화 특성 연구", 한국폐기물자원순환학회지, Vol. 28, No.1, pp. 60-66.
- 팽종인, 박혜숙, 김학민, 2004, "하수처리장 악취발생원 도출 및 저감능 평가", 환경관리학회지, Vol. 10, No. 2, pp. 101-109.
- 환경부, 2008, "하수슬러지 종합대책"
- 환경부, 2011, "2010년도 공공하수처리시설 운영관리실태 분석결과"
- 황현정, 안혜영, 신승규, 송지현, 2010, "무기악취와 슬러지 동시 처리를 위한 저온 플라즈마의 적용", 상하수도학회지, Vol. 24, No. 1, pp. 85-92.
- Barlindhaug, J., 1992, "Thermal hydrolysate as a carbon source for denitrification", Water Science and Technology, Vol. 33, No. 12, 99
- Chu, L., Yan, S., Xing, X. H. and Jurcik, B., 2009, "Progress and perspectives of sludge ozonation as a powerful pretreatment method for monimization of excess sludge production", Water Research, Vol. 43, pp. 1811-1822.
- Deleris, S., Geaugey, V., Camacho, P., Debellefontaine, H. and Paul, E., 2002. "Minimization of sludge production in biological processes: an alternative solution for the problem of sludge disposal", Water Science and Technology Vol. 46 No. 10, 63-70.
- Hayashi, N., Suganuma, H., Satoh, S. and Yamabe, C., 2001, "Treatment of volatile organic compounds by positive streamer corona using a series gap", Japanese journal of applied physics, Vol. 40, pp. 6104-6018.
- Moreau, M., Orange, N., Feuilloley, M. G. J., 2008, "Non-thermal plasma technologies: New tools for biodecontamination", Biotechnology Advances, Vol. 26, pp. 610-617.
- Muller, J, 2000, "Pretreatment processes for the recycling and reuse of sewage sludge", Water Science and Technology, Vol. 42, No. 9, pp. 167-174.
- Oda, T, 2003, "Non-thermal plasma processing for environmental protection: decomposition of dilute VOCs in air", Journal of Electrostatics, Vol. 57, pp. 293-311
- Song, J. J., Takeda, N. and Hiraoka, M., 1992, "Anaerobic treatment of sewage sludge treated by catalytic wet oxidation process in upflow anaerobic sludge blanket reactors", Water Science and Technology, Vol. 26, pp. 867-874.
- Kinney, K. A., Loehr, R. C. and Corsi R. L., 1999, "Vapor-phase bioreactors: avoiding problems through better design and operation," Environ. Prog. Vol. 18, pp. 222-230.
- Tanaka, S., Kobayashi, T., Kamiyama, K. and Bildan, M. L, 1997, "Effects of thermochemical pretreatment on the anaerobic digestion of waste activated sludge",

- Water Science and Technology**, Vol. 35, No. 8, pp. 209-216.
- Tonkyn, R. G., Barlow, S. E., Orlando, T. M., 1996, "Destruction of carbon tetrachloride in a dielectric barrier/packed-bed corona reactor", **Journal of Applied Physics**, Vol. 80, No. 9, pp. 4877-4886.
- Van Langenhove, H., Lootens, A. and Schamp, N., 1988, "Objective evaluation of an odour nuisance problem based on inquiry results", **Atmospheric environment**, Vol. 22, No. 11, pp. 2509-2513.
- Yamamoto, T., Ramanathan, K., Lawless, P. A., Ensor, D. S., Newsome, J. R., Ramsey, G. H. and Plaks, N., 1992, "Control of volatile organic compounds by an acenergized ferroelectric pellet reactor and a pulsed corona reactor", **IEEE Transaction on Industry Applications**, Vol. 28, No. 3, pp. 528-534.