

論 文

선택적인 Aerobic-Anoxic과 Aerobic 슬러지소화에서의 수질특성 비교
The Comparison of the Characteristics of Water Quality in Alternative Aerobic-Anoxic and Aerobic Sludge Digestion

임 봉 수

Bong-Su Lim

Abstract

The objectives of this study were to compare the characteristics of water quality in alternative Aerobic-Anoxic(A/A) and Aerobic(Control) sludge digestion. The A/A process control parameter as the pH signal(dpH/dt) was used. Comparison of the result of A/A digestion with those of Aerobic digestion indicated a 54% saving in aeration compared to Aerobic digestion. TN removal efficiency rates of A/A and Aerobic digestion were 45% and 4%, respectively. The concentration of COD(64 mg/l and 268 mg/l for the A/A and Aerobic digestion, respectively) and Ortho-P in the supernatant were also less with A/A digestion. MLVSS and Coliform destructions were noticed similar for both digestion, but better dewatering characteristics were noted for the A/A digestion.

1. 서 론

효과적인 생물학적 영양소 제거를 위해 선택적인 Aerobic-Anoxic(A/A) 공정은 적절한 공간적인 배열로 적용 가능하고, 내적인 혼합액 반송이 필요 없고, 전체적인 호기성 주공정에 비해 에너지가 절약되며 기존처리장에 쉽게 이용할 수 있는 장점이 있다. 또한 A/A공정은 소화 효과가 좋고 반송되는 상징수의 영양소를 낮은 농도로 처리하여 처리장내에서 상징수흐름(side-stream)의 오염 부하를 줄일 수 있어 슬

러지 소화에 적용하게 되었다. 1,2)

DO, ORP, pH와 같은 실제시간(real time) 제어요소들이 생물학적 폐수처리에서 산소섭취율과 함께 널리 사용되고 있으며^{3,4,5,6)} DO는 A/A공정의 제어를 위해 사용되었지만^{7,8)} 호기성 조건이외의 호흡상태를 인식할 수 없다는 단점이 있다. A/A공정의 제어에 이용되는 On-line 요소는 Anoxic과 혐기성 조건에서도 실제 호흡상태를 잘 나타내 주어야 한다. pH는 선택적인 질산화와 탈질소화 반응에 잘 나타나므로 컴퓨터 장치와 pH sensor를 이용하여 효과적인 on-line 제어요소로 쉽게 감지할 수 있다.³⁾

본 연구의 목적은 A/A 슬러지 소화 공정제어를 위해 실제시간 제어요소로 d(pH)/dt로 적용

*대전대학교 환경공학과 부교수

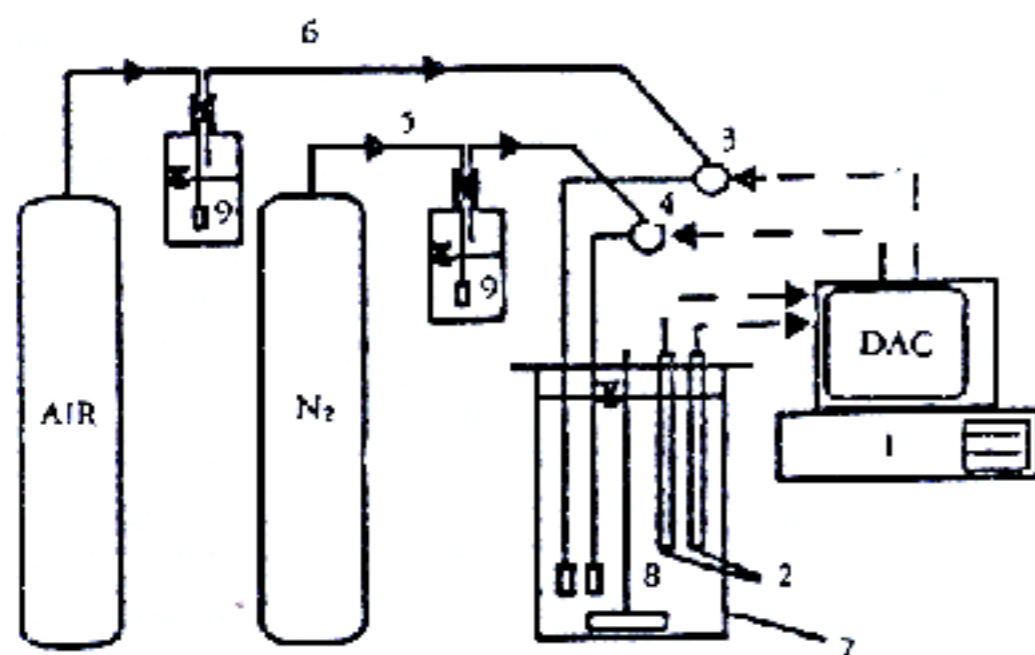
운전하였을 경우, A/A와 연속적인 호기성슬러지 소화의 수질 특성을 비교해 봄으로써 선택적인 Aerobic-Anoxic 슬러지소화가 호기성소화보다 오염물질 제거나 안정화면에서 양호한 지를 검토하고 A/A 슬러지 소화공정의 활용을 위한 기초자료를 제공하는데 있다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험장치

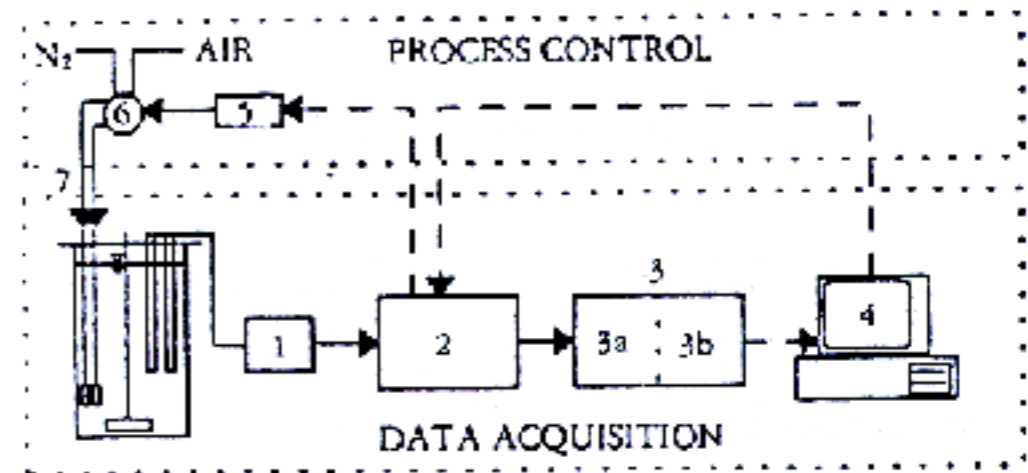
소화조는 발효조(14L)를 사용하였으며 유효용량은 10L로 실험하였다. 공기와 질소 가스는 DAC(Data Acquisition and Control) System에 연결시킨 Solenoid 밸브에 의해 조정되어 소화조에 교대로 주입된다. 슬러지는 200rpm 정도로 혼합하였으며 공기와 질소의 교대 주입에 의해 호기성 또는 Anoxic Cycle로 번갈아 유지된다. 그림 1은 A/A 공정에 의한 슬러지 소화조의 실험장치이다.

DAC System은 intrface card를 갖는 IBM PC와 terminal panel, interface software로 구성되어 있으며, pH와 ORP probe는 terminal panel에 연결되어 번갈아 PC에 있는 interface card에 연결된다. 그림 2는 DAC System을 보



- LEGEND :
- | | |
|----------------------------|-------------------------------|
| 1. DAC System | 6. Air Supply Line |
| 2. ORP & pH Probes | 7. Digester(or AAA reactor) |
| 3. Air Solenoid Valve | 8. Sludge(or mixed liquor) |
| 4. Nitrogen Solenoid Valve | 9. Gas Humidification Bottles |
| 5. Nitrogen Supply Line | |

그림 1. 선택적인 Aerobic-Anoxic(A/A) 공정장치



LEGEND :

- | | |
|--------------------|-------------------------|
| 1. pH/mV Meter(s) | 5. Solid State Relay(s) |
| 2. Terminal Panel | 6. Solenoid Valve(s) |
| 3. Interface Card | 3a. Signal Conditioning |
| 3b. A/D Conversion | 7. Air/Nitrogen Supply |
| 4. PC | 8. Digital Signals |
| | 9. Analog Signals |

그림 2. DAC 시스템의 기능과 요소에 대한 구성도

여주고 있다.

2.2 실험방법

인근 L하수처리장의 1차 활성슬러지에서 채취한 폐활성슬러지(현장운전 SRT = 약 4-6일로 운전됨)를 실험 전에 SS농도 약 1% 정도로 침전시켜 기존의 슬러지 없이 반응조에 주입하여 batch 운전으로 하였으며 실내온도는 약 20°C에서 실험하였다.

선택적인 A/A 운전 제어를 위해 pH를 사용하였는데 제어점(Nitrate가 최대가 되거나 Ammonia가 최소될 때 공기를 주입 또는 정지시켜 제어하는 지점)이 시간에 따라 slope의 변화점으로 나타나는 데 수학적으로 그지점에서 $d(pH)/dt$ 가 0일 때 최대 혹은 최소점을 갖는다. 이와같은 원리를 적용한 software을 이용하여 Air On/Off에 의해 aerobic구간은 pH가 감소하는 slope, anoxic 구간은 pH가 증가하는 slope를 갖도록 하였다. ORP와 pH의 연속적인 monitoring 외에 시료는 주기적으로 MLSS, MLVSS, Solid Nitrogen, SCOD, TKN, NH_4^+ , NO_3^- , NO_2^- , 알카리도, 대장균수 항목을 분석하였다. 분석방법은 Standard Methods⁹⁾를 따랐다. 슬러지 탈수성을 위해서는 비서항계수를 Büchner Funnel을 이용하는 방법¹⁰⁾으로 택했다.

3. 결과 및 고찰

3.1 선택적인 A/A 슬러지소화의 특성

선택적인 A/A 공정의 제어점(Nitrate Apex와 Ammonia Valley)이 pH 곡선에서 시간에 따르는 Slope의 변화심으로 잘 나타나며, pH의 Slope를 이용하여 수학적으로 $d(pH)/dt$ 에 의해 On-line으로 조정할 때도 실제시간이 제어 가능한 것으로 알고 있다. 11)

그림 3은 A/A 슬러지소화 운전(dpH/dt 로 제어)시 Track study에서 얻은 pH와 ORP와 함께 나타난 질소와 알카리도의 상호 변화의 한 예를 나타내고 있다. Anoxic 말기 무렵에 완전한 탈질소화가 될 때 Wareham⁶⁾이 사용한 "Nitrate Knee" (ORP곡선의 최소점)을 관찰할 수 있으며 이에 따른 pH증가, NO_3^- -N의 감소와 NH_4^+ -N의 증가, 알카리도의 증가되는 현상이 잘 일치하고 있었다. Anoxic 반응에서 ENR(Endogenous Nitrate Respiration)동안 생성된 NH_4^+ -N은 평균 $0.29mg NH_4^+$ -N/ $mg NO_3^-$ -N deni.으로 이론적인 0.25와 거의 비슷하였고, Aerobic 반응에서 알카리도의 생성은 $3.6mg CaCO_3/mg NO_3^-$ -N으로 이론치와 거의 동일하였다.

A/A 소화는 46%가 aerobic time, 54%가 anoxic time으로 운전되었고, A/A 소화와 비교하기 위한 Control 반응조로는 연속적인 공기 주입에 의해 충분한 산소가 유지되는 호기성 소화로 운전되었다. 에너지 측면에서 A/A 소화가 연속적인 호기성소화에 비해 54%의 포기 에너지가 절약된다.

3.2 고형물 제거 특성의 비교

MLVSS 감소는 $dX/dt = -k_{xi} X$ ($X = MLVSS, mg/l, k = 1$ 차반응 분해상수, /d) 나타낼 수 있는데 A/A 소화의 경우 $k_{x1} = 0.088 /d, k_{x2} = 0.038 /d$ 로, 호기성소화의 경우 $k_{x1} = 0.084 /d, k_{x2} = 0.043 /d$ 로 계산되었으며 그림 4와 같이 두 단계의 1차 반응으로 solid가 감소되는 특성을 띠었다. MLVSS 감소율은 A/A 소화가

42%, 호기성소화가 39%로 거의 유사하였다.

그림 5는 소화중 슬러지의 MLVSS/MLSS 비율의 변화를 나타내고 있는데 두 경우 나 MLVSS가 차지하는 비율은 적게 감소되는 경향이다. 한편, NVMLSS(Non Volatile MLSS) 감소정도를 비교하여 보면, 호기성소화의 경우 NVMLSS가 1,780mg/l에서 1,320mg/l으로 26%로 감소되었고, A/A 소화의 경우 1,780mg/l에서 1,420mg/l으로 20% 감소되었

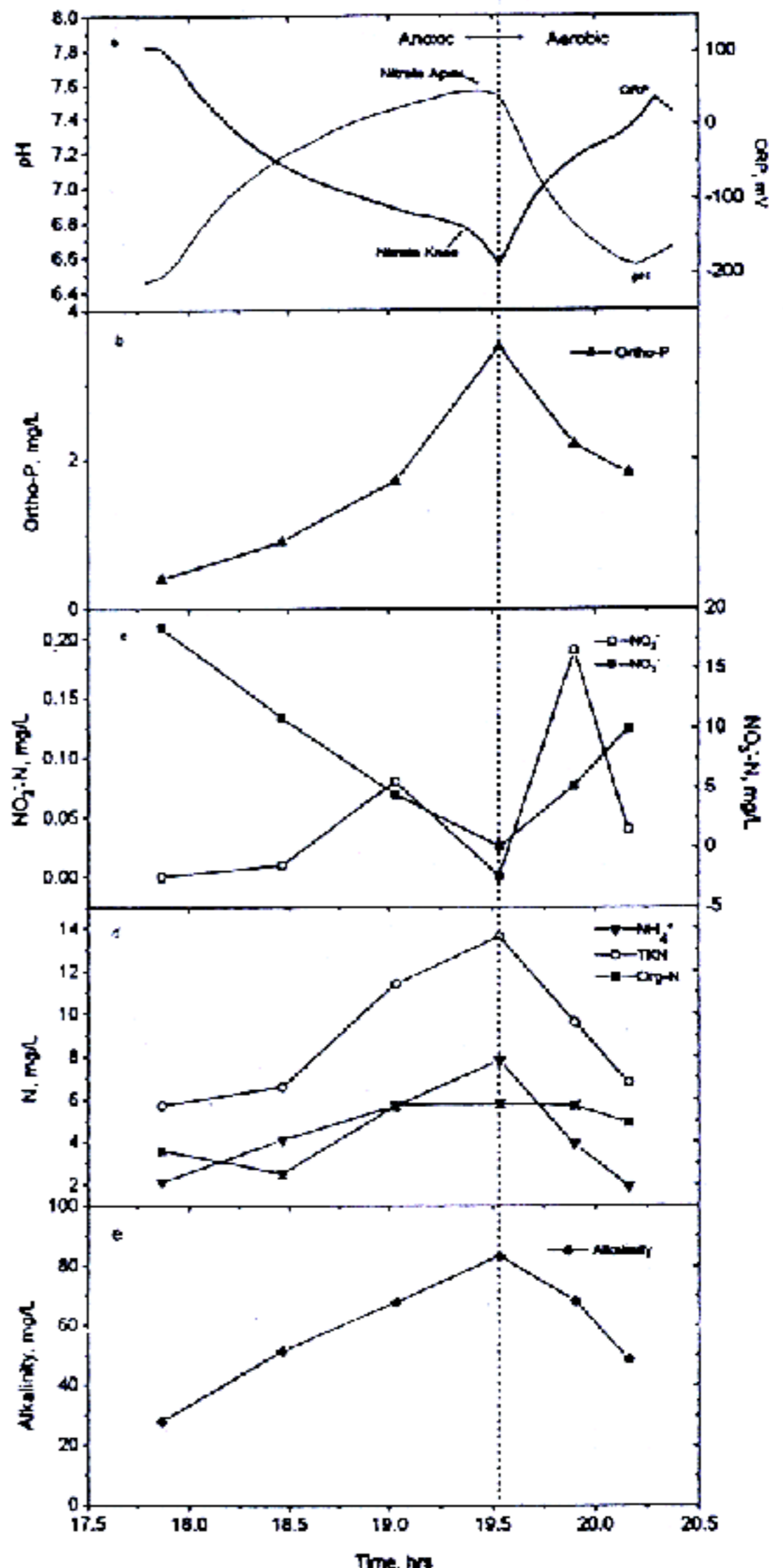


그림 3. A/A 슬러지소화 운전시 Track Study의 결과

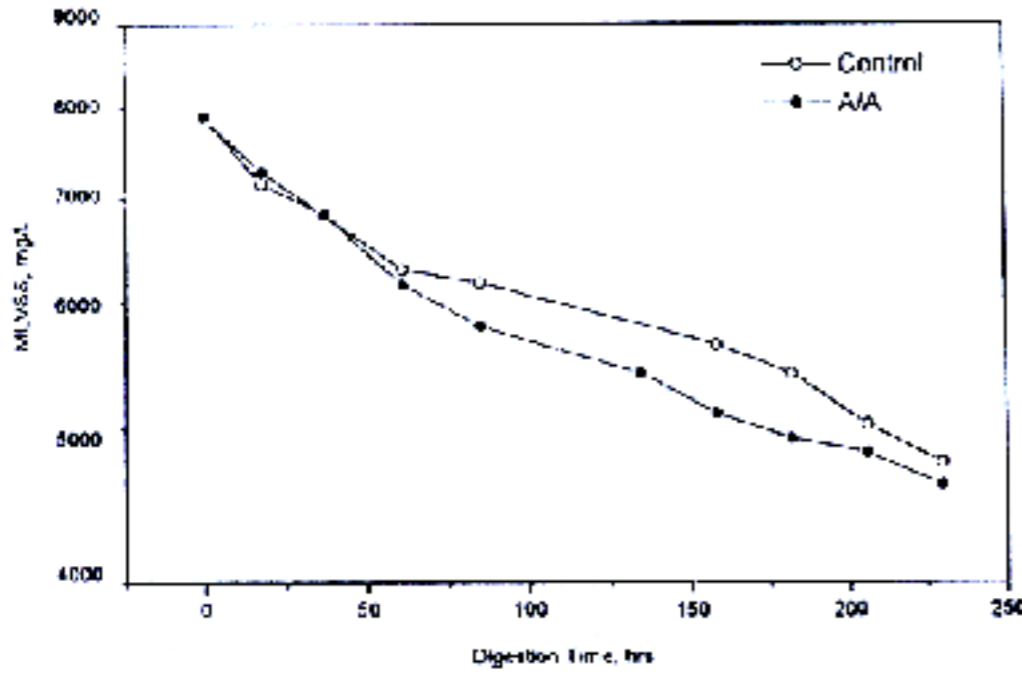


그림 4. MLVSS의 감소특성 비교

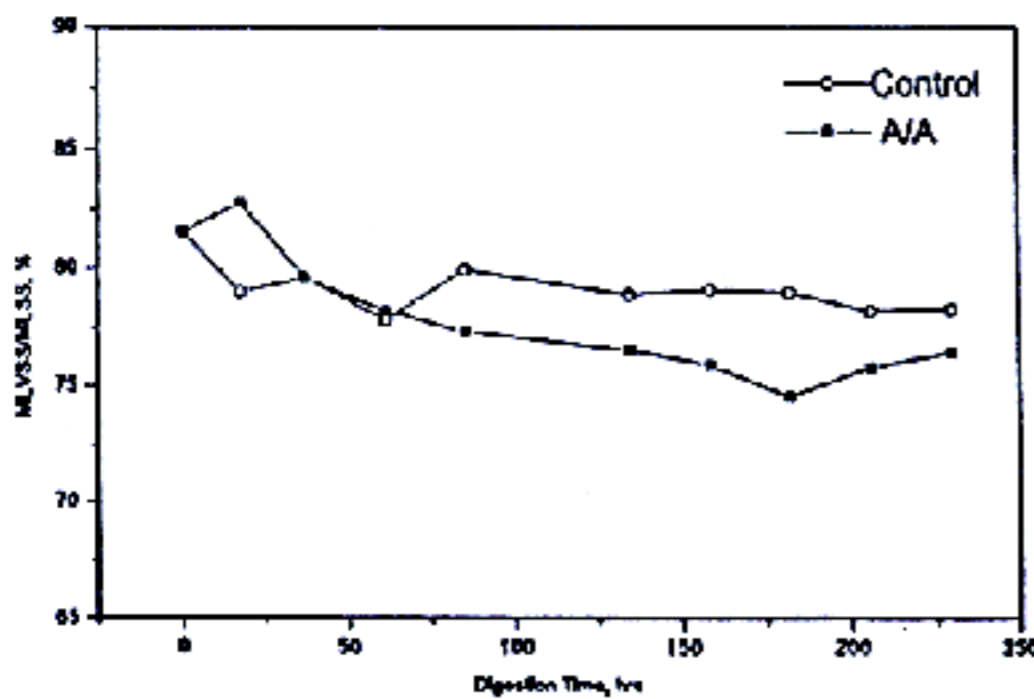


그림 5. 잔유 소화슬러지에 대한 회발성 분율의 변화 비교

나, MLVSS/MLSS 비율이 A/A 소화가 76%, 호기성 소화가 79%로 감소됨은 호기성소화의 NVMLSS 감소가 약간 높기 때문이다.

3.3 질소 제거 및 거동의 비교

Ns(유기질소)의 감소는 A/A 소화의 경우 46%, 호기성 소화의 경우 40%였는데 A/A 소화가 약간 높았다. 그림 6에서와 같이 MLVSS에 남아있는 Ns비율(%)이 A/A 소화가(8.7%) 호기성소화(9.5%) 보다 낮게 나타난 것이 위 사실을 뒷받침하고 있다. 즉 호기성소화가 남아있는 Ns 비율이 높은 것은 Ns가 미생물 세포에 이미 축적되어 있으므로 Ns 제거율이 적어지는 반면에, A/A 소화는 Ns가 세포에서 다른 형태로 전환되어 감소되기 때문에 Ns의 비율이 상대적으로 높은 경향을 띠고 있다.

고형상태에서 방출되는 질소형태의 변화를

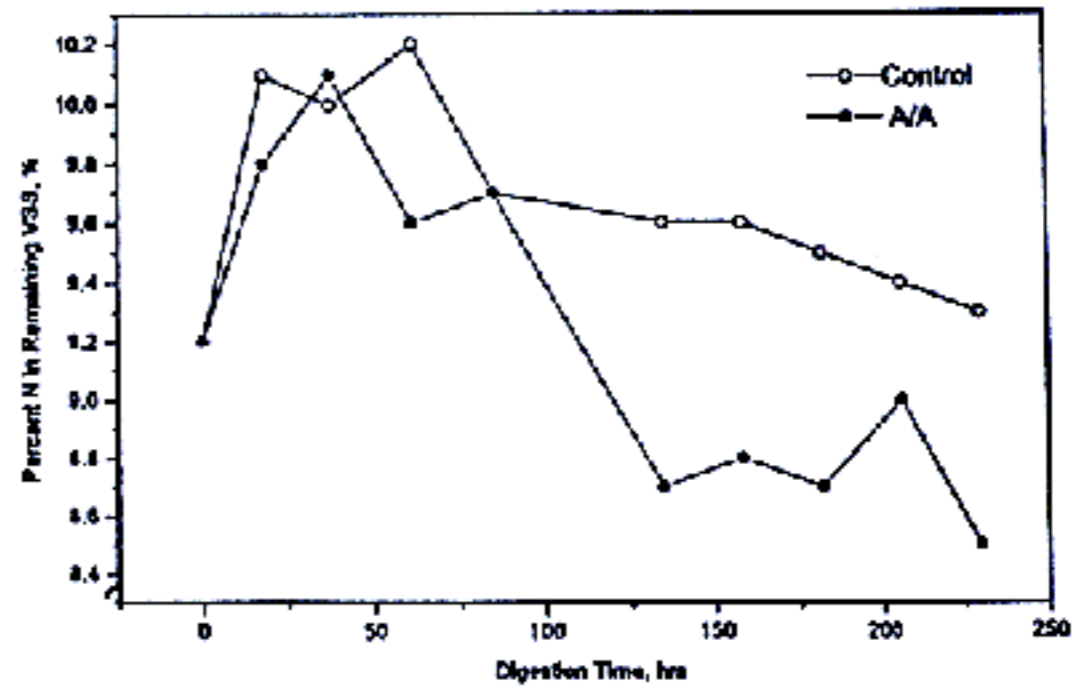


그림 6. 잔유 소화슬러지에 대한 질소함율(%)의 변화 비교

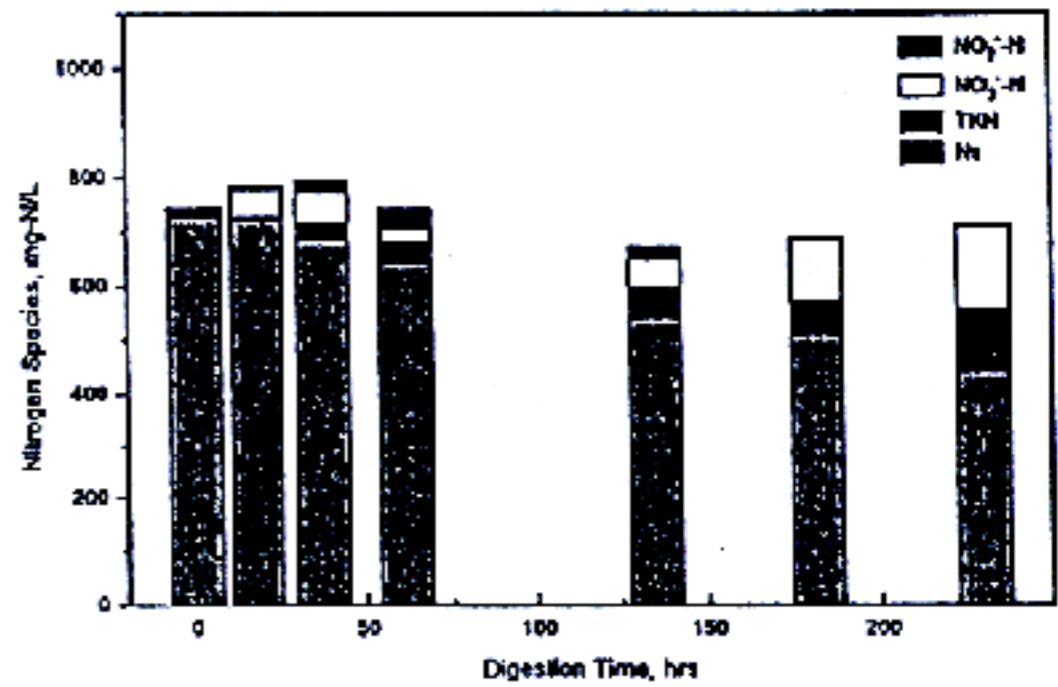


그림 7. 호기성소화 슬러지에 대한 질소형태의 분포

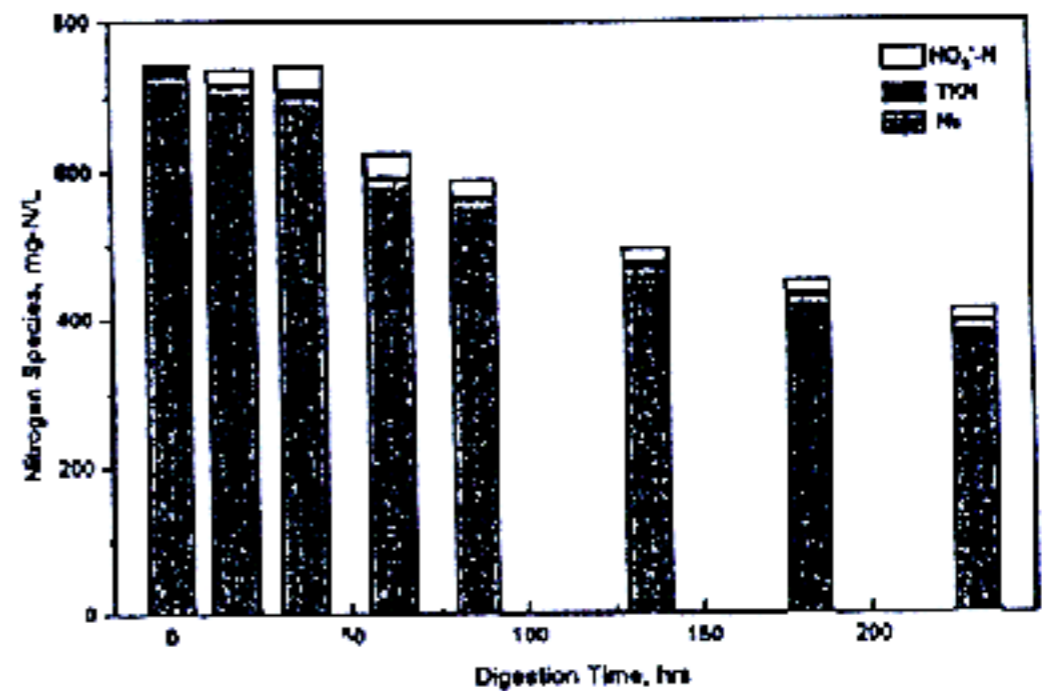


그림 8. A/A 소화 슬러지에 대한 질소형태의 분포

호기성과 A/A 슬러지소화의 경우를 그림 7과 그림 8에 각각 나타내었다. 호기성 소화에서는 방출된 TKN, NO₃-N, NO₂-N은 반응조 내에 축적되지만 A/A 소화에서는 소모되어 축적되지 않는다. 따라서 총질소의 감소는 A/A 소화의 경우 45%, 호기성 경우 4%로 A/A 소화가 뚜

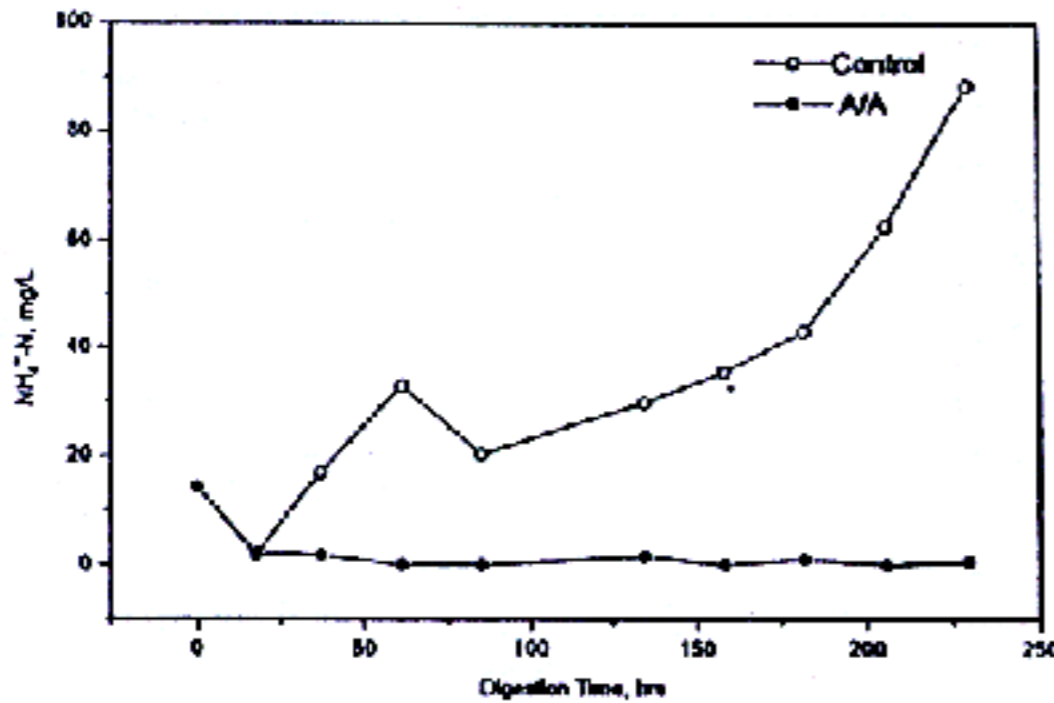


그림 9. 소화기간에 따르는 NH₄⁺-N의 변화 비교

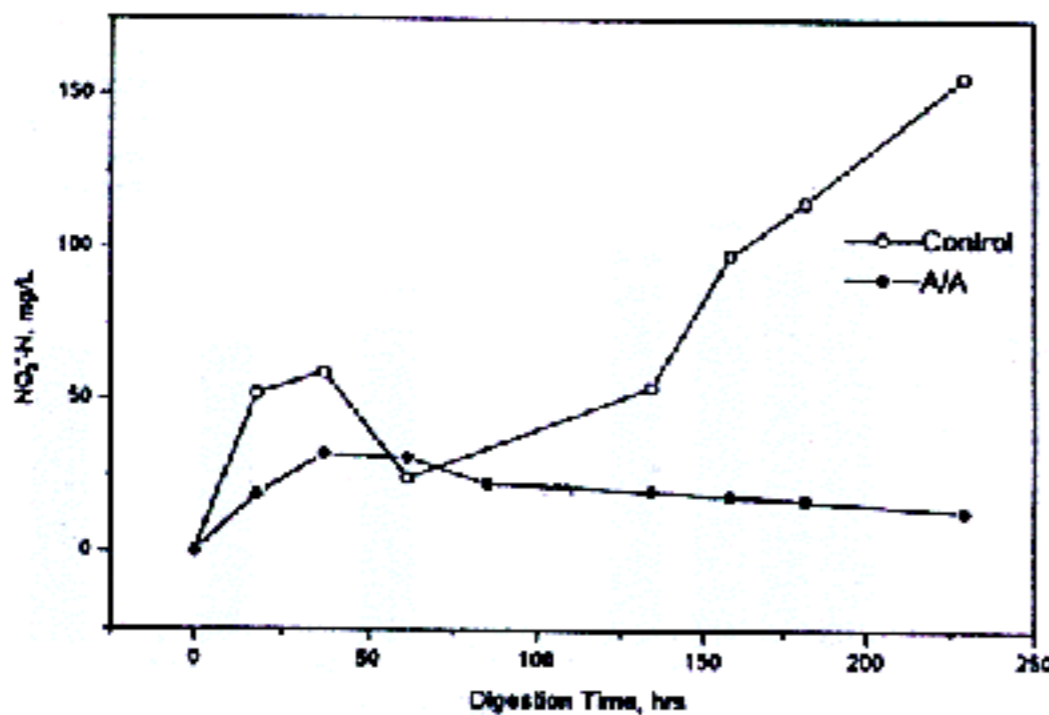


그림 10. 소화기간에 따르는 NO₃⁻-N의 변화 비교

렸하게 질소제거율이 높았다.

호기성 반응에서는 낮은 pH와 제한된 알카리도가 액상의 질소 축적을 일으키게 되었으며 그림 9와 같이 제한된 알카리도는 NH₄⁺가 소모되지 않고 남게하였다. 또한 Mineralization으로 부터 생성된 알카리도가 존재하게 되고 충분한 포기로부터 호기성소화는 질산화에 의해 NO₃-N가 증가됨을 그림 10에서 보여 주었다. 역으로 A/A 소화의 Anoxic 영역에서 생성된 충분한 알카리도는 NH₄⁺를 거의 질산화 시키며 생성된 NO₃-N은 탈질소화 되어 액상의 질소는 감소하게 된다.

호기성 반응에서 NO₂-N의 축적을 그림 11에서 보여 주는데 이는 불충분한 알카리도에 의해 질산화가 완전히 일어나지 않음에 기인한다. 즉 질산화가 진행되면서 알카리도를 다 소모하였기 때문에 NO₂로 축적되었다가 60시간 후에는 세포내의 유기질소가 NH₄로

Mineralization되면서 알카리도가 생성되므로 다시 NO₂는 감소하게 된다.

3.4 COD와 Ortho-P의 제거 비교

소화기간에 따른 COD의 변화가 그림 12에 있는데 호기성소화의 경우 계속 소화가 진행됨에 따라 증가하였다. 즉, 주입 슬러지의 COD가 31mg/l 일 때 SCOD는 호기성소화는 268mg/l, A/A 소화는 64mg/l로 각각 증가했다. 이것은 Cell lysis로 부터 얻은 탄소가 호기성소화 보다 A/A 소화에서 더 많이 소모되기 때문으로 생각된다. 즉 호기성소화의 SCOD는 세포로 부터 용출작용에 의해서 높아지는 반면에 내호흡에 의해서 세포의 양은 감소된다. 그림 4와 같이 MLVSS감소는 이를 뒷받침하고 있다.

슬러지를 여과한 후 상징수를 분석한 결과

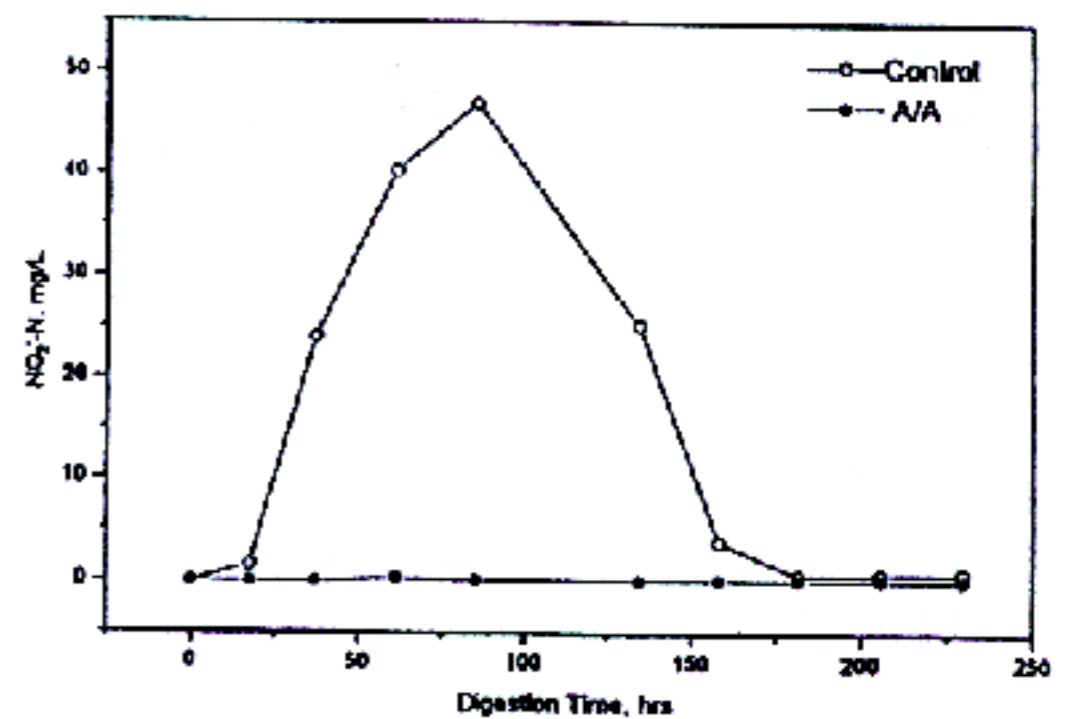


그림 11. 호기성 슬러지 내의 NO₂-N의 축적

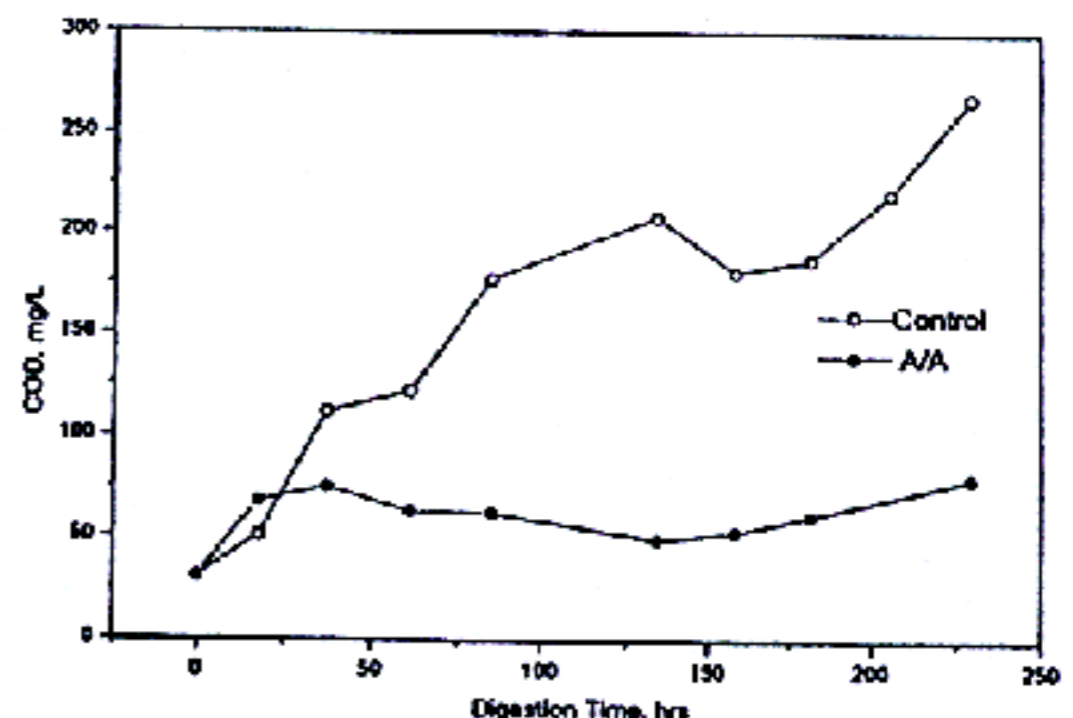


그림 12. 소화기간에 따르는 COD의 변화 비교

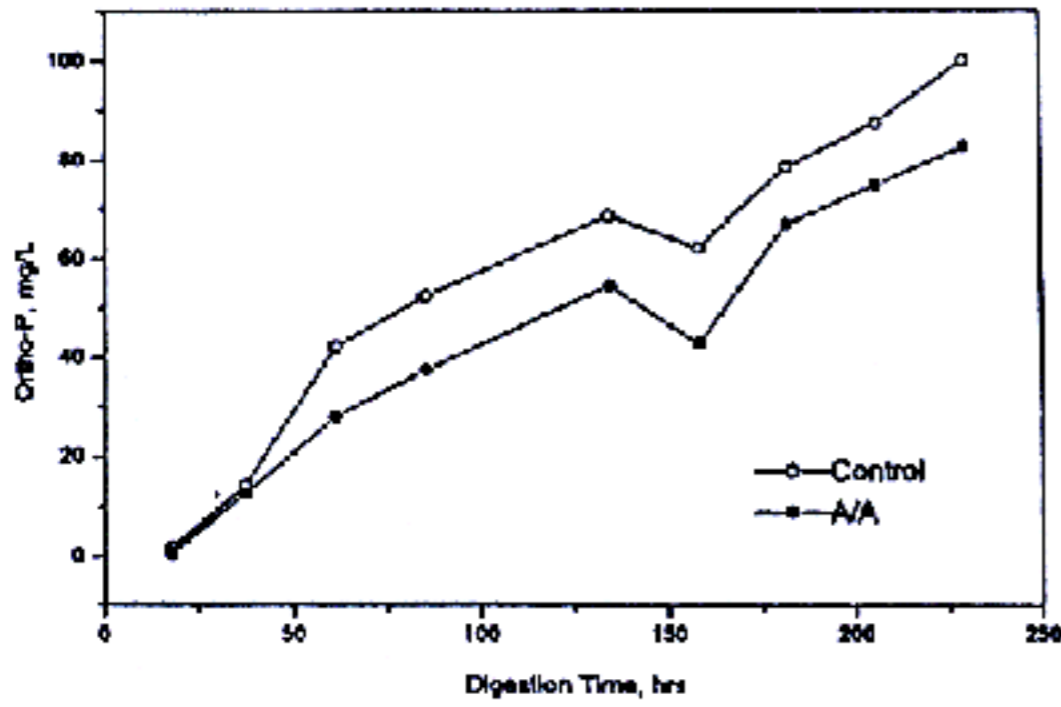


그림 13. 소화기간에 따른 Ortho-P의 변화 비교

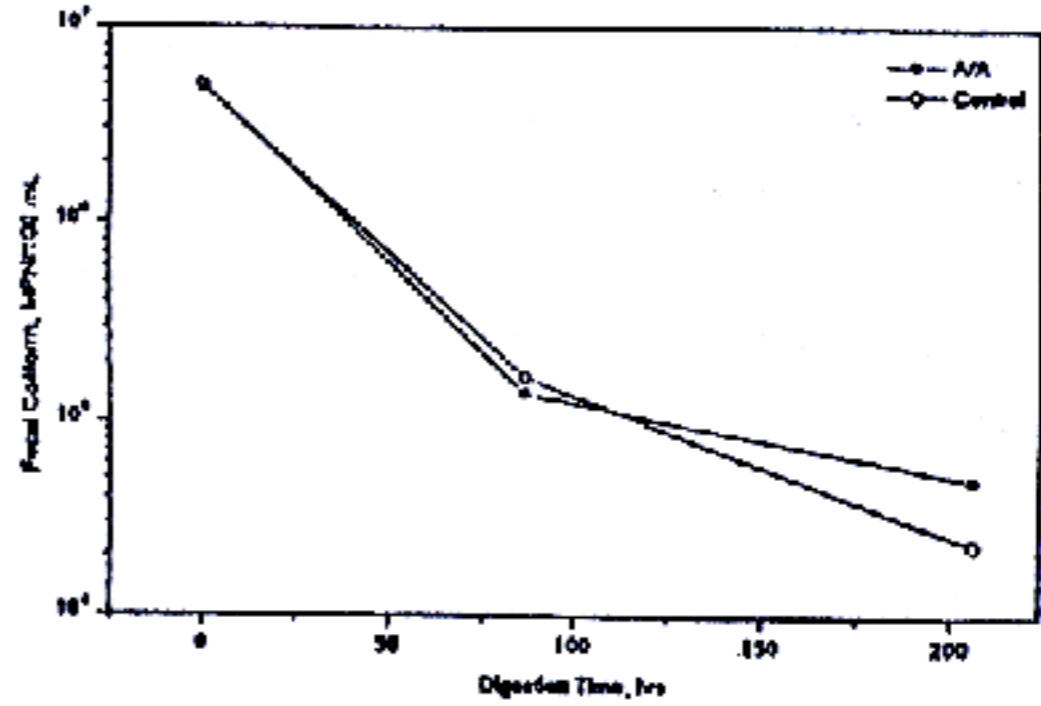


그림 14. 소화기간 동안 대장균군의 감소 비교

10일 소화 후 호기성소화는 Ortho-P가 100mg/L, A/A 소화가 83mg/L로 나타났다.

그림 13은 소화기간에 따른 Ortho-P의 변화를 나타내고 있는데 A/A소화가 호기성소화보다 다소 낮은 농도를 유지하고 있었다.

한편 MLVSS 분해시 방출된 P(%)는 A/A 소화가 2.5%, 호기성소화가 3.2%로 호기성소화가 더 높게 나타났는데 호기성소화가 A/A 소화보다 1.5배 높다고 한 Jenkins¹²⁾의 결과와 유사하였다.

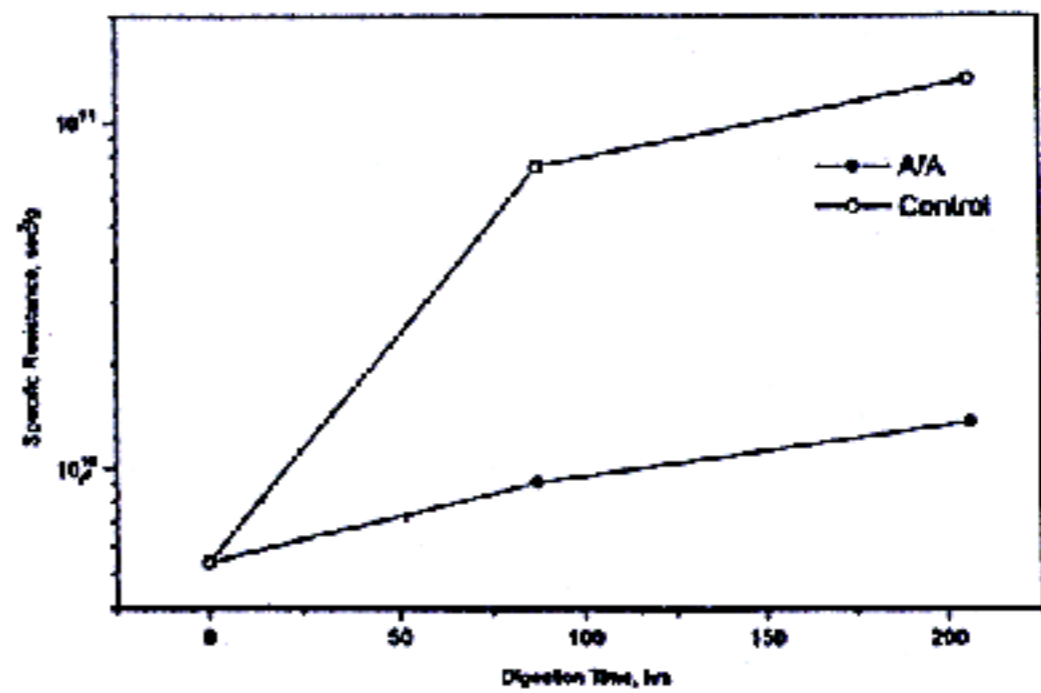


그림 15. 소화기간 동안 비저항계수의 감소 비교

3.5 대장균군수와 탈수성의 비교

두 반응조의 슬러지 일반적인 안정화정도를 나타내는 대장균군수(Fecal Coliforms)와 비저항계수를 소화 초기, 중기, 말기에 시료를 분석한 결과가 그림 14, 15에 각각 나타나 있다. 대장균군수 감소율은 A/A 소화의 경우 말기(8.6일 후)에 5.0×10^6 MPN/100ml에서 5.0×10^5 MPN/100ml로 99%로 나타났고, 호기성소화의 경우 말기에 2.3×10^6 MPN/100ml로 감소되어 99.54%로 나타나 슬러지 안정화 정도는 거의 유사하였다. 소화 말기에 호기성소화가 약간 낮은 대장균군수를 보여주고 있는데 낮은 pH에 기인 한 것 같다.

비저항계수는 소화기간에 따라 증가하였는데 호기성소화 슬러지는 초기에 5.38×10^9 sec²/g에서 말기에 1.33×10^{11} sec²/g로 나타나 25배 증가한 반면, A/A 소화 슬러지는 말기에 1.36×10^{10} sec²/g로 나타나 2.5배 증

가했다. 즉 A/A 소화가 호기성 소화보다 탈수성이 양호하다.

4. 결 론

선택적인 A/A 슬러지소화와 호기성소화의 Batch 실험을 통해 두 공정의 수질특성을 비교한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) T-N제거율은 선택적인 A/A 슬러지소화가 45%, 호기성 슬러지소화가 4%의 제거율로 나타나 A/A 소화가 호기성 소화보다 양호하다.

2) 상징수의 COD 농도와 Ortho-P 농도를 비교할 때 A/A 소화가 호기성 소화보다 상징수에 있어서 다소 양호한 수질을 나타냈다. 또한 MLVSS 분해시 방출된 P(%)는 호기성소화가 A/A 소화보다 다소 높은 편이다.

3) MLVSS와 대장균군수의 감소는 A/A 소화

와 호기성 소화가 각각 약 40%와 약 99%로 거의 유사한 안정성을 보였으며, 탈수성은 A/A 소화가 호기성소화보다 양호하였다.

4) 선택적인 A/A 슬러지 소화가 호기성 슬러지 소화에 비해 포기에너지가 54% 절약될 수 있었다.

참고문헌

1. C.J. Jenkins and D.S. Mavinic, "Anoxic aerobic digestion of waste activated ludge: part I-solids reduction and digested sludge characteristics", *Environ. Technol. Lett.*, Vol.10, No.4 p.355-370, 1989
2. O.J. Hao, M.H. Kim and I.A. Al-Ghusain, "Alternating aerobic and anoxic digestion of waste activated sludge", *J. Chem. Technol. Biotechnol.*, Vol.52, No.4, p.457-472, 1991
3. F.A. Koch, and W.K. Oldham, "Oxidation-reduction potential-a tool for monitoring, control, and optimization of biological nutrient removal system", *Water Sci. Technol.*, Vol. 17, No.11/12, p.259-281, 1985
4. J. Charpentier, H. Godart, G. Martin and Y. Mogno, "Oxidation-reduction potential(ORP) regulation as a way to optimize aeration and C,N and P removal: experimental basis and various full scale examples", *Water Sci. Technol.*, Vol.21, No.10/11, p.1209-1223, 1989
5. M. Fujii, N. Okamura, A. Shohji and M. Kondoh, "Simultaneous removal of phosphorus, nitrogen and BOD in sewage by batch ORP-controlled activated sludge process", *Nippon Steel Technical Report*, No.45, p.56-63, 1990
6. D.G. Wareham, K.J. Hall and D.S. Mavinic, "Real-Time control of aerobic- anoxic sludge digestion using ORP", *J. Environ. Eng. Div., Am. Soc. Civ. Eng.*, Vol.119, No.1, p.120-136, 1993
7. S.Y. Ip, J.S. Bridger and N.F. Mills, "Effect of alternating aerobic and anaerobic condition on the economics of the acivated sludge system", *Water Sci. Technol.*, Vol.119, No.5/6, p.911-918, 1987
8. A. Matusa, T. Ide and S. Fuji, "Behavior of nitrogen and phosphorus during batch aerobic digestion of waste activated sludge", *Water Res.* Vol.22, No.12, p.1495-1501, 1988
9. APHA, AWWA, and WPCF, Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater, 18th Ed., 1992
10. W.W. Eckenfelder, Jr., Industrial Water Pollution Control, 2nd Ed., McGraw-Hill Book Co., p.330-335, 1989
11. B.S. Lim, "Alternative Aerobic-Anoxic Sludge Digestion with pH Control", *J. Kor. Soc. Wat. Qual.*, Vol.10, No.1, p.56-61, 1994
12. C.J. Jenkins and D.S. Mavinic, "Anoxic aerobic digestion of waste activated sludge: part II-Supernatent Characteristics, ORP Monitoring Results and Overall Rating System", *Environ. Technol. Lett.*, Vol.10, No.4, p.371-384, 1989