

효소 전처리를 통한 슬러지 저감

김 정 래 · † 심 상 준 · 최 수 형 · ¹염 익 태
성균관대학교 화학공학과, ¹토목공학과
(접수 : 2003. 10. 2., 게재승인 : 2004. 4. 3.)

Sludge Reduction by Enzyme Pretreatment

Jung Rea Kim, Sang Jun Sim†, Sue Hyung Choi, and Ick Tae Yeom¹
Department of Chemical Engineering,

¹Department of Civil Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea
(Received : 2003. 10. 2., Accepted : 2004. 4. 3.)

We investigate the effect of enzyme pretreatment using protease, carbohydrase, and lipase on improvement of sludge treatment efficiency by measuring SCOD and TCOD. The enzyme-pretreatment increases SCOD of excess sludge. In addition, the amount of sludge reduction during digestion, in terms of SCOD and TCOD, are enhanced by enzyme-pretreatment. Among protease, carbohydrase, and lipase, protease showed the best enhancement of the sludge treatment efficiency. Sludge digestion followed by ozone and enzyme treatments showed more effective sludge treatment when compared with ozone treatment alone. Therefore, we expect that enzyme pretreatment can be used as a useful tool for enhancing the sludge treatment efficiency.

Key Words : Sludge, pretreatment, enzyme, ozone-treatment

서 론

현재 세계적으로 널리 사용되고 있는 하수처리 공법은 활성슬러지 공법이다. 하지만, 이 공법은 다량의 슬러지를 발생시켜 부가적인 슬러지 처리과정을 필요로 한다는 단점이 있다. 실제로 하수처리과정에서 발생하는 슬러지 처리를 위하여 하수처리비용 중 30-40%의 비용이 소요되고 있는 것으로 평가되고 있다(1). 이에 국내외적으로 슬러지를 효과적으로 저감시키기 위한 연구들이 진행 중이며, 이러한 방법의 일환으로 2차 슬러지의 전처리가 제시되고 있다.

슬러지 처리의 궁극적인 목적은 슬러지의 안정화와 부피의 감소라 할 수 있는데, 슬러지 저감은 슬러지 내에 함유되어 있는 유기물을 미생물에 의한 소화과정을 통해 무기물로 변화시킴으로써 이루어질 수 있다. 이러한 의미에서 슬러지 전처리는 소화과정에 앞서 2차 슬러지 내의 살아있는 미생물 또는 유기물을 분해하여 소화조내의 미생물들이 소화시키기 좋은 상태로 유지시켜서 유기물의 처리 효율을 향상시키는 것이다. 슬러지의 전처리 방법들에는 열처리, 초음파 처리와

같은 물리적 처리, 오존이나 다른 화학적 물질에 의한 화학적 처리, 효소나 미생물을 이용한 생물학적 처리 등이 있는데(2-4), 본 연구에서는 저렴하면서도 다른 전처리 과정에 비해 이차적 오염의 위험이 없는, 효소를 이용한 생물학적 전처리 효과에 대하여 연구하였다. 효소에 의한 전처리는 큰 크기의 유기물을 작은 크기로 가수분해하여 슬러지내의 가용화를 높이는 것으로써, 가용화율이 높을수록 소화조 내에서의 미생물에 의한 소화율이 높아져서 슬러지가 많이 저감될 뿐 아니라(4-6), 침전율이 향상되어 슬러지 탈수력도 향상된다고 보고 되고 있다(7, 8).

이러한 장점에 기인하여, 지금까지 효소처리에 사용된 효소들은 단백질을 가수분해하기 위한 protease(9, 10), 당을 가수분해하기 위한 cellulase와 α -amylase(11, 12), 그리고 지방을 가수분해하기 위해 lipase 등이 있다(13). 뿐만 아니라, 효소 사용에 있어서 단일 효소보다는 여러 효소를 함께 사용한 복합효소의 사용이 슬러지 저감과 가수분해 효율에 더 효과적이라는 연구결과가 보고 되고 있다(7). 따라서, 본 연구에서는 단일효소 및 복합효소를 이용한 슬러지 전처리 방법을 도입하였으며, 효소 자체만으로는 미생물의 세포벽을 분해하기 힘들기 때문에(2), 세포분해의 효율을 높임으로써 슬러지 처리 효과를 증진시키기 위하여, 소량의 오존처리를 함께 수행하였다.

† Corresponding Author : Department of Chemical Engineering,
300 Chunchun-dong, Changan-gu, Suwon 440-746, Korea
Tel : +82-31-290-7341, Fax : +82-31-290-7272
E-mail : simsj@skku.edu

재료 및 방법

슬러지

본 실험에 사용된 슬러지는 소화조에 들어가기 전단계의 미생물의 활성도가 높은 호기성 슬러지로, 부곡하수처리장에서 채취하였다. 채취한 슬러지는 실험에 사용되기 전까지 4°C 이하의 냉장고에 보관하였다.

효소의 종류 및 특성

본 연구에서 슬러지의 가수분해를 위해 사용된 효소는 novozyme에서 구입한 4가지의 산업용 효소로, protease (ALCALASE 2.5), α -amylase (AQUAZYM 240), glucosidase (DENIMAX 991), 그리고 lipase (LIPOLASE 100)이다. 각각의 효소에 대한 생산균주, 최적 온도, pH, 활성도를 Table 1에 나타내었다.

Table 1. Characteristics of Enzymes

Enzyme	Product strains	Optimal temperature	Optimal pH	Enzyme activity
ALCALASE 2.5 (protease)	<i>Bacillus licheniformis</i>	55-70°C	6.5-7.5	2.5 AU/g
AQUAZYM 240 (α -amylase)	<i>Bacillus microorganism</i>	45-70°C	5-7	240 KNU/g
DENIMAX 991 (cellulase)	<i>Humicola</i>	50-55°C	5.5-6.5	1500 ACU/g
LIPOLASE 100 (lipase)	<i>Thermomyces lanuginosus</i>	55-60°C	5.5-7	100 KLU/g

AU : The activity is determined relative to an Alcalase standard. The result is given in the same units as for the standard, which are designated; AU(A) - (Anson Unit (Alcalase)).

KNU : 1 KNU (Kilo Novo Unit) is the amount of enzyme which degrades 4870 mg starch dry matter, Merck soluble amyllum, per hour under standard conditions.

ACU : Endo-glucanase activity (cellulase) in ACU is measured relative to a Novozyme A/S enzyme standard.

KLU : Lipase Unit in Gram. 1 LU is the amount of enzymes which releases 1 μ g titrate-able butyric acid per minute under the given standard conditions (1 KLU = 1000 LU).

오존을 이용한 전처리

Y시 하수처리장에서 채취한 슬러지 중 7 L를 취하여 오존 발생기 (Ozonature-1400K2GSN, 50 g O₃/m³, 80%, 5 L/min)에 주입하고, 단위 고형물당 0.02 g의 오존 (g O₃/g SS)이나, 단위 고형물당 0.03 g의 오존 (g O₃/g SS)으로 처리하였다. 두 가지 경우로 처리된 슬러지 중, 오존량 0.02 g O₃/g SS로 처리된 슬러지를 이용하여 효소 전처리 과정과 소화과정을 수행하였다.

효소를 이용한 슬러지 전처리

단위 고형물당 0.02 g의 오존 전처리를 거친 슬러지는 효소처리에 이용되게 되는데, 잔존하는 오존은 효소의 활성을 저해할 수 있으므로, 효소처리에 앞서 슬러지 내에 잔존하는 오존을 1일간 날려주었다. 단일효소와 복합효소의 슬러지 가수분해 효과를 알아보기 위하여 다음과 같은 3가지 서로 다른 경우의 실험을 실시하였다. 1) 슬러지 내의 단백질을 효과적으로 분해하기 위하여 protease만 사용한 경우, 2) 슬러지 내의 당을 분해하기 위하여 α -amylase와 glucosidase를 사용

한 경우, 3) 슬러지 내의 단백질, 당, 지방을 분해하기 위해 protease, amylase, lipase로 구성된 복합 효소를 사용한 경우이다.

효소처리에 앞서, 실험에 사용된 슬러지를 효소의 공통 최적조건인 pH 6-7로 조절하기 위하여 2 N KOH와 1 N HCl 용액을 사용하였다. 먼저 500 mL 비이커 3개에 오존처리한 슬러지를 각각 300 mL씩 분주하고, 첫번째 비이커에는 ALCALASE 2.5 (protease) 120 μ L를, 두번째 비이커에는 AQUAZYM 240 (α -amylase) 60 μ L와 DENIMAX 991 (cellulase) 60 μ L를, 마지막으로 세번째 비이커에는 ALCALASE 2.5 (protease) 120 μ L, AQUAZYM 240 (α -amylase) 60 μ L, DENIMAX 991 (cellulase) 60 μ L, LIPOLASE 100 (lipase) 30 μ L를 넣어서 2시간동안 150 rpm으로 반응을 시켰다.

효소처리는 2가지의 다른 조건에서 실험하였는데, 상온에서의 처리와 효소들의 최적온도인 50-60°C에서의 처리이다. 온도를 50-60°C로 조절한 경우에는 열 자체에 의한 유기물의 분해를 고려하기 위하여, 효소를 넣지 않은 경우를 대조군으로 실험하였다.

효소 전처리를 한 슬러지의 소화

오존과 효소에 의해 전처리된 슬러지는 11일 동안 반응기에서 소화과정을 거치게 된다. 오존처리는 거치지만 효소처리를 거치지 않은 슬러지, 오존처리된 슬러지를 protease로 효소처리한 슬러지, 오존처리된 슬러지를 α -amylase, glucosidase로 효소처리한 슬러지, 오존처리된 슬러지를 protease, α -amylase, glucosidase, lipase 모두를 사용한 복합효소에 의해 효소처리된 슬러지에 대하여 소화를 시켰다. 소화 과정은 각각의 슬러지 300 mL와 활성이 좋은 원슬러지 300 mL를 1.5 L 아크릴 반응기에 각각 주입하고, 교반을 시키면서 11일 동안 진행되었으며, 소화 과정중의 SCOD와 TCOD의 변화를 11일 동안 관찰하였다. 또한 소화과정에 참여하는 원슬러지 내의 호기성 미생물의 활성을 유지하기 위하여, 하루에 한번씩 5분간 공기를 주입하였다.

분석법

슬러지의 저감 변화를 나타내는 인자로 TCOD (Total Chemical Oxygen Demand), SCOD (Soluble Chemical Oxygen Demand), TSS (Total Suspended Solids), VSS (Volatile Suspended Solids) 등이 있으며 이 중 본 연구에서는 TCOD와 SCOD를 공정 시험법 (Standard Methods)에 따라서 측정을 하였다. 둘다 COD를 측정하는 방법으로 TCOD는 반응기 내의 슬러지를 2 mL 채취하여 10-15배 희석하여 희석용액 중 2 mL를 높은 범위의 COD vial에 넣어 측정을 하고 SCOD는 채취한 슬러지를 0.45 μ m의 filter에 여과 시킨 후 2 mL를 높은 범위의 COD vial에 넣어 측정을 하였다.

결과 및 고찰

오존 (O₃) 처리에 의한 원슬러지의 SCOD와 TCOD의 변화

효소에 의한 슬러지의 가수분해 효율을 증진시키기 위한 일환으로, 오존전처리를 함께 수행하였다. 오존에 의한

SCOD의 최대증가율은 0.05 g O₃/g SS에서 나타난다고 보고 되고 있는데(8), 본 연구에서는 효소에 의한 SCOD 증가 효과를 함께 관찰하기 위하여, 0.02 g O₃/g SS과 0.03 g O₃/g SS의 투입량을 사용하였으며, 이에 대한 SCOD와 TCOD의 변화를 Table 2에 나타내었다.

Table 2. Change of SCOD and TCOD on sludge by ozone-treatment

Amount of O ₃ (g O ₃ /g SS)	SCOD (mg/L)		TCOD (mg/L)	
	Original sludge	Ozone-Treated	Original sludge	Ozone-Treated
0.02	348	1245	5190	4485
	213	1205	8640	7690
0.03	156	1395	4850	4380
	180	1590	8835	6750

Table 2에서 보는 바와 같이 오존을 투입하면, 초기의 원슬러지의 SCOD값에 비해 오존 투입 후 SCOD값이 증가함을 알 수 있다. 먼저, 0.02 g O₃/g SS를 사용한 경우에는, 원슬러지의 TCOD가 5190 mg/L 일때 897 mg/L의 SCOD 증가를 보였으며, 원슬러지의 TCOD가 8640 mg/L인 경우에는 992 mg/L의 SCOD 증가를 나타냈다. 또한 오존의 투입량을 0.03 mg/L 투입시, 원슬러지의 TCOD가 4850 mg/L일 때 SCOD 증가량은 1239 mg/L이었고, 원슬러지의 TCOD가 8835 mg/L일 때 SCOD 증가량은 1410 mg/L이었다. 이 결과로부터, 같은 양의 오존으로 슬러지를 전처리 할 경우, 원슬러지의 TCOD가 높을수록 오존처리에 의한 SCOD의 증가가 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 반면, TCOD의 경우에 있어서는, 오존 처리 후 그 양이 감소되는 경향으로 나타났는데, 이는 오존의 강한 자체 산화반응에 의해 TCOD가 감소될 수 있다는 연구보고(8)와 일치되는 결과이다.

따라서, 슬러지를 효소처리 하기에 앞서 소량의 오존으로 전처리 해 줄 경우, 오존의 산화반응에 의하여 효소에 의해 가수분해되기 힘든 유기물을 산화시켜 SCOD를 효과적으로 증가시키고 동시에, TCOD는 감소하는 효과가 있음을 확인할 수 있었다.

효소반응에 의한 슬러지의 가수분해의 결과

효소반응에 의한 슬러지의 가수분해 효과를 효소를 이용하여 전처리를 한 후 슬러지내 증가된 SCOD값의 변화량을 통하여 알아보았다. 먼저 오존처리를 한 슬러지에 일반적인 슬러지 처리조건인 상온에서 효소를 투입하고 2시간 동안 반응을 시킨 후 최종 SCOD의 변화량을 알아보았다.

그 결과 Fig. 1의 왼쪽 막대그래프에서 보는 바와 같이, protease만을 사용한 효소반응에서는 470 mg/L 정도의 SCOD 증가가 확인되었으며, α-amylase와 glucosidase를 이용한 효소 반응에서는 100-150 mg/L 정도의 SCOD 증가가 나타났다. 또한, protease, α-amylase, glucosidase, lipase를 모두 사용한 복합효소 반응에서는 490 mg/L 정도의 SCOD 증가를 확인할 수 있었다. 하지만, 이 결과들은 원슬러지의 8640, 8835 mg/L 농도와 비교해서 매우 낮은 값으로서, 이는 효소 반응의 최적온도인 50-60℃ 조건이 맞지 않는데서 기인한 것으로 사료되었다. 따라서, 효소반응을 최적 온도조건인 50-60℃으

로 조절하여 슬러지의 가수분해를 시도하였다. 그 결과, Fig. 1의 막대그래프에서 보는 바와 같이, 상온에서 슬러지를 가수분해 한 경우에 비해 1.5-2배 정도 높은 SCOD의 증가를 보이며, 효과적으로 슬러지가 가수분해 되고 있음을 확인할 수 있었다. 먼저, protease만을 슬러지의 가수분해에 사용하였을 때 경우 SCOD의 증가량은 650-700 mg/L 정도, α-amylase와 glucosidase를 사용한 경우는 200-250 mg/L 정도, 그리고 복합효소 투입한 경우에는 750-800 mg/L 정도로 나타났다. 이는 열처리 열처리에 의해 증가된 SCOD 150-200 mg/L 가량을 뺀 값이다.

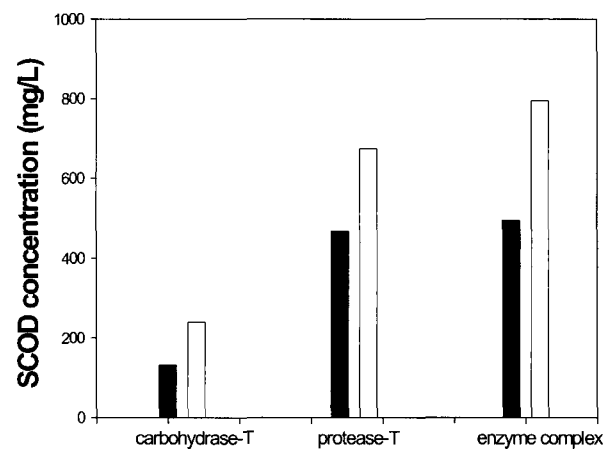


Figure 1. Total increase of SCOD during enzyme treatment for 2h (■ temperature control at room temperature, □ temperature control at 50-60℃).

위 결과를 통하여 효소의 전처리가 슬러지의 SCOD 증가에 효과적이며, 또한 단일효소보다는 복합효소를 사용하였을 때 SCOD 증가량이 높게 나타남을 확인할 수 있었다. 효소반응의 온도를 조절한 경우와 상온에서 실시한 경우를 비교해 보면, 최적온도로 조절해 준 경우에 있어서 전체적으로 높은 SCOD증가를 보였으나, carbohydrate를 분해하는 효소인 α-amylase와 glucosidase를 사용한 경우에는 SCOD 증가량이 두 조건에서 비슷하게 나타났다. 이는 슬러지 내의 성분 중 carbohydrate가 차지하는 부분이 작아, 효소의 활성도를 반응 온도의 최적화를 통해서 증진시키더라도 SCOD 증가가 나타나지 않고 있음을 의미한다.

반면, protease를 포함하여 슬러지의 전처리를 실시하였을 경우(Fig. 1), 단일효소나 복합효소 모든 경우에 있어서 SCOD 증가가 높게 나타나는 경향이 확인되었으며, 이러한 결과로부터 슬러지의 주성분은 단백질일 것이라 유추할 수 있었다. 이러한 경향은 일반 슬러지의 성상이 단백질이 50%, 당이 30%, 지방이 20%(7)로 구성되어져 있다는 보고와도 유사하였다.

효소 전처리한 슬러지의 소화 결과

슬러지의 오존전처리와 효소전처리가 슬러지 소화에 효과적으로 작용할 수 있는지를 알아보기 위하여, 효소 전처리를 거친 3가지 경우의 슬러지와 효소 전처리를 거치지 않고 오

존전처리만을 실시한 슬러지를 이용하여, 11일 동안 소화반응을 실시하였으며, TCOD와 SCOD의 변화를 관찰하였다. 슬러지의 저감은 미생물이 소화과정을 통해 슬러지 내에 녹아 있는 유기물을 먹고, 대사과정을 통해 무기물로 배출하는 과정을 말한다. 따라서 슬러지가 저감되었다는 것은 유기물이 무기물로 변환되었다고 말할 수 있다. 이는 SCOD의 감량 변화를 통하여 알 수 있는데 SCOD의 줄어든 값이 유기물이 무기물로 바뀐 양이다, 이를 최종적으로 확인하는 것은 11일 소화과정동안에 변화되는 초기의 TCOD값과 최종 TCOD의 차이로서 알 수 있다. 이때, 감소된 TCOD의 차이가 슬러지의 저감양이다.

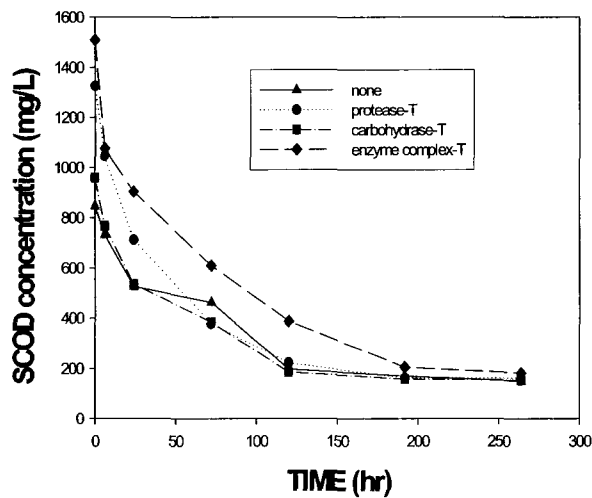


Figure 2. Change of SCOD during digestion for 11 days.

Fig. 2는 소화과정 중의 SCOD의 변화를 나타낸 것으로, 3일 동안은 SCOD가 급격히 감소하다가 3-6일 동안은 완만하게 감소되고 있음을 나타내고 있다. 6-11일 사이에는 감소량은 미흡하고 SCOD값이 일정하게 유지되는 경향을 보이다가 11일에는 최종 SCOD값이 효소를 처리하지 않은 경우와 처리한 경우 모두에 있어서 비슷한 값으로 나타났다. 3일 동안의 SCOD 감소량은 효소처리를 하지 않은 경우는 400-450 mg/L, 효소처리를 한 경우 중 protease만 사용했을 때에는 850-900 mg/L, α-amylase와 glucosidase를 사용한 경우는 550-600 mg/L, 복합효소를 사용한 경우에는 900-1000 mg/L이었다. 완만한 감소 경향을 보인 3-6일 사이의 SCOD 감소량은 효소처리를 하지 않은 경우 150-200 mg/L, protease만 사용한 경우 200-250 mg/L, α-amylase와 glucosidase를 사용한 경우 150-200 mg/L, 복합효소를 사용한 경우는 250-300 mg/L이었다. 마지막으로 6-11일은 복합효소 경우를 제외하고는 SCOD의 감소가 나타나지 않았다.

Fig. 3는 Fig. 2의 정리된 결과로써, 11일 동안 소화과정을 통해 최종적으로 감소된 SCOD의 총량을 보여주고 있다. 그 각각의 양을 살펴보면, 효소처리를 하지 않은 경우에는 650-700 mg/L이고, 효소처리를 한 경우 중 protease만을 사용한 경우에는 1100-1150 mg/L, α-amylase와 glucosidase를 사용했을 때에는 750-800 mg/L, 복합효소를 사용한 경우에는

1350-1400 mg/L 정도였다. 이 결과로부터 효소 전처리를 한 슬러지의 소화가 효소 전처리를 하지 않은 슬러지에 비해 높은 SCOD의 감량을 보임을 확인 할 수 있었으며, 이는 슬러지의 효소전처리가 슬러지 저감에 효과가 있음을 나타낸다. 뿐만 아니라, 효소에 의한 가수분해의 결과에서와 마찬가지로 4가지 효소 중 특히 protease를 사용한 경우에 높은 저감율을 보였다. 실제적으로 SCOD가 저감되면 슬러지가 저감되는가를 알아보기 위하여 TCOD의 변화량을 함께 측정하였다.

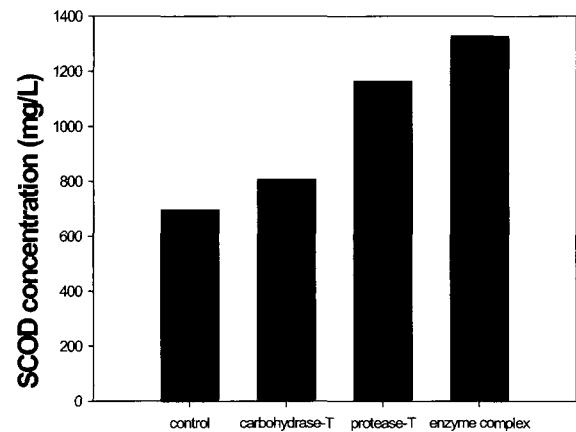


Figure 3. Total decrease of SCOD during digestion for 11 days.

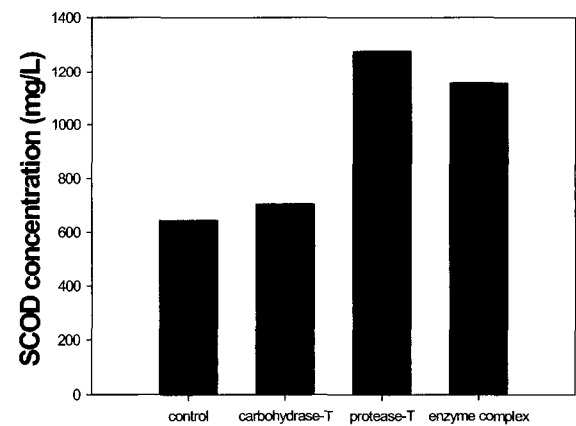


Figure 4. Total decrease of TCOD during digestion for 11 days.

Fig. 4는 소화과정 전의 TCOD와 소화과정을 마친 11일 후의 TCOD의 차를 보여주고 있다. 그 차는 슬러지 내의 TCOD가 저감된 것으로서, 실제적인 슬러지의 저감량으로 볼 수 있다.

그 각각의 슬러지의 TCOD 저감량을 살펴보면, 효소로 처리하지 않은 슬러지의 TCOD 저감량은 650 mg/L, 효소로 처리한 슬러지 중 protease만으로 처리한 슬러지의 TCOD의 저감량은 1300 mg/L, α-amylase와 glucosidase를 사용한 슬러지의 TCOD 저감량은 700 mg/L, 복합효소를 사용한 슬러지의 TCOD의 저감량은 1150 mg/L 정도였다.

위와 같이 슬러지를 효소로 전처리 하였을 때, 높은 슬러지의 저감효과를 얻을 수 있음을 TCOD 와 SCOD의 감량으로 확인할 수 있었으며, 효소중에서도 protease가 가장 높은 효과를 나타냄이 확인되었다. 또한 Fig. 3의 소화 과정 중 SCOD 변화에서 보인 바와 같이, 소화를 마친 11일 후의 최종 SCOD값은 효소처리를 하지 않은 경우와 한 경우 모두에 있어서 비슷한 값을 보임으로, 초기 SCOD의 값, 즉 슬러지 내에 가용화된 유기물은, 모두 미생물에 의해 소화가 이루어졌음을 알 수 있었다. 이에 효소를 사용하여 높은 가수분해 효율을 얻으면 높은 슬러지 저감효율을 얻을 수 있음을 알 수 있었다.

요 약

본 연구는 환경 문제점으로 대두되고 있는 슬러지의 효과적인 저감을 위한 방법으로서 효소를 이용하여 슬러지상 유기물의 가용화율을 높여서 소화조 내에서 미생물의 소화효율을 높이기 위한 것이다. 효소에 의한 슬러지의 가수분해 효율을 높이기 위하여 소량의 오존 (0.02 g O₃/g SS, 0.03 g O₃/g SS)으로 슬러지를 처리한 후 다양한 효소로 슬러지의 가수분해를 유도함으로써 슬러지의 SCOD를 높여 유기물의 가용화를 향상 시켰다. 여러 가지 효소 중 (Protease, α -amylase, glucosidase, lipase)에서 protease가 가장 높은 슬러지의 가수분해 효율을 나타내었다. 오존과 효소로 전처리를 실시한 경우 오존 처리만 한 슬러지에 비해 SCOD 증가량이 높게 나타났으며, 단일 효소보다는 복합 효소를 사용했을 때 유기물의 가용화에 더 효과적임을 확인할 수 있었다. 또한, 효소 전처리시, 효소의 최적온도 조건 (50-60°C)을 맞추어 주었을 경우가 상온에서 효소 전처리를 실시했던 경우에 비해 SCOD값이 1.5-2배 정도 증가하여, 더 높은 가수분해 효율을 보였다. 반면, 소화반응에 있어서는, 효소 전처리를 실시한 슬러지와 효소 전처리를 실시하지 않고 오존전처리만을 실시한 슬러지의 소화반응을 비교해 본 결과, 효소전처리를 실시한 슬러지의 SCOD 및 TCOD의 감소량이 오존처리만 실시한 슬러지에 비해 높게 나타났으며, 단일효소보다도 복합효소에서 높은 SCOD와 TCOD의 감소량을 나타내었다. 따라서, 슬러지를 효소로 전처리하는 것은 슬러지 저감에 효과적으로 작용할 수 있을 것으로 기대되며, 이러한 슬러지의 효소 전처리 방법은 다양한 다른 슬러지 처리방법과 함께 슬러지 처리효율을 향상시키기 위한 방법으로 유용하게 이용될 수 있으리라 기대된다.

감 사

본 연구는 경기지역환경기술 센터의 연구사업이며 슬러지 저감을 위한 환경사업의 일환으로 수행되었으며 참여기업인 (주)지앤지 환경기술과 경기지역환경기술 센터의 연구비 지원에 감사드립니다.

REFERENCES

1. Knapp, J. S. and J. A. Howell (1978), Treatment of primary sewage sludge with enzyme, *Biotechnol. Bioeng.* **20**, 1221-1234.
2. Muller, J. A. (2001), Prospects and problems of sludge pretreatment process, Proc. Sludge Management Entering the 3rd Millennium, Taiwan, Taipei, 111.
3. Wang, Q., J. Chen, K. Kakimoto, H. I. Ogawa, and Y. Kato (1995), Pretreatment of waste activated sludge results in enhancement of its anaerobic digesting efficiency, *J. Jpn. Assoc. Water Environ.* **18**, 875-882.
4. Barjenbruch, M. and O. Kopplow (2001), Enzymatic and thermal pretreatment of surplus sludge, Proc. Sludge Management Entering the 3rd Millennium, Taiwan, Taipei, 125.
5. Cadoret, A., A. Conrad, and J. C. Block (2002), Availability of low and high molecular weight substrates to extracellular enzymes in whole and dispersed activated sludges, *Enzyme Microb. Technol.* **31**, 179-186.
6. Frolund, B., T. Grie, and P. H. Nielsen (1995), Enzymatic activity in the activated-sludge floc matrix, *Appl. Microbiol. Biotechnol.* **43**, 755-761.
7. Parmar, N., A. Singh, and O. P. Ward (2001), Enzyme treatment to reduce solids and improve settling of sewage sludge, *J. Ind. Microbiol. Biotechnol.* **26**, 383-386.
8. Ryong, L. K. (2000), Enhancement of Sludge Biodegradability by Ozone Treatment, M. S. Thesis, Dept. of Civil & Environmental Engineering, Korea University, Seoul.
9. Jung, J. H., X. H. Xing, and K. Matsumoto (2002), Recoverability of protease released from disrupted excess sludge and its potential application to enhanced hydrolysis of protein in wastewater, *Biochem. Eng. J.* **10**, 67-72.
10. Whiteley, C. G., P. Heron, B. Pletschke, P. D. Rose, S. Tshivhunge, F. P. V. Jaarsveld, and K. W. Jones (2002), The enzymology of sludge solubilisation utilising sulphate reducing systems; Properties of protease and phosphatases, *Enzyme Microb. Technol.* **31**, 419-424.
11. Ogden, K. L., G. E. Ogden, J. L. Hanners, and P. J. Unkefer (1996), Remediation of low-level mixed waste, cellulose based materials and plutonium, *J. Hazard. Mater.* **51**, 115-130.
12. Jlanqlang, L., S. M. Lee, and Y. M. Koo (2001), Hydrolysis of Paper Mill sludge using an improved enzyme system, *J. Microbiol. Biotechnol.* **11**, 362-368.
13. Whiteley, C. G., J. E. Burgess, X. Melamane, B. Pletschke, and P. D. Rose (2003), The enzymology of sludge solubilisation utilising sulphate reducing systems; the properties of lipases, *Water Res.* **37**, 289-296.