

효소 전처리가 음식물 쓰레기의 산발효에 미치는 영향

김희준 · 김성홍*[†] · 최영균**

인하대학교 토목환경공학부, *조선대학교 토목공학과, **대구대학교 건설환경공학부

Effect of Enzymatic Pretreatment on Acid Fermentation of Food Waste

HJ Kim · SH Kim*[†] · YG Choi**

School of Civil and Environmental Engineering, Inha University

*Department of Civil Engineering, Chosun University

**School of Civil and Environmental Engineering, Daegu University

(Received July 1, 2005; Accepted July 20, 2005)

ABSTRACT

Food waste can be a valuable carbon source in biological nutrient removal (BNR) systems because of high C/N and C/P ratios. However, food waste should be pretreated to promote its hydrolysis rate because hydrolysis reaction would be a rate-limiting step. This study investigates the influence of the enzymatic pretreatment on acid fermentation of food waste. Solubilization of particulate matter in food waste by using commercial enzymes was examined. The acidification efficiency and the volatile fatty acids (VFAs) production potential of enzymatically pretreated food waste were also examined. The highest volatile suspended solids (VSS) reduction was obtained with an enzyme mixture ratio of 1:2:1 of carbohydrase:protease:lipase. An optimum enzyme dosage for solubilization of food waste was 0.1% (V/V) with the enzyme mixture ratio of 1:2:1. In the acid fermentation of enzymatically pretreated food waste, 0.1% (V/V) enzyme mixture dosage for pretreatment result in the maximum VFAs production and the best VFAs fraction in soluble COD (SCOD). The VFAs production at this addition level was 3.3 times higher than that of no-enzyme added fermenter. The dominant VFAs present was *n*-butyrate followed by acetate.

Keywords: acid fermentation, enzymatic pretreatment, food waste, solubilization, volatile fatty acids (VFAs)

I. 서 론

우리나라에서 신설되는 하수처리장은 대부분 고도처리공정이며, 기존 하수처리장 역시 개조를 통해 고도처리공정화하고 있다. 고도처리공정은 생물학적 질소인 제거 공정(BNR, Biological Nutrient Removal)이 주를 이루고 있는데, 유입 하수의 유기물 함량이 부족하여 질소와 인 제거 효율이 낮은 것이 가장 큰 문제점으로 부각되고 있다. 예를 들면, 우리나라 도시 하수의 BOD/TN비는 2.4 정도로서 생물학적 질소인 제거에 충분하지 못하다.^{1,2)} BNR의 효율을 높이기 위해 외부탄소원을 직접 주입하는 것은 그 대안이 될 수 있는데, BNR의 외부탄소원에 관한 연구는 에탄올, 메탄올, 초

산 등의 화학약품이 주를 이루고 있다. 하지만, 높은 BNR 효율을 맞추기 위해 필요한 화학약품의 비용이 만만치 않기 때문에, 대체탄소원으로서 폐슬러지나 유기성 폐기물을 발효하고 그 산물인 휘발성지방산(VFAs, Volatile Fatty Acids)을 이용하는 연구도 활발히 이루어지고 있다. 일차슬러지,^{3,4)} 분뇨,¹⁾ 돼지분뇨⁴⁾의 발효가 BNR의 대체탄소원으로서 최근 많이 연구되고 있으나 음식물쓰레기 발효에 관한 연구는 그다지 많지 않고 이에 대한 가능성 정도가 보고되어 있을 뿐이다.⁶⁾ 음식물쓰레기는 유기성분 함량이 매우 높기 때문에 적절한 산발효를 통해 초산이나 프로피온산, 뷰티릭산 등 BNR에서 탄소원으로 이용가능한 유기산을 얻을 수 있다. 2000년도 기준 우리나라 음식물쓰레기는 도시쓰레기 발생량의 25% 정도로 매우 많기 때문에 음식물쓰레기를 발효하고 그 산물을 BNR의 외부탄소원으로 재이용하는 것은 폐기물 관리 측면에서도 좋은 대안이 될 수 있을 것이다.

[†]Corresponding author : Department of Civil Engineering, Chosun University
Tel: 82-62-230-7079, Fax: 82-62-230-7083
E-mail : gochamp@chosun.ac.kr

음식물쓰레기는 생물학적으로 쉽게 분해된다고는 하지만 음식물쓰레기의 산발효에서 가수분해반응(hydrolysis reaction)은 여전히 율속단계(rate-limiting step)로 작용한다.⁷⁾ 그러므로 적절한 전처리를 통해 가수분해 속도를 증가시키면 분해 속도를 향상시킬 수 있다. 폐활성슬러지의 생분해성을 향상시키기 위한 전처리에 대한 연구도 많이 되고 있다. 여기에는 열전처리,⁸⁾ 열-화학약품 전처리,⁹⁾ 알칼리제 전처리¹⁰⁾ 등의 물리, 화학적 기술이 포함되지만, 음식물쓰레기의 효소에 의한 전처리는 그러나 그다지 많지 않다.

본 연구의 목적은 음식물쓰레기의 효소에 의한 전처리 효과를 실험을 통해 파악하고, 효율적인 효소의 종류 및 투입량을 결정하는 것이다. 또한, 효소 전처리한 음식물쓰레기를 대상으로 산발효 실험을 실시하여 생산 가능한 휘발성지방산의 양과 그 종류를 분석하므로써, 산발효 산물을 BNR의 외부탄소원으로 사용하는데 그 적합성을 검토하는 것이다. 효소 전처리 실험에서는 carbohydrase, protease, lipase의 3종류의 시판되는 효소를 사용하였고, 산발효 실험은 회분식 반응조를 사용하여, VFAs 생산량 및 그 종류를 조사하였다.

II. 재료 및 방법

1. 실험 재료

음식물쓰레기는 대학 구내식당에서 수집된 것이며, 실험실 반입 후 불순물을 제거하고, 파쇄기(blender)를 사

용하여 잘게 부수었다. 파쇄된 음식물쓰레기는 금속성의 체(mesh size=1,410 μm)로 거른 후 사용하였다. 사용된 음식물쓰레기의 성상은 Table 1과 같다. 야채류와 곡물류는 전체 고형물의 75% 이상이었고, pH는 매우 낮았는데 이는 김치와 같은 발효 음식 및 보관 중의 VFAs 생성 때문으로 판단된다. 분쇄된 음식물쓰레기는 수돗물을 사용하여 TCOD 기준 20,000 mg/l 정도로 희석하여 효소 전처리 실험 및 산발효 실험의 재료로 사용하였다.

Viscozyme, Flavourzyme 및 Palatase의 3가지 시판되는 효소를 사용하여 전처리 실험을 행하였다. 이들 효소는 한국 Novozymes사에서 제공하였으며, Viscozyme은 다중복합효소로서 arabanase, cellulase, β-glucanase, hemicellulase, xylanase 등을 포함하는 광범위 carbohydrases의 한 종류이다. Flavourzyme은 기본적으로 곰팡이류의 protease/peptidase 복합체이며, Palatase는 박테리아성의 lipase의 일종이며 정제된 것이다.

2. 실험 방법

1) 예비실험

음식물쓰레기의 효소 전처리 실험을 실시하기 앞서 최적의 효소 혼합 비율의 찾기 위한 예비실험을 실시하였다. 이를 위해 2조의 실험이 실시되었는데, 단독처리 및 혼합처리가 그것이다. 단독처리 실험은 준비된 음식물쓰레기에 한 가지 효소를 0.025, 0.05, 0.1, 0.2, 0.3%(V/V)씩 투입하여 실험한 것이다. 혼합처리 실험은 각각의 효소를 일정 비율로 혼합하여 투입한 경우인데, carbohydrase:protease:lipase의 비율을 각각 1:1:1, 2:1:1, 1:2:1, 1:1:2로 다르게 한 경우이다. 혼합처리 실험에서 총 효소 투입량은 0.3%(V/V)로 일정하게 하였다.

2) 음식물쓰레기 효소 전처리 실험

음식물쓰레기의 효소 전처리 실험에서는 혼합 효소의 투입율을 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4%(V/V)의 5 단계로 달리하였다. 혼합처리 예비실험 결과 carbohydrase:

Table 1. Characteristics of food waste

	Mean ± S.D.*		Mean ± S.D.
TCOD (g/l)	146.1 ± 7.4	pH	3.87 ± 0.24
SCOD (g/l)	85.7 ± 5.7	Vegetables	45.3 ± 6.1%(w/w)
Total solids (g/l)	113.1 ± 2.7	Grains	31.1 ± 3.3%(w/w)
Volatile solids (g/l)	101.0 ± 5.2	Meat & fish	16.5 ± 2.6%(w/w)

*S.D. = standard deviation.

Table 2. The enzymes used in this experiment

Type of enzyme	State	Product name	Main application and remarks
Carbohydrase	Liquid	Viscozyme	Brewing industry Fruit water treatment Cell-wall degrading enzymes complex
Protease	Liquid	Flavourzyme	Whey processing Protein hydrolysis (Meat/bone stocks)
Lipase	Liquid	Palatase	Dairy industry Cheese flavour enhancement

protease:lipase의 비율이 1:2:1일 때 가장 효과가 좋았으므로, 혼합비율은 이 비율을 유지하였다. 효소를 전혀 넣지 않은 경우도 함께 실험하여 대조군으로 사용하였다. 예비실험과 효소 전처리 실험에서는 반응기로서 1.5 l의 유리제 플라스크를 사용하였으며, 여기에 희석된 음식물쓰레기 1 l씩을 주입하여 실험을 준비하였다. 음식물쓰레기의 pH가 효소의 활성 범위보다 크게 낮았으므로 실험 직전 알칼리제(NaOH)를 주입하여 pH 6.5 ± 0.2 로 조정하였다. 음식물쓰레기가 주입된 플라스크 반응기에 미리 계산된 농도의 효소 용액(10 ml)를 주입하였다. 실험은 45°C로 유지되는 항온실에서 24시간 실시되었으며, 대조군 반응기 역시 효소 용액 대신 10 ml의 증류수를 주입한 후 같은 조건에서 실험하였다. 미리 정해진 시간 간격에 맞추어 시료를 채취하였고, 즉시 분석하였다. 분석항목 중 용해성분은 5,000 rpm의 원심분리기에서 15분 동안 원심분리한 후 GF/C 필터를 사용하여 여과한 후 분석하였다.

3) 효소 전처리된 음식물쓰레기의 혐기성 발효 실험
 혐기성 발효 실험은 회분식으로 진행되었다. 몇 개의 3 l 유리제 플라스크를 준비하여 혐기성 발효 실험의 반응기로 사용하였는데, 각 플라스크에는 0.5 l의 가스 포집 장치가 연결되어 있다. 효소 전처리된 음식물쓰레기 1 l와 일정한 양의 식중슬러지를 혼합하여 반응기에 주입하였다. 회분식의 발효 실험은 35°C로 유지되는 항온실에서 10일동안 진행되었다. 발효실험에 사용된 식중슬러지는 과천시 하수종말처리장상의 혐기성 소화조에서 반입한 것이며, 실험실에서 35°C에서 3일 동안 순응시킨 것이다. 식중슬러지의 TS와 VS는 각각 14.5 g/l, 9.0 g/l였다.

3. 분석 방법

TCOD, SCOD, pH, TSS, VSS 등은 Standard Methods¹¹⁾에 따라 분석하였다. VFAs는 Flame ioni-

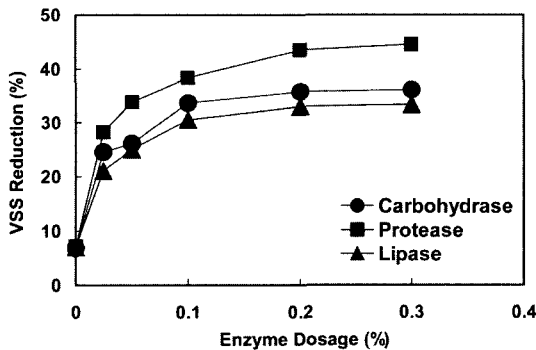


Fig. 1. Effect of enzyme type and dosage on VSS reduction.

zation detector(FID)가 장착된 가스크로마토그래피 (Hewlett-Packard 5890 series 2)를 사용하였고, 칼럼은 25 m HP-INNOWAX capillary colulum을 사용하였다. 시료 1 ml에 10% 인산 0.5 ml를 주입하여 시료를 산성화시킨 후 VFAs 분석을 실시하였다. 칼럼은 145°C 등온조건에서 유지하였고, 시료주입부와 검출부의 온도는 모두 240°C로 설정하였다. Carrier 가스로서 헬륨가스를 사용하였고, FID의 불꽃은 수소와 공기를 이용하였다.

III. 결과 및 토의

1. 효소 전처리

효소의 단독처리 실험에서 24시간 경과 후 VSS 변화가 Fig. 1에 나타나 있다. 효소주입이 없는 경우에도 약 7% 정도의 VSS 감소는 있었으며, 효소 주입율이 증가할수록 VSS 감소율은 쌍곡선형으로 증가하였다. NaOH를 주입하여 pH를 조정하였으므로 이 과정에서 알칼리제에 의한 가수분해반응도 있었을 것으로 사료된다. Carbohydrase나 lipase 처리를 한 경우 주입율 0.1%까지 VSS 감소율은 급격히 증가하여 각각 33.6%, 30.1%에 이르렀으나, 이보다 많은 주입율에서는 VSS 감소율 증가는 그다지 크지 않았다. 그러나 protease의 경우 주입율 0.2%까지 VSS 감소율은 계속 증가하여 43.6%에 달하였다. 음식물쓰레기의 주성분이 탄수화물임에도 불구하고 carbohydrase나 lipase를 주입한 때보다 protease를 주입했을 때 더 높은 VSS 감소율을 보였다. 즉, 탄수화물이 주성분인 음식물쓰레기의 소화에는 protease가 더 효과적인 것이다. Higgins와 Novak의 실험에서도 비슷한 결과가 나타났는데¹²⁾ 이들은 이것을 다음과 같이 설명하였다. 즉, 어떤 탄수화물 복합체(complex)의 생물폴리머 구조는 단백질의 폴리사카라

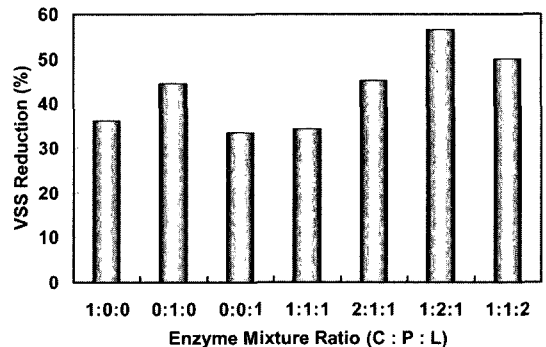


Fig. 2. Effect of enzyme mixture on VSS reduction (C: carbohydrase; P: protease; L: lipase).

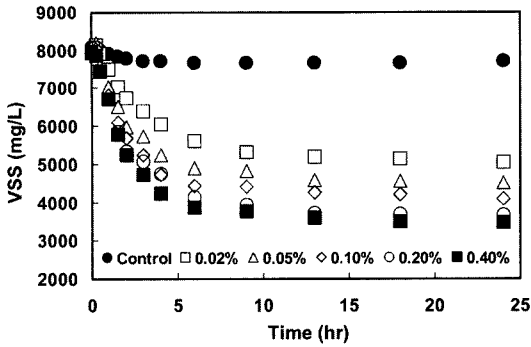


Fig. 3. Effect of enzyme mixture on VSS reduction.

이드(polysaccharides) 결합에 의해 안정화되기도 하는데 이러한 연결작용을 하는 단백질을 lectin-line protein이라고 한다. Protease는 이들 연결 단백질을 용해시켜 결과적으로 탄수화물을 용출하게 만드는 것이다. 이들의 실험에서 폴리사카라이드의 용출량은 protease를 주입했을 때가 효소를 주입하지 않았을 때보다 2배 정도 많았다. 이러한 결과는 음식물쓰레기의 가수분해에서 protease의 중요성을 말해 준다. 쉽게 가수분해 가능한 폴리사카라이드는 protease의 작용으로 용출되고 결과적으로 음식물쓰레기의 가수분해는 증진되는 것이다.

Fig. 2에는 총 효소 주입율을 0.3%로 일정하게 했을 때, 효소의 혼합처리가 VSS 감소율에 미치는 영향이 나타나 있다. Fig. 1에서 추정된 바와 같이 3가지의 효소 중에서 protease가 VSS 감소에 가장 큰 영향을 미치기 때문에 혼합처리에서도 protease 비율이 가장 많은 carbohydrase:protease:lipase = 1:2:1인 때가 가장 높은 VSS 감소율을 보였다. 단독처리 실험에서 0.3%의 protease 단독처리가 가장 높은 VSS 감소율(44.5%)을 보이기는 했지만, 혼합비율 1:2:1일 때(56.7%) 보다는 낮은 감소율을 보이고 있다. 이는 protease가 음식물쓰레기의 분해에서 주도적인 역할을 하며, carbohydrase나 lipase는 protease에 의해 분해되지 않은 성분을 분해하므로 상호보완작용을 하였기 때문으로 판단된다. 이 실험 결과를 근거로 음식물쓰레기의 효소 전처리 실험 및 혐기성 발효 실험에서 혼합처리의 효소 혼합비는 carbohydrase:protease:lipase = 1:2:1로 설정하였다.

효소의 혼합처리가 음식물쓰레기의 전처리에 미치는 영향을 알아보기 위해 혼합효소의 주입율을 0.02, 0.05, 0.1, 0.2, 0.4%(V/V)로 변화시켰다. VSS와 SCOD의 변화를 24시간의 배양기간 동안 측정하였으며, VSS의 변화를 Fig. 3에 표시하였다. 혼합효소의 주입율이 클

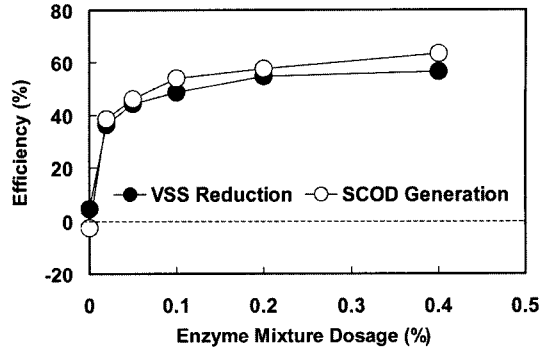


Fig. 4. Effect of enzyme mixture on solubilization of food waste.

수록 VSS의 감소폭도 컸으며, VSS 농도는 혼합효소 주입율이 0.4%일 때 최소값 3,500 mg/L까지 감소하였다. 그러나, 주입율에 비례하는 더 이상의 VSS 감소는 보이지 않았다. 대조군에서도 약간의 용해 및 VSS 감소는 있었으나 그 양은 크지 않았고, 음식물쓰레기에 존재하는 미생물에 의한 분해와, 중화를 위해 주입한 알칼리제에 의한 것으로 판단되었다. 용해는 대부분 초기 8시간 이내에 발생하였고, 그 이후에는 용해폭이 매우 적었다. 따라서 음식물쓰레기의 효소전처리에서 반응시간은 8시간 정도가 적당한 것으로 사료된다.

24시간의 전처리 실험에서 혼합효소 주입율에 따른 VSS 감소 및 이와 상응하는 SCOD 증가를 Fig. 4에 표시하였다. 혼합효소 주입율이 가장 작은 0.02%인 경우에도 괄목할 만한 VSS의 감소가 있어 36.5%에 달했고, 이는 Parmer 등의 실험 결과¹³⁾와 비슷한 정도이다. 이들은 시판되는 효소를 혼합하여 0.03% 주입율로 하수슬러지에 주입한 전처리 실험에서 40.5%의 TSS 감소율을 보고한 바 있는데, carbohydrase 대신에

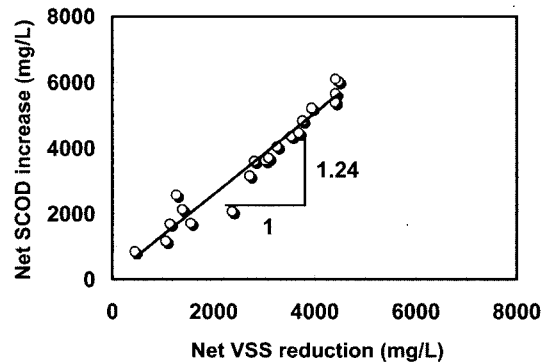


Fig. 5. SCOD generation rate according to VSS reduction in the enzymatic hydrolysis of food waste.

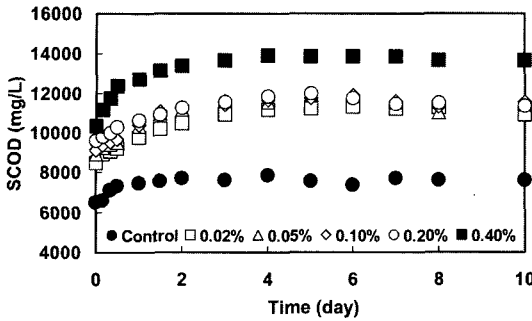


Fig. 6. SCOD variation during batch fermentation of enzymatically pretreated food waste.

cellulase를 사용하였고, 혼합비율도 cellulase:protease:lipase = 1:1:1로 하였다. 어쨌든, 하수슬러지 뿐만 아니라 음식물쓰레기의 입자상물질도 효소에 의해 실용적인 수준까지 가수분해 가능함을 알 수 있다.

VSS 감소율과 COD의 용해는 혼합효소 주입율 0.1%까지는 급격히 증가하다가 이후에는 증가폭이 매우 작았다. 따라서, 주입율 0.1%는 실질적으로 음식물쓰레기의 효소 전처리에서 최적 주입율로 여겨진다. 효소를 주입하지 않은 경우는 VSS 감소율이 4.4% 정도로 매우 작게 나타났고, 이는 미생물에 의한 분해 때문인 것으로 판단된다. 이 경우에 SCOD도 24시간 동안 2.7% 감소하여 미생물에 의한 용해성 유기물의 소비가 가수분해에 의한 유기물 생성보다 더 많았음을 알 수 있다.

측정기간동안 효소전처리한 음식물 쓰레기의 VSS 감소량과 SCOD 증가량을 계산하여 Fig. 5에 표시하였다. VSS 감소량과 SCOD 증가량을 비교한 결과 결정계수(r^2)는 0.944로 나타나 온 상관성이 매우 높게 나타났다. 또한, 이 경우에 VSS 감소량에 대한 SCOD 증가량의 비율은 평균 1.24이다. 이는 효소 주입에 의한 음식물 쓰레기의 가수분해에서 VSS 1g 감소에 SCOD 1.24 g 비율로 증가하는 것을 의미한다.

2. 전처리된 음식물쓰레기의 산발효

Fig. 6에 효소 전처리된 음식물쓰레기의 산발효시 SCOD의 변화를 표시하였다. 대조반응조에서도 발효 초기에 1,000 mg/l 정도의 SCOD 증가가 있었고, 이 농도는 발효 후반까지 거의 일정하였다. 효소 주입율 0.2% 이하인 경우에, SCOD는 실험 시작후 지속적으로 증가하여 5~6일 정도에 가장 높은 농도를 보였으며, 그 이후는 서서히 감소하였다. 효소 주입율 0.02~0.2%일 때에도 SCOD의 괄목할 만한 증가가 있었으나 SCOD 증가가 가장 큰 것은 효소 주입율 0.4%인 경우였다.

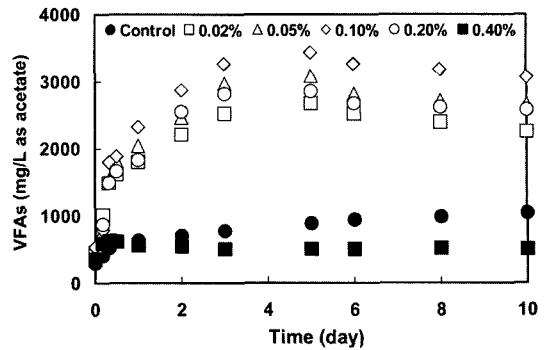


Fig. 7. VFAs production during batch fermentation of enzymatically pretreated food waste.

발효 기간이 긴 경우에 산발효 및 메탄발효에 이르는 미생물의 연쇄반응이 SCOD 변화에 영향을 미칠 것으로 예상되었으나 모든 발효조에서 메탄 발생량은 미미하였고, 메탄 발효는 무시할 수 있었다.

효소 주입율 0.4%인 경우는 SCOD의 변화가 다른 발효조와 다른 양상을 보였다. 즉, 회분식 발효에서 초기 12시간동안 SCOD는 10,300 mg/l에서 12,400 mg/l로 급격히 증가하다가 이 후부터는 증가율이 크게 떨어지고, 발효 4일에서 SCOD 최대값인 13,900 mg/l를 나타내었다. 이 농도는 실험이 끝날 때까지 유지되었다. 총 10일의 발효기간동안 생성된 SCOD의 거의 60%가 초기 12시간 안에 생성된 것인데, 이는 전처리 실험에서 초기 12시간 동안 VSS가 급격히 감소하고 그 이후에는 거의 변화가 없는 것과 무관하지 않다. 그렇지만, 12시간 이후에 VSS 감소는 거의 없었으나 SCOD는 꾸준히 증가하는 것으로 보아 12시간 이후의 SCOD 증가는 음식물쓰레기의 미생물에 의한 가수분해라기 보다는 식중슬러지의 유기물이 효소에 의해 가수분해된 결과인 것으로 판단된다.

Fig. 7에 효소 전처리한 음식물쓰레기 산발효 실험에서의 VFAs 생성량이 표시되어 있다. 효소처리하지 않은 대조반응조에서도 VFAs는 생성되었는데 산발효 초기 12시간 동안 320 mg/l 정도의 VFAs(as acetate)가 증가하였고, 이 후에는 증가폭이 매우 작았다. 효소 주입량 0.02~0.2%인 효소전처리 음식물쓰레기의 경우 같은 기간동안 VFAs의 증가폭은 훨씬 커서 1,200~1,400 mg/l에 달했다. Fig. 6의 초기 12시간의 SCOD 증가와 비교해볼 때, VFAs 증가율은 SCOD 증가율의 거의 2배에 달한다. 이는 이 기간동안의 VFAs는 효소 전처리시 생성된 용존 유기물이 빠른 속도로 VFAs로 전환되었기 때문이다. VFAs는 5일 째에 최대치에 달했고, 그 이후에는 서서히 감소하였다. 5일 이후의 VFAs

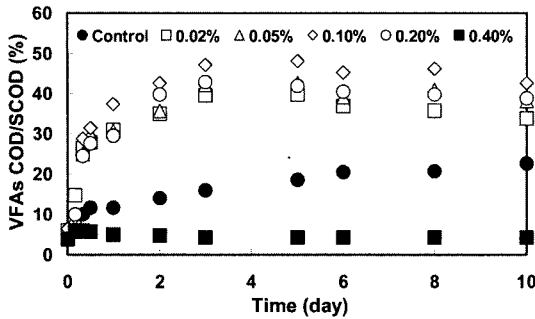


Fig. 8. VFAs fraction in SCOD.

감소는 미미하나 VFAs가 메탄이나 이산화탄소로 전환되었기 때문에 보인다. 효소 주입을 0.4%인 경우는 그러나 매우 다른 양상을 보인다. VFAs는 초기 8 시간 정도까지 생성되나 그 양은 미미하다. 또한, Fig. 6의 SCOD와 비교해 볼 때 SCOD는 증가하는 반면 VFAs는 거의 증가하지 않은 정도로서 그 양은 대조반응조보다도 적다. 즉, 효소 주입을 0.4% 이상에서는 과잉주입현상으로 인해 산발효가 억제되었기 때문이다.

VFAs의 농도를 Eastman과 Ferguson(1981)의 계산법¹⁴⁾에 따라 COD값으로 환산하여 SCOD중 VFAs의 비율을 Fig. 8에 표시하였다. SCOD중 VFAs의 비율은 특히 BNR 공정에서 음식물쓰레기의 외부탄소원으로서의 가용성을 표시하는 중요한 지표이다. 왜냐하면, 탈질이나 생물학적 인제거 반응에서 VFAs는 다른 어떤 유기물보다 유리하기 때문이다. SCOD중 VFAs의 비율은 효소를 주입하지 않은 대조반응조에서도 점차 증가하여 10일 후에는 22.7%에 달하였고, 효소 주입을 0.02~0.2%에서는 이 비율이 최초 4.1~6.0% 정도에서 급격히 증가하여 초기 12시간만에 27.6~31.5%에 달했다. 이는 앞서 설명한 바와 같이 효소 전처리에 의해 생성된 용존 유기물이 VFAs로 쉽게 전환되었기 때문이다. 이 시간 이후에도 VFAs의 비율은 계속 증가하였고, 3~5일 정도에서 최고 함량에 도달하였다. 효소 주입을 0.1%인 경우에 SCOD에 대한 VFAs 비율이 가장 높아 48%에 달하였고, 다음으로 효소 주입을 0.2%인 경우에 43%이었다. 5일 이후에는 VFAs가 오히려 감소한 것으로 보아 메탄 발효 등에 의해 소비되는 양이 생성되는 양보다 더 많은 것으로 나타났다. 효소 주입을 0.4%인 경우는 SCOD에 대한 VFAs의 비율이 6% 보다 낮았고, 이는 대조반응조 보다도 훨씬 낮은 수준이었다. SCOD는 증가하나 VFAs는 증가하지 않는 것으로 보아 이 경우(0.4%)는 전처리 과정에서 잔류한 효소가 식중슬러지를 가수분해하였을 것으로 판단된다. 효소의 과잉주입은 발효와 관계있는 미생물을 분해

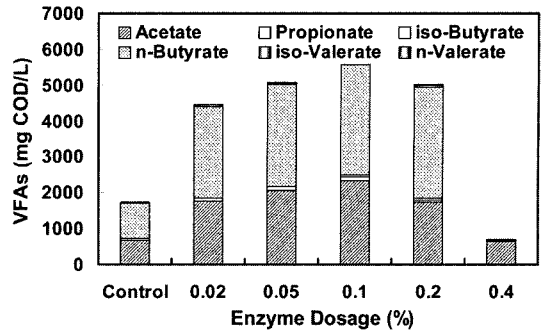


Fig. 9. Maximum VFAs production and the VFAs composition.

시키고, VFAs의 생성은 위축되는 것이다. 효소 주입을 0.2%에서도 작기는 하지만 이와 같은 잔류 효소에 의한 식중슬러지의 저해가 나타났고, 이 때문에 VFAs의 발생량이 효소 주입을 0.1%인 때 보다 오히려 감소한 것으로 보인다. 따라서, 효소 전처리에서 VFAs를 최적화시키는 효소 주입율은 0.1%(V/V) 정도인 것으로 판단된다.

VFAs 발생량 최고점에서의 VFAs 구성은 Fig. 9와 같다. 효소 주입을 0.02~0.2%인 경우에, 효소 전처리에 의해 VFAs의 생성량은 COD 기준 4,500~5,600 mg/l 정도 증가하였다. VFAs의 최고점은 효소 주입을 0.1%인 경우에 발생하였는데 이 경우의 VFAs의 생성량은 대조 반응조의 3.3배 수준이었다. VFAs에서 가장 많은 구성 성분은 n-뷰티릭산(n-butyrate)였으며, 초산(acetate)이 그 다음이었다. 뷰티릭산과 초산이 많이 생성되는 것은 탄수화물이 많은 기질을 산발효했을 때 정형적으로 나타나는 현상이다.¹⁵⁾ Argelier 등¹⁶⁾ 또한 음식물쓰레기를 산발효했을 때 VFA의 대부분은 초산과 뷰티릭산이었음을 보고한 바 있다. 효소 주입을 0.4%인 경우는 VFAs 생성량도 매우 적었지만 그 구성도 단조로와 초산이 거의 대부분이었다.

IV. 결 론

음식물쓰레기의 산발효에 대한 전처리로서 효소를 사용했을 때 효소가 COD 변화와 VFAs의 생성에 미치는 영향을 분석하였다. 실험 결과를 근거로 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 단일종류의 효소로 전처리했을 때 음식물쓰레기의 VSS 감소에는 protease가 carbohydrase나 lipase보다 효과가 높았다.
2. VSS 감소율이 가장 좋은 효소의 배합 비율은 carbohydrase:protease:lipase = 1:2:1이었고, 음식물쓰레

기의 전처리에서 VSS 감소와 용해를 최적화시키는 혼합효소 주입율은 0.1%(V/V)이었다.

3. 효소 전처리한 음식물쓰레기를 산발효시켰을 때, 효소 주입율을 0.1%(V/V)로 한 경우가 VFAs의 생성량이나 SCOD중 VFAs의 함량 측면에서 모두 가장 우수한 결과를 보였다. 이 경우 VFAs 생성량은 효소를 주입하지 않은 경우보다 3.3배 정도 많았고, VFAs의 구성은 n-뷰티릭산, 초산 순이었다.

4. 음식물쓰레기의 효소 전처리에서 효소의 과잉주입은 식중슬러지의 분해를 야기하므로써 VFAs의 생성량이 효소를 주입하지 않을 때보다도 오히려 감소하므로 효소 주입량은 신중히 결정해야 한다.

감사의 글

본 연구는 2003년도 조선대학교 교내연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

참고문헌

- Choi, E. S., Lee, H. S., Lee, J. W. and Oa, S. W. : Another carbon source for BNR system. *Water Science and Technology*, **34**(1-2), 363-369, 1996.
- Park, J. A., Kim, S. H. and Hur, J. M. : Nutrient release during the aerobic and alternant aerobic sludge digestion. *한국환경위생학회지*, **26**(4), 82-87, 2000.
- Moser-Engeler, R., Udert, K. M., Wild, D. and Siegrist, H. : Products from primary sludge fermentation and their suitability for nutrient removal. *Water Science and Technology*, **38**(1), 265-273, 1998.
- 김영규, 김인배, 김민호 : 슬러지를 이용한 유기산 발효 공정의 외부탄소원으로 활용. *한국환경위생학회지*, **27**(4), 79-83, 2001.
- Lee, S. I., Park, J. H., Ko, K. B. and Koopman, B. : Effect of fermented swine wastes on biological nutrient removal in sequencing batch reactors. *Water Research*, **31**, 1807-1812, 1997.
- Lee, C. Y., Shin, H. S., Chae, S. R., Nam, S. Y. and Paik, B. C. : Nutrient removal using anaerobically fermented leachate of food waste in the BNR process. *Water Science and Technology*, **47**(1), 159-165, 2002.
- Kim, H. J., Kim, S. H., Kim, D. Y. and Chung, T. H. : Effect of alkaline pretreatment on acid fermentation of food waste. In Proc. of the Enviro 2002 and IWA 3rd World Water Congress, Melbourne, 7-12, April, 2002.
- Barlindhaug, J. and Ødegaard, H. : Thermal hydrolysis for the production of carbon source for denitrification. *Water Science and Technology*, **34**(1-2), 371-378, 1996.
- Stucky, D. C. and McCarty, P. L. : Thermochemical treatment of nitrogenous materials to increase methane yield. *Biotechnology and Bioengineering*, **8**, 219-233, 1978.
- Rajan, R. V., Lin, J. G. and Ray, B. T. : Low-level chemical pretreatment for enhanced sludge solubilization. *Journal Water Pollution Control Federation*, **61**, 1678-1683, 1989.
- American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation : Standard Methods - for the Examination of Water and Wastewater. Ed. by Greenberg, A.C., Clesceri, L.S., Eaton, A.D. 18th Edition, APHA, 1992.
- Higgins, M. J. and Novak, J. T. : Characterization of exocellular protein and its role in bioflocculation. *Journal of Environmental Engineering*, **127**, 479-485, 1997.
- Parmar, N., Singh, A. and Ward, O. P. : Enzyme treatment to reduce solids and improve setting of sewage sludge. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, **26**, 383-386, 2001.
- Eastman, J. A. and Ferguson, J. F. : Solubilization of particulate organic carbon during the acid phase of anaerobic digestion. *Journal Water Pollution Control Federation*, **53**, 352-366, 1981.
- Zoetemeyer, R. J., van den Heuvel, J. C. and Cohen, A. : pH influence on acidogenic dissimilation of glucose in an anaerobic digester. *Water Research*, **16**, 303-311, 1982.
- Argelier, A., Delgenes, J. Ph. and Moletta, R. : Design of acidogenic reactors for the anaerobic treatment of the organic fraction of solid food waste. *Bioprocess Engineering*, **18**, 309-315, 1998.