

## 유산균 접종에 의한 하수 슬러지의 가용화

양현상 · 최정은 · 이은영\*  
수원대학교 환경공학과

**Solubilization of Sewage Sludge by Inoculation of Lactic Acid Bacteria.** Yang, Hyun-Sang, Jung-Eun Lee, and Eun Young Lee\*. *Department of Environmental Engineering, Suwon University, Suwon 445-743, Korea* – A new approach to the solubilization of excess activated sludge by the inoculation of lactic acid bacteria was studied to reduce the amount of sludge produced in the activated sludge treatment process. Aerobic microorganism in sludge was lysed in anaerobic condition and the cytoplasmic substance eluted was utilized as a carbon source by lactic acid bacteria. On the basis of sludge solubilization efficiency, *Lactobacillus brevis* and *Leuconostoc mesenteroides* subsp *mesenteroides* were selected the best candidates among five kinds of *Lactobacillus* sp. and seven kinds of *Leuconostoc* sp. The sludge solubilization efficiency by heterofermentative lactic acid bacteria was more efficient than that of homofermentative bacteria. Initial value of soluble COD (sCOD) was 1050 mg/L at the initial inoculation time increased to 3070 mg/L (192% solubilization) at 96 h of the incubation time. The inoculation of *lactobacillus brevis* to the sludge resulted in 2824% increase in sCOD value after 96 h of incubation than the control experiment. *Leuconostoc mesenteroides* subsp *mesenteroides* showed 152% increase of solubilization and 30% increase of S-COD/T-COD on 96 h of incubation time. Considering the increase of S-COD by the inoculation of *Leuconostoc* sp. on 24 h, 10% inoculation of lactic acid bacteria to the sludge was most effective.

**Key words :** Sewage sludge, lactic acid bacteria, solubilization, *Leuconostoc*, *Lactobacillus*

### 서 론

2003년 7월 1일부터 하루 10,000톤 이상의 하수처리 시설에서 발생하는 하수슬러지의 직매립이 전면 금지되었으나 뚜렷한 기술의 확보 없이 추진한 결과 발생량의 76.9%를 해양투기로 처리하는 등의 문제점을 초래하였고[4-6], 이러한 조치가 곧 다가올 런던협약 96의정서 발효에 의해 2011년부터 실행되는 하수슬러지의 해양투기 금지 입법에 따른 또 다른 문제점으로 부각되고 있다. 이에 따라 국내에서는 하수 슬러지 처리 기술개발 및 재활용 기술개발이 시급한 현실이다. 슬러지 처리를 위하여 퇴비화, 소각, 건조, 고화, 탄화 등에 대한 연구가 진행되었으나 이들 대부분의 시스템들은 사후 처리방법으로 발생원에서의 슬러지 발생량에 대한 제어 기술이 아니었다. 따라서, 하수슬러지 처리에 있어서도 발생량을 사전에 저감하고 슬러지 내 유효성분을 재이용할 수 있는 원천 감량화 기술 개발이 필요하다[2-3]. 슬러지는 2.5  $\mu\text{m}$  정도의 미생물들이 폴리머(polymer)로 서로 엉켜져 있으며, 10-20  $\mu\text{m}$ 의 서브그룹으로서 약 125  $\mu\text{m}$  정도의 플러크로 이루어져있다[22]. 슬러지의 감량화 효율을 향상시키기 위하여

슬러지 내 미생물의 세포막을 파괴시켜 cell debris를 기질화 하기 위한 다양한 전처리 연구가 진행되어왔다. 잉여슬러지의 대부분을 차지하는 미생물의 세포벽을 파괴시켜 생물반응조로 반송했을 때 미생물이 섭취할 수 있는 상태로 전환시키는 것이 핵심이며, 이를 슬러지의 가용화(solubilization)라고 한다. 이런 전처리는 슬러지의 세포구성 물질들의 가수분해를 촉진시키고 슬러지의 생분해성을 높이는데 주요한 역할을 한다[27]. 이와 같은 전처리 기술은 기계적 분쇄, 열적산화[15]), 초음파[10, 16, 31]와 같은 물리적 방식 그리고 오존처리 [7, 13, 30], 염소처리, 알칼리처리[32]와 같은 화학적 방식 및 생물학적방식 (Oxic-Settling-Anoxic[11], 고온호기성세균) 등으로 분류된다. 물리·화학적 기술은 부산물이나 부가적인 반응 등이 발생하지 않아 후처리에 미치는 영향이 적은 장점이 있다. 그러나 운전 및 유지비용이 높은 편이며, 탈수성 향상에는 큰 성과가 없다는 단점을 지니고 있어 실제 감량화 시스템에의 적용이 어려운 것이 사실이다. 따라서 2차적 문제없이 안정적이고 경제적인 감량화 전처리 기술인 생물학적 방식이 유리하다.

본 연구에서는 슬러지 가용화 방법으로 미생물의 생체량을 줄이는 방법과 생물학적으로 슬러지를 가수분해하여 고형물량을 줄이는 방법을 시도하였다. 유산균을 이용한 유기성 폐기물 발효에 대한 연구는 일부 진행된 바 있으나[29, 33] 슬러지를 대상으로 한 연구는 아주 기초적인 수준에서 시도

\*Corresponding author

Tel: 82-031-220-2614, Fax: 82-031-220-2533,  
E-mail: ley@suwon.ac.kr

되었을 뿐[3, 26] 체계적인 연구가 이루어지지 않고 있다. 하지만, 유기성 폐기물을 발효하는 유산균의 능력에 대하여 여러 연구를 통해 그 가능성이 확인되었으므로[23], 유기물인 하수 슬러지를 대상으로 유산균 발효를 시도하는 것은 매우 흥미롭다 할 수 있다.

Gram-양성의 통성혐기성세균인 유산균은 포도당에 대하여 약 50% 이상의 lactic acid를 대사생산물로 생성하며, 식품이나, 사람과 동물의 장내에서 인체에 해로운 물질, 즉 indole, skatole, phenol, amine, 암모니아 등을 생성하지 않고 부패를 방지하는 등의 유익한 작용을 하는 세균을 말한다[1, 17]. 유산균에 의한 발효는 크게 세 단계로 진행되는데 첫째, 비용해성 고단위 유기물이 유산균이 분비하는 세포외 효소에 의해 단백질, 지방, 탄수화물 등의 저단위 용해성 물질로 전환되는 가수분해 혹은 가용화단계를 거친다. 이후 두 번째 단계로 용해성 단백질은 아미노산으로, 용해성 지방은 지방산과 glycerol의 혼합물로, 용해성 탄수화물은 maltose, glucose, fructose, galactose 등의 당류로 전환된다. 이후 당류가 동형발효형 유산균(homofermentative lactic acid bacteria)에 의해서 lactic acid로, 이형발효형 유산균(heterofermentative lactic acid bacteria)에 의해서 lactic acid, CO<sub>2</sub>, ethanol 또는 acetic acid를 생성하는 마지막 단계를 거친다 [12]. 유산균은 비전이적인 특성과 함께 비침입적인 특성으로 GRAS(generally regarded as safe)로 분류된다. 이런 유산균의 특성으로 현재 식품 및 의학 관련 연구[9, 14, 18-21, 25, 28]가 주를 이루지만, 최근 들어 발효기작과 기질을 분해 할 때 생성되어지는 CO<sub>2</sub>, ethanol 등의 가스성분을 재 이용하는 환경적인 분야의 연구에도 관심이 증가하는 추세이다[24].

이에 따라서 하수슬러지의 수처리공정과 연계한 원천감량화 기술은 사후 처리에 급급한 슬러지처리의 새로운 대안이 될 수 있다. 또한 유기물농도가 낮아 고도처리에 어려움을 겪고 있는 국내 하수의 특성을 감안할 때 슬러지를 유기 탄소원으로 활용하는 많은 이점이 있다.

본 연구에서는 유기성 폐기물인 하수슬러지를 대상으로 *Lactobacillus*와 *Leuconostoc* 속(genus) 유산균의 통성혐기적인 배양 특성과 발효작용을 이용하여 가용화시키는 실험을 하였다. 슬러지 내에 존재하는 호기성 미생물의 용균현상을 유발하여 생체량을 줄이는 Lysis 단계와 Lysis 단계에서 분해되어 방출되는 세포질을 유산균의 탄소원으로 하여 생물학적 분해를 이루는 cryptic growth의 두 단계로 반송슬러지를 가용화 함으로써, 원천적인 슬러지의 감량화에 목적을 두었다.

## 실험장치 및 방법

### 반송 슬러지

슬러지는 S 하수처리장의 2차 반송슬러지를 채취하여 4°C

의 냉장고에 보관하였으며, 유산균을 이용한 반송 슬러지의 가용화율의 측정과 그에 따른 슬러지 내의 유기물질의 감량화 효율을 확인하였다. 날씨 변동 및 유입된 폐수에 따라서 슬러지의 성상이 일정하지 않아 한 실험에 5L의 슬러지를 채취하여 여러 개의 반응조를 만들어 실험하였다.

### 유산균의 배양

실험에 사용된 유산균의 종류는 한국농업미생물 자원센터(KACC)에서 분양 받은 동결 건조된 유산균으로 자세한 내용은 Table 1에 나타내었다. 유산균의 종류에는 동형발효형 유산균(homofermentative lactic acid bacteria) 1종과, 이형발효형 유산균(heterofermentative lactic acid bacteria) 11종으로서, 이후에는 알파벳(A~L)으로 표기하였다(Table 1).

분양 받은 동결 건조된 유산균의 배양은 MRS(de Man-Rogosa-Sharpe)배지를 이용하여 37°C의 혐기조건에서 배양하였다. 호기조건에서도 유산균은 생육이 가능하나, 일반적으로 혐기조건에서 유산균이 더 잘 자라기 때문에 실험에 사용된 유산균의 배양은 혐기적인 조건에서 정치 배양하였다 [23].

### 반송 슬러지의 가용화 실험

Headspace를 포함한 총 부피 625 mL의 혈청병에 슬러지를 100 mL을 넣어 주고 질소가스로 공기를 치환한 후, 고무마개와 알루미늄 캡을 이용해 밀봉하였다. 혐기적인 혈청병 내에서 발생하는 가스는 50 mL 부피의 일회용 실린지를 이용하여 포집하였다. 반송 슬러지내의 호기성 미생물의 용균현상을 유발하기 위해서는 채수한 슬러지를 24시간 동안 혐기적 조건에서 방치한 후 슬러지의 S-COD(Soluble-chemical oxygen demand), MLSS(Mixed liquor suspended solid), pH를 측정하여 슬러지의 분해정도를 조사하였다. 또한, 혐기 조건으로 24시간 방치한 슬러지에 전 배양된 유산균을 접종하여 시간에 따른 슬러지의 가용화정도를 측정하였다.

**Table 1. Lactic acid bacteria used in the experiments.**

Nomenclature	KACC No.	Test No.
<i>Lactobacillus amylophilus</i>	11430	A
<i>Lactobacillus brevis</i>	10553	B
<i>Lactobacillus casei</i>	12413	C
<i>Lactobacillus plantarum subsp. plantarum</i>	11451	D
<i>Lactobacillus plantarum</i>	10552	E
<i>Leuconostoc carnosum</i>	12255	F
<i>Leuconostoc lactis</i>	12305	G
<i>Leuconostoc mesenteroides subsp. mesenteroides</i>	10770	H
<i>Leuconostoc pseudomesenteroides</i>	12304	I
<i>Leuconostoc citreum</i>	11860	J
<i>Leuconostoc fallax</i>	12303	K
<i>Leuconostoc mesenteroides subsp. dextranicum</i>	12315	L

모든 실험 결과는 2반복 실험 후 얻은 결과에 대한 평균값을 이용하였다. 가용화 효율(%)은 배양종료시의 COD 값에서 접종시간의 COD값을 뺀 후 이를 접종시간의 COD 값으로 나눈 백분율로 계산하였다. 대조군과의 비교는 실험시작시의 COD 값을 기준으로 하였다.

### 분석방법

반송슬러지의 COD 분석은 과망간산칼륨(KMnO<sub>4</sub>)법을 이용하였다[8]. 3일간 배양한 유산균을 접종한 반송슬러지를 10,000 rpm으로 원심분리하여 미생물을 제거한 후 그 상등액을 희석하여 KMnO<sub>4</sub>로 유기물질을 산화하였다.

MLSS의 분석 방법으로는 수질공정시험 방법을 따랐으며[8], 가용화된 반송슬러지를 5 mL 채취하여 반송슬러지 내 MLSS의 측정을 통하여 미생물 생체량 변화를 알아보았다.

배양 중 슬러지 내의 pH 변화를 측정하기 위하여 pH meter(Thermo Benchtop, U.S.A)을 이용하여 측정하였다.

### 실험결과 및 고찰

#### 동형유산균과 이형유산균 종류에 따른 반송 슬러지의 변화 관찰

한국농업미생물 자원센터(KACC)에서 분양 받은 유산균 *Lactobacillus* 5종과 *Leuconostoc* 7종을 실험에 이용하였다. 100 mL의 반송슬러지를 담은 혈청병을 24시간 동안 혐기적인 환경으로 방치한 후 12종의 전배양한 유산균을 총 부피의 10%(v/v)가 되도록 접종하였다. 실험에 주로 사용한 S시의 하수처리장의 반송 슬러지의 성상은 함수율이 96%이고, pH는 6.84, 총COD(T-COD)는 2,500 mg/L, 수용성 COD(S-COD)는 55 mg/L, MLSS와 SS는 각각 7500 mg/L, 6860 mg/L이며 TOC는 188,987 mg-C/L이었다. 이 중 *Lactobacillus amylophilus* (A), *L. brevis* (B), *L. casei* (C), *L. plantarum* subsp. *plantarum* (D), *L. plantarum* (E)의 결과를 Fig. 1에 나타내었다. 본 실험에 앞선 예비실험에서는 총 3종의 동형발효형유산균(*Lactobacillus amylophilus*, *L. acidophilus*, *L. salivarius* subsp. *salivarius*)에서 슬러지 가용화가 미미한 결과를 얻었고, 이에 따라 본 실험에선 그 중 가장 좋은 결과를 보였던 *Lactobacillus amylophilus*만을 선택하였다. 유산균을 접종한 직후에는 유산균의 유기물 양으로 인하여 슬러지의 S-COD 값이 급격히 증가하는 것을 알 수 있었고, 슬러지 내에서 유산균의 활동으로 인하여 최종 96시간에 S-COD 값이 증가됨을 알 수 있었다. 또한 실험에 사용한 *Lactobacillus* 5종 중 S-COD 값의 변화가 가장 높게 나온 유산균은 *Lactobacillus brevis*(B)로 유산균 접종 직후 1050 mg/L에서 최종 96시간에는 3070 mg/L로 약 192%의 가용화가 진행되는 것을 알 수 있었다(Fig. 1). Control은 유산균을 접종하지 않은 채 96시간 동안 혐기적으로 방치한 것이다. 96시간동안 *L. brevis* (B)는 반송슬러지 내에서

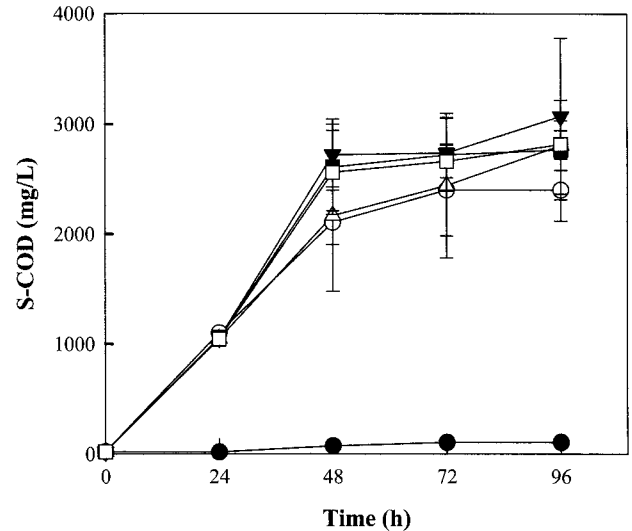


Fig. 1. Changes of S-COD in the sludge by the inoculation of *Lactobacillus* sp. ●, Control (non-inoculation); ○, *Lactobacillus amylophilus* (A); ▼, *Lactobacillus brevis* (B); △, *Lactobacillus casei* (C); ■, *Lactobacillus plantarum* subsp. *plantarum* (D); □, *Lactobacillus plantarum* (E).

control값에 비하여 약 2824%의 S-COD 증가를 보여주었으며, 이는 유산균의 접종에 의하여 반송 슬러지의 가용화가 진행됨을 의미한다.

#### *Lactobacillus brevis*를 이용한 대상 반송슬러지의 선정

유산균의 접종에 따른 반송슬러지의 가용화가 진행되는 데 있어서 반송슬러지의 성상이 가용화에 미치는 영향을 알아보았다. 실험 대상 슬러지는 인근 지역의 부근 3곳의 하수처리장의 반송슬러지를 채취하여 하수처리 공법 및 주요특징을 비교하였으며, *L. brevis*를 접종한 후의 가용화 비율을 알아보았다. 각 하수처리장의 하수처리 공법은 표준 활성오니법으로 인한 생화학적 영양염류 제거법을 사용하며, 하수처리장의 평균 하수 처리량은 S 하수처리장은 520,000 m<sup>3</sup>/d이며, 그 중 공장폐수를 170,000 m<sup>3</sup>/d, 나머지 350,000 m<sup>3</sup>/d는 가정하수와 분뇨가 유입되어지고 있었다. O 하수처리장은 57,000 m<sup>3</sup>/d로 공장폐수와 가정하수가 통합되어 유입되어지고 있으며, A 하수처리장은 437,000 m<sup>3</sup>/d로 인근 지역의 공단에서 1차적으로 처리된 공장폐수가 유입되어지고 있었다.

각 하수처리장의 반송슬러지를 혐기적 조건으로 24시간 방치하여 *Lactobacillus brevis*를 접종한 뒤 총 96시간 동안 슬러지의 S-COD를 측정 결과를 Fig. 2에 도시하였다. 유산균을 접종한 결과, A 하수처리장 슬러지는 접종 직후의 S-COD 값이 1825 mg/L에서 최종 96시간에는 3258 mg/L로 약 78%의 증가를 보였고, O 하수처리장 슬러지의 S-COD는 2825 mg/L에서 최종 96시간에는 3120 mg/L로 약 10%의 증가량을 보였다. 또한 S 하수처리장의 슬러지 경우, S-

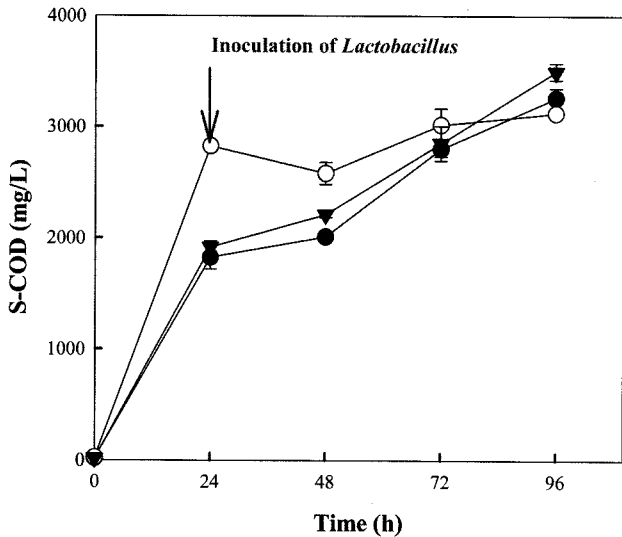


Fig. 2. Comparisons of the solubilization of sludges sampled from three different sewage treatment plants. ●, A-plant; ○, O-plant; ▼, S-plant.

COD값 1915 mg/L에서 3496 mg/L로 약 82%의 증가량을 보여 가장 높은 값을 보여 실험 대상 슬러지로 선정하였다. 각 하수처리장의 하수처리공법은 유사하나, 유입되어지는 하수의 성상에 따라 발생되어지는 슬러지의 성상도 달라지기 때문에 실험에 있어서 오차범위가 가장 적으며, 발생되어지는 슬러지의 성상변화가 가장 적은 S하수처리장의 슬러지를 모든 실험에 사용하였다.

**반송 슬러지의 변화**

슬러지 내에서 고단위 용해성 물질이 유산균에 의해 저단위 용해성 물질로 전환이 이루어진다. 저단위 용해성 물질인 당류는 동형발효형유산균(homofermentative lactic acid bacteria)에 의해 lactic acid으로 전환되고, 이형발효형유산균(heterofermentative lactic acid bacteria)에 의해 lactic acid, ethanol, CO<sub>2</sub> 등으로 전환이 된다[5]. 다음은 슬러지 내에서 동형유산균과 이형유산균의 접종에 따른 반송슬러지의 변화를 나타내었다(Fig. 3).

동형유산균은 *Lactobacillus amylophilus*을 사용하였으며, 이형유산균으로는 *Lactobacillus brevis*와 *Leuconostoc sp.*를 사용하여 반송슬러지의 변화를 관찰한 결과 동형발효형유산균인 *L. amylophilus*를 접종하였을 때 슬러지의 S-COD 값은 초기 1780 mg/L에서 최종 96시간이 지난 후에는 2400 mg/L으로 약 34%의 증가를 보였으며, 이형발효형유산균인 *L. brevis*는 초기 1650 mg/L에서 최종 96시간 후에는 3350 mg/L으로 103%의 증가를 보였으며, *Leuconostoc sp.*를 접종하였을 때는 초기 1450 mg/L에서 3650 mg/L으로 152%으로 증가되었다(Fig. 3). 실험을 통해서 동형발효형유산균을 접종한 것 보다, 이형발효형유산균을 접종할 때, 슬러지 내에서 가용화가 효과적인 것을 알 수 있었다. 또한 이형유

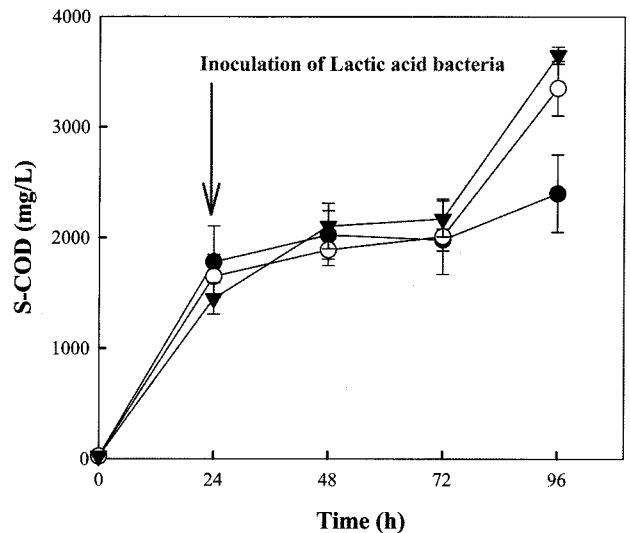


Fig. 3. Effect of the metabolic types of lactic acid bacteria on the sludge solubilization. ●, *L. amylophilus* (A); ○, *L. brevis* (B); ▼, *Leuconostoc sp.*

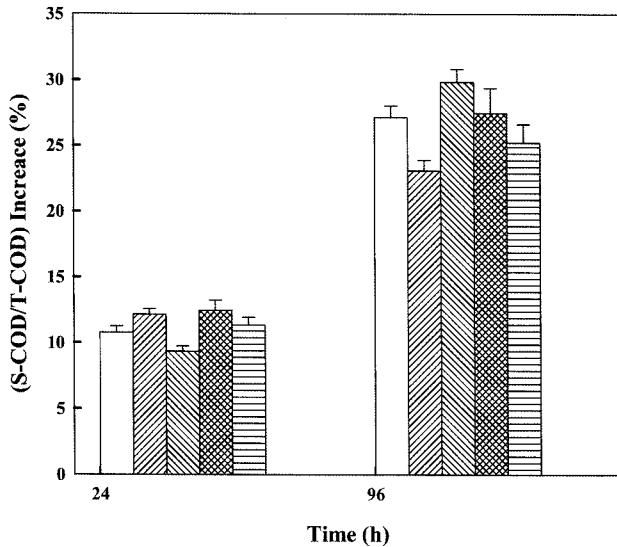
산균 중에서도 *L. brevis* 보다 *Leuconostoc sp.*가 슬러지의 가용화에 효과적임을 알 수 있었다(Fig. 3).

***Leuconostoc sp.*을 이용한 슬러지 가용화**

이형유산균인 *Leuconostoc sp.* 5개 종 으로부터 슬러지의 가용화 정도를 알아보기 위하여 유산균을 접종하고 총COD와 가능성 COD를 측정하여 비교하였다.

반송슬러지를 혐기적 조건에서 24시간 방치한 후 이형유산균인 *Leuconostoc* 5종을 접종하여 슬러지의 가용화 정도를 실험한 결과 시간이 흐름에 따라 S-COD가 증가하는 경향을 보였다. 그 중에서도 *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* (H)의 가용화 증가율이 초기 24시간에서 96시간까지 가장 많이 증가함을 알 수 있었다. 이는 슬러지 내에서 여러 종의 유산균이 가용화를 유도하지만 Fig 4에서 보는 바와 같이 *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* 종이 슬러지 내에서 가장 활발하게 성장하며, 가용화에 효과적인 것으로 사료된다.

*L. mesenteroides* subsp. *mesenteroides*는 접종한 시간 대비 72시간 경과된 후 가용화율이 약 154% 증가되었으며, 나머지 균주의 경우 약 70~100%의 가용화 증가율을 보였다. 따라서 *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides*가 가장 최적의 유산균임을 확인할 수 있었다. 전체 슬러지 내에서 가용화된 슬러지의 비율은 S-COD/T-COD의 증가율을 통해 확인할 수 있었다(Fig. 4). 가장 효과적으로 가용화가 진행된 *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides*의 경우 S-COD/T-COD는 약 30%에 이르렀으며, 나머지 균주의 경우도 23-27%가량의 가용화가 진행된 것임을 알 수 있었다. 슬러지 가용화를 위한 다양한 실험 결과에서



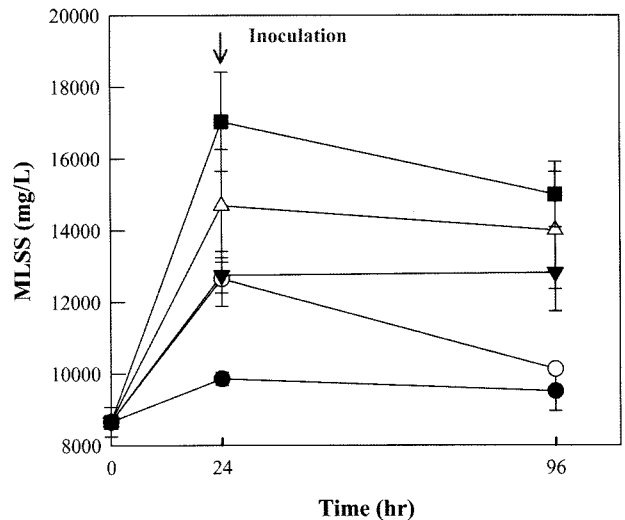
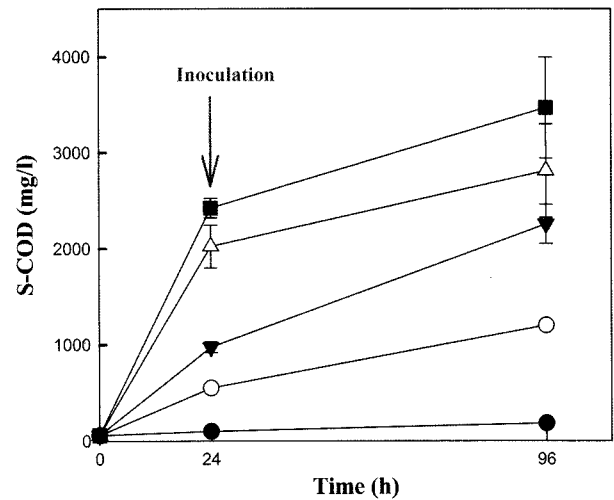
**Fig. 4.** Effect of the inoculation of the various strains of *Leuconostoc* sp. on the increase of S-COD sludge solubilization. □, *Leuconostoc carnosum* (F); ▨, *Leuconostoc lactis* (G); ▩, *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* (H); ▧, *Leuconostoc mesenteroides* (I); ▤, *Leuconostoc citreum* (J).

microbubble ozonation을 이용할 경우, 오존을 최대  $0.16 \text{ g O}_3 \text{ g}^{-1}$  TSS까지 증가시켰을 때 슬러지내의 S-COD 증가는 15-31%까지였다[13]. Chu 등이 사용한 슬러지는 T-COD 값이 3500-5000 mg/L였으며, S-COD는 60-100 mg/L로서 유사한 값을 보였다. 기존의 많은 연구에서 모든 조건이 매우 다양하여 직접적인 비교는 어려우나, 슬러지 가용화의 효율은 40-50%를 넘기 어려웠다. Eskicioglu 등(2007)의 열적 초음파 처리의 경우 50-96°C의 영역에서 SCOD/TCOD의 증가비율(%)이  $9 \pm 1\%$ - $24 \pm 1\%$ 였다고 한다[17]. 따라서, 본 연구에서와 같은 중온성의 온도에서 위와 같은 높은 가용화 처리 효율을 얻은 것은 매우 효과적이라고 할 수 있다.

#### *L. mesenteroides* subsp. *mesenteroides*의 접종량으로 알아본 슬러지의 가용화

반송슬러지 가용화에 가장 효과적인 *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides*의 슬러지에 대한 접종량을 5%, 10%, 15%, 20%, 25%(v/v)로 차이를 두어 슬러지의 가용화율을 알아보기 위해 S-COD, MLSS, pH를 실험하였다. 실험은 초기 24시간에 유산균을 접종한 값과 최종 96시간 값을 측정하여 비교하였다(Fig. 5(a)).

반송슬러지 내에 *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides*의 접종량을 달리하여 슬러지의 가용화 정도를 실험한 결과 초기 반송 슬러지의 S-COD는 58 mg/L이고, 혐기적 조건에서 24시간 방치 후 유산균을 접종하였다. 유산균의 접종량이 증가함에 따라 슬러지 내에 유기물의 양이 증가하므로 S-COD의 값도 또한 증가함을 알 수 있었다. 접종량에 따른 슬러지 가용화 실험은 96시간동안 진행되었으



**Fig. 5.** Effect of the inoculum size of *Leuconostoc mesenteroides* subsp. *mesenteroides* on the sludge solubilization(a) and MLSS(b). ●, Control(non-inoculation); ○, 5%(v/v); ▼, 10%(v/v); ▽, 15%(v/v); ■, 20%(v/v).

며, 최종 96시간째 슬러지의 S-COD 측정 결과는 슬러지의 가용화 정도를 증가율로 비교하였다(Fig. 5(a)). 반송슬러지 총 부피의 10%(v/v)를 접종한 경우 24시간 대비 132%의 S-COD의 증가율을 보여 슬러지 내에서 가용화가 가장 많이 이루어졌음을 알 수 있었다.

또한 가용화된 슬러지의 생체량 변화를 알아보기 위해 MLSS를 측정하였다(Fig. 5(b)). MLSS 농도는 부유물질의 농도로서 미생물량을 표시하는 지표이다. 반송슬러지에 유산균을 접종하였을 때 값이 급격히 늘어난 반면에 72시간 경과 후에는 MLSS 농도가 감소되는 경향을 보였다. 본 연구에서 유산균을 이용한 것은 유산균이 다른 세균에 비하여 세균 증식속도는 빠르지 않고, 앞의 lysis 단계에서 발생된 유기물을 효과적으로 이용할 수 있기 때문이었다. 따라서,

감소율로 비교하였을 때 반송슬러지 부피의 10%(v/v)를 접종한 값이 25%의 감소율을 보여 유산균이 반송 슬러지의 가용화를 유도함과 동시에 유산균의 증식은 증가되지 않음을 알 수 있었다. 편 등(2006)의 슬러지 탈수성 개선을 위해 요쿠르트 발효액을 첨가한 실험에선 5%의 접종량이 가장 효과적이었다고 하였다. 이들이 요쿠르트에서 유산균만 회수한 후 접종하거나, 유산균을 재발효시켜 접종한 실험 역시 최고 5%까지를 대상으로 실험한 것이므로, 본 연구와 직접적인 비교는 어려우나 5%까지는 접종량에 비례하여 탈수성이 개선되어짐은 동일한 결과를 얻었다고 할 수 있다.

이러한 결과로부터 유산균을 이용한 슬러지의 가용화의 가능성을 확인할 수 있었으며, 가용화되어 증가된 SCOD는 생물학적 탈질공정에 탄소원으로 활용 가능한 것으로 밝혀졌다(Ahn 등, 2002). 또한, 상등액을 생물학적 질소제거 공정의 탄소원으로 이용할 경우 고도처리에 유용하게 이용될 수 있을 것이다.

## 결 론

인체와 동물의 건강에 유익한 유산균의 대사기작을 이용하여 배양하면서 슬러지의 감량화를 시도하였다. 혐기적 배양으로 슬러지내의 호기성 미생물을 용균시키고 이로서 방출되는 세포질을 탄소원으로 이용하여 유산균을 생장시킴으로서 슬러지의 가용화율을 증가시켜주었다. 대상균주는 *Lactobacillus* 5종과 *Leuconostoc* 7종을 대상으로 슬러지의 가용화비율을 조사하여 가장 효과가 우수한 *Lactobacillus brevis*와 *Leuconostoc mesenteroides* subsp *mesenteroides*를 선정하였다. 동형유산균과 이형유산균을 적용한 결과, 이형유산균이 가용화에 더욱 효과적이었다. *Lactobacillus brevis*는 초기 접종 직후 sCOD 값이 1050 mg/L에서 최종 96시간 후 3070 mg/L로 약 192%의 가용화가 되었으며, 접종하지 않은 control에 비하여 약 2824%의 가용화가 진행되었다. *Leuconostoc mesenteroides* subsp *mesenteroides*는 동일한 조건에서 152% 가용화되었으며, S-COD/T-COD는 약 30%에 이르렀다. 또한, 이들의 접종량의 증가에 따른 가용화비율을 비교해 본 결과, 총 부피의 10%(v/v)를 접종할 경우, 접종량 대비 가장 효과적임을 알 수 있었다.

## REFERENCE

- 박용하, 장영효, 윤정훈, 김홍중. 1999. 유산균의 연구와 최근 분류학적 고찰. 한국미생물생명공학회지. 12: 35-43.
- 배재근. 2006. 유기성오나의 효율적 관리 및 처리를 위한 시스템 구축방안. 한국폐기물학회 춘계학술연구발표회논문집. pp.79-98.
- 편의식, 배재근. 2006. 유산균을 이용한 슬러지 감량화와 탈수성 개선에 관한 연구. 한국폐기물학회 춘계학술연구발표회논문집. pp. 163-167.
- 환경부. 2005. 전국 폐기물 발생 및 처리 현황.
- 환경부. 2007. 하수슬러지 관리 기본계획.
- 환경부. 2007. 런던협약 96의정서 발효에 따른 하수슬러지 관리 종합대책.
- Ahn, K.-H., K.-Y. Park, S. K. Maeng, J. H. Hwang, J. W. Lee, K.-G. Song, and S. Choi. 2002. Ozonation of wastewater sludge for reduction and recycling. *Wat. Sci. Tech.* 46 (10): 71-77.
- APHA. 1999. Standards Methods for the Examination of Water and Wastewater (20th ed.). *American Public Health Association*. Washington, DC.
- Bogdanov, I. G., P. Popkristov, and L. Marinov. 1962. Effect of antibioticum bulgaricum on Sarcoma 180 and the soild of Ehlich carcinoma. *Abstr. Cancer Congress. Intl.* 1: 364-365.
- Cha, S. Y. 1996. A study on new technology of waste treatment combining microwave with UV. Master's thesis, School of Chem, Eng. and Technol., Yengnam University, Korea.
- Chen, G. H., K. J. An, S. Sebastien, B. Etienne, and D. Malik. 2003. Possible cause of excess sludge reduction in an oxic-settling-anaerobic activated sludge process. *J. Water Res.* 37: 3855-3866.
- Chevalier, P., D. Roy, and P. Ward. 1990. Detection of *Biofidobacterium* species by enzymatic methods. *J. Appl. Bact.* 68: 619-624.
- Chu, L.-B., S.-T. Yana, X.-H. Xinga, A.-F. Yua, X.-L. Sunb, and B. Jurcikkb. 2008. Enhanced sludge solubilization by microbubble ozonation. *Chemosphere* 72: 205-212.
- Cummings, J. H. and G. T. Macfarlane. 1991. The control and consequences of bacterial fermentation in the human colon. *J. Appl. Bact.* 70: 443-459.
- Eskicioglu, C., K. J. Kennedy, and R. L. Drostea. 2006. Characterization of soluble organic matter of waste activated sludge before and after thermal pretreatment. *Wat. Res.* 40: 3725-3756.
- Eskicioglu, C., N. Terzianb, K. J. Kennedy, R. L. Drostea, and M. Hamodac. 2007. Athermal microwave effects for enhancing digestibility of waste activated sludge. *Wat. Res.* 41: 2457-2466.
- Garrity, M. and M. George. 1986. *Bergey's Manual of Systematic Bacteriology*. 8: 110-118.
- Goldin, B. R., L. Swenson, J. Dwyer, M. Sexton, and S. L. Gorbach. 1980. Effect of *Lactobacillus acidophilus* supplements on human fecal bacterial enzymes. *J. Natl. Cancer Inst.* 64: 255-261.
- Goldin, B. R. and S. L. Gorbach. 1980. Effect of *Lactobacillus acidophilus* dietary supplements on 1, 2-dimethyl hydrazine dihydrochloride-induced intestinal cancer in rats. *J. Natl. Cancer Inst.* 64: 263-265.
- Hofvendahl, K. and B. Hajn-Hagerdal. 2000. Factors affecting the fermentative lactic acid production from renewable resource. *Enz. Microbial. Tech.* 26: 87-107.
- Isolauri, E., M. Juntunen, T. Rautanen, P. Sillanauke, and T. Koivula. 1991. A human *Lactobacillus* strain(*Lactobacillus*

- GG) promotes recovery from acute diarrhea in children. *Pediatrics* **88**: 90-97.
22. Jorand, F., F. Zartarizan, F. Thomas, J. C. Block, J. Y. Bottero, G. Villemin, V. Ubrain, and J. Manem. 1995. Chemical and structural (2D) linkage between bacteria within activated sludge flocs. *Wat. Res.*, **29**: 1639-1647.
23. Jung, D. Y., S. M. Lee, Y. M. Koo, and J. S. So. 2003. Optimum condition for simultaneous saccharification and fermentation of paper sludge to produce lactic acid and viable *Lactobacillus* cells. *Kor. J. Biot. Bioeng.* **18**: 14-18.
24. Karuna, S. and D. J. Lee. 2007. Status and prospects of biodiesel and bioethanol industry. *Kor. J. Intl. Agri.* **19**: 20-28.
25. Kimbauer, R., F. Booy, D. R. Lowy, and J. T. Schiller. 1992. *Papillomavirus* L1 major capsid protein self-assembles into virus-like particles that are highly immunogenic. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **92**: 11553-11557.
26. Marquesa, S., J. A. L. Santosb, F. M. Gírioa, and J. C. Roseiro. 2008. Lactic acid production from recycled paper sludge by simultaneous saccharification and fermentation. *Biochem. Eng. J.* In press.
27. Mller J., G. Lehene, J. Schwedes, S. Battenberg, R. Naveke, J. Kopp, N. Dichtl, A. Scheminski, R. Krull, and D. C. Hempel. 2001. Disintegration of sewage sludge and influence on anaerobic digestion. *Wat. Sci. Tech.*, **38**: 425-433.
28. Oh, C. Y. and W. K. Lee. 2000. Antitumor activity of lactic acid bacteria isolated from human intestine against Sarcoma 180 in mice. *Kor. J. Anin. Sci.* **16**: 237-244.
29. Ohkouchia, Y. and Y. Inoue. 2006. Direct production of l(+)-lactic acid from starch and food wastes using *Lactobacillus manihotivorans* LMG18011. *Biores. Technol.* **97**: 1554-1562.
30. Scheminski A., R. Kull, and D. C. Hempel. 2000. Oxidative treatment of digested sewage sludge with ozone, *Wat. Sci. Tech.*, **42**(9): 151-158.
31. Tiehm A., K. Nickel, M. Zellhorn, and U. Neis. 2001. Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization. *Wat. Res.* **35**(8): 2003-2009.
32. Vlyssides, A. G and P. K. Karlis. 2004. Thermal-alkaline solubilization of waste activated sludge as a pre-treatment stage for anaerobic digestion. *Biores. Tech.* **91**: 201-206.
33. Yanga, S. Y., K. S. Jib, Y. H. Baikb, W. S. Kwakb, and T. A. McCaskeyc. 2006. Lactic acid fermentation of food waste for swine feed. *Biores. Technol.* **97**: 1858-1864.

(Received May 29, 2008/Accepted July 9, 2008)