

## 호알칼리미생물을 이용한 슬러지감량형 하수처리공정 연구

# A Study on the Sludge-reduced Sewage Treatment Process Combined with Sludge Solubilization Technique Using Alkalophiles

신경숙<sup>1,\*</sup> · 김윤석<sup>1</sup> · 한대훈<sup>1</sup> · 한운우<sup>2</sup> · 이영하<sup>3</sup> · 허형우<sup>1</sup>

Kyung-Sook Shin<sup>1,\*</sup> · Yoon-Seok Kim<sup>1</sup> · Dae-Hoon Han<sup>1</sup> · Woon-Woo Han<sup>2</sup> ·  
Young-Ha Rhee<sup>3</sup> · Hyung-Woo Hur<sup>1</sup>

1 (주)한화건설 기술연구소

2 대전대학교 토목공학과

3 충남대학교 생명과학부

(2007년 10월 22일 논문 접수; 2007년 12월 13일 최종 수정논문 채택)

### Abstract

Recently, one of the most interesting topic in the field of wastewater treatment is the disposal of excess sludge. The new concept of excess sludge reduction with recirculation of solubilized sludge via effective microorganisms for cell disruption within the wastewater treatment process has been developed in this study. The alkalophiles for degradation of sludge cell wall were isolated as *Exiguobacterium* sp., which could be more effectively solubilized sludge in the anaerobic condition. The SCOD of solubilized excess sludge by *Exiguobacterium* sp. was up to about 2,000mg/L and average TN and TP concentration of solubilized component were 117mg/L and 58mg/L, respectively and C/N ratio was more than 17. To investigate the effects of solubilized sludge by *alkalophiles* on excess sludge reduction and nutrient removal efficiency, the pilot plant of DF<sup>®</sup>-MBR process, combined with membrane bioreactor and sludge solubilization tank, was operated. In the control run(without sludge solubilization), the daily sludge production was about 4.54 kgMLVSS/day. However, in the DF<sup>®</sup>-MBR(with sludge solubilization), the daily sludge production was decreased to 1.39kgMLVSS/day. The effluent quality satisfied the effluent regulation in both cases. Furthermore, the DF<sup>®</sup>-MBR showed relatively better TN removal efficiency in spite of high influent loading. So we concluded that the solubilized excess sludge by alkalophiles was effectively degraded in the MBR process as the carbon source and 70% of sludge reduction efficiency can be achieved.

**Key words:** Solubilization, Sludge reduction, Membrane bioreactor, Alkalophiles

**주제어:** 가용화, 슬러지감량, 막분리 활성슬러지공법, 호알칼리미생물

## 1. 서 론

2005년말 기준으로 가동중인 국내하수처리장은 294개소, 시설용량 22.4백만톤/일로서, 83%의 높은 하수도 보급율을 보이고 있으며, 하수슬러지의 발생량도 연간 2,543천톤으로 꾸준한 증가추세에 있다(환경부, 2006). 국내의 경우 발생한 하수슬러지의 70% 이상을 해양으로 배출하여 왔으나, 런던 협약 '96의 정서가 발표됨에 따라 하수슬러지를 포함한 폐기물의 해양배출규제가 대폭 강화될 예정이며, 2012년부터는 해양투기를 전면 금지할 예정에 있다. 이에 정부에서는 「하수슬러지관리기본계획」을 발표하여, 지자체들이 하수슬러지의 고품화, 퇴비화, 복도재활용 등 재활용방안을 수립하도록 하고 있으며, 특히 기존에 혐기성소화조가 설치되어 있는 처리장에서는 혐기성소화조의 소화효율개선사업을 통하여, 혐기성소화조가 없는 처리장에서는 감량화 기술을 적용하여 슬러지의 발생량을 사전에 줄이는 방안을 적극 권장하고 있다. 혐기성소화를 포함한 슬러지감량에 있어 핵심은 대부분이 미생물로 구성되어 있는 슬러지의 세포벽을 파괴하여 세포벽으로 인해 차단되어 있던 유기물을 용존화하는 전처리방법에 있다. 현재까지 개발된 슬러지의 전처리방법으로는 오존이나 초음파를 이용하는 방법(Tiehm et al., 2001, Weemaes et al., 2000), 열처리방법(Li et al., 1992), Ball Mill 등과 같은 기계적인 전처리방법(Meuller et al., 1998), 산이나 알칼리를 이용하는 화학적인 방법(Lin et al., 1997), 고에너지 전자빔이나 마이크로웨이브를 활용하는 방법 등이 있으며(신 등, 2000, Woods et al., 1993) 미생물의 세포벽을 분해시킬 수 있는 효소를 직접 활용하거나, 효소분비능이 우수한 미생물을 이용하는 생물학적 방법 등도 시도되고 있다(Shiota et al., 2002). 이러한 전처리방법들은 대개 혐기성소화공정과 연계되어 하수슬러지의 소화시간을 단축시키고, 소화효율을 높여 유용한 바이오가스 생산량을 증가시키거나, 슬러지 내 부착수를 감소시켜 탈수효율을 향상시키는 효과가 있음이 입증된 바 있다(Kopp et al., 1997). 한편 가용화된 슬러지를 수처리 공정의 포기조로 재투입하여 유기성분을 재분해 시킴으로써 슬러지를 배출하지 않거나, 배출량을 최소화 한 실증연구사례 등도

있으나(Yasui et al., 1996), 대개의 경우 유기물처리에만 초점을 맞춘 재래식 활성슬러지시스템 혹은 산화구법 등에 적용이 국한되어 있어, 고도처리가 보편화되고 있는 국내상황에 도입하기 위해서는 슬러지가용화시스템을 고도처리공정과 연계할 경우에 대한 체계적인 고찰이 필요하다. 본 연구에서는 슬러지세포벽의 주요 구성성분인 단백질을 분해효소인 Protease 분비능이 우수한 호알칼리 유효균주를 분리·동정하여 가용화효율이 높은 생화학적 가용화시스템을 구성하였으며, 유입흐름제어를 특징으로 하는 하수고도처리 MBR 공정과 연계하여 슬러지의 가용화효율과 가용화조 운전조건에 따른 슬러지감량효율, 그리고 슬러지가용화산물주입이 하수처리공정의 처리효율에 미치는 영향을 종합적으로 평가하였다.

## 2. 실험재료 및 방법

### 2.1. 슬러지가용화를 위한 중온성 호알칼리 유효균주 분리

토양, 퇴비, 슬러지 등에서 채취한 310종의 균주를 대상으로 Protease activity가 우수한 균주를 선별하기 위하여 30°C, skim milk 고체배지하에서 24시간 배양 후 생성된 투명환(Clear Zone)의 크기가 1.2cm 이상인 13균주를 1차 분리하였다. 1차분리된 균주를 대상으로 Protease activity를 정량화하고, 각각의 균주에 Total Solid(이하, TS) 농도가 1%인 하수슬러지를 접종하여 생성된 SCOD 농도를 토대로 최종적인 호알칼리 유효균주를 선별하였으며, 16S-rRNA sequencing과 Fatty acid 분석을 통해 유효균주의 Profile을 조사하였다.

### 2.2. 유효균주의 슬러지가용화효율

호알칼리 유효균주의 가용화효율을 평가하기 위하여 회분식 실험(Batch Test)를 실시하였다. 슬러지의 TS농도를 0.8%, 1.0%, 1.2%로 달리한 플라스크에 초기 pH를 10으로 조정하고 유효균주를 접종한 후 일정시간 경과 후 생성된 용존 COD(SCOD)농도를 비교하였으며, 이때 유효균주를 접종하지 않고 pH만을 실험구와 동일하게 조정하여 대조구로 하였다.

2.3. 슬러지감량형 파일럿구성 및 운전조건

슬러지가용화조를 고도처리공정과 연계한 경우의 슬러지감량효율과 처리수질을 평가하기 위하여 Fig. 1에 나타난 57m<sup>3</sup>/일 처리규모의 DF<sup>®</sup>-MBR 파일럿을 D시 하수처리장에 설치하여 운전하였다. DF<sup>®</sup>-MBR 공정은 준혐기 1조 및 준혐기 2조, 침식식 정밀여과막이 설치된 막분리호기조와 슬러지가용화조로 구성된 공정으로, 유입수와 반송슬러지를 준혐기 1조와 준혐기 2조로 교대로 유입함으로써, 동일한 반응조내에서 시간주기에 따라 무산소 및 혐기조건이 순차적으로 이루어지는 것을 특징으로 한다. 공정의 HRT는 평균 6시간으로, 운전 초반부는 대조(Control)기간으로 슬러지 가용화조를 연계하지 않은 하수처리공정(DF-MBR)만을 단독 운전하였으며, RUN 1-RUN 3 기간 동안은 유효균주를 접종한 슬러지가용화조를 연계하여 막분리 호기조로부터 슬러지를 인발하여 가용화조에서 처리한 후 유입하수와 함께 수처리 공정으로 재투입하는 방식으로 운전하였다. 슬러지가용화조의 체류시간은 평균 24시간으로 운전하였으며, 호알칼리균의 우점화를 위하여 NaOH 주입을 통해 pH 10 이상으로 유지하였다. 슬러지가용화조 운전조건에 따라, RUN 1은 가용화조를 호기상태에서 슬러지 순환율( $r = \text{가용화조 유입슬러지량} / \text{Control 기준 1일 폐기해야하는 슬러지양}$ )을 1로 하였고, RUN 2는 호기상태에서 순환율을 2로 운전하였으며, RUN 3에서는 혐기교반상태에서 순환율을 2로 하여 슬러지가용화조 운전조건에 따른 SCOD 생성량과 슬러지 가용화조내 유효균주의 우점율, 그리고 슬러지 감량효율 등을 비교하였다.

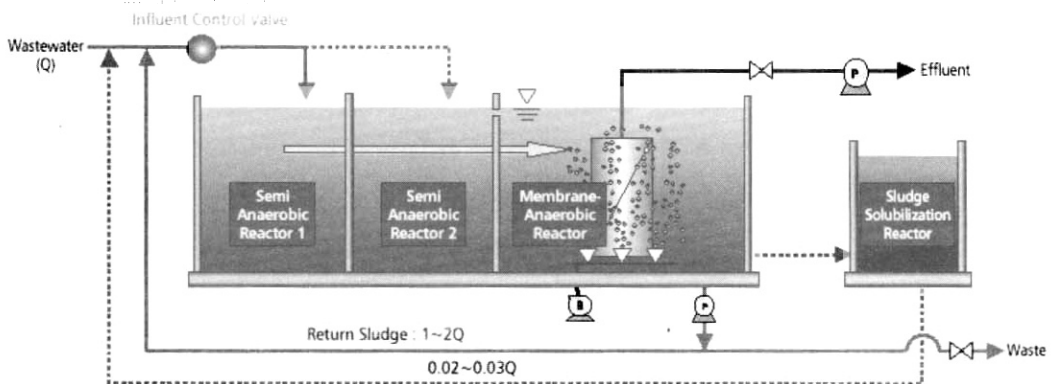


Fig. 1. Schematic diagram of DF<sup>®</sup>-MBR process.

3. 결과 및 고찰

3.1. 슬러지가용화능이 우수한 유효균주동정

슬러지가용화능이 우수한 유효균주를 선별하기 위하여 고체배지하에서의 Clear zone의 크기를 통해 1차 선별한 미생물을 대상으로 Protease activity를 측정하고, Batch상태에서 슬러지와 일정시간 접촉 후 SCOD농도를 평가하였다. Protease activity에 있어 1unit란 30°C에서 1분 동안 1mol의 Tyrosine을 분비 (Release)하는데 요구되는 효소의 양으로 정의된다. Fig. 2와 Fig. 3에 나타난 바와 같이 X-1균주의 Protease activity는 약 3.34unit/mg으로 가장 우수하였고, SCOD생성량도 타 균주접종시에 비해 높은 것으로 나타났다. X-1의 분리동정을 위하여 16S-rRNA의 염기서열을 Genbank Blast 분석결과 Fig. 4와 같이

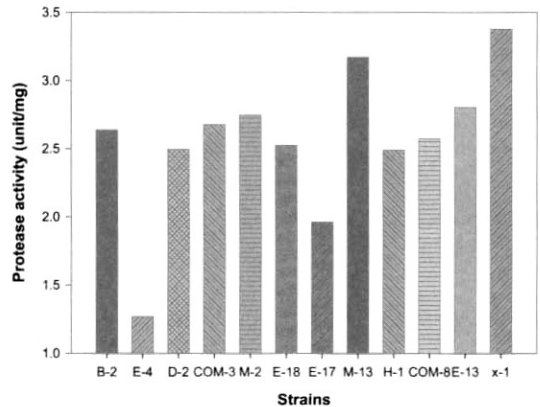


Fig. 2. Protease activity of isolated strains.

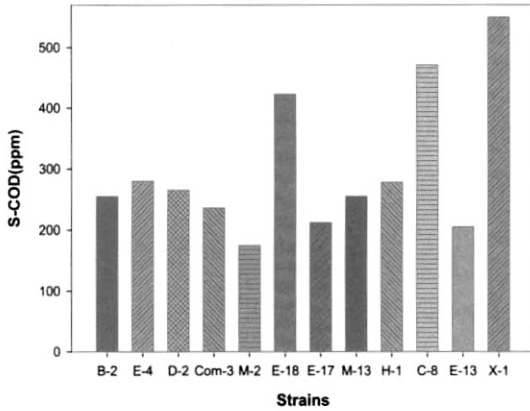


Fig. 3. SCOD of solubilized sludge by isolated strains.

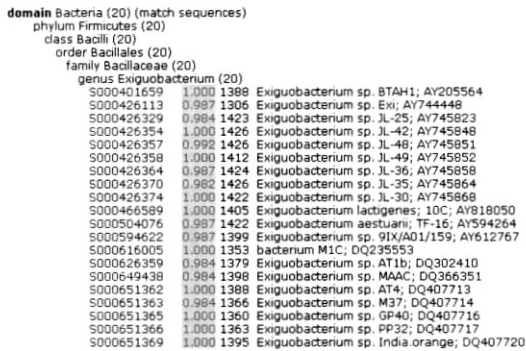


Fig. 4. Identification of X-1 strain using the 16S-γ RNA sequencing analysis.

*Exiguobacterium* sp.와 100% 유사성을 보였다. *Exiguobacterium* sp.는 오렌지 빛의 콜로니를 형성하는 통성혐기성 비포자 형성간균으로, 저온조건에서도 잘 성장하고, 동결 건조 후에도 활성회복능이 우수한 특성을 지니고 있어 슬러지가용화를 위한 유효균주로서의 활용이 용이하므로 최종균주로서 확정하였다 (Farrow et al., 1994).

### 3.2. 유효균주의 슬러지가용화효율평가

유효균주에 의한 슬러지가용화효율을 평가하기 위하여 슬러지의 TS농도를 0.8%, 1.0%, 1.2%로 달리 하여 플라스크에 넣고, *Exiguobacterium* sp.를 접종한 후 pH를 10으로 조정하고 일정시간 경과 후의 SCOD를 측정하였다. *Exiguobacterium* sp.를 접종한 경우의 초기 SCOD가 접종하지 않은 대조군에 비해 높은 것은 접종 전 수세를 시행하였음에도 불구하고,

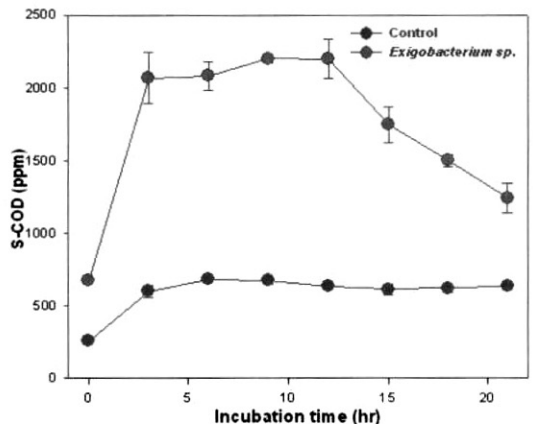
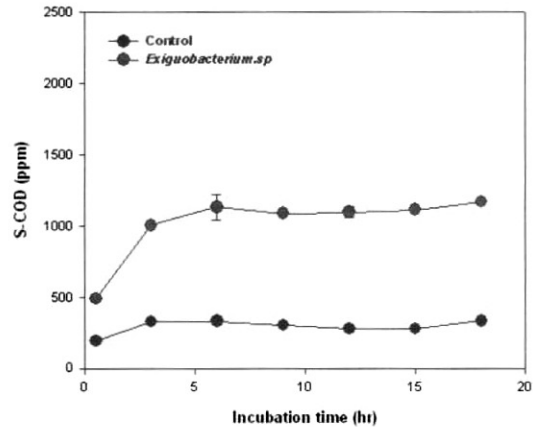
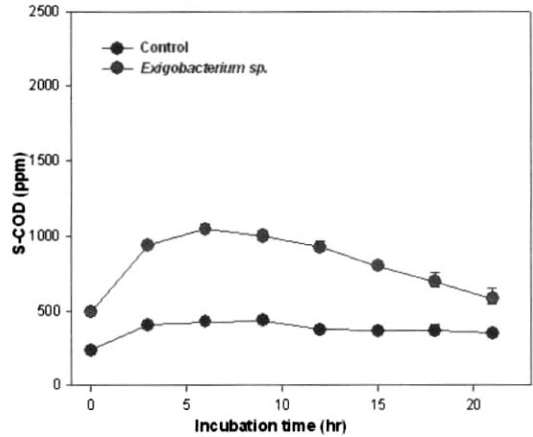


Fig. 5. SCOD concentration of solubilized sludge at various TS concentration (Top: TS 0.8%, Middle: TS 1.0%, Bottom: TS 1.2%).

고농도의 배지성분이 일부 잔존하였기 때문이다. Fig. 5에 나타난 바와 같이 균주 접종없이 pH만 10

로 조정된 대조구 대비 *Exiguobacterium* sp.를 집중한 경우의 SCOD는 TS 0.8%인 경우 122% 높은 1,000mg/L를 나타내었고, TS 1.2%인 경우에는 214% 증가한 2,200mg/L를 나타내어 유효균주에 의해 슬러지가 효과적으로 가용화됨이 입증되었으며, 대상 슬러지의 TS농도가 높을수록 유효균주에 의한 가용화가 보다 효과적인 것으로 나타났다. 또한 TS 1.2%의 그래프와 같이 가용화시간을 길게 유지할 경우 SCOD는 오히려 감소하였는데 이는 가용화된 SCOD 산물이 유효미생물과 생존하고 있는 슬러지내 미생물에 의해 재분해되기 때문으로 사료되며, 따라서 슬러지가용화산물의 SCOD 농도를 높게 유지하기 위해서는 슬러지가용화조 운전시 적절한 가용화시간을 선정하는 것이 중요할 것으로 보인다.

### 3.3. 하수고도처리 MBR운전을 통한 슬러지감량 효율평가

#### 3.3.1. 호기 및 혐기조건에 따른 슬러지가용화조의 효율비교

슬러지가용화조의 적정 운전조건을 도출하기 위하여 슬러지가용화미생물인 *Exiguobacterium* sp.을 주입한 유효용적 1.6m<sup>3</sup> 규모의 연속식 슬러지가용화조를 다양한 조건에서 운전하였다. 예비실험결과를 통해 가용화조의 HRT는 1일로 고정하였으며, *Exiguobacterium* sp.이 통성혐기성세균임을 감안하여, 각각 호기(RUN 1-RUN 2) 및 혐기교반조건(RUN 3)에서 슬러지가용화효율 및 유효균주군집의 안정성을 평가하였다. 대상슬러지는 57m<sup>3</sup>/일 처리규모의 하수고도처리 MBR 파일릿의 막분리 호기조로부터 유입하수 유량(Q) 대비 0.015-0.03Q를 정량펌프를 통해 가용화조로 유입하였으며, 이때 MLSS는 10,000mg/L 내외이었다. Fig. 6에 나타낸 바와 같이 호기조건으로 가용화조를 운전한 RUN 1-RUN 2 기간동안 가용화된 슬러지의 평균 SCOD는 1,050mg/L이었으나, 기계적인 교반만으로 가용화조를 운전한 경우는 2,250mg/L로 2배 이상 높은 값을 나타내었다. 이는 RUN 3기간 동안 소요된 NaOH 양이 42meq/L로 RUN 1-RUN 2의 26meq/L에 비해 현저히 적음에도 불구하고, 혐기조건에서 SCOD 농도가 높아진 결과를 나타내었다. 이는 RUN 3의 경우 혐기 교반에 의해 -400mV 이하의 낮은 ORP조건을 유도

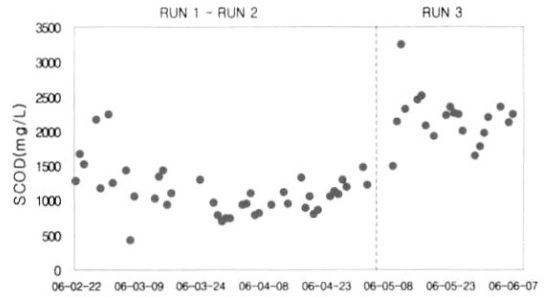


Fig. 6. Variation of SCOD in solubilization tank at aerobic and anaerobic condition.

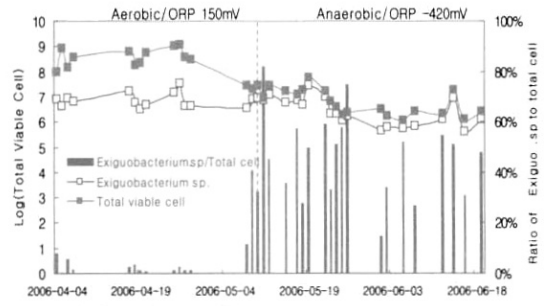


Fig. 7. Variation of total viable cells and *Exiguobacterium* sp. in solubilization tank under aerobic and anaerobic condition.

함으로써, +100mV 이상의 높은 ORP 조건의 막분리 호기조로부터 유입된 슬러지가 Saby 등(2003)의 연구 결과에서 제시한 OSA system과 유사한 급격한 ORP 변화에 의해 슬러지내 미생물의 사멸율이 증가했기 때문으로 사료된다. 이와 같은 결과는 Fig. 7에 나타난 슬러지가용화조내 총 생균수대비 *Exiguobacterium* sp. 개체수의 변화를 통해서도 알 수 있다. 가용화조를 호기조건에서 운전한 경우 가용화조내 ORP는 평균 150mV로 유지되었으며, 이때 총생균수는  $3.7 \times 10^6$ CFU/mL이었으며, *Exiguobacterium* sp.는  $7.5 \times 10^6$ CFU/mL로 가용화조내 총생균의 2%에 해당하여 우점화가 이루어지지 않는 것으로 나타났다. 반면 슬러지가용화조에 공기공급을 차단하고 혐기적 교반만 유지한 결과 반응조내 ORP는 -420mV로 떨어졌으며, 총생균수는  $6.9 \times 10^6$ CFU/mL로 호기조건에 비해 크게 감소하였고, *Exiguobacterium* sp.는  $2.8 \times 10^6$ CFU/mL로 유지되어 유효균주의 점유율이 45.7%에 달하는 등 슬러지가용화조내의 낮은 ORP 유지가 슬러지가용화에 효과적인 것으로 나타났다.

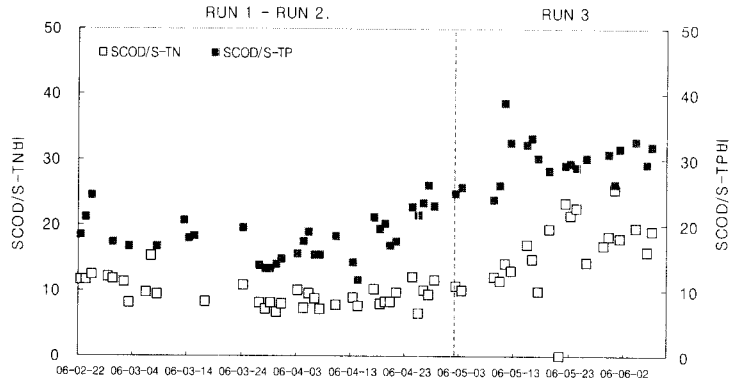


Fig. 8. SCOD/(S)T-N and SCOD/(S)T-P ratio of solubilized sludge.

Table 1. Performance of pilot plant w/ and w/o sludge solubilization tank (unit: mg/L)

Item	Control		RUN 1-RUN 2		RUN 3	
	Influent	Effluent	Influent	Effluent	Influent	Effluent
BOD	124.2	1.0	155.5	1.0	212.6	1.0
COD <sub>Cr</sub>	231.9	10.6	278.9	12.3	366.8	14.0
SS	143.3	<1.0	374.5	<1.0	571.5	<1.0
T-N	35.6	10.1	37.9	10.1	41.4	8.2
T-P	4.3	0.8	5.3	0.9	6.8	1.1

### 3.3.2. 슬러지가용화산물의 성상

본 연구 파일럿에서는 가용화된 슬러지를 유입하수와 함께 수처리공정내에서 재분해되도록 설계되어 있어 가용화 산물의 특성은 공정의 처리효율에 중요한 영향인자이다. 슬러지가용화조로부터 가용화된 슬러지의 상등액을 대상으로 SCOD/(S)T-N비와 SCOD/(S)T-P비를 평가하여 Fig. 8에 나타내었다. Fig. 8에 나타낸 바와 같이 혐기상태에서 운전된 RUN 3의 경우 평균 SCOD/T-N비는 17, SCOD/T-P비는 32를 나타내었다. 가용화된 슬러지의 C/N비는 국내하수의 BOD/TN비가 3-5 범위임을 감안할 때 매우 높은 것으로 슬러지가용화산물을 하수와 함께 준혐기조로 유입할 경우, 하수의 낮은 C/N비를 개선할 수 있는 양질의 탄소원이 될 수 있을 것이며, 다만 C/P비가 하수와 유사한 수준이므로 가용화슬러지의 주입에 따른 T-P부하의 상승이 예상되므로, 슬러지 인발주기 조정하는 등 인 제거 측면에서의 효율적인 공정운영이 필요할 것으로 보인다.

### 3.3.3. 슬러지가용화조 연계에 따른 하수고도처리 MBR 처리성능평가

슬러지가용화조로부터 가용화된 슬러지를 유입하수와 함께 재투입하여 운전할 경우 처리수질의 변화와 슬러지감량효율을 평가하기 위하여 57m<sup>3</sup>/일 처리 규모의 MBR 파일럿을 운전하였으며, 대조구로서 하수만을 유입시켜 동일조건에서 운전하였다. Table 1에 나타낸 바와 같이 슬러지가용화산물을 연계하여 처리할 경우, 평균 유입부하는 RUN 3 기준으로 SCOD의 경우 100 ± 15%, T-P의 경우 40 ± 10%로 비교적 높은 상승폭을 보인 반면, T-N부하는 10 ± 5%로 증가폭이 크지 않았으며, BOD/T-N비도 하수 단독시의 3.5에 비해 RUN 3의 경우 5.1까지 증가하여 슬러지가용화산물의 주입이 유입하수의 C/N비를 개선하는 것으로 나타났다. 처리수질의 경우 유입부하의 증가에도 불구하고, 처리수질은 COD값이 다소 상승한 것을 제외하고는 큰 차이없이 안정적인 값을 보였다. 특히 T-N의 경우는 C/N비가 개선됨에 따라 하수단독처리시의 평균 제거율 70.9%이에 비해 RUN 3의 경우에는 79.8%로 향상된 결과를 나타내

어 가용화된 슬러지가 공정내에서 유용한 탄소원으로 활용되는 것으로 사료된다. T-P제거측면에서는 가용화조를 연계한 후의 처리수질이 다소 높아지기는 하였으나, 방류수수질기준을 만족하였다. 그러나 유입하수의 T-P 농도가 높거나 혹은 오염 총량제에 본격적인 T-P 항목 도입시 엄격한 T-P 처리수질이 요구될 것이므로 이에 대비해 화학적인 인제거기법의 도입을 검토할 필요가 있을 것으로 사료된다.

### 3.3.4. 슬러지가용화조 연계에 따른 슬러지감량 효율평가

슬러지가용화조의 가용화효율과 순환율에 따른 슬러지감량효율을 평가하기 위하여 운전조건을 각각 달리하여 운전한 RUN 1-RUN 3 기간 동안의 1일 슬러지발생량을 비교하였다. 슬러지감량효율은 운전시기 별로 반응조의 MLVSS 증가량과 슬러지 인발량, 스크럼제거량 등을 포함한 총 누적슬러지양을 토대로 일간 MLVSS 증가량을 산정하고, 가용화조를 연계하지 않고 운전한 Control 기간의 일간 MLVSS 증가량과 비교하여 산정하였다. DF-MBR 공정을 단독으로 운전한 Control 운전기간 동안의 1일 슬러지발생량은 4.54kg인데 반해, 슬러지가용화조를 호기상태로 운전하고 순환율을 1로 한 RUN 1의 경우는 3.28kg/d로 27.8%의 감량효율을 나타내었고, 순환율을 2로 증가시킨 RUN 2의 경우는 52.6%까지 감량효율이 증가해 슬러지의 순환율과 감량효율이 매우 밀접한 관련이 있음을 알 수 있었다. 또한 가용화조를 혐기교반상태에서 운전하여 ORP조건을 낮게 유지함으로써 TS가 약 1%인 슬러지의 SCOD농도를 2,000mg/L 이상 유지시키고, 슬러지순환율을 2로 운전한 RUN 3의 경우 69.4%의 높은 슬러지감량효율을 나타내었다. 이와 같은 결과는 슬러지순환율을 수처리공정과 연계한 슬러지감량시스템에 있어 가장 중요한 운전인자로 제시한 Shiota 등(2002)과 배 등(2005)의 연구결과와 일치하는 것으로, 본 연구에서 제시한 효과적인 유효균주를 이용한 가용화 시스템 도입으로 SCOD농도를 2,000mg/L 이상 유지시키고, 슬러지 순환율을 2 이상 유지할 경우에는 처리수질의 악화없이 70% 가량의 유기슬러지감량효율을 달성할 수 있을 것으로 판단되었다.

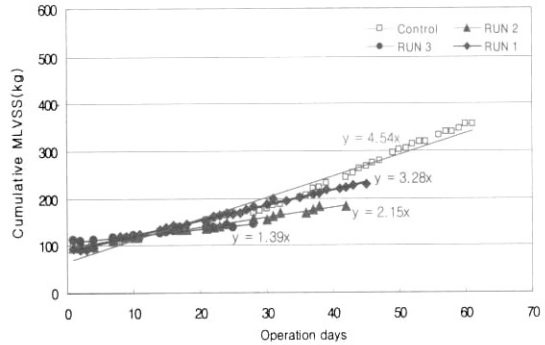


Fig. 9. Cumulative sludge production at different operation condition of sludge solubilization tank.

## 4. 결 론

본 연구에서는 슬러지의 세포벽을 분해할 수 있는 효소 분비력이 탁월한 호알칼리균주를 분리동정하여 생물학적 슬러지가용화시스템을 구성하였으며, 슬러지가용화시스템과 하수고도처리 MBR 공정을 연계하여 가용화 슬러지의 주입에 따른 처리수질 및 슬러지감량효율을 평가하여 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) Protease Activity와 SCOD 생성율을 토대로 총 310종의 후보균주중 호알칼리 유효균주를 분리동정하였으며, 16S-rRNA의 염기서열을 Genbank Blast 분석한 결과, *Exiguobacterium* sp.와 100% 유사성을 나타내었다.
- 2) MLSS가 약 10,000mg/L 내외인 호기상태의 슬러지를 대상으로 *Exiguobacterium* sp.를 접종한 가용화조에서 HRT 1일, pH 10 조건에서 가용화시킬 경우 유효균주의 분비효소와 ORP의 급격한 변화로 인해, 호기상태로 운전시보다 슬러지가 효과적으로 가용됨을 알 수 있었으며, 이때 SCOD는 2,000mg/L 이상을 유지하였다.
- 3) 57톤/일 처리규모의 하수고도처리 MBR공정에 생물학적 슬러지가용화조를 연계하여 운전한 결과, 가용화된 슬러지의 SCOD/T-N비는 10-17로 유입하수와 혼합시 C/N비 개선효과가 있었으며, 그 결과 하수단독 처리시에 비해 T-N처리성능이 약 10% 가량 향상되었다. 유입부하의 증가에도 불구하고 COD 등 처리수질의 변화는 미미하였으나, 인 제거측면을

고려한 운전이 필요하다.

4) 1일 슬러지발생량을 토대로 슬러지감량효율을 산정한 결과, 슬러지순환율을 2로하고, 슬러지 가용화조를 혐기상태로 운전하여 SCOD는 2,000mg/L로 유지한 경우, 슬러지가용화조를 연계하지 않는 Control에 비해 70%의 감량효율을 달성할 수 있었다.

## 사 사

본 연구는 환경부 차세대핵심환경기술개발사업(과제번호 071-041-052)으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 배운선, 김순영, 남덕현, 박철휘, 김진수, Takada K. (2005) 호기성 호열미생물에 의한 하수슬러지감량화 효율에 관한 연구, *상하수도학회지*, **19**(4), pp. 497-505.
2. 신경숙, 강호 (2000) 전자선으로 전처리한 하수슬러지의 특성연구, *대한환경공학회지*, **22**(7), pp. 1225-1232.
3. 환경부, (2006), *하수처리장운영실태보고*.
4. Farrow, J.A. Wallbanks E.S., Collins M.D. (1994) Phylogenetic interrelationships of round-spore-forming Bacilli containing cell walls based on lysine and the non-spore-forming genera Caryophanon, Exiguobacterium, Kurthia, and Planococcus, *International Journal of Systematic Bacteriology*, **44**, pp. 74-82.
5. Kopp, J. and Dichtl, N. (2001) Influence of the free water content on the dewaterability of sewage sludges, *Wat. Sci. Tech.*, **44**(10), pp.177-183.
6. Li, Y.Y. and Noike, T. (1992) Upgrading of anaerobic digestion of waste activated sludge by thermal pretreatment, *Wat. Sci. Tech.*, **26**, pp. 857-866.
7. Lin, J.G., Chang, C.N. and Chang, S.C. (1997) Enhancement of anaerobic digestion of waste activated sludge by alkaline solubilization, *Bioresour. Technology*, **62**, pp. 85-90.
8. Mller J., Lehne G., Schwedes J., Battenberg S., Naveke R., Kopp J., Dichtl N., Scheminski A., Krull R and Hempel D.C. (1998) Disintegration of sewage sludge and influence on anaerobic digestion, *Wat. Sci. Tech.*, **38**(8-9), pp. 425-433.
9. Saby S., Djafer M., Chen G. (2003) Effect of low ORP in anoxic sludge zone on excess sludge production in oxic-settling-anoxic activated sludge process, *Water Research*, **37**, pp. 11-20.
10. Shiota N., Akashi A., Hasegawa S. (2002) A strategy in wastewater treatment process for significant reduction of excess sludge production, *Water Science and Technology*, **45**(12), pp. 127-134.
11. Tiehm, A., Nickel, K. and Zellhorn, M. (2001) Ultrasonic waste activated sludge disintegration for improving anaerobic stabilization, *Water Research*, **35**(8), pp. 2003-2009
12. Weemaes, M, Grootaerd, H., Simoens, F. and Vestraete, W. (2000) Anaerobic digestion of ozonized biosolids, *Wat. Res.* **34**(8), pp. 2230-2336.
13. Woods, R.J, Pikaev, A.K. (1993) Applied radiation chemistry; Radiation processing, John Wiley & Sons, Inc.
14. Yasui H., Nakamura K., Sakuma S., Iwasaki M., Sakai Y. (1996) A full scale operation of a novel activated sludge process without excess sludge production *Wat. Sci. Tech.*, **34**(3-4), pp. 395-404.