

회전식 부착 바실러스를 이용한 하수고도처리 공정에서의 총대장균군 제거 특성

김영호 · 조연제* · 박성주** · 신광수** · 임수빈† · 박현주***

홍익대학교 건설도시공학부

* (주) 세일기술

** 대전대학교 이과대학 생명과학부 미생물학전공

*** 한국토지공사

Removal Characteristics of Total Coliforms in a Rotating Activated Bacillus Contactor Process

Eung-Ho Kim · Yeon-Je Cho* · Seong-Joo Park** · Kwang-Soo Shin** · Soo-Bin Yim† · Hyun-Ju Park***

School of Urban and Civil Engineering, Hongik University, Seoul 121-791, Korea

* Seil Technology Co., Busan 609-701, Korea

** Department of Microbiology, College of Science, Daejeon University, Daejeon 300-716, Korea

*** Korea Land Co., Gyonggido, Seongnam 463-855, Korea

(Received 29 October 2004, Accepted 2 December 2004)

Abstract : This study was performed to examine the disinfection capability of a Rotating Activated Bacillus Contactor (RABC) system, in which the predominant species, *Bacillus* sp. was expected to have a removal or inactivation effect of total coliforms. In a settling test with mixtures of *E. coli* and *Bacillus* sp., a high removal of *E. coli* was observed at 20~40°C, while insignificant removal at 10°C. In a batch test, a 4.5% addition of *Bacillus* sp. to activated sludge considerably enhanced the removal effect of total coliforms, indicating *Bacillus* sp. played an important role in improving the settleability of the sludge and coliforms. In a pilot scale RABC system, the concentration of total coliforms reduced remarkably in the settling tank, suggesting that total coliforms in the RABC process were eliminated through coagulation and precipitation, probably due to extracellular polymeric substance (EPS) of *Bacillus* sp. The fraction of *Bacillus* sp. in the total cell count in the RABC process was in the range of 4.5% ~ 6.3%. The majority (75%) of the *Bacillus* sp. in the RABC process was *Bacillus subtilis* which is known to enhance coagulation and precipitation by producing EPS. Hence, an adoption of a RABC process might be able to eliminate the disinfection unit process from a wastewater treatment system.

keywords : Rotating Activated Bacillus Contactor(RABC) process, Total coliform, *Bacillus* sp., Extracellular polymeric substance, Disinfection unit process

1. 서론

정부에서는 2003년 1월 1일부터 국내 하수처리장의 방류수 수질기준 중 대장균군수에 대하여 충청지역의 경우 1,000 개/mL이하, 기타지역의 경우 3,000 개/mL이하로 규제하고 있기 때문에 하수처리장에서도 소독공정의 도입이 필요한 실정이다(환경부, 2004). 현재 소독시설이 설치되어 있거나 설치 예정 중인 하수처리장의 살균공정의 대부분은 상수의 소독에 사용되는 공정을 도입하는 것으로 알려져 있는데(환경부, 2002), 하수 방류수는 유기물이나 부유물질 등의 성상이 상수와는 많이 다르기 때문에 소독 처리효율 저하 등의 부작용이 예상되며 또한 소독시설을 설치하고 유지하는 데에는 많은 비용이 소요되기 때문에 경제적인 측면 역시 부담이 되고 있다.

환경부의 하수처리장 소독시설 설치사업 업무처리일반 지침(2002)에 따르면 채택된 하수처리공법이 살균효과가 높은 미생물을 사용하여 별도의 소독공정이 불필요할 시에는 소독공정을 설치하지 않아도 된다고 규정하고 있다.

최근 유기물제거는 물론 질소와 인의 제거를 효과적으로 달성할 수 있으며 유기물의 고부하로 인한 냄새문제를 해결할 수 있는 망상형 회전식 바실러스 접촉장치(Rotating Activated Bacillus Contactor, RABC)가 효율적이고 경제적인 하·폐수처리기술로서 크게 주목받아왔다. 특히 김 등(2003)의 연구결과에 의하면, RABC 공정에서 바실러스균을 일정농도 이상으로 유지시키면 슬러지의 침강이 향상되고, 증식과 포자화를 반복하면서 바실러스균이 우점화 된다고 보고되고 있다. 그리고 권 등(1998)과 서 등(1999)의 연구에서는 바실러스균이 여러 가지 항생물질을 분비하여 미생물을 사멸시키고, 고분자의 세포외분비물질(Extracellular Polymeric Substance, EPS)을 분비한다고 밝히고 있다. 따라서 RABC공정의 경우, 바실러스균이 생산하는 항균물질

† To whom correspondence should be addressed.
ysb9643@hotmail.com

과 EPS로 인하여 하·폐수내에 있는 병원성 미생물 및 대장균군의 제거효과가 있을 것으로 예상되어 왔다((주)세일 기술 등, 2003). RABC공법에서 사용되는 바실러스균으로 인해 병원성 미생물 및 대장균군의 제거효과가 확실히 확인되는 경우에는 소독공정을 생략할 수 있으므로 바실러스 우점균을 이용한 하수처리장에서는 운전 비용 면에서 큰 절감효과를 가질 수 있을 것으로 기대된다.

따라서 본 연구에서는 바실러스균의 미생물학적 특성을 중심으로 RABC공법에서의 총대장균군 제거 특성을 분석하여 하수처리장 방류수에 대한 소독공정의 생략 가능성을 평가하고자 하였다.

2. 실험 장치 및 방법

2.1. 대장균군 제거시의 온도 영향 실험

다양한 온도 조건에서의 *Bacillus* sp.의 대장균제거특성을 알아보기 위하여 파일럿플랜트에서 분리 동정한 바실러스균을 이용한 회분실험을 실시하였다.

바실러스균을 인공하수 (COD 200 mg/L, T-N 20 mg/L, T-P 5 mg/L)에 옮겨 10, 20, 30, 40°C 온도 조건에서 120 rpm으로 진탕하여 24시간 동안 적응시켰다. 바실러스균의 초기농도는 대략 10^7 CFU/mL로 하였고 대장균의 초기농도는 약 10^6 CFU/mL로 하였다. 두 시료를 혼합하여 침강 실험을 한 후, 상층액의 대장균 농도를 분석하였다. 또한, 실제 하수처리공정에서의 특성을 알아보기 위해 활성슬러지에 바실러스균을 1.5×10^6 CFU/mL의 농도로 주입하였다. 3시간 동안 포기혼합 후, 침강실험을 수행하여 SVI와 총대장균군의 농도를 측정하였다.

2.2. 파일럿 플랜트의 대장균군 시료 분석

2.2.1. 실험장치

RABC를 이용한 본 공정은 기존 회전원판법과 표준활성슬러지공법을 단순 결합시킨 복합공정이 아니라 회전식 망상형 담체에 바실러스균을 부착 우점화시킨 생물학적 특성과 저DO농도의 점감포기법의 특성을 잘 결합시킨 새로운 복합공법이다. Fig. 1은 RABC공법의 하수처리 공정도 및 제원을 나타낸 것이다. 포기액 순환은 0.1~0.6Q와 0.3~1.0Q정도로 각각 RABC조와 생물반응조 1단으로 순환시켰다. 침전조에서 슬러지 반송은 유입량 대비 0.3~0.5Q와 0~0.4Q로 RABC조와 생물반응조 1단으로 반송 운전하였다.

본 공정에서 바실러스균의 우점화는 점감포기방식과 미생활성제에 의하여 유지되었다. 전체 포기량의 70~80%에 해당하는 산소를 생물반응조 1단에 주입시켰으며, 나머지 산소는 생물반응조 2, 3, 4단에 단계적으로 감소하면서 공급되었다. 생물반응조 1단에서는 DO가 0.5~1.0 mg/L로 유지되었고 나머지 반응조에서는 0.3~0.1 mg/L의 낮은 DO 조건으로 운전되었다. 또한 주요성분이 활성균소인 미생물활성제를 0.02 kg/kgBOD·day의 속도로 생물반응조에 주입시켜 바실러스종을 우점화하였다.

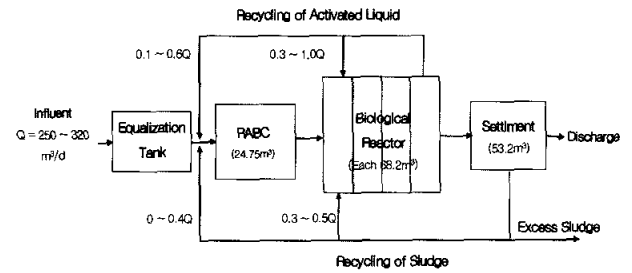


Fig. 1. Schematic diagram of RABC process.

2.2.2. 실험방법

본 연구에서는 파일럿 플랜트로 유입되는 하수 성상변화에 따라 크게 RUN 1, RUN 2, RUN 3으로 구분하였다. RUN 1의 경우 1차 침전만을 수행한 일반 하수를 대상으로 하였으나 실제로는 BOD 등을 저농도로 유입하였으며, RUN 2에서는 정상부하의 하수처리공정의 유입수와 성상을 같게 하기 위하여 분뇨를 혼합한 원수를 이용하였다. 또한 RUN 3에서는 탈수여액을 혼합하였으며 1차 침전을 거치지 않고 직접 투입하였다. 운전기간별 유입수의 하수성상 및 운전조건을 Table 1에 나타내었다.

RABC 공법의 계절별 총대장균군 제거 특성을 파악하기 위해 유입 및 유출수를 대상으로 하여 월별 시료를 채취하여 분석하였으며, 장치내에서 실시간 제거 특성을 분석하기 위하여 각 단에서 채취하여 분석하였다. 총대장균군 시험은 평판도말법(spreading plate method)으로 분석하였다. 또한 실험조건과 제거기전을 파악하기 위해 MLSS, SVI, SS 등의 수질항목을 수질오염 공정시험법에 의해 분석하였다(환경부, 1999).

2.3. 미생물 관찰

파일럿플랜트의 운전상태를 알아보기 위한 미생물 관찰은 채취한 시료를 슬라이드 유리에 도말한 후, 위상차현미경(Axioskop plus, Carl Zeiss, Germany)을 이용하여 수행하였다. 또한 Gram 염색을 한 후에 보라색이 발색되는 것을 통하여 Gram 양성균인 바실러스균을 관찰하였고 포자염색을 통하여 바실러스균의 내세포자의 유무를 확인하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. 바실러스균의 회분실험

Fig. 2는 수온에 따른 바실러스균의 대장균군 제거 경향을 나타낸 그래프이다. 바실러스균을 첨가한 시료에서 20°C, 30°C, 40°C의 수온조건에서 대장균군 제거효율이 점측시간 20분 이후 평균 99% 이상으로 매우 양호했다. 그러나 10°C의 수온조건에서는 바실러스균에 의한 대장균군 제거가 거의 이루어지지 않았다. 이는 첫째 저수온으로 인해 물의 밀도 증가로 침강이 어려운 이유와 둘째 저수온에서 미생물의 효소분비 저하 때문인 것으로 추정된다.

따라서 저수온에서의 바실러스혼합균에 의한 대장균군의 응집침전 효과는 기대하기 힘든 것으로 분석되었다.

Table 1. Conditions of operation steps and characteristics of influent wastewater

	RUN 1	RUN 2	RUN 3
Duration	02. 7. 2 ~ 02. 10. 4	02. 10. 5 ~ 03. 3. 3	03. 3. 4 ~ 03. 4. 25
Operational Time	1 ~ 18 Days	19 ~ 83 Days	84 ~ 89 Days
Influent Flow Rate	300 m ³ /d	300 m ³ /d	300 m ³ /d
Characteristics of influent wastewater	Domestic Sewage (Low concentration)	Domestic Sewage + Night Soil (1% of influent quantity) (Intermittent feeding after primary settlement)	Domestic Sewage + Night Soil (1% of influent quantity) + Water remained after dehydrating sludge (0.5% of influent quantity)
SS (mg/L)	52.0~274.3 (102.7) ^b	58.0~186.7 (100.1)	117.0~623.0 (263.0)
BOD ₅ (mg/L)	62.3~168.3 (102.3)	59.9~140.0 (104.2)	45.7~281.3 (195.8)
COD _{Mn} (mg/L)	21.3~62.0 (38.5)	22.7~76.1 (47.3)	48.0~296.0 ^a (194.0)
TN (mg/L)	24.5~49.5 (33.6)	26.1~70.4 (46.6)	38.2~72.8 (50.8)
TP (mg/L)	2.3~4.3 (3.0)	1.6~6.9 (4.4)	3.2~14.3 (6.5)

^a value measured by COD_c

^b values in the parentheses mean average concentration

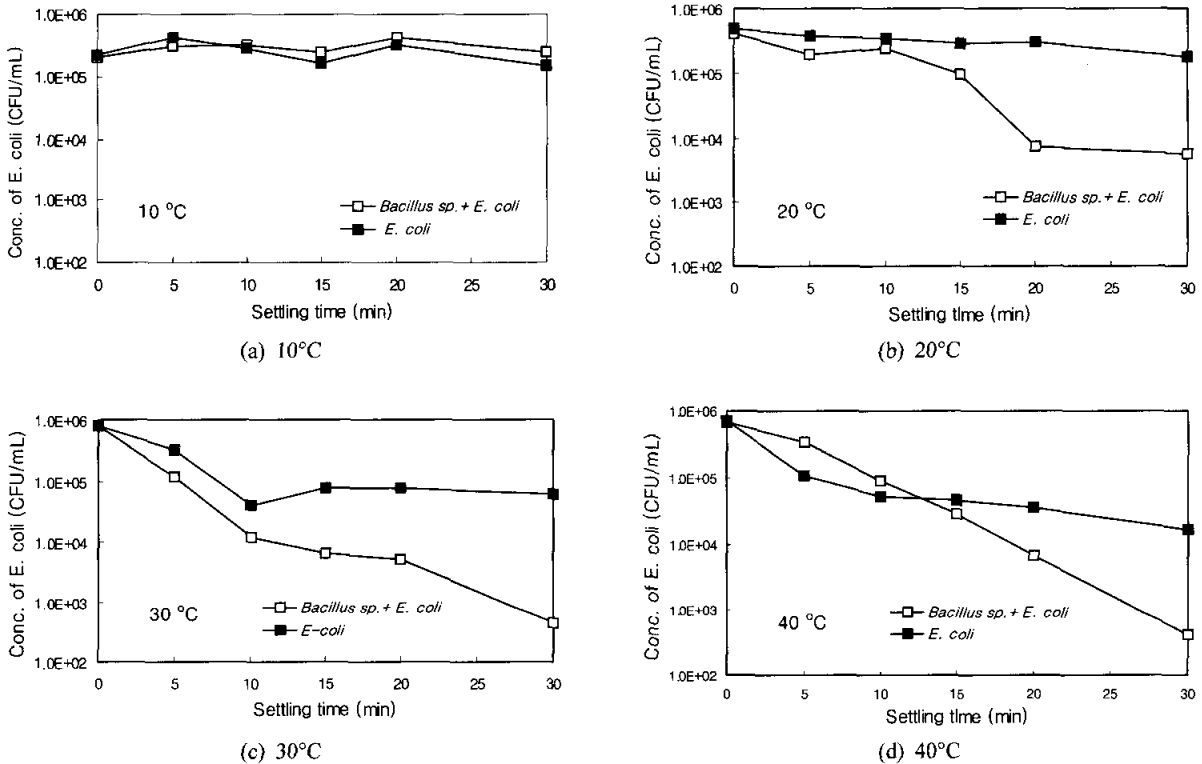


Fig. 2. Variations of *E. coli* concentrations with settling time.

Fig. 3은 일반 활성슬러지와 바실러스균을 우점화한 활성슬러지 시료의 침강곡선을 분석한 그래프이다. 일반 활성슬러지와 바실러스균을 우점화한 활성슬러지 시료의 SV는 각각 28%, 24%의 값을 나타냈으며, SVI로 환산하면 각각 92.7과 73.2로서 바실러스균을 혼합한 경우 SVI값이 21.0% 향상하는 결과를 보였다. 이는 본 연구의 미생물 관찰에서 밝혀졌듯이, 파일럿 플랜트 RABC 공정의 바실러스균이 분비하는 EPS 물질에 의하여 슬러지의 응집성과 침강성이

증가했기 때문인 것으로 판단된다.

Fig. 4는 시간 경과에 따라 일반 활성슬러지와 바실러스균을 우점화한 활성슬러지 시료의 상정액에 대한 총대장균군 농도를 분석한 그래프이다. 바실러스균을 우점화한 시료의 경우, 30분 침강후 총대장균군의 농도가 4.1×10^2 CFU/mL로써 활성슬러지의 상정액의 1.7×10^4 CFU/mL보다 약 1/40 정도로 낮은 값을 보였다. 따라서 본 실험의 결과로부터 바실러스균이 슬러지의 응집 및 침강성을 향상시키고

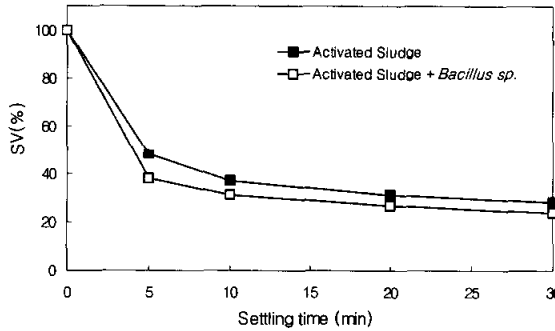


Fig. 3. Comparison of settleabilities of activated sludge and activated sludge mixed with *Bacillus sp.*

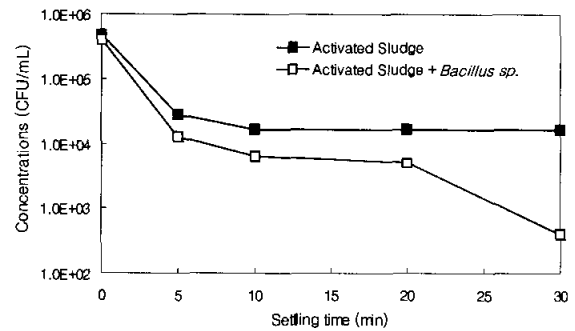


Fig. 4. Variation of total coliforms concentrations in the supernatant of activated sludge and activated sludge mixed with *Bacillus sp.* with settling time.

이에 따라 대장균의 제거율도 향상시킬 수 있다는 것을 알 수 있었다.

3.2. 파일럿 플랜트 시료 분석

Fig. 5는 파일럿 플랜트 RABC 공정 각 단계에서 단위 공정별 실시간 총대장균군의 농도를 나타낸 그래프이다.

RABC 공정 각 단계에서의 총대장균군의 농도를 평판 집락법으로 측정된 결과, 생물반응조 4단에서의 농도는 8.0×10^4 CFU/mL로써 유입수의 농도인 8.1×10^4 CFU/mL와 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 침전조를 거친 유출수의 농도는 2.2×10^2 CFU/mL로 나타났다. 따라서 바실러스균을 이용한 RABC공정에서의 총대장균군의 제거는 주로 침전조에서 응집과 침전을 주요기전으로 하여 이루어지며, 바실러스균의 항균작용으로 인한 세균 및 대장균 사멸효과를 크게 기대할 수 없는 것으로 판단된다.

Fig. 6은 파일럿 플랜트 운전일수별로 유입수와 유출수내에 있는 총대장균군의 농도변화 및 제거효율에 대한 실험을 한 결과이다. 겨울철 수온저하에 따라 제거율이 82.0%까지 저하되어 유출수내 총대장균군 농도가 1,200 개/mL로 증가하는 경향을 보였으나 하수방류수의 대장균군수 기준치인 3,000 개/mL 이하를 만족했다. 본 실험의 결과는 RABC 공정에서 우점종인 *Bacillus sp.*가 중온균의 특성을 가지고 있기 때문에 수온이 낮을 경우 *Bacillus sp.*의 효소분비가 저하되고 이에 따라 응집 및 침전에 영향을 미치는

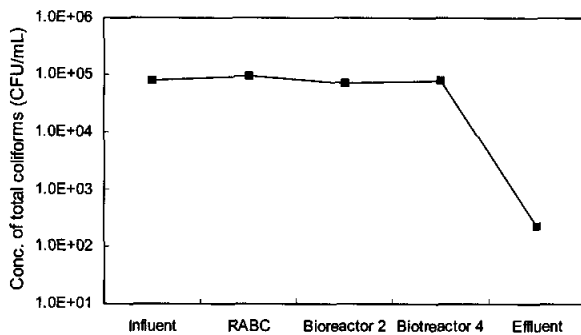


Fig. 5. Concentration of total coliforms at each stage in the RABC process.

EPS의 생성속도가 느려지고 또한 저 수온에서 물의 밀도가 증가되어 침강성이 저하된 것으로 추정된다. 수온이 증가하면서 다시 총대장균군에 대한 제거율이 정상적으로 나타났다음을 확인할 수 있었다. 또한 재래식 하수처리공정에서 2차처리후의 총대장균군 제거효율은 90~99%이라고 알려져 있는데(환경부, 1998) 본 공정에서 운전 기간 중 총대장균군의 평균 제거효율은 95% 이상으로 나타났다.

Fig. 7은 운전일수별로 파일럿 플랜트의 슬러지 침강성을 파악하기 위하여 수온과 SVI를 측정된 결과이고 Fig. 8은 SVI에 따른 총대장균군 제거율의 변화를 나타낸 그래프이다.

Fig. 7에서 보듯이 수온이 저하함에 따라 SVI는 높은 값을 보여 침강성이 저하되고 총대장균군의 제거율도 낮아짐을 알 수 있다. 이는 수온이 저하하면 물의 밀도 상승과 바실러스균의 활성도 저하로 인해 침강성이 저하된다고 판단된다.

Fig. 8에 나타나 있듯이 겨울철 실험 결과, SVI의 변화가 거의 없었으나 수온이 저하하기 시작함에 따라 총대장균군 제거율이 82.0%까지 낮아졌다. 이것은 미생물이 지수적으로 성장 및 사멸되고 주위의 환경변화에 급격히 반응하기 때문에 총대장균군의 제거율이 온도 변화에 민감한 것으로 사료된다.

3.3. 미생물 관찰

내생포자를 확인한 바실러스균의 농도는 용액배피기준으로 RABC 반응조의 생물막에서 1.2×10^7 CFU/mL, RABC

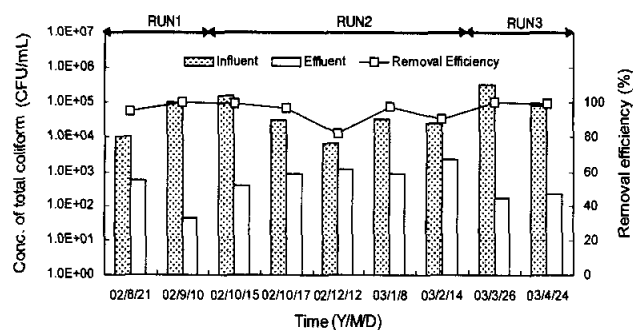


Fig. 6. Variation of total coliforms removal during the pilot-plant operation.

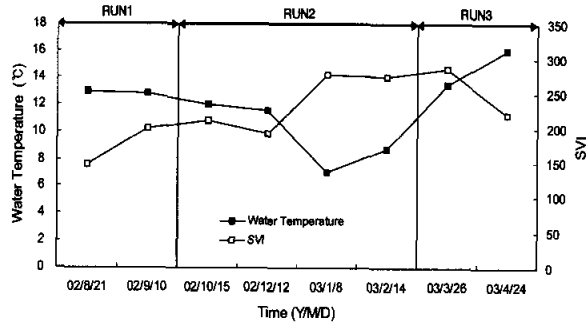


Fig. 7. Variation of SVI and water temperature during the pilot-plant operation.

생물반응조에서 1.0×10^6 CFU/mL로 각각 분석되었으며, 종속영양세균농도에 대한 내생포자존재를 기준으로 한 바실러스균의 농도의 비율인 바실러스균 우점화율은 생물막과 생물반응조에서 각각 6.3%와 4.5%의 값을 보였다.

Fig. 9는 바실러스균의 배양사진으로 영양세포에서 사상체를 형성하고 내생포자로 변화하는 모습을 관찰한 것이다. (a)는 바실러스가 영양세포의 형태로 존재하고 있는 모습이며, 배양시간이 지속됨에 따라 (b)에서와 같이 영양세포의 성장을 시작하여 (c)에서 보듯이 사상체를 형성한다. 배지의 영양분이 고갈되면 (d)에서처럼 내생포자를 형성하여 휴면상태에 들어간다.

바실러스균은 이러한 성장과 포자화 과정을 반복하면서 우점화가 가능하게 되고, 이 균의 증식이 반송비의 증가 등을 통해 일정농도 이상을 유지하면, 영양분 부족상태에서 형성되는 내생포자가 형성되고 내생포자형성과정에서 생성되는 EPS에 의해 응집 및 침강을 통하여 슬러지의 침강이

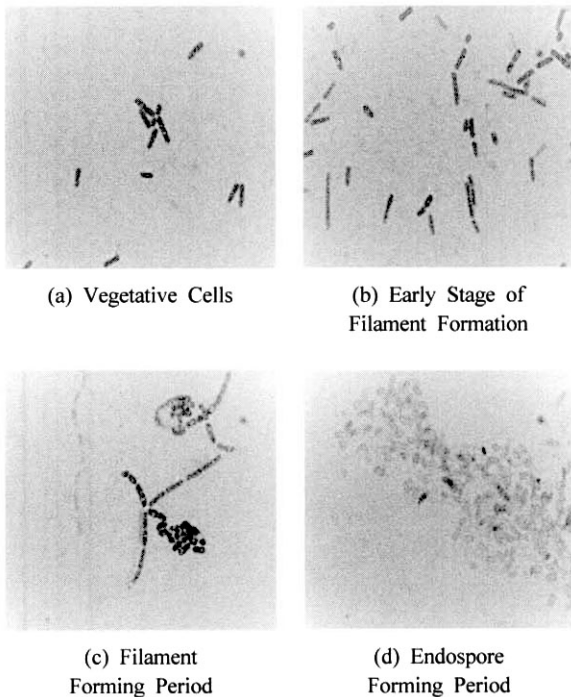


Fig. 9. Life-cycle of *Bacillus* sp. (16×100).

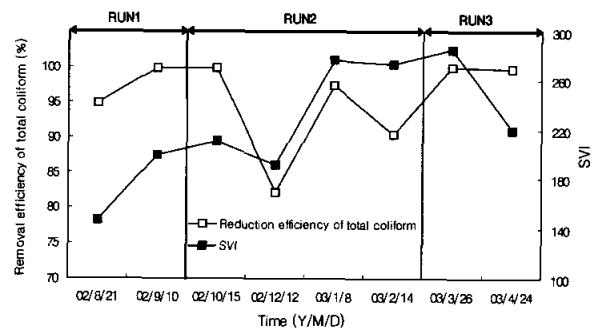


Fig. 8. Variations of SVI and reduction efficiency of total coliforms according to the operational time.

향상되는 것으로 판단된다.

생물막에서 분리한 44개의 바실러스균 중, EPS를 이용한 생물적 응집제로 이용되고 있는 *Bacillus subtilis*가 33개로써 전체의 3/4를 차지하였고 폐수처리용 응집제로 연구되고 있는 *Bacillus megaterium* 역시 동정되어 내생포자 외부의 EPS에 의해 응집 및 침강이 향상된다는 점을 뒷받침할 수 있었다.

4. 결론

망상형 회전식 바실러스 접촉공법 (RABC공법)에서 우점화된 바실러스균을 이용하여 회분식 및 pilot plant 장치를 이용한 총대장균군의 제거 특성을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 바실러스균의 대장균군에 대한 제거효율이 20~40°C에서는 높고 10°C에서 제거효율이 급격히 저하되는 경향을 보였다.
2. 활성슬러지에 바실러스균을 첨가한 후 슬러지침강성이 증가되었고 총대장균군의 제거율도 향상되는 결과를 보였다. 따라서 바실러스균이 슬러지의 응집 및 침강성을 향상시켜 총대장균군의 제거율을 높이는 효과가 있는 것으로 나타났다.
3. 바실러스균은 생물막과 생물반응조에서 각각 6.3%와 4.5%으로 우점화되어 있었으며 동정된 바실러스균의 75%가 EPS에 의해 응집 및 침강성을 높이는 *Bacillus subtilis*이었다.
4. 파일럿 플랜트의 총대장균군에 대한 실험을 통해서 RABC공정의 바실러스균의 항균작용에 의한 소독효과는 거의 없었으며 침전지 내에서 공침(coprecipitation)에 의해 총대장균군이 제거되는 것으로 판단된다. 또한 바실러스균이 중온균이기 때문에 겨울철 총대장균군 제거효율은 저하되었으나, 규제치인 3,000 개/mL이하를 만족하였다.
5. 따라서 본 실험으로부터 바실러스균에 의한 공침의 효과로 총대장균군이 3,000 개/mL이하로 제거되어, RABC공법을 이용한 처리시스템에서는 소독공정의 생략이 가능함을 알 수 있었다. 그러나 상수원 등 특수지역의 규제치인 1,000 개/mL이하를 만족하기 어렵기 때문에 그

경우는 별도의 소독시설이 필요하다고 판단된다.

사 사

본 연구는 환경부의 차세대 핵심환경기술개발사업 연구비 지원(과제번호 012160101)에 의해 수행되었으며, 이에 감사를 드리는 바입니다.

참고문헌

권기석, 정형진, 김건우, 정규영, 토양미생물이 생산하는 생물응집제의 특성, *안동대학교 농업과학기술연구논문집*,

5 (1999).

김응호, 조연제, 박성주, 신광수, 임수빈, 정진권, 망상형 회전식 바실러스 접촉장치를 이용한 하수고도처리에 관한 연구, *한국물환경학회지*, **20**(2), pp. 190-195 (2003).

서현효, 김형갑, *Bacillus* sp. SK31의 생물흡착제 흡착특성 및 생산, *한국토양환경학회지*, **4**(2), pp. 33-43 (1999).

(주)세일기술, 홍익대학교, 망상형 회전식 바실러스 접촉장치(RABC)를 이용한 하수고도처리공법, 환경부 차세대 핵심환경기술개발사업 보고서 (2003).

환경부, 하수도시설기준 (1998).

환경부, 수질오염 공정시험법 (1999).

환경부, 하수처리장 소독시설 설치사업 업무처리 일반지침 (2002).

환경부, 수질환경보전법 (2004).