

## 점감포기에 의한 바실러스 특성을 이용한 폐수의 유기물질 및 질소, 인 처리에 관한 연구

김판수<sup>1</sup>, 이상호<sup>2\*</sup>

### Removal of organic Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Wastewater based on tapered Aeration with *Bacillus sp.*

Pan Soo Kim<sup>1</sup> and Sang Ho Lee<sup>2\*</sup>

**요약** 본 연구는 하·폐수 중의 유기물질뿐만 아니라 질소, 인을 생물학적으로 제거하기 위하여 *Bacillus sp.* 미생물을 사용하였다. *Bacillus sp.* 미생물이 생존하기에 알맞지 않은 상황에서는 포자를 형성하고, 증식과 포자화를 반복하면서 우점화되는 특성을 발현시키기 위해 점감포기를 실시하였다. 반응기 용존산소 농도는 포기조 1단; 1.2~1.5 mg/L, 포기조 2단; 0.3~0.5mg/L, 포기조 3단 ; 0.2mg/L이하로 유지하였다. 또한 공정내 미생물의 유실을 방지하고 미생물이 고농도 상태로 유지 가능한 부착성장의 한 공법인 RBC에 끈상 나선형 미생물 접촉재를 설치한 반응기를 이용하였다. 식종한 *Bacillus sp.*가 적응하는 기간에서의 유입유량은 173 L/d, 내부반송율 200%, 슬러지반송율 100%로 운전을 하였으며, 방류수질을 기준으로 단계적으로 유입유량을 증가시켰다. 정상상태에서 유입유량은 346 L/d이고, 내부반송율과 슬러지 반송율은 각각 50%로 결정하여 실험을 수행하였고, 원수는 Glucose 1,800 mg/L, NH<sub>4</sub>Cl 500 mg/L, KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub> 5mg/L를 혼합한 인공폐수를 제조하여 공정에 주입하였고, 그 결과 각각 미생물이 폐수에 적응하는 단계인 Period 1에서는 각 수질 분석 항목의 농도가 점차적으로 감소하는 경향을 보였으며, 정상상태라고 판단한 Period 2에서는 최종적으로 유입수에 대한 유출수의 제거율은 각각 TCODCr 94%, BOD 87%, T-N 85%, T-P 89%의 결과를 나타내었다.

**Abstract** This study was conducted to investigate an aeration tank with RBC process attached *Bacillus sp.* known as a suitable microorganism for the removing of organic carbon, nitrogen and phosphorus. An aeration tank was based on tapered aeration because *Bacillus sp.* was well grown in this like environment conditions. The biofilm process with *Bacillus sp.* as an advanced treatment process could be a best technology for the prominent removal of organic carbon, nitrogen and phosphorus if the mechanism in the process is verified. The operation conditions of DO in the tapered aeration tank were maintained as 1.2~1.5 mg/L in aeration tank1, as 0.3~0.5 mg/L in aeration tank 2 and less than 0.2 mg/L in aeration tank 3, respectively. Lab-scale experiments were conducted, at room temperature, internal recycle rate was from 200% to 50% and returned sludge rate was from 100% to 50%. As a result, concentration of organic carbons, nitrogen and phosphorus in Period 1 (the time of *Bacillus sp.* adapted to environment) were decreased gradually. Ultimately, each removal rate in this biological experiment were TCODCr 94%, BOD 87%, T-N 85%, T-P 89% in Period 2. Hence, this process showed an excellent performance of the removal of organic carbon, nitrogen and phosphorus and this is an effective system for treating of wastewater.

**Key Words** : *Bacillus sp.*, Rotating Biological Contactor, Media, Tapered aeration.

이 논문은 산업자원부 한국산업기술재단의 지역혁신인력  
양성사업 지원에 의하여 연구되었음.

<sup>1</sup>상명대학교 대학원 토목환경공학과

<sup>2</sup>상명대학교 환경공학과

\*교신저자 : 이상호(leesh@smu.ac.kr)

## 1. 서론

다양한 산업의 발전과 향상된 생활 수준과 더불어 발  
생되는 현재까지의 하·폐수처리는 유기물질 및 부유물  
질 제거에 중점을 두어왔다. 그러나 현재는 하·폐수처

리 분야가 다양해지고 규모가 커짐에 따라 인근 하천, 연안으로 방류되는 영양염류에 의한 부영양화가 발생하는 문제에 직면하고 있다[1]. 과거 하수처리장 방류수 수질 기준이 T-N 60mg/L, T-P 8mg/L로 정해져 있었으나 현재 2008년 1월 1일부터 T-N 40 mg/L, T-P 4 mg/L, 2013년 1월 1일부터 T-N 20 mg/L, T-P 2 mg/L 규제가 강화되는 것으로 예상하고 있다[2]. 이러한 추세에 따라 유기물질은 물론 질소, 인 등의 영양염류를 동시에 제거할 수 있고, 강화되는 방류수 수질기준에 적용할 수 있는 공정의 연구가 시급한 실정이다.

수중의 질소를 제거하는 방법에는 물리·화학적 처리와 생물학적 처리로 나눌 수 있는데 물리·화학적 처리에서는 주로 암모니아 stripping 법이나 불연속적 염소 처리법이 이용되고 있다. 생물학적 질소 제거에는 암모니아 형태의 질소를 질산화 균이 아질산성 질소, 질산성 질소로 질산화 시키고, 탈질 미생물이 질소 가스 형태로 변환시켜 배출되는 방법이 이용되고 있다. 이러한 기작을 바탕으로 한 연구가 활발히 진행되고 있는데, Plug Flow Type의 Roll Pipe System을 이용하여 P.E.관내 삽입된 여재로 인한 질산화 미생물의 성장조건을 극대화하고 부유 미생물을 동시에 순환시키는 RPS-SBR(Rolled Pipe System-SBR)공법[3], 무산소조, 호기조, 철 석출장치로 구성된 공정으로 생물학적인 질산화/탈질화를 이용하여 질소를 제거하는 FNR(Ferrous Nutrient Removal) Process[4] 등이 환경신기술로 지정되고 있다.

그러나 최근에는 질산화, 탈질화 균을 이용한 질소의 생물학적 처리와 다르게 *Bacillus sp.*를 이용한 공법이 연구되고 있다. 이러한 연구 중 대표적인 공법으로 유기물 제거는 물론 질소와 인을 효과적으로 제거하고 고부하의 유기물로 인한 악취문제를 해결할 수 있는 B3(Bio Best *Bacillus*)공법과 망상형 회분식 바실러스 접촉장치(Rotating Activated *Bacillus* Contactor, RABC)가 국내 식품폐수처리장에서 적용되고 있다[6]. 이는 하·폐수 중의 유기물 뿐만 아니라 질소, 인의 제거를 위해 *Bacillus sp.*를 선택 배양하고 우점화 한 후, 이를 포자화 시켜 질소 및 인 성분을 직접 섭취하여 제거하는 방법이다. 극한 상황에서 포자를 형성하는 *Bacillus sp.*는 슬러지의 침강성이 우수하고, 유기물 부하변동에 강한 특성이 있다. 이러한 환경을 점감 포기를 통하여 형성시키는데 그 이유는 용존산소량을 조절하여 혐기성 상태가 되지 않을 정도의 환경을 조성하여 *Bacillus sp.* 이외의 호기성균의 정상적인 성장을 방해하여 용존산소가 낮은 상태에서도 생존이 가능한 통성 미생물인 *Bacillus sp.*의 증식과 포자화를 반복시켜 유기물, 질소 및 인을 제거하는 것이다[6]. 또한 이 공법은 일반적인 활성슬러지 공법에 비하여 경제적으로

로 효과가 있으며 부지가 적게 소요되는 장점을 가지고 있다[7].

본 연구는 나선형 끈상 미생물 접촉재를 부착한 회전원판을 이용하였는데, 공정 내에서 미생물을 접촉재에 부착시키는 부착성장 공법은 현재 활발히 진행되고 있는 연구이며, 고정된 미생물을 하·폐수 내 오염물질 제거에 이용할 경우 원하는 미생물을 우점화 할 수 있고, 이에 따른 높은 효율을 기대할 수 있으며, 공정 내에서 미생물의 유실이 적어 미생물을 고농도로 유지할 수 있다는 장점이 있다. 또한 이러한 부착성장 공법에서는 pH나 온도의 급격한 변화, 높은 부하의 유기물 유입에도 미생물 자체의 완충 작용에 의해 활성이 변하지 않는 장점을 가지고 있다[8].

본 연구에서는 하·폐수의 생물학적처리를 목적으로 한 공법이며, 유기물 및 질소 제거 능력이 뛰어나고 생육이 용이한 *Bacillus sp.*를 본 연구의 주 미생물로 이용하였고, 인공폐수를 제조하여 활성슬러지를 이용한 기존의 공법과 차별화한 공법이다. 따라서 본 연구에서는 바실러스 미생물을 이용하여 실험실 규모의 Plant로 폐수에 함유되어 있는 유기물질, 질소 및 인을 제거하기 위한 목적으로 본 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서 사용한 실험 장치는 그림 1반응기 모식도와 같이 저류조(FRP재질)를 제외한 모든 부분을 투명한 아크릴 재질을 사용하여 반응기를 구성하였다. 저류조 용량은 1 m<sup>3</sup>이며, RBC(회전생물접촉법)의 유효용적은 80L이다. 포기조의 경우는 3단으로 이루어져 있으며, 각 단의 용적은 70L로 동일하고, 침전조 용적은 73L로 제작하였다.

RBC반응조의 회전원판은  $\Phi 550\text{mm}$  아크릴 재질로 제작하였으며, 미생물 부착을 위하여 끈상 나선형 미생물 접촉재를 설치하였고 원판 면적의 약 45~50% 침적시켜 반응기를 운전하였다. 회전원판은 총 3개이며, 선행된 실험결과 끈상 나선형 미생물 접촉재의 단위 길이당 표면적은 1.4m<sup>2</sup>/m, 전체 8.85m를 설치하였으므로 미생물 부착 가능 표면적은 12.4 m<sup>2</sup>이다. 회전속도는 4RPM으로 운전하였다. 포기조 2, 3단에는 점감포기로 인한 슬러지 침강을 방지하고 포기조 내 MLSS의 일정한 혼합을 위해 20RPM의 교반기를 설치하였다. 저류조에서 RBC로의 유입과 포기조 3단에서 RBC로의 유입(내부반송), 침전조에서

서 RBC로의 유입(슬러지반송)은 정량 펌프(Masterflex社 L/S 7523-60)를 사용하였고, 이외의 부분은 공정의 고도 차이를 이용한 자연유하로 수행하였다. 각 공정의 연결관 크기는  $\Phi 25\text{mm}$ 로 제작하였다.

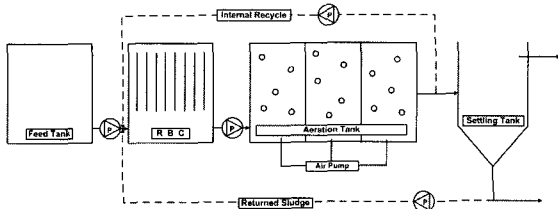


그림 1. *Bacillus sp.* 부착 RBC를 이용한 점감포기 반응기 모식도

### 2.2 시료 제조 및 분석 방법

실험에 사용한 원수는 인공적으로 제조하였으며, 조성은 Glucose 1,800 mg/L,  $\text{NH}_4\text{Cl}$  500 mg/L,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  5mg/L이다. 인공폐수를 공정의 유입 유량에 따라 제조하여 주입하였고, 본 실험을 위한 *Bacillus sp.*는 우점화가 확인된 'W'시 분뇨처리장 포기조의 MLSS를 식종하여 수행하였다. 분석은 각 공정별로 DO, BOD,  $\text{SCOD}_{\text{Cr}}$ 를 측정하였고, 유입수, 유출수에 대하여  $\text{TCOD}_{\text{Cr}}$ , T-N, T-P를 Standard Method[9]에 의해 분석하였다.

### 2.3 실험방법

본 실험에서 사용된 원수 각 항목의 측정값을 평균  $\text{COD}_{\text{Cr}}$  2,079mg/L, T-N 159mg/L, T-P 12mg/L로 제조하여 수행하였고, 46일간 진행되었다. 각 항목별 수질 분석은 1일 1회를 원칙으로 하였으며, 실험을 수행하는 동안 반응기 설치 장소의 기온은  $23\pm 3^\circ\text{C}$ , 수온은  $21\sim 25^\circ\text{C}$ 로 유지하였으며, MLSS 농도는 포기조 2, 3단에 교반기를 설치하여 각 단 평균 4,300mg/L으로 동일하게 유지하였다. 포기조 각 단의 용존산소는 Air Pump(Gast社)를 이용하여 포기조 1, 2, 3단에 공급하였고, 유량을 조절할 수 있는 밸브를 설치하여 포기조 1단에서 3단까지의 점감포기를 실시하였다. 실험 수행 중 포기조 각 단의 DO 농도는 그림 2와 같이 1단 1.2~1.5mg/L, 2단 0.3~0.5 mg/L, 3단 0.2 mg/L이하로 운전하였다.

또한 *Bacillus sp.* 식종 후 인공폐수에 미생물이 적응할 수 있는 약 13일간의 안정화 기간(Period 1)을 두었고, 수질 분석 결과를 바탕으로 적응기간과 정상상태를 구분하였다. 본 실험에서는 실험 종료 시점인 약 33일간 정상상태(Period 2) 운전 조건을 유지하였다. 안정화 기간과 정상상태 기간의 운전 조건은 다음의 표 1과 같다.

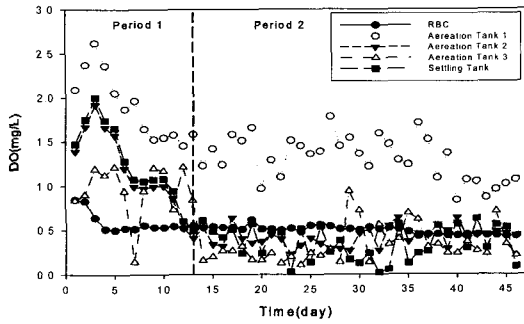


그림 2. 운전경과일수에 따른 포기조 1, 2, 3단의 DO 농도

표 1. *Bacillus sp.*를 이용한 반응기 운전조건

	Influent Flow (L/d)	Internal Recycle (%)	Returned Activated Sludge (%)	Operating Period
Period 1	173	200	100	13 days
Period 2	346	50	50	33 days

안정화 기간 동안의 유입유량을 173 L/d 운전하여 계획 유량의 1/2 수준으로 결정하였고, 적은 유량에서 미생물이 미생물 접촉재에 완전히 부착되고 제조한 인공폐수에 적응하여 활성화상태를 유지시키기 위한 작업이며, 안정화 기간의 수질을 분석하여 유출수질 결과가 일정한 상태를 유지하면 정상상태로 판단하여 유입유량을 346 L/d로 운전하였다.

## 3. 실험결과

### 3.1 $\text{TCOD}_{\text{Cr}}$ 제거율 변화

유입수와 유출수의  $\text{TCOD}_{\text{Cr}}$  농도와 이에 따른 제거율을 그림 3에 나타내었다.  $\text{TCOD}_{\text{Cr}}$ 은 반응조 내 MLSS를 침강시킨 후 상등액으로 분석하였으며, 그림 3에서와 같이 유입수의  $\text{TCOD}_{\text{Cr}}$  농도는 최대 2,476 mg/L, 최소 1,097 mg/L로 평균 2,058 mg/L가 유입되었다. 안정화 기간인 Period 1에서 식종한 *Bacillus sp.*가 인공폐수에 적응을 하는 단계로서 각 단계별  $\text{TCOD}_{\text{Cr}}$  농도가 점차적으로 감소하는 결과를 나타내었다. 운전시작 약 13일 후 Period 2 유입 농도 2,037 mg/L에 대한 유출 농도 153 mg/L로써 약 92% 제거율을 보였으며, 이 시점부터 유입 유량을 173 L/d에서 346L/d로 증가시켰고, 내부반송율을 200%에서 50%로 감소시켰고, 슬러지반송율을 100%에서 50%로 감소하였음에도 불구하고 이후 Period 2(33days)동안 유입농도에 대한 유출농도의 제거율이

90%이상 유지되었으며, 최종적으로 Period 2의 평균 유입농도 2,085 mg/L, 평균 유출농도 131 mg/L로 94%의 제거율을 보였다.

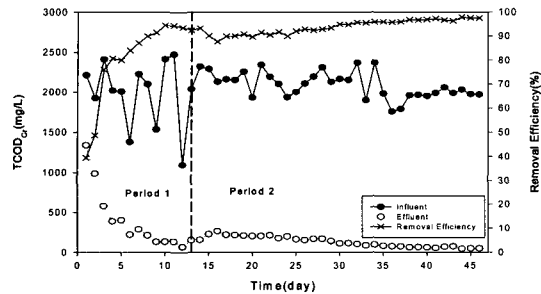


그림 3. 운전경과일수에 따른 유입에 대한 유출의 TCOD<sub>Cr</sub> 농도 변화와 제거율 변화

### 3.2 각 공정별 BOD, SCOD<sub>Cr</sub> 제거율 변화

유입수, RBC 유출수, 포기조 1, 2, 3단, 침전조 유출수의 BOD와 SCOD<sub>Cr</sub> 농도 변화 결과는 그림 4와 같다. BOD와, SCOD<sub>Cr</sub>은 여과지를 이용하여 여과한 시료를 측정하였으며, 유입 BOD, SCOD<sub>Cr</sub>의 농도는 각각 1,334 mg/L, 2,014 mg/L으로 측정되었다. 유입 SCOD<sub>Cr</sub> 농도의 경우 인공적으로 제한한 폐수이기 때문에 폐수 내 부유물질 및 불순물이 존재하지 않아 TCOD<sub>Cr</sub>과 유사한 결과를 나타내었다. 미생물 안정화 단계인 Period 1에서는 각 공정별로 유입농도에 대한 유출농도의 제거율이 점차적으로 감소하는 추이를 나타내고 있으며, 정상상태인 Period 2에서의 공정별 결과는, RBC 반응조에서 각 항목의 농도가 급격히 감소하여 유입 BOD농도 1,334 mg/L, 유입 SCOD<sub>Cr</sub>농도 2,014 mg/L에 대한 평균 유출농도는 각각 172mg/L, 117mg/L로 제거율 87%, 94%의 결과를 나타내었다. 각 공정별 농도변화를 나타낸 그림 4의 결과는 유입 농도에 대한 각 공정별 유출 농도가 RBC 공정 이후 포기조 1, 2, 3단까지 유사한 농도를 보였다.

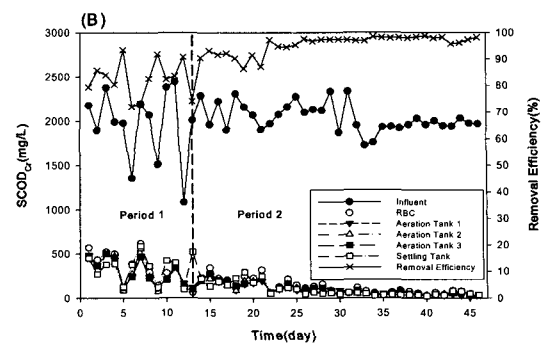
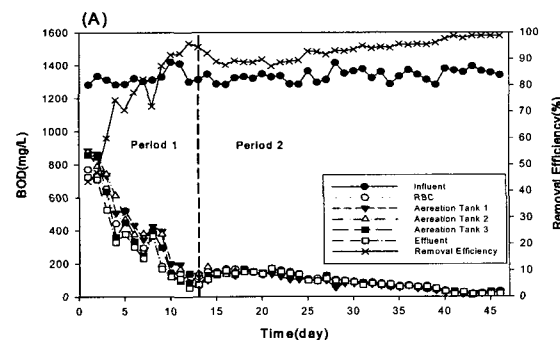
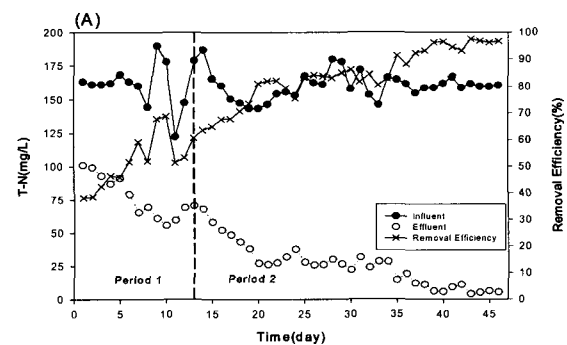


그림 4. 운전경과일수에 따른 각 공정별 BOD(A), SCOD<sub>Cr</sub>(B)의 농도 변화와 유입 농도에 대한 유출 농도의 제거율 변화

### 3.3 각 공정별 T-N, T-P의 제거율 변화

유입수, RBC 유출수, 포기조 1, 2, 3단, 침전조 유출수에 대한 농도변화는 그림 5와 같이 나타났다. 그림 5와 같이 본 실험에서 유입 T-N 농도는 최대 180 mg/L, 최소 143 mg/L로 전체평균 160 mg/L(정상상태 Period 2 동일)의 값을 보이며, T-P의 경우 유입 최대농도 16.4 mg/L, 최소농도 6.3 mg/L, 평균농도 12.0 mg/L(정상상태 Period 2 동일)로 측정되었다. T-N의 경우 Period 1~Period 2기간 동안 점차적으로 감소하는 경향을 보였으며, 총 Period 2 후 24일째 되는 시점부터 제거율이 90% 이상으로 상회하였다. T-P는 Period 1에서 점차적으로 감소하였고, Period 2에서 급격히 감소하였다. 최종적으로 정상상태인 Period 2 기간 T-N, T-P의 평균 유입 농도에 대한 평균 유출 농도는 각각 24 mg/L, 1.3 mg/L로 T-N 제거율은 85%, T-P 제거율은 89%를 보였다.



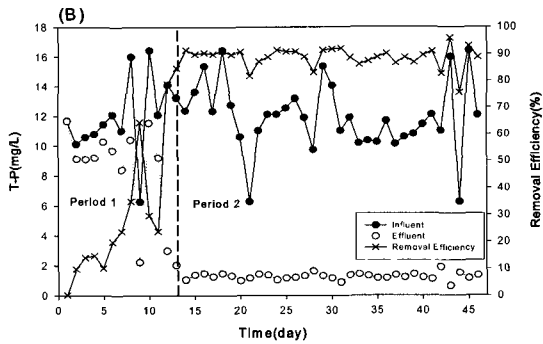


그림 5. 운전정과일수에 따른 유입에 대한 유출의 T-N(A), T-P(B) 농도 변화와 제거율 변화

#### 4. 결론

*Bacillus sp.* 미생물을 이용하여 하·폐수 내 유기물 및 질소, 인 성분을 제거하기 위해 수행한 본 연구에서는 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1. 분뇨를 처리하던 *Bacillus sp.*가 조성이 다른 인공폐수에 식중 되었을 경우, 미생물 자체의 특성을 발현하기 위한 적응기간이 약 13일 정도 필요한 것을 알 수 있었다.
2. 본 실험에서 유입수에 대한 유출수의  $TCOD_{Cr}$ 의 농도 변화는 정상상태 기간 평균 유입 농도 2,085 mg/L, 평균 유출 농도 131 mg/L로 약 94%의 제거율을 나타내었다.
3. 각 공정별로 시료를 분석한 BOD,  $SCOD_{Cr}$ 은 각각 평균 1,334 mg/L, 2,014 mg/L의 농도로 유입되었으며, 최종 유출농도는 각각 172 mg/L, 117 mg/L로 제거율 87%, 93%의 결과를 보였다.
4. T-N 분석결과는 정상상태 Period 2 기간 동안 평균 유입 T-N 농도 160 mg/L, 유출 T-N 농도 24 mg/L로 제거율 85%를 나타내었다.
5. T-P 농도 분석 결과는 정상상태 Period 2 기간 동안 평균 유입 농도 12.0 mg/L, 유출 농도 1.3 mg/L로 제거율은 89%로 측정되었다. T-P의 유입농도에 대한 유출농도 변화 추이는  $TCOD_{Cr}$ , BOD,  $SCOD_{Cr}$ 과 동일하게 안정화 기간인 Period 1에서 점차적으로 감소하여 Period 2이후에는 최종 제거율과 비슷한 수준을 유지하였다.

6. T-N을 제외한  $TCOD_{Cr}$ , BOD,  $SCOD_{Cr}$ , T-P의 농도 변화 추이는 RBC 공정 후 포기조 1, 2, 3단을 거쳐 침전조 유출수까지 제거율이 비슷한 수준을 유지하고 있는데 이는 RBC 공정에서 유기물이 제거가 된 것으로, RBC를 거친 원수가 포기조 1단으로 유입되고, 여기에서 원수중의 대부분의 유기물, 질소, 인이 고농도로 배양된 바실러스와 접촉하면서 대사에 의하여 섭취 및 산화분해가 일어나 제거되고 점감포기에 의한 용존산소 부족 환경을 조성한 2단, 3단으로 이어지면서 바실러스의 생활환경이 나빠지게 되어 포자가 형성된 것으로 이후 반송으로 인한 포기조 1단 합류 후 증식의 단계가 반복되어 *Bacillus sp.*의 특성을 발현한 결과라고 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] 최명섭, 손인식, “무산소-RBC 공정을 이용한 유기물질 및 질소제거”, 대한환경공학회지, 제26권, 제5호, pp. 514-521, 2004.
- [2] 환경부, “하수도법 시행규칙 별표 1 환경부령 제199호”, 환경부, 2006
- [3] 홍석명, 정광모, “RPS-SBR(Rolled Pipe System-SBR)을 이용한 질소·인 제거기술”, 첨단환경기술. 제14권 제8호 통권159호, pp.116-122, 2006.
- [4] 김영규, 조덕희, 이병노, “무산소 호기공정에서 철을 이용한 하수의 질소·인 고도처리기술(FNR Process)”, 환경정보. 제28권 제362호, pp.45-49, 2006.
- [5] 김응호, 조연제, 박성주, 신광수, 임수빈, 박현주 “회전식 부착 바실러스를 이용한 하수고도처리 공정에서의 총 대장균군 제거 특성”, 한국물환경학회지, 제21권, 제1호, pp.73-78, 2005.
- [6] 엄태규, 한동엽, “*Bacillus sp.*를 이용한 SBR의 HRT에 따른 유기물질 및 N,P의 제거특성”, 한국수처리학회지, 제13권, 제3호, pp.21-29, 2005.
- [7] 환경부, “망상형 회전식 바실러스 접촉장치(RABC)를 이용한 하수고도처리공법”, 환경부, 2003.
- [8] K. H. Suh, B. J. Kim, M. C. Cho, Y. H. Kim. & S. G. Kim, “Removal of ammonia-N by immobilized nitrifier consortium.”, Kor. J. Biotechnol., Bioengin., Vol.13, No.3, pp.76-81, 1998.
- [9] APHA, AWWA, WEF, “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater” 18th Ed., APHA, AWWA, WEF, 1992.

**이 상 호(Sang Ho Lee)**

[정회원]



- 1982년 2월 : 경북대학교 공업화학과 (공학사)
- 1988년 7월 : University of Delaware 토목환경공학과 (공학석사)
- 1993년 1월 : University of Delaware 토목환경공학과 (공학박사)

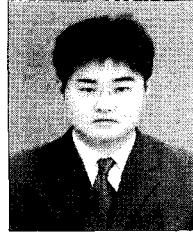
• 1997년 9월 ~ 현재 : 상명대학교 환경공학과 부교수

<관심분야>

하수고도처리, 난분해성 산업폐수처리

**김 판 수(Pan Soo Kim)**

[정회원]



- 2004년 8월 : 상명대학교 환경공학과 (공학사)
- 2006년 2월 ~ 현재 : 상명대학교 토목환경공학과 (공학석사 과정)

<관심분야>

하수고도처리, 난분해성 산업폐수처리