

## BM 미생물제제를 이용한 크루즈선 오·폐수 고도처리

김인수\* · 장재수\*\* · 이연승\*\*\* · † 고성철

\*,\*\*,† 한국해양대학교 토목환경공학부 교수, \*\*\*한국해양대학교 환경기기실험실

### Advanced Treatment of Shipboard Sewage by SBR Process with BM

In-Soo Kim\* · Jae-Soo Chang\*\* · Eon-Sung Lee\*\*\* · † Sung-Cheol Koh

\*,\*\*,† Professor Division of Civil and Environment, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*\*Division of Civil and Environment, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요 약** : 본 연구에서는 크루즈선에서 발생하는 오·폐수의 고도처리를 위하여 SBR공정에 유효미생물을 주입하는 변법을 이용하여 실험실 규모의 실험을 수행하였다. 질소·인의 고도 처리 효율과 크루즈선이라는 특수 환경과의 접목성을 검토한 결과 SBR공정에 유효미생물을 주입하는 변법은 선박환경에 매우 적합한 것으로 평가되었다. 또한 기존의 활성슬러지에 유효미생물의 주입함으로써 슬러지 팽화 등의 문제를 해결할 수 있어 슬러지의 안정성을 확보할 수 있었으며, 미생물 관찰 결과 고도처리에 유리한 미생물종의 출현으로 질소·인의 처리 효율이 높아지는 것을 확인할 수 있었다. 이로 인해 총질소와 인의 제거 효율은 74%, 75%로 나타났으며 이러한 결과로 미루어 강화되어가는 해양오염기준을 충족시킬 수 있을 공정으로 판단된다.

**핵심용어** : 연속회분식 반응조, 유효미생물, 크루즈선, 선박오수, 고도처리

**Abstract** : Lab scale experiment study was carried out for biological treatment process development in cruise. SBR(Sequence Batch Reactor) process with BM(Beneficial Microorganisms) was investigated for practical application on shipboard sewage treatment. From the results it was suggested that SBR process with BM might be a suitable process for advanced cruise sewage treatment in terms of decrease in T-N and T-P, maintenance of useful microorganisms and control of sludge bulking. By adding BM to SBR system, about 40% of EPS in sludge was increased, about 74% of total nitrogen was reduced and the total phosphorus reduction averaged 75%.

**Key words** : SBR, BM, cruise, shipboard sewage, advanced treatment

## 1. 서 론

세계적으로 삶의 질이 향상됨에 따라 선박이 고급화 되고 여행객의 증가로 대형 여객선이 출현하게 되어 오폐수에 대한 해양오염 방지 및 통제의 필요성이 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization) 해양환경보호위원회(MEPC, Maritime Environment Protection Committee) 등에 의해 제기되어 왔다. 2010년부터 선박용 오수처리장치의 배출 기준 및 성능시험 기준은 Res. MEPC.2(VI)에서 Res. MEPC.159(55)로 강화된 기준이 적용되고 있으며, 최근 회의에서는 해양 환경에 영향을 미치는 미세 부분에 관한 규제의 필요성도 제기되고 있다. MEPC 57차 회의에서는 대형 선박 뿐 아니라 소형 선박이 해양환경에 미치는 오염도에 관한 가이드라인 개발 필요성이 제기되었으며, 59차 회의에서는 발틱해 해역의 부영양화 문제가 제기되었고, 60차 회의에서는 여객선을 위한 오수처리장치 형식승인 기준 항목에 인과 질소에 관

한 규제 기준을 추가하는 것에 대한 제의가 있었다.

이렇듯 해양 환경에서도 영양염류에 의한 부영양화 문제가 심각하게 대두되고 있다. 그러나 현재 IMO에서는 열저항성대장균, BOD, COD, SS, pH, 잔류염소만을 규제하고 부영양화와 적조의 주범이 되는 질소와 인의 규제는 제정되어 있지 않아 선박용 오수처리장치는 질소와 인의 처리가 미흡한 실정이다. 육상의 오수처리시설에서는 질소와 인을 처리할 수 있는 고도 처리 공법을 이미 도입하여 처리하고 있으며 이러한 세계적 흐름으로 미루어 차후 선박용 오수처리장치 규제 기준에 질소와 인의 항목이 신설될 가능성은 매우 높다. 따라서 유기물과 함께 질소와 인을 동시에 효과적으로 제거할 수 있는 선박용 오수처리시스템의 개발은 장기적인 관점에서 필수적 과제라 할 수 있겠다.

해외에서 개발되어 시판되고 있는 선박용 오수처리장치는 대부분 MBR(Membrane Bioreactor) 공정을 도입하고 있으며, 하루 처리 용량 약 1m<sup>3</sup>에서 1000m<sup>3</sup> 이상의 고용량까지 일

\* 종신회원, iskim@hhu.ac.kr 051)410-4416  
\*\* 정회원, jschang@hhu.ac.kr 051)410-4753  
\*\*\* 정회원, les@ks.ac.kr 051)410-4983  
† 정회원, skoh@hhu.ac.kr 051)410-4418

반상선에서 대형 크루즈선에 적용 가능한 다양한 용량의 장치가 이미 상용화되어 시장을 선점하고 있다. 그러나 MBR 공정만으로는 질소와 인의 처리가 불가능하며, 수처리 단가가 매우 높다는 단점이 있다. 현재 국내에서 생산되고 있는 오수 처리장치는 최대 300인승 규모의 일반 선박용으로 크루즈선에 적용하는 것은 적합하지 않다. 따라서 IMO의 Res. MEPC. 159(55)의 기준을 만족하면서 선박의 특수성에 부합하고, 앞으로 더욱 강화될 배출 기준을 만족시킬 수 있는 크루즈선용 오수처리장치의 개발이 시급한 실정이며, 질소·인의 고도처리까지 가능한 선박용 오수장치의 개발로 이후 해당 시장을 공략할 수 있는 전환점을 마련할 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 유기물과 영양염류의 고도처리가 가능하며, 다른 처리방법에 비하여 설치공간이 작고 선박 환경과 접목이 용이한 SBR(Sequence Batch Reactor) 공법을 도입하여 컴팩트한 오수처리장치를 개발하는데 목적을 두고, Lab scale의 실험장치를 운영하여 설계인자를 도출하였다. 또한 안정적인 생물학적 처리 효율을 확보하고 질소와 인의 고도처리 효율도 높이고자 SBR 공정에 BM(Beneficial Microorganisms) 제제를 추가 주입하여 BM 제제 주입 전후의 수질을 비교 관찰하며 기초 연구를 수행하였다.

## 2. 실험장치 및 실험방법

### 2.1 실험장치

본 연구에서는 선박오수의 생물학적 처리시 발생할 수 있는 문제 해결과 고도처리 효율을 높이기 위하여 BM의 적용을 검토하였다. 이를 위하여 기존의 SBR 프로세스를 활성슬러지로 운영하는 경우를 run-1, 활성슬러지에 BM을 추가 주입하여 운영한 경우를 run-2로 하여 결과를 비교 관찰하였으며, Lab scale로 제작한 실험장치의 개략도를 Fig. 1에 도시하였다.

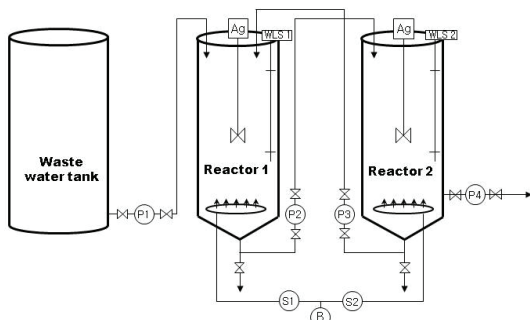


Fig. 1. Schematic diagram of SBR system.

Lab scale 실험 장치는 운영시의 상태 관찰을 위하여 10mm의 투명 아크릴 재질로 처리용량 200 l/d로 제작하였다. SBR 반응조는 원형조로 전체 용적은 146 l (D=0.5m)로 1cycle당 50 l로 운영하여 폭기에 따른 여유 공간을 두었다.

생물학적 처리를 위한 SBR 반응조의 미생물은 *Bacillus sp.*을 우점종으로 하여 연구하였으며, 초기 *Bacillus sp.*의 우점화를 위해 B3공법으로 운전하고 있는 P-분뇨처리장(부산 감전동)의 폭기조 내 농축 슬러지를 채취하여 사용하였다. 슬러지는 체를 이용한 협작물 제거와 수 차례의 세척과정을 거친 후 10 일간 인공 폐수를 이용한 기질 적응기간을 두어 공정에 투입하였으며, MLSS 농도는 약 3000 mg/l 정도를 유지하여 운전하였다.

복합미생물을 이용한 선박오수 처리의 적용 가능성을 검토하기 위하여 다른 조건들은 동일하게 유지하고 BM 제제를 주입하면서 반응기를 운영하여 그 결과를 비교하였다. BM 제제는 원액(B사, BM-S-1)을 구매하여 50배 희석한 후 사용하였으며, 초기 미생물 식중시는 슬러지 부피의 10%에 해당하는 양을 3일간 주입하고, 이후 운영시는 유입수 부피의 1%에 해당하는 양을 유입수에 섞어 주입하였다.

각 공정 내 미생물의 성장 환경 확인을 위하여 pH, DO, 온도, ORP, SV<sub>30</sub>을 지속적으로 측정하였고, 슬러지의 현미경 관찰과 생균수 확인을 통하여 미생물 성장 상태의 정상 여부를 판단하였다.

### 2.2 실험방법

#### 1) 시료의 성상 및 반응조 운전방법

반응조 가동에 사용한 시료는 한국해양대학교 학생기숙사에서 발생하는 오수를 이용하여 선박에서 배출되는 오수와 거의 유사한 실제 시료로 가동하여 현장 실험과 가까운 데이터를 얻을 수 있도록 하였다. 유입된 오수의 특성은 Table 1과 같다.

반응기는 2010년 1월부터 2010년 3월까지 약 3개월 동안 연속 운전하였으며, 수온은 20℃로 유지하고, DO 2.0~ 5.0 mg/l, pH 6.5 ~ 7.5, F/M비 0.15 kg·BOD/kg·MLVSS·DAY로 운전하였다.

Table 1. Characteristics of influent

Parameter	Concentration (mg/l)	
	Range	Mean
BOD <sub>5</sub>	100~200	160
COD <sub>Cr</sub>	200~270	230
T-N	20~95	50
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	0~0.15	0.01
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	28~77	40
T-P	5~15	7
TSS	150~350	260
Thermotolerant Coliform (cell/ml)	4~5 × 10 <sup>4</sup>	4.5 × 10 <sup>4</sup>

#### 2) 반응기 내 미생물 관찰

반응조의 슬러지는 현미경 관찰과 MLSS, SV<sub>30</sub>, 생균수 확인을 통하여 미생물 성장 상태의 정상여부를 판단하였다.

우선 실험에 사용된 활성슬러지와 BM 제제 식중 슬러지의 미생물 조성을 조사하기 위하여 반응기 내 슬러지를 채취하여 순수 배양하였다. 순수 배양한 미생물은 미생물자동정기(VITEK2 Compact, Biomerieux)로 동정하거나 16S rDNA법으로 분석하였다.

또한 활성슬러지를 이용한 공정에서 슬러지의 EPS (Extracellular Polymeric Substances) 성분을 주요하게 기술하는 바, 본 연구에서도 BM 제제를 첨가한 슬러지와 첨가하지 않은 슬러지의 슬러지 내 Protein과 Carbohydrate 성분을 비교하는 실험을 수행하였다. 슬러지의 Protein과 Carbohydrate 성분은 Brown과 Leaster(1980)에 의한 열처리법에 의해 전처리하고 Protein은 Lowry법(Lowry 등, 1951)으로 Carbohydrate는 Phenol-sulfuric acid법(Dubios 등, 1956)으로 정량하였다.

### 3) 분석방법

영양염류는 Standard method 4500(Leonre 등, 1998)을 참조하여 Table 2와 같은 방법으로 분석하였다.

Table 2. Analytical Method

Test item	Analytical Method
T-N	UV(Hitachi U3000)
T-P	UV(Hitachi U3000)
NH <sub>4</sub> -N	UV(Hitachi U3000)
NO <sub>2</sub> -N, NO <sub>3</sub> -N	IC(Metrohm, 709METALFREE)
PO <sub>4</sub> -P	IC(Metrohm, 709METALFREE)

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 생물반응기 내 미생물 관찰

슬러지의 현미경 관찰 결과 장치 운영기간 동안 반응조 내 슬러지는 전반적으로 정상적인 플록을 형성하고 있었다. 활성슬러지로 운영 시 평균 SVI는 117을 나타내었으며 BM 제제 주입 시 SVI는 거의 일정하게 평균 105를 나타내었다.

활성슬러지로 운전 시 인위적인 유분 함유 폐수 유입으로 팽화현상이 두 차례 발생되었으며 이 때의 슬러지를 광학현미경 사진으로 확인해 보면 Fig. 2의 (a)와 같이 플록의 형성이 미비하고 사상균이 많이 존재하는 것을 관찰할 수 있었다. 슬러지의 팽화를 제어하고자 슬러지 침강성 향상을 위하여 50배 희석한 BM 제제를 1일 1회 슬러지 부피의 10% 비율로 주입한 결과 Fig. 2의 (b)와 같이 점차 안정적으로 플록이 형성되는 것을 관찰할 수 있었다.

Fig. 3은 슬러지 팽화가 일어났을 때 BM 제제의 주입에 따른 SVI 변화를 관찰한 결과이다. 슬러지 팽화가 일어났을 때 슬러지는 압밀성이 낮아져 침전효율이 좋지 않았으며, 이때의 SVI는 CASE 1에서는 285, CASE 2에서는 320으로 매우 높은 값을 나타내었다. BM 제제 50배 희석액을 1일 1회 슬러지 부피의 10% 비율로 주입하였을 때 주입 5일 이후 SVI는 150

~170 정도로 낮아졌고 이후에는 정상적인 SVI 값을 보이며 안정된 수치를 나타내었다. 주입 후 초기 SVI 값의 변화가 미비한 것은 BM 제제 내 생물균이 적응기를 거치는 것으로 사료되며, 그 이후 안정된 값을 보이며 수처리에 적합한 SVI 값을 나타내어, BM 제제를 투여함으로써 슬러지 팽화와 같은 현상을 빠르게 극복할 수 있었다.

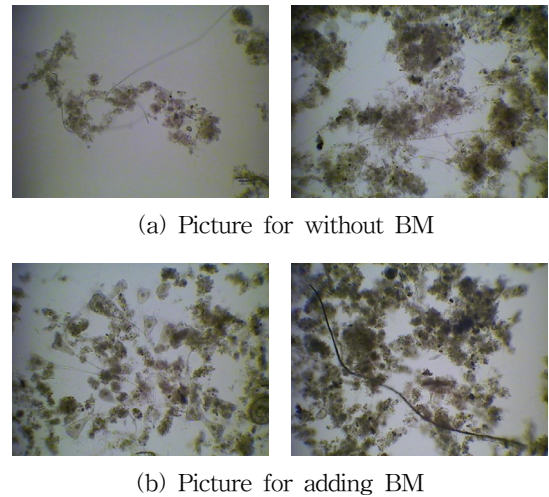


Fig. 2 Pictures of activated sludge (×100).

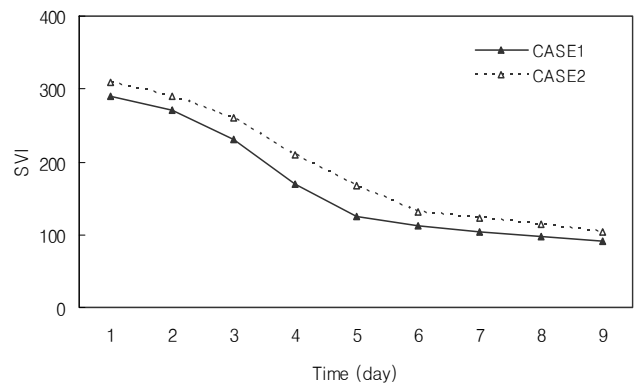


Fig. 3. Change in SVI by adding BM at bulking phenomena occurred.

BM 제제로 반응기 운영 시도 현미경 사진에서 사상균이 관찰되기도 하였으나 매우 안정적인 형태의 플록이 형성되었음을 확인할 수 있었으며 유분 함유 폐수 유입시도 반응기 운영 기간 동안 슬러지 팽화 등의 문제는 발생되지 않았다.

현미경 관찰과 SVI 측정을 통해 BM 제제 주입 시 슬러지의 침강성이 향상됨을 확인할 수 있었으며, 이러한 결과는 활성슬러지와 BM 제제를 주입한 슬러지 간의 EPS 함유량의 차이에 기인한 것으로 사료된다. 유(2005)는 BM 제제를 첨가한 슬러지와 첨가하지 않은 슬러지의 슬러지 내 단백질과 탄수화물 성분을 비교하는 실험을 수행하였으며, BM 제제 첨가 시 단백질 성분은 41%, 탄수화물 성분은 45.7% 상승한 결과를 보고하고, 이러한 슬러지 성분의 변화를 슬러지 침강성

향상의 원인으로 주목하였다. EPS는 미생물 내외부에서 발견되는 다당류, 단백질, 핵산 및 (phosphor-)lipids 등과 같은 고분자 물질이다.

본 실험에서도 BM 제제의 주입에 의해 슬러지의 EPS의 함량이 단백질과 탄수화물의 합으로 약 40% 정도 높아졌다. 이는 BM 제제가 슬러지의 활성을 향상시켜 EPS의 분비가 증가된 결과로 판단되며, 결과적으로 슬러지의 침강성도 좋아진 것으로 판단된다. Table 3에 본 실험에 사용된 활성슬러지와 BM 제제를 5일간 주입한 슬러지의 EPS 함유량 변화를 정리하였다.

Table 3. Comparison of EPS between conventional activated sludge(run-1) and BM added(run-2)

Classification of EPS	run-1	run-2
EPS_protein (mg/L)	142.5	180.0
EPS_carbohydrate (mg/L)	716.2	1,044.8
Total (mg/L)	858.7	1,224.8

생물학적 처리 방법은 화학적 처리 방법에 비해 친환경적인 방법으로 자연 현상을 이용하기 때문에 매우 많은 장점을 가지고 있으나 주변 환경 인자에 대해 큰 영향을 받으므로 공정에 대한 이해와 기술이 요구된다. 그러나 선박의 경우 그 환경의 특수성으로 비전문가가 오수처리장치 운영 업무를 함께 수행할 가능성이 매우 높다. 이에 BM 제제를 식중독 슬러지에서 관찰된 안정적인 특성으로 미루어, 생물학적 처리 시 발생할 수 있는 문제에 대한 대비책으로 BM 제제를 주입하는 것은 매우 간단하고 유용한 해결방법이 될 수 있을 것으로 판단된다.

활성슬러지를 이용한 run-1에서 공정 내 반응조의 미생물은 *Bacillus* sp.로 우점화되어 있었으며 분리 배양하여 미생물자동동정기(VITEK2 Compact, Biomerieux)로 동정하고 생화학 테스트를 거친 결과 *B.subtilis*, *B.cereus*, *B.valismortis*, *B.megaterium* 등으로 나타났다.

사용된 BM 제제는 Pyrosequencing 결과 130종의 다양한 세균 및 효모로 구성되어 있었으며 *Prevotellaceae\_uc\_s* (22.2%), *Lactobacillus\_uc\_s*(17.7%), *Lactobacillus parabuchneri*(6.9%), *Lactobacillaceae\_uc\_s*(6.5%), *Lactobacillus paracasei*(5.8%), *Lactobacillus parafarraginis*(4.3%), *Lactobacillus camelliae*(3.0%), *Lactobacillus manihotivorans* (2.4%), *Acetobacter lovaniensis*(2.3%), *Lactobacillus collinoides*(2.2%), *Lactobacillus vini*(2.0%) 등의 순으로 그 분포를 나타내었다. 또한 순수 분리된 각 미생물 중 현미경 관찰을 통해 효모로 추정된 미생물을 따로 선택하여 미생물자동동정기로 자동 동정하고 생화학테스트를 거친 결과 99% Homology로 *Candida boidinii*, *Saccharomyces cerevisiae*로 동정되었다.

BM 종균에서 동정된 유산균 균주들은 불용성 염을 가용화

하는 것으로 보고되고 있으며(이, 2009), 동정된 메탄올 자화성 효모(Methanol-assimilatin yeast)인 *Candida boidinii*는 암모늄, 질산염, 아질산염, 유기질소원, 요소, 아미노산 형태의 질소원을 모두 이용할 수 있는 것으로 보고되고 있어 영양염류의 제거에 매우 유리하게 작용할 수 있을 것으로 예상된다. 또한 증식속도가 빠르고 성장환경이 넓으며 효소생성능력이 높아 수처리에 매우 유용한 미생물로 보고되고 있으며 폐놀 화합물의 분해능 또한 높은 것으로 알려져 있다(Assiam 등, 2007).

이에 동정된 다양한 균들이 서로 공존공생하며 시너지 효과를 나타내면서 run-2에서 영양염류를 비롯한 오염물질의 제거율 향상에 복합적으로 기여하였을 것으로 사료된다.

Pour plate method로 측정된 생균수는 run-1의 SBR 반응조에서는  $3.2 \times 10^6 \sim 1.2 \times 10^7$  CFU/ml로 나타났으며, run-2의 BM 제제 식중독 시는  $8.7 \times 10^7 \sim 7.2 \times 10^8$  CFU/ml로 나타났다.

BM 제제를 주입한 경우 예상대로 미생물종의 다양성과 높은 미생물 개체수를 보였으며, 이러한 미생물의 조성의 차이에 기인하여 안정적인 수처리 효율을 확보할 수 있었던 것으로 판단된다.

### 3.2 영양염류 제거 효율 비교

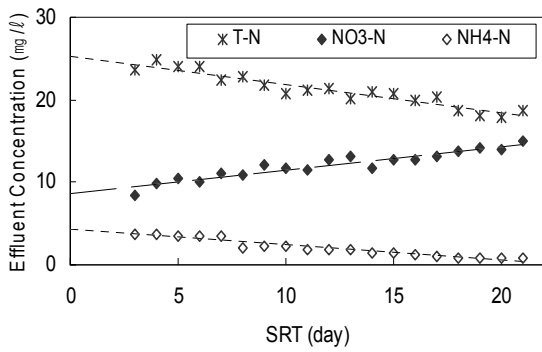
유기물과 영양염류의 동시 제거를 위하여 시료 유입 후 혐기시간을 1.5hr, 초기폭기 1.5hr와 교반 1hr 후, 재폭기시간을 1hr로 설정하여 생물학적 처리를 유도한 후 침전반응이 일어나도록 설정하여 장치를 운영하면서 SRT에 따른 반응기 내 질소와 인의 제거 특성을 관찰하였다.

SRT에 따른 SBR 반응기 유출수의  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N와 T-N 농도를 Fig. 4에 나타내었다.

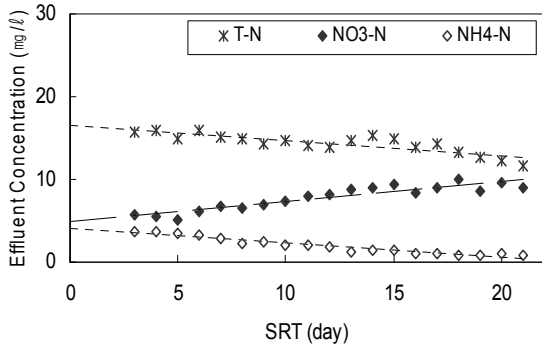
SRT가 증가함에 따라  $\text{NH}_4^+$ -N와 T-N의 유출농도는 낮아지고  $\text{NO}_3^-$ -N의 유출농도는 높아지는 경향을 나타내었으며, run-2의 경우가 run-1의 유출농도보다 낮게 나타났다. SRT에 따라 유출 T-N 중  $\text{NO}_3^-$ -N의 비율도 증가하여, 긴 SRT에서 질산화는 충분히 일어난 반면 탈질량은 다소 미미함을 확인할 수 있었다.

반응기 운영 결과 SRT가 증가함에 따라  $\text{NH}_4^+$ -N 제거율과 T-N 제거율은 모두 증가하였다. SRT에 따른  $\text{NH}_4^+$ -N와 T-N 제거율을 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5와 같이 run-1과 run-2 모두에서  $\text{NH}_4^+$ -N는 높은 제거율을 보여 본 실험에서 설정한 폭기시간 비는 적절하였음을 확인하였다. 반면 전체적인 탈질률은 run-1과 run-2에서 차이를 보였다. run-2의 경우 T-N 유출 평균농도 14.35 mg/L, 평균 74%의 처리 효율을 나타내었으며, run-1에서는 T-N의 평균 유출농도는 21.17 mg/L, 처리 효율은 평균 60%로 나타났다. run-1에서의 낮은 효율은 낮은 C/N비로 인해 탈질이 충분히 이루어지지 않은 것에 기인하는 것으로 사료된다.



(a) run-1



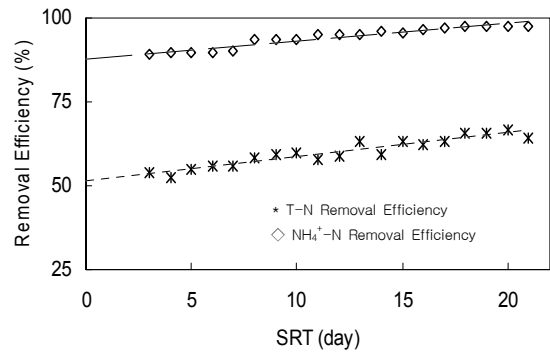
(b) run-2

Fig. 4. Change in T-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>N and NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N with SRT.

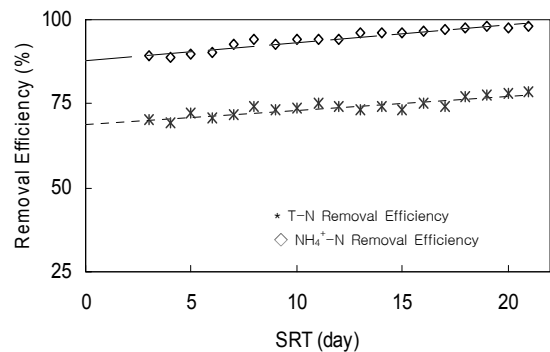
본 연구를 위한 기초 실험에서 본 연구에 사용한 오수의 완전 탈질을 위한 C/N비를 파악하고자 메탄올을 추가 주입하며 관측한 결과, 본 시험에 사용된 오수의 완전탈질에 필요한 C/N비는 7에서 8정도로 나타났다. 이에 본 시험에 사용한 오수와 유사한 특성을 나타내는 크루즈 선박오수의 경우에도 탈질율을 높여 질소 제거 효율을 높이기 위해서는 메탄올이나 아세테이트 등과 같은 화학약품을 외부탄소원으로 사용하여야 하나 이 경우 폐수처리비용의 상승요인이 된다. 또한 전문가가 탑승하지 않은 채 오수처리장치가 운전되는 선박환경을 고려한다면 약품 주입 등의 작업 추가는 또 다른 문제를 야기할 수 있어 효율적이지 못할 것으로 판단된다. 이에 본 연구에서는 외부탄소원의 공급없이 영양염류의 제거율을 높이고자 기존의 활성슬러지로 운영한 SBR 공정에 BM 제제를 주입하였으며, BM 제제의 주입만으로 외부탄소원의 보충 없이 15%의 총질소 제거효율 증대와 7 mg/L as T-N의 수질 개선 효과를 얻을 수 있었다.

run-1과 run-2 두 경우 모두 유입수의 C/N비는 동일하였으나 탈질률의 차이로 인해 T-N 제거율의 차이를 보인 것은 미생물 내 EPS 함량 차이와 run-1과 run-2의 슬러지에 함유된 미생물 조성의 차이에 기인한 것으로 예상된다. 동(2008)은 Biosorption으로 제거된 유기물을 탈질조에서 탄소원으로 사용하도록 유도하여 외부탄소원 없이 C/N비가 낮은 하수의 영양염류를 처리하는 연구를 수행하여, Biosorption에 의한

유기물 흡착 결과 미생물 flocc 내 EPS 함량이 높아지는 것을 기술하였다. 이에 run-1과 run-2 두 경우 모두 유입수의 C/N비는 동일하였으나 동(2008)에 의한 연구 결과와 같이 BM 제제 주입 시 미생물의 EPS 함량이 증가되어 흡착력은 증대되고, 흡착된 유기물은 완전 산화되지 않고 흡착된 채로 머물다가 유기물이 부족한 빈 영양상태에서 탈질에 사용되어 탈질 효율을 높인 것으로 예상된다.



(a) run-1



(b) run-2

Fig. 5 Removal efficiency for T-N, NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N with SRT.

미생물은 기질 농도에 근거하여 높은 기질에서 빠르게 자라나는 부영양체(Copiotrophs)와 낮은 기질에서 서서히 자라는 빈영양체(Oligotrophs)의 2부류로 나누어진다. 빈영양체는 높은 표면적 대 부피비율을 갖도록 형태적으로 적응하면서 저영양소 농도에 반응하며, 기질에 대해 높은 친화력을 가지며 낮은 기질 농도에서도 느린 속도지만 효율적으로 자란다. BM 제제의 경우 부영양체와 빈영양체, 호기성 미생물과 혐기성 미생물, 종속미생물과 독립미생물 등 다양한 미생물의 복합체이다. 이에 생물학적 처리가 불리한 낮은 C/N비를 갖는 오수 처리에 있어서 더 높은 순응력을 나타내어 run-1과 run-2의 C/N비는 일정하였지만 슬러지에 함유된 미생물 조성의 차이에 기인하여 run-2에서는 다수의 미생물이 공존·공생하면서 상승효과를 발휘하여 더 높은 질소 제거율을 보인 것으로 사료된다.

SRT의 변화에 따른 T-P의 제거 특성을 파악하기 위하여

1주기 동안의  $PO_4^{3-}$ -P 농도 거동을 관측하여 그 결과를 Fig. 6에 도시하였다.

초기 유입수 내  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 3.8~4.2 mg/L로 run-1와 run-2에서 유사하였으나, 혐기단계를 거치면서 run-1에서의  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 평균 9.67 mg/L, run-2에서의  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 평균 11.48mg/L로 run-2에서 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 1주기 조작이 완료되었을 때 run-1에서의  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 평균 1.63 mg/L, run-2에서의  $PO_4^{3-}$ -P 농도는 평균 0.69 mg/L로 run-2에서 더 낮게 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

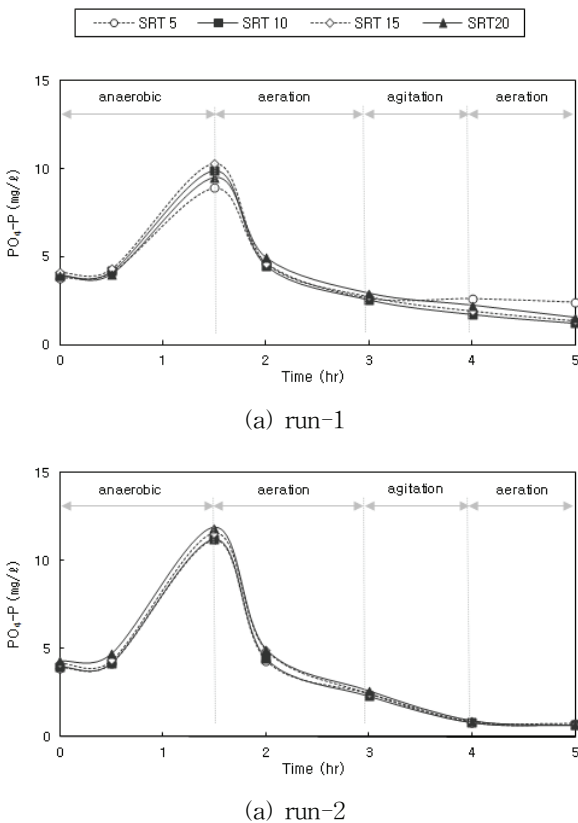


Fig. 6 Variations of  $PO_4$ -P for 1 cycle with SRT.

SRT의 변화에 따른 T-P 제거율을 Fig. 7에 나타내었다.

반응기 운영 결과 run-1에서는 SRT가 증가함에 따라 T-P 제거율이 증가하다가 SRT 15일부터는 조금씩 감소하는 추세를 나타내었다. Kari 등(2002)은 SBR 반응기를 운영하여 SRT에 따른 유기물 및 질소·인의 제거에 미치는 영향을 관측하였으며, 그 결과 SRT가 10일 때 영양염류의 제거 효율이 최대인 것으로 보고하였다. 본 실험에서도 run-1의 경우 SRT 10일에서 15일 사이에서 T-P는 최대 제거 효율을 나타내어 유사한 결과가 도출되었다.

초기 유입수 내 T-P 농도는 6.88~7.12 mg/L로 run-1와 run-2에서 유사하였으나, run-1의 경우 T-P 평균 유출농도는 2.21 mg/L, 평균 68%의 처리 효율을 나타내었으며, run-2

에서의 T-P 평균 유출농도는 1.72 mg/L, 처리 효율은 평균 75%로 나타났다. 또한 run-2에서는 SRT가 30일까지 증가하는 동안 효율 감소를 보이는 구간은 관측하지 못하였다. 이러한 run-1과 run-2에서의 제거 효율 차이는 Fig. 6에서 나타내듯이 복합 미생물에 의해 불용성 무기인산이 가용화되어 용해성 인이 증가되고 이로 인해 인의 방출 및 흡수율이 증가된 것에 기인한 것으로 해석된다.

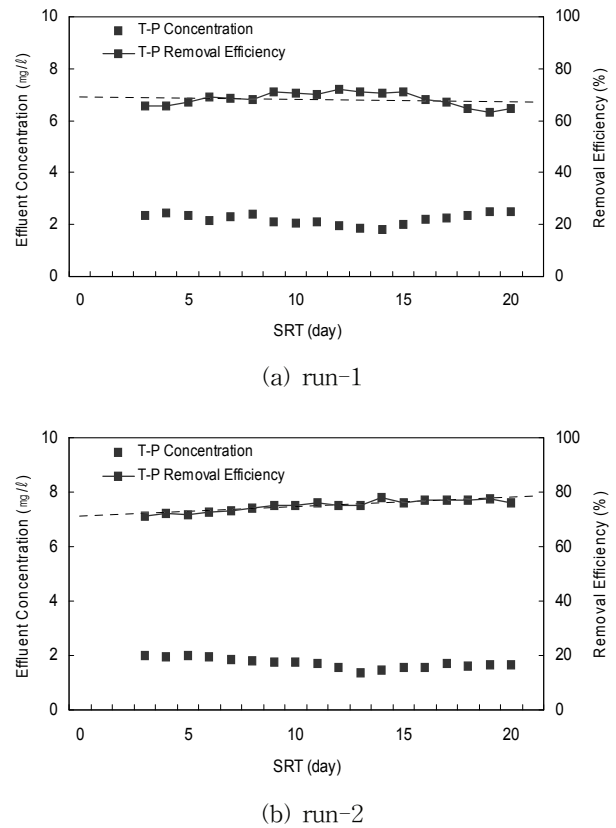


Fig. 7 Removal efficiency for phosphorus with SRT.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 선박오수의 생물학적 처리 시 안정적인 처리 효율을 확보하고 영양염류의 처리 효율을 높이고자 BM의 적용을 검토하였다. 이를 위하여 기존의 SBR 프로세스를 활성슬러지로 운영한 경우와 활성슬러지에 BM을 추가 주입하여 운영하여 비교분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 기존의 활성슬러지는 *B.subtilis*, *B.cereus*, *B.valismortis*, *B.megaterium* 등으로 구성되어 있는 반면 BM 제제는 Pyrosequencing 결과 130종의 다양한 세균 및 효모로 구성되어 있어 영양염류 제거에 더 유리한 미생물종이 다양하게 존재하고 미생물의 개체수 또한 더 높은 것으로 나타났다.
2. BM 제제의 주입에 의해 슬러지의 EPS의 함량이 단백질과 탄수화물의 합으로 약 40% 정도 높아졌으며 이로써 BM 제제의 주입으로 슬러지 팽화현상을 제어할 수 있었다.

3. 기존의 SBR 공정에서 BM 제제를 주입하는 것에 의하여 T-N 처리 효율은 60%에서 74%로, T-P 처리 효율은 68%에서 75%로 처리 효율이 상승하였다.
4. 또한 이러한 결과는 여타의 시설 추가 없이 기존의 활성슬러지에 BM 제제를 주입하는 것만으로 얻을 수 있어 선박 환경에서 매우 편리하게 적용할 수 있을 것으로 판단된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 동영탁(2008), “Biosorption과 질산화균 활성화조를 이용한 질소, 인 제거에 관한 연구”, 서울산업대학교 에너지환경공학과 학위논문.
- [2] 유규선(2005), “산소소모율과 슬러지 침강에 미치는 EM의 영향”, 한국폐기물학회지, Vol. 22, No. 8, pp. 751-757.
- [3] 이상우, 함선녀, 신태수, 김혜경, 연익준, 김광렬(2009), “토양으로부터 분리한 토착유효미생물을 이용한 음식물쓰레기의 자원화”, 대한환경공학회지, Vol. 31, No. 1, pp. 35-41.
- [4] Assiam, H., Penninckx, M. J. and Benlemlih, M.(2007), “Reduction of phenolics content and COD in olive oil mill wastewater by indigenous yeasts and fungi”, Microb. and Bio tech., Vol. 23, No. 9, pp. 1203-1208.
- [5] Karai, F. and Uygur, A.(2002), “Nutrient removal performance of a sequencing batch reactor as a function of sludge age”, Enzyme Microb. Tech., Vol. 31, No. 6, pp. 842-847.
- [6] Leonre, S. E., Aronld, E. G. and Andrew, D. E.(1998), “Standard Method for the Examination of Water and Wastewater”, 20th ed., Am. Pub. Health Assoc., Washington

---

원고접수일 : 2012년 8월 2일  
심사완료일 : 2012년 9월 11일  
원고채택일 : 2012년 9월 25일