

복합미생물제제를 이용한 RCM공법의 선박오수 처리장치 적용에 관한 연구

하신영* · † 김인수

*한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 환경공학과 교수

Advanced Treatment of Shipboard Sewage by RCM Process with BM

Shin-Young Ha* · † In-Soo Kim

*Graduate school of Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

† Professor Division of Environment Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 본 연구에서는 유입수의 변동이 심하고 전문가가 부재한 환경인 선박에서 발생하는 오수의 효과적인 처리를 위하여 RCM공법을 선박오수처리장치에 적용하는 실험실 규모의 실험을 수행하였다. 질소·인의 고도처리 효율과 선박이라는 특수환경과의 접목성을 검토한 결과 RCM공정에 유효미생물을 주입하는 방법은 선박환경에 적합한 것으로 평가되었다. 또한 RCM공정은 활성슬러지 공정에서 배출되는 슬러지는 배출시키지 않고 슬러지액화분해조(SDC)에서 재분해하여 순환함으로써, 최근 해양투기가 금지됨으로 인해 문제가 되고 있는 슬러지의 발생량을 최소한으로 하여 친환경적인 수처리가 가능하다. 복합미생물제제 주입 후 미생물 관찰결과 고도처리에 유리한 미생물종의 출현을 확인하였으며 이들의 상호기작으로 질소·인의 처리에 도움을 주어 처리효율이 높은것이라 판단된다. 유기물 제거효율 실험결과 BOD₅, COD_{Cr} T-N, T-P의 처리효율이 각각 96, 97, 78, 81.68 %로 나타나 Membrane이나 Filter없이도 강화되어가는 해양오염기준을 충족시킬 수 있는 공정으로 판단된다.

핵심용어 : 복합미생물제제, 선박오수처리, RCM(Rumen Cometabolism)공법, 고도처리, 미생물 변화양상

Abstract : Lab scale experiment was carried out to study biological wastewater treatment technology developed for shipboard. RCM process using BM(Beneficial Microorganisms) was investigated for practical application on shipboard sewage treatment. RCM process is an environmental friendly treatment system, with minimum production of sludge. In the test, BOD₅, COD_{Cr}, T-N and T-P were reduced a 96%, 97%, 78% and 81.68% respectively. From the result it was suggested that RCM process with BM might be a suitable process for shipboard sewage treatment, maintenance of useful microorganisms and creating special environment as the SDC tank is circulating in the non-biodegradable organics sludge generated during the wastewater treatment, thus reducing the amount of sludge generated. Therefore, the RCM process does not require additional equipment to strengthen it to meet the marine pollution standards.

Key words : BM , shipboard sewage, RCM(Rumen Cometabolism)Process, advanced wastewater treatment, Changes of microbial

1. 서론

우리나라는 세계 제1의 조선대국이고, 선박의 보유량은 세계 6위의 해양강국이다. 그러나 근해지역을 중심으로 해마다 증가되는 선박의 물동량 증가는 다양한 오염물질을 증가시키고 있으며, 이로 인해 다양한 환경문제를 야기하고 있다. 선박으로 인한 환경오염을 범지구적인 문제임을 인식하고 국제해사기구 IMO(International Maritime Organization)의 「MEPC(Marine Environment Protection Committee)는 선박에서 발생하는 오수의 배출을 규제하는 오수방지협약 MARPOL 73/78 부속서를 2003년 9월 27일부터 국제적으로

발효시켰다」. 현재 Res. MEPC159(55)로 발효시점보다 강화된 기준이 적용되고 있으며, 최근 소형선박의 오염도에 대한 논의가 제기되고 있다(Lee, 2012).이렇듯 해양환경의 부영양화 문제가 심각하게 대두되고 있으며 국내·외에서 강화되고 있는 규제에 맞출 수 있는 선박용 오수처리장치를 개발하고 있지만 전문가의 부재와 변동량이 많은 오수의 특성 때문에 처리가 힘든 질소와 인의 처리가 미흡한 실정이다. 따라서 유동적인 환경에도 유기물과 함께 질소와 인을 동시에 효과적으로 제거할 수 있는 선박용 오수처리시스템의 개발을 위해서는 육상의 활성슬러지 공법보다 더 우점화 된 미생물상과, 간편한 운전 방법이 필수적이다.

* 연회원, hsy4625@kmou.ac.kr 051)410-5211

† Corresponding author : 정희원, iskim@kmou.ac.kr 051)410-4416

(주) 이 논문은 “복합미생물제제를 이용한 RCM공법의 선박오수 처리장치 적용에 관한 연구”란 제목으로 “2014년도 추계학술대회 논문집(2014.10.23-24, pp. 85-86)”에 발표되었음.

이에 본 연구에서는 유기물과 영양염류의 고도처리가 가능할 수 있도록 복합미생물제제를 이용하여 처리장치에 유기물의 처리는 물론 탈질에 효과적인 필요한 풍부한 미생물원을 공급하며, 슬러지가 최소한으로 발생하는 공법으로 국내 폐수 처리에 활용된 바 있는 RCM(Rumen Cometabolism)공법(Ha,2012)을 선박 오폐수처리시설에 도입하여 연구하였다. 안정적인 생물학적 처리 효율이 확보 되었을때 반응기 마다 미생물특성을 파악하여 복합미생물제제를 이용한 선박오수용 처리장치 개발을 위한 기초 자료로 활용하고자 한다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 실험장치

본 연구에서는 선박운행 시 처리가 힘든 잉여슬러지가 발생하지 않는 RCM공법을 선박오수처리장치에 적용하고자 하였으며 Lab-Scale로 제작한 실험장치의 개략도를 Fig.1에 도시하였다.

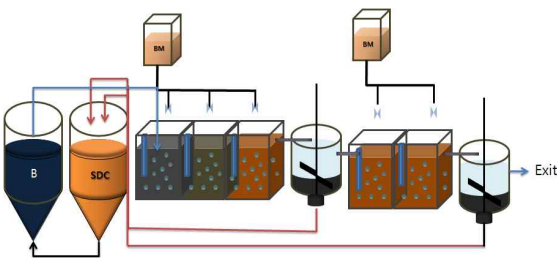


Fig. 1 Schematic diagram of RCM(Rumen Cometabolism) system

Lab-scale 실험장치는 운영시의 상태관찰을 위하여 10mm의 투명 아크릴 재질로 처리용량 20l/day로 제작하였다. 생물학적 처리를 위한 RCM(Rumen Cometabolism)반응조의 미생물은 복합미생물제제(BMs-1)을 우점종으로 하여 연구하였으며, Ha(2012)과 같이 초기 BM s-1의 우점화를 위해 미생물 제제를 각 반응조 총 용량의 30배 희석하여 1주간 폭기 시켜 활성화 상태를 ORP수치를 통해 확인한 후 운전하였으며, 정량펌프를 이용하여 20l/day 폐수를 식종하였다. 각 반응조에 BMs-1의 식종이 끝난 시점인 3주 이후부터는 원액을 30배 희석한 활성액을 유입 수 용량의 2%를 주입하여 운영하였다

1차침전조와 2차침전조에서 발생하게 되는 슬러지는 침전조의 용량의 30%를 정량펌프를 이용하여 일정하게 슬러지액화분해조와 유량조정조에 반송한다. 슬러지액화분해조에 유입된 슬러지는 우점화된 BM미생물에 반응하고 미생물 반응을 마친 슬러지액화분해조의 슬러지는 반송된 양과 동일한 양을 하루에 한번 유량조정조로 반송한다. 본 연구에서 사용한 복합미생물제제의 동정된 미생물과 그 분포를 Table 1에 나타

내었다.

Table 1 Identification of microorganisms in BM by pyrosequencing

Microorganism	Distribution(%)
Prevotellaceae_uc_s	22.2
Lactobacillus_uc	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
Lactobacillus hilgardii	1.8
Lactobacillus pentosus	1.7
Lactobacillus rapi	1.5
Lactobacillus pantheris	1.3
Ethanoligenens_uc_s	1.2
Veillonellaceae_uc_s	1.2
Lactobacillus similis	1.2
Lactobacillus harbinensis	1.0
Rhodospirillales_uc_s	0.5
Others	13.8
Total	100.0

Note) uc_s : Unclassified species

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 현장실험과 유사한 결과를 얻을 수 있도록 하였다. 유입된 오수의 특성은 Table 1과 같다. 반응기는 2013년 6월부터 2013년 9월까지 약 3개월 동안 연속 운전하였으며, Han 등 (2010)과 같이 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 2 Characteristics of influent

Parameter	Concentration(mg/L)	
	Range	Mean
BOD5	150 ~ 200	175
CODcr	200 ~ 250	225
T-N	30 ~ 70	50
T-P	3 ~ 9	8
TSS	150 ~ 250	200

2) 반응기 내 미생물 관찰

BMs-1의 주입에 따른 각 반응조의 미생물 군집 구조의 변화를 분석하기 위해 PCR-DGGE(Polymerase Chain Reaction - Denaturatin gradient gel electrophoresis) 기법을 이용하였다.

우선 FastDNA SPIN KIT for soil (MP Biomedicals, Santa Ana, CA, USA)을 이용하여 시료의 Total DNA를 추출한 후, 미생물 다양성을 확인하기 위하여 시료에서 추출한 DNA를 주형으로 Nested-PCR을 수행하였다. 1차 PCR은 27F와 1522R(Table 3)을 이용하여 PCR을 수행하였고 이 때의 반응조건은 Table 4과 같다. 각각의 PCR products는 1% 아가로스 겔에서 전기영동하여 확인하였다. 그 후 1차 PCR 증폭산물을 주형으로 2차 PCR을 수행하였으며, 이때 사용된 Primer는 16S rDNA의 V3 영역의 염기서열을 증폭하기 위해 40bp의 GC clamp가 붙은 341F-GC와 786R-GC(Table 3)을 이용하였다. 2차 PCR은 Table 4과 같은 반응조건으로 Touchdown-PCR을 수행하여 PCR 증폭 산물을 얻었고, 얻어진 2차 PCR 산물을 이용하여 DGGE(The Dcode universal mutation detection system BIO-RAD catlog no 110-9080-170-9104)를 수행하였다.

DGGE 분석은 30~60%의 농도변화를 갖는 10% Polyacrylamide gel에 증폭산물 35μL를 Loading 한 후, 60℃, 100V에서 18시간 전기영동 하였다. 전기영동이 끝난 겔은 염색 후 Image Analyzer(3L-20 Image analyzer Seoulin scientific Co LTD Korea)로 관찰하였다.

Denaturing gradient gel 상에서 위치가 다른 밴드들로부터 DNA 단편을 회수하기 위하여 먼저 각각의 밴드들을 자른 후 멸균된 증류수 10μL를 넣고 4℃에서 하루 방치 후 Elution 하였다. 이를 주형으로 하여 341F, 786R Primer(Table 4)를 사용하여 증폭시킨 후 증폭된 PCR 주형을 1% 아가로스 겔에서 확인하여 PCR Purification kit(Sap 04-C200)를 이용하여 정제한 후 Solgent 사에 염기서열 분석을 의뢰하였다. 분석된 염기서열은 NCBI(www.ncbi.nlm.nih.gov)에 있는 Blast search 프로그램을 통해 분석하였다.

Table 3 List of primer used in this study

Primer name	Size	Primer sequence
E27F	1495bp	AGA GTT TGA TCM TGG CTC AG
E1522R		AAG GAG GTG ATC CAN CCR CA
341F-GC	445bp	CCT ACG GGA GGC AGC AG
786R		CTA CCA GGG TAT CTA ATC
GC-clamp		CGC CCG CCG CGC GCG GCG GGC GGC GCG GGG GCA CGG GGG G

Table 4 PCR conditions used in this study

Step	Primers	PCR Condition						
		Cycle number	Denaturation		Annealing		Extension	
			℃	min	℃	min	℃	min
First PCR	27F&1522R	20	94	1	50	1.5	72	1
Second PCR (Touchdown-PCR)	341F-GC & 786R	20	94	0.5	60	0.5	72	0.5
		15	94	0.5	50	0.5	72	0.5

3) 분석방법

영양염류는 Standard method 4500(Leonre,1998)와 수질공정시험법 참조하여 Table 5와 같은 방법으로 분석하였다.

Table 5 Analytical Method

Test item	Analytical Method
BOD	Standard Method
COD	Standard Method 5220
SS	Standard Method 2540
T-N	Standard Method 4500(Hitachi U3000)
T-P	Standard Method 4500(Hitachi U3000)

3. 결과 및 고찰

3.1 생물반응기 내 미생물 관찰

1) MLSS 농도 변화

BMs-1을 적용한 RCM반응기의 MLSS 농도는 4,680~6,360 mg/L 사이에 분포 했으며 평균 5,217 mg/L 로 나타났다. 운영기간중의 MLSS 변화를 Fig 2.에 나타내었다.

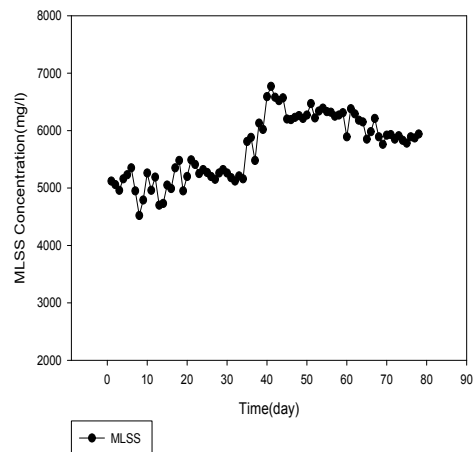


Fig. 2 Change of the concentrations of MLSS

2) 미생물 분포 특성

○ Phylum 분석

BMs-1을 도입하기 전의 시료를 SI-C (유입), An-C (유량 조절조), Ox-c (1차 포기조), Inf-S (침전조), Ox-S (2차 포기조)를 대상으로 분석한 결과를 Fig 3.에 나타내었다. BMs-1 도입 전 Ox-c 와 Ox-S에서 가장 다양한 미생물 Phylum이 나타났었고 Inf-S가 비교적 단순한 미생물 Phylum이 나타났다. BMs-1 도입 후 1달의 시간이 경과한 후 SI-C (유입), An-C (유량조절조), Ox-c (1차 포기조), SL-C (농축슬러지), SDC 슬러지액화분해조, Inf-S (침전조), Ox-S (2차 포기조))를 대상으로 분석한 결과 SDC에서 가장 다양한 미생물 Phylum이 나타났었고 유입수가 비교적 단순한 미생물 Phylum이 나타났다.

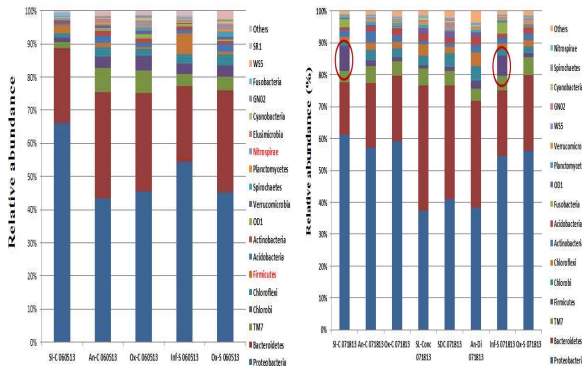


Fig. 3 Comparative analysis of microbial communities at phylum level (before and after)

○ Species 분석

미생물 Species를 분석하기 위해 BMs-1을 도입하기 전과 도입 후 그리고 방류수질의 안정기를 판단하여 총 3회의 분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig 5.에 나타내었다. BMs-1을 도입하기 전에는 인을 축적하는 역할을 하는 미생물인 *Accumulibacter phosphatis*가 소규모로 발견되었지만, BMs-1을 도입한 후 시간이 지남에 따라 점차적으로 증가하여 인의 제거에 도움을 주는 것으로 판단된다. 그리고 슬러지를 침전시키는 역할을 하는 *Zoogliaea_f.us_S* 또한 점차적으로 증가하고 있는 것을 확인 할 수 있다. BMs-1의 도입 전과 다르게 *Comamonadaceae_us_s* 라는 탈질 미생물이 발생하여 질소 제거에 큰 도움을 주는 것으로 판단되며, 9월 14일의 Species 분석을 보면 *Rhodocyclaceae_uc_s*라는 미생물이 발견되었는데 이 미생물은 질산성 질소를 생물학적으로 환원시켜주는 데 도움을 주는 것으로 알려져 있다(Shin,2009).

3.2 처리효율 평가

1) 생물학적산소요구량(BOD₅) 농도 변화

반응기의 유입수와 방류수의 BOD₅ 농도변화와 제거 효율을 모니터링 한 결과를 Fig. 4에 나타내었다. 유입수의 BOD₅ 농도는 156.6 ~ 210 mg/L, 방류수 농도는 5.6 ~ 8.3 mg/L로 BOD₅ 제거율은 약 96% 제거됨을 알 수 있었다.

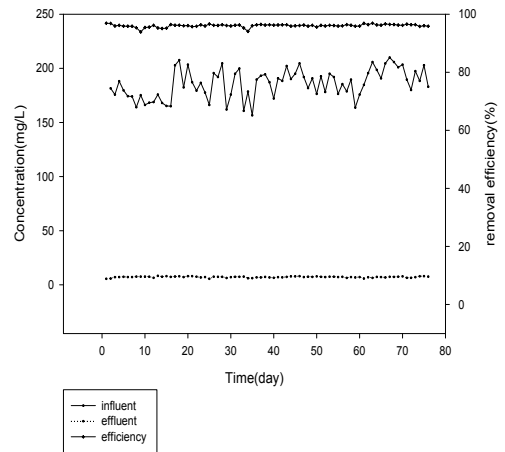


Fig. 4 Variations and removal efficiency of BOD₅ in effluent.

2) 화학적산소요구량(COD_{Cr}) 농도변화

반응기의 유입수와 방류수의 COD_{Cr} 농도변화와 제거 효율을 모니터링 한 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 유입수의 COD_{Cr}농도는 215~ 288 mg/L, 방류수 농도는 7.4 ~ 11.7 mg/L로 부유물질 제거율은 약 95.6% 제거됨을 알 수 있었다.

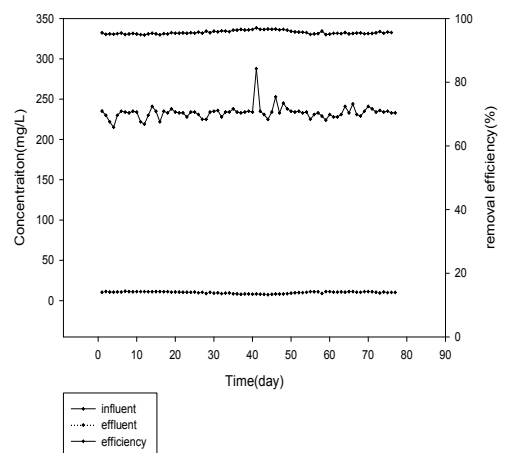


Fig. 5 Variations and removal efficiency of COD in effluent.

3) 총 부유물질(TSS) 농도변화

반응기의 유입수와 방류수의 부유물질(SS) 농도변화와 제거 효율을 모니터링 한 결과를 Fig. 6 에 나타내었다. 유입수의 ss농도는 150~256.3 mg/L, 방류수 농도는 3.4~7 mg/L로 부유물질 제거율은 약 97% 제거됨을 알 수 있었다.

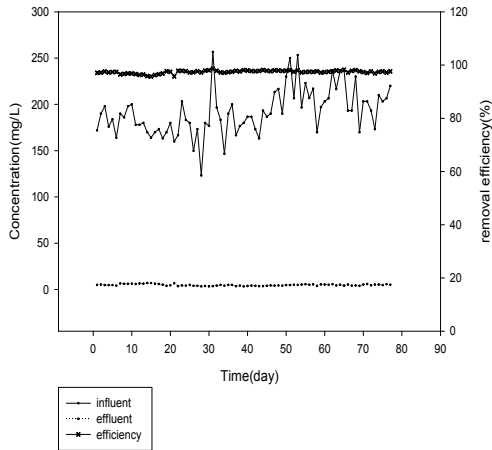


Fig. 6 Variations and removal efficiency of SS in effluent.

4) 총 질소(T-N) 농도변화

반응기의 유입수와 방류수의 총질소(T-N) 농도변화와 제거 효율을 모니터링 한 결과를 Fig. 7 에 나타내었다. 유입수의 T-N농도는 38.1 ~ 78.84 mg/L, 방류수 농도는 8.1 ~ 16.752 mg/L로 Kim 등(2012)에서 수행한 BM미생물제제를 이용한 크루츠선 SBR공정의 오·폐수처리장치실험에서 도출된 제거율 70 ~ 75%보다 RCM공정 적용시 약간 높은 78%의 제거율이 관찰되었다.

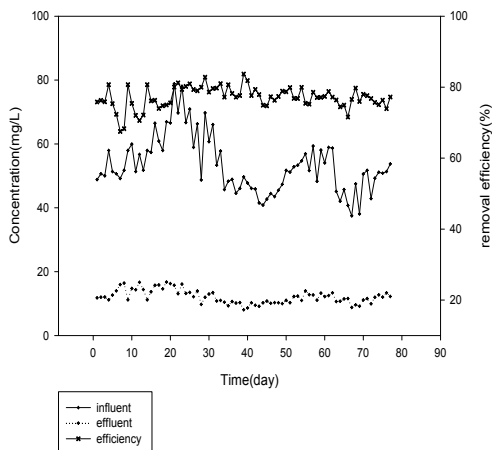


Fig. 7 Variations and removal efficiency of T-N in effluent.

5) 총 인(T-P) 농도변화

반응기의 유입수와 방류수의 총인(T-P) 농도변화와 제거 효율을 모니터링 한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다. 유입수의 T-P농도는 3.841 ~ 8.268 mg/L, 방류수 농도는 0.811 ~ 1.574 mg/L로 T-P 제거율은 약 81.68% 제거됨을 알 수 있었다.

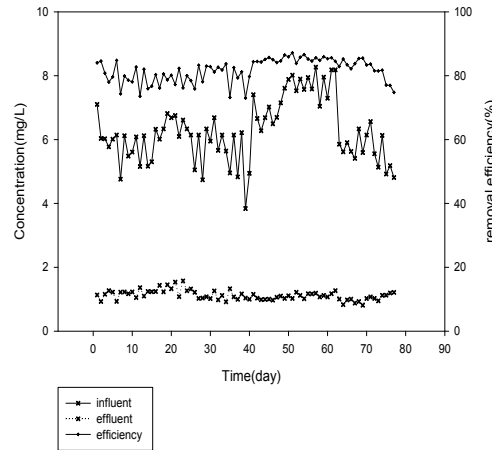


Fig. 8 Variations and removal efficiency of T-P in effluent.

4. 결론

본 연구는 복합미생물제제를 이용한 RCM 공정을 선박오수처리장치에 적용한 연구로서, 선박에서 발생하는 오폐수의 처리효과를 검증하기 위해 Lab-scale 실험장치를 이용하여 연구를 진행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

복합미생물제제를 이용한 선박오수용 RCM(Rumen Cometabolism) 공정에서는 배출수의 BOD₅의 처리효율은 96%, CODcr 평균 처리효율은 95.6%, TSS 처리효율은 97%, T-N 처리효율은 78%, T-P의 처리효율은 81.68%로 MEPC Res. 227(64)의 기준치인 T-N 제거율 70%이상, T-P 제거율 80%이상을 만족하는 효율이 나타났으며, Filter나 Membrane System를 사용하지 않아도 충분히 오수를 처리할 수 있음을 확인하였다.

또한 각 반응기의 미생물을 분석해본 결과 복합미생물제제를 도입하기 전 보다 도입 후 Comamonadaceae_us_s 라는 탈질 미생물의 출현과 Rhodocyclaceae_uc_s종의 우점화로 Shin(2009)의 연구 결과와 같이 질산성 질소의 생물학적 환원 능력을 강화시켜줘 선박이라는 특수한 환경에서 처리가 힘든 질소 제거에 큰 도움을 주는 것으로 판단된다. 또한 타 연구보다 높은 MLSS농도로 변동이 많은 하수가 유입되어도 미생물 환경의 변화가 적은 특성을 가지고 있어 선박에 적용되었을 때 안정적인 수질을 기대할 수 있다고 판단된다.

References

- [1] IMO MAPOR 73/78(1973,1978), Annex, of the international convention for the prevention of pollution from ships.
- [2] IMO, 2012, Resolution MEPC.227(64), Revised guidelines on implementation of effluent standards and performance tests for sewage treatment plants.
- [3] Kim, I. S. et al.(2012), "Advanced Treatment of Shipboard Sewage by SBR Process with BM", Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 36, No. 8, pp. 643-649.
- [4] 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.
- [5] Lee, E. S. and Kim, I. S.(2011), "Shipboard sewage treatment by SBR process with BM", Journal of Korean Navigation and Port Research, Vol. 35, No. 10, pp. 817-822.
- [6] Shin, S, H.(2009), Biological treatment of nitrate and perchlorate in brine water with a biofilter, Chung Ang University.
- [7] Ha, S, Y.(2012), Refractory wastewater treatment by Indigenous Microorganisms, Korea Maritime University
- [8] Han, S, H. et al.(2010), "Ship Sewage Treatment Using Fixed Media Method", Journal of the Korean Society for Marine Environment Engineering, Vol. 13, No. 2, pp. 99-104.

원고접수일 : 2014년 9월 29일
심사완료일 : 2014년 10월 20일
원고채택일 : 2014년 10월 20일