

# Bacillus sp.를 이용한 연속 회분식 반응장치에서 선박 오·폐수처리

박상호\* · 김인수\*\*

\*한국해양대학교 대학원 토목환경공학과 박사과정, \*\*한국해양대학교 토목환경공학과 교수

## Ship sewage treatment using Sequencing Batch Reactor

Sang-Ho Park\* · In-Soo Kim\*\*

\*Doctor course, Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

\*\*Division of Civil and Environmental Engineering, Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea

**요약** : 본 논문에서는 질소와 인을 동시에 처리할 수 있는 생물학적 처리공정의 하나인 연속 회분식 반응기(SBR)를 사용하여 선박에서 발생하는 오·폐수에 대한 처리 성능을 평가하였다. 본 처리공정에서 Bacillus sp.를 이용하여 질소와 인을 동시에 제거할 수 있었다. 유기물(COD)의 변화는 유입수의 COD의 농도가 370mg/ℓ 이고 유출수에서 6.5mg/ℓ 제거효율이 98.5%이상으로 나타났다. 총 질소는 97%정도 제거하였고 총인은 93%정도를 처리하였다. 계면활성제(MBAS)는 93%이상 처리되어 미생물 처리에 대한 저해작용은 관찰되지 않았다.

**핵심용어** : 선박용 오·폐수, 연속 회분식 반응기(SBR), 질소, 인, 계면활성제

**Abstract** : There have been several problems in treating shipboard sewage due to special environmental conditions of ship, such as limited space, rolling and pitching, change of temperature and so on. It was suggested that Sequence Batch Reactor (SBR) might be suitable process for overcome these problems in terms of small size, high capacity of treating wastewater and full automation. In this study a SBR process was employed for biological treatment of organic wastes in the shipboard sewage. This process was able to remove nitrogen and phosphorus as well as organic matter efficiently. More than 95% of chemical oxygen demand(COD) were removed. In addition, about 97% of total nitrogen (T-N) was reduced. The total phosphorus(T-P) reduction averaged 93%. A disturbance operation caused by the treatment of Methylene Blue Active Substances(MBAS) was not observed

**Key Words** : Shipboard Sewage, Sequence Batch Reactor(SBR), Nitrogen, Phosphorus, Methylene Blue Active Substances(MBAS)

## 1. 서 론

연안해역의 오염은 날로 심각해지고 있고 피해규모도 계속 증가하고 있다. 또한 오염으로 인한 양식장이나 어장의 피해는 더욱 크고 생태계의 교란까지 발생한다. 유엔 국제해사기구(IMO)는 이러한 문제점을 인식하고 해양 오염에 관련된 MARPOL 73/78 협약을 채택하였다. 선박의 화장실 등에서 발생하는 오수의 배출을 규제하는 오수방지협약(MARPOL 73/78 부속서 IV)이 2003. 9. 27부터 국제적으로 발효(1973. 11. 2 채택)됨에 따라 총톤수 200톤 이상이나 10인 이상이 승선하는 선박에서 발생하는 오수는 국제협약에 따라 정화하여 처리되어야 한다(국제해사기구 해양환경보호위원회 회의자료, 2003).

이 협약의 발효로 모든 선박은 유엔 국제해사기구의 MARPOL 73/78 규정에 따라 오수처리장치를 설치하여 가동해야한다. 기존선박에 적용된 처리공법으로 활성슬러

지법을 이용한 생물학적 처리장치와 물리·화학적인 처리장치인 전기분해가 있으나 모두 유기물제거에 국한되어 해양오염원 중 적조의 원인물질인 질소와 인을 동시에 제거할 수 없는 공법들이다. 우리나라의 항구들은 대부분 폐쇄해역에 존재하며 정박 중인 선박에서 유출된 질소와 인이 부영양화를 일으켜 해양환경오염과 적조발생에 한 원인을 제공하고 있다(김 등, 1998). 또한 각 나라마다 선박에서 발생하는 오·폐수에 대한 엄격한 처리기준을 제시하고 있어 처리기준을 만족하기 위해서는 질소와 인을 동시에 처리할 수 있는 선박용 고도처리장치의 개발이 시급한 실정이다.

본 논문에서는 질소와 인을 동시에 제거하는 육상의 고도처리장에서 활발하게 사용되어지고 있는 Bacillus sp.를 이용한 생물학적 처리공정의 하나인 연속 회분식 반응기(Sequencing batch reactor)를 이용하여 선박에서 발생하는 오·폐수에 대한 처리 성능을 평가하였다.

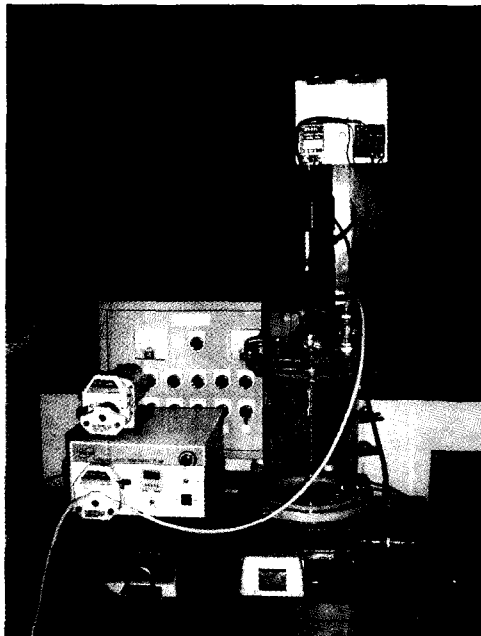
\* 대표저자: 박상호(정회원), sangho@bada.hhu.ac.kr 051)410-4983

\*\* 정회원, iskim@hanara.kmaritime.ac.kr 051)410-4416

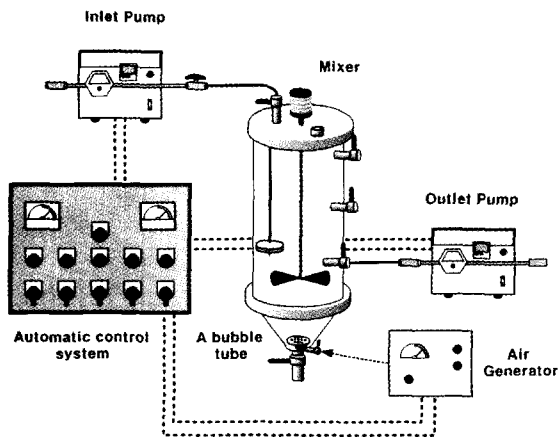
## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에 사용한 반응조는 두께 5mm의 투명 아크릴로 제작된 원형조를 사용하였고 총용적은 14ℓ이며 유효용적은 12ℓ로 운전하였다. 처리후 잔류슬러지 부분의 용량은 5ℓ이며 유출수의 양은 7ℓ로 하였다. 유입 및 유출튜브는 직경 5mm의 실리콘 튜브를 사용하였으며, 유입 및 유출펌프는 미량조절이 용이한 정량펌프(Peristaltic pump)를 이용하여 일정한 양이 주입되고 배출되게 하였다. 교반시간(Mixing time)에서의 반응조의 원활한 혼합을 위해 교반기를 설치하여 50~70rpm으로 교반시켰다. 반응조의 온도는 항온항습기를 사용하여 25±0.5℃를 유지하였다. 본 실험에 사용된 장치의 사진과 개략도를 Fig. 1에 나타내었다.



(a) Picture of SBR reactor



(b) Schematic diagram of SBR reactor

Fig. 1 SBR system used in this study

### 2.2 시료의 성상

본 실험에 사용한 시료는 실험의 편의를 위하여 선박에서 발생하는 오·폐수의 특성을 참조하여 인공폐수를 제조하여 사용하였다(김 등, 1998). 글루코스(Glucose)를 탄소원으로 하여 COD를 400mg/ℓ가 되게 하였고, 질소농도는 NH<sub>4</sub>Cl를 사용하여 40mgNH<sub>3</sub>-N/ℓ로 맞추어 시료의 질소성상을 암모니아성 질소의 형태로 주입하였으며, 인의 농도는 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 사용하여 10mgPO<sub>4</sub>/ℓ로 하였다. Table 1은 선박 오·폐수의 평균특성을 보여주고 있으며, Table 2는 본 실험에 사용된 합성폐수의 성상이다.

Table 1 General characteristics of shipboard wastewater

Division	Concentration(mg/ℓ)	Mean(mg/ℓ)
CODcr	400~500	450
T-N	25~30	27.5
T-P	4~5	4.5
MBAS	10~20	15
Mineral oil(Diesel)	1.3~1.7	1.5
Animal Fat	1.4~1.6	1.5
Vegetable oil	1.4~1.6	1.5

Table 2 Composition of the synthetic shipboard wastewater used in SBR

Composition	Concentration(mg/ℓ)
CODcr	350~450
T-N	36~45
T-P	12~14
MBAS	11~12
Mineral oil(Diesel)	1.5
Animal Fat	1.5
Vegetable oil	1.5

### 2.3 실험조건

본 연구에 사용된 식종슬러지는 울산의 S하수처리장의 B3(Best-Bio-Bacillus System) 반응조로부터 채취하였으며 15일간의 적응기간을 거친 후 반응조에 접종하였다. 포기시간에서의 용존산소(DO)는 바실러스속 세균(*Bacillus* sp.)의 성장특성에 맞추어 산기판의 포기강도에 의해 1단계로 1.5~2mg/ℓ, 2단계 0.8~1.0mg/ℓ, 3단계 0.5~0.5mg/ℓ, 4단계 0.3~0.5mg/ℓ로 점감포기를 하였다. 반응조작은 1일 4주기로 하였으며, 운전조건을 Table 3에 나타내었다. 1주기당 처리량은 약 7ℓ이고 모든 조작은 시간조절기(Time controller)에 의해 자동으로 제어되도록 하였다.

Table 3 Operating conditions for the SBR

Step	Fill	Settle	Idle	Draw	Total(min)					
RUN	10	40	60	50	40	60	80	10	10	360

Aerobic : ▨ Anoxic : ■

### 2.4 분석방법

실험분석치가 안정화되는 정상상태에서 유입수와 처리수에 대하여 시료를 1주기인 360분 동안에 5분마다 취하여 총 71개의 항목을 분석하였다. 본 연구에 사용된 각 항목별 분석방법은 수질오염공정시험법(2000) 및 Standard Methods(1992)를 참조하였다. 각 항목별 분석방법은 Table 4에 나타내었다. 반응조 내의 미생물의 변화를 보기위하여 위상차현미경을 이용하여 관찰하였다.

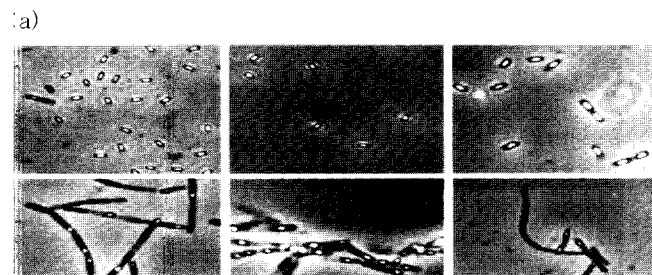
Table 4 Summary of analytical methods

Item	Analytical Method
pH	pH meter(Thermo Orion 720)
ORP	ORP meter(Thermo Orion 720)
TOC	TOC Analyzer(SHIMADSU 5000A)
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Indophenol Method
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	UV Spectrophotometric Method
NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> -N	NED, Colorimetric Method
T-N	UV Spectrophotometric Method
T-P	Automated Ascorbic Acid Reduction Method
DO	DO Meter (YSI Model 58)
MBAS	Metylene Blue Method

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 반응조 내의 Bacillus sp. 미생물

반응조의 미생물을 위상차 현미경을 통하여 관찰하였다. 유기물이 풍부할 때는 *Bacillus* sp.는 플럭(floc)에 부착된 사상(filament) 형태로 관찰이 되며 무산소 상태에서는 필라멘트 형태가 끊어지면서 단간균 형태 혹은 내생포자를 형성하게 된다. 이는 Fig. 2에 반응조 내에서 *Bacillus* sp.의 변화가 잘 나타나있다. (a)는 영양분이 결핍이 되어 생육이 저해되는 침전주기로 *Bacillus* sp.가 내생포자를 형성하며 내생포자는 광학적 굴절률이 아주 뛰어나기 때문에 현미경상에서 관찰할 경우에 다른 미생물들과 쉽게 구분이 된다. (b)는 호기주기에서 무산소주기로 변화는 단계에서 관찰되며 유기체 플럭에 부착된 실 모양의 긴 사상체의 형태로 관찰이 된다. 위상차 현미경을 통해서 실시간으로 반응조의 미생물 상태를 판단할 수 있었다. 또한 그람염색(Gram staining)을 통하여 Gram(+) 세균인 *Bacillus* sp.는 자색으로 변하고 Gram(-) 세균은 적색으로 염색되어 반응조에서 미생물을 구분할 수 있다(Choi et al, 2002).



(b)

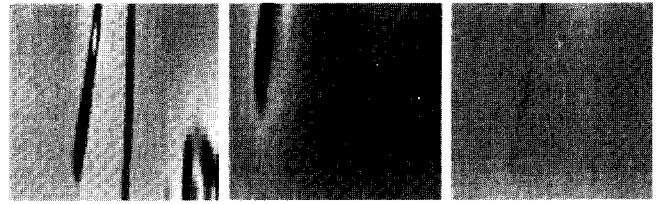


Fig. 2 Observations of *Bacillus* sp. on phase-contrast microscopy : (a) spores in settle( $\times 300$ ); (b) endospores in the anoxic( $\times 300$ )

반응조에서 *Bacillus* sp.의 성장은 양호하고 우점화되어 있었다. 반응조 내부에서 바실러스속 세균의 우점화를 유지하기 위하여 점감포기와 바실러스속 세균의 초기 발아단계와 세포분열을 촉진시키는데 중요한 역할을 하는 규소(Si)와 칼슘(Ca), 마그네슘(Mg) 등의 여러 가지 무기물질을 포함하는 미생물활성제를 호기성주기에 초기 원수부하량의 5%를 주입하였고, 식중후 15일 후에는 원수부하량에 1.5%를 주입하여 개체수를 증가시켰다.

### 3.2 용존산소의 변화

반응조 내부에서 1반응주기(cycle time) 동안의 시간경과에 따른 반응조내 DO, ORP의 변화를 측정하여 각각 Fig. 3, Fig. 4에 나타내었다.

전체적으로 포기시간 동안에 DO의 농도는 0.3~1.5mg/l를 유지하고 있었으며, 1반응주기에서의 시간경과에 따른 포기의 DO는 약간씩 증가하는 경향을 나타내었다. 이는 반응시간 중 초기에 유입된 유기물의 상당량이 제거되어서 반응조내 용량에 대한 유입수의 부하가 상대적으로 감소하여 산소 소모율(섭취율)이 낮아졌기 때문이다. 고반단계에는 포기를 중단하여 10분 이내에 무산소 상태(anoxic state)를 유지하였다.

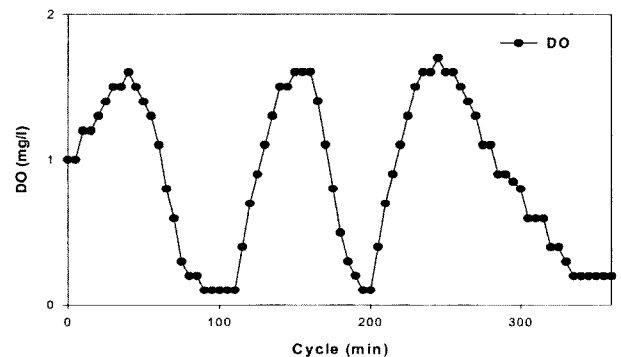


Fig. 3 Variation of DO during one cycle in 6 hours

산화환원 수준을 나타내는 ORP를 통해 반응조내 생화학 반응의 징후를 파악할 수 있는데 운전시간 경과에 따라 DO농도 증감에 비례하여 ORP도 증감하는 경향을 나타내고 있다.

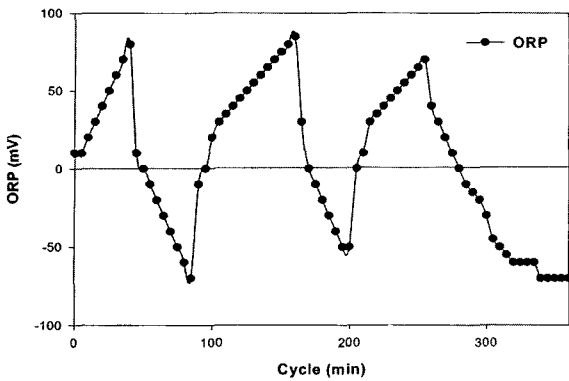


Fig. 4 Variation of ORP during one cycle in 6 hours

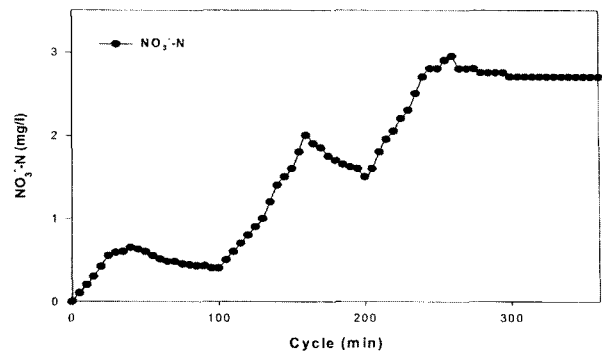


Fig. 7 Variation of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N concentration in effluent with one cycle in 6 hours

### 3.3 유기물 제거효율 평가

Fig. 5에는 시간의 변화에 따른 CODcr, TOC의 유입·유출수의 농도를 나타내었다. 유기물(CODcr, TOC)의 변화는 유입수의 CODcr, TOC의 농도가 각각 370mg/l, 240mg/l이고 유출수에서 6.5mg/l와 3mg/l로 제거효율이 95%이상으로 높은 처리율을 나타냈다. 측정된 결과가 우리나라의 오수처리시 방류수 배출의 법적 기준인 COD 40mg/l, SS 20 mg/l 이하를 만족하였다(김 등, 2002).

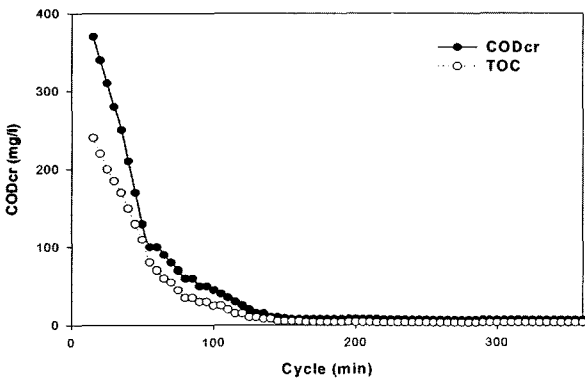


Fig. 5 Variation of each concentration of CODcr and TOC

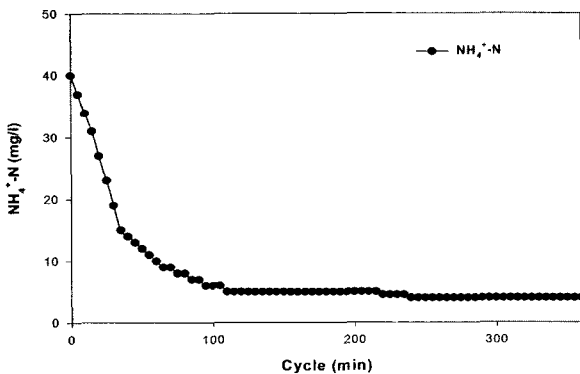


Fig. 6 Variation of NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N concentration in effluent with one cycle in 6 hours

### 3.4 질소, 인의 제거효율 평가

SBR 반응조의 처리 사이클 1회(6시간)동안 반응조 유출수의 암모니아성 질소와 질산성 질소의 농도 변화를 Fig. 6 와 Fig. 7에 나타내었다. 반응조내 호기성공정에서는 암모니아성 질소(NH<sub>4</sub>-N)가 40mg/l에서 4mg/l로 변화였고 무산소 공정에서는 질산성 질소(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>)는 0.5mg/l에서 2.7mg/l로 증가하였다. 호기성 공정과 무산소 공정이 반복되면서 질소가 제거되었다. 선박폐수의 특성상 화장실 오수를 따로 분리하는 분류식이므로 공간의 활용 및 처리장치를 이중으로 만들어야하는 불편이 따른다. 또한 원수의 질소, 인의 농도가 낮아 생물학적 처리에도 부적합하다. 현재 국제해사기구에서는 선박에서 발생하는 모든 폐수를 각 나라의 기준에 따라 처리한 후 배출하도록 유도하고 있다. 현재 우리나라에서는 선박에 대한 정확한 방류수 기준은 없지만 수질환경보전법(2003)에서 배출수 처리기준은 청정지역에서 COD 40 mg/l 이하, T-N 30mg/l 이하, T-P 4mg/l 이하이다. 본 연구에서는 이런 국제적인 규제에 적합하게 대처하기 위하여 선박에서 발생하는 화장실오수와 주방용수를 합류시켜 처리하였다. 합류될 경우 총질소가 30~40mg/l 정도가 존재하며 대부분이 암모니아성 질소로 바다의 부영양화의 주범이 되므로 처리한 후 배출하여야한다.

암모니아의 질산화가 원활하게 일어나서 전체의 90% 이상이 제거되었고 질산성 질소는 5mg/l 이하로 안정적으로 배출되었다. 본 연구에서 사용된 SBR공정으로 선박에서 발생하는 유기물의 처리와 질소를 제어할 수 있다는 것을 확인하였다.

한편 인의 제거에 있어서는 선박폐수의 수질특성상 인의 농도가 매우 낮아 선박에서 발생한 분뇨와 주방폐수를 섞어 이 문제를 해결하였다. 인의 제거기작으로 미생물에 의한 방출과 과잉섭취를 이용하는 본 공정은 과잉으로 인한 인의 제거에 매우 효과적이었다. 실험결과 인의 변화량을 Fig. 8에서와 같이 첫 번째 무산소 공정에서 약 50%의 인이 제거되었으며 2차 무산소 공정에서 추가적인 인의 제거가 이루어져 반응공정 중에 총 93%가 제거되었다.

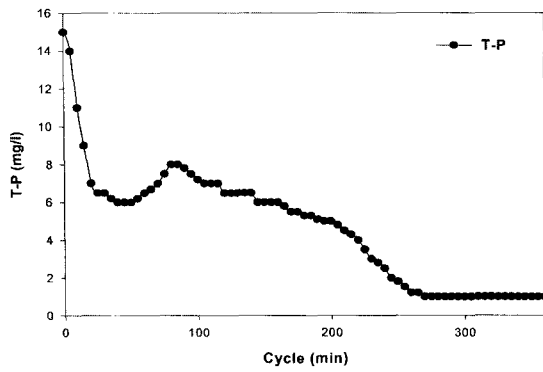


Fig. 8 Variation of T-P concentration in effluent during a 8 cycle

반응조 내에서 각 분석항목에 대한 처리효율을 Fig. 9에 나타내었다. 각각의 COD의 제거효율은 98.5%, 암모니아성 질소는 90%, 총질소의 제거효율은 95%, 인의 제거효율은 93%로 나타났다. *Bacillus* sp.를 이용한 SBR를 사용하여 선박폐수에 대하여 안정적인 처리효율을 나타내었다.

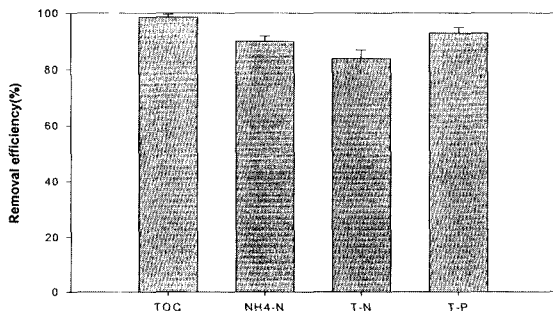


Fig. 9 Removal efficiency of TOC, NH4-N, T-N and T-P in the SBR system

### 3.5 SV(Sludge Volume)의 변화

SBR 반응조 내의 MLSS 농도가 4,500mg/l에서 시작하여 유입수의 농도에 따라 천천히 조절되어 3,500~4,000mg/l을 유지하여 안정화 되는 것을 확인할 수 있었다. 미생물 농도가 자연적인 조절능력에 따라 안정화 되므로 SBR공정에서는 다른 활성슬러지공법처럼 반응이 필요없어 장치가 간편하고 조작이 쉬운 장점을 가진다. 생물상의 변화에 대한 지표로 SV<sub>30</sub>의 변화량에 대하여 Fig. 10에 나타내었다. 미생물의 전체적인 양은 운전 초기에 일정하게 감소하다가 어느 단계에서 안정된 상태를 나타내었으며 이러한 초기 SV<sub>30</sub>의 감소원인은 운전조건의 변화에 따른 미생물의 적응 기간 동안에 사멸되는 미생물의 양이 많기 때문으로 보여진다. TOC값의 변화에 따른 SV<sub>30</sub>의 차이가 크지 않은 것은 주기 변화에 대한 미생물의 적응기간이 약 2~3일 정도로 나타나 SBR 반응조 내의 미생물이 부하에 대한 내성이 강하고 회복력이 우수하기 때문인 것으로 판단되어진다.

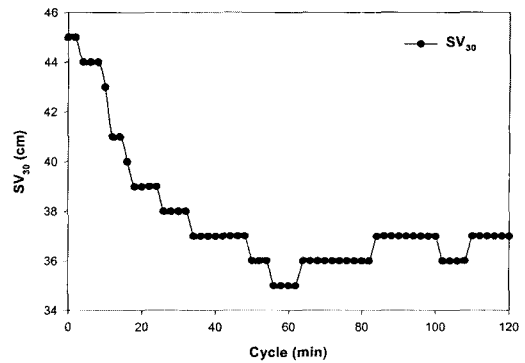


Fig. 10 Variation of SV30 during the test period

### 3.6 계면활성제의 처리

계면활성제는 선박에서 주방의 식기 세척, 세탁 및 목욕시 발생되며 미생물처리가 상당히 까다로운 물질이다. 최근에는 주성분이 Alkylbenzene Sulfonates(ABS)에서 Linear Alkylbenzene Sulfonate(LAS)로 바뀌어 생분해성이 크게 증가하였다. 이러한 계면활성제(LAS)의 농도는 수질오염공정시험법(2000)에 따라 MBAS(Methylene Blue Active Substances)의 농도로 나타내었다(김 등,1998). 활성슬러지 시설이 과부하 되지 않고 효율적으로 가동될 때 LAS의 제거율은 95~99%이었으며 MBAS는 95%이상이 제거되었다(Klein and McGauhey, 1965). 주방에서 식기세척 및 세탁시 발생하는 MBAS의 농도는 보통 30~40mg/l 정도이나 다른 폐수와 희석되어 선박폐수의 농도는 10~20mg/l 정도를 나타낸다. 본 실험에서는 원수의 MBAS의 농도를 12~15mg/l로 제조하여 사용하였다. 한주기 내에서의 MBAS의 변화량은 Fig. 11에서와 같이 첫 번째 호기성 공정에서 약 50%정도가 처리되었으며, 무산소 공정을 거친 후에는 유출수에는 1mg/l 정도로 MBAS가 93%이상이 처리되었다. Fig. 11에서 나타낸 것처럼 MBAS에 의한 미생물 처리의 방해작용은 거의 없었고 안정적인 처리율을 나타내었다. 음이온 계면활성제의 폐수 배출허용기준은 청정지역의 경우 3mg/l 이하, 그 이외의 지역은 5mg/l 이하로 규제하고 있는데(성·이, 2000) 배출수의 허용기준을 만족하고 있어 다른 후단처리가 필요하지 않았다.

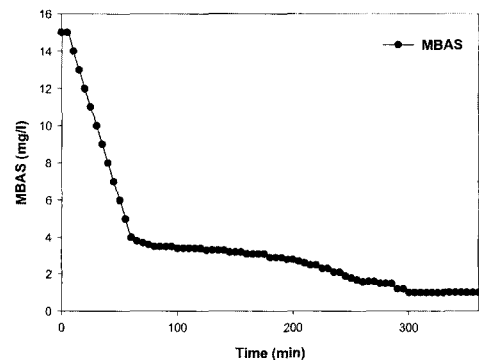


Fig. 11 Variation of MBAS concentration in effluent during a cycle

#### 4. 결 론

육상의 오·폐수의 고도처리에서 사용되는 *Bacillus* sp.를 이용한 SBR을 이용하여 처리성능을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 반응조에서 유기물질의 평균제거효율이 98% 정도로 나타났으며 C/N비의 변화에 따른 처리효율의 변동이 작아 BOD 변화에 따른 쇼크에 미생물의 적응력이 높은 공정으로 나타났다.

(2) 무산소 단계에서 외부탄소원 없이 질소와 인을 동시에 제거할 수 있는 처리공정으로 판단되었다.

(3) 처리장치에서 계면활성제의 처리율은 93%이상으로 미생물 처리의 저해인자로 작용하지 않았다.

(4) 선박폐수의 특성에 기초하여 제조한 인공폐수로 실험한 결과 유기물제거율이 98.5%, 질소와 인이 각각 84%와 93%의 처리효율을 나타내어 방류수 수질기준을 만족하였다.

#### 후 기

이 논문은 부산테크노파크사업의 지원에 의해 연구되었음.

#### 참 고 문 헌

[1] 김인수, 김억조, 김동근, 고성정, 안종수(1998), 선박용수의 재사용에 관한 기초연구(1), 해양안전학회, 제4권 제4호, pp.41~48

[2] 김병균, 서인석, 홍성택, 정위득(2002), 변형 연속회분식 반응기를 이용한 오수의 고도처리, 대한위생학회지, 제17권 제3호, pp.46~51

[3] 수질환경보전법(2003), 환경부

[4] 성일화, 이영준(2000), "합성세제의 처리방안 검토연구", 환경관리학회지, 제6권, 제1호, pp.93~98

[5] 수질오염공정시험법(2000), 동화기술, pp.115~269

[5] 이수구, 박상현, 조장호, 임병란(1998), SBR을 이용한 축산폐수처리에 관한 연구(I), 한국폐기물학회지, 제15권 제1호, pp.49~56

[6] 허목, 이용두, 한지용(2001), SBR 공정에서 폭기/교반 시간비의 변화에 따른 하수중의 질소·인의 제거, 한국수처리기술연구회, 제9권, 제1호, pp.53~61

[7] Choi, Y. S, Hong, S. W, Kim S. J and Chung, I. H(2002), Development of a biological process for livestock wastewater treatment using a technique for predominant outgrowth of *Bacillus* species, Water Science and Technology, vol 45 no 12, pp.71~78

[8] C.K.Lin, Y. Katayama, M. Hosomi, The characteristics of the bacterial community structure and population dynamics for phosphorus removal in SBR activated sludge process, Water Research 37, pp.2944~2952

[9] Fikret Kargi, Ahmet Uygur(2003), Nutrient loading rate effects on nutrient removal in a five-step sequencing batch reactor, Process Biochemistry, pp. 1~6

[10] IMO MARPOL 73/78 의정서 부속서 IV

[11] IMO MEPC 44차, 45차, 46차 회의자료, 2003

[12] Standard Methods 18th(1992), pp.4-75~4-96

[13] Klein, S. A and McGauhey, P. H(1965), "Degradation of biologically soft detergents by Wastewater treatment process", J.W.P.F. 37(6), pp.857~866

원고접수일 : 2003년 9월 30일

원고채택일 : 2004년 3월 10일