

論 文

### 선박용수의 재사용에 관한 기초연구(I)

-연속회분식 반응조를 이용한 선박폐수의 2차처리-

김인수\* · 김억조\*\* · 김동근\*\*\* · 고성정\*\*\* · 안종수\*\*\*\*

### A basic study on the reuse of shipboard wastewater( I )

-The secondary treatment of shipboard wastewater  
by Sequence Batch Reactor(SBR)-

*I.S.Kim\* · U.S.Kim\*\* · D.G.Kim\*\*\* · S.J.Ko\*\*\* · J.S.An\*\*\*\**

〈 목 차 〉

Abstract

1. 서론

2. 실험장치 및 방법

3. 결과 및 고찰

4. 결론

참고문헌

### Abstract

There are several serious problems in treating shipboard wastewater due to special environmental conditions of ship, such as confined space, rolling and pitching, change of temperature and so on. It was suggested that Sequence Batch Reator(SBR) process might be suitable for overcoming above problems in terms of small size, high capacity of treating wastewater and full automation.

In this study the SBR process was used for the secondary treatment of shipboard wastewater. The average removal efficiency of DOC, nitrogen, phosphorus and surfactants(MBAS) were studied and the effects of various C/N ratio on the efficiency of treatment were investigated. From the experimental results it was convinced that the SBR process would be able to be used as a suitable process for removing organic matters and nitrogen in reuse system of shipboard wastewater.

\* 정회원, 한국해양대학교 해양환경공학과

\*\* 영동환경(주)

\*\*\* 정회원, 한국해양수산연수원 수산교육부

\*\*\*\* 동아대학교 환경공학과

## 1. 서 론

우리나라는 하천의 유로가 짧고 하절기에 집중된 강우로 인해 사용가능한 용수의 양이 극히 제한되기 때문에 21세기 복지국가로 발돋움하는데 있어 용수공급문제는 심각하다고 할 수 있다. 이러한 문제의 해결책은 기본적으로 치수 등을 통한 양적인 확보와 각종 용수로 사용된 물을 적정 처리 후 재사용하는 중수도기술에 의한 수자원의 효율적인 관리에서 찾을 수 있다. 그러나 우리나라에서 수자원의 양과 질을 동시에 관리할 목적으로 중수도의 개념을 용수 및 오폐수처리에 도입한 것은 극히 최근의 일이며, 소수의 앞선 연구자들을 제외하고는 이 기술의 실질적인 적용 예가 많지 않고, 수자원의 효율적 관리에 있어서 실효를 거두지 못하고 있는 실정이다. 이것은 중수도 기술을 통하여 용수를 재사용하는 방법에 비해 각종용수의 값이 저렴하고, 중수도에 대한 기술적 기반이 아직까지 취약한 상태이기 때문이다. 따라서, 용수 문제를 해결하기 위해서는 산업전반에 걸쳐 각각의 분야에 적합한 중수도 기술을 개발하여 용수를 재사용함으로써 수자원을 효율적으로 이용해야 한다. 특히, 선박의 경우 항해시에 필요한 용수를 저장할 수 있는 탱크가 한정되어 있어 물이 기름보다 소중하게 취급되고 있으며, 적재한 용수의 양만큼 화물을 실을 수 없고 여객선의 경우 승객의 탑승인원도 제한될 수 밖에 없다. 따라서 해상에서는 용수의 효율적인 사용이 육상의 경우보다 더 큰 경제적 가치가 부여된다. 크기가 작은 어선이나 승조원이 많은 군함의 경우 용수사정이 더욱 열악하며 용수의 효율적인 사용과 처리의 중요성은 다른 어느 경우보다 더욱 중요해진다. 이러한 용수 사용의 제반 문제로 인해 선박에서 조수기를 설치하여 해수를 담수화할 수 있는 장비를 갖추고 있는 경우도 있으나 생산단가가 높아서 비경제적이고 장치의 설치비 또한 고가이다. 항내에 정박한 선박에서 방류되는 생활하수는 폐쇄항만을 오염시키며 관련법규에도 저촉되지만 현재로서는 선박폐

수를 처리할 수 있는 적정공정이 설치되어 있지 않은 상태이다. 선박에서 발생하는 생활폐수를 처리하여 재이용할 수 있다면 해양오염방지효과는 물론 위에서 언급한 물부족현상을 해소하는 일환이 될 수 있다. 육상의 일반적인 폐수처리와는 달리 선박의 폐수처리는 해상의 고립성 및 선박의 이동성과 공간이 협소하다는 점을 고려해야 하는 어려움이 따른다. 본 연구에서는 이러한 선박의 용수문제를 타개하는 대책의 일환으로 연속회분식 반응조(SBR, Sequencing Batch Reactor)를 사용하여 선박의 특성에 맞는 폐수처리시스템 개발의 기초연구를 시도하였다.

연속회분식 반응조는 Fill-and-draw방식의 회분식 반응기로서 기본적으로 재래식 활성슬러지를 사용하는 부유미생물 공정이며 재래식 활성슬러지 공정이 분리된 탱크에서 반응과 침전을 시키는데 비해 SBR공정은 폐수의유입-반응-슬러지 침전분리-처리수 유출-잉여슬러지 유출의 전과정이 한 개의 반응기에서 모두 수행되는 공정이다. 이공정은 하수처리의 3차처리나 산업폐수처리에 많이 적용되는 공정으로 소규모 폐수처리에 적합하고, 장치의 구조가 간단하며, 유기물을 포함하여 질소와 인의 동시제거와 전공정의 자동화가 가능하므로 위에서 언급한 선박의 폐수처리특성에 잘 부합되는 공정으로 판단된다.

## 2. 실험장치 및 방법

### 2.1 실험장치

본 실험에서 사용한 반응조는 아크릴로 제작하였으며 최대용적은 6.5ℓ 이고, 처리후 잔류 슬러지 부분의 용량은 1.5ℓ이며 유출수의 양은 3.5ℓ가 되게 제작하였다. 시료의 주입은 정량펌프를 사용하였고, 무산소공정에는 폭기를 중지하고 650 - 700rpm으로 교반시켰다. 반응조는 자동제어되며, 항온 항습기를 이용하여 25℃를 유지하였다. 장치의 개략도를 Fig.2.1에 도시하였다.

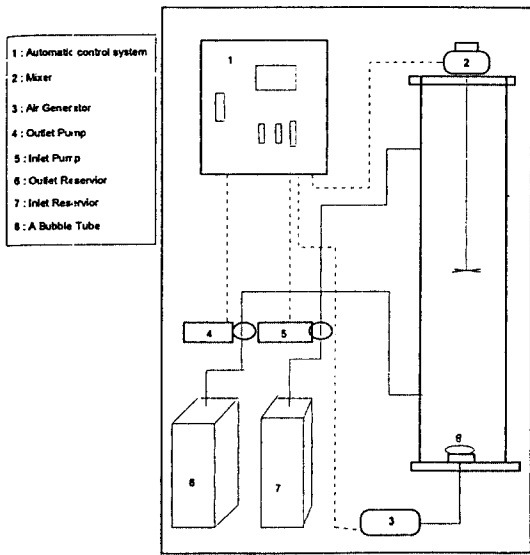


Fig. 2.: Simplified Schematic Diagram of SBR Reactor

2.2 시료의 성상

본 실험에서 사용한 시료는 미생물의 성장에 알맞는 조건을 맞추기 위해 Glucose를 탄소원으로 하여 COD를 RUN 1, 2에서는 200mg/ℓ가 되게 하였고, RUN 3에서는 200mg/ℓ와 400mg/ℓ로, RUN 4에서는 400mg/ℓ로 각각 조정하였다. 질소농도는 NH<sub>4</sub>Cl을 사용하여 40mg NH<sub>3</sub>-N/ℓ로 맞추어 모든 시료의 질소성상을 암모니아성 질소의 형태로 주입하였으며, 미생물의 세포분열에 필요한 질소의 양을 알기 위해 질소를 과잉으로 주입하였다. 인의 농도는 K<sub>2</sub>HPO<sub>4</sub>를 사용하여 10mgPO<sub>4</sub>/ℓ가

Table 2.2 Composition of synthetic substrate used in Run 1,2,3

Composition	Concentration(mg/ℓ)
COD	200 - 400
N	40
P	10

되게 제조하였다. Run1,2,3에서 사용한 시료의 성상은 Table 2.2와 같으며, Run 4에서 사용한 인공 선박폐수의 성상은 Table 2.3에 제시한 선박폐수의 특성에 따라 Table 2.4와 같이 제조하였다.

Table 2.3 General Characteristics of Shipboard Wastewater

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

Table 2.4 Composition of the Synthetic Shipboard wastewater used in Run4

Composition	Concentration(mg/l)
COD	350-450
TN	36-45
TP	12-14
MBAS	11-12
Mineral oil(Diesl oil)	1.5
Animal Fat	1.5
Vegetable oil	1.5

2.3 실험방법

본 연구에 사용된 식종슬러지는 부산 수영하수종말처리장의 활성 슬러지를 채취하여 여과, 수세한 뒤 15일간의 적응기간을 거쳐 실험에 접중되었다. 반응조작은 1일 2주기, 1일 3주기, 1일 4주기로 하였으며, 그 운전조건을 Table 2.4에 나타내었다. 1주기당 처리량은 약 5ℓ 정도이고 모든 조작은 PLC Controller에 의해 자동제어되도록 고안하였다. Table 2.5에 각 실험에서 채택한 SBR 반응조의 운전조건을 도시하였다.

Table 2.5 Operating Conditions of SBR

Step Run	Fill	Aerobic	Anoxic	Aerobic	Anoxic	Aerobic	Anoxic	Aerobic	Settle	Idle	Draw	Total (min)
Run 1	20	90	70	90	70	90	70	90	110	-	20	720
Run 2	10	60	50	60	50	60	50	60	70	-	10	480
Run 3	10	60	70	60	70	60	70	-	70	-	10	480
Run 4	10	40	60	50	40	60	-	-	80	10	10	360

## 2.4 분석방법

본 연구에서 사용된 각 항목별 분석방법은 환경오염공정시험법과 Standard Methods를 참조하였으며, 각 항목별 분석방법을 Table 2.6에 나타내었다.

Table 2.6 Summary of Analytical Methods

Item	Analytical Method
pH	pH Meter(Orion 330pH meter)
DOC	TOC Analyzer(SHIMADSU 5,000A)
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
TOTAL-N	UV Spectrophotometric Method
TOTAL-P	Automated Ascorbic Acid Reduction Method
DO	DO Meter (YSI Model 58)
MBAS	Methylene Blue Method

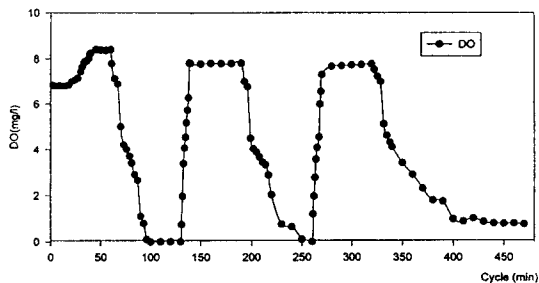


Fig. 3.1 Variation of DO with One cycle

## 3. 결과 및 고찰

## 3.1 용존산소의 변화

반응조 내의 용존산소농도변화를 조사하기 위해 한주기동안 매분 간격으로 DO농도를 측정하여 Fig.3.1에 나타내었다. 그림에서와 같이 유입후 첫 호기공정에서는 DO농도가 서서히 증가하여 20분 후 포화치인 8.4mg/l에 도달하였으며 첫 번째 무산소 공정에서 서서히 감소하여 0에 가까워 짐을 알 수 있다. 두 번째 호기공정과 무산소공정에서도 DO농도는 급격한 증가와 감소를 반복하여 공정의 목적에 잘 부합하였다. 이러한 용존산소의 증감은 호기공정과 무산소 공정의 뚜렷한 차이를 나타내어 호기성 미생물과 탈질박테리아의 생육에 최적의 조건을 제공하고 있음을 확인할 수 있다. 무산소공정에서 DO농도가 급격히 감소하는 것은 호기성생물의 호흡작용에 기인하는 것으로 판단되며 무산소공정동안 내생호흡기를 거쳐 다음의 호기성과과정에서 정상적인 호흡활동에 이르는 시간적 완충작용이 원인이 되어 재포기초기부터 급격한 DO농도의 증가가 나타나는 것으로 판단된다.

## 3.2 DOC(Dissolved Organic Carbon)의 변화

반응 한주기에 대한 DOC의 변화량은 Fig.3.2와 같이 첫번째 호기공정에서 대부분의 탄소원을 소비하지만 각 단계별로 조금씩 여분의 탄소원이 소비되는 것으로 나타났다. 이것은 반응조내에 호기성 미생물이 우점종을 이룬다는 것과 상대적으로

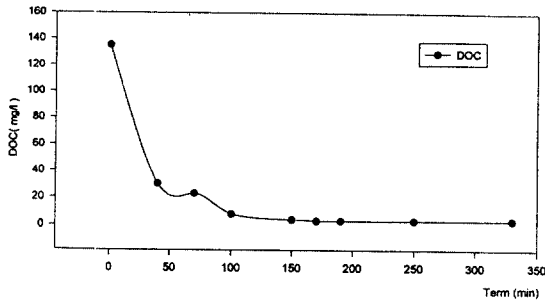


Fig. 3.2 Variation of DOC Concentration in Effluent for One Cycle

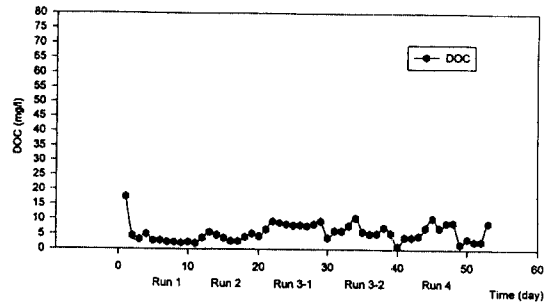


Fig. 3.3 Variation of Effluent DOC Concentration during Test period

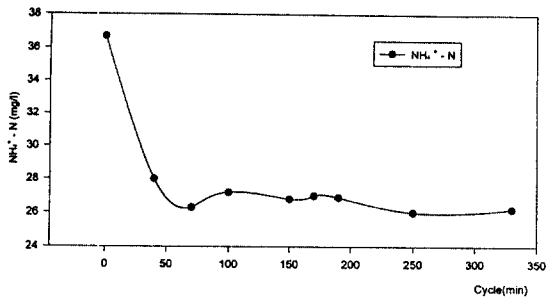


Fig. 3.4 Variation of  $\text{NH}_4^+$  - N Concentration in Effluent with One cycle

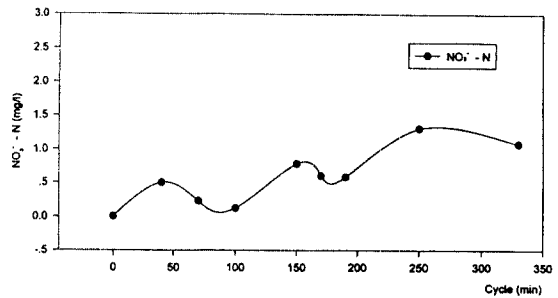


Fig. 3.5 Variation of  $\text{NO}_3^-$  - N Concentration in Effluent with One cycle

단계별로 거의 일정하게 나타났으며, 그래프에서 처리수의 수질이 급격히 변하는 부분은 유입수 수질의 변동에 따른 미생물의 적응기간으로 사료된다. Run 1에서 DOC의 값이 약간 감소하는 경향을 보이지만 전체적인 값의 차이가 크지 않은 것으로 볼 때 시료채취나 분석상의 오차에 기인하는 것으로 생각된다. Run 1에서의 DOC처리율은 95.7%로 안정된 처리율을 보였으며 Run 2로의 전환시 처리수의 수질이 순간적으로 악화되었으나 곧 안정화되어 평균 94.4%의 처리율을 보였다. Run 3-1과 Run 3-2에서는 탄소원의 차이에 따른 DOC처리율을 실험하였는데, 탄소원의 차이는 미생물에 순간적으로 부하쇼크를 주는 것외의 처리율면에서는 거의 차이가 없는 93.6%와 94.1%를 나타내었다. Run 4는 인공실험수의 처리율을 관찰하기 위한 실험으로 세제 및 유류의 투입 초기에는 미생물에 쇼크를 주어 처리율의 감소를 보였지만, 2일정도 경과후 안정된 상태를 찾아 평균 처리율이 95.6%를 나타냈다. 하지만 탄소원에 대한

쇼크보다는 세제 및 유류에 의한 쇼크가 좀 더 오래 지속됨을 알 수 있었다. 각 주기별로 처리율이 큰 차이를 보이지 않는 것은 반응시간이 처리율에 영향을 줄 수 없을 만큼 기질이 쉽게 분해되고 있다는 것을 알 수 있다. 따라서 실험에서의 운전조건이 나쁘고 기질의 변동이 심하므로 공정의 설계에 있어 충분한 마진을 고려해야 할 것이다.

### 3.3 질소, 인의 제거

SBR 반응조의 처리사이클 1회(6시간)동안 반응조유출수의 암모니아성 질소와 질산성질소의 농도 변화는 Fig. 3.4 및 Fig. 3.5에서와 같이 호기공정과 무산소공정이 반복됨에 의해 질산화와 탈질반응이 번갈아 일어나는 형태를 뚜렷이 나타내고 있다. 선박폐수가 육상의 생활하수와 달리 화장실오수를 따로 분리하는 분류식이므로 당연히 원수의 질소, 인 농도가 낮을 수 밖에 없고 따라서 본 연

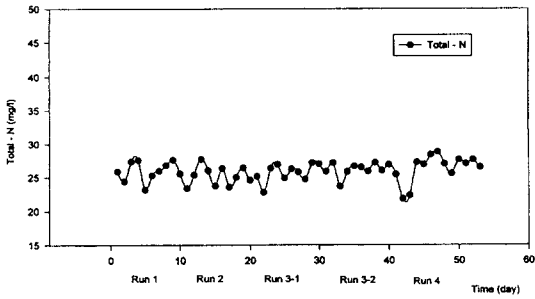


Fig. 3.6 Effluent Concentration of Total - N at each Test

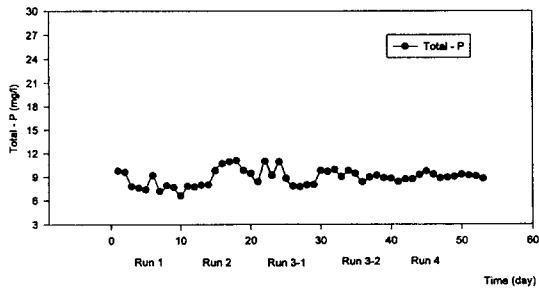


Fig. 3.8 Effluent Concentration of Total - P at each Test

구의 SBR공정은 유기물제거에 초점이 맞추어져 있다. 그러나 주방용수가 합류될 경우에는 25-30 mg/l 정도의 총질소가 존재하며 그 대부분이 암모니아성질소이므로 용수의 재사용을 목표로 할 경우 처리하지 않으면 안된다. 본 연구결과에서 평균적으로 45% 정도의 질소제거율을 나타내었으며 다른 SBR공정 보다 제거율이 40% 정도 낮게 제거된 결과이다. 이원인은 전자공여체로 제공된 기질의 종류가 포도당이라 너무 쉽게 분해가 일어난 결과 탈질공정에서 사용할 Carbon Source가 부족했기 때문으로 판단되며 이것은 실폐수 적용으로 개선될수 있는 문제점으로 생각된다.

전체 실험기간인 60일 동안 유출수의 총질소농도 경일변화량은 Fig.3.6에서와 같이 Run별로 처리효율에서 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 질산성 질소는 평균 4-8%정도 잔류했고 최고 10mg/l로 존재하여 탈질반응이 완전히 진행되지 않는 양상을 나타내었다. 전체적으로 유출수의 총질소평균 농도는 23 mg/l 정도로 나타났으며, 처리율은 45%

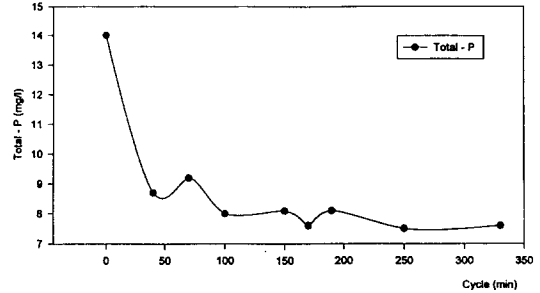


Fig. 3.7 Variation of Total - P Concentration in Effluent with One cycle

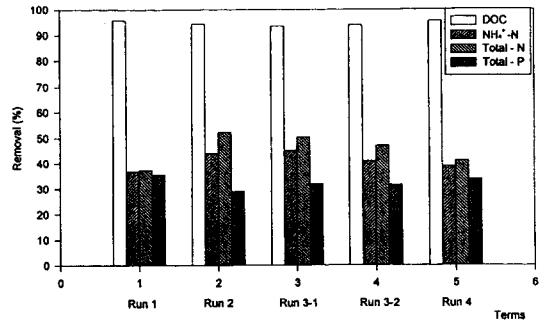


Fig. 3.9 Removal rates of Various Terms at each Test

내외로서 본연구에서 사용한 SBR공정체계를 선박 폐수처리에 적용하면 유기물처리를 주로 하고 부수적으로 질소를 제어할 수 있다는 것을 확인하였다.

한편 인의 제거에 있어서는 선박폐수의 수질특성상 인의 농도가 매우 낮아 주방폐수가 섞이지 않을 경우에는 오히려 미생물의 성장에 필요한 만큼의 인을 영양원으로 첨가해 주어야 할 정도이므로 문제시 되지 않으나 인의 제거기작으로 미생물에 의한 방출과 과잉섭취를 이용하는 본 공정의 특성상 과잉의 인은 매우 효과적으로 제거될 수 있다. 실험결과 인의 한주기 내에서의 변화량은 Fig.3.7에서와 같이 첫 번째 무산소 공정 후 약 30% 정도의 인이 제거되었으며 2차 무산소공정에서의 추가적인 인 제거량은 극히 미미한 결과를 나타내고 있다. 이것은 본연구에서 사용한 SBR Time Schedule이 인의 제거보다는 질소의 제거에 초점이 맞추어진 관계로 첫 번째 호기과정에서 탄소원이 거의 전부 소비되면서 미생물에 의한 섭취가 인제거의 대부분을 차지하는 결과로 판단된다.

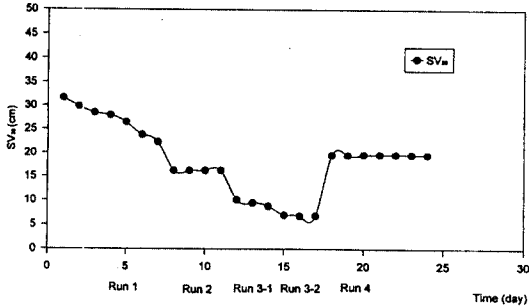


Fig. 3.10 Variation of SV<sub>30</sub> during Test period

실험기간 동안 유출수의 인농도 변화량은 Fig. 3.8 과 같이 Run의 종류에 따라 처리율이 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 각 Run별 평균유출농도는 8.76, 9.664, 9.26, 9.31, 9.12이며, 처리율은 35.5%, 28.94%, 31.9%, 31.5%, 33.8%로 나타났다.

Fig.3.9에 실험기간중 전체분석항목에 대한 유출수의 평균수질을 정리하였으며 여기에서 실험조건에 따른 수질의 변화는 극히 미미하였다.

### 3.4 SV(Sludge Volume)의 변화

반응기 내의 MLSS 농도는 초기 5000mg/ℓ에서 시작하여 유입수의 농도에 따라 서서히 조절되어 적정수준으로 맞추어지는 것을 확인하였으며 이러한 미생물농도의 자연적인 조절능력은 반응이 필요없는 SBR공정의 커다란 장점으로 생각된다. 생물상의 변화에 대한 지표로 SV30의 변화량에 대하여 나타낸 Fig. 3.10에서와 같이 미생물의 전체적인 양은 초기에 일정하게 감소하다가 어느 시점에서 안정된 상태를 나타내었으며 이러한 초기 SV의 감소원인은 운전조건의 변화에 따른 미생물의 적응기간에 사멸되는 미생물의 양이 많기 때문으로 보여진다. DOC값의 변화에 따른 SV30의 차이가 그다지 크지 않은 것은 주기 변화에 대한 미생물의 적응기간이 대략 2-3일 정도로 나타난 것으로 보아 SBR 반응조내의 미생물이 부하쇼크에 대한 내성이 강하고 회복력이 우수하기 때문으로 판단된다. 단 실패수적용실험인 Run 4에서는 투여된 기질의 생분해성이 다른 실험에서 사용한 포도당보다 약하므로 미생물의 적응기간이 상대적으로

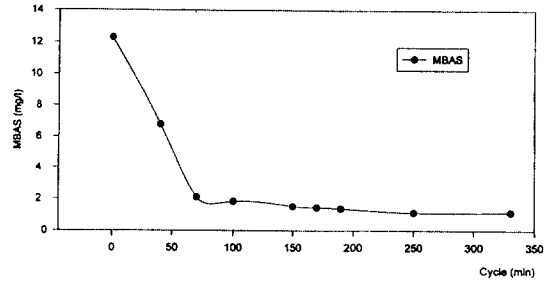


Fig. 3.11 Variation of MBAS Concentration in Effluent with One cycle

길었으나 다른 Run과 마찬가지로 서서히 감소하다가 일정기간 후 안정된 상태를 보였다.

### 3.5 계면활성제의 처리

계면활성제는 선박에서 주방의 식기 세척, 목욕 및 세탁시 발생되며 미생물처리가 상당히 까다로운 물질이다. 최근 그 주성분이 Alkylbenzene Sulfonates(ABS)에서 Linear Alkylbenzene Sulfonate(LAS)로 바뀌어 생분해성이 크게 증가했다해도 Alcohol Ether Sulfates(AES), α-Olefin Sulfonates(AOS), Alkyl Sulfonates(AS), Polyoxyethylene Alkyl Ester(AE), Polyoxyethylene Fat Acid Ester(PAE), Alkyl Phenol Ethoxylates(APE), Secondary Alkane Sulfonates(SAS), α-Sulfo Methyl Ester(ASME) 및 지방산염등의 첨가된 다른 세제성분들때문에 그 처리가 여전히 어려운 현실이다. 이러한 계면활성제의 농도는 MBAS (Methylene Blue Active Substances)의 농도로 나타내는데 주방의 식기세척 또는 세탁시 발생하는 MBAS는 보통 30 - 40mg/ℓ 정도이나 다른 폐수와 희석된 후의 선박 폐수농도는 10 - 20mg/ℓ 정도를 나타내므로 본 실험에서는 원수의 MBAS를 12 - 15mg/ℓ로 제조하여 사용하였다. 한주기 내에서의 MBAS의 변화량은 Fig 3.11에서와 같이 첫 번째 호기공정에서 약 50%정도가 처리되었으며, 첫 번째 무산소공정을 거친후에는 거의 대부분이 처리되었다. 초기 미생물적응단계에서 활동성이 약한 사상균이 출현하여 Bulking 현상이 일어 났으나 BOD 충격과

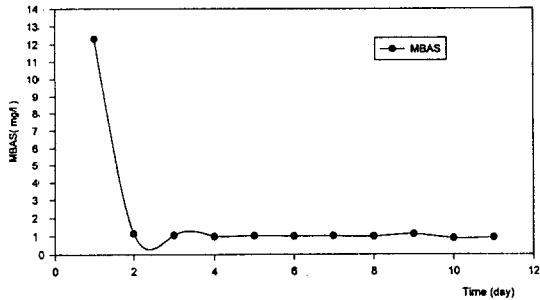


Fig. 3.12 Effluent Concentration of MBAS during Test period

용존산소 쇼크를 1회 실시하여 사상균을 제거할 수 있었다. 2-3일 후에는 정상적인 처리가 가능하였고 슬러지의 발생량도 매우 적었다. 실패수 적용실험인 Run 4에서의 결과도 Fig 3.12에서와 같이 전체적인 처리가 상당히 양호한 것으로 나타났다. MBAS의 평균처리율은 90%정도이며, MBAS의 주입으로 인해 발생가능한 거품은 초기에는 발생량이 다소 있었으나 시간이 경과함에 따라 거의 존재하지 않았다.

## 4. 결 론

선박에서 발생하는 생활폐수를 재사용할 목적으로 연속회분식 반응조(SBR)를 막분리공정의 전처리 공정으로 이용하여 60일간 실험한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 유기물질의 평균제거율은 95% 정도로 나타났으며 C/N비의 변화에 따른 처리효율의 변동이 작아 BOD 부하의 변동에 따른 쇼크에 미생물의 적응력이 높은 공정으로 나타났다.
- (2) 질소와 인은 각각 45%, 33% 정도 제거되어 유기물제거를 우선으로하고 소량의 질소와 인을 동시에 제거할 경우에 적용할 수 있는 적절한 공정으로 판단되었다.
- (3) 계면활성제의 처리율은 90%이상이며 슬러지의 발생량이 극히 작았으나 초기 적응단계에 사상균의 발생에 대한 대책이 필요하다.
- (4) 선박폐수의 특성에 기초하여 제조한 인공폐수로 실험한 결과 유기물제거율이 95.6%, 질소

와 인 각각 38.93%, 33.8%, MBAS 90%의 처리율을 나타내어 중수도의 수질 기준을 만족하였다.

## 5. 참고문헌

- [1] 임연택 외, "실규모 SBR공법을 이용한 오수의 고도처리", 한국수질보전학회 학술연구발표회 논문초록집, p 203-206, 1996.
- [2] 최의소 외, "회분반응식 반응조를 이용한 매립지 침출수의 질소제거", 한국수질보전학회 학술연구발표회 논문초록집, p 207-210, 1996.
- [3] 박수목, "Removal Characteristics of C, N, P in Sequencing Batch Reactor", 경성대학교석사 논문, 1996.
- [4] CHIN K. K., "Post Treatment Anaerobic Effluent Using Sequencing Batch Reactor", Wat. Sci. Tech., vol. 21, p 4-5, 1989.
- [5] 전항배, "연속회분식 반응조를 이용한 질소 및 인 제거공정 개발", 한국과학기술원박사학위논문, p 8-11, 1992.
- [6] 이상민, "Study of Operation Parameter for Enhanced Biological Phosphorus Removal in Sequencing Batch Reactor", 한국과학기술원 석사학위 논문, p 36-38, 1992.
- [7] 정진영 외, "연속회분식 반응기를 이용한 석유화학 폐수의 처리시 미생물 체류시간의 영향", 대한환경공학회 춘계학술연구발표회 논문초록집, p 588-591, 1997.
- [8] Lloyd H. Ketchum. Jr., "Design & Physical Features of SBR", First IAWQ Specialized Conference on SBR Technology, p 7-9, 1996.
- [9] Coronzy M. C., "Intermittent of the Extended Operation Aeration Process for Small System", J. WPCF, vol.51, p 274-287, 1979.

## 편집후기

본 논문은 통상산업부의 공업기반기술개발사업의 일환으로 연구되었으며 이에 감사드립니다.