

## 生物膜 電極反應機를 利用한 廚房廢水 處理 效果

盧賢雄\* · 尹旻燮

\*충청남도보건환경연구원, 대전산업대학교 환경공학과

## Effects of Domestic Wastewater Treatment used Biofilm-Electrode Reactor(BER)

Hyun-Woong Noh\* and Oh-Sub Yoon

\*Chungnam Institute of Health & Environment.

Dept. of environmental engineering, National Taejeon University of Technology

### ABSTRACT

This study was aimed to estimate removal efficiency(%) of BER(Biofilm-Electrode Reactor) and A.S(Activated Sludge) treatments. When were analyzed  $COD_{Cr}$ ,  $NH_3-N$  and T-P by current density and reaction time, the results were as follows :

1) In BER treatment, the removal efficiency of  $COD_{Cr}$  in domestic wastewater was 79-86% when current density was 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15mA)-3.98 mA/dm<sup>2</sup>(25mA) and reaction time was 48 hr.

2) Removal efficiency of  $NH_3-N$  was 71-73% when current density was 2.39-3.98 mA/dm<sup>2</sup> and reaction time 48 hr.

3) When the reaction time was 48 hr removal efficiency(%) of BER treatment for  $COD_{Cr}$ ,  $NH_3-N$  and T-P were more excellent than A.S. treatment.

And then we prospect that was because activated microorganism colonies attached in biofilm on surface of electrode pannel.

Therefore, In order to derive BER treatment efficiency(%) should establish optimum conditions of pH, temp., reaction time, current density and biochemical and electrochemical states.

**Keywords** : BER(Biofilm-Electrode Reactor), domestic wastewater, current density, microorganism colonies.

## I. 서 론

우리나라 음식문화의 특징중의 하나가 국이나 찌개등이 꼭 있어야만 하는 것이 일반적인 식생활 습관으로 되어 있다. 이로 인하여 고농도의 유기물을 함유한 주방폐수가 발생되어 수처리에 있어 문제를 야기시키고 있다.

특히 최근 우리나라의 상수원으로 이용되는 호수 수의 녹조현상은 그원인의 하나가 생활하수중에 함유된 질소나 인이 제거가 되지않고 하천과 강에 유입되는 원인이라할 수 있다.

즉, 고농도의 유기물과 영양염류인 질소나 인의 제거는 재래식의 방법으로 운영할 때는 그 처리의 효율성에 문제를 갖고 있다. 이와같은 현상의 처리

를 효율적이며 안정적으로 처리할 수 있는 폐수처리 반응기의 개발은 크게 관심이 고조되고 있는 분야라 할 수 있다.''

더욱이 부영양화 호소의 상류지역에 위치하는 하수 처리장의 처리수에 대한 T-N과 T-P의 규제로 '96년 1월부터 처리수의 수질기준이 T-N 60 mg/l, T-P 8 mg/l로 강화 적용되고 있다.

기존의 탈질처리기술로 종래의 활성오니법, 살수 여상법, 불연속점염소처리법, 전기산화법, 역삼투압법등이 있으나 처리장 부지증대 및 잉여슬러지의 다량 발생의 문제점등이 대두되어 왔다. 본 실험에서는 전극판에 미생물을 부착시킨 후 미전류를 통하여 미생물의 처리 능력을 최대한으로 이용하는 미생물 막 전극 반응기(BER:Biofilm-Electrode Reactor)

를 이용하여 폐수의 다양한 성상과 고부하율에 적용시켜 한 것이다.

BER 이용사례를 살펴보면 Meller등<sup>2)</sup>은 지하수에서 질산염과 아질산염 제거를 위해 BER이용을 제의하였고 Sakakibara등<sup>3)</sup>은 이 반응기의 실험을 통해 처리효율을 입증하기도 하였다. 또한 Lidia등<sup>4)</sup>은 고농도의 NH<sub>3</sub>-N제거에 의한 유기물 제거효율을 증대시키기도 하였다. 이와같은 고농도의 유기물 및 영양염류의 제거를 위하여 본 실험에서 미생물막 전극반응기(BER)를 이용하였으며, 음극 전극판에 부착시킨 미생물막에 미전류를 통하여 미생물의 처리능력을 최대한으로 이용하는 생화학적 원리를 이용한 방법으로 주방폐수에 함유된 COD<sub>Cr</sub>, NH<sub>3</sub>-N, T-P등에서 양호한 처리효율을 얻었기에 이를 보고코져 한다.

## II. BER의 원리 및 이론적 고찰

질산염을 환원하는 전극 생물막 System의 가능성은 실제적으로 제시되어 왔다. 이 System에서 탈질 생물막은 전극과 접촉되고 물의 전해에 의해 생성된 H<sub>2</sub>는 N<sub>2</sub>가스로 NO<sub>3</sub>의 환원에 이용된다.

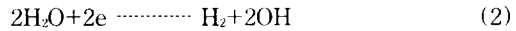
완전한 탈질화는 전류의 존재하에 이루어질 수 있다. 실제 탈질속도는 전류에 의해 확실한 영향을 받으며 그 반응은 Linear, Plateau, Decline의 3단계로 구분할 수 있다.<sup>5)</sup>

질산염을 환원하는 전기화학적 생물막 반응의 효과는 고정된 산소 반응기(Enzyme reactor)와 탈질 생

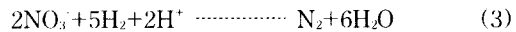
물막반응기<sup>6)</sup>를 이용하여 실험적으로 제시되어 왔다.

미생물막은 반응기에서 음극표면(Cathode surface)에 고정되었고 산소와 전류가 응용되었다. Fig. 1은 탈질 생물막 system에서 발생하는 반응을 나타낸 것이다.

즉, 수소가 물의 전해에 의해 음극(Cathode)에서 발생된다.



질산염은 Bulk liquid로부터 생물막에 확산되며 생물학적으로 전자공여체로서 주어지는 H<sub>2</sub>에 의해 N<sub>2</sub>가스로 환원된다.



반응식 (1)~(3)에서 전자 5 mol은 양론화학적으로 질산염 1 mol을 N<sub>2</sub>가스로 환원하는데 필요하며 H<sub>2</sub> 2.5 mol을 환원하는데 필요하다.

5 mmol/cm<sup>2</sup>-day(=5.7mA/cm)의 전자유동율(electron flux)은 질산염을 1 mmol/cm<sup>2</sup>-day의 속도로 환원하는데 공급될 필요가 있다. 전류가 공급될 때 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, H<sup>+</sup>, 및 OH와 같은 이온 종(ionic species)의 이동은 발전된 전기장(electric field)으로서 영향을 미치게 된다. 전기장은 질산이온이 생물막으로부터 혼합액(bulk liquid)으로 이동하도록 한다. 더욱이 음극 표면에서 반응식 (1)과 (2)는 수소이온을 소모하며 OH기를 생성한다.

미생물은 pH에 민감하므로 H<sub>2</sub>가스를 생성하는 이 전기화학적 반응은 생물막에 있는 pH의 부적정한 상태를 초래할 수도 있다. 모든 전류는 질량전달속도, 전기화학적 반응속도 및 생물막적 반응속도 조절이 필요하다.

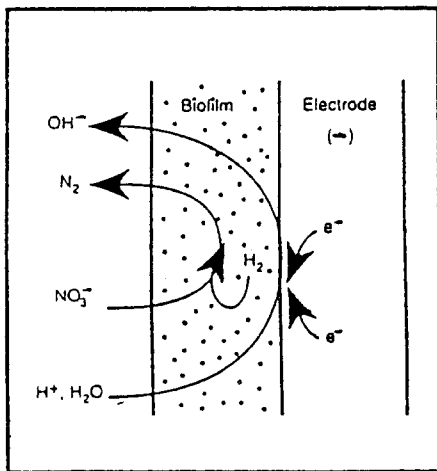
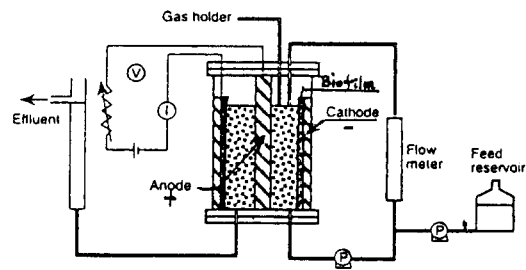


Fig. 1. Schematic diagram of basic biodenitrification theories by BER.



V : Voltmeter, I : Am-meter, P : Pump  
Fig. 2. Schematic diagram of the BER used in the study.

## II. 실험장치 및 방법

### 1. 실험 장치

본 연구에 이용된 실험장치는 회분식 전해장치로서 Fig. 2와 같다.

반응기 내부에 외경 2.5 cm인 막대모양의 철재인 양극과 내경 10 cm인 원통형의 스텐(SUS)재질을 음극으로 사용하였으며 높이는 20 cm로 하였다.

본 회분식 반응기의 외부 재질은 내약품성이 강한 두께 5 mm의 아크릴 수지판을 사용하였고 미생물이 접촉할 수 있는 전극면적은 약 6.2 dm<sup>2</sup>이었으며 반응기의 용량은 1.5 l로 하였다.

전극판에 미생물을 부착시키기 위하여 두께 약 2 mm 정도의 얇은 스폰지를 부착 고정시켰으며 일반 생활하수를 전극판이 잠기도록 반응기를 채운 후 산

소공급을 위하여 폭기시키면서 약 20일간 미생물을 부착시켰다.

전해조의 전원 공급은 DC Power supplier를 사용하였고 전류, 전압과 온도를 측정하기 위하여 Am-meter와 Volt-meter 및 온도계를 사용하였다.

본 장치의 일반 사양은 Table 1에 나타내었다.

또한 별도의 비교시험을 위하여 2 l용량의 비커에 aerator를 설치하여 폭기시키면서 활성오니(A.S.) 처리를 수행하였다.

### 2. 분석 방법

실험에 사용된 시료는 집단급식소(T대학 구내식당)폐수를 채수, 이용하였으며 Table 2와같은 분석 방법을 시행하였다.

**Table 1.** Manufacturing Co. and Specification of experimental instruments.

Instrument	Manufacturing Co.	Spec.
DC Power Supply	Korea Electronic Co. Ltd.	0-30A, 0-50 V
Volt meter	Keithley Instruments INC.	0-50 V
Am-meter	Yokogawa Electric Works. Ltd.	0-5A, 0-100 mA
Thermometer	Dongwoo Medical system Co. Ltd.	DT-880, 100°C

**Table 2.** Experimental methods.<sup>7)</sup>

Item	Analytical methods
COD(mg/l)	K <sub>2</sub> Cr <sub>2</sub> O <sub>7</sub> Reflux method
NH <sub>3</sub> -N(mg/l)	UV Spectrophotometer method
T-P (mg/l)	Ascorbic acid method

## IV. 결과 및 고찰

### 1. 전류밀도에 따른 COD<sub>Cr</sub>의 처리효과

생물막 전극 반응기(BER)의 유기물 처리효율을 알아보기 위하여 각 전류밀도에 따른 반응시간별 COD<sub>Cr</sub>의 농도변화를 시험한 결과 COD<sub>Cr</sub>의 경우 전류밀도 3.18 mA/dm<sup>2</sup>(20 mA)에서 48시간 경과후 약 86%의 가장 높은 처리효율을 나타냈으며 15.9 mA/dm<sup>2</sup>(100 mA)에서 약 62%의 처리효율을 나타냈다. 그 결과는 다음 Table 3과 Fig. 3에서 보여주는 바와 같다. 즉, 전류밀도 1.59 mA/dm<sup>2</sup>(10 mA), 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA), 3.18 mA/dm<sup>2</sup>(20 mA)의 경우로서 5시간 반응에서 각각 40%, 55%, 50%의 제거율을 나타냈고 36시간에서 65%, 77%, 72%의 제거율을 나타냈다. 48시간 이후에는 완만한 제거율을 나타냈다.

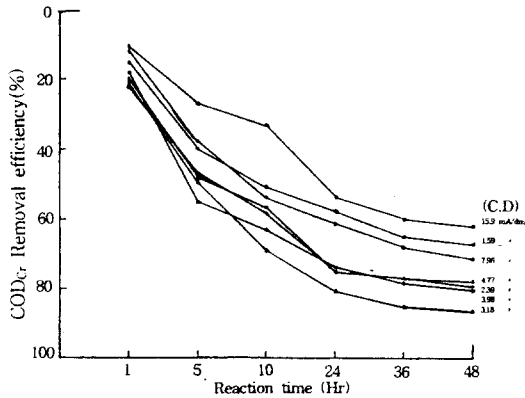
**Table 3.** COD<sub>Cr</sub> removal efficiency(%) of BER for various current density.

Time *C.D.(mA/dm <sup>2</sup> )	Electrolysis reaction time (hr)						
	raw w.water	1	5	10	24	36	48
1.59	620.0	527.0(15)	372.0(40)	303.8(51)	260.4(58)	217.0(65)	204.6(67)
2.39	546.0	447.7(18)	300.3(55)	202.0(63)	142.0(74)	125.6(77)	114.6(79)
3.18	410.0	323.9(21)	205.0(50)	127.1(69)	77.9(81)	61.5(85)	57.4(86)
3.98	680.0	530.4(22)	339.2(47)	285.6(58)	176.8(74)	149.6(78)	136.0(80)
4.77	670.0	536.0(20)	348.4(48)	288.1(57)	167.5(75)	154.1(77)	147.4(78)
7.96	1340.0	1179.2(12)	930.8(38)	616.4(54)	526.6(61)	428.8(68)	388.6(71)
15.90	600.0	534.0(11)	438.0(27)	402.0(33)	276.6(54)	240.0(60)	228.0(62)

unit : mg/l (%), \* C.D. : Current Density.

**2. 전류밀도에 따른 NH<sub>3</sub>-N의 제거 효과**

유기물 제거의 방법과 같이 전류밀도에 따른 암모니아성 질소의 제거효율을 분석한 결과 Table 4 및 Fig. 4에서와 같이 전류밀도 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA)에서 48시간 경과후 약 73%의 가장 높은 제거효율을 나타냈으며 15.9 mA/dm<sup>2</sup>(100 mA)에서 약 60%의 완만한 처리효율을 나타내었다. 즉, 전류밀도 1.59 mA/dm<sup>2</sup>(10 mA), 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA), 3.18 mA/dm<sup>2</sup>(20 mA)의 경우 5시간 반응에서 각각 19%, 21%, 24%를 나타냈으며 36시간 반응에서 각각 55%, 64%, 65%의 제거율을 나타냈으며 48시간 이후에는 완만한 제거율을 나타냈다.



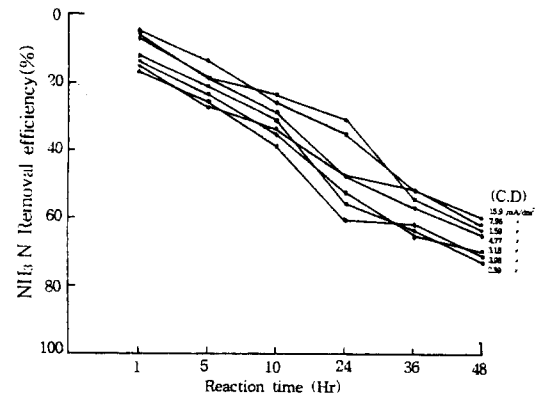
**Fig. 3.** Variation of COD<sub>Cr</sub> removal efficiency(%) by BER for current density.

dm<sup>2</sup>(20 mA)의 경우 5시간 반응에서 각각 19%, 21%, 24%를 나타냈으며 36시간 반응에서 각각 55%, 64%, 65%의 제거율을 나타냈으며 48시간 이후에는 완만한 제거율을 나타냈다.

**3. BER처리와 A.S.법과의 비교**

1) COD<sub>Cr</sub>처리

BER처리와 A.S.처리와의 처리효율을 비교하기 위해 동일 농도의 원액을 동시에 BER조와 폭기조



**Fig. 4.** Variation of NH<sub>3</sub>-N removal efficiency(%) of BER for current density.

**Table 4.** NH<sub>3</sub>-N removal efficiency(%) of BER for various current density.

Time *C.D.(mA/dm <sup>2</sup> )	Electrolysis reaction timee (hr)						
	raw w.water	1	5	10	24	36	48
1.59	111.8	103.9(7)	90.6(19)	84.9(24)	77.1(31)	50.3(55)	40.2(64)
2.39	65.8	57.9(12)	51.9(21)	45.4(31)	28.9(56)	23.7(64)	17.8(73)
3.18	53.6	46.1(14)	40.7(24)	34.8(35)	25.2(53)	18.8(65)	16.1(70)
3.98	212.0	175.9(17)	156.9(26)	129.3(39)	82.7(61)	80.6(62)	61.5(71)
4.77	114.4	97.2(15)	83.5(27)	75.5(34)	59.5(48)	49.2(57)	40.0(65)
7.96	96.2	91.4(5)	82.7(14)	71.2(26)	62.5(35)	46.2(52)	36.6(62)
15.9	102.6	96.4(6)	83.1(19)	72.8(29)	53.4(48)	49.2(52)	41.0(60)

unit : mg/l (%), \* C.D. : Current Density

**Table 5.** COD<sub>Cr</sub> removal efficiency(%) of BER and Activated Sludge method.

Method	Time	Electrolysis reaction time (hr)						
		raw w.water	1	5	10	24	36	48
BER method	2.39(mA/dm <sup>2</sup> )	546.0	447.7(18)	300.3(55)	202.0(63)	142.0(74)	125.6(77)	114.6(79)
	3.98(mA/dm <sup>2</sup> )	680.0	530.4(22)	339.2(47)	285.6(58)	176.8(74)	149.6(78)	136.0(80)
A.S. method		546.0	453.2(17)	349.4(36)	229.3(58)	180.2(67)	152.9(72)	141.9(74)
		680.0	591.6(13)	448.8(34)	306.0(55)	224.4(67)	197.2(71)	190.4(72)

unit : mg/l (%)

(Aeration tank)에 넣고 시간에 따른 제거율을 분석하였다. 그 결과는 Table 5 및 Fig. 5와 같았으며, 처리시간 1시간인 경우 BER이 18-22%, A.S.처리의 폭기조의 경우 13-17%의 제거율을 나타냈으며, 5시간 경과후 BER 47-55%, 폭기조의 경우 34-36%의 제거율을 나타냈다.

48시간의 경우 BER이 79-80%, A.S.처리의 폭기조가 72-74%의 제거율을 나타내어 BER에 의한 제거율이 월등함을 나타냈다.

BER의 처리는 전류밀도 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA), 3.98 mA/dm<sup>2</sup>(25 mA)에서 이루어 졌으며, 이 결과는 Sakakibara의 12.8-20.4 mA 사이가 BER처리의 최적조건이라는 실험 결과치<sup>9)</sup>와 거의 일치함을 알 수 있었다.

2) NH<sub>3</sub>-N 처리

암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N) 역시 동일한 농도의 시료를 이용하여 시험한 결과 Table 6, Fig. 6과 같았으며, 처리 1시간후 BER은 12-17%, A.S.처리의 폭기조의 경우 8%의 제거율을 나타냈고, 5시간후

BER처리는 21-26%, 폭기조의 경우 18-19%의 제거율을 나타냈다. 48시간 처리후 BER처리는 71-73%, A.S.처리의 폭기조는 61-63%의 제거율로 나타나 두 방법간의 뚜렷한 차이를 알 수 있었다.

BER처리의 전류밀도는 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA)와 3.98 mA/dm<sup>2</sup>(25 mA)으로 실시하였으며 미생물 부착 상태는 양호한 편이었고 처리시간을 연장하면 제거율이 더욱 양호할 것으로 사료되었다.

3) 총인 (T-P)의 처리

총인(T-P)의 처리효율을 알아보기 위해 동일한 농도의 시료를 이용하여 실험한 결과 Table 7 및 Fig. 7과 같았으며 BER처리는 전류밀도 3.98 mA/dm<sup>2</sup>(25 mA)에서 1시간 반응후 BER처리에서 54.3%, 폭기조에서 44.7%로 처리되는 것을 알 수 있었으며 48시간후에는 BER처리가 86.4%였고 A.S.처리의 폭기조에서 80.6%의 제거율을 나타냈다. 즉, BER처리와 A.S.처리를 비교실험한 결과 BER처리에서 암모니아성 질소(NH<sub>3</sub>-N)와 총인(T-P)의 제거율이 월등히 우수한 것으로 나타났다.

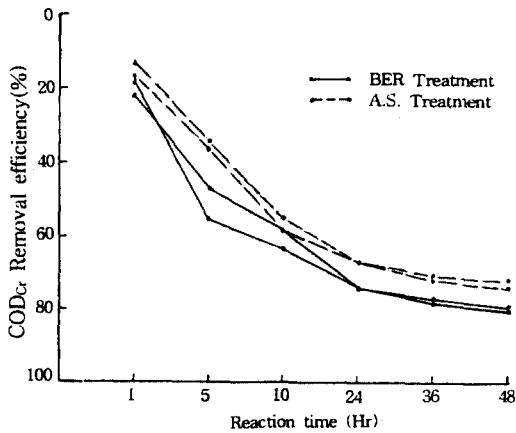


Fig. 5. Comparison with BER and A.S.method in COD<sub>Cr</sub> treatment.

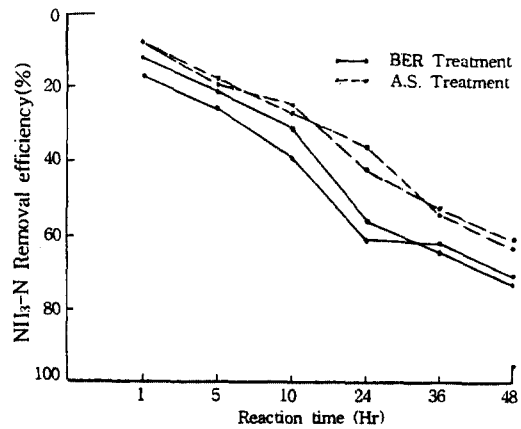


Fig. 6. Comparison with BER and A.S. method in NH<sub>3</sub>-N treatment.

Table 6. NH<sub>3</sub>-N removal efficiency(%) of BER and Activated Sludge method.

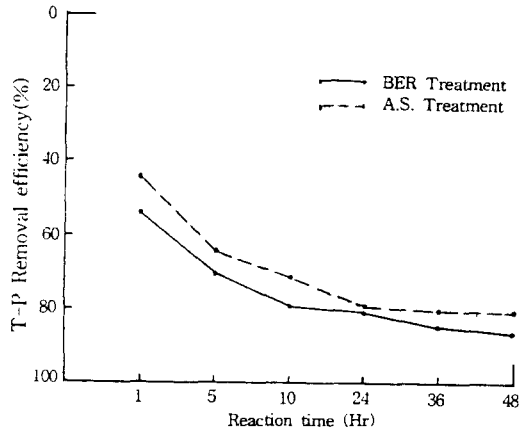
Method	Time	Electrolysis reaction time (hr)						
		raw w.water	1	5	10	24	36	48
BER method	2.39(mA/dm <sup>2</sup> )	65.8	57.9(12)	51.9(21)	45.4(31)	28.9(56)	23.7(64)	17.8(73)
	3.98(mA/dm <sup>2</sup> )	212.0	175.9(17)	156.9(26)	129.3(39)	82.7(61)	80.6(62)	61.5(71)
A.S. method	2.39(mA/dm <sup>2</sup> )	65.8	60.5(8)	53.9(18)	48.1(27)	42.1(36)	30.3(54)	24.3(63)
	3.98(mA/dm <sup>2</sup> )	212.0	175.0(8)	171.7(19)	159.0(25)	122.9(42)	99.6(53)	82.7(61)

unit : mg/l (%)

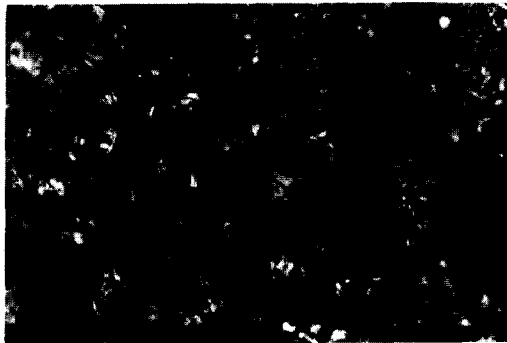
**Table 7.** T-P removal efficiency(%) of BER and A.S.method.

Method	Time	Electrolysis reaction time (hr)						
		raw w.water	1	5	10	24	36	48
BER method	3.98(mA/dm <sup>2</sup> )	4.176	1.91(54.3)	1.24(70.3)	0.87(79.2)	0.82(80.4)	0.64(84.7)	0.57(86.4)
A.S. method		4.176	2.31(44.7)	1.49(64.3)	1.19(71.5)	0.87(80.1)	0.83(80.1)	0.81(80.6)

unit : mg/l (%)



**Fig. 7.** Comparison with BER and A.S. method in T-P treatment.



**Fig. 8.** Condition of microorganism colony by BER treatment.(X400)

4) 미생물군의 생육상태

이상의 실험에서 주로 전류밀도 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA)과 3.98 mA/dm<sup>2</sup>(25 mA)의 BER처리에서 처리효율이 양호하게 나타났으며 이 때의 부착 미생물의 생육상태와 A.S.처리시의 상태를 관찰해 본 결과 Fig. 8 및 Fig. 9와 같았으며 BER처리시의 생육상태가 A.S.처리시의 상태보다 더욱 활발하였고 미생물



**Fig. 9.** Condition of microorganism colony by A.S. treatment.(X400)

군이 밀집되어 있는 것으로 보아 처리효율이 월등히 좋았던 것을 알 수 있었다.

이러한 결과로 보아 처리효율에 미치는 가장 중요한 인자라고 할 수 있는 것은 미생물의 처리대상 원수에 대한 적응시간의 조절과 전류밀도, 반응시간, pH 및 수온등 반응조내의 최적조건을 조성하는 것이 우선 조건이며, 그외에 산소공급등 반응에 미치는 물리 화학적, 전기화학적, 생물학적 제요인을 고려하여 최적조건을 조성하는 것이 주요한 과제라고 생각된다.

**V. 결 론**

생물막 전극 반응기(BER)에 의한 주방폐수의 전류밀도와 시간에 따른 처리실험을 통하여 유기물(COD<sub>Cr</sub>)제거와 NH<sub>4</sub>-N 및 T-P의 제거효율을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. BER처리시 COD<sub>Cr</sub>의 제거효율은 전류밀도 2.39 mA/dm<sup>2</sup>(15 mA)-3.98 mA/dm<sup>2</sup>(25 mA)인 경우 48시간에서 제거효율이 79-86%로 나타났다.
2. NH<sub>4</sub>-N의 제거효율은 전류밀도 2.39-3.98 mA/dm<sup>2</sup>의 경우 48시간에서 71-73%로 나타났다.
3. 처리시간 48시간에서 BER방법의 경우 COD<sub>Cr</sub>은 평균 79.5%, NH<sub>4</sub>-N은 평균 72.0%, T-P는 86.4%였

으며, A.S.방법의 경우 COD<sub>C</sub>은 평균 73.0%, NH<sub>3</sub>-N은 62.0%, T-P은 80.6%로 BER방법의 제거효율(%)이 훨씬 월등한 것으로 나타났으며, 이것은 미생물군이 전극표면의 생물 막에 밀집되어 보다 활발한 생육상태를 유지하고 있었기 때문인 것으로 사료되었다.

따라서 BER처리를 보다 효율적으로 이용하기 위해서는 전극판에 부착하는 미생물이 처리대상 폐수에 신속히 적응할 수 있도록 pH를 6-8의 중성역의 완충상태로하여 미생물의 활성을 증가시켜야 하며, 수온은 5-35°C로 조절하고 주방폐수 이외의 세제 또는 미생물 증식에 영향을 미치는 방해물질의 유입을 최대한 억제하여야 할 것이다.”

### 참고문헌

- 1) 井上 充, 平野 浩, 稻森悠平: 間歇曝氣式 回分活性汚泥法による 生活排水中 窒素, 磷 有機物 除去のための 最適條件の選定, 水質汚濁 研究, 4(5), 301-311, 1991.
- 2) Robert B. Mellor, Jorg Ronnenberg, Wilbur H. Campbell & Stephan Diekmann: Reduction of nitrate and nitrite in water by immobilized enzymes, Nature, 355, 717-719, 1992.
- 3) Utaka Sakakibara, Joseph R. V. Flora, Makram T. Suidan, Pratim Biswas and Masao Kuroda: Measurement of mass transfer coefficients with an electrochemical method using dilute electrolyte solution, Wat.Res., 28(1), 9-16, 1994.
- 4) Lidia B. Eric, Dale A. Carlson: Electrochemical treatment of tannery wastewater using Ti/Pt and Ti/Pt/Ir Electrodes, Wat., 29(2), 517-524, 1995.
- 5) Utaka Sakakibara, Joseph R.V.Flora, Makram T. Suidan, and Masao Kuroda: Modeling of electrochemically-Activated Denitrifying Biofilm, Wat. Res., 28(5), 1077-1086, 1994.
- 6) WQI: Electrodes give bio-denitrification a boost. Proceeding published in Water Science Technology, 29(8-9), 1994.
- 7) 環境部: 水質汚染公定試験方法, 水質編, 1995.
- 8) Utaka Sakakibara, Joseph R.V.Flora, Makram T. Suidan, and Masao Kuroda: Numerical modeling of a biofilm-electrode reactor used for enhanced denitrification, Wat. Sci. Tech., 29(10-11), 517-524, 1994.
- 9) 尹昉燮, 金喆奎, 盧賢雄 共著: 環境微生物學, 大田産業大學校出版部, 233-240, 1996.