

# 막분리조 미세·거대 기포 포기방식과 과포기 용존산소를 활용한 에너지 절감형 하수고도처리기술(e-MBR)



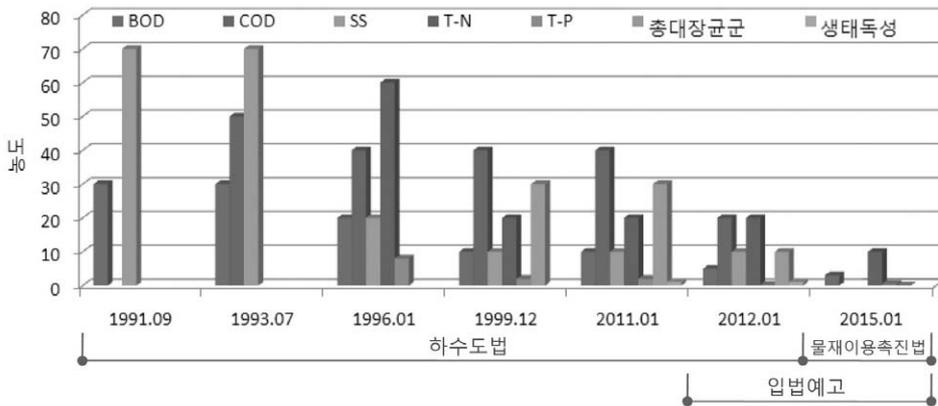
글 김승준 \ 플랜트사업팀 과장 \ 공학박사 \ 전화 02-3433-7748 \ E-mail ksjun@ssyenc.com

## 1. e-MBR 개발 배경

### 1-1. 국가 하수도정책 변화

20세기 후반부터 현재까지 수계 수질개선 및 하수처리장의 고도 처리 전환과 관련하여 우리나라 하수도시설은 급속한 양적 성장

과 기술적 발전을 이루어 왔다. 최근에는 수자원 확보 및 활용의 관점에서 하폐수 처리수의 재이용에 대한 사회적 및 환경적 요구가 증가하고 있으며, 이에 따라 처리수의 요구수질도 지속적으로 강화되고 있다. [그림 1]은 우리나라의 공공하수처리시설 방류수 수질기준 변경 연혁을 나타낸다.



구 분	1991.09	1993.07	1996.01	1999.12 <sup>1)</sup>	2011.01	2012.01 <sup>2)</sup>	2015.01 <sup>3)</sup>
BOD(mg/L)	30	30	20	10	10	5	3
COD(mg/L)		50	40	40	40	20	
SS(mg/L)	70	70	20	10	10	10	
T-N(mg/L)			60	20	20	20	10
T-P(mg/L)			8	2	2	0.2	0.5
총대장균군(×100개/mL)				30	30	10	0
생태독성(TU)					1	1	

1) 특정지역, 2) I지역 기준(I~IV 지역), 3) 친수용수 기준

[그림 1] 공공하수처리시설 방류수 수질기준 변경 연혁

표 1 방류수 수질기준

(단위 : mg/L)

구분		BOD	T-P
500m <sup>3</sup> /일 이상	I 지역	≤5	≤0.2
	II 지역	≤5	≤0.3
	III 지역	≤10	≤0.5
	IV 지역	≤10	≤2

표 2 재이용수 수질기준

(단위 : mg/L)

구분	BOD	T-N	T-P
친수	≤3	≤10	≤0.5
하천유지	≤5	≤10	≤0.5
습지	≤5	≤10	≤0.5

하폐수 처리수의 재이용을 통한 물순환시스템의 확립은 지속 가능한 발전과 자연 생태계 보전의 관점에서 매우 중요한 과제임은 모두가 주지하고 있는 사실이나, 현재까지 기술적 완성도 부족과 여러가지 제약 등으로 인해 매우 제한적으로 적용되고 있다. <표 1>의 공공하수처리시설 방류수 수질기준과 <표 2>의 하폐수 처리수의 용도별 재이용수 수질기준의 공통적 만족을 위해 중요한 인자는 BOD의 완벽한 제거와 총질소 농도 10mg/L 이하 및 총인 농도 0.5mg/L 이하 달성임을 알 수 있다. 그동안 BOD, SS의 확실한 제거 및 오염총량제 적용에 따른 대응성이 높은 MBR 공법의 적용이 확대되어 왔으나, 총인 농도 0.5mg/L 달성의 한계성 때문에 후단 총인 제거설비가 필요하여 이 두 가지 문제를 해결할 수 있는 단일 공정이 필요하였다.

## 1-2. 고효율 MBR 기술의 필요성

### 1) 기존 MBR 기술의 문제점

- ① 처리수 T-P의 한계 : 0.5mg/L(응집제 주입시)
  - 기존 MBR 기술은 질소제거 위주의 공정구성이 주종을 이룸
  - 혐기조가 없거나 유기물 활용도가 낮아 생물학적 인 제거 효율이 낮음
  - 총인 0.2mg/L 이하 달성을 위해 과도한 응집제 주입으로 막 오염, 질산화 방해 및 슬러지 처리비용 증대
  - 겨울철 막분리조의 과도한 용존산소로 인해 생물학적 인 방출 및 탈질 저해
- ② 과도한 포기량에 의한 에너지 소비량 증가
  - 막의 물리적 세정을 위해 거대기포(Coarse Bubble)만 사용 → 과대포기, 높은 용존산소

### ③ 과도한 포기량에 의한 겨울철 분리막 오염 증대

- 수온저하, 거대기포에 의한 과도한 포기로 인한 슬러지 해체

## 2) 발전된 MBR 기술의 개발 필요

2000년대 이후부터 급속한 보급률 향상을 보이고 있는 MBR 기술은 분리막 기술의 발전 및 각종 비용절감 노력과 연계하여 이미 많은 현장에 적용되어 그 성능을 입증 받고 있는 상황이다. 그러나 우수한 성능에도 불구하고 더욱 강화되는 영양염류의 처리 요구수준 달성과 여전히 상대적으로 높은 에너지 소모율의 문제점은 지속적인 발전이 필요한 과제로 남아 있었다. 이에 기존 MBR 기술의 문제점을 개선한 에너지 절감형 MBR 기술의 개발이 필요하였다.

## 2. e-MBR의 개요

### 2-1. e-MBR 기술개발 목표

- ① 질소 및 인 하수초고도처리 MBR 기술 개발
  - T-N 5mg/L, T-P 0.2mg/L 이하
- ② 송풍량 절감을 통한 에너지 절감형 MBR 기술 개발
  - 기존 MBR 공정 대비 30% 절감
- ③ 분리막 오염 저감 및 유지관리 편의성이 높은 MBR 기술 개발

### 2-2. 기술개발 연혁

e-MBR 기술의 개발 연혁은 <표 3>과 같다.

표 3 기술개발 연혁

개발 단계	2007	2008	2009	2010	2011
카트리지형 모듈 개발					
산·기·관 개발					
신기술 개발 착수					
e-MBR 공정 설계					
Lab-Test 공정 최적화					
Pilot Plant 설치 및 운영					
e-MBR 공정 특허 출원					

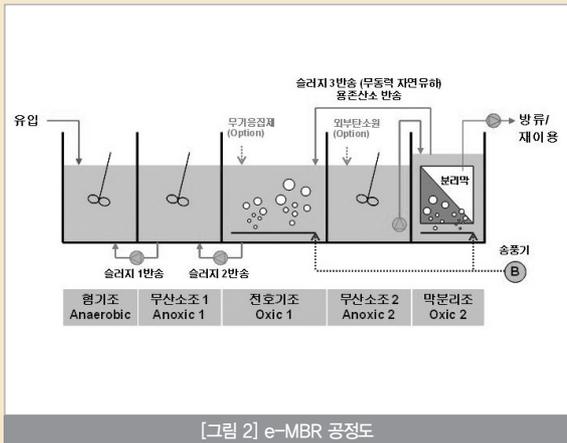
## 3. e-MBR의 공정원리

### 3-1. 질소 및 인 초고도처리가 가능한 공정 구성

e-MBR은 [그림 2]에서와 같이 혐기, 제1무산소, 호기, 제2무산

소, 막분리조 5개의 공정 구성 및 3단 반송라인으로 구성된 기술이다.

- ① 전호기조 용존산소 제어를 통해 별도의 탈기조가 필요 없는 기술
- ② 전호기조-제1무산소조 반송으로 용존산소 영향 최소화 및 2단탈질 공정구성으로 생물학적 질소 제거를 극대화한 기술
- ③ 혐기조 전단 배치로 유기물 이용효율을 높이고, 용존산소 영향을 최소화하여 생물학적 인 제거를 극대화한 기술
- ④ 필요시 응집제 투입을 통하여 인 제거 효율을 더욱 높이면서, 약품비를 절감한 기술(후단 인 처리 설비 불필요)
- ⑤ MBR 중 최초 도입기술 : 탈기조 불필요, 무산소조 → 혐기조 전단 반송, 막분리조 → 전호기조 용존산소 반송, 질소 5mg/L 및 인 0.2mg/L 이하 동시 달성

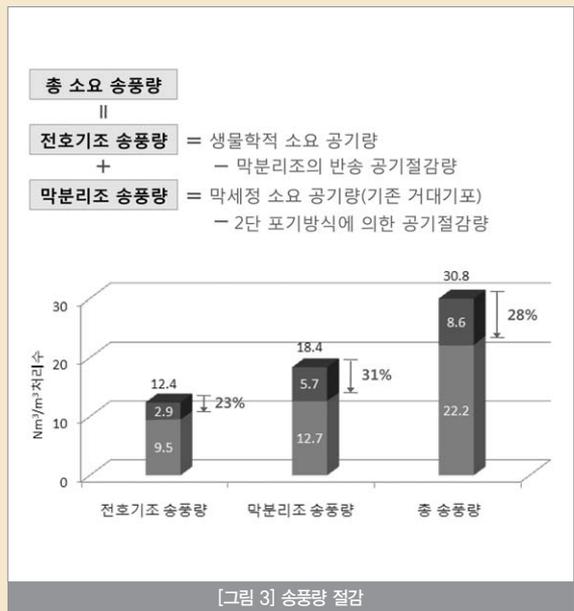


### 3-2. 에너지 절감 기술

e-MBR은 [그림 3]에서와 같이 분리막조에서 전호기조로의 용존산소 반송과 분리막조의 2단포기 방식 적용으로 약 28%의 총 송풍량 절감을 달성한 기술이다.

- ① 자연유하 반송으로 분리막조의 높은 용존산소(4~8mg/L)를 전호기조에 전달, 생물학적 처리에 활용함으로써 전호기조 송풍량의 약 23%를 절감할 수 있었다.
- ② 2단포기(Dual Aeration : Coarse & Fine Bubble 교대포기) 기술을 적용하여, 기존 Coarse Bubble 단일포기보다 분리막 세정 공기량을 약 31% 절감하였다.

또한, 2단포기 산기방식은 거대기포 산기시간을 대폭 줄여 분리막조에서 슬러지 플러의 깨짐 현상이 완화되고, 막오염 진행속도를 늦춤으로써 분리막 여과능을 향상시키는 추가적인 장점을 가지고 있다.



## 4. e-MBR의 우수성

### 4-1. 기술의 성능

유기물, 고형물 및 대장균군은 MBR 공정의 특성상 매우 안정적

표 4 e-MBR 운전 결과

구분	하·추절기(2010.08~11)		
	유입수	처리수	효율(%)
수온(°C)	22.5(16.2~27.9)		
BOD(mg/L)	72.6	1.6	97.5
COD(mg/L)	35.8	6.2	82.3
SS(mg/L)	51.4	0.3	99.5
TN(mg/L)	21.5	4.1	80.5
TP(mg/L)	2.65	0.40	83.8
총대장균군(×100개/mL)	86,529	0.6	99.99

구분	동절기(2010.12~2011.01)		
	유입수	처리수	효율(%)
수온(°C)	13.5(11.4~15.8)		
BOD(mg/L)	112.6	1.8	98.3
COD(mg/L)	42.4	7.0	82.9
SS(mg/L)	82.4	0.3	99.6
TN(mg/L)	29.1	4.1	85.9
TP(mg/L)	3.54	0.13	96.2
총대장균군(×100개/mL)	112,000	2.4	99.99

인 처리효율을 나타내었다.

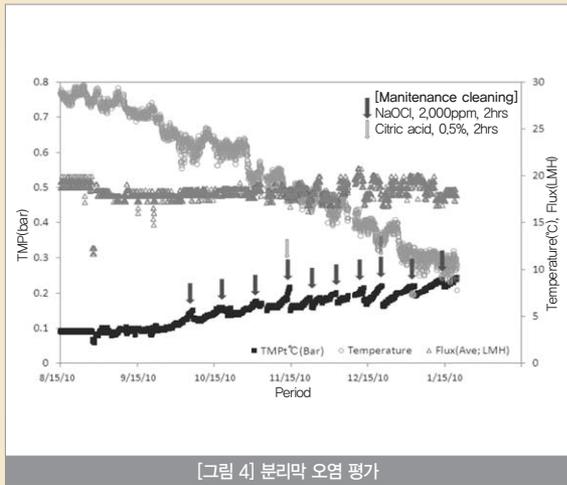
질소 처리의 경우 하·추절기에 외부 탄소원 추가 주입없이 처리수 T-N 약 4.1mg/L, 동절기에는 외부탄소원 주입 후 처리수 T-N 약 4.1mg/L의 달성이 가능하였다.

인 처리의 경우 하·추절기는 응집제 주입없이 처리수 T-P 약 0.4mg/L, 동절기 응집제 주입으로 처리수 T-P 약 0.13mg/L를 나타내었으며, 생물학적 인 제거 기능이 충실히 발휘될 경우, 추가 응집제 주입만으로 0.2mg/L 이하로 인 제거가 가능하였다.

## 4-2. 분리막 성능

### 1) 분리막 오염 평가

[그림 4]는 평가운전 기간 동안 분리막의 Flux와 TMP, 수온변화를 나타낸 것으로, 분리막 Flux는 하·추절기 평균 18.2LMH, 동절기 18.6LMH로 운전되었다. 인 라인 세정을 통한 유지세정을 실시하며 5개월 동안 운전 결과, TMP는 하·추절기 평균 0.14bar, 동절기 평균 0.17bar로 낮게 유지되었다. 그리고 11월 이후로 전단 반응조에 무기응집제를 주입하였으나, 특별한 차압증가 현상은 나타나지 않아 안정적으로 운전되었다.

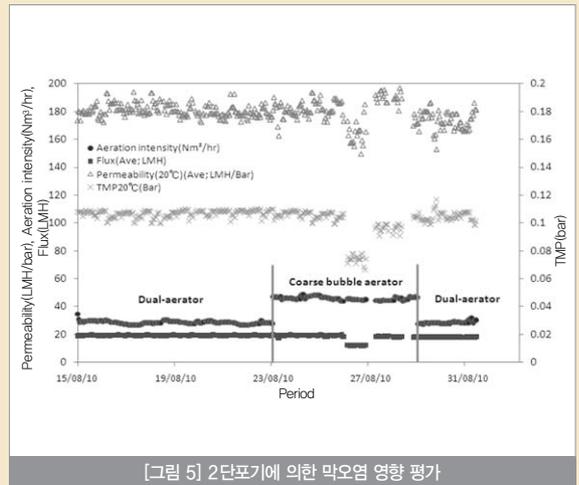


[그림 4] 분리막 오염 평가

### 2) 2단포기에 의한 막오염 영향 평가

[그림 5]는 2단포기 방식과 기존 거대기포 방식을 적용했을 때의 분리막 여과성능을 나타낸 것이다.

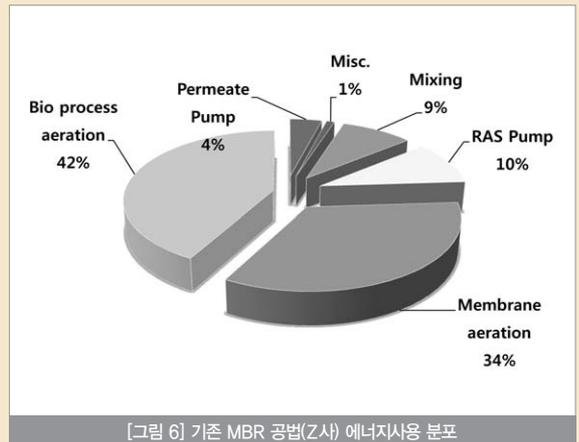
두 방식의 Permeability, TMP 모두 비슷하고, 분리막의 물리세정 효율이 두 방식에서 동일하게 유지됨이 파악되었으며, 기존 거대기포 방식보다 포기 강도가 상대적으로 작음에도 불구하고, 분리막 여과성능 감소없이 세정 공기량을 감소시킬 수 있음이 확인되었다.



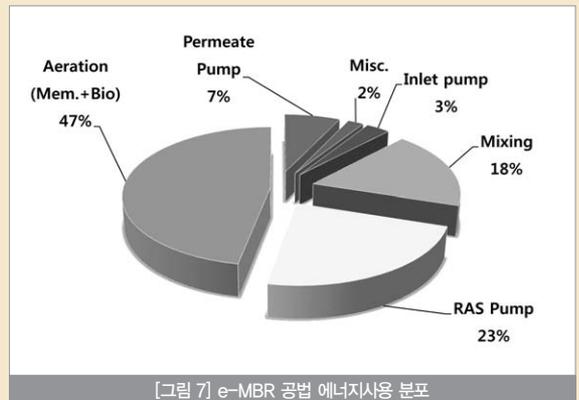
[그림 5] 2단포기에 의한 막오염 영향 평가

## 4-3. 에너지 절감

[그림 6]은 에너지 사용에 따른 경제성을 검토하기 위해 MBR 공정의 단위 시설별 에너지사용 분포를 살펴 본 것이다. 일반적으로 MBR 공정은 송풍에너지가 총 소요에너지의 70% 이상을 차지하



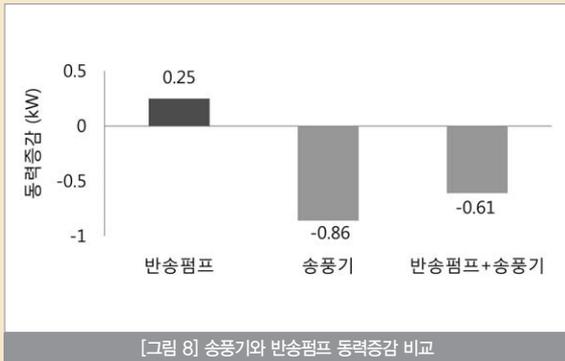
[그림 6] 기존 MBR 공법(Z사) 에너지사용 분포



[그림 7] e-MBR 공법 에너지사용 분포

는 것으로 보고되고 있다. [그림 7]에서 보는 바와 같이 e-MBR에서는 전호기조와 막분리조의 송풍량을 절감하는 방안을 도입하여 송풍을 위한 에너지를 총 사용에너지의 1/2정도로 줄임으로써 전체 공정의 에너지 절감이 가능하였다.

또한, [그림 8]은 본 기술의 특성에 따른 반송라인 1기 추가로 증가된 반송 에너지 증가를 검토한 것으로 송풍기 에너지 절감량이 반송펌프 에너지 증가량보다 훨씬 큰 것으로 나타나, 전체적인 에너지 절감효과가 확인되었다.



#### 4-4. 현장 적용성

비가역 파울링의 원인인 노르말핵산추출물질은 스킴에 축적되는 경향이 높는데, e-MBR은 막분리조에서 전호기조로 자연유하 반송에 의해 막분리조 내의 스킴이 월류 제거됨으로써 막오염을 저감하는 기능이 있다. <표 5>는 국내 MBR 공정이 도입된 D폐수 처리장의 분석자료이다.

표 5 MBR 조별 노르말핵산(n-핵산) 분석

(단위 : mg/L)

구분	유입수	막분리조 슬러지	막분리조 스킴
n-핵산추출물질(광유류)	0.4	6.0	64.0
n-핵산추출물질(동식물류)	11.1	35.0	338.0

## 5. e-MBR 기대효과

### 5-1. 환경적 파급효과

e-MBR에 적용되는 분리막은 제조과정에서 2차 환경오염물질을 배출하지 않는 것으로 특별하다. 또한 재질이 HDPE와 ABS수지이기 때문에 하수처리장에서 수명 주기후 폐기처분할 때에도 재활용이 가능하다. 기존 공법은 생물학적으로 처리할 수 있는 효율

의 한계점까지 도달하였기 때문에 e-MBR은 배출 부하량 최소로 4대강 수자원보호와 부영양화 최소화 및 물순환체계 확립에 일조할 것이다.

### 5-2. 기술적 파급효과

e-MBR은 질소 및 인 초고도처리로 대체 수자원 확보가 가능하게 하여 4대강 상류 수질보호에 사용될 것으로 예상된다. 또한 송풍량 절감 및 막오염 저감으로 유지관리성 증대에 기대를 하고 있다.

### 5-3. 경제적 파급효과

국산제품을 사용함으로써 분리막 수입대체 효과와 국내에서 실적 확보후 수출증대까지 기대할 수 있다. 하수재이용 촉진에 따라 하수를 재이용함으로써 물사용 비용 절감이 예상된다.

결론적으로, 기존 KSMBR의 경우 국내 하폐수 처리장 160개소 이상, 누적용량 약 40만 톤/일의 적용 실적을 보이고 있으며, 이를 바탕으로 e-MBR은 질소 및 인 초고도처리가 가능하여 국내 재이용시장 및 해외시장을 위한 수출주도형 기술로 활용되길 기대하고 있다. S