

수처리

<KEITI 중국사무소 차목승 연구원>

합성 제약(合成制药)폐수 처리기술 소개

▶ 개요

현재, 중국의 합성 제약 폐수 오염 문제는 상당히 심각하며, 이를 해결하기 위해 ABR(Anaerobic Baffled Reactor, 厌氧折流板反应器)¹⁾-SBR(Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process, 序批式活性污泥法)²⁾ 결합 반응기를 사용하여 폐수 처리에 대한 실험을 하였다. 그 결과, 폐수 처리 최적 체류시간이 ABR 반응기에서 9시간, SBR 반응기에서 12시간 일때, COD(chemical oxygen demand, 화학적 산소요구량)제거율이 가장 높게 나타났다. 또한 슬러지 배양기(Fermenter, 培养期)³⁾의 COD제거율이 약 95%로 비교적 높았으며, 슬러지 배양도 잘 이루어진 것을 확인 할 수 있었다. 특히, 합성 제약 폐수 투입(25%)후 슬러지의 평균 COD농도는 711.1mg/ℓ에서 57.4mg/ℓ으로 크게 감소하였으며, 평균 제거율이 약 92.2%에 다달았다. 즉, 유출수의 COD농도가 <화학 합성류 제약공업 수오염물질 배출표준(化学合成类制药工业水污染物排放标准)>(GB21904-2008) 요구 사항에 부합하는 것을 동 실험으로 확인 할 수 있었다.

제약공업에서 발생하는 합성 제약 폐수는 수질성분이 복잡하고 COD농도가 높게 나타나기 때문에 호기성 공법(好氧工艺)으로 직접 처리하기 힘든 상황이다. 하지만 ABR의 경우, 단순한 구조, 설비 부하용량, 슬러지 연령(sludge age, 泥龄)⁴⁾, 고액(固液)분리 효과, 우수한 미생물 배양 등의 장점을 바탕으로 처리가 가능하다. 특히 ABR은 합성 제약 폐수를 선처리하는 과정에서, 반응기의 호기성 분해 작업을 진행하기 때문에 처리효과가 높은 것으로 나타났다. 따라서 본 기술동향은 ABR-SBR 결합 반응기를 통해 합성 제약 폐수를 처리하기 위한 최적 운영조건을 분석한 내용을 수록하였다.

▶ 실험요소

1) (폐수수질) 장춘시(长春市)의 어느 합성 제약 공장에서 발생한 폐수를 채취하였고, 그 결과 수질은 pH값 7, COD 2,000mg/ℓ, 색상은 황색이었다.

1) ABR(Anaerobic Baffled Reactor, 厌氧折流板反应器) : 비중이 조절된 유동상 담체를 이용한 고도처리기술로 생활오수처리, 중수처리, 축산폐수 처리, 산업폐수 등 다양하게 적용된다. 미국 스탠퍼드대이 맥카티(Mc Carty)가 1982년 각종 2세대 혐기성 반응기 처리 공정의 특징과 성능을 결합하여 개발 하였다. 이는 고효율 신규 혐기성 오수바이오테크놀로지이다. (바이두 등 내용 요약정리, 2020.7.31.)

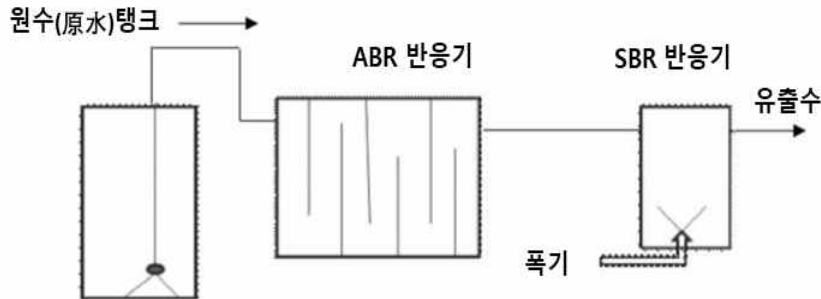
2) SBR(Sequencing Batch Reactor Activated Sludge Process, 序批式活性污泥法) : 일차식 활성 슬러지법으로 간헐 폭기 방식에 따라 운영 되는 활성 슬러지 오수처리기술이다. 주요 특징은 SBR반응조를 바탕으로 초기침전, 생물분해, 2차침전 등으로 구성되어 있으며, 슬러지의 환류 시스템은 없다. 특히 간헐 배출과 유량변화가 심한 경우에 적용된다. (바이두 백과 등 내용 요약정리, 2020.7.31.)

3) 배양기(Fermenter, 培养期) : 배양기는 세균, 미생물 혹은 세포를 인공적으로 증식시키기 위해 만들어진 영양원(배지medium 라고도 불림) 혹은 배양장치(cultivation apparatus)를 가리키는 용어이다. 여기서는 배양기는 배양장치를 일컬으며, 특별히 배양장치의 경우에는 발효조(fermenter)라고도 불린다. (네이버 지식백과 발취, 2020.7.31.)

4) 슬러지 연령(sludge age, 泥龄) : 최종 침전지에서 분리된 고형물의 일부는 폐기되고, 일부는 반송되어 슬러지는 포기시간보다 긴 시간동안 포기 내에 체류하는 시간이다. 그 값은 포기조 내 MLSS(혼합액 현탁고형물)량을 유입수 내의 SS(부유물질, 입자 지름이 2mm 이하로 물에 용해되지 않는 물질)량으로 나눈 값으로 나타낸다. 고형물 체류시간(SRT, solids retention time)은 포기조 내의 미생물의 평균 체류시간으로 슬러지 연령과 동일한 의미하며, 통상 유출수의 SS농도 값은 대단히 적으므로 무시할 수 있다. (네이버 지식백과 발취, 2020.7.31.)

2) (공정과정) 혐기성-호기성 순으로 진행되며, 공정도는 그림1과 같다. 구체적으로 혐기성 공정은 안정적이며 충격에 강한 ABR 반응기를 선적용하고, 호기성 공정은 고효율적인 간헐식(間歇式)⁵⁾ 폭기 반응기 SBR을 사용한다. [그림1. 참고]

<그림1. ABR-SBR 결합 반응기 공정도>



<자료 출처 : 북극성수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

3) (설비규격) ABR, SBR 반응기 모두 스테인리스 재질이고, ABR 반응기는 400X450X600mm(길이X폭X높이)로 6개의 반응실로 구성되어 있으며, 각 반응실에는 상류실(上流室)과 하류실(下流室)이 포함되어 있다. 상류실로 들어갈 때, 약 50°의 경사진 판이 있어 폐수가 균일하게 흐를 수 있고, 그 용량은 24L이다. 이때, 반응을 통해 발생하는 기체는 반응기의 상단부로 배출된다. 또한 SBR 반응기의 규격은 300X240X250mm(길이X폭X높이)이고, 용량이 18L로 ABR 반응기와 6L의 차이가 있다.

4) (실험방법) 슬러지 배양, 최적 운영조건, 슬러지 순화(Domestication of sludge, 汚泥馴化)⁶⁾ 등으로 나누어 실험하였다.

① (슬러지 배양) 실험에 사용한 슬러지는 오수처리장의 폭기조에서 채취하기 때문에 ABR-SBR 결합 반응기가 작동하기 전에 슬러지를 배양해야 했다. 슬러지를 배양할 때 유입수의 조건은 pH값 5.4, COD농도 350mg/ℓ이었다.

② (최적 운영조건) 슬러지 배양 완료 후 ABR-SBR 결합 반응기의 운전조건(ABR 반응기의 폐수 체류시간, SBR 반응기의 폭기 반응시간)을 변경할 수 있으며, 반응기가 합성 제약 폐수를 처리하기 위한 최적 조건은 ABR 반응기에서 폐수 체류시간 9시간, SBR 반응기 폭기 반응 12시간이다.

③ (슬러지 순화) 본 실험은 합성 제약 폐수를 대상으로 하여, 이와 관련된 전용 세균과 영양 물질이 충분하지 않다. 따라서 미생물을 투여할 때, 일반적인 균종과 더불어 필요한 영양물질이 필요하게 되는데, 이때 활성 슬러지의 미생물들은 특정 공업 폐수에서 대사(代謝)하는 효소체계를 구축하게 된다. 슬러지 순화는 최적의 운전조건에서 반응되며, 순화된 유입수는 생활오수와 합성 제약 폐수의 혼합액으로 구성된다. 초기 합성 제약 폐수 25%와 생활오수 75%의 비율에서, COD농도는 750mg/ℓ이다. 그 결과 ABR-SBR 결합 반응기의 COD제거율이 안정화된 후 점차 합성 제약 폐수와 생활오수의 비율 증가를 통해 처리효율을 높일 수 있었다

5) 간헐식(間歇式) : 얼마 동안의 시간 간격을 두고 되풀이하여 일어났다 쉬었다 하는 방식이다.(네이버 국어사전 발췌, 2020.8.3.)

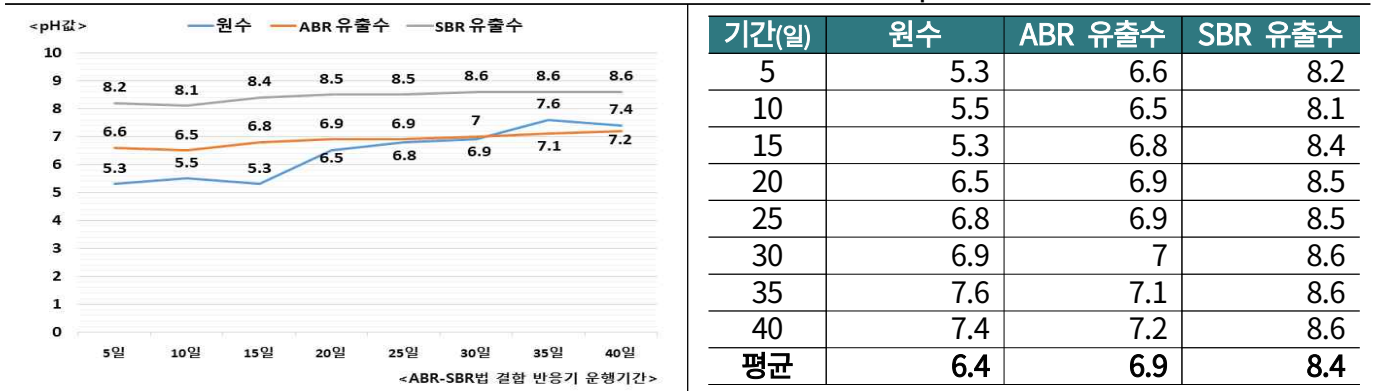
6) 슬러지 순화(Domestication of sludge, 汚泥馴化) : 이미 배양된 생활오수의 활성 슬러지를 특정 산업용 폐수처리 능력을 보유한 슬러지로 바꾸는 과정이다. 슬러지 순화방법은 혼합액에서 공업폐수의 비율을 점차 증가시켜 특정 폐수에 대한 최대작업량에 이르도록 한다.(바이두 백과 발췌, 2020.8.3.)

▶ 실험결과

1) (pH값 변화) ABR, SBR은 모두 미생물의 합성대사와 분해대사를 이용하여 오염물질을 처리하기 때문에 반응기에서 미생물은 ABR-SBR 결합 공법의 핵심이다. 모든 미생물은 일정한 pH값의 범위를 가고, 적정 pH값이 되면 효소활동이 가장 높게 나타난다. pH값 외 영양물질 등 다른 조건들에 의해 미생물의 성장률도 증가하게 되는데, pH값에 따라 미생물은 계속 성장하나 최저·최고 pH값의 범위를 벗어나면 미생물을 죽게 된다. 따라서 단계별 pH값의 변화를 모니터링 하는 것이 가장 중요하며, pH값의 안정화는 설비의 정상운행을 위한 주요 요소 중 하나이다.

<표1>에 따르면, 원수(原水, 자연 그대로의 물)에서 ABR 통한 유출수의 pH값은 변화하는 것을 확인할 수 있었다(pH값 범위는 혼압액 투입량에 따라 상이함). 합성 제약 폐수를 투입한 후 혐기성 가수분해로 인해 ABR 유출수 평균 pH값은 6.9로, 동기간(합성 제약 폐수 투입 前)의 ABR 유입수 pH값 대비 감소한 것을 확인할 수 있었다. 또한 SBR의 유출수 pH값 평균은 8.6로 ABR의 유입수 pH값의 높아지는 결과에 따라 소폭 상승한 것으로 나타났다. 전체적으로 볼 때, pH값은 비교적 안정적이기 때문에 이는 미생물 번식과 대사에 최적 환경을 제공하는 것을 알 수 있었다. 결과적으로 동 모니터링을 통해 미생물의 일정한 성장과 ABR-SBR을 결합한 공정은 안정적으로 운행되는 결과를 확인 할 수 있었다. [표1. 참고]

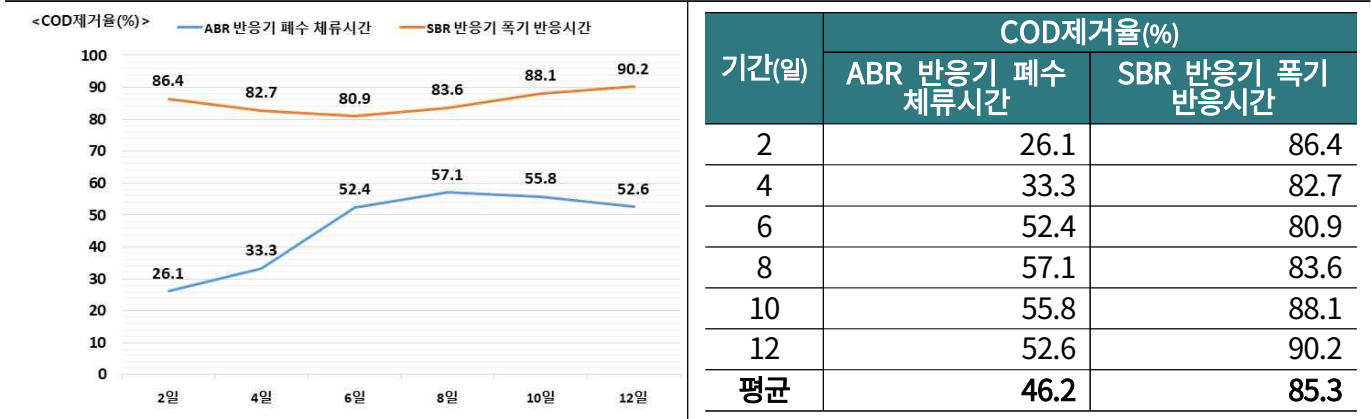
<표1. ABR-SBR 결합 공정 운행기간에 따른 pH값 변화>



<자료 출처 : 북극성수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

2) (최적의 체류시간) 슬러지 배양기(培養期)에서 <표2>를 보면 알 수 있듯이 ABR의 COD 제거율은 폐수의 반응기 체류시간 정도에 따라 상이 했으며, 평균 제거율은 46.20이다. 이때, COD제거율이 최고일 때, 체류시간이 9시간으로, 이는 ABR에서 합성 제약 폐수를 처리하기 위한 최적의 체류시간을 의미한다. 체류시간이 짧으면 유기물질에 대한 부하(有機負荷)가 높아 제거율이 낮아지고, 처리효과도 감소하는 것으로 나타났다. [p.4, 표.2 참고]

<표2. 폐수 체류시간 및 폭기 반응시간에 따른 COD제거율>



<자료 출처 : 북극성수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

3) (폭기 반응시간) 슬러지 배양기에서 폭기시간에 따른 COD제거율은 <표2>와 같다. 폭기 반응시간은 SBR 반응기 용량을 결정하기 위한 중요한 매개변수이다. 가령, 폭기 반응시간이 너무 짧을 경우, 시스템에서 산소공급이 부족하여 미생물이 유기물을 충분히 분해할 수 없고 유출수 수질에 영향을 미친다. 반대로, 폭기 반응시간이 너무 길면, 폐수 속에 있는 유기물을 지나치게 소모하게 된다. 이로 인해 질소제거(反硝化) 효과에 영향을 미치며, 슬러지 팽창으로 인한 에너지소모, 운영비 상승 등 문제가 발생하기 때문에 최적 폭기 반응시간을 고려 해야 한다. [표.2 참고]

4) (25% 합성 제약 폐수 투입 후 슬러지 순화) 오염농도가 최고인 고농도 합성 제약 폐수 투입 후 채취하였으며, COD는 780mg/ℓ로 나타났다. 하지만 ABR-SBR 결합 반응기를 통과하면서 유출수의 COD농도는 ABR 반응기 420mg/ℓ, SBR 반응기 34mg/ℓ로 감소하였다. 이는 수질이 안정적으로 배출되며, <화학 합성류 제약공업 수오염물질 배출표준(化学合成类制药工业水污染物排放标准)>(GB21904-2008)에 규정된 COD배출농도(120mg/ℓ)에 부합하는 것으로 확인하였다.

혼합액 순화의 초기 단계에서 ABR 반응기의 COD제거율은 약 35%이며, 기존 50%(슬러지 배양 후) 대비 15% 감소하였다. 이는 합성 제약 폐수 투입으로, 혐기성 미생물의 기존 성장환경이 변화되고, 폐수의 유기물 및 미생물에 유독작용 물질 증가로 인한 단기활성 저하로 COD제거율이 감소한 것으로 나타났다. 하지만 일정시간이 지난 후, 미생물은 점차 새로운 환경에 적응하면서 합성 제약 폐수에 대한 정화능력을 회복하여 COD제거율은 40%까지 증가하게 되었다.

반면, SBR 반응기는 안정적 운영으로 평균 COD제거율은 89.68%로 나타나며, 특히 후반(약 12일 이후부터)에는 90% 이상 제거율을 보였다. 또한 ABR 반응기 유출수의 COD농도가 증가하여도 SBR 반응기 후 유출수의 COD농도는 영향을 받지 않고 비교적 낮게 나타났으며, 이는 SBR 반응기의 우수한 저항력으로 인해 높은 제거율을 나타내고 있었다. [p.5, 표3 참고]

<표3. 25% 합성 제약 폐수 투여 후 COD농도 및 제거율>

기간(일)	COD농도(mg/l)			COD제거율(%)		
	원수	ABR 유출수	SBR 유출수	ABR	SBR	총
1	698	471	84	32.5	83.1	89.1
2	722	457	72	36.7	85.6	90.2
3	737	491	70	33.4	86.7	90.5
4	761	443	67	41.8	87.2	91.2
5	731	476	69	34.9	87.2	90.6
6	812	450	53	44.6	88.1	93.5
7	729	446	46	38.8	89.9	93.7
8	754	439	51	41.8	88.2	93.2
9	607	417	48	31.3	88.4	92.1
10	658	404	38	38.6	90.3	94.2
11	793	401	42	49.4	88.6	94.7
12	689	408	39	40.8	90.1	94.3
13	695	409	39	41.2	90.1	94.4
14	663	414	71	37.6	85.4	89.3

<자료 출처 : 북극성수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

5) (50% 합성 제약 폐수 투여 후 슬러지 순화) 합성 제약을 투여한 폐수비율이 높아지면서 원수의 COD농도는 최고 1,380mg/l까지 증가하였다. 하지만 이때 SBR 반응기 유출수 COD농도는 74mg/l로 비교적 낮은 수준을 유지하였다. ABR 반응기 유출수의 COD는 상승 곡선을 그리며, 최초 427mg/l에서 최대 912mg/l까지 상승하고, 반응기의 운영은 매우 불안정한 것을 확인할 수 있다. 50% 합성 제약 폐수 혼합액을 사용하여 슬러지를 순화(馴化) 하였을 때, ABR 반응기에서 COD제거율은 35.1%의 제거율을 보이며 급격하게 하락하였다. 이 단계에서는 합성 제약 폐수 농도가 크게 높아져 살균성이 더욱 좋아졌다. 일부 미생물이 고농도의 제약 폐수에 의해 비(非)활성화 되어 ABR 반응기에서 처리효과가 높지 않은 것으로 나타났지만, SBR 반응기는 제거율이 최고 96.7%까지 상승해 안정적 운영이 가능하였다.[표.4 참고]

<표4. 50% 합성 제약 폐수 투여 후 COD농도 및 제거율>

기간(일)	COD농도(mg/l)			COD제거율(%)		
	원수	ABR 유출수	SBR 유출수	ABR	SBR	총
1	1,321	427	43	67.8	90.9	96.7
2	1,446	548	47	62.1	90.1	96.7
3	1,388	591	49	57.4	89.2	96.5
4	1,396	813	54	51.8	90.6	96.1
5	1,405	899	47	36	92.4	96.7
6	1,399	912	56	33.8	91.2	94
7	1,387	908	61	34.5	90.4	95.6
8	1,373	891	59	35.1	90.6	95.7

<자료 출처 : 북극성수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

6) (ABR-SBR 결합 반응기 운영결과) 슬러지 배양기간은 총 60일이며, 유입수의 COD농도 300~450mg/ℓ으로 제한하였고, 유량 2~8ℓ/h(시간), 3일에 한 번, 실험측정 총 6회이며 그 결과 값은 다음과 같다. <표5>의 데이터를 보면, 총 제거율(ABR 유입수의 COD농도와 SBR 유출수의 COD농도 차이)이 최종적으로 약 95%로 유출수의 수질을 안정적으로 보장하는 것으로 나타났다.

<표5. ABR-SBR 결합 반응기 운영결과>

체류시간(h)	폭기 반응시간	COD농도(mg/ℓ)			COD제거율(%)		
		원수	ABR 유출수	SBR 유출수	ABR	SBR	총
3	3	329	190	31	42.3	83.8	90.6
4	4	311	190	39	38.1	79.4	87.5
5	5	328	166	23	49.4	87.9	93.9
6	6	328	163	40	50.4	75.7	87.9
9	9	392	164	18	58.2	89.1	95.4
10	10	409	186	16	54.5	91.2	96.9
12	12	421	185	18	56.1	90.3	95.7

<자료 출처 : 북극성수처리망 자료 KEITI 중국사무소 재구성, 2020>

▶ 시사점

본 기술동향은 합성 제약 폐수의 수질 특성을 분석하여 ABR-SBR 결합 반응기를 통해 폐수를 처리하였고 동 실험에서 ABR 반응기와 SBR 반응기의 가동기(启动期)와 순화기(驯化期)의 특성을 고려하여, 합성 제약 폐수에서 발생하는 COD 분해를 통해 최적의 운영 매개변수를 다음과 같이 분석하였다.

- 1) (최적조건) ABR 반응기의 폐수 체류시간 9시간, SBR 반응기 폭기 반응시간 12시간일 때, ABR-SBR 결합 공정은 합성 제약 폐수를 효과적으로 처리하면서 국가환경표준인 <화학 합성류 제약공업 수오염물질 배출표준(化学合成类制药工业水污染物排放标准)>(GB21904-2008)에 규정된 COD 배출농도에 부합하는 것을 확인하였다.
- 2) (최적온도) 34~36°C에서 유입수의 COD농도 320mg/ℓ일 때, COD제거율은 ABR 반응기 55~60.4%로 나타났다.
- 3) (ABR 반응기 內 체류시간) ABR 반응기 체류시간은 3, 4, 5, 6, 9, 10, 12시간으로 분류하였을 때, ABR 반응기에서 최적의 체류시간은 9시간으로 이때, COD제거율은 61.9%로 나타났다.
- 4) (슬러지 순화) ABR 반응기에서 체류시간이 9시간일 때, 슬러지 순화가 발생한다. 순화 초기 단계에서 생활오수와 합성 제약 폐수의 비율은 3:1로 진행하며, 이 혼합액을 통해 COD 제거율은 최저 32%이지만, 15일간 미생물 배양 후 COD제거율은 46%로 증가하였다. 이는 합성 제약 폐수에 있는 일부 약품 성분이 성장을 억제하고 있어 미생물 활성화에 영향을 미쳤다.
- 5) (SBR 반응기) 가동기에서 유입수의 COD농도는 140~220mg/ℓ이며, 제거율은 90% 이상으로 안정적으로 유출수의 수질을 보장하였다. 또한 슬러지의 순화기에 따라 COD제거율은 최대 96.9%까지 상승한 것을 확인할 수 있다.

북극성수처리망, <http://huanbao.bjx.com.cn/news/20200727/1092170.shtml>, 2020.8.4.접속



중국환경산업 주간기술동향

발행

2020년 8월 4일 KEITI 중국사무소

기획총괄

▶ 박재현 소장(korea@keiti.re.kr)

주저자

▷ 차목승(cms0522@keiti.re.kr)

자료제작

▷ 김종균(jaykim@keiti.re.kr)

국민과 함께
미래를 여는
글로벌 환경전문기관

중국환경산업 주간기술동향은 매주 화요일 발행됩니다.

문의 : +86-10-8591-0997~8