

연구결과보고서

2017년도 연구개발사업에 따라 연구중인 음식물류폐기물의 건조 공정에서 발생하는 응축수의 재이용 기술 개발에 관한 연구의 최종 보고서를 붙임과 같이 제출 합니다.

붙임 : 최종보고서 30부. 끝.

연구기관 : 동우바이오 주식회사

연구책임자 : 권기욱



연구기관장 : 이대현



안산녹색환경지원센터장 귀하

제 출 문

안산녹색환경지원센터장 귀하

본 보고서를 “음식물류폐기물의 건조공정에서 발생하는 응축수의 재이용 기술 개발”에 관한 최종보고서로 제출합니다.

연구기관명 : 동우바이오 주식회사

주관연구책임자 : 권기욱 박사 (동우바이오 기술연구소)

위탁연구책임자 : 최봉호 박사 (한양대학교 건설환경공학과)

연구원 : 박준민, 이원배, 김민경, 박철, 장경석, 고음미

위탁연구기관명 : 한양대학교 산학협력단

음식물류폐기물의 건조공정에서
발생되는 응축수의 재이용 기술 개발

권 기 옥

안산녹색환경지원센터

요 약 문

I. 연구개요

- 최근 경기도권 내의 민간 처리업체들도 퇴비화 과정에서 발생하는 악취로 인한 민원과 퇴비 수요가 점차 줄어들어 규모가 큰 업체들부터 건식사료화 공정으로 전환하고 있는 추세이다.
- 건식사료화 공정은 고비용의 연료가 소모되며 건조과정에서 발생하는 응축수로 인해 폐수 위탁처리량이 기존에 비해 약 2배로 증가하여 처리에 어려움을 겪고 있다.

II. 연구의 필요성 및 목적

- 음식물류폐기물 건조공정에서 발생하는 응축수는 생분해도가 높은 유기물로 구성되어 있어 외부탄소원으로서 가치가 높긴 하지만, 유기물의 농도가 메탄올에 비해 낮고, 폐기물이라는 인식이 지배적이어서 하폐수처리장을 운영하는 곳에서는 응축수를 구매하려하기 보다는 비용을 받고 처리해주려 하는 것이 현실이다. 따라서 외부탄소원으로서의 가치를 높이기 위해서는 응축수로부터 유기물을 최대한 추출하여 농축시키는 것이 필요하다.
- 응축수로부터 유기탄소원 추출/농축하여 이를 하수종말처리장에 외부탄소원으로 공급하고 유기탄소원을 추출한 응축수는 재처리 후 냉각탑의 보충수로 재이용하는 방안에 대해 연구하고자 한다.

III. 연구의 내용 및 범위

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용
1차년도 (2017.4 ~ 2017.12)	<ul style="list-style-type: none"> • 응축수의 유기탄소원 추출용 파일럿 플랜트 설계 • 응축수의 유기탄소원 최적 추출조건 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 응축수 발생 현황 및 수질 정밀 분석 • 폐열을 활용한 건조 에너지 공급 방안 연구 • 폐열을 최적으로 활용 가능한 파일럿 플랜트 설계 • Lab test를 통한 유기탄소원 최적 추출 조건 도출 • 추출된 유기탄소원의 수질 분석 • 유기탄소원 추출 후 응축수의 수질분석
2차년도 (2018.1 ~ 2018.12)	<ul style="list-style-type: none"> • 응축수 유기탄소원 추출용 파일럿 플랜트 최적운전조건 도출 및 경제성 평가 • 추출 외부탄소원의 활용 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 파일럿 플랜트 제작 및 최적 운전조건 도출추출 유기물의 외부탄소원 활용 가능성 검토 : 탈질, BMP test 등 • 처리 공정의 경제성 평가 • 냉각탑 보급수로 재이용하기 위한 추가 수처리 필요성 검토 및 제시 • 사업화 방안 마련 및 추진 • 제조된 유기탄소원의 성능평가 및 최적화

IV. 연구결과

<발생특성>

- 음폐수는 겨울철에 발생량이 가장 낮았으며 봄, 여름으로 갈수록 음폐수의 발생량이 증가되는 것으로 나타났다. 원물에 함유되어 있는 음폐수의 비율 또한 유사한 경향을 나타냈다.
- 응축수의 경우 발생량은 슬러지 케익의 증감에 관계없이 대체로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 원물의 탈수 후 발생하는 슬러지 케익은 평균 함수율이 약 80%로 건조공정으로 이송된다.
- 주말(토, 일)에는 음폐물의 수거를 하지 않기 때문에 월요일에 토, 일의 물량이 한꺼번에 반입됨에 따라 처리량 또한 급격히 증가되었다가 다시 감소하는 형태가 약 4~5일 간격으로 유지되었다. 음폐수와 응축수의 발생량 또한 유사한 발생특성을 나타냈다.

<수질분석>

- 응축수는 음폐수와 달리 유기물의 농도가 매우 높은 반면에 질소, 인, 고형물, 유분의 농도가 매우 낮은 특성을 가지고 있다. 또한 여름철에는 온도가 높아짐에 따라 수거과정에서 산발효 및 알코올발효가 일어나고 건조과정에서 유기산과 알코올이 휘발되어 유기물의 농도가 다른 계절에 비해 높아지는 특징이 있다.

- 중금속의 경우 ‘가’지역의 배출허용기준과 비교하였다. 모든 항목에서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

<분별증류 및 진공증발농축법을 이용한 최적 추출조건 탐색>

- 분별증류법으로 실페수와 합성폐수를 대상으로 110℃에서 추출실험을 실시한 결과 끓는점의 차이에 따라 에탄올과 물이 동시에 추출되었으며 유기산의 추출량은 미량이었다. 잔류물에는 증류되지 않은 유기산이 잔류하였고 물이 증발됨에 따라 잔존 유기산은 점차 농축되었다.
- 진공증발농축법으로 -500 mmHg, -600 mmHg의 감압조건과 70℃, 80℃ 온도에서 각각 유기탄소원 최적 추출 조건을 확인하였다. -600 mmHg, 80℃에서 유기물의 농도가 가장 높았으며 추출시간 또한 가장 짧았다. 따라서 파일럿 플랜트 설계시 이를 최적 추출 조건으로 설정하여 설계하였다.

<추출물 및 잔류물 성상분석>

- 추출물은 투입 원수대비 약 10%의 추출 조건에서 COD가 약 150,000 mg/L 이상의 유기탄소원을 추출할 수 있었고, BOD는 COD의 95%이상으로 나타나 추출된 유기탄소원의 대부분은 생분해가 매우 용이한 성분인 것으로 조사되었다. 본 연구에서 설정한 유기탄소원 농도 목표치(50,000 mgCOD/L)를 약 3배 초과 달성하였다.
- 잔류물을 냉각수로 활용하기 위해 냉각수 수질기준의 기준항목과 비교결과 pH를 제외하고 스케일 유발물질, 부식물질은 기준치 이하로 나타났다. pH는 생물학적 처리 전에 중화를 해야 하므로 기준 달성이 가능하다.

<잔류물의 수처리 공정 및 추출물의 활용>

- 잔류물은 수처리 후 냉각수로 재활용하기 위해 혐기소화와 호기성처리를 조합한 수처리 공정으로 제시하였다. 혐기성은 UASB 또는 EGSB 공법과 호기성은 일반활성슬러지법의 조합이 적합할 것으로 제시하였다.
- 안산시 반월공단 내 도금공장폐수와 염색공장 폐수의 수질을 분석하여 C/N비를 조사한 결과 도금폐수의 경우 외부탄소원이 필요할 것으로 나타났다.

<파일럿 플랜트 설계>

- 파일럿 플랜트의 일처리 용량은 1 m³으로 설계하였으며 2개의 진공증발농축 탱크로 구성하여 회분식으로 운전하되 연속운전 되도록 하였다.
- 진공증발농축 탱크로 유입하기 전 굴뚝의 폐열과 잔류물의 열교환을 통해 50℃의 잔류물을 70℃이상으로 예열 후 진공증발농축기로 투입되도록 설계하였다.

V. 연구결과의 활용계획

- 폐기물로만 여겨졌던 응축수를 바이오매스 자원으로 재활용함으로써, 수거, 운반, 및 처리 시 발생하는 지역 환경현안 문제 감소와 더불어 유기산 생산을 통한 유기탄소원으로 사용에 따른 경제적 이익 창출
- 기존 음폐수를 부가가치가 높은 원료로 판매가능하게 하여 기업 경쟁력 제고
- 일반 산업체의 처리장에 저가의 유기탄소원을 공급하여 폐수처리장 운전비 절감
- 공공시설인 안산시 하수처리장과 민간 폐수처리시설의 연계를 통한 음폐수 유기탄소원 적용성 검증을 통해 기타 단위 발생사업소(타 지역 공공하수처리장, 대단위 민간폐수처리장)로의 확대적용 가능
- 기존 혐기성 소화로 국한되어 처리되던 응축수에 대해 다양한 유기탄소원으로 활용을 통해 새로운 시장 개척

목 차

제 1 장 서 론	2
1. 연구의 필요성	2
2. 연구개발 목표 및 내용.....	5
1.1 연구개발 목표.....	5
1.2 연구개발 내용.....	5
제 2 장 연구 추진전략 및 방법	7
1. 연구 추진전략.....	7
2. 연구 추진방법.....	8
2.1 1차년도.....	8
2.2 2차년도.....	9
제 3 장 연구 수행 내용	13
1. 주관기관의 음식물류폐기물 처리 현황.....	13
1.1 처리 공정.....	13
1.2 물질수지.....	16
1.3 계절별(월별) 발생량 변화.....	18
1.3.1 음폐수 발생량 변화.....	18
1.3.2 응축수 발생량 변화.....	19
1.4 일별 발생량 변화.....	19
1.4.1 음폐수 발생량 변화.....	19
1.4.2 응축수 발생량 변화.....	20
2. 건조응축수 수질분석.....	21
2.1 기본 수질항목.....	21
2.2 중금속 및 미량원소.....	22
3. 유기탄소원 최적 추출조건.....	23

3.1 연구개요	23
3.2 유기물질 추출 전략	23
3.3 연구 방법	24
3.3.1 분별증류 반응기를 이용한 연구	24
3.3.2 진공증발농축기를 이용한 연구	27
3.3.3 분석 방법	29
3.4 연구 결과	30
3.4.1 분별증류 반응기를 이용한 유기탄소원 추출	30
3.4.2 감압증발농축 방법을 이용한 유기탄소원 추출	42
4. 유기탄소원(추출물) 및 잔류물의 성상	46
4.1 추출물과 잔류물의 성상	46
4.1.1 추출물(유기탄소원) 성상	46
4.1.2 잔류물의 성상	47
5. 잔류물 및 유기탄소원의 이용 방안	48
5.1 잔류물을 냉각수로 재활용하기 위한 수처리 방법	48
5.1.1 혐기성 분해 가능성 검토(BMP test)	48
5.1.2 냉각수로 재이용하기 위한 처리 공정	50
5.1.3 안산시 반월공단 내 사업장에 유기탄소원의 적용성 검토	52
6. 파일럿 플랜트 설계	53
제 4 장 결 론	56

<표 목차>

<표 2-1> 냉각탑 보급수의 수질기준(참고자료: KS표준, KSI3003).....	9
<표 3-1> 응축수의 기본 수질항목	21
<표 3-2> 응축수의 중금속 분석결과.....	22
<표 3-3> 분별증류 실험조건.....	25
<표 3-4> 합성폐수 및 응축수 수질 특성.....	26
<표 3-5> 분석 항목 및 방법.....	26
<표 3-6> 실험 시작 전 응축수와 실험 종료 후 잔류물의 성상.....	30
<표 3-7> 실험시작 전 합성폐수 원수와 실험 종료 후 잔류물의 성상.....	34
<표 3-8> 실험시작 전 합성폐수 원수와 실험 종료 후 잔류물의 성상.....	38
<표 3-9> 실험시작 전 합성폐수 원수와 실험 종료 후 잔류물의 성상.....	41
<표 3-10> 추출물 수질 비교.....	46
<표 3-11> 잔류물 수질 비교.....	47
<표 3-12> 분해가능 COD 및 메탄가스 발생 수율 비교	49
<표 3-13> 수처리 경제성 비교 (100 m ³ /일 처리규모).....	50
<표 3-14> 도금폐수와 염색폐수 수질분석 결과	52

<그림 목차>

<그림 1-1> 전국 지역별 처리시설 현황	2
<그림 1-2> 음식물류폐기물 처리방법별 현황	3
<그림 2-1> 기관별 기술 연계도	7
<그림 2-2> 증발농축 반응기 설계 예시	8
<그림 2-3> Pilot plant 운전 예시	10
<그림 2-4> 동우바이오(주) Pilot plant 설치예정 부지	10
<그림 2-5> BMP test 방법 예시	11
<그림 3-1> 처리 공정도	13
<그림 3-2> 전처리 시설 모습	14
<그림 3-3> 건조 시설 모습	15
<그림 3-4> 막여과 시설 모습	15
<그림 3-5> 공정 물질수지	17
<그림 3-6> 월별 음폐수 발생량 변화	18
<그림 3-7> 월별 응축수 발생량 변화	19
<그림 3-8> 일별 음폐수 발생량 변화 (7월)	20
<그림 3-9> 일별 응축수 발생량 변화	20
<그림 3-10> 응축수의 유기물질 분별증류 원리 및 전략	23
<그림 3-11> 분별증류 장치	24
<그림 3-12> 실페수(응축수)로부터 추출물 및 잔류물의 농도 변화	27
<그림 3-13> 실페수로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출효율 변화	28
<그림 3-14> 증류 후 실페수의 pH와 conductivity 변화	29
<그림 3-15> 아세트산 및 알코올 혼합 합성폐수로부터 추출물 및 잔류물의 농도 변화	29
<그림 3-16> 아세트산 및 알코올 혼합 합성폐수로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출 효율 변화	32
<그림 3-17> 증류 후 합성폐수의 pH, Conductivity의 변화	33
<그림 3-18> 아세트산 혼합 합성폐수로부터 추출물 및 잔류물의 농도 변화	35
<그림 3-19> 아세트산 혼합 합성폐수로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출효율 변화	36

<그림 3-20> 합성폐수(아세트산)로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출효율 변화.....	39
<그림 3-21> 증류 후 합성폐수의 pH, Conductivity의 변화.....	40
<그림 3-22> -600 mmHg, 70℃ 조건에서 추출물 및 잔류물의 시간별 농도 변화.....	42
<그림 3-23> -600 mmHg, 70℃ 조건에서 추출물, 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화..	43
<그림 3-24> -500 mmHg, 80℃ 조건에서 추출물 및 잔류물의 시간별 농도 변화.....	43
<그림 3-25> -500 mmHg, 80℃ 조건에서 추출물, 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화..	44
<그림 3-26> -600 mmHg, 80℃ 조건에서 추출물 및 잔류물의 시간별 농도 변화.....	44
<그림 3-27> -600 mmHg, 80℃ 조건에서 추출물, 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화..	45
<그림 3-28> 잔류물 주입량별 가스발생량 변화 (BMP test).....	48
<그림 3-29> 잔류물의 재이용을 위한 수처리 공정.....	51
<그림 3-30> 파일럿 플랜트 공정도 (P&ID).....	54

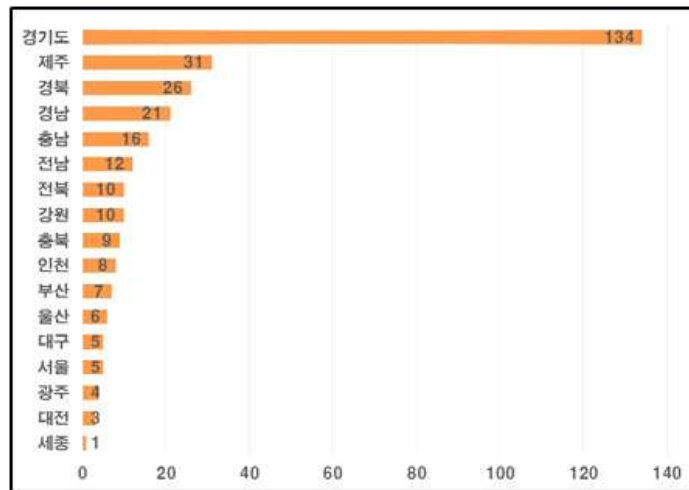
제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성	2
2. 연구개발 목표 및 내용	5

제 1 장 서 론

1. 연구의 필요성

- 경기도의 음식물쓰레기 발생량은 연평균 3,106톤/일이며 음식물폐수(이하 ‘음폐수’)는 2,518 톤/일로 약 36%는 하수처리, 15%는 수도권매립지, 7%는 자체처리, 42%가 해양투기되고 있는 상황이었다. 그러나 2013년 이후로 음폐수의 해양투기가 금지됨으로 인해 약 1,000 톤/일(42% 해양투기 처리분)에 대한 처리 대책이 시급히 필요한 실정이다.
- 경기도는 전국에서 가장 많은 음식물류폐기물(이하 ‘음폐물’) 처리 업체가 밀집되어 있다. 민원 및 부지확보의 어려움 때문에 서울시에서 발생하는 음폐물을 자체처리하지 못하고 인근 경기도 지역으로 이송·처리하고 있다. 따라서 음폐물의 가공 과정에서 발생하는 음폐수의 발생량 또한 경기도가 가장 많은 실정이다.

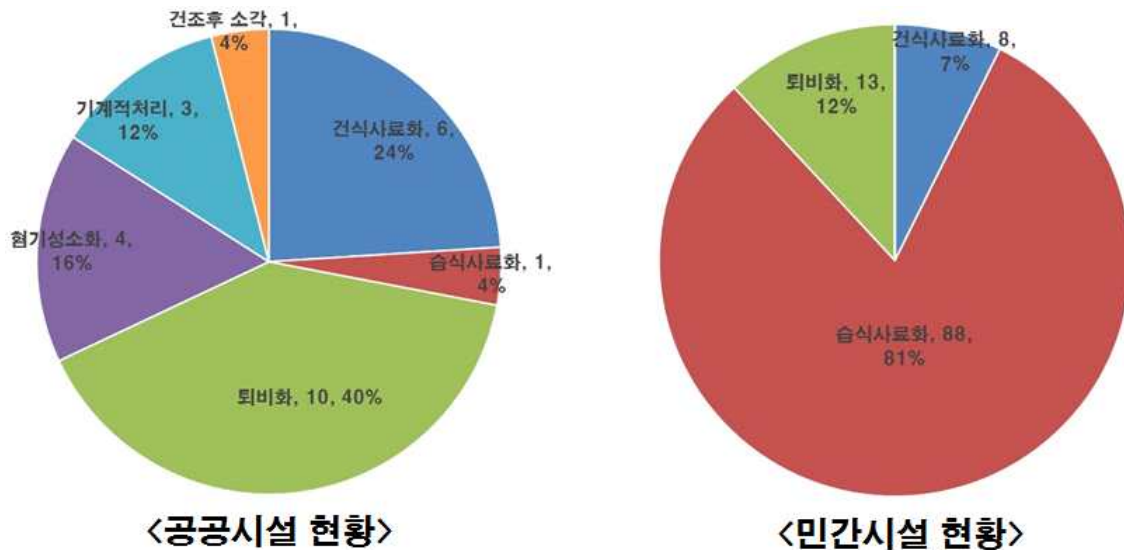


<그림 1-1> 전국 지역별 처리시설 현황

- 전국 처리 시설 중에서 민간처리업체의 경우 습식사료화 81%, 퇴비화가 12%를 차지하여 가장 많은 비율을 차지하는 반면에 공공시설의 경우 퇴비화 40%, 건식사료화 24%, 혐기성소화 16%의 비율을 차지하고 있다.
- 민간처리장의 81%가 습식사료화로 음폐물을 자원화 하고 있는 이유는 처리 단가가 타 방식에 비해 비교적 저렴하기 때문이다. 즉, 건식사료는 건조에 필요한 에너지와 막대한 초기 시설비가 요구된다. 또한 퇴비화는 퇴비화 시설을 갖추기 위한 넓은 부

지가 필요하며 수분조절제로 투입하는 톱밥 구입비가 많이 들기 때문에 영세한 업체들로서는 습식사료화가 가장 경제적인 자원화 방법인 셈이다.

- 공공처리장에서 건식사료의 비율이 높은 이유는 대부분 하수종말처리장 내에 음폐물 처리시설을 운영하고 있어 음폐수의 처리가 원활하고, 하수슬러지 처리용 혐기성 소화조로부터 바이오가스를 공급 받아 건식사료에 요구되는 에너지를 저비용으로 충당할 수 있기 때문인 것으로 판단된다.



<그림 1-2> 음식물류폐기물 처리방법별 현황

- 최근 경기도권 내의 민간 처리업체들도 퇴비화 과정에서 발생하는 악취로 인한 민원과 퇴비 수요가 점차 줄어들어 규모가 큰 업체들부터 건식사료화 공정으로 전환하고 있는 추세이다.
- 그러나 민간업체들은 바이오가스화 시설이 없기 때문에 고비용의 연료비를 부담해야 하며 특히, 건조과정에서 발생하는 응축수로 인해 폐수 위탁처리량이 기존에 비해 약 2배로 증가하여 처리에 어려움을 겪고 있다.
- 음폐물의 함수율이 약 80%라고 하면 이중 약 70%(건조물의 함수율 약 10% 잔존)는 폐수처리비용으로 빠지게 되고 건조에 필요한 연료비를 합하면 이윤창출이 불가능한 실정이다. 건조화 시설의 도입으로 악취 민원은 해소되었지만 처리비용의 증가로 인해 시설의 유지가 매려운 실정이다.
- 특히, 더욱 문제가 되는 것은 음폐수 처리이다. 음폐수는 현재 해양투기 금지 후 공공처리장에 위탁처리 하고 있으며, 서울시의 경우 수거해 가는 음폐물의 비율에 따라 공공처리장에 반입 가능한 음폐수를 제한하고 있다(예; 서울시 음폐물 1톤을 수거해 가면 0.5톤의 음폐수 반입가능)

- 따라서 건조사료화 공정으로 처리하는 업체의 경우 기존 음폐수에 응축수가 더해져 음폐수 발생량이 약 2배로 증가(현재 응축수도 음폐수로 구분)되기 때문에 할당된 처리량만으로는 응축수까지 처리하기에 부족하다.
- 2015년 12월 31일 기준 건조사료화 방식으로 운영 중인 민간 업체는 전국 8군데이며 이들 업체에서 하루 발생하는 응축수의 양은 약 1,380톤으로 위탁처리비만 하루 2,200만원이 소요된다.
- 응축수는 음폐물의 건조과정에서 증발된 수증기가 열교환기에서 냉각수와 접촉하여 발생되는데, 수증기의 온도가 약 120℃로 높기 때문에 다량의 냉각수가 대기로 증발되어 이를 보충해 주어야 한다. 동우바이오(주)의 하루 약 250톤의 음폐물 처리시 하루 약 50~60톤의 냉각수를 보충해 주어야한다.
- 응축수는 음폐수에 비해 외부탄소원으로 활용가치가 매우 높다. 수질 분석결과 CODcr (~20,000 mg/L), TN(>120 mg/L), TP(>5 mg/L), 유분 (>70 mg/L), MLSS(>20 mg/L)로서 음폐수에 비해 질소, 인 농도가 매우 낮고 특히, 유분과 고형물의 농도가 매우 낮은 특징을 가지고 있다. 주요 유기물을 구성하는 물질은 에탄올 및 휘발성유기산으로 생물학적 분해가 매우 용이한 물질들이다.
- 응축수는 생분해도가 높은 유기물로 구성되어 있어 외부탄소원으로서 가치가 높긴 하지만, 유기물의 농도가 메탄올에 비해 낮고, 폐기물이라는 인식이 지배적이어서 하폐수처리장을 운영하는 곳에서는 응축수를 구매하려하기 보다는 비용을 받고 처리해주려 하는 것이 현실이다. 따라서 외부탄소원으로서의 가치를 높이기 위해서는 응축수로부터 유기물을 최대한 추출하여 농축시키는 것이 필요하다.
- 따라서 응축수로부터 유기탄소원 추출/농축하여 이를 하수종말처리장에 외부탄소원으로 공급하고 유기탄소원을 추출한 응축수는 재처리 후 냉각탑의 보충수로 재이용하는 방안에 대해 연구하고자 한다. 이를 통해 안산시 하수종말처리장 또는 안산시 내 외부탄소원이 필요한 민간 폐수처리장에 메탄올보다 저렴한 비용으로 공급하여 외부탄소원 구매 비용 절감을 도모할 수 있을 것이다. 또한 응축수의 재이용 기술 확보 하여 유사 생산 공정(건조 공정)에 보급함으로써 환경적, 경제적 효과를 높일 수 있는 기술의 개발이 필요하다.

2. 연구개발 목표 및 내용

1.1 연구개발 목표

- 음식물류폐기물의 건조과정에서 발생하는 응축수의 자원화 및 재이용수 생산 기술 개발
 - 폐열을 활용하여 응축수로부터 고농도 유기탄소원을 추출하기 위한 증발농축 기술 개발
 - 유기탄소원이 추출된 응축수를 냉각탑 보급수로 재이용하기 위한 경제적인 수처리 방안 제시
 - 농축된 유기탄소원의 활용 최적화 방안 도출

1.2 연구개발 내용

구 분	연구개발 목표	연구개발 내용
1차년도 (2017.4 ~ 2017.12)	<ul style="list-style-type: none"> • 응축수의 유기탄소원 추출용 파일럿 플랜트 설계 • 응축수의 유기탄소원 최적 추출조건 도출 	<ul style="list-style-type: none"> • 응축수 발생 현황 및 수질 정밀 분석 • 폐열을 활용한 건조 에너지 공급 방안 연구 • 폐열을 최적으로 활용 가능한 파일럿 플랜트 설계 • Lab test를 통한 유기탄소원 최적 추출 조건 도출 • 추출된 유기탄소원의 수질 분석 • 유기탄소원 추출 후 응축수의 수질분석
2차년도 (2018.1 ~ 2018.12)	<ul style="list-style-type: none"> • 응축수 유기탄소원 추출용 파일럿 플랜트 최적운전조건 도출 및 경제성 평가 • 추출 외부탄소원의 활용 최적화 	<ul style="list-style-type: none"> • 파일럿 플랜트 제작 및 최적 운전조건 도출추출 유기물의 외부탄소원 활용 가능성 검토 : 탈질, BMP test 등 • 처리 공정의 경제성 평가 • 냉각탑 보급수로 재이용하기 위한 추가 수처리 필요성 검토 및 제시 • 사업화 방안 마련 및 추진 • 제조된 유기탄소원의 성능평가 및 최적화

제 2 장 연구의 추진전략 및 방법

1. 연구 추진전략	7
2. 연구 추진방법	8

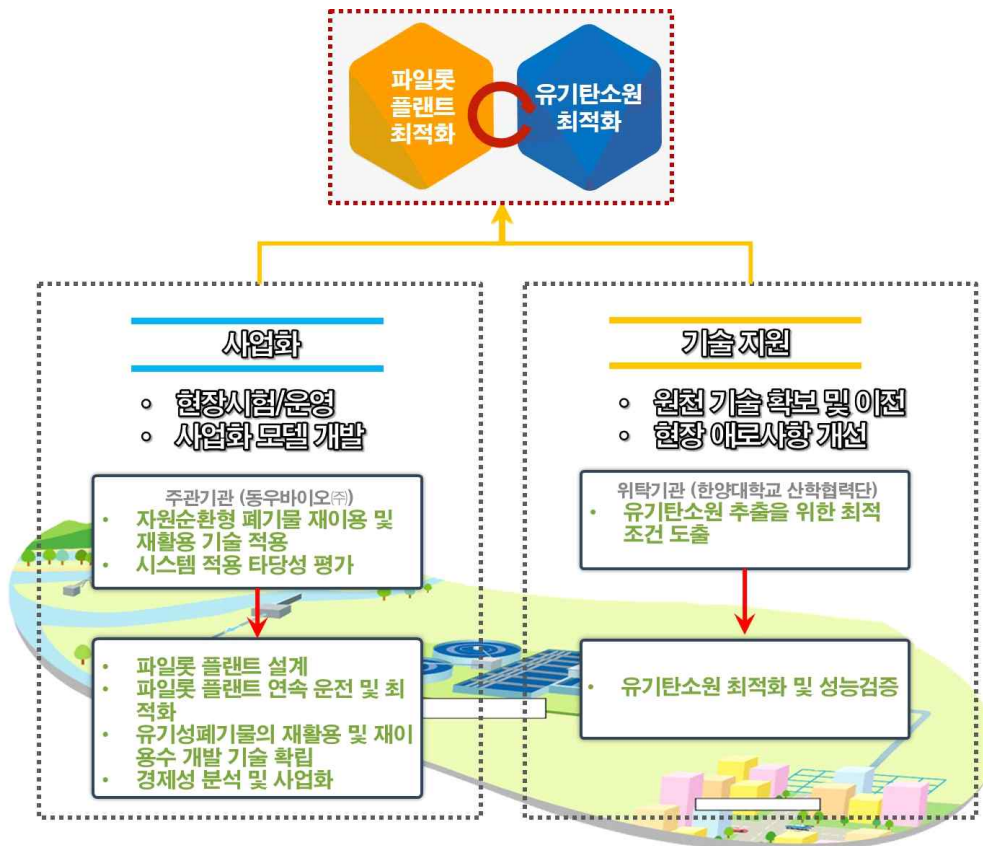
제 2 장 연구 추진전략 및 방법

1. 연구 추진전략

○ 기술개발 추진 전략 흐름도



- 기술개발 시 주관 및 주관기관 및 위탁연구기관 보유 기술/특허 적극 활용
- 주관기관과 위탁기관의 상호 기술 연계를 바탕으로 효율적인 목표 달성



<그림 2-1> 기관별 기술 연계도

- 기관들과의 정기적 미팅을 통한 연구결과 공유 및 향후 방향 모색
- 국내외 관련 연구실과의 연구결과 공유 및 해외 연구동향 파악을 위한 연구세미나 및 학회 참가
- 기술개발 후 사업화 추진 전략 수립

2. 연구 추진방법

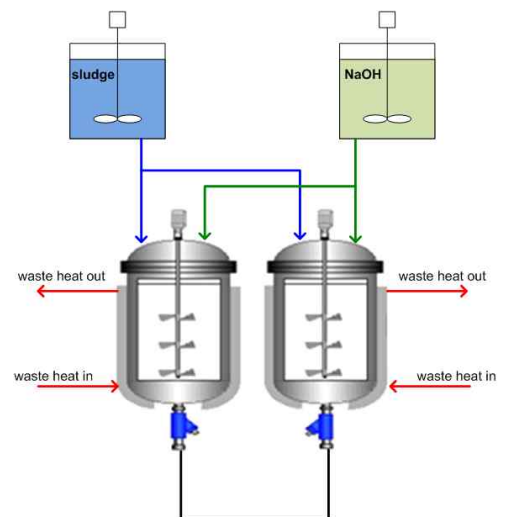
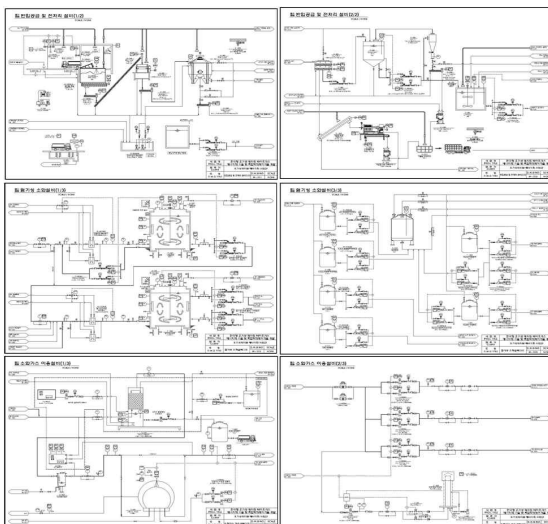
2.1 1차년도

○ 개발목표

- 주관기관(동우바이오(주)) : 응축수의 유기탄소원 추출용 파일럿 플랜트 설계
- 위탁연구기관(한양대학교 산학협력단) : 응축수의 유기탄소원 최적 추출조건 도출

○ 개발 내용 및 범위: 주관기관

- 응축수 발생 현황 및 수질 정밀 분석
 - 반입되는 응폐물 대비 계절별 응축수 발생 현황 조사·분석
 - 냉각탑 보급수 수질항목 포함 수질 분석
- 폐열을 활용한 건조 에너지 공급 방안 연구
 - 폐열발생 현황(발생량, 온도 등), 이송거리, 이송방안, 이용방안 등
- 폐열을 최적으로 활용 가능한 파일럿 플랜트 설계



<그림 2-2> 증발농축 반응기 설계 예시

○ 개발 내용 및 범위: 위탁연구기관

- Lab test를 통한 유기탄소원 최적 추출 조건 도출
 - 온도, 압력, 체류시간, pH 등
- 추출된 유기탄소원의 수질 분석
- 유기탄소원 추출 후 응축수의 수질분석
 - 냉각탑 보충수로 재이용 가능 검토

<표 2-1> 냉각탑 보급수의 수질기준(참고자료: KS표준, KSI3003)

구 분	항 목	기 준
기 준 항 목	pH [25℃]	6.0- 8.0
	전기 전도율 [25℃] (μS/cm)	200 이하
	염화물 이온 (mg Cl ⁻ /ℓ)	50 이하
	황산 이온 (mg SO ₄ ²⁻ /ℓ)	50 이하
	산 소비량 [pH 4.8] (mg CaCO ₃ /ℓ)	50 이하
	칼슘 경도 (mg CaCO ₃ /ℓ)	50 이하
참 고 항 목	탁도(도)	5.0 이하
	철 (mg Fe/ℓ)	0.3 이하
	암모늄 이온 (mg NH ₄ ⁺ /ℓ)	0.2 이하
	이온상 실리카 (mg SiO ₂ /ℓ)	10 이하

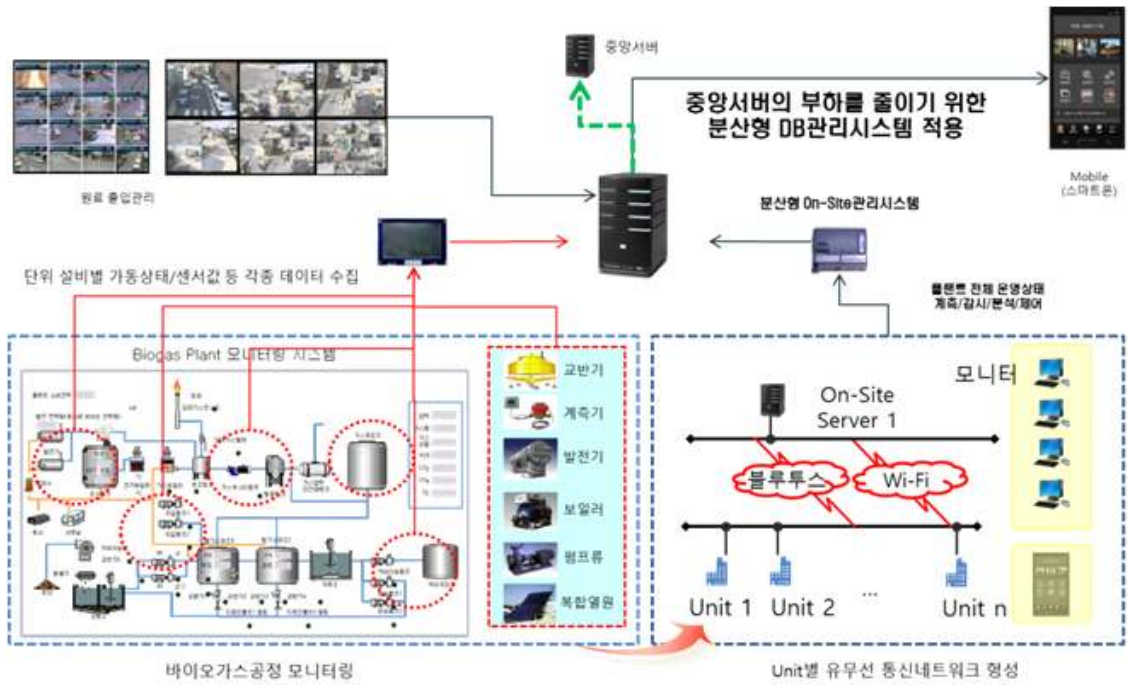
2.2 2차년도

○ 개발목표

- 주관기관(동우바이오(주)) : 응축수 유기탄소원 추출용 파일럿 플랜트 최적운전조건 도출 및 경제성 평가
- 위탁연구기관(한양대학교 산학협력단) : 추출 외부탄소원의 활용 최적화

○ 개발 내용 및 범위: 주관기관

- 파일럿 플랜트 제작 및 최적 운전조건 도출
- 처리 공정의 경제성 평가
- 냉각탑 보급수로 재이용하기 위한 추가 수처리 필요성 검토 및 제시
 - 냉각탑 보급수 수질기준 만족 검토
 - 스케일 물질의 제거를 위한 방안 수립
- 사업화 방안 마련 및 추진



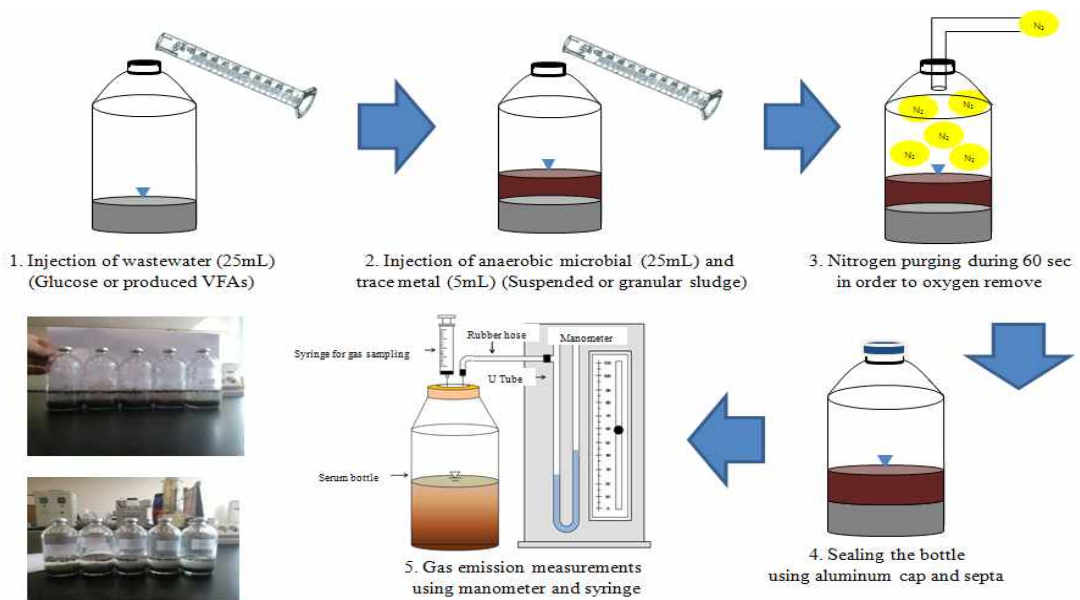
<그림 2-3> Pilot plant 운전 예시



<그림 2-4> 동우바이오(주) Pilot plant 설치예정 부지

○ 개발 내용 및 범위: 위탁연구기관

- 제조된 유기탄소원의 성능평가 및 최적화
 - 추출된 외부탄소원의 고질화를 위한 첨가물질 도출 : 미네랄 성분 등
 - 탈질 유기탄소원으로 가장 많이 사용되는 메탄올과의 탈질 실험을 통해 비탈질속도 및 유기물 분해 속도 비교 고찰
 - 메탄 생성조에 주입한 후 메탄 생성 효율 평가를 통해 유기탄소원으로 성능 평가
 - 글루코스를 유기탄소원으로 사용하여 메탄 생성을 할 경우, 응축수로부터 생산된 유기탄소원의 메탄 생성 효율 비교·평가 실시



<그림 2-5> BMP test 방법 예시

제 3 장 연구 수행 내용

1. 주관기관의 음식물류폐기물 처리 현황	13
2. 건조응축수 수질분석	21
3. 유기탄소원 최적 추출조건	23
4. 유기탄소원(추출물) 및 잔류물의 성상	46
5. 잔류물 및 유기탄소원의 이용 방안	48
6. 파일럿 플랜트 설계	53

제 3 장 연구 수행 내용

1. 주관기관의 음식물류폐기물 처리 현황

1.1 처리 공정

- 본 연구의 주관기관인 동우바이오(주)는 서울 및 수도권 지역(안산 포함)의 지자체들로부터 음식물류폐기물을 반입하여 처리 및 재활용하는 민간회사로서 허가 처리 용량 315 톤/일로 민간에서는 가장 큰 규모의 업체이다.
- 음폐물을 전처리 후 고품분은 퇴비화(2017년 중단 예정) 또는 건조사료, 습식사료로 재이용하고 있으며, 음폐수는 혐기성소화조, 소각장(요소수 대응), 폐수처리장(탈질 목적의 외부탄소원), 바이오가스화 시설(유기탄소원)으로 공급하고 있는 유기성 폐바이오매스 자원화 시설 운영업체이다.



<그림 3-1> 처리 공정도

- 2016년 건조시설을 준공하여 시간당 약 5톤의 스팀을 생산할 수 있는 보일러를 2대 운전하고 있으며, 연료는 우드펠렛을 이용하고 있다. 파쇄/선별 및 탈수된 슬러지 케이크는 디스크 타입의 건조기로 이송되어 스팀에 의한 간접 가온으로 약 120℃에서 건조된다.

- 음식물폐기물 처리과정에서 재활용 생산된 액상사료(80℃이상 가열처리)를 돼지농가 및 기타 동물농가에 공급하고 있으며, 동·식물성 잔재물은 발효(60~80℃)과정을 거쳐 퇴비화하여 농가에 공급하고 있다.
- 해양투기 전면금지에 따라 선도적 기술보완을 통하여 처리과정에서 발생하는 액상은 수도권매립지(Bio가스시설) 등 바이오가스 처리시설에 유기탄소원으로 공급하고 있으며, 회수된 유분은 동·식물성유지 제조업체에 공급하고 있다(월 약 1,700만원 수익 발생)



<파쇄/선별 과정>



<탈수기>



<2상원심분리기, 3상원심분리기>



<유분회수 탱크>

<그림 3-2> 전처리 시설 모습



<탈수케익 반입 호퍼(건조 공정 투입 전)>



<건조기>



<보일러>



<열교환기 및 냉각탑 (응축수 발생)>

<그림 3-3> 건조 시설 모습

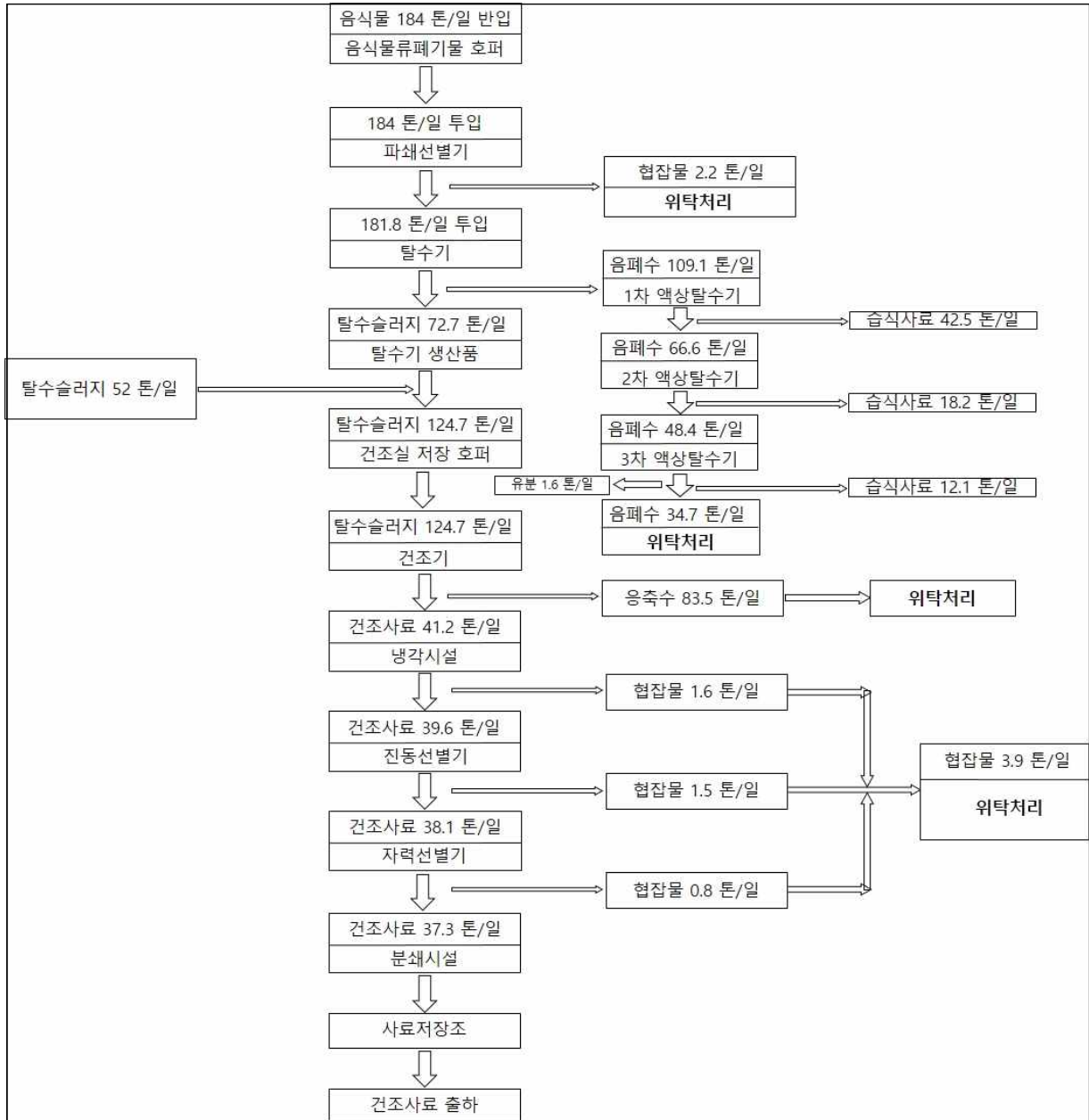
○ MF/UF/RO로 구성된 막여과 시설(약 50톤/일 처리용량)을 갖추고 있으며 응축수 재이용을 위한 전처리 방안에 대해 자체 처리방안에 대해 연구 중이다.



<그림 3-4> 막여과 시설 모습

1.2 물질수지

- 주관기관에 반입되는 음식물류폐기물의 종류는 모두 2가지로 구분된다. 하나는 파쇄/선별 및 탈수를 하지 않은 상태의 음식물류폐기물('원물'이라고 명칭)과 이를 한 상태의 음식물류폐기물('슬러지케익'이라고 명칭, '기계적 처리'로 구분)의 두 종류이다.
- 슬러지 케익은 이미 탈수를 했기 때문에 전처리 공정을 거치지 않고 곧바로 건조공정으로 투입되게 된다.
- <그림 3-5>는 주관기관 공정의 물질수지를 나타낸 것이다. 음식물류폐기물 평균 투입량 184 톤/일을 기준으로 공정에서 발생하는 협잡물과 부산물, 최종생산물의 물질수지를 나타냈다.
- 본 공정에서 음식물류폐기물 원물 대비 음폐수의 발생비율을 약 60%가 된다. 음폐수로부터 수거된 고형물은 가공을 거쳐 습식사료로 생산되며 그 비율은 원물대비 약 40%, 생산된 음폐수 대비 약 70%가 된다.
- 협잡물은 원물대비 파쇄/선별 단계에서 약 1.2%, 건조 공정에서 약 2.1%가 발생되어 총 3.3%가 발생된다. 이는 모두 소각로로 위탁처리 한다.
- 건조사료는 탈수슬러지 대비 약 30%가 생산되며 이 과정에서 응축수는 약 67%가 발생된다.

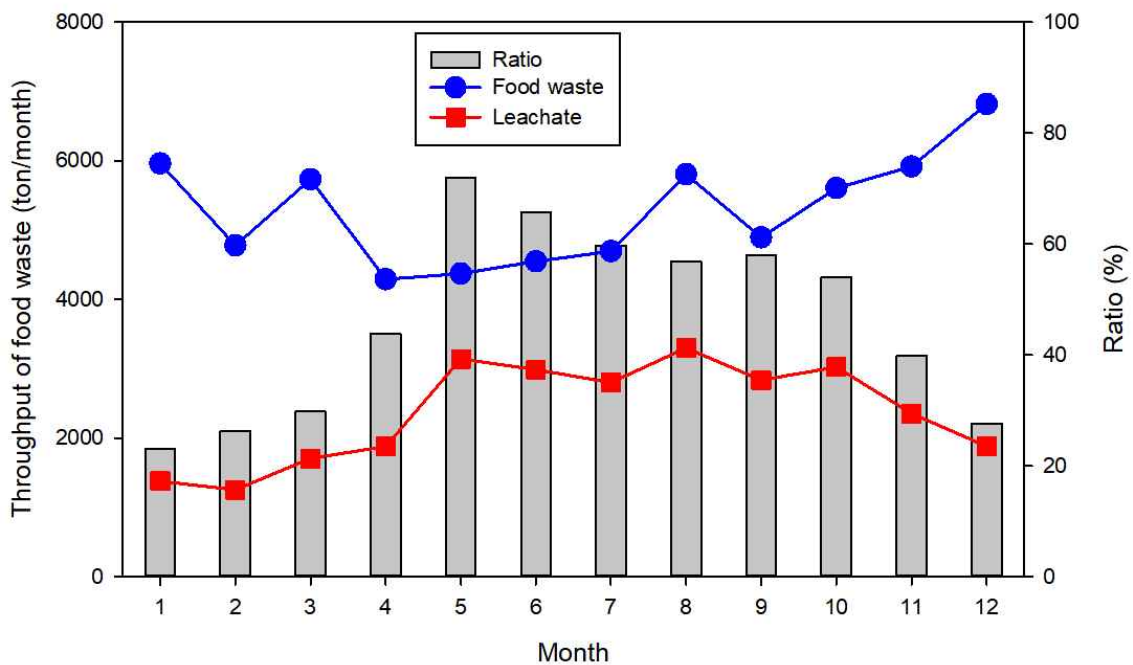


<그림 3-5> 공정 물질수지

1.3 계절별(월별) 발생량 변화

1.3.1 음폐수 발생량 변화

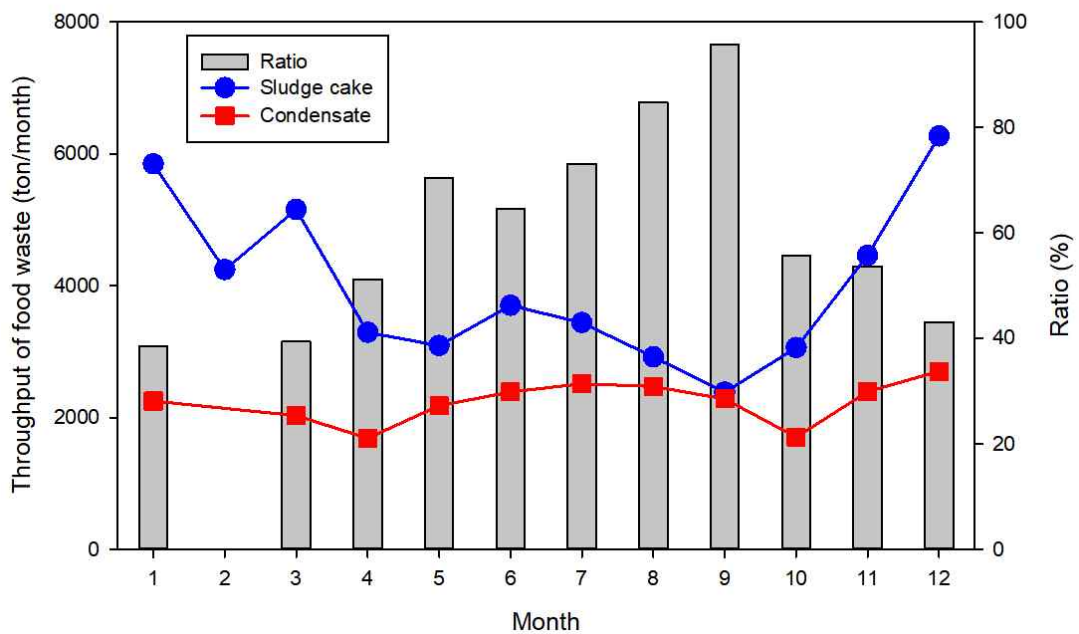
- <그림 3-6>은 계절별(3~5월: 봄, 6~8월: 여름, 9~11월: 가을, 12~2월: 겨울)로 음폐수 발생량의 변화를 나타냈다. 이는 주관기관에 반입되는 음식물류폐기물의 반입량과 음폐수 발생량의 연간 자료를 대상으로 분석한 것이다.
- 대체로 겨울철의 음폐수 발생량이 가장 낮았으며 봄, 여름으로 갈수록 음폐수의 발생량이 증가되는 것으로 나타났다. 원물에 함유되어 있는 음폐수의 비율 또한 유사한 경향을 나타냈다.
- 각 계절별 평균 음폐수 발생량은 겨울 26%, 봄 49%, 여름 61%, 가을 51%로 나타났다. 따라서 1년 평균 음폐수 발생량은 46%으로 일반적으로 알고 있는 60%보다 다소 낮았던 것으로 나타났다.



<그림 3-6> 월별 음폐수 발생량 변화

1.3.2 응축수 발생량 변화

- <그림 3-7>는 계절별 응축수 발생량의 변화를 나타냈다. 이는 주관기관에 반입되는 음식물류폐기물을 파쇄/선별, 탈수 후 슬러지 케익의 건조과정에서 발생하는 응축수 발생량의 연간 자료를 대상으로 분석한 것이다.
- 응축수의 경우 발생량은 슬러지 케익의 증감에 관계없이 대체로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 일반적으로 슬러지 케익의 증감에 따라 응축수의 발생량도 비례할 것으로 생각되지만 예상과 달랐다. 원물의 탈수 후 발생하는 슬러지 케익은 평균 함수율이 약 80%로 건조공정으로 이송된다.



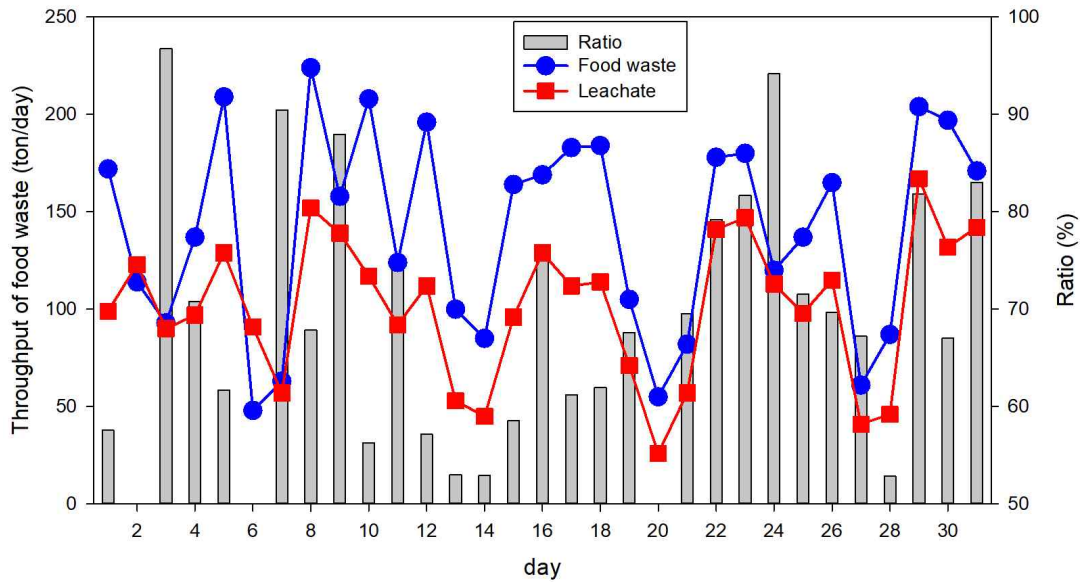
<그림 3-7> 월별 응축수 발생량 변화

1.4 일별 발생량 변화

1.4.1 음폐수 발생량 변화

- <그림 3-8>는 7월의 일별 음폐수 발생량의 변화를 나타낸 것이다. 음폐수의 발생량은 항상 음식물류폐기물 원물의 반입량에 비례한다.
- 지자체의 경우 대부분 주말에는 음폐물의 수거를 하지 않기 때문에 월요일에는 토, 일의 물량이 한꺼번에 반입됨에 따라 처리량 또한 급격히 증가되었다가 다시 감소하는 형태가 약 4~5일 간격으로 유지되었다. 이에 음폐수 발생량 또한 유사한 형태를 나타냈다.
- 이러한 특성은 음식물류폐기물 전용 혐기성소화조 운영에 있어서도 문제점으로 작

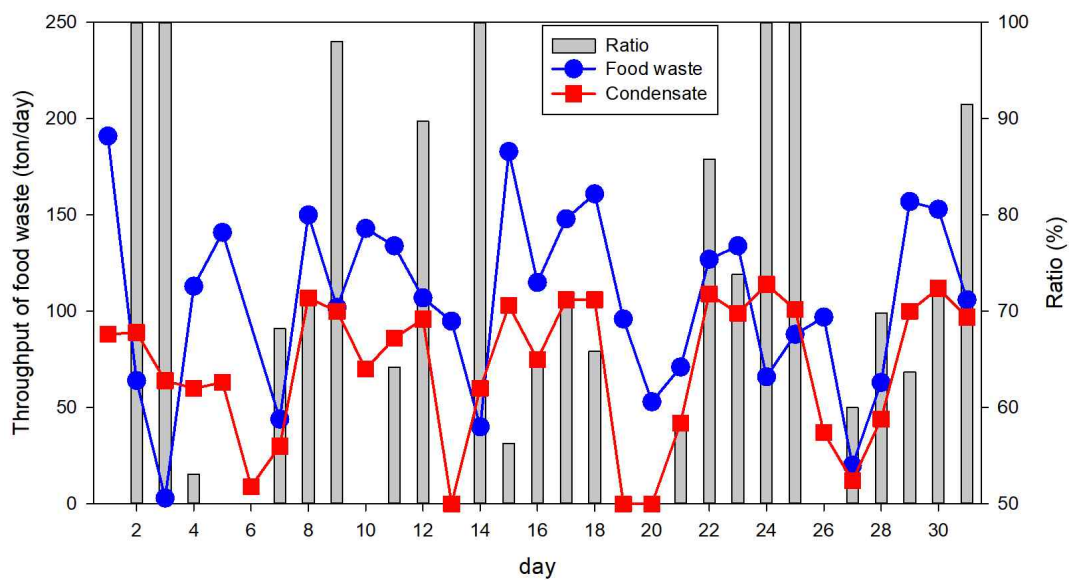
용한다. 반입량의 급격한 증가는 소화조에 충격부하를 주기 때문이다. 따라서 소화조 운전시 이러한 음식물류폐기물의 반입 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다.



<그림 3-8> 일별 음식물 발생량 변화 (7월)

1.4.2 응축수 발생량 변화

- <그림 3-9>은 7월의 일별 응축수 발생량의 변화를 나타낸 것이다.
- 응축수 역시 음식물과 마찬가지로 약 4~5일 간격으로 처리량이 급격히 변화하는 것으로 나타났다.



<그림 3-9> 일별 응축수 발생량 변화

2. 건조응축수 수질분석

2.1 기본 수질항목

- 주관기관에서 발생하는 응축수의 수질을 모니터링하기 위해 2주에 한 번씩 수질을 분석하였으며 <표 3-1>에 나타냈다.
- 응축수는 음폐수와 달리 유기물의 농도가 매우 높은 반면에 질소, 인, 고형물, 유분의 농도가 매우 낮은 특성을 가지고 있다. 또한 여름철에는 온도가 높아짐에 따라 수거과정에서 산발효 및 알코올발효가 일어나고 건조과정에서 유기산과 알코올이 휘발되어 유기물의 농도가 다른 계절에 비해 높아지는 특징을 가지고 있다. 겨울철과 여름철의 유기물 농도의 차이는 약 5,000 mg/L까지 차이가 난다.
- 평균 유기물 농도는 21,374.3 mg/L로 나타났으며 유기물의 주요 구성 물질은 에탄올과 유기산인 것으로 나타났다. 보다 정밀한 유기탄소원 추출 조건을 도출하기 위해 어떠한 유기산이 존재하는지 알아보기 위해 현재 분석 중이다.

<표 3-1> 응축수의 기본 수질항목

항목	1차 (5.16)	2차 (5.30)	3차 (6.7)	4차 (6.20)	5차 (7.4)	6차 (7.18)	7차 (8.1)	평균
pH	3.9	3.5	3.4	3.4	3.5	3.5	3.5	3.5 (±0.17)
BOD	8,448	10,344	9,200	8,600	11,300	12,300	11,000	10,170.3 (±1466.5)
CODcr	16,860	18,960	21,900	18,700	23,300	24,900	25,000	21,374.3 (±3238.3)
TN	191.0	129.0	110.0	140.0	159.0	120.0	190	148.4 (±32.6)
NH ₃ -N	185.2	110.2	100.0	130.0	120.0	110.0	170	132.2 (±32.7)
TP	2.4	5.3	3.2	4.5	5.8	2.5	5.6	4.19 (±1.47)
Alkalinity	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D	N.D
TS	640	500	200	320	430	500	650	462.9 (±163.2)
n-Hexane 추출물질	26.2	30.9	40.3	-	-	60.4	-	39.5 (±15.1)

2.2 중금속 및 미량원소

- 응축수 내에 중금속 및 미네랄 물질의 농도를 조사하였다. 본 연구에서는 유기탄소원을 추출하고 남은 물은 재처리(생물학적 처리 등) 후 냉각탑에서 냉각수로 활용할 예정이다. 따라서 생물학적 처리 과정에서 미량원소의 존재는 미생물의 활성을 도울 수 있기 때문에 존재 여부를 조사하였다.
- 중금속의 경우 ‘가’지역의 배출허용기준과 비교하였다. 모든 항목에서 기준을 초과하지 않는 것으로 나타났다.

<표 3-2> 응축수의 중금속 분석결과

항목	1차 (5.16)	2차 (7.18)	평균	‘가’지역 배출허용기준
페놀	2.373	N.D	2.373	3이하
구리	0.605	0.246	0.426	1이하
납	0.016	N.D	0.160	0.1이하
카드뮴	0.005	N.D	0.005	0.02이하
나트륨	0.213	0.480	0.347	
칼륨	0.230	0.195	0.213	
시안	0.012	0.12	0.066	0.2이하
비소	N.D	N.D	N.D	0.05이하
수은	N.D	N.D	N.D	0.001이하
철	N.D	N.D	N.D	2이하
망간	N.D	0.002	0.002	2이하
아연	0.561	0.057	0.309	1이하
염소이온	187	42.075	114.538	
황산이온	2.4	44.246	23.323	
마그네슘	0.219	0.115	0.167	
칼슘	111.3	0.692	55.996	

3. 유기탄소원 최적 추출조건

3.1 연구개요

- 분별증류는 열에너지를 이용하여 물체의 온도변화를 통한 상(相)을 변화시켜 물질을 분류 하는 방법이다. 대표적인 분별증류는 정유분야에서 많이 사용되는 상압 증류 방법이 그중 하나이며, 이는 혼합물의 끓는점(비등점) 차이를 이용하여 대기압하에서 물질을 분별 증류한다.
- 본 연구에서는 분별증류의 원리를 이용하여 음식물 응축수의 유기물질을 추출하여 유기탄소원으로 사용하기 위한 운전조건을 도출하고자 하였다. 분별증류법으로 응축수에 있는 유기물질을 분리하기 위하여 끓는점 차이를 조절할 수 있는 Lab-scale 반응기를 제작 및 진공증발농축기를 이용하여 응축수로부터 유기탄소원의 추출을 위한 운전조건을 연구하였다.

3.2 유기물질 추출 전략

- <그림17>은 본 연구의 유기탄소원의 추출 전략을 나타낸 그림이다. 유기탄소원을 추출하기 위하여 대상물질의 끓는점을 이용하여 감압, 가열, 증발, 냉각, 추출의 방법을 적용하였다.
- 응축수 유기물질은 주로 알코올과 유기산으로 구성되어 있다(p.26 참조). 따라서 알코올, 물, 유기산의 끓는점 차이를 이용하여 분별증류법으로 응축수의 유기탄소원을 추출하고자 한다.
- 알코올, 물, 유기산의 끓는점은 각각 약 80℃, 100℃, 120℃이다. 이들 물질이 함께 존재할 경우 100℃로 가열하게 될 경우 알코올과 물이 동시에 추출 될 수 있다. 만약 이 온도에서 가열이 지속되면 물이 모두 휘발되기 전까지는 120℃까지 온도를 증가시키기 어렵기 때문에, 유기산은 잔류하고 물은 계속 증발하여 추출된 유기탄소원은 도리어 물과 희석되어 목표 농도를 달성하기가 어렵게 될 수 있다. 따라서 본 연구에서 목표로 하는 유기물 농도 범위 내에서만 추출하고 적정 시간이 되었을 때 가열을 중단하여 추출된 유기물의 농도를 달성하고자 하였다.

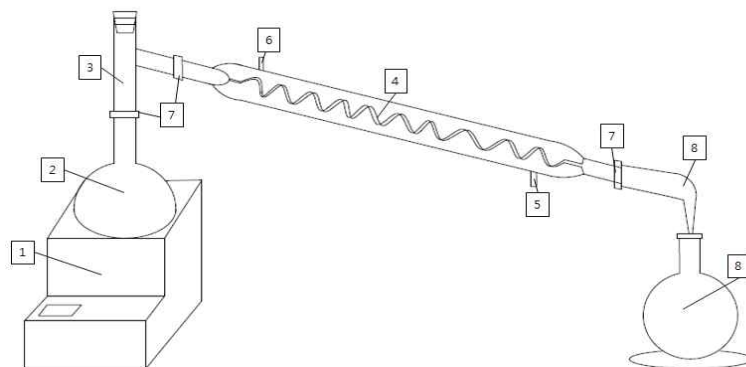


<그림 3-10> 응축수의 유기물질 분별증류 원리 및 전략

3.3 연구 방법

3.3.1 분별증류 반응기를 이용한 연구

- <그림 3-11>은 분별 증류 반응기의 모식도를 나타냈다. 음식물류폐기물의 건조공정에서 발생하는 응축수의 재이용 기술 개발을 위한 Lab scale 분별증류 반응기는 유효부피 500mL 규모로 설계 및 제작하였다.
- 이 반응기는 분별증류의 원리로 유기물을 추출할 수 있도록 운전하였다. 히팅 맨틀은 외부온도센서와 내부온도센서를 모두 사용할 수 있게 하여 시료의 온도와 증기의 온도를 측정할 수 있게 하였다. 삼방증류 어댑터를 사용하여 외부온도 측정과 증류를 동시에 할 수 있게 구성 하였으며 냉각기는 냉각수의 유입과 유출이 용이하도록 구성하였고 증류물이 충분히 냉각될 수 있도록 직선이 아닌 나선형으로 구성하였다. 마지막으로 소뿔형 증류 어댑터를 사용하여 증류물이 원활하게 나올 수 있게 구성하였다. 또한, 각 연결부위의 결합을 위하여 테이퍼 클립을 이용하여 고정하였다.



<그림 3-11> 분별증류 장치

- (1. 히팅 맨틀 2. 시료 주입용 둥근바닥 플라스크 3. 삼방증류 어댑터 4. 냉각기 5. 냉각수 유입부 6. 냉각수 유출부 7. 테이퍼클립 8. 소뿔형 증류 어댑터 9. 샘플링 포인트)

- 본 연구에서는 각 샘플별로 온도에 따라 추출되는 시간을 확인하였다. 80℃, 100℃, 110℃에서 각 샘플별로 추출물의 발생시간을 확인하였다. <표 3-3>에서 나타낸바와 같이 3시간 이상 증류물이 발생되지 않으면 추출에 너무 많은 시간이 소요되기 때문에 비현실적일 것으로 판단하였다.
- 80℃에서는 증류시간이 10시간 이상이 지나도 추출물이 발생되지 않았으며, 100℃에서는 4시간 후에도 추출물 발생 되지 않았다. 그러나 110℃에서는 약 50분 후 추출물이 발생되기 시작하였다.

<표 3-3> 분별증류 실험조건

실험 조건	증류 실험 조건		
	온도(℃)	실험 여부	비 고
실패수	80	X	10시간이상 증류되지 않음
실패수	100	X	4시간이상 증류되지 않음
실패수	110	O	
합성폐수 (에탄올+아세트산)	80	X	10시간이상 증류되지 않음
합성폐수 (에탄올+아세트산)	100	X	4시간이상 증류되지 않음
합성폐수 (에탄올+아세트산)	110	O	
합성폐수 (아세트산)	80	X	10시간이상 증류되지 않음
합성폐수 (아세트산)	100	X	4시간이상 증류되지 않음
합성폐수 (아세트산)	110	O	

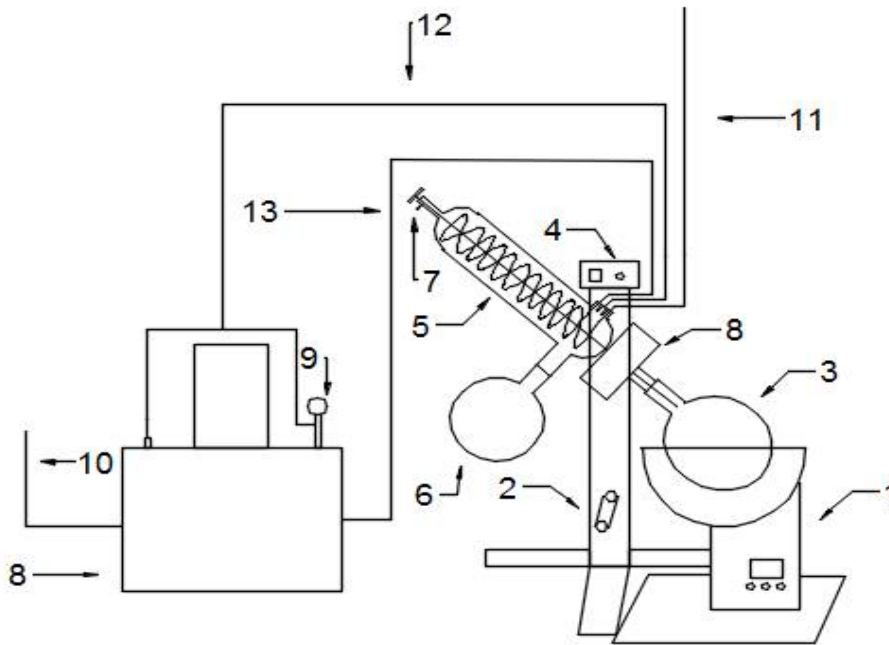
- 주관기관에서 배출되는 음식물류폐기물 건조공정에서 발생하는 응축수를 이용하여 유기탄소원의 추출 조건을 연구 하였다. 이후 합성폐수를 제조하여 추출조건을 재 실험 하였다. 응축수 및 합성폐수의 특성은 <표 3-4>에 나타냈다.

<표 3-4> 합성폐수 및 응축수 수질 특성

실험 조건	성 상				
	CODcr (mg/L)	TVFAs (mg/L)	Ethanol (mg/L)	전기전도도 (μS/cm)	pH
실 폐수 (음식물 건조 응축수)	36,200	23,000	8%	1.032	3.44
합성 폐수 (에탄올+아세트산)	17,800	5,000	10,000	0.452	2.76
합성 폐수 (아세트산)	5,360	5,000	-	0.466	2.85

3.3.2 진공증발농축기를 이용한 연구

- <그림 3-12>는 진공증발농축기의 모식도를 나타냈다. 음식물류폐기물의 건조공정에서 발생하는 응축수의 재이용 기술 개발을 위한 Lab scale 분별증류 반응기와 동일한 원리로 작용하지만, 감압을 할 수 있는 장치와, 회전을 통한 열에너지의 분배가 최대한 균일할 수 있도록 구성되어있다.
- 이 반응기는 진공증발농축기의 원리로 유기물을 추출할 수 있도록 운전하였다. 히팅 맨틀에서 가열된 물이 시료에 열을 전달하면서 회전 한다. 증발되는 시료를 냉각수를 이용하여 냉각되며 최종적으로 추출물이 얻어지게 된다. 각 연결부위는 테이퍼 클립을 통하여 추출물을 외부와 차단하였다. 또한 감압을 진행 할 수 있도록 감압장치에 조절기를 설치하여 원하는 압력으로 감압할 수 있도록 구성하였다. 또한, 냉각수의 유출수를 이용하여 감압펌프의 유입수로 사용하여 감압펌프를 냉각하였다.



<그림 3-12> 진공회전증발 농축기

- (1. 히팅 맨틀 2. 높이 조절 3. 유입 둥근바닥 플라스크 4. 회전 조절 디스플레이 5. 냉각 장치 6. 유출 둥근바닥 플라스크 7. 압력 배출구 8. 감압 장치 9. 압력 조절 장치 10. 압력 조절 장치 냉각수 유출부 11. 냉각수 유출부 12. 감압 튜브 13. 냉각수 유출부)

- 진공증발농축실험은 온도와 감압 조건에 따라 추출조건 및 시간을 확인하고자 하였다. 온도와 감압조건에 따라 추출 시간과 추출물의 농도를 확인하여 유기탄소원으로 활용가치를 높이고자 하였다.
- 감압조건과 온도조건은 현장의 여건을 감안하여 설정하였다. 감압조건은 일반적으로 현장에서 사용 및 운전되고 있는 감압증발농축기의 설계 조건을 기반으로 선정하였다. 현재의 조건보다 더 감압을 하는 것에 대해 기술적 어려움은 없으나, 감압을 많이 하게 될수록 특수 기밀 용기사용으로 초기 투자비용이 매우 높아지고 및 운전상의 어려움 때문에 현장 적용에 있어서 경제성 및 편의성이 감소되어 현실성이 떨어질 것이라 판단하였다.
- 온도는 폐열을 활용하여 응축수를 예열 후 진공증발농축기로 유입시키고 이 때 진공증발기로부터 1시간 내에 원하는 유기탄소원이 추출될 수 있는 온도 조건으로 설정하였다.
- 70℃의 온도에서 500 mmHg를 감압한 조건에서는 추출물이 발생되지 않았다. 따라서 이 조건에서는 추가 실험을 수행하지 않았다.

<표 3-5> 감압추출 실험조건

번호	온도 (℃)	감압 (mmHg)	비 고
1	70	-500	추출불가
2	70	-600	
3	80	-500	
4	80	-600	

3.3.3 분석 방법

- <표 3-6>은 추출물의 성상 분석 방법을 나타낸 것이다. pH와 Conductivity는 pH/ORP/Conductivity meter (D-74, HORIBA)를 사용하였으며, 온도는 히팅 맨틀의 Heating mantle prove (미성과학기기(주))를 사용하였다. 그리고 COD분석에는 DR-3900(HACH)를 사용하였다. 이를 통하여 유기탄소원 추출 후 응축수의 수질분석을 실시하여 최적조건을 도출하고, 유기탄소원에 대한 분별 증류의 적합성을 판단하고자 하였다.
- 추출물에 존재하는 악취유발 물질의 농도를 확인하기 위해 법적 지적악취 유발물질 22종에 대해 지정분석기관에 의뢰 하였으며, 중금속 항목에 대해서도 분석하였다.

<표 3-6> 분석 항목 및 방법

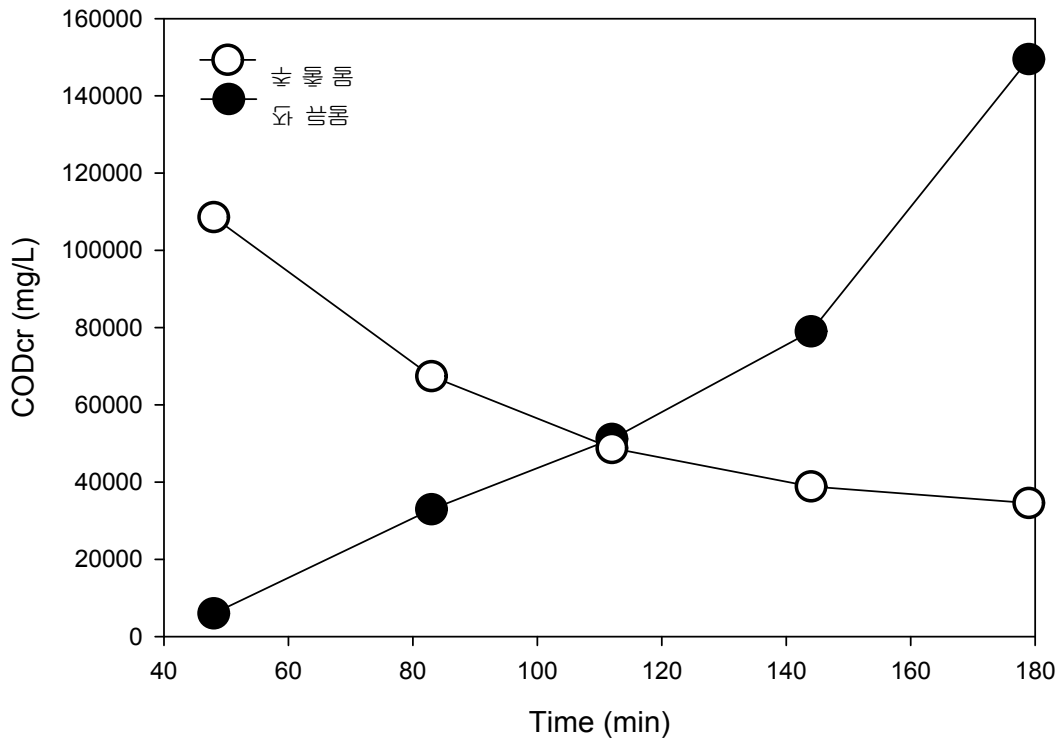
분석 항목	분석기기
pH, Conductivity	pH/ORP/COND meter (D-74, HORIBA)
Temperature	Heating mantle prove (미성과학기기(주))
CODcr	DR-3900, HACH

3.4 연구결과

3.4.1 분별증류 방법을 이용한 유기탄소원 추출

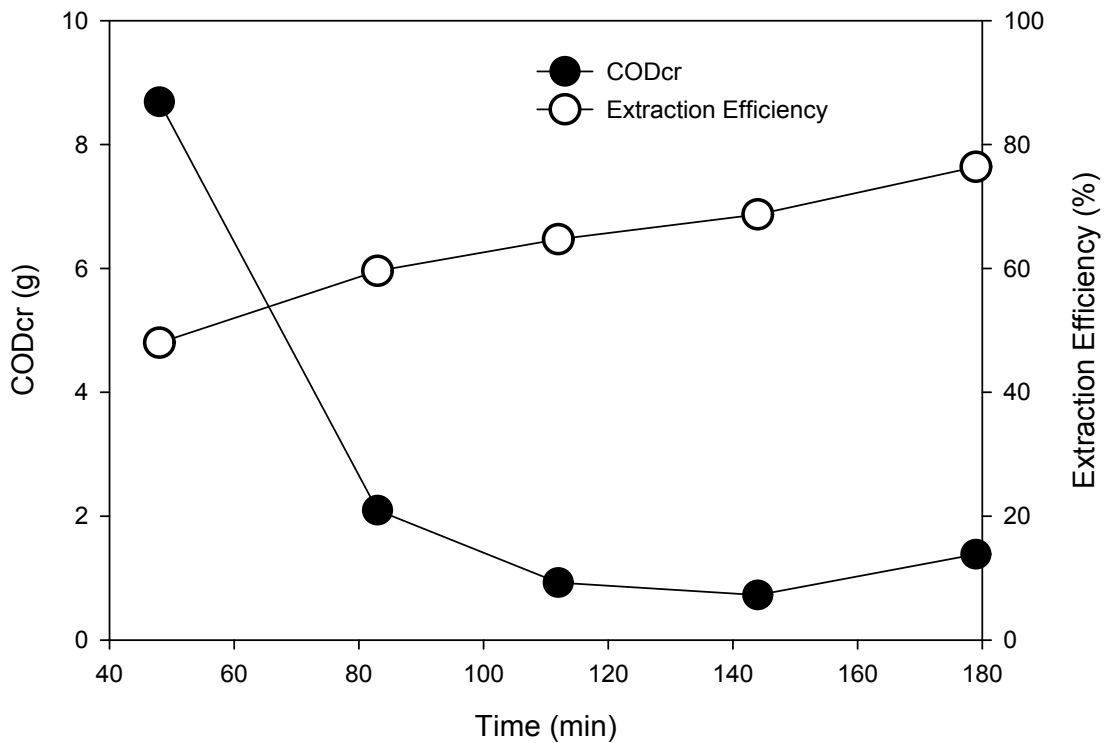
3.4.1.1 실페수(응축수)의 유기탄소원 추출 특성

- <그림 3-13>은 시간에 따른 추출물의 COD변화를 나타낸 그림이다. 최초 추출물은 약 48분에 발생되었으며 각 샘플은 약 80 mL씩 채취하였다. 최초 샘플의 COD분석 결과 108,600 mg/L로 나타났으며 가장 높은 농도를 나타냈다.
- 시간이 지날수록 COD는 점차 감소하였다. 유기물은 물과 함께 추출되었으며 유기물은 원수로부터 추출됨에 따라 시간이 지날수록 농도가 점차 감소된 것으로 판단된다.
- 반면에 잔류물의 농도는 점차 증가되는 것으로 나타났다. 이는 110℃에서 증류되지 않은 유기산이 잔류하였고 물이 증발됨에 따라 잔존 유기산은 점차 농축되어 농도는 증가된 것으로 판단된다.



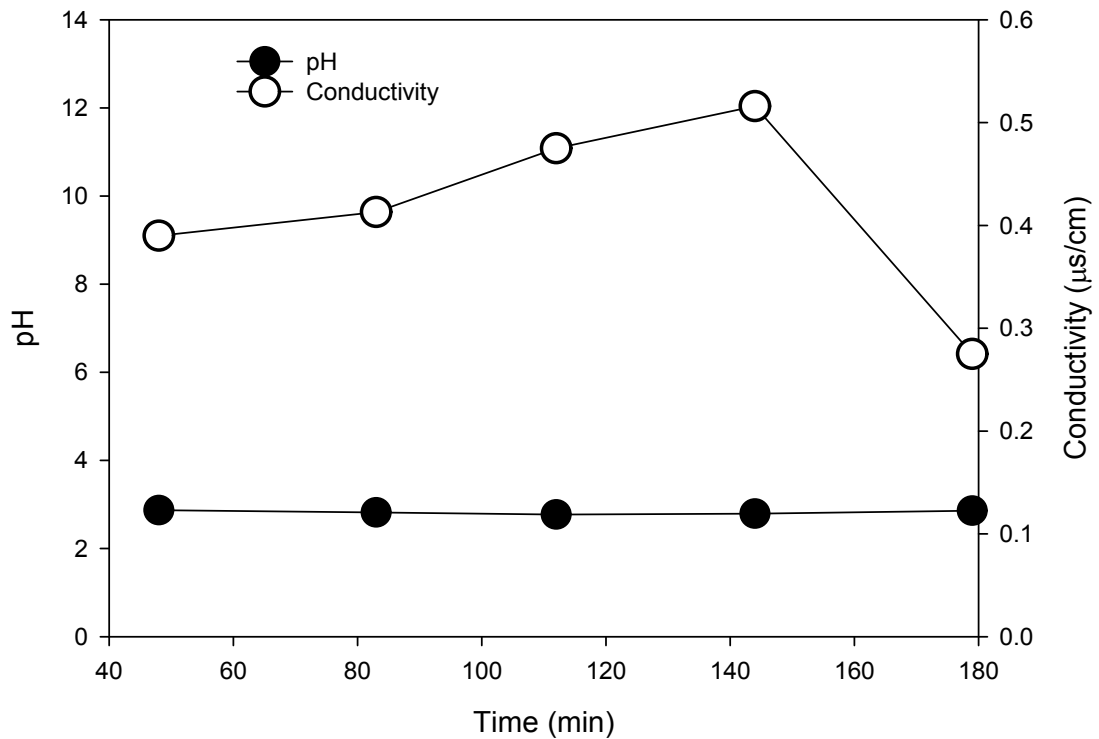
<그림 3-13> 실페수(응축수)로부터 추출물 및 잔류물의 농도 변화

- <그림 3-14>은 응축수를 증류후의 COD변화를 $C \times V = M$ (C : 농도 V : 부피 M : 질량)을 이용하여 CODcr (g)으로, 누적 추출효율은 $\frac{\text{누적추출량(COD(g))}}{\text{원수의유기물량(COD(g))}} \times 100$ 의 식을 이용하여 나타냈다.
- 첫 샘플이 발생한 48분에 약 8.5 g의 COD가 추출되어 48%의 추출효율을 나타냈다. 이후 추출효율은 점차 증가되어 실험종료 시점에서 76.4%의 추출효율을 나타냈다. 잔류물에 존재하는 유기물은 110℃에서 휘발되지 않은 유기산 종류의 유기물이 잔존했을 것으로 판단된다.



<그림 3-14> 실패수로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출효율 변화

- <그림 3-15>는 추출되는 각 샘플의 pH 및 conductivity를 나타낸 것이다. 평균 pH는 2.82이며 일정하게 유지되었다. 유기산의 일부가 추출되었기 때문에 낮은 pH를 나타낸 것으로 판단된다.
- Conductivity는 냉각탑 보급수 기준인 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 낮은 값을 나타냈다. 이는 높은 농도의 유기산염이 추출되고 있기 때문에 산성(낮은 pH)과 전기전도도가 나타난 것으로 판단된다.



<그림 3-15> 증류 후 실패수의 pH와 conductivity 변화

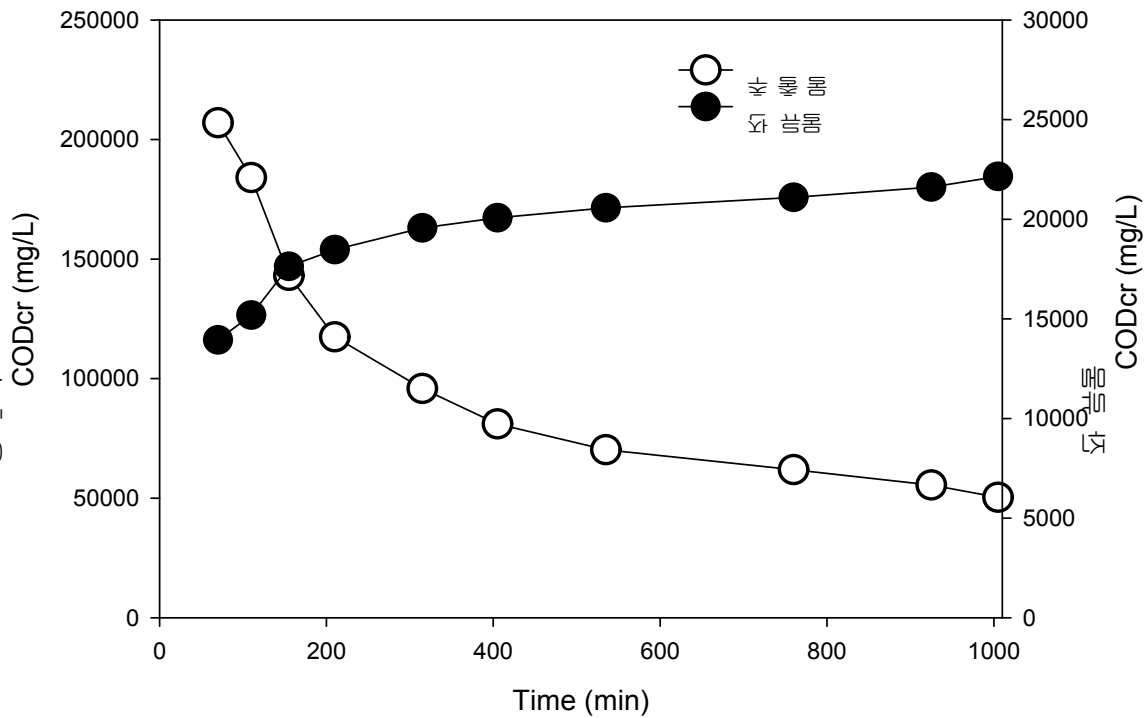
- <표 3-7>은 실험 전·후 응축수 원수와 잔류물의 성상을 비교하였다. 실험 종료 후 잔류물의 COD는 응축수 원수에 비해 크게 낮아지지 않았다. 그러나 추출효율은 90.3%로 나타났다. 이는 <그림 3-14>에서 실험 종료시점의 추출효율이었던 76.4%에 비해 13.9%가 높았다. 이론 추출효율이 실제 측정된 추출효율에 비해 낮았던 것인데 이는 실험과정에서 추출물을 채취할 때 알코올과 같은 유기물이 대기 중으로 휘발되었기 때문에 낮았던 것으로 판단된다.
- 응축수 원수의 농도는 최종 증류 후 응축수의 pH는 0.36더 높아졌으며 conductivity는 약 2.03 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 높아졌다. 이는 물이 증류됨에 따라 유기산의 일부가 추출되었고 전기전도도 유발물질의 농도가 농축되었기 때문으로 판단된다.

<표 3-7> 실험 시작 전 응축수와 실험 종료 후 잔류물의 성상

항목	CODcr (mg/L)	CODcr (g)	pH	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
응축수	36,200	18.1	3.44	1.032
잔류물	29,400	1.76	3.8	3.06
추출효율(%)	-	90.3	-	-

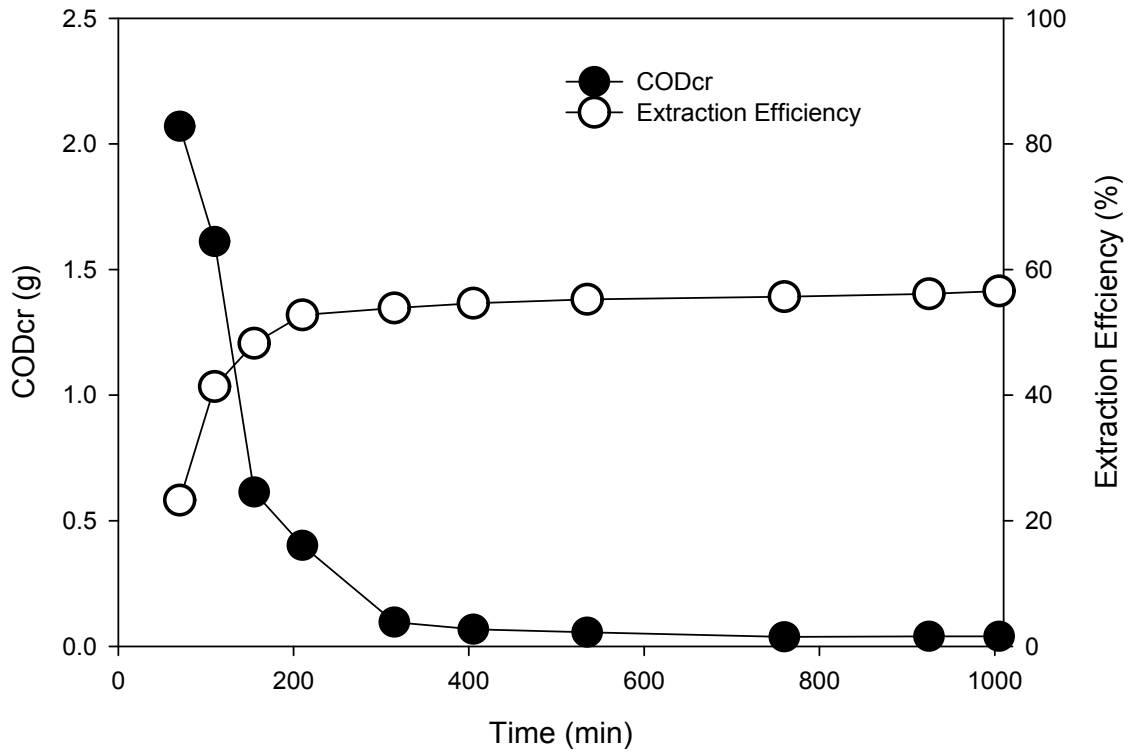
3.4.1.2 합성폐수(아세트산+알코올)의 유기탄소원 추출 특성

- 응축수 원수의 주된 유기물은 알코올과 유기산이다. 앞서 실험을 이용한 실험에서 실험초기에 추출물의 유기물 농도가 높았고 이후 점차 낮아졌다. 110℃에서 알코올의 추출이 활발히 일어났고 반면에 잔류물에는 유기산이 농축되었을 것으로 판단되었다. 따라서 이를 확인하기 위해 유사한 조건의 합성폐수를 이용하여 실험하였다.
- <그림 3-16>는 아세트산(유기산) 및 알코올 합성폐수로부터 추출물과 잔류물의 COD변화를 나타낸 것이다. 전반적으로 실험 결과와 유사한 형태의 추출 특성을 나타내었다. 즉, 추출 초기에는 추출물의 농도가 높았다가 점차 감소하였으며 잔류물은 점차 농도가 높아졌다. 이는 실험 초기 에탄올의 증류가 발생하였고 증류를 진행함에 따라 에탄올의 증류량이 감소된 것으로 판단된다.



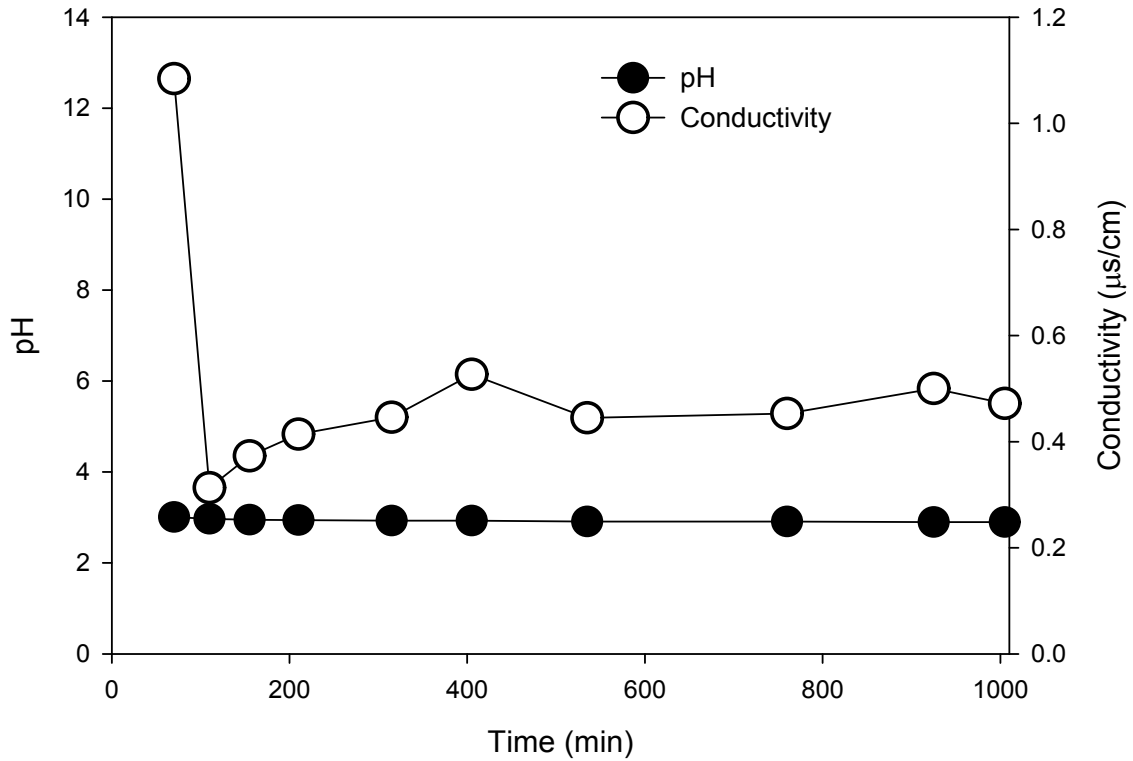
<그림 3-16> 합성폐수(알코올+유기산)로부터 추출물 및 잔류물의 농도 변화

○ <그림 3-17>은 합성폐수 내 COD 질량 및 추출 효율을 나타낸 그림이다. 첫 샘플에서 2.07g의 유기물이 추출되어 23%의 추출효율을 나타냈으며 추출물은 210분 이후부터 약 COD 0.1g 이하로 유지되었다. 따라서 추출 가능한 유기물은 210분 내에 대부분 추출된 것으로 판단되며 이때의 추출 효율은 약 53%로 나타났다.



<그림 3-17> 합성폐수(알코올+유기산)로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출효율 변화

○ <그림 3-18>는 합성폐수를 이용하여 분별증류 한 각 샘플의 pH 및 conductivity를 나타낸 것이다. 평균 pH는 2.93이었으며 일정하게 유지 되었다. 낮은 pH는 산성물질의 증류를 의미하며, 합성폐수에 포함된 아세트산으로 판단된다. 또한 conductivity는 냉각탑 보급수 기준인 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 낮은 값을 나타내고 있다.



<그림 3-18> 증류 후 합성폐수의 pH, Conductivity의 변화

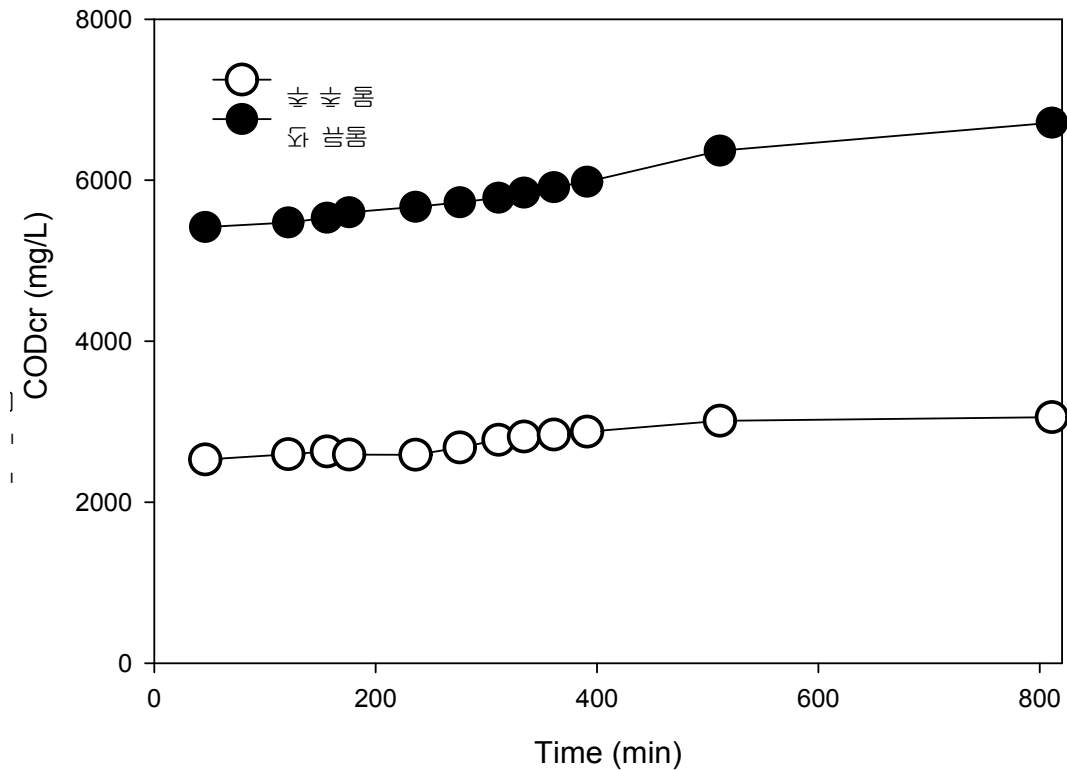
- <표 3-8>는 실험 전·후 합성폐수 원수와 잔류물의 성상을 비교하였다. 실험 종료 후 잔류물의 COD는 응축수에 비해 3.56배 낮아졌다. 대부분의 알코올 성분은 휘발되었기 때문인 것으로 판단된다. 추출효율은 78.1%로 나타났으며 실패수 실험과 유사하게 이론치와 비교했을 때와 같이 21.6%의 효율 차이가 났다.
- 응축수 원수의 농도는 최종 증류 후 응축수의 pH는 0.79더 높아졌으며 Conductivity는 약 0.068 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 높아졌다. 이는 증류수로 실험했기 때문에 실패수에 비해 염농도가 낮아 큰 차이를 보이지는 않았던 것으로 판단된다. 그러나 전체적인 경향은 유사했다.

<표 3-8> 실험시작 전 합성폐수 원수와 실험 종료 후 잔류물의 성상

항목	CODcr (mg/L)	CODcr (g)	pH	Conductivity ($\mu\text{S}/\text{cm}$)
합성폐수	17,800	8.9	1.95	0.452
잔류물	5,000	1.95	2.74	0.52
추출효율(%)	-	78.1	-	-

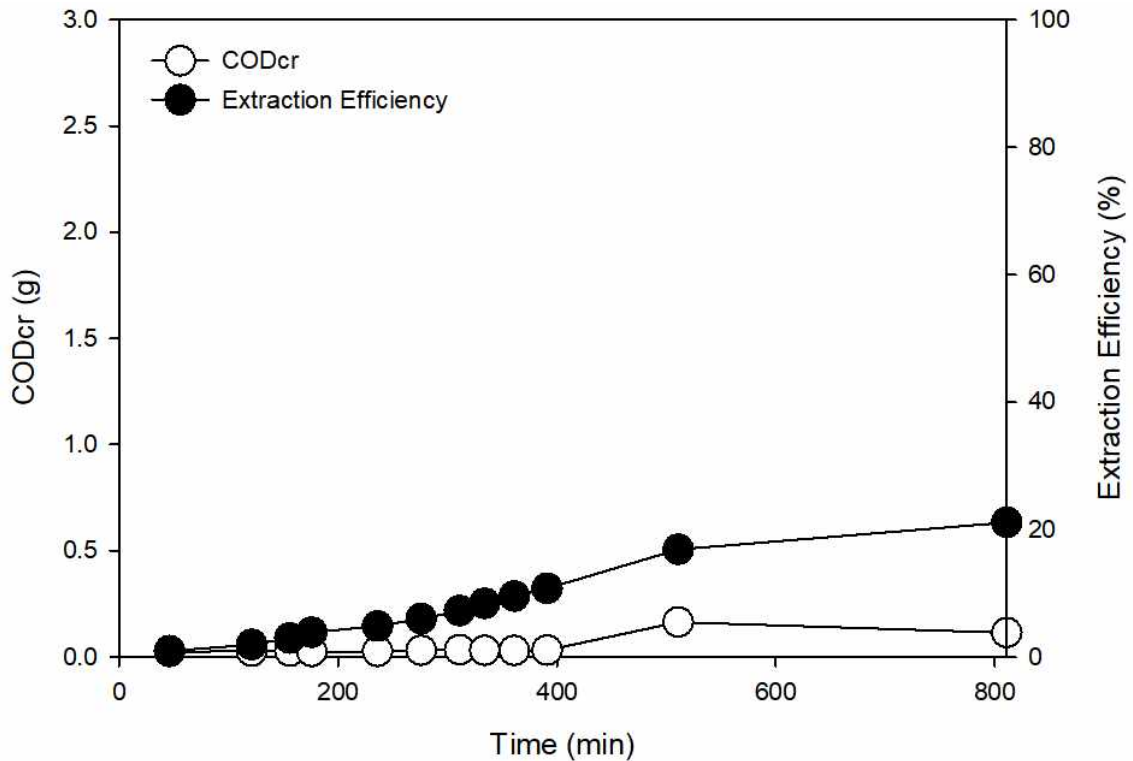
3.4.1.3 합성폐수(아세트산)의 유기탄소원 추출 특성

- 본 실험은 유기산만 혼합한 합성폐수에서 유기탄소원 추출 특성을 알아보기 위해 실시하였다. 앞선 실험에서는 유기산 외에 에탄올과의 혼합된 조건이어서 유기산만의 추출 특성을 확인하기 어려웠다. 반응온도를 110℃로 추출했기 때문에 추출된 유기물 중에 유기산은 추출되지 않을 것으로 판단했었다. 그러나 추출물의 pH 변화를 살펴본 결과 원수와 크게 다르지 않았던 것으로 나타나 유기산의 일부도 추출되었을 것이라 예상하였다. 이에 이러한 가설을 재확인하기 위해 본 실험을 수행하였다.
- <그림 3-19>은 아세트산 혼합 합성폐수로부터 추출물과 잔류물의 COD 농도변화를 나타내었다. 이전 실험과 달리 추출물의 농도는 실험 초기에 비해 높아지지 않았다. 또한 시간이 지남에 따라 초기농도 2,530 mg/L에 비해 최종 농도가 약 500 mg/L만 증가되었으며, 증가되는 기울기 또한 매우 완만하였다. 반면에 잔류물의 농도는 초기 농도 5,417 mg/L로 추출물에 비해 2.14배 높았으며 이러한 경향은 실험이 종료될 때까지 유지되는 것으로 나타났다.



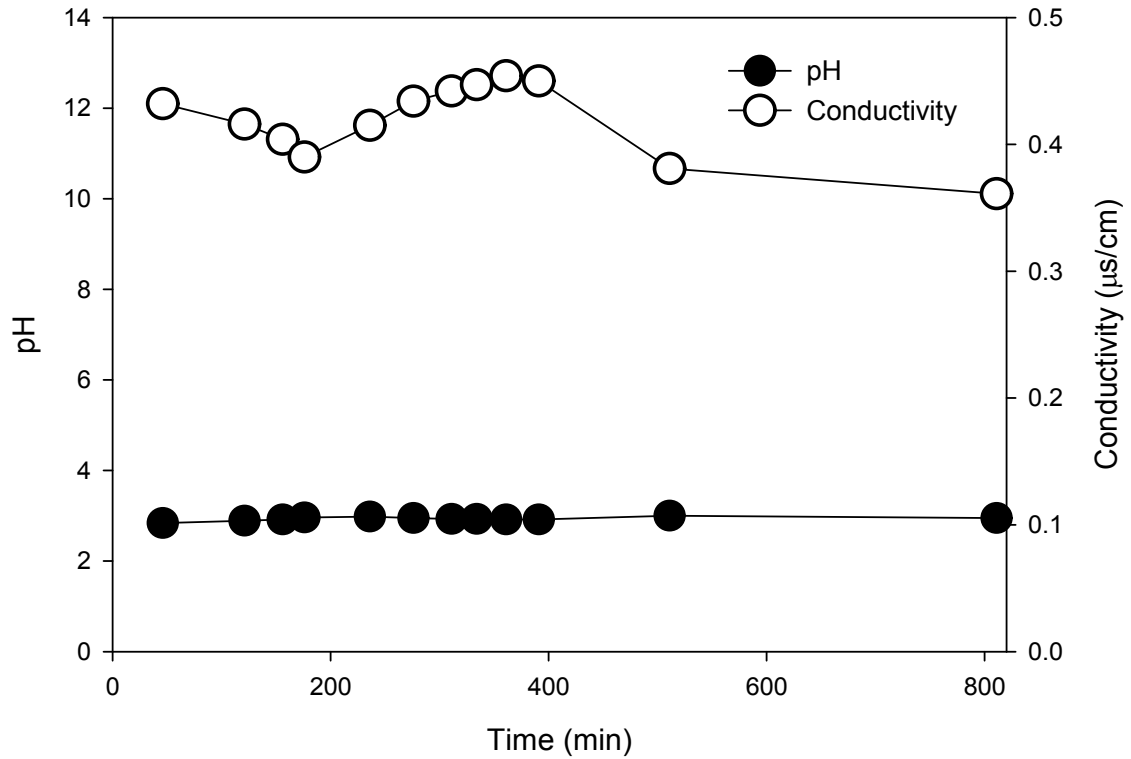
<그림 3-19> 합성폐수(아세트산)로부터 추출물 및 잔류물의 농도 변화

- <그림 3-20>은 추출물의 유기탄소원을 질량으로 환산한 결과이다. 최종 적으로 0.11 g의 COD만이 추출되었으며 이때의 추출 효율은 21.1%였다. 이는 원수의 COD질량 2.68 g에 비교하면 매우 미미한 양이었다.
- 유기산의 휘발에 의해 일부 추출물에 포함될 수 있으나 끓는점에 의한 증발은 아니어서 최종 추출물의 유기탄소원의 양은 매우 적었던 것으로 판단된다. 이를 통해 실험 폐수(응축수)에서 추출된 유기물은 대부분 알콜류일 것으로 판단된다.



<그림 3-20> 합성폐수(아세트산)로부터 추출물의 유기물 질량 및 추출효율 변화

○ <그림 3-21>은 합성폐수를 이용하여 분별증류 한 각 샘플의 pH 및 conductivity를 나타낸 것이다. 증류 실험은 총 811분간 수행하였다. 평균 pH는 2.93이며 일정한 값을 가지는 경향이 있다. 낮은 pH는 유기산이 일부 추출되었음을 의미하며, 합성 폐수에 포함된 아세트산으로 판단된다. 또한 conductivity는 냉각탑 보급수 기준인 200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ 보다 낮은 값을 나타내었다.



<그림 3-21> 증류 후 합성폐수의 pH, Conductivity의 변화

○ <표 3-9>은 실험 전·후 합성폐수 원수와 잔류물의 성상을 비교하였다. 최종 잔류물의 농도가 원수에 비해 1.2배 농축되었으며 이는 물이 증발됨에 따라 농도가 농축되었던 것으로 판단된다. 추출 효율은 25.4%로 나타나 앞선 실험들에 비해 매우 낮았다. 따라서 유기산은 수중에 존재하면서 끓는점 이하로 가열하여도 25% 정도는 휘발에 의해 추출물에 존재할 수 있음을 알 수 있다. pH 결과도 이를 뒷받침 한다.

<표 3-9> 실험시작 전 합성폐수 원수와 실험 종료 후 잔류물의 성상

항목	CODcr (mg/L)	CODcr (g)	pH	Conductivity (μS/cm)
합성폐수	5,360	2.68	2.85	0.47
잔류물	6,670	2.00	2.80	0.46
추출효율(%)	-	25.4	-	-

3.4.2 감압증발농축 방법을 이용한 유기탄소원 추출

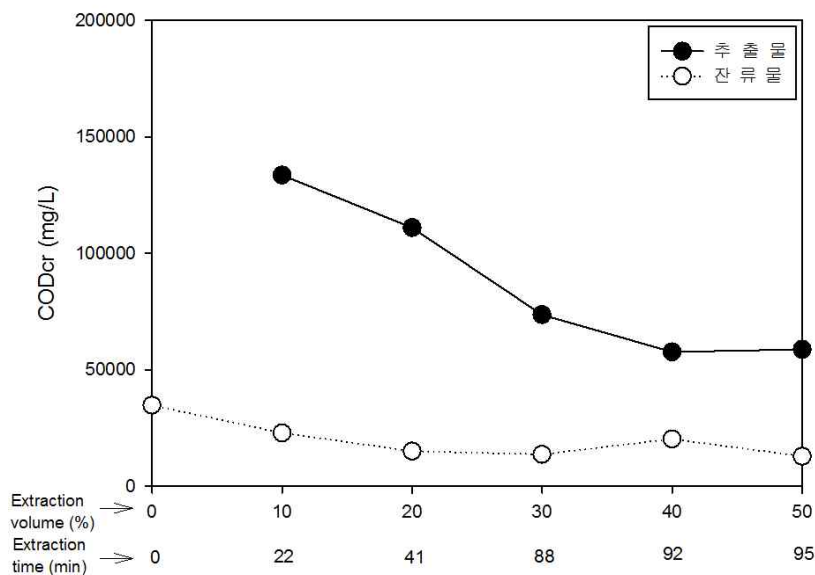
○ 본 연구에서는 응축수로부터 유기탄소원을 추출하는데 요구되는 에너지 절감을 위해 굴뚝에서 발생하는 폐열을 활용하고자 하였다. 현장의 굴뚝에서 발생하는 폐열은 온도가 약 120℃이며 응축수는 약 50℃가 된다. 따라서 유기탄소원 추출반응기에 투입시키기 전에 응축수를 예열하고, 반응기 내부 압력을 낮추는 동시에 끓는점을 낮추어 유기탄소원 추출에 요구되는 에너지를 최소화하고자 하였다.

3.4.2.1 온도별 감압조건에 따른 추출 특성

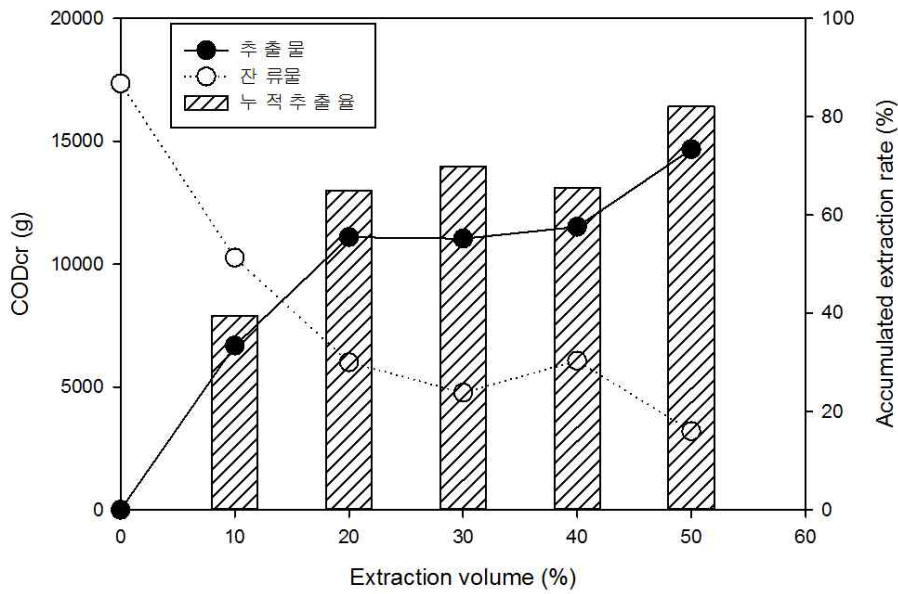
- -600 mmHg, 70℃에서의 추출

○ <그림 3-22>는 -600 mmHg, 70℃ 조건에서의 농도변화를 나타낸 것이다. 500 mL의 원수를 대상으로 추출하였다. 10%~50%까지 추출 과정에서 10%의 추출 시 COD농도가 153,000 mg/L로 가장 높았다. 이러한 결과는 앞서 감압을 하지 않고 수행한 분별증류 실험결과와 매우 유사하였다. 이후 농도는 점차 감소되었다. 10% 추출에 걸린 시간은 22분이었다.

○ <그림 3-23>는 -600 mmHg, 70℃ 조건에서의 추출물과 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화를 나타낸 것이다. 10% 추출 지점에서 추출효율은 약 40%로 나타났다. 이는 22분의 추출만으로도 응축수내 유기물을 절반가량 뽑아 낼 수 있음을 의미한다. 잔류물의 유기물 질량이 감소된 것은 유기물이 아닌 물이 빠져 나갔기 때문에 나타난 결과로 판단된다.



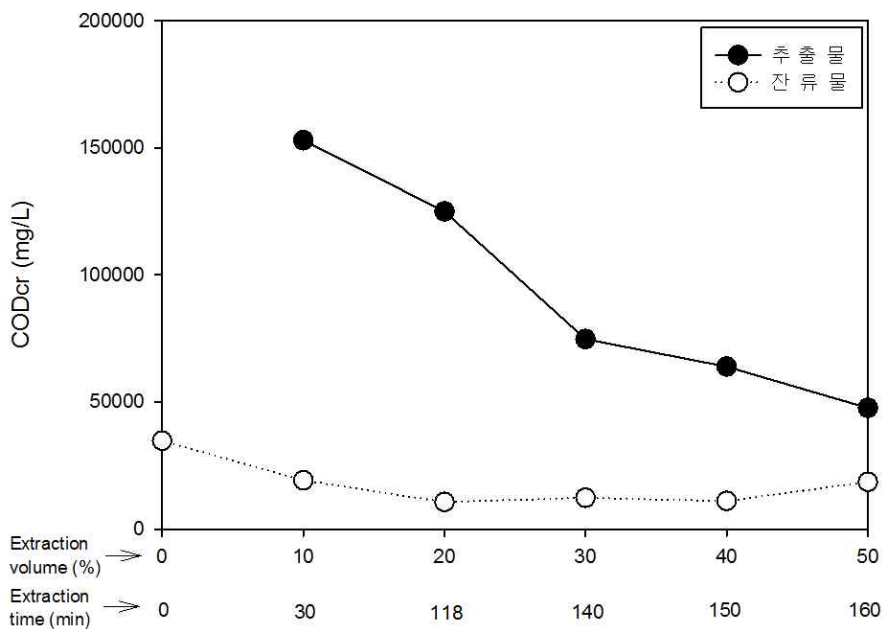
<그림 3-22> -600 mmHg, 70℃ 조건에서 추출물 및 잔류물의 시간별 농도 변화



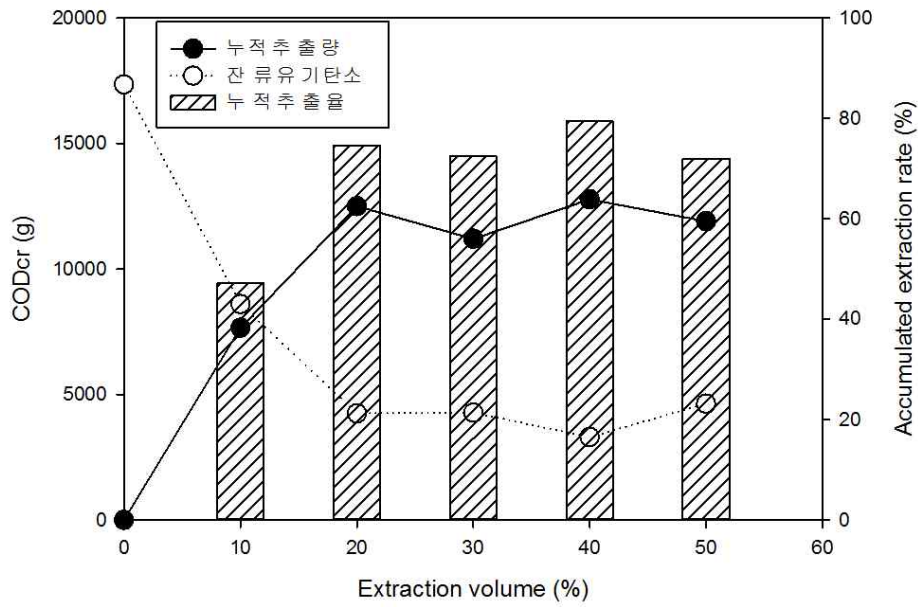
<그림 3-23> -600 mmHg, 70°C 조건에서 추출물, 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화

• -500 mmHg, 80°C에서의 추출

○ 본 실험에서의 온도는 이전보다 10°C를 높이고 감압은 100 mmHg 줄인 조건에서 실험하였다. <그림 3-24>에 나타낸바와 같이 10% 추출 지점의 농도가 가장 높았던 경향은 이전 실험과 큰 차이를 보이지 않았다. 그러나 10% 추출 시간은 약 8분이 증가되었다. <그림 3-25>의 유기물 질량과 추출효율 역시 70°C, -600 mmHg 조건과 큰 차이를 보이지 않았다.



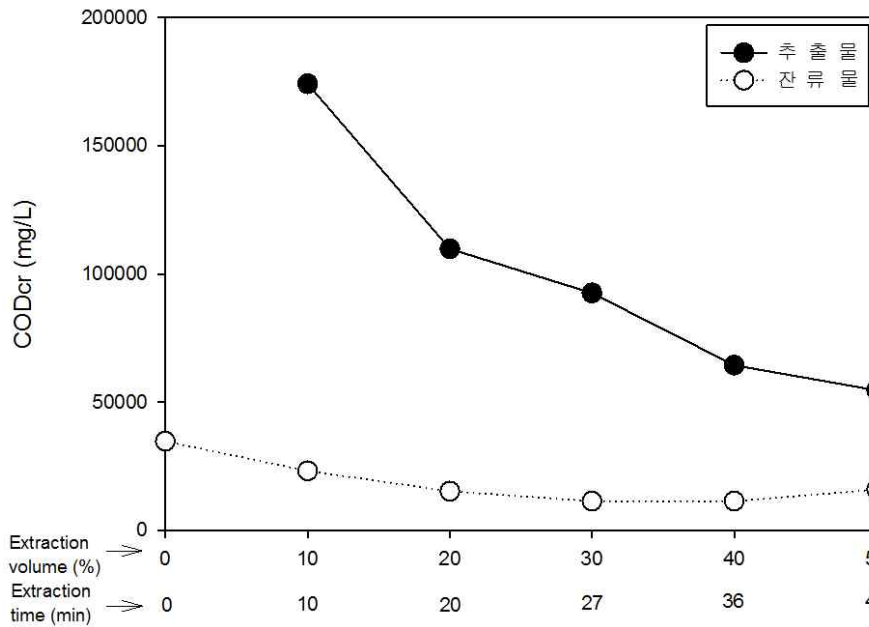
<그림 3-24> -500 mmHg, 80°C 조건에서 추출물 및 잔류물의 시간별 농도 변화



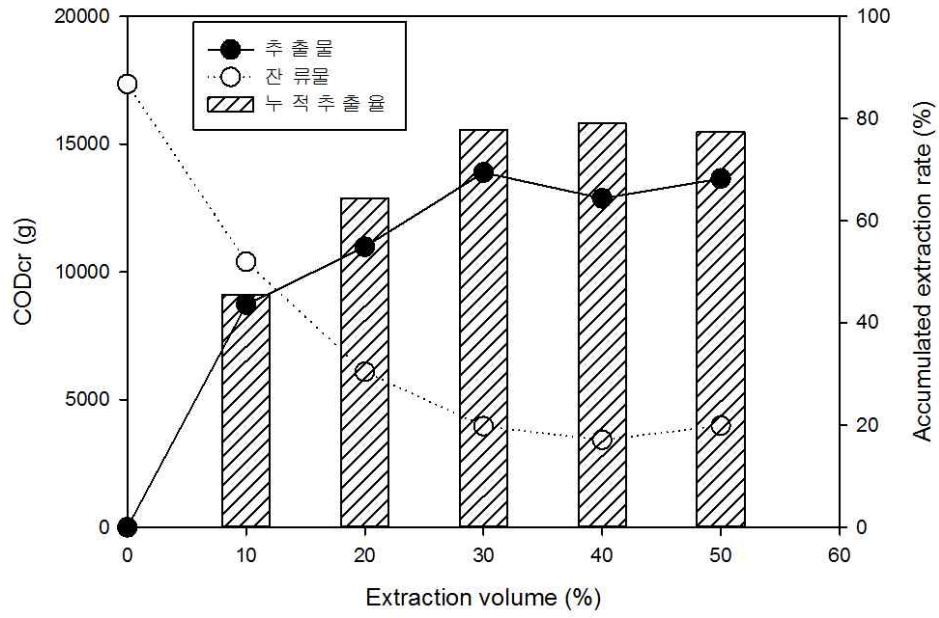
<그림 3-25> -500 mmHg, 80℃ 조건에서 추출물, 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화

• -600 mmHg, 80℃에서의 추출

○ 본 실험은 감압조건과 온도조건이 이전 실험에 비해 가장 높은 조건이다. 10% 추출 시점은 10분으로 가장 빨랐으며 추출 농도 또한 가장 높았다. 추출물의 농도 감소와 잔류물 농도 변화 경향은 이전 실험들과 유사하였다.



<그림 3-26> -600 mmHg, 80℃ 조건에서 추출물 및 잔류물의 시간별 농도 변화



<그림 3-27> -600 mmHg, 80°C 조건에서 추출물, 잔류물의 유기물 질량 및 추출효율 변화

4. 유기탄소원(추출물) 및 잔류물의 성상

4.1 추출물과 잔류물의 성상

4.1.1 추출물(유기탄소원) 성상

- 각 조건별로 10% 추출단계에서의 수질을 비교하였다. 본 연구에서 목표로 설정했던 유기탄소원 농도 BOD₅ 50,000 mg/L를 2배 이상 상회하는 결과를 나타냈다. 또한 BOD₅/COD_{cr}의 비율이 90%를 넘는 것으로 나타나 추출된 유기물은 생물학적 분해도가 매우 높은 것을 알 수 있었다. 상대적으로 질소의 농도는 매우 낮기 때문에 대체 탄소원으로서의 가치가 매우 높을 것으로 판단된다. 한편, 추출 유기물의 농도는 600 mmHg, 70℃에서 가장 낮았다.

<표 3-10> 추출물 수질 비교

분석항목	단위	원수	추출물		
			-600 mmHg, 70℃	-500 mmHg, 80℃	-600 mmHg, 80℃
COD _{cr}	mg/L	34,700	133,600	153,000	174,200
BOD ₅	mg/L	24,480	120,900	150,300	169,100
NH ₄ ⁺ -N	mg/L	-	95.5	63.5	79
BOD ₅ / COD _{cr}	-	-	0.9	0.98	0.97

4.1.2 잔류물의 성상

- 본 연구에서 잔류물은 냉각수로 재이용하고자 한다. 이를 위해서는 잔류물의 수질을 파악하여 냉각수로 재이용하기 위한 수질을 만족하기 위한 수처리가 필요하다.
- 국가기술표준원에서는 ‘냉동·공조용 냉각수 수질 기준 (KSI3003), 2013년’을 설정하고 산업계에서 이를 준수할 것을 규정하고 있다. 본 기준의 주요 목적은 보일러 배관에 스케일 발생과 부식방지를 주목적으로 하고 있으며 ‘기준항목’에 칼슘경도, 염소이온, 황산이온, 알칼리도, 전기전도도를 규정하고 있다. 또한 ‘참고항목’으로 탁도, 암모늄이온, 철, 이온성 실리카, 포화지수를 포함하고 있다. 본 연구에서는 ‘기준항목’을 대상으로 잔류물의 수질을 비교하였다.
- <표 3-11>에 나타낸바와 같이 알칼리도를 제외하고 모든 항목에서 기준을 만족하는 것으로 나타났다. 냉각수 수질기준에 COD항목은 포함되어 있지 않다. 그러나 현재 잔류물의 COD는 약 20,000 mg/L로 매우 높기 때문에 냉각수로 사용 시 미생물 번식으로 인한 슬러리 때문에 열교환 효율 감소 및 배관이 막힐 우려가 있다. 따라서 고농도의 유기물은 가장 경제적인 처리방법인 생물학적 처리가 필요한 것으로 판단된다.
- 잔류물의 pH는 약 3.5로 낮아 현재는 냉각수 수질기준에 만족하지 못한다. 그러나 생물학적 처리과정에서 중화를 해야 하므로 기준 만족이 가능하다.

<표 3-11> 잔류물 수질 비교

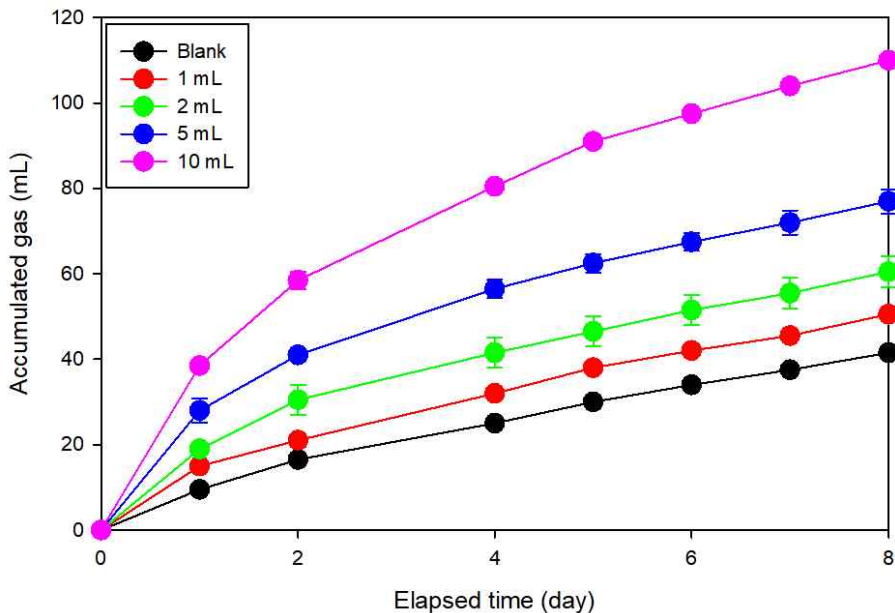
분석항목	단위	냉각수의 수질기준	원수	잔류물		
				70℃, 600 mmHg	80℃, 600 mmHg	80℃, 500 mmHg
CODcr	mg/L	기준 없음	34,700	22,800	23,100	19,100
칼슘경도	mg/L	150이하	2.368	11.642	5.392	-
염소이온	mg/L	200이하	0.11	0.07	N.D.	N.D.
황산이온	mg/L	200이하	N.D.	N.D.	N.D.	N.D.
알칼리도	mg/L	100이하 (pH 4.8)	pH 3.5	pH 3.5	pH 3.5	pH 3.5
전기 전도도	μSm	8000이하	1.03	0.924	0.959	0.981

5. 잔류물 및 유기탄소원의 이용 방안

5.1 잔류물을 냉각수로 재활용하기 위한 수처리 방법

5.1.1 혐기성 분해 가능성 검토(BMP test)

- 냉각수로 재활용하기 위해 선택 가능한 생물학적 수처리 방법으로는 혐기성처리와 호기성 처리가 있다. 현재 잔류물은 생물학적 분해가 용이한 유기물이고, 고형물이 전혀 없고, 질소의 농도도 매우 낮기 때문에 호기성 처리만으로도 적용 가능할 것이다. 그러나 반응조의 용량이 커짐에 따라 초기 투자비용이 높아지고 산소 공급에 요구되는 동력비, 슬러지 처리비, 응집제 비용 등을 감안했을 때 호기성처리 만으로는 비경제적일 것으로 판단된다. 따라서 잔류물의 처리 방법은 혐기성 처리와 호기성 처리를 병행하는 것이 좋을 것으로 판단된다.
- 응축수 원수로부터 10%(부피기준)를 추출 후 잔류물의 유기물농도는 평균 약 21,600 mg/L로 나타났다. 잔류물이 혐기성조건에서 분해 가능한 유기물이 어느정도인지를 알아보기 위해 BMP test를 수행하였다.
- <그림 3-28>에 나타낸바와 같이 샘플 주입량이 증가됨에 따라 가스발생량 또한 증가되는 것으로 나타났다. <표 3-12>에서 8일까지 증가된 가스량을 대상으로 분해 가능 유기물의 양과 수율을 확인하였다.



<그림 3-28> 잔류물 주입량별 가스발생량 변화 (BMP test)

<표 3-12> 분해가능 COD 및 메탄가스 발생 수율 비교

Vol. of Sample	Gas production (mL)@8day	%CH ₄	분해 가능 COD (g COD/L)		수율 (mL CH ₄ /g COD)	
			1 ¹⁾	2 ²⁾	1 ³⁾	2 ⁴⁾
0	47	70	0	0	0	0
1	56	70	16	19	358	438
2	67	70	18	9	398	318
5	83	70	13	12	286	266
10	116	70	12	12	276	241
평균	-	-	15	13	330	316
	-	-	14		323	
처리효율	-	-	79.5%		81.7%	

1) (sample gas vol.-blank gas vol.)0.7/(sample vol.)(395 ml CH₄/g COD)

2) (later sample gas vol.-pervious sample gas vol.)0.7/(sample vol.)(395 ml CH₄/g COD)

3) (sample gas vol.-blank gas vol.)0.7/(sample vol.)(initial sample COD)

4) (later sample gas vol.-pervious sample gas vol.)0.7/(sample vol.)(initial sample COD)

- BMP test에 주입했던 잔류물의 초기 COD는 17.6 g/L였다. BMP결과를 통해 분해 가능 COD를 계산한 결과 14 g COD/L로 나타나 초기 COD에 비해 79.5%가 분해 가능했던 것으로 나타났다. 메탄수율을 확인한 결과 g COD당 323 mL의 메탄가스가 생성되어 이론적 메탄생성수율에 비해 81.7%가 메탄가스로 전환된 것으로 나타났다.
- 이러한 결과는 향후 잔류물을 냉각수로 재이용하기 위한 수처리 공정을 설계하는데 있어서 중요한 결과이다. 잔류물 내에 존재하는 유기물은 혐기성 공정에서 최소 80%정도는 분해가 가능할 것으로 볼 수 있으며 체류시간과 운전조건에 따라 이는 좀 더 증가될 수 있다.

5.1.2 냉각수로 재이용하기 위한 처리 공정

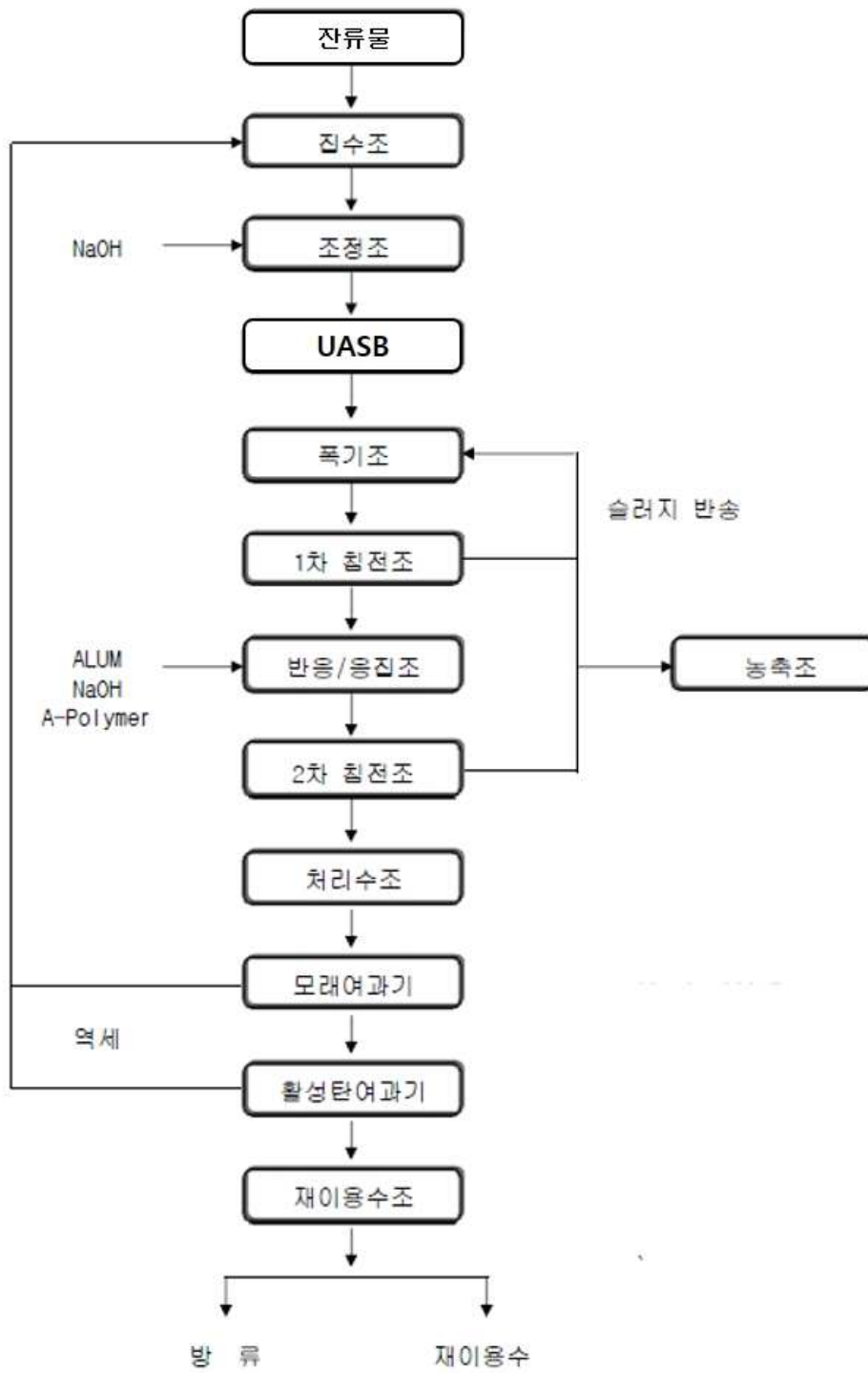
- <그림 3-29>에 본 연구에서 재이용수 생산을 위해 제안하고자 하는 수처리 공정도를 나타냈다. 혐기성처리는 고효율 혐기소화의 일종인 UASB(Upflow Anaerobic Sludge Blanket) 또는 EGSB(Expanded Granular Sludge Bed Digestion)로 1차 처리하고, 후처리는 일반 활성슬러지법으로 처리하도록 구성하였다. 특히, 이들 혐기성 공법은 고형물이 없는 폐수 조건에서 적용성이 좋다. 호기성처리 시 잔류물의 질소 농도가 매우 낮기 때문에 질소 제거를 위한 고도처리는 불필요 할 것으로 판단된다. 또한 혐기성 처리에서 바이오가스 생산이 가능하므로 음식물류폐기물 건조 공정에 건조연료로 활용할 수 있어 보다 경제적이다.
- 호기성 처리는 MBR(Membrane Biological Reactor) 형태로 적용하여 반응조의 용량을 일반 활성슬러지법에 비해 축소시킬 수도 있겠으나, 이는 현장 운전인력의 전문성과 부지의 특성을 고려하여 선택할 수 있겠다. 단, MBR을 채택하지 않을 경우에는 침전조 유출수내 미세 플러들의 제거 및 잔류 미량오염물질의 제거를 위해 공정의 최후단에 모래여과 및 활성탄 여과 탑을 설치하는 것이 필요할 것으로 판단된다.
- <표 3-13>는 제안 공정으로 운전시 경제성을 평가한 표이다. 하루 100 m³의 잔류물을 제안 공정으로 처리한다고 가정 하였을 때 혐기성소화조 운전으로 인한 바이오가스 활용으로 약품비와 활성탄 교체비 전력비가 모두 상쇄되고 오히려 연간 약 130만원의 이익이 발생되는 것으로 조사되었다.

<표 3-13> 수처리 경제성 비교 (100 m³/일 처리규모)

(단위: 원)

구 분	사용량	단 가	운전비		비 고	
			월간	연간		
약품비	ALUM(7%)	144	150	514,286	6,171,429	
	NaOH(25%)	48	280	403,160	4,837,916	
	ANION	0.2	5,000	30,000	360,000	
	그레놀 촉진제	7.0	12,000	2,520,000	30,240,000	
	소계			3,467,445	41,609,345	
활성탄교체	8.2	2,500		615,094	7,381,125	교체 6개월
전력비	1,170	78		2,737,753	32,853,038	
중계				6,820,292	81,843,508	
Biogas (6,500 kcal/m ³)	420	550		-6,930,000	-83,160,000	
합 계				-109,708	-1,316,492	

※ 인건비, 감가상각비 제외



<그림 3-29> 잔류물의 재이용을 위한 수처리 공정

5.1.3 안산시 반월공단 내 사업장에 유기탄소원의 적용성 검토

- 안산 반월공단 내 도금폐수 및 염색폐수를 대상으로 유기탄소원 적용 가능성을 검토하였다<표 3-14>. 도금폐수와 염색폐수의 C/N비가 각각 4, 20.6으로 나타났다. 종속영양탈질에 있어서 이론적 C/N는 2.47 g as MeOH/g NO₃-N이지만 현장에서 약 95%의 탈질을 달성하기 위해서 C/N를 5~6으로 유지한다.
- 도금폐수의 경우 질소처리를 위한 유기물이 충분하지는 않기 때문에 외부탄소원이 필요한 상황이다. 또한 현재의 C/N는 CODcr으로 계산했기 때문에 이 CODcr의 유기물이 생분해 불가능한 물질이라면 외부탄소원의 필요량은 더욱 높아질 것이다.
- 염색폐수의 경우도 마찬가지로 CODcr의 생분해 가능성을 파악하여 외부탄소원 필요성 여부를 확인해야 하겠다. 또한 도금폐수 및 염색폐수 처리장에서 현재 운영현황에 대한 정보를 수집하여 외부탄소원의 활용여부를 확인한 결과, 도금폐수는 50% 메탄올을 이용하는 것으로 나타나 향후 본 연구의 유기탄소원의 활용성이 높을 것으로 판단된다.

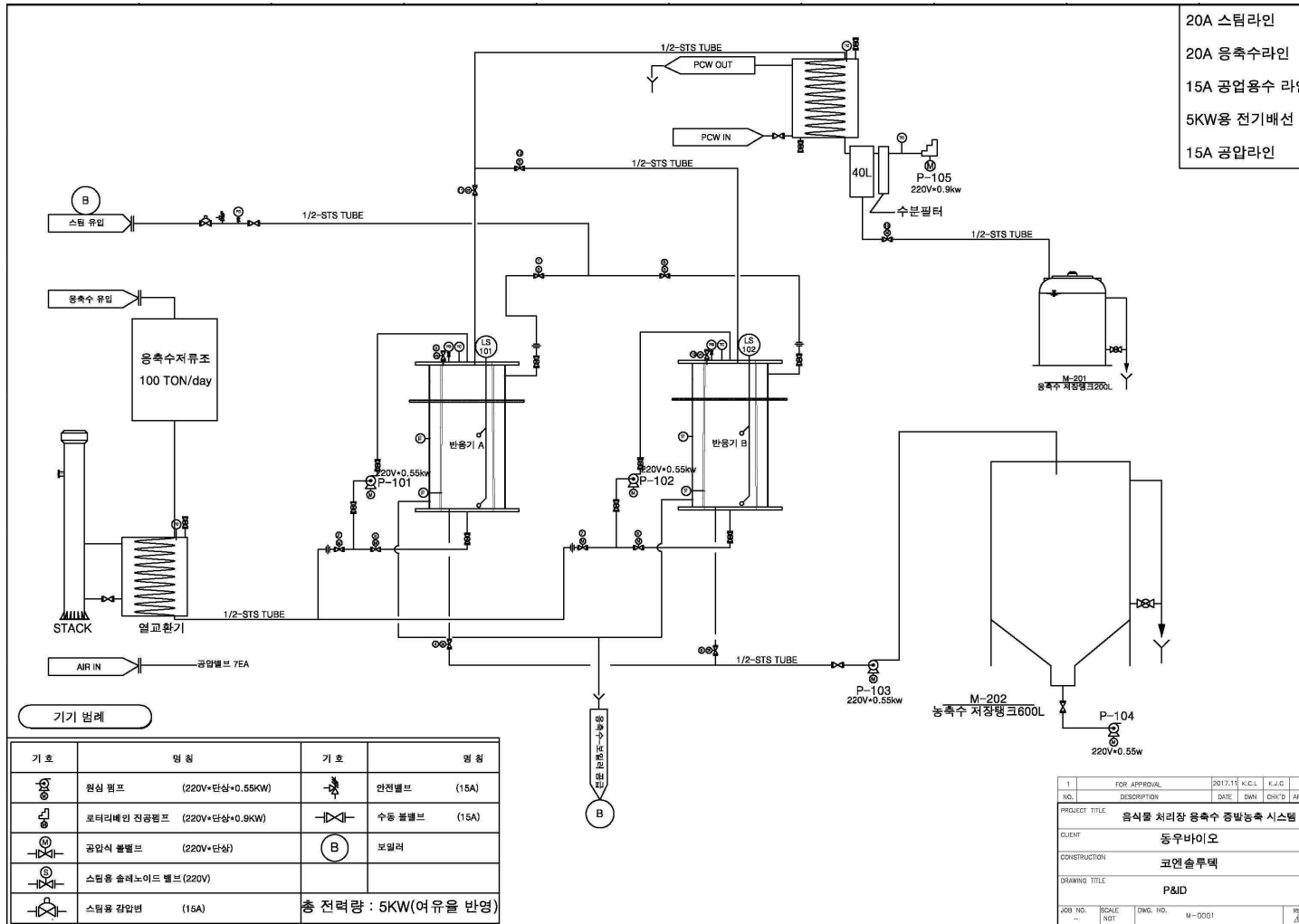
<표 3-14> 도금폐수와 염색폐수 수질분석 결과

(단위: mg/L)

분석항목	도금폐수	염색폐수
TCODcr	381	573
SCOD	360	433
TN	90	21
TSS	73.6	32
pH	2.29	6.79
C/N	4	20.6

6. 파일럿 플랜트 설계

- 본 연구에서 목표로하는 파일럿 플랜트의 처리용량은 1 m³/day 규모이다. 이를 만족하기 위한 파일럿 플랜트를 설계하였다.
- 현재 굴뚝에서는 약 120℃의 폐열이 대기로 배출되고 있으며 유량은 250 m³/min이며 응축수 온도는 약 50℃이다.
- <그림 3-30>에 파일럿 플랜트의 공정도를 나타냈다. 설계기준은 진공증발농축법을 적용하였으며 증발농축기 2조를 병렬 교차 운전하는 방식을 채택하였다. 1기가 회분식으로 운전되는 동안 다른 1기가 배출될 수 있도록 하기 위함이다. 또한 굴뚝에서 버려지는 폐열은 진공증발농축기로 투입되기 전에 열교환기를 통해 50℃에서 80℃까지 예열 후 투입될 수 있도록 설계하였다.
- 증발농축기 온도는 앞선 실험에서 도출된 바와 같이 80℃가 되도록 가열할 것이며 안정적인 가열을 위해 증발농축에 요구되는 에너지는 메인 공정의 스팀을 공급할 계획이다. 증발농축기는 이중관으로 제작하고 외부관으로 공정 내 발생하는 스팀을 통과시켜 증발효율을 향상시키기 위한 열원으로 사용하고자 한다.
- 설계 인자는 다음과 같다. 진공증발, 80℃(-600 mmHg), 1일 운전시간, 24 hr/day, 진공증발농축기 반응조부피 100L x 2set, 증발속도 2L/min로 설계하였다.
- 증발농축기의 상부에서 원액을 펌프로 펌핑하여 상부에서 분사 및 감압 처리함으로써 증발농축 시키고자 한다. 메인 공정에서 생산한 스팀을 증발농축기의 외관으로 상, 하 방향으로 주입함으로써 순화되는 원액과의 접촉을 통해 증발효과 극대화하고자 하며 투입된 원액이 일정 수위가 되면 펌프를 이용해 PE 농축수 탱크로 이송될 수 있도록 하였다.
- 스팀이 유입 및 분사 노즐 막힘 등 발생할 수 있는 사고를 대비해 압력계이치를 장착하고 유입량의 수분을 충분히 증발시키기 위한 건조 환경 조성 및 증발농축기 내부 온도 유지 위한 단열재를 설치하고자 하였다.



<그림 3-30> 파일럿 플랜트 공정도 (P&ID)

제 4 장 결 론



결 론 56



제 4 장 결 론

<발생특성>

- 음폐수는 겨울철에 발생량이 가장 낮았으며 봄, 여름으로 갈수록 음폐수의 발생량이 증가되는 것으로 나타났다. 원물에 함유되어 있는 음폐수의 비율 또한 유사한 경향을 나타냈다.
- 응축수의 경우 발생량은 슬러지 케익의 증감에 관계없이 대체로 일정하게 유지되는 것으로 나타났다. 원물의 탈수 후 발생하는 슬러지 케익은 평균 함수율이 약 80%로 건조공정으로 이송된다.
- 주말(토, 일)에는 음폐물의 수거를 하지 않기 때문에 월요일에 토, 일의 물량이 한꺼번에 반입됨에 따라 처리량 또한 급격히 증가되었다가 다시 감소하는 형태가 약 4~5일 간격으로 유지되었다. 음폐수와 응축수의 발생량 또한 유사한 발생특성을 나타냈다.

<응축수 수질분석>

- 응축수는 음폐수와 달리 유기물의 농도가 매우 높은 반면에 질소, 인, 고형물, 유분의 농도가 매우 낮은 특성을 가지고 있다. 또한 여름철에는 온도가 높아짐에 따라 수거과정에서 산발효 및 알코올발효가 일어나고 건조과정에서 유기산과 알코올이 휘발되어 유기물의 농도가 다른 계절에 비해 높아지는 특징이 있다.
- 중금속의 경우 '가'지역의 배출허용기준과 비교하였다. 모든 항목에서 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

<분별증류 및 진공증발농축법을 이용한 최적 추출조건 탐색>

- 분별증류법으로 실페수와 합성폐수를 대상으로 110℃에서 추출실험을 실시한 결과 끓는점의 차이에 따라 에탄올과 물이 동시에 추출되었으며 유기산의 추출량은 미량이었다. 잔류물에는 증류되지 않은 유기산이 잔류하였고 물이 증발됨에 따라 잔존 유기산은 점차 농축되었다.
- 진공증발농축법으로 -500 mmHg, -600 mmHg의 감압조건과 70℃, 80℃ 온도에서 각각 유기탄소원 최적 추출 조건을 확인하였다. -600 mmHg, 80℃에서 유기물의 농도가 가장 높았으며 추출시간 또한 가장 짧았다. 따라서 파일럿 플랜트 설계시 이를 최적 추출 조건으로 설정하여 설계하였다.

<추출물 및 잔류물 성상분석>

- 추출물은 투입 원수대비 약 10%의 추출 조건에서 COD가 약 150,000 mg/L 이상의 유기탄소원을 추출할 수 있었고, BOD는 COD의 95%이상으로 나타나 추출된 유기탄소원의 대부분은 생분해가 매우 용이한 성분인 것으로 조사되었다. 본 연구에서 설정한 유기탄소원 농도 목표치(50,000 mgCOD/L)를 약 3배 초과 달성하였다.
- 잔류물을 냉각수로 활용하기 위해 냉각수 수질기준의 기준항목과 비교결과 pH를 제외하고 스케일 유발물질, 부식물질은 기준치 이하로 나타났다. pH는 생물학적 처리 전에 중화를 해야 하므로 기준 달성이 가능하다.

<잔류물의 수처리 공정 및 추출물의 활용>

- 잔류물은 수처리 후 냉각수로 재활용하기 위해 혐기소화와 호기성처리를 조합한 수처리 공정으로 제시하였다. 혐기성은 UASB 또는 EGSB 공법과 호기성은 일반활성슬러지법의 조합이 적합할 것으로 제시하였다.
- 안산시 반월공단 내 도금공장폐수와 염색공장 폐수의 수질을 분석하여 C/N비를 조사한 결과 도금폐수의 경우 외부탄소원이 필요할 것으로 나타났다.

<파일럿 플랜트 설계>

- 파일럿 플랜트의 일처리 용량은 1 m³으로 설계하였으며 2개의 진공증발농축 탱크로 구성하여 회분식으로 운전하되 연속운전 되도록 하였다.
- 진공증발농축 탱크로 유입하기 전 굴뚝의 폐열과 잔류물의 열교환을 통해 50℃의 잔류물을 70℃이상으로 예열 후 진공증발농축기로 투입되도록 설계하였다.

주 의 문

최종연구보고서 (17-08-04-10-16)

음식물류폐기물의 건조 공정에서 발생하는 응축수의 재이용 기술 개발

발행인 : 센터장 김 문 일

발행일 : 2017년 1월 17일

발행처 : 안산녹색환경지원센터

주 소 : 경기 안산시 상록구 한양대학로 55 한양대학교 제2공학관 513호

전 화 : 031-400-4236, 436-8141~5

팩 스 : 031-400-4237

e-mail : agec@agec.or.kr

※ 주 의

1. 이 보고서는 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 보고서입니다.
2. 이 보고서 내용을 발표할 때에는 반드시 안산녹색환경지원센터에서 시행한 연구개발사업의 연구결과임을 밝혀야 합니다.
3. 국가과학기술 기밀유지에 필요한 내용은 대외적으로 발표 또는 공개하여서는 안 됩니다.