

폐수처리 기술동향



이 양 래
(KIMM 산업설비연구부)

- '80 전남대학교 문리학과 (학사)
- '82 전남대학교 대학원 물리학과 (석사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



김 명 배
(KIMM 산업설비연구부)

- '82 서울대학교 기계공학과 (학사)
- '89 한국과학기술원 기계공학과 (석사)
- '82-현재 한국기계연구원 선임연구원



송 치 성
(KIMM 산업설비연구부)

- '83 한국해양대학교 기관공학과 (학사)
- '83-'87 영국 Zodiac Maritime Co.
- '89 한국해양대학교 기계공학과 (석사)
- '89-현재 한국기계연구원 연구원

1. 서 론

최근의 극심한 대기환경오염과 더불어 수자원의 오염도 공업화의 진전에 따라 그의 심각성은 매우 우려되고 있다.

산업공해 중 특히 폐수에 대한 공해는 오래전부터 사회문제화 되어 왔고 산업폐수의 종류가 다양해서 그 종류에 따라 처리하는 방법도 다양하며 종래의 처리방법인 화학적 처리방법은 막대한 양의 약품이 사용된다. 공장폐수중 도금폐수는 타 산업폐수와 비교하면 그 양은 적으나 유해도가 높고, 도금공정중에 발생하는 Cr, Ni, Cu, Zn 등의 유해중금속이나 유독성이 높은 CN 화합물을 함유하고 있다.

또한 도금공정상 탈지, 수세공정이 필수적으로 이 공정중에 투입되는 화학약품 때문에 PH가 산성 또는 알카리성으로 기울어져 있는 특성을 가지고 있다.

염색폐수는 염색공정과 염색할 섬유의 세척공정에서 주로 발생되며 이중에 염료가 다량 함유되어 색도와 온도가 높으며 색소의 산화를 위해 독성물질인 크롬이 투입되게 된다.

이러한 폐수의 처리는 종래의 화학적 처리방법에 의해서 어느정도 분해·응집시키고 있으나 투입된 약품 자체가 또다른 오염원이 될 수 있으므로 폐수의 완전한 처리는 사실상 불가능하고 오염도를 1차적으로 줄여서 배출하는 것이 현재의 일반적인 상황이다.

특히 도금·염색공업에서 배출되는 중금속 오염폐수 등은 그 처리가 거의 불가능할 뿐 아니라, 그의 처리비용도 높기 때문에 제품원가에 미치는 폐수처리비용도 급상승하게 된다. 특히 최근의 환경규제의 강화는 이의 처리비용의 상승을 가

저이기 때문에 국내 관련제품의 가격경쟁력도 우려할만한 수준에까지 이르게 되었다.

이러한 이유로 선진외국에서는 저렴한 비용의 폐수처리장치의 개발을 서두르게 되었는데 막분리를 이용한 폐수처리방법과 감압증발에 의한 폐수처리 방법이 그것이다.

상기의 처리기술은 원래 담수화 공정에서 소금을 분리하여 바닷물로 부터 청수를 생산하는 장치로써 개발되었던 기술인데 이러한 분리기술을 폐수처리 등에 적용시켜 개발된 방법이다.

얇은 막을 이용하여 용존부의 이온을 제거하는 막분리 방법에는 역삼투막을 이용한 역삼투막법 (Reverse Osmosis Membrane), 전기적으로 양이온과 음이온을 분리하여 제거하는 전기투석막법 (Electro Dialysis)이 있다.

증발법에는 열에 의해 원수가 가열되고 증발된 수증기를 냉각·응축시켜 순수한 물을 얻는 방식으로 증발방법에 따라 다단후레쉬 증발방식 (Multi-Stage Fresh Evaporation), 수직증발관식 (Vertical Tube Evaporation) 및 증기압축방식 (Vapor Compression) 등이 있다.

2. 중금속 회수를 위한 폐수처리방치

2.1 화학처리방식에 의한 폐수처리

화학처리에 의한 폐수정화 처리방식은 종래부터 사용되어 왔던 기술이다. 화학적 처리기술은 그 폐수의 성분에 따라 그 폐수와 화학반응을 일으켜 응집·침전시켜 폐수를 처리하는 관계로 폐수의 주성분에 따라 그 처리방법이 달라진다. 그림 1은 화학적 폐수처리방법의 일례를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 각 폐수를 산·알카리 폐수, Cr계 폐수 등으로 성분별로 분리하고, 그 성분 및 농도에 따라 적정량의 화학약품을 투여하여 처리하고 있다.

이러한 화학약품 처리에 의한 폐수처리방법은 그림에서 보는 바와 같이 단일성분 폐수에 대하여는 어느정도 효과를 볼 수 있으나 폐수수거 과정에서 폐수의 분리수거가 현실적으로 불가능하기 때문에 화학적 처리방식으로는 복합적인

성분이 함유된 폐수처리가 거의 불가능하다. 일반적으로 도금공정 또는 염색공정에서 배출되는 폐수는 폐수의 종류에 따라 함유된 중금속의 종류도 다르기 때문에 적정량의 화학약품 투여 및 원폐수의 특성을 정확히 분석한 후 행하여야 하나, 원 폐수의 성분분석을 하는데만도 며칠씩이나 걸리는 공정이 필요하기 때문에 현실적으로 화학약품에 의한 복합폐수처리는 불가능하게 된다.

그림 2는 폐수처리의 일반적인 과정을 나타내고 있다. 정수처리는 응집, 침전, 여과, 살균을 기본으로 한 공정이 표준이지만 집수지의 오염으로 인해 고도의 정수처리기술이 요구되며, 처리면적이 가능한한 적어야 하고 설비 복잡화 및 인력부족에 따른 보수·유지 관리가 용이하면서 안정된 수질을 얻을 수 있는 처리공정이 요구되기 때문에 폐수처리장치의 시스템 제어와 처리단계에서 폐수의 질을 판별할 수 있는 Monitoring System 기술이 요구된다. 따라서 생산공정의 개선, 공정 조작의 합리화가 선행되어 폐수처리에 부담을 줄여야 하는 것이 중요하며 처리기술의 진보보다 발생원에 대한 근본대책에 보다 많은 노력을 기울일 필요가 있다고 본다.

상기와 같은 처리시스템의 순서는 대개 개념적으로 완성되어 있으나, 유기물질 제거가 가능하며 동시에 BOD와 동시제거 및 필요한 동력의 절감이 검토되어야 한다. 폐수의 생물학적 처리와 화학약품이 투여되는 응집처리는 앞으로도 중요한 방법으로 기술개선이 요구된다.

동시에 오염물질의 특성, 폐수의 성상파악, 폐수처리장치의 유지·관리와 조작기준 등이 선행되어야 한다.

2.2 막분리에 의한 폐수처리방법(역삼투압식 처리방법)

분리막(Membrane)은 고분자 재료의 물질선택 투과성질을 이용한 분리기술의 하나로 1960년대 미국에서 개발되었다. 초기의 분리막은 역삼투막 (Reverse Osmosis Membrane)을 중심으로 개발되었으나 최근에는 한외여과막(Ultrafiltration), 정밀여과막(Micro Filtration)을 비롯한 수처리뿐만 아

공 정 도(현재)

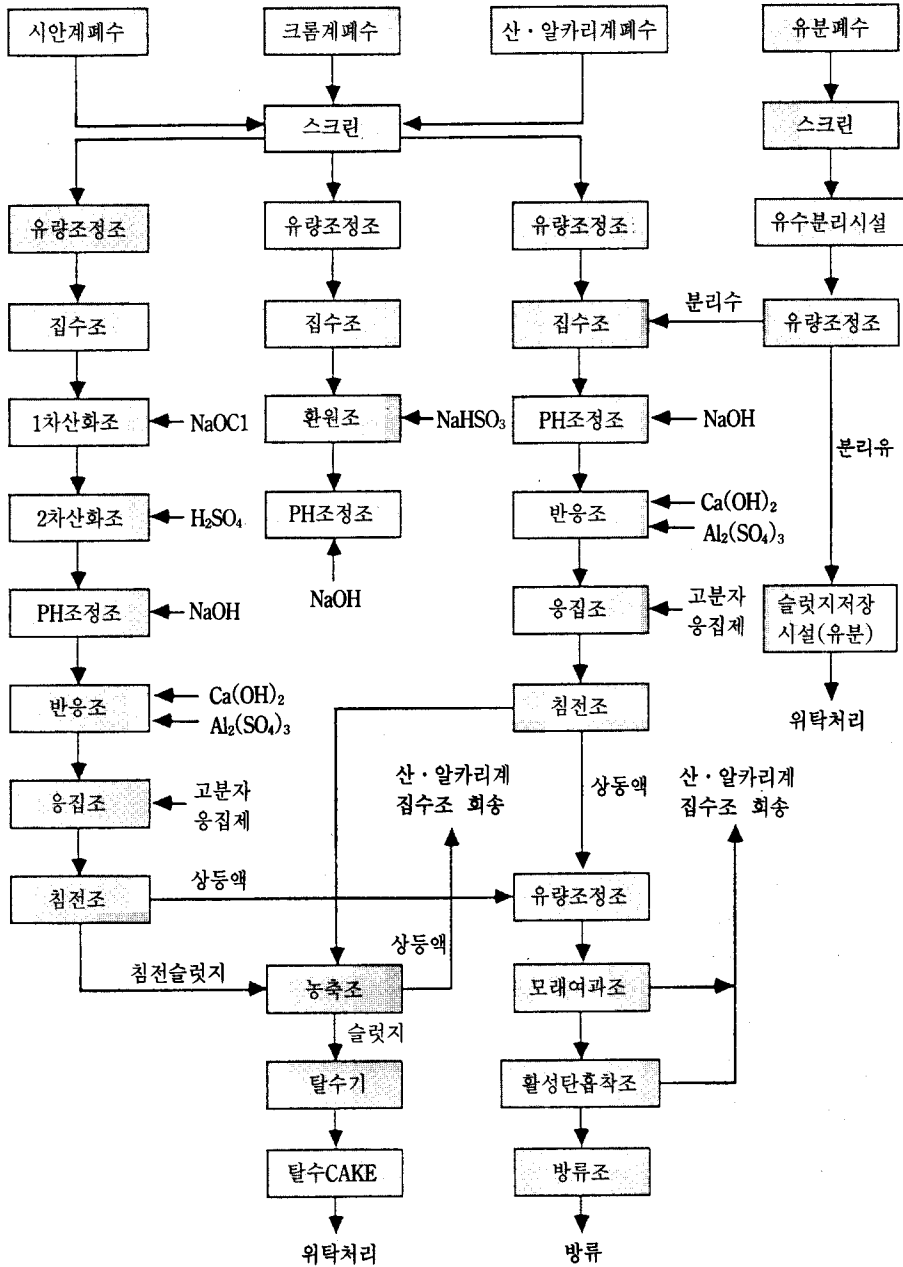


그림 1. 화학적 처리방법

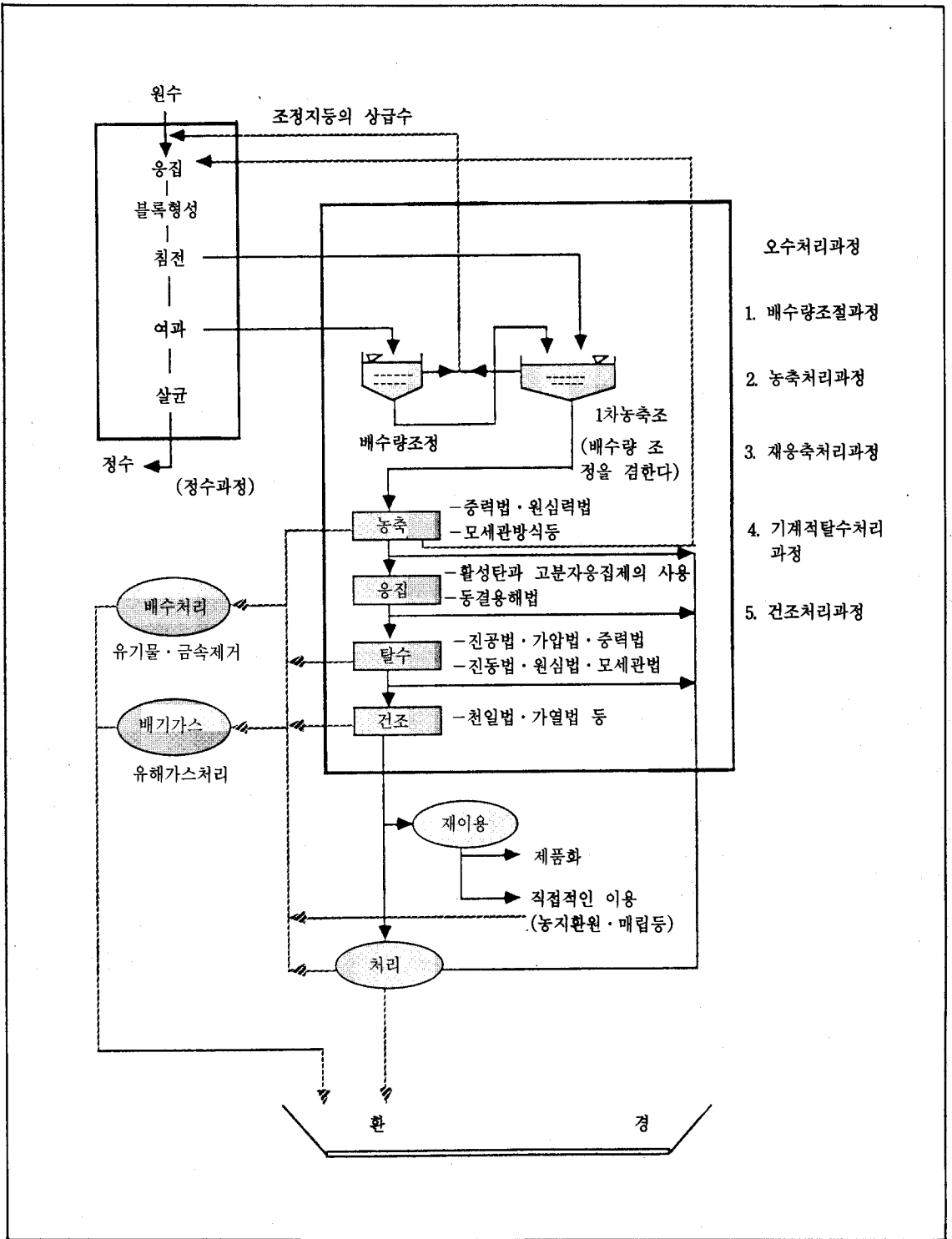


그림 2. 폐수처리의 일반적인 과정

나라 투석, 기체분리 및 투과증발막에 이르기까지 광범위하게 개발되고 있다.

표 1은 각종 분리막의 특징을 정리하였다.

삼투현상은 농도가 서로 다른 두 용액이 반투막을 사이에 두고 접촉하고 있을 때 이 막을

경계로 두 용액의 농도차이와 관련된 Osmotic Head라는 압력차이가 생기게 되고, 이 압력차이로 인하여 농도가 낮은 용액중의 용매(물) 성분이 반투막을 투과하여 농도가 높은 용액쪽으로 이동하여 평형에 도달하는 현상이다.

표 1. 각종 분리막의 특성

분리방법	막 형태	구동력	분리원리	적용분야
정밀여과	대칭형 다공성막 (Pore size 0.1~10 μ m)	정수압 차 (0.1~1Bar)	Pore size 및 흡착 현상에 기인한 체걸름	전자공업의 초순수제조, 무균수 제조, 식품의 무균여과
한외여과	비대칭형 다공성막 Pore size Skin층 10 ² -10 ⁻¹ μ m Support층 1~10 μ m	정수압 차 (0.5~1Bar)	체걸름 (Sieving)	전자공업의 초순수제조, 유수혼합물분리, 도료 페인트회수, 효소농축, 혈장 단백질분리, 섬유 호제 회수, 섬유·제지 공업의 폐수처리
역 삼 투	비대칭성 Skin형막 Skin층: 균일막 Pore size: A	정수압 차 (20~100Bar)	용해, 확산	해수, 공업용수의 탈염, 액체식품의 탈수, 전기 도금공업의 탈이온수, 농축, 폐수처리 재이용, 화학, 약품공업의 무균, 탈이온수
투 석	비대칭성 다공성막 (균일 팽윤막, Pore size: 0.1~10 μ m)	농도 차	대류가 없는 층 에서의 확산	인공신장 및 의료공업, 화학, 식품, 약품공업 에서의 고분자와 저분자 의 분리
기체분리	균일, 다공성막	정수압 차 농도차	용해, 확산 확산	공업용, 의료용 산소 부화, 매탄-이산화 탄소분리, 천연가스에서 수소회수, 공기중의 질소농축, 핵공업의 희소가스 회수
투과증발	균일계 막	농도차	용해, 확산	에탄올의 탈수, 공비 혼합물의 탈수
전기투석	양이온, 음이온 교환 막	전위 차	입자의 전하, 크기	염수의 탈염, 알칼리 제조, 공업용수의 연화, 도금공업의 중금속회수, 약품, 제당공업의 탈이온화, 폐수처리

폐수처리에 많이 사용되는 역삼투현상은 상기와 같은 자연계의 현상을 역으로 이용하여 물질을 분리하는 막의 물리·화학적특성, 분리대상 물질의 특성, 그리고 압력차를 추진력으로 하는 세가지 요소의 조합에 의해 행하여진다. 또한 막을 실제로 사용하기 위해서는 막을 압력용기에 넣어 사용하게 되는데 이것을 Module이라고 한다. 이 Module은 형태에 따라 Tubular type, Plate type, Sprial Wound type 및 Hollow Fiber type으로 구분한다.

Tubular type은 관형이라고도 하며 1/2~1"의 다공성관의 내부에 막이 Lining되어 있는 형태를 말하며 공급수는 관의 내부로 유입되고 생성수는 관의 외부로 유출된다. 이 형태는 관의 내부로 Sponge ball을 통과시킴으로서 막의 표면을 세정할 수 있는 장점이 있어 페인트, Juice 등과 같은 고농도의 용액이나 자동차공업, 식품공업의 농축에 많이 사용되는 형태이다.

Sprial Wound형은 그림 1과 같이 Sheet상의 막 2매를 다공질 Sheet Support의 양쪽에 놓고 3면을 접합한 뒤, 1면은 Product Water Tube로 하여 이를 둘둘 말아서 만든 것으로 막과 막 사이에 spacer가 있어 원수는 집수관과 평행하게 흐르며 spacer에 의해 난류가 촉진되어 농도분극이 적고 막면의 유속을 균일하게 유지할 수 있는 구조이다.

Module의 구성재료로서 spacer는 두께가 0.7~1 mm, 공극율 73% 정도의 PP제막을 사용하며 막의 지지체 재료는 Polyester web 위에 직접 막을 형성하고 투과수의 유로에는 0.28mm의 멜라민 수지를 함침시킨 Polyester web을 이용한다.

Hollow fiber type은 Tube의 내압력은 관의 내경과 외경의 비에 의해 결정되며 두께에는 관계 없는 원리를 이용, 관의 형태로 성형된 막을 아주 가늘게 하면 내압성이 증가되어 지지체가 필요 없는 구조가 되는 것을 이용한 형태이다.

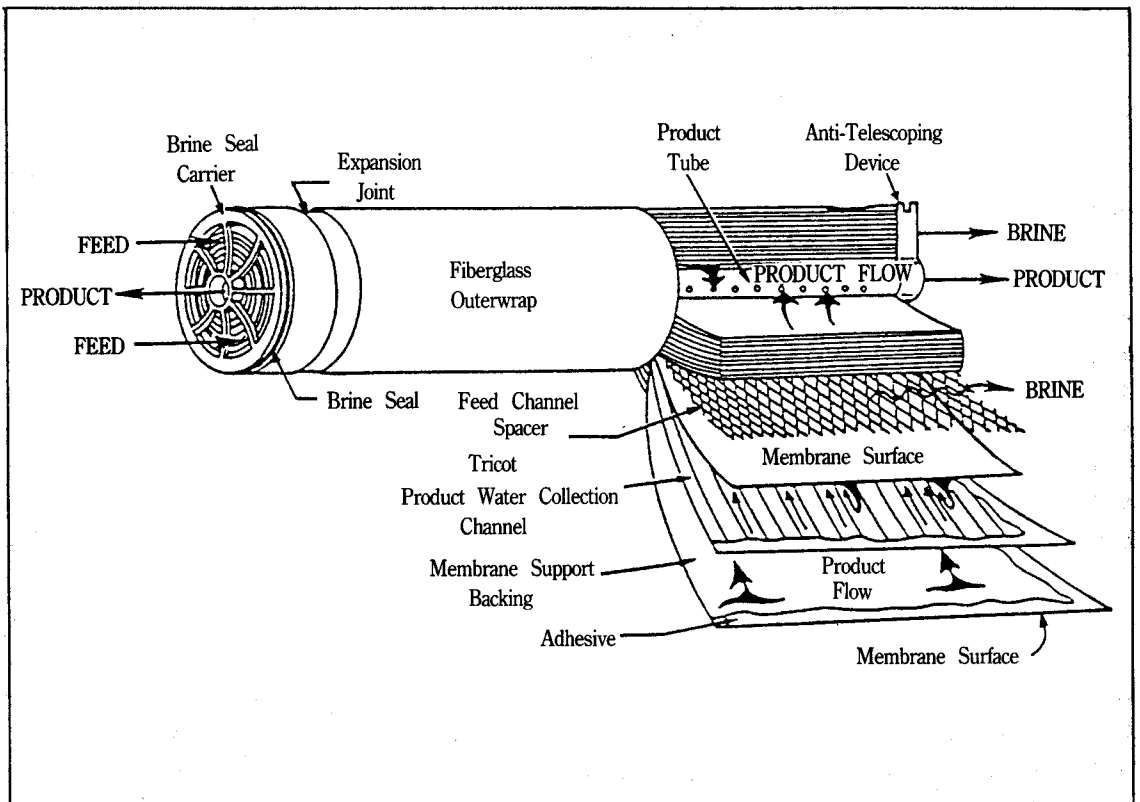


그림 3.1 Sprial Wound형 Membrane Module

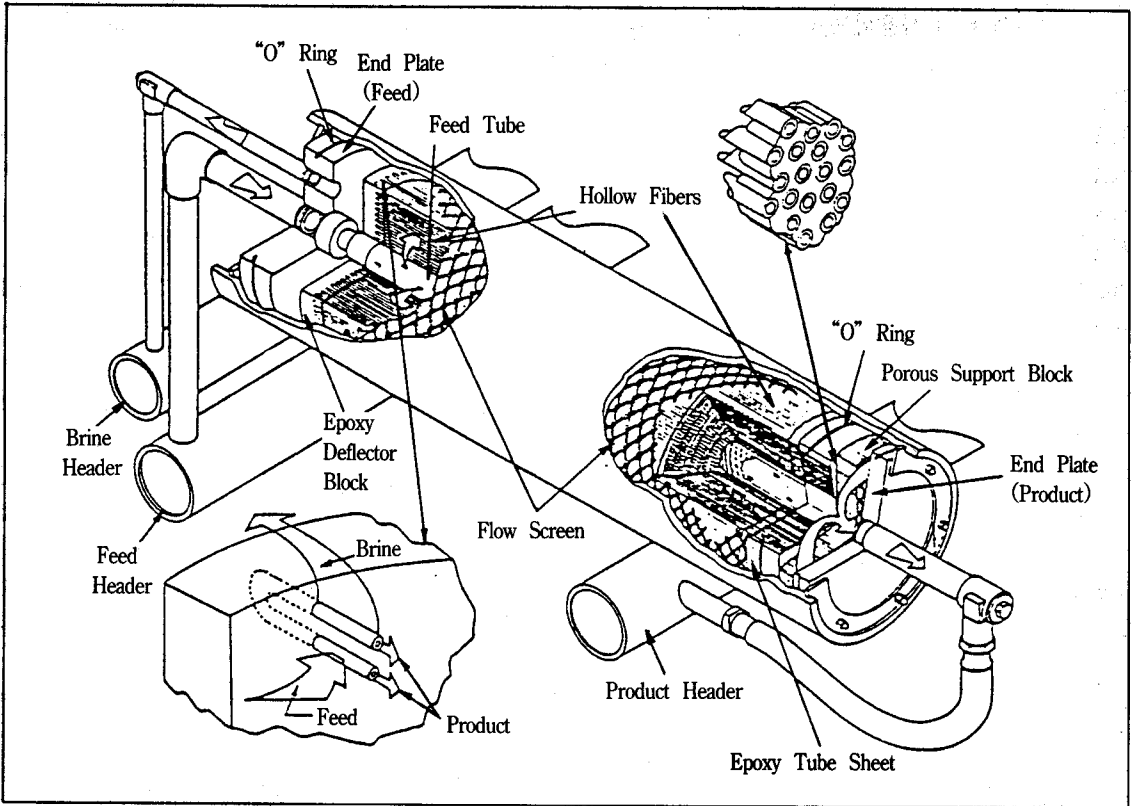


그림 3.2 Hollow Fiber형 Membrane Module

역삼투막을 이용한 폐수처리공정에서 사용되는 막은 단위면적당의 투과유량이 많고 높은 금속 이온 배제율을 가지며, 화학적 및 기계적인 변화에 안정하고 압력 및 온도 등의 운전조건 범위가 넓은 특성을 가져야 하며 상업화 되기 위하여 막의 수명이 길고 제조단가가 싸야 한다. 이와같은 특성을 갖는 막의 소재로 과거에는 Cellulose Acetate (CA)계의 막을 사용하였으나 최근에는 보다 개선된 Synthetic Polymembrane(SPM)이 개발되어 사용되고 있다.

SPM은 CA막과 비교하여 막의 수명이 길고 PH나 미생물 등에 대한 화학적 안정성이 높고 저압에서 운전이 가능하여 운전비용이 적게 든다는 장점이 있다. 그러나 SPM은 Chlorine, $KMnO_4$ 와 같은 산화제가 함유된 용액과 접촉하게 되면 막의 성능이 급격하게 저하되는 단점이 있어 이의 개선을 위한 연구가 현재 진행되고 있다.

막의 구조는 Loeb와 Sourirajan에 의해 60년대

초에 제작된 비대칭 막과 80년대에 상업화가 된 복합막 2가지가 있다. 비대칭 막은 반투성 특성을 갖는 박막층과 이를 지지해 주는 다공성의 지지층이 같은 재질로 구성되어 있으며 복합막은 박막층과 다공성의 지지층이 서로 다른 재질로 구성되어 있다. 역삼투압식에 의한 폐수처리기술은 상기에서 설명한 바와 같이 막에 의한 분리기술을 이용한 것으로써 에너지의 소비율이 대단히 낮은 것이 특징이다. 또한 이러한 분리기술은 중금속에 오염된 폐수의 정화효율이 대단히 높아 화학적 처리방식에 대하여 대단히 안정된 폐수처리를 행할 수 있다는 것이 장점이다. 그러나 막에서 폐수가 분리되는 관계로 슬러지에 의한 막의 손상이 비교적 쉽고 파손시 막 교환에 따른 운전비가 비싸지는 결점이 있다. 따라서 역삼투압식 폐수처리장치에 공급되는 폐수에 대해서 부유물을 제거하기 위한 1차 처리과정을 필히 거쳐야 하기 때문에 운전조건이 매우 까다롭고, 분리막의 재

료가 고분자 물질이기 때문에 내열성이 약하여 최대 50°C 이하의 온도에서만 사용이 가능하며 수처리에 사용되는 화학약품에 대한 내구성도 고려되어야 한다. 최근의 처리공정은 생물처리와 복합하여 침전지처리 대신에 분리막을 응용하는 경우가 증가됨으로써 고농도의 슬러지 성분에 의한 분리막의 눈막힘현상 방지를 위한 처리설비의 개발도 요구되고 있다.

2.3 증발법에 의한 폐수처리 기술

증발법에 의한 폐수처리장치 또한 바닷물의 담수플랜트 또는 식품공정에서 농축시스템을 응

용한 제품이다. 이러한 증발에 의한 폐수처리방법도 저렴한 값으로 다량의 폐수를 처리하여야 하기 때문에 에너지절약이 매우 중요한 문제가 되고 있어 여러가지 형태의 에너지 절약형 증발·농축방식이 개발되기 시작하였는데 그의 구조상 1단과 2단의 구조로 되어 있으며, 최근에는 에너지의 효율적인 사용을 전제로 제품이 개발되고 있기 때문에 현재 생산되는 제품은 거의가 2단 구조로 되어 있다.

2단 감압증발 처리장치도 구조의 간단화와 에너지의 효율적 사용을 위하여 2단에서 발생하는 증기를 응축하지 않고 다시 압축하여 1단으로 보내어지는 구조로 되어 있다. 압축하는 방식은

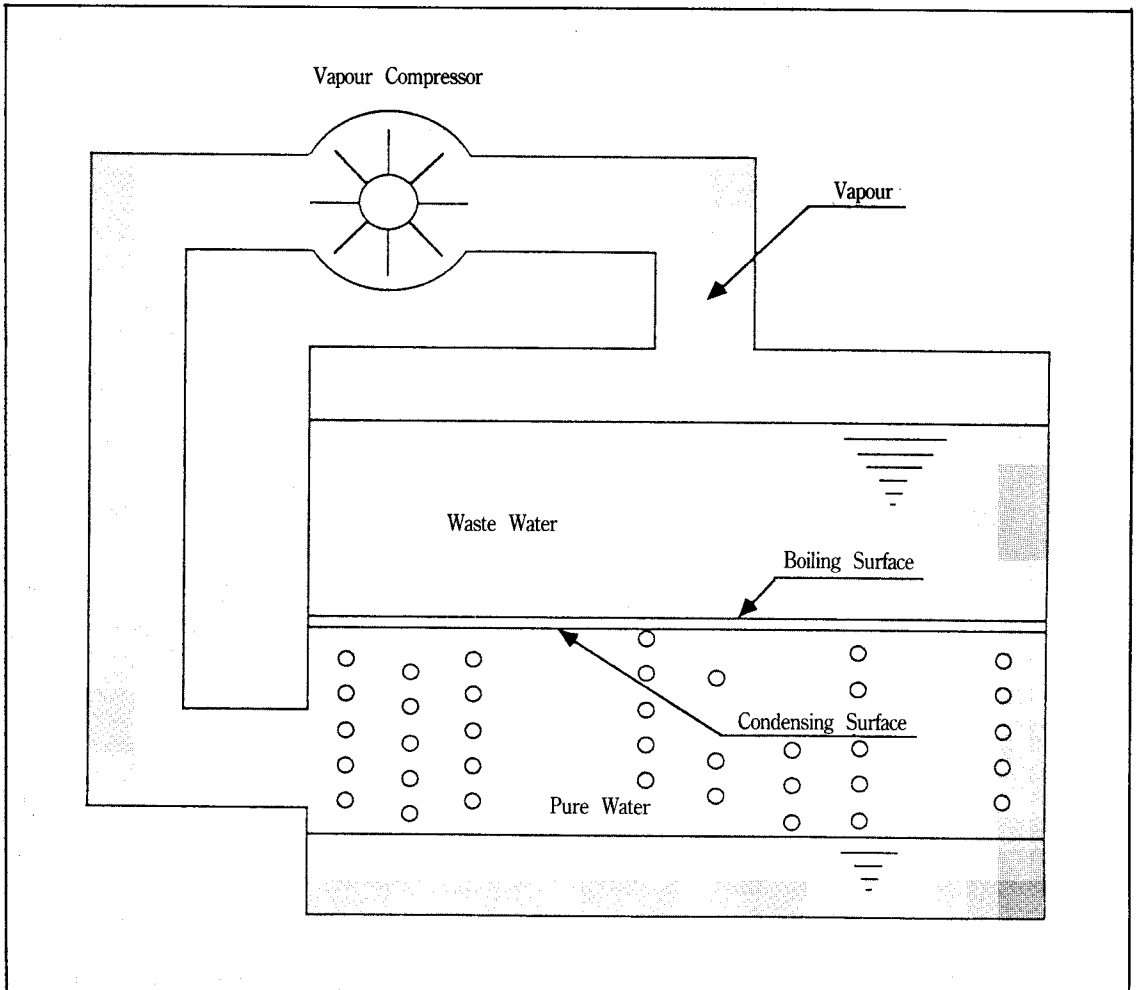


그림 4. 증기압축식 폐수처리 원리

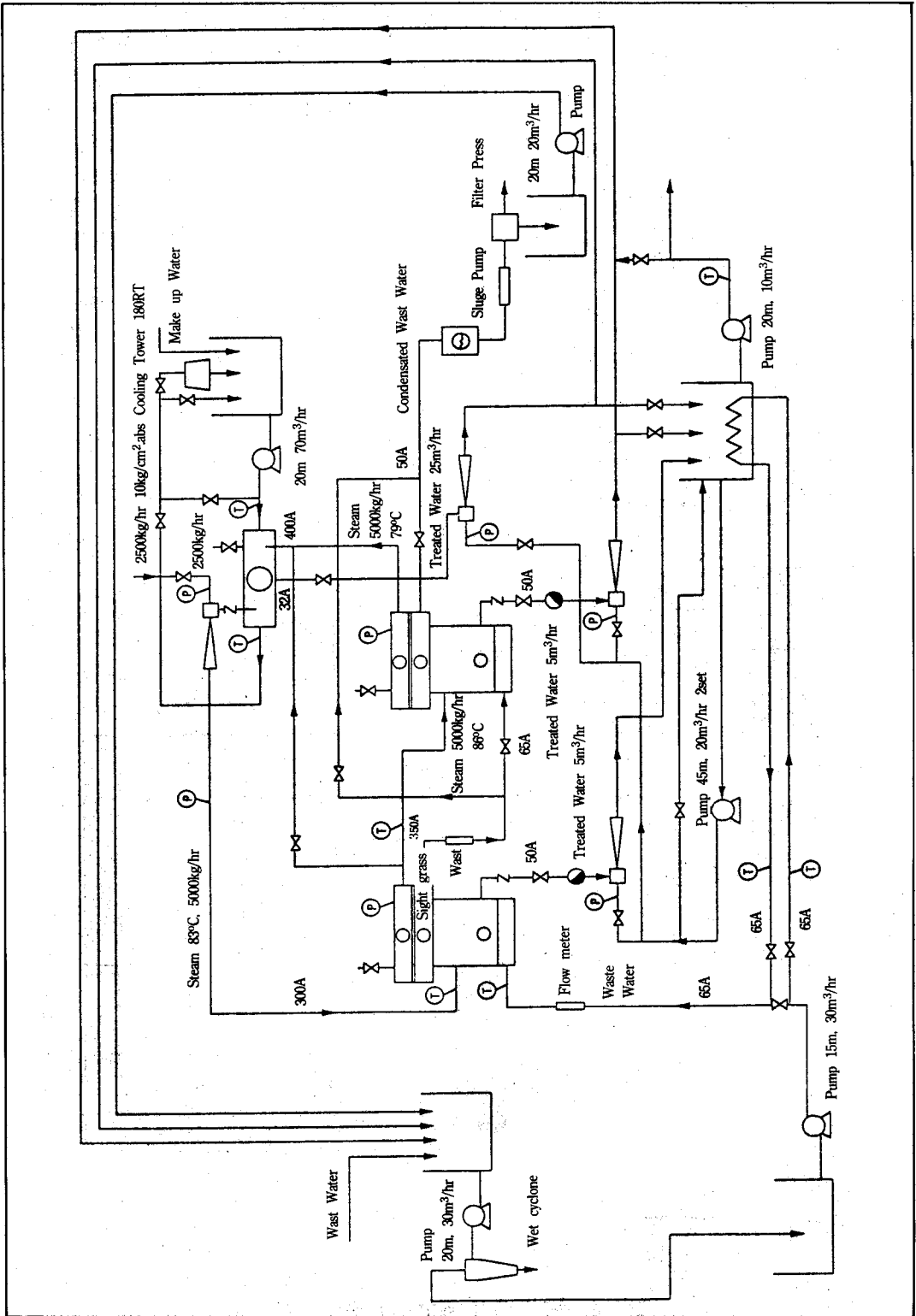


그림 5. Waste Water Treat Apparatus

현재 임펠러식 콤프레서를 이용하는 방법과 증기와 에젝터를 이용한 써모콤프레샤 방식이 개발되어 있다.

각 방법 또한 장단점이 있으나 핵심기기들의 국산화가 이루어지지 않고 있다. 이러한 증기압축방식을 이용한 감압증발식 폐수처리기술의 원리는 그림 4와 같이 저압측에서 증발한 저압의 증기가 콤프레샤에 의하여 가압 승온되어 고압측으로 유입되는데 이곳에서는 저압측의 낮은 폐수의 온도에 의하여 증발·분리된 순수 증기가 응축되고 저압측의 폐수는 고온고압의 증기에 의하여 가열되어 수분이 증발되는 원리이다. 이 방식은 증기의 잠열을 버리지 않고 순환되는 구조로 되어 있어 에너지 소비율이 매우 낮은 특징을 갖고 있다.

감압증발식 폐수처리방식은 폐수처리 효율이 매우 높고 어떠한 공장 혼합폐수도 처리가 가능한 방식으로 국내에서는 일본의 사사쿠라 제품이 소개되어 현재 폐수처리 농축시스템으로서 가동중에 있는 시스템이다. 이러한 감압증발식 폐수처리장치는 폐수의 완전 처리가 가능하고 처리된 순수처리수는 보일러 공업용수로도 사용이 가능한 시스템이다. 이 방식은 상기의 역삼투압방식과 더불어 화학처리방식의 대체처리시스템으로서 점차 사용이 늘어날 전망이다.

그림 5는 한국기계연구원이 중소기업과 공동연구를 통하여 개발하고자 하는 2단 구조의 감압증발식 폐수처리장치의 흐름도를 보여주고 있다. 시간당 처리능력은 10Ton/h이고 증기소모량은 2 Ton/h로 에너지 절약형 시스템이다. 이 장치는 작동원리가 선박용 조수장치와 유사한 부분이 많다. 밀폐된 용기를 스팀에젝터나 수에젝터 또는 진공펌프 등을 이용하여 내부의 압력을 대기압 이하로 내리고 유체의 비등점을 낮게 하여 대기압하에서 증발되는 온도보다 아주 낮은 40°C 근방에서 수분을 증발시키고 이 물질을 탈수시켜서 고형화하여 회수처리하는 방법이다.

증발온도가 낮기 때문에 공급되는 열원으로서 소각로를 이용할 수도 있고 공장내에서 재사용하지 않는 폐열을 이용할 수 있어 폐수처리비용이 화학적 처리방법에 비하여 1/10 정도로 운전이

가능한 시스템이다. 폐수의 증발온도가 낮기 때문에 사용한 증기를 압축하여 재 사용함으로써 장치의 운전경비가 낮지만 보일러에 의하여 생산된 증기를 써모콤프레셔를 사용하여 가동하였을 경우는 증기의 생산단가가 비교적 높기 때문에 폐수처리장치의 운전비도 약간씩 상승하는 경향이 있다. 따라서 최근에는 전기구동에 의한 임펠러식 증기압축기가 채택되고 있기는 하나 폐수처리용량이 커지게 되면 블레이드도 상대적으로 커지게 됨에 따라 소용량에 한정되어 있고 액적동반에 의한 블레이드 침식의 단점과 가격이 고가인 문제점이 있다. 따라서 현재 기계연구원에서 수·증기 구동이젝터를 이용한 증기압축기의 개발을 진행중에 있으며 이의 개발이 성공리에 수행될 경우 현재의 폐수처리장치보다 진일보한 장치가 개발되어 폐수처리시스템과 관련된 산업에 기여할 수 있으리라 본다.

3. 결 론

상기에서 논한 폐수처리방법 외에도 1차 처리된 폐수의 2차 처리나 또는 1차 처리를 거치지 않은 폐수를 호기성으로 처리하기 위하여 활성슬러지법을 비롯하여 미생물이 유기물을 섭취 분해하여 폐슬러지로 처리하는 방법등 폐기물 처리를 위한 다양한 기술이 발표되고 있다.

폐수의 성분이 다양하고 이에따라 처리해야 하는 방법도 경우에 따라 달라지지만 공장에서 폐수와 섞여서 방출되는 중금속 회수를 위한 폐수처리장치는 앞에서 논한 막에 의한 분리법과 감압증발법이 주종을 이루고 있다. 2가지 방법 모두가 화학공학과 기계공학적인 접근이 요구되는 기술들이며 시스템을 국산화시키기 위해서는 시스템의 성능을 시험할 수 있는 실험장치의 기본설계가 선행되어야 하며 재료기술로서는 폐수의 성상에 따른 부식성 재료 및 내열성이 강한 고분자화합물에 의한 박막의 연구가 병행되어야 할 것이다. 폐수처리기술 가운데 기술집약적인 분야라고 할 수 있는 측정분석 기기류를 포함한 전자 및 Monitoring System 관련업종은 현 단계에서 선진환경업체들과 경쟁이 어렵기 때문에 오염물질

배출시설 등의 분야를 중심으로 독창적인 주력 대상을 선정해서 집중적인 투자와 연구가 요망된다. 수처리와 관련된 국내의 업체는 대부분이 영세한 중소기업이고 대기업은 10여 업체에 지나지 않은 실정이며, 관련설비의 설계나 감리기기 제작 등은 걸음마 단계이다. 때문에 핵심기술의 대부분을 외국에 의존하고 있는 상황이고 핵심기술을 설사 이전한다 해도 영세성이 있는 중소기업의

입장에서는 자기 것으로 수용할 수 있는 준비마저도 갖추어지지 않은 상황이다. 2천년까지는 국내의 환경산업이 외국업체에 단계적인 시장개방이 이루어질 것으로 예상되며 상기와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 국가적인 지원과 정부출연연구기관을 통한 중소기업의 기술전수가 문제점을 해결할 수 있는 좋은 방법이라고 본다.

환경보전 캠페인

환경마크 상품을 사시다!



한국기계연구원