

# 와류 발생 로터를 이용한 고효율 분리막 수처리 모듈 개발

최상규, 김병인 | 한국기계연구원 박기택 | (주) 필텍코리아

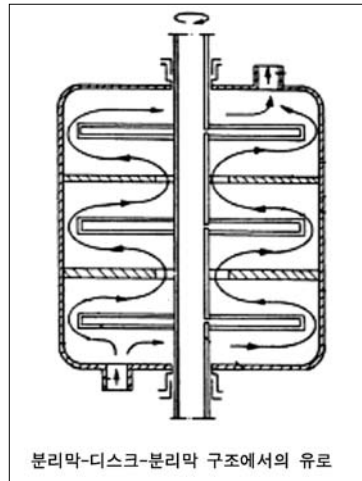
## 1. 서 론

분리막(Membrane)을 이용한 수처리 장치는 다공성 분리막을 이용하여 오염물질은 걸러내고 원수는 통과시켜 깨끗한 처리수로 배출하여 정화하는 여과장치로서, 근래에 분리막의 제조기술이 보편화됨으로써 정수 및 하폐수 등의 고도처리 분야에 널리 적용되고 있으며, 최근에는 탁월한 여과성능으로 인해 순수 및 초순수 제조 분야 및 해수담수화 공정과 같은 새로운 산업분야에도 적용되고 있다.

다공성 분리막을 이용한 이러한 액상-액상, 액상-고상 분리기술에서의 가장 큰 난제는, 분리과정에서 고형물질이 분리막 표면이나 분리막의 기공(pore) 내부에 점착되어 여과된 액체의 통로인 기공의 크기를 감소시키거나 막아버림으로써 분리막의 액상(또는 기상)-고상 분리 능력을 급격히 저하시키는 것이다.

이러한 문제를 해결하기 위하여 지난 수십 년에 걸쳐 분리막의 표면에 유체의 흐름을 이용한 전단력을 발생시켜 오염물질의 점착을 억제하는 다양한 방법이 제안되어 사용되어 왔다 (예: 적층된 고정형 (또는 회전형) 분리막들 사이의 회전형 (또는 고정형) 디스크 구조의 분리막 여과 시스템 (그림 1)). 그림 1과 같은 종래의 여과장치에서는, 분리막과 분리막 사이에 디스크를 설치함으로써 분리막과 디스크 사이의 상대 운동을 통해 분리막의 표면에 강한 층류 전단유동(Laminar shear flow)을 발생시켜 막 표면에서의 고형물의 점착을 감소시키도록 하고 있다. 그러나 상대운동에 의한 막 표면에서의 유동에 의한 전단율(shear rate)은 분리막과 디스크의 간격이 크면 클수록 급격히 감소한다. 전단율을 증가시키기 위해 분리막과 디스크의 간격을 가능한 한 작게 할 경우 디스크 양면의 압력차로 인해 분리막과 디스크가 서로 접촉하여 막의 손상을 초래할 수 있는데, 이를 방지하기 위해서는 부품의 정밀 가공 및 정밀 조립이 필요하게 되고 이는 제작비의 상승으로 이어진다.

또한, 적층된 분리막-디스크-분리막 사이의 긴 유로로 유체가 이송됨에 따라(그림 1: 분리막-디스크-분리막 구조에서의 유로) 압력 강하가 일어나고, 이를 보상하여 적절한 여과 압력을 유지하고 성능 저하가 일어나지 않게 하기 위해서는 높은 압력으로 유체를 공급하여야 한다. 이는 바로 동력비의 상승으로 이어져 운전 관리비가 증가하여 장치의 경제성을 저하시키게 된다. 따라서 분리막-디스크-분리막의 상대 운동에 의한 유속의 변화만으로는 막 표면 유체의 전단율을 증가시키는 데에 한계가 있다.



분리막-디스크-분리막 구조에서의 유로

그림 1. 분리막-디스크-분리막 구조의 회전형 층류 전단 유동형 분리막 여과 시스템

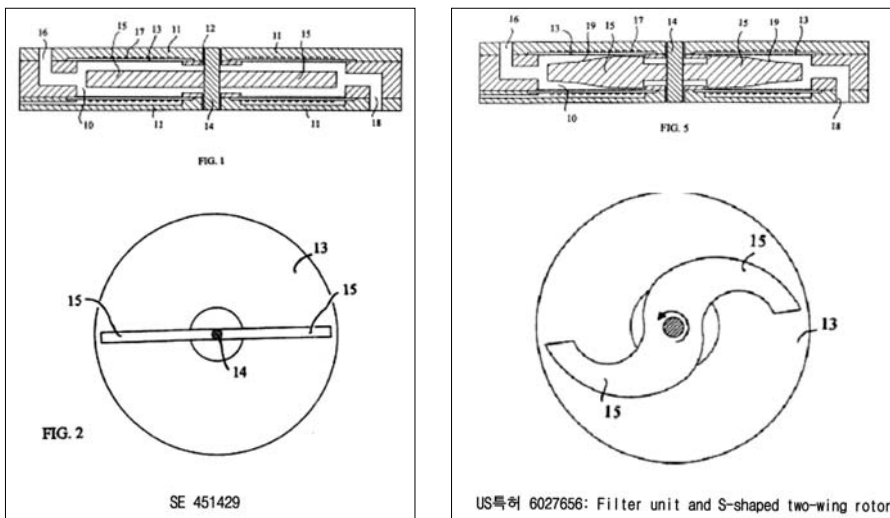


그림 2. 분리막-로터-분리막 구조의 난류유동형 여과장치(RMS, CR-filter사)  
(a) SE451429 (b)USP6027656

그림 2(a)는 난류 유동을 응용하여 오염물의 분리막 점착을 억제하는 여과장치를 보여주고 있다. 본 장치는 전술한 분리막-디스크-분리막 구조와는 달리 분리막-로터-분리막 구조로 되어 있는데 로터의 형상이 디스크 형태가 아닌 막대 형태를 가지고 있어 로터가 회전할 때 분리막과 분리막 사이에서 층류전단유동(laminar shear flow) 뿐만 아니라 난류유동(turbulent flow)을 형성시키게 된다. 디스크형 로터를 갖는 시스템에 비해 막과 막 사이의 유로가 작아 압력 손실이 적고, 층류전단유동 여과장치에 비해 고형물의 점착 방지에 효과적이다.

그러나, 실제적으로는 그 효과가 충분하지 않아 일정한 시간 간격으로 브러시나 밸브와 같은 기계요소를 로터의 날개에 부착시킨 후 이를 회전시켜 분리막 표면에 점착되어 있는 물질들을 제거하는 분리막의 재생과정(Regeneration process)을 실시하게 된다. 이 과정에서 분리막 표면의 다공질 코팅(coating)도 함께 제거될 수밖에

에 없는데 이를 보완하기 위해 막 표면에 다공질 코팅을 새로 하기도 하는데, 이러한 기계적 재생방법은 요구되는 기공의 크기를 유지하기 어렵고 재생이 어려울 경우 막을 교환해야 하는 단점을 가지고 있다. 그림 2 (b)의 USP 6,027,656에서는, SE451429의 막대형 로터의 형상을 변경시킨 S 형상의 로터를 사용하여 막 사이에서 보다 큰 난류유동을 유발시킴으로써 기계적 재생방법이 필요 없는 형태의 분리장치가 제안되어 있다. 그러나, 채택된 로터의 형상이 단지 두 개의 날개로 이루어져 큰 난류유동을 기대할 수 없을 뿐만 아니라, 처리하고자 하는 유체의 종류 및 성상에 따라 난류 유동의 크기를 제어할 수 있는 변수로서 유일하게 로터의 속도만이 사용되기 때문에 그 특성이 다른 여러 가지 액체의 분리를 위해서는 많은 제약이 따른다. 이러한 단점을 보완하기 위하여, 상기 특허에서는 여러 형상의 로터 단면과 함께 로터에 초음파 또는 전기장 발생장치를 첨가하는 방법도 제안하고 있다.

그림 3의 여과장치는 미국 NLI사의 진동형 여과장치인 VSEP으로서 그림 3(a)의 필터팩을 그림 3(b)의 필터팩-비틀스프링-가진 질량(Seismic mass)으로 구성된 비틀 진동형 공진시스템으로 가진하여 필터팩 내부의 분리막과 분리막 사이의 유체에 진동형(oscillatory) 층류 전단 유동을 발생시켜 막 표면의 오염물질 점착을 저감하는 장치이다. 그러나 본 시스템은 그림 1, 2의 회전형에 비해 장치가 복잡하고 운전할 때에 가진 장치의 진동에 의해 주변장치의 진동과 소음을 발생시켜 친환경적이지 못할 뿐만 아니라 비틀 스프링과 같은 핵심 요소의 내구성에도 많은 문제점을 야기하고 있다.

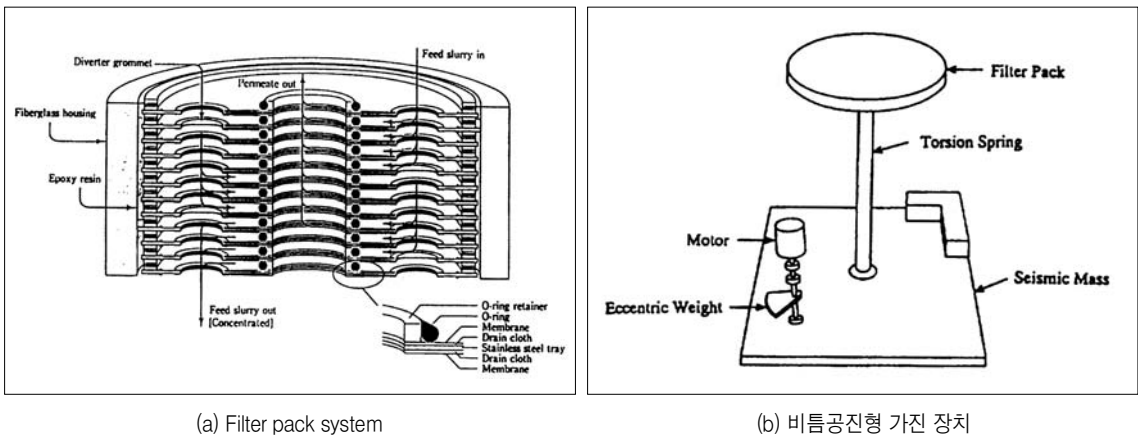


그림 3. 진동형 분리막 여과 시스템 (VSEP, 미국 NLI사)

이상에서 설명한 바와 같이 막 표면의 이물 점착현상을 방지하기 위한 가장 효과적인 방법은 막 표면에서의 전단력(shear stress)을 최대한 증가시키는 것이다. 이를 위해서는 난류유동을 만드는 것이 필수적이나, 지금까지 제안된 방법들은 제한적인 범위에서만 난류유동을 발생시키고 있다. 특히, 분리막-디스크-분리막 구조에 비해 보다 나은 난류유동을 촉진시킬 것으로 판단되는 그림 2의 경우에는 단 두개의 날개를 가진 로터를 사용함으로써 난류 유동이 국부적으로만 발생되어 보다 큰 난류유동을 발생시키기 위해서는 회전속도를 증가시킬 수밖에 없다. 또한, 밀도 또는 점도와 같은 특성이 다른 유체의 경우에는 각기 다른 크기의 난류 유동이 필요함에도 불구하고 로터의 형상이 고정되어 있어 오직 로터 회전속도의 변화에 의해서만 원하는 크기의 난류 유동을 발생시킬 수 있다. 따라서, 점도 및 밀도가 큰 유체일수록 더 큰 난류유동을 만들기 위해 회전속도를 증가시켜야만 하고 이로 인해 요

구동력이 증대되어 동력 손실이 매우 커지게 되는 단점이 있다.

이러한 단점에도 불구하고 그림 1, 2, 3의 여과 방법들이 전 세계적으로 VSEP(미국), Spintek(미국), CR-filter(핀란드) 등의 극소수의 기업들에 의해서만 상용화되어 시장을 지배하고 있으며 국내에는 상기 외국사들의 장비가 고가로 수입되어 적용되고 있다. 현재 국내에는 고농도 유체 및 하/폐수 분야에 분리막을 이용한 처리기술이 널리 적용되면서 막막힘(fouling) 억제 모듈에 대한 수요가 늘고 있고, 세계적으로도 고도처리기술인 분리막 기술의 적용이 확장되면서 수요가 증가하는 추세에 있다.

따라서 국내의 하/폐수 처리시장을 거의 독점하다시피 하고 있는 고가의 외산 분리막 여과시설로부터 증가일로에 있는 국내시장을 보호하고 나아가 기하급수적으로 팽창하고 있는 세계의 수처리 시장에 진출하기 위하여 본 연구팀에서는 (주)필텍코리아와 공동으로 외류발생로터를 응용한 독자적인 분리막 여과기술을 개발하고 이를 이용한 분리막 수처리 장치(이하 KIM21)의 상용화에 성공하였다.

## 2. 기술의 개요

### 2.1 KIM21의 기술적 특성

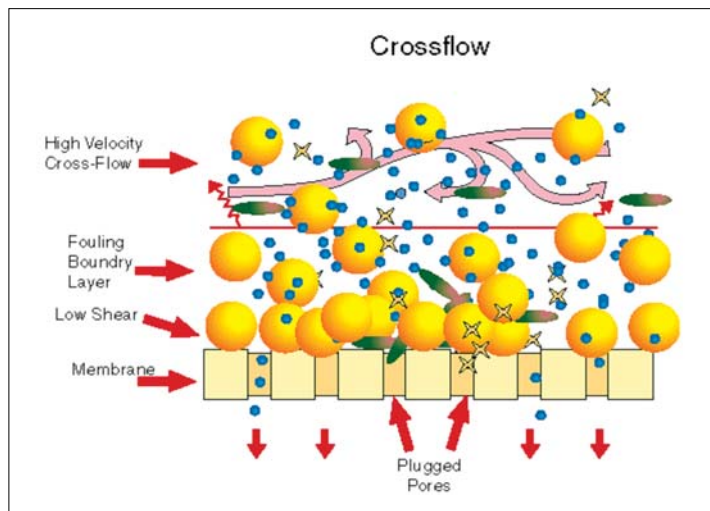


그림 4. Cross-flow 분리막 시스템의 작동원리

그림 4는 기존의 모든 막분리 공정의 특징을 나타내고 있다. 기존 공정들은 cross-flow로 유체가 흐르면서 막 표면에 전단력을 발생시켜 막에서 오염물을 이탈시켜 막오염을 막고 처리율을 유지시키는 방식을 고수하고 있다.

그림 5는 국내에서 보급되어 왔던 미국 NLI사의 VSEP(Vibratory Shear Enhanced Procee)에 대한 운전 개념도이다. VSEP은 필터팩-축-질량으로 이루어진 비틀진동계에 편심을 이용한 비틀공진을 발생시키고, 공진을 멤브레인에 전달함으로써 막의 막힘현상을 억제하는 원리를 적용하여 막오염을 방지하는 장치이다. 독특한 원리를 이용한 본 제품은 기존의 막분리 공정들이 적용이 불가능한 여러 분야에 독보적인 위치를 점유해 왔으나, 진동에 의한 기기의 손상이 잦고, 진동의 한계가 3/4 인치라는 제약이 있었다.

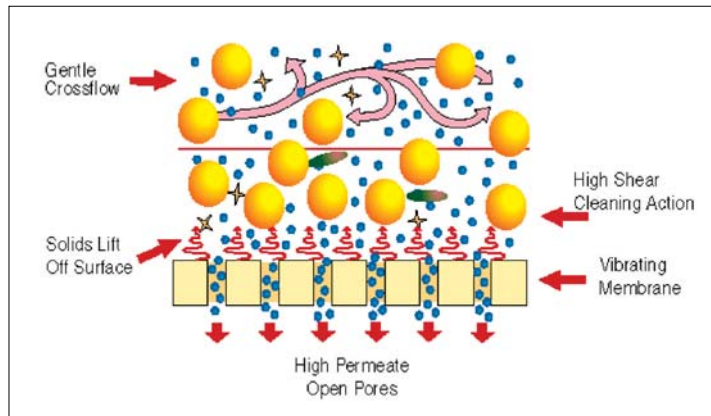


그림 5. 진동형 여과장치의 작동원리

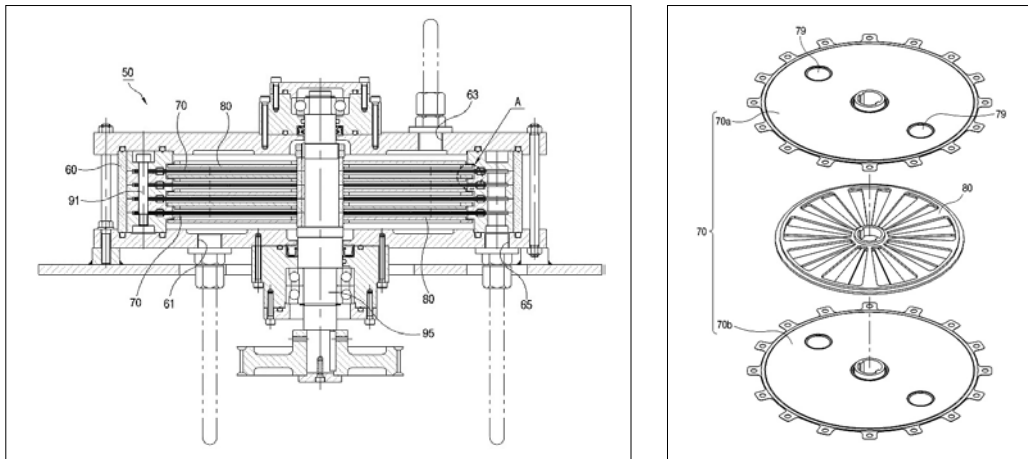


그림 6. 와류발생 로터를 갖는 분리막 여과장치 KIM21의 개념도

그림 6은 차세대 막분리 공정인 KIM21의 개념도를, 그림 7은 작동원리를 나타내고 있다. KIM21은 내부 유로에 연속된 블레이드(blade) 형태의 vortex generator가 설치되어 회전함으로써 강한 와류를 발생시키고, 이 와류는 막표면에 강한 전단력을 발생시켜 막의 막힘 현상을 억제하며 따라서 처리량을 대폭 증가시킨다.

이 방법은 종래 분리막 여과장치(그림 1, 2)에서 사용되고 있는 층류전단유동에 의한 막표면 전단력 발생기법이나 국부 난류전단유동 발생장치(그림 3)와는 달리 유동의 전단력을 와류에 의해 배가시켜 오염물질에 의한 막막힘 현상의 억제 또는 방지효과가 매우 뛰어나고 또한 기존 방법과 달리 와류 생성 로터의 형상 변경을 통해 와류의 강도(vortex intensity), 와류 빈도(vortex frequency)와 같은 특성을 능동적으로 조절함으로써 밀도 또는 점도와 같은 물성치가 다른 유체의 분리과정에 적합하고 소요동력을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

## 2.2 KIM21의 구조 및 운전

와류발생형 분리막 수처리 장치인 KIM21의 구조는 다음과 같이 크게 분리막-와류발생로터-분리막의 순서로 분리막과 와류발생 로터를 순차적으로 배치한 적층형 구조로 되어 있는 모듈부와 모듈 지지부 및 구동부로 구분된

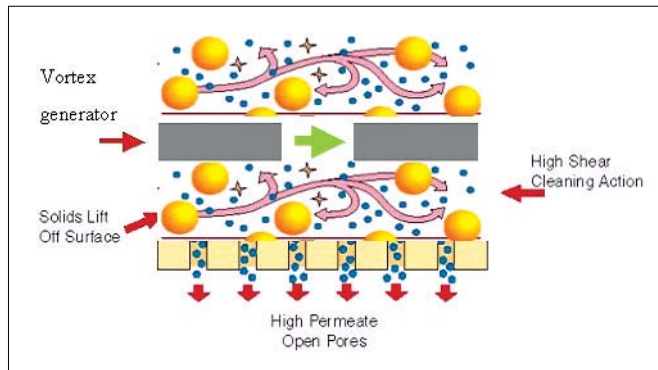


그림 7. KIM21의 작동원리

다(그림 8).

- 모듈(필터) : 내부에 Vortex generator와 멤브레인이 설치되어 있으며, 폐수를 분리 정제하는 역할을 한다.
- 드라이브 모터 : 동력을 발생시키며, 동력을 모듈의 회전축에 전달하여 외류발생로터 (vortex generator:그림 9)를 회전시키는 역할을 한다.
- 프레임 : 모듈과 모터를 지지한다.

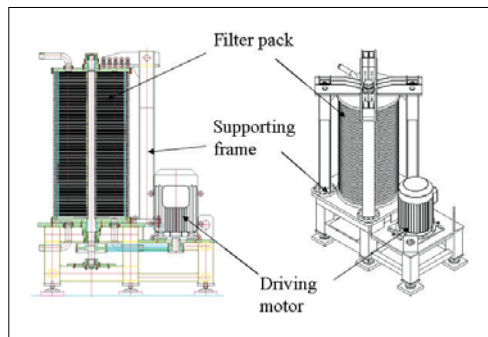


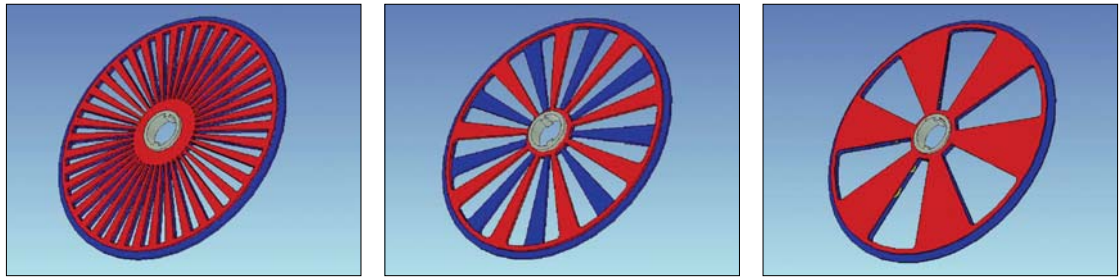
그림 8. KIM21 구성도

그림 9와 같은 형상의 외류 발생 로터는 분리막과 분리막 사이의 유로에서 외류를 발생시키는 작용을 한다. 금속과 성질이 유사한 고강도 엔지니어링 플라스틱으로 제조되었고, 고온과 산 및 알칼리에 안정하다. 분리막은 그림 10과 같이 스테인레스 판에 용착되어 있으며 폐수를 분리 정제 하는 역할을 한다.

KIM21 내부의 유체 흐름은 그림 11과 12에 도시된 바와 같다. 유입수는 모듈 하부로 유입되어 그림 12와 같이 막을 투과한 처리수는 모듈 외곽라인을 통해 이동하여 하부배관으로 배출되고, 막을 투과하지 못한 농축수는 상부로 이동하여 상부배관을 통해 배출 된다.

### 3. 성능

차세대 막분리 공정인 외류 발생형 분리막 모듈인 KIM21 (Vortex generating module)과 기존의 멤브레인 기술



(a) 평판형 다익 로터 (기본형)

(b) Zig-zag type 다익 로터

(c) 다중 날개형 로터 (B형)

그림 9. 와류 발생 로터 (vortex generator)



그림 10. 분리막 및 분리막 지지판

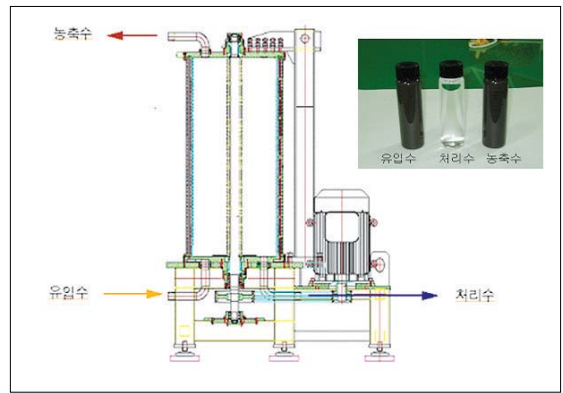


그림 11. KIM21 유체 흐름도 및 처리 결과 비교

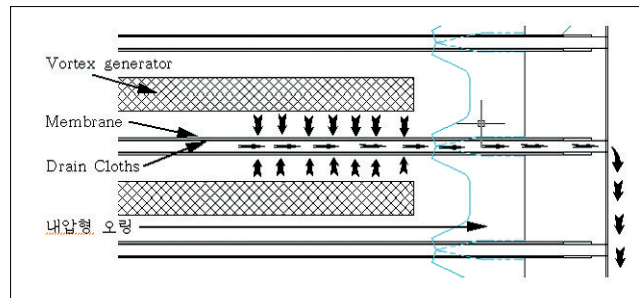


그림 12. 여과부 내부 구성도 및 유체흐름

인 cross-flow type module, 그리고 최근에 도입된 vibratory module (VSEP)과의 성능을 비교하기 위해 일차로 고평도 폐수인 축산폐수를 대상으로 여과실험을 수행하여 비교하였다(그림 13).

cross-flow type module은 축산폐수에 대해 적용이 불가능하였고, vibratory module(VSEP)은 지속적으로 flux가 감소하여 불안한 운전을 나타냈으나 KIM21- vortex generating module은 VSEP에 비해 약 1.5배의 성능을 나타내며 안정적으로 운전되었다.

그림 14는 본 연구팀에서 개발, 제작하여 울산 소재 S 정밀화학에 설치한 D-850급 KIM21 분리막 여과장치이다. 설치된 D-850급 KIM21은 기존에 설치되어 있던 미국 NLI사의 진동형 여과장치인 VSEP을 대체하기 위해

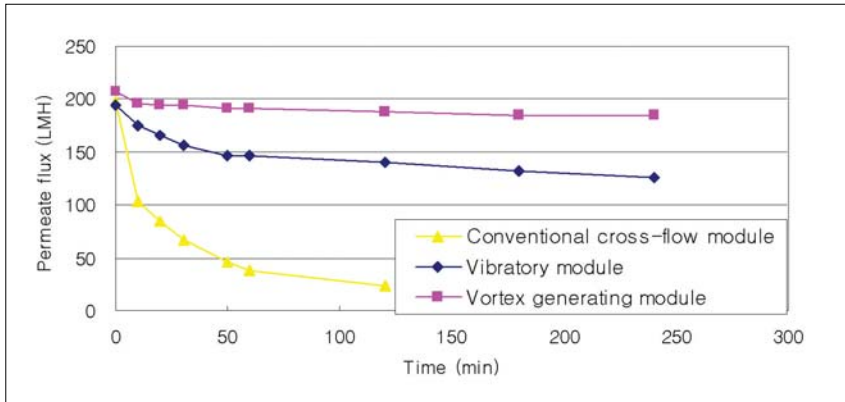


그림 13. 기존 분리막 수처리 기술과 KIM21의 성능비교



그림 14. S-정밀화학에 설치된 KIM21 (D-850)

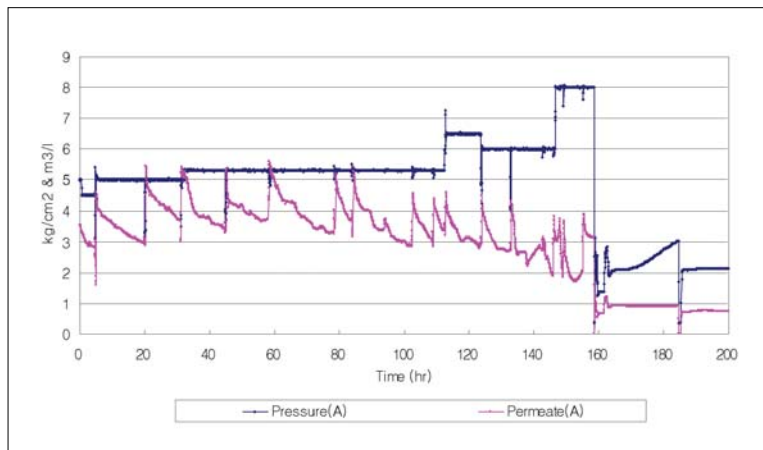


그림 15. S사의 VSEP 운영 자료



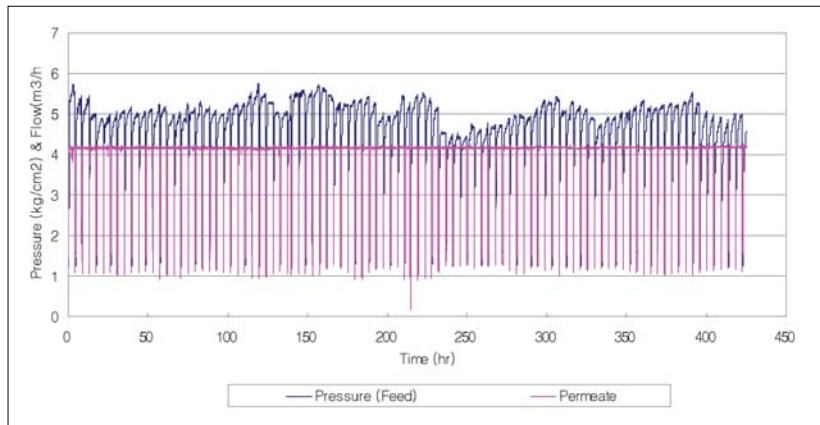


그림 16. S사에 설치된 KIM21 및 운영자료

설치되었기 때문에 VSEP과의 성능비교가 가능하였다.

그림 15와 16은 S사의 셀룰로오스 폐수처리설비로 설치된 VSEP과 KIM21의 운전자료이다. 그림 15에서 보여주는 바와 같이 VSEP은 처리수량(permeate)이 불안정하고, 기계적인 고장이 자주 발생하여 공장운영에 많은 어려움을 가져왔으나 KIM21은 그림 16과 같이 처리수량이 일정하게 유지되며 기계적인 문제들이 없어서 현재 매우 안정적으로 운전되어 모두 3기의 KIM21이 납품되어 현재 가동 중에 있다.

#### 4. 결 론

고농도 유체의 분리 기기는 기술적 어려움과 시장의 특수성으로 인해 국내제품은 개발되지 않았고, 미국, 핀란드에서 수입되는 고가의 해외장비가 주종을 이루고 있었다. 본 연구팀은 (주)필텍코리아와 공동으로 연구를 수행하여 새로운 vortex generating 기술을 분리막 수처리 분야에 적용하여 상용화 제품을 개발함으로써 국내 및 해외에 경쟁력을 갖는 국내 기술을 확보하였다. 이 기술의 주요 원리는 회전하는 로터의 힘을 이용하여 수중에 강한 소용돌이를 발생시켜 오염물이 분리막에 침착되는 것을 방지하는 것으로 소용돌이를 발생시킬 때 소요되는 에너지를 최소화하기 위해 독특한 로터 형상을 채택하고 있다.

본 연구를 통해 유동해석을 통한 vortex generator 형상 최적화가 이루어졌고, 회전축 및 베어링계의 공진점에 대한 최적 설계가 적용되었으며, 양산을 목적으로 하는 상용화 제품의 특성에 맞게 vortex generator의 소재를 특수소재로 선정하여 구조해석을 수행하였고 신뢰성있는 제작기술을 개발하였다. 다양한 membrane을 적용하기 위해 300psi 고압에서 회전축 및 기기 가동과 성능에 문제가 되지 않도록 최적 sealing 기술을 개발하였고, 운전 내구성 평가를 통하여 제품의 성능을 검증하였다.

해당 기술의 기술력 향상으로 인해 개발된 제품의 경쟁력은 경쟁사 제품의 성능과 비교평가한 결과 탁월한 성능이 있음이 검증되었다. membrane 기술의 적용이 불가능한 폐수에 대해 실험을 진행한 결과, 경쟁사의 제품 보다 1.5배 이상의 우수한 여과 성능을 나타내었다. 이러한 결과는 지금까지 국내 고농도 폐수 처리 분야에 해외 기술을 이용하여 고가의 장비를 사용할 수밖에 없었던 현실에서 탈피하고 더 나아가 경쟁력 있는 제품을 개발함으로써 국

내시장뿐만 아니라 해외시장까지 진출할 수 있는 가능성을 보여주었다.

개발된 와류발생형 분리막 수처리 기술은 고농도 폐수로 문제가 되는 침출수, 축산폐수, 산업폐수의 정수뿐만 아니라 지금까지 맥주 제조 공정에서 버려졌던 고농도 효모수에서의 원료 회수, 나노 금속 제조 공정에서 나노 입자 물질을 농축, 정제 하여 제품의 상품 가치 제고, 정밀화학공정에서 발생하는 폐수 (메틸셀룰로오스 등)에서 원료의 선별추출 등 막막힘 현상으로 불가능했던 자원재생 분야까지 적용이 가능하게 됨에 따라 관련 산업체의 경쟁력 향상에 도움이 될 것으로 기대되고 있다.

## ❁ 참고 문헌

- [1] USP 3,437,208, “Apparatus for dynamic filtration of liquids”
- [2] USP 4,036,759, “Apparatus and system for stabilizing the disc elements of a rotary concentrator for solids-containing fluids”
- [3] USP 5,275,725, “Flat separation membrane leaf and rotary separation apparatus containing flat membranes”
- [4] USP 5,415,781, “Dynamic filter separator and separation process”
- [5] USP 5,679,249, “Dynamic filter system”
- [6] USP 6,165,365, “Shear localized filtration system”
- [7] USP 6,416,666, “Simplified filtration system”
- [8] USP 6,027,656, “Separation method and apparatus”
- [9] USP 6,209,727, “Separation device having abutment rings as an outer cover”
- [10] SE 451429, “Separation method and apparatus”
- [11] USP 4,952,317, “Device and method for filtering a colloidal suspension”
- [12] USP 5,014,564, “Eccentric drive mechanism”
- [13] VSEP maintenance manual, NLI inc.



최 상 규

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 책임연구원  
· 관심분야 : 고속/고정밀 회전기기, Micro Power Generation  
· E-mail : skchoi@kimm.re.kr



김 병 인

· 한국기계연구원 정보장비연구센터 선임기술원  
· 관심분야 : Micro power generation, Micro machining  
· E-mail : kimbi@kimm.re.kr



박 기 택

· (주) 필텍코리아 대표이사  
· 관심분야 : 분리막을 이용한 환경설비, 자원재생, 해수담수화  
· E-mail : gtp@filtech.ne.kr