

## 수처리용 세라믹 필터 연구 동향

송인혁\* · 하장훈 · 배병서 · 박영조 · 고재웅 · 백연경 · 김영국 · 이정구 · 한유동

한국기계연구원 부설 재료연구소

### Research Trend of Ceramic Filter for Water Treatment

In-Hyuck Song\*, Jang-Hoon Ha, Byungseo Bae, Young-Jo Park, Jae-Woong Ko,  
 Youn-Kyoung Baek, Young-Kuk Kim, Jung-Goo Lee, and Yoo-Dong Hahn

Korea Institute of Materials Science, Changwon, Kyungnam 641-010, Korea

#### 1. 서 론

현재 세계는 물 부족 현상이 심화되고 있으며, 수질 오염으로 인하여 물산업의 중요성이 부각되고 있다. 많은 매체들이 21세기 물 산업이 20세기 석유 산업을 추월할 것이라는 전망을 내놓았고, 앨빈 토플러 등의 미래 학자들 역시 21세기가 물의 시대가 될 것이라고 전망하고 있다. 이러한 전망을 바탕으로 많은 기업들이 물 산업을 미래 성장 사업으로 주목하기 시작했으며, 자국 물 산업 육성을 위해 각국 정부들도 구체적인 계획을 발표하고 있다[1]. 특히 그림 1에서와 같이 물산업은 단위 산업으로 반도체 산업이나 조선 산업보다 큰 규모를 갖추고 있다. 이처럼 세계 물산업 규모가 상당히 큰 이유는 국민 생활과 산업 활동에 필수적인 서비스로 전 세계적으로 산업이 형성되어 있기 때문이다.

심각해지는 물 부족 현상으로 인하여 수처리 기술의 중요성을 증대되고 있으며, 또한 물 산업 구조가 대규모 사업화가 가능하도록 패러다임이 변해가고 있다. 즉 20세기

초반에 성립된 화학 처리제 중심의 수처리 기술 패러다임이 최근 들어 필터의 미세한 구멍(Pore)을 통해 오염 물질을 걸러내는 멤브레인(Membrane) 방식의 기술 패러다임으로 전환되고 있다. 기존 멤브레인 방식의 기술은 필터 자체의 높은 제조 비용과 시스템 운영시 과도한 전기 소모 문제 등으로 운영 유지 측면에서 경제적 효용이 낮아 시장의 외면을 받아왔다. 하지만 21세기에 접어든 후, 제조 기술의 혁신으로 가격 경쟁력을 확보하고, 기존 방식으로 처리하지 못했던 물질들을 걸러낼 수 있는 멤브레인 방식 고유의 장점이 부각됨으로써 빠르게 시장이 성장되고 있다. 특히 멤브레인 방식은 기술 진입 장벽이 존재하기 때문에, 기술 차별화를 달성한 기업들을 중심으로 전 세계 시장이 재편 되고 있다. 실제로 현재 멤브레인 시장은 매출 상위 5개 기업의 점유율 합계가 전체 시장의 75% 이상을 차지할 정도로 과점화 되었다[3, 4].

물론 이와 같은 중요성이 증대되는 멤브레인의 소재는 대부분 유기물로 이루어져 있어, 현재 고분자 멤브레인이 시장을 주도하고 있다. 그러나 최근 들어 일본을 중심으로 무기물로 이루어진 세라믹 분리막에 대한 중요성이 증대되고 있다. 수처리용 세라믹 분리막은 다양한 무기소재를 이용하여 제조하며 내열성, 내약품성, 내유기 용매성 등이 우수하고 기계적 강도도 강하다. 주로 정밀여과와 한외여과용으로 사용되나 최근에는 나노여과막 적용성이 검토되고 있으며 고분자로 만들어진 유기막에 비하여 고온의 가혹한 조건에서도 사용될 수 있으므로, 다양한 하·폐수 처리에 적용될 수 있다. 향후 수처리용 세라믹 분리막 소재는 복합화를 통하여 구조와 기능 특성의 극대화가 가능하여 처리 용량을 증대시키고, 고집적화의 실현을 가능하게 할 수 있다. 특히 기존의 고분자 분리막의 단점을 보완하

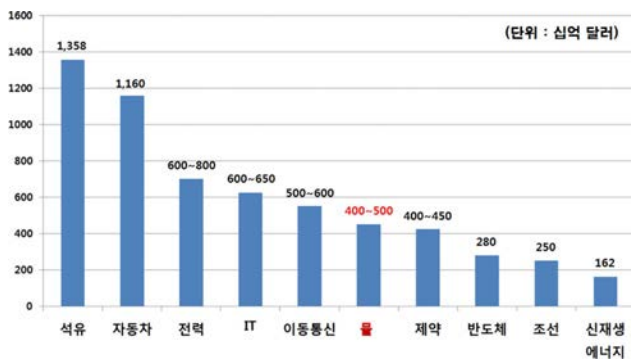


Fig. 1. State of art of water industry and business prospects [2].

\*Corresponding Author : In-Hyuck Song, TEL: +82-2-55-280-3534, FAX: +82-55-280-3392, E-mail: sih1654@kims.re.kr

는 새로운 세라믹 분리막은 향후 수처리를 중심으로 증류, 흡착, 추출 등이 요구되는 제약, 반도체, 음료, 제지, 발전소 등 다양한 극한환경을 요구하는 시장으로 확대가 가능한 포괄적인 기술 분야이다. 특히, 세라믹 분리막은 열적 안정성이 높아 재생이 가능하므로, 현재 고분자 분리막 시장에서 대두되고 있는 폐분리막 매립 문제로 인한 2차적인 환경 문제 발생을 최소화 할 수 있게 되어, 친환경적인 분리막 소재이다.

미래 선도적인 신개념의 수처리용 세라믹 분리막 소재는 복합화를 통하여 구조와 기능 특성의 극대화가 가능하여 처리용량을 증대시키고, 고집적화의 실현을 가능하게 할 수 있다. 또한 분리막 소재의 단일기능을 융복합 기능으로, 고에너지 소비를 저에너지 소비로 수처리 패러다임 변화에 대응함으로써, 열악한 미래 환경에 대응하는 원천 소재를 개발하는 것은 매우 중요하다. 특히 본 고에서는 수처리용 세라믹 분리막 소재 연구 현황을 중심으로 특히 지지체 소재를 중심으로 일반적으로 기술하였다.

**2. 수처리 산업의 중요성 및 현황**

수처리 공정에 있어서 기존의 물리화학적, 생물학적 공정 보다 수질 개선 효과가 우수하고 약품 사용이 배제된 환경 친화적 분리막 분리 공정으로 기술이 진화 중이며, 도시화와 산업화에 따른 수질 악화, 난분해성 폐수의 증가, 환경 규제 강화, 생활수준 향상 등으로 환경 친화적인 수처리 기술의 필요성이 증가하고 있다. 향후 세계적인 물산업 성장은 인구 증가, 산업화, 도시화가 활발하게 진행 중인 아시아 개도국 시장이 이끌 것으로 전망된다. 특히, 세계 1, 2위의 인구를 가지고 있는 중국, 인도 등의 신흥국 중산층 소비자가 향후 20년간 30억명의 신규수요자로 등장하면서 경제 성장에 따른 공업용수와 생활용수의 수요가 급증 할 것으로 전망된다.

현재 미국, 일본, 유럽 등은 세라믹 분리막 상용화 연구가 진행되어 플랜트가 설치되고 있는 시점임에도 불구하고 국내에서는 아직 체계적인 연구가 거의 전무한 상태이며, 일부 실시되고 있는 세라믹 분리막을 이용한 수처리 시스템 평가의 경우 분리막 소재는 외국 수입품을 이용하여 평가하고 있는 실정이다. 현재 미국, 일본, 유럽 등은 세라믹 분리막 상용화 연구가 진행되어 플랜트가 설치되고 있는 시점임에도 불구하고 국내에서는 아직 체계적인 연구가 거의 전무한 상태여서 선진국과 기술격차는 큰 편이다.

세계의 주요 수처리 관련 업체 현황을 살펴보면, 소재, 부품, 기계제조 분야와 장비설계, 조립, 시공 분야, 사업운영 분야로 크게 3분야로 구분할 수 있다. 국내의 경우 플



**Fig. 2. News article about technical transfer from Japan company (Meiden Co.) [5].**

랜트 산업의 발달로 인하여 장비설계, 조립, 시공 분야는 비교적 발전되어 있으나 소재 부품분야는 아직 미흡한 상태이다. 이에 최근들이 소재 부품 산업에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으나 실제적으로 고분자 소재 시장을 중심으로 형성되어 있으며 세라믹 멤브레인 관련된 시장은 거의 전무하며, 수입에 의존하고 있다.

그림 2는 세라믹 분리막 관련 일본의 중견 기업인 Meiden 사로부터 국내 대기업인 한라 그룹이 제품 공급 및 기술 협력 계약을 했다는 기사이다(매일경제, 2014. 02. 03). 이는 10 여년 전에 국내 관련 기업들이 선진 외국에서 고분자 분리막의 원천기술을 수입하는 것과 흡사하다. 즉 이제 국내 대기업들도 세라믹 분리막의 중요성을 인식하고 있는 것으로 판단되며, 국내에서도 이와 같은 세라믹 분리막에 대한 원천기술 확보가 매우 절실하며, 이를 위한 지속적인 추진이 요구되는 매우 중요한 시기이다.

2011년 8월 한국환경산업기술원에서는 연구 분류체계에 있어서도 미래지향형 하수처리 핵심 분야 및 세부기술을 분류 하였다. 핵심 분야를 에너지 효율화/효율향상 분야, 미량 유해물질 제어 분야, 하수 중 유효자원 회수 분야, 슬

	첨진성 하수처리 기술	기존의 호기성 활성슬러지 기반 하수처리공정을 첨진성 공정으로 대체하는 기술
미량 유해물질 제어	고도산화분해기술	일반적인 산화 공정에서 사용하는 산화제보다 강력한 산화능력을 가진 radical 물질을 반응 과정에서 생성시켜 물속의 오염물질을 무해하게 분해시키는 새로운 수처리 방법
	세라믹 막 수처리 기술	기존의 유기막을 대체하는 고내구성, 세라믹 재질의 정민/왕외/나노이파막에 의한 하·폐수 처리 및 재이용 기술
	흡착기술	유체상의 특정 성분들을 고체 흡착제의 표면에 부착시켜 분리시키는 공정기술
		축산분뇨, 음식물쓰레기, 하수슬러지 등의 물질을

**Fig. 3. Future technology for wastewater disposal proposed from KEITI (2011. 8).**

리지 자원화 분야 등으로 구분하였으며, 이때 미량 유해 물질 제어 분야의 세부 핵심기술로서 고도산화 분해기술, 세라믹 막 수처리 기술, 흡착기술 등을 제시하였다. 이는 세라믹 막 수처리 기술의 중요성이 점점 중요해 지고 있음을 입증하는 것이다.

### 3. 수처리 분리막의 분류 및 특성

일반적으로 분리막이란 2개 이상의 성분 중에서 특정 성분만을 선택적으로 분리할 수 있는 경계층을 말하며, 분리막의 기공 크기나 구조 및 분리되는 입자 크기나 성질에 따라 분류한다[6]. 따라서 멤브레인을 이용한 분리 공정에는 멤브레인에 의해 물리적으로 구분되는 두 가지의 상이 필요하게 되며 이때의 멤브레인은 나노 다공성(nanoporous), 마이크로 다공성(microporous) 또는 매크로 다공성(macroporous)이거나, 이들의 조합으로 이루어져 있게 된다. 멤브레인의 분리공정은 서로 다른 두 상 사이에 위치하는 막이 두 상 사이의 물질의 이동 및 확산을 조절하는 것으로서, 혼합물 형태의 두상 중에 한 상이 선택적으로 이동되어 다른 상과 분리되는 과정을 말하는 것이다. 멤브레인을 통한 특정한 상의 이동은 한 가지 이상의 구동력에 의하여 발생되며, 이 구동력은 농도와 압력의 구배와 같은 화학적 혹은 전기적 포텐셜의 차이에 의해 발생된다[7].

분리막의 구조는 크게 두가지로, 막의 표면에서 속까지 균일한 구조를 가진 대칭막과 균일이 아닌 비대칭 막으로 나누어 볼 수 있다. 세라믹 막은 입자가 소결되어 형성되는 것으로 일반적으로 비대칭 막으로 이루어져 있다. 보통은 2층 혹은 3층 구조로 이루어져 있으며, 하층은 조대한 입자로 구성되는데 이는 투과 저항을 낮게 하여 높은 투과 유속이 얻어지는 역할을 하기 위함이다. 물질 분리는 표면의 미세한 입자로 구성된 치밀한 층에서 이루어진다. 그림 4는 전형적인 세라믹 막의 구조로서 삼층 구조로 이루어져 있다. 1~15  $\mu\text{m}$ 의 기공크기를 가지는 제일 아래층을

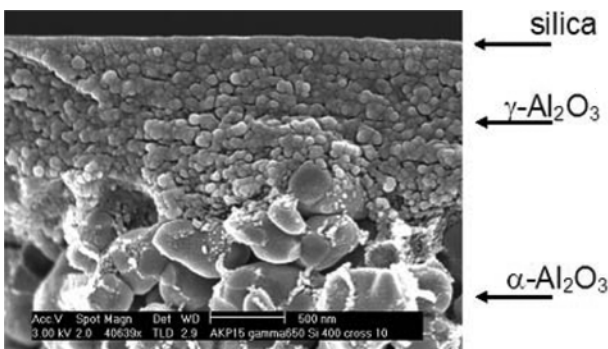


Fig. 4. Typical microstructure of ceramic membrane.

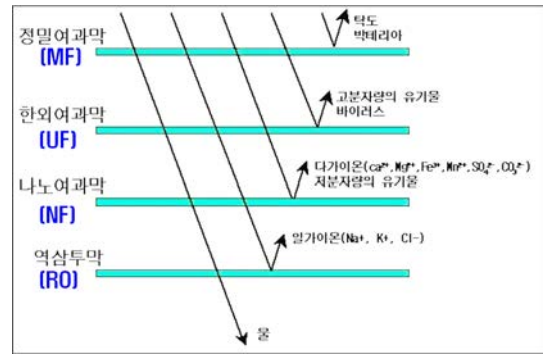


Fig. 5. Classification of membrane with variation of pore size.

지지층(support)이라고 하며, 중간층은 0.1~1  $\mu\text{m}$ 의 기공 크기를 갖고, 제일 위층을 분리막이라고 하며 3~100 nm의 기공크기를 갖는다. 밑의 두층을 1차 분리막이라고 하며, 세층을 모두 갖춘 것을 2차 분리막이라고 한다[8].

멤브레인의 종류는 구멍의 크기에 따라 정밀여과(MF), 한외여과(UF), 나노여과(NF), 역삼투 필터(RO)로 나뉜다. 일반적으로 정밀여과(MF, microfiltration)는 0.1~10  $\mu\text{m}$ , 한외여과(UF, ultrafiltration)는 10~100 nm, 나노여과(NF, nanofiltration)는 1~10 nm, 역삼투(RO, reverse osmosis)는 1 nm 이하를 나타낸다. 또한 이를 통해 실제적으로 분리할 수 있는 물질을 그림 5에 정리하였다. MF 필터는 탁도를 조절하고 각종 박테리아를 제거할 수 있는 필터이다. 또한 UF 필터는 고분자량의 유기물이나 각종 바이러스를 제거할 수 있다. NF 필터는 각종 다가의 이온( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Fe}^{3+}$  등)과 저분자량의 유기물을 충분히 제거할 수 있다. RO 필터는 일가이온 들을 제거하여 최종적으로 순수한 물만을 통과시킬 수 있다. 보통 상/하수 처리 및 담수와 하수 재이용의 전처리(Pre treatment)에 MF와 UF가 사용되며, NF와 RO는 담수와 하수 재이용 처리 부분에 주로 사용되고 있다.

그림 6은 세라믹 분리막의 제조 형태에 따라 특성 별로 분류한 것이다. 허니컴 형태의 모노리스 타입의 세라믹 필터는 약 200개의 유속 채널을 보유하고 있으며, 비교적 높은 모듈당 15 or 25  $\text{m}^2$  필터 면적을 보유하고 있다. 한 개의 필터 하우징에는 1개의 필터를 수직으로 장착하게 되어 있으며, 주로 MF 필터를 중심으로 활용되며, 현재 일본을 중심으로 많은 상용화가 이루어지고 있다. 엘레먼트 타입의 세라믹 필터는 약 0.1  $\text{m}^2$  또는 0.2  $\text{m}^2$ 의 막면적을 가진 관형의 세라믹 필터를 금속 모듈에 조합하여 최종적으로 20 내지 30  $\text{m}^2$ 의 막 면적을 가지는 필터로 제조된다. 주로 MF, NF, UF 필터를 중심으로 다양하게 활용된다. 관형의 세라믹 멤브레인은 주로 폐수 처리를 위하여 소형 수처리 시스템에 사용하며, 유체의 흐름 방향도 바깥




Monolith type	Element type	Flat sheet type
IN-OUT (pressurized)	IN-OUT (pressurized)	OUT-IN (submerged)
		
photo: NGK	photo: Atech innovations GmbH	photo: membrane-engineering
0.1 $\mu$ m Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Different pore size and materials, e.g. > 0.1 $\mu$ m SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 0.1 $\mu$ m ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub>	Different pore size and materials, e.g. > 0.1 $\mu$ m SiC, Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> < 0.1 $\mu$ m ZrO <sub>2</sub> , TiO <sub>2</sub>
15 or 25 m <sup>2</sup> area/module	e.g. <30m <sup>2</sup> area/module	e.g. <2 m <sup>2</sup> area/module

Fig. 6. Classification of ceramic membrane with variation of type [9].

Table 1. Characteristics of ceramic membrane

장점	단점
<ul style="list-style-type: none"> <li>- 고온 열적 안정성: 내열성을 가지며 열처리에 의한 파울링 제거 가능</li> <li>- 유기용매, 산, 염기 등 화학적 안정성 우수: 높은 내부식성</li> <li>- 분리막 장기간 사용가능: 사용 수명이 보통 3~10년 정도</li> <li>- 고분자 분리막 보다 유리한 형상 및 배열가능: 튜브, 다중채널, 허니컴, monolith 제조가능</li> <li>- 높은 기계적 강도로 고압 조업 가능: 고투과율, 고 분리효율 운용 가능</li> <li>- 미생물 및 세균의 오염 방지 가능</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 제조 가격이 고가: 고분자 분리막에 비해 5배 이상 고가</li> <li>- 취성이 높아 깨지기 쉬움 (균열 없는 기공 구조 제어 필요 분리막 두께, 미세구조 재현성 보완)</li> <li>- 모듈 작업 시 배관 및 밀봉이 어려움: 고온에서 열팽창률 차이로 균열 발생</li> </ul>

쪽에서 안쪽으로 향하게 설치하며, 주로 MF, NF, UF 필터를 중심으로 다양하게 활용될 수 있다.

일반적인 수처리 공정에서 고분자 분리막은 처리 공정 후 수중에 용해되어 있거나 산에 의해 용해된 Fe, Mn 등이 고분자 분리막 내부에 침적되어 biofouling을 유발하나 세라믹 막은 산이나 염기에 의한 역세 시 내약품성에 강한 장점이 있으며 발전소에서 배출되는 고온의 1차 계통수 처리 등에 특성이 있다. 즉 세라믹 분리막은 무기소재(알루미나, 티타니아, 탄화규소, 질화규소, 지르코니아, 제올라이트 등)를 이용하여 제조하며 내열성, 내약품성, 내유기 용매성 등이 우수하고 기계적 강도도 강하다. 주로 정밀여과와 한외여과용으로 사용되나 최근에는 나노 여과분리막으로도 사용되고 있으며 고분자로 만들어진 유기 분리막에 비하여 고온의 가혹한 조건에서도 사용될 수 있으므로, 다양한 하·폐수 처리에 적용될 수 있다.

특히 현재 실용화되고 있는 막분리 공정에 사용되고 있는 세라믹 분리막은 고분자 분리막에 비해 표 1과 같은 장단점을 지니고 있다[10].

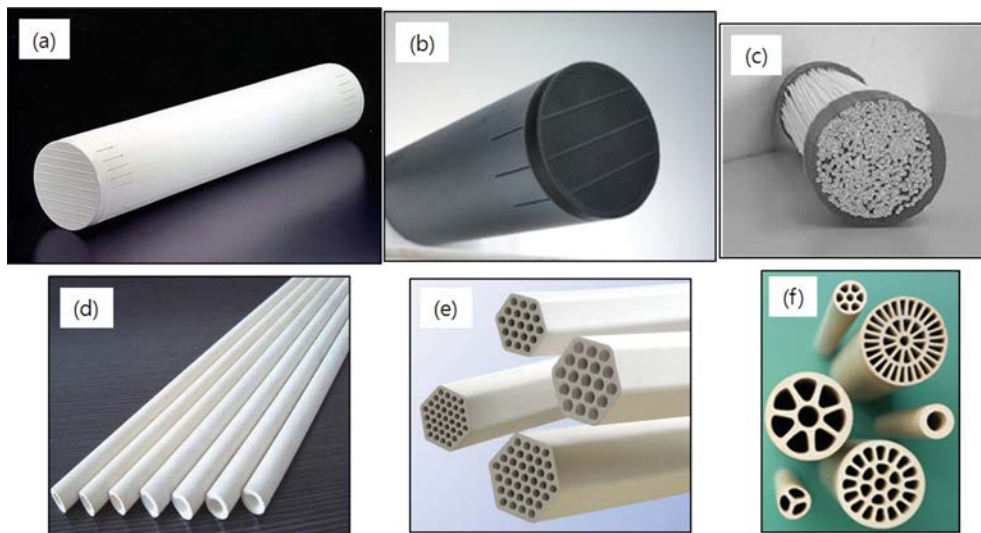
#### 4. 세라믹 분리막의 발전 과정 및 제조 공정

세라믹 분리막은 1940년대에 미국의 Corning Glass Co.에 의해 제조된 Vycor 타입의 다공성 유리와 미국정부에 의한 Mahatan Project에서 개발된 UO<sub>2</sub> 핵연료 제조를 위한 UF6 동위원소 기체분리용 분리막에 그 기원을 두고 있다. 특히, 세라믹 분리막은 우리나라의 농축 기술 개발에 사용되어지므로 전략물자 소재이며 수입제한 품목으로 아직까지도 선진국에서도 국가의 전략적 소재로 육성하고 있는 산업이어서 기술이전을 제한하고 있으며 외국제품 수입 시 많은 제약이 따른다.

한편, 프랑스에서는 1950년대와 1960년대 초반에 동위원소 농축용 세라믹 분리막을 개발하였고, 이들이 현재 상업화의 기술을 보유하고 있다. 1960년대 중반이후 Oak Ridge Lab.에서 액체분리용 세라믹 분리막이 개발되어 1970년대의 세라믹 분리막의 상업화에 기여를 하게 되었다. 이후 세라믹 분리막의 잠재적 응용성이 높이 평가되면서 이들에 대한 상업적인 활동과 연구개발이 활발히 이루어지기 시작한 것은 1980년대 이후의 일이다. 1980년대

**Table 2. Examples of commercialized ceramic membranes**

Company	Materials	Pore size	Type/shape
Atech	SiC/SiC Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.05 ~ 1.0 μm	Tube Multichannel
Bekaert	SS fiber media	Macroporous	Tube
CEP Aratuion	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.3 ~ 40 nm	Hollow fiber
Ceramem	Cordierite/SiC	-	Monolithic
CERASIV	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	5 nm ~ 1.4 μm	Tube
ECO Cera,ocs	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	6 nm ~ 0.2 μm	Tube, Disc
Fairey	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2 ~ 0.35 μm	Multichannel
Fuji Filters	Glass	4 ~ 90 μm	Tube
Liq Tech	SiC	0.05~0.5 μm	Monolithic
MAST Carbon	Carbon	Microporous	Multichannel
Mitsui	Zeolite	Ultra microporous	Tube
METAWATER	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Macroporous	Monolithic
NOK	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.2 ~ 6 μm	Tube
Pall Exekia	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /ZrO <sub>2</sub> Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 ~ 100 nm 0.1 ~ 5 μm	Multichannel
Pall	SS fiber media Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , Ag	Macroporous 1 ~ 300 kDa	Pleatable media Disc
Novasep Orelis	Carbon/ZrO <sub>2</sub>	1.5 kDa ~ 0.14 μm	Tube
Sterlitech	ATZ Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , TiO <sub>2</sub> , ZrO <sub>2</sub>	0.14 ~ 14 μm 1 ~ 300 kDa 0.2 ~ 5 μm	Disc
Sulzer	SiO <sub>2</sub> Zeolite	Microporous Ultramicroporous	Tube Multichannel
Sumitomo	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	50 ~ 200 nm	Monolithic
Synkera Tech	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (anodic)	18 ~ 80 nm	Disc
TAMI	TiO <sub>2</sub>	0.14 ~ 14 μm 1 ~ 300 kDa	Tube Multichannel
Whatman	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	20 ~ 0.2 μm	Disc

**Fig. 7. Morphology of the various ceramic filter for water treatment (a)(b) Monolith type, (c) hollow type and (d)(e)(f) tube type.**

이후의 세라믹 분리막은 정밀여과공정에 사용되기 시작했고, 그 동안 미국, 일본 및 유럽 등에서 막의 제조 및 용

용기술에 대한 광범위한 연구가 진행되고 있으며 상업화의 선두에 서 있다.

표 2에서는 세라믹 분리막을 제조하는 기업의 대표적인 상업화 사례들을 정리하였다. 현재 실용화되고 있는 분리막의 재질은 알루미나 외에 단일 산화물 또는 유리질이 대부분이지만, 높은 열적 안정성과 열충격 저항에 강한 비산화물계나 복합산화물계의 재질에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 최근 가볍고 기계적 강도와 내알카리성이 높을 뿐 아니라 세라믹막의 재료로 단백질 흡착능이 낮은 것으로 알려진 탄소에 대한 관심도 증가하고 있다.

그림 7은 현재 개발 되고 있는 다양한 형태의 수처리용 세라믹 필터를 형태에 따라 분류한 것으로서 크게 MONOLITH TYPE, HOLLOW TYPE, TUBE TYPE 등으로 구별되고 있으며, 대부분 알루미나 소재가 주류를 이루고 있으나 탄화규소, 질화규소, 지르코니아, 타이타니아 소재도 많이 제조되고 있는 실정이다. 또한 그림 8은 현재 그림 7과 같은 수처리용 세라믹 필터를 이용하여 개발되어 있는 다양한 형태의 수처리용 세라믹 모듈 및 시스템을 인터넷의 기업 카탈로그를 통하여, 일부 발췌하여 나타낸 것이다.

세라믹막의 제조법은 일반적인 신소재의 제조법과 마찬가지로 주로 초기 성형 및 분리막층의 코팅방법에 따라 분류될 수 있다. 초기 성형 공정으로는 Extrusion 공정, Slip-casting 공정, Pressing 공정, Tape-casting 공정 등이 있으며, 분리막층의 코팅공정은 Dip-coating 공정, Aerosol deposition 공정, Sol-gel 공정, 등 다양한 공정을 사용할 수 있다.

### 5. 세라믹 분리막의 연구 현황

분리막용 세라믹 지지체는 미국 Pall Corp.사, 일본 Noritake Co.사와 NGK Insulators 사 등이 개발하여 시판하고 있으며, 지지체 위에 분리층을 형성시킨 분리막 unit 제작업체로는 일본 Mitsui Engineering & Shipbuilding Co. 스위스 Sulzer Chemtech, Pervatech BV사, 미국 GEA Filtration사 등이 있다.

수처리용 세라믹 분리막 MF, UF(MBR 포함)의 2009년도 일본 시장은 14억엔으로 전체 5.4%를 차지, 주로 정수장과 산업폐수처리에 사용되고 있으며 장래에 해수담수화의 전처리에 사용될 수 있으며 2010년 15억엔, 2011년 17억엔, 2012년 22.5억엔, 2015년 33억엔으로 예측된다(2010년 (주)후지경제 자료).

나노기공 세라믹 분리막 소재는 에너지, 환경, 화학, 우주, 바이오 분야의 핵심인 촉매, 분리(흡착, 흡수, 분리막, 필터) 소재, 단열재, 센서, 경량소재, 저장소재, 광학소재, 기관소재, 생물분자분리체 등의 근간물질이며 그 시장규모가 2012년 10,000억불/년에 이를 것으로 예상하기 때문에 각 선진국은 그 연구개발에 박차를 가하고 있다[11-12].

Mitsui사는 세라믹 분리막을 이용한 탈수 막 모듈 및 시스템 기술에서 세계에서 독보적인 위치를 점하고 있으며, 제올라이트를 알루미나 지지체 위에 형성시켜 상용급 플랜트를 개발, 수출하고 있다. 일본을 비롯한 미국, 유럽 국가에서 하니컴형의 세라믹 분리막이 상용화되고 있다. 이

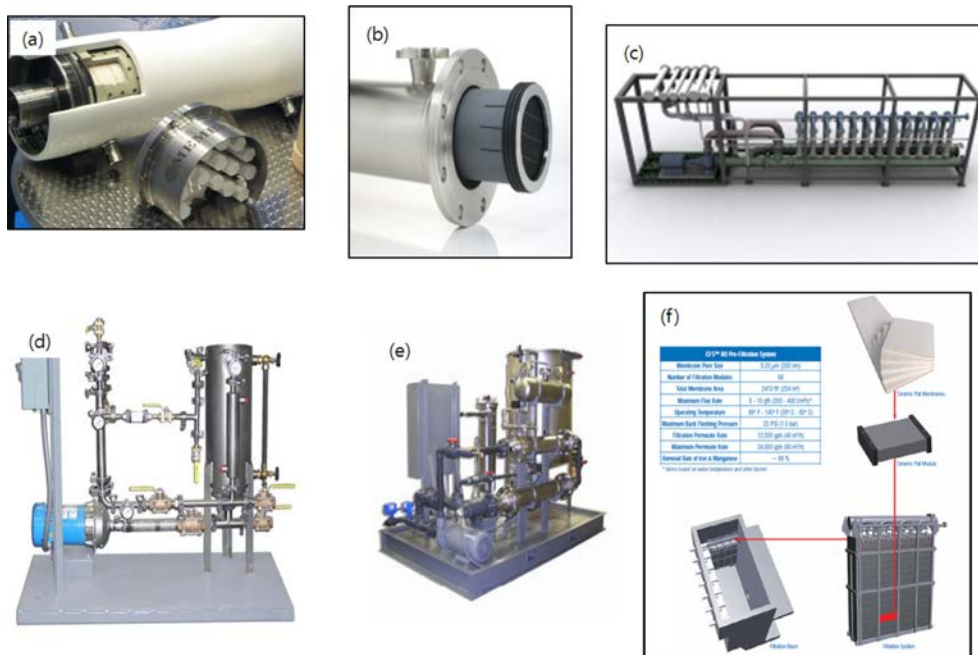


Fig. 8. Commercialized ceramic filter modules and systems for water treatment: (a) membrane modules (Pall), (b) membrane modules (CeraMem), (c) CeraMem ceramic membrane system, (d)(e) Hilco ceramic membrane System and (f) CFS membrane system.

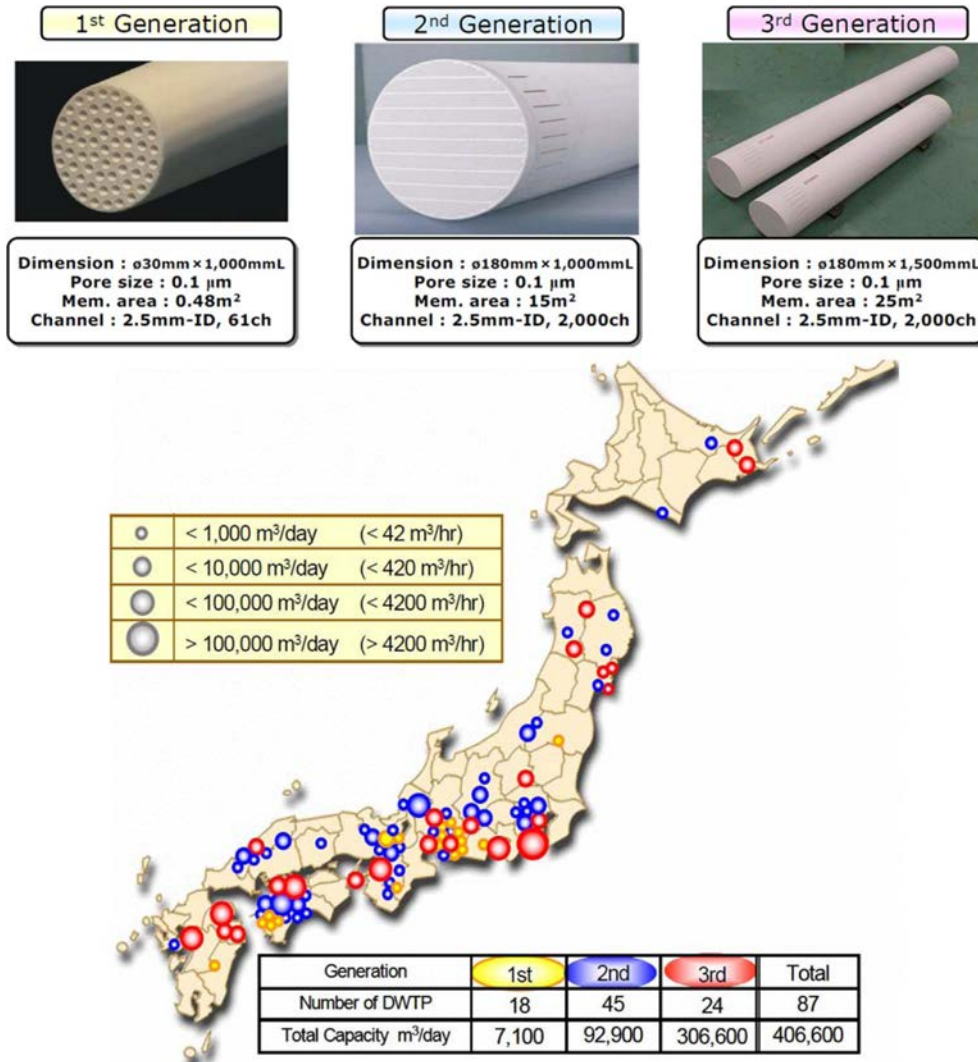


Fig. 9. Specification of ceramic membrane and installation map in Japan [13].

들의 경우는 alumina/alumina 복합 분리막 뿐만 아니라 zirconia/alumina, titania/alumina, zirconia/silicon carbide 등의 다양한 재질의 복합 세라믹 분리막이 개발되어 여러 분야에서 실용화 되고 있으며, 특히 일본의 NGK사에서는 이 소재를 이용하여 광범위한 산업(자동차, 화학, 제약, 건설, 환경 산업 등)에 적용하고 있는 대표적인 사례이다.

그림 9는 일본에서 세라믹 분리막을 이용하여 운영되고 있는 정수장 현황을 나타 낸 것으로 이때 사용된 분리막 중 1세대 분리막은 1985년부터 응용이 되기 시작하였으며, 1996년에 처음 음용수 처리 정수장(DWTP, drinking water treatments plant)에 처음 설치되었으며, 분리막의 가격과 분리특성을 향상시키기 위하여 2세대 3세대 분리막이 2001년과 2006년에 각각 설치되었다. 현재 87개의 정수장이 일본 전역에 설치되었으며, 처리용량도 1일에 406,600  $\text{m}^3$  규모로 운영되어지고 있다.

2006년에 시작된 일본의 제3차 과학기본계획의 정책목

표 중 하나는 “건전한 물 순환과 지속 가능한 물 이용”이며, 이를 위해 4개의 프로그램으로 구성된 “물(水)·물질 순환과 유역권 연구영역”이 설정되어 있다. 그중에서 “대책관리를 위한 적정기술” 프로그램에는 “국제적으로 보급 가능한 첨단 수처리기술”이란 연구과제가 있으며, 과제의 목표는 “막이나 미생물을 이용한 수처리”이며, 유역권 관리에 관한 첨단기술을 개발하여 세계 각국에 보급하고 하천, 호수, 습지대 및 연안 등의 물 환경을 개선하여 유엔의 밀레니엄 개발목표 달성에 기여하는 것을 목적으로 하고 있다.

유럽은 Framework Program으로 다공질 세라믹 지지체 개발과 액상 분리용 세라믹 막 시스템을 개발하였고, 일본은 Noritake, NGK, Nikkato 등의 소재 전문기업을 중심으로 Yamaguchi 대학, AIST와 함께 지지체를 개발, 상업화 하고 있고 미국 US Filter도 알루미늄 지지체 제품을 개발 하였다.

물 부족이 심각한 이스라엘, 싱가포르 등은 정책적으로 하수의 재활용에 막분리 공정을 적용하였다. 이스라엘은 2020년까지 전체 용수 수요량의 23%를 MBR 공정을 통해 공급할 예정이며, 싱가포르는 2011년까지 자립 가능한 수자원을 확보한다는 정책하에 “NEWater” 개발에 성공하였다.

국내 세라믹 필터 및 분리막 개발과제는 90년대부터 추진해 왔으며, 현재 MF 시장이 형성되는 시점이다. 그러나 또한 폐수 정화용 알루미늄 필터와 폐유 처리용 알루미늄 필터의 개발 등이 소규모로 진행되고 있으며, 기술수준은 선진국과 격차가 있다.

국내 세라믹 다공체 연구는 주로 압출에 의한 분리막 제조연구로 응용분야는 기체분리, 자동차용으로 개발단계에 있으며, 관련 소재기업으로는 세라컴, 칸세라, 나노, 코센테크, 맥테크, 화인테크 등이 있다. 또한 국가출연연구소로는 한국세라믹기술원, 한국화학연구원, 한국에너지기술연구원, 재료연구소 등에서 부분적인 연구가 진행되고 있다. 현재 세라믹스 필터의 가장 큰 단점 중의 하나인 여과면적을 극대화시키는 기술을 개발하는 것이 최대의 과제이며, 여과대상 물질에 따른 세라믹스 분리막의 소재 개발 및 시스템 업체와 공동 연구가 필요하다. 효성엔지니어링(주)과 수자원공사 주도로 2005년 이후부터 200 m<sup>3</sup>/day 규모의 pilot 플랜트를 경북 G정수장에 시험 운영을 하고 있으나 사용된 세라믹 분리막은 NGK insulators사(일본)의 소재를 수입하여 사용하고 있는 실정이다.

세라믹 분리막의 경우 선진 기업과의 기술격차뿐만 아니라 장기간 축적된 신뢰도 장벽을 극복하는데 어려움이 있고, 특히 원천 소재 기술은 국내에 전무한 상태이므로 원천 소재 기술의 자립을 위해서는 세라믹 분리막 소재개발에서 시스템에 이르는 분리막 수처리 기술 전반에 대해 정부의 장기 전략에 근거한 정책적 지원이 필요하다.

## 6. 재료연구소에서의 수처리용 분리막 관련 연구 현황

재료연구소에서는 기관고유사업으로 수처리용 다공성 세라믹 분리막 제조 기술 관련 연구를 집중적으로 수행하고 있다. 구체적으로는 연구 분야를 세라믹 지지체 기공 제어 분야와 기능성 부여 분야, 세라믹 지지체 압출 공정 제어 분야 등으로 구분하여 연구가 추진 중에 있다. 기존의 세라믹 필터는 주로 알루미늄, 타이타니아, 지르코니아 소재를 중심으로 연구가 이루어져 왔으나, 재료연구소에서는 기존의 엔지니어링 세라믹스 소재 이외에 규조토 등의 천연 다공성 소재를 이용하여 기존 소재 대비 높은 강도 및 통기율을 보이는 저가의 필터 지지체를 개발 하였다. 또한 다양한 코팅 공정을 통하여 기공크기 조절 및 기능성을 부여하고 있다. 특히 수처리 필터용 지지체 제조를 위해서 비표면적 증대 및 내구성을 증가시킬 수 있는 압출 공정을 기반으로 하였다. 즉 압출 공정 시스템은 수처리 필터를 제조하기 위한 핵심 공정으로서, 세라믹 분말을 이용하는 형상 제어 기법의 하나로서 압출 공정을 통하여 관형, 허니컴, 평판형 등의 다양한 형태로 성형이 가능하였다. 그림 10은 재료연구소에서 압출 공정에 의해 제조된 다양한 형상의 수처리용 세라믹 지지체의 모습이다.

## 7. 수처리 분야의 시장 현황

환경부 2010년 10월에 발표한 물산업 육성전략에 따르면 국내 물산업 시장은 2008년 12조원 규모이며 이 중 상수도 5조4천억원, 하수도 4조5천억원, 먹는 샘물 4,500억원으로 구성되어 있으며, 물산업 전체 시장은 2013년에는 17조원, 2020년에는 26조원으로 확대될 것으로 전망하고 있다. 2007년 기준으로 국내 하·폐수 처리 시장 규모는 24 억 달러(US) 규모이며, 이는 전체 세계시장의 2.1%정

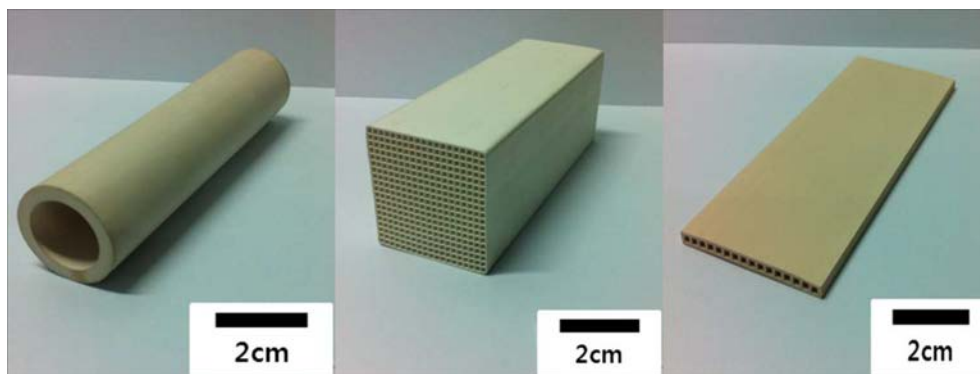


Fig. 10. Morphology of a sintered ceramic support filter for water treatment fabricated by KIMS (tube, honeycomb and flat tube shape).



Table 3. Market trends of ceramic membranes

(단위 : 억원, 억 달러)

구분		2011	2013	2015	2017	2019	CAGR
국내 (억원)	세라믹 UF 멤브레인	124	202	330	540	870	27.6
	세라믹 MF 멤브레인	169	196	228	190	304	7.6
	세라믹 NF 멤브레인	-	-	80	100	130	15.0
	기체분리 멤브레인 소재	200	350	500	750	1,031	20.1
(소계)		493	748	1,138	1,580	2,335	
국외 (억달러)	세라믹 UF 멤브레인	2.4	2.9	3.5	4.3	5.2	21.5
	세라믹 MF 멤브레인	3.6	4.1	4.6	5.4	6.2	14.5
	세라믹 NF 멤브레인	0.9	1.2	1.6	2.0	2.6	30.0
	기체분리 멤브레인 소재	1.8	3.1	4.4	6.4	9.3	20.1
(소계)		8.7	11.3	14.1	18.1	23.3	

\*2011년 소재원천기술개발사업 과제 기획보고서: “기공제어기술을 이용한 세라믹 복합분리막 제조기술 개발”

: 후지경제 “고기능성 분리막 시장의 전모 및 장래 예측” (2009),

: GWI, “Global Water Market 2011” (2010)

: World Membrane Separation Technologies (The Freedonia Group, 2009)

: Automotive World Car Industry Forecast Report, 2004

: 후지경제 “고기능분리막 시장의 전모 및 장래예측” (2009)

: World Membrane Separation Technologies (The Freedonia Group, 2009)

도에 해당되며 이에 정부는 2007년 ‘물산업 육성 5개년 추진 계획’에서 2005년 10.9조원인 국내 물산업 시장을 10년내 20조원 규모로 육성하겠다는 목표를 밝힌바 있다.

세라믹 분리막 수처리 기술의 경우 국내 세라믹 분리막 시장에 대한 정확한 조사 자료는 없으나, 일부 식품산업에 사용되는 경우와 정수처리에 사용되는 경우(수자원공사 연초정수장)를 제외하면 국내 시장규모는 미미한 것으로 조사되며, 향후 중소규모 시설을 중심으로 폐수처리와 재이용 분야에 세라믹 막이 활발하게 도입될 것으로 전망된다. 2011년 미래지향형 하수처리 시스템에 대한 기술동향에 대한 환경기술 기술동향보고서에 의하면, 세계 세라믹 분리막 수처리 시장규모를 기준으로 국내 시장은 2015년 이후부터 본격화될 것으로 예상하고 있다.

분리막 소재는 전 세계적으로 현재 100억달러, 한화 11조원 규모의 시장이 형성돼 있으며, 연 15% 가량의 성장률을 보이고 있어 오는 2018년이면 20조원 수준으로의 성장이 예상되며 분리막 기반 부품의 규모는 전 세계적으로 약 1,000억달러, 한화 100조원대 규모로 성장할 것으로 전망된다.

현재 세계적인 선도 기업들도 해결하지 못하는 한계특성들을 돌파할 수 있는 신규소재 개발에 성공할 경우 2008년 2,000억원 규모에 그치고 있는 국내 멤브레인 산업을 2018년 세계 시장 점유율 30%, 1조원대 규모로 육성할 수 있을 것으로 예상된다. 물 산업이 점차 유망해져 가는 가운데 분리막 기술의 중요성이 점차 시장에서 커지고 있는 실정이며, 분리막 기술의 발전에 따라 물 시장 전망과 분리막의 물 시장에서 차지하는 비중이 급증하고 있는

상황이다.

## 6. 결론 및 요약

최근 들어 수처리 패러다임이 멤브레인으로 바뀌고 국가 영역이었던 운영관리가 민영화로 됨에 따라, 고분자 멤브레인 영역에서 활동적인 연구가 진행되고 있는 반면 아직 세라믹 소재 분야에서는 국내에서 체계적인 연구가 이루어지지 않는 상태여서 선진국과 기술격차는 큰 편이다. 현재 미국, 일본, 유럽 등은 수처리용 세라믹 분리막 상용화 연구가 진행되어 플랜트가 설치되고 있는 시점이지만, 향후 국내의 세라믹 소재 관련 기반기술 수준을 고려할 때 집중적인 연구개발을 통하여 기술격차를 줄일 가능성이 있다고 판단된다. 최근 들어 재료연구소에서는 과거 다년간 다공질 세라믹스 관련 연구를 수행하였으며, 이를 기반으로 수처리용 세라믹 분리막 관련 연구를 수행하고 있다. 향후 수처리 분야에서 분리막 소재의 연구 방향은 다음의 5가지로 정리할 수 있다. 첫째 NT와 BT의 융합(Fusion)이 이루어지는 소재, 둘째는 높은 유속(high flux)을 가질 수 있는 소재, 셋째는 낮은 에너지 소비를 보이는 소재, 넷째는 낮은 파울링(Fouling)을 보이는 소재, 마지막 다섯째는 낮은 환경충격(Low environmental impact)이 요구되는 소재 등으로 정리할 수 있다. 그러므로 기존의 다공질 분리막 소재 이외에도 이와 같은 미래 지향적 분리막 소재를 개발하기 위하여 많은 노력이 요구되어지는 시점이다. 본고를 통하여 아무쪼록 많은 관심 있는 연구자들이 수처리 관련 세라믹 소재에 많은 관심을 가지기를 바란다.

## 감사의 글

본 연구는 한국기계연구원 부설 재료연구소 주요사업의 지원으로 이루어진 결과입니다.

## 참고문헌

- [1] H. H. You: LG Business insight, 7/22 (2009) 2.
- [2] ImFact: State of art of water industry and business prospects, imFact Publishing Co., (2013) 32.
- [3] Frost & Sullivan, Global Desalination Plant Market (2009).
- [4] R. B. Alley and T. Berntsen, Change 2007: The Physical Science Basis, Summary for Policy makers, WMO (2007).
- [5] News article: Hanla, technical transfer from Japan company (Meiden Co.) Maeilkyungje, Feb. 3. 2014 (<http://news.mk.co.kr>).
- [6] H. K. Lonsdale: J. Membrane Sci., **43** (1989) 1.
- [7] S. K. Kang: R&D Trend and Information Analysis of Ceramic Membrane for Water Treatment, Prospectives of Industrial Chemistry, **7**(3) (2004) 83.
- [8] K. Keizer and J. Burggraaf: Proceedings of 14th international conference on science of ceramics (The institute of ceramics, state-on-trent, UK (1987) 43.
- [9] U. Mueller: Techneau, Ceramic membrane applications for filter backwash water treatment, Technical report, 17/01/08 Jan, 2008.
- [10] J. H. Park: New & Information for chemical Engineers, **21**, 1 (2003) 33.
- [11] G. Q. Lu: Nanoporous Materials, 2004.
- [12] EC, Roadmap Report on Nanoporous Materials, 2005.
- [13] K. Hattori: Operation with keramic membrane filtration system for DWTP in Japan. Sbornik konference Pitna voda (2010) 101.