

특집

SiC

# 에너지환경용 탄화규소질 세라믹스의 동향 및 전망

글 \_ 우상국, 한인섭 || 한국에너지기술연구원 융복합재료연구센터  
skwoo@kier.re.kr, ishan@kier.re.kr

## 1. 서론

최근 들어 EU의 배출권거래제 시행과 더불어 교토의 정서가 발효됨에 따라 온실가스 감축의무가 본격화되고 석유자원의 고갈 및 중국·인도 등 거대 개도국의 에너지 수요 폭발 등으로 인한 에너지 시장의 불안정이 심화되면서 에너지와 환경을 동시에 고려해야 하는 시대가 도래하였다. 따라서 전세계적으로 에너지 및 환경에 대한 관심이 날로 고조되고 있으며 단순히 에너지는 절감과 보전이라는 개념을 뛰어넘어 환경친화적인 관리가 요구되고 있다.

특히 산업이 고도화됨에 따라서 필연적으로 발생하는 에너지의 과다한 소비와 급속한 환경의 악화로 야기되는 문제점에 대한 해결책이 요구되고 있으나, 기존의 에너지 환경 소재로는 에너지 절약 및 환경오염 방지에 한계가 있는 실정으로 신 에너지·환경산업에 맞는 첨단 혁신 소재의 개발이 중요한 전략이 될 것이다.

차세대 핵심소재인 지식집약적 에너지환경용 소재 개발은 신 에너지·환경산업의 기술경쟁력 확보에 중요전략이 될 것이며 지금까지 접근이 어려웠던 새로운 개념의 에너지기기 및 시스템 개발을 가능하게 할 것으로 예상된다.

에너지환경용 소재는 고온에서의 기계적, 열적, 화학적 특성이 우수해야 하는데, 이러한 특성을 만족할 수 있는 소재로 비산화물 세라믹스가 이용되고 있다. 1980년대 중반부터 자동차 엔진용 세라믹스 재료의 개발을 중심으로 비산화물 세라믹스에 대한 연구가 본격적으로 시작되

어 밸브류, 기계 밀봉재류, 전열관 및 열전대 보호관류, 버너 노즐류, 용해로용 주입관이나 래디언트 튜브 등의 제철, 제강, 화학분야 및 발전분야에서 필요로 하는 에너지 절약형 비산화물 세라믹스에 대한 개발이 진행되고 있다.

비산화물 세라믹스 중 탄화규소질 세라믹스는 고온에서 기계적, 열적, 화학적으로 우수한 특성을 나타내며 제품을 제조하는데 있어서 소요되는 공정단가가 질화물 및 붕화물 세라믹스에 비해 상대적으로 낮기 때문에, 가장 많이 에너지환경용 소재로서 이용이 되고 있다.

따라서 본 내용에서는 현재 에너지환경용 소재로서 이용되고 있는 탄화규소질 세라믹스의 현황 및 향후 동향을 기술하여 향후 연구에 도움을 주고자 한다.

## 2. 본론

### 2.1 세라믹 열교환기

가스터어빈을 구동하여 발전을 하고자 할 경우 에너지를 절약하기 위한 방법으로 고온의 폐열을 이용하여 연소공기를 예열시켜야만 한다. 연소공기를 예열시켜 에너지를 절약하는 방법 중 단순하고도 가장 좋은 방법은 열교환기를 사용하여 고온 배가스로부터 열교환된 연소공기를 버너에 공급하는 것이다. 연료연소를 위한 예열공기 온도를 상온보다 650~700°C 정도로 높이면 20% 이상의 연료절감이 가능하며 800°C 정도로 높이면 약 30~40%, 1100°C로 높이면 50~55%의 연료절감이 가능하다.<sup>1,2)</sup>

그러나 현재 널리 사용되고 있는 내열금속강재 열교환

기의 경우(stain-less steel, 내열합금강 등) 800~900°C 이상에서는 모두가 산화, 부식, creep 등으로 인하여 그 사용이 제한되고 있는 실정이다. 또한 연소가스 중에는 연료성분 중의 불순물로 인하여 화학적 침식작용을 일으키는 부식성의 산화물 염이 발생되므로 금속재료의 부식문제는 더욱 심각한 문제로 대두되고 있다. 따라서 70년대 oil shock 이후 선진국에서는 폐열회수를 통한 에너지 절약의 일환으로, 고온에서의 부식문제, 열간강도 등의 문제를 해결할 수 있는 세라믹 재료에 관심을 갖게 되었고 Fig. 1과 같은 세라믹 열교환기 개발에 많은 연구를 투자하고 있다.

세라믹 열교환기는 모든 부품이 세라믹 재료로서 구성되어 있으며 배기가스 온도가 높으면서 부식성 물질이나 부식성 가스를 많이 함유하고 있는 요·로 및 가스터빈 등의 폐열회수에 주로 응용되고 있다. 고온용 세라믹 열교환기는 코디어라이트질, 몰라이트질, 지르콘질, 알루미늄질, 사이알론질, 질화규소질, 탄화규소질 또는 복합재료로 된 세라믹 소자를 이용하여 미국, 영국, 서독, 일본 등을 중심으로 연구개발 되었고 일부상용화 되고 있다. 특히 1000~1500°C 사이의 고온폐열 회수를 위한 세라믹 소재로는 비산화물계의 탄화규소질(SiC) 및 산화물계의 고순도, 초미립으로 된 알루미늄질( $Al_2O_3$ )이 적합한 것으로 나타났으며, 이중 SiC 소재는 내열성, 내식성, 내열충격성, 열전도성 등 열교환기에 요구되는 모든 특성들을 갖고 있기 때문에 고온용 세라믹 열교환기 재재료로는 가장 우수한 재질임이 평가 보고되고 있다.<sup>3)</sup> 현재 세라믹 열교환기 재료로 사용되고 있는 탄화규소질 세라믹 재료는 반응소결 탄화규소를 사용하고 있다. 이러한 반

응소결 SiC는 소결조제 없이 1500~1600°C의 낮은 온도에서 소성 후 수축이나 팽창없이 성형체의 치수 그대로 소성되는 특징이 있어 대형이나 전열관 같은 제품의 제조가 용이할 뿐만 아니라 상압소결에 비해 소성온도가 낮은 데에 따라 에너지 비용이 매우 낮아지는 공정상의 특징을 갖고 있다. 그러나 이러한 매우 우수한 장점을 갖고 있음에도 불구하고 더 효율적인 그리고 광범위하게 보급이 되지 못하고 있는 것은 세라믹 고유의 취성파괴 및 이에 따른 낮은 신뢰도 때문이다.

국내의 경우, 한국에너지기술연구원 (KIER) 및 한국과학기술연구원 (KIST) 등과 같은 정부출연연구기관을 중심으로 액상 반응소결에 의한 탄화규소질 세라믹 연구가 수행되고 있다. 한국에너지기술연구원에서는 1987년 이후 액상 반응소결에 의한 탄화규소질 세라믹 소결체 제조에 관한 연구를 국내에서 최초로 개발하기 시작하여 현재까지 수행하고 있으며, 타일 소성용 킬른에 사용되는 버너 타일 (Burner Tile)의 개발 및 실증, 자동차 디젤 엔진용 세라믹 밸브 타렛 (Valve Tappet) 및 세라믹-금속 접합 밸브 타렛의 개발 및 실용화, 세라믹 열교환기용 전열관의 개발 및 상용화, 펌프용 세라믹 밀봉재의 개발 및 기업화, 철강 열처리용 라디언트 튜브 (Radiant Tube) 및 버너 노즐 개발 등을 액상 반응소결법에 의해 성공적으로 수행한 바 있다.<sup>4)</sup>

한국과학기술원의 경우에도 1990년대 초부터 금속 실리콘의 용융, 침투에 따른 반응 소결을 이용한 탄화규소 제조기술에 대한 연구를 수행하였으며, 개발된 기술을 국내 Inocera Inc. 업체에 기술을 이전하여 반도체 치구용 탄화규소질 제품을 생산하고 있다. 또한 최근 들어 액상 반응소결 기술을 이용하여 고온 가압용 세라믹 필터를 제조하기 위한 연구도 수행하고 있다.

최근 세라믹 고유의 취성파괴의 단점을 개선하여 세라믹의 신뢰도를 향상시키고자 세라믹섬유강화 복합재료를 이용하여 Fig. 2와 같은 열교환기를 제작하는 연구가 미국, 독일 등에서 진행되고 있다. 즉, near-net-shape의 제조가 가능하고 제조공정 온도가 낮은 복합재료 제조방법인 용융침침법(melt infiltration), 화학증착침침법(chemical vapor infiltration) 및 용융금속산화법(directed oxi-

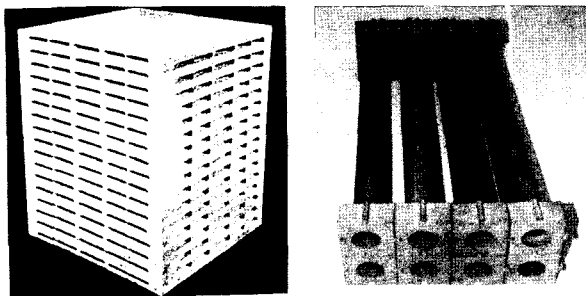


Fig. 1. 세라믹 열교환기.

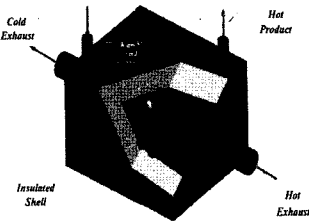


Fig. 2. 섬유강화 세라믹 열교환기.

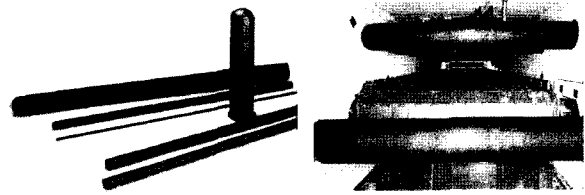
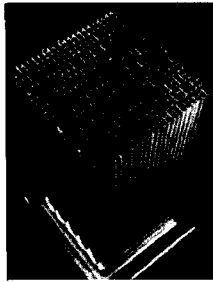


Fig. 3. Coors Ceramic Company 및 독일 Schunk 사에서 개발된 다양한 형상의 세라믹 래디언트 튜브

dation method of molten metal) 등의 개발이 이루어지고 있다. 이러한 세라믹섬유강화 복합재료 제조기술의 달성으로 인하여 고온, 고압에서 사용 가능한 세라믹 열교환기를 사용할 경우 약 50% 이상의 열효율 증가를 가져올 것으로 보고되고 있다.<sup>5)</sup>

또한 탄소섬유-탄화규소 복합재료를 이용한 차세대 고온, 고압 열교환기를 사용하여 일반 산업체 폐열의 50%(일반 금속재 열교환기의 경우, 온도효율이 40% 정도임)를 회수한다고 가정하면, 일반적인 금속재 열교환기에서 회수할 수 있는 약 2,156억원 보다 579억원 많은 약 2,695억원의 에너지절약이 가능할 것으로 전망되고 있다.

## 2.2 열처리용 래디언트 튜브 및 노즐

제철, 제강 산업중 금속의 가스 가열이나 간접식 분위기 열처리에서 금속의 침탄(carburization), 경화, 서냉을 위해 이용되고 있는 래디언트 튜브나 버너 노즐은 대부분 Ni-Cr계 합금이나 일부 mullite 세라믹스 재질로 구성되어 있다. 그러나 금속 제품은 900~950°C 이하의 낮은 온도영역에서 사용이 가능하며, 침탄과 creep, 변형 및 튜브 내벽의 화공(burn-through)으로 인해 그 수명이 6~8개월 정도인 문제점이 있다. 또한 mullite 세라믹스 제품은 금속 제품에 비해 사용온도는 다소 높으나 열충격에 의해 쉽게 취성파괴(brittle fracture)를 일으키는 단점이 있어 작업량의 손실, 열처리로의 손상 및 부품교체를 위한 예상치 않은 비가동 시간의 증가로 인해 상당량의 에너지 낭비를 초래하고 있는 실정이다.

이에 따라 금속 제품이나 mullite 세라믹 제품에 비해

사용온도가 높고, 열유동 능력이 크며, 부식성 분위기에서 내식 특성을 나타낼 뿐만 아니라 우수한 내크립성(creep resistance)과 열충격저항성을 갖는 고효율, 고성능 래디언트 튜브나 버너 노즐 제품의 개발이 제철, 제강 분야에서 지속적으로 요구되어 왔다.

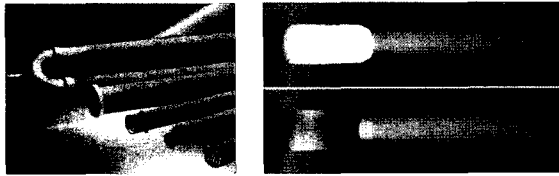
이를 위해 Fig. 3과 같이 미국, 독일 및 일본 등의 선진국에서는 기존의 제품을 탄화규소질 복합재료로 개발하여 사용온도를 최고 1350°C까지 증가시키고, 내구성이 금속 제품에 비해 3배 이상인 제품을 개발하여 열처리로의 효율 향상과 유지보수 비용 절감, 비가동 시간의 단축에 의한 생산성 향상을 통해 에너지 절약을 달성하고 있는 상태에 있다.<sup>6)</sup>

이와 같은 세라믹 복합재료로 래디언트 튜브를 금속 열처리로 등에 적용시킬 경우, 금속 재질 래디언트 튜브의 처리능력(50~55Btu/h/in<sup>2</sup>)에 3배 이상(150~200 Btu/h/in<sup>2</sup>), 생산성 3~4배 증가와 열처리 시스템의 효율을 50% 향상시킬 수 있어 에너지 절약 효과를 달성할 수 있다고 보고하고 있다.<sup>7)</sup>

그러나 최근들어 산업현장에서 요구되는 환경이 점차 초고온, 고강도 및 높은 파괴인성, 초내열 및 내식성 등의 극한적인 환경에서 적용될 수 있는 재료로의 전환이 요구되고 있어 1980년대 후반부터 이러한 급속히 변화되는 환경에서 적용될 수 있는 재료로서 섬유강화 복합재료 세라믹스가 주목받게 되었다.

이에 따라 선진국에서는 세라믹스의 소결방법 가운데 소결수축이 없어 near-net shape 제조가 가능하며, 공정온도가 낮고, 소결시간이 짧아 양산화 및 실제 응용이 가능한 특징을 갖고 있는 금속의 용융침투(melt infiltration)에 의한 액상 반응소결법(Reaction Sintering)을 이용하여 치밀질 소결체를 제조하는 방법으로 섬유강화 래

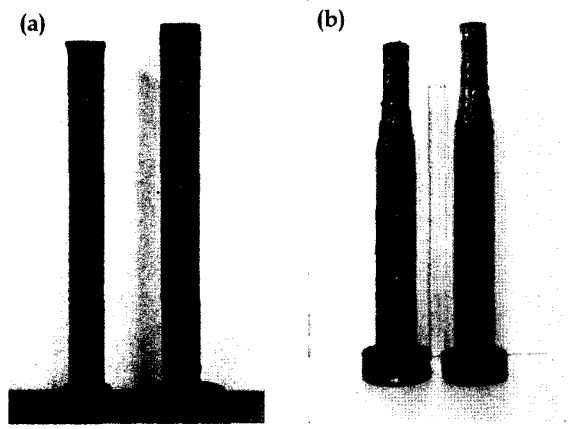
디엔트 튜브 및 노즐 등을 개발하여 Fig. 4와 같이 열처리로에 적용하고 있다. 미국, 독일 등의 국가에서는 현재 래디언트 튜브나 버너 노즐 뿐만 아니라 자동차, 고속철도, 항공기용 브레이크 디스크 및 패드, 차세대용 고온·고압 열교환기 등의 개발과 그 외 우주항공용이나 로켓 추진용 고기능성 복합재료에 이르기까지 이들 복합재료를 이용하고자 하는 연구개발을 수행하고 있다.



(a) Si-SiC 복합체 래디언트 튜브 (b) 고성능 버너 노즐  
**Fig. 4.** Inex Inc.에서 개발된 Si-SiC 복합체 래디언트 튜브 및 독일 Schunk사에서 개발한 고성능 버너 노즐.

국내의 경우 한국에너지기술연구원에서 액상 반응소결법을 응용하여 탄소섬유와 탄소분말로 구성된 성형체를 제조하고, 탄소/탄소 성형체에 금속 실리콘(Si metal)을 용융침투시켜 치밀질이면서 고인성, 고강도를 보유하고, 내열성 및 내식성이 우수한 탄소섬유-탄화규소 세라믹 복합재료 소결체를 Fig. 5와 같이 제조하였으며, 현재는 참여기업을 통하여 래디언트 튜브와 버너 노즐의 실용화를 위한 연구를 수행하고 있다.

현재 금속재(Ni-Cr 합금, Inconel 합금) 래디언트 튜브를 사용하고 있는 열처리로(침탄로, 소둔로, 서냉로)는



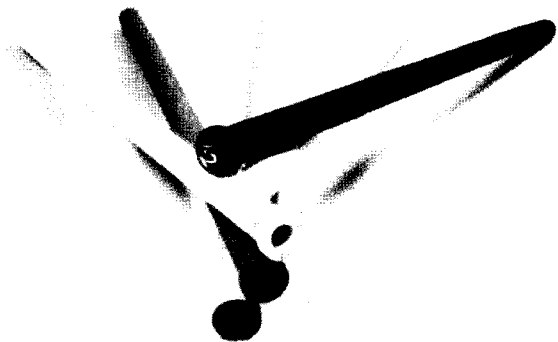
(a) 래디언트 튜브 (b) 래디언트 버너 노즐  
**Fig. 5.** 한국에너지기술연구원에서 개발된 철강 열처리로용 C-Si-SiC 복합체 제품.

포항제철 4,000대를 비롯하여 제철, 제강업체에 약 8,300대 정도가 설치되어 있으며, 중소기업체의 열처리로, 건조로 등에 사용되는 것을 포함하면 약 10,000대 정도가 설치되어 있을 것으로 예측된다. 금속재 래디언트 튜브의 수명을 약 1.5~2년으로 볼 때, 래디언트 튜브 단일품의 시장만으로도 연간 약 165억원의 시장규모를 갖고 있어 투자경제성은 매우 밝다고 할 수 있다.

### 2.3 고내구성 세라믹 필터

최근 에너지와 환경문제가 대두됨에 따라 21세기의 에너지효율과 환경문제를 동시에 해결하기 위한 기술로 석탄의 액화나 가스화에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 석탄의 가스화 연구 중 석탄가스화 복합 발전 시스템(IGCC, Integrated Gasification Combined Cycle), 가압유동층 연소방법(PFBC, Pressurized Fluidized-Bed Combustion), Integrated Gasification Advanced Cycle (IGAC) 및 Integrated Gasification Fuel Cell(IGFC) 기술 등은 에너지효율 극대화와 청정에너지 생산을 위한 차세대 화력발전시스템 기술로서 부각되고 있다.

고온가스 내에 존재하는 입자상 물질의 제거를 위한 장치들로는 사이클론, 전기집진기, GBF (Granular Bed Filter), 다공성 세라믹 필터 등과 같은 다양한 방법들이 사용되거나 개발되고 있으며, 이들 중 대부분의 학계와 산업계 연구들이 Fig. 6과 같은 다공성 세라믹 필터를 이용한 집진시스템 개발에 집중되고 있다. 즉, 배가스 정제 방법으로는 일차적으로 사이클론에서 큰 먼지입자를 제



**Fig. 6.** 고온용 다공성 세라믹 필터.

거한 후, 세라믹 필터를 이용하여 이차집진을 하고 있다.<sup>8)</sup>

그러나 가압유동층 연소 배가스중에는 gas turbine을 마모시키는 먼지입자가 다량 함유되어 있고, 부식 및 침식을 유발하는 알칼리성 금속화합물이 다량 함유되어 있다. 특히 알칼리성 금속 화합물은 미세한 먼지형태, 휘발된 증기 상태, 먼지에 응축되어 입자에 응집된 상태로 존재하고 있다. 이와 같은 입자상 물질을 제거하기 위하여 세라믹 필터에 대한 연구가 독일과 미국이 중심이 되어 수행되고 있다.

집진필터용 세라믹 재료로서 모노리스 산화물 및 비산화물계 소재, 산화물 및 비산화물계 연속상 세라믹 섬유소재 (CFCC), 산화물계 섬유 필라멘트 와인딩 소재, 단섬유 진공함침 소재 및 산화물 및 비산화물계 망상 다공성 소재 등을 후보소재로 선정하여 1980년대부터 Fig. 7과 같은 PFBC, PCFBC 또는 IGCC 실증 플랜트에 적용하여 현재까지 소재의 평가와 문제점 분석을 수행하고 있다.<sup>9)</sup>

초기의 집진필터로 제조된 Monolithic Oxide-Based 필터의 단점을 보완하고자 독일의 Schumacher, 미국의 Pall Advanced Separations 및 IF&P 등에서는 고온에서 열전도도가 우수하며, 부식저항성이 좋은 탄화규소질 모노리스 세라믹을 이용한 집진필터를 개발하였다.

대표적인 제품은 독일 Schumacher사의 Dia Schumalith 필터로서 탄화규소 (SiC, silicon carbide) 지지층을 점토계 무기결합재를 이용하여 10mm 두께로 개발한 것이다.

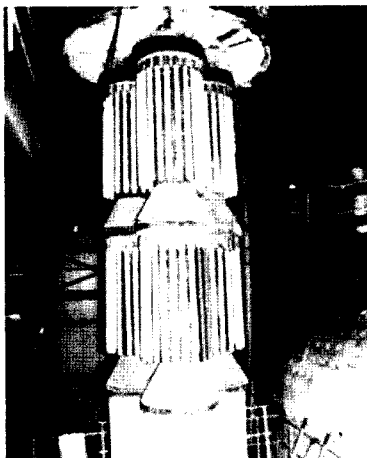


Fig. 7. Siemens Westinghouse 실증 플랜트에 설치된 실험용 세라믹 필터.

이 제품은 Fig. 8에 나타난 바와 같이 점토 바인더가 탄화규소 입자에 코팅되어 입자들 간에 neck (또는 ligament)를 형성시켜 지지층을 구성하고, 약 100 $\mu$ m 두께로 외부 멤브레인 표면층을 형성하여 제조한다. F40 Schumacher 필터를 bench-scale 실험과 pilot-scale 시험을 수행한 결과, 점토계 바인더의 조성변화가 필요하여 FT20이라는 고온 및 내크립성을 갖는 알루미늄실리케이트계 바인더를 개발 후, Schumacher FT20명의 필터를 개발하였다.

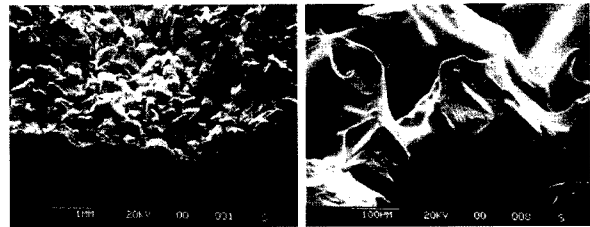


Fig. 8. Schumacher사의 Dia Schumalith 점토계 바인더를 사용한 탄화규소 캔들 필터의 파단면 (좌측)과 점토결합 탄화규소 입자 형상 (우측).

미국 Pall Advanced Separations사의 Pall 326 필터는 고온에서 내크립성 (creep resistance)이 강한 바인더를 사용하여 탄화규소 입자를 결합시킨 필터로 개발하였으나 PFBC/PCFBC 분위기에 대한 집진시험 결과, Schumacher사 제품과 유사하게 silica-enriched 층의 외부 표면을 따라 outgassing에 의한 void나 hole 형성이 관찰되었다.

한편 IF&P사에서는 Filtros Ceramic Products사와 협력하여 상기한 점토결합 탄화규소 필터에서의 바인더에 의한 문제점을 최소화하기 위해 재결정 탄화규소 (Recrystallized Silicon carbide) 필터를 개발하였다. 그러나 이 제품도 bench-scale PFBC 시스템에 적용한 결과, 재결정 탄화규소 입자 표면으로 실리카가 형성되기 시작하였으며, 국부적으로 수지상 물라이트 (dendritic mullite) 결정이 형성되는 결과를 나타내었다.

탄화규소질 세라믹 필터의 단점을 극복하고자 1990년대부터 DuPont (현재 GE Power System)사, McDermott 사, Techniweave (현재 Albany International Techniweave, Inc.)사 및 3M 사 등에서 산화물 섬유를 이용한 집진필

터를 개발하여 운전 시험한 결과, 내부 crack 및 강도저하 등의 결과를 나타내었다. 따라서 현재 고온·고압용 집진필터에 대한 연구는 탄화규소질 세라믹스에 무기결합제(inorganic binder)의 결합방식을 이용한 세라믹 캔들 필터에 대한 연구가 가장 경제적인 방법으로 알려져 있으며, 선진국의 경우에도 이들 무기결합제를 변경시킴에 따른 고내구성 집진필터의 개발에 주력하고 있다.

국내의 경우, 청정발전 시스템용 고온·고압 집진필터 및 시스템 개발에 관한 연구는 선진국들에 비하여 그 수준이 기초 연구단계에 있으며, IGCC용 합성가스 정제 시스템 개발이나 합성가스 미세분진 제거용 고내구성 세라믹 캔들 필터의 국산화 개발 단계에 도달하기 위해서는 아직도 많은 연구가 수행되어야 한다. 2000년 들어서 한국에너지기술연구원 및 한국과학기술연구원에서 탄화규소질 세라믹스를 이용한 세라믹 캔들 필터에 대한 연구를 수행하고 있으나 아직까지 상용화를 위해서는 더 많은 연구가 필요하다. 그러나 향후 석탄 화력발전 공정에 적용될 고온·고압 세라믹 캔들 필터의 소요량은 급격히 증가할 것으로 예측되고 장치의 규모도 대규모로 전환될 것으로 전망된다. 따라서 고온·고압가스 정제용 세라믹 캔들 필터의 국산화 개발이 완료되어 상품화 되었을 경우, 고온·고압용 집진장치의 설치비 원가절감액과 집진필터 교체에 따른 비용의 절감액은 매우 클 것으로 추정된다.

## 2.4 배가스 슬러리 분사 노즐

석탄 화력발전의 배가스 탈황(FGD, Flue Gas Desulfurization) 기술은 1960년대부터 미국, 일본, 독일 등 선진국을 중심으로 활발하게 연구개발이 진행되어 왔다.

배가스 탈황은 화석연료 중에 포함되어 있는 유황분이 연소될 때 발생하는 배기가스 중에서 황산화물(SO<sub>2</sub>)을 화학적 또는 물리적인 방법으로 제거한 후, 처리된 가스를 연도로 배출하는 기술을 말한다. 배가스 탈황 공정은 흡수제의 형태에 따라 습식과 건식, 반응 생성물로부터 흡수제의 회수여부에 따라 재생법과 비재생법으로 분류하며, 현재 전 세계적으로 상용화되고 있는 처리 공정은 비재생 습식 석회석-석고 공정이 채택되어 전체 설비용

량의 80% 이상을 점유하고 있다.

배가스 탈황용 슬러리 분사 노즐은 화력발전소의 spray tower 방식 배연탈황 설비의 덕트 쿨러(duct cooler)와 흡수탑(absorber) 내에 설치되어 비재생 습식 석회석-석고 공정에 의해 배가스 중 황산화물을 제거하거나 배가스의 냉각을 위해 필수적으로 장착되는 특수 기능성 세라믹 노즐이다. Fig. 9에는 현재 국내의 화력발전소에서 수입하여 사용하고 있는 대표적인 노즐의 예를 나타내었다.

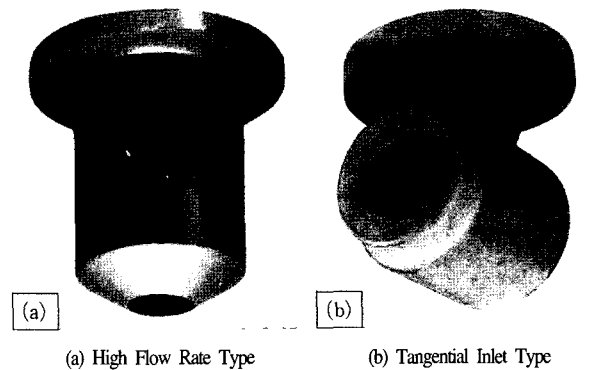


Fig. 9. 석탄 화력발전소 배가스 탈황용 슬러리 분사 노즐의 형상.

현재 슬러리 분사 노즐은 주로 질화규소 결합 탄화규소(Silicon Nitride-Bonded Silicon Carbide or Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-bonded SiC) 세라믹스를 사용하고 있다. 탄화규소 세라믹스를 내열, 내식재료로 사용하기 위해서는 주로 점토 결합(clay-bonded), 산질화규소 결합(Si<sub>2</sub>ON<sub>2</sub>-bonded) 및 질화규소 결합(Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>-bonded) 방법을 이용하여 제품을 만드는 방법이 있다. 이 가운데에서 고온강도, 내열충격성, 내식성이 가장 좋은 제품이 얻어지는 방법은 질화규소 결합 방법이다. 특히 이 재질은 알칼리성이나 산성 분위기 뿐만 아니라 CO 가스에 대한 내부식성이 매우 우수하며, 높은 고온강도, 우수한 내열충격성과 철광석이나 코우쿠스(cokes)에 대해 하향이동에 대한 내마모성도 뛰어난 것으로 알려져 있어 상용화가 가장 활발히 진행되고 있다.<sup>10)</sup>

최근에는 미국의 BETE Fog Nozzle Inc.사나 Spraying System Co.에서 기존의 금속 및 플라스틱 노즐의 개발 뿐만 아니라 질화규소 결합 탄화규소 재질이 갖는 우수

한 내식성과 내열충격성에 착안하여 탈황용 슬러리 분사 노즐을 개발하기 시작하여 국내를 포함한 전 세계의 화력발전소 시장에 고가로 공급하고 있는 상태에 있다.

1998년을 기준으로 전세계에 걸친 배가스 탈황설비는 678기로 224,627MW에 해당된다. 그러나 1999년 기준으로 우리나라를 비롯한 많은 개발도상국(홍콩, 대만, 태국, 말레이시아, 파키스탄, 중국 등)에서 석탄 화력발전소의 신규 건설과 함께 배가스 탈황설비를 설치하였거나 설치 중에 있기 때문에 향후 급격한 설비용량의 증가가 예상되어 탈황용 슬러리 분사 노즐의 시장은 증가할 것으로 예상되고 있다.

### 3. 결 론

지구온난화 및 기후변화협약에 따라 전세계적으로 환경오염물질에 대한 규제가 실효되었으며, 세계 각국에 이에 대한 효율적 대응이라는 국가적인 과제를 안고 있다. 에너지 및 환경이슈에 대한 이러한 도전들을 비용 효과적으로 슬기롭게 극복하기 위하여 신 에너지 기술개발에 대한 시대적 요구가 증가하고 있다. 이에 선진 각국들은 고효율, 고성능 에너지 절약기기 및 대체에너지 기기의 개발을 통한 에너지기술력의 강화로 신 에너지·환경산업의 독자적 기술기반을 구축하여 차세대 에너지·환경시장을 선점하고자 선의의 경쟁을 하고 있다.

고온에서의 기계적, 열적, 화학적 특성이 우수한 에너지환경용 소재는 에너지 기술의 한계를 극복하고, 에너지 산업의 고도화 실현을 주도하며 환경오염의 주원인인 화석연료의 사용을 억제하기 위한 원천 핵심재료로 대두되고 있다.

특히 탄화물 (Carbides), 질화물 (Nitrides) 및 붕화물 (Borides)과 같은 비산화물계 세라믹스는 고온의 에너지환경용 소재로서 전세계적으로 연구가 진행되고 있다. 그 중에서 탄화규소질 세라믹스는 고온에서 우수한 특성을 나타내는데 비하여 소요되는 공정단가가 질화물 및 붕화물 세라믹스에 비해 상대적으로 낮기 때문에, 가장 많이 에너지환경용 소재로서 이용되고 있다. 전술한 바와 같이 전열관 및 열전대 보호관류, 버너 노즐류, 래디

언트 튜브, 고내구성 세라믹필터 및 배가스 슬러리 분사 노즐 등의 제철, 제강, 화학 및 발전분야에서 필요로 하는 에너지환경용 탄화규소질 세라믹스의 개발에 대하여 전 세계적으로 많은 노력을 기울이고 있으며, 시장을 선점하고자 경쟁하고 있는 실정이다. 따라서 우리의 경우에도 에너지환경용 소재로서 가장 경제성을 갖고 있으며, 그 실용화 부문이 확대되고 있는 탄화규소질 세라믹스에 대한 연구 개발 및 보급에 대하여 더 많은 연구투자 및 개발이 절대적으로 필요한 실정이다. 또한 단기적인 안목보다 장기적인 안목으로 에너지환경용 탄화규소질 세라믹스의 개발이 이루어지도록 노력할 때 향후 에너지환경용 소재 강국으로 도약할 수 있으며 청정환경을 이루는데 일조할 것으로 생각된다.

### 참고문헌

1. Bryan D. Forster, "Ceramics in Heat Exchangers", ACS Columbus, Ohio, 49~50 (1985)
2. Development of Tube Type Ceramic Heat Exchangers for High Temperature Waste Heat Recovery(I~III), MOST/KIER Report, 1988~1990
3. G.C.Wei, et al "Evaluation of Tubular Ceramic Heat Exchanger Materials in Residual Oil Combustion Environment", ORNL/TM-7578 (1981)
4. Development and Application of High Temperature Ceramic Nozzles, Valves and Thermocouple Protecting Tubes(I~IV), MOCIE/KIER Report, 1992~1996
5. W. Krenkel and R. Renz, "C/C-SiC Components for High Performance Applications," ECCM, June3-6, Naples, Italy, 1998
6. GRI Periodical Article, "Composite Radiant Tubes : Opportunity for the Heat Treating Industry, [http://www.gri.org/pub/content/jun/19980602/120215/1\\_98\\_rad\\_tubes.html](http://www.gri.org/pub/content/jun/19980602/120215/1_98_rad_tubes.html)
7. GRI Document No. GRI-91-/0478, "High-Temperature Industrial Radiant Tube", May 1991
8. J.P.K. Seville : "Particulate Removal II - Overview", High Temperature Gas Cleaning, pp.131-141, 1999
9. M.A.Alvin, Filter Component Assessment-Ceramic candles-, DOE Final Report, 2004
10. R. Ramachandra Rao and T. S. Kannan, "Slip cast nitride-bonded silicon carbide bodies", *Materials Chemistry and Physics*, 75 270-275(2002)

●● 우상국



- 1978. 연세대학교 요업공학과 학사
- 1987. 한국과학기술원 무기재료공학과 석사
- 1994. 한국과학기술원 무기재료공학과 박사
- 2004. 한국에너지기술연구원 에너지신소재 연구부 부장/센터장
- 2004. 한국에너지기술연구원 에너지재료 연구센터 센터장
- 현재. 한국에너지기술연구원 융복합재료 연구센터 책임연구원

●● 한인섭



- 1985. 명지대학교 무기재료공학과 학사
- 1987. 명지대학교 무기재료공학과 석사
- 1995. 명지대학교 무기재료공학과 박사
- 현재. 한국에너지기술연구원 융복합재료 연구센터 센터장, 책임연구원