



## 내화물 산업 및 기술동향

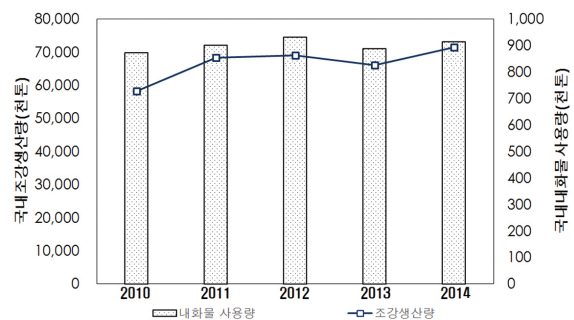
글\_ 이석근  
한국내화(주)

### 1. 序 言

내화재료는 근대공업의 눈부신 부흥과 함께 철강, 유리, 세라믹, 시멘트 등 기간산업의 기반을 지지하는 자원으로 중요한 역할을 수행하여 왔다. 특히 20C 중엽 철강 프로세스의 변혁과 연속주조(continuous casting)화를 지향함으로써 steel-making은 평로에서 전로로 바뀌고, RH-OB 탈가스법이 도입되고 연주법이 개발되는 등 큰 변화를 이루어 왔다. 제철제강의 핵심소재인 내화물도 이에 부응하여 새로운 제품을 지속적으로 개발하며 동반 발전하여 왔다. 그 후 철강 process가 안정화되고 새로운 혁신적 기술 적용이 없어지면서 내화물 기술발전도 정체를 피할 수 없게 되었다. 더욱이 철강업체들이 철강 제조 cost 절감을 위하여 내화물 가격 삭감을 전략적이면서 지속적으로 구사함으로써, 철강 생산성 증대와 강재 품질의 향상을 위한 내화물의 기여에 대한 기대감이 사그라들 수밖에 없게 되었다. 이는 새로운 기술과 합성원료가 접목된 차세대내화물 개발에 대한 기반을 뿌리채 흔들어버리는 환경을 조성하게 되었고, 새로운 기술에 대한 R&D보다는 노재 운용 적정화 및 사용기술 최적화에 힘을 쏟게 되었다.

Fig. 1과 Fig. 2에 각각 국내 및 세계의 최근 5년간 조강생산량과 총 내화물사용량<sup>1)</sup> 추이를 나타낸다. 그동안 내화물은 철강 측의 요구에 의한 수동적 R&D 활동이 대세를 이루었다고 볼 수 있다. 고객의 needs에 부응하는 attitudes는 소중한 일이지만, 더욱 지켜야 할 가치는 내

화물 본연의 seeds를 기르는 것일 것이다. 이에 게을리하고 단순히 고객의 needs만을 쫓아 중장기 안목으로 해야 할 기술개발에 소홀히 한다면, 결국 고객의 needs와 스스로의 seeds를 모두 잃어버리게 될 것이다. 한마디로 요약하면 내화물은 성숙산업이고 최근에는 기술의 정체감도 부인할 수 없으나, 저가의 수입공세에 제동을 걸려면 쉽게 흉내낼 수 없는 부가가치 높은 신기술로 대항하는 것 외에는 뾰족한 방법이 없다. 本 報에서는 내화물 산업의 발전전략으로서 기반기술 강화, 나노기술 접목, 산학협력 활성화의 3가지를 제시한다. 즉, 내화물의 기반기술을 강화함으로써 현재의 역량을 키우고, traditional ceramics인 내화물에 첨단인 nano technology의 concept을 이입(移入)시켜 미래에 대비하고, 또한 대학교 및 공공립연구소와 더불어 open innovation을 실천하여 개발 효율을 극대화하자는 전략을 제언코자 한다.



\*자료 : 한국철강협회, 대한내화물공업협동조합

Fig. 1. 국내 내화물시장과 조강생산량



Fig. 2. 세계 내화물시장과 조강생산량

## 2. 기반기술 강화

### 2.1 新원료 개발

global화된 내화물 원료의 향후 동향은 수요공급 balance 이외의 요인 즉, 독과점 및 자원 민족주의에 의해 공급제한, 정세불안, 투기, 환율변동 등에 좌우되기 때문에 정확히 예측하기 어렵고, 따라서 내화물 원료의 질적, 양적 측면에서 안정적 확보를 추진하는 것이 중요하다. 특히 세계에 지대한 영향을 주던 중국산 내화물 원료는 매장량의 고갈과 중국 국내의 소비 증가 및 환경 문제 등으로 일부 원료가 수출 제한(전력 다소비에 따른 공해 발생을 유발하는 원료 등) 되거나, 최악의 경우에는 수출금지(매장량이 적거나 대량생산이 곤란한 원료 등) 될 수 있음도 고려해야 한다. 내화원료 자원이 부족한 우리나라의 경우는 수입 원료에 대한 의존도는 앞으로도 늘어날 것이므로, 중국 이외의 새로운 해외 공급원의 탐구를 추진할 필요가 있다. 단 중국은 지정학적으로 가까운 나라이며 앞으로도 중국산 내화물 원료가 상당부분을 차지할 수 밖에 없으므로, 그 대응으로서 그동안의 단순 수입에서 벗어나 개발 수입 등 종래와는 다른 장기적 관점에서 진지하게 검토하고 확보 전략을 구축해야 할 시점이기도 하다. 또한, 내화물의 지속적 기술혁신과 관련한 환경 문제를 해결하기 위하여는 high-performance 이면서 환경 친화적인 新원료의 개발이 요구된다.

내화물 원료의 특징은 다품종, 품질의 제한, 산지의 편재, 소규모의 鑛床과 함께 소비량이 상대적으로 적다는

것을 들 수 있다. 제철제강산업이 발달함에 따라 그 기반이 되는 내화물 원료의 종류가 다양해지고 있다. 내화원료의 수요와 공급을 원활히 하기 위하여는 세부 품목별로 그 사용량을 파악할 필요가 있다. 이 수요 공급에 따라 국내 공급 가능한 품목을 구분할 수 있으며, 원료의 등급을 파악하여 부가가치를 높이기 위한 방안을 도출할 수 있다. 그러나 사용하는 원료의 다양성으로 말미암아 현재 사용 중인 광물 원료소재에 대하여 그 사용처뿐만 아니라 용도별 소요량에 대한 구체적인 데이터의 확보가 용이하지 않다. 이는 수출입 물량에 있어서도 품위와 관계없이 총괄적으로 표시되거나 대표적인 품목에 가려져 있기 때문에 정확히 통계를 잡을 수 없는 것이 현실이다. 그리고 점차 수요처의 요구가 다양해지고 구체적이기 때문에 전통적인 방법으로 생산되는 원료소재로는 실제 산업체에서 요구하는 다양한 수요를 감당할 수 없다. 여러 가지 광물은 다양한 용도개발을 통해 고기능, 고부가가치제품의 원료로서 각 산업에 광범위하게 이용되고 있다. 나아가 급속히 발전하는 산업화에 따른 제품의 기능화 및 전문화가 요구되고 있는 현실에서 원료 역시 고급화되어야만 고부가가치를 창출할 수 있다. 비금속 원료소재의 고급화를 위해서는 원료광물의 고순도화, 분말제조 기술에서는 미립 분체화, 입도분포 제어, 저에너지 분쇄기술 개발 등이 요구된다. 또한 분말제품의 표면처리에 의한 기능부여기술, 과립화기술 및 합성기술 등이 필요하다. 내화원료의 안정적 발전을 위해서는 우선적으로 원료소재의 규격화 및 규격에 따른 균일 제품의 장기적/안정적 생산시스템 구축을 통한 안정적인 수요체계를 확립하여야 함은 물론 기능성 원료 등과 같은 고부가가치 품목에 대한 기술개발이 필요하다. 내화물 원료로서는 안전성, 산출량, cost 등의 관점을 고려하면 선택의 폭이 상당히 제한될 수 밖에 없다. 따라서, 금후의 원료개발은 성분적으로는 비산화물계를 포함해 3성분 이상을 조합한 복합원료나 불균일 조성, 예를 들면 내외부가 서로 다른 특징점을 갖는 경사재료 등에 대해 연구개발이 필요하다. 또한, 성분 외에도 입도 등의 제어기법을 재검토하고, 溫故之新의 원료와 nano 등의 신원료를 적절히 조화시키는 사고와 approach가 중요하다.



### 2.2 산화방지 기술

흑연은 화학적으로 안정하여 타 성분과 결합하여 저용 접합합물을 형성하지 않으며 산화물과 젖음각(wetting angle)이 크고 부착력(work of wettability)이 작아 용체(融體, melt)에 대한 침식저항성이 우수하다. 또한 열전도율이 크기 때문에 열충격저항성이 뛰어나다. 즉, 내화물 수명에 영향을 미치는 가장 큰 2가지 인자인 내식성과 내spalling성에 발군의 특성을 발현하는 물질이다. 더욱이 흑연 산지는 러시아, 한반도, 멕시코, 중국, 오스트리아, 브라질, 인도, 마다가스카르, 독일, 스리랑카 등으로, 산지가 많고 인조 흑연도 제조되고 있기 때문에 장기적으로 안정 공급 가능한 저가자원이다. 따라서, 흑연의 적절한 활용은 발현특성과 가격을 동시에 만족시키는 거의 유일한 방책이므로, 흑연의 단점인 고온산화에 대한 방지를 위한 완성도 높은 기술개발이나 연구는 아무리 강조하여도 지나치지 않는다.

카본함유내화물은 산소로 취련하는 전로의 구축로재 등으로 사용되기 때문에, 탄소의 산화에 의한 손상의 경감은 해결하여야 할 큰 문제이며 여러가지 시도가 이루어져 왔다. 이 산화방지를 위한 가장 효과적인 방법 중 하나는 Al과 같은 금속, AlSi과 같은 합금, SiC와 같은 탄화물 등의 非酸化物을 첨가하는 것이다. 이들 비산화물의 첨가에 관해 그 거동이 규명되면서, 비산화물은 탄소의 산화방지 뿐이 아니라 기공률의 감소, 강도의 증대, 표면 보호층의 형성, 생성 탄소의 결정화<sup>2)</sup> 등 내화물의 복원에도 기여하는 것이 밝혀졌다. Table 1에 카본함유내화물의 산화방지제로서 가능한 물질을 그룹별로 분류하여 나타낸다.

AlSi, Al4SiC4 등의 2종류의 금속을 포함한 합금이나

탄화물, 더 넓은 의미로는 2종류 이상의 금속 원소를 함유한 혼합물, 합금이나 탄화물 등을 첨가한 경우, 각각의 원소가 동시에 산화 방지에 기여하는 것이 아니고 순번적으로 산화 방지에 기여하게 된다. 첨가된 비산화물은 직접적으로는, CO(g)를 C(s)으로 환원시키고 탄소감량 속도를 억제시킴으로써 탄소의 산화손상을 경감시키는 것이다. 더우기 스스로 최종적으로 산화물이 되는데 이 산화물이 내화물의 특성 강화에 효과적으로 작용하게 된다<sup>3)</sup>. 그것은 표면 보호층의 형성, 2차 생성탄소의 결정화, 기공률의 감소, 강도 증가 등이다. 이들 효과의 정도는, 첨가되는 비산화물의 양과 입도에 의해 영향을 받는다. 또한 비산화물로부터 유래하는 산화물의 석출 위치는 출발 내화물의 미세 구조에 의해 영향을 받는다. 예를 들어 MgO-C계 내화물에 첨가된 Al입자가 MgO입자 주위에 존재하느냐 흑연 중에 존재하느냐에 따라, 생성하는 스피넬이 MgO입자 주변에 혹은 흑연 중에 생성하는 차이가 일어나는데, 이 차이는 내화물 특성에 영향을 미치게 된다. 爐 조업온도와 열변동, 분위기, slag 조성 등의 사용 조건에 적합하도록, 첨가할 비산화물을 선택하고 그 거동에 기반하여 첨가량과 입경을 선택하는 것이 중요하다.

### 2.3 Eco friendly 기술

#### 1) Cr-free 내화물

크롬함유내화물은 고온에서 기계적, 열적, 화학적 특성이 뛰어나며, 고 내식성이 요구되는 시멘트 rotary kiln, RH 등의 2차정련로, 폐기물 용융로, 유리 용해로 등의 내장재로 사용되고 있다. 크롬함유내화물이 내식성

Table 1. 카본함유내화물 산화방지에 적용 가능한 물질

금속	합금	탄화물	복합탄화물	酸化탄화물	질화물	酸化질화물	붕화물
Al	AlSi AlMg	Al <sub>4</sub> C <sub>3</sub>	Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub> Al <sub>6</sub> B <sub>4</sub> C <sub>7</sub>	Al <sub>4</sub> O <sub>4</sub> C Al <sub>2</sub> OC	AlN	AlON SiAlON Si <sub>2</sub> ON <sub>2</sub>	ZrB <sub>2</sub> Ca <sub>3</sub> B <sub>2</sub> (B <sub>4</sub> C)
Si		SiC	Al <sub>4</sub> ZrC <sub>4</sub> Al <sub>4</sub> SiC <sub>4</sub>		Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>		
Zr		ZrC			ZrN		
Ca		CaC <sub>2</sub>			CaN		
B		B <sub>4</sub> C			BN		



이 뛰어난 이유로 3가크롬은 녹는점이 2,265°C로 높고, 다른 고온 산화물 예를들어  $Al_2O_3$ 이나  $MgO$ 와 비교해 slag와 반응하여 비교적 고용점화합물을 생성한다. 그러나 크롬함유내화물은 그 사용 과정에서 시멘트, slag, 유리 등에 포함되는 calcia 성분이나 알칼리산화물( $Na_2O$ ,  $K_2O$  등)과 반응하여 인체에 해로운 6가크롬을 생성하기 쉽다는 결점을 가지고 있다. 6가크롬은 수용성이므로 사용 후 내화물의 재처리를 포함해 취급에는 엄격한 주의가 요구되고, 폐기 후에도 관리가 필요하고 산업폐기물 처리업자에게 위탁할 필요가 있다<sup>4)</sup>. 따라서 크롬을 포함하지 않는 내화물 이른바 크롬프리내화물의 개발이 요구되고 있다. 크롬프리내화물은 각 maker가 배합설계 및 제조 기술에 대해 독자적인 방법으로 개발/개선되어 그 재질이 다양하고 사용원료도 각기 다르다. 특수한 chrome-free용 원료에 대한 R&D도 일부에서는 이뤄지고 있지만 실용화까지는 이르지 않고 있으며, 지금까지 내화물용으로 개발된 원료를 chrome-free용으로서 사용하고 있는 실정이다. 크롬광을 이용한 크롬함유내화물도 결국 스피넬계 원료의 특성을 살린 내화물의 하나이므로, chrome-free내화물이란 크롬 이외의 성분을 활용하여 스피넬을 형성함<sup>5)</sup>을 의미하며 이와같은 concept은 유용하다고 사료된다.

$Cr_2O_3$ 는 slag와 반응하기 어렵다는 특성 이외에도 slag melt의 점성을 올린다는 특성을 가지고 있다. 이 특장점과 유사한 특성이 기대되는 원료로서  $Y_2O_3$ 나  $ZrO_2$ 를 이용한 크롬프리내화물이 검토되고 있다. 염기성 slag에 대한 내식성이나 고진공 하에서의 안정성 등이 요구되는 RH용 brick으로서  $MgO-Y_2O_3$ 질과  $MgO-ZrO_2$ 질이 검토되는데, 내식성 면에서는  $MgO-Y_2O_3$ 질은 마그네슘에 비해 약 10% 우수하고,  $MgO-ZrO_2$ 질은 유사한 결과가 보고된 바 있다. yttria는 지금까지는 내화물에 이용되지 않는 새로운 고용점물질로 기대되고 yttria가 함유된 복합원료도 새로운 크롬프리용으로서 가능성이 있지만 희토류산화물이기 때문에 cost의 barrier가 있다.  $ZrO_2$ 는 용점이 약 2,700°C로 매우 높은데다 slag이나 시멘트의 주성분인 CaO와의 반응생성물인  $CaZrO_3$ 도 고용점이며 rotary kiln에서의 코팅성도 기대된다. 또한

$ZrO_2$ 는  $Cr_2O_3$ 처럼 slag에 대한 용해도가 낮고 점성을 증대시키는 효과도 기대된다.

chrome-free 원료로서 dolomite를 들 수 있으며, 마그네시아-스피넬질에 비해 코팅부착성 및 내화도가 우수하다. 북미와 유럽에서는 돌로마이트질 brick이 조건이 severe한 시멘트 rotary kiln의 燒成帶에 적용하고 있으며 마그네슘 brick과 동등 이상의 performance를 나타내고 있다. 그러나 종래의 돌로마이트질은 잔존수축성 때문에 비가동시의 줄눈부 벌어짐, 열충격저항성의 열화 및 slaking 방지 대책의 필요성 등의 문제점이 있어 고온 다습한 우리나라에서는 특히 이들 특성을 개선하는 것이 중요하다.  $MgO-CaO-ZrO_2$ 는 해수 마그네시아 clinker를 주 원료로 하고 이에  $CaO-ZrO_2$ 조성물을 첨가한 것이다. CaO성분은 코팅부착성 개선,  $ZrO_2$ 는 침식저항성 개선에 유효하다.

현재 chrome-free 실용화에 제동이 걸리는 요인은 품질면에서보다도 가격 문제로서 값싼 벽돌 제조가 향후 중요한 과제이다. 염기성내화물용으로 이용 가능한 원료를 가격을 고려하여 생각하면 마그네시아, 칼시아, 알루미나 및 지르코니아 정도이다. 이들 원료의 단일사용의 경우도 있겠으나 시멘트 rotary kiln 燒結帶용 원료 clinker에는 이들의 복합체가 필요하다<sup>6)</sup>. 현재 시판되고 있는 복합 clinker는 마그네시아-칼시아계와 마그네시아-알루미나계 2종류이다. 향후에는 3성분계의 원료를 개발할 필요가 있으며, 특히 제3성분으로서는  $ZrO_2$ 가 가장 주효하다고 사료된다.

## 2) 환경친화 binder

내화물의 환경문제는 local한 것과 global한 것의 2가지로 나누어 생각할 수 있다. 전자는 실제로 내화물을 사용할 때의 臭氣와 發塵 같은 작업환경 문제이며, 후자는 省에너지 같은 지구적인 환경 대책이다. 내화물에 있어 환경문제가 대두될 때 반드시 등장하는 keyword는 binder이다. 내화물을 제조/사용하는데 binder는 빼놓을 수 없는 중요한 원료이다. 역할은 내화성 원료에 保形성과 성형성을 부여하는 것과 내화성 골재가 고온에서 소





결이 일어날 때까지 골재들을 결합시켜 조직을 유지하게 하는 것이다<sup>7)</sup>. 최적 binder를 선택하는 것은 내화물의 수명을 좌우하는 주요요소이다. 또한 binder에 요구되는 특성은 내화물의 재질 이외에, 정형과 부정형, 소성과 불소성이란 분류 방법이나 spray, 유입시공 등의 시공방법의 여러가지 조건에 의해 크게 달라진다.

tar와 pitch는 카본본드를 발현하기 때문에 특히 탄소 함유 내화물의 binder로서 사용된다. 그러나 열이 가해지면 냄새와 연기 발생이 심해 벤조피렌을 비롯한 발암성을 갖는 다환방향족 탄화수소를 다량 포함하기 때문에 환경부하가 무척 높은 물질이라고 말할 수 있다. 콜타르 6종 및 pitch 9종의 정량분석을 실시하면, 콜타르에서는

5,890~11,800ppm, pitch는 8,580~16,500ppm의 벤조피렌이 검출된다. 이 환경적 및 보건적 차원에서 tar나 pitch를 대체하는 binder가 검토되어 왔으며, 多價 alcohol을 사용함으로써 유해물질의 방산을 억제하면서 brick의 충전성을 향상시킬 수 있다. phenol resin은 정형, 부정형 상관없이 폭넓게 binder로서 사용되고 있다. 그 이유로서는 ①적당한 점성을 가지고 있으며, 성형강도가 높고 용제에 의해 비교적 넓은 범위를 갖는 점도조제가 가능하다. ②약200°C의 비교적 저온에서 경화하기 때문에 baking강도도 높다. ③탄화 후 고정 탄소율이 높기 때문에 골재들을 단단히 접착시켜 強固한 카본본드를 형성한다. ④tar나 pitch와 비교해 작업환경에 미치는 영향

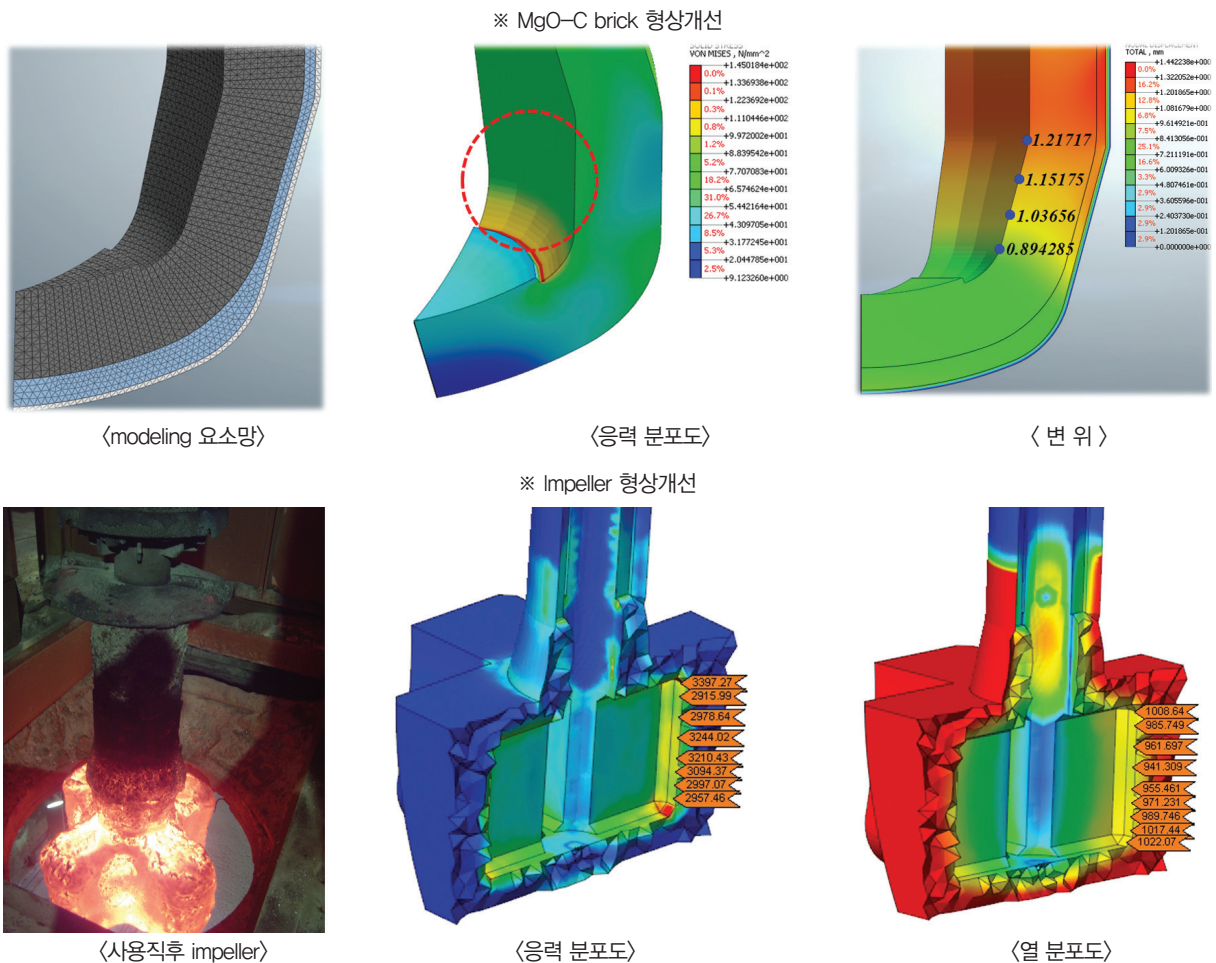


Fig. 3. 내화물에서의 FEM simulation 활용 예



이 적고 작업성 및 혼련성도 우수하다. ⑤탄소함유내화물에 사용되는 흑연이나 산화물에 대한 젖음성이 좋다. 등을 들 수 있다. 용도로서는 상기의 특성을 살려 주로 MgO-C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-C, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiC-C brick이나 mud재, ramming재 등의 부정형내화물에 사용되고 있다. 반면 문제점으로는 ①phenol 탄화를 통해 얻어지는 탄화조직이 난흑연화 카본이기 때문에 brittle하고, 열충격저항성이나 내산화성에 열위하다. ②phenol에는 소량의 free phenol이 포함되어 있기 때문에, 제조시나 축로시 작업자가 phenol에 노출된다. ③제조된 내화물 예열시 phenol resin가 분해되어 자극성 가스와 냄새가 발생한다. 臭氣는 약300°C에서 냄새 발생이 시작하여 500°C안팎에서 가장 강한 악취를 발생시킨다. phenol resin의 분해가스에서 고농도의 페놀, 크레졸, 크실레놀 등의 방향족 유기화합물이 검출되었으며, 이들 성분이 점막을 자극시켜 臭氣를 느끼게 된다. ①에 대해서는 tar나 pitch를 병행하여 사용하여 탄화조직 중에 fine mosaic 구조를 구축시켜 인성을 갖는 카본본드를 얻는 시도가 이루어지고 있다. ②에 대해서는 free phenol이 적은 친환경 제품을 사용하는 것이 바람직하다. ③에 대해서는 가열 시에 발생하는 phenol의 분해가스가 문제가 되는 것이기 때문에 불가피한 문제이고, 따라서 제조 시 보다 고온에서 baking 처리하거나 phenol resin 이외의 binder 개발이 요구되며, 非芳香族 유기고분자화합물을 이용함으로써 가열시의 냄새와 분해가스 발생을 크게 억제할 수 있다. 이 binder system의 변경에 의한 강도 저하는 matrix 중에 분산되어 있는 미세흑연과 금속분말의 반응에 의한 탄화물의 생성으로 보충하면 된다.

## 2.4 simulation 기술

Computer Aided Engineering 즉 CAE는 CAD로 작성한 모델의 성능을 컴퓨터 내에서 다양하게 검토하여 그 자료를 토대로 모델을 수정하는 시스템이다. 이를 통해 제품의 성능이나 특성을 시험 제작 전에 미리 예측할 수 있게 되었으며, 개발기간의 단축과 더불어 공정비용 절감 등을 할 수 있게 되었다. 기존에는 제조된 제품에 대해 실험을 통해서만 성능 검증이 가능하였기 때문에 문제점

은 결함을 예측할 수 없었다. CAE는 1960년대 유한요소 해석에 기초하여 전 산업분야에 급속도로 보급되었고, 이러한 보급속도는 제품 life cycle의 지속적인 단축과 시장에서의 경쟁력 강화에 대비하여 더욱더 가속화 될 것이다. 유한요소해석에는 선형정적해석, 열전달/열응력해석, 피로해석, CFD유동해석, 위상최적화, 動해석, 비선형적/준정적해석, 모드/좌굴해석이 있으며 다양한 물리적 현상에 대해 유한요소해석이 가능하다.

유한요소법(FEM, Finite Element method)은 이론해(theoretical solution)를 직접 구하기 어려운 복잡한 모델을 우리가 조작할 수 있는 유한개의 요소로 분할한 다음 개별요소의 특성을 계산한 뒤 전체요소의 특성을 모두 조합하여 근사적으로 계산하는 방법이다. 내화물에서는 열응력 시뮬레이션 장치를 활용하여 응력분포를 분석함으로써 재질적 또는 구조적 개발을 진행하고 있다. 이 때 각 재료의 값 즉 밀도, 열팽창계수, 열전도도, 프아송비, 비열, 탄성계수 등의 값을 요구하는데, 내화물은 엄밀히 말하면 복합체이면서 불균질 bulk이기 때문에 정확한 값을 구하기가 쉽지 않으므로 이에 대한 적절한 대응이 필요하다. 또한 수모델 시험을 연계한 유체역학 시뮬레이션 프로그램을 활용하여, 내화물의 형상에 따른 슬랙이나 용강의 유동패턴을 예측하고 profile 최적화를 통해 노체 장수명화를 꾀하여야 한다.

## 3. 나노기술 접목

내화물 기술의 level up에는 nano technology적 관점에서의 approach 그리고 과감한 신기술 도입이 불가결하며 그 일환으로서 나노입자의 응용/적용은 유효한 수단이다. 내화물은 입경이 수 mm에서 sub-micron까지 이르는 폭넓은 입도 분포를 가진 분체 집합체로 이루어져 있다. sub-micron 입자는 수백 nano에 해당하는데 이 영역에서의 미세구조 제어야말로 차세대내화물의 key technology이다. 나노내화물은 수백 nano 이하의 나노입자를 주체로 구성하는 나노구조 매트릭스에 대한 기술적 구현으로 정의할 수 있다. 나노내화물은 현재까지 가시적으로는 카본블랙 및 Hybrid Graphite Black (HGB)



적용[8]이다. 즉, 다양한 카본블랙의 적용에 의해 열충격 저항성의 향상, 기공의 細孔徑化, 기공형상 제어를, HGB 적용은 극미량 첨가에 의해 내산화성 향상, 소결강도 제어, 내식성 향상을 지향<sup>9)</sup>하고 있다. 또한 나노내화물은 결정질 흑연에 비해 성에너지와 CO<sub>2</sub> 저감에 대한 기대가 있다.

카본블랙은 몇 가지의 제조방법이 확립되어 있으며, 세계에서 다양한 품종이 연간 1,000만톤 정도 생산되고 있다. 카본블랙은 aggregate의 1차입자 지름과 aggregate의 발달도에 따라 많은 품종으로 나뉘어진다<sup>10)</sup>. 상품으로 판매하는 것은 입경의 지표로서 질소흡착 비표면적 또는 요오드 흡착량으로 나타내는 것이 많다. 입경이 작을수록 질소흡착 비표면적 또는 요오드 흡착량이 커진다. aggregate 발달 정도는 오일 흡수량으로 나타내며, 흡수량이 클수록 aggregate가 발달해 있다. 카본블랙은, aggregate를 최소단위로 하는 구조체이지만 일반조건 하에서는 강한 물리적 응집력으로 agglomerate를 만든다. 이 응집력은 매우 강해 떼어놓기에 강한 전단력이 필요할 뿐만 아니라, 일단 떨어뜨려도 곧 응집되어 원래의 agglomerate로 돌아간다. 일반용도에서는 agglomerate 그대로 matrix (고무, 수지 등)에 분산시켜서도 바람직한 최종 제품의 특성을 얻을 수 없다. 즉, 카본블랙은 aggregate 크기로 matrix에 충분히 분산시킴으로써 우수한 특징을 나타낸다. 다른 재료에 비교해 분산 정도가 최종 제품의 물성을 결정한다고 말해도 과언이 아니다. matrix에 어떻게 분산시킬지는 matrix에 따라서도 다르므로 주의를 요한다. 다만 금속이나 산화물의 나노 크기의 재료에 비교하면 탄소질로 만든 카본블랙은 분산되기 쉽다. 카본블랙 품종 중 입경이 크고 aggregate가 발달하지 않은 품종일수록 분산이 잘 된다.

카본블랙을 출발원료로 붕소, 티탄 등을 내재시킨 graphite계 나노입자 HGB (Hybrid Graphite Black)를 합성하여 내화물에의 적용을 시도하고 있다. 즉 다양한 카본 블랙 및 HGB의 적절한 조합에 의해 나노구조 matrix를 형성하여 고기능성을 발휘하는 나노내화물 (nano-tech refractories) 개발을 지향하고 있다. 카본계 나노입자의 존재와 함께 유기계 binder의 승온에 따

른 탄화과정의 제어도 중요하다. 탄화과정의 제어에 의한 fiber나 whisker상의 이방성 생성물을 형성시키는 것도 나노구조 matrix의 기능향상에 효과를 발휘한다. 최대의 효과는 열충격저항성 향상으로, 열충격에 의해 생기는 급격한 열팽창이나 수축을 나노구조 matrix에서 흡수하는 것이다. 즉, 기존 흑연함유내화물이 열충격을 흑연의 높은 열전도성에 의존하고 신속하게 열확산시킴으로써 열팽창이나 수축을 흡수시키는 것을, 신기술에서는 나노구조 matrix의 나노입자의 입계 flexibility와 binder 수지의 휘발분산 및 탄화과정 제어에 따른 나노크기의 기공 생성에 의해, 내화물 입자 개개의 열팽창이나 수축을 흡수하게 된다. 또한 내화물 입자간 기공 중에도, 나노입자를 충전시킬 수 있다면 기공 분할에 의한 細氣孔化가 진행되어 내식성이 향상된다. 나노입자는 수지 binder와 함께 내화물의 조립, 미립, 첨가제 간에 분산되어 기공 내부와 공극을 균질하게 충전하는 효과가 있다. 그 결과 나노입자에 의해 내화물 입자의 열 팽창이나 수축이 흡수/완화될 뿐만 아니라 열응력이 내화물 내부에 편재하는 것을 방지한다.

기존 내화물의 세계에서 제어할 수 있는 것은 미크론 단위의 미분 지역이 한계이며, 나노입자를 의도적으로 적용한 분자구조 제어는 미답분야이다. 기존의 내화물에서는 열충격저항성과 내식성이 다른 특성 즉 반대방향의 벡터이다. 즉, 열충격저항성을 향상시키면 내식성은 저하하기 때문에 양자의 타협점을 사용 조건에 매치시키려 해왔던 것이 현실이다. 나노내화물은 열충격저항성과 내식성이 동시에 향상하는 경향 즉 벡터의 동일방향을 나타내며 나노입자가 매우 소량 첨가에 의존한다. 나노입자는 극히 독특한 기능을 발휘해 전자재료 등으로 응용이 진행되고 있지만 가격이 비쌀 수밖에 없다. 나노입자 적용에 최대의 과제이기도 하다. 또한 분산기술 등이 부족하여 cost performance의 극복하는 노력이 기대된다. 수백나노 이하의 나노입자를 활용한 내화물의 개발이 필수적이며, 재료 기술적 approach, 균일 분산을 강화하는 분체 신평정 등 생산기술도 포함한 다면적인 대처에 의한 차세대내화물의 개발을 기대한다.





## 4. 산학협력 활성화

신제품의 기술적 사양에 있어서 기업이 보유하고 있는 자원으로는 해결하기 어려운 항목이 있으며, 이를 단기간에 확보하기 위해서는 대학 및 국공립연구소와 협력하는 것이 해결책이 될 수 있다. 대학이나 국공립연구소에서는 제품개발을 하지 않으며, 장래에 필요할 것으로 생각되는 첨단기술이나 학술적으로 흥미 있는 테마에 대해서 연구를 수행하고 연구 성과를 논문의 형태로 발표하는 것이 일반적이다. 대학, 국공립연구소의 seeds를 신제품개발에 활용하기 위해서는 어떤 seeds가 신제품 개발의 어느 부분에 적용될 수 있는지에 대한 세밀한 기술적인 break down과 평가가 필요하다. 제품의 seeds 그 자체가 대학이나 국공립연구소에서 나온다고 생각하면 안된다. 가치관이 다른 産과 學研이 협력을 하는 것이기 때문에 반드시 답이 존재하는 방정식을 기대하는 것 자체가 무리일 수 있다. 그러면 産學研 협력에는 무엇이 필수적인가? 가장 핵심적인 것은 명확한 계획과 win-win 이라 여겨진다. 우선, 산학협력에 의한 연구개발을 수행하기로 정해진 시점에서는 명확한 개발계획이 세워져 있어야 한다. 협력기관과 함께 각자의 역할을 분명히 하고 기업은 어떻게 제품화를 구현해 나갈 것인지를 확립해 두어야 한다. 또한, 계획을 수립하는 데 있어서 원칙은 4W2H 즉, 누가, 언제까지, 어디서, 무엇을, 어떻게 그리고 얼마에 개발할 것인지를 명확히 하는 것이다. 산학협력은 당사자가 모두 이익을 얻는 상호이익을 실현해야만 성공했다고 할 수 있다. 기업과 대학, 연구소는 존재의 목적이 다르기 때문에 이익상반이라는 본질적으로 섞일 수 없는 부분을 양자가 갖고 있다. 연구 성과를 가능한 한 빨리 학회에서 발표하고 싶다고 생각하는 것이 대학, 연구소이다. 이에 대해서 “기업의 매출 및 이익에 관련된 노하우는 감추고 싶다”라고 생각하는 것이 기업이다. 이 때문에 어느 쪽이든 한쪽만이 이익을 얻게 될 때 다른 쪽은 인내를 강요당하게 되며 이것이 문제의 원인이 된다. 따라서 이러한 특성을 상호간에 인식하여 상호이익을 실현할 수 있으며 우호적인 관계를 지속할 수 있는 방법을 찾아야 한다. 산학협력은 중장기적인 관점에서 보아야 한다라는 말의 근거

가 여기에 있는 것이다. 이를 다시 표현하면, 단발적이고 긴급한 과제에 대해서는 산학협력이 그다지 효과적이지 못하다는 것을 뜻한다. 상호이익을 낳기 위한 전제로 상호이해에 근거하는 신뢰관계가 필요하다. 특히, 기업의 기술이나 경영에 관한 회사기밀 사항이 포함되는 경우라면 보다 강한 신뢰관계가 필요하다. 기업은 협력관계에 있는 대학, 연구소의 상황이 어떠한지, 산학협력 또는 기업에 대해서 바라는 것이 무엇인가를 이해하고자 하는 자세가 필요하다. 그렇기 때문에 소통이 반드시 필요한 것이며, 협력을 통한 연구개발이 끝난 후에도 친밀한 관계를 유지하는 것이 중요하다. 산학협력의 연구형태 중 하나인 위탁연구라고 하더라도 하청으로 인식한다면, 산학협력은 결코 좋은 결과를 얻기 어렵다<sup>11)</sup>. 기업이 연구 성과에 대해서 기대했던 것과 다르다고 생각하는 경우의 원인은 커뮤니케이션 부족에 의한 것이 대부분이다.

기업에게 산학협력이란 아직 어렵고 특별한 것이라고 인식되고 있다. 처음부터 고액의 연구를 시작할 필요는 없으며, 무료 기술 상담부터 시작하는 것도 하나의 방법이 될 수 있다. 또한, 학회나 교류회를 활용하여 인맥을 만드는 것도 중요하다. 기업에게 산학협력이란, 자사의 핵심 기술과 노하우를 바탕으로 중장기적인 수익향상을 노릴 때 선택할 수 있는 것이다. 신기술개발에 대해서는 개발 기술의 난이도 및 자사의 경영자원 그리고 주어진 환경이나 상황에 맞는 방법을 선택하는 것이 무엇보다 중요하다.

## 5. 結 言

현재 우리는 인류 탄생 이래 가장 풍요한 시대를 살고 있다. 거슬러 올라가보면 정신적으로는 르네상스요, 물질적으로는 산업혁명이 그 출발점이라 할 수 있다. 산업혁명은 mass product의 혁명적 구현이고, 이를 가능하게 한 중공업의 근간을 이루는 소재는 내화물이었다. 19C 당시에는 노체를 대형화하는 축로기술과 조업이 지속가능하도록 노재보수를 쉽게 할 수 있는 것이 최대 관심사이었다. 그 결과물로 부정형내화물이 탄생하였으며 노재장인은 최대의 대우를 받았으리라 짐작된다. 그 후 20C 중반부터는 본격적으로 내화물 재질에 대한 R&D가 이루





어지고, 제철제강인들이 세라믹의 특성을 이해하면서 내화물에 대한 사용기술이 진보하였다. 그 결과는 내화물 사용 원단위의 지속적 감소를 초래하여, 내화물 원단위는 1960년대 50 kg/t-steel에서 현재에는 8 kg/t-steel 수준으로 대폭적인 감소세를 나타내고 있다. 이는 과잉 생산능력으로 이어져 최근에는 내화물 설비용량의 65% 정도만이 가동되고 있으며 따라서 경쟁압력이 증대되고 있다. 향후에도 세계 철강수요가 연 1~2% 정도의 저성장이 예상되고 있고, 국내 철강수요도 연 2.0~2.5% 정도의 수요 둔화가 예상되고 있어 국내 내화물 업체의 어려움도 지속될 것으로 예측된다. 해외 내화물 시장에서는 가격경쟁력을 앞세운 중국이 지속적으로 생산기지로서의 역할을 담당하며 독주가 계속될 것으로 예상된다. 그리고 세계 내화물 메이저 업체인 RHI, VESUVIUS, KROSAKI, SHINAGAWA 등이 인수합병을 활발히 하여 거대 내화물 회사로 탄생되었고 중국도 정부 주도로 업체의 통폐합이 활발히 진행되고 있어, 향후 중국 내 내화물 시장의 재편과 대형 내화물업체의 등장으로 국내 내화물업체의 위기는 한층 심화될 것으로 보인다. 이에 대한 대책은 무엇일까? “원가절감과 업체간 공동대응”이라고 피상적으로 얘기할 수도 있다. 실제적으로 과연 그럴까? 원가절감으로 가격면에서 중국과 대적할 수 없으며, 더욱이 그 여파로 흔들리는 품질편차는 오히려 경쟁력을 상실할 것이다. 그리고 국내업체들끼리의 M&A는 꿈도 못 꾸고, 최소한의 공동대응마저 눈앞의 이해관계로 간단치가 않다. 그렇다면 작금의 상황과 앞으로 예견되는 위기에 대한 대응방안은 무엇인가? 이에 대한 답을 본 報에서는 3가지로 제안하였다. 기반기술 강화, 나노기술 접목, 산학협력 활성화가 그 keywords로서 즉, 내화물의 기반기술을 강화함으로써 현재의 역량을 튼튼히 하고, traditional ceramics인 내화물에 첨단인 nano technology의 concept을 移入시켜 미래에 대비하며, 또한 대학교 및 국공립연구소와 더불어 open innovation을 실천하여 개발 효율을 극대화하자는

전략이다. 나아가서 회사조직의 풍토를 혁신하여 불량률 제로를 지향하는 개인과 조직의 체질 개선, 국제적 수준의 기업문화 창출과 품질경영시스템 도입을 통한 역동적인 변화를 추구함으로써 창조와 혁신의 DNA를 주입하는 창조지식경영을 해야 할 것으로 사료된다.

### 참고문헌

1. 이종락, “내화물공업현황”, *대한내화물공업협동조합*, pp60~64 (2014).
2. S. Zhang and A. Yamaguchi, *J. Ceram. Soc. Japan*, 120 [9] 830~834 (1994).
3. Akira Yamaguchi, *Taikabutsu*, 61 [9] 505 (2009).
4. Toyoyasu Obana, *Taikabutsu*, 61 [9] 461 (2009).
5. Goto, *J. Soc. Inorg. Mater. Japan*, 13, 538~542 (2006).
6. T. Obana, A. Tsuchinari, I. Shimigu, Y. Nakamori, K. Tokuchi and M. Ishihara, *UNITECR 1999*, 269~271 (1999).
7. Hisashi Tomiya, *Taikabutsu*, 61 [9] 510 (2009).
8. S. Takanaga, O. Matsuura, M. Hatta, T. Ochiai and S. Tamura, *UNITECR 2007*, 627 (2007).
9. Tsunemi Ochiai, *Taikabutsu*, 56 [4] 152 (2004).
10. Shinichi Tamura, Tsunemi Ochiai, Takaaki Kanai, Shiqeyuki Takanaga and Osamu Matsuura, *Taikabutsu*, 61 [9] 497 (2009).
11. S. Kim, *Ceramic Korea* [12] 66 (2010).

### 이석근



- 1976-1980년 서울대학교 무기재료 학사
- 1980-1983년 서울대학교 무기재료 석사
- 1989-1993년 동경공업대(TIT) 무기재료 박사
- 1982-1987년 POSCO 기술연구소 책임연구원
- 1987-2008년 RIST 수석연구원, 기능소재실장
- 2002-2002년 나코야공업대(NIT) 객원연구원
- 2009-2011년 삼일&스톨베르그 기술연구소장
- 2012년-현재 한국내화(주) 기술연구소장