

구조 세라믹스의 개발과 응용

김 태 우

Development and Applications of Structural Ceramics

Taewoo Kim



- 김태우(국민대 기계공학과)
- 1960년생
- 구조세라믹스, 복합재료를 전공하였으며, 응력해석 및 재료설계에 관심이 있다.

1. 머리말

신소재의 보편적인 정의는 '재료의 원료를 새로 개발하거나, 종래의 원료에 개선된 제조기술 또는 응용기술을 적용시켜 종래에 없던 우수한 특성, 기능을 갖게 하는 소재'라고 한다. 즉, 고 부가가치의 금속, 세라믹스, 폴리머, 복합재료를 총칭하여 신소재 또는 첨단소재(advanced materials)라고 하며, 산업기기의 중요한 기능소재로서 기계공업의 발전에 필수적이다.

세라믹스(ceramics)의 어원은 고대 그리스어 'keramos'에서 유래한다.⁽¹⁾ 진흙가루를 빚어 불에 구워서 만든 물체를 의미하였으니, 세라믹스는 인류문명의 역사만큼이나 오래된 재료이다. 세라믹스는 무기(inorganic)재료, 또는 요업재료라고 해석되어 왔다. 요업의 요(窯)자는 '아궁이(穴)속에 양(羊)처럼 부드럽게 재료를 성형가공하여 넣은후 불(火)을 때어 만든 물체'를 의미하여, 종래에는 항아리, 바닥타일, 부엌식기 등을 주로 연상하게 하였다. 그러나 1970년대부터 1980년대 초반에 걸쳐 본격적으로 시

작된 세라믹스에 관한 연구는 제조 및 사용분야 전반에 걸쳐 기술혁신을 가져왔다. 그 후 천연 광석분말만이 아니라 새로운 화학적 방법으로 제조된 분말을 사용하여 창출된 재료라는 뜻으로 '뉴(new)세라믹스'라고 불려지거나, 개선된 제조기술을 통하여 재료의 섬세한 미세조직을 얻음으로 우수한 특성을 갖는 재료라는 뜻으로 '파인(fine)세라믹스'⁽²⁾ 등의 이름이 붙여지게 되었다. 이제 센서용 소재는 물론이고, 가위, 손목시계 케이스, 바이오 세라믹스 등에 이르기까지 10년 전보다 훨씬 다양하게 세라믹스를 사용한 물체를 발견할 수 있다. 이들 세라믹스 중 기계적, 또는 열 응력을 받는 구조물에 적용되는 것을 구조 세라믹스(structural ceramics)라고 한다. 이 글에서는 차세대 자동차 및 항공기에까지 적용이 시도되고 있는 이들 구조세라믹스를 대상으로 하여 일반적인 제조법, 응용분야, 연구동향 및 전망을 정리하고자 한다.

2. 세라믹스의 개발

세라믹스는 원자간 결합력이 큰 공유결합

표 1 대표적인 구조 세라믹스의 물성^{(3)*}

	알루미나	탄화규소	질화규소	탄화보론	금속
밀도 (g/cm ³)	3.96	3.10	3.23	2.51	7.7
열팽창계수 ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	8.0	4.0	3.2	5.0	12.5
열전도도 (W/m·K)	30	120	35	30	42.5
탄성계수 (GPa)	380	410	310	445	200
경도(Knoop) (kg/mm ²)	2000	2800	1600	3000	335
융점(분해온도) ($^{\circ}\text{C}$)	2050	2800	1800	2450	1500

*스치는 단순 비교를 나타내기 위함이며 공정에 따라 다소 변화함.

또는 이온결합을 하여 금속보다는 주로 열과 전기의 절연체 또는 반도체의 역할을 한다. 금속보다 융점이 높을 뿐 아니라 열전도율은 낮고 열발산율은 큰 점을 이용하여 우주왕복선의 겔표면 타일재료⁽²⁾로 사용될 수도 있었다. 그러나 결합력이 강하기 때문에 급작스런 파괴의 형태를 보이기도 한다. 장점은 이용하고 약점은 잘 보완하면, 새로운 소재로 개발되는 것이다.

대표적인 구조세라믹스는 표 1에서 예시한 바와 같이 알루미나(Al_2O_3), 지르코니아(ZrO_2), 사이알론(Si-Al-O-N) 등의 산화물계와 탄화규소(SiC), 질화규소(Si_3N_4), 탄화보론(B_4C), 탄화티탄(TiC) 등의 비산화물계가 존재한다. 탄화규소는 질화규소보다 파괴인성은 낮으나, 고온강도와 열전도율이 높아 고온에서 단열을 목적으로 하는 엔진부품보다는 열교환기에 적합하다. 사이알론이나 탄화티탄은 세라믹스 절삭공구소재로 이용이 되어왔다. 한편, 산화, 부식에 대하여 우수한 특성이 요구된다면 알루미나와 같은 산화물계 세라믹스를 선택하게 된다.

2.1 제조기술

세라믹스는 분말제조과정, 성형과정, 그리고 소결과정을 거치며 필요에 따라 가공을 하게 되는데, 제조과정⁽⁴⁾의 차이가 완성된 재료의 미세조직을 변화시키며, 곧 성능을 결정하게 된다.

2.1.1 분말의 합성

세라믹스는 융점이 높기 때문에, 필요한 성분의 원료에 열을 가한 후 액체상태에서 화학반응하거나 주물작업하기 어렵다. 용해물의 상태로 만든 후 원하는 성분을 침전시키고 여과, 또는 열분해법 등을 사용하여 분말의 형태로 만들어진다. 개선된 기술 중의 하나가 졸-겔(sol-gel)법⁽⁵⁾이다. 분산된 입자의 콜로이드 용액을 화학적으로 혼합하여 겔의 형태로 만들어 건조, 분쇄, 가열 등의 과정을 거쳐 분말이 되는데, 입자특성의 개선으로 인하여 소결작업이 단축되며 재료특성이 개선되는 경우이다. 따라서 이 분말합성과정중 불순물의 잔류정도, 분말입자의 모양, 크기, 크기분포 등을 조절하는 것은 파인세라믹스의 성능을 결정짓는 첫번째 인자이다.

2.1.2 성형공정

분말로 형상을 유지하기 위하여 유기질을 혼합하여 압력을 가하는 방법을 분말압축법이라 한다. 한편, 테이프성형(일명 닥터블레이드)법은 그림 1에 예시한 바와 같은 일련의 공정을 거친다. 한 번에 0.05~0.3mm 정도의 얇은 막형태로 성형하고 이것을 원하는 두께가 될 때까지 적층하여 두꺼운 판을 만들 수 있다. 이 방법은 주로 다층 커패시터(MLC: multi-layer capacitor)와 같은 전자산업의 세라믹스 제조에 사용되어 왔으나,

구조세라믹스에도 이 개념이 응용⁽⁶⁾되기도 하였다. 이러한 성형법은 주로 평판형태나 동일한 단면적을 갖는 제품의 성형에 이용된다.

또한, 분말사출성형법(powder injection molding)⁽⁷⁾은 기계가공을 최소화하고, 비교적 복잡한 최종형상(near-net shaping)의 성형체까지 만들 수 있어서 세라믹스 터보로터 등의 부품제작에 적용되고 있다.

세라믹스의 입계(grain) 사이에 공간, 즉 기공(pores)이 존재하면 기공선단에서 응력 집중현상이 일어나며, 재료의 급작스런 파괴를 일으킨다. 따라서 구조용으로 사용하기 위한 세라믹스가 이론밀도에 가깝게 되도록 성형하는 것이 우선 중요하다. 또한 중요한 것은 성형공정중에 혼입되는 유기물을 소결 작업전에 제거하는 탈지공정(debinding)이

다. 특히 테이프성형법이나 사출성형법에 의한 성형체중 30~50% 정도 함유된 유기물질을 제거하는 데는 상당한 시간과 기법이 요구된다.

용매로 유기물질을 용해시켜 추출하거나, 열을 가하여 분해시킴으로써 대기속으로 제거하는 방법 등이 있다. 탈지시간 및 가해지는 열의 최소화는 생산단가의 최소화를 위하여 필수적이다. 반면 충분하지 않으면 외부로 빠져나오는 과도한 기체의 압력이 성형체의 변형을 발생시킨다. 성형의 각 과정에 적절한 압력, 시간, 온도의 관계를 발견하는 데는 많은 실험과 제조공정의 모델링을 통한 해석작업이 필요하다.

2.1.3 소결과정

유기질이 제거된 성형체에는 분말간의 접촉력 외에 강도가 거의 없다. 따라서 1200~2000°C 전후로 열을 가함으로써 입자간의 물질이동을 촉진시켜 기공을 채우고 강도를 갖게 한다. 이 과정을 소결(sintering)이라고 하며, 종래의 항아리, 부엌식기 등의 제작법이다. 소결과정을 촉진시키기 위하여 압력이나 미량의 소결촉진용 화학원소가 가해지기도 한다. 한편, 실리콘계의 분말을 질소 또는 질산화합물의 분위기에서 반응하게 하여 질화규소를 제조하는 반응소결법이 있다.

최근에는 초단파(microwave)를 이용⁽⁸⁾하여 건조 및 소결작업을 하는 연구가 진행되고 있는데, 압력이 없이도 소요시간을 단축시키며, 에너지를 절약할 수 있는 등의 이점이 보고되고 있다. 실험실규모에서 입증된 개념을 상업화하기 위하여 해결하여야 할 연구과제가 아직 남아있다.

2.2 재료설계 기술

제조기술의 발전과 함께 실제 사용될 환경조건에 적절한 설계기술의 개선이 요구된다. 세라믹스는 압축강도보다 인장강도가 훨씬

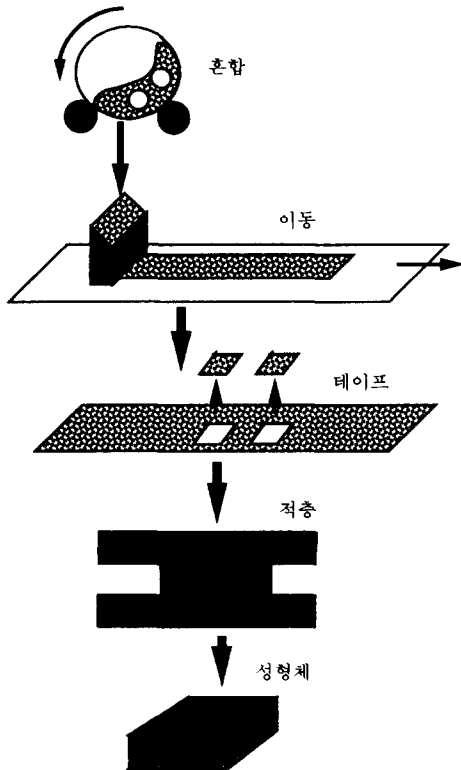


그림 1 테이프 성형공정의 순서도

작다. 따라서 세라믹으로 부품을 구성할 경우, 부품이 받는 인장응력이 허용강도를 넘지 않도록 설계하는 것이 필수적이다. 이 밖에도 구조 세라믹스의 마찰조건에 대한 특성 연구(tribology), 강도 및 수명예측, 특히 고온용이라면 크리프, 열충격하중 등에 대한 재료설계기술이 요구된다. 따라서 유한요소법과 같은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 실제 제품의 형상 및 하중조건하에서 세라믹스에 발생가능한 응력분포를 예측하는 것은 중요하다.

세라믹스는 기지재료(matrix)로 사용되거나, 또는 인성증가를 위하여 섬유(fiber), 휘스커(whisker), 입자상(particulate), 또는 판상(platelet) 형태⁽⁹⁾의 보강재로 선택되기도 한다. 보강재의 형상, 비율, 배열상태에 따라 물성, 특성이 변화하므로 시편제조에 앞서 적절한 설계가 요구된다. 세라믹스 복합재료는 단일(monolithic) 세라믹스 재료에 비하여 아직껏 제조단가가 저렴하지 않으나, 인성이 증가하여 다양한 형상설계의 가능성을 갖는다.

복합재료의 형태를 거치지 않고, 비산화계 세라믹스인 탄화규소와 산화계 세라믹스인 멀라이트($3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$)를 함께 사용하는 방법⁽¹⁰⁾으로 약점을 상호 보완하기도 한다. 알루미늄이나 또는 멀라이트와 같은 산화계 세라믹스와 적층판의 형태^(6,10)를 이루어 인성 및 내식성의 개선을 기대하기도 한다. 적층판의 형태는 그림 2에서 예시한 바와 같이 동일 소재내에서도 미세조직의 변화를 초래시킬 수 있다.

한편, 코팅은 강화재와 기지 사이의 결합력을 조절하여 복합재료의 파괴인성을 증진시키는 역할도 한다. 코팅을 하는 경우 모재와의 물성, 특히 열팽창계수의 차이로 인한 계면(interface)의 응력을 최소화시키기 위하여 물성치가 다른 여러 코팅층을 입히거나, 두께에 따라 점진적으로 변화하게 하는 설계를 하기도 한다. 이와 유사한 개념으로



그림 2 적층된 복합재료/단일 세라믹스의 예⁽¹⁰⁾

세라믹스와 금속 간의 조직을 점진적으로 변화시키는 복합재료의 형태를 경사기능재료(FGM : functionally gradient material)⁽¹¹⁾라고 한다.

지르코니아는 상온과 용점 사이에 두 번의 상변태점이 있다. 변태를 억제하는 안정제(stabilizer)의 양을 충분치 않게 혼합하면 상변화가 부분적으로 방지되며 냉각도중 미세한 침전물이 모재상에 석출된다. 재료내의 입자의 크기를 조절하여줌으로써 강도와 인성을 증진시킬 수 있으며,⁽¹²⁾ 부분안정화 지르코니아(PSZ : partially stabilized zirconia)라고 한다. 원하는 내열충격성, 내마멸성을 얻기 위하여 조성을 적절히 설계한 복합재료(예 : 탄화규소 또는 알루미늄/지르코니아)의 형태로도 개발되고 있다.

2.3 성질 및 성능 평가기술

세라믹스 강도의 저하를 초래하는 결함의 대부분은 재료의 성형과정중에 생성되는 기포, 입자의 불균일한 분산, 또는 기계가공중에 발생하는 표면의 결함이 대부분이다. 세라믹스의 파괴강도는 변화가 커서 평균강도 값을 설계에 이용하기 어렵다. 따라서 와이블 계수(Weibull modulus)로써 강도의 분포 정도를 나타내거나, 파괴확률의 계산⁽¹³⁾으로 실제 부품에 대한 신뢰도(reliability) 평가가 이루어지기도 한다. 또한, 적용될 하중보다

높은 수준의 하중을 가하는 보증시험(proof-test)을 통하여 파손이 없는 제품만을 선별함으로써 100% 신뢰성 있는 세라믹스의 응용을 기대할 수 있다. 제조공정의 각 단계에서 또는 완료 후의 제품에 대하여 비파괴검사⁽¹⁴⁾를 통하여 결함의 크기나 위치 등을 발견하여 재료의 신뢰성을 증가시킬 수 있을 것이다.

세라믹스 소재에 대한 개선된 제조기술, 설계기술, 평가기술의 확립으로 상품화 가치를 지닌 응용분야의 실현을 기대할 수 있다. 이것은 재료과학자와 기계공학자가 함께 도전해야 할 과제이다.

3. 응용 및 연구분야

3.1 응용분야

세라믹스 소재의 장점을 이용하여 절삭공구의 소재와 같은 단품에 적용되기도 하지만, 종합적인 시장성이 있는 자동차와 항공기에 적용이 고려되어 왔다. 세라믹스를 자동차의 엔진부품⁽¹⁵⁾에 사용할 수 있다면 분명한 사실은 금속으로 만들어진 엔진보다는 가볍고 더 높은 온도에서까지 운전이 가능하며 마멸(wear)에 대한 저항이 크다는 것이다. 따라서 정적(static)하중을 받는 부품뿐 아니라, 가스터빈, 또는 그림 3에서 나타낸 터보차저 등의 로터와 같은 동적(dynamic)하중을 받는 구조물에도 응용이 가능하다. 관성이 작으므로 필요한 회전력에 도달하는 시간이 짧아질 것이며, 엔진온도가 증가되므로 연료의 효율적인 연소와 함께 배기가스의 오염정도도 줄일 수 있게 된다. 따라서 현재의 금속소재로 만든 엔진의 부품을 교환할 수 있다면 형상변화없이도 자동차의 무게는 상당히 감소할 것이다. 더욱이 엔진의 불필요한 냉각장치의 제거 또는 배기가스 에너지의 일부회수와 같은 구조개선 등을 통하여 실질적인 열효율, 연비향상을 기대할 수 있다.

세라믹스 소재가 기계용으로 사용되는 분



그림 3 세라믹스로 제작된 로터의 예

야는 주로 경량화 또는 고온용 구조물, 절연체용, 내마멸성 향상용, 또는 금속부품의 약점보완용의 형태이다. 실제로 피스톤 링, 예열 플러그, 볼 베어링뿐 아니라, 절삭공구나 제트 터빈부품에도 응용되고 있다. 베어링의 재료로는 현재 질화규소 또는 지르코니아가 사용되고 있다. 한편 세라믹스의 높은 경도, 내부식성, 내열성 등을 이용하여 기존의 금속부품에 세라믹스 코팅⁽¹⁶⁾을 할 수 있다. 용사(thermal spray)법, 화학증착법(CVD)등이 있으며, 코팅재료와 모재 사이의 확실한 접착, 균일한 두께 등이 보장되어야 한다.

탄화보론은 헬리콥터의 방탄역할을 위하여 미국에서 개발된 것이 시초이며 현재는 미군용차에 장착되는 소재이다. 이것은 탄화보론이 금속에 비하여 가볍고 경도가 높기 때문에 금속탄환의 관통력을 효과적으로 억제시킬 수 있기 때문이다. 이 밖에도 세라믹스는 고온에서 강도를 유지하며, 부식에 대한 저항성이 우수하여 금속보다 유리하다. 실지의 방탄은 금속 또는 폴리머재료를 기지(matrix)로 한 복합재료판을 후판으로 하여 파편 및 탄환의 진행을 억제하고, 그 앞판은 적층구조로 된 세라믹스로 탄환관통력의 일차적인 저하역할을 하고 있다. 미국은 국방산업에 응용되었던 기술의 상업화를 추구하고 있으나, 금속합금 또는 금속복합재료와 경쟁력을 갖기 위하여 제작 및 가공비용의 저렴화에 많은 노력이 요구되고 있다.

3.2 연구동향 및 전망

세라믹스엔진의 초기 개발단계 때에는 대부분의 금속부품을 세라믹스로 대체할 수 있을 것으로 기대했다. 실제로 생산된 세라믹스는 종래의 금속으로는 건디기 힘든 영역에서까지 그 적용이 증대되어 왔다. 그러나 고생산단가 및 취성문제의 미해결로 인하여, 전체 구조물의 재질을 교환하기보다는 세라믹스로 대체 효과가 큰 부품 등을 중심으로 연구가 추진되고 있다. 현재 터보차저 로터, 실린더 헤드, 배기밸브, 필터 등이 생산되며, 일부 자동차에서 실제로 시험되고 있다. 세라믹스가 자동차에 적용될 때 금속보다 현저한 우수성을 나타내는 디젤엔진, 또는 가스터빈 엔진에의 적용이 주목되고 있다. 세라믹스 보강재에 단일 세라믹스, 단일금속, 또는 금속간합금(intermetallic alloy)을 기지재료로 한 복합재료의 개발도 계속되고 있다.

한편, 세라믹스의 우수한 특성을 효과적으로 이용하기 위한 수단으로 세라믹스와 금속의 접합기술이 있다. 고온환경에서 회전되는 터보차저 로터는 세라믹스로 하고, 회전축은 금속으로 제작하여, 축과 터보로터를 접합시키는 연구이다. 물성이 다른 재료간의 접합은 일반적으로 접합체면의 확산이 활발한 고온에서 행하여지는데 접합공정의 개발과 함께 접합체의 설계도 꾸준히 진행되고 있다.

일본의 연구팀은 세라믹스와 금속간의 접합을 위하여 종래의 브레이징합금을 이용한 방법대신 이온빔⁽¹⁷⁾을 가해준 실험을 하였다. 재료의 표면처리 또는 계면의 접합력을 향상시키는 작용을 하였으며 우수한 접합강도가 보고되었다. 과거 접합의 적용은 주로 전자세라믹스를 대상으로 하여왔지만, 신뢰성있는 강도가 보증되는 기술은 구조세라믹스에도 적용이 가능할 것이다.

세라믹스 분말의 입자를 작게 하면 성형체의 충전율이 높아지고, 소결작업도 촉진되기 때문에, 입자의 크기를 나노미터($1\text{ nm}=10^{-6}$

mm) 정도의 크기로 제조하는 연구도 진행되고 있다. 이를 나노상(nano-phase) 세라믹스라고 하며, 복합재의 형태가 될 때 나노-복합재료(nano-composites)⁽¹⁸⁾라고 한다. 소결온도의 저하로 인하여 보강재의 열화(degradation)도 억제할 수 있다. 또한, 나노미터의 크기로 제조된 세라믹스는 연성 및 인성이 좋아 기계가공성이 개선되는 이점이 있다.

미국의 정부기관(Dept. of Commerce)이나 표준연구소(NIST)는 관련산업체들로 컨소시움을 결성하여 세라믹스의 전반에 관한 공동연구를 지원하고 있다. 관심있는 기업체라도 개발을 위하여 단독 투자하기에 경비나 인력의 부담이 큰 기술개발에 공동투자하고 결과를 공유함으로써 연구개발의 시간을 줄일 수 있다. 한편, 일본은 1981년 초부터 주로 실수요자인 기업의 주도와 정부(과기청 및 통산성)의 조정으로 구조세라믹스의 응용 기술을 개발하고 있다. 이같이 미국과 일본은 정부주도 또는 조정하에 연구시간, 경비, 역할분담을 하여 효율적으로 필요한 결과를 공유하고 있다. 일본은 미국보다 본격적인 연구시작은 늦었지만, 미국의 우위를 점유하고 있는 분야도 있다.

국내⁽¹⁹⁾에서의 세라믹스에 대한 연구는 1980년대 정부출연연구소(한국과학기술연구원 및 한국기계금속연구원)와 일부 대학실험실에서 시작되었다. 그러나 국내의 세라믹스 업계는 구조용품보다는 주로 전자산업 관련하여 비교적 많은 투자가 이루어져 왔다. 세라믹스 분말의 합성과정에 대한 연구도 꾸준히 수행되어 왔으나, 실험실에서의 생산을 제외하고는 거의 모든 분말 또는 원료를 수입하고 있는 실정이다. 현재 세라믹스 관련 기술은 선도기술 개발과제(일명 G-7프로젝트) 및 소재산업이 진보된 옛 러시아의 기술 도입과 같은 국제공동연구등을 통하여 박차를 가하고 있다. 그림 4에 나타난 바와 같이 현재 국내의 몇 기업⁽²⁰⁾에서도 탄화규소의 절

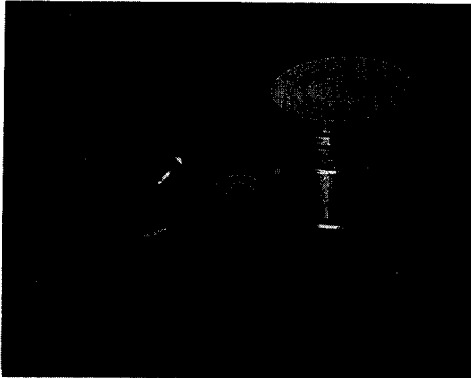


그림 4 국내의 구조세라믹스의 적용예⁽²⁰⁾

삭공구 소재를 비롯하여 다양한 구조 세라믹스를 개발하고 있으며, 일부는 상품화하고 있다.

세라믹스는 금속이나 폴리머재료보다 구조물의 적용에 대한 연구기간이 짧았지만, 상당한 가능성을 보여주고 있다. 그러나 아직까지 세라믹스에 대해 엔진효율의 증가와 같은 장점보다는 가격, 수명, 신뢰성보장 등이 더 요구되고 있다. 그러나 기술적 해결과 함께 효율적인 세라믹스의 이용가치는 분명히 높아질 것이다.

최근 국내에도 구조세라믹스에 대한 연구인력, 수요 등이 증가하고 있어서, 연구된 기술의 모방에 의한 개선연구뿐만 아니라 창의적인 기술개발이 증가될 것으로 기대된다. 종래보다 우수하고 신뢰성있는 세라믹스 소재의 개발은 더욱 더 응용분야를 확대시킬 것이 틀림없다.

4. 맺음말

이 글에서는 기계공업과 관련되는 구조세라믹스를 대상으로 개발과 응용기술의 현황 및 전망에 대하여 정리하였다. 현존하는 재료의 성질을 개선하는 것은 곧 기계부품의 형상변화 없이도 성능향상을 의미하며, 구조물이 사용되는 환경에 따라 구조세라믹스의 선택

은 불가피하다.

기반기술로 분류되는 소재산업은 당장의 상품화 가치가 작더라도 기초연구의 발전을 최소한의 성과로 진행되어야 한다. 아울러, 새로운 응용분야 개발과 함께 단계별 연구방향의 조정이 필요하다. 국내 세라믹스의 기술열세는 학교-연구소-산업체가 기초연구에서부터 제품화까지의 역할을 공동분담하여 자체기술을 축적함으로써 극복할 수밖에 없는 것으로 보인다. 구조세라믹스의 개발을 중복투자없이 효과적으로 추진하는 것이 경쟁력을 갖춘 신소재산업의 국제화에 대비하는 길일 것이다.

참고문헌

- (1) Ichinose, N., 1987, *Introduction to Fine Ceramics*, Wiley.
- (2) Vaughn, R. L., 1980, "Skin Milling for the Space Shuttle," *Manufacturing Engineering*, pp. 80~82.
- (3) Ceramic Source, 1992-93, The American Ceramic Society.
- (4) Onoda, G. Y., 1978, *Ceramic Processing before Firing*, Wiley.
- (5) Pierre, A. C., 1991, "Sol-Gel Processing of Ceramic Powders," *Am. Cer. Soc. Bull.*, pp. 1281~1288.
- (6) Geiger, G., 1991, "Progress Continues in Composite Technology," *Am. Cer. Soc. Bull.*, p. 212.
- (7) German, R. M., 1990, *Powder Injection Molding*, Metal Powder Industries Federation.
- (8) Katz, J. D. and Blake, R. D., 1991, "Microwave Sintering of Multiple Alumina and Composite Components," *Am. Cer. Soc. Bull.*, pp. 1304~1308.
- (9) Chou, Y. and Green, D. J., 1993, "Silicon Carbide Platelet/Alumina Composites : II.

- Mechanical Properties," *J. Am. Cer. Soc.*, pp. 1452~1458.
- (10) Amateau, M. F. and Messing, G. L., "Fiber Preform Processing," 1987~1989, Annual Report for Projects within Center for Advanced Materials, Penn. State Univ.
- (11) Sheppard, L. M., 1992, Enhancing Performance of Ceramic Composites, *Am. Cer. Soc. Bull*, pp. 617~631.
- (12) Green, D. J., 1989, Transformation Toughening of Ceramics.
- (13) Nemeth, M. M., 1989, "Designing Ceramic Components with the CARES Computer Program," *Am. Cer. Soc. Bull*, pp. 2064~2070.
- (14) Sheppard, L. M., 1991, "Evolution of NDE Continues for Ceramics," *Am. Cer. Soc. Bull*, pp. 1265~1279.
- (15) 서정만, 1991, "세라믹 엔진은 가능한가?," 대한기계학회지, pp. 212~219.
- (16) Hocking, M. G., 1989, Metallic and Ceramic Coatings, Longman Scientific & Technical.
- (17) Matsuura, M, Chida, N. and Fujinuma, H., 1992, "Si₃N₄, SiC, Al₂O₃/Cu Bonding with Utilizing Mo Metallization of Ceramics by Means of Ion Beam Dynamic Mixing," *J. of Japan Inst. Metals*, pp. 308~314.
- (18) Zhao, J, Stearns, L. C. Harmer, M. P., Chan, H. M., Miller, G. A. and Cook, R. E, 1993, "Mechanical Behavior of Alumina-Silicon Carbide Nanocomposite," *J. Am. Cer. soc.*, pp. 503~510.
- (19) Kim, Y. S. and Jang, S. D., 1993, "Ceramic Engineering Training and Ceramic Business in Korea," *Am. Cer. Soc. Bulletin*, pp. 89~90.
- (20) Fine Ceramics, 상품 카달로그, 쌍용양회공업주식회사. ■