

구조 요업재료의 현황과 전망



김 해 두 (요업재료실장)

- '72-'79 연세대학교 요업공학과, 학사
- '79-'80 영국 Sheffield대학 요업과, 석사
- '81-'83 연세대학교 요업공학과, 박사과정 이수
- '83-'87 독일 Aachen공대 요업과, 박사
- '84-'86 독일 Aachen공대 요업과, 연구조교
- '86-'88 독일 Aachen공대 요업과, 연구원
- '88.1-현재 한국기계연구소 요업재료실, 선임연구원

1. 서 언

일반적으로 구조 요업재료는 금속이나 고분자 재료와 비교해 경도, 내마모성, 내열성 등이 우수하기 때문에 사용 환경이 매우 가혹한 조건에서 이상적으로 사용되어질 것으로 예상되고 있다. 특히 고온에서의 안정성과 타물질과의 비활성 및 재료의 경량성 등으로 인하여 실제 응용면에서 많은 이점을 가지고 있으나 근본적으로 취성이라는 문제점에 의해 실제 사용에 많은 제한을 받고 있으며 따라서 구조 요업재료 연구 개발의 주류는 구조 요업재료를 어떻게 강화할 것인가하는 점이다.

본 고에서는 구조 요업재료의 현황과 전망에 대해 Advanced Materials & Processes 1991년 1월호를 중심으로 살펴보고자 한다.

2. 구조요업 재료의 강화

구조 요업재료에 적절한 인성을 부여할 수 있다면 고기능의 Superalloy도 부분적으로 대체할 수 있을 것이며, 몇몇 세라믹 기지 복합재료(ceramic-matrix composite)의 파괴인성은 Al합금의 파괴인성($25-26 \text{ MPa m}^{1/2}$)보다 높은 $30 \text{ MPa m}^{1/2}$ 값을 보여주고 있으며, 이러한 세라믹 기지 복합재료를 지속적으로 적당한 가격에 제조할 수 있다면 높은 온도, 부식성, 마모가 심한 환경에서의 사용에 이상적일 것이다.

일반적으로 세라믹 복합재료는 제조시 다른 재료들보다 훨씬 높은 온도와 압력이 필요하며 이러한 조건에서 기지재료와 보강재간의 양립성(compatibility)은 다른 종류의 복합재료에서는 없

있던 몇가지 요소에 의존한다. 기지재료와 보강재 사이의 열팽창 계수차이가 세라믹 복합재료를 만드는 것을 아주 어렵게 한다. 더우기, 계면의 성질이 고분자 복합재료에 보다 세라믹 복합재료의 기능에 더 중요한 요인이라고 여겨진다.

지난 10년간 세라믹 복합재료의 실제 응용에 있어서 신뢰성에 대해 몇가지 접근방법으로 실질적인 진보가 있었다. 엔지니어들은 취성에 대해서 많이 알게 되었으며 결함(flaw)과 강도와 관계와 같은 세라믹의 파괴 미소역학(micromechanics)의 이해를 증진시켜왔다.

이러한 접근으로, 통계적인 방법과 비파괴 기술이 강도와 부품의 수명과 같은 설계에 필요한 사항을 지정하는데 사용될 수 있었다. 게다가 강도를 제한하는 결함의 근원이 밝혀졌으며 이러한 결함의 근원을 제거하기 위해 제조 공정이 연구 개발되어 왔다. 세라믹에 대한 임계결합 크기가 금속재료에 대한 임계결합 크기보다 약 100배 정도 작기 때문에 제조 공정이 매우 엄격히 조절되어야 한다.

이들 두 접근은 부품에서 의도하는 응력을 파괴응력 이하에 있도록 유지하는것에 의존한다. 그러므로 만약 어떤 이유로 파괴응력을 초과하게 되면 급작한 파괴가 일어난다. 세번째 접근은 파괴저항을 향상시킬수 있도록 세라믹 미세구조를 설계하여 결함들에 대해 어느 정도 견디게 하는 것이다.

균열(crack)이 진전되는 동안 에너지를 소산 시킴으로써 급작스런 파괴를 막을 수 있는 가능성이 탄소섬유를 사용하여 1969년에 증명됐지만, 이들 복합재료는 330°C-400°C의 온도에서 성질이 저하되었다. 오늘날까지 많은 노력이 세라믹 연속보강섬유에 초점이 맞춰져 왔는데, 그것은 whisker, platelet, 입자등의 보강재와 마찬가지로 hot pressing에 의해서 비교적 쉽게 제조될 수 있기 때문이다.

New Hampshire주의 Dover에 있는 Cogebi사는 항공기 내부구조의 불에 대한 저항성이 운모를 기지료하는 laminates에 의해 향상되고 있다고 보고했다. 항공산업에 특별한 관심이 쏠리는 것은 불이 났을때 직면하게 되는 극한 상황에 lamina-

tes가 노출됐을때 유독한 연기를 적게 방출하고 열도 상당히 적게 방출한다는 점이다.

운모가 aluminosilicate에 기본을 두고 있는 무기 결정이기 때문에 1000°C까지 온도 저항성이 있으며 1800°C까지 열적으로 안정하다. 이것은 완전 비가연성이고, 대부분의 화학 물질에 저항성이 있으며, microwaves가 통과하고, Young's modulus가 130-173GPa로 높은 기계적 성질을 가지고 있다.

이 판넬(panel)은 자연적으로 산출되는 작은 운모판들로 이루어져 있으며 속에 penolic, epoxy, silicone과 같은 고기능의 수지가 결합성분으로 아주 조금 함유되어 있다. 그 결과되는 제품은 honeycomb구조와 유연성이 있는 sheets나 견고한 sheet또는 판넬이 있으며, 일반적인 방법으로 고분자화한것과 평행하지 않은 면에 응용되는 prepreg sheets가 있다.

Sigma Monofilament라고 알려진 진보된 SiC섬유는 매우 우수한 강도와 stiffness를 보여준다. 이 섬유는 독일회사 Sigma Composites에 의해 개발된 화학 증착법을 사용하여 영국 Hampshire에 Farnborough의 BP Metal Composites사에 의해 만들어 지는데, 이 공정은 다른 경쟁적인 공정에 의해 얻을 수 있는것 보다 실질적으로 더 나은 특성을 부여해 준다. 섬유의 주요 용도는 금속의 강화와 여러가지 aluminide와 같은 금속간 화합물의 강화이다.

금속 복합재료에 필요한 온도에서 SiC 섬유와 반응하는 titanium에 대해서는, SiC섬유가 hot titanium과 양립할 수 있도록 SiC섬유에 새로운 barrier coating을 BP가 개발해냈다. 가볍고(밀도: 3.4 g/cm³), 강도가 높으며 (3,500 MPa), Stiffness가 좋은 (400 GPa) 이 섬유는 우주항공에 응용하는 범위에서도 이상적이다. 높은 온도에서 강도를 유지할 수 있는 이섬유의 능력은 세계의 우수한 jet-engine제조 업체들로하여금 이 섬유를 hot-turbine 부품에 대해서 평가하도록 해왔다. 단섬유(monofilament)에 덧붙여 직조한 preform과 금속복합재료로된 laminates와 같은 섬유를 바탕으로 하는 제품의 한 영역이 영국의 Sunbury에 있는 BP의 섬유 공장과 그 산하업체인 California의 Chatsworth에 있는 DWA Composite Specialties사에 의해서

만들어졌다.

Georgia 주 Augusta에 있는 Thermal Ceramics 사에 의해 Kaowool 세라믹 섬유를 제조하는데 사용된 제조 기술의 향상은 이제 재료설계공학자 (design engineers)에게 shot의 양과 크기를 한정하여 복합재료를 만들고 섬유가 아닌 입자들은 성형할 때 조건을 선택하고 상대적인 섬유의 길이를 제어할 수 있는 능력을 준다. 이 기술은 +100- μ m shot이라는 지극히 낮은 수준으로 두면서, shot입자로 부터 섬유를 분산시키고 분리시키는 dry and wet techniques의 조합을 포함하고 있다.

3. 구조 요업 재료의 제조공정

구조 요업재료를 이용한 부품의 생산에서 특히 중요한 개념은 near net shape제조이다.

몇몇 제조 공정들은 기계 가공이나 다이아몬드공구로 가공할 필요가 없는 net-shape부품을 만드는데 사용될 수 있다. Georgia 주의 Alpharetta에 있는 Technical Ceramic Laboratories Inc.는 저압 사출 성형 공정(low-pressure, injection-molding processes)이 개발되어, 그 결과 최종 성질이 hot pressing 이나 hot isostatic pressing에 의해 제조된 부품의 특성에 접근하는 net-shape 세라믹 부품을 만들었다고 말한다. 비싸지 않은 금형을 사용하는 이 공정은 그 어떤 다른 제조 방법이나 기술보다 훨씬 값이 싼 net-shape부품을 생산할 수 있다.

또한 CVI기술등이 세라믹 복합재료를 제조하기 위해 최근에 사용되고 있다. 이들은 기지 재료가 보강재료의 다공질 preform속으로 침투(infiltrate) 되는 방법이다. 기지재료는 용융된 액체, 고분자 재료 또는 증기의 침투에 의해 증착될 수 있다.

New Mexico주 Los Alamos에 있는 Los Alamos National Laboratory(LANL)의 연구자들은 세라믹 복합재료의 제조 기술로서 chemical-vapor infiltration(CVI)이 processing 동안 preform에 stress를 주지 않은 잇점이 있다고 보고한다. 또한 CVI시 사용되는 비교적 낮은 온도가 화학적 침식에 의한 fiber integrity에 불리한 변화를 제한해 준다. 효과적인 CVI는 반응 가스가 다공질 preform속을 이동해다니다가 표면증착이 일어나고 발생되는

가스가 제거되는 과정을 포함하고 있다. 그러므로 CVI는 기본적으로 화학증착법(CVD)을 다공질의 섬유가 많은 preform에 응용한 것이다.

현재 사용되는 CVI process는 등은 확산제한침투(isothermal diffusion-limited infiltration)과 강제유동 열구배공정(forced-flow thermal-gradient process)을 포함하고 있다. 이 등은 공정은 프랑스에 있는 the Socie'te' Europeenne de Propulsion(SEP)에 의해 개발되었다. 이 공정은 고 품질의 복합재료를 만들어내며, 기판에 대해 크기나 형상의 제한이 없어 near-net-shape 부품의 제조를 가능케 한다. 그러나 바깥쪽의 우선적 증착은 기공을 닫힘을 빨리 일어나게 할 수 있으며, 그럴 경우 기공을 다시 열기 위한 다이아몬드기계 가공 조작을 위해 공정의 중단이 필요하다. 이 SEP공정은 확산이 제한되기 때문에 공정에 장시간(몇주)이 필요하다. 이 확산문제는 또한 발생가스의 역확산에 의해서 더 악화된다. 일본의 연구자들은 맥동반응가스유동(pulsed reactant flows)을 사용하여 크게 향상 시켰다. LANL 역시 등은 강제유동 반응로(isothermal forced-flow reactor)를 사용한다.

Tennessee주 Oak Ridge에 있는 Oak Ridge National Laboratory에서 미국에서는 제일먼저 행해진 열경사 강제 유동 공정(thermal gradient forecd-flow process)는 반응가스흐름의 반대 방향으로 급격한 열경사를 고의적으로 만들어 주는 것이다. 압력경사하에서 차가운 반응가스가 들어가 뜨거운 면쪽으로 흘러가면, 이 뜨거운 면에서 증착반응이 일어난다. 증착이 진행되어 감에 따라, 밀한 부분에서 복합재료의 열전도도가 증가하며, 높은 온도의 증착 선단이 차가운 면에서 접근해가며, 이 공정을 이용하여 24시간 정도로 짧은 반응시간이 보고되었다. 고 품질의 밀한 복합재료가 제조되는 동안, 종종 잔존 기공율이 높은 부분이 형성되며, 이는 preform내에서 일어나는 가스흐름의 양상 때문인 것으로 사료된다.

기술적인 면에서 향상이 있을수도 있지만, LANL 연구자들은 최종 제품의 가격이 많이 떨어질려면 새로운 공정의 개발이 있어야 할 것으로 생각하고 있다. LANL과 그 밖의 곳에서 "거꾸로된(inverted)" 열경사를 포함되는 마이크로파에 의한 가

열이 연구되고 있으며, 이것은 기존의 기술보다 더 나은 장점이 있으나 공정시간의 단축이 가능해야 하며, 보다 넓은 범위에서 균일한 복합재료가 될 수 있어야 한다. 마이크로파가 들어가 거꾸로된 열경사로 인해 증착이 안에서 밖으로 일어나기 때문에, 닫힌 기공을 다시 열기 위한 주기적인 기계가공이 필요하지 않다.

4. 구조 요업 재료의 응용 전망

세라믹 복합재료에 대한 응용 목록이 계속해서 늘고 있다. 열교환기, 항공기, turbine engine과 자동차에의 응용품에 덧붙여 LANL의 연구자들은 배출냉각(transpiration cooling)에 사용하는 것을 고려하고 있다. 여기서, 잔존 기공에 대한 세심한 제어와 기공의 공간 분포를 제어하는 것이 필요하다.

강화되지 않은 세라믹 또한 열교환기나 이와 비슷한 부품에서 이득을 주며, Si_3N_4 와 AlN 은 높은 형상비를 가지며 현재 압출된 봉, 판 또는 다른 모양으로 사용되고 있는 제품으로서의 SiC 와 합류해 왔다.

Connecticut 주 New Canaan에 있는 ESK Engineered Ceramics는 이들 비산화물 세라믹이 산화물 세라믹 보다 수명도 길고 특히 비철금속과 같은 액상금속과 접촉하에서 부식과 열충격에 대한 탁월한 저항을 가진다고 말한다. 그러므로, 이들 제품들 또한 열전대 보호관, 노즐, casting tubes로서 응용할 수 있을 것으로 기대된다.

금속과 세라믹을 접합하는데 있어 열적인 부조화의 문제를 해결하려는 연구계획이 Massachusetts 주 Waltham에 있는 GTE Laboratory Inc. 에 의해 수행되어 왔다.

Oak Ridge National Laboratory의 지원하에서 미 에너지성의 후원을 받고 있는 이 계획의 전반적인 목적은 접합설계와 유한 요소 분석(finite-element analysis)의 조합을 통하여 세라믹과 금속간의 높은 온도에서의 강한 결합을 이루어야 하는 것이며 아래의 세부적인 목적을 가지고 있다.

- 접합이 $650^{\circ}C$, 1000 mechanical cycles, 1000 thermal cycles에서 $20.9N \cdot m$ 의 토오크를

견디도록 개발해내는 것과 또 그것을 증명하는것.

- 세라믹 금속 접합의 성능을 예측할 수 있도록 하는것

시험용으로 선택한 재료들은 Si_3N_4 와 SiC 그리고 납땜으로 접합된 nickel-base superalloy 와 iron-base superalloy 이다. 접합 특성이 부분적으로 향상이 되고있는 반면 부적당한 납땜 금속 때문에 $500^{\circ}C-600^{\circ}C$ 사이에서 민기 어려울 정도로 접합의 강도가 떨어진다. 따라서 이런 문제를 해결하기 위해 납땜용 합금이 개발되고 있다.

세라믹 기지 복합재료 연구의 대부분의 구동력은 항공우주산업이다. 특히 군사적 그리고 상업적 항공모함을 위한 터빈 엔진 응용에 있다. 이상적으로, Sikorsky에 따라, 터빈 엔진은 연료를 태워 얻을 수 있는 온도 즉, 주로 1,925에서 2,200 $^{\circ}C$ 온도에서 작동해야만 한다. 이러한 온도는 완전 연소를 위해 충분히 공기가 존재할 때의 터빈 입구 온도 범위이다. 추가적인 공기가 터빈과 연소기 부분의 금속 성분이 녹지 않을 정도의 충분한 냉각이 되도록 필요하고, 이러한 공기는 추진력에 아무런 기여도 하지 않는다. 고온에서 견딜 수 있는 엔진은 연료를 30% 덜 소비할 수 있다. 다시말해 상업적 정기 여객기에 대한 상당한 돈이 절약 될 것이다. 이러한 온도에서 작동하는 군용기는 재연소기에 필요한 것 없이 마하3이상에서 유지 작동에 필요한 추진력을 얻을 수 있다. 이러한 것은 추진력/무게의 비를 100% 증가시키고, 연료 소모를 50% 감소시키는 결과를 초래할 수 있다. 더우기, 디자인, 재료 그리고 제조기술이 생산단계에까지 발전될 수 있다면, 미래의 제트 엔진은 복합재료 압축기와 세라믹 터빈을 보유할 것으로 기대된다.

세라믹 복합재료들이 산업적인 가스 터빈 사용의 증가를 보일것으로 기대된다.

최근 미국 기술자협회(ASME)에서 소개된 예측에 따르면, 산업적인 엔진의 효율과 전체적인 성능이 1에서 10-MW output까지 세라믹 부품들을 사용하므로 발전될 것으로 생각된다. 그들은 산업적인 gas-turbine엔진이 항공모함과 자동차 엔진과 같은 요구 조건을 가지지 않는다고 지적한다.

그 대신 손쉽게 유지 보수될 수 있어야 하고, 효율이 크기나 무게보다 더 중요하다.

세라믹 연소기로 디자인된 가스 터빈은 환경 면에서 큰 장점이 있다. 고온 연소 동안 발생하는

불연소 가스와 질소 산화물은 금속 연소기의 냉각기 부분을 지나서 방출한다. 그러나 온도가 세라믹 연소기 전체적으로 더 고르게 되어, 보다 더 작게 방출하게 된다.