

세라믹스의 접합기술

Current Status of Joining Ceramics and Metals

菅沼克昭 || 大阪大學産業科學研究所

Katsuaki Suganuma || Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka University

suganuma@sanken.osaka-u.ac.jp

Abstract

Joining ceramics to metals has a variety of applications both in the structural and the electronics fields. One of the great benefits of the adoption of joining into the structural applications is to provide reliability to the ceramic components by backing up with metal components. In joining ceramics and metals, two key factors, i.e., establishing chemical bonding at interfaces and dissipation of thermal stress across interfaces, should be paid for attention. Many joining methods have been already established such as adhesive and mechanical joining, brazing and soldering, and solid state bonding. Each has its own benefits with some drawbacks. One can select a suitable process and materials following the requirements of the application. This report focuses on the current status of joining technology for ceramics/metal system.

1. 서론

1970년부터 1980년대에 걸쳐서 파인세라믹스 열기가 세계를 뒤덮은 시대로써, 세라믹스와 금속의 접합기술도 비약적인 진보를 하였다. 세라믹스와 금속은 모든 물성에 있어서 큰 차이가 있으므로, 양자간의 접합에 있어서는 계면형성 기구뿐만이 아니라 계면을 통한 구조 안정성도 이해하는 것이 필수적이다. 접합기술의 연구개발에

대해서는 여러 해 동안 계면의 젖음성 등의 거시적인 반응을 중심으로 검토되었으나, 접합의 본질을 이해하고 실용적인 기술로 연결하기 위해서는 나노 레벨의 해석기술과 시뮬레이션 기술의 큰 발전이 필요하다고 하겠다. 최근 20년간 세라믹스/금속의 접합기술 개발은 놀랄만하지만 같은 시기에 기초적인 분야에서 매우 발전이 커서 세라믹스와 금속의 접합 영역은 기술면에 있어서도 또 학문적인 면에서도 이미 완성에 이르고 있다고 할 수 있을 것이다. 예를 들면, 초고분해능 전자현미경 관찰(HREM)에 의한 원자배열의 직접 관찰과 조성 및 상태 분석, 또 광전자분광분석법(XPS)이나 오제(Auger) 분석에 의한 상태분석 등에 의해서, 오늘날 밝혀지고 있는 사례가 매우 많다. 이 때문에 접합 대상만 정하면 기술은 자연스럽게 내놓을 수 있는 수준이 되었다고 말해도 과언이 아닐 것이다.

한편, 현실적인 기술로써 볼 때, 접합의 포인트는 계면형성과 열응력 완화의 2가지가 성공의 관건이며, 미시적인 면으로부터 거시적인 면까지의 관점이 중요시 된다.

또한 원자레벨에서의 과학적인 해명이 발전했다고는 말할 수 있으나, 모든 응용이 가능하게 되었다고 말할 수는 없다. 예를 들면, 큰 면적의 신뢰성이 큰 접합을 가능하게 하는 기술이나 500°C를 넘는 내열성이 있는 접합, 특수한 부식환경 등에 있어서는 접합기술의 선택은 여전히 큰 과제로 남아있다. 주된 원인으로서는 열응력의 문제가 매우 깊이 관여되고 있다. 이들 어려운 접합대상에 대해서도 접합기술을 실현하기 위해서는 오늘날의 기술로

서도 각각에 대응되도록 매우 자세하게 고려할 필요가 있으며, 실용화를 고려하는 제품의 성질에 보다 다양한 접합형태를 제안하지 않으면 안 된다. 특히, 부가가치를 높여서 신뢰성을 중시하는 응용의 경우에는 나노 레벨로부터 거시적 구조까지의 접합구조의 건전성을 보증할 수 있는 것이 바람직하다.

오늘날 세라믹스/금속의 접합기술을 실용화한 많은 경우는 전자기기의 분야에 집중하고 있다. 이것은 세라믹스의 용도가 전기적, 자기적 분야에 보급되고 있으며, 구조적 용도로는 당초 기대했던 대로의 실용화가 진전되고 있지 않다는 것으로 나타나고 있다. 이하의 본문에서는 접합에 관한 과거의 기술도 포함되며 일본에서의 접합기술의 실용화 상황에 대해서 간단히 개략을 정리해본다.

2 여러 가지 접합기술

세라믹스와 금속의 접합기술은 다양하며, 간단한 것으로는 볼트 연결이나 유기 및 무기계의 접착제에 의한 것 등도 있다. 그 주된 분류를 Table 1에 정리하였다. 아래

에는 주된 접합법의 개요를 소개한다.

2.1 접착제와 기계적 접합

이 양자는 접합기술 중에서도 가장 간편하며 경제적인 기술이지만, 구조설계를 충분히 잘 하면 용도는 이외로 넓다. 지르코니아는 칼이나 가위 등의 일용품으로써 일찍부터 실용화되어 있다. 또 우주선 외벽의 실리카 타일이 실리콘 계의 내열접착제로서 접속되어 있는 것은 잘 알려져 있다. 또한 공업적인 용도로는 철강 프로세스에 있어서 분체 운반용의 내마모가 요구되는 배관이나 라이너 또는 블로어 등에 사용되고 있다. 내열온도에는 한계가 있으나 150°C 정도까지는 에폭시계의 구조용 접착제로 충분히 견디며 이 온도를 넘어서는 영역에서는 실리콘계가 사용된다. Fig. 1에는 이들의 실용화의 보기를 나타내고 있다¹⁾.

1980년대로부터 1990년대에는 자가용차에 질화규소 터보차저가 많이 사용되었다. 이 실용화에는 후술하는 활성금속 팸질과 구워 붙이기가 실용화 되었다²⁾. 구워 붙인 소재들 간의 열팽창 차이를 적극적으로 이용하는

Table 1. Variation of Joining Methods

Category	Sub-category	Joining strength	Heat-resistance	Economy	Notes
Adhesive joining	Organic adhesive	○	×	◎	Simple process. Degradation in air/light exposure. Poor airtightness.
	Inorganic adhesive	×	○	◎	Simple process. Weakness to thermal stress.
Mechanical joining	Shrink-fitting	○	×	○	Simple process. Weak to stress concentration.
	Bolting	○	○	◎	Simple process. Repairable. Weak to stress concentration.
Soldering	-	○	×	◎	Simple process. Possible in air atmosphere. Repairable. Specific requirement for solder alloy and condition.
Brazing	Indirect metallization	◎	○	◎	Typically, Mo-Mn method. And available only for alumina with silica.
	Direct metallization	◎	○	○	Active metal layer coating or brazing with alloys with a certain amount of active metals. Requires high vacuum.
Solid-state bonding	Eutectic bonding	○	○	◎	Cu ₂ O liquid formation. For oxides and oxidized ceramics.
	Hot-press/HIP	◎	◎	△	Excellent heat resistance. Expensive process.
	Surface activated bonding	◎	△	△	No heating and no thermal stress. Soft metals such as Al. High vacuum is required for most cases.
	Anodic bonding	△	○	○	Lower temperature than hot pressing. Glass ceramics with some electric conductivity at joining temperature.
	Microwave heating	?	◎	○	Availability?
	Friction welding	◎	△	◎	Simple but only for aluminum
Welding	Electron beam welding	×	◎	△	Less availability
	Laser welding	×	◎	○	
Cast bonding	Cast molding	△	△	◎	Can be categorized in mechanical method. Only for aluminum.
	SQ method	◎	△	◎	Simple and tight interface. Only for aluminum.

◎: excellent, ○: good, △: fair, ×: worse

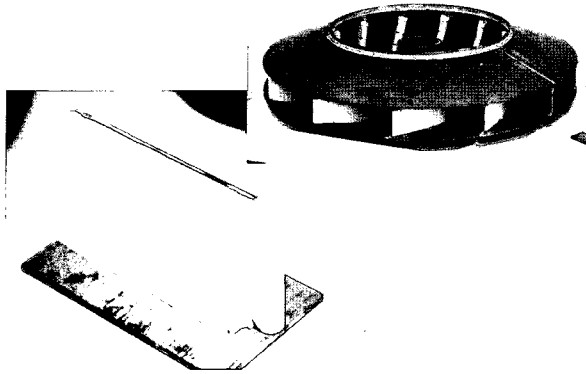


Fig. 1. Al₂O₃ blower for steel industries¹⁾.

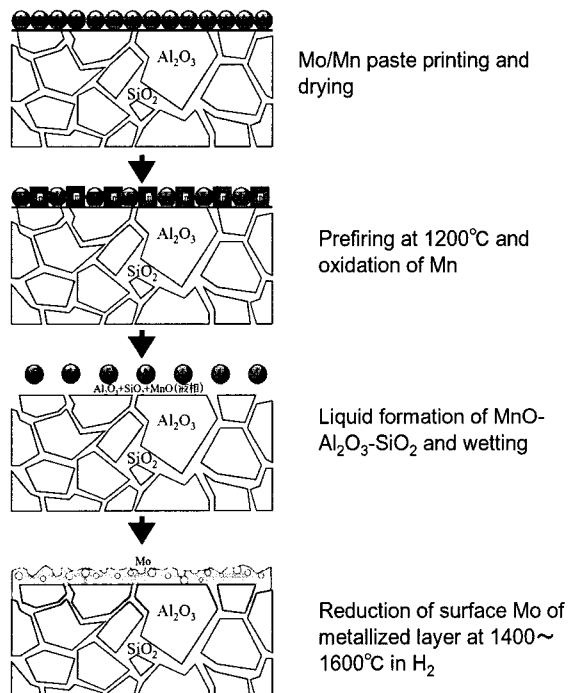


Fig. 2. Schematic illustration of Mo-Mn process.

방법이 있으나 응력집중을 적절하게 설계함으로써 유기계 접착제가 견디지 못하는 온도영역까지 신뢰성을 충분히 얻을 수 있다.

2.2 메탈라이즈법

전자세라믹스 부품에 대한 금속의 접합에는 거의 대부분의 경우에 세라믹스 표면을 메탈라이즈하여 뿔질을 한다. 절연애자나 집적회로의 절연기판에는 알루미늄이나 사

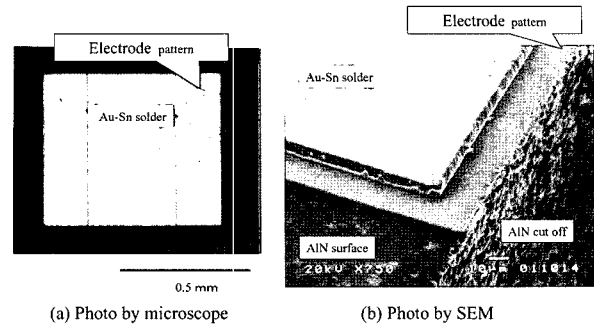


Fig. 3. Au-Sn solder pattern/electrode metallized pattern.

Table 2. Thermal Stress Compensation Methods

Method	Notes
off-metal interlayer	Soft metals such as aluminum, copper and nickel or metal mesh/metal forms.
Soft-metal/hard-low expansion metal interlayer	Laminated interlayers of soft metals/hard and low expansion metals, typically, such as combinations of aluminum, copper, nickel, iron, niobium as soft metals; and of tungsten and molybdenum.
Grading/Functionally Graded method	Continuously graded layer in composition.

용되고 있으며, 그 접합은 알루미늄이나 표면을 금속화하는 Mo-Mn법으로 처리가 행해지고 있다. 이 프로세스에 있어서 계면조직 변화를 Fig. 2에 모식적으로 나타내었다.

기본적으로 고온에 있어서 알루미늄 중의 실리카가 망간 산화물과 액상을 형성함으로써 계면의 젖음을 확보하고 견고한 결합을 만든다. 이 원리로부터 알루미늄에 첨가된 실리카가 적은 경우, 계면강도는 낮아진다. 따라서, 접합이 가능한 세라믹스가 한정되게 된다. 또한 결정 입경의 영향을 받아서 입경은 어느 정도 큰 편이 효과적이다³⁾. 최근에는 비산화물계 세라믹스에 대한 응용도 넓어져서, 활성금속의 스파터링에 의한 계면상의 형성, Ni 메탈라이즈나 W의 동시소성에 의한 메탈라이즈법이 많이 사용되고 있다 (Fig. 3⁴⁾). 이들 메탈라이즈법으로 얻어지는 계면강도는 꺾임강도가 200MPa을 넘으며, 후술하는 활성 금속법에 의해서 얻어지는 값에 필적한다. 또한 내열온도도 뿔질 재료의 내열온도나 산화기동에 좌우되며 활성금속과 거의 다르지 않다. 따라서 활성금속법과 비교하면 프로세스가 다소 복잡하다는 결점이 있으나 거의 동등한 기술로 생각된다.

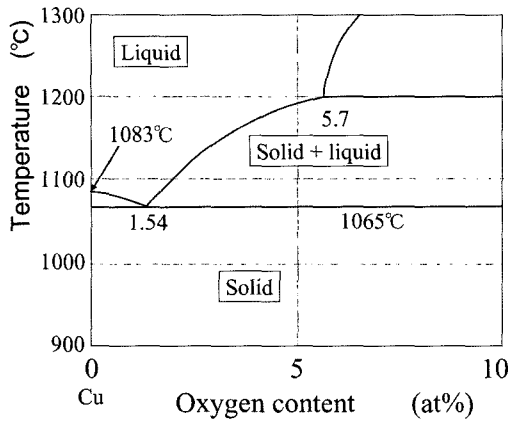


Fig. 4. Phase diagram of Cu corner of Cu-O binary alloy.

2.3 공정 접합법

알루미늄이나 베릴리아 등의 산화물 세라믹스와 구리의 접합에서는 공정용점을 이용한 접합이 가능하다. 이 방법에서는 접합시의 산소의 분압을 제어함으로써 구리 위에 Cu_2O 막을 생성시켜서 이 층이 접합온도 1063~1083°C 사이의 온도로 가열되면 용융하여 계면의 젖음을 촉진한다. 구리 기관의 제조에 많이 사용된다. Fig. 4에는 구리-산소 상태도의 구리 측을 나타내었으며, 미량의 산소가 존재함으로써 고·액 공존의 영역이 얻어진다. 구리는 25 μm 이상 (50~130 μm)의 두께가 필요하며 접합강도는 140MPa가 되어야 하고 300°C의 열피로에 견딜 수 있는 접합이 가능하다. 또, 이 방법으로는 세라믹스 표면이 산화되어 있는 상태이면 질화 알루미늄 등에 대해서도 유효하다. 이 방법은 기본적으로 금속 측이 구리, 세라믹스 측은 산화물로 한정되지만 특별한 진공장치도 필요하지 않는 유용한 방법이다.

2.4 활성금속법

세라믹스의 종류에 상관없이 강한 계면형성을 가능하게 하며, 땀질재료에 활성금속을 미량 첨가하는 활성금속법이다. 활성금속법에서는 일반적인 금속용의 땀질 재료로 티탄, 지르코늄, 하프늄 등이 수% 첨가된다. 활성금속법의 다양성으로서 금속 시트를 다층으로 중첩하든지 미리 이들 금속을 세라믹스 면에 증착시켜 둘 수도 있다.

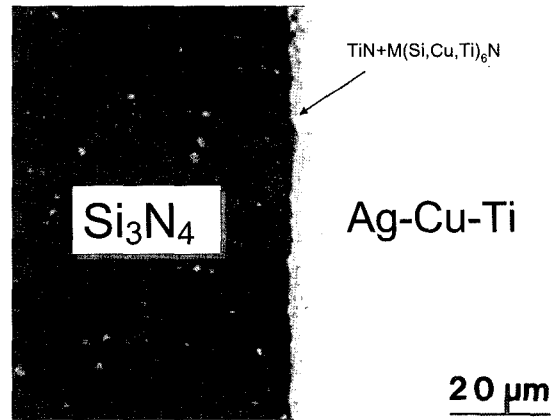


Fig. 5. SEM of interface between Si_3N_4 and Ag-Cu-Ti braze layer.

땀질을 하므로 그만큼 응용범위도 넓으며 오늘날의 새로운 응용분야의 접합기술의 주류가 되고 있다.

땀질 재료의 대표적인 것으로 Ag-Cu-Ti계, Cu-Sn-Ti계, Co-Ti계, Ni-Ti계, Al 합금계 등이 있다. 그 중에서도 Ag-28wt%Cu-(1~3)wt%Ti (은 땀질 재료에 티탄을 첨가한 합금)은 가장 많이 사용되고 있다. 접합계면 강도는 모재의 강도나 땀질 재료의 두께에 의존하며, 질화규소 등에서 강한 경우에는 500MPa를 넘는다.

Fig. 5에는 Si_3N_4 를 활성금속 땀질한 경우의 전형적인 계면조직을 나타내었다. 계면에는 Si_3N_4 측으로부터 얇은 TiN 층과 Ti_5Si_3 층 또는 M_6N (M:Ti, Si, Ag, Cu)의 질화물이 생기며, 땀질 재료 층은 Ag와 Cu-Ti의 공정조직이 된다⁹⁾. 이와 같이 세라믹스가 질화물이면 세라믹스 측으로부터 제1층째에 TiN이 생기며, 탄화물이면 TiC, 산화물이면 TiO가 형성된다. 이들 산화물은 부정비화합물이며 금속 액체와의 젖음은 양호하다. 이 땀질 재료는 대부분의 세라믹스에 대하여 유효하다. 대기 중에 있어서 이 땀질 재료의 사용 상한 온도는 은 땀질 재료와 같으며 내열강도와 내산화성의 점으로부터 대략 500°C이다⁹⁾.

알루미늄이나 그것의 합금은 소프트한 메탈일 뿐만 아니라 땀질 재료로서도 유효하다. 기본적으로는 알루미늄 자체가 활성이기 때문에 합금 원소의 첨가는 필요하지 않는 경우가 많다. 강도로서는 땀질 재료 층의 두께가 얇

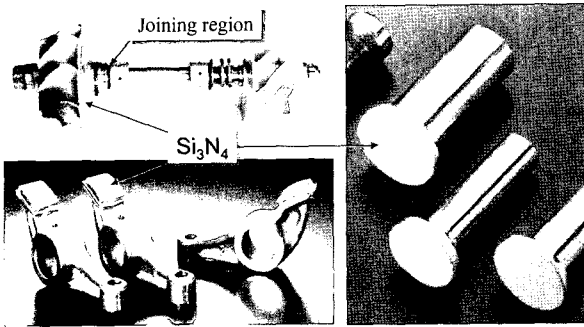


Fig. 6. Si₃N₄/steel joints of turbo-charger rotor, tappet, and rocker arm for vehicles.

을 때에 질화규소에 대하여 500MPa 정도가 얻어진다. 이 강도는 모재 강도에 의존하는 것으로서 강한 세라믹스를 사용하면 더욱 강도가 높아진다.

전자재료와는 달리 구조재료 분야에서는 접합기술의 실용화 예는 매우 적지만, Ag-Cu-Ti계의 활성금속으로 접합한 예가 몇 가지 발견되었다. 자가용 차에 실용화된 질화규소재 터보차저 로터(질화규소재의 날개를 구리의 축에 접합)나 로크 암에의 응용, 타페트에의 응용 등은 이것의 대표적인 것이다. Fig. 6에는 이들에 대한 예를 나타내었다.

최근, 유리의 접합에 무연(Pb-free) 뿔질에 활성금속을 이용한 마찰 용접법이 개발되었다⁷⁾. 이 방법은 진공 2중 유리의 접합법으로써 개발된 것으로 고속, 고강도, 기밀성 등을 특징으로 하고 있다. 용접뿔납은 Sn-Zn 계 활성금속이 미량 첨가된다.

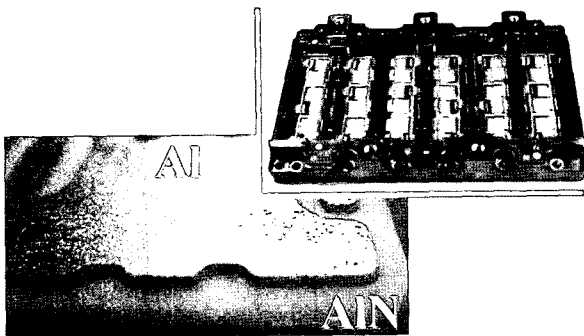


Fig. 7. AlN/Al joint fabricated by SQ process and IGBT for hybrid car.

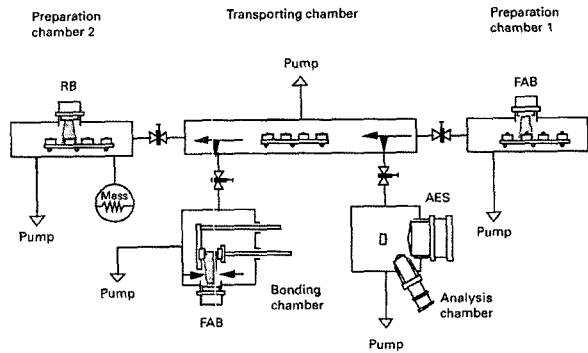


Fig. 8. Schematic illustration of Surface activated bonding process¹¹⁾.

2.5 고압주조접합법 (SQ 접합법)

알루미늄을 고압주조에 의해서 세라믹스에 직접 접합하는 방법이 개발되었다^{8,9)}. 이 방법에서는 고압하에서 계면 접촉하는 금속 용탕의 산화막 제거효과를 이용한 것이다. 먼저 접합된 부품재료와 금형이 어떤 온도로 예열된다. 이 온도는 금형이 250~600°C, 세라믹스는 500~800°C의 범위이다. 한편, 알루미늄 용탕을 700~800°C에서 용해 유지한다. 부품을 금형에 세트하고 알루미늄 용탕을 주입하여 10~100MPa으로 가압한다. 용탕은 고압을 낮추는 즉시로 응고한다. 부품을 금형으로부터 꺼내어서 냉각하여 종료한다. 이와 같은 일련의 조작은 모두 대기 중에서 실시 가능하다. 세라믹스에 열충격이 걸리지 않는 예열온도 조건을 설정할 필요가 있으며, 하이브리드 자동차 등의 IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)가 실용화되어 있다 (Fig. 7).

2.6 고상 접합법

계면을 녹이지 않고 접합하는 방법을 고상접합이라고 한다. 핫프레싱(hot-pressing) 등에 의한 1축 가압이나 열간 정수압 등에 의한 등방가압을 사용하는 방법이 주가 되지만 마찰압 접합 등도 시도되고 있다. 고상 접합법은 뿔납이나 뿔질재료 등 용점이 낮은 재료를 개재하지 않으므로 내열성이 우수한 특징을 나타내지만 반대로 형상의 제약, 비용이 높은 등의 결점이 있다. 산업계에서의 사용실례는 적으며, 단품적인 이용에 한정되고 있다.

특수한 고상접합의 방법으로서, Fig. 8에 나타낸 진공

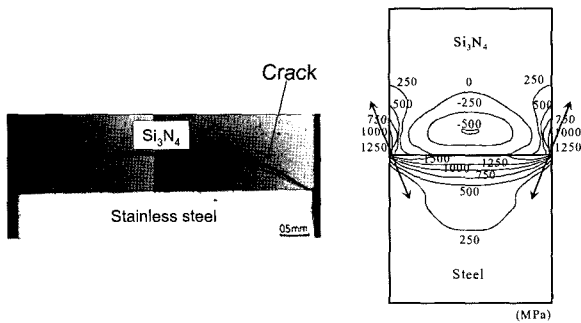


Fig. 9. Thermal stress distribution calculated by FEM and crack induced by thermal stress on cooling from joining temperature.

중에서 비착재(非着材)의 표면을 이온으로 쏘아서 활성화시켜 접합하는 상온 활성화 접합도 개발되고 있다^{10,11)}.

양극접합법도 고상접합법의 특수한 예로써 분류할 수 있으나 최근에는 MEMS에의 적용이 진행되고 있다¹²⁾. 우리와 실리콘의 접합에서는 접합의 저온화가 가능한 한편으로 땀질 재료를 사용하지 않으므로 내열성이 양호하다.

3. 열응력의 완화기술

소재간의 열팽창계수의 차이에 의해서 생겨나는 열응력의 문제는 세라믹스와 금속의 접합에 있어서 피할 수 없는 난제 중의 하나이다. 예를 들면, 계면의 결합강도가 높은 경우에도 열응력이 있는 경우에는 접합 프로세스 냉각과정에서 세라믹스 속에서 부서져버리는 수가 있다. Fig. 9는 이것의 전형적인 예로서 계면강도는 강하지만 냉각 중에 높은 열응력이 발생하기 때문에 세라믹스 측으로 돔(dome)상의 균열이 진전하는 모습을 나타내고 있다. 실제의 접합체 제품에 발생하는 열응력을 평가하는 것은 어떤 형상의 제품을 제작한 경우에 그 열응력이 유효하게 경감되고 있는가를 자세히 살펴보기 위해서 필요하며 계면형성과 함께 접합기술 확립을 위한 하나의 키포인트(key point)가 된다. 열응력을 이해하기 위해서는 실측과 유한요소법(FEM 또는 CAE) 등의 계산기 시뮬레이션의 2가지가 필요하다.

열응력은 접합면 사이즈에 의존하는 경향이 있다. 결국 사이즈의 증대와 함께 열응력은 확실히 커진다. 열응

력이 큰 경우에 접합강도가 낮아지는 것은 당연하다고 말하고 있으나 시험 샘플 수를 많이 취하면 평균강도는 낮아지지만 그 중에는 높은 강도를 가진 시험편을 얻는 경우도 있다. 이것은 접합후의 냉각과정에서 내부에 결합이 형성되는 확률이 높아지며 얻어지는 강도의 분산을 증가시키기 때문이다. 또한 당연히 접합체의 사용 중의 열피로에 의해서 같은 현상이 일어나는 것에 주의할 필요가 있다.

접합체에 대한 열응력의 악영향을 경감하기 위해서는 접합체 전체의 내부응력을 경감할 수 있으면 좋다는 것은 말할 것도 없으나 오히려 계면 근방, 특히 세라믹스 측의 인장응력 성분을 저하시키는 것이 중요하다. 이것은 세라믹스가 압축응력에 강한 반면, 인장에 약하기 때문이다. 열응력을 경감시키기 위해서는 가장 먼저 열팽창 차이가 작은 재료의 조합이 가장 바람직하다. 알루미늄/니오브 또는 코발트 합금계는 여기에 적합하다.

그러나 세라믹스의 접합대상이 되는 금속의 철(Fe)계나 니켈(Ni)계 합금인 경우가 많으며 여기에 가까운 열팽창률을 가진 세라믹스를 선택하는 것은 실제로 거의 기대할 수 없다. 따라서 접합형상을 연구하는 방법이나 어떤 것이든지 중간층을 사용하는 방법이 채택되어야 한다. 세라믹스가 난가공성인 것으로부터 필연적으로 후자의 중간층을 사용하는 평면의 접합이 주류를 이룬다.

열응력을 완화시키기 위해서 다양한 중간층 구조가 고안되고 있다. Table 2에는 그 중에서 대표적인 것을 정리하였다. 그들 중에서 고강도 접합에 성공한 예는 연금속 중간층, 연금속/경(硬)·저팽창 금속 적층 중간층 등에서 얻어지고 있다. 단지, 전자의 경우 열피로를 입게 되는 고온재료에는 사용될 수 없으며 후자에서는 접합면적이 비교적 작은 것으로 한정되는 등의 결점이 있고, 아직도 개량의 여지가 있다고 할 수 있다.

세라믹스 측의 내부응력을 감소시키기 위해서는 열팽창율이 중간적인 층을 끼우는 것보다는 세라믹스에 가까운 값을 가지는 층이 효과적이다. 질화규소의 경우에는 열팽창계수가 매우 작기 때문에 중간층은 적층인 것이 필요하다. 자가용차에 탑재되는 세라믹스 터보차저는 질화규소의 날개를 강철로 된 축에 접합하기 때문에 니켈/

텅스텐/니켈의 3층 구조의 중간층을 채용하고 있다. 이와 같이 적층 구조의 중간층은 내열성을 증시하는 접합에 있어서는 유일하게 고강도를 보증하는 접합구조이다. 그러나 이 중간층은 10mm로부터 20mm 정도의 작은 접합면을 가지는 경우에는 유효하지만 열응력의 사이즈 효과에 의해서 더욱 큰 면적을 접합하는 경우에는 특별한 주의가 필요하다.

4. 결론

이 글에서는 일본에 있어서 세라믹스와 금속의 접합기술에 관하여 몇 가지의 실례와 함께 소개하였다. 세라믹스와 금속의 접합기술 그 자체는 기원전에 장식물이나 식기 등에서 실용화되었다고 말할 수 있다. 한편, 산화물 세라믹스에 대한 공업적 실용화가 진행된 것은 제2차 세계대전 후의 전자산업의 발전에 의한 것이며 비산화물계에 대한 공업적 실용화는 1980년대의 파인세라믹스의 붐(boom)에 동반한 것이다.

여기서 설명한 바와 같이 초고분해능 전자현미경 등을 사용하는 실제의 계면관찰이나 제1원리계산 등의 시뮬레이션으로부터 접합계면에 있어서 나노레벨에서의 현상을 해명하는 것은 매우 진전되어 있다. 응용기술에 있어서도 여러 가지의 방법이 개발되고 있으며 또한 무엇이 가능하고 무엇이 가능하지 않는지도 이해되고 있으며 기술의 선택에 그만큼 고민해야 할 어려움이 줄어들고 있다. 열응력 등의 과제는 실현 가능한 접합형태에 아직 제한이 있으며 접합체의 수명을 크게 좌우하는 인자인 것을 충분히 알아둘 필요가 있다.

세라믹스와 금속의 접합은 제품에 가까운 최종단계의 마무리 기술이다. 그 제품의 신뢰성을 여하히 높여서 부가가치를 주는 가는 매우 중요한 명제이며 계면형성과 동시에 열응력의 처리방법 등에 적절하고 확실한 판단을

하지 않으면 안 된다. 이 때문에도 접합의 과학적 기초에 대한 충분한 이해를 하는 것이 바람직하다.

참고문헌

1. 高橋俊夫 :セラミックス, **40**[6], 423 (2005).
2. K.Katayama, T.Watanabe, M.Matoba, N.Katoh: SAE Technical Paper Series, 861128(1986).
3. J. R. Floyd; *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 42, 65 (1963).
4. 株)トクヤマ技術資料より
5. A. H. Carim; *J. Am. Ceram. Soc.*, 73, 2764 (1990).
6. K. Sukanuma, K. Niihara, T. Fujita; *J. Less-Common Metals*, **158**, 59 (1990).
7. K. Sakaguchi, S. Domi, and K. Sukanuma: The 3rd International Symposium on the Science of Engineering Ceramics(EnCera04), The Ceramic Society of Japan, Osaka Oct. 31- Nov. 3, 2004
8. K. Sukanuma: *J. Mater. Sci.*, **26**, 6144 (1991).
9. X. S. Ning, K. Sukanuma: *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, **445**, 101 (1997).
10. 須賀唯知, 宮遲薫一, 高木秀樹, 日本金屬學會誌, **54**, 713 (1990).
11. N. Hosoda, Y. Kyogoku, T. Suga, *J. Mater. Sci.*, **33** 253 (1998).
12. 秦 昌平 :セラミックス, **41**[6] 429-33, (2006).

●● 菅沼克昭 (수가누마카츠아끼)



- 1982년 東北大學 박사 취득.
- 오사카대학 산업과학연구소 조수.
- 1986년 방위대학 조교수.
- 1996년 오사카대학 산업과학연구소 교수
- 산업과학 나노테크놀로지 센터장
- 현재, 경산성 저온매표준화 프로젝트 위원장