

세라믹/금속접합재의 열사이클피로에 따른 접합계면의 잔류응력분포 특성

박영철 · 김현수 (동아대)

*허선철 · 강제욱 (동아대원)

ABSTRACT

The ceramic has such high qualities as light weight, abrasion resistance, heat resistance compared with metal, but since it is breakable, it can't be used as structural material and it is desirable to joining metal which is full of toughness, but, according as the ceramic/metal joint is executed at high temperature, the joint residual stress develops near the joint sides in the process of cooling the high temperature down to the suitable temperature due to difference of the thermal expansion coefficient between ceramic and metal, and the joint residual stress lowers the fracture strength.

In this study, to ensure security and improvement of bending strength, I studies on see distribution shape of residual stress according to high thermal cycle, and the influence of thermal cycle and distribution shape of residual stress on joint strength.

1. 서 론

세라믹은 일반재료에 비하여 가볍고, 내마모성, 내식성, 내열성등이 우수하기 때문에 집적회로기판, 압전소자, 센서, 절삭공구, 단열재, 가스터빈등 고강도 및 내열성이 요구되어지는 구조물에 금속재료를 대신해서 세라믹의 적용이 활발히 검토¹⁻⁵⁾되어지고 있으나 가공이 어렵고, 내충격, 인장력등에 대단히 취약하기 때문에 일반 구조용 재료로서 사용하기에는 대단히 어렵기 때문에 세라믹과 금속의 접합이 요구되어지고 있다.

그러나, 세라믹/금속접합재는 접합시에 고온에서 접합되어지기 때문에 냉각시에 세라믹과 금속의 열팽창계수의 차이로 인하여 양재료의 소성구속에 의한 접합잔류응력이 발생하며, 이때 세라믹측에 발생하는 인장잔류응력은 접합재의 파괴강도를 크게 저하시키게 된다.

따라서 접합재의 잔류응력의 크기와 분포를 정확히 파악한다면 접합강도의 향상과 신뢰성을 충분히 확보할 수 있을 것이라 생각되어지며 X선에 의한 응력측정법으로 접합계면에서 발생하는 접합잔류응력을 측정함으로써 접합재의 잔류응력 분포에 관한 연구를 하고자 한다.

한편, 세라믹/금속재료를 구조용재료로 사용하기 위해서는 사용중에 발생할 수 있는 열사이클피로, 응력부식

균열, 크리프등 장시간 사용상 발생할 수 있는 문제들에 대해서도 충분히 검토되어야 한다.

따라서, 본 연구에서는 $Si_3N_4/STS304$ 접합재를 사용하여, 접합후에 200℃, 300℃, 400℃, 500℃에서 열사이클을 1사이클, 3사이클, 10사이클을 가하였을 때 잔류응력 분포의 변화를 명확히 밝히기 위하여 PSPC형 X선 측정장치를 이용하여 접합계면의 잔류응력 분포를 검토하였다. 또한, 4점굽힘 시험을 통하여 각 온도에서의 열사이클부하로 인한 접합재의 열화정도를 정량적으로 평가함과 동시에 파괴해석을 통하여 파괴기구를 명확히 밝혀냄으로서, 열사이클 온도와 열사이클 반복회수에 따른 잔류응력분포의 변화와 이러한 잔류응력이 접합재의 강도에 미치는 영향에 대하여 명확히 밝혔다.

2. 실험방법

2.1 시험편과 접합방법

접합재 시험편은 동을 중간층으로한 질화규소(Si_3N_4)와 오스테나이트계 스테인레스강(STS304)을 환성금속법을 이용하여 접합하여 제작하였으며, 시험편 형상과 치수는 Fig.1과 같다. 각 재료의 탄성계수값과 포와송비, 열팽창계수등 시험편의 재료특성은 Table 1과 같이 하였으며, 가공과정에서 발생하는 잔류응력을 제거하기 위

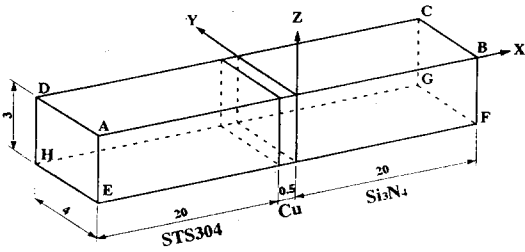


Fig.1 Configuration of specimen (unit:mm)

Table 1 Material properties of specimen

Brazing filler	Ti - Ag - Cu
Temperature	1073 K ~ 1123 K
Atmosphere	Vaccum, 1×10^{-5} torr
Inter layer	Cu (thickness 0.5mm)

Table 2 Conditions of joining

	Si3N4	Cu	STS304
E (GPa)	304	108	193
ν	0.27	0.33	0.3
α (/K)	3.06×10^{-6}	17.7×10^{-6}	16.5×10^{-6}

하여, 접합하기 전에 절화규소를 래핑가공 후 1000°C의 대기중에서 24시간 이닐링처리를 실시하였고, 스테인레스강은 연삭가공 후 900°C의 대기중에서 1시간 노멀라이징 처리를 실시한 후 접합하였다. 접합방법은 비교적 높은 강도와 신뢰성을 얻을 수 있는 활성금속법을 이용하였으며, 접합조건은 Table 2와 같다.

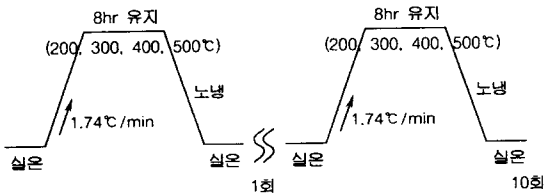


Fig.2 Geometry of heat cycle processing

2.2 열사이클 부하조건

접합재의 열사이클은 PIB실리콘이트 관상전기로를 사

용하여 200°C, 300°C, 400°C, 500°C에서 각각 열사이클을 가하였고, 이 열사이클과정의 모식도는 Fig.2와 같다.

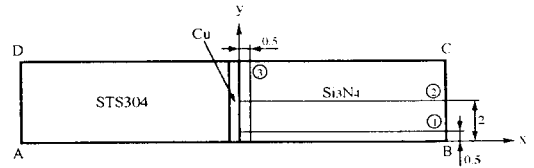


Fig.3 Measurement points of residual stress

2.3 X선 잔류응력측정방법

Fig.3은 접합재의 잔류응력을 측정하기 위한 측정위치를 나타내고 있다. 그림에서 보는것처럼 시험편 표면 세라믹부의 단부는 ①과 같이 $y=0.5\text{mm}$ 에서 x 방향을 따라 $x=0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7\text{mm}$ 인 점에 대하여 계면수직방향 잔류응력(σ_x)을 측정 하였고, 중앙선상은 ②와 같이 $y=2\text{mm}$ 에서 x 방향을 따라 $x=0.5, 1, 1.5, 2, 3, 5, 7\text{mm}$ 인 점에 대하여 계면수직방향 잔류응력(σ_x)을 측정하였다. 또한, 접합계면근방의 응력상태를 보다 정확히 파악하기 위하여 ③와 같이 $x=0.5\text{mm}$ 에서 y 방향으로 $x=0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5\text{mm}$ 에서 접합계면에 수직방향의 σ_x 를 측정하였다.

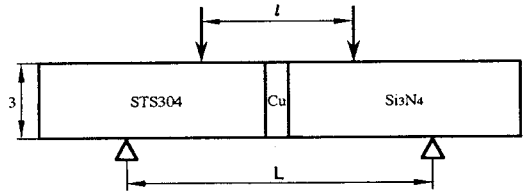


Fig.4 Geometry of 4-point bending test specimen

2.4 4점 굽힘시험

접합 후 열사이클을 부하하지 않은 시험편과 열사이클을 각 온도에서 1, 3, 10사이클을 부가한 가하여진 시험편에 대하여 JIS R1601¹⁹⁾에 준하여 대기중 실온에서 접합부가 중앙에 위치하도록하여 4점굽힘시험을 수행하였다. Fig.4 는 4점굽힘시험을 한 모식도를 나타내며 Cross head 속도는 0.5mm/min으로 조절하였으며, 최대 하중 P_{\max} 로부터 굽힘강도 σ_b 를 계산하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합계면의 잔류응력분포

Fig.5는 단부근방의($y=0.5\text{mm}$)의 x 방향에 있어서 계면 수직방향 잔류응력 σ_x 분포를 측정된 결과를 나타낸다.

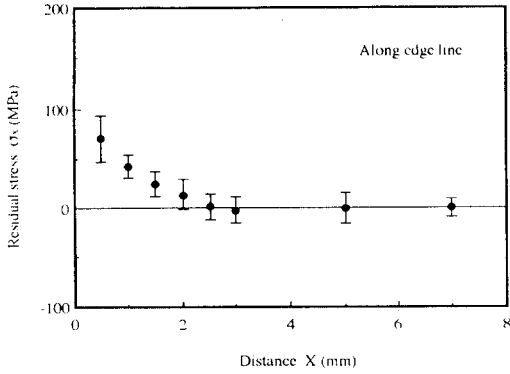


Fig.5 Distribution of residual stress σ_x along the edge line of the specimen (X-axis)

그림에서 보는바와 같이 접합계면 근방에서 최대인장응력값을 나타내나, 계면근방에서는 응력구배가 대단히 크기 때문에 계면에서 멀어짐에 따라 급격히 감소하여, 계면으로부터 약 2.5mm 떨어진 영역에서 압축잔류응력으로 반전한 후, 계면으로부터 약 4mm 떨어진 영역에서 최대압축잔류응력을 나타낸다.

Fig.6은 계면근방($x=0.5\text{mm}$)에서 y방향으로의 접합계면의 수직방향잔류응력 σ_x 분포를 측정된 결과를 나타낸다.

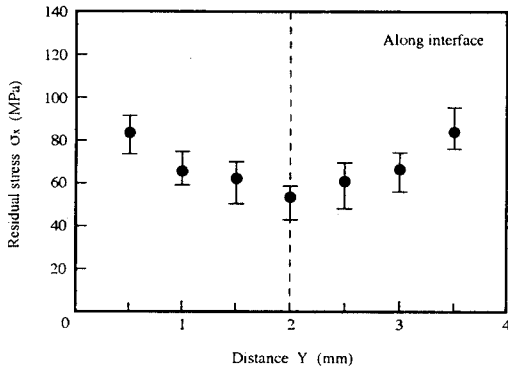


Fig.6 The variation of residual stress σ_x at the interface along the Y-axis ($x=0.5$)

다. σ_x 의 분포는 그림에서 보는 바와 같이 접합체의 양단부에서 최대인장응력을 나타낸 후 중앙부로 갈수록 인장응력은 점차 감소되는 것을 알 수 있으며, 그 분포 형상은 중앙선에 대하여 거의 점대칭이 된다는 것을 알 수 있다. 이상의 결과로부터 세라믹/금속접합체의 강도를 크게 저하시키는 인장잔류응력은 계면에 가까울수록 중앙부보다도 단부에서 크게 발생된다는 것을 알 수 있다.

Fig.7은 집합후의 잔류응력 측정값과 각 온도 200℃,

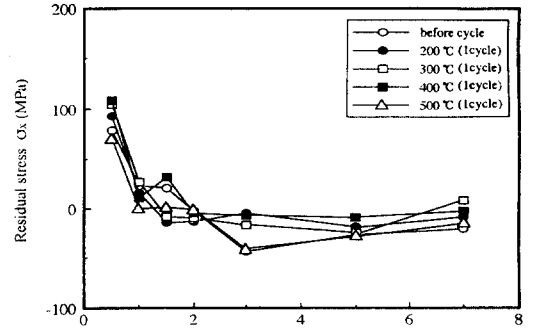


Fig.7 Distribution of residual stress σ_x along the center line at various temperature

300℃, 400℃, 500℃의 1사이클 부가한 후의 시험편에 대하여 중앙선상($y=2\text{mm}$)의 x방향의 계면수직방향 잔류응력값 σ_x 의 분포를 측정된 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 열사이클 부기 후의 잔류응력분포는 열사이클 부기전과 거의 동일한 분포로 계면에 가까울수록 높은 잔류응력값을 나타내고 있다. 즉, 최대인장잔류응력값을 나타내는 $x=0.5\text{mm}$ 에서의 잔류응력값을 비교하여 보면 열사이클부하에 의해 잔류응력의 전체적인 분포형태는 거의 동일하나, 각 부위의 잔류응력 절대값은 변화가 나타남을 알 수 있다.

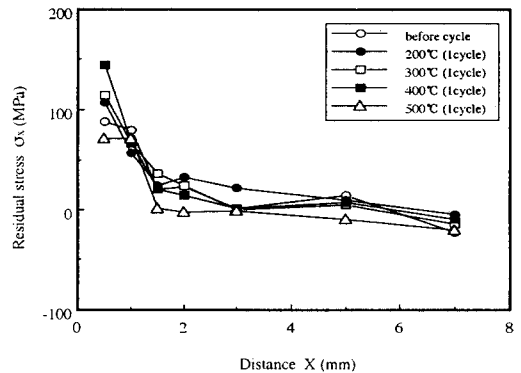


Fig.8 Distribution of residual stress σ_x along the edge line at various temperature

Fig.8은 집합 후의 잔류응력값과 각 온도(200℃, 300℃, 400℃, 500℃)에 있어서의 1사이클 후의 세라믹 단부($y=0.5, x=0.5\sim 7\text{mm}$)의 잔류응력값을 나타내고 있다. 단부의 경우에도 앞의 중앙선과 같이 열사이클 후의 잔류응력분포 형태는 열사이클 부하전과 거의 유사하게 분포하고 있으며, 200℃, 300℃, 400℃의 경우 열사이클 온도가 증가함에 따라 계면근방에서 발생하는 최대인장잔

류응력값은 열사이클 부하에 의하여 증가하며 그 증가의 폭은 열사이클 온도가 높아질수록 커진다는 것을 알 수 있다. 이는 중간층으로 사용되는 동의 탄소성특성, 특히 변형률 경화의 영향이라 생각된다.

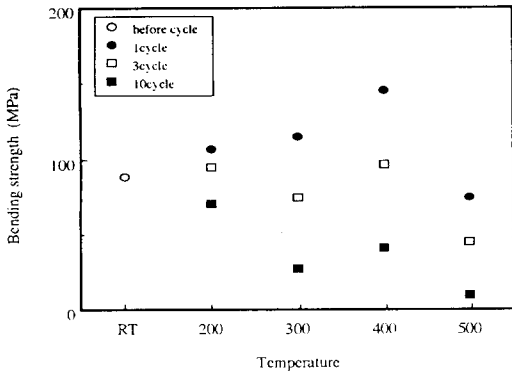


Fig.9 Distribution of residual stress σ_x along the edge line at various temperature

Fig.9는 앞의 파괴의 기점이 되는 집합계면근방에서 최대인장 잔류응력값을 나타내는 단부의 계면근방 ($y=0.5\text{mm}$)의 최대인장 잔류응력값을 중심으로 하여 각 온도의 열사이클 부하에 의한 잔류응력의 변화를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 200°C, 300°C, 400°C, 500°C 모두 3사이클, 10사이클로 갈수록 잔류응력은 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 사이클이 증가할수록 동의 소성변형량의 증가와 더불어 Brazing Filler의 열화로 인하여 소성구속의 정도가 적어져 응력의 해방이 생기기 때문으로 생각되어지며 이에 대한 연구는 Brazing Filler와 세라믹의 화학적 반응에 의한 석출물, 화합물 등의 조성과 병행해서 연구되어야 한다.

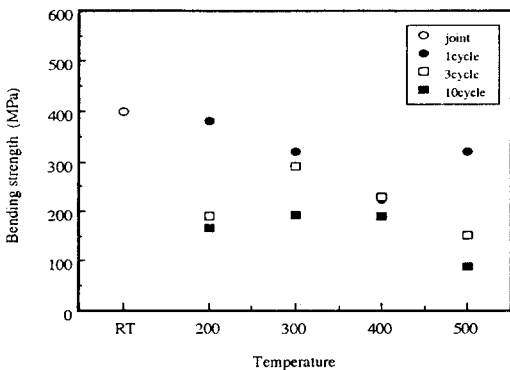


Fig.10 The relation between bending strength and various temperature

3.2 굽힘시험에 의한 파괴 강도

3.2.1 열사이클 부하에 따른 굽힘강도

Fig.10은 열사이클 부하에 따른 굽힘강도의 변화를 검토한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 집합체의 파단 강도는 열사이클을 부하하지 않은 재료에 비해 부하에 의하여 저하한다는 것을 알 수 있다. 즉, 열사이클 부하 온도가 높을수록 굽힘강도는 점차 저하하고 있다는 것을 알 수 있으며, 또한 사이클부하횟수가 증가 할수록 굽힘강도 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 이는 1사이클의 경우 Fig.8의 결과에서 보듯이 잔류응력의 결과에 따라 굽힘강도가 저하한다는 것을 알 수 있으며, 3사이클 이상 고온으로 갈수록 응력완화제로 있는 동과 Brazing filler의 열화에 의해 강도가 저하할 것으로 생각된다. 그러나, 200°C의 경우 3사이클, 10사이클의 경우 다른 온도에 비해 굽힘강도가 많이 저하하는 것은 파단형태에 따르는 것으로 질화규소와 최인접반응생성물 사이의 계면에서 파괴가 일어나는 파단형태이므로 강도저하가 큰 것으로 생각된다.

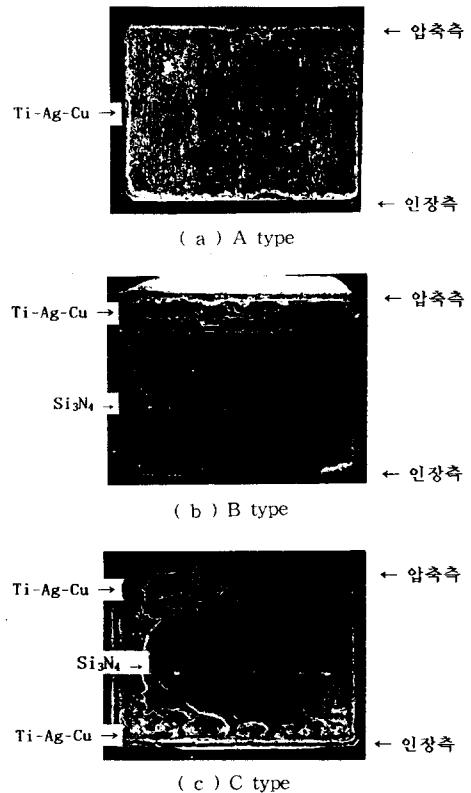


Fig.11 Photo of fractured plane by 4-point test

3.3 파면형태

Fig.11은 굽힘시험후의 파단면을 200배 확대한 파단면 사진을 나타내고 있으며 그림에서 보는 것처럼 파괴형

태는 대략 A, B, C형의 3가지 파괴형태로 대별할 수 있다. 즉, (a)는 균열이 구리와 세라믹의 계면에서 균열이 시작되어 직선적으로 계면을 따라 진전하여 결국 최종파단까지도 구리와 세라믹의 경계부분에서 일어나는 A형태이다. 이에 반하여 (b)는 균열이 계면근방의 세라믹측에서 발생하여, 즉, 최대인장잔류응력이 발생하는 세라믹부분에서 균열이 발생하여 세라믹측을 따라 진전한 후 약 전체길이의1/3정도 균열이 진전한 후 다시 접합계면으로 천이한 후 최종파단은 동과 세라믹의 경계부분에서 파단하는 B형태이다. 그리고, (c)는 균열이 구리와 세라믹의 계면에서 발생되어 계면을 따라 진전하다가 세라믹측으로 천이하여 균열이 4/5정도 진전한 후 최종파단은 다시 구리와 세라믹의 계면부분으로 이동하여 최종파단에 이르는 C형태이다.

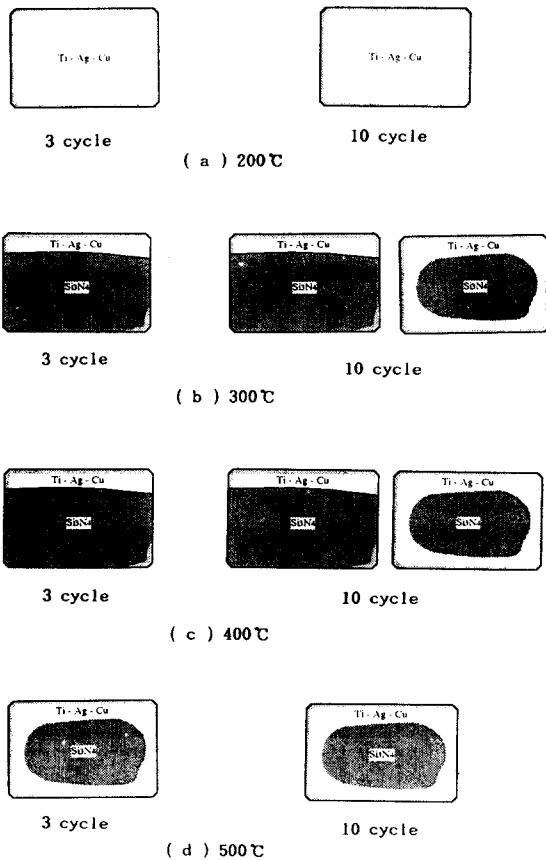


Fig.12 Geometry of fractured plane in various temperature

Fig.12는 각 온도와 열사이클 부하에 따른 파괴형태를 표시하고 있다.

200 °C의 경우는 파괴형태가 앞의 Fig.14의 A type 으로 나타났다. 3사이클, 10사이클 모두 파괴형태는 동일한 파괴형태로 나타났다. 300 °C 열사이클 부하의 경

우는 3사이클에서는 파단형태가 B type 이나 10사이클에서는 B type이나 C type의 2가지 파괴형태가 혼재되어 있는 것을 알 수 있다. 또한, 400 °C의 경우는 300 °C와 마찬가지로 3사이클에서는 B type, 10사이클에서는 B type, C type이 혼재되어 있다. 500 °C의 경우는 3사이클, 10사이클 모두 C type형태의 파괴 형태가 되었다. 따라서 저온에서는 A type, 비교적 저온·고사이클(300°C, 400°C, 3사이클)의 경우는 B type의 파단면, 고온·고사이클(500°C, 3사이클, 5사이클)에서는 C type형이 나타난다는 것을 알 수 있다. 또한, Fig.10의 강도결과와 비교하여 보면 대체적으로 C type의 파괴형태가 파단강도가 저하된다는 것을 알 수 있다.

4. 결론

세라믹/금속 접합체의 실사용 조건을 고려한 열사이클 부하에 따른 강도열화현상을 검토하기 위하여 Si₃N₄/STS303 접합체의 잔류응력 및 분포형태를 연구하였으며 또한 4점 굽힘시험을 통하여 잔류응력과 열사이클이 굽힘강도에 미치는 영향에 대하여 검토, 고찰한 결과는 다음과 같다.

- 1)접합체의 접합잔류응력은 접합계면에 있어서 양단부로 갈수록 접합잔류응력값은 증가하였다.
- 2)접합체에 있어서 접합체의 파단강도에 영향을 미치는 접합잔류응력값은 200°C, 300°C, 400°C의 경우는 접합 후 1사이클까지는 증가하나 3사이클, 10사이클등으로 열사이클이 증가함에 따라 잔류응력값은 감소하였다.
- 3)접합체의 잔류응력값과 4점굽힘강도값과의 상관관계는 접합후 그리고 1사이클까지는 잔류응력값이 증가함에 따라 굽힘강도가 감소하며, 고온, 고사이클로 갈수록 잔류응력값이 감소하고 굽힘강도 또한 감소하기 때문에 고온, 고사이클로 갈수록 굽힘강도는 잔류응력값보다는 계면의 산화물, 석출물등의 영향으로 강도가 감소한다는 것을 알 수 있다.
- 4)접합체의 파단형태는 대략 3가지 정도로 구분할 수 있고 저온, 저사이클의 경우에는 A type 파괴형태가, 저온, 고사이클의 경우에는 B type, 고온, 고사이클로 갈수록 B, C type형의 파괴형태가 존재한다가 (c)형으로 천이한다는 것을 알 수 있었다.

후 기

본 논문은 1995년도 산학협동재단 학술연구비에 의하여 수행하였으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.