

〈논 문〉

경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열응력해석 (2) — 소결재 —

임 재 규* · 송 준 희*

Thermal Stress Analysis of Functionally Graded Ceramic/Metal Composites (II) — Sintering Material —

Jae-Kyoo Lim and Jun-Hee Song

Key Words: Functionally Graded Material(경사기능재료), Thermal Stress Analysis(열응력해석), Sintering(소결), Residual Stress(잔류응력), Axial Stress(축응력), Radial Stress(반경응력), Hoop Stress(원주응력), Shear Stress(전단응력)

Abstract

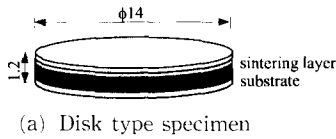
The development of a new material which should be continuously use under severe environment of very high temperature has been urgently requested. For the development of such super-heat resistant materials, the main problem is not only to make the superior thermal barrier properties but also to actively release thermal stress. So, a new concept of functionally graded material (FGM) has been proposed to overcome this problem. A composition and microstructure of FGM are varied continuously from place to place in ways designed to provide it with the maximum function of mitigating the induced thermal stress. So, FGM can be applied in the aerospace, the electronic and the medical field, etc.. In this study, thermal stress analysis of sintering PSZ/NiCrAlY graded material was conducted theoretically using a finite-element program. The temperature condition was sintering temperature assuming a cooling-down process up to room temperature. Fracture damage mechanism was analyzed by the parameters of residual stress. It could be known that FGM provided with the function of mitigating the induced thermal stress.

1. 서 론

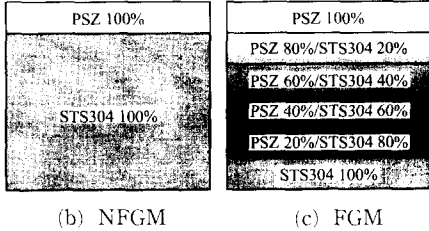
우주항공분야, 핵융합로, 고압 터빈요소 등을 비롯하여 모든 산업분야에 있어서 가혹한 실기환경의 극복을 위한 신소재의 요구가 절실해지고 있다. 우주선의 외표면 및 엔진내벽, 가스터빈 날개 등은 표면층이 초고온의 산화성 분위기이고, 냉각제층은

저온의 유체에 노출되어 재료의 두께방향에는 큰 온도차와 더불어 열응력이 발생한다. 이와 같은 가혹한 환경에서 사용되는 재료는 우수한 내열특성 및 내구성 등이 요구되기 때문에 종래의 재료로 모 든 특성을 만족시키는 것이 곤란하다. 따라서 새로운 초내열재료를 개발하는 것이 필요하다. 이와같은 요구에 의해 새로운 개념의 재료가 출현하였는데 이것이 경사기능재료(functionally graded material; 이하 FGM)이다.^(1,2) FGM은 수천도의 고온 환경에 접하는 곳에 세라믹을 배치하여 내열성을

*회원, 전북대학교 기계공학부



(a) Disk type specimen



(b) NFGM

(c) FGM

NFGM	Thickness (mm)	FGM	Thickness (mm)
PSZ 100%	0.2	PSZ 100%	0.2
		PSZ 80%/STS 304 20%	0.2
		PSZ 60%/STS 304 40%	0.2
STS 304 100%	1.0	PSZ 40%/STS 304 60%	0.2
		PSZ 20%/STS 304 80%	0.2
		PSZ 304% 100%	0.2

Fig. 1 Disk type model by sintering process

부여하고 냉각을 행하는 측에는 금속재료를 조합하여 열전도성과 기계적 강도를 부여한다. 이 세라믹과 금속사이의 조성이나 조직, 공극률이 최적으로 분포되도록 재료합성을 실시하여 열응력을 적극적으로 완화시킨다고 하는 것이 목적이다. (3-5)

FGM의 개발은 단순히 열팽창 특성을 높이는 것만은 아니고 열응력을 적극적으로 완화시켜 큰 온도차에도 견디는 재료를 제작하는 것이다. 또한, 열차폐코팅의 기본적인 파괴모드를 살펴보면 FGM을 구성하는 세라믹과 금속사이의 계면에서 발생하는 계면박리(delamination)현상과 세라믹부분의 미소크랙(microcrack), 수직크랙(vertical crack), 탈락(spallation)파괴 등이 존재한다. 그리고 소결재에 있어서는 제조시의 온도변화로 인한 열응력의 발생으로 잔류응력이 생기고 내부에 크랙이 형성되어 건전한 재료를 제작하는데 어려움이 있다. 특히, 파괴는 열부하에 따라 가장 취약한 금속-세라믹 공유영역 근방의 세라믹내에서 주로 극심하게 발생한다. 이러한 문제점을 해결하지 않고서는 재료의 내구성과 신뢰성은 확보되기 어렵다. (6-8)

세라믹/금속 복합재료는 여러 가지의 제작기술에

의해 얻어질 수 있는데 소결법은 다른 방법에 비해 두꺼운 재료를 만들 수 있는 것이 큰 특징이다. 소결재는 원료분말을 조합해 잘 혼합하고 압형내에 적층충진하여 압축성형해서 성형체를 소결해 얻어진다. 소결시의 가장 큰 문제점은 금속과 세라믹 분말의 소결평형이다. 혼합분말의 소결 수축량 조절과 적절한 소결조건이 구해지지 않으면 건전한 소결체를 얻기가 어렵다. (1)

따라서, 본 연구는 제조시에 발생하는 열응력의 분포를 평가하고 열충격실험에 대한 내열충격성을 비교하여 건전한 재료가 개발되도록 조성 및 조직을 구상하는 최적설계에 이바지하는 것이 목적이다. 이같은 열응력해석은 실험에서 얻은 기초적인 자료를 바탕으로 실제 실험에 더욱 근접된 이론적 모델해석을 행할 수 있으며, 주로 재료설계부분에서 중요하게 취급된다. 소결법에 의한 세라믹/금속 복합재료의 해석모델은 비교적 소결이 용이한 지르코니아/스테인리스강이며, NFGM과 FGM의 2가지 형태이다. 해석은 범용 유한요소해석 program인 MARC를 사용하고, 원반형의 시편 모델에 있어서 각 응력방향에 대한 잔류응력의 향으로 열응력분포를 조사하였다. (9-10)

2. 시험편 및 해석방법

2.1 시험편

해석에 사용될 시편의 모델은 Fig.1에 보이는 것처럼 부분안정화 지르코니아(partially stabilized zirconia ;이하 PSZ)인 $ZrO_2-8 wt\% Y_2O_3$ 와 STS 304를 구성재료로 하고, 이들 분말에 의해 적층되어 예비성형된 재료를 고온 소결노에서 소결시켜 제작되는 2가지의 종류이다. 하나는 PSZ와 STS 304를 직접 집합한 무경사재(NFGM)이고, 다른 하나는 PSZ와 STS 304의 두 성분을 체적퍼센트(0%, 20%, 40%, 60%, 80%, 100%)에 따라 경사화한 FGM이다. 시편의 외관은 Fig.1의 (a)와 같이 원반상의 형태로 직경은 14 mm이고, PSZ와 STS 304로 구성되는 소결층의 전체 두께는 1.2 mm이다. NFGM의 두께는 PSZ층이 0.2 mm, STS 304층이 1.0 mm로 구성되어 있으며, FGM은 PSZ층이 0.2 mm, PSZ와 STS 304로 혼합된 경사층이 각각 단계별로 0.2 mm씩 4단계로 0.8 mm, STS 304층이 0.2 mm로 구성되어 있다. 그림의 (b)와 (c)는 원반형의 단면을 도식적으로 나타낸 것이며

하단부의 표는 각 조성층의 사양을 제시하고 있다.

2.2 유한요소해석

열응력해석 장치는 범용 유한요소법 구조해석 프로그램인 MARC(k 5.2)를 이용하였다. 또한, MARC용 pre·post-processing program인 MENTAT (II ver. 2)의 환경에서 메쉬의 생성과 해석결과 출력 등을 행하였다. 해석모델은 2차원의 4변형 축대칭요소를 사용하였다. 이 유한요소법에 대한 프로그램의 기본식은 가상일의 원리에 근거를 두고 있다. 열응력해석의 알고리즘은 온도낙차 ΔT 가 부여된 때 선팅창률을 이용해 구한 열변형률을 초기 변형률로 도입하여 응력-변형률관계식을 얻고 가상일의 식을 사용하는 순서로 실행된다.

도입된 원반형의 모델은 두께방향으로 축대칭이기 때문에 Fig. 2에 제시된 바와 같이 소결층 두께 방향의 1/2 단면(사선부분)을 유한요소로 분할하여 실시하였다. 그림의 X좌표가 두께방향인 회전축이며 Y좌표는 반경방향을 나타낸다. 열응력해석의 인자인 잔류응력이 축응력, 반경응력, 원주응력, 전단응력의 성분들로 그림에 도시되어 있다. Fig. 3은 실제 해석에 사용한 메쉬의 형상을 찍은 (a) NFGM과 (b) FGM의 사진이다. 유한요소해석을 위한 메쉬모델에서 NFGM의 요소는 100, 절점은 121 개이고, FGM의 요소는 300, 절점은 341개이다. 메쉬의 생성에서 세라믹부분을 포함한 공유영역은 조밀한 간격으로 분할하였다. 입력한 물성치는 Table 1 과 같다.

열응력해석의 조건들을 살펴보면, 크게 NFGM과 FGM의 두 재료로 구별된다. 이들 재료들이 상온에서 가열된 후 최대 등온온도(소결과정의 최대

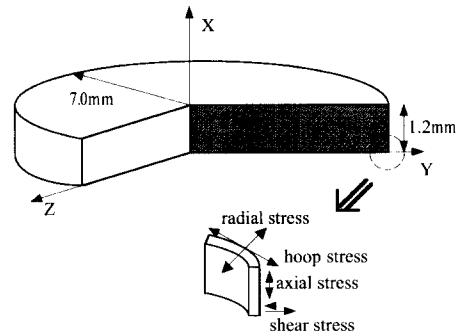
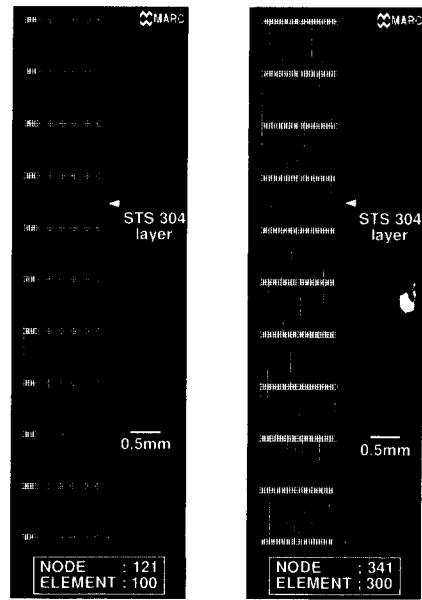


Fig. 2 The FEM model of NFGM and FGM for sintering material



(a) NFGM

(b) FGM

Fig. 3 Mesh generation for FEM analysis in sintering material

Table 1 Thermal and mechanical properties used for sintering material

Material	Properties	Young's modulus E (GPa)	Thermal expansion coefficient α ($\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C}$)	Poisson's ratio μ
PSZ 100%		190	13.3	0.310
PSZ 80%/STS 304 20%		169	13.7	0.299
PSZ 60%/STS 304 40%		190	15.3	0.277
PSZ 40%/STS 304 60%		182	17.4	0.278
PSZ 20%/STS 304 80%		188	190.0	0.276
STS 304 100%		144	21.1	0.265

온도인 소결온도)에서 실온까지 균일하게 냉각하는 때(온도낙차 ΔT)에 발생하는 열응력을 구하여 잔류응력이라고 했다.⁽¹¹⁾ 이 과정의 열응력분포는 정상상태에서 구하였다. 잔류응력의 인자는 축응력(axial stress) σ_a , 반경응력(radial stress) σ_r , 원주응력(hoop stress) σ_θ , 전단응력(shear stress) τ_{ra} 의 향으로서 평가하였다. 이 때의 최대온도는 본 재료계의 소결온도인 1350°C로 정하였고, 상온까지 냉각할 때의 자연대류과정에 대한 열응력분포를 조사하였다.

3. 해석결과 및 고찰

3.1 잔류응력의 분포

세라믹재료와 금속재료 중에 기계적 성질이 우수한 것은 금속재료이다. 또한 세라믹재료가 압축응력보다 인장응력에 매우 취약하다는 것도 기지의 사실이다. 따라서 본 해석에 있어서 세라믹부분과 공유영역을 중점적으로 분석하였고 압축잔류응력이 작으면 인장잔류응력의 측면에 초점을 맞추어 고찰하였다.

Figs. 4~11은 MARC의 해석결과에서 출력된 NFGM과 FGM의 결과이며, 잔류응력의 분포가 등고선의 형태로 나타나 있다. 그림의 왼편은 각 숫자에 해당하는 잔류응력의 값을 파스칼(Pa)의 단위로 나타내었다. 양의 부호를 갖는 응력은 인장응력성분(전단응력은 正)을 나타내고, 음의 부호는 압축응력성분(전단응력은 負)을 표시한다. 모든 그림은 전체 시험편을 대표하는 해석모델의 일부인 1/3부분을 확대하여 나타내었다. 그림의 상부에는 각 부분에 해당되는 조성층이 표시되었고 등고선은 잔류응력의 분포를 나타내고 있다. 따라서 등고선이 넓은 부분은 응력의 변화가 심하지 않고, 반면에 등고선이 조밀한 부분은 응력이 급격하게 변화되고 있음을 시사한다. 예를 들어, Fig. 5의 반경응력처럼 PSZ와 STS 304의 계면 근방은 등고선이 매우 밀집되어 있는데 이는 급격한 응력의 변화가 생기고 있음을 가리키는 것이다.

Figs. 4~7은 NFGM의 모델에서 발생한 잔류응력의 분포를 보인 것이다. 반경응력(Fig. 5), 원주응력(Fig. 6), 전단응력(Fig. 7)들은 PSZ 부분이 압축응력상태(전단응력은 負)에 있지만 축응력은 PSZ부분에 인장응력이 발생하였다. 금속부분의 모든 응력성분들은 인장응력과 압축응력이 동시에 존

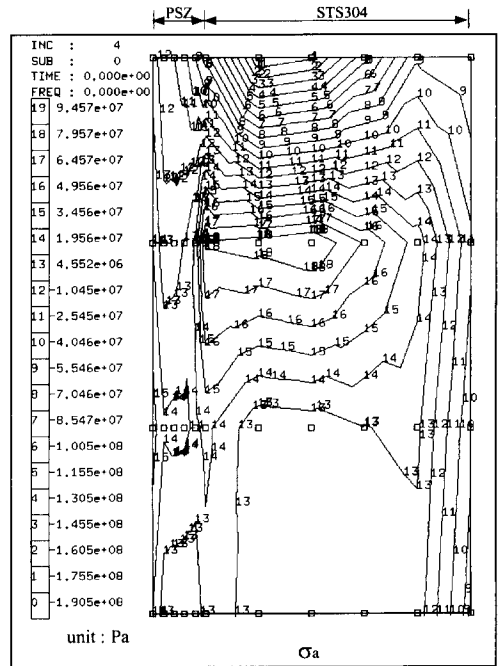


Fig. 4 Axial stress distribution in NFGM

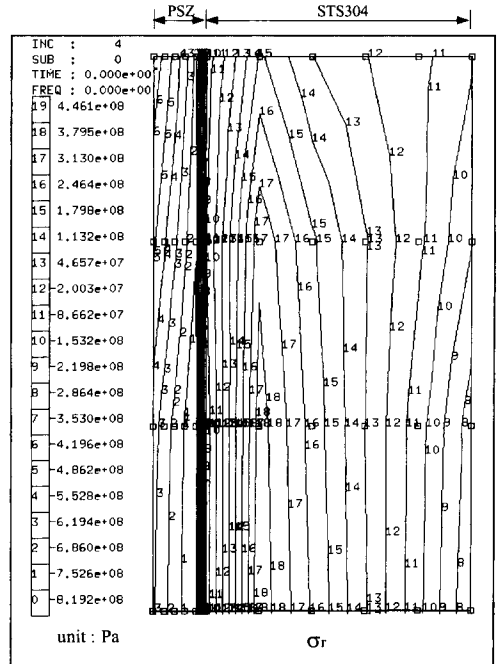


Fig. 5 Radial stress distribution in NFGM

재하였다. 또한, 재료계가 달라지는 공유역에서는 거의 모든 응력들이 급변하고 있어 계면의 분석이 더욱 더 중요하게 여겨졌다. Fig. 4의 축응력분포

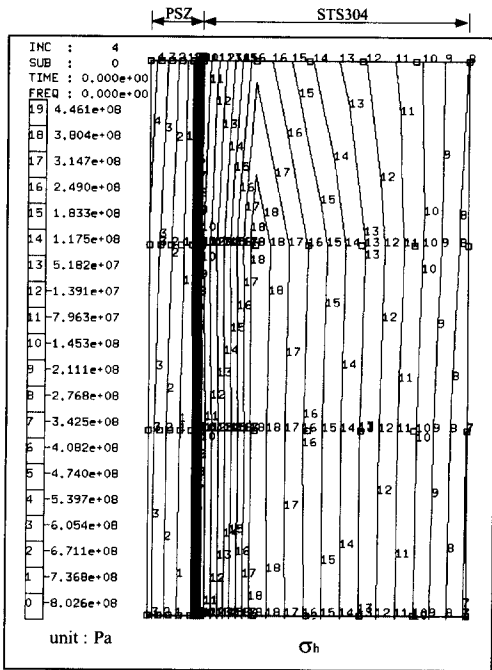


Fig. 6 Hoop stress distribution in NFGM

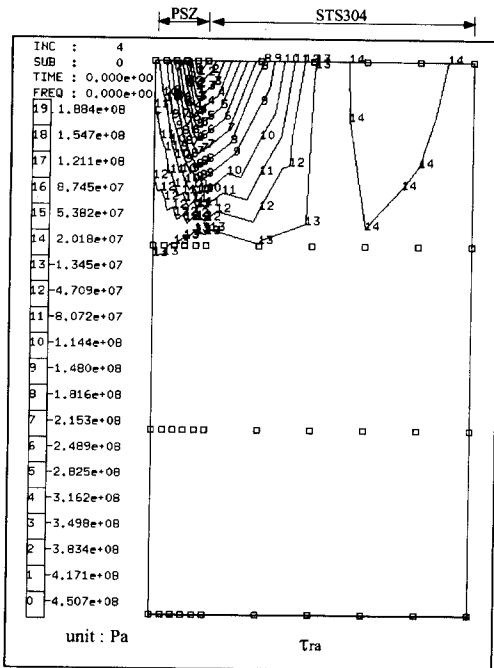


Fig. 7 Shear stress distribution in NFGM

를 살펴보면 세라믹인 PSZ부는 인장응력의 상태에 있으며 금속부분인 STS 304부는 압축응력에서 인장응력까지 분포되고 있다. PSZ 부분만을 관찰해

볼 때, 표면은 -10.45 MPa의 압축응력에서 49.56 MPa의 인장응력까지 변화되고 있으며, PSZ부와 STS 304부가 접하는 공유영역에서는 -70.46 MPa의 압축응력에서 94.57 MPa의 인장응력까지 분포하였다. 더구나 PSZ 영역중에서 공유면의 응력등고선이 가장 조밀하여 응력이 심하게 변화됨을 보이고 있다. 이러한 결과는 표면보다 공유면의 부분이 높은 응력상태에 놓이게 되어 재료의 파손이 용이해짐을 뒷받침하는 것이다. 이와같은 축응력성분의 인장응력작용으로 인하여 재료의 파괴형태는 공유면을 따라 크랙이 생성되는 계면박리(delamination)현상이 발생하게 될 것으로 판단된다.

Figs. 8~11은 FGM의 모델에서 발생된 잔류응력의 분포를 보이고 있다. Fig. 8의 축응력분포는 PSZ 영역내에 압축응력과 인장응력이 공존하고 있다. PSZ 100%의 표면에서는 36.21 MPa의 인장응력이 작용하고 계면에서는 -30.38 MPa의 압축응력에서 36.21 MPa의 인장응력까지 분포하였다. 경사층에서는 -41.48 MPa에서 63.95 MPa까지의 압축과 인장응력이 발생하였다. 주목할 만한 것은 여러 개의 서로 다른 조성층으로 구성되었음에도 불구하고 계면에서 급격한 응력변화를 보이지 않는다는 사실이다. 비록 인장응력성분이 존재하고 있지만 분포가 완만하며 NFGM의 축응력과 비교해서도 낮은 값을 지니고 있다. 따라서 축응력성분으로 인한 재료의 파손확률은 작다고 판단된다. Fig. 9는 반경방향의 응력인 반경응력분포로서 PSZ부의 표면은 244.1 MPa의 인장응력상태에 있으나 반면 계면에서는 -24.89 MPa의 압축응력상태에 있다. 경사층에서는 응력이 서서히 변화되고 있으며 -193.0 MPa의 압축응력에서 109.6 MPa의 인장응력까지 분포하고 있다. 계면에서의 심한 응력변화도 나타나지 않았다. Fig. 10의 원주응력은 반경응력의 분포와 거의 유사하며 PSZ부의 표면은 243.3 MPa의 인장응력상태에 있으나 반면 계면에서는 -27.16 MPa의 압축응력상태에 있다. 경사층에서는 응력이 서서히 변화되고 있으며, -196.2 MPa의 압축응력에서 108.0 MPa의 인장응력까지 분포하고 있다. 또한 계면에서의 심한 응력변화도 나타나지 않아 응력이 경사층의 도입으로 완화된음을 알 수 있다. 그러나 PSZ부의 표면에 반경응력과 원주응력이 높은 인장응력을 유발하기 때문에 이로 인한 재료의 파괴가 발생하게 될 것이다. 즉, 반경방향과 원주방향의 인장응력으로 인해 PSZ 영

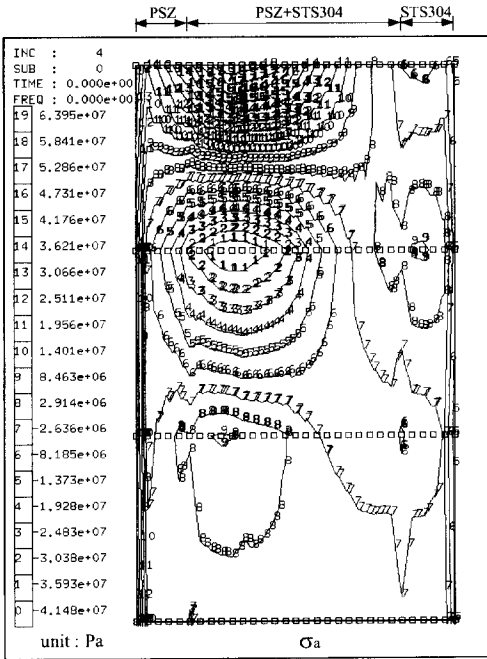


Fig. 8 Axial stress distribution in NFGM

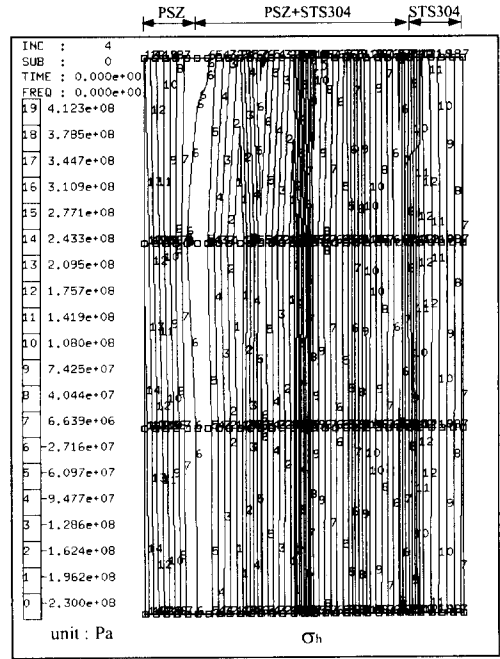


Fig. 10 Hoop stress distribution in FGM

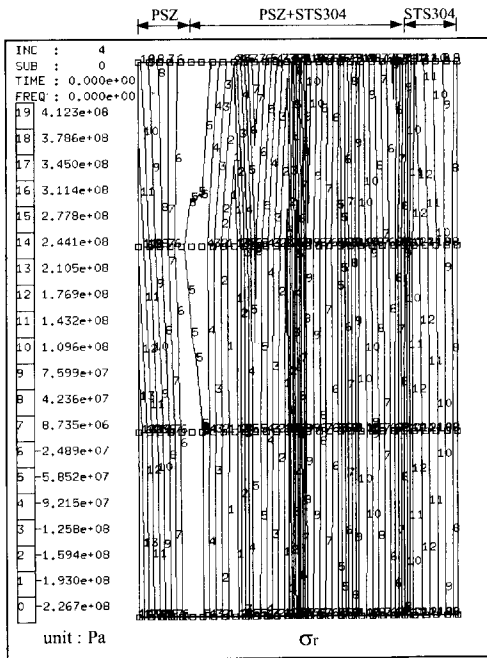


Fig. 9 Radial stress distribution in FGM

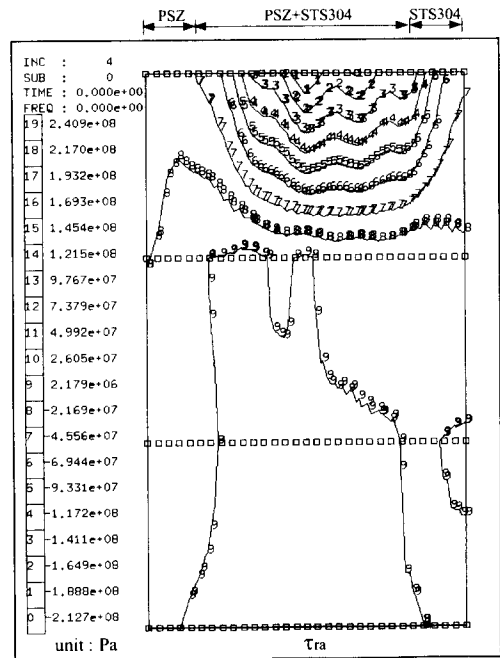


Fig. 11 Shear stress distribution in FGM

역에서 계면에 수직하고 두께방향에 평행한 수직크랙(vertical crack)이 성장할 것으로 판단된다. Fig. 11의 전단응력분포에서는 PSZ층에 낮은 수준

의 정응력(2.1 MPa)과負응력(21.7 MPa)이 발생하며, 전체적으로 응력의 구배는 완만하였다.

NFGM과 FGM 모델에 대한 잔류응력의 변화를

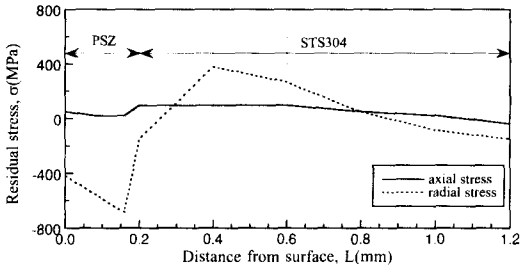


Fig. 12 Residual stress distribution in the direction of thickness of NFGM

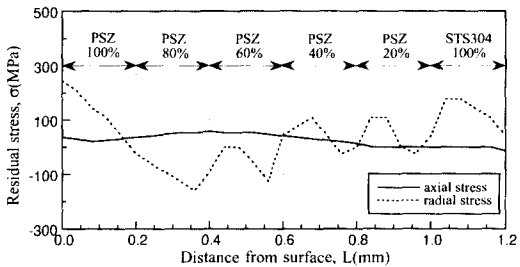


Fig. 13 Residual stress distribution in the direction of thickness of FGM

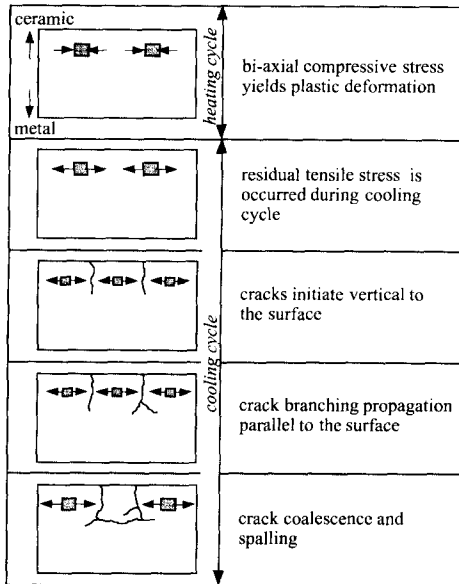


Fig. 14 Fracture mechanism of crack initiation and propagation in the top surface of NFGM and FGM during thermal shock

조사하기 위해서 축응력(실선)과 반경응력(파선) 성분을 중심으로 Fig. 12와 13에 각각 도시하였다. 이것은 Figs. 4~11의 응력분포에서 각 층의 최대 잔류응력을 두께방향(축방향)의 길이에 대해서 나

타낸 것이다. Fig. 12는 NFGM의 각 조성층에 대한 잔류응력의 분포를 보인 것이다. 축응력의 분포를 보면 PSZ층과 STS 304 층의 경계인 계면에 최대 인장응력 94.5 MPa이 작용하였다. 그러나 반경응력은 PSZ층에서 압축응력의 상태에만 놓여 있으며 STS 304 층에서 379.5 MPa의 높은 인장응력을 나타낸다. 세라믹재는 인장응력에 취약하고, 이에 비해 금속재는 인장응력에 강하며 파괴의 발생은 금속층보다 세라믹층에서 발생한다는 것은 기지의 사실이다. 따라서 PSZ층에서 인장응력이 발생시 재료의 파손이 발생하는 것으로 생각된다. 즉, 전술한 바와 같이 NFGM재는 축응력성분으로 인해 공유면에서 계면박리의 파괴형태를 유발시킬 것이다. Fig.13은 FGM의 각 조성층에 대한 잔류응력 분포이다. 축응력분포를 보면 PSZ 80%/STS 304 20%층과 PSZ 60%/STS 304 40%층 사이에서 58.4 MPa의 가장 높은 인장응력이 발생하였으며, NFGM의 것과 비교하면 작았다. 반면 반경응력은 PSZ 100%의 표면부에서 244.1 MPa의 최대 인장응력을 나타내었으며, STS 304의 성분이 많아질수록 압축응력에서 인장응력으로 서서히 변화하였다. 따라서 PSZ 100%의 표면부에 높은 인장반경응력의 발생으로 축방향에 평행한 수직크랙이 형성된 것으로 생각된다. 또한 FGM재에서는 각 층의 계면에서 응력의 큰 변화가 나타나지 않아 경사층의 응력완화를 확인할 수 있었다.

이러한 NFGM과 FGM의 모델을 비교해 보면, FGM이 NFGM보다 적은 열응력이 생성되고, NFGM의 계면박리 파괴에 비해 FGM은 수직크랙이 생성되어 파괴수준도 FGM이 낮다. FGM은 경사층을 도입하여 열응력 완화의 기능을 부여시키고 있다. 즉, NFGM에 비해 FGM이 우수한 내열특성을 가진다는 사실을 알 수 있다. 그리고 본 모델의 조건은 소결 제조시의 열응력의 생성에 관한 것이므로 이러한 사실에 비추어 보면 NFGM보다는 FGM이 제조가 용이하며 건전한 재료를 얻을 수 있다는 것을 내포하는 결과이다.

3.2 열응력 파괴기구

Fig. 14는 열충격시험 동안에 발생하는 파괴기구와 응력상태를 나타낸 모식도이다. 이 모식도는 열충격실험⁽¹²⁾과 유한요소해석에 의한 결과를 바탕으로 작성한 것이다. NFGM과 FGM은 top-coat인 세라믹부분이 가장 취약하기 때문에 세라믹영역에

국한하여 모식화한 것이다. 가열시에는 그림에서처럼 2축 압축응력상태에 있게 되며 냉각단계에 들어서부터 인장응력이 작용하게 된다. 인장응력으로 인해 미소크랙과 기공들이 합체되어 크랙은 생성되고 응력의 증가에 따라 크랙의 전파로 발전한다. 발달한 크랙들이 서로 합체되어 수직크랙과 계면박리로 성장하고 이들의 파괴가 복합되어 재료의 일부가 탈락되기에 이르러 결국 재료는 파손된다. 이러한 과정들이 열충격으로 인해 생성된 열응력의 영향으로 재료의 파손을 일으키는 전형적인 파괴기구이다. 냉각과정에서 생기는 인장응력의 방향에 따라 파괴의 형상은 다르게 나타난다. 즉, 코팅층의 두께방향에 평행한 응력성분은 이종재료의 접합력이 취약한 계면에서 응력집중이 생겨서 계면박리의 파괴를 유발한다. 그러나, 두께방향에 수직인 응력성분들은 재료의 기계적 성질이 약한 세라믹부분에서 수직크랙을 발생시킨다. 다시 말하면, 잔류응력의 특징에 따라 재료의 파괴모드를 추정할 수 있었다.

4. 결 론

본 연구는 제조시에 발생하는 열응력의 분포를 평가하고 열충격실험에 대한 내열충격성을 비교하여 최적설계에 제공하기 위해 열응력해석을 실시하였다. 해석방법은 유한요소법을 이용하고 각 응력방향에 대한 잔류응력의 향으로 열응력분포를 조사하였다. 해석모델의 재료는 세라믹/금속 복합재료이고 재료의 제조방법은 소결법에 의한 것이다. NFGM과 FGM에 대한 모델형상은 원주형 시험편이다. 유한요소는 4변형 축대칭요소를 사용하였다. 온도조건은 1350°C이며, 냉각시 발생하는 잔류응력의 분포를 축응력, 반경응력, 원주응력, 전단응력의 향으로 분석하였다. 이러한 해석으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 소결재의 모델에서 NFGM의 PSZ층은 축방향의 잔류응력이 인장응력상태에 있었으며 반경응력, 원주응력, 전단응력은 압축잔류응력이 분포하고 STS 304 부분은 인장과 압축응력이 같이 나타났다. 1350°C에서 실온으로 냉각함에 따라 계면에서 큰 인장응력의 작용으로 계면박리를 일으킨다고 생각된다.

(2) 소결재의 모델에서 FGM은 경사층의 도입으로 계면에서 응력이 완화되었으며, PSZ 100%의

표면에서 반경응력과 원주응력이 높은 인장응력상태에 있었다. 파괴형태는 PSZ의 표면에서 계면에 수직하고 두께방향에 평행한 수직크랙이 성장할 것으로 분석되었다.

(3) 소결재에서 FGM은 NFGM보다 낮은 수준의 열응력이 발생하였고 파괴도 FGM이 더 적게 발생한다. 이것은 열충격실험과 유사한 결론이 얻어졌고 그같은 분석이 유효함을 알았다.

(4) 열응력해석과 열충격실험을 바탕으로 재료의 파괴기구를 추정할 수 있었고, 파괴는 냉각시의 세라믹 부분에 인장응력의 작용이 주 원인이다. 또한 냉각과정에서 유발되는 인장응력의 방향성에 의존해 파괴형상이 달라지므로 잔류응력의 특징에 따라 파괴모드를 알 수 있었다. 그리고 FGM은 열응력 완화의 기능을 가지고 있으며, NFGM보다 우수한 내열특성을 나타냈다. 따라서 열응력이 적게 생성된 FGM이 NFGM보다 제조가 용이하며 더 견직한 재료임을 확인하였다.

참고문헌

- (1) 社團法人 未踏科學技術協會, 傾斜機能材料研究會, 1993, “傾斜機能材料,” 工業調査會.
- (2) 新野正之, 1990, “傾斜機能材料の開発,” 粉體および粉末冶金, 第37卷, 第2號, p. 242.
- (3) Niino, M., Hirai, T. and Watanabe, R, 1987, “The Functionally Gradient Materials,” *J. Jpn. Soc. Comp. Mater.*, Vol. 13. No.1. p. 257.
- (4) Gill, B. J. and Tucker, Jr. R. C, 1986, “Plasma Spray Coating Process,” *Materials Science and Technology*, Vol. 2, pp. 207~213.
- (5) 科學技術廣報財團, 1987, “複素化による機能發現と熱應力緩和のための基礎技術に関する調査報告書,” 昭和61年度 科學技術振興調整費.
- (6) 加藤眞一郎, 橋田俊之, 高橋秀明, 1991, “傾斜機能材料の熱應力緩和特性に及ぼす影響,” 日本機械學會論文集, 第57卷, 542號, pp. 2427~2431.
- (7) Miller, R. A. and Lowell, C. E., 1982, “Failure Mechanisms of Thermal Barrier Coatings Exposed to Elevated Temperatures,” *Thin Solid Films*, Vol. 95, pp. 265~273.
- (8) Wei, G. C. and Walsh, J., 1989, “Hot-Gas-Jet Method and Apparatus for Thermal-Shock Testing,” *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol. 72, No. 7, pp.

1286~1289.

- (9) 송준희, 임재규, 정세희, 1995, “경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열응력해석,” 한국복합재료학회 추계학술대회 논문집, pp. 275~280.
- (10) 송준희, 임재규, 정세희, 1996, “세라믹/금속 소결 경사기능재료의 열응력해석,” 한국복합재료학회 춘계학술대회 논문집, pp. 40~45.
- (11) 伊藤義康, 高橋雅士, 宮崎松生, 柏谷英夫, 1992, “傾斜組成コーティング部材の残留應力特性,” *J. Soc. Mat. Sci. Japan*, Vol. 41, No. 469, pp. 1575~1580.
- (12) 송준희, 임재규, 1996, “경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열충격특성에 관한 연구,” 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2134~2140.