

〈논 문〉

경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열응력 해석 (1) — 플라즈마 용사재 —

송준희* · 임재규** · 정세희***

(1996년 7월 27일 접수)

Thermal Stress Analysis of Functionally Graded Ceramic/Metal Composites (I) — Plasma Spraying Material —

Jun-Hee Song, Jae-Kyoo Lim and Se-Hi Chung

Key Words : Functionally Graded Material(경사기능재료), Thermal Stress(열응력), Finite Element Analysis(유한요소해석), Plasma Spraying(플라즈마 용사), Delamination(계면박리), Vertical Crack(수직크랙), Fracture Mechanism(파괴기구)

Abstract

A traditional notion of composites has been composed as a uniform dispersoid, but now it is proposed without regard to such rule with process development. Functionally Graded Material (FGM) consists of a new material design that is to make intentionally irregular dispersion state. In this study, thermal stress analysis of plasma spraying PSZ/NiCrAlY gradient material was conducted theoretically using a finite-element program. A formations of the model are direct bonding material(NFGM) and FGM with PSZ and NiCrAlY component element. The temperature conditions were 700°C to 1100°C assuming a cooling-down process up to room temperature. Fracture damage mechanism was analyzed by the parameters of residual stress.

1. 서 론

근래에 들어 가혹한 환경조건하에서 사용할 수 있는 신소재 개발이 요구되고 있다. 종래의 복합재료에서는 분산상의 분산상태가 균일한 것이 규칙으로 되어왔지만 더욱 더 새로운 소재개발을 지향하여 지금은 기존의 관념에 구애되지 않게 제안되고 있다. 즉, 분산상태를 의도적으로 불균일하게 한 이른바 ‘경사기능재료(functionally graded material ; 이하 FGM)’가 새로운 재료의 설계개념이라

할 수 있다.⁽¹⁾

FGM은 재료의 한쪽방향에서 다른 방향에 걸쳐 구성성분의 농도를 연속적으로 변화시킴으로써 성질을 연속적으로 경사화한 재료이기 때문에 여러분야의 극단환경에서 적용할 수 있다. 이것은 내열분야를 비롯하여 전기, 기계, 화학 등의 다방면에 이르러 경사기능화에 의한 신소재의 개발이 기대되고 최근에는 세계적인 주목을 받고 있다.

열응력 완화를 목적으로 한 경사기능재료의 개념은 수천도의 고온환경에 접하는 곳에 세라믹을 배치하여 내열성을 부여하고, 냉각을 행하는 측에는 금속재료를 사용하여 열전도성과 기계적 강도를 부여한다. 이 세라믹과 금속사이의 조성이나 조직, 공극률이 최적으로 분포되도록 재료합성을 행한 것

*회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

**회원, 전북대학교 기계설계학과

***회원, 전북대학교 정밀기계공학과

에 의해 열응력을 적극적으로 완화시킨다고 하는 목적이 경사기능재료의 개념에 해당한다. 그러나, 제조시의 온도변화와 사용상의 온도차로 인한 열응력의 발생으로 잔류응력이 생기고 내부에 크랙이 형성되어진다. 특히, 파괴는 열부하에 따라 가장 취약한 금속-세라믹 공유영역 근방의 세라믹내에서 주로 극심하게 발생한다. 이러한 문제점을 해결하지 않고서는 재료의 내구성과 신뢰성은 확보되기 어렵다.⁽²⁾

따라서, 본 연구에서는 이러한 문제점을 보완하기 위하여 지르코니아/금속 경사재의 온도조건에 따른 열응력해석을 실시하였다. 해석은 범용 유한요소해석 프로그램인 MARC를 사용하고 시편형상은 중공 원통형 실린더의 1/4부분을 모델화하였다.

2. 실험방법

2.1 실험재료

본 계산에 사용된 시편의 모델은 Fig.1에 보이는 것처럼 부분안정화 지르코니아(PSZ)인 $ZrO_2 - 8wt\%Y_2O_3$ 와 초합금인 NiCrAlY, STS304를 구성재료로 하고 제작형태는 플라즈마 용사(plasma spraying)로 코팅된 2가지의 종류이다. 하나는 기존의 전통적 방식으로서 세라믹과 금속을 직접 코팅한 무경사재(non-FGM; 이하 NFGM)이고, 다른 하나는 PSZ와 NiCrAlY의 두 성분을 체적퍼센트(0%, 25%, 50%, 75%, 100%)에 따라 경사화

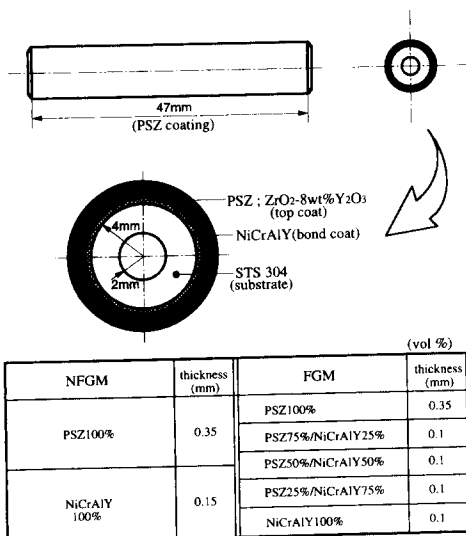


Fig. 1 Specimen model of tube type

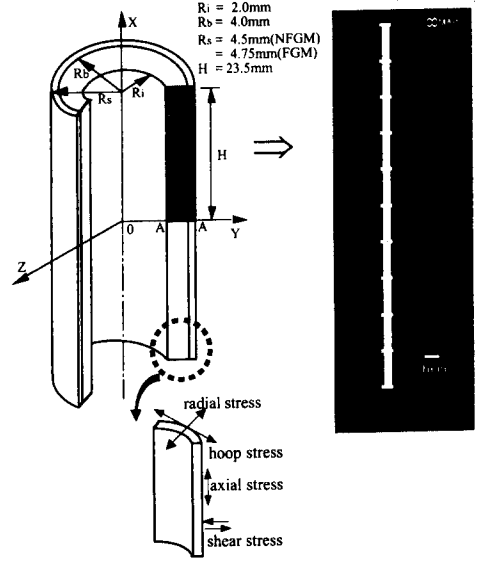
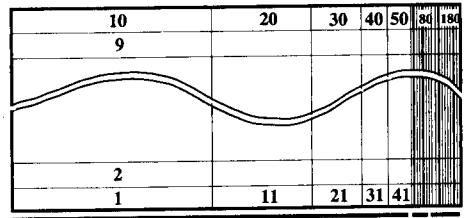
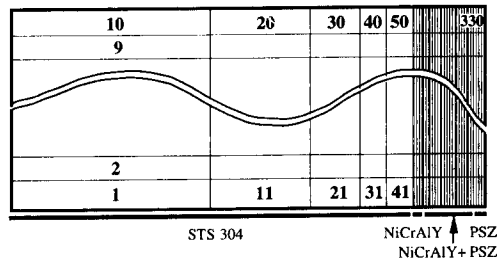


Fig. 2 The FEM model of thermal stress analysis in NFGM and FGM



NFGM	STS304	NiCrAlY	PSZ
Element	1-50	51-80	81-180
Node	1 - 209		

(a) NFGM



FGM	STS304	NiCrAlY	PSZ 25%	PSZ 50%	PSZ 75%	PSZ
Element	1-50	51-80	81-130	131-180	181-230	231-330
Node	1 - 374					

(b) FGM

Fig. 3 Mesh generation for FEM analysis

Table 1 Thermal and mechanical properties used in finite-element analysis

Material	Young's modulus E (GPa)	Thermal expansion co. $\alpha (\times 10^{-6}/^{\circ}\text{C})$	Poisson ratio μ
PSZ	$E=45.06-0.0248T$; T in $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$ - 9.75 400 $^{\circ}\text{C}$ - 10.7 600 $^{\circ}\text{C}$ - 10.9 1000 $^{\circ}\text{C}$ - 10.7	0.23
NiCrAlY	$E=125.06-0.0149T$; T in $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$ - 12.5 400 $^{\circ}\text{C}$ - 14.3 600 $^{\circ}\text{C}$ - 15.7 1000 $^{\circ}\text{C}$ - 16.5	0.23
STS304	$E=201.44-0.1643T$; T in $^{\circ}\text{C}$	100 $^{\circ}\text{C}$ - 17.3 400 $^{\circ}\text{C}$ - 17.9 600 $^{\circ}\text{C}$ - 18.7 1000 $^{\circ}\text{C}$ - 20.6	0.29

한 FGM이다. Fig. 1과 같이 기재(substrate)인 STS304의 외경은 8 mm, 두께는 2 mm, 시편길이는 47 mm이다. NFGM은 두께 0.35 mm의 세라믹 코팅층과 0.15 mm의 금속합금층으로 구성되어 있으며 FGM은 세라믹과 금속합금의 혼합된 코팅층의 두께가 0.75 mm이다.

2.2 유한요소해석

열응력해석은 범용 유한요소법 구조해석 프로그램인 MARC(k5.2)를 이용하였다. 해석모델은 2차원의 4변형 축대칭요소를 사용하였으며, 시험체가 축대칭이기 때문에 Fig. 2에 제시된 바와같이 길이 방향의 1/4단면(사선부분)을 유한요소로 분할하였고 'A-A' 단면은 구속된 조건으로 실시하였다. 그림의 X좌표가 회전축이며, Y좌표는 반경방향을 나타낸다. 유한요소해석을 위한 메쉬형태가 Fig. 3(a), (b)에 보여진다. NFGM의 요소수는 180, 절점수는 209이고, FGM의 요소수는 330, 절점수는 374이다. 그리고, 전술한 바와같이 세라믹 코팅층이 발생한 열응력에 가장 취약하기 때문에 세라믹 부분을 포함한 공유영역의 응력을 파악하는 것이 가장 중요하다. 따라서 메쉬의 생성은 세라믹부분과 공유영역을 기재(substrate)보다 훨씬 조밀하게 분할하였다. Table 1은 계산에 사용한 물성치를 나타낸 것이다.⁽³⁾ 또한, 온도에 따른 물성치의 영향을 고려하여 분석을 행하였다.

열응력해석의 조건들을 살펴보면, 크게 NFGM

과 FGM의 두 재료로 구별된다. 이들 재료들이 상온에서 일정한 속도로 가열된 후 최고 등온온도(열충격시험시 행해지는 가열, 등온유지, 냉각의 단계에서 등온유지시의 온도)에서 실온까지 균일하게 냉각하는 때(온도차 ΔT)에 발생하는 열응력을 구하여 잔류응력이라고 했다. 이 과정의 열응력분포는 정상상태에서 구하였다. 또한, 본 해석결과에 발생한 잔류응력의 항들을 축응력(axial stress) σ_a , 반경응력(radial stress) σ_r , 원주방향응력(hoop stress) σ_h , 전단응력(shear stress) τ_{rz} 의 4가지로서 평가하였다. 최고 등온온도는 NFGM의 경우에 700 $^{\circ}\text{C}$, 800 $^{\circ}\text{C}$, 900 $^{\circ}\text{C}$, 1000 $^{\circ}\text{C}$ 의 4가지 조건이고, FGM은 여기에 1100 $^{\circ}\text{C}$ 를 추가한 5가지의 조건으로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 물성치의 이론적 해석

열응력해석에 사용된 물성치는 탄성계수, 열팽창계수, 푸아송비 등이다. 온도에 따른 이들 물성치들은 Table 1에 기초하여 선형관계식으로 계산하였다. 본 연구의 재료는 이중복합체인 세라믹/금속 성분으로 구성되어 있기 때문에 물성치의 복합법칙을 도입해야만 한다.⁽⁴⁾

탄성률에 관한 2원복합체의 복합법칙은 고전적인 방법에서부터 에너지법, 自己無撞着近似(self-consistent)法, 等價介在物(Eshelby)法 등으로 대별된

다. 입자분산형 복합재의 모델에 대한 대표적인 연구는 1889년 Voigt를 시작으로 Reuss, Kerner, Hashin, Tuchinski 등의 많은 연구자에 의해 근사식이 보고되고 있다.^(5,7) 본 연구에서는 예상치와 실측치에 좋은 일치율을 보이고 있는 식 (1)의 대수혼합법칙⁽⁷⁾을 해석에서 사용하였다.

$$\log E_c = V_1 \log E_1 + V_2 \log E_2 \quad (1)$$

여기서, E_c 는 복합재의 탄성계수이고, E_1, E_2 및 V_1, V_2 는 각각 구성요소의 탄성계수와 체적분율이다.

열팽창계수에 대한 2원 복합계의 이론해석은 지금까지 많은 연구가 있다. 대표적인 연구자는 Turner(1946), Kerner(1956), Levin(1967), Rosen & Hashin, Fahmy & Ragai(1970), Takao & Taya(1985) 등이 있다.^(8,9) 이들 중에서 본 연구에서는 Kerner식과 Fahmy & Ragai식을 이용하였다. Kerner의 근사식⁽¹⁰⁾과 Fahmy & Ragai의 근사식⁽¹¹⁾은 각각 식 (2)와 (3)으로 표현되며 동일한 값이 구해진다.

$$\alpha_c = \alpha_1 + V_2(\alpha_2 - \alpha_1) \frac{3K_1K_2 + 4G_1K_2}{4G_1V_2(K_2 - K_1) + 3K_1K_2 + 4G_1K_1} \quad (2)$$

$$\alpha_c = \alpha_1 - \frac{3(\alpha_1 - \alpha_2)(1 - \mu_1)V_2}{2E_1/E_2(1 - 2\mu_2)V_1 + 2V_2(1 - 2\mu_1) + (1 + \mu_1)} \quad (3)$$

여기서, α_c 는 복합재의 열팽창계수이고 α_1, α_2 는 각각 구성요소의 열팽창계수이며, K 와 G 는 체적탄성률과 전단탄성률, μ_1 과 μ_2 는 각각의 푸아송비이다.

3.2 잔류응력의 분포

Fig. 4와 5는 MARC의 해석에서 출력된 결과로 NFGM재 800°C의 최대 등온온도조건에서 분포된 축방향, 반경방향의 잔류응력을 대표적으로 제시한 것이다. NFGM재의 온도에 따른 잔류응력의 분포에서 축응력, 원주응력, 전단응력은 세라믹부분에서 압축잔류응력(전단응력은 負)이 발생하고, 금속부분에서는 인장과 압축잔류응력이 함께 발생하였다. 그러나, 반경응력은 금속부분에서 압축잔류응력이 발생하지만 세라믹부분에서는 인장잔류응력이 발생하고 있다. 금속부분에서 최대응력은 온도가 증가함에 따라 인장응력을 증가시키는 방향으로 증가되지만 최소 응력은 압축응력을 증가시키는 방향

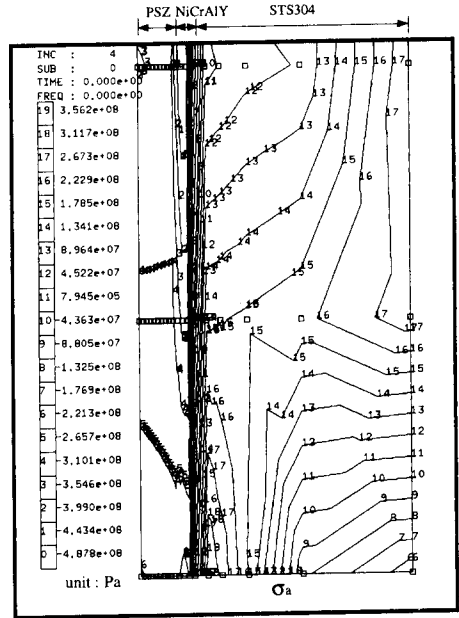


Fig. 4 Axial stress distribution(NFGM 800°C)

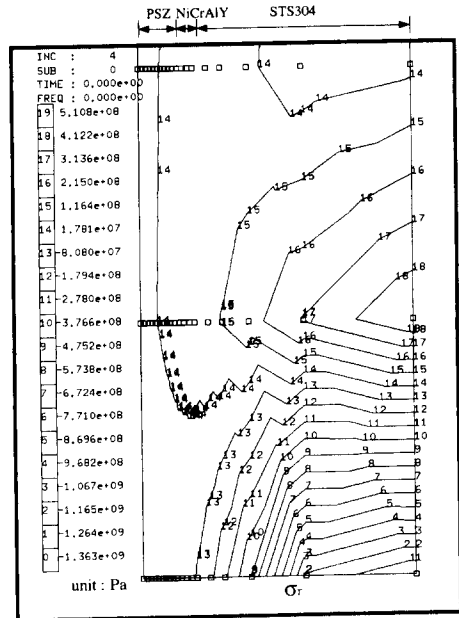


Fig. 5 Radial stress distribution(NFGM 800°C)

으로 증가하는 현상을 보이고 있다. 따라서 NFGM재의 세라믹부분에서는 반경방향의 응력성분만이 인장잔류응력을 발생하고 있음을 알 수 있었다. 또한, 재료계가 변화하는 공유역에서 응력성분들이 급변하고 있어 계면의 분석이 중요함을 시

사하고 있다.

Fig. 6은 NFGM재의 세라믹영역에서 발생하는 최대 잔류응력의 분포를 온도의 조건에 따라 나타낸 것이다. 최대 잔류응력값은 Fig. 4와 5처럼 MARC 출력결과들의 분포에서 가장 큰 잔류응력값을 취한 것이다. 응력분포는 반경응력(R)이 가장 높은 인장응력을 보이고 전단응력(S), 원주응

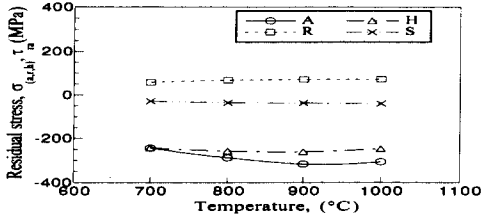


Fig. 6 Residual stress distribution in ceramic part of NFGM

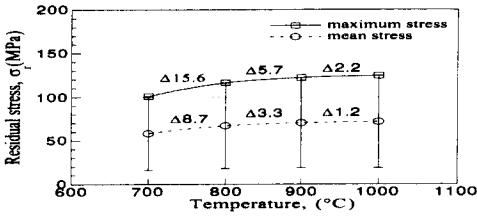


Fig. 7 Radial stress distribution in ceramic part of NFGM

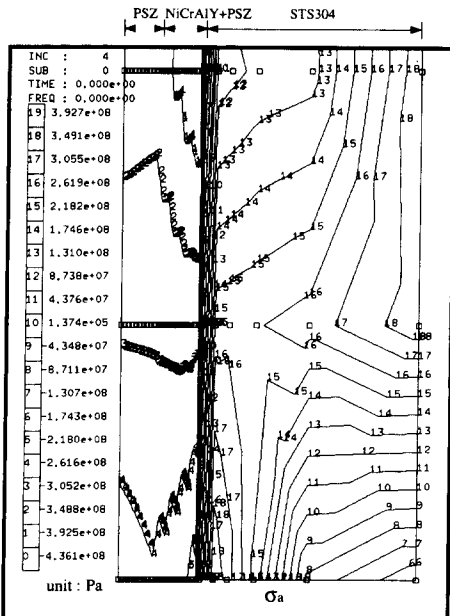


Fig. 8 Axial stress distribution (FGM 1000°C)

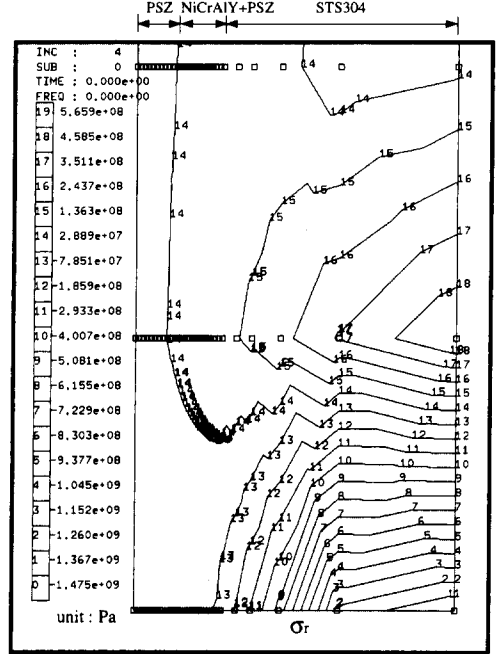
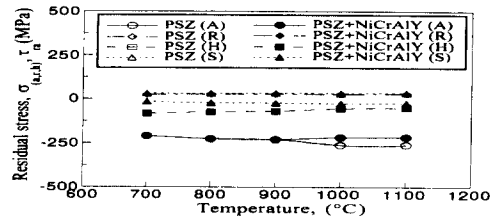
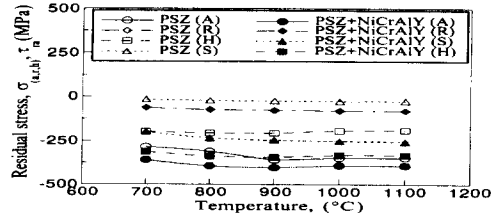


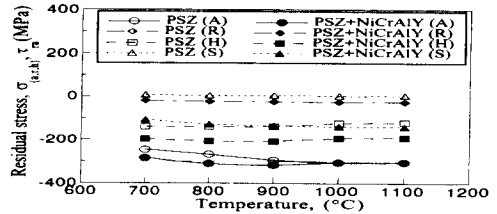
Fig. 9 Radial stress distribution (FGM 1000°C)



(a) Maximum stress



(b) Minimum stress

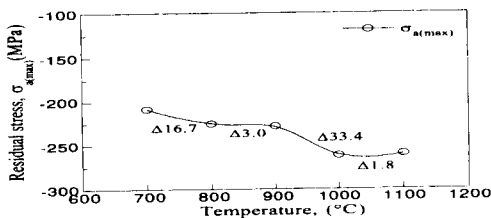


(c) Mean stress

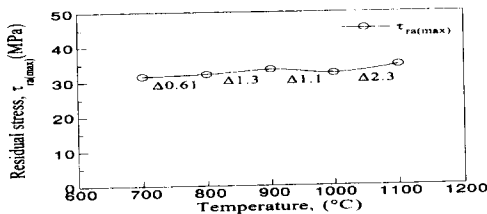
Fig. 10 Residual stress distribution in ceramic and ceramic/metal part of FGM

력(H), 축응력(A)의 순으로 응력이 작아진다. 온도가 증가함에 따라 축응력, 원주응력, 전단응력은 1000°C조건을 제외하고는 점차 압축잔류응력(전단응력은 負)이 증가하고, 반면에 반경응력은 인장잔류응력이 증가하고 있다. 세라믹은 인장응력에 취약하기 때문에 반경응력이 커질수록 재료는 파손의 우려가 높다. 이러한 반경응력을 세라믹부분에 대해 자세히 나타낸 것이 Fig. 7이다. 그림의 실선은 최대 반경응력을 나타내고 파선은 평균 반경응력을 가리킨다. 그림에서처럼 최대 반경응력은 평균 잔류응력과 더불어 온도가 증가함에 따라 더 큰 인장응력을 발생시키고 있다. 최대 반경응력은 또한 100MPa이상의 인장응력을 가지며, 평균응력은 60 MPa이상의 분포를 보인다. 더욱 중요한 사실은 800°C온도를 기점으로 증가율이 감소하고 있다는 사실이다. 이것은 인장잔류응력이 증가하다가 800°C조건에서 어느 정도의 에너지방출이 생겼을 것으로 생각된다. 즉, 반경방향의 응력이 재료에 크랙을 발생시켰음을 알 수 있다. 세라믹과 bond-coat인 NiCrAlY사이의 계면이 가장 취약하기 때문에 세라믹부분에서 발전된 반경응력은 그 공유면에서 계면박리(delamination)크랙을 발생시켰을 것으로 추정된다.

Fig. 8과 9는 여러 온도조건중 FGM의 1000°C에



(a) Axial stress



(b) Shear stress

Fig. 11 Variation of (a) axial stress and (b) shear stress with temperature in ceramic part of FGM

서 발생된 축응력과 반경응력에 대한 출력결과이다. FGM재의 온도에 따른 잔류응력의 분포에서 축응력, 반경응력, 원주응력은 세라믹부분에서 압축잔류응력이 발생하고 금속부분에서는 인장과 압축잔류응력이 동시에 발생하였다. 그러나, 전단응력은 금속부분에서는 負의 잔류응력이 발생하지만 세라믹부분에서는 正의 잔류응력이 발생하고 있다. 또한, 금속부분에서 최대 응력은 온도가 증가함에 따라 인장응력을 증가시키는 방향으로 증가되지만 최소응력은 압축응력을 증가시키는 방향으로 증가하는 현상을 보이고 있다. 그러나, PSZ와 경사층에 대해서, 축응력 평균치는 압축응력이 증가하다가 1000°C를 기점으로 감소하며 전단응력 평균치는 正의 응력이 감소하다가 1000°C를 지나 증가하는 현상을 보였다. FGM재의 세라믹부분에서는 전단응력성분이 正의 응력을 발생하고 있었다.

Fig. 10(a)~(c)는 FGM재의 온도에 따른 잔류응력의 분포를 최대, 최소, 평균응력별로 나타낸 것이다. 그림에서 PSZ 부분은 '○◇□△'의 기호로 표시하고 경사층인 PSZ+NiCrAlY 부분은 '●◆■▲'의 기호로서 축응력, 반경응력, 원주응력, 전단

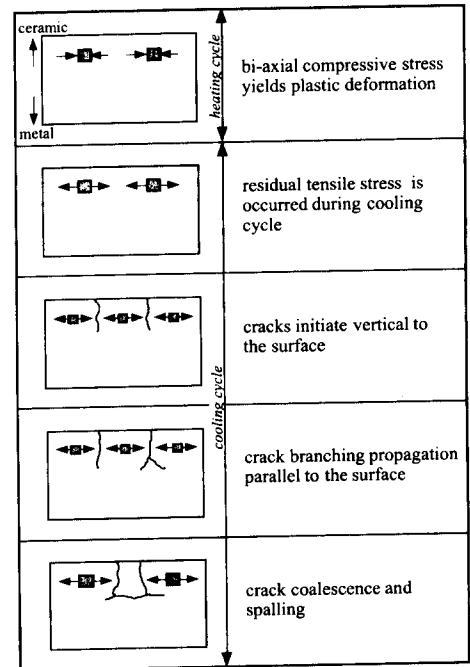


Fig. 12 Sequence of crack initiation and propagation at the top surface of NFGM and FGM during thermal shock test

응력을 나타내었다. 그림(a)의 최대 응력분포를 보면 PSZ부의 전단응력성분이 30 MPa이상으로 가장 높게 분포하였고, 경사층에서는 반경응력성분이 24 MPa이상으로 가장 높게 분포하였다. 그림(b)의 최소 응력분포를 보면 최대 응력분포의 순서와 거의 동일하며 모두 압축응력상태에 있다. 그림(c)의 평균응력분포에서도 역시 최대·최소응력분포와 유사한 거동을 보였다.

Fig. 11(a), (b)는 FGM의 PSZ 부분에서 온도 조건에 따른 축응력과 전단응력의 최대 응력분포의 변화를 보인 것이다. 그림(a)의 최대 축응력은 온도의 증가에 따라 압축응력이 245 MPa이상으로 증가하고 있다. 그러나, 1000°C 부근에서는 압축응력이 더욱 큰 기울기로서 증가하는 경향을 보이다가 1000°C 이상에서는 오히려 약간 감소되었다. 그림(b)의 최대 전단응력분포에서도 역시 유사한 특성을 보이고 있다. 1000°C를 기점으로 正의 응력이 다소 감소되다가 증가함을 알 수 있다. 1000°C에서 이러한 응력의 감소현상은 에너지의 방출을 의미한다. 즉, 1000°C 조건에서 부재에 손상을 일으켰음을 알 수 있다. 축응력과 전단응력의 분포특성으로 미루어 크랙의 형태는 수직크랙으로 추정된다.

열충격시험 동안에 발생하는 파괴기구와 응력상태의 모식도를 Fig. 12에 나타내었다.⁽¹²⁾ 전술한 바와같이 NFGM과 FGM은 top-coat인 세라믹부근이 가장 취약하기 때문에 세라믹영역에 국한하여 고려하였다. 가열시에는 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 재료의 일부가 탈락되기에 이르러 결국 재료는 파손된다. 이러한 과정들이 열충격때문에 생성된 잔류응력의 영향으로 재료의 파손을 일으키는 전형적인 파괴기구이다. 냉각과정에서 생기는 인장응력의 방향에 따라 파괴의 형상은 다르게 나타난다. 즉, 코팅층의 두께방향에 평행한 반경응력은 이중재료의 접합력이 취약한 계면에서 응력집중이 생겨서 계면박리의 파괴를 유발한다. 그러나, 두께방향에 수직인 축응력 등은 재료의 기계적 성질이 약한 세라믹부분의 수직크랙을 발생시킨다. 다시말하면, 잔류응력의 특징에 따라 재료의 파괴모드를 추정할 수 있다.

4. 결 론

무경사재와 경사재의 중공 원통형시험편을 대상으로 최대최소응력을 사용하여 유한요소해석을 실시하였다. 온도조건의 범위는 700°C~1100°C로 하였고 냉각시 발생하는 잔류응력의 분포를 축응력, 반경응력, 원주응력, 전단응력의 향으로 분석하였다. 이러한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) NFGM에서는 반경방향의 잔류응력이 인장응력상태에 있었으며 축응력, 원주응력, 전단응력은 압축잔류응력(전단응력은 負)이 분포되었다.

(2) FGM에서는 축응력과 전단응력의 성분이 1000°C에서 응력의 큰 변화를 보였으며 전단응력은 正의 응력상태에 있다.

(3) 파괴손상기구는 NFGM의 경우에 800°C에서 계면박리현상을 일으키고, FGM의 경우에는 1000°C에서 수직크랙을 발생시킨다.

후 기

본 연구는 1994년도 학술진흥재단의 지원으로 수행된 국제협력과제 연구의 일부로서 이에 감사드립니다.

참고문헌

- (1) 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2號, pp. 242.
- (2) Wei, G. C. and Walsh, J., 1989, "Hot-Gas-Jet Method and Apparatus for Thermal-Shock Testing," *J. Am. Ceram. Soc.*, 72[7], pp. 1286~1289.
- (3) 宮脇和彦, 橋田俊之, 高橋秀明, 1990, "レーザー局所加熱試験による傾斜機能材料の熱衝撃破壊及び熱應力緩和と特性評價に関する研究," 粉體および粉末冶金, 第37卷 7號, pp. 957~961.
- (4) 若島健司, 1989, "ニューセラミックス," 2(6), pp. 103~107.
- (5) Hale, D. K., 1976, *J. Mater. Sci.*, 11, pp. 2105.
- (6) 關根英樹, 丹野 顯, 近藤俊美, 小澤喜仁, 1991, 素材物性學雜誌, 4, pp. 94.
- (7) 香川豊, 八田博志, 1990, "セラミックス基複合材料," アダネ承風社, pp. 113.

- (8) Wakashima K., Otuka and M. Umekawa, S. 1974, *J. Compos. Mater.*, 8, pp. 391.
- (9) Schapery, R. A., 1968, *J. Compos. Mater.*, 2, pp. 380.
- (10) Kerner, E. H., 1956, "The Elastic and Thermo-elastic Properties of Composite Media," *Proc. Phys. Soc.*, B69, pp. 808~813.
- (11) Fahmy, A. A. and Ragai, A. N., 1970, *J. Appl. Phys.*, Vol. 41, pp. 5108.
- (12) 송준희, 임재규, 1996, "경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열충격특성에 관한 연구," 대한기계학회논문집(A), 제20권, 제7호, pp. 2134~2140.