

경사기능재료의 열응력 해석

이종권, 강기준, 한지원
호서대학교 기계공학부

1. 서론

최근에 세라믹-금속 접합, 열차폐코팅(Thermal Barrier Coating), 마모저항코팅 등 이종재료접합의 이용이 급증하고 있다. 열차폐코팅의 경우, 고온환경쪽에 세라믹을 배치하여 내열성을 부여하고, 냉각환경쪽은 금속재료를 사용하여 열전도성과 기계적 강도를 부여한다. 이 때 두 재료의 경계부에서는 열적, 기계적 특성 차이로 인하여 제조과정이나 사용중에 열적, 기계적 부하에 의하여 내부잔류응력이 생기게 되며, 이는 재료의 강도, 파괴특성에 많은 영향을 미치기 때문에 잔류응력의 감소기술이 중요시되고 있다[1]. 일본등 선진국에서는 다른 두 재료의 조성을 연속적으로 경사화시켜 경계부에서 열응력 완화기능과 열차폐성을 동시에 갖춘 새로운 개념의 복합재료가 개발되고 있는 바 이러한 재료를 경사기능재료(Functionally Gradient Material: FGM)라 한다[2]. 이 경사기능재료는 두 재료의 열팽창계수 차이를 최소화하는 방법을 이용하므로 경계부에서의 조성이나 조직, 공극률이 최적 분포가 되도록 재료를 합성하는 것이 중요하다.

Williamson[3], Tang[4], Honein등[5]은 선형, 비선형적 조성분포를 갖는 경사기능재료와 단순히 두 재료를 직접 접합시킨 무경사기능재료(non-FGM)에 대한 열탄성 해석을 통하여 경사기능재료의 경계부에서 잔류응력이 감소됨을 보여 주고 있다. 또 고온의 경우 금속성분은 소성변형을 나타내므로 실질적인 해석 결과를 얻기 위해서는 열탄소성해석을 해야 한다. 국내에서도 몇몇 연구자[6]에 의해 FGM에 관한 연구가 진행되고 있으나 아직은 다양한 세라믹과 금속합성에 따른 잔류응력의 해석에 대한 자료의 축적이 미진한 상태이다.

따라서 본 연구에서는 제조과정중 세라믹-금속 두 재료의 체적함유율(Volume Fraction)변화와 경사부의 두께 변화에 대해 유한요소법에 의한 열탄소성해석을 통하여 잔류응력을 완화시킬 수 있는 최적의 조성분포 조건을 검토하고자 한다.

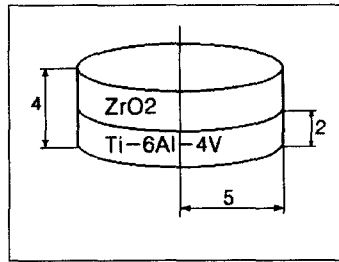
2. 유한요소해석

2.1 유한요소 해석모델

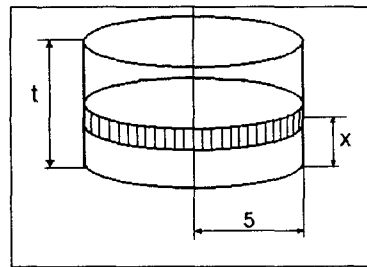
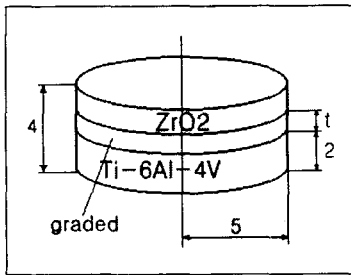
해석모델은 Fig.1과 같이 부분안정화 지르코니아(PSZ)인 ZrO_2 와 합금인 Ti-6Al-4V로 구성된 FGM과 단순히 두 재료를 접합시킨 무경사재(non-FGM)로 하였다. FGM의 경우, ZrO_2 의 체적함유율은 다음과 같이 나타났다.

$$V_{ZR} = \left(\frac{x}{t}\right)^p \text{----- (1)}$$

여기서 t는 경사된 부분의 두께이고, x는 각 층의 중심까지의 거리이며, p는 체적함유율 경사지수(Gradient Exponent)이다.



a) non-FGM



b) FGM

Fig.1 Model Geometry

2.2 유한요소해석

열응력 해석은 온도의 영향을 고려한 재료 물성치를 이용하였으며, FGM의 물성치는 혼합법칙(Role of Mixture)으로 결정하였다. 탄성계수는 Voigt[7]의 제안식

$$\log E_c = V_1 \log E_1 + V_2 \log E_2 \text{----- (2)}$$

을 이용하였다.

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

또 열팽창계수는 Kerner[7]의 근사식

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

을 이용하였다.

여기서, α_c 는 복합재의 열팽창계수이고 α_1, α_2 는 각각 구성요소의 열팽창계수이며 K, G는 체적탄성계수와 전단탄성계수이다.

열응력해석은 범용구조해석 프로그램인 ANSYS를 이용하였다.

이 때 사용한 요소는 2차원 8절점 등매개요소(8-Node Isoparametric Element)이며, non-FGM과 FGM의 총 요소 수는 각각 2000~2400개, 총 노드 수는 6000~7500개이다. 세라믹 층이 열응력에 가장 취약하므로 세라믹 부분을 포함한 공유영역의 응력을 파악하는 것이 가장 중요하기 때문에 Mesh의 생성은 세라믹 부분과 공유영역을 기재(Substrate)보다 훨씬 조밀하게 분할하였다. Fig.2는 유한요소 Mesh의 예를 도시한 것이다.

열응력해석의 조건은 체적함유율 경사지수 p를 0.2, 1.0, 2.0, 3.0과 경사부두께 t=0.5, 1.0, 2.0, 4.0mm로 변화시킨 FGM과 단순 접합시킨 non-FGM에 대해 최고 등온온도 1200K에서 300K까지 균일하게 서냉하는 열하중을 주었다. 이 과정의 열응력 분포는 정상상태로 하였다.

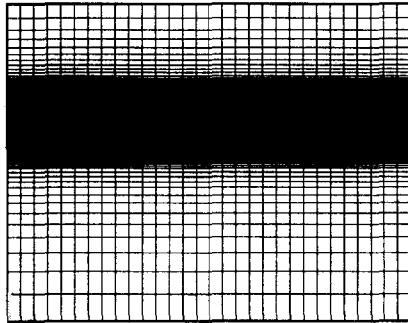


Fig.2 Finite Element Computational Mesh

3. 해석결과 및 검토

3.1 non-FGM의 잔류응력분포

Fig.3은 non-FGM이 냉각되는 과정에서 발생하는 잔류응력의 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 1200K로부터 서서히 냉각되면서 축방향 인장응력은 서서히 증가하다가 500K에서 최대를 이루며, 그 이후 급격히 감소함을 보이고 있다.

non-FGM과 FGM을 비교해 보면 FGM은 non-FGM보다 현저하게 낮은 잔류응력을 발생함을 알 수 있다.

Fig.4는 500K로 냉각되었을 때 재료내에 분포된 축응력을 나타낸 것이다. 그림에서 축응력은 세라믹쪽 경계부에 높은 인장응력을 보이고 있다. 이처럼 응력들이 세라믹-금속의 경계부에서 최대응력을 발생하므로 열부하시 경계부에서 파손 가능성이 있음을 보이고 있다.

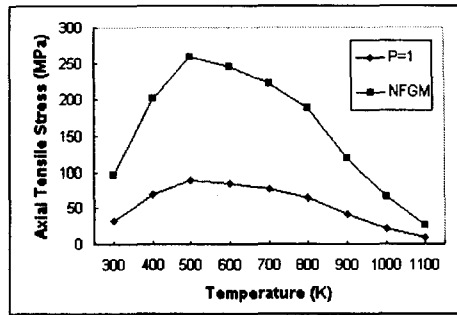


Fig.3 Axial Stress vs. Decreasing Temperature for non-FGM and FGM of p=1

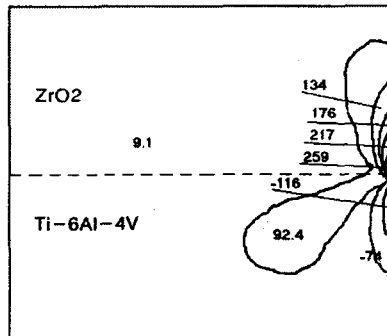


Fig.4 Axial Stress Distribution

3.2 FGM의 잔류응력분포

Fig.5는 경사부 두께 $t=1\text{mm}$ 인 FGM이 냉각되는 과정에서 발생하는 잔류응력의 변화를 나타낸 것으로 각각의 p 값에 대해 500K에서 최대 축인장응력을 보이며, 그 중 $p=1$ 인 경우 가장 낮은 응력을 발생한다.

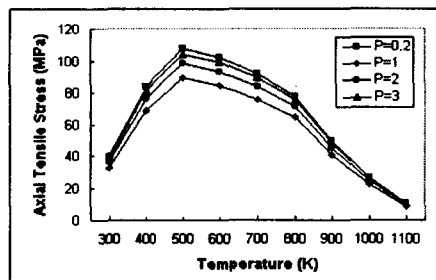


Fig.5 Axial Stress vs. Decreasing Temperature for FGM

Fig.6은 p 와 응력의 관계를 나타낸 것이다. 그림에서 축응력, 반경응력, 전단응력들은 모두 p 의 증가에 따라 감소하며, $p=1$ 일 때 가장 낮은 응력상태를 보이다가 p 의 증가와 함께 서서히 증가됨을 보이고 있다. 따라서 세라믹-금속 접합에서 경계부의 조성성분은 선형적인 분포 $p=1$ 의 경우가 최적임을 알 수 있다.

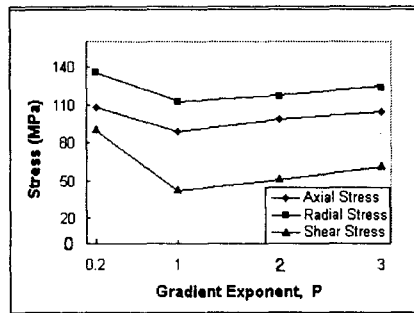


Fig.6 Stress vs. Gradient Exponent p

Fig.7은 $p=1$ 인 경우, t 의 변화에 대한 각 응력들을 나타낸 것이다. 그림에서 $t=2\text{mm}$ 까지는 응력의 감소 현상이 높게 나타나나, 그 이상에서는 서서히 감소됨을 보이며, 두께 변화의 영향이 거의 없음을 나타낸다. 전반적으로는 경사부의 두께 t 가 두꺼울수록 각 응력들은 낮게 나타났다.

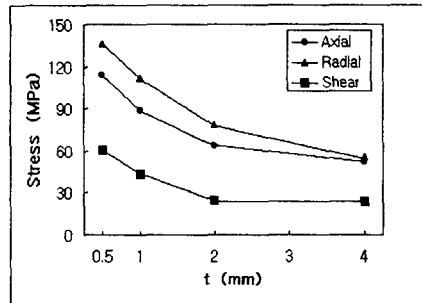


Fig.7 Stress vs. Gradient Thickness, t

4. 결론

세라믹-금속 경사기능재료에 대해 유한요소법에 의한 열응력해석결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 경사기능재료내의 잔류응력이 무경사재료의 경우보다 현저히 낮게 발생하였다.
- (2) $P=1$ 인 선형적 조성성분을 분포를 갖는 경사기능재료에서 가장 낮은 잔류응력을 나타냈다.
- (3) 경사부의 두께가 두꺼울수록 응력이 작게 나타났으며, $t=2\text{mm}$ 이상에서는 두께변화의 영향이 둔화됨을 보이고 있다.
- (4) 1200K에서 서서히 냉각시킬 경우 500K에서 가장 높은 축인장응력을 나타냈다. 따라서 제조공정중 500K로 냉각될 때 재료의 파괴여부를 고려해야 하겠다.

5. 참고문헌

- [1] 岩本信也, " 金屬とセラミックスの接合 ", 1990
- [2] M. Koizumi, " The Concept of FGM ", Ceramic Transations, Vol. 34, 1993
- [3] R.L. Williamson, J.T. Drake and B.H. Rabin, " Numerical Modeling of Interface Residual Stresses in Graded Ceramic-Metal Materials ", Developments in Ceramic and Metal-matrix Composites, edited K. Upadhyya, PP. 241~251, 1991
- [4] X.F. Tang, L.M. Zhang, Q.J. Zhang and R.Z. Yuan, " Design and structural Control of PSZ-Mo Functionally Gradient Materials with Thermal Stress Relaxation ", Ceramic Transations, Vol. 34, PP. 457~463, 1993
- [5] E. Honein, T. Honein and G. Hermann, " Stress analysis of funtionally Gradient Materials Based on a Heterogenization procedure ", 3rd International Symposium on Structural and Functional Gradient Materials, PP. 201~208, 1994
- [6] 송준희, 임재규, 정세희, " 경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열응력 해석 (1) ", 대한기계학회 논문집, 제 21권, 3호, PP.439-446, 1997
- [7] W.D. Kingery, H.K. Bowen and D.R. Uhlmann, " Introduction to Ceramics " PP. 603~775, 1985