

# 코팅 경사기능 재료의 균열전파에 관한 평가

권 오 현

부경대학교 안전공학부

(2008. 6. 9. 접수 / 2008. 8. 8. 채택)

## The Evaluation of Crack Propagation in Functionally Graded Materials with Coatings

Oh-Heon Kwon

Division of Safety Engineering, Pukyong National University

(Received June 9, 2008 / Accepted August 8, 2008)

**Abstract** : Recently, new functionally graded material(FGM) that has a spatial variation in composition and properties is developed because of its good quality. This material yields the demands for resistance to corrosion and high temperature in turbine blade, wear resistance as in gears and high strength machine parts. Especially coating treatment in FGM surface brings forth a mechanical weak at the interface due to discontinuous stress resulting from a steep material change. It often leads cracks or spallation in a coating area around an interface. The behavior of propagation cracks in FGMs was here investigated. The interface stresses were reduced because of graded material properties. Also graded material parameter with exponential equation was founded to influence the stress intensity factor. And the resistance curve with FGM coating was slightly increased.

**Key Words** : functionally graded materials(FGMs), propagating crack, stress field, stress intensity factor, graded coatings, graded material parameter, mixture rule

### 1. 서론

구조물의 성능을 향상시키는 수단으로서 단일 재료에서의 결점을 보완한 여러 가지 복합재를 개발하여 이를 활발히 산업에 응용하고 있다. 그 중에서도 부품에서의 효율적 재료특성값에 대한 설계 최적화방안에 기여하기 위하여 경사기능재료(Functionally Graded Material; 이하 FGM)의 사용이 이용되기 시작했다. 부품이 다중적 재료성분을 가지도록 함에 따라 기계적, 물리적 특성을 향상시키는 효과적 방법의 하나로 최근 FGM제조 및 기능에 대한 다양한 연구가 이루어지고 있다. FGM의 용어는 항공분야 재료에 처음으로 사용되어져 선박, 엔진 등 주요 기계부품에 응용되어져 왔다<sup>1)</sup>. FGM은 여러 종류의 재료특성값을 다양한 경사된 형태로 조성하여 열적, 전기적 및 기계적 성능을 향상시킬 수 있다. Raob<sup>2)</sup> 등은 터빈블레이드의 열적 저항코팅에 대하여 연구하였다. 이 연구에서 열응력에 기인한

터빈블레이드 표면균열이나 스프링클을 방지하기 위한 열저항 세라믹코팅에는 계면박리현상, 열적 손상을 현저히 낮아지게 함을 보였다. 또한 FGM에서의 고온성능향상과 더불어 표면코팅문제 및 균열 파괴거동 등에 대한 연구<sup>3-5)</sup>도 관심을 받기 시작하였으나 파괴거동에 대한 실험적, 수치해석적 평가<sup>6,8)</sup>는 주로 직선 또는 지수경사에 대한 결과이며 다양한 조건의 경사기능의 영향에 대한 연구는 아직 명확히 이루어지고 있지 않다. 특히 기지층과의 사이에 재료불일치에 의한 응력의 불연속으로 발생된 균열은 재료성능에 심각한 영향을 초래할 수 있다. 최근 Parameswaran 등<sup>9)</sup>은 탄성구배에 따른 FGM에서의 균열응력장 해석을 수행하였다. 지금까지의 FGM 연구는 주로 기지의 FGM 또는 코팅문제에 따른 해결방안을 제시하고 있으나 기지에 FGM형 코팅을 한 경우에 대한 균열거동에 관한 연구는 거의 이루어지지 않고 있어 이 부분에 대한 연구가 절실하다 할 것이다.

본 연구에서는 금속 기지에 NiCoCrAl/ZrO<sub>2</sub>를 표면 FGM코팅을 한 경우에 대하여 경사기능식을 제

시한 후, 유한요소해석으로 경사기능코팅층에서의 응력상태 및 균열전파거동에 관하여 평가하는 것을 목적으로 한다.

## 2. FGM 해석

### 2.1. FGM 물리적 특성식

구성성분의 체적함유율이 점차적으로 변하는 경사기능 코팅층의 재료특성값은 두께방향으로 제시된 경사식에 따라 변하게 한다. 재료의 국부체적율은 경사식의 함수로 유도하였다. 유도된 식은 복합재 혼합법칙을 이용하여 재료의 특성값으로 정의될 수 있다. 편의상  $y$ 축은 다층의 기능경사코팅면을 따라 주어지고  $x$ 축이 FGM코팅두께방향으로 주어졌다. 임의의  $x$ 위치에서 기지의 국부체적분율은  $g(x)$ 로 표현하였다. 이때  $g(x)$ 는 코팅층의 경사특성을 포함하고 있다.

Fig. 1은 코팅층의 경사기능방향을 나타낸다.

일반적으로  $g(x)$ 는  $x$ 의 선형함수 및 지수함수로 표현된다. 여기서는 Chi 등<sup>10)</sup>이 제안한 S자형 함수식을 응용하였다. S자형 함수식은 2-역수함수식을 적용하였다. 따라서 경사코팅층의 재료물성값이 2-역수함수식을 따름에 의해 매우 점진적이며 연속적으로 변화하게 된다. 이렇게 함으로써 경사코팅층에 균열이 발생하여도 불연속계면에 존재하는 형태가 아니라 균질재에 대한 파괴해석을 행할 수 있다. 경사 기능 코팅층의 표면에 균열이 발생되는 경우에는 코팅층 계면 또는 기지 쪽으로 전파하게 된다. 다음 식 (1)은 여기서 적용된 2-역수함수식을 나타낸다.

$$g_1(x) = \frac{1}{2} \left( \frac{x}{h_c/2} \right)^p ; 0 \leq x \leq \frac{h_c}{2} \quad (1)$$

$$g_2(x) = 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{h_c - x}{h_c/2} \right)^p ; \frac{h_c}{2} \leq x \leq h_c$$

여기서  $h_c$ 는 코팅층의 두께이고  $p$ 는 재료경사매개변수이다.

식 (1)을 이용하여 경사기능코팅층에 대한 재료

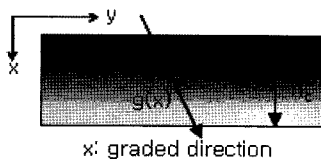


Fig. 1. The direction of functionally graded coatings.

물성값 탄성계수  $E$ 와 포와송비  $\nu$ 는 혼합법칙을 적용하여 다음 식 (2)에 의해 주어진다.

$$E(x) = g_1(x)E_s + (1 - g_1(x))E_c \quad (2)$$

$$E(x) = g_2(x)E_s + (1 - g_2(x))E_c$$

$$\nu(x) = g_1(x)\nu_s + (1 - g_1(x))\nu_c$$

$$\nu(x) = g_2(x)\nu_s + (1 - g_2(x))\nu_c$$

여기서  $E_s$ ,  $E_c$ ,  $\nu_s$ ,  $\nu_c$ 는 각각 기지 및 코팅층의 탄성계수와 포와송비를 나타낸다.

### 2.2. 수치해석적 평가모델

경사기능 코팅부의 두께는  $h_c$ , 기지 두께는  $h_s$  라 할 때 코팅층 표면에서 균열이 발생하여 경사기능 방향에 평행방향으로 존재하는 경우를 평가한다. 두께방향에 따라 경사식은 식 (1), (2)에서 제시한 연속적인 임의 방정식으로 제어한다. 이때 FGM코팅부의 재료경사 매개변수  $p = 1, 2, 5, 10$ 의 4가지 경우에 대하여 평가하였다. 코팅부 물성값은 NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub>를 상정하여 경사식을 적용하고 기지는 Nickel을 상정하였다. 기공의 영향은 배제하였다. Ni 및 NiCoCrAlY, ZrO<sub>2</sub>의 탄성계수 및 포와송비는 각각 207GPa, 205GPa 및 53GPa와 0.312, 0.3 및 0.25를 선택하였다. 주어진 경우에 대하여 코팅두께방향에 따른 탄성계수  $E$ 에 대한 변화치를 Fig. 2에 나타내었다. 포와송비  $\nu$ 도 유사한 결과가 얻어진다.

얻어진 관계식은 유한요소해석의 응력평가에 적용하였다. 프로그램은 범용ANSYS코드를 사용하였고 PC에서 계산을 수행하였다. Fig. 3은 유한요소 평가모델을 나타내었다. 여기서 FEA Area는 유한요소해석이 수행되는 영역을 표시한다.

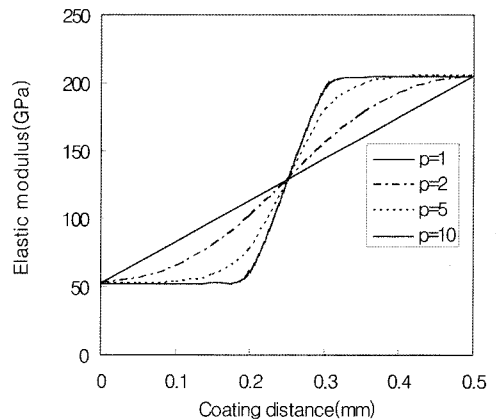


Fig. 2. Variation of elastic modulus with graded parameter,  $p$ .

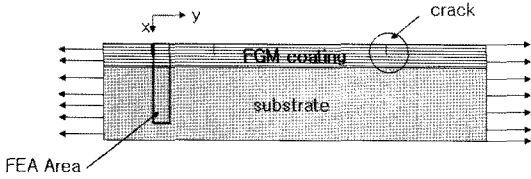


Fig. 3. The numerical evaluation model.

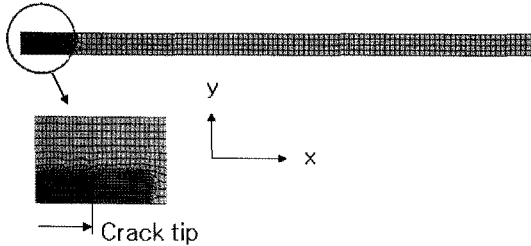


Fig. 4. The example of a finite element mesh.

기지높이 25mm에 경사기능코팅두께는 1mm로 정하고 초기균열길이 a는 FGM코팅 두께에 대하여 60%인 600μm로 하여  $h_c/h_s = 1/25$ ,  $a/h_c = 0.6$ 의 경우를 상정하였다. 유한요소형태는 plane42를 사용하여 평면변형률상태를 가정하였다.

Fig. 4는 해석에 사용된 시험편 요소분할의 예를 나타낸다. 분할된 요소수는 63625이며 절점수는 64835이다.

### 2.3. 경사기능코팅층의 응력확대계수

코팅층 표면에서 발생한 균열은 코팅층 안쪽으로 성장하여 기지와 계면을 따라 성장하거나 기지를 통과하게 된다. 균열이 코팅층내에 있을 때 코팅의 재료물성값이 연속적으로 변화하는 FGM의 경우에는 균열선단이 언제나 균열재내의 상태에 있는 것으로 간주 할 수 있다.

따라서 균열선단에 발생하는 특이성의 문제는 이 종재료의 경우와는 다르게 고려되지 않으나 재료 물성치는 코팅층의 두께 방향에 따라 변화함으로 응력확대계수에 반영되어야 한다. 다음 식 (3)은 경사기능코팅층에 적용된 2-멱함수  $g(x)$ 를 고려한 응력확대계수를 나타낸다<sup>11)</sup>.

$$K_I = \frac{E(x)}{(1+\nu(x))} \frac{1}{\sin \theta} \frac{1}{(\kappa - \cos \theta)} \sqrt{\frac{2\pi}{r}} u_y(r, \theta) \quad (3)$$

여기서  $\kappa$ 는 평면변형률상태에서  $\kappa = 3 - 4\nu(x)$ 이다.  $u_y(r, \theta)$ 는 균열단에서 임의의  $r, \theta$ 위치에서의  $y$  방향 변위이다.

또한 코팅부와 기지의 응력은 각각 다음 식 (4)에 의해 주어진다.

$$\sigma_y(x) = \frac{\varepsilon_0 E(x)}{1 - \nu^2(x)}, \quad \frac{\varepsilon_0 E_s}{1 - \nu_s^2} \quad (4)$$

$\varepsilon_0$ 는 원방 변형율을 나타낸다.

### 3. 결과 및 고찰

Fig. 5는 재료매개변수  $p=5$ 의 경우에 대한 균열단 부근 응력 등고선 분포를 나타낸다. 균열단 부근에는 여전히 고응력분포를 나타내고 있으나 단일코팅계면에서 나타나는 급격한 응력변화는 감소함을 알 수 있다. 또한 예리한 균열단 균열재의 등고선 분포에서 나타나는 것과 같은 균열단 주변으로 대칭원의 형태가 아니라 전체적으로 타원의 형태를 나타내고 있다.

Fig. 6은 FGM 역수방정식의 재료매개변수  $p$ 의 변화에 따른  $\sigma_{yy}$ 의 변화를 균열단으로부터 균열길이 방향으로의 변화에 대해 구한 결과이다. FGM 매개변수  $p$ 가 10에서 1로 작아짐에 따라 균열단  $\sigma_{yy}$

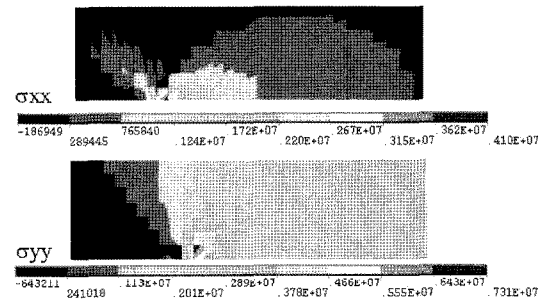


Fig. 5. The example of stress contours around crack tip with parameter  $p=5$ .

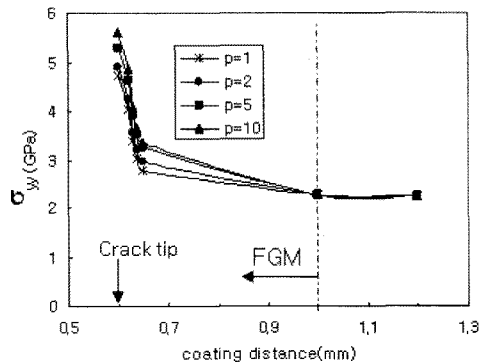


Fig. 6. The equivalent  $\sigma_{yy}$  from crack tip to graded direction with parameter  $p$ .

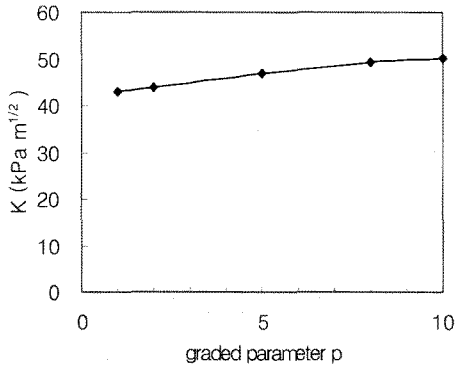


Fig. 7. Stress intensity factor variation according to the coating graded parameter p.

응력은 5.62GPa에서 4.72GPa로 점점 작아지고 있음을 나타내고 있다.

각각의 경우에 있어서  $\sigma_y$ 가 균열단으로부터 약 0.03mm떨어진 위치까지 급감소하면서 이후 서서히 감소하여 계면 근방에서는 거의 일정한 값을 나타내고 있다.

코팅거리 거의 1mm의 위치는 코팅재료와 기지의 계면에 가까운 위치임에도 불구하고 경사기능 재료상수의 변화에 의하여  $\sigma_y$ 가 거의 일정한 값을 가진다.

Fig. 7은 p의 변화에 대한 응력 확대계수의 변화를 나타낸다. Fig. 7에서 p의 값이 커질수록 K의 값이 증가하고 있음을 알 수 있다. 이것은 p가 커짐에 따라 균열의 성장이 어렵게 됨을 나타낸다.

Fig. 8은 균열성장예 따른 응력확대계수의 변화를 나타내고 있다. 기지층에서는 응력확대계수가 균열 성장에 따라 급격히 성장하는 반면 FGM 코팅층에서의 변화는 서서히 증가하는 경향을 보이고 있으며 매개변수 p에 따라서 유사한 경향을 보이고 있다. 또한 매개변수 p는 균열성장 저항곡선에 다소의 영향을 미치고 있음을 알 수 있다.

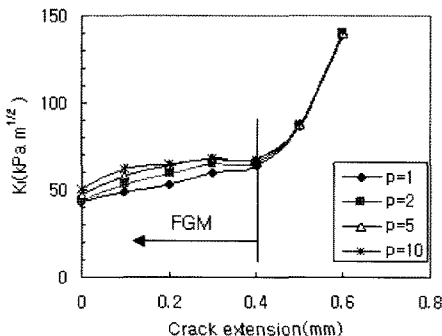


Fig. 8. Crack growth resistance for different graded parameter p.

#### 4. 결론

본 연구에서는 니켈금속재료에 NiCoCrAlY/ZrO<sub>2</sub>를 경사기능(FGM)코팅을 한 경우에 대하여 FGM 코팅층에서의 균열의 성장거동을 평가하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 주어진 경사식은 경사층의 경사층 특성을 재료경사매개변수 p에 따라서 효과적으로 나타낼 수 있었다.
- 2) 균열단 부근에는 여전히 고응력분포를 나타내고 있으나 단일코팅계면에서 나타나는 급격한 응력변화는 현저히 감소하였다.
- 3) 재료경사매개변수 p의 값이 커질수록 응력확대계수 K의 값이 증가하고 있어 균열의 성장이 어렵게 됨을 나타낸다.
- 4) 매개변수 p는 균열성장 저항곡선에 다소의 영향을 미치며 FGM 코팅층에서의 변화는 서서히 증가하는 경향을 나타내었다.

**감사의 글 :** 이 논문은 2005학년도 부경대학교의 지원을 받아 수행된 연구임(PK-2005-042).

#### 참고문헌

- 1) T. T. Mattew, J. M. Robert, "Crack propagation in graded composite", Composites Science and Tech., Vol. 65, pp. 201 ~220, 2005.
- 2) K. J. Raob, "Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> composite coatings for thermal barrier application", Compos, Sci Tech., Vol. 57, No. 1, pp. 81 ~89, 1997.
- 3) W. Jianxin., M. L. Chad, "On the fracture toughness of ferroelectric ceramic with electric field applied parallel to the crack front", Acta Materialia, Vol. 52, pp. 3435 ~3446, 2004.
- 4) F. Delale, F. Erdogan, "The crack problem for a nonhomogeneous plane", Jour. of App. Mech., Vol. 50, pp. 609 ~614, 1983.
- 5) H. P. Xiong, A. Kawasaki, Y. S. Kang, R. Watanabe, "Experimental study on heat insulation performance of functionally graded metal/ceramic coatings and their fracture behavior at high surface temperature", Surface & Coatings Tech., Vol. 194, pp. 203 ~214, 2005.
- 6) P. R. Marur, H. V. Tippur, "Evaluation of mechanical properties of functionally graded material", Jour. of testing and Evaluation, Vol. 26. pp. 539 ~545, 1998.
- 7) C. E. Rousseau, "Evaluation of crack tip field and

- fracture parameters in functionally graded materials”, Ph.D. Dissertation, Auburn University, 2000.
- 8) H. Cai, G. Bao, “Crack bridging in functionally graded coatings”, *Int. J. Solids Structure*, Vol. 35, No.7-8, pp. 701 ~ 717, 1998.
- 9) V. Parameswaran, A. Shukla, “Asymptotic stress field for stationary cracks along the gradient in functionally graded materials”, *J. Appl. Mech.*, Vol. 69, pp. 240 ~ 243, 2002.
- 10) S. Chi, Y. L. Chung, “Cracking in coating sub strate composite with multi layered and coatings”, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 70, pp. 1227 ~ 1243, 2003.
- 11) J. Abanto, J. Lambros, “Investigation of crack growth in functionally graded materials using digital image correlation”, *Eng. Fract. Mech.*, Vol. 69, pp. 1695 ~ 1711, 2002.