

# 열하중을 받는 열차폐형 경사기능재료의 손상해석

## Finite Element Damage Analysis of Thermal Barrier Coating Type Functionally Graded Material Subjected to Thermal Loading

이 제명\*, 都井 裕\*\*

\* 삼성중공업 조선플랜트 연구소, 용접도장연구부

\*\* Institute of Industrial Science, University of Tokyo

### 1. 서언

열응력완화형 경사기능재료(Functionally Graded Material, 이하 FGM)란, 기계재료의 표면에 열차폐재료를 접합시키는 방법을 통해, 초고온환경에서의 내열성, 고강도등을 얻고자 하는 기능성재료의 하나이다. 이러한 재료의 대표예로서, 표면에 세라믹계코팅을 실시하여 열유속레벨을 낮추고 구조부재의 長수명화를 목적으로 하는 알루미늄-스텐레스강계 경사기능재료가 개발되고 있다<sup>(1)~(3)</sup>. 그러나, 열차폐성확보라는 장점에도 불구하고, 이종재료간 경계부에서의 균열발생이라는 단점이 심각한 문제로 지적되고 있으며, 재료개발에 있어 가장 큰 어려움으로 지적되고 있다. 이러한 문제들에 대한 해결방안으로, 막대한 비용을 필요로 하는 실험적인 연구 대신 수치해석에 의한 예측수법개발이 요구되고 있으나, 대부분의 연구가 금속학적 야금학적연구인 까닭에, 역학적기구구명에 관한 연구는 기초적인 수준에 머물러 있는 것이 현실이다. 따라서 본 연구에서는 열충격, 열피로를 수반하는 경사기능원판에 대한 유한요소손상해석수법을 개발하여 재료개발, 신구조방식에의 적용검토 등에 활용할 수 있는 기틀을 제공하고자 한다.

### 2. 해석모델 및 유한요소정식화

본 연구에서는, 열차폐코팅재 역할의 표면부 알루미늄( $Al_2O_3$ )와 그 하부에 스텐레스강(316 Stainless Steel)으로 구성된 FGM 디스크에 대한 열충격/열피로 문제에 관한 손상해석을 수행한다. 열하중을 받는 재료 및 구조물에 대한 정식화수법으로는, 초기변형률법(Initial strain method)의 사용이 일반적이다. 즉, 점소성변형률증분  $\{\Delta \epsilon_{vp}\}$ 과 열변형률증분  $\{\Delta \epsilon_{\theta}\}$ 을 초기변형률로 취급함으로써 다음과 같은 증분형 요소강성방정식을 얻을 수 있다<sup>(4)</sup>.

$$\{\Delta F\} + \{F_r\} + \int_v [B_0]^T [D_e] (\{\Delta \epsilon_{\theta}\} + \{\Delta \epsilon_{vp}\}) dV = [K_o] \{\Delta u\} \quad (1)$$

여기서,  $\{\Delta F\}$ ,  $\{F_r\}$ ,  $\{\Delta u\}$ 는 각각, 외력증분벡터, 불평형력증분벡터, 절점변위증분벡터를 나타낸다. 점소성변형률증분 계산에 필요한 변형률속도는 다음식을 사용한다<sup>(4)</sup>.

$$\dot{\epsilon}_{ij}^{vp} = \frac{3}{2} \left\langle \frac{\sigma_{eq}/(1-D) - R - k}{K} \right\rangle^N \frac{s_{ij}}{\sigma_{eq}} \quad (2)$$

표면으로부터 전파되는 온도이력은 다차원물체의 열전도방정식의 이론해로부터 각 증분단계에서 구하여지며<sup>(5)</sup>, 수치적분점상에서 열변형률증분량으로 계산되어진다. 온도해석결과의 대표적 예로서, 표면의 온도이력결과를 범용해석프로그램결과와의 비교를 통해 그림 1에 나타내고 있다.

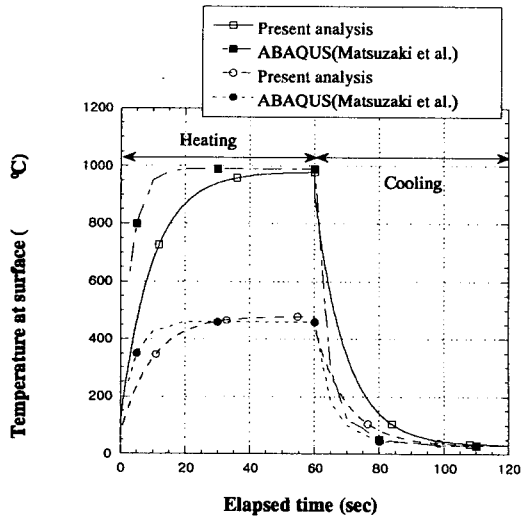


Figure 1. Temperature history of surface subjected to thermal shock ( $1\text{MW/m}^2$ ,  $3\text{MW/m}^2$ , respectively)

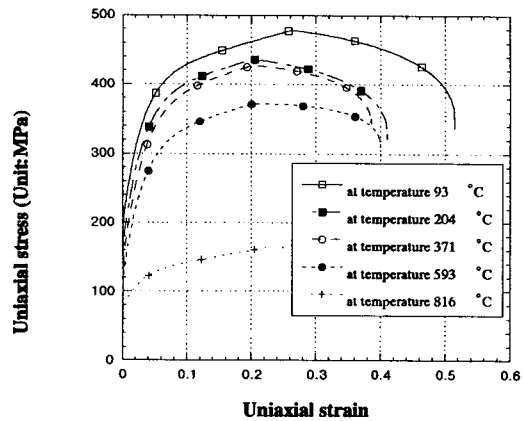


Figure 2. Stress-strain behavior of 316 Stainless steel at each temperature

한편, 재료 혹은 구조부재의 내부에 발생하는 손상/균열에 관한 해석수법으로서 연속체손상 역학이 주목을 받고 있다<sup>(3)(4)</sup>. 본 연구에서는 손상역학수법을 채용하여 원판내부의 균열발생을 예측한다. 손상정도파악에 사용된 구성식, 즉 손상속도발전방정식은 다음과 같은 식을 사용하였다.

$$\dot{D} = \left( -\frac{Y}{S} \right)^s \dot{p} \quad (3)$$

여기서,  $D$  는 0부터 1까지 연속적으로 변화하는 스칼라량의 손상변수이며,  $Y$ 는 에너지해방률,  $p$  는 누적소성변형률이다.

한편, 본 해석모델과 같이 재료의 성질이 균질하지 않은 경우, 비균질 재료의 표현방법으로서 체적비의 조성방법에 따라 몇 가지 방법이 제시되어 있다. 가장 대표적으로는 voronoi 분할법, self-consistent법 등이 있으나, 본 연구에서는 온도전과 방향으로만 재료물성이 변한다는 가정하에 다음과 같은 체적비조성식을 사용한다<sup>(1)</sup>.

$$p^i(z) = (p_c^i - p_s^i) \left( \frac{z}{b} \right)^n + p_s^i \quad (4)$$

여기서  $b$ 는 원판두께를 나타내며  $z$ 는 두께방향 층의 위치이다. 또한,  $p_c^i$ 는 순수  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,  $p_s^i$ 는 순수 스테레스강의 재료성질을 나타내는  $i$ 번째 재료정수이다. 즉, 식(4)를 사용함으로써, 순수  $\text{Al}_2\text{O}_3$  층과 순수 스테레스강층 사이에서 연속적으로 변화하는 재료성질을 표현할 수 있다. 또한 식(4)의  $n$ 을 바꾸어 줌으로써 각 층별 위치에서의 가중치를 조절할 수 있게 된다.

### 3. 해석결과 및 고찰

그림 2에 스테레스강에 대한 재료거동파악결과를 나타내고 있다. 즉, 각 온도범위에 대한 단축인장테스트거동을, 식(1)~(3)과 같은 해석적방법에 의하여 표현하였다. 동일하게  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 에 관한

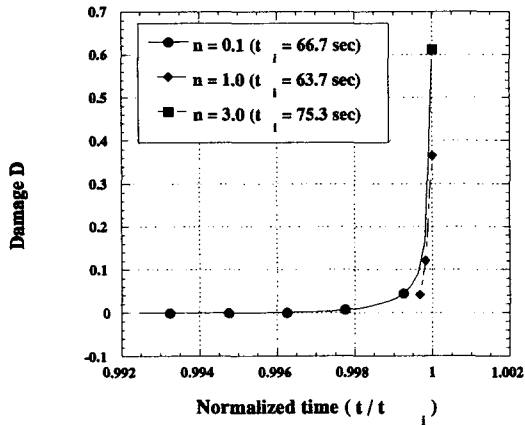


Figure 3. Damage evolution behavior for different value of n

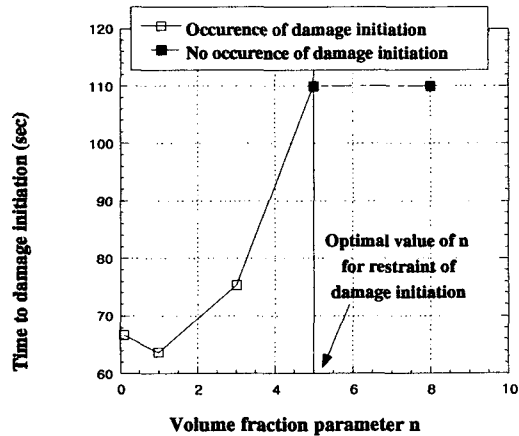


Figure 4. Relation between volume fraction parameter n and damage initiation time

해석을 바탕으로, FGM디스크를 구성하는 두 가지 기준재료에 대한 구성방정식의 재료정수결정이 가능하게 된다. 이상의 결과를 바탕으로 열충격 및 열피로를 받는 FGM디스크에 대한 해석을 수행한다. 먼저, 열충격에 대해서는 두께 5mm 직경 60mm의 원판을, 열피로에 대해서는 두께 5.5mm 직경 12.5mm의 원판을 사용하였다. 두 경우 모두 기존의 해석 및 실험결과와의 비교를 위한 모델설정이다. 열충격문제에 관한 온도계산결과는 그림 1에 나타내고 있다. 그림 3에서는 열충격을 받는 FGM디스크에 대하여, 재료조성비 n 과 손상발전이력의 관계를 보이고 있으며, 그림 4에는 손상발생억제를 위한 n 의 최적해를 나타내고 있다.

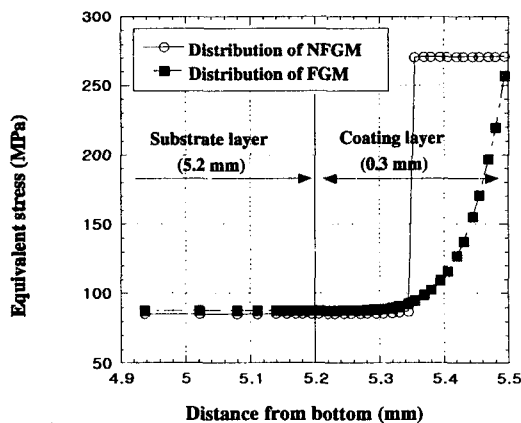


Figure 5. Equivalent stress distribution along central axis

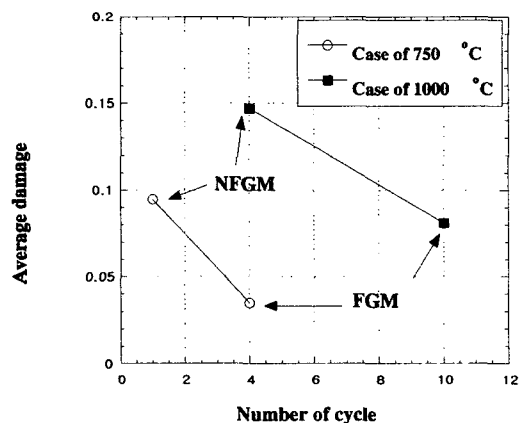


Figure 6. Relation between average damage and the number of cycle

그림 5,6은 열피로를 받는 FGM디스크의 손상해석결과를 나타내고 있다. 열피로에 대한 온도 분포는 상온 25°C의 재료가 750°C-200°C, 1000°C-200°C의 열사이클을 수반하는 문제이다. 열피로해석에서는 코팅방법의 상이점에 따른 차이를 파악하기 위해, ① 0.15mm의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 코팅재에 5.35mm의 스텐레스강을 직접 접합시킨 경우(이하 NFGM)와, ② 표면재료 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 접합부재료 스

텐레스강으로 구성된 0.3mm의 FGM코팅재를 5.2mm의 스텐레스강에 접합시킨 경우(이하 FGM)에 대하여 해석을 수행하였다. 그림 5에서는 디스크중심에 있어서의 두께방향 유효응력분포를 나타낸다. 그림으로부터 알 수 있듯이, FGM의 경우가 NFGM에 비해 응력의 불연속성이 완화되어 있으며, 결국 이러한 응력분포가 접합부분의 손상발생에 영향을 미치게 된다. 그림 6에서는 손상발생에 미치는 FGM의 영향을, 두 경우의 온도 및 사이클 수에 대해서 얻어진 손상발생량과의 비교를 통해서 나타내고 있다. 그림으로부터 알 수 있듯이 NFGM에 비하여 FGM의 경우가 손상발생이 억제되고 있으며, 이는 동일 재료에 대한 실험으로부터 얻어진 균열밀도 측정결과와도 일치하고 있다.

이상과 같은 연구를 통해서, 기존의 방법으로는 파악이 불가능했던 FGM디스크의 손상문제에 관한 해석적접근이 가능하게 되었으며, 본 해석수법의 유용성을 확인할 수 있었다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고온환경 상에서 사용되는 열차폐형 FGM재료의 손상/균열발생거동에 대하여, 연속체손상역학수법을 이용한 유한요소해석을 수행하였다. 열충격 및 열피로를 받는 세라믹-스텐레스계 FGM재료의 균열발생특성에 관한 해석결과는, 실험결과와의 비교를 바탕으로 본 해석수법의 유용성을 보이고 있다. 본 연구에서 개발된 수법은, 첨단재료로서의 기대가 높아짐에도 불구하고 제작 및 실험이 곤란한 FGM재료의 손상강도평가 및 설계지원수법으로서 실용상 매우 유용한 수법이라고 판단된다. 또한, 모재, 용접재료, HAZ부 등 각기 다른 재료특성을 지닌 용접부에 있어서의 손상/균열발생 등, 대다수의 열변형/강도 문제에 관한 예측수법으로 적용될 수 있으리라 판단된다.

#### Reference

1. M. Grujicic and H. Zhao, "Optimization of 316 Stainless/Alumina Functionally Graded Material for Reduction of Damage Induced by Thermal Residual Stress", *Mat. Sci. & Engng. A252* (1998), 117-132.
2. G.N. Preveen and J.N. Reddy, "Nonlinear Transient Thermoelastic Analysis of Functionally Graded Ceramic-Metal Plates", *Int. J. of Solids and Structures*, Vol. 35, No.33 (1998), 4457-4476.
3. J.M. Lee and Y. Toi, "Elasto-Plastic Damage Analysis of Functionally Graded Material Disk Subjected to Thermal Shock and Thermal Cycle", *Trans. of Japanese Society of Mechanical Engineering (A)*, Vol.67, No.3 (2001). 503-510, (in Japanese).
4. J.M. Lee "A Study of Computational Mechanics of Thermal Damage Problems for Structural Members", Ph.D. Dissertation, Dept. of Naval Architects and Ocean Engineering, University of Tokyo, (1999)(in Japanese)
5. Y. Toi, J.M. Lee, "Thermal Elasto-viscoplastic Damage Analysis of Pylon Members in Hot-Dip Galvanization", *Trans. of the 15th International Conference on Structural Mechanics in Reactor Technology (SMiRT-15)*, Vol.2, Seoul, Korea, (1999), 245-252.