

열충격에 의한 세라믹코팅재의 파괴거동

한 지 원

호서대학교 기계공학과

(2003. 8. 13. 접수 / 2003. 12. 4. 채택)

Fracture Behavior of Ceramic Coatings Subjected to Thermal Shock

Ji-Won Han

Department of Mechanical Engineering, Hoseo University

(Received August 13, 2003 / Accepted December 4, 2003)

Abstract : An experimental study was conducted to develop an understanding of fracture behavior of ceramic thermal barrier coating when subjected to a thermal shock loading. The thermal loading was applied using a 1.5kW CO₂ laser. In the experiments, beam-shaped specimens were subjected to a high heat flux for 4sec and cooling of 7sec in air. The interface crack length was increased as the crack density, the surface pre-crack length and the coating thickness were increased. The center surface crack length was increased as the maximum surface temperature got higher and the surface pre-crack length got shorter.

Key Words : thermal barrier coating, thermal shock, surface pre-crack, interface crack

1. 서 론

가스터빈엔진의 열효율은 터빈흡입온도에 크게 의존한다. 즉 높은 흡입온도는 높은 열효율을 나타낸다. 그러므로 보다 효율적인 가스터빈의 개발을 위해서는 고온, 고강도 재료나 열저항코팅 기술의 개발이 필수적이다. 최근에는 열차폐코팅(Thermal barrier coatings)을 사용하여 터빈의 흡입온도를 점차 증가시키고 있는 실정이다^{1,2)}.

열차폐코팅은 세라믹코팅, 금속 Bond coat, 금속 모재(Substrate)로 구성되며, 금속모재에 세라믹코팅을 하면 열팽창계수의 차이로 쉽게 분리되기 때문에 중간에 Bond coat를 첨가하여 열팽창계수 차이를 완화시키고, 경계층에서 산화막 형성을 막아주게 한다^{3,4)}.

엔진내벽에 사용된 열차폐코팅은 연료의 연소분사에 의한 열충격(Thermal shock)을 짧은 시간내에 집중적으로 받아 세라믹과 Bond coat의 경계층에서 생기는 균열로 인하여 세라믹코팅이 분리되거나 파쇄되는 현상이 나타난다. 이같은 파괴의 메카니즘은

아직 정확히 파악되지는 않았지만 두 접합재의 열팽창계수 차이에 의한 응력, Bond coat의 산화막, Creep, 미세구조 등이 주된 요인임이 보고되고있다⁵⁻⁷⁾.

이를 보완하기 위해서 최근에는 경사기능(Functionally graded) 열차폐코팅에 대한 연구가 일본, 미국 등 선진국에서 활발히 진행되고 있다. 이는 Bond coat부분을 두께방향으로 다단계로 물성치를 변화시켜 두 접합재간의 온도차를 점진적으로 감소시키기 위한 재료로서 열차폐코팅의 내구성과 신뢰성을 크게 높일 수 있다는 연구 보고가 있으나 제작상의 어려움과 많은 경제적 부담으로 아직은 실용화되지 못하는 실정이다^{8,9)}.

세라믹코팅방법으로 전자빔-물리증착법(Electron beam-physical vapour deposit)과 플라즈마 용사(Plasma spray) 등이 주로 이용된다.

전자빔-물리증착법에 의한 코팅은 Fig. 1과 같이 기둥형미세구조(Columnar microstructure)로 Strain tolerance가 우수하여 열적-기계적저항을 향상시켜 사용수명을 연장시킬 수 있지만, 열전도성이 높아서 열차폐기능이 다소 떨어지고 생산가격이 너무 비싼 것이 단점이다.

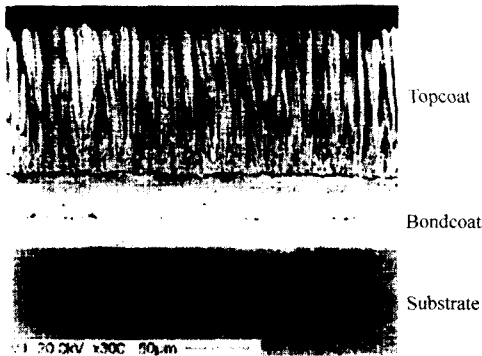


Fig. 1. Columnar microstructure of EB-PVD coating

플라즈마용사에 의한 코팅은 얇은 층상미세구조로 제작공정이 쉽고, 생산가격이 싸며, 열전도성이 낮아 온도차를 크게 할 수 있으나 열적-기계적저항은 전자빔-물리증착법에 의한 코팅보다 낮다^{10,11)}.

Sumner 등¹²⁾은 플라즈마 용사 코팅재에 전자빔-물리증착법에 의한 코팅재의 기동형 미세구조의 역할을 할 수 있는 표면예균열(Surface pre-crack)을 만들고 반복적인 열부하(Cyclic thermal loads)를 가하는 실험에서 표면예균열이 재료의 파쇄 저항력을 증가시킨다고 하였다.

지금까지의 코팅재의 수명 평가에 대한 연구는 표면예균열이 없는 코팅재에 대해 반복적 열부하나 전기로 환경하에서 수행되고 있으나¹³⁾, 열충격하에서 표면예균열이 있는 코팅재에 대한 연구는 극히 미진한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 플라즈마 용사 세라믹코팅재에 표면예균열을 만들고, 한번의 열충격을 가했을 경우 표면예균열과 코팅두께가 경계부균열(Interface crack)의 발생에 미치는 영향을 알아보고자 한다.

2. 실험방법

2.1. 시험편

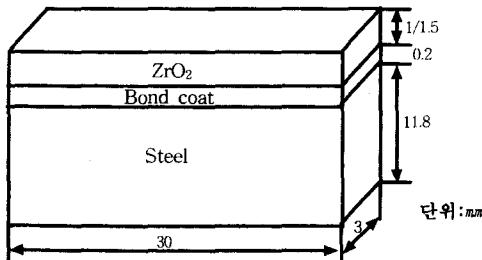


Fig. 2. Specimen geometry

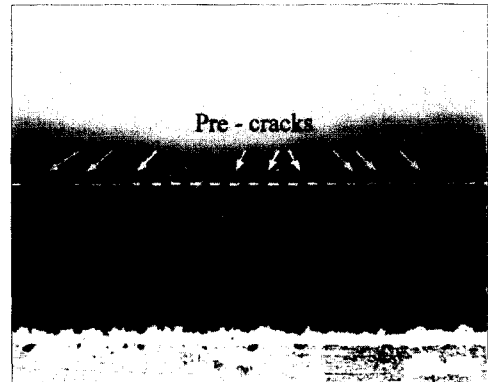


Fig. 3. Crack morphologies in specimen with pre-cracks

표면의 코팅재료는 부분안정화 지르코니아(PSZ)인 ZrO_2 이며, 코팅두께는 1mm와 1.5mm로 하였고, 중간 Bond coat는 NiCoCrAlY를 0.2mm로 하였으며, 금속모재부분은 Steel로 11.8mm로 하였다. 시험편의 두께는 3mm로 하였다.

세라믹 표면에는 0.15, 0.5, 1mm길이의 표면예균열을 만들었으며, 균열밀도(균열갯수/1인치)는 8, 17, 21로 하였다. Fig. 3은 균열길이 0.15mm, 균열밀도 21인 경우의 시험편을 나타낸 것이다.

각 시험편은 CNC에 부착된 Water jet로 잘랐으며, 자른면은 자를 때 생길 수 있는 미세균열 제거와 테스트 후에 발생된 균열길이를 측정하기 위해 Emery paper로 양면을 각각 약 0.1mm정도 연마하였다. 세라믹 표면에는 정확한 온도측정을 위하여 Pyromark 시리즈 2500페인트를 총두께가 $40\mu m$ 를 넘지 않게 3번 칠하고, 18시간 공기중에서 건조시킨 후 전기로에서 $250^\circ C$ 로 2시간 가열하였다.

2.2. 실험장치

세라믹의 표면에 열을 가하기 위해서 1.5kW CO_2 Laser를 이용하였다. 각 시험편에는 4초 동안 가열 후 7초 동안 공기중에서 냉각을 시켰다. 열 가열 시 표면온도 측정은 $500\sim 2500^\circ C$ 까지 측정 가능한 Iacon사의 Pyrometer(Model 7000)를 사용하였다. 균열길이 측정은 200배 배율로 전자현미경을 이용하였다.

3. 해석결과 및 검토

3.1. 표면예균열의 거동

Fig. 4는 코팅두께 1mm, 표면예균열길이 0.15mm, 균열밀도 21인 경우 실험 후 시험편의 중앙에 위치한

표면균열과 경계부균열의 형상을 대표적으로 나타낸 것이다.

Kokini 등⁸⁾은 수치해석을 통해서 세라믹 코팅의 표면에서는 열을 가할 때 압축응력을 보이거나 냉각이 시작되면 인장응력으로 바뀌기 때문에 표면균열의 개구부분이 열리면서 표면균열을 크게 성장 시키며, 세라믹표면이 굽힘현상이 일어나기에 표면균열의 바로 아래의 경계층부분이 위쪽으로 따라 올라가는 현상이 나타나서 결국 경계부균열이 발생한다고 하였다.

그림에서도 표면에균열중 시편의 중앙에 위치한 균열이 가장 크게 진전을 하였으며, 이 균열이 경계부균열의 발생, 성장에 주도적 영향을 미치고 있음을 보여주고 있어 kokini의 보고와 잘 일치하였다.

Fig. 5는 코팅두께 1mm, 균열밀도 21인 경우 표면에균열길이가 0.15mm와 0.5mm일 때 중앙에 위치한 표면균열길이가 가열온도의 관계를 나타낸 것이다.

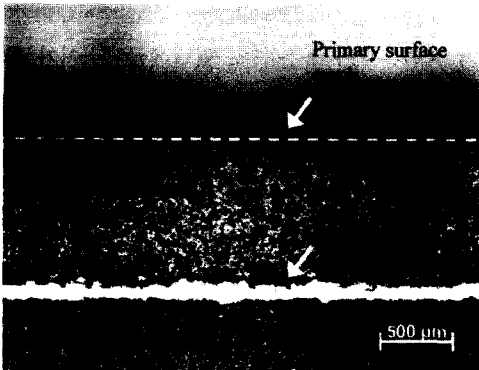


Fig. 4. Crack morphologies after heat flux

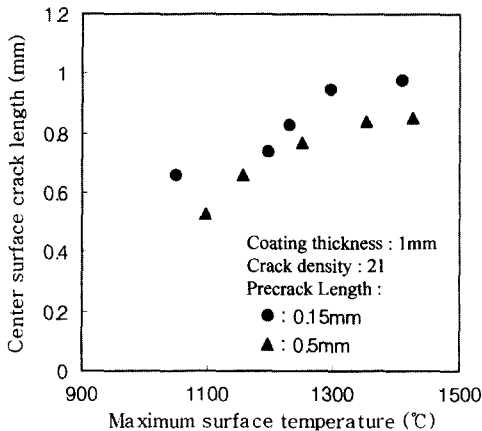


Fig. 5. Center surface crack length vs. maximum surface temperature in different precrack length

그림에서 0.15mm인 경우가 0.5mm보다 표면균열 길이가 길게 발생됨을 알 수 있다. 0.15mm에서는 가열온도가 1400°C가 되면 균열이 두께 1mm를 거의 관통하게됨을 보이거나 0.5mm에서는 균열이 0.85mm정도 성장하기에 1400°C 이상의 열이 가해져야 두께 1mm를 관통할 수 있고 경계부균열과 함께 세라믹 코팅부분이 분리 또는 파쇄될 수 있을 것으로 사료된다. 즉 표면에균열길이가 0.5mm가 0.15mm보다 더 높은 가열온도에서 코팅의 분리나 파쇄됨을 알 수 있다.

3.2. 균열밀도의 영향

Fig. 6은 코팅두께 1mm, 표면에균열길이가 0.5mm인 경우 균열밀도가 경계부균열길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

균열밀도 8인 경우 1100°C까지는 경계부균열이 발생하지 않았으나 그 이상온도에서 발생하며, 온도 증가와 함께 균열길이가 증가함을 보이고 있다. 균열밀도 17인 경우도 1230°C까지는 균열이 발생하지 않았으나 그 이후 균열밀도 8인 경우와 같은 현상을 보였다. 그림에서 균열밀도 8이 균열밀도 17보다도 낮은 온도에서부터 경계균열의 발생을 나타냈으며, 같은 온도에서도 훨씬 길게 나타났다. 이는 균열밀도가 낮을수록 낮은 가열온도에서 경계부로 균열이 전파되고, 동일온도에서도 균열길이가 길게 전파된다.

3.3. 표면에균열길이의 영향

Fig. 7는 코팅두께 1mm, 균열밀도 21인 경우 표면에균열길이가 경계부균열길이에 미치는 영향을 나타낸 것이다.

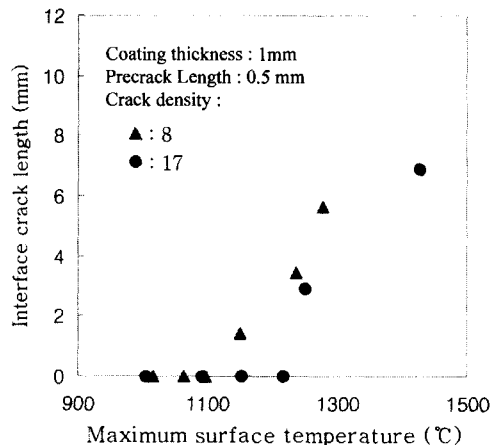


Fig. 6. Interface crack length vs. maximum surface temperature in different crack densities

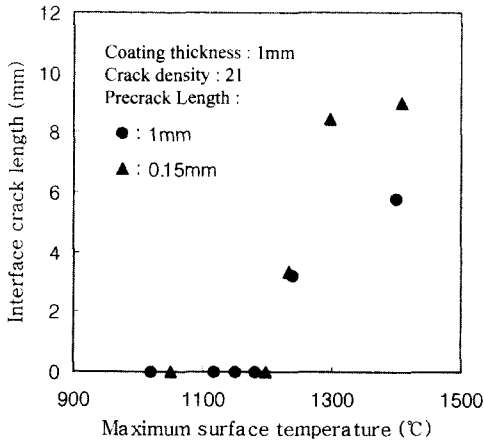


Fig. 7. Interface crack length vs. maximum surface temperature in different precrack length

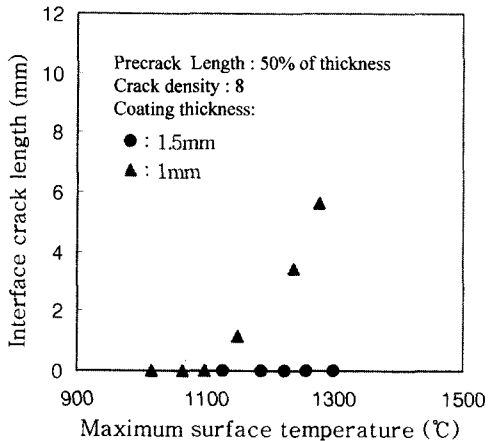


Fig. 8. Interface crack length vs. maximum surface temperature in coating thickness

그림에서 표면예균열길이 1mm와 0.15mm인 경우 가열온도가 1200°C까지는 경계균열이 발생하지 않았으나 그 이상의 온도에서 발생하며 경계부균열길이는 표면예균열길이 1mm가 0.15mm보다도 짧게 발생됨을 알 수 있다.

3.4. 코팅두께의 영향

Fig. 8은 코팅두께 1mm와 1.5mm가 경계부균열 길이에 미치는 영향에 대해 나타낸 것이다. 균열밀도는 8이며, 표면예균열길이는 각 두께의 50%로 하였다.

그림에서 코팅두께 1mm의 경우 가열온도 1100°C까지는 경계부균열이 발생하지 않았으나 이 온도 이상에서 발생하며 균열길이가 크게 증가됨을 보

고 있으나 코팅두께 1.5mm인 경우에는 1300°C까지도 경계부균열이 발생하지 않고 있음을 보이고 있다. 이는 코팅두께가 두꺼울수록 경계부균열의 발생은 어려우며 내구성이 향상될 수 있음을 알 수 있으나 코팅에 소요되는 경제적부담이 증가되고 코팅두께의 제약을 받는 경우가 많다. 따라서 최적의 코팅두께 조건을 설정하는 것이 중요하다.

4. 결론

플라즈마 용사 세라믹 코팅재에 존재하는 표면에 균열의 형상이 열충격을 받았을 때 경계부균열의 발생에 미치는 영향에 대한 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 균열밀도가 높고, 표면예균열길이가 길고, 코팅 두께가 두꺼울수록 높은 가열온도에서 표면균열이 경계부로 전파하였으며 경계부균열의 길이는 짧게 발생하였다.
- 2) 표면온도가 높을수록, 표면예균열길이가 짧을수록 시편중앙에 위치한 표면균열길이는 증가함을 나타냈다.

참고문헌

- 1) R. VaBen, G.Kerkhoff, D.stover, "Delopmernt of a micromechanical life prediction model for plasma sprayed thermal barrier coatings", *Materials Science and Engineering*, A 303, pp. 100~109, 2001.
- 2) W. Beele, G. Marijnissen, A. Van Lieshout, "The evolution of thermal barrier coatings-status and upcoming solution for today's key issues", *Surface and Coatings Technology*, 120~121, pp. 61~67, 1999.
- 3) P.K. Wright, A. G. Evans, "Mechaniss governing the performance of thermal barrier coatings", *Current Opinion in Solid-satate and Materials Science*, 4, pp. 255~265, 1999.
- 4) A. Rabiei, A, G. Evans, "Failure mechanisms associated with the thermally grown oxide in plasmas-sprayed thermal barrier coatings", *Acta Materials*, 48, pp. 3963~3976, 2000.
- 5) X. Q. Ma Termoto, "Quantitative acoustic emission analysis of plasma sprayed thermal barrier coatings subjected to thermal shock test", *Materials Science*

- and Engineering, A 308, pp. 101~110, 2001.
- 6) A. Kucuk, C. C. Bermdt, "Influence of plasma spray parameter on mechanical properties of yttria stabilized zirconia coatings", *Material Science and Engineering, A* 284, p. 29~40, 2000.
 - 7) K. W. Schliching, N. P. Padture, "Failure modes in plasma-sprayed thermal barrier coatings", *Materials Science and Engineering A00*. PP. 1~11, 2002.
 - 8) Klod Kokini, Jeffery Dejonge, "Thermal shock of functionally graded thermal barrier coatings with similar thermal resistance" *Surface and Coating with Technology*, No. 154, pp. 223~231, 2002.
 - 9) K. A. khor, Z. L Dong, Y. W. Gu, "plasma sprayed functionally graded thermal barrier coatings", *Materials Letters* 38, pp. 437~444, 1999.
 - 10) Bertrand Saint Ramond, "HITS - High insulation thermal barrier coating system", *Air 8 Space Europe*, Vol. 3, No 3. pp.174~174, 2001.
 - 11) M. Calies, J.-L. chaboche, "Numerical simulation of EB-PVD thermal barrier coatings spallation", *Acta Materialia*, 51, pp. 1133~1141, 2003.
 - 12) I.E. Sumner, D.L. Ruckle, "Development of improved-durability plasma sprayed ceramic coatings for gas turbine engines", *NASA Technical Memorandum* 81512, 1990.
 - 13) M.F.J. Koolloos, J.M. Houben, "Behavior of Plasma-sprayed thermal barrier coatings during thermal cycling and the effect of a preoxidized NiCrAlY bond coat", *Journal of Thermal Spray Technology*, Vol. 9, No 1. pp. 49~58, 2000.