

플라즈마 용사법에 의한 열차폐 코팅의 열피로에 따른 AE신호 특성 연구

박진효*(부산대 대학원 정밀기계공학과), 이구현, 예경환(한국기계연구원),
김승태, 전체홍(한전기공), 김정석(부산대 기계공학부)

A Study on Acoustic Emission Characteristics through the Cyclic Thermal Test of Thermal Barrier Coating by Plasma Spray Process

J. H. Park(Mech. Eng. Dept., PNU), K. H. Lee, K. H. Ye(Surface Eng. Dept., KIMM),
S. T. Kim, C. H. Jeon(Korea Plant Service & Engineering Co.), J. S. Kim(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

This paper is to investigate a defect for thermal barrier coating layers by acoustic emission method in 4-point bending test. The two-layer thermal barrier coating is composed of 150 μ m CoNiCrAlY bond coating by vacuum plasma spray(VPS) process and 250 μ m ZrO₂-8wt%Y₂O₃ ceramic coating layer by air plasma spray(APS) process on Inconel-718. The specimen prepared by cyclic thermal test(500, 1000, 2000cycle) at 1050 $^{\circ}$ C. The AE monitoring system is composed of PICO type sensor, a wide band pre-amplifier(40dB), PC and AE DSP(16/32 PAC) board. The AE event, amplitude, Cumulative energy and count of coating specimens is evaluated according to cyclic thermal test.

Key Words : Plasma Spray(플라즈마 용사), Thermal barrier coating(열차폐 코팅), Acoustic Emission(음향방출), 4-Point Bending Test(4점 굽힘시험)

1. 서론

항공기 및 선박추진제 그리고 발전기에 널리 사용되고 있는 가스터빈 엔진의 열차폐를 위해 플라즈마 용사법(plasma spray method)을 이용한 열차폐코팅(thermal barrier coating, TBC)기술이 널리 사용되고 있다. 일반적으로 열차폐용 코팅층은 바깥쪽에 있는 단열 효과가 우수한 ZrO₂층의 탑(top) 코팅과, 기판과 이 층 사이에 있는 MCrAlY(M=Ni and/or Co) 본드(bond)코팅의 이중 구조로 이루어져 있다.^{1,4} 국내의 가스터빈 발전소의 경우, 주로 기동과 정지가 빈번한 부하조절용으로 이용되고 있어, 열피로에 의한 열차폐 코팅층의 파괴가 가장 중요한 문제로 되고 있다.

이러한 코팅층의 파괴 거동을 관찰, 평가하기 위해 적용되는 비파괴검사로는 방사선 투과법(radio-graphy testing, RT), 초음파 탐상법(ultra-sonic testing, UT), 와전류 탐상법(eddy current testing, ECT), 자분 탐상법(magnetic particle testing, MT), 침

투 탐상법(penedrant testing, PT), 음향 방출법(acoustic emission, AE)등이 있다. 대부분은 정지 중에 결함의 발생을 감시하는 방법이지만, 음향방출 시험은 가동상태를 유지하면서 결함의 발생이나 성장유무를 연속적으로 감시할 수 있으며, 또한 금속 간의 결함이나 마찰의 직접적인 원인에 근거한 신호를 감지하고 분석하기 때문에 상대적으로 손상의 조기 탐지와 센서만을 원하는 부위에 부착하기만 하면 설비에는 전혀 영향을 주지 않는다는 장점을 가지고 있다. 이러한 원인으로 기계부품의 운전 중에 용사 부재의 밀착성을 검사, 평가하기 위해 AE법을 이용한 기술에 대한 요구가 높아지고 있다.^{2,7}

따라서 본 연구에서는 플라즈마 용사법에 의한 열차폐 코팅층의 기계적 특성과 고온피로시험에 의한 코팅층의 박리현상을 음향방출(acoustic emission, AE)법으로 평가하기 위하여, Inconel-718을 모재(substrate)로 하여 본드코팅재로서 금속계 분말 CoNiCrAlY를 진공플라즈마 용사(vacuum plasma spray, VPS)법에 의한 본드코팅과 탑코팅재로서 열차

폐용 피복재인 $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$ 를 대기플라즈마 용사 (air plasma spray, APS)코팅한 후, 고온피로 실험에 따라 시험편을 마련하였다. 이들에 대한 4점 굽힘 시험 시의 AE특성을 파악하여 코팅재의 박리현상을 검토하였다.

2. 실험방법

2.1 시험편의 제작

실험에 사용된 모재(substrate)는 Inconel-718을 사용하였으며, 시험편의 형상 및 치수는 40mm(길이)×5mm(폭)×4mm(높이)로 하였다. 코팅에 앞서 전처리로서 기재의 표면을 Table 1의 조건으로 블라스팅을 실시한 후, 초음파세척기에서 초음파 세척을 약 15분 동안 실시하였다. 열차폐 코팅에 있어서 본드 코팅은 진공플라즈마 용사장치를 이용하였고, 탑 코팅은 대기플라즈마 용사장치를 이용하였다. Table 2은 코팅조건을 나타내었다. 코팅재료는 본드 코팅 재료로 CoNiCrAlY 합금분말을, 탑 코팅 재료로 $ZrO_2-8wt\%Y_2O_3$ 세라믹 분말을 사용하였다. 코팅 층의 두께는 본드 코팅은 150 μ m, 탑 코팅은 250 μ m로 하였으며, 코팅 분말의 물리적 성질은 Table 3에 나타내었다.

제조된 코팅층은 광학 및 주사전자현미경으로 시료의 단면 및 표면 모폴로지 조사하였고, 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 미소경도를 측정하였다. 경도값은 10회 측정 후 최대/최소 값을 버리고 평균을 내어 산출하였다. 또한, XRD를 이용하여 코팅층의 상분석을 하였다.

Table 1 Conditions of grit blasting process

Parameters	Condition
Distance	150mm
Grit	White Alumina
Blasting pressure	7kg/cm ²
Grit size	46 mesh
Roughness(Ra)	3.62 μ m

Table 2 Conditions of vacuum plasma spraying process

Method of plasma spray	VPS	APS
Working Pressure[mbar]	200	1013
Plasma Arc current[A]	800	600
Primary Gas[SLPM]	55	45
Secondary Gas[SLPM]	6	11
Stand-off distance[mm]	300	63.5
Powder feeding rate[g/min]	48	45
Carrier Gas[SLPM]	3	6

Table 3 Chemical composition and particle size of coating materials

Commercial Name	Composition					Average Particle Size
	Co	Ni	Cr	Al	Y	
72.26.1C CoNiCrAlY	Bal.	32	21	8	0.5	45 μ m
ZrO ₂ -8wt% Y ₂ O ₃	ZrO ₂		Y ₂ O ₃			70 μ m
	Bal.		8			

2.2 열피로 저항성 평가

코팅층의 파괴(failure)는 열팽창계수 불일치에 의한 열응력과 세라믹코팅층의 상(phase)변화, 금속 결합층의 산화에 의한 금속결합층과 세라믹코팅층의 접합강도 감소에 기인한다.⁸

용사 코팅층의 미세구조 및 기계적 특성을 평가할 목적으로 열피로(cyclic thermal test) 저항성 평가를 행하였다.

고온피로시험은 한국공업규격 세라믹용사 시험법(KSD 8333)을 준하였다. 시험은 자체 제작한 고온 피로시험기(Fig. 1)을 이용하여 대기압분위에서 1050 $^{\circ}$ C의 온도조건으로 수행하였다. 온고구배를 50 $^{\circ}$ C로 유지시키기 위하여 시험편을 안에서 7분간 유지 후 밖에서 2분간 공랭시키는 과정을 한 사이클로 하여 500, 1000, 2000회의 시험을 실시하였다.

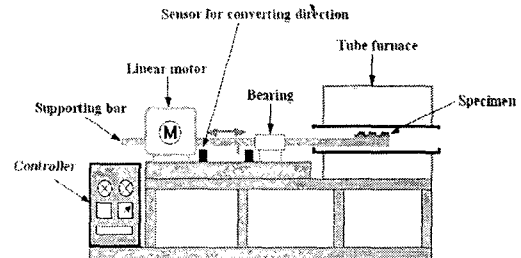


Fig. 3 The schematic diagram of thermal fatigue test

2.3 AE실험

AE실험은 만능시험기(Instron 4206)를 이용하여 4점 굽힘시험(4-point bending test)을 하였으며, 크로스헤드 이송속도는 0.3mm/min으로 하였다. 실험장치 구성은 Fig. 2와 같다. AE센서에서 감지된 신호는 전치증폭기에서 40dB 증폭하고 잡음을 줄이기 위해 100~1,200kHz의 대역여과를 한 후 AE DSP 16/32-[PAC]보드에 입력되었다. AE검출에 사용된 센서는 PICO Type[PAC]의 150kHz의 공진주파수 범위를 감지하는 압전형 변환기를 사용하였다. 총 이득(gain)은 60dB이며, 문턱값(threshold)은 40dB로 설정하였다. AE센서는 고감도이기 때문에 외부의 잡음에 대

한 영향을 최소화되도록 안정된 환경을 조성하여 AE 신호를 계속하였다.

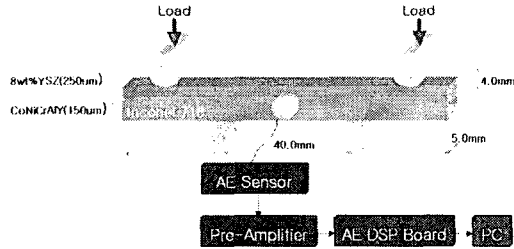


Fig. 2 The schematic diagram of AE test

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세구조 분석

열피로 시험에 따른 경도(hardness) 측정 결과를 Fig. 3에 나타내었고, 세라믹 코팅층의 표면을 XRD 분석하여 상변화를 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 3에서 보는바와 같이 세라믹 층의 경도는 980~1080Hv 내외였고, 본드 코팅층은 370~430Hv 정도를 나타내었다. as-spray한 시편에 비해 열사이클 횟수가 증가 하면서 미세하나마 경도가 증가하다가 2000cycle에서 다소 감소하는 경향을 보이고 있다. 경도 상승의 원인은 고온의 분위기에서 생성된 산화물 형성에 기인하는 것으로, 경도 감소는 열응력에 따른 균열 생성에 기인한 것으로 사료된다.⁹

Fig. 4의 XRD 분석결과 용사전의 ZrO₂-8wt% Y₂O₃ 세라믹 분말은 정방정과 단사정이 혼재해 있으나 용사 후의 코팅층은 대부분 정방정으로 이루어져 있다. 또한, 열피로 시험에 따른 상변태는 거의 일어나지 않는 것으로 판단되며, 본 실험에서는 상변태 효과는 거의 없는 것으로 사료된다.

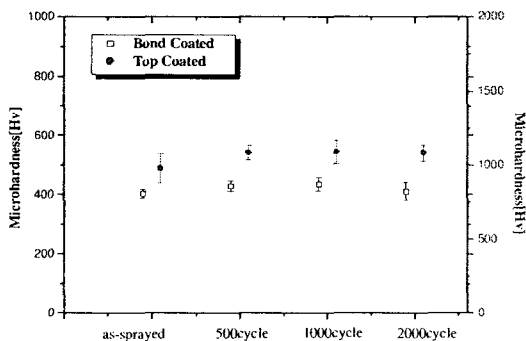


Fig. 3 Microhardness variations before and after cyclic thermal test

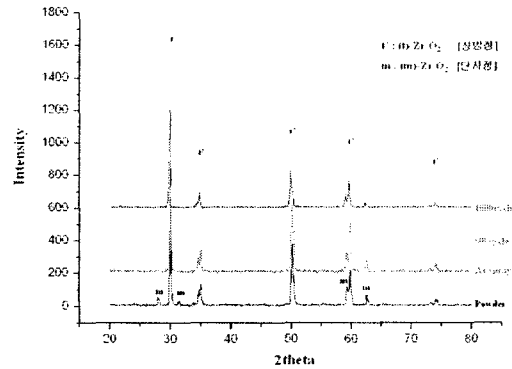


Fig. 4 The XRD analysis of ZrO₂ powder and TBC

3.2 AE특성

코팅을 하지 않은 모재와 as-spray한 시편 그리고 500, 1000, 2000cycle 열피로한 시편의 AE 사상수(event)와 AE 진폭(amplitude)를 Fig. 5에 나타내었고, 누적량 AE 계수(count) 및 누적량 AE 에너지(energy)를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 AE 사상수 특성은 용사 피막을 가진 코팅재가 모재에 비해 활발한 음향방출이 일어나고 있다. 열피로한 시편의 경우 굽힘 시험 시작 초기부터 음향방출이 발생하고 있으며, as-spray시편에 비해 음향방출 발생 시간이 단축되고, AE 사상수는 증가하고 있다. 이는 코팅재가 고온의 환경에 장시간 노출되어 경한 성질로 변한 것으로 추정된다. 또한, 열피로 횟수를 2000 cycle 했을 때 AE 사상수가 감소하고 있어 열피로 횟수의 증가에 따라 모재와 코팅층간의 열응력 불일치에 따른 결합이 발생하였음을 보여주고 있다. AE진폭 특성은 모재를 제외한 모든 시험편은 코팅층의 음향방출원으로 추정되는 음향방출을 하고 있다. 열피로한 시편은 시험시작 초기부터 AE진폭이 급증하고 있으며, 이는 코팅층의 박리 및 파괴 그리고 소성변형으로 추정된다. 또한, 열피로 횟수가 증가함에 따라 AE진폭이 감소하는 경향을 보이고 있으며, 이는 열피로 횟수에 따른 코팅층의 결합으로 인해 밀착성을 감소하고 있다고 추정된다.

Fig. 6는 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지특성을 나타내었다. AE 사상수 특성에서와 같이 모재와 as-spray한 시편에 비해 열피로한 시편이 누적량 AE 계수와 누적량 AE 에너지가 빨리 발생하며, 열피로 횟수의 증가에 따라 감소하는 경향을 보여주고 있다. 이는 열피로에 의한 결합의 성장과 균열생성에 따른 박리 및 파괴 그리고 소성변형으로 추정된다.

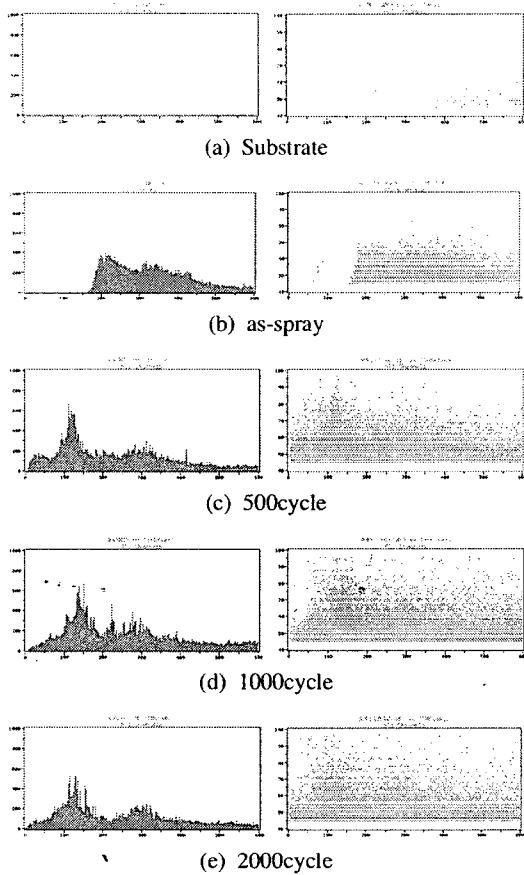


Fig. 5 AE event and amplitude depending on time

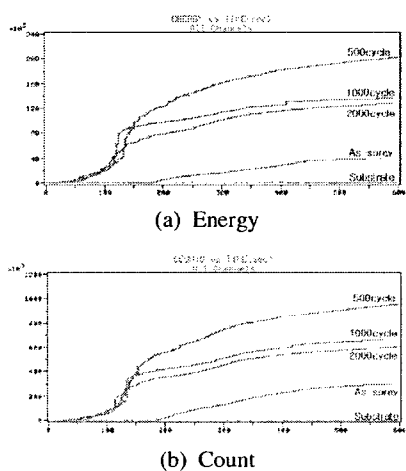


Fig. 6 Cumulative energy and count depending on time

4. 결론

플라즈마 용사법에 의한 열차폐 코팅제의 기계적 특성과 고온피로시험에 의한 코팅제의 박리현상을 음향방출법으로 평가한 결과는 다음과 같다.

- (1) 코팅층의 경도측정에서 세라믹 층의 강도는 980~1080HV, 본드 코팅층은 370~430HV이고, 열사이클 횟수 증가에 따라 경도가 증가하다가 2000cycle에서 다소 감소한다.
- (2) XRD 상분석 결과 열피로 시험에 따른 상변태는 거의 일어나지 않았다.
- (3) 열피로 시험에 따른 코팅층의 결함을 AE 사상수, AE 진폭 및 AE 에너지와 계수 등의 신호 분석을 통해 가능하며, AE 신호는 코팅층의 박리 및 탈락이 발생하는 구간에서 급격히 증가한다.
- (4) 열피로 횟수의 증가에 따라 AE 사상수, AE 진폭 및 AE 에너지와 계수는 감소한다.

참고문헌

1. T.E. Strangman, "thermal barrier coating for turbine airfoils, Thin Solid Films, 127, pp. 93-105, 1985
2. R.D. Maier, C.N. Scheuermann and C.W. Andrews, "Degradation of a two-layer thermal barrier coating under thermal cycling," Am. Ceram. Soc. Bull., 60, pp. 55-561, 1981
3. A. Bennett, "Properties of thermal barrier coatings," Mater. Sci. Technol., 2, pp. 257-261, 1986
4. L. Lclait, S. Alperine and R. Mevrel, "Alumina scale growth at Zirconia-MCrAlY interface: A microstructure study," J. Mater. Sci., 27, pp. 5-12, 1992
5. Ronnie K Miller, Paul McIntire, "Nondestructive testing handbook acoustic emission testing," American Society for Nondestructive Testing, 2nd, Vol.5, pp. 23-33, 1997
6. 윤동진, "음향방출을 이용한 구조물진단기술" 대한기계학회지, 제22권 6호, pp. 47-53, 1997
7. 오세규, "AE에 의한 비파괴검사와 응용," 한국박용기관학회지, 제12권 4호, pp. 2-9, 1998
8. R. A. Miller and C. E. Lowell, Thin Solid Films, 95, 265, 1991
9. G.W. Stachowiak, G.B. Stachowiak, Wear, 143, pp.177-295, 1991