

용사법에 의해 제작된 금속/세라믹 경사기능 재료의 기계적 특성

Mechanical Properties of Metal/Ceramic FGM made by Thermal Spraying Method

김영식 · 남기우 · 김현수 · 오명석 · 김귀식

Y. S. Kim, K. W. Nam, H. S. Kim, M. S. Oh and K. S. Kim

Key Words : Plasma Spraying(플라즈마 용사), Functionally Graded Materials(경사기능 재료), Al₂O₃(산화 알루미늄), NiCrAlY(니켈-크롬-알루미늄-이트륨 합금), Thermal Shock Resistance (내열충격성), Adhesive Strength(밀착강도), 3 Point Bending Test(3점굽힘시험), Acoustic Emission(음향방출)

Abstract : This study was aimed at development of fabrication process of functionally graded materials(FGM), consisting of metal and ceramic by thermal spraying method. NiCrAlY/Al₂O₃ FGM were made by using plasma spraying onto the SS400 carbon steel substrate. And mechanical properties such as microhardness, thermal shock resistance and adhesive strength of the coating layer were investigated. Adhesive strength was evaluated by acoustic emission method. It was resulted that NiCrAlY/Al₂O₃ FGM made by thermal spraying method showed excellent thermal shock resistance and adhesive strength compared to the other lamellar structures of sprayed coatings and that AE is useful tool to evaluate the defect of thermal sprayed coating layer.

1. 서 론

현재 항공기나 자동차 등의 부재, 혹은 초경질 절삭공구 등에 널리 사용되고 있는 구조용 세라믹은 가벼우면서도 내열, 내식, 내마모 등에 있어서 탁월한 기계적 특성을 나타내고 있다. 반면 세라믹은 충격에 약하고, 가공성이 불량하다는 치명적인 결점도 함께 지니고 있다. 따라서 구조용 재료로서 세라믹을 보다 널리 활용하기 위해서는 세라믹 재료가 지닌 기능성을 충분히 살리면서도 취약점을 보완할 수 있는 금속과의 복합화가 필수적이라 할 것이다. 브레이징법, 고상접합법, 용사법 등에 의한 금속과 세라믹의 복합화^{1,4)}는 세라믹의 탁월한 기능성을 살리면서도, 금속재료의 기계적 강도를 유지할 수 있는 매우 유용한 복합 재료의 제조방법으로 인식되고 있는데, 금후 우주·항공, 원자력, 자동차 등 시대를 앞서가는 공업분야에 폭넓게 이용될 전망이다.

한편, 물성이 다른 두 재료의 복합화에 있어서 가장 큰 문제점으로 지적되고 있는 것은 계면에서의 양재료의 급격한 열팽창계수의 차로 인한 열응력의 발생이다⁵⁻⁸⁾. 차세대 항공기의 기체구조나 엔진부재 혹은 핵융합로 구조체의 실현에는 각종 극한의 환경, 특히 초고온환경에서의 사용을 감당할 수 있는 재료가 요구된다. 실제로 이미 실용화되고 있는 가스터빈 엔진을 생각해보면 표면온도 2000K, 온도낙차 1000K라는 매우 가혹한 사용환경하에 있다⁹⁾. 이러한 상황하에서 발생하는 열응력은 종래의 단열코팅(Thermal Barrier Coating : TBC)¹⁰⁻¹³⁾ 개념만으로는 대응이 불가능한데, 경사기능재료(Functionally Graded Materials : FGM)는 바로 이러한 문제를 발단으로, 물성이 다른 이종재료의 계면에 있어서의 급격한 물성차 특히 열팽창계수의 차를 완화시켜 열응력의 발생을 저감시키고자하는 착상에서 비롯된 전혀 새로운 개념의 신재료로서, 최근 국내외적으로 많은 관심을 모으고 있다¹⁴⁻²⁰⁾.

현재까지 이루어진 FGM 관련 연구결과들을 살펴보면 많은 연구가 CVD법, 분말야금법 또는 SHS 법 등에 의한 FGM 프로세스의 개발과 그 기계적·열적 특성의 규명에 집중되어 있고²¹⁻²⁶⁾, 용사법을

접수일 : 1998년 12월 16일
김영식, 오명석 : 부경대학교 기계·자동차공학부
남기우 : 부경대학교 재료공학과
김현수 : 부경대학교 대학원
김귀식 : 제주대학교 기계공학과

이용한 FGM 관련 연구²⁷⁻²⁹⁾는 여타의 프로세스에 비하면 그다지 활발하지 못한 형편이다. CVD법, 분말야금법 또는 SHS법 등에 의해 제작된 FGM은 제조 프로세스상 그 치수나 형상에 제한이 있어 실제 구조물이나 부재에 적용하기 어렵고, 따라서 아직은 시험편 수준에 머무르고 있는 것이 현실이다³⁰⁾. 이러한 관점에서 비교적 큰 구조물이나 부재에로의 적용이 용이한 용사법에 의한 FGM 개발의 필요성이 절실히 요구되는 것이다.

본 연구는 이와 같은 학문적, 사회적 배경하에, 고온의 사용환경하에서 견딜 수 있는 금속기지 내 열구조재의 개발을 목표로, 플라즈마 용사법에 의한 금속/세라믹 FGM을 제작하고, 특성평가시험을 통해 그 기계적 특성을 규명하였다.

2. 실험재료 및 방법

2.1 코팅 시험편의 제작

본 실험의 용사장치로는 Metco사제의 플라즈마 용사장치(Metco, 7MB)를 사용하고, 기재로서는 탄소강 평판(SS400, 40×50×6mm)을 사용하였다. 또한 FGM을 제작하기 위한 코팅 재료로서는 최대입경 56 μ m인 NiCrAlY 분말(Metco, Amdry962)과 최대입경 11 μ m인 Al₂O₃ 분말(Metco, 101NS)을 사용하였다.

전처리로서 #30 알루미늄 블라스트에 의해 기재 표면을 조면화하고 아세톤으로 초음파세척을 행한 후, 경사조성을 갖는 용사코팅층을 작성하였다. 즉, 기재의 표면에 먼저 NiCrAlY 분말을 용사하고, 그 위에 NiCrAlY 분말과 Al₂O₃ 분말을 각각 8:2, 6:4, 4:6, 2:8의 중량비로 혼합한 혼합분말을 차례로 용사하여 경사조성을 갖는 4층의 혼합피막을 작성한 후, top coating층에는 Al₂O₃ 분말을 용사하여, 모두 6층으로 구성된 복합코팅층을 작성하였다. NiCrAlY

분말과 Al₂O₃ 분말의 혼합시에는 볼밀에 의해 두 분말을 충분히 섞어 균일한 조성이 되도록 하였다. 각 층의 두께는 100 μ m로 하여 전체 코팅층의 두께가 600 μ m가 되도록 용사건의 이송속도와 pass수를 조정하였다.

한편 이와 같이 하여 제작된 경사조성을 갖는 용사코팅층의 기계적 특성을 종래의 단층코팅이나 혼합코팅의 그것과 비교하기 위해, 다시 재료 및 적층 형태가 다른 3종류의 코팅 시험편을 제작하였다. 3종류의 코팅 시험편 모두 적층두께를 600 μ m로 동일하게 하였다. 본 연구에서는 이상의 4종류의 코팅 시험편을 각각 다음과 같이 기술하기로 하였다.

- ALUNA : Al₂O₃ 분말을 용사한 코팅 시험편
- NIALY : NiCrAlY 분말을 용사한 코팅 시험편
- MIXED : Al₂O₃ 분말과 NiCrAlY 분말을 1:1의 중량비로 혼합하여 용사한 코팅 시험편
- GRADE : 경사조성을 갖는 6층의 복합코팅 시험편

Table 1, 2는 각각 본 실험에 사용한 Al₂O₃ 분말과 NiCrAlY 분말의 화학조성을, Table 3은 본 실험

Table 1 Chemical compositions of Al₂O₃ Ceramic powder used (wt%)

Al ₂ O ₃	TiO ₂
97	3

Table 2 Chemical compositions of NiCrAlY powder used (wt%)

Ni	Cr	Al	Y
Bal.	22	10	1

Table 3 Spraying conditions

Specimens		ALUNA	NIALY	MIXED	GRADE
Parameters					
Spray gun type		Metco 7MB			
Gas pressure (MPa)	Primary	0.69			
	Secondary	0.35			
Power	Arc Amps (A)	500			
	Arc Volts (V)	60	70	65	60-70
Carrier gas flow(m ³ /hr)		1.05			
Spraying distance(mm)		75	140	100	75-140
Spraying rate(kg/hr)		3.2	3.6	3.4	3.2-3.6

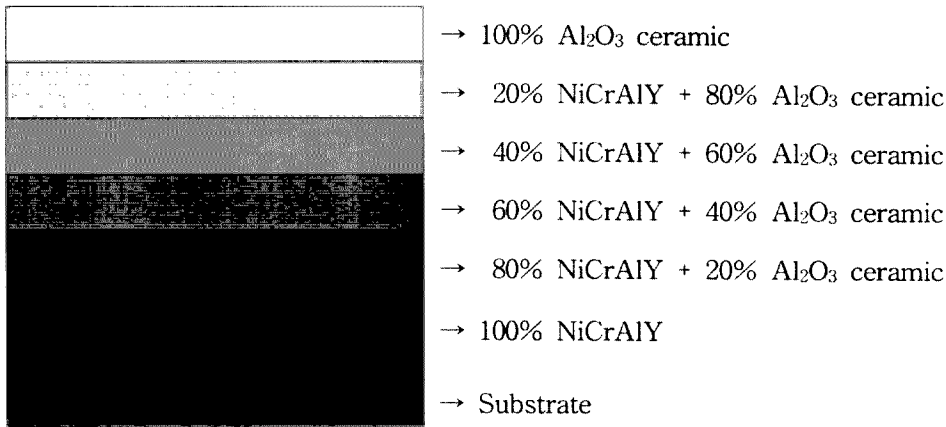


Fig. 1 Schematic illustration of specimen GRADE

에 있어서의 용사조건을 나타낸다. MIXED의 경우 용사조건은 ALUNA와 NIALY 용사조건의 중간값을 사용하였고, 경사조성을 갖는 6층의 복합코팅인 GRADE의 경우는 각 층마다 용사조건을 달리하여 base coating층은 NIALY와 같은 조건으로, top coating층은 ALUNA와 같은 조건으로 용사하였다. Fig. 1은 시험편 GRADE의 적층형태를 도식적으로 나타낸 것이다.

2.2 특성평가시험

상기와 같이 재료와 적층형태를 달리하여 제작된 4종류의 코팅 시험편에 대해 다음과 같은 특성평가 시험을 통해 그 기계적 특성을 평가하였다.

2.2.1 조직시험

주사형 전자현미경(Scanning Electron Microscope : SEM)을 이용하여 4종류의 코팅 시험편의 기공 및 단면의 미세조직을 분석하였다. 또한 경사 조성의 원활성을 검토하기 위해 Al₂O₃의 주 성분원소인 Al과 NiCrAlY의 주 성분원소인 Ni에 대한 SEM 선분석을 실시하였다.

2.2.2 미소경도시험

500gf의 압자를 이용한 마이크로비커스 경도시험 기로서 코팅층 단면의 미소경도를 측정하였다. 하중 유지 시간은 10초로 하고, 시험편당 측정개소는 ALUNA와 NIALY는 9개소, MIXED는 18개소, GRADE는 36개소로 하였다.

2.2.3 열충격시험

1073K의 전기저항로중에서 시험편을 10분간 유지한 후 실온의 청수중에 급랭시키는 방법으로 반복 열충격을 가하고, 매회의 열충격시마다 육안 및

확대경을 통해 코팅층의 크랙이나 박리 등의 손상을 관찰하였다. 열충격시험에 사용한 시험편은 10×30×6mm로 가공하였으며, 코팅 시험편의 10%이상 손상이 발생되면 전반적인 파손으로 간주하였다.

2.2.4 음향방출(Acoustic Emission : AE)법에 의한 밀착성시험

10×50×6mm로 가공된 코팅 시험편을 만능재료 시험기를 이용하여 1mm/min의 변위제어속도로 하중을 가하는 3점굽힘시험을 실시하고, 이때 센서를 통해 검출된 AE에너지를 증폭시켜 얻어진 데이터를 토대로 입자간의 결합력 및 기재와 코팅층 사이의 밀착성을 분석하였다. 만능재료시험기는 Instron사의 최대사용하중 5 ton의 것을 사용했으며, 3점굽힘시험시 하부의 지지점 사이의 거리는 40mm로 하였다. AE장치는 Physical Acoustic Co.사의 MITRAS 2001을 사용하였다. 센서는 150kHz의 공진주파수를 갖는 R-15센서를 사용하였고, 측정된 신호의 정확한 검출을 위해 100~300kHz의 필터를 사용하였다. Threshold는 31mV로 설정하였다. 코팅 시험편과 센서 사이의 접촉은 고진공 실리콘을 사용하여 그 밀착성을 증대시킴으로서 3점굽힘시험시 발생하는 이상신호 검출을 최대한 억제하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 경사조성을 갖는 용사코팅층의 조직 및 경도

Fig. 2는 ALUNA, NIALY, MIXED 및 GRADE의 미세구조를 나타내는 SEM사진이다. 사진상으로 ALUNA는 검게, NIALY는 상대적으로 희게 나타나고 있다. 또한 MIXED는 Al₂O₃ 분말과 NiCrAlY 분말이 혼재된 조직임을 보여주고 있으며, GRADE

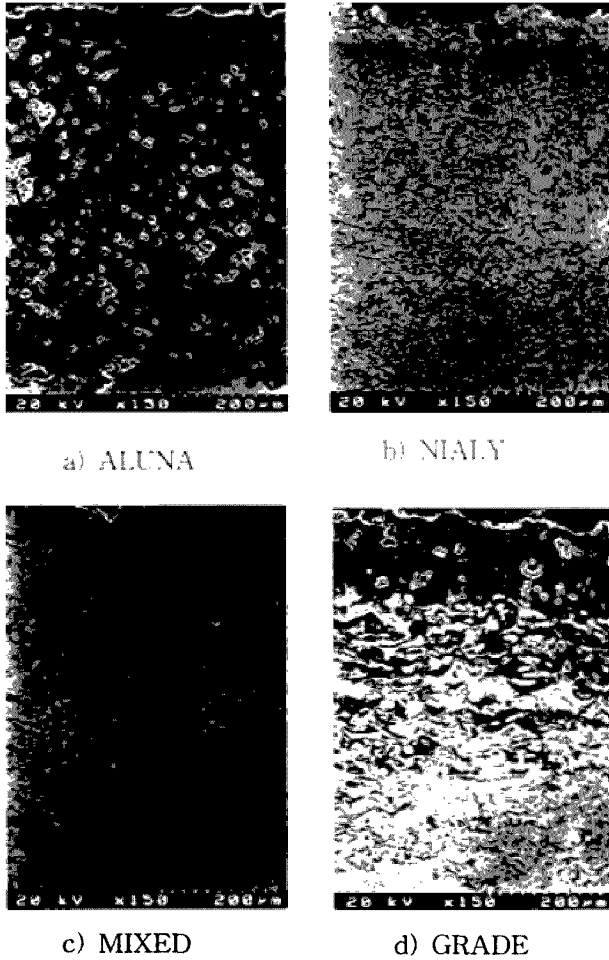


Fig. 2 SEM photographs of lamellar structures

는 기지로부터 top coating층으로 갈수록 점진적으로 Al_2O_3 의 분율이 증대되는 경사조성의 구조로 되어 있음을 보여주고 있다. 한편 혼합코팅인 MIXED와 경사조성을 갖는 6층의 복합코팅인 GRADE의 경우 단층코팅인 ALUNA나 NIALY에 비해 기공이 현저히 감소되었음을 알 수 있는데, 이것은 입경이 큰 NiCrAlY 분말의 입자사이를 입경이 작은 Al_2O_3 분말입자가 충전된 상태로 용사되었기 때문으로 판단된다.

Fig. 3은 GRADE에 있어서 두 원소 Al과 Ni에 대한 SEM 선분석 결과를 나타낸 것으로서, 두 원소는 모두 동일한 코팅 시험편의 동일한 선상에서 scanning되었다. 그림에 나타난 바와 같이 코팅층의 Al 성분은 top coating층에서 가장 높게 나타나고 base coating층으로 갈수록 점진적으로 감소되고 있으며, Ni 성분은 그 반대의 경향을 보여 코팅층이 대체로 원만한 경사조성을 이루고 있음을 잘 나타내고 있다. Fig. 2, 3의 결과는 본 실험에서 작성한 GRADE가 용사법에 의해 제작된 금속/세라믹

FGM의 가장 이상적인 형태라고 할 수는 없으나, 다른 FGM 제작방법과는 달리 필요로 하는 두께와 조성을 비교적 쉽게 제어할 수 있다는 사실을 잘 나타내고 있는 것이다.

Fig. 4는 마이크로비커스 경도시험기에 의해 측정된 코팅 시험편의 단면미소경도를 나타낸 것이다. 4종류의 시험편중 ALUNA의 경도치가 가장 높으며 NIALY가 가장 낮은 경도치를 나타내고 있다. MIXED의 경우 Al_2O_3 분말과 NiCrAlY 분말을 1:1의 중량비로 혼합해서 용사하였음에도 불구하고 NIALY의 경도치에 근접한 수치를 나타내고 있는데, 이것은 앞의 Fig. 2의 조직사진에서도 볼 수 있듯이 코팅층을 구성하고 있는 Al_2O_3 의 부피분율보다 NiCrAlY의 부피분율이 크기 때문인 것으로 생각된다. 경사조성을 갖는 시험편 GRADE의 경우 최저 경도치는 NIALY의 경도치와 근사한 값을 나

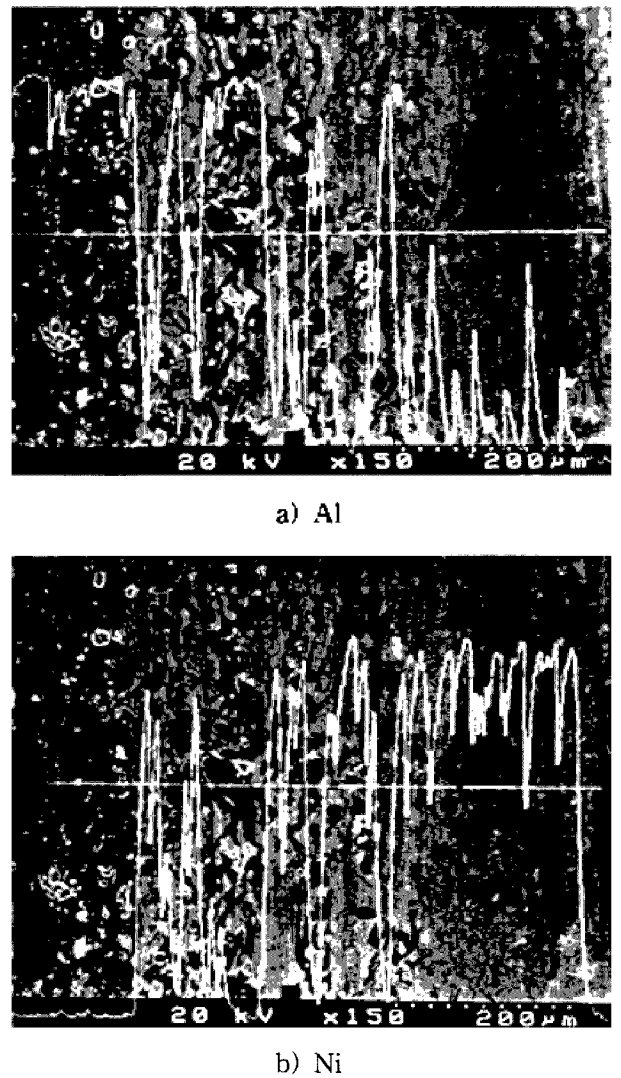


Fig. 3 SEM line profile of primary element of specimen GRADE

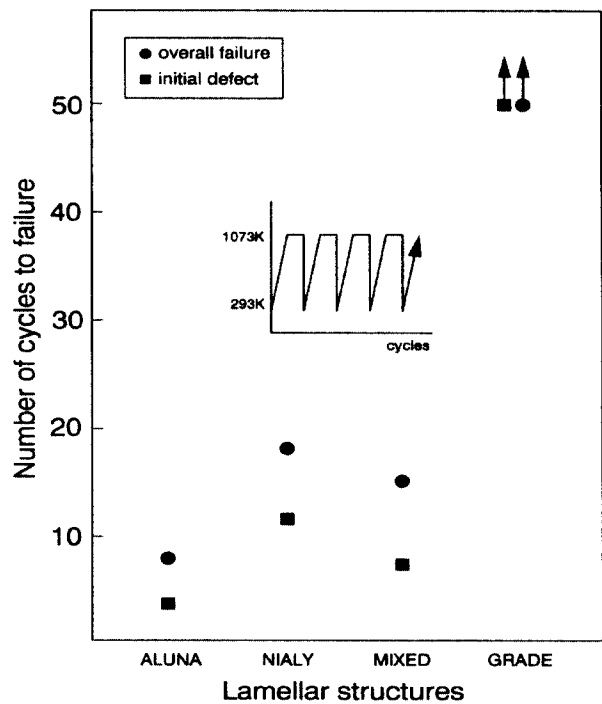
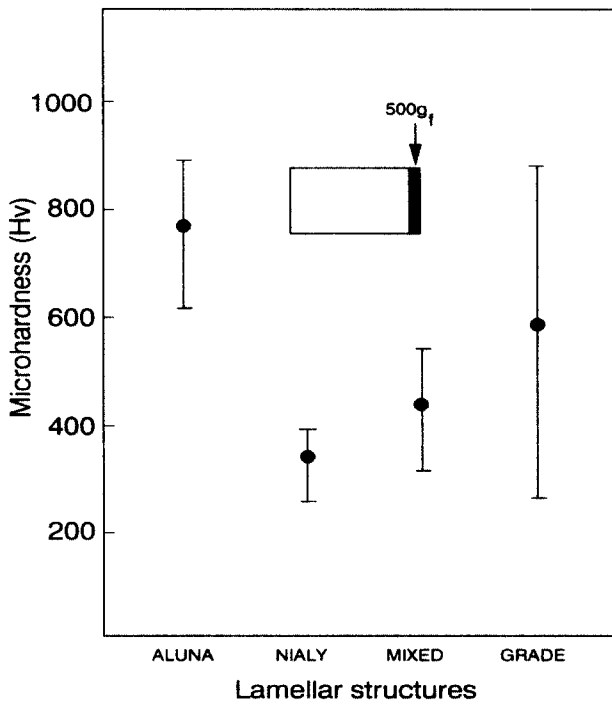


Fig. 4 Distribution of microhardness as to lamellar structures

Fig. 5 Thermal shock resistance as to lamellar structures

타내며, 최고 경도치는 ALUNA의 경도치에 근접한다. 이처럼 심한 경도의 편차를 나타내는 이유는 낮은 경도치를 나타내는 base coating층에서부터 높은 경도치를 나타내는 top coating층에 이르기까지 그 조성이 점진적으로 변하기 때문에 측정부위에 따라 경도치가 달리 측정되기 때문이다.

3.2 경사조성을 갖는 용사코팅층의 열충격특성

Fig. 5는 4종류의 코팅 시험편에 대한 열충격시험의 결과를 나타낸 것이다. ALUNA는 3회의 열충격에 의해 시험편의 끝단에서 국부적인 박리가 나타나기 시작하여, 8회의 열충격에 의해 기재와 코팅층이 완전히 박리되었다. NIALY는 12회의 열충격에서 초기손상이 관찰되어, 18회의 열충격에 의해 코팅층의 10%정도가 손상되는 전반적인 파손으로 진행되었다. MIXED는 7회 열충격에 의해 시험편의 끝단에서 최초로 미소한 크랙이 관찰되었고, 14회의 열충격에 의해 기재와 코팅층이 완전히 분리되었다. 반면 GRADE는 50회의 열충격에도 박리나 균열 등 어떠한 코팅층의 손상도 관찰되지 않았다.

용사코팅층의 열충격특성은 기재와 코팅층사이의 열팽창계수 차이에 기인하는 열응력에 지배적인 영향을 받는다. 단층코팅 시험편인 ALUNA와 NIALY,

그리고 혼합코팅 시험편인 MIXED는 모두 20회 미만의 열충격에 의해 전반적인 코팅층의 파손이 일어났는데 반해, base coating층으로부터 top coating층에 이르기까지 점진적으로 열팽창계수의 차이를 완화시켜가는 경사조성의 시험편인 GRADE는 50회의 반복 열충격에도 전혀 손상이 없어, 차후 초고온의 환경하에서 사용되는 기계구조물이나 부재에 용사법에 의해 제작된 FGM이 그 대응재료로서 제시될 수 있음을 본 실험의 결과는 잘 나타내고 있다.

3.3 경사조성을 갖는 용사코팅층의 밀착성

Fig. 6은 4종류의 코팅 시험편에 대한 AE시험의 결과로서 3점굽힘시험시 방출된 AE에너지와 시간 경과에 따른 누적에너지를 함께 나타낸 것이다. ALUNA의 경우 50sec 부근에서 처음으로 큰 에너지 방출이 있고, 이후 120sec와 380sec 부근에서 매우 큰 에너지가 방출되면서 누적에너지가 급격히 변화하고 있음을 보여주고 있다. 이러한 결과와 3점굽힘시험 진행시 관찰된 코팅 시험편의 손상거동 및 시험종료후 관찰된 코팅 시험편의 계면 및 표면형상으로 볼 때, ALUNA의 경우 초기 50sec 부근에서 계면박리가 일어나고, 120sec와 380sec 부근에서 코팅층의 표면을 관통하는 크랙이 순간적으로

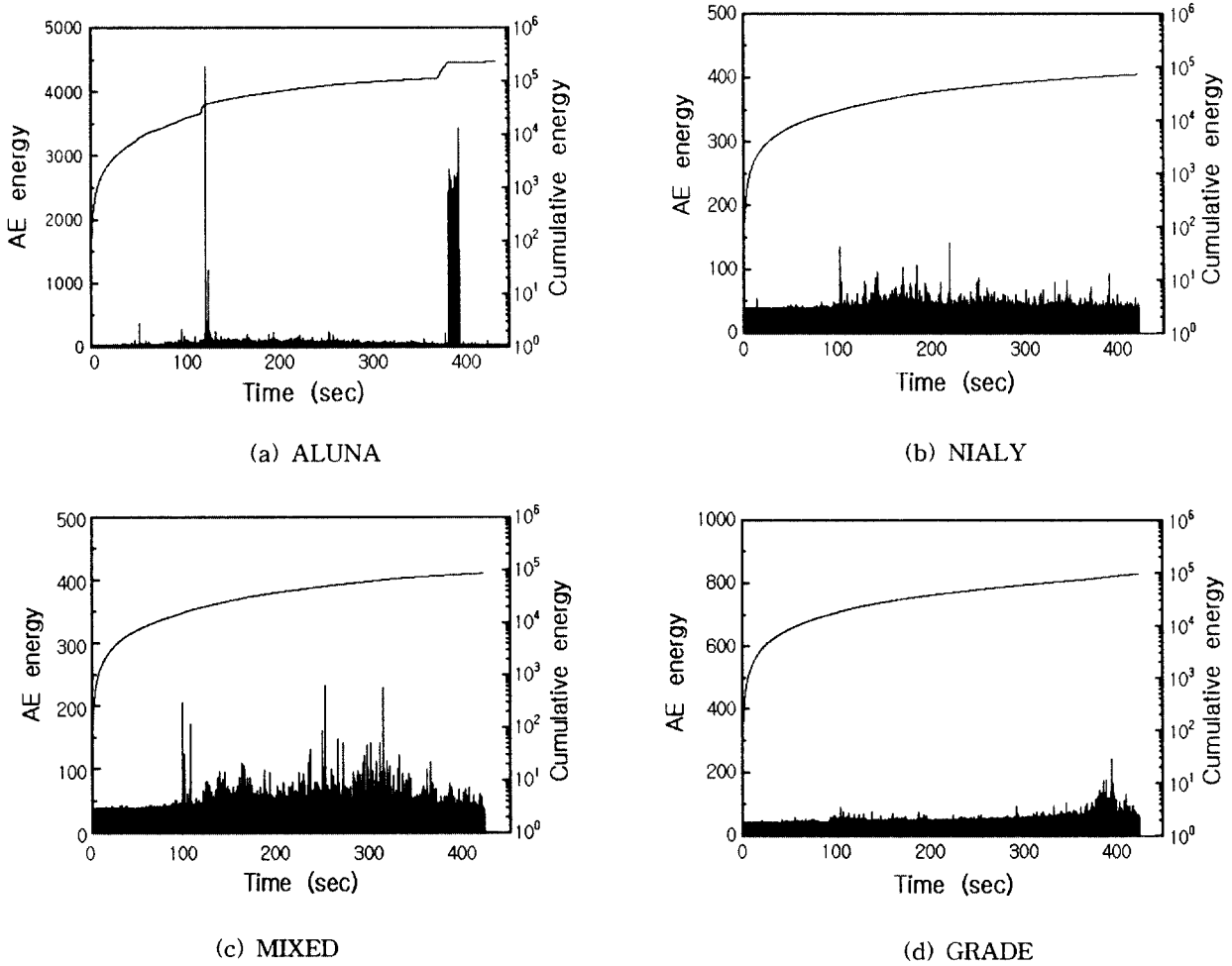


Fig. 6 AE energy and cumulative energy during 3 point bending test

발생한 것으로 생각된다. NIALY의 경우는 100sec 부근에서 처음으로 큰 에너지 방출이 일어나고, 이후 비슷한 수준의 에너지 방출이 계속되고 있음을 나타내고 있는데, 전술한 Al_2O_3 분말을 용사한 시험편 ALUNA와 NiCrAlY 분말을 용사한 시험편 NIALY를 비교해보면, ALUNA의 경우 매우 큰 에너지 방출과 함께 순간적으로 코팅층의 표면을 관통하는 크랙이 발생하는 전형적인 취성거동을 보이는데 비해, NIALY의 경우는 많은 작은 크랙들이 연속적으로 발생하여 코팅층이 외부하중에 대해 상당한 인성을 갖고 있다는 사실을 잘 보여주고 있다.

MIXED의 경우는 전술한 ALUNA와 NIALY의 손상거동이 혼합된 형태를 나타내고 있다. 즉, 100sec 부근에서 큰 에너지 방출이 일어나고, 이후 비슷한 수준의 연속적인 에너지 방출이 일어나면서 그 중간중간에 몇 차례의 큰 에너지 방출이 일어나

는 거동을 보여주고 있는 것이다. 이는 Al_2O_3 분말을 용사한 시험편 ALUNA와는 달리 Al_2O_3 와 NiCrAlY가 혼합된 조직이므로 Al_2O_3 의 취성을 상당 부분 NiCrAlY가 완화시켜 그 인성이 증대된 결과로 해석된다. GRADE의 경우는 위의 3시험편과는 아주 다른 특징적인 모습을 나타내고 있는데, 370sec에 이르기까지 큰 에너지 방출이 없이 진행되다가 400sec 부근에 이르러 비슷한 수준의 에너지 방출이 한꺼번에 일어나는 거동을 보여주고 있다. 이러한 결과는 Al_2O_3 분말을 용사한 top coating층의 취약한 인성이 그 아래의 혼합코팅층과 NiCrAlY층에 의해 크게 보완되어, 370sec에 이르기까지 소성변형을 수반하며 큰 인성으로 외부하중을 견디다가 그 한계인 400sec 부근에 이르러 작은 크랙들이 동시에 발생한 것으로 해석된다.

이상 4종류의 코팅 시험편에 대한 3점굽힘시험과 AE시험을 병행한 결과를 종합해보면 다음과 같이 정리할 수 있다. Al_2O_3 코팅 시험편인 ALUNA가

외부하중에 의해 파손될 때에는 매우 큰 에너지 방출과 함께 코팅층의 표면을 관통하는 크랙이 순간적으로 발생한다. NiCrAlY 코팅 시험편인 NIALY는 외부하중에 대해 상당히 큰 인성을 가지며, 크랙이 발생될 때의 AE에너지는 4종류의 시험편중 가장 낮은 수준이다. Al₂O₃와 NiCrAlY가 혼합된 코팅층인 MIXED는 Al₂O₃가 갖는 취성을 NiCrAlY가 상당 부분 완화시켜주며, 따라서 크랙이 발생하는 경우의 AE에너지도 ALUNA에 비해 훨씬 낮은 수준이다. 경사조성의 코팅 시험편인 GRADE는 상당히 큰 외부하중에 견디며, 따라서 입자간의 결합력이나 기재와 코팅층 사이의 밀착력도 상대적으로 높다. 이상의 결과는 큰 외부하중이나 진동이 작용하는 가혹한 환경하에서 사용되는 기계구조물이나 부재에 용사법에 의해 제작된 FGM이 신뢰성과 내구성을 갖춘 대응재료로서 이용될 수 있다는 사실을 잘 나타내고 있는 것이다.

한편 3점굽힘시험 진행시의 코팅 시험편의 계면 박리나 표면크랙 등의 손상거동은 AE거동과 잘 일치하며, 이와 같은 결과로 판단해 볼 때 AE법이 추후 실제 구조물이나 부재에 적용된 용사코팅층의 손상이나 미소한 크랙을 감지할 수 있는 모니터링 시스템으로도 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

4. 결 론

본 연구에서는 고온의 사용환경하에서 견딜 수 있는 금속기지 내열구조재의 개발을 목표로, 플라즈마 용사법에 의한 금속/세라믹 FGM을 제작하고, 특성평가시험을 통해 그 기계적 특성을 규명하였다. 주요한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 용사법은 다른 FGM 제작방법과는 달리 사용 목적에 대응하여 적절한 재료와 적절한 코팅층의 두께, 그리고 적절한 경사조성을 갖는 FGM을 제작할 수 있으며, 무엇보다도 대상물의 크기나 형상에 크게 제한을 받지 않아 실제 기계구조물이나 부재에 적용할 수 있다는 사실이 확인되었다.
- 2) 용사법에 의해 제작된 Al₂O₃/NiCrAlY FGM은 Al₂O₃ 혹은 NiCrAlY의 단층코팅에 비해 기공율이 적은 치밀한 미세조직을 가지며, 코팅층의 경도는 측정개소에 따라 다양한 분포를 나타내었다.
- 3) 용사법에 의해 제작된 Al₂O₃/NiCrAlY FGM의 내열충격성은 Al₂O₃ 혹은 NiCrAlY의 단층코팅에 비해 월등히 양호한 결과를 나타내며, 50회의 상온-1073K의 반복 열충격에 대해 어떠한 작은 손상도 관찰되지 않았다.
- 4) 용사법에 의해 제작된 Al₂O₃/NiCrAlY FGM은

Al₂O₃ 혹은 NiCrAlY의 단층코팅에 비해 상대적으로 큰 인성을 가지며, 입자간의 결합력이나 기재와 코팅층 사이의 밀착력도 상대적으로 높게 나타났다.

- 5) AE법에 의해 분석한 용사코팅층의 손상거동은 실제 시험편의 손상거동과 잘 일치하였으며, AE법이 실제 구조물이나 부재에 적용된 용사코팅층의 손상이나 미소한 크랙을 감지할 수 있는 모니터링 시스템으로도 활용될 수 있다는 사실이 확인되었다.

후 기

본 연구는 1997년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 ME97 C-12)에 의하여 연구되었으며, 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 松田福久, 中田一博, "最近の表面改質技術の現状", *ジョイテック*, 89-4, pp. 99~106, 1989
2. 小林唯志 外, "多様化高度化する表面改質技術", *溶接技術*, Vol. 37, No. 6, pp. 60~93, 1989
3. 尾崎義治, "セラミックス改質", *材料*, 40卷, 457号, pp. 1253~1263, 1991
4. 石川量大 外, "溶射法によるアルミニウムの表面改質", *金屬*, 90-5, pp. 38~45, 1990
5. J. W. Watson and S. R. Levine, "Deposition stress effects on the life of thermal barrier coatings on burner rigs", *Thin Solid Films*, 119, pp. 185~193, 1984
6. I. Kvernes and M. Seiersten, "Developments and problems in the use of thermal barrier coatings on metals", *NACE's Int. Conf. on High Temperature Corrosion*, Vol. NACE-6, pp. 615~620, 1981
7. D. H. Harries, "Practical aspects of ultra-thick thermal barrier coatings", *ASM's Int. Conf. on Surface Modifications and Coatings*, No. 8512-018, 1985
8. S. Stecura, "Two-layer thermal barrier coating for turbine airfoils-furnace and burner rig test results", *NASA Tech. Rep. NASA-TM X-3425*, 1976
9. 松崎祐司 外, "傾斜機能材料(FGM)の基盤技術に関する研究", *川崎重工技報*, 111号, pp. 45~54, 1991

10. R. C. Hendricks and G. McDonald, Assessment of variation in thermal cycle life data of thermal barrier coating rods", NASA Tech. Memo. NASA-TM-81743, 1981
11. C. McDonald, R. C. Hendricks, "Effect of thermal cycling on ZrO_2 - Y_2O_3 thermal barrier coatings", Thin Solid Films, No.73, pp. 491~496, 1980
12. S. Stecura, "Two Layer Thermal-Barrier Systems for Ni-Al-Mo Alloy and Effect of Alloy Thermal Expansion on System Life", Am. Ceram. Soc. Bull., No. 61-2, pp. 256~262, 1982
13. M. M. Stack, J. Chacon-Nava and M. P. Jordon, "Elevated temperature erosion of range of composite layers of Ni-Cr based functionally graded material", Mat. Sci. and Tec., Vol. 12, pp. 171~177, 1996
14. 정연길, 최성철, 소결법에 의한 ZrO_2 계 경사기능재료에 관한 연구, 요업학회지, 32권, 1호, pp. 120~130, 1995
15. 平野, 若島, "FGM의設計", 日本複合材料學會誌, 17(2), 1991
16. 新野正之, 平井敏雄, 渡辺龍三, "傾斜機能材料-宇宙機用超耐熱材料を目指して、日本複合材料學會誌, 13-6, 1987
17. N. Cheraddi, A. Kawasaki and M. Gasik, "Worldwide Trends in Functionlly Graded Materials Research and Development, Composite Engineering, 4, 1994
18. P. Kwon and C. K. H. Dharan, "Gradient Materials Design of Particulate Composite Structures", ASME(Materials Division) Winter Annual Meeting, San Francisco, CA, 1995
19. D. P. Miller, J. J. Lanutti, and R. D. Noebe, "Fabrication and Properties of Functionlly Graded NiAl/ Al_2O_3 Composites", J. of Mater. Res., 8(8), 1993
20. S. Nomura and D. Sheahen, "Micromechanical Approach to the Thermomechanical Analysis of FGMs", 4th Int. Symp. on FGM, 1996
21. 川崎 亮 外, "粉末スプレー積層法による焼結傾斜機能材料の作製", 粉末および粉末冶金, 37卷, 7号, pp. 922~928, 1990
22. 高倉敏一 外, "ガス壓燃焼焼結法による TiB_2 -Ni系焼結傾斜機能材料の作成", 粉末および粉末冶金, 37卷, 7号, pp. 933~936, 1990
23. 渡辺龍三, 川崎 亮, "粉末冶金法による傾斜機能材料の開発", 粉末および粉末冶金, 39卷, 4号, pp. 279~286, 1992
24. 佐佐木 眞 外, "化學氣相析出法によるTiC/C系傾斜機能材料の合成", 粉末および粉末冶金, 39卷, 4号, pp. 295~298, 1992
25. K. Wakashima and H. Tsukamoto, "Micromechanical Approach to the Thermomechanics of Ceramic-Metal Gradient Materials", Pro. of the 1st Int. Sym. on FGM, p. 19, 1990
26. K. Fujii et al., "Functionally gradient material of silicon carbide and carbon as advanced oxidation-resistant graphite", J. of Nuclear Materials, 187, pp. 204~208, 1992
27. 송준희, 임재규, "경사기능성 세라믹/금속 복합재료의 열충격특성에 관한 연구", 대한기계학회논문집(A), 20권, 7호, pp. 2134~2140, 1990
28. 浜谷秀樹 外, "プラズマ溶射法で作製した傾斜機能材料のマイクロ組織", 日本溶接學會論文集, 11卷, 4号, pp. 576~582, 1993
29. Y. Shinihara, "Thermal Stability of NiCrAlY/PSZ FGM by Plasma Twin Torches Method", ISIJ Int. Vol. 32, No. 8, 1992
30. 伊藤義康, 高橋雅士, "傾斜機能材料", OHM, 81卷, 8号, p. 70, 1994