대한기계학회논문집 A권, 제26권 제10호, pp. 2089~2095, 2002

압자압입시험에 의한 이종재료 접합층의 계면인성 평가

송준희*· 김학근*· 임재규†
(2002년 2월 19일 접수, 2002년 7월 15일 심사완료)

Evaluation of Apparent Interface Toughness of Composites Layers by Indentation Test

Jun-Hee Song, Hak-Kun Kim and Jae-Kyoo Lim

Key Words: Ceramic/Metal Composites(세라믹/금속 복합재료), Functionally Graded Material(경사기능재료), Mechanical Characteristics(기계적 특성), Interface Toughness(계면인성), Indentation Test(압자압입시험)

Abstract

Ceramic/metal composites have many attractive properties and great potential for applications. Interfacial fracture properties of different layered composites are important in material integrity. Therefore, evaluation of fracture toughness at interface is required in essence. In this study, the mechanical characteristics for interface of ceramic/metal composites were investigated by indentation test of micro-hardness method. Apparent interfacial toughness of TBC system could be determined with a relation between the applied load and the length of the crack formed at the interface by indentation test.

1. 서 론

자연산 또는 인공적인 세라믹 성분을 금속 기지 상에 적층시킨 구조는 열적, 전기적 단열성뿐만 아니라 고경도와 강도가 요구되는 구조물에 큰 잠재력을 가지고 있다. 이러한 적층구조는 우주항공기술 분야에서 고온사용을 목적으로 개발되어졌으며 절삭공구와 엔진 부품에서 기계적·열적 보호를 위해 현재 상용화되고 있다.[1] 이는 초합금 재료에 세라믹을 적층시킨 열차폐 코팅(thermal barrier coating, TBC)에서 첨단의 신소재인 경사기능재료(functionally graded material, FGM)[2~4]에 이르기까지 연구가 활발하게 진행중이다. FGM은 TBC를 진보시킨 개념으로서 금속기재와 세라믹 코팅층 계면에서 발생하는 열응력을 감소시켜 열차단 코팅의 열적 안정성을 향상시키기 위한 방안으로 '재료설계의 단계에서 사용조건에 맞게 의도적으로 조성과 미시조직을 연속적 혹은 단계적으로 경사 분포화시켜 열응력 완화 또는 요구되는 기능을 발휘시키는 재료'라고 정의할 수 있다.

그러나 이러한 TBC 종류들은 세라믹 코팅층과 금속 모재의 열팽창계수 및 탄성계수 등의 차이로 인해 고온과 저온의 가혹한 환경에서 열응력으로 인한 균열발생 및 코팅층 박리 파괴가 일어난다. 층간의 박리현상은 재료의 건전성에 심각한 문제를 야기시키고, 금속/세라믹의 복합구조를 조기에 파괴시킬 수 있다.[5] 더구나 금속/세라믹 적층 복합구조는 층을 구성하고 있다. 이같은 계면에서는 기계적·열적인 물성치들이 급변하기 때문에 재료 구조의 취약성을 유발시킨다. 계면이 생기지 않도록 제조하는 방법이 이상적이지만 제조 공정상 어려운 문제이고 기술적으로도 아직

* 회원, 전북대학교 부설 공학연구원 공업기술연구센터
† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차신기술연구소
E-mail : jklim@moak.chonbuk.ac.kr
TEL : (063)270-2321 FAX : (063)270-2460

이 단계까지는 도달하지 못하였다. 필연적으로 발생하는 계면의 물성치와 특성이 전체 구조물의 성능을 좌우한다. 따라서 계면의 기계적인 접합강도와 파괴역학적 인자중에서 파괴인성을 평가하는 것이 선결과제이다. 근래에 들어 복합재료와 이종재료의 파괴인성에 대한 연구는 활발히 진행중이지만 대부분 시험편 크기가 종래의 파괴역학적 평가법에 준하는 정도(수 ㎜)여서 표준화된 평가법을 응용하면 구할 수 있다.[6~8] 그러나 코팅층의 두께가 얇고(수 ㎛) 시험편도 소형인 개발초기의 재료와 TBC계의 일반적인 강도평가와 파괴인성 시험은 미진하다.

따라서 본 연구에서는 코팅층 계면의 접합특성과 기계적 특성치를 파악하기 위해서 압자압입시험[9]을 실시하였다. 실험을 통하여 균열을 개시시키는 임계하중을 인자로 하여 이종재료 계면에서의 접합능력인 겉보기 계면인성값을 구하고 그에 대한 경향을 분석하였다.

2. 시험편

본 연구에서 사용된 시험편은 고온용 구조재료로 사용되는 니켈기 초합금인 인코넬(Inconel HX)재를 기재(substrate)로 하고 부분 안정화 지르코니아(PSZ)를 세라믹 단열 코팅층으로 하였다. 또한 기재와 단열 코팅층 사이의 물성치 차이를 줄이기 위해 NiCrAlY을 본드코트(bond coat)로 사용하였다. 기재 위의 단열 코팅층은 폭발용사법을 사용하여 적층시켰다.[10] 폭발용사법은 폭발 관통내에 아세틸렌, 수소 등의 연료가스와 산소를 혼합시킨 후 점화시켜 폭발시키고, 이때 생성되는 폭발열과 압력을 이용하여 분말을 용융, 분사하는 방법이다. Fig. 1은 제조된 TBC의 단면사진과 물성치의 변화를 도식적으로 나타내었다.

시험편은 3종류로서 전통적 TBC인 2중 코팅의 이종재(Duplex)와 2종류의 FGM이다. 첫 번째의 Duplex 시험편은 NiCrAlY bond coat층이 약 50㎛, PSZ 코팅층이 약 100㎛ 정도로 제작되었다. 두 번째 시편은 FGM으로서 NiCrAlY bond coat층(약 50㎛) 위에 PSZ 함유량을 각각 22.7, 30.6, 46.9, 63.8, 72.6, 77.9vol%로 NiCrAlY와 혼합해 변화시킨 단계별 경사화 코팅층을 차례로 약 90~110㎛ 정도씩 적층하고 탑코트(top coat)로서 PSZ 100% 코팅층을 약 100-150㎛ 정도 적층하여 제작하였다. 세 번째 시편은 두 번째 시편과 동일한 방법으로 제작하였으나 PSZ 코팅층을 제외한 모든 코팅층의 두께를 2배로 제작하였다. Table 1에 시험편의 자세한 사양이 목록되었다.

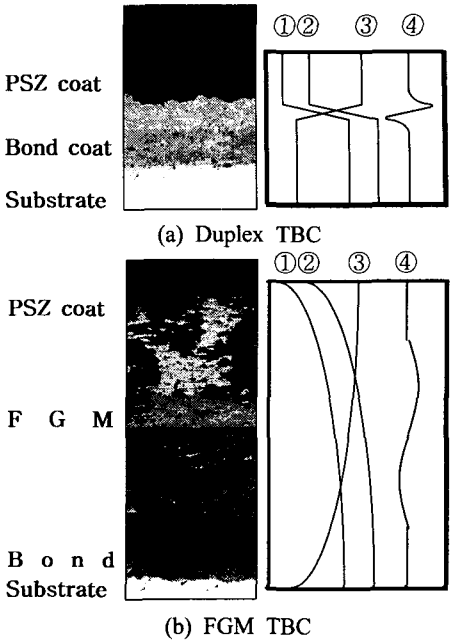


Fig. 1 The concept of Duplex and FGM structure and properties

Table 1 Specification of specimens

Type	Substrate	Bond coat	FGM coat	PSZ coat
Duplex	Inconel HX(3mm)	NiCrAlY(50㎛)		100~150㎛
FGM1		NiCrAlY(50㎛)	600~700㎛	
FGM2		NiCrAlY(100㎛)	1200~1400㎛	

3. 실험방법

3.1 경도시험

경도측정을 위해 사용된 시험기는 하중을 100g에서 1000g까지 가할 수 있는 마이크로 비커스 경도 시험기이고, 경도 시험절차는 ASTM E 103-84, KS L 1603, KS B 5538의 시험 절차에 따라 수행하였다.[11,12] 이러한 절차에 의해 경도 시험은 각각의 시편에 대하여 두께방향으로 일정

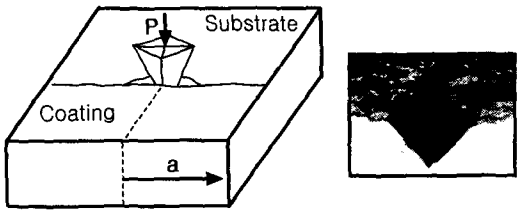


Fig. 2 Principle of the interface indentation test

간격씩 측정하였으며, 각 위치의 경도 평균값을 구하기 위해서 기준점으로부터 각각 동일 거리에서 500g의 하중으로 5회 반복하여 조사하였다.

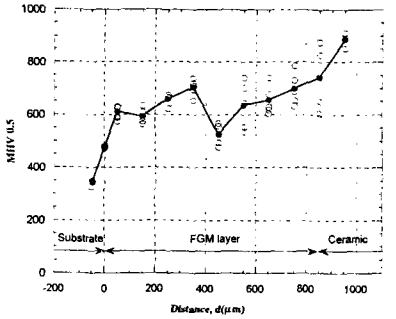
3.2 계면 압자압입 시험

계면의 접합특성을 조사하고자 계면에서 균열이 발생하고 증식되도록 압입압자가 코팅 두께면에 수직하게 작용하였으며 Fig. 2와 같이 다이아몬드 원뿔 형태의 비커스(Vickers) 압자를 사용하였다. 이때 균열 반지름(a)은 화상분석기를 사용하여 측정하였다. 각각의 코팅층 계면에서 작용하중과 균열길이는 5점 이상을 구하여 평균값을 사용하였다. 여기서 구해진 하중(P)과 균열길이(a) 사이의 관계는 로그 좌표계를 이용하면 주어진 기재와 코팅에 대하여 직선으로 나타난다. 따라서 이 관계가 선형적이므로 $a=\alpha P^n$의 식으로 나타낼 수 있다. 여기서 n은 코팅 두께의 함수이다. 또한 측정된 균열길이(a)는 계면의 압입자국 대각선의 절반을 포함하고 있다. 그래서 가해진 하중이 계면에서 균열을 증식시키기에 충분하지 않을 때의 균열길이(a)는 단지 계면 압흔 대각선의 절반이다. 바꿔 말하면, 균열이 발생하지 않는 다른 하중으로 수행된 계면 경도시험으로부터 평균 대각선 길이를 계산하는 것은 가능하다. 이것을 로그 좌표계로 나타내면 겉보기 경도선(apparent hardness line)이라고 부르는 직선이 얻어진다. 이때 균열이 발생할 경우의 직선과 겉보기 경도선이 교차하는 점은 균열이 형성되지 않는 한계, 즉 임계점(P_c, a_c)으로 정의할 수 있다. 또한 이 점은 계면에서 코팅의 접합특성을 나타내는 기준으로서 고려되어진다.

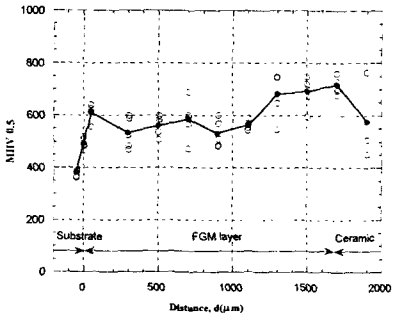
4. 실험결과

4.1 경도시험 결과

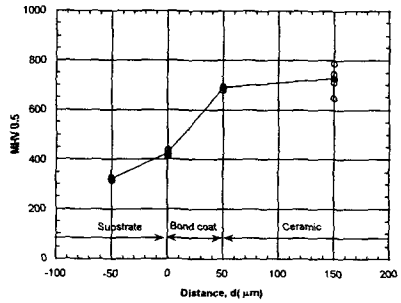
마이크로 비커스 경도 시험기로 측정한 각



(a) FGM1



(b) FGM2



(c) Duplex

Fig. 3 Hardness distribution

시편의 코팅층내 경도 분포는 Fig. 3에 제시되었다. (a)와 (b)는 다층 적층된 FGM 시편이고, (c)는 단일 적층된 Duplex 시편이다. 기재의 최하부 경도는 표시되지 않았지만 250~260 MHV 0.5로 일정하였으나 계면부근에서는 345, 381, 320 MHV 0.5로 약간의 차이를 보이고 있다. 그리고 기재와 bond coat 층에서는 경도 분산(*scatter*)이 적은 반면 FGM층과 세라믹층내에서는 큰 경도 분산을 보이고 있다. 이는 세라믹의 취성적 성질과 코팅층 적층시 발생한 불균일한 기공 때문이며, FGM2가 FGM1에 비해 더욱 편차가 큰 것은

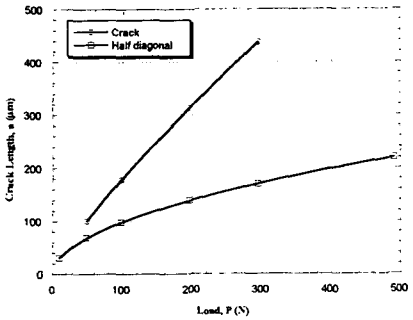


Fig. 4 Experimental data of indentation load and crack length for FGM1

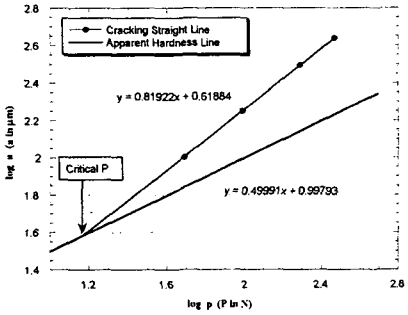


Fig. 5 Relationship of load and crack length converted into bilogrithmic coordinates

시편 제조시 두께 증가에 의해 FGM 각 코팅층 계면의 표면 조도의 증가로 인하여 더 많은 기공이 형성되었기 때문이다. 또한 기재와 bond coat 층간 계면의 경도는 이웃한 층들의 경도치에 중간값을 보이고 있는데 이는 계면인성을 구하기 위한 모델 확립에 중요한 근거를 제공한다.

4.2 계면 압자압입시험 결과

Fig. 4는 FGM1 시편의 계면에서 수행된 압자압입 시험으로 증식된 균열길이와 계면경도에 해당하는 대각선의 반절을 보여준다. Fig. 5는 임계하중과 임계균열을 구하기 위하여 Fig. 4를 로그 좌표계로 변환한 그래프이다. 균열 직선(cracking straight line)과 겉보기 경도선(apparent hardness line)이 교차하고, 이 교차점은 계면에서 균열 개시의 한계를 나타낸다. 즉, 교차점이 임계하중(P_C)과 임계균열(a_C)이다. 이러한 절차를 수행함으로써 FGM1의 경우 15.39N(log1.19)에서 균열이 개시됨을 알 수 있다. 이와 동일한 절차로 구해진 FGM2와 Duplex의 시험결과는 Table 2에 나타내었다.

Table 2 Results of apparent interface toughness

	FGM 1	FGM 2	Duplex
P_c (N)	15.39	17.61	9.31
a_c (μm)	39.03	41.09	31.19
Hs (MPa)	344.39	381.43	294.30
H_C (MPa)	611.79	611.05	611.54
Es (GPa)	150.40	150.40	150.40
E_C (GPa)	121.40	121.40	121.40
$(E/H)^{1/2}$	17.98	17.31	19.12
K_{ea} ($MPa \cdot m^{1/2}$)	17.02	17.36	15.33

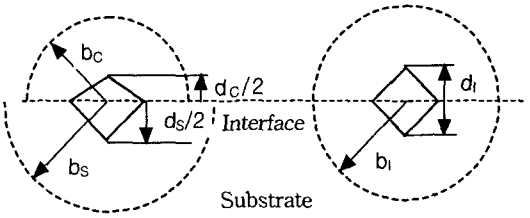


Fig. 6 Geometrical schematization of an indent at the surface

4.3 겉보기 계면인성

압자압입시험은 재료의 경도값에 많은 영향을 받기 때문에 임계하중만으로 접합특성을 정의하는데에는 무리가 있다. 즉, 동일재료에 대하여는 임계하중만으로 접합특성을 나타낼 수 있지만, 경도값이 다른 재료에서 구해진 임계하중과 직접 비교하는 것은 어려움이 있다. 그래서 이를 일반화하기 위해서는 영계수와 비커스 경도율(E/H)을 고려해야만 한다.[13~16] Fig. 6은 접합특성의 일반화를 위한 모델의 기하학적인 특성을 도식적으로 나타낸 것이다. 이러한 모델을 적용함으로서 실제 압흔의 모양을 균등질 재료에서의 거동으로 교정할 수 있다. 기재와 코팅층의 평균 기하학적인 특성을 고려함으로써 계면의 압흔 대각선(d_I)과 소성역 반지름(b_I)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$d_I = \frac{d_C + d_S}{2} \text{ 과 } b_I = \frac{b_C + b_S}{2} \tag{1}$$

$$H = C\frac{P}{d^2} \tag{2}$$

여기서, d_I는 일반적인 경도 관계로부터 하중의 증가에 따라 감소되어진다.

재료의 기계적인 성질에 소성역 반지름을 관련시키는 Lawn[14] 식으로부터 b_I, b_S, b_C는 다음과 같이 표현된다.

$$b = \frac{d}{2}\left(\frac{E}{H}\right)^{1/2}\cot^{1/3}\xi \tag{3}$$

여기서 ξ는 압흔의 리지(ridges) 사이의 각도의 절반이다. 식 (1)과 (3)으로부터

$$\left(\frac{E}{H}\right)_I^{1/2} = \frac{2}{\cot^{1/3}\xi}\frac{b_I}{d_I} = \frac{2}{\cot^{1/3}\xi}\frac{b_C+b_S}{d_C+d_S} \quad (4)$$

여기서, I, C, S는 계면, 코팅, 기재를 각각 지칭한다.

식 (2), (3)으로부터 식 (4)의 d_C, d_S과 b_C, b_S를 대체하면,

$$\left(\frac{E}{H}\right)_I^{1/2} = \frac{\left(\frac{E}{H}\right)_S^{1/2}}{1+\left(\frac{H_S}{H_C}\right)^{1/2}} + \frac{\left(\frac{E}{H}\right)_C^{1/2}}{1+\left(\frac{H_C}{H_S}\right)^{1/2}} \quad (5)$$

이 관계는 각각의 기재와 코팅이 코팅-기재의 혼합계인 계면에서 내포된 전체적인 거동을 설명하는 것이다. 혼합계의 탄성율은 대수혼합법칙[17] [$\log E_3 = V_1 \log E_1 + V_2 \log E_2$]을 사용하였고 첨자 3은 복합재이고 1, 2는 구성요소, V는 체적분율을 의미한다. 본 연구에서는 식 (5)에 의해서 유도된 (E/H)율을 보상해서 K_{ea}을 계산한 다음의 관계를 이용하였다.[9]

$$K_{ea} = 0.015\frac{P_c}{a_c^{3/2}}\left(\frac{E}{H}\right)_I^{1/2} \quad (6)$$

각 시편에 대하여 식 (6)로 계산된 겉보기 파괴인성값은 Table 2에 나타내었다.

이와같이 Chicot의 실험식을 이용하여 계면인성을 구하였다. 먼저 세라믹 100%층과 이웃한 층의 계면에서 겉보기 계면인성값을 구하였다. 취성과 연성재료가 혼재된 계면에서 인성값을 평가할 수 있었으며, 더구나 본 연구의 시험편처럼 두께가 얇은 재료에서 측정이 가능하였다.

경사층이 없는 Duplex와 경사층을 갖는 FGM의 단순비교에서도 FGM의 계면이 높은 인성값을 지녀 FGM 재료의 응력완화 효과를 기대할 수 있음을 알았다. 또한 Duplex 시험편의 계면인성이 다른 시험편들에 비해서 현저히 낮게 평가되었는데 이는 계면에 이웃한 층들의 두께가 인성치에 의존성이 있음을 시사하는 것이다. 경사층과 bond coat층의 두께가 FGM1에 비해 2배인 FGM2에서의 인성값이 FGM1에 비해 약간 높았다. Duplex는 연취성 계면인데 비해 FGM은 취성계면이기 때문에 비균질과 균질성으로 인한 계면인성의 차이가 발생한다고 판단된다.

4.4 FGM 경사층의 겉보기 계면인성

경사층내의 세라믹/금속 함유량에 따른 임계하중과 계면인성을 알아보기 위하여, FGM1과 FGM2 시험편에 대하여 PSZ가 0%, 22.7/30.6%, 46.9/63.8%, 72.6/77.9%인 곳에서 압자압입시험을 수행하였다.

Fig. 7은 FGM1 시험편의 결과로 전술한 바와 같이 검게 칠해진 표시가 균열(crack)이고 흰 표시가 대각선의 반절(half diagonal)을 나타낸다. 그림에서 세라믹 함유량이 증가될수록 균열이 더 많이 증식되어졌고 기울기도 증가하였다. Fig. 8은 FGM2 시험편의 결과를 나타낸 것이다. FGM2도 FGM1과 마찬가지로 세라믹 조성이 증가할수록 균열과 기울기는 증가하는 경향을 나타냈다. 이것은 세라믹 조성이 증가함으로써 세라믹 파괴의 전형적인 취성파괴의 영향에 기인한 것으로 생각된다.

Fig. 7과 8을 사용하여 계면인성을 구한 값이 Table 3에 요약되어 있다. 세라믹 조성이 증가되어지면 균열이 빠르게 증식되고 급격한 인성의 저하를 가져왔다. 또한 경사 조성층의 계면인성은 코팅층 두께보다는 세라믹 함유량에 더 큰 영향을 받고 있었다. Table 2와 3을 그래프로 나타낸 것이 Fig. 9이다.

Fig. 9는 압자압입시험이 수행된 모든 시험편

Table 3 Apparent interface toughness in FGM

	FGM1 (Vol%)				FGM2 (Vol%)			
	0	22.7/30.6	46.9/63.8	72.6/77.9	0	22.7/30.6	46.9/63.8	72.6/77.9
P_c (N)	15.39	8.49	5.82	3.88	17.61	8.38	6.45	3.57
a_c (μm)	39.03	25.99	21.16	16.98	41.09	27.27	22.8	16.17
Hs (MPa)	344.39	583.94	604.80	625.66	381.43	506.41	560.57	612.59
H_C (MPa)	611.79	604.80	625.66	646.52	611.05	560.57	612.59	665.68
Es (GPa)	150.40	114.50	107.57	100.67	150.40	114.50	107.57	100.67
E_C (GPa)	121.40	112.19	102.98	99.30	121.40	112.19	102.98	99.30
$(E/H)^{1/2}$	17.98	13.81	13.08	12.54	17.31	14.60	13.42	12.52
K_{ea} (MPa·m$^{1/2}$)	17.02	13.28	11.74	10.43	17.36	12.89	11.93	10.31

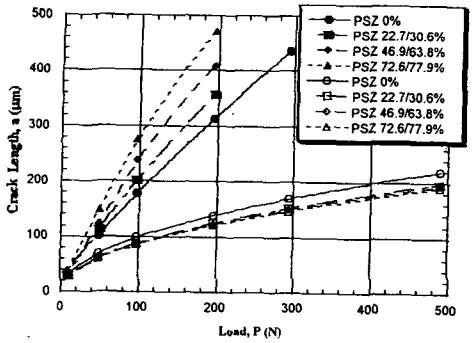


Fig. 7 Experimental data and half diagonal at the interface in FGM1

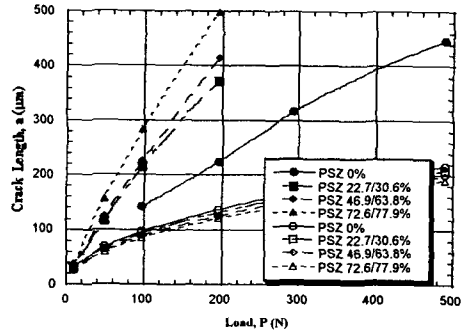


Fig. 8 Experimental data and half diagonal at the interface in FGM2

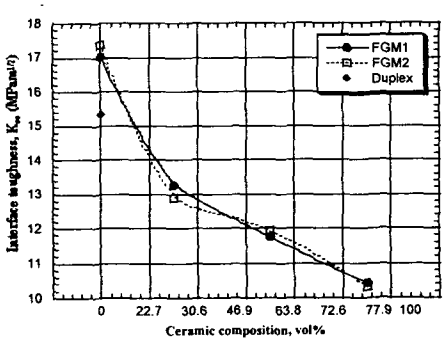


Fig. 9 Comparison of interfacial toughness

의 기재/금속계 결합 코팅층 계면뿐만 아니라 FGM1 시험편과 FGM2 시험편에 대한 경사조성층의 계면인성을 포함하고 있다. 기재/금속계 결합 코팅층 계면에서의 계면인성은 거의 비슷한 계면인성를 보이고 있다. 그러나, Duplex 시험편의 계면인성은 다른 시험편들에 비해서 현저히 낮게 평가되었다. 이것은 전술한 것처럼 Duplex는 계면에 이웃한 코팅층과 전체 코팅층의 두께가 모두 얇기 때문에 상대적으로 코팅층 두께의 영향을 다른 시험편들에 비해 덜 받게된다. 더구나 계면이 취성에서 연성재료로 급변한 것도 하나의 원인이다. 따라서 Duplex재가 FGM보다 계면인성이 낮았다.

FGM의 경사 코팅층내에서는 두께의 영향보다는 세라믹 조성에 더 많은 영향을 받기 때문에 코팅층내에서는 FGM1과 FGM2 모두 비슷한 계면인성을 보이고 있다. FGM1과 FGM2 시험편 경사층에서 세라믹 조성의 함유량에 따른 계면인성은 세라믹 성분이 증가할수록 계면인성이 급격히 감소되었다. PSZ 72.6/77.9%인 층의 계면인성은 가장 낮았으며 기재/금속 코팅층 계면에 비해 FGM1의 경우 39%, FGM2의 경우 41% 정도 감소하였다. 그 이상의 세라믹 함량에서는 측정이 불가능하였지만 점점 낮아지리라 예상된다. 세라믹 단체재에서도 금속재보다는 인성이 낮기 때문에 계면에서도 동일한 경향을 나타내는 것이다. 이와같이 거의 모든 층에서 계면인성을 측정할 수 있다는 사실이 좋은 결과였다.

5. 결 론

본 연구에서는 폭발용사법으로 제작된 Duplex TBC와 FGM TBC 재료에 대한 접착층간의 계면인성을 평가하기 위하여 비커스 미소 경도시험과 계면 압자압입시험을 수행하였다. 경도시험을 통해서는 이종재료 적층구조의 경도분포 경향을 조사하였고, 압자압입시험에서는 임계하중을 결정한 후, Chicot의 실험식을 이용하여 계면인성을 구하였다. 이와 같은 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 기재와 금속계 결합 코팅층에서는 경도값의 분산(scatter)이 적은 반면, FGM층과 세라믹층내에서는 코팅층 적층시 발생한 기공으로 인하여 큰 경도값의 분산을 보였다. 코팅층 두께가 두꺼워지면 분말야금 공정의 특성상 경도 분산의 정도는 더욱 심해졌다.

(2) 금속성분이 많은 계면에서는 균열을 개시시키는 임계하중이 Duplex, FGM1, FGM2 순으로 컸지만 균열에 대한 저항을 나타내는 겉보기 계면인성은 FGM2, FGM1, Duplex 순으로 나타났다. 즉, 계면에 이웃한 층과 전체 코팅층의 두께가 증가할수록 계면인성이 우수하였다. 그러므로 계면인성은 코팅층 두께에 많은 영향을 받고 있음

을 알 수 있었다.

(3) 경사조성층에서는 세라믹 조성 함유량이 증가될수록 균열이 빠르게 진전하여 급격한 인성의 저하를 가져왔고, 코팅층 두께가 다르더라도 동일한 조성의 계면에서는 계면인성이 거의 유사하였다. FGM의 경사층에서는 코팅층의 두께보다 세라믹 조성 함유량이 계면인성에 더 큰 영향을 미치는 것으로 생각된다.

(4) 기존의 평가법에서 어려웠던 두께가 얇고 크기가 작은 코팅층의 계면인성을 비교적 간단하게 측정할 수 있었다. 더구나 다층의 이종 복합재에서도 적용이 가능하며 강도와 인성을 함께 구할 수 있었다.

참고문헌

(1) Hu, X.Z., Wang, H., 1998, "Fracture and damage at interfaces of ceramic laminates," *Key engineering materials,* Vol. 145, pp. 901~906.

(2) Jun-Hee Song, Jae-Kyoo Lim and Takahashi, H., 1996, "Thermal Shock/Fatigue Evaluation of FGM by AE Technique," *KSME International Journal*, Vol. 10, No. 4, pp. 435~442.

(3) Song, J.H., Yoon, J.Y., and Lim, J.K., 1998, "Thermal Shock Fracture Characteristics of Functionally Graded Ceramic/Metal Composites by Gas Burner Heating," *Transactions of the KSME,* Vol. 22, No. 5, pp. 795~803.

(4) Jun Hee Song and Jae Kyoo Lim, 2000, "Thermal Characteristics Evaluation of Functionally Graded Composites for PSZ/Metal," *KSME International Journal*, Vol. 14, No. 3, pp. 298~305.

(5) Marry S. Kaliszewski, Gesa Behrens, Arthur H. Heuer, 1994, "Indentation Studies on Y_2O_3-Stabilized ZrO_2 : Development of Indentation-Induced Cracks," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, pp. 1185~1193.

(6) Kim, Y.J. and Lee, H.Y., 2001, "J and CTOD Estimation for Homogeneous and Bi-Material Fracture Toughness Testing Specimens," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 8, pp. 1079~1089.

(7) Chung, N.Y., Kang, S.G. and Lee, M.D., 2000, "Analyses of Stress Intensity Factors and Evaluation of Fracture Toughness in Adhesively Bonded DCB Joints," *Transactions of the KSME*, Vol. 24, No. 6, pp. 1547~1556.

(8) Chung, N.Y., Lee, M.D. and Kang, S.G., 2000, "Evaluation of Fracture Toughness by Energy Release Rate for Interface Crack in Adhesively Bonded Joints," *Transactions of the KSME*, Vol. 24, No. 9, pp. 2174~2182.

(9) Chicot, D., Demarecaux, P., Lesage, J., 1996, "Apparent Interface Toughness of Substrate and Coating Couples from Indentation Tests," *Thin solid films*, Vol. 283, pp. 151~157.

(10) Tyurin, Yu. N. and Pagrebnjak, A. D., 1999, "Advances in the Development of Detonation Techniques and Equipment for Coating Deposition," *Surface and Coating Technology*, Vol. 111, No 2-3, pp. 269~275.

(11) ASTM E 103-84, 1984, "Standard Test Method for Rapid Indentation Hardness Testing of Metallic Materials".

(12) Korean Standards Association, 2001, "TESTING METHOD FOR VICKERS HANDNESS OF HIGH PERFORMANCE CERAMICS," *KS L1603.*

(13) Marshall, D. B. and Evans, A. G., 1981, "Reply to 'Comment on Elastic/Plastic Indentation Damage in Ceramics : The Median/ Radial Crack System," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 64, No. 12, C-182.

(14) Lawn, B. R. and Marshall, D. B., 1978, "Fracture Mechanics of Ceramics," *Plenum Press*, New York, Vol. 3, p. 205.

(15) Marion, R. H., 1979, "Use of Indentation Fracture to Determine Fracture Toughness," *ASTM STP 678*, pp. 103~111.

(16) Smith, S. S., Magnusen, P. and Pletka, B. J., 1981, "Fracture Toughness of Glass Using the Indentation Fracture Technique," *ASTM STP 745*, pp. 33~45.

(17) Christensen, R. M., 1979, "Mechanics of Composites Materials," *John Wiley & Sons.*