

〈論 文〉

MSP 시험법에 의한 경사기능재료의 파괴인성 및 AE 특성 평가

송준희* · 임재규** · 정세희***

(1994년 6월 8일 접수)

Evaluation of Fracture Toughness and AE Characteristics in Functionally Gradient Material by means of MSP Test

Jun-Hee Song, Jae-Kyoo Lim and Se-Hi Chung

Key Words : Functionally Gradient Material(경사기능재료), Modified Small Punch Test(개량형 소형편치시험), Acoustic Emission(음향방출), Fracture Toughness(파괴인성), Plasma Spray(플라즈마 용사), Partially Stabilized Zirconia(부분안정화 지르코니아)

Abstract

In this study, mechanical characteristics test of Functionally Gradient Material(FGM) was performed by means of Modified Small Punch(MSP) Test with FGM; NiCrAlY-8YSZ and PSZ-Ni. To determine fracture mechanic factor, it was carried out MSP test that has possibility with small specimen (10×10×0.5 mm³) and AE test to analyze micro fracture mechanism. As a result, fracture behavior became varied from brittle fracture to ductile as the content of Ni(or NiCrAlY) composition was increased and fracture energy was increased too. AE characteristics demonstrated that AE technique can detect the onset of fracture processes and AE energy was suddenly increased in the vicinity of maximum load. Since Young's modulus, fracture stress and fracture toughness was determined by MSP test, it can be known that the composition of NiCrAlY 75%/8YSZ 25% has the best mechanical property and furthermore this result is supported with fracture surface observation.

1. 서 론

우주항공분야, 핵융합로, 고압터빈 등을 비롯하여 극심한 온도변화에 노출되는 환경에서 연속사용이 가능한 재료의 개발은 날로 요구가 크게 증대되고 있는 실정이다. 고온기기에서는 내열합금이 용

점부근까지 상승하고 그 수명도 한계에 처해 있다. 이러한 상황에 적절한 초내열재료를 개발하기 위해서는 기본적으로 열방어 특성을 증가시키고 열응력을 최대한으로 완화시킬 수 있는 제어기술이 필요하다. 그러므로 이들의 문제는 기존에 사용된 재료나 제조방법으로서 해결하기가 곤란하다. 따라서, 최근에서야 한 단면에서 다른 단면까지 연속적인 재료의 조성, 조직을 유지하는 Ceramic/금속복합재료와 같은 경사기능재료(functionally gradient material; 이하 FGM)가 출현하게 되었고, 이 점

*정회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

**정회원, 전북대학교 기계설계학과

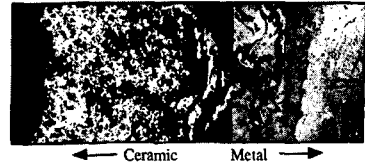
***정회원, 전북대학교 정밀기계공학과

단소재에 대한 연구와 개발이 다각적으로 추진되고 있다. (1~3)

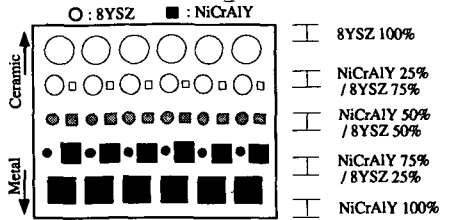
이러한 경사기능재료의 각 단면, 즉 다른 경사조성비로 인한 미세조직의 층은 각기 서로 다른 기계적 성질을 지니고 있다. 따라서 각각의 구성비에 따른 물리적, 기계적 인자값은 우선적으로 파악해야 할 항목이다. 더불어 개선된 소재의 구조건전성을 확보하기 위해서는 그 재료의 미세적인 파괴기구 해석과 파괴역학적 인자들을 찾는 연구가 필연적으로 수행되어야 한다. 경사기능재료의 개발에 있어서 초기단계에서 소규모 시험편을 용이하게 채취할 수 있고 제조에 따른 경제적 손실과 시간을 절약하기 위해서, 본 연구에서는 개량형소형편치시험(modified small punch test ; 이하 MSP 시험)법을 이용하여 조사하였다. (4,5) 본 실험의 목적은 경사구조의 기초가 되는 각각의 미세조직에 대하여 물성치를 확보하고 그에 대한 상호분석을 하고자 한다. 즉, 재료의 탄성계수(E), 파괴응력(σ_f), 파괴인성치(K_{IC})를 조성비율에 따라 각각 구하였다. 그리고, 미세적인 파괴거동을 조사하기 위해서 비파괴평가법인 음향방출(acoustic emission ; 이하 AE) 시험을 병행하여 실시하였고 각 파단면의 파괴형태는 전자현미경을 통하여 파면사진으로 분석하였다. (6)

2. 시험편 및 실험방법

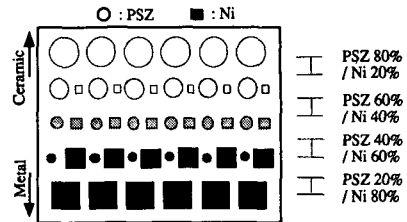
본 연구에서 사용한 시험재료는 각기 다른 방법으로 제조된 2종류의 시험편이다. 하나는 Ni기합금(NiCrAlY 합금)분과 ZrO_2 계 세라믹스분(ZrO_2 -8wt% Y_2O_3 ; 이하 8YSZ)을 Plasma Spray법으로



(a) Microphotograph for NiCrAlY/8YSZ material



(b) NiCrAlY/8YSZ material using plasma sprayed method



(c) PSZ/Ni material using doctor blade method

Fig. 1 Structure of FGM

경사조성시킨 재료이다. 다른 하나는 IC기판, 세라믹 콘덴서 등에서 사용하는 박막적층법을 이용한 Partially Stabilized Zirconia(ZrO_2 -3mol% Y_2O_3 ; 이하 PSZ)/Ni 경사재이다. (7) 여기에 첨가된 지르코니아(ZrO_2)는 높은 용점과 우수한 내열성능을 지니

Table 1 Composition of specimen type

Materials	Specimen No	Composition ratio
NiCrAlY/8YSZ	P1	8YSZ 100%
	P2	NiCrAlY 50%/8YSZ 50%
	P3	NiCrAlY 75%/8YSZ 25%
	P4	NiCrAlY 100%
PSZ/Ni	Z1	PSZ 80%/Ni 20%
	Z2	PSZ 60%/Ni 40%
	Z3	PSZ 40%/Ni 60%
	Z4	PSZ 20%/Ni 80%

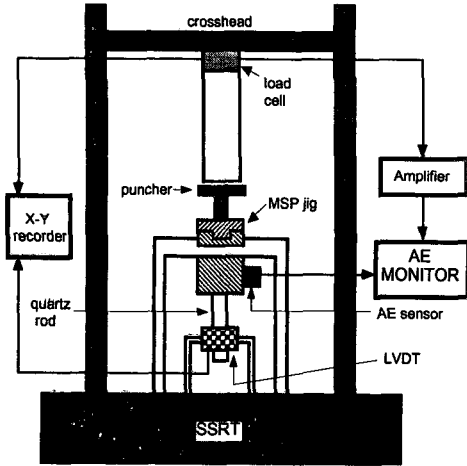


Fig. 2 Testing system

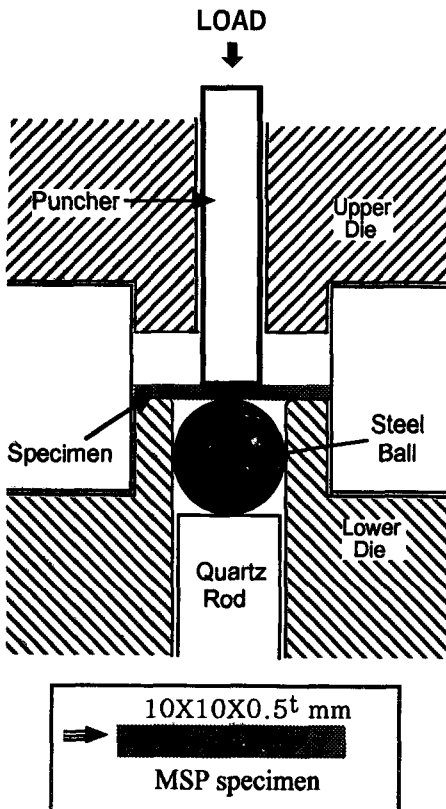


Fig. 3 Schematic diagram of MSP test

도식적으로 나타나 있으며, 제조된 이들 두 재료들은 Table 1에서와 같이 각각의 조성비에 따라서 4 종류의 시험편으로 제조하였다. MSP 시험에 사용할 시험편은 diamond cutter에 의해 자른 후 $10 \times 10 \times 0.5 \text{ mm}^3$ 의 크기로 연마를 행했다.

실험장치도가 Fig. 2에 개략적으로 나타나 있다. 실험장비는 1 ton의 load cell 용량을 갖는 저변형률시험기(SSRT)를 사용했으며, crosshead 속도는 0.1 mm/min 로 작동하였다. Fig. 3에 보여진 바와 같이, MSP 시험에서 하중은 원주형 펀처(puncher)에 의해 부과되고 시험편은 단순지지상태이며, 시험 하부표면의 강구와 석영봉을 이용하여 고정도 변위계(LVDT)로 하중점 변위측정을 하였다. 하중과 변위측정을 위해 X-Y Recorder와 하중 출력전압을 증폭시킨 후 AE 장비의 parametric input 채널에 연결하여 동시에 기록하였다. 또한 미세적 파괴기구를 해석하기 위해 지그의 측면에 AE 센서를 부착하여 AE 신호를 AE 분석기(LOCAN AT ANALYZER)에서 모니터링하였다. 이때의 AE total gain 값은 80 dB로 설정하였다. 실험은 상온에서 실시하였고, 외부로부터의 잡음(기계적, 전자기적 잡음)을 피하기 위해 안정한 환경을 조성시켰다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 MSP 시험

종래의 SP시험은 금속 등의 연성재료에 대한 특성평가용으로 개발되어 사용된 시험법이며, 세라믹과 같은 취성재료에 적용하기 위해서 새롭게 응용한 시스템이 MSP 시험법이다.

Fig. 4는 NiCrAlY/8YSZ 경사재에 대해서 각각의 조성비에 따른 하중-변위선도를 파괴하중까지 나타낸 것이다. 그림에서 나타난 바와 같이 8YSZ 100% 곡선에서는 탄성적인 거동을 보이며, NiCrAlY 100% 재료에서는 대조적으로 소성적인 거동이 많이 발생하는 것을 알 수 있다. 즉, 8YSZ 성분이 감소하고 NiCrAlY의 배합비율이 증가함에 따라 취성파괴에서 연성파괴거동으로 이동하였다. 또한, 최대하중 P_{max} 지점까지의 변위량도 NiCrAlY 함유량이 많을수록 크게 나타났다. 조성비율만 다른 이들 재료에서 최대하중은 NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 재료에서 약 470 N 정도로 가장 높았다.

며 고온에서 안정한 화학적 상태를 유지하므로 2000 K 이상의 고온을 사용할 경우에 기초가 되는 재료이다.^(8~10) 경사기능재료의 내부구성이 Fig. 1에

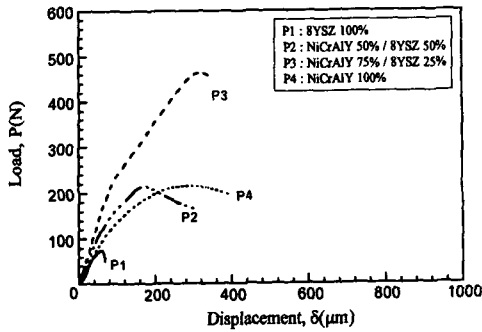


Fig. 4 Load(P)-displacement(δ) curve(NiCrAlY/8YSZ)

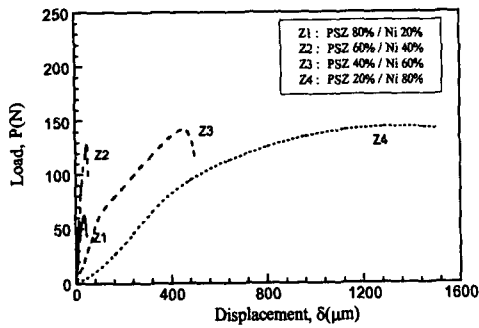


Fig. 5 Load(P)-displacement(δ) curve(PSZ/Ni)

Fig. 5는 PSZ/Ni 경사재의 하중-변위곡선을 파괴하중까지 나타낸 것이다. Fig. 4와 유사하게, Fig. 5에서도 Ni의 함유량이 증가될수록 연성적인 거동을 뚜렷하게 보이고 있다. 반면, PSZ 성분이 많이 포함됨에 따라 취성적인 파괴에 이르고 있다. 최대하중 P_{max} 는 PSZ 80%/Ni 20% 경사재를 제외하고는 비교적 비슷한 분포를 보이고 있다. 또한, 최대하중점까지 변화된 변위는 Ni 함량의 증가에 따라 증가하고 있다.

Ni과 NiCrAlY 함량에 따른 파괴에너지와 최대하중이 Fig. 6에 제시되어 있다. 파괴에너지는 Fig. 4와 5의 하중-변위선도하에서 파괴하중 지점까지를 수치적분한 면적값으로 산출하였다.⁽⁵⁾ 모든 재료에서 Ni계의 함량이 증가하면 파괴에너지도 따라서 증가하였다. 또한, 최대하중도 파괴에너지의 값과 비슷하게 분포됨을 알 수 있다. 그러나, PSZ/Ni 재의 Ni 40% 이상에서는 최대하중값이 거의 일정하지만 파괴에너지는 급격하게 상승하였다. 이것은 재료들이 비슷한 최대하중점을 갖지만 Ni의 함량이 증가하여 연성적인 거동을 확대시킴으로서, 이에 따른 큰 변형(deformation)으로 결과된 파괴에

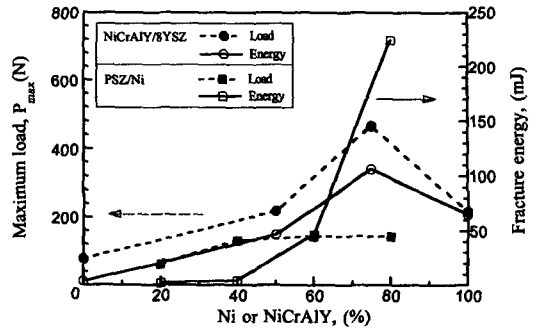
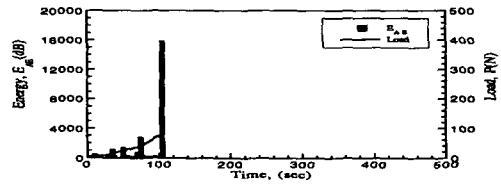
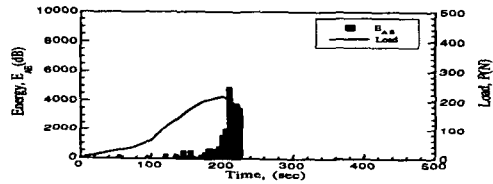


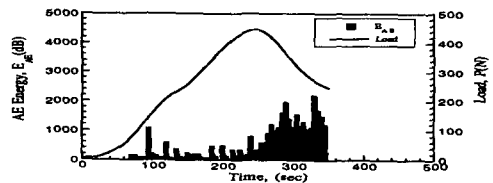
Fig. 6 Fracture energy and maximum load for Ni or NiCrAlY percentage



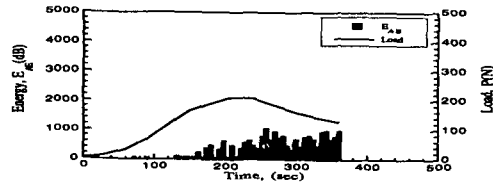
(a) PSZ 80%/Ni 20%



(b) PSZ 60%/Ni 40%



(c) PSZ 40%/Ni 60%



(d) PSZ 20%/Ni 80%

Fig. 7 Load and AE energy distribution in NiCrAlY/8YSZ material

너지는 훨씬 커지기 때문이다. 주목할만한 것은 가장 높은 최대하중(약 466 N)을 보였던 NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 재료에서 역시 가장 높은 파괴에너지(약 0.1 J)가 분포되었다는 사실이다.

3.2 AE 거동

미시적인 파괴거동을 살펴보기 위해서 AE 분석을 병행하였다. 모든 재료에서 Ni 혹은 NiCrAlY 조성비가 커질수록 많은 AE energy가 방출되었으며, 탄성적인 구간에서는 소량의 AE가 발생하였고 탄성구간 이후의 영역에서는 AE가 급격히 증가되었다.

Fig. 7은 NiCrAlY/8YSZ 경사재에 대하여 하중의 증가에 따라 수반되는 AE energy 분포를 시간에 대해 나타낸 것이다. 그림(a)의 세라믹 100%에서 그림(d)의 NiCrAlY 100%까지 하중에 대한 AE 거동을 살펴보면 탄성영역 근방에서는 AE 발생이 미미한 정도이지만 최대하중점 부근에서부터는 AE 방출에너지가 급격히 증가하고 있음을 알 수 있다. 특히 (a)의 8YSZ 100%에서는 최대하중에 도달하자마자 바로 파괴되는데 이때 약 16000 dB의 급격한 AE 에너지가 방출되어 파괴거동과

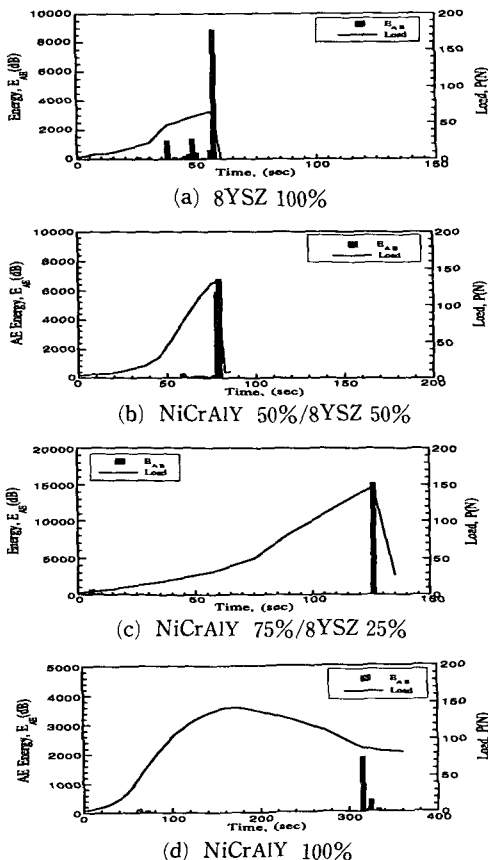


Fig. 8 Load and AE energy distribution in PSZ/Ni material

잘 일치하고 있었다. 그림(b)~(d)의 재료에 대한 AE 거동에서도 1000 dB 이상의 AE 에너지가 최대하중 부근에서 크게 분포됨을 확인할 수 있다. AE 에너지가 갑자기 증가되는 지점은 안정크랙에서 불안정 크랙으로 성장하는 임계점을 보여주는 것으로 평면변형률 파괴인성평가의 중요한 정보인 임계응력(P_0) 결정지점을 제공한다.⁽¹¹⁾

Fig. 8에서는 PSZ/Ni에 대한 재료의 AE 에너지 거동과 하중분포를 보이고 있다. 하중분포를 보면 거의 취성적인 파괴형태를 하고 있다. 하중이 낮은 시험초기에서는 AE가 방출되지 않았으며, 그 후에서 최대하중점 이전까지는 AE 에너지 방출량이 미약하고 취성과괴 지점에서 7000 dB 이상의 두드러진 AE 방출형태를 나타내고 있다. 그림(d)의 PSZ 20%/Ni 80% 재료에서는 최대하중점을 지나 약 90 N의 하중에서 2000 dB 정도의 높은 방출을 보였다. 이것은 다른 재료에 비해 연성의 성질이 부가되어 최대하중을 지나 그 이후에 파괴됨을 AE 관찰로 알 수 있다. 따라서 취성거동을 나타내는 대부분의 재료에서 파괴진행의 과정을 AE 방출로서 확인가능하였다.

3.3 파괴인성 평가

MSP 시험에 의해 구해진 인자들과 시험조건에서 탄성계수(E), 파괴응력(σ_f)을 환산하는 식을 Table 2에 나타내었다. 여기에서 파괴인성값은 많은 굽힘시험과 round compact tension(RCT) 시험을 통하여 얻은 평면변형률 파괴인성치(K_{Ic})와 MSP 시험을 통하여 얻은 파괴응력(σ_f) 간의 상관관계를 이용하여 아래의 실험식(1)로부터 산출되었다.⁽¹²⁾

$$K_{Ic} = 0.07 (\sigma_f)^{2/3} \quad (1)$$

Fig. 9는 Ni의 배합비율에 따른 탄성계수 E 값을 도시한 그림이다. NiCrAlY-8YSZ, PSZ-Ni의 두 재료에서 Ni계의 함량이 증가함에 따라서 탄성계수가 감소하고 있다.

이는 Fig. 4와 5에서 논의된 것처럼 Ni 혹은 NiCrAlY가 함유량이 많아질수록 변위량도 증가하여 연신이 증가되기 때문에 탄성계수가 감소하는 경향을 보이는 것으로 분석된다. 그러나 NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 재료에서 NiCrAlY 50%/8YSZ 50%재보다 다소 증가된 경향을 보이는 것은 탄성 한계내에서 하중의 증가율이 더 크기 때문이다. 또

Table 2 Conversion formula of Young's modulus and fracture stress

	$\sigma_f = \frac{3P}{2\pi t^2} \left[1 - \frac{1-v^2}{4} \cdot \frac{b^2}{a^2} + (1+v) 1n \frac{a}{b} \right]$ $E = \frac{P}{\delta} \cdot \frac{3(1-v^2)}{16\pi t^3} \left[\frac{4(3+v)a^2}{1+v} - \frac{7+3v}{1+v} b^2 - 4b^2 1n \frac{a}{b} \right]$
	$\sigma_f = \frac{3P}{2\pi t^2} \left[\frac{1-v}{2} \left(1 - \frac{b^2}{a^2} \right) + (1+v) 1n \frac{a}{b} \right]$ $E = \frac{P}{\delta} \cdot \frac{3(1-v^2)}{2\pi t^3} \left[\frac{(3+v)a^2 - (1-v)b^2}{2(1+v)} - b^2 \left(1n \frac{a}{b} + 1 \right) \right]$

ν = Poisson ratio

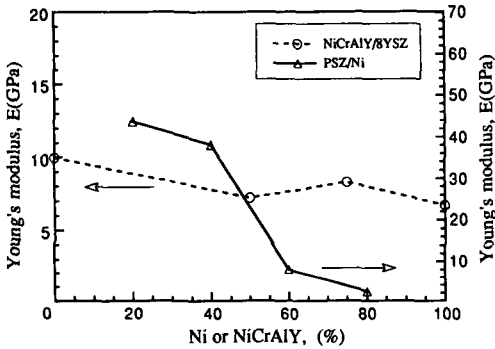


Fig. 9 Young's modulus distribution for Ni or Ni-CrAlY percentage

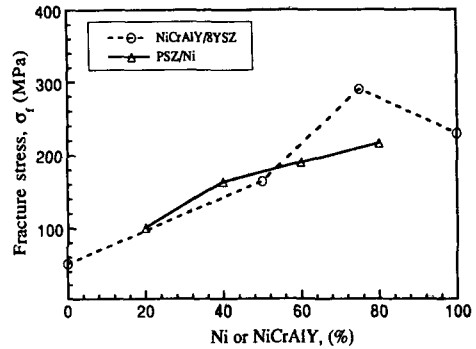


Fig. 10 Fracture stress distribution for Ni or NiCrAlY percentage

한 PSZ 60%/Ni 40%재와 PSZ 40%/Ni 60%재의 큰 탄성계수 차이는 두 재료의 변위량에 대한 하중의 증가율이 Fig. 5에서와 같이 후자의 재료가 상당히 작기 때문이다.

Fig. 10은 Ni의 함유율에 따른 파괴응력값 σ_f 를 도시한 그림이다. Ni계의 함유량이 많을수록 파괴응력값도 증가를 보이고 있다. 그러나 NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 재료에서는 NiCrAlY 100%보다 높은 분포를 갖고 있으며 그 재료에서 가장 높은 최대치(약 290 MPa)가 나타났다.

Fig. 11은 Ni계의 함유율에 따른 파괴인성값 K_{Ic} 의 관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서도 역시 Fig. 10과 같은 경향을 보이고 있다. Ni계의 배합비율이 증가함에 따라 파괴인성치도 증가하였다. 또한, NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 재료에서 peak 값이 나타나서 가장 높은 파괴인성치(약 3.1 MPa·m^{1/2})를 보였다. 그러므로 가장 큰 파괴에너지, 파

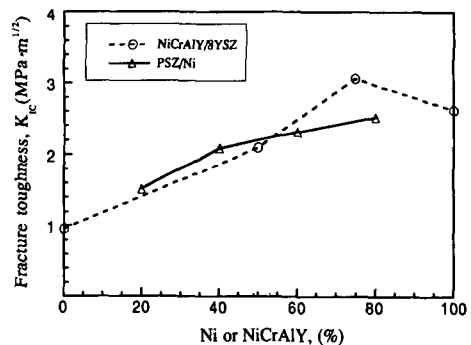


Fig. 11 Fracture toughness distribution for Ni or NiCrAlY percentage

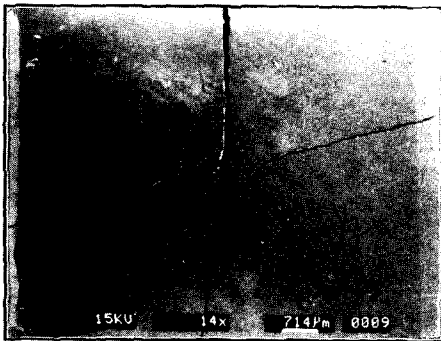
괴응력, 파괴인성치를 지닌 NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 조성비가 기계적 성능면에서 가장 우수하다고 평가된다. 이러한 결과는 재료가 완전히 연성적인 거동을 하거나 반대로 취성적인 거동을 하는 재료보다 연취성적인 성질이 혼합된 재료가 인성이 더

높다는 사실을 뒷받침하는 것이다. 사실상 연성파괴와 취성파괴를 엄밀히 구분하는 것은 어렵지만, 이는 연성적인 거동에 주된 영향을 끼치는 Ni계의 크랙전파 방향에 세라믹 입자가 분재되어 크랙방향이 세라믹 입자 주위를 돌아서 진행하고 입자(금속과 세라믹)간의 이방성 때문에 높은 인성을 갖는 것으로 추정된다. 더불어 이들 그림에서 살펴본 바와 같이 MSP 시험으로 조성비에 따라 각기 다른 물성치를 확보하여 파괴인자들의 비교가 가능하였다.

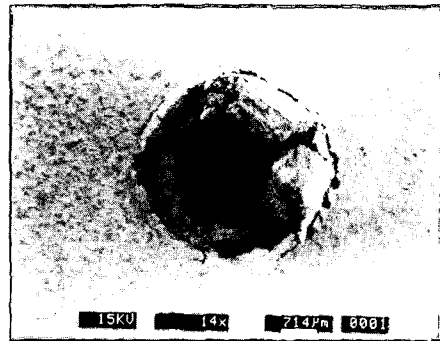
3.4 파면고찰

Fig. 12(a), (b)는 PSZ 60%/Ni 40%재와 NiCrAlY 75%/8YSZ 25%재의 표면을 촬영한 대표적인 SEM 사진이다. Fig. 12(a)는 X자형의 최성적 파괴형태를 나타내고 하중편치의 중심부가 X자

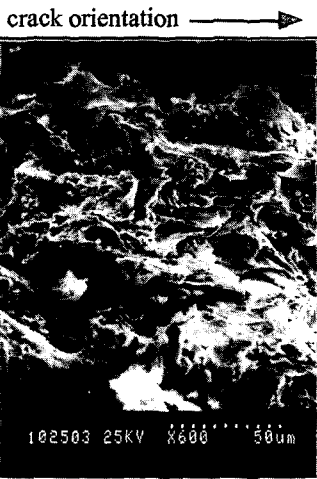
형의 교점이다. Fig. 12(b)에서는 연취성적인 파괴양상으로 bulging되었고 하중중심부를 기점으로 원주방향에서 크랙이 진전되어 파괴되었음을 알 수 있다. Fig. 12(c), (d)는 가장 높은 인성치를 나타낸 NiCrAlY 75%/8YSZ 25%재와 NiCrAlY 100%재의 대표적인 파면을 관찰한 전자현미경 사진이다. 파면의 상태를 관찰해 보면 NiCrAlY 75%/8YSZ 25%재는 NiCrAlY와 세라믹으로 분포된 입자크기가 NiCrAlY 100%재에 비하여 작았다. NiCrAlY 100%재에는 입계를 따라 크랙이 연속형으로 진전되었으며 NiCrAlY 75%/8YSZ 25%재와 비교해 볼 때 입계면이 비교적 매끈한 곡선형상을 구성하는 반면에, NiCrAlY 75%/8YSZ 25%재에는 세라믹입자가 떨어져 나가 움푹 패인 형상(dimple과 유사한 형태-사진의 'A'부분)을 보이며 입계면이 거칠고 강한 결속력을 지니고 있음이 확인되었다.



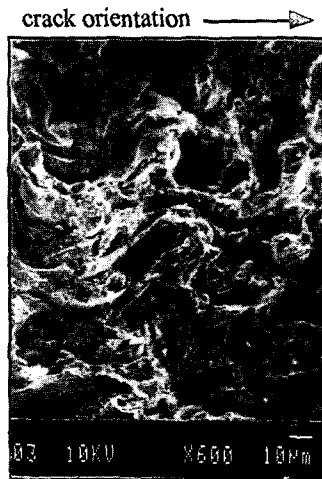
(a) PSZ 60%/Ni 40%(Surface)



(b) NiCrAlY 75%/8YSZ 25%(Surface)



(c) NiCrAlY 75%/8YSZ 25%(Fracture surface)



(d) NiCrAlY 100%(Fracture surface)

Fig. 12 SEM photographs of surface and fracture surface

또한 검은 부분인 NiCrAlY 금속입자가 흰 부분인 8YSZ 세라믹입자를 파묻는 형상으로 구성되어 이 세라믹입자에 의해 금속입자가 핀정지효과(pin arrest effect)를 가져와 소정의 크랙지연을 유발시키는 작용때문에 NiCrAlY 100%재보다도 높은 파괴인성값을 지니는 것으로 분석된다. 즉, 금속입자(NiCrAlY)에서 크랙이 진행되다가 세라믹입자와 접하게 되면 크랙의 진로가 변화되어 진전되거나 다른 부위의 미소크랙이 합체되어 확장되고 있다. 이와 같은 크랙의 방향전환과 취약한 타 부위의 크랙생성은 바로 세라믹입자가 개재되어 크랙의 전파가 용이하지 못하기 때문이며, 파면사진에서도 세라믹입자가 빠져나간 부분에서 굴곡이 되어 크랙의 방향이 변화되었음을 알 수 있다. 이러한 경향은 사진에서 명확히 보여지며 Fig. 11에서 추정할 것 과도 잘 부합된다.

4. 결 론

본 연구에서는 경사기능재료의 기초구조가 되는 각각의 미세조직에 대하여 재료의 탄성계수(E), 파괴응력(σ_f), 파괴인성치(K_{IC})를 구하고 미시적인 파괴거동을 조사하기 위해서 MSP 실험과 AE 실험을 실시하고 전자현미경을 통하여 파면을 분석하였다. 이러한 실험을 토대로 다음과 같은 결과를 얻을 수 있었다.

(1) 두 시험편에서 Ni계의 배합비율이 증가함에 따라 비선형거동의 형태가 두드러지게 나타났다. 반면 ZrO₂계가 많이 함유될수록 취성적인 파괴형태로 되었다.

(2) AE 시험에서는 최대하중점 근방에서부터 다량의 AE 에너지가 검출되었으며 재료의 미시적인 파괴특성에 대한 정보를 제공하였다.

(3) Ni계의 함유량이 증가하면 탄성계수는 감소하고, 파괴응력 및 파괴인성값은 증가하였다. 그러나, NiCrAlY 75%/8YSZ 25% 경사재료에서는 탄성계수가 증가하고, 파괴응력 및 파괴인성값도 가장 높게 나타나 기계적 성질이 제일 우수함을 알 수 있었다. 또한 파면관찰을 통해서도 이같은 현상이 증명되었다.

(4) 조성비에 의존한 파괴역학적 특성평가로

MSP 평가가 기존의 파괴특성을 평가하는 시험과 비교하여 유효함이 증명되었고 이를 설계 및 제조에 응용할 수 있는 데이터베이스화가 가능하였다.

참고문헌

- (1) Niino, M., Hirai, T. and Watanabe, R., 1987, "The Functionally Gradient Materials," *J. Jpn. Soc. Comp. Mater.*, 13-1, pp. 257.
- (2) Gill, B. J. and Tucker, R. C. Jr., 1986, "Plasma Spray Coating Processes," *Mater. Sci. Technol.*, 2, pp. 207~213.
- (3) 科學技術廣報財團, 1987, "複素化による機能發現と熱應力緩和のための基礎技術に關する調査報告書," 昭和61年度 科學技術振興調査費.
- (4) JAERI-memo 62-193, 1987, "小型ハンチ(SP) 試驗方法(案)."
- (5) Okuda, S., Saito, M., Hashida, T. and Takahashi, H., 1991-4, "Small Punch Testing Method for the Development of Functionally Gradient Materials," 日本機械學會論文集(A編), 57卷, 536號, pp. 940~945.
- (6) 송준희, 임재규 외, 1993, "경사기능재료의 파괴인성 및 AE 특성에 관한 연구," 대한기계학회 추계학술대회논문집(I), pp. 399~402.
- (7) (社團法人)未踏科學技術協會, 傾斜機能材料研究會, 1993, "傾斜機能材料," pp. 11~84.
- (8) 박정현, 1990, "뉴세라믹스," pp. 49~60.
- (9) 日本セラミックス協會, 1991, "セラミックス先端材料—強度と微細構造—," pp. 271~282.
- (10) 山崎道夫, 1977, "材料科學 14," No. 6, pp. 284.
- (11) Song, J. H., Lim, J. K. and Shoji, T., 1993, "A Study on Fracture Toughness Evaluation of Polymer Composite Materials Using Acoustic Emission Technique," *APCFS '93* pp. 739~744.
- (12) 齊藤, 高橋, 鄭, 川崎, 道邊, 1991-3, "微小試驗片法による金屬/セラミックス複合材料の破壊特性評價," 日本機械學會論文集(A編), 57卷, 535號, pp. 50.