

## NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 박막코팅을 이용한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 계면특성향상 -(2)계면특성평가

문 철 희

위스콘신 대학교 재료공학과 연구원(현재 삼성전관 근무)  
(1997년 5월 9일 접수)

### Enhanced Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti Interfacial Properties Using NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Interlayers - (2) Determination of the Interfacial Properties

Cheol-Hee Moon

Dept. of Mat. Sci. and Engr., University of Wisconsin-Madison  
(Samsung display devices co. now)

(Received May 9, 1997)

#### 요 약

길이 5.5 cm, 폭 0.5 cm, 두께 0.05 cm인 알루미늄 기판위에 NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti (x=0, 0.25, 0.5, 0.75, 1) 박막층을 스퍼터코팅하였고, 두 개의 시편을 T<sub>1</sub>코팅층을 서로 마주보게 하여 950°C에서 3시간동안 1MPa의 압력하에서 hot press하여 계면특성을 평가하기 위한 시편을 제조하였다. 시편의 한쪽 알루미늄 기판에 precrack을 형성시킨 후 4 point bending test를 통하여 계면부의 파괴양상 및 계면강도를 조사하였다. NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>층을 조성을 달리함에 따라 x값이 0.75, 1인 경우는 crack이 한쪽 기판에서 다른쪽 기판으로 전달되는 혼합파괴 양상을 보였다. 본실험에서 채택한 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 시스템은 950°C에서 계면 사이에 화학적 반응이 일어나지 않고, NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>층의 조성을 달리함에 따라 계면특성을 조절할 수 있으므로 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 복합체의 계면특성을 향상시키는 것으로 평가되었다.

#### ABSTRACT

Two NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti sputter-coated Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> substrates (L 5.5 cm×W 0.5 cm×T 0.05 cm) were diffusion bonded together using hot press method at 950°C for 3 hours under 1MPa of applied pressure. 4 point bending tests were used to evaluate the mechanical performance of these precracked laminate beams. Two types of mechanical responses were observed: crack penetration through the interface for x=0.75, 1 and crack deflection into an interface for x=0.25, 0.5. The Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti system suggested here has been proved to be effective for the thermokinetic stability and tailorability of the interfaces of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti composites at 950°C.

**Key words :** Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti composites, 4 point bending test, Interfacial strength, Thermokinetic stability, Tailorability of the interface

#### 1. 서 론

금속기지복합재료(Metal matrix composites : MMCs)는 저비중, 고강도 등 항공재료로서 이상적인 특징을 가지고 있으므로 기존의 항공재료를 대체할 수 있을 것으로 각광받고 있다. 이들중의 하나인 섬유강화 Ti복합재(Fiber reinforced Ti composites)는 실현 가능성이 가장 높은 재료중의 하나이지만, Ti의 반응성이 높아서 대부분의 강화재로 쓰이는 재료들과 화학적으로

쉽게 반응하는 것이 가장 큰 문제로 되어있다. 특히 현재의 가공기술로는 복합재 제조시 고온, 고압하에서 성형해야 하며 사용환경 또한 고온, 부식성의 환경이므로 반응을 일으킬 가능성은 더욱 높아진다. 이와같은 Ti와 강화재 사이의 반응을 막기 위해서는 둘 사이에 코팅층을 도입하는 것이 필요하다. 이와같은 목적으로 섬유강화 복합체에 사용되는 코팅층은 다음과 같은 중요한 조건을 만족해야 한다. 첫째, 코팅층은 섬유와 기지 계면에서 일어나는 화학반응을 막아야 한다. 이를 위해서는 계

면사이에 열역학적/반응화적인 안정성(Thermokinetic stability)이 확립되어야 한다. 둘째, 금속기지에서 섬유에 전달된 부하는 금속/섬유 계면을 따라 전파하여 계면이 파괴되는 양상(Fiber debonding)과 섬유로 바로 전이되는 양상(Load transfer)의 두가지로 적절하게 조화되어야 바람직한 복합체로서의 특성을 기대할 수 있으므로 이를 조절가능하게 하는 코팅층이 요구된다. 셋째, 코팅층은 충분히 얇아서 복합재를 구성하는 물질들의 장점을 조합한 기계적특성을 가지게 해야 한다.

본연구에서 다루고자 하는 알루미늄/섬유강화 Ti 복합재( $Al_2O_3$  fiber reinforced Ti composites)는 알루미늄/섬유와 Ti 각각의 특성을 놓고 볼 때에는 분명히 유망한 복합재료특성을 기대할 수 있지만, 고온에서 서로 반응하여<sup>1)</sup> 기계적특성에 악영향을 미친다는 문제점을 지니고 있다. 본연구는 이러한  $Al_2O_3/Ti$  계면에 열역학적인 안정성과 적합한 기계적특성을 함께 제공할 수 있는 코팅시스템을 찾으려는 노력의 일환으로서, 알루미늄 기판위에  $NbC_xC_{1-x}/Y_2O_3/Ti$ 층을 차례로 스퍼터코팅하였고, 이와같이 코팅된 2개의 알루미늄 기판을 Ti층을 서로 마주보게 하여 고온, 고압하에서 hot press하여 접합된 시편에 대하여 4 point bending test를 통하여 계면의 기계적특성을 평가하였다. 알루미늄/섬유강화 Ti 복합재료( $Al_2O_3$  fiber reinforced Ti composites)에서 복합재료로서의 바람직한 특성을 얻으려면 알루미늄/fiber 계면 근처에서 부하의 전이(Load transfer)와 debonding이 적합하게 조화되어야 하므로,  $NbC_xC_{1-x}$ 층의 주된 도입목적은  $Al_2O_3$ 와 강한 결합력을 가지는  $NbC$ 와  $Al_2O_3$ 와 debonding을 일으키는 C를 적절하게 혼합함으로써  $Al_2O_3/NbC_xC_{1-x}/Y_2O_3/Ti$  다층구조의 계면에서 mixed mode fracture가 일어나게 하는 것이다.<sup>2)</sup>  $Y_2O_3$  층은 C와 Ti사이의 화학반응을 막기 위한 확산방지층(diffusion barrier)으로서 도입되었다. 이와같은  $Al_2O_3/NbC_xC_{1-x}/Y_2O_3/Ti$  다층구조에 대하여 (1)편에서는 계면의 열안정성과 관하여 살펴보고<sup>2)</sup> 본실험에서는  $NbC_xC_{1-x}$ 의 조성을 변화시킴으로써 계면의 기계적특성을 변화시킬 수 있는지를 살펴보기로 한다.

이와같은 계면특성을 평가하기 위하여 실제의 복합재 성형공정을 통하여 실험하는 것은 시간과 비용적인 측면에서 힘든 일이므로 본실험에서는 다음과 같은 모델 시스템이 이용되었다. 복합재료에서 파괴는 궁극적으로 복합적인 형태의 응력에 의하여 섬유와 기지의 계면에서 일어나므로 복합재의 기계적특성을 테스트하기 위해서는 복합형태의 부하조건(mixed-mode loading)하에서 계면강도를 측정하는 것이 필요하다. Fig. 1은 재료의 계면에 존재하는 두가지 형태의 응력인 Mode I(계면에

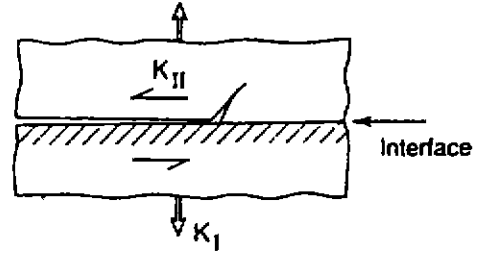


Fig. 1. Stresses at a bimaterial interface

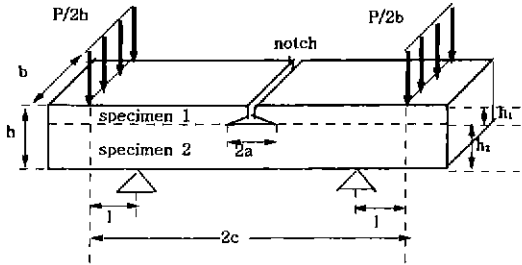


Fig. 2. Charalambides' test specimen geometry

수직인 응력)과 Mode II(계면에 평행한 전단응력)을 나타낸 것이다. 그림에서 Mode I과 Mode II가 어느 정도씩 존재하는가 하는 것은 다음의 phase angle  $\psi$ 에 의하여 결정된다.

$$\psi = \tan^{-1} (K_{II}/K_I) \quad (1)$$

여기서  $K_I$ 과  $K_{II}$ 는 각각 Mode I과 Mode II응력의 intensity factor이며 Mode I만 존재하는 경우는  $\psi$ 가  $0^\circ$ , Mode II만 존재하는 경우는  $\psi$ 가  $90^\circ$ 이다. Charalambides 등에 의하여 고안된 4 point bending test<sup>3,4)</sup>는 Fig. 2와 같이 마주보는 2개의 평행한 시편에 대하여 한 쪽 시편에 노치를 만들고 계면에 precrack을 만든 후, 노치가 있는 쪽의 시편이 인장응력을 받도록 수직인 방향의 응력을 가한다. 이와같은 구조의 시편을 사용하면  $\psi$ 가  $35-60^\circ$ 인 조건을 만족하므로 Mode I과 Mode II가 거의 비슷하게 분포된 응력하에서의 계면파괴강도를 측정할 수 있다. Fig. 2와 같은 시험방법을 사용하면 시편 1과 시편2의 계면에서 crack의 진행방향은 계면을 통하여 반대편의 시편으로 전달되는 crack penetration (Fig. 3(a))과 계면을 따라 방향을 바꾸어 진행되는 crack deflection (Fig. 3(b))의 두가지 중에서 하나를 택하게 된다. Cook<sup>5)</sup>과 Hutchinson<sup>6)</sup>은 두 시편의 계면에서 계면을 따라 crack이 진행되는 crack deflection이 일어나는 것은 계면의 fracture toughness(strain-energy release rate)가 crack이 진행되려는 상대편 시편의 그것과 비교하여 25% 이하인 경우임을 계산식을 이

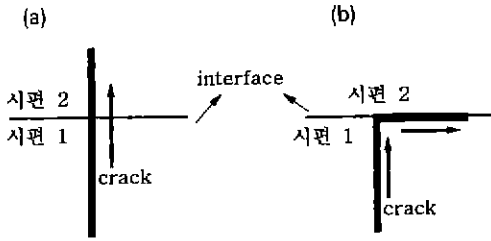


Fig. 3. Manners in which a crack can propagate when approaching a bimaterial interface perpendicularly (a) crack penetration and (b) crack deflection

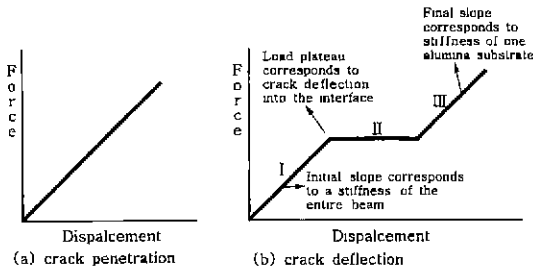


Fig. 4. Sample force vs. displacement graph which exhibits (a) crack penetration through the interface and (b) crack deflection into the interface

용하여 밝혀내었다.

본실험의 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti 다층구조에서 각각의 층을 구성하는 재료들의 intrinsic fracture toughness는 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 40 Jm<sup>-2</sup>, NbC 50 Jm<sup>-2</sup>, C 1 Jm<sup>-2</sup>, Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 35 Jm<sup>-2</sup>, Ti 35 Jm<sup>-2</sup> 이므로, 이와같은 주장에 따르면 NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>층에서 x가 작은 경우 interfacial debonding이 일어날 것으로 예상할 수 있다. 4 point bending test에서 crack penetration과 crack deflection은 Fig. 4와 같은 응력 vs. 변위그래프를 통하여 파악할 수 있다. (a)는 crack이 반대편 시편으로 바로 전달되는 crack pene-

tration의 경우로서 그래프는 직선으로 나타난다. (b)는 crack이 계면부를 따라서 전파되는 crack deflection의 경우로서 I부분은 노치를 가진 시편과 반대편의 노치가 없는 시편이 계면층에 의하여 결합되어 있는 상태에 해당하며, 이때의 직선의 기울기는 전체시편의 stiffness 즉, 두시편 사이의 계면강도와 노치가 없는 시편의 강도에 의하여 결정된다. Fig. 4(b)에서 그래프의 기울기를 이용하면 stiffness는 다음과 같이 결정된다.

$$E = \frac{dF}{dd} \frac{l^2}{bh^3} (3L-4l) \tag{2}$$

여기서 dF/dd는 응력 vs. 변위그래프의 기울기, b는 시편의 폭, h는 시편의 두께, l은 내부부하점과 외부부하점 사이의 간격, L은 외부부하점 사이의 간격(Fig. 2에서 2c)이다. 이 공식은 4 point bending test에서의 geometry를 설명하기 위하여 유도된 것으로 만약 이론적인 stiffness가 얻어지지 않으면 노치가 없는 시편의 기울기와 비교하여 검토해보아야 한다.

Fig. 4(b)에서 I부분의 기울기는 Fig. 4(a)의 crack penetration의 경우와 유사해야 하며 III부분의 기울기는 노치가 없는 시편의 stiffness와 유사하다. 또한 그래프에서 I에서 II로 천이되는 점은 crack이 계면을 통하여 진행되기 시작하는 점이며, 기울기가 0인 II부분은 crack deflection이 일어나는 fracture toughness에 해당하는 부하에서 일어난다. 이때의 fracture toughness (strain energy release rate)는 crack이 시편 중앙부의 노치로부터 대칭적으로 전파되어 나가는 steady-state를 가정하면 다음과 같이 결정된다.<sup>3478)</sup>

$$G_0 = \frac{21 P^2 l^2}{16 E_2 b^2 h_2^3} \tag{3}$$

여기서 P는 deflection이 일어나는 부하값, E<sub>2</sub>는 노치가 없는 시편의 탄성계수, l은 내부부하점과 외부부하점의 간격이다. 이와같은 Charalambides의 test geometry

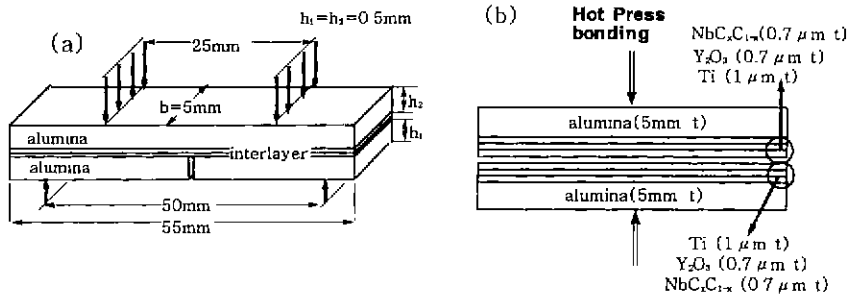


Fig. 5. Test specimen used for this study. (a) Test specimen geometry for 4 point bend test and (b) Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>/Y<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Ti model system

는 원래는 bimaterial 계면에 적용하는 것이나 본실험과 같이 다층박막 계면층을 통하여 접합되어진 경우에도 효과적으로 적용되어왔으며<sup>9,12)</sup> 실제로 Charalambides의 원래 시편구조보다 잔류응력이 오히려 작다고 알려져 있으므로 본실험에서는 Fig. 5(a)와 같이 Charalambides의 test geometry.를 응용한 방법으로 테스트시편을 제조하여 계면특성을 평가하였다.

## 2. 실험방법

본 연구에서 4 point bending test에 사용한 시편구조는 Fig. 5(b)에서와 같이 5 mm 두께의 알루미늄 기판위에  $NbC_xC_{1-x}$ 층 (0.7  $\mu m$  두께)과  $Y_2O_3$ 층 (0.7  $\mu m$  두께), Ti층 (1  $\mu m$  두께)을 차례로 스퍼터코팅하였고, 이와같이 코팅된 2개의 알루미늄 기판을 Ti층을 서로 마주보게 하여 950°C에서 3시간동안 1MPa의 압력하에서 hot press하여 접합하였다. 알루미늄기판위에  $NbC_xC_{1-x}/Y_2O_3/Ti$  박막층의 스퍼터조건 등에 대해서는 앞서의 논문에서 언급하였다.<sup>2)</sup> 여기서  $NbC_xC_{1-x}$ 의 두께를 0.7  $\mu m$ 로 정한 이유는 일반적으로 코팅층의 두께는 기판 roughness의 3배 이상이어야 코팅이 연속적으로 잘된다고 알려져 있으므로 본 실험에서 사용한 알루미늄 기판의 roughness인 0.2  $\mu m$ 를 고려한 두께이며, Ti의 경우에는 나중에 서로 접합되는 층이므로 일반적으로 접합력이 좋다고 평가되는 두께인 1  $\mu m$ 로 하였다.<sup>13)</sup> 이와같이 스퍼터코팅한 시편은 아세톤과 메탄올에서 각각 20분씩 세정한 후 950°C에서 1MPa로 3시간 동안 hot press하여 접합하였다. 여기서 온도를 950°C로 정한 것은 앞서의 실험결과<sup>2)</sup> 1000°C에서는 코팅층간에 화학적반응이 일어날 가능성이 있기 때문이다. 승온과 강온에 소요된 시간은 각각 2시간으로 하였다.

Hot press로 접합한 시편의 중앙부분 위에 Vickers 미소경도계로 2개의 미세한 노치를 형성하였으며 3 point bending apparatus를 사용하여 2개의 노치사이에 연결된 crack이 생겨  $Al_2O_3/NbC_xC_{1-x}$  계면에 남아있도록 하였다. 즉 한쪽 시편은 crack에 의하여 중앙부위가 분리되어 있고 계면 및 다른 쪽 시편은 crack의 영향을 받지 않고 연결되어 있는 상대가 본 실험의 4 point bending test를 위하여 필요한 시편의 형상이다. 이와같이 제조한 테스트시편을 Fig. 6의 4 point flexure apparatus에 설치하였다. 그림에서 외부부하점은 5 cm간격이 떨어져 있으며, 내부부하점은 서로 2.5 cm 떨어져 있다. 이 4 point flexure apparatus는 인장테스트장치에 연결되어 있으며  $4.23 \times 10^{-1} cm sec^{-1}$ 의 cross head speed로 변위가 일정하게 조절되었다. 부하는 100 kg의 load cell에 의하여 측정되었고 변위는 컴퓨터를 이용하여

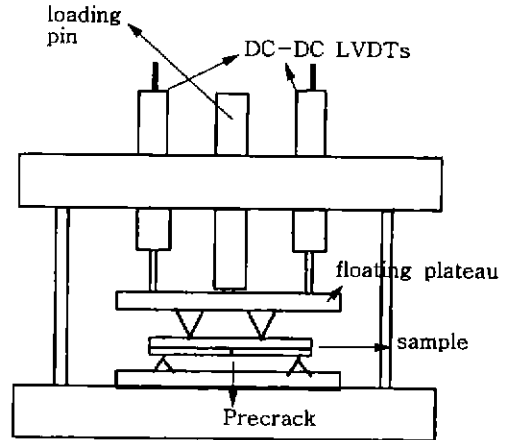


Fig. 6. Schematic drawing of the 4 point bending test jig used in this study

정확하게 조절되었다.

## 3. 결과 및 고찰

Fig. 7~Fig. 10은 알루미늄 기판위에 코팅한  $NbC_xC_{1-x}/Y_2O_3/Ti$  다층구조에서 각각  $x=0.25, 0.5, 0.75, 1$ 인 경우에 대하여 4 point bending test를 통하여 얻어진 응력 vs. 변위그래프를 나타낸다. 이 그래프들을 비교해보면  $NbC_xC_{1-x}$ 층의 조성에 따라 서로 다른 계면파괴양상을 나타냄을 알 수 있다. Fig. 7은  $NbC_{25}C_{75}$ 인 경우로서 처음에는 순수탄성을 나타내는 선형그래프를 나타내지만 0.95 kg의 부하에서 crack이 갑자기 계면으로 전파되는 수평그래프로 바뀌고 있다. 이는  $NbC_{25}C_{75}$ 의 fracture toughness를 넘는 부하에서 crack이 계면을 따라서 deflection되는 것을 의미한다. 마지막으로 나타나는 탄성 구역은 노치가 없는 상대편 알루미늄 기판의 stiffness를 의미한다. 이는 4 point bending test에서 crack이 내부부

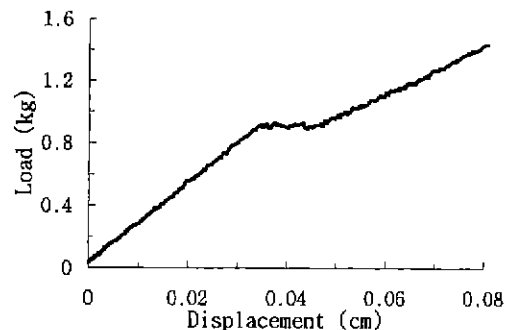


Fig. 7. Force vs. displacement graph for a  $NbC_{25}C_{75}$  sample

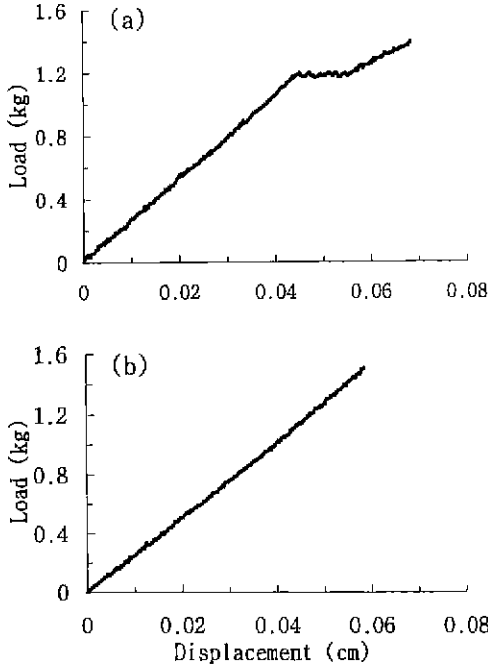


Fig. 8. Force vs. displacement graph for a NbC<sub>50</sub>C<sub>50</sub> sample (a) and (b)

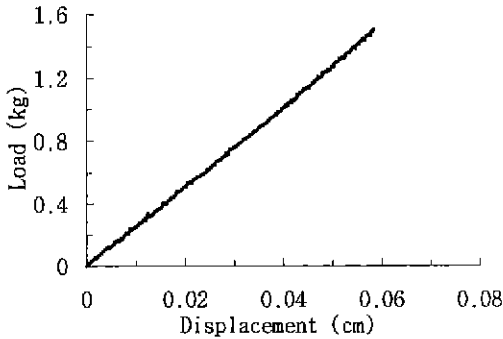


Fig. 9. Force vs. displacement graph for a NbC<sub>75</sub>C<sub>25</sub> sample

하점을 지나서 충분히 전파되고나면 외부력의 대부분이 상대편의 노치가 없는 알루미늄 기판을 탄성변형시키는데 쓰여지기 때문이다.

Fig. 8은 NbC<sub>50</sub>C<sub>50</sub>인 경우로서 Fig. 7과 비슷한 양상을 보이는 (a)의 경우와, Fig. 7과는 다른 (b)와 같은 양상을 나타내는 경우가 혼합되어 나타났다. (a)의 경우 전체적인 양상은 Fig. 7과 비슷하지만 crack deflection이 일어나는 부하값은 1.2kg으로서 더 높음을 알 수 있다. 이 결과는 NbC<sub>25</sub>C<sub>75</sub>보다 Nb<sub>50</sub>C<sub>50</sub>인 경우의 fracture toughness가 더 높음을 의미하며, 이는 NbC와 C의 intrinsic fracture toughness가 각각 50 Jm<sup>2</sup>와 1 Jm<sup>2</sup>임을

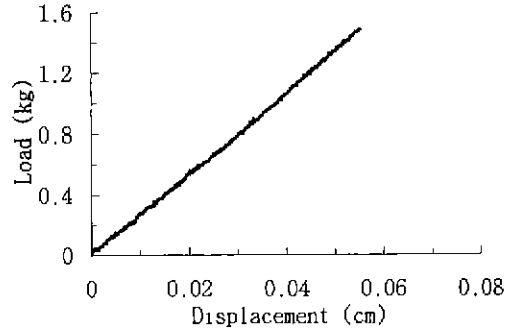


Fig. 10. Force vs. displacement graph for a NbC<sub>100</sub>C<sub>00</sub> sample

고려할 때 당연한 결과이다. (b)의 경우는 crack이 계면에서 reflection되지 않고 바로 노치가 없는 상대편 알루미늄 기판으로 전달되는 crack penetration양상을 보여준다. x가 0.75 및 1인 Fig. 9, Fig. 10의 경우에도 이와 동일한 crack penetration양상을 보였으며 이들은 기공기 등에 있어서도 별다른 차이점을 발견할 수 없었다.

이와같이 응력 vs. 변위 그래프에서 나타나는 두가지 형태의 파괴양상은 다음과 같이 설명할 수 있다. NbC<sub>x</sub>C<sub>1-x</sub>층은 NbC와 C가 연속적으로 존재하여 이루어져 있으며 crack penetration과 crack deflection의 천이는 NbC<sub>50</sub>C<sub>50</sub> 근처에서 나타나고 있다. 그러므로 crack 선단부에 C가 국부적인 연속성을 가지고 존재하면 crack deflection이 일어나고, NbC가 연속적으로 존재하면 crack penetration이 일어난다고 이해할 수 있다. 그런데 계면의 G값이 crack이 진행되려는 상대편 시편의 G값의 25% 이하인 경우 crack deflection이 일어난다는 Cook<sup>(7)</sup>과 Hutchinson<sup>(8)</sup>의 주장을 고려한다면, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>의 경우는 G값이 40 Jm<sup>-2</sup>, NbC의 경우는 50 Jm<sup>-2</sup>, C의 경우는 1 Jm<sup>-2</sup>이므로, C에 NbC가 조금만 섞이더라도 계면파괴양상이 crack deflection에서 crack penetration으로 급작스럽게 바뀔 가능성이 있는 것이다. 또한 Fig. 8에서 NbC<sub>50</sub>C<sub>50</sub>인 경우 두가지의 파괴양상을 모두 발견할 수 있었던 것으로 보아 NbC<sub>50</sub>C<sub>50</sub>인 조성 근처에서 계면파괴양상이 crack penetration에서 crack deflection으로 천이되는 점이 존재함을 알 수 있다. 또한 Fig. 7 및 Fig. 8(a)에서 crack deflection이 일어나는 부하값을 앞에서 살펴보았던 식 (3)에 대입하면 각 계면의 계면파괴강도를 계산할 수 있다. 본실험에서 l=1.25 cm, E<sub>2</sub>=366 GPa를 대입하면 식 (3)은 다음과 같이 간단히 정리되며

$$G_c = P^2 / (1.5 Jm^{-2} N^{-2}) \quad (4)$$

앞서의 NbC<sub>25</sub>C<sub>75</sub>와 NbC<sub>50</sub>C<sub>50</sub>에서 관찰된 부하값을 식

(4)에 대입하면 각 경우의  $G_{90}$ 값은  $1.3 \text{ Jm}^2$ 와  $2.1 \text{ Jm}^2$ 으로 파악된다. 이는 순수한 C의 경우  $G_{90}$ 이  $1 \text{ Jm}^2$  임을 고려할 때 어느 정도 납득이 가는 수치인 것으로 판단된다.

#### 4. 결 론

$\text{NbC}_x\text{C}_{1-x}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  스퍼터코팅한 알루미늄 기판을 hot press하여 접합하였으며, 4 point bending test를 통하여 계면특성을 평가하였다.  $x$ 가 0.75, 1인 경우에는 crack이 코팅층과는 무관하게 바로 인접한 기판으로 전파되었으나  $x$ 가 0.25, 0.5인 경우에는 코팅한 계면부에서 crack이 어느정도 진행되고 난 후 인접기판으로 전파되었으며, 이와같은 계면부의 파괴양상은  $\text{NbC}_{30}\text{C}_{70}$ 조성을 중심으로 천이하는 것으로 나타났다. 본연구의  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{NbC}_x\text{C}_{1-x}/\text{Y}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  다층구조는  $950^\circ\text{C}$  이하에서 열적으로 안정하며  $x$ 를 달리하여 계면부의 강도를 적절하게 조절할 수 있는 것으로 평가되므로,  $\text{NbC}_x\text{C}_{1-x}/\text{Y}_2\text{O}_3$  층을 코팅함으로써 알루미늄나섬유강화 Ti 복합재료( $\text{Al}_2\text{O}_3$  fiber reinforced Ti composites)의 특성을 크게 향상시킬 수 있을 것으로 기대된다.

#### REFERENCES

1. J. A. DeKock, A Study of the Interfacial Stability of Ti/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  and TiAl/ $\text{Al}_2\text{O}_3$  Composite Materials, pp90 (1995).
2. Cheol-Hee Moon, "Enhanced  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ti}$  Interfacial Properties Using  $\text{NbC}_x\text{C}_{1-x}/\text{Y}_2\text{O}_3$  Interlayers-(I) Sputtering and Thermal Stability," *J. Kor Ceram. Soc.*, **34**(8), 908-913 (1997).
3. P. G. Charalambides, J. Lund, A. G. Evans, R. M. McMeeking, *J. of Appl. Mech.*, Vol. **56**, pp77 (1989).
4. P. G. Charalambides, H. C. Cao, J. Lund, A. G. Evans, *Mech, of Mat.*, Vol. **8**, pp269 (1990).
5. J. Cook, J. E. Gordon, *Proc R. Soc. London*, A282, pp508 (1964).
6. M. He, J. W. Hutchinson, *Int. J. of Sol. Str.*, Vol. **25**, pp1053 (1989).
7. S. J. Howard, Y. C. Tsui, T. W. Clyne, *Acta Metall.*, Vol. **42**, pp2823 (1994).
8. Y. U. Tusi, S. J. Howard, T. W. Clyne, *Acta Metall.*, Vol. **42**, pp2837 (1994).
9. H. F. Wang, W. W. Gerberlich, J. E. Angelo, M. J. Mills, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. **318**, pp375 (1994).
10. H. F. Wang, J. C. Nelson, C. L. Lin, W. W. Gerberlich, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* Vol. **314**, pp103 (1993).
11. H. F. Wang, W. W. Gerberlich, C. J. Skowronek, *Acta Metall.*, **41**, pp2425 (1993).
12. A. G. Evans, B. J. Dalgleish, J. W. Hutchinson, *Acta Metall.*, **37**, pp3254 (1993).
13. A. Simanovskis and S. Stolyarova, *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Vol. **239**, pp599 (1992).
14. C. McCullough and R. R. Kieschke, *Mat. Res. Soc. Symp.*, Vol. **350**, pp119 (1994).