

# 적층복합재료의 충격특성에 미치는 적층구조의 영향

박 원조\*, 허 선철\*, 이 상필\*\*, 윤 한기\*\*, 이 광영\*

## Effects of Laminate Structures on Impact Properties of Laminate Composites

Won Jo Park, Sun Chul Huh, Sang Pill Lee, Han Ki Yoon, Kwang Young Lee

**Key Words:** Laminate Composites(적층복합재료), Impact Testing(충격시험), MMC(금속기복합재료)

### Abstract

By alternating  $Al_{18}B_4O_{33}/AC4CH$  composites with Al1050 sheets and then hot pressing, MMC/Al laminate composites have been successfully fabricated as parameters of the laminate structure and the number of Al sheet. Impact properties for laminate composites have been evaluated both in the laminate structure and in the impact load direction. Lamination of Al sheet and MMC layer showed a remarkable improvement in the absorbed impact energy compared to that of monolithic MMC. Laminate composites mounted with Al sheet at the outside of the configuration had a higher impact energy in the edge wise compared to that with Al sheet at the inside. Furthermore, there was an anisotropy in the impact value of laminate composites, that is, impact values for the flat wise in a constant volume fraction of Al sheet dramatically increased along with Al sheet number, even if impact values for the edge wise were nearly constant

### 1. 서 론

항공기나 자동차 등의 구조물에 고용이 기대되는 금속기 복합재료는 기지재에 비하여 낮은 파괴인성, 연성 및 충격흡수능력 때문에 국부적인 부품으로 사용이 제한되고 있다. 이의 저인성을 보완하기 위하여 기지재와 적층구조로 하면, 이방성 구조를 가지지만, 인성을 개선시킬 수는 있다. 적층에 의한 인성의 향상 기구는 구성재료의 소성변형과 접합계면의 박리 현상이 균열을 분산시키기 때문에 균열이 급속히 진전되지 않는다<sup>1)</sup>. 적층재료의 연구는 순금속과 합금을 조합하여 각종 기계적 특성을 연구한 결과<sup>2)~5)</sup>와, 입자강화 금속기 복합재료와 Al 합금을 이용한 적층재료에 대한 연구<sup>6)~7)</sup>도 활발히 진행되고 있으며, 이의

파괴거동에 대한 연구도 보고<sup>8)~9)</sup> 되고 있다.

따라서 적층을 이용한 강인화 방법은 금속간 화합물을 기지재로한 초고온 재료의 정적 파괴거동에 대해서도 우수한 개선 효과를 나타낸다고 보고되고 있다.<sup>10)~12)</sup> 그러나, 이들의 연구에서는 금속기 복합재료의 인성치 개선에 대하여 적층수, 적층배위등의 적층구조가 인성에 미치는 효과를 계통적으로 설명하고 있지 않다.

따라서 본 연구에서는 위스커 강화금속기복합재료와 고연성의 Al 층을 조합하여 강화재의 체적분율을 일정하게 한 적층금속기 복합재료를 진공핫프레스에 의해 제작하고 계장화 살피 충격시험기를 이용하여 적층구조, Al 층수 및 충격방향과 적층금속기복합재료의 충격하중 및 충격흡수 에너지에 미치는 영향을 비교 고찰하였다.

### 2. 실험방법

#### 2.1 적층소재

본 실험에 사용한 금속기복합재료(MMC)는 스퀴즈 캐스팅에 의해 제조하였고, 위스커는  $Al_{18}B_4O_{33}$  이며, 기지재는 Al합금(AC4CH)이다. 그리고 제작된 MMC의 기지재에 함침된 위스커

\* 경성대학교 수송기계공학부

\*\* 동의대학교 기계시스템공학부

Al<sub>18</sub>B<sub>4</sub>O<sub>33</sub> 이며, 기지재는 Al합금(AC4CH) 이다. 그리고 제작된 MMC의 기지재에 함침된 위스커의 체적율은 20%로 일정하게 유지시켰다.

MMC는 절단 후 샌드페이퍼(#600)로 두께 1.6, 2.0, 2.7, 4.0, 8.0mm 로 각각 연마한 후, 적층복합재료로 제작하기 위하여 연성이 풍부한 공업용 순알루미늄판(Al 1050)을 사용하였다. 이때 Al 박판의 두께도 각각 0.4, 0.6, 0.8, 1.2mm으로 유지시켰다. MMC 박판과 Al 박판을 진공 핫프레스로 적층하였으며, 전 처리로 각각 전해연마, 초음파 세척을 하여 표면의 이물질 및 산화막을 제거하였다.

## 2.2 적층 금속기복합재료의 제작

적층복합재료는 MMC와 Al판을 Fig.1 과 같이 번갈아 조합한 예비 성형체를 진공중의 핫프레스를 이용하여 제작하였다. 이때의 제조 조건을 Table 1 에 나타내었다.

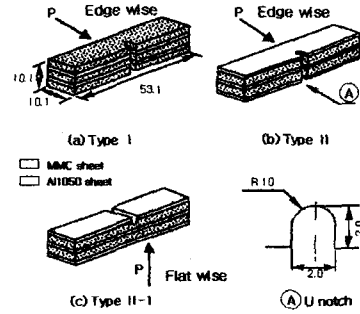
**Table1** Fabrication conditions for MMC/Al laminate composites

Volume fraction of Al1050	20%
Number of Al1050layer	2, 3, 4, 6
Preparation temperature	500℃
Applied pressure	25MPa
Pressure holding time	30min
Vacuum pressure	$1.33 \times 10^{-2}$ Pa

Al층의 두께를 변화한 경우에도 Al층의 체적율이 20% 가 되도록 조정하여 제작하였다. 제작한 적층복합재료의 치수는 23 × 12 × 55mm 이다. 적층복합재료의 제조 파라메타는 MMC층과 Al층의 배열 위치가 다른 적층구조와 Al층의 두께를 변화하여 층수를 달리 하였다.

## 2.3 계장화 살피 충격시험

충격시험기는 용량 1ton의 계장화 살피식 하이드로닉 샷(hydraulic shot) 충격시험기를 이용하였고, 시험은 상온, 충격속도와 스펠의 길이는 각각 3.3m/sec 와 40mm로 실시하였다. Fig. 1은 본 실험에 사용된 시험편의 형상, 치수 및 충격 방향을 나타내었다.



**Fig. 1** Impact specimens showing dimension and configuration between laminate structure and impact direction

(b) 와 (c)는 Al 박판을 2~6층으로 변화한 것이다. 시험편은 적층복합재료에서 채취한 후, 노치는 JIS-Z-2202 규정에 의거 U형으로 삼입하였으며, 이때의 노치는 방전가공에 의해 삼입하였다. (a)(b)에서 Al 층의 배열 위치를 달리한 적층구조의 시험편은 예지 방향에 대하여 충격시험을 행하였고, (b)(c)와 같이 외측에 Al 층을 배열한 적층재료의 시험편은 예지 방향과 프렛 방향에 대하여 충격시험을 실시한 후, 적층구조, Al층수 및 충격방향이 충격특성에 미치는 영향을 평가하고, Al층과의 적층화에 대한 충격흡수에너지를 적층화 되지 않은 순수 MMC와 서로 비교 검토하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 적층화한 재료 및 MMC의 충격거동

MMC 및 적층재는 Fig. 1(a)과 (b)에서 예지 방향 및 (c)의 프렛 방향에 충격시험을 한 결과를 Fig. 2에 나타내었다.

순수 MMC의 경우는 충격하중이 최대점에 도달한 후, 파단까지 거의 수직으로 낙하하는 거동으로 보이지만, 적층복합재료는 어느 타입도 공히 최대하중점이 후, 하중이 완만히 감소하는 연성적 파괴거동 형태로 나타내고 있다. Al층의 배열 위치가 다른 타입 I 과 II를 예지 방향에 충격시험을 한 때에도 충격하중 - 변위 곡선은 약간 다르게 나타났다.

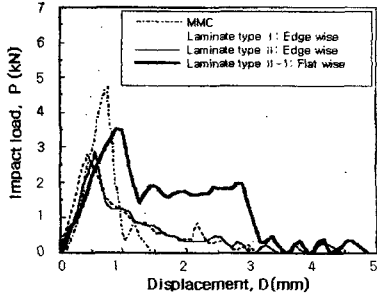


Fig. 2 Impact behavior for MMC and MMC/Al laminate composites depending on laminate structure and impact direction

충격방향을 변경한 타입 II는 프레트 방향의 충격하중-변위곡선은 명확한 차이가 나타나지 않았다. 따라서 프레트 방향의 경우는 최대하중 이후도 큰 충격하중과 변위를 유지하면서 파단에 도달하고 있다. 이것은 균열진전 양식이 에지 방향과 프레트 방향이 서로 다르다는 걸 확인할 수 있다. 타입 I과 타입 II에 대하여 각각 6~7개의 시험편을 사용하여 충격시험을 행하였고, 최대충격하중 및 파단까지의 변위량(파단변위)을 구하여 Fig.3에 나타내었다.

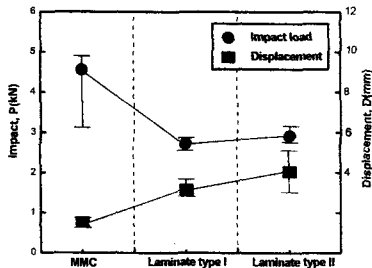


Fig. 3 Effects of laminate structures on the load carrying capacity and the displacement under the edge wise

적층복합재료의 최대충격하중은 Al 층을 적층화 한 것이 MMC 에 비하여 낮게 나타나고 있지만, 파단변위는 대폭적으로 증가하였다. 특히 타입 II의 경우의 충격하중은 MMC 보다 약 20% 감소함에도 불구하고, 파단변위는 약 200% 이상

개선되었음을 보여주고 있다. 또 Al 층의 배열위치가 다른 타입 I과 타입 II의 경우, 최대충격하중은 대부분 같은 값을 나타내지만, 파단변위는 Al 층의 수에 영향을 받는 것을 알 수 있다. 여기에서 에지 방향의 충격시험을 충격흡수에너지의 관점에서 정리하여 Fig.4에 나타내었다.

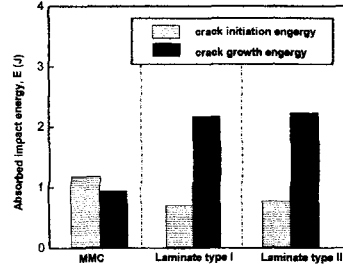


Fig. 4 Effects of laminate structures on the absorbed impact energy under the edge wise

충격흡수에너지는 충격하중-변위곡선의 면적을 적분하여 구하였다. 여기에서 적층복합재료의 전충격흡수에너지(E)을 최대충격하중점을 경계로 하여 2개로 나누고, 그 이전에 흡수된 에너지를 균열발생 에너지( $E_i$ )로 하고 그 이후 파단까지 흡수된 에너지( $E_p$ )로 평가하였다. MMC의 균열발생 에너지는 Al층의 적층화에 의해 약간 감소하지만, 균열전파 에너지는 크게 증가하였다. 특히, 타입 II의 경우에서 균열발생에너지는 약 0.7 J이지만, 균열전파 에너지는 약 2.2J으로 증가하고 타입 II의 전충격흡수에너지는 MMC 보다 약 40% 정도 크게 나타나고 있다. 또 타입 I과 II의 전흡수에너지를 비교하면, Al층수를 늘린 타입 II가 타입 I보다 약간 크게 나타났다. 이들은 강화재의 체적율과 접합계면수는 동일하고, 적층구조는 Al층의 두께를 체적율 20%에 맞게 그의 수를 2층에서 3층으로 늘린 것이 다르다.

이에 의해 강화재의 층수를 증가함으로써 충격흡수에너지를 증대시키는 효과가 있다고 생각된다.

### 3.2 충격특성이 이방성에 미치는 Al층수의 영향

적층복합재료의 충격특성의 이방성 및 Al층수

의 영향을 검토하기 위하여 AI층수를 2에서 6개로 변화시키고, 각각 에지 방향 및 프레트 방향으로 충격시험을 행하였다. 실험에 사용된 적층 복합재료에 대한 AI층의 체적율은 20%로 일정하게 하기 위하여 AI층수를 늘렸을 때 그의 두께는 얇게 된다.

Fig. 5는 에지 방향에 충격시험 한 결과를 최대충격하중과 파단변위에 관하여 정리한 결과이다. AI층수를 증가한 최대충격하중은 거의 직선적으로 증가하지만, 파단변위는 AI층수가 3층을 경계로 감소하는 경향을 나타내고 있다.

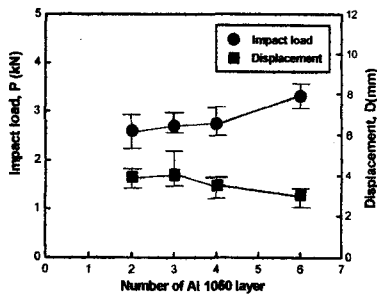


Fig. 5 Effects of aluminum layers on the load carrying capacity and the displacement under the edge wise

한편 Fig.6은 프레트 방향에 충격시험한 결과를 정리하여 나타내었다. 최대충격하중은 AI층수가 많은 것에 대하여 크게 증가하는 경향을 나타내고 있다. 그러나 파단변위는 3층까지는 크게 증가 하나 그 후의 층에서는 둔화되는 경향으로 나타나고 있다. 이의 결과에서 충격하중은 AI층의 증가에 따라 개선효과가 크게 나타나지만, 파단변위는 충격방향에 크게 영향을 받을 수 있었다.

따라서 변위는 AI층의 소성변형에 지배되지만, 에지 방향의 경우는 AI층수 즉, 체적율에 의존하지만, 프레트 방향은 단순히 AI층의 체적율에 의존하지 않고, 중립축보다 떨어진 위치에서의 AI층의 존재 여부에 의존한다고 생각된다. 이는 중립축에서 전단응력이 최대가 되는 이론과 같음을 알 수 있다.

Fig.7은 전충격흡수에너지 및 충격값에 미치는 층수의 영향을 나타내었다. 에지 방향의 흡수에너지

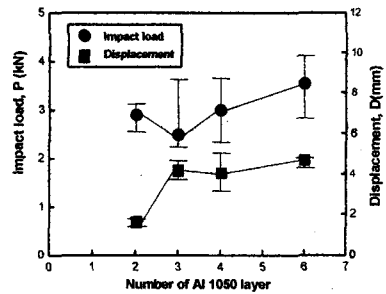


Fig. 6 Effects of aluminum layers on the load carrying capacity and the displacement under the flat wise

너지는 AI층을 증가시켜도 그다지 향상되지 않았다. 그러나 프레트 방향의 경우는 AI층수에 따라 크게 증가함을 나타내는 특징을 가지고 있다. 이는 에지 방향의 경우, AI층의 증가에 반하지 않고, 즉 Fig.5와 같이 파단변위의 감소에 기인된다고 생각된다. 따라서 프레트 방향에 비해 전충격흡수에너지가 적게 되는 원인임을 알 수 있었다. 충격값은 AI층이 6층이 될 때, 프레트 방향의 경우,  $10.4 \text{ J/cm}^2$  이나 에지 방향은  $3.02 \text{ J/cm}^2$  이며, 약 300%의 개선 효과가 있음을 나타내고 있다. 따라서 AI층을 증가시키면 프레트 방향의 적층복합재료의 충격값을 크게 개선하는 효과가 있음을 보여주고 있다.

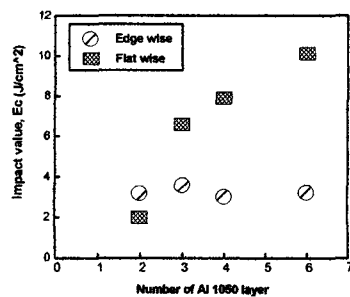
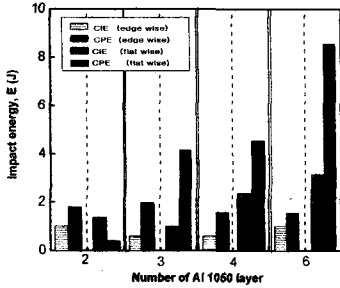


Fig. 7 Effects of aluminum layers and impact directions on the absorbed impact energy and the Charpy impact value

Fig. 8은 위의 실험결과를 다시 균열전파 에너지

지(CPE)와 균열발생 에너지(CIE)로 분류하여 나타내었다. 예지 방향의 경우는 Al층의 증가에 의해 최대하중 이후의 균열전파 에너지는 크게 개선되고 있는 것을 알 수 있다. 또 충격에너지의 이방성은 균열 발생에너지 보다도 균열의 전파에너지에 현저히 나타나고 있음을 알 수 있다.

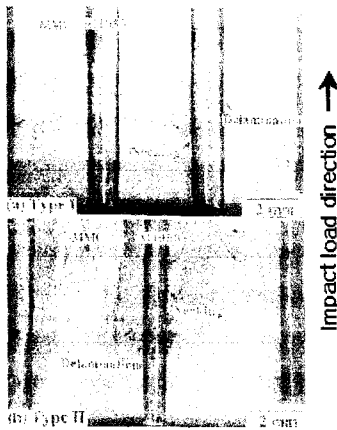


**Fig. 8** Crack initiation energy(CIE) and crack propagation energy(CPE) for laminate composites depending on aluminum layers and impact load directions

### 3.3 적층복합재료의 파괴기구

#### 3.3.1 적층배위가 다른 경우

**Fig.9** (a) (b)는 Al층을 내측(타입 I)과 외측(타입 II)에 배열한 적층구조의 예지 방향으로 파단한 파단면을 관찰한 사진이다.



**Fig. 9** Typical fractograph for MMC/Al laminate composites with different structures fractured in the edge wise load direction

적층복합재료는 MMC의 취성파괴와 Al층의 연성파괴가 공존하는 파괴거동을 나타내고 있다. 타입 I과 타입 II에서는 어느 것도 Al층의 넥킹 변형이나 Al층의 계면박리가 일어나지만, 넥킹양과 박리 길이는 거의 같은 양으로 존재하며, 파단양식도 거의 같은 모양으로 관찰되었다. 적층배위가 다른 타입 I과 타입 II의 충격흡수에너지의 차는 외측으로 배열한 Al층은 소성구속이 적기 때문에 보다 자유로운 변형이 쉽게 일어난다고 생각된다.

#### 3.3.2 충격방향이 다른 경우

**Fig. 10(a)** 및 (b)는 Al층의 수가 6층인 적층복합재료에서 충격방향을 각각 예지 방향 및 프레트 방향의 파단면을 관찰한 사진이다. 그리고 **Fig.11**은 도식적으로 표현한 그림이다. 프레트 방향은 계면박리가 전접합계면으로 일어나고 있는데 반해, 예지 방향의 계면박리는 적게 관찰되었다. 또 어느 방향으로 충격시험을 하여도 Al층의 넥킹 변형은 발생하고 있지만, 프레트 방향의 경우는 변형정도가 예지 방향에 비해 큰 것으로 관찰되고 있다. 즉, 균열진전경로에 의한 구성재료의 변형거동이 다르게 되고 있는 것으로 생각된다. MMC의 파면을 비교하면, 예지 방향의 경우, 파단은 평탄하게 거의 직선적으로 진전한 양상으로 나타나고 있다. 그러나 프레트 방향의 경우는 MMC 층 내에서凹凸모양의 파면을 나타내고 있다. 이것은 제2층 이후의 균열 발생은 Al층에 의해 지연되고, 전파, 정체, 발생을 반복하여 균열진전경로가 변화하기 때문이라고 생각되어진다. 그러나 프레트 방향의 Al층은 상당히 큰 넥킹을 동반한 변형이 약 100% 정도로 명확히 관찰되고 있으며, 예지 방향으로 충격시험을 한 것은 Al층이 MMC의 파단과 같이 일부의 균열은 계면을 따라 진전한다고 생각되어지고, Al층의 넥킹변형은 80%정도에 불과하다. 따라서 Al층의 변형이 각각 다른 것은 예지 방향과 프레트 방향의 충격흡수에너지의 값이 **Fig. 7**과 **Fig.8**에서와 같이 근본적으로 상이함에 기인한다고 할 수 있다. 또 계면박리는 Al층의 넥킹 변형의 결과로 발생된다고 생각되고, Al층의 넥킹 변형이 큰 만큼 박리도 크게 된다고 해석할 수가 있다.

#### 3.3.3 예지 방향의 충격에서 층수가 다른 경우

Fig.9(b) 와 Fig.10(a)을 비교하면 예지 방향은 Al층수를 증가한 것이 Al층의 넥킹 현상이 감소하고, 평탄한 파단면으로 되어있는 것을 확인할 수 있다. 특히 Al층이 6층인 경우, 중앙의 Al

는 것이 프레트 방향과 다르고, Al층수를 증가하여도 충격흡수에너지가 그다지 개선되지 않는 원인으로 생각되어 진다.

#### 4. 결론

MMC의 충격흡수에너지를 개선할 목적으로 Al층과 조합한 적층복합재료를 제작하고 적층배위, 적층수 및 충격방향이 충격하중 및 흡수에너지에 미치는 영향을 조사하였다. 또 적층복합재료의 충격파괴기구에 대하여 고찰한 결과는 다음과 같다.

1) 적층복합재료의 충격하중-변위곡선은 최대하중점에 도달한 후, 하중선이 완만하게 낙하하여 파단까지 지연되는 현상을 나타내며, 파단면도 연성파괴에 해당한다. 그리고 타입II의 충격흡수에너지는 MMC에 비해 약40%의 적층효과가 개선되었다.

2) 접합계면수와 Al층의 체적율을 같이 하고, Al층의 배열위치를 달리한 타입I과 타입II는 예지 방향의 충격흡수에너지는 타입II가 타입I보다 약간 크게 나타났다. 이것은 외측에 배열한 Al층은 내부의 Al층 보다 변형이 크기 때문으로 생각된다.

3) 프레트 방향의 충격값은 Al층의 수가 증가할 때 현저히 증가하지만, 예지 방향은 Al층수를 증가하여도 거의 일정하였다.

4) 프레트 방향의 충격파단면은 Al층수를 증가할 때, Al층은 넥킹변형을 동반한 파면을 형성하지만, 예지 방향은 평탄한 파면을 형성하였다.

#### 후기

본 연구는 경상대학교 지역대학육성사업단의 지원으로 이루어졌으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

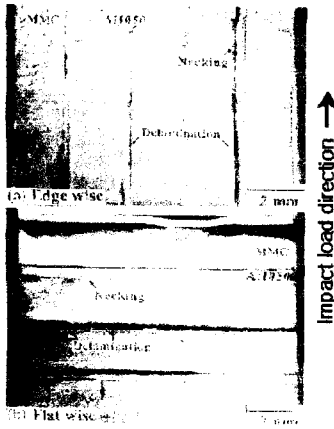


Fig. 10 Typical fractograph for MMC/Al laminate composites fractured in different impact directions

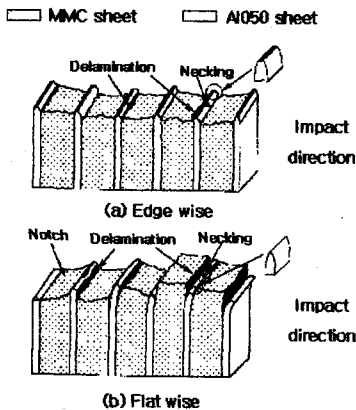


Fig. 11 Schematic sketch for deformation behavior of aluminum sheet and interfacial declamation in MMC/Al laminate composites fractured to different impact directions

층은 넥킹 변형 영역이 현저히 적게 나타나고 있는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 양쪽으로 MMC가 둘러 쌓여 소성구속을 형성하기 때문으로 생각되어 진다. Al층의 변형량이 크게 증가하지 않

## 참고문헌

- (1) W. H. Hunt, T. M. Osman and J. J. Lewandowski., 1993, "JOM", pp. 30-38.
- (2) J. A. Alic and A. Denesh., 1978, "Eng. Fract. Mech", pp. 177-179.
- (3) S. Lee, J. Wadsworth and O. D. Sherby., 1991, "J. Compo. Mater.", pp. 842-845.
- (4) C. K. Syn, D. R. Lesuer, J. Wolfenstine and O. D. Sherby., 1993, "Metal. Trans.", pp. 1647-1651.
- (5) G. B. Babu and R. K. Dube., 1996, "ISIJ Inter.", pp. 1184-1192.
- (6) C. K. Syn, D. R. Lesuer and O. D. Sherby., 1993. "Light Materials for Transportation Systems", N. J. Kim, ed., "Center for Advanced Aerospace Materials", pp. 763-769.
- (7) C. K. Syn, S. Stone, D. R. Lesuer and O. D. Sherby., 1994, "High Performance Metal and Ceramic Matrix Composites", K. Upadhya, ed., pp. 125-129.
- (8) L. Y. Ellis and J. J. Lewandowski., 1994, "Mater. Sic. Eng.", pp. 59-64.
- (9) J. J. Lewandowski and P. M. Singh, 1995, "Intrinsic and Extrinsic Fracture in Inorganic Composite Systems", J. J. Lewandowski and W. H. Hunt. Jr, ed., pp. 129-134.
- (10) L. Xiao, Y. S. Kim, R. Abbaschian and R. Hecht 1991, "Sic. Eng.", pp. 277-282.
- (11) K. T. Venkateswara Rao, G. R. Odette and R. O. Ritchie, 1992, "Acta. Metall. Mater.", pp. 353-359.
- (12) D. E. Alman, J. C. Rawers and J. A. Hawk, 1995, "Metal. Trans.", pp. 589-595.