

9Al₂O₃ · 2B₂O₄ / AC4CH 금속기 복합재료의 피로강도 특성

박원조[†] · 이광영* · 허선철**
(2001년 2월 15일 접수, 2001년 7월 4일 심사완료)

Fatigue Strength Characteristic of Metal Matrix Composite Material in 9Al₂O₃ · 2B₂O₄ / AC4CH

Won Jo Park, Kwang Young Lee and Sun Chul Huh

Key Words: Reinforcement Fiber(강화섬유), Matrix Material(기지재), Preform(예비성형체), Squeeze Casting Method(고압응고주조법), Metal Matrix Composite(금속기 복합재료), Infiltration(함침)

Abstract

Metal matrix composites with whisker reinforcements have significant potentials for demanding mechanical applications including defense, aerospace, and automotive industries. Especially metal matrix composites, which are reinforced with aluminum borate whisker, have been used for the part of piston head in automobile because of good specific strength and wear resistance. In this study, AC4CH-based metal matrix composites with Al₁₈B₄O₃₃ reinforcement have been produced using squeeze casting method, after T6 heat treatment, we evaluated fatigue life property of matrix and MMC composite and investigated fracture mechanism.

1. 서론

최근 차세대 첨단재료로서 기존의 금속재료에 비해 월등히 우수한 성질을 갖는 새로운 제조기술 및 재료개발에 대한 요구가 점차 증가함에 따라 복합재료에 관한 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있다. 기존의 금속재료로는 경량화, 고강도, 고강성이 한계에 이르렀으며, 금속이 기본적으로 가지고 있는 높은 밀도, 부식성 및 제품생산에 필요한 고에너지 요구 등의 문제 때문에 복합재료의 사용이 증가하고 있는 추세이다.^(1,2) 현재, 성능이 향상된 강화섬유와 기지재가 개발되어 더욱 더 고기능성을 가진 복합재료가 연구되고 있으며 경제적인 성형, 제작기법에 대한 연구가 많은 관심을 끌고 있다.^(3~5) 복합재료 중 금속기 복

합재료는 금속성질과 세라믹 성질을 조합한 것으로 비강도, 내식성, 내마모성과 비탄성이 높고 열팽창계수가 낮으며 고온성질이 우수하여 항공기 및 자동차 부품 등의 여러 분야에서 크게 주목받고 있다. 고압주조법은 강화재를 예비성형체로 제조한 후 용융기지재를 함침시켜 성형하는 방법으로 주조와 단조를 동시에 병행할 수 있고 제조방법이 간단하며 단시간에 정밀정형부품을 제조할 수 있을 뿐만 아니라 가압력에 의해 강화재와 기지재간에 결합력을 향상시켜 치밀한 미세조직을 얻을 수 있어 기계적 특성을 크게 개선시킬 수 있다. 또한, 금속기 복합재료에 관한 연구는 국내외적으로 많이 연구되고 있으나^(6,7) 가격과 제조면에서 우수한 ABO_w/AC4CH 복합재료에 관한 연구는 전무한 상태이고 선진 외국에서도 강도평가에 관한 연구는 거의 없는 실정이다.

따라서, 본 연구에서는 알루미늄 보레이트 휘스커를 강화재로 하고 스퀴즈 캐스팅 법에 의해 금속기 복합재료를 제작하고 편석조직을 없애기 위하여 T6처리를 한 후 기지재와 MMC복합재료의

[†] 책임저자, 회원, 경상대학교 수송기계공학과

* 회원, 경상대학교 수송기계공학과

** 회원, 경상대학교 수송기계공학과

E-mail : schuh@nongae.gsnu.ac.kr

TEL : (055)640-3186 FAX : (055)640-3188

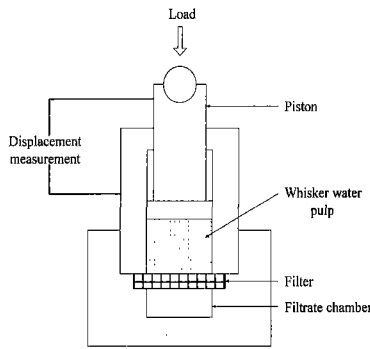


Fig. 1 Fabrication of whisker preform

피로수명 특성을 평가하고 파괴기구를 고찰 하였다.

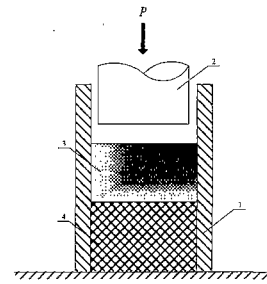
2. 실험 방법

2.1 복합재료 제조 방법

강화재로 사용된 휘스커는 M 12 type으로 일본의 西國化成(株)에서 생산된 것이며, 매트릭스 재료로 사용된 AC4CH는 순수한 Al-Si-Mg계 합금에서 Fe의 함량을 0.2% 이하로 관리하여 인성을 높인 알루미늄 합금이다. 이 합금은 주물용 합금 중 중간 정도의 강도를 나타내지만, 연신율이 커서 인성이 우수하고 주조성도 양호하며, 내식성이 우수한 합금으로 여러 가지 기계부품으로 많이 사용되며, 현재 자동차 휠용 합금으로 이용되고 있다. 먼저 MMC의 강화재료인 알루미늄 보레이트 휘스커 150 g과 물 1000 cc 그리고 바인더(아니온계 폴리 아크릴 아미드) 0.1 g을 잘 교반하여 휘스커 펄프(whisker water pulp)를 Fig. 1과 같이 압축해서 필터(filter)를 통해 수분을 제거하여 프리폼(preform)을 제작한다.

2.2 스퀴즈캐스팅법

프리폼을 가열속도 5°C/min으로 가열하여 1200°C에서 4시간 동안 유지하고 소결시킨 후 로냉하고, 소결된 프리폼은 120×80×50(w×h×t)의 치수로 가공하여 이를 다시 약 700°C로 가열하고, 스퀴즈캐스팅 장치의 금형내에 고정한 후 금형내 온도가 200°C로 유지되었을 때 760°C의 Al용탕을 금형에 주입하여 프



(1) mold (2) plunger (3) melt (4) preform
Fig. 2 Diagram of squeeze casting apparatus

Table 1 Chemical composition of AC4CH(wt%)

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Ni	Ti	Pb	Sn	Cr	Al
.2	7.5	.45	.1	.2	.1	.05	.2	.05	.05	.05	-

레스 장치에서 스퀴즈캐스팅법으로 프리폼에 Al 용탕을 짜 넣는 장치는 Fig. 2와 같다. 이때의 실험조건은 가압력 83.4MPa, 가압속도 50m/sec, 가압시간 40sec로 프리폼의 공극에 용탕을 침투, 응고시켜서 휘스커 강화복합재료를 제작하였으며, Table 1은 복합재료를 제작하기 전의 기지재(AC4CH)의 화학적 조성을 나타내고 있다.

2.3 열처리

MMC와 AC4CH를 알루미늄의 전형적인 열처리 방법인 T6 열처리를 하기 위해 AC4CH의 경우, 535°C정도의 온도에서 수 시간 용체화 처리하여 인성을 개선한다. 그 이유는 공정 Si가 용체화 처리시간이 길어짐에 따라 확산에 의해 각이 없어지고 등그런 형상을 가지게 되며 이로 인하여 응력집중이 작아져 인성이 개선되는 것이다. 또한 T6열처리는 일반적으로 용체화 처리 후에 시효처리를 행한다.

T6 열처리전의 재료에서 복합부 및 미복합부를 각각 20×20×100(mm)로 절단한 후 내수연마로서 습식연마를 실시하고 열처리하며 열처리 조건은 Fig. 3과 같다. JIS H5202규정에 의해 535°C까지 가열한 전기로(VJ-880DP)에 시료를 넣고 8시간 동안 유지한 후 수증에서 급냉하여 용체화시켰다. 시효처리는 155°C로 가열한 전기로에서

용체화 하여 처리한 재료를 넣고 8시간 동안 유지하고 노냉으로 인공시효경화 처리를 하였으며 이상의 처리는 대기 중에서 행하였다.

2.4 피로실험

피로시험에 사용한 시험기는 MTS model 810 10tonf 용량 서보유압식 피로시험기이다. 기지재인 AC4CH 합금 및 MMC의 피로시험을 위하여 L-T방향으로 채취하여 기계가공하고 평행부는 내수연마지(#600-1500)를 이용하여 습식연마 하였으며 최종적으로 알루미나 분말(#0.3 μ)로 정밀연마한 시험편의 치수 및 형상은 Fig. 4와 같다.

실험은 ASTM D3470 규정에 의거하여 실시하였으며 인장 편진피로시험으로 응력비 R=0.1, 반복주파수 20Hz, 정현파로 하중제어모드(load control mode) 방식으로 실험을 하였으며 실험온도는 상온, 피로한도는 반복수 N=10⁷ cycle 의 응력으로 결정하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 AC4CH와 MMC의 기계적 성질

T6열처리 전의 AC4CH와 MMC 그리고 T6 열

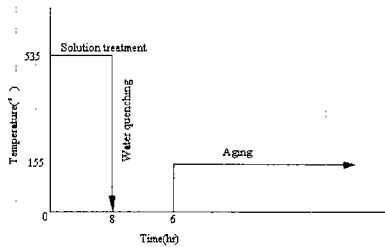


Fig. 3 Schematic diagram of T6 heat treatment

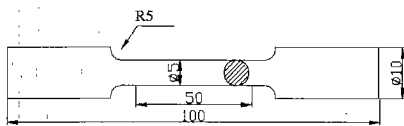


Fig. 4 Schematic of fatigue test specimen (unit : mm)

처리 후의 AC4CH와 MMC의 인장강도 특성을 Fig. 5에 나타내었다. 그림에서 보는 것처럼 AC4CH의 경우는 열처리전에 비해 열처리 후가 인장강도가 증가하고 있으며 MMC의 경우는 열처리전에 비해 열처리 후가 인장강도가 감소하고 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 AC4CH보다 복합재 MMC의 인장강도가 약 1.5배 이상 증가하였다는 것을 알 수 있다.

3.2 복합재료 조직사진

Fig. 6은 복합재료 열처리전의 미시조직사진을 나타내고 있다. 그림에서 매트릭스에 휘스키가 균등하게 분포하고 있다는 것을 알 수 있으므로 비교적 스쿼즈 캐스팅법에 의한 복합재료 제조 방법이 우수하다는 것을 알 수 있다.

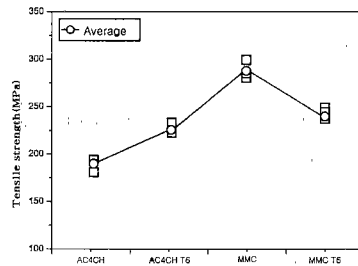


Fig. 5 Tensile strengths of AC4CH and MMC

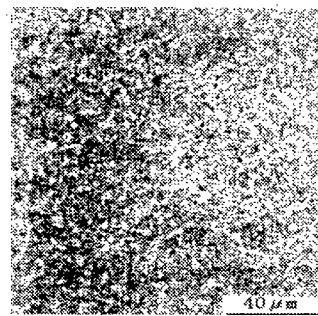


Fig. 6 Optical microstructure of composite material

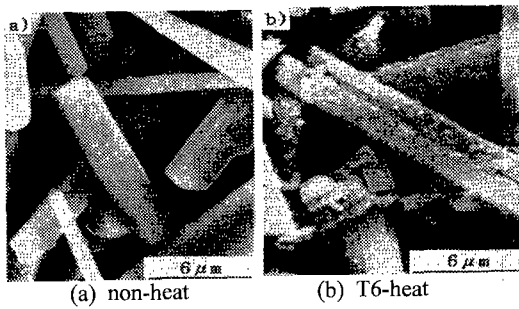


Fig. 7 SEM photographs of extracted whisker

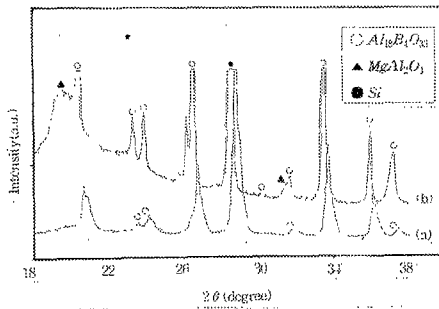


Fig. 8 X-ray diffraction of extracted whiskers from MMC composites

3.3 열처리재의 조직

열처리재는 535℃에서 8시간 용체화 한 후 수중에서 급냉하여 용체화 처리를 하였으며 반응생성물의 유무를 확인하기 위하여 비열처리재 및 T6 열처리재에서 추출한 휘스커의 SEM사진을 Fig. 7에 나타내었다. 휘스커의 정출에는 15% 회염산을 사용하고 추출에 필요한 시간은 약 1주일 소요되었으며 상온에서 실시하였다. (a)는 열처리하지 않은 시험편의 조직사진을 나타내는 것으로서 비열처리재에서 추출한 휘스커의 표면은 반응생성물이 거의 확인되지 않았으며 비교적 매끈하고 깨끗한 표면을 유지하고 있다. (b)는 T6열처리한 시험편의 조직사진을 나타내는 것으로서 T6열처리재에서 추출한 휘스커 표면은 거친 형상의 반응생성물이 생성되었음을 확인할 수 있다.

휘스커 표면에 생성된 반응생성물을 확인하기 위해 X선 회절실험을 한 결과를 Fig. 8에 나타내며 반응생성물은 MgAl₂O₄ (spinal)로 확인 되었다.

기지재인 AC4CH 합금 및 MMC의 T6 열처리

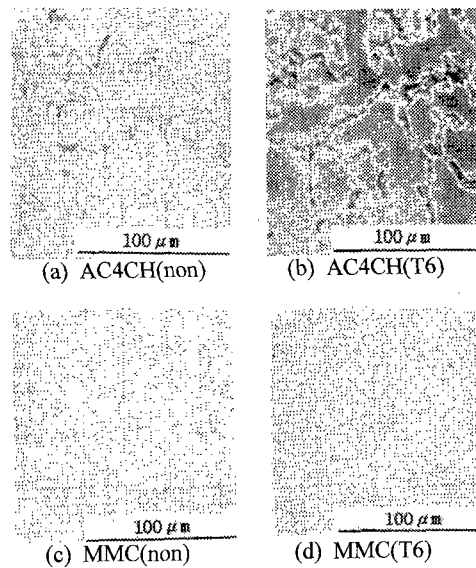


Fig. 9 SEM photographs of MMC and AC4CH structure

전·후의 SEM 사진을 Fig. 9에 나타내었다. MMC는 기지재 중에서 휘스커가 비교적 균일하게 분산되어 있는 것으로 관찰되었으며, 휘스커 상호간에 석출물이나 정출물이 MMC보다는 미세하지 못하다. 따라서 복합화에 의해 석출물이나 정출물의 미세화는 기계적인 형상에 기여할 것으로 기대된다. 한편, T6 열처리한 AC4CH는 T6열처리전보다도 조직이 미세하며 MMC는 시효처리에 의해 석출물의 형상, 분포 및 밀도의 변화는 그다지 명확하지 않으나 조대화 되어 있는 것으로 확인되었다.

3.4 AC4CH와 MMC의 피로시험 결과

Fig. 10은 AC4CH의 T6 열처리재와 비열처리재의 피로시험 결과를 나타내고 있다. 비열처리재의 10⁷에서 피로수명은 약 70MPa인 것을 알 수 있다. T6 열처리한 AC4CH재의 10⁷ 피로수명은 약 83MPa 로 T6 열처리를 하지 않은 AC4CH재보다 약 20% 증가 하였다. 이는 T6 열처리에 의해 함유하고 있는 Mg가 Mg₂Si 로 되어 합금 중에 석출한 석출경화형의 합금으로 되고 강도와 경도가 상승하기 때문에 피로한도도 증가하였다고 생각한다.

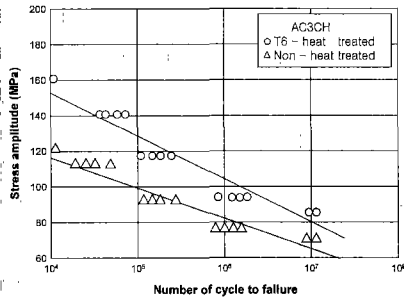


Fig. 10 Fatigue test results of AC4CH

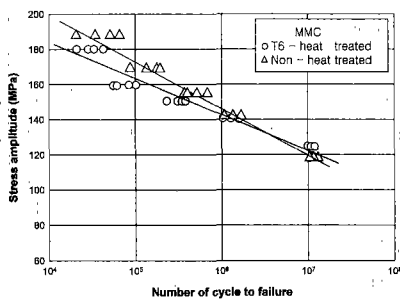


Fig. 11 Fatigue test results of MMC

Fig. 11은 MMC재의 T6 열처리재와 비열처리재의 피로거동을 나타내었다. T6 처리를 하지 않은 복합재의 10⁷ 피로수명은 120 MPa이며 T6 열처리한 복합재의 10⁷ 피로수명은 123 MPa로 나타나고 있다. 즉 T6 열처리는 복합재의 피로한도에는 그다지 큰 영향을 미치지 못한다고 생각한다. 그리고 10⁶ cycle 이하의 영역을 보면 T6 열처리를 실시한 복합재가 T6 열처리를 실시하지 않은 쪽보다 빨리 파단됨을 알 수 있다. 예를 들면 최대응력인 180MPa에서 T6 열처리한 MMC는 2 × 10⁴ cycle에서 T6 열처리하지 않은 복합재는 4 × 10⁴ cycle에서 파단됨을 알 수 있다. 이 결과 MMC재의 경우 열처리에 의한 피로수명한도의 증가를 기대할 수 없음을 알 수 있다.

위의 결과에서 AC4CH와 복합재의 T6 열처리 및 T6열처리의 전, 후의 피로거동을 서로 비교하였다. AC4CH와 복합재의 피로수명한도에서 AC4CH는 약 70 MPa인 반면에 복합재료는 약

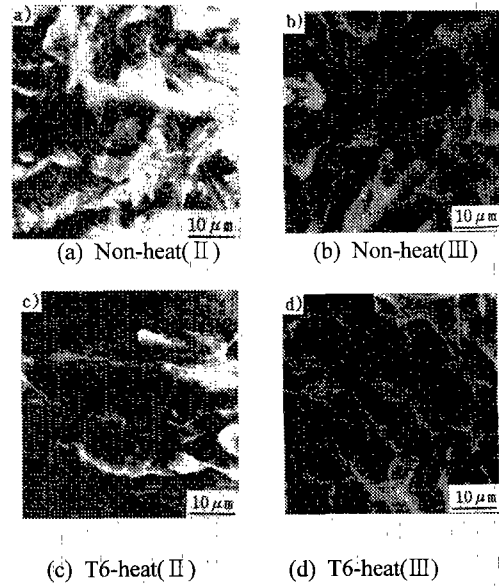


Fig. 12 SEM photographs of fatigue fracture surface of AC4CH

120MPa로 AC4CH보다 약 71% 정도 높게 나타나고 있다. 이 결과에서 알 수 있듯이 알루미늄 보레이트 휘스커는 Al-Si-Mg계인 AC4CH 합금의 강화재로 유용함을 알 수 있다. 그러나 AC4CH재의 T6열처리전후를 비교하면 T6 열처리 한 것이 피로한도는 약간 높게 나타나지만 MMC는 T6 열처리를 하면 피로한도는 전반적으로 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다. 이것은 열처리 후의 알루미늄 보레이트 휘스커 강화복합재에서 Al-Si-Mg계인 AC4CH합금을 기지재료한 복합재료는 기지재가 함유하고 있는 소량의 Mg 원소가 열처리에 의해 알루미늄 보레이트 휘스커와 반응하여 침정석(spinal: MgO · Al₂O₃)을 형성하여 본래의 시효경화의 효과를 얻을 수 없다는데 기인한다.^(8,9)

3.5 파괴시험 후의 피로파면

Fig. 12는 약 120 MPa에서 피로파괴 한 후의 AC4CH재의 T6 열처리재와 비열처리재의 피로파면인데, 피로파괴 특유의 스트라이에이션(Striation)이 관찰되고 있다. 그리고 초기에 크랙이 발생하여 이들이 서로 합체화하여 전파하고 있는 양상으로 관찰되고 있다. 그리고 (b)는 최종 파괴 지점에서 급속 파단한 사진으로 파면은 입

내연성 파면을 나타내고 있다. (c)는 T6 열처리한 AC4CH파면의 SEM 사진으로 역시, 스트라이에이션(striation)이 관찰되고 있으며, (d)는 급속파단한 파단부로 역시, 파면은 입내·연성파괴를 나타내고 있다. T6 열처리에 의해 덤플 영역과 최종 입내연성파괴의 양상이 서로 다를 수 있다.

Fig. 13은 약 160 MPa에서 피로파괴한 후의 T6 열처리하지 않은 MMC파면과 T6 열처리한 MMC의 SEM사진을 나타내고 있다. (a)는 T6 열처리하지 않은 MMC의 경우인데, T6열처리하지 않은 AC4CH와 마찬가지로 반복응력에 의해 많은 미소크랙이 발생하고, 그 미소크랙이 각각 합체되어 큰 크랙이 형성되며, 최종 파괴에 도달함을 알 수 있다. (b)는 급속파단부를 확대한 사진으로 파면의 일부에 입계파괴의 일부인 벽개파괴와 비슷한 부분이 관찰 되었다. c) T6 열처리한 경우로 파단부에 미소 flaking이 생긴 것을 확인할 수 있으며 이는 spinal의 영향으로 생각하며, 급속파단부인 d)에서는 전반적으로 AC4CH의 경우보다 거칠다는 것을 확인할 수 있다.

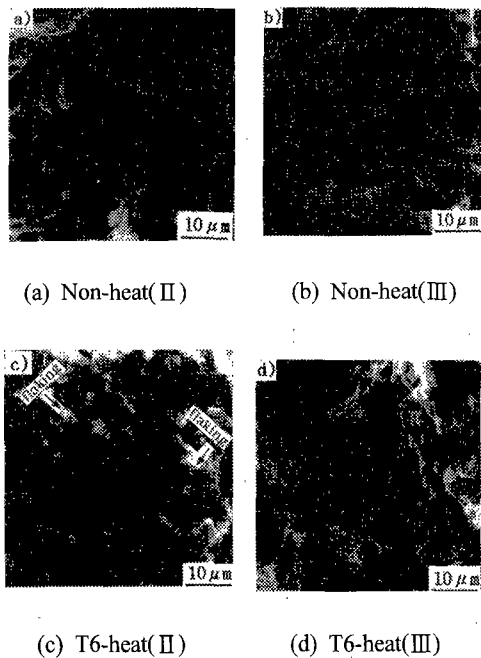


Fig. 13 SEM photographs of fatigue fracture surface of MMC

4. 결 론

알루미늄 보레이트 휘스커를 강화재로 하고 Al-Si-Mg계인 AC4CH를 기지재로 하여 스퀴즈 캐스팅법에 의해 금속기 복합재료를 제작하였다. 편석조직을 없애기 위해 T6 열처리를 하여 피로 실험을 행한 후 주사식 전자 현미경에 의해 파면을 관찰하고 피로특성을 연구한 결과는 다음과 같다.

(1) MMC의 T6열처리제의 X-선 회절의 결과는 기지재가 함유하고 있는 소량의 Mg 원소가 휘스커와 반응하여 첨정석(spinal : $MgO \cdot Al_2O_3$)을 형성하기 때문에 본래의 시효경화 효과를 얻을 수 없으므로 기계적 성질은 저하 되었다.

(2) T6 열처리전의 AC4CH의 피로한도 보다 MMC의 피로한도가 10^7 cycle에서 약 71% 정도 크게 나타났으며 MMC를 T6 열처리한 경우에는 피로강도가 전반적으로 낮게 측정 되었다.

(3) 휘스커의 표면 관찰에서 T6 열처리전의 휘스커 표면은 손상이 적고 반응생성물이 거의 발견되지 않았으며 비교적 깨끗한 표면을 유지한 반면, T6 열처리 후의 휘스커에서는 반응생성물이 많이 부착되어 있음을 알 수 있었다. 따라서 이 반응 생성물에 의해 피로특성이 전반적으로 저하됨을 알 수 있다.

후 기

이 논문은 2001년도 두뇌한국21사업에 의해 지원되었음.

참고문헌

(1) Chang, S.Y., Hiroyasu, T. and Akihiko, K., 1997 "Mechanical Properties and Fracture Process of SiC_w/Mg Composites Produced by Squeeze Casting and Extrusion," *Materials Transaction, JIM*, Vol. 38, No. 1, pp. 18~27.

(2) Yoshida, K. and Yano, T., 1998 "Processing and Microstructure of Silicon Carbide Fiber Reinforced Silicon Carbide Composite by Hot-Pressing," *Journal of Nuclear Materials*, pp.

- 258~263.
- (3) Enoki, M. and Kim, B. N., 1999, "Crack Propagation Behavior of Ni/NiAl Laminate Materials," *J. Japan Inst. Metals*, Vol. 63, No. 7, pp. 838~843.
- (4) Enoki, M. and Kim, B. N., 1999, "Crack Propagation Behavior of Ni/NiAl Laminate Materials," *J. Japan Inst. Metals*, Vol. 63, No. 7, pp. 838~843.
- (5) Spriet, P. and Habarou, G., 1996, "Application of Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites in Military Turbojet Engines," *Pap. Am. Soc. Mech. Eng.*, 96-Gt-286, pp. 1~13.
- (6) Gibbs, W.S., Petrovic, J. J. and Honnell, R.E., 1987, "SiC Whisker MoSi₂-matrix Composite," *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol. 8, pp. 645~648.
- (7) Kajuch, J., Short, J. and Lewandowski, J.J., 1995, "Deformation and Fracture behavior of Nb in Nb₅Si₃/Nb laminate toughness," *Acta Metall. Mater.*, Vol. 43, pp. 1955~1967.
- (8) Fei, W. D., Jiang, X.D., Li, C. and Yao, C.K., 1996, "Effect of Interfacial Reaction on the Young's Modulus of Aluminium Borate Whisker Reinforced Aluminium Composite," *Journal of Materials Science letters*, Vol. 15, pp. 1966~1968.
- (9) Yao, C.K., Fei, W. D. and Jiang, X. D., 1997, "Effect of Interfacial Reaction on Fracture Behaviour of Aluminium Borate Whisker Reinforced Aluminium Composite," *Materials Science and Technology*, Vol. 13, pp. 918~922.