

< 논문 >

TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 피로균열진전에 대한 냉간압연효과

이진경[†] · 박영철* · 이규창** · 이상필*** · 조운호**** · 이준현****
(2005년 3월 2일 접수, 2005년 8월 25일 심사완료)

Effect of Cold Rolling on Fatigue Crack Propagation of TiNi/Al6061 Shape Memory Composite

Jin-Kyung Lee, Young-Chul Park, Kyu-Chang Lee, Sang-Pill Lee, Youn-Ho Cho
and Joon-Hyun Lee

Key Words: Crack Growth Rate(균열성장률), Shape Memory Effect(형상기억효과), Pre-Strain(에 변형률), Fatigue Crack(피로균열), Stress Intensity Factor(응력확대계수)

Abstract

TiNi alloy fiber was used to recover the original shape of materials using its shape memory effect. The shape memory alloy plays an important role within the metal matrix composite. The shape memory alloy can control the crack propagation in metal matrix composite, and improve the tensile strength of the composite. In this study, TiNi/Al6061 shape memory alloy(SMA) composite was fabricated by hot press method, and pressed by a roller for its strength improvement. The four kinds of specimens were fabricated with 0%, 3.2%, 5.2% and 7% volume fraction of TiNi alloy fiber, respectively. A fatigue test has performed to evaluate the crack initiation and propagation for the TiNi/Al6061 SMA composite fabricated by this method. In order to study the shape memory effect of the TiNi alloy fiber, the test has also done under both conditions of the room temperature and high temperature. The relationship between the crack growth rate and the stress intensity factor was clarified for the composite, and the cold rolling effect was also studied.

1. 서론

금속복합재료에서 강화재로서 형상기억합금^(1,2)을 이용한 형상기억복합재료를 제조하여 구조물 부품으로 응용할 경우, 형상기억합금의 형상기억 효과에 의해 복합재료 전체의 인장강도를 증가시킬 수 있다는 장점을 가지고 있다. 그러나 대부

분의 구조물은 단순한 인장응력만을 받는 곳에 사용되기 보다는 다양한 형태의 반복적인 피로하중을 받고 있다. 특히 본 연구에서 응용하고자 항공기 날개재료로서의 형상기억복합재료는 온도에 의한 반복적인 열충격 뿐만 아니라 운항중의 다양한 기압 및 바람의 영향, 이착륙에서의 다양한 종류의 충격 및 피로하중을 받기 때문에 피로하중에 의한 형상기억복합재료와 같은 첨단재료의 피로균열특성은 반드시 규명되어야 한다. 따라서 본 연구에서는 핫프레스법^(3,4)에 의해서 제작된 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 피로균열진전 특성을 평가하기 위하여 피로시험을 실시하였으며 핫프레스법에 의해 제작된 복합재료의 냉간 압연효과를 평가하기 위하여 냉간압연을 실시한 복합재료에 대해서 피로실험⁽⁵⁻⁸⁾을 실시하였다. 한편 마르텐사이트상인 TiNi에 인장 예변형

† 책임저자, 회원, 동의대학교 기계공학과
E-mail : leejink@dongeui.ac.kr
TEL : (051)890-1663 FAX : (051)890-2232
* 회원, 동아대학교 기계공학과
** 산업과학연구원 신뢰성 평가센터
*** 회원, 동의대학교 기계공학과
**** 회원, 부산대학교 기계공학과

(pre-strain)을 가하고 TiNi의 오스테나이트 변태 완료 온도인 A_r 점 이상(363K)으로 가열을 하면 TiNi의 형상기억효과에 의하여 TiNi와이어는 원래의 길이로 수축되려 한다.⁽⁹⁾ 우수한 지적특성을 가진 TiNi 섬유를 강화재로 사용한 Al6061 기지 복합재료에 대하여 강화재인 TiNi섬유의 역변태 온도에서 피로실험을 수행하여 변태온도에 의한 형상 회복력이 피로균열제어에 미치는 효과를 정량적으로 평가하였다. 또한 피로균열제어 메커니즘을 TiNi 섬유의 형상기억 수축과 열팽창의 관점에서 검토·고찰하여 복합재료의 설계지침을 수립하고 고온에서의 섬유강화와 피로균열전파제어에 대한 정확한 정보를 얻고자 하였다.

2. 실험방법

본 연구에서는 우수한 지적특성을 가진 TiNi 섬유를 강화재로 사용하고 알루미늄을 기지재로 사용하여 진공상태에서 핫프레스법에 의해 후판 복합재료를 제조하였다. 한편 강화섬유를 기지재내에 일정하게 1mm로 배열하기 위하여 강화섬유만 고정하는 고정틀을 제조⁽³⁾하였으며 이와 같은 방법으로 제조된 후판 복합재료에 인장강도를 향상시키기 위해서 냉간압연을 실시하였다. 냉간압연에 의해 압하율 20%로 만들어진 후판 복합재료와 냉간압연을 전혀 가하지 않은 시험편에 대하여 피로하중에 대한 균열진전 특성을 평가하기 위하여 피로균열진전실험을 실시하였다.

피로균열진전실험에 사용된 시험기는 20톤의 전기 유압서보식 피로시험기(SHIMADZU)이며, 일정진폭하중제어 방식으로 인장-인장의 편진 반복하중을 가하였으며, 주파수 10Hz의 정현파, 응력비는 0.3으로 설치하여 연구를 수행하였다. Fig 1은 피로시험에 사용된 CT시험편의 형상 및 치수를 나타낸다. 시험편의 형상 및 치수는 ASTM E649-88의 규정에 근거하여 제작하였으며 시험편 노치부분에 예비균열(pre-crack)을 도입하기 위하여 미소한 하중을 가하여 1.5mm의 예비균열을 도입하였다. 또한 시험편의 표면에서의 균열길이를 측정하기 위하여 유성염료와 배율 50배인 이동식 망원현미경을 이용하여 균열길이를 측정하여 피로균열 진전속도 da/dN 과 응력 확대계수범위 ΔK 의 관계를 규명하였다.

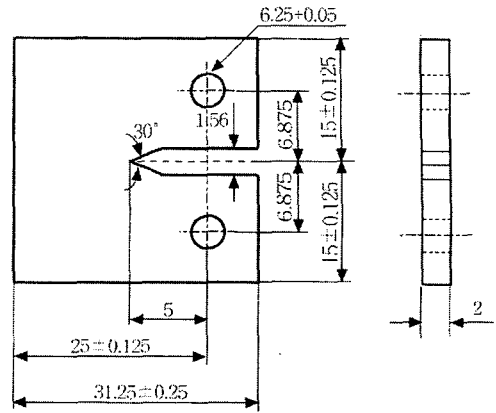


Fig. 1 Geometry and dimensions of C.T. specimen

3. TiNi/Al6061 복합재료의 피로균열 진전 거동

3.1 비압연재의 피로균열진전 거동

3.1.1 상온에서의 피로균열진전 거동

Fig. 2는 TiNi 섬유의 체적함유량이 0%, 3.2%, 5.2%, 7%인 경우에 있어서 TiNi/Al6061 형상기억 복합재료의 상온에서의 피로균열진전을 실험한 결과를 나타낸다.⁽¹⁰⁾ 그림에서 보여주는 바와 같이 모든 시험편에서 피로균열진전 속도와 응력확대계수와의 관계는 전형적인 Paris식에 대체적으로 일치하며, ΔK 가 증가함에 따라 피로균열진전 속도 da/dN 은 선형적으로 증가하고 있다. Paris 식($da/dN=C\Delta K^m$)으로 구한 균열 안전성장단계에서의 균열진전속도와 응력확대계수와의 비인 기울기 m 은 4.0~5.0 정도의 값을 나타내었다. 일반적인 강의 실험정수 $m=2.25\sim 3.25$ 인 것과 비교해서 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 값이 다소 큰 것으로 나타났다. Paris 식의 기울기인 m 을 구하기 위하여 최소자승법을 이용하여 각 데이터 점의 실험식을 구하였으며 이를 이용하여 C 를 이끌어내었다. 그리고 응력확대계수가 $10MPa\cdot m^{1/2}$ 일 때 각 시험편의 균열진전속도는 0.0%인 경우 $2.586E-4$ 을 나타내었으며 3.2%, 5.2%, 7.0%인 경우 각각, $2.017E-4$, $6.506E-5$, $2.203E-5$ 로 나타났다. 즉, 이상의 결과에서 보여주는 바와 같이 TiNi 섬유의 체적함유량이 높을수록 균열진전속도는 늦

어져서 TiNi 섬유 함유에 따른 피로균열지연효과를 확인 할 수 있었다. 그러나 이와 같이 상온에서의 복합재의 균열진전저항효과는 TiNi섬유의 형상기억효과에 의한 것이 아니라 TiNi 섬유가 기지인 Al6061에서 균열이 진전하는 것을 어느 정도 지연시키고 있기 때문에 섬유의 체적 함유율이 증가할수록 균열진전속도는 감소하는 것으로 사료된다.

3.1.2 고온(363K)에서의 피로균열진전 거동

Fig. 3은 As변태온도 이상인 363K에서 TiNi/Al6061 형상기억 복합재료의 TiNi 섬유의 체적함유율이 0.0%, 3.2%, 5.2% 그리고 7.0% 각각에 대하여 균열진전실험결과를 나타낸 것이다. 그림에서 보는 바와 같이 대체적으로 Fig. 2의 상온에서의 실험결과와 유사한 형태를 나타내고 있으며, 상온과 비교하면 대체적으로 균열진전속도가 대단히 늦어졌다는 것을 알 수 있다. 예를 들어, 앞의 Fig. 2에서와 마찬가지로 응력확대계수가 $10\text{MPa m}^{1/2}$ 의 값에서 0.0%인 경우 $3.014\text{E-}4$ 으로 상온에서와 비슷한 값을 나타내었지만 3.2%, 5.2%, 7.0%의 TiNi 섬유 체적율을 가지는 시험편에서는 $6.199\text{E-}5$, $1.811\text{E-}5$, $8.866\text{E-}6$ 으로 상온에서보다 균열진전속도의 값이 상당히 낮아졌다는 것을 알 수 있었다. 뿐만 아니라 균열진전속도는 모재에 비하여 체적함유량이 증가할수록 늦어져서 체적함유량 7.0%의 복합재료에서 가장 늦은 균열진전속도를 나타내었다. 또한 형상기억합금

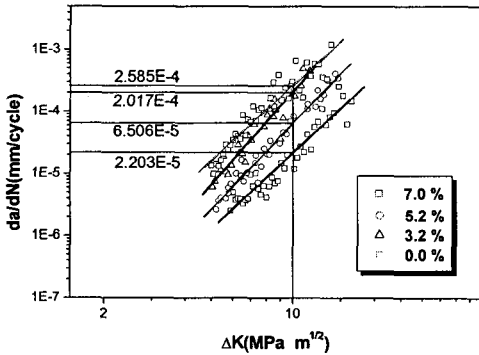


Fig. 2 Relation between crack growth rate and stress intensity factor at room temperature ($V_f=0.0, 3.2, 5.2, 7.0\%$. R.O.A. = 0%)

에 의한 피로균열지연효과를 상온과 비교하여 보면 상온보다 훨씬 커져 있음을 알 수 있으며, 고온에서의 피로균열지연효과가 대단히 큰 것을 확인 할 수 있었다. 고온에서 균열지연효과를 보다 명확히 확인하기 위하여 앞의 Fig. 2와 Fig. 3의 고온의 피로시험효과를 하나의 그래프로 정리한 결과가 Fig. 4에 나타내었다.

Fig. 4에서 보는 바와 같이 상온에서는 형상기억합금에 의한 균열진전지연효과는 섬유에 의한 피로균열저지에 의한 결과로써 나타나므로 그 효과는 그다지 크게 나타나지 않으나, 363K에서는

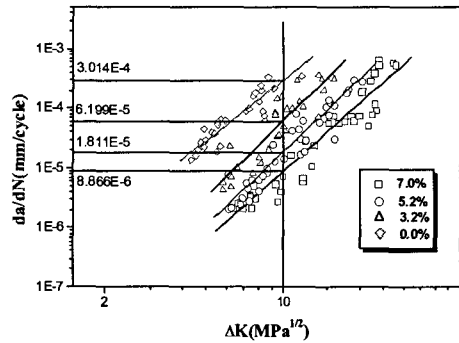


Fig. 3 Relation between crack growth rate and stress intensity factor at 363K ($V_f=0.0, 3.2, 5.2, 7.0\%$. R.O.A.=0%)

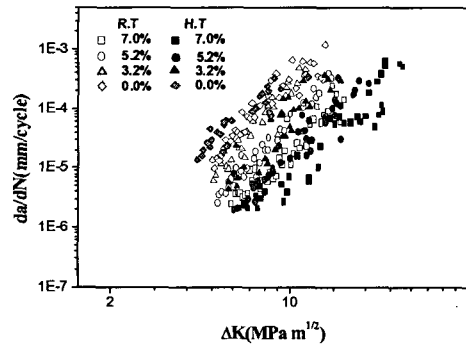


Fig. 4 Relation between crack growth rate and stress intensity factor at room temperature and 363K ($V_f=0.0, 3.2, 5.2, 7.0\%$. R.O.A.=0%)

상온과 비교해서 명확히 균열진전지연 효과를 보이고 있다. 이는 363K에서는 TiNi 첨유의 국부적인 형상기억수축 및 기지인 Al6061과 TiNi첨유의 열팽창계수 차이 등에 의해 Al6061 기지 내에 발생하는 압축잔류응력과 균열선단 응력저하 효과 등의 영향이 크게 작용하기 때문에 균열지연 효과가 상온에 비하여 대단히 크게 나타남을 알 수 있다.

3.2 냉간 압연재의 피로균열진전 거동

3.2.1 상온에서의 피로균열진전 거동

Fig. 5는 핫프레스 방법으로 제조한 시험편에 대하여 냉간압연의 효과를 평가하기 위하여 20% 냉간 압연을 실시하여 상온에서의 피로균열진전 특성을 검토한 결과이다. 압연재의 피로균열진전 특성은 앞의 냉간압연을 하지 않은 시험편의 결과와 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 모재 Al6061재의 전파속도에 비하여 첨유함유량이 증가할수록 균열진전속도는 지연되어 7.0%경우가 가장 늦은 균열진전속도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 한편 응력확대계수의 값이 10MPa m^{1/2}인 경우의 균열진전속도를 측정된 결과 0.0%인 경우 2.853E-4이었으며 3.2%, 5.2%, 그리고 7.0%인 경우 각각 2.464E-4, 7.560E-5, 2.890E-5이었다. 이와 같은 균열진전속도는 앞의 Fig. 2의 상온에서 냉간압연을 가하지 않은 시험편과 거의 비슷함을 보여주었다. 따라서 상온에서의 피로균열진전속도는 냉간압연의 효과는 크게 향상되지 않음을 알 수 있었다.

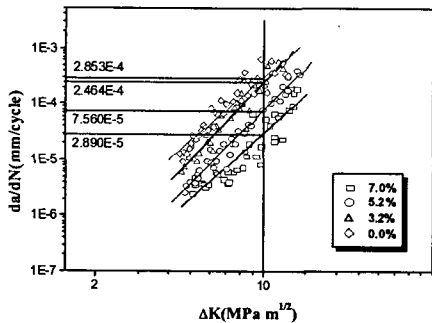


Fig. 5 Relation between crack growth rate and stress intensity factor at room temperature (Vf=0.0, 3.2, 5.2, 7.0%. R.O.A.=20%)

3.2.2 고온에서의 피로균열진전 거동

Fig. 6은 20% 냉간 압연한 복합재료에 대하여 고온 피로균열진전시험을 한 결과이다. 냉간압연한 복합재료의 경우 고온피로균열진전특성은 앞의 비압연재와 거의 같은 양상을 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 TiNi 첨유에 의하여 복합재료의 피로균열진전속도는 크게 지연되어 7.0%체적 함유량의 냉간 압연재의 경우가 가장 낮은 피로균열진전속도를 나타내고 있음을 알 수 있다. 냉간 압연한 복합재료에 대하여 응력확대계수가 10MPa m^{1/2}인 경우, 균열진전속도를 측정된 결과

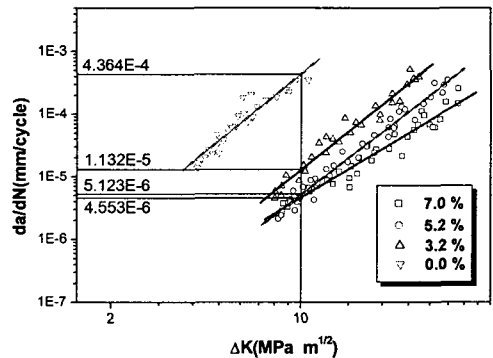


Fig. 6 Relation between crack growth rate and stress intensity factor at 363K (Vf=0.0, 3.2, 5.2, 7.0%. R.O.A.=20%)

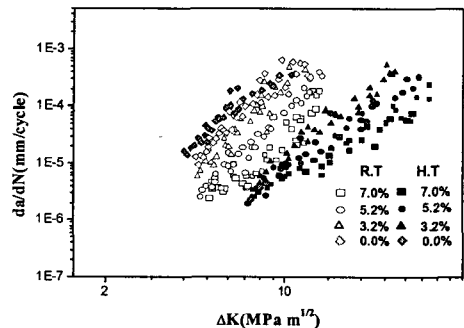


Fig. 7 Relation between crack growth rate and stress intensity factor at room temperature and 363K (Vf=0.0, 3.2, 5.2, 7.0%. R.O.A.=20%)

0.0%, 3.2%, 5.2%, 7.0%의 TiNi 섬유 체적율을 가지고 있는 시험편에 대하여 각각 $4.364E-4$, $1.132E-5$, $5.123E-6$, $4.553E-6$ 으로 나타났다. 이러한 값들은 고온에서 압연을 하지 않은 경우인 Fig. 3의 결과와 비교하여 균열진전속도가 조금 낮게 나타났다. 따라서 Fig. 6의 냉간 압연한 복합재료인 경우에는 냉간압연효과가 발생하여 강화재와 기지재의 계면에서의 접촉율을 증가시키고 기지재의 조직을 더욱 조밀하게 만들어 고온에서 TiNi 강화섬유의 형상기억효과에 의해 균열의 진전을 상당히 억제시키는 결과를 얻을 수 있었다. 이와 같이 냉간압연에 의한 접촉율의 증가는 냉간압연을 실시하지 않은 복합재료보다 균열진전속도를 저하시킬 수 있음을 알 수 있다.

Table. 1 Values of the material constants, m and C for TiNi/Al6061 SMA composite under each conditions

Vf		압하율(0%)		압하율(20%)	
		m	C	m	C
7.0%	m	4.06	3.79	3.86	2.46
	C	1.92E-9	1.44E-9	3.99E-9	1.58E-8
5.2%	m	4.60	4.07	4.31	3.03
	C	1.63E-9	1.54E-9	3.70E-9	4.78E-9
3.2%	m	5.03	4.23	4.56	3.48
	C	1.88E-9	3.65E-9	6.79E-9	3.75E-9
0.0%	m	4.04	3.42	3.82	3.51
	C	2.36E-8	1.15E-7	5.83E-8	1.35E-7
온도		293K	363K	293K	363K

Fig. 7에서는 냉간 압연을 실시한 시험편에 대하여 상온과 고온에서의 균열진전속도를 비교한 결과이다. 앞에서 언급한 바와 같이 20%의 냉간압연을 받은 시험편에서의 균열진전속도는 고온에서 상온에 비하여 현저하게 낮게 나타남을 알 수 있었다. 이러한 결과 역시 형상기억합금의 형상기억효과에 의해 균열성장이 급격히 억제됨을 알 수 있었다.

Table 1에서는 비압연재와 냉간압연을 받은 복합재료에 대하여 Paris equation에 의해 구해진 재료상수인 m과 C의 값을 나타낸 것이며 Fig. 8에서는 이들 결과를 그래프로 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 Fig. 8(a), (b)는 각각 상온과 고온에서 비압연재와 냉간압연을 받은 복합재료의 m의 값을 나타낸 것으로 두 경우 모두 TiNi 섬유의 체적율이 증가함에 따라 Paris 식의 기울기인 m의 값이 감소함을 알 수 있다. 이러한 결과는 강화재인 TiNi 섬유가 균열진전을 억제시키는 역할을 하며 따라서 섬유의 체적율이 증가함에 따라 균열진전속도는 점차적으로 감소하는 경향을 보이는 것과 잘 일치하고 있다. 그리고 Fig. 8(c)와 (d)에서는 비압연재와 압연재에 대하여 상온과 고온에서의 m의 값을 비교한 것으로 두 경우 모두 상온에서의 TiNi 섬유를 함유한 복합재료인 경우 m의 값이 고온에 비하여 높은 값을 나타내었다. 따라서 고온에서는 TiNi 섬유의 형상기억효과에 의해 균열진전속도가 감소함에 따라 m의 값도 낮게 나타남을 알 수 있었다.

4. 결론

TiNi/Al6061 형상기억 복합재료의 형상기억효과에 의한 피로균열진전저항을 평가하기 위한 피로균열진전실험에서 다음의 결과를 얻었다.

(1) 비압연재인 경우 상온에서 TiNi 섬유의 체적 함유율이 증가할수록 균열진전속도는 감소하는 경향을 나타내었으며 고온에서도 균열진전속도는 상온과 마찬가지로 TiNi 섬유가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었지만 강화섬유의 형상기억효과에 의해 균열진전속도는 현저히 감소함을 알 수 있었다.

(2) 압연재의 경우 비압연재와 마찬가지로 상온과 고온에서 강화섬유의 체적함유량이 증가됨에 따라서 균열진전의 지연 효과는 뛰어났으며, 특

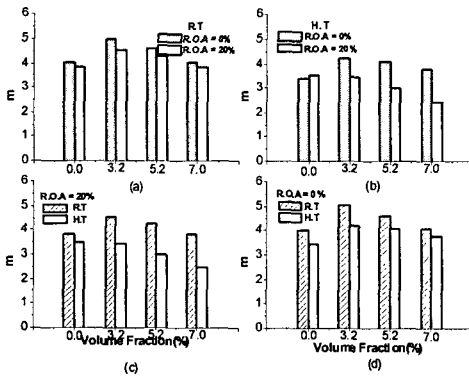


Fig. 8 Comparison of the material constants(m)

히 고온에서는 비압연재에 비하여 균열지연효과가 현저히 증가하였다.

(3) 상온과 고온 및 비압연재와 냉간압연을 받은 모든 경우의 TiNi/Al6061 형상기억복합재료에 대해서 TiNi 섬유의 체적함유율이 증가함에 따라 paris 식의 기울기인 m 의 값이 감소함을 보였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 및 한국과학기술기획평가원의 지원을 받아 2004년도 기초공동연구소사업(BAERI)을 통해 수행되었습니다.

참고문헌

- (1) Lee W. B., Jie M. and Tang C. Y., 2001, "Constitutive Modeling of Aluminum Matrix NiTi Fiber-Reinforced Smart Composite," *J. of Materials Processing Technology*, Vol. 116, No. 2-3, pp. 219 ~ 223.
- (2) Psarras G. C., Parthenios J. and Galiotis C., 2001, "Adaptive Composites Incorporating Shape Memory Alloy Wires - Part I - Probing The Internal Stress and Temperature Distributions with a Laser Raman Sensor," *J. of Materials Science*, Vol. 36, No. 3, pp. 535 ~ 546.
- (3) Lee, J. K. and Park Y. C., 2004, "Fabrication and AE Characteristics of TiNi/Al6061 Shape Memory Alloy Composite" *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 3, pp. 453 ~ 459.
- (4) Lee K. S., 2003, "Damage Tolerance in Hardly Coated Layer Structure with Modest Elastic Mismatch," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 11, pp. 1638 ~ 1649.
- (5) Ritter J. E., Jacome G. S., Pelch J. R., Russell T. P. and Lardner T. J., 2002, "Controlling Modulus Subcritical Crack Growth at Epoxy/Glass Interfaces," *J. of Electronic Packaging-Transactions of ASME*, Vol. 124 No. 4, pp. 328 ~ 333.
- (6) Ando K., Chu M.C., Matsushita S. and Sato S., 2003, "Effect of Crack-Healing and Proof-Testing Procedures on Fatigue Strength and Reliability of Si3N4/SiC Composites," *J. of the European Ceramic Society*, Vol. 23, No. 6, pp. 977 ~ 984.
- (7) Song, J. H. and Lim J. K., 2003, "Low Cycle Fatigue of PPS Polymer Injection Welds (II)-Fiber Orientation and Fracture Mechanism," *KSME International Journal*, Vol. 17, No. 6, pp. 836 ~ 843.
- (8) Fuat O., 2004, "An Elastic-Plastic Stress Analysis in Silicon Carbide Fiber Reinforced Magnesium Metal Matrix Composite Beam Having Rectangular Cross Section Under Transverse Loading," *KSME International Journal*, Vol. 18, No. 2, pp. 221 ~ 229.
- (9) Lee, J. K., Park, Y. C., Lee, J. H., Lee, S. P. and Hur, K. D., 2004, "Nondestructive Evaluation and Fracture Mechanism of Smart Material", *Key Engineering Materials*, Vol. 261-263, pp.1379 ~ 1384.
- (10) Harris, B., Ankara, A. O. and McGuire, M. A., "Fatigue Crack Propagation in Metal-Matrix/ Metal-Fibre Composites," 1976, *J. Phys. D: Appl. Phys.* 9, pp. 365 ~ 372.