

마그네슘 금속복합재의 피로균열거동해석

Fatigue Crack Growth Behavior of a Magnesium-Based Composite

김 두 환¹⁾ · 박 용 걸²⁾ · 김 성 훈³⁾ · 한 석 규⁴⁾
Kim, Doo Hwan Park, Yong Gul Kim, Sung Hoon Han, Suk Kyu

요 약 : 마그네슘 금속 복합재의 열처리 및 섬유 강화재 방향에 따른 효과를 파악하기 위하여 인장강도 및 피로해석이 연구되었다. TEM 관측에 따라 시편은 섬유 강화재와 마그네슘 복합기지 사이의 시효 열처리된 변형된 계면이다. 인장실험 결과로부터 시효 처리된 시편의 극한 인장강도는 주조상태의 시편보다 시효 처리시 화학반응에 의한 섬유 강화재-기지간의 접합강도 약화로 감소하였다. 피로균열 거동실험은 균열거동 방향이 섬유 강화재 방향과 수직인 시편과 균열거동 방향이 섬유 강화재 방향과 평행한 시편을 실험하였다. 피로균열 거동해석을 비교해보면 섬유 강화재와 하중방향이 수직인 시효처리된 시편의 경우가 주조상태의 시편보다 피로균열 거동에 더 크게 저항하였다. 반대로 섬유 강화재 방향에 평행한 주조상태의 시편은 섬유 강화재 방향에 평행한 시효처리된 시편보다 피로 균열거동에 더 크게 저항함을 알 수 있었다.

ABSTRACT : The effects of heat treatment and fiber orientation on tensile strength and fatigue behavior were studied in a continuously reinforced, magnesium-based composite. Following an earlier TEM investigation, specimens were thermally aged to modified the interfacial zone between the alumina fibers and the magnesium alloy matrix. From the tensile experimental results, the ultimate tensile strength of the aged specimens were lower than that of the as-fabricated due to weak fiber-matrix interfacial strength with chemical reaction during the thermal processing. The fatigue crack growth experiments were conducted with specimens having the fiber orientation normal to the crack growth direction (longitudinal) and also specimens with the fibers oriented parallel to the crack growth direction (transverse). A comparison of the fatigue crack growth behavior indicates that aged longitudinal specimens are more resistant to fatigue crack growth

1) 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 교수, 공학박사

2) 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 부교수, 공학박사

3) 정회원, 서울산업대학교 구조공학과 조교수, 공학박사

4) 학생회원, 서울산업대학교 구조공학과 석사과정

본 논문에 대한 토의를 1998년 5월 31일까지 학회로 보내주시면 토의회답을 게재하겠습니다.

the as-fabricated longitudinal specimens. Conversely, as-fabricated transverse specimens are more resistant to fatigue crack growth than aged transverse specimens.

핵 심 용 어 : 열처리, 강화재 방향, 피로거동, 마그네슘 금속 복합재, Transmission Electron microscopy, 섬유 강화재-기지간의 접합강도, 피로균열거동, 직류 전위차법

KEYWORDS : heat treatment, fiber orientation, fatigue behavior, magnesium-based composite, TEM, fiber-matrix interfacial strength, fatigue crack growth, potential drop technique

1. 서 론

다결정 마그네슘 금속 복합재는 높은 강성, 낮은 밀도, 내구성 때문에 이상적인 재료로 간주되며 제조공정의 개발⁽¹⁾로 최근 1970년 중반부터 사용되고 있다.

중량에 비해 높은 강도와 강성이 요구되는 구조용용분야 특히 교량, 빌딩, 비행기, 우주선 등 전형적으로 경 중량이 강조되는 구조물의 경우 이 복합재료는 우수한 연성과 높은 수행성등으로 인해 매우 효과적인 재료로 판정되어진다.

그러나 오늘날 복합 금속재에 대한 강성 메커니즘 지식은 극히 한정되어 있고 섬유 강화재와 기지 사이의 상호관계 역할에 대한 규명은 극히 빈약한 실정이므로 이 불확실성이 응용시 발생되는 극한 상황에 합성 구조체를 실제 설계에 적용치 못하게 제한을 두는 요인으로 평가되고 있다.

복합재료는 일반적으로 비 등질성, 비 등방성의 경우이기 때문에 균질로 간주되는 공학 금속재료와는 많은 다른 특성을 갖고 있으며 주요하중을 지지하는 구조에서의 금속기지복합재의 사용은 변동하중 조건하에서 균열진전에 충분히 저항하는 능력이 요구되며 이러한 능력을 발전시키기 위해서는 미세구조와 역학적 성질 사이에의 관계에 대한 좀 더 나은 이해를 통해서만 가능하다. 특히 피로하중에서 입계공동의 발생, 성장 및 서로간의 연결로 파괴된다고 알려져있다. 그러므로 계비테

이션은 복합재의 수명을 결정하는 중요한 기구라고 할 수 있다. 복합재의 사용에 장애가 되는 주요 요인은 복합재 제조시 섬유 강화재간의 화학반응에 의한 취성의 계면생성이다. 이 계면생성은 복합재의 역학적 성질에 해롭다.

그러나 이러한 복합재의 피로파괴거동에 있어서 계면층의 역할에 대한 연구는 거의 드문 상태이며 용력상태, 복합원소 첨가, 변형 및 열처리에 대한 섬유 강화재/기지간의 계면의 높은 민감성으로 인하여 이러한 변수들은 금속기지 복합재의 피로 특성을 최적화하는데 주요 변수^(2,3)로 작용하므로 피로거동에 대한 이러한 변수의 영향을 이해하는 것은 복합재에의 피로손상을 주도하는 메커니즘을 이해하는 것으로서 복합재의 최적화 설계에 매우 중요한 과제이다.

지금까지 섬유 강화재로 보강된 마그네슘 복합재의 인장 및 피로특성에 관한 많은 연구^(4,5)가 진행되었다. 이들 연구는 주로 합금원소의 성분, 강화재 체적률 및 방향에 대한 역학적 성질에 대한 거동을 주로 다루었으며 그 중에서 Chin⁽⁵⁾은 시효 열처리에 의한 복합재의 섬유 강화재와 기지간의 경계면의 화학반응에 대하여 연구하였다.

그의 투과형 전자현미경을 통한 연구로 450°C에서의 95시간 동안의 시효처리를 통하여 미세조직에서의 여러 변화를 확인하였다.

첫째 계면의 폭이 0.25μm에서 1~2μm까지 증가되었다는 것과, 둘째 산화 마그네슘 계면의 입

자 크기가 감소하였으며, 세째 마그네슘 기지에 다각형의 전이구조가 생성되었다는 것으로 산화 마그네슘 입자 크기의 감소가 이러한 미립자와 연관된 용력집중의 감소로 인하여 계면의 파괴강도를 증가시켰다는 것을 암시하고 있다.

본 연구에서는 연속 섬유 강화재로 보강된 마그네슘 기지 복합재의 인장강도 및 피로강도에 있어서 섬유 강화재 방향에 대한 하중상태 및 열처리의 효과에 목적이 있다. 특히 균열진전을 가속화시키는 섬유 강화재와 기지간의 계면의 역할에 중점을 두고 있으며 연구의 궁극적인 목적은 금속 기지 복합재에서의 피로균열매커니즘을 보다 나은 이해를 통한 복합재료의 최적화 설계에 있으며 본 연구로부터 얻어진 결과와 정보는 마그네슘 금속 복합재의 전반적인 특성을 최적화시킬수 있는 피로수명의 증가와 복합재료의 신뢰성 개선에 크게 기여할 것이다.

2. 연구내용 및 방법

본 연구에서 사용된 재료는 직경 20 μm 의 다결정 α -알루미나 섬유(체적률 35%)로 보강된 마그네슘 판재로 마그네슘의 성분은 4.25% Zn, 0.5% Zr, 1.25% rare earth., 나머지는 마그네슘이다.

본 연구에서는 2가지의 열처리조건을 선택하여 인장 및 피로시험을 실시하였다. 하나는 압력용액 침투법에 의한 주조 상태이며 나머지는 450°C 전기로에서의 95시간 동안 시효 처리된 시효 열처리 상태이다. 열 시효 처리시 금속재의 과도한 산화를 피하기 위하여 전기로는 80torr의 진공수준으로 떨어뜨린 후 아르곤 가스로 채우고 이 과정을 다섯번 반복한 후에 열처리를 하였다.

시편의 규격은 인장 및 S-N선도용 피로시험을 위하여 길이 15.24cm, 폭 1.27cm, 두께 0.25cm의 ASTM 표준시편을 사용하였으며 균열 길이 전파속도 측정을 위하여 길이 10cm, 폭 1.27cm, 두께 0.25cm의 직사각형 시편 끝에 노

치를 가공한 후에 균열을 발생시켜 시험하였다.

인장시험은 섬유 강화재와 하중방향과의 각도가 0° (longitudinal), 22.5°, 45°, 67.5° 그리고 90° (transverse)에 대하여 각각 실시하였다. 인장시험은 MTS810을 사용하여 변형률 속도 $2.1 \times 10^{-4}/\text{S}$ 로 실시하였다.

피로시험은 S-N선도를 위하여 용력비 0.1, 주파수 15Hz로 실시하였으며 한편 하중방향이 섬유 강화재 길이방향인 시편과 횡방향인 시편에 대한 피로균열속도를 측정하기 위하여 SEN (single edge-notched) 시편을 사용하여 피로시험을 실시하였으며 균열 길이는 이동식 광학 현미경과 직류 전위차법(direct current potential drop technique)을 사용하여 측정하였다.

본 실험에서는 직류전위차법의 경우 20암페어를 이용해서 실시하였으며 해상도는 약 0.05mm로 시편의 가열과 전류의 표류오차를 최소화하기 위하여 1.5초 동안 시편에 일정한 전류를 가하여 실시하였다. 이 기간 동안 균열의 양편 지점 사이의 전압을 측정하여 균열 길이를 결정하였다. 마그네슘 합금의 접 용접의 어려움 때문에 균열 전위 탐침자를 정확한 위치에 소형볼트를 이용하여 기계적으로 부착하였다.

직류 전위차법의 사용에 앞서서 광학적으로 측정된 균열 길이의 값과 균열 전위차의 측정치를 연관시키는 보정식이 필요하다.

본 연구에서는 섬유 강화재 방향에 따라 다른 두 가지의 보정 연관식을 사용하였다. 이러한 차이점은 시편을 따라 흐르는 전류의 흐름에 대한 알루미나 섬유 강화재의 영향으로 판단된다. 피로균열 실험의 경우 실험 전에 동일 방향의 시편은 동일하중 조건하에서 예비 균열가공하였다. 길이 방향 섬유 강화재로 이루어진 시편은 용력비 0.1로 1820N의 일정 진폭 하중 하에서 실험되었고 횡방향 섬유 강화재로 이루어진 시편은 용력비 0.1과 320N의 일정진폭 하중 하에서 실험하였다.

3. 연구결과 및 고찰

3.1 인장거동

인장실험에 대한 결과는 그림 1과 같다. 본 그래프를 통하여 섬유 강화재의 방향과 열처리 조건이 본 마그네슘 복합재의 인장거동에 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 최대인장강도는 섬유 강화재와 하중 축과의 각도가 증가함에 따라 감소함을 알 수 있다.

일반적으로 연속 섬유 강화 복합재의 인장강도의 경우 혼합법칙(Rule of Mixtures)을 이용하여 섬유 강화재의 분율에 대한 복합재의 강도 및 탄성계수를 예측할 수 있다. 즉, 복합재가 외부 하중을 받고 있을 때 섬유 강화재와 기지는 전체 하중을 각각 분담하고 있다. 여기서

$$E_f = \text{모든 섬유 강화재에 의해 지지되는 하중}$$

$$F_m = \text{기지에 의해 지지되는 하중}$$

$$F_c = \text{복합재 전체에 의해 지지되는 하중}$$

단순히 하중균형을 이루게 되면

$$F_c = F_f + F_m \quad (1)$$

이며, 면적과 여기에 해당하는 응력으로 표현하면 $\sigma_c A_c = \sigma_f A_f + \sigma_m A_m$ 이며 면적과 부피와는 1대 1의 관계이므로

$$\sigma_c v_c = \sigma_f v_f + \sigma_m v_m = \sigma_f v_f + \sigma_m (1 - v_f) \quad (2)$$

본 연구의 경우 섬유 강화재인 다결정 α -알루미나의 경우 인장강도가 1380MPa, 탄성계수 379GPa⁽⁶⁾, 기지인 동일한 마그네슘 합금의 경우 인장강도가 207MPa, 탄성계수는 14.9Gpa⁽⁷⁾, 체적률 35%를 식(2)를 사용하여 하중과 섬유 강화재의 각도가 0도인 경우 이론적 인장강도를 구

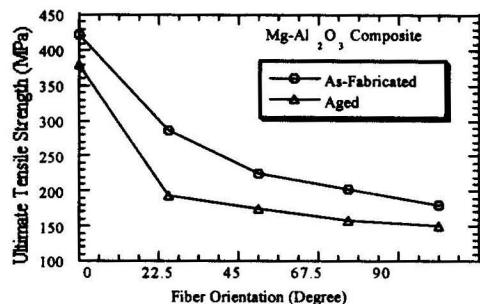


그림 1. 시효열처리 및 주조상태 마그네슘 복합재의 섬유방향에 따른 인장강도

하면 617.6 MPa이다.

실험결과와 비교해보면 주조상태의 424MPa보다 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 이 같은 오차는 세라믹 강화재의 경우 섬유 강화재 표면에 거의 결합이 없는 완전한 섬유 상태에 대한 실험치로 실제 이 같은 섬유 강화재를 이용하여 복합재를 만들 경우 복합재 제조시 섬유 강화재 표면이 약간의 손상을 입을 경우에 대단히 취성인 섬유 강화재의 파괴강도는 저하된다고 사료되며 각도가 90도인 경우 강화재간의 접합이 완전하다면 최소한 기지의 강도에 해당하는 약 207MPa 정도가 되어야 하나 기지와 섬유 강화재간의 계면의 화학반응에 의한 취성화에 강도가 저하되었다고 사료된다. 한편 시효처리된 시편의 경우 주조시편보다 낮음을 알 수 있다.

이 같은 사실은 예상했듯이 시효처리로 인하여 섬유 강화재와 기지간의 계면 혹은 섬유 강화재 표면에서의 화학반응에 의하여 섬유 강화재의 강도가 저하되었음을 예시하고 있으며, 두 가지의 열처리 조건의 각도에 따른 강도저하의 경향이 유사함을 알 수 있다. 한편 동일한 열처리 조건에서 최대인장강도는 2.2~2.3배정도 차이가 발생하였다.

3.2 피로거동

동일한 하중 조건하에서 주조상태와 시효 처리된 섬유 강화재 길이방향 시편에 관한 균열길이 대 사이클 수에 대한 일반적인 그림은 그림 2와 같다. 본 그래프의 기울기에 해당하는 피로균열전파 속도는 주조상태의 경우 시효처리 시편에 비하여 빠르며 결과적으로 피로수명이 $1/3$ 로 단축되었음을 알 수 있다. 이러한 사실은 시효 복합재가 주조상태의 복합재에 비해 섬유 강화재를 관통하는 피로균열에 좀 더 저항성이 있음을 알 수 있다. 주목할 만한 사항은 각도가 0° 인 경우 그림 1에서 주조상태 시편이 시효처리 시편보다 약간 인장강도가 높았으나 피로수명은 짧다는 점이다. 이러한 강화 메커니즘은 시효처리시 계면에 화학 반응으로 인한 취성의 상이 존재하여 섬유 강화재와 기지 사이의 접합강도를 감소시켜 하중이 충분히 전달되지 못해 인장강도는 저하되나, 피로시에는 이러한 약한 계면이 파괴되면서 마찰 에너지의 형태로 에너지를 분산시키는 효과⁽⁶⁾가 발생하여 피로에 강해진 것으로 추정된다.

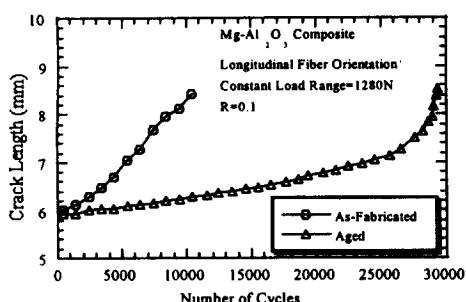


그림 2. 시효열처리 및 주조상태 마그네슘 복합재의 하중방향에 평행한 시편의 균열길이 대 사이클 수

한편 두 가지의 시편 모두 균열 크기가 약 8.5mm정도에 이를 때 갑자기 파괴되었다. 그림 3은 동일 하중 범위 하에서의 주조상태와 시효 처리된 하중방향과 섬유 강화재가 직각인 시편에

관한 균열길이 대 사이클 수에 대한 그래프이다. 이 그래프에서는 주조상태의 복합재가 시효 처리재보다 섬유 강화재 방향에 평행한 피로 균열에 대하여 저항성이 훨씬 크다는 것을 보여주고 있다. 이러한 사실도 앞서 언급한 피로 강화메커니즘과 일치하여 만일 균열이 섬유 강화재와 동일한 방향으로 전파시 시효처리시 발생된 취성의 계면에 의하여 균열이 이러한 취성의 계면을 따라 빠른 속도로 전파되므로써 수명이 저하된다는 사실이다. 여기서 주목되는 것은 주조상태의 시편의 경우 균열길이가 약 7.5mm와 9.5mm에서 균열전파속도가 일시적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 예비관찰을 통하여 이와 같은 일시적인 균열전파속도의 감소는 균열선단 근처에서 섬유 강화재 구조에서의 결합에 기인되는 것으로 판단되나 이 같은 불균일한 균열진전거동에 대한 앞으로의 연구가 좀 더 필요하다.

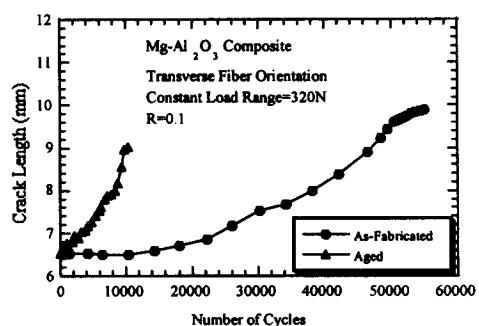


그림 3. 시효열처리 및 주조상태 마그네슘 복합재의 하중방향과 직각인 시편의 균열길이 대 사이클 수

두 가지의 열처리 조건에 대하여 섬유 강화재와 하중축과의 각도에 따른 피로시험에 관한 결과는 그림 4, 5와 같다.

그림 4에서 알 수 있듯이 길이 방향의 시편의 경우 주조상태 시편이 시효 처리된 상태의 시편보다 강도가 약간 강한 관계로 100 싸이클 근방에서는 피로수명이 약간 컷으나 그 이후로는 그림

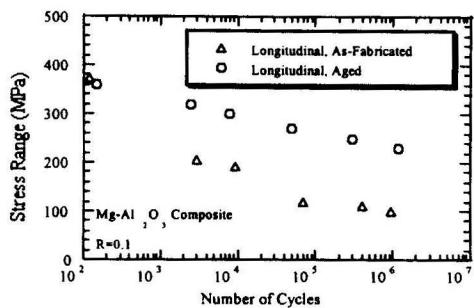


그림 4. 시효열처리 및 주조상태 마그네슘 복합재의 하중방향에 평행한 시편의 피로거동

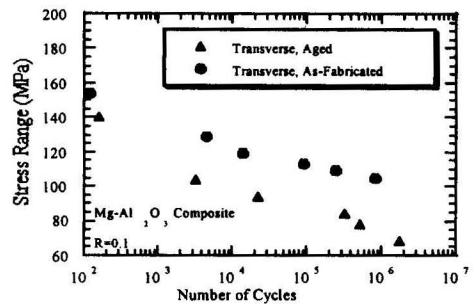


그림 5. 시효열처리 및 주조상태 마그네슘 복합재의 하중방향과 직각인 시편의 피로거동

2에서 나타난 빠른 균열전파속도에 기인하여 시효처리 시편보다 수명이 더욱 급격히 감소함을 알 수 있다.

이 같은 사실도 앞서 유추한 취성의 계면에 의한 에너지 분산효과와 일치한다. 한편 그림 5에서 알 수 있듯이 섬유 강화재와 하중축과의 각도가 직각인 시편의 경우 시효 처리된 시편 주조상태 시편보다 강도가 약한 관계로 하중 전구간에 걸쳐 주조상태 시편보다 수명이 낮다는 것을 알 수 있다. 이 같은 사실은 시효처리 시편의 시효처리에 의한 세라믹 강화재와 기지금속간의 화학반응에 의한 계면의 약화에 기인된 것으로 앞서 서술한 그림 3에서의 빠른 균열전파속도와 일치된다.

그림 6은 320N의 하중 범위에서 실험된 주조상태의 횡방향 시편의 파괴 표면의 일례를 나타낸다. 이 시편에서 피로 균열은 기지를 관통하는 균열 전파와 섬유 강화재/기지 접촉면의 분리에 의하여 발생되었다. 이 같은 마그네슘 복합재에 대한 피로 균열 메커니즘은 또한 Hack^(8, 9)등에 의해 관찰되었다.

그림 6의 좌측의 취성벽개파괴 구역은 마그네슘 합금을 통한 피로 균열전파에 해당되며 우측의 연성파단 표면은 섬유 강화재/기지를 따라 균열이 전파된 결과임을 알 수 있다. 그리고 계면의 파면을 통하여 섬유 강화재와 기지사이의 계면의 분리에 의하여 미소균열이 발생되었음을 알 수 있다. 미소균열 발생 후에는 섬유 강화재에 붙어 있던 나머지 기지의 연성파면을 통하여 섬유 강화재와 기지사이의 계면의 분리에 연성 전단파괴가 일어나게 된다.

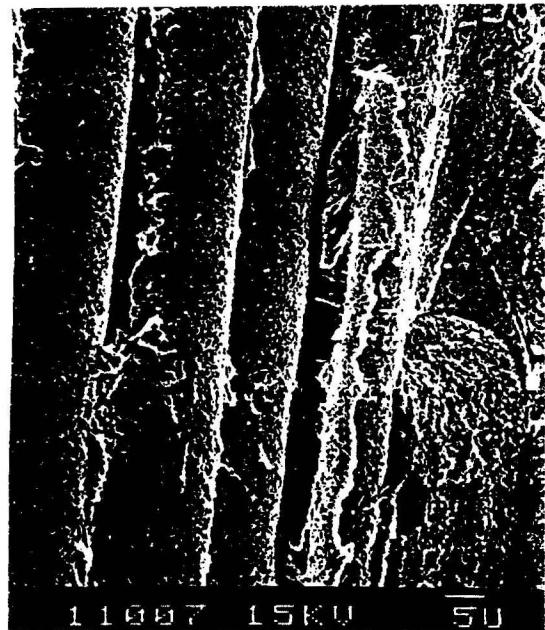


그림 6. 섬유강화재/기지 접촉면에서의 미소 기지 균열을 보여주는 주조상태 횡방향 시편의 피로파괴표면

4. 결 론

연속 세라믹 강화 마그네슘 기지 복합재의 열처리 조건 및 섬유 강화재 방향에 따른 인장강도 및 피로수명에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 인장강도의 경우 시효처리된 시편이 주조상태의 시편보다 시효처리시 계면에서의 화학반응에 의한 접합강도 약화로 강도가 10~20% 감소하였으며 두 가지 열처리 모두 섬유 강화재와 하중방향 간의 각도가 증가하면서 강도가 감소함을 보였다.

2. 섬유 강화재와 하중방향이 일치하는 시편의 경우 시효처리된 시편이 주조상태의 시편보다 균열 전파속도가 감소하여 피로수명이 결과적으로 증가함을 보였다.

3. 섬유 강화재와 하중방향이 수직인 시편의 경우는 시효처리된 시편이 시효시의 접합계면에서의 화학반응에 의한 취성계면에 의하여 주조상태의 시편보다 균열전파속도가 증가하여 피로수명이 결과적으로 감소함을 보였다.

감사의 글

본 논문은 서울산업대학교 교내학술연구비지원에 의해 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- (1) Hehman, F., and Jones, H., "Rapid solidification of magnesium alloys," in *Rapidly Solidified Alloys and*

Magnetic Properties, MRS, Giessen, B.S., Polk, D.E., Taub, A.L., eds., 1986, p259-274.

- (2) Dauskardt, R.H., Richie, R.O., and Cox, B.N., "Fatigue of advanced materials," *Advanced Materials & Processes*, 1993, p26-35.
(3) Cox, B.N., and Marshall, D.B., "Crack bridging in the fatigue of fibrous composites". *Fatigue Fracture Eng. Mater. Struc.* vol 14, 1991, p847-861.
(4) Nunes, J., et al., "Tensile and fatigue behavior of aluminium fiber reinforced magnesium composite," (Report MTL TR 86-7, U.S. Army Materials Technology Laboratory, 1986).
(5) Chin, E.S.C., "Transmission electron micro-scropy study of alumina fiber reinforced magnesium composite," (Report MTL TR 87-7, U.S. Army Materials Technology Laboratory, 1987).
(6) Dhingra, A.K., Philos. Trans. R. Soc. London 1980, A294, 411
(7) Propeties and Selection, Metal Handbook, ASM, 1069
(8) Chawla, K.K., *Composite materials* (New York, NY : Springer-Verlag, 1987, p233-236)
(9) Fishman, S.G., "Ramifications of recent micromechanical innovations on understanding in composite materials, in *Inter-faces in Metal-Ceramic Composites*, TMS, Lin, R.Y., Arsenault, R.J., Martins, G.P., and Fishman, S.G., eds. 1990, p3-29

(접수일자 : 1997. 7. 24)