

TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 미세조직 및 피로특성에 관한 연구

윤두표 · 박영철 · 김순국* · 이준희* · 이규창**

동아대학교 기계공학과

*동아대학교 금속공학과

**포항산업과학연구원

A Study on the Microstructure and Fatigue Properties of TiNi/Al6061 Shape Memory Composite

D.P. Yun, Y.C. Park, S.K. Kim*, J.H. Lee* and G.C. Lee**

Mechanical Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714

* Metallurgical Engineering, Dong-A University, Pusan 604-714

** Research Institute Structure & Technology, Pohang

(1998년 7월 25일 받음, 1998년 9월 9일 최종수정본 받음)

초 록 본 연구는 형상기억합금을 이용하여 제조한 신소재 중의 하나인 형상기억복합재료를 소개하고자 한다. 이 복합재료는 TiNi 섬유와 Al6061 기지와의 열팽창차이로 인한 인장잔류응력을 제거하고 기지내에 압축잔류응력을 발생시켜 높은 인장강도를 갖는다. 따라서 본 연구에서는 용탕단조법으로 복합재료를 제조한 후 미세조직을 관찰하고 TiNi 섬유의 역변태온도 이상에서 피로실험을 수행하여 복합재료의 피로특성을 검토하였다. 이 결과 363K에서의 피로균열전파제어효과는 섬유체적률과 예변형에 의하여 증가된다.

Abstract In this study TiNi/Al6061 shape memory composite is introduced as one of new material using a shape memory alloy. High tensile strength of composite due to compressive residual stress in matrix by the shape memory effect of TiNi fiber can be produced. This composite can remove the tensile residual stress by the difference of coefficients of thermal expansion between fiber and matrix, one of the significant weak point of metal matrix composite. In this paper, shape memory composites are made by squeeze casting. And then, microstructure and fatigue properties of the composites by shape memory effect above inverse transformation temperature A_1 of TiNi alloy are discussed. The results of the fatigue crack control properties of TiNi/Al6061 shape memory composite by a squeeze casting are summarized as follows; the effect of fatigue crack propagation control at 363K increases according to the increase of volume fraction and prestrain in composites.

1. 서 론

차세대 구조재료로서 특히 각광받는 신소재인 지적재료는 1980년 후반에 그 개념이 제안되었으며, 1990년대에 들어서야 비로소 연구가 활성화되고 있다. 특히 기계공학 분야에 관한 연구는 항공우주 등의 관련산업에 집중되어 있으며 그 재료로서는 형상기억합금, 압전재료, 광섬유, 전기점성유체 등을 플라스틱 또는 금속과 같은 내부에 조합시켜 센싱(sensing), 변형제어, 진동제어, 손상제어가 가능한 복합재료형 지적재료의 개발에 관한 연구가 활발하게 진행되고 있다.^{1~3)}

이러한 지적재료는 재료자체에 센서(sensor)와 액츄에이터(actuator)의 기능을 갖추는 동시에 내부 또는 외부에 이것을 연결하는 프로세서(processor)를 가지고, 재료 주위의 환경 변화를 재료자체가 감지하여 미리 정하여진 응답으로 재료가 그 자체를 제어하여 만들어 갈 수 있는 재료이다.

지적화를 위한 금속계 신소재로서 형상기억합금(shape

memory alloy)은 온도감지와 구동기구, 시간적기억과 회복기능 등을 재료자체가 가지고 있으므로 지적재료의 조건을 모두 갖추고 있을 뿐만 아니라 대변형과 고강도 액츄에이터로서의 특징이 있기 때문에 금속, 폴리머(polymer), 콘크리터(concrete) 등과의 복합화에 의하여 지적인 구조 재료를 만들 수 있다.

그러나 이러한 형상기억합금을 강화재로 사용한 복합재료의 개발은 아직 미비한 편이며 다만 Eshelby⁴⁾ 등에 의해 형상기억복합재료의 이론 모델이 제안되었고, Furuya⁵⁾ 등에 의해 최근에 실험적으로 정립되었으나 그 결과마저도 형상기억복합재료의 인장특성에 국한되었고 그 밖의 소재특성 연구는 아직 시도가 되지 않았다.

따라서 본 연구에서는 우수한 지적특성과 상변태에 의한 체적변화를 아울러 겸비한 TiNi 형상기억합금을 강화재로 사용하여 용탕단조법(squeeze casting)으로 형상기억복합재료를 제작한 후, 계면접합성 및 복합재료의 미세조직을 관찰하였다. 또한 TiNi 형상기억합금에 의한 복합재료의 섬유강화효과 및 형상기억효과^{6,7)}가 복합재료의 피로특성

에 미치는 영향을 파악하기 위하여 상온 및 강화재의 역변태온도에서 피로 실험을 수행하여 변태온도에 의한 형상회복력이 피로균열제어에 미치는 효과에 대하여 검토하였다.

2. 재료 및 실험방법

2-1. 형상기억복합재료의 제조

본 연구에서 사용한 강화섬유로서는 일본 Kanto 특수강(주)에서 제작 시판한 직경 0.4mm인 냉간가공된 Ti-50%Ni 형상기억합금을 사용하였으며, 형상기억복합재료는 용탕단조법으로 제조하여 그 특성을 비교하였다.

용탕단조법에 의한 형상기억복합재료의 제조는 TiNi 합금을 110mm 크기로 절단한 후 Fig. 1에서 보는 바와 같은 전용 복합재료 제작용 치구의 상하 지지판에 끼워 고정하였다. 이때, TiNi 섬유를 실용목적에 따라 0%, 3%와 5%의 세 종류의 시료를 준비하였다.

본 연구에서의 기지금속으로는 금속복합재료에 일반적으로 이용되는 Al6061을 사용하였으며, 주조 후의 기지금속의 화학적 성분과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타내었다.

이상과 같이 제조된 시료는 방전가공을 이용하여 Fig. 2와 같이 기계가공을 한 후, 압축잔류응력 유도를 위한 가공열처리를 실시하고, 가공열처리 후의 시험편에 대하여 피로 실험을 실시하였다.

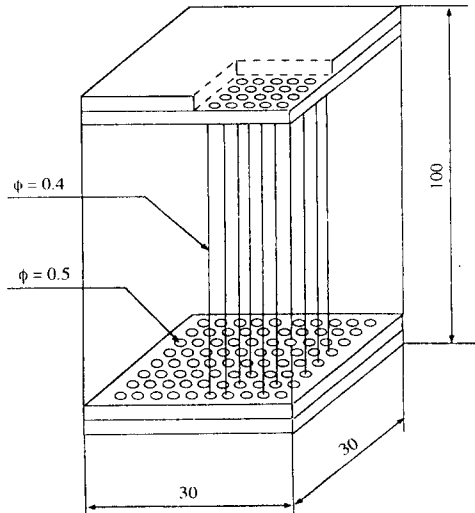


Fig. 1. Model for aligning TiNi fiber(unit:mm).

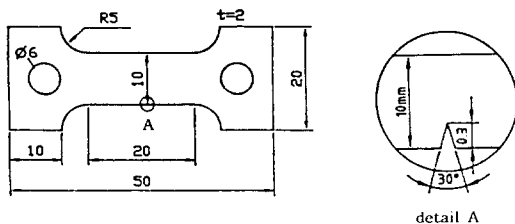


Fig. 2. Geometry of fatigue specimen.

2-2. 실험방법

형상기억복합재료의 피로균열진전거동 특성을 검토하기

Table 1. Chemical composition of Al6061 (wt%).

| Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Al |
|------|-----|------|------|-----|------|------|------|
| 0.60 | 0.3 | 0.26 | 0.02 | 1.0 | 0.10 | 0.06 | Bal. |

Table 2. Mechanical properties of Al6061.

| Temperature | Tensile stress (MPa) | Elastic modulus(GPa) | Elongation (%) |
|-------------|----------------------|----------------------|----------------|
| R.T | 135 | 64.3 | 11.9 |

위하여 ASTM-E647⁹⁾의 일정하중하에서 응력비 R=0.1을 가하였으며, 주파수 10Hz의 반복하중하에서 피로균열진전시험을 수행하였다. Fig. 2에 피로시험편의 형상과 치수를 나타내었으며, 피로시험에 사용된 시험기는 전기유압 서어보식 피로시험기(SHIMADZU EBH-10L)를 사용하였다. 또한 자체제작한 전기로를 피로시험기에 부착하여 90°C (363K) ±3°C 내에서 노내의 분위기를 안정화시켰다. 한편, 형상기억합금의 형상기억효과가 형상기억복합재료의 피로균열진전 제어에 미치는 영향을 검토하기 위하여 각각의 시험편에 예변형을 1%를 부가하였으며, 균열길이의 측정에는 이동식 공구현미경을 이용하여 측정하였다. 또한, 결과의 처리에 있어서는 7점 증분식 방법(seven point increase method)으로 피로균열전파속도와 응력확대계수를 구하였다.

3. 결과 및 고찰

3-1. 형상기억복합재료의 조직 및 경도

본 연구에서는 우선 복합재료의 계면특성 및 열적안정성 여부를 확인하기 위하여 광학현미경 조직 및 등시간 시효 후의 경도변화를 조사하였다.

Fig. 3은 용탕단조한 TiNi/Al6061 복합재료의 광학현미경 조직 사진이다.

그림에서와 같이 섬유와 기지의 계면 접합상태는 양호함을 알 수 있으며 복합화는 잘 이루어졌음을 확인할 수 있다.

그리고 Fig. 4는 본 복합재료의 열적 안정성을 확인하기 위해 각 온도에서 2hr 등시시효시켰을 경우의 기지 조직사

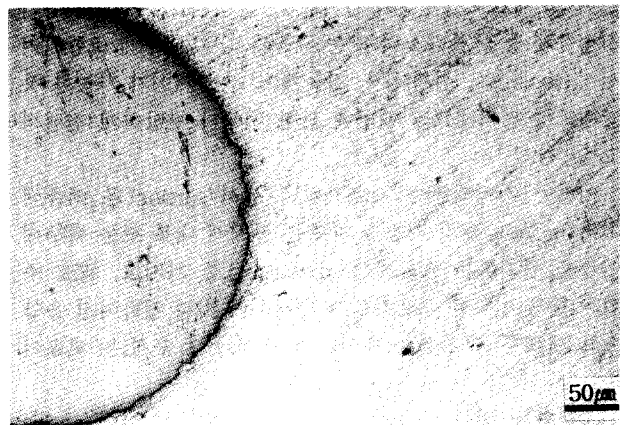


Fig. 3. Microstructure of TiNi/Al6061 composite.

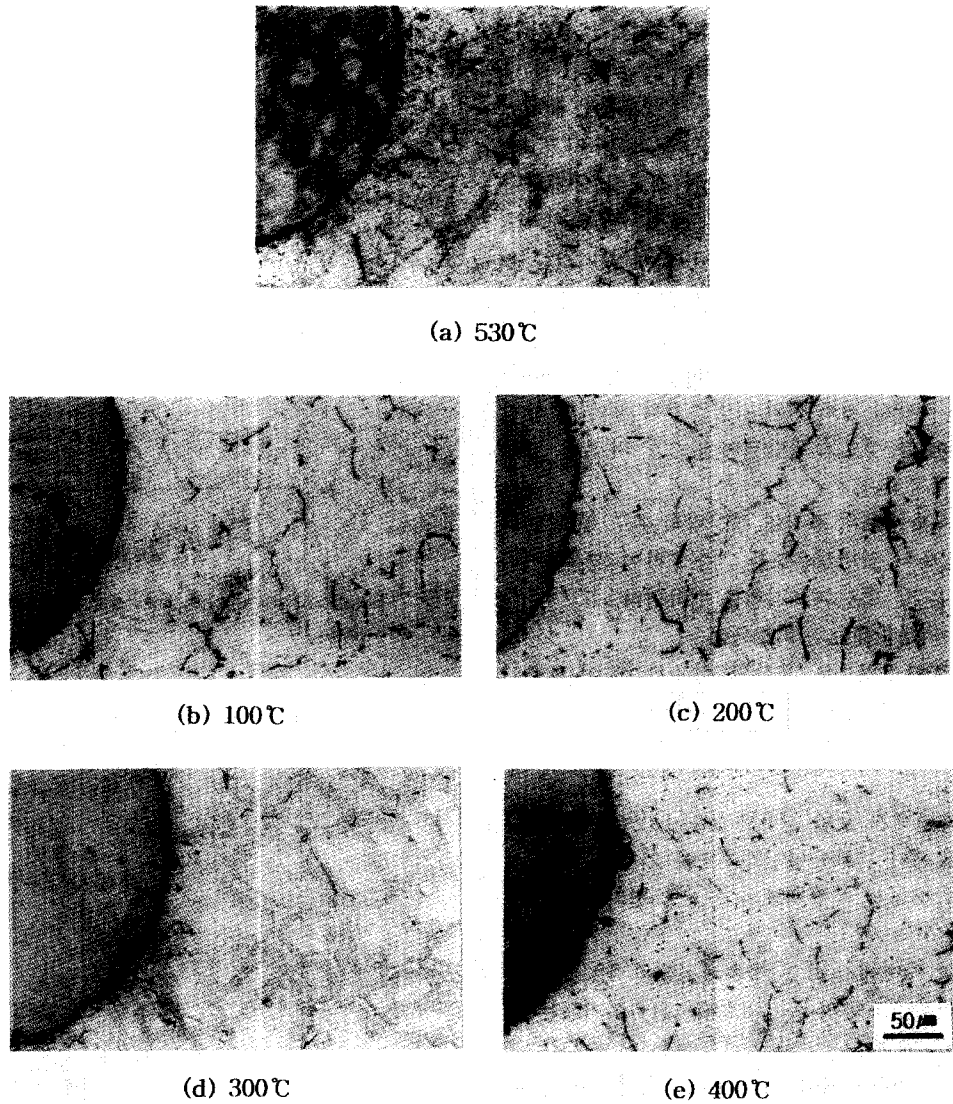


Fig. 4. Microstructure of TiNi/Al6061 composite age hardening for 2hr at various temperature. (a) 530°C (b) 100°C (c) 200°C (d) 300°C (e) 400°C

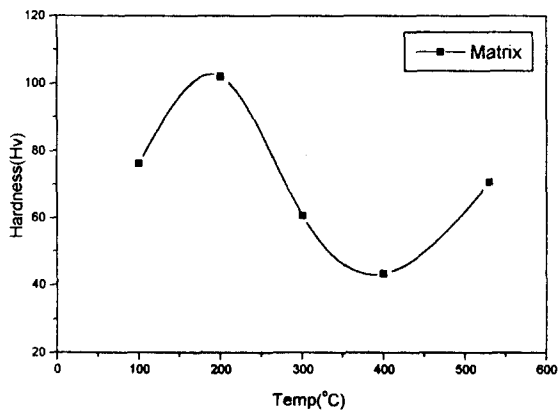


Fig. 5. Thermal stability of matrix in TiNi/Al6061 composite.

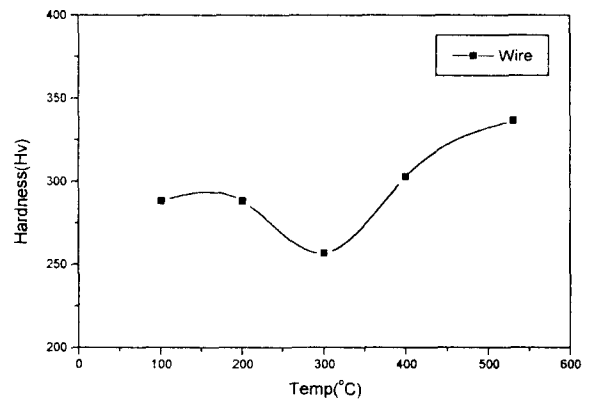


Fig. 6. Thermal stability of wire in TiNi/Al6061 composite.

진이다. a)는 530°C 용체화처리한 경우이며 b)~e)는 등시시효 처리한 결과이다. b)의 경우 결정입계에 석출물이 석출되었지만 아직 명확한 양상은 띠고 있지 않으나 온도가 200°C인 c)의 경우 결정립은 미세하고 균일하게 분포하고

있으며 석출물은 입계에 고루 분산되어 있음을 알 수 있다. 그리고 이 석출물은 합금 조성으로 보아 Mg₂Si인 것으로 사료된다. 이보다 고온인 d) 및 e)의 경우에 있어서는 열적 특성 열화에 기인한 결정립의 조대화가 일어났음을 알

수 있다.

따라서 이와 같은 조직의 변화에 따른 기계적 성질을 관찰하기 위해 각 온도에서의 경도 변화를 Fig. 5 및 6에 나타내었다. 기지의 경우 Fig. 5에서와 같이 경도값은 200℃까지는 증가하다가 그 후 급격히 감소함을 알 수가 있다. 이는 200℃까지는 석출경화효과로 인해 경도가 증가하나 300℃ 이상의 경우 열적 특성 열화에 따른 결정립 조대화로 인해 연화되고 있는 것으로 판단되며 530℃에 있어서는 용체화처리에 따른 고용경화효과로 경도가 증가하는 것이라 판단된다. 그리고 섬유에 있어서는 Fig. 6에서와 같이 300℃까지는 다소 감소하다가 그 후 증가하는 양상을 나타내고 있으며 이는 복합재 제조 시의 가공조건의 차이 및 상변태에 따른 영향이 클 것으로 판단되며 앞으로 더 많은 고찰이 필요하리라 생각된다.

이상과 같은 복합재료의 조직내 결정립의 분포 및 경도의 결과와 TiNi 섬유의 역변태온도를 기초로하여 상온과 90℃에서 각각 상온 및 고온 피로시험을 행하였다.

3-2. 형상기억복합재료의 피로특성

Fig. 7은 용탕단조법으로 제작된 섬유체적률이 0%인 A16061 모재와 섬유가 강화된 TiNi/A16061 형상기억복합재료를 상온에서의 피로균열전파속도와 응력확대계수를 나타낸 그림이다.

섬유강화의 측면에서 보면 섬유체적률이 0%인 A16061 모재가 동일 ΔK에서 피로균열전파속도가 가장 낮으며 섬유체적률이 5%, 3%인 복합재료의 순으로 전파속도가 증가한다.

또한 예변형의 측면에서 보면 섬유체적률이 3%인 복합재료와 섬유체적률이 5%인 복합재료에 있어 초기에는 비슷한 ΔK_{th}를 나타내고 있으나 균열안정성장 영역에서는 5%의 경우가 약간 높은 ΔK를 나타내고 있음을 나타낸다. 그러나 불안정파괴 영역에서는 5%의 경우가 급속한 파단에 이르게 됨을 알 수 있다.

위와 같은 결과에 있어서 우선 모재보다 섬유강화가 된 복합재료의 균열진전이 빠르게 나타나는 것은 금속이 복합재료의 경우 Logdon⁹⁾의 보고에서처럼 섬유의 강화로 인하여 모재에 비해 파단시까지의 변형이 줄어들어서 연성의 저하현상을 나타내어 ΔK_{th} 이후의 안정성장영역에서는 복합재료의 균열전파속도가 모재보다 빠르게 전파된다는 결과와 유사함을 나타내었다. 그러나 섬유체적률이 3%보다 5%의 경우가 조금 높게 나타나는 것은 섬유강화복합재료에 있어서 균열선단에서 발생하는 파괴일이 강화섬유 사이의 간격이 증가함에 따라 증가하게 되므로 이와같이 5%보다는 3%의 경우가 더 빠른 균열전파속도를 가지는 것이라 할 수 있다.

또한 예변형의 경우에 있어서는 섬유체적률이 3%인 경우 복합재료내에 있어서 균열전파저항을 증가시킬수 있는 기지의 소성변형¹⁰⁾이 섬유체적률 3%보다 5%에 가해진 변형량이 전체적으로 증가함으로써 균열성장안정영역에서는 3%의 경우가 빠른 균열진전을 보이나 불안정 영역에서는 예변형량에 균열선단에서의 소성량이 합해진 5%의 경

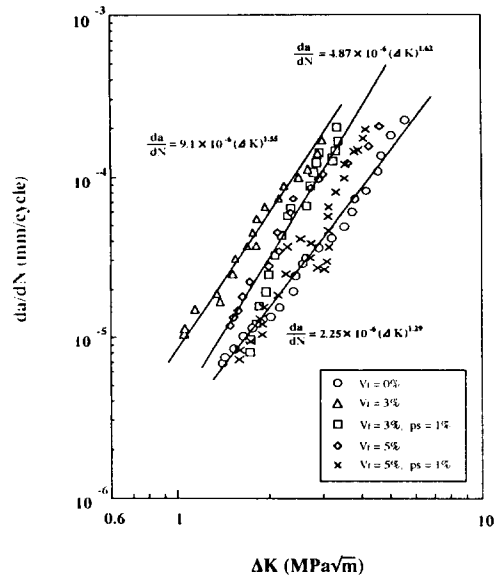


Fig. 7. Relation between crack growth rate and stress intensity factor range at R.T.

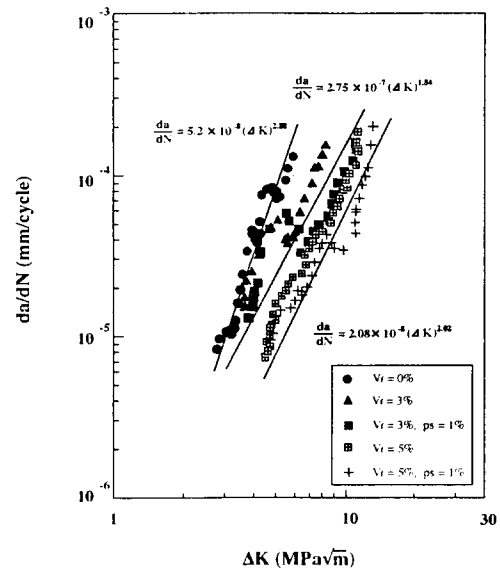


Fig. 8. Relation between crack growth rate and stress intensity factor range at 363K.

우가 급속파단에 이르게 되는 것이라 생각된다. 그러나 두 경우의 측면에 있어서 ΔK의 차이는 그다지 크게 나타나지 않음을 보인다.

Fig. 8은 363K에 있어서는 경우를 나타낸 그림이다. 전체적으로 섬유체적률이 0%의 모재인 A16061의 경우가 동일 ΔK 영역에서 가장 빠른 피로균열전파를 나타낸다. 또한 섬유체적률이 증가함에 따라 낮은 피로균열진전을 나타낸다. 예변형의 경우에 있어서는 높은 체적률인 5%의 경우에 예변형의 효과가 가장 높게 나타나 체적률 3%일 때 보다 큰 증가를 보이고 있음을 알 수 있다.

이상의 결과에서 A16061 모재에 섬유가 강화된 경우가 체적률이 0%인 A16061 모재보다 균열진전저항이 큰 이유는 363K에서 강화섬유인 TiNi 섬유의 상변태에 따라 발생

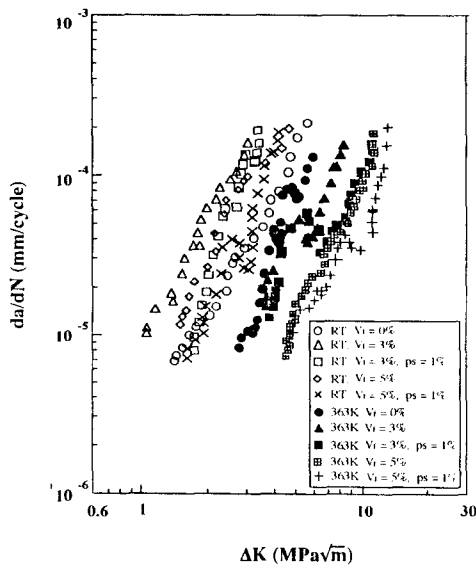


Fig. 9. Relation between crack growth rate and stress intensity factor range at R. T. and 363K.

한 압축잔류응력이 상온시 기지와 섬유계면에 분포되어 있는 인장잔류응력을 완화시켜주는 효과를 가져오고 또한 반복피로에 의한 균열선단에서의 소성영역의 확대가 계면에서 발생되어진 압축잔류응력으로 인해 저지됨으로서 균열진전 속도가 낮아지는 것이라 생각된다. 이러한 결과는 Cooper¹¹⁾에 의해 이미 실험적으로 증명된 결과에서도 알 수 있다. 그리고 3%의 경우보다 5%의 경우에 있어 균열진전저항이 커지는 것은 동일 단면적내에서 발생한 응력의 폭이 5%의 경우가 크고, 계면에 의하여 생성되는 내부표면적 또한 매우 크기 때문이다. 이는 Wolf¹²⁾와 Scala¹³⁾의 보고와 유사한 경향을 보인다.

예변형에 의한 복합재료에 있어서의 ΔK 의 증가는 형상기억열처리에 의하여 기억된 TiNi 섬유의 원래형상에서 가해진 예변형과 제조시의 계면에 잔류한 인장응력이 TiNi 섬유의 변태온도인 363K에서 응력유기마르텐사이트변태로 인하여 수축, 회복하려는 형상회복력의 증가로 가해진 예변형량이 모두 압축잔류응력으로 바뀔 때 따라 섬유강화에 의하여 완화된 계면에서의 인장잔류응력이 상쇄되는 형상기억효과를 일으킨다. 이러한 효과는 단순 강화의 경우보다 훨씬 더 인성이 증가되는 경향을 나타낸다. 이는 체적률이 3%인 경우보다 5%의 경우에 있어서 더 큰 회복력을 나타냄을 보이며, 또한 이때의 압축잔류응력으로 균열선단에서의 균열개구변위(CTOD, Crack Tip Opening Displacement)의 감소가 일어남으로서 피로균열전파는 감소하는 것이라 생각한다.

Fig. 9는 상온과 363K에서 A16061 모재와 TiNi 섬유가 강화된 복합재료의 피로균열전파속도를 응력확대계수의 범위로 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있는 바와같이 섬유체적률이 0%인 A16061 모재에 있어 상온과 363K에서의 ΔK 의 증가는 그다지 높지 않음을 알 수 있다. 이는 363K에서의 모재 연성이 상온과의 온도차가 높지 않으므로 모재에

서의 연신에 따른 ΔK 의 증가는 크지 않음을 보인다.

4. 결 론

TiNi 합금을 이용하여 용탕단조법으로 형상기억복합재료를 제조한 후 피로실험을 통하여 형상기억복합재료의 피로특성에 대하여 얻은 결과는 다음과 같다.

1) 섬유와 기지의 계면접합성은 양호하였으며, 200°C 시효한 경우가 가장 뛰어난 조직 및 특성을 나타내었고 온도가 증가할수록 결정립 조대화에 의해 기계적특성이 열화하였다.

2) TiNi/A16061 복합재료의 경우 상온에서의 피로균열 전파저항은 기지금속이 피로균열전파에 큰 영향을 미치며, 피로에 있어서는 섬유강화효과와 예변형효과가 나타나지 않았다.

3) 고온에 있어서의 TiNi/A16061 복합재료의 피로균열 제어효과는 섬유체적률에 따라 뚜렷한 증가를 나타내며, 예변형에 의해서도 그 효과가 큼을 알 수 있다. 이는 TiNi 형상기억합금의 예변형에 의한 형상기억효과 때문이다.

참 고 문 헌

1. E. F. Crawley, E. A. Anderson, "Detailed Models of Piezoceramic Actuation of Beams," J. of Intelligent Material Systems and Structures, Vol. 1, No. 1, p. 4, (1990)
2. Y. Choi, A. F. Skrecher, H. Conrad, "Vibration Characteristics of a Composite Beam Containing Electrotheological Fluid," J. of Intelligent Material Systems and Structures," Vol. 1, No. 1, p. 91, (1990)
3. I. Amato, "Smart as a Brick," Science News, Vol. 137, No. 10, p. 152, (1990)
4. J. D. Eichelby, "Proc. Roy. Soc. Lond.," A241, p. 376, (1957)
5. Y. Furuya, "Design and Experimental Verifications of Intelligent Materials Using Shape Memory Alloy" Proceedings of the International Symposium on the Microsystems, Intelligent Materials and Pobots, Sendai, Japan, p. 313, (1995)
6. 關口行雄, "Ti-Ni形狀記憶合金의SME사이클による機械的性質への影響", 日本工業材料, 第31卷第1號, p. 61, (1992)
7. H. Ehrenstein, "Production and Shape Memory Effect of Nickel-Titan," Proceedings of the International Conference on Martensitic Transformations, p. 1083, (1986)
8. "Constant-Load-Amplitude Fatigue Crack Growth Rates Above 10^{-6} m/cycle," ASTM E647-86, p. 714, (1995)
9. W. A. Logsdon and P. K. Liaw, "Tensile, Fracture Toughness and Fatigue Crack Growth Rate Proper-

- ties of silicon Carbide Whisker and Particulate Reinforced Aluminum Metal Matrix Composite," *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. **24**, No. 5, p. 737 (1986)
10. G. A. Cooper and A. Kelly, "Mechanical Physics Solids," Vol. **15**, p. 279, (1967)
11. G. A. Cooper, "Material. Science." Vol. **5**, p. 645, (1970)
12. R. M. Vennett, S. M. Wolf, and A. P. Levitt, "Metal Transaction," Vol. **1**, p. 1569, (1970)
13. C. Schoene and E. Scala, "Metal Transaction," Vol. **1**, p. 3466, (1970)