

Ti-Ni 형상기억합금의 피로특성에 관한 연구

박 환 수¹⁾, 김 영 식²⁾

A Study on the Fatigue Properties of Ti-Ni Shape Memory Alloys

Hwan-Soo Park, Young-sik Kim

Abstract

The term of shape memory alloy is applied to the group of metallic material that demonstrates the ability to return to previously defined shape when subjected to the appropriate thermal procedure. Although a relatively wide varieties of alloy are known to exhibit the shape memory effect, only those that can recover substantial amounts of strain or that generate significant force upon changing shape are of commercial interest.

A shape memory alloy may be further defined as one that yields a thermoelastic martensite. In this case, the alloy undergoes a martensitic transformation by twinning mechanism below the transformation temperature. The deformation is then reversed when the twinned structure reverts upon heating to the parent phase.

And if the material is loaded above its transformation temperature, the stress-induced martensite can be generated. During this procedure, the strain increases under the constant stress. Upon unloading, though, the material reverts to the parent

1) 한국해양대학교 대학원 기계공학과

2) 한국해양대학교 이공대학 재료공학과 교수

phase, and the shape recovery occurs without heating procedure. This effect, which causes the material to be extremely elastic, is known as superelasticity.

Because of its excellent mechanical properties, the practical use of the Ti-Ni shape memory alloy has been appraised more than the Cu-Ti-Ni shape memory alloy or the Fe-Ti-Ni shape memory alloy. However the fatigue property of the shape memory or superelastic behavior has not been clarified sufficiently.

In this paper, several tests, such as, DSC, tensile test, fatigue test were conducted in order to clarify the effect of the transformation behavior, test temperature, and strain on the fatigue life of the shape memory alloys.

Main conclusions are obtained as follows.

1. In the stress-strain curve, the stress for inducing martensite increases with the increasing of the test temperature and Ni-content.
2. The fatigue life curve of the Ti-Ni shape memory alloy consists of different straight lines: hence it is divided in short, middle, and long life zone.
3. The fatigue life of Ti-Ni shape memory alloy decreases with the increasing of the test temperature and Ni-content.
4. The fracture pattern resulted from the rotary bending fatigue test has transition from a ductile fracture under low temperature and small strain to a brittle fracture under high temperature and large strain.

1. 서 론

형상기억합금으로 주목받고 있는 Ti-Ni계 형상기억합금은 기계적 성질 및 내식성이 우수하여 Cu계 및 Fe계 등 다른 형상기억합금에 비하여 가공성 및 형상기억합금의 안정성이 우수하여 실용화의 측면에서 가장 유망한 합금으로 평가되

어 있고, 실제 여러 분야에서 실용화가 진행되고 있다. 따라서 Ti-Ni계 형상기억합금에 관한 기초적인 연구도 활발히 진행되어 형상기억기구, 변형거동, 마르텐사이트 결정학, 준안정상의 결정구조 등에 있어서 많은 연구결과가 보고 되고 있다.

그러나 Ti-Ni계 형상기억합금을 실용화하는데 있어 가장 중요하다고 사료되는 반복변형 혹은 반복응력 상태에서 형상기억거동 및 초탄성거동의 피로현상에 대한 연구는 충분히 이루어져 있지 않다. 그러므로 이 연구에서는 반복굽힘 변형을 받은 상태에서 여러 가지 온도 분위기에서 이 합금의 피로현상을 정량적으로 밝혀 이 합금의 실용화를 위한 기초자료로 제공하고자 한다.

2. 실험 재료 및 실험 방법

본 실험에서 사용한 재료는 인발가공된 Ti-50.0at%Ni, Ti-50.5at%Ni, Ti-50.85 at%Ni 형상기억합금으로 직경 1mm 선재(線材)이다. 이러한 선재에서 길이 100mm의 시험편을 절단하고, 산화피막을 제거하기 위하여 에머리지페이퍼로 기계적 연마를 실시하였다. 그리고 직경 12mm의 투명석영관에 1×10^{-2} Torr의 진공분위기에서 아르곤을 취입하고 봉입하여 673K에서 1시간 동안 어닐링한 후 수중에서 급랭하였다. 열처리가 완료된 시험편은 다시 에머리지페이퍼로 기계적 연마를 하여 산화피막을 제거하였다.

재료의 변태점은 DSC(Differential Scanning Calorimeter)로 측정하였고, 재료의 정적변형거동은 최대용량 5t의 INSTRON형 인장시험기에 의해 여러 가지 온도분위기에서 측정하였다. 또한 온도변화에 따른 형상기억합금의 피로수명 측정을 위하여 Fig. 1과 같이 자체 제작한 회전굽힘 피로시험기에 의해 피로시험을 실시하고, 주사형 전자현미경에 의해 피로파면을 관찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 시험편의 변태거동 및 정적변형거동

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4는 DSC 측정장치로 무부하상태에서 α 알루미나 분말

을 기준물질로 하여 합금의 변태점을 측정한 결과이다.

Fig. 5는 353K에서 측정한 Ti-50.0at%Ni 합금의 stress-strain곡선이다. 이 결과에 의하면 strain의 변화에 따라 4개의 변곡점이 나타난다. 이들 변곡점 중 가장 먼저 나타난 변곡점 ①은 R(Rhombohedral)相 변태가 시작되는 지점이며, 두 번째 변곡점 ②는 R相 변태가 종료되는 지점이다. 그리고 세 번째 변곡점 ③은 M相변태 시작되는 지점이며, 네 번째 변곡점 ④는 M相 변태가 끝나고 소성변형이 시작되는 지점으로 생각된다.

Fig. 6, Fig.7, Fig.8은 여러 가지 온도에서 측정한 시험편의 stress-strain 곡선이다. 여기서 온도의 변화에 따라 마르텐사이트相과 모상인 B2相으로 구분된다.

이 결과에 의하면 마르텐사이트相 상태에서는 낮은 응력에서 항복거동이 나타나, 온도의 상승과 더불어 B2相 상태에서 부하하면 M相 유기응력이 크게 상승함을 보이고 있다.

3.2 피로수명과 파면특성

Fig.9, Fig.10, Fig.11은 여러 가지 온도에서 측정한 회전굽힘 피로시험 결과이다. 역시 온도의 변화에 따라 마르텐사이트相과 모상인 B2相으로 구분된다. 합금의 조직이 M相인가, B2相인가에 따라 피로수명이 크게 달라짐을 알 수 있다. 즉 같은 피로하중을 받더라도 B2相 상태에서 보다 M相 상태에서 피로수명이 훨씬 길어짐을 보이고 있다.

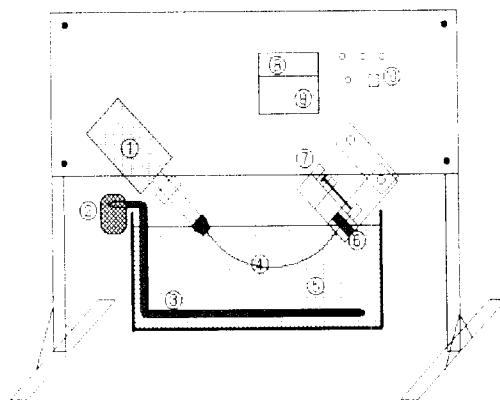
그리고 일정한 온도에서의 피로수명 곡선은 일반 합금의 경우와 다르게 단수명 영역, 중수명 영역, 장수명 영역으로 구분되고 있음을 보이고 있다. 여기서 단수명 영역과 중수명 영역의 경계점은 Fig.5의 M相 변태시작점인 ③지점과 일치함을 보이고 있다. 그리고 중수명영역과 장수명영역의 경계점은 Fig. 5의 R相 변태점인 ②지점과 일치하고 있다. 따라서 Ti-Ni 형상기억합금의 경우 R相 변태점 이하의 부하상태에서는 급격한 수명연장 현상이 나타나, M相 변태가 시작되는 부하 이상의 반복피로하중 상태에서는 매우 짧은 피로수명을 보이고 있음을 보이고 있다.

Fig. 12는 피로파면의 SEM 사진이다. 이 결과에 의하면 같은 반복 변형률 상태에서도 낮은 온도에서의 파면은 연성적인 파괴에서만 볼 수 있는 덩플을 쉽게 찾을 수 있으며 온도의 증가와 더불어 덩플의 수가 점차 감소한다. 특히 온도가 높을수록, 변형률이 커질수록 커진 결정립의 내부에 취성벽개파괴의 특

징인 벽계계단과 피 모양이 일부 나타남을 볼 수 있다.

4.결 론

- (1) Ti-Ni 형상기억합금의 변태점은 조성비에 따라 달라지며, Ni의 함량이 많을수록 변태점은 낮아진다.
- (2) Ti-Ni 형상기억합금의 변형거동과 피로수명은 온도와 Ni 함량에 따라 크게 영향을 받는다. 즉 온도가 높아질수록, Ni 함량이 많을수록 마르텐사이트 유기용력은 높아지며, 피로수명은 저하한다.
- (3) Ti-Ni 형상기억합금의 피로수명은 변형률에 크게 의존한다. R相 변태 이하의 변형률에서는 10^6 이상으로 급격한 수명연장 현상이 나타나나, 마르텐사이트相 변태가 시작되는 변형률 이상의 반복피로에서는 10^4 이하로 피로수명이 급격히 저하한다.
- (4) Ti-Ni 형상기억합금의 피로파괴는 낮은 온도와 부하응력에서는 연성적 파괴 경향을 보이나, 온도와 부하응력의 증가와 더불어 조직의 상변태에 의해 취성적 파괴 경향을 나타낸다.



1. Speed control motor
2. Temperature control unit
3. Heater
4. Specimen
5. Silicon oil
6. Bearing
7. Light sensor
8. Revolution counter
9. Speed control unit
10. Control switch

Fig.1 Schematic of rotary bending fatigue tester for SMA wire.

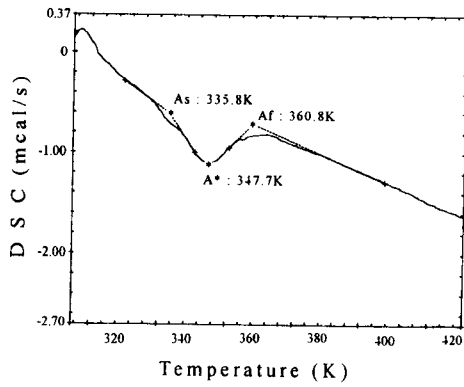


Fig.2 DSC curve measured in Ti-50.0at%Ni wire

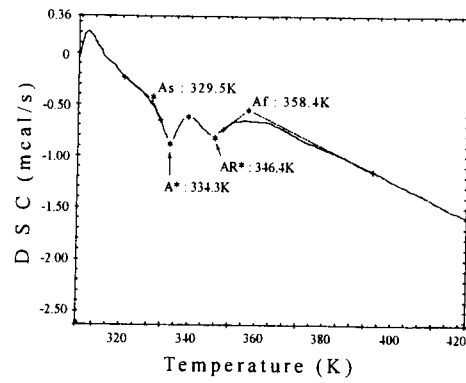


Fig.3 DSC curve measured in Ti-50.5at%Ni wire

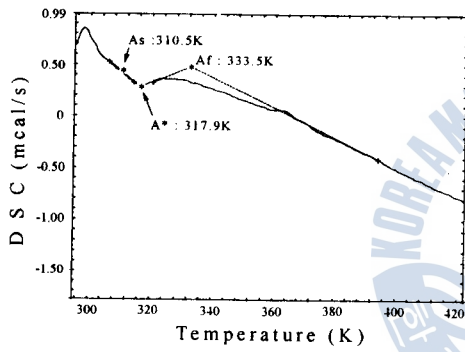


Fig.4 DSC curve measured in Ti-50.85at%Ni wire

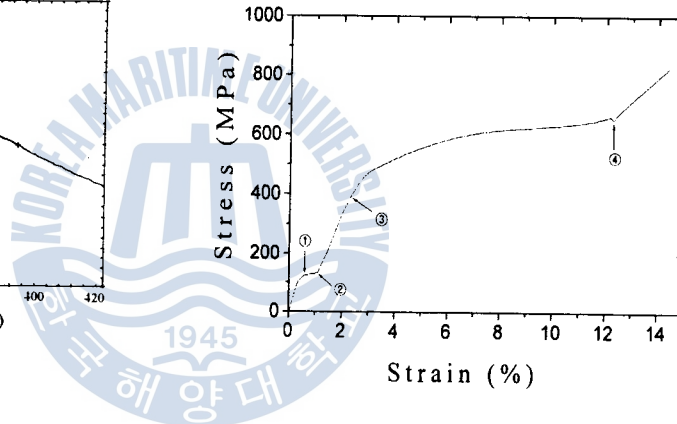


Fig.5 The Stress-Strain curve in the Ti-50.5at%Ni

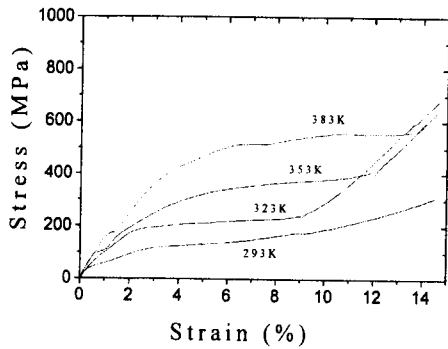


Fig.6 The Stress-strain curve in the Ti-50.0at%Ni

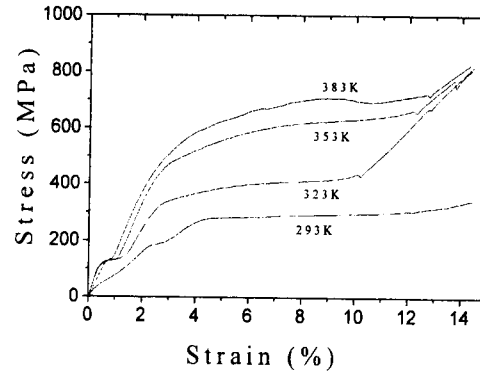


Fig.7 The Stress-Strain curve in the Ti-50.5at%Ni

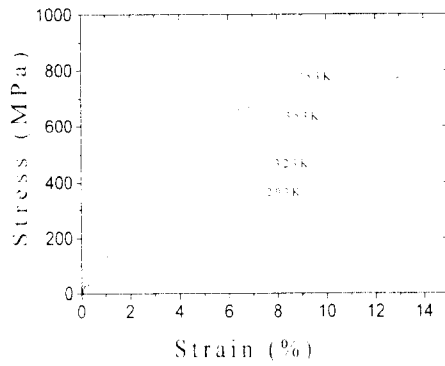


Fig.8 The Stress Strain curve in the Ti-50.85at%Ni

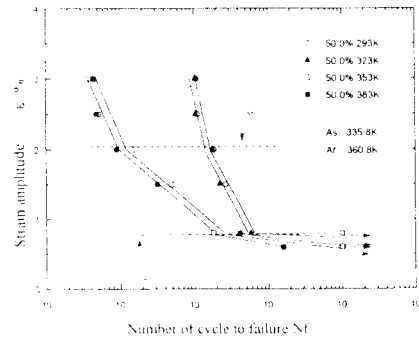


Fig.9 The ϵ -N curve in the Ti 50.0at%Ni

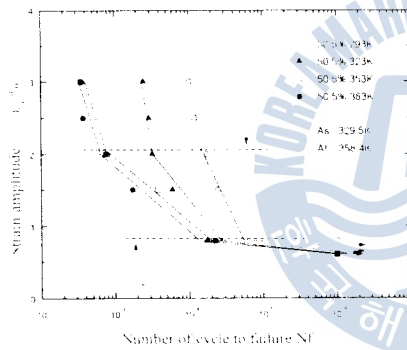


Fig.10 The ϵ -N curve in the Ti 50.5at%Ni

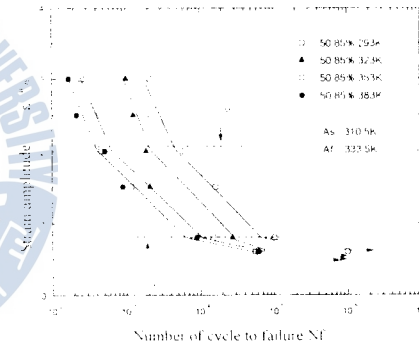
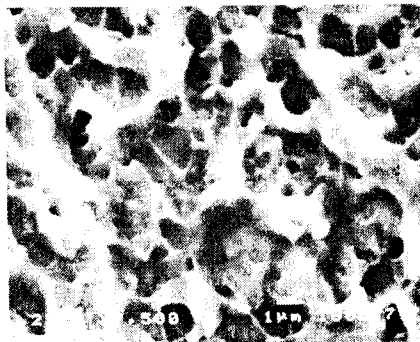
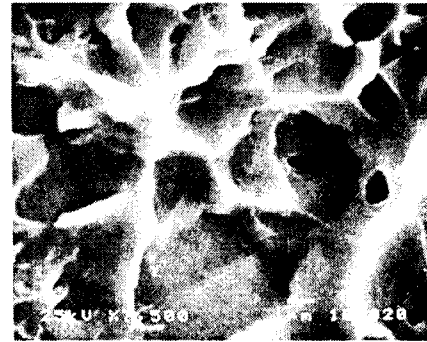


Fig.11 The ϵ -N curve in the Ti 50.85at%Ni



(a) 293K



(b) 383K

Fig.12 The Photomicrograph of fatigue fracture surface in the Ti 50.0at%Ni

참고문헌

- (1) 丹久保 熙康, 形狀記憶合金, 産業圖書, pp24~30, (1984)
- (2) 田中善久, 戶狀壽, 宮崎修一, 形狀記憶合金의 機械的性質, 養賢堂發行, pp30~33, pp129~130, (1993)
- (3) 鈴木雄一, 李根喆, 金龍洙, 實用形狀記憶合金, 機電研究社, pp28~31, (1993)
- (4) 形狀記憶合金開發委員會編輯部, 形狀記憶合金과 그 使用方法, 機電研究社, pp24~25, (1991)
- (5) 金永植, “形狀記憶合金의 熔接과 그 疲勞特性”, 大韓熔接學會 特別講演 및 春季學術發表 概要集, pp5~11, (1997)
- (6) 金永植, “形狀記憶合金의 舉動特性和 그 應用”, 大韓機械學會誌, Vol.37, No.10, pp35~40, (1997)
- (7) 許景喆, 金俗榮, 南泰鉉, “Ti-Ni-Cu 形狀記憶合金의 形狀回復力”, 大韓金屬學會誌 Vol.33, No.10, pp1296~1301, (1995)
- (8) 南泰鉉, 許景喆, 東成洙, “Ti-Ni-Cu 形狀記憶合金의 變態溫度에 미치는 定荷重 熱싸이클의 影響”, 大韓金屬學會誌, Vol.34, No.6, pp665~677, (1996)
- (9) 河光秀, 許信九, 曹圭鳳, 南泰鉉, “加工熱處理한 Ti-Ni-Cu 形狀記憶合金의 形狀回復應力”, 大韓金屬學會誌, Vol.35, No.3, pp288~296, (1997)
- (10) NiTi Properties, “Shape Memory Applications, Inc”, #3 Selected Properties of NiTi, pp18~20, (1997)
- (11) Timoshenko & Young, 材料力學, 文運堂, pp10~13, pp212~216, (1987)
- (12) 鄭隣相, “形狀記憶合金의 實用化에 따른 特性評價法과 最近 開發動向”, 大韓金屬學會會報, Vol.7, No.2, pp123~131, (1994)
- (13) 金鐵煥, 金商周, 金學信, 最新材料科學과 工學, 吉重堂, pp211~218, (1994)
- (14) 李東寧, 材料強度學, 文運堂, pp311~334, (1992)