

## Ti-Ni 형상기억합금의 회전굽힘 피로특성에 관한 연구

A study on the rotary bending fatigue properties of Ti-Ni shape memory alloys

김 영식\*, 김 종호\*, 박 환수\*\*

\*: 한국해양대학교, \*\*: 한국해양대학교 대학원

### 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 평가되어 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 되도 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 형상기억합금으로 직경 1mm 선재(線材)이다. 이러한 선재에서 길이 100mm의 시험편을 절단하고, 산화피막을 제거하기 위하여 에머리지 페이퍼로 기계적 연마를 실시하고 5분간 초음파 세척을 하였다. 그리고 직경 12mm의 투명석영관에  $1 \times 10^{-2}$  Torr의 진공분위기에서 아르곤을 취입하고 봉입하여 673K에서 1시간 동안 어닐링한 후 수중에서 급냉하였다. 열처리가 완료된 시험편은 다시 에머리지페이퍼로 기계적 연마를 하여 산화피막을 제거하고 5분간 초음파 세척을 하였다.

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, 주사형전자현미경에 의해 피로파면을 관찰하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 시험편의 변태거동 및 정적변형거동

Fig. 2는 DSC 측정장치로 무부하상태에서  $\alpha$ 알루미늄 분말을 기준물질로 하여 합금의 변태점을 측정된 결과로서 As점은 335.8K, Af점은 360.6K이다.

Fig. 3은 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 peak에 이른 지점이자 M(Martensite)相이 시작되는 지점으로 생각된다. 그리고 세 번째 변곡점 ③은 M相 변태가 peak에 이른 지점이며, 네 번째 변곡점 ④는 M相 변태가 끝나고 소성변형이 시작되는 지점으로 생각된다.

Fig. 4는 여러 가지 온도에서 측정한 시험편의 stress-strain곡선이다. 여기서 293K와 323K의 결과는 무부하상태에서 마르텐사이트相이며, 353K와 383K의 결과는 무부하상태에서 모상인 B2相이다. 이 결과에 의하면 마르텐사이트相 상태에서는 낮은 응력에서 항복거동이 나타나나, 온도의 상승과 더불어 B2相 상태에서 부하하면 M相 유기응력이 크게 상승함을 보이고 있다.

### 3.2 피로수명과 파면특성

Fig.5는 여러 가지 온도에서 측정된 회전굽힘 피로시험 결과이다. 293K와 323K의 결과는 마르텐사이트相 상태에서, 353K와 383K의 결과는 B2相 상태에서 반복피로하중을 받는 경우로, 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 장수명 영역과 중수명 영역의 경계점은 Fig.3의 R相 변태 peak점이자 M相 변태시작점인 ②지점과 일치함을 보이고 있다. 그리고 중수명영역과 장수명영역의 경계점은 Fig. 3의 R相 변태의 시작점인 ①지점과 일치하고 있다. 따라서 Ti-50.0at% Ni 합금의 경우 R相 변태 시작점 이하의 부하상태에서는 급격한 수명연장 현상이 나타나나, M相 변태가 시작되는 부하 이상의 반복피로하중 상태에서는 매우 짧은 피로수명을 보이고 있음을 보이고 있다.

Fig. 6은 피로파면의 SEM 사진이다. 이 결과에 의하면 같은 반복 변형률 상태에서라도 높은 온도에서 파단된 파면은 cleavage facet 양상을 보이거나, 낮은 온도에서 파단된 파면은 연성적인 dimple 파면양상을 나타냄을 알 수 있다.

### 4. 결 론

- (1) 형상기억합금의 피로수명은 온도변화에 대단히 민감하며, M相에서 보다 B2相 상태에서 반복부하시 피로수명은 현저히 저하한다.
- (2) 형상기억합금의 피로수명은 R相 변태 시작점 이하에서는  $10^6$ 이상의 수명을 보이거나, M相 시작점 이상의 부하상태에서는  $10^4$ 이하로 짧아진다.
- (3) 형상기억합금의 피로파면은 낮은 온도에서는 연성적인 파면거동이 나타나나, 높은 온도에서는 취성적인 파면양상이 나타난다.

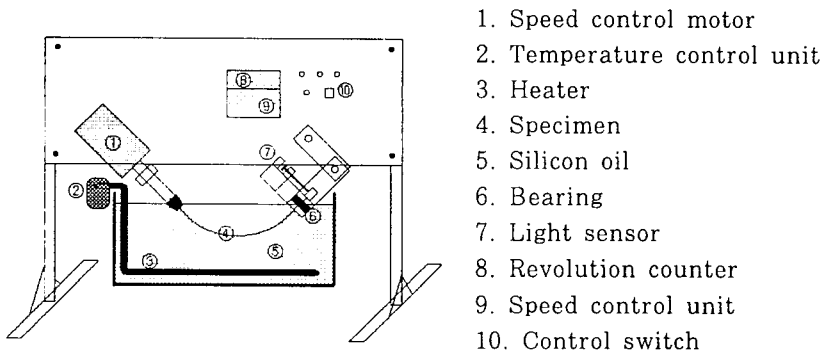


Fig.1 Schematic diagram of rotary bending tester for SMA wire.

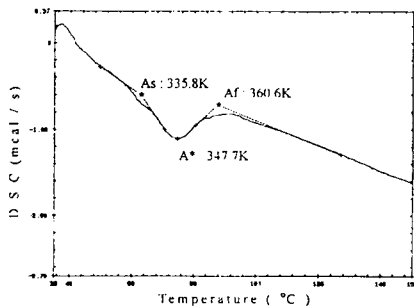


Fig.2 DSC curve measured in Ti-50.0at%Ni wire

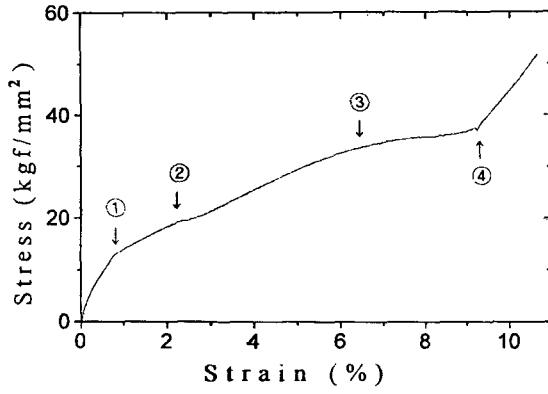


Fig. 3 Stress-Strain curve at 353K

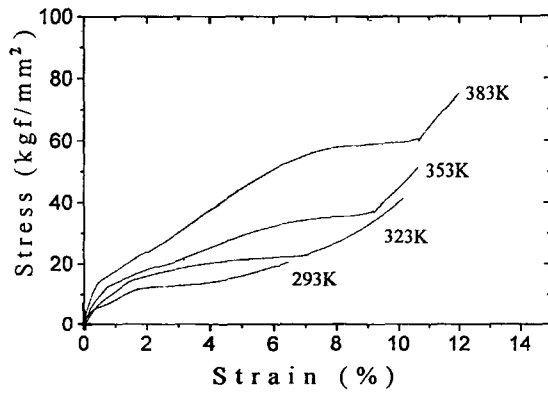


Fig. 4 Stress-Strain curve at various temperature.

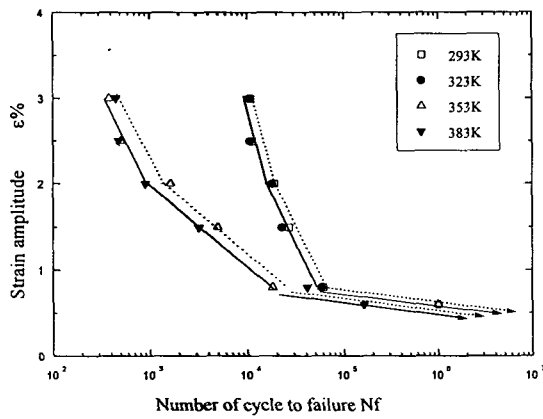
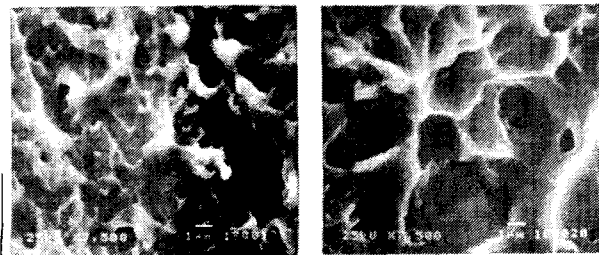


Fig. 5 S-N curve at various temperature.



(a) 293K

(b) 383K

Fig. 6 SEM microphotographs of fatigue fracture surface at 2.5% strain and various temperature(K)