

◎ 論 文

# Ti-Ni 형상기억합금의 반복 변형 거동에 미치는 열처리의 영향

박 영 철\* · 조 용 배\*\* · 오 세 욱\*

(1994년 2월 28일 접수)

## The Effects of Heat Treatment on Cyclic Deformation of Ni-Ti Shape Memory Alloy

Young-Chul Park\* · Yong-Bae Cho\*\* · Sae-Wook Oh\*

**Key Words :** Shape Memory Alloy(형상기억합금), Shape Memory Effect(형상기억효과),  
Martensite Transformation(마르텐사이트 변태), Cyclic Deformation(반복변  
형), Degradation(열화)

### Abstract

In this paper, fatigue testing was carried out under the change of aging time(0.5, 1, 5, 10hrs) by electric heating method which is one of the useful method in the application of Robot's actuator.

Fatigue degradation behaviors such as cyclic deformation property, amount of deformation, decrease in recovery and variation of transformation temperature for each specimen were examined closely, and the effect of aging time condition was studied on their fatigue degradation behaviors.

\* 정희원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\* 정희원, 동아대학교 대학원 기계공학과

+ 본 논문에서는 시효시간을 0.5시간, 1시간, 5시간, 10시간 변화시켜 처리한 시험편을, 로봇트 액츄에이터로 응용시 가장 유용한 방법의 하나인 전기가열 방법으로 피로실험을 행하여, 각 시험편의 반복 변형특성과 반복 사용에 따른 형상변화량, 회복력의 저하, 변태온도의 변화 등과 같은 피로열화 거동을 명확히 규명하고 시효처리 조건의 영향을 검토하였다.

## 1. 서 론

최근, 형상기억합금(Shape memory alloy; SMA)의 독특한 형상기억효과(Shape memory effect; SME) 및 초탄성(Super elasticity)을 이용한 열엔진, 로봇, 인공심장, 펌프 및 그외 각종 액츄에이터 등의 개발에 관하여 많은 연구가 진행되고 있다.<sup>1-4)</sup> 그중에서도 형상기억합금으로 만든 액츄에이터를 사용한 로봇의 경우 구동부분이 형상기억합금 자체만으로 되어 있으므로 모터 또는 유압실린더를 사용한 종래의 로봇에 비하여 구조를 극히 간편화, 경량화 시킬 수 있을 뿐만 아니라, 소음이 전혀 없는 상태로 부드럽게 3차원 작동이 가능하다. 특히, 형상기억합금 자체가 내식성이 우수할뿐만 아니라 온도이외의 환경조건의 영향을 거의 받지 않으므로, 심해, 우주 또는 핵발전 설비 등 극한 환경에서도 사용될 수 있다는 등의 많은 장점을 지니는 로봇을 개발할 수 있다. 그러나, 실제로 형상기억합금을 로봇용 액츄에이터로 실용화 하기 위해서는 해결해야 할 기술적인 문제점이 대단히 많다. 그중에서도 특히 반복사용에 따른 형상기억합금의 피로열화가 가장 큰 문제점이다.

일반적으로 액츄에이터는 장시간 운전을 하기 때문에 많은 반복 동작 사용이 필요하며, 이와 같은 반복적인 가열 냉각 사이클에 의하여 액츄에이터의 형상기억합금은 피로열화를 일으키게 되므로 형상기억합금의 변태온도와 변형거동에 많은 변화가 일어나서 로봇의 정확한 동작제어를 어렵게 한다.

따라서 형상기억합금을 로봇용 액츄에이터로 사용할 경우 반복사용중에 나타나는 변형거동의 변화, 변태온도의 변화 등의 피로열화 거동을 사전에 미리 파악하여 그에 대한 개선 및 대비방안을 사전에 마련하여 두는 것이 매우 중요하다.

형상기억합금의 반복 변형에 따른 피로열화를 개선하기 위한 방안으로는 우선적으로 슬립변형에 대한 임계응력을 높일 수 있는 미세조직을 갖도록 하는 것이 필요하며, 그중 하나의 방법으로 시효열처리에 의한 석출경화가 대단히 유용한 방

법으로 보고되고 있다.<sup>2), 3)</sup>

이와 같이 시효처리가 형상기억합금의 피로열화를 개선시키기 위한 유용한 방법중의 하나로 각광 받고 있지만, 시효처리 조건이 형상기억합금의 피로열화에 미치는 영향에 대한 상세한 연구는 아직 대단히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 형상기억합금을 사용한 로봇용 액츄에이터의 개발에 있어서 가장 문제점으로 지적되고 있는 반복변동에 따른 피로열화 현상을 개선하여 로봇의 정확한 동작제어를 기하기 위해 열처리 시효조건을 변화시킨 시험편을 직접통전가열냉각방식에 의한 피로시험을 행하여, 각 시험편의 반복 변형특성, 변태온도 변화, 피로수명등과 같은 피로열화 거동을 명확히 규명하고 아울러 시효처리 조건이 피로열화 거동에 미치는 효과를 명확히 밝히고자 한다.

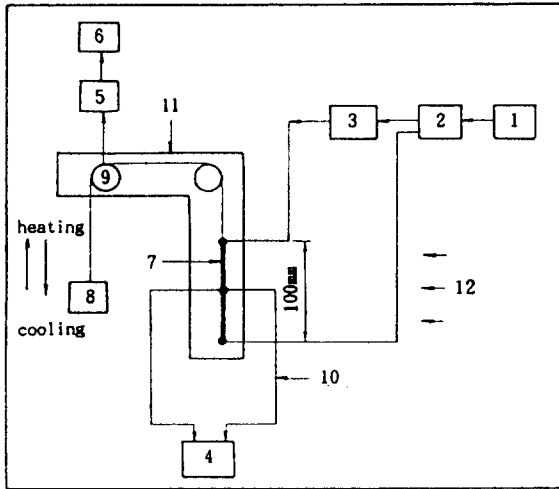
## 2. 재료 및 시험방법

### 2-1. 재 료

본 연구에 사용한 시료는 日本關東特殊鋼(株)에서 제작한 냉간가공한 직경 0.5mm의 Ti-Ni(50.5at%) 합금(Nitinol)와이어(wire)를 사용하였다. 시료의 열처리는 와이어(wire)의 냉간가공시 발생되는 가공잔류응력을 없애기 위하여 진공중(10<sup>-3</sup>torr)에서 1073K의 온도로 1시간 유지한 후, 빙수에서 급냉하여 용체화처리를 하였다. 또한 형상기억효과를 얻기 위한 열처리는 실험목적에 따라 시효처리가 피로열화 거동에 미치는 영향을 상세히 파악하기 위하여 시효처리온도는 673K로 고정하고 시효시간을 0.5시간, 1시간, 5시간, 10시간으로 변화시킨 4종류의 시험편을 준비하였다. 이때 시효열처리는 진공중에서 실시하였으며, 시료내 직선의 형상을 기억시키기 위하여 치구를 사용하여 시료를 직선의 형태로 고정된 상태로 열처리를 수행하였다.

### 2-2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 자체 제작한 열사이클(cycle)피로시험장치의 구성도를 나타내고 있



- |                                 |                       |
|---------------------------------|-----------------------|
| 1 : direct current power supply | 7 : specimen          |
| 2 : timer relay                 | 8 : weight            |
| 3 : counter                     | 9 : displacement gage |
| 4 : digital voltmeter           | 10 : CA thermocouple  |
| 5 : zero supression             | 11 : frame            |
| 6 : X-Y recoder                 | 12 : cooling fan      |

Fig. 1 Diagram of the equipments for the direct current type SMA fatigue test

다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편을 길이 100 mm 로 절단하여 시험편 양끝을 압착단자를 사용하여 양 척에 고정시켰으며 하부의 척은 시험기에 고정시켰으나 상부는 풀리(pulley)를 사용하여 최대한 마찰손실이 없도록 자유롭게 움직일 수 있게 하였다. 시험편의 가열에는 가변식직류정전류장치에 의한 직접통전 가열방식을 이용하였으며, 냉각에는 냉각속도를 빠르게 할 목적으로 팬(fan)을 사용하여 강제 공냉시켰다. 이때 시험편의 온도는 타이머를 사용하여 가열시간 및 냉각시간을 제어하여 조절하였으며, 통전 및 가열사이클의 횟수가 카운터(counter)에 기록되게 하였다.

시험편 변형량의 측정에는 회전식변위계를 사용하였으며 시험편 온도의 측정에는 CA(Chromel-Aluomel)열전대를 사용하였다. 한편, 본 연구에서는 각 시험편의 역변태온도( $A_r$ ,  $A_s$ 점)와 마르

텐사이트 변태온도( $M_s$ ,  $M_r$ 점)의 측정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 X-Y레코드에 출력된 X축의 시험편온도와 Y축의 변형량으로 형성된 히스테리시스곡선(hysteresis loop)을 이용하였다. 또한, 본 연구와 같이 응력을 부하한 상태에서 반복 열사이클 피로시험을 수행하는 경우에는 시험편의 변태온도가 하중조건과 열사이클 반복수에 따라 변화되므로 각 응력 및 일정한 반복수 간격으로 변태온도를 측정하였다.

본 연구의 가열-냉각 열사이클 온도구간으로 냉각 최저 온도는 상온  $20^{\circ}\text{C}$ 로 하였으며 가열 최고 온도는  $A_r$ 온도보다 약  $20^{\circ}\text{C}$ 가 높은  $100^{\circ}\text{C}$ 로 온도구간을 설정하였다. 이와 같은 온도구간을 얻기위한 전류조건은 예비실험을 실시하여 사용 전류를 3.2A, 통전시간을 3sec, 냉각시간을 22sec로 결정하였다.

열사이클 피로실험의 부하응력은 Fig. 3에서 시료의 응력-변형율곡선(stress-strain curve)을 이용하여 탄성구역에 해당하는 94 MPa, 150 MPa과 초탄성 구역의 180 MPa 및 마르텐사이트 경화구역에 해당하는 250 MPa의 4종류의 하중을 선택하였다.

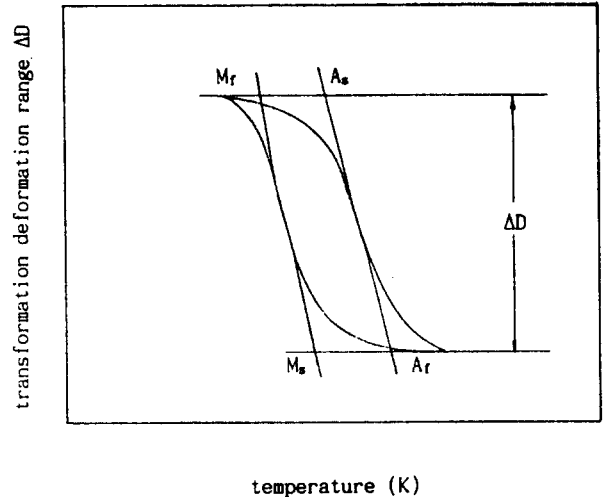


Fig. 2 Temperature-transformation deformation hysteresis loop

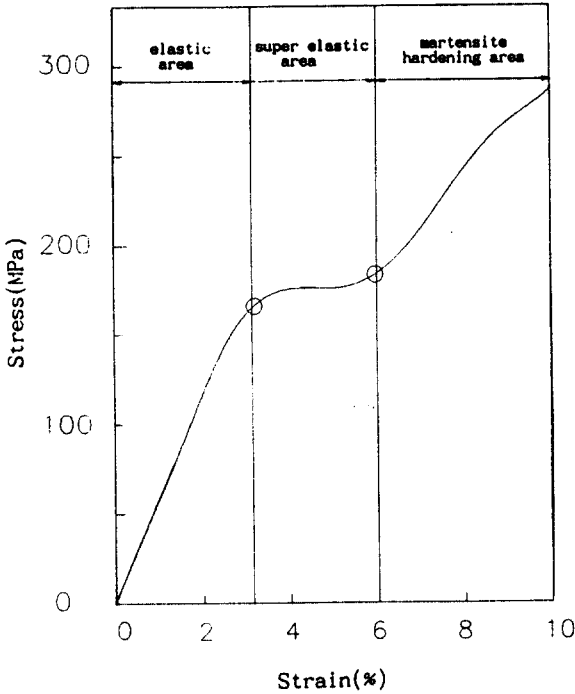


Fig. 3 Stress-Strain curve of Ti-Ni wire

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3-1. 반복변형에 따른 변형량 거동

Fig. 4는 반복 열사이클피로에 따른 변형량 변화거동을 나타낸다. 그림에서 보는 바와 같이, 총 변형량( $\Delta D_{total}$ )은 마르텐사이트 변태에 의하여 발생하는 변태변위량( $\Delta D$ )과 역변태에 의하여 회복될 때 슬립에 의한 소성변형으로 원래의 위치로 돌아오지 않고 영구변형으로 잔존하게 되는 영구 변형량( $\Delta U$ )의 두종류로 구분하였다.<sup>4)</sup> 본 연구에서는 피로열화 거동을 보다 명확히 규명하기 위하여 변형 거동을 이와 같은 두가지 변위량으로 구분하여 각각에 대하여 검토하였다.

##### 3-1-1. 마르텐사이트 변태변위량의 거동

Fig. 5는 각 시편에 대하여 반복 열사이클 피로에 있어서 마르텐사이트 변태변위량의 거동을 검토한 결과이다. 그림에서 종축은 마르텐사이트

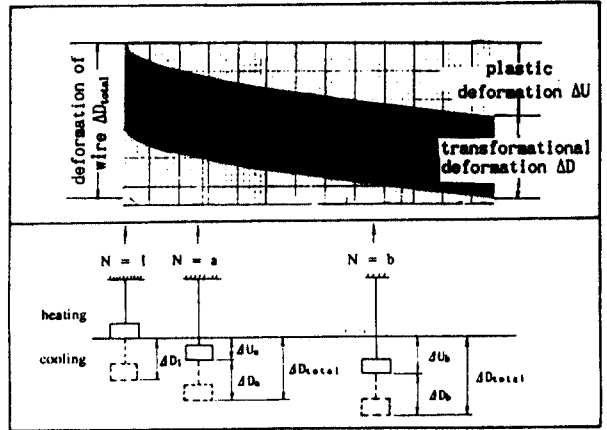
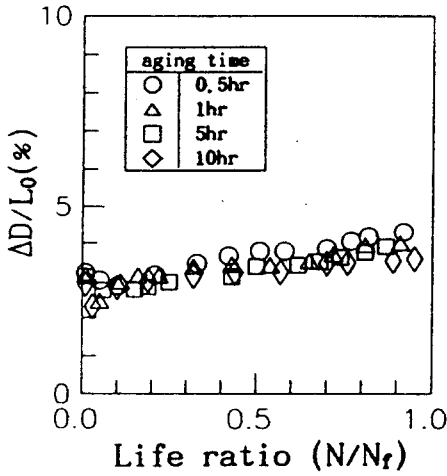


Fig. 4 An example of transformation deformation ( $\Delta D$ ) and elongation of Wire( $\Delta U$ ) of Ti-Ni wire during fatigue test

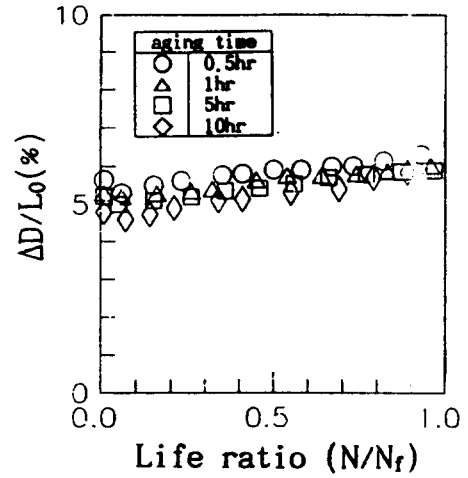
변태변위량  $\Delta D$ 를 원래의 시편 길이  $L_0$ 로 무차원화한  $\Delta D/L_0$ 를, 횡축은 반복수  $N$ 을 과단시 반복수  $N_i$ 로 무차원화한  $N/N_i$  (이하, 수명비)를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이, 저응력레벨에서는 피로수명초기에 변태변위량이 다소 크게 증가하나, 그 이후에는 큰 변화없이 반복수에 따라 일정량 증가하고 있으며 그 피로열화의 정도는 1-2% 정도의 미소한 양으로 나타났다. 또한, 250 MPa인 고응력의 경우에는 거의 모든 피로수명에 걸쳐 거의 변화없이 일정함을 알 수 있고 94 MPa인 저응력에서는 변태변위량의 크기가 현저히 작으며 반복수의 증가에 따라 변형량이 증가하며, 150MPa 이상의 응력이상에서는 거의 일정하거나 고응력에서 오히려 줄어드는 것으로 나타난다.

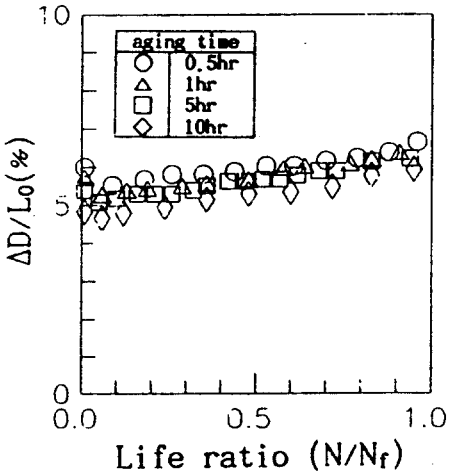
부하응력이 증가하면 변태변위량의 크기가 크게 되지만, 재료자체의 변태변위량의 최대치는 일정하여 그 이상의 변태변위량은 부하응력의 증가로서도 얻을 수 없으며, 오히려 슬립에 의한 소성변형이 커짐으로 인해 역변태에 따른 회복량이 작아지므로 변태변위량의 크기가 줄어드는 것으로 사료된다.



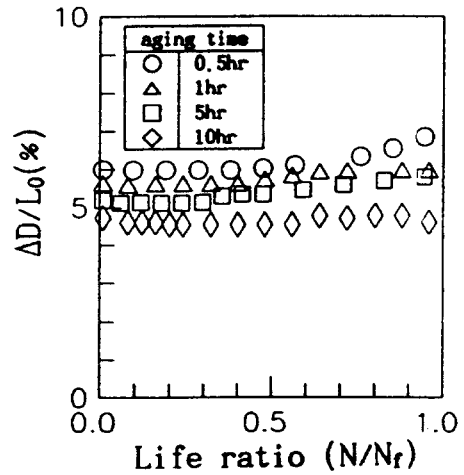
(a) 94MPa



(b) 150MPa



(c) 180MPa



(d) 250MPa

Fig. 5 The relation between degradation factor( $\Delta D/L_0$ ) and life ratio( $N/N_r$ ) for various specimen

Fig. 6은 응력이 180MPa에서 반복 동작중의 변태 변위량  $\Delta D$ 를  $N=1$ 에서의 변태변위량  $D_1$ 에 대해 무차원화한  $\Delta D/D_1$ (규격변위폭)과 수명비  $N/N_r$ 와의 관계를 검토한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이, 시효열처리에 의해 변태변위량은 변화하며 모든 시편이 수명비  $N/N_r=0.1$ 에서 변태변위량이 가장 작고, 이후 일정량 증가하고 있음을 보이며, 시효시간이 긴 순서로 변태변위량의

피로열화가 줄어드는데, 0.5 시간 시효처리한 시편을 제외하고는 피로열화가 매우 적게 나타난다. 이와 같이 시효시간이 변태 변위량에 영향을 미치는 것은, 시효처리에 따른 석출물의 영향으로 마르텐사이트변태가 안정화되기 때문이라고 사료되며, Photo1에서 보는 바와 같이 시효시간이 길수록 석출물의 양이 증가하고 있는 것을 볼 수 있다.

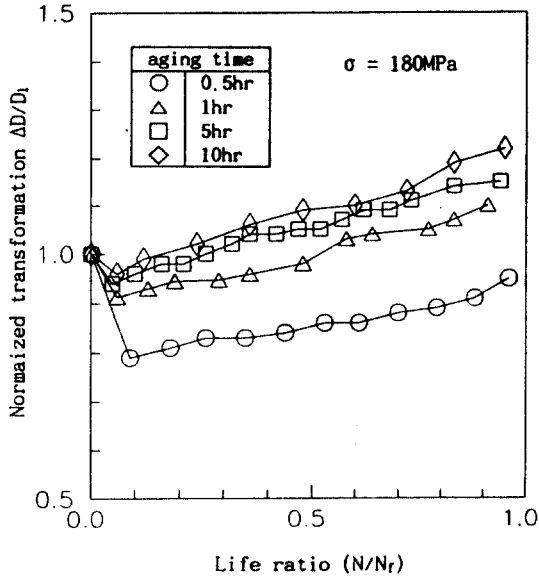


Fig. 6 The relation between degradation factor ( $\Delta D/D_1$ ) and life ratio ( $N/N_r$ ) on aging time at 180MPa

이상과 같이 변태변위량의 변화에 미치는 시효 처리의 영향에 대하여 검토하여 본 결과 변태변위량은 초기수명에서 약간의 열화를 나타내지만 이후 일정해 지는데 그 피로열화 정도는 매우 미소한 양이며, 시효시간이 길수록 변태변위량은 작지만 피로열화가 적게 나타나 우수한 피로특성을 나타내었으며, 변태변위량의 열화는 시효시간을 길게 하면 피로열화는 크게 방지할 수 있음을 알 수 있었다.

### 3-1-2. 영구변형량( $\Delta U$ )의 거동

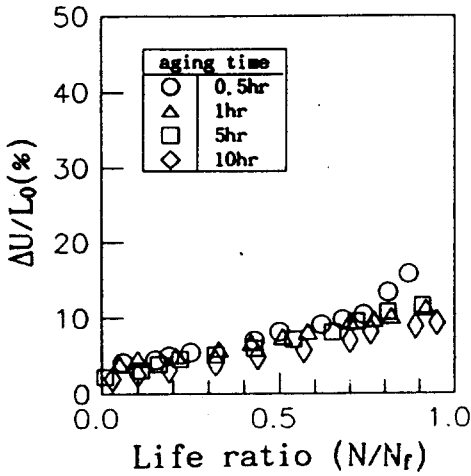
Fig. 7은 각 시편에 대하여 반복 열사이클피로에 있어 슬립변형으로 인하여 원래의 위치로 형상회복되지 않는 영구변형량( $\Delta U$ )의 거동에 대하여 검토한 결과이다. 그림에서 종축은  $\Delta U$ 를 원래의 시편 길이  $L_0$ 로 무차원화한  $\Delta U/L_0$ 이고, 횡축은 수명비( $N/N_r$ )를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이, 영구변형량은 전피로수명에 걸쳐서 직선적으로 증가를 보이고 있으며, 마르텐사이트변태변형량에 비하여 그 피로열화가 대단히 크며 시효시간이 길수록 영구변형량의 열화가

감소하고 있음을 알 수 있다. 이것은 초기에 도입된 전위가 반복 사용에 따라 밀집하여 슬립임계응력을 높이고 이후 전위의 도입을 어렵게 하므로 수명초기 이후 영구변형량의 증가가 완만해지는 것이며, 시효시간이 길수록 미세한 석출물들이 많이 생겨나고, 이러한 석출물들의 미세조직은 일종의 가공경화의 효과를 가져와 슬립에 의한 소성변형을 억제하므로 영구변형량의 크기가 작게 되는 것으로 판단된다.

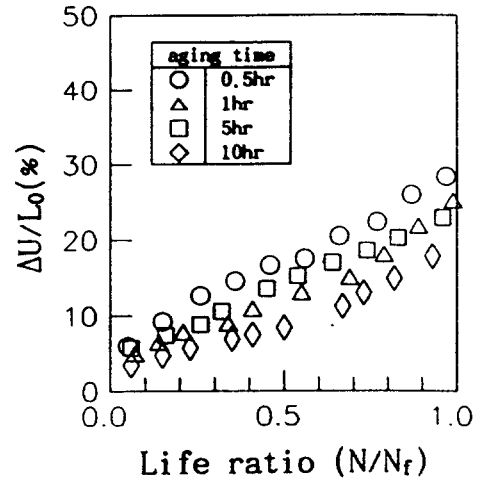
한편, 영구변형량에 미치는 부하응력의 영향을 검토하여 보면 영구변형량은 슬립에 의한 소성변형이 영구변형으로 잔존하게 되는 것이므로 부하응력의 영향을 매우 크게 받는데, 그림에서 나타난 것과 같이 고응력으로 갈수록 슬립에 의한 소성변형이 커지므로 영구변형량의 피로열화 정도가 커짐을 알 수 있다.

이상의 결과로 부터, 영구변형량은 전체 피로수명을 통하여 큰 피로열화를 보이고 수명의 초기에 피로열화가 현저하다는 것을 알 수 있다. 그리고 이러한 영구변형량은 부하응력의 영향을 크게 받는 것으로 나타났는데, 정량적으로 검토하여 보면 고응력의 경우 피로열화 정도는 50% 정도로 피로열화 정도가 크다는 것을 알 수 있고, 시효시간이 길어질수록 피로열화 정도가 크게 감소함을 알 수 있었다.

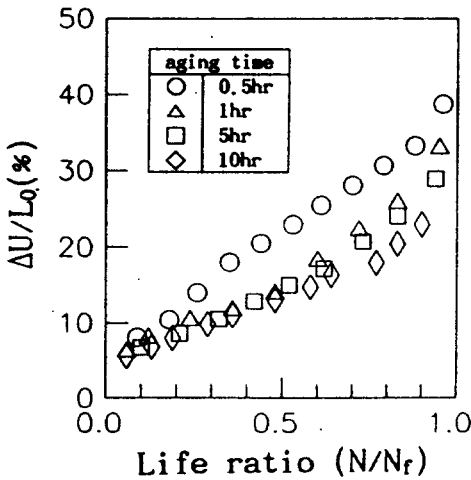
이상 열사이클에 의하여 형상기억합금의 변형 거동에 대하여  $\Delta D$ 와  $\Delta U$ 의 두 인자로 분리하여 정량적인 측면에서 검토하여 본 결과,  $\Delta D$ 의 피로열화 정도는 실제 약 1-2%의 대단히 작은 양으로 거의 피로열화가 나타나지 않는 반면,  $\Delta U$ 는 94MPa의 저응력에서 약 8-10% 그리고 150MPa 이상의 고응력에서는 20-50% 정도의 큰 피로열화를 보이고 있어 실제 형상기억합금에서 피로열화의 주인자가  $\Delta U$ 임을 알 수 있었다.<sup>5)</sup> 그리고 시효처리시간이 길수록 형상기억합금의 피로열화를 상당히 개선할 수 있음을 알 수 있는데, 본 실험에서는 10시간 시효처리 시편의 경우 고응력에서 형상기억합금의 피로열화의 주인자인  $\Delta U$ 의 피로열화 정도를 약 10-20% 정도까지 감소시킬 수 있음을 알 수 있었다.



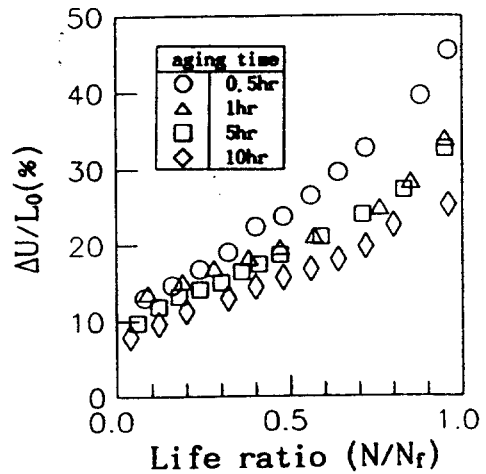
(a) 94MPa



(b) 150MPa



(c) 180MPa



(d) 250MPa

Fig. 7 The relation between degradation factor( $\Delta U/L_0$ ) and life ratio( $N/N_r$ ) for various specimen

3-1-3. 완전변태시의 변형량 거동

Fig. 8은 형상기억합금을 완전변태 시켰을 때 피로수명에 따른 변태변위량의 거동과 영구변형량의 변화를 검토한 결과이다. 앞의 Fig. 5, Fig. 7과 비교해 보면, 완전히 변태시킨 경우가 변태변위량은 약간 크나 영구변형량의 피로열화가 매우

크게 나타나 실온의 분위기에서 피로실험을 행한 시편에 비해 나쁜 피로특성을 보인다. 이것은 완전변태시에 따른 변형량이 커지는데다 변태를 위한 온도구간이 커짐으로 인한 열응력의 영향이 조합되어 나타난 결과로 사료된다. 그리고 각각 피로수명에 따른 피로거동은 실온의 경우와 유사

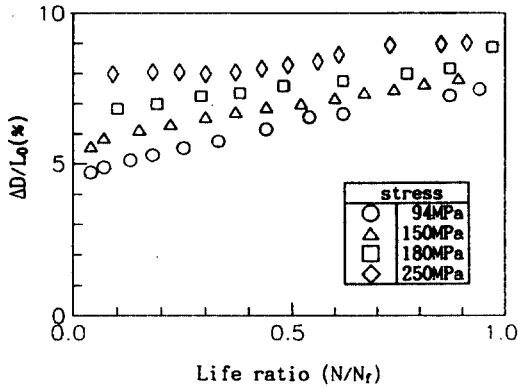
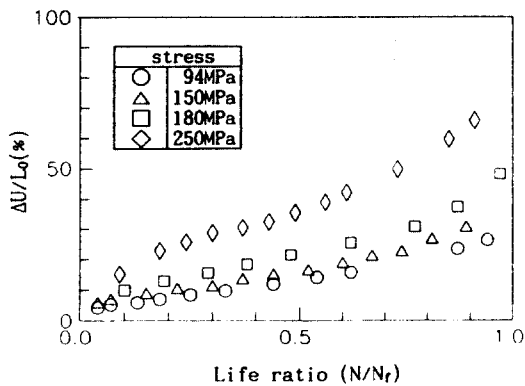
(a)  $\Delta D/L_0$ (b)  $\Delta U/L_0$ 

Fig. 8 The relation between degradation factor ( $\Delta D/L_0$ ,  $\Delta U/L_0$ ) and life ratio ( $N/N_r$ )

하게 나타남을 알 수 있다.

이상, 형상기억합금의 반복동작에 따른 변형량의 피로열화를 검토한 결과, 형상기억합금에서 변형량의 피로열화는 Fig. 6에서 보는 바와 같이 수명의 초기에서 현저히 나타나므로 재료를 사용하기 전에 초기수명  $N/N_r=0.1$  정도의 사이클을 training한 후 사용하면 피로열화를 줄일 수 있을 것으로 예측할 수 있으며 반복 동작에 따른 피로열화는 슬립에 의한 소성변형이 주원인인 것으로 나타났는데, 이는 시효처리로써 피로열화 정도를 개선하는데 상당히 효과적임을 알 수 있었다. 또한 재료를 완전히 변태시키지 않고 반복변형을 가하면 변태변위량의 크기는 약간 줄어들지만

영구변형량의 피로열화가 크게 감소하여 우수한 피로특성을 나타냄을 알았다.

### 3-2. 반복변형에 따른 변태온도의 변화

Fig. 9는 각 부하응력에서의 피로 수명비( $N/N_r$ )에 따른 변태 온도  $M_s$ ,  $A_r$ 의 변화를 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이  $M_s$ 와  $A_r$ 는 반복수가 증가함에 따라 점점 저하함을 알 수 있다. 이와 같이 변태온도가 반복수의 증가에 따라 감소하는 것은

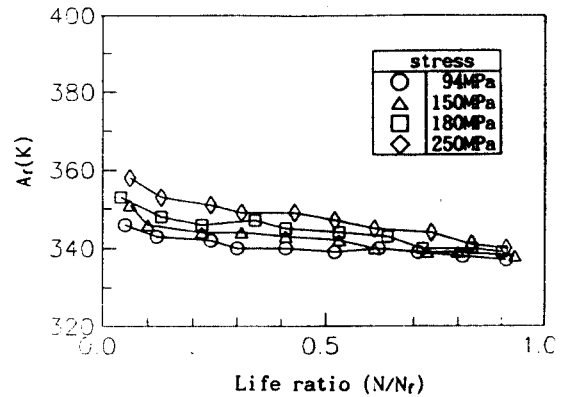
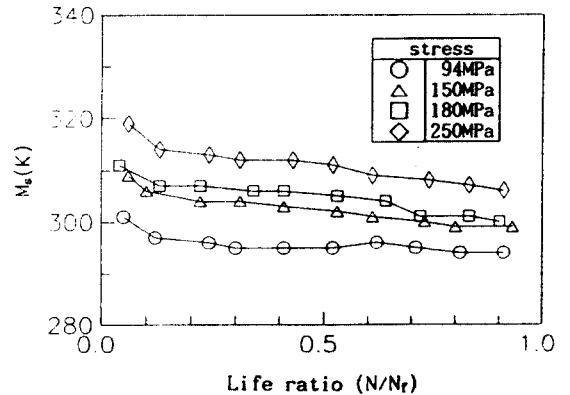
(a)  $A_r$ (b)  $M_s$ 

Fig. 9 The behavior of inverse transformation finish temperature  $A_r$  and martensite transformation start temperature  $M_s$  with thermal fatigue cycle at aging time of 1hr



전위가 사이클의 반복시에 도입되어 전위의 밀도가 증가하고 전위에 의해 형성된 응력장은  $M_s$ 와  $A_f$ 를 감소시켜 결국 마르텐사이트 변태를 억제하기 때문인 것으로 사료되며,<sup>(6), (7), (8)</sup> 이것은 열사이클의 반복시에 생긴 가공경화 때문에 사이클이 증가할수록 전위의 도입을 더욱 어렵게 하고 초기 반복 과정중에  $A_f$ 와  $M_s$ 가 급속히 감소하다가 후반으로 갈수록 완만하게 변한다는 사실과 일치하며 전위에 의해 형성된 응력장이 열사이클의 반복에 의한 영향을 받는 것을 알 수 있다.

Fig. 10은 부하응력에 따른 변태온도  $A_f$ 와  $M_s$ 의 변화를 정량적으로 검토한 결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 부하응력이 증가할수록  $A_f$  및  $M_s$ 가 서서히 증가함을 알 수 있고, 시효열처리 유지시간에 따라  $A_f$ 와  $M_s$ 가 변화 하지만  $A_f$ 보다  $M_s$ 에 더 큰 영향을 주어 시효열처리 유지시간이 길수록  $M_s$ 가 높아짐을 알 수 있다. 이것은 시효열처리 유지시간이 길어지면  $Ti_3Ni_4$  등의 석출이 현저하게 되어 기지의 Ni 농도가 감소하여  $M_s$  온도가 상승하는 것으로 사료된다.

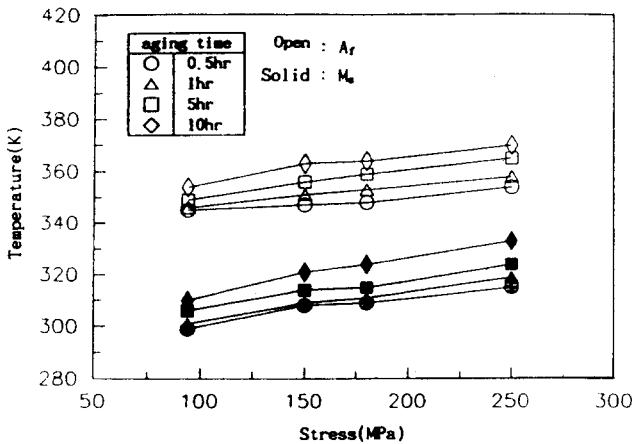


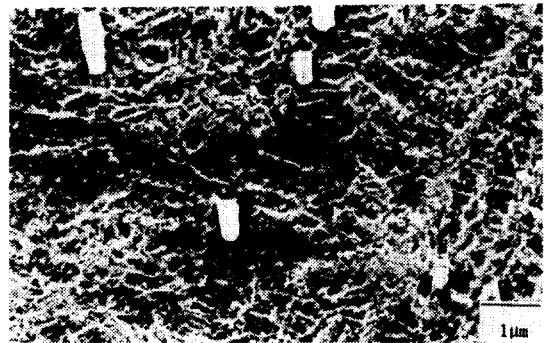
Fig. 10 Effect of tensile stress on transformation temperature

3-3. 조직관찰 및 피로수명

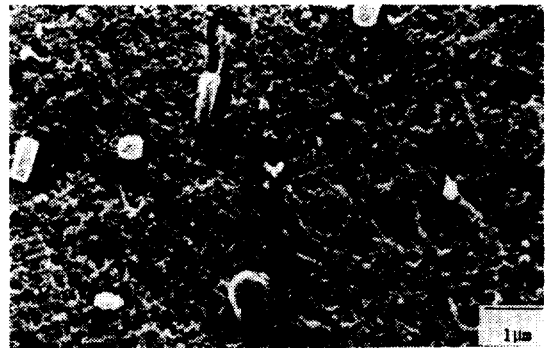
photo 1은 시효시간이 다른 시험편과 파단전, 후의 조직 사진이다.



(a) Original specimen(0.5hr)



(b) Original specimen(10hr)



(c) Fractured specimen(10hr)

Photo 1. S.E.M. of Ti-Ni Shape Memory Alloy

사진에서 기지조직은 TiNi이고 미세한 석출물은  $Ti_3Ni_4$ 로 사료되며,<sup>(3), (9), (10), (11)</sup> 이와 같은 석출물들은 시효열처리 유지시간이 길수록, 그리고 반복수가 증가 할수록 많아지는 것을 관찰할 수 있다.

이러한  $Ti_3Ni_4$  석출물들은 고밀도 전위들과 마찬가지로 열사이클의 피로열화를 억제하는데 대단히 효과가 있으므로<sup>3)</sup> 장시간 시효열처리에 의하여 보다 많은  $Ti_3Ni_4$ 를 석출시킨 시험편일수록 반복 변형특성의 피로열화는 더욱 개선되어 질 것으로 사료되며, 이것은 Fig. 7의 연구결과와 잘 일치하고 있는 것을 알 수 있다.

Fig. 11은 각 시험편에 대한 S-N곡선을 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 응력과 파단수명은 직선관계를 유지하고 있으며, 시효시간이 큰 재료일수록 피로수명이 우수하게 나타난다. 이는 앞에서 검토한 변형량거동과 밀접한 관계가 있는데 시효시간이 길수록 변태변위량의 크기와 소성 변형에 의한 연신이 작아 시험편의 피로수명이 증가하는 것으로 판단된다. 그리고 실온에서 역변태 완료온도( $A_f$ )까지의 온도구간으로 피로실험을 행한 시험편이 드라이아이스 분위기로 마르텐사이트 변태 완료온도( $M_f$ )에서 역변태 완료온도( $A_f$ )까지 완전히 변태시킨 시험편보다 피로수명이 증가하는 것으로 나타났는데, 이도 변형량 거동의 검토 결과와 잘 일치하고 있다.

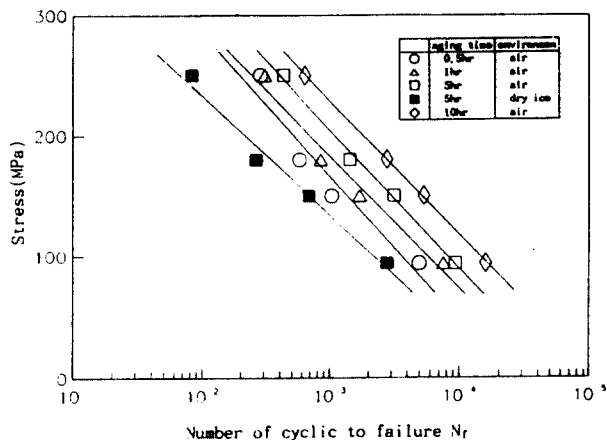


Fig. 11 The relation between tensile stress and number of cycles to failure

## 4. 결 론

본 논문에서는 시효시간을 변화시켜 처리한 시험편을 로보트 액츄에이트 응용시 가장 유용한 방법의 하나인 전기 가열 방법으로 피로실험을 행하여, 각 시험편의 반복 변형 특성과 반복 사용에 따른 형상변화량, 회복력의 저하, 변태온도의 변화 등과 같은 피로열화 거동을 명확히 규명하고 시효처리 조건의 영향을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 형상기억합금의 반복변형에 따른 피로열화의 주인자는 형상회복저하량( $\Delta U$ )이었으며, 시효시간이 길수록 석출물에 의한 양호한 내부구조를 형성하여 피로열화를 현저히 감소시킬 수 있었다.
- (2) 부하응력이 작용하는 경우, 재료를 완전히 변태시키지 않아도 변태변위량( $\Delta D$ )의 크기에는 큰 차이가 있으며, 이에 반해 피로열화의 현격한 감소를 가져오고 피로수명 면에서 우수함을 보였다.
- (3) 반복변형으로 인한 가공경화 현상으로 내부 전위밀도가 증가하여, 변태온도  $A_f$  및  $M_s$ 는 감소하였다.
- (4) 형상기억합금의 피로수명은 변형량의 피로열화와 밀접한 관련이 있으며, 시효처리 시간이 길어질수록 변태변형량은 적지만 긴 피로수명을 보였다.

## 후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심과제 연구비 지원(과제번호 911-0907-023-2)으로 수행된 연구결과와 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 1) 鈴木雄一, “實用形狀記憶合金”, 機電研究社, pp. 119-121, 1989
- 2) 舟久保, 熙康, “形狀記憶合金”, 産業圖書, pp. 157-161, 1984

- 3) T.W. Duerig, K.N.Melton 외 2명, "Engineering aspects of shape memory alloys", Butterworth-Heinemann, pp. 394-413, 1990
- 4) 古屋泰文, 島田平八, 松本 實, 本間敏夫, "Ti-Ni 形状記憶合金ワイヤーの繰返し變形動作特性と劣化", 日本金屬學會誌, 第52卷, 第2號, pp. 139-143, 1988
- 5) 古屋泰文, 三塚賢一 외 2명, "Ti-Ni 形状記憶合金の溫度變化の伴う繰返し變形特性と劣化・壽命評價", 第3回新素材及びその製品の非破壊評價ツソポゾウム, pp. 53-58, 1990
- 6) 栗林勝利, "形状記憶合金を使つたマイクロロポット", 日本金屬學會誌, vol. 8, pp. 85-89, 1989
- 7) Ridgway banks, "Nitinol heat engines", Shape Memory Effect in Alloys, Plenum Press, pp. 537-546, 1975
- 8) 鈴木雄一, "實用形状記憶合金", 機電研究社, pp. 119-121, 1989
- 9) 見沼亮介, 松本實, 本間敏夫 "Ni過剰TiNi合金における時効過程の金相學的研究" 日本金屬學會誌, 第43卷2號, pp. 149-158, 1987
- 10) 佐分利 敏雄, "ニッケル・チタン系形状記憶合金の開発研究の現状" 日本金屬誌, pp. 11-18, 1989. 8月
- 11) M.Nishida, C.M.Wayman, and T.Honma, "Precipitation Processes in Near-Equiatomic TiNi Shape Memory Alloys", Metallurgical Transactions A, Vol. 17A, pp. 1505-1515, 1986