

Ti-Ni합금의 반복변형특성에 미치는 pre-strain의 효과

박 영 철* · 조 용 배** · 허 선 철***

(95년 1월 26일 접수)

The Effect of Pre-strain on Cyclic Deformation Characteristic of Ti-Ni Alloy

Young-Chul Park* · Yong-Bae Cho** · Sun-Chul Hue***

Key Words : Shape Memory Alloy(형상기억합금), Shape Memory Effect(형상기억효과), Martensitic Transformation(마르텐사이트 변태), Cyclic Deformation(반복변형), Degradation(열화)

Abstract

In SMA(Shape Memory Alloy), the degradation by fatigue is one of the most important problems to be overcome, when SMA is used for robot-actuator materials.

The actuator is operated repetitively for long time and its repeating operation develops the fatigue degradation of SMA. The fatigue degradation changes the transformation temperature and deformation behavior and results in inaccurate operation control of robot.

Accordingly, the changing behavior of transformation temperature and deformation which results from repeating operation is to be investigated in advance and the scheme to resolve those problems have to be made for the design of actuator.

In this paper, for the improvement of the fatigue degradation by repetitive movement and better control of the correct movement by the stability of martensite transformation in the development of Robots actuator, Pre-strain(0, 1.5, 5, 8%) are loaded in the specimens and fatigue testing were carried out by the method of heating and cooling in direct condition. From the results of these experiments, the effects on pre-strain which affect the transformation characteristic and fatigue degradation phenomena were correctly investigated

* 정희원 동아대학교 공과대학 기계공학과

** 정희원 동아공업고등학교 기계과

*** 동아대학교 대학원 기계공학과

1. 서 론

공업의 발전이 가속화 됨에 따라서 금속재료는 더욱 다양한 성질이 요구되고 있다. 새로운 금속 재료의 개발은 이러한 시대적 요청에 따라서 종래 금속재료의 성질을 개량하여 극한 상황에서도 사용될 수 있는 재료를 만들거나, 또는 새로운 성질을 찾는 것으로 진행되고 있다. 형상기억합금(shape memory alloy: SMA)은 후자에 해당하는 것으로, 저온에서 변형을 받은 재료를 어느 특정한 온도 이상으로 가열하게 되면 원래의 형상으로 되돌아가는 형상기억효과(shape memory effect : SME)를 지니고 있다.^{1),2),3)}

이러한 기능을 가진 형상기억합금으로 만든 액츄에이터를 사용한 로봇의 경우 구동 부분이 형상기억합금 자체만으로 되어 있으므로 모터 또는 유압실린더를 사용한 종래의 로봇에 비하여 구조를 극히 간편화, 경량화 시킬 수 있을 뿐만 아니라, 소음이 전혀없는 상태로 부드럽게 3차원 작동이 가능하며, 특히 Ti-Ni계 형상기억합금 자체가 내식성이 우수할 뿐만 아니라 온도이외의 환경조건의 영향을 거의 받지 않으므로 심해, 우주 또는 핵발전 설비 등 극한 환경에서도 사용될 수 있다는 등의 많은 장점을 지니는 로봇으로 개발할 수 있다.⁴⁾ 그러나, 실제로 형상기억합금을 로봇용 액츄에이터로 실용화 하기 위해서는 해결해야 할 기술적인 문제점이 대단히 많다. 그 중에서도 특히 반복사용에 따른 형상기억합금의 피로 열화가 가장 큰 문제점이다.

일반적으로 액츄에이터는 장시간 운전을 하기 때문에 많은 반복동작이 필요하며 이와 같이 반복적인 가열 냉각 사이클에 의하여 액츄에이터로 이용되는 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 변화등 피로열화 거동을 사전에 미리 파악하여 이에 대한 개선 및 대비방안을 사전에 마련하여 두는 것이 매우 중요하다.

형상기억합금의 반복변형에 따른 피로열화를 개선하기 위한 방안으로 프리스트레인(pre-strain)에 의한 트레이닝(training)처리가 대단히 유용한 방법으로 보고되고 있지만^{2),5)} 프리스트레인의 부가에 의해 형상기억합금의 피로열화를 개선시키기 위한 상세한 연구는 아직 대단히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 형상기억합금을 사용한 로봇용 액츄에이터의 개발에 있어서 가장 문제점으로 지적되고 있는 반복동작에 따른 피로열화 현상을 개선하여 로봇의 정확한 동작제어를 기하기 위해 프리스트레인을 변화시킨 시험편을 직접 통전 가열-냉각방식에 의한 피로시험을 수행하여, 각 시험편의 반복변형 특성, 변태온도 변화, 피로수명 등과 같은 피로열화 거동을 명확히 규명하고자 한다.

2. 재료 및 실험방법

2-1. 재료

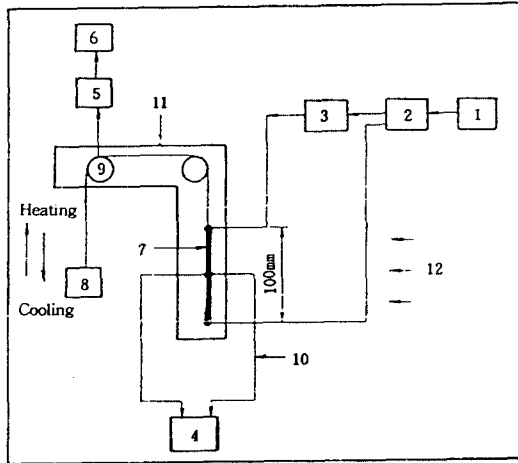
본 실험에서 사용한 시험편은 냉간가공한 日本關東特殊鋼(株) 제품으로 직경 0.5mm인 Ti-Ni_{50.5at.%} 형상기억합금 와이어(wire)이다. 시험편의 열처리 는 냉간가공시에 발생된 가공 잔류응력을 제거하기 위하여, 진공(10^{-3} torr)중에서 1073K의 온도로 1시간 동안 유지한 후 얼음물에 급랭하였으며, 직선으로 형상기억처리를 하기 위하여 먼저 치구를 사용하여 시험편을 직선의 형상으로 고정된 후, 진공중에서 673K의 온도로 1시간동안 유지한 후, 얼음물에 급랭시켰다.

2-2. 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 자체 제작한 열사이클 피로시험 장치의 구성도를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 시험편을 길이 100mm로 절단하여 시험편 양끝을 압착단자를 사용하여 양 척에 고정시켰다. 하부의 척은 시험기에 고정시켰으며 상부는 풀리(pulley)를 사용하여 최대한 마찰손실 없이 자유롭게 움직일 수 있게 하였다. 시험편의 가열에는 가변식 직류 정전류장치에 의한 직접 통전 가열방식을 이용하여 가열하였으며, 냉각에는 냉각속도를 빠르게 할 목적으로 팬(fan)

을 사용하여 강제 공랭시켰다. 이때 시험편의 온도는 타이머를 사용하여 가열시간 및 냉각시간을 제어하여 조절하였으며, 가열 및 냉각 사이클의 횟수가 카운터(counter)에 기록되게 하였다.



- 1 : Direct current power supply 2 : Timer relay
 3 : Counter 4 : Digital voltmeter 5 : Zero suppression
 6 : X-Y recorder 7 : Specimen 8 : Weight
 9 : Displacement 10 : CA thermocouple 11 : Frame
 12 : Cooling fan

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

시험편의 변형량 측정에는 회전식 변위계를 사용하였으며 시험편 온도의 측정에는 CA(Chromel-Alumel)열전대를 사용하였다.

각 시험편의 역변태온도(A_r , A_s)와 마르텐사이트 변태온도(M_r , M_s)의 측정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 X-Y레코더에 출력된 X축의 시험편온도와 Y축의 변형량으로 형성된 히스테리시스곡선(hysteresis loop)의 접선법을 이용하여 측정하였다. 또한, 본 연구와 같이 일정응력을 부하한 상태에서 반복 열사이클 피로시험을 수행하는 경우 시험편의 변태온도는 응력부하 조건과 열사이클 반복회수에 따라 변화되므로 각 응력 조건에서 일정한 반복회수 간격으로 변태온도의 변화를 측정하였다.

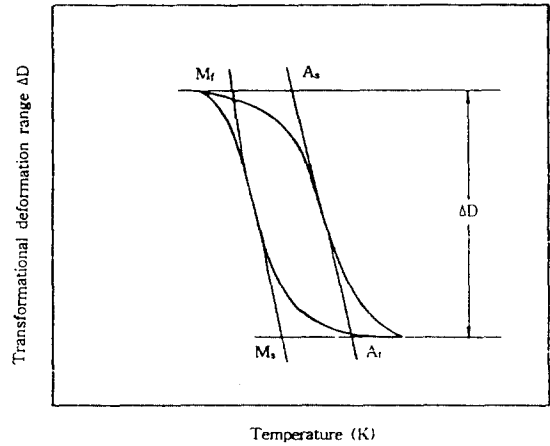


Fig. 2 Hysteresis loop of temperature-transformation deformation.

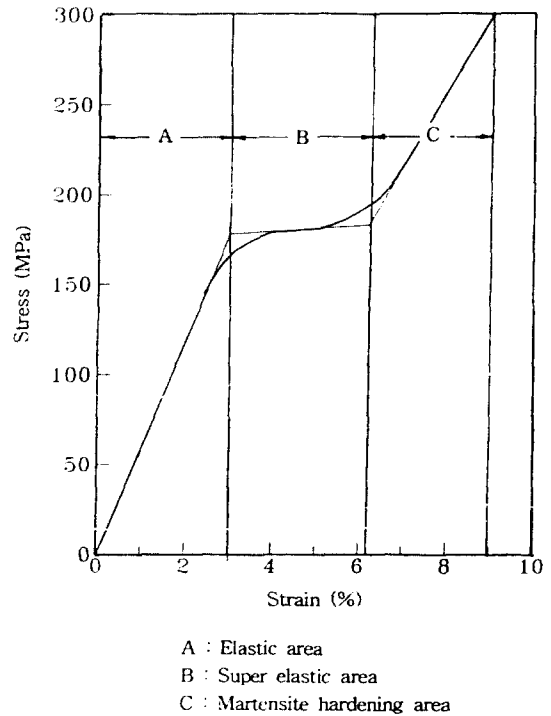


Fig. 3 Stress-strain curve of Ti-Ni wire with pre-strain 0% specimen.

본 연구의 가열-냉각 열사이클 온도구간으로 냉각 최저온도는 상온인 20℃로 하였으며, 가열 최고온도는 형상기억합금의 A₁온도보다 약 10℃가 높은 100℃로 온도구간을 설정하였고, 이와 같은 온도구간을 얻기 위한 통전조건은 전류를 3.2A, 통전시간을 3sec, 냉각시간을 22sec로 하였다.

열사이클 피로실험시의 부하응력은 Fig. 3의 응력-변형률곡선(stress-strain curve)을 이용하여 탄성구역에 해당하는 94MPa, 150MPa과 초탄성구역의 180MPa 및 마르텐사이트 경화구역에 해당하는 250MPa의 4종류의 하중을 선택하였으며 프리스트레인의 부가도 탄성구역의 1.5%, 초탄성구역의 5%, 마르텐사이트 경화구역의 8%를 선택하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

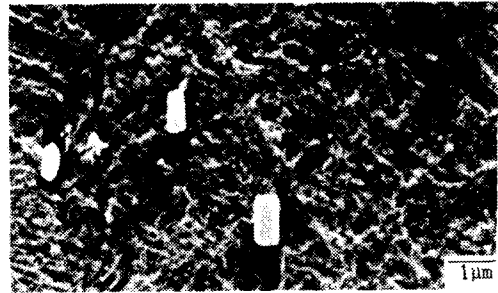
3-1 반복동작에 따른 변형량 거동

Photo 1의 (a)는 프리스트레인과 열피로를 부가하지 않은 원시험편이며 (b)는 cycle의 증가로 파단한 시험편의 전자현미경(Scanning Electron Microscope; S.E.M.) 조직사진이다.

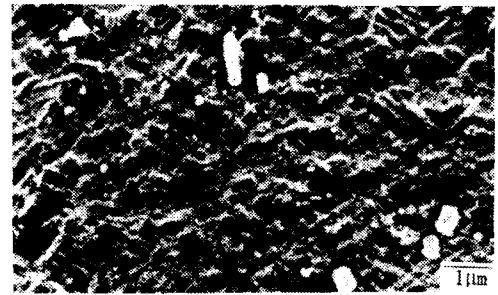
사진에서 기저조직은 TiNi이고 미세한 석출물은 Ti₁₁Ni₁₄로 생각되며,^{2),(6),(7),(8)} 이와 같은 석출물들은 cycle의 증가로 인해 많아지는 것을 관찰할 수 있다.

佐分利 敏雄⁷⁾, Nishida⁸⁾의 연구결과에 의하면 50.5at.% Ni-Ti합금은 시효열처리에 의하여 생성되는 석출물이 시효열처리 온도에 따라서 달라지게 되며, 본 연구와 같은 비교적 중온에서 시효열처리하면 TiNi(β) \rightarrow TiNi+Ti₁₁Ni₁₄의 과정에 의해 Ti₁₁Ni₁₄가 석출된다. 이와 같은 미세한 Ti₁₁Ni₁₄ 석출물들은 고밀도 전위들과 마찬가지로 열사이클의 피로열화를 억제하는데 대단히 효과가 있지만²⁾ 열사이클의 영향으로 수명비가 증가하면 Ti₁₁Ni₁₄ 석출물의 양이 많아지며 크기도 성장하게 되고, 석출물의 크기가 지나치게 성장할 경우, 석출물 계면에서 다수의 전위를 발생시켜 두 상과의 정합성을 잃게 되어 영구변형이 나타나게 되며⁹⁾ 이러한 석

출물이 변태온도와 변태변형량에도 영향을 미칠 것이라고 생각된다.



(a) Specimen before test



(b) Fractured specimen

Photo 1. S.E.M. of Ti-Ni_{50.5at.%}

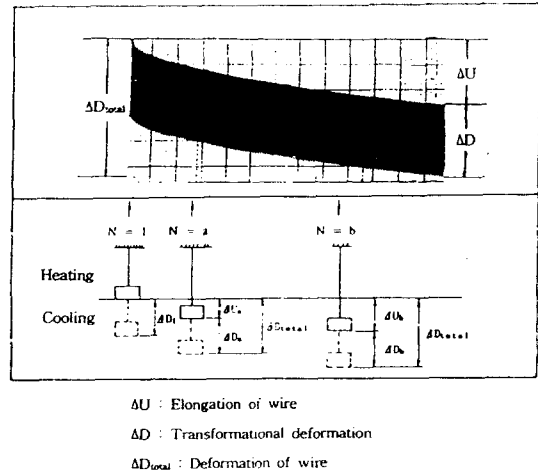


Fig. 4 Illustration of transformation deformation(ΔD) and elongation(ΔU) of Ti-Ni wire during fatigue test.

Fig. 4는 반복 열사이클 피로에 따른 변형량 변화 거동을 나타낸다.

그림에서 보는 바와 같이, 총변형량(ΔD_{total})은 마르텐사이트 변태에 의하여 발생하는 변태변형량(ΔD)과 역변태에 의하여 회복될 때 슬립에 의한 소성변형으로 원래의 위치로 돌아오지 않고 영구 변형으로 잔존하게 되는 영구변형량(ΔU)의 두 종류로 구분하였다.¹⁰⁾ 본 연구에서는 피로열화 거동을 보다 명확히 규명하기 위하여 변형거동을 이와 같은 두가지 변형량으로 구분하여 각각에 대하여 검토하였다.

Fig. 5는 반복동작 중의 시험편의 마르텐사이트 변태변형량(ΔD)에 미치는 프리스트레인의 영향에 대하여 검토한 결과이다. 그림에서 종축은 마르텐사이트 변태변형량을 원래의 시험편길이 L_0 로 무차원화한 $\Delta D/L_0$ 를, 횡축은 반복수 N 을 파단시 반복수 N_f 로 무차원화한 N/N_f (이하, 수명비)를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 프리스트레인을 부가하지 않은 경우에는 전체 피로수명에 대하여 피로 반복회수가 증가함에 따라서 변태변형량이 커지고

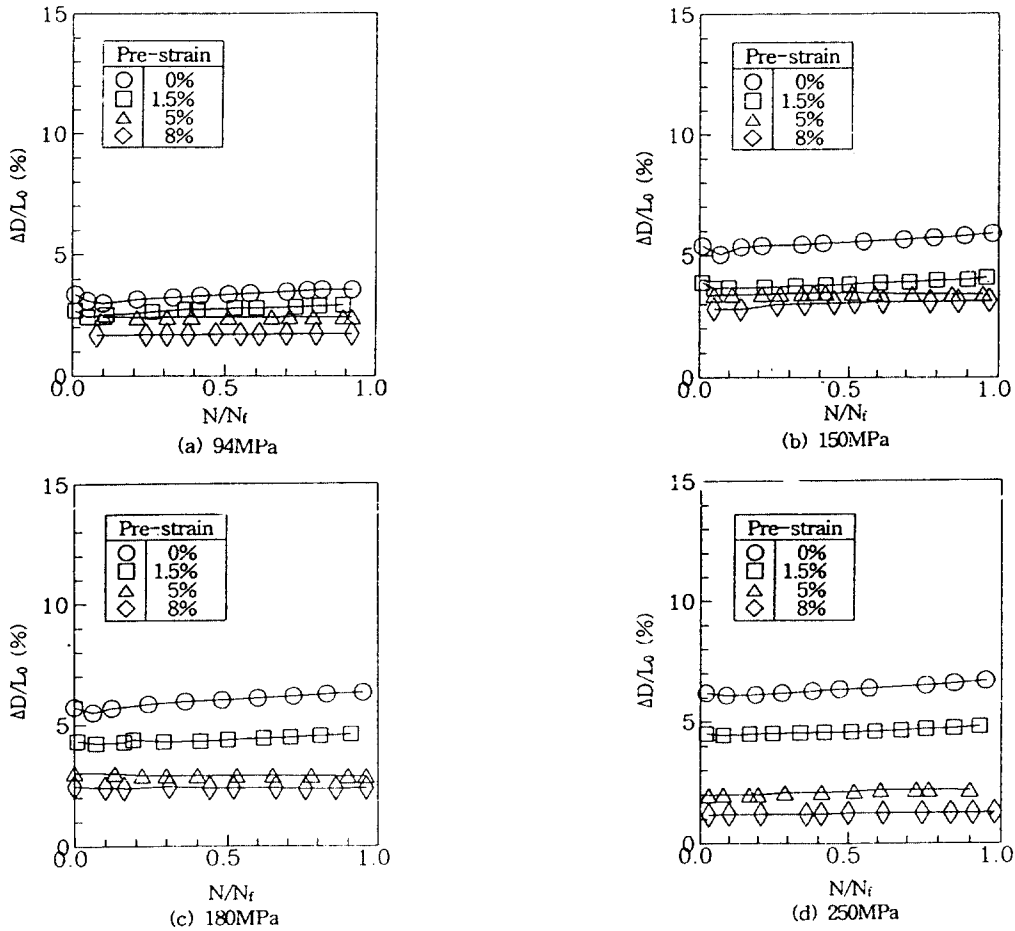


Fig. 5 The comparison of relationships between martensitic transformation deformation factor($\Delta D/L_0$) and life ratio(N/N_f) for the specimens with pre-strain of 0%, 1.5%, 5% and 8% of tensile loads of (a) 94MPa, (b) 150MPa, (c) 180MPa, and (d) 250MPa.

있다. 반복피로에 의하여 변태변형량이 커지는 이유는 photo 1에서 보는 바와 같이 열사이클의 영향으로 생성되는 Ti_3Ni_4 석출물의 양이 많아지는 것과¹¹⁾, 슬립에 의해 영구변형한 시험편도 변태변형을 하기 때문으로 생각된다.¹²⁾ 그러나 프리스트레인을 부가한 시험편은 프리스트레인을 부과하지 않은 시험편보다 변태변형량은 감소하지만, 피로 반복에 따른 변태변형량의 변동폭은 줄어드는 것을 볼 수 있다. 즉, 피로 파단시까지 변태변형량의 크기는 처음과 거의 일정한 것을 알 수 있다. 그리고 응력이 150, 180, 250MPa의 경우에도 94MPa의 경우와 마찬가지로 프리스트레인을 부과하지 않은 경우에는 변태변형량은 증가하지만 프리스트레인을 부가함으로써 변태변형량의 변화는 거의 없는 것을 볼 수 있다.

따라서 문제가 되는 피로 반복 변형에 따른 변태변형량의 변화는 프리스트레인의 부가에 의해 해결될 수 있다. 이와 같이 프리스트레인을 부가함에 따라 변태변형량의 크기는 크게 작아지지만 전 피로수명에 걸쳐서 변태변형량의 변화폭이 거의 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다. 이와같이 변태변형량이 적은 것은 프리스트레인의 부가시 발생하는 고밀도 전위가 모상에서 마르텐사이트 상으로 변태하는 것을 억제하기 때문으로 생각되며^{13),14)} 반복피로에 따른 변태변형량의 변동폭은 줄어들어 피로파단시까지 변태변형량의 크기가 일정함을 알 수 있다. 그러나, 이와 같은 프리스트레인의 부가에 의하여 마르텐사이트 변태변형량의 피로열화 현상을 거의 완전하게 방지할 수는 있으나, 이용할 수 있는 변태변형량의 크기를 크게 감소시키므로 이것이 큰 문제라고 생각된다.

Fig. 6은 부하응력 180MPa에서 마르텐사이트 변태변형량 ΔD 를 초기 마르텐사이트 변태변형량 ΔD_1 으로 무차원화한 변태변형비($\Delta D/\Delta D_1$)와 수명비의 관계를 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 프리스트레인의 부가량에 따라 변태변형비는 각각 다른 값을 나타내며, 프리스트레인을 부과하지 않은 경우에는 수명비 0.1까지 급격하게 감소하고 이후 큰 기울기로 피로파단시까지 증가하는 것을 볼 수 있으나 프리스

트레인을 부가한 경우에는 변동폭은 줄어들면서 대체로 5% 이상의 프리스트레인을 부가한 경우에는 파단시까지 일정하게 변태변형비가 유지되는 것을 볼 수 있다.

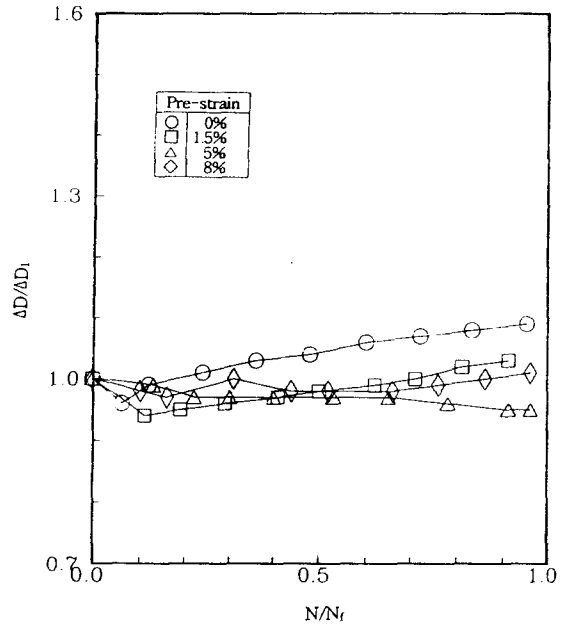


Fig. 6 The comparison of relationships between degradation factor($\Delta D/\Delta D_1$) and life ratio(N/N_r) with pre-strain of 0%, 1.5%, 5%, and 8% under tensile load of 180MPa.

그러나 프리스트레인을 부가함으로써 얻어지는 변태변형량이 Fig. 5에서 보는 바와 같이 과도하게 적어지는 결점이 있으므로 실용화에 있어서 이와 같이 프리스트레인의 부가를 이용할 경우 이에 대한 충분한 검토가 필요하다고 생각된다. 이상에서 검토한 변태변형량을 살펴보면 프리스트레인을 부과하지 않은 경우 전체 피로수명에서 피로열화를 보이나, 프리스트레인이 5% 이상인 경우 변태변형량의 변화는 일정하여 로트 액츄에이터로 응용시 프리스트레인이 5% 이상으로 부가한 재료가 우수함을 알 수 있었다.

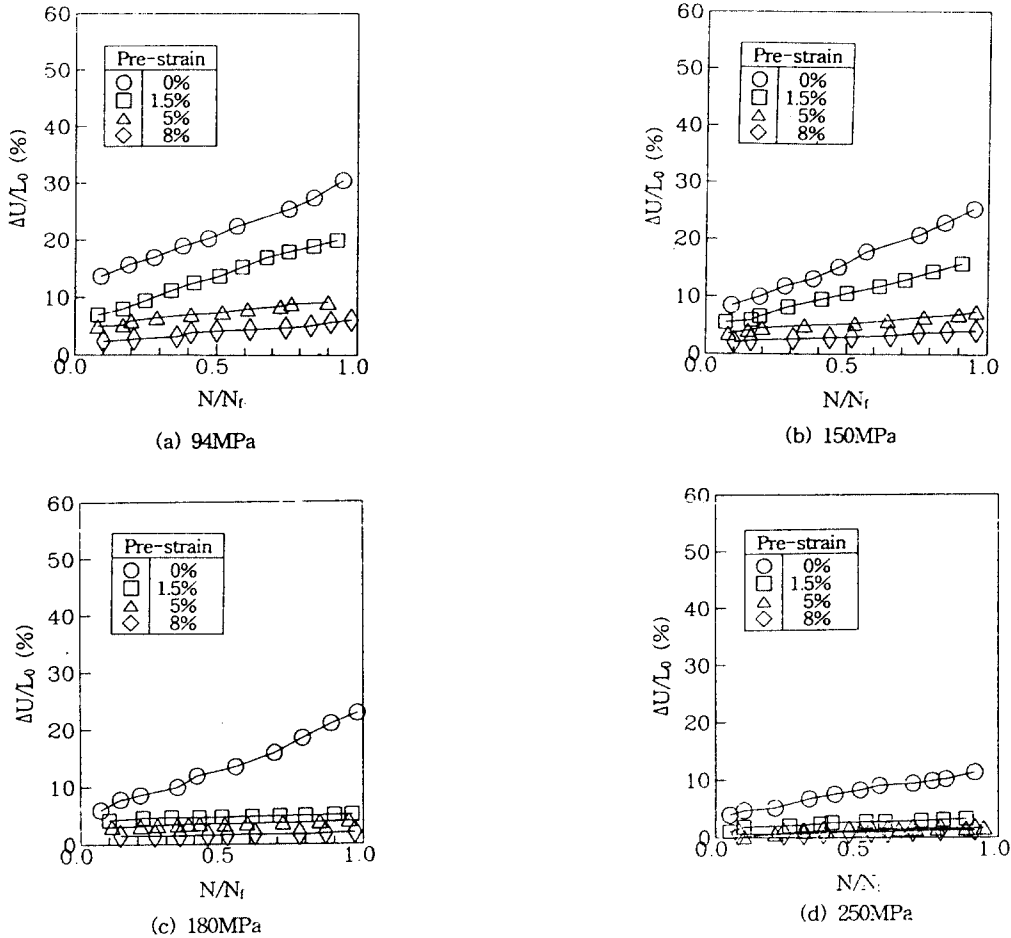


Fig. 7 The comparison of relationships between elongation factor($\Delta U/L_0$) and life ration(N/N_r) for specimens with pre-strain of 0%, 1.5%, 5%, and 8% under tensile loads of (a) 94MPa, (b) 150MPa, (c) 180MPa, and (d) 250MPa.

Fig. 7은 반복동작 중의 시험편의 영구변형량(ΔU)에 미치는 프리스트레인의 영향에 대하여 검토한 결과이다. 그림에서 종축은 영구변형량을 원래의 시험편길이 L_0 로 무차원화한 $\Delta U/L_0$ 를, 횡축은 반복수 N 을 파단시 반복수 N_r 로 무차원화한 수명비를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 영구변형량은 전체 피로수명을 통하여 변태변형량에 비해 매우 큰 피로열화를 나타내고 있는데 특히 프리스트레인을 부가하지 않은 원시험편의 경우에는 그 크기가 프리스트레인을 부가한 경우보다 대단히 큰 것을 알

수 있으나, 이에 반하여 프리스트레인을 부가함에 따라서 영구변형량(ΔU)은 점차 줄어들어서 프리스트레인이 5%, 8% 부가한 경우에는 피로파단시까지 원시험편의 약 1/10로 감소하는 것을 알 수 있으며 그 감소량도 프리스트레인이 클수록 크게 됨을 알 수 있다. 특히 8%의 프리스트레인을 부가한 경우 영구변형량은 약 2mm(2%)로 극히 적은 것을 알 수 있다. 그리고 전체적으로 보면 프리스트레인을 부가하여도 열사이클반복회수가 증가함에 따라서 영구변형량이 증가하나 증가폭이 적어 거의 완전한 피로열화를 방지할 수 있었다.

이상과 같이 형상기억합금의 피로열화에 대하여 영구변형량(ΔU)과 변태변형량(ΔD)의 두 인자를 구분하여 검토한 결과 영구변형량과 변태변형량은 모두 피로열화를 나타내고 있으나, 실제로 그 변형량 변화의 크기에 있어서는 대단히 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 프리스트레인을 부가하지 않을 경우 변태변형량의 피로열화 정도는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 실제 약 2~3%인데 반하여 영구변형량의 피로열화 정도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 약 20~40%로 대단히 큰 값이므로 실제 형상기억합금의 피로열화의 주 인자가 영구변형량임을 알 수 있었다. 그러나 5% 이상 프리스트레인을 부가함으로써 영구변형량을 약 2~3% 정도까지 개선할 수 있어 거의 완전하게 영구변형량의 피로열화를 방지할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 프리스트레인 부가에 의하여 피로열화의 주인자인 영구변형량의 피로열화를 거의 완전하게 방지할 수 있음을 알았다.

3-2 반복동작에 따른 변태온도 거동

Fig. 8은 프리스트레인을 변화시킨 각 시험편과 부하응력에 따른 M_s 온도와 A_f 온도의 변화를 정량적으로 검토한 결과이다.

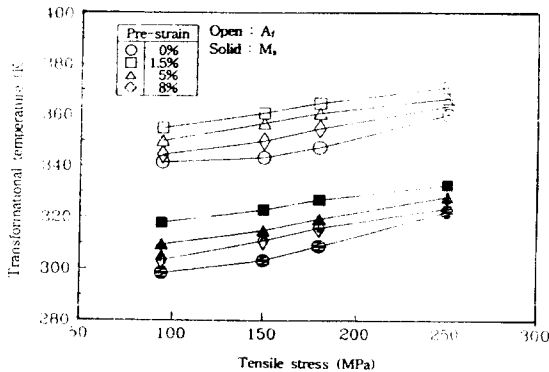


Fig. 8 The effect of tensile stress on transformation temperature A_f , M_s for specimens with pre-strain of 0%, 1.5%, 5%, and 8%.

그림에서 보는 바와 같이 부하응력이 증가할수록 M_s 온도와 A_f 온도가 증가하고 있으며, 프리스트레인을 8% 부가한 탄성구역의 시험편은 프리스트레인을 더 적게 부가한 시험편 보다 M_s 온도와 A_f 온도가 감소하는데 이것은 프리스트레인을 부가시 부하응력의 영향으로 응력유기 마르텐사이트 변태가 발생하여 변태온도는 상승한다. 그러나, 이때 발생하는 전위는 프리스트레인의 부가가 클수록 크며 이 전위의 영향으로 변태온도가 낮은 것이라 생각된다.^{15),16)}

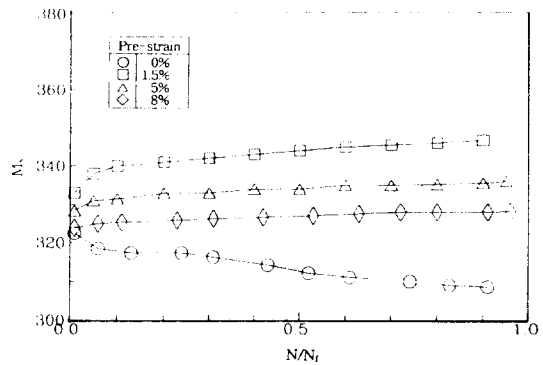


Fig. 9 The change of martensitic transformation temperature M_s with pre-strain of 0%, 1.5%, 5%, and 8% pre-strain at tensile load 250MPa.

Fig. 9는 반복 열사이클 부하에 따른 변태온도의 저하에 대한 프리스트레인의 영향을 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 프리스트레인을 부가하지 않은 시험편은 M_s 온도가 반복회수의 증가에 따라 점점 저하함을 알 수 있다. 이와 같이 변태온도가 반복회수의 증가에 따라 감소하는 것은 전위가 사이클의 반복시에 도입되어 전위의 밀도가 증가하고 이 전위에 의해 형성된 응력장은 M_s 온도를 감소시켜 결국 마르텐사이트 변태를 억제하기 때문인 것으로 생각되며 이것은 열사이클의 반복시에 생긴 가공경화 때문에 사이클이 증가할수록 전위의 도입을 더욱 어렵게 하며 초기 반복과

정중에 M_s 가 급속히 감소하다가 후반으로 갈수록 완만하게 변한다는 사실과 일치하며^{4),17),18)} 전위에 의해 형성된 응력장이 열사이클의 반복에 의한 영향을 받는 것을 알 수 있다. 그러나, 프리스트레인을 부가한 경우에는 반복회수의 증가에 따라 M_s 온도가 저하하지 않고 오히려 초기에는 조금 높아진 후 피로파단시까지 일정하게 유지된다는 것을 알 수 있다. 따라서 프리스트레인을 부가한 시험편의 경우 안정한 M_s 점을 얻을 수 있으므로 보다 안정된 마르텐사이트 변태변형량을 얻을 수 있으며 이는 앞의 Fig. 5의 경우와 잘 일치한다. 이와 같이 프리스트레인의 부가에 의하여 수명 초기에 M_s 온도가 높아지는 이유는 프리스트레인의 부가에 의하여 응력유기 마르텐사이트 변태를 유발시키므로 M_s 온도가 상승할 것으로 생각되며, 프리스트레인의 부가가 클수록 가공경화의 정도가 크며 열사이클 반복 초기에 임계전위를 갖게 되어 그 이후 반복회수의 증가에 따라 도입되는 전위가 적으므로 결과적으로 전위의 이동이 보다 적어 M_s 의 변화를 억제시키는 것으로 생각된다.^{2),5),19)}

3-3 피로수명

Fig. 10은 각 시험편의 피로수명을 검토한 S-N 곡선이다.

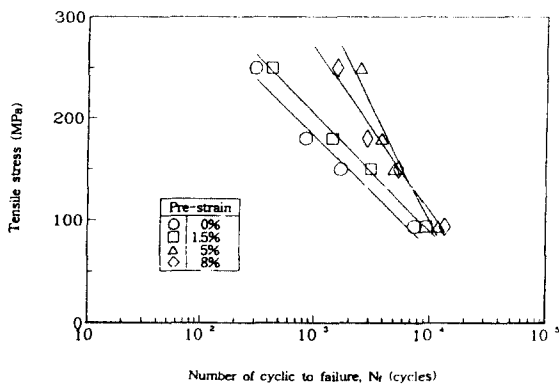


Fig. 10 The comparison of relationships between tensile stress and number of cycles to failure (N_f) for specimens with pre-strain of 0%, 1.5%, 5%, and 8%.

그림에서 보는 바와 같이 비교적 저응력인 탄성 범위 내에서의 각 시험편의 파단수명은 약 10,000 회 정도의 비교적 긴 수명을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 부하응력과 파단수명의 관계는 대체적으로 직선 관계를 유지하고 있으며 그 기울기는 프리스트레인을 부가하지 않은 시험편의 기울기는 대체적으로 완만하나 프리스트레인을 부가함으로써 기울기가 대단히 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 프리스트레인을 부가한 시험편에 있어서도 고응력에서는 현저한 피로수명의 개선효과를 나타내나, 저응력에서는 그다지 큰 피로수명 개선효과를 나타내지 않았다.

4. 결론

본 연구에서는 형상기억합금을 이용한 로봇용 액추에이터 개발에 있어 가장 문제점으로 지적되고 있는 반복동작에 따른 피로열화를 개선하기 위하여 직경 0.5mm Ti-Ni_{50.5at.%} 형상기억합금 와이어에 프리스트레인을 부가하여 전기 가열방식으로 열피로시험을 수행한 시험편의 반복사용에 따른 형상변화량, 회복력의 저하, 변태온도의 변화 등과 같은 피로열화 거동을 검토한 결과는 다음과 같다.

(1) 형상기억합금의 열사이클 피로에 있어서 마르텐사이트 변태변형량 (ΔD)의 피로열화는 2~3% 정도이나, 영구변형량 (ΔU)의 피로열화는 20%~40% 정도로 마르텐사이트 변태변형량에 비해 대단히 크므로 영구변형량이 피로열화를 일으키는 주인자임을 밝혔다.

(2) 프리스트레인의 부가에 의해 마르텐사이트 변태변형량 (ΔD)의 피로열화를 억제할 수 있었으며, 특히 5% 이상의 프리스트레인을 부가할 경우 초기부터 안정화되어 피로열화를 방지할 수 있었다.

(3) 영구변형량 (ΔU)은 5% 이상 프리스트레인을 부가한 경우 피로열화를 크게 개선할 수 있으며, 250MPa의 고하중에서는 프리스트레인을 8% 부가함으로써 피로열화를 거의 완전히 방지할 수 있었다.

(4) 프리스트레인의 부가로 인해 피로수명은 증

가하였고, 250MPa의 고응력에서는 5%의 프리스트레인을 부가하였을 때 수명이 가장 우수하였다.

(5) 열사이클 부가에 따른 변태온도(M_s)의 열화는 5% 이상 프리스트레인의 부가에 의해 거의 방지할 수 있었다.

후 기

본 연구는 1994년도 교육부 학술연구조성비(기계공학 : ME 94-C-20)에 의하여 연구 되었으며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 宮崎修一, 大塚和弘, “形狀記憶合金の基礎と今後の課題”, 金屬, vol. 8, pp. 2~10, 1989.
- 2) T.W. Duerig, K.N. Melton, D. Stockel, C.M. Wayman, “Engineering Aspects of Shape Memory Alloys”, Butterworth-Heinemann, pp. 394~413, 1990.
- 3) 홍성원, 임병희, 이오연, “Ti-Ni-B 형상기억합금의 상변태 및 열처리 특성”, 대한금속학회지, 第28卷8號 pp. 743~751, 1990.
- 4)鈴木雄一, “實用形狀記憶合金”, 機電研究社, pp. 119~121, 1989.
- 5) 戸伏壽昭, 田中喜久昭외, “種種の熱力學經路を受けるTi-Ni形狀記憶合金の繰返し變形”, 日本機械學會誌, 第53卷552號, pp. 1411~1416, 1992.
- 6) 見沼亮介, 松本實, 本間敏夫, “Ni過剩TiNi合金における時效過程の金相學的 研究”, 日本金屬學會誌, 第43卷2號, pp. 149~158, 1987.
- 7) 佐分利敏雄, “ニッケル・チタン系形狀記憶合金の開発研究の現狀”, 金屬, vol. 8, pp. 11~18, 1989.
- 8) 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.
- 9) 形狀記憶合金 開發 委員會, “形狀記憶合金과 그 使用方法”, 機電研究社, p. 21, 1990.
- 10) 古屋泰文, 三塚賢一, “Ti-Ni 形狀記憶合金の溫度變化に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シンポジウム, pp. 53~58, 1990.
- 11) 박영철, 조용배, 오세욱 “Ti-Ni 형상기억합금의 반복변형거동에 미치는 열처리의 영향”, 한국해양공학회, 제8권1호, pp. 154~164, 1994.
- 12) 古室泰文, 島田平八, 松本實, 本間敏夫, “Ti-Ni形狀記憶合金ワイヤの繰返し變形作動特性と劣化” 日本金屬學會誌, 第52卷2號, pp. 139~143, 1988.
- 13) 吳明勳, 池光求, 張禹錫, 申明撤, 洪鍾撤, “Ti-Ni形狀記憶合金의 反復變形에 의한 性能劣化現象”, 大韓金屬學會誌, 第27卷1號, pp. 70~76, 1989.
- 14) 宮崎修一, 坂本英和, “形狀記憶合金の繰返し特性”, 日本金屬學會誌, 第24卷1號, pp. 33~40, 1985.
- 15) S. Miyazaki, Y. Igo, and K. Otsuka, “Effect of Thermal Cycling on the Transformation Temperatures of Ti-Ni Alloys”, Acta Metall, Vol. 34 No. 10, pp. 2045~2051, 1986.
- 16) S. Miyazaki, “Engineering Aspects of Shape Memory Alloys”, Butterworth-heinemann, pp. 394~413, 1990.
- 17) 栗林勝利, “形狀記憶合金を使ったマイクロロボット”, 日本金屬學會誌, vol. 8, pp. 85~89, 1989.
- 18) Ridgway banks, “Nitinol heat engines”, Shape Memory Effect in Alloys, Plenum Press, pp. 537~546, 1975.
- 19) 李五演, 千炳善, 南宮庭, 趙珖熙, “Ti-Ni-Cu 형상기억합금의 상변태 및 열사이클에 의한 피로특성”, 대한금속학회지, 第27卷2號, pp. 103~112, 1989.