大韓機械學會論文集 第18卷 第11號, pp. 2913~2921, 1994

〈論 文〉

Ti-Ni 형상기억합금의 열피로열화 거동

박영철* · 조용배** · 오세욱*

(1994년 4월 28일 접수)

Thermal Fatigue Degradation Behavior of Ni-Ti Shape Memory Alloy

Young Chul Park, Young Bae Cho and Sae Wook Oh

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 material. The actuator is operated repeatitively 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 study, the fatigue tests were carried out on SMA specimens prepared to have different condition of aging time and pre-strain with the direct-current heating-cooling method, which was a general method of operation in robot actuators. The behavior of transformation temperature and deformation were examined and analyzed in each specimen and the study was performed to establish the optimistic manufacturing condition of SMA against the fatigue degradation.

1. 서 론

공업의 발전이 가속화 됨에 따라서 금속재료에는 더욱 더 다양한 성질이 요구되고 있다. 새로운 금속재료의 개발은 이러한 시대적 요청에 따라서 종래의 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.[1~3]

이러한 기능을 가진 형상기억합금으로 만든 액추에이터를 사용한 로보트의 경우 구동부분이 형상기억합금 자체만으로 되어 있으므로 모터 또는 유압실린더를 사용한 종래의 로보트에 비하여 구조를 극히 간편화, 경량화시킬 수 있을 뿐만 아니라, 소음이 전혀없는 상태로 부드럽게 3차원 작동이 가능하며, 특히 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

*정회원, 동아대학교 기계공학과
**동아대학교 대학원 기계공학과

지니는 로보트로 개발할 수 있다. 그러나, 실제로 형상기억합금을 로보트용 액추에이터로 실용화 하기 위해서는 해결해야 할 기술적인 문제점이 대단히 많다. 그 중에서도 특히 반복사용에 따른 형상기억합금의 피로열화가 가장 큰 문제점이다.

일반적으로 액추에이터는 장시간 운전을 하기 때문에 많은 반복동작 사용이 필요하며 이와 같이 반복적인 가열 냉각사이클에 의하여 액추에이터의 형상기억합금은 피로열화를 일으키게 되므로 형상기억합금의 변태온도와 변형거동에 많은 변화가 일어나서 로보트의 정확한 동작제어를 어렵게 한다. 따라서 형상기억합금을 로보트용 엑추에이터로 사용할 경우 반복사용중에 나타나는 변형거동의 변화, 변태온도의 변화등 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 석출경화와 pre-strain에 의한 트레이닝(training)처리가 대단히 유용한 방법으로 보고되고 있다.[2,4]

이와 같이 시효처리가 형상기억합금의 피로열화를 개선시키기 위한 유용한 방법중의 하나로 각광받고 있지만 시효처리조건과 pre-strain 부가에 의한 형상기억합금의 피로열화에 미치는 영향에 대해서 상세한 연구가 아직 대단히 미흡한 실정이다.

본 연구에서는 형상기억합금을 사용한 로보트용 액추에이터의 개발에 있어서 가장 문제점으로 지적되고 있는 반복동작에 따른 피로열화현상을 개선하여 로보트의 정확한 동작제어를 기하기 위해 시효열처리 조건을 변화시킨 시험편을 직접 통전 가열-냉각방식에 의한 피로시험을 행하여, 각 시험편의 반복변형 특성, 변태온도 변화, 피로수명 등과 같은 피로열화 거동을 명확히 규명하고 아울러 시효처리 조건과 pre-strain 조건이 피로열화 거동에 미치는 효과를 명확히 밝히고자 한다.

2. 재료 및 시험방법

2.1 재료

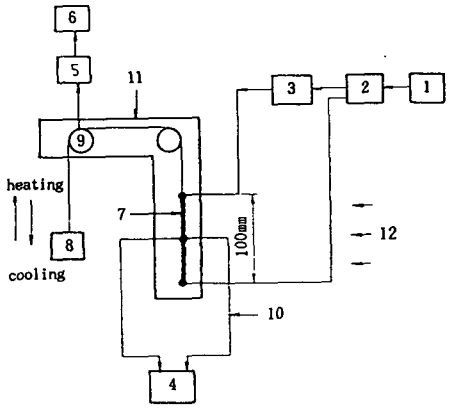
본 실험에 사용한 시험편은 냉간가공한 직경 0.5 mm의 Ti-$Ni_{50.5\,at.\%}$합금(Nitinol ; 日本關東特殊鋼(株)製品) 와이어(wire)이다. 시험편의 열처리는 와이어 냉간가공시 발생된 가공 잔류응력의 영향을 없애기 위하여 진공중(10^{-3} torr)에서 1073 K의 온도로 1시간 유지한 후, 빙수에 급냉하여 용체화처리를 하였다. 형상기억효과(SME)를 위한 시효열처리는 실험목적에 따라 시효처리조건이 피로열화 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 시효시간을 1시간으로 일정하게 유지하고 시효온도를 873 K, 773 K, 673 K로 달리 시효처리한 A, B, C의 3종류 시험편을 준비하였다. 또한, pre-strain이 피로열화 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 673 K로 1시간 유지한 C시험편에 pre-strain을 5%, 8%를 부가한 D, E 시험편을 준비하여 합계 5종류의 시험편을 준비하여 실험을 수행하였다. 이때 시효열처리 온도 구간을 673 K~873 K로 결정한 이유는 본 연구의 Ti-$Ni_{50.5\,at.\%}$의 시료의 경우에는 673 K이하의 시효열처리로써는 석출물이 거의 석출되지 않았기 때문에 비교적 양호한 석출물이 생성될 수 있는 673 K~873 K를 시효처리온도 구간으로 결정하였다.

2.2 실험장치 및 방법

Fig. 1은 본 실험에 사용된 자체 제작한 열사이클 피로시험장치의 구성도를 나타내고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시험편을 길이 100 mm로 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 가변식 직류 정전류장치에 의한 직접 통전 가열방식을 이용하여 가열하였으며, 냉각에는 냉각속도를 빠르게 할 목적으로 팬(fan)을 사용하여 강제 공냉시켰다. 이때 시험편의 온도는 타이머를 사용하여 가열시간 및 냉각시간을 제어하여 조절하였으며, 통전 및 가열 사이클의 회수가 카운터에 기록되게 하였다.

시험편 변형량의 측정에는 회전식 변위계를 사용하였으며 시험편 온도의 측정에는 CA(chromel-alumel)열전대를 사용하였다.

각 시험의 역변태온도(A_f, A_s)와 마르텐사이트 변태온도(M_f, M_s)의 측정은 Fig. 2에서 보는 바와 같이 X-Y레코드에 출력된 X축의 시험편온도와 Y축의 변형량으로 형성된 히스테리시스곡선(hysterisis loop)의 접선법을 이용하여 측정하였다. 또한,



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

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

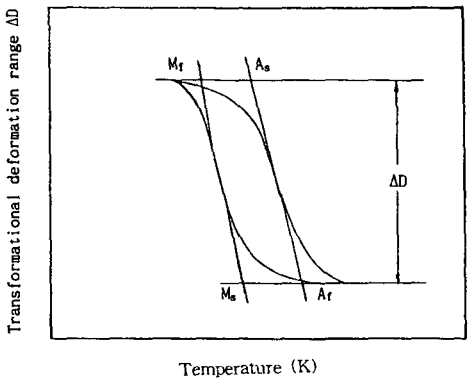


Fig. 2 Temperature-transformation deformation hysteresis loop

본 연구와 같이 일정응력을 부하한 상태에서 반복 열사이클 피로시험을 수행하는 경우에는 시험편의 변태온도가 응력부하 조건과 열사이클 반복수에 따라 변화되므로 각 응력 조건에서 일정한 반복회수 간격으로 변태온도의 변화를 측정하였다.

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

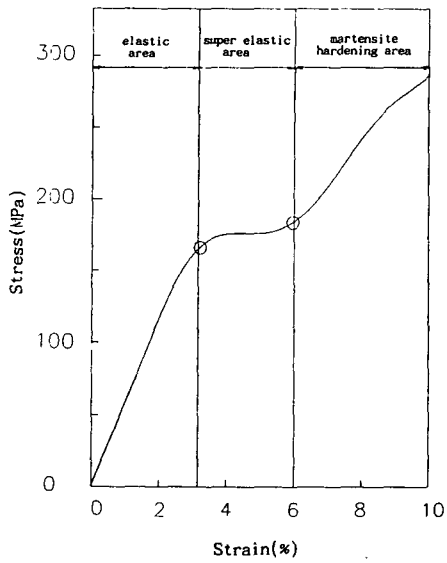


Fig. 3 Stress-strain curve of Ti-Ni wire (C specimen)

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

3. 실험결과 및 고찰

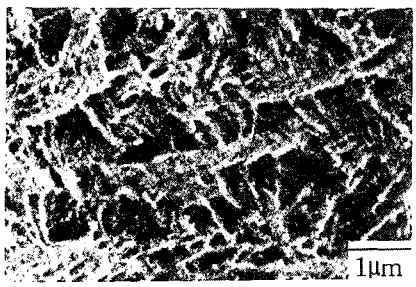
3.1 반복동작에 따른 변형거동

Photo 1은 시효열처리 온도를 달리한 각 시험편들의 전자현미경 조직사진으로써 기지조직은 TiNi이고 미세한 석출물은 Ti_3Ni_4로 사료된다.[2,5~7]

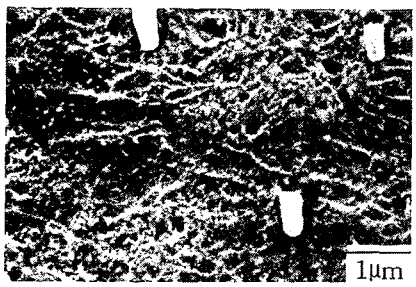
사진에서 알 수 있는 바와 같이, 573 K 시효온도에서 열처리한 시료는 석출물의 생성을 거의 관찰 할 수 없었으나, 673 K, 773 K, 873 K 시효온도에서 열처리한 시료에서는 다수의 석출물이 생성되어 있는 것을 관찰할 수 있었으며, 이와같은 석출물들은 시효열처리 온도가 높을수록 성장되며, 또한 많아지는 것을 관찰할 수 있다.

Saburi,[6] Nishida[7]의 연구결과에 의하면 50.5 at.% Ti-Ni합금의 시효처리에 의하여 생성되는

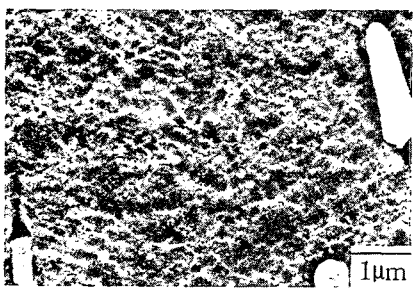
석출물은 시효온도에 따라서 달라지며, 본 연구와 같은 비교적 중온에서 시효열처리한 경우, 즉 953 K 이하의 온도에서 시효하면 $TiNi(\beta) \rightarrow TiNi + Ti_3Ni_4$의 과정에 의해 Ti_3Ni_4가 석출되며, 이와 같은 미세한 Ti_3Ni_4 석출물들은 고밀도 전위들과 마찬가지로 열사이클의 피로열화를 억제하는데 대단히 효과가 있지만[2] Ti_3Ni_4 석출물은 고온 또는 장시간 시효에 의하여 지나치게 성장할 경우, 석출물 계면에서 다수의 전위를 발생시켜 두 상과의 정합성을 잃게 되어 형상기억효과를 크게 저하시키게 된다.[8] 따라서 시효열처리 온도가 고온으로 될수록 석출되는 Ti_3Ni_4가 보다 성장되게 될 것이며, 결과적으로 시효열처리 온도를 달리한 각 시험편의 반복 변형거동 등의 제 특성들이 대단히 달라질 것으로 생각된다. 또한 보다 낮은 온도에서 시효처리할 경우 Ti_3Ni_4 석출물의 석출량이 적게 생성되어 피로열화 거동이 나쁘게 될 것으로 사료된다.[9] 따라서 본 연구에서는 석출물이 비교적 안정적으로 생성되는 시효열처리 온도인 673 K~873 K의 온도범위를 시효열처리 온도로 설정하여 보다 우수한 피로열화 특성을 나타내는 시효열처리 온도의 영향을 중점적으로 검토하였다.



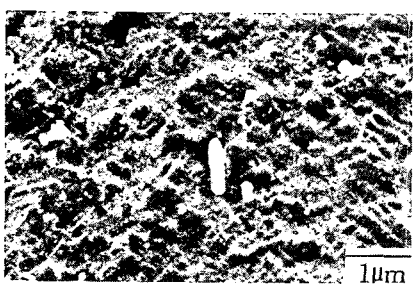
(a) 573K



(b) 673K



(c) 773K



(d) 873K

Photo 1 Photograph of Ti-$Ni_{50.5at.}$ % alloys aged at various temperature

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

그림에서 보는 바와 같이, 총 변형량(ΔD_{total})은 마르텐사이트변태에 의하여 발생하는 변태변형량(ΔD)과 역변태에 의하여 회복될 때 슬립에 의한 소성변형으로 원래의 위치로 돌아오지 않고 영구변형으로 잔존하게 되는 영구변형량(ΔU)의 두종류로 구분하였다.[10] 본 연구에서는 피로열화 거동을 보다 명확히 규명하기 위하여 변형거동을 이와 같은 두가지 변형량으로 구분하여 각각에 대하여 검토하였다.

Fig. 5는 시효열처리 온도을 달리한 각 시험편에 대하여 반복 열사이클 피로에 따른 마르텐사이트변

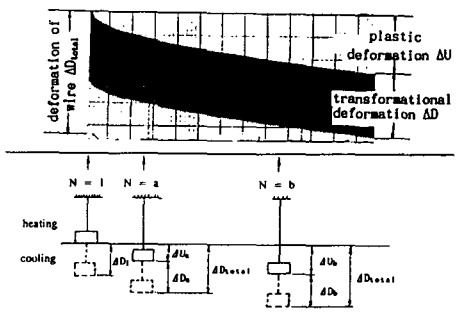


Fig. 4 An example of transformation deformation (ΔD) and elongation of Ti-Ni wire (ΔU) during fatigue test

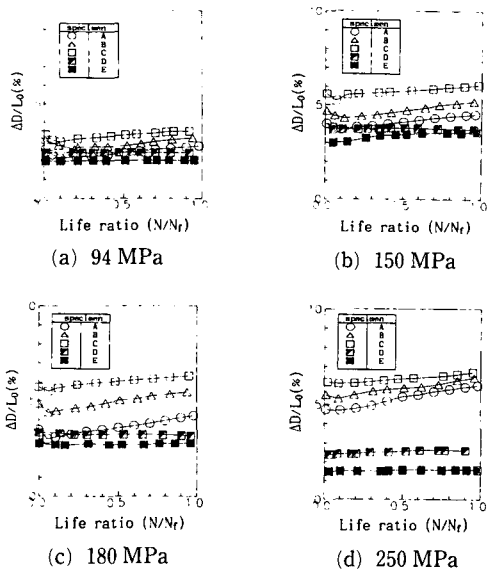


Fig. 5 The relation between deformation factor (D/L_0) and life ratio (N/N_f) for the various specimen

태변형량(ΔD)의 거동을 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 부하응력이 94 MPa에서 250 MPa로 증가함에 따라 변태변형량은 증가하고 있다. 이는 높은 부하응력에서는 보다 응력유기 마르텐사이트변태가 일어나기 쉽기 때문으로 생각된다. 한편, 변태변형량은 시효열처리에 따라 달라져 시효온도가 낮을수록 변태변형량이 크다는 것을 알 수 있다. 즉, C 시험편의 변태변형량이 가장 크며, B, A 순으로 변태변형량이 작아졌다. 그러나 부하응력 크기에 따라 시효열처리 온도가 미치는 영향은 달라, 탄성구역에 해당되는 비교적 적은 응력인 94 MPa에서는 시효열처리 온도에 따라 변태변형량이 크게 차이가 나지 않으나, 초탄성구역인 150 MPa, 180 MPa에서는 C 시험편이 A 시험편에 비하여 대단히 큰 변태변형량을 나타내었다. 그러나 마르텐사이트 경화구역에 해당되는 비교적 큰 응력인 250 MPa에서는 A 시험편의 변태변형량이 크게 증가하여 그 차이가 크게 줄어진 것을 알 수 있다. 또한, 반복 열사이클 부하에 따른 마르텐사이트 변태변형량의 변화는 시효온도가 높을수록 변태변형량의 변화가 커져 피로열화가 커진다는 것을 알 수 있다. 즉, 시효온도가 673 K인 C 시험편의 경우에는 낮은 부하응력인 94, 150 MPa에서는 거의 모든 피로수명에 걸쳐 변태변형량이 거의 일정하여 피로열화현상을 보이지 않으나, 부하응력이 커지면 피로반복수의 증가에 따라 변태변형량이 다소 증가하나 그 증가량은 대단히 미소함을 알 수 있다. 이에 반하여 873 K의 A 시험편의 경우에는 탄성한도 범위의 94 MPa에서는 거의 모든 피로수명에 걸쳐 거의 일정한 변태변형량을 나타내나 점차 부하응력이 커짐에 따라 그 변형량은 크게 증가하여 약 2%정도의 다소 큰 피로열화를 나타냄을 알 수 있다. 따라서 대체로 낮은 부하응력에서는 시효처리 온도에 관계없이 모든 시험편에서 마르텐사이트 변태변형량의 피로열화는 나타나지 않아 크게 문제가 되지 않지만 부하응력이 커지면 모든 시험편에서 대체적으로 피로열화가 나타나며 시효처리 온도 673 K 중에서 시효열처리한 C 시험편이 가장 양호한 피로열화 거동을 나타냄을 알 수 있었다.

이와 같이 반복피로에 의하여 변태변형량이 커지는 이유는 형상기억합금을 가열, 냉각의 반복 열피로를 가하면 마르텐사이트 변태와 역변태가 반복적으로 일어나므로, 마르텐사이트상의 성장과 소멸이 반복하여 생긴다. 따라서 마르텐사이트상과 모상 austenite상의 계면은 반복적으로 이동이 생기므로 계면에는 이로 인하여 전위밀도가 증가하여 내부응력이 축적되게 되므로 보다 변태를 촉진시키게 되어 변태변형량이 증가하게 된다고 생각된다.[11] 또한 마르텐사이트 변태변형량의 피로열화 정도가 시효열처리 온도가 높을 수록 현저하다는 것은 바로 시효온도가 높을수록 Ti_3Ni_4 석출물이 성장하여 형상기억효과를 저하시키기 때문이라고 생각된다.

한편, 이와 같은 피로열화현상은 pre-strain의 부가에 의하여 완전하게 방지할 수 있음을 알 수 있다. 즉, 그림에서 보는 바와 같이 pre-strain을 부가함에 따라 변태변형량의 크기는 크게 작아지지만 전 피로수명에 걸쳐서 변태변형량의 크기는 거의 변화량이 일정하게 나타나는 것을 알 수 있다.

이것은 pre-strain을 부가하면 도입된 전위에 의하여 변태변형량을 크게 저하시키지만 반복피로에 따른 변태변형량의 변동폭은 줄어 들어 피로 파단시까지 변태변형량의 크기가 일정함을 알 수 있다. 그러나, 이와같이 pre-strain의 부가에 의하여 마르텐사이트 변태변형량의 피로열화현상을 완전히 방지할 수는 있으나, 이용할 수 있는 변태변형량의 크기를 크게 감소시키므로 이것이 또한 큰 문제라고 생각되어 진다.

Fig. 6은 시효열처리 조건이 피로열화 거동에 미

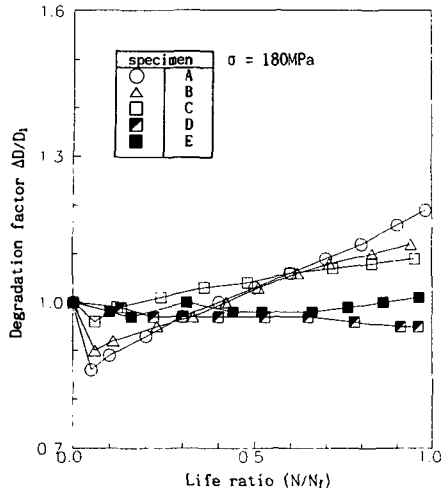


Fig. 6 The relation between degradation factor ($\Delta D/D_i$) and life ratio (N/N_f) on aging temperature

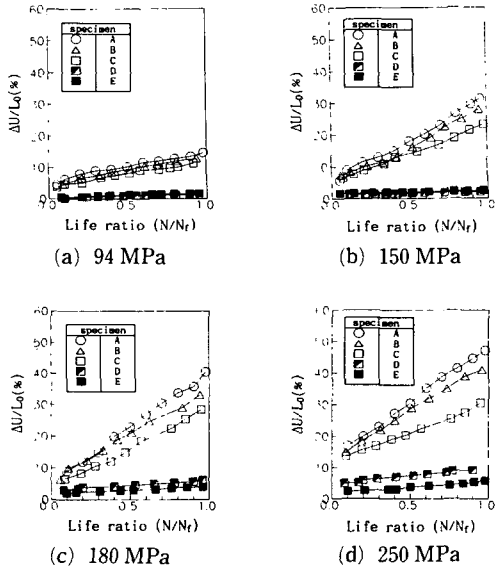


Fig. 7 The relation between elongation factor ($\Delta U/L_0$) and life ratio (N/N_f) for various specimen

치는 영향을 보다 상세히 파악하기 위하여 반복피로 중의 변태변형량(ΔD)과 초기 $N=1$에서의 변태변형량 D_i으로 무차원화한 규격변형량($\Delta D/D_i$)과 수명비(N/N_f)의 관계를 나타내었다.

그림에서 보는 바와 같이 시효열처리 온도에 따라 변태변형량의 변화거동은 각각 다른 값을 나타내나 대체적인 경향은 A, B, C 모든 시편에서 마르텐사이트변태변형량은 수명초기에 크게 감소하여 N/N_f가 0.1부근에서 최저값을 나타낸 후 다시 서서히 증가하여 최종 파단에 이르는 것을 알 수 있다.

각 시험편에 대하여 반복회수의 증가에 따른 변태변형량의 변화를 살펴보면 C시험편이 다른 시험편에 비하여 변형량의 거동이 가장 안정되어 있는 것을 알 수 있다. 그리고 변태변형량의 피로열화 현상은 pre-strain을 부가함으로써 완전하게 개선할 수 있음을 알 수 있다. 즉, pre-strain을 부가한 D, E 시험편의 경우에는 그림에서 보는 바와 같이 전 피로수명에 걸쳐 변태변형량의 변화가 없이 일정하게 유지되어 전혀 피로열화현상이 나타나지 않는 것을 확인할 수 있었다.

이상과 같이 마르텐사이트 변태변형량의 피로열화 거동에 대하여 검토하여 본 결과 변태변형량의 피로열화는 피로수명 초기($N/N_f=0.1$)에 급격히 감소한 후 서서히 증가하여 피로수명 말기에 비교적 큰 피로열화 거동을 나타내나 그 피로열화 정도는 대단히 미소한 양으로 특히 탄성응력에 해당되는 94 MPa이내의 저응력 영역에서는 거의 피로열화를 관찰할 수 없었다. 또한 이와 같은 마르텐사이트변태변형량의 피로열화는 시효열처리 조건에 의하여서도 크게 개선할 수 있으며, pre-strain의 부가로써는 완전히 방지할 수 있었다. 그러나 pre-strain을 부가함으로써 얻어지는 변태변형량이 크게 작아지는 결점이 있으므로 실용화에 있어서 이와 같은 pre-strain의 부가를 이용할 경우 이에 대한 충분한 검토가 필요하다고 생각된다.

Fig. 7은 시효열처리 조건을 변화시킨 각 시험편에 대하여 반복 열사이클 피로에 있어서 영구변형량(ΔU)의 거동에 관하여 검토한 결과이다. 그림에서 종축인 ΔU는 원래 시험편의 길이 L_0로 무차원화한 $\Delta U/L_0$값이며, 횡축은 반복수 N을 파단시 반복수 N_f로 무차원화 한 N/N_f를 나타내고 있다.

그림에서 보는 바와 같이 영구변형량은 반복회수의 증가에 비례하여 전 수명에 걸쳐 선형적으로 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉, 94 MPa의 낮은 응력에서는 완만한 기울기의 증가를 나타내나, 부하응력이 증가함에 따라 그 기울기가 급격히 커져서 고응력인 250 MPa에서는 대단히 큰 피로열화 현상을 나타내고 있다. 또한 영구변형량의 피로열화 거동에 미치는 시효처리 온도의 영향을 살펴보면 시효처리 온도가 낮을수록 그 변화폭은 작아지며 부하응력이 클수록 그 경향은 더욱 더 뚜렷하게

나타내어 673 K로 열처리한 시험편 C가 가장 양호한 피로열화 거동을 나타내었다. 그러나 이와 같은 영구변형량의 피로열화는 그림에서 보는 바와 같이 시효열처리 조건만으로서는 만족할 만큼 개선시킬 수 없었으며, pre-strain의 부가에 의해서만이 완전하게 개선될 수 있었다. 즉, pre-strain을 부가한 D, E 시험편의 경우 모든 응력범위에서 전 피로수명에 걸쳐 거의 일정한 영구변형량 거동을 보여 pre-strain부가에 의해 영구변형량의 피로열화현상은 완전히 개선될 수 있다는 것을 알 수 있다. 이상과 같이 형상기억합금의 피로열화에 대하여 ΔU와 ΔD의 두 인자를 구분하여 검토한 결과 ΔU와 ΔD는 모두 피로열화를 나타내고 있으나, 실제로 그 변형량과 변화량의 크기에 있어서는 대단히 큰 차이를 나타내고 있음을 알 수 있다. 즉 ΔD의 피로열화 정도는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 실제 약 2~3%인데 반하여 ΔU의 피로열화 정도는 Fig. 7에서 보는 바와 같이 약 20~40%로 대단히 큰 값이므로 실제 형상기억합금의 피로열화의 주 인자가 ΔU임을 알 수 있었다. 또한, ΔU의 피로열화는 Fig. 5의 결과로부터 알 수 있는 바와 같이 본 연구의 최적 시효처리 온도인 673 K로 시효열처리함으로써 거의 방지할 수 있으나, 실제 형상기억합금의 피로열화의 주 인자라 할 수 있는 ΔU는 673 K에서 시효열처리를 실시한 C 시험편의 경우에도 가장 큰 응력인 250 MPa의 경우에는 45%에서 30%로 약 15%정도의 개선만 가능하여 시효처리 온도의 조절만으로는 이와 같은 피로열화의 극히 일부분 밖에 개선할 수 없었으나, 5% pre-strain의 부가로써 약 3%정도까지 개선할 수 있어 거의 완전하게 ΔU의 피로열화를 방지할 수 있음을 알 수 있다. 따라서 pre-strain 부가에 의하여 피로열화의 주인자인 ΔU의 피로열화를 거의 완전하게 방지할 수 있음을 알았다.

3.2 반복동작에 따른 변태온도 거동

Fig. 8은 시효열처리를 달리한 각 시험편에 있어서 응력에 따른 변태온도 M_s와 A_f의 변화를 정량적으로 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 모든 시편에서 부하응력이 증가할수록 M_s와 A_f는 완만하게 증가함을 알 수 있으며, 또한 높은 시효온도로 열처리한 시편일수록 변태온도가 높게 나타났다. 이는 높은 온도에서 시효열처리할 수록 석출물이 많이 생성되고

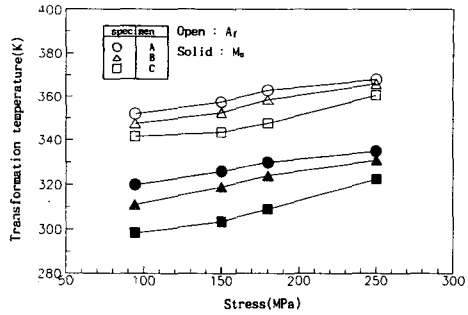


Fig. 8 The effect of tensile stress on transformation temperature

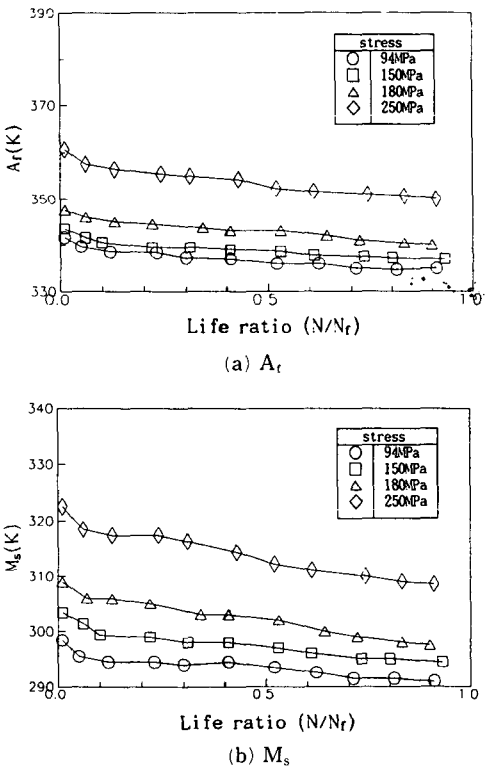


Fig. 9 The behavior of martensitic transformation temperature(A_f and M_s) with thermal fatigue cycle

따라서 기지의 Ni의 함유량이 줄어들기 때문에 M_s 온도가 상승하는 것으로 생각된다.[12]

Fig. 9는 최적 시효열처리 조건인 673 K로 열처리한 C시험편에 대하여 반복열사이클 피로과정에 있어서 변태온도 M_s와 A_f의 변화를 각 부하응력에서 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 모든 부하응력에서 반

복회수가 증가할수록 변태온도는 점차 저하하며, 그 저하 정도는 부하응력이 클수록 크다는 것을 알 수 있다. 또한 변태온도의 저하 정도는 A_f 변태온도의 저하보다 M_s 변태온도의 반복피로에 의한 저하가 훨씬 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 반복 열사이클 피로에 의하여 M_s 변태온도가 크게 저하하는 이유는 반복 열사이클 부하에 의하여 시료의 내부에 전위가 도입되며 이와 같이 도입된 전위에 의하여 형성된 응력장이 M_s 변태온도를 감소시켜 결국 마르텐사이트 변태를 억제하기 때문이라 생각된다.[13~18] 이와 같은 반복 열사이클 부하에 의해 변태온도가 변화되므로 형상기억합금을 이용한 액추에이터로서 로보트를 제어할 경우, 오동작을 야기시키는 원인이 될 것으로 생각된다. 따라서, 이와 같은 거동을 사전에 면밀히 검토하여, 이것을 감안하여 사용온도를 결정 하여야만 오동작을 방지할 수 있다고 생각된다.

Fig. 10은 이와 같은 반복 열사이클 부하에 따른 변태온도의 저하에 대한 pre-strain의 영향을 검토한 결과이다.

그림에서 보는 바와 같이 pre-strain을 부가한 경우에는 반복수의 증가에 따라 M_s가 저하하지 않고 오히려 초기에는 조금 높아진 후 피로파단시까지 일정하게 유지된다는 것을 알 수 있다. 따라서 pre-strain이 부가된 시험편의 경우 안정한 M_s점을 얻을수 있으므로 보다 안정된 마르텐사이트 변태변형량을 얻을 수 있으며 이는 앞의 Fig. 5의 경우와 잘 일치한다. 이와 같이 pre-strain의 부가에 의하여 수명 초기에 M_s변태온도가 높아지는 이유는 pre-strain의 부가에 의하여 응력유기 마르텐사이트 변태를 유발시키므로 M_s온도가 상승할 것으로 사료되며, 부가된 pre-strain량이 많을수록 가공경화의 정도가 크며 열사이클 반복 초기에 임계전위를 갖게 되어 그 이후 반복회수의 증가에 따라 도입되는 전위가 적으므로 결과적으로 전위의 이동이 보다 적어 M_s의 변화를 억제시키는 것으로 사료된다.[2,11,16]

3.3 피로수명

Fig. 11은 각 시험편의 피로수명을 검토한 S-N 곡선이다.

그림에서 보는 바와 같이 비교적 저응력인 탄성범위 내에서의 각 시험편의 파단수명은 약 10,000회 정도의 비교적 긴 수명을 가지는 것을 알 수 있다. 또한 부하응력과 파단수명의 관계는 대체적으로 직선관계를 유지하고 있으며 그 기울기는 pre-strain을 부가하지 않은 시험편의 기울기는 대체적으로 완만하게 일정하나 pre-strain을 부가함으로써 기울기가 대단히 크게 증가하는 것을 알 수 있다. 또한 피로수명은 시효열처리 온도가 낮을수록 양호하게 나타났으며, pre-strain의 부가에 의하여 더욱 더 피로수명을 개선시킬 수 있었다. 그러나 pre-strain을 부가한 시험편에 있어서도 고응력에서는 현저한 피로수명의 개선효과를 나타내나, 저응력에서는 그다지 큰 피로수명 개선효과를 나타내지 않았다.

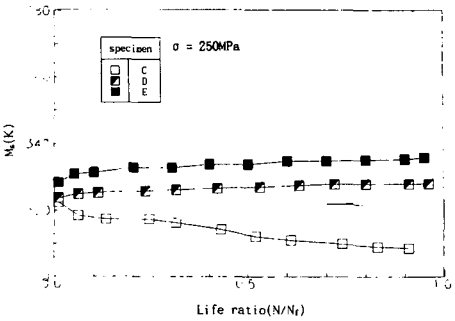


Fig. 10 The changes of martensitic transformation temperature(M_S) with thermal cycle

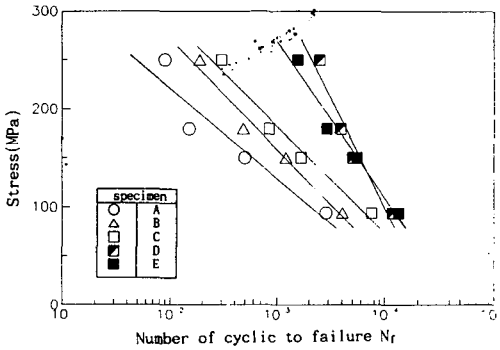


Fig. 11 The relation between tensile stress and number of cycle to failure

4. 결 론

본 논문에서는 시효열처리 온도와 pre-strain을 부가한 시험편을, 로보트 액추에이터 응용시 가장 유용한 방법의 하나인 통전 가열방법으로 피로실험을 행하여, 각 시험편의 반복 변형특성과 반복 사

용에 따른 형상변화량, 회복력의 저하, 변태온도의 변화 등과 같은 피로열화 거동에 미치는 시효열처리 온도와 pre-strain의 영향을 검토하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 형상기억합금의 반복동작과 피로열화의 개선방안에 대하여 피로열화의 주인자는 영구변형량(ΔU)임을 알았다.

(2) 적합한 시효열처리 방법을 이용함으로써 마르텐사이트 변태변형량의 피로열화는 어느 정도 개선할 수 있었으나 피로열화의 주 인자인 영구변형량에 의한 피로열화는 개선할 수가 없었다. 그러나 pre-strain의 부가에 의해 변태변형량(ΔD)과 영구변형량(ΔU)의 피로열화까지 거의 완전하게 개선할 수 있었다.

(3) 형상기억합금의 변태온도는 반복 열사이클 부하에 의하여 저하하였으며 이와 같은 경향은 부하응력이 클 수록 현저하였다.

(4) 피로수명은 본 연구 범위에서는 시효열처리 온도가 낮을수록 양호하였으며, pre-strain의 부가에 의하여 피로수명은 보다 크게 개선되었다.

후 기

본 연구는 한국과학재단의 핵심과제 연구비 지원(과제번호 911-0907-023-2)으로 수행된 연구결과의 일부이며 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

(1) 宮崎修一, 大塚和弘, 1989, "形狀記憶合金の基礎と今後の題," 金屬, Vol. 8, pp. 2～10

(2) Duerig, T. W., Melton, K. N., Stockel, D. and Wayman, C. M., 1990, "Enginering Aspects of Shape Memory Alloys," *Butterworth-Heinemann*, pp. 394～413

(3) 홍성원, 임병희, 이오연, 1990, "Ti-Ni-B 형상기억합금의 상변태 및 열처리 특성," 대한금속학회지, 第28卷 8號 pp. 743～751

(4) 舟久保, 熙 康, 1984, "形狀記憶合金" 產業圖書, pp. 157～161

(5) 見沼亮介, 松本實, 本間敏夫, 1987, "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

(6) 佐分利 敏雄, 1989, "ニッケル・チタン系形狀記憶合金の開發研究の現狀," 金屬, Vol. 8, pp. 11～18

(7) Nishida M., Wayman C. M. and Honma T., 1986, "Precipitation Processes in Near-Equiatomic TiNi Shape Memory Alloys," *Metallurgical Transactions* A, Vol. 17A, pp. 1505～1515

(8) 形狀記憶合金 開發 委員會, 1990, "形狀記憶合金과 그 使用方法," 機電研究社, p. 21

(9) 金子憲一 외 5명, 1993, "Ni-Ti合金の組成と熱處理が形狀記憶特性に及ぼす影響について" 日本機械學會誌, Vol. 42, No. 480, pp. 1103～1108

(10) 古屋泰文, 三塚賢一 외 2명, 1990, "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壞評價非破壞評價シンポジウム, pp. 53～58

(11) 戶伏壽昭, 田中喜久昭 외 3명, 1992, "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58卷 552號, pp. 1411～1416

(12) 大塚和弘, 1985, "形狀記憶合金の材料特性," 日本金屬學會會報, 第24卷 1號, pp. 26～32

(13) 신명철, 지광구 외 3명, 1986, "形狀記憶合金開發에 관한 硏究報告書," 科學技術院, pp. 2～9

(14) 李丙澤, 南宮延, 李五演, 千炳善, 1988, "Ti-Ni 형상기억합금의 열 Cycle에 의한 피로특성," 대한금속학회지, 第26卷 3號, pp. 217～229

(15) 오명훈, 지광구, 신명철, 1989, "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 7號, pp. 70～76

(16) 李五演, 千炳善, 南宮庭, 趙珖熙, 1989, "Ti-Ni-Cu 형상기억합금의 상변태 및 열사이클에 의한 피로특성," 대한금속학회지, 第27卷 2號 pp. 103～112

(17) 韓喆湖, 李亨蘭, 洪錫均, 千炳善, 1990, "Ti-Ni-X(Cu, Al) 形狀記憶合金의 擬彈性 및 耐蝕性에 관한 硏究," 대한금속학회지, 第28卷 6號, pp. 477～481.

(18) 宮崎 修一, 坂本 英和, 1985, "形狀記憶合金の繰り返し特性," 日本金屬學會會報, 第24卷 1號, pp. 33～40