

◎ 論 文

형상기억합금의 反復變形特性和 疲勞現象에 관한 연구

박 영 철* · 오 세 옥* · 조 용 배** · 허 정 원** · 이 명 렬**

(1992년 1월 28일 접수)

A Study on Cyclic Deformation and Fatigue Phenomenon of Shape Memory Alloy

Young Chul Park, Sae Wook Oh, Yong Bae Cho, Chung Weon Hue, Myung Reyl Lee

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

Abstract

Recently, the robot actuator worked by the driving recovery-force of the thermo elastic martensitic transformation of shape memory alloys(SMA) has been studied. In general, such a SMA actuator necessitates a number of cyclic repeated motion, so that the investigation of gradual decrease of recovery force with repeated motion cycle as well as the prevention of such a degradation of shape memory effect(SME) are very important for the actual use of a robot actuator.

However, such research and discussions about the degradation of SME are very few up to the present. Therefore, in this study, the characteristics of the cyclic deformation and degradation of SME of Ti-Ni alloy would be investigated and discussed in detail by current heat type fatigue tester, which is a newly designed fatigue tester by author.

In addition, we will establish a new design concept for robot actuator from these result.

1. 서 론

形狀記憶合金(Shape Memory Alloy ; 이하 SMA)중 공업재료로 사용되는 종류는 Ti-Ni계(Nitinol)와 Cu계(Betalloy)이다. 특히 Ti-Ni계는

Cu계에 비하여 形狀回復力(recovery force)이 우수하여 공업분야 뿐만 아니라 의료분야 등 여러 응용분야에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다. 최근에는 형상기억합금의 열탄성 마르텐사이트 변태의 성질인 열에너지를 기계적에너지로 변환이 가능한 기능성을 이용하여 형상기억합금을 로봇트

* 정희원, 동아대학교 공과대학 기계과
** 정희원, 동아대학교 공과대학 기계과 대학원

용 액추에이터에 적용하기 위한 연구 및 개발이 활발히 행하여지고 있다. 형상기억합금을 이용한 액추에이터는 3차원적 작동이 가능하며, 내식성이 우수하다는 점 등 많은 장점을 지니고 있다. 이러한 장점 때문에 형상기억합금을 이용한 로봇트는 심해, 우주, 핵발전 설비 등 극한 상황에서도 사용이 가능한 큰 이점이 있다.¹⁻⁹⁾

그러나, 形状記憶合金은 로봇트용 액추에이터의 구동용 재료로써, 실용화할 경우 많은 문제점이 나타나며, 그 중 반복동작에 따른 형상기억합금의 疲勞現象이 가장 큰 문제점으로 지적되고 있다. 일반적으로 액추에이터는 많은 반복동작이 필요하며, 이와같이 반복적으로 동작을 하면 형상기억합금은 形状回復力 저하 및 變態變位量 변화 등과 같은 疲勞現象이 일어난다. 따라서 형상기억합금을 로봇트용 액추에이터로 사용할 경우에, 이와같은 疲勞現象을 방지하는 것이 대단히 중요한 문제이다.^{10,11)}

그러므로, 본 연구는 로봇트용 액추에이터의 개발을 위한 기초 데이터 축적을 위하여 Ti-Ni계 형상기억합금을 직접통전 가열냉각방식에 의한 피로시험을 행하여 反復變形特性과 疲勞現象을 규명하는 것이 목적이다.

2. 실험장치 및 방법

2-1. 시험편

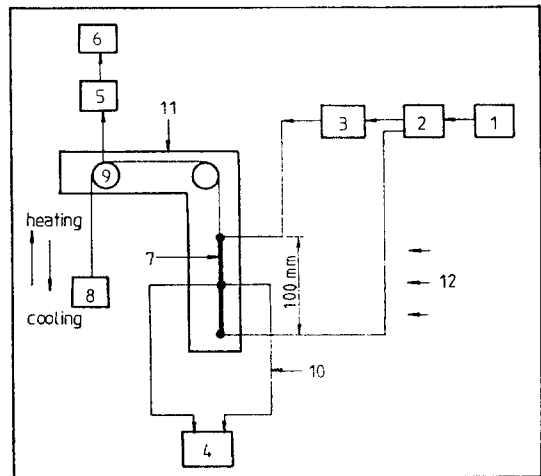
본 실험에 사용한 시료는 냉간가공한 직경 0.5 mm의 Ti-Ni_{50.6%} 합금(Nitinol; 日本古河電工(株)製品)와이어이다. 시료의 열처리는 우선 와이어 냉간가공시 발생된 가공잔류응력의 영향을 없애기 위하여 진공중(10^{-3} torr)에서 1073K의 온도로 1시간 유지한 후 빙수에서 급냉하여 용체화 처리를 하였으며, 형상기억효과(shape memory effect: 이하 SME)를 위한 열처리는 시편에 직선의 형상을 기억시키기 위한 치구를 사용하여, 시료를 직선상으로 고정한 후 진공 중에서 각각 시료처리온도를 673K, 773K, 873K로 달리하여, 1시간 유지한 후 빙수에서 급냉시켰다. 본 논문에서는 시료처리온도 673K에서 시료처리한 시험편을 A시료, 773K

경우를 B시료, 그리고 873K 경우를 C시료로 칭하였다.

2-2. 실험방법

Fig. 1은 본 실험에 사용한 SMA용 피로시험장치의 구성도를 나타내고 있다. 시료의 시험거리인 양척 사이의 거리를 100mm로 설정하고, 시험편 양끝에 압착단자로 압착시켜 (1)번의 current power에서 직접통전 가열냉각하는 방법을 사용하였다. 척 하부는 고정되고 상부는 풀리를 이용하여 여러가지 응력을 부하하였다. 이 경우 각 부하에서 최대한 마찰손실이 없도록 자유로이 움직일 수 있도록 설치하였다.

변위량은 회전식 변위계를 사용하여 검출하고, 이 신호는 제로서프레션(zero-suppression)을 통과시킨 후 X-Y 레코더의 Y축으로 출력하였다. 온도는 Cr-Al 열전대를 이용하여 측정하고, 이



- | | |
|--------------------------|----------------------|
| 1. direct current power | 7. specimen |
| 2. timer relay | 8. weight |
| 3. counter | 9. displacement gage |
| 4. digital voltage meter | 10. CA thermocouple |
| 5. zero suppression | 11. frame |
| 6. X-Y recorder | 12. fan wind |

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

신호를 X-Y 레코더의 X축으로 출력하였다. 각 조건에서 변태온도의 변화를 조사하기 위하여 Fig. 3과 같은 X축의 온도와 Y축의 변위량으로 형성되는 히스테리시스곡선을 이용하였다. 시료의 통전 가열전원은 가변직류 정전류장치(D. C power supply)를 사용하였으며, 타이머를 사용하여 통전시간 및 냉각시간을 제어하였다. 이때 냉각속도를 빠르게 할 목적으로 팬(fan)을 사용하여 강제 공냉시켰다. 또한, 시험편의 통전 및 가열 사이클의 회수를 카운트(counter)에 기록되게 하였다.

한편, 피로 시험 중에 疲勞現像을 조사하기 위하여 形狀回復 低下量(U)과 變態變位量(D)을 X-Y레코더에 기록하였으며, 전기저항을 50사이클마다 조사하여 反復變形動作 특성과의 연관성을 검토하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3-1. 실험조건의 결정

피로시험의 부하응력레벨을 결정하기 위하여 정적상태에서 인장시험을 실시하여 응력(stress)-변위(strain) 곡선을 그렸으며, 이를 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 형상기억합금의

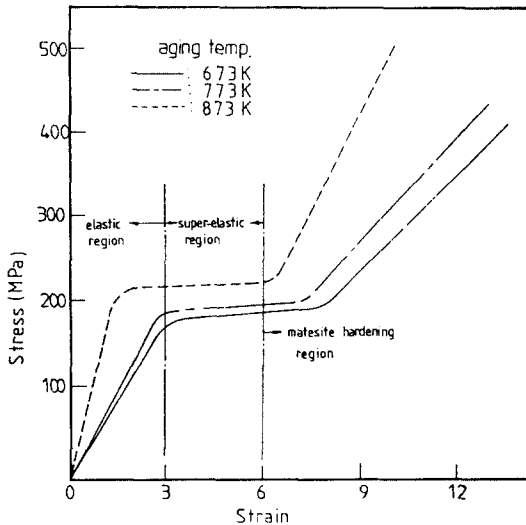


Fig. 2 Stress-strain curve of Ti-Ni wire for various aging temperature.

응력-변위곡선은 보통강과 대단히 다른 형태를 나타내고 있으며, 이 곡선을 전체적으로 탄성구역, 탄성구역, 마르텐사이트 경화구역 등으로 구분하여 3구역으로 나눌 수 있다. 여기서 초탄성구역이란 일반적으로 변형량 3-5%의 범위를 말한다.¹²⁾ Fig. 2의 결과를 기초로 하여 본 연구에서 부하할 응력레벨은 탄성구역에 해당하는 67MPa, 137MPa와 초탄성 구역에 해당하는 183MPa 및 마르텐사이트 경화구역에 해당하는 202MPa 등을 선택하였다.

시험편이 변태를 일으키기 위해서는 가열시에 최고온도가 역변태 완료온도(A_f 온도) 이상까지 가열하고 냉각시에도 최저온도는 마르텐사이트 변태 완료 온도(M_f 온도) 이하까지 되도록 통전전류와 통전시간 및 냉각시간을 설정해야 한다. 따라서 피로시험 이전에 먼저 D. S. C(시차주사열량계: difference scanning calorimeter)를 이용하여, 시험편의 각 逆變態點(A_f, A_s)과 마르텐사이트 변태점(M_f, M_s)을 구해야 한다.

그러나 본 실험과 같이 실온 대기 중이고, 응력이 부하될 경우에 무응력 상태에서의 상변태 경우와는 변태온도가 달라지며, 부하응력의 레벨에 따라서도 변태온도가 변화하므로 부하중에서는 D. S. C를 이용하여 변태온도를 측정할 수 없다.¹³⁾ 따라서 본 연구에서는 Fig. 3에서 보는 바와 같이 接線法을 이용하여 각각의 실험응력에서 직접 변태온도를 결정하였으며 그 결과를 Table. 1에 나타내었다. 위의 결과를 기초로 피로시험의 최고온도 및 최저온도를 363K 및 293K로 결정하였으며 이 온도범위에서 전체의 피로시험을 실시하였다.

위와 같이 결정한 실험온도를 얻기 위하여 통전 조건 및 냉각조건을 결정하였으며 결정한 실험조

Table 1. Transformation temperature of Ti-Ni wire material for various stress.

stress material	67MPa				137MPa				183MPa			
	A_s	A_f	M_s	M_f	A_s	A_f	M_s	M_f	A_s	A_f	M_s	M_f
aging temp. (K)												
673	311	320	299	295	318	342	312	307	322	356	318	314
773	315	331	303	298	324	350	313	310	327	357	323	316
873	318	336	314	310	327	357	323	314	332	359	330	321

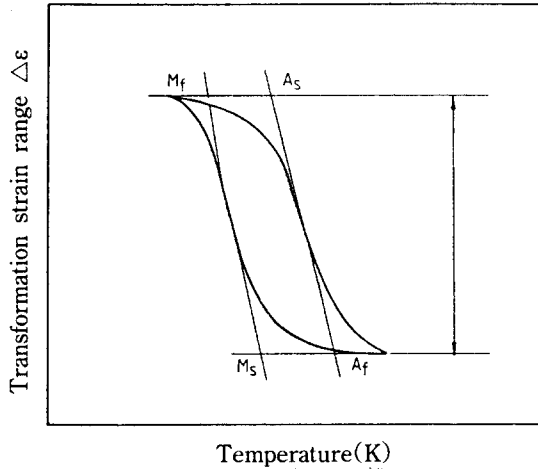


Fig. 3 Method of transformation temperature by hysteresis loop.

- M_s : Martensitic transformation starting temperature
- M_f : Martensitic transformation finishing temperature
- A_s : Austenitic transformation starting temperature
- A_f : Austenitic transformation finishing temperature

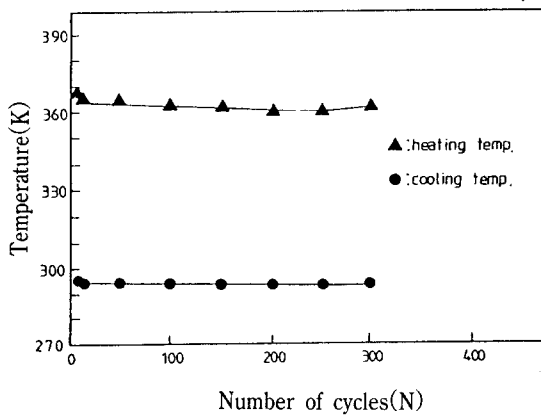


Fig. 4 Temperature change of Ti-Ni wire during heating cycle for material in condition of aging time 773K and test stress 137MPa.

건은 통전전류 4.4A, 통전시간 3sec, 냉각시간 15 sec, 냉각속도 4.5K/sec, 가열속도 22.9K/sec이었다. 또한, 피로시험 중에 시험편이 변형되면 시험편의 전기적 조건이 변하므로 동일한 통전시간(가열시간)을 주어도 가열온도가 변할 수 있다. 이를 확인하기 위하여 수차례의 예비실험을 실시하였으며, Fig. 4에 결과 중 한 예를 나타내었다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 동일한 통전시간에 대한 온도의 변화는 거의 없었다.

3-2. 變形量 舉動

Fig. 5는 피로시험 중의 시험편의 形狀回復 低下量(ΔU)와 變態變位量(ΔD)의 변화를 X-Y 레코더에 기록한 결과이다. 總變位量(ΔD_{total})은 반복 동작에 의하여 원래의 길이로 되돌아 오지 않고, 영구변형으로 잔존하는 변위량인 形狀回復 低下量(ΔU)과 마르텐사이트 변태에 의하여 발생하는 마르텐사이트 變態變位量(ΔD , 앞에서의 ϵ_{SME} 와 같은 양을 말한다)로 구분할 수 있으며, 본 연구에서는 疲勞劣化의 인자를 규명하기 위하여 ΔU 와 ΔD 두 인자를 구분하여 각각의 인자에 대하여 검토하였다.

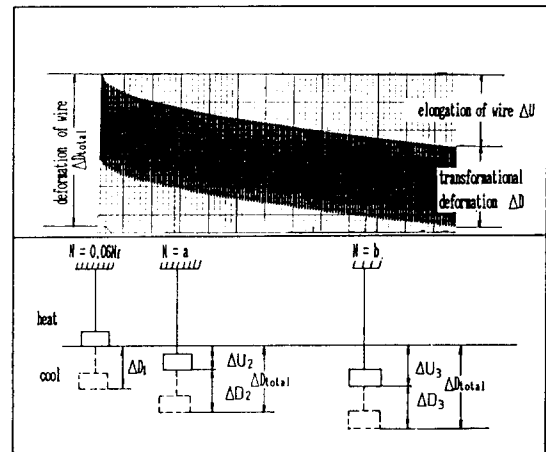


Fig. 5 An example of elongation(ΔU) and transformational deformation(ΔD) of Ti-Ni specimen during fatigue test.

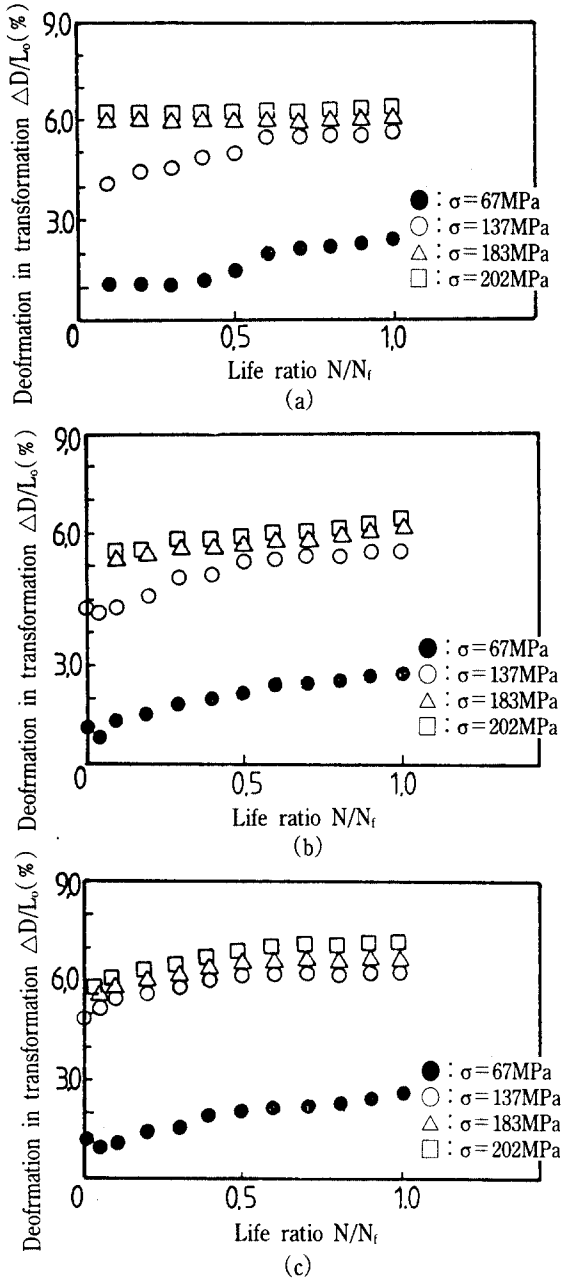


Fig. 6 Behavior of degradation factor with thermal cycles for aging temp. (a) 673K, (b) 773K, (c) 873K

가. 變態變位量(ΔD) 舉動

Fig. 6은 각 시료(A, B, C)에서 부하응력에 따른 變態變位量(ΔD)을 시험편의 초기길이 L₀로 무차

원화한 變態變形率($\epsilon_{SME} = \Delta D/L_0$)과 반복회수(N)을 파단까지의 반복회수(N_f)로 무차원화한 수명비(N/N_f)와의 관계를 나타내었다. 모든 시료에서, 탄성구역에 해당하는 부하응력 67MPa, 137MPa에서는 반복회수가 증가함에 따라 ϵ_{SME} 도 조금씩 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 초탄성 구역내에 해당하는 부하응력 183MPa과 마르텐사이트 경화 구역에 해당하는 부하응력 202MPa에서는 상대적으로 변화가 적으며 거의 일정한 값을 나타낸다.

Fig. 7은 變態變位量(ΔD)의 劣化現象을 조사하기 위하여 응력이 183MPa에서 變態變位를 ΔD를 초기 변위량 D_i에 대하여 규격화한 변위량(ΔD/D_i)과 수명비(N/N_f)의 관계를 나타내었다. A시료에서는 變態變位量(ΔD)의 疲勞劣化現象은 나타나지 않으나 B, C시료에서는 N/N_f가 0.3에서 약간의 劣化現象을 보이다가 그 이후에는 거의 일정함을 보이고 있다. 결과로 부터 시효처리 673K A시료가 B시료(773K) 및 C시료(873K)보다 로보트용 액추에이터 재료로서 적합함을 알 수 있다. 일반적으로 Ti-Ni SMA재료를 로보트용 액추에이터로서 10⁴회 이상 사용하고자 할 경우에는 變態變形量을 1% 이하 ($\epsilon_{SME} \leq 0.01$)에서 사용하므로, 이러한 조건에서는 A, B 및 C재료를 모두 로보트용 액추에이터 재료로서 사용할 수 있다.

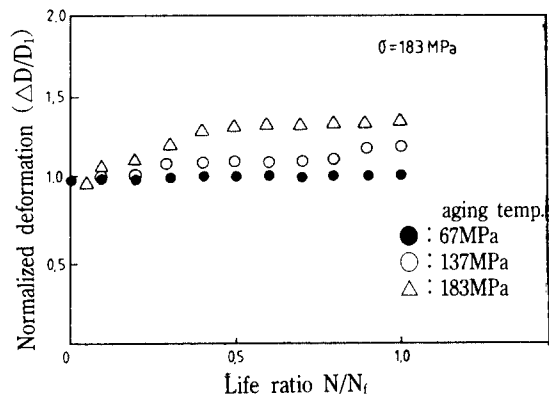


Fig. 7 Relation between normalized transformational deformation and life ratio.

나. 形狀回復 低下量(ΔU) 거동

Fig. 8은 각 부하응력에서 形狀回復 低下量(Δ

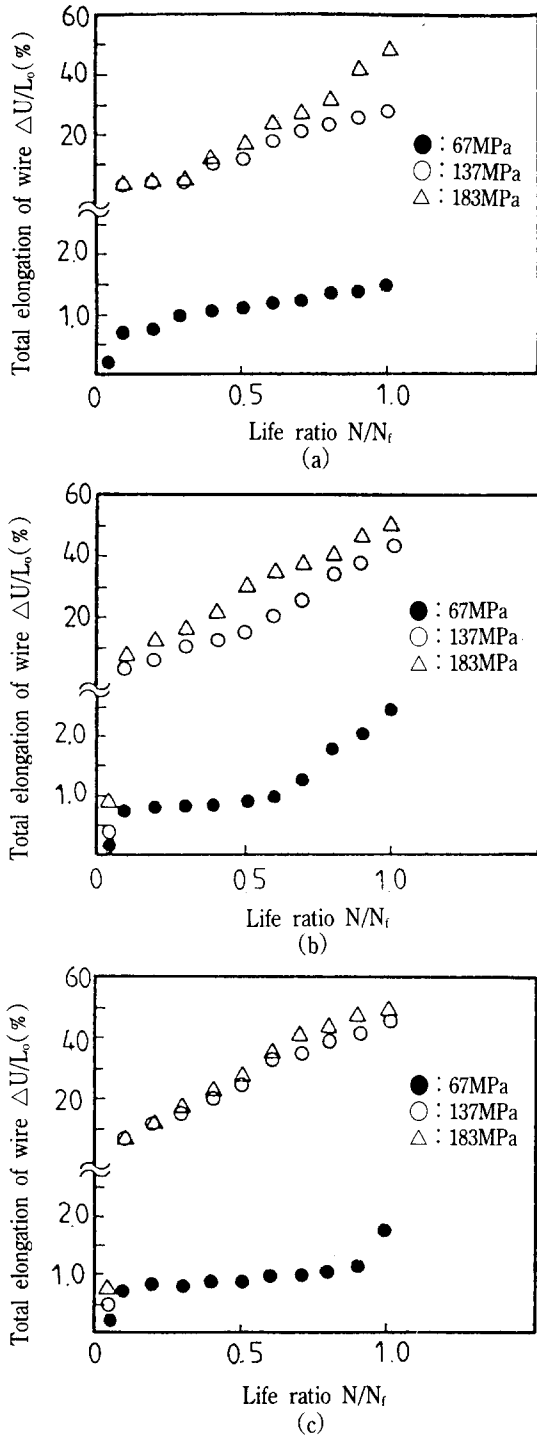


Fig. 8 Behavior of degradation factor with thermal cycles for aging temp. (a) 673K, (b) 773K, (c) 873K

U)를 초기 와이어의 길이 L_0 에 대해 무차원화한 形狀回復 低下量($\Delta U/L_0$)와 수명비(N/N_r)의 관계를 나타낸 것이다. 67MPa의 낮은 응력에서는 파단시까지 $\Delta U/L_0$ 는 다른 두 응력레벨보다 거의 변화가 적으나, 137MPa과 183MPa인 고응력에서는 피로반복회수가 증가함에 따라 $\Delta U/L_0$ 가 급격히 증가하고 있다. 이 결과는 SME를 와이어 또는 스프링의 부재로 고응력에서 사용할 경우에는 사용반복회수가 점점 증가함에 따라 形狀回復 低下量이 급격히 증가되므로 원래의 위치까지 정확히 복귀하지 않으므로 정밀한 조정이 곤란함을 의미한다.

형상기억합금의 疲勞現象을 일으키는 두 인자인 ΔU 와 ΔD 에 대하여 Fig. 6~Fig. 8을 이용하여 검토하여 본 결과 ΔD 의 경우에는 저응력에서 疲勞現象을 일으키나, ΔU 의 경우 오히려 저응력보다 고응력에서 疲勞現象을 일으킨다는 상반된 결과를 얻었다. 시간에 따른 U의 증가는 고온에서의 크리프현상과 비슷한 거동으로서, 고응력에서는 열피로사이클 중에 시험편의 온도가 상승할 경우에 크리프현상이 생기는 것으로 생각된다. 그리고 결과를 정량적으로 검토하여 보면, ΔU 의 경우에 피로현상의 정도는 탄성구역에 해당하는 저응력(67MPa)에서 1~2% 정도이지만 초탄성 구역에 해당하는 고응력(137MPa, 183MPa)에서는 30~40% 정도로 대단히 크다. 또한 ΔD 의 경우에 피로현상의 정도는 전체 응력에서 1~2% 정도로 적다.

따라서 疲勞現象을 일으키는 주인자는 ΔU 이다. 결과적으로 현재의 재료를 이용하여 疲勞現象을 일으키지 않고 보다 높은 정도를 가지는 로봇트를 제작하기 위하여서는 대체로 초탄성 이하인 응력에서 사용하는 것이 바람직하다. 이와 같은 낮은 응력에서도 약 1~2%의 疲勞現象을 나타내므로 이와같은 疲勞現象을 방지하는 연구가 필요하며, 고응력에서 사용하기 위해서는 疲勞現象의 주인자인 ΔU 를 감소 및 방지하는 연구가 필요하다고 생각된다.

3-3. 수명평가

가. S-N 곡선

Fig. 9는 각 시료에 대한 S-N곡선을 나타내고

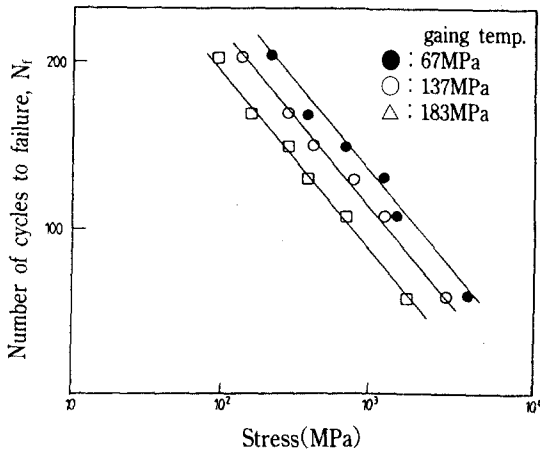


Fig. 9 Relation between maximum cyclic stress and number of cycle to failure.

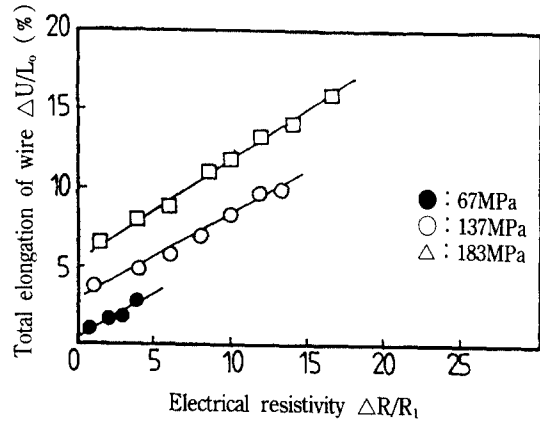
있다. 그림에서 보는 바와 같이 응력과 파단수명은 각 시효처리 온도에 대하여 직선적인 관계를 나타내고 있다. 피로수명은 C시료 < B시료 < A시료 순으로 커지고 있으며, 673K에서 시효처리한 A시료가 피로수명에 있어서 가장 우수함을 알 수 있다.

이상에서 Fig. 6, 8 및 9의 결과로부터 실제로 보트용 액추에이터를 사용할 경우 673K에서 시효처리한 A시료가 B시료 및 C시료보다 우수한 재료임을 알았다.

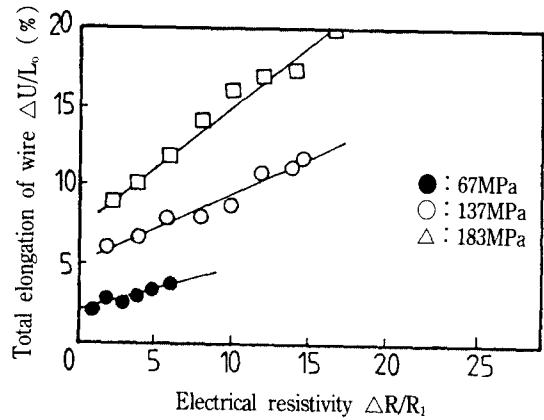
나. 電氣抵抗 變化率 및 形狀回復 低下量의 관계

Fig. 10은 形狀回復 低下量($\Delta U/L_0$)과 電氣抵抗 變化率(R/R_1)의 관계를 나타낸 것이다. 모든 시료에서 응력레벨이 높을수록 대체적으로 기울기는 증가하고, 시효온도가 높을수록 기울기가 현저하게 증가하였다. 이러한 점은 시효온도가 높은 재료일수록 $\Delta U/L_0$ 가 급격히 증가한다는 것을 의미하며, 이는 와이어의 신장에 따른 단면적의 감소와 관계가 있다고 사료된다.

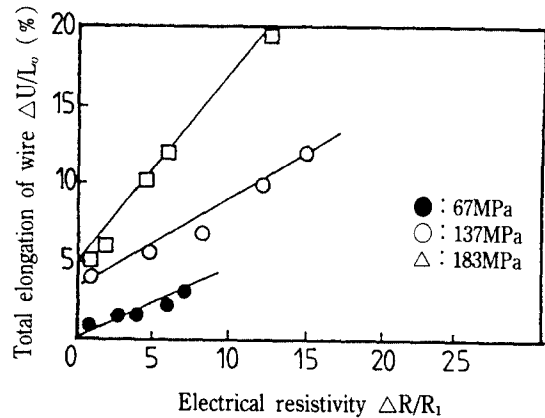
이상의 결과로부터 3종류 응력레벨에서 $\Delta U/L_0$ 와 R/R_1 두 인자는 각각 선형성을 나타내고 있다. 따라서 $\Delta R/R_1$ 을 알면 $\Delta U/L_0$ 값도 구할 수 있게 된다. 즉, 전기저항값을 이용하면 직접통전 SMA 액추에이터의 위치제어 등의 직접적인 피이드 백(feed back)기구 등에서 형상기억합금을 응용할 수 있는 가능성을 알 수 있다.



(a)

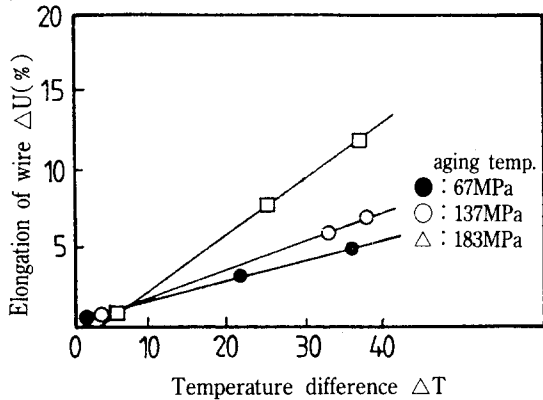


(b)

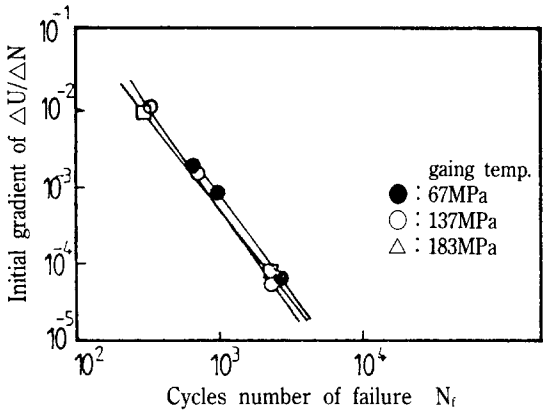


(c)

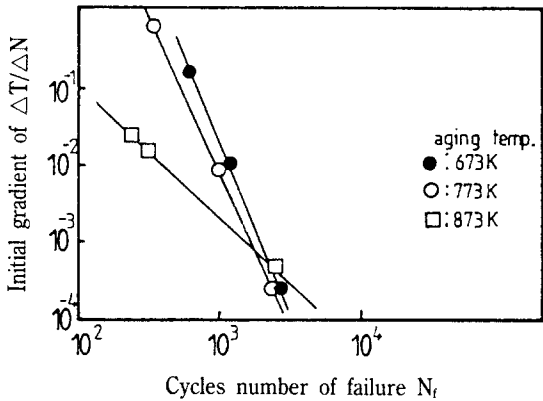
Fig. 10 Relation between $\Delta U/L_0$ and R/R_1 according to aging temp.



(a)



(b)



(c)

Fig. 11 Relation of (a) $\Delta U-\Delta T$, (b) $\Delta U/\Delta N-N_f$, (c) $\Delta T/\Delta N-N_f$ during fatigue tests.

Fig. 11은 각 시험편의 $N/N_f=0.2$ 인 사이클수에 서 측정된 ΔU 와 ΔT 를 나타내었다. (a)는 ΔU 와

ΔT 의 관계, (b)는 $\Delta U/\Delta N$ 과 N_f 의 관계, (c)는 $\Delta T/\Delta N$ 과 N_f 와의 관계를 나타낸 것이다. 각각의 관계들이 양대수 그래프위에 직선으로 나타나는 데, 이것으로부터 형상기억합금의 열피로 중에서 變態溫度差(ΔT) 및 形狀回復 低下量(ΔU) 변화를 검토하면 피로파단수명을 非破壞的으로 추정할 수 있음을 알 수 있다.

4. 결 론

形狀記憶合金에서 시효처리온도 변화 및 하중레벨에 대하여 반복변형특성과 피로현상을 실험적으로 연구하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 形狀記憶合金의 2개의 열화인자 중 形狀回復 低下量(ΔU)은 저응력에서는 피로회복회수가 증가하여도 큰 변화가 없으나, 고응력에서는 피로 반복수에 따라서 현저하게 증가하며, 變態變形量($\Delta D/L_0$)의 변화는 거의 없다.

(2) 673K에서 시효처리한 시료가 773K, 873K에서 처리된 시료에 비하여 疲勞現象이 적게 발생하며, 피로수명도 크다. 따라서 673K에서 시효처리한 시료가 로보트용 액츄에이터 재료로서 우수함을 알았다.

(3) $\Delta U-\Delta T$ 관계, $\Delta U/\Delta N-N_f$ 관계 및 $\Delta T/\Delta N-N_f$ 관계를 기초로 하여, 變態溫度差(ΔT) 및 形狀回復 低下量(ΔU)을 이용하여 비파괴적인 수법으로 파단수명을 예측할 수 있는 가능성을 제시하였다.

후기: 본 연구는 91년도 한국과학재단 일반연구(과제번호 911-0907-023-2)의 지원을 받아 수행한 연구 결과의 일부입니다. 연구를 지원하여 주신 한국과학재단 관계자에게 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 1) 三輪敬之, 本間 大, 日本金屬學會會報, Vol. 24, p. 61, 1985.
- 2) 古屋泰文, 島田平八, 本田力雄, 第4回 日本金屬學會學術講演論文集, p. 461, 1986.
- 3) 田村谷一, 鈴木雄一, 日本金屬學會講演概要, pp. 224~227, 1986.

- 4) 古屋泰文, 島田平八, 日本非破壊検査協會, 第1回 新素材 およびその製品の非破壊検査シンポジウム, p. 87, 1984.
- 5) Shvindlerman L. S and Straumal B. B., *Acta Metall.*, Vol. 32, pp. 1735~1779, 1985.
- 6) C. M. Wayman, *Proc. Int. Conf. on Martensitic Transformation*, pp. 645~654, 1986.
- 7) O. Matsumoto, S. Miyazaki, K. Otsuke and H. Tamura, *Acta Metall.*, Vol. 35, p. 2137, 1987.
- 8) 신명철, 지광구, 정영훈, 이규환, 송근용, 형상기억합금 개발에 관한 연구보고서, 과학기술원, 1986.
- 9) 이병택, 남궁연, 이오연, 천병선, "Ti-Ni형상기억합금의 열 Cycle에 의한 피로특성", 대한금속학회지, Vol. 26, No. 3, pp. 217~229, 1988.
- 10) C. M. Wayman, 維木次南: 日本金屬學會會報 19號, p. 323, 1980.
- 11) T. Honma, Y. Shugo and M. Matsumoto, *Res. Inst. Min. Drese. Met. Report* 28, 2, 1972.
- 12) 한철호, 이형란, 홍석균, 천병선, "Ti-Ni-X (X=Cu, Al) 형상기억합금의 의탄성 및 내식성에 관한 연구", 대한금속학회지, Vol. 28, No. 6, pp. 477~485, 1990.
- 13) 성윤모, 지광구, 신명철, 홍종철, "Ni-Ti 형상기억합금의 상변태에 미치는 열 Cycle에 의한 피로특성", 대한금속학회지, Vol. 26, No. 8, pp. 776~ 783, 1988.