

실험법에 의한 지능성 복합체의 회복응력 측정에 관한 연구

황재석* · 이효재*

(2002년 5월 27일 접수, 2003년 2월 11일 심사완료)

A Study on the Measurement for the Recovery Stress of Intelligent Composite by Experiment

Jai-Sug Hawong and Hyo-Jae Lee

Key Words : Intelligent Composite(지능성 복합체), Prestrain(초기변형율), Shape memory Alloy (SMA, 형상기억합금), Fiber Volume Fraction(파이버 체적 비율), Thermal Expansion(열팽창), Transformation Temperature(변태온도), Reverse Martensite to Austenite Temperature(역변태), Recovery Stress(회복응력)

Abstract

Shape memory is a physical phenomenon which a platically metal is restored to its original shape by a solid state phase change by heating. TiNi alloy is the most effective material in the shape memory alloy(SMA). To study(measure) recovery stress of intelligent composite, Ti50-Ni50 shape memory matrix with prestrain SMA fiber. When SMA fiber of the intelligent composite is heated over austenite starting temperature(As) by electric heating, a recovery stress are generated. The recovery stress of the intelligent composite was measured by strain gage or photoelastic experiment. Measuring method of recovery stress by photoelastic experiment was developed in this research. It was certified that photoelastic experiment was more effective and more precise than strain gage method in the measurement of recovery stress.

1. 서론

신소재의 개발은 물질의 개발에서 새로운 기능을 가진 재료의 개발로 변천되기 시작했다. 80년대 후반부터 형상을 기억할 수 있는 재료에 대한 연구가 활발하여 형상기억합금을 비롯한 형상기억폴리머 등이 개발되었다.

그러나 형상기억재료 자체만으로는 원하는 구조용 재료의 기계적 특성과 지능성 재료로서의 물리적, 화학적인 기능을 가진 지능성 재료^(1,2)의

특성을 얻을 수 없다. 그래서 현재는 지능성 재료의 특성을 구비한 지능성 복합체의 개발이 활발히 진행중이고, 그 중에서도 형상기억합금을 내재한 복합체의 개발과 거동해석이 두드러지게 연구되어지고 있다.^(3,4) 그 중에도 형상기억합금의 회복응력을 측정하는 방법으로는 형상기억합금의 양단을 양쪽지지보에 고정시키고 회복력에 의한 지지보의 변형을 스트레인 게이지를 이용하여 회복응력을 구하는 방법⁽⁵⁾과 한쪽을 고정시키고 다른 한쪽에 스프링을 연결하여 형상기억합금의 회복력에 의한 스프링의 강성변화로부터 회복력을 구하는 방법⁽⁶⁾등이 제시되었다.

본 연구에서는 형상기억합금을 내재한 지능성 복합체를 제작하고, 형상기억합금 파이버(Ti50-Ni50 SMA Fiber)와 지능성 복합체의 형상회복특성과 회복응력 측정방법을 규명하고, 광탄성 실험법을 이용하여 지능성 복합체의 회복응력을 측정할 수 있는 방법을 제안하고자 한다.

* 책임저자, 회원, 영남대학교

E-mail : jshawong@yumail.ac.kr

TEL : (053)810-2445 FAX : (053)813-3703

** 영남대학교 인턴연구원

2. 형상 기억합금의 회복특성과 지능성 복합체

2.1 형상기억합금의 회복특성

형상기억합금의 회복특성은 형상기억합금의 상변태온도에 의존하여 발생한다.^(7,8) 일반적으로 형상기억합금은 상온에서 마텐사이트상을 갖고 있으며, 역변태 온도 즉 형상을 회복할 수 있는 온도 이상으로 가열하게 되면 모상인 오스테나이트상으로 되돌아가게 된다. 이러한 역변태 과정을 통해서 형상기억합금은 형상을 회복하게 되며, 변태온도와 특성은 합금의 조성과 열처리 조건에 의하여 결정된다. 상온의 마텐사이트상은 안정된 조직을 가지고 있으며, 이 조직은 응력의 적용에 의해서 재배열되고 재료에는 변형이 발생하게 된다. 재료에 발생된 변형은 마텐사이트 변태온도에서 오스테나이트 변태온도 이상으로 가열했을 때 원래의 형상을 회복하게 된다. 이것은 형상기억합금의 변형된 조직이 오스테나이트상의 조직으로 재배열되는 과정에서 발생하는 형상회복특성으로 정의할 수 있다.

Fig. 1은 형상기억효과와 응력, 변형률, 온도와 의 상관관계를 나타낸 그림이다. 형상기억합금을 A점까지 하중을 가하였다가 제거하면, B만큼의 초기변형률(=ε)이 발생하게 된다. 이렇게 초기 변형된 형상기억합금에 열을 가하면 합금은 원래의 형상을 회복하게 된다. 즉 점 B에서 점 C로 변화하는 거동을 의미한다. 이때 회복응력이 발생하게 된다.

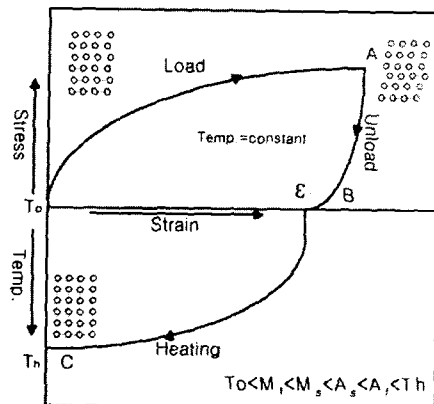


Fig. 1 Schematic illustration of shape memory effect

만일 형상기억합금이 양단에서 스프링이나 클램프에 의해서 구속되어 있다면 형상기억합금에는 응력이 발생한다. 이 응력이 바로 형상기억합금의 회복응력이다.⁽⁵⁾

2.2 지능성 복합체의 온도에 따른 열팽창

초기변형률이 가해진 지능성 복합체에 임의의 온도에서 작용하는 하중은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$F_{total}(T) = F_0 + F_{thr}(T) - F_{rec}(T) \quad (1)$$

F_0 는 지능성 복합체에 작용하는 외력, $F_{thr}(T)$ 은 파이버 방향의 열팽창력, $F_{rec}(T)$ 는 형상기억합금 파이버의 상변태에 의해서 발생하는 회복력이다. 파이버의 체적비율이 작은 경우에는 지능성 복합체의 열팽창은 주로 모재의 열팽창의 영향을 받는다. 그러므로 지능성 복합체의 열팽창력은 식(2)와 같이 표현할 수 있다.

$$F_{thr}(T) = \alpha_m(T - T_0)E_m A_m \quad (2)$$

여기서 E_m , A_m , α_m 은 각각 모재의 탄성계수, 단면적, 열팽창계수이고 T_0 는 상온을 의미한다. 식 (1)과 (2)에서 가해진 외력이 일정하고, 부가적인 외력이 작용하지 않는다면 지능성 복합체의 회복력은 온도에 따른 복합체의 열팽창에 크게 의존함을 알 수 있다. 그래서 본 연구에서는 지능성 복합체의 각각의 파이버 체적비율(0.5%, 1%, 1.5%)에 따른 지능성 복합체의 열팽창을 구하였다.

지능성 복합체의 열팽창을 구하기 위해서 제작된 지능성 복합체의 중앙에 스트레인 게이지(EA-00-125BZ-350, Measurements Grop, INC.)를 접착하고 전기로에서 일정 온도를 유지시키면서 온도에 따른 열팽창을 조사하였다. 이때 시험편의 온도는 시험편에 삽입된 열전대(Thermocouple, Copper -Constantan type)를 사용하여 오실로스코프를 통해서 Fig. 2와 같은 방법으로 측정하였다.

2.3 스트레인 게이지에 의한 형상기억합금

파이버와 지능성 복합체의 회복응력 측정 형상기억합금 파이버와 지능성 복합체의 회복

응력을 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 회복응력 측정 장치⁽⁹⁾를 이용하여 형상기억합금 파이버의 초기변형률과 지능성 복합체의 파이버 체적비율에 따른 지능성 복합체의 회복응력과 형상기억합금 파이버의 회복응력을 측정하였다.

Fig. 3에서 형상기억합금 파이버와 지능성 복합체에 발생한 회복력은 외팔보에 변형을 가하게 되고, 이때 발생한 변형을 외팔보에 접착된 스트레인 게이지를 통하여 회복력을 구하였다. 또한 형상기억합금 파이버에 열을 가하는 방법으로 Fig. 4와 같은 통전장치⁽⁹⁾를 사용하였다. Fig. 4에 나타낸 것처럼 형상기억합금에는 저항에 의한 열이 발생하게 되고, 이 열에 의해서 형상기억합금은 변태온도에 도달하여 역변태를 하게 된다. 본

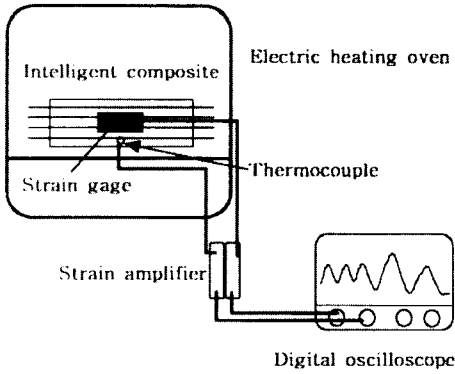


Fig. 2 Schematic drawing of the experimental set-up for measurement of the thermal strain

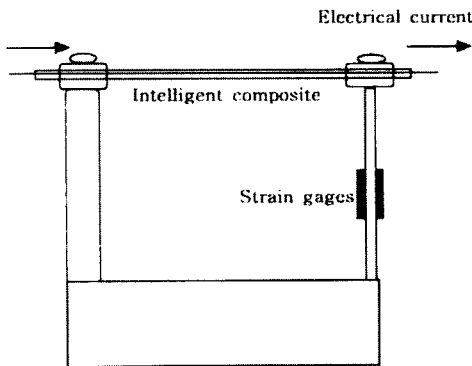


Fig. 3 The measurement device of the recovery stress

연구에서는 형상기억합금에 1A, 1.5A(Ampere)의 정전류와 DC 10V의 정전압을 사용하여 5°C/min로 온도를 상승시키면서 회복응력을 측정하였다.

2.4 광탄성 실험법에 의한 지능성 복합체의 회복응력 측정

광탄성 성질을 가진 지능성 복합체인 경우, 광탄성 실험을 통해서 지능성 복합체에 발생하는 광탄성 무늬를 측정하고 광응력 법칙을 사용하여 회복응력을 구할 수 있다.

광탄성 실험법으로 지능성 복합체의 회복응력을 구하는 방법은 다음과 같다.

① 원공이나 균열을 가진 지능성 복합재료에 상온에서 일정응력 σ_0 를 가한다.

② 형상기억합금 파이버에 열을 가하면서 온도 변화에 따른 지능성 재료의 광탄성 무늬를 기록한다. (N_{temp})

③ 상온에서 온도변화에 따라 지능성 재료에 발생한 광탄성 무늬와 동일한 광탄성 무늬 ($N_{temp} = N_{room}$)가 발생하도록 일정응력 σ_{room} 을 가하고, 이때의 일정응력 σ_{room} 에 상온과 기준온도와의 응력프린지치의 비에 의한 응력값을 보정한 $\sigma_a (= \sigma_{room} \times f_{\sigma(temp)}/f_{\sigma(room)})$ 를 구한다.

④ 가해진 일정응력 σ_0 와 각 온도의 광탄성 무늬가 발생하도록 가해진 일정응력 σ_{room} 에 응력프린지치가 보상된 응력 σ_a 와의 자가 회복응력 σ_r 이 된다. ($\sigma_r = \sigma_0 - \sigma_a$)

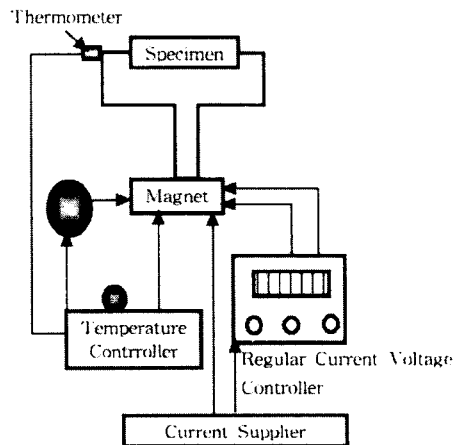


Fig. 4 Electric heating device

이상과 같은 과정을 통해서 광탄성 실험법으로 지능성 복합체의 회복응력을 측정할 수 있다.

3. 실험결과

3.1 지능성 복합체의 제작

본 연구에서는 형상기억합금의 열적회복특성인 기능성을 이용하고 기계적 특성을 구비한 폴리머인 에폭시수지를 사용하여 지능성 복합체를 제작하였다. 연구에 사용된 성상기억합금은 직경 400 μm 의 Ti50-Ni50 형상기억합금 파이버를 사용하였고, 파이버의 변태온도는 각각 35 $^{\circ}\text{C}$ (Mf : Martensite finishing temperature), 40 $^{\circ}\text{C}$ (Ms : Martensite starting temperature), 45 $^{\circ}\text{C}$ (As : Austenite starting temperature), 56 $^{\circ}\text{C}$ (Af : Austenite finishing temperature)이며, 400 $^{\circ}\text{C}$ 에서 1시간동안 열처리하고 담금질(Ice quenching)하여 직선으로 형상기억 처리되었다. 그리고 사용된 모재인 에폭시수지는 비스페놀 B형 아랄다이트 B41이며 경화제는 HT903을 사용하였다.

지능성 복합체의 제작방법은 초기변형률(Prestrain)장치⁹⁾를 이용하여 형상기억합금 파이버에 0%, 3%와 6%의 초기변형률을 가하고 준비된 주형상자에 장착하여 130 $^{\circ}\text{C}$ 에서 완전히 용해된 에폭시 수지와 경화제를 중량비 10:3.5로 혼합한 후 주형상자에 주입하여 0.5%, 1%, 1.5%인 지능성 복합체를 제작하였다. 이렇게 제작된 지능성 복합체를 Ti50-Ni50 SMA Fiber Epoxy Composite (Ti50-Ni50 SMA-FEC)라 한다.

3.2 지능성 복합체의 온도에 따른 열팽창

Fig. 5는 Fig. 2와 같은 장치를 이용하여 구한 각 온도에 따른 지능성 복합체의 열팽창을 나타낸다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 모재인 에폭시의 열팽창은 온도의 증가와 함께 80 $^{\circ}\text{C}$ 까지 증가하고, 80 $^{\circ}\text{C}$ 이후에는 일정한 값을 나타낸다. 그러나 지능성 복합체는 파이버 체적비율에 따른 형상기억합금 파이버의 변태기동에 의해서 열팽창이 에폭시수지와는 다르게 발생한다. 형상기억합금의 As 온도(45 $^{\circ}\text{C}$), 즉 I 영역(Region I)까지는 지능성 복합체의 열팽창이 모재인 에폭시의 열팽창과 거의 동일하게 증가하며, As온도 이후인 II영역(Region II)에서는 지능성 복합체의 파이버 체적비율에 따라서 열팽창이 에폭시보다는 서서히 감

소하다가 모재의 열팽창이 완료되는 80 $^{\circ}\text{C}$ 이후인 III영역(Region III)에서는 각각 다른 일정한 값을 갖는다. 영역 I, 영역 II 그리고 영역 III등의 관계는 다른 형상기억합금 복합체에서도 같은 경향을 나타난다는 것을 유추할 수 있다.

지능성 복합체의 파이버 체적비율이 0.5%와 1%인 경우, 온도의 증가와 함께 열팽창은 증가하고 각각 70 $^{\circ}\text{C}$ 이후에서는 형상기억합금 파이버의 역변태에 의한 회복특성에 의해서 열팽창이 감소한다. 즉 체적비율이 클수록 역변태에 가까운 온도에서 열팽창이 감소한다. 그러나 80 $^{\circ}\text{C}$ 이후에는 파이버 체적비율에 관계없이 각각 일정한 값을 나타낸다. 그리고 파이버 체적비율이 1.5%인 경우는 60 $^{\circ}\text{C}$ 까지 온도의 증가와 함께 열팽창이 증가하고 그 이후에서는 형상기억합금 파이버의 회복특성에 의해서 열팽창이 점차 감소한다. 그리고 80 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 이것은 에폭시 수지의 글라스 전이역의 온도가 약 90 $^{\circ}\text{C}$ 이기 때문이다. 이와같은 지능성 복합체의 열팽창 특성은 모재의 글라스 전이영역 온도, 모재의 열팽창과 형상기억합금의 역변태에 의한 회복력 등과 관계되고 파이버 체적비율의 증가에 의해서 열팽창이 감소됨을 알 수 있다. 즉 파이버 체적비율이 클수록 모재의 열팽창에 의한 변화를 크게 감소시킬 수 있다. 에폭시와 같은 종류의 폴리머를 모재로 가진 지능성 복합체의 열팽창에 있어서는 이와 유사한 현상이 발생됨을 알 수 있다.

3.3 스트레인 게이지에 의한 회복응력 측정

3.3.1 초기변형률에 따른 형상기억합금

파이버의 회복응력

본 연구에서 사용된 Ti50-Ni50 형상기억합금 파이버의 초기변형률에 따른 회복응력을 측정하기 위해서 초기변형률 장치를 이용하여 형상기억합금 파이버에 초기변형률을 가한 후, Fig. 3의 장치에 형상기억합금 파이버를 고정하고 Fig. 4의 장치로 형상기억합금 파이버에 열을 가하고 회복응력 측정방법을 사용하여 형상기억합금 파이버의 초기변형률에 따른 각 온도에서의 회복응력을 측정하였다. Fig. 6과 Fig. 7에 각 온도와 초기변형률에 따라 측정된 회복응력을 나타내었다.

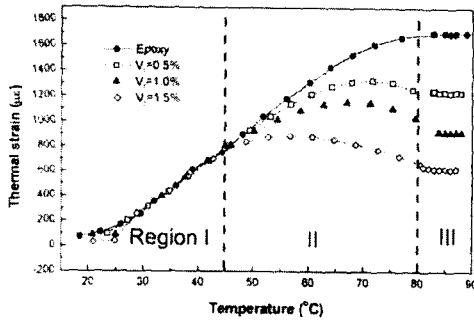


Fig. 5 Thermal strain of Ti50-Ni50 SMA-FEC with temperature

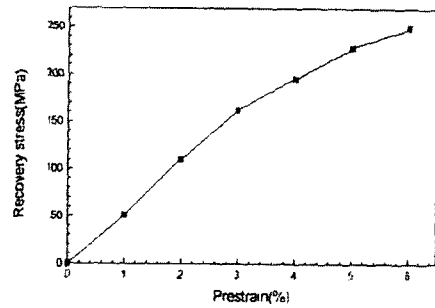


Fig. 7 Recovery stress of Ti50-Ni50 SMA fiber with prestrain.

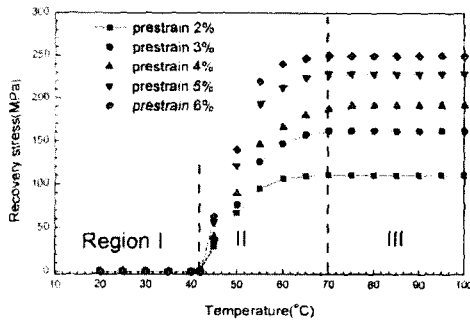


Fig. 6 Recovery stress of Ti50-Ni50 SMA fiber with temperature(°C)

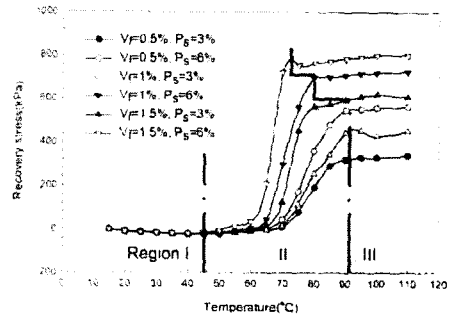


Fig. 8 Recovery stress of Ti50-Ni50 SMA-FEC with temperature(°C)

Fig. 6에서 형상기억합금 파이버의 회복기동은 As 온도이하인 I 영역(Region I)에서는 형상기억합금 파이버의 회복력이 발생되지 않고, As 온도보다 높은 온도(Region II)에서 회복력이 발생하여 회복응력이 온도의 증가와 함께 크게 증가한다. 각각 초기변형률이 3%, 5%, 6%로 증가할 때, 회복응력이 일정한 간격으로 증가한다. 그리고 약 70°C보다 큰 영역(Region III)에서는 일정한 값을 갖는다. 이 경우에서도 3구역 즉 As 온도이하인 영역(제 I 영역), As 온도 이상이고 70°C보다 적은 영역(제 II 영역) 그리고 70°C 이상인 영역(제 III 영역)등으로 구분된다.

Fig. 7은 각 초기변형률에 대한 최대회복응력을 나타낸 것이다. Fig. 7에서 형상기억합금 파이버의 초기변형률에 따른 회복응력은 초기변형률이 3%까지는 초기변형률의 증가와 함께 선형적으로 증가하며, 3%이상에서는 초기변형률의 증가와 함께 완만하게 증가됨을 알 수 있다.

Fig. 7과 Fig. 8에서 형상기억합금 파이버의 회복응력은 초기변형률이 증가할수록 증가하며, 약 70°C 이상의 온도에서는 일정한 값을 나타내고 있다. 즉 형상기억합금과 파이버의 회복응력은 초기변형률에 크게 의존하며 발생하며 약 70°C 이상의 온도에서는 가해진 초기변형률이 완전히 회복되어 일정한 값을 갖는다.

3.3.2 초기변형률과 파이버체적비율에 따른

지능성 복합체의 회복응력

형상기억합금 파이버의 회복응력은 파이버에 가해진 초기변형률의 증가와 함께 증가하고 지능성 복합체의 회복응력은 파이버의 체적비율과 초기변형률의 영향을 받는다. 그러므로 본 연구에서는 3%와 6%의 초기변형률이 가해진 지능성 복합체를 제작하고 각각의 파이버 체적비율에 따른 회복응력을 연구하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 초기변형률 3%와 6%, 파이버 체적비율 변화 0.5%, 1%, 1.5%에 따른 지능성 복합체의 회복응력을 나타낸다.

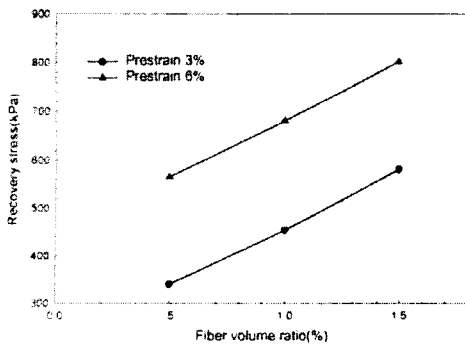


Fig. 9 Recovery stress of Ti50-Ni50 SMA-FEC with fiber volume ratio.

Fig. 8에서 형상기억합금 파이버의 A_s 온도이하(Region I)에서는 형상기억합금 파이버의 회복력이 발생하지 않아서 형상기억합금 파이버의 초기변형률에 의해서 지능성 복합체의 회복응력이 음(-)의 값을 갖게 되고, A_s 온도이후(Region II)에서는 형상기억합금 파이버의 회복력이 발생하여 지능성 복합체의 회복응력이 나타나게 된다. 그리고 A_f 온도이상에서는 모재의 강성저하로 인해서 회복응력이 크게 발생하고, III영역(모재의 열변형이 완료되는 영역)에서는 회복응력이 거의 일정한 값을 갖는다. 그리고 III영역에서는 3종류의 영역이 존재한다. 온도가 각각 70°C , 80°C 그리고 90°C 이상인 영역에서 온도에 대한 회복응력은 일정하다. 회복응력은 파이버의 체적비율과 초기변형률의 영향을 동시에 받는다. 그래서 Fig.8을 기준으로 회복응력이 일정하게 유지되는 영역을 구분하면 아래와 같다. 파이버의 체적비율(Vf)과 초기변형률(Ps) 곱의 크기가 0.045%이하인 경우는 90°C 이상, 0.06%인 경우에는 80°C 이상, 0.09%이상인 경우에는 70°C 이상에서 각각 회복응력이 일정하다. 그러므로 파이버의 체적비율과 초기변형률의 곱을 변수로 하는 것이 좋다.

Fig. 9는 파이버 체적 비율에 대한 Ti50-Ni50형상기억합금복합체(Ti50-Ni50 SMA-FEC)의 회복응력을 나타낸 것이다. 이 형상 기억합금 복합체의 회복응력은 초기변형률과 파이버 체적 비율에 대하여 선형적으로 변한다.

Fig. 8과 Fig. 9에서 알 수 있듯이 지능성 복합체의 회복응력은 파이버 체적비율과 초기변형률의 증가에 따라서 증가하며, 지능성 복합체의 파이버 체적비율보다는 가해진 초기변형률에 더 크

게 의존하여 증가한다. 또한 형상기억합금 파이버의 A_s 온도가 45°C 인데 비해서 지능성 복합체의 초기 회복은 파이버 체적비율에 따라서 이보다 높은 온도에서 발생한다. 이와 같은 초기 회복온도상승의 원인은 모재인 에폭시수지의 온도에 따른 열팽창에 의한 형상기억합금 파이버의 회복력 감소에 의한 것이다. 그러나 에폭시수지의 열팽창이 거의 완료되는 온도인 80°C 근방에서는 형상기억합금 파이버의 회복력이 크게 발생하고 80°C 이후에서는 열팽창과 회복력 발생이 완료되어 회복응력이 거의 일정한 값을 갖는다.

초기변형률이 6% 가해진 형상기억합금 파이버의 회복응력이 약 250MPa인 것에 비해서 파이버 체적비율이 1.5%이고 초기변형률이 6%인 지능성 복합체의 회복응력은 약 800kPa 정도이다. 파이버 체적비율이 1.5%인 복합체의 회복응력 800kPa를 파이버 체적비율이 100%인 복합체의 회복응력으로 환산하면 약 53MPa이다. 이것은 형상기억합금 파이버의 회복응력 250MPa와 차이가 매우 크다. 이러한 회복응력의 큰 차이는 모재의 열팽창과 모재와 형상기억합금 파이버의 열팽창력과 회복력의 상호작용에 의한 회복응력의 손실때문으로 생각된다. 이러한 사실은 다른 연구자의 논문에서도 볼 수 있다.(10)

3.4 광탄성 실험법에 의한 지능성 복합체의 회복응력 측정

Fig. 10~12는 본문 2.4절의 광탄성 실험법을 이용하여 측정된 회복응력과 광탄성 무늬를 나타낸다. 각 그림에서 σ_0 는 가해진 응력이며, σ_c 는 상온과 기준온도와의 응력프린치치의 차에 의한 응력값을 보상한 응력, σ_0/σ_{20} 는 가해진 응력을 지능성 복합체의 20°C 의 항복응력비로 표시한 것이다.

Fig. 10과 Fig. 11의 지능성 복합체는 내재한 형상기억합금 파이버가 원공과 균열에서 연속적으로 연결된 경우이고, Fig. 12는 지능성 복합체의 형상기억합금 파이버가 양 크랙 첨단 사이에 존재하지 않는 경우의 등색선 무늬와 회복응력을 나타낸다.

Fig. 10은 파이버 체적 비율(=Vf)이 0.5% 원공의 크기(= $\frac{d}{w}$)가 0.33, 그리고 $\frac{\sigma_0}{\sigma_{20}} = 0.09$ 일때의 온도변화에 따른 등색선무늬의 변화를 나타낸

것이다. Fig. 10에서 알 수 있듯이 일정한 응력 $\sigma_0=6.42\text{MPa}$ 가 작용함과 동시에 상온(20°C)에서 온도가 증가됨에 따라 원공주위에 집중된 무늬차수가 점점 감소되어 80°C 에 있어서는 형상기억합금의 회복력 때문에 무늬차수는 거의 없음을 시각적으로 알 수 있다. 이때 외부에서 가해지는 응력($=\sigma_0$)은 6.42MPa 이고 회복응력(σ_r)은 5.87MPa 이다. 그래서 원공주위에 나타난 무늬차수로서 환산된 응력(σ_a)은 0.54MPa 이다. Fig. 11은 $V_f=0.5\%$, $P_s=5\%$, 폭에 대한 크랙길이 비($=\frac{2a}{w}$)가 0.33 그리고 $\frac{\sigma_0}{\sigma_{20}}=0.07$ 일 때 온도변화에 따른 크랙 첨단부근의 무늬차수 변화를 나타낸 것이다. 이 경우에서도 마찬가지로 온도가 증가함에 따라 무늬차수가 점점 감소하며 온도가 80°C 일 때 무늬차수가 거의 감소됨을 시각적으로 볼 수 있다. 이때 회복응력($=\sigma_r$)은 4.09MPa 이다.

Fig. 10과 Fig. 11을 통해서 지능성 복합체에 작용한

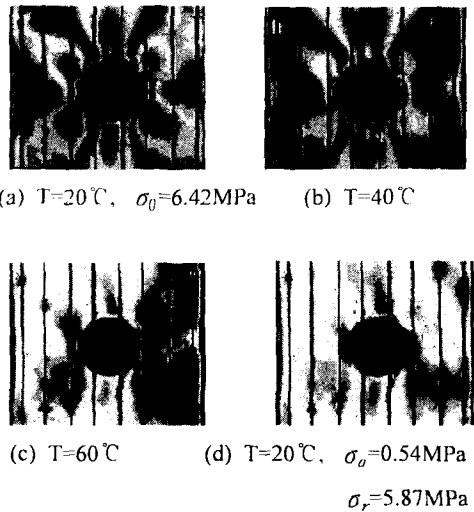


Fig. 10 Isochromatic fringe patterns of Ti50-Ni50 SMA-FEC with continuous fiber with temperature. ($d/w=0.33$, $V_f=0.5\%$, $P_s=5\%$, $\sigma_0/\sigma_{20}=0.09$)

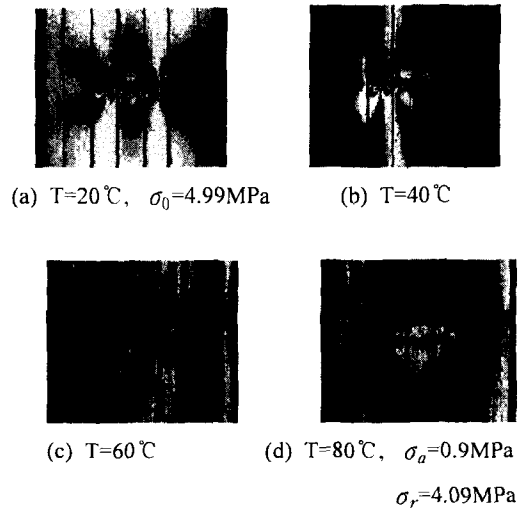


Fig. 11 Isochromatic fringe patterns of Ti50-Ni50 SMA-FEC with continuous fiber with temperature. ($2a/w=0.33$, $V_f=0.5\%$, $P_s=5\%$, $\sigma_0/\sigma_{20}=0.07$)

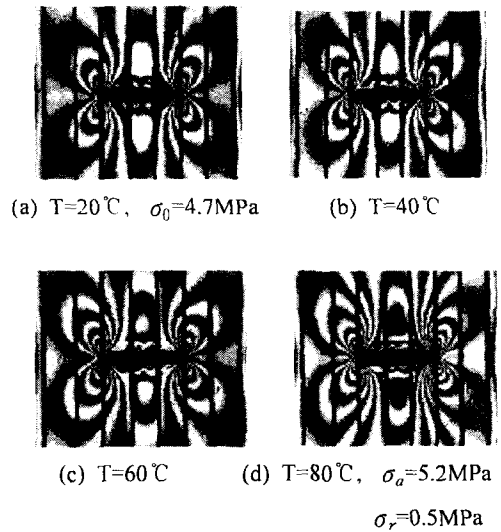
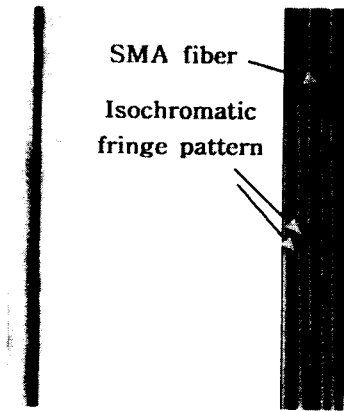


Fig. 12 Isochromatic fringe patterns of Ti50-Ni50 SMA-FEC with non-continuous fiber between both crack tips with temperature. ($2a/w=0.33$, $V_f=0.5\%$, $P_s=6\%$, $\sigma_0/\sigma_{20}=0.07$)



(a) at 20°C (b) at 80°C

Fig. 13 Isochromatic fringe patterns of intelligent material with single SMA fiber

일정응력 σ_0 가 형상기억합금의 역변태에 의해서 온도에 따라 감소됨을 알 수 있고, 80°C에서는 회복응력의 발생으로 인해서 집중된 응력이 90%이상 감소되어 회복응력 σ_r 이 최대가 됨을 알 수 있다. 그러나 형상기억합금 파이버가 균열에서 잘려진 경우인 Fig. 12에서는 형상기억합금에 역변태 온도이상의 열을 가해도 균열주위에서의 광탄성 무늬는 변화하지 않고 80°C에서는 더 많이 집중된 광탄성 무늬를 관찰할 수 있다. 이러한 원인은 균열에서 잘려진 형상기억합금 파이버는 균열담힘효과를 발생시키기보다는 모재의 열전달에 의해서 회복력을 발생시켜 균열열림효과를 가져오기 때문이다. Fig. 8에서 파이버 체적비율이 1.5%이고 초기변형률이 6%일때의 지능성 복합체의 최대 회복응력이 약 800kPa인데 비해서 Fig. 10의 원공을 가진 지능성 복합체의 회복응력은 약 5.87MPa이고 Fig. 11의 균열을 내재한 경우는 약 4.90MPa이다. 이와 같은 회복응력은 형상기억합금 파이버에 근접할수록 더 큰 값을 나타내고 형상기억합금 파이버와 파이버 사이, 즉 형상기억합금 파이버에서 멀어질수록 더 작은 값을 나타내기 때문이다.(10) 또 하나의 이유는 스트레인 게이지에 의한 회복응력의 측정은 Fig. 3과 같은 외팔보의 장성이 스트레인 게이지의 감도에 비하여 크고 양단의 고정 등에 의한 오차라고 생각할 수 있다. 위와 같은 현상은 Fig. 13과

같은 광탄성 실험을 통해서 더 잘 관찰할 수 있다.

Fig. 13은 초기변형률 6%의 한 개의 형상기억합금 파이버를 가진 지능성 복합체에 열을 가하여 발생한 회복응력을 광탄성 실험을 통해서 나타낸 것이다. 지능성 복합체의 형상기억합금 파이버에 발생한 회복응력은 광탄성 성질을 가진 모재에 전달되고 이때 발생한 회복응력은 Fig. 13과 같은 광탄성 무늬로서 나타나게 된다. Fig. 13의 형상기억합금 파이버에 가까이 갈수록 더 큰 무늬차수를 나타내고, 이것은 형상기억합금 파이버에 의해서 발생한 회복응력이 지능성 복합체의 단면적 전체에 걸쳐서 동일하게 작용하는 것이 아니라 형상기억합금 파이버에서 멀어질수록 선형적으로 감소됨을 의미한다. Fig. 10과 Fig. 11에서 알 수 있듯이 Fig. 10의 경우의 회복응력 발생비율은 가한 응력의 92%가 되고, 크랙을 가진 Fig. 11의 경우의 회복응력 발생비율은 82%나 된다. 이러한 이유는 무엇보다도 원공인 경우에는 원공부근의 형상기억합금 파이버에 모재가 없기 때문에 모재에 의한 형상기억합금 파이버의 회복응력을 측정하기 위해서는 무엇보다도 원공을 가진 지능성 복합체에 광탄성 실험법을 응용하는 것이 가장 유효하다.

4. 결론

위와 같은 지능성 복합체의 회복응력 측정에 관한 연구를 통하여 아래와 같은 결론은 얻을 수 있다.

(1) 에폭시와 같은 폴리머를 모재로한 지능성 복합체의 열팽창에는 제Ⅰ영역(약 15°C에서 45°C사이), 제Ⅱ영역(약 45°C에서 80°C사이) 그리고 제Ⅲ영역(약 80°C이상)등이 존재한다. 그리고 제Ⅰ영역에서는 지능성 복합체의 열팽창이 모재의 열팽창과 동일하게 증가되고, 제Ⅱ영역에서는 지능성 복합체의 열팽창이 파이버 체적비율에 따라 모재(에폭시)보다 서서히 감소하면서 증가한다. 그리고 제Ⅲ영역에서는 지능성 복합체의 열팽창이 파이버 체적비율에 따라 각각 온도와 관계없이 일정하게 유지된다.

(2) 지능성 복합체의 회복응력의 발생 단계는 크게 3영역, 영역Ⅰ(A_s 이하인 영역), 영역Ⅱ(A_s 이후와 70°C, 80°C 그리고 90°C 이하인 영역) 그리

고 영역Ⅲ(각각 70℃, 80℃ 그리고 90℃ 이상인 영역)등으로 구분된다. (Fig. 8 참조) 영역 I에서는 에폭시(모재)의 열팽창 때문에 음의 회복응력이 발생하고, 영역Ⅱ에서는 회복응력의 발생이 시작되어서 온도와 초기변형률의 증가에 따라 회복응력도 증가된다. 영역Ⅲ에서는 온도의 증가에 관계없이 각각 일정한 회복응력이 발생한다.

(3) 지능성 복합체의 회복응력은 파이버 체적비율과 초기변형률에 대하여 선형적으로 변한다. 파이버 체적비율과 초기변형률의 곱의 크기가 0.045%이하인 경우는 90℃이상, 0.06%인 경우는 80℃이상, 0.09% 이상인 경우에는 80℃이상에서 각각 회복응력이 일정하다. 그리고 파이버 체적비율과 초기변형률의 곱은 회복응력평가의 변수로 사용할 수 있다.

(4) 균열을 가진 지능성 복합체에 내재한 형상기억합금이 잘려진 경우의 형상기억합금의 회복응력은 지능성 복합체에 더 큰 결함을 발생시킨다.

(5) 광탄성 실험법에 의한 지능성 복합체의 회복응력 측정법이 체계화되었고 그 측정법은 지능성 복합체에 발생한 지역적은 회복응력을 측정하는데 유효하다.

(6) 지능성 복합체의 회복응력을 측정하는데 가장 유효한 방법은 원공을 가진 지능성 복합체에 광탄성 실험법을 적용하는 것이다.

참고문헌

- (1) Rogers. C. A. 1993, "Intelligent Material Systems-The Dawn of a New Material Age," *J. of Intelligent Material Systems and Structures*, Vol.4, pp. 4~12.
- (2) Toshinori Takagi, 1996, "The Concept and the Recent Research on Intelligent Materials," *Third ICIM/ECSSM '96*, pp. 2~15.
- (3) J. S. Hawong, A. Shimamoto, H. J. Lee, D. C. Shin, 1998, "Application of the Transparent Photoelastic Experiment to the Plane Fracture Mechanics of Intelligent Material," *Proceedings of the SEM Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics*, pp. 463~465.
- (4) D. J. Lee, T. H. Jeong, 1997, "Design of Smart Components Based on Shape Memory Effer." *ICCM11*, Vol. 4, pp. 528~539.
- (5) J. E. Bidaux, J. A. E. Manson, R. Gotthardt, 1996, "Active Modification of the Vibration Frequencies of a Polymer Beam Using shape-Memory-Alloy Fibers," *Third ICIM/ECSSM '96*, pp. 517~522.
- (6) S. O. Park, H. C. Park, W. B. Hwang, K. S. Han, "Active Stiffness Control of Laminated Composite Beams using shape Memory Alloy Wires." *Proceedings of the KSMEA Spring Conference on Experimental and Applied Mechanics '95*, pp. 568~573.
- (7) R.D Jean, C. T. Hu, 1994, "Shape Memory Effect by Constant-Stress Aging in Ti50.50at.% Ni Alloy," *Journal of Material Science*, Vol. 29, pp. 449~455.
- (8) T. Moroishi, K. Kashida, K. Suzuki, Sakai, 1993, "Recent Development on Application of Titanium and Its Alloy," *Proc. 3rd Japan International SAMPE Symposium*, pp. 1640~1645.
- (9) Hyo-Jae Lee, Jai-Sug Hawong and Shimamoto Akira, 1998, "A Study on the Development of Photoelastic Model Material with Shape Memory Effect. *Transaction of the KSME,A* Vol. 22, No. 3 pp. 2237~2247.
- (10) T. H. Jeong and D. J. Lee, "Mechanical and Thermo-Mechanical Properties of intelligent Polymer Matrix Composites with shape Memory Alloy," *Transaction of the KSME,A* Vol. 22, No. 10, pp. 1902~1911.