본 연구는 '95년도 교육부 학술연구 조성비(ME95-C-13)에 의하여 연구되었음.

형상기억효과를 가진 투과형 광탄성 실험용 모델재료 개발에 관한 연구

이효재* · 황재석** · Akira Shimamoto***

(1997년 7월 21일 접수)

A Study on the Development of Photoelastic Model Material with Shape Memory Effect

H. J. Lee and J. S. Hawong and Shimamoto Akira

Key Words: Photoelastic Model Material(광탄성 모델재료), Shape Memory Effect(형상기억효과), Ti_{50}-Ni_{50} Shape Memory Alloy(Ti50-Ni50 형상기억합금), Ti_{50}-Ni_{50} Shape Memory Alloy Fiber Epoxy Composite(Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금 에폭시 복합체), Recovering Strain(회복변형률), Prestrain(초기변형률), Fiber Volume Ratio(파이버 체적비율), Stress Fringe Value(응력프린지치), Elastic Modulus of Fiber Direction(파이버방향의 탄성계수)

Abstract

The photoelastic model material with shape memory effect and the molding processes for the material are developed in this research. The matrix and fiber of the photoelastic model material developed in this research are epoxy resin (Araldite to hardner 10 to 3 (weight ratio)) and wire of Ti_{50}-Ni_{50} shape memory alloy, respectively. It is called Ti50-Ni50 Shape Memory Alloy Fiber Epoxy Composite (Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC). Ti50-Ni50 SMA-FEC is satisfied with the requirements of the photoelastic model material and can be used as a photoelastic model material. The maximum recovering strain of Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC is occurred at 80℃ in any prestrain of Ti_{50}-Ni_{50} shape memory alloy fiber and in any fiber volume ratio. Recovering strain(force) is increased with the increment of the prestrain and the fiber volume ratio. The best prestrain of Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC is 5% for the recovering force among 1%, 3%, 5%.

1. 서 론

최근 CuAlMn,[1] Ti3Al, TiNiCu,[2] Ti50Pd30Ni20,[3] FeMaCrSiNi[4] 그리고 Ti_{50}-Ni_{50}[5]등은 형상기억재료로서 사용되어 왔다. 이 중에서도 Ti_{50}-Ni_{50} 합금은 여러분야에 많이 사용되고 있다. 특히 의공학분야의 정형외과[6]나 치과분야[7] 그리고 산업분야에 Ti_{50}-Ni_{50} 합금(Nitinol)의 변태에 의한 형상회복 특성이 넓게 응용되고 있다. 그러나 Ti_{50}-Ni_{50} 합금의 변태특성에 대한 연구는 많이 행해졌지만 Ti_{50}-Ni_{50} 합금 복합체에 대한 연구는 그렇게 많지 않고, 대부분 초기 단계이다.

이러한 연구는 대부분 유한요소법에[8] 의한 Ti_{50}-Ni_{50} 복합체의 거동해석에 관한 것이고, 실험적 방

*회원, 영남대학교 대학원 기계공학부
**회원, 영남대학교 기계공학부
***Saitama Institute of Technology, Japan

법에 의한 Ti_{50}-Ni_{50} 복합체의 거동에 관한 연구는 거의 없다. Ti_{50}-Ni_{50} 합금으로 구성된 구조물이나 Ti_{50}-Ni_{50} 합금 파이버를 가진 복합체로 구성된 구조물들이 산업현장에 많이 사용되므로, 시기적으로 Ti_{50}-Ni_{50} 복합체의 거동에 관한 연구는 실험적으로 반드시 규명되어야 한다.

실험으로 재료의 거동을 연구할 수 있는 실험법은 광탄성 실험법, 홀로그래피법, 모아레법, 코스틱스법, SPATE 등이 있다. 이 중에서도 광탄성 실험법은 넓게 응용되고 있다.

투과형 광탄성 실험법으로 구조물의 응력상태나 재료의 거동을 연구하기 위해서는 반드시 광탄성 성질을 가지는 광탄성 모델재료의 개발이 선행되어야 한다. 그러므로 본 연구의 목적은 형상기억효과를 갖고 있으며, 투과형 광탄성 실험의 모델재료로 사용될 수 있는 재료를 개발하는 것이다.

2. 형상기억효과를 가진 투과형 광탄성 실험의 모델재료 개발

형상기억효과[9]를 가진 광탄성 실험의 모델재료를 개발하기 위해서는 광탄성 성질을 가지는 재료를 모재로 사용하고 형상기억효과를 가진 파이버를 파이버로 사용하여야 한다. 그래서 본 연구에서는 광탄성 성질을 가지는 에폭시 수지(Araldite와 경화제가 중량비 10 : 3으로 혼합된 수지)를 모재로 사용하고 파이버로서 형상기억합금으로 현장에 가장 많이 사용되고 있는 Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금 와이어(wire)를 파이버로 사용하였다.

에폭시 수지와 Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금 파이버로서 만들어진 복합체를 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy Composites(Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC)라 칭하고, 아래와 같은 방법으로 주형되었다. 사용된 형상기억합금 파이버의 직경은 0.4 mm이고, 파이버의 피치(Pitch) 2 mm와 4 mm에 대한 파이버 체적비율(fiber volume ratio)은 각각 0.42%와 0.84%이다. 선명한 광탄성 등색선 무늬를 얻기위해서 빛의 투과성을 좋게 할 있는 최소의 피치는 약 2 mm이다. 그리고 Fig. 1은 형상기억합금 파이버에 초기변형률(prestrain)을 가할 수 있는 장치와 파이버를 원하는 피치대로 배열할 수 있는 리드(reed)가 부착된 장치이다.

Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC는 아래와 같이 주형된다.

(1) 두께가 일정한 유리판에 물에 적신 셀로판지를 기포없이 잘 입힌다.

(2) 셀로판지를 입힌 유리판을 노내에서 건조한 후 유리판 위에 양면 테이프를 붙인 폭이 좁은 유리로 주형상자를 만들어 장치에 고정시킨다.

(3) Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber의 피치를 균일하게 분포시키면서 Fig. 1의 장치를 사용하여 초기변형률을 가하여 노내에서 주형상자 위에 수평이 되도록 장착한다. 그 위에 실리콘을 사용하여 완전히 밀봉한다.

(4) 아랄다이트(Araldite)를 노내에서 130℃로 3시간 동안 가열하여 완전히 용해시킨 후, 아랄다이트(Araldite) 용액에 경화제(Hardner, HT903)를 넣고 5분 간격으로 교반하고 완전히 녹으면 그 혼합액을 주형상자에 붓는다.

(5) 기포를 완전히 제거하고 Fig. 2의 성형사이클에 따라 혼합액을 중합시키면 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy 복합체가 만들어진다.

이렇게 주형된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy

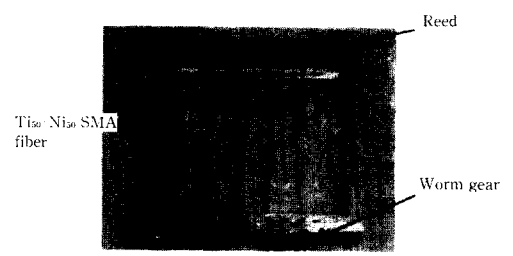


Fig. 1 Device for prestrain controller and fiber pitch controller.

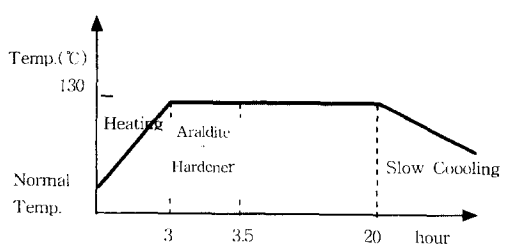


Fig. 2 Molding cycle in furnace.

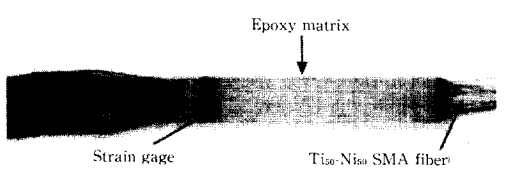
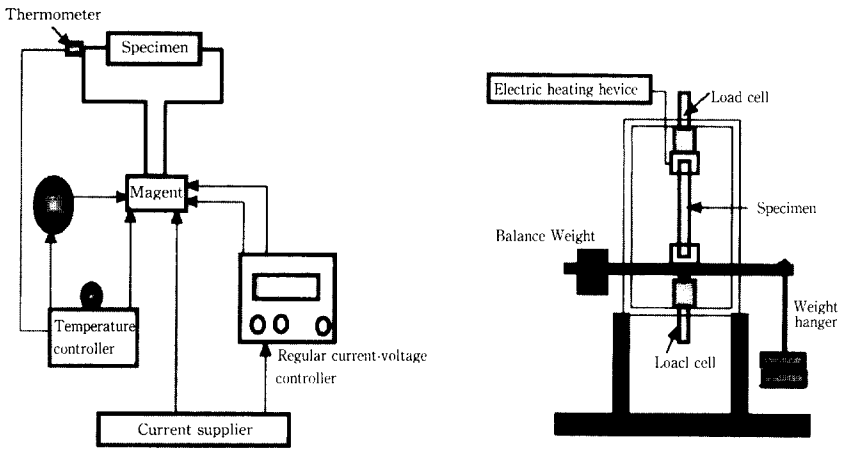


Fig. 3 Configuration of specimen. (Ti_{50}-Ni_{50} SMA fiber epoxy composite)



(a) Electric heating device (b) Loading device

Fig. 4 Electric heating device for temperature control and loading device.

Composite(Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC)는 Fig. 3과 같다.

3. 광탄성 재료의 유효성과 형상기억효과

3.1 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy 복합체의 변태특성

본 연구에 사용된 형상기억합금 파이버는 400℃에서 1시간 동안 냉간가공한 Ti_{50}-Ni_{50}의 합금이고, 이 합금의 Mf(Martensitic Finishing Temp.)는 35℃, Ms(Martensitic Starting Temp.)는 40℃, As(Austenite Starting Temp.)는 50℃, Af (Austenite Finishing Temp.)는 54℃이다. 이러한 형상기억합금 파이버를 가진 에폭시 복합체의 온도에 대한 변태특성[10, 11]을 조사하기 위하여 Fig. 4와 같은 통전장치와 하중장치를 사용하였다.

Fig. 4(a)에 보여진 통전장치를 이용해서 시험편의 형상기억합금에 정전류, 전압을 가하면 형상기억합금의 저항에 의해서 열이 발생하게 되고, 이 열에 의해서 형상기억합금은 회복특성을 나타내게 된다. 이 때 발생한 열은 열전대에 의해서 측정되고 온도조절기는 일정한 온도를 유지하도록 마그네이트를 작동시켜 전류를 단속하게 된다.[12]

온도에 대한 변태특성을 연구하기 위한 시편의 모양은 Fig. 3과 같고, 스트레인 게이지도 Fig. 3과 같이 접착되었다. 파이버의 피치 2 mm, 4 m에 대한 파이버 체적비율(V_f)은 각각 0.42%와 0.84%이고, 초기변형률은 1%, 3%, 5%인 경우이다. 일반적으로 니티놀의 회복가능한 초기변형률은 10%

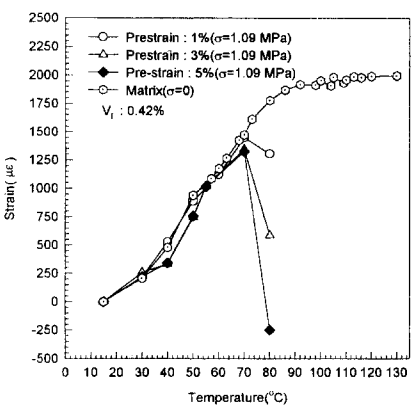


Fig. 5 Recovering strain of Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC with temperature variation.

이내이지만 본 연구에서 초기변형률을 5%까지로 제한한 것은 본 연구에 사용된 Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금의 100% 회복가능한 초기변형률이 6%이내이기 때문이다. 이러한 시편과 Fig. 4와 같은 통전장치와 하중장치를 사용하여 온도에 대한 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 회복변형률은 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 이때 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC에 가한 응력은 1.09 MPa이고, 순수 에폭시에 가한 응력은 무응력상태이다.

Fig. 5와 Fig. 6에서 보듯이 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy Composite의 회복변형률은 파이버의 체적비율과 초기변형률에 관계없이 80℃에서 발생하지만 회복변형률은 파이버 체적비율(V_f)이 증가할수록 크다. 실제의 Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금의 A_f는

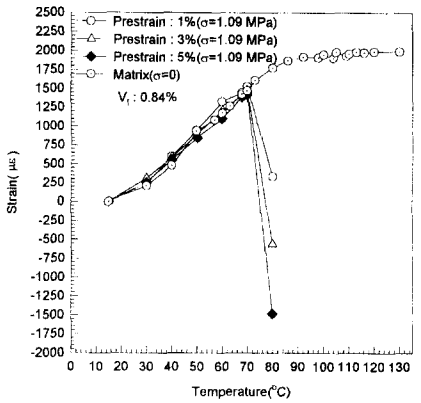


Fig. 6 Recovering strain of Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC with temperature variation.

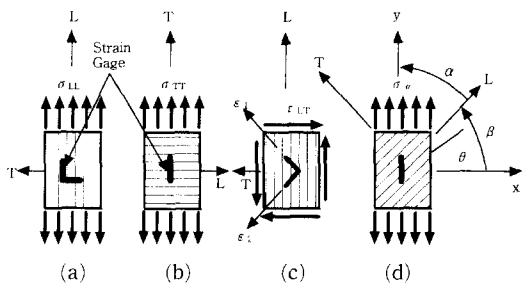


Fig. 7 Specimen for the measurement of physical properties and stress frine values.

54℃인데 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC가 완전히 회복되는 온도가 약 80℃인 것은 Fig. 5와 Fig. 6에서 보듯이 모재인 순수 에폭시가 온도의 증가와 함께 팽창하다가 80℃이후, 즉 에폭시의 그라스 전이역 이후에서는 팽창하지 않으므로, 그 이후에는 54℃이후에 발생된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA 파이버의 회복력만이 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC에 작용하기 때문이다. 그러므로 Fig. 5와 Fig. 6에서 복합체의 회복력이 발생되는 온도는 순수 형상기억합금의 회복력이 발생되는 온도보다 높다. 그리고 회복력은 파이버의 체적비율(V_f)과 초기변형률(ε_{ps})이 증가할수록 커진다.

3.2 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 물성치

등방성체의 물성치와 응력프린지치는 방향에 관계없이 일정하지만 이방성체의 물성치와 응력프린지치는[13] 각 방향에 따라 다르다. 그리고 직교이방성체의 평면문제에 있어서는 기본물성치인 E_L, E_T, G_{LT}, ν_{LT}와 기본 응력프린지치인 f_L, f_T, f_{LT}만이 필요하다.

각 하중에 대한 변형률은 Fig. 7과 같은 시험편의 중앙에 접착된 스트레인 게이지로서 측정되었고, 등색선 무늬차수는 각 하중에 대해서 시험편에 발생하는 광탄성 무늬로서 측정되었다. 여기서 f_L과 E_L은 각각 하중방향과 파이버 방향이 일치하는 경우의 응력프린지치와 세로탄성계수이고, f_T와 E_T는 하중방향과 파이버방향이 수직인 경우의 응력프린지치와 세로탄성계수이다. ν_{LT}는 파이버의 수직방향의 변형률을 파이버방향의 변형률로 나눈 값이다($-\frac{\varepsilon_T}{\varepsilon_L}=\nu_{LT}$). f_{45}는 전단응력프린지치(f_{LT})를 구하기 위한 파이버방향이 45°인 시험편의 응력프린지치이며, E_{45}는 전단탄성계수(G_{LT})를 구하기 위한 파이버방향이 45°인 시험편의 세로탄성계수를 의미한다. 각 하중에 의해서 측정된 무늬차수와 변형률로부터 응력프린지치[14]는 방정식 (1)에 의해서 얻어진다.

$$f_L=\frac{\sigma_L t}{N},\quad f_T=\frac{\sigma_T t}{N},\quad f_{45}=\frac{\sigma_{45} t}{N} \tag{1}$$

여기서, t는 시험편의 두께이고, N은 광탄성 무늬차수이다.

전단응력프린지치 f_{LT}와 전단탄성계수 G_{LT}는 방정식 (2)로부터 구해진다.[13, 14]

$$f_a=f_L\left[\left(\cos^2\alpha-\frac{f_L}{f_T}\sin^2\alpha\right)^2+\left(\frac{f_L}{f_{LT}}\right)^2\sin^2 2\alpha\right]^{-\frac{1}{2}},\quad \alpha=45 \tag{2a}$$

$$\frac{1}{G_{LT}}=\frac{4}{E_{45}}-\left(\frac{1}{E_L}+\frac{1}{E_T}-\frac{2\nu_{LT}}{E_L}\right) \tag{2b}$$

각 초기변형률과 온도에 대한 물성치는 Table 1에 나타내었다. Table 1에서 보듯이 온도가 증가할수록(상온에서 80℃까지) 파이버 체적비율과 초기변형률에 관계없이 탄성계수와 응력프린지치는 감소함을 알 수 있다. 각 온도에서 파이버 체적비율이 증가하면 탄성계수와 응력프린지치도 증가한다. 그러나 일정한 온도에서 초기변형률이 증가할수록 탄성계수와 응력프린지치는 약간 증가한다. 푸아송의 비 ν_{LT}는 본 연구에 사용된 어떤 파이버 체적비율과 어떤 온도에 대해서도 거의 일정하다는 것을 알 수 있다.

3.3 광탄성 재료의 유효성

광탄성 실험에서 가장 중요한 것은 광탄성 모델재료를 선정하는 것이다. 완전한 광탄성 모델재료를 얻는다는 것은 매우 어렵다. 그러므로 이상적인

Table 1 Stress fringe values and physical properties.

V_f	Temp.	ε_{ps}(%)	E_L (GPa)	E_T (GPa)	G_{LT} (GPa)	f_L (kN/m)	f_T (kN/m)	f_{LT} (kN/m)	ν_{LT}
0.42 %	30	1	4.15	2.92	1.26	13.22	13.51	11.44	0.35
		3	4.56	3.64	1.31	15.15	14.08	11.55	0.37
		5	5.02	3.91	1.74	15.16	14.28	13.96	0.35
	40	1	3.96	3.11	1.17	13.95	12.64	15.14	0.36
		3	4.37	3.67	1.31	13.42	12.34	14.44	0.36
		5	4.88	3.88	1.61	11.67	13.62	13.25	0.35
	50	1	3.62	2.86	1.20	13.29	11.23	16.18	0.37
		3	3.99	3.56	1.24	13.17	11.95	13.58	0.39
		5	4.33	3.78	1.46	11.25	12.09	12.49	0.36
	60	1	3.15	2.78	1.16	12.98	11.04	15.35	0.35
		3	3.21	3.24	1.27	12.97	11.52	13.98	0.34
		5	3.93	3.40	1.41	11.21	12.56	12.58	0.37
	70	1	2.67	2.60	0.93	12.63	10.55	13.97	0.37
		3	2.70	2.89	1.26	12.45	11.23	13.41	0.38
		5	3.26	3.01	1.33	11.18	11.67	12.01	0.36
	80	1	2.29	2.54	0.89	12.49	8.20	16.27	0.34
		3	2.47	2.72	1.19	12.35	10.00	15.91	0.35
		5	2.99	2.85	1.29	11.18	10.12	11.98	0.35
0.84 %	30	1	4.87	3.15	1.60	16.44	13.25	10.88	0.36
		3	4.98	3.80	1.35	16.32	13.56	14.58	0.34
		5	5.12	4.03	1.67	15.36	14.26	11.24	0.36
	40	1	4.69	3.27	1.38	15.45	12.40	13.61	0.35
		3	4.74	3.96	1.29	15.26	12.48	14.43	0.35
		5	4.89	4.22	1.60	13.73	13.94	13.09	0.35
	50	1	4.17	3.08	1.36	15.46	12.40	13.47	0.36
		3	4.22	3.72	1.27	14.60	12.03	14.19	0.37
		5	4.47	3.97	1.60	13.20	13.24	12.38	0.39
	60	1	3.59	3.08	1.21	15.01	12.35	13.11	0.35
		3	3.60	3.60	1.23	14.15	11.77	14.27	0.37
		5	4.11	3.78	1.55	12.98	11.08	12.48	0.36
	70	1	3.09	2.93	1.26	14.32	11.85	12.62	0.36
		3	3.33	3.25	1.25	14.15	10.98	13.66	0.36
		5	3.58	3.54	1.35	12.95	10.76	12.04	0.35
	80	1	3.03	2.55	1.26	13.93	10.98	14.92	0.37
		3	3.19	3.03	1.23	13.98	10.55	15.68	0.36
		5	3.32	3.25	1.25	12.09	10.00	14.33	0.36

ε_{ps} : Prestrain, V_f : Fiber volume ratio, Temp. : Temperature(℃)

광탄성 재료에 가장 가까운 재료를 사용하는 것이 이상적이다.

투과형 광탄성 실험의 모델재료로서 구비할 조건[15]은 (1) 투과성, (2) 선형성, (3) 응력프린지치, (4) 균일성, (5) 크리이프, (6) 종탄성계수 및 비례한도, (7) 잔류응력, (8) 온도 의존성, (9) 시간연효과, (10) 가공성 그리고 (11) 재료가격 등이다. 그리고 형상기억효과를 가진 구조물의 응력상태를 투과형 광탄성 실험으로 해석할 때는 투과형 광탄성 실험의 모델재료로서 위의 11가지 구비조건 이외에도 광탄성 실험의 모델재료가 형상기억효과의 성질을 가져야 한다.

이상의 구비조건에 대해서 본 연구에서 개발된 형상기억효과를 가진 투과형 광탄성 실험용 모델재료의 충족여부를 검토한 결과는 다음과 같다.

3.3.1 투과성

빛의 투과성은 체적비율이 낮으면 낮을수록 좋다. 그러나 본 연구자에 의하면 체적비율이 20%까지 파이버 체적비율을 가진 광탄성 실험용 모델재료는 투과형 광탄성 실험의 모델재료로 사용될 수 있다는 것이 확인되었다.[11, 16] Fig. 8의 광탄성 무늬는 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 순수 굽힘실험에 의한 광탄성 무늬로서 무늬의 선명성과 연속성이 우수하다는 것을 알 수 있다. 그러므로 빛의 투과성은 별로 문제가 되지않는다.

3.3.2 선형성

광탄성 실험의 모델재료로 사용되는 재료는 탄성한도 내에서 기계적 성질과 광학적 성질에 있어서 선형성을 가져야 한다. Fig. 9와 Figs. 10, 11 그리고 Figs. 12, 13, 14 등은 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 온도와 파이버 체적비율에 대한 응력과 변형률 사이의 관계, 응력과 무늬차수와의 관계등을 나타낸다. 응력이 0인 경우, 즉 시험편에 하중이 작용하지 않는 경우에도 변형률과 무늬차수가 존재하는 것은 온도변화(상온이상)에 의해서 형상기억기능을 가진 재료가 형상기억효과를 발생시

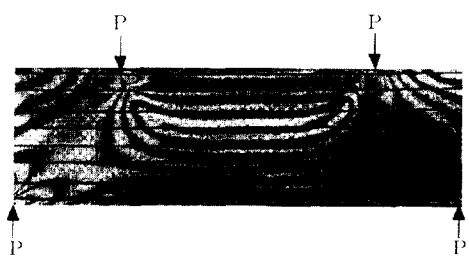


Fig. 8 Pure bending moment specimen for measurement of transparency.

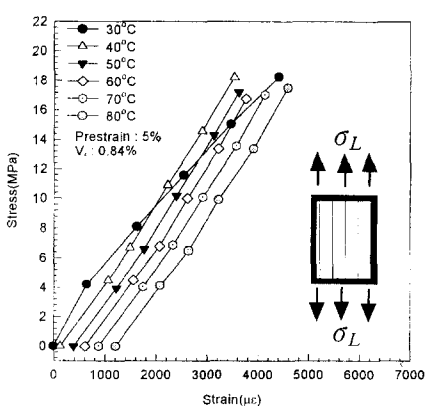


Fig. 9 Relationship between stress and strain in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

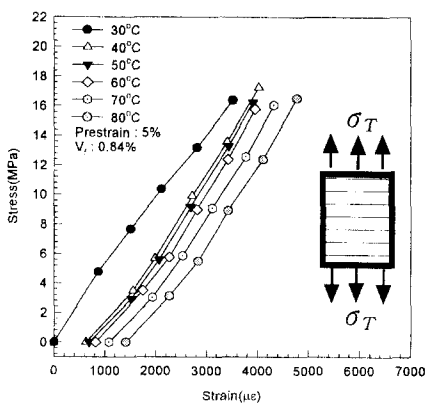


Fig. 10 Relationship between stress and strain in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

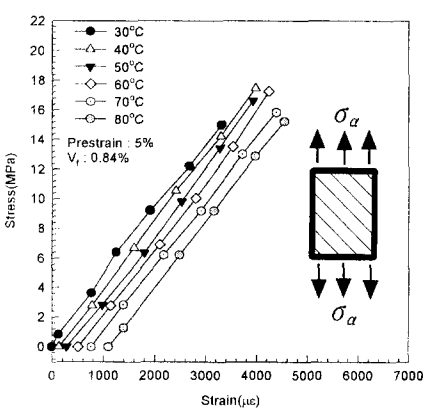


Fig. 11 Relationship between stress and strain in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

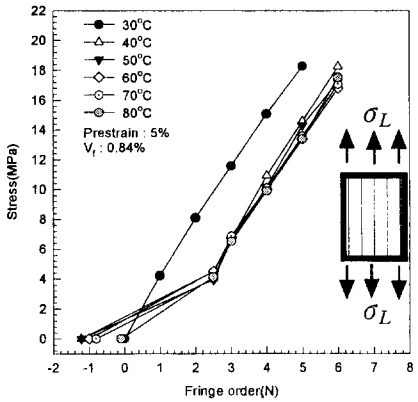


Fig. 12 Relationship between stress and fringe order in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

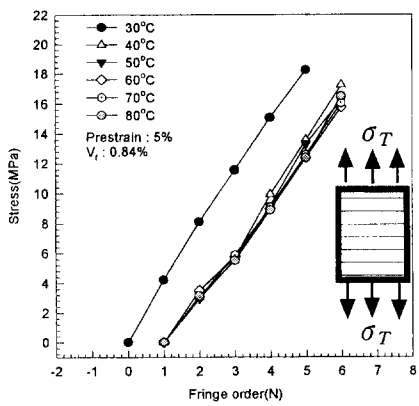


Fig. 13 Relationship between stress and fringe order in the Ti50-Ni50 SMA-FEC.

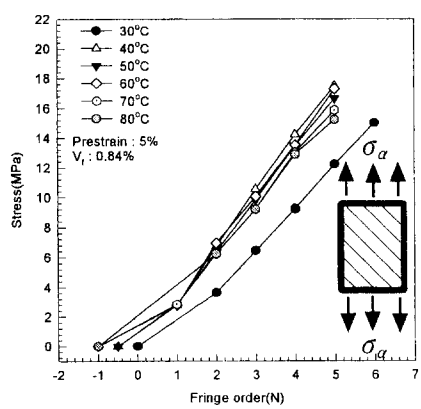


Fig. 14 Relationship between stress and fringe order in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

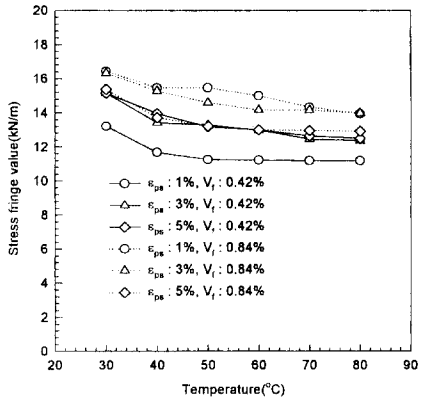


Fig. 15 Stress fringe values with temperature variation in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC(f_L)

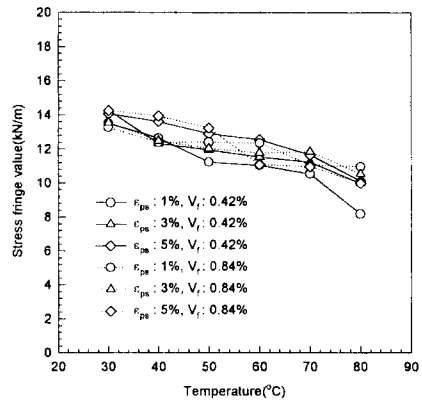


Fig. 16 Stress fringe values with temperature variation in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC(f_T)

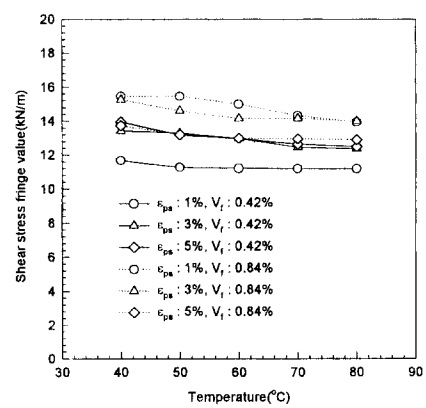


Fig. 17 Stress fringe values with temperature variation in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC(f_{LT})

키기 때문이다. 그러나 상온(온도가 30℃인 경우)이고 응력이 존재하지 않는 경우에는 응력과 무늬차수는 0이고, 응력과 변형률관계, 응력과 무늬차수의 관계가 매우 선형적이라는 것을 알 수 있다.

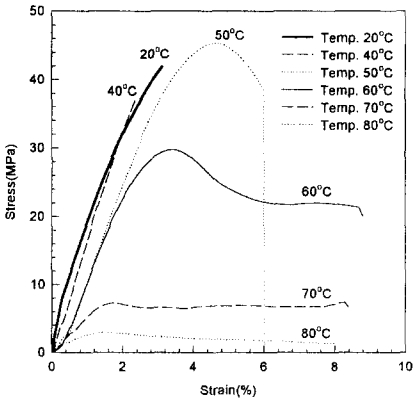


Fig. 18 Temperature dependent stress-strain relation of the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

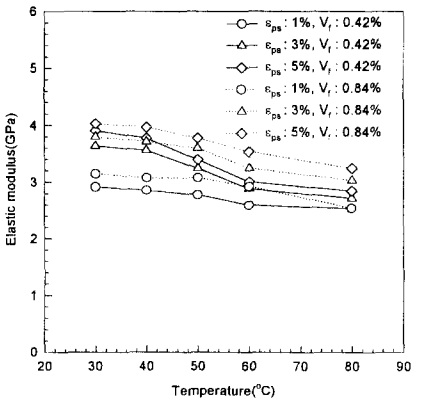


Fig. 20 Elastic modulus(E_T) with temperature variation in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

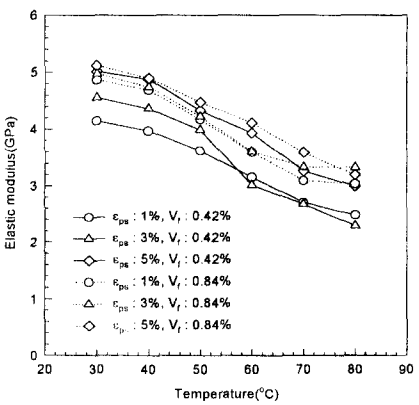


Fig. 19 Elastic modulus(E_L) with temperature variation in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

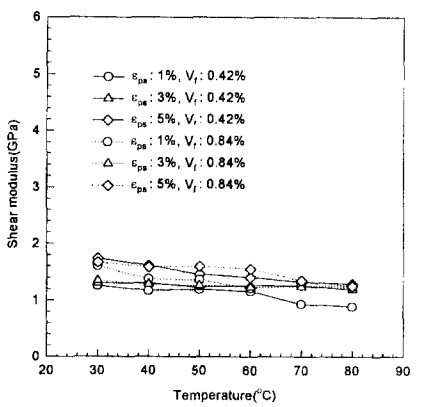


Fig. 21 Elastic modulus(G_{LT}) with temperature variation in the Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC.

3.3.3 응력프린지치

Figs. 15, 16, 17 등은 각각 온도에 대한 응력프린지치의 변화(f_L, f_T, f_{LT})를 나타낸다. 일반적으로 광탄성 모델재료의 응력프린지치는 0.035 kN/m≤f_σ≤350 kN/m[17] 사이에 존재해야 한다. 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 각 온도와 파이버 체적비율 그리고 초기변형률에 따른 응력프린지치도 이 조건을 잘 만족하고 있다는 것을 알 수 있으며, f_L, f_T는 온도의 증가와 함께 상당히 감소하고 f_{LT}는 조금 감소한다는 것을 알 수 있다. 이러한 현상은 형상기억합금 파이버의 회복변형률 때문이며, Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC를 이용해서 광탄성 실험을 할 때는 반드시 각 온도와 파이버 체적비율, 초기변형률에 맞는 응력프린지치를 사용해야 한다는 것을 알 수 있다.

3.3.4 균일성

개발된 광탄성 실험용 재료가 완전히 직교이방성체로서 역할을 하고 Fig. 8에 보인것과 같이 등색선 무늬가 매끄럽게 연결되므로 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 균일성은 매우 좋다고 볼 수 있다.

3.3.5 크리프

Fig. 18은 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC가 각 온도에서 형상기억회복 거동이 끝난 직후의 응력과 변형률관계를 나타낸 그림이다. 이 그림에서 알 수 있듯이 초기상태에서는 응력과 변형률 사이의 선형성이 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 그리고 이때의 변형률속도는 0.2 mm/min 이다.

대부분의 광탄성 재료는 고분자 재료이므로 온도에 대한 크리프 특성을 갖고 있으나, 사용하는 시

간이 짧다면 이 영향은 무시될 수 있다. 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC도 모재가 고분자 재료인 에폭시이지만 Fig. 18에 보인 것과 같이 실험의 한계온도인 80℃에서도 변형률이 약 2%까지 선형성이 보장되며 크리프현상이 나타나지 않는다는 것을 알 수 있다. 그러므로 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC는 광탄성 실험의 모델재료로서 크리프현상이 매우 적다고 볼 수 있다.

3.3.6 종탄성계수와 비례한도

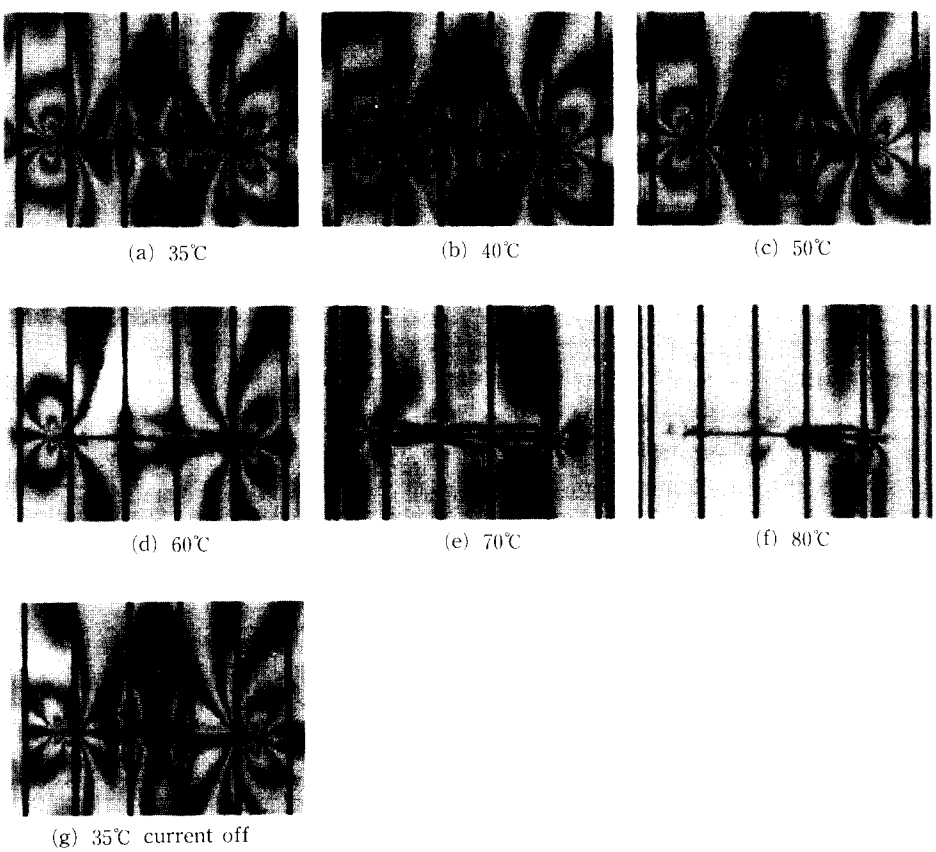
광탄성 모델재료는 종탄성계수와 비례한도가 크면 클수록 모델재료로서 유효하다. 종탄성계수와 비례한도가 높은 Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금을 파이버로 사용하고, 이 파이버와 모재사이의 접착강도는 에폭시 자체만의 강도와 거의 같다는 것이 확인되었으므로 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 종탄성계수와 비례한도는 투과형 광탄성 모델재료로 유효하다는 것을 알 수 있다. Figs. 19, 20, 21은 이것을 잘 증명하고 있다. 그러므로 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC를 이용해서 광탄성 실험을 할 때는 반드시 각 온도와 각 파이버 체적비율 그리고 각 초기변형률에 대응되는 탄성계수를 사용해야 한다.

3.3.7 잔류응력

잔류응력이 광탄성 실험의 모델재료에 존재하게 되면 가해지는 하중에 의하여 발생하는 응력분포의 무늬차수와 중첩을 일으키게 되고 이것은 큰 오차를 발생시키게 된다. 그러나 본 연구에서는 Ti_{50}-Ni_{50} SMA FEC를 주형할 때 Fig. 2와 같은 주형사이클(molding cycle)을 이용하였으며, 제작된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA FEC의 모재와 파이버 사이에는 잔류응력이 발생하지 않았다.

3.3.8 기타

온도의 영향과 시간연효과는 순수 에폭시와 같고 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy Composite는 Ti_{50}-Ni_{50} 형상기억합금 파이버의 강도로 인한 가공성에는 문제가 있지만 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber를 자를때 발생하는 열응력에 주의한다면 별 문제가 되지 않는다.



(a) 35℃ (b) 40℃ (c) 50℃

(d) 60℃ (e) 70℃ (f) 80℃

(g) 35℃ current off

Fig. 22 Isochromatic fringe pattern of Ti_{50} Ni_{50} SMA-FEC with temperature variation.

재료의 가격면에서는 Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber가 고가이므로 어쩔 수 없는 사항이지만 얻어지는 효과를 볼 때 가격은 문제가 되지 않는다. 위와 같은 이유로서 광탄성 재료로서 구비할 점에서 가장 중요한 것은 재료의 선형성과 광탄성 응력프린지치이다. 그리고 특히 중요한 것은 광탄성 실험 모델재료의 형상기억효과이다.

3.4 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 형상기억효과

형상기억효과를 가진 구조물의 응력상태를 투과형 광탄성 실험이나 반사형 광탄성 실험으로 해석하고자 할 때, 광탄성 실험 모델재료가 갖추어야 할 가장 중요한 성질은 형상기억효과이다. 그러므로 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 형상기억효과를 시각적으로 나타내기 위하여 Fig. 4(a)와 같은 온도조절장치가 부착된 Fig. 4(b)와 같은 하중장치를 사용하였다.

시편에 일정한 하중을 주기위하여 Fig. 4(a)와 같은 지렛대를 이용하였고, 이 때 시편에 가하여지는 하중은 로드셀(load cell)로 얻었다. 그리고 온도조절기를 이용하여 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 파이버의 온도를 35℃, 40℃, 50℃, 60℃, 70℃, 80℃ 등으로 변화시켰다. 이때 시편에 가하여지는 일정한 응력은 5.3 MPa이다. 응력을 일정하게 유지하면서 온도조절기를 이용하여 온도를 변화시키면서 CCD를 통하여 얻은 등색선 무늬는 Fig. 22에 나타내었다. 이때 파이버 체적율 V_f=0.42%이고 초기변형률은 3%이다.

Fig. 22의 (a)~(f)에서 보듯이 무늬차수는 온도가 50℃까지 증가함에 따라 증가하다가 50℃이후에는 온도가 증가함에 따라 무늬차수가 감소한다. 온도가 80℃에서는 무늬차수가 최대로 감소한다. 즉 온도가 80℃에서 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 회복력이 가장 크다. 이러한 사실은 스트레인 게이지로서 측정한 회복응력 크기를 나타내는 Fig. 5의 결과와 완전히 일치한다. 그리고 Fig. 22의 (g)에서 보듯이 선원을 완전히 차단하면 시편에 나타나는 등색선 무늬는 온도가 35℃때의 등색선 무늬와 완전히 일치한다. 이것은 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC가 탄성효과가 매우 좋다는 것을 알 수 있다. 그러므로 이 재료는 광탄성 재료로서 매우 좋다는 것도 알 수 있다. Figs. 9~11의 응력과 변형률관계, Figs. 12~14의 응력과 무늬차수 관계 등으로서 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 선형성이 매우 좋고, 이 재료의 응력프린지치의 범위도 광탄성재료가 갖추어야할 응력프린지치 범위($0.035\ kN/m \le f_\sigma \le 350\ kN/m$)를 만족하고 있으며, 그 이외의 광탄성 재료가 구비할 조건과 온도에 대한 형상기억효과가 충분히 나타나므로 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC는 형상기억합금 파이버로 구성된 구조물의 응력상태를 투과형 광탄성 실험으로 해석할 때, 광탄성 실험의 모델재료로 사용될 수 있다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

위와 같은 모델 주형과 광탄성 재료의 유효성에 대한 실험을 통하여 아래와 같은 결론을 얻을 수 있다.

(1) 본 연구에서 개발된 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC는 광탄성 재료로서의 구비조건을 잘 만족하고 있으므로 형상기억효과를 가진 재료로 구성된 구조물의 응력해석용 투과형 광탄성 실험의 모델재료로 사용될 수 있다.

(2) Ti_{50}-Ni_{50} SMA Fiber Epoxy Composite는 초기변형률과 파이버 체적비율 등에 관계없이 최대의 회복력이 발생되는 온도는 약 80℃이다. 그리고 파이버의 체적비율과 초기변형률 이 클수록 회복력도 커진다.

(3) 초기변형률이 각각 1%, 3%, 5%인 Ti_{50}-Ni_{50} SMA 파이버를 진 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 회복력을 발생시키는데 가장 적절한 초기변형률은 5%이다.

(4) 통전법으로 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 파이버의 온도를 80℃까지 변화시킬 때 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 응력프린지치는 10-15 N/m 사이이다. 그러나 각 온도에 따른 응력프린지치는 큰 차이가 있다. 그러므로 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC를 이용해서 광탄성 실험을 할 때는 반드시 각 온도와 각 파이버 체적비율 그리고 각 초기변형률에 대응되는 응력프린지치를 사용해야 한다.

(5) Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC의 파이버방향의 세로탄성계수는 온도가 증가할수록(상온에서 80℃ 까지) 상당히 감소하고, 각 온도에서 초기변형률과 파이버의 체적비율이 증가할 수록 증가한다. 그러므로 Ti_{50}-Ni_{50} SMA-FEC를 이용해서 광탄성 실험을 할 때는 반드시 각 온도와 각 파이버 체적비율 그리고 각 초기변형률에 대응되는 탄성계수를 사용해야 한다.

참고문헌

(1) Kato, J. Dutkiewicz and Miura, S., 1994, "Superelasticity and Shape Memory Effect in Cu-23at.%Al-7at.%Mn Alloy Single Crystals," *Acta. Metall. Mater*. Vol. 42, No. 4, pp. 1359~1365.

(2) Kandra, J. T. and Lee, E. W., 1994, "Temperature and Microstructural Dependence of the Deformation of a High NbTi-Al Alloy," *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol. 25A, pp. 1667~1679.

(3) Golberg, D., Xu Ya, Murakami, Y., Morimoto, S. and Otsuka, K., 1994, "Improvement of a $Ti_{50}Pd_{30}Ni_{20}$ High Temperature Shape Memory Alloy by Thermomechanical Treatments," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 30, No. 10, pp. 1349~1354.

(4) Federzoni, L. and Guenin, G., 1994, "Shape Memory Effect Associated with a Deformation at a Temperatures Just Below as in a Fe-Mn-Cr-Si-Ni Shape Memory Alloy," *Scripta Metallurgica et Materialia*, Vol. 31, No. 1, pp. 31~36.

(5) Jean, R. D. and Hu, C. T., 1994, "Shape Memory Effect by Constant-Stress Aging in Ti50.50 at. % Ni alloy," *Journal of Material Science*, Vol. 29, pp. 449~455.

(6) Ley, T. J. and Stice, J. D., 1992, "Development of Retractable Bone Probe Using Shape Memory Alloys," *Materials Research Society Symposium Proc*., Vol. 246, pp. 399~402.

(7) Van Humbeeck, Ir. J., 1992, "The Growth of Shape Memory Applications in Europe," *Materials Research Society Symposium Proc*., Vol. 246, pp. 377~387.

(8) Koko, T. S., Orisamolu, I. R., Smith, M. J. and Akpan, U. O., 1997, "Finite Element Based Design Tool for Smart Composite Structures," *SPIE*, Vol. 3039, pp. 125~129.

(9) 舟久保 熙康, 1984, 形狀記憶合金, 産業圖書, pp. 53~83.

(10) Lin, Ping-Hua, Hisaaki Tobushi, Kikuaki Tanaka and Akira Ikai, 1996, "Deformation Properties of TiNi Shape Memory Alloy," *JSME International Jounal*, Series A, Vol. 39, No. 1, pp. 108~116.

(11) 黃在錫, 崔善浩, 島本聰, 高橋賞, 1989, "光彈性 實驗用 複合材料の 開發に 關する 研究(第1報 直交異方性 複合材料の 開發)," 日本機械學會論文集 A編, 第55卷, 509号, pp. 11~16.

(12) Nishida, M. and Wayman, C. M., 1984, "Electron Microscopy Studies of the All-Round Shape Memory Effect in a Ti-51.0 at. %Ni Alloy," *Scripta Metallurgica*, Vol. 18, pp. 1389~1394.

(13) Hawong, J. S., Simamoto, A., Takahashi, S., and Choi, S. H., 1996, "A Method of Measuring Physical Properties from Stress Fringe Values," *JSME International Journal*, Vol. 33, No. 4, pp. 497~505.

(14) Sampson, R. C., 1970, *A Stress-optic Law for Photoelastic Analysis of Orthotropic Composites*, Experimental Mechanics May, pp. 210~215.

(15) Hawong, J. S., Simamoto, A., Takahashi, S., and Choi, S. H., 1990, "Study on the Development of Photoelastic Experimental Composite Material," *JSME International Journal, Series*, Vol. 33, No. 1, pp. 89~95.

(16) 황재석, 1991, "복합체 응력해석의 광탄성 실험법," 대한기계학회지, 제31권, 제3호, pp. 276~291.

(17) Dally, J. W. and Riley, W. F., 1991, *Experimental Stress Analysis*, McGraw-Hill, Inc. pp. 468~475.