

Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 복합체의 계면 접착 전단강도 향상에 관한 연구

이 효 재* · 황 재 석**
(1999년 11월 27일 접수)

A Study on the Improvement of Interfacial Bonding Shear Strength of Ti₅₀-Ni₅₀ Shape Memory Alloy Composite

Hyo Jae Lee and Jai Sug Hawong

Key Words: Shape Memory Alloy(SMA, 형상기억합금), Shape Memory Effect(형상기억효과), Shape Memory Alloy Composite(형상기억합금 복합체), Pull-out Test(인발시험), Surface Treatment(표면처리), Interfacial Bonding Shear Strength(계면 접착 전단강도), Transformation Temperature(변태 온도)

Abstract

In this paper, single fiber pull-out test is used to measure the interfacial bonding shear strength of Ti₅₀-Ni₅₀ shape memory alloy composite with temperature. Fiber and matrix of Ti₅₀-Ni₅₀ shape memory alloy composite are respectively Ti₅₀-Ni₅₀ shape memory alloy and epoxy resin. To strengthen the interfacial bonding shear stress, various surface treatments are used. They are the hand-sanded surface treatment, the acid etched surface treatment and the silane coupled surface treatment etc.. The interfacial bonding shear strength of surface treated shape memory alloy fiber is greater than that of surface untreated shape memory alloy fiber by from 10% to 16%. It is assured that the hand-sanded surface treatment and the acid etched surface treatment are the best way to strengthen the interfacial bonding shear strength of Ti₅₀-Ni₅₀ shape memory composite. The best treatment condition of surface is 10% HNO₃ solution in the etching method to strengthen the interfacial bonding shear strength of Ti₅₀-Ni₅₀ shape memory alloy composite.

1. 서 론

최근 형상기억합금을 화이버로 사용한 복합체^(1,2)가 자동차와 항공산업⁽³⁾ 그리고 의공학 분야⁽⁴⁾ 등에 많이 사용되고 있다. 형상기억합금은 그 자체의 변태특성상 마텐사이트 조직에서 변형을 가하면, 가해진 변형은 잔류변형으로 남게 되고, 이 잔류변형은 형상기억합금에 열을 가함으로써 원래의 형상을 회복하는 형상기억효과를 나타낸

다.^(5,6) 이러한 형상기억합금의 형상기억효과를 이용한 고기능성 복합체의 설계와 제작, 응용은 향후 산업전반에 걸쳐서 큰 영향을 미칠 것으로 기대된다.

형상기억합금 복합체의 거동은 형상기억합금 화이버가 지니고 있는 형상기억특성에 의해서 지배적인 영향을 받게 되고, 형상기억특성을 복합체에 완전하게 전달시키기 위해서는 형상기억합금 화이버와 복합체의 모재와의 계면접착력(접착강도), 즉 계면 접착 전단강도가 형상기억합금 화이버의 회복력보다 강해야 한다. 만일 형상기억합금 화이버와 모재와의 계면 접착 전단강도가 형상기억합금의 회복전단력 보다 낮다면 형상기억합금 복합체는 형상기억합금 화이버의 형상기억특성을 완전하게 나타내지 못한다. 그러므로 형상기억합금 화이버를 강화한 복합체의 설계와 제작에서 우선적으로 고려해야 할 사항은 형상기

* 회원, 영남대학교 인턴연구원

** 회원, 영남대학교 기계공학부

E-mail : jshawong@ynucc.yeungnam.ac.kr

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

역합금 화이버와 복합체의 모재와의 계면 접착 전단강도이다. 본 연구에서는 온도변화와 형상기억합금 화이버의 표면처리에 의한 형상기억합금 복합체의 계면 접착 전단강도 측정법을 체계화하고, 최적의 계면 접착 전단강도를 발생시키는 조건을 구하고, 이에 대한 계면 접착 전단강도의 향상에 관하여 검토하였다.

2. 형상기억합금의 특성과 계면 접착 전단강도

2.1 형상기억합금의 특성

Fig. 1은 형상기억효과를 설명하기 위한 형상기억합금의 응력, 변형률, 온도와의 상관관계를 나타낸 그림이다. 그림에서 T_0 와 T_h 는 각각 마텐사이트 변태이하의 온도와 오스테나이트 변태이상의 온도를 의미한다. 마텐사이트 변태온도(M_s) 이하에서 형상기억합금에 A점까지 하중을 가한 후, 하중을 제거하면 B만큼의 초기변형률(잔류변형)이 남게 된다. 이렇게 초기변형된 형상기억합금에 오스테나이트 변태온도(A_f) 이상의 열을 가하면 형상기억합금은 원래의 형상을 회복하는 형상기억효과를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 $Ti_{50}Ni_{50}$ 합금은 잉곳(ingot)상태에서 직경 $400\mu m$ 로 인발가공되고, $400^\circ C$ 에서 1시간 동안 열처리한 후, 담금질(ice quenching)하는 방법으로 형상기억처리 하였다. 이렇게 열처리된 합금의 변태온도⁽⁷⁾는 각각 $M_f=35^\circ C$, $M_s=40^\circ C$, $A_s=50^\circ C$, $A_f=54^\circ C$ 이며, 온도에 따른 응력과 변형률의 관계는 Fig. 2와 같다.

Fig. 2에서 변형률 1~2%까지는 형상기억합금의 응력과 변형률 관계가 선형적이고, 변형률 2%~10%사이에서는 항복현상이 발생함을 알 수 있다. 이 항복구간에서의 변형률이 형상기억합금에 가할 수 있는 초기변형률이며, 형상기억효과를 나타내는 변형률이다. 또한 형상기억합금의 탄성계수는 마텐사이트상($40^\circ C$ 이하)과 오스테나이트상($50^\circ C$ 이상)에서 각각 19.5Gpa과 40Gpa이며, 항복강도는 200~700MPa이다. 온도의 증가, 즉 형상기억합금이 마텐사이트상에서 오스테나이트상으로 변화할수록 형상기억합금의 회복력 발생에 의해서 항복강도와 탄성 범위가 증가하지만 $100^\circ C$ 이상(초탄성 온도이상)이 되면 거의 유사한 값을 갖는다.

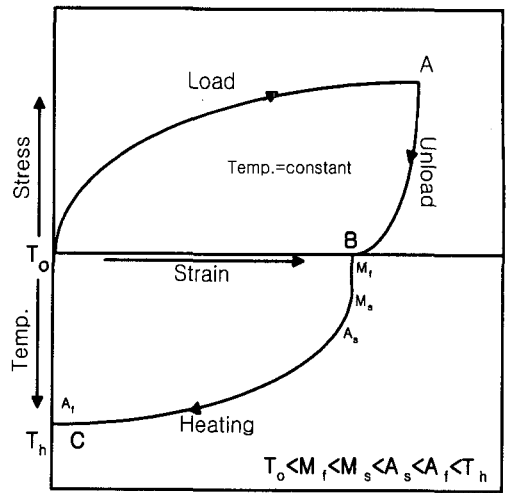


Fig. 1 Schematic illustration of shape memory effect

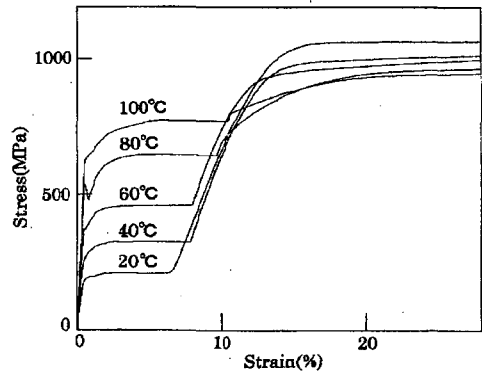
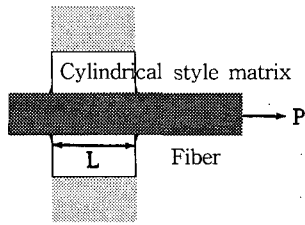


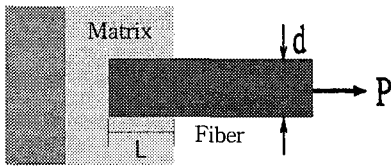
Fig. 2 Stress-strain curve of $Ti_{50}Ni_{50}$ shape memory alloy

2.2 계면 접착 전단강도

계면 접착 전단강도는 다른 기계적인 시험방법(인장, 압축, 전단, 충격, 피로 시험 등)으로는 측정되어 질 수 없는 중요한 변수이다. 그러므로 한 개의 화이버와 그 주위의 모재와의 접착강도를 측정할 수 있는 시험방법^(8~10)들이 개발되었다. 그 중에서도 유용하게 사용될 수 있는 시험방법으로 한 가닥 인발시험법(single fiber pull-out test)이 계면 접착 전단강도를 측정하는 방법으로 제시되었다. 이 방법은 1963년 Broutman⁽¹¹⁾에 의해서 처음 제시되었고, 가장 고전적인 방법이다.



(a) Favre-Perrin resin disc variant



(b) Chua-Piggott controlled embedded length variant

Fig. 3 Single-fiber pull-out test

Favre와 Perrin⁽¹²⁾은 Fig. 3(a)와 같은 화이버 주위에 얇은 원통형의 모재를 갖는 시편을 사용하여 화이버의 초기인발(initial pull-out)이 일어나는 하중을 측정하였으며, Chua와 Piggott⁽¹³⁾는 Fig. 3(b)와 같은 단순화한 블록형태의 모재에 화이버를 삽입시켜 화이버의 묻힘 위치에 따른 인발응력을 구하였다.

모재와 화이버 사이의 평균 계면 접착 전단강도는 식(1)과 같이 주어진다.

$$\tau = \frac{P_m}{\pi d L} = \frac{\sigma_m d}{4L} \quad (1)$$

여기서 τ 는 평균 계면 접착 전단강도, P_m 은 화이버에 가해진 최대하중, d 는 화이버의 직경, L 은 화이버의 묻힘길이, σ_m 은 화이버에 가해진 최대응력이다.

3. 실험방법

3.1 형상기억합금 화이버의 표면처리

본 연구에서 사용한 형상기억합금의 표면처리 방법은 샌드페이퍼(sand paper, #400)에 의한 스크래칭(scrambling)법과 질산에 의한 에칭법(HNO₃ 5~35%)⁽¹⁴⁾ 그리고 실란커플링제(silane coupler)에 의한 표면처리법 등이다.

형상기억합금을 스크래칭하는 방법으로는 형상

기억합금의 길이방향에 대해서 직각방향으로 샌드페이퍼를 이용하여 10회 스크래칭을 하였다. 그리고 에칭과 커플링방법으로는 실온에서 형상기억합금을 질산과 에탄올의 혼합액 속에서 10분간 에칭하는 방법과 실란커플링 수용액 중에 형상기억합금을 30분간 담구어 실란커플링액이 형상기억합금에 접촉되는 방법을 사용하였다. 이러한 방법으로 표면처리된 형상기억합금 화이버와 표면처리되지 않은 형상기억합금 화이버를 각 온도변화(20℃~80℃)에 따라 인발시험(pull-out test)을 수행하여 최적의 표면처리방법과 최대 계면 접착 전단강도를 구하였다. 그리고 본 연구에서 실험온도를 20℃~80℃로 정한 것은 인발시험의 모재가 되는 에폭시 수지의 유리전이역이 100℃이므로 이를 고려하여 결정한 것이다.

3.2 형상기억합금 화이버 인발 시험편의 제작

형상기억효과를 가진 화이버의 인발시험 시험편을 제작하기 위해서는 접착성이 우수한 재료를 모재로 사용하고, 형상기억효과를 가진 와이어를 화이버로 사용하여야 한다. 본 연구에서는 에폭시 수지(Araldite와 경화제가 중량비 10:3으로 혼합된 수지)를 모재로 사용하고 화이버로서 형상기억합금으로 가장 보편적으로 사용되고 있는 Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 와이어(wire)를 사용하였다.

형상기억합금 화이버인 Ti₅₀-Ni₅₀의 인발시험 시험편은 아래와 같이 주형된다.

① 모재인 에폭시 수지와 접착하지 않는 고밀도 폴리에틸렌수지로 인발시험 시험편의 주형기를 제작한다.

② Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버를 샌드페이퍼에 의한 스크래칭 방법, 질산에 의한 에칭법 그리고 실란커플링제에 의한 표면처리법 등으로 표면처리를 한다.

③ Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버를 주형상자에 수직이 되도록 장착하고, 기밀을 유지하도록 실리콘(silicone)을 사용하여 완전히 밀봉한다.

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

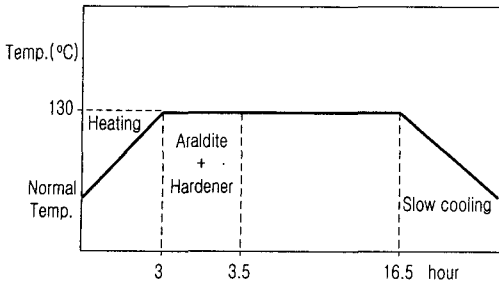


Fig. 4 Molding cycle in furnace

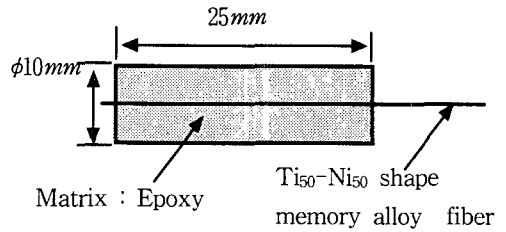
⑤ 기포를 완전히 제거하고 Fig. 4와 같은 경화 사이클에 따라 13시간 동안 중합시키면 인발시험 시편이 만들어 진다.

이렇게 만들어진 인발시험의 시편은 Fig. 5(a)와 같고, 시편의 성형 중에 발생할 수 있는 형상 기억합금 화이버와 모재 사이의 잔류응력을 광탄성 실험장치를 이용하여 관찰한 결과, 잔류응력에 의한 광탄성 무늬를 관찰할 수 없었으므로 잔류응력에 의한 인발시험의 영향은 무시할 수 있다.

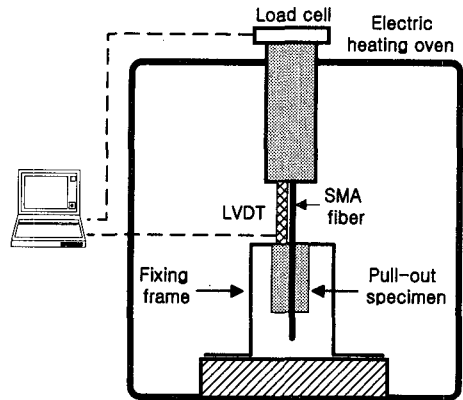
3.3 평균계면 접착 전단강도 측정

Fig. 5(a)와 같은 형상으로 제작된 인발시험 시편을 Fig. 5(b)와 같은 고정장치와 온도를 변화시킬 수 있는 전기오븐이 부착된 인장시험기에 장착시키고, 변형률 속도 1%로 인발시험을 수행하였다. 인발시험에 사용된 시험기는 로드-셀 용량 2kN의 인장시험기이며, 변위측정기(LVDT)를 이용하여 변위를 측정하였다. 로드-셀과 변위측정기로 측정된 인발하중과 변위는 AD 보드가 장착된 컴퓨터에 기록되고 분석되었다. 이러한 방법으로 구해진 형상기억합금의 초기 인발하중과 시편의 기하학적형상, 그리고 식 (1)로부터 형상기억합금 화이버의 평균 계면 접착 전단강도를 구하였다. 또한 위와 같은 실험을 각 온도(20, 40, 60, 80°C)와 형상기억합금 화이버의 표면처리 조건(표면처리되지 않은 조건, 질산에 의한 에칭, 샌드페이퍼에 의한 스크래칭, 실란커플링제에 의한 커플링)에 따라서 실험을 수행하였고, 각 온도와 표면처리조건에 따라 형상기억합금 화이버의 평균 계면 접착 전단강도를 구하였다.

4. 실험결과 및 고찰



(a) Specimen configuration



(b) Fixing and loading device of pull-out test specimen

Fig. 5 Pull-out test specimen and loading device

4.1 형상기억합금 화이버의 표면처리에 의한 계면 접착 전단강도의 변화

먼저 질산과 에탄올 혼합액의 최적의 표면처리 조건을 결정하기 위하여 질산의 양을 5~35%까지 변화시키면서 형상기억합금 화이버를 에칭하고, 이러한 조건에서 에칭된 형상기억합금 화이버를 이용하여 인발시험을 수행하여 최적의 에칭 조건을 결정하였다. Fig. 6은 20°C에서의 형상기억합금 화이버의 인발시험의 진행상태(응력과 변형률 관계)를 각 에칭조건에 대하여 나타낸 것이다. 응력과 변형률 관계선도상의 A점은 각 경우의 응력과 변형률 선도가 선형적으로 증가되다가 수평으로 변화되는 경계선상의 점을 나타내고, 점 B는 응력과 변형률 선도가 갑자기 떨어지는 경계의 점을 나타낸다. 그리고 점 A는 형상기억합금 화이버가 모재에서 초기분리되는 지점(initial debonding point)이고, 점 B는 화이버가 모재에서 분리되어 빠져 나오기 시작하는 인발점(pull-out point)을 나타낸다. Fig. 6과 같이 형상기억합금

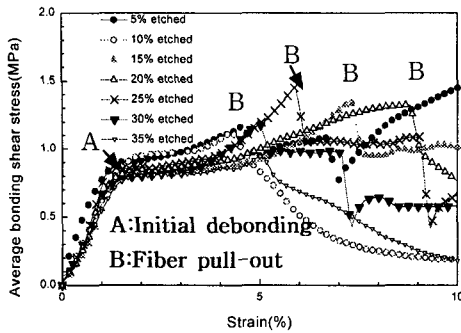


Fig. 6 SMA fiber pull-out curve with etched conditions

화이버는 가해지는 응력에 대해서 A 지점까지 계면 접착 진단강도를 유지하다가 계면 접착 진단강도 이상의 응력이 가해지면 초기계면분리 (initial interface debonding)가 일어나고, 그 이후에서는 일정 응력하에서 형상기억합금 화이버의 체적감소에 의한 계면분리가 진행된다. 그리고 형상기억합금 화이버와 모재 사이의 계면이 완전히 분리된 후에는 형상기억합금 화이버의 인발 (pull-out)이 진행된다. Fig. 6에서 알 수 있듯이 질산의 양을 10%까지 증가시킬수록 계면 접착 진단강도가 증가하며, 그 이상(15% 이상)이 되면 계면 접착 진단강도는 감소함을 알 수 있다. 즉 질산에 의한 에칭법을 사용할 경우, 질산 10%에 의한 표면처리법이 계면 접착 진단강도를 증가시키는 데 가장 적절함을 알 수 있다. 본 연구에서는 이러한 초기계면분리 응력(A 지점의 응력)을 형상기억합금 화이버의 계면 접착 진단강도로 규정하고, 각 경우의 계면 접착 진단강도를 측정하였다.

Fig. 7은 각 에칭조건에 따른 계면 접착 진단강도를 나타낸 것이다. Fig. 7에서 알 수 있듯이 최대 계면 접착 진단강도는 질산이 10%인 경우에 발생하며, 질산의 양이 15% 이상이 되면 계면 접착 진단강도가 감소한다. 이것은 질산에 의해서 형상기억합금의 단면 수축이 크게 발생하였기 때문이다. 그래서 본 연구에서는 질산 10%의 에칭법으로 형상기억합금 화이버를 표면처리하고 각 온도에서 표면처리 되지 않은 형상기억합금 화이버와 샌드페이퍼에 의한 표면처리법, 실란커플링제에 의한 표면처리법 등과 비교하였다.

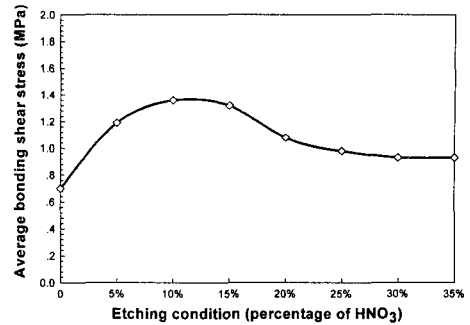


Fig. 7 Average maximum shear stress induced in the matrix with the different surface etching method

4.2 온도변화에 대한 계면 접착 진단강도

온도변화에 따른 계면 접착 진단강도의 변화를 측정하기 위해서 질산 10%로 에칭한 형상기억합금 화이버와 샌드페이퍼에 의하여 스크래칭된 형상기억합금 화이버, 실란커플링제에 의해서 표면처리된 형상기억합금 화이버 등과 표면처리되지 않은 형상기억합금 화이버의 계면 접착 진단강도를 비교하였다.

Fig. 8과 Fig. 9는 각각 20℃와 80℃에서의 표면처리조건에 따른 형상기억합금 화이버의 계면 접착 진단강도의 변화를 나타낸다. 형상기억합금은 A_s 이상의 온도에서는 원래의 형상을 회복하려는 형상기억특성을 갖고 있으므로 시험 온도의 증가와 함께 탄성계수와 항복강도가 증가하게 된다. 형상기억합금의 탄성계수와 항복강도의 증가는 인발강도의 증가와 계면 접착 진단강도의 증가를 가져오게 된다. 20℃의 시험온도인 Fig. 8에서 샌드페이퍼와 에칭에 의한 표면처리조건이 최대 0.9~0.98MPa의 계면 접착 진단강도를 나타내었고, Fig. 9의 80℃에서는 계면 접착 진단강도가 2.20~2.25MPa로 증가하였다. 또한 실란커플링제에 의한 표면처리조건은 20℃의 시험온도에서 0.7MPa, 80℃에서는 1.78MPa의 계면 접착 진단강도를 나타내었다. 즉 시험온도가 높을수록 형상기억합금의 항복강도의 증가에 의해서 계면 접착 진단강도가 증가하며, 표면처리된 형상기억합금 화이버의 계면 접착 진단강도가 표면처리 되지 않은 형상기억합금 화이버의 계면 접착 진단강도보다도 16% 이상 증가된다.

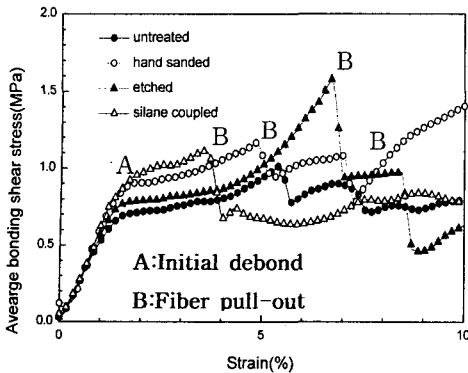


Fig. 8 SMA Fiber pull-out curve with conditions of surface treatment at 20°C

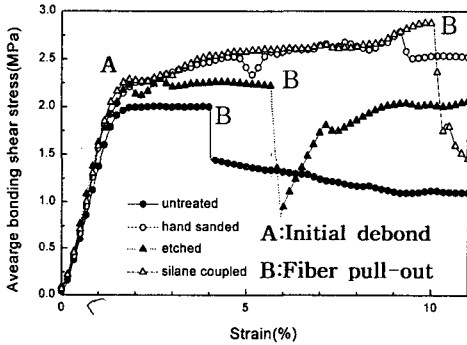


Fig. 9 SMA Fiber pull-out curve with conditions of surface treatment at 80°C

Fig. 10은 각 온도와 표면처리조건에 따른 계면 접착 전단강도를 나타낸다.^(15,16) 이 그림에서 알 수 있듯이 핸드샌드와 에칭에 의한 방법은 온도의 증가와 함께 계면 접착 전단강도가 비례적으로 증가하는데 비해서 실란커플링제에 의한 표면처리조건인 경우는 60°C와 80°C 사이에서 계면 접착 전단강도가 크게 증가된다. 이것의 원인은 온도상승에 의한 실란커플링제의 화학적인 반응작용에 원인이하여 계면 접착 전단강도의 상승을 가져온 것이다. 그런데 일반적으로 계면 접착 전단강도를 향상시키는 표면처리방법 중에서 샌드페이퍼에 의한 표면처리방법은 에칭에 의한 표면처리 방법보다 접착전단응력이 낮다고 보고되고 있다.⁽¹⁶⁾ 그러나 본 연구의 결과는 그렇지 않다. 표면처리 되지 않은 형상기억합금 화이버와 핸드샌드로 표면처리된 형상기억합금 화이버, 에칭된

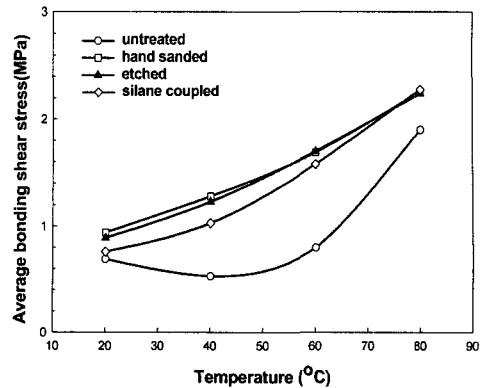
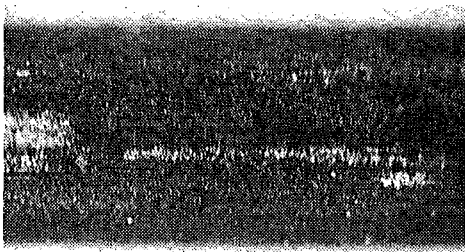


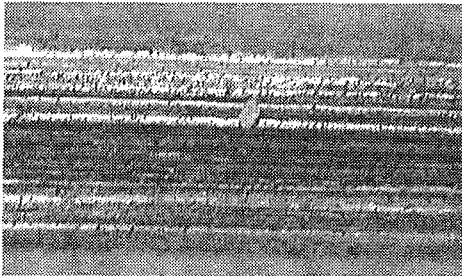
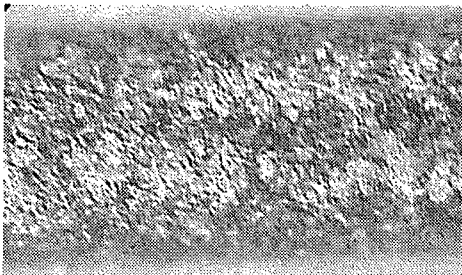
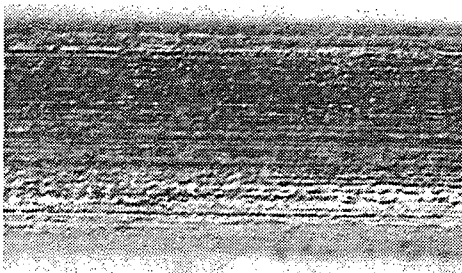
Fig. 10 Average maximum bonding shear stress of SMA fiber with conditions of surface treatment

형상기억합금 화이버, 실란커플링제로 표면처리된 형상기억합금 화이버 중에서 계면 접착 전단강도가 가장 큰 경우는 핸드샌드된 형상기억합금 화이버이고, 그 다음이 질산으로 에칭된 형상기억합금 화이버와 실란커플링된 형상기억합금 화이버, 표면처리되지 않은 형상기억합금 화이버의 순서이다. 그러나 핸드샌드된 형상기억합금 화이버의 계면 접착 전단강도와 에칭된 형상기억합금 화이버의 계면 접착 전단강도는 비슷하다. 본 연구에서 사용한 샌드페이퍼에 의한 표면처리조건이 높은 접착전단응력을 나타내는 것은 샌드페이퍼로 형상기억합금을 스크래칭할 때 스크래칭 방향을 본 연구에서는 형상기억합금 화이버의 길이방향에 대해서 수직으로 스크래칭하였기 때문이다. 이것은 Fig. 11의 현미경 사진을 통해서 확인할 수 있다.

Fig. 11은 표면처리조건에 따른 형상기억합금 화이버의 현미경 사진이다. Fig. 11(a)는 표면처리되지 않은 형상기억합금 화이버이고, Fig. 11(b)는 형상기억합금 화이버가 길이방향으로 샌드페이퍼로 스크래칭된 것이며, Fig. 11(c)는 형상기억합금 화이버의 수직방향으로 스크래칭한 것이고, Fig. 11(d)는 실란커플링제에 의해서 커플링된 형상기억합금 화이버이다. 각각의 현미경 사진에서 알 수 있듯이 표면처리 되지 않은 형상기억합금 화이버보다는 표면처리 된 형상기억합금 화이버의 표면이 거친 것을 알 수 있다. 이러한 형상기억합금 화이버의 표면거칠기가 접착전단응력을 향



(a) Untreated SMA fiber

(b) Scratched SMA fiber
(horizontal direction for SMA fiber)(c) Scratched SMA fiber
(vertical direction for SMA fiber)

(d) Coupled SMA fiber

Fig. 11 Photographs of SMA fiber with conditions of surface treatment

상시키는데 크게 기여하게 된다. 그리고 샌드페이퍼로 스크래칭된 Fig. 11(b)와 Fig. 11(c)의 표면을 관찰, 비교해 볼 때 형상기억합금 화이버의 수직방향으로 스크래칭된 것은 길이방향으로 스

크래칭된 것보다도 인발시험에서 접착전단응력을 향상시키게 된다.

인발시험의 결과, 모든 온도에서 표면처리되지 않은 형상기억합금 화이버의 계면 접착 전단강도가 가장 낮게 나타났으며, 시험온도가 20℃~80℃까지 증가할수록 핸드샌드와 에칭된 시편의 계면 접착 전단강도가 높게 나타났다. 이러한 결과는 에칭과 핸드샌드된 형상기억합금 화이버의 거친 표면이 모재인 에폭시와의 접착력을 증가시켰기 때문이며, A_s 이상의 온도에서는 형상기억합금의 회복특성에 기인하여 에칭과 핸드샌드된 형상기억합금 화이버의 표면결합과 실란커플링제의 화학반응으로 계면 접착 전단강도가 높게 발생하였다.

5. 결 론

Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버의 인발시험을 통해서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 질산에칭에 의한 Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버의 표면처리에서 최적의 조건은 질산 10%에 의한 에칭 방법이다.

(2) 표면처리된 Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버의 계면 접착 전단강도는 표면처리 되지 않은 형상기억합금 화이버의 계면 접착 전단강도 보다 각각의 시험온도에서(20℃~80℃ 사이) 16% 이상 증가된다.

(3) Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버의 계면 접착 전단강도는 역변태 온도에 따라 변화하며, A_f 이상의 온도(80℃)에서 100% 증가된다.

(4) 샌드페이퍼에 의한 스크래칭 방법, 질산에 의한 에칭법 그리고 실란커플링제에 의한 표면처리조건 중에서 Ti₅₀-Ni₅₀ 형상기억합금 화이버의 수직방향으로 핸드샌드된 표면처리조건과 질산에 의한 에칭 방법이 계면 접착 전단강도를 증가시키는 방법으로 유용하게 사용될 수 있다.

참고문헌

- (1) Hawong J. S., Shimamoto A., Lee H. J., Furuya Y., 1997, "Study on the Development of Photoelastic Experiment Model Material for Ti₅₀-Ni₅₀ SMA-FRP," *Proceedings of SPIE(The International Society for Optical*

- Engineering), Smart Structures and Materials 1997, Mathematics and Control in Smart Structures, Vol. 3039, pp. 559~570.*
- (2) 황재석, 이효재, 1998, "형상기억효과를 가진 투과형 광탄성 모델재료 개발에 관한 연구," 대한기계학회논문집, 대한기계학회, 제22권 제3호, pp. 2237~2247.
- (3) Van Humbeeck Ir. J., , 1992, "The Growth of Shape Memory Applications in Europe," *Materials Research Society Symposium Proc.*, Vol. 246, pp. 377~387.
- (4) Ley T. J., Stice J. D., 1992, "Development of retractable bone probe using shape memory alloys," *Materials Research Society Symposium Proc.*, Vol. 246, pp. 399~402.
- (5) Ping-Hua Lin, Hisaaki Tobushi, Kikuaki Tanaka, Akira Ikai, 1996, "Deformation Properties of TiNi Shape Memory Alloy," *JSME International Journal, Series A*, Vol. 39, No. 1, pp. 108~116.
- (6) 舟久保 熙康, 1984, *形状記憶合金*, 産業圖書, pp. 53~83.
- (7) Jean R. D., Hu C. T., 1994, "Shape Memory Effect by Constant-stress Aging in Ti50.50at.%Ni Alloy," *Journal of Material Science*, Vol. 29, pp. 449~455.
- (8) Jiang K. R., Penn L. S., 1992, "Improved Analysis and Experimental Evaluation of the Single Filament Pull-out Test," *Composites Science and Technology*, Vol. 46, pp. 89~103.
- (9) Goettler R. W., Faber K. T., 1989, "Interfacial Shear Stresses in Fiber-Reinforced Glasses," *Composites Science and Technology*, Vol. 37, pp. 129~147.
- (10) Marshall D. B., Cox B. N., 1985, "The Mechanics of Matrix Cracking in Brittle-matrix Fiber Composites," *Acta Metall.*, Vol. 33, pp. 2013~21.
- (11) Broutman L. J., 1963, *Interfaces in Composites*, ASTM STP 327, p.133.
- (12) Favre J. P., Perrin J., 1972, *Journal of Material Scienc*, Vol. 7, No. 1113.
- (13) Chua and Piggott, 1986, "Recent Studies of the Glass Fibre-Polymer Interface," *Ind. Eng. Chem. Prod. Res. Devel.*, Vol. 26, pp. 672~701.
- (14) 문인동, 1985, *금속조직에칭기술*, 청문각, pp. 100~103.
- (15) 김경렬, 1999, 등방성체/등방성체 이종재료용 동적 광탄성 실험의 Hybrid법 개발에 관한 연구, 영남대학교 석사학위논문, pp. 40~45.
- (16) Jonnalagadda K., Kline G. E., Sottos N. R., 1997, "Local Displacement and Load Transfer in Shape Memory Alloy Composites," *Experimental Mechanics*, Vol. 37, No. 1, pp. 78~86.