論 文

# 금형주조법을 이용한 TiNi/6061Al 지적복합재료의 제조 및 기계적 특성

김순국 · 이준희 · 윤두표* · 박영철* · 이규창** · 김영희

# Fabrication and Mechanical Properties of TiNi / 6061Al Smart Composite by Permanent Mold Casting

Soon-Kook Kim, Jun-Hee Lee, Doo-Pyo Yun*, Young-Chul Park*,
Gyu-Chang Lee** and Young-Hee Kim

## Abstract

6061Al-matrix composite with TiNi shape memory fiber as reinforcement has been fabricated by Permanent Mold Casting to investigate the mechanical properties of the smart composites. The composites have showed good interface bonding as a result of the analysis of SEM and EDX. The smartness of composite is given due to the shape memory effect of the TiNi fiber which generates compressive residual stresses in the matrix material when heated after being prestrained. The tensile strength of the composites was tested at temperatures between 90°C and room temperature with increasing amount of pre-strain, and it showed that the tensile strength at 90°C was higher than that of the room temperature. Especially, the tensile strength of the composite increases with increasing pre-strain. It showed that hardness of matrix was higher than that of common 6061Al alloy.
(Received September 21, 1998)

## 1. 서 론

최근 산업 발달과 더불어 다양하고 가혹한 분위기 중에서 사용되는 재료가 날로 늘어나고 있지만 재료 자체의 비강도, 비강성 등의 부족 및 결함 발생 등으로 인해 충분한 안정성을 확보하지 못하고 돌발적인 상황에서 끔찍한 사고를 유발하는 경우가 많이 발생하고 있다. 따라서 이를 개선할 목적으로 기존의 금속재료를 복합화하여 기계적 특성을 개선하고 더욱 고기능을 가진 재료를 개발하기 위한 연구가 세계적으로 활발히 진행되고 있다. 이러한 금속기 복합재료는 기존의 금속재료에 비해 비강도, 비강성 뿐만 아니라 내열성, 내마모성 등을 향상시킬 수 있어 구조재, 자동차 및 항공기 재료로서 활용할 수 있다[1-4]. 금속기 복합재료 제조시 강화수단으로는 금속 및 세라믹 등을 여러 형태로 사용할 수 있다. 그러나 세라믹 강화 금속 복합재료는 기지금속과 세라믹 간의 젖음성이 좋지 못하여 계면에서 결함 발생 등의 문제점이 발생하게 된다. 또한 열팽창 계수 차이로 인해 냉각 과정 중 기지 내에 인장잔류응력을 발생시켜 복합재료의 기계적 특성을 저하시킨다[5]. 이러한 단점을 보완하고 재료 내부의 결함 발생 및 진전 상황을 우선적으로 파악할 수만 있다면, 원자력 발전소나 항공기, 그리고 대형 선박 및 건축물 등에서의 인명 및 재산상의 피해를 미연에 방지 또는 최소화하는 것이 가능할 것이다. 따라서 이러한 기능을 가지는 소위 지적 복합재료 (Smart Composite) [6-7]에 대한 연구가 1990년대 들어서 미국, 일본을 중심으로 새롭게 진행되고 있으나 아직 초보 단계에 지나지 않아 우수한 지적 복합재료를 상용화하기 위해서는 아직 많은 연구가 필요하다.

지적 복합재료는 다양한 재료 및 공정제어기술을 이용하여 제조할 수 있지만, 특히 형상기억합금을 강화재로 이용한 금속기 복합재료는 세라믹 강화 복합재료와는 달리 형상기억 효과를 이용하여 복합재료의

동아대학교 금속공학과(Dept. of Metallurgical Engineering Dong-A University)
*동아대학교 기계공학과(Dept. of Mechanical Engineering Dong-A University)
**포항산업과학연구원(RIST)

기지에 압축잔류응력을 유발시킴으로서 고온 기계적 특성 및 지적 특성을 향상시킬 수 있다[8-9]. 따라서 본 연구에서는 분말야금법 및 용탕단조법[10-11] 등에 비해 비교적 작업이 용이한 금형주조법으로 TiNi/6061Al 금속 복합재료를 제조하여 복합재의 섬유강화 효과 및 형상기억 효과에 기인한 압축잔류응력이 복합재료의 기계적 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

## 2. 실험방법

TiNi/6061Al 지적 복합재료를 제조하기 위해 강화재로 직경 0.4mm의 wire를 사용하였으며, 복합재료 제조를 위한 전단계로 방전가공한 스테인레스 판재 및 Cu봉재를 이용하여 지그를 제작한 후 wire를 조립하여 예비성형체를 제조하였으며 그 그림을 Fig. 1에 나타내었다.

상용의 6061Al합금을 기지재로 사용하여 복합재를 금형주조하였다. 용탕을 금형에 주입시 주입온도 및 금형예열온도에 따라 제조된 복합재의 결합 정도가 다르기 때문에 본 실험에서는 예비 실험결과 얻어진 data를 토대로 최적 조건인 주입온도 730°C, 초기 금형 예열 온도는 250~350°C로 하였으며 금형에 1회 예비주입을 행하여 금형을 충분히 고온으로 안정화 시킨 후 복합재를 주조하였다. 또한 주입시 난류에 따른 결함 형성의 크기를 최대한 억제하기 위하여 자체 제작한 주입컵을 이용, 최대한 조용한 주입이 되도록 하였다. 이의 모식도를 Fig. 2에 나타내었다.

이와 같이 제조된 복합재는 압탕 부위 및 측면 스테인레스 판재를 제거한 다음 압하율 10~15%로 압연 처리한 후 인장시편을 제조하고 형상기억 열처리를 실시하였다.

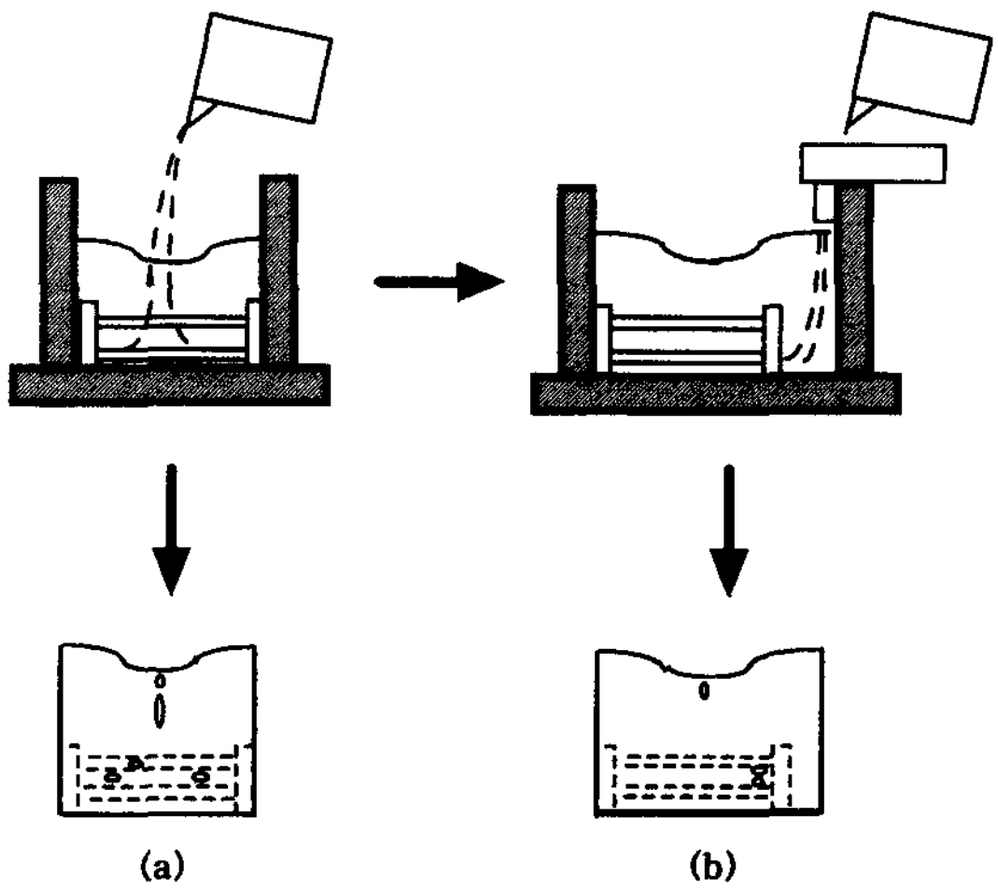



Fig. 2. Schematic diagram of pouring method (a) before improvement, (b) after improvement.

본 연구에서는 6061Al 합금의 용체화 처리 온도 구간을 고려하여 530°C 2hr 처리한 후 얼음물에 퀜칭하였다.

복합재료의 미세조직을 관찰하였으며, 계면 반응층의 변화를 고찰하기 위해 SEM 및 EDX 분석을 하였다. 인장시편은 상온에서 각각 0~3% 예비변형(Pre-strain)을 가한 후 보관하였다가 재차 상온 및 Af 온도 이상인 90°C에서 1시간 유지한 후 0.5 mm/min의 변형속도로 상온 및 고온인장시험을 행하였으며 이를 통해 금형주조법에서의 지적 복합재료 제조의 가능성

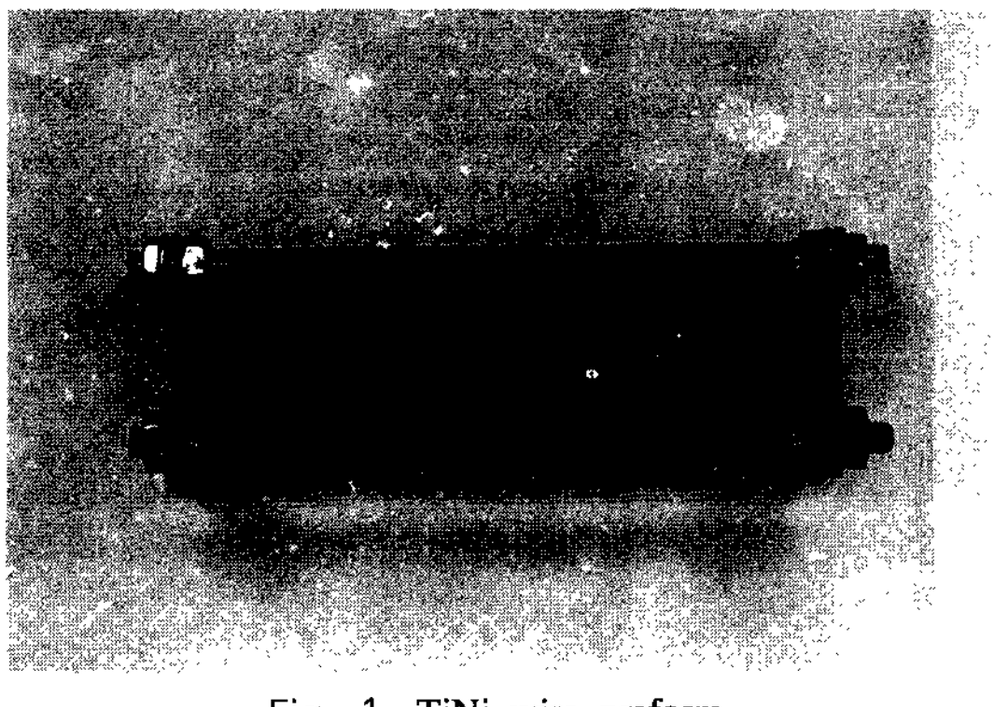


Fig. 1. TiNi wire preform.

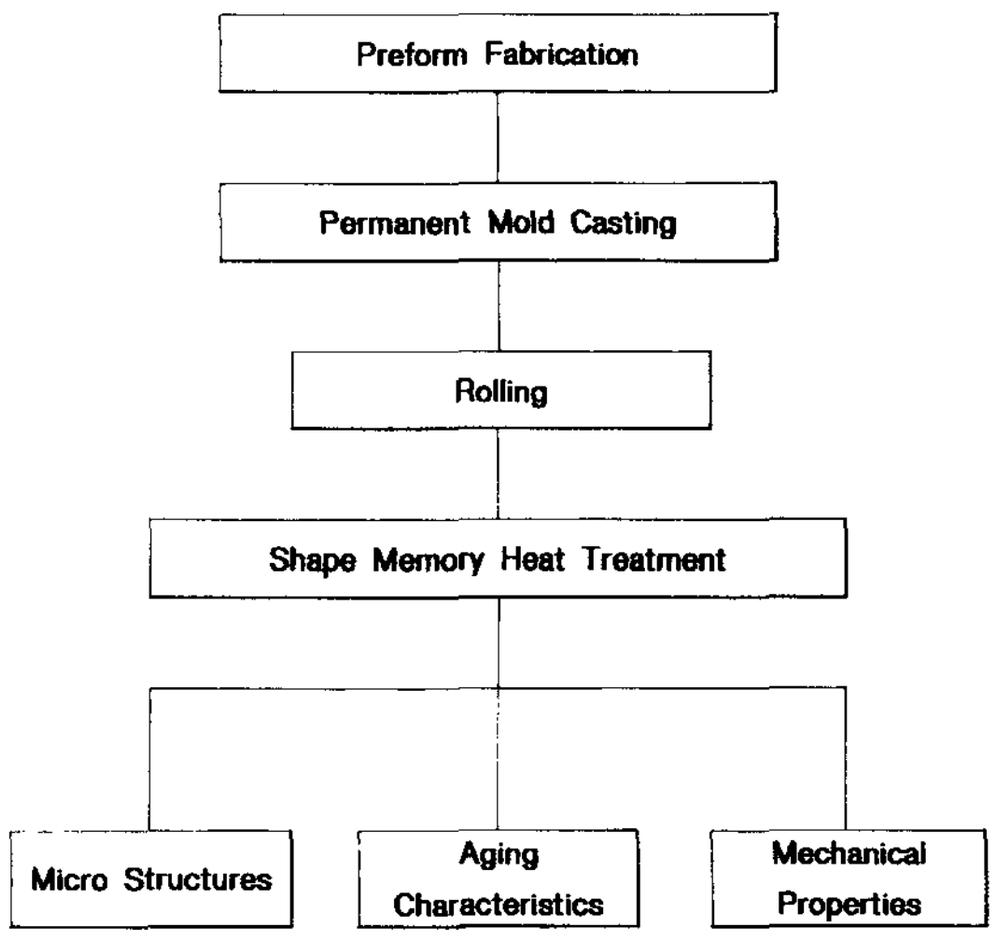


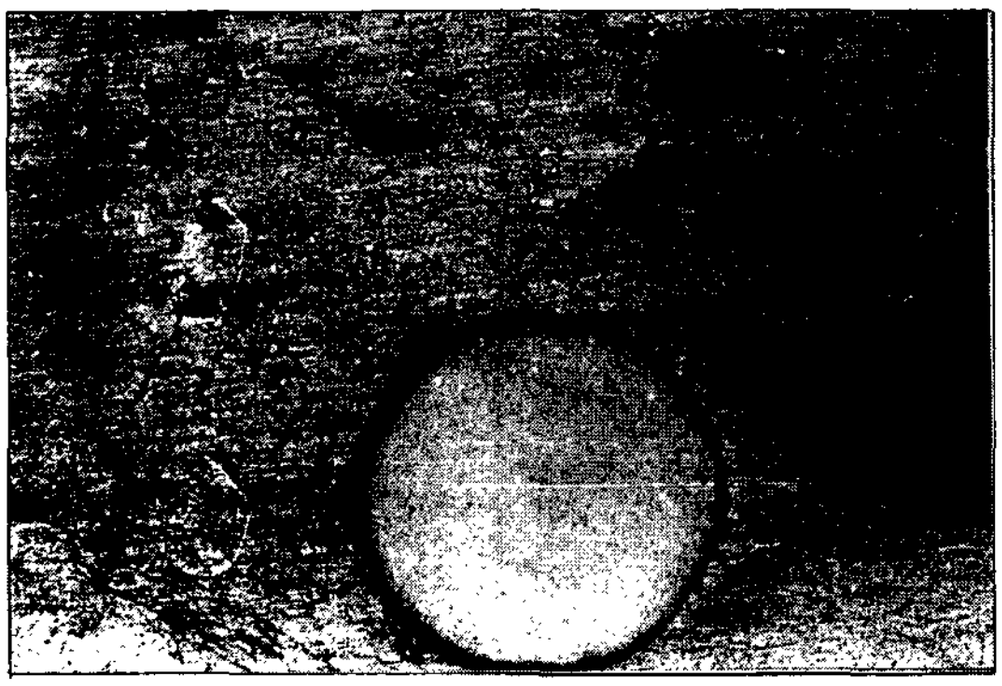

Fig. 3. Schematic diagram of experimental procedure.

및 기계적 특성 등을 고찰하였다. 이들의 개략 공정도를 Fig. 3에 나타내었다.

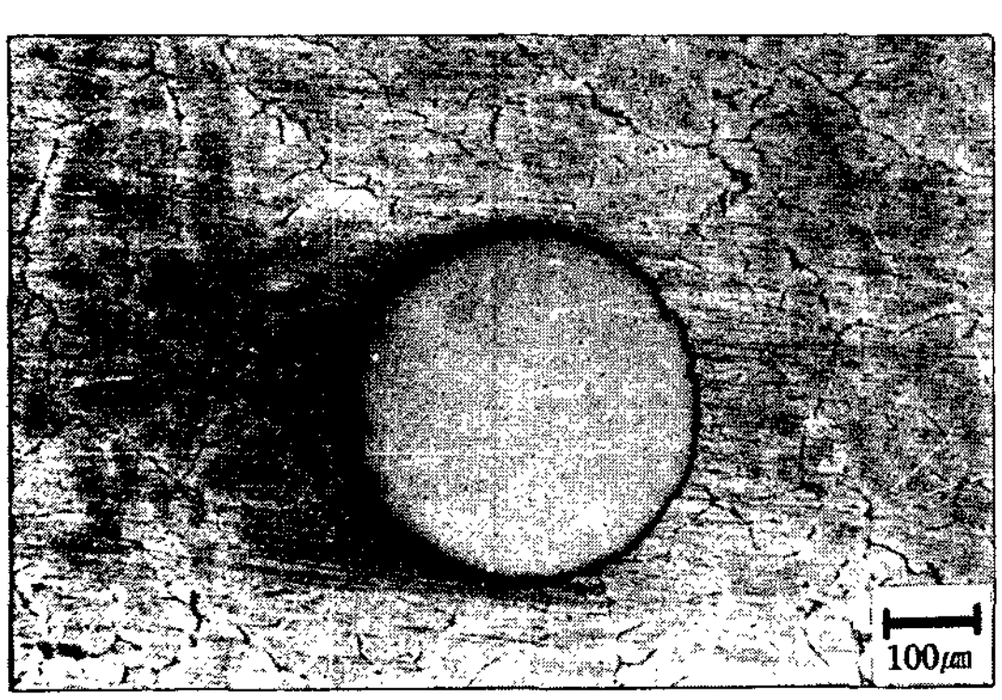
## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 주조 조직

Fig. 4는 주입 방법에 따른 결함형성 정도 및 결함의 위치를 나타낸 광학현미경 조직 사진이다. Fig. 4의 (a), (b)부분은 Fig. 2의 (a), (b) 방법으로 금형주조한 복합재의 미세조직을 각각 나타낸 것이다. (a)의 경우는 용탕을 예비성형체의 center 부위로 직접 낙하시켜 주입한 결과이다. 이 때 예비성형체 제작시 지지대로 쓰인 Cu봉재 부위가 용탕 주입시 탕 흐름을 간섭하게 되고 일부 용탕이 Cu봉재와 부딪치며 비산되는 등 작업상의 문제점 등으로 주조 결함이 발생하였으며, 또한 wire가 용탕의 수직 낙하하는 힘에 의해 일부 끊어지거나 처지는 등의 결함이 발생하여 시편가공시 원하는 wire 체적분율을 얻기가 곤란하였다. Fig. 2(b)와 같이 자체 제작한 주입구를 이용하여 주입한 결과 용탕이 금형 벽면을 타고 주입되면서 wire 등에 직접적인 힘을 가하지 않고 원활한 용탕 흐름에 의해 주조결함이 center에는 거의 나타나지 않았다. 일부 발생되는 주조 결함 역시 지그 측면의 스테인레스 판재 주위로 국부적으로 발생되어 주조 후 가공에 의해 제거가 용이하였으며 시편 가공 후 wire의 체적분율을 확인한 결과 양호함을 알 수 있었다. 이에 따라 모든 시편을 Fig. 2(b) 방법에 의해 복합재를 제조한 후 본 연구에 사용하였다.



**(a) Before improvement**




**(b) After improvement**

Fig. 4. Optical micrographs of TiNi/606 All composite.

### 3.2 복합재료의 계면 반응 및 상변태 특성

Fig. 5는 복합재료의 내부에 압축잔류응력을 발생시키기 위해 실시한 process와 형상기억합금의 강화기구[12]를 모식적으로 나타낸 것이다. 그림에서와 같이 TiNi wire를 6061Al기지 내에 복합화 시킨 후 530°C에서 2 hr 형상기억 열처리를 행한 후 급냉시켜 TiNi wire를 마르텐사이트상으로 만든다. 이렇게 마르텐사이트상으로 연화된 복합재에 예비변형을 가한 후 Af 온도 이상으로 가열하면 마르텐사이트는 오스테나이트로 역변태가 일어나 형상기억 효과에 의해 수축하여 6061Al기지 내에 압축잔류응력을 발생시켜 복합재료를 인장시험시 압축잔류응력에 기인한 강도의 향상을 꾀할 수가 있다. 그런데 이 경우 복합재 기지와 fiber 간의 결합력이 재료의 기계적 성질에 큰 영향을

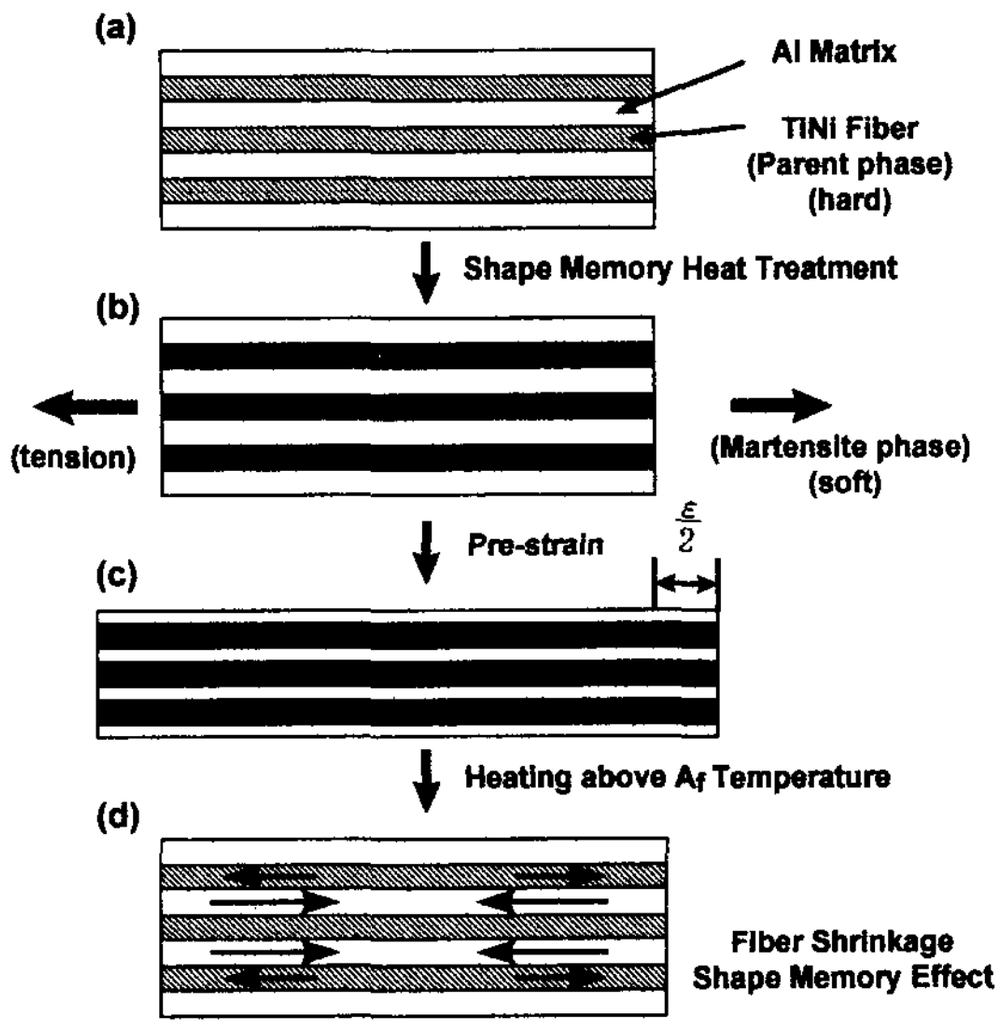



Fig. 5. Concept of Smart Composite with TiNi fibers.

Fig. 6. SEM microstructure at the interface of TiNi/606 Al composite.

미치게 된다. 따라서 본 복합재료의 계면접합성 및 계면 확산 상태를 확인하기 위해 가공 후 압연 처리한 시편의 SEM 및 EDX분석을 실시하였으며 그 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서와 같이 fiber와 기지 사이의 계면을 SEM 미세조직을 통해 확인한 결과 접합 상태 불량 등으로 인한 결함은 나타나지 않았다. 특히 우수한 기계적 특성을 얻기 위해 가공 후 10~15%의 압하율로 압연처리를 실시하였기 때문에 기지와 wire의 접합 상태 뿐만 아니라 기지 내 조직 역시 더욱 치밀해졌다. 따라서 경도 시험시 측정 부위에 관계없이 전체적으로 고른 data 분포를 얻을 수 있었으며 이에 따라 압연 효과가 있었던 것으로 판단된다. 또한 계면에서 화살표로 표시한 부분을 EDX분석한 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 530°C 2hr 용체화 처리한 직후 계면을 EDX분석한 결과 기지 내에 확산층이 존재하였다. 따라서 본 복합재는 시효에 따라 확산층이 계면에 형성되어 접합상태는 양호하다고 판단된다. 그리고 이 확산량은 175°C로 시효처리 시 시간의 경과에 따라 점점 증가하다가 24시간 시효 시 감소하였다. 이와 같이 본 복합재는 시효처리 조건에 따라 계면에서의 확산반응 효과가 달라질 것으로 판단되며 특히 시효에 의한 기지 및 wire의 경도 및 기계적 특성 또한 이러한 계면 반응과 밀접한 관계가 있으리라 사료된다. 따라서 시효처리에 따른 복합재 계면의 확산층 거동에 관해서는 더 많은 고찰이 필요하며 현재 이 부분에 대해서 연구를 계속 진행하고 있다.

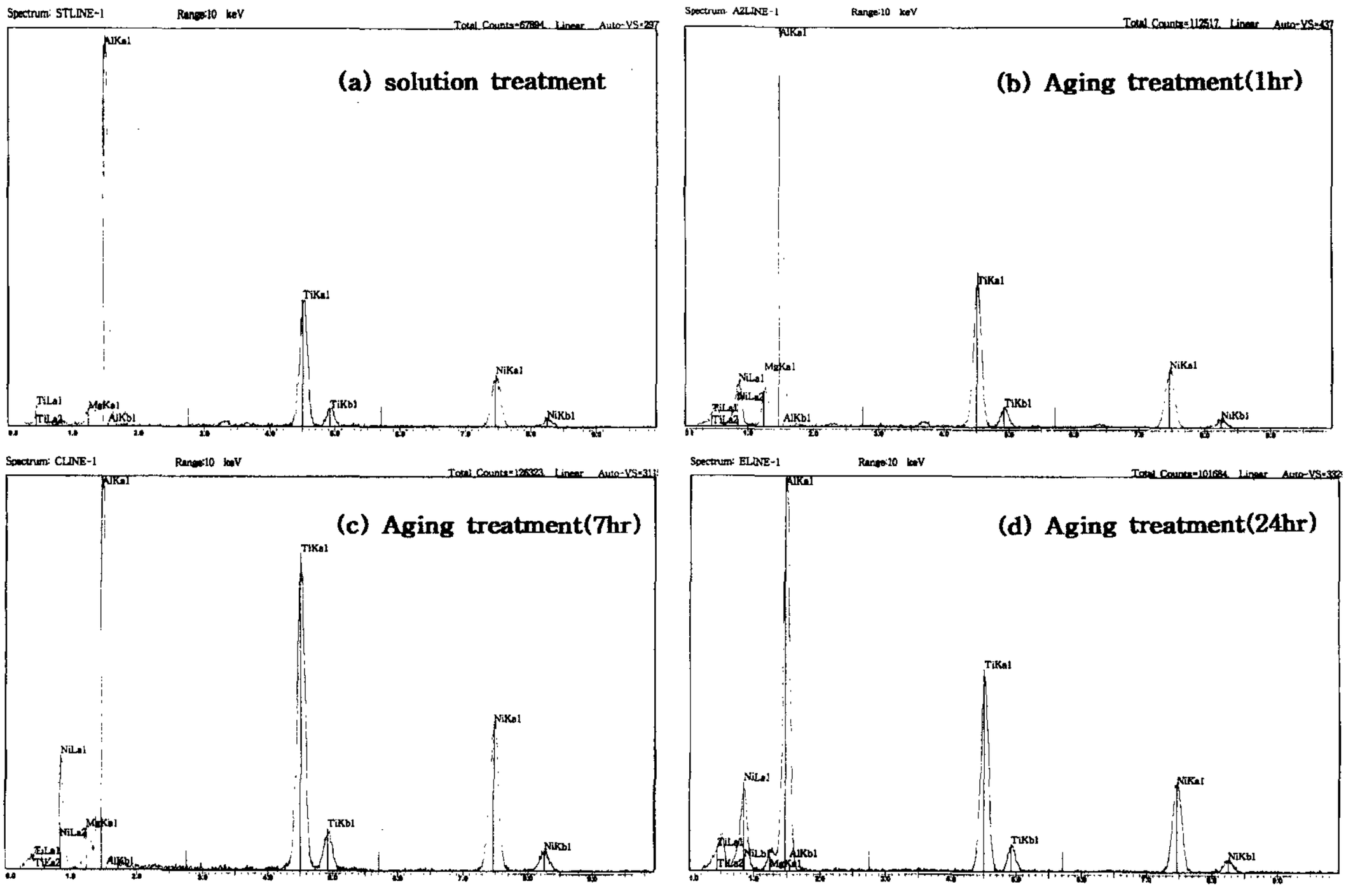



Fig. 7. EDX scan of TiNi/6061Al composite with variation of aging time.

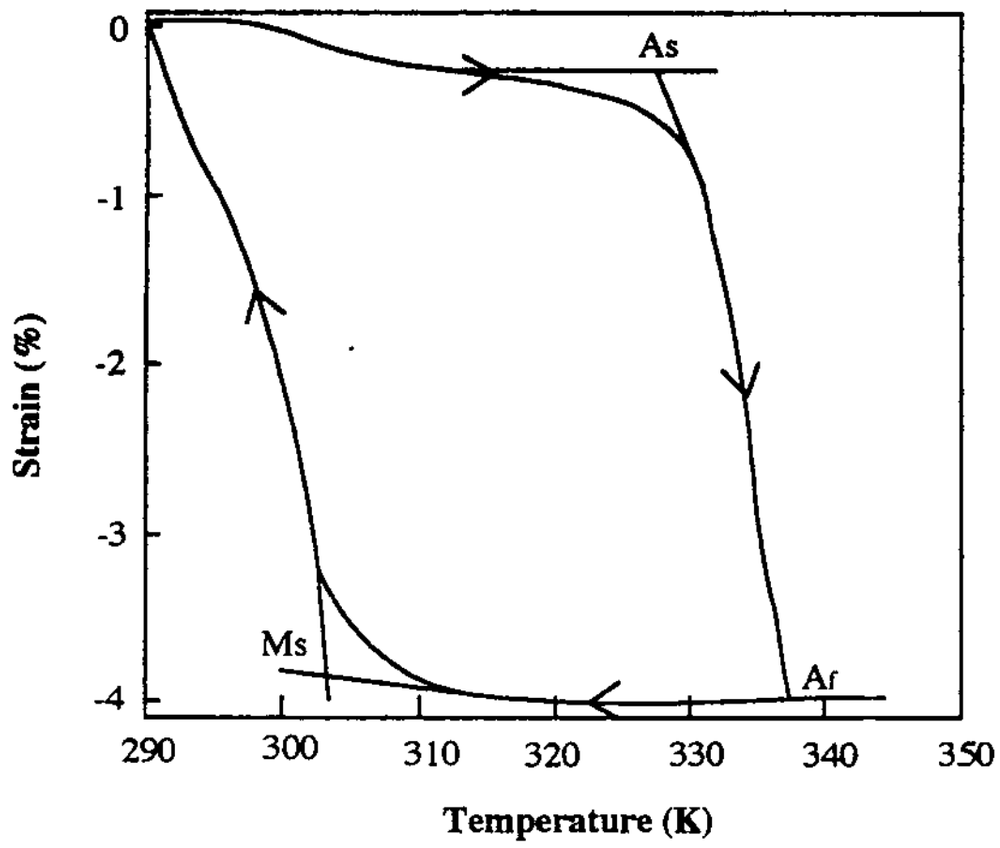



Fig. 8. Strain of TiNi fiber as a funtion of temperature under constant stress of 94 MPa.

복합재료의 상온 및 고온 인장시험시 wire의 상변태에 따른 인장특성 등을 고찰하기 위해 우선 TiNi wire의 변태변형율-온도 Hysteresis시험을 통해 온도 조절에 따른 wire의 변위를 측정하여 변형율-온도 Hysteresis곡선을 검토하였다[13]. Fig. 8과 같이 TiNi wire를 형상기억 처리한 시편을 94MPa의 일정 응력하에서 가열 냉각에 따른 변태변형율-온도 Hysteresis 특성을 측정한 후 그 곡선으로부터 TiNi wire의 변태온도를 구한 결과 Af 66°C, Ms31°C였다.

### 3.3 복합재의 기계적 특성

복합재료 강화재 및 기지재는 환경 및 사용 조건 등에 따라 그 재료 각각의 기계적 특성이 변할 수 있다. 따라서 복합재료의 기지 및 fiber의 시효 특성 및 열적 안정성 등을 조사할 필요가 있다. 따라서 본 연구에서는 제조된 복합재료의 열처리 조건에 따른 경도 특성을 고찰하고 상온 및 고온에서의 예비변형량 변화에 따른 인장 특성 등을 통해 복합재의 기계적 특성을 고찰하였다.

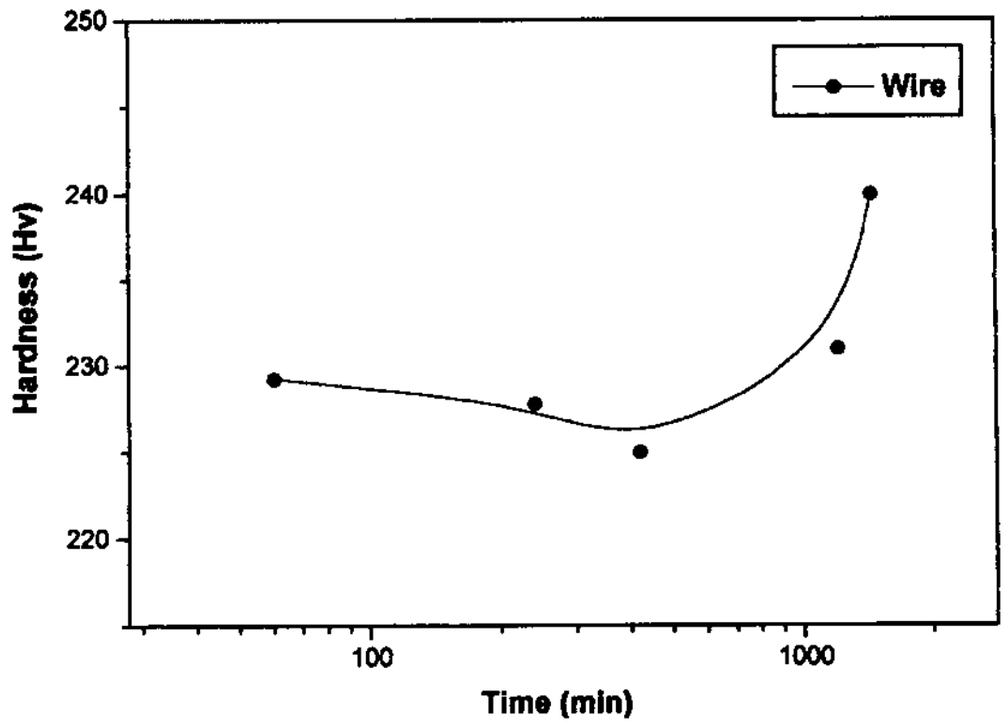



Fig. 10. Age hardening curves of wire in TiNi/6061Al composites aged at 175°C.

Fig. 9 및 10은 복합재료를 175°C에서 등온 시효한 후 기지 및 fiber에 대한 경도치 변화를 나타낸 것이다. 기지의 경우 시간의 경과에 따라 경도치는 증가하고 있으며 1200분에서 최대값에 이른 다음 감소하고 있다. Fig. 10의 fiber재(TiNi wire)의 경우는 시간의 경과에 따라 약 400분까지는 약간 경도치 하락을 보이다가 이후 급격히 상승하고 있다. 복합재료의 열적 안정성을 조사하기 위해 각 온도에서 2hr 등시시효 처리한 경우에 있어서의 결과를 Fig. 11에 나타낸다. 기지는 상온에서 200°C까지는 증가하다가 그 후 급격히 연화되고 있는 반면 Fig. 12의 fiber재는 200°C까지는

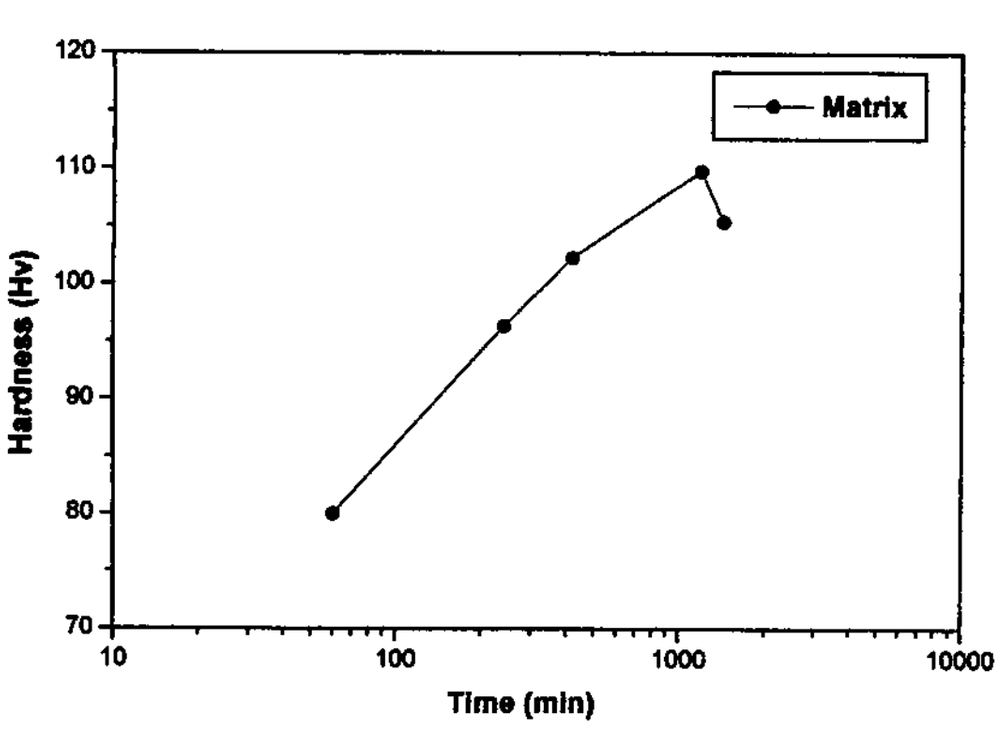



Fig. 9. Age hardening curves of matrix in TiNi/606Al composites aged at 175°C.

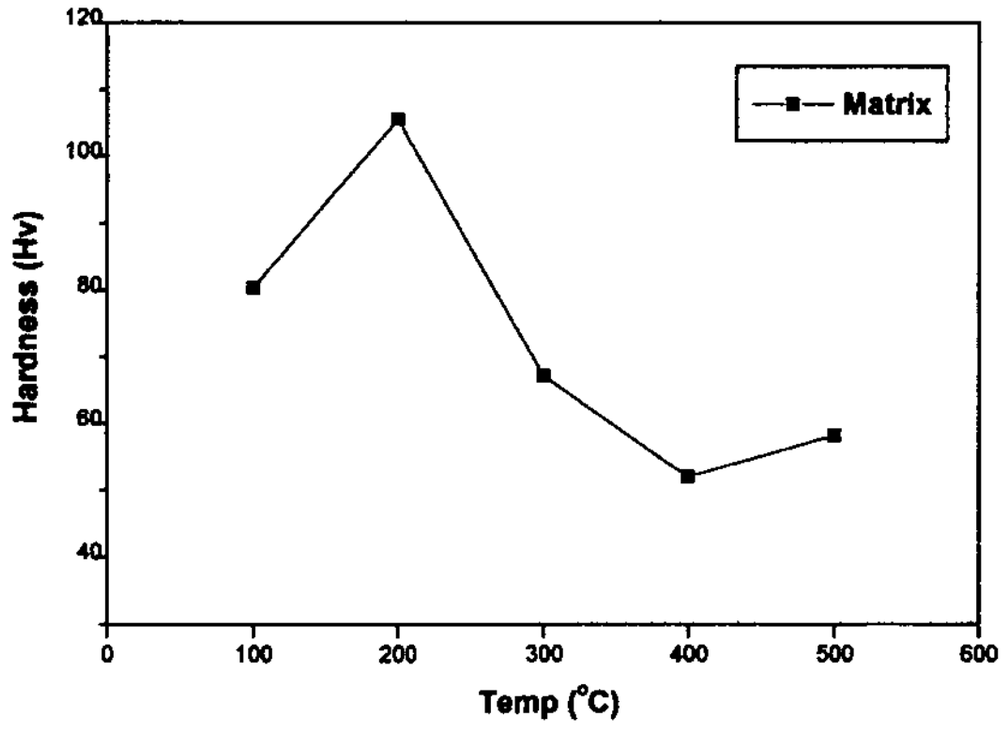



Fig. 11. Thermal stability of matrix in TiNi/6061Al composites.

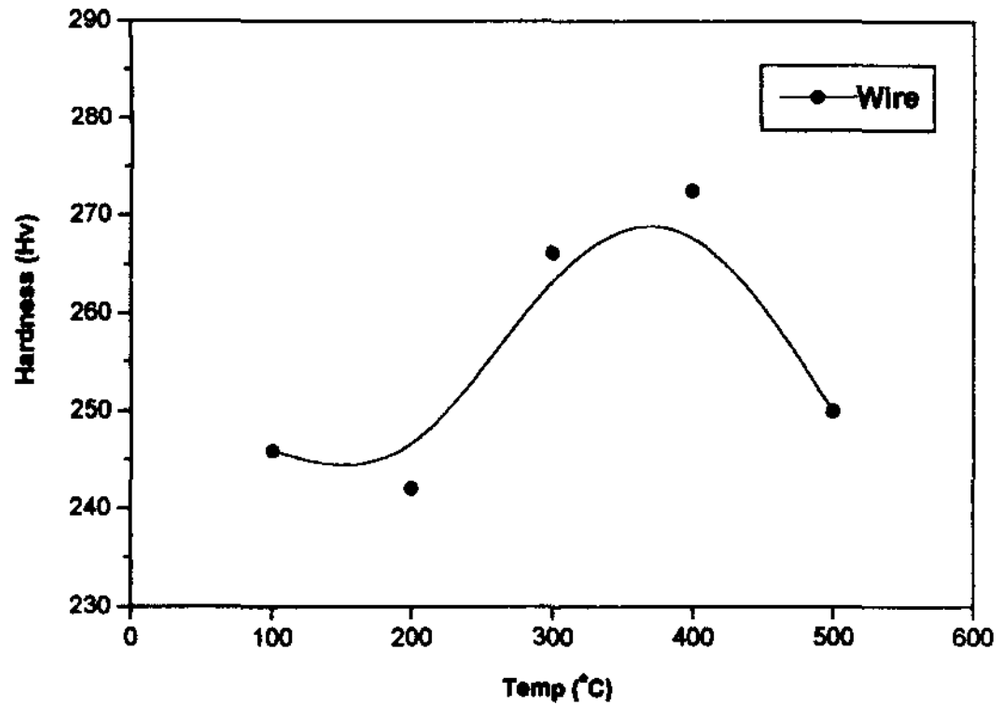



Fig. 12. Thermal stability of wire in TiNi/6061Al composites.

약간 감소하다가 이후 급격히 증가하고 있음을 알 수가 있다. 본 결과를 비교해 보면 등온 및 등시 시효 모두에 있어서 기지와 fiber재는 시효 cycle이 서로 반대 양상을 보이고 있음을 알 수 있으며 이로 인해 복합재는 상호 보완 관계가 되어 우수한 기계적 성질을 나타내게 된 것으로 판단된다.

또한 TiNi/6061Al 복합재의 지적 특성을 확인하기 위해 상온 및 고온에서 인장시험을 행한 결과를 Fig. 13 및 14에 나타내었다. fiber로 복합화한 경우가 fiber가 없는 경우보다 높은 인장강도값을 나타내고 있으며 특히 고온 인장의 경우가 상온 인장한 경우에 비해 더 우수한 인장강도값을 나타내었다. 그리고 예비변형량의 변화에 따라 상온 인장의 경우는 인장강도 증가폭이 그다지 크지 않으나 90°C 고온 인장한 경우는 예비 변형량 증가에 따라 인장강도 증가가 더욱 커짐을 알 수가 있다. 이러한 이유는 상온에서는

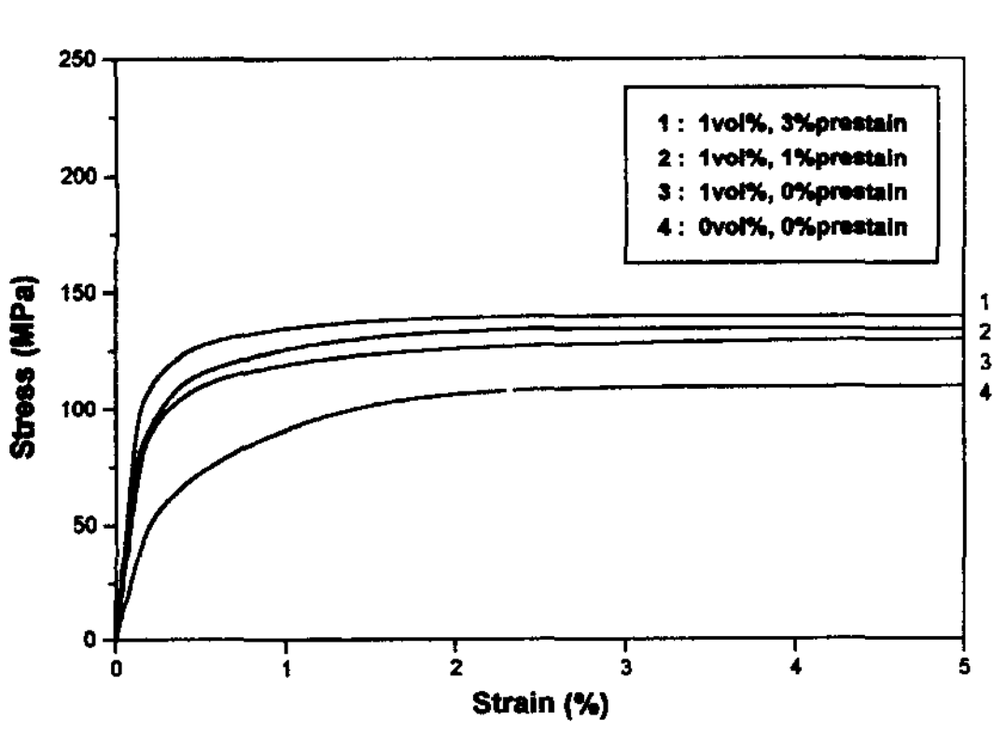



Fig. 13. Stress-strain curves of TiNi/6061Al composites at room temperature.

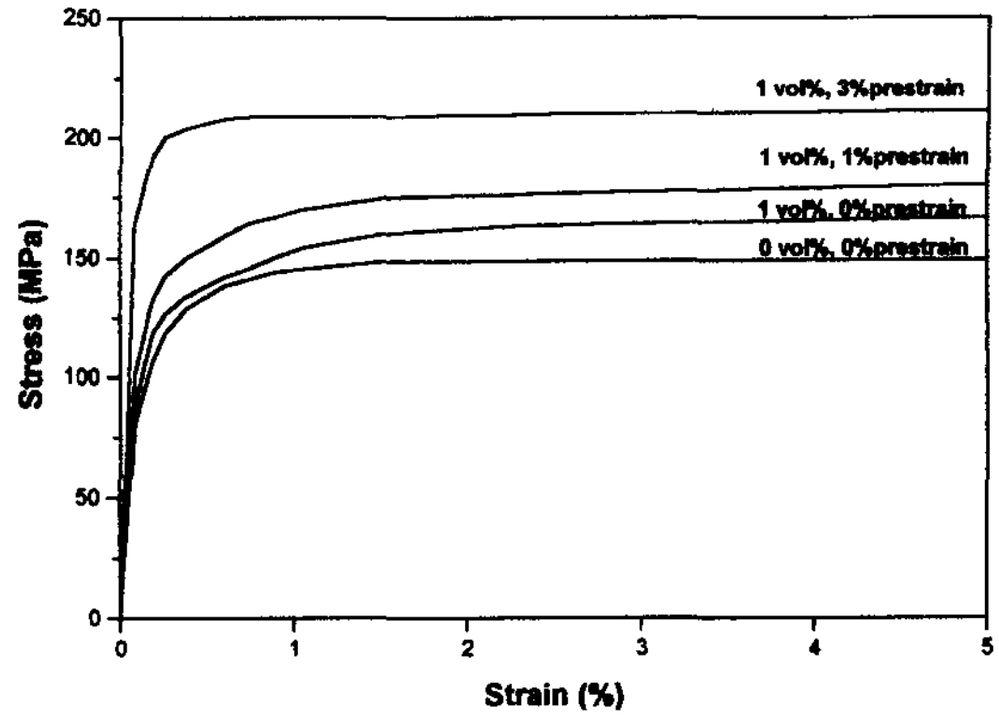



Fig. 14. Stress-strain curves of TiNi/061Al composites at 90°C.

상변태에 의한 효과보다는 예비변형량에 따른 가공경화효과에 기인하여 인장강도가 증가하지만 고온인 경우는 fiber재인 TiNi wire가 오스테나이트로 역변태가 일어나고 또한 예비변형량이 큰 경우 반응량이 더욱 커져 보다 높은 인장강도값을 나타내게 된 것으로 판단된다.

Fig. 13 및 14의 상온 및 고온인장시 항복강도와 예비변형률의 관계를 Fig. 15에 나타낸 후 최소자승법에 의해 식을 산출한 결과

$$Y = 8.92X + 97.47 \text{(at room temperature)}$$
$$Y = 27.26X + 120.90 \text{ (at } 90^{\circ}C)$$

의 관계를 얻을 수 있었다.

여기서 Y는 항복응력, X는 예비 변형량을 나타낸다.

따라서 위의 식을 토대로 상온보다 고온인장의 경우가 예비변형량에 따라 약 3배 이상의 우수한 인장강

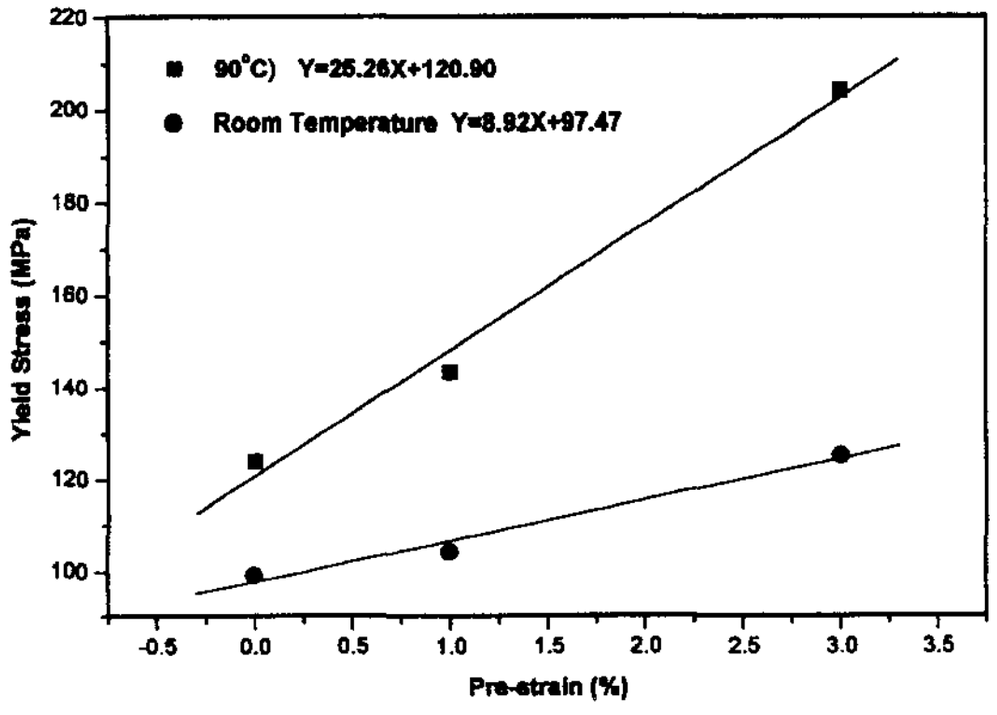



Fig. 15. Yield stress vs. Prestrain curves tested at 90°C and room temperature.

도값을 나타내고 있음을 알 수 있다.

## 4. 결　　론

금형주조법을 이용하여 TiNi/6061Al 지적 복합재료를 제조하고 기계적 특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 금형주조법에 의해서도 큰 결함없이 기계적 특성이 우수한 복합재료 제조가 가능하였다.

2. 복합재 중 기지는 200°C wire는 400°C까지 우수한 열적 안정성을 나타내었다.

3. 복합재에 있어서 시효시 기지(6061Al)와 fiber (TiNi wire)는 시효 cycle이 서로 반대 양상을 나타내며 이로 인해 복합재는 상호 보완관계로 우수한 기계적 특성을 나타낼 수 있다.

4. 지적 복합재의 인장강도는 일반 금속재와는 달리 고온에서도 우수하였으며, 예비변형량 증가에 따라 더욱 향상된 인장강도 값을 얻을 수 있었다.

5. 고온인장의 경우 예비변형에 따라 상온보다 약 3배의 우수한 인장강도값을 나타낸다.

## 후　　기

이 논문은 1998학년도 동아대학교 학술연구조성비(일반과제) 및 동아대학교 지역협력센터(지능형 통합항만관리연구센터) 연구비 지원에 의하여 수행되었으며 이에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

[1] 이준희, K. Hamada, M. Taya, K. Inoue, 박창선, 김순국 : 한국재료학회지 11. (1997) 951-956.

[2] B. E. QUIGLEY, G. J. ABBASCHIAN, R. *et al.* : Metall. Trans. A (13A), (1982) 93.

[3] Jintao Wang, Mimoru Furukawa and Zenji Hirota : Metallrugical and Materials Transaction A (26A), (1995) 581.

[4] D. M. Stefanescu, B. K. Dhindaw, S. A. Kacia and A Moitra : Metall. Trans. A, 19 (1998) 2847.

[5] S. V. Nair and H. G. Kim : Scr. Mrtall, 25 (1991) 2359.

[6] 科學技術廳, 航空 · 電子等技術審議會諮問 第13號に對する答申(平成1年11月) 1-82.

[7] C. A. Rogers, E. S. Chen and A. F. Findies : Int. Workshop in Intell. Mater, Scientific Information (1989) 23.

[8] C. A. Rogers : J. of Intelligent Material Systems and Structures, 4 (1993) 4.

[9] Y. Furuya, A Sasaki and M. Taya : Mater. Trans. Jim. 34-3 (1993) 224

[10] Quenisset, J. M., R. Fedou and F. Girot : Proceeding of International Symposium on A, 133-138 (1988).

[11] Friend. C. M. : J. of Material Science, 22 (1987) 3005-3010.

[12] M. Taya, A. Shimamoto and Y. Furuya : Proc. 1CCM-10, Whistler, B. C., Canada, 1995. P. V275-V282.

[13] 박영철, 윤두표, 허선철, 이규창, 古屋泰文 : 대한금속학회지, 1 (1997) 98.