

# TiNi/6061Al 지적 복합재료의 미세조직에 미치는 냉간압연의 영향.

박성기, 신순기, 이준희

## Effect of cold rolling on the microstructures of TiNi/6061Al smart composites.

Sung-Ki Park, Soon-Gi Shin, Jun-Hee Lee.

Key Word : Permanent mold casting, TiNi/6061Al composites, cold rolling, interface, microstructures, tensile strength

### Abstract

The 2.5 vol% TiNi/6061Al composites were fabricated by permanent mold casting, and its microstructures and tensile test for the cold rolled composites with maximum 50% reduction ratio were investigated. In the case of TiNi fiber with 2mm interval in preform, the interface bonding of fabricated composites were good. EPMA analysis results were found the small amount of Mg, Si segregated interface of diffusion layer. Transverse section of TiNi fiber was decreased with increasing reduction ratio and 40% reduction ratio was observed microcrack from TiNi fiber. And the tensile strength of composites at 38% reduction ratio was 194MPa. In the case of over 38% reduction ratio, the decrease of the tensile strength was due to TiNi fiber rupture by excess working. The fracture mode was appeared brittle fracture with increasing reduction ratio

### 1. 서론

최근 항공기 및 원자력 관련 산업분야에의 응용을 주 목적으로 재료 스스로 외부 환경 변화에 대응할 수 있는 새로운 소재들<sup>1)</sup>이 개발되고 있다.

이들 중에서 기존 철강에 비해 경량인 TiNi형상 기억합금 강화 6061Al 지적 복합재료<sup>2)</sup>는 강화재와 기지금속간의 계면 집합성이 우수하고, 또 TiNi의 형상 회복력을 이용하여 기지금속내에 압축 잔류 응력을 유발시켜 고온기계적 특성을 향상시킬 수 있는 특징이 있다. 후자의 성질을 응용하여 내부에 발생하는 결함의 성장을 억제하여 재료의 급작파괴에 의한 대형 사고를 미연에 방지할 수 있는 기능등을 가지게하는 소위 "재료의 지능화"의 연구<sup>3)~5)</sup>가 다수 보고되고 있다. 한편 이들 복합재료의 제조법 중 금형주조법<sup>6)</sup>을 제외하고는 비교적 공정이 복잡하고 설비비가 많이 드는 단점이 있다. 하지만 이 주조법도 공정이 간단하기는 하나, 다른 제조법<sup>7)~10)</sup>에 비하여 금속기지 중에

기공 등의 주조결함이 쉽게 발생하는 단점이 있어, 이것에 의해 생산성 및 기계적 특성이 저하하는 문제점을 지니고 있다.

이러한 재료에 금속의 소성가공에 흔히 이용되고 있는 압연공정을 도입하면 기공과 같은 미세한 주조결함의 일부 소멸이 예상되어 문제점 해결이 다소 가능하리라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 우선 TiNi형상 기억합금을 강화재로 6061Al을 기지로 한 TiNi/6061Al 복합재료를 금형주조법으로 대기중에서 제조하여 냉간 압연 시의 압하율 변화에 따른 미세 조직의 변화와 인장특성에 대해서 검토하였다.

### 2. 실험방법

본 연구에서는 강화재로 Ti-50at%Ni(일본 Kantoc(주), 직경0.5mm)을 기지금속으로는 6061Al 합금(대우통신(주))을 사용하였다. 먼저 복합재료 제조를 위한 전 단계로 두께 5mm 철판(SM45C) 및 직경 10mm너트를 지지대로 한 치구를 이용하여, TiNi의 간격을 각각 1.24mm와 2mm(도입량은 간격에 관계없이 2.5vol%)로 하여 일 방향으로 배열시킨 예비성형체를 Fig. 1과 같이 제작하였다. 전기로(한성기계(주))에서 573K로

Sung-Ki Park, Soon-Gi Shin, Jun-Hee Lee.  
Division of Metallurgical and Material, and  
Chemical Engineering Dong-A University 840  
Hadan 2-dong, Sahagu, Busan 604-714, Korea

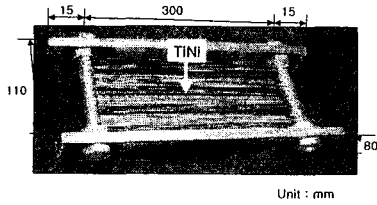


Fig. 1 Appearance of fabricated TiNi preform.

가열시킨 예비성형체를 673K로 예열한 금형(SM45C)에 장착한 후 기지금속 용탕을 993K에서 주입 냉각하여 가로330mm 세로110mm 높이80mm의 TiNi/6061Al 복합재료 잉고트를 제조하였다. 제조된 잉고트를 전기로(한성기계(주))중 673K에서 24시간 균질화 처리 후 와이어 가공으로 두께 5.2mm의 판재로 절단하였다. 가공된 판재를 Fig. 2에 모식적으로 나타낸 방법으로 냉간 압연(길동체인(주) 제의 2단 압연기)하였다.



Fig. 2 Schematic diagram of cold rolling.

압연 시에는 가이드를 설치하여 강화재의 배열 방향으로만 압연 되도록 하였으며, 압하율은 최고 50% 까지 변화시켰다. 제조된 복합재료는 광학(LEICA) 및 주사 전자 현미경(HITACHIS-2400)으로 미세 조직과 표면을 관찰하였으며, 계면 성분 분석을 위해 EPMA를 이용하였다. 인장시험(Instron Model 1350)은 ASTM 370의 규격으로 시험편을 제작하여 363K 에서 1mm/min 속도로 실시하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 복합재료의 미세 조직

Fig. 3는 TiNi 간격을 1.24mm로 한 예비 성형체를 사용하여 대기 중에서 제조한 2.5vol%TiNi/6061Al 복합재료를 다이아몬드 슬러리로 연마한 뒤 Dix-Keller용액 (2%HF-3%HCl-5%HNO<sub>3</sub>-H<sub>2</sub>O)으로 10초 동안 부식시킨 미세 조직을 종단면을 광학 현미경으로 관찰한 것이다. 그림 중의 a)는 주조조직 그대로 이며 b)는 압하율 38%로 압연한 것이다. a)에서와 같이 강화재 주위 및 기지조직에 기공, shrinkage cavity등의 주조결함이 상당히 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이것은 TiNi의 간격이 좁아 주입시 기지금속의 침투가 원활

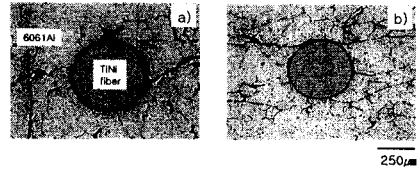


Fig. 3 Optical microstructures of 2.5vol%TiNi/6061Al composites. (The distance of TiNi interfiber in preform is 1.24mm) a) As cast, b) 38% reduction

하지 못하였기 때문으로 사료된다. 또 b)와 같이 38%의 높은 압하율로 압연하였음에도 불구하고 이들 결합들이 일부 줄어들기는하나 완전히 제거되지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 4에는 TiNi의 간격을 2mm로 하여 제작한 예비성형체를 이용하였을 경우로 부식시간을 30초, 압하율은 38%시의 미세조직(종단면, 횡단면)

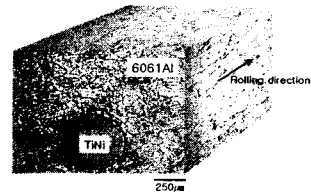


Fig. 4 Optical microstructure of 38% rolled 2.5vol% TiNi/6061Al composites. (The distance of TiNi interfiber in preform is 2mm)

을 나타내었다.

강화재 주위의 연신된 결정립과 압연방향으로의 소성유동이 뚜렷이 관찰된다. 이것은 말할 것도 없이 도입된 압연공정에 의한 것으로 판단된다. 또 Fig. 4로부터 Fig. 3에서와 같은 기공은 거의 존재하지 않으며, 계면의 접합성도 크게 향상됨을 알 수 있다. 이 결과로부터 본 연구에서 채용한 방법으로는 예비성형체 제작 시 TiNi의 간격을 2mm이상으로 할 필요가 있다는 것과 압연공정도입이 조직제어에 상당히 효과적이라는 것을 시사한다. TiNi가 회복력에 의한 지적 기능을 나타낸다 하더라도 복합화 된 상태에서 기지와 계면 접합성이 불량하면 그 기능은 크게 떨어질 것이다. Fig. 5 a)는 이를 보다 자세하게 검토하기 위하여 Fig. 4의 □ 부분을 확대 관찰한 것이다. 기지와 강화재 사이에 양호한 접합 상태를 유지함을 알 수 있다. 이것은 예비성형체 제작이 TiNi의 간격을 2mm로 함으로서 기지금속인 6061Al 용탕이 잘 침투할 수 있었기 때문으로 사료된다. Fig. 5 b)는 a)에서 검은선으로 나타낸 부분에 대하여 기지와 강화재 사이의 원소의 확산 상태를 EPMA를 이용하여 선분석 한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 강화재 쪽에서는 Ti,

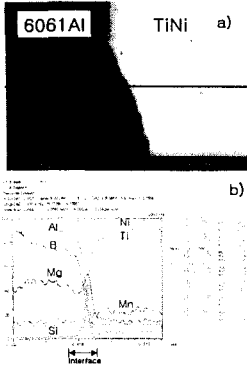


Fig. 5 EPMA micrograph and line analysis of  $\square$  area in Fig. 4.

Ni등이 균일하게 존재하였으며, 또 기지금속 쪽에서는 Al, Mg, Si등이 분석되었다. 또 계면에서는 소량의 Mg, Si이 편석되어 있음을 알 수 있다. 이 후에는 TiNi의 간격을 2mm로 한 예비성형체를 이용하여 제조한 복합재료 대하여 실험을 실시하였다. Fig. 6에는 여러 가지 압하율로 냉간 압연한 판재의 종단면을 나타내었다.

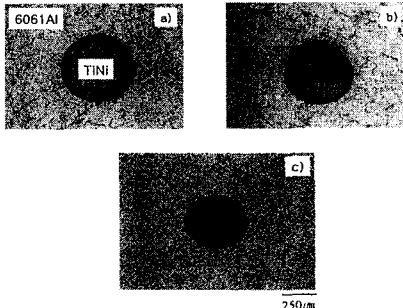


Fig. 6 Transverse sections of 2.5vol%TiNi/6061Al composites with reduction ratio. a) 0%. b) 25%. c) 50%

그림에서와 같이 압하율이 증가할수록 TiNi의 직경은 점차적으로 작아짐을 알 수 있다. 이것은 압연시 균일하게 압축력을 받았기 때문으로 사료된다. Fig. 7와 Fig. 8은 압하율40% 이상으로 압연한 판재의 TiNi부근 횡단면 조직을 관찰한 결과를 나타낸 것이다.

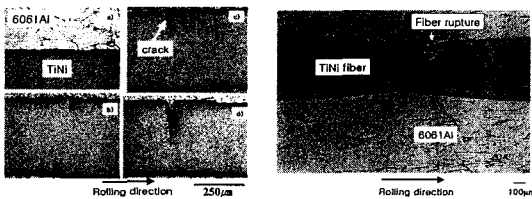


Fig. 7 Crack growth behaviors of TiNi in TiNi/6061Al composites with reduction ratio a) 40%. b) 42%. c) 44%. d) 46%.

Fig. 8 TiNi rupture in 2.5vol%TiNi/6061Al composites at 50% reduction ratio.

Fig. 7 a)에서와 같이 압하율40%에서는 파인 압

연에 의해서 발생한 것으로 추측되는 TiNi에 미세한 크랙들이 다수 잔존하는 것을 볼 수 있다. 압하율을 42% 이상으로 증가시키면 크랙은 성장하여 Fig. 8에서와 같이 압하율50%에서 완전 파단현상이 일어남을 알 수 있다.

### 3.2 복합재료의 인장특성

Fig. 9에는 압하율에 따른 2.5vol%TiNi/6061Al 복합재료의 363K에서 인장 시험한 결과를 나타낸다. 인장 강도는 압하율 38%까지는 압하율 증가에 따라 증가하나 그 이상에서는 오히려 감소한다. 전자는 압하율이 증가할수록 강화제인 TiNi의 가공경화와 회복력에 의한 강화 및 기지금속의 압연에 의한 조직 미세화에 기인된 것으로 사

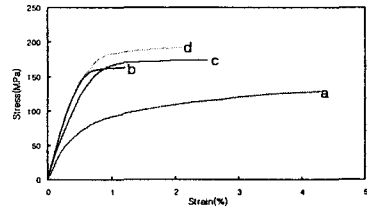


Fig. 9 Stress-strain curves for tensile test at 363K of 2.5vol% TiNi/6061Al composites with reduction ratio. a) 0%. b) 50%. c) 25%. d) 38%

료된다. 후자는 Fig. 8에서 알 수 있듯이 TiNi의 파단에 의한 회복력 상실이 주원인이 된 것으로 사료된다. 또 연신율은 압하율이 증가할수록 감소하는 현상을 나타내었다.

### 3.3 복합재료의 파면조직

Fig. 10에는 Fig. 9에서 실시한 시험편의 파단면 관찰 결과를 나타내었다.

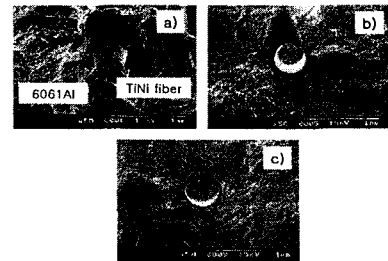


Fig. 10 The fracture surfaces (SEM) of TiNi/6061Al composites for tensile test with reduction ratio. a) 0%. b) 25%. c) 50%.

그림에서와 같이 압하율이 25%까지는 기지금속과 TiNi의 변형특성 차이로 인하여 TiNi가 pull out되는 현상이 관찰되며, 또 최종적으로는 네킹에 의한 전형적인 연성 파괴의 양상을 나타낸

다. 또 기지 파단면에 요철부가 다수 관찰되는 것으로 보아 기지 역시 연성적으로 파괴되었음을 알 수 있다. 그러나 압하율을 50%로 더욱 증가시킨 경우는 TiNi형상기억합금은 앞과는 다른 즉 취성 파괴의 양상을 나타내며, 기지의 경우도 평탄면이 대부분을 차지해 거의 취성 파괴를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 압하율이 증가할수록 TiNi는 취성적으로 파괴되며, 또 기지가 평탄하게 되는 것은 다음과 같이 설명된다. 즉 압하율이 증가할수록 TiNi는 가공경화되며, 기지는 가공 방향으로 연신된 결정립을 나타내어(상대적으로 결정립계 간의 간격이 좁아짐으로 인하여 결정 미세화와 같은 효과를 나타냄) 이들이 전위에 의한 이동을 방해하였기 때문으로 생각된다.

#### 4. 결 론

TiNi형상기억합금의 간격을 1.24mm와 2mm로 한 예비 성형체를 이용하여 금형주조법으로 제조한 2.5 vol%TiNi/6061Al 복합재료를 압하율 최고 50%까지 변화시켜 냉간 압연 한 후, 미세 조직의 변화와 인장 특성에 대해서 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) TiNi의 간격을 2mm로 하여 제조한 TiNi/6061Al 복합재료의 계면 접합 상태는 양호하였으며, EPMA 분석 결과 계면에 Mg와 Si이 편석되어 있음을 알 수 있었다.
- 2) 압하율이 증가할수록 TiNi의 단면적이 감소하였으며, 압하율 40%에서 TiNi에 미세크랙이 관찰되기 시작하여 50%에서 완전 파단현상이 일어났다.
- 3) 인장강도는 압하율 38%에서 가장 높은값을 나타내었으며, 그 이상 일 경우에는 파잉 가공으로 인한 TiNi의 파단현상이 일어나 오히려 감소하였다.
- 4) TiNi/6061Al 복합재료의 파면은 압하율이 증가할수록 취성 파괴 양상을 나타내었다.

#### 참고문헌

1. D.L.Mc Danel, Metall, Trans, 16A, 105 (1985).
2. K. Hamada, J.H. Lee, K. Mizuuchi, M. Taya, and K. Inoue, Materials Transactions, A, March, 1127 (1998).
3. W.D. Armstrong, J. Intell, Mater. Systems Struct., 7, 448 (1996).
4. K. Mizuuchi, K. Inoue, M. Sugioka and M. Itami, 9th CIMTEC-World Forum on New

- Materials SymposiumVIII-Smart Materials Systems P. Vincenzini(Editor) Techna Srl. 1999
5. J.G. Boyed and D.C. Lagoudas, J. Intell Master. Systems Struct., 5, 333 (1994).
6. S.K. Kim, J.H. Lee, Kor. J. Mater. Res., 9(4), 419 (1999).
7. B.S. Kim, Y.S. Cho, I.D. Choi, D.M. An, K.M. Cho and I.M. Park, J. Kor. Inst. Met. and Mater. 35(10), 1359 (1997).
8. J.H. Lee, K. Hamada, M. Taya, K. Inoue, C.S. Park and S.K. Kim, J. Kor. J. Mayer. Res., 7(11), 951 (1997).
9. Y.C. Park, D.P. Yun, S.C. Heo. G.C. Lee, Y. Furuya, J. Kor. Inst. Met. and Mater. 35(1), 96 (1997).
10. K. Mizuuchi, K.Inoue, K.Hamada, M.Sugioka, M.I tami, Y. Okandam, and Kawahara, Glasgow June2000.