

TiNi/6061Al 복합재료의 인장특성에 미치는 열처리의 영향

박성기 · 신순기 · 이준희[†]

동아대학교 신소재 가공청정 공정개발 연구센터

The Effect of Heat Treatment on the Tensile Properties of TiNi/6061Al Composites

Sung-Ki Park, Soon-Gi Shin and Jun-Hee Lee[†]

Center for Advanced Net Shape Manufacturing and Clean Process 840, Hadan 2-dong, Sahagu, Dong-A University Busan 604-714, Korea

(2002년 1월 4일 받음, 2003년 1월 17일 최종수정본 받음)

Abstract The 1.6 vol% and 2.5 vol% TiNi/6061Al composites were fabricated by permanent mold casting for investigating the effect of heat treatment on tensile strength for composites. The tensile strength without T₆ treatment at 293 K was increased with increasing the volume fraction of TiNi fiber and at 363 K the higher the pre-strain, the higher the tensile strength. The tensile strength of the composite with T₆ treatment at 293 K was found to increase with increasing both the amount of pre-strain and the volume fraction of TiNi fiber and was higher than that without T₆ treatment. It should be noted that the tensile strength 2.5vol%TiNi/6061Al composites rolled at a 38% reduction ratio was the maximum value of 298 MPa. The tensile strength of composites decreased with increasing the reduction ratio over 38% because of the rupture of TiNi fiber.

Key words Permanent mold casting, TiNi/6061Al composites, Heat treatment, Tensile strength, Reduction ratio

1. 서 론

최근 산업의 다양화와 우주 및 항공분야 등 첨단산업의 발달로 경량이면서 강도가 뛰어나고 우수한 물성을 지닌 새로운 재료에 대한 요구가 증대되고 있다. 이러한 요구에 부응하기 위하여 경량금속인 Al을 기지로한 복합재료의 제조가 활발히 연구¹⁻⁶⁾되고 있다. Taya⁷⁾ 등은 TiNi를 강화재로한 6061Al 기지 복합재료를 용탕단조법으로 제조 후 형상 기억 열처리를 이용하여 기지내에 압축 잔류 응력을 유발시킴으로서 강도를 향상시킬 수 있음을 보고하였다. 또 Lee⁸⁾ 등은 진공 열간 프레스법으로 제조된 TiNi/6061Al 복합재료에 대해서 예비변형률, TiNi 체적분율, 기지금속인 6061Al의 T₆ 처리에 관한 영향을 연구하여 이들 인자들을 적절히 제어함으로써 강도를 향상시킬 수 있음을 부분적으로 밝히기도 하였다. 한편 Iwahashi⁹⁾는 금속 재료를 압연하면 결정입자가 미세화 되어 강도, 파괴인성, 초소성 등의 특성이 향상된다고 보고하였다. 그러나 TiNi/6061Al 복합재료의 경우 압연공정을 도입하여 기계적 성질 등의 재료특성 개선에 대한 연구는 거의 없는 실정이다.

저자들은 앞의 연구¹⁰⁾에서 TiNi/6061Al 복합재료의 기계적 특성 개선을 위한 압연공정 도입의 유용성을 검토할 목적으로 냉간 압연시의 계면 및 파면조직 관찰을 중

심으로 한 기초적 검토를 시도하였다. 제시된 논문에는 하면 금형주조법으로 제조된 복합재료에서 강화재와 기지는 우수한 계면접합성을 나타내며, 계면에서는 상호 확산이 일어남을 알 수 있었다. 또 압하율이 증가함에 따라 강화재의 직경이 줄어들며, 기지의 횡단면에서는 결정이 연신된 변형조직을 관찰할 수 있었다. 한편 Arsenault¹¹⁾ 등은 20vol%SiC/6061Al 복합재료에 대해서 T₆ 처리 전의 인장강도는 100 MPa이지만 T₆ 처리하면 200 MPa로 향상된다고 보고하였다. 그들은 이러한 현상은 기지금속인 6061Al의 석출강화효과에 의한 것임을 주장하였다. 그러나 TiNi/6061Al 복합재료의 인장특성에 미치는 T₆ 처리 영향에 관한 연구는 지금까지도 행하여진 바 없다. 따라서 본 연구에서는 TiNi/6061Al 복합재료의 강도 향상을 목적으로 강화재인 TiNi의 체적분율을 1.6 vol%, 2.5 vol%로 변화시켜 금형주조법으로 제조 후 열처리하여 이러한 처리가 인장 특성에 어떤 영향을 미치는지 상세히 검토하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 강화재는 일본 Kantoc(주) Ti-50 at%Ni (직경 0.5 mm)을, 기지금속은 상용의 6061Al 합금이다. 복합재료 제조하기 전에 먼저 두께 5 mm의 철판(SM45C)과 직경 10 mm의 너트로 구성된 치구에 TiNi를 일 방향으로 배열한 예비성형체를 제작하였다. 이

[†]E-Mail : jhlee@mail.donga.ac.kr

예비성형체를 전기로를 이용하여 573 K로 가열 후 673 K로 예열된 금형에 장착하여 용융 기지금속을 주입(주입 온도 993 K)하였다. 제조된 복합재료를 673 K에서 24시간 균질화처리 후 TiNi의 직경과 인장시험편의 치수를 감안하여 TiNi의 체적분율이 1.6 vol%, 2.5 vol%가 되도록 판재(두께 5.2 mm)로 가공하였으며, 또 2.5 vol%의 경우에는 그 일부를 냉간 압연하였다. 압연 시에는 가이드를 설치하여 TiNi의 배열 방향으로만 압연 되도록 하였으며, 압하율은 최고 50%까지 변화시켰다. 이렇게 제조된 복합재료로서 인장시험편을 가공하였으며, Fig. 1은 본 연구에서 제작한 인장시험편을 모식적으로 나타내었다. 또 T₆처리는 전기로를 이용하여 813 K에서 2시간, 448 K에서 6시간 실시하였다. 인장시험은 만능시험기(Instron사의 Model 1350)를 이용하여 상온(293 K)과 고온(363 K)에서 각각 실시하였다. 또 미세조직은 2%HF-3%HCl-5%HNO₃-H₂O, 10%HF+40%HNO₃+50%H₂O으로 기지금속과 강화재를 부식시킨 후 광학현미경으로 관찰하였다.

3. 결과 및 고찰

Fig. 2에는 열처리를 하지 않은 6061Al 및 TiNi의 체적분율이 1.6 vol%, 2.5 vol%인 TiNi/6061Al 복합재료를 상온에서 인장시험한 결과를 나타내었다. 여기서 TiNi의 체적분율이 1.6 vol%와 2.5 vol%인 것은 인장특성의 비교를 위한 것이다. 그림에서와 같이 6061Al에 비해 강

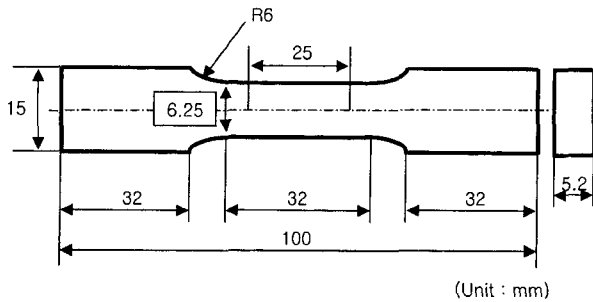


Fig. 1. Schematic drawing of specimen for tensile tests.

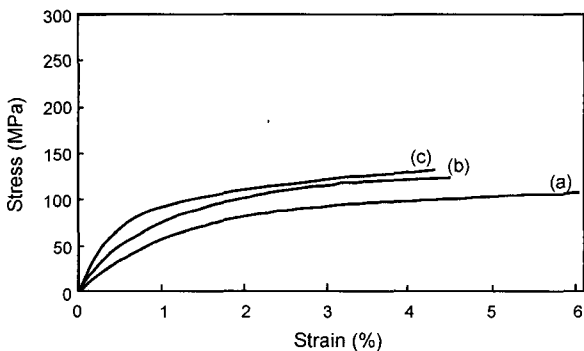


Fig. 2. Stress-strain curves of 6061Al alloy and TiNi/6061Al composites at room temperature. (a) 6061Al, (b) 1.6vol%TiNi/6061Al, (c) 2.5vol%TiNi/6061Al

화재를 도입한 복합재료가, 또 복합재료에서 TiNi의 체적분율이 증가할수록 강도값은 상승하나 변형률은 오히려 감소하는 것을 알 수 있다. 전자는 소위 섬유강화효과^{12,13}에 의한 것이며, TiNi의 체적분율 증가에 따라 인장강도가 상승한 것은 강화재의 량이 증가할수록 이러한 효과가 더욱 커지기 때문으로 사료된다. 한편 변형률 감소의 경향은 SiC 섬유를 강화재로한 6061Al기지합금의 복합재료에서 섬유강화효과에 의해 인장강도가 높을수록 변형률이 낮아진다고 한 Kim¹⁴등의 연구결과와 일치한다. 따라서 본 연구에서 변형률의 감소는 TiNi의 체적분율 증가로 기지금속의 소성변형이 일부 구속됨에 기인되는 것으로 사료된다.

Fig. 3에는 열처리를 하지 않은 1.6vol%TiNi/6061Al 복합재료를 인장시험 전에 예비변형을 부여하지 않은 것(0%)과 2%를 부여한 시험편에 대해서 고온에서 평가한 결과를 나타내었다. 예비변형을 부여하지 않을 때 강도값은 123 MPa, 2%의 경우에는 125 MPa로 그 값에 큰 차이는 없었다. 이것은 TiNi의 체적분율이 너무 작아 형상기억효과에 의한 회복력이 강도향상에 영향을 미치지 않기 때문으로 사료된다. 한편 변형률은 강도값이 높을수록 감소하여 Fig. 2와 동일한 경향을 나타내었다. Fig. 4에는 Fig. 3과 동일한 시험조건에서 단지 TiNi 체적분율

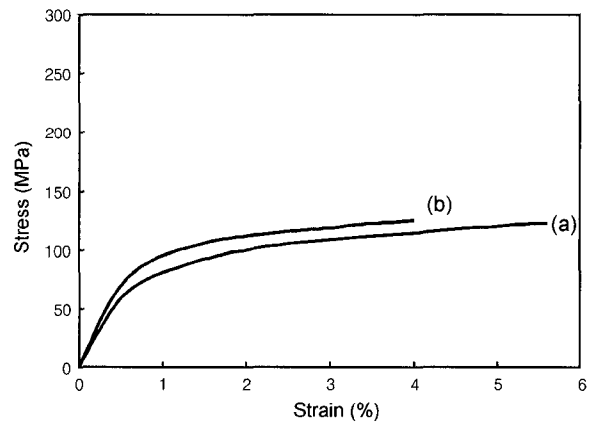


Fig. 3. Stress-strain curves of 1.6vol%TiNi/6061Al composites at 363 K with pre-strain content. (a) 0%, (b) 2%

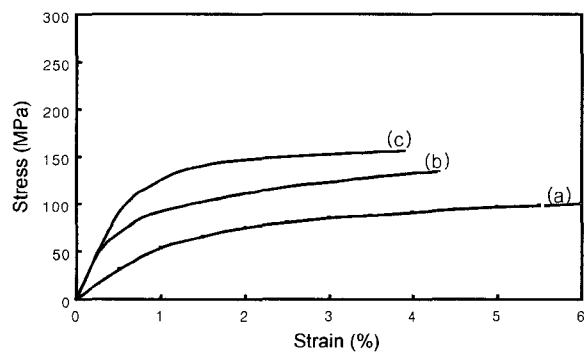


Fig. 4. Stress-strain curves of 6061Al alloy and 2.5vol%TiNi/6061Al composites at 363 K with pre-strain content. (a) 6061Al, (b) 0%, (c) 2%

을 2.5 vol%로 증가시킨 시험편에 대하여 평가한 결과를 나타내었다. 예비변형을 부여하지 않은 경우에는 134 MPa, 2%일 때는 156 MPa를 나타내어 강화재를 도입하지 않은 6061Al보다 높은값을 나타내었다. 이러한 결과로부터 TiNi/6061Al 복합재료의 고온강도는 TiNi의 체적분율이 높을수록 예비변형의 효과가 큰 것을 알 수 있다. 이것은 Fig. 5에 나타낸 TiNi를 강화재로 도입한 지적 복합재료의 강화 기구 개념도⁷⁾로 잘 설명될 수 있다. 그림에서와 같이 TiNi를 6061Al기지금속 내에 도입하여 형상 기억 열처리를 하면 마르텐사이트 상으로 된다. 이것을 인장방향으로 일정량의 예비변형을 가한 후 A_f (Austenite finish) 온도 이상으로 가열하면 형상 기억 효과에 의해 TiNi이 수축하여 기지금속에 압축응력이 발생하여 잔류하게 된다. 이러한 기구에 의하여 TiNi을 도입한 TiNi/6061Al 복합재료는 강화되게 되며, 또 Fig. 3과 Fig. 4에서 TiNi의 도입량이 많을수록 예비변형에 의한 강화 효과가 큰 것은 TiNi의 도입량이 많을수록 강화작용이 크게 나타나기 때문으로 해석된다.

이러한 실험 결과를 이론값과 비교하기 위해 Fig. 6에

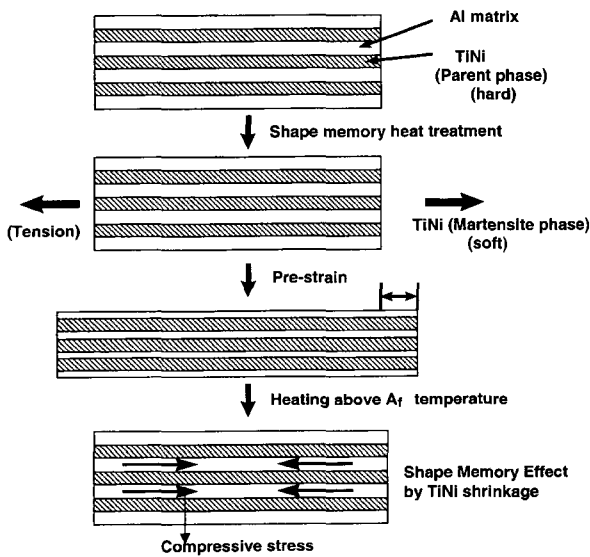


Fig. 5. Reinforcement mechanism of TiNi/6061Al smart composites.

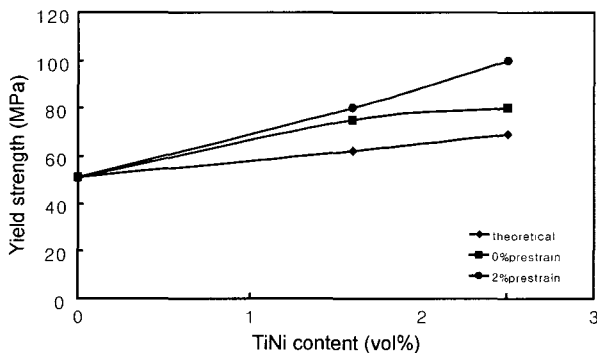


Fig. 6. Relationship between yield strength and TiNi content for TiNi/6061Al composites.

복합재료 중에 도입한 TiNi량과 항복강도와와의 관계를 나타내었다. 여기서 항복강도를 이용한 것은 TiNi 선재를 고온에서 인장시험 할 때 직경이 작아 시험편 Holder 부에서의 빠짐 현상이 나타나 파단 강도를 구할 수 없었기 때문이다. 한편 이론값의 계산에는 $\sigma_c = \sigma_f f_1 + (1 - f_1) \sigma_m$ ¹⁵⁾을 이용하였다. 이 식은 유도과정에서 강화재와 기지금속이 완전히 접합하고 있다는 것을 가정하고 있는데 앞의 연구결과¹⁰⁾에서 이러한 조건이 만족됨을 확인하였다. 여기서 σ_c 는 복합재료의 항복강도이며, σ_f 와 σ_m 은 강화재와 기지의 항복강도, 그리고 f_1 은 강화재 체적분율을 나타낸다. Fig. 6에서 이론값의 계산에 이용한 TiNi의 항복강도는 750 MPa¹²⁾이며, 기지는 52 MPa이다. 그림에서와 같이 TiNi체적분율 1.6 vol%의 이론값은 62 MPa이며, 실측값은 예비변형을 부여하지 않은 경우는 75 MPa, 2% 예비변형을 부여한 후는 80 MPa를 나타내었다. 또 TiNi 체적분율 2.5 vol%로 증가한 경우의 이론값은 69 MPa이며, 실측값은 예비변형을 부여하지 않은 경우는 80 MPa, 2% 예비변형을 부여한 후는 100 MPa를 나타내었다. 이것으로부터 TiNi 체적분율, 예비변형량이 증가할수록 실측값과 이론값의 차가 커짐을 알 수 있다. 이러한 이유들은 앞에서 설명되어졌다. Fig. 7에는 6061Al과 TiNi의 체적분율을 1.6 vol%, 2.5 vol%로 하여 제조한 TiNi/6061Al 복합재료를 T_6 처리 후 상온에서 인장시험한 결과를 나타내었다. 강도는 전체적으로 열처리를 하지 않은 경우(Fig. 2)보다 높은값을 나타내며, 또 TiNi 체적분율 증가에 따른 강도 상승과 변형을 감소현상도 동일한 경향을 나타냄을 알 수 있다.

Fig. 8에는 T_6 처리한 1.6vol%TiNi/6061Al 복합재료에 대해서 2%의 예비변형을 부여하였을 때 TiNi의 회복력이 인장강도에 미치는 영향을 알아보기 위해서 고온에서 인장시험한 결과를 나타내었다. 예비변형을 부여하지 않은 경우에는 182 MPa, 2% 때는 252 MPa를 나타내었다. 이것으로부터 Fig. 5에서 설명된 TiNi의 회복력에 의한 강화기구가 T_6 처리한 시험편에서도 작용하고 있음을 알 수 있다. Fig. 9는 Fig. 8과 동일한 시험조건으로서 단지 TiNi의 체적분율을 2.5 vol%로 증가시킨 시험편에 대

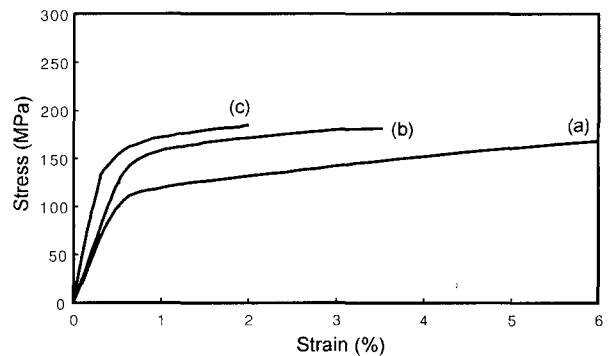


Fig. 7. Stress-strain curves of T_6 treated 6061Al alloy and TiNi/6061Al composites at room temperature. (a) 6061Al, (b) 1.6vol%TiNi/6061Al, (c) 2.5vol%TiNi/6061Al

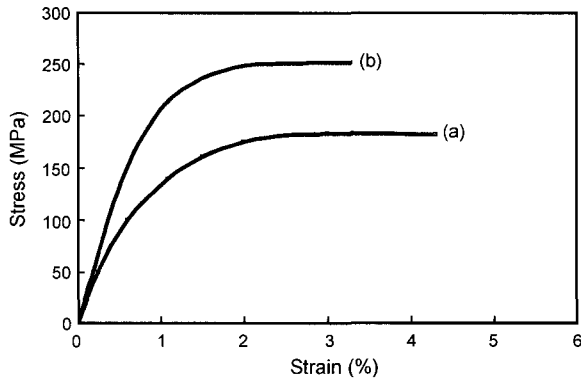


Fig. 8. Stress-strain curves of T6 treated 1.6vol%TiNi/6061Al composites at 363 K with pre-strain content. (a) 0%, (b) 2%

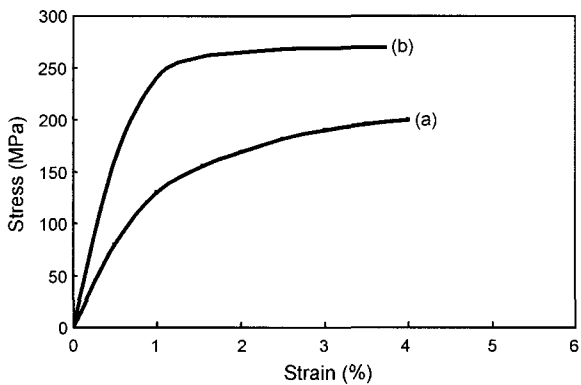


Fig. 9. Stress-strain curves of T6 treated 2.5vol%TiNi/6061Al composites at 363 K with pre-strain content. (a) 0%, (b) 2%

하여 평가한 결과이다. 예비변형을 부여하지 않은 경우에는 200 MPa, 2% 때는 270 MPa를 나타내어 예비변형량이 증가할수록 강도값이 상승함을 알 수 있다.

상기의 인장시험 결과(Fig. 7~Fig. 9)에 의하면 T₆ 처리에 의해 크게 강도값이 상승하였다. 이러한 이유를 알아보기 위해서 TiNi/6061Al 복합재료에서 T₆ 처리 전후의 TiNi와 6061Al기지의 미세조직을 관찰하여 Fig. 10에 나타내었다. 먼저 TiNi의 미세조직에서 검은점의 석출물을 관찰할 수 있다. 이것은 Rozner¹⁶⁾ 등에 의하면 제조공정 중 혼입된 산소 등에 의하여 형성된 산화물, Ti₄Ni₂O_x라고 확인되고 있다. 또 T₆ 처리전의 기지금속에는 미세한 석출물들이 결정입계를 따라 분포하고 있으나 T₆ 처리 후에는 결정입내에 고용됨을 알 수 있다. Skolianos¹⁷⁾ 등은 이러한 석출물은 Mg₂Si, (FeCrMn)₃SiAl₁₂ 들이며, 미세한 Mg₂Si가 강도를 상승시키는 것으로 보고하고 있다. 그러나 본 연구에서는 확인할 수 없었다. 따라서 T₆ 처리 된 TiNi/6061Al 복합재료의 강도 상승은 TiNi에 의한 회복력과 기지금속 중에 석출한 금속간 화합물의 소위 석출 강화 작용¹¹⁾에 의한 것으로 사료된다. Fig. 11은 냉간압연한 2.5vol%TiNi/6061Al 복합재료는 T₆ 처리 후 고온에서 인장시험한 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 압하율 0%는 200 MPa, 38%일 때 최

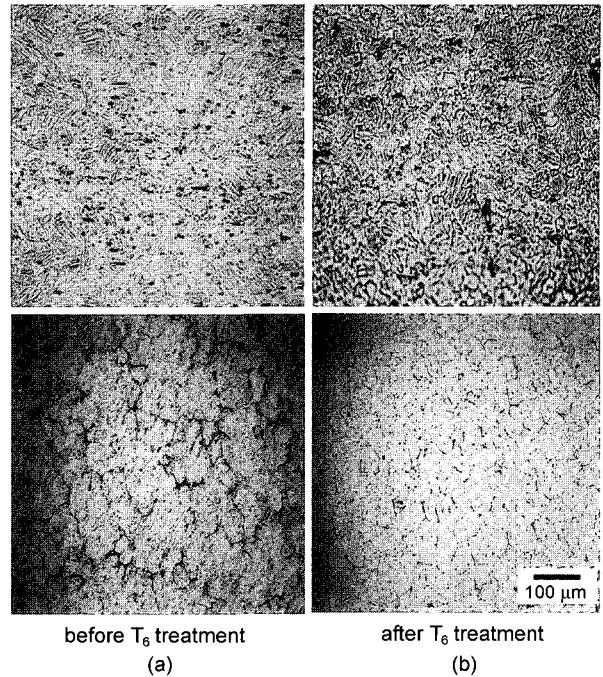


Fig. 10. Optical micrographs of 2.5vol%TiNi/6061Al composites. (a) TiNi, (b) 6061Al

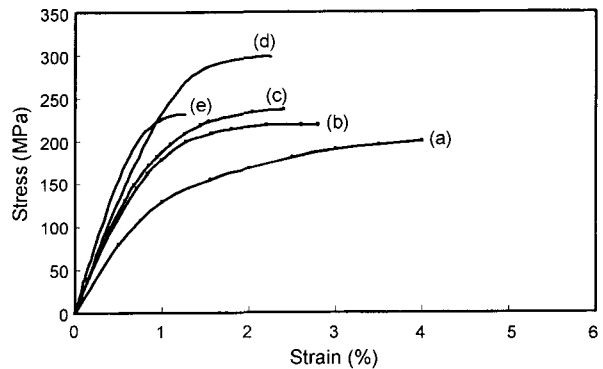


Fig. 11. Stress-strain curves of T₆ treated 2.5%TiNi/6061Al composites at 363 K with reduction ratio. (a) 0%, (b) 13%, (c) 25%, (d) 38%, (e) 50%

대 298 MPa를 나타내었으나, 50%에서는 오히려 232 MPa로 감소하였다. 이와같이 고온에서 압하율 증가에 의한 인장강도의 증가는 6061Al기지의 변형조직에 의한 결정립의 미세화 효과¹⁰⁾와 TiNi의 형상기억효과에 의한 것으로 사료되며, 50%에서 감소한 것은 과잉 압연에 의한 TiNi의 파단에 의한 회복력의 상실이 주된 원인인 것으로 판단된다.

4. 결 론

TiNi의 간격을 2 mm로 한 예비 성형체를 이용하여 TiNi/6061Al 복합재료를 제조하여 이 재료의 인장특성에 미치는 열처리의 영향을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 열처리를 하지 않는 복합재료를 상온에서 평가한 결과 인장강도는 TiNi의 체적분율이 증가할수록 상승하였으며, 또 고온에서 평가한 경우도 예비변형량이 증가할수록 상승하였다.

2) T₆처리 후 상온에서 평가한 결과 인장강도는 전체적으로 열처리전 보다 높은값을 나타내며, TiNi의 체적분율이 증가할수록 상승하였다. 또 예비변형 부여 후 고온에서 평가한 경우는 열처리를 하지 않았을 때와 동일한 경향을 나타내었다.

3) 2.5vol%TiNi/6061Al 복합재료를 압연하였을 경우의 강도는 압하율이 증가할수록 증가하다가 압하율 38%에서 최대값인 298 MPa를 나타내었다. 그러나 그 이상의 압하율에서는 오히려 감소하였으며, 이는 과잉가공으로 인한 TiNi의 파단에 의한 것으로 추측되었다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 신소형재 가공청정 공정 개발 연구센터(R12-2002-004-01-003) 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

1. T. Christman and S. Suresh, *Acta Metall.*, **36(7)**, 1691 (1988).
2. S. Lim, J. Kaneko and M. Sugamata, *Proc. the Korea-Japan Metals Symposium on Composite Materials*, (1988).
3. W. Hall and V. Barrailler, *Metall. Trans. A*, **17A**, June, 1075 (1986).
4. P. K. Liaw, J. G. Gregg and W. A. Logsdon, *Journal of Materials science* **22**, 1613 (1987).
5. Donald webster, *Metall. Trans. A*, **13A** August, (1982).
6. A. L. Gerger and J. A. Walker, *J. Met.* **43(8)**, (1991).
7. M. Taya, A. Shimanoto and Y. Furuya, *Proc. ICCM-10, whistler, B.C., Canada*, (1995).
8. J. H. Lee, K. Hamada, M. Taya, K. Inoue, C. S. Park and S. K. Kim, *Kor. J. Mater. Res.*, **7(11)**, 951 (1997).
9. Y. Iwahashi, M. Furukawa, Z. Hotita, M. Nemoto and T. G. Langdon, *Metall. Mater. Trans. A*, **29**, 2245 (1998).
10. S. K. Park, S. G. Shin, K. H. Park, J. H. Sung, Y. C. Park, G. C. Lee and J. H. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **11(12)**, 1028 (2001).
11. R. J. Arsenault, *Metall. Trans. A*, **17**, 379 (1986).
12. S. K. Kim and J. H. Lee, *Kor. J. Mater. Res.*, **9(4)**, 419 (1999).
13. S. M. Lee, H. J. Lee and C. P. Hong, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **28(3)**, (1990).
14. H. J. Kim and E. P. Yoon, *J. Kor. Inst. Met. & Mater.*, **29(10)**, 1055 (1991).
15. Geroge, E. Dieter, *Mechanical Met.(McGraw-Hill) SI Merric*, ed, 220 (1988).
16. A. G. Rozner et.al., *Trans. ASM*, **58**, 415 (1965).
17. S. M. Skolianos, G. Kiourtisidits and T. Xatzifotiou, *Mater. Sci. and Eng.* **A231**, 17 (1997).