

금형주조법에 의한 TiNi/6061Al 복합재료의 미세조직에 미치는 냉간가공도의 영향

박성기 · 신순기 · 박광훈 · 성장현 · 박영철* · 이규창** · 이준희†

동아대학교 재료금속 · 화학공학부

*동아대학교 기계공학과

**포항산업과학연구원

Effect of the Degree of Cold Working on the Microstructures for TiNi/6061Al Composites by Permanent mold Casting

Sung-Ki Park, Soon-Gi Shin, Kwang-Hoon Park, Jang-Hyun Sung, Young-Chul Park,

Gyu-Chang Lee, Jun-Hee Lee†

Division of Metallurgical and Material, and Chemical Engineering

Dong-A University 840 Hadan 2-dong, Sahagu, Busan 604-714

*Division of Mechanical Engineering

**Research Institute of Structure and Technology, Po-Hang 790-784

(2001년 9월 28일 받음, 2001년 11월 26일 최종수정본 받음)

Abstract The 2.5 vol% TiNi/6061Al composites were fabricated by permanent mold casting. The 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, interface diffusion layer of this composites was made by the mutual diffusion. Transverse section of TiNi fiber was decreased with increasing reduction ratio and longitudinal section of TiNi fiber showed multiple wave phenomenon. And the tensile strength of composites at 38% reduction ratio was the most high. 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

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

1. 서 론

세라믹 섬유 강화재를 이용한 금속기지 복합재료는^{1~4)} 세라믹 강화재와 금속 기지의 열팽창 계수의 차이에 의하여 제조 공정 중 기지금속에 인장 잔류 응력이 생기게 되어 기계적 특성을 저하시키는 단점이 있다. 이와 같은 단점을 극복하고자 TiNi 형상기억합금(이하 : TiNi)을 강화재로 이용한 복합재료 연구가 시도되고 있으며^{5,6)}, 대부분이^{6,7,10,11,18)} 6061Al합금을 기지로 이용하고 있다. 이는 두 물질의 열팽창 계수가 유사하여 강화재와 기지 금속간의 계면 특성이 우수하고, 특히 TiNi의 형상 회복력을 이용하여 세라믹 강화 복합재료와는 달리 기지 금속에 압축 잔류 응력을 유발시켜 기계적 특성을 향상시킬 수 있기 때문이다. 또 후자의 성질을 이용하여 재료 내부에 발생하는 결함의 성장을 억제하여 대형 사고를 미연에 방지할 수 있는 기능을 가진 소위 지능 복합재료 (Smart composites)^{8,9)}라는 새로운 개념의 신소재로도 활용 할 수 있다.

한편 지금까지 이 재료를 얻기 위한 방법으로는 주조법^{10,11)},

용탕 단조법¹²⁾, 분말 야금법^{13,14)}, 열간 프레스법^{15,16)}, SPS 법^{17,18)} 등이 있으며, 제조 후 압연에 의한 기계적 특성 개선에 관한 연구는 거의 시도된 적이 없다. 또 이들 제조법 중 주조법을 제외하고는 비교적 공정이 복잡하고 설비비가 많이 드는 단점이 있다. 하지만 주조법도 공정이 간단하기는 하나, 다른 제조법에 비하여 금속기지 중에 기공 등의 주조 결함이 쉽게 발생하는 단점이 있어, 이것에 의해 생산성 및 기계적 특성이 저하하는 문제점을 지니고 있다. 이러한 재료에 압연공정을 도입하면 기공과 같은 미세한 주조결함의 일부 소멸이 예상되어 문제점 해결이 다소 가능하리라 생각된다. 따라서 본 연구에서는 TiNi을 강화재로 6061Al을 기지로 한 TiNi/6061Al 복합재료를 금형주조법으로 대기 중에서 제조한 후 냉간 압연 시의 압하율 변화에 따른 미세 조직의 변화와 인장특성에 대해서 검토하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 수행한 실험의 과정을 Fig. 1에 개략적으로 나타내었다. 강화재로서는 일본 Kantoc(주) Ti-50at%Ni

† E-mail : jhlee@mail.donga.ac.kr

Table 1. Chemical composition of 6061Al alloy.

(wt%)								
Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
0.63	0.29	0.29	0.030	1.00	0.13	0.014	0.004	Bal

(직경 0.5mm)을 사용하였으며, 지지금속은 상용의 6061Al 합금으로 화학 조성은 Table 1과 같다. 복합재료 제조를 위한 전 단계로 두께 5mm 철판 및 직경 10mm너트를 지지대로 한 지그를 이용하여, TiNi의 간격을

1.24mm와 2mm(도입량은 간격에 관계없이 2.5vol%)을 일 방향으로 배열한 예비성형체를 Fig. 2와 같이 제작하였다. 전기로에서 573K로 가열시킨 예비성형체를 673K로 예열시킨 금형에 장착한 후 6061Al합금을 993K에서 주입하여 가로 330mm 세로 110mm 높이 80mm의 복합재료를 제조하였다 (Fig. 3). 제조된 복합재료를 673K에서 24시간 균질화 처리 한 후 와이어 가공으로 판재로 가공하였

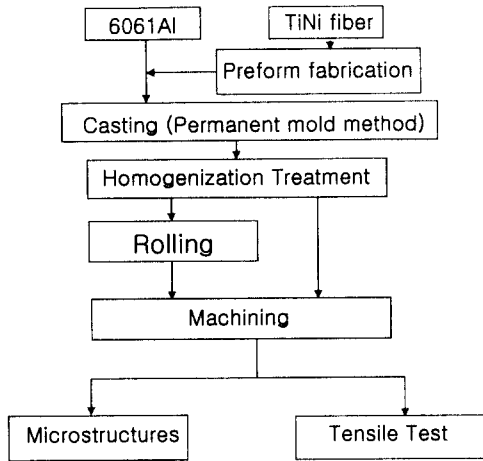
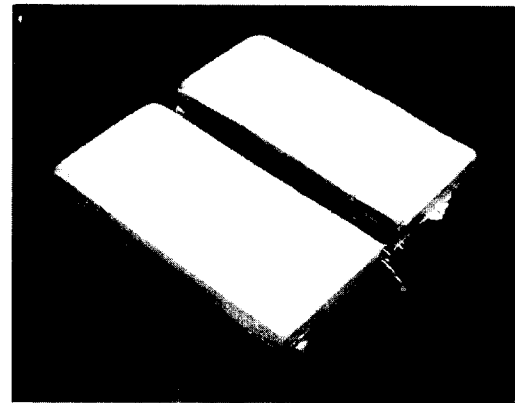
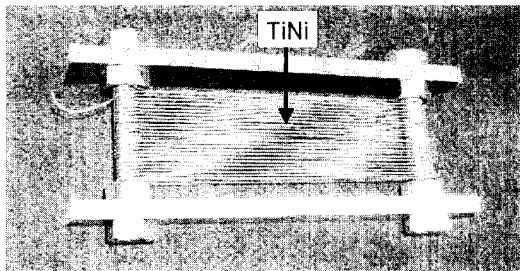


Fig. 1. Flow chart of experimental process.



10cm

Fig. 3. Appearance of 2.5 vol% TiNi/6061Al composites by permanent mold casting.



5cm

Fig. 2. Photograph of fabricated TiNi preform.

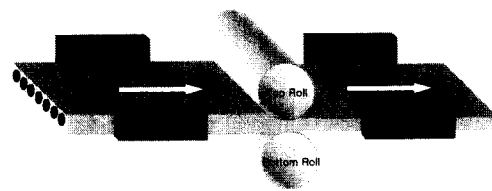
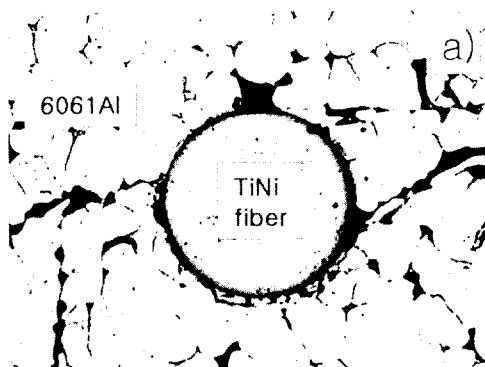
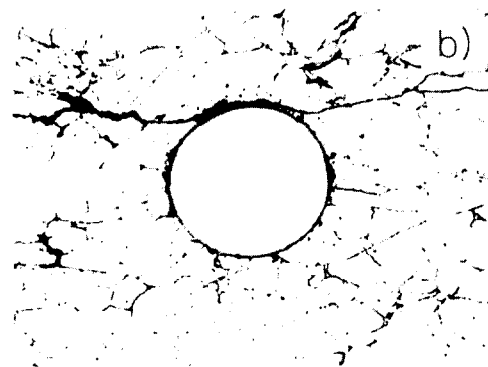


Fig. 4. Schematic diagram of cold rolling method.



a)



b)

250µm

Fig. 5. Optical microstructures of 2.5 vol% TiNi/6061Al composites. (The average distance of TiNi interfiber in preform is about 1.24mm.) a) As cast b) 38% reduction

3. 실험결과 및 고찰

3. 1 복합재료의 미세 조직

Fig. 5는 TiNi 간격을 1.24mm로 한 예비 성형체를 사용하여 대기 중에서 제조한 2.5 vol%.TiNi/6061Al 복합재료를 다이아몬드 슬러리로 연마 한뒤 Dix-Keller용액 (2%HF-3%HCl-5%HNO₃-H₂O) 으로 부식시킨 미세 조

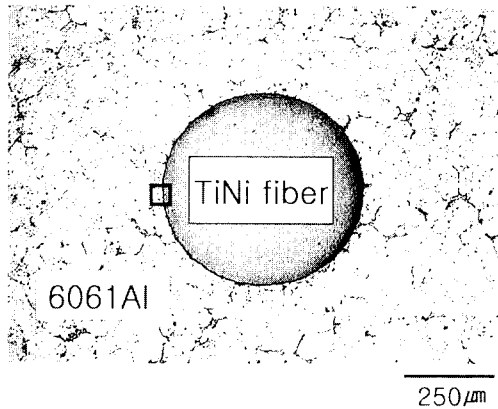


Fig. 6. Optical micrographs of 2.5 vol%TiNi/6061Al composites. (The average distance of TiNi interfiber in preform is about 2mm.)

다. 가공된 재료를 Fig. 4에 나타낸 방법으로 냉간 압연하였다. 압연 시에는 가이드를 설치하여 TiNi의 배열 방향으로만 압연 되도록 하였으며, 압하율은 최고 50%까지 변화시켰다. 제조된 복합재료는 광학 및 주사 전자 현미경 (SEM) 으로 미세 조직과 파면을 관찰하였으며, 계면의 성분 분석을 위해 EDS를 이용하였다. 인장시험은 ASTM 370의 규격으로 시험편을 제작하여 363K에서 1mm/min 속도로 실시하였다.

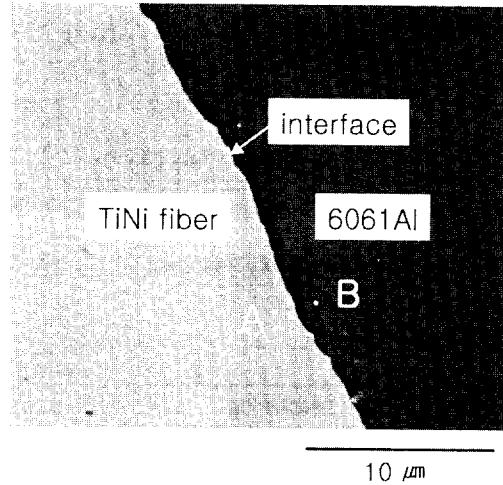


Fig. 7. SEM micrographs of □ area in Fig. 6. (A, B positions are about 1 m from interface, respectively)

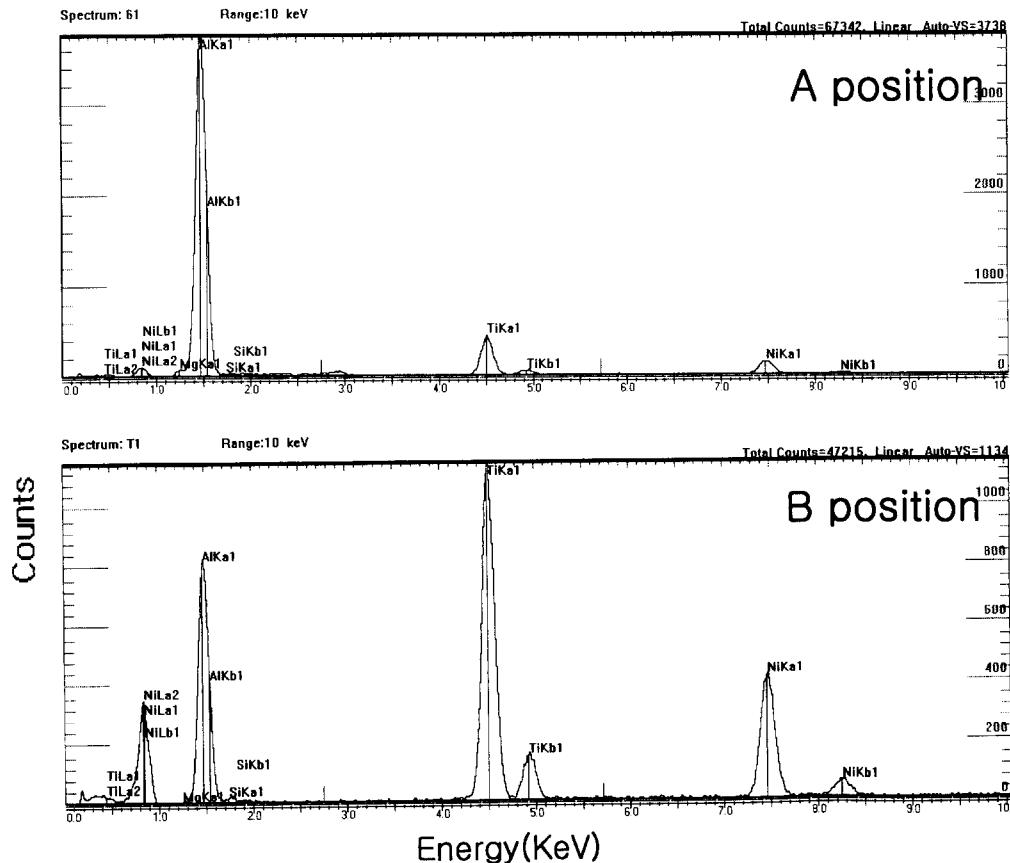


Fig. 8. EDS analysis of A, B position in Fig. 7.

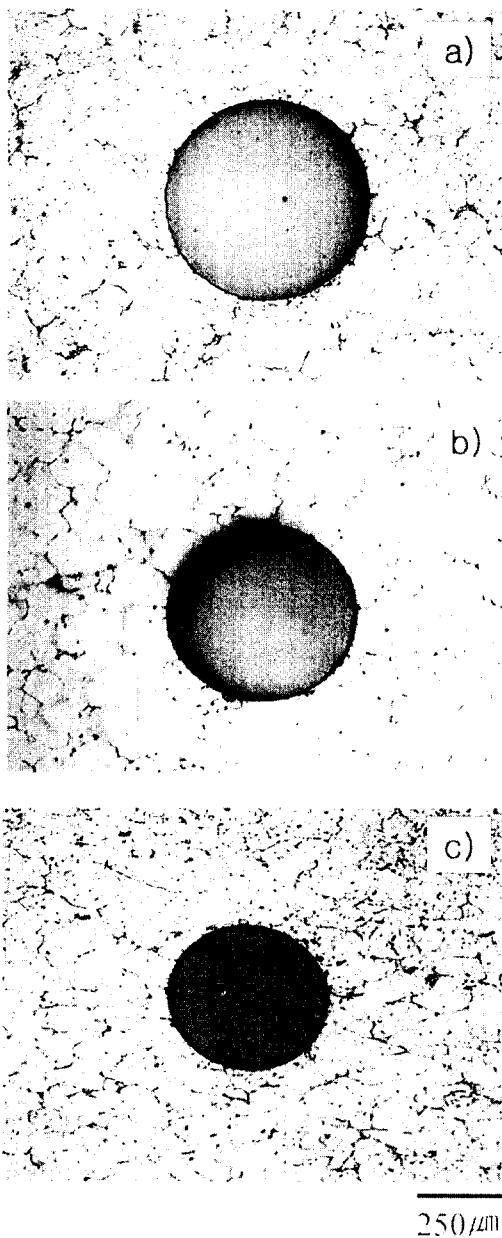


Fig. 9. Optical micrographs of 2.5 vol% TiNi/6061Al composites with reduction ratio. a) 0%, b) 25%, c) 50%

직을 광학 현미경으로 관찰한 것이다. 그림 중의 (a)는 주조조직 그대로이며, (b)는 압하율 38%로 압연한 것이다.

그림에서와 같이 강화재 주위 및 기지조직에 기공, shrinkage cavity 등의 주조결함이 상당히 많이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이것은 TiNi의 간격이 좁아 기지금속의 침투가 원활하지 못하였기 때문으로 사료된다. 또 (b)와 같이 38%의 높은 압하율에도 불구하고 이들 결함들이 완전히는 제거되지 않음을 확인할 수 있다.

Fig. 6에는 Fig. 5와 동일한 조건에서 TiNi의 간격을 2mm로 하여 제작한 예비성형체 미세조직을 나타낸다. Fig. 5(a)에서와 같은 기공은 거의 존재하지 않고, 상당히 계면이 양호한 것을 알 수 있다. 이 결과는 본 재료의 예비성형체 제작 시 TiNi 간격을 2mm 정도로 유지할 필요가

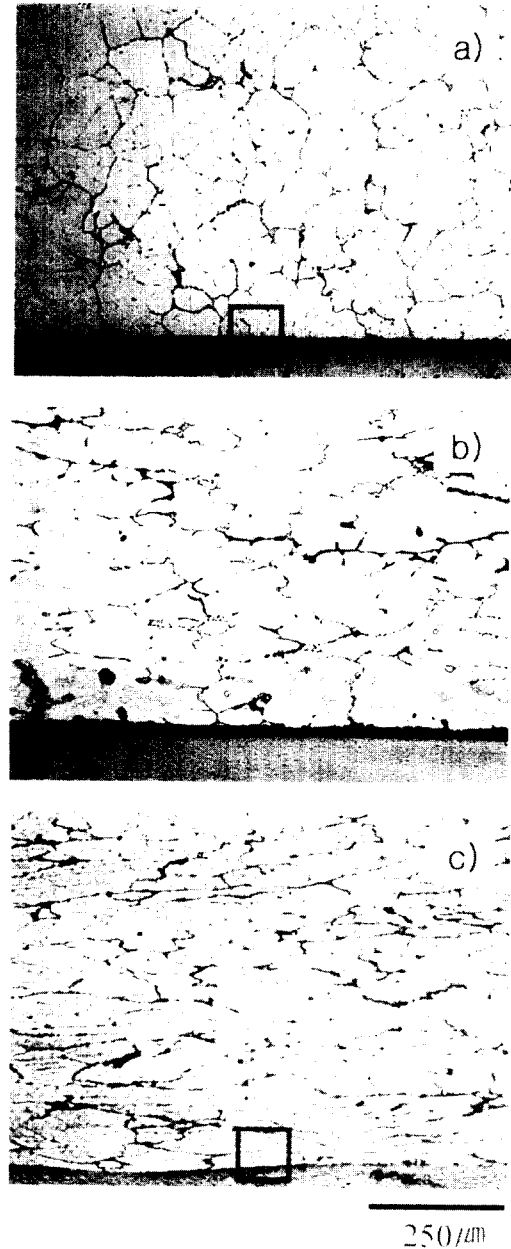


Fig. 10. Longitudinal section of 2.5 vol% TiNi/6061Al composites with reduction ratio. a) 0%, b) 25%, c) 50%

있다는 것을 의미한다.

강화재의 성질이 아무리 뛰어난 특성 및 회복력에 의한 효과를 나타낸다 하더라도 복합화 된 상태에서 Fig. 5와 같이 주조 결함 등에 의해서 기지와 계면 접합성이 불량하면 복합재료에서의 역할을 발휘할 수가 없다. Fig. 7은 이를 확인하기 위하여 Fig. 6 □ 부분을 확대한 것이다. 기지와 강화재 사이에 양호한 접촉 상태를 유지함을 알 수 있다. 이는 TiNi의 간격을 2mm로 함으로써 기지금속인 6061Al 용탕이 잘 침투할 수 있었기 때문이다. 이 계면 부근에서의 원소의 확산 상태를 EDS를 이용하여 계면으로부터 각각 약 1μm 떨어진 지점을 분석한 결과를 Fig. 8에 나타내었다. 그림에서와 같이 기지 쪽에는 Ti 및 Ni의 peak를 관찰할 수 있으며, 또 TiNi 쪽에도 기지 성분인 Al, Si

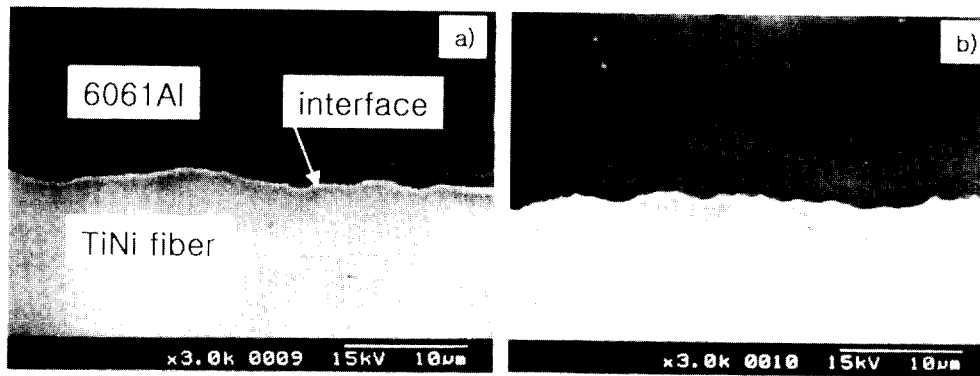


Fig. 11. SEM micrographs of the interface in 2.5 vol%TiNi/6061Al composites with reduction ratio. a) 0%, b) 50%

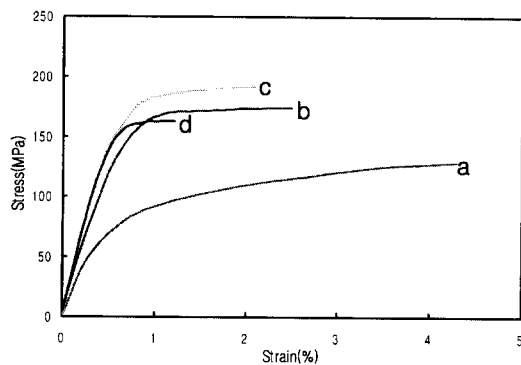


Fig. 12. Stress-strain curves for tensile test at 363K of 2.5 vol% TiNi/6061Al composites with reduction ratio. a) 0%, b) 25%, c) 38%, d) 50%

등의 peak를 관찰 할 수 있다. 이 결과는 Ti, Ni, Al 등의 정확한 확산 량은 추측할 수 없지만 이들 성분이 상호 확산 하고 있음을 나타내고 있다. Furuya¹⁹⁾는 이에 대하여 TiNi에 대한 Al의 확산이 Al기지에 대한 Ti 및 Ni의 확산 보다 크다는 것을 보고한 바 있다. 이 후에는 TiNi의 간격을 2mm로 한 예비성형체를 이용하여 제조한 복합재료 대하여 실험을 실시하였다.

Fig. 9와 Fig. 10에는 여러 가지 압하율로 냉간 압연한 판재의 종단면과 횡단면 조직을 나타내었다. 그림에서와 같이 압하율이 증가할수록 TiNi의 직경은 점차적으로 작아짐을 알 수 있다. 이것은 압연 시 TiNi가 균일하게 힘을 받기 때문으로 사료된다. 또 압하율이 증가할수록 기지의 결정립이 연신된 현상을 나타내며, 압하율이 증가할수록 더 심한 것을 알 수 있다. Fig. 11은 Fig. 10의 (a), (c)의 □부분을 SEM으로 관찰한 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 횡단면은 양호한 접합을 유지하고 있는 것을 알 수 있으며, 또 압연율을 50%로 높여도 소위 다중 wave 현상을 관찰할 수 있었다. 이것은 Kim²⁰⁾의 연구 결과에 의하면 강화재가 금속일 때 관찰되는 현상으로 압하율 증가에 의해 생긴 것으로 사료된다. 또 그들은 이러한 현상이 일어남으로써 계면의 파괴없이 wave의 네킹 부위(wave의 모퉁한 부분)가 응력을 지지해줌으로서 고강도를 나타낸다고 보고하였다.

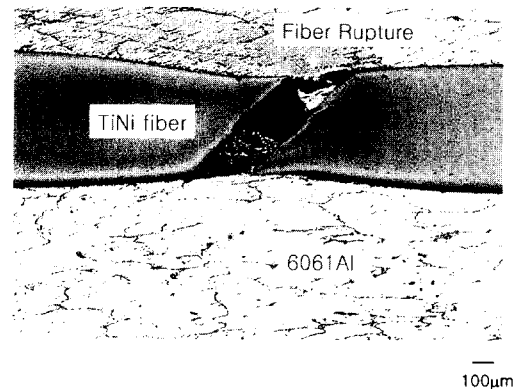


Fig. 13. TiNi fiber rupture in 2.5 vol%TiNi/6061Al composites at 50% reduction ratio.

3. 2 복합재료의 인장특성

Fig. 12는 압하율에 따른 2.5 vol%TiNi/6061Al 복합재료의 363K에서 인장 시험한 결과를 나타낸다. 인장 강도는 압하율 38%까지는 압하율 증가에 따라 증가하나 그 이상에서는 오히려 감소한다. Fig. 13은 압하율 50% 시험편의 횡단면 조직을 관찰한 결과를 나타낸다. 그림에서와 같이 압하율 50%에서는 과잉 압연에 의한 TiNi의 파단에 의하여 인장강도가 감소한 것으로 판단된다. 한편 연신율은 압하율의 증가에 따라 비례적으로 감소한다.

이는 Fig. 9와 Fig. 10에서 알 수 있듯이 압하율이 50%까지 증가함에 따른 TiNi와 6061Al기지의 변형조직과 가공화 현상에 의한 것으로 사료된다.

3. 3 복합재료의 파면조직

Fig. 14에는 Fig. 13에서 실시한 시험편의 파단면 관찰 결과를 나타내었다. 그림에서와 같이 압하율 0%인 경우에도 기지금속과 TiNi의 변형특성 차이로 인하여 TiNi가 pull out되는 현상이 관찰되며, TiNi는 네킹에 의한 전형적인 연성 파괴의 양상을 나타내었다. 또 기지 파단면에 요철 부가 많은 것으로 보아 연성적으로 파괴되었음을 알 수 있다. 압하율이 25%로 증가되어도 TiNi는 0% 일때와 마찬가지로 네킹이 관찰되며 기지는 약간의 요철부도 잔존하고 있지만 평탄면이 많아짐을 관찰할 수 있다. 압하율을 50%

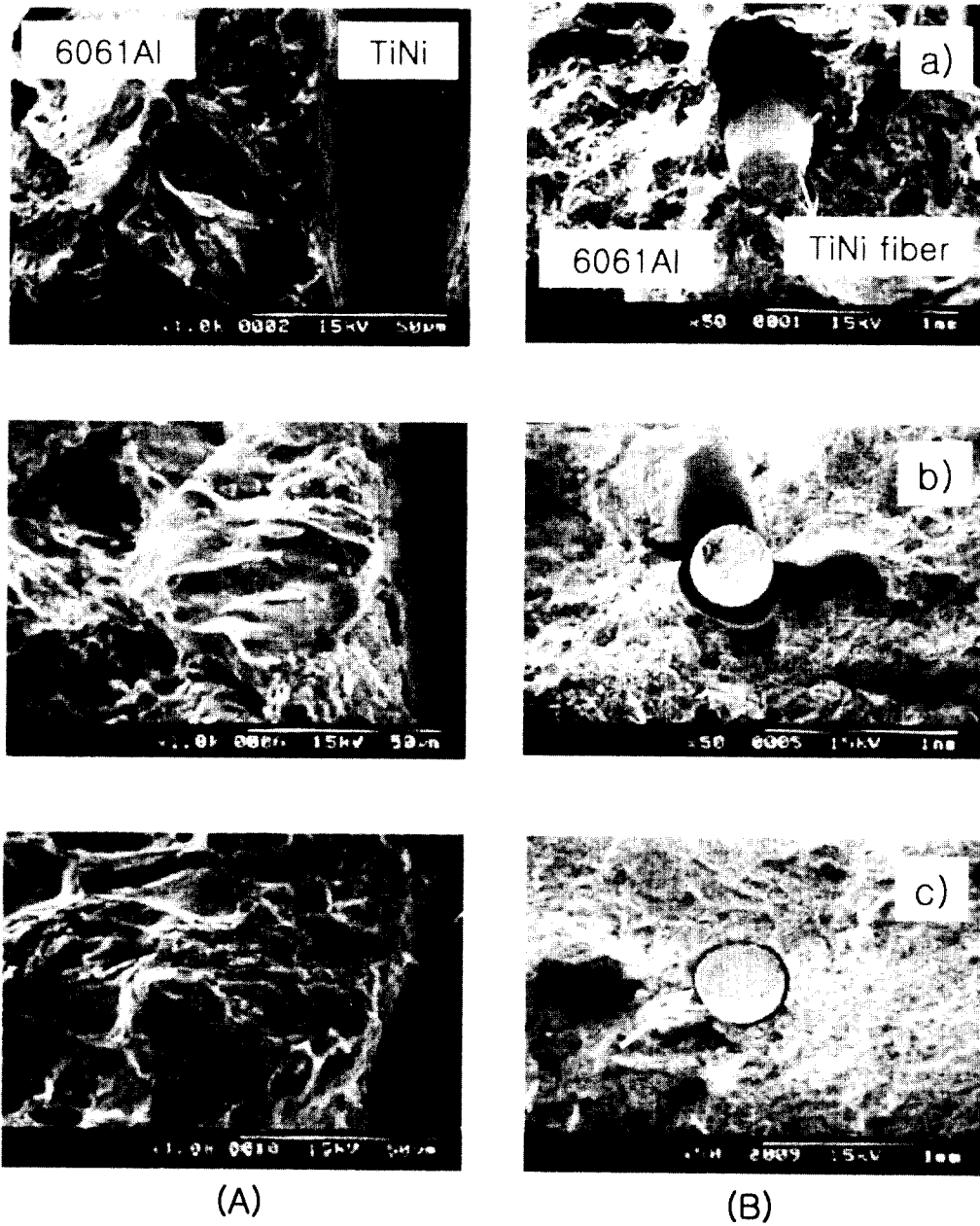


Fig. 14. SEM micrographs of the fraction surfaces of TiNi/6061Al composites with reduction ratio. (A) is magnification of arrow area in (B). a) 0%, b) 25%, c) 50%

로 더욱 증가시킨 경우는 TiNi는 앞과는 다른 즉 취성 파괴의 양상을 나타내고 있으며, 기지의 경우도 평탄면이 대부분을 차지해 거의 취성 파괴를 나타냄을 알 수 있다. 이와 같이 압하율이 증가할수록 TiNi가 취성적으로 파괴되며, 기지가 평탄하게 되는 것은 다음과 같이 설명된다. 즉 압하율이 증가할수록 TiNi는 가공경화되며, 기지는 가공 방향으로 연신된 결정립을 나타내어 이들이 전위에 의한 슬립의 지속적인 진행을 방해하였기 때문으로²¹⁾ 생각된다. 한편 앞서 언급된 연신율 감소 원인도 이와같이 압하율이 증가할수록 연성적 파괴에서 취성적 파괴 양상으로 변화하기 때문으로 생각된다.

4. 결 론

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

- 1) TiNi의 간격을 1.24mm인 경우에는 기지금속의 침투가 원활치 못하였으며, 2mm로 조정된 결과 기지금속이 잘 침투된 복합재료를 얻을 수 있었다.
- 2) TiNi의 간격을 2mm로 하여 제조한 TiNi/6061Al 복합재료의 계면 접합 상태는 양호하였으며, EDS 분석 결과

과 6061Al기지와 TiNi 사이에 상호 확산이 이루어짐을 알 수 있었다.

3) 압하율이 증가할수록 TiNi의 종단면적이 감소하였으며, 횡단면의 계면에서는 다중 wave 현상이 관찰되었다.

4) 인장강도는 압하율 38%에서 가장 높은값을 나타내었으며, 그 이상 일 경우에는 과잉 가공으로 인하여 TiNi의 파단 현상이 일어나 오히려 감소하였다.

5) TiNi/6061Al 복합재료의 파면은 압하율이 증가할수록 취성 파괴 양상을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. D.L. Mc Danel, Metall, Trans., **16A**, 105 (1985).
2. J.M. Papazian and P.N. Adler, Meta. Trans., **21A**, 401 (1990).
3. H.K. Kang, J.H. Lee and S.K. Kim, J. KFS, **18(1)**, 69 (1998).
4. Jintao Wang, Minoru Furukawa and Zenji Hirora, Metallurgical. and Materials. Transactions, A, **26A**, 581 (1995).
5. M. Taya, A. Shimanoto and Y. Furuya, Proc. ICCM-10, Whistler, B.C., Canada, 1995. P. V275-V282
6. W.D. Armstrong, J. Intell. Mater. Systems Struct., **7**, 448 (1996).
7. K. Mizuuchi, K. Inoue, M. Sugioka and M. Itami, 9th CIMTEC-World Forum on New Materials Symposium VIII-Smart Materials Systems P. Vincenzini (Editor) OTechna Srl. 1999
8. J.G. Boyd and D.C. Lagoudas, J. Intell Master. Systems Struct., **5**, 333 (1994).
9. E.A. Rogers, E.S. Chen and A.F. Findies, Int. Workshop in Intell. Mater, Scientific Information (1989).
10. S.K. Kim, J.H. Lee, D.P. Yun, Y.C. Park and G.C. Lee, J. KFS, **18(6)**, 534 (1998).
11. S.K. Kim and J.H. Lee, Kor. J. Mater. Res., **9(4)**, 419 (1999).
12. 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).
13. B.S. Kim, C.H. Han, I.D. Choi, I.M. park and D.M. An, J. Kor. Inst. Met. and Mater. **36(8)**, 469 (1998).
14. Y.C. Park, D.P. Yun, S.C. Heo, G.C. Lee and G.C. Lee, Y. Furuya, J. Kor. Inst. Met. and Mater. **35(1)**, 96 (1997).
15. K. Hamada, J. H. Lee, K. Mizuuchi, M. Taya, and K. Inoue, Meterials Transactions, A, March, **1127** (1998).
16. 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).
17. Y. Furuya, H. Yaguchi, M. Saito, M. Taya and R. Watanabe, International Symposium on smart structural system March19, (1997).
18. K. Mizuuchi, K. Inoue, K. Hamada, M. Sugioka, M. Itami, Y. Okanda, and Kawahara, Glasgow June 2000.
19. Y. Furuya. A. Sasaki and M. Taya, Mater. Trans., JIM. **34-3**, **224** (1993).
20. J.J. Kim, M.S. Yoo and N.J. Kim, J. Kor, Inst. Met. and Mater, **38(6)**, 790 (2000).
21. M.K. Cheol, Dong-A University Doctor thesis (1993).