

고온 프레스법에 의한 TiNi/Al2024 복합재료의 제조 및 기계적 특성평가

손용규¹ · 배동수[#] · 박영철² · 이규창³

Fabrication and Mechanical Properties of TiNi/Al2024 Composites by Hot-Press Method

Yong-Kyu Son, Dong-Su Bae, Young-Chul Park, Gyu-Chang Lee

(Received October 22, 2008)

Abstract

Shape memory alloy has been used to improve the tensile strength of composite by the occurrence of compressive residual stress in matrix using its shape memory effect. In order to fabricate shape memory alloy composite, TiNi alloy fiber and Al2024 sheets were used as reinforcing material and matrix, respectively. In this study, TiNi/Al2024 shape memory alloy composite was made by using hot press method. In order to investigate bonding condition between TiNi reinforcement and Al matrix, the micro-structure of interface was observed by using optical microscope and diffusion layer of interface was measured by using Electron Probe Micro Analyser. And the mechanical properties of composite with three parameters(volume fraction of fiber, cold rolling amount and test temperature) were obtained by tensile test. The most optimum bonding condition for fabrication the TiNi/Al2024 composite material was obtained as holding for 30min. under the pressure of 60MPa at 793K. The strength of composite material increased considerably with the volume fraction of fiber up to 7.0%. And the tensile strength of this composite increased with the reduction ratio and it also depends on the volume fraction of fiber.

Key Words : Shape Memory Alloy Composite, Hot Press, Mechanical Property, Fabrication Condition, Fiber Volume Fraction and Reduction Ratio

1. 서 론

복합재료는 1960 년대 선진국의 우주 항공 산업의 경쟁, 산업용 항공 산업의 성장 등으로 인하여 이에 대한 연구개발이 활발히 이루어져 왔으며, 기존 금속재료에 비하여 비강도, 내부식성이 우수하고 열전도율이 낮으며 피로강도가 높은 특성으로 오늘날 신소재의 한 분야로 자리 잡고 있다[1].

그러나 복합재료는 강화재료와 기지금속 사이의

열팽창 계수의 차이에 의해 잔류응력이 발생하여 강도가 저하되는 현상이 나타나는 문제점이 대두되었다[2]. 따라서 최근에는 이러한 문제를 극복하기 위해서 복합재료의 강화재료를 형상기억합금(SMA; shape memory alloy)으로 대체한 지적 복합재료에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. SMA 는 변형을 가하여도 일정한 온도이상으로 가열하면 원래의 형태로 돌아가는 형상회복효과(SME; shape memory effect)의 특성을 이용하여 잔류응력의 문제를 해결

1. 동의대학교 대학원 신소재공학과(원, ㈜현진소재 품질관리부)
2. 동아대학교 기계공학과
3. 포항산업과학연구원 부품신소재연구본부
교신저자: 동의대 신소재공학과, E-mail: dsbae@deu.ac.kr

할 수 있을 뿐만 아니라 SMA 자체의 강도를 이용한 고강도 복합재료의 강화재료로서 이용될 수 있다[3]. 특히 Ti-Ni 계 SMA는 여타의 합금에 비하여 SME 및 그 안정성이 우수하고, 부식저항이 탁월하기 때문에 실용화의 측면에서 가장 주목을 받고 있다[4~5].

지적 복합재료의 설계개념은 상온에서 응력을 가하여 변형을 시킨 후 온도를 올리면 복합재료의 강화재인 SMA 섬유가 마르텐사이트 상에서 오스테나이트 상으로 역변태를 일으켜 변형된 응력만큼 다시 회복되려는 성질을 이용하는 것이다. 이러한 원인은 SMA의 고유의 특성인 SME 때문이며, 이는 복합재료의 기지에 압축잔류응력을 발생시켜 전체적으로 기계적인 특성이 향상된다[6~7]. SMA의 이러한 특성은 비강도, 비강성 등의 제반특성이 매우 우수하나 제조적인 측면에서는 낮은 변태온도로 인하여 기지와 결합이 어렵고, 온도에 민감한 반응을 일으켜 제조방법에서의 어려움이 있다. 그러므로 실용화의 측면에서는 제조방법과 최적의 제조조건이 중요하며, 제조된 복합재료의 강화기구에 대한 정확한 정보를 확보하는 것이 중요하다[8~9].

국내에서는 지적복합재료에 대한 연구가 거의 이루어지지 않은 실정이며, 제조적인 면에서는 몇몇의 연구자들에 의해 용탕단조법이나 분말야금법을 이용한 연구가 진행되었을 뿐이다[10]. 그러나 이러한 방법들을 이용하여 제조된 지적복합재료는 강도특성 면에서 만족할 만한 수준이 아니었으며, 강화재인 SMA 섬유의 배열분제나 기지금속과의 접합에 대한 과제 등 많은 문제점들이 노출되었다.

본 연구에서는 이러한 문제점들을 극복하고 지적복합재료를 대량으로 생산하기 위한 방법으로 고온 프레스(hot press)법에 의한 TiNi/Al2024 복합재료의 제조에 있어서 최적 제조 조건과 금속간 접합상태를 분석하였으며, 강화기구인 SMA의 체적함유량 변화에 따른 강화효과와 복합재료의 압축에 따른 강도특성변화와 그 원인에 대한 체계적인 연구를 목적으로 하였다.

2. 실험 방법

2.1 복합재료의 제조조건

본 연구에서는 TiNi/Al 기 형상기억복합재료를 제조하기 위하여 두께 1mm의 알루미늄 판재와 직경

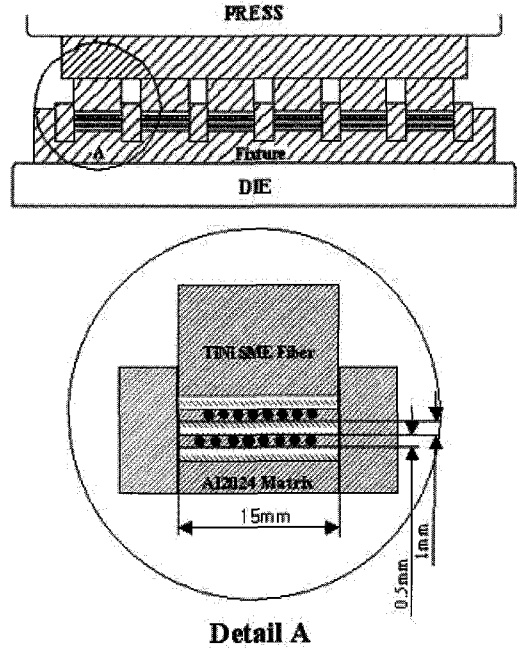


Fig. 1 Schematic diagram of hot pressing

0.4mm의 TiNi 섬유(Ti-50.0 at% Ni)를 사용하였으며, 250톤 용량의 유압 프레스 장치를 최고 1073K까지 온도유지가 가능한 고온 노 내에 장착하여 이용하였다.

복합재료의 제조 시 TiNi 섬유의 체적함유량은 TiNi 섬유들 간의 배열간격을 고려하여 3.2%, 5.2%, 7.0%인 3종류로 달리하여, 260mm×15mm×1mm의 알루미늄 판재 사이에 일정한 배열로 고정시킨 후, 알루미늄 판재를 Fig. 1과 같이 프레스 다이 사이에 놓고 고온에서 압력을 가하였으며[8], Fig. 2에 그의 프리 폼(free-form)을 나타내었다.

TiNi/Al2024 후판 복합재료의 제조조건을 결정하기 위하여 강도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 세 가지 요인(온도, 압력, 시간)을 고려하였다. 우선 확산층에 영향을 미치는 온도를 각각 773K, 793K, 813K로 변화시키고, 압력을 각각 45MPa, 60MPa, 75MPa로 변화시켜 온도와 압력이 복합재료의 제조공정에 미치는 영향을 관찰하였으며, 각각의 조건에 대하여 30분간 온도와 압력을 일정하게 유지하였다.

최적 제조조건 결정은 제조된 복합재료 프리폼의 단면에 대하여 광학현미경으로 관찰하여 정하였으며, EPMA(Electron Probe Micro Analyser)를 이용하여 그 접합계면의 확산층을 분석하였다.

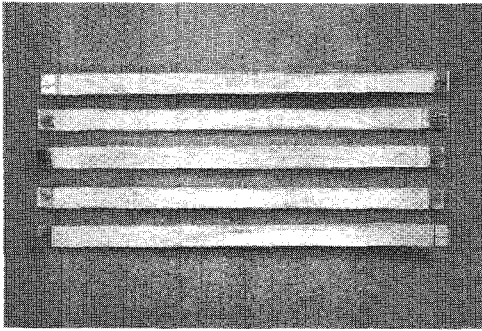


Fig. 2 The shape of composite free-form

2.2 냉간압연 조건

고온 프레스법에 의해 제조된 TiNi/Al2024 복합재료에서 기지금속의 강도증가 효과 및 기지와 섬유의 접합성을 향상시키기 위하여 냉간압연을 실시하였으며, 또한 압하율을 각각 0%, 10%, 20%로 달리하여 그에 따른 복합재료의 강도증가 효과를 조사하였다.

2.3 열처리 조건

TiNi/Al2024 복합재료에서 기지금속인 Al 2024의 강도를 증가시키기 위하여 T4 처리(용체화처리 후 자연시효)를 실시하였다. 복합재료를 768K의 온도로 60분간 유지하여 용체화처리 후, 상온에서 105시간까지 자연 시효처리를 실시하여 미소경도의 변화를 측정된 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 3에서, 실온에서의 유지시간이 경과함에 따라 시효경화가 진행되어 경도가 시효시간에 따라 상승함을 알 수 있었고, 95시간이후에는 경도변화가 거의 없었다. 따라서 본 연구에서는 시험편에 대하여 768K에서 60분간 용체화처리 후 95시간 동안 상온에서 자연시효 처리하였다.

2.4 인장시험

TiNi/Al2024 복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위하여 저온과 상온 및 고온에서 각각 동일한 크로스헤드 속도(2mm/min)로 인장시험을 실시하였으며, 그 파단면은 주사전자현미경으로 관찰하였다. 이를 위한 판형 인장시험편은 고온 프레스법으로 제조된 복합재료의 프리 폼을 이용하여 가공, 채취하였으며, 인장시험편의 평행부는 길이 64mm, 폭 15mm, 두께 2mm인 크기로 제조하여 사용하였다. 저온 인장시험은 복합재료가 비행기 부품으로 사용되었을 때 10,000ft 상공에서의 대체적인 온도를

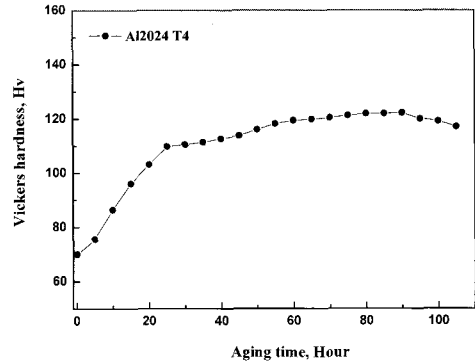


Fig. 3 The Vickers hardness of Al2024 as a function of aging time at room temperature

기준으로 한 228K에서 실험하기 위하여 알코올과 드라이아이스를 혼합 사용하였다. 상온 인장시험은 만능인장시험기(Instron 1137, 15ton)를 사용하여 실온인 293K에서 실시하였다. 고온 인장시험은 고온 챔버를 설치한 만능인장시험기(Shimadzu FHF-EB5-10L형 5ton)를 사용하였으며, 그 유지온도의 설정은 SMA인 TiNi 변태온도 측정결과[10], 94MPa에서의 마르텐사이트 변태개시온도인 M_s 와 오스테나이트 변태완료온도인 A_f 는 각각 304K와 339K로 보고 되었으므로, 본 실험에서는 A_f 온도보다 높은 온도인 363K에서 기계적 특성을 평가하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 복합재료의 최적 제조조건

TiNi/Al2024 지적복합재료의 최적 제조조건을 결정하기 위하여, 다양한 조건에서 제조된 복합재료의 미세조직을 Fig. 4에 나타내며, 이는 온도와 압력 변화에 따른 TiNi SMA 섬유와 Al2024와의 접합상태를 보이고 있다.

Fig. 4에 나타낸 바와 같이, 유지온도 773K에서는 압력이 증가할수록 접합된 상태가 양호하였으며, 45MPa일 경우에는 작은 압력으로 인해 접합면이 완전히 접합되지 않은 상태로 존재함을 관찰할 수 있다. 또한 75MPa의 경우 접합계면은 양호하였으나 미소한 접합라인이 관찰되었다.

793K에서는 45MPa의 압력일 경우 접합계면이 완전히 접합되지 않았으며, 60MPa의 압력일 경우 우수한 접합상태를 나타내었다. 압력이 75MPa인 경우는 접합성은 양호하였으나 무리한 압력으로 인하여 휘어지는 현상이 발생하였다.

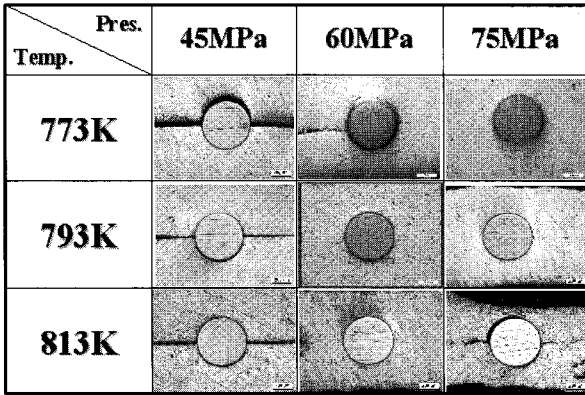


Fig. 4 OM micrographs of TiNi/Al2024 composite fabricated under various processing conditions (scale bar = 200 μm)

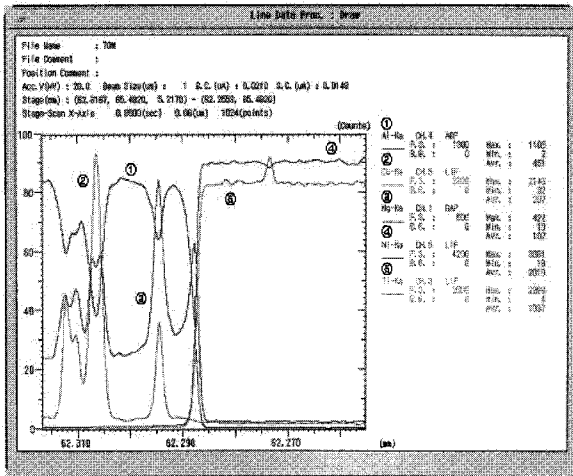
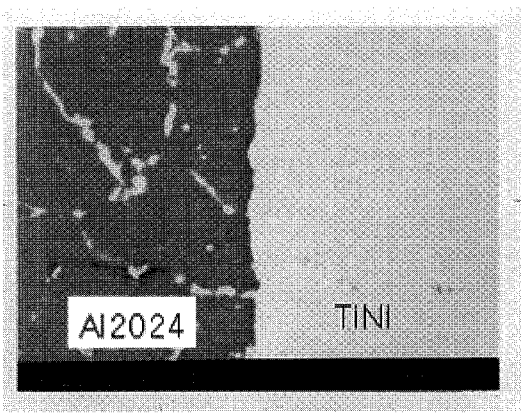


Fig. 5 EPMA analysis result of the interface between fiber and matrix

813K의 경우, 온도가 높아짐으로써, Al2024 모재가 찌그러지는 현상이 나타났다. 또한, 표면의 형상이 온도가 증가함에 따라서 용융현상이 나타나고 있다. 그러므로 표면이 매우 거칠며, 부분적인 용융현상으로 기계적 성질에 영향이 미칠 것이라고 판단된다.

따라서, TiNi SMA 섬유와 기지금속인 Al2024의 접합계면에 대한 광학현미경 관찰에서, 793K에서 60MPa의 압력으로 30분간 유지한 경우가 가장 우수한 접합상태를 나타냄을 확인하였으며, 이 조건으로 제조한 시험편의 접합계면을 EPMA 분석을 실시한 결과를 Fig. 5에 나타내었다.

Fig. 5의 그래프에서 ①의 곡선은 Al, ④는 Ni 그리고 ⑤는 Ti의 접합계면 부근에서의 성분분포를 나타내는데, 이들 곡선이 62.285mm와 62.290mm의 구간에서 급격한 농도분포의 변화를 보이고 있으므로, 접합계면에서의 확산층의 두께는 약 5μm이며, Ti₃Al₂ 성분이 확산층에서 관찰되어 기지와 섬유가 화학적 반응의 결과로 계면접합이 발생한 것을 알 수 있었다.

그러므로, Fig. 4와 5의 결과로부터 TiNi/Al2024 복합재료에 대한 제조조건을 가열온도 793K, 압력 60MPa 및 유지시간 30분으로 결정하였으며, 이와 같은 조건에서 제조된 시료에 대하여 기계적 특성을 평가하였다.

3.2 체적함유량에 따른 복합재료의 기계적 특성

TiNi/Al2024 형상기억복합재료에서 강화재인 TiNi 섬유가 복합재료의 인장강도에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 인장시험온도를 달리하여 실시한 강화재의 체적함유량에 따른 인장시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

Fig. 6에서 알 수 있듯이, 강화재의 체적함유량이 0%인 기지의 인장강도는 시험온도의 증가에 따라서 감소하는 일반적인 경향을 나타내고 있다. 그러나, 강화재가 존재하는 복합재료의 경우에는 시험온도에 따른 강도의 변화거동이 다른 것을 보여준다.

저온(228K)에서의 복합재료의 인장강도는 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 저온에서는 강화재인 TiNi의 마르텐사이트변태로 인하여 강화재 자체의 강도가 증가하므로[10], 강화재의 체적함유량이 높을수록 복합재료의 인장강도에 대한 기여도가 더욱 증가하기 때문이다.

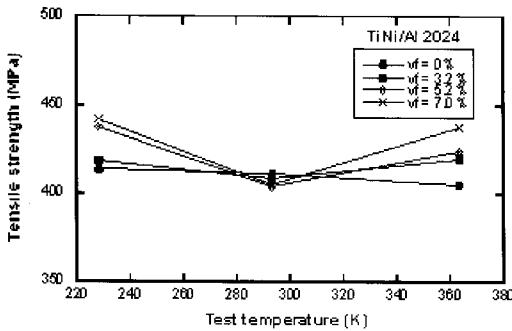


Fig. 6 Changes of tensile strength in TiNi/Al2024 composite materials with different fiber volume fractions at given test temperatures

상온(293K)에서는 인장강도가 최소값을 가지며, 체적함유량이 증가함에 따라 오히려 인장강도는 크게 변함이 없는데, 이는 체적함유량이 적은 TiNi의 상온에서의 강도보다 모재인 알루미늄의 강도특성이 더 우월하게 나타나기 때문이다.

그러나, 고온(363K)에서는 복합재료의 인장강도 값이 강화재의 체적함유량이 증가함에 따라서 다시 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 오스테나이트 변태개시온도, A_s 이상의 온도에서는 TiNi SMA의 형상기억효과의 강화현상[6~7]으로 인하여 강화재인 TiNi 섬유가 초기의 형상으로 되돌아가려는 특성 때문에 섬유와 모재의 계면에서 압축잔류응력이 발생함과 동시에, TiNi 섬유자체의 강도역시 증가하므로 인장강도가 증가하는 것[9]으로 판단된다. 그리고, 그 증가폭의 정도는 저온에서는 강화재의 체적함유량이 5.2%에서, 고온에서는 7.0%의 체적함유량에서 각각 복합재료의 인장강도의 증가가 현저하게 나타났다.

3.3 압하율에 따른 복합재료의 기계적 특성

고온 프레스법에 의해 제조된 복합재료인 경우 양호한 계면접합 상태가 관찰되었으며, 우수한 강도특성을 나타내었다. 기지금속의 강도증가 효과 및 기지와 섬유의 접합성을 더욱 향상시키기 위하여 냉간압연을 실시하였다. 냉간압연에 의한 강도 증가 효과를 평가하기 위하여 복합재료를 각각 10%, 20%로 압하율을 달리하여 압연 및 열처리를 행한 후 시험편을 가공하여 인장시험을 실시하였다. 시험편의 섬유체적함유량은 3.2%, 5.2%, 7.0%의 3종류로 하였다.

냉간압연한 TiNi/Al2024 복합재료의 기계적 특성을 평가하기 위하여 저온(228K), 상온(293K) 및 고온(363K)에서 인장시험을 수행한 결과를 Fig. 7에 나타내었다.

먼저, Fig. 7의 (a), (b) 및 (c)에서 섬유의 체적함유량이 0%이고 압하율 0%와 압하율 20%인 경우, 각각의 Al2024 모재의 인장강도는 시험온도와 관계없이 약 20MPa의 차이를 나타내므로, Al2024 모재는 20%의 압하율에 의해 약 20MPa의 강도 증가 효과를 가지는 것을 알 수 있다. 그리고, 여기서는 연신율의 결과 그래프를 나타내지 않았으나, 시험온도와 무관하게 압하율이 0%에서, 섬유의 체적함유량이 0%인 경우의 연신율은 약 19%, 3.2%의 경우는 약 18%, 5.2%의 경우는 약 16%, 7.0%의 경우는 약 15%를 나타내어, 섬유의 체적 함유량이 증가함에 따라 연신율은 약간 감소함을 알 수 있었다.

Fig. 7(a)에서, 저온에서는 압하율이 증가할수록 인장강도가 증가함을 나타내며, 체적함유량이 증가할수록 복합재료의 인장강도는 증가하는데, 특히 5.2%와 7.0%의 체적함유량에서의 강도증가분이 큰 것을 알 수 있어, 저온에서의 TiNi의 마르텐사이트의 변태에 의한 강도기여의 효과가 큰 것을 나타낸다.

Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이, 상온에서의 복합재료의 인장강도의 변화는 압하율이 증가할수록 약간 증가하는 강도특성을 나타내고 있다. 상온에서의 체적함유량 7%, 압하율 20%에서의 인장강도가 저온의 경우보다 낮은 이유는, Fig. 6에서도 나타난 바와 같이 상온에서는 모재인 Al2024의 강도특성이 체적함유량이 적은 TiNi 섬유의 강도보다 더 우월하게 작용하기 때문이다. 그리고, 압하량 20%로 증가에 따른 복합재료의 강도 증가분이 약 20MPa이므로, 이는 압하율 20%에서의 Al2024 기지의 강도 증가분인 약 20MPa과 유사하다. 따라서, 상온에서는 섬유의 체적함유량의 증가에 따른 복합재료의 인장강도의 증가에 대한 기여효과는 무시 가능하므로, 복합재료의 강도특성은 모재인 Al2024의 강도특성에 의해 좌우된다는 것을 알 수 있다.

Fig. 7(c)는 고온에서 TiNi/Al2024 복합재료의 체적함유량과 압하율에 따른 인장강도의 변화를 나타낸다. 그래프에서 압하율이 높고, 섬유의 체적함유량이 높을수록 높은 강도특성을 나타낸다. TiNi/Al2024 복합재료의 최대인장강도의 증가분은 초탄성영역

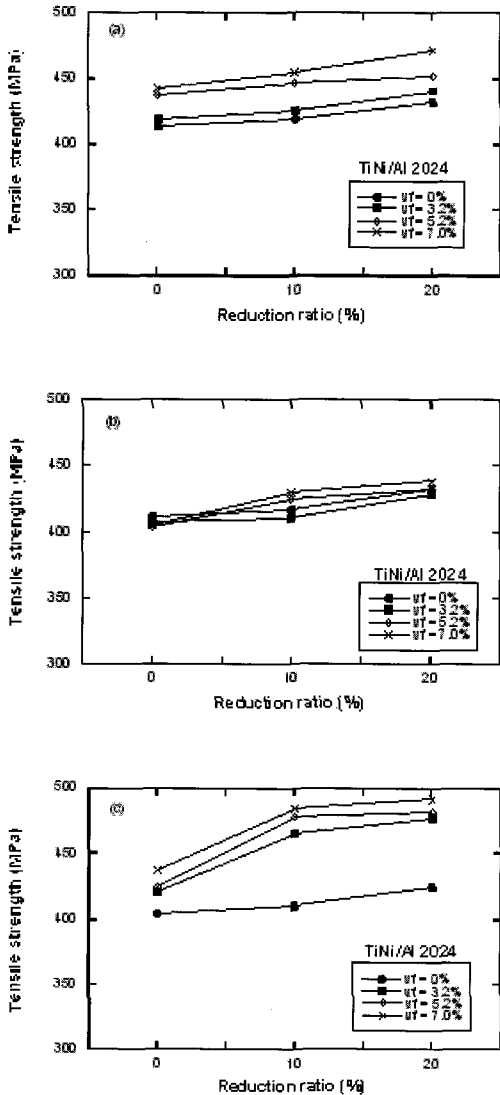


Fig. 7 The relation between fiber volume fraction of TiNi/Al2024 and reduction ratio at (a) 228K, (b) 293K and (c) 363K

에서 발생하는 TiNi SMA 섬유와 냉간압연에 의해 지지금속의 강화현상에 기인한 것이다. 체적함유량이 7%이고 압하율이 20%인 TiNi/Al2024 복합재료의 최대인장강도는 492.4MPa 이므로, 이는 압연하지 않은 Al2024 모재의 인장강도인 405.1MPa 와 비교해서 87.3MPa 만큼 높은 강도를 나타내었다.

또한 섬유의 체적함유량이 0%이고 압하율 20%인 Al2024 모재의 최대인장강도인 425MPa 와 비교

해 보면, 복합재료의 경우가 67.4MPa 만큼 높은 인장강도를 나타내므로, 이는 TiNi SMA 섬유의 강화효과에 의한 인장강도의 증가로 판단된다. 따라서, 고온에서는 압하율과 섬유의 체적함유량의 증가가 복합재료의 인장강도의 증가에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다.

3.4 파면거동

TiNi/Al2024 복합재료의 섬유의 체적함유량이 3.2%인 복합재료를 이용하여 압하율에 따른 상온 인장시편의 파면을 SEM 으로 관찰한 결과를 Fig. 8 에 나타내었다.

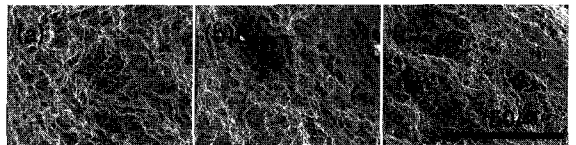


Fig. 8 SEM fractographs of TiNi/Al2024 composites with (a) 0%, (b) 10% and (c) 20% reduction ratio

압하율이 가해지지 않은 경우, Fig. 8(a)에 보이는 것처럼 지지재료의 파면은 연성파괴의 양상을 나타내고 있다. 그러나, 압하율이 10%로 부가된 경우 {Fig. 8(b)}, 적은 부분이지만 벽개파괴가 발생한 것을 알 수 있으며, 압하율이 20%로 증가하면 Fig. 8(c)에 나타난 바와 같이 연성파단면은 감소하고 넓은 부분에 걸쳐서 벽개파괴가 발생하였음을 알 수 있다. 따라서, 기지는 압하율의 증가에 따른 전위밀도의 증가 및 내부변형에너지의 증가로 인한 가공경화현상이 발생하여 복합재료의 인장강도는 증가하였으나, 그 파단면은 연성 파괴보다 취성의 파괴양상이 증가됨을 알 수 있다.

4. 결론

고온 프레스법을 이용하여 제조한 TiNi/Al2024 형상기억복합재료의 제조조건 및 기계적 특성에 대한 연구결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) TiNi/Al2024 복합재료는 793K 에서 60MPa 의 압력으로 30 분간 유지한 경우가 가장 우수한 접합 상태를 나타내었으며, Al2024 기지와 TiNi 강화섬유의 접합계면에는 Ti_xAl_y 의 확산층이 존재하였다.

(2) 복합재료의 강화섬유의 체적함유량을 7.0%까지 증가함에 따른 복합재료의 강도증가 효과는 현

저하였다.

(3) 복합재료의 고온 인장강도는 강화섬유의 체적 함유량과 압하율이 증가할수록 우수하였으며, 그 체적함유량 7.0%와 압하율 20%의 조건에서 492.4Mpa의 최대 인장강도를 얻을 수 있었다.

(4) 복합재료의 압하율이 증가함에 따라 인장강도는 증가하나 Al2024의 과단부위에 평탄면이 많아 기지가 취성파괴의 양상을 나타내었다.

후 기

본 연구는 동의대학교 교내연구비(2007AA195)의 지원으로 수행되었습니다.

참 고 문 헌

- [1] T. W. Duerig, K. N. Melton, D. Stockel, C. M. Wayman, 1990, Engineering Aspects of Shape Memory Alloys, Butterworth-Heinemann, pp. 394~413.
- [2] B. D. Agarwal, J. Broutman, 1990, Analysis and performance of fiber composite, a wiley-interscience publication, pp. 71~72.
- [3] M. Taya, Y. Furuya, Y. Yamada, R. Watanabe, S. Shibata, T. Mori., 1993, Proceedings Smart material, edited V, K. Varadam, SIM. No. 1916, p. 373.
- [4] T. Tadaki, K. Otsuka, K. Shimizu, 1988, Shape Memory Alloy, Ann. Rev. Mater. Sci., Vol. 18, pp. 25~45.
- [5] S. W. Hong, B. H. Lim, O. Y. Lee, 1990, Phase Transformation and Thermal Fatigue Characteristics of Ti-Ni-B Shape Memory Alloys, J. Kor. Inst. Met., Vol. 28, pp. 743~751.
- [6] Yuanti Huang, Gueping Yang, Ping He, 1985, The Investigation of Internal Friction Electric Resistance and Shape Change in NiTi Alloy During Phase Transformations, Scripta Metallurgica, Vol. 19, pp. 1033~1038.
- [7] Akira Shimamoto, Hiroshi Ohkawara, Fumio Nogata, 2004, Enhancement of mechanical strength by shape memory effect in TiNi fiber-reinforced composites, Engineering Fracture Mechanics, Vol. 71, Issue 4-6, pp. 737~746.
- [8] Young-Chul Park, Dong-Sung Park, Jun-Hee Lee, Gyu-Chang Lee, 2002, Fabrication and Characterization of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum Matrix Composite by Using Hot Press, Korea Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 26, pp. 1223~1231.
- [9] Young-Chul Park, Dong-Sung Park, Dong-Hwa Lee, Gyu-Chang Lee, 2002, The Strength Evaluation of TiNi/Al6061 Composite by Using Finite Element Method, Korea Society of Precision Engineering, Vol. 19, pp. 72~78.
- [10] Y. C. Park, D. P. Kim, G. C. Lee, Y. Furuya, 1997, Material Properties and Strengthening Mechanism in Shape Memory TiNi Fiber Reinforced Al Matrix Composite, Korea Society of Mechanical Engineers(A), Vol. 21, pp. 405~413.