

## 형상기억복합재료의 제조공정 및 신뢰성 평가

### Fabrication Process and Reliability Evaluation of Shape Memory Alloy Composite

이진경\*, 박영철\*\*, 이규창\*\*\*, 최일국\*\*\*\*, 이준현\*\*\*\*\*

Jin-Kyung Lee\*, Young-Chul Park\*\*, Kyu-Chang Lee\*\*\*, Il-Kook. Choi\*\*\*\*  
 and Joon-Hyun Lee\*\*\*\*\*

**초 록** 형상기억복합재료는 복합재료내에 압축잔류응력을 발생시킴으로써 재료의 인장강도를 증가시키는데 사용되어지고 있다. 본 연구에서는 형상기억복합재료를 제조하기 위하여 TiNi 강화재와 Al6061 기지재를 사용하였으며 핫프레스 방법에 의해 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조하였다. 그러나 핫 프레스 방법에 의해 제조된 형상기억복합재료는 하중을 받을시 강화재와 기지재 사이에 계면손상현상이 발생하였으며 이를 위하여 냉간압연을 실시하였다. 냉간압연을 받은 시험편은 냉간압연을 받지 않은 시험편에 비하여 인장강도가 현저히 증가하였다. 또한 본 연구에서는 고온에서 형상기억복합재료의 미시적 손상을 평가하기 위하여 음향방출기법을 이용하였다.

**주요용어**: 형상기억복합재료, 핫프레스, 냉간압연, TiNi 합금, 음향방출

**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 and Al6061 were used as reinforcing material and matrix, respectively. In this study, TiNi/Al6061 shape memory alloy composite was made by using hot press method. However, the specimen fabricated by this method had the bonding problem at the boundary between TiNi fiber and Al matrix when the load was applied to it. A cold rolling was imposed to the specimen to improve the bonding effect. It was found that tensile strength of specimen subjected to cold rolling was more increased than that of specimen which did not underwent cold rolling. In addition, acoustic emission technique was used to quantify the microscopic damage behavior of cold rolled TiNi/Al6061 shape memory alloy composite at high temperature.

**Keywords**: shape memory alloy, compressive residual stress, TiNi alloy, hot press, cold rolling, acoustic emission.

#### 1. 서 론

복합재료 내부의 잔류응력 문제를 해결하기 위하여 최근에는 형상기억효과(shape memory effect)를 이용한 형상기억복합재료(shape memory alloy composite)[1-3]를 제조하

여 복합재료의 인장강도를 증가시키려는 연구가 진행중에 있다. 특히 1962년 처음으로 선보인 TiNi 형상기억합금은 지금까지 광범위하게 연구되어 왔으며 복합재료의 강화재로써 호평을 받고 있다. 그러나 다른 종류의 금속복합재료(MMC)와 달리 TiNi 합금을 강화한 형상기억복합재료를 제

(접수: 2001. 10. 31) \* 동의대학교 기계산업시스템공학부(Division of Mechanical and Industrial System Engineering, Dong-Eui University, Pusan 614-714), \*\* 동아대학교 기계산업시스템공학부, \*\*\* 산업과학연구원 신뢰성 평가센터, \*\*\*\* 동의대학교 대학원, \*\*\*\*\* 부산대학교 기계공학부

조합에 있어 강화재와 기지재간의 계면접합문제를 해결하는 것이 큰 이슈가 되었다. 특히 Maji[4] 등은 콘크리트내에 강화재로서 형상기억합금을 넣어 강화재와 기지재간의 접합상태 및 Pullout 현상 등에 대해 평가하였으며, 백[5] 등은 이러한 계면접합 문제를 해결하기 위하여 핫 프레스(hot press)방법으로 아르곤 분위기에서 다양한 온도와 압력을 이용하여 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조하였다. 본 연구의 목적은 TiNi/Al6061 복합재료를 후판으로 제조하기 위한 기초로 연구로써 핫프레스 방법을 채용하여 복합재료를 제조하고 복합재료의 강화기구를 규명하는 것이다. 국내에서는 용탕단조법이나 분말야금법을 이용한 지적복합재료의 제조에 관한 연구가 활발히 추진되어 왔다[6]. 그러나 이런 방법들로 제조된 지적복합재료는 강도특성 면에서 만족할 만한 수준이 아니었으며, 강화재인 섬유 배열문제 등 많은 문제점들이 노출되었다. 강도 문제와 섬유의 배열문제를 동시에 해결할 수 있는 대안으로써 핫프레스법은 아주 유용한 방법이다. 핫프레스 방법의 장점으로는 다양한 크기의 복합재료를 제조할 수 있으며, 다양한 섬유함유량을 가진 복합재료를 제조할 수 있다는 점이다. 또한 후판으로 제조할 수 있으므로 복합재료의 상용화 측면에서 매우 유리하다. 그러나 이러한 핫 프레스 방법에 의해 제조된 복합재료에서 강화재와 기지재간의 계면에서 화학적인 반응에 의해 양호한 접합상태를 나타내었지만 복합재료에 인장응력을 가하였을 때 강화재와 기지재간의 계면분리현상이 발생하였으며 특히 알루미늄간의 층간분리현상도 관찰되었다. 이로 인해 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 인장강도값은 이론치보다 낮게 나타났다. 따라서 본 연구에서는 복합재료내의 강화재와 기지재간의 계면접합상태를 더욱 향상시키고 기지재의 조직상태를 더욱 개선시키기 위하여 핫 프레스 방법으로 제조한 시험편을 냉간압연시켜 복합재료의 인장강도를 변화를 고찰하고자 하였다. 또한 냉간압연의 효과를 평가하기 위하여 복합재료에 압하율(Reduction Ration, RR)을 변화시켜가면서 실험을 실시하였다. 그리고 복합재료의 미시적 손상기구 및 정도를 비파괴적으로 평가하기 위하여 음향방출(Acoustic Emission, AE)기법[7,8]을 이용하여 복합재료가 하중을 받아 소성변형 및 균열 발생, 성장시 발생하는 탄성파를 이용하여 재료의 손상거동을 연속적으로 온라인 모니터링하였다.

2. 시험편 제조 및 실험방법

2.1. 핫프레스 방법에 의한 시험편 제작

본 연구에서는 Al6061과 500 $\mu$ m의 TiNi(Ti-50 at.%)

와이어를 사용하여 TiNi/Al6061형상기억합금 시험편을 제조하였다. 먼저 최고 1273K까지 온도 유지가 가능한 250톤 용량의 고온 프레스(hot press)를 제작하여 시험편을 제조하였다. Fig. 1에서는 시험편 제조과정을 나타낸 것으로 Al6061 사이에 TiNi 와이어를 일정한 간격으로 고정시키고 핫 프레스 내의 온도를 833K, 60MPa의 압력으로 고정하고 30분동안 가압하였으며 Al6061 표면의 산화를 방지하기 위하여 아르곤 분위기에서 시험편을 제조하였다. 또한 기지재인 Al6061의 강도를 증가시키기 위해 T6열처리를 실시하였다. TiNi/Al6061 형상기억복합재료에 대하여는 793K와 813K에서 1시간동안 용체화처리 후 냉각수에 담금질을 실시하였으며, 시험편의 기계적 특성을 증가시키기 위하여 공기 중에서 448K로 시효처리를 실시하였다. 마지막으로 상온에서 시험편에 1 $\times$ 10<sup>-4</sup>mm/s로 예변형을 가하였다. 이러한 방법에 의해 제작된 시험편에 대하여 냉간압연을 실시하였다.

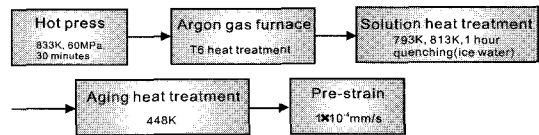
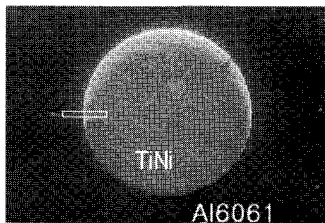


Fig. 1 Specimen manufacturing process

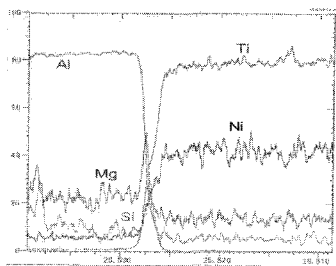
2.2. 냉간압연 및 열처리

본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 핫 프레스 방법에 의해 제조된 복합재료인 경우 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 계면에서의 화학적인 작용으로 양호한 계면접합과 EPMA 분석결과 확산층의 두께가 400 $\mu$ m 및 TiAl 성분이 확산층에서 관찰되었다. 그러나 인장하중을 받을 경우 강화재와 기지재 사이의 계면 박리 현상 및 기지재 사이에도 계면손상이 두드러졌기 때문에 후판 복합재에 대하여 냉간압연을 실시함으로써 기지금속인 Al6061의 강도증가 효과 및 기지와 섬유의 접합성을 향상시켜 복합재료의 강도증가 효과에 대하여 평가하였다. Fig. 3은 핫 프레스 방법에 의해 제조된 후판 복합재를 냉간압연하는 실험 개요도를 나타낸 것으로 압하율을 달리하여 냉간 압연을 실시하였다. 본 연구에서는 냉간압연에 의한 강도증가 효과를 평가하기 위하여 후판 복합재를 각각 10%, 20%로 압하율을 달리하여 압연한 후 시험편을 가공하여 363K에서 인장시험을 실시하였다. 시험편의 섬유 체적함유량은 3.2%, 5.2%, 7%의 3종류를 취하였다. 한편

열처리의 순서는 복합재료의 강도 및 기지와 섬유와의 접합면에 영향을 미치기 때문에 본 연구에서는 핫 프레스 방법에 의해 제조된 시험편을 냉간압연 후 형상기억 열처리를 실시하였다. 형상기억 열처리를 먼저 실시하는 경우는 압연과정에서 발생하는 열에 의해 섬유에 형상기억 효과가 발생하여 섬유는 늘어나지 않으려는 성질이 생기고, 반면에 기지는 늘어나려는 성질이 발생하여 계면분리 현상이 발생하였다. 따라서 압연 전에 형상기억 열처리를 우선 실시하는 경우는 섬유의 형상기억 효과에 의해 기지와 섬유의 계면분리 및 섬유의 지나친 변형에 의해 형상기억 효과가 반감되는 결과를 확인하였다.



(a)



(b)

Fig. 2 SEM micrograph(a) & EPMA analysis(b) of the interface of fiber and matrix in Al6061 SMA composite

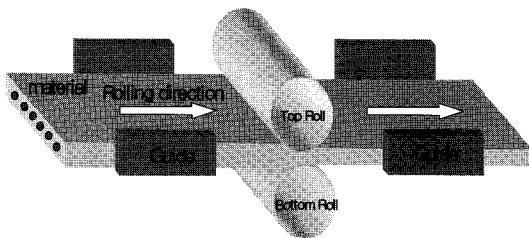
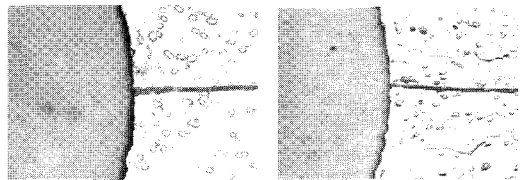


Fig. 3 Schematic diagram of cold rolling machine

따라서 냉간압연을 실시한 후 813K에서 형상기억 열처리를 실시하였으며, 이어서 448K에서 13시간 시효처리를 실시하였다. Fig. 4는 압하율이 따른 기지와 섬유의 접합 상태를 광학현미경으로 관찰한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 압하율이 높을수록 기지와 섬유의 접합상태가 우수함을 확인할 수 있으며, 압하율이 20%인 경우를 압하율 0%와 비교해서 아주 좋은 계면 접합성을 보임을 알 수 있다. Fig. 5에서는 냉간압연한 시험편에 대하여 미시적 손상거동을 평가하기 위한 인장시험편의 규격을 나타낸 것이다.

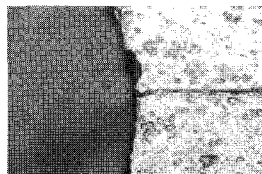
2.3. 실험개요도 및 실험방법

본 연구에서는 TiNi/Al6061 형상기억 복합재료의 미시적 손상거동을 평가하기 위하여 Fig. 6에서 보여주는 실험 개요도를 따라 실험을 실시하였다. 먼저 알루미늄과 TiNi 파이프를 적층하여 핫 프레스에서 833K, 60MPa에서 30분동안 가압한 후 복합재료의 균질화를 위하여



(a) RR=0%

(b) RR=10%



(c) RR=20%

Fig. 4 Bonding condition after cold rolling

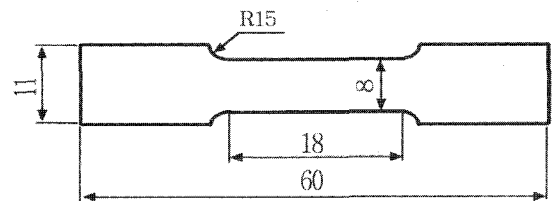


Fig. 5 Dimensions of specimen

793K에서 1시간동안 용체화 처리를 하였다. 용체화 처리가 끝난 시험편에 대하여 압연장치를 이용하여 냉간가압하여 복합재료 내부의 기지재와 강화재의 접합을 강화하였으며 동시에 기지재의 강도를 증가시켰다. 이러한 방법에 의해 제조된 시험편에 대하여 인장하중을 가하였으며 그때 복합재료 내부의 미세적 파손기구 및 손상정도를 평가하기 위하여 전자 현미경 및 음향방출 기법을 이용하였다.

Fig. 7에서는 실험방법에 대한 개요도를 나타낸 것으로 시험편을 인장시험기(SHIMADZU)에 노를 장착하여 시험편의 온도를 363K로 가열한 후 1.0mm/min의 변형속도로 인장시험을 실시하였다. 시험편에 하중이 가해지면 시험편 내에 미소균열이 발생, 성장함에 따라 탄성파가 발생하며 발생한 탄성파는 AE 센서에 의해 감지된 후 프리앰프(Pre amplifier)에 의해 40dB 증폭된다. 이렇게 증폭된 신호는 AE 시스템(MISTRAS 2001)내에서 AE 사상수(event), 진폭(amplitude), 에너지(energy) 등의 AE 파라미터들이 분석되어진다. 그리고 사용된 AE 센서는 233~373K에서 사용가능한 광대역(100~1200kHz) 센서를 사용하였으며 잡음을 제거하기 위한 문턱전압값(threshold level)은 45dB로 정하였다. 또한 시험편 내부의 미세적 손상거동을 평가하기 위하여 전자현미경(SEM)을 이용하여 시험편의 파단면을 관찰하였다.

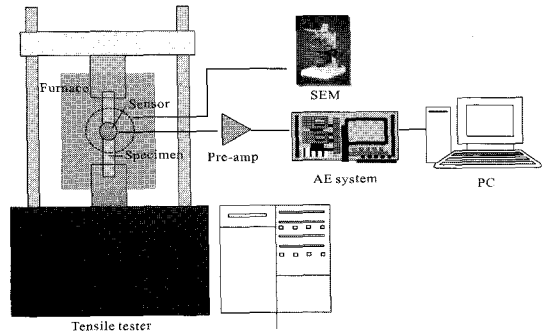


Fig. 7 Schematic diagram of experimental set-up

### 3. 실험결과 및 토의

#### 3.1. 예변형율과 압하율에 따른 강도변화

본 연구에서는 핫프레스 방법에 의해 제조된 TiNi/AL6061 형상기억복합재료에 대하여 압하율에 따른 강도의 변화를 관찰하기 위하여 10, 20%로 압하율을 증가시킴에 따른 인장강도의 변화를 평가하였으며 재료내부의 잔류압축응력의 변화 및 TiNi 합금의 체적율에 따른 재료의 인장강도의 변화를 평가하기 위하여 강화재의 체적율이 3.2%, 5.2%, 7%로 증가함에 따른 강도변화를 측정하였다.

Fig. 8에서는 압하율의 증가에 따른 인장강도의 변화를 나타낸 것으로 냉간압연을 전혀 받지 않은 시험편에 비하여 압하율을 10, 20%로 증가시킴에 따라 형상기억복합재료의 인장강도는 현저히 증가함을 알 수 있다. 또한 압하율이 10%인 시험편과 20%인 시험편에서의 인장강도 변화는 크게 차이를 보이지는 않았지만 압하율 20%인 시험편에서의 인장강도가 약간 높게 나타났다. 그리고 탄성계수(Young's modulus)값도 냉간압연을 받은 시험편이 전혀 냉간압연을 받지 않은 시험편에 비하여 약간 높게 나타났다.

Fig. 9에서는 TiNi 강화재의 체적율에 따른 형상기억복합재료의 강도의 변화를 나타낸 것으로 그림에서 보여주는 바와 같이 TiNi 합금의 체적율이 2%정도 증가함에 따라 인장강도는 6%정도 증가함을 알 수 있었다. 이것은 363K에서 강화재인 TiNi 합금의 인장강도가 기지재인 알루미늄보다 현저히 높기 때문에 복합재료의 인장강도 또한 TiNi 합금의 체적율이 증가할수록 점차적으로 증가함을 알 수 있다. 그리고 체적율을 5.2, 7%로 증가시킨 모

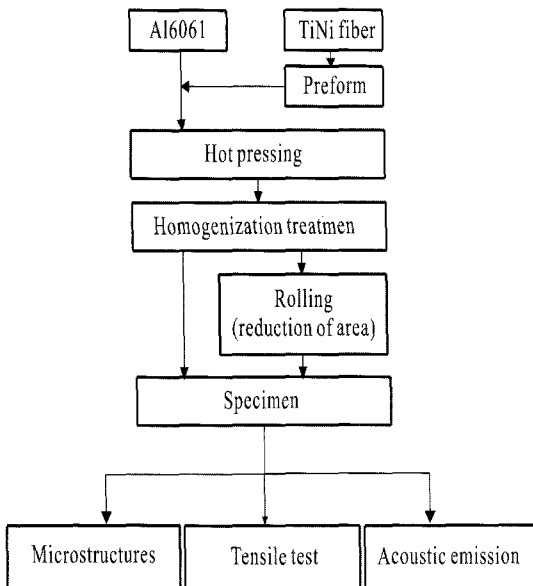


Fig. 6 Schematic diagram of experimental procedures

든 시험편에서 냉간압연을 가한 시험편에서의 인장강도가 냉간압연을 가하지 않은 시험편에 비하여 현저히 증가한 반면 냉간압연을 증가시키에 따라서는 인장강도가 점차적으로 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 10에서는 형상기억복합재료에 대하여 압하율과 예변형율이 인장강도에 미치는 영향에 대한 결과를 나타낸 것으로 먼저 압하율을 10, 20%로 증가한 경우 앞에서 언급한 경우와 마찬가지로 압하율을 가하지 않은 시험편에 비하여 현저히 인장강도가 증가하였다. 그러나 재료내부에 압축응력을 증가시키기 위하여 예변형율을 1, 3, 5%로 증가시킨 경우 예변형율이 증가함에 따라 예변형을 가하지 않은 시험편에 비하여 인장강도가 점차적으로 증가하지만 압하율을 가한 시험편에 비하여 강도의 증가현상은 그렇게 크게 나타나지 않았다. 따라서 복합재료의 인장강도를 증가시키기 위해서는 재료 내부에 압축잔류 응력을 가하기 위하여 예변형을 가하는 방법보다는 핫 프레스 방법으로 제작된 시험편에 대하여 냉간압연을 가하는 방법이 더욱더 효율적이라는 것을 알 수 있었다.

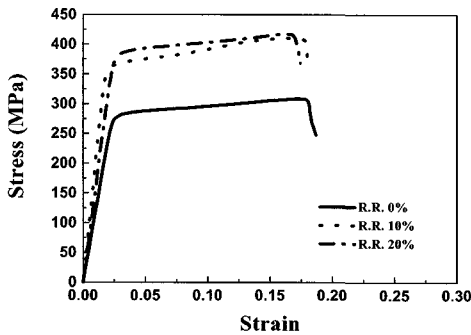


Fig. 8 Stress-strain curves according to RR variation (Vf=5.2%)

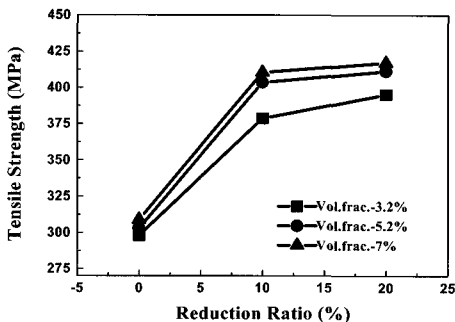


Fig. 9 Stress-strain curves according to volume fraction of TiNi fiber and RR

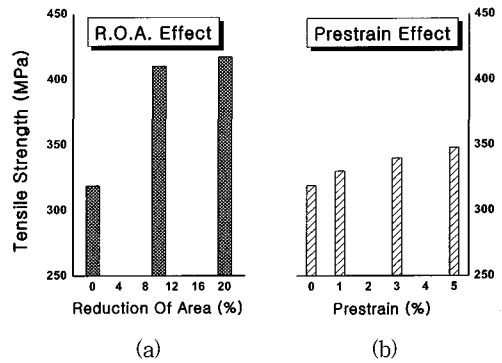


Fig. 10 The relationship between the effect of RR(a) and pre-strain(b) for tensile strength of TiNi/Al6061 SMA composite(Vf=5.2)

### 3.2. 냉간압연을 받은 형상기억복합재료에 대한 AE 신호 특성

본 연구에서는 핫 프레스 방법에 의해 제조된 형상기억복합재료에 대하여 강도를 증가시키기 위하여 냉간압연을 받은 시험편의 미세적 손상을 비파괴적으로 평가하기 위하여 AE 기법을 적용하여 유효한 AE 파라미터를 추출하고자 하였다.

Fig. 11은 압하율을 0, 10, 20%로 증가시킨 시험편에 대하여 인장하중을 가하였을 때 발생하는 AE 신호의 파라미터들 중 AE 사상수 변화를 나타낸 것이다. 그림에서 보여주는 바와 같이 냉간압연을 전혀 받지 않은 압하율이 0%인 시험편인 경우 하중 초기에 소수의 AE신호가 발생하며 하중이 점차적으로 증가함에 따라 AE 신호도 다수 발생함을 알 수 있다. 그리고 파단직전에 AE 신호는 급격히 증가함을 보여주고 있다. 그러나 압하율이 10%인 경우에는 하중 초기에는 AE 신호가 전혀 발생하지 않지만 점차적으로 하중이 증가하여 복합재료의 소성변형이 발생함에 따라 소수의 AE 사상수가 발생하고 있다. 그러나 소성변형이 현저히 증가하여도 AE 신호는 거의 증가하지 않는 경향을 보여주고 있으며 압하율이 20%인 복합재료에서는 하중초기 및 소성변형이 현격히 진행을 하더라도 AE 신호는 거의 발생하지 않았다. 그러나 파단직전에 도달하게 되면 앞의 두 경우의 시험편들과 마찬가지로 다수의 AE 신호가 발생하게 된다. 특히 압하율 0%인 시험편에서 발생한 AE 사상수는 총 357개가 발생하였으며 10%인 경우 231, 20%의 압하율을 받은 시험편에서는 137개가 발생하였다. 이처럼 압하율을 증가시키

에 따라 발생하는 AE 사상수가 감소하는 것은 압하율을 증가시키에 따라 복합재료 내부의 기공 및 기지재와 강화재 사이의 계면손상 등에 의한 불균질이 감소함에 따라 복합재료가 하중을 받았을 때 AE 신호의 발생원을 감소시켰음을 알 수 있다.

그리고 압하율이 증가함에 따라 AE 신호의 발생시점도 점차적으로 감소함을 알 수 있다. 특히 냉간압연을 전혀 받지 않은 시험편인 경우 하중초기에 강화재와 기지재간의 계면손상에 의해 AE 신호가 다수 발생함을 보여주고 있으며 하중이 증가함에 따라 복합재료의 소성변형이 점차적으로 증가함에 따라 AE 신호도 증가하는 경향을 나타내었다. 그리고 복합재료의 파단직전 급격한 소성변형 및 강화재의 파단, 기지재 내의 균열전파 등에 의해 다수의 AE 신호가 발생함을 알 수 있었다. 특히 파단면 관찰에서 압하율을 전혀 받지 않은 시험편에서는 앞에서 언급한 바와 같이 강화재와 기지재의 계면분리 현상 및 기지재간의 적층분리현상 그리고 pull-out 현상이 발생하였다. 이러한 pull-out 현상은 압하율을 10% 받은 시험편에서도 약간 발생하였지만 20%의 압하율을 받은 시험편에서는 이러한 현상은 전혀 발생하지 않았다. 따라서 10%의 압하율을 받은 시험편에서는 Fig. 8의 강도변화에서 냉간압연을 전혀 받지 않은 시험편에 비하여 현저히 인장강도를 증가하였지만 기지재와 강화재의 계면손상 문제 및 재료 내부의 불균질은 여전히 남아 있는 것으로 사료된다. 이러한 재료내부의 불균질 등을 제거하기 위해서는 20%이상으로 압하율을 증가시켜야함을 알 수 있었다.

Fig. 12에서는 압하율이 증가함에 따른 AE 신호의 카운터 변화를 나타낸 것으로 압하율을 전혀 받지않은 시험편 및 10, 20%의 압하율을 받은 시험편에서는 하중이 증가함에 따라 AE 카운터가 단계적으로 증가하며 파단 직전에 급격히 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나 20%의 압하율을 받은 시험편에서 총 발생한 AE 신호는 10%의 압하율을 받은 시험편에 비하여 적게 발생하였지만 AE 카운터는 더 많이 발생하였다. 이러한 이유는 20%의 압하율을 받은 시험편인 경우 압하율이 증가함에 따라 복합재료는 더욱 취성화되며 재료 내부의 불균질로부터 발생하는 AE 신호의 카운터 및 에너지도 현저히 증가하는 것으로 판단된다.

Fig 13에서는 에너지의 변화를 나타낸 것으로 0%, 10%의 압하율을 받은 시험편에서 하중초기 및 중기에 재료내부의 강화재와 기지재의 계면손상 및 소성변형에 의해 발생하는 AE 신호의 에너지는 50이하의 낮은 에너지를

를 나타내지만 강화재의 파단에 의해서는 150이상의 높은 에너지를 나타내었다. 그러나 20%의 압하율을 받은 시험편에서는 파단직전 150이상의 높은 에너지를 나타내는 신호가 다수 발생하고 있다. 이것은 앞에서 언급한 바와 같이 압하율이 증가함에 따라 복합재료의 취성화에 의해 AE 발생원에서 발생하는 탄성파의 에너지가 현저히 증가함을 알 수 있다.

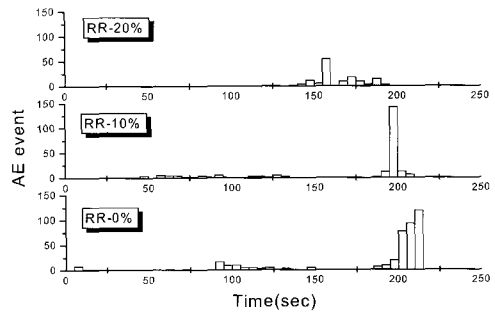


Fig. 11 AE event vs. time according to reduction ratio(RR)

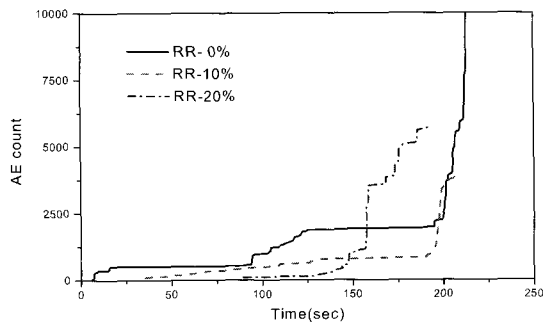


Fig. 12 AE count vs. time according to reduction ratio(RR)

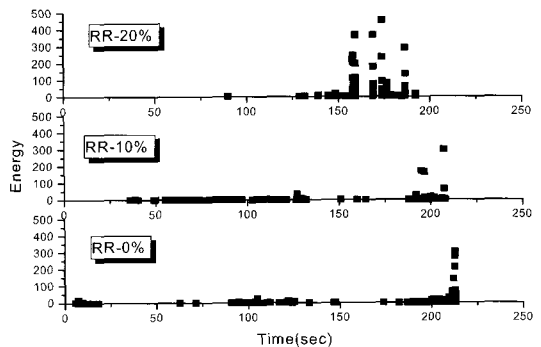


Fig. 13 Energy vs. time according to reduction ratio(RR)

Fig. 14, 15, 16에서는 복합재료의 미시적 손상을 평가하기 위한 파형과 주파수의 특성을 나타낸 것으로 Fig. 14에서는 압하율을 받지 않은 시험편에서 하중 초기 재료 내부의 강화재와 기지재 사이의 계면손상에 의해 발생하는 전형적인 파형을 나타낸 것으로 돌발형 형태의 파형과 530kHz의 주파수 특성을 나타내었으며 Fig. 15에서는 파단직전 강화재의 pull-out 현상이 발생함에 따른 AE 신호로서 연속형 형태의 파형과 200kHz 정도의 낮은 주파수 대역을 나타내었다. 마지막으로 Fig. 16에서는 TiNi 강화재가 파단될 때의 전형적인 파형을 나타낸 것으로 다른 미시적 손상에 비하여 아주 높은 진폭의 신호와 500-600kHz의 주파수 대역을 나타내었다. 따라서 각각의 미시적 손상에 따른 파형과 주파수 특성을 평가함으로써 복합재료의 미시적 손상거동 및 손상정도를 평가할 수 있었다.

#### 4. 결 론

본 연구에서는 TiNi/Al7075형상기억복합재료를 제조하여 미시적 손상을 평가하기 위하여 음향방출기법을 적용한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 예변형률과 압하율을 증가함에 따라 복합재료의 인장강도는 증가하였으며 TiNi 합금의 체적율이 증가함에 따라 인장강도 역시 증가하였다. 특히 복합재료의 인장강도를 증가시키기 위하여 예변형률의 증가보다는 압하율을 증가시키는 것이 더욱 효과적이었다.
2. 압하율이 증가함에 따라 재료내부의 불균질의 감소에 의해 AE 사상수는 감소하였으며 AE 에너지는 증가하는 경향을 보였다. 또한 강화재와 기지재의 계면손상에 의해 발생하는 탄성파는 돌발형형태의 신호로서 530kHz의 주파수 특성을 나타내었으며 pull-out 현상에 의해서는 연속형 형태의 신호와 200kHz의 저주파수대역, TiNi 합금의 파단에 의해서는 높은진폭의 돌발형 형태의 신호와 500-600kHz의 주파수 특성을 나타내었다.

#### 참고문헌

- [1] K. Hamada, J. H. Lee, K. Mizuuchi, M. Taya, K. Inoue, "Thermo-mechanical Behavior of TiNi Shape Memory Alloy Fiber Reinforced 6061 Aluminum

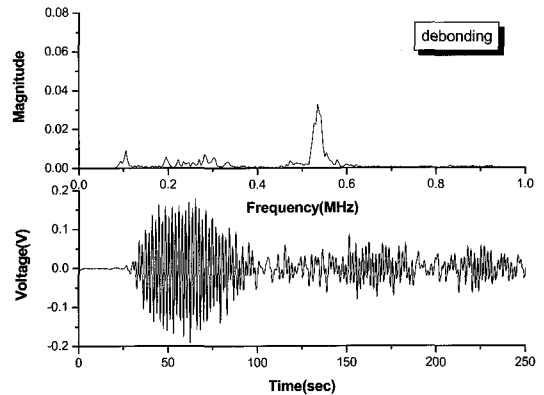


Fig. 14 Typical waveform and spectrum due to debonding at the boundary between TiNi alloy and Al matrix

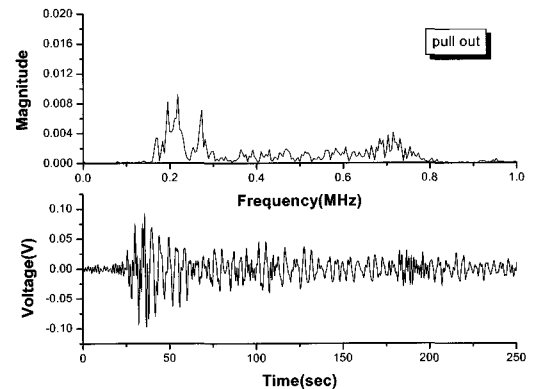


Fig. 15 Typical waveform and spectrum due to pull-out

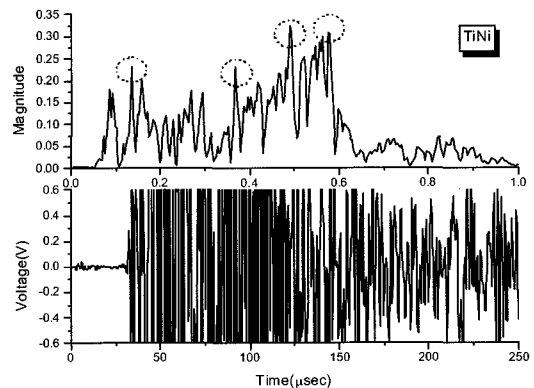


Fig. 16 Typical waveform and spectrum due to TiNi fracture

- Matrix Composite," Metallurgical and Materials Transaction(A), Vol. 29A, pp. 1127-1135, (1998)
- [2] Y. Furuya, "Design and Experimental Verification of Intelligent Materials Using Shape Memory Alloy," Proceeding of the International Symposium on the Microsystems, Intelligent Materials and Pobots, Sendai, Japan, pp. 313-318, (1995)
- [3] N. Kashiwagura, Y. Ohsawa, S. Iwata, J.-Y. Jin, H. Kamioka, "Ultrasonic Behavior of Ti0.49-Ni0.51 Shape Memory Alloy between 0°C and 90°C," Japanese Journal of Applied Physics Part 1-Regular Papers Short Notes & Review Papers, Vol. 39, No. 5B, pp. 2928-2932, (2000)
- [4] Arup K. Maji, Ihsosvany Negret, "Smart Prestressing with Shape-Memory Alloy," J. of Engineering mechanics Vol. 124, No. 10, pp. 1121-1128, (1998)
- [5] Y. C. Park, Y. Furuya, "Thermal Cyclic Deformation and Degradation of Shape Memory Effect in Ti-Ni Alloy," Nondestr. Test. Eval., Vol. 4, No. 8, pp. 541-554, (1992)
- [6] 박영철, 윤두표, 이규창, Y Furuya, "TiNi/Al 형상기억복합재료의 기계적특성 및 강화기구," 대한기계학회 논문집(A), 제21권 제3호, pp. 405-413, (1997)
- [7] 이준현, 이진경, 윤동진, "음향방출을 이용한 콘크리트 부재의 미시적 파괴특성의 온-라인 모니터링", 한국비파괴검사학회지 Vol. 19, No.1, pp.25-33, (1999)
- [8] Fregonese M, Idrissi H, Mazille H, Renaud L, Cetre Y., "Monitoring pitting corrosion of AISI 316L austenitic stainless steel by acoustic emission technique: Choice of representative acoustic parameters," J. of Materials Science, Vol. 36 No. 3, pp. 557-563, (2001)