

형상기억복합재료에 대한 온라인 모니터링 시스템 개발

Development of On-line Monitoring System for Shape Memory Alloy Composite

이진경[†], 박영철*, 이민래**, 이동화***, 이규창****

Jin-Kyung Lee[†], Young-Chul Park*, Min-Rae Lee**, Dong-Hwa Lee*** and Kyu-Chang Lee****

초 록 형상기억복합재료를 제조하기 위하여 핫프레스 방법을 이용하여 최적의 제조조건을 도출하였으며 냉간압연에 의해 지지재와 강화재의 계면접합을 강화하여 강도를 증가시켰다. 이러한 방법에 의해 제조된 형상기억복합재료에 대하여 외부 하중에 의한 손상정도와 균열의 발생을 감지하여 균열 발생 및 진전을 억제하는 온라인 모니터링 시스템을 개발하고자 한다. 이를 위하여 음향방출 신호의 파라미터를 이용하여 손상에 따른 최적의 AE 파라미터를 도출하였으며 가열시스템을 이용하여 형상기억합금을 가열함으로써 형상기억합금의 수축에 의한 복합재료 내부에 균열진전을 억제시키는 시스템을 개발하였다.

주요용어 : 형상기억합금, 핫프레스, 냉간압연, AE 파라미터, 균열억제

Abstract A hot press method was use for the optimal manufacturing condition for a shape memory alloy (SMA) composite. The bonding between the matrix and the reinforcement within the SMA composite by the hot press method was strengthened by cold rolling. In this study, the objective was to develop an on-line monitoring system for the prevention of the crack initiation and propagation by shape memory effect of SMA composite. Shape memory effect was used to prevent the SMA composite from cracking. For the system to be developed, an optimal AE parameter should be determined based on the degree of damage and crack initiation. When the SMA composite was heated by the plate heater attached at the composite, the propagating cracks appeared to be controlled by the compressive force of SMA.

Keywords: shape memory alloy(SMA), hot press, cold rolling, AE parameters, crack suppression

1. 서 론

TiNi 형상기억합금(shape memory alloy, SMA)이 강화된 지적복합재료(smart composite)에 대해서는 많은 연구들이 진행되어 왔다[1-4]. 이와 같은 형상기억복합재료를 이용한 구조물의 제작은 상온(마르

텐사이트 상)에서 인장 예변형을 지적복합재료에 부가하고, 온도를 올리면 강화재인 TiNi 섬유가 오스테나이트 변태를 일으켜 예변형량 만큼 복합재료 내에서 줄어들려는 성질을 이용한 것으로 이러한 성질은 TiNi 섬유의 형상기억효과(shape memory effect, SME) 때문이며, 이러한 형상기억효과에 의

해 기지에는 압축잔류응력(compressive residual stress)이 발생하여 전체적으로 복합재료의 강도가 증가하게 된다. 형상기억효과는 L. C. Chang 와 T. A. Read에 의해서 Au - 47.5 at.%Cd합금에서 최초로 발견되었으며, 1964년 미국 매릴랜드주에 있는 해군무기연구소에서 우연한 기회에 Ti-Ni합금에서도 형상기억 효과가 있음을 알았다. 한편 본 연구에서는 핫프레스 방법에 의해 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 제조하였으며 핫프레스 방법에 의해 제조된 복합재료내의 강화제와 기지재간의 계면접합상태를 더욱 향상시키고 기지재의 조직상태를 더욱 개선시키기 위하여 시험편에 대하여 냉간압연을 실시하여 복합재료를 제조하였다. 이와 같이 핫프레스와 냉간압연에 의해 제조된 형상기억합금은 형상기억효과를 이용하여 가정용 기구, 산업용 기구, 의료용 기구 등에 널리 이용되고 있다. 특히 기존의 항공기 구조물의 재료로 많이 이용되고 있는 알루미늄 재료는 반복적인 항공기의 운항 및 고도의 영향 등으로 인한 열 피로특성을 나타내게 되며 이와 같은 피로하중에 의하여 재료 내부의 균열 발생 및 진전을 가져오게 된다. 본 연구에서는 알루미늄

대신에 형상기억복합재료를 이용하여 항공기 구조물의 강도의 증가는 물론 형상기억효과를 이용하여 형상기억복합재료 내부에 균열이 발생할 경우 이를 실시간으로 감지하여 더 이상의 균열발생 및 진전을 억제하는 시스템을 개발하고자 한다. Fig. 1에서는 전체적인 온라인 모니터링 시스템의 개요도를 나타낸 것으로 먼저 복합재료 내부의 균열의 발생 및 손상정도를 감지하기 위하여 음향방출 시스템 [5,6]을 이용하였으며 손상정도에 따라 발생하는 AE 파라미터들 중 가장 유효한 파라미터를 도출하게 된다. 도출된 최적의 파라미터값 이상이 되면 다음 단계인 형상기억합금을 가열하게 된다. 일정한 온도로 가열된 형상기억합금은 원래의 형태로 돌아갈려고 하는 성질을 가지고 있기 때문에 원상태로 수축하게 된다. 그러면 기지재인 알루미늄과 강화제인 형상기억합금 사이에 수축응력이 발생하게 되며 결과적으로 계면 및 기지재에 발생한 균열의 성장은 멈추게 할 수 있다. 이와 같은 형상기억복합재료에 대한 AE를 이용한 온라인 모니터링 시스템의 개발은 항공기 구조물뿐만 아니라 일반 산업용 구조물 등에서도 많은 응용이 기대된다.

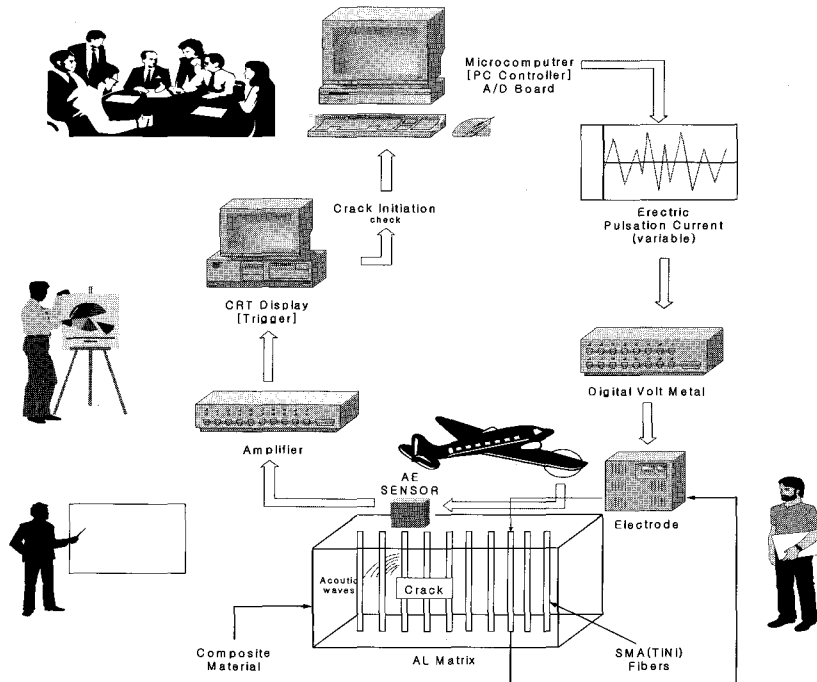


Fig. 1 Schematic diagram of the on-line monitoring system

2. 시험편 제조

2.1. 시험편의 최적제조조건 및 냉간압연

본 연구에서는 Al6061과 500 μm 의 TiNi(Ti-50 at.%)와이어를 사용하여 TiNi/Al6061형상기억합금 시험편을 제조하였다[7]. 복합재료의 최적 제조조건을 결정하기 위하여, 복합재료의 강도에 영향을 미칠 것으로 예상되는 세 가지 요인(온도, 압력, 시간)을 고려하였다. 다양한 조건에서 제조된 복합재료의 미세조직을 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 2에 나타난 바와 같이 온도 및 압력조건에 따라서 섬유와 기지의 접합정도에 차이를 보이고 있으며 Fig. 2(d)의 온도 833K 압력 60MPa로 30분간 유지한 상태에서 최적의 접합상태를 나타낸다. Fig. 2(a)~(c)의 조건에서는 기지와 기지의 접합계면에서 접합라인이 관찰되었으며, 섬유와 기지의 접합계면에서도 완전한 접합이 되지 않은 상태로 존재함을 관찰할 수 있다. 접합계면에 대한 SEM과 EPMA 분석 결과로부터 TiNi/Al6061 형상기억복합재료의 최적 제조조건으로 833K, 60MPa에서 30분간으로

결정하였다. 본 연구에서는 앞에서 언급한 바와 같이 핫 프레스 방법에 의해 제조된 복합재료인 경우 Fig. 2에서 보여주는 바와 같이 계면에서의 화학적인 작용으로 양호한 계면접합이 관찰되었다. 그리고 EPMA 분석결과에서 확산층의 두께가 400 μm 로 관측되었으며 Ti와 Al 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[7]. 냉간압연을 실시한 후 813K 에서 형상기억열처리를 실시하였으며[8], 이어서 448K 에서 13시간 시효처리를 실시하였다. 이와 같은 방법에 의해 제조된 시험편에 대하여 인장하중을 가하였으며 그때 복합재료 내부의 미세적 파손기구 및 손상정도를 평가하기 위하여 전자 현미경 및 음향방출기법의 여러 파라미터를 이용하였다. Fig. 3에서는 완성된 TiNi/Al6061 형상기억복합재료를 나타낸 것이다.

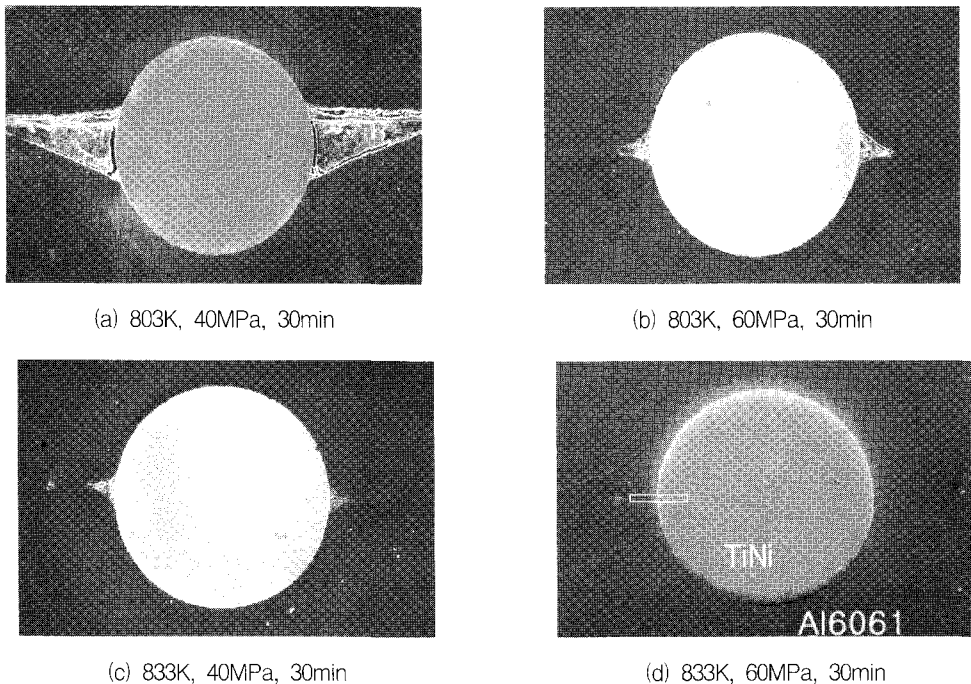


Fig. 2 SEM micrographs of the TiNi/Al6061 composites made by various processing conditions

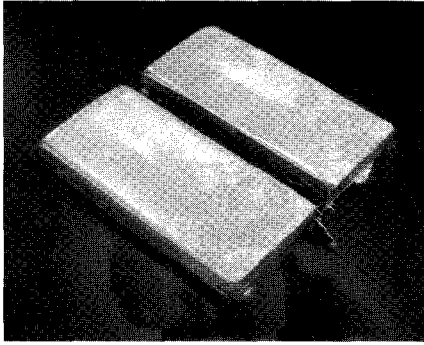


Fig. 3 As-fabricated state of TiNi/Al6061 SMA composite

3. 온라인 모니터링 시스템

3.1. 온라인 모니터링 시스템의 전체 개략도

Fig. 4는 A/D보드(analog/digital board)를 이용한 AE 온-라인 모니터링 시스템의 전체적인 개요도를 나타낸 것이다. Fig. 4에서 보여주는 바와 같이 시스템의 전체 구성은 1) 인장시험시스템 2) AE 측정시스템 3) 온도가열 및 제어시스템으로 구성하였다. 먼저, 인장시험시스템은 최대 2ton의 인장시험기를 제조하여 하중 및 변위를 제어하였으며 AE 측정시스템은 1) 신호입력부, 2) 신호증폭부

및 3) 신호처리부로 구성되어진다. 현재 구현된 AE 신호 입력부는 기존의 상용장비와 같은 감도를 나타내기 위해서 파워 서플라이(power supply)를 통하여 일정전압(18V)이 공급되도록 제작하여 4채널의 신호입력 시스템을 구현하였다. 한편, AE센서를 통하여 측정된 AE신호는 프리앰프를 통하여 40dB로 증폭시켰으며 주변잡음을 제거하기 위하여 100-300kHz의 대역필터를 통하여 필터링 시켰다. 그런 다음 20MHz 샘플링의 고속 A/D보드를 통하여 신호를 취득한 후 AE신호에 대한 파라미터를 분석하였다. 이렇게 분석된 AE 파라미터는 손상정도에 따른 AE 신호의 특성에 따라 일정 레벨이상의 신호가 발생하게 되면 마지막에 있는 온도가열 및 제어 시스템에서 온도가열 시스템이 작동하여 형상기억복합재료를 가열하게 된다. 본 연구에서는 363K로 시험편을 가열하였으며 이렇게 가열된 형상기억복합재료는 형상기억합금의 수축으로 인하여 더 이상의 균열진전을 억제하는 시스템으로 구성되어졌다.

3.2. 온라인 모니터링 시스템의 세부구성

본 연구에 의해 개발된 형상기억복합재료에 대한 온라인 모니터링 시스템은 크게 하드웨어와 소프트웨어 두 부분으로 구성되어진다.

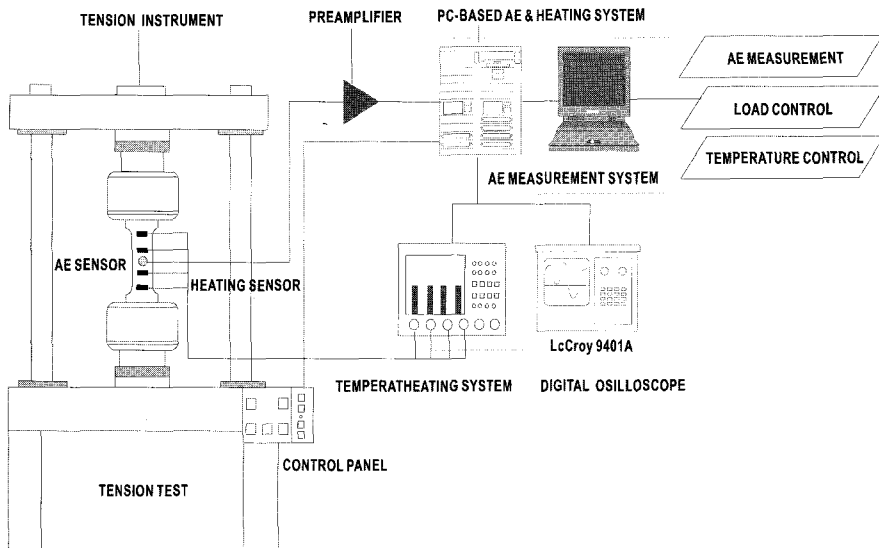
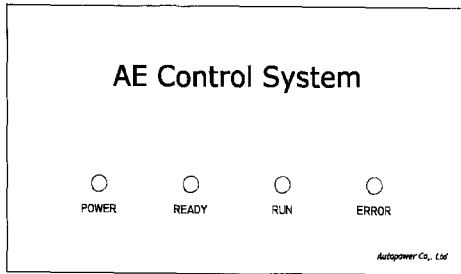


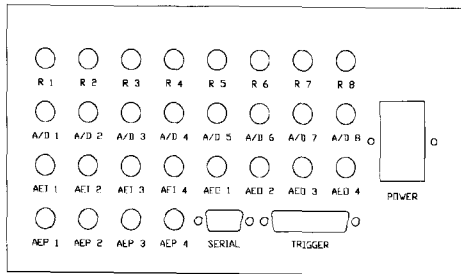
Fig. 4 Experimental set-up of the on-line monitoring system

3.2.1. 하드웨어

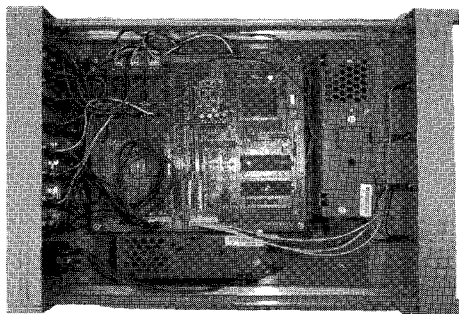
하드웨어의 구성과 각 부분의 제어장치는 Fig. 5에 나타난 바와 같이 전면((a) front panel)과 후면((b) rear panel)으로 구성되어지며 Fig. 5(c)에서는 내부 사진을 나타낸 것이다.



(a) Front panel



(b) Rear panel



(c) Inside view

Fig. 5 The on-line monitoring system controller

전면은 시스템에 전원을 공급하는 전원단자(power indicator), 온라인 모니터링 시스템이 적절한 초기화를 수행한 후 PC와의 통신 준비를 하는 준비단자(ready indicator), 시스템의 온도제어를 수행하는 가동단자(run indicator)로 구성되어진다. 마

지막으로 에러단자(error indicator)는 PC와의 통신상에 문제가 발생하는 것을 감지한다. 그리고 후면에서 R1~R7는 가열기(plate heater)와 인장시험기에 부착된 냉각팬(cooling pan)과 연결되며 A/D 1~A/D4는 써미스트(thermistor)센서와 연결된다. AE1~AE4는 프리앰프의 신호 단자와 연결되어 AE 신호를 입력하며 AEO1~AEO4는 PC에 장착된 A/D 보드의 CH0~CH3 단자와 연결되어 AE 신호를 출력하게된다. 또한 AEP1~AEP4는 프리앰프에 별도로 제공된 전원 케이블과 연결된다.

3.2.2. 소프트웨어

프로그램의 화면 구성은 Table 1에서 보여주는 바와 같이 화면 좌측과 우측부분으로 나뉘어져 있으며 좌측화면에는 상태에 맞는 그래프가 출력되고, 우측화면에는 설정 및 계측결과가 표시된다.

Table 1 Screen formation of program for the on-line monitoring system

	Left screen	Right screen
Configuration	None	Signal & AE Parameters Configuration
Oscilloscope	AE Sensor Graph	Signal & AE Parameters Configuration
Extension	AE Sensor Graph	AE Parameters Display
Heating	Heating Graph	Heating Time & Current Temperatures

Fig. 6은 신호를 설정하기 위한 초기화면을 나타낸 것으로 화면 우측의 제어장치(controller)를 이용하여 신호와 관련된 사항을 설정한다.

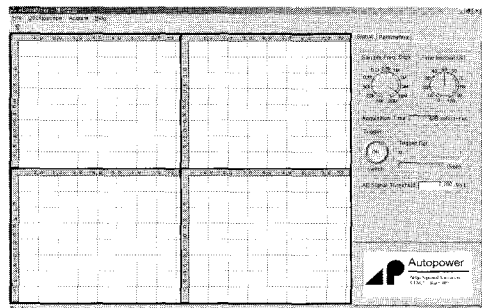


Fig. 6 Signal acquisition parameters configuration

본 실험을 수행하기 위해서는 다음의 파라미터 값들이 설정되어야 한다.

샘플 주파수(sample frequency)에서는 샘플링을 수행하는 주기를 선택하는 부분으로 선택 가능한 범위는 10 kHz에서 20 MHz까지이지만 본 연구에 사용된 AE 센서의 주파수 특성상 샘플링 주파수는 10 MHz 이상으로 조정되었다. 또한 타임 인터벌(time interval)은 한 번의 신호 샘플링으로 최대 8192개의 데이터를 측정할 수 있으며 이 중 분석을 수행할 데이터의 양을 백분율로 입력한다.

데이터 획득 시간(acquisition time)은 앞에서 입력된 샘플 주파수와 타임 인터벌로 정해진다. 트리거(trigger)는 AE 신호에 대한 트리거 전압 레벨(trigger voltage level)을 설정한다. 설정범위는 0~1V사이이며 디폴트(default)값은 0.5V이다. AE signal을 분석할 때 사용되는 문턱전압값을 입력한다. AE 신호 문턱전압값(AE signal threshold)은 신호 획득을 위한 트리거 레벨값과 AE 파라미터 분석 시 사용되는 문턱전압값은 다르게 적용되며 이는 미세 신호에 대한 응답성 향상과 신호 자체의 백색잡음을 제거하기 위함이다.

화면 우측의 탭(Tab)에서 파라미터를 선택하면 Fig. 7과 같은 설정화면이 나타난다.

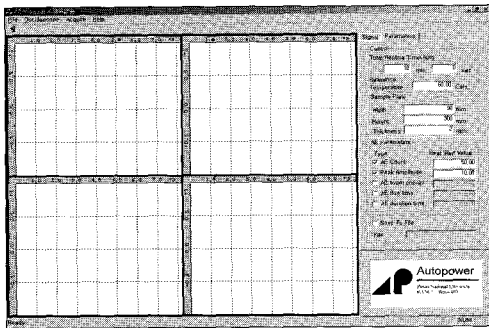


Fig. 7 AE parameters configuration

제어기(controller)는 온도 제어와 관련된 값을 설정하며 전체 가열시간(total heating time)은 가열 시작 후 완료까지의 시간을 입력한다. 그리고 기준온도(reference temperature)는 온도 제어 시 기준이 되는 값으로써 범위는 상온에서 100°C까지이다.

AE 파라미터(AE parameters)는 가열을 시작할 조건을 설정한다. 앞의 체크박스(checkbox)를 선택하면 해당 항목이 선택되며 가열시작 조건을 입력하

는 텍스트(text)창이 입력 가능 상태로 변환다. 선택된 파라미터 중 어느 하나라도 시작 조건을 만족하게 되면 가열을 시작하도록 되어 있다. 마지막으로 파일저장(save to file)부분에서는 획득된 AE 신호를 파일로 저장할 지에 대한 여부를 결정한다.

한편, 본 연구에서는 프로그램의 메뉴에서 Oscilloscope\Start를 선택함으로써 오실로스코프 기능을 이용할 수 있다. 오실로스코프 상태에서는 신호 및 AE 파라미터 배치(AE parameters configuration)가 가능하며 또한 신호 형태(signal configuration)는 즉각적으로 그래프 화면에 결과가 반영됨으로 오실로스코프 상태로 파형을 보며 초기 설정을 수행하면 용이하게 할 수 있다. 그리고 다른 메뉴를 선택하기 전에 반드시 Oscilloscope\Stop을 선택하여 오실로스코프 기능을 중지하여야 한다. 중지하지 않은 상태에서 다른 메뉴를 선택하였을 경우 다른 메뉴가 정상적으로 동작하지 않거나 동작하더라도 시스템에 많은 리소스를 소모하므로 전체적으로 동작 수행 능력이 저하될 수 있다. 오실로스코프 기능은 제어기와 시리얼 통신이 되지 않는 상태에서도 이용 가능하다.

AE 시스템 테스트(AE system test)에서는 제어기에 연결된 인장시험기를 이용하여 인장시험을 수행할 수 있으며 인장 시험 시작은 acquire\manual\extension start를 선택하여 가능하며 인장 시험 중단은 acquire\manual\extension stop 메뉴를 통해서 이루어진다. 데이터 획득 시점은 4개의 채널 중 임의의 채널에서 입력된 전압이 신호설정시 설정한 트리거 레벨보다 높은 시점에서 시작되며 4 채널의 신호가 동시에 입력된다. 실험 중 프로그램의 좌측 화면에는 4개의 채널에 대한 파형이 표시되며 우측 화면에는 4개의 채널에 대한 6가지의 AE 파라미터가 표시된다.

Fig. 8은 하나의 채널을 통하여 음향 방출 신호가 검출된 화면을 나타낸다.

가열테스트(heating test)에서는 연결된 제어기를 이용하여 수동으로 온도제어를 수행할 수 있다. 수동으로 온도제어를 수행할 때에는 acquire\manual\heating start를 선택하며 온도제어를 종료할 때에는 acquire\manual\heating stop을 선택하며 온도 제어는 relay on/off 제어로 이루어진다. 실험 중에는 좌측 화면에는 온도에 대한 1분간의 시간-온도 그래프가 표시되며 우측에는 현재 온도 값이 수치로 표시된다.

Fig. 9는 하나의 가열기(plate heater)와 하나의 써미스터(thermistor)를 이용하여 기준 온도 60도로 제어하는 화면을 보여주고 있다.

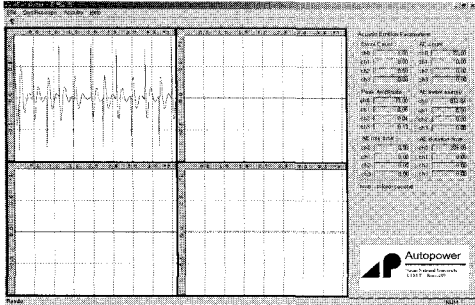


Fig. 8 Screen for an AE signal from one channel

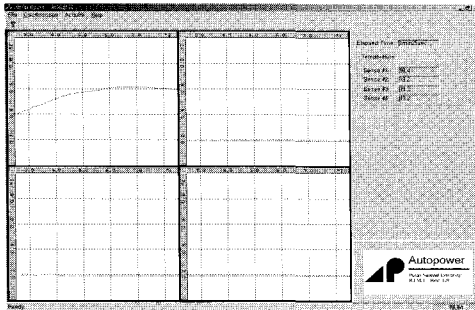


Fig. 9 Screen for the heating control system

4. 결 론

본 연구에서는 기존의 고가의 음향방출 시스템을 이용하지 않고 새로운 A/D 보드를 이용하여 형상 기억 복합재료의 손상에 따른 음향방출 신호를 획득하고 최적의 AE 파라미터를 도출하였으며[7] 다음 단계인 형상기억합금을 가열시켜 더 이상의 균열 발생 및 진전을 억제시키는 온라인 모니터링 시스템을 개발하였다. 한편 기존의 음향방출 시스템 내에 장착된 A/D보드와 본 연구에 이용된 보드의 신호처리 능력의 차이에 의해 신호획득에 어느 정도 한계를 나타내었다. 그러나 신호처리 능력을 향상시키는 보드를 사용하면 기존의 고가의 음향방출 시스템을 이용하지 않고 구조물의 손상을 온라인 모니터링 할 수 있으며 나아가 형상기억 복합재료를 이용하여 더 이상의 균열의 발생 및 진전을 억제시킬 수 있는 온라인 모니터링 시스템을 개발할 수 있다는 가능성을 제시하였다.

참고문헌

- [1] Y. Furuya, "Design and Experimental Verification of Intelligent Materials Using Shape Memory Alloy," Proc. of the International Symp. on the Microsystems, Intelligent Materials and Robots, Sendai, Japan, pp. 313-318, (1995)
- [2] Y. C. Park and 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)
- [3] M. Liu, X. M. Zhang, L. Liu, Y. Y. Li and A. V. Shelyakov, "In Situ TEM Observations of Martensite-Austenite Transformations in a Ni₄₉Ti₃₆Hf₁₅ High Temperature Shape Memory Alloy," J. of Mats. Sci. Letters, Vol. 19, No. 15, pp. 1383-1386, (2000)
- [4] 박영철, 윤두표, 이규창 and Y. Furuya, "TiNi/Al 형상기억복합재료의 기계적특성 및 강화기구," 대한기계학회논문집(A), 제21권 제3호, pp. 405- 413, (1997)
- [5] J. K. Lee, J. H. Lee and S. R. Jeong, "A Study on Microscopic Damage Behavior of Carbon Fiber Sheet Reinforced Concrete using Acoustic Emission Technique," Proc. of the 2-Asia-Australasian Conference on Composite Materials, Vol. II, pp. 781-786, (2000)
- [6] S. T. S. Bukkapatnam, S. R. T. Kumara and A. Lakhtakia, "Analysis of Acoustic Emission Signals from Machining," J. of Manufacturing Sci. & Engr., Vol. 121, No. 4, pp. 568-576, (1999)
- [7] 이진경, 박영철, 이규창, 최일국, 이준현, "형상 기억복합재료의 제조공정 및 신뢰성평가", 비파괴검사학회지, 제21권 제6호, pp. 634-641, (2001)
- [8] 이진경, 박영철, 구후택, "TiNi/Al6061 형상기억 복합재료의 고온에서의 손상거동에 대한 AE 특성", 비파괴검사학회지, 제22권 제1호, pp. 45-52, (2002)