목재 섬유판의 음향방출 위치표정과 재료 특성 평가

노승남*, 박익근+, 서성원+, 김용권++

(논문접수일 2005. 2. 28, 심사완료일 2005. 4. 27)

Acoustic Emission Source Location and Material Characterization Evaluation of Fiberboards

Sing-Nam Ro*, Ik-Keum Park+, Seong-Won Sen+, Yong-Kwon Kim++

Abstract

Acoustic Emission(AE) technique has been applied to not only material characterization evaluation but also on-line monitoring of the structural integrity. The AE source location technique is very important to identify the source, such as crack, leak detection. Since the AE waveforms obtained from sensors are very difficult to distinguish the defect signals, therefore, it is necessary to consider the signal analysis of the transient wave-form. In this study, we have divided the region of interest into a set finite elements, and calculated the arrival time differences between sensors by using the velocities at every degree from 0 to 90. A new technique for the source location of acoustic emission in fiberboard plates has been studied by introducing Wavelet Transform(WT) de-noising technique. WT is a powerful tool for processing transient signals with temporally varying spectra. If the WT de-noising was employed, we could successfully filter out the errors of source location in fiberboard plates by arrival time difference method. The accuracy of source location appeared to be significantly improved.

Key Words : Acoustic Emission(AE), Source location, Material characterization, Wavelet transform, De-noising, Arriving time difference

1. 서 론

일반적으로 재료가 외부로부터 하중을 받아 변형을 일으킬 때나 재료 내부에 전위, 균열 등의 결함이 생성하고 질량의 급격한 변위가 생기면 원자의 재배열이 일어나며 이 때 물체는 급속한 에너지 해방과 함께 탄성파(elastic wave)를

* 서울산업대학교 기계공학과 (singnam@snut.ac.kr)
주소: 139-743 서울시 노원구 공릉2동 172
+ 서울산업대학교 기계공학과
++ 서울산업대학교 에너지·환경대학원

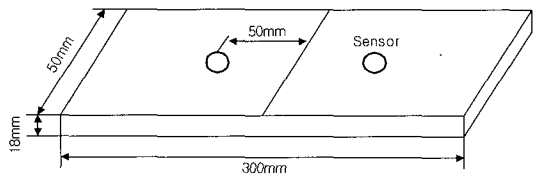


Fig. 7 Specimen and sensor location

방출한다. 이 탄성파 방출을 음향방출(acoustic emission; AE)이라 부르며 이는 재료 내부의 균열발생 및 성장 등의 동적 거동을 상시상태에서 모니터링하고 AE발생원(AE source)의 위치 및 발생원에서 무엇이 일어나고 있는가를 파악할 수 있는 매우 유익한 재료평가 기법의 하나이다[1~3,7].

근년에 세계적으로 환경문제 및 자원문제가 고조되면서 우리나라의 섬유판 제조설비가 급격히 확장되어 왔다. 따라서 섬유판에 의한 목재, 합판 등의 대체수요 확장 및 신수요 개발을 위한 치열한 기술개발 노력을 기울여 가고 있어, 품질의 신뢰성 및 용도의 호환성은 더욱 개선될 것으로 기대된다. 특히 각종 부가가치가 있는 기계요소 부품재료로써의 목재 및 목질재료의 선호도가 증대되고 있으므로 앞으로 섬유판의 수요는 더욱 확장될 것으로 전망된다[4,5].

본 연구에서는 목질 판상 제품인 섬유판(fiberboard)의 함수율, 접착제, 그리고 한국산업규격(KS)에 규정된 물리적 성질의 실험적 검증과 AE 전파거리측정, 음속 및 이방성 측정, 평면위치 표정, 하중과 AE사상총수와의 관계 및 분산성 파동의 시간-주파수해석에 웨이블릿 변환을 통하여 섬유판에 대한 재료 특성 평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증하고자 한다.

Table 1 Sensors used for experiment

Model Related Specifications	WDI
Sensor drive capability (w/RG-58 AU cable)	up to 300ft. (2m)
Dimensions(dia.×ht(mm))	29×30
Weight(gm)	70
Peak sensitivity Ref V/m/s[Ref V/mbar]	87† [-28]*
Operation frequency range(kHz)	100~1000
Resonant frequency(kHz)	125† [500]*

Note: †Denotes response to plane waves
*Denotes response to surface waves

2. 실험장치 및 방법

2.1 실험장치 및 시험편

본 연구에서 사용한 AE 신호분석 장비로는 MISTRAS -2001(PAC)이 사용되었으며 AE 센서(sensor)는 Table 1과 같다. 또한 섬유판이 굽힘하중을 받을 때 AE특성을 평가하기 위하여 미국 United사의 SFM-10E 5톤 만능 재료시험기를 사용하였다.

AE은 센서의 위치에 따라 정확도에 큰 영향이 있기 때문에 센서를 정확한 위치에 고정시키기 위하여 Fig. 1과 같이 지그를 제작 활용하였다. 시편에 수직, 수평선을 작도하고 지그의 수직, 수평면에 작도면을 일치시키면 그 중심에 센서의 중심을 일치시킬 수 있다. 또한 접촉매질(couplant)로 고진공 그리스(grease)를 사용하였고, 돌발형 AE(pseudo-burst AE) 신호원를 발생시키기 위하여 JSNDI-006 샤프심을 사용하였으며, 목재는 감쇠가 심한 재료이기 때문에 미세한 신호를 획득하기 위하여 AE 신호분석 장비에서 전치증폭기(pre-amplifier)로 60dB 증폭하여 수신하였다.

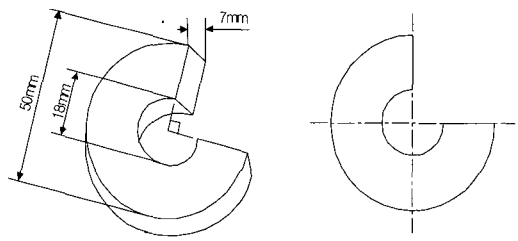


Fig. 1 Jig

Table 2 Chemical composition

Type	Resin	Solid(%)	Resin Contents(%)
P	Tannin 100%	50	20
M	Melanin 100%	60	13
U	Urea 100%	52	13

Table 3 Material properties

Type	Density (g/cm^3)	Moisture contents (%)	Bending strength (N/mm^2)	Modulus of elasticity (kg/mm^2)
P	0.99	9	63.1	425.7
M	0.92	8	52.6	414.5
U	0.60	6	25.1	189.1

재료 특성평가를 위한 실험에 사용된 섬유판은 P형, M형, U형 등 3가지를 사용하였으며, 각각의 화학적 특성과 재료 특성은 Table 2, Table 3과 같다. 목재의 변수 중 함수율(moisture content)은 중요한 비중을 차지하고 있으며, 함수율에 따라 AE 카운트수(count)는 현저하게 차이가 나지만 본 연구에서 사용된 시편들은 모두 함수율 10%미만인 시험편을 사용하여 함수율의 영향에 의한 카운트수의 변화를 최대한 제거하였다.

2.2 실험방법

AE 전파거리를 측정하기 위하여 각 형별로 Fig. 2와 같은 시험편을 사용하였다. 또한 전파거리를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같이 하나의 센서를 시험편에 부착하고 20mm간격으로 샤프심을 파단 시켰을 때, 발생하는 돌발형 AE의 카운트수 및 에너지 파라미터의 변화를 목재의 각 형별로 살펴보았다. 이때 샤프펨의 끝 부분에 45°플라스틱 지그를 사용하여 샤프심이 일정한 각도에서 파단될 수 있도록 하였다.

재료의 음속 및 방향성을 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 2개의 센서를 100mm간격으로 시험편에 부착하고 좌측 하단

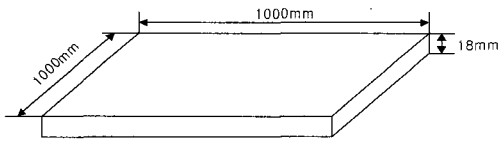


Fig. 2 Specimens

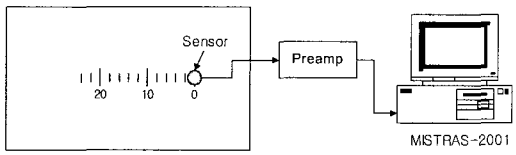


Fig. 3 The system for measurements of AE propagation distance

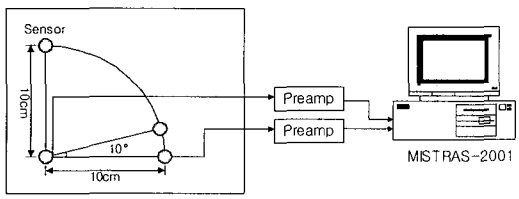


Fig. 4 The system for velocity and anisotropy measurements

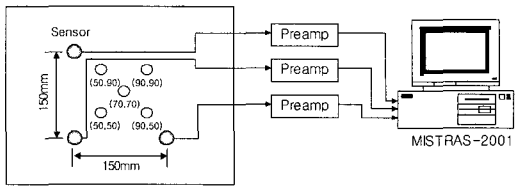


Fig. 5 Arrangement of sensors and specimen

의 기준으로 사용되는 센서에서 다른 센서와 수직이 되도록하여 기준센서의 바로 옆에서 샤프심을 파단시켜 돌발형 AE신호를 발생시켰으며, 10°간격으로 90°까지 센서를 회전을 시키면서 음속을 측정하였다. 또한 신호의 오차를 줄이기 위하여 웨이블릿 디노이징(wavelet de-noising) 기법을 적용하였다.

평면 위치표정의 유용성을 알아보기 위하여 Fig. 5와 같이 3개의 센서를 90°의 각도로 배열하고 각 센서간의 거리를 150mm로 하여 좌측 하단의 센서를 기준으로, mm를 기준단위로 하여 2차원 좌표계를 생성하여 기준으로부터 Table 4와 같이 5개의 위치에서 돌발형 AE 신호를 발생시키고 평면 위치표정 기술을 이용하여 데이터를 분석하였다.

목재는 인장 응력보다 굽힘응력을 받는 환경에서 많이 사용된다. Fig. 6은 굽힘하중과 AE 카운트수의 관계를 알아보기 위한 실험장치의 개요도를 나타내고 있다. AE 센서는 굽

Table 4 The exact coordinates of AE sources

X(mm)	Y(mm)
50	50
50	90
70	70
90	50
90	90

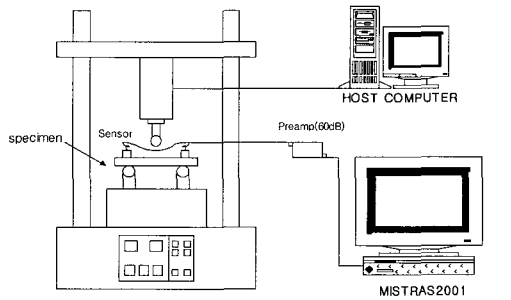


Fig. 6 A schematic diagram of experimental setup for bending test

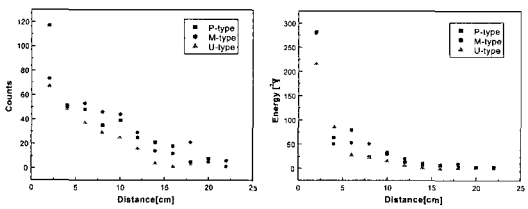
힘 하중을 받는 중앙부에서 양쪽으로 50mm 이격된 부분에 설치하였으며, Fig 7에서 시편의 형상 및 센서의 위치를 잘 나타내고 있다. 또한 만능재료시험기와 AE 신호분석 장비는 서로 독립된 장비로서 데이터를 공유할 수 있는 방법은 시간의 파라미터를 이용하는 방법이 있으며 이를 위해 만능시험기를 200kgf/min으로 하중제어를 하였다. 이 때 센서의 고정은 셀로판 테이프를 사용하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 AE 전파거리 측정

AE신호해석에서 감쇠가 심한 재료의 경우 AE신호의 전파거리는 매우 중요한 변수이다. Fig. 8(a)은 각각 다른 종류의 시험편에서 AE원(source)과 센서의 거리에 따른 카운트수를, Fig. 8(b)는 센서의 거리에 따른 에너지를 측정함으로서 신호의 전파 가능한 거리를 나타내고 있다. P형, M형 및 U형의 순서로 밀도와 강도가 높은 시험편이며, 이에 따라 밀도와 강도가 높은 시험편에서 상대적으로 많은 카운트수 및 에너지를 측정할 수 있었으며 또한 신호의 전파거리가 긴 것을 알 수 있다. P형 과 M형의 경우 220mm까지 신호가 측정되었으며 U형의 경우 에는 180mm까지 신호가 측정되었다. P형과 M형의 음속은 큰 차이가 나지 않으나 U형 섬유판의 경우 음속이 상대적으로 느리기 때문에 신호의 전달거리가 짧다.

목재 경우 조직의 결정입자가 크기 때문에 감쇠가 심하며 특히 목재 섬유판의 경우에는 제품의 제작환경 및 방법에 따라서 큰 차이를 보인다. 목재 섬유판에 AE를 적용시키는 경우 가장 큰 문제는 밀도의 불균일성과 심한 감쇠라고 사료된다. Fig. 9(a)는 P형 목재 섬유판에서 각각 60mm, 100mm, 140mm, 180mm, 200mm거리에서 획득한 RF 신호이며, M형 과 U형 또는 P형과 비슷한 RF 신호를 획득할 수 있었다. 200mm거리에서는 거의 신호를 구별할 수 없어 Fig. 9(b)에서 신호가 미약하게 측정되는 원거리에서 측정된 신호의 Y축 스케일을 조정하여 신호를 분석한 결과로 잡음을 제거하여 AE신호의 특성을 파악할 수 있는 문턱값(threshold)을 Table 5와 같이 선택하였다.



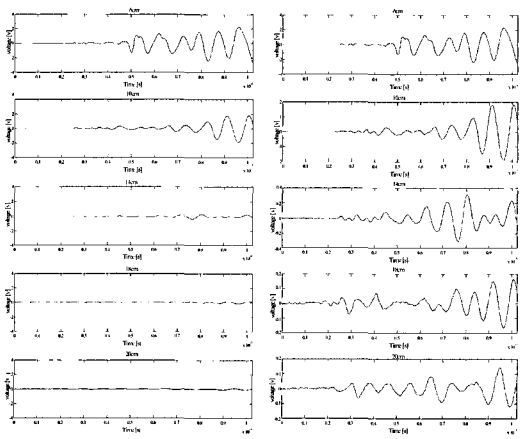
(a) (b)

Fig. 8 Variation of (a)AE counts and (b)AE energy with distance

3.2 목재 섬유판의 AE 특성 평가

Fig 9(b)는 전통적인 방법으로 재료의 음속을 측정하는 것 보다 웨이블릿 디노이징 기법을 적용했을 때 각 각도별 측정 속도가 보다 일정하게 유지되어 실제로 평면 위치표정 시 오차를 줄여 줄 수 있음을 나타내고 있다.

Fig 10과 같이 2개의 센서에서 신호를 획득한 후 Table 5와 같은 문턱값을 이용하여 두 신호의 시간차를 측정하여 속도를 구하였다. 또한 Fig. 10(c)은 Fig. 10(a)의 신호를 웨이블릿 디노이징 처리를 하였다. 디노이징 된 신호는 신호의 앞부분의 고주파 성분이 제거됨으로 인하여 음속을 더 정밀하게 측정되었으며 이는 감쇠가 비교적 적은 저주파 성분만 남았다고 볼 수 있다. Table 6은 탄성계수와 밀도의 상관관계를 이용하여 계산된 음속, 측정값, 디노이징 기법을 이용하여 측정된 음속의 결과이다.



(a) (b)

Fig. 9 (a) RF signal of P-type board
(b) Scaled RF signal of P-type board

Table 5 Threshold levels

Types	Threshold(V)
P	0.1
M	0.1
U	0.04

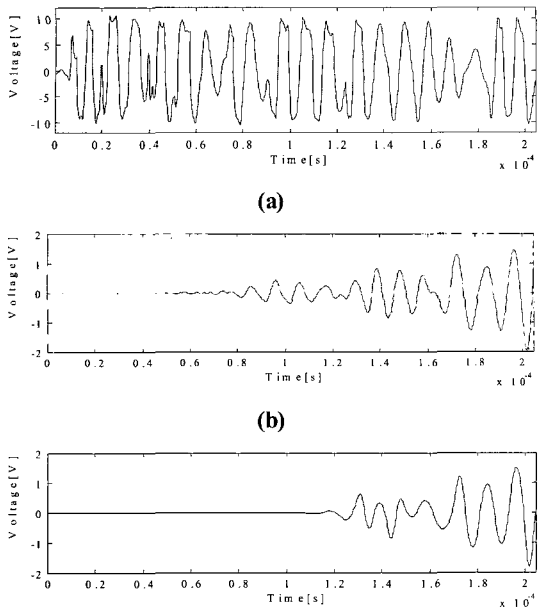


Fig. 10 (a) Original signal (b) arrival time measurement (c) effect of the wavelet transform de-noising on the arrival time measurement

Table 6 Comparison of velocity with various methods

Type	Theoretical(m/s)	Measured(m/s)	De-noised(m/s)
P	2054	2102	1902
M	2080	2146	1971
U	1751	1544	777

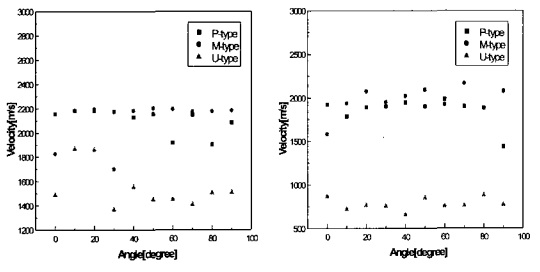


Fig. 11 Comparison of velocity between conventional threshold method with wavelet de-noising

Fig. 11은 전통적인 방법으로 재료의 음속을 측정하는 것보다 웨이블릿 디노이징 기법을 적용했을 때 각도별 측정 속도가 보다 일정하게 유지되어 실제로 평면위치 표정 시 오차를 줄여줄 수 있다는 것을 보여준다.

Fig. 12은 원거리(100mm)에서 측정한 RF 신호를 각 목재별로 웨이블릿 변환하여 비교한 것이다. 각 목재에서의 등치선도(contour plot)을 살펴보면 U형 섬유판에서 신호의 발생시각이 P형과 M형보다 늦게 발생됨을 볼 수 있으며, 이는 이론적인 섬유판의 음속과 실험으로 측정된 결과와 같이 U형의 속도가 P형, M형보다 느리다는 것을 알 수 있다. 시간-주파수 변환 그래프에서도 시간상에서의 같은 결과를 보여주고 있다. 또한 각 목재별 시간-주파수 변환의 진폭을 살펴보면 P형과 M형 섬유판 보다 U형 섬유판의 진폭이 현저하게 낮은 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 AE신호의 음속과 굽힘시험을 웨이블릿 변환과 비교함으로써 시간-주파수 해석이 목재의 결합력을 평가할 수 있음을 확인 할 수 있었다.

3.3 평면 위치표정

섬유판에서 통상적인 문턱값 통과 방법과 디노이징 방법을 이용하여 각 형별로 위치표정을 실시하였으며 각 문턱값은 Table 5와 같다. 각 형별로 위치 표정의 결과는 Fig. 12에서 전통적인 문턱값 통과 방법과 웨이블릿 디노이징 방법과 비교되어 있다. 그림에서 보면, 의사 발생원이 모든 센서로부터 같은 거리에 있는 중앙에서는 비교적 정확한 값을 얻고 있는데, 이는 각각의 센서에 측정되는 파형이 거의 비슷하여 문턱값으로 부터 얻어지는 시간차가 거의 나지 않아서 이다. 의사 발생원이 임의의 센서에 가깝거나 멀어질 때 통상적인 방법에 의한 위치 표정의 결과는 매우 좋지 않았다. 하지만

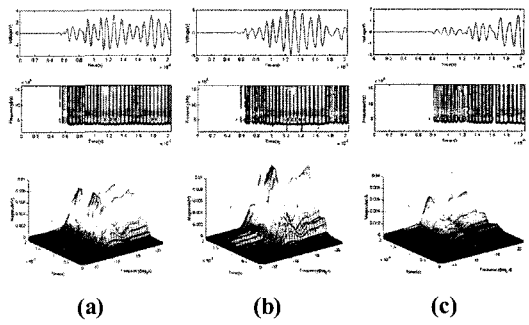


Fig. 11 Measured signal, contour plot and 3-D plot of the wavelet transform (a) P-type, (b) M-type and (c) U-type

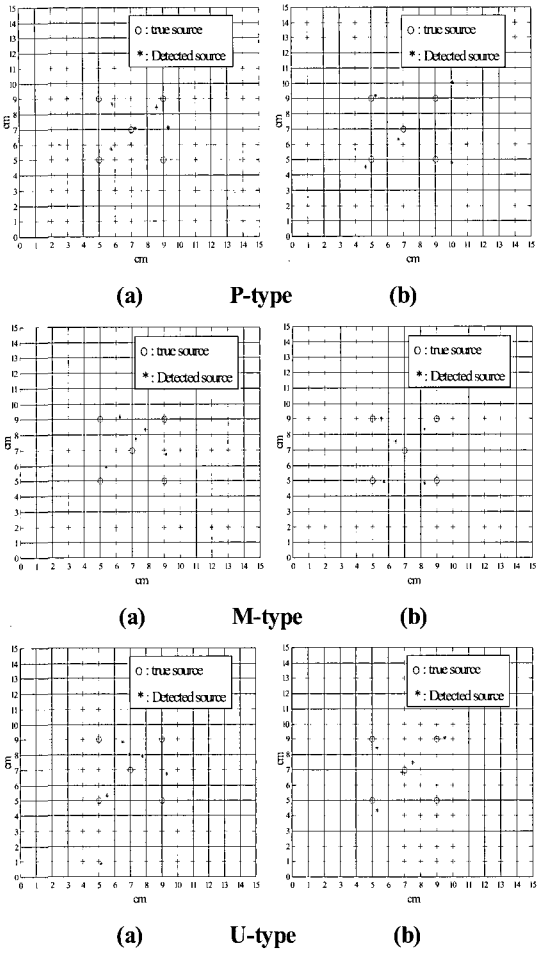


Fig. 12 Comparison of fiberboard source location with different method, (a) conventional, (b) wavelet de-noising method

각 센서에 도달하는 파형에서 고주파 성분을 제거해 줌으로써, 위치 표정의 오차가 더욱 줄어드는 것을 Table 7에서 보여준다. 특히 U형 섬유판의 경우 감쇠가 심하여 비교적 원거리의 센서에서 측정된 신호에서 감쇠에 민감한 고주파성분과 감쇠에 영향을 비교적 적게 받는 신호에서 구분이 확실히 되며, 웨이블릿 디노이징 기법을 적용하였을 경우 그 효과가 다른 유형의 섬유판보다 뚜렷함을 알 수 있다.

3.4 하중과 누적AE이벤트수와의 관계

Fig. 13과 같이 휨 강도 실험을 통하여 하중과 누적AE이벤트수와의 관계를 알아보았다. 굽힘 응력이 작은 U형 섬유판부터 M형, P형의 순서로 최초 AE 이벤트가 발생하였으며, 재료의 기계적 성질이 비슷한 P형과 M형의 경우 누적 AE이벤트수가 급격히 증가하는 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 밀도가 작은 U형 섬유판의 경우 처음에 AE 이벤트수가 서서히 증가하다가 일정한 순간부터 급격해지는 경향을 나타내고 있다. 이는 섬유판에 사용된 접착제의 종류에 따른 차이라고 사료된다. Table 8의 최대 하중과 최초 AE 발생 하중과의 비를 이용하여 휨강도 예측이나 보증이 가능할 것으로 사료된다.

Table 7 Comparison of location errors between conventional threshold method with wavelet de-noising method

Type	Error(cm)	
	Measured	De-noised
P	1.01	0.76
M	1.00	0.82
U	1.32	1.01

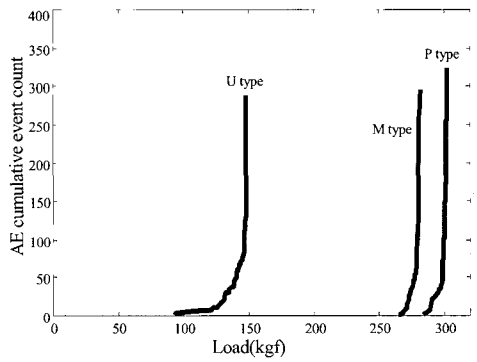


Fig. 13 Relationship of load with cumulative AE event count

Table 8 Relationship of load with cumulative AE event count

Type	P	M	U
First AE event load(kgf)	284	264	93
Maximum load(kgf)	302	282	148
Ratio of maximum load with first AE event load(%)	94	93	62

4. 결 론

목질 판상 제품인 섬유판(fiberboards)의 재료 특성 평가의 유용성 유무를 실험적으로 검증한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 목재 섬유판의 경우 밀도와 강도가 높은 시험편에서 상대적으로 많은 AE 카운트와 에너지를 측정할 수 있었으며, P형과 M형의 경우 220mm까지 측정되었으며, U형의 경우에는 180mm까지 신호가 측정 되어 대체로 감쇠가 심하여 AE신호의 유효전파거리가 짧음을 알 수 있었다.
(2) 목재 섬유판의 음속 및 이방성 측정에서 전통적인 방법으로 재료의 음속을 측정하는 것보다 웨이블릿 변환을 이용한 분산성 파동의 시간-주파수해석이 효과적인 도구임을 확인할 수 있었다.
(3) AE 위치표정에서 문턱값 통과 방법을 사용할 때 야기되는 도달시간차 측정상의 오차문제를 웨이블릿 변환에 의한 디노이징을 통해 팽창파 성분을 제거할 수 있었다. 따라서 각도별 측정 속도가 보다 일정하게 유지되어 음속 측정 및 평면위치표정 측정의 오차를 줄일 수 있었다.
(4) 하중과 누적AE이벤트수와의 관계에서는 최대 하중과 최초 AE발생 하중과의 비로부터 휨강도의 예측이나 보증이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

(1) Gorman, M. R., and Prosser, W. H., 1990, "AE Source Orientation by Plate Wave Analysis," *J. of Acoustic Emission*, Vol. 9, No. 4, pp. 283~288.
(2) Anthony, R. W., 1993, "Application of Acoustic-Ultrasonics to Finger-jointed Lumber," The American Society for Nondestructive Testing, Inc., *Second International Conference on Acousto-Ultrasonics*, pp. 191~200.
(3) Gorman, M. R., 1991, "Plate Wave Acoustic Emission," *J. of Acoustical Society of America*, Vol. 90, No. 1, pp. 358~364.
(4) Inoue, H., 1996, "Experimental Wavelet Analysis of Flexural Waves in Beams," *Experimental Mechanics*, Vol. 36, No. 3, pp. 212~217.
(5) Misiti, M., 1997, *Wavelet Toolbox User's Guide, For use With MATLAB*, The Math Works.
(6) Kishomoto, K., 1995, "Time-Frequency Analysis of Dispersive Waves by Means of Wavelet Transform," *Transaction of the ASME, Journal of Applied Mechanics*, Vol. 62, No. 4, pp. 841~846.
(7) Rhee, Z. K., Park, S. O. and Woo, C. K., 2004, "AE Source Location in Planar Defects using Spot Excitation," Transactions of the Korean Society of Machine Tool Engineers, Vol. 13, No. 5, pp. 87~95.