

## 주성분 분석을 이용한 목재 건조 중 발생하는 음향방출 신호의 해석 및 분류

### Analysis and Classification of Acoustic Emission Signals During Wood Drying Using the Principal Component Analysis

강호양\*, 김기복\*\*†

Ho-Yang Kang\* and Ki-Bok Kim†

초 록 본 연구는 목재(참나무 판목 판재) 건조 중 발생하는 음향방출 신호에 대하여 목재 내 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호를 해석하고 분류하기 위하여 수행되었다. AE 신호의 특징값들에 대한 상관분석을 실시하여 상호의존성이 높은 변수를 제거한 후 주성분 분석을 실시하였다. AE 변수들을 독립변수로 한 분류기와 주성분들을 독립변수로 한 분류기에 대하여 분류성능을 비교하였다. 목재 건조 시 발생하는 표면할열과 수분이동에 따른 AE 신호 파형을 분석한 결과 대체적으로 표면할열에 의한 신호가 최대진폭이 크며 상승시간이 짧고 상대적으로 고주파의 신호인 것으로 분석되었다. 다중 회귀분석모델을 이용하여 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호를 분류할 수 있는 분류기를 개발하고 평가한 결과 개별 AE 변수들을 독립변수로 하는 분류기 보다 주성분들을 독립변수로 하는 분류기의 분류성능이 양호한 것으로 나타났다.

**주요용어:** 음향방출, 목재건조, 수분이동, 표면할열, 주성분 분석, 분류기

**Abstract** In this study, acoustic emission (AE) signals due to surface cracking and moisture movement in the flat-sawn boards of oak (*Quercus Variabilis*) during drying under the ambient conditions were analyzed and classified using the principal component analysis. The AE signals corresponding to surface cracking showed higher in peak amplitude and peak frequency, and shorter in rise time than those corresponding to moisture movement. To reduce the multicollinearity among AE features and to extract the significant AE parameters, correlation analysis was performed. Over 99 % of the variance of AE parameters could be accounted for by the first to the fourth principal components. The classification feasibility and success rate were investigated in terms of two statistical classifiers having six independent variables (AE parameters) and six principal components. As a result, the statistical classifier having AE parameters showed the success rate of 70.0 %. The statistical classifier having principal components showed the success rate of 87.5 % which was considerably than that of the statistical classifier having AE parameters.

**Keywords:** acoustic emission, wood drying, moisture movement, surface cracking, principal component, classifier

### 1. 서 론

삼림에서 벌채된 목재는 대부분 건조공정을 거쳐 산업용 재료가 되므로 건조정도에 따라 목질 재료의 품질이 결정된다. 목재에 포함된 과도한 수분을 제거하여 운송비용을 줄일 수 있으며 목재를 적절하게 건조하게 되면 목재 사용 중에 발생할 수 있는 수축 및 팽윤을 제한할 수 있을 뿐만 아니라 건조과정을 통해 비틀림, 갈라짐, 할열 등과 같은 결함의 발생을 크게 줄일 수 있다. 또한 건조된 목재는 생재에 비해 기계가공이 보다 용이하기 때문에 정확한 치수로 재단이 가능하며, 각각의 부품으로 재단한 부재를 못이나 나사못, 볼트, 접착제 등을 사용하여 견고하게 짜 맞출 수 있다. 그리고 도장성능이 향상되어 기능성을 증진시킬 수 있으며, 건조 후의 방부처리를 통해 장기간의 사용이 가능하다.

목재 건조 시 급속한 열원에 노출되게 되면 목재 표면과 내부의 급격한 온도차에 따라 목재 표면에서의 인장응력과 내부의 압축응력이 발생하게 되며 이에 따라 음향방출(AE)이 발생하게 된다. 이러한 목재 건조 중에 발생하는 음향방출 특성들을 이용하여 목재 건조 과정을 제어하기 위한 연구가 여러 연구자들에 의해 수행되어왔다[1-7]. 목재 건조 과정 중에 발생하는 음향방출 신호들은 목재 밀도, 섬유 길이, 수분함량, 온도 등에 따라 AE 발생빈도, 크기와 주파수 등에 영향을 받게 된다[8,9]. 목재 건조 중에 순간적으로 발생하는 표면의 스트레인이 목재의 탄성한계에 다다르게 되면 AE 활동이 증가하며[8] 최초의 작은 균열이 관찰된 후 곧바로 누적 AE 에너지가 급속도로 증가한다고 보고되고 있다 [5]. 방사상 평면 방향으로 목재 방사방향(wood ray)의 세포와 축 방향 tracheids 사이에는 결합력이 상대적으로 약하기 때문에 건조된 목재와 젖은 목재 모두에서 상당히 많은 AE 활동이 관찰된다 [10,11].

AE를 이용하여 목재 건조과정을 제어하기 위해서는 건조과정 중에 발생하는 AE 신호원을 구분하고 분류해야 한다. 현재까지, AE 발생 원은 목재 재료 내 결정 상(相)의 미끄러짐, 세포벽 내에서의 미소균열, 박리 과정 등으로 보고되고 있다 [12-14]. 목재 건조 중에 발생하는 다양한 AE 신호를 분석하기 위한 연구가 일부 연구자들에 의해 수행되고 있으며 Lee 등[15]은 군집분석과 정준

판별 분석방법을 이용하여 목재 인장시험 시 발생하는 AE 신호를 분류하기 위한 연구를 수행하였다. 그러나 현재까지 목재 건조 시 발생하는 AE 신호에 대한 분석이나 분류에 관한 연구는 거의 많지 않은 실정이다.

본 연구는 최근 AE 신호처리 기법에 많이 사용되고 있는 주성분분석 기법[16-18]을 이용하여 목재 건조 시 발생하는 AE 신호를 분석하고 분류하기 위하여 수행되었다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1. 공시재료 및 AE 실험장치

공시재료로는 건조 중 할열이 쉽게 발생하는 참나무 판목 판재를 선택하였다. 먼저 자연상태로 건조되어 함수율이 충분히 낮고 결함이 없는 판재에 수분을 흡습시켜 함수율이 60~70 %인 시편을 만들었다. 시편 크기는 18×18 cm<sup>2</sup>, 두께는 3 cm로 하였으며 시편의 건조 중 발생하는 음향방출 신호를 획득하기 위하여 Fig. 1에서 보는바와 같은 실험장치를 구성하였다. 판재 표면의 중심선을 따라 4개 지점에 100~900 kHz의 광대역 AE 센서(SE900, DECI 사)를 각각 부착하였으며 센서가 부착된 판재를 건조실 내부에 위치시킨 후 프리앰프(20 dB, Vallen System)와 센서를 연결하였다. AE 신호는 상용 AE 장비(Vallen ANSY4)와 디지털 오실로스코프(PM3384B)를 사용하여 측정하였다. 이때, AE 장비에서 내장 앰프는 34 dB, 문턱값은 50.1 dB로 설정하였다. 측정된 AE 신호로부터 얻을 수 있는 AE 파라미터들은 Table 1에서 보는바와 같다.

Table 1 AE parameters extracted from AE signals

AE parameter	Meaning
PA	peak amplitude (dB)
RC	ring-down count
ED	event duration (μs)
FR	frequency (RC/ED)
EN	energy (dB)
RT	rise time (μs)
AR	peak amplitude/rise time (dB/μs)

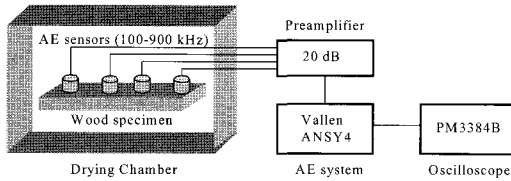


Fig. 1 AE measurement system during wood drying

## 2.2. AE 측정 및 신호분석 방법

목재 건조실험은 목재 건조에 따른 수분이동에 의한 AE 신호와 표면할열에 의한 AE를 얻기 위하여 2가지 건조과정을 수행하였다. 목재 건조온도는 상온조건에서 수행하였는데 충분히 흡습된 시편을 상온에 장시간 방치하여 뭉으로써 목재 시편과 주위환경이 평형을 유지하게 됨으로써 건조가 이루어지게 하였다. 이것은 목재 건조를 위하여 인위적으로 열풍을 가할 때 발생할 수 있는 열응력에 의한 AE의 발생을 방지하기 위함이었다. 따라서 상온조건에서 시편을 장시간 방치하면서 수시로 표면 상태를 조사하면서 AE 신호를 획득하였다. 상온 건조 시작 후 약 21.8 시간 동안 표면에 균열이 발생하지 않은 것으로 관찰되었기 때문에 이 시간까지 획득한 AE 신호를 목재 내 수분이동에 의한 신호로 하였다. 한편 시편 표면에 균열이 발생하기 시작한 시점은 목재 내 수분이동이 끝나는 시간(21.8 시간)이며 이후 약 26 시간까지 표면할열에 의한 AE 신호를 측정하였다.

목재 건조 중 수분이동에 의한 1000개의 AE data set와 표면할열에 의해 발생하는 1000개의 AE data set를 얻은 다음 수분이동에 의한 500개의 data set와 표면할열에 의한 500개의 data set를 이용하여 AE 신호를 분류하기 위한 해석 및 분류 모델을 개발한 다음 나머지 1000개의 data set를 이용하여 분석결과를 검증하였다. 상용 AE 장비에서 측정된 AE 신호로부터 Table 1에서 보는 바와 같은 7개의 AE 변수들을 이용하였으며 AE 신호분류를 위한 통계분석을 실시하였다.

목재 건조 시 발생하는 AE 신호를 분류하기 위한 통계분석에서는 경험에 의해서 선정한 분류변수를 이용하여 다중 회귀분석을 실시하였다. 이를 위하여 먼저 Table 1에서 나타난 특징변수들의 다중 공선성을 검토하기 위하여 각 변수들간의 상관관계 해석을 수행하여 두 변수간의 상호의존성이 높은

변수를 분석에서 제외하였다. 그 다음 각각의 변수들을 이용하여 특징값-특징값 선도를 작성한 후 신호 분류에 적합한 특징변수들을 검토하였으며 특징 변수들의 차원을 축소하여 나타난 주성분 분석의 결과와 비교하였다. 분류 클래스는 목재 건조 시 수분 이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호로서 수분이동의 경우 1, 할열의 경우 0으로 설정하였다. 이때 회귀식의 결과값은 0과 1사이의 값을 출력하는데, 이 결과를 이용하여 수분이동과 표면할열을 분류하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 목재 건조 시 발생하는 AE 신호 고찰

시편 건조 시간에 따른 누적 AE hit 수는 Fig. 2에서 보는바와 같다. 건조 초기(5시간 정도)까지는 AE 신호가 거의 없었으나 그 후부터 12시간까지 급격히 증가한 후 약 21.8 시간까지 누적 AE hit 수는 거의 일정하게 유지되었다. 그 후 표면할열이 발생한 시점부터 AE 신호의 hit 수는 급격하게 증가하였다.

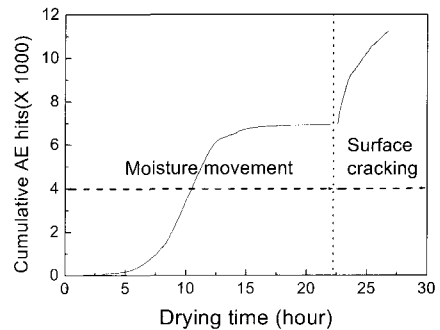


Fig. 2 Cumulative AE hits during drying time

표면할열과 수분이동에 따른 대표적인 AE 신호 파형은 Fig. 3에서 보는바와 같다. 대체적으로 표면할열에 의한 신호가 최대진폭이 크며 상승시간이 짧고 상대적으로 고주파의 신호인 것으로 분석되었다.

### 3.2. 음향방출 신호해석을 위한 파라미터 분석

각 AE 변수들간의 내재하는 다중공선성을 분석하고 변수들간의 상호의존성이 높은 선형종속적인 관

계를 분석하기 위하여 상관분석을 실시하였다[19]. Table 2에서 나타난 바와 같이 상관계수 0.7 이상의 강한 상관관계를 가지는 PA를 제거하여 총 6개의 변수를 분석에 사용하였다.

Table 2 Correlation analysis results among AE parameters

	RC	FR	EN	ED	RT	AR
PA	<b>0.7085</b>	0.5313	<b>0.7003</b>	0.3821	0.2402	-0.0753
RC		0.2741	0.6978	0.6632	0.4495	-0.1564
FR			0.2851	-0.2444	-0.0847	0.0468
EN				0.3868	0.2464	-0.1018
ED					0.4233	-0.094
RT						-0.333

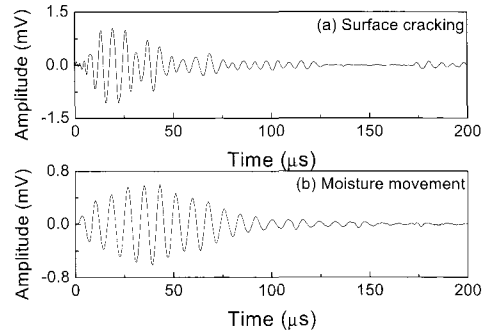


Fig. 3 Typical AE waveforms corresponding to (a) surface cracking and (b) moisture movement in the wood specimen during drying

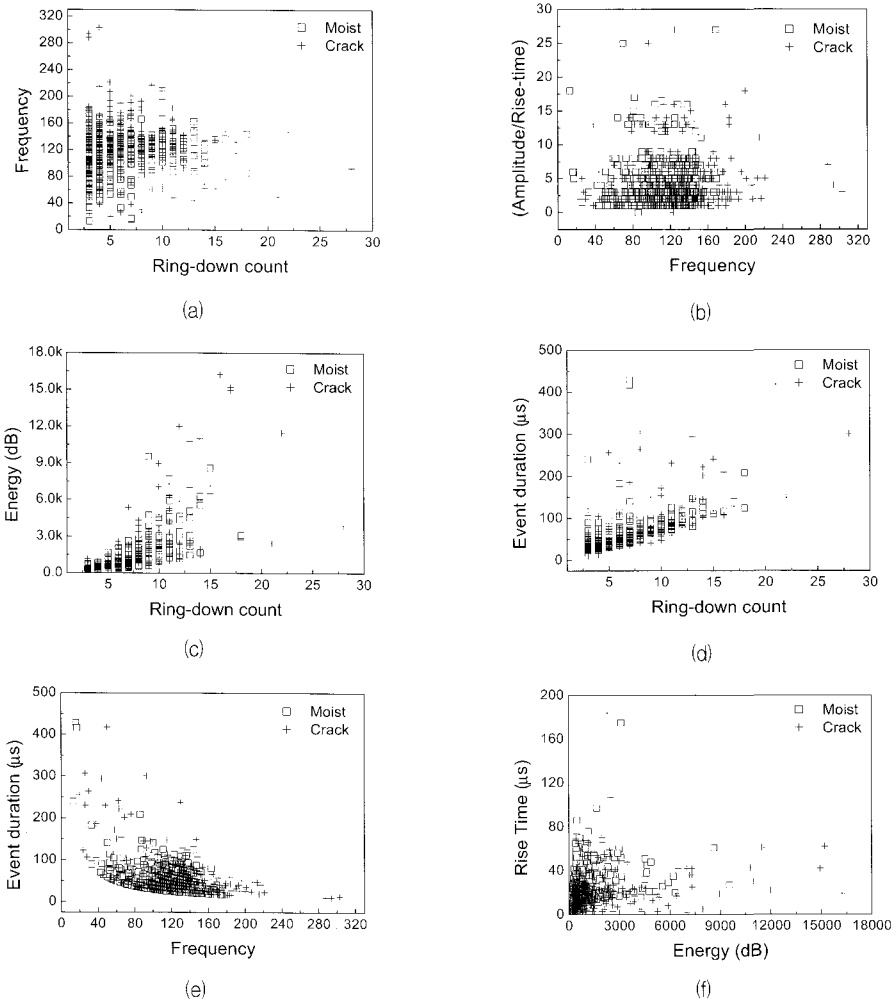


Fig. 4 Feature-feature plots for (a) RC v.s. FR, (b) FR v.s. AR, (c) RC v.s. EN, (d) RC v.s. ED, (e) FR v.s. ED, and (f) EN v.s. RT

Table 2의 분석결과를 토대로 하여 목재건조 시 수분이동에 의한 신호와 표면활열에 의한 신호의 구분 가능성을 검토하기 위하여 특징값-특징값 선도를 분석하였다. Fig. 4에 임의로 선택된 2개의 특징변수들의 조합을 이용하여 특징값-특징값 선도를 나타내었다. 전반적으로 Fig. 4에서 보는 바와 같이 각각의 특징값-특징값 선도에서 수분이동에 의한 신호와 표면활열에 의한 신호가 대부분 중첩되는 것으로 나타나 단순히 특징변수들만을 이용하여 이들 신호를 분류할 경우 분류성능이 낮게 나타날 것으로 생각된다. 또한 이들 특징변수들 간의 관계로부터 신호 분류를 위한 의미 있는 정보를 얻는다는 것은 매우 곤란할 것으로 판단된다.

3.3. 주성분 분석을 이용한 목재 건조 시 발생하는 AE 신호 해석

목재 건조 시 목재 내 수분이동에 의한 음향방출 신호와 표면활열에 의한 음향방출 신호를 분석하기 위하여 주성분 분석을 실시한 결과 Table 3에서 보는바와 같다. 전체 6개의 주성분에서 제 1 주성분, 제 2 주성분, 제 3 주성분, 제 4 주성분이 전체 데이터 변이의 99 %를 차지하는 것으로 분석되었다. 따라서 제 1 주성분 ~ 제 4 주성분의 4개의 주성분을 이용하여 수분이동에 의한 신호와 표면활열에 의한 신호를 분석하였다.

주성분 분석 결과로부터 얻어진 고유벡터는 Table 4에서 보는 바와 같으며 제 1 주성분 ~ 제 4 주성분을 나타내는 식은 다음 식 (1)~식 (4)와 같다.

$$PC1 = 0.2143RC + 0.4059FR + 0.0336EN + 0.1132ED + 0.1033RT + 0.136AR \quad (1)$$

Table 3 Eigenvalues of principal components, percentage proportion and cumulative percentage

Principal component	Eigenvalue	Percentage proportion	Cumulative percentage
1	1163.90	94.77	94.77
2	23.17	1.89	96.66
3	19.32	1.57	98.23
4	13.89	1.13	99.36
5	4.51	0.37	99.73
6	3.36	0.27	100.00

$$PC2 = -0.5484RC + 0.3071FR - 0.1640EN - 0.4157ED - 0.3689RT + 0.5186AR \quad (2)$$

$$PC3 = 0.3235RC + 0.8060FR + 0.1582EN - 0.1143ED - 0.0123RT - 0.1731AR \quad (3)$$

$$PC4 = 0.4106RC - 0.0935FR + 0.1342EN + 0.3311ED - 0.0050RT + 0.8007AR \quad (4)$$

여기서, PC1은 제 1 주성분, PC2는 제 2 주성분, PC3은 제 3 주성분, PC4는 제 4 주성분을 각각 나타낸다.

식(1)~식(4)을 이용하여 특징값-특징값 선도를 Fig. 5와 같이 나타내어 수분이동에 의한 신호와 표면활열에 의한 신호의 구분이 가능한지를 검토하였다. Fig. 4에서 나타난 바와 같이 특징 변수들만을 이용하여 분석한 특징값-특징값 선도에서 수분이동에 의한 신호와 표면활열에 의한 신호가 겹쳐져 구

Table 4 Eigenvectors from principal component analysis

Principal component \ AE parameter	RC	FR	EN	ED	RT	AR
1	0.2143	0.4059	0.0336	0.1132	0.1033	0.136
2	-0.5484	0.3071	-0.164	-0.4157	-0.3689	0.5186
3	0.3235	0.806	0.1582	-0.1143	-0.0123	-0.1731
4	0.4106	-0.0935	0.1342	0.3311	-0.005	0.8007
5	0.2127	-0.0952	0.165	0.1643	-0.9187	-0.1914
6	-0.3048	0.2574	-0.51	0.7496	-0.0524	-0.0694

분이 곤란한 부분들이 Fig. 5에서 보느냐와 같이 주 성분들을 이용할 경우 신호의 구분이 가능할 것으로 나타났다. 특히 Fig. 5의 (a)~(c)에서 제 1 주 성분과 조합을 이루는 제 2, 3, 4 주 성분들에 대한 특징값-특징값 선도를 분석한 결과 대체적으로 제 1 주 성분의 값이 1.0 이상일 경우는 수분이동에 의한 신호가 많이 분포하고 1.0 이하일 경우는 표면할열에 의한 신호가 많이 분포하는 것으로 나타났다. 따라서 제 1 주 성분을 기준으로 하여 목재 건조 과정에서 수분이동에 의한 음향방출 신호와 표면할열에 의한 음향방출 신호의 구분이 가능할 것으로 생각된다.

3.4. 통계 분석에 의한 음향방출 신호분류

목재 건조 시 발생하는 수분이동에 의한 음향방출 신호와 표면할열에 의해 발생하는 음향방출 신호를 분류하기 위하여 지금까지의 분석결과를 토대로 하여 통계 분석에 의한 분류를 수행하였다. 먼저 주 성분 분석을 수행하지 않은 특징변수들만을 이용하여 분석을 수행하였는데 Table 5는 SAS의 요인분석에 의해 결정계수( $R^2$ ) 값이 큰 4개의 모형으로 선정된 분류변수들을 나타낸다.

따라서 Table 5에서 가장 양호한 결정계수를 나타내는 변수가 6개일 경우를 선정하여 회귀분석을

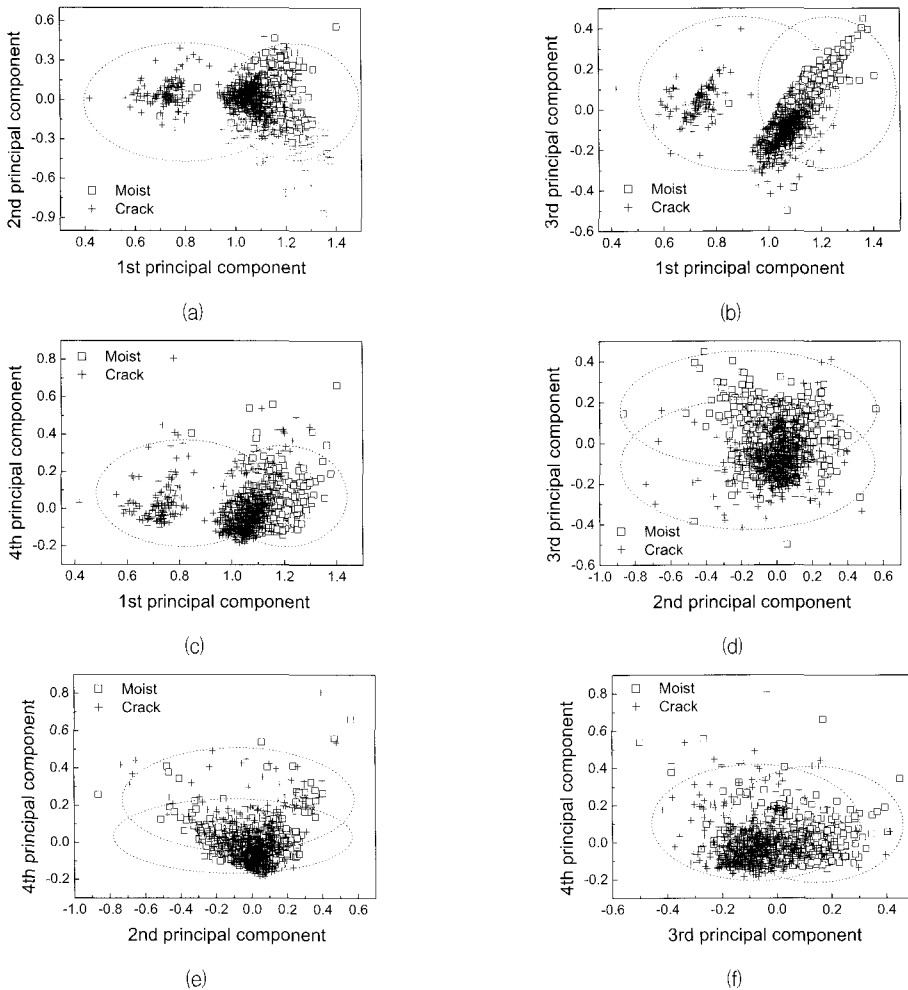


Fig. 5 Feature-feature plots for (a) 1st principal component v.s. 2nd principal component, (b) 1st principal component v.s. 3rd principal component, (c) 1st principal component v.s. 4th principal component, (d) 2nd principal component v.s. 3rd principal component, (e) 2nd principal component v.s. 4th principal component, and (f) 3rd principal component v.s. 4th principal component.

실시하여 식 (5)와 같은 분류식을 나타내었다.

$$IDX = -0.40859 + 0.011851RC - 0.00371FR - 0.00003EN - 0.00226ED + 0.00483RT + 0.01054AR \quad (5)$$

여기서, IDX은 분류 클래스를 나타내며 그 값은 0 또는 1이 된다.

한편, 각 특징변수들에 대하여 주성분들을 독립 변수로 하여 음향방출 신호를 분류하기 위한 회귀 분석을 실시한 결과를 Table 6에 나타내었다. 이때, Table 3에서 분석된 바와 같이 제 1 ~ 제 4 주성분만으로도 전체 데이터의 변이를 99%로 설명할 수 있으므로 회귀식에 포함되는 독립변수로서는 제 1 ~ 제 4 주성분을 이용하였으며 비교를 위하여 전체 주성분을 모두 독립변수로 하여 회귀분석을 실시하였다. 대체적으로 주성분을 분류를 위한 회귀식의 독립변수로 사용할 경우 모델의 결정계수가 특징값들을 독립변수로 사용할 경우보다 향상되었다.

Table 5 The variables and the R2 values of four selected models by FACTOR procedure in the SAS

No. of variables	Variables selected	R <sup>2</sup>
3	FR ED RT	0.1916
4	FR ED RT AR	0.1961
5	FR EN DR RT AR	0.2000
6	RC FR EN ED RT AR	0.2130

식 (5)와 Table 6의 분석결과를 이용하여 회귀식을 이용한 분류기의 분류성능을 분석하였다. 분류를 위한 회귀모델의 개발에 사용되지 않은 1000개의 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호를 이용하여 개발된 각 분류기의 성능을 검증하였다. 분류를 위한 패턴으로서는 수분이동에 의한 신호를 Moist, 표면할열에 의한 신호를 Crack으로 설정하였다. Table 7에서 보논바와 같이 주성분 분석

Table 6 The variables and the R<sup>2</sup> values of four selected models having principal components

Variables	Equation Number	Regression coefficients							R <sup>2</sup>
		a <sub>0</sub>	a <sub>1</sub>	a <sub>2</sub>	a <sub>3</sub>	a <sub>4</sub>	a <sub>5</sub>	a <sub>6</sub>	
PC1, PC2	(6)	-1.58525	1.95052	0.24003					0.3242
PC1, PC2, PC3	(7)	-1.15909	1.55921	0.18409	1.24431				0.4306
PC1, PC2, PC3, PC4	(8)	-1.16325	1.56302	0.18463	1.24297	-0.06893			0.4309
PC1, PC2, PC3, PC4, PC5, PC6	(9)	-1.33620	1.72184	0.20738	1.18690	-0.08113	-0.97582	-3.26340	0.5575

Regression model :  $IDX = a_0 + a_1PC1 + a_2PC2 + a_3PC3 + a_4PC4 + a_5PC5 + a_6PC6$

Table 7 Results of classification analysis between moisture transfer and surface cracking by multiple regression models (values in parenthesis are for validation)

Classifier	Independent variable	Correct classification (%)			Error ratio (%)*	
		Moist	Crack	Total	Error I	Error II
Eqn.(3)	AE features	87.6 (84.0)	56.6 (56.0)	72.1 (70.0)	13.4 (16.0)	43.4 (44.0)
Eqn.(4)	Principal components	85.0 (88.6)	64.6 (67.0)	74.8 (77.8)	15.0 (11.4)	35.4 (33.0)
Eqn.(5)		78.0 (80.8)	84.0 (84.0)	81.0 (82.4)	22.0 (19.2)	16.0 (16.0)
Eqn.(6)		78.2 (81.0)	83.6 (83.8)	80.9 (82.4)	21.8 (19.0)	16.4 (16.2)
Eqn.(7)		83.8 (86.0)	91.4 (89.0)	87.6 (87.5)	16.2 (14.0)	8.6 (11.0)

\* Error I : classifying Moist as Crack  
Error II : classifying Crack as Moist

을 이용한 회귀모델이 단순히 특징값만을 이용하는 경우보다 분류 성능이 양호한 것으로 나타났다. 특히 분석에 사용된 주성분을 모두 사용할 경우 전체 분류율은 87.5%로서 목재 건조 시 발생하는 음향방출 신호의 분류가 가능할 것으로 분석되었다.

#### 4. 요약 및 결론

본 연구는 목재 건조 중 발생하는 음향방출 신호를 이용하여 목재 내 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호를 해석하고 분류하기 위하여 수행되었다. 이를 위하여 얻어진 AE 신호의 특징값들에 대한 상관분석을 실시하여 상호의존성이 높은 변수를 제거한 후 AE 변수들에 대한 특징값-특징값 선도를 분석하였다. AE 신호의 특성을 해석하고 분류성능을 향상시키기 위하여 주성분 분석을 실시하였다. AE 변수들을 독립변수로 한 분류기와 주성분들을 독립변수로 한 분류기에 대하여 분류성능을 비교하였다. 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 목재 건조 시 발생하는 표면할열과 수분이동에 따른 AE 신호 파형을 분석한 결과 대체적으로 표면할열에 의한 신호가 피크 전압이 크며 상승 시간이 짧고 상대적으로 고주파의 신호인 것으로 분석되었다.
- (2) AE 변수들을 이용한 특징값-특징값 선도를 분석한 결과 대체적으로 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호가 중첩되어 나타난 반면 주성분 분석 결과를 이용하여 특징값-특징값 선도를 분석한 결과 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호의 분류가 가능할 것으로 분석되었다.
- (3) 주성분 분석결과 대체적으로 제 1 주성분의 값이 1.0 이상일 경우 수분이동에 의한 신호가 많이 분포하고 1.0 이하일 경우는 표면할열에 의한 신호가 대체적으로 분포하는 것으로 나타나 제 1 주성분을 기준으로 하여 목재 건조 과정에서 수분이동에 의한 음향방출 신호와 표면할열에 의한 음향방출 신호의 구분이 가능할 것으로 분석되었다.
- (4) 다중 회귀분석모델을 이용하여 수분이동에 의한 신호와 표면할열에 의한 신호를 분류할 수 있는

분류기를 개발하고 평가한 결과 개별 AE 변수들은 독립변수로 한 분류기 보다 주성분들을 독립변수로 한 분류기의 분류성능이 양호한 것으로 나타났으며 인공신경망과 연계 할 경우 분류성능이 향상될 것으로 판단된다.

#### 참고문헌

- [1] M. Noguchi, Y. Kagawa and J. Katagiri, "Detection of acoustic emissions during hardwood drying". Mokuzaei Gakkaishi, Vol. 26, No. 9, pp .637-637, (1980)
- [2] M. Noguchi, S. Okomura and S. Kawamoto, "Characteristics of acoustic emission during wood drying", Mokuzaei Gakkaishi. Vol. 31, No. 3, pp. 171-175, (1985)
- [3] C. Skaar, W. Simpson and R. Honeycutt, "Use of acoustic emissions to identify high levels of stress during oak lumber drying", Forest Products Journal, Vol. 30, No. 2, pp. 21-22, (1980)
- [4] R. M. Honeycutt, C. Skaar and W. Simpson, "Use of acoustic emission to control drying rate of red oak", Forest Products Journal, Vol. 35, No. 1, pp. 48-50 (1985)
- [5] S. Ogino, K. Kaino and M. Suzuki, "Prediction of lumber checking during drying by means of acoustic emission technique", Journal of Acoustic Emission, Vol. 5, No. 2, pp. 61-65, (1986)
- [6] S.-H. Lee, S. Quarles and A. Schniewind, "Wood fracture, acoustic emission, and the drying process. Part 2. Acoustic emission associated with fracture", Wood Science and Technology, Vol. 30, pp. 283-292, (1995)
- [7] M. C. Breese, S. Zhao and G. McLeod, "The use of acoustic emissions and steaming to reduce checking during the drying of European oak", Holz als Roh und Werkstoff, Vol. 53, No. 6, pp. 393-396, (1995)
- [8] J. D. Booker, "Acoustic emission related to instantaneous strain in Tasmanian eucalypt timber during seasoning", Wood Science and Technology, Vol. 28, pp. 249-259, (1992)



- [9] D. Krug, S. Tobisch, R. Emmler and K. Froehlich, "The use of certain parameters of the acoustic emission analysis for the control of wood drying processes", Holz als Roh und Werkstoff, Vol. 53, No. 4, pp. 253-256, (1995)
- [10] W. Molinski, J. Raczkowski and S. Ploszko, "Mechanism of Acoustic Emission in Wood Soaked in Water", Holzforschung, Vol. 45, pp. 13-17, (1991)
- [11] I. Cunderlik, W. Molinski and J. Raczkowski, "The monitoring of drying cracks in the tension and opposite wood by acoustic emission and scanning electron microscopy method", Holzforschung, Vol. 50, pp. 258-262, (1996)
- [12] J. D. Booker, "Acoustic emission and surface checking in Eucalyptus regnans boards during drying", Holz Roh-Werkstoff, Vol. 52, No. 6, pp. 383-388, (1994)
- [13] K. N. Sato, M. Kamei, M. Fushitani and M. Noguchi, "Discussion of tensile fracture of wood using acoustic emissions. A statistical analysis between the relationships of AE and fracture stress", Mokuzai Gakkaishi, Vol. 30, No. 8, pp. 653-659, (1984)
- [14] A. P. Schiewind, "Concise Encyclopedia of Wood and Wood-based Material Acoustic emission and acousto-ultrasonic characteristics ", Pergamon Press, Oxford, (1989)
- [15] S.-H. Lee, S. Quarles and A. Schniewind, "Wood fracture, acoustic emission, and the drying process. Part 2. Acoustic emission associated with fracture", Wood Science and Technology, Vol. 30, pp. 283-292, (1995)
- [16] 김기복, 윤동진, 정중채, 박휘립, 이승석, "주성분 회귀분석 및 인공신경망을 이용한 AE 변수와 응력확대계수와의 상관관계 해석", 비파괴검사학회지, Vol. 21, No. 1, pp. 80-90, (2001)
- [17] 김기복, 윤동진, 정중채, 이승석, "주성분 분석과 인공신경망을 이용한 피로균열 열림·닫힘시 음향방출 신호분류", 비파괴검사학회지, Vol. 22, No. 5, pp. 532-538, (2002)
- [18] A. Chichibu, T. Kikuchi and T. Kishishita, "Principal Component Analysis of AE Waveform Parameters for Investigating an Instability of Geotechnical Structures", Journal of Acoustic Emission, Vol. 11, No. 4, pp. S47-S56, (1993)
- [19] SAS Institute, SAS/STAT Guide for Personal Computer, Version 6 Edition, SAS Institute, Cary, NC (1987)