

Stress wave법에 의한  
열적 열화된 목재의 휨탄성계수 예측\*<sup>1</sup>

이 전 제\*<sup>2</sup> · 김 정 원\*<sup>3</sup>

Estimating MOE of Thermal Degraded Wood  
by Stress Wave Method\*<sup>1</sup>

Jun-Jae Lee\*<sup>2</sup> · Jeong-Won Kim\*<sup>3</sup>

ABSTRACT

The strength and stiffness of structures would be weakened by thermal degradation of wood members which are exposed to a variety of heat including a fire. For this reason, thermal degraded wood members can't pertinently support the load. However, it is easy to repair or rehabilitate wood structures. So, the degraded wood members which can't support the load can be replaced with new members. For the sake of this advantage, there is a need for nondestructive evaluation(NDE) technique, which is very effective to assess wood members in service. In this paper, it was considered whether the stress wave method is adequate to estimate static bending MOE of thermal degraded wood.

As the result, the relationship between static bending MOE and MOE<sub>sw</sub> in elevated temperature was found out significant. Therefore, the application of stress wave method for estimating static bending MOE of thermal degraded wood would be possible. However, it is thought that further research for the effects of exposure temperature, time, and thermal degradation on the relationship between static bending MOE<sub>b</sub> and MOE<sub>sw</sub> would be needed.

*Keywords* : Stress wave, Thermal degradation, Exposure time, NDE, MOE

1. 서 론

최근 국내의 목구조택 산업은 보급단계를 지나 점

차적으로 새로운 산업으로 자리를 잡아가고 있다. 이러한 실정에서 설계와 자원의 효율적인 이용에 관한 목구조물에 대한 여러 연구가 수행되고 있으며, 이러한 연구중에서 화염에 노출된 목재의 내화성능에 관

\*1 접수 1998년 7월 20일 Received July 20, 1997

\*2 서울대학교 농업생명과학대학 College of Agriculture & Life Science, Seoul National University, Suwon 441-744, Korea

\*3 SK상사 SK Global Co., Ltd., Seoul 100-192, Korea

련하여 Schaffer (1971)는 225℃ 이상에서는 그 이하의 온도에서보다 탄성계수가 급격히 감소함을 밝혔으며, 金등(1995)은 함수율 15%로 조절된 3×10cm 단면크기를 가지는 부재 2개를 집성하여 구성한 단면크기 6×10cm에 길이 340cm인 Douglas-fir의 온도에 따른 탄성계수의 감소기율이 0.0044/℃라고 보고하였다. 이러한 연구를 통해 목재는 일반적인 인식과는 달리 화재에 매우 안전한 재료라는 사실을 검증하였다. 목재는 가연성재료이지만 열적 성질에 있어서 열확산계수와 열팽창계수가 다른 건축재료에 비해 매우 낮으며, 화염노출시 탄화막을 형성하여 연소를 억제하고, 갑작스러운 파괴나 급격한 강도 감소를 일으키지 않는다. 그리고, 목조주택은 부분적인 개보수가 용이하기 때문에 화재진화 후, 목재의 열화 정도를 정확하게 파악할 수 있다면 하중을 지탱할 수 없는 부분만 개보수하여 자원을 효과적으로 이용할 수 있게 된다. 이를 위해서 목재부재의 열화 정도를 구조적인 변경없이 실제 사용상태에서 파악할 수 있는 비파괴시험기술의 적용에 대한 많은 연구가 이루어져야 할 것이다.

비파괴시험은 재료의 최종사용성능(end-use capability)의 변경없이 재료의 물리적·기계적 성질을 규명하는 과학이다. 이러한 시험은 해당 재료의 성질, 성능과 상태에 관한 정확한 정보를 제공하는 비파괴 시험(nondestructive test, NDT)기술에 의존한다. (Ross *et al.*, 1994) 목재에 대한 비파괴시험기술에 관한 연구는 Jayne(1959)의 기본가설에서부터 출발한다. 그는 다양한 비파괴시험방법으로 측정되는 목질재료의 에너지 저장과 방출 성질은 그 재료의 정적거동(static behavior)을 결정하는 mechanism에 의해 변한다고 주장하였다. 결과적으로 회귀분석을 통해 비파괴시험방법으로 측정된 목질재료의 성질과 그 재료의 정적 탄성과 강도 거동 사이에서 유용한 수학적 관계를 얻을 수 있게 되었다. 본 연구에서 사용된 stress wave법은 다른 비파괴시험법과는 달리 구조체를 이루고 있는 재료를 직접 시험할 수 있는 기술로서 1960년대부터 목재와 목질재료의 강도적 성질과 응이등 내부결합탐지, 구조체의 안전성평가에 적용되고 있으며, (Ross & Pellerin, 1991) 특히 Pellerin(1985), Rutherford(1987), Ross(1994) 등에 의해 생물학적으로 열화된 목재와 구조체의 물리적·기계적 성질을 평가하는데 매우 유용한 시험법으로 인정되고 있다.

본 연구의 궁극적인 목적은 화재가 진화된 후 화염에 노출된 목재의 강도적 성질을 stress wave 비

파괴시험기술의 적용으로 파악하여 하중지지를 충분히 할 수 있는 부재는 교체하지 않고 계속 사용할 수 있게 하여 부족한 목재자원을 효율적으로 이용하는 데 있다. 이를 위해서는 열적 열화된 부재의 휨탄성계수 측정에 비파괴시험의 적용가능성을 검토하는 것이 선행되어야 한다. 본 연구에서는 비파괴시험방법의 하나인 stress wave법을 이용하여 열적 열화된 시험재의 휨탄성계수를 측정할 수 있는지 여부를 조사하고, 회귀분석을 통해서 열적 열화된 소시편의 휨탄성계수 예측식을 구하고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1 공시재료

본 연구에 사용된 수종은 낙엽송(*Larix leptolepis*)과 구조용재로서 목조주택시공에 많이 사용되고 있는 Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*)이며, 용이와 할렬의 변수를 무시할 수 있도록 단면크기 10mm×10mm에 길이 300mm인 무결점소시험재로 준비하였다. Stress wave 전달시간은 측정시 섬유방향에 대한 파의 전달방향에 영향을 받기 때문에 시험재의 길이를 섬유길이방향으로 일치시켰으며, 시험재 일부는 함수율 측정을 위해서 채취되었다. 모든 시험재는 항온항습실에서 조습처리하여 최종함수율을 15~17%정도가 되도록 조절하였다. 조습처리를 거친 시험재는 5개의 온도단계(100, 150, 200, 225, 250℃)와 3가지의 노출시간(각 온도별 도달시간, 도달시간+1시간, 도달시간+2시간)에 대하여 각각 20개씩을 취하여 노출시켰다. 이 때 온도별 도달시간은 oven내에서 각 시험재내부의 온도가 목표온도에 이르는 시간으로, 동일 수종, 같은 크기를 갖는 시험편을 사용하여 열전쌍과 자동온도기록계를 통해 얻은 박 등(1996)의 결과를 사용하였다. 박 등은 50, 100, 150℃로 일정하게 유지한 oven에서 시험편의 중앙부가 각 온도에 도달하는데 걸린시간은 각각 13, 20, 27분으로 온도단계의 증가와 직선적인 비례관계를 보인다고 보고하였다. 본 연구에서는 이러한 비례관계를 200℃ 이상의 온도단계에도 적용하였다.

### 2.2 시험방법

#### 2.2.1 비파괴 시험

본 실험의 비파괴시험방법은 Fig. 1에서 볼 수 있듯이, 먼저 시험재를 start clamp와 stop clamp 사이에 고정시킨다. 고정이 끝나면 start clamp에

있는 진자형태의 ball-hammer로 clamp를 타격하여 파(wave)를 발생시키고 이 파를 stop clamp에 전달하게 된다. 전달된 파는 시험재 끝부분에 위치한 두 sensor에 감지되어 파가 전달되는 시간을 stress wave timer가 측정한다. 본 실험에서 사용된 비파괴기는 Metriguard 사에서 제작한 Model 239A Stress Wave Timer를 사용하였다. 이렇게 측정된 시간으로 속도를 계산하여 식 (1)을 이용하여 MOE를 구하게 된다.

$$MOE_{sw} = \rho \times C^2 / g \quad (1)$$

여기서 C : stress wave propagation speed (m/sec)

MOE<sub>sw</sub> : stress wave로 측정된 MOE  
(kg/cm<sup>2</sup>)

g : 중력가속도 (m/sec<sup>2</sup>)

ρ : 부재의 밀도 (g/cm<sup>3</sup>)

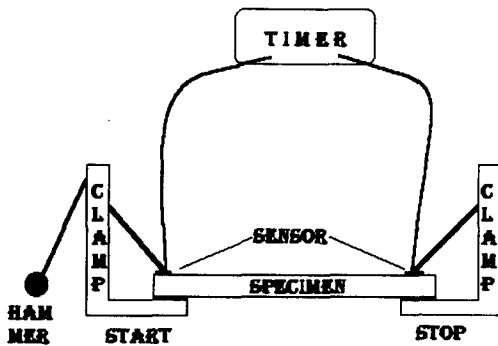


Fig. 1. Schematic diagram of stress wave measurement.

### 2.2.2 정적 휨시험

휨탄성계수는 span을 24cm로 하고, 5mm/min의 하중속도로 3점 하중을 적용하여 만능강도시험기로 측정하였다.

본 연구는 선별된 시험재를 상온기전상태에서 stress wave 전달시간과 밀도를 측정하고, 만능강도시험기로 휨탄성계수를 측정된 뒤 일부 시험재에서 시험편을 채취하여 함수율을 측정하였다. 상온에서 측정된 시험재는 고온노출직후 stress wave 전달시간, 밀도, 만능강도시험기에서의 휨탄성계수, 함수율을 측정하였다.

### 2.2.3 고온노출후 조습처리

고온노출후 휨성능의 회복정도를 구명하기위해, 각

온도 단계별로 노출된 시험편은 1주일간 항온항습실에서 조습처리한 후에 휨탄성계수와 함수율을 측정하였다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 온도노출전 휨탄성계수의 관계

전체시험재에 대한 온도노출전 비파괴시험방법인 stress wave법으로 측정된 MOE(이후 MOE<sub>sw</sub>로 표시함)와 정적 휨시험에 의한 휨탄성계수(이후 MOE<sub>b</sub>로 표시함)의 상관관계를 나타낸 Fig. 2와 3에서 두 수종 모두 정상재인 경우 상관관계가 매우 높게 나타났다. 여기서 F검정을 통해 MOE<sub>sw</sub>값과 MOE<sub>b</sub>값의 유의성 검정을 하였는데, F값이 국산낙엽송과 Douglas-fir의 각각에 대해 109.96과 175.94로서 유의수준 5%에서의 값보다 매우 크므로 고도로 유의하다고 볼 수 있다.

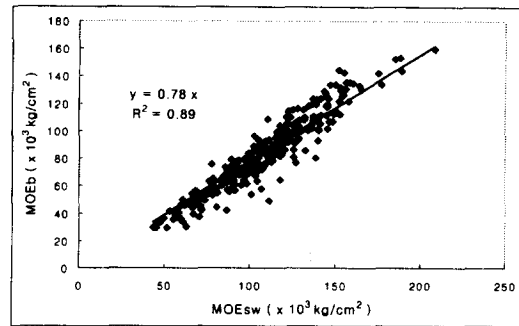


Fig. 2. Relationship between MOE<sub>sw</sub> and MOE<sub>b</sub> of Japanese Larch before exposure.

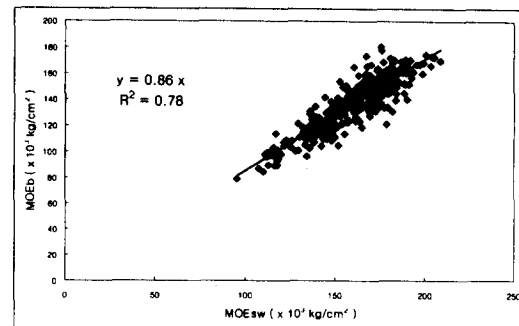


Fig. 3. Relationship between MOE<sub>sw</sub> and MOE<sub>b</sub> of Douglas-fir before exposure.

### 3.2 온도에 따른 목재의 물리적 성질변화

#### 3.2.1 증발

일반적으로 목재는 높은 온도에 노출될 때 목재내 수분이 증발하면서 무게가 감소하고 증기가 발생되는데, 이러한 증기가 발생하는 현상(Smoldering)은 목재가 탄화되는 것과 관계없이 진행된다. 그러나, 고온노출로 인해 목재내 수분이 모두 증발한 후 목질부분의 순수한 질량이 감소하면서 탄화가 진행된다. 그래서 열적 열화의 증거로는 색세의 변화와 더불어 고온노출된 목재의 질량감소라고 알려져 있다.(Wood Handbook, 1987) 본 실험에서는 두 수종 모두 200℃에서 2시간 노출되었을 때부터 시험재의 색깔이 검은 빛을 띄기 시작했으나, Table 1 에 나타낸바와 같이 두 수종 모두 온도 225℃에서 1시간노출후부터 함수율 0%가 되었고, 질량이 감소하였으므로, 결과적으로 본 실험에 사용된 두 수종모두 225℃에서 1시간노출후부터 열적 열화가 일어났다고 볼 수 있다.

#### 3.2.2 함수율

Table 1에 초기함수율과 처리조건별 노출직후의 함수율을 나타내었다. 고온조건일수록 그리고 노출시간이 길수록 함수율이 감소함을 나타내고 있으며, 225℃

에서 1시간노출후부터 수분이 모두 빠져나가고 목질부분의 순수질량이 감소하는 열적 열화가 있었음을 유추할 수 있다. Table 2는 항온항습실에서 1주일 이상 조습처리한 후의 온도조건별 회복함수율인데, 노출온도가 높을수록 함수율의 회복정도가 낮음을 알 수 있다. 또한 열적 열화가 발생한 225℃ 1시간 조건이후에서 노출된 후 조습처리된 시험재의 경우는 함수율이 7%이상으로 회복하지 못하는 경향을 두 수종에서 동일하게 나타내고 있다. 이는 열화로 인한 질량의 감소로 모세관이 부분적으로 파괴되고 리그린이 연화되어 수분의 흡착이 용이하지 않았기 때문이라 사료된다.

이상과 같이 고온에 노출된 후 물리적 성질의 변화를 살펴 볼 때, 본 연구에 사용된 국산낙엽송과 Douglas-fir는 수종에 관계없이 모두 온도 225℃에서 1시간노출후부터 열적 열화가 일어났다고 가정할 수 있다.

### 3.3 MOEsw와 MOEb의 관계

#### 3.3.1 온도노출조건의 영향

본 연구는 비파괴시험의 방법 중의 하나인 stress wave법으로 측정된 MOEsw로 고온에 노출되어 열적

Table 1. Initial MC and MC after exposure in elevated temperatures and time.

Temp. level (°C)	MC(%) of Japanese Larch				MC(%) of Douglas-fir			
	Initial	0 hr.*	1 hr.*	2 hr.*	Initial	0 hr.*	1 hr.*	2 hr.*
100	17.1	11.1	6.6	5.3	15.9	9.5	5.8	1.8
150		3.9	3.2	2.8		1.8	1.4	2.3
200		2.1	1.2	0.8		2.3	0.9	0.4
225		1.4	0	0		0.4	0	0
250		0	0	0		0	0	0

\* means duration of exposure.

Table 2. MC after recovery for a week.

Temp. level (°C)	MC(%) of Japanese Larch			MC(%) of Douglas-fir		
	0 hr.	1 hr.	2 hr.	0 hr.	1 hr.	2 hr.
100	11.6	10.2	11.1	12.1	10.6	11.1
150	10.9	9.4	11	10.4	10.7	10.8
200	8.8	8.5	8.0	8.9	8.3	7.4
225	7.3	6.7	6.4	6.9	6.1	6.2
250	4.0	6.4	6.2	6.0	5.8	6.0

열화된 목재의 MOEB를 예측하는 데 목적이 있다. 본 연구의 결과를 통해서 볼 때, 국산낙엽송이 Douglas-fir에 비해 상관관계가 대체적으로 높게 나타나는 것을 제외하고는 각 처리조건에 따른 영향은 작다고 볼 수 있으며, 특히 열적 열화된 225℃의 1시간 조건에서도 노출시간과 온도에 상관없이 높은 상관관계를 나타내고 있다. 국산낙엽송이 상대적으로 높은 상관관계를 나타내는 것은 Douglas-fir에 비해 시험재들간의 밀도의 변이가 작기 때문인 것으로 사료된다.

고온에 노출된 목재의 휘탄성계수는 온도노출에 따른 목재의 밀도변화와 함수율변화, 목질부분의 열화에 의해 결정되고, MOESw는 식(1)에서 볼 수 있듯이 목재의 밀도와 목재사이의 파의 전달속도에 의해 결정된다. 이때 함수율이 낮아지면서 목재사이의 파의 전달속도가 증가함이 Gerhards(1974)의 연구에서 밝혀졌으며, 급속한 함수율감소와 고온처리로 인해 발생된 목질부분의 열화는 목재조직의 부분적인 파괴와 연화를 수반하여 파의 전달속도에 영향을 준다. 결국 온도노출에 따른 정적 휘탄성계수와 MOESw는 동일한 mechanism으로 변화한다고 볼 수 있다. 그러나, 파의 전달속도는 함수율의 변화와 목질부분의 열화뿐만 아니라 밀도와 목리, 웅이 등의 요인에 의해서도 변화하기 때문에, 이들 요인들에 관한 연구가 계속되어야 할 것이다. 특히, 고온노출된 목재는 열화가 진행되면서 동시에 함수율도 낮아지는데, 파의 전달속도는 열화가 진행되면서 감소하고 함수율이 낮아지면서 증가하기 때문에 이들 두 요인이 파의 전달속도에 미치는 영향을 추후의 연구를 통해서 정량화할 필요성이 있다.

Fig. 4와 5에 온도노출직후 국산낙엽송과 Douglas-fir의 MOESw와 MOEB의 상관관계를 나타내었다. 여기서 온도 225℃의 1시간노출조건 이후의 열적 열화된 부분을 구분하여 각 수종에 대해 2개의 회귀식으로 구성하였다. 이들 회귀곡선에서 F검정을 통해 열적 열화가 발생하지 않은 부분과 발생한 온도 225℃의 1시간노출조건 이후의 부분에 대해 유의성 검정을 하였는데, F값이 국산낙엽송과 Douglas-fir의 각각에 대해 9.04와 8.01로서 유의수준 5%에서의 값보다 크므로 유의하다고 볼 수 있다. 결과적으로 고온에 노출된 목재의 MOEB를 예측하는데 있어서, 열적 열화된 부분을 구분하여 비교파시험이 수행되어야 한다.

여기서 두 수종의 노출직후의 기율기가 각각 노출전의 기율기에 비해 약간씩 증가하였다. 이는 온도노

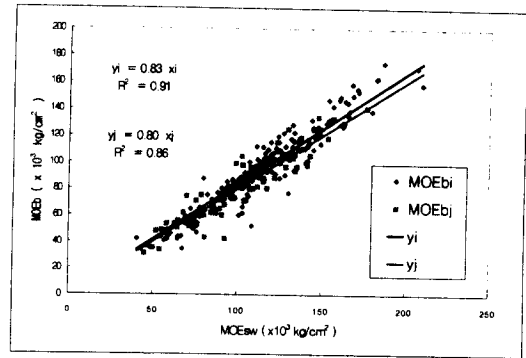


Fig. 4. Relationship between MOEB and MOESw at each exposure environment for Japanese Larch.

Note : i - temperature level and duration of exposure from 100℃-0hr to 225℃-0hr  
j - temperature level and duration of exposure from 225℃-1hr to 250℃-2hr

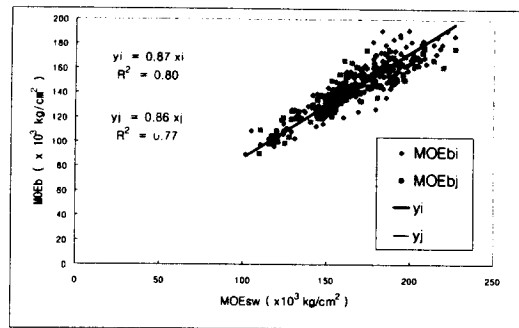


Fig. 5. Relationship between MOEB and MOESw at each exposure environment for Douglas fir.

출후 목재 밀도의 감소와 급속한 함수율의 감소와 고온처리로 인한 목재조직의 부분적인 파괴 및 연화로 인해 상대적으로 MOESw값이 MOEB값에 비해 낮아졌기 때문이라 사료된다. 목재는 열에 노출되면 온도 100℃까지는 결합수가 증발하게 되고, 100℃부터 구조수가 방출되기 시작하여 열분해가 시작된다. 이러한 열분해는 온도가 상승하고 노출시간이 길어지면서 목질부분을 구성하는 주요성분인 탄소와 수소, 산소가 분해되어 가연성가스로 방출되면서 목질부분의 질량이 감소하게되고, 목재조직이 부분적으로 파괴된다.(이 필우 등, 1992) 결국 이러한 조직의 파괴는 파가 진행하게 되는 매질의 성질을 변화시켜,

파의 전달속도에 영향을 주게 된다.

Fig. 4, 5에서 열적 열화된 부분의 기율기가 열적 열화가 일어나지 않은 조건에서의 기율기에 비해 작은데, 이는 열적 열화로 인한 MOEb값의 감소에 비해 MOEsw의 값이 열화전과 비교하여 상대적으로 적게 감소하였기 때문인 것으로 사료된다. 즉 목재 조직의 파괴로 열적 열화되어 파의 전달속도가 감소하지만, 동시에 시험재의 수분이 모두 증발하여 파의 전달속도가 상승하는 효과로 인해 열적 열화로 인한 감소효과가 크게 반감되어 고온노출시 열화전의 파의 전달속도와 거의 비슷하기 때문에 이러한 현상이 나타났다고 볼 수 있다. 그러나, 기율기의 변화가 크지 않고 두 수종모두 고온노출조건에서와 열적 열화가 발생한 조건에서도 높은 상관관계를 나타내고 있기 때문에, 열적 열화된 목재의 휨탄성계수를 예측하는데 비파괴시험방법이 적용될 수 있으며, 소시험재의 경우 이들의 회귀식을 고온노출직후의 휨탄성계수 예측식으로 이용할 수 있다. 또한, 정상재의 경우에 휨탄성계수를 예측하기 위해 적용된 식(1)을 동일하게 고온노출조건에서와 열적 열화가 발생한 조건에서도 사용할 수 있음을 알 수 있다.

### 3.3.2. 조습처리의 영향

Fig. 6, 7은 온도노출후 1주일이상 항온항습실에서 조습처리한 후 국산낙엽송과 Douglas-fir의 MOEsw와 MOEb의 상관관계를 나타낸것인데, 여기서 온도 225℃의 1시간노출조건이후의 열적 열화된 부분을 구분하여 각 수종에 대해 2개의 회귀식으로 구성하였다. 이들 회귀곡선에서 F분포를 통해 고온노출직후 열적열화가 발생하지 않은 부분과 발생한 온도 225℃의 1시간노출조건 이후의 부분에 대해 조습처리후 유의성 검정을 하였는데, F값이 국산낙엽송과 Douglas-fir의 각각에 대해 10.81과 10.2로서 유의수준 5%에서의 값보다 크므로 유의하다고 볼 수 있다. 결과적으로 조습처리한 후에도 목재의 MOEb를 예측하는데 있어서, 열적 열화된 부분을 구분하여 비파괴시험이 수행되어야 한다.

두 수종모두 고온노출조건에서와 열적 열화가 발생한 조건에서도 높은 상관관계를 나타내고 있는데, 결론적으로 소시험재의 경우 Fig. 6, 7의 회귀식을 고온노출 뒤 조습처리한 후의 휨탄성계수 예측식으로 이용할 수 있다. Fig. 4, 5와 Fig. 6, 7에서 볼 수 있듯이 열적 열화가 발생한 부분의 기율기가 상대적으로 열적 열화가 일어나지 않은 부분의 기율기에 비해 조습처리한 후에 증가한다. 이는 조습처리

후 함수율이 회복되면서 시험재에 침투된 수분의 영향으로 stress wave 전달시간이 증가하면서 MOEsw가 감소하지만, 밀도의 회복으로 인해 MOEsw는 상대적으로 조습후에 약간 증가하게 되는데, MOEb의 회복이 열화가 발생하지 않은 부분에서는 MOEsw의 증가정도와 거의 비슷하였으나, 열화가 발생한 부분에서는 밀도 회복으로인한 MOEsw의 증가정도가 수분의 침투로 감쇠되어 상대적으로 MOEb의 회복정도가 크기 때문인 것으로 사료된다.

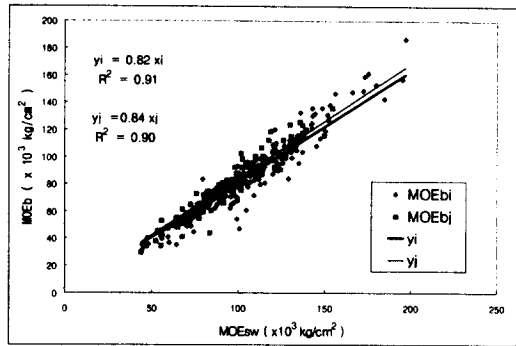


Fig. 6. Relationship between MOEb and MOEsw after a week recovery for Japanese Larch.

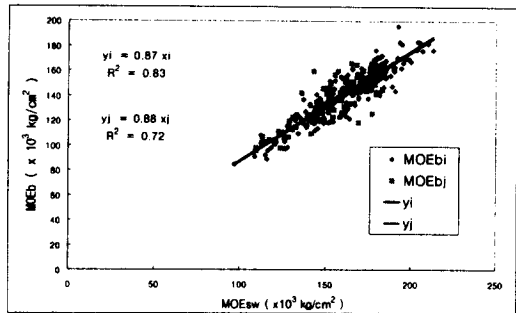


Fig. 7. Relationship between MOEb and MOEsw after a week recovery for Douglas fir.

## 4. 결 론

비파괴시험방법의 하나인 stress wave 법을 이용하여 측정된 소시험재의 MOEsw와 온도 노출조건에 따른 정적휨탄성계수(MOEb)와의 관계를 조사한 본 연구의 결과는 다음과 같다.

1. 본 연구에 사용된 국산낙엽송과 Douglas-fir는 온도 225℃에서 1시간 노출후부터 목질 부분의 순수한 질량이 감소하여 열적 열화가 발생했다.
2. 고온 노출후 각 온도단계에 대해서 stress wave test로 측정된 MOEsw로서 MOEb를 예측할 수 있으며, 상관관계는 온도조건과 노출시간에 관계없이 매우 높았다.
3. 고온 노출후 열적 열화된 온도 225℃에서 1시간을 기준으로 나눈 두 구간, 즉 열화전후에서 MOEsw와 MOEb의 관계가 변화되었다.
4. 열적 열화된 시험재에서 stress wave법으로 측정된 MOEsw와 정적 휨시험에 의한 휨탄성계수와 의 상관관계가 온도조건과 무관하게 매우 높으므로, 이들간의 회귀식으로 열적 열화된 소시험재의 간단한 MOEb 예측식을 제공할 수 있다.
5. 온도노출후 조습처리에 의한 영향은 열적 열화가 일어나지 않은 상태에서는 별영향이 없었으나, 열적 열화가 일어난 상태에서는 영향이 있는 것으로 나타났다.

이상의 결과로부터 stress wave법은 고온노출된 목재의 MOE측정에 적용가능한 것으로 판단되나, 노출온도, 열적 열화 여부등의 조건이 양자간의 관계에 영향을 미치는 것으로 나타남으로써 이에 대해서는 보다 많은 연구가 필요한 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

1. American Society for Testing and Materials. 1988. Methods of Testing Small Clear Specimens of Timber. ASTM D 143, ASTM, Philadelphia, PA.
2. Galligan, W. L. and R. W. Courteau. 1965. Measurement of elasticity of lumber with longitudinal stress waves and the piezoelectric effect of wood. Second Sym. on Nondestructive Testing of Wood.
3. Gerhards, C. C. 1974. Stress wave speed and MOE of sweetgum ranging from 150 to 15 percent MC. *Forest Prod. J.* 25(4): 51-57
4. Jayne, B. A. 1959. Vibrational properties of wood as indices of quality. *Forest Prod. J.* 5(5): 294-301

5. Kim Y. G. and J. J. Lee. 1995. Studies on prediction about behavior of wood beam under standard fire condition. *J. of the Korean Society of Wood Sci. & Tech.* 23(4): 10-17
6. Park J. S. and Lee J. J. 1996. The effect of exposure time in high temperatures on bendign properties of wood. Proceedings of the International Wood Engineering Conference. Vol 2: 406-412
7. Pellerin, R. F., R. C. De Groot and G. R. Esenther. 1985. Nondestructive stress wave measurements of decay and termite attack in experimental wood units, 5th nondestructive testing of wood symposium. September 9-11: 319-352
8. Ross, R. J., J. C. Ward and Anton TenWolde. 1994. Stress wave nondestructive evaluation of wetwood. Forest Products Society. *Forest Prod. J.* 44(7/8): 79-83
9. Ross, R. J., R. C. DeGroot and W. J. Nelson. 1994. Technique for nondestructive evaluation of biologically degraded wood. *Experimental Techniques* 29, Vol. 18, No.5.
10. Ross, R. J. and R. F. Pellerin. 1991. Nondestructive testing for assessing wood members in structures: A review, Gen. Tech. Rep. FPL-GTR-70. Madison, WI: U.S. Department of Agriculture, Forest Service, Forest Products Laboratory.
11. Rutherford, P. S. 1987. Nondestructive stress wave measurement of incipient decay in Douglas-fir. Pullman, WA: Washinton State University, M.S. thesis.
12. Schaffer. 1971. Elavated temperature effect on the longitudinal mechanical properties of wood. PH. D. Thesis, Univ. Wisconsin, Madison. WI.
13. Wood Handbook : Wood as an Engineering Material. 1987. 3:24-25
14. 산림청. 1995. 국산재 시대를 대비한 새로운 목재문화창출 및 목재제품규격화 방안. p.129-133
15. 이 필우 등. 1992. 목재공학. 향문사. p.224-225