

# 구조용 집성재 제조용 접착제 (Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Resin) 유전 가열을 위한 고주파 전기장 세기 추산<sup>1</sup>

양 상 윤<sup>2</sup> · 한 연 중<sup>2</sup> · 박 용 건<sup>2</sup> · 엄 창 득<sup>3</sup> ·  
김 세 종<sup>3</sup> · 김 광 모<sup>3</sup> · 박 문 재<sup>3</sup> · 여 환 명<sup>2,4,†</sup>

## Estimation of Radio Frequency Electric Field Strength for Dielectric Heating of Phenol-Resorcinol-Formaldehyde Resin Used for Manufacturing Glulam<sup>1</sup>

Sang-Yun Yang<sup>2</sup> · Yeonjung Han<sup>2</sup> · Yonggun Park<sup>2</sup> · Chang-Deuk Eom<sup>3</sup> ·  
Se-Jong Kim<sup>3</sup> · Kwang-Mo Kim<sup>3</sup> · Moon-Jae Park<sup>3</sup> · Hwanmyeong Yeo<sup>2,4,†</sup>

### 요 약

집성재의 생산성 향상을 위한 고주파 가열 경화기술에 대해 연구하였다. 고주파가 유전체에 가해지면 내부에서 에너지 손실에 의한 발열이 발생한다. 집성재를 구성하는 라미나와 접착제는 유전체이므로 집성재에 고주파를 주사하면 내부에서 발열이 발생한다. 집성재 제조에 이용되는 대부분의 상온 경화형 접착제는 고온에서 빠른 경화가 이루어지므로 고주파 가열 기술을 이용하면 집성재 내부 접착층의 온도를 상승시킴으로써 빠른 경화를 유도할 수 있다. 본 연구에서는 낙엽송재와 phenol-resorcinol-formaldehyde (PRF) 접착제의 유전 특성을 평가하고, 집성재 내부의 접착층의 빠른 경화를 유도하는 고주파 가열 경화 기작을 이론적으로 분석하였다.

연구 결과, 온도상승인자인 PRF 접착제의 상대손실계수가 낙엽송재의 상대손실계수에 비해 높았으나, 온도상승저해인자인 밀도와 비열도 높았다. 그러나 상대손실계수의 비율이 온도상승저해인자의 비율보다 높기 때문에 고주파 가열에 의한 발열량은 접착제에서 더 높을 것으로 예상된다. 이러한 실험 결과를 이용한 이론적 접근을 바탕으로, 접착층이 목표온도까지 상승하기 위한 ISM 영역의 고주파 주파수 별 전기장의 상대 세기를 추정하였다.

<sup>1</sup> Date Received February 27, 2014, Date Accepted March 28, 2014

<sup>2</sup> 서울대학교 농업생명과학대학 산림과학부. Department of Forest Sciences, College of Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

<sup>3</sup> 국립산림과학원 임산공학부. Department of Forest Products, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

<sup>4</sup> 서울대학교 농업생명과학연구원, Research Institute for Agriculture and Life Sciences, Seoul National University, Seoul 151-921, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 여환명(e-mail: hyeo@snu.ac.kr)

## ABSTRACT

For enhancing productivity of glulam, high frequency (HF) curing technique was researched in this study. Heat energy is generated by electromagnetic energy dissipation when HF wave is applied to a dielectric material. Because both lamina and adhesives have dielectric property, internal heat generation would be occurred when HF wave is applied to glulam. Most room temperature setting adhesives such as phenol-resorcinol-formaldehyde (PRF) resin, which is popularly used for manufacturing glulam, can be cured more quickly as temperature of adhesives increases. In this study, dielectric properties of larch wood and PRF adhesives were experimentally evaluated, and the mechanism of HF heating, which induced the fast curing of glue layer in glulam, was theoretically analyzed.

Result of our experiments showed relative loss factor of PRF resin, which leads temperature increase, was higher than that of larch wood. Also, it showed density and specific heat of PRF, which are resistance factors of temperature increase, were higher than those of wood. It was expected that the heat generation in PRF resin by HF heating would occur greater than in larch wood, because the ratio of relative loss factor to density and specific heat of PRF resin was greater than that of larch wood. Through theoretical approach with the experimental results, the relative strengths of ISM band HF electric fields to achieve a target heating rate were estimated.

**Keywords :** Dielectric property, Dielectric heating, Power density, heating curing

## 1. 서 론

우리나라는 70년대부터 시행되어온 산림사업의 성공으로 인하여 임목축적량이 점차로 증가하였다. 현재에는 산림을 효과적으로 관리하기 위한 방안으로 간벌 및 벌목에 대한 필요성이 증가하면서, 국산재의 소비를 촉진할 시점에 이르렀다. 그러나, 현실적으로는 상대적으로 작은 직경의 임목이 산지에서 벌목되기 때문에 구조용의 대형 부재를 확보하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 구조용 공학목재들이 개발되어왔다. 구조용 공학목재 중, 1990년대부터 목재의 부가가치를 높이기 위해 활발히 개발, 이용되어온 구조용 집성재는 사용자가 원하는 규격의 대형부재를 제작할 수 있는 장점을 갖는다(Lee *et al.* 2003; Kim *et al.* 2007; Kim *et al.* 2009).

제재목을 이용하여 구조용 집성재를 제조하기 위해서는 제재목 사이에 접착제가 도포된다. 집성재 제조에 많이 사용되는 PRF 접착제는 대개 상온에서 24시간 이상의 경화시간을 요한다(Shim *et al.* 2005). 때문에 접착제가 경화하는 동안 일정 수준의 압력을 접착면에 계속 가해야 한다. 이로 인해 재래의 구조용 집성재 생산 공정은 대형 가압장치 내에서 장시간을 소요하므로 생산성의 측면에서 단점이 존재한

다. 접착제로부터 기인한 생산성 문제를 해결하기 위해서는 접착제의 경화시간을 단축시켜야 한다.

일반적으로 상온 경화형 수지인 PRF 접착제는 높은 온도에서 빠르게 경화한다(Pizzi 2003). 그러나 도포된 접착제의 빠른 경화를 위해 고온으로 가열하고자 하는 경우, 라미나 사이에 접착층이 존재하므로 전도나 대류 열전달에 의해서는 접착층을 가열하기가 어렵다. 이를 해결하기 위한 방법으로 접착제를 도포한 집성재에 고주파 유전가열기술을 응용할 수 있다. 접착제와 같은 유전체에 고주파를 가하는 경우, 전자기파가 갖는 에너지의 유전손실에 의해 내부에서 발열이 발생한다. 이를 이용하여 전자기 에너지를 열에너지로 전환하여 접착층의 온도를 상승시킬 수 있다(Pereira *et al.* 2004).

단위면적당 유전손실에 의한 발열량인 Power density (PD, 전력밀도)는 식 (1)에 따라 전기장의 세기, 주파수, 상대손실계수와 상관관계를 갖는다(Zhou and Avramidis 1999).

$$\frac{PD}{d} = (5.56 \times 10^{-11}) E^2 f \epsilon_r'' \quad (1)$$

PD	: Power density	(W/m <sup>2</sup> )
d	: Distance between electrical plates	(m)
E	: Electric field strength	(V/m)
f	: Frequency	(Hz)
$\epsilon_r''$	: Relative Loss factor	

재료의 발열에 의한 시간당 온도 상승률은 식 (2)에 따라 밀도, 비열과 상관관계를 갖는다.

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{PD/d}{\rho c_p} \quad (2)$$

T	: Temperature	(°C)
t	: Time	(s)
$\rho$	: Density	(kg/m <sup>3</sup> )
C <sub>p</sub>	: Specific heat	(J/g°C)

따라서 제한시간 내에 접착층의 온도를 정확하게 높이기 위해서는 상관관계를 갖는 물성을 조사해야 한다. 이에 본 연구에서는 집성재의 생산성을 높일 수 있는 고주파 유전가열 기술을 연구하고자 하였다. 집성재 제조에 이용되는 각 재료의 물성을 측정하고, 이를 토대로 목표로 하는 경화시간에 도달하기 위한 전기장의 세기를 추정하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 재료

본 연구에서는 집성재 제조에 이용할 제재목으로 낙엽송을 선택하였다. 접착제는 Oshika Shinko사의 Deernol-No. 40 (Phenol-resorcinol-formaldehyde, PRF)을 사용하였다. PRF 접착제는 경화제와 100:15의 비율로 혼합하여 준비하였다.

### 2.2. 방법

#### 2.2.1. 밀도 측정

낙엽송의 밀도를 측정하기 위해 150 mm × 150 mm × 20 mm의 크기를 갖는 시편을 제작하고, 시편을 10% 함수율로 조습하여 무게와 부피를 측정하였다. 경화제를 혼합한 액상 PRF 접착제의 밀도를 측정하기 위해 매스실린더를 이용해 부피와 무게를 측정하였다.

#### 2.2.2. 비열 측정

비열을 측정하기 위해 TA Instruments사의 Differential scanning calorimetry (DSC), Q200을 사용하였다. DSC는 시간당 온도변화량과 시간당 엔탈피 변화량을 측정하므로 다음의 식 (3)을 이용하여 비열을 구할 수 있다(Chae 2007).

$$c_p = \frac{dH/dt}{dT/dt} \times \frac{1}{m} \quad (3)$$

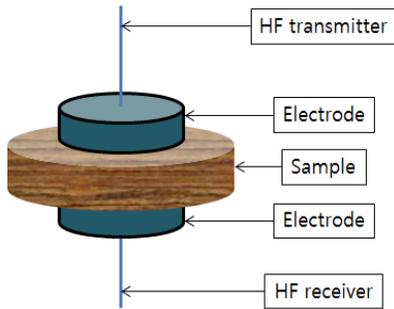
dH/dt : Enthalpy differences between empty (J) and specimen per seconds

m : mass of test specimen (g)

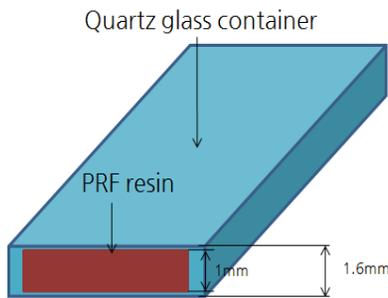
고주파 가열의 가동조건은 대기압 하에서 100°C를 초과하지 않을 것으로 예상하였다. 그러므로, 10°C에서 100°C까지의 온도를 검사영역으로 선정하였다. DSC의 승온속도는 분당 5°C로 가열-냉각-가열의 사이클로 주사하였으며, 이 중 2번째 사이클에서의 측정결과를 이용하여 비열을 결정하였다(Skoog *et al.* 2006).

#### 2.2.3. 유전특성 측정

목재와 PRF 접착제는 극성분자로 구성되기 때문에, 자성특성은 미미한 대신 높은 유전특성을 갖는다. 때문에 목재와 PRF 접착제는 전계에 의한 영향을 크게 받는다. 이러한 재료의 유전특성을 이용하여 발열과의 상관관계를 유도하려면 고주파 유전특성을 평가할 필요가 있다. 교번전계 내에서 유전체가 갖는 상대유전특성을 표현하기 위해 두 가지 변수를 정의



**Fig. 1.** Schematic diagram of larch's HF dielectric properties measurement.



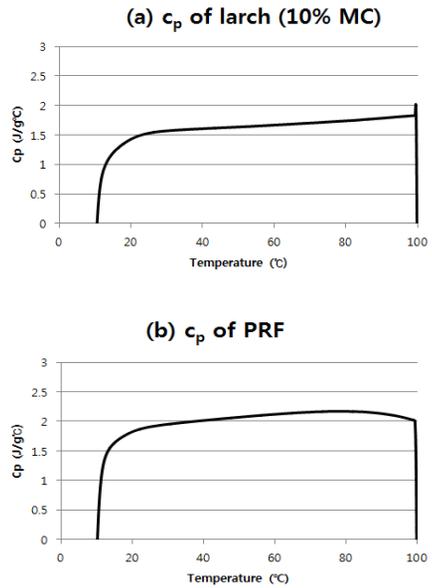
**Fig. 2.** Schematic diagram of PRF's HF dielectric properties measurement.

할 수 있으며, 이는 각각 아래의 식 (4)와 같이 상대 유전상수( $\epsilon_r'$ )와 상대손실계수( $\epsilon_r''$ )로 정의된다(Agilent Technologies Inc. 2006).

$$\epsilon_r = \epsilon_r' - j\epsilon_r'' \quad (4)$$

고주파 유전특성을 측정하기 위해 Impedance Analyzer(Agilent, E4991A)와 Dielectric Material Test Fixture (Agilent, 16453A)를 사용하였다. 유전특성 분석을 위한 고주파의 주파수 대역은 라디오파 범주인 10 MHz에서 50 MHz를 채택하였다. 낙엽송의 유전특성은 3 mm 두께로 3방향(종축, 방사, 접선방향)의 시편을 제작하여 Fig. 1과 같이 측정하였다.

본 연구에서 유전특성의 측정을 위해 사용한 장비는 고체시료에 적합한 평행평형의 치구이므로, 액상 접착제의 유전특성을 측정하기에 어려움이 있다. 때문에 석영유리용기를 제작하여 용기 내부에 접착



**Fig. 3.** Specific heat of specimens: (a) larch, (b) PRF.

제를 주입하여 간접적으로 고주파 유전특성을 측정하였다. 액상 접착제의 고주파 유전특성 측정 모식도는 Fig. 2와 같다.

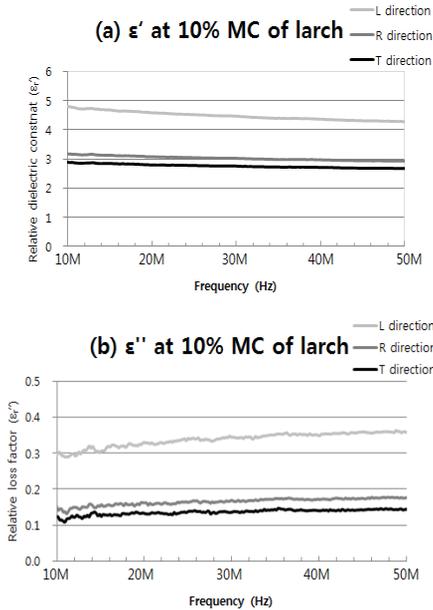
### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 밀도 측정

집성재를 제작하기 위해서는 건조된 라미나가 사용된다. 때문에 평균 10%로 조습한 낙엽송 시편을 준비하였다. 낙엽송 시편의 부피와 무게를 측정하여 얻은 밀도는 평균  $663.5 \text{ kg/m}^3$ 였으며, 경화제를 혼합한 액상 PRF 접착제의 밀도는  $1,043 \text{ kg/m}^3$ 으로 나타났다.

#### 3.2. 비열 측정

Fig. 3은 DSC와 식 (3)을 이용하여 측정한 낙엽송과 PRF의 비열을 나타낸다. 목재의 경우, 비열은 온도에 따라 증가하였다. PRF는  $80^\circ\text{C}$ 까지 비열이 증가하였고,  $80^\circ\text{C}\sim 100^\circ\text{C}$  구간에서는 감소하였다. 낙엽



**Fig. 4.** Relative dielectric constant ( $\epsilon_r'$ ) and loss factor ( $\epsilon_r''$ ) of larch wood: (a)  $\epsilon_r'$ , (b)  $\epsilon_r''$ .

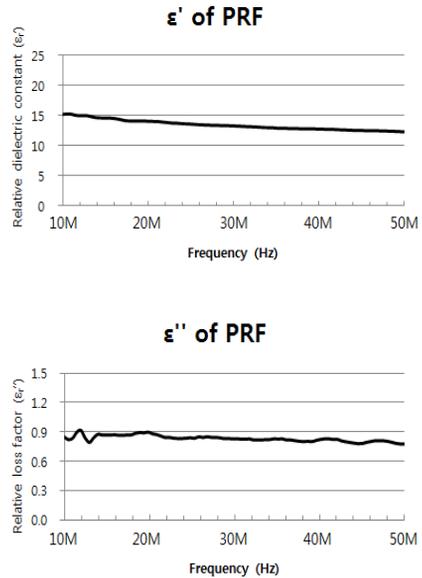
송의 평균 비열은 1.42 J/g°C였고 PRF 접착제의 평균 비열은 2.08 J/g°C였다.

### 3.3. 유전특성 측정

목재의 이방성을 고려하는 경우, 목재의 유전율은 일반적으로 길이방향의 유전율이 가장 크고, 방사, 접선방향 순으로 유전율이 낮아진다. 이는 세포의 기하학적 형상에 기인한 것으로 알려져 있다. 이방성에 따른 유전특성의 변화는 수중에 따라 차이를 나타내기 때문에 낙엽송의 이방성에 따른 유전율을 측정하였다(Fig. 4).

Fig. 4(a)에 나타난 것과 같이, 낙엽송의 상대유전상수는 측정주파수대역에서 주파수가 상승할수록 완만하게 감소하였다. 종축방향의 상대유전상수는 5에서 4 사이의 값을 나타내었으며, 방사방향과 접선방향의 상대유전상수는 3.2에서 2.8사이로 나타났다.

Fig. 4(b)에 나타난 것과 같이, 낙엽송의 상대손실계수는 측정주파수대역에서 주파수가 상승할수록 증



**Fig. 5.** Relative Dielectric constant ( $\epsilon_r'$ ) and loss factor ( $\epsilon_r''$ ) of PRF resin: (a)  $\epsilon_r'$ , (b)  $\epsilon_r''$ .

가하였다. 종축방향의 상대손실계수는 0.3에서 0.35 사이의 값을 나타내었으며, 방사방향과 접선방향의 상대손실계수는 0.1에서 0.18사이로 나타났다.

실험 결과, 전기장의 방향과 세포장의 방향이 일치하는 경우인 종축방향의 상대유전상수 및 상대손실계수가 가장 높았으며, 방사방향과 접선방향의 차이는 방사조직의 배향차이에 의해 발생하는 것으로 판단된다.

고주파 가열의 목표인 경화제를 혼합한 액상 PRF 접착제의 상대유전상수와 상대손실계수는 Fig. 5에 나타난 것과 같이 주파수가 상승할수록 감소하였다. 측정주파수대역에서 접착제의 상대유전상수는 15에서 12, 상대손실계수는 0.9에서 0.7 사이의 값을 나타내었다. 결과적으로, PRF 접착제의 상대손실계수가 낙엽송재의 상대손실계수에 비해 약 4~6배 높게 나타난 것으로 나타났다. 따라서, 식 (1)에 따라 고주파 가열시 에너지 손실에 의해 접착층이 낙엽송재에 비해 4~6배 높은 발열이 일어날 것으로 예측하였다.

**Table 1.** Estimated relative strength of electric field at each ISM bands

Frequency (MHz)	Relative strength of electric field
13.56	1
27.12	0.71
40.68	0.58

### 3.4. 고주파 가열경화의 출력 추정

본 연구의 실험 결과를 이용하여 목표 경화온도 도달에 필요한 전기장의 세기를 정하고자 하였다.

전자기파는 통신 등 다양한 분야에서 이용되므로, 산업적으로 이용가능한 주파수는 ISM band로 정해져 있다. 이 중 HF영역에서 개방된 주파수는 13.56, 27.12, 40.68 MHz이다. 따라서 산업적으로 이용가능한 주파수에서 고주파 가열을 수행해야 한다.

본 연구에서는 접착층을 상온인 25°C에서 10분 내 80°C까지 높이는 것을 목표로 하였다. 이러한 목표를 달성하기 위해 각각의 ISM band의 주파수를 갖는 전자기파가 목표 온도 도달을 위해 가져야 하는 최소 전기장의 세기를 추정하였다.

식 (1)과 (2)를 조합하면, 목표 시간 내 목표 온도에 도달하기 위해 고주파 가열경화 시스템이 가져야 하는 전자기파의 전기장의 세기를 다음 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$E = \sqrt{\frac{1}{5.56 \times 10^{-11}} \times \frac{\partial T}{\partial t} \frac{\rho c_p}{f \epsilon_r''}} \quad (5)$$

집성재에 고주파를 가하게 되면 라미나와 접착층 모두 가열되나, 앞서 획득한 밀도, 비열, 상대손실계수를 식 (2)에 대입하면, 시간당 온도 상승률은 접착층이 라미나에 비해 높다. 따라서 가열 중 접착층과 라미나 사이의 온도 구배가 발생한다. 그러나, 본 연구에서는 접착층과 라미나 사이의 온도차에 의한 열전달은 고려하지 않고 이론적 전기장의 상대 세기를 추정하였다.

Table 1과 같이, 주파수가 높아질수록 고주파 가열

경화장치가 가져야 할 전기장의 세기가 작아졌다. 이는 주파수가 증가할수록 상대손실계수가 작아지지만, 주파수가 그보다 더 높아져 Power density가 상승하여 발열량이 증가하기 때문이다.

## 4. 결 론

고주파 유전 가열은 집성재 내부에 위치한 접착제의 온도를 효율적으로 높여 빠른 경화를 달성할 수 있는 장점을 갖는다. 고주파 유전 가열 경화를 효과적으로 수행하기 위해서는 집성재의 구성요소인 라미나와 접착제의 밀도, 비열, 상대손실계수가 필요하다. 본 연구에서는 ISM band에서의 PRF의 유전가열 성능을 조사하였다. 그 결과, 주파수가 높아질수록 낮은 전기장 세기에서 목표 온도에 도달할 것으로 예상되었다. 그러나, 접착층과 라미나 간의 온도 구배에 따른 열확산은 고려되지 않았으므로 이에 대한 연구를 수행해야 정확한 출력 추산이 가능할 것으로 판단된다. 본 연구결과는 고주파 가열경화기를 설계할 때 발전기의 주파수 및 그에 따른 출력성능을 선택할 수 있는 근거자료로 사용가능하리라 기대된다.

## REFERENCES

- Agilent Technologies, Inc. 2006. Application note : Basic of measuring the dielectric properties of materials. Agilent Technologies, Inc. USA. pp. 4~6.
- Chae, S.H. 2007. Specific Heat Measurements of Several Polymer Materials. DanKook University Master's Thesis. Korea pp. 26~27
- Kim, K.M., Shim, K.B., Park, J.S., Kim, W.S., Lim, J.A., Yeo, H. 2007. Development of Pitch Pine Glued Laminated Timber for Structural Use -Improvement of Bending Capacity of Pitch Pine Glulam by Using Domestic Larch Lamina-. Mokchae Konghak 35(6): 13~22.
- Kim, K.M., Shim, S.R., Shim, K.B., Park, J.S., Kim, W.S., Kim, B.N., Yeo, H. 2009. Development of

- Structural Glued Laminated Timber with Domestic Cedar. Mokchae Konghak 37(3): 184~191.
- Lee, J.J., Kim, K.M., Han, J.S., Kim, J.K. 2003. Evaluation of the Bending Properties of Glulam with Different Cross-Section. Mokchae Konghak 31(5): 65~71.
- Pereira, C., Blanchard, C., Carvalho, L., Costa, C. 2004. High frequency heating of medium density fiberboard (MDF): theory and experiment. Chemical Engineering Science 59(4): 735~745.
- Pizzi, A. 2003. Handbook of Adhesive Technology 2nd ed. Marcel Dekker Inc., New York.
- Shim, S.R., Yeo, H., Shim, K.B. 2005. Evaluation of Shear Bond Strength and Adhesive Bond Durability of Mixed Species Structural Glued Laminated Timber. Mokchae Konghak 33(1): 87~96.
- Skoog, D., Holler, J., Crouch, S. 2006. Principles of instrumental analysis 6th ed. Saunders College Publishing, New York. pp. 575~577.
- Zhou, B., Avramidis, S. 1999. On the loss factor of wood during radio frequency heating. Wood Science & Technology 33(4): 299~310.