

## 반복하중하에서 다보결합부의 역학적 특성<sup>\*1</sup>

장 상 식<sup>\*2</sup>

# Mechanical Characteristics of Dowel Joints under Cyclic Loads<sup>\*1</sup>

Sang-Sik Jang<sup>\*2</sup>

### ABSTRACT

Cyclic tests were performed with dowel joints which are being widely used for furniture manufacturing in Korea. In this study, effects of various factors—such as species of joint members, diameter and length of dowels, and space between dowels—on stiffness, strength and damping ratio of joints were evaluated and concluded as follows:

1. Under cyclic loads, failure of dowel joints were caused by bending failure of dowels.
2. Dowel joints were evaluated to be stiff but general load carrying capacities were relatively low.
3. Joint moduli and damping ratios of dowel joints decreased as diameter and length of dowels, and space between dowels increased.
4. In dowel joints, properties of dowel itself have greater effects on stiffness and strength of joints than properties of joint members.

### 1. 서 론

목재부재들은 구조부재 사이의 결합부에 의하여 목구조를 형성하고 목구조에 작용하는 하중은 결합부를 통하여 다른 부재에 전달되거나 여러개의 부재로 분산된다. 목구조의 파괴는 하중의 전달 또는 지지과정에서 목재부재는 아직 견재하나 결합부의 과도한 변형 또는 파괴에 의하여 목구조 전체의 기능을 상실하는 경우가 일반적이다. 그러므로 결합부의 특성을 올바르게 이해하고 그 약점을 보강하는 것이 목구조 전체의 구조적 성능 향상에서 가장 먼저 생각하여야 할 부분이라고 하겠다.

결합부는 부재간의 요철에 의한 맞춤결합부와 보조철

물을 사용한 철물결합부로 크게 나눌 수 있다. 철물결합부는 최근에 목조건축을 중심으로 발달되었으며 간단하고 강도가 뛰어난 결합방법으로서 각종 보조철물들이 개발되고 있다. 맞춤결합부는 우리나라에서도 오랜 옛날부터 건축이나 가구 등의 제작에 널리 사용되어 왔으며 그 대표적인 예로 장부결합부와 다보결합부를 들 수 있다.

각종 결합부들이 오랜 역사를 가지고 사용되어 오고 있으나 이들에 관한 과학적이고 체계적인 연구는 비교적 근래에 이르러 시작되었다. 이러한 연구들은 주로 철물결합부(장, 1989; Jang & Polensek, 1989; McAlister, 1989)에 집중되어 있으며 근래에 이르러 그 용도가 확대되고 있는 손가락결합부(Bohannan & Kanvik,

\*1 접수 1995년 9월 18일 Received September 18, 1995.

본 연구는 1994년도 한국과학재단 연구비 지원(과제번호: 941-0600-017-1)에 의해 수행되었음.

\*2 충남대학교 농과대학 College of Agriculture, Chungnam National University, Taejon 305-764, Korea

1969)와 LVL에서의 맞댄 결합부(Larson *et al.*, 1987) 등에 관한 연구도 점차 이루어지고 있다. 가구분야에서는 다보 결합부(김·장, 1993; Ekelman, 1969·1978) 및 장부결합부(Ekelman, 1978)가 주된 결합형태로 사용되고 있으나 이들에 관한 연구는 정적하중하에서의 강도 및 강성도 평가만이 이루어지고 있는 실정이다. 이들 목재부재 사이의 합부는 회전결합부와 고정결합부의 중간형태인 반고정결합부(semi-rigid joint)의 특성을 지니고 있으며 접착제의 사용(Ebewele *et al.*, 1980)에 의하여 그 강성이 증가되는 경향을 보이고 있다.

목재 결합부는 부재간에 하중을 전달시켜 주는 역할을 수행하며 이 때에 각 부재간의 유기적 관계의 척도가 되는 하중분담(load sharing) 및 부분복합작용(partial composite action)을 나타낸다. 목재결합부의 이와 같은 작용의 정도는 결합부의 강성도와 강도적 특성에 따라 변이가 있다. 특히 목재결합부는 장기 및 반복하중하에서 변형이 증가되며 이로 인해 강성도의 감소가 초래된다(Foschi·Bonac, 1977; Jenkins *et al.*, 1979; Soltis·Mtenga, 1985). 그러므로 장기 및 반복하중하에서 목재결합부의 하중분담 및 부분복합작용의 정도는 하중의 크기, 기간 및 속도에 의하여 영향을 받게 된다.

반복 하중하에서 목재결합부는 부재간의 미끄러짐과 마찰에 의한 감쇠(damping)를 나타낸다. 감쇠란 부재에 전달된 진동에너지가 내부마찰에 하여 흡수되는 현상을 의미하는데 구조물이 진동에 견디는 능력은 구조물의 감쇠능력에 좌우된다. 목재구조물에서 진동에너지를 흡수하는 감쇠의 주된 요인은 부재의 내부마찰에 의한 감쇠와 결합부내에서 부재간의 접촉면에서의 마찰에 의한 감쇠를 들 수 있는데 부재의 감쇠능력은 결합부의 감쇠능력에 비하여 무시될 수 있을 정도로 작다(Polensek, 1975·1976; Yeh *et al.*, 1971). 그러므로 결합부의 감쇠가 목구조물의 진동에 대한 저항에 가장 큰 영향을 미친다고 할 수 있다.

다보결합부는 주로 의자, 탁자 및 책상 등과 같은 뼈대형 가구의 부재간 결합부로 널리 사용되고 있다. 이들 뼈대형 가구들은 사람들의 일상생활에서 앉거나 그 위에서 여러가지 작업을 수행하기 위한 도구로 사용되고 있다. 그러므로 이러한 가구들은 사용중에 여러가지 형태의 주기적으로 변하는 반복하중을 받게 되며 그 수명은 이러한 반복하중하에서의 역학적 특성에 좌우된다고 할 수 있다.

본 연구에서는 뼈대형 가구에서 널리 사용되고 있는 다보결합부에 있어서 부재의 수종, 장부의 직경과 길이 그리고 장부사이의 간격 등이 반복하중하에서 결합부의 강성도, 강도 및 감쇠에 미치는 영향에 대하여 조사하였다.

## 2. 결합계수 및 감쇠비

### 2.1 결합계수

결합부에서는 작용하는 모멘트에 대한 결합부의 회전비를 결합계수(joint modulus or stiffness modulus)라 하여 결합부의 모멘트에 대한 저항능력을 나타내는 값으로 사용하고 있다. 일반적으로 강성계수의 측정을 위한 시험은 수직 및 수평부재 사이의 결합부에 수직하중을 가하여 실시하고 다음 식에 의하여 강성계수 Z의 값을 계산한다(박·이, 1990; Ekelman, 1978).

$$Z = \frac{\theta}{M \cdot P} = Z = \frac{\theta}{M \cdot P} = \frac{\arctan(\frac{\Delta}{l})}{P \cdot l} \quad (1)$$

여기서  $\theta$  = 결합부의 회전 (rad)  
M = 모멘트 (kgf-cm)  
 $\Delta$  = 시험편 끝부분의 변형(cm)  
l = 결합부재의 길이 (cm)  
P = 하중의 크기(kgf)

### 2.2 감쇠비

인장 및 압축 양방향의 반복하중하에서 감쇠계수(damping coefficient)는 다음과 같이 최대감쇠력(maximum damping force)과 최대속도(maximum velocity)사이의 비로 표현된다(장, 1989).

$$C = \frac{F_{\max}}{V_{\max}} = \frac{P_0}{\omega d} \quad (2)$$

여기서 C = 감쇠계수  
 $F_{\max} = P_0$  = 최대감쇠력  
 $V_{\max}$  = 최대속도  
 $\omega$  = 자연주파수(natural frequency)  
d = 변형량

목재는 점탄성의 성질을 갖고 있으므로 점성감쇠(viscous damping)의 성질이 적용되어야 한다. 점성감쇠의 경우에  $P_0$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$P_0 = \frac{E_d}{\pi d} \quad (3)$$

여기서  $E_d$  = 한주기당 감소된 에너지의 양,  
식 (3)를 식 (2)에 대입하면

$$C = \frac{E_d}{\pi \omega d^2} \quad (4)$$

임계감쇠(critical damping)는 미감쇠와 과감쇠를 구분하는 경계점에서의 감쇠현상을 의미하는데 첫번째 주기에서 진동의 성질이 완전히 소멸되는 경우에 해당된다. 점성감쇠에서 임계감쇠는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$C_c = 2m\omega = \frac{2k}{\omega} \quad (5)$$

여기서  $C_c$  = 임계감쇠  
 $m$  = 질량  
 $k$  = 강성도(stiffness)

식 (5)에서 강성도는 정적하중-변형선도 아래의 면적  $A_s$ 를 사용하여 다음식과 같이 나타낼 수 있다.

$$k = \frac{2A_s}{d^2} \quad (6)$$

식 (6)를 식 (5)에 대입하면

$$C_c = \frac{4A_s}{\omega d^2} \quad (7)$$

일반적으로 감쇠능력의 평가에는 감쇠계수보다 감쇠비(damping ratio)를 사용하는 것이 편리하다. 감쇠비는 임계감쇠에 대한 감쇠계수의 비로 표현될 수 있다. 그러므로 식 (4)를 식 (7)로 나누면 감쇠비에 관한 식을 얻을 수 있다.

$$D_r = \frac{C}{C_c} = \frac{E_d}{4\pi A_s} \quad (8)$$

여기서  $D_r$  = 감쇠비.

식 (8)에서  $A_s$ 는 정적하중-변형선도 아래의 면적을 나타내며 주어진 주기에서 결합부에 전달된 이용가능한 에너지의 양을 의미한다.  $E_d$ 는 한 주기당 에너지의 감소량으로서 반주기에 대한 에너지의 감소량을 사용하면 감쇠비는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$D_r = \frac{A_d}{2\pi A_s} \quad (9)$$

여기서  $A_d$  = 반주기당 감소된 에너지의 양

식 (9)에 100을 곱하면 % 단위의 감쇠비를 계산할 수 있다.

감쇠시험은 4단계의 반복하중을 가하여 실시하였다(장, 1989). 각 하중 단계별로 3주기의 반복하중을 가하

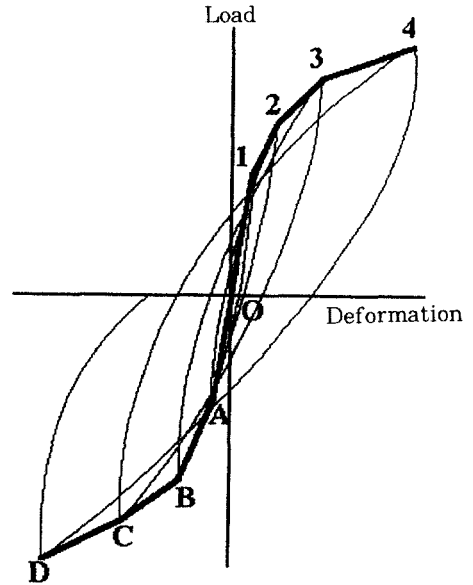


Fig. 1. Definition of stepwise joint moduli in cyclic tests.

였으며 그 중에서 2번째 주기의 하중-변형선도로 부터 감쇠계수 및 결합계수를 계산하였다. 하중함수의 각 단계별 2번째 주기의 하중함수 하에서 구한 하중변형선도는 그림 1과 같으며 원점과 각 꼭지점을 연결한 직선의 기울기를 각 하중단계에서의 결합부의 강성으로 볼 수 있다. 이 단계별 직선들로부터 각 하중단계에서의 모멘트와 측정지점의 변형량을 계산하고 변형량은 다시 결합부의 회전각으로 환산한 후 식 (1)로부터 각 하중단계별 결합계수를 구하였다. 각 하중단계별 결합계수는 그림 1에서 X축의 상부(직선 O-1-2-3-4)와 하부(직선 O-A-B-C-D)에 대한 값의 평균치로 계산하였다.

### 3. 재료 및 방법

#### 3.1 공시재료

본 연구에서 사용되는 시험편을 제작하기 위하여 육송(radiata pine)과 라왕(laun)을 사용하였다. 시중제재소에서 공시목을 구입하고 필요한 치수로 제재하여 3~4개월 동안 평형상태에 도달할 때까지 실내에서 조습처리를 실시하였다. 부재의 치수는 두께와 폭을 각각 30 및 50mm로 하였으며 길이는 300mm로 하였다.

결합부 제작에 사용된 다보(dowel)는 소련산 자작나무(larch)로 제작된 것을 시중에서 구입하였으며 접착제

Table 1. Dowel joint specimens used for cyclic tests.

Specimen No.	Dowel diameter (mm)	Dowel length (mm)	Space between dowels(mm)
6-40-25	6	40	25
6-60-15	6	60	15
6-60-20	6	60	20
6-60-25	6	60	25
6-80-25	6	80	25
6-40-25	8	40	25
8-60-15	8	60	15
8-60-20	8	60	20
8-60-25	8	60	25
8-80-25	8	80	25

는 시중에서 판매되는 초산비닐수지(수지율 40%)를 사용하였다. 다보의 직경은 6mm와 8mm의 두가지를 사용하였고 다보의 길이와 다보사이의 간격이 결합부의 강도에 미치는 영향을 측정하기 위하여 길이는 40, 60 및 80mm 그리고 간격은 15, 20 및 25mm의 변이를 주었다.

### 3.2 시험방법

다보결합부의 결합부재는 육송과 라왕의 2가지 수종으로 제작되었으며 각 수종에 대하여 표 1과 같이 10가지의 시험편을 제작하여 반복하중시험을 실시하였다. 반복하중시험을 위하여 수직부재를 고정시키고 수평부재에 하중을 가하면서 수평부재의 변형을 측정할 수 있는 시험장치를 제작하였다 (장, 1989).

## 4. 결과 및 고찰

### 4.1 다보결합부의 역학적 거동

본 연구에서 사용된 다보결합부에는 2개의 다보가 사용되었다. 다보결합부에 외력이 작용하면 이 하중은 결합부에 모멘트로 전달되며 이 모멘트는 2개의 다보를 통하여 작용하는 우력으로 지지된다. 따라서 하중의 방향에 따라 상부 또는 하부의 다보에는 압축력 또는 인장력이 작용하며 이는 다보와 다보 구멍사이의 집착층의 전단력으로 지지된다. 반복하중하에서는 각 다보에 압축과 인장의 반복하중이 작용하며 변형이 증가될수록 휨하중의 형태로 작용하여 최종적으로는 다보의 휨 파괴에 의하여 결합부의 파괴가 발생한다.

### 4.2 결합계수

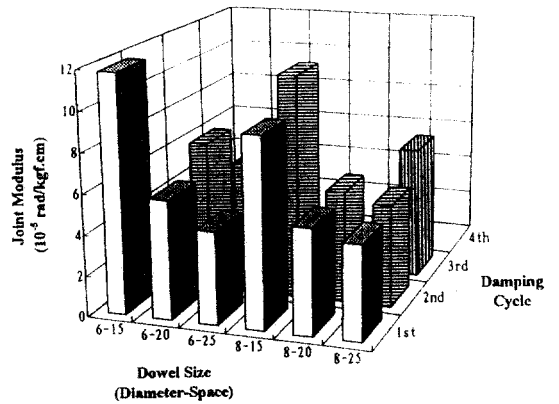


Fig. 2. Joint moduli of dowel joints composed of radiata pine members and dowels of 60mm length: 8~25 specimens failed at 4th cycle and others failed at 3rd cycle.

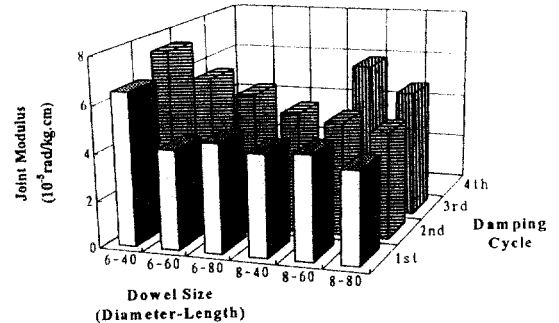


Fig. 3. Joint moduli of dowel joints composed of radiata pine members and dowels of 25mm space: 8~60 and 8~80 specimens failed at 4th cycle and others failed at 3rd cycle.

4단계의 반복하중하에서 다보결합부의 결합계수의 변화는 그림 2, 3, 4 및 5와 같다. 다보결합부의 반복하중 시험에서는 모든 시험편에 대하여 10, 20, 30 및 40kgf의 하중단계를 적용하였다.

그림 2는 육송부재에서 60mm 길이의 다보를 사용한 경우의 결합계수의 변화이다. 전체적으로 8-60-15 시험편의 2번째 하중단계와 6-60-15 시험편에 대한 결합계수만이 10~4rad/kgf·cm 수준으로서 강성이 높게 나타났다.

8-60-20 시험편의 일부와 8-60-25 시험편만이 3단계의 하중까지 지지할 수 있는 능력을 보였으며 나머지는 모두 2단계까지만을 지지하였고, 6-60-15 시험편은 1단

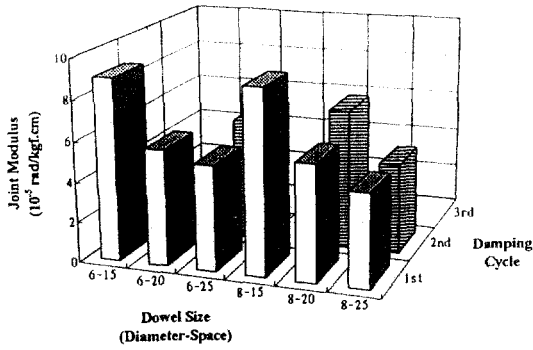


Fig. 4. Joint moduli of dowel joints composed of laun members and dowels of 60mm length: 6~15 and 6~20 specimens failed at 2nd cycle and others failed at 3rd cycle: Part of 8~25 specimens failed at 4th cycle.

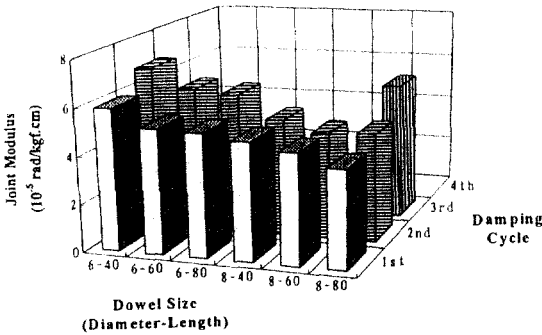


Fig. 5. Joint moduli of dowel joints composed of laun members and dowels of 25mm space: 8~80 and part of 8~60 specimens failed at 4th cycle and others failed at 3rd cycle.

계 하중만을 지지할 수 있었다. 그러므로 다보결합부가 강성은 비교적 높게 나타났으나 전체적인 하중지지능력을 나타내는 강도는 낮은 것으로 평가되었다. 다보의 직경이 6mm에서 8mm로 증가됨에 따라 결합계수가 감소하였으며 다보 사이의 간격이 증가됨에 따라 역시 결합계수가 감소하였다.

그림 3은 육송부재에서 다보사이의 간격이 25mm인 경우에 다보의 길이 변화에 따른 결합계수의 변화를 보여주고 있다. 8-60-25 및 8-80-25 시험편만이 3단계의 하중까지 지지하였으며 나머지는 2단계의 하중까지만 지지하였다. 다보의 길이가 증가함에 따라 결합계수는 감소하는 경향을 나타내었다.

Table 2. Damping ratios of dowel joints composed of radiata pine members and dowels of 60mm length.

Dowel size (diameter -Space)	Damping ratios (%) at			
	1st Cycle	2nd Cycle	3rd Cycle	4th Cycle
6-15	6.5	-	-	-
6-20	4.1	4.3	-	-
6-25	3.6	3.7	-	-
8-15	4.1	5.3	-	-
8-20	3.7	4.3	-	-
8-25	3.2	3.1	4.2	-

\* Specimen failed.

Table 3. Damping ratios of dowel joints composed of radiata pine members and dowels of 25mm space.

Dowel size (diameter -length)	Damping ratios (%) at			
	1st Cycle	2nd Cycle	3rd Cycle	4th Cycle
6-40	4.3	4.1	-	-
6-60	3.6	3.7	-	-
6-80	3.3	3.6	-	-
8-40	3.6	3.6	-	-
8-60	3.2	3.1	4.2	-
8-80	2.9	2.5	3.3	-

\* Specimen failed.

그림 4는 라왕 부재에서 길이 60mm의 다보가 사용된 경우에 다보사이의 간격이 결합계수에 미치는 영향을 나타내고 있으며 그림 5는 라왕 부재에서 다보사이의 간격이 25mm인 경우에 다보의 길이 변화가 결합계수에 미치는 영향을 보여주고 있다. 그림 4와 5를 그림 2 및 3과 비교하여 보면 육송부재와 라왕 부재 사이에 비슷한 경향을 나타내고 있으며 결합부의 강성도 및 강도에는 결합 부재의 영향이 크지 않고 다보의 재질이 중요함을 알 수 있다.

#### 4.3 감쇠비

각 하중단계별 감쇠비의 변화는 육송부재에 대하여는 표 2와 3 그리고 라왕부재에 대하여 표 4와 5에 수록하였다. 표 2, 3, 4 및 5에서 보면 다보의 치수와 간격에 따라 약간의 변이는 있으나 전체적으로 3~6% 범위의 감쇠비를 나타내었다. 다보의 치수 및 간격에 따른 감쇠비의 변화 경향은 그림 2, 3, 4 및 5의 결합계수의 변화 경

Table 4. Damping ratios of dowel joints composed of laun members and dowels of 60mm length.

Dowel size (diameter -Space)	Damping ratios (%) at			
	1st Cycle	2nd Cycle	3rd Cycle	4th Cycle
6-15	4.3	-*	-	-
6-20	3.4	-	-	-
6-25	2.9	3.5	-	-
8-15	3.5	-	-	-
8-20	2.6	3.6	-	-
8-25	3.2	3.2	-	-

\* Specimen failed.

향과 비슷하였다. 다보 길이가 증가할수록 감쇠비는 감소 하였으며 다보 사이의 간격이 증가할수록 역시 감쇠비가 감소하는 경향을 나타내었다. 반복하중이 증가함에 따라 감쇠비도 증가하는 경향은 나타내었으나 그 차이가 그렇게 크지는 않았다. 다보결합부의 감쇠비는 장부결합부의 감쇠비보다 전체적으로 낮은 값을 나타내었다.

## 5. 결 론

우리 나라에서 뼈대형 목재가구에 널리 사용되고 있는 다보결합부에 대한 반복하중시험을 실시하였다. 본 연구에서 결합부재의 수종, 다보의 직경과 길이 및 다보 사이의 간격 등이 결합부의 강성도, 강도 및 감쇠비에 미치는 영향을 조사한 결과는 다음과 같다:

1. 반복하중하에서 다보결합부의 파괴는 궁극적으로 다보의 휨파괴에 의하여 발생되었다.
2. 다보결합부는 비교적 강성이 높은 결합부로 분류될 수 있었으나 전체적인 하중지지 능력은 낮은 것으로 평가되었다.
3. 다보결합부에서 다보의 직경, 길이 및 다보사이의 간격이 증가할 수록 결합계수 및 감쇠비는 감소하는 경향을 나타내었다.
4. 다보결합부에서는 결합부의 강성도 및 강도에 부재보다는 다보자체의 재질이 더욱 큰 영향을 주는 것으로 나타났다.

## 참 고 문 헌

1. 김성욱, 장상식, 1993. 상자형 목재가구 결합부의 역학적성질. *한국 가구학회지* 4(1):33~40

Table 5. Damping ratios of dowel joints composed of laun members and dowels of 25mm space.

Dowel size (diameter -length)	Damping ratios (%) at			
	1st Cycle	2nd Cycle	3rd Cycle	4th Cycle
6-40	3.4	4.9	-*	-
6-60	2.9	3.5	-	-
6-80	3.2	3.3	-	-
8-40	3.2	3.4	-	-
8-60	3.2	3.2	-	-
8-80	3.2	3.5	3.6	-

\* Specimen failed.

2. 박희준, 이필우, 1990. 목재와 목질판상재료의 dowel-joint 반강접합 특성에 관한 비교연구. *한국가구학회지* 1(1): 12~25
3. 장상식, 1989. Creep에 의한 못결합부의 강성도의 변화에 관한 연구. *목재공학* 17(4): 35~43
4. 장상식, 강호양, 이화형, 1994. 손가락결합부재의 감쇠거동. *목재공학* 22(4): 43~50
5. Atherton, G. H. 1983. Ultimate strength of structural particleboard diaphragms. *Forest Prod. J.* 33(5): 22~26
6. B.Bohannan and K. Kanvik. 1969. Fatigue strength of finger joint. USDA Forest Products Lab., Res. Pap. FPL 114, Madison, WI, USA.
7. R.O.Ebewele, B.H.River and J.A.Koutsky. 1980. Tapered double cantilever beam fracture tests of phenolic-wood adhesive joints. *Wood & Fiber* 12(1): 40~65
8. C.A.Ekelmen. 1969. Engineering concepts of single-pin dowel joints. *Forest Products J.* 19(12): 52~60
9. R.O.Foschi and T. Bonac. 1977. Load-slip characteristics for connections with common anils. *Wood Sci.* 9(3): 118~125
10. R.O.Foschiand T. Bonac. 1978. Strength design of furniture. Tim. Tech. Inc., West Lafayette, Indiana, USA.
11. C.J.Gatchell and C. C. Peters. 1981. The serpentine end-matched joints: Evaluating strength and stability. USDA Forest Products Lab., Res. Pap. NE-485, Madison, WI.

USA.

12. Jang, S. and A. Polensek. 1989. Theoretical models for creep-slip of nailed joints between wood and wood-based materials. *Wood Sci. & Tech.* 23: 237~249.
13. Jang, S. Y. Fujimoto and Y. Mataka. 1992. Fatigue behavior of framing-to-sheathing nailed joints. *Forest Prod. J.* (in process).
14. Jenkins, J. L., A. Polensek and K. M. Bastendorff. 1979. stiffness of nailed wall joints under short- and long-term lateral loads. *Wood Sci.* 11(3): 145~154
15. Larson, D. S., L. B. Sandberg, T. L. Laufanberg, G. P. Krueger and R. E. Rowlands. 1987. Butt joint reinforcement in parallel-laminated veneer (PLV) lumber. *Wood & Fiber Sci.* 19(4): 414~429
16. McAlister, R. H. 1989. Interaction between truss plate design and type of truss framing. *Forest Prod. J.* 39(7/8): 17~24
17. Polensek, A. 1975. Damping capacity of nailed wood-joint floors. *Wood Sci.* 8(2): 141~151.
18. Polensek, A. 1976. Damping of roof diaphragms with tongue-and-groove decking. *Wood Sci.* 9(2): 70-77
19. Polensek, A. 1989. Nonlinear Damping in nailed wood components. In Proceedings of the 5th Engineering Mechanics Division Specialty Conference. EM Division/ASCE. Laramie, Wyoming: 301~304
20. Polensek, A. and K. M. Bastendorff. 1979. Damping roof diaphragms: Tongue-and-groove decking constructed with glued lumber panels. *Wood Sci.* 11(3): 155~158
21. Polensek, A. and S. Jang. 1989. Predicting creep of nailed lumber-to-plywood joints. *J. Eng. Mech.* 115(10): 2182~2198
22. Soltis, L. A. and P. V. A. Mtenga. 1985. Strength of nailed wood joints subjected to dynamic load. *Forest Prod. J.* 35(11/12): 14~18
23. Yeh, C. T., G. J. Hartz and C. B. Brown. 1971. Damping sources in wood structures. *J. Sound Vib.* 19(4): 411~419