

## 나선형 철선못 접합부의 항복내력 및 강성 예측\*<sup>1</sup>

황 권 환\*<sup>2†</sup> · 심 국 보\*<sup>2</sup>

### Estimation of Yield strength and Slip Modulus for Helically Threaded Nail Connection \*<sup>1</sup>

Kweonhwan Hwang\*<sup>2†</sup> · Kug-Bo Shim\*<sup>2</sup>

#### 요 약

기둥-보 구조와 경골목구조가 혼합된 공법은 경골목구조가 심벽 또는 평벽 요소로써 구조내력성능의 대부분을 차지하고 있다. 경골목구조의 수평진단내력성능은 면재에 대한 못접합부의 진단성능으로부터 예측할 수 있으며, 못접합부는 못의 휨내력성능을 이용하여 예측할 수 있다. 못접합에 의한 내력벽의 항복내력과 벽체 강성을 예측하기 위한 기초 연구로써 못의 휨내력성능을 이용한 못접합부의 항복내력 및 접합계수(초기강성)를 검토하였다. 못접합부 내력성능 예측에는 각각의 주부재에 대해 일반 지압내력 및 지압강성을 이용하고, 파스너인 나선형 철선못의 휨시험에 의한 휨항복내력성능을 이용하였다. 홈가공부의 지름에 의한 항복내력은 예측 정밀성이 우수하였으나, 접합계수는 낮게 예측되었다. 그 원인으로 주부재에서는 비중의 영향, 측면부재에서는 못머리지름에 의한 인발, 접합부에서는 못머리부의 지압 및 모멘트저항 등이 영향을 끼침을 알 수 있었으며, 이에 대한 차후 검토가 요구된다.

#### ABSTRACT

In the post-beam structure, the infilled light-frame construction provides most shear strengths. Shear properties of the light-frame structure can be estimated from the shear properties of nailed connection for the sheathings, and those of nailed connections can be done from nail bending strengths. For the basic study to predict the yield strength and the slip modulus of a nailed sheathing shear wall, those of a nailed joint were examined from nail bending strengths. To estimate shear properties of a nailed connection, referenced bearing strength and bearing constant

\*<sup>1</sup> 접수 2009년 7월 31일, 채택 2009년 8월 6일

\*<sup>2</sup> 국립산림과학원 녹색자원이용부 탄소순환재료과, Div. of Wood Engineering, Dept. of Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 주저자(corresponding author) : 황권환(e-mail : m54290@chol.com)

for the wood members and the experimental nail bending strengths of the helically threaded nail were applied. The yield strength using the diameter at grooves instead of shank diameter was well coincided with the experimental value, but the slip modulus was estimated much smaller. The effective factors, specific gravity for the main member, withdrawal by nail head diameter to the side member, and embedment and moment at the nail head were considered, and further examinations are needed for the precise prediction of the nailed connections.

**Keywords:** nailed connection, yield strength, slip modulus, bearing strength, bearing constant, helically threaded nail

## 1. 서 론

현대 목조건축에 있어 국산 낙엽송(*Japanese larch, Larix kaempferi*) 집성재를 구조부재로 한 기둥-보 공법이 주목받고 있다. 기둥과 보로 이루어지는 골조는 전통짜맞춤공법을 보단부 접합부에 적용하며, 골조내부는 합판 및 오에스비와 같은 면재(*sheathing*)를 못접합하여 전단내력벽을 형성하는 혼합벽체 방식이 적용되고 있다[1]. 이는 경골구조와 전통구조(기둥-보 구조)가 혼합된 형식으로 벽체와 골조의 상호작용 효과에 의해 시공성, 경제성, 구조내력 측면에서 유리하다.

이러한 혼합벽체구조는 일본에서의 골조구조와 내력벽을 혼합한 축조공법과 유사한 구성을 이루므로 그 내력성능과 전단내력벽으로써의 성능파악이 쉽다. 즉, 내력벽에 대한 전단성능은 사용된 부재의 종류 및 두께, 접합에 이용되는 못의 종류 및 직경 등으로부터 각각의 전단내력성능이 예측가능하기 때문이다[2,3]. 이러한 연구는 주로 표면이 평활한 못의 단면지름에 대한 평가로 일반화되어 있으며[2,4-6], 나선형 철선못(8d~20d)은 홈가공부의 지름이 일반못에 비해 작으나 인발력에서는 유사한 성능을 발휘하는 것으로 평가하고 있다[7]. 현재 국내에서 많이 이용되고 있는 나선형 철선못에 대해서는 홈가공부 및 표면상태를 고려한 보다 상세한 연구가 필요한 실정이다.

본 연구에서는 나선형 철선못으로 접합한 전단내력벽의 내력성능을 파악하기 위한 기초연구로서 나선형 철선못의 휨성능으로부터 못접합부의 항복내력

및 접합계수(초기강성)를 예측하고 실험값과 비교·검토하였다.

## 2. 전단내력 예측식 및 시험방법

### 2.1. 못접합부의 영향인자

못은 통직하고 가느다란 파스너로써 못머리와 못끝을 갖고 두 개 이상의 부재를 연결한다. 이러한 못은 종류와 모양이 용도에 따라 변화해 왔으며, 변색과 부식을 방지하고 휨내력성능을 향상시킬 목적으로 도금 또는 용융하거나 못대에 나사산을 가공하는 경우도 있다. 이러한 못의 성능은 못대지름에서 결정되지만 못대의 나사산에 의해 성능이 일부 향상되며, 나사못은 더욱 강도를 향상시킬 수 있다[8]. 못접합부에 끼치는 영향 요소들을 Table 1에 정리하였다.

### 2.2. 못접합부의 항복내력

일본투바이포건축협회[2]에서는 합판 및 구조용 패널을 면재로 하여 못접합한 1면전단접합부의 항복내력( $P_y$ )은 식 (1)로부터 산출하고 있다.

$$P_y = N \cdot C \cdot F_{e1} \cdot d \cdot t \quad (N) \quad (1)$$

여기서,  $P_y$ 는 1면전단항복내력,  $N$ 은 못박기 방법에 의한 계수(표면못박기는 1),  $F_{e1}$ 은 측면부재의 지압강도,  $d$ 는 못대지름,  $t$ 는 측면부재의 두께,  $C$ 는 식 (2)에 의한 값

Table 1. Parameters of influence on the performance of nailed joints[8]

Materials and dimensions		Joint configuration	Loading conditions
Nail	Joint member		
Type	Density	Number of Nails per joint	Kind of loading:
Size	Friction	Single, double, multiple shear	static, repetitive, dynamic
Shape	Shrinkage	Member thickness	Rate of loading and rate of
Surface	Swelling	Nail clinching	deformation
Mechanical properties:	Relaxation	Pre-drilled holes	Load duration
Ductility	Moisture content	End and edge distance	Timber between assembly
Buckling resistance	Moisture content	Spacing of nails	and loading
Stiffness	Mechanical properties:	Angle between nail axis and	
Flexural property	Compressive strength	wood surface or wood	
Tensile strength	Embedding strength	orientation	
	Modulus of elasticity	Depth of penetration	
	Foundation modulus		
	Creep modulus		

$$C = \min \left( 1, \frac{1}{2 + \beta} \left\{ \sqrt{2\beta(1 + \beta) + \frac{4\beta(2 + \beta)M_y}{F_{e1}dt^2}} - \beta \right\}, \frac{1}{t} \sqrt{\frac{4\beta M_y}{(1 + \beta)F_{e1}d}} \right) \quad (2)$$

여기서,  $\beta$ 는 주부재와 측면부재의 지압강도비,  $M_y$ 는 못의 휨항복모멘트(Nmm)

따라서, 식 (1)에서 못의 휨항복모멘트( $M_y$ )는 일반 원형못의 경우 표면상태가 매끄러운 것에 대해서는 항복내력( $P_y$ ) 690 N/mm<sup>2</sup>을 이용하여 3393 Nmm ( $M_y = F_y \cdot d^3/6$ )를 적용할 수 있으나, 표면이 홈가공된 못에 대해서는 직접 실험을 통하여 구하도록 하고 있다. 또한, 지압강도는 SPF에 대해 35 N/mm<sup>2</sup>, 낙엽송에 대해 45 N/mm<sup>2</sup>, 구조용합판 및 구조용패널은 41 N/mm<sup>2</sup>로 설정하고 있다[2].

### 2.3. 못접합부의 강성

일본투바이포견축협회[2]에서는 내력벽, 지붕, 마루판과 면재의 못접합부에 대한 접합계수( $K_S$ )는 식 (3)과 같이 원형단면 평활못이 충분한 관입깊이를 가지는 경우에 대해 적용하고 있다.

$$K_S = C \frac{k_1 \cdot d}{\lambda} \quad (3)$$

여기서,  $\lambda = 1.5 \frac{k_1^{0.25}}{E^{0.25} \cdot d^{0.75}}$

$$C = \frac{\gamma(\gamma H + \gamma^{0.75})}{(2\gamma L + \gamma^{0.25})(\gamma H + \gamma^{0.75}) - (\gamma J - \gamma^{0.5})^2}$$

$$L = \frac{\sinh(\lambda t) \cosh(\lambda t) - \sin(\lambda t) \cos(\lambda t)}{\sinh^2(\lambda t) - \sin^2(\lambda t)}$$

$$J = \frac{\sinh^2(\lambda t) + \sin^2(\lambda t)}{\sinh^2(\lambda t) - \sin^2(\lambda t)}$$

$$H = \frac{\sinh(\lambda t) \cosh(\lambda t) + \sin(\lambda t) \cos(\lambda t)}{\sinh^2(\lambda t) - \sin^2(\lambda t)}$$

여기서,  $d$ 는 못의 지름(mm),  $E$ 는 못의 탄성계수(N/mm<sup>2</sup>),  $\gamma$ 는 구조재와 면재의 지압강성비( $k_2/k_1$ )를 나타내며, 지압강성(N/mm<sup>3</sup>)은 실험으로부터 구한다.

식 (3)은 주부재인 목재를 탄성기초(elastic foundation), 못을 탄성보(a beam on the elastic foundation)로 가정된 이론[9]에 기초한 초기강성의 산출에서 원형단면 평활못으로 관입깊이가 충분한 경우를 상정한 것이다. 목재 및 면재의 지압강성과 못의 탄성계수는 시험에 의함을 원칙으로 하지만 JIS 규격 못은 탄성계수를 205 kN/mm<sup>2</sup>으로 할 수 있다. 대표적인 목재 및 면재의 지압강성은 낙엽송과 SPF에 대



Fig. 1. Used nails and nail bending test.

해  $61 \text{ N/mm}^3$ , 구조용합판 및 구조용패널은  $71 \text{ N/mm}^3$ 로 설정하고 있다. 또한, 1면전단 못접합부의 초기강성(접합계수)은 12 mm 면재에 CMN50 못을 적용하면  $410 \text{ N/mm}$ 이다.

## 2.4. 못의 휨성능

홈가공된 나선형 철선못은 크게 도금상태에 따라 표면이 매끄러운 것과 표면이 거친 것의 두 종류로 구분된다. 본 연구에서는 편의상 표면이 매끄러운 것에 대해서는 S-type, 표면이 거친 것은 R-type으로 각각 명명하였다. 사용된 못의 휨항복내력을 구하고자 경간 60 mm의 중앙집중하중에 의한 휨시험을 행하였다. 못의 개수는 아연도금 표면상태에 따른 각각의 형태에 따라 2종류(S-type, R-type)로 구분하여 각각 11개씩 행하였다(Fig. 1).

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1. 못의 휨내력성능

나선형 철선못의 전체길이는 80 mm, 못대지름은 3.28 mm (홈가공부 지름 3.09 mm)이었다. 못의 표면상태에 있어 S-type은 전체 표면이 매끄럽고 색상이 명확하며, R-type은 표면이 거칠며 홈가공부가 상대적으로 다소 둔탁하다. 표면상태에 따른 각각의 못접합부에서는 이들 두 가지 요소가 상쇄효과를 발휘하여 서로 비슷한 전단내력성능을 발휘할 것으로 예상되며 현장에서는 구분없이 사용하고 있다.

목조건축구조설계매뉴얼[5]에 의하면, 못대지름이 2.87~3.33 mm인 보통못의 휨항복내력은  $700 \text{ N/mm}^2$ , 3.25 mm의 나선형 철선못은  $896 \text{ N/mm}^2$ 이며, 지압내력( $F_e$ )은 목재비중과의 관계식( $117G^{1.84}$ )으로부터 산정하고 있다. 이 관계식을 나선형 철선못에 대해 SPF 규격재(비중  $0.46 \text{ g/cm}^3$ )에 적용하면 지압내력은 23.2 MPa이며, 기준허용전단내력( $Z$ )은 1면전단 접합부에 있어 측면부재(side member)의 두께 12 mm, 주부재의 비중이 0.40인 경우 못의 길이(50~82 mm)에 따라 200~300 N의 범위로 설정하고 있다.

파스너의 직경이 전단성능에 큰 영향을 끼치는 다우얼 접합부의 특성상 나선형 철선못의 전단성능은 인발력의 향상과 함께 일반못보다 우수할 것으로 예측된다. 또한, 못의 휨항복내력은 표면이 매끄러운 나선형 철선못(S-type)은 183 N ( $946 \text{ N/mm}^2$ ), 표면이 거친 것(R-type)은 212 N ( $1101 \text{ N/mm}^2$ )이었으며, 각각의 휨강성은 S-type은 155 N/mm, R-type은 169 N/mm였다(Table 2).

나선형 철선못의 휨시험에 의한 휨성능은 못의 표면상태에 따라 다소 차이를 나타냈으며, JIS 규격못의 탄성계수에 비해 20~25% 정도 낮은 값을 나타냈다[2]. 특히, 휨강성은 표면상태가 거친 못이 표면이 깨끗한 못보다 10% 정도 높게 나타나 초기 강성에도 영향을 끼칠 것으로 기대되었다. 낮은 탄성계수의 원인으로 나선형 철선못의 특성상 홈가공부가 결점으로 작용하여 초기 강성부분에서부터 영향을 끼치기 때문인 것으로 검토되었다.

Table 2. Nail bending strengths by each nail type

Nail type	$P_{max}$ (N)	$P_y$ (N)	$\alpha_y$ (N/mm <sup>2</sup> )	$M_y$ (N · mm)	$K$ (N/mm)	$E$ (kN/mm <sup>2</sup> )
Smooth (S)	359 ± 17	183 ± 10	946	4652	155 ± 11	155 ± 11
Rough (R)	366 ± 17	212 ± 14	1101	5414	169 ± 6	170 ± 13

Legends :  $P_{max}$ , maximum load;  $P_y$ , yield load;  $\alpha_y$ , yield strength;  $M_y$ , yield moment;  $K$ , bending stiffness;  $E$ , modulus of elasticity for a nail

Table 3. Yield strengths for common nail and S-type nail

Species	Nail diameter, $d$ (mm)	Yield strength, $P_y$ (MPa = N/mm <sup>2</sup> )		$Exp^*$
		Common nail	S-type nail	
		$M_y = 3393$ N · mm	$M_y = 4652$ N · mm	
SPF	3.09	712	793	800
Larch		750	837	850

\* Experimental values cited at the reference[10]

### 3.2. 못접합부의 항복내력

Table 3은 식 (1)에 의해 구한 항복내력과 실험값 [10]을 나타냈으며, 못의 직경에 따라 각각의 항복모멘트값을 달리 적용한 것이다. 각각의 못접합부의 휨항복내력은 현행 국내기준[4,5]과 일본기준[2,3]을 참조하여 일반 다우얼형 파스너에서는 3393 N · mm를 적용하고, 본 연구에서 사용된 S-type 나선형 철선못의 휨내력성능인 4652 N · mm를 적용하여 산출하였다. 전반적으로 본 연구에서의 못은 일반못에 비해 내력성능이 뛰어나며, 이는 일반못과는 달리 철선못은 못대의 변형부가 주부재로부터 인발에 저항하고 표면가공처리로 인해 못대의 강도가 증가한 때문이다[7].

표제와 같이 기존 연구결과[10]에 가장 근사한 값은 S-type의 홈가공부 못대지름을 적용한 것이며, 이로써 나선형 철선못은 일반못보다 우수한 성능을 발휘하는 것으로 나타났다. 하지만, 실험값을 예측하기 위해서는 못대지름이 아닌 홈가공부의 지름을 적용하여야 함을 알 수 있었다. 이러한 경향은 재질 상태가 연한 SPF에서 뚜렷하였으며, 국내산 낙엽송의 경우에는 실험값보다 다소 낮게 예측됨을 알 수 있다. 이러한 현상은 낙엽송의 실제 지압성능이 제시된 값(45 MPa)[2]보다 다소 높을 가능성이 있음을

알려주는 것이다. 낙엽송집성재 지압성능은 드릴날에 의해 선공부가 거칠어짐에도 불구하고 드리프트 핀 12 mm와 16 mm에 대해 49 MPa을 제시[11]하여 못에 의한 지압강도를 실험으로부터 구할 필요가 있다.

철물접합부에서의 파스너에 의한 목재와의 접합에서는 크게 두 가지의 성능을 우선적으로 파악할 필요가 있음이 밝혀졌다. 첫째, 파스너 자체의 내력성능은 휨시험에 의해 파스너 강성과 휨내력을 얻어야 하며, 둘째, 목재 자체의 내력성능은 못에 대한 지압강성과 지압내력을 각각 구하여야 함을 알 수 있다. 실험결과만을 고려한다면, SPF는 북미의 실험결과이므로 정밀도가 높았을 것이며, 낙엽송은 일본에서 적용하는 값이므로 국내 낙엽송과는 재질 차이가 있을 것이다. 이러한 부분을 감안하여 다양한 파스너와 파스너 직경에 대해 지압시험을 충분히 행하여 접합부 성능예측이 보다 정밀하게 이루어지도록 하여야 할 것이며, 설계의 기초자료로 충분히 이용되어야 할 것이다.

### 3.3. 못접합부의 접합계수

Table 4는 식 (3)에 의해 산출한 접합계수를 나타낸 것으로, 실험값과 비교하였다. 지압강성은 각각의 못접합부에 대해 동일하게 나타나 실제 영향을 주

Table 4. Estimated slip moduli and each component by Equation (3)

Nail type	$\lambda^*$	$C^*$	$L^*$	$J^*$	$H^*$	$K_S$ (N/mm)	
						$Eq^{**}$	$Exp^{***}$
Smooth (S)	0.094	0.202	1936	1444	3.019	471	692 (SPF)
Rough (R)	0.092	0.198	1979	1449	3.196	473	824 (Larch)

\* Legends are referred to the equation (3), \*\* Slip modulus calculated from Equation (3),

\*\*\* Referenced experimental value of slip modulus[10].

는 요소는 못의 휨탄성계수이며, 탄성계수는  $\lambda$ 값 산출에 큰 영향을 끼치지 않으므로 두 못 사이의 접합계수는 큰 차이를 나타내지 않았다.

예측된 접합계수는 측면부재 두께 12 mm를 가정한 일반못접합부의 내력[2]보다 다소 높은 수준에서 두 못 간의 차이는 없음을 알 수 있다. 그러나, 실제 접합부의 접합계수[10]는 예측값보다 거의 45~75% 정도 높게 나타났다. 평활한 못대를 가진 일반못은 관입깊이가 충분하여 초기 거동에서 못의 휨내력이 크게 작용한 후 인발이 작용하며, 측면부재(면재)로 못머리가 관통(punching shear)하는 경우는 그다지 많지 않다. 하지만, 나선형 철선못은 관입깊이가 충분하면 주부재로부터의 인발보다는 측면부재에서 못머리가 관통하는 것이 일반적이다. 식 (3)은 일반못 접합부에서 못대지름이 영향인자이고, 본 연구에서 사용된 못은 못머리의 영향이 커서 생긴 차이라고 해석할 수 있다. 즉, 나선형 철선못의 항복내력을 예측할 때는 못자체의 휨성능이 중요한 요소로서 주부재와 측면부재사이의 휨에 의한 항복내력을 고려해야 하고, 강성은 못의 휨성능과 측면부재에 대한 못머리 지름의 지압과 인발을 고려해야만 할 것이다. 이러한 이유 때문에 기존 연구는 주로 철관을 측면부재로 한 예측 모델식을 설정하여 실험값과의 비교가 주로 행해졌다[12]. 합판을 측면부재로 한 연구에서는 못머리의 관통 정도에 따라 해석함에 있어 못머리의 관통 시험[13] 등을 행하여 초기강성이 2배 정도 낮게 예측되기도 하였다.

한편, 식 (3)의  $\lambda$ 값은 실제 못지름을 적용하고, 접합계수의 산정에서  $d$ 값을 못머리지름 6.5 mm로 한 경우, 994 N/mm (R-type), 989 N/mm (S-type)으로 나타났다. 이는 실제 접합부의 접합계수에 비해 20

~45% 정도 높게 평가된 것이며, S-type에 대해 식 (3)에서 SPF는 못대지름의 57%를 증가시킨 4.55 mm를 적용하고 R-type에 대해서는 68%를 증가시킨 5.42 mm를 적용하면 실제값과 동일한 값을 얻을 수 있다. 이 때 못머리가 전부 측면부재인 오에스비 면재에 영향을 끼치는 것이 아니라 60~70% 수준으로 못머리의 지압이 발생하고 일부 마찰력은 작용하지만 부재간의 미끄러짐(slip)에 의하여 못머리는 모멘트저항을 받게 됨을 뜻하는 것이다. 이로써, 나선형 철선못 접합부의 강성에는 주부재의 비중, 부재간의 마찰력, 못머리에 의한 인발 및 지압과 못머리부의 모멘트 등을 고려해야 하는 다소 복잡한 거동이 발생하는 것으로 판단되어 이에 대해 추후 검토가 필요하다.

따라서, 나선형 철선못 접합부의 항복내력에 있어서는 일반못과 같이 주부재와 측면부재의 지압과 못의 휨항복내력이 결정인자이며, 강성에 있어서는 못의 휨항복강성 이외에 측면부재에 대한 못머리의 지압, 관통력(인발력), 모멘트가 보다 큰 결정인자임을 알 수 있었다. 이러한 현상은 실험값으로부터 비중이 낮은 SPF보다는 비중이 상대적으로 높고 못인발력이 높은 낙엽송에서 현저하였다.

## 4. 결론

오에스비를 측면부재로 적용한 나선형 철선못 접합부의 전단내력성능 예측을 위하여 못의 휨내력성능을 이용하여 못접합부의 항복내력 및 접합계수의 일반 예측식의 적용가능성에 대해 검토하였다.

SPF 및 낙엽송 주부재는 흙가공부의 지름을 이용하였을 때, 항복내력은 실험값과 일치하였으며, 접합계수는 낮게 나타났다. 이에 대한 영향인자로서 주

부재의 비중, 못머리지름에 의한 인발, 못머리부의 모멘트 등이 검토되었으며, 나선형 철선못 접합부의 접합계수의 보다 정확한 예측을 위해서는 이들 검토 사항에 대한 추후 연구가 필요한 것으로 검토되었다.

## 참 고 문 헌

1. 황권환, 박주생, 박문재. 2007. 프리컷 방식을 적용한 기둥-보 공법의 수평전단내력. 목재공학 35(6): 1~12.
2. 日本ツーバイフォー建築協會. 2002. 枠組壁工法建築物構造計算指針.
3. (財)日本住宅・木材技術センター. 2006. 木造軸組工法住宅の許容応力度設計.
4. 대한건축학회. 2005. 건축구조설계기준 및 해설.
5. 대한건축학회. 2008. 목조건축설계매뉴얼.
6. American Forest & Paper Association. 1997. National Design Specification for Wood Construction.
7. Wills, B, S. Winistorfer, D. Bender, and D. Pollock. 1996. Threaded-nail fasteners - research and standardization needs, Transactions of the ASAE, 39(2): 661~668.
8. Ehlbeck, J. 1979. Nailed joints in wood structures, Virginia Polytechnic Institute and State University, No. 166, 7~20.
9. Wilkinson, T. L. 1971. Theoretical lateral resistance of nailed joints, J. of the Structural Div., ASCE 97 (ST5) Proc. Paper 8121: 1381~1398.
10. 황권환, 박문재. 2008. 오에스비에 대한 각종 부재의 못전단성능. 목재공학 36(4): 66~76.
11. 김건호, 홍순일. 2008. 국내산 낙엽송집성재의 지압특성. 목재공학 36(4): 93~101.
12. Foschi, R. O. 1974. Load-slip characteristics of nails, Wood Science 7(1): 69~76.
13. 若島嘉朗, 平井卓郎. 1997. 繰り返し負荷を受ける木材と合板の釘接合部の履歴特性(第3報) - 基礎材料性能の再検討. 木材學會誌 43(5): 417~426.