

CLT-콘크리트 합성 거동을 위한 전단 연결재 부재 실험과 해석 연구

Experimental and Analytical Study of Shear Connectors for the CLT-Concrete Composite Floor System

박 아 론*
Park, A-Ron

이 기 학**
Lee, Kihak

Abstract

This paper assesses the structural performance (force-slip response, slip modulus, and failure modes) of a CLT-concrete composite by conducting fifteen push-out test specimens. In addition, non-linear 3D finite element analysis was also developed to simulate the load-slip behavior of the CLT-concrete specimens under shear load. All 15 test specimens simulating the effect of concrete thickness, connection angle and penetration depth with four different shear connector types were built and tested to evaluate the flexural performance. Experimental results show that the maximum shear capacity for the composite action is obtained when the fixing angle is 90° and the penetration depth of 95mm for SC normal screw was used to achieve ductile failure compared to other shear connectors.

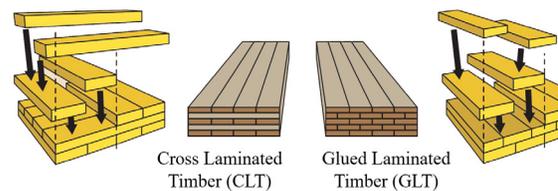
Keywords : Reinforced concrete, Cross laminated timber, Shear connector, Timber-concrete composite

1. 서론

CLT(Cross Laminated Timber)-콘크리트 합성 구조 시스템은 콘크리트를 상부 압축 영역에 타설하고 CLT 부재를 하부 인장 영역에 배치하여 CLT의 구조적 성능을 효과적으로 발휘할 수 있는 건축 구조 시스템이다. CLT의 장점은 각 목재를 교차 접합으로 적층시켜 강도와 강성의 안정적 향상이 가능한 신뢰성 높은 목재료일 뿐만 아니라 기존 목재료에 비해 강도가 1.5배이며, 건조 수축 및 비틀림이 거의 없어 정량적인 구조 계산이 가능하다는 것이다. 이러한 이유로 유럽이나 북미에서는 대규모대 공간다층 구조에 널리 사용되고 있다¹⁾.

목재의 결 방향이 서로 연직하게 접합한 구조용 집성재인 CLT는 목재의 주축 방향으로 3층, 부축 방향으로 2층의 레이어를 교차로 적층함으로써 슬

래브로 사용이 가능한 구조 부재이다. 비슷한 원리의 구조용 집성재료는 결 방향을 서로 평행하게 접합한 GLT(Glued Laminated Timber)가 있다. GLT는 목재를 한쪽 결 방향으로 5층 적층하여 휨 부재 또는 압축 부재로 사용이 가능하다. CLT와 GLT의 차이는 <Fig. 1>에 나타내었다²⁾.



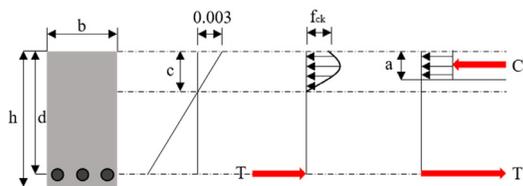
<Fig. 1> Comparisons of CLT and GLT systems

하지만 CLT를 바닥 슬래브로 사용했을 때 목조 재료의 한계 때문에 처짐과 진동, 이에 따른 층간 소음 등으로 기존 철근 콘크리트 바닥 시스템에 비해 사용성이 불리하다. 이러한 단점을 극복하기 위하여 콘크리트와의 일체화를 통한 구조적 합성을 고려하였다. <Fig. 2>는 기존 철근 콘크리트 보로써 압축 영역에는 콘크리트를 타설하고 인장 영역에는

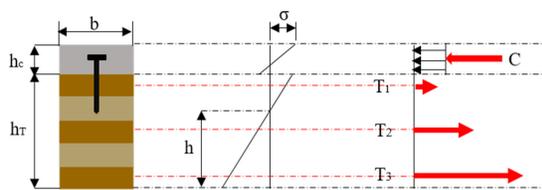
* 정희원, 세종대학교 건축공학과, 공학석사
College of Engineering, Sejong University

** 교신저자, 정희원, 세종대학교 건축공학과 교수, 공학박사
College of Engineering, Sejong University
Tel: 02-3408-3286 Fax: 02-3408-3331
E-mail: kihaklee@sejong.ac.kr

철근을 배치한 복합 구조 재료이다³⁾. 콘크리트는 시멘트, 물, 골재가 혼합되어 일정 시간이 경과한 후 압축 강도를 가지며, 철근은 콘크리트를 대신하여 외부 인장력에 저항하는 휨 부재의 구조체로서 성능을 발휘한다. <Fig. 3>은 CLT-콘크리트 합성 구조체로 압축 영역에는 콘크리트, 인장 영역에는 CLT를 배치하여 변형도, 응력도와 그에 따른 힘의 관계를 나타내었다. h_c 는 콘크리트 두께, h_r 는 CLT의 두께이며, 5개의 층을 갖는 재료이기 때문에 T_1 , T_2 , T_3 은 결 방향으로 적층된 CLT의 재료 내 생기는 인장 응력을 표시한 것이다. T_1 , T_2 , T_3 사이의 재료는 법선 방향으로 적층되어 있으며 그에 따른 인장력을 지지하게 된다. 따라서 콘크리트와 CLT의 휨에 대한 합성 거동이 수직 하중을 지지하는데 중요한 영향을 미치게 된다. 콘크리트와 합성 구조로 얻을 수 있는 장점은 크게 2가지로 진동에 대한 사용성이 증대되며, 철근을 쓰지 않음으로써 기존 콘크리트 골조를 CLT-콘크리트 합성 구조 시스템으로 대체한 건식 공법을 통해 상대적으로 짧은 공사 기간을 갖게 된다.



<Fig. 2> Strain and stress diagram of reinforced concrete systems



<Fig. 3> Strain and stress diagram of CLT-concrete systems

본 연구의 목적은 CLT-콘크리트 합성 구조 시스템에서 CLT와 콘크리트 사이의 전단력 전달, 보강 및 일체성 확보를 위해 설치하는 전단 연결재의 최대 하중을 유한 요소 모델링을 통해 해석적으로 예측하고, 전단 실험체의 제작 및 실험을 통해 성능을 평가하는 것이다. 전단 가력 실험을 통하여 전단 연

결재의 각 변수에 대한 전단 성능을 평가할 수 있는 정량적인 지표를 제시하는 데 연구의 의의가 있다. 또한 유한 요소 해석 결과와 푸시아웃 실험의 비교 및 분석을 수행한 후 이를 이용하여 전단 연결재의 성능을 예측하는 자료를 제공하고자 한다.

2. CLT-콘크리트 합성 구조 시스템 전단 가력 실험

전단 가력 실험을 수행하기 위하여 유한 요소 해석을 통한 해석적인 예측을 수행하고 이를 통해 각각 다른 4가지 변수를 선정하여 실험^{4),5)}을 진행하였다. 전단 가력 실험 설계를 위한 사전 연구의 변수는 콘크리트의 두께, 전단 연결재의 종류, 정착 각도 및 정착 깊이이다.

2.1 유한 요소 해석

본 실험체는 신뢰성을 확보하기 위하여 Khorsandnia, Valipour & Crews(2012)에 의한 복합재 연결의 거동 실험 연구⁶⁾를 선행 연구로 고려하였다. 평균 재령 28일 일축 압축 강도가 50MPa, 평균 탄성 계수가 36.6GPa인 콘크리트를 사용하였고, 전단 연결재는 항복 강도가 500MPa인 강재를 사용하였다. 적층된 목재는 평균 탄성 계수가 11.3GPa, 굽힘 및 인장 강도는 각각 46.8MPa 및 33.4MPa이다. 유한 요소 해석 연구는 매쉬를 나누어 균질하지 않은 재료는 10 노드의 절점계를 사용하였고, 비교적 균질한 재료는 20 노드의 절점계⁷⁾를 사용하였다. 이는 목재의 장변과 단변에 따라 굽힘 강도 및 인장 강도 등의 특성이 균질하지 않기 때문이다.

<Fig. 4>의 (a)는 유한 요소 모델의 전단 연결재 모델, (b)는 유한 요소 해석 모델의 매쉬, (c)는 거동 연구의 실험체를 나타낸 것이다.

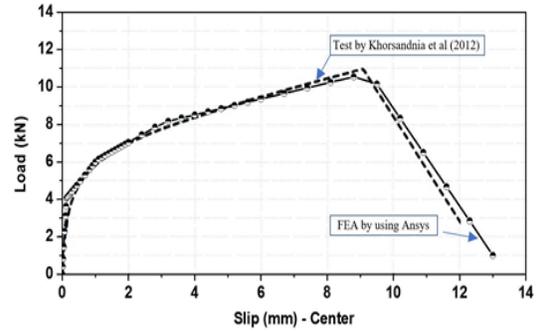
전단 연결재의 전단 성능을 평가하기 위해 콘크리트와 전단 연결재의 탄성 계수를 다음과 같이 고려하였다. 콘크리트와 전단 연결재의 거동을 평가하기 위해 탄성 계수를 유로코드2 (EC2) ICC, 2015⁸⁾의 식 (1), (2)를 사용하였다.

$$E_{cm} = 9.5 \sqrt[3]{f_{ck} + 8} \quad (1)$$

여기서, $\sigma_c = \left(\frac{kn - n^2}{1 + (k-2)n} \right) f_{ck}$ (2)

$n = \frac{\epsilon_c}{\epsilon_{c1}} ; \epsilon_{c1} = 0.0022$
 (ϵ_{c1} , 최대 압축 응력의 변형률);

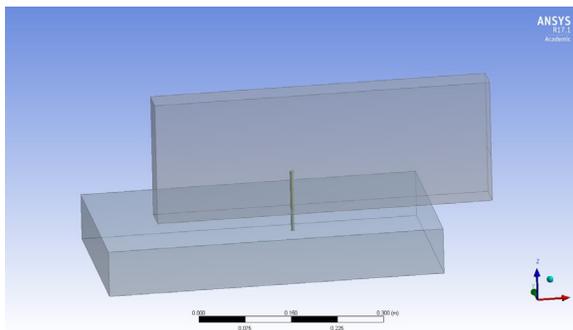
$$k = 1.1 E_{cm} \times \frac{\epsilon_{c1}}{f_{ck}} \quad (3)$$



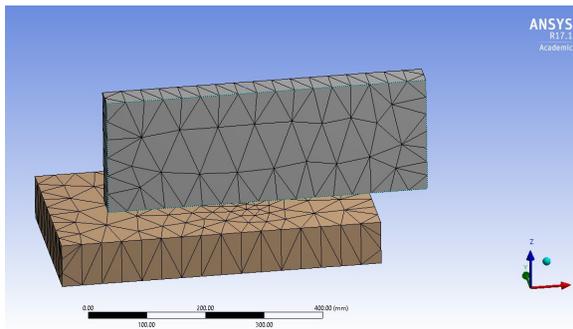
<Fig. 5> Finite element analysis model test results curve

<Table 1> Test results of finite element analysis model

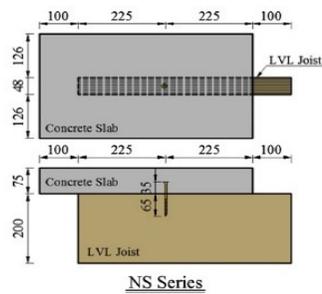
	Max. load (kN)	Displacement (mm)	Test/Analysis
Previous shear test (S1) ⁶⁾	10.2	8.8	-
Finite element analysis model	10.1	8.8	6.4%



(a) Modeling of push-out test



(b) Modeling of CLT specimen



(c) Geometry of push-out test⁶⁾

<Fig. 4> Modeling of finite element analysis

구조 해석 프로그램인 Ansys를 사용하여 기존 실험 결과를 비교해 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 이러한 결과는 실제 콘크리트 못, 볼트, 스크류 볼트 등과 같은 다양한 전단 연결재에 적용할 수 있다. CLT-콘크리트 복합 시스템의 2가지 유한 요소 모델 실험을 통하여 이력 현상과 기계적 거동을 예측하였다. 선행 연구의 실험과 유한 요소 해석의 근사 결과는 <Fig. 5>와 <Table 1>에 나타내었고, 최대 강도 측면에서 6.4%의 차이를 보여 합리적인 해석 모델이 개발된 것으로 평가되었다.

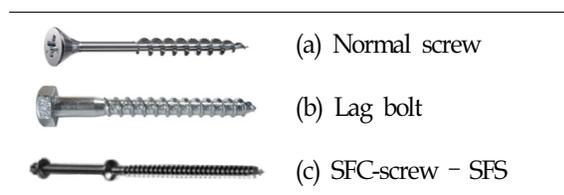
2.2 실험체 계획

여러 가지 다른 조건을 주어 정착 각과 전단 연결재의 종류에 따른 전단 연결재의 성능을 평가하고자 실험을 진행하였다. 콘크리트 두께, 전단 연결재 종류, 정착 길이와 정착 각 등의 변수를 조절하여 CLT-콘크리트 복합 시스템의 요소 실험체를 제작하였다⁹⁾. 전단 연결재는 선 시공된 CLT에 계획된 변수에 따라 중앙부에 스크류를 2개씩 정착시키고, 거푸집을 대어 철근을 배근하고, 상부에 콘크리트를 타설하여 제작하였다. 제작 과정은 <Fig. 6>에 나타내었다. 콘크리트 두께는 100mm, 75mm 총 2개의

<Table 2> Detail of 15 shear test specimen

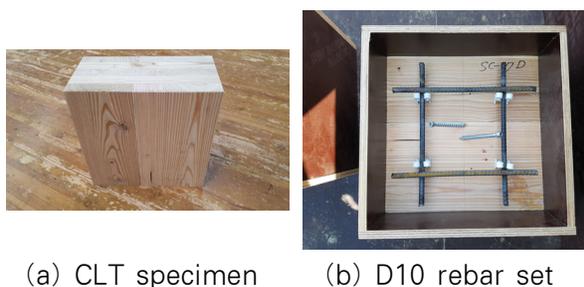
	Specimen (unit)	CLT depth (mm)	Concrete depth (mm)	Shear connector angle (°)	Concrete volume (m ³)	Amount of rebar (d=10mm) (mm ³)
1	SC-7d	150	100	45		
2	SC-100-90			90	0.009	74183.7
3	SC-100-60	150	100	60		
4	SC-100-45			45		
5	B-100-90			90		
6	B-100-60	150	100	60	0.009	74183.7
7	B-100-45			45		
8	SFC-100-90			90		
9	SFC-100-75	150	100	75	0.009	74183.7
10	SFC-100-60			60		
11	SFC-100-45			45		
12	SC-13d	150	100	45	0.009	74183.7
13	SC-75-45			45		
14	B-75-45	150	75	45	0.00675	74183.7
15	SFC-75-45			45		

<Table 3> Screw types



변수, 정착 각은 90°, 75°, 60°, 45° 총 4개의 변수, 콘크리트 정착 길이는 45°의 정착 각에서 65mm, 95mm, 115mm 총 3개의 변수로 진행하였다. 모든 시편은 <Table 2>에 나타내었다.

1번 시편의 SC-7d는 SC 노말 스크류를 사용하여 스크류 직경의 7배만큼 CLT에 정착시켰다는 의미이다. 2번 시편의 SC-100-90은 SC 노말 스크류를 목재 중앙부에 100mm, 목재와 콘크리트가 맞닿는 표면으로부터 90°로 정착시켰다는 의미이다. B는 Lag bolt, SFC는 SFC 스크류를 의미한다. 본 실험에 사용된 전단 연결재의 종류는 <Table 3>에 나타내었다.



(a) CLT specimen

(b) D10 rebar set

2.3 실험 수행 및 측정 방법

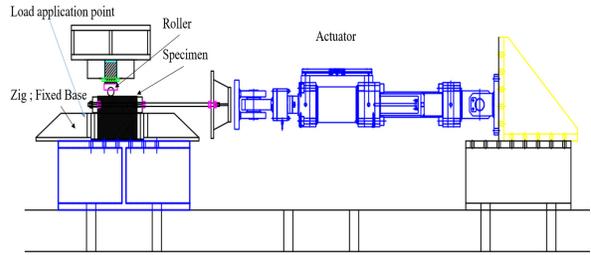


(c) Installation SC screw detail
(d) Curing of concrete
<Fig. 6> Shear test specimen detail

실험체의 구성은 <Fig. 7>의 도면에 실험 가력 셋업을 나타내었다. 실험을 수행하기 위하여 <Fig. 8>과 같이 전단 실험체의 CLT 부분을 고정단으로 해석하고 지그로 단단하게 고정한 뒤 콘크리트 부분에 지그를 통하여 액츄에이터로 순수 전단 하중을 가력하였다. 급작스러운 파괴를 방지하기 위하여 모든 실험체는 <Fig. 9>와 같이 전단 하중 가력 그래

프를 따라 30단계에 걸쳐 하중 제어한 후 기준점 이후에는 1mm씩 전단 연결재의 파괴 모드에 따라 항복 또는 파단까지 횡 변위 제어하였다. 그리고 4분 까지 최대 6kN까지의 전단 하중을 1사이클 가력하고, 그 이후에는 다시 1kN부터 항복 또는 파단까지 전단 하중 재하를 실시하였다. 이는 CLT와 콘크리트에 의한 부착력을 제거하기 위함이다. 실험은 전단 하중에 의한 끝단부의 뒤틀림 및 처짐이 있을 것으로 가정하고 롤러를 설치하여 실험체에 순수 전단력만 가력하였다. 실험 모델의 전체적인 거동과 힘의 흐름을 파악하기 위해 기둥의 최상부에서 변위 용량 $\pm 300\text{mm}$, 하중 용량 100kN인 액츄에이터를 이용하여 전단 하중 가력 변위와 하중을 측정하였고, 연결부의 변형과 횡 변위가 가해짐에 따라 소성힌지 영역에서의 전단 변형률을 측정하였다. 또한 오차 없이 뒤틀림 변위와 전단 하중 가력에 따른 실험체의 거동을 정확히 측정하고자 시편의 좌상, 좌하, 우상, 우하 지점에 LVDT를 설치하였다.

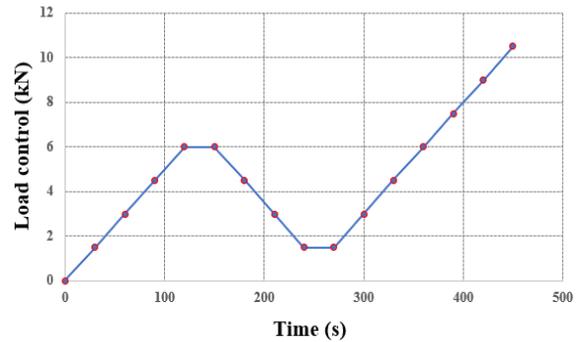
본 실험에서 사용된 콘크리트의 평균 재령 28일 일축 최대 압축 응력은 28MPa이고, 전단 연결재의 직경은 SC(노말 스크류) 9mm, B(라그 볼트) 10mm, SFC 스크류 7.5mm이다. 전단 연결재 하나당 최대 인장력은 25.4kN, 23.6kN, 16kN이다.



<Fig. 7> Plan view of shear force test setting



<Fig. 8> Picture of test setting



<Fig. 9> Load control curve

<Table 4> Results of shear test

Specimen	Max. load (kN)	Displacement (mm)	Failure mode
1	26.50	2.59	2 Bolt yielding
2	48.21	17.64	2 Bolt yielding
3	26.07	3.06	2 Bolt yielding
4	31.76	4.08	2 Bolt yielding
5	48.54	10.92	2 Bolt failure
6	30.99	2.11	1 Bolt failure, 1 Bolt yielding
7	41.95	1.31	1 Bolt failure, 1 Bolt yielding
8	44.21	13.57	2 Bolt failure
9	23.36	5.19	2 Bolt failure
10	25.67	3.15	2 Bolt failure
11	37.16	1.83	2 Bolt failure
12	27.58	1.94	Con'c Failure
13	35.43	2.30	2 Bolt yielding
14	43.94	1.91	2 Bolt failure
15	32.27	2.22	2 Bolt failure

3. 실험 결과

3.1 파괴 모드의 비교

모든 실험 모델의 전체적인 이력 거동은 <Table 4>의 최종 파괴 모드를 통하여 비교하였고, 시편의 성능을 비교·검토하기 위한 각종의 수치 결과들을 기록하였다. 각 전단 연결재의 최대 전단 하중 지지 능력은 SFC-B-SC 순서로 증가하고, 연성 능력은 B-SFC-SC 순서로 증가하였다. 이에 따라 전체적으로 SFC 스크류의 전단 강도가 낮게 발생하여 전단 하중에 대한 복합 단면 일체 효과는 라그 볼트와 노말 스크류(SC)에 비해 발현되지 못하였다. 연성은 노말 스크류가 가장 높은 것으로 나타났다.

정착 길이에 따른 전단 연결재의 최대 전단 하중 지지 능력은 SC-7d와 SC-13d를 비교하였다. SC-7d와 SC-13d는 노말 스크류 직경의 각각 7배, 13배씩의 길이로 CLT에 정착하였다는 의미이다. 전단 연결재와 콘크리트 정착 깊이 내에서 SC-13d는 콘크리트 정착이 비교적 적기 때문에 콘크리트의 과도한 균열과 분리 현상이 일어나 콘크리트가 파괴되었다.

3.2 전단 실험 결과 및 분석

<Fig. 10 (a)~(h)>는 전단 저항 수준 평가를 위한 하중-변위 실험 결과를 나타낸 것이다.

<Fig. 10 (a)>는 노말 스크류의 전단 연결재 실험체에 정착 각과 콘크리트 두께의 변수를 두어 나타낸 것이다. 이 경우 콘크리트 두께의 변수보다 정착 각의 변수가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 또한 90°의 정착 각에서 가장 우수한 성능을 보이고, 나머지 정착 각에서는 비슷한 성능을 나타내는 것으로 분석되었다.

<Fig. 10 (b)>는 라그 볼트의 경우와 마찬가지로 콘크리트 두께의 변수보다 정착 각의 변수가 더 큰 영향을 미치는 것을 확인할 수 있었다. 또한 90°의 정착 각에서 가장 우수한 성능을 보이고, 나머지의 정착 각에서는 비슷한 성능을 나타내는 것으로 판단되었다.

<Fig. 10 (c)>는 SFC 스크류의 경우에 대해 분석한 것으로, 콘크리트 두께의 변수보다 정착 각의 변수가 더 큰 영향을 미치며, 90°의 정착 각에서 가장 우수한 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 또한 가력 하중에 대하여 비교적 수평 방향인 75°의 정착 각에서는 오히려 다른 정착 각보다 최대 전단 저항 하중이 적음을 확인할 수 있었다.

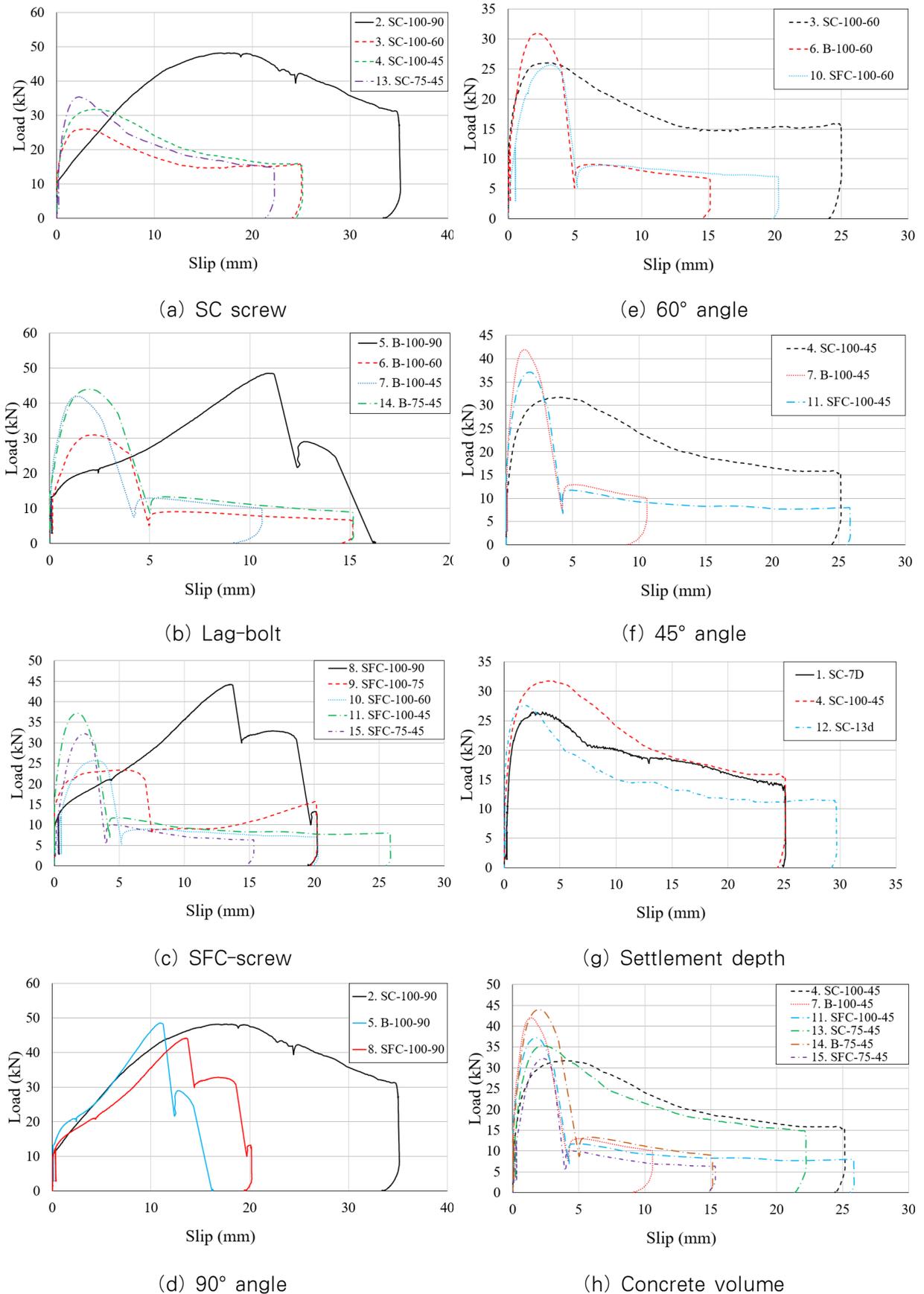
<Fig. 10 (d)>는 <Fig. 10 (a), (b)>와 <Fig. 10 (c)>에서 확인한 바와 같이 성능이 가장 좋은 90°의 정착 각에서 전단 연결재의 종류에 따른 전단 성능의 하중-상대 변위 관계를 나타낸 것이다. 이 관계에서는 노말 스크류가 가장 좋은 연성과 최대의 전단 저항 지지 능력을 보였으며, SFC 스크류는 중간 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다.

<Fig. 10 (e)>는 60°의 정착 각에서 전단 연결재의 종류에 따른 전단 성능의 하중-상대 변위 관계를 나타내었다. 이 관계에서는 노말 스크류가 가장 좋은 연성과 최대의 전단 저항 지지 능력을 보였다.

<Fig. 10 (f)>는 30°의 정착 각에서 전단 연결재의 종류에 따른 전단 성능의 하중-상대 변위 관계를 나타내었다. 이 관계에서는 노말 스크류가 연성이 가장 좋고, 라그 볼트에서 최대의 전단 저항 지지 능력을 보였다. SFC 스크류는 중간 값을 갖는 것을 확인할 수 있었다. 여기서 SFC 스크류는 가력 방향의 한쪽 스크류가 이미 항복하였으나 반대쪽 스크류의 거동을 통해 가장 큰 연성을 가짐을 확인할 수 있었다.

<Fig. 10 (g)>는 동일한 정착 각의 노말 스크류에 65mm, 95mm, 115mm로 정착 길이에 변수를 주어 실험을 진행하였다. SC-13d의 시편이 콘크리트 정착 길이가 비교적 짧기 때문에 콘크리트의 과도한 균열과 분리 현상이 일어나 콘크리트가 파괴되어 콘크리트 뿔힘 현상이 발생하였다.

<Fig. 10 (h)>를 통해서는 콘크리트 소요량이 전단 성능에 미치는 영향이 작은 것을 확인할 수 있었다.



〈Fig. 10〉 Load slip curve from shear connector shear test

4. 결론

본 실험 연구에서는 전단 연결재의 종류, 정착 각, 정착 길이, 콘크리트 두께 등을 변수로 CLT-콘크리트 요소 실험체의 거동 및 파괴 모드, 연성 능력, 전단 내력 특성 등을 파악하였다. 다음은 본 연구를 통해 얻은 결론이다.

1) 전단 연결재의 정착 각에 따른 최대 전단 하중 지지 능력은 대체적으로 90°- 75°- 45°- 60° 순서로 감소하고, 연성 능력은 90°- 75°- 45°- 60° 순서로 증가하였다. 90°의 시편에서 가장 컸으며 연성 또한 크게 관찰되었다. 대체로 정착 각이 수직에 가까울수록 최대 횡하중의 지지 능력은 증가하고 전단 내력과 연성 능력은 최대를 보였다.

2) SC-13d의 시편과 SC 노말 스크류를 사용한 시편을 비교 분석한 결과, 전단 연결재와 콘크리트 정착 길이가 비교적 짧은 경우에는 콘크리트의 과도한 균열과 분리 현상이 일어나 콘크리트 파괴 및 전단 연결재의 뽑힘 현상이 발생하였다.

3) 정착 각에 따라 설치된 두 전단 연결재의 한쪽에만 전단 하중을 받는 실험체는 수직으로 전단 연결재가 설치된 실험체보다 전단 강도와 연성이 작게 관찰되었다. 이에 따라 90° 실험체에서 전체적으로 전단 강도와 연성이 가장 높게 발생하였고, 전단 하중에 대한 합성 효과는 하중 가력 방향의 직교 방향인 90°에서 최적으로 발현하였다.

4) 본 실험에서 SC-노말 스크류, 90°의 정착 각과 95mm의 정착 길이를 갖는 SC-100-90의 2번 시편이 전단 하중에 대한 최대 성능을 갖는 것으로 나타났다. 이에 따라 90°의 정착 각과 정착 길이가 CLT와 콘크리트의 합성 거동에 가장 큰 영향을 미치는 것으로 관찰되었다.

감사의 글

이 논문은 2019년 한국연구재단 중견연구자사업 연구비지원(NRF-2016R1A2B4014186)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

References

1. Baker, W. F., Horos, D. R., Johnson, B. M., & Schultz, J. A. (2014) Timber Tower Research: Concrete Jointed Timber Frame. Proceedings of the Structures Congress, USA, pp.1255~1266
2. Park, A. R., & Lee, K. (2017). Failure investigation of Timber-Concrete Composite Structure System with Various Embedment Lengths of Shear Connectors. Proceedings of the Korea Concrete Institute Autumn Conference, Republic of Korea, Vol.29, No.2, pp.721~722
3. Ollgaard, J. G., Slutter, R. G., & Fisher, J. W. (1971). Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal-Weight Concrete (Report No. 360.2). USA: American Institute of Steel Construction
4. Hassanieh, A., Valipour, H. R., & Bradford, M. A., "Load-slip behaviour of steel-cross laminated timber (CLT) composite connections", Journal of Constructional Steel Research, Vol.122, pp.110~121, 2016
5. Kim, D., & Ryu, G., "An Experimental Study on the Serviceability Evaluation with Vibration Test of RC Slab", Journal of the Korea Society of Disaster Information, Vol.10, No.2, pp.312~318, 2014
6. Khorsandnia, N., Valipour, H. R., & Crews, K., "Experimental and analytical investigation of short-term behaviour of LVL-concrete composite connections and beams", Construction and Building Materials, Vol.37, pp.229~238, 2012
7. Ansys Inc. "Ansys Workbench Release 17.1, Help System, Mechanical User's Guide", USA, 2016.
8. ICC, "International Building Code", USA: International Code Council, 2015.

9. HILTI, "Anchor Fastening Technology Manual", 2016.

- Received : October 24, 2018
- Revised : February 22, 2019
- Accepted : February 25, 2019