

목재-콘크리트 하이브리드 부재의 전단성능 I*1

- 목재 내 철근 정착 길이에 따른 전단성능 평가 -

이 상 준*2 · 엄 창 득*2 · 김 광 모*2†

Shear Performance of Wood-Concrete Composite I*1

- Shear Performance with Different Anchorage Length of Steel Rebar in Wood -

Sang-Joon Lee*2 · Chang-Deuk Eom*2 · Kwang-Mo Kim*2†

요 약

목재-콘크리트 하이브리드 부재는 특히 목조 거더교의 상부구조 등으로 유용하게 적용될 수 있으며, 이를 위한 핵심 사항은 상판으로 사용되는 콘크리트 및 거더로 사용되는 목재의 전단성능 부여에 따른 일체화 거동이다. 현재까지 북미 및 유럽 등을 중심으로 관련 연구가 진행되어 왔으나 대부분의 경우 시공성의 담보를 목적으로 한 것으로 목재와 콘크리트의 전단성능을 확보하기 위한 기초적인 연구는 미비한 실정이다. 따라서 본 연구는 목재-콘크리트 하이브리드 구조의 역학적인 거동을 평가하기에 앞서 가장 중요한 사항 중 하나인 부재 간 전단성능을 평가하기 위한 목적으로 수행되었다. 실제 시험에 앞서 EYM을 통해 목재 내 철근의 정착 길이별 항복모드 및 기준허용전단내력 값을 확인하였으며, 사용한 SD30A 철근에 대한 모드 전환이 이루어지는 철근의 정착 길이 등을 확인할 수 있었다. 전단시험을 통해 초기강성 및 항복하중 값은 정착길이 20 mm 이상인 경우 정착 길이에 무관하게 유사한 값을 나타냈으나, 최대하중의 경우에는 철근의 인발 저항과 복합적으로 작용하여 정착 길이 60 mm 이상과 이하에서 다른 거동을 나타냈다. 시험 후 X선 직접촬영법의 적용을 통해 이를 검증할 수 있었다.

ABSTRACT

The wood-concrete composite can be effectively applied for bridge superstructure, and the concept of fully composite action between each member is one of the most important

*1 접수 2012년 4월 24일, 채택 2012년 5월 17일

*2 국립산림과학원 임산공학부 재료공학과, Dept. of Forest Resources Utilization, Korea Forest Research Institute, Seoul 130-712, Korea

† 교신저자(corresponding author) : 김광모(e-mail: lovewood@forest.go.kr)

consideration. Until now, related researches have been done mainly in North America and EU countries not enough to cover the fundamental studies. Therefore, this study is planned to perform one of the important issue for using the wood-concrete composite. The objective of this study is evaluation of shear performance with different anchorage length of steel rebar in wood. Prediction of the yield mode and the reference design value was firstly performed as the preliminary investigation. Then, initial stiffness, yield load and maximum load were derived from the shear test due to different anchorage length of the steel rebar (SD30A in Korean Standard) in wood. It was found out from this study that initial stiffness and yield load are not related with the anchorage length over 20 mm of anchorage length while maximum load shows increasing tendency till 60 mm of anchorage length. Pullout strength of inserted steel rebar in wood is considered to be one reason and this was also verified with the x-ray radiography.

Keywords: wood-concrete composite, steel rebar, shear performance, EYM, pullout strength, X-ray radiography

1. 서 론

최근 목재를 구조부재로 사용한 구조물의 축조에 대한 검토가 다각적으로 이루어지고 있으며 이와 관련한 연구 또한 활발히 진행되고 있다(김, 2011; 박과 황, 2011; Lim *et al.*, 2011). 이를 위해서는 집성재 등 목질재료의 사용이 수반되어야 하며, 나아가 철재, 콘크리트, 석재 등 이종재료와의 하이브리드화에 대한 접근이 더불어 진행되고 있다. 특히 목재-콘크리트 하이브리드의 개념은 목재가 거더로서 인장 하중을 부여받고 콘크리트가 상판으로서 압축 하중을 부여받는 교량, 특히 거더교에서 많이 시도되어 왔다(Ritter, 1990; Flach and Frenette, 2004).

최근 Yeah 등(2011)은 그의 리뷰 논문을 통해 교량의 상부구조(Bridge Superstructure)로 목재-콘크리트 하이브리드 부재(Timber-Concrete Composite Structure)를 적용하는 데 있어서의 연구의 주안점을 다음의 세 가지로 지적한 바 있다. 첫 번째로 휨응력을 받는 하이브리드 부재의 중립축 위치가 상부 콘크리트는 온전히 압축하중을, 하부 목재는 온전히 인장 하중을 받게 형성되어야 한다는 것이다. 두 번째로는 목재와 콘크리트 간 일체화 거동을 위해 전단성능을 부여해야 한다는 것이며, 마지막으로 세 번째는 목재가 부담하는 콘크리트의 사하중 및 차량 등 이동에

따른 동적하중에 대한 설계가 이루어져야 한다는 것이다. 이 세 가지 중에서도 특히 두 번째의 목재와 콘크리트의 일체화 거동이 구조적 효율성 및 안정성을 위해 가장 크게 고려되어야 하는 점으로 지적되고 있다.

특히 시공 상의 측면에서 철근을 이용한 전단 성능 부여와 관련한 실험적 연구들이 주로 북유럽을 중심으로 많이 수행되어 왔다(Mascia and Soriano, 2004; LeBorgne and Gutkowski, 2010). 그러나 이에 대한 이론적 고찰은 거의 이루어진 바가 없는 실정이며, 이에 본 연구는 목재-콘크리트 하이브리드 부재의 역학적 거동을 연구하기에 앞서 구조적 성능에 가장 핵심적으로 작용하는 목재와 콘크리트의 일체화 거동을 분석하기 위한 목적으로 계획되었다. 목재 및 콘크리트 내 철근의 정착 길이 및 각도에 따른 전단성능 평가와 하이브리드 부재에 대한 평가를 단계적으로 수행할 예정에 있으며, 본 연구는 이에 대한 기초 연구로서 목재만으로 주부재 및 측면부재를 구성한 1면전단접합부에서 목재 내 철근의 정착 길이에 따른 합성 부재의 전단성능을 평가하였다. 실험에 앞서 EYM (European Yield Model)을 이용하여 전단 성능을 예측하고 실험을 통해 이를 검증하였다.

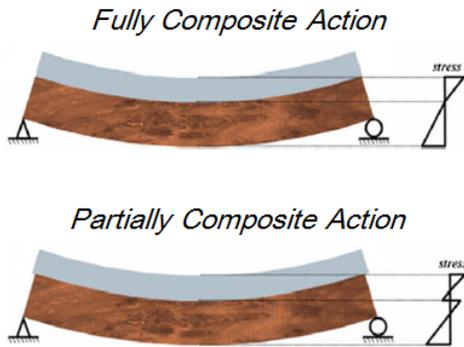


Fig. 1. The concept of fully & partially composite action of timber-concrete composite structure (Yeah et al., 2011).



Fig. 2. Prepared wood anchored with steel rebar.

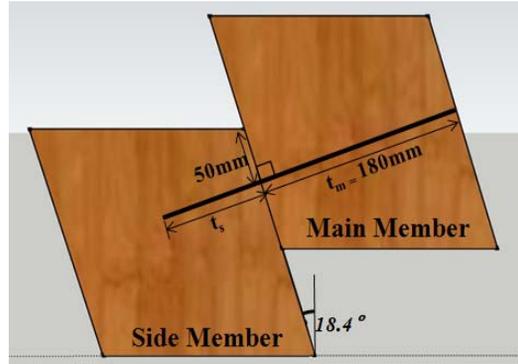


Fig. 3. Schematic view of wood-to-wood composite.



Fig. 4. Shear test of steel rebar.

2. 재료 및 방법

2.1. 공시재료

2.1.1. 목재

공시수종은 잣나무(*Pinus koraiensis* Sieb.)였고 22°C, 상대습도 50%의 항온항습실에서 조습하여 이용하였다. 열기건조하여 측정된 함수율과 기건비중은 각 13.2(± 3.84)%, 0.48(± 0.067)이었다. 시편의 크기는 두께, 폭, 높이를 각 120, 180, 200 mm로 하였으며, 1면전단접합부를 구성하기 위한 시편의 형상은 Julita and Salokangas (2010)의 선행 연구내용을 토대로 18.4°의 경사재로 제작하여 이용하였다

2.1.2. 철근

전단 성능을 부여하기 위한 연결 철물로서 KS D 3504 (철근 콘크리트용 봉강) 표준에 의거하여 SD30A, 호칭명 D10 철근을 사용하였다. SD30A 철근의 항복 내력은 294 MPa 이상으로 규정되며, 공칭단면적 (D10 철근의 경우 71.3 mm²)을 고려하면 전단강도는 20.97 kN 이상이 되어야 하는 것으로 계산되었다. 사용되는 철근의 이중전단시험을 통해 실제 발현되는 전단강도를 확인해 본 결과(Fig. 4), 측정된 전

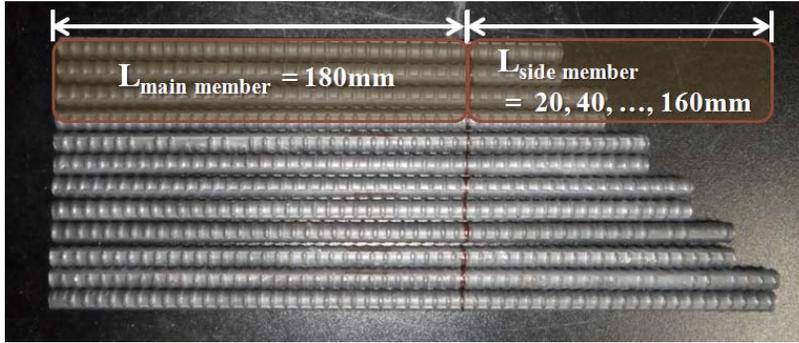


Fig. 5. Prepared steel rebar.

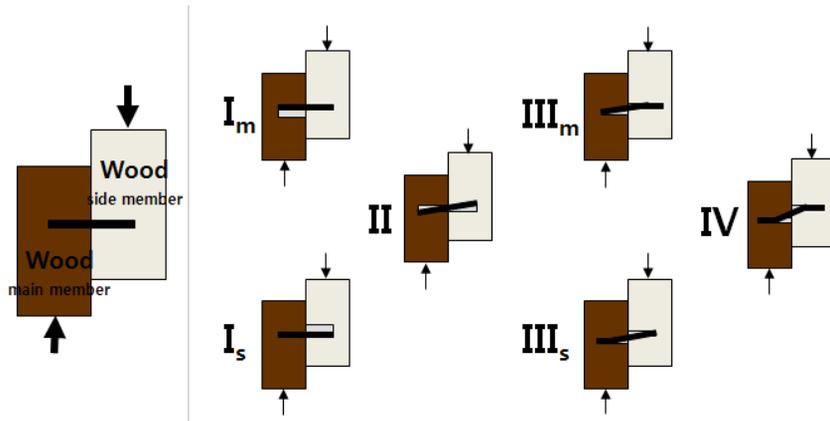


Fig. 6. EYM of wood-to-wood composite.

단 항복하중은 22.06 kN으로 규정치를 만족하는 것으로 확인되었다. 철근은 목재 내 정착길이 8단계에 맞춰 200 mm에서 340 mm까지 20 mm 간격으로 절단하여 실험에 이용하였다(Fig. 5).

2.1.3. 시험체 제작

준비된 목재 시편의 폭 중앙 및 시편 길이의 50 mm 지점(Fig. 3)에 지름 11 mm의 드릴 구멍을 철근 정착 길이에 따라 천공하고, 드릴구멍에 독일 Fischer사에서 제작된 FIS V 360S 케미칼앵커를 주입하고 철근을 정착하였다. 2일 간의 양생 과정을 통해 시험체 제작을 완료하였다.

2.2. 전단성능 평가

2.2.1. EYM을 통한 전단성능 예측

목재 내 철근 정착 길이에 따른 전단 성능을 예측하기 위해 EYM을 적용하여 각 시험체의 항복모드별(Fig. 6) 기준허용전단내력(Z)을 산출하였다. 철물 및 주부재·측면부재에 나타나는 네 가지의 항복모드에 따라 기존 EYM에서 제안된 식에 적용하여 항복하중을 계산하였으며, 이 중 최소값이 나타나는 모드 및 이때의 하중을 해당 시험체의 항복모드 및 기준허용전단내력으로 가정하였다. 투입되는 각 재료의 물성치는 목재의 장부축지압내력(F_{ew})은 31.6 MPa(목조건축구조설계매뉴얼, 2008)로 하였으며 철근의



Fig. 7. Shear test.

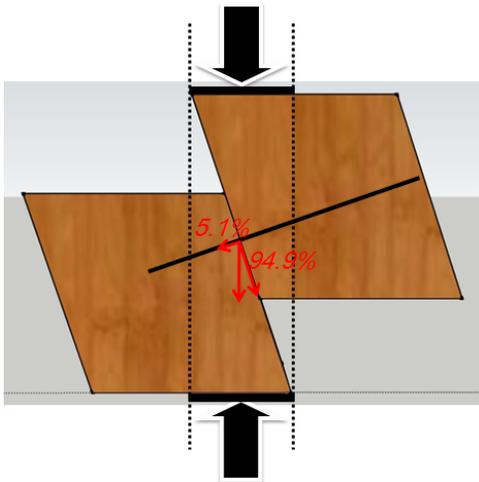


Fig. 8. Schematic view of shear test.

휨항복강도(F_{yb})는 실제 시험에 적용된 SD30A, 호칭 명 D10 철근의 물성치인 294 MPa로 하였다. 그 외 주부재 및 측면부재의 철근 관입길이(t_m , t_s)는 각 시험체의 조건에 맞게 입력하였다.

2.2.2. 전단시험

1면전단접합부에 대한 시험을 수행하기 위해서 시험체의 제작 및 시험 방법은 기존연구(Julita and



Fig. 9. Photographs of X-ray source and digital detector.

Salokangas, 2010)를 참조하여 설계하였다. 준비된 시험체에 대해 미국 Instron사의 만능강도시험기(최대하중 200 kN)를 이용하여 전단시험을 수행하였으며, 하중속도는 3.5 mm/min.로 하였다. Fig. 3 및 8에서 확인되는 바와 같이 재하하중이 시편 전단면의 18.4°임을 고려하여 전단성능을 산출하였다.

2.2.3. 파괴모드

전단시험 이후 시험체의 파괴모드를 분석하고, 특히 시험체 내부 철근의 변형 형태 및 정도를 확인하기 위하여 X선 직접촬영을 수행하였다. X선 선원은 벨기에 ICM사의 CP100을 이용하였고, 명도 데이터 획득을 위한 디지털디텍터는 일본 RF사의 NX06을 이용하였다(Fig. 9). 관전압 및 관전류는 각 60 kVp, 1.5 mAs로 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1. EYM을 통한 항복모드 및 허용전단 내력 예측

EYM에 의해 각 시험체의 항복모드별로 산출한 전단내력의 결과를 Table 1에 제시하였다. 항복내력이 최소가 되는 모드에서의 하중을 해당 시험체에 대한 기준허용전단내력(Reference Design Value)으로 결정하였다.

철근의 정착길이가 짧은 경우(15 mm 이하)에는 철물의 변형없이 목재에서 지압파괴가 일어나는 I_s 모드가 발생하며, 철근의 정착길이가 20 mm 이상인

Table 1. Results of EYM for different anchorage length of steel rod (Unit : N)

Anchorage length (mm)	Yield mode				Determined yield mode	Reference design value (Z)
	I _s	II	III _s	IV		
5	1,580	20,502	9,688	5,565	Is	1,580
10	3,160	20,218	13,469	5,565	Is	3,160
15	4,740	19,966	16,299	5,565	Is	4,740
20	6,320	19,744	7,900	5,565	IV	5,565
40	12,640	19,146	25,734	5,565	IV	5,565
60	18,960	18,960	31,076	5,565	IV	5,565
80	25,280	19,126	35,569	5,565	IV	5,565

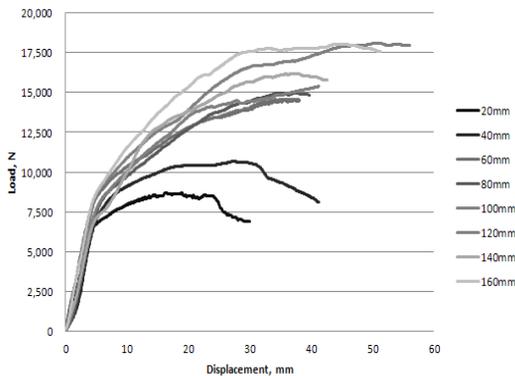


Fig. 10. Load-displacement curve.

경우에는 주부재 및 측면부재 모두에 철물의 소성회전지점이 형성되는 IV 모드가 발생하는 것으로 확인되었다. 이를 통해 계산된 기준허용전단내력은 철근의 정착길이 5, 10, 15 및 20 mm 이상에서 각 1,580, 3,160, 4,740, 5,565 N이었다.

EYM을 통한 본 예측을 통해 측면부재 내 정착길이 15 mm에서 20 mm 사이에서 모드 변환이 이루어짐을 확인할 수 있었다. I_s모드가 나타날 것으로 예측된 15 mm 이하의 정착길이를 갖는 시험체는 철근의 휨과는 무관하게 목재의 지압강도(F_{ew}) 및 측면부재 내 관입길이(t_g)에 의해서만 전단강도가 좌우되고 또한 예비실험을 통해 확인해 본 결과 관입길이가 너무 짧아 항복점까지 하중이 재압되기 전에 철근이 빠져버리는 현상이 나타났다. 따라서 실제 전단시험은 IV모드가 나타날 것으로 예측된 정착길이 20 mm 이상의 시험체에 대해 수행하였다.

Table 2. Shear performance of wood-to-wood composites due to anchorage length

Anchorage length (mm)	Initial stiffness (kN/mm)	Yield load (N)	Maximum load (N)
20	1.53	6,185	8,685
40	1.43	7,038	10,675
60	1.87	7,853	14,609
80	1.49	7,938	14,990
100	1.78	8,120	18,106
120	1.56	7,244	15,380
140	1.51	6,371	16,180
160	1.90	8,136	18,059

3.2. 전단시험 결과

철근의 측면부재 내 정착길이 단계 별 전단시험에 의한 하중-변형 곡선을 Fig. 9에 나타내었으며, 초기강성, 항복하중 및 최대하중을 도출한 결과를 Table 2에 제시하였다.

초기강성과 항복하중은 각 1.63 ± 0.19 kN/mm, $7,360 \pm 778$ N의 값을 나타내었으며, 정착길이와는 특별한 경향이 확인되지 않았다(Fig. 10). 이는 EYM을 통해 예측된 바와 같이, 정착길이 20 mm 이상에서는 하중 재하 시 항복까지의 초기 거동은 IV모드로서 같은 양상이 나타나기 때문인 것으로 판단된다. 기준허용전단내력의 경우에는 EYM을 통해 5,565 N의 값이 예측되었는데 측정된 항복하중은 이에 비해 약 32% 가량 크게 나타났다. 이를 통해 EYM을 통한

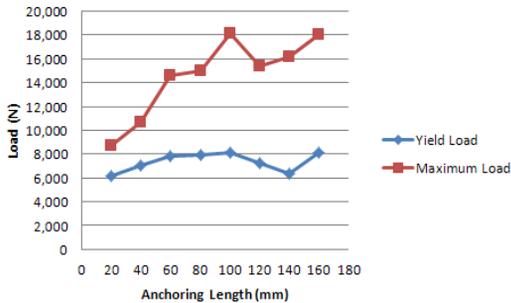


Fig. 11. Yield and maximum loads due to the anchoring length.

접합부 설계가 타당한 결과를 도출함을 확인할 수 있었다.

Fig. 11에는 항복하중과 최대 전단하중을 함께 나타냈다. 최대 전단하중의 경우에는 항복하중과 달리 정착길이가 증가함에 따라 정착길이 60 mm까지는 증가하는 경향이 나타났다. 정착길이가 60 mm 이후에는 비교적 일정한 값을 보였다. 이는 주부재 및 측면부재 내부에서 소성힌지점이 형성되는 항복하중의 발현 이후 하중 재하가 지속되면, 철근의 정착길이가 짧은 경우(60 mm 이하)에는 측면부재에서 철근의 빠짐이 복합적으로 발생되기 때문인 것으로 판단된다. 이는 파괴이후 촬영한 시험체의 X선 사진(Fig. 12)을 통해서도 확인할 수 있다. 시험체의 최대 전단하중은 약 18,100 N으로 확인되었는데 이는 실험적으로 확인된 철근의 전단항복하중인 22,060 N의 약 82% 수준이었다.

3.3. X선 직접촬영법에 의한 파괴모드 고찰

Fig. 12는 전단시험 이후 X선 직접촬영법을 통해 얻은 전단면에서의 파괴모습을 보여준다. 필름의 명도 차이의 확인을 통해 목재의 주부재(사진의 오른쪽부재) 및 측면부재(사진의 왼쪽부재) 내부의 철근이 휘어있는 양상을 확인할 수 있다.

정착길이가 20 mm에서 60 mm까지의 결과를 확인해 본 결과 측면부재 쪽 철근이 기존의 드릴 구멍에서 하중 방향으로 크게 벗어나 있음을 알 수 있다. 이는 항복점 이후 하중 재하가 지속되면 철근이 빠지는 현

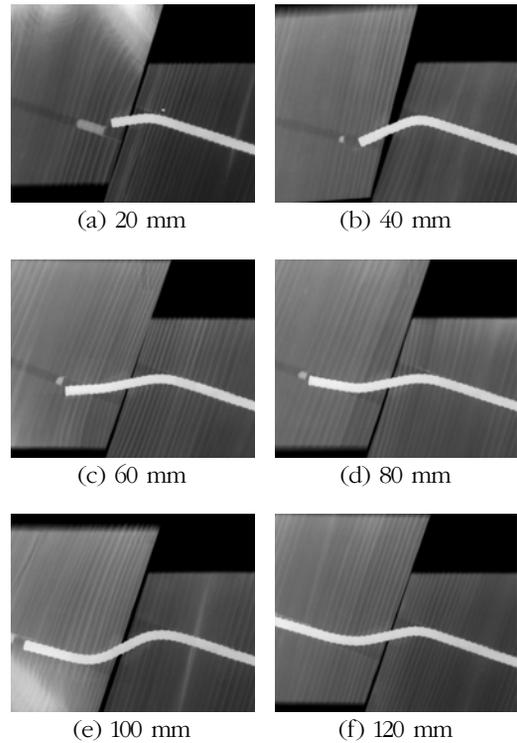


Fig. 12. X-ray radiographies of various anchoring lengths.

과가 나타났기 때문으로 판단된다. 그러나 정착길이가 80 mm 이상에서는 측면부재 내부의 기존 드릴구멍에 철근이 상당부분 보존되고 있음을 확인할 수 있으며, 이는 전단시험을 통해 확인된 최대 전단하중의 결과를 반증하는 것으로 판단하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 목재-콘크리트 하이브리드 부재의 역학적 거동을 확인하기 위한 기초적인 연구로서 목재 내 철근의 정착길이에 따른 전단성능을 평가하였다. 시험에 앞서 EYM을 통해 철근의 정착 길이별 항복모드 및 기준허용전단내력의 산출을 통해 실제 시험체의 역학적인 거동을 예측하였다. 이를 통해, 사용된 SD30A D10 철근의 경우 목재 내 정착길이 15 ~ 20 mm 사이에서 I모드에서 IV모드로 모드의 전환

이 이루어지는 것을 알 수 있었다. 정착길이 20 mm 이상의 시험체를 제작하여 실제 전단시험을 통해 이를 검증하였으며, 도출된 초기강성 및 항복하중은 각 1.63 ± 0.19 kN/mm, $7,360 \pm 778$ N로 정착길이의 증가에 무관한 값을 나타냈다. 이를 통해 항복하중까지의 초기거동은 EYM에서 예측된 바와 같이 정착길이 20 mm 이상의 경우 동일한 것을 알 수 있었다. 그러나 항복하중 이후 하중 재하가 지속되어 시험체 최종 파괴 시에 도출된 최대하중은 정착길이 약 60 mm 이상과 이하에서 다른 거동을 나타냈으며, 이는 철근의 인발저항과도 관계가 있음을 X선 직접촬영법을 통해 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

1. 김광모. 2011. 목조 차도교량 사례-노르웨이 에벤스타브리지. 산림. 2011년 5월호. pp. 86~89.
2. 박주생, 황권환. 2011. 기둥-보 뼈대구조를 위한 각부 접합부의 모멘트저항성능. 목재공학 39(1): 8~14.
3. 대한건축학회. 2008. 목조건축구조설계매뉴얼(KBC Wood Design Manual).
4. 한국표준협회. 2010. 철근콘크리트용 봉강. KS D 3504.
5. American Forest & Paper Association. 2005. National Design Specification.
6. Flach, M. and C. D. Frenette. 2004. Wood-Concrete-Composite-Technology in Bridge Construction. Proceedings of 8th World Conference on Timber Engineering (WCTE 2004), Lahti, Finland.
7. Jutila, A. and L. Salokangas. 2010. Wood-Concrete Composite Bridges - Finnish Speciality in the Nordic Countries. Proceedings of International Conference on Timber Bridges, Lillehammer, Norway. pp. 383~392.
8. LeBorgne, M. R. and R. M. Gutkowski. 2010. Effects of various admixtures and shear keys in wood-concrete composite beams. Construction and Building Materials 24: 1730~1738.
9. Lim, J., H. Yeo, and J. J. Lee. 2011. Study on evaluation of performance for pitch pine round timbers as safety barrier beam members. J. Korean Wood Sci. & Tech. 39(5): 390~397.
10. Mascia, N. T. and J. Soriano. 2004. Benefits of timber-concrete composite action in rural bridges. Materials and Structures 37: 122~128.
11. Ritter, M. A. 1990. Timber bridge: design, construction, inspection, and maintenance. U. S. Department of Agriculture, U. S. Forest Service, EM 7700-8.
12. Yeoh, D., M. Fragiaco, M. De Franceschi, and K. H. Boon. 2011. State of the art on timber-concrete composite structures: literature review. Journal of Structural Engineering 137(10): 1085~1095.