

9층 공학목재 사무소 건물의 성능기반 내진설계

Performance-based Seismic Design of 9-Story Engineered Wood Office Building

추유림^{1)*} · 김태완¹⁾ · 김승래¹⁾

Chu, Yurim^{1)*} · Kim, Taewan¹⁾ · Kim, Seung Re¹⁾

¹⁾강원대학교 건축공학과

¹⁾Department of Architectural Engineering, Kangwon National University

/ A B S T R A C T /

One of engineered woods, glued laminated timber (GLT), can provide a constant level of performance and desired strength even if the quality of wood is low. Due to this fact, there is a growing interest in GLT using domestic species and related research has been carried out continuously. In addition, GLT is popularly being applied to the long-span or high-rise structures overseas. However, KBC 2016 does not allow the engineered woods to be used for middle and high-rise buildings by limiting height. Therefore, a proper design procedure and rationale should be clearly presented by the help of performance-based seismic design. With this background, the goal of this study is to establish a specific procedure for design of a 9-story building with RC shear walls and GLT frames according to the performance-based design of KBC 2016. The performance objectives were set according to KBC and the acceptance criteria for each goal were defined. The RC shear walls and GLT frames were designed by concrete and wood structure requirements, respectively. Analytical models were developed to reflect their nonlinear features, and both nonlinear static and dynamic analyses were conducted. Performance evaluation results showed that the shear walls have insufficient shear strength, so they were re-designed. Consequently, it has been confirmed that GLT frames can be applied to a 9-story office building with the assistance of RC shear walls and performance-based seismic design.

Key words: Engineered wood, Glued laminated timber, Office building, Performance-based seismic design, Nonlinear analysis

1. 서론

오랫동안 목재는 가공이 쉽고, 훌륭한 심미적 요소를 가진 친환경 재료로 인식되고 있으며 그 수요가 끊이지 않고 있다. 그러나 단일 목재는 화재에 취약하고 함수율에 따라 변형이 크며, 웅이나 갈라짐과 같은 흠이 있기 때문에 재료의 품질이 균일하지 못한 단점이 존재한다. 이에 원목을 가공하여 단일 목재의 단점을 보완하고, 공학적인 방법에 의해 강도 성능을 확보하는 공학 목재 (Engineered Wood)가 등장하였다. 종류로는 목재 층재를 섬유방향으로 집성한 GLT (Glued Laminated Timber), 층재를 직교시켜 집성한 CLT (Cross Laminated Timber), 그리고 합판이나 OSB와 같은 구조용 판재 등이 있다.

집성재에 대한 연구는 주로 목재의 수급이 쉽고 내수가 큰 미국과 유럽

등을 중심으로 이루어졌으며 이를 토대로 공학목재의 활용 범위 및 시공 가능한 건물의 규모도 계속 증대되고 있다. 반면, 우리나라는 국토 면적의 50% 이상이 산림으로 이루어졌음에도 불구하고, 벌기령에 도달하지 못한 임지가 많고 생산비와 같은 여러 현실적인 문제로 인하여 연간 목재 소비량의 80% 이상을 수입하여 사용하고 있다 [1]. 우리나라 산림을 이루는 소경재들은 크기가 작고 물리 및 화학적 성질도 대경재에 비해 뒤떨어진다 [2]. 이러한 실정으로 국내산 원목을 구조부재로 이용하는 데에는 여러 어려움이 있을 수 있다. 그러나 집성재는 재료 자체가 다소 저급하더라도 일정한 수준의 성능과 원하는 강도를 갖는 부재를 만들어낼 수 있기 때문에 국산재의 이용률을 향상시킬 수 있다. 따라서 이를 구조물에 더욱 활발히 활용할 수 있도록 국내 수종을 이용한 집성재의 성능 및 접합부 등에 대한 연구가 계속해서 수행되고 있다 [3-5].

이와 같이, 국내에서도 공학목재에 대한 관심 및 관련 연구가 이어지고 있고 이미 집성재를 대경간 또는 고층 건물에 적용한 해외 사례도 증가하고 있지만 건축구조기준인 KBC2016 [6]의 목구조에 대한 일반사항에서는 목조부분의 높이를 지붕높이 18 m 이하 또는 처마높이 15 m 이하로 제한하고

*Corresponding author: Chu, Yurim

E-mail: yurim92@kangwon.ac.kr

(Received December 27, 2017; Revised March 22, 2018; Accepted March 27, 2018)

있으며 이는 목구조를 다른 구조와 병행한 건축물에도 동일하게 적용되는 제한사항이다. 따라서 현행 구조기준을 따르면, 중·고층 건물에 공학목재를 적용하는 것은 불가능하다. 따라서 KBC에 따라 공학목재 건물의 내진설계를 수행하기 위해서는, 성능설계법을 이용하여 적절한 설계 절차와 근거를 명확하게 제시하여야 한다. 단, 현행 기준에서 공학목재 골조 또는 CLT 벽체를 지진력저항시스템으로 정하고 있지 않은 점, 그리고 이들의 횡력저항 성능에 대한 정보가 부족한 점을 고려하여 공학목재 골조는 중력저항시스템으로 사용하고, 지진력저항시스템은 철근콘크리트 (Reinforced Concrete, RC) 전단벽을 사용하는 것이 유리할 것으로 판단된다.

기존연구인 Chu et al. [7]은 이러한 RC 전단벽-GLT 골조 시스템의 중·고층 건물 적용 가능성을 조사하였다. 이 연구에서는 9층 사무소 건물을 하나의 RC 전단벽-RC 골조로, 다른 하나는 RC 전단벽-GLT 골조로 각각 등가정적해석법을 사용하여 설계한 후 내진성능을 비교하는 방식을 사용하였다. 비교한 결과 두 시스템 사이에 내진성능의 차이가 크게 없으므로 9층 사무소 건물에 공학목재를 적용 (물론 지진력저항시스템은 RC 전단벽을 사용하지만) 하는 것은 큰 문제가 없다. 또한 두 시스템의 탄소배출량을 비교했을 때 공학목재를 적용하면 상당한 양을 감축할 수 있으므로 환경적 측면으로도 공학목재의 적용이 매우 긍정적인 것으로 나타났다. 하지만 두 시스템 모두 벽체 전단에서 성능이 부족하였고, 공학목재의 경우에는 앞서 언급한 대로 일반적인 설계법으로는 설계가 불가능하므로 성능설계법을 적용한 공학목재의 내진설계절차를 확립할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 기존연구를 통해 확인한 공학목재 적용의 가능성을 바탕으로 하여 KBC2016의 성능설계법을 이용한, RC 전단벽과 GLT 골조로 이루어진 9층 사무소 건물의 내진설계절차 확립을 목표로 하였다. 이에 KBC에 따라 두 개의 성능목표를 설정하고 각 목표에 대한 허용기준을 정의하였다. 부재 설계는 RC 전단벽과 GLT 골조 각각 콘크리트와 목구조 규정을 따랐다. 해석 모델에서 RC 전단벽은 전통적인 모델링 방식을 따랐으며, GLT 골조는 GLT 보-기둥 및 RC 전단벽-GLT 보 연결부에 모멘트-회전각 관계로 비선형 거동을 반영하였다. 해석은 비선형 정적해석 및 비선형 동적해석 모두 수행하였다. 최종적으로 해석 결과와 허용기준을 비교하여 성능을 평가하고 성능이 부족한 부재에 대하여 재설계를 수행하였다.

2. 성능설계법 개요

2016년에 개정·고시된 국내 건축구조기준 [6]에는 ‘성능설계법’ 조항이 추가되었다. 이는 비탄성해석을 사용하여 구조물의 비탄성변형응답을 설계에 정확하게 반영하거나 다양한 성능수준을 만족하도록 설계하고자 하는 경우, 그리고 해당 기준 내에 규정되어있는 지진력저항시스템 및 이에 대한 내진설계계수를 적용하기 어려운 구조물의 설계에 적용할 수 있는 설계법이다. KBC2016에 따라 성능설계를 수행할 시에는 설계 절차와 근거를 명확하게 제시하여야 한다. 성능설계법은 그 특성상, 기준에서 구체적인 절차 및 방법을 제시하고 있지 않기 때문에 국내외의 여러 문헌 [8-10]을 참고하여 수행할 수 있다.

Fig. 1은 이러한 성능설계법의 절차를 간략한 순서도로 표현한 것이다. 성능설계법을 이용하여 구조물을 설계하기 위해서는 가장 먼저 성능목표(Performance Objective)를 설정하여야 한다. 이는 특정 지진위험도에 대하여

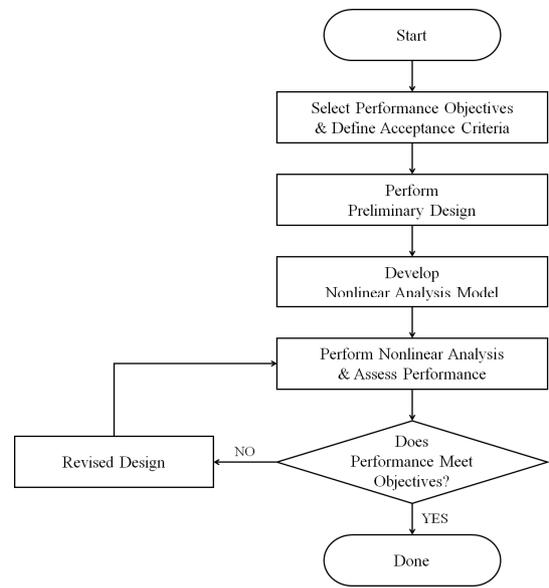


Fig. 1. Performance-based design flow diagram

Table 1. Performance objectives in KBC2016 [6]

Seismic use group	Performance level	Seismic hazard
Special	Operational (or immediate occupancy)	1.0 × Design spectral acceleration
	Life safety and collapse prevention	1.5 × Design spectral acceleration
I	Life safety	1.2 × Design spectral acceleration
	Collapse prevention	1.5 × Design spectral acceleration
II	Life safety	1.0 × Design spectral acceleration
	Collapse prevention	1.5 × Design spectral acceleration

구조물이 만족해야 하는 성능수준을 의미하는 것으로, 건축물의 내진등급에 따라 결정된다. KBC의 성능목표를 나타낸 Table 1을 살펴보면, 하나의 내진등급에 대해 두 가지의 성능목표가 정의되어 있기 때문에 구조설계자는 이를 모두 만족하도록 설계하여야 한다. 단, Table 1에 정의되어 있는 것은 최소한의 성능목표이기 때문에 이보다 높은 성능목표를 설정하는 것도 가능하다. 성능목표가 결정되면 비선형 해석을 통해 이를 평가할 수 있도록 평가항목을 정하고 각각의 허용기준 (Acceptance Criteria)을 정의한다. 기본적인 평가항목은 구조물의 층간변위각과 각 부재의 비탄성변형이며 이에 대한 허용기준을 정의할 때는 KBC, ASCE 41-13 [11] 등을 참고하여 결정할 수 있다. 기본설계 (Preliminary design)는 사양설계법 (Prescriptive design method)을 이용하여 고정하중, 활하중, 횡하중 등을 산정하고 이에 대한 부재의 크기, 철근 배근 등을 결정하는 단계이다. 이 결과를 토대로 비선형 해석을 위한 모델을 작성하는데 이때, 모든 부재를 비선형으로 모델링하는 것이 반드시 옳은 결과를 가져오는 것은 아니다. 따라서 비선형 거동에 큰 영향을 주지 않는 범위에서 비선형 모델링의 범위를 조정하여야 한다 [8]. 비선형 모델링의 범위에 포함되는 재료 및 부재 모델을 작성 시, 재료강도는

공칭강도가 아닌 기대강도를 적용하며 부재의 강도 계산 시에는 강도감소 계수를 1.0으로 한다. 또한 유효강성을 적용하여 균열에 대한 영향을 고려한다. 해석모델 작성이 완료되면 비선형 해석을 수행한다. KBC에서는 성능설계법을 이용할 경우, 비선형정적해석과 비선형동적해석을 모두 이용하여 구조물의 성능을 평가하도록 규정하고 있다. 따라서 먼저 비선형정적 해석을 수행하여 목표성능만족여부를 확인하고, 성능을 만족하면 비선형 동적해석을 수행하여 다시 성능을 평가한다. 비선형동적해석을 위한 지진 파의 선정은 KBC의 0306.7.4.를 따르되, 앞서 결정한 성능목표에 부합하는 수준으로 선정 및 보정한다. 이러한 두 가지의 비선형 해석에 대하여, 성능을 만족하지 못하는 부재가 있을 시에는 목표 성능을 만족할 때까지 재설계를 수행한다.

3. KBC에 따른 성능설계법 수행

기존 연구 [7]에서는 KBC2016 [6]에 따라 성능목표를 정하고 비선형 동적해석을 수행하여 전체 건물의 거동과 각 부재별 성능을 평가함으로써 대상 건물의 성능목표 만족 여부를 확인하고, 이를 통해 9층 사무소 건물에 대한 GLT 골조-RC 전단벽 건물의 적용 가능성을 조사하였다. 이 장에서는 이러한 기존 연구의 설계 및 해석 결과를 인용하고, 2장에서 설명한 성능설계법의 절차를 기초하여 성능기반 내진설계를 수행하였다.

3.1 성능목표 및 허용기준

기본적으로 성능목표는, Table 1에서 볼 수 있듯이, 건물의 내진등급에 따라 결정할 수 있다. 본 연구의 설계 대상 건물은 일반 사무소 건물로, 중요도(2)에 해당한다. 중요도(2)인 건물의 내진등급은 II 등급이므로 Table 1에 따라 설계스펙트럼가속도의 1.0배에 대한 인명안전(Life Safety, LS) 수준과 설계스펙트럼가속도의 1.5배에 대한 붕괴방지(Collapse Prevention, CP)수준을 성능목표로 결정할 수 있다. 여기서 설계스펙트럼가속도는 2400년 재현주기의 지진위험도로 정의한 최대고려지진(Maximum Considered Earthquake, MCE)에 대한 스펙트럼가속도의 2/3 수준이다.

대상 건물이 이와 같이 결정된 성능목표를 만족하는지 판단하기 위하여 평가항목을 결정하였다. 건물 전체의 성능을 평가하기 위한 항목으로 층간변위각을 사용하였다. 부재별 비탄성 응답을 평가하기 위한 항목은 RC 벽체와 GLT 골조 각각에 대해 설정하였다. RC 벽체의 휨 성능 평가를 위해 소성회전각을 사용하고 전단 성능 평가에는 벽체에 작용하는 전단요구량을 사용하였다. GLT 골조의 성능은 보 양단 연결철물에서의 회전각 및 기둥에 작용하는 모멘트요구량을 사용하여 평가하였다.

Table 2에는 각각의 평가항목에 대하여 정의한, GLT골조-RC 전단벽 건물의 허용기준을 나타내었다. 먼저 CP수준의 허용기준에 대해 서술하면, 층간변위각의 CP 허용기준은 KBC의 허용층간변위각 규정을 참고하여, 내진등급II에 해당하는 2.0%로 정하였다. 이것이 타당한지 알아보기 위해, GLT 골조만을 해석모델로 작성하여 비선형정적해석을 수행한 결과, 층간변위각이 2.0%에 도달하더라도 GLT 골조의 저항성능에 문제가 없음을 확인하였다. RC 전단벽에 작용하는 전단요구량에 대한 CP 허용기준은 각 벽체의 전단강도로 정하였다. 또한 단부 소성회전각에 대해서는 ASCE 41-

Table 2. Acceptance criteria for GLT frame & RC shear wall building

Parameters		Performance level	
		LS	CP
Story Drift Ratio [6]		1.5%	2.0%
RC Shear wall	Shear Force	$0.75 \times$ Shear strength	$1.0 \times$ Shear strength
	Plastic Rotation angle [11]	LS Level	CP Level
GLT Beam-column connection	Rotation angle [7]	$0.75 \times$ CP Level	CP Level ¹⁾
GLT Column	Moment	$0.75 \times$ Moment strength	$1.0 \times$ Moment strength

¹⁾ Rotation angle at the point where the moment strength drops on moment-rotation relationship of GLT beam-column connection

13 [11]에 제시된 허용기준 값을 사용하였다. 이때, 벽체마다 축력비와 작용전단력이 다르기 때문에 각 벽체의 소성회전각 허용기준도 다르다. GLT 부재는, 재료 자체가 취성적 성질을 가지고 있기 때문에 변형 능력은 고려하지 않았다. 또, GLT 보-기둥을 연결하기 위해 일반적으로 볼트 접합부를 사용하므로 볼트의 개수에 따라 보-기둥 연결부의 성능이 달라진다. 따라서 GLT 부재와 보-기둥 연결부에 대해서는 대상 건물마다 적절한 방법으로 허용기준을 정하는 것이 바람직할 것으로 보인다. 이에 본 연구에서는 기존 연구에서 구한 GLT 보-기둥 연결부의 볼트 접합부에 대한 모멘트-회전각 관계에서, 모멘트 강도가 급감하는 시점의 회전각을 CP수준의 허용기준으로 정하였다. GLT 기둥은 연성능력이 없다고 판단하여 모멘트강도를 CP 허용기준으로 정하였다. RC 전단벽의 소성회전각을 제외한 모든 평가항목들의 LS 허용기준은 CP 값의 75%로 정하였다. 이는 공단요령 [10]의 하중 지배부재에 대한 LS 허용기준 설정을 참고한 것이다.

3.2 기본 설계

기본 설계를 수행한 대상 건물은 GLT 골조와 RC 전단벽이 함께 존재하는 9층 사무소 건물로 각 층의 층고는 4 m이다. 건물의 계단실은 RC 전단벽으로 이루어져있고 그 외는 GLT 골조로 이루어져있으며, 특히 Fig. 2를 통해 RC 전단벽이 평면의 한쪽 끝에 집중 배치되어 있는 것을 확인할 수 있다.

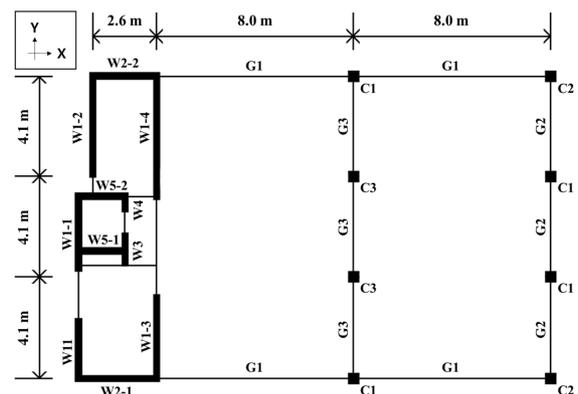


Fig. 2. Plan of 9-story office building [7]

Table 3. Gravity loads for preliminary design [7] (kN/m²)

Story	ENG-WOOD	
	Dead load	Live load
Typical	4.80	3.50
Roof	4.04	1.00

Table 4. Dimensions of section [7] (mm)

Element	Section	Dimension
Girder	G1	160 × 530
	G2	160 × 530
	G3	160 × 760
Column	C1	360 × 360
	C2	300 × 300
	C3	480 × 480
Wall		200

여기에서 슬래브는 Khai and Lee [12]에 따른 150 mm 두께 CLT 패널과 100 mm 두께 RC 슬래브를 함께 사용한 합성 바닥판으로 가정하였다. 이러한 합성 바닥판이 RC 벽체와 G3, G3와 G2에 얹히는 것으로 가정하였기 때문에 바닥하중은 RC 벽체와 보 부재에 1 방향으로 전달된다. 따라서 내부의 X방향 보는 생략하였다. G1의 경우는 중력하중 지지에 반드시 필요하지는 않지만 건축적 완성을 위하여 배치하였다.

중력하중은 합성 바닥판의 무게를 고려하여 현행 구조기준을 따라 산정하였으며 이를 Table 3에 나타내었다. 지진하중 산정을 위한 변수들은 각각 지역계수 (S) 0.176 g (0.22 g의 80%), S_D 지반, 중요도 계수 1.0을 사용하였다. 지진력저항시스템은 건물골조시스템의 RC보통전단벽으로 정하였고 이에 따라 반응수정계수 (R)는 5.0을 사용하였다. 콘크리트의 공칭강도는 24 MPa, 철근은 400 MPa이며 GLT의 수종은 국내산 낙엽송으로 가정하였고, 등급은 대칭 다른등급 10S-30B를 사용하였다.

대상 건물은 철근콘크리트 건물이나 철골 건물과 같이 특정 구조재료만을 사용한 건물과 달리, GLT와 RC를 혼용하기 때문에 부재 설계를 할 때에는 각 구조재에 맞는 적절한 조합을 적용하여 수행하여야 한다. 먼저, GLT 골조의 설계는 허용응력설계법을 사용한다. 골조는 대상 건물의 지진력저항 시스템에 포함되지 않기 때문에 중력하중만을 고려하여 부재의 크기를 결정하였다. 이를 위해, 하중조합은 1.0D + 1.0L을 사용하였고, 대칭 다른등급 구성 집성재의 기준허용응력에 보정계수를 적용하여 설계허용응력을 산정하였다. 부재의 단면은 설계허용응력을 초과하지 않고 충분한 내력을 갖도록 결정하였다. 보 부재 양단은 핀 접합으로 가정하였으며 이 부분에 작용하는 소요전단력에 대하여 필요한 볼트의 개수를 산정하였다. RC 전단벽은 대상 건물의 주요 횡력저항시스템으로서, 중력하중 및 지진하중에 대하여 설계하여야 한다. RC 부재는 극한강도설계법을 사용하기 때문에 하중조합은 1.2D + 1.0L ± 1.0E와 0.9D ± 1.0E 중에서 가장 요구력이 큰 하중조합에 대하여 설계하였다. 이에 따라 설계된 부재의 크기를 Table 4에 나타내었다. RC 전단벽의 수직철근비는 벽체마다 다르지만 최소 0.48%에서 1.99%이다. 수평철근비는 모든 벽체가 0.29% (D10@250)이다. 이와 같이 설계된 RC 전단벽이 횡력저항시스템으로서의 능력을 제대로 발휘하기 위해서는, 골조와 벽체 사이에서 횡력이 잘 전달되어야 한다. 이를 위해 G1과

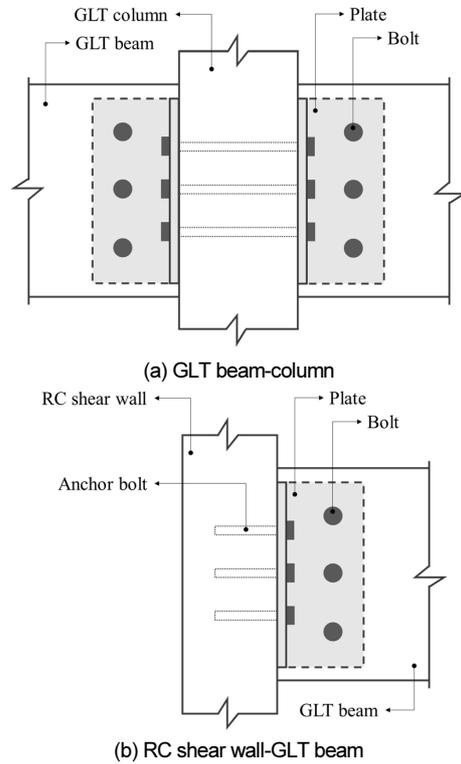


Fig. 3. Details of connection

RC 전단벽 사이의 연결철물 설계 시 층 전단력, 그리고 모멘트로 인해 발생하는 축력을 반영하였다. Fig. 3에는 GLT 보-기둥 및 RC 전단벽-GLT 보 연결부의 상세를 나타내었다.

3.3 비선형 해석 모델 작성

기본 설계를 통해 결정된 부재의 사이즈 및 철근 배근 등을 바탕으로 해석 모델을 작성하였다. 구조해석 프로그램은 비선형 정적 및 동적해석이 가능한 PERFORM-3D [13]를 사용하였다. 이 프로그램에서 보와 기둥 부재는 단부를 집중힌지로 모델링하여 휨 또는 전단에 대한 비선형 거동을 관찰할 수 있다. 전단벽은 섬유 (Fiber)요소를 사용하며 이를 이용하여 비선형 휨 거동을 확인할 수 있으며 벽체의 전단 속성도 선형 또는 비선형으로 모델링할 수 있다. 따라서 이 프로그램은 비선형 해석을 통한 내진성능평가가 필요한 기존 건물의 보강이나 신축건물의 성능설계에 사용할 수 있다.

해석모델 작성에 사용한 콘크리트와 철근에 대한 재료 모델은 기대강도계수를 적용한, 응력-변형을 관계로 하였다. 기대강도계수는 ‘공동주택 성능기반 내진설계지침’ (이하 지침) [8]에 따라 콘크리트와 철근에 1.1을 사용하였다. GLT에 대한 재료 모델은 탄성 모델을 사용하였다. RC 전단벽의 부재모델은 휨에 대하여 섬유 (Fiber) 요소를 사용하였다 (Fig. 4(a)). 여기에 사용된 콘크리트 및 철근의 기대강도계수를 적용한 응력-변형을 곡선을 Fig. 4(b)와 (c)에 나타내었다. 벽체의 전단 속성은 탄성으로 하였다. GLT 보-기둥 및 RC 벽-GLT 보 연결부는 전단 강도에 비해 휨 강도가 매우 작기 때문에 해당 부분의 파괴는 휨에 의해 지배된다. 따라서 GLT 보-기둥 및 RC 벽-GLT 보 연결부를 휨지배거동으로 판단하여 Moment hinge 모델로 정의하였다. 결과적으로 전단은 탄성으로 정의하였다. 이를 위해 기본설

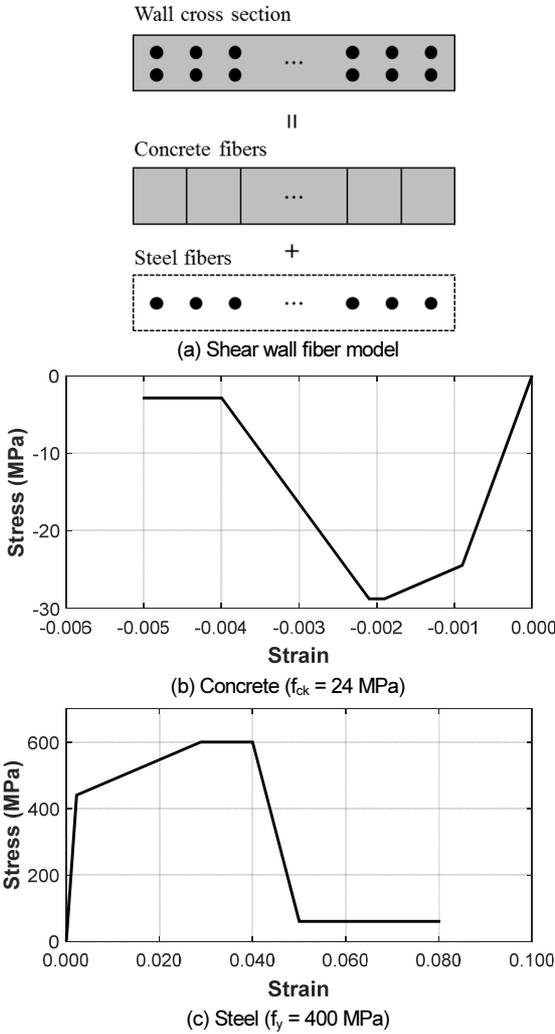


Fig. 4. Stress-strain curve

계로 결정된 목재의 수종, 볼트 직경 등에 따라 단일 볼트 접합부의 Load-Slip 실험을 선행하고 이를 이용하여 연결부의 모멘트-회전각 관계를 정의하는 것이 바람직하다. 그러나 본 연구에서는 실험을 수행할 수 없었으므로 층재의 두께, 볼트 직경, 목재의 물성치가 유사한 Gattesco and Toffolo [14]의 볼트 1개에 대한 Load-Slip 실험결과를 참고하였다. 이를 사용하여 연결부의 모멘트-회전각 관계를 정의하기 위해 연결부가 평형 상태일 때 외부 모멘트가 한 일(식(1))과 내부 볼트가 한 일(식(2))이 같다는 에너지 보존법칙을 이용하였다 [15].

$$W_E = \int_0^{\theta_{max}} M d\theta \quad (1)$$

$$W_I = \sum_{bolts} \left(\int_0^{s_{max}} F ds \right) \quad (2)$$

식(1)에서 M 은 연결부에 가해진 휨 모멘트, θ 는 M 으로 인해 발생된 회전각이며 식(2)에서 F 는 외력에 의해 각 볼트에 발생하는 내부력, s 는 F 로 인해 발생하는 변위이다. Fig. 5(a)는 GLT 보-기둥 및 RC 벽-GLT 보 연결부의 모멘트-회전각 관계의 예시이며 이 관계를 Fig. 5(b)와 같이 GLT 보

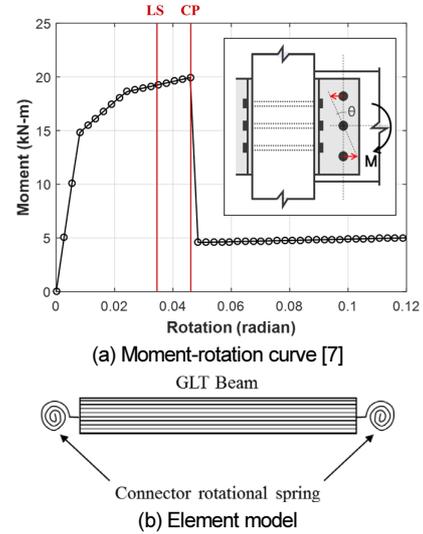


Fig. 5. Properties of connection

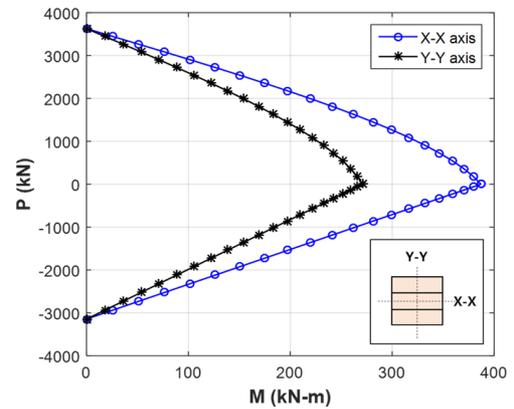


Fig. 6. Example of PM interaction curve of GLT column [7]

의 양단부에 입력하였다. 기둥은 작용하는 축력에 따라 모멘트가 달라지기 때문에, GLT 기둥에 대하여 PM 상관곡선(Fig. 6)을 작성하고 이를 해석 모델에 반영하였다. KBC의 목구조 기준에는 목재 기둥의 축 응력-휨 응력 관계식이 정의되어 있기 때문에 축력과 모멘트 관계식으로 변환하여 사용하였다. 이를 위해 축 응력에는 GLT 기둥의 단면적을 곱하였고 휨 응력에는 단면계수를 곱하였다. 또한 기준에서는 허용응력을 제공하고 있기 때문에 공학목재의 안전율인 2.1 [16]을 곱하여 집성재의 축 응력 및 휨 응력 값으로 사용하였다. 연결부 및 GLT 기둥의 PM 곡선에 대한 더욱 자세한 사항은 Chu et al. 에 서술되어있다. 또한 기타 모델링에 대한 구체적인 내용은 지침과 ASCE 41-13을 참고하였다.

3.4 비선형 해석 및 성능평가

3.4.1. 비선형정적해석 및 성능검토

앞서 언급했듯이, KBC의 0306.9.5에서는 비선형정적해석과 비선형동적해석법 두 가지를 모두 사용하여 구조물에 대한 해석과 검증을 수행해야 한다고 규정하고 있다. 이 조항에 대한 해설에 의하면, 비선형정적해석에

의한 검증을 추가적으로 요구하는 이유는, 현재의 모델링 및 해석 기술의 수준을 고려했을 때 기둥이나 보와 같은 선형부재들의 해석 결과는 비교적 신뢰성이 있지만 벽체와 같은 면부재의 해석은 신뢰성이 크게 떨어질 수 있고, 해석 결과만을 가지고 엔지니어가 설계 및 해석의 오류를 판단하기 어렵기 때문이다. 이에 비선형정적해석을 수행하여 대상 건물의 목표성능 만족 여부를 확인하였다. 비선형정적해석 수행에 대한 전반적인 사항은 지침을 참고하였다.

비선형정적해석을 수행할 때에는 여러 하중 조합을 고려하여야 하지만 해석의 편의를 위하여 단일 중력하중 조합은 1.0D + 0.25L을 사용하고, 해석 결과 검증 시, 지침에서 요구하는 최소강도기준을 만족하는지 확인하였다. 대상 건물의 X 방향 및 Y 방향에 대하여 비선형정적해석을 수행하였으며 이를 통해 얻은 최하층의 밀면전단력과 최상층의 수평변위를 변환하여 스펙트럼가속도(Spectral Acceleration, Sa)와 스펙트럼변위(Spectral Displacement, Sd)를 각 축으로 하는 역량스펙트럼(Capacity Spectrum)을 작성하였다. 또한 반응수정계수를 고려하지 않은 탄성 요구스펙트럼(Demand Spectrum)을 산정하고 이로부터 대상 건물의 에너지소산능력 등을 고려하여 비탄성 요구스펙트럼을 계산하였다. Fig. 7은 역량스펙트럼과 탄성 요구스펙트럼을 중첩한 가속도-변위 응답스펙트럼을 나타내었는데 이를 살펴보면, X 방향과 Y 방향 모두 성능점이 거의 탄성영역에 위치하는 것을 알 수 있다.

성능점에서의 X 방향과 Y 방향에 대한 층간변위각은 각각 0.43%와

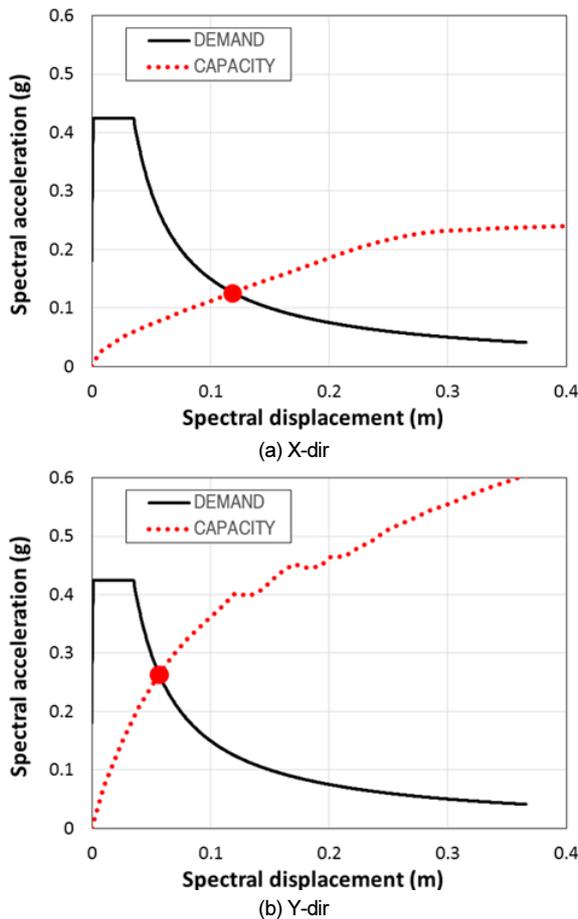


Fig. 7. ADRS capacity-demand curve

0.10%로 LS수준 (1.5%) 및 CP수준 (2.0%)을 만족하였다. GLT 골조 및 RC 전단벽에 대한 평가항목들도 모두 LS 및 CP수준 허용기준을 만족하였다. 또한 지침에서는 초과강도계수(Ω)가 1.5 이상일 때 최소강도기준을 만족하는 것으로 판단하는데, Ω 은 역량곡선 상에서 설계 밀면전단력에 대한 최대 강도의 비율로 구할 수 있다. 대상 건물의 설계지진력 (V_D)는 1,062 kN이고, 역량곡선에서의 최대 밀면전단력은 X 방향 및 Y 방향에 대하여 각각 2,650 kN, 4,020 kN으로 나타났다. 따라서 Ω 은 X 방향에 대해 2.5, Y 방향에 대해 3.8이므로 최소강도기준도 만족하였다.

3.4.2 비선형동적해석 및 성능검토

비선형정적해석을 통해 대상 건물이 목표 성능을 만족한다는 것을 확인하였으므로 이에 대해 비선형동적해석을 수행하였다. 이를 위해 PEER Ground Motion Database [17]에서 지진파를 선정하였다. 이때, 목표 스펙트럼은 설계응답스펙트럼의 1.5배와 1.0배 즉, MCE 수준 및 MCE의 2/3수준으로 설정하였다. 규모는 6~7, 전단파속도 ($V_{s,30}$)는 180~360 m/s로 하였다. 지진파는 MCE 수준 및 MCE의 2/3수준에 대하여 각각 7개씩 선정하였으며 이에 대한 정보를 Table 5에 나타내었다. 각각의 지진파는 서로 직교하는 2성분의 쌍으로 구성된다. 이와 같이 선정된 지진파들을 KBC의 설계지진파 선정 규정에 따라 목표 스펙트럼의 1.3배보다 10% 이상 작지 않도록 보정하였다. Fig. 8에는 지진위험도에 따른 목표 스펙트럼, SRSS 스펙트럼 그리고 이들의 평균 스펙트럼을 나타내었다.

본 연구에서는, 두 개의 성능목표 만족 여부 확인을 위해 지진파를 각각 7개씩 사용하였기 때문에 해석 결과를 통한 성능 평가 시, 최대응답을 평균한 값을 허용기준과 비교하였다. 또한 벽체의 비선형 거동이 1층에 집중되는 것을 고려하여 벽체의 성능평가는 1층에 대해서만 수행하였다.

Fig. 9에는 대상 건물의 층간변위각 결과를 나타내었다. 3.1 절에서 설정한

Table 5. Information on ground motions selected from PEER data base

MCE × 2/3 Level				
Record Number	Earthquake Name	Year	Magnitude	Vs,30 (m/s)
6	Imperial Valley	1940	6.95	213.44
122	Friuli	1976	6.50	249.28
169	Imperial Valley	1979	6.53	242.05
175	Imperial Valley	1979	6.53	196.88
266	Victoria	1980	6.33	242.05
337	Coalinga	1983	6.36	265.21
346	Coalinga	1983	6.36	308.84
MCE Level [6]				
Record Number	Earthquake Name	Year	Magnitude	Vs,30 (m/s)
68	San Fernando	1971	6.61	316.46
159	Imperial Valley	1979	6.53	242.05
161	Imperial Valley	1979	6.53	208.71
185	Imperial Valley	1979	6.53	202.89
337	Coalinga	1983	6.36	265.21
339	Coalinga	1983	6.36	307.59
346	Coalinga	1983	6.36	308.84

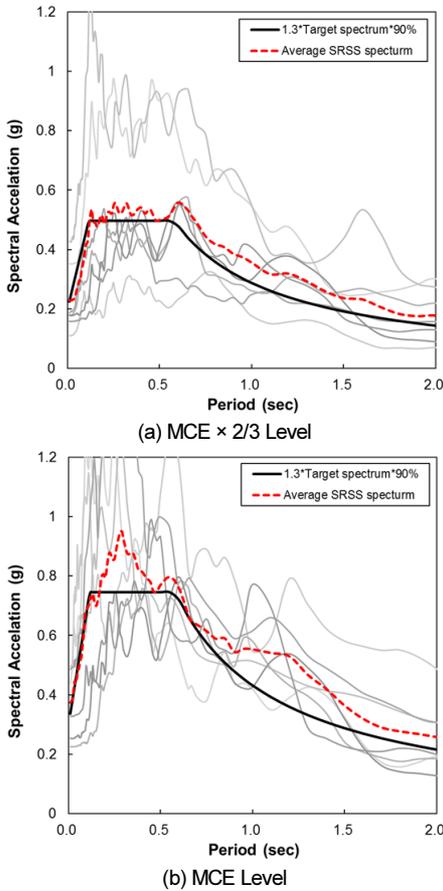


Fig. 8. Spectra of scaled ground motions

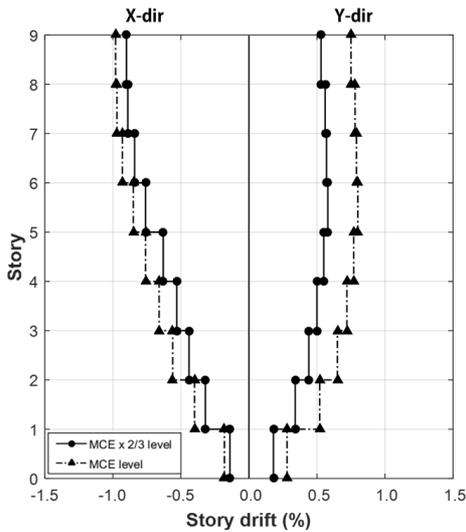


Fig. 9. Story drift

층간변위각 허용기준은 LS와 CP 각각 1.5%와 2.0%로, Fig. 7에서 MCE의 확인할 수 있다. 부재별 성능 중, GLT 보-기둥 연결부의 회전각과 GLT 기둥의 모멘트, RC 전단벽의 소성회전각은 모두 허용기준을 만족하였으며 자세한 값은 생략하였다. 그러나 각 지진위험도에 대한 요구전단력과 벽체의 전단강도를 비교한 Table 6에서 알 수 있듯이, 일부 벽체의 전단성능은 성능목표를 만족하지 못하였다.

Table 6. Shear performance of walls by seismic hazards

Wall ID	MCE × 2/3 Level			MCE Level [6]		
	Fu	Fn	DCR	Fu	Fn	DCR
W1-1	569	642	0.60	659	856	0.77
W1-2	1118	877	1.27	1284	1170	1.10
W1-3	860	727	1.18	939	970	0.97
W1-4	1573	1048	1.50	1615	1397	1.16
W2-1	1622	684	1.37	1460	913	1.60
W2-2	1530	556	2.75	1619	741	2.18
W3	95	321	0.30	105	428	0.25
W4	59	280	0.21	61	374	0.16
W5-1	466	406	1.15	525	542	0.97
W5-2	365	367	0.99	481	489	0.98
W11	568	513	1.11	598	684	0.87

3.5 재설계

비선형 해석을 통해 전단성능이 부족한 것으로 나타난 일부 벽체들에 대해 재설계를 수행한 후 다시 비선형 해석 및 평가를 수행하였다. 이 절에서는 비선형정적해석 과정은 생략하였으며 이후 기술되는 평가 결과는 모두 비선형동적해석을 통한 결과임을 주지한다. 본 연구에서는 Table 7의 4 가지 방법으로 벽체를 재설계하였다.

A는 수평철근의 간격을 최소로 하여 수평철근량을 증가시키는 방법이다. KBC의 0507.4.4에서는 전단철근에 의한 전단강도(V_s)가 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)의 4배 이상이 되지 않도록 규정하고 있다. 따라서 전단성능이 부족한 벽체들에 대하여 V_s 가 $4V_c$ 와 같도록 수평철근 간격을 줄였다. 이때 수평철근 간격이 100 mm보다 작은 것은 현실적이지 않을 것으로 판단하여 수평철근의 최소 간격은 100 mm로 하였다. B 방법은 A 방법과 동시에, 콘크리트 및 철근의 재료강도를 증가시키는 방법이다. C 방법은 벽체의 두께를 300 mm로 늘리는 방법이다. 이때 수평철근비는 기본설계와 동일할 수준으로 유지하였다. D 방법은 A 방법과 C 방법을 병행하는 것이다.

이러한 방법으로 전단성능이 부족한 벽체에 대하여 재설계한 후 다시 벽체의 전단DCR을 산정하였으며 이를 Table 8에 나타내었다. A, B, C 방법은 여전히 성능을 만족하지 못하는 벽체가 존재하였다. A 및 B 방법의 한계는, 앞에서 언급한 것과 같이 V_s 가 $4V_c$ 를 초과할 수 없고, 만약 V_s 가 $4V_c$ 보다 작더라도 수평철근 간격을 100 mm보다 작게 하는 것은 매우 비현실적이기 때문에 V_s 를 $4V_c$ 까지 증가시킬 수 없는 경우도 많다는 점이다. 또한, 벽체의 전단강도를 증가시키기 위해 콘크리트 압축강도(f_{ck})를 높이는 것은 철근 항복강도(f_y)를 높이는 것보다 상대적으로 효과가 작다. 그러므로 f_y 를 증가시켜야 하지만 현행 구조기준에서 전단철근의 설계기준항복강도는 최대 500 MPa로 규정되어 있기 때문에 이를 증가시키는 것도 한계가 있다. C 방법은 벽체 두께 증가에 따라 사용 가능한 실의 면적이 달라질 수 있다는 점이 가장 큰 한계이다. 따라서 이 방법으로 재설계를 하는 것은 설계 변경이 가능하다는 전제하에 가능하다. 또한 벽체의 두께를 늘리면 강성이 커지게 되고, 이에 따라 벽체에 물리는 요구 전단력이 더 커지기 때문에 이 방법만으로 벽체의 전단강도를 확보할 수는 없다. 이 결과를 통해 벽체의 전단강도가 부족한 경우, 벽체를 추가하지 않고 벽량을 높일 목적으로 단순히 벽체 두께

Table 7. Re-design method of RC shear wall

Type	Method	Content			
A	Decrease in spacing of horizontal reinforcement	Increase in the V_s not to exceed $4V_c$ ($s_{min} = 100$ mm)			
B	Type A & Increase in material strength	Increase in the V_s not to exceed $4V_c$ ($s_{min} = 100$ mm)			
		f_{ck} (MPa)	24	→	30
		f_y (MPa)	400	→	500
C	Increase in thickness of RC shear wall	T (mm)	200	→	300
D	Type C & Decrease in spacing of horizontal reinforcement	T (mm)	200	→	300
		Increase in the V_s not to exceed $4V_c$ ($s_{min} = 100$ mm)			

Table 8. Demand-to-capacity ratios of re-designed walls in shear

Wall ID	MCE × 2/3 Level				MCE Level			
	A	B	C	D	A	B	C	D
W1-2	0.78	0.64	0.73	0.56	0.59	0.48	0.76	0.58
W1-3	0.82	0.56	0.66	0.51	0.62	0.42	0.71	0.54
W1-4	0.82	0.67	0.88	0.67	0.62	0.51	0.91	0.70
W2-1	1.14	0.93	1.34	0.67	0.85	0.70	1.24	0.62
W2-2	1.55	1.27	1.57	0.57	1.17	0.96	1.69	0.61
W5-1	0.69	0.57	0.80	0.61	0.52	0.42	0.72	0.55
W11	0.84	0.70	0.60	0.46	0.63	0.53	0.59	0.46

를 증가시키는 것이 반드시 효과적이지는 않다는 점을 알 수 있다. 이에 본 연구에서 고려한 재설계 방안 중에서 대상 건물의 벽체 전단강도 부족 문제를 해결하는 데에 가장 효과적인 것은 벽체 두께와 수평철근량을 모두 증가시킨 D 방법임을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 GLT 골조와 RC 전단벽으로 이루어진 9층 사무소 건물을 KBC2016의 성능설계법 규정에 따라 설계하기 위한 구체적인 절차를 확립하고, RC 전단벽의 부족한 전단 성능을 보강하는 방안을 제시하였다.

대상 건물의 각 부재에 대한 기본 설계는 현행 구조기준을 따를 수 있지만, 성능목표 만족 여부 판단에 필요한 각 부재의 허용기준 설정과 비선형 해석모델 작성에는 각 부재의 실제 비선형 거동이 적절히 반영되어야 한다. 특히 대상 건물의 GLT 보, 기둥 자체는 변형능력을 고려하지 않으면서 GLT 단부의 볼트 접합부 파괴 양상에 따라 보-기둥 연결부의 능력을 보수적으로 예측하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 단, 볼트 접합부의 파괴는 수종과 볼트 종류 등에 따라 다르게 나타날 수 있으므로 보다 정확한 해석 모델 작성을 위해, 실험자료 확보가 중요할 것이다.

또한 대상 건물의 비선형 해석 결과, 벽체의 전단강도가 부족한 것으로 확인되었으며 이를 해결하기 위한 여러 방안 중, 벽체의 두께와 수평철근량을 동시에 증가시키는 것이 가장 효과가 큰 것을 확인하였다. 그러나 이 방법은 건물의 설계 자체를 변경하는 것이기 때문에 실무에서 적용하기 쉬운 방법은 아니다. 또한 벽체의 두께가 두꺼워지는 것이 반드시 벽체의 횡력 저항에 유리한 것도 아니다. 벽체의 두께를 변경하지 않으면서 전단강도를 확보할 수 있는 방안은 수평철근량 및 재료강도를 증가시키는 것이지만, 본 연구의 대상 건물과 같이, 이 방법으로도 벽체의 전단강도 부족을 해결할 수 없다면

두께를 변경하는 것은 불가피하다.

본 연구에서는 벽체의 두께와 수평철근량을 동시에 증가시키는 것으로 성능을 만족시킬 수 있었지만 이것으로도 해결되지 않는다면 구조계획의 문제일 수도 있다. 따라서 평면의 변경이 가능한 경우에 한하여, 횡력 분배가 용이하도록 벽체의 배치를 변경하거나 벽량이 상대적으로 적은 방향에 벽체를 추가하는 것도 고려해볼 수 있을 것이다. 하지만 대상 건물의 규모나 평면 형태가 다를 경우에는 본 연구와는 또 다른 접근 방법을 선택해야 할 수도 있다. 따라서 이 연구의 결과는 GLT 골조-RC 전단벽 건물을 대표할 수 없으며 후속 연구를 통해 적절한 기본설계 방법 마련과 GLT 부재에 대한 보다 정확한 허용기준 정의 및 비선형 모델이 필요함을 주지하는 바이다.

/ 감사의 글 /

본 연구는 국토교통부 국토교통기술촉진연구사업의 연구비지원(16CT-AP-C115068-01)에 의해 수행되었습니다. 이에 감사드립니다.

/ REFERENCES /

1. Korea Forest Service [Internet]. Available from http://www.forest.go.kr/newkfsweb/html/HtmlPage.do?pg=/resource/resource_040302.html&mn=KF_S_02_01_04_03_02 (accessed November 20, 2017)
2. Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. Development of Structural Design Method for Glulam Structures and Evaluation of Fire-resistance of Glulam, 2002;30-157.
3. Park HK, Han JS, Hwang SW. A Study on the Bending Behavior Characteristics of a Glued-laminated Beam by the Small Size Thinning Timber. Journal of the Architectural Institute of Korea Struc-

- tural & Construction, 2003;19(6):11-17.
4. Korea Forest Service, Development of Element Technologies for Large-scaled Timber Construction, c2008.
 5. Pang SJ, Oh JK, Park MJ, Lee JJ, Development of Stochastic Model for Predicting the Bending Strength of Glued Laminated Timber, Proceeding of the Architectural Institute of Korea, 2015;109-110.
 6. AIK, KBC 2016, Korean Building Code-structural, Architectural Institute of Korea, c2016.
 7. Chu YR, Kim TW, Kim SR, A Study on Potential of Engineered Wood for 9-Story Office Buildings, EESK J Earthquake Eng. 2017;21(4): 163-170
 8. AIK, Guidelines for Performance-based Seismic Design of Residential Buildings, Architectural Institute of Korea, c2016.
 9. PEER, Guidelines for Performance-based Seismic Design of Tall Buildings (TBI), Pacific Earthquake Engineering Center, c2017.
 10. Korea Infrastructure Safety Corporation, Seismic Evaluation/Rehabilitation of Existing Buildings, Korea Infrastructure Safety Corporation, c2013.
 11. ASCE, Seismic Evaluation and Retrofit of Existing Buildings (ASCE/SEI 41-13), American Society of Civil Engineers, c2013.
 12. Khai MQ, Lee KH, Experiment of Hybrid Crodd Laminated Timber-concrete Floor Panel Systems, Proceedings of EESK Conference, c2017.
 13. CSI, Perform-3D, Nonlinear Analysis and Performance Assessment for 3D Structures, User Guide Version 6, Berkely, CA: Computers and Structures Inc, c2011
 14. Gattesco N, Toffolo I, Experimental Study on Multiple-bolt Steel-to-Timber Tension Joints, Materials and Structures, 2004;37:129-138.
 15. Awaludin A, Smittakorn W, Hayashikawa T, Hirai T, M- θ Curve of Timber Connection with Various Bolt Arrangements Under Monotonic Loading, Journal of Structural Engineering, 2007;53A:853-862.
 16. Pang SJ, Lee JJ, Oh JK, Evaluation of Allowable Bending Stress of Dimension Lumber: Confidence Levels and Size-adjustment, Journal of the Korean Wood Science and Technology, 2013;41(5):432-439.
 17. Pacific Earthquake Engineering Research (PEER) Center, PEER Strong motion database [Internet], Available from: <http://ngawest2.berkeley.edu> (accessed December 6, 2017).