

BIM 기반의 고력볼트 마찰접합부 설계자동화 시스템의 프로토타입 구축

A Development of Prototype Design Automation System for Standard Connections Using High-Strength Bolts based on BIM

엄진업¹⁾ · 신태송²⁾
Eom, Jin Up Shin, Tae Song

요약 : 본 연구는 철골 구조물의 실시설계 단계에서 활용 가능한 접합부 설계자동화 시스템의 프로토타입 개발에 관한 것으로 보 이음 마찰접합부를 대상으로 한다. 연구에서 접합부 구조설계를 위하여 한국강구조학회에서 발간된 고력볼트 표준접합 설계편람에서 제시하고 있는 표준설계법 및 접합부 표준화 원칙을 검토하고, 수정·보완하였으며, 이를 근간으로 접합부 구조해석 알고리즘을 작성하였다. 작성된 알고리즘을 토대로 접합부 구조설계를 수행하고, 도출된 구조설계 결과로부터 실시설계 단계의 BIM 모델링 소프트웨어에서 접합부 모델을 자동 생성할 수 있는 설계자동화 시스템을 개발하였다. 개발 시스템의 적용성 및 효율성을 검증하기 위하여 개발 시스템으로부터 도출된 접합부 설계 결과(라이브러리 D/B)와 설계편람에서 제시하고 있는 설계 일람표를 비교·검토하였다. 또한 샘플 모델을 대상으로 개발 시스템을 적용하였으며, 접합부 구조설계 결과와 BIM 모델링 소프트웨어와 연동하여 자동 생성된 모델 및 상세도의 속성을 비교·검토하였다.

ABSTRACT : This study is related to the development of a design automation system for the construction design phase of steel structures. The system intended for beam splice friction connections using high-strength bolts. The standard design method and standardization principles that are suggested in the design manual for standard connections using high-strength bolts published by the Korean Society of Steel Construction(KSSC) were reviewed. A structural analysis algorithm was formulated from the review. A design automation system that can automatically calculate the structural design of connections and automatically generate the connection model without separate inputs was developed. To verify the validity of the developed system, its results were compared with the data in the table for the connection design in the Design Manual. The development system was also applied to the sample model. Then the structural design results were compared with the properties of the connection models and drawings created from the results.

핵심용어 : BIM, 실시설계, 보 이음 마찰접합부, 설계편람, 설계 자동화

KEYWORDS : BIM, construction design(CD), beam splice friction connection, design manual, design automation

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

건축물의 구조용 재료 중에서 강재는 강도뿐만 아니라 변형 능력이 우수하여 여러 면에서 안전성능이 우수하다. 특히, 지진이나 폭발 등과 같은 재난에 저항하는 성능이 다른 재료보다 우수함은 그 동안에 전 세계적으로 발생한 건축물 피해사

례에서 통계적으로 입증되었다. 그 동안의 강구조 기술은 후 판 고강도강인 SM570TMC강, 내진성능이 우수한 SHN강과 SHN강, 고강도 고력볼트인 F13T 등 고성능 강재의 개발과 최근 발표된 KBC-09 건축구조설계기준에서 개정된 새로운 강구조설계법 등을 통해 발전을 거듭하고 있다(한국강구조학회, 2009). 최근 한국강구조학회에서는 고력볼트 이음의 설계 및 시공에서 안전하고 경제적인 설계와 공사비 절감 및 공기단축을 도모하기 위하여 KBC-09 강구조기준에 따른 고

1) 동명대학교 건축공학과, 박사과정(breadline@naver.com)

2) 교신저자, 동명대학교 건축공학과 교수

(Tel: 051-629-2461, Fax: 051-629-2459, E-mail: tsshin@tu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2012년 4월 30일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

력볼트 설계편람(이하, 설계편람)을 발간하였다. 설계편람은 KBC-09의 한계상태설계법을 적용한 설계법을 제시하고 있으며 고력볼트의 치수 및 배열과 철판 치수가 임의적일 정도로 다양한 기존의 표준조합을 많은 부분 단순화한 설계지침을 제시하고 있다.

또한 강구조 기술은 최근 건설 산업의 새로운 패러다임으로 자리매김한 BIM 기술로 인해 발전에 더욱 박차를 가하게 되었다. 건설 산업에서의 BIM은 계획BIM, 설계BIM, 시공BIM등 적용 분야와 사용 목적에 따라 다양하게 구분되며, 설계BIM의 경우 단위 설계업무(계획설계, 기본설계, 실시설계)에 따라 계획설계BIM, 기본설계BIM, 실시설계BIM으로 세분화된다. 여기서 철근콘크리트 구조의 경우 계획 및 기본설계 단계에서 콘크리트 부재에 대한 BIM의 적용은 일정수준 이상 이루어져 왔으나, 실시설계 단계 즉, 철근 배근 및 후속 작업(철근 시공도 작성, 물량 산출 등)들은 모델링 방법상의 문제, 모델링 후의 용량 증가 문제, 배근 표준화 지침의 부재 등에 의해 여전히 기존 2D 기반으로 이루어지고 있다(Rafael 등, 2010; 이병권 등, 2009; 홍성욱 등, 2011). 이에 반해, 강구조는 접합부 디테일에 대한 라이브러리, 표준조합부 설계법 및 표준화 원칙 등이 잘 정립되어 있어 기본설계의 주골조 모델링뿐만 아니라 접합부 모델링 및 후속 작업을 포함하는 실시설계 단계에서도 비교적 적용이 우수하다(엄진업, 2010, 신태송 등, 2011). 강구조에서 실시 설계 단계에서 사용되는 BIM 모델링 소프트웨어는 다양하나 국내·외에서 가장 보편적으로 사용되는 소프트웨어로는 Tekla Structures(이하, TEKLA)를 들 수 있다. TEKLA에서는 조합 타입에 따라 '매크로(macro)' 형태의 파라메트릭 라이브러리(parametric library)를 제공하며, 사용자는 이를 사용하여 반복적인 모델링 과정을 효율적으로 수행할 수 있다. TEKLA에서 매크로의 사용은 분명 작업의 생산성을 증대시킬 수는 있지만 근본적으로 A&D(Analysis and Design) 기능은 포함하지 않기 때문에 선행 단계인 구조설계 단계와는 분리되어 있어 설계 결과를 포함하는 기본 도면을 수반하게 되며 사용자는 2D도면으로부터 수작업을 통해 모델을 생성할 수밖에 없는 근본적인 번거로움이 내재되어 있다(신태송 등, 2010).

이에 본 연구에서는 설계편람에서 제시하고 있는 설계지침 및 표준화 원칙을 검토하고, 이를 적용하여 보 이음부의 마찰 조합을 대상으로 고력볼트 표준조합부 설계자동화 시스템(이하, 개발 시스템)의 프로토타입을 구축하고자 한다. 또한 써드 파티 어플리케이션(3rd Party Application) 개발을 목적으로 소프트웨어 벤더에서 제공하는 API(Application Programming Interface)를 통해 BIM 소프트웨어와의 연동함으로써 개발 시스템의 효율성을 높이고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

연구의 목적을 달성하기 위한 연구의 절차는 그림 1과 같다.

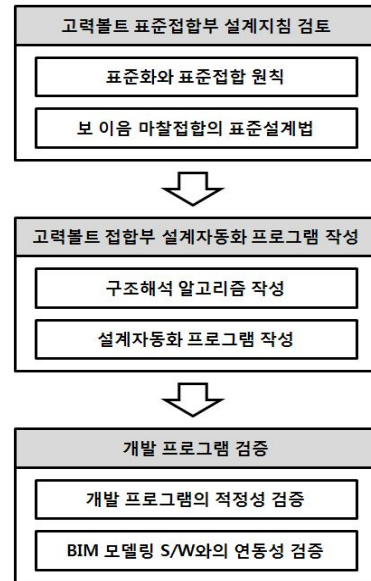


그림 1. 연구의 절차

먼저, 설계편람에서 제시하고 있는 고력볼트 조합부의 설계법을 검토하였다. 설계편람에서는 보와 기둥 부재에 대하여 각각 마찰조합과 지압조합의 네 가지 설계법을 제시하고 있으나, 연구에서는 보 이음의 마찰조합만을 대상으로 하였다. 설계법의 검토 방법은 KBC-09 건축구조설계기준의 강구조 기준을 근거로 제안하고 있는 표준화된 설계법(이하, 표준설계법)을 분석하여 설계적용의 타당성을 검토하였다(대한건축학회, 2009).

다음으로 검토된 설계법과 설계편람에서 제시하고 있는 표준화 원칙을 이용하여 조합부 구조해석을 위한 알고리즘을 작성하였으며, 이를 기반으로 Excel VBA(Visual Basic for Application)를 이용하여 고력볼트 조합부 설계 자동화 프로그램을 작성하였다. 프로그램 작성에서 사용된 Excel VBA는 엑셀 응용 프로그램에서 활용할 수 있는 Visual Basic을 의미하는 것으로 닷넷 프레임워크(.NET Framework) 개발환경에 속하며, 연구에서 대상으로 하는 BIM 소프트웨어인 TEKLA에서 제공하는 OpenAPI 역시 닷넷 환경에서 구동되기 때문에 시스템 개발을 위한 적합한 환경이라 할 수 있다. 프로그램 작성 과정에서는 조합부 설계에 필요한 입력 값인 모부재의 단면 및 재질 정보, 볼트의 단면 정보, 철판의 재질 정보와 표준화 설계 원칙을 각각 엑셀 데이터베이스로 구축하여 시스템의 접근 및 확장에 효율성을 제고할 수 있도록 하였다.

마지막으로, 완성된 프로그램의 검증을 수행하였다. 프로그

램 검증은 두 가지 목적으로 구분하여 진행하였다. 첫 번째는 개발 프로그램으로부터 도출된 설계 결과의 적정성을 검증하는 것으로, 설계편람에서 제시하고 있는 접합부 설계 일람표와 개발 프로그램으로부터 도출된 접합부 설계 결과표 즉, 라이브러리 D/B를 비교·분석하였다. 두 번째는 설계 결과와 BIM 모델링 소프트웨어 사이의 연동성을 검증하는 것으로, 샘플 구조물을 대상으로 실제 모델로부터 접합부 설계를 위한 입력 값을 연동하여 구조설계를 수행하고, 다시 그 결과를 모델로 내보내어 구조설계 결과와 접합부 모델의 속성 값을 비교함으로써 개발 시스템의 적용성을 검증하였다.

2. 고력볼트 표준접합부의 설계지침 검토

2.1 고력볼트 표준접합 설계편람

고력볼트 표준접합 설계편람은 한국강구조학회에서 2009년도에 발간된 것으로 KBC-09 건축구조기준의 한계상태설계법에 따른 고력볼트 접합부의 표준설계법을 제시하고 있으며, 철판 및 고력볼트 배치의 표준화 및 표준접합 원칙을 포함하고 있다. 설계편람에서 사용된 고력볼트는 기존의 F10T 뿐만 아니라 성능이 1.3배 우수한 1,300MPa 급의 F13T 고력볼트가 적용되고 있으나, F13T 고력볼트에 대한 적용은 향후 연구결과가 더 필요한 부분으로 보완/확정할 필요가 있을 것으로 사료된다. 기존의 건축구조기준(KBC-05)에서는 고력볼트의 마찰접합만을 규정하고 있으나, 이와 달리 KBC-09에서는 마찰접합 뿐만 아니라 지압접합도 규정하고 있어 설계편람에서는 보와 기둥 이음부에 대하여 각각 마찰접합, 지압접합을 적용하여 총 4가지 타입에 대한 설계법을 제시하고 있다. 설계 편람의 부록에서는 제시된 설계법을 통해 도출된 고력볼트 표준접합부 설계 일람표를 포함하고 있다. 일람표에는 SS400, SHN490 재질의 강재를 대상으로 F10T와 F13T 고력볼트를 적용하여 보에 대해서는 100%, 85%, 70%의 부분강도를 기둥에 대해서는 100%, 75%, 50%의 부분강도에 대한 설계 결과를 테이블로 정리하였다.

2.2 표준화와 표준접합 원칙 검토

기존의 고력볼트 표준접합은 고력볼트 치수 및 배열과 철판 치수가 임의적일 정도로 다양하였으나, 설계편람에서는 일본의 철골구조 표준접합위원회에서 집필하여 건설성 주택국에서 감수한 철골구조표준접합부(H형강편)을 참조하여 많은 부분을 단순화하는 설계법을 제시하고 있으며, 그 내용을 요약하면 다음과 같다.

2.2.1 철판 표준화와 고력볼트 배치의 표준화

설계편람에서는 설계, 시공, 제작 시 혼선을 줄이기 위하여, 철판의 폭과 두께로 사용할 수 있는 범위를 일정하게 제한하고 있으며, 그 내용은 다음과 같다.

- 1) 플랜지 철판의 폭은 형강의 공칭 폭으로 한다.
- 2) 철판의 두께는 플랜지와 웨브별로 각각 표 1, 표 2와 같이 일정한 규격으로 표준화한다.

표 2. 플랜지 철판 두께 표준화(mm)

9	12	16	19	22	25	28
---	----	----	----	----	----	----

표 3. 웨브 철판 두께 표준화(mm)

6	9	12	14	16	19
---	---	----	----	----	----

또한, 설계편람에서는 플랜지와 웨브의 이음에 대하여 고력볼트 배치에 대한 표준화 원칙을 제시하고 있으며, 그 내용은 다음과 같다. 먼저 플랜지이음부의 규격에 관한 것으로 플랜지 공칭 폭에 따라 철판의 폭, 볼트의 규격 및 배치 방법을 표준화하고 있으며 그 내용은 표 3과 같다.

표 4. 플랜지 이음부의 규격

플랜지 공칭폭	철판 폭		볼트 게이지		응력의 직각방향 연단거리	볼트 규격	볼트 열수	볼트 배치
	외측	내측	g1	g2				
100	100	-	56	-	22	M16	2	정렬
125	125	-	75	-	25			
150	150	60	90	-	30	M20		
175	175	70	105	-	35			
200	200	80	120	-	40			
250	250	100	150	-	50			
300	300	120	130	50	35	M22	4	엇모
350	350	140	140	70	35			
400	400	165	150	85	40		4	정렬

다음은 웨브 이음에 관한 것으로 그 내용을 요약하면 다음과 같다. 설계편람에서는 웨브 철판의 상하방향 길이는 부재 춤의 60% 이상으로 규정하고, 웨브 제1열 볼트와 내철판의 간격은 60mm 이상을 원칙으로 하며, 부재의 춤이 200mm 이하인 경우, 웨브와 플랜지의 볼트를 절반의 피치로 엇갈리게 배치하는 것으로 규정하고 있다. 웨브 볼트의 상하방향 피치는 60mm, 90mm 120mm의 3 종류로 하며, 종방향 피치는 60mm로, 종방향 및 횡방향 연단거리는 볼트 지름에 상관없이 모두 40mm로 표준화 한다.

2.2.2 표준접합 원칙

설계편람에서는 보와 기둥의 표준접합 원칙에 대해 제시하고 있다. 연구의 대상인 보에 대해서 그 내용을 정리하면 다음과 같다. 보의 표준접합 원칙은 소요강도와 설계강도로 구분된다. 먼저, 소요강도 산정에 관한 것으로 설계편람에서는 브라켓 길이를 고려하여, 휨강도 및 전단강도에 대한 전강도 설계법(Full Strength Design) 또는 전강도의 85%와 70%인 경우의 부분강도설계법(Partial Strength Design)으로 표준화하고 있다. 다음은 휨재의 공칭휨강도에 대한 것으로, 설계편람에서는 보의 횡좌굴에 의한 휨강도 감소는 고려하지 않고 국부좌굴만을 고려하며, 순단면에 대한 공칭휨강도를 고려하지 않고, 총단면에 대한 공칭휨강도에 대해 적용을 제한하고 있다(KBC-09 0706.13).

2.3 보 이음 마찰접합부의 표준설계법

설계편람에서 제시하고 있는 보 이음 마찰접합부의 표준설계지침은 접합부 설계 과정을 소요강도 산정, 플랜지 이음 설계, 웹 이음 설계의 세 단계로 구분하고 있다. 표준설계지침에서는 접합부의 소요강도 산정에 있어 플랜지의 경우 보의 국부좌굴만을 고려하여 플랜지와 웹의 판폭두께비를 검토하고, 그 중 작은 값을 공칭휨강도로 하며, 부분강도비를 고려하여 소요휨강도를 산정한다. 웹의 경우 판폭두께비를 고려하지 않고 공칭전단강도에 대해서만 부분강도비를 고려하여 소요전단강도를 산정하며, 그 후속 설계과정은 그림 2와 같다.



그림 2. 보 이음 마찰접합부 표준설계법

2.4 표준설계법 비교 · 검토

그림 2에서 제시하고 있는 표준설계법은 연구의 목적인 고력 볼트 표준접합부 설계자동화 프로그램의 근간이 되는 것으로, 프로그램으로의 적용에 앞서 KBC-09 강구조기준 및 참고 문헌에서 제시하고 있는 설계식과 비교 · 분석하여 제시된 설계지침의 적정성을 검토하였다. 설계식의 비교를 위해 KBC 2009 강구조설계(한국강구조학회, 2009); 철골구조설계(신태승, 2005), 손선욱(호서대학교, 2008) 등의 문헌을 참고하였다.

표 5. 표준 설계법 비교 · 검토

비교 항목		설계 편람	KBC 2009	비고	
플랜지 부분	설계모멘트 강도	○	○	동일 적용	
	인장 강도	항복상태	○	○	동일 적용
		파단상태	×	○	추가 적용
	설계미끄럼강도	○	○	$\phi=0.85$	
웹 부분	전단 강도	항복상태	○	○	동일 적용
		파단상태	×	○	추가 적용
	설계미끄럼강도	○	○	$\phi=0.85$	
설계법	전강도설계	○	○	동일 적용	
	부분강도설계	○	×	사용자 정의	
	존재응력설계	×	○	사용자 정의	

표 4의 비교 항목을 바탕으로 설계편람에서 제시하고 있는 설계식을 수정 보완하였으며, 그 내용은 다음과 같다. 먼저, 플랜지 첩판의 폭 및 두께 결정에 관한 것으로, 첩판의 두께 결정식을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$\text{외 첩판 두께} = \frac{0.5 \times A_{upf}}{\text{외 첩판 폭}} \quad (1)$$

$$\text{내 첩판 두께} = \frac{0.5 \times A_{upf}}{2 \times \text{내 첩판 폭}} \quad (2)$$

$$\text{외 첩판 두께} = \frac{A_{upf}}{\text{외 첩판 폭}} \quad (3)$$

여기서, A_{upf} = 플랜지의 소요 단면적

설계편람에서는 모든 단면에 대해 식 (1)과 식 (2)를 공통으로 적용하고 있다. 즉, 플랜지에 작용하는 축력에 대해 내 첩판과 외 첩판 모두가 저항하는 것으로 하고 있으나, 표 3에서 제시하고 있는 플랜지 이음부의 규격에서 플랜지의 공칭 폭이 150mm 이하인 단면의 경우 외 첩판만을 사용하도록 표준화되어 있으므로 첩판의 두께 결정식은 공칭 폭 150 mm를 기준으로 서로 다른 결정식을 사용해야 함을 알 수 있다.

본 연구에서는 플랜지의 공칭 폭이 150mm을 초과하는 경우에는 식 (1), 식 (2)를 적용하고, 공칭 폭이 150mm 이하인 경우에는 식 (3)을 추가로 적용하도록 변경 하였다.

다음은, 웨브 첩판의 두께 결정에 관한 것으로, 설계편람에서는 첩판의 두께 결정식을 다음과 같이 제시하고 있다.

$$t_{pw} = \frac{0.5 V_u}{\phi_v 0.6 F_y d_p} \quad (4)$$

여기서, $\phi_v = 1.0$ (전단강도감소계수)

d_p = 웨브 첩판의 춤

식 (4)는 접합부재 즉, 웨브 첩판의 전단항복 조건에 대한 소요두께 산정 식으로, 설계편람에서는 계산된 값 이상을 웨브 첩판의 두께로 선정하도록 제시하고 있다. 하지만 KBC-09 0710.4.2에 따르면 접합부재의 설계전단강도 ϕR_n 은 전단항복과 전단파단의 한계상태 모두 고려하도록 되어 있으므로 연구에서는 전단항복 외에 전단파단에 대하여 식 (5)를 추가하였으며, 계산된 값 중에서 작은 값을 소요두께로 산정하고, 웨브 첩판의 두께는 소요두께 이상이 되도록 적용하였다.

$$t_{pl} = \frac{0.5 V_u}{\phi_v 0.6 F_u (d_p - n_w d_h)} \quad (5)$$

여기서, n_w = 웨브 첩판의 고력볼트 행수, d_h = 볼트 구멍의 크기, $\phi_v = 0.75$ 를 의미한다.

마지막으로, 고력볼트의 미끄럼강도 산정에 관한 것으로 KBC2009 강구조기준에서는 사용성 하중조합에 대하여 마찰접합을 설계하고, 강도하중조합에 따라 지압강도를 검토하도록 되어 있다. 본 연구에서는 하중조합에 따른 소요강도에 대하여 미끄럼이 일어나지 않는 마찰접합 즉, $\phi = 0.85$ 를 적용하였다.

3. 고력볼트 접합부 설계자동화 프로그램 구현

3.1 구조해석 알고리즘 작성

고력볼트 접합부 설계자동화 프로그램의 작성에 앞서 설계편람의 검토를 통해 수정·보완된 설계 법으로부터 접합부 구조해석 알고리즘을 작성하였다. 작성된 알고리즘은 이후 시스템 구현 단계에서 활용되어진다. 그림 3은 작성된 알고리

즘의 일부로, 입력된 값으로부터 접합부 소요강도를 산출하기 까지의 설계과정을 포함하고 있다. 연구에서는 작성된 알고리즘을 공학용 해석 솔루션인 MathCAD를 이용하여 검증하였으며 이를 통해 설계식의 적정성을 검토하였다(그림 4).

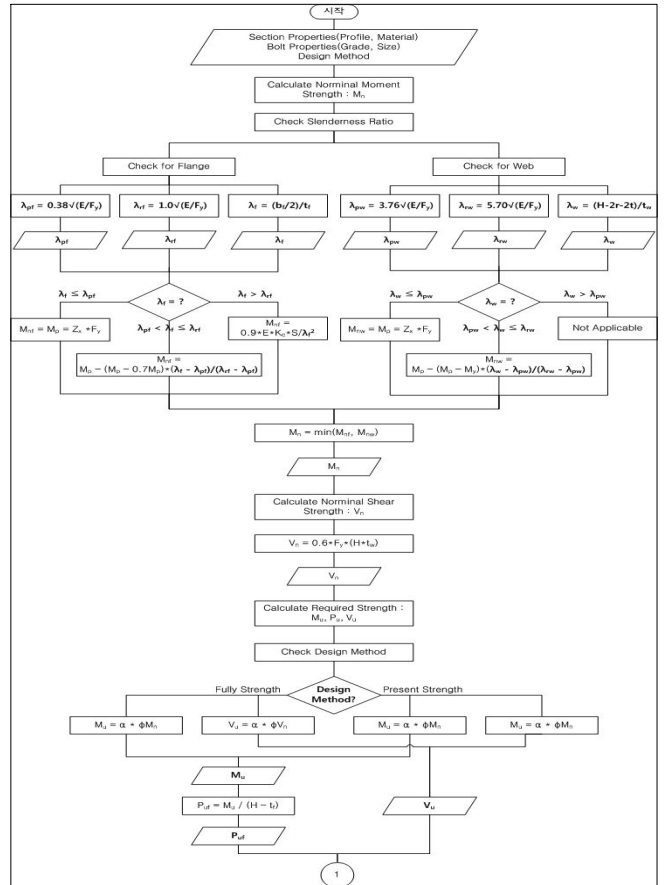


그림 3. 접합부 구조해석 알고리즘

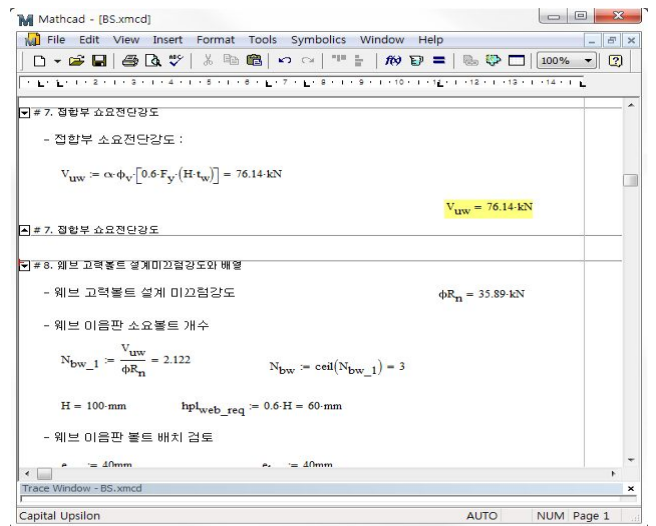


그림 4. MathCAD를 이용한 알고리즘 검증

3.2 프로그램 작성

3.2.1 프로그램 작성 환경

연구에서는 접합부 설계자동화 프로그램의 작성을 위해 Excel VBA를 이용하였으며, 설계 결과와 BIM 모델링 S/W와의 연동을 위해 TEKLA OpenAPI를 활용하였다. Excel VBA는 Excel 응용프로그램에서 활용할 수 있도록 Visual Basic 프로그래밍 언어를 내장한 것으로 Visual Basic 본연의 프로그래밍 기능과 Sheet, Range 등 Excel 고유의 개체에 대한 접근성을 제공한다. 또한 사용자에 의해 customizing이 용이한 spread sheet를 제공하여 UI(User Interface)의 구현이 용이하며, 데이터베이스 프로그래밍이 용이하여 비교적 개발 속도가 빠른 장점이 있다.

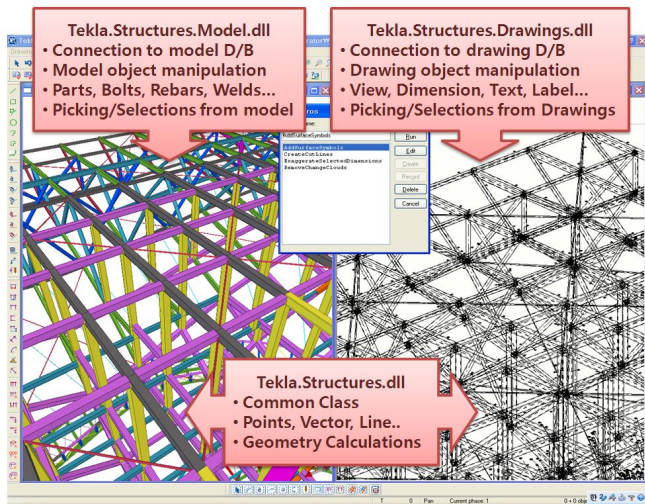


그림 5. TEKLA OpenAPI 프로그래밍 환경

Tekla OpenAPI는 TEKLA Structures와 연동 가능한 3rd party application 개발을 목적으로 TEKLA 벤더에서 제공하는 API로 TEKLA에서 사용되는 거의 모든 객체와 기능에 대한 접근성을 제공한다. 사용자는 .NET Framework 환경(C#, Visual Basic 등)에서 제공되는 DLL (Dynamic Linking Library)를 참조함으로써 모델 및 드로잉 객체를 자유롭게 컨트롤 할 수 있다.

3.2.2 보 이음 마찰접합부 설계자동화 시스템 구현

2.4절에서 설계편람에서 제시하고 있는 설계법을 검토하여 수정 보완하여 접합부 구조해석 알고리즘을 작성하였으며, 이를 근간으로 보 이음 마찰접합부의 설계자동화 시스템을 구현하였다. 구현이 완료된 시스템의 UI(User Interface)는 그림 6과 같다. 설계자동화 시스템은 기능적으로 크게 접합부 구조설계와 BIM 모델링 S/W와의 연동을 통한 모델링

자동화로 구분하여 구현하였다.

접합부 구조설계 기능의 구현은 다음과 같다. 먼저, 설계조건 입력에 관한 것으로, 연구에서는 입력의 효율성을 높이기 위하여 구조설계를 위하여 요구되는 모부재의 단면, 재질 정보, 접합재 즉 볼트 및 철판의 재질, 단면 정보를 D/B로 구축하고 입력 대화상자와 연동하여 단순한 선택만으로 입력이 가능하도록 하였으며, 플랜지의 공칭폭 결정에 따른 철판 및 볼트의 표준화 원칙(표 3) 등을 D/B화하여 단면 정보의 입력 단계에서 관련된 사항들이 자동으로 결정되도록 하였다. 또한 설계편람에서는 전강도설계법을 근간으로 구조 설계자에 의해 설계횡강도에 대한 실제 소요강도의 비율, 브라켓 길이 등을 고려하여 85%, 70%의 부분강도를 선택할 수 있도록 제안하고 있으나, 연구에서는 사용자 정의에 의한 부분강도를 선택할 수 있도록 하였으며, 전강도설계법 외에 존재응력설계법을 추가하여 좀 더 범용적으로 적용할 수 있도록 하였다(그림 7). 개발 시스템에서는 존재응력설계법의 선택할 경우 접합부의 소요강도(M_u , V_u)는 사용자에 의해 입력된 존재응력을 부재의 공칭설계강도와 비교하여 최소 부재설계강도의 50% 중 큰 값을 만족하도록 설정하였다.

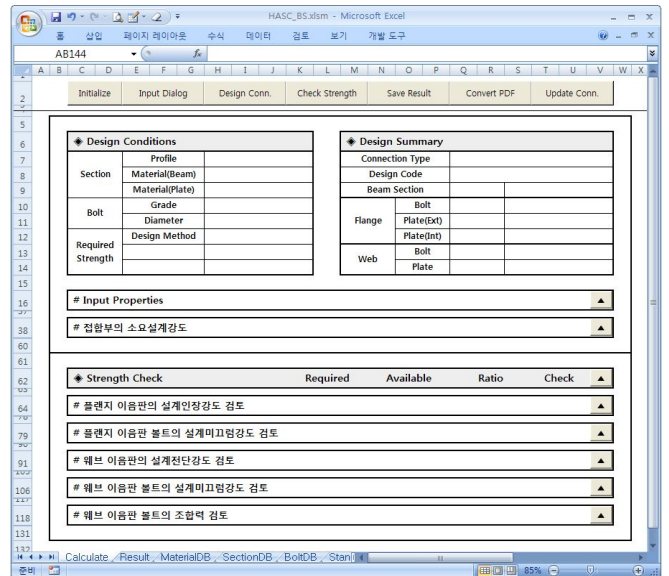


그림 6. 보 이음 마찰접합부의 설계자동화 시스템의 UI

입력된 설계 조건으로부터 시스템 내부적으로 구조설계 알고리즘을 근간으로 작성된 설계 기능을 이용하여 접합부 구조설계를 수행하고, 그 결과를 시트에 출력한다. 그림 7은 출력된 설계 결과를 PDF로 변환한 것으로, 연구에서는 단일 접합부에 대하여 리포트 형식의 상세한 설계 결과를 출력하며(좌), 여러 접합부에 대하여 테이블 형식의 요약된 설계 결과를 출력하도록(우) 구현하였다.

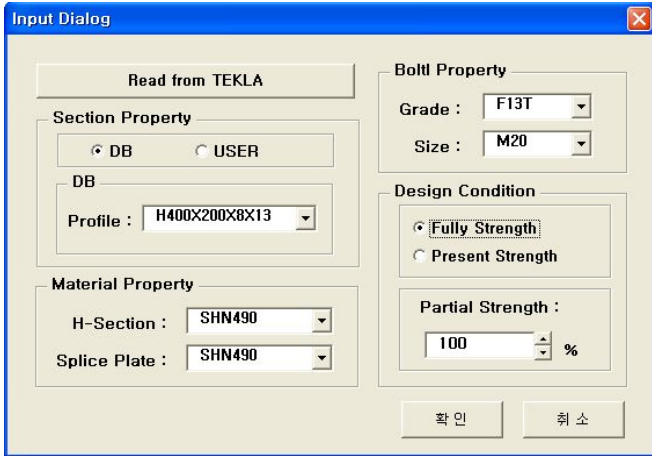


그림 7. 설계조건 입력 대화상자

```

Dim Model as Model
Set Model = New Model

Dim PPick As New Picker
Dim SPick As New Picker

Set PP = PPick.PickObject(PickObjectEnum_PICK_ONE_PART)
Set SP = SPick.PickObject(PickObjectEnum_PICK_ONE_PART)

With Worksheets("SectionDB")

    Dim RNG As Range
    Set RNG = .Range("A2", .Range("A2").End(xlDown))

    For Each Cell In RNG

        Dim tempName As String
        tempName = Replace(Cell.Value, "X", "", 1, -1, vbTextCompare)
        If tempName = PP.Profile.ProfileString Then
            SectionType = "DB"
            Exit For
        Else
            SectionType = "USER"
        End If

    Next

End With
    
```

그림 9. TEKLA에서 모부재의 정보를 가져와서 저장하는 코드 예제

4. 개발 시스템 검증

4.1 접합부 구조설계 결과의 적정성 검증

보 이음 마찰접합부의 설계자동화 시스템의 구조설계 결과의 적정성을 검증하기 위하여 설계편람에서 부록으로 제시하고 있는 접합부 설계 일람표와 개발 시스템을 통해 도출된 접합부 설계 라이브러리 D/B를 비교·검토하였으며, 그 결과는 표 4와 같다. 표 4는 SHN490 강재를 대상으로 F13T 고력볼트를 이용한 보 이음부의 마찰접합부에 대한 것으로 100% 전강도설계법을 적용한 결과이다.

동일한 부재에 대하여 개발 시스템에서 도출된 설계 결과(왼쪽)와 설계편람에서 제시하고 있는 설계 일람표(오른쪽)를 나타낸 것으로 전체 단면 중 일부를 보여주고 있다. 설계 결과를 검토한 결과 서로 상이한 부분을 발견할 수 있었다. 연구에서는 이를 확인한 결과 그 원인을 다음과 같이 구분할 수 있었다.

첫 번째는 H100×100×6×8, H250×125×6×9 단면에 해당하는 것으로 플랜지 첩판의 두께가 서로 다르게 나타난다. 이는 2.4절에서 제시한 바와 같이 보 플랜지의 공칭폭이 150mm 이하인 경우 플랜지 두께를 결정하기 위하여 추가적인 설계식을 적용하였기 때문인 것으로 개발 시스템에서 도출된 결과는 설계편람에서 제시하고 있는 결과보다 크게(두 겹께) 나타난다.

두 번째는 H200×200×8×12, H250×250×9×14 등의 단면에 해당하는 것으로 웹 첩판의 두께가 개발 시스템에서

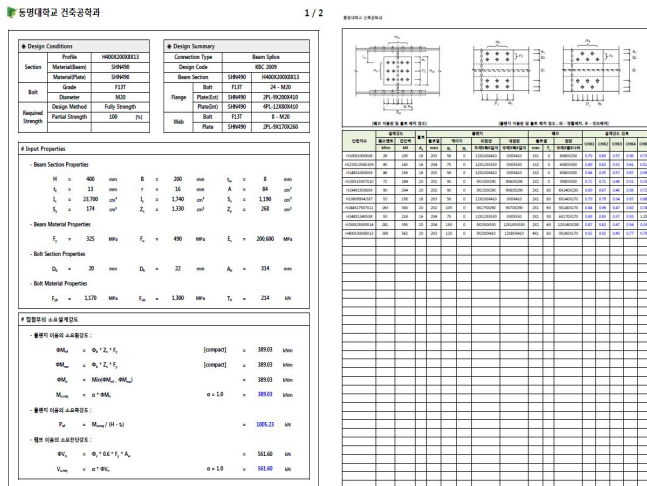


그림 8. 접합부 설계 결과 PDF 변환

다음은 접합부 모델링 자동화에 관한 것으로 개발 시스템과 TEKLA와의 정보 공유를 통해 접합부 설계 결과로부터 해당 접합부를 자동으로 생성하는 기능을 의미하며, TEKLA와의 정보 교환은 설계 조건의 입력 단계와 설계 결과의 출력 단계에서 이루어진다.

먼저 설계조건의 입력 단계에서는 그림 6의 입력 대화상자에서 Read from TEKLA 기능을 이용하여 TEKLA로부터 모부재의 정보를 읽어오며(그림 8), 시스템 내부에서는 모부재의 인스턴스(instance) 정보를 저장한다. 설계 결과의 출력 단계에서는 구조설계 결과로부터 API를 이용하여 해당 접합부의 인스턴스를 생성하고, 입력 단계에서 저장된 모부재의 인스턴스에 접합부 인스턴스를 추가 생성하여 TEKLA에서 해당 부재의 접합부 모델을 생성한다.

표 6. 설계조건 보 100%, SHN490, F13T의 보 이음 마찰접합부 설계 결과 검토 일부(좌 : 개발 시스템, 우: 설계편람)

단면치수	개발 시스템															설계편람																		
	볼트	플랜지									웹						볼트	플랜지									웹							
		볼트열			게이지			외침판			내침판			볼트열	피치	침판		볼트열			게이지			외침판			내침판			볼트열	피치	침판		
		db	m	n	g1	g2	t	b	h	t	b	h	m					n	Pc	t	b	h	db	m	n	g1	g2	t	b				h	t
H100X100X6X8	16	2	3	56	0	12	100	410	0	0	0	1	1	0	6	60	230	16	2	3	56	0	9	100	410	0	0	0	1	1	0	6	60	230
H250X125X6X9	16	2	4	75	0	16	125	530	0	0	0	2	2	90	6	170	290	16	2	4	75	0	12	125	530	0	0	0	2	2	60	6	140	290
H340X250X9X14	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	530	3	1	60	12	200	170	20	2	4	150	0	9	350	530	12	100	410	3	1	60	9	200	170
H350X357X19X19	22	4	3	140	70	12	350	410	16	140	410	3	2	60	19	200	290	22	4	3	140	70	12	200	410	16	140	410	3	2	60	19	200	290
H354X176X8X13	20	2	3	105	0	9	175	410	12	70	410	3	1	90	6	260	170	20	2	3	105	0	9	250	410	12	70	410	3	1	90	6	260	170
H404X201X9X15	20	2	4	120	0	12	200	530	16	80	530	4	1	60	9	260	170	20	2	4	120	0	12	300	530	16	80	410	4	1	60	9	260	170
H244X175X7X11	20	2	2	105	0	9	175	290	9	70	290	2	1	60	9	140	170	20	2	2	105	0	9	175	290	9	70	410	2	1	60	9	140	170
H248X249X8X13	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	530	2	1	60	9	140	170	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	410	2	1	60	9	140	170
H338X351X13X13	22	4	2	140	70	9	350	290	12	140	290	2	2	120	12	200	290	22	4	2	140	70	9	350	290	12	140	410	2	2	120	12	200	290
H346X174X6X9	20	2	2	105	0	9	175	290	9	70	290	3	1	90	6	260	170	20	2	2	105	0	9	175	290	9	70	410	3	1	90	6	260	170
H400X400X13X21	22	4	4	150	85	16	400	530	16	165	530	3	2	90	12	260	290	22	4	4	150	85	16	400	530	16	165	410	3	2	90	12	260	290
H400X408X21X19	22	4	4	150	85	16	400	530	16	165	530	4	2	60	19	200	290	22	4	4	150	85	16	400	530	16	165	410	4	2	60	19	200	290
H294X200X8X12	20	2	3	120	0	9	200	410	12	80	410	3	1	60	9	200	170	20	2	3	120	0	9	200	410	12	80	410	2	2	90	9	170	290
H294X302X12X12	22	4	1.5	130	50	9	300	350	9	120	350	3	1	60	12	200	170	22	4	1.5	130	50	9	300	350	9	120	440	2	2	90	12	170	290
H298X201X9X14	20	2	3	120	0	9	200	410	12	80	410	3	1	60	9	200	170	20	2	3	120	0	9	200	410	12	80	410	2	2	90	9	170	290
H298X204X12X12	20	2	4	130	50	9	300	440	12	120	440	3	1	60	9	200	170	22	4	2	130	50	9	300	440	12	120	440	2	2	90	9	170	290
H300X300X10X15	22	4	2	130	50	9	300	440	12	120	440	3	1	60	12	200	170	22	4	2	130	50	9	300	440	12	120	440	2	2	90	9	170	290
H708X302X15X28	22	4	4	130	50	19	300	800	25	120	800	9	1	60	14	560	170	22	4	4	130	50	19	300	800	25	120	530	5	2	90	14	440	290
H200X200X8X12	20	2	3	120	0	9	200	410	9	80	410	2	1	60	9	140	230	20	2	3	120	0	9	200	410	9	80	410	2	1	60	6	140	230
H200X204X12X12	20	2	3	120	0	9	200	410	12	80	410	2	2	60	12	140	350	20	2	3	120	0	9	200	410	12	80	410	2	2	60	9	140	350
H250X250X9X14	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	530	2	2	60	12	140	290	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	410	2	2	60	9	140	290
H250X255X14X14	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	530	2	2	60	16	140	290	20	2	4	150	0	9	250	530	12	100	410	2	2	60	14	140	290
H300X305X15X15	22	4	2	130	50	12	300	440	12	120	440	2	2	120	12	200	290	22	4	2	130	50	12	300	440	12	120	440	2	2	90	14	170	290
H344X348X10X16	22	4	3	140	70	9	350	410	12	140	410	3	1	60	12	200	170	22	4	3	140	70	9	350	410	12	140	410	3	1	60	9	200	170
H344X354X16X16	22	4	3	140	70	12	350	410	16	140	410	3	2	60	19	200	290	22	4	3	140	70	12	350	410	16	140	410	3	2	60	14	200	290
H388X402X15X15	22	4	3	150	85	9	400	410	12	165	410	3	2	90	14	260	290	22	4	3	150	85	9	400	410	12	165	410	3	2	90	12	260	290
H390X300X10X16	22	4	2	130	50	12	300	440	16	120	440	4	1	60	12	260	170	22	4	2	130	50	12	400	440	16	120	440	4	1	60	9	260	170
H394X398X11X18	22	4	3	150	85	12	400	410	16	165	410	4	1	60	12	260	170	22	4	3	150	85	12	400	410	16	165	410	4	1	60	9	260	170
H394X405X18X18	22	4	3	150	85	12	400	410	16	165	410	3	2	90	16	260	290	22	4	3	150	85	12	400	410	16	165	410	3	2	90	14	260	290

설계 편람보다 더 크게 나타나는 경우이다. 이 경우는 2.4절에서 설명한 바와 같이 웹 침판의 두께를 결정하기 위한 설계 식의 차이로 인해 발생하는 것으로 설계편람에서는 웹 침판의 두께를 결정하기 위하여 웹 이음의 전단항복만을 고려하지만, 개발 시스템에서는 KBC-09 설계기준에서와 같이 전단항복 뿐만 아니라 전단파단 또한 함께 고려하기 때문에 특정 단면에 대하여 설계편람에서 제시하고 있는 값보다 더 크게 계산된다.

4.2 BIM 모델링 S/W와 연동성 검증

BIM 모델링 S/W와의 연동성 및 개발 시스템의 적용성을 검증하기 위하여 TEKLA에서 3D-2BAY의 샘플 모델을 대상으로 개발 시스템을 적용하여 접합부 구조설계 및 모델링을 수행하였으며 그 결과를 검토하였다. 샘플 모델은 SS400 강재를 사용하였으며, 기둥과 보는 각각 H200×200×8×12, H400×200×8×13 단면을 적용하였다. 그림 10은 보 이음부에 대하여 개발 시스템을 적용한 것으로 TEKLA 모델과 연동하여 접합부 설계 조건을 입력하는 과정을 나타낸 것이며, 그림 11은 접합부 설계 결과로부터 TEKLA에서 자동 생성된 보 이음 접합부를 나타낸 것이다.

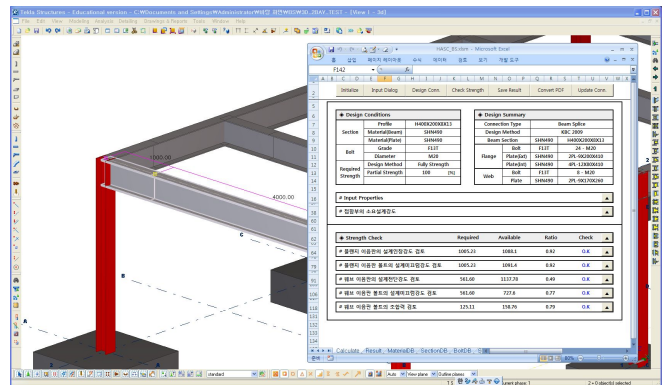


그림 10. 접합부 구조설계 및 결과 출력 과정

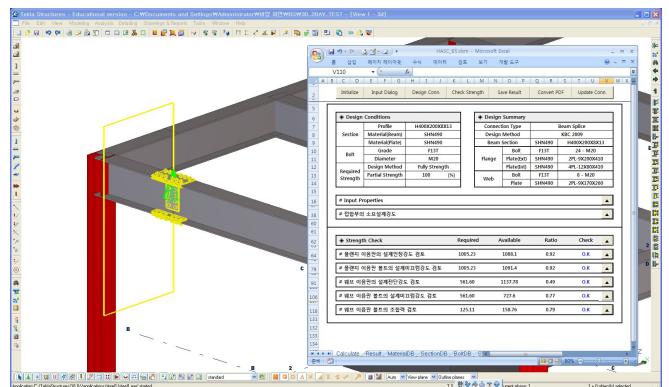


그림 11. 설계 결과로부터 모델을 자동 생성하는 과정

그림 12는 입력된 설계조건으로부터 보 이음 마찰접합부의 구조설계를 수행한 상세 결과를 나타내고 있으며, 그림 13은 테이블 형식으로 출력된 설계 결과를 나타낸 것이다.

Strength Check	Required	Available	Ratio	Check
# 볼렌지 이음판의 실제인장강도 검토	1005.23	1088.1	0.92	O.K
- 볼렌지 이음판의 인장항복강도				
$\Phi R_{m,y} = \Phi \cdot F_y \cdot A_g$		$\Phi = 0.90$	$= 1088.10$	kN
- 볼렌지 이음판의 인장파단강도				
$\Phi R_{m,t} = KBC09 - 0706.13$ 참조			$= 0.00$	kN
- 볼렌지 이음판의 실제인장강도				$= 1088.10$ kN
# 볼렌지 이음판 볼트의 실제미끄럼강도 검토	1005.23	1091.4	0.92	O.K
- 고력볼트의 실제미끄럼강도				
$\Phi R_{s,s} = N_s \cdot (\Phi \cdot \mu \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s)$		$\Phi = 0.85$	$= 1091.40$	kN
$N_s = 6$	$=$	볼렌지 이음판 볼트 개수($m = 3, n = 2$)		
$\mu = 0.50$	$=$	미끄럼계수(페인트하지 않은 경우)		
$h_{sc} = 1.00$	$=$	표준크기구멍		
$N_s = 2$	$=$	전단면의 수		
# 웨브 이음판의 실제전단강도 검토	561.60	1137.78	0.49	O.K
- 웨브 이음판의 전단항복강도				
$\Phi R_{m,y} = \Phi \cdot 0.6 \cdot F_y \cdot A_g$		$\Phi = 1.00$	$= 1521.00$	kN
- 웨브 이음판의 전단파단강도				
$\Phi R_{m,t} = \Phi \cdot 0.6 \cdot F_u \cdot A_{nv}$		$\Phi = 0.75$	$= 1137.78$	kN
- 웨브 이음판의 실제전단강도				$= 1137.78$ kN
$\Phi R_{w} = \text{Min}(\Phi R_{m,y}, \Phi R_{m,t})$				
# 웨브 이음판 볼트의 실제미끄럼강도 검토	561.60	727.6	0.77	O.K
- 고력볼트의 실제미끄럼강도				
$\Phi R_{s,s} = N_s \cdot (\Phi \cdot \mu \cdot h_{sc} \cdot T_b \cdot N_s)$		$\Phi = 0.85$	$= 727.60$	kN
$N_s = 4$	$=$	웨브 이음판 볼트 개수($m = 1, n = 4$)		
$\mu = 0.50$	$=$	미끄럼계수(페인트하지 않은 경우)		
$h_{sc} = 1.00$	$=$	표준크기구멍		
$N_s = 2$	$=$	전단면의 수		
# 웨브 이음판 볼트의 조합력 검토	125.11	158.76	0.79	O.K
- 웨브 이음판 볼트의 조합력 검토				
$M_{s,app} = \Phi \cdot Z_w \cdot F_y \cdot (0.5h_w / 0.5(1-k))$		$\Phi = 0.90$	$= 39.85$	kNm
$R_{c,t} = M_{s,app} \cdot y / (\Sigma x^2 + \Sigma y^2)$			$= 68.71$	kN
$R_{c,y} = M_{s,app} \cdot x / (\Sigma x^2 + \Sigma y^2)$			$= 34.36$	kN
$R_{c,w} = V_{s,app} / \Sigma N_w$			$= 70.20$	kN
$R_s = \sqrt{(R_{c,x}^2 + (R_{c,y} + R_{c,w})^2)}$			$= 125.11$	kNm
$\Phi R_{c,s} = \Phi \cdot 2.4 \cdot d_b \cdot f_u \cdot F_u$		$\Phi = 0.75$	$= 158.76$	kNm

그림 12. 개발 시스템에서 출력된 구조설계 상세결과

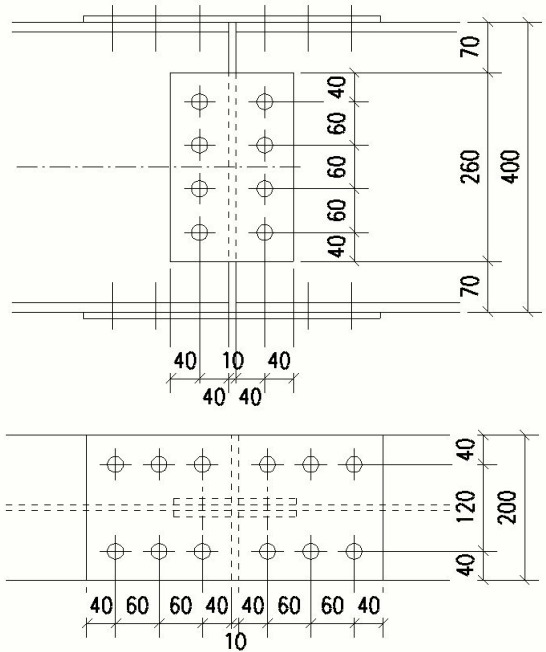


그림 14. TEKLA에서 자동 생성된 접합부 상세도

5. 결론

본 연구는 철골 구조물의 실시설계 단계에서 활용 가능한 보 이음 마찰접합부 설계자동화 시스템의 구축에 관한 것으로 연구를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 보 이음 마찰접합부를 대상으로 고력볼트 표준접합 설계 편람에서 제시하고 있는 표준설계법을 검토하였으며, 이를 통해 플랜지 침판의 치수 결정식과 웨브의 전단강도 결정식을 수정·보완하였다.
- (2) 수정·보완된 설계법에 따라 보 이음 마찰 접합부의 구조설계 알고리즘을 작성하였으며, 이를 근간으로 접합부 설계자동화 시스템을 구축하였다.
- (3) 접합부 설계자동화 시스템은 설계편람에서 제시하고 있는 전강도설계법 뿐만 아니라 존재우력설계법을 적용하여 경우에 따라 다양한 설계조건을 선택할 수 있도록 하였으며, BIM 모델링 S/W와 설계 데이터를 공유하여 시스템의 설계 조건의 입력 및 설계 결과의 출력, 즉 설계 결과가 반영된 접합부 모델 생성을 자동화 할 수 있도록 하였다. 이를 통해 설계 업무의 효율성 및 생산성을 제고할 수 있을 것으로 판단된다.

단면지수	설계강도				볼트				플랜지				웨브				설계강도 검토			
	요모멘트	전단력	축력	모멘트	외경지	외경지	외경지	내경지	외경지	내경지	외경지	내경지	외경지	내경지	CHK1	CHK2	CHK3	CHK4	CHK5	
H400X200XB13	389	562	20	2X3	120	0	9X200X410	12X80X410	4X1	60	9X200X170	0.92	0.92	0.49	0.77	0.79				

그림 13. 개발 시스템에서 출력된 접합부 설계 결과표

이상으로 TEKLA에서 개발 시스템을 적용한 결과, 개발 시스템에서 도출된 접합부 설계 결과와 설계 결과를 연동한 TEKLA 모델로부터 작성된 상세도를 비교한 결과 잘 일치하는 것으로 확인되었다(그림 14).

감사의 글

이 논문 또는 저서는 2010년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2010-000382 2).

참 고 문 헌

대한건축학회(2009) 국토해양부 고시 건축구조기준 및 해설, 기문당.

손선욱(2008) LSD에 의한 고력볼트 접합부의 표준화 설계법, 공학석사학위논문, 호서대학교.

신태송(2005) 철골구조설계, 기문당.

엄진업(2010) BIM 기반의 구조상세설계 자동화 시스템 구축에 관한 연구, 공학석사학위논문, 동명대학교.

엄진업, 신태송(2011) BIM 기반의 구조설계와 상세설계 인터페이스 모듈 개발, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제1호, pp.113-124.

엄진업, 신태송(2010) BIM 기반의 철골접합부 모델링 자동화에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제1호, pp.99-108.

이병권, 김치경, 김계중(2009) 3차원 골조정보모델을 이용한

철근배근 자동생성 시스템, 2009년도 한국전산구조공학회 정기학술대회 논문집, 한국전산구조공학회, pp.784-788.

한국강구조학회(2009) KBC-09 강구조기준에 따른 고력볼트 표준접합 설계편람, 구미서관.

한국강구조학회(2009) KBC2009 강구조설계, 구미서관.

홍성욱, 조영상, 이제혁, 홍성철(2011) 파라메트릭 기술기반 철근 콘크리트 구조물의 기둥부재 자동배근시스템 구축에 관한 연구, 대한건축학회논문집, 대한건축학회, 제27권, 제1호, pp.11-18.

Rafael, S., Israel, K., Charles, M.E., and Jeong, Y.S. (2010) The Rosewood experiment - Building information modeling and interoperability for architectural precast facades, Automation in Construction, Vol. 19, pp.419-432.

Solomon, J. (2001) Steel Structures: Design and Behavior, 4/E, HarperCollins.

TEKLA Structures DotNET API Documentation(16.0)

TEKLA Structures Releasenote 16.0.

(접수일자 : 2011. 3. 23 / 심사일 2011. 3. 28 / 심사완료일 2011. 10. 5)