

# Connector 요소를 이용한 플레이트 거더 볼트이음부의 해석

## Analysis of Bolted Joints for Plate Girder using Connector element

황 원 섭<sup>1)</sup> · 민 선 영<sup>2)</sup> · 김 희 주<sup>3)</sup>  
*Hwang, Won Sup · Min, Seon Young · Kim, Hee Ju*

**요 약 :** 본 논문은 플레이트 거더 상세부 설계에서 가장 주요요소가 되는 볼트 이음부에 관한 구조거동을 해석적으로 검토하였다. 또한, 비선형 유한요소프로그램인 ABAQUS의 Connector요소를 사용하여 간단하게 볼트의 거동을 표현하는 수치해석방법을 제안하고, 선행 연구의 실험을 토대로 수치해석을 실시하여 해석방법의 타당성을 검토하였다. 이음부의 위치에 따라 달라지는 작용력의 영향을 검토하기 위하여, 서로 다른 위치의 모델을 3가지로 선정하고, 각각의 모델에 대하여 다양한 설계변수(이음판의 단면적, 이음판의 강종, 볼트의 강종)에 따른 거동을 비교·분석하였다. 설계 변수에 대한 구조물의 모멘트-변위 관계를 도출하여, 각 설계 변수가 구조물의 극한 거동에 미치는 영향을 파악하고, 힘의 크기에 따른 영향을 비교하였다.

**ABSTRACT :** In this study, structural behavior of bolted joints which were important elements in plate girder design was analyzed using commercial FE analysis program. Also, the numerical analysis method that simply showed behavior of bolts was proposed using the connector element of ABAQUS, nonlinear FE program. Numerical analysis was conducted to verify the proposed numerical analysis method on the basis of the experiment of previous study. In order to investigate effects of action force which was changed by locations of the bolted joints, the three different models were developed by the locations of the bolted joints and behavior for the each model was compared and analyzed by various design parameters (area of splice plates, stiffness of splice plates, and stiffness of bolts). The moment-displacement relations of structures for the various design parameters were investigated to analyze effects of each parameter in ultimate behavior of the structures. Also, the effects of each parameter were compared by force.

**핵심용어 :** 플레이트 거더, 유한요소해석, 고장력 볼트 이음부, Connector 요소

**KEYWORDS :** plate girder, finite element analysis, joints of high tension bolts, Connector element

### 1. 서론

최근 산업화의 진전과 더불어 사회기반시설 구조물이 거대화, 장대화 되는 추세에 있으며, 이에 따라 콘크리트 구조물과 비교하여 상대적으로 자중이 작고 강성이 큰 강구조물이 많이 건설되고 있다. 이러한 강구조물은 콘크리트와 달리 부재와 부재간의 연결에 의해 이루어지며, 부재의 연결의 방법으로는 크게 용접에 의한 연결과 볼트를 이용하는 방법이 주로 사용되고 있다.

용접에 의한 연결은 공장용접과 현장용접으로 나눌 수 있으며, 전자는 용접설비의 자동화와 작업조건 등의 평균화를 통

해 품질에 대한 신뢰성이 확보되나, 후자의 경우 기능공의 숙련도, 용접조건, 용접설비 등에 따라 연결부의 품질에 대한 신뢰성이 상대적으로 떨어지므로 공장용접의 약 90% 수준만을 인정하고 있다(건설교통부, 2005). 이런 이유로 용접이음보다는 볼트이음을 주로 사용하고 있으며, 볼트 연결의 경우 품질관리가 비교적 용이한 고장력 볼트의 연결이 주로 사용되어 지고 있다.

이러한 고장력 볼트 이음부에 관한 연구는 사용이 증가함에 따라 활발하게 진행되고 있으나, 인장력이 작용하는 고장력 볼트 이음부의 거동을 규명(이승용, 1998; 김동조, 2002)하는 연구들이 대부분을 차지하였고, 압축력 하

1) 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수, 공학박사(hws@inha.ac.kr)  
2) 교신저자. 인하대학교 사회기반시스템공학부 대학원 공학석사  
(Tel.: 032-873-2130, Fax: 032-873-2130, E-mail: modestmb@naver.com)  
3) 인하대학교 사회기반시스템공학부 대학원 박사과정

본 논문에 대한 토의를 2011년 12월 31일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

에서 볼트의 거동을 분석하는 연구(한진희, 2007)도 일부 진행되었다.

그러나 휨과 전단력을 받는 고장력 볼트 이음부에 관한 연구는 미비한 실정이다. 실제 강교량의 고장력 볼트 이음부는 휨 모멘트와 전단력이 지배적으로 작용하므로, 이에 대한 신뢰성 있는 자료가 절대적으로 필요하다. 또한, 기존의 유한요소해석을 통한 고장력 볼트 이음부의 연구(장동일, 1997; 김동조, 2002; 김동현 외, 2005; 한진희, 2007)들은 볼트를 제원대로 모델링하여 볼트의 거동을 구현 하였다. 그러나 이러한 수치해석방법은 볼트 갯수가 적은 비교적 간단한 이음부에서는 적용이 용이하나, 플레이트 거더교의 이음부와 같이 다수의 볼트로 구성되어 있는 경우에는 많은 시간이 소요되고, 해석의 수렴성이 낮아지는 등의 문제점이 야기된다.

따라서 본 연구에서는 볼트이음부의 거동에 관한 상세 검토를 위하여 상용 유한요소해석프로그램 ABAQUS에서의 Connector 요소를 사용하여 볼트이음부의 해석방법을 제안하고, 선행논문의 실험결과와의 비교를 통하여 타당성을 검토하였다.

또한 향후 합리적인 이음부 설계법의 제안을 위하여 휨 모멘트와 전단력이 동시에 작용하는 3종류의 해석 모델에 대한 볼트이음부의 주요 설계 변수가 되는 이음판의 단면적과 강종 그리고 볼트 강종에 따른 영향을 검토하였다.

## 2. 볼트 이음부의 해석 모델

### 2.1 볼트의 모델화

기존의 연구들은 실제 볼트를 모델링하여 유한요소해석을 실시하였다. 이런 수치해석방법은 볼트수가 플레이트 거더교의 이음부와 같이 볼트의 개수가 많은 구조물에 적용할 경우 많은 시간이 소요되고, 해석의 수렴성이 낮아진다.

따라서 본 연구에서는 유한요소해석프로그램 ABAQUS내에서 실제 볼트를 모델링하지 않고, 절점간의 간단한 연결로 볼트의 거동을 표현하는 Connector요소를 사용하였다.

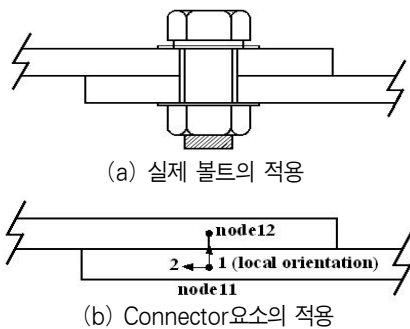


그림 1. 고장력 볼트의 Connector 요소 개념도

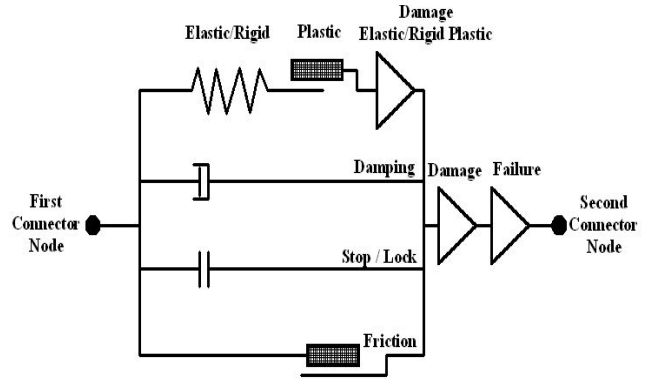


그림 2. Connector 요소의 다양한 거동

Connector요소는 물리적 메커니즘을 가진 다양한 종류의 연결부를 유한요소프로그램 내에서 간단하게 구현하는 요소로서, 볼트가 위치하고 있는 부분의 절점과 절점을 연결함으로써 볼트를 효과적으로 구현할 수 있다.

그림 1은 Connector 요소를 사용한 고장력 볼트의 개념도이며, 그림 2는 Connector요소의 다양한 거동을 나타낸다.

Connector요소의 선형 탄성 거동은 식 (1)에 의하여 정의되며, 이 식을 통하여 볼트의 강성을 도출하였다.

$$F_i = D_{ii}u_i \quad (i = 1, 2, 3) \tag{1}$$

여기서,  $F_i$  :  $i$ 번째 방향의 상대변위를 발생시키는 힘  
 $u_i$  :  $i$ 번째 방향의 Connector요소의 변위나 회전

Connector요소의 소성 거동은 재료특성 입력과 유사하나, 응력-변형률 ( $\sigma$ - $\epsilon$ )관계가 아닌 볼트의 힘-상대변위 ( $F$ - $u$ ) 관계로 정의된다. 이때 볼트의 힘-상대변위 관계는 재료시험에 의해 결정되어지며, 시험이 용이하지 않을 경우 기존의 실험결과를 바탕으로 산출되어진 AISC 코드에 명시된 식 (2)를 이용한다. 그림 3은 식 (2)를 사용하여 구한 볼트의 힘-변위 관계를 나타낸다. 실제 볼트의 경우 중 방향으로 항복이후, 그림 3처럼 변위가 크게 늘어나는 것이 아니라 파괴가 되나, 본 연구에서는 볼트의 극한거동이 목적이 아니므로, 아래의 그래프와 같이 입력하였다.

$$R = R_{ult} (1 - e^{-10\Delta})^{0.55} \tag{2}$$

여기서  $R_{ult} = 0.7(F_u)A_bN_s$   
 $\Delta$  : 볼트의 상대변위 ( $mm$ )  
 $e_c$  : 볼트의 인장강도 ( $MPa$ )  
 $A_b$  : 볼트의 단면적 ( $mm^2$ )  
 $N_s$  : 전단면의 수

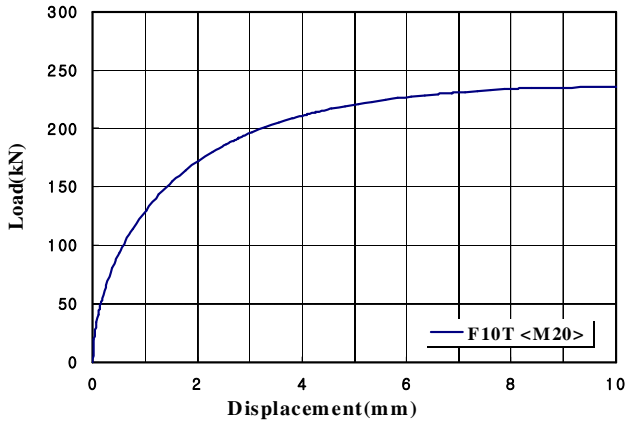


그림 3. F10T 볼트의 힘 - 변위 관계

또한 이음관과 모재의 마찰면은 기존의 해석방법과 동일하게 마찰면을 설정하여 마찰계수 0.4를 적용한다. 다만 볼트 헤드부와 이음관 사이의 마찰은 따로 설정할 수 없으므로, Connector요소 내에 Friction거동의 사용하여 마찰 접합을 표현 할 수 있도록 하였다.

### 2.2 볼트이음부의 해석방법

Connector요소를 사용한 해석방법의 타당성을 검토하기 위하여 선행논문에서 실시한 실험을 기준으로 해석을 실시하여 결과를 비교하였다.

볼트의 미끄러짐 거동에 관한 검토는 선행논문인 이창원(2003)가 실시한 인장실험과 동일한 단면의 해석모델을 만들어 비교하였다. 그림 4는 선행논문에서 실시한 인장실험의 모델이며, 그림 5는 해석모델의 형상이다.

그림 5(b)는 해석 모델의 측면을 보여주고 있으며, 볼트가 위치해 있는 곳에 선으로 표시된 Connector요소를 확인할 수 있다. 이를 통해 ABAQUS 내에서 Connector요소의 적용 형상을 알 수 있다. 이와 같이 Connector요소를 이용한 해석 모델 외에도, 볼트를 실제 모델링한 솔리드 모델도 제작하여 해석적 타당성 검증에 이용하였다. 해석과 실험의 결과는 그림 6에 나타내었다.

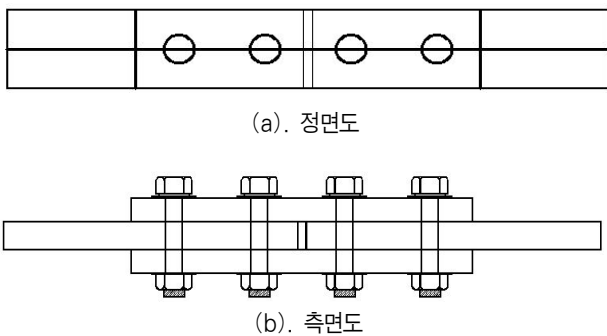


그림 4. 실험 모델 형상

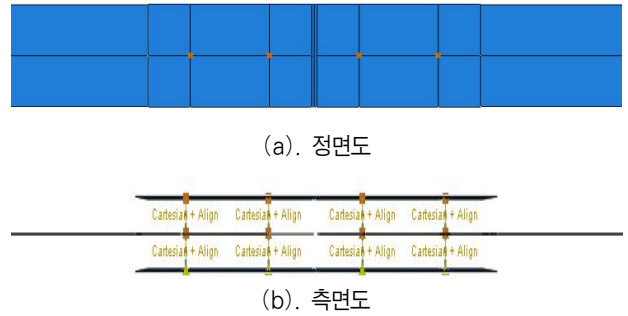


그림 5. 해석 모델 형상

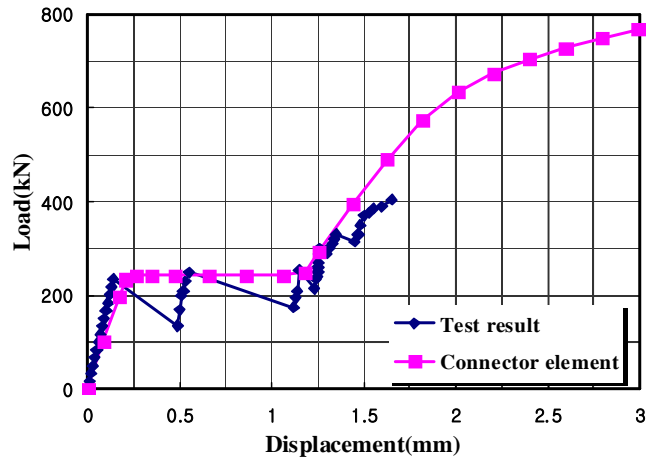


그림 6. 인장 실험결과와 해석결과와의 비교

그림 6을 통하여 Connector요소는 탄성영역과 미끄러짐 거동을 표현해 낼 수 있으며, 실험결과와도 유사한 값을 보임을 알 수 있다. 다만, 마찰이음에서 미끄러짐이 일어난 후 지압이음 상태로 간 뒤에는 Solid요소보다 값이 크게 나왔다. 이는 Connector요소를 이용할 경우 볼트 구멍이 없으므로, 유효 단면적이 늘어나기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 Connector요소는 볼트의 미끄러짐 거동을 표현할 수는 있으나, 극한거동을 보여줘야 하는 인장 실험 등에 적용되기 위해서는 향후 연구가 필요할 것으로 판단된다.

본 연구에서 사용 될 휨 거동에 대한 타당성 검토는 선행 논문인 秋山壽行(1996)가 실시한 실험의 결과와 비교하였다. 실험체의 단면제원과 동일하게 해석모델을 만들고, 재료시험을 통해 얻은 결과를 사용하여 강재의 재료특성을 입력하였다. 실험과 해석의 결과는 그림 7에 나타내었다. 그림의 x축은 플레이트 거더 중앙부의 최하지점의 변위를 측정된 것이며, y축은 표 1에 나타난 항복모멘트  $M_y$ 의 값으로 모멘트 값을 나눈 무차원 값으로 표현되었다

그림 7을 살펴보면, 본 연구에서 제안한 해석방법과 실험의 탄성부분은 기울기가 거의 일치하며, 항복하는 지점의 변위도 일치하는 형상을 보였다. 실험 및 해석에서 나온 항복모멘트 ( $M_y$ )의 값은 표 1과 같으며, 이들의 오차는 2.5%내외로 미

비함을 알 수 있다. 이는 휨 거동의 경우, 부재가 먼저 항복함에 따라 연결부가 극한에 도달하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 해석방법이 휨을 받는 이음부의 거동을 표현하는데 있어서 타당하다고 판단된다.

표 1. 실험 및 해석의 항복 모멘트( $M_y$ )

Test result model	Connector model
322.9tf · m	331.4tf · m

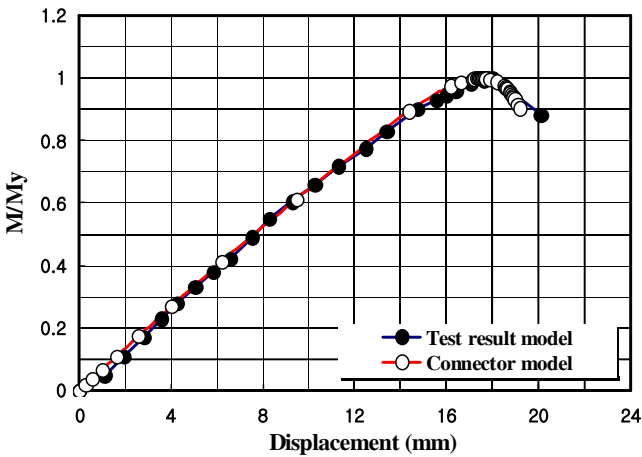


그림 7. 휨 실험결과와 해석결과와의 비교

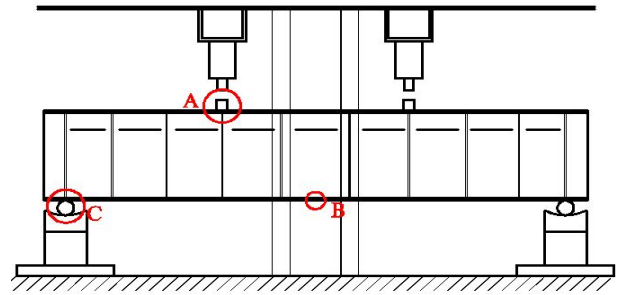


그림 8. 거더의 하중 및 변위 측정 지점

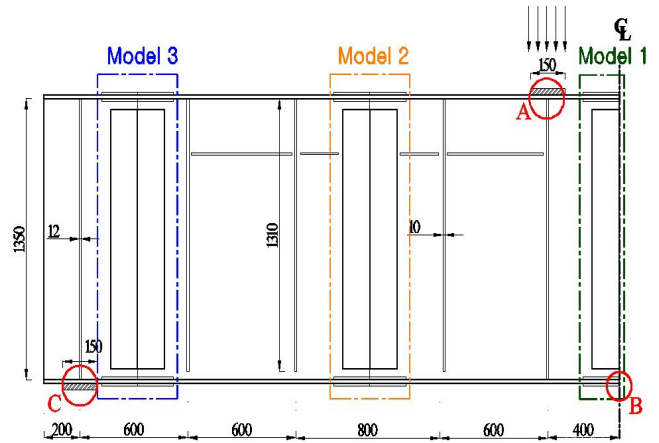
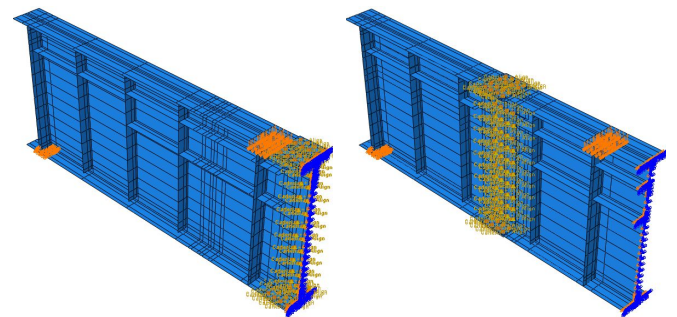


그림 9. 해석모델(Half Model)의 단면제원

### 3. 이음부 강도에 관한 설계 변수의 영향

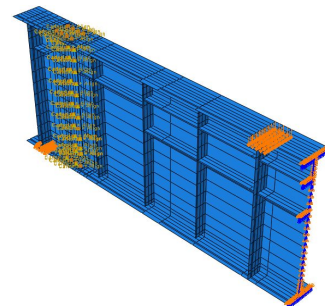
#### 3.1 해석 모델의 제원

연구에 사용된 강재는 SM490Y이고, 고장력 볼트는 F10T M20을 사용하였다. 부재의 대칭성을 고려하여 전체모델의 1/2만 모델링 하였다. 그림 8은 본 해석모델의 이해를 돕기 위한 그림이며, 변위와 하중의 측정 지점을 보여준다. A점에서 하중을 받으며, 점 B에서 거더의 변위를 측정하고, 점 C는 거더의 지점을 나타낸다. 해석 모델은 휨과 전단력이 이음부의 강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 그림 9와 같이 동일한 거더에 이음부의 위치가 다른 3개의 모델을 만들었다. 이를 해석상에 구현한 모습은 그림 10과 같으며, 이를 통해 모델마다 다른 이음부의 위치를 한눈에 확인할 수 있다. 각 이음부에 작용하는 힘을 계산할 결과는 표 2와 같다. 이는 해석모델의 중앙이 허용 휨 응력에 도달했을 때를 기준으로 계산되었다.



(a) Model 1

(b) Model 2



(c) Model 3

그림 10. 해석모델의 형상

표 2. 해석 모델의 작용 응력

	작용 전단응력 ( $v/v_a$ )	작용 휨응력 ( $f/f_a$ )	전단응력 : 휨 응력
Model 1	0 MPa (0%)	210 MPa (100%)	0 : 1
Model 2	35 MPa (29.8%)	125.16 MPa (59.6%)	1 : 2
Model 3	35 MPa (29.8%)	31.32 MPa (14.9%)	2 : 1

또한 본 연구에서는 제한한 해석기법을 사용하여 휨과 전단력을 받는 고장력볼트 이음부의 설계변수에 대한 영향을 분석하였다.  $(A_s)_{req}$ 는 이음판의 필요단면적으로 표 2의 응력을 기준으로 도로교 설계기준에 준거하여 계산하였으며, 설계 변수는 표 3과 같다.

표 3. 해석 모델의 응력 제한

Model		$(A_s)_{req}$ ( $cm^2$ )	$\frac{A_s}{(A_s)_{req}}$	이음판 강종	볼트 강종
Model 1	U-flg	52.20	0.4 0.6 0.8 1.0 1.2	SS 400 SM 490 SM 490Y SM 570	F8T F10T F13T
	Web	121.5			
	L-flg	52.20			
Model 2	U-flg	31.32			
	Web	85.05			
	L-flg	31.32			
Model 3	U-flg	7.95			
	Web	56.07			
	L-flg	7.95			

### 3.2 이음판의 단면적에 대한 영향

이음판의 단면적이 구조물의 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 이음판의 단면적을 변화시키며 해석하였고, 그 결과를 그림 11, 그림 12 및 그림 13과 같다.  $y$ 축은 각 모델의 해석 시 발생한 최대 모멘트와 이론식에 의한 항복모멘트 비  $M/M_y$ 이며, 이때 해석모델의 항복모멘트는 이론적으로 계산된  $297kn.m$ 를 사용하였다.

그림 11은 상부플랜지 이음판의 단면적비  $(A_s/(A_s)_{req})$  변화에 따른 해석모델의 강도특성을 비교 한 것이다. 여기서 나타낸 바와 같이 휨응력이 지배적인 Model 1과 Model 2에서는 단면적 비가 작을수록 강도가 크게 감소하게 되며, 전단력이 우세한 Model 3에서는 그 영향이 거의 없다는 것을 알 수 있다. 또한, Model 1과 Model 2에서는 상부플랜지 이음판의 단면적이  $A_s/(A_s)_{req} = 1.0$  이하일 때, 항복 모멘트 이후 모멘트 값이 떨어지는 현상을 보였다. 이러한 원인은 상부플랜지의 경우 압축력에 의하여 이음부에서 좌굴이 발생하였기 때문인 것으로 판단된다.

그림 12는 하부플랜지의 단면적비에 따른 영향을 검토한

것이다. 휨 응력만이 작용하는 Model 1의 경우 상부플랜지 이음판과 거의 동일한 거동 특성을 나타내고 있으나, 휨 응력과 동시에 전단 응력이 작용하는 Model 2의 경우에는 상부플랜지 이음부와는 다르게 단면적비가 0.8 까지 줄여도 구조물 전체의 거동에 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다. 또한 항복 모멘트 이후 모멘트 값이 떨어지지 않고 유지한다는 점에서 상부플랜지의 이음판과 다른 결과가 나왔다.

또한 그림 13은 복부 이음판의 단면적비에 따른 거동특성을 비교한 것이다. Model 1의 경우는 단면적비의 변화에 따른 영향이 거의 없었으며, Model 2의 경우 필요단면적의 60%까지 줄여도 거동특성에 대한 영향이 작다는 것을 알 수 있다. 한편 휨 응력에 비하여 전단응력이 우세한 Model 3의 경우는 플랜지 이음판과는 달리 복부판 단면적의 변화에 따라 크게 영향을 받는다는 것을 알 수 있다.

그러나 복부판 이음판의 경우는 모든 모델에서 필요단면적을 0.8까지 줄여도 구조물 전체의 거동에는 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 이는 상하 플랜지의 이음판에서 복부판의 전담하는 휨 모멘트의 일정 부분을 부담했기 때문에 복부판 이음판의 단면적에 따른 영향이 미비한 것으로 판단된다.

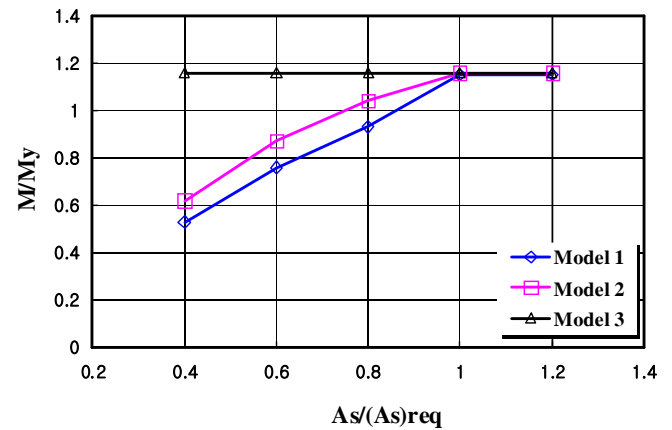


그림 11. 상부플랜지 이음판의 단면적 변화

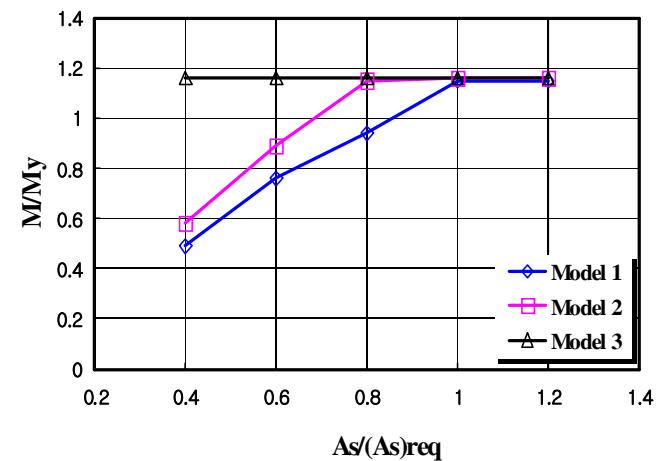


그림 12. 하부플랜지 이음판의 단면적 변화

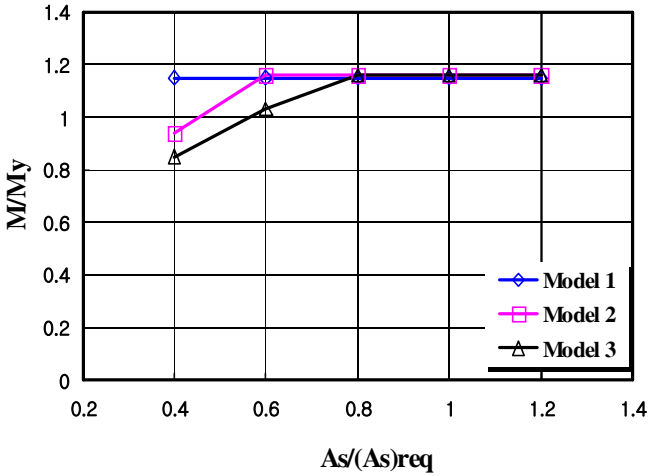


그림 13. 복부판 이음판의 단면적 변화

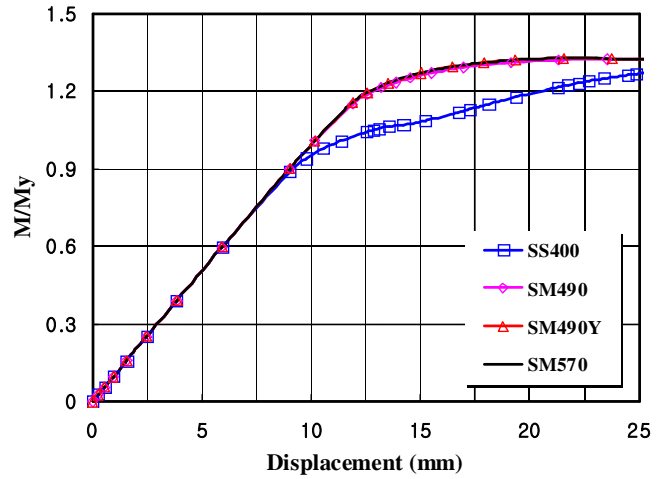


그림 15. 이음판 강종에 따른 영향 (Model 2)

### 3.3 이음판의 강종에 대한 영향

이음판의 강종이 이음부 거동에 미치는 영향을 파악하기 위하여 모재의 강종을 SM490Y, 이음판의 단면적비를  $A_s/(A_s)_{req} = 1.0$  으로 하고, 이음판의 강종만을 변화시켰다.

그림 14와 그림 15는 각각 휨 응력만이 작용하는 Model 1과 휨 응력과 전단응력의 비가 2:1인 Model 2의 강도 비 ( $M/M_y$ )와 거더의 중앙점 최하단에서의 수직 변위( $\delta$ )와의 관계를 나타낸 것이다. 여기서 볼 수 있는 바와 같이 이음판의 강종이 모재의 강종보다 낮을 경우 이음부의 강도는 저하된다는 것을 알 수 있다.

그러나 그림 16과 같이 전단력이 우세한 Model 3에서는 이음판의 강종이 SS400일 경우에만 항복모멘트가 작게 나타나는 것을 확인 할 수 있다.

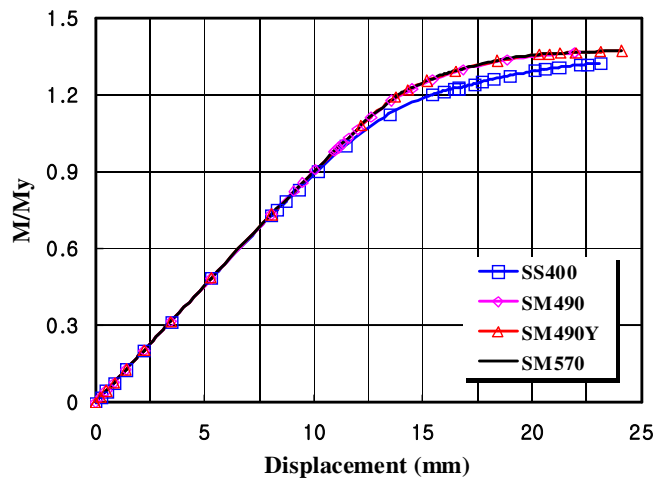


그림 16. 이음판 강종에 따른 영향 (Model 3)

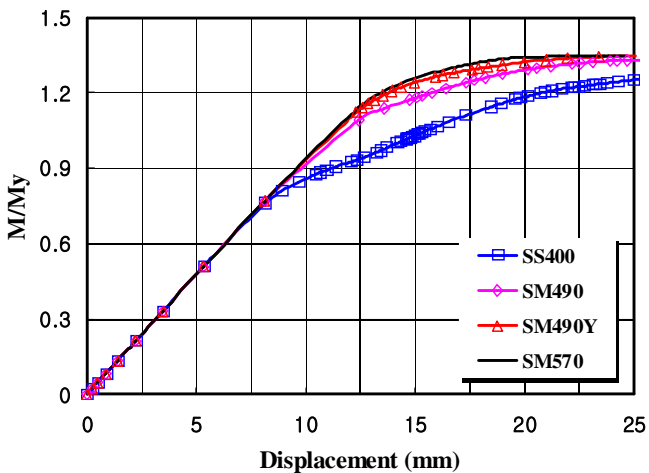


그림 14. 이음판 강종에 따른 영향 (Model 1)

그림 17은 Model 1에서 이음판의 강종이 SS400일 때, 항복모멘트의 차이가 발생하지 않도록 하는 필요단면적비에 대하여 검토한 것이다. 여기서 나타낸 바와 같이 모재 SM490Y와 동일한 강재의 이음판을 사용할 때보다 단면적을 1.5배 이상 증가시켜야 한다는 것을 알 수 있다. 이때의 1.5 배는 SM490Y의 허용응력과 SS400의 허용응력의 비와 일치한다.

그림 18은 Model 1의 이음판을 SM570을 사용했을 경우에 대한 결과이며, 모재와 동일한 강재인 SM490Y의 경우보다 이음판의 단면적을 0.8배까지 줄일 수 있다는 것을 확인하였다. 이때의 0.8배는 SM570의 허용응력과 SM490Y의 허용응력의 비와 일치한다. 따라서 현행 설계기준에서 이음판의 설계 시 이음판의 강종의 규제 없이 허용응력에 의거하여 설계하도록 한 규정은 타당한 것으로 판단된다.



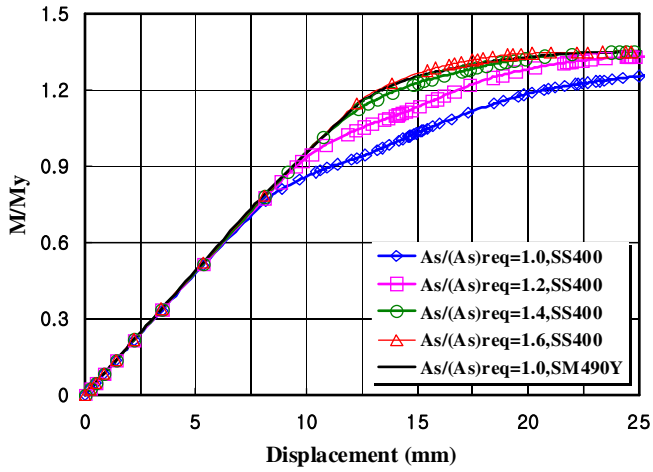


그림 17. 이음판 단면적비에 따른 영향 (SS400)

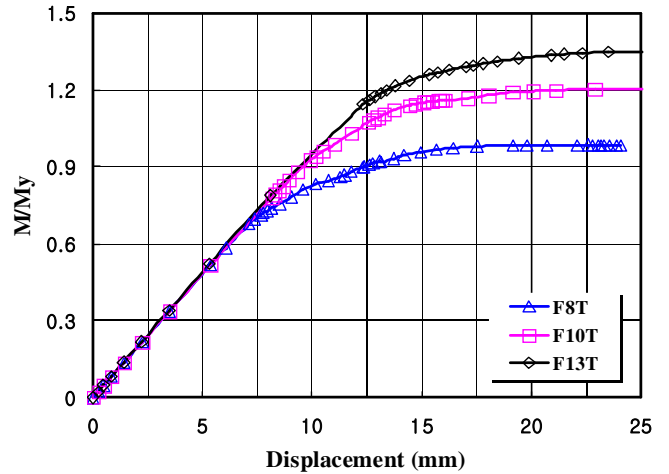


그림 19. Model 1-볼트의 강종 변화에 따른  $M-\delta$  곡선

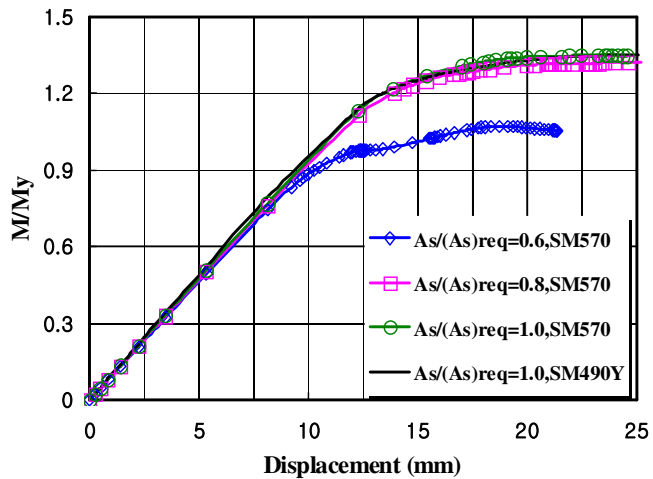


그림 18. 이음판 단면적비에 따른 영향 (SM570)

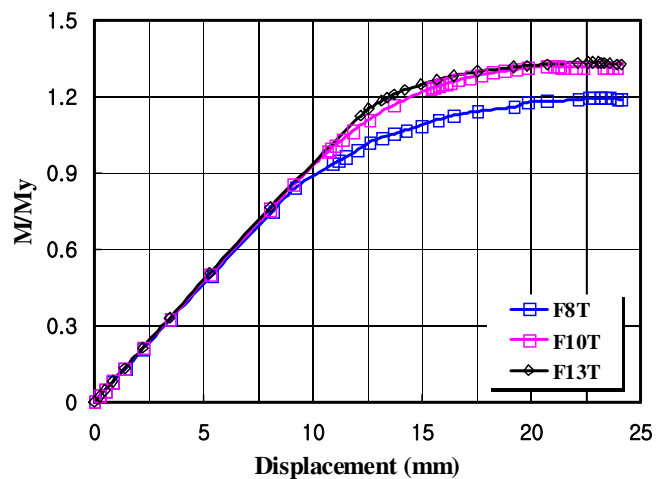


그림 20. Model 2-볼트의 강종 변화에 따른  $M-\delta$  곡선

### 3.4 볼트의 강종에 대한 영향

고장력 볼트의 강종에 따른 구조물의 거동을 파악하기 위하여 볼트를 F13T, F10T, F8T로 변화시켜 해석을 수행하였다. 이때의 볼트는 F13T M20을 기준으로 설계를 하였다.

이에 대한 결과 그래프는 이음부의 최대모멘트와 이론식에 의한 항복모멘트 비  $M/M_y$ 와 거더의 중앙점 최하단에서의 수직변위  $\delta$ 와의 관계로 나타내었다.

그림 19를 살펴보면 휨 응력이 지배적인 Model 1에서 볼트의 인장강도가 작을수록 감소하게 된다는 것을 알 수 있다. F13T의 경우는  $M/M_y$ 은 1.13에서 항복하였고, F10T의 경우는 0.96에서, 그리고 F8T의 경우는 0.74에서 항복하였다.

전단응력과 휨 응력의 비율이 1:2인 Model 2에서는 F13T와 F10T이상의 경우 강도차이가 거의 없으나 F8T의 경우에는 감소한다는 것을 그림 20을 통해 알 수 있다.

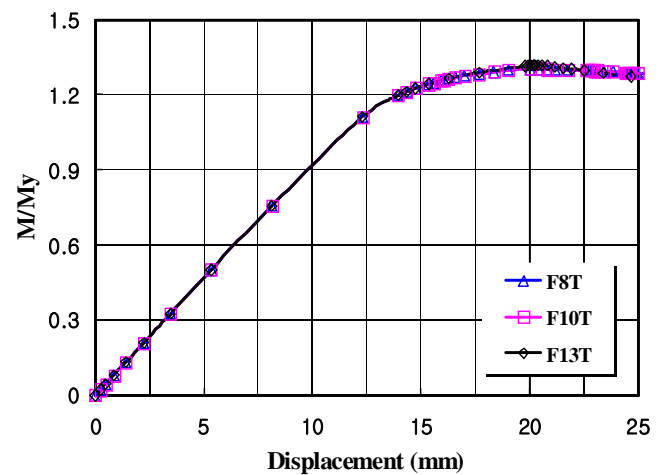


그림 21. Model 3-볼트의 강종 변화에 따른  $M-\delta$  곡선

또한 그림 21의 Model 3에서는 볼트의 강종에 따른 영향이 거의 없는 것으로 나타났다. 이에 대한 원인은 전단응력이

지배적인 Model 3의 경우 이음부의 작용력이 매우 작았기 때문에 현행 설계기준에 따라 설계 된 볼트의 개수가 이음부에 작용하는 힘에 비해 매우 과대했던 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강교량의 볼트 이음부에 관한 구조거동을 해석적으로 검토하였다. 기존의 볼트 해석방법보다 간단하게 볼트의 거동을 표현할 수 있는 Connector요소를 사용한 수치해석 기법을 제시하였고, 해석방법의 타당성을 검토하였다. 그리고 제시한 해석방법을 사용하여 휨응력과 전단력이 작용하는 고장력 볼트 이음부에 대한 설계변수(이음판의 단면적, 이음판의 강종, 볼트의 강종)의 영향을 파악하였다.

또한 이음부의 작용력에 따른 설계변수의 영향을 비교·분석하기 위하여 이음부의 위치를 변화시켜 총 3개의 모델에 관한 해석을 진행하였으며, 이를 통해 도출한 결론은 다음과 같다.

- (1) 볼트가 위치하고 있는 절점과 절점간의 연결을 통하여 볼트의 거동을 구현하는 Connector요소를 사용한 해석방법을 제안하였다. 또한 선행논문에서 실시한 휨을 받는 고장력볼트 이음부의 실험과 유한요소해석에서 산출된 모멘트-변위 곡선을 비교한 결과 초기 탄성 거동의 기울기와 항복이 발생하는 변위 및 모멘트가 거의 유사함으로써 제안한 Connector요소를 사용한 볼트의 구현방법의 타당성을 확인 하였다.
- (2) 이음판의 단면적이 고장력 볼트 이음부에 미치는 영향을 분석한 결과 3개의 모델에서 각각 다른 결과가 나왔다. 휨모멘트가 지배적으로 작용하는 Model 1과 Model 2에서는 상부플랜지 이음판의 단면적에 가장 큰 영향을 받는 것으로 나왔다. 특히 상부플랜지의 이음판은  $A_s/(A_s)_{req} = 1.0$  이하에서 항복 이후 모멘트가 떨어지는 현상이 발생하였다. 하부플랜지 이음판의 단면적은 상부플랜지 이음판의 단면적과 유사한 거동을 나타냈으나 항복이후 모멘트 값이 유지되는 거동을 보였다. 복부 이음판의 경우는 전단력의 크기와 이음판 단면적의 영향이 비례하였으나, 모든 모델에서 필요단면적을 0.8까지 줄여도 구조물 전체의 거동에는 영향을 미치지 않았다.
- (3) 이음판의 강종이 미치는 영향은 Model 1, Model 2, Model 3의 순으로 크다는 것을 확인하였다. 또한 이음판의 강종의 변화는 허용응력의 비로 표현될 수 있음을 확인하였다. 따라서 이음판의 설계 시 강종의 규제 없이 허용응력에 맞춰 설계하도록 규정 된 현행 설계기준은 타당하다고 생각된다.

- (4) 볼트 강종의 경우, 이음부의 위치는 구조물의 거동에 큰 영향을 미치지 않았으며, 작용력 대비 설계된 볼트의 총 허용력이 가장 큰 변수인 것으로 확인되었다.

지금까지의 연구를 통하여 이음판에 작용하는 힘의 종류에 상관없이 동일한 방법으로 설계하고 있는 현행 설계법이 합리적이지 않다고 판단된다. 보다 합리적인 설계로 개선하기 위해서는 이음판에 작용하는 힘의 종류에 따라 설계시 주요 부분에 대한 비중을 달리하여야 한다고 생각하며, 향후 이에 대한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

이 논문은 인하대학교의 연구비 지원사업의 일환으로 수행되었으며, 이에 깊은 감사를 드립니다.

#### 참 고 문 헌

강구조공학(2000) 한국강구조학회, 구미서관.  
 변대근, 윤성기 박성수(1994) 접합요소를 이용한 볼트 접합부의 유한요소해석, 전산구조공학회 논문집, 전산구조공학회, 제7권, 제2호, pp.139-146.  
 심재수, 김춘호, 김동조(2004) 고장력볼트 이음부의 3차원 유한요소 해석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제4호, pp.407-414.  
 이승용(1998) 고장력볼트 이음부의 역학적 거동에 영향을 미치는 제인자의 평가, 한양대학교 대학원, 박사학위논문.  
 이창원(2004) 고장력볼트 연결부 결합에 대한 미끄러짐 및 접촉 탄소성 해석, 충남대학교 대학원, 박사학위논문.  
 장동일, 김성훈, 이승용, 최준혁(1997) 고장력볼트 이음부의 내부 압축응력 분포, 대한토목학회 학술발표회 논문집, 대한토목학회, 제9권, 제2호, pp.171-179.  
 조강균(2009) 고장력 볼트구멍의 크기와 과대 볼트 구멍의 위치가 마찰이음부 인장 내하력에 미치는 영향, 조선대학교 대학원, 석사학위논문.  
 최성모, 김진호, 우해성(2003) 고력볼트 마찰접합부의 설계기준 및 내력에 대한 연구, 대한건축학회 구조계, 대한건축학회, 제19권, 제1호.  
 최성모, 노원경, 김진호(2004) 과대구멍 또는 슬롯구멍을 갖는 고력볼트 마찰이음부의 거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회 학술발표대회 논문집, 한국강구조학회, pp.138-144.  
 한진희, 최종경, 허인성, 김성보(2008) 압축력을 받는 고장력 볼트 이음부의 미끄러짐 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제20권, 제2호, pp.279-288.  
 秋山壽行(1996) 高力ボルト摩擦接合継手部の限界状態に関する研究, 大阪大學 博士學位論文.



西村宣男(1997) 鋼材の繰々返塑性履歴構成式の高精度化と有限要素法への導入に関する研究, 研究結果報告書.

龜井義典(2000) 高力ボルト摩擦接合継手の限界強度に関する析的研究, 大阪大學 博士學位論文.

ABAQUS ver 6.8-1 (2006) Theory and User's Manual, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc., Pawtucket, RI.

AISC (2005) *Manual of steel construction, 3rd Edition*, American Institute of Steel Construction.

(접수일자 : 2010. 12. 31 / 심사일 2011. 1. 1 /

심사완료일 2011. 6. 9)