Plate Girder 볼트 이음부 강도에 관한 해석적 연구

An Analytical Study for the Strength of the High Tension Bolted Joints in Plate Girder

함 준 수¹⁾ · 황 원 섭²⁾ · 양 성 돈³⁾ · 정 지 승⁴⁾
Ham, Jun Su · Hwang, Won Sup · Yang, Sung Don · Chung, Jee Seung

요 약 : 본 논문은 강교량 이음부에서 고장력볼트의 유효활용방안을 모색하기 위하여 고장력볼트가 적용된 이음부에 관한 구조거동을 해석적으로 검토하였다. 또한, 비선형 유한요소프로그램인 ABAQUS의 Connector요소를 사용하여 간단하게 볼트의 거동을 표현하는 수치해석 방법을 제안하고, 선행 연구의 실험을 토대로 수치해석을 실시하여 해석방법의 타당성을 검토하였다. 고장력볼트 이음부 강도에 영향을 미치는 주요 설계변수를 파악하기 위해 솔리드 요소를 사용한 인장 시험체를 선택하여 다양한 설계변수(모재 및 이음판의 강종, 이음판의 두께, 볼트 재료특성, 설계볼트축력)에 관한 영향을 비교·분석하였다. 또한, 플레이트 거더 볼트 이음부에서 고장력볼트 적용부위에 따른 강도특성을 분석하기 위하여 설계변수(상부 플랜지, 하부 플랜지, 상·하부플랜지, 웹)에 따른 구조물의 모멘트-변위 관계를 도출하여 각 설계변수가 극한거동에 미치는 영향을 비교·분석하였다.

ABSTRACT : In this study, structural behavior of high tension bolted connections was analyzed in order to investigate effective utilizations. Also, the simplified numerical analysis method showing bolt behavior was proposed using the connector element in the ABAQUS, a nonlinear finite element program and verified by numerical analyses on the basis of the experiment of previous study. In an effort to analyze strength properties of plate girder which high tension bolts are applied to, the effects of each design parameter were compared and analyzed after moment-displacement relations were investigated according to design parameters (upper flange, lower flange, upper and lower flange, web) by action force standards.

핵심용어 : 고장력볼트 이음부, 플레이트 거더, 수치해석, Connector 요소

KEYWORDS : joints of high tension bolts, plate girder, numerical analysis, connector element

1. 서론

최근 사장교와 현수교 등과 같은 장대교량의 건설이 지속적으로 증가하고 있으며, 이에 따라 구조물의 대형화, 장대화, 대공간화가 필수적이다. 또한 사회기반시설 구축에 투입되는 비용에 있어서도 건설 및 공용기간의 비용을 포함하는 전체 비용의 최소화 등이 요구되어지고 있는 상황에서 국내에 건설되어진 26,000여 개의 도로교 가운데 강교량의 점유율이 증가하고 있는 추세이다(건설교통부 교량현황조사서, 2005).

강재를 사용한 강구조물은 부재와 부재의 연결로 이루어지며, 연결 방법으로는 용접에 의한 방법과 고장력볼트에 의한 방법이 주로 사용되고 있다. 용접공의 숙련도 및 작업조건,

용접설비 등에 따라 이음부의 신뢰성 확보가 어려운 용접에 의한 방법보다 작업속도가 빠르고 신속성, 간편성, 정적 및 피로강도 등의 역학적 특성이 우수한 고장력볼트에 의한 이음을 광범위하게 사용하고 있다.

현재 고장력볼트 이음부는 작용력이 큰 경우에는 다수의 볼트가 필요함에 따라 단면 결손을 고려한 순단면적이 크게 감소하여 단면이 커지게 되고, 이와 반대로 작용력이 작은 경우에는 모재강도의 75%를 설계하중으로 사용한다는 설계기준에 따라 소요 볼트 개수가 많아지는 문제점을 가지고 있다.

또한 고장력볼트 이음부에 관한 연구는 사용이 증가함에 따라 활발하게 진행되고 있으며, 인장력이 작용하는 고장력볼트 이음부의 거동을 규명(이승용, 1998; 심재수 등, 2004)하는 연

1) 교신저자. 인하대학교 토목공학과, 박사과정
(Tel: 032-873-2130, Fax: 032-873-2130, E-mail: jsham@inha.edu)

2) 인하대학교 사회기반시스템공학부 교수, 공학박사(hws@inha.ac.kr)

3) (주)포스코건설 토목기술그룹 토목사업본부, 부장(ysdon@poscoenc.com)

4) 동양대학교 철도토목학과 교수, 공학박사(jschung@dyu.ac.kr)

본 논문에 대한 토의를 2013년 2월 28일까지 학회로 보내주시면 토의 회답을 게재하겠습니다.

구들이 대부분을 차지하였고, 압축력 하에서 볼트의 거동을 분석하는 연구(한진희 등, 2008)도 일부 진행되었다. 그러나 강교량과 같이 휨과 전단력을 받는 고장력볼트 이음부에 관한 연구는 미비한 실정이다.

실제 강교량과 같은 고장력볼트 이음부는 휨 모멘트와 전단력이 지배적으로 작용하므로, 이에 대한 신뢰성 있는 자료가 필요하다. 휨을 받는 고장력볼트 체결부에서 과대공에 따른 영향을 실험적으로 규명(박정웅 등, 2009)하였고, 해석적으로는 기존의 유한요소해석을 통한 고장력볼트 이음부의 연구(장동일 등, 1997; 심재수 등, 2004; 한진희 등, 2008; 신경재 등, 2011)들은 볼트의 실제 사이즈와 동일하게 모델링하여 볼트의 거동을 구현 하였다. 그러나 기존의 수치해석방법은 볼트 개수가 적은 비교적 간단한 이음부에서는 적용이 용이하나, 실제 강교량의 이음부와 같이 다수의 볼트로 구성되어 있는 경우에는 기존의 Solid 요소를 사용한 해석방법으로는 많은 해석시간이 소요되고 해석의 수렴성도 낮아지기 때문에 거의 불가능하다. 기존 해석방법의 문제점을 해결하기 위하여 셸요소(S3R)과 볼트의 거동을 구현할 수 있는 Connector 요소를 사용하여 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 고장력볼트의 유효활용방안을 모색하기 위하여 고장력볼트 이음부 강도에 관한 설계변수의 영향 및 휨과 전단력을 받는 고장력볼트 마찰 이음부의 3차원 유한요소해석을 통하여 거동을 예측 및 영향을 비교·분석하고, 경제적이고 합리적인 강교량 이음부의 설계를 위한 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 고장력볼트 이음부 강도에 관한 설계변수의 영향

2.1 해석모델의 제원 및 재료특성

고장력볼트 이음부 강도에 영향을 미치는 주요 설계변수를 파악하기 위해 Solid 요소를 사용한 인장 시험체를 선택하여 다양한 설계변수(모재 및 이음판의 강종, 이음판의 두께, 볼트 재료특성, 설계볼트축력)에 관한 영향을 비교·분석하였다.

고장력볼트 이음부의 해석모델은 秋山壽行(1996)이 사용한 고장력볼트 이음부 인장실험의 시험체를 사용한다. 그림 1은 해석모델의 단면 제원을 나타내며 강종은 SS400을 사용하였고, 볼트는 F8T, M20을 사용하였다.

본 연구에서 사용한 모재 및 이음판 강재의 강종은 SS400이며, 西村宜男(1997) 등이 제안한 강재구성식인 식 (1)을 사용하였다. 그림 2는 강재의 응력 - 변형률 관계를 나타낸 것이고, 구성식의 재료 정수는 표 1과 같다.

그림 1. 해석모델의 단면 제원

$$f = a \cdot \ln\left(\frac{\epsilon_{mon}^P}{b} + 1\right) + \left(E_{st}^P - \frac{a}{b}\right)\epsilon_{mon}^P + f_y \quad (1)$$

여기서, ϵ_{mon}^P : 변형률 경화시점 ϵ_{st} 을 원점으로 한 변형률

E_{mon}^P : 변형률 경화 기울기

f_y : 하향복점의 응력

a, b : 재료실험으로부터 구한 계수

그림 2. 강재의 응력 - 변형률 관계

표 1. 강재구성식 재료정수

	SS400	SM490Y	SM570
f_y (kgf/cm ²)	2400	3600	4600
E (kgf/cm ²)	2050000	2050000	2050000
E_{st}^P (kgf/cm ²)	53000	54300	29000
ϵ_{st}^P	0.0125	0.0185	0.0057
a	2730	3440	561000
b	0.0426	0.0484	1.39

2.2 해석방법

상용유한요소 프로그램인 ABAQUS(2006)의 Solid 요소를 사용하여 해석을 수행하였다. 해석은 하중재하와 설계볼트 축력 도입의 2단계 step으로 나뉘며, step 1에서 설계볼트 축력을 도입하기 위해 그림 3와 같이 볼트 헤드부의 양끝단을 모두 구속한 후, 볼트 중앙부에 도로교설계기준에서 제시한 133kN을 도입하였다. step 2에서는 그림 4와 같이 본 하중을 재하하기 위해 step 1에서 구속하였던 경계조건을 제거하고 변위제어를 통해 인장하중을 재하하였다.

해석모델의 접합면은 미끄럼계수를 적용할 수 있는 contact 요소를 사용하여 모델링하였다. 그림 5의 ①, ②과 같이 모재와 이음판, 볼트 헤드부와 이음판의 접합면에서의 미끄럼계수는 도로교설계기준에서 제시하고 있는 0.4를 적용하였고, ③과 같이 볼트 구멍과 볼트의 몸체 사이의 접합면에 대한 미끄럼계수는 0을 적용하였다.

또한, 해석시간의 절약을 위해 해석모델의 대칭성을 고려하여 1/2로 모델링하였고, 대칭경계조건을 부여하였다.

그림 3. 설계볼트축력 도입

그림 4. 해석모델의 경계조건

그림 5. 해석모델의 접합면

본 해석기법의 타당성을 검토하기 위하여 秋山壽行(1996)가 실시한 실험의 결과와 비교하였다. 해석모델은 시험체의 단면 제원과 동일하게 만들고, 재료 정수 값은 秋山壽行(1996)이

실시한 재료시험을 통해 얻은 결과, 항복응력(f_y)는 284.8MPa, 탄성계수(E)는 209000N/mm²를 사용하였다. 그림 6은 실험과 해석결과를 나타낸다. 여기서 x 의 P 는 인장하중이고, P_y 는 항복하중으로서 모재의 항복응력(f_y)에 순단면적(A_n)을 곱하여 산출하였다. 또한 y 축의 Δ 는 인장하중(P)에 의한 변위이고, L 은 해석모델의 전체 길이는 나타낸다. 해석에서는 실험에서 발생하지 않은 응력 집중에 의한 2차 미끄러짐이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 이렇게 발생한 2차 미끄러짐에 대한 해석결과를 초기 미끄러짐이 발생한 점까지 평행이동 시키면 실험결과와 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다. 따라서 본 해석방법이 타당한 것으로 판단된다.

그림 6. 실험결과와 해석결과 비교

2.3 모재 및 이음판 강종에 관한 영향

모재 및 이음판 강종이 고장력볼트 이음부 강도에 미치는 영향을 파악하기 위해 볼트의 강종은 F8T로 고정된 후, 모재 및 이음판 강종 SS400과 SM490Y, SM570에 대하여 해석을 수행하였다.

그림 7은 모재 및 이음판 강종에 대한 하중-변위관계 곡선이며, 이를 보면 모든 강종이 약 0.25 P_y 에서 초기 미끄러짐이 발생하는 것을 알 수 있다. SM570의 경우 $P/P_y=1.0$ 에 도달한 이후 크게 강도가 상승하여 볼트 강도를 충분히 활용하였고, SM490Y의 경우 $P/P_y=1.0$ 에 도달한 이후 서서히 강도가 상승하여 볼트의 강도를 어느 정도 활용한 것을 확인할 수 있다. 또한 SS400의 경우 초기 미끄러짐 이후 약간 강도가 상승하나 볼트 강도를 활용하기 이전에 모재가 파괴되는 것을 알 수 있다. 따라서 모재와 이음판의 강종은 재료의 강도 차이가 적은 SM570을 사용하는 것이 효율적이라고 판단된다.

이후 해석에서는 모재와 볼트의 강도를 모두 활용할 수 있게 하기 위하여 모재 강종은 SM490Y, 볼트 강종은 F8T로 고정하여 해석을 수행하였다.

그림 7. 모재 및 이음판 강종 변화에 따른 하중 - 변위관계 (F8T)

2.4 이음판 두께에 관한 영향

이음판 두께가 고장력볼트 이음부에 미치는 영향을 파악하기 위하여 모재와 이음판 두께비를 변화하여 해석을 수행하였다. 여기서 t_s 는 상·하 이음판 두께의 합이고, 모재와 이음판의 강종은 SM490Y, 볼트의 강종은 F8T로 고정하였다.

그림 8은 이음판 두께의 영향을 보여주는 하중-변위관계 곡선이다. 모재와 이음판의 두께비가 $t_s/t=1.0$ 이상일 경우 $P/P_y=1.0$ 이후 강도가 상승하여 이음판의 두께비가 볼트 강도를 충분히 활용하였고, $t_s/t=0.75$ 인 경우는 미끄럼 강도 이후 상승률이 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 $t_s/t=0.5$ 일 때는 미끄럼 하중이 감소하고 강도 상승률도 거의 없는 것을 알 수 있다. 따라서 이음판 두께는 모재 두께의 1.0배 이상으로 하는 것이 유효하다고 판단된다.

그림 8. 이음판 두께 변화에 따른 하중 - 변위관계 (SM490Y, F8T)

2.5 볼트 재료특성에 관한 영향

모재 및 이음판의 강종이 일정할 때 볼트 강종이 고장력볼트 이음부에 미치는 영향을 파악하기 위해 볼트 강종이 F8T와 F10T, F13T로 변화하여 해석을 수행하였다.

그림 9는 볼트 강종의 영향을 보여주는 하중-변위관계 곡선이며 고장력볼트일수록 미끄럼 하중이 증가하는 것을 알 수 있으나 항복 후 극한거동에는 차이가 없는 것을 확인할 수 있다. 따라서 볼트 재료특성의 영향보다는 모재 및 이음판에 고강도 강재를 사용하여 항복 하중을 증가시키는 경우에만 효과가 있다고 판단된다.

그림 9. 볼트 강종 변화에 따른 하중 - 변위관계 (SM490Y)

2.6 설계볼트축력에 관한 영향

설계볼트축력이 고장력볼트 이음부에 미치는 영향을 파악하기 위하여 도로교설계기준에 제시된 F8T의 설계볼트축력 133.2kN($\times 1.0$)을 기준으로 하였으며, 설계볼트축력을 각각 99.9kN($\times 0.75$), 66.6kN($\times 0.5$)으로 변화하여 해석을 수행하였다.

그림 10은 설계볼트축력의 영향을 보여주는 하중-변위 곡선이다. 여기서 설계볼트축력이 $\times 1.0$, $\times 0.75$, $\times 0.5$ 일 때 미끄럼 하중은 각각 117.59kN, 87.07kN, 55.64kN이며, 미끄럼 하중은 도입된 설계볼트축력에 비례하는 것을 알 수 있다. 또한 미끄럼 이후 강도의 상승폭은 설계볼트축력이 작을수록 감소하는 것을 알 수 있으며, 그림 9에서 나타난 것과 같이 고장력볼트 이음부의 극한거동은 설계볼트축력에 상관없이 거의 일치하는 것을 확인할 수 있다.

고장력볼트의 마찰이음은 볼트에 도입된 설계볼트축력에 의해 접촉면에서 발생하는 마찰 저항력에 의해 저항하는 이음

방법이다. 따라서 도로교설계기준에서 제시한 축력값을 적용하는 것이 유효하다고 판단된다.

그림 10. 설계볼트축력 변화에 따른 하중 - 변위관계(SM490Y, F8T)

3. Plate Girder의 고장력볼트 유효적용부위

3.1 해석 모델의 제원

플레이트 거더의 고장력볼트 이음부의 해석 모델은 秋山壽行(1996)가 수행한 휨 실험의 시험체를 사용한다. 강종은 SM490Y이고, 고장력볼트는 F10T, M20을 사용하였다. 여기서 상·하 플랜지의 $t_s/t = 1.3$ 이고, 웹의 $t_w/t = 2.0$ 으로 적용되었다. 그림 11과 그림 12는 시험체의 단면 제원 및 고장력볼트 이음부 상세를 나타낸다.

그림 11. 해석모델의 단면 제원

그림 12. 해석모델의 고장력 볼트 이음부 상세

3.2 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 ABAQUS(2006) 내에서 실제 볼트를 모델링하지 않고, 절점간의 간단한 연결로 볼트의 거동을 표현하는 Connector 요소를 사용하였다.

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

그림 13은 Connector 요소를 사용한 고장력볼트의 개념도이며, 그림 14는 Connector 요소의 다양한 거동을 나타낸다.

그림 13. 고장력 볼트의 Connector 요소 개념도

그림 14. Connector 요소의 다양한 거동

Connector 요소의 선형 탄성 거동은 식 (2)에 의하여 정의되며, 이 식을 통하여 볼트의 강성을 도출하였다.

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

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(σ - ϵ)관계가 아닌 볼트의 힘-상대변위(F - u) 관계로 정의된다. 이때 볼트의 힘-상대변위 관계는 재료시험에 의해 결정되어지며, 시험이 용이하지 않을 경우 기존의 실험 결과를 바탕으로 산출되어진 AISC(2005)코드에 명시된 식 (3)을 이용한다. 그림 15은 식 (3)를 사용하여 구한 볼트의 힘-변위 관계를 나타낸다. 실제 볼트의 경우 종 방향으로 항복이후, 그림 15처럼 변위가 크게 늘어나는 것이 아니라 파괴가 되나, 본 연구에서는 볼트의 극한거동이 목적이 아니므로 아래의 그래프와 같이 입력하였다.

$$R = R_{ult} (1 - e^{-10\Delta})^{0.55} \quad (3)$$

여기서 $R_{ult} = 0.7(F_u)A_bN_s$

Δ : 볼트의 상대변위(mm)

F_u : 볼트의 인장강도(MPa)

A_b : 볼트의 단면적(mm²)

N_s : 전단면의 수

그림 15. 고장력볼트의 하중 - 변위 관계 (F10T, M20)

또한 이음판과 모재의 마찰면은 기존의 해석방법과 동일하게 마찰면을 설정하여 마찰계수 0.4를 적용한다. 다만 볼트 헤드부와 이음판 사이의 마찰은 따로 설정할 수 없으므로, Connector 요소 내에 Friction 거동의 사용하여 마찰 접합을 표현 할 수 있도록 하였다.

3.3 볼트이음부의 해석방법

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

볼트의 미끄러짐 거동에 관한 검토는 제 2장에서 사용한 秋山壽行(1996)의 인장실험과 동일한 단면을 사용하여 해석모델을 만들어 비교하였다. 그림 16는 Connector 요소를 사용한 해석모델의 형상이다.

그림 16(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.

그림 16. Connector요소를 사용한 고장력볼트 인장 해석 모델 형상

해석과 실험의 결과는 2.2절의 그림 6에 나타내어 볼트를 실제 모델링한 솔리드 모델과도 비교하였다.

Connector 요소를 사용한 그림 6에 나타낸 Connector 요소를 사용한 결과를 통하여 Connector요소는 탄성영역과 미끄러짐 거동을 표현해 낼 수 있으며, 실험결과와도 유사한 값을 보임을 알 수 있다.

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 19에 나타내었다. 이때 x축은 그림 17의 A인 플레이트 거더 중앙부의 최하지점의 변위(Δ)를 측정 한 것이며, y축은 표 2에 나타난 항복모멘트 M_y 의 값으로 모멘트 값을 나눈 무차원 값으로 표현되었다.

그림 19을 살펴보면, 본 연구에서 제한한 해석방법과 실험의 탄성부분은 기울기가 거의 일치하며, 항복하는 지점의 변위도 일치하는 형상을 보였다. 실험 및 해석에서 나온 항복모멘트(M_y)의 값은 표 2과 같으며, 이들의 오차는 2.5%내외로 미비함을 알 수 있다. 이는 휨 거동의 경우, 부재가 먼저 항복하기 때문에 연결부분이 극한까지 거동하지 않기 때문인 것으로 판단된다. 따라서 본 해석방법이 휨을 받는 이음부의 거동을 표현하는데 있어서 타당하다고 판단된다.

표 2. 실험 및 해석의 항복 모멘트(M_y)

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

그림 17. 실험 모형도

(a) 유한요소 해석 모델

(b) Connector 요소의 상세 모델

그림 18. Connector 요소의 적용

그림 19. 실험결과와 해석결과의 비교

3.4 고장력볼트의 상부 플랜지(압축) 적용

Plate Girder의 이음부에서 고장력볼트의 부분 적용이 구조물의 거동에 미치는 영향을 파악하여 유효적용부위를 판단하기 위해 적용부위를 변화하여 해석을 수행하였다. 그림 20는 상부 플랜지(압축)에만 고장력볼트를 적용하고 하부 플랜지와 웹에는 일반볼트를 적용한 경우의 모멘트-변위관계 곡선이다. 그림과 같이 압축을 받는 상부 플랜지에만 고장력볼트를 적용한 경우 약 $M/M_y=0.8$ 에서 볼트의 미끄러짐이 발생하는 것을 확인할 수 있었으며 극한강도 이후 강도가 급격히 저하되는 것을 알 수 있었다.

3.5 고장력볼트의 하부 플랜지(인장) 적용

그림 21은 하부 플랜지에는 고장력볼트를 적용하고 상부 플랜지와 웹에는 일반볼트를 적용한 모델에 대한 모멘트-변위 관계 곡선이다.

이를 보면 상부 플랜지에만 고장력볼트를 적용한 경우와 같이 약 $M/M_y=0.8$ 에서 볼트의 미끄러짐이 발생하였으나 상부 플랜지에 고장력볼트를 적용한 모델과는 달리 극한강도 이후 강도 저하가 크지 않다는 것을 확인할 수 있으며, 이를 통해 인장을 받는 하부 플랜지에 고장력볼트를 적용하는 것이 상부 플랜지에 적용하는 것보다 유효하다고 판단된다.

3.6 고장력볼트의 상·하부 플랜지 적용

그림 22는 상·하부 플랜지에만 고장력볼트를 적용하였을 경우의 모멘트-변위관계 곡선이다.

상부 또는 하부 플랜지에만 고장력볼트를 적용한 모델은 약 $M/M_y=0.8$ 에서 볼트의 미끄러짐이 발생한 반면에 상·하부 플랜지에 모두 고장력볼트를 적용한 경우에는 볼트의 미끄러짐이 발생하지 않았으며 약 $M/M_y=1.05$ 에서 항복되는 것을 확인할 수 있다. 따라서 Plate Girder의 상·하부 플랜지에만 고장력볼트를 적용하여도 유효하다고 판단된다.

3.7 고장력볼트의 웹 적용

그림 23은 웹에만 고장력볼트를 적용하고 상·하부 플랜지에는 일반볼트를 적용한 경우의 모멘트-변위관계이다.

그림과 같이 적용한 고장력볼트에 관계없이 약 $M/M_y=0.8$ 에서 미끄러짐이 발생하였다. F8T의 경우 미끄러짐 발생 직후 항복이 발생하였으며 F10T의 경우는 약 $M/M_y=0.98$ 에서 항복이 발생한 것을 확인할 수 있었다. F13T의 경우 약 $M/M_y=1.02$ 에서 항복이 발생하는 것을 알 수 있었으며 웹에만 고장력볼트를 적용할 경우 F13T의 적용이 가장 효과적이라고 할 수 있으나 플랜지에만 고장력볼트를 적용한 경우에 비해 유효하지 않다고 판단된다.

그림 20. 상부 플랜지 적용에 따른 $M - \Delta$ 곡선

그림 21. 하부 플랜지 적용에 따른 $M - \Delta$ 곡선

그림 22. 상·하부 플랜지 적용에 따른 $M - \Delta$ 곡선

그림 23. 웹 적용에 따른 $M - \Delta$ 곡선

3.8 모재강종에 따른 유효 고장력볼트의 강종

앞의 고장력볼트는 상·하부 플랜지에 적용하는 것이 유효하다는 해석결과를 기초로 하여 모재 강종에 따른 유효 고장

력볼트 강종을 검토한다.

그림 24는 모재 강종에 따른 유효 고장력볼트 강종을 파악하기 위해 고장력볼트의 강종은 F10T를 상·하부 플랜지에 적용하고, 모재 및 이음판 강종을 SS400, SM490Y, SM570을 적용하였다. SS400의 경우 M/M_y 가 약 0.64에서 항복하고 SM490Y의 경우 약 1.05에서 항복하는 것을 확인할 수 있었으며 SM570은 M/M_y 가 약 1.25에서 항복하는 것을 알 수 있었다. 또한 극한강도는 SS400의 경우 약 0.76, SM490Y의 경우 약 1.10이며 SM570의 경우 약 1.32인 것을 확인할 수 있었다. 본 절의 해석결과와 앞 절의 해석결과를 비교해보면 고장력볼트의 극한강도(f_b)와 모재 및 이음판의 극한강도(f_u)의 차이가 적을수록 볼트의 재료특성을 충분히 활용할 수 있으며 효율적인 설계가 가능하다고 판단된다.

그림 24. 모재 강종에 따른 $M - \Delta$ 곡선

4. 결 론

본 연구에서는 휨 모멘트와 전단력을 받는 강교량 고장력볼트 이음부에서의 고장력볼트 유효활용방안을 모색하기 위하여 수치해석 모델을 통해 설계변수에 대한 영향과 고장력볼트의 유효 적용성을 검토하였다.

본 연구에 대한 주요 결론을 요약하면 다음과 같다.

- (1) Connector요소를 사용하여 볼트의 거동을 표현할 수 있는 해석 방법을 제안하고, 해석방법의 타당성을 검증하였다.
- (2) 모재 및 이음판 강종이 고장력볼트 이음부의 거동에 주요 설계변수임을 확인하였다. 즉, 모재 및 이음판 강종의 극한강도(f_u)와 볼트의 극한강도(f_b)의 차이가 작을수록 고장력볼트의 재료특성을 효과적으로 활용할 수 있다고 판단된다.
- (3) 이음판 두께의 합과 모재의 두께비(t_s/t)가 1.0배 이상이면 고장력볼트 이음부의 거동이 거의 차이가 없음을 확인하였다. 따라서 현행 설계에서 기준으로 하고 있는 이음판 두께의 합은 모재 두께의 1.0배 이상이 유효하다고 판단된다.
- (4) I - Girder 이음부의 부분적으로 고장력볼트를 적용한 모델과 모두 고장력볼트를 적용한 모델의 비교를 통하여 강교량에서 고장력볼트 이음부의 유효 적용부위를 확인하였다. 휨이 탁월하게 작용하는 I - Girder 이음부에서는 인장과 압축을 받는 상·하부 플랜지에만 고장력볼트를 적용하여도 그 재료특성을 유효하게 활용할 수 있는 것으로 판단된다.
- (5) I - Girder 이음부에서 웹에만 고장력볼트를 부분 적용한 경우 유효성을 확인하였다. 플랜지에만 고장력볼트를 적용한 경우와 비교해보면 미끄러짐은 거의 차이가 없이 발생하나 부재의 항복이 더 빨리 발생하는 것을 확인하였다. 따라서 웹에만 고장력볼트를 적용하는 것은 유효하지 않다고 판단된다.

감사의 글

본 논문은 2011년 포스코 지원 학위논문에 의하여 수행되었습니다. 연구지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- 건설교통부(2005) 교량현황조사서.
- 박정웅, 양승현, 장석인(2009) 휨을 받는 고장력볼트 체결부에서 과대공에 따른 사용성에 관한 연구, 한국산학기술학회논문지, 한국산학기술학회, 제10권, 제10호, pp.2831-2836.
- 신경재, 임보혁, 이수현, 최성모(2011) 웹을 볼트로 집합한 보-기둥 집합부의 유한요소해석, 한국강구조학회 논문집, 한국강구조학회, 제23권, 제3호, pp.305-316.
- 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.
- 장동일, 김성훈, 이승용, 최준혁(1997) 고장력볼트 이음부의 내부 압축응력 분포, 1997년도 학술발표회논문집, 대한토목학회, 제9권, 제2호, pp.171-179.
- 조재병, 성택룡(2009) 시간에 따른 F13T 고장력 볼트의 체결력 감소, 대한토목학회논문집, 대한토목학회, 제29권, 제4호, pp.291-297.
- 한진희, 최종경, 허인성, 김성보(2008) 압축력을 받는 고장력 볼

트 이음부의 미끄러짐 거동, 한국강구조학회논문집, 한국강
구조학회, 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關する研
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
素法への導入に關する研究, 研究結果報告書.
ABAQUS (2006) Theory and User's Manual ver 6.8-1,

Hibbit Karisson & Sorensen, Inc. Pawtucket. RI.
AISC (2005) *Manual of steel construction, 3rd Edition*,
American Institute of Steel Construction, USA.

(접수일자 : 2012. 2. 16 / 심사일 2012. 2. 20 /
게재확정일 2012. 8. 8)