

볼트의 변형을 고려한 강재 조립 합성보의 휨거동

Flexural Behavior of Steel Composite Beam with Built-up Cross-section Considering Bolt Deformation

김 성 보† 김 훈 겸* 정 경 환** 한 만 엽*** 김 문 영****
Kim, Sung-Bo Kim, hun-kyom Jung, Kyoung-Hwan Han, Man-Yop Kim, Moon-Young
(논문접수일 : 2007년 9월 6일 ; 심사종료일 : 2008년 1월 11일)

요 지

본 연구에서는 볼트의 변형을 고려한 강재 조립 합성보의 휨거동에 대한 해석기법 및 결과가 제시되었다. 볼트의 변형, 합성효과 및 접촉면의 마찰이 합성보의 휨거동에 끼치는 영향을 파악하였다. 볼트의 변형이 합성보의 휨거동에 끼치는 영향을 고려하기 위하여, 구조해석 프로그램인 ABAQUS의 Nonlinear Spring요소를 사용하였으며 볼트의 변형을 고려하지 않은 결과와 비교하였다. 유한요소 모델에 의해서 처짐, 휨응력, 전단응력이 계산되었으며 이런 결과는 완전 비합성보, 부분 합성보 및 완전 합성보의 해석 값과 비교되었다. 해석결과 합성보의 거동은 강재의 마찰보다 볼트의 갯수로 표현되는 합성률에 크게 영향을 받았다. 특히 합성률이 50%이상일 되면 볼트의 변형을 고려한 합성보의 휨거동은 완전합성보와 유사하게 나타났다.

핵심용어 : 볼트 변형, 강재 마찰, 합성보, 강재 조립 단면

Abstract

The analysis and results of flexural behavior for steel composite beam with built-up cross-section considering bolt deformation are presented in this paper. The bolt deformation and the restrict effect due to bolt-connection and friction are considered to investigate the flexural behavior of steel composite beam. Nonlinear spring element in ABAQUS is used to consider bolt deformation, also the results are compared with those in case bolt deformations are ignored. The displacement, bending stresses and shear stresses are calculated by F.E. model, and these results are compared with the analytical value of no interaction beam, partial interaction beam and full interaction beam. As a result of analysis, the behavior of composite beam is more dependant on the composite rate than the friction of the steel. When the composite rate is more than 50%, the behavior of composite beam considering the effects of bolt deformation is similar to that of fully composite beam.

Keywords : bolt-deformation, steel friction, composite beam, built-up cross-section

1. 서 론

최근 들어 산업고도화에 따라 강 구조물의 건설이 증가하는 현 시점에서 단일 형강만을 이용한 구조물에 비해 강성이 증대되고, 보다 큰 하중에 저항 할 수 있고, 높은 피로강도를 갖는 두개의 강재조립보가 합성적으로 작용하는 합성보의 중요성이 더욱 대두되고 있다. 하지만 용접을 통한 합성보의

경우 용접조건이 까다롭고 인성이 낮아 취성파괴와 피로균열에 취약한 약점을 갖고 있다. 용접을 통한 합성보의 약점을 보완하기 위하여 볼트로 체결된 조립 합성보의 개발이 진행 중에 있으며 조립 및 해체 작업이 용이한 장점으로 인하여 가시설 구조물에 다수 적용되고 있다(김성보 등, 2006). 합성보의 거동은 전단연결재의 영향을 크게 받으나, 이러한 전단연결재는 강형의 강도와 마찰, 전단연결재의 재질, 크기,

† 책임저자, 정회원 · 충북대학교 토목공학과 교수
Tel: 043-261-3241 ; Fax: 043-275-2377
E-mail: sbkim@chungbuk.ac.kr

* 충북대학교 토목공학과 박사과정

** 충북대학교 토목공학과 공학석사

*** 정회원 · 아주대학교 토목설계공학과 교수

**** 정회원 · 성균관대학교 토목환경공학과 교수

• 이 논문에 대한 토론을 2008년 4월 30일까지 본 학회에 보내주시면 2008년 6월호에 그 결과를 게재하겠습니다.

배치 방법 등 매우 많은 영향인자로 인해 이론적으로 규명하기 어려우므로, 전단연결재의 거동은 주로 실험 데이터 등에 의존하여 왔다. 그러나 이러한 실험 데이터는 합성보의 다양한 조건을 파악하기에는 자료가 부족한 실정이므로 합성보의 다양한 변수에 대한 구조 거동의 자료를 마련하는 것이 시급한 과제라 생각한다.

합성보와 전단연결재 및 볼트 거동과 관련된 연구로는 강형간에 수직변위와 마찰을 포함한 해석 식이 제안되었으며 (Adekola, 1968), 부모멘트를 받는 합성보의 비선형 해석에 관한 연구와 (Fabbrocino, 1999), 유한요소법을 사용한 주기적 하중에 의한 합성보의 이력에 관한 연구가 수행되었다 (Filip, 2000). 한편 국내에서는, 볼트 접합부 해석 방법 및 볼트 체결과 마찰계수에 관한 연구가 있었으며 (변대근 등, 1994; 손승요 등, 1994), 프리캐스트 콘크리트 바닥판 교량의 전단연결부 설계에 대한 연구가 수행되었다 (장승필 등, 1998). 또한, 합성부재의 거동 해석을 위한 해석 모델들이 제안되었다 (곽호경 등, 2000; 오명호 등, 2005). 김성보 등(2007)은 볼트로 체결된 강재 조립 합성보의 휨거동에 관한 연구를 수행하였다.

본 연구에서는 볼트의 변형을 고려한 강재 조립 합성보의 휨거동을 파악하기 위하여, 다양한 변수를 고려할 수 있는 강재 조립 합성보의 유한요소 해석기법을 제시하고, 볼트의 변형, 전단연결재에 의한 합성률, 그리고 마찰면의 영향 등을 해석변수로 하는 합성보를 해석함으로써 볼트의 변형을 고려한 합성보의 휨 거동 특성을 분석하였다.

2. 합성보의 분류와 거동

2.1 합성보의 분류

2개의 강재보 사이의 전단연결재가 수평 전단력을 저항하는 합성보는 합성 정도에 따라 일반적으로 비합성보, 완전합성보, 부분합성보, 부분 합성보로 분류한다. 그림 1(a)에서 합성작용이

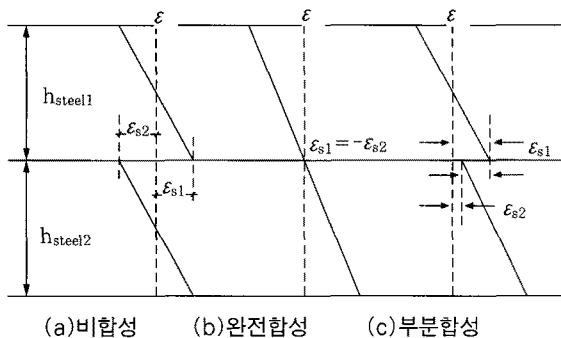


그림 1 Classification of composite beam

없는 경우에는 2개의 강재보는 각각의 중립축을 가지고 변형을 하며, 그림 1(b)에서처럼 완전 합성작용을 하는 경우는 하나의 중립축을 가지고 일체화되어 거동한다. 그림 1(c)의 경우처럼 부분 합성작용을 하는 경우는 두 경우의 중간의 양상을 가지게 된다.

2.2 완전 비합성보

그림 2(a)가 완전 비합성보라면, 지간중앙의 최외측 플랜지 연단에서 발생하는 최대휨응력(σ_{max})과 지점부 복부중앙에서 발생하는 최대전단응력(τ_{max}) 및 최대처짐(δ)은 식 (1)~식 (3)으로 나타낼 수 있다.

$$\sigma_{max} = \frac{My_{max}}{I} = \frac{3wL^2}{8[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (1)$$

$$\tau_{max} = \frac{VQ}{Ib} = \frac{3wL[b(h-t_f)t_f/t_w + (h/2-t_f)^2]}{2[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (2)$$

$$\delta = \frac{5wL^4}{64E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (3)$$

여기서, h 와 b 는 각각 단일형강의 총 높이와 폭이고 t_w , t_f 는 각각 복부 및 플랜지의 두께이다.

한편 단면 상하연단에서의 휨 변형도(ϵ_x), 미끄러짐 변형도(s)는 식 (4), (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon_x = \frac{My_{max}}{EI} = \frac{3w(L^2 - 4x^2) \times h}{8E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (4)$$

$$s = \frac{w(3L^2x - 4x^3) \times h}{4E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)^3]} \quad (5)$$

2.3 완전 합성보

그림 2(a)가 완전 합성보라면, 최대휨응력(σ_{max})과 최대전단응력(τ_{max}) 및 최대처짐(δ)은 식 (6)~식 (8)으로 나타낼 수 있다.

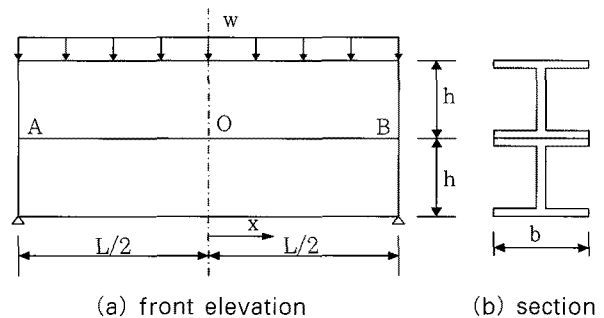


그림 2 Composite beam under uniformly distributed load

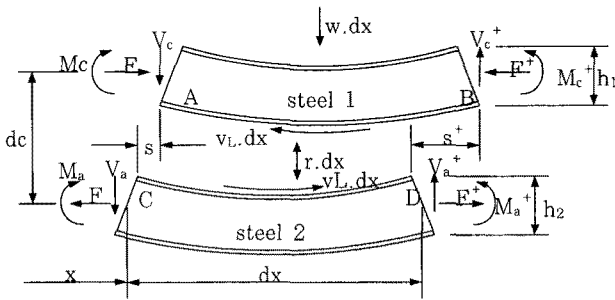


그림 3 Infinitesimal of element of partially composite beam

$$\sigma_{max} = \frac{3whL^2}{16[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)(h^2 - ht_f + t_f^2)]} \quad (6)$$

$$\tau_{max} = \frac{3whL}{8b} \cdot \frac{[2bt_f + (h-2t_f)t_w]}{[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)(h^2 - ht_f + t_f^2)]} \quad (7)$$

$$\delta = \frac{5wL^4}{256E[bh^3 - (b-t_w)(h-2t_f)(h^2 - ht_f + t_f^2)]} \quad (8)$$

2.4 부분 합성보

그림 3과 같은 부분 합성보의 축력과 모멘트 및 전단력의 평형조건식은 다음과 같다.

$$\frac{dF}{dx} = -v_L \quad (9a)$$

$$\frac{dM_c}{dx} + V_c = \frac{1}{2} v_L h_1 \frac{dM_a}{dx} + V_a = \frac{1}{2} v_L h_2 \quad (9b)$$

$$V_a + V_c = wx \quad (9c)$$

또한, 두 개의 보의 곡률 및 축방향 변형도는 식 (10), (11)로 나타낼 수 있다.

$$\phi = \frac{M_a}{EI_2} = \frac{M_c}{EI_1} \quad (10)$$

또한, AB와 CD축상의 축방향 변형도는 다음과 같다.

$$\epsilon_{AB} = \frac{1}{2} h_1 \phi - \frac{F}{EA_c} \quad (11a)$$

$$\epsilon_{CD} = \frac{1}{2} h_2 \phi + \frac{F}{EA_a} \quad (11b)$$

윗식의 ϵ_{AB} 와 ϵ_{CD} 의 차이가 미끄러짐 변형도이다.

3. 유한요소 해석

3.1 강제 및 전단연결재 모델링

합성보의 모델은 범용 비선형 유한요소 해석 프로그램인

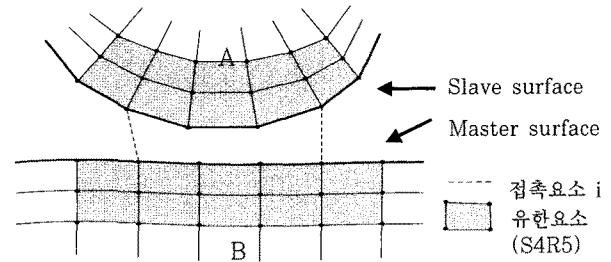


그림 4 Mechanical surface interaction with friction

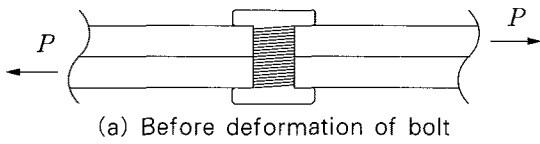
ABAQUS를 이용하여 소성 대변형을 고려한 셸 요소(S4R5)를 사용한다. 3차원 요소로 모델링하고, 계산 속도를 높이기 위하여 4절점 요소를 사용한다. 강재는 재료의 비선형성을 고려하기 위하여 소성 관련 옵션 중 PLASTIC을 사용한다. 한편, 전단연결재의 비선형 거동을 나타내기 위하여 마찰효과를 구현할 수 있는 접촉요소 및 결합요소(MPC, SPRING)를 사용한다. MPC요소에서는 두 절점의 자유도를 일치시키는 TIE옵션을 사용하고, SPRING요소에서는 Nonlinear SPRING옵션을 사용하여 볼트의 휨변형을 고려하였다.

3.2 접촉요소의 거동

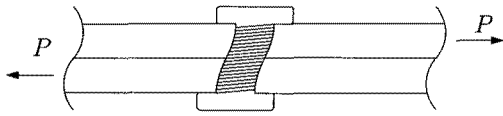
접촉요소를 사용해서 접촉 문제를 해석하는 과정을 설명하기 위하여 그림 4에 나타난 하나의 접촉요소 i 에 대한 거동을 살펴보면 다음과 같다. 접촉요소는 두 영역 A 및 B의 상대적인 거동에 따라 길이가 증가하거나 감소하는 상태가 될 것이다. 결국 접촉요소의 길이는 두 영역 사이의 간격으로 정의되며, 이 값은 상수가 아니라 접촉문제의 수렴해를 구하는 반복과정에서 계속 변하는 변수가 된다. 이와 같은 두개의 강재보 사이의 상호 작용은 ABAQUS의 FRICTION모델을 사용하였다. 본 논문의 유한요소 해석모델에 사용된 접촉요소는 ABAQUS의 Surface-to-Surface 모델이며, 이 모델은 두 요소의 접촉된 면이 있을때 적용 가능한 모델로서 대변형 해결이 가능하고, 일관된 강성행렬로 계산되며, 비대칭 강성 행렬 옵션을 제공하는 기능을 가지고 있다.

3.3 볼트의 휨변형

그림 5는 합성보 플랜지의 볼트체결을 도시화한 것이며, 횡하중이 재하되면 그림 5(a)처럼 볼트가 체결된 합성보의 플랜지에는 휨 모멘트에 의한 축력이 발생하게 된다. 여기서 발생하는 축력이 미끄러짐 하중에 도달하면 볼트와 볼트구멍 사이의 간격만큼 미끄러짐이 발생하게 된다. 하중의 증가와 더불어 그림 5(b)와 같이 볼트의 휨변형과 함께 상·하 플랜



(a) Before deformation of bolt



(b) After deformation of bolt

그림 5 Deformation of bolt

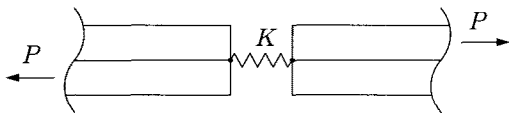


그림 6 Nonlinear spring bolt deformation

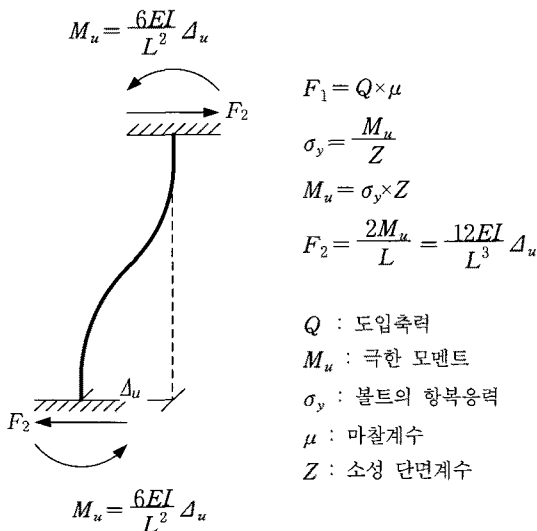
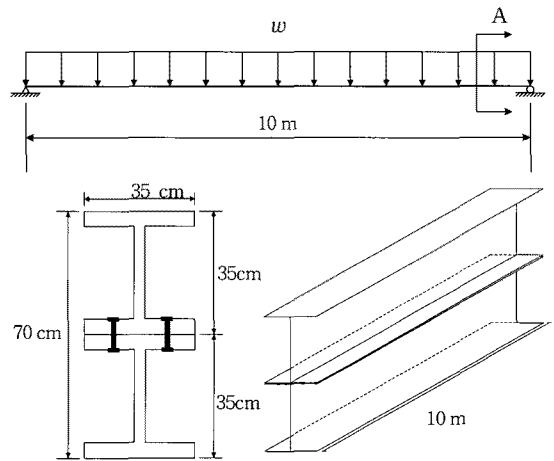


그림 7 Theoretical modeling

지의 지속적인 미끄러짐이 발생되면서 합성보의 부재가 파괴에 도달하게 된다. 유한요소 프로그램에서 볼트의 비선형 거동특성을 구현하기 위해 그림 6처럼 볼트를 비선형 스프링으로 치환하여 모델링하였다.

유한요소 프로그램인 ABAQUS에서 지원되는 Nonlinear SPRING 옵션은 스프링의 힘과 변위의 계산이 선행 되어야 한다. 먼저 볼트의 도입축력과 마찰계수를 곱하여 볼트와 볼트구멍사이의 미끄러짐 하중을 계산하였으며, 그림 7과 같이 볼트를 양단 고정보로 이상화하여 횡변위가 발생하였을 때의 단부모멘트를 계산하고, 이 모멘트로부터 볼트의 파괴하중을 유도하였다. 외력으로 인한 플랜지의 축력이 미끄러짐 하중 (F_1)에 도달하면 볼트와 볼트구멍사이의 간격(3mm)만큼 미끄러짐 발생하며, 이 후의 하중 (F_2)은 볼트의 휨강성으로 저항하며 파괴하중 이상이 되면 3mm+ Δu 이상의 미끄러짐이



Double H-350x350x12x19

그림 8 Analysis model

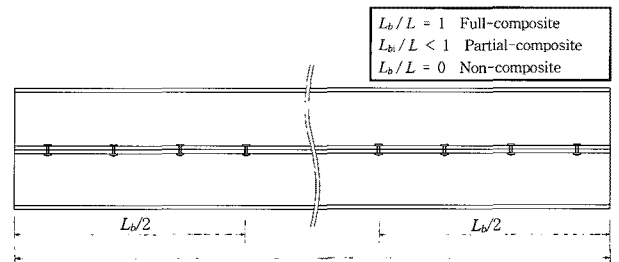


그림 9 Definition of composite rate

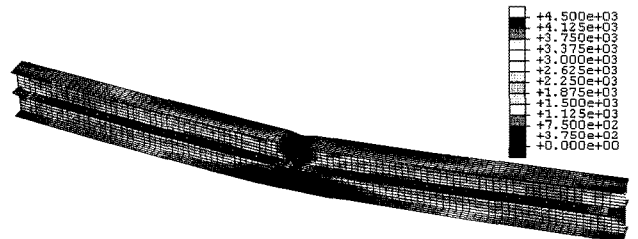


그림 10 Definition of composite rate

계속된다고 가정하였다. 여기서 수치 3mm는 볼트 조립이 용이하도록 하는 볼트의 공칭축지름과 볼트 구멍지름의 차이이다.

4. 수치 해석 예

4.1 유한요소 해석

그림 8에 해석에 사용된 합성보가 도시 되어있다. 강재보는 SM490Y, H-350x350x12x19형강이며, 2개의 강재가 완전 합성 되었을 때의 단면2차 모멘트 I_{∞} 는 183.406 cm⁴이다. 형강의 탄성계수는 2.1E5 MPa, 마찰계수(μ)를 0.4, 0.6, 0.8까지 변화를 주었으며, 포와송비는 0.3으로 하였다. 접촉요소를 사용하여 강재보 변위가 다른 강재보의 내부로

Table 1 Section properties of member(H-350×350×12×19)

A[cm ²]	I _x [cm ⁴]	I _∞ [cm ⁴]	I _y [cm ⁴]	r _x [cm]	r _y [cm]	Z[cm ³]
173.9	39,506	183,406	13,581	15.2	8.84	2300

Table 2 Yield stress of steel plate

강종	SS400 / SM400 / SMA41		SM490		SM490Y / SM520 / SMA50			SM570 / SMA58		
강재의 판두께 (mm)	40이하	40초과 100이하	40이하	40초과 100이하	40이하	40초과 75이하	40초과 100이하	40이하	40초과 75이하	75초과 100이하
기준항복점 (kgf/cm ²)	2400	2200	3200	3000	3600	3400	3300	4600	4400	4300
허용축방향 인장응력 (kgf/cm ²)	1400	1300	1900	1750	2100	2000	1950	2600	2500	2450

Table 3 Central distance of each bolt

볼트의 호칭	최소 중심간격	최대 중심간격		최소연단거리
M20	65	130	12t	32
M22	75	150		37
M24	85	170		42

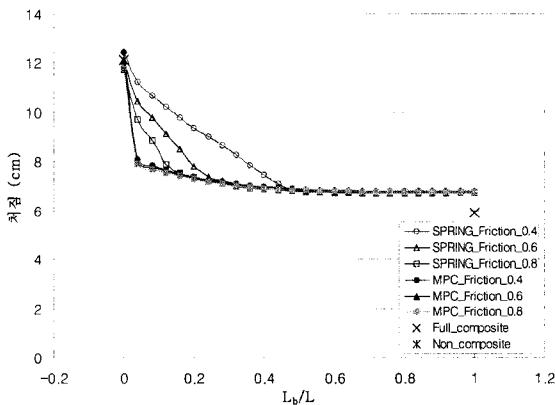


그림 11 Maximum deflection of composite rate

침범하는 것을 방지하였으며, 접촉요소의 마찰을 고려하였다. 변수로는 볼트의 휨변형효과, 볼트체결에 의한 합성물과 강재사이의 마찰값(μ)으로 설정하였다. 합성보의 합성률은 그림 9와 같이 전체지간장(L)과 양 지점으로부터 볼트가 체결된 길이(L_b)의 비로 나타냈으며, 전체지간과 볼트의 거리비가 '1'일 경우를 완전 합성이며, 전체지간과 볼트의 거리비가 '1'보다 작을 경우를 부분 합성, 전체지간과 볼트의 거리비가 '0'일 때를 비합성이라 하였다.

한편, 해석에 사용된 볼트는 F10T의 M24 고장력볼트이고, 볼트사이의 간격은 표 3에 표시된 설계기준값을 사용하였다.

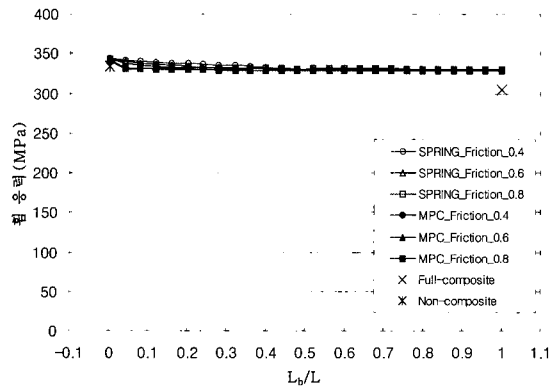
그림 10은 합성보의 유한요소 해석 결과 나타난 대표모델(합성률이 1이고 마찰계수가 0.4인 경우)에 대한 변형도와 휨응력도를 나타내고 있다.

4.2 합성보의 처짐

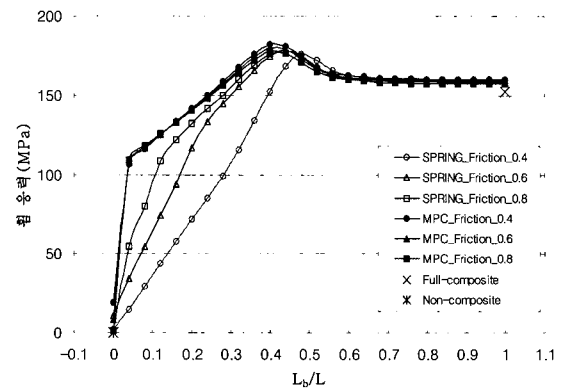
구조해석 결과 나타난 볼트의 변형효과, 합성률의 증가 및 마찰계수의 변화에 따른 합성보 중앙점의 최대처짐을 그림 11에 나타내었다. 여기서, MPC는 볼트의 변형을 무시하고 볼트 연결부에서 상·하 플랜지가 완전히 구속되어 있는 경우이고 SPRING은 볼트의 휨 변형을 비선형 스프링을 이용하여 고려한 경우이다. MPC와 SPRING의 합성률에 따른 초기의 변위의 차이는 MPC는 Tie웁선으로 묶여있어 합성률의 변화에 따른 처짐의 변화가 거의 없게 계산되었다. 비선형 스프링 강성을 적용한 SPRING의 경우는 합성률이 약 50%미만인 경우에는 마찰계수의 차이에 따른 처짐변화가 크게 나타났다. 마찰계수가 0.4이고 합성률이 20%, 40%인 경우 볼트의 변형을 무시한 MPC는 볼트의 변형을 고려한 SPRING에 비하여 처짐값이 23%, 7%작게 계산되었고, 합성률이 50%이상이면 두 경우의 처짐이 동일하게 나타났다.

4.3 합성보의 휨 응력

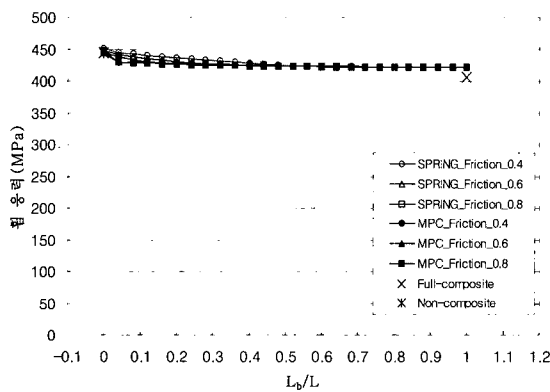
합성보의 휨 응력은 축방향의 $L/4$ 지점과 $L/2$ 지점에서 강재의 상단플랜지와 상단복부에서 검토하였고, 각 변수에 대한 정확한 분석을 위해서 이론식과 비교할 수 있도록 각 단면내 동일점에서 응력을 검토하였다. 완전 합성과 비합성의 해석하는 식 (1), (6)에 의해 구해지며, 완전 합성일 경우



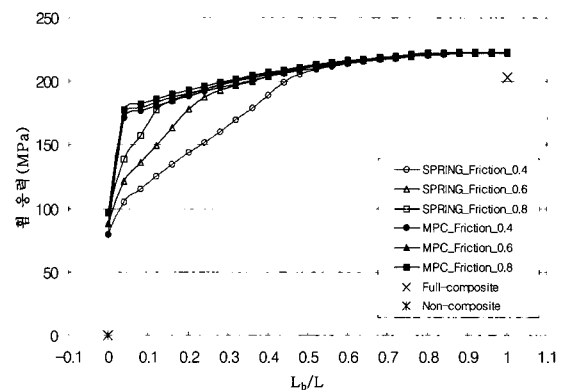
(a) Bending stress at flange by composite rate ($L/4$ region)



(b) Bending stress at web by composite rate ($L/4$ region)



(c) Bending stress at flange by composite rate ($L/2$ region)



(d) Bending stress at web by composite rate ($L/2$ region)

그림 12 bending stress - L_b/L curve

에는 일체보의 단면 2차모멘트를 적용하였고, 완전 비합성일 경우에는 두 개의 강재가 서로 독립적인 거동을 하므로 하나의 단면 2차 모멘트를 적용한다.

$L/4$ 지점의 합성보 플랜지에서의 휨 응력값은 완전 합성일 경우 304.8 MPa이며, 완전 비합성일 경우에는 333.2 MPa이다. 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 152.4 MPa이며, 완전 비합성의 경우 0.0 MPa으로 계산되었다. $L/2$ 지점의 플랜지에서의 응력은 완전 합성일 경우 406.4 MPa, 완전 비합성일 경우에는 444.3 MPa이며, 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 203.2 MPa, 완전 비합성의 경우 0.0 MPa이다.

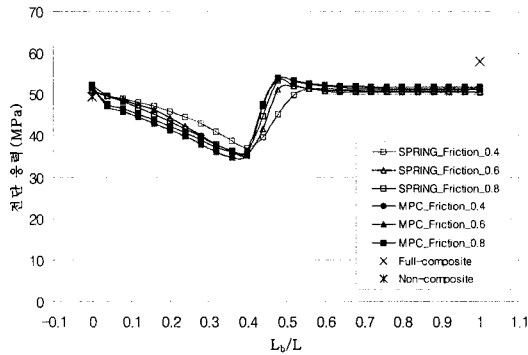
그림 12는 볼트의 변형효과, 합성률 및 마찰계수의 변화에 따른 휨 응력을 나타낸다. $L/4$ 지점 및 $L/2$ 지점의 플랜지에서의 휨 응력은 그림 12(a) 및 그림 12(c)에서 볼 수 있듯이 볼트의 변형효과, 마찰계수와 합성률에 크게 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 보였다. 이는 합성보인 경우 단면이 차모멘트의 증가, 전체 합성보가 부담하는 휨모멘트의 증가 및 중립축에서 상·하 플랜지 연단거리의 증가가 서로 상쇄되어 휨응력의 변화가 크지 않기 때문이며, 본 논문의 수치

해석결과 및 이론해와 비교에서 확인하였다. 반면에 $L/4$ 지점 복부에서 볼트의 휨변형을 고려한 SPRING은 볼트의 변형을 무시한 MPC에 비하여, 마찰계수가 0.4이고 합성률이 10%, 30%인 경우, 휨 응력은 각각 65%, 36% 작게 계산되었다. 한편, $L/2$ 지점에서 SPRING이 MPC에 비하여 휨 응력이 각각 36%, 17% 작게 계산되었다. 하지만 복부의 휨응력도 합성률이 50% 이상이 되었을 때 볼트의 휨효과를 고려한 거동은 휨효과를 무시한 거동 및 완전합성보의 거동과 거의 일치함을 확인하였다.

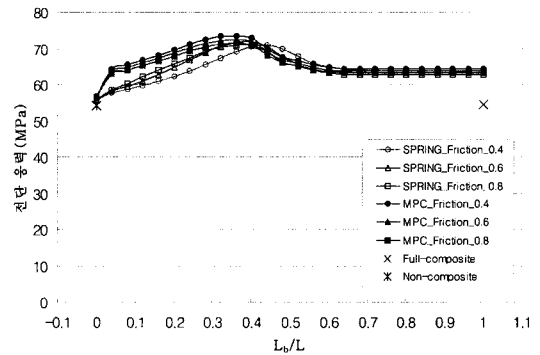
4.4 합성보의 전단응력

합성보의 전단응력은 축방향의 $L/4$ 지점과 지점에서 강재의 중앙플랜지와 상단복부에서 비교하였다. 완전 합성과 완전 비합성보의 해석하는 식 (2), (7)에 의해 구해진다.

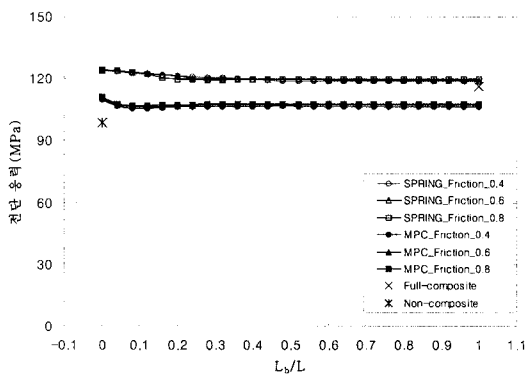
$L/4$ 지점의 중앙플랜지에서의 전단응력은, 완전 합성일 경우 58.1 MPa이며, 완전 비합성일 경우에는 49.3 MPa이다. 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 54.5 MPa이며, 완전 비합성의 경우 54.2 MPa으로 계산되었다. 지점에서 플랜



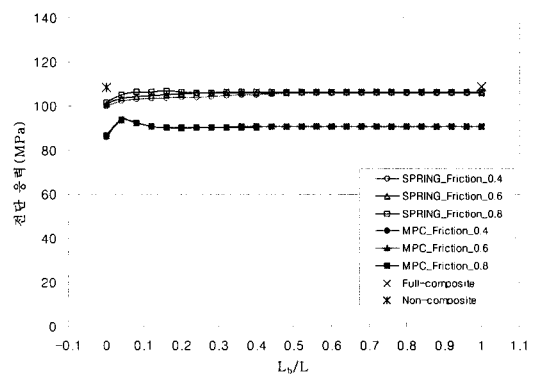
(a) Shear stress at flange by composite rate ($L/4$ region)



(b) Shear stress at web by composite rate ($L/4$ region)



(c) Shear stress at flange by composite rate (support region)



(d) Shear stress at web by composite rate (support region)

그림 13 Shear stress - L_b/L curve

지에서의 전단응력은 완전 합성일 경우 116.2MPa, 완전 비합성일 경우에는 98.6MPa, 복부에서의 응력은 완전 합성의 경우 108.9MPa, 완전 비합성의 경우 108.4MPa이다.

그림 13은 볼트의 변형효과, 합성률 및 마찰계수의 변화에 따른 전단응력을 나타낸다. 플랜지의 전단응력은 합성률이 45%전후에서 급격하게 변화하였으며 이는 전단응력이 계산되는 $L/4$ 지점과 합성률 45%일때의 볼트체결구간이 일치하기 때문으로 판단된다. 복부에서의 전단응력은 합성률이 50%전까지 볼트의 변형효과, 합성률 및 마찰계수의 변화에 따라 최대 15%이내의 변화를 보일뿐 이후의 전단응력은 완전 합성보와 거의 일치하였다.

지점의 플랜지와 복부에서의 전단응력은 그림 13(c),(d)에 도시된 바와 같이 볼트의 변형효과, 합성률 및 마찰계수의 변화에 크게 영향을 받지 않고, 볼트의 변형효과를 고려한 경우 무시하는 경우보다 15%정도 응력이 크게 계산됨을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 강재 조립 합성보의 비선형 휨 거동 특성을

파악하기 위하여, 범용비선형 유한요소 프로그램인 ABAQUS에 적용하여 볼트의 변형, 합성보의 합성률, 마찰계수 등을 변수로 하여 합성보의 휨거동을 분석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 상·하 강재보의 접촉면을 접촉요소를 사용하고 고장력 볼트의 체결, 미끄러짐 및 변형효과를 나타낼 수 비선형스프링 요소를 적용함으로써 강재 조립 합성보의 비선형 유한요소 해석 기법을 제시하였다.

2. 강재 사이의 마찰계수 변화와 볼트의 변형에 따른 합성보의 거동에서 볼트의 변형을 무시하고 볼트 체결점에서 상·하 플랜지의 거동을 일치화시키는 경우, 최대 처짐은 합성률이 0~20%에서 3%의 차이를 보이고 나머지 구간은 거의 유사한 거동을 보였다. 한편, 볼트의 변형을 고려하여 비선형 스프링을 사용하면 마찰계수의 차이에 따른 처짐변화가 크게 발생함을 파악하였다.

3. 강재 조립 합성보의 플랜지에서의 휨 응력은 볼트의 변형효과, 마찰계수와 합성률에 크게 영향을 받지 않고 거의 일정한 값을 보였다. 복부의 휨응력은 합성률이 50%이상이었을 때 볼트의 휨효과를 고려한 거동은 휨효과를 무시한

경우 및 완전합성보와 동일하게 나타났다.

4. 강재조립 합성보의 처짐, 휨 응력, 전단응력은 합성률이 50%미만일 때에 합성률, 마찰계수, 볼트 변형효과가 크게 발생하였고, 합성률이 50%이상이면 모두 완전 합성보와 유사한 거동을 보임을 확인하였다.

감사의 글

본 연구는 2007년도 충북대학교 학술연구비 지업사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 저자는 연구비 지원에 감사드립니다.

참 고 문 헌

곽효경, 서영재 (2000) 부분강합성보의 시간의존적 거동해석, 한국전산구조공학회논문집, 13(4), pp.461~763.

김성보, 한만엽, 김문영, 정경환 (2006) 혁신적 프리스트레스트 가시설 구조시스템(IPS)을 적용한 굴착면의 해석 및 설계, 대한토목학회 논문집, 26(1A), pp.461~763.

김성보, 한만엽, 김문영, 지태석, 정경환 (2007) 볼트로 체결된 강재 조립 합성보의 휨거동, 한국전산구조공학회 논문집, 20(2), pp.207~216.

변대근, 윤성기, 박성수 (1994) 접합요소를 이용한 볼트 접합부의 유한요소 해석, 한국전산구조공학회논문집, 7(2), pp.

139~146.

손승요, 신근하 (1994) 소성역체결 볼트의 체결력과 마찰계수에 관한 연구, 한국전산구조공학회논문집, 7(3), pp.133~141.

오명호, 장태영, 김명환, 김대중, 김상대 (2005) 비조밀단면을 가진 SC 합성기둥의 비선형 해석, 한국강구조학회 논문집, 17(74), pp.60~71.

장승필, 심창수, 김종희, 김영진 (1998) 프리캐스트 콘크리트 바닥판 교량의 전단연결부 설계, 한국강구조공학회논문집, 10(4), pp.761~767.

Adekola, A. O. (1968) Partial interaction between elasticity connected element of a composite beam, *Int. J. Solids and Struct.* 4, pp.1125~1135.

ABAQUS, ABAQUS User's Manual, Version 5.8, Hibbit, Karlson & Sorenson, Inc, 1998.

Fabbrocino, G, Manfredi, G, Cogenza, E. (1999) Non-linear analysis composite beams under positive bending, *Computers and structures*, 70, pp.77~89.

Filip, C. F., Ashraf, A. (2000) Mixed formulation of nonlinear steel-concrete composite beam element, *J. Struct. Engng.*, ASCE, 126(3), pp.371~382.

Johnson, R. P. (2004) Composite structures of steel and concrete, Blackwell publishing.