

# 부모멘트를 받는 합성보의 전단합성 거동에 대한 유한요소해석

신현섭<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>한국건설기술연구원 인프라구조연구실

## FE Analysis of the Composite Action in the Composite Beam subjected to the Hogging Moment

Hyun-Seop Shin<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology

**요약** 부모멘트를 받는 합성보 슬래브에서 인장균열 발생과 균열의 진행에 따른 슬래브의 강성저하가 전단연결부의 합성거동에 미치는 영향을 실험적으로 분석하기는 매우 어렵다. 본 논문에서는 부모멘트를 받는 합성보에서 콘크리트 슬래브 및 강재 보, 스티드를 포함한 전단연결부 등의 형상과 물성을 최대한 실제와 유사하게 모델링하는 기법을 이용함으로써, 부재 간 합성작용을 해석할 수 있는 3차원 유한요소모형을 개발하였다. 개발된 3차원 유한요소모형을 이용하여 부모멘트 구간에 설치되는 합성보의 전체 휨거동 및 기존의 1차원 또는 2차원 모델로는 해석이 어려운 전단합성작용을 분석할 수 있었다. 해석결과에 따르면 부모멘트를 받는 합성보에서의 전단연결부 거동은 철근콘크리트 슬래브의 철근비 및 인장 균열거동에 지배를 받게 됨을 알 수 있었다. 전단연결부의 하중-슬립 관계를 검토해 본 결과, 전단연결부의 슬립강성은 슬래브의 초기균열 및 철근의 항복이 발생한 시점을 기준으로 변화됨을 알 수 있었다. 또한, 구간별로 합성율이 100% 미만으로 설계되는 부분합성 설계가 합성설계의 효율성 측면에서 더 유리할 수 있다는 기존의 실험적 연구결과를 간접적으로 확인할 수 있었다.

**Abstract** In the composite beam subjected to the hogging moment it is very difficult to evaluate the influence of the reduction of slab stiffness due to cracks and their development on the horizontal shear behavior of shear connection. In this study, a 3D FE model is developed by which one can analyze the composite action in the composite beam subjected to the hogging moment. In this FE model, each structural member and shear connection are modeled as similar as possible to details of the composite beam. Bending behaviour, and composite action which could not be analyzed using the existing 1D or 2D FE model are investigated by the 3D model. Analysis results show that the reinforcement ratio and crack behaviour of the slab are main factors which exert a strong influence on the composite action. According to the analysis results about load-slip behavior, initial crack of slab and yielding of rebars have a influence on the slip stiffness of shear connection. The existing experimental results, that the design of partial interaction can be more efficient in designing of shear connection of the composite beams, are indirectly verified by the FE analysis.

**Key Words** : Composite action, Composite beam, Hogging moment, FE analysis, Shear stud

### 1. 서론

합성보에서 강재 보와 콘크리트 슬래브는 스티드를 비롯한 기타 유사 전단연결재에 의해 서로 연결되어 일체적으로 거동하게 된다. 강과 콘크리트의 합성작용에 있어

서 결정적 역할을 하는 전단스티드 및 스티드를 둘러싸고 있는 콘크리트를 포함한 전단연결부의 전단합성 강도는 일반적으로 Push-out 시험을 통해 간접적으로 결정하고 있다.

정모멘트를 받고 있는 합성보에서 전단연결부의 전단

\*Corresponding Author : Hyun-Seop Shin(Korea Institute of Construction Technology)

Tel: +82-31-910-0287 email: hsshin@kict.re.kr

Received May 24, 2013

Revised (1st July 9, 2013, 2nd July 17, 2013)

Accepted August 7, 2013

합성 거동에 관해서는 현재까지 많은 연구결과에 의해 강도 및 변형특성 등이 잘 알려진 바 있다. 그러나, 부모멘트 구간에서의 전단합성 거동에 관해서는 실험 및 해석적 연구 모두 이에 대한 자세한 자료를 찾아보기는 쉽지 않다. [1-4]에 의하면 콘크리트 바닥판이 인장상태에 있는 부모멘트 영역에서 전단연결부의 강성은 일반 Push-out 시험의 결과 보다 더 저하되며, 강도 또한 감소된다고 보고하고 있다. 또한, [5]에 의하면 전단연결부의 전단강도 및 강성은 전단연결재 자체의 강도에 의해서 뿐만 아니라 콘크리트 균열에 대한 슬래브 내력과의 관련이 있다고 보고하고 있다.

그러나, 부모멘트를 받는 합성보 슬래브에서 인장균열 발생과 균열의 진행에 따른 슬래브의 강성저하가 종방향으로 배치된 전단연결부의 합성거동에 미치는 영향을 실험적으로 분석하기는 매우 어렵다. 또한, Push-out 시험으로부터 구한 하중-슬립 관계곡선을 이용하는 유한요소해석 방법에서는, 합성거동이 이미 알려진 것으로 가정한 상태에서 구조 전체의 휨거동을 분석하는 것이므로, 엄밀한 의미에서 전단연결부의 거동은 분석될 수 없다.

본 논문에서는 콘크리트 슬래브의 인장거동이 스티드에 의한 전단합성작용에 미치는 영향을 분석함으로써, 부모멘트를 받는 합성보의 전단연결부 거동을 해석적으로 평가하고자 한다. 이를 위해 부모멘트를 받는 합성보에서 콘크리트 슬래브 및 강재 보, 스티드를 포함한 전단연결부 등의 형상과 물성을 최대한 실제와 유사하게 모델링하는 기법을 이용함으로써 부재 간 합성작용을 해석할 수 있는 3차원 유한요소모델을 개발하였다. 개발된 유한요소모델의 적합성은 부모멘트를 받는 합성보 실험체에 대한 참고문헌의 구조실험 결과와 비교함으로써 확인하였다.

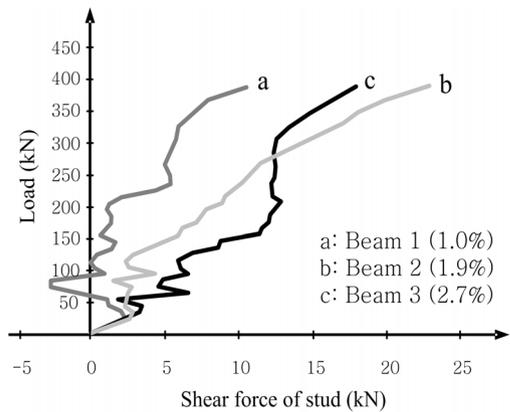
## 2. 정모멘트 및 부모멘트에 의한 전단합성거동 고찰

부모멘트를 받는 합성보에 대한 관련 연구를 검토해보면, [6]에서와 같이 인장균열을 포함한 콘크리트의 소성거동, 강재 보와 슬래브의 합성작용이 부모멘트를 받고 있는 합성보의 휨거동에 미치는 영향에 대한 실험연구가 수행된 바 있다. 이 연구에서는 부모멘트를 받는 합성보에서 강재 보와 슬래브의 합성거동을 알아보기 위해 두 부재 사이에 발생하는 슬립과 강재 보 각 위치에서의 변형률을 측정하였다. 각 위치에서 측정된 변형률의 차이로부터 스티드에 작용하는 전단력을 계산하였고, 이를 Fig. 1에서와 같이 재하하중 단계에 따라 나타내었다. Fig. 1

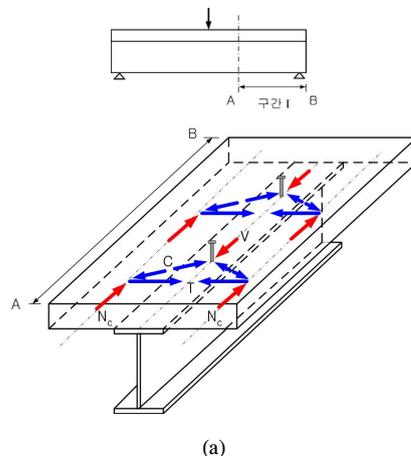
에서 곡선 a, b 및 c는 철근비가 각각 1.0%, 1.9% 및 2.7%에 상당하는 합성보에 대한 결과이다.

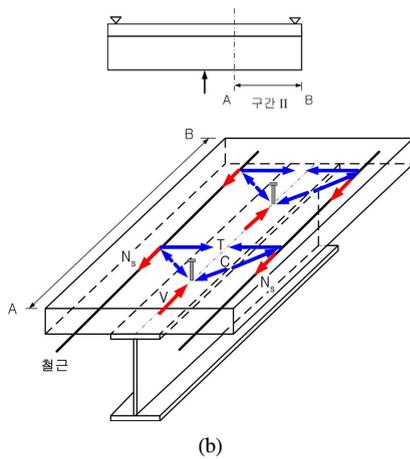
이에 따르면, 균열이 발생할 때 합성단면에서의 전단력에 대한 스티드에 발생하는 전단력의 비가 일시적으로 감소하는 것을 알 수 있다. 또한 철근비가 작을수록 관계곡선의 기울기가 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 슬래브 철근비가 전단연결부의 거동에 대한 하나의 변수로서 작용하기 때문이다.

한편, [3]에 의하면 인장을 받는 슬래브에서 전단연결부의 강도가 약 10~20% 정도 감소하게 된다는 것이 관찰된 바 있다. 또한, [7]에 의하면 전단강도의 감소폭은 크지 않지만 강성의 경우 약 2배 가까이 감소하게 된다고 보고하고 있다. 이와 같은 구조거동의 원인은 휨모멘트의 정 또는 부에 따라 스티드를 통해 전달되어지는 전단력과 슬래브 내력 사이의 힘의 평형관계를 검토함으로써 알 수 있다.



[Fig. 1] Shear force of stud in the composite beam subjected to the hogging moment[6]





[Fig. 2] Mechanism of horizontal shear force transmission in the steel-concrete interface  
 (a) composite beam in the positive moment region  
 (b) composite beam in the hogging moment region

Fig. 2(a)에 나타난 바와 같이 정모멘트를 받는 합성보의 경우, 전단스터드에 의해 도입되는 수평전단력 V는 전단스터드를 둘러싸고 있는 콘크리트에 형성되는 압축력 C 및 횡방향 철근에 작용하는 인장력 T와 균형상태에 있다. 또한, A위치의 슬래브 단면에 작용하는 압축력 Nc는 구간 I에 있는 모든 스티드에 작용하는 수평전단력의 합과 같게 된다[8].

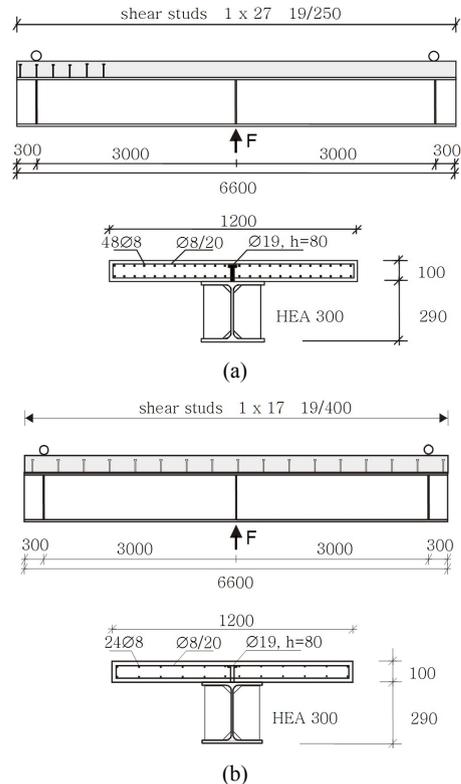
한편, 부모멘트를 받는 합성보의 경우에는 Fig. 2(b)에 나타난 바와 같이 스티드를 둘러싸고 있는 콘크리트에 작용하는 압축력 C 및 횡방향 철근에 작용하는 인장력 T가 스티드에 의해 도입되는 수평전단력 V와 균형을 이루는 것은 정모멘트구간 합성보에서와 같으나, 부모멘트 구간 II에 존재하는 스티드 수평전단력의 합은 슬래브에 작용하는 인장력(Ns)과 균형을 이루게 된다. 이와 같은 사실을 고려하면, 부모멘트를 받는 합성보에서 전단연결부의 거동은 철근콘크리트 슬래브의 균열 및 인장거동과 밀접한 관계를 갖게 됨을 알 수 있다.

### 3. 해석 대상 합성보

본 논문에서는 유한요소해석에 의해 콘크리트 슬래브의 인장거동이 스티드에 의한 전단합성작용에 미치는 영향을 유한요소해석을 통해 분석하고자 한다. 이를 위해서는 유한요소모델이 분석목적에 적합한지를 검증하는 것이 필요하며, 본 논문에서는 Fig. 3에 나타난 바와 같은 합성보 실험체에 대해 참고문헌의 실험결과[9,10]를 해석 결과와 비교하여 보았다.

[Table 1] Details of specimen[9-10] for FE analysis

	B400	B600
steel beam	HEA300 (290 X 300 X 8.5 X 14)	
concrete slab	1200 X 100	1200 X 100
longitudinal rebar	48 Ø 8	24 Ø 8
traverse rebar	Ø 8 @ 200	Ø 8 @ 200
reinforcement ratio, ρ(%)	2	1
arrangement of studs	1 X 27	1 X 17
degree of shear connection (%)	100	100
compressive strength of concrete (N/mm <sup>2</sup> )	100	91
tensile strength of concrete (N/mm <sup>2</sup> )	5	5
elastic modulus of concrete (N/mm <sup>2</sup> )	32673	30592
yield strength of steel beam (N/mm <sup>2</sup> )	525	510
tensile strength of steel beam (N/mm <sup>2</sup> )	617	585
yield strength of rebar (N/mm <sup>2</sup> )	616	616
tensile strength of rebar (N/mm <sup>2</sup> )	679	679



[Fig. 3] Specimen[9-10] for FE analysis  
 (a) composite beam B400(ρ = 2%)  
 (b) composite beam B600(ρ = 1%)

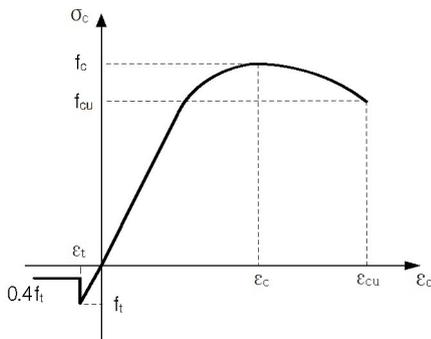
### 4. 유한요소해석

#### 4.1 해석모델

##### (1) 콘크리트 모델

유한요소해석에 사용된 콘크리트 모델은 Fig. 4에 나타난 것처럼 압축상태와 인장상태에서의 콘크리트의 응력-변형률 곡선 관계가 고려되었다. 인장을 받는 철근콘크리트 부재의 tension stiffening을 해석적으로 고려하기 위해 Fig. 4에 나타난 바와 같이 콘크리트에 인장균열이 발생한 이후에도 일정 강도(0.4f<sub>t</sub>)를 유지하게 한다[11]. 파괴기준으로서는 Fig. 5 및 식 (1)에서와 같은 Khan-Saugy[12]에 의해 제안된 파괴기준이 사용되었다. 콘크리트가 받을 수 있는 일방향 최대 압축응력은 다축 응력상태에서의 압축강도로 제한되며, 이는 다축 응력상태에서의 압축강도에 대한 실험결과[13]에 의한다. 또한, Fig. 6에 나타난 바와 같이, 순수 인장에 대한 파괴포락선은 일축 인장강도에 의해 제한되며(tension cutoff), 3차원 응력공간에서 압축과 인장이 동시에 작용하는 조합응력상태에 대한 파괴포락선은 다축 응력상태에서의 일축 압축강도 및 일축 인장강도에 해당하는 점을 경계로 하여 선형적인 분포를 나타내는 것으로 가정된다[14].

콘크리트 요소의 파괴 즉, 압괴 및 균열은 Solid 요소의 절점에서가 아닌 요소의 내부에서 일어나는 smeared model이 사용되었다. 인장철근은 트러스요소를 사용하였고 절점은 콘크리트 3D 요소의 절점과 해당 위치에서 공유토록 하였다. 유한요소해석에 사용된 프로그램은 범용 해석프로그램 중의 하나인 ADINA이다.



[Fig. 4] stress-strain curve of concrete

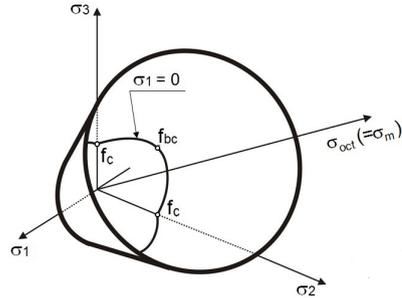
$$\alpha I_1 + \sqrt{J_2} - k = 0 \tag{1}$$

여기서,

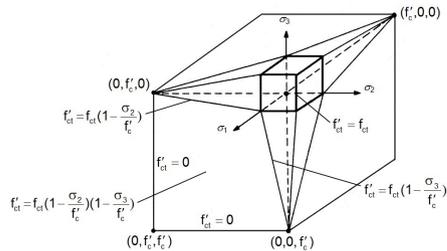
$$I_1 = \sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3 = 3\sigma_{oct}$$

$$J_2 = \frac{1}{6} [(\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2] = \frac{3}{2} \tau_{oct}^2$$

$$\alpha = \frac{n-1}{\sqrt{3}(2n-1)}, \quad k = \frac{-n}{\sqrt{3}(2n-1)}, \quad n = \frac{\sigma_{bc}}{\sigma_c}$$



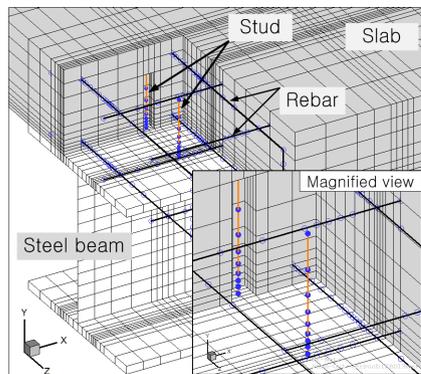
[Fig. 5] Triaxial compressive failure envelope of concrete model [12]



[Fig. 6] Triaxial tensile failure envelope of concrete model [14]

##### (2) 전단연결부를 포함한 합성보 모델링

부모멘트를 받는 합성보의 전단연결부 거동을 해석적으로 평가하고자 스티드를 포함한 전단연결부의 형상과 물성을 최대한 실제와 유사하게 모델링하는 기법을 이용한다.

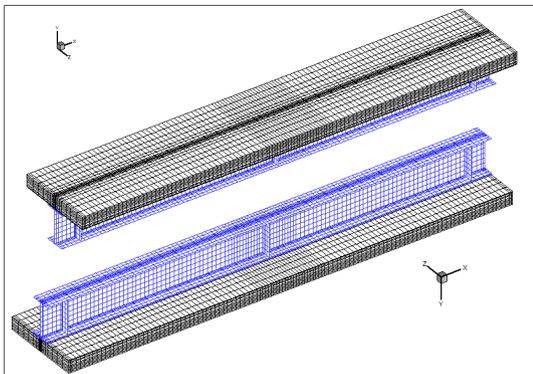


[Fig. 7] Existing FE model of the shear connection applied to this study [15, 16]

콘크리트 슬래브와 강재보 사이에 설치되는 전단연결부는 Fig. 7에 나타난 바와 같은 Push-out 시험체에서의 전단합성거동 해석을 위해 개발된 모델[15, 16]을 적용하였다. 이에 의하면, 스티드는 해석의 효율성 및 모델의 단순화를 위해 Beam 요소를 이용하여 머리부분, 줄기 및 하단 용접부 각각의 해당 단면적에 따라 실제 형상에 상당하도록 단순화 되었다. 스티드와 지압부 콘크리트가 맞닿는 부분은 해당 절점의 변위에 대한 구속방정식에 의해 서로 구속되어 진다. Fig. 7에서 스티드 주변의 빈공간은 다만 전단연결부 모델의 상세를 가시화하기 위해 편의상 나타내어진 것이고, 실제 모델에서의 스티드 앞 부분과 뒷 부분의 콘크리트는 떨어진 거리 없이 해당 절점들이 분리된 상태로 되어 있다. 절점들이 분리된 부분, 즉 스티드와 직접 맞닿는 부분의 지압부 콘크리트의 폭은 전단 스티드의 직경과 동일하게 하고 있다.

이와 같이 스티드를 포함한 전단연결부를 실제의 형상과 물성을 이용하여 유사하게 모델링한 것은, 스프링 요소에 Push-out 시험으로부터 얻은 하중-슬립 관계곡선을 물성값으로 대입하여 모델링 하는 방법의 경우 전단연결부 거동의 해석이 어렵기 때문이다. 전단연결부 모델링 방법 자체의 적합성은 Push-out 시험체에 대한 실험결과와 비교함으로써 알 수 있다. 그러나, 본 논문에서 사용한 전단연결부 모델링 방법은 Push-out 시험체의 해석에 관한 연구결과[15,16]를 활용한 것이고, 모델의 적합성은 이미 보고된 바 있기 때문에 실험결과와의 직접적 비교는 생략하였다.

전단연결부를 포함해 전체 합성보에 대한 3차원 유한요소모델을 Fig. 8에 나타내었다. 여기서, 슬래브와 강재보의 상부플랜지가 맞닿는 면인 합성면은 3D Contact Surface 요소를 사용하여 부재 상호간의 접촉에 의한 하중전달을 가능하도록 하였다.



[Fig. 8] 3D FE model of the composite beam in the hogging moment region

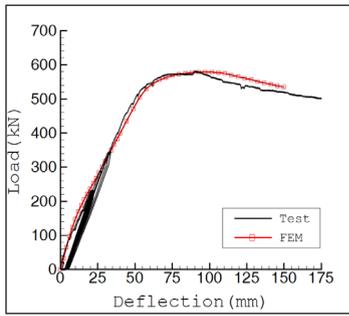
본 논문에서 사용된 유한요소프로그램에서는 Contact 조건이 Solid 요소 간에 성립되는 관계로, 슬래브와 접하는 강재 보 상부플랜지는 Solid 요소를 적용하고 웹 및 하부 플랜지는 Shell 요소를 사용하였다. 여기서, 웹 및 하부 플랜지에 사용된 Shell 요소는 휨압축에 의해 발생하는 국부좌굴이 고려될 수 있도록 하였다. 이와 같은 강재보 모델링 방법은 전체를 Shell 요소로 모델링하는 방법에 비해 더 많은 수의 요소가 사용되어 모델링 과정 및 해석의 효율성이 감소될 수 있다. 그러나, 본 논문에서와 같이 합성보를 구성하는 부재 전체를 가능한 실제의 형상과 유사하게 모델링할 필요성이 있어서 많은 수의 요소가 사용될 경우, 강재 보 플랜지를 Solid 요소로 모델링함에 따라 발생하는 효율성 문제는 전체 모델링 과정을 고려했을 때 큰 부분으로 작용하지 않는다.

또한, 본 논문에서는 스티드가 Beam 요소로 모델링되었고, 이 요소가 Solid 요소로 모델링 된 상부플랜지와 접하도록 하였다. 이 경우 스티드에서 발생하는 모멘트가 플랜지에 전달되지 않는다. 합성보의 전단합성거동에 관한 연구결과[9-10, 17]를 참고하면, 콘크리트의 강도가 클수록 스티드에 작용하는 수평전단력의 대부분은 스티드 하단의 용접부에 집중된다. 이와 같은 경우, 모멘트팔길이 감소로 스티드의 거동은 전단에 의해 지배받게 되고, 스티드로부터 강재보에 전달되는 전단력의 영향이 더 증가할 것으로 예상할 수 있다. 이와 같은 이유로 Beam 요소와 Solid 요소로 구성되는 스티드-상부플랜지 접합부가 전체 구조해석 결과 및 본 논문의 해석목적에 큰 영향을 주지 않을 것으로 가정하였으며, 해석목적에 대한 유한요소모델의 적합성은 실험결과와 해석결과의 비교로부터 검토하고자 한다.

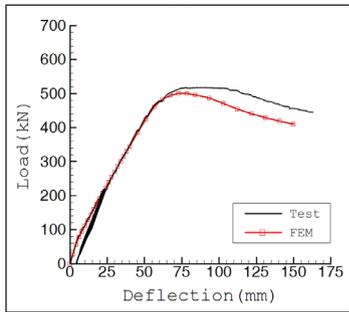
#### 4.2 해석결과와 실험결과의 비교

철근비가 각각 2% 및 1%인 합성보 B400, B600에 대한 유한요소해석 결과로서 얻은 중앙부 처짐 및 지간의 4등분 지점에서 강재 보와 슬래브 사이에 발생한 슬립을 각각 실험결과와 비교하여 Fig. 9 및 Fig. 10에 나타내었다. 각 합성보에 대한 하중-처짐 곡선 비교에 나타난 바와 같이 균열발생 전 휨강성, 균열 발생 후 강성저하와 철근항복 이후 보 하부플랜지의 휨압축 좌굴에 따른 강도저하 등에 의한 하중-처짐 관계 곡선의 변화가 잘 묘사되고 있음을 알 수 있다.

참고문헌[9, 10]의 실험에서 관찰된 바에 의하면 합성면에 존재하는 화학적 부착은 본 실험 전에 최대하중의 약 40%에 상당하는 하중을 25회 반복하여 재하하는 단계에서 대부분 파괴된 것으로 나타났다.



(a)

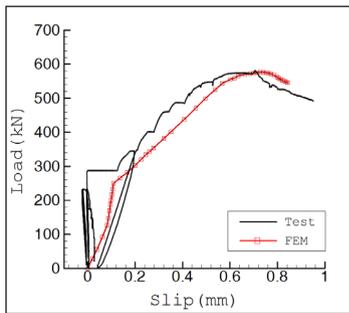


(b)

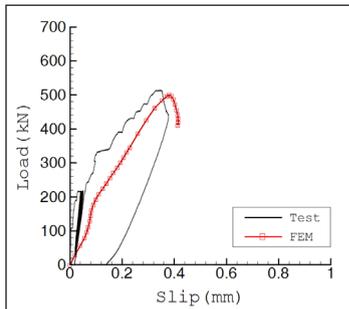
[Fig. 9] Comparison of load-deflection curve with test result

(a) Composite beam B400

(b) Composite beam B600



(a)



(b)

[Fig. 10] Comparison of load-slip curve with test result

(a) Composite beam B400

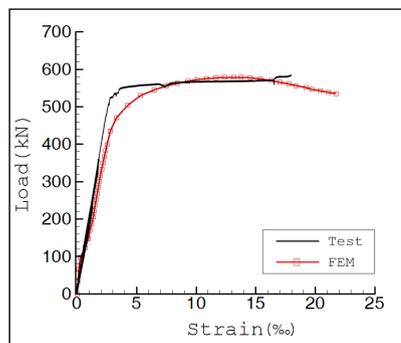
(b) Composite beam B600

합성보 B400의 경우, 225~290kN의 하중이 작용할 때 대부분 파괴되어 반복재하 이후의 주 하중단계에서는 합성작용에 거의 영향이 없는 것으로 나타났다. 이를 고려하여 구조거동에 영향을 미칠 만한 화학적 부착이 존재하지 않는 것으로 가정 하였고, 유한요소해석에서도 이에 의한 합성작용은 고려치 않았다.

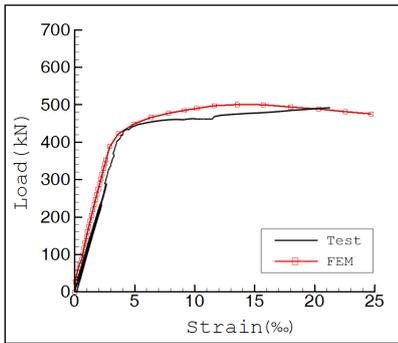
실험결과와 해석결과를 비교해 보면, 화학적 부착의 존재 여부에 따라 하중-슬립곡선은 Fig. 10 (a)에 나타난 바와 같이 하중이 약 290kN에 도달하기 전에는 화학적 부착이 존재하여 슬립이 거의 발생하지 않고 있으나, 반복재하에 의해 파괴된 이후에는 실험결과와 해석결과가 비교적 잘 맞고 있음을 볼 수 있다.

시간중양에서 측정된 인장철근 및 강재 보의 하중단계에 따른 변형률 등을 유한요소해석 결과와 비교하여 Fig. 11 및 Fig. 12에 나타내었다. 이에 의하면, 해석결과로부터 얻은 하중-변형률 관계의 전체적인 변화 양상이 실험결과와 비교적 잘 일치하고 있는 것으로 나타났다. 또한, 하중-변형률 관계 곡선의 기울기인 변형률 증가량에 대한 하중 증가율의 비가 비교적 크기 않은 오차범위 이내로 실험결과에 근접하고 있음을 알 수 있다. Fig. 11 및 Fig. 12의 변형률 비교에 나타난 바와 같이, 처짐이나 슬립 등 구조물 전체의 변형뿐만 아니라 단면 각 부분에서의 변형률 또한 4.1절의 3차원 유한요소모델에 의해 실험결과와 비교적 유사한 해석결과를 얻을 수 있었다.

강재 보의 휨거동, 슬래브 인장거동과 같은 각 부재의 구조거동과 함께 스티드에 의한 전단합성 작용의 결과 Fig. 9 ~ Fig. 12과 같은 변형이 발생한 것이고, 이와 같은 전체적 및 국부적 변형상태를 본 논문의 유한요소모델에 의해 비교적 유사하게 해석할 수 있기 때문에, 콘크리트 슬래브의 인장거동이 스티드에 의한 전단합성 작용에 미치는 영향 또한 해석결과를 분석함으로써 평가할 수 있을 것으로 판단된다.

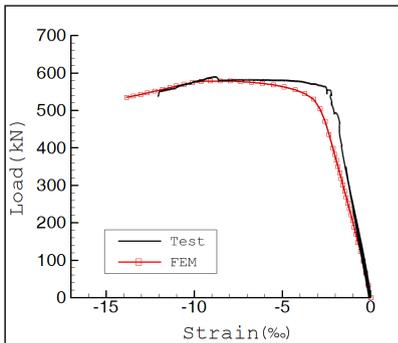


(a)

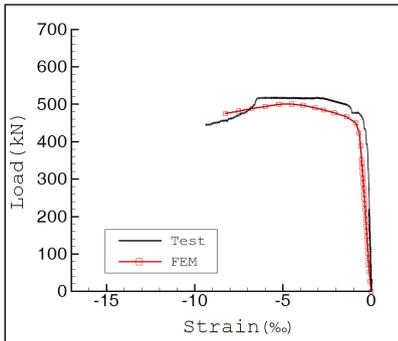


(b)

[Fig. 11] Comparison of rebar strain with test result  
(a) Composite beam B400  
(b) Composite beam B600



(a)



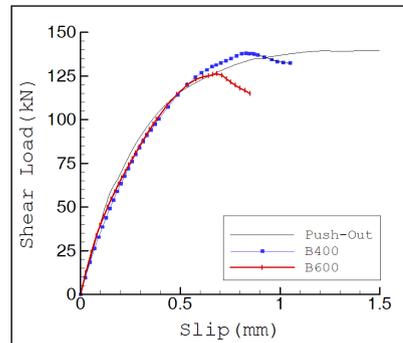
(b)

[Fig. 12] Comparison of steel beam strain with test result  
(a) Lower flange of steel beam, B400  
(b) web of steel beam, B600

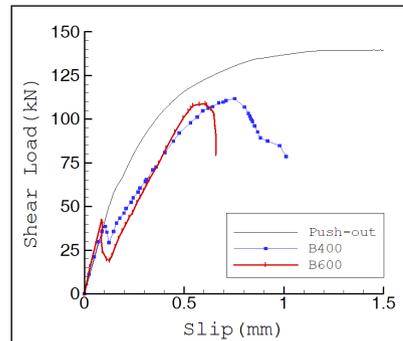
### 5. 균열거동이 합성작용에 미치는 영향

부모멘트 구간에서 스티드에 발생하는 수평전단력의 합은 슬래브에 작용하는 인장력과 균형을 이루기 때문에 스티드의 슬립거동은 철근콘크리트 슬래브의 인장거동과

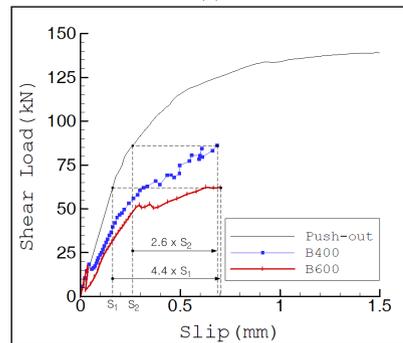
밀접한 관계를 갖게 된다. 이와 같은 관계를 구체적으로 알아보기 위해 먼저 합성보 B400과 B600에 대한 유한요소해석 결과 중 전단스티드의 거동을 Push-out 시험결과 [9, 10]를 기준으로 비교하여 보았다. 여기서, Push-out 시험 결과와 비교한 것은, Push-out 시험결과와 본 논문의 전단연결부 거동 자체를 비교하기 위함은 아니다. Push-out 시험결과로부터 얻는 하중-슬립 관계곡선을 하나의 기준으로 잡고, 본 논문의 결과값들 간의 차이를 서로 비교하기 위한 것이다.



(a)



(b)



(c)

[Fig. 13] Comparison of load-slip curve with test result  
(a) In the position of support (b) In the position of quarter span (c) In the position of 0.15L from center of span

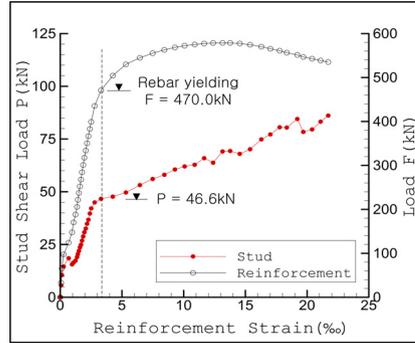
Fig. 13에 각각 지점 부근, L/4 위치, 지간 중심으로부터 0.15L 떨어진 곳에 위치한 스티드에 대해 하중-슬립곡선을 Push-out 시험결과와 비교하여 나타내었다. 먼저, 균열발생이 다른 구간에 비해 거의 없고 균열폭이 매우 작은 지점부근에 위치한 스티드의 경우 Fig. 13 (a)에 나타난 바와 같이 합성보가 최대 휨모멘트 내력에 도달하기 전 까지 하중-슬립곡선관계는 Push-out 시험에서의 슬립 거동과 유사하게 나타났다. 그러나, L/4위치 및 지간 중심으로부터 0.15L 부근에 있는 스티드의 경우 Fig. 13 (b) 및 (c)에 나타난 바와 같이 전단연결부 스티드가 부담하는 전단력은 지점 부근에 위치한 스티드가 부담하는 전단력 보다 작은 것으로 나타났다. 또한, 철근비 1% 및 2%로 설계된 합성보 B600 및 B400에 대한 Fig. 13 (c)의 해석결과를 보면 철근비가 상대적으로 적은 B600(철근비 1%)의 경우에서 스티드가 부담하고 있는 전단력이 더 작은 것으로 나타났다.

지간 중심으로부터 0.15L 부근에 있는 스티드의 슬립 강성(수평전단력-슬립 관계곡선의 기울기)은 지점 부근에서의 스티드 슬립강성 보다 작게 나타났다. 여기서는 슬립강성의 전체적인 변화양상을 비교하는 것으로도 스티드 위치에 따른 슬립강성의 차이점이 분명하므로, 수치적인 비교는 생략한다. Fig. 13 (b) 및 (c)의 해석결과에서 초기균열 시 일시적인 하중 감소가 있는 것처럼 나타난 것은, 본 논문에서 사용한 콘크리트 모델이 일정 구간에서의 연속적인 균열발생과 같은 재료의 취성적 거동을 정확히 묘사하는 데에는 어느 정도 한계가 있기 때문으로 사료된다.

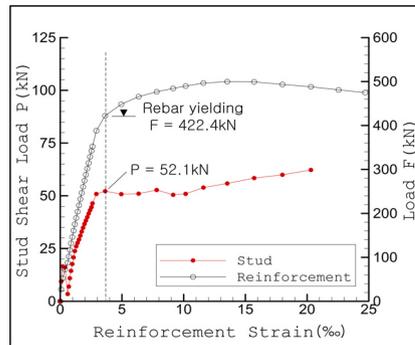
콘크리트 슬래브의 인장거동이 스티드의 합성거동에 미치는 영향을 좀 더 구체적으로 분석해 보고자 한다. 이를 위해 Fig. 14에 나타난 바와 같이 지간 중심 부근 철근의 인장변형을 변화와 스티드가 부담하는 전단력 변화를 하나의 그래프에 나타내었고, 이를 앞서 나타난 Fig. 13 (c)의 결과와 관련하여 검토해 보았다.

앞서 나타난 Fig. 13 (c)에 나타난 해석결과를 보면, 지간 중앙부근에 위치하고 있는 전단스티드의 경우 슬래브의 초기균열 발생 이후 강성이 감소했으며, Fig. 14에 나타난 바와 같이 인장철근이 항복하는 시점에서 다시 강성의 감소가 발생하였다. 이러한 강성감소 결과로 인해 Fig. 13 (c)에 나타난 바와 같이 최종 하중재하단계에서의 슬립은 합성보 B400의 경우 Push-out 시험에 비해 약 2.6 배, B600의 경우 4.4배 정도 증가한 것으로 나타났다. 또한, Fig. 13 (c)에서 알 수 있는 바와 같이 최대하중이 재하된 상태에서, 지간 중심으로부터 0.15L에 위치한 스티드는 합성보 B400(철근비 2%)에서의 경우 Push-out 시험 결과로부터 얻을 수 있는 최대내력의 68%, B600(철근비

1%)의 경우 50%에 상당하는 전단력을 부담하고 있다. 이와 같은 경향은 Fig. 13에 나타난 바와 같이 균열이 비교적 덜 발생하는 지점부 보다 균열이 집중되는 지간 중심에서 더 뚜렷함을 알 수 있다.



(a)



(b)

[Fig. 14] Variation of shear stiffness of the shear connection according to the rebar yielding  
(a) Composite beam B400  
(b) Composite beam B600

위와 같은 결과로 부터 부모멘트 구간에 놓이는 합성보 스티드의 전단합성 거동은 콘크리트 슬래브의 철근량 및 인장균열 거동에 지배를 받게 되며, 이러한 경향은 철근량이 적은 경우에서 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

현재 부모멘트 구간에서는 부분합성 설계가 허용되지 않고 있으나, [4] 및 [18]에서의 실험결과에 의하면, 구간별로 부분합성으로 설계된 합성보가 휨모멘트 내력의 큰 감소를 나타내지 않으면서도 합성설계의 효율성 및 전체 구조의 연성적 거동 측면에서 더 유리 할 수 있다는 것이 보고되어 있다. 본 논문에서 검토한 바에 의하면 균열이 집중되어 발생하는 구간에서는 스티드에 의한 전단력 부담이 다른 구간에 비해 현저히 작음을 알 수 있다. 이와 같은 보 길이 방향의 전단연결부 거동을 고려하였을 때, [4] 및 [18]에서의 실험적 연구에서도 검토된 바와 같이

균열이 집중되는 슬래브 구간에는 스티드를 배치하지 않거나, 합성율 100% 설계에 비해서 더 넓은 간격으로 배치하는 부분합성 설계가 전체 구조의 연성적 거동은 물론 합성설계의 효율성에도 더 유리할 것으로 사료된다.

## 6. 결론

본 논문에서는 합성보 철근콘크리트 슬래브의 인장거동이 스티드에 의한 전단합성작용에 미치는 영향을 유한요소해석에 의해 분석함으로써, 부모멘트를 받는 합성보의 전단연결부 거동을 해석적으로 평가하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

본 연구에서 개발한 3차원 유한요소모델로 부모멘트 구간에 놓이는 합성보의 전체 휨거동 및 슬래브와 강재보의 전단합성 작용을 효과적으로 분석할 수 있었다. 분석 결과에 따르면, 부모멘트 구간에 존재하는 스티드의 전단합성 거동은 철근콘크리트 슬래브의 인장거동에 지배를 받게 되며, 이러한 경향은 철근량이 적은 경우에서 더 뚜렷하게 나타남을 알 수 있었다.

또한, 합성율 100%로 설계된 합성보에서 슬래브의 균열이 집중된 구간에서는 다른 구간에 비해 스티드가 부담하는 전단력이 더 작게 발생함으로써, 전체 전단합성작용에 대한 이 구간에서의 기여도가 상대적으로 작다는 것을 알 수 있었고, 부분합성 설계가 합성설계의 효율성 측면에서 효과적일 수 있다는 기존 연구결과를 간접적인 방법으로 검토할 수 있었다.

부분합성으로 설계되는 합성보의 한계 합성비율, 스티드의 배치에 따른 전단연결부 거동과 합성보의 휨모멘트 내력 변화 등에 대한 구체적인 분석을 위해서는 향후 실험적, 해석적 연구가 더 필요할 것으로 사료된다.

## References

[1] R. P. Johnson, R. D. Greenwood, K. van Dalen, "Stud shear-connectors in hogging moment regions of composite beams", *The Structural Engineer*, 47, pp.345-350, 1969.

[2] R. P. Johnson, *Composite Structures of Steel and Concrete - Volume 1: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings*. Blackwell Scientific Publications, 1994.

[3] H. Bode, *European steel-concrete composite structure, construction and calculation*. Werner Verlag, 1998.

[4] G. Fabbrocino, M. Pecce, "Experimental tests on steel-concrete composite beams under negative bending", *Proc. of 2000 Annual Conf. of Canadian Society for Civil Engineering*, Montreal, Canada, 2000.

[5] A. Shariati, N. H. RamliSulong, MeldiSuhatri, M. Shariati, "Various types of shear connectors in composite structures: A review", *International Journal of Physical Sciences*, vol.7, No.22, pp.2876-2890, 2012.

[6] M. G. Navarro, J. P. Lebet, "Tests on Cracked Composite Beams for Bridges", *Theory and Practice in the structural engineering*, Ibidem-Verlag, pp.521-532, 2000.

[7] R. P. Johnson, "Some Research on Composite Structures in the U.K., 1960-1985", *Proc. of an Engineering Foundation Conference*, Irsee, Germany, June 9.-14, 1996.

[8] European Committee for Standardization(CEN), *Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures*. 1994.

[9] J. Hegger, P. Doinghaus, "High Performance Steel and High Performance Concrete in Composite Structures", *International Symposium on High Performance Concrete*, Orlando, USA, pp.494-505, 2000.

[10] G. Sedlacek, J. Hegger, G. Hanswille, *Use of High Strength Steel S460*, ECSC Research Project, RWTH-Aachen University, 2000.

[11] G. König, E. Fehling, Zur "Riss breitenbeschränkung im Stahlbetonbau", *Beton- und Stahlbetonbau* 83, Heft 6, pp.161-167, 1988.

[12] M.H. Khan, B. Saugy, "Evaluation of the Influence of some Concrete Characteristics on Nonlinear Behavior of Prestressed Concrete Reactor Vessel", *ACI Publication SP-34*, pp.159-179, 1972.

[13] G.G. Balmer, "Shearing Strength of Concrete under High Triaxial Stress-Computation of Mohr's Envelope as a Curve", *Structural Research Laboratory Report No. SP-23*, U.S. Department of the Interior, 1949.

[14] K.J. Bathe, S. Ramaswamy, "On Three- Dimensional Nonlinear Analysis of Concrete Structures", *Nuclear Engineering and Design* 52, pp.385-409, 1979. DOI: [http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493\(79\)90029-3](http://dx.doi.org/10.1016/0029-5493(79)90029-3)

[15] H. S. Shin, *A contribution to the numerical analysis of the load carrying behavior of the composite beams with high strength steel and high strength concrete*. Dissertation, RWTH- Aachen University, 2004.

[16] H. S. Shin, "Analysis of a Load Carrying Behavior of Shear Connection at the Interface of the Steel-Concrete Composite Beam", *Journal of Korean Society of Steel*

Construction, vol. 17, No. 6, pp.737-747, 2005.

[17] R.P. Johnson, *Composite Structures of Steel and Concrete, volume 1, Beams, Columns, Frames and Applications in Building*, London, 1975.

[18] H. Y. Loh, B. Uy, M. A. Bradford, "The effects of partial shear connection in the hogging moment regions of composite beams", *Journal of constructional steel research*, vol. 60, pp.897-919, 2004.

DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jcsr.2003.10.008>

---

신 현 섭(Hyun-Seop Shin)

[정회원]



- 1996년 2월 : 인하대학교 대학원 토목공학과 (공학석사)
- 2004년 9월 : 독일 아헨공대 토목공학과 (공학박사)
- 2004년 12월 ~ 현재 : 한국건설기술연구원 수석연구원

<관심분야>

토목구조, 합성구조 설계