

# 앵글형 전단 연결재의 내력평가 및 유한요소해석

이준섭<sup>1</sup> · 신경재<sup>2\*</sup> · 정승민<sup>3</sup> · 채일수<sup>4</sup>

<sup>1</sup>박사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, <sup>2</sup>교수, 경북대학교, 건설환경에너지공학부,

<sup>3</sup>석사과정, 경북대학교, 건설환경에너지공학부, <sup>4</sup>대표이사, ㈜아이에스중공업

## Strength Evaluation and Finite Element Analysis of Channel Shear Connectors

Lee, Jun-Seop<sup>1</sup>, Shin, Kyung-Jae<sup>2\*</sup>, Jung, Seung-Min<sup>3</sup>, Chae, Il Soo<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Graduate Student (Doctor Course), School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>2</sup>Professor, School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>3</sup>Graduate Student (Master Course), School of Architectural Engineering, Kyungpook National University, Daegu, 41566, Korea

<sup>4</sup>President, Innovation & Smart Heavy Industry Co. Ltd., Gyeongsan, 38449, Korea

**Abstract** - In a composite structure, shear connectors are essential for the steel frame and concrete to behave together. According to the shape and arrangement of the shear connecting material, the composition rate changes, and the internal force of the member changes accordingly. Therefore, the efficient shape and arrangement of the shear connection material are very important. Currently, studies on synthetic structures are being conducted little by little in Korea. However, the study of the detailed form of the shear connection material is insufficient. In this study, a push-out experiment of a shear connecting material used in a filled composite beam was conducted and the proof strength was evaluated. In addition, finite element analysis was performed based on the experimental results and a representative model for variable analysis was presented.

**Keywords** - Composite structure, Shear connector, Horizontal shear force, ABAQUS, Finite element analysis

### 1. 서론

하나의 재료로 건물을 건축하면, 시공의 편의성이 높아 지나, 한 재료의 특성만을 가지게 된다. 이에 각 재료들의 단점을 보완하기 위해 여러 재료들을 함께 쓰는 방법이 현재 까지 여러 방법으로 개발되고 있다. 현재 건축물에서 제일 많이 사용되는 요소는 콘크리트와 철골이다. 콘크리트의 경우 압축에는 강하지만 인장에는 약하며, 철골의 경우 강도는 강하나, 내화성과 진동에 약한 것이 대표적인 성질이다. 이 재료들의 장점을 활용하기 위해 현재는 합성구조를 많이 사용하고 있다. 합성구조의 경우 콘크리트와 철골의 장점을

활용하기 위해 두 가지 재료를 연결해줄 필요가 있고, 연결 방법으로 전단 연결재를 사용하고 있다.

전단 연결재의 주사용 목적은 콘크리트와 철골 사이의 부착 고리로 경계면에 발생하는 수평 전단력에 저항하기 위해 사용된다. 일반적으로 전단 연결재는 용접과 생산 방법이 쉬운 스티드 앵커라는 원형 나사를 사용하고 있다. 스티드 앵커의 경우 한 개당 내력이 부족하여, 많은 수의 앵커를 설치해야 하며, 충전형 합성구조의 경우 콘크리트 측압을 견디기 위한 부가적인 장치의 설치가 필수적이다. 하지만 국내의 경우 스티드 앵커에 대한 연구는 많이 진행되고 있으나, 앵글형 전단 연결재에 대한 연구는 많이 미비하다<sup>[1][4]</sup>.

본 논문에서는 합성구조에서 사용될 수 있는 앵글형 전단 연결재의 형상을 제시하고, 내력을 평가하였다. 실험체의 변수는 연결재의 높이로 하였다. 그리고 다양한 변수의 실험은 현실적으로 제한되므로 실험적 검증에 대한 대안으로 유한요소해석 모델링 기법을 제시하고 신뢰성을 검증하였다. 유한요소해석 프로그램으로는 범용 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 활용하였다<sup>[5][6]</sup>.

Note.-Discussion open until February 28, 2022. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on June 11, 2021; revised on July 02, 2021; approved on July 03, 2021.

Copyright © 2021 by Korean Society of Steel Construction

\*Corresponding author.

Tel. +82-53-950-5591 Fax. +82-53-950-5590

E-mail. shin@knu.ac.kr

## 2. 실험

### 2.1 실험계획

일반적으로 사용되는 스티드형 전단 연결재는 Fig. 1(a)와 같이 H형강의 플랜지 위에 스티드를 용접하여 설치하고 있다. 본 논문에서 사용된 앵글형 전단 연결재는 Fig. 1(b)와 같이 플랜지 위에 ㄱ형 앵글을 플랜지에 용접하여 설치하였다. 용접은 피복아크용접으로 진행되었으며, 용접 크기는 각장 6 mm로 계획되었다.

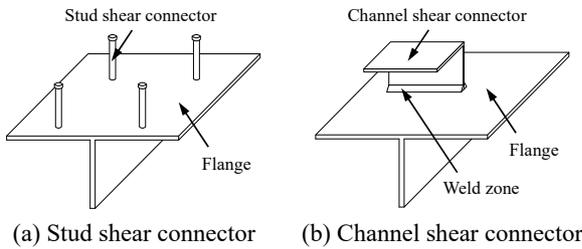


Fig. 1. Shear connector

전단 연결재에서 중요한 것은 연결재의 높이, 두께, 넓이가 있다. 본 연구에서는 실제 설계식에 제시된 변수값이 아닌 높이에 대한 영향을 분석하기 위해, 실험체의 변수를 높이로 설정하였다. 실험은 용량 3,000 kN의 만능재료시험기(UTM)에서 실시하였다. 실험체는 Eurocode를 참고하여 제작하였으며<sup>[7]</sup>, Fig. 2는 실험체 상세 도면으로 전단 연결재의 크기 및 실험체 배치를 확인할 수 있다. Table 1은 실험체 일람으로 상세 치수를 나타내고 있다.

Table 1. Test specimens

No.	Specimen	$L_c$ (mm)	$h_s$ (mm)	$t_p = t_w$ (mm)
1	S-300-40-1	300	40	6
2	S-300-40-2			
3	S-300-40-3			
4	S-300-60-1		60	
5	S-300-60-2			
6	S-300-60-3			

$L_c$ : length of angle;  $h_s$ : height of angle;  $t_p = t_w$ : thickness of angle

Fig. 3는 실험체 철골부 모습으로 H형강의 보에 전단 연결재가 연결된 형태를 하고 있다. 전단 연결재의 용접 길이는 선행연구와의 비교를 위해 아래와 같이 진행하였다. Fig. 4는 콘크리트 타설 후 실험체의 모습이다.

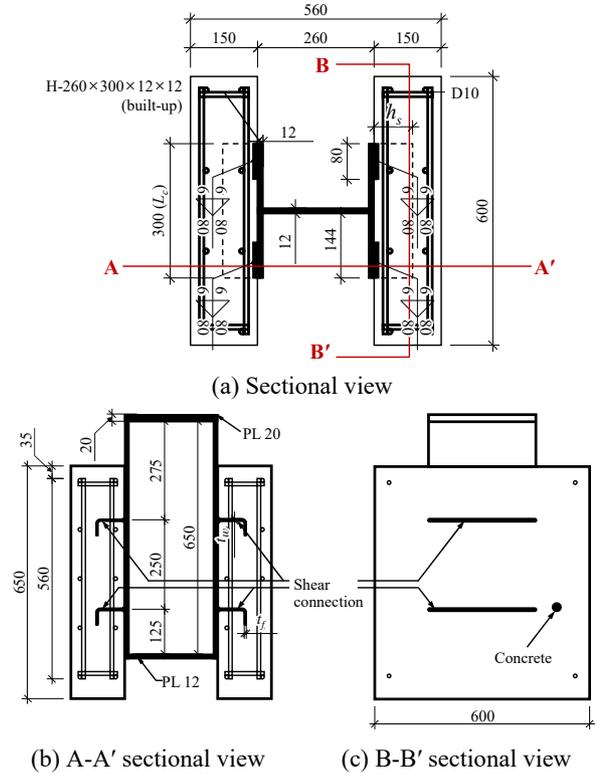


Fig. 2. Specimen floor plan



Fig. 3. Steel part of specimen



Fig. 4. Specimen after concrete pouring

## 2.2 재료시험

실험체에 사용된 재료에 대한 재료시험을 실시하여 재료의 강도를 측정하였다. 강재는 금속재료 인장 시험편(KS B 0801)에서 판모양 정형 시험편 5호에 따라 제작하고, 금속재료 인장시험방법(KS B 0802)을 따라 시험을 실시했다.<sup>[8],[9]</sup> 콘크리트의 경우 콘크리트 압축강도시험방법(KS F 2405)이 제시하는 방법에 준하여 진행하였다.<sup>[10]</sup> Fig. 5는 강재 시험편과 콘크리트 재료 시험편이다.



Fig. 5. Material specimens

Table 2는 재료시험 결과이다. 전단 연결재로 사용된 6t 강재의 경우 평균 항복강도 270.72 MPa, 인장강도 405.87 MPa로 나타났으며, 연신율은 평균 37.89%로 나타났다. H형강에 사용된 12t 강재의 경우 평균 항복강도 342.70 MPa, 인장강도 512.71 MPa로 나타났으며, 연신율은 평균 34.75%로 측정되었다. 모든 강재가 KS규격을 만족하는 것으로 나타났다<sup>[11],[12]</sup>. 콘크리트의 경우 28일 양생을 기준으로 평균 강도 25.99 MPa로 측정되었다.

Table 2. Results of material test

Coupon	No.	<i>t</i> (mm)	<i>F<sub>y</sub></i> (MPa)	<i>F<sub>u</sub></i> (MPa)	Elongation (%)
SS235	1	6.0	275.42	411.86	35.19
	2		268.62	401.18	39.03
	3		268.12	404.56	39.45
SM275	4	12.0	347.04	518.71	32.68
	5		340.90	512.03	33.92
	6		340.17	507.40	37.65
Concrete	<i>f<sub>ck</sub></i> = 25.99 MPa				

*t*: thickness of coupon; *F<sub>y</sub>*: yield strength of steel; *F<sub>u</sub>*: tensile strength of steel; *f<sub>ck</sub>*: compressive strength of concrete

## 2.3 Push-out 실험

실험은 실험체를 3,000 kN의 만능재료시험기에 설치하

고, Fig. 6와 같이 4개의 LVDT를 통해 전단 연결재의 변위를 측정하였다. 실험방법은 Eurocode를 참고하여 진행하였으며, Eurocode에는 예상 최대하중의 5% - 40%로 25회 반복 가력을 진행하고 본 가력을 진행해야 한다고 명시되어 있다. 가력 속도는 1.5 mm/min로 하였으며, 최대 하중의 80%로 감소하였을 때 실험을 종료하였다.

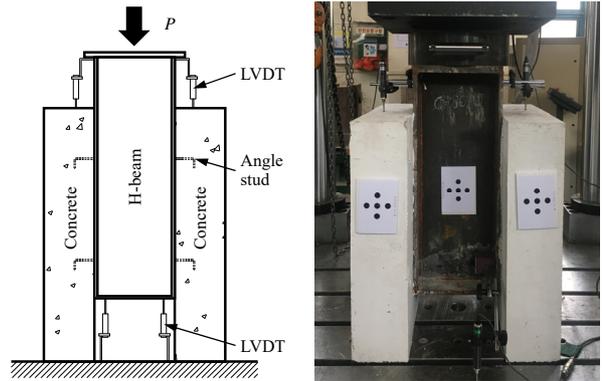


Fig. 6. Test set-up

## 2.4 실험결과

Table 3는 실험결과를 표로 정리한 것이다. 본 연구에서는 Eurocode를 참고하여 *P<sub>Rk</sub>*를 평가하였다. *P<sub>Rk</sub>*는 최대 강도의 90% 강도로 이때의 변위를 통해 연성능력(*δ<sub>u</sub>*)을 평가한다. 또한 연성능력의 90%를 특성연성능력(*δ<sub>uk</sub>*)이라고 평가한다. Eurocode에서는 전단 연결재의 특성연성능력을 6 mm로 규정하고 있어, 본 실험에선 전단 연결재의 높이가 40 mm인 경우 이에 관한 규정을 통과하지 못하는 것으로 나타났다<sup>[7]</sup>. 실험체의 파괴 모드는 전단 연결재 부위에 균열이 집중적으로 발생하여, 콘크리트 탈락으로 인한 강도 저감으로 판단된다.

Table 3. Results of push-out test

No.	Specimen	<i>Q<sub>u</sub></i> (kN)	<i>P<sub>Rk</sub></i> (kN)	<i>δ<sub>u</sub></i> (mm)	<i>δ<sub>uk</sub></i> (mm)
1	S-300-40-1	781.89	703.70	5.09	4.58
2	S-300-40-2	891.58	802.42	5.96	5.36
3	S-300-40-3	910.96	819.86	7.01	6.31
4	S-300-60-1	1,197.73	1,077.96	9.30	8.37
5	S-300-60-2	1,171.53	1,054.38	10.66	9.59
6	S-300-60-3	1,346.90	1,212.21	10.34	9.31

*Q<sub>u</sub>*: ultimate strength of the specimen; *P<sub>Rk</sub>* = 0.9*Q<sub>u</sub>*; *δ<sub>u</sub>*: displacement at *P<sub>Rk</sub>*; *δ<sub>uk</sub>* = 0.9*δ<sub>u</sub>*

Eurocode에서는 동일한 표본에 대해 총 3번의 실험을 진행하여 평균 강도의 편차가 10%를 초과하지 않는 경우를 신뢰하고 있다<sup>[7]</sup>. 본 실험결과 높이가 40 mm인 실험체의 경우 편차가 86.15 kN, 60 mm인 실험체의 경우 123.87 kN으로 위와 같은 사항을 만족하는 것으로 나타났다.

Fig. 7은 실험결과와  $P_{Rk}$ 를 나타낸다. 전단 연결재의 높이가 증가할수록 최대 강도가 증가하는 것으로 나타났다. 실험체들의 평균 최대 강도는 S-300-40의 경우 861.48 kN, S-300-60의 경우 1,238.72 kN으로 측정되었다.

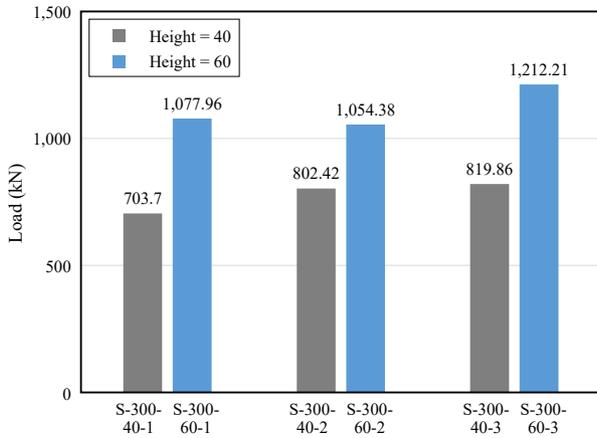


Fig. 7. Bar chart of  $P_{Rk}$  results

### 2.5 이론 검토

실험결과에 대한 이론적인 검토를 위해 현재 존재하는 다양한 전단 연결재의 식에 대한 고찰을 진행하였다. 본 논문에서는 ANSI/AISC 360<sup>[13]</sup>(이하 AISC), Eurocode<sup>[7]</sup>, CSA S16<sup>[14]</sup>(이하 CSA), Pashan<sup>[15]</sup> 식으로 계산을 진행하였다. 실험 결과 전단 연결재의 높이에 따라 강도가 변화하는 것을 확인하였다. 하지만 Eurocode와 Pashan의 식을 제외하곤

전단 연결재의 높이가 변수로 존재하지 않는다. 현재 국내 설계식의 경우 AISC를 바탕으로 진행되고 있어, 추후 연구 및 고찰을 통해 설계식의 수정이 필요하다고 사료된다.

$$Q_{n,AISC} = 0.3(t_f + 0.5t_w)L_c\sqrt{f_{ck}E_c} \quad (1)$$

$$Q_{n,Eurocode} = 10bh^{\frac{3}{4}}f_{ck}^{\frac{2}{3}}/\gamma_v \quad (2)$$

$$Q_{n,CSA} = 36.5(t_f + 0.5t_w)L_c\sqrt{f_{ck}} \quad (3)$$

$$Q_{n,Pashan} = (336t_w^2 + 5.24L_cH_c)\sqrt{f_{ck}} \quad (4)$$

여기서,  $Q_n$ : 전단 연결재의 공칭강도(N)

$t_f$ : 전단 연결재의 플랜지 두께(mm)

$t_w$ : 전단 연결재의 웹 두께(mm)

$L_c$ : 전단 연결재의 용접길이(mm)

$f_{ck}$ : 콘크리트의 강도(MPa)

$E_c$ : 콘크리트의 탄성계수(MPa)

$H_c$ : 전단 연결재의 높이(mm)

$b$ : 전단 연결재의 길이(=  $L_c$ , mm)

$h$ : 전단 연결재의 높이(mm)

$\gamma_v$ : 부분안전계수(= 1.25)

Table 4는 이론 계산과 실험결과를 비교한 것이다. 이론 계산결과가 실험결과보다 상당히 낮은 값으로 계산되어, 보수적으로 나타나는 것을 확인할 수 있다. 설계값들의 표준편차와 평균을 비교하였을 때, AISC와 CSA가 특히 보수적인 것을 확인할 수 있었다. 이 중 Pashan이 제시한 식이 제일 실험과 유사한 결과를 얻었다는 것으로 판단된다. 이를 토대로 현재 앵글형 전단 연결재의 경우 설계식의 정확성이 많이 떨어져 경제적인 설계가 이뤄지지 않는다고 판단된다.

Table 4. Comparison of test value and theoretical results

No.	Specimen	$Q_u$ (kN)	$Q_{n,AISC}$ (kN)	$\frac{Q_u}{Q_{n,AISC}}$	$Q_{n,Eurocode}$ (kN)	$\frac{Q_u}{Q_{n,Eurocode}}$	$Q_{n,CSA}$ (kN)	$\frac{Q_u}{Q_{n,CSA}}$	$Q_{n,Pashan}$ (kN)	$\frac{Q_u}{Q_{n,Pashan}}$
1	S-300-40-1	781.89	1,212.64	0.64	774.83	1.01	963.44	0.81	836.45	0.93
2	S-300-40-2	891.58		0.74		1.15		0.93		1.07
3	S-300-40-3	910.96		0.75		1.18		0.95		1.09
4	S-300-60-1	1,197.73	1,050.20	0.99	1,050.20	1.14	963.44	1.24	1,143.81	1.05
5	S-300-60-2	1,171.53		0.97		1.12		1.22		1.02
6	S-300-60-3	1346.9		1.11		1.28		1.40		1.18

### 3. 유한요소해석

#### 3.1 해석모델 일반사항

해석 연구에서는 범용 비선형 유한요소해석 프로그램인 ABAQUS를 사용하여 진행하였다. 본 논문에서는 현재 다양하게 제시된 콘크리트 모델을 참고하여 전단 연결재에 대한 해석모델을 제시하였다.

콘크리트와 철골의 해석요소는 8개의 절점을 가진 저감적분요소인 솔리드 요소(C3D8R)를 이용하였다. 콘크리트의 경우 해석시간이 현저히 증가하므로, 저감적분요소를 사용하여 해석속도를 증가시켰다. 경계조건은 실제 실험과 같게 UTM 베드와 철판을 삽입하여 마찰계수를 입력하여 표현하였으며, 메쉬의 크기는 전체적으로 20으로 하였으며, 전단 연결재가 있는 부위에는 10으로 지정하였다. 접촉 요소는 general contact 요소를 사용하였으며, 실험체 내의 접촉면에는 모두 입력하였다. 접촉면의 특성으로 법선 방향은 hard contact 기능을 사용하여 압축에는 관통되지 않고 인장에 의해 분리될 수 있게 하였다. 그리고 접선방향은 penalty 기능을 이용하여 마찰력에 대한 저항을 철과 콘크리트의 마찰계수는 0.65로 입력하여 해석을 진행하였다<sup>[16]</sup>.

콘크리트에 매입되는 철근의 경우 트러스 요소로 모델링하였으며, 콘크리트와의 함께 거동시키기 위해 embedded element 기능을 활용하여 콘크리트와 일체화시켰다.

유한요소해석 방법은 크게 내연적(implicit), 외연적(explicit)인 방법으로 나누어진다. 일반적으로 내연적 방법이 매 단계마다 반복 계산을 진행하여, 해의 정확성이 높은 것으로 판단된다. 하지만 해석의 시간과 수렴성이 높지 않아 본 연구에서는 결과를 분석하기에 적합하지 않다고 판단하였다. 이에 본 연구에서는 해석의 수렴성이 높은 외연적 방법을 사용하여 해석을 진행하였다.

#### 3.2 콘크리트 해석모델

콘크리트의 응력-변형률의 경우 인장과 압축을 모두 표현하며, 최대 응력 이후 콘크리트의 응력 감소를 표현할 수 있는 concrete damaged plasticity 기능을 활용하였으며, 입력한 값은 Table 5와 같다.

콘크리트의 damage parameter(손상 변수)는 콘크리트의 탄성 구간 이후 강도 감소 시 콘크리트의 탄성계수를 변환시키는 계수로, ABAQUS에서 제시하는 단축 주기 거동을 참고하여 계산을 진행하였다.

콘크리트의 탄성계수( $E_c$ )는 ACI 318의 식 (5)를 참고하여 계산하였으며, 콘크리트의 푸아송비는 0.2를 활용하였다<sup>[17]</sup>.

$$E_c = 4700\sqrt{f_{ck}} \quad (5)$$

여기서,  $E_c$ : 콘크리트의 탄성계수(MPa)

$f_{ck}$ : 콘크리트의 압축강도(MPa).

Table 5. Material properties of concrete

Concrete compressive behavior		Concrete compression damage		Concrete tensile behavior		Concrete tension damage	
Yield stress (MPa)	Inelastic strain	Damage parameter	Inelastic strain	Yield stress (MPa)	Cracking strain	Damage parameter	Cracking strain
10.39	0	0	0	2.60	0	0	0
11.37	4.97E-05	0	4.97E-05	0.05	9.76E-04	0.98	9.76E-04
15.01	2.50E-04	0	2.50E-04	-	-	-	-
18.13	4.50E-04	0	4.50E-04	-	-	-	-
20.73	6.50E-04	0	6.50E-04	-	-	-	-
22.81	8.50E-04	0	8.50E-04	-	-	-	-
24.37	1.05E-03	0	1.05E-03	-	-	-	-
25.41	1.25E-03	0	1.25E-03	-	-	-	-
25.93	1.45E-03	0	1.45E-03	-	-	-	-
25.99	1.55E-03	0	1.55E-03	-	-	-	-
13.00	3.36E-03	0.5	3.36E-03	-	-	-	-
5.20	4.44E-03	0.8	4.44E-03	-	-	-	-

콘크리트 응력-변형률 관계는 전단 연결재의 경우 콘크리트의 탈락이 발생하여 강도가 감소하는 경우가 많으므로, 콘크리트의 강도 저감을 표현하고 있는 Kent-Park의 식에 따라 적용하였다. 해당 식은 식 (6), 식 (7)과 같으며 그 형상은 Fig. 8과 같다<sup>[18],[19]</sup>.

$$\sigma_c = f_{ck} \left[ 2 \frac{\epsilon_c}{0.002} - \left( \frac{\epsilon_c}{0.002} \right)^2 \right] \quad (6)$$

$$\epsilon_{50u} = \frac{3 + 0.0285 f_{ck}}{14.2 f_{ck} - 1000} \quad (7)$$

여기서,  $\epsilon_c$ : 콘크리트의 압축변형률.

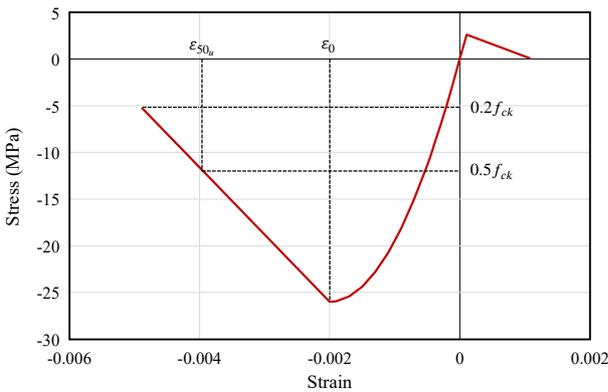


Fig. 8. Proposed stress-strain relationship (Kent-Park)

또한 콘크리트 압축과 인장의 특성과 손상에 대한 변수는 기본적으로 ABAQUS의 기본값을 활용하였다. Dilation angle은 소성 유동을 정의하는 변수로 38을 입력하였다. Eccentricity는 콘크리트의 압축강도와 인장강도의 비로 계산되는 이심률로 0.1을 사용하였다.

이축압축강도와 일축압축강도 비( $f_{b0}/f_{c0}$ )는 실험결과를 바탕으로 계산할 수 있으나, 본 연구에서는 ABAQUS에서 제시된 기본값 1.16을 사용하였다.  $K$ 는 콘크리트의 소성 모델의 항복면을 정의하는 변수로  $0.5 \leq K \leq 1.0$ 의 값 분포를 가지고 있는 것으로 기존의 연구를 통해 알려져 있다. 본 연구에서는 ABAQUS에서 제시된 기본값 2/3을 입력하였다.

Viscosity parameter는 viscosity를 변경하여 해석의 수렴성을 개선할 수 있다. 하지만 본 해석에서는 해석의 수렴성이 크게 낮아지지 않아 0을 사용하였다.

### 3.3 철골부 해석모델

철골부의 경우 ABAQUS에서는 재료시험을 바탕으로 산정된 공칭응력( $\sigma_{nom}$ )-변형률( $\epsilon_{nom}$ )을 진응력( $\sigma_{true}$ )-진소성변

형률( $\epsilon_{ln}^{pl}$ )로 변환하여 입력하여야 한다. 식 (8), 식 (9)를 통해 계산 후, ABAQUS에 입력을 하였다.

$$\sigma_{true} = \sigma_{nom}(1 + \epsilon_{nom}) \quad (8)$$

$$\epsilon_{ln}^{pl} = \ln(1 + \epsilon_{nom}) - \sigma_{true}/E \quad (9)$$

여기서,  $\sigma_{true}$ : 진응력(MPa)  
 $\sigma_{nom}$ : 공칭응력(MPa)  
 $\epsilon_{nom}$ : 공칭변형률  
 $\epsilon_{ln}^{pl}$ : 진소성변형률  
 $E$ : 탄성계수(MPa).

### 3.4 유한요소해석 결과

Fig. 9은 앵글형 전단 연결재의 모델링 형상을 나타내고 있다. 본 실험체는 대칭적인 형태이므로, 실험체의 1/2만 모델링하여 해석을 진행하였다. Fig. 9(a)는 철골부의 형상을 나타내고 있으며, Fig. 9(b)는 콘크리트부를 나타내고 있다.

실제 실험에서는 콘크리트와 철골부의 접촉 효과를 제거하기 위해 25회 반복 가력을 실시하였다. 하지만 유한요소해석모델에서는 콘크리트와 철골 사이의 접촉은 표현하지 않았으므로, 단순 가력으로 해석을 진행하였다.

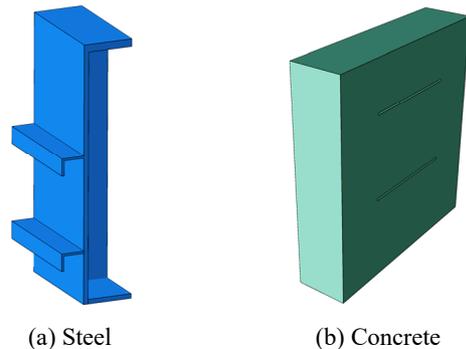


Fig. 9. FEA modeling

Fig. 10은 콘크리트 부분의 해석결과로 최대 하중 도달 후 추가적인 동일 변위(= 2 mm)가 발생했을 때 인장에 의한 손상정도(DAMAGET)와 압축에 의한 손상정도(DAMAGEC)를 나타낸 것이다. Fig. 11은 실제 실험의 결과 사진을 나타낸 것이다. 두 그림의 비교를 통해 해석한 결과 콘크리트의 균열 부분이 전단 연결재 부분에 집중적으로 나타난 것을 확인할 수 있었고, 전체적인 균열 양상은 실험결과 유사함에 따라 구축한 해석모델은 실제의 거동을 효과적으로 나타냈다고 판단된다.

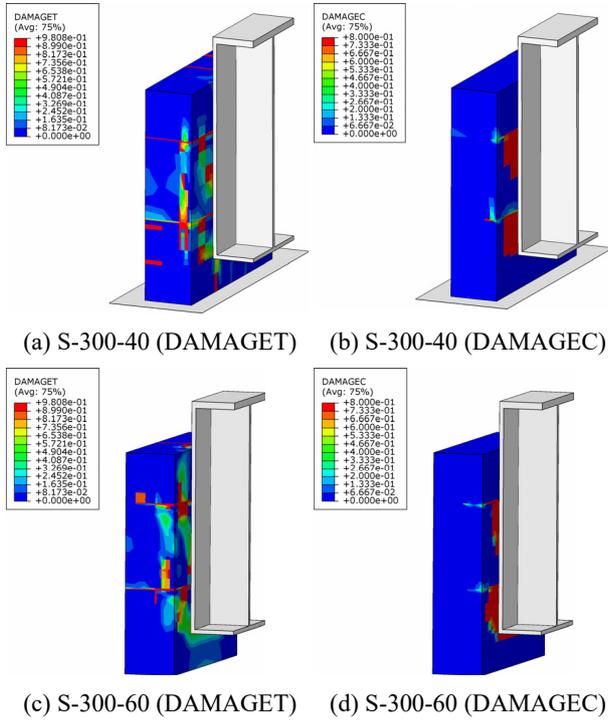
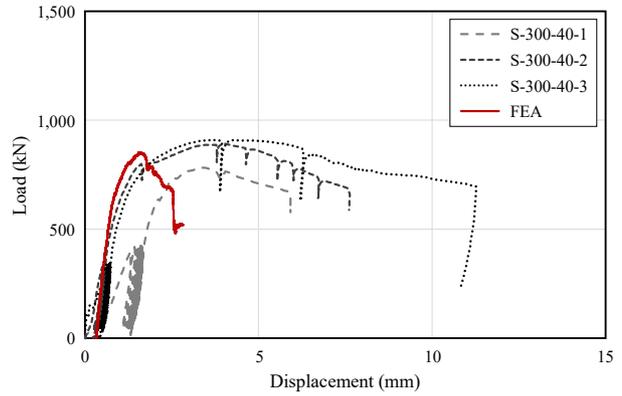
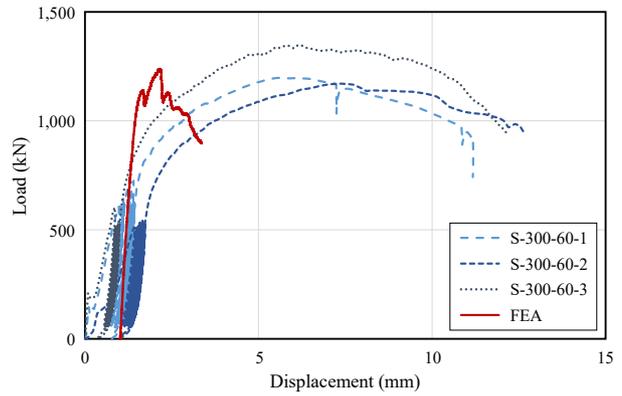


Fig. 10. FEA results

로 인해 발생하는 것으로 사료되므로, 이를 나타내지 못한 것으로 보인다.



(a) S-300-40



(b) S-300-60

Fig. 12. Load-displacement curve

Table 6는 실험결과와 유한요소해석결과의 최대 강도를 비교한 것이다. 실제 실험의 최대 강도와 전산 해석의 최대 강도의 비가 S-300-40의 경우 평균 1.01%, S-300-60의 경우 평균 1.00%로 나타났다. 이를 통해 전단 연결재의 강도를 예상하기에 충분하다고 판단된다.



Fig. 11. Experiment results

Fig. 12는 실험결과와 해석결과를 비교한 하중-변위 곡선이다. 초기 강성의 경우 실제 실험과 유사한 결과를 보이는 것으로 보였다. 하지만 초기 강성 이후 그래프의 형상은 실험결과가 더 높은 변형능력을 나타냈다. 이는 실제 실험의 경우 콘크리트의 균열이 발생하면서, 콘크리트의 탈락이 일어난다. 이를 통해 변위증가폭이 증가하게 되어, 변형능력이 상당히 증가한 것으로 판단된다. 하지만 유한요소해석에서는 콘크리트의 강도가 줄어드는 것은 표현할 수 있으나, 콘크리트의 균열 발생 후 콘크리트가 탈락하는 것은 표현하지 못하고 있다. 이에 변형능력의 경우 콘크리트의 탈락으

Table 6. FEA results

No.	Specimen	$Q_u$ (kN)	$Q_{max,FEA}$ (kN)	$\frac{Q_u}{Q_{max,FEA}}$
1	S-300-40-1	781.89	851.30	0.92
2	S-300-40-2	891.58		1.05
3	S-300-40-3	910.96		1.07
4	S-300-60-1	1,197.73	1,239.44	0.97
5	S-300-60-2	1,171.53		0.95
6	S-300-60-3	1,346.90		1.09

본 논문에서는 Eurocode를 바탕으로 전단 연결재에 대한 평가를 진행하였다. 이에 본 유한요소해석모델을 통해 제시되지 않는 여러 형상의 전단 연결재의 강도를 예상하는 데 사용이 가능할 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 논문에서는 앵글형 전단 연결재에 대한 가력실험을 실시하고, 다양한 설계식에 대한 평가를 진행하였다. 그리고 전산해석을 통한 유한요소해석모델을 제시하여, 강도 측면의 신뢰성 확보 모델을 제안하였다.

- (1) Eurocode를 활용하여 앵글형 전단 연결재의 내력 평가에 대해 진행하였다. 본 논문에서 형태를 가지는 앵글형 전단 연결재의 경우 높이가 40 mm인 실험체의 경우 연성능력이 통과하지 못하였다, 이를 통해 위와 같은 형태의 전단 연결재를 사용할 때 높이 제한이 있어야 한다고 판단된다.
- (2) 앵글형 전단 연결재의 설계식은 현재 다양하게 제시되어 있다. 하지만 그 중 대다수에는 전단 연결재의 높이에 대한 기준이 없다. 본 연구에서는 Pashan의 식이 강도비가 제일 균등한 분포를 보이므로, 앵글형 전단 연결재의 설계식으로 제일 적합하다고 판단된다.
- (3) ABAQUS를 활용한 전산해석을 통해 앵글형 전단 연결재의 모델링 기법에 관하여 서술하였다. 실제 실험과의 강도비가 0.92% - 1.09%로 해석기법이 앵글형 전단 연결재의 강도를 예상하는 데 적합하다고 판단된다.
- (4) 콘크리트의 탈락으로 인한 변형능력에 대한 모델은 아직 부족하다고 판단된다. 이에 추가적인 연구를 통해 콘크리트 탈락에 대한 변형능력 증가를 표현할 수 있는 방법에 관한 연구가 필요하다.
- (5) 본 연구를 통해 강도 측면의 신뢰성 확보 모델을 구축하였다. 추가적인 연구를 통해 다양하게 제시된 설계식의 증명과 새로운 설계식의 제안이 가능할 것이라 사료된다.

#### 감사의 글

이 성과는 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로

로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구입니다(NRF-2020R1A6A3A13068506).

이 성과는 2020년도 경북대학교의 재원으로 건축안전기술연구소 지원을 받아 수행된 연구입니다.

#### 참고문헌(References)

- [1] Kim, S.B., and Kim, S.S. (2006) An Evaluation on the Shear Strength for Different Forms of Shear Connector in T-Type Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.18, No.2, pp.279-288 (in Korean).
- [2] Kim, Y.J., Bae, J.H., Ahn, T.S., and Jang, D.W. (2014) Push-out Test on Welded Angle Shear Connectors Used in Composite Beams, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.26, No.3, pp.155-167 (in Korean).
- [3] Ahn, H.J., Jung, I.Y., Kim, Y.J., and Hwang, J.S. (2015) Shear Resistance of BESTOBEAM Shear Connector According to the Length, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.27, No.5, pp.483-491 (in Korean).
- [4] Lee, M.-K., Shin, K.-J., Lee, J.-S., and Chae, I.-S. (2019) Push-out Test on Evaluation of Shear Strength Using Angle Shear Connectors, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.31, No.6, pp.413-421 (in Korean).
- [5] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2016) *Abaqus/CAE User's Guide*, DSS, USA.
- [6] Dassault Systèmes Simulia Corp. (2016) *Abaqus Analysis User's Guide*, DSS, USA.
- [7] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building* (EN 1994-1-1: 2004), Belgium.
- [8] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [9] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Method of Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0802: 2003), Korea (in Korean).
- [10] Korean Agency for Technology and Standards (2017) *Standard Test Method for Compressive Strength of Concrete* (KS F 2405: 2010), Korea (in Korean).
- [11] Korean Agency for Technology and Standards (2018)

- Rolled Steels for Welded Structures* (KS D 3515: 2018), Korea (in Korean).
- [12] Korean Agency for Technology and Standards (2018) *Rolled Steels for General Structure* (KS D 3503: 2018), Korea (in Korean).
- [13] American Institute of Steel Construction (2016) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-16), USA.
- [14] Canadian Standards Association (2014) *Design of Steel Structures* (CSA S16-14), Canada.
- [15] Pashan, A. (2006) *Behavior of Channel Shear Connectors: Push-out Tests*, Master's Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- [16] Rabbat, B.G., and Russell, H.G. (1985) Friction Coefficient of Steel on Concrete or Grout, *Journal of Structural Engineering*, American Society of Civil Engineers, Vol.111, No.3, pp.505-515.
- [17] American Concrete Institute (2014) *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-14), USA.
- [18] Hognestad, E. (2006) *A Study of Combined Bending and Axial Load in Reinforced Concrete Members* (University of Illinois Engineering Experiment Station, Bulletin Series No. 399), University of Illinois, Urbana, USA.
- [19] Kent, D.C., and Park, R. (1971) Flexural Members with Confined Concrete, *Journal of the Structural Division*, American Society of Civil Engineers, Vol.97, No.7, pp.1969-1990.

---

**요 약**: 합성구조에서 전단 연결재는 철골조와 콘크리트가 함께 거동하기에 필수적인 요소이다. 전단 연결재의 형상과 배치에 따라 합성율은 변화하고 이에 부재의 내력이 변화하게 된다. 이에 전단 연결재의 효율적인 형상과 배치가 매우 중요하다. 현재 국내에서는 합성구조에 대한 연구가 조금씩 진행되고 있다. 하지만 전단 연결재의 상세한 형태에 대한 연구는 미비하다. 본 연구에서는 충전형 합성보에 사용되는 전단 연결재의 푸쉬아웃 실험을 실시하고 내력을 평가하였다. 그리고 실험결과를 바탕으로 유한요소해석을 진행하고 이를 증명하여 변수해석모델을 제시하고자 한다.

**핵심용어**: 합성구조, 전단 연결재, 수평 전단력, ABAQUS, 유한요소해석

---