

합성보에 적용된 앵글 전단연결재의 Push-out 실험

김영주^{1*} · 배재훈² · 안태상³ · 장동운⁴

¹수석연구원, DRB동일, 건설기술연구소 ²선임연구원, DRB동일, 건설기술연구소 ³소장, DRB동일, 건설기술연구소
⁴부장, 쌍용건설, 건축기술부

Push-out Test on Welded Angle Shear Connectors used in Composite Beams

Kim, Young Ju^{1*}, Bae, Jae Hoon², Ahn, Tae Sang³, Jang, Dong Woon⁴

¹Senior Researcher, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

²Researcher, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

³Director, Construction Engineering Center, DRB Holding Co., Ltd., Seoul, 150-903, Korea

⁴General Manager, Construction Technology Development Dept., SsangYong E&C, Seoul, 136-726, Korea

Abstract - Steel-concrete composite beam has been used for a considerable time in building construction. An essential component of a composite beam is the shear connection between the steel section and the concrete slabs, which is provided by mechanical shear connectors. A variety of shapes and devices have been in use as shear connectors. This study summarizes the results of an experimental investigation involving the testing of push-out specimens with angle shear connectors. All of 22 push-out specimens were designed to study the effect of a number of parameters on the shear capacity of angle shear connectors such as the height of the angle connector, the length of welding, and the pitch of angles. Based on the test results, a design equation was developed for predicting the shear strength of angle shear connectors.

Keywords - Composite beam, Push-out test, Angle shear connector, Shear capacity, Design equation

1. 서론

일반적으로 합성보는 바닥판 내에 철골보를 삽입하여 시공하거나 철골보와 슬래브의 합성효과를 이용하여 동일한 스펠에서 부재의 휨강성이 증가함으로, 적재하중에 의한 처짐이 적고 진동이나 충격을 받는 보에 특히 유리하다. 이와 같은 장점으로 인해 국내·외에서 합성보에 대한 연구를 진행하며 다양한 형태의 합성보를 개발하고 있다^{[1],[2],[3]}. 합성보의 구조적 강성 및 강도가 충분히 발휘되기 위해서는

전단연결재에 의하거나 또는 부재간의 부착력에 의한 전단 합성작용이 필수적이다. 전단연결재의 성능은 주로 Push-out 실험방법으로 평가하는데, 이는 콘크리트 슬래브와 철골보 사이에 전단력을 직접적으로 평가할 수 있을 뿐만 아니라 실험방법도 편리하기 때문이다. 따라서 국내·외적으로 Push-out 실험을 통해서 다양한 전단연결재의 성능을 평가해 오고 있다^{[4],[5],[6],[7],[8]}.

본 연구에서는 Fig. 1과 같이 U형단면 상부에 앵글을 용

Note.-Discussion open until December 31, 2014. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 4, 2014; revised April 1, 2014; approved on May 14, 2014.

Copyright © 2014 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-2168-9141 Fax. +82-2-2672-6423

E-mail. kim.young.ju@drbworld.com

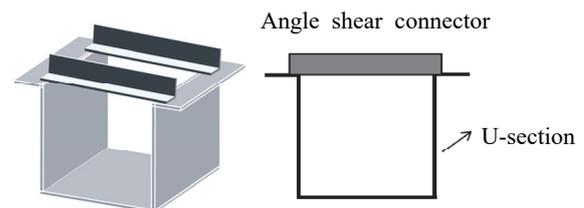


Fig. 1. U-shaped section with angle shear connectors

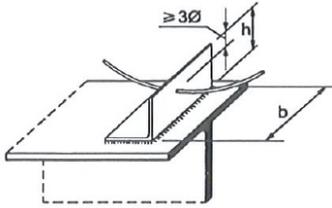


Fig. 2. Angle shear connector as used in europe^[9]

접합 철골단면에 U형단면 내부와 상부 슬래브에 콘크리트를 타설하여 철골과 콘크리트의 합성효과를 평가하고자 한다. 여기서 앵글은 전단연결재로의 역할뿐만 아니라 간격 유지재로의 역할도 기대된다. Eurocode 4^[9]서는 Fig. 2와 같이 H형강보 상부플랜지에 앵글을 용접하여 전단연결재로 사용하도록 상세와 설계식을 제시하였다. 그러나 본 연구에서 대상으로 하고 있는 U형단면보는 상부플랜지에만 콘크리트와 접촉하는 H형강과 달리 U단면 내부의 큰 면적에 걸쳐서 접촉하고 파괴모드도 다를 것으로 판단되기 때문에 그 거동 및 성능도 많이 다를 것으로 예상되어 기존 Eurocode에서 제안된 식이외의 다른 평가방법이 필요할 것으로 판단된다.

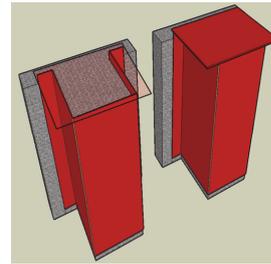
따라서 본 연구에서는 U형단면보의 상부에 용접 설치된 앵글의 전단성능을 평가하기 위해서 Push-out 실험을 실시하고 그 결과를 바탕으로 하여 Eurocode의 제안식을 기초로 새로운 설계식을 도출하고자 한다. 또한 스티드가 전단연결재로 사용된 실험체와의 비교를 통해서 앵글 전단연결재의 전단성능을 상대적으로 평가하고자 한다.

2. 실험프로그램

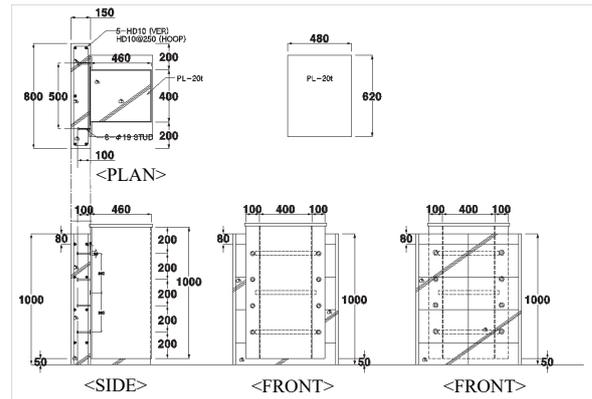
2.1 실험체

Push-out 실험체의 기본형상은 Fig. 3(a)와 같다. 합성보의 철골단면은 U형이며, 단면의 상부에 앵글을 용접하여 간격유지재와 전단연결재의 역할을 동시에 달성하도록 계획되었다. 전단력의 설계 시 필요 전단력은 인장을 받는 강재와 압축을 받는 콘크리트의 응력이 충분히 발휘되도록 전단력을 산정한다. 즉, 인장측의 강재가 항복했을 때의 내력 ($A_s F_y$)과 유효폭을 고려한 압축을 받는 콘크리트의 등가응력 ($0.85 f_{ck} A_c$) 중 작은 값을 기준으로 소요 전단력을 산정한 뒤, 이 전단력 이상의 내력을 발휘하도록 전단연결재의 소요개수를 산정하고 일정구간에 배치한다.

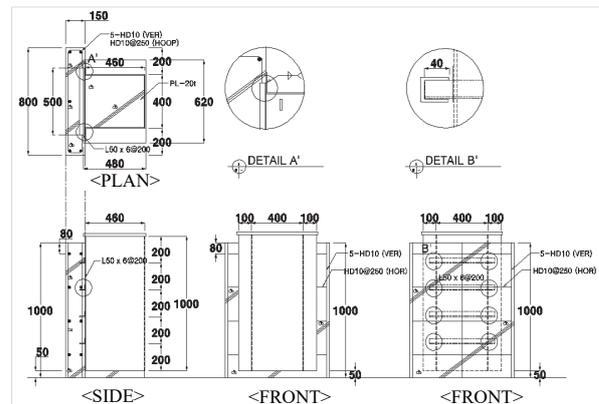
실험체 상세는 Fig. 3(b)~(c)에 나타내었다. 보의 철골단면은 6mm의 강판으로 제작되었으며, 넓이가 400mm, 높이가 460mm로 되어있다. 실험체의 높이는 1000mm이고, 슬래브는 두께 150mm, 넓이가 800mm로 계획되었다. 또한, 슬래브의 성능확보를 위해서 D10철근을 수직 및 수평으로 배근하여 보강하였다. Table 1은 실험체일람을 나타낸 것이다. 총 22개의 실험체가 계획되었고, 전단연결재에 따라 4개의 시리즈로 구분하였다. 주요 실험변수는 앵글의 크기(L-30×30×3, L-40×40×5, L-50×50×6), 용접



(a) 3D view of push-out specimen



(b) specimen with stud connectors



(c) specimen with angle shear connectors

Fig. 3. Push-out test specimen

길이(20mm, 30mm, 40mm), 앵글의 피치(200mm, 300mm) 등 이다. 여기서 용접의 길이는 Fig. 3(c)에 나타낸 것과 같이 앵글과 평행한 용접의 길이를 나타낸 것이다. 앵글의 유무에 따른 전단성능의 비교를 위해서, 앵글 대신에 평철을 용접한 실험체(EA-00; 기준 실험체)도 제작하였다. 또한, 기존 전단연결재인 스티드($\phi 19$, 100mm)를 사용한 실험체 3개를 제작하였다. 스티드의 피치를 150mm, 200mm 및 300mm으로 하여 피치별 성능도 파악하였다. 이 실험체 또한 간격유지를 위한 평철을 각각 용접하여 콘크리트 타설 시에 발생할 수 있는 벌어짐의 현상을 방지하도록 하였다.

2.2 실험체 셋업

Push-out 실험을 위한 실험체 셋업은 Fig. 4에 나타냈다. 실험체는 정적으로 압축력이 도입되도록 3,000kN 용량의 만능시험기(UTM)에 설치하였다. 또한 Fig. 4에는 콘크리트와 철골단면의 상대변위를 측정하고자 설치한 변위계



(a) Front view (b) Side view (c) Back view

Fig. 4. Test setup

의 위치를 나타내었는데, 실험체 좌우 양측에 각각 200mm 변위계 2개를 설치하였다. 전단연결재의 변형상태를 파악하기 위해서 앵글 및 스티드에 변형도 게이지를 부착하였다. 변형도 게이지에 대해서는 실험결과에서 자세히 기술하였다. Table 2는 재료시험결과를 나타내었고, 스티드의 경우는 인장강도가 400MPa인 재료를 사용하였다.

Table 1. Test specimen

Specimen			Shear connector	Height [mm]	Thickness [mm]	Diameter [mm]	No. SCs [ea]	Pitch [mm]
Series I (Stud)	1	S-100-19-300	Headed welding stud	100	-	19	6	@300
	2	S-100-19-200		100	-	19	8	@200
	3	S-100-19-150		100	-	19	10	@150
Specimen			Shear connector	Depth [mm]	Thickness [mm]	Welding [mm]	No. SCs [ea]	Pitch [mm]
Baseline	4	EA-00	-	-	-	-	-	-
Series II (L-30)	5	EA-30-20-200	Equal Angle	30	3	20	4	@200
	6	EA-30-30-200		30	3	30	4	@200
	7	EA-30-40-200		30	3	40	4	@200
	8	EA-30-20-300		30	3	20	3	@300
	9	EA-30-30-300		30	3	30	3	@300
	10	EA-30-40-300		30	3	40	3	@300
Series III (L-40)	11	EA-40-20-200		40	5	20	4	@200
	12	EA-40-30-200		40	5	30	4	@200
	13	EA-40-40-200		40	5	40	4	@200
	14	EA-40-20-300		40	5	20	3	@300
	15	EA-40-30-300		40	5	30	3	@300
	16	EA-40-40-300		40	5	40	3	@300
Series IV (L-50)	17	EA-50-20-200		50	6	20	4	@200
	18	EA-50-30-200		50	6	30	4	@200
	19	EA-50-40-200		50	6	40	4	@200
	20	EA-50-20-300		50	6	20	3	@300
	21	EA-50-30-300		50	6	30	3	@300
	22	EA-50-40-300		50	6	40	3	@300

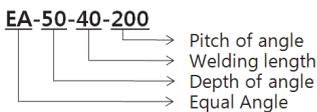


Table 2. Material test results

Specimen		Y.S. [MPa]	T.S. [MPa]	Y.R.	Elo. [%]
PL-6	SM490	488	552	0.88	22
PL-3	SS400	338	421	0.80	39
PL-5	SS400	279	456	0.61	38
PL-6	SS400	400	454	0.88	39
D10	HD400	501	636	0.79	18
Concrete	24MPa	$f_{ck} = 28.5\text{MPa}$			

3. 실험결과

3.1 실험체 거동 및 파괴상황

3.1.1 Series I 실험체

시리즈 I 실험체는 기존의 전단연결재를 스티드($\phi 19$, 100mm)로 사용한 실험체로서 실험변수는 연결재의 간격 (150mm, 200mm, 300mm)이다. 실험체의 파괴모드는 Fig. 5에 나타내었고, 스티드의 저항에 의해서 상부, 측면 및 후면에 그림과 같이 균열이 발생하였다. 균열은 스티드가 위치한 곳에서 시작되어 경사방향으로 진행되었다. 그리고 Fig. 5(b)와 같이 콘크리트 슬래브와 보플랜지 사이가 벌어지는 현상도 관찰되었다. Fig. 6은 시리즈 I 실험체의 콘크리트 균열도를 도시한 것이다.

Fig. 7은 스티드 실험체의 하중-변위관계 그래프를 나타낸 것이다. S-100-19-300 실험체는 약 13mm의 변위에서 최대내력(859kN)을 발휘하였고, 하중이 서서히 감소하다가 24mm 변위에서 700kN의 하중에서 570kN의 하중으로 갑작스럽게 저하하는 현상을 보였다. S-100-19-200 실험체는 약 8mm의 변위에서 최대내력(808kN)에 도달하

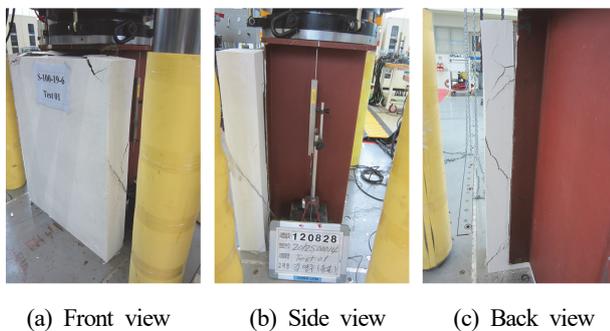
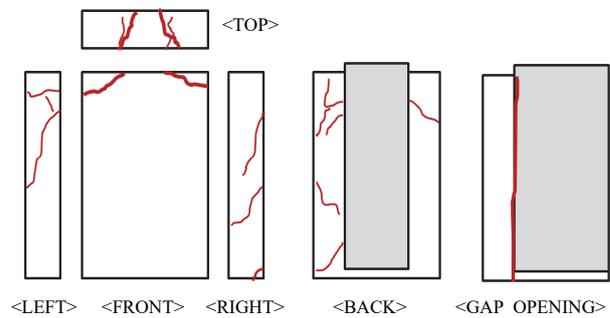
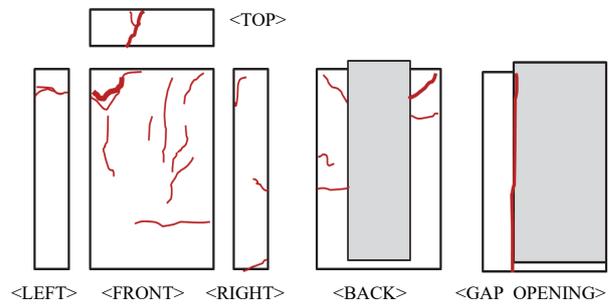


Fig. 5. Failure mode (Specimen S-100-19-300)

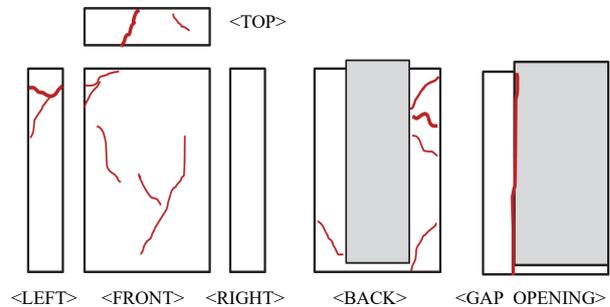
였고 하중이 점진적으로 감소하였다. 이 실험체는 S-100-19-300 실험체보다 스티드 간격이 좁음에도 불구하고 오히려 최대내력은 상대적으로 낮게 평가되었다. S-100-19-150 실험체는 약 5mm에서 최대내력(974kN)에 도달하였고 하중이 점진적으로 감소하는 현상이 관찰되었다. 이 실험체는 앞의 두 실험체에 비해서 내력이 증가하였을 뿐만 아니라 최대내력에 도달하는 시점이 다른 실험체에 비해서 작은 변위에서 발생하였다. 합성보의 특성에 있어서 작은 변위에서 보다 큰 내력을 발휘하는 것이 콘크리트와 강재의 합성거동을 더욱 명확히 발휘하는 것으로 판단된다.



(a) Specimen S-100-19-300



(b) Specimen S-100-19-200



(c) Specimen S-100-19-150

Fig. 6. Crack pattern of concrete slab (Series I)

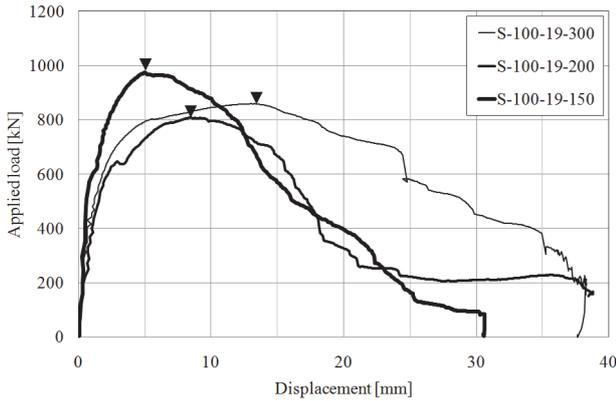


Fig. 7. Load-displacement curve (Series I)

3.1.2 Series II 실험체

시리즈II 실험체는 앵글 L-30×30×3 부재를 전단연결재로 사용한 실험체이며, 변수는 용접길이와 앵글의 간격이다. 시리즈II 실험체의 파괴모드는 Fig. 8에 나타난 것같이, 콘크리트의 균열은 관찰되지 않았고 콘크리트슬래브와 보플랜지 사이의 간격만 벌어진 상태로 실험이 종료되었다. 이는 앵글부재의 높이가 낮기 때문에 콘크리트의 균열에 영향을 미치지 않은 것으로 보인다. 사진으로는 확인할 수 없지만 육안으로는 벌어진 틈을 통해 앵글부재를 관찰할 수 있었는데 변형이 증가할수록 앵글부재의 면외변형이 매우 증가하였고, 상대변위가 15mm 이상으로 진행되었을 때는 용접부가 파단되는 현상도 관찰되었다. Fig. 9는 육안으로 관찰한 앵글의 변형성상을 도시한 것이다. 크게 2가지 파괴모드를 나타냈는데, 용접되지 않고 수직으로 세워져 앵글웨브가 면외방향으로 휘어지는 모드와 용접이 파단되는 모드이다.

Fig. 10은 실험체의 하중-변형관계 그래프를 나타낸 것이다. 그래프는 최대하중 도달이후에 변위가 증가하면서 앵글의 변형 및 용접부의 파단에 의해 하중이 서서히 감소하는 결과를 보여준다. 실험변수의 영향을 살펴보면, 앵글의 간격과 용접의 길이에 의해 전단성능의 차이가 명확히 구분되었다. 앵글의 간격이 200mm 및 300mm인 실험체는 각각 평균적으로 약 500kN 및 400kN의 최대 전단성능을 보였다. 따라서 앵글의 간격이 300mm인 실험체는 간격이 200mm인 실험체에 비해서 약 100kN 정도의 내력이 감소한 것으로 알 수 있으며, 내력수준은 200mm 간격인 실험체의 약 80%정도인 것으로 파악되었다. 또 하나의 변수인 용접길이에 대해서 살펴보면, 용접길이가 30mm인 실험체와 40mm인 실험체는 내력이 어느 정도 유사한 것으로

관찰되지만 용접길이가 20mm인 실험체는 내력이 매우 감소하는 것을 알 수 있다. 이는 용접이 20mm인 경우는 용접의 파단시점이 당겨져서 조기에 하중감소를 초래했다고 추측할 수 있다.

앵글이 없는 무보강 실험체 EA-00의 경우에는 콘크리트와 강재면의 마찰과 아울러 간격유지를 위한 평철과 동시에 저항하였으며, 내력이 후반부에는 약 300kN까지 증가하였으나 가력초기의 의미 있는 구간에서는 약 200kN의 전단성능을 발휘하였다. 무보강 실험체의 전단성능은 앵글이 있는 실험체에 비해서 매우 빈약한 결과를 나타냈다. 이



Fig. 8. Failure mode (Specimen EA-30-20-200)

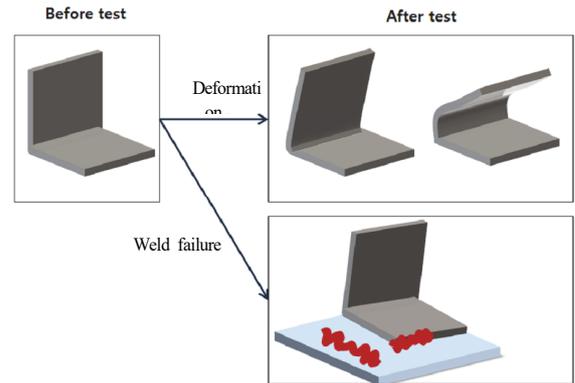


Fig. 9. Failure mode of angle shear connector

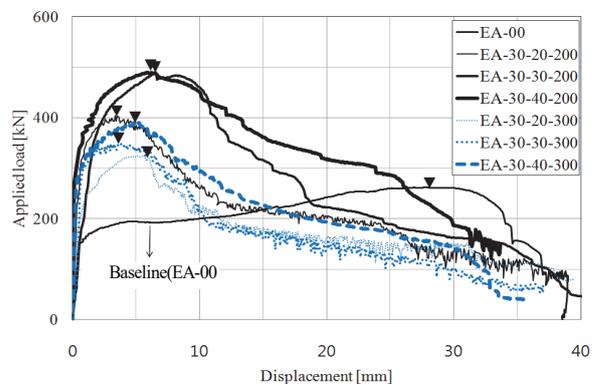


Fig. 10. Load-displacement curve (Series II)

로써 앵글이 철근콘크리트와 강재의 합성효과에 큰 영향을 미치는 것으로 파악된다.

3.1.3 Series III 실험체

시리즈III 실험체는 앵글 L-40×40×5 부재를 전단연결재로 사용한 실험체이다. Fig. 11은 실험체 중에서 두 실험체의 파괴모드를 나타낸 것이며, 실험종료 시 콘크리트와 강재보의 상대변위가 약 60mm인 상태에서 관찰한 것이다. 실험종료 후에 자체적으로 완전분리된 것이 아니라 관찰을 위해서 도구를 사용하여 슬래브를 인위적으로 분리하여 관찰한 것이다. 그림을 살펴보면, 앵글의 변형성상은 등분포하중을 받는 양단고정보의 휨변형모드를 나타낸다고 할 수 있다. 앵글의 단부가 용접으로 고정되어 있기 때문에 앵글의 단부가 중앙부 보다 큰 휨변형을 경험한 것을 알 수 있다. Fig. 11(b)는 용접부의 파단성상과 휨에 의한 앵글 단부의 소성화를 보여준다.

결론적으로 앵글을 전단연결재로 사용하는 합성보는 콘크리트와 강재사이에 전단력이 작용할 경우, 초기에는 두 재료 사이의 접촉면의 마찰력과 앵글의 탄성거동으로 저항하다가 상대변형이 증가하면 등분포하중을 받는 양단고정보의 거동을 하고, 종국적으로는 앵글단부의 소성화에 의해서 최대내력을 발휘한다고 판단할 수 있다. 이후 앵글의 휨변형 증가와 용접부의 파단, 콘크리트의 균열에 의해서 전단저항성능이 저하한다고 할 수 있음을 또한 추측할 수



(a) EA-40-40-200



(b) EA-40-40-300

Fig. 11. Failure mode

있었다. 앵글의 파괴모드를 종합하면 Fig. 12와 같이 표현할 수 있다.

Fig. 13은 시리즈III 실험체의 하중-변형관계 그래프를 나타낸 것이다. 비교를 위해서 무보강 실험체 EA-00도 함께 나타내었다. 시리즈II 실험체와 마찬가지로 용접부 길이가 길어질수록 그리고 앵글의 간격이 좁아질수록 실험체의 전단성능이 향상되는 것을 알 수 있다. 용접부의 길이가 20mm인 실험체는 용접부 파단에 의해서 큰 전단내력을 발휘하지 못했다. 그러나 용접부의 길이가 30mm와 40mm인 실험체는 20mm인 실험체보다 훨씬 큰 전단성능을 발휘함을 알 수 있고, 최대내력은 유사하게 나타났다. 따라서 용접길이는 30mm이상만 확보하면 앵글의 전단저항성능이 잘 발휘될 수 있을 것으로 보인다. 또한 그래프는 앵글간격이 200mm인 실험체는 약 700kN을, 간격이 300mm인 실험체는 약 580kN의 최대내력을 발휘함을 보여줌으로써, 앵글간격이 200mm인 실험체는 300mm인 실험체에 비해서 전단저항성능이 약 20% 향상되는 결과를 보여줌으로써 시리즈II와 같은 결과를 관찰할 수 있다.

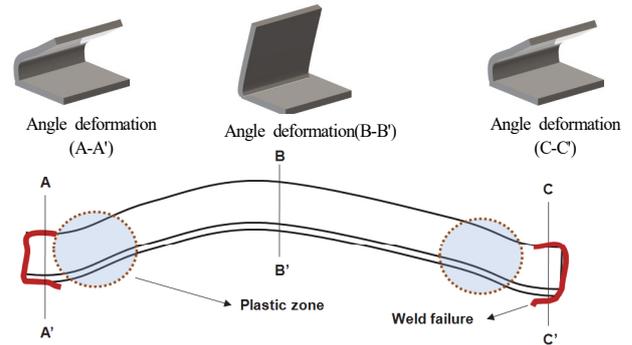


Fig. 12. Angle deformation after test

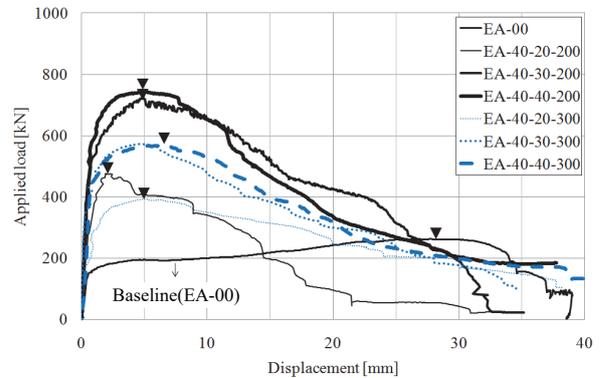


Fig. 13. Load-displacement curve (SeriesIII)

3.1.4 Series IV 실험체

시리즈IV 실험체는 앵글 L-50×50×6 부재를 전단연결재로 사용한 실험체이며, 최종파괴상황을 관찰하면 Fig. 14와 같이 콘크리트슬래브의 균열은 발견되지 않았고 슬래브와 강재보 단면 사이의 벌어짐 현상(이격)만 관찰되었다. 단지 육안으로 관찰하면 Fig. 9와 같이 앵글이 면외변형 또는 용접부 파단의 파괴모드를 나타내었다. 앵글의 전체변형은 Fig. 12와 같이 유사할 것이라고 판단된다.

Fig. 15는 실험체의 하중-변형관계 그래프를 나타낸 것이다. 앵글이 타 실험체에 비해서 가장 크기 때문에 전단내력이 가장 높은 결과를 나타내었다. EA-50-40-200 실험체의 경우 최대내력이 940kN으로 나타났고, 이는 스티드를 사용한 실험체 S-100-16-150과 비슷한 내력성능을 발휘하였다. 이전 실험체들과 유사하게 용접길이가 20mm인 실험체는 전단성능이 가장 빈약하였고, 용접길이가 30mm 및 40mm인 실험체는 20mm인 실험체에 비해서 내력이 큰 폭으로 상승하였다. 또한 앵글간격이 200mm인 실험체의 최대내력은 앵글간격이 300mm인 최대내력의 1.2 배 정도 향상되는 결과를 보였다.

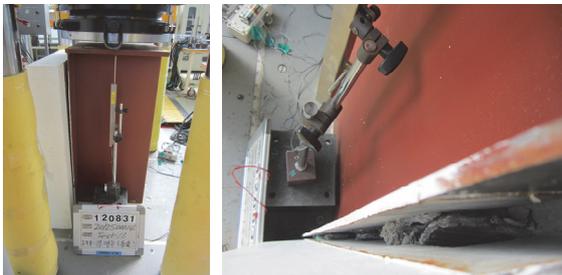


Fig. 14. Failure mode

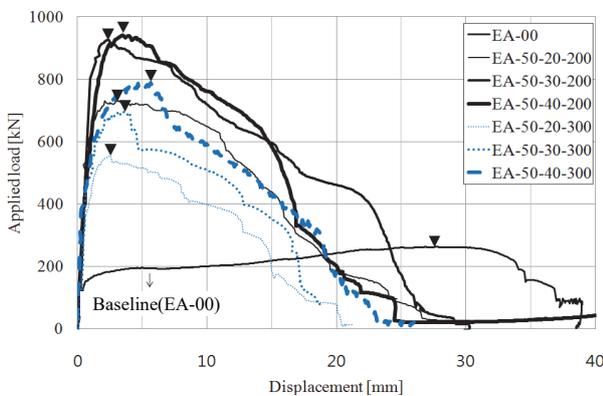


Fig. 15. Load-displacement curve (Series IV)

3.2 전단연결재의 변형도 분포

Fig. 16은 스티드에 부착된 변형도게이지의 결과를 나타낸 것이며, 변위에 따른 변형도 분포를 나타낸 것이다. 스

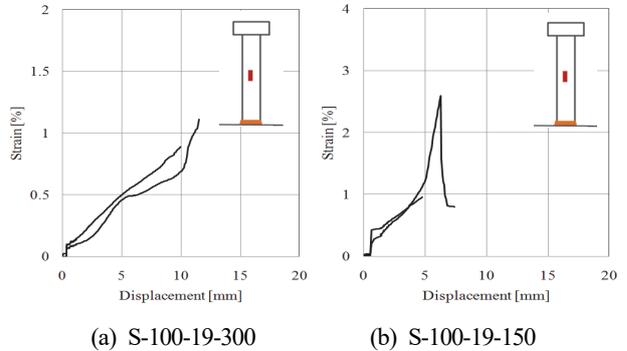
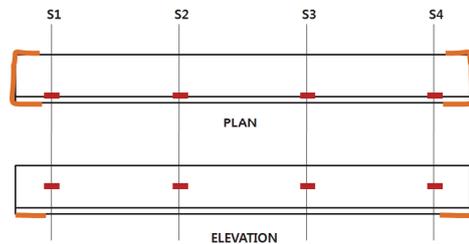


Fig. 16. Strain distribution of stud shear connectors



(a) location of strain gauge

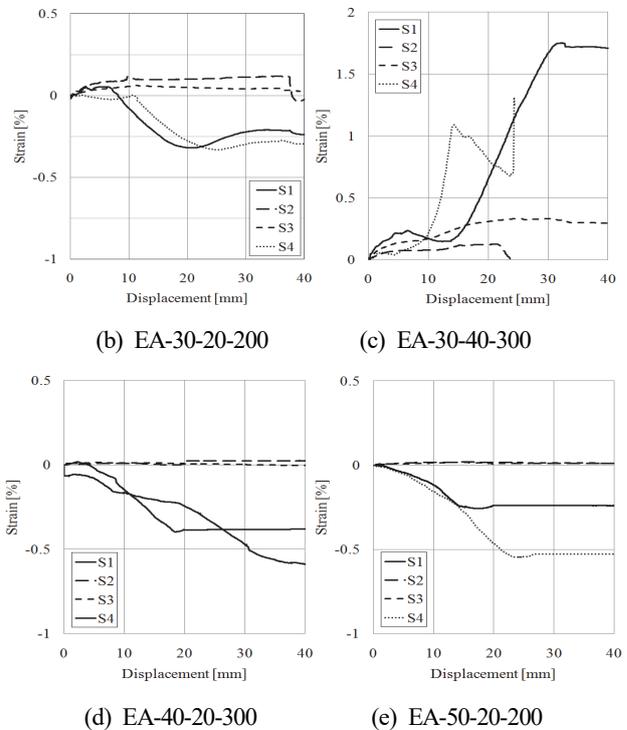


Fig. 17. Strain distribution of angle shear connectors

터드의 경우 변위발생시점부터 하중과 비례관계로 변형도가 증가하는 것을 볼 수 있다. Fig. 17은 앵글에 부착된 변형도게이지의 결과를 나타내며, Fig. 17(a)는 변형도게이지 위치, Fig. 17(b)는 변형도분포를 나타낸 것인데, 등분포하중을 받는 양단고정보의 변형모드와 같은 분포를 보이는 것으로 추측할 수 있다. 즉, 양단에 부착된 변형도 게이지는 고정단 모멘트에 의해 큰 변형도를 나타내었고 중앙부는 보다 작은값을 나타내었다. 따라서 앵글을 전단연결재로 사용하면 큰 변형 시에는 양단고정보의 변형모드로 강판-콘크리트 간 전단력을 잘 저항하는 것으로 판단된다.

4. 분석 및 평가

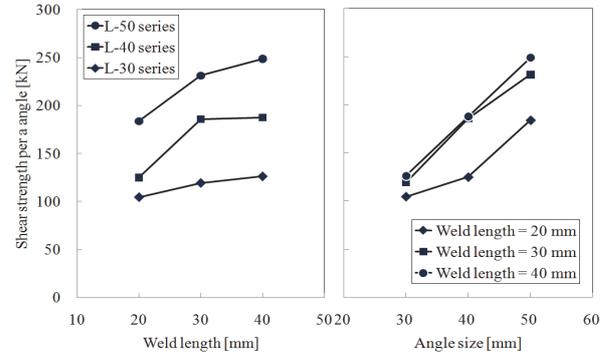
4.1 전단내력에 미치는 변수의 영향

본 절에서는 전단연결재 Push-out 실험을 바탕으로 전단연결재의 종류, 앵글의 사이즈, 용접길이 및 앵글의 간격 등의 실험변수에 따라서 전단성능에 미치는 영향을 조사하고자 한다. Table 3에 Push-out 실험결과를 나타내었고, Q_n 는 전단연결재 1개당 최대전단내력을 나타낸다.

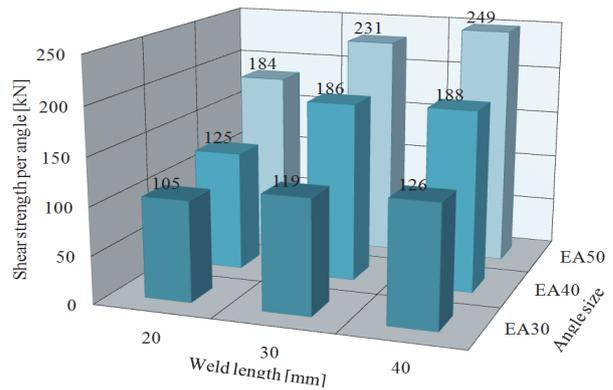
Fig. 18(a)와 (b)는 각각 용접길이와 앵글의 사이즈에 따른 전단내력의 변화를 나타낸 것이다. Fig. 18은 용접길이와 앵글의 크기가 증가할수록 내력도 비례적으로 증가하는 것을 보여주는데, 용접길이 30mm인 실험체는 20mm인 실험체에 비해서 내력이 13%~49% 증가하였고, 용접길이 40mm인 실험체는 30mm인 실험체에 비해서 내력이 약 1%~9%가 증가하였음을 알 수 있다. 이 결과를 참조하면 실험체별 약간의 차이가 있지만 용접길이 30mm와 40mm인 실험체의 내력은 거의 유사한 결과를 나타낸 반면, 용접길이 20mm인 실험체의 내력은 상대적으로 매우 작은 값을 나타내었다. 앵글의 크기에 따라서는 앵글 사이즈가 EA40인 실험체는 앵글 사이즈가 EA30인 실험체에 비해서 내력이 19%~56% 증가하였고, 앵글 사이즈가 EA50인 실험체는 EA40인 실험체에 비해서 38%~56%분포로 증가하였다. 앵글의 사이즈에 대해서는 그 내력의 증가하는 특성이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 18(c)는 용접길이와 앵글사이즈에 따른 내력의 크기를 함께 나타낸 것이다.

Fig. 19는 전단연결재인 스티드와 앵글을 가진 실험체 중 내력이 비슷한 실험체 4개의 하중-변위관계 그래프를 나타낸 것이다. 스티드가 전단연결재로 사용된 실험체의

그래프는 점선으로, 앵글이 연결재로 사용된 실험체는 실선으로 도시했다. 그래프는 전단연결재의 종류에 따라 최대내력의 도달시점에 차이가 있음을 알려준다. 즉, 스티드가 있는 실험체에 비해서 앵글이 있는 실험체는 작은 변위에서 최대내력에 빨리 도달함을 관찰하였다. 이는 앵글을



(a) Effect of weld length (b) Effect of angle size



(c) Bar chart

Fig. 18. Effect of test parameters on shear capacity

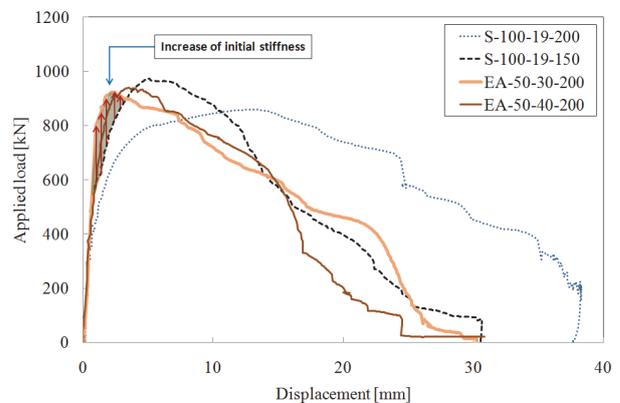


Fig. 19. Comparison of load-displacement curves

전단연결재로 사용하면 콘크리트 슬래브와 강재보와의 상대변위가 작은 변위에서 스티드 실험체에 비해서 보다 큰 내력을 발휘할 수 있음을 말해준다. 이러한 결과는 스티드에 비해서 앵글의 강성이 더 크기 때문에 기인한 것이라고 판단된다. 통상 스티드는 T형강 또는 채널 등의 강성이 큰 (Rigid) 전단연결재와 다르게 유연한(Ductile) 전단연결재로 분류되고 있다.^{[8],[10]}

4.2 연성능력의 평가

전단연결재의 가장 중요한 역할은 콘크리트와 강재 사이의 전단력을 충분히 저항하여 일체화하는 것이며, 또 다른 요구되는 역할중의 하나가 연성적인 거동을 해야 하는 것이다. Eurocode 4에서는 전단연결재의 특성슬립성능(Characteristic slip capacity, δ_u)가 6mm 이상이면 연성적인 연결재로 평가하고 있다^[9]. Fig. 20은 Eurocode 4에서 특성슬립성능을 평가하는 방법을 도시화 한 것이며, 미끄러짐 성능(δ_u)은 파괴하중의 90%에 해당하는 특성저항내력(Characteristic resistance, P_{RK})에 상당하는 변위로 평가된다.

Table 3에는 연성능력을 나타내는 δ_u 를 나타내었는데, 실험체 EA-30-20-200, EA-40-20-200, EA-50-30-300을 제외한 다른 모든 실험체들은 Eurocode 4에서 제시하는 연성능력기준인 6mm를 상회하는 것으로 나타났다. 3개의 실험체가 연성능력을 제대로 발휘하지 못한 이유는 모두 양단 용접부에서 조기 파단하여 하중이 급속히 저하한데 따른 결과이다. 이러한 용접부의 조기파단을 방지한다면 U형단면의 상단에 용접 접합한 앵글 전단연결재는 연성능력이 확보가능하다고 판단된다.

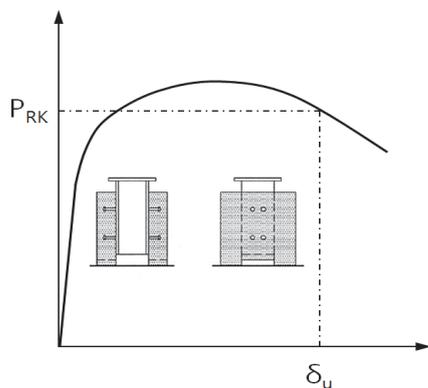


Fig. 20. Determination of slip capacity δ_u (Eurocode, 2004)^[8]

4.3 전단내력 평가

4.3.1 스티드 전단연결재

강구조설계기준 해설^[11]에서는 스티드 전단연결재의 강도를 평가함에 있어서 미국의 하중저항계수설계법(LRFD)에 근거하여 콘크리트슬래브 또는 합성슬래브에 매입된 스티드 전단연결재 1개의 공칭강도는 다음과 같이 산정하도록 규정하고 있다.

$$Q_u = 0.5 \cdot A_{sc} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq R_g R_p A_{sc} F_u \quad (1)$$

여기서, A_{sc} : 스티드 전단연결재의 단면적(mm²)

E_c : 콘크리트의 탄성계수(MPa)

F_u : 스티드 전단연결재의 인장강도(MPa)

f_{ck} : 콘크리트의 압축강도(MPa)

R_g, R_p : 테크방향과 스티드 개수에 따른 계수

그 밖에 Eurocode 4^[8]에서는 스티드 전단연결재에 대한 설계 전단강도를 다음과 같이 평가하도록 하였다.

$$P_{Rd} = Min \left\{ \frac{0.8 f_u \pi d^2 / 4}{\gamma_v}, \frac{0.29 \alpha d^2 \sqrt{f_{ck} E_{cm}}}{\gamma_v} \right\} \quad (2)$$

$$\alpha = 0.2 \left(\frac{h_{sc}}{d} + 1 \right) \quad \text{for } 3 \leq h_{sc}/d \leq 4$$

$$\alpha = 1 \quad \text{for } h_{sc}/d > 4$$

여기서, γ_v : 부분안전계수(mm²)

E_{cm} : 콘크리트의 탄성계수(MPa)

f_u : 스티드의 인장강도(≤ 500 MPa)

d : 스티드의 직경(mm)

h_{sc} : 스티드의 길이(mm)

4.3.2 앵글 전단연결재

Eurocode 4^[8]에서는 합성보의 전단연결재로써 앵글이 적용되었을 때 아래와 같은 식을 사용하도록 하고 있다.

$$P_{Rd} = 10bh \frac{3}{4} f_{ck}^3 / \gamma_v \quad (3)$$

여기서, γ_v : 부분안전계수(mm²)

b : 앵글의 길이(mm)

h : 앵글의 높이

Table 4는 기존 H형단면보 상부와 U형단면보 상부에 용접된 앵글 전단연결재의 형상과 파괴모드를 정리하여 나타낸 것이다. 1장의 서론에서 기술한 바와 같이, 똑같은 앵글 전단연결재를 사용하더라도 파괴모드가 완전히 다르기 때문에 U형단면보의 경우에는 앵글 전단연결재에 대한 새로운 설계식이 필요하다.

따라서 본 연구에서는 식 (3)을 기본으로 실험결과와 회기식을 정리하여 U형단면보 상부에 용접 접합된 앵글전단연결재의 내력식을 제안하였다. 회기식에 사용된 변수로는 앵글의 높이, 용접길이 및 콘크리트 강도 등을 사용하였다. 특히, 본 실험체에서는 앵글의 용접길이가 전단내력의 중요한 변수라고 판단되어 이를 중심으로 실험체 설계가 진행되었다. 제안된 식은 아래와 같다.

Table 4. Angle as a shear connector

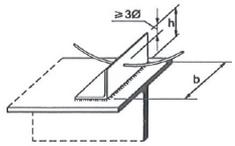
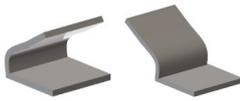
Sort	Angle with H-section ^[5] (Eurocode)	Angle with U-section (Proposed)
Detail		
Failure mode		

Table 3. Test result

Specimen (Stud)	TEST		Eq.(1)	Eq.(2)	Comparison	
	Q_T [kN]	δ_u [mm]	Q_n [kN]	P_{Rd} [kN]	Q_T / Q_n	Q_T / P_{Rd}
S-100-19-300	143	18.4	112	66	1.28	2.17
S-100-19-200	101	13.2	112	66	0.90	1.53
S-100-19-150	97	10.1	112	66	0.87	1.47
Specimen (Angle)	TEST		Eq.(3)	Eq.(4)	Comparison	
	Q_T [kN]	δ_u [mm]	P_{Rd} [kN]	Q_{Pro} [kN]	Q_T / P_{Rd}	Q_T / Q_{Pro}
EA-00	262	32.8	-	-	-	-
EA-30-20-200	101	5.9	479	98	0.21	1.03
EA-30-30-200	122	10.6	479	124	0.26	0.98
EA-30-40-200	122	10.2	479	134	0.26	0.92
EA-30-20-300	108	6.3	478	98	0.23	1.10
EA-30-30-300	113	6.3	478	124	0.24	0.94
EA-30-40-300	130	7.3	478	134	0.27	0.97
EA-40-20-200	119	4.1	594	136	0.20	0.88
EA-40-30-200	180	10.3	594	167	0.30	1.08
EA-40-40-200	186	9.2	594	177	0.31	1.05
EA-40-20-300	131	9.3	594	136	0.22	0.97
EA-40-30-300	191	8.3	594	167	0.32	1.14
EA-40-40-300	189	11.1	594	177	0.32	1.07
EA-50-20-200	183	9.5	702	177	0.26	1.03
EA-50-30-200	231	7.3	702	214	0.33	1.08
EA-50-40-200	235	7.3	702	222	0.33	1.06
EA-50-20-300	185	6.2	702	177	0.26	1.04
EA-50-30-300	231	4.5	702	214	0.33	1.08
EA-50-40-300	263	6.5	702	222	0.37	1.18

$$Q_{pro} = \frac{10h^{\frac{2}{3}}f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{(0.0012l_w^2 - 0.057l_w + 1.9)^{\frac{2}{3}}} \quad (4)$$

여기서, l_w : 용접의 길이(mm)
 h : 앵글의 높이
 f_{ck} : 콘크리트의 압축강도(MPa)



4.3.3 전단내력 평가

본 연구에서는 U형단면 강재보에 스티드 또는 앵글 전단연결재가 용접 접합된 실험체에 대한 실험을 실시하였고, 이에 대해서 각 전단연결재의 전단내력을 평가하고자 기존의 내력식 및 제안된 내력식에 대해서 앞절에서 살펴보았다. 본 절에서는 내력식과 실험결과를 비교함으로써 전단내력을 평가하고 식의 적정성을 판단하고자 한다. Table 3에 각 식들에 의한 내력평가결과를 정리하여 나타내었다.

먼저 스티드 전단연결재의 전단내력에 대해서 살펴보면, 국내기준인 식 (1)에 의하면 이론값에 대한 실험값의 분포는 0.87~1.28의 결과를 보였다. Table 3의 결과는 스티드의 간격이 좁아질수록 한 개당 전단내력평가가 과대평가하고 있는 경향을 나타내고 있지만, 기존 H형강이 아니라 U형단면임을 감안하면 식 (1)은 스티드의 내력을 잘 반영한다고 할 수 있다. 그러나 Eurocode에 기반한 식 (2)에 의하여 평가하면 이론값에 대한 실험값의 분포는 1.47~2.17로 스티드의 내력을 매우 과소평가하는 경향이 있다. 이는 Eq.(2)의 내용상 부분안전계수 $\gamma_v (= 1.25)$ 를 사용하는 유로코드가 보다 보수적으로 내력을 평가한 것으로 판단된다.

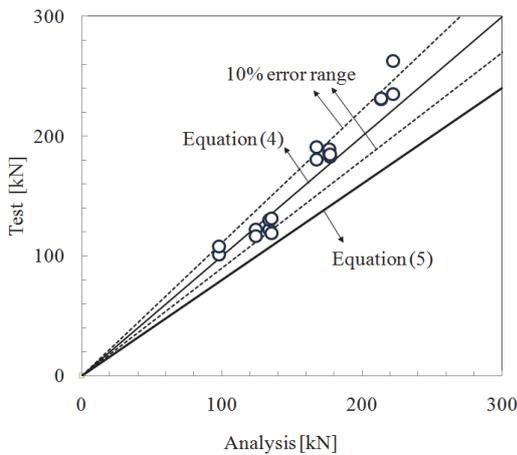


Fig. 21. Verification of proposed equation

앵글 전단연결재의 내력을 제안한 식 (4)를 검증하기 위해서 Fig. 21과 같이 실험값과 이론값을 비교하여 그래프에 나타내었다. 식 (4)에 따르면 이론값에 대한 실험값의 분포는 0.88~1.18을 나타냈으며, 대부분의 실험체가 10% 오차내로 이론값과 잘 대응된다.

그러나 본 실험에 사용된 실험체는 그 개수 및 변수(보폭이 400mm로 고정)가 매우 제한되어 있기 때문에 실 현장에 적용하기 위해서는 안전율의 적용이 필요할 것으로 판단된다. 따라서 식 (4)에 대해서 Eurocode에서 사용되는 부분안전계수(γ_v)를 적용하여 보다 안전율이 증가된 수정식을 다음과 같이 제안한다.

$$Q_{pro} = \frac{\left\{ \frac{10h^{\frac{2}{3}}f_{ck}^{\frac{2}{3}}}{(0.0012l_w^2 - 0.057l_w + 1.9)^{\frac{2}{3}}} \right\}}{\gamma_v} \quad (5)$$

여기서, 부분안전계수(γ_v)는 Eurocode와 마찬가지로 1.25를 적용한다. 이러한 결과를 또한 Fig. 21에 나타내었다. 식 (5)는 앵글 전단연결재의 내력을 안전율로 통해서 조금 과소평가하는 경향을 보이지만 초기실험결과를 반영한 점을 고려하여 안전성에 주안점을 두었다.

5. 결론

본 연구는 U형단면 강재보의 상부에 용접된 앵글 전단연결재에 관한 실험결과를 정리하여 나타내었고, 기준에서 제시하고 있는 이론식을 수정하여 새로운 전단내력식을 제안하였다. 결과적으로 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 실험으로부터 얻은 하중-변위관계 그래프를 통해 U형단면 강재보 상부에 용접된 앵글 전단연결재는 앵글의 크기 및 용접길이를 적절히 확보하면 기존의 스티드 전단연결재와 동등한 성능을 발휘하였다.
- (2) 앵글의 용접길이에 따른 성능을 살펴보면, 용접길이가 30mm인 실험체는 20mm인 실험체에 비해서 내력이 13%~49% 증가하였고, 용접길이가 40mm인 실험체는 30mm인 실험체에 비해서 내력이 약 1%~9%가 증가하였다. 이 결과를 참조하면 용접길이가 30mm인 실험체와 40mm인 실험체의 내력이 거의 유사한 결과를

나타낸 반면 용접길이가 20mm인 실험체의 내력은 상대적으로 매우 저하하는 결과를 보였다.

- (3) 앵글의 크기에 따라서는 앵글 사이즈가 40인 실험체는 30인 실험체에 비해서 내력이 19%~56% 증가하였고, 앵글 사이즈가 50인 실험체는 40인 실험체에 비해서 38%~56%분포로 증가하였다. 앵글의 사이즈에 대해서는 그 내력의 증가하는 특성이 뚜렷하게 나타나는 것을 알 수 있다.
- (4) 앵글 전단연결재의 파괴모드는 등분포하중을 받는 양단고정보와 비슷한 양상을 보여주었다. 즉, 하중이 작용하면 양단부의 용접부가 고정단역할을 하므로 단부에서 증가한 모멘트에 의해 소성화가 진행되고 점차적으로 중앙부의 휨변형이 증가되었다. 이러한 파괴모드는 전단연결재인 앵글의 연성능력을 높이는데 효과적임을 밝혀준다. 실험결과 Eurocode에서 제시하고 있는 연성능력지수를 대부분 상회하는 결과를 보였다.
- (5) 전단연결재인 앵글의 설계를 위해서 실험결과에서 얻은 실험체의 최대내력을 바탕으로 회기식을 이용하여 설계식을 제안하였다. 제안된 설계식은 실험결과와 매우 좋은 대응을 보였다. 또한 앵글 전단연결재의 실적용을 위해서 Eurocode에서 사용하고 있는 부분안전계수를 적용하여 수정 설계식을 제안하였다. 따라서 이 수정식을 적용하면 합성보를 실적용함에 있어서 보다 안전측으로 설계가 가능하리라 판단된다.

참고문헌(References)

- [1] 허병욱, 배규용, 문태섭(2004) 매입형(슬림플로어) 합성보의 휨성능 평가: 층이 깊은 데크 플레이트와 비대칭 H형강 철골보, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제2호, pp.235-245.
Heo, B.W., Bae, K.W., and Moon, T.S. (2004) Flexural Capacity of the Encased (Slim Floor) Composite Beam with Deep Deck Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.235-245 (in Korean).
- [2] 채홍석, 류재용, 정경수, 문영민, 최성모(2010) 단부 보강한 합성보(에코거더)시스템의 구조성능에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제22권, 제6호, pp.533-541.
Chae, H.S., Ryoo, J.Y., Chung, K.S., Moon, Y.M., and Choi, S.M. (2010) Experimental Study on Structural Performance of End-Reinforced Steel-Beam System (Eco-Girder), *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.22, No.6, pp.533-541 (in Korean).
- [3] 박금성, 허병욱, 곽명근, 배규용(2008) 주거용 매입형 합성보의 휨거동에 대한 실험적 연구, 대한건축학회논문집-구조계, 대한건축학회, 제24권, 제12호, pp.91-98.
Park, K.-S., Heo, B.-W., Kwak, M.-G., and Bae, K.-W. (2008) Experimental Study on the Flexural Behavior of Encased Composite Beams for Residential Buildings, *Journal of the Architectural Institute of Korea - Structure & Construction*, AIK, Vol.24, No.12, pp.91-98 (in Korean).
- [4] 신현섭(2005) 합성보 전단연결부의 구조거동에 대한 비교 분석, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제17권, 제6호, pp.737-747.
Shin, H.S. (2005) 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*, KSSC, Vol.17, No.6, pp.737-747 (in Korean).
- [5] Ciutina, A.L., and Stratan, A. (2008) Cyclic Performances of Shear Connectors, *Proceedings of International Conference on Composite Construction in Steel and Concrete IV*, Engineering Conferences International & Structural Engineering Institute (American Society of Civil Engineers), USA, pp.52-64.
- [6] Pashan, A. (2006) *Behavior of Channel Shear Connectors: Push-out Tests*, Master's Thesis, University of Saskatchewan, Canada.
- [7] 김성배, 김상섭(2006) T형 합성보의 시어 커넥터 형상에 따른 전단내력 평가에 관한 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제18권, 제2호, pp.279-288.
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).
- [8] European Committee for Standardization (2001) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building, Draft No. 2* (prEN 1994-1-1: 2001), Belgium.
- [9] European Committee for Standardization (2004) *Eurocode 4: Design of Composite Steel and Concrete Structures, Part 1-1: General Rules and Rules for Building* (prEN 1994-1-1: 2004), *Final Draft*, Belgium.

- [10] Johnson, R.P. (1994) *Composite Structures of Steel and Concrete, Volume I: Beams, Slabs, Columns, and Frames for Buildings*, Blackwell Scientific Publications, UK.
- [11] 한국강구조학회(2011) 하중저항계수설계법에 의한 강구조설계기준 해설, 구미서관.
KSSC (2011) *Korean Steel Structure Design Code and Commentary: Load and Resistance Factored Design*, Goomiseogwan, Korea (in Korean).

요 약 : 강-콘크리트 합성보는 오랫동안 건물시공에 사용되어져 왔다. 합성보의 필수요소는 강재단면과 콘크리트 슬래브 사이의 전단접합이며, 주로 기계적 전단연결재가 사용되며 다양한 형상의 장치가 사용되어져 왔다. 본 연구는 앵글 전단연결재를 가진 push-out 실험체의 실험결과를 조사한 것이다. 앵글 전단연결재의 전단성능을 검토하기 위해서 모두 22개의 push-out 실험체를 설계하였으며, 앵글의 높이, 용접길이 및 앵글의 간격 등의 실험변수를 바탕으로 그 영향을 검토하였다. 실험결과를 바탕으로 앵글 전단연결재의 전단강도를 예측할 수 있는 설계식을 제안하였다.

핵심용어 : 합성보, Push-out 실험, 앵글 전단연결재, 전단성능, 설계식
