

절곡 강판을 이용한 AU합성보 덮개형 강재앵커의 전단성능 평가

임환택¹ · 최병정^{2*}

¹박사과정, 경기대학교, 건축공학과, ²교수, 경기대학교, 플랜트·건축공학과

Shear Capacity Evaluation of Steel Plate Anchors Using Folded Steel Plate in AU-composite Beam

Lim, Hwan Taek¹, Choi, Byong Jeong^{2*}

¹Doctoral Graduate Student, Dept. of Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea

²Professor, Dept. of Plant and Architectural Engineering, Kyonggi University, Suwon, 16227, Korea

Abstract - Based on U-shaped composite beam, the new form of AU-composite beam were developed to create economical and efficient components reducing the cost and shortening the length of construction work. Because the U-shaped sections are open and needs to be fixed by topping concrete securely. Therefore, it is required to maintain the U-shaped sections in a structure and to work in the safe condition through construction. It also requires accessories that resist the horizontal shear force for synthesis between the top and bottom of the U-shaped section. To reinforce these shortcomings, a shear connector has been developed with various purposes of steel plate anchors. In this study, the steel plate anchors were directly tested and the shear force was evaluated by the horizontal shear force. The experiment was divided into two types, depending on the applicable deck plates. As a result of the experiment, the continuous type specimens showed greater resistance in both strength and displacement than the ones of stud anchor specimen. In discontinuous type case, due to shear simulations and simple element analysis, the less increase the ratio of width to height and the more shear strength decreased. Thus, the shear strength equation of the stud anchor was modified to suggest the new shear strength based on the testing results.

Keywords - AU-composite beam, Stud anchor, Steel plate anchor, Push-out test, FEM, Shear strength

1. 서론

최근 서로 다른 두 가지 이상의 특성을 가진 재료를 조합하여 하나의 구조체를 형성하며 구조적 성능과 더불어 경제성에 초점을 맞춘 합성부재가 개발되고 있다. 특히 합성보의 대부분은 H형강보 대신 U형 강판을 사용하고 내부에 콘크리트를 채우는 형식이 주를 이루고 있으나, 이러한 U형 강재보는 형상적 특성상 상부 개방에 따른 U형 단면 유지의 폭 고정

을 위한 별도의 철물과 시공시의 안전을 위한 작업자용 발판 그리고 U형 단면과 콘크리트 사이의 합성을 위하여 수평전단력에 저항하여 합성을 유발하는 인자가 필요하다. 이를 위하여 U형 단면의 폭을 고정하고 수평전단력에 저항하면서 작업자용 발판과 시공하중 저항체인 절곡강판을 이용한 A형의 덮개형 강재앵커(Steel plate anchors using folded steel plate)를 검토하여 U형 단면 상부에 놓인 반슬림 폐단면 충전형 합성보(AU-composite beam)를 연구하였다.

AU합성보의 구성 요소인 A형의 덮개형 강재앵커는 U형의 강재보와의 합성거동을 위하여 콘크리트의 경계면에서 발생하는 수평전단력에 저항하게 되는데 이때 미끄러짐이 발생할 수 있다. 이때의 각각 요소들은 Fig. 1(a)에 나타낸 바와 같이 개별적으로 거동하면서 합성보의 휨강도 저하의 원인이 된다. 반대로 미끄러짐을 제한한다면 Fig. 1(b)와 같이 일체화되어 합성단면의 전강도를 발휘하면서 완전합성부

Note.-Discussion open until February 28, 2018. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on April 20, 2017; revised August 28, 2017; approved on September 8, 2017.

Copyright © 2017 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-31-249-9702 Fax. +82-31-249-9702

E-mail. bjchoi@kyonggi.ac.kr

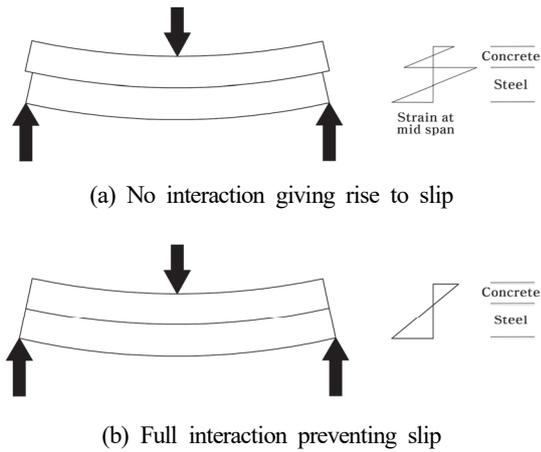


Fig. 1. Effect of composite action

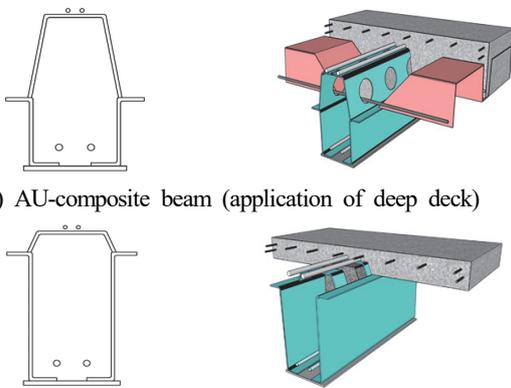


Fig. 2. Application shape of AU-composite beam

재의 역할을 할 것으로 기대된다.

이에 AU합성보의 핵심적인 역할로 Fig. 2와 같은 절곡강판을 이용한 A형의 뒀개형 강재앵커에 대하여 일반적으로 사용되는 스티드 앵커(Stud anchor)와의 비교를 통해 전단성능을 평가하고 설계시 적용될 성능평가식을 제안하였다.

2. 강재앵커의 거동

2.1 스티드 앵커(Stud anchor)

대부분의 합성보에서는 스티드 앵커를 사용하고, 작용하는 중력하중에 의해 수평전단력이 작용한다. 이때 슬래브의 콘크리트에 매립된 스티드 앵커의 지압응력 분포는 Fig. 3과 같이 스티드 앵커의 하부에 대부분 집중된다. 매립된 스티드 앵커 주변의 콘크리트, 철근, 강재 플랜지에 의해 스티드 앵커

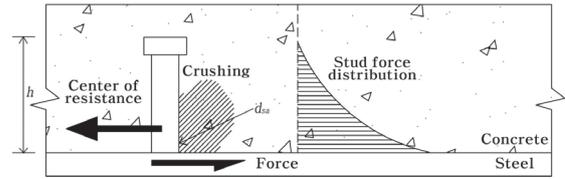


Fig. 3. Distribution of force acting on a shear-connector in plane slab

드 앵커에서 콘크리트 지압으로 저항하기 때문에 높은 저항응력이 가능하다. 그러므로 스티드 앵커의 파괴모드는 콘크리트의 파괴나 쪼개짐, 그리고 스티드 앵커의 전단파괴가 된다. 따라서 콘크리트에 매립된 스티드 앵커의 전단강도는 항복강도(F_y)보다 최대인장강도(F_u)에 의해 결정된다.

스티드 앵커의 전단강도는 파괴모드로부터 산정하게 되는데, 국내 강구조설계기준^[1]과 미국 강구조기준^[2]에서는 콘크리트의 지압강도와 스티드 앵커의 전단파괴강도를 비교하여 다음의 식 (1)과 같이 작은 값으로 결정한다.

$$Q_n = 0.5A_{sa} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq R_g R_p A_{sa} F_u \quad (1)$$

여기서, A_{sa} 는 스티드 앵커의 단면적(mm^2), f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도(MPa), E_c 는 콘크리트의 탄성계수(MPa), R_g 는 데크플레이트의 골당 스티드 앵커 개수에 따른 계수, R_p 는 스티드 앵커의 설치 위치에 따른 계수, 그리고 F_u 는 스티드 앵커의 인장강도(MPa)이다.

또한 스티드 앵커의 강성, 강도 상대변위(Slip capacity)는 여러 가지 변수의 영향을 받는다. 스티드 앵커의 단면적과 높이, 스티드 앵커의 인장강도, 콘크리트의 탄성계수와 압축강도, 그리고 콘크리트 타설 방향 등의 영향을 받는다^{[3],[4]}. 스티드 앵커의 h/d_{sa} 비가 낮을 때에는 뽑힘(Pull-out)이 발생하며, 슬래브의 하부 철근이 부적절하거나 상대적으로 슬래브 강성이 낮을 때는 슬래브에 균열이 발생한다. 그러므로 기준에서는 이러한 영향을 반영하고 있다.

2.2 절곡 강판을 이용한 AU합성보의 뒀개형 강재앵커

절곡 강판을 이용한 AU합성보의 뒀개형 강재앵커는 적용되는 Deep deck나 Truss deck 등의 여러 데크 플레이트에 의해 적용 가능한 특성을 반영하여 형태를 연속형과 단속형으로 크게 나눌 수 있다. 이러한 형태는 본 연구에서 제안되는 전단강도 평가에 매우 중요한 역할을 한다. 또한 뒀개형 강재

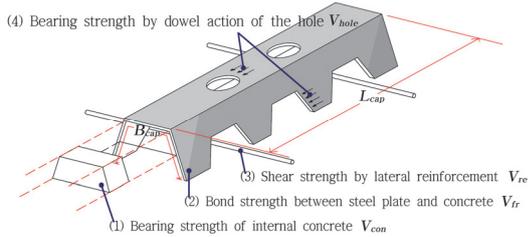


Fig. 4. Shear resistive element of Steel plate anchors (continuous type)

앵커는 수평전단력에 대한 저항체의 역할과 더불어 U형 강재보 특성상 상부 개방에 대한 강재보의 변형 방지 및 시공중 작업자용 발판으로 활용이 가능한 핵심요소이다.

2.2.1 덮개형 강재앵커(연속형)

AU 합성보의 덮개형 강재앵커(연속형)는 개방된 U형 단면의 상부에 부착되어 폐단면을 구성하고, 이때 덮개형 강재앵커의 기하학적 형상의 이점을 통해 콘크리트와 강재보의 화학적 부착력 상실 이후에도 덮개형 강재앵커의 형상에 의한 기계적 부착력이 작용한다. 그러므로 덮개형 강재앵커의 전단강도는 Fig. 4에 나타난 바와 같이 전단저항요소에 의해 결정되는 것으로 판단되었다.

(1) 내부 콘크리트의 지압강도

덮개형 강재앵커(연속형)의 절곡한 강판에 둘러싸인 콘크리트의 지압강도는 전단내력을 향상시킨다(Kim, 2011). 따라서 콘크리트 슬래브의 할렬인장력에 전단내력에 기여하므로 절곡강판을 이용한 덮개형 강재앵커의 내부 콘크리트도 전단내력에 포함하였다. 덮개형 강재앵커의 하부에서 균열이 발생하기 전의 인장응력은 Fig. 4의 (1)과 같은 분포형상으로 나타낼 수 있으며, 총 할렬인장력은 응력분포 체적과 같다. 여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도(MPa), A_{con} 은 덮개형 강재앵커 내부의 콘크리트 단면적(mm^2)이다.

$$V_{con} = 0.85 \times f_{ck} \times A_{con} \tag{2}$$

(2) 강판과 콘크리트 사이의 부착력

합성보의 전길이에 걸쳐 부착된 덮개형 강재앵커와 콘크리트의 접촉면에서의 화학적 부착력은 전단내력에 기여하는 비중이 크다. 국외 연구에서는 부착력의 크기를 약 60psi (0.41MPa)로 제안(Roeder, 1984)한 결과를 적용하였다.

여기서, L_{cap} 은 덮개형 강재앵커의 축방향 길이(mm), B_{cap} 은 덮개형 강재앵커의 단면 길이(mm)이다.

$$V_{fr} = 0.41 \times L_{cap} \times B_{cap} \tag{3}$$

(3) 횡방향 철근의 전단강도

덮개형 강재앵커의 측면에 설치된 관통구에 횡방향 철근이 배근되는 경우에는 전단마찰이론에 의한 마찰계수, 철근 단면적, 철근 응력의 곱에 의해 전단내력에 기여한다. 선행 연구결과에서는 마찰계수를 1.0, 철근의 응력을 항복강도의 90%로 제안하고 있다(Sara, 2002). 여기서, n 은 철근 개수, A_{re} 는 철근 단면적(mm^2), f_y 는 철근의 항복강도(MPa)이다.

$$V_{re} = 0.9 \times n \times A_{re} \times f_y \tag{4}$$

(4) 관통구의 다웰작용에 의한 지압강도

구멍난 강판을 강재앵커(전단연결재)로 사용하는 Perforbond와 Hat 형태로 강판을 절곡한 강재앵커(전단연결재)의 실험 및 해석적 연구로부터 구멍 안에 형성되는 콘크리트의 다웰작용이 전단내력을 향상시킨다(Park, 2006; Kim, 2006). 이러한 결과로부터 덮개형 강재앵커의 측면에 설치된 관통구의 콘크리트 다웰작용에 의한 지압강도는 콘크리트의 공칭전단강도와 단면적으로 산정할 수 있다. 여기서, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준강도(MPa), t_{cap} 는 덮개형 강재앵커의 강판 두께(mm), d_{hole} 은 관통구의 직경(mm)이다.

$$V_{hole} = 0.85 \times f_{ck} \times t_{cap} \times d_{hole} \tag{5}$$

그러므로 덮개형 강재앵커의 전단강도 V_{cap} 는 앞에서 살펴본 식 (2), (3), (4) 및 (5)의 합으로 나타낼 수 있다.

$$V_{cap} = 0.85f_{ck}A_{con} + 0.41L_{cap}B_{cap} + 0.9nA_{re}f_y + 0.85f_{ck}t_{cap}d_{hole} \tag{6}$$

2.2.2 덮개형 강재앵커(단속형)

절곡강판을 이용한 덮개형 강재앵커(단속형)는 수평전단력에 대해 스티드 앵커와 비슷한 저항요소로서 작용하고 그 전단저항도 동일한 원리가 적용될 것으로 판단된다. 그리고 U형 강판과 슬래브와의 경계면에서 수평전단력에 저항하는

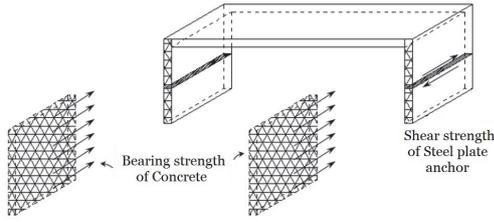


Fig. 5. Shear resistive element of steel plate anchors

메카니즘은 Fig. 5와 같이 뒷개형 강재앵커 측판의 전단강도, 측판 및 콘크리트의 지압강도로 저항할 것이다. 그러므로 뒷개형 강재앵커(단속형)의 전단강도는 식 (7)과 같다. 여기서 A_{cap} 은 뒷개형 강재앵커 측판의 단면적(mm^2), E_c 는 콘크리트의 탄성계수(MPa), F_u 은 뒷개형 강재앵커의 인장강도(MPa)이다.

$$Q_{cap} = 0.5A_{cap}\sqrt{f_{ck}E_c} \leq A_{cap}F_u \quad (7)$$

3. 전단성능 실험

3.1 실험 계획

뒷개형 강재앵커의 전단성능을 검증하기 위하여 직접전단 실험을 계획하였고, 그 계획에는 뒷개형 강재앵커가 Deep deck나 Truss deck 등의 데크플레이트에 능동적으로 적용 가능한 특성을 반영하여 형태를 연속형과 단속형으로 구분하여 총 6개의 실험체에 대해서 직접전단실험을 수행하였다.

3.1.1 뒷개형 강재앵커(연속형)

실험체는 AU 합성보의 휨성능에서도 동일한 성능을 위하여 총 585mm, 뒷개형 강재앵커 및 U형 단면의 강판두께로 각각 4.5mm, 9.0mm를 사용하였다. AU 합성보 단면은 폐쇄형으로 하부 U형 단면부와 상부 사다리꼴 모양의 A형 뒷개형 강재앵커로 구성되며, U형 단면은 9mm로 하고 뒷개형 강재앵커 단면은 4.5mm로 계획하였다. 실험체에 스티드 앵커와 뒷개형 강재앵커 단면을 변수로 하였으며, 뒷개형 강재앵커 단면은 콘크리트와의 합성 효과를 높이기 위해 측면에 천공한 형태를 변수로 하였다. 천공은 300mm 간격으로 하였으며, 형태는 원형(직경 150mm)과 사다리꼴형($H \times (B_1 + B_2) = 120\text{mm} \times (120\text{mm} + 180\text{mm})$)을 사용하였다. 스티드 앵커는 직경 19mm, 길이 150mm를 사용하였다. 실험체 일람은 Table 1에, 실험체의 상세는 Fig. 6에 나타내었다.

3.1.2 뒷개형 강재앵커(단속형)

콘크리트에 매립된 뒷개형 강재앵커(단속형)는 부착력이

Table 1. List of specimens (continuous type)

Specimens	Parameter	Dimension (mm)	Lower steel plate (U shaped)
(a) Stud	Stud anchor	$\varnothing 19$	Thk. : 9.0
(b) AU-O	Steel plate anchor-O	Thk. : 4.5 ($\varnothing : 150$)	
(c) AU-U	Steel plate anchor-U	Thk. : 4.5 ($H \times W : 120 \times 180$)	

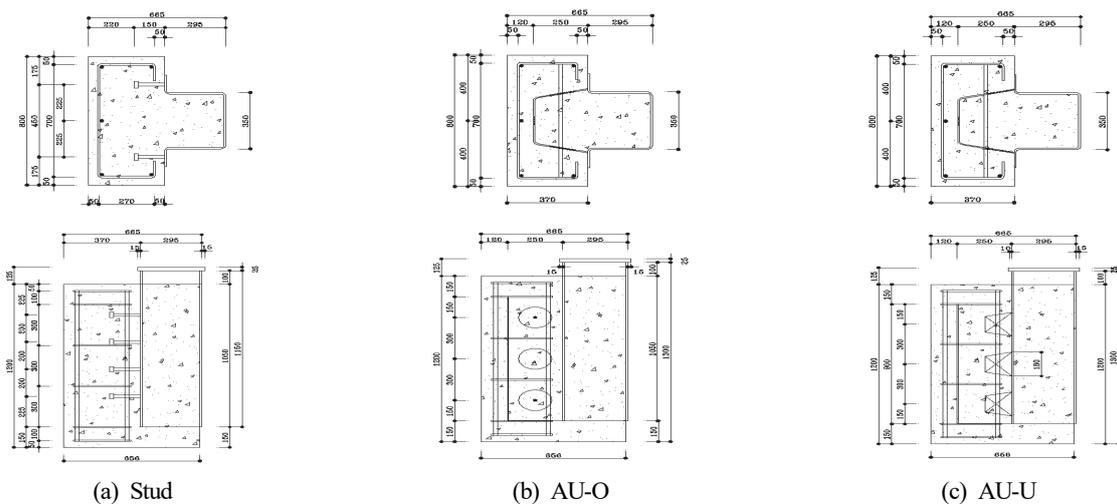


Fig. 6. Detail of specimens (continuous type)

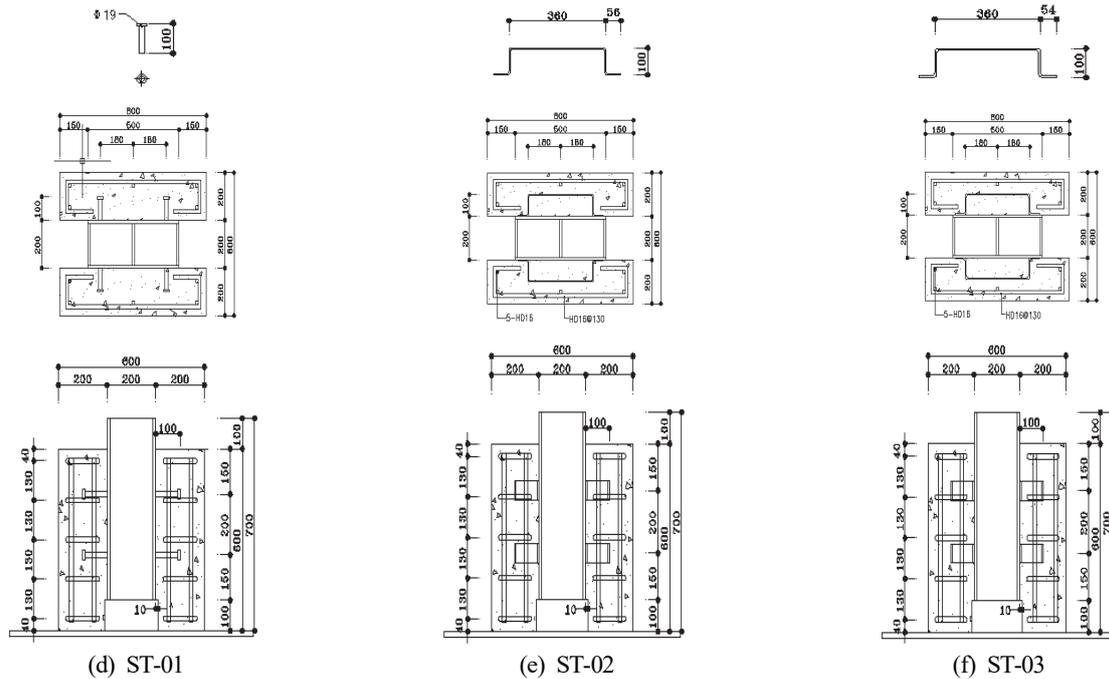


Fig. 7. Detail of specimens (discontinuous type)

아닌 측면의 전단강도에 의해 거동될 것이므로 실험체에서 U형 단면을 제외하였으며, 그 전단성능 평가를 위하여 직접전단실험을 계획하였다.

뒷개형 강재앵커(단속형)의 형상을 변수로 3개의 실험체를 스티드 앵커와 뒷개형 강재앵커(4.5mm, 6.0mm)를 좌우 대칭으로 부착하여 제작하였다. 실험체 일람은 Table 2에 정리하였고, 실험체 상세는 Fig. 7에 나타내었다. 뒷개형 강재앵커(단속형)는 폭 60mm, 높이 100mm이고, 스티드 앵커는 직경 19mm, 높이 100mm이다. 콘크리트 강도는 24mpa, 강재는 SM490을 적용하였다.

3.2 실험 방법

3.2.1 뒷개형 강재앵커(연속형)

3,000kN의 만능재료시험기(UTM, Universal testing

Table 2. List of specimens (discontinuous type)

Specimens	Parameter	Dimension (mm)	A_v (mm ²)
(d) ST-01	Stud anchor	∅ 19×100	283.5
(e) ST-02	Steel plate anchor (Thk : 4.5)	100×60×4.5	270.0
(f) ST-03	Steel plate anchor (Thk : 6.0)	100×60×6.0	360.0

machine)를 사용하여 변위제어 방법으로 0.03mm/s의 속도로 가력하였다. 실험체 설정은 지면에 실험체를 세워놓고 강재보에 부착한 가력판에 하중을 가하는 방식으로 진행하였다. 강재보와 콘크리트의 전단변형량을 고려하여 콘크리트면 위로 노출된 강재보는 100mm이다.

전단성능에 따른 강재보의 수직변위를 측정하기 위해 변위계(LVDT, The linear variable differential transformer)를 설치하였다. 또한 강재보와 콘크리트 사이에 설치되어 합성작용을 일으키는 강재앵커(전단연결재)의 거동을 확인하기 위하여 스티드 앵커와 뒷개형 강재앵커에 변형률계(Strain gauge)를 부착하였다.

3.2.2 뒷개형 강재앵커(단속형)

뒷개형 강재앵커(단속형)의 Push-Out 실험은 Fig. 8과 같이 최대용량 2,000kN의 만능재료시험기(UTM)를 사용하여 변위제어 방법으로 0.03mm/s의 속도로 가력하였다. 가력보를 통해 중앙부의 강재에 가력하고, 실험체의 변위는 좌우측에서 변위계로 측정하였다. 콘크리트의 외부면에 총 8개(정면:6개, 측면:2개)의 변형율 게이지를 부착하였고, 콘크리트에 매립되는 스티드 앵커에 각각 2개씩(길이방향, 전단방향), 뒷개형 강재앵커에 각각 2개씩(전단방향, 인장방향) 부착하였다.

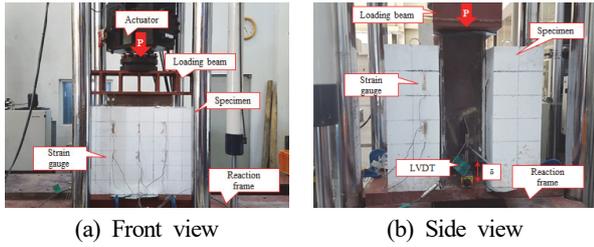


Fig. 8. Setting of specimen and measuring equipment (discontinuous type)

3.3 재료 실험

콘크리트의 설계기준강도(f_{dk})는 24MPa로 계획하였으며, KS F 2405에 따라 제작한 공시체의 압축강도 시험결과 Table 3와 같다. 공시체의 변형률은 부착한 변형률계(Strain gauge)와 공시체 변위를 측정하였다. 실험체에 사용된 강재는 SM490($F_y=315$ MPa)으로 계획되어 KS B 0801에 따라 인장시험편을 채취하여 인장시험을 수행하고 그 결과는 Table 4와 같다.

3.4 파괴 거동

3.4.1 덮개형 강재앵커(연속형)

강재보에 스티드 앵커를 부착한 스티드 앵커 실험체 (a)는 최대하중 801.9kN($\delta_{max}: 3.6$ mm) 이후 급격한 내력저하를 보였다. 덮개형 강재앵커에 원형으로 천공한 실험체 AU-O(b)는 타 실험체와 대비되는 연성적인 거동을 보였다. 강재보와 콘크리트 사이의 화학적 부착력이 소멸되어 탈락 후 강재보의 형상에 의한 기계적 부착력이 하중-변위 거동을 지배하며, 가력 종료 시까지 급격한 내력저하 없이 변형만 지속적으로 증가하는 매우 안정적인 거동을 나타내었다.

Table 3. Test results for compressive strength of concrete

f_{dk} (MPa)	Test		Elastic modulus (E_c , MPa)
	Stress (f_{max} , MPa)	Strain (ϵ_{peak})	
24	25	0.002686	15,987

Table 4. Test results for tension strength of steel

Thickness (mm)	Yield strength (F_y , MPa)	Tensile strength (F_u , MPa)	Yield strain (ϵ_y)	Elastic modulus (E_s , MPa)
4.5	285	405	0.001392	204,741
6.0	300	450	0.001447	207,326



Fig. 9. Failure mode of specimens (continuous type)

덮개형 강재앵커에 사다리꼴형으로 천공한 실험체 AU-U(c)는 스티드 앵커와 유사한 650.7kN에서 초기 미끄러짐이 발생하였으나, 이후에도 선형적인 하중-변위관계를 보이고 강도가 증가하였다. 약 1,050kN에서 완만한 내력 증가를 보이면서 최대하중 1,320.8kN에 도달하였다. 반면 최대하중 이후에는 급격한 내력저하를 보이는 스티드 앵커 실험체와 유사한 거동을 보였다. 덮개형 강재앵커(연속형) 실험체의 파괴양상을 Fig. 9에 나타내었다.

3.4.2 덮개형 강재앵커(단속형)

덮개형 강재앵커(단속형) 실험체의 파괴양상을 Fig. 10에 나타내었다. 강판에 스티드 앵커를 부착한 실험체인 ST-01(d)는 가력 초기에 파열음과 함께 미끄러짐이 발생하였다. 이후 부터는 스티드 앵커를 통해서만 강판에서 콘크리트로 하중이 전달되어 하중이 증가함에 따라 강재와 콘크리트 사이가 벌어지는 현상이 발생하였으며, 실험 종료 후 최대 벌어짐은 7mm가 발생하였다.

강판에 4.5mm 두께의 덮개형 강재앵커를 부착한 실험체 ST-02(e)는 스티드 앵커 실험체와 유사한 거동을 보였다.

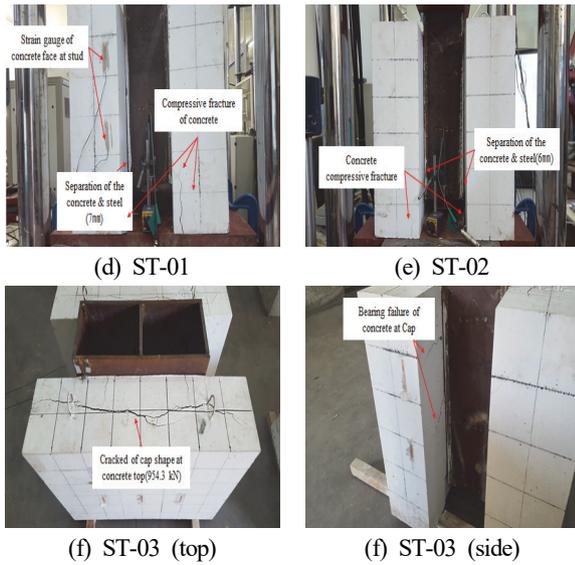


Fig. 10. Failure mode of specimens (discontinuous type)

실험체 ST-01(d)와 같이 소리가 발생하지는 않았으나, 초기 미끄러짐을 보였고 항복 후에도 지속적인 강도증가를 보였다. 최대강도 발현 이후 스티드 앵커와 같은 계단식 내력저하를 나타냈다. 강재와 콘크리트 사이의 벌어짐이 발생하면서 강성이 저하되었고, 실험 종료 후 하부의 최대 벌어짐은 6mm가 발생하였다.

강판에 6.0mm 두께의 덮개형 강재앵커를 부착한 실험체 ST-03(f)는 다른 실험체와 비교 시 가력 초기는 유사하나, 항복 후에는 상이한 거동을 보였다. 실험체 ST-01(d)와 실험체 ST-02(e)와 같이 가력 초반 미끄러짐이 발생하였으며, 큰 강성의 저하없이 하중이 증가하였다. 최종파괴구간에서도 타 실험체와 같은 계단식 내력저하가 아닌 급격한 내력저하를 보였다. 실험체 ST-03(f)는 콘크리트의 파괴에 의해 실험이 종료되었으며, 강판의 전단강도가 콘크리트의 지압강도보다 크기 때문에 판단된다.

3.5 하중-변위 관계

3.5.1 덮개형 강재앵커(연속형)

덮개형 강재앵커(연속형) 실험체에 대한 실험결과, 초기 강성(K_i)과 탄성한계하중(P_{el}), 탄성한계변위(δ_{el}), 최대하중(P_{max}), 최대변위(δ_{max})를 Table 5에 정리하였고, 하중-변위 관계는 Fig. 11에 나타내었다. 초기강성은 하중-변위 관계에서 최대하중의 10% 점과 50% 점을 연결한 선분의 기울기로 산정하였으며, 탄성한계하중은 초기강성이 저하되는 시점의 하중으로 산정하였다. 탄성한계하중시의 변위값을 탄성한계변위로 설정하였다.

각 실험체의 최대강도를 비교하면 스티드 앵커 실험체 (a)

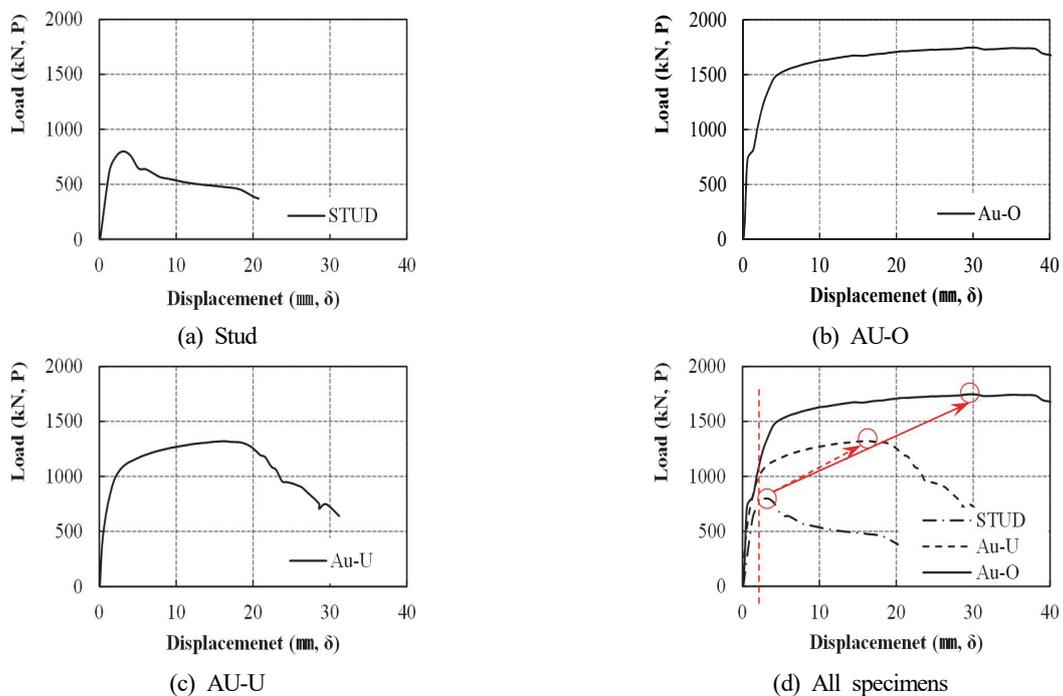


Fig. 11. Load-displacement relationships of specimens (continuous type)

Table 5. Results of direct shear test (continuous type)

Specimens	K_i (kN/mm)	P_{el} (kN)	δ_{el} (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)
(a) Stud	477.4	620.6	1.3	801.9	3.6
(b) AU-O	1,212.8	727.7	0.6	1,723.0	23.4
(c) AU-U	774.7	650.7	0.8	1,320.8	16.3

K_i : Initial stiffness, P_{el} : Elastic limit load, δ_{el} : Elastic limit displacement, P_{max} : Max. load, δ_{max} : Displacement at max. load

대비 실험체 AU-O(b)는 약 2.1배, 실험체 AU-U(c)는 약 1.6배의 높은 강도를 발휘하였다. 하중초기의 강성을 유지하는 구간을 탄성한계로 보았을 때, 최대 하중점의 변위와 탄성 한계점의 변위비(δ_{max}/δ_{el})는 스티드 앵커 실험체 (a)의 경우 2.7배, 실험체 AU-O(b)는 39.0배, 실험체 AU-U (c)는 20.3배를 나타내었다. 따라서 덮개형 강재앵커(연속형)를 설치할 경우 스티드 앵커 실험체와 비교하였을 때 연성적인 거동을 보임을 알 수 있었다.

3.5.2 덮개형 강재앵커(단속형)

각 실험체의 하중-변위 관계를 Fig. 12에 나타내었다. 실험체의 좌우측에서 LVDT를 통해 측정된 변위값과 그 평균값을 함께 나타내었다. 실험체의 최대 내력점까지는 두 LVDT가 동일하게 측정되었으나, 최대강도 발현이후에는 좌우측의 변위가 상이하게 나타났다.

Table 6. Results of direct shear test (discontinuous type)

Specimens	K_i (kN/mm)	P_s (kN)	P_{max} (kN)	δ_s (mm)	δ_{max} (mm)	P_s/P_{max}
(d) ST-01	251.0	75.4	685.0	0.5	5.25	11%
(e) ST-02	697.4	87.0	732.0	0.1	23.1	12%
(f) ST-03	394.2	121.4	954.3	0.1	15.4	13%
(e)/(d)	2.8	1.2	1.1	0.2	4.4	-
(e)/(d)	1.6	1.6	1.4	0.2	2.9	-

K_i : Initial stiffness, P_s : Slip load, P_{max} : Max. load, δ_s : Displacement at slip load, δ_{max} : Displacement at max. load

실험체의 초기강성(K_i)은 최대하중(P_{max})의 10% 점과 50% 점을 연결한 선분의 기울기로 산정하였다. 4.5mm 두께의 덮개형 앵커가 부착된 실험체 ST-02(e)는 스티드 앵커 실험체 ST-01(d)보다 강재 단면적이 약 5% 작으나, 약 2.8배의 높은 강성과 약 1.1배의 높은 강도를 발휘하였으며, 4.4배의 변형성능을 나타내었다. 6.0mm 두께의 덮개형 앵커가 부착된 실험체 ST-03(f)는 스티드 앵커 실험체 ST-01(a) 대비 강재 단면적이 약 27% 많기 때문에 강성은 약 1.6배, 강도는 약 1.4배를 나타내었고 약 2.9배의 변형성능을 보였다. 또한 상대적으로 취성적 거동을 보이는 스티드 앵커 대신에 덮개형 강재앵커를 사용할 경우 항복 후에도 지속적인 강도증가를 보이기 때문에 합성보에 사용 시 연성적인 거동을 예상할 수 있었다. 실험 결과는 Table 6에 정리하였다.

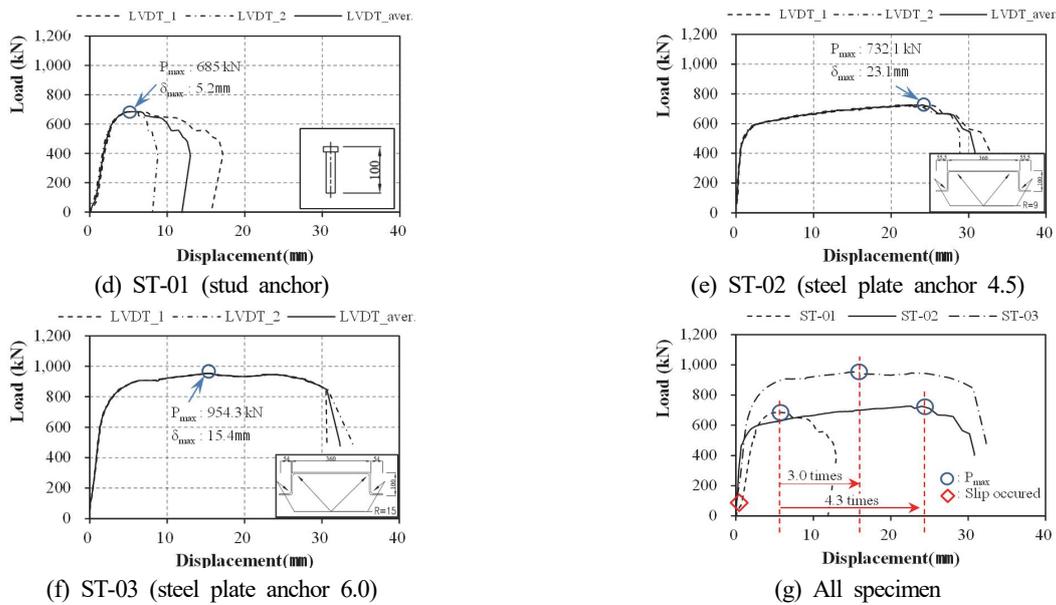


Fig. 12. Load-displacement relationships of specimens (discontinuous type)

4. 뿔개형 강재앵커의 전단강도 평가

4.1 뿔개형 강재앵커(연속형)의 강도 평가

국내의 강구조설계기준과 미국 강구조기준에서 스티드 앵커의 전단강도는 앞의 식(1)에서 논한 바와 같이 콘크리트의 지압강도와 스티드 앵커의 전단파괴강도를 비교하여 작은 값을 결정한다.

$$Q_n = 0.5A_{sa}\sqrt{f_{ck}E_c} \leq R_gR_pA_{sa}F_u \quad (1)$$

위 식 (1)의 R_g , R_p 는 스티드 앵커의 배열 및 설치위치에 따른 계수이므로 본 연구가 뿔개형 강재앵커의 전단성능에 대한 기초연구임을 고려하여 제외하였다. 따라서 뿔개형 강재앵커에서도 스티드 앵커의 강도감소계수는 생략되었다.

이를 토대로 뿔개형 강재앵커(연속형)의 강도식인 식 (6)과 실험체의 실험값을 Table 7에 정리하였다. 실험체별로 비교하면, 스티드 앵커 실험체인 Stud(a)는 실험값이 이론값을 7% 상회하였는데 이는 이론식이 경험적인 실험식에 의해 제안되어 안전율이 반영된 것으로 판단된다. 또한 뿔개형 강재앵커를 사용한 실험체 AU-O(b)와 AU-U (c)는 실험값과 이론값이 거의 동일하여, 뿔개형 강재앵커(연속형)의 전단강도를 보다 정확하게 평가할 수 있을 것으로 판단되었다.

Table 7. The comparison of V_{test} and V_{theory} (continuous type)

Specimens	V_{test} (P_{max} , kN)	V_{theory}					$V_{test}/$ V_{theory}
		① V_{con} (kN)	② V_{fr} (kN)	③ V_{re} (kN)	④ V_{hole} (kN)	The sum (ΣV , kN)	
(a) Stud	801.9	-	-	-	-	748.4	1.07
(b) AU-O	1,723.0	1,195.3	277.0	152.8	100.3	1,725.4	1.0
(c) AU-U	1,320.8	796.9	276.2		86	1,284.9	1.02

Table 8. The comparison of V_{test} and V_{theory} (discontinuous type)

Specimens	V_{test} (kN)	Eq. (1) (kN)	Left of Eq. (7) (kN)	Right of Eq. (7) (kN)	$V_{test}/$ V_{theory}	Failure mode
(d) ST-01	685.1	680.4	-	-	1.00	Stud anchor
(e) ST-02	732.1	-	682.8	874.8	0.84	Steel PL anchor
(f) ST-03	954.3	-	910.4	1,296.0	1.05	Con'c

4.2 뿔개형 강재앵커(단속형)의 강도 평가

4.2.1 기존 강도식의 평가

뿔개형 강재앵커(단속형)의 전단강도는 식 (7)에 의한 계산값과 실험값을 Table 8과 같이 정리하였다. 실험체 ST-01(d)는 실험값이 685.1kN으로 계산값인 680.4kN과는 0.7%의 차이를 보였다. 또한 실험체 ST-02(e)의 경우, 뿔개형 강재앵커의 전단파괴강도인 732.1kN의 실험결과를 나타내었으며 식 (7)에 의한 뿔개형 강재앵커의 전단파괴모드의 874.8kN과는 84%로 평가되었다. 그리고 실험체 ST-03(f)는 실험결과 954.3kN으로 콘크리트의 파괴강도에 의해 결정되었으나 식 (7)에 의한 콘크리트의 파괴모드의 910.4kN과 비교시 5%를 상회하는 결과를 나타냈다. 따라서 식 (7)을 사용한 뿔개형 강재앵커(단속형)의 전단강도 평가시 콘크리트의 파괴모드시 평가는 가능하지만, 전단파괴모드에 대해서는 일치하지 않음을 확인할 수 있었다. 이에 대하여 해석적 검토를 통한 원인을 파악해 보았다.

4.2.2 뿔개형 강재앵커 측판에 대한 유한요소 해석

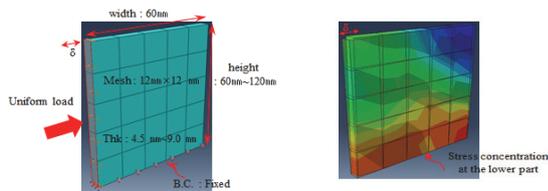
뿔개형 강재앵커(단속형)의 전단강도 평가시 실험값과 제시된 식 (7)에 의한 계산값을 비교한 결과, 콘크리트 파괴모드를 제외하고 뿔개형 강재앵커의 전단파괴모드인 경우에 별도의 강도감소계수가 필요할 것으로 판단되었다. 먼저, 강재의 파괴모드에서 뿔개형 강재앵커의 형상에 따른 강도감소요인을 고려할 필요가 있었다. 스티드 앵커의 경우 몸체 직경과 길이로 구성된 형상이 제한사항이기 때문에, 뿔개형 강재앵커도 두께, 폭, 높이의 형상을 감안하여 폭-높이비에 따른 측판의 전단강도에 대한 영향을 예상하였다. 이에 뿔개형 강재앵커의 유한요소 해석시 뿔개형 강재앵커의 두께, 폭, 높이에 대한 영향을 고려하였다.

유한요소 해석시 ABAQUS 해석프로그램을 사용하였고, 그 해석모델 일람은 Table 9에 정리하였다. 해석 시 강재는 실험체와 동일한 SM490($F_y=315\text{MPa}$, $F_u=490\text{MPa}$)을 적용하였다. 또한 해석모델의 지점조건과 가력조건, 메쉬(Mesh)를 Fig. 13(a)에 나타내었고, 해석 후 각 메쉬의 응력 분포 및 변형형상은 Fig. 13(b)에 나타내었다. 해석모델은 강판 두께별(4.5mm, 6.0mm, 9.0mm)로 뿔개형 강재앵커의 폭을 60mm로 고정하고, 높이를 60mm, 90mm, 120mm로 증가시켜 뿔개형 강재앵커의 폭-높이비(1, 1.5, 2)를 선정하였다. 뿔개형 강재앵커는 측판이 합성보 플랜지에 용접되어 설

치되기 때문에 해석모델의 하부를 고정단으로 설정하고 수평방향으로 가력하였다. 해석 결과를 변위 10mm 단위로 Table 10에 정리하였고, 폭-높이비가 1.0인 해석모델에 대

Table 9. List of FEM model

Model	Thickness (mm)	Height (mm)	width-height ratio
(1) 4.5-60	4.5	60	1.0
(2) 4.5-90		90	1.5
(3) 4.5-120		120	2.0
(4) 6.0-60	6.0	60	1.0
(5) 6.0-90		90	1.5
(6) 6.0-120		120	2.0
(7) 9.0-60	9.0	60	1.0
(8) 9.0-90		90	1.5
(9) 9.0-120		120	2.0



(a) Detail of analysis (b) Analysis model

Fig. 13. Setting of specimen & measuring equipment

Table 10. List of FEM

Specimens	P_p (kN)	P_δ (kN)					Average
		$P_{\delta 10}$	$P_{\delta 20}$	$P_{\delta 30}$	$P_{\delta 40}$	$P_{\delta 50}$	
(1)	66.1	57.6	59.4	61.4	63.8	67.0	-
(2)		42.6	45.0	47.4	49.8	52.2	
(3)		33.6	35.4	37.3	39.3	41.7	
(2)/(1)		0.74	0.76	0.77	0.78	0.78	0.77
(3)/(1)		0.58	0.60	0.61	0.62	0.62	0.60
(4)	88.2	76.9	79.2	82.0	85.3	89.6	-
(5)		56.7	59.7	63.3	66.0	69.6	
(6)		44.8	47.6	49.8	52.6	55.5	
(5)/(4)		0.74	0.75	0.77	0.77	0.78	0.76
(6)/(4)		0.58	0.60	0.61	0.62	0.62	0.61
(7)	132.3	115.5	118.8	122.6	127.8	134.0	-
(8)		85.3	90.0	94.6	99.2	105.4	
(9)		66.8	71.1	74.3	78.6	82.9	
(8)/(7)		0.74	0.76	0.77	0.78	0.79	0.77
(9)/(7)		0.58	0.60	0.61	0.62	0.62	0.60

한 강도비를 나타내었다. 해석모델의 하중-변위 관계를 Fig. 14(a)~(c)에, 폭-높이비와 강도비의 관계를 Fig. 14(d)에 나타내었다.

유한요소 해석 결과, 강판 두께에 관계없이 폭-높이비가 덮개형 강제앵커 측판의 전단강도에 영향을 미치는 것으로 나타났다. 해석모델의 단면적에 대한 소성하중(P_p)을 식 (8)에 의해 계산하면, 두께별로 각각 66.1kN, 88.2kN, 132.3kN으로 계산되며, 이때의 변위는 약 48mm로 동일하였다. 이를 통해 폭-높이비가 1.0인 모델을 기준으로 폭-높이의 비가 1.5인 경우는 평균 0.77배, 폭-높이의 비가 2.0인 경우에는 평균 0.6배의 전단강도를 발휘하였다. 따라서 덮개형 강제앵커(단속형)의 전단강도 산정시 유한요소 해석 결과를 반영하여 폭-높이비에 따른 덮개형 강제앵커 측판의 전단강도 감소계수를 적용할 필요가 있을 것으로 판단되었다.

$$P_p = A_v \times F_u \quad (8)$$

4.2.3 강도감소계수를 적용한 전단강도 평가

유한요소 해석 결과를 반영하여 덮개형 강제앵커 측판의 폭-높이비에 따라 전단강도 감소계수(λ)를 적용하여 식 (7)을 다음과 같은 식 (9)와 같이 수정하여 검토하였다.

$$Q_{cap} = 0.5A_{cap} \sqrt{f_{ck} E_c} \leq \lambda A_{cap} F_u \quad (9)$$

실험체의 덮개형 강제앵커(단속형)는 폭 60mm, 높이 90mm 이므로 폭-높이비가 1.5이다. 따라서 식 (9)에 전단강도 감소계수인 $\lambda = 0.77$ 을 적용할 경우, 실험체 ST-02(e)의 덮개형 강제앵커 측판에 대한 전단강도는 덮개형 강제앵커의 전단파괴강도인 673.6kN으로 산정된다. 이는 실험체 ST-02(e)가 덮개형 강제앵커의 전단파괴 거동의 실험값 732.1kN과 비교시 약 8%를 상회하였다. 또한 실험체 ST-03(f)에 식 (9)의 전단강도 감소계수인 $\lambda = 0.77$ 을 적용하면 콘크리트 파괴강도의 값으로 거동이 지배되어 910.4kN으로 산정되었다. 이 값은 실험체 ST-03(f)가 콘크리트의 파괴에 의해 결정된 실험값인 954.3kN과 약 5%의 차이를 보였다. 따라서, 덮개형 강제앵커(단속형)의 전단강도 감소계수인 $\lambda = 0.77$ 인 경우 실험값은 식 (9)에 의한 전단강도보다 약 5~8% 범위내에서 초과됨을 알 수 있었다. 이를 정리하여 Table 11에 나타내었다.

이와 같이 유한요소 해석 결과에 근거하여 덮개형 강제앵

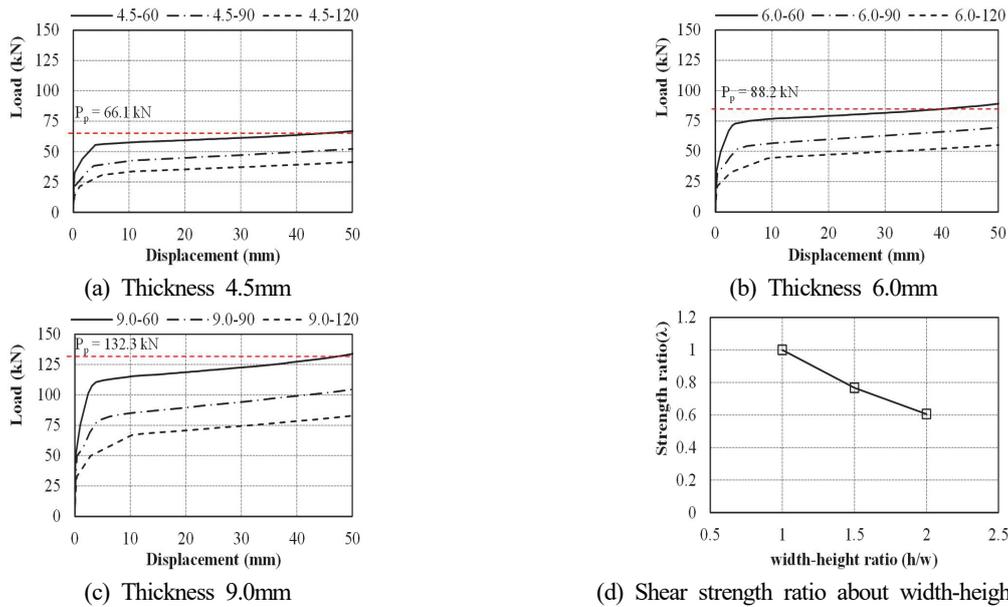


Fig. 14. The shear strength about the width-height ratio of Steel plate anchor's side plate

Table 11. The comparison of V_{test} and calculated V_{theory} by Eq. (9)

Specimens ①	V_{test} (kN) ②	Left of Eq. (9) (kN) ③	Right of Eq. (9) (kN) ④	Min(③, ④) of Eq. (9) (kN) ⑤	$V_{test}/$ V_{theory} ⑥	Failure mode ⑦
ST-02	732.1	682.8	673.6	673.6	1.08	Steel PL anchor
ST-03	954.3	910.4	985.0	910.4	1.05	Con'c

커(단속형)의 전단강도는 강제앵커 측판의 폭-높이비의 제한사항을 고려하고 그에 따라 전단강도 감소계수가 반영된 식 (9)를 적용하여야 할 것이다.

5. 결론

본 연구는 AU 합성보의 핵심적인 요소로 절곡강판을 이용한 덮개형 강제앵커를 개발하여 전단성능 실험과 단순모델에 대한 유한요소해석을 통해 전단성능을 평가하였다. 그 결과는 다음과 같이 요약될 수 있다.

- (1) 절곡강판을 이용한 AU합성보의 덮개형 강제앵커(연속형)를 직접전단실험한 결과, 덮개형 강제앵커(연속형)는 스티드 앵커 실험체와 비교시 강도가 1.6배 이상 높고 탄성한계점과 최대강도점의 변위비도 20.3배 이상으로

- 매우 연성적인 거동을 보였다.
- (2) 덮개형 강제앵커(연속형)의 전단 거동을 통해 제안한 전단강도식은 실험값과 거의 동일한 값을 보였으며 이를 통해 덮개형 강제앵커(연속형)의 전단강도를 예측할 수 있었다.
- (3) 덮개형 강제앵커(단속형)의 직접 전단실험 결과, 스티드 앵커와 유사한 거동을 보이면서 단면적이 약 5% 적어도 강성은 약 2.8배, 강도는 약 1.1배를 발휘하고 4.4배의 변형성능을 나타내었다.
- (4) 덮개형 강제앵커(단속형)의 전단강도 평가의 실험값과 제안식의 값을 비교한 결과, 덮개형 강제앵커가 전단 파괴모드인 경우 덮개형 강제앵커(단속형)의 측판을 두께별로 폭-높이비가 전단강도에 미치는 영향을 유한요소 해석을 통해 평가하였다. 덮개형 강제앵커(단속형)의 두께별 폭-높이비가 1에서 1.5, 2.0으로 증가할수록 전단강도는 평균 0.77배, 0.6배로 감소하였다. 이에 제안식의 값과 실험값을 비교하여 제안식의 적정성을 검토하고, 덮개형 강제앵커(단속형)의 전단강도 산정시 덮개형 강제앵커 측판의 폭-높이비의 제한사항을 고려한 전단강도 감소계수(λ)를 제안하였다.

감사의 글

This work was supported by the Nuclear Research &

Development of the Korea Institute of Energy Technology and Planning(KETEP) grant funded by the Korea government Ministry of Trade, Industry and Energy (No. 20151510400100). Also this research was supported by a grand (12 High-tech Urban D06) from High-tech Urban Development Program funded by Ministry and Maritime Affairs of Korean Government. In addition, this research was supported by N.I STEEL Co., Ltd., ACT PARTNER and N.tage Co., Ltd..

참고문헌(References)

- [1] 한국강구조학회(2014) 강구조설계기준(하중저항계수설계법), 국토교통부.
KSSC (2014) *Steel Structure Design Code, Ministry of Land, Infrastructure and Transport, Korea* (in Korean).
- [2] American Institute of Steel Construction (2010) *Specification for Structural Steel Buildings* (ANSI/AISC 360-10), USA.
- [3] Ollgaard, J.G., Slutter, R.C., and Fisher, J.W. (1971) Shear Strength of Stud Connectors in Lightweight and Normal Weight Concrete, *Engineering Journal*, American Institute of Steel Construction, Vol.8, No.2, pp.55-64.
- [4] Mainstone, R.J., and Menzies, J.B. (1967) Shear Connectors in Steel-Concrete Composite Beams for Bridges, Part 1: Static and Fatigue Tests on Push-out Specimens, *Concrete*, Concrete Society, Vol.1, No.9, pp.291-302.
- [5] 허병욱, 곽명근, 배규웅, 정상민, 강석규(2007) 트러스 데크를 사용한 강판성형 합성보의 휨성능 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제19권, 제4호, pp.413-423.
Heo, B.W., Kwak, M.K., Bae, K.W., Jung, S.M., and Kang, S.K. (2007) Flexural Capacity of the Profiled Steel Composite Beams with Truss Deck Plate, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.4, pp. 413-423 (in Korean).
- [6] 김상섭, 김상모, 김성배, 서동기, 김규석(2004) 단순지지 T형 합성보의 휨거동에 관한 실험적 연구, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제16권, 제2호, pp.225-233.
Kim, S.S., Kim, S.M., Kim, S.B., Seo, D.G., and Kim, K.S. (2004) An Experimental Study on the Behavior of the T-Type Steel Composite Beam, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.16, No.2, pp.225-233 (in Korean).
- [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).

기 호(Notation)

- A_{sa} : 스티드 앵커의 단면적(mm²)
- f_{ck} : 콘크리트의 설계기준강도(MPa)
- E_c : 콘크리트 탄성계수(MPa)
- R_g : 데크플레이트의 골당 스티드 앵커 개수에 따른 계수
- R_p : 스티드 앵커의 설치 위치에 따른 계수
- F_u : 스티드 앵커 또는 강판의 인장강도(MPa)
- A_{cap} : 덮개형 강재앵커 측판의 전단방향 단면적
- λ : 덮개형 강재앵커 측판의 전단강도감소계수

요 약 : U형 합성보를 근간으로 층고절감과 공기단축을 위하여 경제적이고 효율적인 새로운 형상의 AU합성보를 연구하였다. 그러나 U형 단면의 특성상 상부가 개방되어 폭 고정을 위한 별도의 철물이 필요하며 U형 단면과 콘크리트 사이의 합성을 위하여 수평전단력에 대한 저항체가 필요하다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 A형의 덮개형 강재앵커를 개발하였다. 본 연구에서는 A형의 덮개형 강재앵커에 대한 직접전단실험을 수행하고 수평전단력에 의한 내력을 평가하였다. 덮개형 강재앵커는 적용되는 데크플레이트의 형상에 따라 연속형과 단속형으로 구분하였다. 실험 결과, 연속형의 경우 스티드 앵커와 동일한 구조적 거동으로 강도와 변위가 스티드 앵커 이상으로 발휘하여 스티드앵커와 동일하게 평가할 수 있다. 단속형의 경우는 직접전단실험과 단순모델의 유한요소해석을 통해 폭-높이비가 증가할수록 전단강도가 감소하였다. 이에 따라 스티드앵커의 전단강도식을 개선하여 성능평가식을 제안하였다.

핵심용어 : AU합성보, 스티드 앵커, A형의 덮개형 강재앵커, 직접전단실험, 유한요소해석, 전단강도