

강섬유 보강 초고성능 콘크리트 슬래브의 뚫림 전단 성능 평가

Estimation of Punching Shear Strength for Ultra High Performance Concrete Thin Slab

박지현*
Park, Ji-Hyun

홍성걸**
Hong, Sung-gul

Abstract

UHPC(Ultra High Performance Concrete) is used widely with its remarkable performance, such as strength, ductility and durability. Since the fibers in the UHPC can control the tensile crack, the punching shear capacity of UHPC is higher than that of the conventional concrete. In this paper, seven slabs with different thickness and fiber volume ratio were tested. The ultimate punching shear strength was increased with the fiber volume ratio up to 1%. The shear capacity of specimens with the fiber content 1% and 1.5% do not have big differences. The thicker slab has higher punching shear strength and lower deformation capacity. The critical sections of punching shear failure were similar regardless of the fiber volume ratio, but it were larger in thicker slab.

Keywords : Failure behavior, Punching shear, Thin slab, UHPC

1. 서론

UHPC(Ultra High Performance Concrete)는 강섬유보강 초고강도 콘크리트이다. 강도는 물론 연성과 내구성이 좋다는 장점도 있어 최근 UHPC를 활용하기 위해 연구가 활발히 진행 중에 있다. 얇은 UHPC 슬래브는 가벼운 자중으로 큰 하중을 견딜 수 있다는 큰 장점이 있어 조발대교의 바닥판에 사용되었으며, 대공강 및 셸구조에의 활용도 기대된다.

UHPC 슬래브는 인장력에 대한 저항성을 가지고 있기 때문에 별도의 보강없이 뚫림 전단에 대해 저항할 수 있다. 기존 콘크리트 슬래브에서는 많은 양의 보강 철근과 스테럽이 필요하지만, UHPC를 사용할 경우 이러한 철근의 사용량을 줄일 수 있는 장점이

있다. 기존 콘크리트를 사용하여 UHPC 슬래브와 같은 뚫림 전단 강도를 가지는 30mm 두께의 슬래브를 타설하려면 D10 스테럽을 15mm 간격으로 보강해주어야 한다. 본 실험변수로 적용된 두께 중 가장 큰 60mm 슬래브에 대해서는 D16의 스테럽을 30mm 간격으로 보강해주어야 하는데 이는 ACI에서 제시한 최소 스테럽 간격인 100mm에 훨씬 미치지 못하는 간격이다. 이처럼 실제 구조물에서 같은 강도의 얇은 슬래브는 배근이 어렵기 때문에, 얇은 슬래브 설계에 UHPC를 사용하는 것은 매우 효과적이지만 아직 UHPC의 역학적 구조 성능에 대한 연구 결과가 많지 않기 때문에 이를 사용한 구조 설계에 어려움이 있다.

본 연구에서는 얇은 UHPC 슬래브에 집중하중이 작용할 때 발생하는 뚫림 전단 파괴 거동을 관찰하고 성능을 파악하고자 하였다. 기존 뚫림 전단강도 평가식은 일반 콘크리트의 강도 범위를 제시하며, 강섬유의 영향을 고려하지 않는다. 또한, 기존 콘크리트는 취성 파괴가 일어나 인장철근의 보강이 필수적이기 때문에 철근비를 뚫림 전단강도 산정식에 포함하는 경우도 있지만 UHPC는 자체 인장력으로 인해 철근

* 정회원, 서울대학교 공과대학 건축학과, 석사과정
Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University

** 교신저자, 서울대학교 공과대학 건축학과, 공학박사
Department of Architecture and Architectural Engineering, Seoul National University
Tel: 02-880-7061 Fax: 02-874-2628
E-mail: sglhong@snu.ac.kr

보강 없이 사용이 가능하며, UHPC의 인장력을 반영하는 산정식이 필요하다.

K-UHPC 설계지침에서는 직접 인장실험을 통해 균열폭에 따른 평균 사인장 응력을 제시하여 이를 뚫림전단 산정식에 적용하는 방식을 도입하고 있다. 재료 실험 및 본 실험을 통해 K-UHPC 설계식 결과를 이번 실험에서의 결과와 비교해 그 타당성을 입증하고자 한다.

2. 실험 계획

UHPC는 <Table 1>의 배합표를 기준으로 배합되었다. 기존의 포트랜드 시멘트와 실리카 폼이 사용되었고, 평균 4 μ m의 잔골재가 포함된다. UHPC 보강에 사용되는 강섬유의 인장응력은 2,000MPa가 넘어야 한다.

<Table 1> Mixing proportion of UHPC

W/B (%)	Cement (kg/m ³)	Silica fume (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)
23	783.2	195.8	861.52
Filing powder (kg/m ³)	Superplast icizer (kg/m ³)	Steel fiber volume ratio	
234.96	15.66	0%~1.5% (19.5mm and 16.3mm fibers are mixed in the ratio of 2:1)	

UHPC 배합에는 굵은 골재가 없고 물 사용량이 매우 작다는 특성이 있다. UHPC의 물-바인더 비는 0.23으로 시멘트 및 실리카 폼 재료에 비해 매우 적은 양의 물을 사용하고 있다. 물을 적게 사용함으로써 시멘트 재료 사이의 공간을 극소화 시킬 수 있으며, 매우 작은 골재가 그 사이의 재료를 채우는 역할을 한다.

인장 강도 2,500MPa의 19.5mm 강섬유와 16.3mm 강섬유가 2:1의 비율로 UHPC 보강을 위해 사용된다. 기존 연구에서 다양한 길이의 강섬유를 사용함으로써 다양한 균열 폭에 따라 응력을 제어하는 가교현상이 효과적으로 일어난 것을 확인할

수 있었다.¹⁾ 뚫림전단 강도에 크게 영향을 미치는 인장 응력을 높이기 위해 2가지 종류의 강섬유가 사용되었다. 강섬유 부피비가 뚫림전단 강도에 미치는 영향을 확인하기 위하여 0%, 0.5%, 1.0%와 1.5%의 강섬유 부피비를 가진 UHPC에 대하여 실험을 진행하였다. 강섬유의 양 및 재료 특성과 인장 응력의 관계가 명확히 정립되어 있지 않은바, 본 연구에서는 UHPC의 직접 인장응력 실험결과로 강섬유 부피비가 인장응력에 미치는 영향과 이에 따른 뚫림전단 성능의 향상을 확인하고자 하였다.

2.1 실험체 제작

본 연구에서는 7개의 1,600mm 정사각형 형태의 슬래브를 제작하였다. 슬래브 두께와 강섬유 부피비를 변수로 실험을 진행하였으며 실험체 일람은 <Table 2>와 같다.

슬래브 두께는 30mm, 40mm, 50mm, 60mm의 네 종류로 일반 슬래브에 비해 비교적 작게 정하였으며 이는 아래 두 가지 이유로 설명될 수 있다. 첫 번째는 기존 콘크리트 슬래브에 비해 성형성이 좋은 제작상의 장점과 강도가 높고 연성이 좋은 재료 물리적의 장점을 활용하기 위함이며, 두 번째는 RC 슬래브의 윗면에 보강용으로 사용할 경우를 변수로 포함시키기 위함이다. 기존 연구에서 2% 이상의 강섬유는 UHPC 성능 보강에 큰 영향을 미치지 못한다는 결과가 있으므로, 이 연구에서 강섬유 부피비는 0 ~1.5%의 4가지 타입으로 변수를 설정하였다.

<Table 2> Punching shear test specimens

Specimen ID	Slab thickness (mm)	Fiber volume ratio (%)
D30-f1.5	30	1.5
D40-f1.5	40	1.5
D50-f1.5	50	1.5
D60-f1.5	60	1.5
D40-f1.0	40	1.0
D40-f0.5	40	0.5
D40-f0.0	40	0.0

2.2 재료 실험

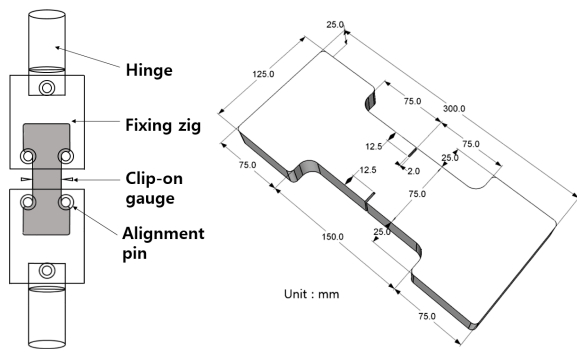
2.2.1 압축 강도 실험

뛰어난 압축 성능은 UHPC의 가장 큰 장점 중 하나이다. 이번 연구에서는 강섬유 부피비에 따라 4가지 종류의 UHPC에 대한 실험을 진행하였다. 각 강섬유 부피비에 따라 3개의 시편을 실험하였고, 그 평균값은 <Table 3>과 같이 나타났다. 강섬유가 많을수록 압축 강도도 큰 것으로 나타났지만, 그 차이는 표준 편차와 크게 차이가 나지 않아 무시할 수 있을 정도로 판단된다.

<Table 3> Compressive strength test results of UHPC

Fiber volume ratio	0%	0.5%	1.0%	1.5%
Compressive strength [MPa]	114.1	120.9	124.2	126.6
Standard deviation [MPa]	6.33	6.68	6.24	8.98

2.2.2 인장 강도 실험



<Fig. 1> Direct tensile strength test of UHPC and notched specimen (KCI, 2012)

압축 강도 실험과 마찬가지로 4가지 종류에 대한 UHPC 공시체의 직접 인장 강도 시험방법에 따라 실험을 진행하였다. <Fig. 1>과 같이 직접인장시험체의 양단은 힌지로 고정하고, 노치 구간에 클립게이지를 설치하여 개구변위를 측정하였다. 그 결과는 <Table 4>와 같다.

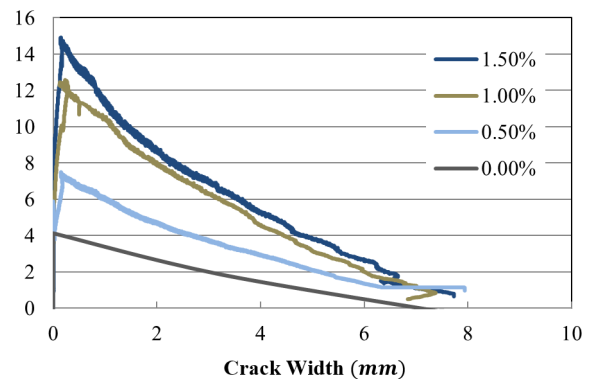
극한 인장 강도, f_{tk} 는 강섬유 부피비가 커질수록 증가하는 형태를 보였지만, 1.0%와 1.5% 부피비의 UHPC 인장 강도는 거의 차이가 없는 것으로 나타

났다. 또한, 1.5% 강섬유 부피비의 UHPC의 인장강도 표준편차가 1.0% 보강된 UHPC에 비해 2.65배 크게 나타났다. 안정된 인장 강도 값을 경제적으로 얻기 위해 1.0% 강섬유 부피비가 더욱 유리할 수 있을 것으로 여겨졌고, 이를 위한 추후의 실험이 필요할 것으로 보인다.

<Table 4> Tensile strength test results of UHPC

Fiber volume ratio	0%	0.5%	1.0%	1.5%
Cracking stress, f_{crk} [MPa]	-	5.79	12.30	13.73
Ultimate tensile stress, f_{tk} [MPa]	4.07	6.43	14.98	15.12
Crack width at f_{tk} , w_u [mm]	0	0.54	0.4	0.44
Limit on crack width, w_{lim} [mm]	7.54	6.95	7.12	8.2
w_u/w_{lim} [mm/mm]	0.0	0.077	0.056	0.053
Standard deviation [MPa]	0.065	0.799	1.795	4.758

Tensile Stress (MPa)



<Fig. 2> Crack width-tensile stress relationship for UHPC

<Fig. 2>에서 확인할 수 있듯이 강섬유가 없는 UHPC를 제외한 시편은 극한 상태에 도달했을 때, 거의 비슷한 균열 폭을 가지는 것으로 확인했고 강섬유 부피비와 인장 강도에 관계없이 w_u 와 w_{lim} 값이 거의 비슷하게 나타났다.

2.3 실험체 제작 및 실험 계획

실험체는 1,600mm 정사각형 형태의 슬래브로 제작하였다. 실험체를 실험 지그에 고정하기 위하여 <Fig. 3>과 같이 네 번 가장자리에 실린더를 설치하여 구멍을 제작하였다. 완전 고정 경계조건을 형상화하기 위해 단부까지의 순경간은 1,200mm이고, 슬래브의 두께는 30mm에서 60mm로 제작되었다.

슬래브 실험에 있어 완전 고정 단부 설계는 어려움이 있어 지금까지 콘크리트 슬래브는 주로 단순 지지 경계조건을 형상화하여 실험되었다. 하지만 이번 연구의 목표인 슬래브의 뚫림전단 파괴 성능 확인을 위해서는 뚫림전단 파괴를 유도하기 위해 완전 고정 단부 설계가 필수적이다. 얇은 슬래브의 특성으로 인해 단순지지 슬래브로 실험할 경우 슬래브가 휨 파괴를 일으키거나 단부에서 비틀림 파괴가 일어날 경향이 크다. 이를 보완하기 위해 완전 고정 단부가 필요하다고 판단되어 기존 논문의 실험에서 사용된 방법을 적용하였다.²⁾

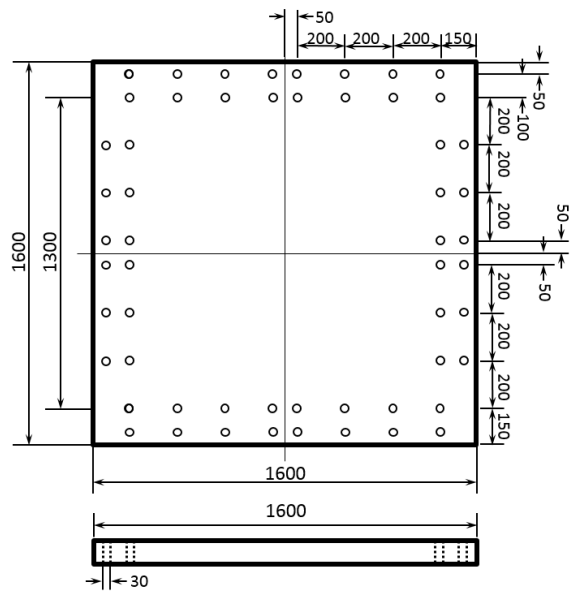
지그 4면에서 2열의 볼트로 고정함으로써, 단부에서의 휨 및 비틀림 파괴를 막고자 하였다. 고정단의 상세는 <Fig. 4>와 같으며, 슬래브 하부에서 H500×200 형강이 지지하고 상부에서 C200×90 형강으로 회전과 변형을 방지하였다.

재하판의 크기는 얇은 UHPC 슬래브의 특성상 재하면적이 넓으면 휨파괴가 일어날 가능성이 크다고 판단되어 휨파괴를 유도하지 않는 크기 내에서 브릿지 데크의 운하중을 형상화하고자 하여 계획하였다. 이와 같은 조건을 고려하고, 기존의 실험결과¹⁾를 참고하여 재하판의 크기는 50mm×50mm으로 정하였으며 <Fig. 5>와 같이 윗면에서 하중을 가하도록 계획하였다.

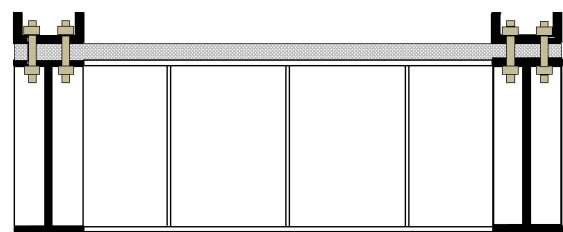
2.4 계측 계획

뚫림 전단 거동을 관찰하고 파괴의 양상을 확인하기 위해 수직 변위와 수평 변위를 슬래브 중심에서 거리에 따라 측정하였다. 수직 변위는 총 9개의 LVDT를 하중 재하 중앙부와 100mm, 200mm, 300mm, 500mm 떨어진 부분에 2방향으로 설치하여 측정하였다. 콘크리트 게이지는 슬래브의 인장면

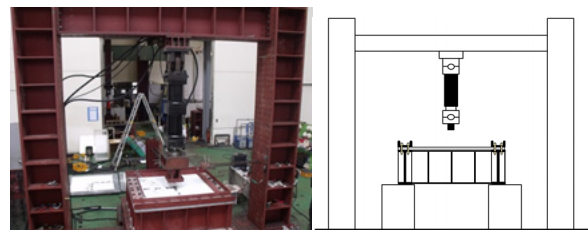
과 압축면의 같은 자리에 부착하여 파괴가 일어나는 스트럿 각도를 확인하고자 하였다. 슬래브의 상·하부에 총 12개의 콘크리트 게이지를 계획하였다. 이는 슬래브에 2방향으로 재하 면과 200mm, 400mm 떨어진 곳에 설치되었다. 콘크리트 게이지를 통해 미세 균열의 크기를 측정함으로써 위험 단면의 위치를 파악할 수 있을 것으로 예상하였다.



<Fig. 3> Test specimen black-out and the elevation



<Fig. 4> Fully restrained boundary condition



<Fig. 5> Specimen setting

3. 실험 진행 및 결과

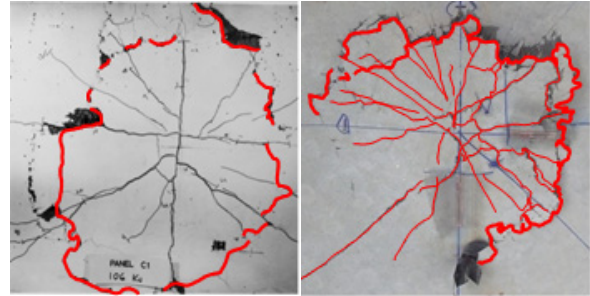
이 연구에서는 뚫림 전단 파괴 메커니즘을 파악하기 위해 뚫림 전단 형태의 관찰과 변형 측정이 매우 중요하게 다루어졌다. 미세 균열의 위치와 균열 폭은 콘크리트 게이지를 통해 측정되었으며, 추후의 실험에서 참고 할 수 있도록 파괴 과정에 대해 상세히 관찰하고 기록하였다.

3.1 실험 일반 및 파괴 거동

뚫림 전단으로 파괴가 일어난 UHPC 슬래브와 기존 콘크리트 슬래브는 <Fig. 6>과 같은 차이점을 보였다. UHPC 슬래브에서는 기존 콘크리트 슬래브에 비해 미세한 균열이 많이 발생한 것을 확인할 수 있었다. UHPC 슬래브에 미세 균열이 발생하면 보강된 강섬유가 미세 부분의 슬래브에 철근처럼 작용하여 뚫림 전단에 저항하는 연화 구간이 발생한다. 미세 균열이 일정 균열 폭보다 커지면, 그 부분에서 위험 균열이 발생하고 그 부분에서 파단이 일어나게 된다. 강섬유의 이러한 효과를 가교 현상이라고 부르며, 가교 현상으로 인해 기존 콘크리트 슬래브에 비해 UHPC 슬래브의 뚫림 전단 저항성이 크게 나타난다.

재하 하중이 8kN에서 10kN에 도달했을 때, 작은 소음이 들려 미세 균열이 발생하고 강섬유의 뿔뿔 현상이 일어났음을 예상할 수 있었다. 하중이 최대 하중의 70%정도까지 증가했을 때 강섬유의 파단이 일어나는 것으로 보였고, 크게 파괴가 일어나는 소음이 들렸다.

기존 콘크리트 슬래브의 뚫림 전단 실험에서는 파괴 단면이 재하 단면에서부터 슬래브 두께의 3배 ~ 4배 떨어진 곳에서 파단이 일어나지만 UHPC 슬래브의 경우 인장면의 파단 면적이 보다 넓은 것으로 확인되었다. 이 실험에서는 재하 단면에서 슬래브 두께의 5배 ~ 6배만큼 떨어진 부분에서 파괴가 일어나는 것을 확인할 수 있었다. 이를 통해 UHPC 슬래브의 스트럿 각도가 기존 콘크리트 슬래브의 각도인 45°보다 완만하다고 가정할 수 있다.



<Fig. 6> Punching shear failure pattern of (Normal concrete slab: left, UHPC: right)

3.2 최대 뚫림 전단 강도와 중앙부 처짐

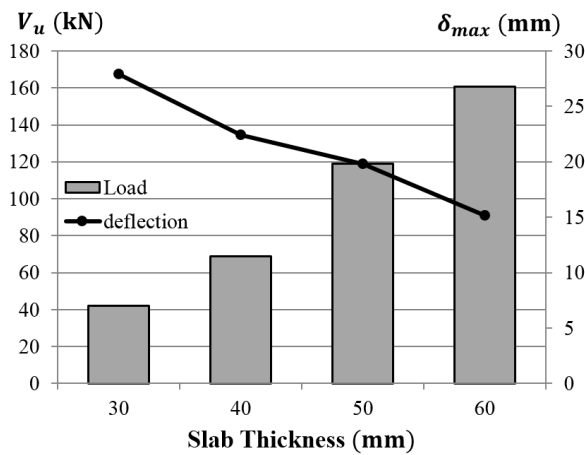
한계 상태에 도달했을 때, 최대 뚫림 전단 강도와 수직 처짐이 <Table 6>과 같이 나타났다. <Fig. 7>과 <Fig. 8>은 각각 슬래브의 두께와 강섬유 부피비가 최대 뚫림전단 강도(V_u)와 V_u 가 가해질 때 수직 처짐(δ_{max})에 미치는 영향을 나타낸 그래프이다.

<Fig. 7>에서 두꺼운 슬래브일수록 뚫림 하중에 대한 저항성이 커지는 것을 확인할 수 있었다. 최대 뚫림 전단 강도는 최대 수직 처짐에 반비례하는 형태를 보여 두꺼운 슬래브일수록 뚫림 전단 강도는 증가하지만, 연성은 오히려 감소함을 확인할 수 있다.

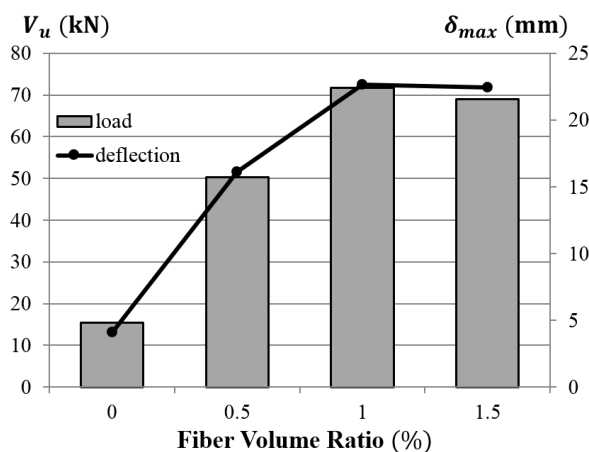
반면, <Fig. 8>에서는 강섬유 부피비가 증가함으로써 뚫림 전단 강도가 증가함과 동시에 최대 수직 처짐 또한 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 0%에서 1%까지 강섬유 부피비가 증가함에 따라 V_u 와 δ_{max} 가 함께 증가하는 추세를 보였다. 하지만, 1%와 1.5% 강섬유 부피비를 갖는 슬래브의 경우 강도와 처짐의 큰 차이가 없었고, 오히려 1% 강섬유 보강 UHPC 슬래브에서 더 높은 강도와 처짐을 보였다. 이는 사전 재료 실험에서와 비슷한 결과로, 일정 비율 이상의 강섬유가 보강될 경우 강섬유가 고르게 분포하지 못해 오히려 강도 저하를 야기하기 때문인 것으로 판단되었다. 더욱 경제적이면서 높은 강도를 내는 효과적인 강섬유 부피비를 찾기 위한 추후 연구가 진행되어야 할 것이다.

〈Table 5〉 Punching shear test results

Specimen ID	δ_{max} (mm)	V_u (kN)
D30-f1.5	27.90	42.19
D40-f1.5	22.44	69.05
D50-f1.5	19.81	118.94
D60-f1.5	15.12	160.80
D40-f1.0	22.65	71.65
D40-f0.5	16.1	50.33
D40-f0.0	4.13	15.43



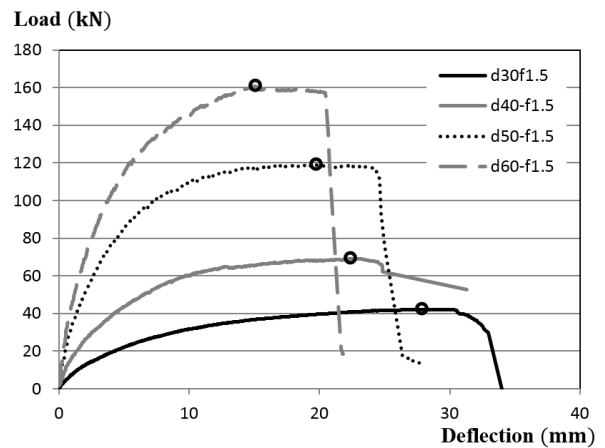
〈Fig. 7〉 Ultimate punching shear strength and maximum deflection corresponding to the slab thickness



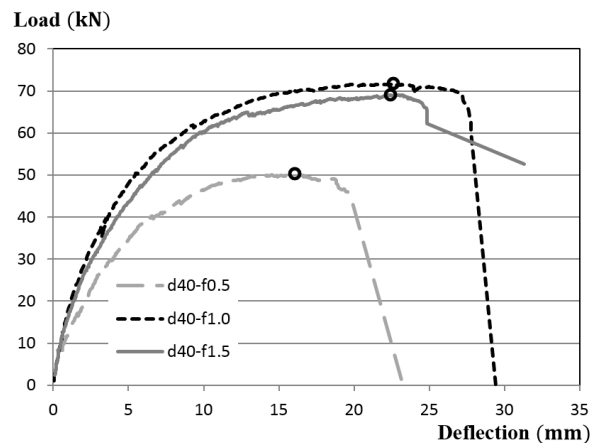
〈Fig. 8〉 Ultimate punching shear strength and maximum deflection corresponding to the fiber volume ratio

3.3 하중 증가에 따른 변형

하중 증가에 따른 중앙부 수직 처짐의 변화를 슬래브 두께에 따라 <Fig. 9>로, 강섬유 부피비에 따라 <Fig. 10>으로 나타내었다. 취성 파괴가 일어나는 기존 콘크리트 슬래브와 달리 UHPC 슬래브는 최대 하중에 도달한 후에도 변형이 일어나며 뚫림 전단에 저항할 수 있다. 이는 강섬유의 가교 현상으로 인한 연화작용에 의한 최대 하중에 도달한 후 곡선의 평평한 구간으로 설명할 수 있다. 그래프의 곡선은 매끄럽지 않고 울퉁불퉁하게 표현되었다. 일정치 않은 주기의 작은 곡선은 강섬유가 늘어나면서 인장력을 발휘하여 강도가 증가하는 구간과 강섬유의 파단으로 인해 강도가 감소하는 구간으로 반복된다.



〈Fig. 9〉 Load-deflection relations corresponding to the thickness of the slab



〈Fig. 10〉 Load-deflection relations corresponding to the fiber volume ratio

얇은 슬래브는 연화구간이 더 길게 나타나는 경향이 있었다. 30mm, 40mm 슬래브의 경우 휨파괴의 가능성이 보여 이에 대한 추후 연구와 실험이 필요할 것으로 판단된다. 섬유 혼입률 0.5% 슬래브에 비해 1.0%와 1.5% 슬래브가 뚫림 하중에 대한 저항성과 연성이 확연히 높은 것으로 나타났으며, 1.0% 강섬유 부피비의 슬래브가 가장 높은 강도와 연성을 보였다.

4. 실험 분석

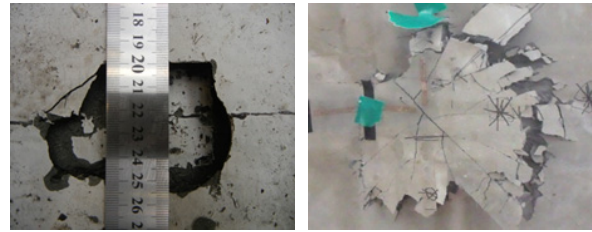
얇은 UHPC 슬래브의 뚫림 전단 성능을 파악하여 안전하고 경제적인 기준을 마련하는 것이 연구의 최종 목표이다. 뚫림 전단 성능을 정확하게 예측하기 위하여 파괴 거동에 대한 관찰과 연구가 필요하다. 이번 연구에서는 슬래브에 하중을 가할 때 변형과 파괴 형태 등이 매우 중요하게 다루어졌다.

4.1 파괴 단면

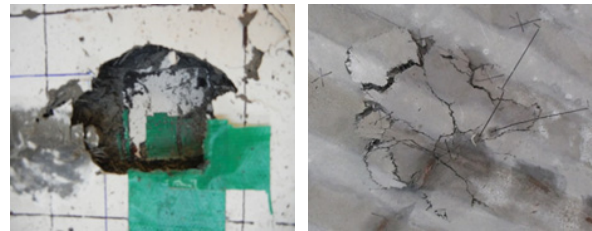
뚫림 전단 파괴는 취성 파괴로 짧은 시간 안에 파괴되기 때문에 대피를 위한 시간 확보가 어렵다는 단점이 있다. UHPC 슬래브는 불규칙한 방향으로 균열이 일어나며 콘 형태의 뚫림 파괴가 일어난다.

AFGC 기준(2002)에서는 강섬유 배열 방향이 UHPC 타설 방향과 거푸집의 영향을 받는다고 명시하고 있다.³⁾ 이 실험에서 불규칙한 균열 형태는 불규칙한 강섬유 배열에 의한 것으로 판단되며, 강섬유 배열 제어를 위한 UHPC 타설 기술에 대한 연구가 필요할 것으로 여겨진다.

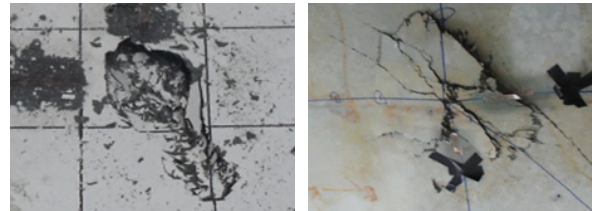
<Fig. 11>에서 확인할 수 있듯이 강섬유 보강이 없는 D40-f0.0 슬래브를 제외한 나머지 UHPC 슬래브 압축 면은 거의 비슷한 형태로 재하면 매우 가까운 곳에서 파괴되었다. 슬래브에 재하 판이 박힐 정도로 재하면과 가까운 파괴 단면을 보여 압축면에서의 위험단면은 재하 단면과 같은 것으로 가정하였다.



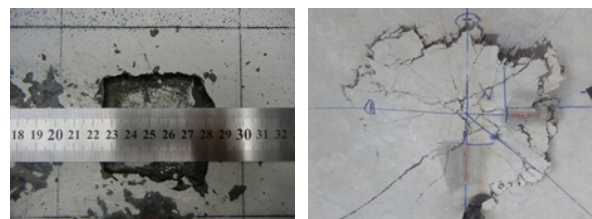
(a) D40-f0.5



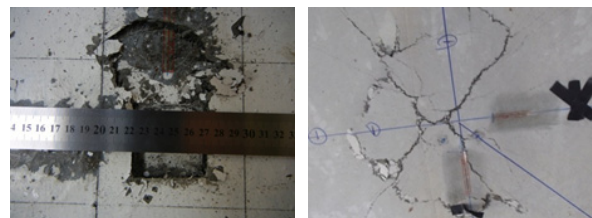
(b) D40-f1.0



(c) D30-f1.5 ($A_c = 29,750\text{mm}^2$)



(d) D40-f1.5 ($A_c = 27,500\text{mm}^2$)



(e) D50-f1.5 ($A_c = 41,900\text{mm}^2$)



(f) D60-f1.5 ($A_c = 70,500\text{mm}^2$)

<Fig. 11> Failure pattern and the section area (Compressive side: left, Tension side: right)

4.1.1 강섬유 부피비에 따른 파괴 단면

강섬유 부피비가 다른 슬래브의 파괴를 비교했을 때, 강섬유가 보강되지 않은 D40-f0.0 슬래브를 제외한 나머지 슬래브는 파괴 형태 및 면적이 비슷한 것으로 관찰되었다. 파괴 단면은 콘 형태로 풀-아웃 파괴가 일어났다.

4.1.2 슬래브 두께에 따른 파괴 단면

인장 축의 파괴 면적은 슬래브의 두께에 따라 다르게 나타난 것을 확인할 수 있었다. 두께가 두꺼운 슬래브의 파괴 단면이 더 크게 나타나는 것으로 보였다. 하지만 30mm 두께의 슬래브는 다른 슬래브와 달리 길쭉한 형태로 파괴되었으며, 40mm 두께 슬래브보다 큰 파괴 면적을 가지고 있었다. 이는 30mm 두께의 슬래브가 휨 파괴의 영향을 받은 것으로 여겨지며, 추후 뚫림 전단과 휨 파괴의 경계를 찾기 위한 연구를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

4.2 UHPC 뚫림 전단 강도 예측식

기존 콘크리트와 달리 UHPC 구조물은 인장력을 고려해야하기 때문에 기존 설계 강도식을 사용하는데 어려움이 따른다. 이를 보완하기 위해 UHPC의 강도 성능을 정확히 예측하기 위한 식이 연구 중에 있다. UHPC에서 현재 제시하고 있는 설계식의 타당성을 확인해 보고자 이번 실험의 결과 값과 비교해보았다.

UHPC 설계식은 직접 인장 시험을 통해 균열폭-인장력의 관계를 파악하고 이를 통해 평균 사인장 강도를 가정하여 뚫림 전단 강도식에 대입하고 있다. UHPC의 특정 배합비(강섬유 직경 :0.2mm, 길이 16mm 1%, 20mm 1%)로 타설했을 때, 균열이 생기기 시작할 때의 인장력 f_{crk} 는 평균 9.5MPa로 나타났다. 최대 인장력($f_{tk} = 13.0$ MPa)을 가질 때 균열폭 w_u 는 0.3mm, 인장력을 발휘하지 못하게 되는 균열폭 w_{lim} 은 5.3mm로 정의된다. 이 때 산정식은 다음과 같다.⁴⁾

$$V_{pcd} = \phi_b f_{vd} u_p d \tag{1}$$

ϕ_b : 부재 감소 계수 (0.77)

f_{vd} : 평균 사인장 응력

$$f_{vd} = \frac{1}{w_v} \int_0^{w_v} \phi_c \sigma_k(w) dw$$

$w_v = \max(w_u, 0.3mm)$

u_p : 재하면에서 $d/2$ 떨어진 위험 단면의 둘레

d : 슬래브 두께

<Table 6> Comparison of prediction and test results

Specimen ID	Punching shear strength (kN)	Predicted strength (kN)	$\frac{V_u}{V_{pred.}}$
D30-f1.5	42.19	68.24	0.62
D40-f1.5	69.05	102.36	0.67
D50-f1.5	118.94	142.17	0.84
D60-f1.5	160.80	187.67	0.86
D40-f1.0	71.65	96.79	0.74
D40-f0.5	50.33	77.58	0.65
D40-f0.0	15.43	14.44	1.07

UHPC 뚫림 전단 강도 산정식의 결과와 실험 결과를 비교하였다. UHPC 산정식은 전체적으로 UHPC 슬래브의 뚫림 전단 강도를 과대평가하는 것으로 나타났다. 사전 인장 재료 실험의 결과를 이용하여 계산한 결과 비교적 얇은 30mm와 40mm 두께슬래브의 뚫림 전단 강도를 30%이상 크게 예측하는 경향을 보였으며 이러한 결과를 통해 다음과 같은 가정으로 설명될 수 있다. 첫째, UHPC에는 강섬유가 배열되며 강도를 발현하기 위한 표면 두께가 필요한데 슬래브 두께가 얇으면 표면 두께를 제외하고 강도를 발현할 수 있는 두께가 매우 얇아 슬래브의 뚫림 전단 강도 발현이 어렵다. 둘째, 슬래브 두께가 얇아 단부에서 비틀림 혹은 휨 균열이 보다 많이 일어나기 때문이다.

5. 결론

1. 직접 인장 실험과 뚫림 전단 실험 결과 강섬유 부피비가 증가하면 인장 강도는 증가하지만, 균열폭은 비슷하게 나타났다. 1.0%와 1.5% 강섬유 보강 UHPC의 인장강도는 크게 차이가 없었다.

2. 뚫림 전단강도와 슬래브 두께는 비례하지만, 중앙부에서의 처짐은 반비례하게 나타났다. 강섬유가 UHPC 슬래브의 연성파괴를 유도하지만, 두꺼운 슬래브에서는 취성파괴가 일어나는 경향을 보였다. 또한 30mm 두께 슬래브를 제외했을 때, 두꺼운 슬래브에서 뚫림 파괴 면적이 더 넓게 나타났다.

3. 강섬유가 미세균열이 위험균열로 발전하는 것을 막아 미세 균열이 더 넓은 부분에서 일어나게 된다. 강섬유의 이러한 가교현상으로 인해 뚫림 전단에 저항하는 연화 구간이 발생하게 된다.

4. 본 연구의 실험 결과를 UHPC 뚫림 전단 산정식에 대입한 결과 40mm 이하의 얇은 슬래브에 대해 뚫림 전단 강도를 더욱 과대평가하는 경향을 찾을 수 있었다.

본 연구에서는 얇은 UHPC 슬래브의 뚫림 전단 파괴 거동 및 강도를 확인하고자 실험을 수행했으며 UHPC 뚫림 전단 산정식의 결과와 비교하여 식의 타당성을 파악하고자 하였다. 그 결과 얇은 슬래브의 강도가 과대평가되는 경향을 찾을 수 있었고, 이에 대한 추후 실험을 통해 산정식의 보완 또는 슬래브 최소 두께의 제시가 필요할 것으로 판단했다.

감사의 글

이 논문은 한국건설기술연구원 'Super Structure 2020'의 연구지원으로 수행되었습니다.

References

1. Kwon, and et al., "Development of Ultra-High Performance Hybrid Fiber-Reinforced Cement-Based Composites", ACI Materials Journal, Vol.111, pp.309-318, 2014

2. Joh., and et al., "Punching Shear Strength of Deck Slabs Made of Ultra High Performance Concrete", Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection, Vol.15, No.4, pp221-231, 2011 (in Korean)
3. AFGC, "Ultra High Performance Fiber-reinforced Concrete Recommendations", AFGC, p.358, 2013
4. KCI, "Design Guidelines for Ultra High Performance Concrete K-UHPC Structure", Korea Concrete Institute, 2012

■ Received : February 23, 2015

■ Revised : March 31, 2015

■ Accepted : March 31, 2015