



## 중공형상 및 재료의 영향을 고려한 도넛형 이방향 중공슬래브의 일방향 전단강도

정주홍<sup>1)</sup> · 이승창<sup>2)</sup> · 최창식<sup>3)</sup> · 최현기<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>한양대학교 건축환경공학과 <sup>2)</sup>삼성물산(주) 기반기술연구소 <sup>3)</sup>한양대학교 건축공학과

### One-Way Shear Strength of Donut Type Biaxial Hollow Slab Considered Hollow Shapes and Materials

Joo-Hong Chung,<sup>1)</sup> Seung-Chang Lee,<sup>2)</sup> Chang-Sik Choi,<sup>3)</sup> and Hyun-Ki Choi<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Sustainable Architectural Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

<sup>2)</sup>R&D Center Samsung C&T Corporation, Seoul 137-070, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Architectural Engineering, College of Engineering, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

**ABSTRACT** This paper presents the shear capacities of biaxial hollow slab with donut type hollow sphere. Recently, various types of slab systems which can reduce self-weight of slabs have been studied for increasing constructions of taller and larger building structures. A biaxial hollow slab system is widely known as one of the effective slab system, which can reduce self-weight of slab. According to previous studies, the hollow slab has low shear strength, compared to solid slab. Also, the shear capacities of biaxial hollow slab are influenced by the shapes and materials of hollow spheres. However, the current code does not provide a clear computation method for the shear strength of hollow slab. To verify the shear capacities of this hollow slab, one-way shear tests were performed. Four test specimens were used for test parameters. One was conventional RC slab and others were hollow slabs. The test parameters included two different shapes and materials of plastic balls. The shape parameters were donut and non-donut forms and the material parameters were general plastic and glass fiber plastic. The results showed that the shear strengths varied depending on hollow shapes and materials used in the slab.

**Keywords :** biaxial hollow slab, hollow sphere, shear strength, experimental study, flat plate slab

### 1. 서 론

최근 층간소음 규제 강화 등 주거환경에 대한 관심이 높아짐에 따라 슬래브의 소음, 진동 등을 줄이고자 슬래브의 두께가 증가하고 있는 추세이다. 슬래브의 두께 증가는 슬래브 자중(self-weight) 증가로 이어지게 되고, 이는 기둥, 벽, 기초 등과 같은 수직 부재의 크기 및 수량을 증가시키게 되므로 건축물 전체의 중량 및 소요 물량을 크게 높이는 요인으로 지적되고 있다. 특히, 층고 절감 및 거푸집공사의 단순화 등의 장점으로 인하여 많이 사용되어지고 있는 플랫플레이트(flat plate) 슬래브의 경우, 기존 RC라멘조 슬래브에 비해 슬래브 두께가 두 겹기 때문에 이에 따른 영향이 더욱 높게 나타난다. 이러한 슬래브 두께 증가로 인한 문제를 해결하고자, 슬래

브의 자중을 경감시킬 목적으로 이방향 중공슬래브 공법이 제안되었다. 이방향 중공슬래브란 플랫플레이트 슬래브의 콘크리트 타설 전 슬래브의 상부근과 하부근 사이에 중공(hollow)을 형성할 수 있는 중공형성체를 설치하고 타설함으로써 슬래브의 복부에 중공을 형성하는 바닥 구조 시스템이다. 이러한 이방향 중공슬래브는 중공형성체 부피만큼의 콘크리트 중량이 감소되기 때문에 슬래브의 철근량 및 동바리와 같은 가설재의 감소가 가능하다. 또한 슬래브 휨 성능에 영향을 적게 미치는 슬래브 웨브 부분의 콘크리트를 중공형성체로 대체함으로써, 휨 성능 및 차음성능은 동일 두께의 일반 철근콘크리트 슬래브와 동등한 수준을 유지하면서, 경감된 슬래브 중량에 따라 벽체와 기둥 등과 같은 수직 구조부재 및 기초와 파일의 물량을 감소시킬 수 있기 때문에 효율적이고 경제적인 건물 설계를 가능하게 하는 구조 시스템으로 주목을 받고 있다.

이러한 중공슬래브의 장점을 활용하여 ‘BubbleDeck Technology’와 ‘Cobix Technologies AG’<sup>1)</sup>는 구형 또는 타

\*Corresponding author E-mail: chk7796@naver.com

Received February 3, 2012, Revised May 7, 2012,

Accepted May 16, 2012

©2012 by Korea Concrete Institute

원형 플라스틱 볼을 중공체로 사용하여 슬래브의 방향성을 없애면서 콘크리트 몰량 및 슬래브의 자중을 감소시킬 수 있는 이방향 중공슬래브 공법을 개발하였다. 또한 정주홍 등은 다양한 중공형상을 변수로 한 해석적 연구를 수행하여 이방향 중공슬래브에 있어서 중공형성체의 형상이 슬래브의 성능을 좌우하는 중요한 요소인 것을 밝혀내었으며, 중공형성체의 최적형상으로 도넛형 중공형상을 제안하였다.<sup>2)</sup> 또한 제안된 도넛형 중공형성체의 형상이 중공슬래브의 휨 강도와 휨 강성에 미치는 영향에 관한 실험적 검증을 수행하여, 도넛형 중공슬래브의 휨 성능을 확인하였다.<sup>3)</sup>

하지만 이방향 중공슬래브는 전단에 저항하는 슬래브 북부의 콘크리트가 감소하기 때문에 전단강도가 감소할 것으로 예상된다. Aldejohann, M.,<sup>1)</sup> 김상모 등<sup>4,5)</sup>의 연구에서는 이방향 중공슬래브가 동일 두께의 RC 슬래브 대비 약 60% 수준의 전단강도가 발현됨을 확인하였고, 그 원인으로 단면감소를 제시하였다.

그러나 이 연구에서는 단면감소 이외에 중공형상 및 중공형성체 재료가 중공슬래브의 전단강도에 영향을 미칠 것이라고 판단하였다. 따라서 이 연구에서는 도넛형 중공형성체를 사용한 중공슬래브와 도넛형이 아닌 중공형성체를 사용한 중공슬래브의 일방향 전단 성능에 대한 실험대 실험을 통하여 중공형상이 전단 성능에 미치는 영향에 대하여 평가하였다. 또한 일반 플라스틱(polypropylene) 도넛형 중공형성체와 유리섬유 보강 플라스틱(glassfiber reinforced polypropylene) 도넛형 중공형성체를 적용한 이방향 중공슬래브 실험체의 일방향 전단 성능 실험 결과의 비교를 통하여, 중공형성체 재료에 따른 전단 성능을 평가하였다. 마지막으로 현행기준 및 기존연구의 전단강도식의 도넛형 이방향 중공슬래브 적용성에 대한 평가를 실시하였다.

## 2. 도넛형 이방향 중공슬래브

### 2.1 도넛형 중공형성체

이 연구에서 사용한 도넛형 중공형성체는 Fig. 1과 같이 직육면체의 모서리와 꼭지점에 대응하는 부분을 외측으로 볼록한 곡면으로 형성하여 외관을 형성하였으며, 상하부 중앙을 관통하여 연결한 내부 홀(hole)을 형성하여 도넛형 형상을 가지는 것이 가장 큰 특징이다. 이러한 내부 홀의 역할은 콘크리트의 타설을 용이하게 하고, 중

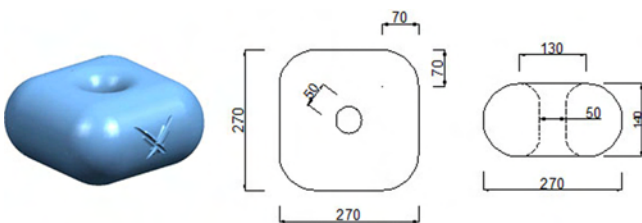


Fig. 1 Donut type hollow sphere shape (unit: mm)

공형상의 폭을 절반으로 줄임으로써 기하학적으로 슬래브의 전단강성 및 전단강도를 향상시키는 것이다. 각 부분의 크기는 정주홍 등<sup>2)</sup>의 연구에서 유한요소해석을 통하여 도출한 최적 중공형성체 크기와 동일하게 Fig. 1과 같이 높이 140 mm, 폭 270 mm, 곡률반경 70 mm, 내부 홀 직경 50 mm이다.

도넛형 중공형성체는 일반적으로 사용되는 폴리프로필렌(polypropylene) 플라스틱 및 유리섬유를 보강하여 강도 및 강성을 높인 고강도 유리섬유 보강 폴리프로필렌 플라스틱을 사용하여 두 가지 종류로 제작하였다.

### 2.2 도넛형 이방향 중공슬래브의 구성

도넛형 이방향 중공슬래브 공법의 구성은 Fig. 2와 같다. 도넛형 이방향 중공슬래브는 중공형성체 자체가 슬래브 상하부 주근의 스페이서 역할을 할 수 있도록 돌기를 형성한 도넛형 중공형성체 및 부력에 의한 중공형성체 부상방지를 위한 T형 앵커로 이루어져 있다. 도넛형 이방향 중공슬래브의 특징은 중공형성체 자체가 상하부 주근의 스페이서 역할을 수행함으로써, 도넛형 중공형성체가 중립축 부근에 자동적으로 위치되기 때문에 기존의 이방향 중공슬래브 공법에 사용되어지던 와이어메쉬나 철근 등으로 제작된 중공형성체 고정철물이 제거된 것이 특징이다.

## 3. 실험 계획

### 3.1 실험 개요

이 연구에서는 슬래브의 자중 비율이 높은 250 mm 두께의 플랫폼레이트 슬래브를 대상으로 하여, 이방향 중공슬래브의 일방향 전단 성능평가를 수행하였다. 도넛형 이방향 중공슬래브의 전단 성능평가의 목적은 다음과 같다.

동일한 철근비와 전단 경간비를 가지는 RC 슬래브와 도넛형 이방향 중공슬래브의 파괴 거동, 전단강도 및 전단 균열폭을 비교하여 도넛형 중공슬래브의 전단 성능을 평가하는 것이 첫 번째 목적이다. 두 번째는 중공형성체의 형상 및 재료에 따른 전단강도의 차이를 비교하여 중

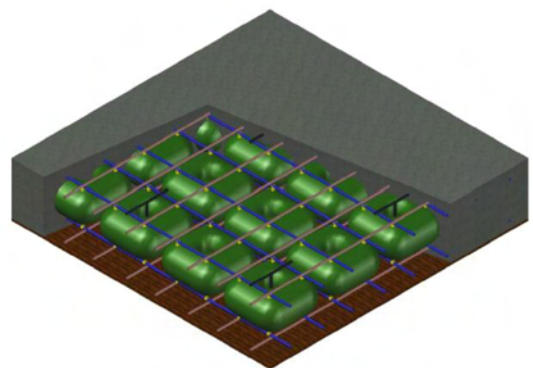


Fig. 2 Donut type biaxial hollow slab

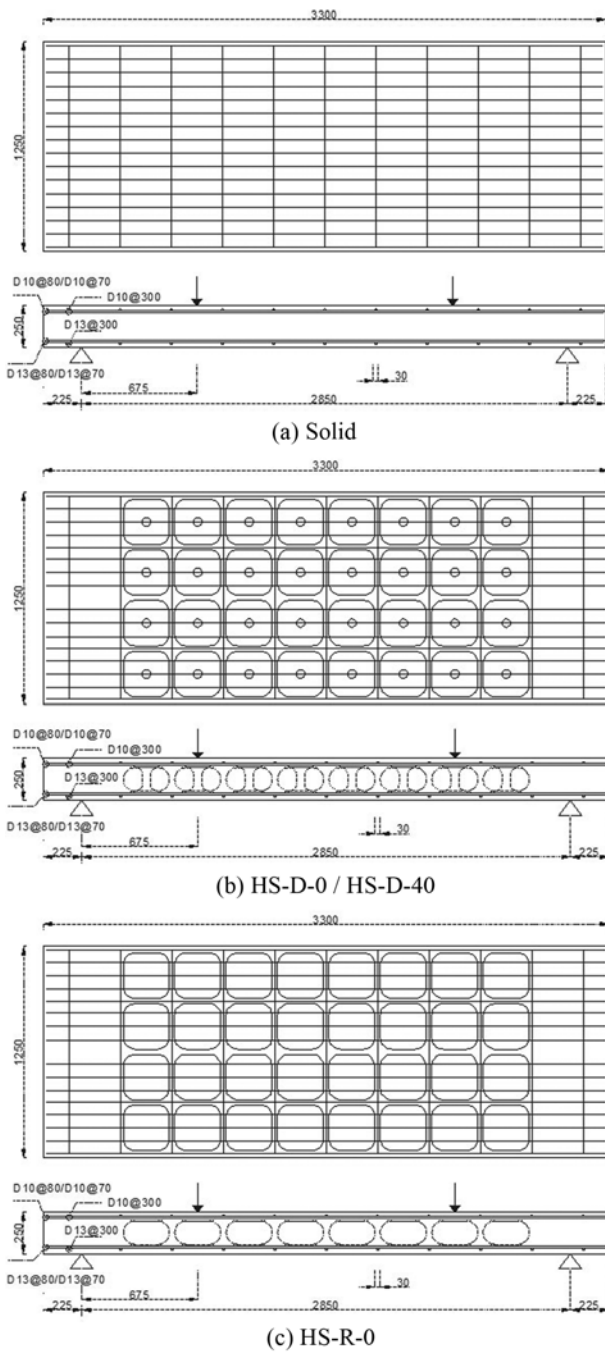
**Table 1** Properties of specimens

Specimen name	Length (mm)	Width (mm)	Height (mm)	Clear span (mm)	Effective depth (mm)	Shear span to depth ratio	$f_{ck}$ (MPa)	$f_y$ (MPa)	Top re-bar	Bottom re-bar	Reinforcement ratio (%)	Hollow shape	Ball material
Solid	3,300	1,250	250	2,850	210.9	3.19	24	400	16-D10	16-D13	0.768	-	-
HS-D-0												Donut	P.P
HS-D-40												Donut	P.P + G.F
HS-R-0												Round box	P.P

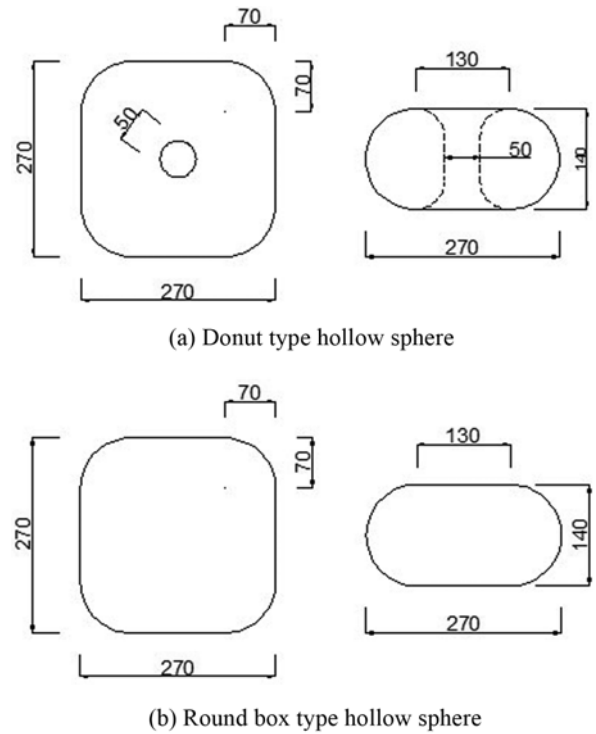
Where, HS-hollow slab

D-donut shaped ball, R-round box shaped ball

0-polypropylene 100%, 40-polypropylene(60%)+glass fiber(40%)



**Fig. 3** Specimen details (unit: mm)



**Fig. 4** Hollow sphere details (unit: mm)

공형상 및 재료에 따른 이방향 중공슬래브의 전단 성능 변화를 파악하는 것이다.

이를 위하여 Table 1과 같이 총 4개의 실험체를 제작하였다. 실험체의 총 길이는 3,300 mm이며 지점간의 거리는 2,850 mm이다. 슬래브 실험체의 높이 및 폭은 모두 동일하게 250 mm, 1,250 mm로 제작하였다.

휨 파괴 이전에 전단 파괴가 선행하게 하기 위해서 극한강도 설계법을 이용하여 휨 철근 비( $\rho$ )는 0.57%, 전단 경간비( $a/d$ )는 3.2로 실험체를 설계하였다. 실험 변수인 중공형상은 Fig. 4와 같이 도넛형과 라운드 박스형 두 가지를 사용하였으며, 도넛형 중공형성체의 경우 폴리프로필렌과 유리섬유 보강 폴리프로필렌 플라스틱 두 가지의 재료를 사용하여 제작하였다. 기타 중공형성체 형상 및 재료 등의 변수는 Table 1에 나타내었으며, 실험체의 크기 및 형상은 Fig. 3과 같다.

### 3.2 실험체 제작

실험체는 하부 휨 철근 배근 후 중공형성체를 설치하고 상부 휨 철근을 배근 및 조립하여 모듈화하였으며, 실험값 측정을 위해 철근에 변형률 게이지를 부착하였다. 기 제작된 철제 거푸집에 중공슬래브 모듈을 배치 후 콘크리트를 타설하였으며, 양생기간의 단축을 위하여 증기양생하였다.

### 3.3 재료 실험

이 실험에서 사용한 콘크리트의 설계기준 강도는 24 MPa이며, 배합비는 Table 2에 제시하였다. KS F 2405에 따라 각 실험체당 3개씩 총 12개의 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원통형 공시체를 제작하여 실험체와 동일한 조건에서 양생하였다. 콘크리트의 강도시험은 구조 실험 직전 실시하였고, 12개 공시체의 평균 강도는 28.5 MPa로 설계기준 강도인 24 MPa보다 다소 높게 나타났으며, 슬럼프 값은 평균 120 mm의 값을 보였다.

철근은 SD400의 D10, D13 이형 철근을 휨 철근으로 사용하였다. 각 철근에 대하여 KS D 3504 및 3552의 규정에 따라 인장시험편을 제작하여 강도평가를 수행하였으며, 시험 결과는 Table 3과 같다.

중공형성체의 재료인 폴리프로필렌과 유리섬유 보강 폴리프로필렌 플라스틱에 대한 재료 실험은 따로 수행하지 않았으며, 재료 공급업체에서 제공한 플라스틱의 제원을 Table 4에 나타내었다.

### 3.4 가력 및 계측 계획

이 실험에서는 단순지지 2점 가력을 통하여, 슬래브 실험

체의 전단 성능을 평가하였다. Fig. 5와 같이 반력 힌지를 실험체 양 단부에서 225 mm 떨어진 부분에 위치시켜 실험체의 미끄러짐 및 응력집중을 방지하였다. 가력 힌지는 실험체 지지점에서 중앙 방향으로 675 mm씩 떨어진 곳에 위치시킴으로써 전단 경간 비를 3.19로 설정하여 전단 파괴를 유도하였다. 또한 가력힌지를 중공슬래브에 있어서 가장 취약할 것으로 예상되는 중공형성체의 중앙부에 위치시켰다.

가력은 최대 용량 2,000 kN의 정동적 유압식 가력기를 사용하여 1 mm/min 속도로 변위제어를 하였다. 가력 하중은 가력기에 부착된 로드셀을 통하여 측정하였으며, 슬래브의 처짐을 계측하기 위하여 LVDT를 실험체 중앙 하부에 3개, 가력 위치 및 지지점 부근에 각 1개씩 총 7개를 설치하여 슬래브의 처짐을 측정하였다. Fig. 6과 같이 실험체의 전단 균열폭 및 전단 변형각을 측정하기 위하

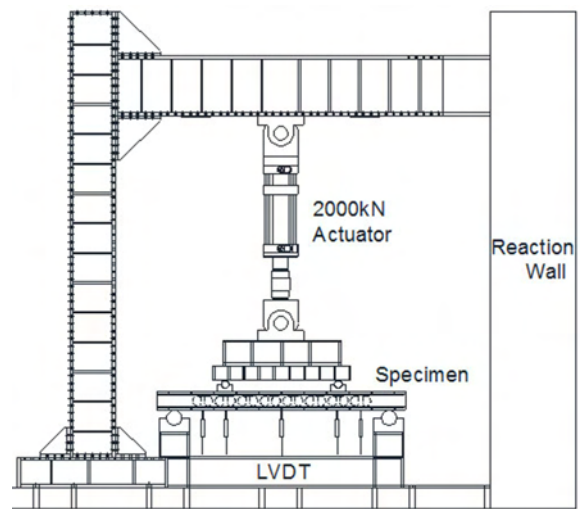


Fig. 5 Test setup & LVDT location

Table 2 Mix proportion of concrete

Design strength (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m <sup>3</sup> )				
			W	C	S	G	Admixture
24	56.6	47.4	193	341	837	985	1.7

Table 3 Tensile strength of rebar

Rebar type	Nominal strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Elastic modulus (GPa)
D10	400	469	648	17.36	196.1
D13	400	473	665	18.21	194.3

Table 4 Properties of plastic

Material	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Elastic modulus (MPa)	Density (g/cm <sup>3</sup> )
P.P	29.4	300	1323	0.91
P.P(60%)+G.F(40%)	117.6	3	8330	1.22

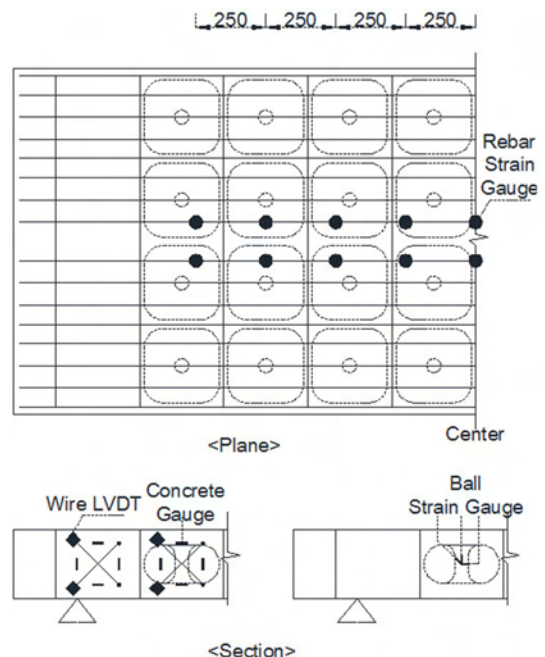


Fig. 6 Wire LVDT & strain gauge location (unit: mm)

여 전단 균열 발생 예상부분인 슬래브 단부에 wire LVDT 4개를 45° 각도로 교차하여 X자형으로 부착하였으며, 수평/수직방향으로 총 8개의 콘크리트 게이지를 부착하였다. 또한 중공형성체의 전단 변형을 확인하기 위하여, 양단부에 위치한 중공형성체 측면에 수직/수평/대각 방향으로 3개의 변형률 게이지를 부착하였다.

#### 4. 실험 결과 및 분석

##### 4.1 균열 양상 및 파괴 거동

솔리드(solid) 실험체를 포함한 이방향 중공슬래브 실험체는 중공형상 및 중공형성체 재료와 상관없이, 위험 단면에서 사인장 균열 발생 후 균열의 확장 및 함께 하중 저항 능력이 떨어지는 전형적인 전단파괴 거동을 보이고 있다. 솔리드 슬래브의 경우 가력지점에서부터 초기 균열이 발생한 후 지지점을 향하여 균열이 진전되었으며, 그 균열폭이 커지면서 최종적으로 전단 파괴되었다. 이에 반해 이방향 중공슬래브 실험체의 경우 초기 전단 균열이 양단의 첫 번째 중공형성체가 위치한 부분의 복부에서 발생하였으며, 지지점과 가력지점 양방향으로 진전되다가 그 균열폭이 커지면서 최종적으로 전단 파괴되었다. 이러한 경향은 Fig. 7의 최종 균열양상을 통해 확인할 수 있다. 이방향 중공슬래브 실험체 HS-D-0, HS-D-40, HS-R-0 모두 양단부 첫 번째 중공을 가로질러 전단 균열이 발생하는 것을 확인할 수 있다.

각 실험체의 초기 전단 균열하중 및 극한 전단하중은 Table 5와 같다. 솔리드 실험체의 경우 초기 전단 균열은 480.69 kN의 하중에서 발생하였으며, 이방향 중공슬래브 실험체의 경우 이보다 현저히 낮은 200 kN의 하중을 전후하여 초기 전단 균열이 발생하였다. 이방향 중공슬래

Table 5 Test results

ID	$P_{cr}$ (kN)	$P_y$ (kN)	$P_u$ (kN)	$\delta_y$ (mm)	$\delta_u$ (mm)	$\frac{P_u}{P_{u, Solid}}$	$\frac{\delta_u}{\delta_y}$	$\frac{P_u}{P_y}$
Solid	480.7	508.8	564.8	14.57	16.95	1.00	1.16	1.11
HS-D-0	199.1	353.2	417.4	11.39	22.94	0.73	2.01	1.18
HS-D-40	212.9	367.4	442.8	12.08	23.17	0.78	1.91	1.21
HS-R-0	196.2	284.1	338.4	9.33	15.72	0.60	1.68	1.19

브 실험체의 초기 전단 균열이 솔리드 실험체에 비해 절반 이하로 낮게 나오는 이유는 전단력의 대부분을 부담하는 슬래브 복부의 콘크리트가 중공에 의하여 결손되면서, 중공슬래브 웨브 부분 콘크리트의 부담이 높아지기 때문인 것으로 판단된다. 중공슬래브의 초기 균열의 발생 위치가 솔리드 실험체와 다르게 슬래브 복부에서 발생하는 이유 역시 동일한 원인 때문인 것으로 사료된다.

이방향 중공슬래브 실험체의 초기 전단 균열 하중은 솔리드 실험체의 40.8~44.3%의 수준으로, 솔리드 실험체 대비 극한 전단 하중비 60~78%에 비해 낮은 것을 확인할 수 있다. 이 결과 이방향 중공슬래브의 중공은 극한 전단 강도보다 초기 전단 균열 발생에 더 많은 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한 솔리드 실험체 대비 이방향 중공슬래브 실험체의 초기 전단 균열 하중과 극한 전단 하중비를 살펴보면, 솔리드 슬래브의 경우 초기 전단 균열과 최종파괴 비율이 85%, 이방향 중공슬래브의 경우 그 비율이 48~58%로 이방향 중공슬래브의 전단 균열 발생이 솔리드 슬래브보다 조기에 발생하는 것을 확인할 수 있다.

하지만, 항복하중 시 변위에 대한 극한하중 시 변위의 비율인 변위 연성도를 통해 연성도 확인해본 결과, 도넛형 이방향 중공슬래브의 경우 2.01로 솔리드 슬래브 대비 약 73% 증가하였고, 비도넛형 이방향 중공슬래브인 HS-R-0 실험체 대비 20% 증가함을 확인하였다.

##### 4.2 전단강도

###### 4.2.1 중공형상이 전단 성능에 미치는 영향

도넛형 중공형성체를 삽입한 HS-D-0 실험체의 극한 전단강도는 208.72 kN으로 솔리드 실험체의 극한 전단강도인 282.39 kN의 약 73% 정도로 기존 연구 결과<sup>1)</sup>(55~64%)를 상회하는 결과를 보여주고 있다. 이에 반해 라운드박스 형상의 중공형성체를 삽입한 HS-R-0 실험체는 169.22 kN의 극한 전단강도를 보이며, 솔리드 실험체 대비 약 60%, HS-D-0 실험체 대비 약 81% 정도의 전단강도를 보여주고 있다. 이러한 HS-D-0 실험체와 HS-R-0 실험체의 전단강도의 차이는 도넛형 중공형성체의 내부 홀에 의한 기하학적 전단 강성 증가 때문인 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위해 Fig. 6과 같이 설치한 wire LVDT를 통해 측정된 전단 균열폭을 비교하여 Fig. 9에 나타내었다. Fig. 9를 살펴보면 전단 균열 이후 HS-D-0 실험체의 전단 균열폭이 동 하중에서의 HS-R-0 실험체 전단 균열폭보다 작음을 통해 확인할 수 있다. 따라서

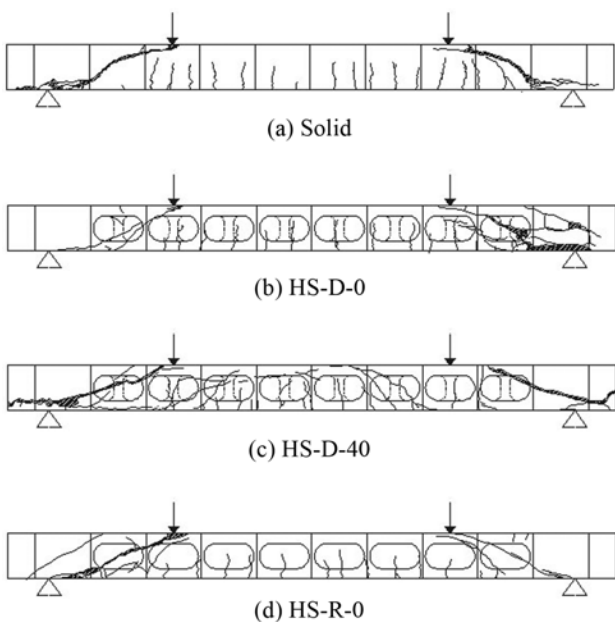
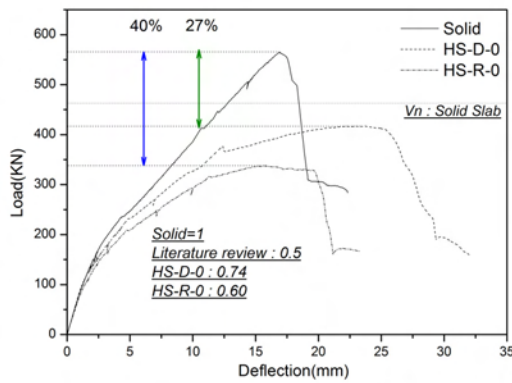
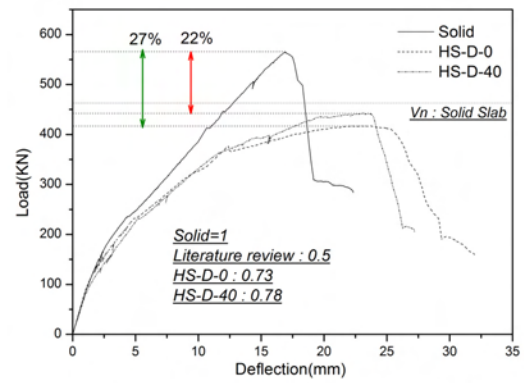


Fig. 7 Crack pattern



(a) Load-deflection curve by hollow shapes



(b) Load-deflection curve by materials

Fig. 8 Load-deflection curve

내부 홀이 있는 도넛형 중공형상이 내부 홀이 없는 중공형상에 비해 Fig. 8(a)와 같이 더 높은 전단 성능을 보임을 확인할 수 있다. Fig. 9는 wire LVDT를 통해 측정된 변위값으로, 전단 균열 이후 하중 증가에 따른 전단 균열폭의 증가를 나타낸다.

#### 4.2.2 중공형성체 재료가 전단 성능에 미치는 영향

Fig. 8(b)를 살펴보면, 폴리프로필렌 플라스틱을 사용한 도넛형 중공슬래브 HS-D-0 실험체의 극한 전단강도에 비해 유리섬유 보강 폴리프로필렌 플라스틱을 사용한 도넛형 중공슬래브 HS-D-40 실험체의 극한 전단강도가 약 6% 정도 높은 221.38 kN으로 나타났다. 또한 Fig. 9에서 HS-D-40 실험체의 전단 균열폭이 동 하중에서 HS-D-0 실험체의 전단 균열폭보다 작음을 확인할 수 있다. 따라서 중공형성체의 재료 강도 및 강성이 슬래브의 전단 성능에 직접적으로 영향을 미치는 요소인 것으로 판단된다. 이를 확인하기 위하여, Fig. 10과 같이 중공형성체에 전단 균열과 직교하는 방향으로 부착한 변형률 게이지의 변형률을 확인하였다. 중공형성체의 하중-변형률 그래프를 살펴보면, 중공형성체가 전단 변형에 저항하는 방향, 즉 전단 균열에 수직인 방향으로 변형을 일으키고 있음을 확인할 수 있다. 고강도 재료를 사용한 HS-D-40 실험

체의 도넛형 중공형성체는 동일한 형상을 가진 HS-D-0 실험체의 중공형성체에 비해 변형률이 75% 정도 작게 나타났다. 하지만 탄성계수가 폴리프로필렌 플라스틱보다 6.3배 높다는 점을 고려할 때 중공형성체의 전단 저항 성능 자체는 더 높을 것으로 판단된다. 따라서 중공형성체 강도 및 형상이 전단 균열폭의 발생 및 진전에 영향을 주는 것을 Figs. 9 및 10을 통하여 확인 할 수 있다. 따라서, 도넛형상에 있어서 중공형성체 재료의 강도 및 탄성계수가 높을수록 이방향 중공슬래브의 전단 균열이 억제되고 이에 따라 Fig. 8(b)와 같이 전단강도가 다소 상승하는 것으로 판단된다.

## 5. 도넛형 이방향 중공슬래브 전단강도 산정

### 5.1 각국의 이방향 중공슬래브 전단강도 설계 기준

현재 각국의 전단강도 설계 기준을 살펴보면, 이방향 중공슬래브에 대한 기준은 전무하며, 가장 좁은 웹 두께를 고려하여 다음과 같이 식(1) 및 (2)를 사용하여 전단강도를 산정하고 있다.

$$\text{KCI 2007: } V_n = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (1)$$

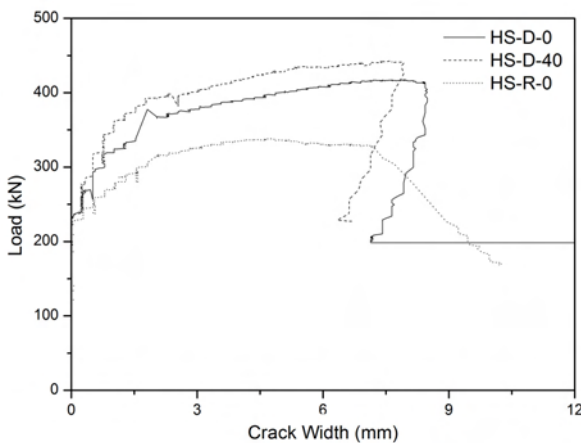


Fig. 9 Relationship of load-shear crack width

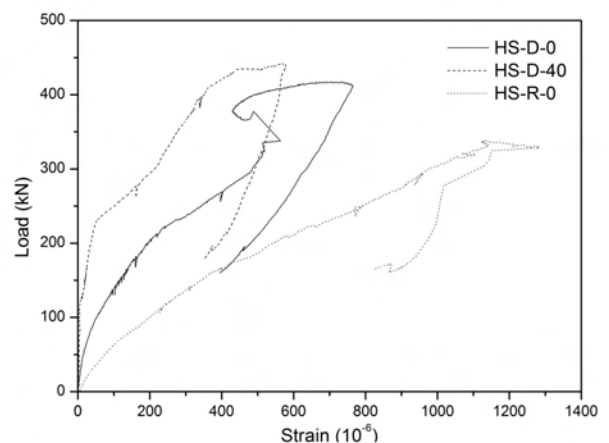


Fig. 10 Load-strain curve at the hollow sphere

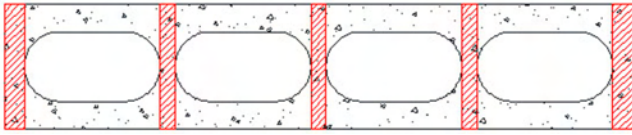


Fig. 11 Area of concrete web in biaxial hollow slab

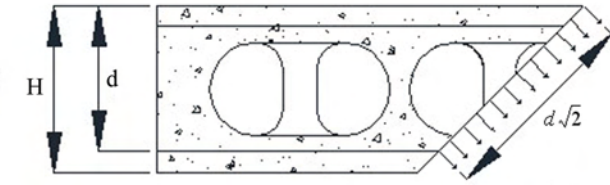


Fig. 12 Effective cross-sectional area

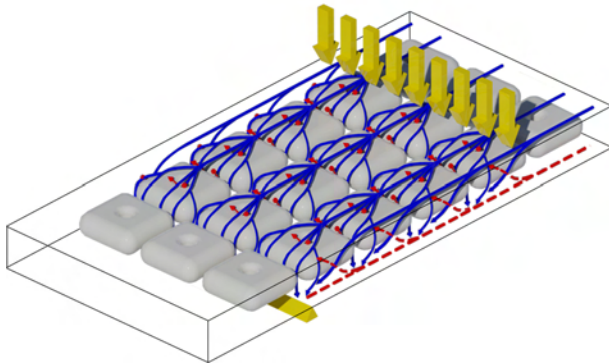


Fig. 13 Truss behaviour of donut type biaxial hollow slab (solid line: compression, dotted line: tension)

$$EC2: V_n = \tau_{rd} \kappa (1.2 + 40 \rho_1) b_w d \quad (2)$$

여기서  $b_w$ : 슬래브 웨브 두께의 합

하지만 이러한 방법들은 Fig. 11과 같이 가장 좁은 폭의 웨브 두께만 고려하기 때문에, 콘크리트 압축영역에서 발생하는 아치형태의 압축대와 웨브 면적 이외의 콘크리트 전단강도를 고려하지 못하여 이방향 중공슬래브의 전단강도를 매우 저평가하고 있는 것으로 알려져 있다.  $d\sqrt{2}$

## 5.2 유효단면 환산법

유효단면 환산법이란, 이방향 중공슬래브의 전단강도 산정 시 중공에 의한 단면 결손을 고려하기 위해서, Fig. 12와 같이 전단면을 45° 방향의 콘크리트 유효단면으로 환산하여 전단강도를 평가하는 방법이다. 이 방법은 Markus Aldejhann<sup>1)</sup>이 유한요소 해석 및 실험을 통하여, Fig. 13과 같이 중공 사이의 압축력을 받는 부분의 콘크리트가 아치형태의 압축대를 형성하여 전단응력이 45° 방향으로 트러스 거동을 하는 것에 착안하여 제안하였으며, 비교적 이방향 중공슬래브의 전단강도를 정확히 예측하는 것으로 알려져 있다.

하지만, Table 6에 나타난 바와 같이 솔리드 슬래브 전

Table 6 Comparison shear strength by methods

Specimen name	$V_{n1}$ (kN)	$V_{n,eff}$ (kN)	$V_u$ (kN)	$V_{n1}$	$V_{n,eff}$	$V_u$
				$V_{n1(Solid)}$	$V_{n,eff(Solid)}$	$V_{u(Solid)}$
Solid	239.37	239.37	282.39	1.000	1.000	1.000
HS-D-0	32.55	124.79	208.72	0.136	0.521	0.739
HS-D-40	32.55	124.79	221.38	0.136	0.521	0.783
HS-R-0	32.55	117.65	169.22	0.136	0.491	0.599

Where,  $V_{n1}$ : using equation (4) with material test result  
 $V_{n,eff}$ : using effective cross-sectional area

Table 7 Effective cross-sectional area ratio

Sphere type		Donut type	
Vertical cross-section ratio	45° cross-section ratio	Vertical cross-section ratio	45° cross-section ratio
0.40	0.58	0.49	0.52

단강도 대비 이방향 중공슬래브 전단강도의 비율을 살펴본 결과 유효단면 환산법을 적용하더라도 이 연구에서 사용한 기본형이 직육면체인 이방향 중공슬래브의 전단강도를 저평가하고 있음을 확인할 수 있다. 특히, 도넛형 이방향 중공슬래브의 경우 솔리드 슬래브 대비 22%의 차이를 보이고 있다. 여기서,  $V_{n1}$ 은 Fig. 11과 같이 가장 좁은 폭의 웨브 두께만을 고려하여 식 (4)를 통해 산정한 전단강도이며  $V_{n,eff}$ 의 경우 Fig. 12와 같이 전단면을 45° 방향의 콘크리트 유효단면으로 환산하여 산정한 전단강도이다.

이렇게 유효단면 환산법 통한 도넛형 이방향 중공슬래브 전단강도 산정값과 실험값의 차이가 발생하는 이유는 다음과 같다. 유효단면 환산법을 제안한 Markus Aldejhann<sup>1)</sup>의 연구는 중공형상이 구형이기 때문에, Table 7과 같이 45° 전단면으로 유효단면 환산 시 수직단면에 대한 유효단면 환산 비율보다 높아지며, 이를 통해 아치형 압축대에 의한 트러스 프레임 효과를 보정해주게 된다. 하지만 이 연구에서 사용한 도넛형 중공형성체는 기본형이 직육면체형이기 때문에, 수직단면에 대한 유효단면 환산 비율과 45° 전단면에 대한 유효단면 환산 비율의 차이가 거의 발생하지 않음을 알 수 있다. 또한, 도넛형 이방향 중공슬래브의 경우, Fig. 13과 같이 중공형성체의 내부 홀에 의해 추가적인 압축대를 형성할 수 있다. 따라서 기본형이 직육면체형인 도넛형 중공슬래브에 있어서 45° 유효단면 환산법을 통해서도 내부 홀에 의한 트러스효과에 대하여 효과적으로 보정이 되지 않으므로, 도넛형 이방향 중공슬래브의 실험 결과인 솔리드 슬래브 대비 73~78%의 전단강도를 보이는 실험 결과를 저평가하는 결과를 보여주고 있다.

따라서, 도넛형 이방향 중공슬래브의 일방향 전단강도 산정을 위해서는 기존의 구형 및 내부 홀이 없는 중공형상에 적용되던 유효단면 환산법이 아닌 내부 홀에 의한 트러스 효과의 증대를 고려할 수 있는 방법에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

이 연구에서는 도넛형 이방향 중공슬래브의 전단강도를 평가하기 위하여 구조성능 실험을 수행하였다. 또한 그 결과를 바탕으로, 현행 기준식을 변형하여 중공형상과 중공형성체 재료를 고려한 산정식을 제안하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 중공 형상과 중공형성체 재료가 이방향 중공슬래브의 전단강도에 영향을 미치고 있음을 확인하였다.
- 2) 도넛형 이방향 중공슬래브의 전단강도는 solid 실험체의 전단강도의 73~78% 수준으로 기존의 이방향 중공슬래브에 비해 우수한 강도를 보이고 있다.
- 3) 기존의 구형 이방향 중공슬래브의 전단강도 산정에 사용되는 유효단면 산정법으로는 기본형이 직육면체형인 도넛형 이방향 중공슬래브의 전단강도를 정확하게 산정할 수 없음을 확인하였다.
- 4) 이상과 같은 결과로부터, 도넛형 이방향 중공슬래브 설계시 전단력이 큰 부분의 중공 적용 여부에 관한 결정을 통하여 경제적인 설계를 수행할 수 있을 것으로 판단된다.

이 연구는 2009년도 삼성물산(주) 건설부문 지원에 의해 수행되었고, 이에 감사드립니다.

### 참고문헌

1. Aldejohann, M. and Schnellenbach-Held, M., "Investigations on the Shear Capacity of Biaxial Hollow Slabs-Test Results and Evaluation," *Darmstadt Concrete*, Vol. 18, 2003, pp. 1~11.
2. 정주홍, 최현기, 이승창, 최창식, "이방향 중공슬래브의 최적 중공형성체 형상도출을 위한 해석적 연구," 대한건축학회 논문집, 27권, 7호, 2011, pp. 3~10.
3. Kim, B. H., Chung, J. H., Choi, H. K., Lee, S. C., and Choi, C. S., "Flexural Capacities of One-Way Hollow Slab with Donut Type Hollow Sphere," *Key Engineering Materials*, Vol. 452-453, 2011, pp. 773~776.
4. 김상모, 장대영, 김상섭, "이방향 중공슬래브의 구조성능 평가," 대한건축학회 논문집, 25권, 8호, 2009, pp. 35~42.
5. 강지연, 김형근, 주은희, 김상모, 김희선, 신영수 "공법에 따른 중공슬래브 전단강도에 관한 실험연구," 한국콘크리트학회 봄 학술대회 논문집, 23권, 1호, 2011, pp. 15~16.

**요 약** 이 연구는 도넛형 중공형성체를 사용한 이방향 중공슬래브의 일방향 전단 성능에 관한 연구이다. 최근 건물의 고층화 및 장경간화로 인하여, 다양한 자중 저감형 슬래브 공법에 대한 연구가 진행되고 있다. 이방향 중공슬래브 시스템은 구조성능 저하를 최소화하면서 자중을 효율적으로 줄일 수 있는 시스템으로 알려져 있다. 하지만 기존 연구에 따르면 이방향 중공슬래브는 일반 RC 슬래브에 비해 낮은 전단강도를 가지고 있으며, 이는 중공형상 및 중공형성체 재료에 의해 영향을 받는 것으로 보고되고 있다. 또한 현재의 설계기준은 이방향 중공슬래브의 일방향 전단강도에 대해 명확한 기준을 제시하지 못하고 있다. 도넛형 이방향 중공슬래브의 일방향 전단강도를 확인하기 위하여, 총 4개의 전단강도 실험체를 제작/실험하였다. 그 중 한 개의 실험체는 기준 RC 실험체이고 나머지는 모두 중공슬래브이다. 변수는 도넛형과 비도넛형 두 가지의 중공형상 및 일반 플라스틱과 유리섬유 강화 플라스틱 중공형성체로 설정하였다. 실험 결과, 중공형상과 재료에 따라 이방향 중공슬래브의 전단강도는 차이를 보임을 확인할 수 있었다. 또한 이 결과를 바탕으로 기존의 구형 중공슬래브의 일방향 전단강도 산정시 사용되는 유효단면 산정법의 도넛형 이방향 중공슬래브 적용에 대한 문제점을 도출하였다.

**핵심용어** : 이방향 중공 슬래브, 중공 형성체, 전단강도, 실험적 연구, 무량판 슬래브