Journal of the Korea Concrete Institute
Vol. 27, No. 6, pp. 651~659, December, 2015
http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2015.27.6.651

pISSN 1229-5515
eISSN 2234-2842

일체형 중공재의 중공부 내부형상에 따른 이방향 중공슬래브의 전단성능 평가

최현민 [1] · **박태원** [1]* · **백인관** [1] · **김제섭** [1] · **한주연** [1]

[1]단국대학교 건축공학과

Shear Performance of Board-type Two-way Voided Slab

Hyeon-Min Choi,[1] Tae-Won Park,[1]* In-Kwan Paik,[1] Je-Sub Kim,[1] and Ju-Yeon Han[1]

[1]Department of Architectural Engineering, Dan-kook University, Yongin 16890, Rep. of Korea

ABSTRACT Currently, social demands for long span building structures are increasing due to architectural planning purposes and economic efficiency. As a result, lighter board-type voiding materials were suggested. With the use of board-type voiding materials, a slab is able to become light weight and convenient. This process efficiently eliminates concrete where it is not required; considerably diminishing dead weight while maintaining the flexural strength of the slab. The reduction in concrete also allows for overall cost reductions and design flexibility. Also it can be ease with fixing the voided material that is composed of one body form. Although board-type voiding materials are ideal, the top and bottom concrete plates lack integrity. Because of this, test results show horizontal cracking towards the tops and bottoms of the concrete columns, or webs, connecting the slabs. The key to correcting this problem is to increase the shear strength. In order to increase the shear strength of the structure, horizontal shear area must increase. R70(100)-D-F has the largest horizontal shear area as it also shows stronger strength. As a result, shear strength (V_{nh}) is dependent on the horizontal shear area (N). $V_{nh} = \alpha \times 0.16\sqrt{f_{ck}}\frac{\pi D^2}{4} \times N$ ($\alpha = 1.8125$). The web columns have a shear span to depth ratio (a/d) that is less than 2; which classifies it as a deep beam. In this case, however, the shear strength of the deep beams may be as much as 2 to 3 times greater than that predicated conventional equations developed for members of normal proportions. As a result, α is suggested as an extra coefficient in the equation for shear strength (V_{nh}).

Keywords : performance evaluation, board-type voided slab, fixing material, horizontal shear strength

1. 서 론

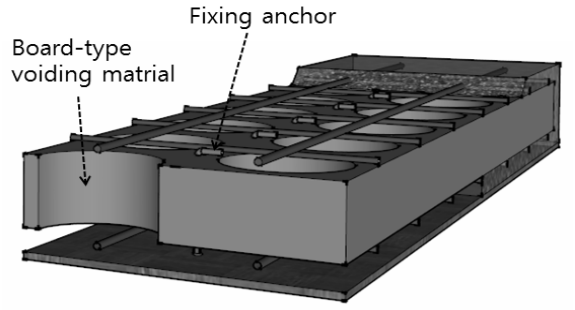
건축물은 사용용도의 다양화와 건설기술의 발전으로 인하여 점차 대형화 및 장경간화 되고 있는 추세이며, 이러한 추세로 인해 슬래브에는 처짐이나, 소음 및 진동 등의 문제가 발생한다. 이러한 문제점을 해소하기 위하여 『공동주택 바닥충격음 차단구조인정 및 관리기준(2014)[1)]』에는 슬래브의 두께를 증가시켜 슬래브의 강성을 강화시키도록 하고 있다. 그러나 슬래브 두께 증가는 자중(Self weight)의 증가로 이어지게 되고 이는 기둥, 벽, 기초 등과 같은 수직 부재의 크기를 증가시켜 건축물 전체의 중량을 크게 높이게 된다. 이에 대한 대안으로 중공슬래브(Voided slab)를 사용할 수 있는데 이는 휨 성능에 영향을 미치지 않는 부분의 콘크리트 단면을 중공재로 치환함으로써 중공재 부피만큼 콘크리트가 줄어들어 자중감소효과를 가져올 수 있다.[2)] 이러한 중공슬래브의 장점을 활용하여 기존에는 중공관을 일방향으로 배치하는 방법[3-8)]과 'BubbleDeck Technology'와 'Cobiax Technologies AG'에서 개발한 구형 또는 타원형 플라스틱 구(球)를 중공제로 사용한 공법이 있는데, 이중 중공률을 최대화 할 수 있는 구형 이방향 중공슬래브가 많이 사용되고 있다.[9)] Fig. 1에서 보듯이 구형 이방향 슬래브는 슬래브의 방향성을 없앰으로써 콘크리트 물량 및 슬래브의 자중을 감소시킬 수 있는 이방향 중공슬래브 공법이다. 하지만, 이러한 구형 이방향 중공슬래브는 콘크리트 타설 시 비중차로 인한 부력이 발생하게 되어 중공재의 고정을 반드시 필요로 한다. 그러나 현재까지는 적절한 부력 방지 대책이 제시되지 못하여 개별 중공재를 고정하거나 중공재를 블럭화하여 고정시키는 방법이 현장에서 적용되고 있다. 이러한 공법은 수많은 개별 고정장치가 추가 되어야 하므로 중공 슬래브 현장 적용 시 공기증가의 원인이 되고 있다. 이에

*Corresponding author E-mail : min_2e@naver.com
Received May 28, 2015, Revised July 16, 2015,
Accepted August 17, 2015

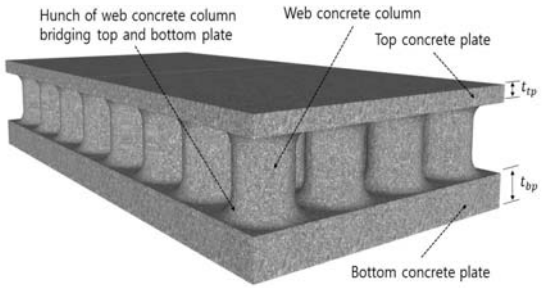
본 연구에서는 공기향상을 위하여 판형중공재를 제안하였다. 판형중공재란 Fig. 2에서 보듯이, 중공재가 일체형으로 시공되므로 고정이 쉽고, 시공과정이 간편하다는 장점이 있다. 그러나 단점은 시공과정에서 부력을 많이 받게 되는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 중공재 고정장치를 개발하였고, 제안한 고정장치를 활용하여 부력실험을 실시하고 성능을 검증하였다.

또한, 이방향 중공슬래브는 전단에 저항하는 슬래브 복부의 콘크리트가 감소하기 때문에 전단강도가 감소할 것으로 예상된다. Aldejohann, M.[9] 김상모 등[10,11]의 연구에서는 이방향 중공슬래브가 동일 두께의 RC 슬래브 대비 약 60% 수준의 전단강도가 발현됨을 확인하였고, 그 원인으로 단면감소를 제시하였다. 따라서 본 연구에서는 판형 중공재의 전단 성능 실험을 실시하여 각 타입별 판형 중공재의 수평전단강도를 평가하였고, 이를 바탕으로 전단강도 설계식을 제안하였다.

Fig. 1 Voided slab with ball-type voiding material



(a) Board-type Voiding material



(b) Completion

Fig. 2 Voided slab with board-type voiding material

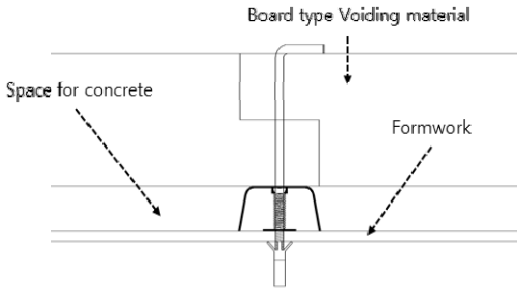
2. 중공재 일체 판형 이방향 중공슬래브

2.1 공법 개요

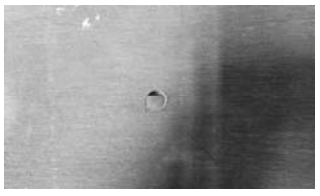
중공재 일체 판형 이방향 슬래브는 판형태의 중공재에 일정한 간격으로 원기둥 모양의 홀을 가공한 후, 콘크리트를 채워 넣어, 홀에 콘크리트 웨브 기둥층을 형성하고 슬래브 상·하에 일체된 플랜지를 형성한다. 중공재 자체가 서로 일체화 되어있기 때문에 이동성이 좋고 시공성이 뛰어난 장점이 있다.

2.2 중공재 고정장치

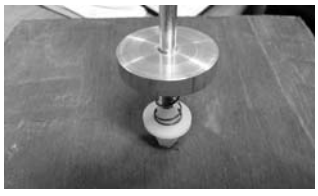
일반적으로 중공슬래브를 형성하기 위하여 사용되는 중공재는 콘크리트에 비해 밀도가 현저히 낮아, 콘크리트가 타설되면 부력에 의해 상승된다. 이는 중공슬래브의 시공시에 가장 큰 문제점이 된다. 또한, 하부근의 부식방지와 내화 구조성능인증을 위하여 중공재 하부에도 일정두께의 콘크리트 구조체를 형성해야 하고 중공재와 거푸집 사이에 콘크리트가 타설될 일정공간이 반드시 필요하다. 하지만 실제 현장에서는 중공재의 설치 후, 작업자들의 통행으로 중공재가 침강되어 일정품질을 만족시킬 수 없는 경우도 다수 발생되고 있는 실정이다. 이러한 문제로 인하여 중공재의 위치가 설계자의 의도와는 다르게 시공되고, 결국 구조성능의 하락 등과 같은 품질저하로 나타난다. 본 연구에서는 이를 개선하기 위하여 판형 중공재에 적합한 중공재 고정장치를 제안하였다.



(a) Detail of the fixing device with voiding material

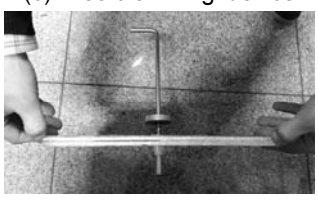


(b) Mould hole



(c) Insert a fixing device

(d) Insertion of fixing device



(e) Completion

Fig. 3 Install process of the fixing device

Fig. 3(a)은 본 연구에서 제안한 중공재 고정장치의 조립도를 나타내고 있으며 그림과 같이 중공재가 접합되는 면을 나타냈는데 그 부분에 고정장치가 삽입되어 떨어진 중공재를 연결시켜 준다. 중공재 고정장치는 손으로 가력하여 나무 거푸집 부분에서 고정 되는데 그 순서는 Fig. 3(b)~(e)와 같다. 먼저 합판 또는 데크플레이트형 거푸집에 드릴을 사용하여 ϕ15 mm로 천공 후 중공재 고정장치를 천천히 삽입하면 플라스틱 부분이 거푸집 하부에서 자동적으로 고정됨으로써 완성된다.

본 실험체에 적용되는 중공재 고정장치의 성능을 검토하기 위하여 고무대야 하부에 구멍을 뚫고 고정장치를 삽입 한 후, 물을 부어 고정장치가 받는 부력을 측정하였다. 고정장치는 외각 4개와 접합부를 가정한 중앙부에 1개를 설치하여 실험을 수행하였다.

본 연구에서 사용한 중공재의 크기는 가로 1 m, 세로 1 m 높이 0.5 m인 사각형태의 중공재이고 부력은 중공재의 부피에 물의 밀도를 곱한 값으로 계산하였다. 식 (1)은 판형 중공재 부피의 부력이다.

$$F = \rho \times V \quad (1)$$

(F: 부력, ρ: 유체의 밀도, V: 공제된 유체의 부피)

본 실험은 실제 타설 시 받는 부력인 시멘트페이스트로 실험을 하여야 했으나, 실험의 여러 환경 조건들로 인하여 물로 대신 하였다. Table 1에서는 물에 의한 부력과 콘크리트 실제 타설 시 시멘트 페이스트에 의해서 받는 부력을 함께 나타내어 정리 하였는데 실험한 중공재는 실제 타설 현장에서 받는 시멘트페이스트의 밀도 23,520 N/m^3 보다 낮은 9,800 N/m^{3}의 밀도를 물에 의해서 받고 있지만 중공재의 부피를 크게 하면 고정장치 한 개가 받을 수 있는 부력의 크기를 높일 수 있다. 실험결과 대야에 가득찬 물이 일으키는 부력은 980 N으로써 실제 타설 시 시멘트 페이스트에 의해서 받는 부력인 294 N보다 충분히 큰 강도를 발휘한다.

3. 구조성능 실험

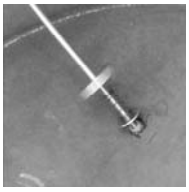
3.1 실험 개요

판형태의 중공재를 사용한 중공슬래브는 주근이 콘크리트 상부 플랜지 및 하부 플랜지에 배치되고 휨모멘트에 의한 콘크리트 압축대가 주로 중공재 위치와는 상관없는 콘크리트 슬래브 상부 플랜지에 위치한다. 따라서 휨강도는 중공부가 없는 일반 콘크리트 슬래브와 대등한 성능을 갖는다. 하지만, 전단강도는 주로 웨브 콘크리트가 담당하므로, 중공슬래브의 전단강도는 중공형태에 따라 위험할 수 있다. 본 연구에서는 구조성능 실험을 계획하고 파괴강도에 적합한 설계식을 제안하기 위하여 다음과 같은 사항들을 검토하고자 한다.

첫째, 판형 중공재를 삽입하지 않은 기존 슬래브와의 전단강도를 비교하였다. 둘째, 동일한 중공률을 가진 슬래브 내부의 웨브 콘크리트의 반지름 크기에 의한 전단강도를 비교하였다. 마지막으로 헌치단의 유무와 콘크리트 웨브 기둥의 배열을 주요변수로 하여 판형 중공슬래브의 전단강도의 증강여부를 평가하였다.

Table 1 Anti-Buoyancy-Anchors performance analysis

	Size (m^3)	Density of Water (N/m^3)	Number of Fixing device (EA)	Buoyancy (N/EA)
Water	$1\times1\times0.5$ ($W\times L\times H$)	9,800	5	980
Concrete	$0.25\times0.25\times0.2$ ($W\times L\times H$)	23,520	5	294



(a) Fixing device

(b) Voiding material in the plastic bucket

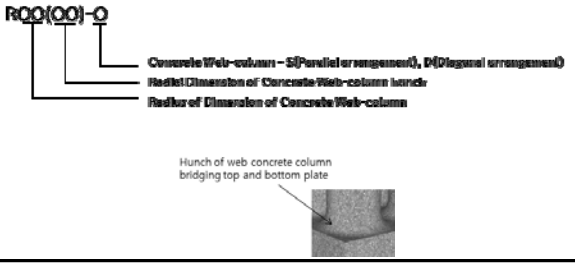
(c) Detail of fixed point

(d) Maximum buoyancy state

Fig. 4 Buoyancy-Resistance Experiment

Table 2 Parameters of test specimens (unit : mm)

Specimen	D	Void ratio(%)	Web column's Arrangement	Fixing material
R0	-	-	-	-
R120-D	120	36	Diagonal	Fixed
R80-S	80	36	Straight	Fixed
R80-D	80	36	Diagonal	Fixed
R60-D	60	36	Diagonal	Fixed
R70(100)-D	100	36	Diagonal	Fixed
R60(100)-D	100	40	Diagonal	Fixed



3.2 주요 실험 변수 및 실험체 상세

본 연구에서는 Table 2와 같이 총 7개의 실험체를 제작하였다. 40%의 중공률을 가지는 R60(100)-D-F 실험체를 제외한 모든 실험체는 36%의 중공률을 가지고 상·하부 플랜지의 두께는 50 mm로 같다. 또한 R0 실험체를 제외한 모든 실험체에 중공재 고정장치를 삽입하였다. 실험체의 상세는 Fig. 5에 정리하였다. 모든 슬래브 실험체의 크기는 폭 600 mm, 길이 2,200 mm이며, 두께는 250 mm이다. 콘크리트 슬래브의 휨철근으로써 하부 플랜지에는 HD16 철근 2개를 길이방향으로 배치하였고 상부 플랜지에는 압축철근으로써 HD13 철근 2개를 배치하였다. 또한 슬래브의 직각방향으로 온도 철근을 HD10@300 mm로 배치하였다. 슬래브에 사용한 D16, D13, D10 철근의 항복강도는 각각 f_y = 444 MPa이고, 콘크리트 압축강도는 f_{ck} = 27 MPa이었다.

3.3 가력계획 및 계측계획

Fig. 6은 실험을 위한 재하조건을 보여준다. 실험에서

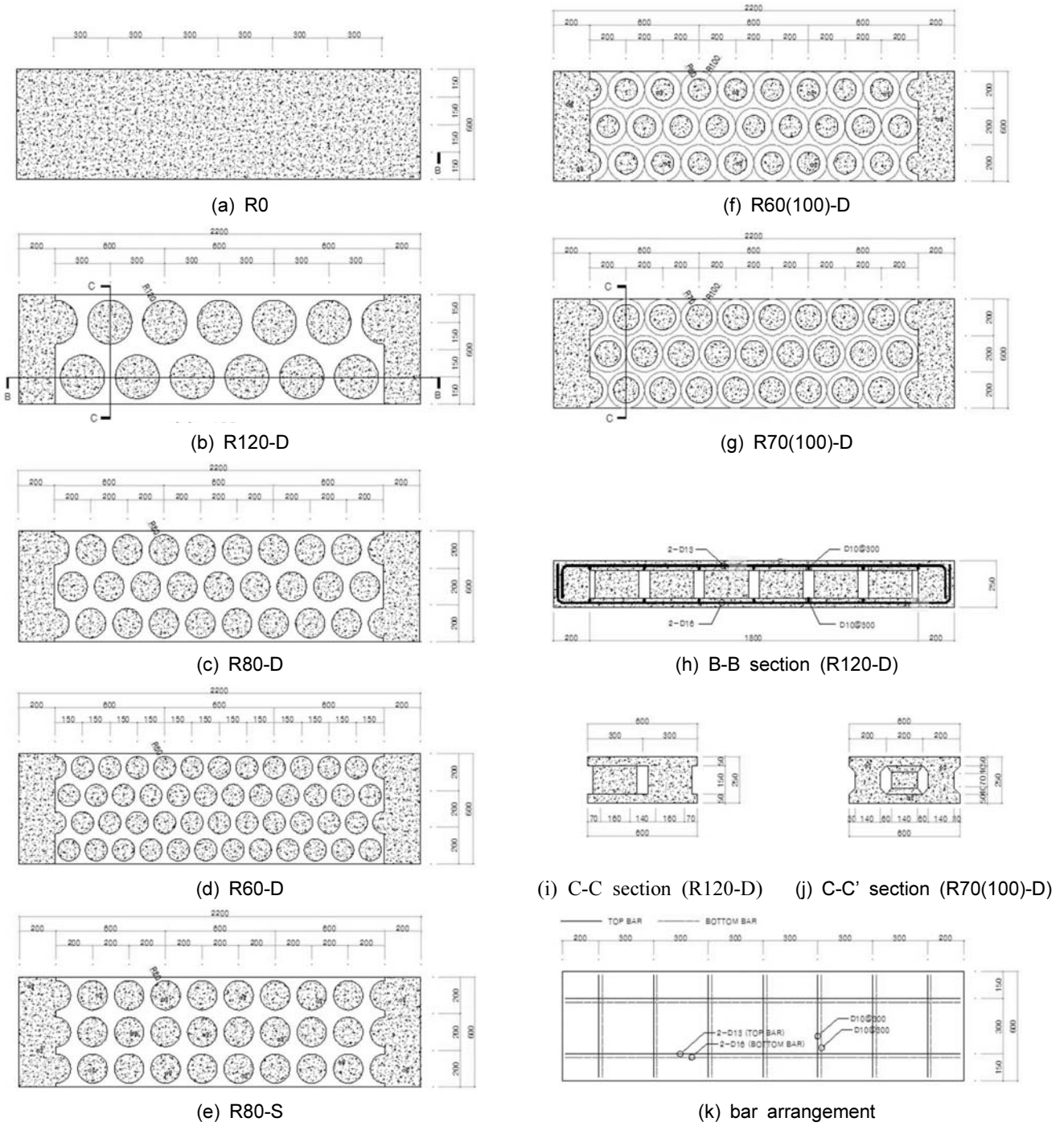


Fig. 5 Specimen details (unit: mm)

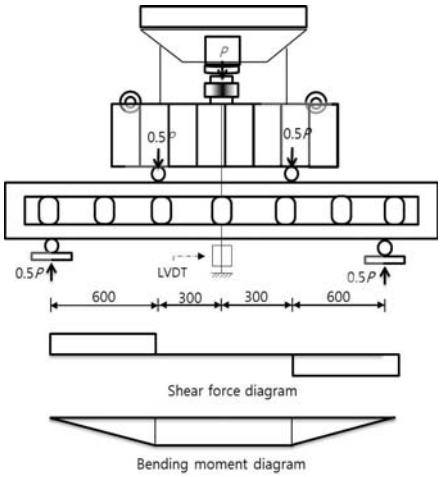


Fig. 6 Test Set up (unit: mm)

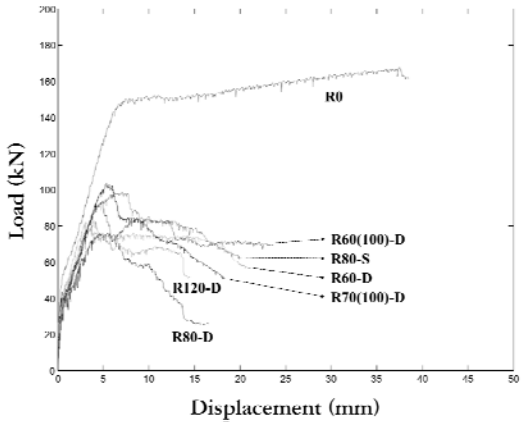


Fig. 7 Load-Displacement Curve (Flexual/Shear)

는 최대용량 2,000 kN의 UTM을 사용하여 슬래브 상부에 강재보를 설치하여 2점 수직가력을 하였고 로드셀을 사용하여 가해진 수직력을 측정하였다. 그리고 슬래브 중앙 하부에 LVDT를 설치하여 슬래브의 중앙 처짐을 계측하였다. 실험체의 가력점과 하부 지점 사이의 전단경간 길이는 600 mm이고 깊이가 250 mm로써 전단경간대 깊이의 비(a/d)가 2.4로서 깊은 보의 형태를 하고 있고 전단파괴를 유도하였다.

3.4 실험결과

Fig. 7은 모든 실험체의 하중 변위곡선을 나타내는데, 중공재가 없는 기준 실험체 R0는 처짐 7 mm 부근에서 항복강도(P_y) 146.9 kN을 보여주면서 휨파괴 되었고, 나머지 실험체는 이에 미치지 않는 강도를 가지며 조기에 파괴 되었는데, 그 이유는 웨브기둥과 상하부 플랜지 부분에서 접합성능이 떨어져 수평전단파괴가 일어났기 때문이다. 헌치가 적용된 실험체는 플랜지와 웨브기둥이 만나는 면적이 다른 실험체들에 비해서 크기 때문에 다른 실험체보다 큰 강도를 나타내었고, 일렬로 배열한 실험체가 사선으로 배열한 실험체 보다 강도가 훨씬 더 컸다. 실험체의 하중증가에 따른 중공슬래브의 손상을 Fig. 8에 나타내었다. R0는 중공부가 없으므로 전단에 대해 충분히 저항할 수 있다. 그 결과 휨파괴 되었고, R0를 제외한 나머지 슬래브에서는 대각전단 균열(DC)과 함께 수평전단파괴의 양상이 두드러지게 나타났다. 특히 지지점 부근에서 시작된 대각 균열은 콘크리트 웨브기둥으로 흘러가 플랜지와의 접합된 부분에서 수평전단 파괴가 일어났다. 헌치를 적용한 실험체(f)와 (g)는 헌치부분에서 대각균열을 보이다가 웨브기둥이 만나는 점에서 다시 수평전단파괴 되었다. 그러나 파괴강도는 콘크리트 웨브기둥의 크기가 큰(g)가 10 kN이 더 컸다. 헌치에서 많은 응력을 버티다가 웨브기둥에서 파괴되기 시작한 실험체는 웨브기둥의 면적이 클수록 더 많은 응력을 발휘한다.

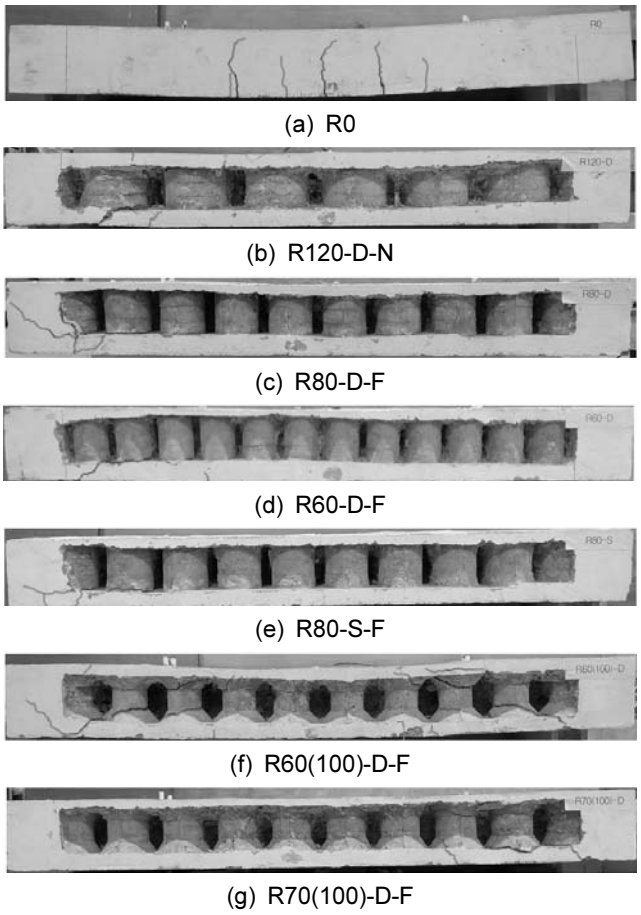


Fig. 8 Test result of spacimens

4. 실험결과 분석

4.1 수평전단면에 따른 강도증가

수직하중에 직접적으로 저항하는 수평전단면이 전단강도에 큰 요인으로 작용한다. 수평전단면이란 가력점에서 직접적으로 저항하는 콘크리트 웨브 기둥의 단면적이다. 웨브기둥은 상하부 플렌지에 접합되어 있는데, 수직하중을 받으면 가력점에서 콘크리트 웨브기둥 양쪽에 우

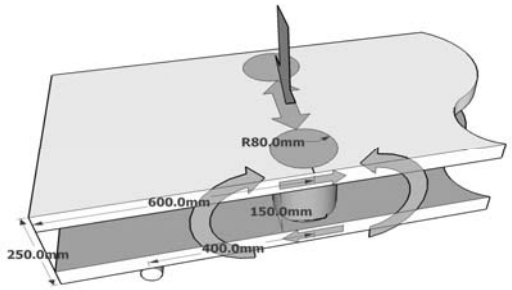


Fig. 9 Horizontal shear area on R80-D-F specimen

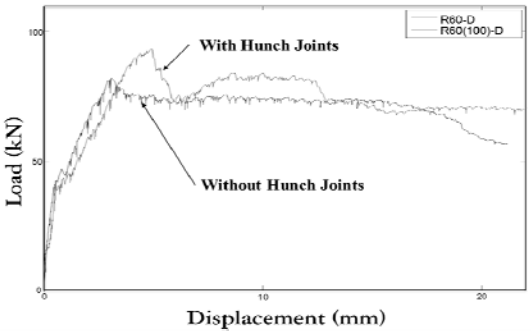


Fig. 10 Hunch effect on Horizontal Shear area

력모멘트가 발생한다. 모멘트는 지점에 가까워질수록 작은데 우력모멘트도 마찬가지로 지점에 가까울수록 작다. 그래서 좌·우 우력모멘트의 크기가 달라지면 우력모멘트가 큰쪽으로 수평전단력이 웨브 기둥의 상·하부에 작용하게 된다. 이때, 원의 단면적이 저항체로써 작용 한다. 이를 수평전단면이라고 하고 Fig. 9에 나타내었다.

R80-D-F 실험체의 경우, 가력을 하게 되면 웨브 기둥 2개가 힘을 받게 되고 이에 해당하는 원의 단면적이 수평전단면이다. 다른 실험군에 비해서 수평전단면이 가장 작은 이 실험체는 가장 적은 강도인 76.23 kN을 나타냈다.

수평전단면적이 5,239 mm^2로 같은 R60-D-F과 R120-D-F 실험체는 동일한 강도 82.0 kN에서 파괴되었다.

4.2 헌치 적용에 따른 영향

그림 Fig. 10에서 보듯이, 반지름이 같고 배열이 같은 두 실험체는 헌치를 적용한 R60(100)-D가 헌치를 적용하지 않은 R60-D보다 강도가 12% 더 크게 나타났다. 이는 Fig. 11에서 보듯이, 가력점에서 수평력에 저항할 수 있는 웨브 기둥의 수평전단면이 25% 커져 웨브기둥과 슬래브 상·하부 플랜지의 일체성이 증가하였기 때문으로 사료된다. 시공시 헌치의 적용이 슬래브의 강도에 유리하게 작용하고 헌치의 조건에 따라, 45°이상의 헌치를 두는 것을 권장한다.

4.3 중공재 배열에 따른 영향

그림 Fig. 12는 중공재의 배열에 따른 결과를 나타내고

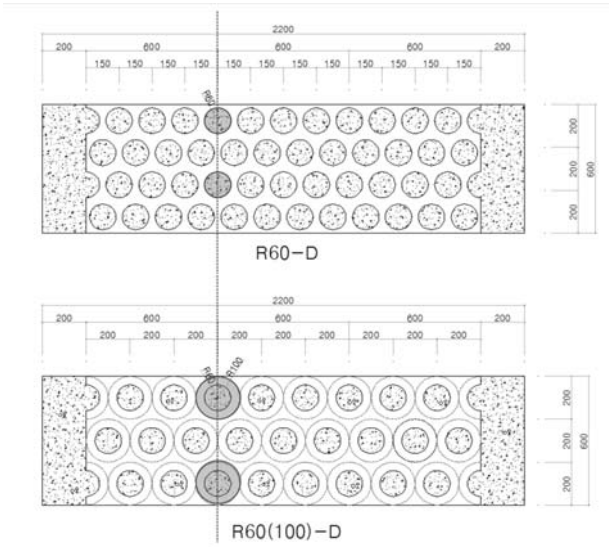


Fig. 11 Horizontal Shear area of applied hunch

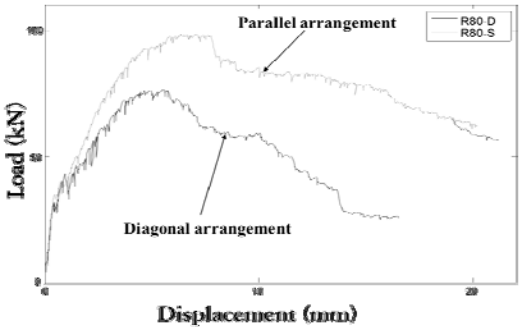


Fig. 12 Different Horizontal Shear force from arrangement

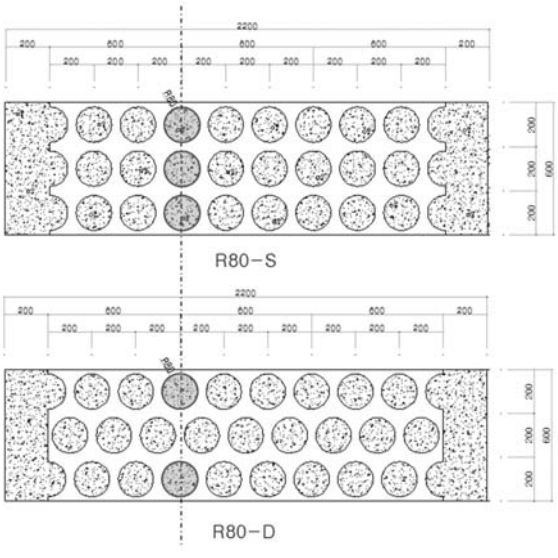


Fig. 13 Different Horizontal Shear area from arrangement

있다. 사선으로 배열된 실험체 R80-D의 강도가 일렬로 배열된 실험체 R80-S보다 약 20% 감소하였다. Fig. 13에서 보듯이, R80-D의 경우 가력점부근에서 수평력에 저항할 수 있는 웨브 기둥의 수평전단면적이 일렬로 배열된 시험체에 비해서 33% 감소했기 때문으로 사료된다.

4.4 예측 전단강도의 비교

다음은 구조설계기준(2012) 일반 전단강도식 (2)와 Markus와 Martina (2005)[12]에 의해 제안된 보정된 식 (3), 그리고 수평 전단 면적에 따라서 계산한 식 (4)를 나타낸 식이다.

$$V_{n1} = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\, b_w d \tag{2}$$

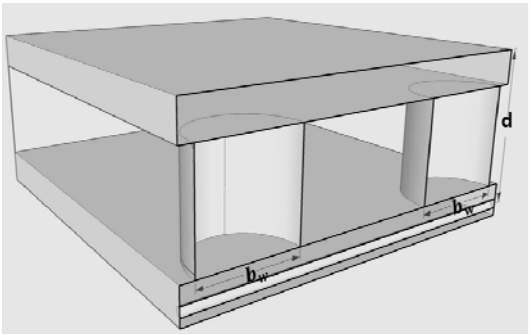
$$V_{n,eff} = \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\, b_w \sqrt{2}\, d \tag{3}$$

$$V_{nh} = \alpha \times \frac{1}{6}\sqrt{f_{ck}}\frac{\pi D^2}{4} \times N \quad (\alpha = 1.8125) \tag{4}$$

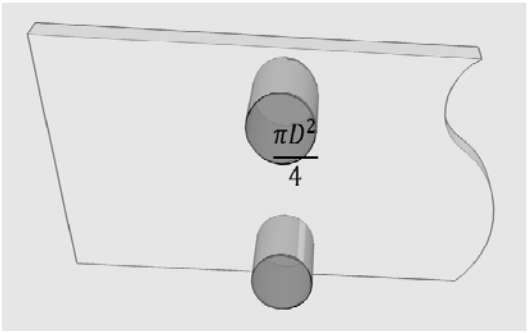
(N헌치일때, $(0.95 \times$ 헌치면적$) + (0.05 \times$ 웨브기둥면적$)$)

식 (4)의 경우, 본 연구에서 제안한 설계식이다. 판형중공재는 수평전단파괴가 지배적이므로, 수평전단면적에 의해서 파괴 강도가 결정 된다. Fig. 14(a)는 기존 KBC 2012에서의 전단력 산정식 V_{n1}이며 (b)는 본 연구에서 제안된 공식 V_{nh}을 나타냈다. Fig. 14(a)는 유효길이 b_w에 수평인장철근 중심에서 압축측 연단까지의 거리 d를 곱한 수직 전단면적에 대해서만 고려하고 있지만, 판형중공슬래브의 경우 파괴강도가 수평 전단 면적이 지배적인 슬래브이므로 (b)에서 보듯이 수평전단면적이 고려되어야 한다. 이에 따라 원의 넓이인 $\frac{\pi D^2}{4}$와 웨브 기둥의 개수 N이 수식에 적용되고 있다. 또한 Table 3에서 수평전단면적(Horizontal shear area)의 크기와 파괴강도(Maximum strength)의 관계를 나타내었다. 표에서 알 수 있듯이, 수평전단면적이 커질수록 파괴강도가 증가한다.

또한 콘크리트 원의 지름이 웨브 기둥 높이보다 짧다. 이는 경간 대 깊이의 비인 a/d가 2보다 작은 깊은 보의 구조를 하고 있을 때, 콘크리트 응력은 통상의 식인 $0.16\sqrt{f_{ck}}$으로 예측하는 값보다 훨씬 크다. 그래서 본 연구에서는 $\alpha \times 0.16 \times \sqrt{f_{ck}}$로 표시하고 강도 증가 계수 α로 표기 하였다. 실험결과 파괴하중을 유효면적으로 나눈 응력은 1.8의 평균 응력을 가지고, 이를 식으로 표현하면 수식 (5)와 같다. 이때 α는 1.8125 정도의 수치를 가진다. 이때의 응력값은 파괴하중보다 약간 낮은 1.5의 설계응력 값을 설정하여, 설계 강도로써 예측식을 산정하였다.



(a)



(b)

Fig. 14 Area of shear strength

$$\frac{V_n\,(\text{파괴하중})}{\text{유효면적}} = \alpha \times \frac{1}{6} \times \sqrt{f_{ck}}\,(N/mm^2) \approx 1.8 \tag{5}$$

$$\therefore\ \alpha = 1.8125\ (f_{ck} = 27\,MPa)$$

Table 3 Comparison of shear strengths predicted by current design code and proposed method

Specimen	Test results		KBC 2010 Shear provision V_{n1} (kN)	Shear prediction by Martina s $V_{n,eff}$ (kN)	Horizontal shear area (mm^2)	Horizontal shear prediction V_{nh} (kN)	$\frac{V_u}{V_{n1}}$	$\frac{V_u}{V_{n,eff}}$	$\frac{V_u}{V_{nh}}$
	Maximum strength (kN) V_u	Failure mode							
R0	175	flexural failure	-	-		-	-	-	-
R120-D-N	82.77	Horizontal shear cracking	49.50	70.00	45239	68.11	1.67	1.18	1.22
R80-D-F	76.23		66.00	93.33	40212	60.54	1.16	0.82	1.08
R60-D-F	82.00		49.50	70.00	45239	68.11	1.66	1.17	1.20
R80-S-F	98.26		98.99	140.00	60319	90.81	0.99	0.70	1.08
R60(100)-D-F	93.47		49.50	70.00	60344	90.85	1.89	1.34	1.03
R70(100)-D-F	103.40		57.75	81.67	60961	91.78	1.79	1.27	1.13

R60(100)-D와 R70(100)-D과 같은 헌치단이 적용된 중공슬래브의 경우, 모든 수평전단면적(N)을 헌치 부분의 원의 면적으로 하기에는 무리가 있다. 헌치와 만나는 웨브기둥의 원의 면적이 작을수록 적은 강도를 발휘하기 때문이다.

이때에 환산단면적을 이용하여 헌치의 지름이 100 mm인 단면적을 웨브기둥과 만나 단면적이 줄어드는 것을 고려해야한다. 환산단면적은 헌치 부분의 단면적이 가져가는 비율은 0.95% 콘크리트 웨브 기둥의 단면적이 가져가는 비율은 0.05% 로 계산한 단면적을 말한다. R70(100)-D의 지름을 계산하는 경우, (100×0.95)+(70×0.05)로 계산하고 R60(100)-D의 지름을 계산하는 경우, (100×0.95)+(60×0.05)로 계산한다.

실험결과, Table 3에서 보듯이 V_u/V_{n1}과 같은 경우는 1.79라는 값을 보이며 파괴강도를 과소평가 했고, $V_u/V_{n,eff}$의 경우, 0.70이라는 수치를 보이며 파단강도를 너무 과대평가하는 경우도 보였다.

반면에 제안한 설계식 (5)의 V_u/V_{nh}는 1.03~1.22의 예측범위를 보이며 20% 내외에서 파단강도를 잘 예측하였다. 이에 따라서 제안한 전단력식으로 판형 중공슬래브의 전단강도를 가장 잘 예측할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 슬래브의 구조성능을 확보하기 위하여 개발된 판형중공재와 그 시공성을 개선시키기 위하여 제안된 중공재 고정장치를 개발하여 그 장치의 성능을 검토하고 판형중공재의 수평전단파괴에 대한 적절한 설계식을 도출하기 위해서 연구를 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

1) 본 연구에서 개발된 중공재 고정장치는 개당 980 N 이상의 부력을 감당할 수 있는 것으로 나타났다. 시공현장에서 단위슬래브의 하나의 고정장치가 부담해야 하는 부력이 294 N이므로, 실험에서 증명한 980 N의 무게를 버티는 고정장치는 부력체가 뜨지 않을 만큼의 충분한 힘을 발휘할 것으로 판단된다.
2) 부족한 전단강도를 보충하기 위하여 중공부를 일렬로 배열하지 않고 엇모배열을 하였을 경우를 비교하여 보면 일렬로 배열 한 실험체의 강도가 사선배열한 실험체보다 하중에 직접영향을 받는 수평전단면적이 커져서 더 큰 강도로 설계 할 수 있다. 또한 헌치를 적용시킨 실험체의 강도 또한 수평전단면적이 커짐에 따라 더 큰 강도로 설계 할 수 있다.
3) V_{n1} 전단강도 식은 실험체의 최대강도를 크게 과소평가 하였다(V_u/V_{n1}=0.99~1.89). 그 이유는 수직전단강도만을 고려했기 때문이다. 마찬가지로 $V_{n,eff}$ 전단강도식은 실험체의 최대강도를 과대평가하는 경향이 두드러져 설계강도로써 잘 맞지 않았다($V_u/V_{n,eff}$ = 0.70~1.34). 수평전단면적에 따른 V_{nh} 식은 설계식 중에서 실험체의 최대강도를 가장 잘 예측하였다 (V_u/V_{nh} = 1.03~1.22). 이는 판형중공재의 최대강도를 예측하는 중요한 식으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 2015년 (주) 디엠그랑프리 연구비 지원(연구과제번호: R-2015-00275)에 의해 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

References

1. Ministry of Land, Infrastructure and Transport and Maritime Affairs (Building Planning Division). Floor Impact Sound Insulation structure admit and management criteria in Apartment Houses Enforcement, Act No. 2013-889, 2014, 044- 201-3370.
2. Chung, J. H., Choi, H. K., Lee, S. C., and Choi, C. S., Flexural Strength and Stiffness of Biaxial Hollow Slab with Donut Type Hollow Sphere, *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.30, No.5, 2014, pp.3-11.
3. Troels Brondum-Nielsen, "Ultimate Flexural Capacity of Cracked Ploygonal Concrete Sections with Circular Holes Under Biaxial Bending", *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.3, 1987, pp.212-215.
4. Troels Brondum-Nielsen, "Serviceability Limit State Analysis of Concrete Sections with Circular Holes Under Biaxial Bending", *ACI Structural Journal*, Vol.84, No.4, 1987, pp.293-295.
5. Tamon Ueda and Boonchai Stitmannaithum, "Shear Strength of Precast Prestressed Hollow Slabs with Concrete Topping", *ACI Structural Journal*, Vol.88, No.4, 1991, pp.402-410.
6. Lin, Y., "Design of Prestressed Hollow Core Slabs with Reference to Web Shear Failure", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.120, No.9, 1994, pp.2675-2696.
7. Matti, P., and Heli, K., "Shear Resistance of PHC Slabs Supported on Beams. I: Tests", *Journal of Structural Engineering, ASCE*, Vol.124, No.9, 1998, pp.1050-1061.
8. Ulf Arne Girhammar and Matti Pajari, "Tests and Analysis on Shear Strength of Composite Slabs of Hollow Core Units and Concrete Topping", *Construction and Building Materials*, Vol.22, No.8, 2008, pp.1708-1722.
9. 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.
10. Kim, S. M., Jang, T. Y., and Kim, S. S., "Structural Performance Tests of Two-way Void Slabs", *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol.25, No.8, 2009, pp.35-42.

11. Kang, J. Y., Kim, H. G., Joo, E. H., Kim, S. M., Kim, H. S. and Shin, Y. S., “Experimental Studies on the Effect of Construction Methods on Shear Strength of Hollow Core Slab”, *Proceedings of the Korea Concrete Institude*, Vol.23, No.1, 2011, pp.15-16.
12. Martina, S., and Markus, A., Biaxial Hollow core slabs - theory and tests, Bentonwerk, Fertigteil Technic, 2005, section 50-59.

요 약 최근에 사회적 요구와 경제적인 요구로 인해서 장스팬 건축물이 증가하고 있다. 그러나 장스팬 건축물은 자중이 증가하여 처짐·진동·소음의 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 판형중공슬래브가 제안되었는데 이는 슬래브 안에 일체형 중공재를 삽입함으로써 자중이 감소된 슬래브를 만들 수 있다. 이 시스템은 휨성능에는 영향을 받지 않는 단면을 중공재로 대체함으로써 슬래브의 강성은 그대로 유지하면서, 소음 및 처짐을 줄이고 자중을 감소할 수 있는 장점이 있다. 그러나 이 시스템의 경우 부력에 의해 일체화된 중공재가 상승한다는 단점이 있다. 따라서 판형 중공재 고정장치를 개발하였고, 또한 이를 삽입한 판형중공재의 성능을 알아보기 위하여 7개의 실험체를 제작하여 그 성능을 알아보고 그 결과 나타난 수평전단파괴에 대해서 예측을 할 수 있는 식을 제안하였다.

핵심용어 : 수행능력 평가, 판형중공슬래브, 중공재 고정장치, 수평전단강도