

중공체가 삽입된 철선 일체형 데크플레이트 슬래브의 휨성능 평가

Evaluation on the Flexural Performance of Steel Wire-integrated Void Deck Plate Slab

김 성 배* 박 준 용** 이 용 교***
Kim, Sung-Bae Park, Jun-Yong Lee, Yong-Gyo
 이 도 형**** 김 상 섭*****
 Lee, Do-Hyung Kim, Sang-Seup

Abstract

The purpose of this study is to evaluate flexural performance and stiffness through the comparison of solid deck plate and void deck plate. In this experiments, the main variable of specimens is thickness of slab; 150mm, 200mm. There are a series of 150mm thickness and three series of 200mm. Each series consists of 3 specimens. It's produced for comparison according to existence and material of openings. Additionally 200mm thickness specimens are produced for another variable; steel fiber, shear span-depth ratio. As a result of these experiments, it was better than equal or solid deck plate that flexural performance of void deck plate. Therefore, there is no loss of flexural strength due to the introduction of hollow slab.

키워드 : 중공 데크플레이트, 철선, 강섬유, 전단경간비
Keywords : Void Deck Plate, Steel Wire, Steel Fiber, Shear Span-depth Ratio

1. 서 론

국내·외적으로 가장 크게 관심을 받고 있는 부분은 환경 및 녹색성장이다. 건축분야에서도 친환경 소재개발 및 이산화탄소 절감을 위한 노력이 진행되고 있다. 건축분야에서 가장 일반적으로 사용되고 있는 콘크리트는 생산 시 약 300kg/m³의 이산화탄소가 배출되고 있으며, 이를 절감하기 위해 다양한 시도가 진행되고 있다^{(1)~(2)}.

국내에서도 초고층 계획이 경쟁적으로 진행되고 있다. 초고층 건축물은 연직하중보다 지진과 바람 등의 수평력에 효과적으로 저항할 수 있는 구조시스템이 요구된다. 그러나 초고층건축물의 경우 층수증가에 따른 고정하중 증가와 건물 총중량 증가로 밀면전단력이 증가하게 된다. 그러므로 건축물 중량을 저감하는 것이 내진성능을 향상시키는 가장 기본적인 전제조건이 된다^{(3)~(4)}.

일반적으로 슬래브는 골조공사에서 차지하는 비중이 대략 40% 정도로 평가되고 있다. 그러므로 슬래브의 공사효율 및 시공방법 개선이 전체 골조공사에서 차지하는 비중이 매우 크다. 이미 국내에서는 무지주 및 시공성 개선을 위해 철선 일체형 데크플레이트 사용이 일반화되어 있다.

철선 일체형 데크플레이트(이하 데크플레이트라고 한

다)는 기존에 사용되던 거푸집을 대체하고 슬래브 하부에 있는 동바리를 제거하여 상당한 시공성을 향상시켰다. 또한 데크플레이트는 얇은 강판을 사용하여 기존 거푸집을 이용한 슬래브공법과 경제적인 면에서도 큰 차이를 보이지 않고 있다.

최근 건축구조물에 대한 층간소음과 진동이 사회적인 문제로 대두되어 정부의 정책과 기준이 강화되고 있다. 따라서 강화된 기준을 만족하기 위하여 슬래브 두께를 증가시키는 방법으로 기준을 강화하고 있다. 그러나 슬래브 두께의 증가는 고정하중과 지진하중 증가를 초래하는 등 여러 가지 검토할 사항이 추가적으로 부각되어 이에 대한 해결방안이 절실히 요구되고 있다^{(5)~(6)}. 이미 유럽과 일본 등에서는 고정하중의 감소와 소음 및 진동의 저감효과가 있는 재료를 중공체로 사용하여 건축구조물에 적용^{(7)~(9)}하는 것이 일반화되고 있다. 이러한 경우 거주환경이 개선되고 슬래브 자중과 지진하중 감소 등 많은 이점을 가진다⁽¹⁰⁾. 중공 슬래브의 특성에 의해서 이방향 중공형 슬래브도 콘크리트 중량을 줄이고, 슬래브의 힘 전달을 효과적으로 유도하는 장점이 있다⁽¹¹⁾.

이에 본 연구에서는 기존의 데크플레이트를 이용하여 콘크리트 중량을 저감시킨 중공형 슬래브의 적용성을 검토하였다. 이미 이방향 중공형 슬래브에 대한 연구가 국내에서도 다소 진행되고 있으나, 데크플레이트를 활용한 일방향 중공슬래브에 대한 연구는 아직 미비한 상태이다. 본 연구는 일정한 폭을 갖는 단위스팬에 대한 휨 실험으로 데크플레이트를 이용한 중공형 슬래브의 휨성능에 대해 평가하였다. 본 실험은 중공체의 유무와 종류, 슬래브 두께, 강섬유 콘크리트 적용, 전단 경간비를 실험변수로 하였다.

* (주)센구조연구소 소장, 공학박사
** 한국기술교육대학교 건축공학부 석사과정
*** (주)코스틸 기술연구소 과장, 공학박사
**** (주)나라구조엔지니어링 대표이사, 공학박사
***** 한국기술교육대학교 건축공학부 교수, 공학박사
(교신저자, 이메일 : kimss@kut.ac.kr)

‘본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2010년도 산학연공동기술개발사업(No.00043608-1)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.’

표 1. 실험체 일람표

구분	실험체명	중공체 종류	두께 (mm)	폭 (mm)	길이 (mm)	콘크리트 종류	전단스팬 높이비	중공부 면적 (mm ²)	단면 결손율 (%)
A 시리즈	SLD-M-150-N	-	150	750	4,300	보통	13.5	0	0.0
	SVD-M-150-N	폴리스티렌						19,920	17.7
	PVD-M-150-N	고무주름관						12,720	11.3
B 시리즈	SLD-M-200-N	-	200	750	4,300	보통	9.6	0	0.0
	SVD-M-200-N	폴리스티렌						30,320	20.2
	PVD-M-200-N	PVC 파이프						26,550	17.7
C 시리즈	SLD-M-200-F	-	200	750	4,300	강섬유	9.6	0	0.0
	SVD-M-200-F	폴리스티렌						30,320	20.2
	PVD-M-200-F	PVC 파이프						26,550	17.7
D 시리즈	SLD-S-200-N	-	200	750	3,300	보통	5.1	0	0.0
	SVD-S-200-N	폴리스티렌						30,320	20.2
	PVD-S-200-N	PVC 파이프						26,550	17.7

2. 실험계획

2.1 실험 개요

표 1은 실험체 계획 및 각 실험체의 제원이다. 데크플레이트 실험체에 삽입된 중공의 종류는 폴리스티렌과 고무주름관, PVC관 등이다. 실험체는 모두 12개를 제작하였으며, 슬래브 두께에 의한 휨성능을 비교하기 위해 150mm, 200mm 슬래브 실험체를 각각 A 및 B시리즈로 3개씩 제작하였다. 또한 슬래브 두께 200mm 실험체를 대상으로 강섬유 콘크리트를 적용하여 비교한 것이 C시리즈이고, 전단경간비에 따른 영향을 비교한 것이 D시리즈이다. 그림 1은 실험체명에 대한 기호 명칭이며, 그림 2는 중공체가 삽입된 철선 일체형 데크플레이트 실험체의 형상을 나타낸 것이다.

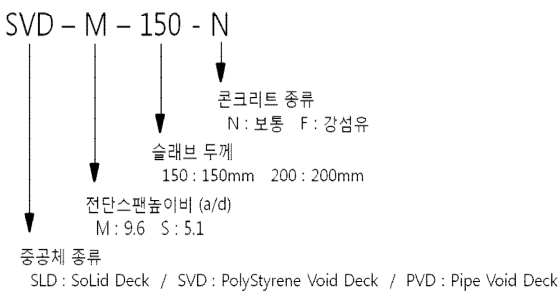


그림 1. 실험체 기호 및 명칭

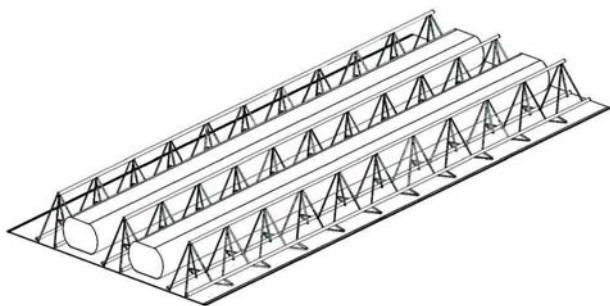
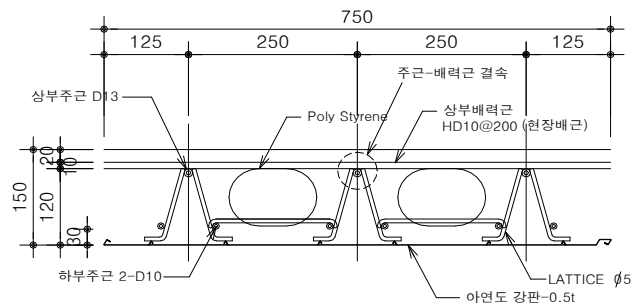


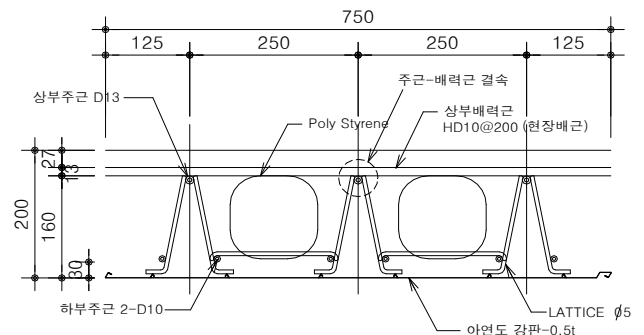
그림 2. 중공체가 삽입된 철선 일체형 데크플레이트의 형상

실험체의 단위 폭은 750mm, 길이는 4,300mm이고, 중공체 삽입에 의한 단면결손율은 11.3~20.2% 이다. 중공체는 데크플레이트의 철선 트러스 사이에 삽입하여 중공부를 형성하였다. 강섬유 콘크리트의 경우, 강섬유 혼입량은 전체 콘크리트 중량대비 0.15%이다.

폴리스티렌을 삽입한 실험체의 단면형상은 그림 3과 같다. 실험체는 폴리스티렌과 데크플레이트 사이에 콘크리트를 채울 수 있는 최소거리 확보를 위해 하부 주근에 후크근을 걸고 그 위에 폴리스티렌을 얹어서 충분한 이격거리를 확보하였다. 폴리스티렌의 단면은 중공효과가 가장 큰 직사각형을 기본으로 하였으며, 원활한 콘크리트 타설 및 응력집중현상을 방지하기 위하여 모서리 부분을 라운드 처리하였다. 또한 중공부의 부상방지를 위해서 상부주근과 배력근을 격자형으로 결속 하였다.

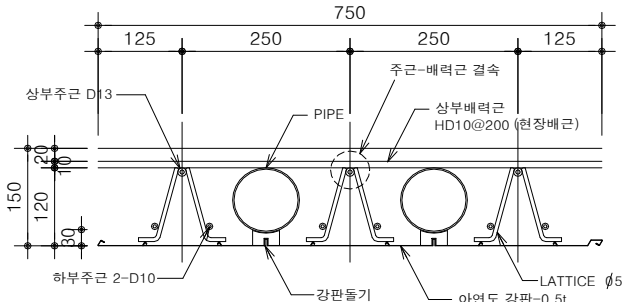


(a) SVD-M-150-N 단면형상

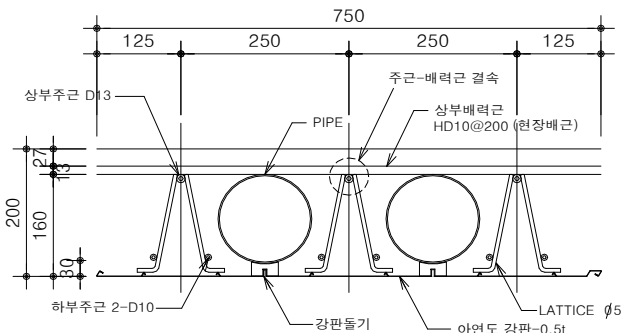


(b) SVD-M-200-N / SVD-M-200-F / SVD-S-200-N 단면형상
그림 3. 중공 데크플레이트 실험체 형상 (폴리스티렌)

파이프를 삽입한 실험체의 단면형상은 그림 4와 같다. 실험체의 두께에 따라서 관의 직경을 달리하기 위해 발생되는 추가적인 가공과정의 부담을 최소화하기 위해 기존에 생산되어 있는 적합한 직경의 고무주름관과 PVC관을 선택적으로 사용하여 실험체를 제작하였다. 고무주름관과 PVC관의 직경은 각각 D90, D130이다. 파이프와 데크플레이트 사이에는 콘크리트를 채울 수 있는 최소거리 확보를 위해 데크플레이트에 십자형의 강판돌기를 제작하고 용접으로 고정하였다.



(a) PVD-M-150-N 단면형상



(b) PVD-M-200-N / PVD-M-200-F / PVD-S-200-N 단면형상

그림 4. 중공 데크플레이트 실험체 형상 (파이프)

2.2 재료시험

실험체에 사용된 콘크리트 배합비는 표 2와 같다. 동일 조건의 콘크리트에 강섬유를 첨가하여 강섬유 콘크리트 공시체도 제작하였다. 사용된 강섬유의 인장강도(f_u)는 1,083MPa 이고, 콘크리트의 설계기준강도(f_{ck})는 24MPa이다. KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험방법에 의해 직경 100mm, 높이 200mm의 원주형 공시체를 수중에서 28일 양생한 후 만능시험기(Universal Testing Machine)로 0.3N/mm²의 하중제어 방식으로 압축시험하였다. 실험결과 일반 콘크리트의 경우 압축강도는 25.20MPa 이고, 강섬유를 혼입한 콘크리트는 24.42MPa이다.

실험체에 사용된 철선(SWM-P/R)은 KS D 3552(철선)에 적합한 선재로 D13, D10, $\phi 5$ 이며, 철선에 대한 인장시험편은 KS B 0801규준에 따라 제작하였고, KS B 0802에 의거 철선에 대한 인장강도, 연신율 등을 측정하였으며, 소재의 시험결과는 표 3과 같다. 데크플레이트는 SGC440(KS D 3506, $f_y = 335$ MPa)이며, 인장강도는 한국화학시험연구원의 소재시험결과이다.

표 2. 콘크리트 배합비

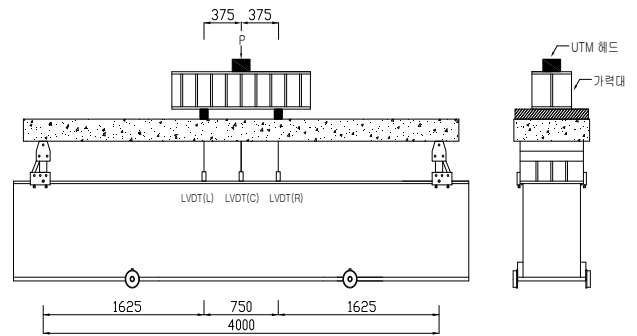
설계 강도 (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	단위 재료 소요량(kg/m ³)				
			물	시멘트	잔골재	굵은 골재	혼화제
24	50.4	45.7	175	347	824	980	1.7

표 3. 소재의 인장강도 시험결과

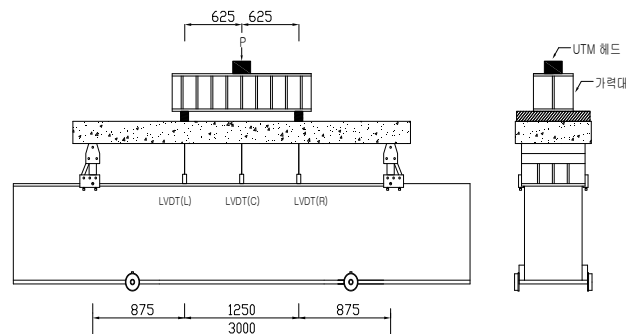
구 분	항복강도 (MPa)	인장강도 (MPa)	연신율 (%)
D13 철선	510.0	558.0	20.1
D10 철선	553.0	595.0	10.0
$\phi 5$ Lattice	-	607.3	16.4
0.5mm 데크플레이트	394.0	440.0	25.0

2.3 가력 및 계측 계획

본 연구에서는 전단경간비에 의한 휨내력의 변화를 검토하기 위해서 그림 5와 같이 반력지점으로부터 가력지점까지의 거리를 조절하여 전단경간비를 구분하였다. 가력은 최대 용량이 2,000kN인 만능시험기를 이용하여 3mm/min 속도의 변위제어로 2점 가력하였다. 먼저 양단부에서 중심으로 150mm 안으로 이동한 지점에 반력힌지를 설치하였다. 그리고 가력프레임 증상으로 그림 5(a)와 같이 두 가력지점 사이가 750mm가 되도록 설치하였으며, 그림 5(b)와 같이 두 가력지점 사이가 1,250mm가 되도록 설치하였다.



(a) 전단경간비 9.6의 실험전경



(b) 전단경간비 5.1의 실험전경

그림 5. 중공 데크플레이트의 휨 실험전경

하중증가에 따른 실험체의 처짐을 측정하기 위하여 중앙부와 가력지점이 놓인 위치에 바로 아래부분에 3개의 변위계(Linear Variable Displacement Transducer)를 설치하였다. 또한 상부 콘크리트와 데크플레이트의 변형률을 파악하기 위해서 스트레인게이지를 콘크리트 상부면과 데크플레이트 밑면 중앙부에 각각 1개씩 부착하였다.

2.4 내력 평가 및 산정식

본 연구에서는 단면의 내력을 간편하게 계산 할 수 있는 합리적인 접근방법으로 그림 6과 같이 Whitney의 등가직사각형 응력분포를 채택하여 휨 내력을 평가하였다.

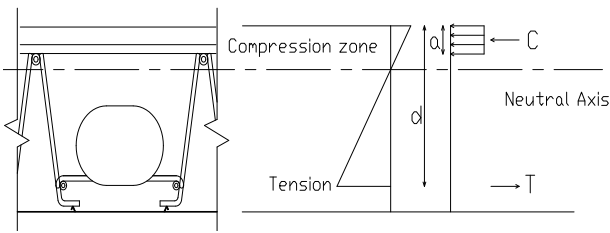


그림 6. 중공 데크플레이트의 응력도

여기서, 등가응력블록의 깊이(a)는 $a = A_s f_y / 0.85 f_{ck} b$ 를 통해서 산정하였으며, 최종적으로 이론에 의한 휨강도 및 실험결과에 의한 휨내력은 식 (1)과 식 (2)로 산정하였다.

$$M_n = A_s f_y \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1)$$

$$M_u = \frac{P_n}{2} \times l_1 \quad (2)$$

여기서, M_n : 공칭휨강도 (kN·m)

M_u : 실험결과에 의한 최대 휨내력 (kN·m)

P_n : 실험체의 최대하중(kN)

A_s : 인장철선의 단면적 (mm^2)

f_y : 철선의 항복강도 (N/mm^2)

l_1 : 반력지점에서 가력지점까지 거리 (mm)

3. 실험결과

3.1 실험체 파괴양상

본 연구의 실험결과는 표 4와 같다. 표에는 각 실험체의 초기균열하중과 초기균열 하중시 변위, 최대하중과 최대하중시 변위 등을 정리하였다. 12개의 실험체의 전체적인 파괴양상은 그림 7과 같이 중앙부에 초기 휨균열이 발생한 후 하중이 증가함에 따라 균열이 점차 확산되었다. 그리고 휨 항복이후 최대내력에 도달하면서 그림 8과 같이 콘크리트 상부가 압괴되면서 파괴되었다.

슬래브 두께가 200mm인 모든 실험체는 최대내력 이후에 처짐이 증가함에 따라 데크플레이트에 극한내력 이상의 인장력이 작용하여, 그림 9와 같이 국부적인 파단이 발생되었다. 그리고 데크플레이트의 파단으로 휨내력이 급격하게 저하되면서 파괴되었다.



그림 7. 슬래브 두께 150mm 실험체 휨 파괴형상



그림 8. 상부 콘크리트 압괴 균열



그림 9. 슬래브 두께 200mm 실험체의 데크플레이트 파단

표 4. 실험결과

구분	실험체명	P_{cr} (kN)	δ_{cr} (mm)	P_{max} (kN)	δ_{max} (mm)
A	SLD-M-150-N	5.88	2.10	49.49	129.84
	SVD-M-150-N	6.76	4.80	53.70	114.72
	PVD-M-150-N	8.23	6.11	55.86	110.51
B	SLD-M-200-N	14.11	1.70	81.24	77.18
	SVD-M-200-N	13.62	3.60	77.22	73.58
	PVD-M-200-N	10.98	2.40	79.18	77.78
C	SLD-M-200-F	10.09	1.50	80.56	70.76
	SVD-M-200-F	7.25	1.40	82.22	79.96
	PVD-M-200-F	13.13	2.50	82.03	75.28
D	SLD-S-200-N	38.22	2.90	161.70	72.58
	SVD-S-200-N	38.22	2.70	172.48	79.69
	PVD-S-200-N	43.12	3.30	172.48	73.68

P_{cr} ; 초기균열 하중

δ_{cr} ; 초기균열하중시 처짐량

P_{max} ; 최대하중

δ_{max} ; 최대하중시 처짐량

3.2 슬래브 두께에 의한 거동특성

그림 10은 슬래브 두께에 따라 A시리즈(두께150mm)와 B시리즈(두께200mm)를 비교한 하중-변위곡선이다. B시리즈 실험체의 평균 최대하중은 79.21kN으로, A시리즈 실험체의 평균 최대하중인 53.02kN보다 약 1.5배 높게 나타났다. 그러나 구조특성은 A시리즈 실험체가 B시리즈 실험체보다 연성적 거동을 하는 것으로 나타났다.

B시리즈 실험체는 대부분 최대하중이후 급격히 내력이 저하되면서 파괴되었다. 특히, SVD-M-200-N 실험체는 최대하중이후 계단식의 하향 곡선을 보이고 있다. 이런 현상은 하중증가와 함께 수직변위가 증가하면서 최하부의 테크플레이트가 인장력을 받게 되고, 한계상태에 이르러 테크플레이트가 국부적으로 항복 및 과단 되면서 발생하였다. 또한 이러한 테크플레이트의 과단 현상은 A시리즈 실험체를 제외한 슬래브 두께 200mm인 B, C, D시리즈 실험체 9개 모두에서 발생하였다.

3.3 강섬유에 의한 거동특성

그림 11은 슬래브 두께가 200mm인 동일한 실험체로서 콘크리트 내부에 강섬유 포함여부에 따라 B시리즈(보통콘크리트)와 C시리즈(강섬유콘크리트)를 비교한 하중-변위곡선이다. 실선으로 나타난 것이 B시리즈 실험체이고, 점선으로 나타난 것이 C시리즈 실험체이다. B시리즈 실험체의 평균 최대하중은 79.21kN이고, C시리즈 실험체의 평균 최대하중은 81.60kN으로 매우 유사한 값으로 나타났다.

그러나 초기 하중-변위곡선의 기울기인 강성은 C시리즈 실험체가 약간 높은 것으로 나타났다. 하중-변위곡선으로 비교하면, B시리즈 및 C시리즈 실험체 6개는 매우 유사한 구조적 거동을 나타내고 있다. 그러므로 강섬유콘크리트와 보통콘크리트의 휨내력 차이는 없는 것으로 판단되나, 강섬유콘크리트에 대한 실험결과는 강섬유 함유량이 0.15%인 경우에 한정된 것이다.

3.4 전단경간비에 의한 거동특성

그림 12는 슬래브 두께가 200mm인 동일한 실험체로서 전단경간비에 따라 B시리즈(a/d 9.6)와 D시리즈(a/d 5.1)를 전단경간비의 영향에 따른 휨내력과 변위와의 관계를 나타낸 것이다. 실험을 통해 측정된 최대하중(P_{max})에 실험체 자중을 반영하여 산정한 최대 휨내력의 평균은 B시리즈가 70.53kN·m이며, D시리즈 실험체의 최대 휨내력의 평균은 77.32kN·m로 나타났다. 실험결과 두 시리즈 모두 파괴 양상은 전형적인 휨 파괴로 나타났으며, 전단경간비가 작은 D시리즈 실험체의 최대 휨내력 평균이 B시리즈 실험체보다 약 10%정도 높게 나타났다. 그러나 본 실험에서 기준이 되는 중공이 없는 솔리드 실험체를 비교하였을 때는 큰 차이가 나타나지 않았다. 이론적으로 동일단면제원 실험체라 하더라도 전단경간비에 따라서 휨파괴와 전단파괴가 나타나며, 일반적으로 전단경간비가 클수록 휨내력이 높게 나타나지만, 본 실험의 결과 3% 미만의 차이를 나타냈다. 또한 동일 시리즈 내에서 휨내력 차이는 실험상의 오차로 판단된다.

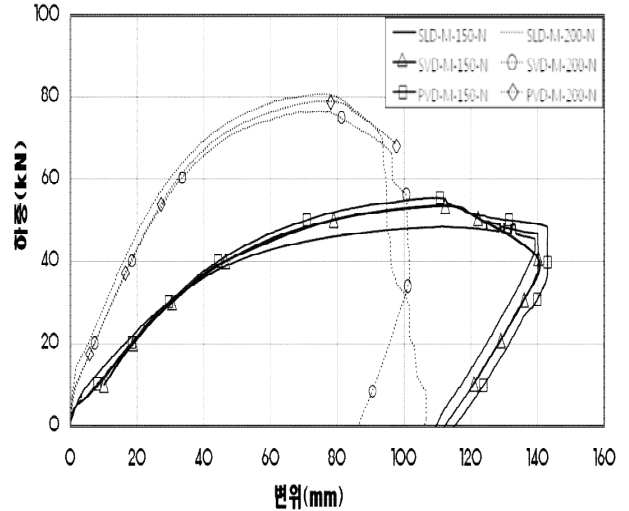


그림 10. 실험체 두께에 따른 하중-변위곡선 (A, B 시리즈)

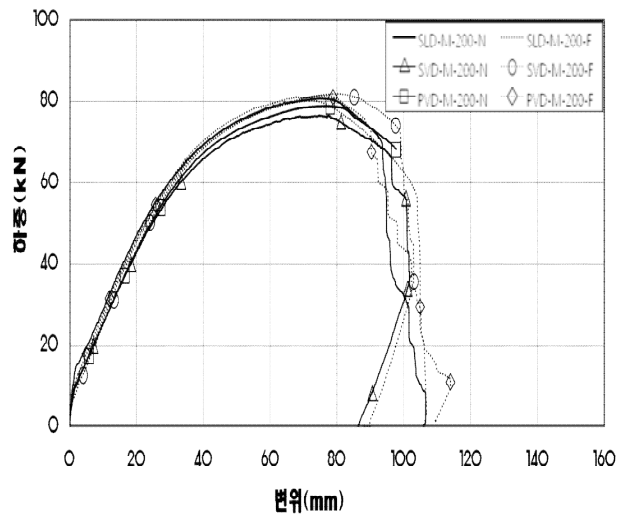


그림 11. 강섬유의 영향에 따른 하중-변위곡선 (B, C 시리즈)

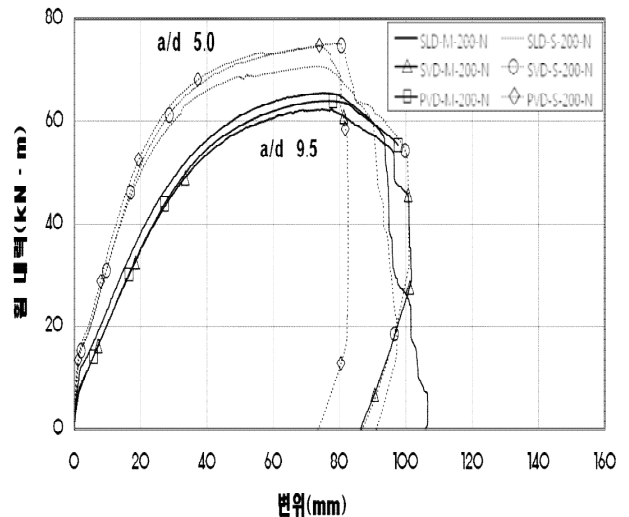


그림 12. 전단경간비의 영향에 따른 휨내력과 변위와의 관계 (B, D 시리즈)

4. 분석 및 고찰

4.1 실험결과 분석

표 5는 각 시리즈 실험체에 대한 항복하중(P_y), 항복변위(δ_y), 휨강성(K), 휨내력비 등을 정리하였다. 공칭휨강도(M_n)는 소재시험결과를 적용하였다. 또한 중공체 삽입에 따른 고정하중의 영향을 반영하여 휨강도(M_u)를 산정하였다. 항복하중 시 변형은 초기강성과 최대하중의 수평선이 만나는 점으로 산정하였고, 이 항복변위와 하중-변위 곡선이 만나는 점의 하중을 항복하중으로 정의하였다⁽¹²⁾. 강성은 항복하중의 1/3~2/3구간의 기울기로 산정하였다.

항복하중 및 최대하중은 각 시리즈별 실험체간의 편차가 크지 않으며, 솔리드 실험체 보다 중공형 실험체의 항복하중이 더 크게 나타나는 경향을 보였다. 실험결과에 의한 최대휨내력과 공칭휨강도를 비교하면, 약 38~79%가량 최대 휨내력이 더 크다. 또한 초기강성은 표 5와 그림 10~그림 12를 보면 슬래브두께와 전단경간비에 따라 차이가 크며, 고정하중에 의한 모멘트증가는 솔리드 실험체와 비교하면 약 5% 정도가 된다.

공칭강도에 대한 최대휨내력 비가 약40% 이상 상승한 것은 하부 인장철근 내력($A_s f_y = 471 \times 553$)에 대한 하부 강판의 내력($A_p f_{y2} = 375 \times 394$) 비가 57%에 달하기 때문이다. 표 5에는 하부 강판의 내력을 반영한 경우의 공칭모멘트(pM_n)를 포함하였다. 내력산정은 재료의 기준강도를 반영하여 내력을 산정하였으며, 최대내력과 큰 차이를 보이지 않는다. 그러나 하부강판은 거푸집으로 사용된 것이므로 테크플레이트의 내력산정 시 구조재로 포함되지 않으며, 본 공칭강도 산정에서 제외하였으나 하부강판이 내력에 차지하는 비중이 크다.

표 5. 실험결과분석

실험체명	P_y (kN)	δ_y (mm)	$\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$	K kN/mm	M_n kN·m	pM_n kN·m	M_u kN·m	$\frac{M_u}{M_n}$	
A	SLD-M-150-N	34.85	44.15	2.94	0.90		45.50	1.56	
	SVD-M-150-N	42.87	53.04	2.16	0.98	29.20	43.80	47.99	1.64
	PVD-M-150-N	45.14	55.56	1.99	0.95		50.28	1.72	
B	SLD-M-200-N	68.50	38.74	1.99	1.83		73.07	1.73	
	SVD-M-200-N	64.10	37.64	1.95	1.88	42.22	64.21	68.37	1.62
	PVD-M-200-N	66.30	38.94	2.00	1.87		70.15	1.66	
C	SLD-M-200-F	66.97	37.23	1.90	1.98		72.51	1.72	
	SVD-M-200-F	67.44	38.74	2.06	1.98	42.16	64.04	72.44	1.72
	PVD-M-200-F	68.08	37.20	2.02	2.00		74.46	1.72	
D	SLD-S-200-N	133.61	27.83	2.61	4.98		74.71	1.77	
	SVD-S-200-N	137.89	27.49	2.90	5.04	42.22	64.21	78.63	1.86
	PVD-S-200-N	139.12	26.29	2.80	5.11		78.73	1.86	

P_y ; 항복하중 δ_y ; 항복하중시 처짐량 K ; 휨 강성 $\frac{\delta_{max}}{\delta_y}$; 연성 pM_n : 하부강판을 반영한 공칭강도 M_n ; 공칭강도 M_u ; 실험결과에 의한 휨강도(고정하중포함)

4.2 단면결손의 영향

각 실험체는 전단면에 콘크리트를 채운 솔리드 실험체와 길이방향으로 일정한 중공단면을 갖는 중공 실험체로 구분된다. 중공이 형성된 슬래브에서 단면결손의 영향을 비교 평가하였다.

그림 13은 표 5의 실험결과분석을 기초로 단면결손율과 휨내력비를 분석한 것이다. 휨내력비는 실험에 의한 최대 휨내력을 공칭휨강도로 나눈 값이며, 단면결손율에 따라 평균치로 정리한 것이다. 그림 13과 같이 단면결손율이 증가할수록 오히려 휨내력비가 상승하는 경향을 보이니, 그 범위는 약 5% 전후로 단면결손이 휨내력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

그림 14는 표 4의 실험결과에서 슬래브 두께가 200mm 인 9개 실험체에 대해 중공 실험체의 최대 휨내력을 솔리드 실험체의 최대 휨내력으로 나눈 값과 단면결손율 관계이다. 단면결손율이 증가할수록 솔리드 실험체에 대한 중공 실험체의 휨내력비가 약간 상승되는 경향을 보인다. 그러므로 인장측 부근 콘크리트 슬래브 내부의 중공에 의한 단면감소는 휨내력에 큰 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.

그림 15는 솔리드 실험체를 기준으로 중공 실험체의 강성을 비교한 것이다. 강성비는 솔리드 실험체와 비교하면 1.00~1.09로 1.00에 근접하게 분포하며, 솔리드 실험체보다 중공 실험체가 조금 크다. 그러므로 일방향 슬래브 내부에 일정한 면적의 중공부 형성은 강성을 저하시키지 않는 것으로 판단된다.

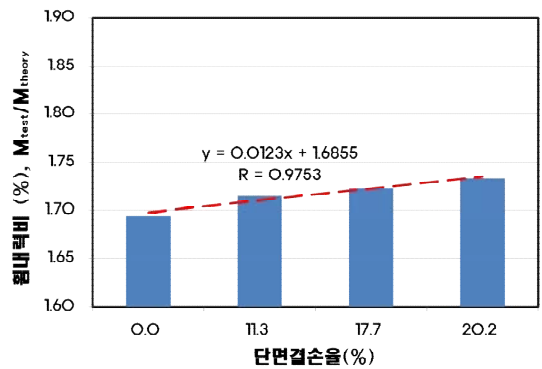


그림 13. 단면결손율과 최대 휨내력비

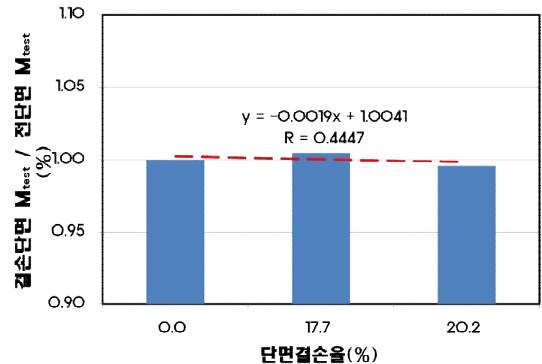


그림 14. 단면결손율과 솔리드 실험체에 대한 중공 실험체의 최대 휨내력비(슬래브 두께 200mm)

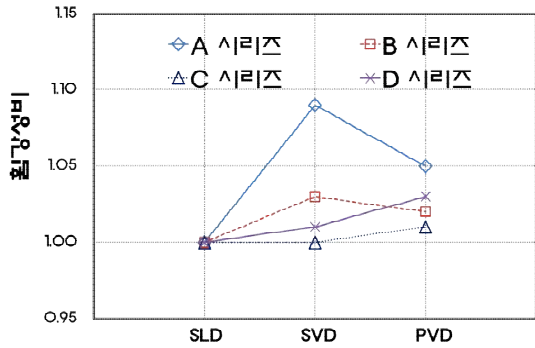


그림 15. 각 시리즈별 휨 강성비의 비교

4.3 전단경간비의 영향

그림 16은 전단경간비에 의한 파괴형태를 구분한 것이다⁽¹³⁾. B시리즈와 D시리즈의 실험체는 각각 전단경간비 (a_v/d)를 주요 변수로 비교하였으며, 각 실험체는 그림 17의 구분과 같이 휨 파괴형태가 발생하였다. 그러므로 실험을 통해 측정된 최대하중에 가력지점으로부터 반력지점까지의 거리를 고려하여 최대 휨내력을 산정하였다.

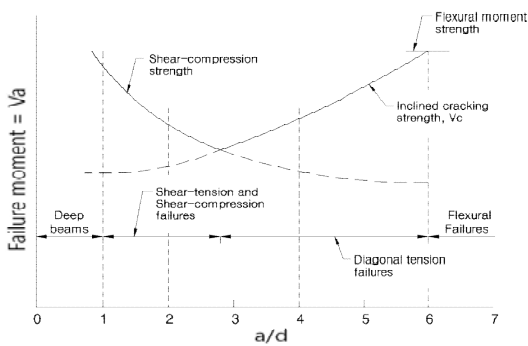


그림 16. 전단경간비에 의한 파괴형태

$$V_u \leq \phi V_n = \phi (V_c + V_s)$$

$$V_s = n A_v f_{vt} \sin \alpha, \quad V_c = \frac{1}{6} \sqrt{f_{ck}} b_w d \quad (3)$$

$$V_c' = 2.13 (f_{ck} \rho_w \frac{d}{a_v})^{1/3} b_w d \quad (4)$$

V_s : 스테럽의 전단강도 V_c : 콘크리트의 전단강도

V_c' : 전단경간 반영한 콘크리트 전단강도

n : 전단보강 철근 수 (= d/s)

ρ_w : 인장철근비 (= $A_s/b_w d$, $A_s = 6 - \phi 10 = 0.0037$)

f_{ck} : 콘크리트 압축강도 a_v/d : 전단경간비

b_w : 유효 폭 (= 750mm) d : 유효 층 (= 170mm)

휨재의 경우 공칭전단강도(V_n)는 식 3과 같이 콘크리트에 의한 전단강도(V_c)와 스테럽에 의한 전단강도(V_s)로 구분된다. 소요강도(V_u)가 콘크리트의 전단강도 보다 작은 슬래브와 기초 등은 전단보강하지 않으므로 콘크리트의 전단강도로 산정한다. 식 (3)에서 콘크리트의 전단강도 (V_c)는 철근비가 0.0075~0.025의 범위에서 적합하며, 철근

비가 낮은 경우 콘크리트의 전단강도는 실제보다 높게 평가된다. 이에 대해 주티(T. C. Zsutty)에 의해 제안된 식 4는 전단경간비와 인장철근비를 반영하고 있다⁽¹⁴⁾. 본 실험의 경우 인장철근비(ρ_w)는 0.0037이다. 그러므로 식 3보다 식 (4)로 산정하는 것이 적합하다.

본 실험결과 B와 D시리즈의 기준 실험체는 최대하중 (P_{max}) 차이가 3% 미만으로 나타났다. 또한 식 (3)과 식 (4)는 콘크리트의 단면적($b_w d$)이 전단내력을 결정하는 중요한 변수이므로 단면결손이 있는 중공 실험체의 경우 중공율에 비례하여 최대하중이 기준 실험체보다 낮아야 한다⁽¹⁵⁾. 그러나 본 실험에서는 큰 차이가 없는 것으로 나타났으며, 이것은 중공데크 플레이트의 경우 일정한 전단경간비 이상을 확보하면 최대내력은 큰 차이가 없는 것으로 판단된다.

4.4 중공체 종류의 영향

그림 17은 각 시리즈별 중공체 종류에 따른 최대 휨내력을 비교한 것이다. 중공체의 종류는 표 1과 같이 솔리드 실험체를 제외하면 3가지 종류이다. 솔리드 실험체를 제외하고, 각 중공체 종류에 따른 최대 휨내력을 비교하면 큰 차이가 없다. 또한 표 4에서 실험결과에 의한 항복하중시 변위에 대해 최대하중시 변위비도 중공체의 종류에 따라 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 4.2절 단면결손의 영향과 같이 휨 부재에서 중립축으로부터 인장측에 해당하는 부분을 중공으로 만든 경우와 동일한 결과이며, 중공체로 사용된 소재의 종류에 따라 최대 휨내력 및 변형능력에 대한 영향은 없는 것으로 판단된다.

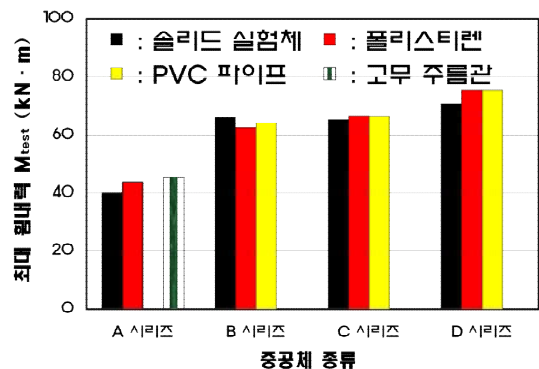


그림 17. 중공체 종류와 최대내력의 차이

4.5 강섬유 첨가의 영향

표 6은 강섬유의 영향을 비교하기 위해 동일 실험변수에 보통콘크리트의 B시리즈와 강섬유 콘크리트의 C시리즈 실험체를 비교한 실험결과이다. 강섬유가 포함된 실험체의 경우 강성이 보통콘크리트 실험체 보다 평균 약 10%가량 높다. 그러나 최대하중과 항복하중은 실험상 편차만 나타났을 뿐 큰 차이가 없었다. 일반적으로 강섬유를 첨가한 콘크리트는 보통 콘크리트에 비해 뚜렷한 연성 증가가 나타난다⁽¹⁵⁾. 그러나 본 실험에서는 하부에 배근된 6개의 이형철선과 데크플레이트가 인장력을 지배적으로 부

답하므로 강섬유 보강에 의한 연성증가 효과가 나타나지 않은 것으로 판단된다. 이러한 양상은 B시리즈와 C시리즈인 6개 실험체의 최종적인 파괴형태를 통해서 확인할 수 있다. 슬래브 두께가 200mm인 각 실험체는 항복하중 이후 계속되는 하중의 증가에 의해 최대하중에 도달하고, 하중증가에 따라 처짐이 증가하면서 테크플레이트에 국부적인 파단이 발생하였다. 그러므로 강섬유는 초기 휨강성 증진에는 기여를 하지만, 연성적인 거동은 하부 인장철선과 테크플레이트가 부담하므로 강섬유가 연성적 거동에 미치는 영향은 작은 것으로 판단된다.

표 6. 콘크리트 종류에 의한 영향

실험체명	콘크리트 구분	K (kN/mm)	P_{cr} (kN)	P_{max} (kN)	δ_{max}/δ_y
SLD-M-200	보통	1.83	14.11	81.24	1.99
	강섬유	1.98	10.09	80.56	1.90
SVD-M-200	보통	1.88	13.62	77.22	1.95
	강섬유	1.98	7.25	82.22	2.06
PVD-M-200	보통	1.87	10.98	79.18	2.00
	강섬유	2.00	13.13	82.03	2.02

5. 결 론

본 연구에서는 철선 일체형 테크플레이트를 이용한 일방향 슬래브에서 중공체의 유무와 종류, 슬래브 두께, 강섬유 콘크리트 적용, 전단 경간비를 실험변수로 휨내력으 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 중공율이 20% 이하인 중공 테크플레이트 슬래브의 경우, 콘크리트가 전부 채워진 테크플레이트 슬래브(솔리드 실험체)와 구조특성을 비교한 결과, 솔리드 실험체의 휨내력 및 변형성과 큰 차이가 없는 것으로 확인되었다. 그러므로 일정 비율이하의 중공단면은 철선일체형 테크플레이트 슬래브의 성능에 영향을 미치지 않는 것으로 판단된다.
- 2) 폴리스티렌과, 고무주름관, PVC관 등으로 제작한 중공단면의 경우, 중공체의 종류에 의한 휨내력 및 강성 등의 영향은 없는 것으로 나타났으며, 중공체는 다양한 종류의 소재 적용이 가능할 것으로 판단된다.
- 3) 강섬유가 0.15% 함유된 경우, 동일변수의 실험체를 비교하면 강성은 일부 증가하나, 강섬유를 혼입한 실험체의 휨내력은 크게 증가하지 않는 것으로 나타났다.
- 4) 전단경간비가 5.1 이상인 실험체의 경우 연성적인 휨 파괴가 나타나며, 중공부 형성에 따른 휨내력 저하는 없는 것으로 판단된다.

본 연구에서는 다양한 재질과 형상을 갖는 중공체를 삽입한 테크플레이트 슬래브에 대해 솔리드 슬래브와 동등한 성능의 휨내력이 확보되는가를 중심으로 검토하였다.

그러나 향후 중공체 삽입율이 20% 이상인 경우와 중공체 삽입에 의한 진동 및 소음, 내화성능 등에 대한 추가연구가 필요할 것으로 판단된다.

참고문헌

1. 현은미, 최용석, 김용식, '친환경건축물의 이산화탄소 배출 저감 연구, 대한건축학회 2009년도 학술발표대회논문집 계획계 제29권 제1호 2009. 10, pp. 657~660
2. '이산화탄소 저감 및 처리기술 개발 사업단' 한국연소학회, 제31회 KOSCO SYMPOSIUM 논문집 2005. 1, pp. 339~343
3. 최장순, '초고층건물 집합체로서의 수직도시', 대한건축학회, 건축, 제52권 제11호 (통권 354호) 2008. 11, pp. 63~65
4. 김태호, 박지형, 김옥중, 이도범, 고현 '초고층 구조물의 지진해석을 위한 지진기록의 조정방법', 한국지진공학회 논문집, 제12권 제5호 (통권 제63호) 2008. 10, pp. 11~21
5. 건설교통부, 공동주택 바다 충격음 차단구조 인정 및 관리기준, 건설교통부고시 제2004-71호, 2005.
6. 이원열, 정상민, 신덕, '공동주택 슬래브 두께변화에 따른 공사비 증가 산정 평가', 한국건축시공학회지, 제5권 제2호(통권 제16호) 2005. 6, pp. 161~166
7. Markus Aldejohann, Martina Schnellenbach-Held, "Investigations on The Shear Capacity of Biaxial Hollow Slabs - Test Setup and Test Program -", Darmstadt Concrete 17, 2002.
8. Markus Aldejohann, Martina Schnellenbach-Held, "Investigations on the Shear Capacity of Biaxial Hollow Slabs - Test Results and Evaluation -", Darmstadt Concrete 18, 2003.
9. Markus Aldejohann, Martina Schnellenbach-Held, "Zweiachsiges Hohlkörperdecken in Theorie und Versuchen; Biaxial hollow slabs, theory and tests", Betonwerk + Fertigteil-Technik, seiten 50~59, 10/2005.
10. 홍건호, 박홍근, 황재승, 'Hollow core 슬래브의 중량충격음 성능에 대한 연구', 대한건축학회논문집 계획계, 제24권 제6호 (통권 236호) 2008. 6, pp. 355~362
11. 김상모, 장태영, 김상섭, '이방향 중공슬래브의 구조성능평가', 대한건축학회논문집 구조계, 제25권 제8호 (통권 250호) 2009. 8, pp. 35~42
12. 建設省建築研究所, (社)鋼材倶楽部, "鋼構造物の耐震保有性能評価のための標準試験方法と評価基準の提案", 1996. 12.
13. Leonhardt, F., Walther, "Reducing the Shear Reinforcement in Reinforced Concrete Beams and Slabs", Magazine of Concrete Research, Vol.17, No.53, pp.187~198. December 1965.
14. 김상식, '철근콘크리트 구조설계 4판, 2008. 문운당
15. 대한건축학회, 강섬유 보강콘크리트 바닥슬래브 활용기술 세미나, 2009. 6

(接受: 2011. 1. 5)