



도넛형 이방향 중공슬래브의 부착특성에 관한 실험적 연구

정주홍¹⁾ · 강성훈¹⁾ · 이승창²⁾ · 최창식³⁾ · 최현기^{4)*}

¹⁾한양대학교 대학원 건축환경공학과 ²⁾삼성물산(주) 기반기술연구소 ³⁾한양대학교 건축공학과 ⁴⁾한양대학교 산업과학연구소

An Experimental Study for Bond Characteristics of Deformed Bar Embedded in Donut Type Biaxial Hollow Slab

Joo-Hong Chung,¹⁾ Sung-Hoon Kang,¹⁾ Seung-Chang Lee,²⁾ Chang-Sik Choi,³⁾ and Hyun-Ki Choi^{4)*}

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

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

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

⁴⁾The Research Institute of Industrial Science, Hanyang University, Seoul 133-791, Korea

ABSTRACT This study investigated the bond characteristics of embedded deformed steel bar in donut type biaxial hollow slabs. The donut type hollow sphere make concrete inner cover formed between steel bar and hollow sphere due to the hollow shape and arrangement. Generally, inner cover was thinner than outer cover, and some part of donut type biaxial hollow slab has smaller inner cover thickness than 2.5 d_b . It was affected to the bond condition of deformed bar. Furthermore, inner cover thickness changes along the longitudinal deformed bar due to hollow shape. Therefore, donut type hollow slab was divided 3 regions according to the hollow shape such as insufficient region, transition region, sufficient region. Pull-out test were performed to find out the effect of bond condition by the region. Main parameters are inner cover thickness, embedded length and bond location. Bond characteristics of donut type biaxial hollow slab were confirmed through comparison of bond stress-slip relationship, maximum bond strength and bond stress distribution of each regions. And the calculation method of bond strength of donut type biaxial hollow slab was suggested based on the test results.

Keywords : donut type biaxial hollow slab, inner cover thickness, bond stress-slip relationship, bond stress distribution

1. 서 론

1.1 연구 배경 및 목적

이방향 중공슬래브란 플랫폼 슬래브의 상부근과 하부근 사이에 중공형성체를 설치함으로써 슬래브의 복부에 중공을 형성하는 바닥 구조 시스템이다. 이러한 이방향 중공슬래브는 휨 성능에 영향을 적게 미치는 웨브 부분의 콘크리트를 중공형성체로 대체함으로써, 휨 성능 및 차음성능이 동일 두께의 일반 RC 슬래브와 동등한 수준을 유지하면서도 중량을 약 30% 정도 감소시키는 효율적인 구조 시스템으로 주목 받고 있다. 이러한 중공 슬래브의 장점을 활용하여 ‘Bubble Deck Technology’

와 ‘Cobix Technologies AG’는 구형 또는 타원형 플라스틱 볼을 중공형성체로 사용하는 이방향 중공 슬래브 공법을 개발하였으며, 그 구조성능을 검증하였다.¹⁾ 또한 정주홍 등은 다양한 중공형상을 변수로 해석적 연구를 수행하여 중공형성체의 최적형상으로 도넛형 중공형상을 제안하였으며, 실험적 연구를 통하여 도넛형 이방향 중공슬래브의 휨, 전단, 뚫림 전단 등의 구조성능을 검증하였다.²⁻⁵⁾

한편, 슬래브에 있어서 철근과 콘크리트의 부착성능은 슬래브의 처짐, 균열, 인장강성 등에 영향을 미치는 중요한 요소이다. ‘Cobix Technologies AG’는 이방향 중공슬래브의 경우 중공형성체에 의해 하부 인장 철근을 감싸고 있는 콘크리트가 감소하게 되며, 이에 따라 철근의 부착성능이 감소할 수 있음을 주장하였다. 실험 결과 ‘Cobix Technologies AG’ 이방향 중공슬래브의 최대 부착강도가 일반 RC 슬래브에 비해 약 45% 감소하는 것으로 나타났다.⁶⁾ 하지만 도넛형 이방향 중공슬래브의 경우 중공형성체와 철근이 맞닿아 있지 않고 중공형성체 형상이 다르

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

Received August 17, 2012, Revised November 21, 2012,

Accepted December 10, 2012

©2013 by Korea Concrete Institute

기 때문에 Cobiax 슬래브와 상이한 부착 조건을 가지고 있다. 슬래브 철근의 부착성능은 최소 피복두께 등 부착 조건에 좌우되기 때문에 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착성능에 관한 연구가 필요할 것으로 판단된다.

1.2 도넛형 이방향 중공슬래브 부착 조건

일반적으로 콘크리트와 이형철근의 부착 거동은 철근의 지름, 마디형상, 간격, 표면의 거친 정도에 따라 영향을 받으며 콘크리트의 피복두께, 인장강도 등에 따라 결정지어진다. 이 연구에서 대상으로 하는 도넛형 중공형성체는 Fig. 1과 같이 직육면체의 모서리와 꼭지점에 대응하는 부분을 외측으로 볼록한 곡면 외관을 형성하였으며, 상하부 중앙을 관통하여 연결한 내부 홀(hole)을 가지고 있다.

도넛형 이방향 중공슬래브는 슬래브 복부에 중공형성체가 배치됨에 따라 중공형성체와 철근 사이에 피복이 형성된다. 또한 중공형성체 형상에 따라 변단면이 발생하므로 Fig. 2와 같이 철근의 길이 방향을 따라 중공형성체와 철근사이의 피복두께가 변하게 된다. 도넛형 이방향 중공슬래브는 철근의 중심에서 콘크리트 표면까지의 거리가 $2.5d_b$ 이상으로 충분한 피복두께를 확보하고 있다. 하지만 내부피복의 경우 철근의 길이방향으로 두께가 변하기 때문에, 일반적으로 충분한 피복두께인 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하게 된다. 따라서 도넛형 이방향 중공슬래브의 철근 부착 조건은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 3가지 구간으로 나누어진다.

이 연구에서는 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착특성

을 파악하기 위하여 슬래브를 Fig. 2와 같이 3가지 부착 구간(sufficient, transition, insufficient region)으로 구분하여 각 구간의 부착특성을 파악하고자 하였다. 또한 슬래브 내부의 중공형성체와 철근 사이에 발생하는 내부피복이 철근 부착성능에 미치는 영향을 파악하기 위하여 철근의 내부피복두께를 변수로 하여 실험적 연구를 수행하였다.

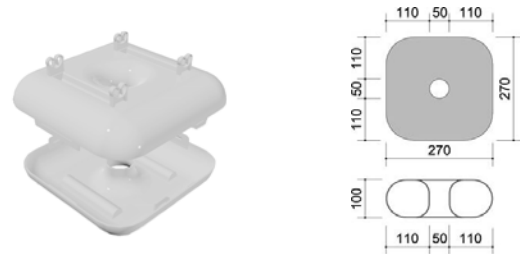
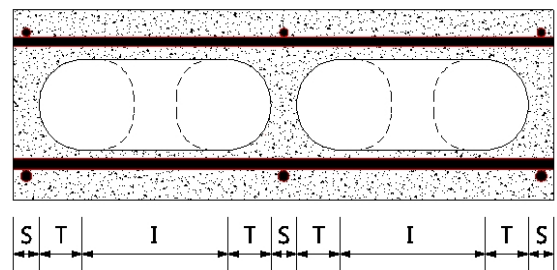


Fig. 1 Donut type hollow sphere shape (unit: mm)



I : insufficient region
T : transition region
S : sufficient region

Fig. 2 Section of donut type biaxial hollow slab

Table 1 Details of test specimens

Specimen	f_{ck} (MPa)	Rebar diameter (mm)	Height (mm)	Width (mm)	Length (mm)	Parameters		
						Embedded length (mm)	Inner-cover thickness (mm)	Bond region
S-270-S-E	30	12.7 (D13)	150	150	335	270	-	-
GB-270-0-E							0	Entire
GB-270-10-E							10	
GB-270-26-E							26	
GB-50-0-A						50	0	A-Type (transition region 1)
GB-50-10-A							10	
GB-50-26-A							26	
GB-50-0-B							0	B-Type (insufficient region)
GB-50-10-B							10	
GB-50-26-B							26	
GB-50-0-C						50	0	C-Type (transition region 2)
GB-50-10-C							10	
GB-50-26-C							26	

Note) S : solid slab, GB : donut type biaxial hollow slab

2. 부착 실험

2.1 실험 변수

이 연구에서는 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착특성을 파악하기 위하여 철근의 문힘길이 및 부착구간의 위치, 내부피복 두께를 실험변수로 하여 총 13개의 실험체를 제작하였다. 각 실험체 제원 및 변수는 Table 1에 나타내었다. 철근 문힘길이는 각 구간별의 부착응력-슬립 특성 및 부착응력 분포를 파악하기 위한 변수이다. 문힘길이 $5d_b$ 이하의 짧은 부착 실험체는 철근의 길이방향에 따른 구간별 중공형상 및 위치에 따라 Fig. 3(a)~(c)와 같

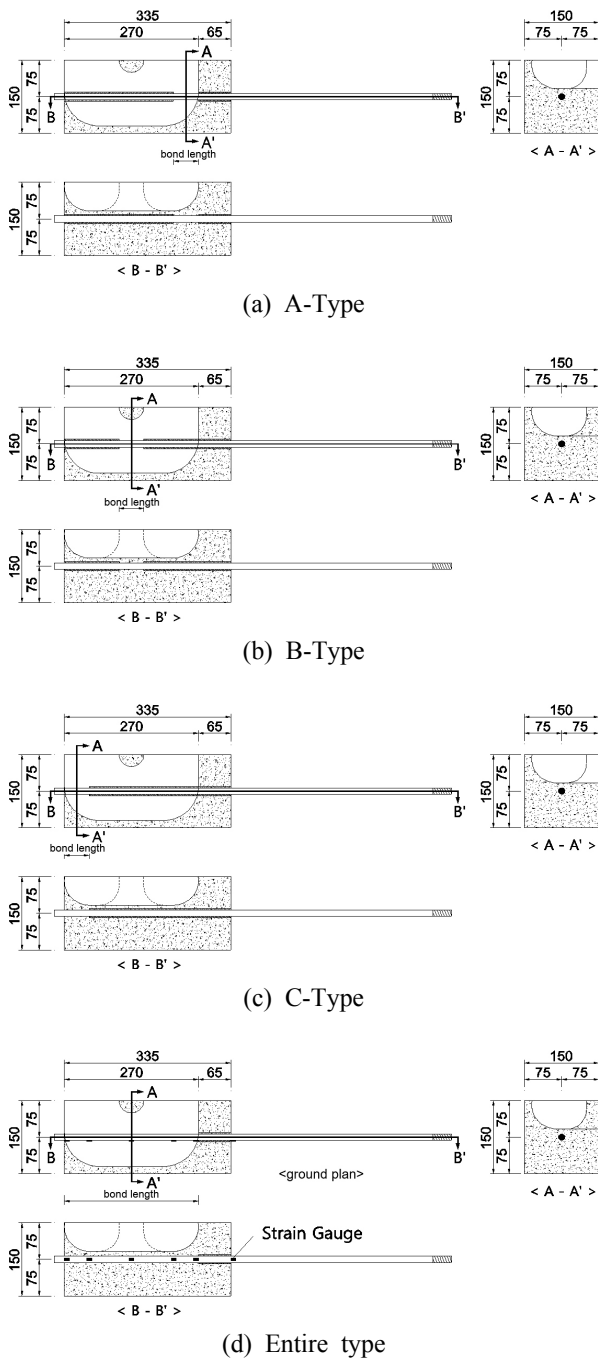


Fig. 3 Specimen details (unit: mm)

이 3가지 타입으로 계획하여 각 구간별 부착응력-슬립 특성을 확인하였다. 또한 도넛형 중공형성체의 3가지 구간이 모두 고려될 수 있는 문힘길이 270 mm의 긴 부착 실험체를 계획하여 철근의 부착응력분포를 산출하고 길이방향에 따른 부착응력 발현정도를 확인하였다. 내부피복두께 변수의 경우 제안된 도넛형 이방향 중공슬래브의 순 내부피복두께 10 mm, 충분한 피복두께 조건($2.5d_b$)를 만족하는 순 내부피복두께 26 mm, 철근과 중공형성체가 맞닿아 있는 순 내부피복두께 0 mm 등 총 3가지 내부피복 두께를 고려하여 부착특성을 확인하였다.

2.2 재료 실험

이 실험에서 사용한 콘크리트의 설계기준 강도는 30 MPa이며, 배합비는 Table 2에 나타내었다. KS F 2405에 따라 총 5개의 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원통형 공시체를 제작하여 실험체와 동일한 조건에서 양생하였다. 콘크리트의 강도시험은 구조실험 직전 실시하였고, 5개의 공시체의 평균 강도는 29.5 MPa로 설계 기준 강도인 30 MPa와 동일한 강도를 나타내었다. 부착실험에 사용된 철근은 실험체의 부착과괴를 유도하기 위하여 SD500의 D13 이형 철근을 사용하였다. KS D 3504 및 3552의 규정에 따라 철근 인장시험편을 제작하여 강도평가를 수행하였으며, 시험 결과는 Table 3과 같다.

2.3 실험체 제작

실험체 제작은 KS F 2441⁷⁾을 참고하였으며, 도넛형 이방향 중공슬래브의 주인장 철근인 하부철근을 대상으로 하여 수평 배근 실험체를 제작하였다. 실험체 제작에 사용된 중공형성체는 기존에 제작된 도넛형 중공형성체를 각각 1/2로 나누어 슬래브 내부의 중공면을 형성하였다. 실험체 상세도는 Fig. 3에 나타내었으며, 긴 부착 실험체의 경우 중공형성체가 적용된 전구간의 부착응력 분포를 확인하기 위하여 Fig. 3(d)와 같이 구간별로 변형률 게이지(strain gauge)를 부착하였다. 변형률 게이지는 부착면에

Table 2 Mix proportion of concrete

Design strength (MPa)	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m ³)				
			W	C	S	G	Admixture
30	44.2	46.9	165	373	837	966	1.87

Table 3 Tensile strength of rebar

Rebar type	Nominal strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Ultimate strength (MPa)	Elongation (%)	Elastic modulus (GPa)
D13	500	576	751.57	12.21	203

의한 영향을 최소화하기 위하여 철근 측면 리브에 부착하였다. 또한 pull-out 실험에서 발생할 수 있는 지압면의 압축력에 의한 영향을 줄이기 위해 PVC 파이프를 이용하여 하중단에서부터 길이 $5d_b$ 의 비부착 구간을 계획하였다. 모든 실험체는 콘크리트 타설 3일 이후 거푸집을 해체하고 실험 전 28일 동안 양생을 실시하였다.

2.4 실험 방법

실험은 Fig. 4와 같이 재하용 철물을 제작하고 철근에 이중 나사선 커플러를 체결하였으며, 500 kN 용량의 스크류잭으로 철근을 인발하였다. Pull-out 실험에서 발생하는 실험체와 지압판 사이에 발생하는 압축력에 의한 영향을 감소시키기 위하여 철근 주위의 지압판에 $2.5d_b$ 크기만큼 구멍(hole)을 형성하였으며, 실험체와 지압판 사이에 고무패드를 설치하여 마찰력을 감소시켰다. 철근과 콘크리트의 슬립을 측정하기 위하여 Fig. 5와 같이 자유단에 돌출되어 있는 철근과 자유단 콘크리트의 상대변위를 측정하여 자유단 철근의 순수 슬립을 측정하였다. 또한 재하단에 2개의 LVDT를 설치하여 철근의 최소 슬립이 2.5 mm에 도달하는 것을 확인하였으며, 실험 중 발생할 수 있는 편심을 측정하였다. 추가적으로 실험의 정확성을 확보하기 위하여 Fig. 5와 같이 총 6개의 LVDT를 스크류잭 및 철물에 설치하여 실험 중 발생할 수 있는 변위를 측정하여 실험값을 보정하였다. 가력속도는 KS F 2441에 따라 0.6 mm/min의 속도로 변위제어를 실시하였으며, 실험체에 부착파괴가 발생하고 잔류부착응력이 확인될 때까지 하중을 가력 하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착응력-슬립 관계

Fig. 6은 내부피복두께별로 부착구간에 따른 부착응력-슬립 관계 변화를 나타낸 그래프이다. 모든 실험체가 취

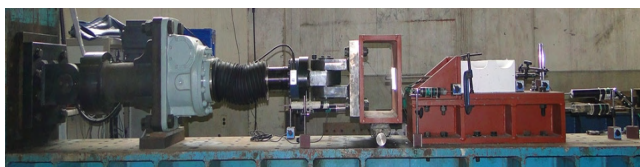


Fig. 4 Test setup

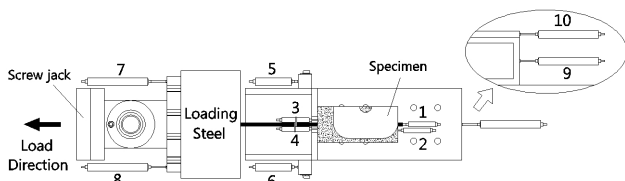
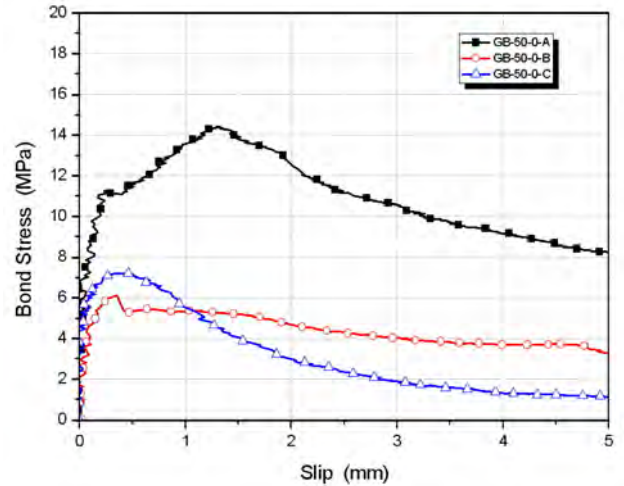
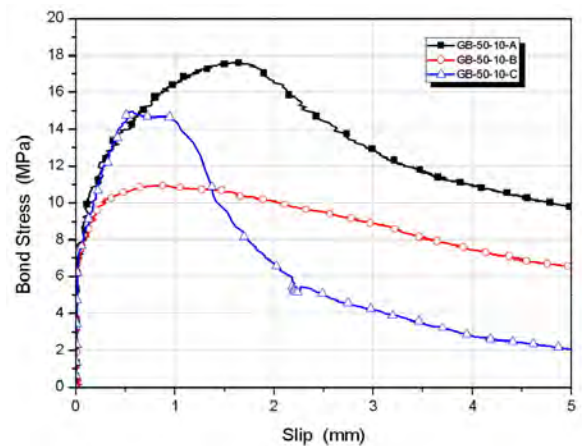


Fig. 5 LVDT location

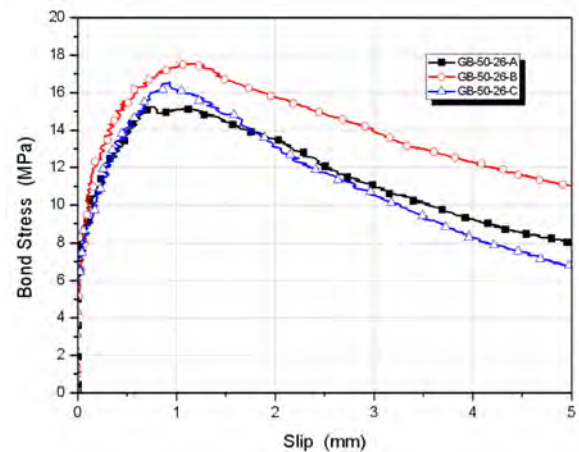
대 부착응력 이전에는 초기 화학적인 접착력만으로 부착응력이 증가하다가, 슬립이 발생하면서 철근과 콘크리트의 맞물림 작용에 의해 부착응력이 완만히 증가하는 전형적인 부착거동을 보이고 있다. 하지만, 최대부착응력 이후의 잔류부착응력 및 파괴 거동은 내부피복두께 및 부착구간에 따라 상이한 결과를 보여주고 있다. Fig. 6(c)



(a) Inner cover thickness: 0 mm



(b) Inner cover thickness: 10 mm

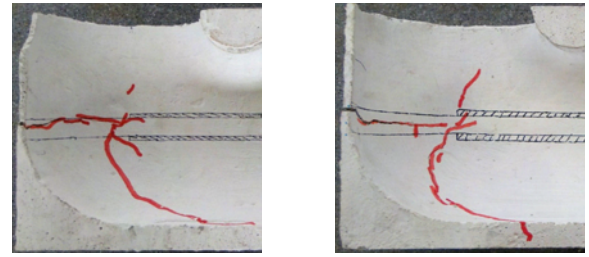


(c) Inner cover thickness: 26 mm

Fig. 6 Bond stress-slip curve

Table 4 Test results of short specimen

Specimen	P_u (kN)	τ_{max} (MPa)	s_{max} (mm)	Failure mode
GB-50-0-A	28.74	14.41	1.29	Splitting
GB-50-10-A	35.14	17.61	1.74	Pullout
GB-50-26-A	30.41	15.24	0.78	Pullout
GB-50-0-B	12.20	6.12	0.35	Splitting
GB-50-10-B	21.84	10.95	0.85	Pullout
GB-50-26-B	35.01	17.55	1.14	Pullout
GB-50-0-C	14.37	7.20	0.38	Splitting
GB-50-10-C	29.81	14.94	0.38	Splitting
GB-50-26-C	33.00	16.54	0.93	Pullout



(a) GB-50-10-C

(b) GB-50-0-C

Fig. 7 Crack pattern

따라서 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도 산정 시 내부피복 두께에 따른 부착특성을 고려하여 구간별로 산정해야 할 것으로 판단된다.

3.2 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착응력 분포

부착응력 분포는 철근의 축방향으로 일정한 거리에 따라 배치된 변형률 게이지를 통하여 인접한 2개의 측정점 사이의 변형률 차이로부터 다음의 식 (1) 및 (2)로 도출하였다. 철근의 탄성구간 이후($\epsilon_s \geq 0.0028$)에는 철근 인장 시험 결과(F_s)를 사용하여 식 (2)를 통하여 부착응력을 산정하였다.

$$\mu = \frac{d_b E_s \Delta \epsilon_s}{4 \Delta x} \quad (1)$$

$$\mu = \frac{d_b F_s}{4 \Delta x} \quad (2)$$

E_s : 철근의 탄성계수(MPa)

d_b : 철근의 직경(mm)

F_s : 비탄성구간의 철근 강도(kN)

$\Delta \epsilon_s$: 측정점 사이의 철근 변형률의 차

Δx : 측정점간의 거리(mm)

Azizinamini의 연구에서는 철근의 매입길이가 길면 부착응력의 분포는 매입길이에 따라서 변화하게 됨을 주장하였다. 또한, 초기 하중 단계에서 부착응력이 하중단 근처에 집중되어 발생하며, 하중이 증가함에 따라 내부로 이동하여 철근의 축방향으로 콘크리트가 응력을 순차적으로 분담해 나가게 되는 것을 주장하였다.⁸⁾ 하지만 도넛형 이방향 중공슬래브의 경우 철근의 길이방향에 따라서 부착조건이 다르므로, 짧은 부착 실험체 결과에서 살펴본 바와 같이 부착응력-슬립 관계가 변하게 된다. 따라서 각 구간의 부착응력의 발현정도를 확인하기 위하여 중공형성체의 전체 형상이 고려된 entire-type의 실험체를 통하여 하중단계별 부착응력분포를 파악하였다.

Fig. 8에 나타난 각 entire-type 실험체의 하중단계별 철

와 같이 충분한 내부피복 두께($2.5d_b$)를 확보한 GB-50-26 시리즈 실험체의 경우, 부착구간의 위치와 상관없이 유사한 최대부착응력을 보여주고 있다. 또한 최대부착응력 이후 철근과 콘크리트의 마찰로 인하여 유지되는 잔류부착응력이 최대부착응력의 40%~60% 수준으로 완만히 감소하는 전형적인 뽑힘파괴(pull-out failure) 거동을 보이고 있다.

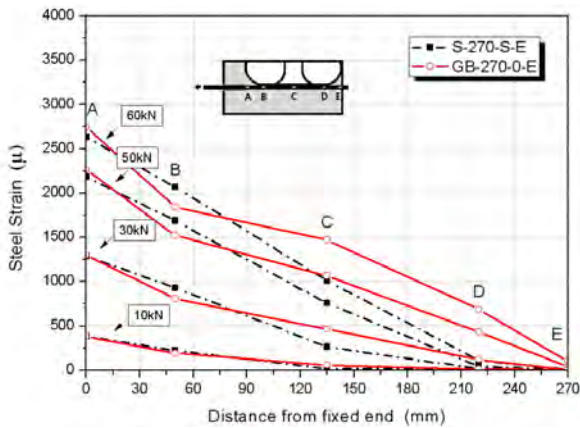
Fig. 6(b)는 순 내부피복두께가 10 mm인 GB-50-10 시리즈 실험체의 실험 결과이다. 실험 결과 내부피복두께가 일정하지만 가장 얇은 B-type 실험체가 가장 낮은 부착응력을 보이고 있음을 확인 할 수 있다. 내부피복두께가 변화하는 transition region에서 두께 변화 방향이 서로 대칭인 A-type과 C-type 실험체에서는 하중단의 내부피복이 얇은 C-Type 실험체가 A-type 실험체에 비해 부착강도가 감소하였다. 또한 B-type과 C-type의 경우 최대부착응력 이후 철근을 따라 종방향 균열이 발생하면서 잔류부착응력이 급격히 감소하는 쪼갬파괴(splitting failure)가 발생하였으며, 내부피복두께가 더 작은 GB-50-0 시리즈 실험체에서 그 차이가 더 크게 나타났다. Fig. 6(a)를 살펴보면 순 내부피복두께가 0 mm인 GB-50-0 시리즈 실험체 C-type의 경우 A-type과 철근을 감싸고 있는 콘크리트 내부피복 조건이 동일함에도 불구하고 두께 변화방향에 따라 최대부착응력이 50% 감소하는 것을 확인할 수 있다.

이러한 결과는 내부피복이 얇을 경우 변단면에서의 조기균열이 발생하기 때문인 것으로 사료된다. 충분한 내부피복두께를 확보하지 못한 실험체 GB-50-10 및 GB-50-0 시리즈의 C-Type 실험체의 경우 부착응력이 높게 발생하는 하중단 부위의 내부피복두께가 얇으며 하중단에서 멀어질수록 내부피복두께가 증가하게 된다. 따라서 Fig. 7과 같이 자유단 부위의 변단면에서 쪼갬균열이 발생하였으며, 이후 철근의 마디에서 발생하는 수직분리를 콘크리트가 견디지 못하고 박리됨을 확인 할 수 있다. 이와 같이 도넛형 이방향 중공슬래브에서 충분한 내부피복두께를 확보하지 못한 경우 부착구간에 따라 각각 다른 부착응력-슬립 관계를 보여주고 있는 것을 확인 할 수 있다.

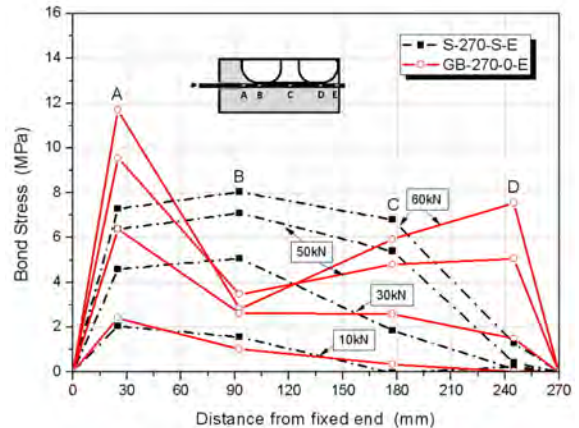
근의 변형률을 살펴보게 되면, 철근과 콘크리트 사이의 부착력을 통하여 철근 인장력의 일부를 콘크리트가 부담하게 되므로 실험체의 자유단으로 이동할수록 철근의 변형률이 감소하고 있음을 확인할 수 있다. S-270-S-E와 GB-270-26-E의 경우와 같이 내부피복이 $2.5d_b$ 를 만족하는 경우 하중이 증가함에 따라서 철근 변형률이 선형적으로 증가하는 것을 확인할 수 있다. 한편 내부피복두께가 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하는 GB-270-0-E 실험체와 GB-270-10-E 실험체의 철근 변형률의 경우 Fig. 8(c)와 다르게

하중 증가에 따라 C점 및 D점의 변형률이 S-270-S-E에 비해 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 B점과 D점 사이의 내부피복두께가 작기 때문에 콘크리트가 철근의 인장력을 부담해주는 양이 감소하며, 이에 따라 철근의 슬립이 증가하기 때문인 것으로 판단된다. 또한, 이에 따라 B~D 구간의 콘크리트가 부담해야 할 철근의 부착응력이 변단면 구간인 D~E 구간의 콘크리트로 조기에 전달되고 있기 때문인 것으로 사료된다.

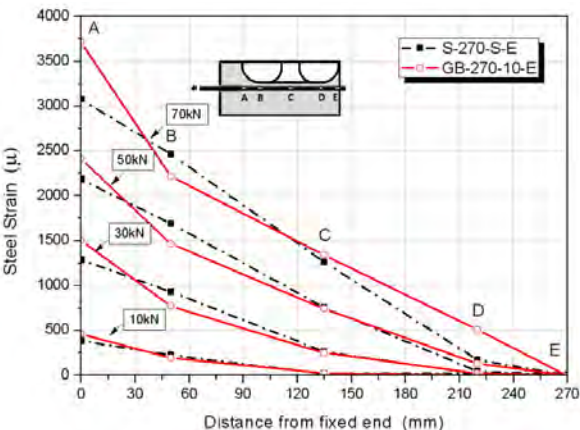
이러한 거동은 Fig. 9의 하중 단계별 부착응력 분포를



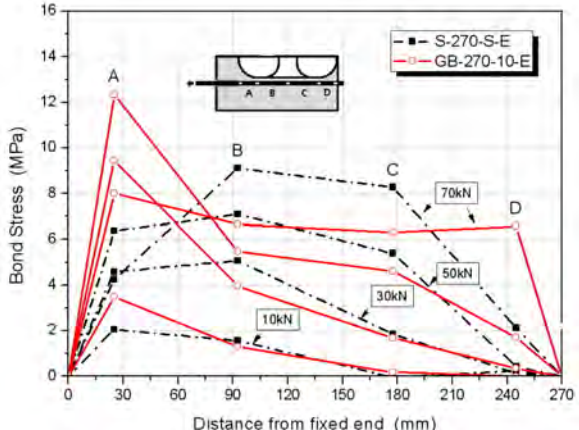
(a) GB-270-0-E vs. S-270-S-E



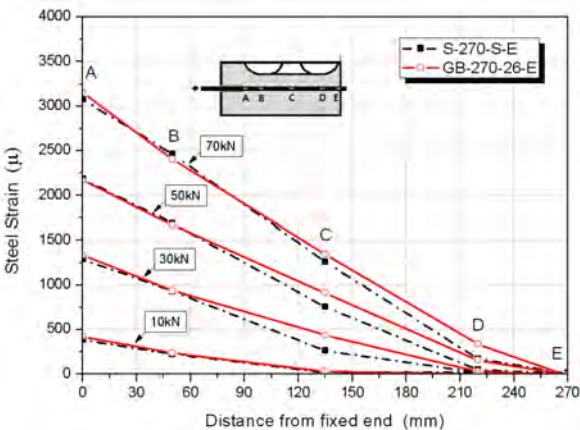
(a) GB-270-0-E vs. S-270-S-E



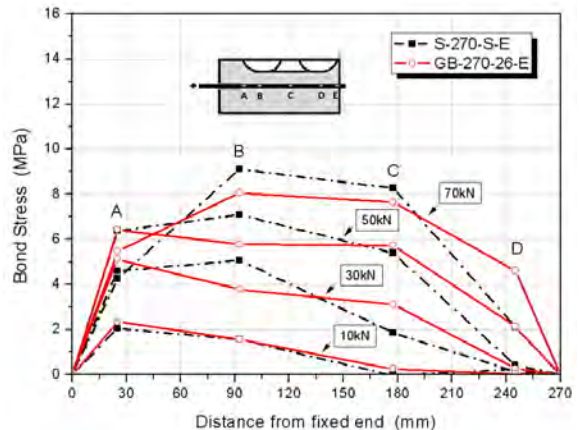
(b) GB-270-10-E vs. S-270-S-E



(b) GB-270-10-E vs. S-270-S-E



(c) GB-270-26-E vs. S-270-S-E



(c) GB-270-26-E vs. S-270-S-E

Fig. 8 Re-bar strain distribution

Fig. 9 Bond stress distribution

Table 5 Test results of entire type specimen

Specimen	P_u (kN)	τ_{avg} (MPa)	τ_{max} (MPa)	Failure mode	τ_{max} location
S-270-S-E	87.10	8.10	10.23	Yielding	B
GB-270-0-E	60.27	5.59	11.69	Splitting	A
GB-270-10-E	72.93	6.77	13.38	Splitting	A
GB-270-26-E	89.60	8.32	10.47	Yielding	B

통해 보다 명확하게 확인할 수 있다. 내부피복이 $2.5d_b$ 를 만족하는 GB-270-26-E 실험체의 경우 하중 증가에 따른 부착응력 분포가 S-270-S-E 실험체와 매우 유사한 것을 확인할 수 있다. 또한 Azizinamini의 연구와 같이 초기 하중 단계에서 최대 부착응력점이 하중단 근처에 집중되어 발생하였으며, 하중이 증가함에 따라 철근의 축방향으로 콘크리트가 응력을 순차적으로 분담하는 거동을 확인 하였다. 하지만 실험체의 최소 내부피복두께가 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하는 GB-270-0-E 실험체와 GB-270-10-E 실험체의 경우 초기에 하중단에 부착응력이 집중되어 발생하는 현상은 동일하였으나, 하중 증가에 따라 내부피복두께가 최소인 B~C 구간에서 부착응력이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 또한 B~C 구간에서 부착응력이 감소함에 따라 D 구간의 부착응력 기여도가 급격히 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과를 살펴볼 때, 도넛형 이방향 중공슬래브의 경우 내부피복두께에 따라 구간별로 상이한 평균부착응력을 보이는 것을 확인할 수 있다. 또한, 내부피복이 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하는 경우 일반 RC 슬래브와 상이한 부착응력 분포를 보임을 확인할 수 있다. 따라서 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 산정할 경우 구간별로 부착강도를 산정해야 할 것으로 사료된다.

4. 도넛형 이방향 중공슬래브 부착강도 산정

4.1 CEB-FIP 평균 부착강도

CEB-FIP MC2010에서는 직접적으로 철근의 평균 부착강도 산정식을 제시하고 있지 않고 있으며, 식 (3)과 같이 이형철근의 정착길이(l_d) 산정식을 정의하고 있다. 식 (3)은 정착길이에 따른 철근의 발현강도(f_{stm}) 산정식 식 (4)를 기반으로 도출하였다.

$$l_d = \frac{\Phi}{4} \frac{f_{yd}}{f_{bd}} \quad (3)$$

$$f_{stm} = 54 \left(\frac{f_c}{20} \right)^{0.25} \left(\frac{20}{d_b} \right)^{0.2} \left(\frac{l_b}{d_b} \right)^{0.55} \left[\left(\frac{c_{min}}{d_b} \right)^{0.33} \left(\frac{c_{max}}{c_{min}} \right)^{0.1} + 8K_{tr} \right] \quad (4)$$

여기서,

- l_b : Embedded length
- $c_{min} : \min [c_x, c_y, c_{si}]$
- $c_{max} : \max [c_x, c_{si}]$

제안된 식을 살펴보게 되면, 철근을 감싸고 있는 피복 두께의 최대와 최소 두께를 고려하여 철근의 발현강도를 예측할 수 있도록 되어있다. 그러나 이러한 철근의 발현강도를 통해 산정한 평균부착강도 예측식 또한 마찬가지로 철근 길이방향으로 부착조건이 변화되는 도넛형 이방향 중공슬래브의 구간별 부착특성을 반영하지 못하고 있다. 이에 따라 식 (4)를 통해 평균부착응력을 산정할 경우 Table 6에 나타난바와 같이 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 과소평가하고 있는 것을 확인할 수 있다.

4.2 도넛형 이방향 중공슬래브 부착강도 산정기법

실험 결과 도넛형 이방향 중공슬래브의 각 구간별(A, B, C) 부착강도가 다르게 나타남에 따라, 구간별 특성을 고려할 수 있도록 다음 식 (5)와 같이 실험 결과로 도출한 각 구간별 부착강도 기여분을 고려하는 부착강도 산정식을 제안하였다. 식 (5)는 짧은 부착 실험을 통해 도출한 각 구간별 부착응력-슬립 관계를 기반으로 각 구간별 평균부착응력을 산정하여 전체 문힘 길이에 따른 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 예측하는 방법이다.

$$\tau_{avg} = \frac{\sum \tau_{avg,reg} \times l_{reg}}{l_{total}} \quad (5)$$

여기서,

- $\tau_{avg,reg}$: Average bond stress of each region
- l_{reg} : Embedded length of each region
- l_{total} : Total embedded length of re-bar

여기서, 각 구간별 평균부착응력인 $\tau_{avg,reg}$ 의 산출은 다음과 같이 Rilem standard method⁹⁾ 및 KS 평균 부착응력 산정기법을 통해 도출하였다. Rilem standard method는 식 (6)과 같이 부착응력-슬립 곡선에서 각각의 슬립(0.01, 0.10, 1.0 mm)에 대한 부착응력 값을 평균하여 평균 부착

Table 6 Test results vs. suggested method

Specimen	Test result	Conventional method	Suggested method	
	P_{Test} (kN)	$P_{CEB-FIP}$ (kN)	P_{Rilem} (kN)	P_{KS} (kN)
GB-270-0-E	60.27	45.61	52.25	61.68
GB-270-10-E	72.93	56.50	76.61	77.30
GB-270-26-E	89.60	66.04	114.51	110.47

응력을 산출하는 방법이다. KS F 2441의 평균부착응력 산정기법도 이와 유사한 방법으로 재하단의 미끄러진 양을 5개의 등 간격으로 나누어 이에 대한 공칭 평균 부착응력을 계산하도록 명시되어 있다. 이때 재하단의 미끄러진 양의 한계는 0.25 mm를 넘지 못하도록 되어있다. 따라서 이 연구에서는 식 (6) 및 (7)을 사용하여 각 구간별 평균 부착응력을 산정하였으며, 이를 바탕으로 도출한 도넛형 이방향 중공슬래브 실험체의 평균부착강도를 Table 6에 나타내었다.

$$\tau_{avg,Ritem} = \frac{\tau_{0.01} + \tau_{0.10} + \tau_{1.0}}{3} \quad (6)$$

$$\tau_{avg,KS} = \frac{\tau_{0.05} + \tau_{0.10} + \tau_{0.15} + \tau_{0.20} + \tau_{0.25}}{5} \quad (7)$$

Table 6에 나타난 바와 같이 기존의 CEB-FIP 부착강도 제안식은 내부피복두께가 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하는 경우 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 약 25% 정도 저평가하고 있다. 하지만, 구간별 부착특성을 고려하여 제안된 식 (5)를 적용할 경우 실험값과 5% 내외의 오차를 보이며 매우 정확하게 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 예측하고 있음을 확인할 수 있다. GB-270-26-E 실험체의 경우 제안식을 통한 예측값이 실험값보다 20% 이상 높게 나타났다. 이는 GB-270-26-E 실험체의 부착 파괴 이전에 철근의 파단에 의해 실험을 종료하였기 때문인 것으로 판단된다.

5. 결 론

이 연구에서는 도넛형 이방향 중공슬래브의 철근 부착 특성 및 부착 강도를 평가하기 위하여 부착 실험을 수행하였다. 또한 그 결과를 바탕으로, 도넛형 중공슬래브의 중공형상에 따른 구간별 부착특성을 고려한 부착강도 산정식을 제안하였다. 이 연구를 통하여 얻은 결과는 다음과 같다.

- 1) 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착응력-슬립 관계는 중공형상에 따른 부착구간 및 내부피복 두께에 영향을 받는 것으로 나타났다. 특히, 최소 내부피복두께가 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하는 경우 부착구간별로 최대부착강도의 차이가 크게 발생하며, 파괴거동 또한 다르게 나타났다.
- 2) 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착응력 분포 또한 내부피복 두께에 따라 일반 RC 슬래브와 상이하게 나타났다. 중공에 의해 내부피복두께가 $2.5d_b$ 를 만족하지 못하는 경우 최소내부피복을 가지는 구간에서 일반 RC 슬래브에 비해 25%~50% 낮은 평균부착응력을 나타내고 있으며, 내부피복두께가 확보되는 변단면 구간에 부착응력이 집중되는 것을 확인

하였다.

- 3) 최소 피복두께를 가지고 일괄적으로 부착강도를 산정하는 기존의 방식으로는 철근 길이방향으로 부착 조건이 변화되는 도넛형 이방향 중공슬래브의 구간별 부착 특성이 반영되지 못하고 있다. 이에 따라 기존의 방식은 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 과소평가하고 있음을 확인 하였다.
- 4) 이 연구에서는 구간별 부착특성을 고려하는 부착강도 산정방법을 제안하였으며, 분석 결과 실험값과 5% 내외의 오차를 보이며 매우 정확하게 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착강도를 예측하고 있다.

6. 향후 연구 과제

이 연구에서는 pull-out 실험을 통하여 내부피복두께에 따른 도넛형 중공슬래브의 철근 부착 특성 및 부착 강도를 평가하였다. 그러나 슬래브 철근의 경우 휨 부착으로 거동하며, 연속적이기 때문에 이 실험체와는 다른 거동을 보일 것으로 판단된다. 따라서 향후 실제 도넛형 중공슬래브와 유사한 응력상태에서 철근의 부착응력을 파악하기 위한 보완연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 2011년도 삼성물산(주) 건설부문 지원에 의해 수행되었으며 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. Chung, J. H., Choi, H. K., Lee, S. C., and Choi, C. S., "An Analytical Study on the Optimal Hollow Spheres in a Biaxial Hollow Slab," *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 27, No. 7, 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, 2010, pp. 773-776.
4. Chung, J. H., Choi, H. K., Lee, S. C., and Choi, C. S., "Shear Capacity of Biaxial Hollow Slab with Donut Type Hollow Sphere," *Procedia Engineering*, Vol. 14, 2011, pp. 2219-2222. (doi: <http://dx.doi.org/10.1016/j.proeng.2011.07.279>)
5. Chung, J. H., Choi, H. K., Lee, S. C., and Choi, C. S., "Experimental Study about Punching Shear Strength of Biaxial Hollow slab with Donut type Hollow Sphere," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 1, 2010, pp. 59-60.
6. Dr. Ing. Ralf Avak, "Topic: Bubble Deck-a New Type of

- Hollow-Body Ceiling,” *Report No. 9919586*, Institute of Concrete, Denmark, 2001, pp. 6-9.
7. KS F 2441, “Standard Test Method for Comparing Concrete on the Basis of the Bond Developed with Reinforcing Steel,” Korean Agency for Technology and Standards, 2010, pp. 1-7.
 8. Azizinamini, A., Stark, M., Roller, J. J., and Ghosh, S. K., “Bond Performance of Reinforcing Bars Embedded in High-Strength Concrete,” *ACI Structural Journal*, Vol. 90, No. 5, 1993, pp. 554-561.
 9. Rilem-Fip-Ceb, “Bond Test for Reinforcing Steel: 1-Beam Test (7-II-28 D). 2-Pullout Test (7-II-128): Tentative Recommendations,” *Materials and Structures*, Vol. 6, No. 32, 1973, pp. 96-105.

요 약 이 연구는 도넛형 이방향 중공슬래브에 매입된 이형철근의 부착특성 및 부착강도 산정을 위한 기초적인 연구이다. 도넛형 이방향 중공슬래브의 철근 부착특성 및 부착강도 산정을 위해 pull-out test를 수행하였다. 도넛형 중공형성체는 슬래브 내부에 배치되어 철근과 중공형성체 사이에 내부의 피복이 형성된다. 이러한 내부피복두께는 외부피복두께보다 상대적으로 작은 피복두께를 가지며 중공형상에 따라 $2.5d_b$ 보다 작은 내부피복두께가 형성되기 때문에 철근의 부착에 영향을 미치게 된다. 또한 중공형성체가 일정 간격으로 떨어져 배치되어 있으므로 인장철근을 감싸고 있는 피복두께의 조건이 철근의 길이방향으로 변하게 된다. 따라서 도넛형 이방향 중공슬래브의 부착특성을 알아보기 위해서 중공형성체 형상에 따라 부착구간을 구분하였다. 구간별로 내부피복두께에 따른 부착응력-슬립 관계를 확인하였으며, 중공형성체 전 구간에 걸친 부착응력분포를 확인하여 철근의 길이방향에 따른 부착응력의 발현정도를 확인하였다. 또한 구간별 부착응력-슬립 관계를 기반으로 하여 도넛형 중공슬래브의 부착강도를 산정할 수 있는 부착강도 산정 방법을 제안하였다.

핵심용어 : 도넛형 이방향 중공 슬래브, 내부피복두께, 부착응력-슬립 관계, 부착응력 분포