



## 초고성능 콘크리트(UHPC)의 부착특성에 관한 연구

국경훈<sup>1)</sup> · 신현오<sup>1)</sup> · 광임종<sup>2)</sup> · 윤영수<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>고려대학교 건축사회환경공학부 <sup>2)</sup>한국건설기술연구원

### Bond Characteristics of Ultra High Performance Concrete

Kyung-Hun Kook,<sup>1)</sup> Hyun-Oh Shin,<sup>1)</sup> Im-Jong Kwahk,<sup>2)</sup> and Young-Soo Yoon<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>School of Civil, Environmental and Architectural Engineering, Korea University, Seoul 136-701, Korea

<sup>2)</sup>Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

**ABSTRACT** Ultra high performance concrete (UHPC), is characterized by its high compressive strength and advanced tensile behavior that is much superior to those of conventional concrete. In order to apply this new material in practice, the bond characteristics of UHPC were evaluated in this study. Pull-out tests between UHPC and deformed steel rebar were carried out according to the modified RILEM test method, and were verified by finite element analysis. From the test results showed that UHPC presents 5 to 10 times higher bond strength compared to normal strength concrete, this study suggested remarkably reduced development length and concrete cover comparing to existing specifications. The test results of 700 MPa high strength steel rebar demonstrated the applicability of high strength steel to UHPC. In addition, the transfer length measurements of seven-wire strand in UHPC specimens indicated that the transfer length limit set by the current design code is very conservative for UHPC.

**Keywords :** UHPC, bond, pull-out test, transfer length, high strength steel rebar

### 1. 서 론

최근 콘크리트 구조물이 초고층·초장대화 되는 추세에 있으며, 이로 인해 기존의 콘크리트는 강도 대비 높은 자중과 낮은 인장강도 등의 약점으로 인하여 적용성의 한계가 지적되고 있다. 이러한 관점에서 기존의 콘크리트가 갖는 단점을 보완한 초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC)가 국내에서도 개발되었으며, 현재 이의 활용 위한 다양한 연구가 진행되고 있다.<sup>1,2)</sup> UHPC는 기존의 콘크리트와는 다른 재료와 배합, 양생 등을 통해서 높은 압축강도를 구현하고, 다량의 강섬유를 혼입하여 인장강도를 향상시킨 고성능 섬유 보강 시멘트계 복합체(high performance fiber reinforced cementitious composites)이다. 세계적으로 UHPC를 실제 구조물에 적용하고 있지만, 아직 그 거동특성이 연구 중에 있으며 설계 기준에서도 UHPC의 역학적 특성을 반영하고 있지 못하는 실정이다.<sup>3-5)</sup>

현행 설계기준에서는 철근의 정착 길이를 산정할 때 기존 사례의 부족으로 콘크리트의 압축강도를 70 MPa로 제한하고 있으며, 강연선의 응력 전달 길이 역시 콘크리트

트 압축강도의 영향을 반영하지 못하고 있는 실정이다. 그러나 설계강도 180 MPa의 UHPC는 이러한 강도 기준을 훨씬 상회하고 있기 때문에, 현행 설계기준을 적용할 경우 극히 보수적이며 비경제적인 설계가 이루어지게 된다. 또한 UHPC의 인장 극한 변형률은 일반 철근의 항복 변형률보다 높으며, 강섬유의 영향으로 인해서 일반 콘크리트와는 정착 및 부착 거동이 달라진다. 이에 이 연구에서는 UHPC의 정량적인 정착 및 부착 성능을 평가하기 위해서 다양한 부착 길이와 피복 두께를 변수로 인발실험(pull-out test)을 수행하였으며, UHPC와 강연선의 응력 전달 길이(transfer length)를 측정하였다. 또한 유한 요소해석을 통해 인발 실험 결과를 검증하였다.

### 2. 실험 방법

#### 2.1 UHPC 배합

초고성능 콘크리트의 표준배합구성은 Table 1과 같다. 물-결합재비(W/B)가 0.2이며, 분체는 시멘트, 실리카 폼, 충전재, 잔골재로 구성되며, 액상형 감수제를 첨가하였으며, 전체 체적에 대해 2% 부피비로 강섬유를 사용하였다. 사용한 강섬유는 인장강도 2,500 MPa, 직경 0.2 mm, 길이 13 mm의 특성을 가진다. 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며, 반응성 분체는 실리카 폼을 사용한다. 잔골

\*Corresponding author E-mail: ysyoon@korea.ac.kr

Received May 11, 2010, Revised July 12, 2010,

Accepted August 20, 2010

©2010 by Korea Concrete Institute

**Table 1** Mix proportions of UHPC (by weight ratio)

W/B	Cement	Silica fume	Sand	Filler	Super plasticizer	Steel fiber
0.2	1	0.25	1.1	0.3	0.016	2%*

\*Volume fraction of fibers

재는 0.5 mm이하의 호주산 모래를 사용하였으며, 충전제는 입자들의 평균 크기가 2 μm, SiO<sub>2</sub> 함유율이 98% 이상이다. 감수제는 폴리칼본산계의 고성능 감수제를 사용한다.

**2.2 철근의 인발실험**

현재까지 UHPC와 철근의 인발실험에 대해 규정된 실험 방법이 없기 때문에, 기존에 UHPC의 정착 및 부착 특성을 평가하기 위하여 가장 많이 활용된 RILEM에서 추천하는 실험법(RILEM<sup>6)</sup>)을 바탕으로 UHPC의 특수성을 고려하여 일부 수정을 가한 방법을 적용하였으며, 이를 통해 선행 연구자들의 실험 결과와의 분석을 실시하고자 하였다.

RILEM에서는 콘크리트와 철근의 부착 길이를 5d<sub>s</sub>로 추천하고 있으나 이러한 부착 길이는 일반 콘크리트를 기준으로 한 것이며, 기존 연구(Hegge 등<sup>7)</sup>, Holschemacher 등<sup>8,9)</sup>, Weiße 등<sup>10)</sup>)에서 5d<sub>s</sub>에 준하는 부착 길이를 적용한 실험은 부착 파괴가 발생하기 전에 철근이 항복하여 최종적인 부착 성능을 확인할 수 없었다. 따라서 이 연구는 UHPC의 높은 부착 성능을 확인하고 철근 항복을 방지하기 위해 1d<sub>s</sub>와 2d<sub>s</sub>를 부착 길이로 설정하였다.

한편 RILEM 실험법은 실험체의 중심에 철근이 위치하도록 규정하고 있으나 이 연구에서는 UHPC의 피복 두께에 따른 정착 및 부착 특성을 확인하기 위해서 피복 두께를 1d<sub>s</sub>와 2d<sub>s</sub> 그리고 철근이 시편의 중심에 위치하도록 변수를 설정하였다.

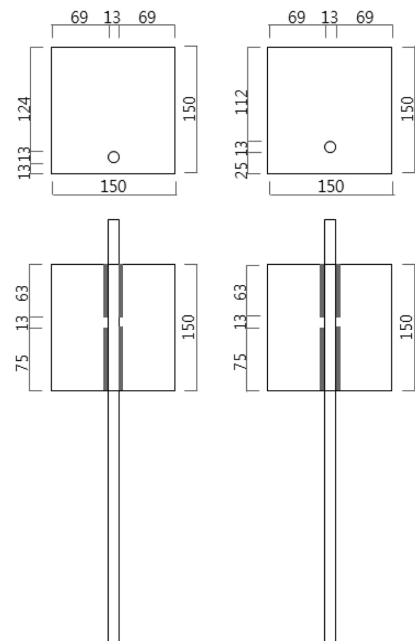
또한 UHPC의 높은 강도에 따른 고강도 철근의 적용 가능성을 확인하기 위하여 D13 규격의 700 MPa급 고강도 철근을 사용한 실험체를 추가하였다. 실험변수 상세는 Table 2에 나타내었다.

**2.3 응력 전달 길이**

응력 전달 길이 측정을 위한 시편의 길이는 최소한으로 판단되는 1,200 mm로 결정하였으며, 150 × 150 mm 단면을 사용하였다. 강연선의 직경은 실무에서 가장 많이 활용되는 12.7 mm와 15.2 mm를 사용하였으며, 철근 인발실험에서와 마찬가지로 피복 두께에 따른 영향을 확인하기 위해서 각각 1d<sub>s</sub>, 2d<sub>s</sub>, 3d<sub>s</sub>의 피복 두께를 적용하였다. 강연선은 항복하중의 90%에 해당하는 긴장력을 도입하였고, 절단 전후에 실험체의 길이 방향을 따라 변형률을 측정하였다.

**Table 2** Variables of pull-out tests

Strength of rebar (MPa)	Designation of rebar (diameter, mm)	Bond length (mm)	Thickness of cover (mm)
400	D-10 (9.53)	9.5	9.5, 19.1, 45
		19.1	19.1
		28.6	9.5, 19.1, 45
	D-13 (12.7)	12.7	12.7, 25.4, 69
		25.4	25.4
		38.1	12.7, 25.4, 69
	D-16 (15.9)	15.9	15.9, 31.8, 67
		31.8	31.8
		47.7	15.9, 31.8, 67
	D-19 (19.1)	19.1	19.1, 38.2, 90.5
		38.2	38.2
		57.3	19.1, 38.2, 90.5
D-22 (22.2)	22.2	22.2, 44.4, 89	
	44.4	44.4	
	66.6	22.2, 44.4, 89	
700	D-13 (12.7)	12.7	12.7, 25.4, 69
		25.4	25.4
		38.1	12.7, 25.4, 69



**Fig. 1** Specimens of pull-out tests (unit : mm)

**Table 3** Variables for transfer length test

Diameter of strand	Concrete cover	Length of specimen
12.7	1d (12.7 mm)	1,200 mm
	2d (25.4 mm)	
	3d (38.1 mm)	
15.2	1d (15.2 mm)	
	2d (30.4 mm)	
	3d (45.6 mm)	

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 재료특성

실험체를 제작하기 위해 총 2.6 m<sup>3</sup>의 UHPC를 타설하였으며, 세 차례에 걸쳐 각각 1.2 m<sup>3</sup>, 0.7 m<sup>3</sup>, 0.7 m<sup>3</sup>을 생산하였다. 타설 후 24시간 기건 양생 후에 72시간 동안 증기 양생을 실시하였으며 굳지 않은 콘크리트의 특성은 Table 4에 나타내었다.

UHPC 배합의 압축강도를 측정하기 위해  $\phi 100 \times 200$  mm 공시체를 제작하여 실험하였으며, 휨 성능 평가를 위하여  $100 \times 100 \times 400$  mm 실험체를 제작하여 휨강도 실험을 실시하였다. UHPC 배합의 압축강도는 약 180~190 MPa 범위의 비교적 고른 분포를 나타내어 안정적으로 강도를 확보하였다. 한편 휨강도는 15~35 MPa로 큰 편차를 나타내었는데, 이는 섬유 방향성에 따라 균열 후의 휨 저항 성능에서 차이를 보이는 결과라고 할 수 있다.

철근의 coupon test를 실시하여 결과를 Table 6에 나타

**Table 4** Characteristics of fresh UHPC

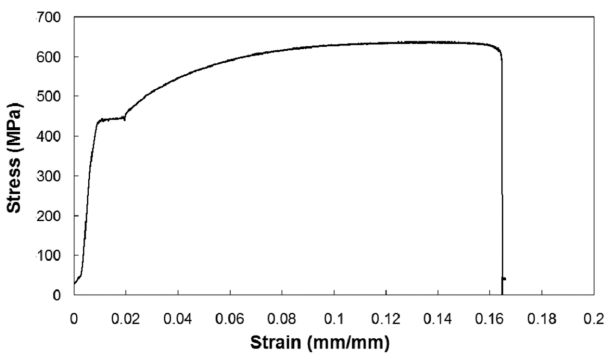
Batch	1st	2nd	3rd
Air content (%)	1.0	1.6	2.0
Flow (mm)	170	160	170

**Table 5** Strength of UHPC

Batch	1st	2nd	3rd
Compressive strength (MPa)	192.6	177.7	179.6
Flexural strength (MPa)	15.9	34.7	29.5

**Table 6** Steel properties

Designation	Nominal strength load (kN)	Yielding load (kN)	Failure load (kN)
D10	28.4	35	40
D13 (400 MPa)	50.7	55	80
D13 (700 MPa)	88.7	95	120
D16	79.4	110	130
D19	114.6	145	175
D22	154.8	195	240



**Fig. 2** Steel stress-strain curve

내었으며, 대표적인 D13 철근(SD400)의 응력-변형률 관계를 Fig. 2에 나타내었다. 인발실험 결과의 최대하중과 비고를 용이하게 하기 위하여 Table 6의 물성치는 측정 하중으로 표현하였다.

**Table 7** Summary of pull-out tests

Steel rebar (diameter)	Bond length (mm)	Concrete cover (mm)	Maximum load (kN)	Maximum strength (MPa)	
D10 (9.5 mm)	9.5	9.5	20.7	72.9	
		19	21.3	75	
		45	21.6	76.2	
	19	19	41	72.3	
		28.5	9.5	42.3	49.7
	D13 (12.7 mm) 400 MPa	12.7	19	41.2	48.4
45			44.4	52.2	
12.7			39.7	78.4	
25.4		25.4	51.8	102.2	
		69	46.9	92.5	
38.1		12.7	67.6	44.5	
	25.4	71	46.7		
	69	68.4	45		
D16 (15.9 mm)	15.9	15.9	36.1	45.4	
		31.8	50.7	63.8	
		67	56	70.5	
	31.8	31.8	100.4	63.2	
		47.7	15.9	109.1	45.8
	47.7	31.8	111.6	47	
67		116.3	48.8		
D19 (19.1 mm)		19.1	19.1	82.7	72.1
	38.2		102	89.4	
	90		99.8	87.1	
38.2	38.1	140	60.9		
	57.3	19.1	60.4	17.6	
	57.3	38.2	146.2	42.5	
90		150	43.6		
D22 (22.2 mm)	22.2	22.2	87.5	56.3	
		44.4	104.6	67.1	
		89	121.2	78.2	
	44.4	44.4	173.7	56.8	
		66.6	22.2	168.5	36.3
	66.6	44.4	206.4	44.5	
D13 (12.7 mm) 700 MPa		12.7	12.7	27.1	53.5
			25.4	41.3	81.4
	69		43.3	85.4	
25.4	25.4	71.1	70.2		
	38.1	12.7	90.7	59.7	
25.4		105.3	69.5		

### 3.2 철근의 인발실험 결과

실험 결과는 Table 7과 같다. 최대 하중은 인발시 기록된 최대 하중 값을 나타내고, 부착강도는 철근의 부착길이에 따라서 달라지기 때문에 직접 구하는 것은 불가능하므로 최대 강도로 나타내었다. 최대 강도는 최대 하중이 부착길이 전 부분에 동일하게 분배된다고 가정하여 최대 하중을 콘크리트와 철근의 부착 면적으로 나누어 계산하였다. 부착 길이가 철근 직경의 3배( $3d_s$ )인 경우에는 거의 모든 실험체에서 부착 파괴가 발생하지 않고 철근의 항복이 먼저 발생하였다. 반대로 부착 길이가 철근 직경과 같은 경우( $1d_s$ )에는 부착 슬립이 발생하며 파괴가 진행되었다. 따라서 부착 길이가  $1d_s$ 에서  $2d_s$ 로 증가함에 따라 증가하는 경향을 보였던 최대 부착하중은 부착 길이가  $3d_s$ 으로 증가하여도 부착 길이  $2d_s$ 의 결과와 큰 차이가 없는 결과를 보여주었다. 실험 결과를 이전의 80 MPa급 고강도 콘크리트의 부착실험<sup>11)</sup>에서 D10, D19 철근에 대하여 각각 부착 길이  $10d_s$ 로 실험한 결과 32.5 kN, 120 kN의 최대 부착하중을 나타낸 것과 비교하면, UHPC의 경우 부착길이  $2d_s$  이상에서 동등 혹은 그 이상의 부착하중을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 비교로부터 간접적으로 UHPC의 뛰어난 부착성을 알 수 있다.

철근의 직경의 변화의 영향은 부착 길이가  $2d_s$ 의 경우에는 56.8 MPa에서 72.6 MPa로 직경별 편차가 크지 않다. 하지만 직경이 커짐에 따라서 부착응력이 줄어드는 경향을 보인다. 부착 길이  $1d_s$ 의 경우에는 D13 철근에서 가장 큰 부착응력을 나타내었으며 나머지 경우에는 비슷한 결과를 보여주어 철근의 직경이 작은 것이 부착응력의 발현에 유리하지만 그 차이는 크지 않은 것으로 나타났다.

피복 두께가 얇은 실험체의 경우 같은 변수의 실험에서도 편차가 큰 결과를 보여주었다. 피복 두께가 철근의 직경과 같은 경우( $1d_s$ )에는 일부 실험체에서 콘크리트 피복에서 철근 방향 균열이 발생하며 쪼갬 파괴가 일어나는 모습을 보였기 때문에 취성적인 파괴로 인하여 일관적인 결과를 얻기 어려웠기 때문으로 판단된다. 또 피복 두께에 따른 결과를 비교해 보면 피복 두께가 커질수록 최대하중 및 부착응력이 증가하는 경향을 발견할 수 있지만 그 차이가 크지는 않으며 피복 두께 보다는 부착 길이의 영향을 더 크게 받는 것을 확인할 수 있다.

### 3.3 철근의 인발실험 결과 분석

앞서 언급한 바와 같이 실험 결과에서 UHPC는 일반 강도 콘크리트 뿐 만 아니라 고강도 콘크리트와 비교하여도 부착 성능이 매우 높다. 하지만 현재 사용되고 있는 설계기준의 경우 UHPC의 활용에 따른 새로운 기준이 없는 상황이며, 기존의 정착 길이 산정식은 식 (1)과 같다.<sup>5)</sup>

$$l_{db} = \frac{0.6d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (1)$$

여기서,  $l_{db}$ =기본 정착 길이(mm),  $d_b$ =철근의 공칭 지름(mm),  $f_y$ =철근의 설계기준 항복강도(MPa),  $f_{ck}$ =콘크리트의 설계기준압축강도(MPa)이다.

식 (1)은 콘크리트 압축강도의 영향을 70MPa로 제한하고 있기 때문에 UHPC의 정착 및 부착 성능을 반영하기에는 무리가 있다. UHPC를 활용한 구조물의 설계에 현재의 기준을 그대로 적용하는 경우 과도한 정착 길이를 확보해야만 한다. 따라서 UHPC의 부착 성능을 평가한 실험결과를 바탕으로 하여 다음과 같은 설계식 (2)를 제안하고자 한다. Fig. 3에서 현행 설계기준과 실험 결과 그리고 제안식에 의한 정착길이를 비교하여를 나타내었다.

$$l_{db} = \frac{0.075d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \quad (2)$$

실험 결과에 따르면 400 MPa급 철근의 경우에  $2d_s$ 의 부착 길이의 경우에 충분한 성능을 보여주었으며 700 MPa급의 경우에는  $3d_s$  이상의 실험체에서 역시 철근의 항복강도 이상의 부착 성능을 나타내었다. 제안식에 따르면 180 MPa 급의 UHPC의 경우 400 MPa의 이형철근에 대하여 약  $2.2d_s$ 의 최소 정착 길이를 보여준다.

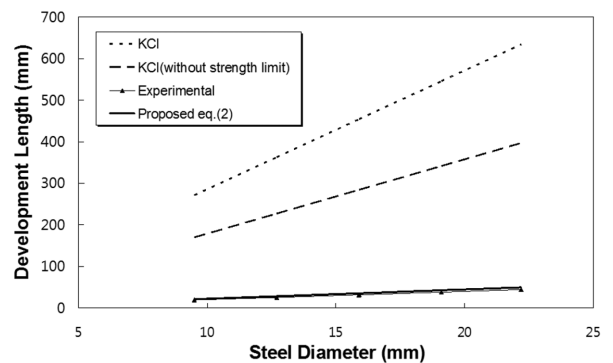


Fig. 3 Development length of UHPC

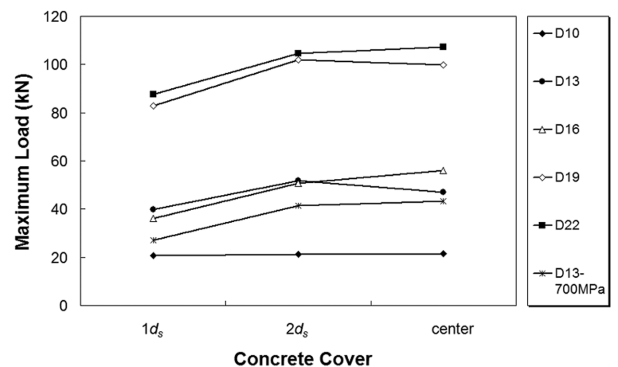


Fig. 4 Max. load versus cover of UHPC

UHPC는 기존의 콘크리트보다 큰 강도를 활용하여 구조 부재의 슬림화를 꾀하고 있으며 이러한 목표를 달성하기 위해서 피복 두께의 최소화는 필수적이라고 할 수 있다. UHPC의 정착 성능에 따라 철근의 성능을 이끌어 낼 수 있는 최소 피복 두께를 실험 결과를 통해 확인하였다. Fig. 4는 부착 길이가  $1d_s$ 의 경우에 피복 두께에 따른 최대 부착하중의 변화를 나타낸 것으로 피복 두께가  $2d_s$ 에서 이미 최대 부착하중, 다시 말해서 철근의 항복하중에 도달하는 것을 알 수 있다. 따라서 UHPC는 피복 두께  $2d_s$  미만에서 400 MPa 철근의 항복하중에 달하는 부착 성능을 나타낸다고 할 수 있다. 이러한 결과로부터 UHPC를 사용한 철근콘크리트 구조물의 피복 두께는 주철근 직경의 2배 이상을 적용하였을 때 안전율을 고려하여도 충분하다고 판단되어진다.

UHPC의 높은 강도 성능을 더 효율적으로 활용하기 위한 방안으로 고강도 철근을 활용하였을 때의 부착 성능을 평가하기 위하여 SD700철근에 대한 인발실험을 실시하여 그 결과를 비교하였다. Fig. 5와 같이 부착 길이  $2d_s$  이하에서는 거의 동일한 거동을 보이는 반면 부착 길이  $3d_s$  이상에서 큰 차이를 나타내는 것을 볼 수 있다. 400 MPa 실험체의 실험 결과는 부착 길이  $2d_s$ 에서 이미 철근의 항복하중에 도달한 경우로 부착 길이가 늘어남에 따라 더 이상 부착하중이 증가하지 않는다. 하지만 700 MPa 실험체에서는 부착 길이  $3d_s$ 에서 항복하중에 도달하는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 UHPC의 성능을 구조물에 적합하게 활용하기 위해서 보강재의 성능도

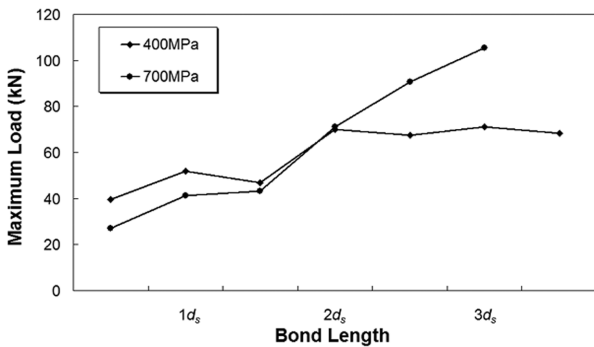


Fig. 5 Development performance of high strength steel rebar

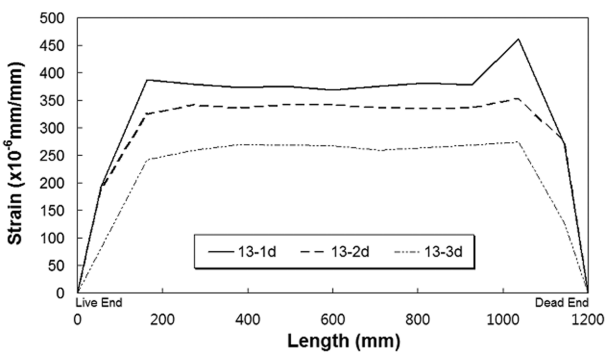


Fig. 6 Strain of 12.7 mm strand

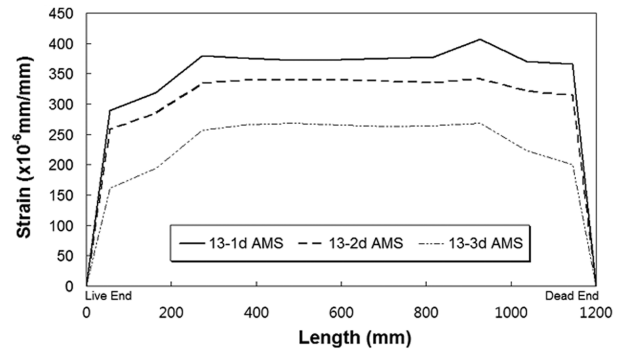


Fig. 7 Strain of 12.7 mm strand (AMS method)

Table 8 Transfer length of 12.7 mm strand

Specimen	Transfer length (mm)	
	Live end	Dead end
13-1d	237	54
13-2d	235	165
13-3d	250	242

이 향상될 필요가 있다는 것을 시사한다.

### 3.4 응력 전달 길이

응력 전달 길이의 실험은 시편 당 23개의 콘크리트 표면 게이지를 부착하고 강연선 절단 전·후의 변형률을 기록하여 원본 데이터를 이용한 그래프와 AMS 보정을 이용한 그래프를 얻었으며 전달길이의 산정은 95% AMS (average maximum strain) 방법을 사용하였다.

12.7 mm 강연선의 응력 전달 길이 실험 결과를 Table 8에 나타내었다. Live end와 dead end의 차이를 살펴보면 live end의 경우가 더 큰 전달 길이를 나타내고 있다. 피복 두께에 따른 전달 길이의 차이는 live end의 경우 큰 차이가 없는데 비해 dead end에서는 피복이 커짐에 따라 전달 길이도 크게 증가하는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 그래프에서 나타나는 것과 같이 AMS 보정을 사용하였음에도 측정점의 한계로 인해 변형률이 급격하게 변화하는 구간에서 변형률의 작은 차이가 전달 길이 값에 크게 반영이 되었기 때문인 것으로 판단된다. 따라

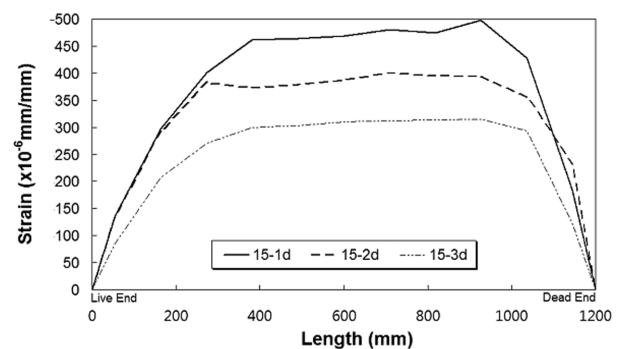


Fig. 8 Strain of 15.2 mm strand

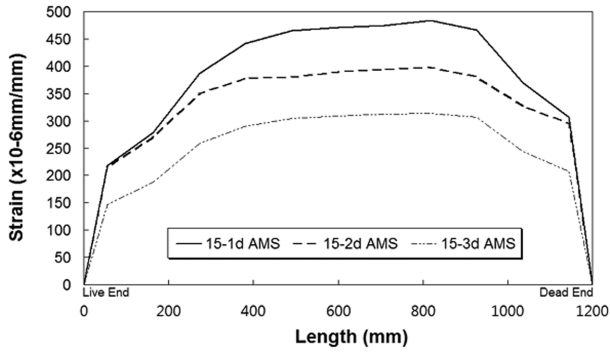


Fig. 9 Strain of 15.2 mm strand (AMS method)

Table 9 Transfer length of 15.2 mm strand

Specimen	Transfer length (mm)	
	Live end	Dead end
15-1d	380	265
15-2d	311	265
15-3d	375	246

서 실제 피복 두께에 따른 전달 길이 차이는 live end의 결과와 마찬가지로 크지 않을 것으로 판단된다.

15.2 mm 강연선의 응력 전달 길이 실험 결과는 Figs. 8, 9와 Table 9에 정리되어 있다. Live end와 dead end의 차이를 살펴보면 live end의 경우가 더 큰 전달 길이를 나타내고 있으며, 피복 두께에 따라 전달 길이가 변화하는 양상은 나타나지 않았다. 강연선의 직경에 따른 응력 전달 길이의 차이는 편차가 작은 Live end의 측정 길이를 기준으로 비교해 보면 12.7 mm는 240 mm, 15.2 mm는 355 mm 정도로 볼 수 있다. 따라서 12.7 mm에 비하여 15.2 mm의 응력 전달 길이가 크며 강연선의 직경이 증가할수록 응력 전달 길이도 증가하는 것을 알 수 있다.

현행 설계기준의 전달길이 규정<sup>4)</sup>은 식 (3)과 같으며, 이는 강연선의 직경과 유효 프리스트레스의 함수로써 콘크리트 압축강도의 영향은 반영하지 않고 있다.

$$l_t = 0.15 \frac{f_{pe} D}{3} \quad (3)$$

여기서,  $l_t$  = 강연선의 전달 길이(mm),  $f_{pe}$  = 손실이 일어난 후의 강재의 유효 프리스트레스(MPa),  $D$  = PS 강재의 공칭 지름(mm)이다.

설계기준의 식 (3)을 사용하여 전달길이를 산정할 경우 12.7 mm 실험체의 경우 약 880 mm, 15.2 mm 실험체의 경우 1,050 mm의 결과를 나타낸다. 이는 실험결과와 3배 수준으로 극히 보수적이며 UHPC의 응력전달길이 산정을 위해서는 새로운 기준의 정립이 필요하다는 것을 의미한다.

#### 4. 인발실험 유한요소해석

비선형 해석 프로그램인 MIDAS FEA를 사용하여 실험

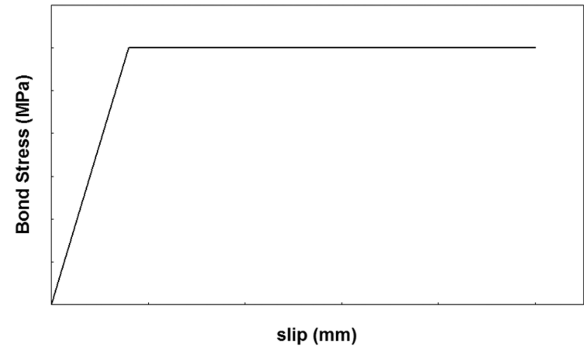


Fig. 10 Material model of interface

험을 모사하여 해석 과정을 수행하였고 이를 통해 인발 실험 결과와 비교하여 실험 결과를 검증해보았다. UHPC와 보강재의 부착이 발생하는 접촉면은 크게 비부착면과 부착면으로 나뉜다. 비부착면은 UHPC와 보강재가 서로 완전한 비부착 상태를 유지하기 때문에, 이를 모사하기 위해서 UHPC mesh와 보강재 mesh의 절점 간에 미세한 간격을 두는 방법을 통해 비공유 상태를 유지하였다. 부착면은 UHPC부와 보강재 부분의 절점이 공유되는 부분의 mesh에 형성이 되고, 부착면의 재료 구성 모델은 bond-slip 모델을 선택하였다.

해석 결과의 일부분이 Tables 10, 11과 Fig. 11에 제시되어 있다. Table에 제시되어 있는 값은 3가지로, A는 실험의 결과 값으로, 실험을 통해 측정된 부착 강도를 나타내고 있으며, 재료모델링 과정에서 interface mesh의 bond-slip model에 적용되었다. B는 유한요소해석을 통해 도출된 결과 값으로, UHPC와 철근의 경계면에 형성된 interface mesh에서 발생한 부착 응력 중에서 최대 부착 응력의 값을 나타내고 있다. C는 해석 결과를 산정식에 적용하여 도출된 결과 값으로, 하중 단계에 따라 가해진

Table 10 Analysis of D10 specimens

Specimens	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	B/A	C/A	Mode
SP-10-1C	76.2	76.2	80.4	1.000	1.055	Crack
SP-10-11	72.9	72.9	76.9	1.000	1.055	Crack
SP-10-12	75.0	75.0	76.6	1.000	1.021	Crack
SP-10-22	72.3	65.8	68.8	0.910	0.952	Yielding
SP-10-31	49.7	45.3	45.8	0.911	0.922	Yielding
SP-10-32	48.5	41.1	45.8	0.847	0.944	Yielding

Table 11 Analysis of high strength rebar specimens

Specimens	A (MPa)	B (MPa)	C (MPa)	B/A	C/A	Mode
7SP-13-1C	85.4	85.4	89.9	1.000	1.053	Crack
7SP-13-11	53.5	53.5	56.4	1.000	1.054	Crack
7SP-13-12	81.4	81.4	86.6	1.000	1.064	Crack
7SP-13-22	70.2	70.2	73.3	1.000	1.044	Crack
7SP-13-31	59.7	58.2	58.3	0.975	0.977	Yielding
7SP-13-32	69.3	58.5	58.3	0.844	0.841	Yielding

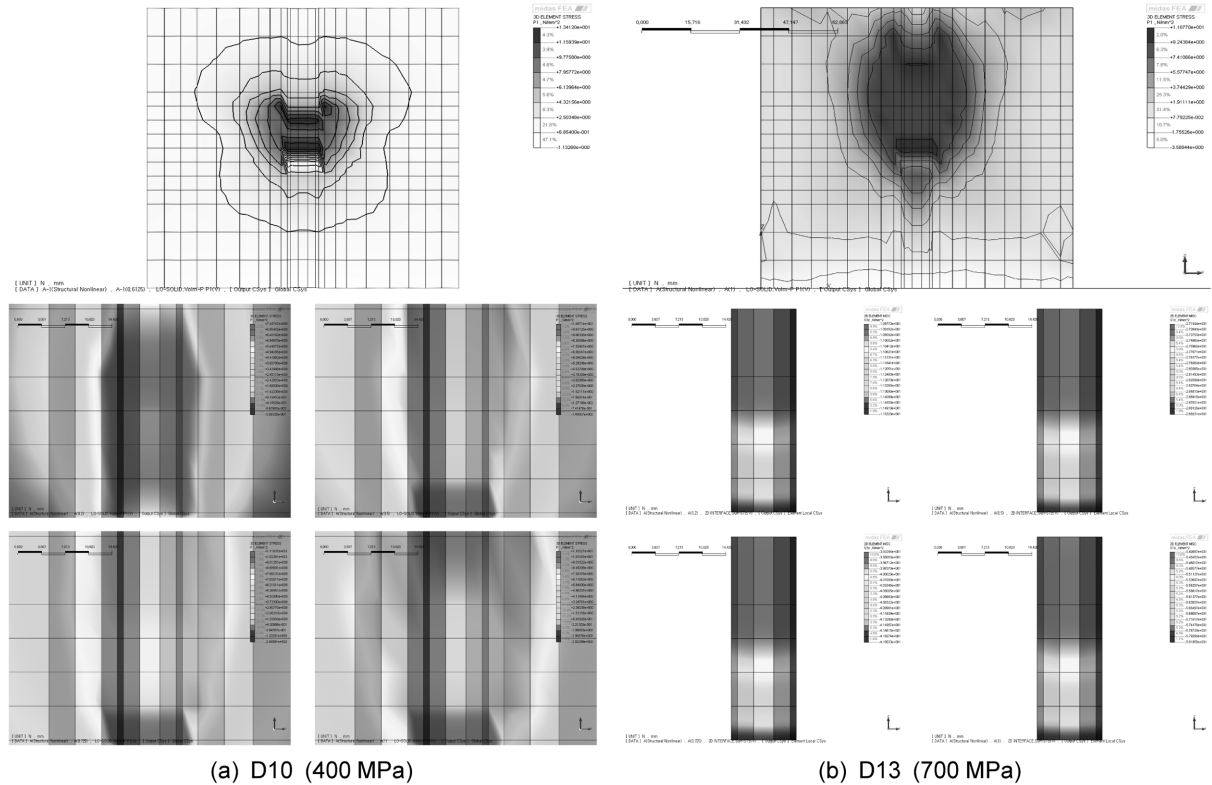


Fig. 11 Stress distribution

하중의 크기를 이용하여 해석이 종료되는 시점에서 발생하게 되는 최대 부착 응력의 크기를 나타내고 있다. C와 같이 부착 응력 산정식에 하중의 크기를 적용해서 부착 응력을 산정하는 방법은, interface mesh를 별도로 형성하지 않고 완전 부착을 가정한 경우 B와 같은 방법으로 부착 응력을 도출하는 것이 불가능하기에, 이러한 경우 적용할 수 있는 방법으로서 부착 응력의 산정을 위해 사용될 수 있는 대안으로서 활용될 수 있다. 표에 나타난 실험변수의 경우 첫 번째 부분은 400 MPa와 700 MPa 철근의 종류를 두 번째 부분은 철근의 직경을 세 번째 부분은 부착길이와 피복두께를 각각 나타내고 있다.

해석값이 실험값에 비해서 약 5~10% 정도 높은 부착 강도를 보였으며,  $1d_s$ 의 부착 길이를 갖는 부재는 항복 하중 내에서 균열이 발생하는데 반해서, 철근의 직경이 작은 경우  $2d_s$  이상의 부착 길이에서는 항복 하중 내에서 균열이 발생하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 응력 분포 양상은 UHPC와 보강재 간의 접촉면의 양 끝단에 집중되는 현상을 보였으며, 이에 따라 접촉면의 주변부에서부터 균열이 진행되는 것을 확인하였다. 700 MPa급의 고장력 철근을 사용한 경우는, 부착 길이가  $3d_s$ 에 이르러도 항복 하중 내에서 균열이 발생하는 것 역시 확인하였으며 실험 결과와 해석 결과가 유사한 값을 보이는 것으로 나타났다.

## 5. 결 론

UHPC와 철근 및 강연선의 부착 및 정착 특성을 평가

하기 위해 기본 요소에 대한 실험을 수행하였고, 그 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) UHPC와 철근의 부착거동은 종래의 콘크리트에 비하여 높은 성능을 나타내었으며, 철근의 직경에 따라 큰 편차를 나타내지 않고 안정적인 성능을 보였다.
- 2) 부착 길이에 따른 부착성능의 변화는 부착 길이  $2d_s$  이상에서 철근의 항복강도에 근접한 부착강도를 나타냈으며, 현행 설계기준에서 UHPC의 높은 부착 성능을 반영하지 못하고 있기 때문에 UHPC를 위한 정착 길이 산정식을 제안하였다.
- 3) UHPC는 피복 두께  $2d_s$ 에서 400 MPa 철근의 항복 강도에 준하는 부착 성능을 나타내는 것으로 나타났다며 부재의 단면 축소를 가능하게 하기 위하여 최소 피복 두께를  $2d_s$ 로 하는 것이 타당하다고 판단된다.
- 4) 고장력철근의 사용은 부착 성능의 강화를 통해 UHPC의 높은 성능을 활용하기 위한 유효한 방안이 될 수 있다.
- 5) UHPC의 응력 전달 길이는 강연선의 직경이 증가함에 따라 증가하는 경향을 보여주었으며, 현행 설계기준의 전달 길이 산정식은 UHPC에 적용하기에 극히 보수적인 것으로 나타났다.
- 6) 유한요소해석 결과는 실험 결과와 유사하게 나타났으며, 응력 분포 양상은 UHPC와 보강재 간의 접촉면의 양 끝단에 집중되는 현상을 보였다.

## 감사의 글

이 연구는 한국건설기술연구원에서 위탁 시행한 한국건설기술연구원 기본과제(10주요) 초고성능 콘크리트 활용 원천기술개발 사업의 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 김성욱, 강수태, 한상묵, “초고성능 시멘트 복합재의 특성 및 활용 현황,” 콘크리트학회지, 18권, 1호, 2006, pp. 16~21.
2. 김성욱, 박정준, 강수태, 류금성, 고경택, 이장화, “초고성능 콘크리트의 개발과 활용,” 한국콘크리트학회 봄학술대회 논문집, 20권, 1호, 2008, pp. 1117~1120.
3. 한국도로교통협회, “도로교설계기준,” 한국도로교통협회, 2005, 510 pp.
4. 한국콘크리트학회, “콘크리트구조설계기준 해설,” 기문당, 2007, 523 pp.
5. American Concrete Institute, “Building Code Requirements for Structural Concrete and Commentary,” *ACI 318-08 and ACI 318R-08*, Farmington Hill, Mich., 2008, 473 pp.
6. RILEM, Technical Recommendations for the Testing and Use of Construction Materials: RC 6, Bond Test for Reinforcement Steel. 2. Pull-out Test, 1970, pp. 218~220.
7. Hegge, J., Tuchlinski, D., and Kommer, B., “Bond Anchorage Behavior and Shear Capacity of Ultra High Performance Concrete Beams,” *Proceedings of the Second International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2008, pp. 351~359.
8. Holschemacher K., Weiße, D., and Dehn, F., “Influence of the Rebar Position on the Bond Behaviour in High Strength Concrete,” *Leipzig Annual Civil Engineering Report(LACER)*, No. 7, University of Leipzig, Germany, 2002, pp. 135~144.
9. Holschemacher, K., Weiße, D., and Klotz, S., “Bond of Reinforcement in Ultra High Strength Concrete,” *Proceedings of International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Kassel, Germany, 2004, pp. 375~388.
10. Weiße, D. and Holschemacher, K., “Some Aspects about the Bond of Reinforcement in Ultra High Strength Concrete,” *Leipzig Annual Civil Engineering Report(LACER)*, No. 8, University of Leipzig, Germany, 2003, pp. 251~263.
11. 신현오, 민경환, 류두열, 곽임종, 윤영수, “강섬유 보강 고강도 콘크리트의 부착 특성,” 한국콘크리트학회 가을 학술대회 논문집, 21권, 2호, 2009, pp. 401~402.

**요약** 초고성능 콘크리트(ultra high performance concrete, UHPC)는 종래의 보통 콘크리트와 다른 새로운 재료로써 높은 강도와 향상된 인성을 그 특징으로 한다. 이러한 새로운 재료의 활용을 위하여 이 연구에서 초고성능 콘크리트의 부착 성능을 평가하고자 하였다. 수정된 RILEM 방법을 사용하여 초고성능 콘크리트와 이형 철근의 인발실험(pull-out test)을 수행하였으며 보통 콘크리트와 비교하여 5~10배에 달하는 부착강도를 확인하여 기존의 설계 기준에 비하여 현저하게 감소한 정착길이와 피복 두께를 제안하였다. 700 MPa급 고장력 철근의 실험 결과의 비교로부터 초고성능 콘크리트에서 고강도 철근 활용의 유효성을 확인하였다. 강연선의 응력전달길이 측정실험을 통하여 현재 전달길이 기준이 UHPC의 경우 매우 보수적이라는 것을 확인하였다. 또한 유한요소해석을 통하여 실험 결과를 검증하였다.

**핵심용어** : 초고성능 콘크리트, 부착, pull-out test, 응력전달길이, 고강도 철근