



## 보강 섬유 종류에 따른 고인성 시멘트 복합체내에서 철근의 겹침 이음 성능

전에스더<sup>1)</sup> · 윤현도<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>충남대학교 건축학부

# Effect of Reinforcing Fiber Types on Lap Splice Performance of High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composite(HPFRCC)

Esther Jeon<sup>1)</sup> and Hyun-Do Yun<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>Division of Architecture Engineering, Chungnam National University, Daejeon 305-764, Korea

**ABSTRACT** This paper investigates the lap splice performance of structural steel bars embedded in high performance fiber reinforced cementitious composite(HPFRCC) with various matrix ductilities. Matrix ductility is governed fiber type and fiber volume fraction. Fiber types were polypropylene(PP), polyethylene(PE) and hybrid fiber[polyethylene fiber+steel cord(PE+SC)]. The lap splice length( $l_d$ ) was calculated according to the relevant ACI code requirements for reinforcing bars in normal concrete. As the result of tests, lap splice strength of HPFRCC using PE1.5 and hybrid fiber increased by up to 82-91 percent more than that of concrete. Splice strength and energy absorption capacity of PE0.75+SC0.75 or PE1.5(fiber volume fraction 1.5%) specimen increased more than that of PP2.0(fiber volume fraction 2.0%) specimen. Therefore lap splice performance depends on fiber tensile strength and Young's modulus more than fiber volume fraction. Also, HPFRCC appear multiple crack and ductile postpeak behavior due to bridging of fiber in cementitious composite.

**Keywords :** lap splice, high performance fiber reinforced cementitious composite(HPFRCC), hybrid fiber, multiple crack, bridging

### 1. 서 론

프리캐스트 콘크리트( precast concrete, PC) 구조는 고품질화 및 공기 단축 등의 장점을 가지고 있어, 아파트 및 사무실 등과 같이 모듈화가 가능한 대형 건축물의 구조 시스템에 매우 적합하여 선진외국에서 폭넓게 사용되고 있으며, 국내의 경우에도 여러 가지 기술적인 문제를 해결하면서 그 사용 범위가 날로 증가하고 있다. 그러나 이러한 PC구조에 있어서 가장 중요한 문제는 PC접합부의 파괴가 부재 파괴에 선행되지 않도록 접합부의 강도 및 연성도를 높게 설계하여야 한다는 것이다. 이로 인하여 접합부 상세가 복잡해지고 배근량이 과대하게 됨으로써 시공성 저하 및 비용 상승을 초래하게 된다. 80년대 후반 Naaman 및 Wight<sup>1)</sup>는 강진 지역에서도 적용 가능한 PC구조 시스템의 개발을 목적으로 PC접합부에 섬유 혼입률 20%의 SIFCON(slurry infiltrated fiber concrete)을 PC 접합부에 적용하여 내진 성능을 개선하고자 하였다. 최근 Harajli 등<sup>2)</sup>은 철근콘크리트 보의 겹침 이음부에 강섬유 및 폴리프로필렌(polypropylene, PP)섬유 보강 콘크리트(fiber reinforced concrete, FRC)를 적용하여 겹

침 이음부의 부착 성능을 개선하고자 하였다.

SIFCON은 과대한 섬유 혼입률로 인한 시공성 및 경제성 문제가 제기되었고 FRC내 겹침 이음부는 보통 콘크리트에 비하여 겹침 이음부 강도가 증진되지만 단조재하에서도 최대내력 이후 다소 취성적인 파괴 양상을 보이는 문제점이 제기되었다.

최근 시멘트 매트릭스와 보강 섬유의 재료 특성을 반영하여 마이크로 역학 이론을 근거로 산정된 임계 섬유 혼입률 이상(통상 2%이내)만으로 시멘트 복합체를 보강함으로써 직접 인장하에서 초기균열 발생 이후에도 급격한 강도 저하 없이 미세한 균열을 폭 넓게 분산시켜 강재와 같이 유사변형 경화 특성을 부여할 수 있는 고인성 시멘트 복합체(high performance fiber reinforced cementitious composite, HPFRCC)의 개발 및 활용에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 본 연구자가 개발한 HPFRCC는 철근 항복변형률(0.2%)의 5배 이상(1.0%)까지도 유사변형경화 특성을 보이고 있으며, 또한 반복 하중 하에서도 강성 및 내력 저하를 지연함으로써 에너지 소산 능력이 크게 개선되는 것으로 나타났다<sup>3)</sup>. 따라서 HPFRCC를 PC접합부에 적용함으로써 기존 SIFCON 및 FRC의 적용시 제기된 문제점이 해결될 수 있을 것으로 판단된다.

이에 본 연구에서는 보 및 폴리에틸렌(polyethylene, PE), 그리고 이를 인장강도 및 탄성계수가 높은 5연선

\*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr  
Received August 3, 2006, Accepted March 5, 2007  
©2007 by Korea Concrete Institute

강섬유(steel cord, SC)와 함께 혼입한 HSPFRCC를 각각 제조하여 보강 섬유 종류에 따른 HSPFRCC내 철근의 겹침 이음 성능 및 파괴 특성을 실험적으로 평가하고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험 계획

본 연구에서는 HSPFRCC의 보강 섬유 종류에 따른 철근의 겹침 이음 성능을 보통 콘크리트와 비교·평가하기 위하여 Table 1에 나타난 바와 같이 모든 시험체에서 D22 철근의 겹침이음길이( $l_d$ )를 설계기준값의 60%로 동일하게 하여 겹침이음부의 파괴를 유도하였다. 콘크리트, PP2.0%, PE1.5%, PE0.75% 및 SC0.75%를 하이브리드한 시멘트 복합체의 인장변형 능력에 따른 철근의 겹침 이음 성능을 평가하고자 한다. 또한 겹침 이음 길이에 대한 영향을 평가하기 위하여 겹침 이음 길이가 설계기준값의 90%인 보통 콘크리트 시험체도 추가로 계획하였다.

### 2.2 인장을 받는 철근의 겹침 이음 길이에 관한 규정

콘크리트구조설계기준(2003)<sup>4)</sup>은 인장 이형철근 및 이형철선의 정착 및 이음에 관한 기본정착이음길이( $l_d$ )를 철근의 지름, 철근의 순간격, 콘크리트의 피복두께 등에 따라 보정계수를 곱해서 산정하도록 규정하고 있으며, 철근콘크리트 부재에서 인장 이형철근의 정착·이음길이 계산식은 다음 식 (1)과 같다.

$$l_d = \frac{0.90d_b f_y}{\sqrt{f_{ck}}} \frac{\alpha\beta\gamma\lambda}{\left(\frac{c+k_{tr}}{d_b}\right)} \quad (1)$$

여기서  $d_b$ 는 철근의 직경(mm),  $f_y$ 는 철근의 설계기준항복강도(MPa),  $f_{ck}$ 는 콘크리트의 설계기준강도(MPa)를 나타낸다. 그리고 콘크리트구조설계기준에서는 철근 배치 위치계수, 에폭시 도막계수, 철근크기에 따른 계수, 경량콘크리트 계수에 따라 각각  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\lambda$ 값을 규정하고 있다.

### 2.3 시멘트 복합체의 제조

HSPFRCC의 제조에 사용된 재료로서 시멘트는 S사의 조

Table 1 Summary of test specimen

Specimen*	Bar size (mm)	Lap splice length ratio of Eq.(1)	b×d×h (mm)
Concrete-0.9	22	0.9	130×110×770
Concrete-0.6		0.6	130×110×580
PP2.0-0.6			
PE1.5-0.6			
PE0.75 + SC0.75-0.6			

\*PP2.0(fiber type-V<sub>f</sub>(%))-0.6(lap splice length ratio of Eq.(1))

강 포틀랜드 시멘트를 사용하였고 세골재는 입경 0.1~0.3 mm의 특수 7호 규사를 사용하였다. 시멘트 복합체의 인장강도 및 인장 변형 능력을 개선하기 위한 보강용 섬유로는 현재 국내외의 연구에서 많이 사용되어지는 합성 섬유 중 PP 섬유, 고장력 PE 섬유 및 특수하게 제작된 타이어 보강용 5연선 강 섬유를 사용하였으며 각 섬유의 특성 및 형상은 Table 2, 시멘트 복합체의 배합은 Table 3에 각각 나타내었다.

### 2.4 재료 강도

본 연구에 사용된 D22 철근의 기계적 성질은 KS B 0802(금속재료 인장시험방법)에 준하여 평가하였으며 Table 4 및 Fig. 1에 나타난 바와 같이 항복강도 및 인장강도는 각각 472.27과 603.95 MPa으로 나타났다.

콘크리트와 HSPFRCC의 압축강도 특성 평가는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 준하여 실시하였으며 Table 5 및 Fig. 2에 그 결과를 비교하여 나타내었다. 모든 시험체의 압축강도는 55 MPa내외로 유사하게 나타났으며 HSPFRCC의 탄성계수는 섬유 혼입과 굵은골재의 부재로 인해 콘크리트에 비해 33~45% 정도 낮게 나타났다.

Table 2 Properties of fiber

Fiber	Specific gravity (kg/m <sup>3</sup> )	Length (mm)	Dia. (μm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Young's modulus (GPa)
PP	910	15	40	375	600	5
PE	970	15	12	1,250	2,500	75
SC	7,850	32	405	79	2,300	206
	PP		PE			SC

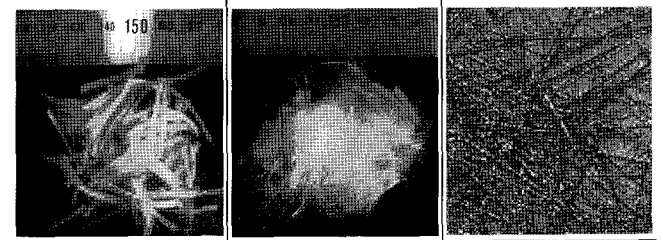


Table 3 Mixture proportions of composites

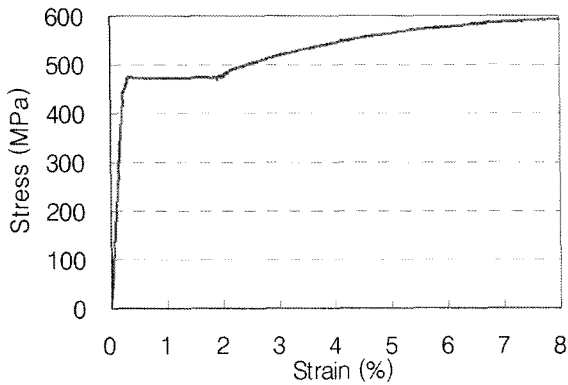
Composites	W/C	Fiber volume fraction, V <sub>f</sub> (Vol. %)		Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )			
		PP	PE	C	S	A	W
Concrete	0.37	-	-	459	759	570	170
PP2.0	0.45	2.00	-	1,036	414	-	466
PE1.5	0.45	-	1.50	1,042	417	-	469
PE0.75+SC0.75	0.45	-	0.75	1,042	417	-	469

Table 4 Properties of steel

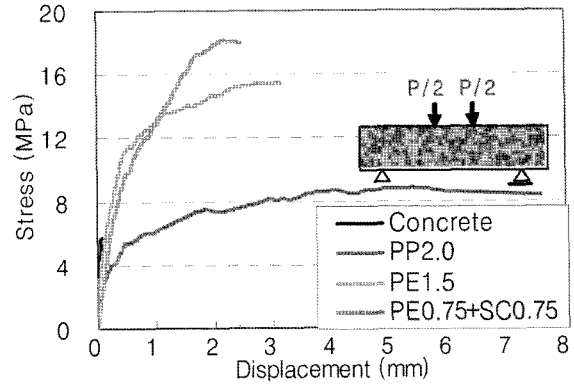
Yielding stress f <sub>y</sub> (MPa)	Yielding strain ε <sub>y</sub> (%)	Tensile strength f <sub>t</sub> (MPa)	Young's modulus E <sub>s</sub> (GPa)
472.27	0.22	603.95	174.11

**Table 5** Strength properties

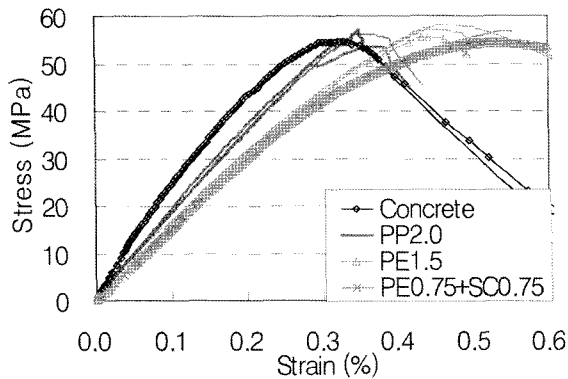
Composites	Compressive stress (MPa)	Elastic modulus (GPa)	Max. compressive strain (%)	Flexural stress (MPa)	Tensile stress (MPa)
Concrete	54.85	27.97	0.314	5.73	-
PP2.0	55.59	18.91	0.358	8.83	4.13
PE1.5	57.03	16.27	0.444	15.46	5.30
PE0.75 + SC0.75	54.98	15.37	0.533	18.15	5.45



**Fig. 1** Stress-strain curve of steel



**Fig. 3** Bending test results



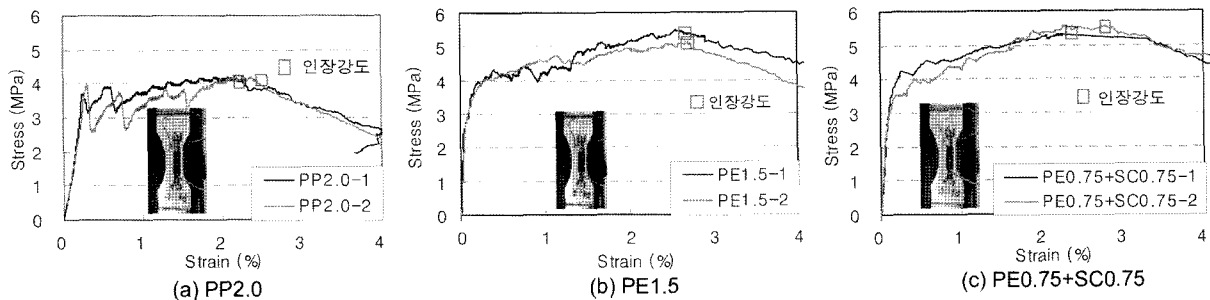
**Fig. 2** Compression test results

휨강도는 KS F 2408(콘크리트 휨강도 시험 방법)에 준하여 평가하였고 Fig. 3과 같이 휨강도는 PE0.75+SC0.75(18.15 MPa) > PE1.5(15.46 MPa) > PP2.0(8.83 MPa) > Concrete(5.73 MPa)순으로 나타났다. PE0.75 + SC0.75의 휨강도는 PE1.5에 비해 17% 높게 나타났으며 이는 매트릭스와 SC의 높은 부착력에 따라 SC가 매크로 균열면을 가교하며 균열폭의 증가를 억제함에 따른 것으로 판단된다. 또한 Fig. 4와 같이 덩벨형(dumbbell shape) 시험

체를 이용한 직접인장 실험을 실시하였으며, 취성적인 성질을 갖는 콘크리트에 대한 직접인장강도 실험은 제외하였다. 모든 HPRCC는 다수의 미세한 균열이 인장 시험편 전면에 폭 넓게 분산되며 유사변형경화 특성을 보였으며 직접인장강도는 PE0.75 + SC0.75(5.45 MPa) > PE1.5(5.30 MPa) > PP2.0(4.13 MPa)순으로 나타났다. 또한 직접인장 실험시 인장 변형 능력은 PE1.5(2.63%) > PE0.75 + SC0.75(2.25%) > PP2.0(1.91%)순으로 나타났으며 모든 시험체가 2% 내외의 우수한 인장 변형 능력을 보였다. PE1.5 및 PE0.75 + SC0.75의 섬유 총 혼입률은 1.5%로 PP2.0에 비해 낮았지만 PE 및 SC 섬유 자체가 갖는 높은 인장강도 및 탄성계수로 인해 휨 및 직접인장강도 특성은 보다 우수한 것으로 나타났다.

### 2.5 시험체 제작 및 실험 방법

HPRCC의 인장 변형 능력에 따른 인장강도, 강성 및 파괴 특성을 평가하고 이를 보통 콘크리트와 비교하기 위하여, 콘크리트 및 섬유 종류(PP, PE), 하이브리드(PE+SC)를 변수로 총 4개의 HPRCC 시험체를 겹침이음길이



**Fig. 4** Uniaxial tension test results of HPRCC

380 mm로 제작하였으며, 겹침이음길이에 따른 영향을 평가하기 위하여 겹침이음길이 570 mm인 콘크리트 시험체 1개를 추가로 제작하였다. 철근변형계이지는 Fig. 5(a)와 같이 시험체당 총 3개를 시험체의 중앙, 그리고 단부에서 각각 30 mm 떨어진 복합체 내외부에 부착하였다. 또한 섬유 혼입에 따른 시험체의 인장 변형 능력을 평가하기 위하여 시험체 제작시 매립된 강봉에 변위계(LVDT)를 설치하여 실험 구간의 길이 변화를 측정하였다. 겹침이음 시험체에 직접인장력은 최대 2,000 kN 용량의 만능시험기(UTM)를 이용하여 반복 가력(repeated)하였다. 반복 가력을 위한 재하이력은 초기에 0.5%, 0.1%로 재하하였고 이후 0.1%씩 점증시켰으며 재하속도는 변위량에 따라 1/400 ~1/100 mm/sec.의 속도로 각각 변위 제어하였다.

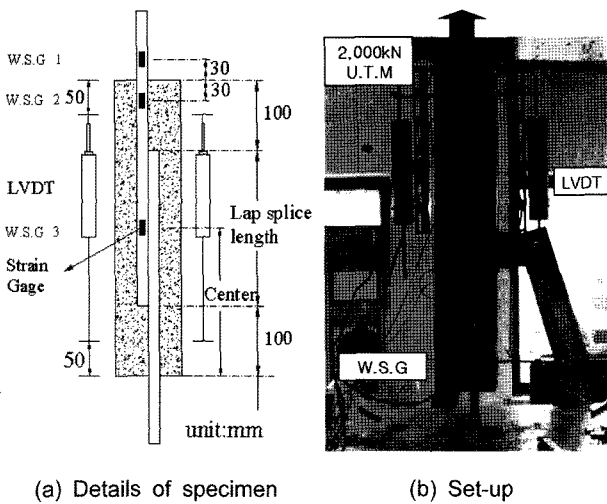


Fig. 5 Testing set-up

### 3. 철근의 겹침이음 실험 결과

#### 3.1 하중-변위 관계

Fig. 6은 철근의 겹침이음부에 콘크리트, PP2.0, PE1.5 및 PE0.75 + SC0.75 시험체의 축인장력-축변형 관계를 비교하여 나타낸 것이며, 축변형량은 시험체 양측에 설치된 변위계를 통해 측정된 평균값으로 하였다.

초기균열강도는  $PP2.0 > PE0.75 + SC0.75 > Concrete > PE1.5$  순으로 크게 나타났으며, 콘크리트의 경우 초기균열 발생 이후 매트릭스 내에서 응력을 재분배하지 못하고 초기균열폭이 급격하게 증가하여 축변형이 0.3 mm까지 증가되었다. 또한 HPRCC시험체는 시멘트 체적비의 1.5~2.0% 혼입된 섬유 및 굵은골재의 부재로 인해 초기강성 및 초기균열강도가 콘크리트보다 대체적으로 작게 나타났으나, 초기균열 이후 강도 저하가 발생하지 않는 것으로 보아, 섬유의 인장 변형 능력으로 인해 철근에 도입된 응력을 적절히 재분배하는 것으로 판단된다. 또한 철근의 겹침이음길이가 규준의 60%로 동일한 경우, 콘크리트 시험체는 83.06 kN의 최대강도 및 이후 겹침이음부에서의 취성적 파괴 특성이 나타난 반면, Fig. 6(c) 및 (d)에 나타난 바와 같이 PE 및 하이브리드 섬유로 보강된 HPRCC시험체에서는 150.92 및 158.27 kN의 강도를 보여 콘크리트 시험체에 비해 각각 81.70% 및 90.55% 높은 강도를 나타냈으며, 겹침이음길이가 규준의 90%인 Concrete-0.9보다도 14.05~19.60% 겹침이음부 강도가 향상되는 것으로 보아 겹침이음부의 보강 상세(겹침이음 길이 및 횡보강근)를 단순화시킬 수 있을 것으로 판단된다.

PP2.0는 최대내력에 이를 때까지 콘크리트와 유사한

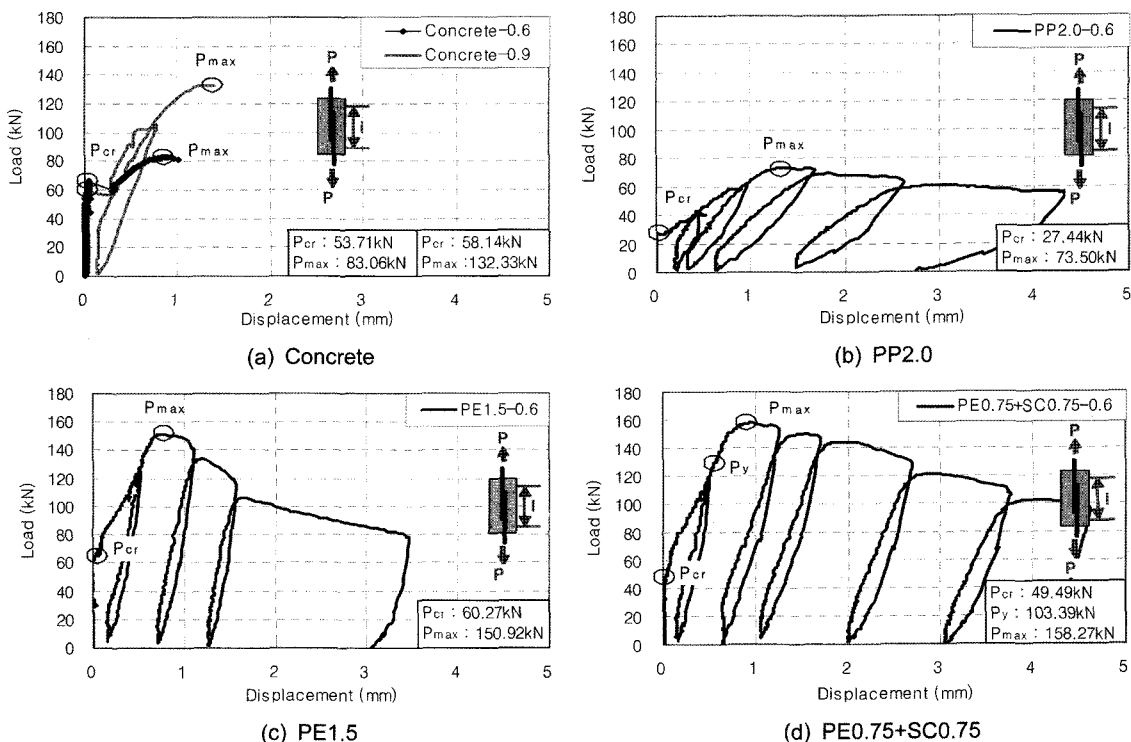


Fig. 6 Load-displacement curves of lap splice specimens in tension

거동 특성을 보였으며 전반적으로 다른 HSPFRCC에 비해 이음부 강도 개선 효과는 낮게 나타났다. 이는 PP섬유의 인장강도 및 탄성계수가 PE 및 SC에 비하여 상대적으로 낮기 때문인 것으로 판단된다. 그러나 콘크리트 이음부 시험체는 초기균열 이후 균열폭이 증대되며 최대 강도에 이른 후 취성적인 파괴 양상을 보인 반면, PP2.0은 초기균열 이후에도 섬유와 고교 작용에 의해 매트릭스 내에서 응력재분배에 따른 미세균열 확산 및 최대내력 이후 연성적인 파괴 양상을 보였다.

총 섬유 혼입률은 1.5%로 동일하나 PE 및 PE+SC로 보강된 경우에는 휨 및 직접인장강도 등 HSPFRCC의 직접인장 시험에서 나타난 결과와는 상이하게 각 HSPFRCC 내에서 철근 겹침 이음부 강도는 큰 차이를 보이지 않았다. 두 시험체 모두 섬유 자체의 높은 인장강도 및 탄성계수로 인해 반복 하중 하에서도 높은 변형 능력 및 강성보유 특성을 보였다. 그러나 하이브리드 HSPFRCC는 철근의 항복시까지 작용되는 인장응력을 시멘트 복합체에 재분배하는 것으로 나타났으며 PE1.5에 비해 최대강도 이후 비교적 안정적인 강도 저하 특성을 나타내었다. 이는 휨강성 및 부착강도가 큰 매크로 SC가 균열폭의 증가를 효율적으로 제어하고 있기 때문인 것으로 판단된다.

### 3.2 균열 특성

Figs. 7 및 8은 철근의 겹침 이음 길이가 설계기준값의 60% 일 때, 콘크리트 및 HSPFRCC의 인장변형률에 따른 평균 균열폭, 균열수 및 최종 파괴 상황을 비교하여 나타낸 것이다. 여기서 균열수는 각 사이클별 최대강도시 시험체의 변위 측정구간(LVDT가 설치된 구간)에서 발생한 균

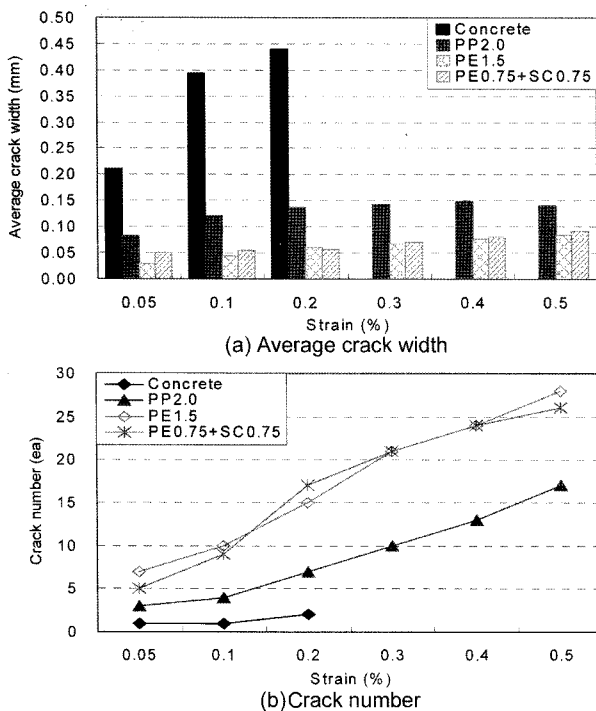


Fig. 7 Average crack width and crack number for specimens under repeated loading(specimen-0.6)

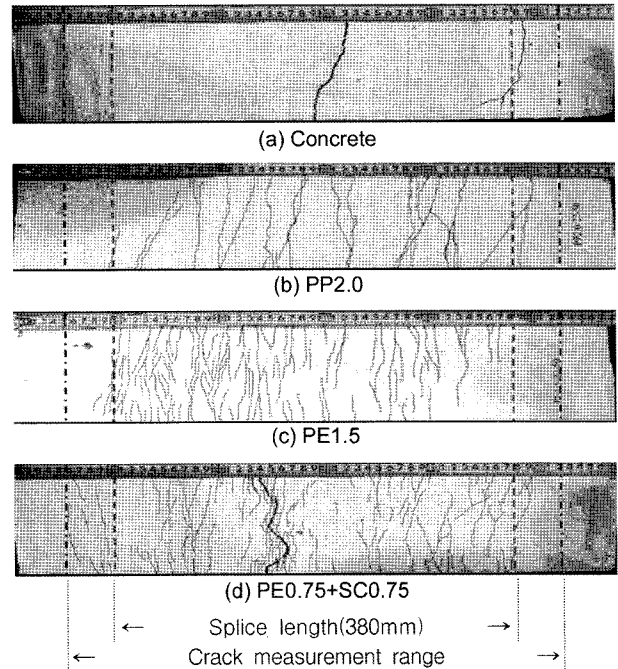


Fig. 8 Failure mode(Specimen-0.6)

열수이다.

HSPFRCC의 균열은 콘크리트에서와 같이 균열폭이 크거나 시험체의 너비 전체에 발생되지 않기 때문에 균열 길이가 시험체 너비의 3/4이상이 되면 1개의 균열이 발생한 것으로 판단하였고, 평균 균열폭은 조사 시점에서의 HSPFRCC 변형률을 조사된 균열수로 나누어 산정하였다.

Fig. 7(a)과 같이 겹침 이음부 시험체 표면에 발생된 평균 균열폭은 Concrete > PP2.0 > PE0.75 + SC0.75 > PE1.5 순으로 크게 나타났으며 콘크리트의 평균 균열폭은 PE1.5 및 PE0.75 + SC0.75에 비해 5배 정도 크게 나타났다. 또한 실험 구간에서 발생한 균열수는 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 PE1.5 > PE0.75 + SC0.75 > PP2.0 > Concrete 순으로 나타났으며 콘크리트는 낮은 인장강도로 인해 2개의 초기균열이 발생한 후 인장응력이 증가함에 따라 시험체 중앙부에서의 균열폭이 국부적으로 증가되면서 최종 파괴되었다. 또한 PP2.0은 PE1.5 및 PE0.75 + SC0.75에 비해 균열 개수가 다소 적게 나타났으나 섬유 혼입으로 인해 최대 17개의 미세균열이 분산되는 등 콘크리트와 유사한 내력을 보였음에도 불구하고 균열폭 및 균열수 면에서는 현저한 차이를 보였다. PE1.5 및 PE0.75 + SC0.75는 최대 26~28개의 균열수를 나타내어 2개의 균열수를 보인 콘크리트에 비해 13~14배 정도의 많은 미세균열을 보였으며, PE섬유만을 1.5% 혼입한 PE1.5시험체의 평균 균열폭은 최대 0.085 mm이고 그에 따른 균열수는 28개로 나타나, 본 연구에서 적용된 HSPFRCC 중 가장 우수한 미세 균열 분산 특성을 보였다. 이는 마이크로 섬유인 PE섬유가 실험 초기부터 겹침이음부에 작용되는 인장응력을 매트릭스 내에 재분배함으로써 미세균열이 매크로 균열로 진전되는 것을 제어하고, 이로 인해 재료 시험(직접인장시험)에서와 같은 다수의 미세 균열 분산 특성(Fig. 8)을 나타낸 것으로 판단된다.

또한 하이브리드 HPRC는 PE1.5에 비해 마이크로 섬유 혼입량이 적어 0.2%까지는 마이크로 균열 제어 능력이 다소 작게 나타났으나 이후 매크로 섬유인 SC의 부착력 및 가교 작용으로 인해 다른 시험체보다 넓은 범위로 균열이 분산되는 특성을 보였다. 이후 인장변형률 0.62% 도달시 매크로 섬유의 부착력 상실로 인해 중앙부에서 응력이 집중되어 균열이 국부화되며 최종 파괴되었다.

이상과 같이 HPRC는 콘크리트와는 다르게 초기균열 이후 매트릭스 내에서 섬유의 가교 작용에 의한 인장응력 재분배로 인하여 초기균열 이후에도 균열폭은 증가되지 않아 취성적인 파괴를 억제하고 이음부 강도를 증진시켰다.

### 3.3 설계기준식과의 비교

Fig. 9는 콘크리트 및 HPRC의 응력-변형률 관계의 포락선을 비교하여 나타낸 것으로, 응력은 철근에 도입되는 인장력을 철근의 단면적으로 나누어 산정하였으며, 변형률은 시험체의 양측에 설치된 변위계를 통해 측정된 값을 측정 길이로 나누어 산정하였다.

본 연구에서 시험체의 겹침이음된 철근량은 전체 철근량과 동일하여 B급 이음에 해당되지만 콘크리트설계기준에서 규정하고 있는 겹침이음된 철근에서의 응력 집중 현상을 방지하기 위한 1.3배의 정착 길이는 적용하지 않았다.

Fig. 9에 나타낸 바와 같이 PE 및 PE+SC를 혼입한 HPRC(규준에 따른 겹침 이음 길이의 60%)의 겹침 이음부 강도는 동일한 겹침 이음 길이의 콘크리트 시험체에 비해 82~91% 상회하는 것으로 나타났으며, 또한 겹침 이음 길이가 90%인 콘크리트 시험체보다 높은 겹침 이음부 강도 및 반복 하중 하에서 0.7~0.9%의 인장 변형 성능을 발휘하는 것으로 나타났다.

### 3.4 강성 특성

Fig. 10은 콘크리트와 인장 변형 능력이 상이한 HPRC의 하중-변위 관계의 포락선에서 변위에 따른 강성비를 비교하여 나타낸 것이다.

콘크리트 시험체는 취성적인 재료 특성으로 인해 겹침

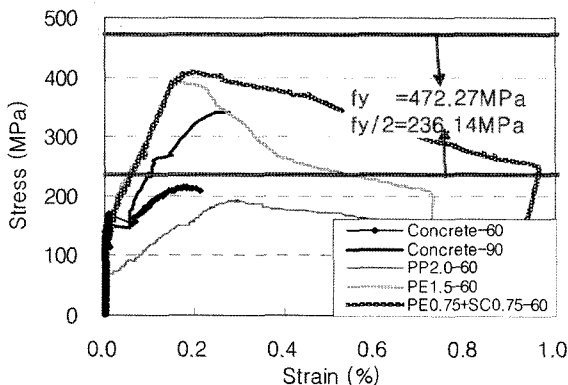


Fig. 9 Stress-strain curves of specimens

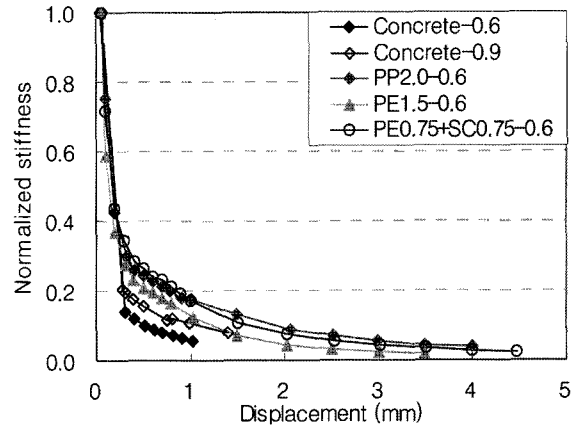


Fig. 10 Normalized stiffness of HPRC specimens

이음 길이에 관계없이 초기균열 이후 강성이 급격하게 저하하기 시작하여 최대강도 이후 실험이 종료되었으며, HPRC는 혼입된 섬유의 응력 재분배로 인해 콘크리트 시험체보다 우수한 강성을 보였다. PP2.0시험체는 섬유의 높은 신율로 인해 최대강도 이후 PE 및 하이브리드 HPRC에 비해 보다 낮은 강성 저하를 보였고, PE1.5 시험체에서 최대강도시 강성은 시험체 중 가장 우수하였으나, 강성비에서는 매크로 섬유인 SC의 부착력 및 가교작용으로 인해 마이크로 균열이 매크로 균열로 진전되는 것을 지연시키고 강성 저하를 억제하는 하이브리드 HPRC와는 달리 마이크로 섬유인 PE가 하중 증가에 따른 균열폭 증가를 제어하지 못하고 강성이 저하하였다.

### 3.5 에너지 흡수 능력

Fig. 11은 콘크리트 및 HPRC의 반복 가력에 따른 사이클별 누적된 소산 에너지를 비교한 것으로 겹침 이음 길이가 60%인 경우 PE0.75+SC0.75 > PE1.5 > PP2.0 > 콘크리트 순으로 크게 나타났으며 이를 정리하여 Table 6에 나타내었다. 또한 겹침 이음 길이가 90%인 콘크리트 시험체는 취성적인 콘크리트의 특성으로 인해 겹침 이음 길이가 60%인 HPRC시험체의 21.85~46.89%에 해당하는 에너지 소산 능력을 발휘하였다. 따라서 고인성 시멘트 복합체를 PC 접합부에 적용시 접합부의 에너지 소

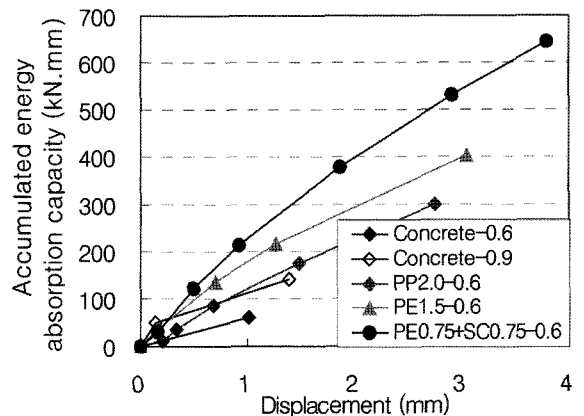


Fig. 11 Accumulated energy absorption capacity

**Table 6** Test results

Specimen	Initial crack		Maximum load					$R_{max}^{**}$	Energy (kN·mm)	
	$P_{cr}$ (kN)	$d_{cr}$ (mm)	$P_{max}$ (kN)	$\delta_{max}$ (mm)	$\sigma_{max}$ (1) (MPa)	$f_y/2$ (2) (MPa)	(1)/(2)			$k_{max}^*$ (kN/mm)
Concrete-0.6	59.25	0.302	83.06	0.75	214.61	236.14	0.91	98.66	1.00	-
Concrete-0.9	58.14	0.284	132.33	1.23	341.95		1.45	107.93	1.59	140.76
PP2.0-0.6	26.95	0.073	73.50	1.33	189.92		0.80	55.40	0.88	300.15
PE1.5-0.6	61.25	0.018	150.92	0.72	389.97		1.65	198.72	1.82	403.56
PE0.75+SC0.75-0.6	49.49	0.046	158.27	0.93	408.97		1.73	169.58	1.91	644.26

\*  $k_{max}$  : stiffness of maximum load

\*\*  $R_{max}$  : maximum load ratio to concrete-0.6

산 능력은 크게 개선될 것으로 기대된다.

### 3.6 철근 변형률

Fig. 12는 철근의 겹침 이음 실험시 철근변형률계이지의 위치에 따른 변형률을 응력 단계에 따라 비교하여 나타낸 것으로 철근변형률계이지의 위치는 Figs. 5 및 12와 같다.

Fig. 12(a)에서 콘크리트는 초기균열(189.15 MPa)이 발생하기 전까지는 철근에 작용된 인장응력이 시험체 내 겹침 이음부에 거의 전달되지 않은 것으로 나타났으며, 초기균열 발생 이후 Fig. 8(a)와 같이 겹침 이음부 중앙에 발생한 균열의 폭이 급격히 증가하고 겹침 이음부의 철근에 미끄러짐이 발생하면서 최종 파괴되었다.

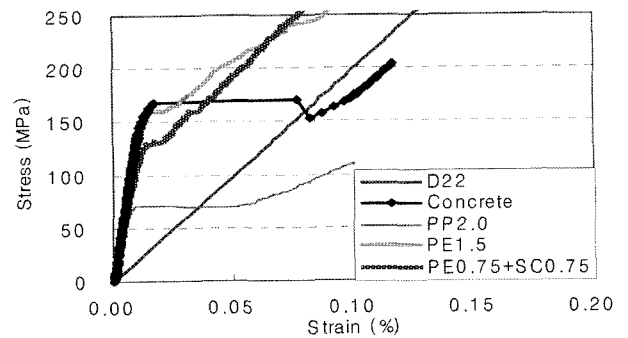
Fig. 8(b) 및 Fig. 12(b)에 나타난 바와 같이 PP2.0은 200 MPa에 이르러 시험체 단부로부터 중앙부로 30 mm 안쪽에 발생한 균열폭이 증가되면서 철근계이지(W.S.G 2)에서 가장 큰 변형이 유발되었다. 그러나 PP섬유가 해당 균열면을 지속적으로 가교하며 균열폭의 급격한 증가를 억제하며 매트릭스 내에서 인장응력을 재분배하여 Fig. 6(b)과 같이 연성적인 거동을 유도하였다.

Fig. 12(c) 및 (d)에 나타난 바와 같이 PE 및 SC로 보강된 HPRCC에서는 콘크리트와 달리 혼입된 섬유는 효율적인 균열면 가교와 응력재분배로 시험체 전면에 미세 균열이 분산되며 최대 하중까지 겹침이음부 철근에 응력이 전 구간에 균등하게 전달되고 있는 것으로 나타났다.

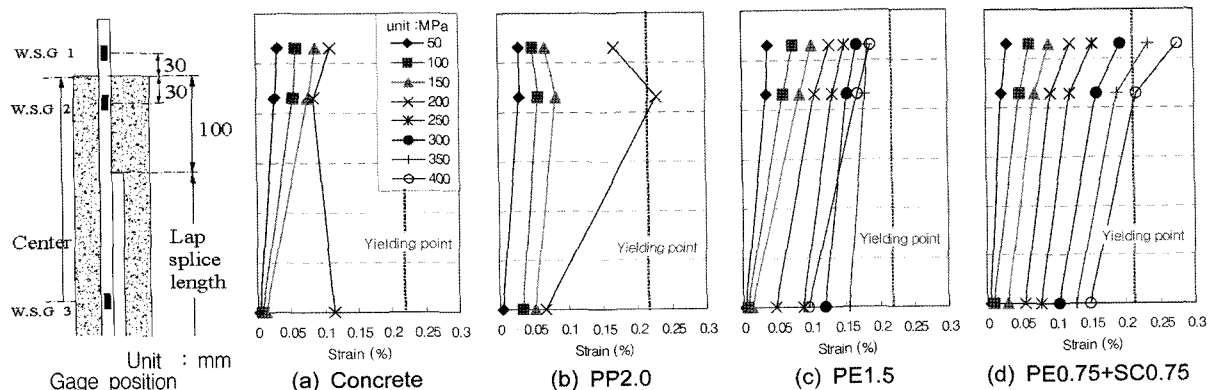
Fig. 13은 시험체에 도입된 인장응력(인장하중/철근의 공칭 단면적)과 각 시멘트 복합체의 철근 겹침 이음부에

부착된 철근계이지(W.S.G 3)의 변형을 관계를 각 시험체 별로 비교하여 나타낸 것이다. 콘크리트는 초기균열 (189.15 MPa) 발생 이후 변형이 급격히 증가되며 단일 철근과 대등한 거동을 보였다. PP2.0은 콘크리트에 비하여 낮은 응력(70.90 MPa)하에서 초기균열이 발생되었고 이는 모재의 건조수축의 영향에 따른 것으로 판단되며 초기균열 발생 이후 거동은 콘크리트와 유사한 거동을 보였다. PE1.5와 PE0.75 + SC0.75 시험체는 콘크리트와 대등한 초기균열강도를 보였으며 초기균열 발생 이후에도 균열면에 대한 PE 및 SC섬유의 효율적인 가교로 콘크리트 및 PP2.0과 상이하게 급격한 변형의 증가 없이 파괴시까지 단일 철근에 비하여 높은 응력을 보유했다.

Fig. 14는 철근 겹침 이음부위에서 콘크리트 및 다양한 종류의 섬유로 보강된 HPRCC 등 시멘트 복합체별 인장 부담 응력을 평가하기 위하여 W.S.G 1 및 3의 변형률 차이에 탄성계수를 곱하여 인장 부담 응력을 산정하였다.



**Fig. 13** Stress-strain curves of steels at splice position



**Fig. 12** Strains of steels at gage position(specimen-0.6)

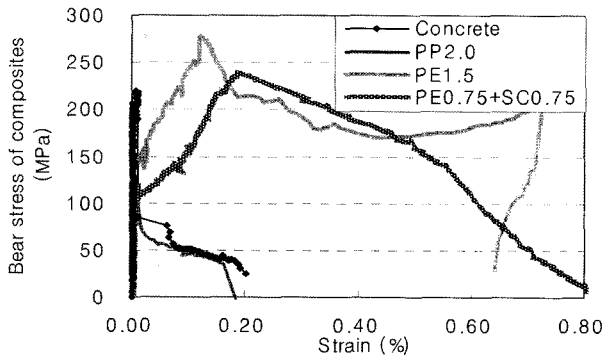


Fig. 14 Bear strength of cementitious composites

콘크리트 및 PP2.0의 경우, 실험 초기부터 변형률 0.2%까지는 응력 전달 경로에 따라 W.S.G 1 및 3에서의 응력차가 크게 나타났으나 이후 시험체 중앙부의 균열로 인해 응력이 중앙부로 집중되면서 응력차가 급격하게 감소되었다. 그러나 PE1.5 및 PE0.75 + SC0.75에서는 최대하중까지 W.S.G 1 및 3에서의 응력차가 증가하다 최대내력 이후 점진적으로 감소되는 등 3.2절의 균열 특성에서 나타난 바와 같이 시험체에 도입된 응력을 철근 겹침 이음부 뿐만 아니라 시험체 전 구간에 걸쳐 재분배함으로써 시험체 내 겹침 이음부가 받게 되는 응력을 보강 섬유가 부담하는 정도가 다른 시험체에 비해 큰 것으로 나타났다. 이상과 같이 HFRCC의 보강 섬유 종류에 따라 시멘트 복합체의 인장 부담 능력 및 균열 분산 능력이 상이하게 나타났다.

#### 4. 결 론

우수한 인장강도 및 인장 변형 능력을 갖는 HFRCC를 직접인장을 받는 철근의 겹침 이음부에 적용함으로써 겹침 이음 길이를 줄이고 궁극적으로 배근 상세를 단순화하기 위한 연구의 일환으로 보강 섬유 종류에 따른 HFRCC 내에서 철근의 겹침 이음 성능을 평가하고 이를 일반 콘크리트 및 설계기준식과 비교한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 시멘트 매트릭스 및 보강 섬유의 물성과 마이크로 역학을 기반으로 PP, PE 및 SC를 사용한 HFRCC의 제조가 가능하며 보강 섬유의 물리적 특성에 따라 HFRCC의 인장강도 및 인장 변형 능력이 상이하게 나타났다.
- 2) 철근 겹침 이음 시험체에 대한 직접인장시 HFRCC의 배합 특성으로 인하여 초기균열 강도는 PE1.5를 제외하고 Concrete보다 작게 나타났으나 초기균열 발생 이후 급격한 강도 저하는 발생하지 않았으며, 최대내력 이후에도 안정된 강도 및 강성 저하 특성을 보이며 연성적인 거동을 보였다. 또한 겹침 이음 길이가 설계기준값의 60%인 PE1.5 및 PE0.75+SC0.75의 이음부 강도가 설계기준값의 90% 이음 길이를

갖는 콘크리트보다 높게 나타난 바 HFRCC를 적용한 철근 겹침 이음 길이 저감 및 보강 상세 단순화의 가능성이 확인되었다.

- 3) HFRCC는 콘크리트와 상이하게 초기균열 발생 이후 복합체 및 철근의 겹침 이음부에서의 응력을 재분배함으로써 균열폭은 급격한 증가를 억제하고 균열수는 급진적으로 증가시키는 특성을 보였다. 이러한 균열 분산 특성은 시멘트 복합체 내 혼입된 섬유의 특성에 따라 다르게 나타났고, 다수의 미세 균열 분산 능력을 갖는 HFRCC의 적용시 구조물의 내구성 증대도 가능한 것으로 판단된다.
- 4) 시험체 내 겹침 이음부의 철근 변형률을 비교한 결과, PE1.5 및 PE0.75+SC0.75는 Concrete 및 PP2.0에 비해 응력 재분배가 시험체 전 구간에 걸쳐 균등하게 전달되었으나, 최대 내력시 단일 섬유만을 혼입한 PE1.5시험체에서는 겹침 이음부에서의 철근 변형률이 다소 감소되는 등 겹침 이음부에서의 구속력이 저하되는 것으로 나타났다. 그러나 PE0.75 + SC0.75는 최대내력에 이르기까지 겹침 이음부에서의 철근변형률이 점진적으로 증가하는 등 부착력 및 직경이 큰 강섬유가 매크로 균열을 억제하여 대변형시까지 효율적으로 겹침 이음부를 일체화하는 것으로 나타났다.
- 5) PE0.75 + SC0.75의 경우 반복 하중하에서 단일 섬유만을 사용한 PP2.0 및 PE1.5시험체에 비해 균열 분산 및 응력 재분배로 인한 겹침 이음 성능(하중-변위 관계, 에너지 흡수 능력)이 우수한 것으로 나타난 바 부착력 및 직경이 큰 강섬유를 적절하게 혼입하여 보강함으로써 대변형시까지도 겹침 이음부의 균열과 손상 제어가 가능할 것으로 판단된다.

#### 감사의 글

본 논문은 한국과학재단(과제번호 R01-2005-000-10546 -0)의 연구비 지원으로 수행된 연구의 일부임.

#### 참고문헌

1. Wight, J.K. and Naaman, A.E., *Fiber Reinforced Concrete Connections for Earthquake Resistant Design of Precast Reinforced Concrete Structures*, Report No. UMCE 89-13, UM, Ann Arbor, 1989.
2. Harajli, M.H. and Salloukh, "Effect on Fibers on Development/Splice Strength of Reinforcing Bars in Tension", *ACI Materials Journal*, Vol.97, No.4, 1997, pp.317~324.
3. 윤현도, 양일승, 한병찬, 福山洋, 전에스터, 문연준, "복합 섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장거동", 대한건축학회 춘계학술발표대회논문집, 24권 1호, 2004, pp.55~58.
4. 건설교통부 제정, 콘크리트구조설계기준, 한국콘크리트학회, 203pp.



---

**요 약** 본 논문은 다양한 연성 능력을 갖는 고인성 시멘트 복합체 내에서 철근의 겹침 이음 성능을 평가하고자 하였으며, 시멘트 복합체의 연성은 보강 섬유 종류 및 혼입률에 따라 좌우되게 된다. 본 연구에 사용된 섬유는 폴리프로필렌(PP)와 폴리에틸렌(PE), 그리고 PE 섬유와 5연선의 강섬유를 하이브리드하여 사용하였으며, PP 섬유의 혼입률은 2.0%, PE 및 하이브리드 고인성 시멘트 복합체의 혼입률은 1.5%로 하였다. 철근의 겹침이음길이는 일반 콘크리트에서 철근의 겹침 이음에 사용되는 ACI 기준에 의해 산정하였다. 고인성 시멘트 복합체 내에서 철근의 겹침 이음 실험을 수행한 결과, PE1.5 및 PE0.75+SC0.75 시험체의 겹침 이음 강도가 콘크리트에 비해 82~91%정도 높게 나타났으며, PE1.5 및 PE0.75+SC0.75 시험체의 겹침 이음 강도 및 에너지 흡수 능력이 PP2.0에 비해 높은 것으로 나타났다. 따라서 철근의 겹침 이음 성능은 섬유의 혼입률보다는 섬유의 인장강도 및 탄성계수에 의해 향상됨을 알 수 있었다. 또한 고인성 시멘트 복합체는 시멘트 복합체 내에서 섬유의 가교 작용으로 인해 미세균열의 분산 특성 및 최대강도 이후 연성적인 강도 저하를 보이는 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 겹침이음, 고인성 시멘트 복합체, 하이브리드 섬유, 미세균열, 가교작용