

이음된 초고강도 강섬유보강콘크리트 보의 휨강도에 관한 실험적 연구

배백일¹, 손동희², 최현기^{3*}, 정형석³, 최창식⁴

An Experimental Study on the Flexural Strength of Lap Spliced Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete Beams

Baek-Il Bae¹, Dong-Hee, Son², Hyun-Ki, Choi^{3*}, Hyung-Suk, Jung³, Chang-Sik, Choi⁴

Abstract: This study examines the bending behavior of lap-spliced ultra-high-strength fiber-reinforced concrete members and evaluates the safety of the design codes for ultra-high-strength fiber-reinforced concrete structures. An experiment on a total of six beams was performed. The main variables were the fiber-inclusion and the lap-spliced length at the center of the beams. The steel fibers in a volume fraction of 2% were used, and the lap-splice lengths were determined to be 8db and 16db. As a result of the test, the specimens not reinforced with fiber lost abrupt load-bearing capacity at the lap region and did not experience yielding of the reinforcing bar. In the case of fiber-reinforced concrete, if a lap-splice length of 16db is secured, the yielding of the main reinforcing bar can be experienced, and appropriate flexural strength can be expressed. Based on the experimental results of this study, as a result of reviewing the lap-splice length calculation formulas of the current design standards and the ultra-high-strength concrete structural design recommendations, it was found that all of them were evaluated conservatively.

Keywords: Ultra-high strength concrete, Steel fiber reinforced concrete, Lap-splice, Lap-splice length design standard, Ultra high performance concrete design recommendation

1. 서 론

콘크리트에 대한 강섬유의 혼입은 구조물이 압축 및 인장 응력 모두에 대해 높은 저항능력 및 변형능력을 보유하게 함에 따라 구조부재 단면의 크기를 혁신적으로 감소시킬 수 있는 계기가 되었다. 특히, 최근에는 초고강도 콘크리트에 강섬유를 혼입함으로써 부재크기의 감소와 보강 상세의 개선에까지 영향을 미치게 되었다(Chen and Graybeal, 2012; Choi et al., 2015).

초고강도 강섬유보강콘크리트는 대부분 증기양생을 요구하고 있기 때문에(Richard and Cheyrezy, 1994) 프리캐스트 부재 형태로 사용되는 경우가 많으며, 부재단면 축소로 인한 부재 크기 감소를 통해 경간을 크게 할 수도 있다. 따라서, 초고강도 강섬유보강콘크리트의 사용에 있어서도 철근이나 보

강재와 콘크리트 사이의 부착과 정착은 중요한 설계 요소가 된다.

Tepfers(1979)는 철근이 콘크리트에 작용시키는 응력은 철근의 둘레에 대하여 방사형으로 발생하게 되고 해당 응력에 의해 콘크리트에는 철근의 길이 방향에 따라 쪼갬 균열이 발생하게 된다고 보고하였다. 보통콘크리트의 경우 콘크리트가 보유한 인장강도가 낮으므로 쪼갬파괴의 방지를 위해 주인장 철근의 횡방향으로 철근을 배치시켜 보강하는 방법을 사용하였다. 반면 강섬유보강콘크리트 혹은 초고강도 강섬유보강콘크리트는 매트릭스가 보유한 높은 인장저항능력과 섬유와의 교작용에 의해 철근의 둘레 방향으로 방사되는 응력에 대한 저항능력이 커지게 된다. 정착 및 이음 길이 설계에 있어서 새로운 대안이 될 수 있으며 이를 반영한 설계안이 도출되어야 할 필요가 있다.

철근과 콘크리트 사이의 부착특성을 정의할 수 있는 가장 간단한 방법은 직접 뽑힘 실험이다. 직접뽑힘실험에 대한 기존 연구 결과(Holschemacher et al., 2004; Rilem, 1994; Saleem et al., 2013; Bae et al., 2016), 변수에 따른 차이가 있을 수 있으나, 초고강도 강섬유보강콘크리트를 사용할 경우, 최대 70MPa의 높은 극한부착응력을 보유할 수 있는 것으로 나타났다. 이는 ACI408(2001) 보고서에도 기술되어 있는 바와 같

¹정희원, 한양사이버대학교, 디지털건축도시공학과 교수

²정희원, 한양대학교, 건축공학부 박사과정

³정희원, 경남대학교, 소방방재공학과 교수

⁴정희원, 한양대학교, 건축공학부 교수

*Corresponding author: chk7796@kyungnam.ac.kr

Department of Fire and disaster prevention engineering, KyungNam University, Changwon, 51767, Korea

•본 논문에 대한 토의를 2022년 1월 31일까지 학회로 보내주시면 2022년 2월 호에 토론결과를 게재하겠습니다.

이 실험체의 설치 상황에 따른, 철근-콘크리트 부착지역에서의 구속응력 작용에 의해 발생한 현상이다. 인장겹침이음의 경우 직접뿔힘 실험과는 달리 보강재 주변의 콘크리트가 압축력을 받는 구간이 없기 때문에 직접뿔힘 실험을 통한 겹침이음길이 설계는 부착강도의 과대평가로 인한 안전하지 못한 설계가 될 수밖에 없다. 이에 따라 겹침이음길이의 안전성 평가 및 설계방법은 보강재 주변 콘크리트에 압축력이 작용하지 않거나 적게 만든 실험 방법을 사용할 것을 권고하였다. 이에 따라 ACI408에서는 겹침이음된 보의 휨 실험을 통해 정착길이 산정식을 제안하고 있다.

초고강도 강섬유보강콘크리트 부재 또한 겹침이음 보의 응력상태와 유사한 형태가 더 많이 적용되므로 이에 대한 연구가 필요한 상황이다. 그러나 보통콘크리트와는 달리 초고강도 강섬유보강콘크리트의 경우 해당 연구가 매우 제한적으로 수행되었다(Lee, 2016; Lee et al., 2017). 이음과 관련된 기존 연구에 대한 검토 결과, 철근의 항복이 현행설계기준보다 더 짧은 이음 길이에서 관측되었으나, 아직 연구 결과를 일반화하기에는 어려운 상황이다. 따라서 본 연구에서는 초고강도 강섬유보강콘크리트를 사용할 경우 현재 적용할 수 있는 요구 이음길이 산정식의 안전성에 대한 평가를 위해 이음부가 있는 초고강도 강섬유보강콘크리트 보의 휨 실험을 수행하였다.

2. 철근의 인장 이음길이에 대한 설계기준

2.1 KCI Model Code(2017)

KCI model code(2017)에서는 철근의 이음길이를 정착길이를 기반으로 정의한다. 기본정착길이와 상세식을 사용하여 정착길이를 산정하고, 이음길이를 결정할 때에는 인장이음의 경우 A급과 B급으로 나누어 각각 $1.0l_d$, $1.3l_d$ 이상, 최소 300mm 이상의 이음길이를 확보하도록 정하고 있다. 이 때 사용되는 정착길이 l_d 의 상세식은 식 (1)과 같다.

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

여기서, d_b 는 철근의 직경[mm], f_y 는 철근의 항복강도 [MPa], λ 는 경량콘크리트계수, f_{ck} 는 콘크리트의 설계기준항복강도[MPa]를 의미한다. c 는 철근 간격 또는 피복 두께에 관련된 치수이며, K_{tr} 은 횡방향철근지수으로써, 식 (2)를 통해 결정할 수 있다. 식 (2)에 사용되는 A_{tr} 은 정착되는 철근의 횡방향으로 배치되는 철근의 단면적이며, s 와 n 은 각각 정착길이 l_d 구간 내에 있는 횡방향 철근의 최대 중심간 간격[mm]를 의

미하며, 쪼개질 가능성이 있는 평면을 따라 정착되거나 이어지는 철근 또는 철선의 수를 의미한다.

$$K_{tr} = \frac{40A_{tr}}{sn} \quad (2)$$

횡방향 철근이 배치되어 있더라도 설계를 간편하게 하기 위해 $K_{tr} = 0$ 으로 사용할 수 있다. 식 (1)에 적용하는 계수 α , β , γ 는 각각 철근배치 위치계수, 도막계수 그리고 철근 또는 철선의 크기계수를 의미한다.

2.2 EUROCODE2(2005)

유로코드의 정착 및 이음 설계에 관한 산정식은 극한부착응력을 기반으로 하고 있다. 리브가 있는 철근의 경우 극한부착응력의 설계값은 아래 식 (3)을 통해 결정된다.

$$f_{bd} = 2.25\eta_1\eta_2f_{ctd} \quad (3)$$

여기서, f_{ctd} 는 콘크리트 설계 인장강도, η_1 은 부착 조건과 타설이 이루어질 때 보강근의 배치 위치, η_2 는 철근의 지름에 연관된 계수를 의미한다. 이 때 부착조건은 부재의 크기와 철근의 배치 위치 등을 반영한다.

식 (3)에서 정의된 극한부착응력을 기반으로, 식 (4)를 통해 요구정착길이 $l_{b,rqd}$ 를 산정하고, 이 값에 계수를 곱하는 식 (5)를 통하여 요구이음길이 l_o 를 산정한다.

$$l_{b,rqd} = (\phi/4) (\sigma_{sd}/f_{bd}) \quad (4)$$

$$l_o = \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_5\alpha_6l_{b,rqd} \geq l_{0,min} \quad (5)$$

이 때, 최소요구이음길이 $l_{0,min}$ 은 다음 식 (6)을 통해 결정할 수 있다.

$$l_{0,min} > \max \{ 0.3\alpha_6l_{b,rqd}; 15\phi; 200mm \} \quad (6)$$

식 (3)으로부터 (5)에서 사용되는 변수 및 계수들은 다음과 같다. ϕ 는 철근의 직경, σ_{sd} 정착이 시작되는 위치에서 철근에 작용하는 설계응력의 크기, α_1 , α_2 , α_3 , α_4 그리고 α_5 는 각각 철근의 형태, 콘크리트 피복, 일반철근의 구속효과, 용접철근의 구속효과 그리고 횡압력에 의한 구속효과를 의미한다.

2.3 KICT Recommendation(2012)

국내에서 발간된 초고성능콘크리트 K-UHPC 구조설계지침(2012)에 따르면, KCI model code에서 사용하는 방법과 같

이, 직선정착길이를 산정하고 A급 및 B급 이음길이를 구분하여 이음길이를 산정하도록 하고 있다. 직선정착길이 l_d 는 기본정착길이 l_{db} 에 보정계수를 곱하여 구할 수 있다. 기본정착길이 l_{db} 는 식 (7)을 통해 산정하며, 횡방향철근의 영향을 고려하지 않는다면, 철근위치계수 α 를 수정하여 철근의 직경이 D19 이하일 때에는 1.2α , 철근의 직경이 D22 이상일 경우 1.5α 를 적용하도록 하고 있다. 이 때, α 는 상부철근의 경우 1.3, 그 외의 경우에는 1.0을 사용한다. 최소 겹침이음 길이는 KCI model code와 달리 100mm를 적용하도록 권고하고 있다.

$$l_{db} > \frac{0.186d_b f_{yk}}{\phi_m \sqrt{f_{ck}}} \quad (7)$$

여기서, ϕ_m 은 재료저감계수로 일반적으로 0.77을 사용한다.

2.4 AFGC Recommendation(2013)

초고성능 콘크리트의 성능을 반영한 구조물의 설계기준인 AFGC의 권고안에서는 섬유가 주철근의 길이방향 균열을 억제하는 역할을 하고 있음을 명시하고 있다. 기본적으로 EC2와 같은 형태의 이음길이 산정 방안을 사용하고 있으나 재료의 강도 발현 수준을 고려하여 극한부착강도 산정식을 조정하였다. 초고성능 콘크리트와 철근 사이의 극한부착응력은 식 (8)를 통해 결정할 수 있으며 최소 이음 길이는 식 (9)을 통해 결정할 수 있다.

$$f_{bd} = \eta \eta_1 \eta_2 \kappa f_{ctd} \quad (8)$$

$$l_{0,\min} > \max \{ 0.3\alpha_6 l_{b,rqd}; \delta 15\phi; \delta 200 \text{ mm} \} \quad (9)$$

여기서 η_1 과 η_2 는 EC2에서 사용된 계수와 동일하며, η 는 이형철근이 사용된 경우 2.25를 적용하도록 하고 있다. κ 는 $1 + 0.5f_{ctfm}/f_{ctm,el}$ 로 계산 가능하며 1.5를 초과할 수 없다. 여기서 f_{ctfm} 은 평균 최대 균열후 응력이며, $f_{ctm,el}$ 은 인장하에서 탄성한계응력의 평균값을 의미한다. δ 는 $1 - 0.5f_{ctfm}/f_{ctm,el} \geq 0.5$ 을 통해 산정할 수 있다.

3. 실험계획

3.1 변수 및 실험체 상세

본 연구에서는 초고강도 강섬유보강콘크리트의 휨강도 발현을 위한 요구 이음 길이에 대한 설계식의 안전성을 평가하기 위해 이음된 보에 대하여 4점 가력 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 주요 변수는 철근의 이음길이와 강섬유의 혼입량으로 설계기준 혹은 권고안에 대하여, 재료의 특성에 대해 직접 영향을 받는 인자로 결정하였다. 매트릭스의 설계기준 압축강도는 120MPa, 철근의 설계기준 항복강도는 500MPa로 설정하였다.

총 여섯 개의 실험체에 대한 실험을 수행하였으며, 실험체의 상세는 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다. 실험체명은 강섬유의 혼입 여부에 따라 M과 F2로 구분하여 각각 강섬유가 혼입되지 않은 실험체와 혼입된 실험체로 구분하였다. 이 때 혼입된 강섬유는 부피비로 2%로 정하였다. 사용된 강섬유는 직선형으로 길이는 13mm, 직경은 0.2mm이었으며 제조처에서 제공된 인장강도는 2800MPa인 것으로 확인되었다. 실험체명의 1.38은 실험체의 철근비를 나타내며, 8db와 16db는 각각 이음길이를 나타낸다. 마지막 지표가 없는 경우는 이음 구간이 없는 실험체를 의미한다. 이음 개소는 전술한 바와 같

Table 1 Test variables

Specimen	b	d	h	L	l_{sp}	Concrete	Longitudinal Rebar		Transverse Rebar(D10) (in shear span)		Fiber		
							f_c	A_s	f_y	s	f_{yt}	V_f	L_f
						[MPa]	[MPa]	[MPa]	[mm]	[MPa]	[%]	[mm]	[mm]
M-1.38						128.99					0	13	0.2
F2-1.38						119.07					2	-	-
M-1.38-8db	220	280	350	2400	180	128.99	2-D22	543.71	D13@150	430.67	0	-	-
F2-1.38-8db					360	119.07					2	13	0.2
M-1.38-16db					180	128.99					0	-	-
M-1.38-16db					360	119.07					2	13	0.2

b : width, d : effective depth, h : height, L : total length of the test specimens, l_{sp} : splice length, f_c : compressive strength of concrete at test date, A_s : area of tensile reinforcement, f_y : yield strength of tensile reinforcement, s : spacing of shear reinforcement at shear span, f_{yt} : yield strength of shear reinforcement, V_f : fiber volume fraction, L_f : fiber length, D_f : fiber diameter

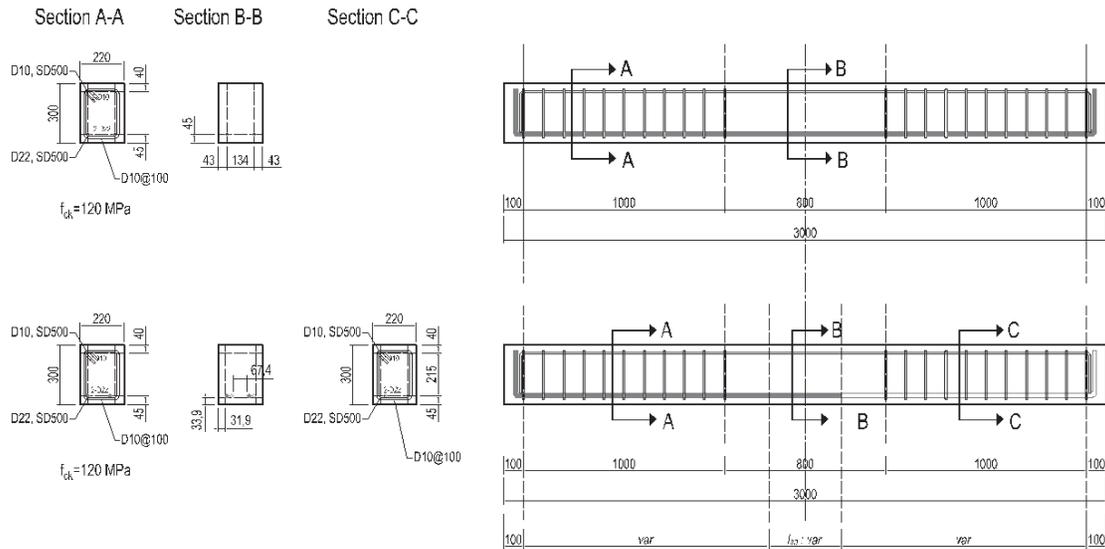


Fig. 1 Details of test specimens(Unit : mm)

Table 2 Mix proportions and mechanical properties of concrete

	Water	Cement	Slag	Silica Fume	Sand	Steel Fiber	Compressive strength	Elastic modulus	Flexural Strength
	Unit Weight [kg/m^3]						[MPa]		
$V_f = 0\%$	210	780	240	180	1020	-	128.99	31,433	4.92
$V_f = 2\%$						156	119.07	36,686	22.60

이 보의 중앙부에 위치하고 총 두 개의 철근이 이음되었으며, 이음 길이 내에는 횡방향 구속력을 배제하기 위하여 횡방향 철근을 배치하지 않았다.

사용된 콘크리트의 재료특성을 정의하기 위하여 압축 및 인장시험을 수행하였다. 압축시험은 KS F 2405에 의거하여 높이 200mm, 지름 100mm의 원주형 공시체를 사용하여 수행하였다. 강섬유의 혼입에 따른 인장강도 및 변형능력에 대한 평가를 수행하기 위해 3점 가력 휨 실험을 수행하였다. 휨강도 시험에 사용된 시험체는 150x150x550의 프리즘을 사용하였다. 실험체의 제작에 사용된 콘크리트에 대한 배합비는 Table 2에 나타내었으며 강섬유의 혼입량에 따른 압축 및 인장강도시험 결과를 함께 나타내었다.

3.2 가력 및 측정계획

실험체의 계획에 맞추어, 이음구간에 일정한 모멘트가 작용하도록 하기 위해 4점 가력 실험을 수행하였다. 용량 2,000kN의 액츄에이터를 사용하였으며, 이음된 실험체의 급격한 하중지지능력 상실이 예상되어 변위제어를 통해 분당 1mm의 속도로 가력을 수행하였다. 이음부의 철근을 통해 전달되는 응력의 크기를 검토하기 위하여 이음부에 스트레인게이지를 설치하였으며, 중립축 변화를 검토하기 위해 실험체

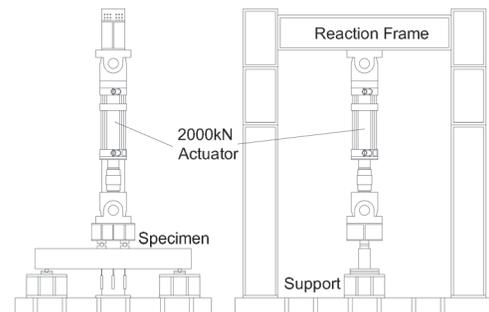


Fig. 2 Test setup and deflection measurement plan

표면에 스트레인게이지를 부착하였다. 또한 가력부 바로 아래 LVDT를 설치하여 중앙부 및 가력부에서의 처짐을 직접 측정할 수 있도록 하였다. 실험체의 가력 및 처짐 측정 계획은 Fig. 2에 나타내었다.

4. 실험결과

4.1 파괴양상

본 연구의 주요 목적은 초고강도 강섬유보강콘크리트 보의 주인장철근이 이음된 경우 휨성능을 검토하기 위함이므로,

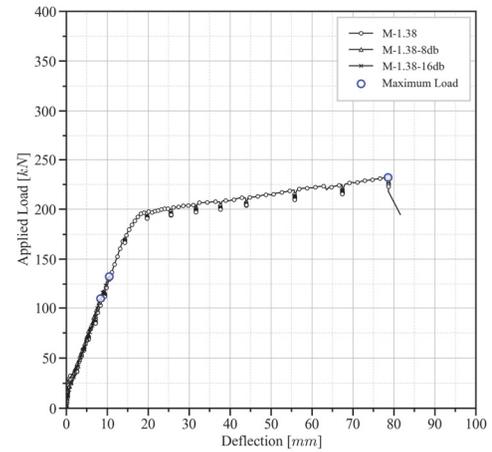
전단파괴를 방지하기 위해 전단철근을 배치하였으며 모든 실험에서 전단파괴는 관찰되지 않았다. 실험체의 최종 파괴 상태를 Photo 1에 정리하여 나타내었다.

철근이 이음되지 않은 실험체인 M-1.38과 F2-1.38은 모두 전형적인 휨파괴 경향을 나타내었다. Photo 1(a)와 (b)에 나타난 바와 같이 두 실험체 모두 일정 모멘트가 작용하는 지점에 수직 방향의 균열이 뚜렷하게 발생한 것을 확인할 수 있다. 강섬유의 혼입에 따라 균열간격이 크게 좁아졌으며, 보 중앙 상단에서의 압괴가 방지되었다. 균열의 확산 이후 가력지점에서 균열의 집중 현상이 나타나고 가력지점에서 압괴가 서서히 진행되며 파괴되었다. Photo 1(c)와 (d)에는 이음길이가 8db인 실험체들을 나타내었다. 이음길이가 8db인 경우 강섬유가 혼입되지 않은 M-1.38-8db 실험체는 초기 균열이 가력지점에서 발생하였으나, 하중의 증가와 함께 이음부에서 수평균열이 발생하였다. 이후 가력지점사이에서 급작스러운 대각 방향의 균열 발생과 함께 큰 소리를 내면서 파괴를 경험하였다. 반면 F2-1.38-8db 실험체는 초기 균열 발생 이후 이음철근 단부 주위에 균열이 확산되기 시작했으며, 중앙부에 균열이 집중되면서 파괴가 서서히 진행되는 것을 확인할 수 있었다. Photo 1(e)에 나타난 바와 같이 M-1.38-16db 실험체는 이음길이가 길어졌음에도 불구하고 M-1.38-8db와 유사한 파괴 양상을 보였다. 반면, Photo 1(f)에 나타난 바와 같이 F2-1.38-16db 실험체는 초기 균열 발생 이후, 일정모멘트 작용 구간에 균열의 확산을 경험하고 가력부에서 균열이 집중되어 큰 처짐을 경험하면서 가력부 상단 콘크리트의 압괴를 경험하며 파괴되었다. 이는 F2-1.38과 유사한 파괴 양상으로, 강섬유가 혼입될 경우 16db의 이음길이를 만족시킬 경우 이음되지 않은 경우와 유사한 파괴거동을 보이는 것을 의미한다.

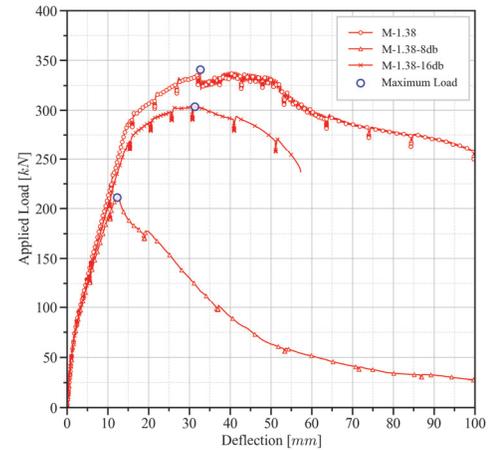
4.2 하중-처짐 관계

Fig. 3의 (a)와 (b)에 섬유 혼입 여부를 기준으로 하여 작용

하중-중앙부 처짐 사이의 관계를 나타내었다. 작용하중은 액츄에이터의 로드셀에서 측정된 값을 기준으로 나타내었다. 또한, 실험체에 작용하는 균열 발생 및 최대작용하중시의 하



(a) M-series



(b) F2-series

Fig. 3 Load-deflection relation of test specimens



(a) M-1.38



(b) F2-1.38



(c) M-1.38-8db



(d) F2-1.38-8db



(e) M-1.38-16db



(f) F2-1.38-16db

Photo 1 Failure pattern of test specimens

Table 3 Test results

Specimens	δ_y [mm]	P_y [kN]	δ_{max} [mm]	P_{max} [kN]	δ_{ult} [mm]	P_{ult} [kN]
M-1.38	13.54	86.81	70.28	115.74	54.52	111.24
F2-1.38	10.35	128.68	30.38	170.45	38.98	168.86
M-1.38-8db	-	-	7.58	55.15	-	-
F2-1.38-8db	-	-	11.12	105.64	18.49	75.86
M-1.38-16db	-	-	9.94	66.32	-	-
F2-1.38-16db	11.52	117.94	27.65	151.86	-	-

δ_y : center deflection at the yielding of the tensile rebar, P_y : half of the applied actuator load at the yielding of the tensile rebar, δ_{max} : center deflection at maximum loading state, P_{max} : half of the applied actuator load at at maximum loading state, δ_{ult} : center deflection at ultimate state($\epsilon = 0.003$), P_{ult} : half of the applied actuator load at at ultimate state($\epsilon = 0.003$)

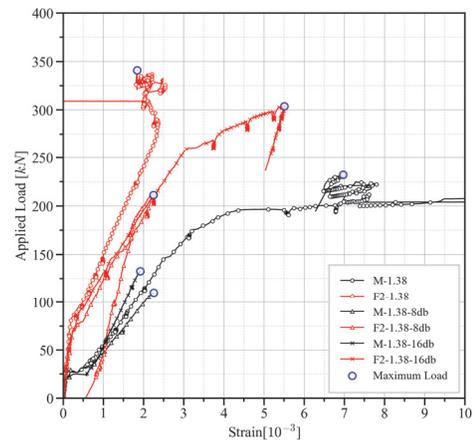
중과 해당 시점에서의 변위를 Table 3에 정리하여 나타내었다. Fig. 3(a)와 파괴 유형에서 확인할 수 있는 바와 같이, M-1.38은 초기 균열, 주인장철근 항복, 파괴까지 세 개의 다른 기울기를 가진 선형 거동을 하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 8db와 16db의 이음길이가 적용된 두 실험체는 모두 부재의 항복 이전 급격한 하중지지능력의 상실을 경험하는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 섬유로 보강되어 있는 F2군 실험체들은 파괴 유형에서 살펴본 바와 같이 균열의 국부화에 의한 비선형성 하중-처짐 관계를 Fig. 3(b)에서 확인할 수 있었다. 8db의 이음길이를 가진 경우에는 부재의 항복 이전에 하중지지능력의 감소를 경험하는 것을 확인할 수 있었으나, 16db의 이음 길이가 확보될 경우 F2-1.38에 비하여 최대 작용하중의 크기는 작지만 유사한 하중-처짐 관계를 보이는 것을 확인할 수 있었다. 이는 파괴 유형에서 나타난 바와 같이 16db의 이음길이가 확보될 경우 충분한 휨강도 및 연성을 확보할 수 있는 조건이 될 것으로 판단하였다.

5. 이음성능평가

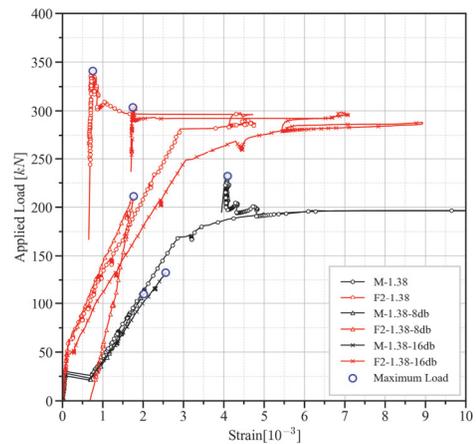
5.1 철근의 변형률

이음된 초고강도 강섬유보강콘크리트 보가 충분한 휨거동을 경험한 것을 검토하기 위해 인장철근의 변형률을 검토하였다. 파괴 패턴에서 확인된 바와 같이, 강섬유의 혼입 여부, 이음 여부 및 이음 길이에 따라 파괴가 집중되는 위치가 중앙부 또는 가력지점으로 나타났으므로, 보의 중앙 위치, 가력단에서의 위치로 나누어 각각 Fig. 4의 (a)와 (b)에 모든 실험체에 대하여 하중-변형률 관계로 나타내었다.

이음되지 않은 실험체 중 하나인 M-1.38은 가력위치와 실험체 중앙부 위치 모두에 대하여 철근의 항복을 경험하는 것을 확인할 수 있었다. 반면 F2-1.38의 경우 항복을 경험하고 있지 않은 것으로 나타났다. 더불어 변형률의 크기가 오히려



(a) Center of span length



(b) Loading Point

Fig. 4 Load-strain relation of test specimens

줄어드는 현상이 나타나는데 이는 가력점에서 철근의 항복이 먼저 발생하고, 균열의 국소화가 발생하면서 보의 변형이 가력점에 집중되었기 때문에 나타난 현상으로 판단된다. 8db의 이음길이가 적용된 경우에 대하여, 강섬유가 혼입되지 않은

실험체인 M-1.38은 철근의 항복을 경험하지 못하였다. 강섬유가 혼입된 F2-1.38실험체의 경우 급작스러운 파괴가 나타나지는 않았으며, 하중-처짐 관계에서 하중지지능력의 상실이 M-1.38에 비하여 급작스럽게 나타나지는 않았으나, 철근이 중앙부 및 가력지점 모두에서 항복하지 않는 것을 확인할 수 있었다. 16db의 이음길이가 확보되었을 경우에도 강섬유로 보강되지 않은 M-1.38-16db는 철근이 탄성상태에 있을 때 파괴되는 것을 확인할 수 있었다. 반면, 강섬유로 보강된 경우, 이음부 내와 가력지점 모두 철근이 항복을 경험하는 것을 확인할 수 있었다.

이로부터, 파괴양상 및 하중-처짐 관계로부터 판단한 바와 같이, 120MPa의 압축강도를 보유한 초고강도콘크리트에 대해서는 2% 부피비의 강섬유로 보강되어도, 8db의 이음길이에서는 휨능력을 제대로 발휘하기 어려우며, 16db의 이음길이가 확보될 경우, 2% 부피비의 강섬유가 혼입되면 휨강도의 발현이 가능함을 확인할 수 있었다.

5.2 이음길이 설계기준 검토

현행설계기준 및 초고성능콘크리트 구조설계지침들에 의거한 이음길이 설계방법론의 적합성을 검토하기 위하여, 본 연구에서 수행된 실험체의 제원을 바탕으로 각 설계기준 및 설계지침들에서 요구하는 인장이음길이를 검토하였다. KCI model code에서는 콘크리트의 설계기준압축강도에 대한 제한을 $\sqrt{f_{ck}}$ 가 8.4MPa를 초과하지 않도록 설계하고 있으며, EC2에서는 C60/75 이상의 콘크리트를 사용할 경우 취성적 파괴가 예상되므로 주의해야 함을 언급하고 있다. 본 연구에서 수행한 콘크리트의 설계기준압축강도는 120MPa이며, 압축시험 결과 강섬유가 보강되지 않은 경우 128.99MPa, 강섬유가 보강된 경우 119.07MPa로 $\sqrt{f_{ck}}$ 가 8.4MPa를 초과하며, C60/75에 요구되는 설계기준 압축강도를 초과하므로, 한계

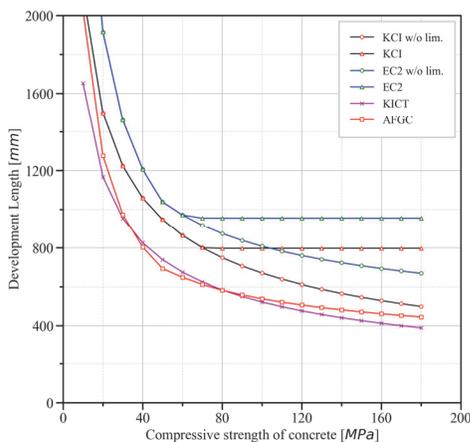


Fig. 5 Required lap-splice length calculated by design codes

치를 적용하여 평가할 수 밖에 없다. 초고강도콘크리트를 대상으로 하는 두 설계지침은 지침에서 기술하고 있는 바와 같이 제한된 실험 결과에 의존한 설계방법이지만 재료강도의 한계로부터 자유로운 상황이다. 따라서, KCI model code와 EC2에 재료강도 한계를 적용시킨 요구이음길이를 통해 현행 설계기준의 적합성을 검토하였고, 재료강도 한계를 적용시키지 않은 요구이음길이를 검토하여 설계기준식이 가진 잠재성을 평가하였다. 더불어, 초고성능콘크리트 설계지침의 요구이음길이를 산정하여 설계지침안의 안전성을 평가하였다.

콘크리트의 압축강도 변화에 따른 인장이음길이의 변화를 본 연구에서 사용된 D22, SD500 철근 및 실험체의 콘크리트 파괴 및 이음 상태를 반영하여, 현행 KCI model code, EUROCODE2, K-UHPC 구조설계지침, AFGC recommendation으로 나누어 Fig. 5에 나타내었다. 본 연구에서 수행된 실험 결과, 콘크리트의 압축강도가 119.07 MPa이고 2% 부피비로 섬유가 보강되었으며, 이음길이가 16 d_b 인 355mm가 적용된 경우 적절한 휨강도 및 변형능력을 제공할 수 있는 것으로 나타났다. 이 값은 Fig. 5에 나타난, 본 연구에서 검토한 모든 현행설계기준 및 초고성능콘크리트구조설계지침이 보수적으로 평가하고 있음을 보이고 있다.

6. 결론

이음된 초고강도 및 초고강도 강섬유보강 콘크리트를 적용한 보의 휨파괴 실험 결과과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 이음되지 않은 초고강도콘크리트 보의 거동은 철근의 항복 이후 지속적인 작용하중 증가를 경험하였으며, 콘크리트의 취성적 압괴로 인한 파괴를 경험하였다. 반면, 섬유의 보강에 의해 휨강도의 증가를 경험하고 급작스러운 파괴가 방지되는 것을 확인하였다.
- 2) 8db의 이음 길이가 적용된 경우 섬유가 보강된 실험체와 보강되지 않은 실험체 모두 철근의 항복 이전에 파괴를 경험하는 것을 확인할 수 있었다. 섬유가 보강되지 않은 경우에는 철근의 항복 이전에 하중지지능력을 급속히 상실하는 파괴 양상을 보였으나, 섬유가 보강된 경우에는 천천히 하중지지능력을 상실하는 것으로 확인되었다.
- 3) 16db의 이음길이가 적용된 경우, 섬유로 보강되지 않은 실험체는 8db의 이음길이가 적용된 실험체와 유사한 파괴 양상을 보였다. 반면, 섬유가 보강된 경우에는 인장철근이 항복하면서 이음되지 않은 실험체와 유사한 파괴 양상을 보이는 것을 확인할 수 있었다.
- 4) 설계기준압축강도가 120MPa인 초고강도콘크리트 보에 대하여 섬유가 2% 부피비로 혼입되고, 16db의 이음 길이가 확보된 경우 단면의 휨강도를 발현할 수 있는 것으로

로 확인되었다. 섬유 혼입량 차이는 초고강도 강섬유 보강콘크리트의 거동을 크게 변화시키므로 이에 대한 연구가 추후 필요할 것으로 판단된다.

- 5) 보통콘크리트에 대한 현행설계기준과 초고성능콘크리트에 대한 구조설계지침에 대해 분석해 본 결과, 모든 설계기준과 구조설계지침이 안전한 이음 설계를 진행하고 있는 것으로 나타났다. 다만, 재료 강도에 대한 제한을 고수할 경우 현행설계기준은 과도한 이음길이를 요구하는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한양사이버대학교의 연구비 지원으로 이루어짐.

References

1. Chen, L., and Graybeal, B. A. (2012), Modeling structural performance of second-generation ultrahigh-performance concrete pi-girders. *Journal of Bridge Engineering*, 17(4), 634-643.
2. Richard, P., and Cheyrezy, M. H. (1994), Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength. *Special Publication*, 144, 507-518.
3. Choi, Jeong-II, Koh, Kyung-Taek, and Lee, Bang-Yeon. (2015), Tensile Behavior of Ultra-High Performance Concrete According to Combination of Fibers. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, 19(4), 49-56
3. Tepfers, R. (1979), Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars. *Magazine of Concrete Research*, 31(106), 3-12.
4. Holschemacher, K., Weiße, D., and Klotz, S. (2004), Bond of reinforcement in ultra high strength concrete. In Proceedings of the International Symposium on UHPC, Kassel, Germany, 375-387.
5. Rilem, T. C. (1994), RC 6 Bond test for reinforcement steel. 2. Pull-out test, 1983. RILEM recommendations for the testing and use of constructions materials, 218-220.
6. Saleem, M. A., Mirmiran, A., Xia, J., and Mackie, K. (2013), Development length of high-strength steel rebar in ultrahigh performance concrete. *Journal of Materials in Civil Engineering*, 25(8), 991-998.
7. Bae, B. I., Choi, H. K., and Choi, C. S. (2016), Bond stress between conventional reinforcement and steel fibre reinforced reactive powder concrete. *Construction and Building Materials*, 112, 825-835.
8. Lee, H. J., Chung, C. H., Shin, D. H., Park, S. J., and Kim, I. G. (2017), Evaluation on Structural Performance of Precast Bridge Deck Joint using HSFRC. *Journal of the Korea institute for Structural Maintenance and Inspection*, 21(6), 196-205.
9. Kim, S., Lee, J., Joh, C., and Kwahk, I. (2016), Flexural Bond Behavior of Rebar in Ultra-High Performance Concrete Beams Considering Lap-Splice Length and Cover Depth. *Engineering*, 8(03), 116.
10. KCI (2017) KCI Model Code 2017. Seoul, Korea; Kimoondang Publishing Company. Korea Concrete Institute(KCI), 637(In Korean)
11. Code, P. (2005), Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings. British Standard Institution, London.
12. Korea Concrete Institute (2012) Design Guidelines for K-UHPC, KCI-M-12-003, Korea, 1-66.
13. AFGC(Association Française de Génie Civil) (2013) Interim Recommendations, Ultra High Performance Fibre Reinforced Concretes, France, 358.

Received : 10/01/2021

Revised : 10/18/2021

Accepted : 10/19/2021

요 지 : 본 연구에서는 이음된 초고강도 강섬유보강콘크리트 부재의 휨거동을 검토하고, 현행설계기준의 초고강도 강섬유보강콘크리트 구조물의 이음 설계에 대한 안전성을 평가하기 위해 총 6개의 보에 대한 가력 실험을 수행하였다. 주요 변수는 섬유의 혼입여부와 이음 길이로 설정하였다. 혼입된 섬유는 강섬유로 2%의 부피비로 결정하였으며, 이음길이는 8db와 16db로 결정하여 실험체를 제작하였다. 실험 결과 섬유로 보강되지 않은 실험체들은 이음부에서 급격한 하중지지능력을 상실하고 철근의 항복을 경험하지 못하였으나, 섬유로 보강된 경우 16db의 이음길이가 확보되면 주인장철근의 항복을 경험할 수 있으며, 적절한 휨강도를 발휘할 수 있는 것으로 나타났다. 본 연구의 실험결과를 바탕으로 현행설계기준 및 초고강도콘크리트 구조설계지침의 이음길이 산정식들을 검토한 결과 모두 보수적인 평가를 하고 있는 것으로 나타났다.

핵심용어 : 초고강도콘크리트, 강섬유보강콘크리트, 이음, 이음설계기준, 초고성능콘크리트 구조설계지침