

겹침이음된 초고강도콘크리트 보의 횡방향보강 요소가 미치는 영향

배백일¹, 최현기^{2*}

Influence of Transverse Reinforcement Elements for Flexural Strength of Lap Spliced Ultra-high-strength Reinforced Concrete Beams

Baek-Il Bae¹, Hyun-Ki, Choi^{2*}

Abstract: In this study, lap spliced ultra-high strength reinforced concrete beams were tested and the code criteria for calculating the lap splice length which was affected by the transverse reinforcement and concrete covering performance were reviewed. The main variables for test were set as fiber volume fraction and transverse reinforcing bar arrangement to improve the confining performance of the concrete cover. The change of the confining performance of concrete cover according to the increase in the fiber mixing amount at 1% and 2% volume ratio was examined, and D10 stirrups with a spacing of 100 mm were placed in the lap spliced region. As a result of the test, the specimens confined by the stirrups showed a sudden drop of load bearing capacity with horizontal cracking at the position of tensile longitudinal reinforcement. However, horizontal cracks were not appeared at the location of longitudinal reinforcement for the specimens with steel fiber. And these specimens showed gradual decrease of load bearing capacity after experiencing peak load. In particular, it was found that the strain at the position of the tensile longitudinal reinforcements of the specimens to which the mixing ratio of 2% was applied exceeds the yield strain. As a result of measuring the strain on the concrete surface, it was found that the fiber was more effective in preventing damage to the concrete surface than the stirrups for short lap spliced region.

Keywords: Ultra-high strength concrete, Steel fiber reinforced concrete, Lap-splice, Transverse reinforcement

1. 서론

콘크리트의 강도 증가에 대한 연구는 콘크리트 구조설계의 발전과 함께 지속적으로 이루어져 왔으며, 최근에는 200MPa에 준하는 압축강도를 보유한 초고강도 콘크리트가 개발되어 현재 다양한 건설 산업 분야에서 사용되고 있다. 일반적으로 설계기준 압축강도가 120MPa를 초과하는 콘크리트의 경우 RPC(Reactive Powder Concrete)의 형태로 개발되고 있으며, RPC는 수화반응의 촉진을 위해 증기 양생이 대부분 필수적이다(Richard and Cheyrezy, 1994). 이에 따라, 초고강도콘크리트 부재는 프리캐스트의 형태로 사용되는 경우가 많으며, 압축시의 폭발적인 파괴 형태에 의해 강섬유가 함께 사용된다.

강섬유보강콘크리트는 휨설계 수행시에 보통콘크리트와 다르게 콘크리트의 인장강도를 반영한 설계를 수행하기 때문

에 부재 단면의 축소가 가능하다. 부재단면 축소는 일차적으로 부재의 피복 두께 감소를 야기하게 되며 피복두께 감소는 철근과 콘크리트 사이의 부착에 관한 문제를 일으킬 수 있다. 특히, 정착에 관한 구조설계기준들에는(KCI 17, 2017, EC2, 2005) 강도에 대한 제한이 존재하고 있으며 다양한 제약조건을 요구하고 있으므로, 발현되는 압축강도의 크기가 설계기준의 제약사항보다 크고, 강섬유의 보강에 의한 거동의 변화가 예상되는 초고강도 섬유보강콘크리트의 경우, 안전한 설계를 위해서는 해당 변수들에 대한 검증이 필요하다.

인장겹침이음길이를 결정하는 주요 변수는 콘크리트의 압축강도, 철근의 항복강도, 피복의 두께, 철근의 직경, 철근비, 철근리브의 상대면적 등이 있다. Tepfers(1979)는 철근의 리브가 콘크리트에 철근의 방사방향으로 응력을 가함으로써 쪼갠인장 파괴를 유발하여 부착파괴가 야기되는 것을 보고하였다. 콘크리트가 해당 인장응력을 부담하는 것과 함께 횡보강근이 부착응력에 의해 야기되는 쪼갠인장 파괴를 방지하게 되며 이 현상을 설계기준에서는 K_{tr} 이라는 지표를 통해 정착길이의 산정에 반영하고 있다(KCI, 2017).

ACI408(2012)에서는 횡보강근이 정착 및 이음에 미치는 영향에 대하여 Tepfers(1973), Orangun et al.(1977) 그리고 Darwin and Graham(1993a, b)의 연구 결과를 인용하여 횡보강

¹정회원, 한양사이버대학교, 디지털건축도시공학과 교수

²정회원, 경남대학교, 소방방재공학과 교수

*Corresponding author: chk7796@kyungnam.ac.kr

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

•본 논문에 대한 토의를 2022년 11월 30일까지 학회로 보내주시면 2022년 12월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

근이 정착 및 이음 철근에 대하여 쪼갬 균열의 진전을 제한하는 효과를 가지고 있다고 보고하였다. 또한, 횡보강근은 부착력의 증가를 야기함으로써 부착 파괴 유형 중 하나인 쪼갬파괴를 뺏힘파괴로 변화시킬 수 있음을 보고하였다. Zuo and Darwin (1998, 2000)은 쪼갬 균열이 예상되는 지점에서 철근이 피복의 쪼갬 파괴에 저항하는 기여분에 대한 연구를 진행하였다.

초고강도강섬유보강콘크리트의 경우 콘크리트 매트릭스가 보유한 상대적으로 높은 쪼갬인장강도의 크기와 함께 섬유가 보강효과가 더해질 수 있다. 그러나 여러 구조설계기준에서는 최소의 횡방향철근을 요구하고 있으며 초고강도강섬유보강콘크리트의 경우에도 최소의 횡방향철근량에 대한 검토는 필요하다. 특히, 재료의 특성을 반영할 경우 요구되는 이음길이 크기가 짧아지게 되므로, 이 경우 횡보강근의 배치 방법에 대한 검토도 필요하다. 본 연구에서는 짧은 이음 길이가 적용된 초고강도강섬유보강콘크리트 휨재에 횡보강근 적용시 구조 성능 변화를 검토하기 위해 6개의 휨 실험체를 계획하였다.

2. 이음 및 정착시 횡보강근의 효과

2.1 KCI Model Code(2017)

KCI model code(2017)에서는 이음 및 정착 위치에서 횡보강근의 효과를 요구정착길이를 감소시키는 데 적용하고 있다. 아래 식 (1)에서 횡보강근의 효과는 횡방향철근지수 K_{tr} 로 반영하고 있으며, K_{tr} 은 식 (2)를 통해 산정할 수 있다.

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

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

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, 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 의미하며, 쪼개질 가능성이 있는 평면을 따라 정착되거나 이어지는 철근 또는 철선의 수를 의미한다. 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. 이음 길이는 A급, B급 이음으로 구분하여 정착길이에 대하여

각각 1.0과 1.3을 곱하여 산정한다.

2.2 EUROCODE2(2005)

유로코드는 극한부착응력의 크기를 산정하는 식을 제공하고 있으며, 극한부착응력길이를 사용하여 정착길이를 결정하는 방법을 사용하고 있다. 리브가 있는 이형철근에 대한 극한부착응력의 크기는 식 (3)을 통해 결정할 수 있다.

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

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. 식 (3)에서 정의된 극한부착응력을 기반으로, 식 (4)를 통해 요구정착길이 $l_{b,rqd}$ 를 산정하고, 이 값에 정착되는 철근 및 주변 상재를 반영하는 계수를 적용한 식 (5)를 통해 이음 길이를 산정한다.

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

$$l_0 = \alpha_1\alpha_2\alpha_3\alpha_5\alpha_6l_{b,rqd} \geq l_{0,min} \quad (5)$$

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

식 6은 최소요구이음길이를 의미한다. 식 (4)에서 ϕ 는 철근의 직경, σ_{sd} 정착이 시작되는 위치에서 철근에 작용하는 설계 응력의 크기를 의미하며, 식 (5)에 사용된 계수들 α_1 , α_2 , α_3 , α_5 그리고 α_6 는 각각 철근의 형태, 콘크리트 피복, 일반철근의 구속효과, 용접철근의 구속효과 그리고 횡압력에 의한 구속효과를 의미한다. 횡방향철근의 구속효과는 계수 α_3 로 반영하며 아래 식 (7)을 통해 결정된다.

$$\alpha_3 = 1 - K\lambda \quad (7)$$

이 때 α_3 는 0.7보다 크거나 같고 1.0보다 작거나 같다. K 는 구속철근의 위치에 따른 것으로 구속철근이 이음되는 철근의 양측을 감싸는 형태일 경우 0.1을 사용하고 $\lambda = (\Sigma S_{st} - \Sigma A_{st,min}) / A_s$ 로 결정된다. 이 때 ΣA_{st} 는 설계 정착 길이 l_{bd} 내에 배치된 횡방향철근의 면적, $\Sigma A_{st,min}$ 은 최소 횡방향철근의 양으로 보의 경우 $0.25A_s$ 를 적용하고, 슬래브의 경우 0을 사용한다.

2.3 KICT Recommendation(2012)

초고성능콘크리트 K-UHPC 구조설계지침(2012)은 KCI Model Code의 설계방법론을 따르고 있다. 기본정착길이의 개념을 적용함에 따라 횡방향철근의 영향을 직접적으로 반영하

지는 않고 있으나 최소철근량의 횡방향철근이 배치될 수 있도록 정하고 있다. 기본정착길이는 식 (8)을 통해 결정할 수 있다.

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

여기서 d_b 는 철근의 직경, f_{yk} 는 철근의 항복강도 특성값, f_{ck} 는 K-UHPC의 압축강도 특성값 그리고 ϕ_m 은 재료저감계수로 0.77을 사용할 것을 제안하고 있다. 정착길이 산정식에 대한 보정계수는 D19 이하의 직경을 가진 철근에 대해 철근상세에 대한 기준을 만족시킬 경우 0.8α 를, 상세 기준 불만족 시에는 1.2α 를 적용한다. D22 이상의 직경을 가진 철근에 대해서는 각각 α 와 1.5α 를 사용한다. 이 때 α 는 상하부 철근의 배치 위치계수를 의미하며 상부철근에 대해서는 $\alpha = 1.3$ 을 적용하고 기타 철근에 대해서는 $\alpha = 1.0$ 을 적용한다. 인장이형 철근 이음 길이는 KCI model code와 동일한 방법을 사용하여 결정하며, 최소 겹침이음 길이는 KCI model code와 달리 100mm를 적용하도록 권고하고 있다.

2.4 AFGC Recommendation(2013)

AFGC의 초고성능콘크리트 설계권고안에서는 섬유와 피복 탈락 방지 효과를 명시하고 있다. EC2와 동일한 형태의 이음 설계기준을 사용하고 있으나 재료강도를 반영하여 극한부착강도 산정식을 조정하였다. 해당 설계권고안의 극한부착강도의 산정식과 최소이음길이 산정식은 식 (8) 및 (9)와 같다.

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

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

여기서 η_1 과 η_2 는 EC2에서 사용된 계수와 동일하며, η 는 이형 철근이 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. 이음길이의 산정시 횡방향철근의 효과에 대해서는 아직 정량적인 결정을 하기에는 충분하지 못한 실험 결과들이 보고되어 있는 상황이기때문에 EC2의 설계방법을 따를 것을 권고하고 있다.

3. 실험계획

3.1 변수 및 실험체 상세

본 연구에서는 강섬유와 이음구간 내의 횡방향 구속요소들이 초고강도콘크리트 부재의 휨성능에 미치는 영향을 검토하기 위해 휨과괴가 유도될 수 있는 휨부재를 제작하였고 이들에 대한 4점 가력 실험을 수행하였다. 주요 변수는 AFGC recommendation(2013)에서 언급한 바와 같이 횡방향의 피복 탈락에 영향을 주는 인자인 강섬유의 혼입량과 횡방향철근의 유무로 결정하였다. 매트릭스의 설계기준 압축강도는 180MPa, 철근의 설계기준 항복강도는 주인장철근과 압축철근 그리고 횡방향철근 모두 500MPa로 계획하였다. 겹침이음된 실험체의 겹침이음길이는 220mm로 계획하였다.

섬유의 보강성능은 일반적으로 혼입량의 크기에 따라 달라지므로 강섬유의 혼입률을 부피비로 0%, 1%, 2%로 계획하였으며, 횡방향철근은 겹침이음 길이의 양단과 중앙부를 구속할 수 있도록 100mm 간격으로 계획하였다. 각 실험체의 상세를 Table 1과 Fig. 1에 각각 나타내었다.

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]	[mm]	[MPa]	[%]	[mm]	
H-0-0						173.3					0	-	-
H-0-V2						178.5					2	13	0.2
H-10db-0	220	255	300	2400	220	173.3	2-D22	530	D10@100	541	0	13	0.2
H-10db-V1						174.0					1		
H-10db-V2						178.5					2		
H-10db-S						173.3					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

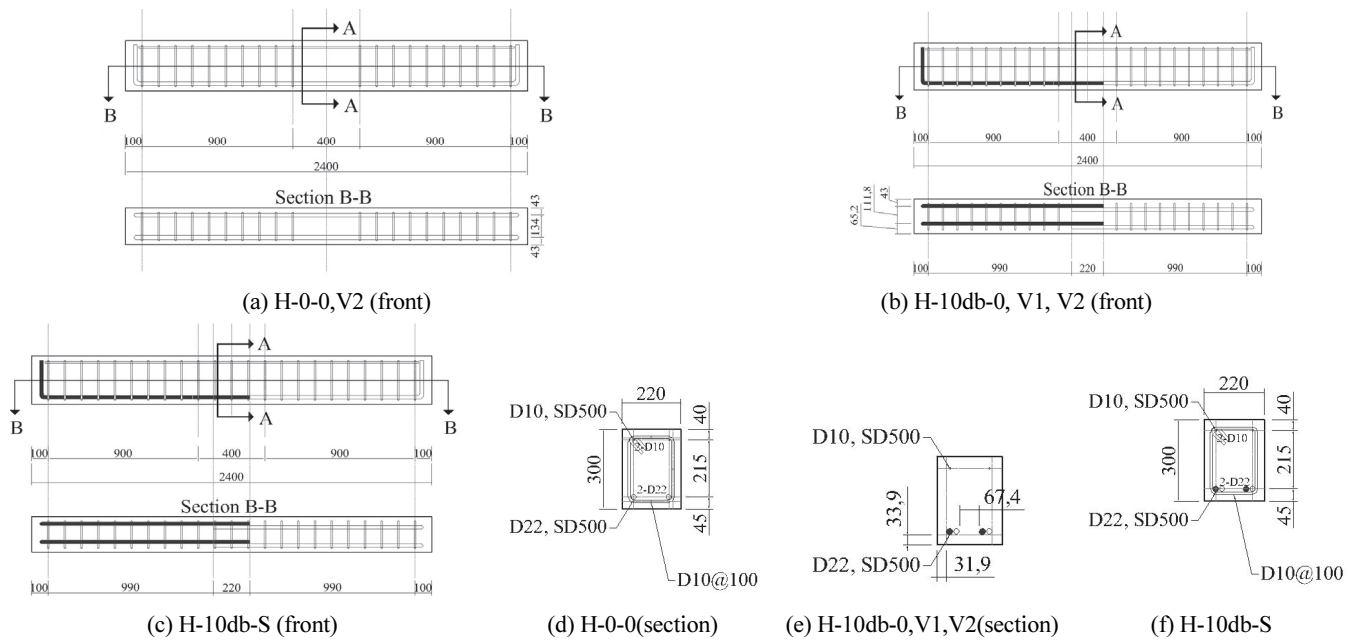


Fig. 1 Details of test specimens (Unit : mm)

실험체명은 실험체에 사용된 매트릭스의 설계기준압축강도-겹침이음 길이-횡방향 보강량의 순으로 구분하여 Table 1에 나타내었으며, 횡방향보강량의 크기는 보강되지 않은 경우 0, 1% 부피비의 강섬유로 보강된 경우 V1, 2% 부피비의 강섬유로 보강된 경우 V2로 표현하였으며, 횡방향철근만 배치된 경우에는 S로 표현하여 구분하였다.

150MPa 이상의 초고강도 수준의 설계기준 압축강도의 확보를 위해 RPC(Reactive Powder Concrete)개념이 적용된 UHPC(Ultra-High-Performance Concrete)로 실험체를 제작하였으며, 증기양생을 통해 강도를 확보하였다. 강섬유로 혼입된 실험체에 사용된 강섬유는 직선형, 길이는 13mm, 직경은 0.2mm인 것을 사용하였다. 제조처에서 제공한 인장강도의 크기는 2800MPa로 확인되었다.

실험체 제작에 사용된 콘크리트의 재료특성 중 압축강도는 KS F 2405에 의한 높이 200mm, 지름 100mm의 원주형 공시체를 통해 확인되었으며, 인장강도는 150×150×550mm 크기의 프리즘에 대한 3점 휨가력 시험을 통해 확인되었다. 실험체의 제작에 사용된 콘크리트의 배합비는 Table 2에 정리하

여 나타내었으며, 압축 및 휨인장강도 시험 결과를 함께 정리하여 나타내었다.

3.2 가력 및 측정계획

휨모멘트의 지지능력에 대한 겹침이음부의 성능을 평가하기 위해, 이음 구간에 일정한 크기의 모멘트가 작용하도록 Fig 2에 나타난 바와 같은 4점 가력 실험을 수행하였다. 사용한 액츄에이터의 용량은 1,000kN 이었으며, 최대 강도 발현 이후의 하중지지능력 측정이 가능할 수 있도록 분당 1mm 속도의 변위제어로 가력하였다. 실험체의 처짐은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 실험체 하부에 설치한 LVDT를 통해 측정될 수 있도록 하였다.

실험체의 처짐중립축의 변화를 검토하기 위하여 압축력으로 예상되는 측면 콘크리트 표면과 압축 연단에 변형률 측정 게이지를 부착하였으며, 철근의 부착응력에 의한 균열 발생 시점의 검토를 위해 실험체 바닥면에 변형률 측정 게이지를 부착하였다. 실험체의 측면 및 바닥면에 부착한 변형률 측정 게이지의 위치를 Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)에 각각 나타내었다.

Table 2 Mix proportions and mechanical properties of concrete

	Water	Cement	Silica Fume	Filler	Sand	Steel Fiber	Compressive strength	Elastic modulus	Flexural Strength
$V_f = 0\%$						-	173.3	52,046	
$V_f = 1\%$	170	799.5	199.9	239.9	879.5	78	174.0	51,253	9.8
$V_f = 2\%$						156	178.5	53,336	13.2

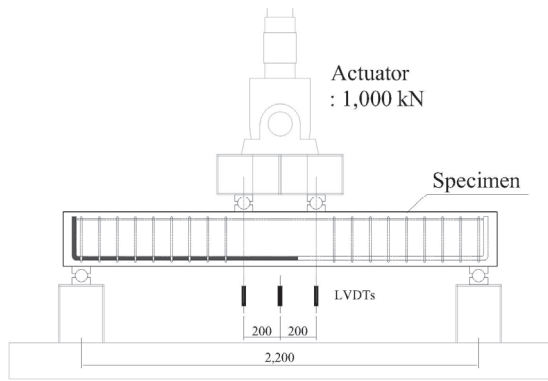
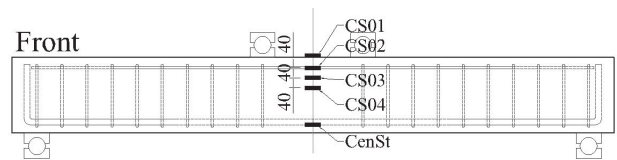
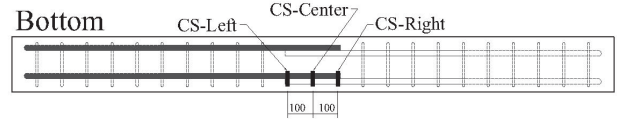


Fig. 2 Test setup and deflection measurement plan



(a) front surface of test specimens



(b) bottom surface of test specimens

Fig. 3 Strain measurement

4. 실험결과

4.1 파괴양상

휨모멘트에 대한 겹침 이음부의 지지능력을 검토하기 위해 모든 실험체들은 휨파괴가 발생하도록 설계되었다. 실험 결과 모든 실험체들이 휨파괴 되었고 최종 파괴 상태를 Photo 1에 정리하여 나타내었다.

철근이 이음되지 않은 실험체인 H-0-0과 H-0-V2는 모두 전형적인 휨파괴 경향을 나타내었다. 다만 극한상태에서 섬유가 보강되어 있지 않은 경우 보 상부 콘크리트의 압괴로 하중 지지능력을 상실하였으나, 강섬유로 보강된 경우 초기 균열의 균열폭 확대로 최종파괴에 이르는 것을 확인하였다.

Photo 1(c), (d), (e) 그리고 (f)에는 이음길이가 10db인 실험체들을 최종 파괴 상태를 나타내었다. 강섬유가 혼입되지 않은 H-10db-0 실험체는 초기 균열의 가력 지점 하부 발생 이후 보의 중앙부에서 균열이 발생하였다. 이후 주인장철근을 따라 수평 방향의 균열이 발생하였고 급작스러운 균열의 진전과 함께 하중지지능력을 상실하였다.

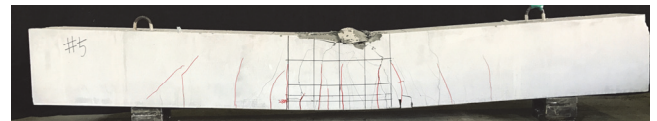
이음된 실험체에 강섬유로 보강된 H-10db-V1과 V2는 유사한 파괴 패턴이 나타났다. 가력 위치에서 초기 휨균열이 발생한 이후 이음된 철근 끝단에서 균열이 발생하였으며, 해당 균열은 대각방향으로 진전되고, 중앙부에서 보의 상부로 진전되면서 균열폭이 확장되며 최종파괴되었다.

횡방향철근으로 보강된 H-10db-S는 H-10db-0과 유사한 균열 패턴으로 파괴되었다. 가력지점 휨균열 발생, 수평방향 균열 발생, 중앙부 휨균열 진전의 순서로 나타났으며, H-10db-0과는 다르게 수평균열 발생시 하중지지능력을 바로 상실하지 않고 수직방향의 균열 진전이 일부 나타난 뒤 상부에서의 수평 방향 균열이 발생하며 최종 파괴되었다.

4.2 하중-처짐 관계

Fig. 4의 (a)와 (b)에 섬유에 의한 구속 효과의 검토와 스텐

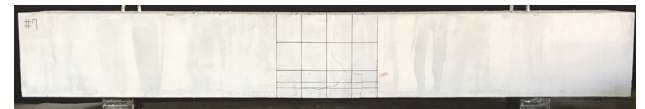
럽에 의한 구속효과의 변화를 확인하기 위한 작용하중-중앙부 처짐 사이의 관계를 나타내었다. 작용된 하중의 크기는 가력장치에 설치된 로드셀을 통해 측정하였다. 측정된 최대하중과 최대처짐 그리고 항복시의 하중과 항복시의 처짐은 Table 3에 정리하여 나타내었다. 이 때 철근의 항복은 Fig. 3(a)에 나타나있는 실험체 정면에 부착한 변형률 측정 게이지로 측정된 변형률에 기반한 철근 위치에서의 변형률 추정을 통



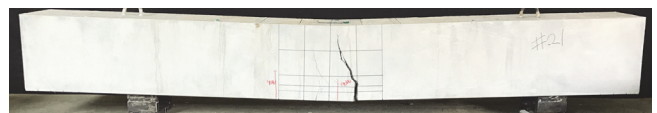
(a) H-0-0



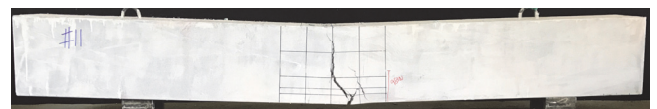
(b) H-0-V2



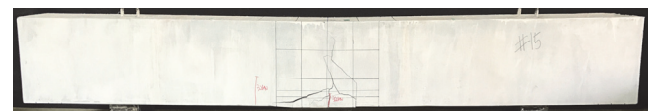
(c) H-10db-0



(d) H-10db-V1



(e) H-10db-V2



(f) H-10db-S

Photo 1 Failure pattern of test specimens

Table 3 Test results

Specimens	δ_y [mm]	P_y [kN]	δ_{max} [mm]	P_{max} [kN]	μ
H-0-0	8.44	199.56	52.04	270.02	6.17
H-0-V2	9.22	214.21	17.67	340.15	1.92
H-10db-0	-	-	4.96	126.00	-
H-10db-V1	-	-	7.41	242.68	-
H-10db-V2	9.07	316.54	9.37	318.74	1.03
H-10db-S	-	-	5.19	118.4	-

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, μ : displacement ductility factor ($= \delta_{max} / \delta_y$)

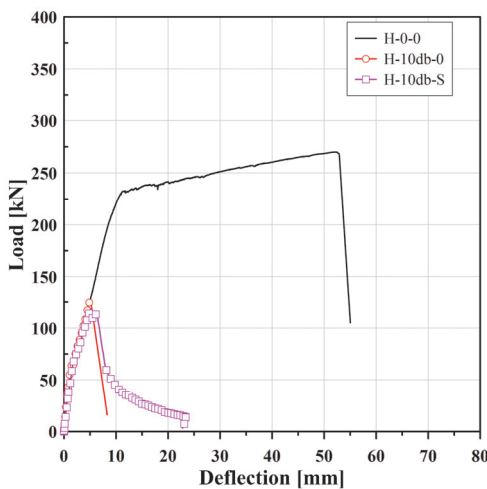
해 이루어졌다.

Fig. 4에서 확인할 수 있는 바와 같이 이음되지 않은 두 실험체는 전형적인 휨거동을 경험하는 것을 확인할 수 있었고, 섬유유 유무에 따라 철근의 항복 이후 거동이 달라지는 것을 확인할 수 있었다. 섬유유의 혼입은 최대강도의 발현 이후 완만한 기울기의 하중지지능력의 감소 형태로 파괴 패턴을 변화시켰다. 이음된 실험체에 대하여, 섬유유가 혼입되지 않은 경우 Fig. 4(a)에서 확인할 수 있는 바와 같이 급격한 하중지지능력의 상실을 경험하였으며 Photo 1(c)에서 확인 가능한 바와 같이 주인장철근의 방향으로 균열이 최대하중을 경험함과 동시에 발생하였다.

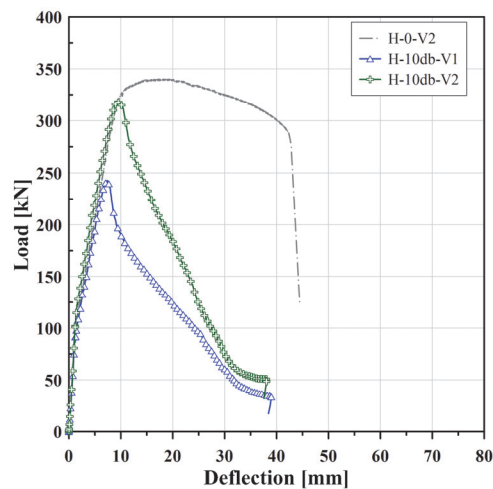
횡보강근으로 보강되어 있는 경우 최대하중지지능력에 도달했을 때 Photo 1(f)에서 확인할 수 있는 주인장철근의 방향으로 균열이 발생하였다. 하중지지능력의 경험 이후 하중지지능력의 상실이 서서히 나타나면서 주인장균열 방향의 균열

폭 확대가 관찰되었고 수직방향으로 균열이 진전되었다. 이때 하중지지능력의 크기는 보강되지 않은 실험체보다 더 낮은 것으로 나타났다.

섬유유가 혼입된 경우 Fig. 4(b)에 나타난 바와 같은 모든 실험체들이 하중지지능력의 급작스러운 상실을 경험하지 않는 것으로 나타났다. 파괴 형태와 연관되었을 때, 섬유유가 주인장철근 방향의 균열을 방지함으로써 콘크리트 내에서 철근이 뽑히면서 잔류 강도를 보유할 수 있게 해준 것으로 판단된다. 섬유유의 혼입량이 클수록 하중지지능력이 증가하는 것을 확인할 수 있었고, 섬유유로 혼입되지 않은 실험체인 H-10db-0에 비하여 1% 부피비의 섬유유로 혼입된 H-10db-V1은 1.92 배의 최대하중 크기의 증가가 나타났고 2% 부피비의 섬유유로 혼입된 H-10db-V2는 2.53배의 최대하중 크기의 증가가 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 이음된 실험체를 중연성지수의 평가가 가능한 실험체는 철근이 항복한 H-10db-V2뿐이었으며, 이 경



(a) Specimens without steel fiber



(b) Specimens with steel fiber

Fig. 4 Load-deflection relation of test specimens

우에도 이음되지 않은 실험체에 비해 크게 낮은 연성지수를 보유하게 되는 것으로 나타났다.

5. 콘크리트피복에 대한 구속효과

실험체의 파괴 패턴과 하중지지능력을 검토한 결과 이음부에서의 콘크리트피복에 대한 구속요소의 종류에 따라 휨성능에 차이가 있는 것을 확인할 수 있었다. 파괴패턴에서 관찰한 측면에서 주인장철근 방향의 균열 발생시점과 함께 하부 콘크리트 피복의 균열 발생시점에 대한 검토를 위해 Fig. 3(b)와 같이 하부표면에 변형률 측정 게이지를 설치하여 하부피복의 파괴 시점을 관찰하였다. 각 실험체에 대하여 변형률을 측정 한 결과를 Fig. 5에 부착 위치에 따라 나타내었다.

구속요소가 제공되지 않은 H-10db-0의 경우 최대하중의 경험시까지 하부 표면에서의 변형률의 큰 변화가 나타나지 않은 상태인 것을 확인할 수 있었다. 이는 균열의 발생에 대한 검토 결과에서도 확인할 수 있는 바와 같이 콘크리트의 인장응력 하에서의 급격한 파괴가 그대로 반영되어 나타난 결과로 판단된다.

철근으로 보강된 경우 최대하중의 경험과 함께 하부표면의 변형률 증가가 두드러지게 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 음의 방향 변형률은 측정 위치가 아닌 다른 위치에서의 균열이 먼저 발생하여 나타난 현상으로 판단되며, 부착응력의 크기가 클 것으로 판단되면 이음 단부에서 더 큰 변형이 콘크리트 표면에서 나타나는 것을 확인할 수 있었다.

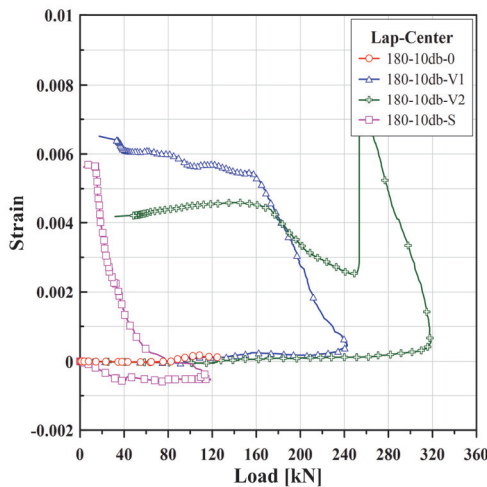
강섬유의 보강에 의한 콘크리트 하부 표면에서의 변형률 변화는 섬유가 보강되지 않은 실험체들과 다르게 최대하중의 경험 이전 완만한 변형률의 증가를 보이는 것을 확인할 수 있

었다. 이는 인장응력에 대한 섬유보강콘크리트의 저항력 증진과 함께 균열 발생시의 가교작용에 의한 균열폭 확장의 급격한 증가 방지 효과가 이음 구간에서 이음된 철근의 방사 응력의 작용 방향에 대해서도 나타나는 것을 의미한다. 이 현상은 큰 부착응력이 작용하는 이음단부에서 더 뚜렷하게 나타나는 것을 통해 큰 부착응력에 대하여 강섬유가 효과적인 구속요소로 사용될 수 있음을 의미하는 것으로 판단할 수 있다.

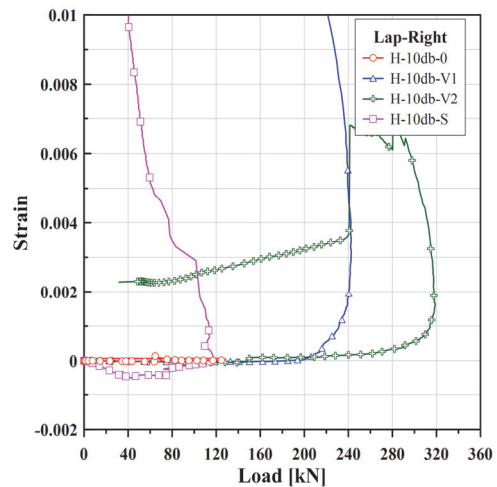
6. 결론

접침이음된 초고강도 콘크리트 휨재에 대한 이음부 구속요소를 주요 변수로 실험을 수행한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- 1) 이음되지 않은 초고강도 콘크리트 보의 휨실험 결과 강섬유의 혼입은 휨강도의 증진을 야기하고 최대하중의 조기 발현 및 최대하중 발현 이후의 완만한 하중저하 현상이 일어나는 데에 기여하는 것으로 나타났다.
- 2) 이음이 적용되고 구속요소가 제공되지 않은 실험체의 경우 급작스러운 하중지지능력의 상실이 최대하중의 경험과 함께 나타나는 것으로 확인되었다.
- 3) 철근으로 횡구속된 경우 횡구속되지 않은 실험체에 비하여 더 낮은 하중에서 파괴되었다. 이는 스테럽의 배치에 따른 콘크리트 피복의 감소에 의한 변화로 판단된다. 반면 파괴 이후 하중지지능력의 상실 과정에서는 최종파괴시까지 완만한 하중지지 능력의 상실을 경험하였다.
- 4) 강섬유로 보강된 경우 이음된 실험체의 하중지지능력이 크게 증진되었다. 스테럽에 의한 구속효과가 하중지지능력의 상실과 함께 처짐량의 증가로 나타난 것처럼 강



(a) at the center of lap region



(b) at the end of the lap region

Fig. 5 Strain measurements at bottom surface of test specimens

섬유도 콘크리트 피복의 구속을 통해 큰 처짐을 발생시키는 것을 확인할 수 있었다.

- 5) 철근이 이음된 철근 주위의 방사응력에 대해 저항하는 능력에 비해 강섬유가 인장철근을 중심으로 한 방사 응력에 저항하는 데에 더 효과적인 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(21CTAP-C164325-02).

References

1. Richard, P., and Cheyrez, M. H. (1994), Reactive powder concretes with high ductility and 200-800 MPa compressive strength, *Special Publication*, 144, 507-518.
2. KCI (2017), KCI Model Code 2017. Seoul, Korea; Kimoondang Publishing Company. Korea Concrete Institute(KCI). 637(In Korean),
3. Code, P. (2005), Eurocode 2: design of concrete structures-part 1-1: general rules and rules for buildings. British Standard Institution, London.
4. Tepfers, R. (1979), Cracking of concrete cover along anchored deformed reinforcing bars, *Magazine of Concrete Research*, 31(106), 3-12.
5. ACI Committee 408 (2003), Bond and Development of Straight Reinforcing Bars in Tension (ACI 408R-03), American Concrete Institute, Farmington Hills, MI.
6. Orangun, C. O., Jirsa, J. O., and Breen, J. E. (1977), Reevaluation of Test Data on Development Length and Splices, *ACI JOURNAL, Proceedings*, 74(3), Mar., 114-122.
7. Darwin, D., and Graham, E. K. (1993a), Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars, *ACI Structural Journal*, 90(6), Nov.-Dec., 646-657.
8. Darwin, D., and Graham, E. K. (1993b), Effect of Deformation Height and Spacing on Bond Strength of Reinforcing Bars, SL Report 93-1, University of Kansas Center for Research, Lawrence, Kans., Jan., 68 pp.
9. Zuo, J., and Darwin, D. (1998), Bond Strength of High Relative Rib Area Reinforcing Bars, SM Report No. 46, University of Kansas Center for Research, Lawrence, Kans., 350 pp.
10. Zuo, J., and Darwin, D. (2000), Splice Strength of Conventional and High Relative Rib Area Bars in Normal and High-Strength Concrete, *ACI Structural Journal*, 97(4), July-Aug., 630-641.

Received : 09/18/2022

Revised : 09/23/2022

Accepted : 10/05/2022

요 지 : 본 연구에서는 초고강도 콘크리트에 적용된 겹침 이음의 안전성을 평가하기 위해 초고강도콘크리트 보의 휨성능을 평가하였다. 설계기준에서 정하고 있는 정착 길이 및 겹침이음 길이 산정식에서 겹침이음 길이에 영향을 미치는 횡보강근과 콘크리트 피복 성능의 검토가 수행되었다. 주요 변수는 콘크리트 피복의 구속 성능 증진을 위한 섬유 혼입과 횡방향철근 배치로 설정하였다. 강섬유가 혼입되었으며 1% 및 2% 부피비로 섬유의 혼입량 증가에 따른 콘크리트 피복 성능의 변화를 검토하였으며, 이음 구간 내에 간격 100mm의 D10 스티럽이 배치되도록 하였다. 실험 결과, 스티럽으로 구속된 실험체는 주인장철근 방향으로의 수평균열 진전과 함께 급격한 하중저하 현상이 나타났으며, 강섬유로 보강된 실험체의 경우 주인장철근 방향의 균열 확대가 억제되고 급작스러운 하중지지능력의 상실을 경험하지 않는 것으로 나타났다. 특히, 2%의 혼입률이 적용된 실험체의 주인장철근 위치의 변형률은 항복 변형률을 초과하는 것으로 나타났다. 콘크리트 표면에 대한 변형률 측정 결과 철근보다는 섬유가 더 콘크리트 표면의 손상을 방지하는 데에 효과적인 것으로 나타났다.

핵심용어 : 초고강도콘크리트, 강섬유보강콘크리트, 이음, 횡방향철근
