

강섬유 혼입율 및 형상비가 초고강도 콘크리트의 역학적 성질에 미치는 영향

The Effects of Mixture Rate and Aspect Ratio of Steel Fiber on Mechanical Properties of Ultra High Performance Concrete

최종구¹ · 이건철^{2*} · 고경택³Jung-Gu Choi¹ · Gun-Cheol Lee^{2*} · Kyung-Taek Koh³

(Received February 9, 2017 / Revised February 21, 2017 / Accepted February 24, 2017)

Ultra high performance concrete is inevitably used in case of skyscraper and super long span bridge. In general, the flexural and the tensile strengths of concrete are lower than the compressive strength, so brittle cracks occur and energy absorption ability is lowered. In order to solve this problem, this study is intended to examine the effect of the steel fiber volume fraction and aspect ratio on the mechanical properties of ultra high performance concrete. In series I, 20-mm straight steel fiber was added with a volume fraction of 0, 1.0, 1.3, 1.5 and 2.0%. In series II, 16-mm steel fiber was added with a volume fraction of 0, 1, and 1.5%, and then mechanical properties were examined according to aspect ratio. In the results of experiment, a difference in compressive strength was insignificant. However, regarding the flexural strength and tensile strength, as the volume fraction and aspect ratio increased, flexural performance and tensile performance improved.

키워드 : 초고강도 콘크리트, 강섬유, 형상비, 역학적 성질**Keywords :** Ultra high performance concrete, Steel fiber, Aspect ratio, Mechanical property

1. 서론

최근 건설 기술의 발전으로 대형화, 초고층화 및 초장대화의 수요가 증가됨에 따라 압축강도 100MPa 이상의 초고강도 콘크리트의 사용이 증가되고 있는 상황이다. 각종 건축·토목 구조물에 광범위하게 사용되고 있는 콘크리트는 높은 압축강도 발현 및 강성이 우수한 장점을 지닌 반면 매우 낮은 인장강도, 휨강도 및 인성으로 균열에 대한 저항성과 에너지 흡수능력이 매우 낮아 동적하중 하에서 콘크리트가 갑자기 파괴되는 취성적 성질을 나타내는 단점을 지니고 있다. 이러한 콘크리트의 단점인 취성적 성질을 연성적 성질로 유도하고 역학적 성질을 개선하기 위하여 국내·외적으로 다양한 연구가 진행되고 있으며, 대표적으로 인장강도 및 탄성률이 우수한 강섬유를 콘크리트 속에 혼입하여 인장저항 능력과 균열 저항성을 향상시키는 강섬유 보강 콘크리트(steel fiber

reinforced concrete)가 있다.

기존의 발표된 연구결과에 의하면, 강섬유 보강 콘크리트는 강섬유의 혼입율이 증가할수록 콘크리트에 분산된 섬유의 가교작용에 의해 인장강도 및 에너지 흡수능력이 향상되어, 균열의 생성 및 성장을 억제시켜 콘크리트의 구조적 안전성을 증가시키는 효과를 가지고 있는 것으로 보고되고 있다. 하지만, 과도하게 강섬유를 혼입할 시 섬유 뭉침 현상으로 작업성 확보가 어려워 오히려 콘크리트의 성능이 저하될 수 있어 사용이 제한적인 단점을 지니고 있다. 이에 따라 국내·외에서 강섬유보강 콘크리트의 장점은 극대화하면서 동시에 작업성을 확보할 수 있는 방안에 대해 다양한 연구가 활발히 진행되고 있다.

이와 관련하여 국내에서는 강섬유와 PET섬유를 동시에 혼입한 하이브리드 섬유보강 콘크리트의 역학적 특성을 검토한 결과 섬유 혼입율이 1% 이상을 초과할 시 섬유뭉침 현상이 발생하지만, 섬유

* Corresponding author E-mail: glee@ut.ac.kr

¹한국교통대학교 건축학부 공학석사 (Department of Architecture, Korea National University of Transportation, Chungcheongbuk-do 27469, Korea)²한국교통대학교 건축학부 교수 (Department of Architecture, Korea National University of Transportation, Chungcheongbuk-do 27469, Korea)³한국건설기술연구원 연구위원 (Structural Engineering Research Division, KICT, Gyeonggi-do 10223, Korea)

혼입율에 따른 압축강도의 변화는 적으며, 혼입율이 증가할수록 휨강도가 Plain에 비해 최대 45%가 증가하는 것으로 보고하였다 (Kim 2014). 국외의 연구 내용(Zhang et al. 2010)에서는 강섬유 혼입율이 고강도 콘크리트의 압축강도 및 인장강도 미치는 영향에 대해 검토하여 강섬유 혼입시 Plain 콘크리트 보다 최대 15.5%의 압축강도가 증가하고, 강섬유 혼입율이 증가할수록 인장강도가 증가하여 혼입율이 1.5%일때 최대 인장강도를 발현하는 것으로 보고 하였다.

이와 같이 국내외에서 고강도콘크리트의 역학적 성질을 개선하기 위한 연구가 진행되고 있으며 특히, 국내에서 설계기준강도 100MPa 이상의 초고성능 콘크리트 개발을 위한 연구로 최근 200MPa급 사장교용 초고성능 콘크리트 개발이 되었고, 초고강도 섬유 보강 콘크리트 개발 및 방호방폭용 콘크리트에 대한 연구가 진행중에 있다.

따라서, 본 연구에서는 하중 작용 시 강섬유의 혼입율 및 형상비 변화에 따라 설계기준강도 120MPa의 초고강도 콘크리트의 역학적 성질에 미치는 영향에 대해 검토하였다. 향후 시공성을 만족하며 역학적 성능을 개선시키는 초고강도 섬유 보강 콘크리트 개발에 활용하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같으며, 배합사항은 Table 2와 같다. 배합사항으로는 설계기준강도는 120MPa의 초고강도 콘크리트로 설정하였고, 목표 슬럼프 플로는 사전연구를 통하여 강섬유 혼입율이 1.5%일 때를 기준으로 650±50mm의 고유동 범위로 설정하였으며, 목표 공기량은 4.5±1.5%를 만족하도록 배합을 하였다.

실험 변수로서 강섬유 혼입율 변화 조건인 시리즈 I과 강섬유 형상비 변화 조건인 시리즈 II로 구분하여 검토하였다. 즉, 시리즈 I에서는 강섬유의 직경이 0.2mm이고, 강섬유의 길이가 20mm로 형상비가 100인 직선형 강섬유에 대하여, 콘크리트의 체적비 대비 0, 1.0, 1.3, 1.5, 2.0%를 혼입하여 5수준으로 실시하였다. 시리즈 II에서는 직경이 0.2mm이고, 강섬유의 길이가 16mm로 형상비 80인 직선형 강섬유에 대하여, 콘크리트의 체적비 대비 0, 1.0, 1.5%를 혼입하여 3수준으로 실시하였다.

실험사항으로 굳지 않는 상태로는 슬럼프 플로, 공기량 실험을 측정하고, 경화 상태로는 압축거동, 휨인장거동, 직접인장거동을 평가하였다.

Table 1. Experimental plan

Factor		Levels		
Mixture	Tagret compressive strength(MPa)	1	120	
	Target slump flow (mm)	1	650±50	
	Target air content(%)	1	4.5±1.5	
	Series I	Diameter (mm)	1	0.2
		Length(mm)	1	20
		Replacement ratio(%)	5	0, 1.0, 1.3, 1.5, 2.0
	Series II	Diameter (mm)	1	0.2
		Length(mm)	1	16
		Replacement ratio(%)	5	0, 1.0, 1.5
	Curing condition(°C)	1	After high temperature steam curing for 48 hours (air dry curing)	
Experiment	Fresh state properties	2	Slump flow air content	
	Hardened state properties	3	Compressive behaviors Flexural behaviors Tensile behaviors	

Table 2. Mix proportions

Division	Steel fiber replacement ratio(%)	Unit mass(kg/m ³)				
		Water	Pre-mixing binder	Sand	SP	AA
Series I (20mm)	Vf = 0, 1.0, 1.3, 1.5, 2.0	209	1,258	847	17.7	0.7
Series II (16mm)	Vf = 0, 1.0, 1.5	209	1,258	847	17.7	0.7

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 프리믹싱 결합제는 주 성분이 보통포틀랜드 시멘트, 고로슬래그미분말, 지크로늄미분말로 구성되어 있고, 각각의 물리적·화학적 성질은 Table 3 및 4와 같다. 또한, 국내 D사에서 제조된 충전재, 팽창재, 수축저감제를 첨가하여 프리믹싱 결합제로 사용하였다. 잔골재는 울산 울주군에서 생산된 S사의 호주산 규사를 사용하였고, 물리적 성질은 Table 5와 같다. 강섬유는 Z사에서 제조된 직선형 강섬유로서 물리적 성질은 Table 6과 같고, 강섬유의 샘플 사진을 Fig. 10에 나타내었다. 콘크리트의 유동성을 증가시키기 위해 폴리칼본산계 고성능 감수제를 사용하였으며, AE제 병용 시 미세기포의 연행을 방지하기 위하여 실리콘계 소포제를 사용하였다.

Table 3. Physical properties and Chemical composition of cement and blast furnace slag

Table	Specific surface area (cm ² /g)	Density (g/cm ³)	Chemical composition(%)					
			SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃
C	3,413	3.15	21.01	6.40	3.12	61.33	3.02	2.30
BS	3,850	2.13	34.2	14.1	0.72	6.49	6.25	1.84

Table 4. Physical properties and chemical composition of zirconium powder

Specific surface area (m ² /g)	Moisture absorption (cm ³ /g)	Moisture desorption (cm ³ /g)	Chemical composition(%)		
			SiO ₂	ZrO ₂	MgO
8.76	10.80	2.00	95.60	3.90	0.02

Table 5. Properties of fine aggregates

Density (g/cm ³)	Yellowness	Oil absorption (g/100g)	Mohs Hardness	pH	Average size(μm)
2.63	1.71	28.0	7.0	6.5	2.2

Table 6. Physical properties of steel fiber

Diameter (mm)	Length (mm)	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)
0.2	20	100	2,700
0.2	16	80	2,700

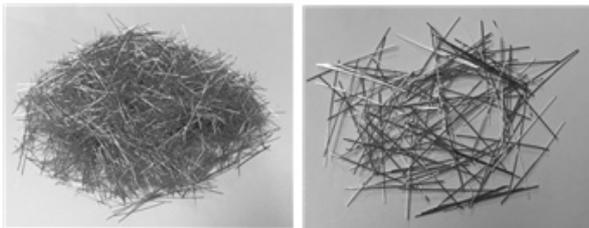


Fig. 1. Straight steel fiber

2.3 시험방법

본 연구의 시험방법으로 시험체 양생은 2~3일 동안 습윤 양생을 실시한 후 탈형을 실시하였다. 탈형 된 시험체는 48시간 동안 90±2℃의 고온에서 증기양생을 실시한 후 소정의 재령 일까지 20±2℃의 기건 상태에서 양생 후 시험을 실시하였다. Fig. 2는 굳지 않은 상태의 시험방법을 나타낸 것이고, Fig. 3은 경화 상태의 시험방법을 나타낸 것이다. 굳지 않은 상태로 슬럼프 플로 시험은

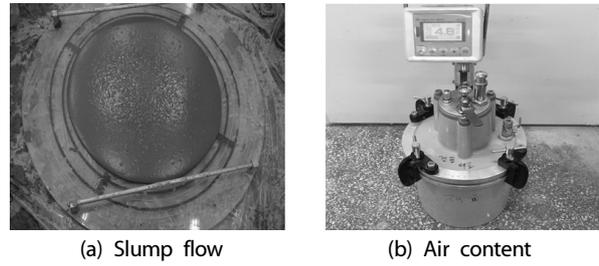
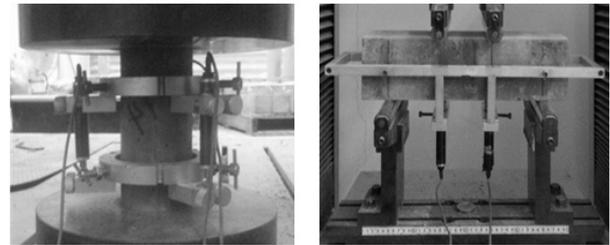
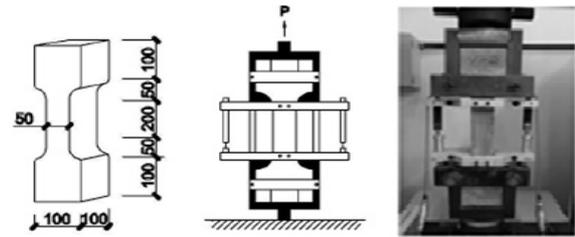


Fig. 2. Test methods for the fresh state



(a) Compressive behaviors (b) Flexural behaviors



(c) Direct tensile behaviors

Fig. 3. Test methods for the hardened state

KS F 2594에 의거하여 실시하였고, 공기량 시험은 KS F 2421의 시험방법에 의거하여 측정하였다. 경화 상태의 압축거동 평가로 압축강도시험은 KS F 2405에 의거하여 실시하였고, 탄성계수 시험은 KS F 2438에 의거하여 실시하였다. 휨인장거동 평가로 휨인장강도시험은 KS F 2566에 의거하여 실시하였고, 휨인성 평가로는 ASTM C 1018 및 ASTM C 1609에 의거하여 실시하였다. 직접인장거동 평가는 한국건설기술연구원에서 제안하는 강섬유 보강 콘크리트 시험방법에 의거하여 덩벨형 시험체를 제작 후 300kN 용량의 만능재료 시험기를 사용하여 0.4mm/min의 하중 재하속도로 측정하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트 특성

3.1.1 슬럼프 플로 및 공기량

Fig. 4는 강섬유 혼입률 및 형상비에 따른 슬럼프 플로 및 공기

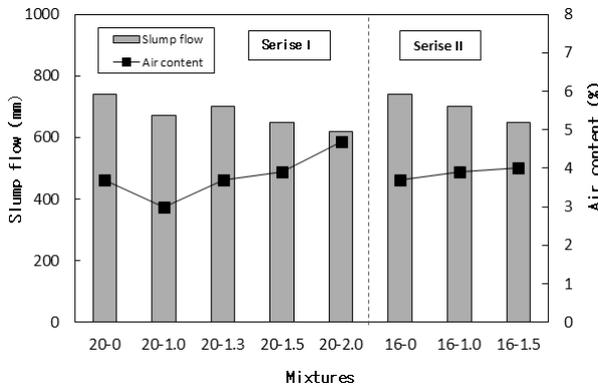


Fig. 4. Slump flow and air content of fresh mortar

량 결과를 나타낸 것이다. 먼저, 슬럼프 플로 시험 결과 강섬유가 혼입되지 않은 Plain 배합의 경우 740mm의 높은 유동성을 나타낸 반면, 강섬유가 혼입된 배합은 강섬유 혼입율이 증가할수록 슬럼프 플로 값이 반비례적으로 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 강섬유 혼입율이 증가할수록 시멘트 페이스트와 섬유간의 접촉 면적이 증가하게 되어, 굳지 않은 콘크리트의 점도가 향상되어 슬럼프 플로우가 저하된 것으로 판단된다. 한편, 강섬유 형상비가 작을수록 다소 유동성이 증가하는 것으로 나타났지만, 그 차이는 미비한 것으로 나타났다.

공기량의 경우 강섬유의 혼입물 및 형상비가 증가할수록 시멘트 매트릭스와 강섬유 사이에서 부착계면 발생으로 인한 공극이 형성되어 공기량이 증가하는 경향을 나타내었다. 그러나, 본 연구의 배합에서 사용된 소포제로 인하여 강섬유에 의해 발생하는 다량의 공기량을 제어하여 모든 배합에서 목표 공기량 범위인 $4.5 \pm 1.5\%$ 에 만족하는 것으로 나타났다.

3.2 경화 콘크리트 특성

3.2.1 압축거동

Fig. 5는 강섬유 혼입물 및 형상비에 따른 압축강도 및 탄성계수 시험결과를 나타낸 것이다. 기존의 연구문헌(Kim et al, 2009)에 따르면 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도는 강섬유의 형상비 및 형상에 따라 10% 내외로 영향을 준다고 보고되기도 하지만, 대부분의 연구자들은 강섬유의 혼입율이 증가함에 따라 압축강도에 미치는 영향은 적은 것으로 보고하고 있다. 본 연구에서도 기존연구 결과와 유사한 경향을 나타내었다. Plain 배합을 포함한 강섬유 보강 콘크리트 배합 모두 목표 설계기준강도인 120MPa 이상을 나타내었지만 실험적 오차범위에 해당하는 것으로 판단되어, 강섬유 혼입물 및 형상비가 강섬유 보강 콘크리트의 압축강도에 미치

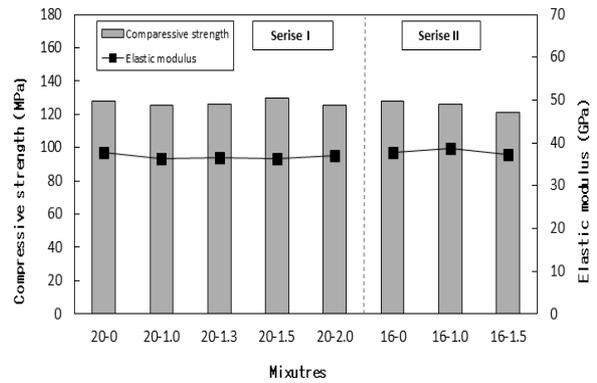


Fig. 5. Compressive strength and elastic modulus

는 영향은 미미한 것으로 판단된다.

또한, 탄성계수의 경우 압축강도의 영향을 가장 많이 받기 때문에, 대부분의 배합에서 압축강도와 유사한 경향으로 36.4~38.6GPa 범위의 탄성계수를 나타내었다. 이처럼 혼입물 및 형상비에 따른 탄성계수의 증감차이가 일정하지 않고 비슷한 탄성계수를 나타내어, 강섬유가 탄성계수에 미치는 영향은 적은 것으로 판단된다.

3.2.2 휨인장거동

Fig. 6~9는 강섬유 혼입물 및 형상비에 따른 휨인장거동 특성을 나타낸 결과이다. Fig. 6은 휨인장강도 및 등가 휨인장강도 시험결과를 나타낸 것이다. Plain 배합은 최대 하중에 도달한 후 시험체의 중앙부 하단에 균열이 발생하여 완전히 파단되는 취성 파괴의 특성을 나타내어 8.4MPa의 낮은 휨인장강도를 나타내었다. 반면, 강섬유가 혼입된 배합에서는 강섬유 혼입율이 증가할수록 휨인장강도가 증가하며, 등가 휨인장강도 또한 비례적으로 증가하는 경향을 나타내었다. 이에 따라 Plain 배합과 대비하여, 20~2% 배합이 약 4.2배 이상 증가한 37.5MPa의 가장 우수한 휨인장강도를 나타내었

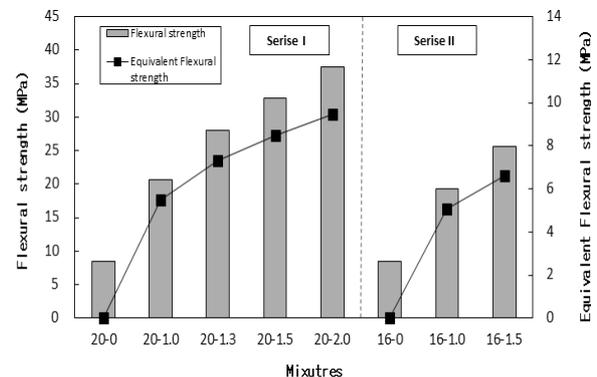


Fig. 6. Flexural strength and equivalent flexural strength

으며, 9.4MPa의 높은 등가 휨인장강도를 나타내었다. 이처럼 강섬유의 혼입율이 증가할수록 콘크리트의 휨성능이 향상되는 것은 Plain 배합과 달리 강섬유 보강 콘크리트 시험체에서 인장축에 많은 미세한 균열들이 다수 발생하며, 단위면적당 증가하는 강섬유의 뽑힘저항(pull-out)에 의해 강섬유가 균열 발생 단면내의 균열의 벌어짐을 억제하는 작용을 하여 휨성능이 향상된 것으로 판단된다.

한편, 강섬유의 혼입율은 동일하고 형상비가 다를 경우 형상비가 클수록 휨인장강도 및 등가 휨인장강도가 증가하는 것으로 나타내었다. 이에 따라 형상비가 100인 20-1.5% 배합이 형상비가 80인 16-1.5% 배합보다 휨인장강도가 7.24MPa 증가한 32.87MPa로 나타내었고, 등가휨인장강도 또한 휨인장강도 비례하여 1.8MPa이 증가한 것으로 나타내었다. 이처럼 강섬유의 형상비가 증가할수록 콘크리트의 휨인장강도가 향상되는 것은 매트릭스의 균열 발생 이후 강섬유의 길이가 긴 만큼 강섬유와 매트릭스 사이에서 부착단면이 증가하고 가교작용이 오래 동안 발휘하여 인발 에너지 증가로 인한 균열의 진전을 억제한 것으로 판단된다.

Fig. 7은 하중-처짐 곡선은 나타낸 것으로 Plain 배합의 경우 취성적 거동을 나타내어 본 결과에서 제외하였다. 이에 따라 강섬유가 혼입된 모든 배합에서 초기 균열 이전에 탄성거동을 나타내고, 전반적으로 강섬유의 혼입율이 증가할수록 초기균열이 발생한 후 콘크리트에 혼입된 섬유가 콘크리트의 인장균열의 성장을 억제하여 변형을 증가와 함께 강도가 일부 회복하여 증가하는 변형을 경화 현상이 처짐 0.3~1mm 범위에서 나타내었다. 이는 초기균열 이후 강섬유의 보강효과로 인해 균열 발생 면이 벌어짐을 억제시켜주는 등가 휨인장강도의 작용에 의한 결과로 판단된다. 이에 궁극적으로 초기균열강도 보다 최대 휨인장강도가 더큰 것으로 나타내었다. 또한, 최대 휨인장강도에 도달 후 변형을 연화거동에 의해 취성거동 대신 경사가 완만하게 감소하는 비선형적 거동과 연성적 거동특성을 나타내었다.

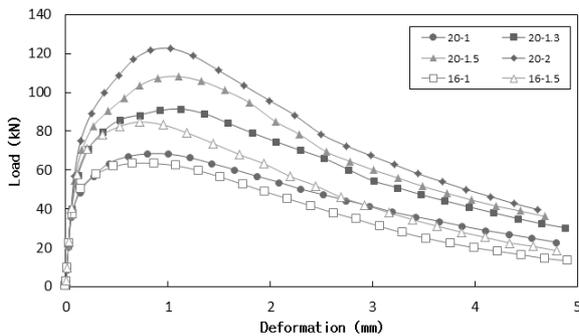


Fig. 7. Flexural strength - strain curves

한편, 형상비에 따른 변화의 차이로는 형상비가 클수록 휨인장 강도 시험체에 작용하는 하중에 대한 저항성이 증가하여 초기균열 강도 및 최대 휨인장강도가 향상되고, 이에 대응하는 변형률이 증가하는 것으로 나타내었다. 최대 휨인장강도 이후 변형을 연화거동 현상이 형상비가 클수록 크게 나타나 경사가 조금 더 완만해지는 경향을 나타내었다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 잔류강도 및 휨인성을 나타낸 것이다. 본 그래프는 하중-처짐 곡선을 기초로 하여 실선은 초기균열하중 및 최대하중에 대한 영향을 나타내고, 점선은 각각의 처짐에 대한 영향을 나타낸 것이다. 강섬유의 혼입율 증가에 따른 초기균열강도 및 이때의 처짐 능력차이는 거의 없는 것으로 나타났다. 한편, 초기 균열강도 이후 처짐 0.5mm에서 최대강도 지점까지는 변형을 경화 거동에 의한 영향으로 잔류강도, 처짐 능력 및 에너지 흡수 능력이 향상되는 것으로 나타났다. 최대강도 이후 변형을 연화거동 현상이 나타나고 처짐이 2.0mm에서 3.0mm로 증가함에 따라 비례적으로 잔류강도는 낮아지나 처짐 능력 및 에너지 흡수 능력은 완만하게 상승하는 경향을 나타내었다. 이에 따라 강섬유 보강 콘크리트는 최대강도를 발현한 후 연성적인 거동을 나타내며, 강섬유의 혼입율이 2%일 때 가장 우수한 휨인장거동 특성을 나타내었다.

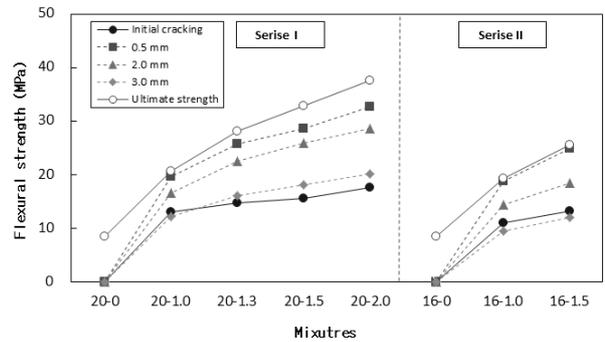


Fig. 8. Retained strength

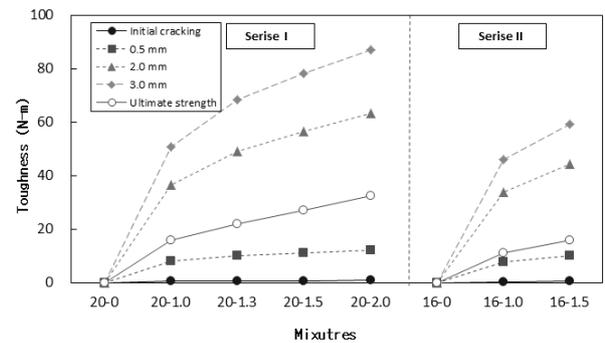


Fig. 9. Toughness

형상비에 따른 차이로는 형상비가 클수록 휨인장강도, 처짐 능력 및 에너지 흡수 능력이 향상되는 것으로 나타났으며, 최대강도 이후 변형을 연화거동에서의 에너지 흡수능력 또한 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 강섬유의 혼입 및 형상비가 증가할수록 내하력 증진효과에 의하여 휨인장강도, 처짐 능력 및 에너지 흡수 능력이 향상되어 취성적 거동 대신 우수한 연성적 거동을 하는 것으로 나타내었다.

3.2.3 직접인장거동

Fig. 10~12는 강섬유 혼입 및 형상비에 따른 직접인장거동 특성을 나타낸 결과이다. Fig. 10은 직접인장강도 및 신장량을 나타낸 것이다. 휨인장거동과 유사한 경향으로 강섬유의 혼입률이 증가할수록 직접인장강도와 이때 대응되는 신장량이 증가하는 것으로 나타났다. 이에 따라 Plain 배합은 6.1MPa의 낮은 인장강도를 나타낸 반면, 강섬유가 혼입된 20-2% 배합은 약 2배 이상 증가한 12.1MPa의 높은 직접인장강도와 0.566mm의 신장량을 나타내었다.

형상비에 따른 차이로는 형상비가 클수록 장력에 대한 저항도가 증가하여 직접인장강도 및 신장량이 크게 향상되어 20-1.5% 배합이 16-1.5% 배합보다 약 1.4배 이상 증가한 직접인장강도 11.7MPa와 신장량 0.447mm를 나타내었다.

Fig. 11은 응력-변형을 곡선을 나타낸 것이다. 강섬유의 혼입률이 증가할수록 초기균열 발생 후 강섬유가 매트릭스 내부에서 균열의 성장을 구속하는 역할을 하여 강도가 일부 증가하는 변형을 경화현상에 의해 균열강도 보다 최대인장강도가 더 큰 것으로 나타내었다. 최대인장강도 이후 변형을 연화거동현상에 의해 취성적 파괴 대신 완만하게 파괴되는 연성적 파괴를 나타내었다. 한편, 형상비가 증가할수록 직접인장강도 및 그 때의 변형률이 증가하는 경향을 나타내었다.

Fig. 12는 직접인장거동 및 변형 능력을 나타낸 것이다. 전반적으로 강섬유 혼입률이 증가할수록 초기균열강도는 다소 증가하지만 그 때의 변형 능력은 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이러한 초기 균열강도 결과는 강섬유의 영향보다는 시멘트 매트릭스의 특성에 의한 영향이 더 크게 작용하기 때문에 강섬유의 혼입률은 초기 변형능력에 큰 영향을 주지 못하는 것으로 판단된다.

하지만, 최대 인장강도의 경우에는 초기균열 발생 후 섬유의 가교 작용에 의한 변형을 경화현상에 의해 혼입률이 증가할수록 인장강도가 증가하며 이때의 변형 능력 또한 현저히 증가되는 것으로 나타나 혼입률이 2%일 때 우수한 인장강도 및 변형 능력을 나타내었다.

형상비에 따른 차이로는 형상비가 증가할수록 초기균열강도는 다소 증가하나 그 때의 변형 능력차이는 거의 없으나, 초기균열 발생

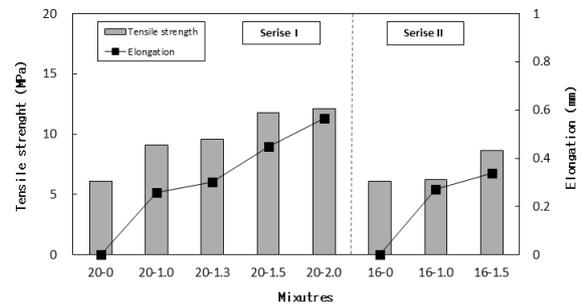


Fig. 10. Tensile strength and elongation

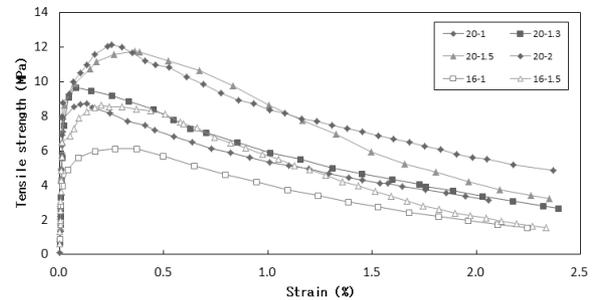


Fig. 11. Direct tensile strength - strain curves

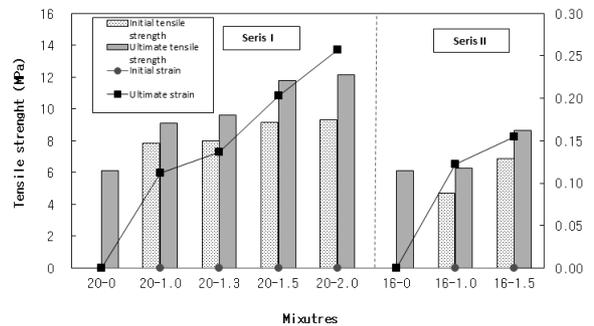


Fig. 12. Tensile strength and deformation capacity

후 최대 인장강도에서의 신장량이 크게 증가하여 변형능력 모두 증가하는 것으로 나타났다. 이처럼 형상비가 클수록 인장강도 및 변형 능력이 향상되는 것은 길이가 긴 강섬유가 균열 발생 후 매트릭스 내부에서 섬유의 가교 작용이 오랫동안 지속되어 균열 폭의 증가를 억제하며 매트릭스 내에 미세균열을 재분배하기 때문으로 판단된다.

4. 결론

본 연구는 강섬유 보강 콘크리트의 역학적 성능을 개선시켜 강섬유 보강 초고강도 콘크리트 개발을 위한 연구로서 설계기준강도 120MPa의 초고강도 강섬유 보강콘크리트의 직선형 강섬유 혼입

율 및 형상비 변화에 따른 역학적 특성을 규명하고자 균지 않은 상태 및 경화상태의 성질에 대하여 분석하였으며, 본 연구를 통하여 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 균지 않은 콘크리트의 성질에서 슬럼프 플로는 모든 배합에서 목표 범위인 650±50mm를 만족하였으며, 공기량은 소포제를 혼입함에 따라 목표 범위인 4.5±1.5%를 만족하였다.
2. 압축거동 시험 결과 Plain 배합과 비교하였을 때 강섬유 혼입율 및 형상비가 압축강도 및 탄성계수에 미치는 영향은 적은 것으로 나타났다.
3. 휨인장강도 및 등가 휨인장강도 시험결과 강섬유 혼입율 및 형상비가 증가할수록 휨성능이 향상되는 것으로 나타났으며 휨인장거동 시험 결과 강섬유 혼입율 및 형상비 증가에 따라 초기균열 발생 시 처짐 능력의 차이는 미미하나, 초기균열강도 발생 후 최대강도 지점까지 변형률 경화거동에 의해 잔류강도, 처짐 능력 및 에너지 흡수 능력이 향상되는 것으로 나타났다.
4. 직접인장강도 및 신장량의 시험 결과 강섬유 혼입율 및 형상비가 증가할수록 직접인장강도가 향상되는 것으로 나타났다. 직접인장거동 시험 결과 휨인장거동과 유사하게 혼입율 및 형상비가 증가할수록 내부의 구속력이 증가하여 초기균열 발생 후 변형률 경화거동에 의해 최대 인장강도 및 그 때의 변형 능력이 향상되는 것으로 나타났고, 최대 인장강도 이후 변형연화거동에 의해 취성 파괴 대신 연성파괴를 나타내었다.

이상을 종합해 볼 때 강섬유의 혼입율 및 형상비가 설계기준강도 120MPa 강섬유 보강 콘크리트의 압축거동에 미치는 영향은 거의 미비하나, 혼입율 및 형상비가 증가할수록 휨성능 및 인장성능 향상에 있어 효과적인 것으로 나타내었다. 이 중 혼입율이 2%이고, 형상비가 100일 때 가장 우수한 효과를 나타내었다. 하지만 강섬유 보강 콘크리트 개발에 있어 시공성, 경제성 및 역학적 성능을 고려해볼 때 일부 연구내용의 보완이 필요하지만 형상비가 100이고, 혼입율

이 1.5%인 강섬유를 사용하는 것이 효과적일 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비 지원(과제번호:16AUDPB06962504000000)에 의해 수행되었습니다.

References

Chun, H.M., Kim, Y.I. (2004). Strength Characteristics and Toughness of Steel Fiber-Reinforced High-Strength Concrete, Journal of The Architectural Institute of Korea Conference, **24(2)**, 455-458 [in Korean].

Kim, S.Y. (2014). Mechanical Properties of Hybrid Fiber Reinforced Ultra-high Strength Concrete, Master's Thesis, Dankook University [in Korean].

Kim, Y.J., Kim, B.S., Cho, C.B., Cho, J.R., Jin, W.J., Kim, H.H., Lee, C.H., Kim, J.H. (2009). System integration for hybrid cable stayed bridge : super bridge 200, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology Trend/Research Report [in Korean].

Yoon, E.S., Park, S.B. (2006). An experimental study on the mechanical properties and long-term deformations of high-strength steel fiber reinforced concrete, Journal of Korean Society of Civil Engineers, **26(1)**, 401-409 [in Korean].

Zhang, J., Yan, C.W., Jia, J.Q. (2010). Compressive strength and splitting tensile strength of steel fiber reinforced ultra high strength concrete (SFRC), Applied Mechanics and Materials, **34(35)**, 1441-1444.

강섬유 혼입율 및 형상비가 초고강도 콘크리트의 역학적 성질에 미치는 영향

UHPC는 초고층 건물 및 초장대교의 경우 필연적으로 사용되어진다. 일반적으로 콘크리트는 압축강도보다 낮은 휨강도 및 인장강도를 가지므로 취성균열이 발생하여 에너지 흡수능력이 저하된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 본 연구에서는 강섬유의 혼입율과 형상비가 UHPC의 기계적 물성에 미치는 영향을 조사하고자한다. 시리즈 I에서, 20mm 직선형 강섬유가 0, 1.0, 1.3, 1.5 및 2.0%의 혼입율로 첨가되었다. 시리즈 II에서는 16mm 강섬유를 0, 1, 1.5%로 혼입한 후 형상비에 따라 역학적 성질을 조사하였다. 실험결과, 압축강도의 차이는 미비했다. 하지만 휨강도 및 인장강도와 관련하여 혼입율 및 형상비가 증가함에 따라 휨성능 및 인장성능이 개선되었다.