



골재크기 및 섬유혼입률에 따른 강섬유 보강 고강도 콘크리트의 압축거동

안경림¹⁾ · 장석준¹⁾ · 장상혁¹⁾ · 윤현도^{1)*}

¹⁾충남대학교 건축공학과

Effects of Aggregate Size and Steel Fiber Volume Fraction on Compressive Behaviors of High-Strength Concrete

Kyung-Lim Ahn,¹⁾ Seok-Joon Jang,¹⁾ Sang-Hyeok Jang,¹⁾ and Hyun-Do Yun^{1)*}

¹⁾Dep. Architecture Engineering of Chung-Nam National University, Dae-jeon 305-764, Korea

ABSTRACT This paper describes the effect of aggregate size on compressive behavior of high-strength steel fiber reinforced concrete. The Specified compression strength is 60 MPa and the range of fiber volume fraction is 0~2%. The main variable is the aggregate size, which was used for the aggregate size of 8 and 20 mm. So, ten concrete mixtures were prepared and tested to evaluate the fresh and hardened properties of SFRC at curing ages (7, 14, 28, 56 and 91 days), respectively. Items estimated in this study are the fresh properties (air contents, slump), hardened properties (compressive strength, modulus of elasticity, post-peak response and compressive toughness). As a result, the aggregate size has little effect on the compressive strength and modulus of elasticity. On the other hand, the ductile behavior was shown after post peak and the compressive toughness was increasing as decreasing the aggregate size. These effects are clearly represented in the fiber volume fraction 2%, which are the point appeared fiber ball. It is considered that the decreasing the aggregate size has effect on the fiber dispersibility.

Keywords : steel fiber reinforced concrete(SFRC), compressive behavior, curing age, aggregate size, compressive toughness index

1. 서 론

건설기술의 발달로 초고층 및 대형 구조물에 대한 수요가 증가하면서 고강도 콘크리트의 사용이 점차 증가하고 있다. 콘크리트는 압축강도가 높을수록 취성적인 성질이 두드러진다는 단점을 갖고 있으며, 이에 대한 개선을 목적으로 강섬유 보강 콘크리트에 관련된 연구가 진행되어 왔다. 콘크리트의 경우 균열 발생 시 주변부에 응력이 증가하면서 균열 폭이 증가하게 되지만, 섬유를 보강하면 변형연화현상 및 구조적 안정성을 확보할 수 있다. M. C. Nataraja 등¹⁾의 연구에서 보고된 바에 따르면, 섬유 혼입률은 압축력을 받는 강섬유 보강 콘크리트(SFRC)의 최대하중 이후 거동에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 섬유 혼입률이 증가함에 따라 가교하는 섬유의 개수가 증가하여 최대하중 이후 응력감소가 줄어들어 연성적인 거동이 나타난다. Barros와 Sena-Cruz²⁾의 연구에서는 섬유

의 가교작용에 의한 에너지 소산 메커니즘을 다음과 같이 보고하고 있다. 최대하중 이전에는 수직균열이 발생하며 연화구간의 초기에 들어서면서 전단균열이 발생하는데, 일반적으로 이러한 파괴패턴은 높은 에너지 용량의 응력-변형률 거동을 나타내며 특히 변형연화단계에서 두드러지게 나타난다. Fig. 1은 섬유의 가교작용의 메커니즘을 나타낸 것이다. 균열발생 이후 섬유의 가교작용에 의해 에너지가 흡수되며 이로 인해 연성이 증가하게 된다. 하지만 윤현도 등³⁾의 연구에서는 2% 이상의 높은 혼입률에서 섬유의 분산성 저하로 인해 섬유의 뭉침 현상이 발생하며, 연성특성이 저하되는 것으로 나타났다. Romualdi와 Mandel⁴⁾은 강섬유의 길이에 따른 보강효과를 평가하였다. 실험결과 강섬유의 길이가 짧을수록 섬유간의 이격이 줄어들며, 이로 인해 강섬유의 분산성 및 역학적 특성이 향상되는 것으로 나타났다. 이장화 등⁵⁾의 연구에서는 굵은 골재 최대 치수 및 잔골재율에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 휨 강도를 평가하였다. 굵은 골재 최대치수 13 및 19 mm와 섬유혼입률 1%에 대한 휨 실험결과, 초기 균열강도 및 최대 휨강도, 파괴에너지가 증가하였으며 최대 골재 크기가 작은 배합에서 위커빌리티 및 섬유 분산성이 향상되었다. 따라서, 섬유의 분산성이 보강효과

*Corresponding author E-mail : wiseroad@cnu.ac.kr

Received July 21, 2014, Revised January 8, 2015,

Accepted January 14, 2015

©2015 by Korea Concrete Institute

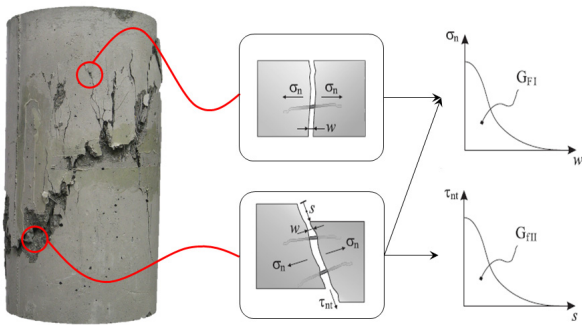


Fig. 1 Energy dissipation mechanism of SFRC under compression²⁾

에 영향을 미치며, 굵은 골재 최대치수 및 잔골재율은 섬유 분산성의 주요한 영향인자가 될 수 있다고 보고하고 있다. 또한 윤현도 등³⁾의 연구에서는 골재크기가 강섬유 보강 콘크리트(Steel fiber reinforced concrete; SFRC)의 휨 강도 및 인성에 미치는 영향에 대해 보고하고 있는데, 최대골재크기가 감소할수록 SFRC의 휨 강도 및 인성이 향상되는 것으로 나타났다. 이는 최대골재크기의 감소가 섬유 분산성에 영향을 미치기 때문으로 보고하고 있다.

강섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 50년 이상 수행되면서 역학적 성능의 우수성이 입증되었음에도 불구하고 현장 적용에 한계를 갖는 이유는 섬유의 균일한 분산 기술이 부족하기 때문이다. 현재 굵은 골재 크기의 조절이 섬유 보강 콘크리트의 휨 성능에 끼치는 영향에 대한 연구는 비교적 많이 진행되고 있지만, 현재 휨 성능을 제외한 나머지 역학적 특성에 대해서는 연구가 미흡한 실정이다. 하지만 SFRC의 실용화 및 실 구조부재에 적용하기 위해서는 SFRC의 섬유분산성 및 연성적인 거동특성에 대한 검증이 이루어져야 한다. 따라서 본 연구에서는 최대골재크기 및 섬유 혼입률에 따른 SFRC의 압축 거동을 평가하는데 주목적을 두고 있으며, 재령에 따른 압축 강도, 압축 인성 등 압축 거동에 대해 평가하고자 한다.

2. 강섬유 보강 콘크리트의 압축시험

2.1 시험 계획

일반적으로 SFRC의 경우 섬유혼입률이 증가함에 따라 최대 하중 이후에 연성적인 거동을 나타낸다. 특히 압축 시험의 경우 콘크리트는 최대하중 이후에 취성적인 파괴가 일어나는 반면 SFRC는 균열부위의 가교작용으로 인해 응력집중완화 및 에너지 소산 능력의 증대가 나타나며, 이로 인해 변형연후구간을 거치면서 연성적인 파괴 거동을 보이는 것을 이전 연구를 통해 확인하였다. 하지만 골재 크기 및 섬유 혼입 과다에 따른 영향으로 섬유 뭉침 현상이 발생하여 역학적 특성이 저하될 가능성이 있기 때문에, 굵은 골재 크기 및 섬유 혼입률에 따른 SFRC의 역학적 성능평가가 필요할 것으로 판단되었다.

Table 1 Summary of specimens

Specimen	f_{ck}^* (MPa)	Maximum aggregate size (mm)	Volume fraction (%)	Steel fiber content (kg/m ³)
60-8-0.0	60	8	0.0	0.000
60-8-0.5			0.5	39.20
60-8-1.0			1.0	78.50
60-8-1.5			1.5	117.7
60-8-2.0			2.0	157.0
60-20-0.0		20	0.0	0.000
60-20-0.5			0.5	39.20
60-20-1.0			1.0	78.50
60-20-1.5			1.5	117.7
60-20-2.0			2.0	157.0

* f_{ck} =Specified compressive strength

Table 2 Mix proportion of concrete

f_{ck} (MPa)	W/C (%)	Unit weight (kgf/m ³)			
		W*	C*	S*	G*
60	33	203	609	914	548

*C=Cement, W=Water, S=Sand, G=Gravel

Table 3 Mechanical properties of steel fiber

Fiber type	Specific gravity	Aspect ratio	Tensile strength (MPa)	Elastic modulus (GPa)
Hooked end	7.85	60	1,100	205

따라서 본 연구에서는 최대골재크기 및 섬유 혼입률에 따른 SFRC의 압축거동을 평가하기 위해 Table 1과 같이 시험체를 계획하였다. 최대골재크기는 8 및 20 mm, 섬유 혼입률은 0, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%로 설정하였으며 콘크리트 및 SFRC의 설계기준 압축강도는 60 MPa이다. 사용한 배합에 대해 압축강도, 탄성계수, 최대하중 이후 거동 및 압축인성을 평가하였으며, 재령에 따른 변화를 알아보기 위해 각 배합별로 타설 후 재령 7, 14, 28, 56, 91일에 시험을 수행하였다.

2.2 재료 및 비빔

시험에 사용된 배합은 Table 2에 나타내었으며, 동일한 배합조건에 섬유혼입률에 따라 강섬유를 혼입하였다. 강섬유의 경우 국내 K사의 인장강도 1,100 MPa급, 지름 0.5 mm, 길이 30 mm의 후크형 강섬유를 사용하였다. 사용된 강섬유에 대한 역학적 특성은 Table 3에 나타난 바와 같다. 굵은 골재 크기는 상기에 언급한 바와 같이 사용하였으며 8 mm 골재와 잔골재 입도 차이를 위해 잔골재의 최대 크

기는 2.5 mm로 고정하였다. 물-시멘트비는 30%이며, 20±3°C의 수조에서 수중 양생 후 시험 24시간 전에 기건 양생한 후 재령에 따라 시험을 실시하였다.

콘크리트 및 SFRC의 제작을 위해 용량 0.1 m³의 강제식 팬 믹서를 사용하였으며, SFRC 제조 시 재료의 투입 순서 및 비빔시간은 섬유 혼입의 뭉침 현상에 영향을 미치기 때문에 모든 배합에서 동일한 방법을 사용하였다. 잔골재 및 굵은 골재를 1분간 건비빔하였으며, 시멘트를 투입하여 다시 1분간 비빔을 실시하였다. 이후 배합수 및 혼화제를 투입하였다. 콘크리트 및 SFRC 제작 시 콘크리트의 유동성이 섬유 분산에 미치는 영향을 최소화하고자 혼입률에 관계없이 혼화제는 일정량 첨가하였다. 강섬유 투입 시에는 섬유의 뭉침 현상을 방지하기 위하여 1.5% 이상의 혼입률에서는 총 혼입량의 1/2씩 2회에 걸쳐 투입하였다. 압축시험을 위한 공시체는 KS F 2403⁶⁾에 따라 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원주형 공시체를 사용하였으며 각 변수에 따라 3개의 시험체를 제작하였다.

2.3 시험 방법

압축강도 측정을 위해 실험체는 각 변수별로 3개씩 제작하였으며, 재령 7, 14, 28, 56, 91일에 압축시험을 실시하였다. KS F 2405⁷⁾에서는 콘크리트의 압축시험 시 하중 제어 방식을 사용하여 0.6±0.4 MPa의 속도로 가력 하도록 규정하고 있지만, 하중제어 방식을 사용하면 가력속도가 일정하기 때문에 최대하중 이후 변형연화구간에 대한 측정에 어려움이 있다. RILEM TC 148-SSC (2000)⁸⁾에서는 압축시험 시 보통 콘크리트의 경우 1±0.1 μm/s의 속도로 가력할 것을 권고하고 있으며, SFRC의 경우 JSCE-SF4 (1994)⁹⁾에 의하면 단일압축력을 받는 SFRC는 10~30 μm/s로 시험할 것을 권고하고 있다. Barros와 Sena-Cruz²⁾의 연구에서는 압축시험 시 10 μm/s의 속도로 변위제어방식을 사용했는데, 연구 결과 변위제어방식을 통해 SFRC의 최대하중이후 변형연화구간을 충분히 묘사할 수 있는 것으로 나타났다.

따라서 본 연구에서도 Barros와 Sena-Cruz²⁾의 시험방법에 따라 10 μm/s 속도의 변위제어방식을 사용하였으며, 시험은 2000 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하였다. 또한 변형을 측정하기 위해 중앙부 100 mm 구간에 2개의 변위계를 사용하였다.

2.4 압축인성 평가 방법

인성이란 어떠한 재료가 파괴될 때까지 필요한 에너지의 양을 나타내며, 응력-변형률 곡선에서 곡선 아래의 면적을 이용하여 인성을 평가할 수 있다. 다른 시험체와 인성을 비교하기 위해서 인성지수를 사용하는데, 인성지수에 대한 정의는 연구자들마다 조금씩 차이가 있다. Fanella와 Naaman은 섬유를 보강한 콘크리트와 보강하지 않은 콘크리트의

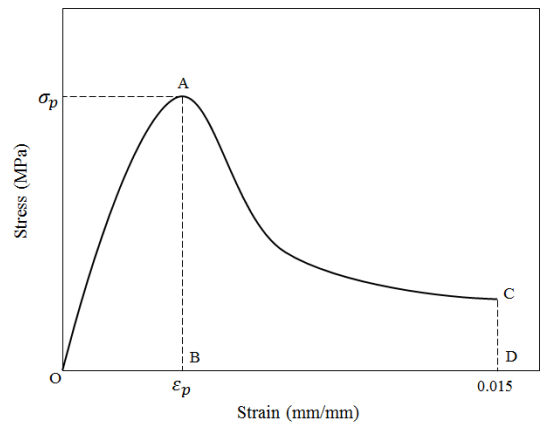


Fig. 2 Definition of compressive toughness¹⁾

비율을 FRC의 인성지수로 정의하였으며, 시험체가 잔여 저항능력이 존재하더라도 변형률 0.0154까지만 인성지수를 산정하였다. 또한 정의된 비율을 최대 하중 이후 곡선의 면적과 최대 하중 이전까지 곡선의 면적비로 정의할 수 있다고 제시하고 있다. Ezeldin과 Balaguru의 연구에서는 섬유의 혼입률 및 형상비가 SFRC의 최대 하중 이후 거동에 영향을 고려하기 위해 섬유 혼입률 및 형상비를 보강지표 $RI(=w_f \times l/d)$ 의 형태로 사용하였다. 여기서 w_f 는 강섬유의 중량률을 뜻하며, 섬유 혼입률을 3.2배한 값과 거의 일치한다. 이 방법에서는 변형률 0.015까지의 인성을 산정하였다. 본 연구에서는 형상비를 변수로 설정하지 않았기 때문에 Fanella와 Naaman의 정의를 사용하여 압축인성을 평가하였다. SFRC의 균열 이후 거동은 섬유 혼입률에 영향을 받지만, 일반적으로 균열 이전에는 강섬유 보강에 따른 효과가 미비하다. 섬유가 보강되지 않은 콘크리트는 최대하중 이후에 취성적으로 파괴되며, 균열 이전의 거동은 섬유 혼입의 유무와 관계없이 유사하기 때문에, 인성지수 산정 시 섬유가 보강되지 않은 콘크리트의 거동을 SFRC의 균열 이전 거동으로 대체하였다. Fig. 2는 본 연구에서 사용한 압축 인성 평가 방법에 대한 개념도이며, 식 (1)을 사용하여 인성지수를 산정하였다.

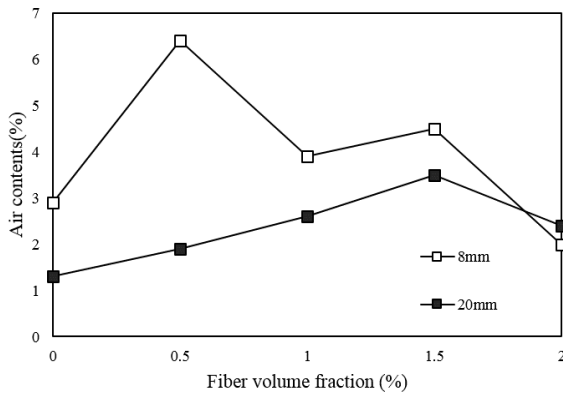
$$\text{Toughness index} = \frac{\text{Area } OACD}{\text{Area } OAB} \quad (1)$$

3. 강섬유 보강 콘크리트의 압축특성

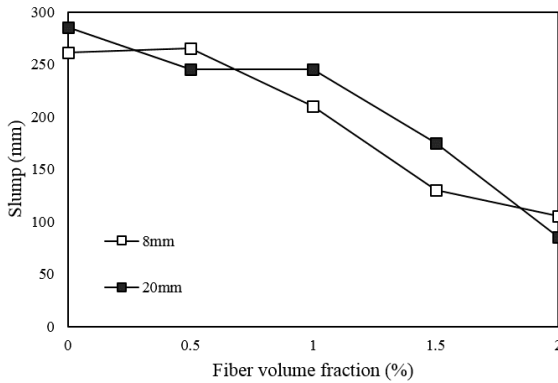
3.1 굵지 않은 성상

3.1.1 공기량

Fig. 3(a)은 섬유 혼입률 및 굵은 골재 크기에 따른 공기량을 나타낸 그래프이다. 강섬유를 혼입할 경우 섬유 혼입률이 증가할수록 공기량이 증가하는 양상을 보였는데, 이는 콘크리트 내에 강섬유가 분산되면서 갇힌 공기를 증가시켜 공극을 형성하기 때문으로 판단된다. 섬유



(a) Effect of volume fraction on air contents



(b) Effect of volume fraction on slump

Fig. 3 Properties of the fresh concrete

혼입물 0.5%를 갖는 8 mm 시험체는 경향에서 벗어난 양상을 보였는데 이는 배합상의 문제로 판단된다. 골재 크기에 따른 영향에서는 굵은 골재의 크기가 작을수록 공기량이 증가하는 경향을 나타냈다. 콘크리트 속의 공기는 모르타르 중에 존재하는데, 굵은 골재 크기가 감소할수록 단위 콘크리트 중에 모르타르 량이 많아지게 된다.¹³⁾ 따라서 굵은 골재 크기가 작을수록 단위 콘크리트 내 공기량이 많아지게 된다. 이로 인해 굵은 골재 크기가 작은 8 mm 시험체의 공기량이 20 mm 시험체의 공기량

보다 많은 것으로 판단된다.

3.1.2 슬럼프

Fig. 3(b)는 SFRC의 섬유 혼입률 및 굵은 골재 크기에 따른 슬럼프 값을 나타낸 것이다. 섬유 혼입률의 증가에 따라 슬럼프 값은 감소하는 경향을 나타내었다. 또한 굵은 골재 크기가 감소할수록 슬럼프 값이 감소하는 경향을 보였으나, 그 차이는 매우 미소한 것으로 나타났다. 이는 골재 크기가 슬럼프에 미치는 영향이 섬유 혼입률에 따른 영향에 비해 미소하기 때문에 굵은 골재 크기에 따른 변화가 나타나지 않는 것으로 판단된다. 또한 골재 간의 마찰력을 완화시켜주는 시멘트 페이스트가 비교적 많아 콘크리트의 유동성이 향상되는 것으로 사료된다.¹⁴⁾

3.2 압축강도

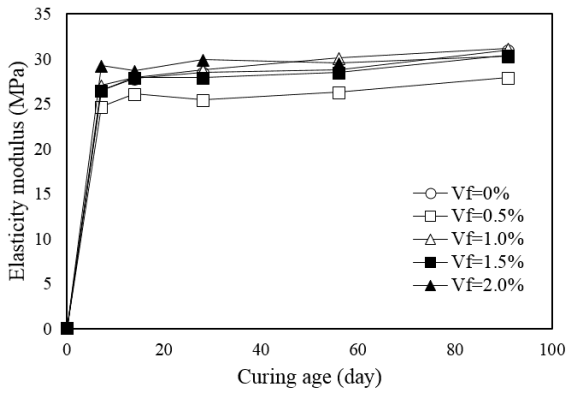
Table 4는 재령 7, 14, 28, 56, 91일의 압축강도 시험 결과로, 각 3개의 시험체의 평균값과 표준편차를 함께 나타내었다. 압축 시험 결과, 섬유 혼입률에 따른 압축강도의 변화는 매우 미소한 것으로 나타났다. 섬유 혼입률 0.5%를 갖는 8 mm 시험체의 경우 압축강도가 다른 배합의 시험체에 비해 현저히 낮은 것을 확인할 수 있는데, 이는 3.1.1에서 언급한 바와 같이 배합 상의 문제로 인해 공기량의 증가하여 압축강도가 저하된 것으로 판단된다. 일반적으로 굵은 골재의 크기가 감소하게 되면 콘크리트 내의 균질한 충전으로 인해 각 골재간의 상호접착력이 증가하기 때문에 강도가 증가하나,¹¹⁾ 본 연구에서는 굵은 골재 크기에 따른 차이가 크지 않은 것으로 나타났다. 이는 강섬유가 혼입되면서 골재의 충진을 방해하기 때문으로 판단된다.

3.3 탄성계수

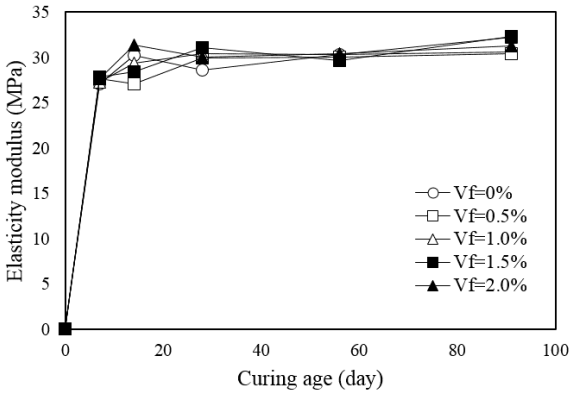
탄성계수는 재료의 변형 능력을 평가하는 값으로서 콘

Table 4 Compressive strength of specimens

Specimen	Compressive strength (MPa)				
	7days	14days	28days	56days	91days
60-8-0	53.94±3.95	57.94±0.59	67.29±0.56	67.90±0.79	70.80±0.16
60-8-0.5	51.00±1.90	54.92±0.32	58.17±0.84	58.97±0.74	66.51±3.21
60-8-1.0	58.32±0.88	58.05±3.67	68.58±0.54	68.17±0.59	74.49±0.87
60-8-1.5	56.89±1.17	60.27±0.43	63.57±0.49	64.47±1.08	74.46±0.67
60-8-2.0	59.43±0.56	60.40±2.30	68.24±0.40	69.83±1.22	72.18±3.32
60-20-0	59.12±0.71	65.17±0.36	66.93±2.81	68.36±1.46	77.99±1.15
60-20-0.5	54.51±1.28	60.04±0.78	66.65±1.56	65.56±2.42	75.38±1.02
60-20-1.0	58.20±0.71	61.98±2.13	66.53±1.30	67.40±0.62	73.08±0.78
60-20-1.5	56.58±0.88	61.83±0.64	67.60±1.35	69.28±0.23	75.73±3.00
60-20-2.0	56.95±0.31	61.94±1.62	65.54±1.23	64.49±3.74	77.67±0.88



(a) 8 mm series



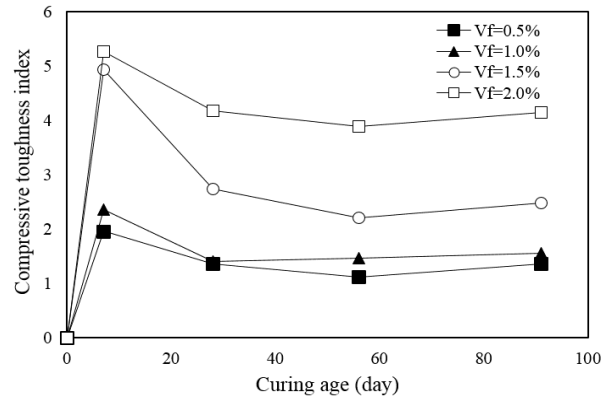
(b) 20 mm series

Fig. 4 Effect of age on elasticity modulus

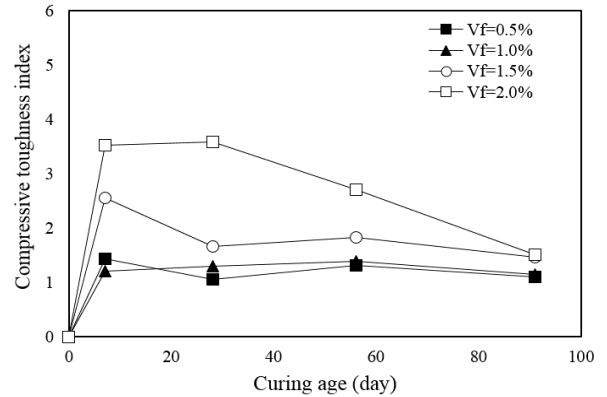
크리트의 강도에 가장 많은 영향을 받는다. Fig. 4는 재령에 따른 탄성계수의 변화를 나타낸 것으로, 압축강도의 변화와 유사한 양상을 보였다. 또한 섬유 혼입률이 증가할수록 탄성계수도 증가하는 양상을 보이는데, 이는 콘크리트에 비해 탄성계수가 높은 강섬유의 혼입에 따른 영향으로 판단된다. 하지만 그 영향이 크지 않으며, 굵은 골재 최대 크기에 따른 영향도 미소한 것으로 판단된다.

3.4 압축인성

SFRC의 경우 섬유의 혼입률이 증가하게 되면 최대하중 이후 응력감소가 줄어들게 되는데, 이와 같은 특성을 응력-변형률 곡선에서 재료의 인성평가를 통해 확인할 수 있다. Fig. 5는 재령에 따른 인성의 변화를 나타낸 그래프이다. 재령이 지남에 따라 인성지수가 줄어들었는데, 이는 매트릭스의 경화에 의해 연성특성이 저하되기 때문으로 판단된다. 섬유 혼입률 1.5% 이상에서는 8 mm 골재를 사용한 시험체와 20 mm 골재를 사용한 시험체의 재령에 따른 인성의 변화양상이 다르게 나타났다. 8 mm 골재를 사용한 시험체의 압축인성이 보다 높게 나타났으며, 20 mm 골재를 사용한 시험체의 경우 재령이 지남에 따라서 인성이 계속해서 줄어드는 양상을 보이는 반면에 8 mm 골재를 사용한 시험체의 경우에는 재령에 지나도 인성이 안정적으로 유지되는 것으로 나타났다.



(a) Aggregate size 8mm series



(b) Aggregate size 20mm series

Fig. 5 Influence of age on SFRC toughness index

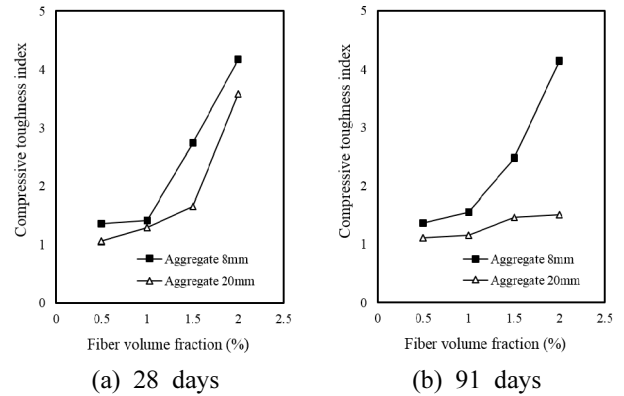


Fig. 6 Effect of volume fraction on SFRC toughness index for the series

Fig. 6은 재령 28일과 91일에서 섬유 혼입률에 따른 압축인성을 나타내었다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이, 재령 28일에서는 두 시험체 모두 섬유 혼입률이 증가함에 따라 압축인성이 증가하는 것을 확인하였다. 20 mm 골재를 사용한 경우 섬유 혼입률 2%에서 급격한 인성 증가를 보였으며, 8 mm 골재를 사용한 배합에서는 섬유 혼입률 1.5% 이상에서 압축인성이 비약적으로 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 1% 이하의 혼입률에서는 인성증진이 나타나지 않았다. Fig. 6(b)는 재령 91일에서 섬유 혼입률에 따른 압축인성을 나타내었다. 8 mm 골재를 사용한 배합

에서는 재령 28일과 유사한 압축인성을 나타내었으나, 20 mm 골재를 사용한 배합에서는 압축인성이 감소한 것을 확인하였다. 섬유 혼입률 1.5% 이하에서는 재령 28일과 유사하였으나 섬유 혼입률 2%에서는 압축인성이 재령 28일 대비 약 58% 감소하였다. 따라서 압축인성 평가 결과, 섬유 혼입률 1.5% 이하에서는 인성 특성이 크게 나타나지 않았지만 1.5% 이상의 경우 골재 크기가 작을수록 인성지수가 높고 재령이 지나도 안정적인 인성을 확보하는 것으로 나타났다.

3.5 최대하중 이후 거동특성

Fig. 7은 각 재령 7, 28, 91일의 압축응력-변형률 관계를 나타낸 것이다. 본 그래프는 각 배합마다 시험체 3개의 그래프를 평균하여 나타내었다. 재령 7일에서, 섬유 혼입률이 1% 이하일 때 변형연화특성 미소하게 나타났으며, 굵은 골재 크기도 큰 영향을 보이지 않았다. 섬유 혼입률 1.5% 이상의 시험체에서는 최대하중이후 연성적인 특성이 나타났으며 8 mm 골재를 사용한 시험체가 20 mm 골재를 사용한 시험체에 비해 비교적 우수한 연성특성을 갖는 것으로 나타났다. 재령 28일의 경우 섬유 혼입률 1.0% 이하의 배합에서는 최대하중이후 연성특성이 크게 나타나지 않았으나, 1.5% 배합의 경우 8 mm 골재를 사용한 시험체에서 최대하중이후 연성적인 거동이 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 또한 섬유 혼입률 2.0% 배합에서는 두 가지 골재크기의 배합 모두 최대하중 이후 우수한 변형연화특성을 보였다. 재령 91일의 시험결과에

서는 섬유 혼입률 1.0% 이하에서는 28일의 거동특성과 유사한 양상을 나타내었다. 섬유 혼입률 1.5% 이상의 배합에서는 28일에 비해 연성특성이 감소한 것을 확인할 수 있었고, 특히 20 mm 골재를 사용한 경우 비교적 취성적인 거동을 나타내었다. 이는 매트릭스의 경화에 따라서 연성특성이 감소하는 것으로 판단된다. 최대 하중 이후 특성을 확인한 결과, 1.0%이하의 배합에서는 연성특성이 크게 나타나지 않음을 알 수 있었으며, 섬유 혼입률 1.5% 이상의 배합에서는 연성적인 거동이 나타나며 골재 크기가 작을수록 우수한 거동을 확인할 수 있었다. 재령이 증가함에 따라서 변형연화특성이 저하되는 특성을 보였으며 60-20-1.5 시험체에서 저하되는 양상이 다른 배합에 비해 뚜렷하게 나타났다. 이는 재령이 증가할수록 매트릭스가 경화되고 이로 인해 매트릭스의 취성적인 성향이 강섬유의 연성특성보다 크게 나타나기 때문으로 사료된다. 또한 골재크기가 작을수록 변형연화현상의 저하가 줄어들었는데, 이는 골재크기의 감소로 섬유의 분산성이 향상되어 20 mm 골재에 비해 강섬유의 연성특성이 높게 나타났기 때문이라고 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 굵은 골재의 최대 크기와 섬유 혼입률 및 재령에 따른 강섬유 보강 고강도 콘크리트의 균지 않은 성상, 압축강도 및 역학적 특성을 평가하였다. 본 연구에서 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

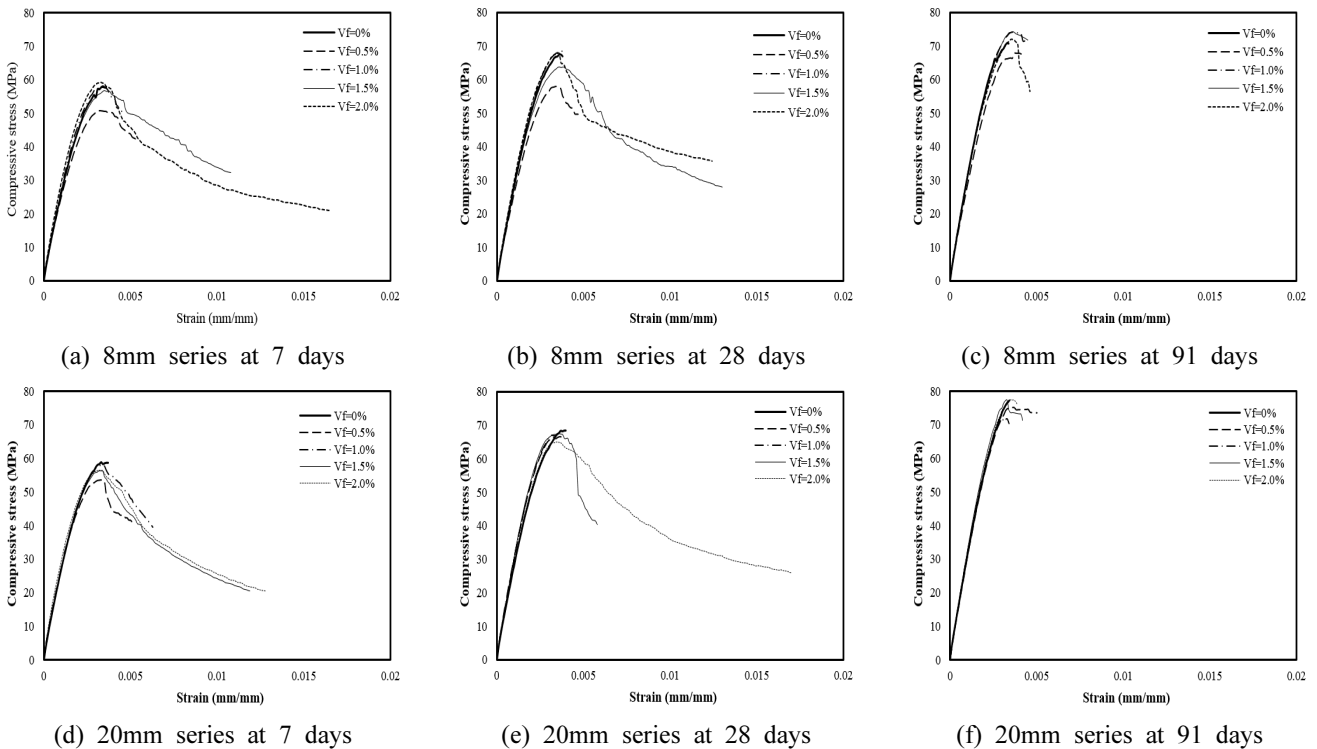


Fig. 7 Stress-strain relationships for the series

- 1) 강섬유 보강 콘크리트의 공기량은 섬유 혼입률의 증가와 함께 증가하는 양상을 보였는데, 이는 강섬유의 혼입률이 늘어나면서 갇힌 공기가 증가되어 공극을 형성하기 때문인 것으로 사료된다. 골재크기에 따른 영향에서는 굵은 골재의 크기가 작을수록 공기량이 증가하는 경향을 나타내었다. 또한 섬유 혼입률이 증가할수록, 굵은 골재의 크기가 작을수록 슬럼프는 감소하였다.
- 2) 압축강도 측정 결과, 강섬유 혼입률이 압축강도에 미치는 영향은 미소한 것으로 나타났다. 일반적으로 골재크기가 감소함에 따라 압축강도가 증가하는 것과는 달리 본 연구에서는 골재크기가 압축강도에 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났으며, 이는 강섬유의 혼입에 의한 현상일 것으로 사료된다.
- 3) 탄성계수는 재령이 지남에 따라서 증가하였으며, 골재 크기에 따른 영향을 미소한 것으로 나타났다. 또한 섬유 혼입률에 따라서 탄성계수가 점진적으로 증가하는 경향이 나타났는데 이는 높은 탄성계수를 갖는 강섬유가 혼입되었기 때문으로 사료된다.
- 4) 압축응력-변형률 곡선에서는 섬유 혼입률 1.5% 이상에서 최대하중이후 연성적인 특성이 나타났으며 골재크기가 줄어들수록 섬유의 분산성이 향상되어 우수한 연성이 나타나는 것으로 판단된다.
- 5) 강섬유 보강 콘크리트의 압축인성은 재령에 따라 감소하는 것으로 나타났지만 골재크기가 감소할수록 재령이 지나도 안정적인 것으로 나타났다. 또한 섬유 혼입률과의 관계에서는 20 mm 골재를 사용한 배합에서 2%의 압축인성이 1.5%의 압축인성보다 작았다. 하지만 8 mm 골재를 사용한 배합은 섬유 혼입률 2%가 1.5%보다 높은 압축인성을 나타내었다. 따라서 골재크기가 줄어들면서 섬유의 분산성이 향상되어 인성이 향상되는 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원 건설기술연구사업의 연구비지원(13건설연구A02)에 의해 수행되었습니다.

References

1. Nataraja, M. C., Dhang, N., and Gupta, A. P., "Stress-strain curves for steel-fiber reinforced concrete under compression," *Cement & Concrete Composites*, Vol. 21, 1991, pp. 383-390.
2. Joaquim A. O., Barros, Jose M. Sena-Cruz, "Compression behaviour of steel fibre reinforced self-compacting concrete – age influence and modeling," *Civil Engineering*, Minho University, Portugal, 2006, pp. 57.
3. Jang, S. J., Yun, Y. J., Yun, H. D., "Influence of Fiber Volume Fraction and Aggregate Size on Flexural Behavior of High Strength Steel Fiber-Reinforced Concrete (SFRC)," *Applied Mechanics and Materials*, Vol. 372, 2013, pp. 223-226.
4. James, P., Romualdi, James A. Mandel, "Tensile Strength of Concrete Affected by Uniformly Distributed and Closely Spaced Short Lengths of Wire Reinforcement," *Journal of the American Concrete Institute*, ACI, 1964, pp. 657-671.
5. Lee, J. H., Park, H. S., Cho, H. W., Kang, S. T., Kim, D. J., and Kim, J. J., "Effect of Fine Aggregate Size and Sand Percentage on Flexural Characteristics of SFRC," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, 2011, pp. 431-432.
6. KS F 2403, "Standard test method for making and curing concrete specimens," *Korea Standards Association*, 2014, pp. 14.
7. KS F 2405, "Standard test method for compressive strength of concrete," *Korea Standards Association*, 2010, pp. 10.
8. RILEM TC 148-SSC, "Strain softening of concrete-test methods for compressive softening, test method for measurement of the strain-softening behaviour of concrete under uniaxial compression," *Materials and Structures*, Vol. 33, No. 230, 2000, pp. 347-351.
9. JSCE-SF4, "Part III - 2 Method of tests for steel fiber reinforced concrete," *Concrete Library of JSCE*, No. 3, 1984, pp. 74.
10. Katsuta, T., "On the elastic and plastic properties of concrete in compression tests with high deformation velocity: Part 1," *Trans Inst Jap Arch*, No. 29, 1943, pp. 380-392.
11. Fenella, D. A., and Naaman, A. E., "Stress-strain Properties of Fiber Reinforced Mortar in Compression," *ACI Journal*, Vol. 82, No. 4, 1985, pp. 475-483.
12. Ezeldin, A. S., and Balaguru, P. N., "Normal and high strength fiber reinforced concrete under compression," *Journal of Materials on Civil engineering*, Vol. 4, No. 4, 1992, pp. 415-427.
13. Sim, J. I., and Yang, K. H., "Effect of the Maximum Aggregate Size on the Workability and Mechanical Properties of Lightweight Concrete," *Journal of the Architectural Institute of Korea*, Vol. 25, No. 5, 2012, pp. 61-68.
14. Kim, D. H., Lee, S. S., Song, H. Y., and Kim, E. Y., "An Experimental Study on the Properties of Concrete according to G/S ratio classified by Maximum Size of Coarse Aggregate," *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 4, No. 2, 2004, pp. 97-103.
15. The Korea Concrete Institute(KCI), "Structural Concrete Design Code," 2012.
16. Lee, T. H., Shin, H. O., Lee, S. H., Lee, J. H., and Yoon, Y. S., "Prediction of the Elastic Modulus of Ultra High Strength Concrete," *Proceedings of the Korea Concrete Institute*, Vol. 25, 2012, pp. 337-338.
17. Sivakumar, A., and Manu Santhanam, "Mechanical properties of high strength concrete reinforced with metallic and non-metallic fibres," *Cement & Concrete Composite*, Vol. 29, 2007, pp.

603-608.

18. Lavanya Prabha, S., Dattatreya, J. K., Neelamegam, M., and Seshagiri Reo, M. V., "Study on stress-strain properties of reactive powder concrete under uniaxial compression," *International Journal of Engineering Science and Technology*, Vol. 2, No. 11, 2010, pp. 6408-6416.

19. Kang, S. T., and Ryu, G. S., "The Effect of Steel-Fiber Contents on the Compressive Stress-Strain Relation of Ultra High Performance Cementitious Composites (UHPCC)," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 23, No. 1, 2011, pp. 67-75.

요 약 콘크리트는 압축강도가 증가할수록 취성적인 성질이 두드러지는데, 이를 보완하기 위해 강섬유를 혼입하여 콘크리트에 연성을 부여하는 강섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있다. 강섬유 보강 콘크리트는 섬유 혼입률에 따라 역학적 특성이 달라지며, 일반적으로 1.5%의 혼입률이 가장 효과적인 것으로 알려져 있다. 섬유 혼입률 2%를 초과하게 되면 섬유 뭉침 현상이 발생하는데, 이로 인해 역학적 특성이 저하된다. 본 연구에서는 2% 이상의 높은 혼입률에서 섬유의 분산성을 향상시키기 위해 굵은 골재 크기를 변수로 재령에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 압축거동에 대해 평가하였다. 굵은 골재 크기에 따른 굳지 않은 성상, 압축강도, 탄성계수 및 압축인성 등을 평가한 결과 섬유 혼입률이 증가할수록 공기량은 증가하였으며, 공기량이 증가함에 따라서 슬럼프는 감소하였다. 또한 골재 크기가 압축강도 및 탄성계수에 미치는 영향은 미소하였지만, 섬유의 분산성을 향상시켜 압축인성 및 최대하중 이후 거동에 영향을 끼치는 것으로 나타났다. 또한 강섬유 보강 콘크리트의 압축인성은 재령이 지날수록 감소하게 되는데, 굵은 골재 크기가 감소할수록 압축인성의 감소율이 줄어들어 보다 안정적인 것으로 나타났다. 따라서 본 연구에서 나타난 것과 같이 강섬유 보강 콘크리트의 굵은 골재 크기를 조절하여 높은 혼입률을 갖는 강섬유 보강 콘크리트의 섬유 분산성과 연성적인 거동을 부여할 수 있을 것으로 판단된다.

핵심용어 : 강섬유 보강 콘크리트, 굵은 골재 최대 크기, 압축거동, 압축인성