

섬유혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 탄소섬유 보강시멘트 복합재료의 역학적 특성과 내충격성 검토

허광희¹, 송기창², 박종건^{3*}, 한윤정³, 임채영⁵

Mechanical Properties and Impact Resistance Review of Carbon Fiber Reinforced Cement Composites with Different Fiber Contents and Fiber Lengths

Gwang-Hee Heo¹, Ki-Chang Song², Jong-Gun Park^{3*}, Yoon-Jung Han³, Cae-Young Lim⁵

Abstract: Recently, the applications of carbon fiber have been broader than ever when it comes to such industrials as automobiles, ships, aerospace, civil engineering and architecture because of their lightweight-ness and high mechanical properties. This study analyzed mechanical properties and flexural behavior of carbon fiber reinforced cement composites(CFRC) with different fiber contents and fiber lengths, and also impact resistance by natural drop test on mortar specimens was compared and examined. In addition, contents of carbon fiber(CF) were varied by 0.5%, 1.0%, 2.0% and 3.0%. Fiber lengths was used for 6 mm and 12 mm, respectively. As a result of the test, the flow value was very disadvantageous in terms of fluidity due to the carbon fiber ball phenomenon, and the unit weight was slightly reduced. In particular, the compressive strength was decreased with increasing carbon fiber contents. On the other hand, the flexural strength was the highest with 12 mm fiber length and 2% fiber content. As the results of the impact resistance test, the specimens of plain mortar takes about 2 ~ 3 times to final fracture, while the specimens of CFRC is somewhat different depending on the increase of the fiber contents. However, when the fiber length is 12 mm and the fiber content is 2%, the impact resistance was the highest.

Keywords: Carbon fiber(CF), Carbon fiber reinforced cement composites(CFRC), Flow value, Flexural strength, Impact resistance test

1. 서 론

탄소섬유(Carbon Fiber, CF)란 적어도 92% 이상의 탄소원 소로 이루어진 섬유를 칭하는 것으로, 제조방법 및 원료에 따라 PAN계, 피치계 및 레이온계로 대별할 수 있으며, 섬유길이에 따라 단섬유와 장섬유로 구분된다. 개발초기에는 경제적 부담 증가로 건설재료로서의 활용에 다소 어려움이 있었으나 탄소섬유의 기계적 특성과 화학적 안정성 등 역학적 성질이 높아 콘크리트나 모르타르의 보강재로 국내외에서 많은 주목을 받고 있다(Lee et al., 1994; Reda et al., 2001; Wang et al., 2017; Lu et al., 2018). 특히, 탄소섬유는 높은 인장강도 및 인장탄성률을 가진 21세기형의 첨단 복합재료로서 용도는 우주 항공, 조선, 자동차 및 레저산업의 재료뿐만 아니라 토목, 건

축 분야에서 콘크리트 구조물의 내진보강 및 CNG 탱크 등의 구조재료로서 다양한 산업분야에서도 적용되어 왔으며, 그 이용 분야가 점차 증대되고 있는 유망한 신소재이다(Chen et al., 1996; Boulfiza et al., 2000; Oh et al., 2018).

최근, 탄소섬유를 혼입한 탄소섬유 보강시멘트 복합재료(Carbon Fiber Reinforced Cement Composites: CFRC)의 개발을 위한 연구와 노력이 행하여지고 있으며, 탄소섬유는 시멘트 복합재료로서 휨 강도를 향상시키는데 사용되고 있다. 그리고 충격하중에 의한 국부적인 파괴를 억제하기 위하여 섬유를 혼입함으로써 휨 인성 및 충격에 대한 저항성을 향상시키는 시멘트 복합재료에 관한 많은 연구가 진행되고 있다(Min et al., 2011; 2018; Heo et al., 2019).

또한, 각종 보강용 섬유로서 단섬유인 강, 유리, PVA, 아라미드, 아크릴, PE, PP 등을 사용하여 제조된 시멘트 복합재료는 높은 휨 · 인장강도, 인성증대, 변형능력 및 에너지 흡수능력을 발휘할 수 있을 뿐만 아니라 균열을 제어함으로써 각종 열화 인자의 침투를 억제할 수 있는 장점이 제시되어 있다(Li et al., 2001; Wang et al., 2001; Son et al., 2017).

한편, 주요 건설재료 중 하나인 콘크리트나 모르타르는 다른 건설재료에 비해 요구되는 역학적 성능이 우수하고 내구

¹정회원, 건양대학교 해외건설플랫폼학과 교수

²정회원, 건양대학교 의료신소재학과 교수

³정회원, 건양대학교 공공안전연구소 선임연구원

⁴정회원, 공개발 대표

*Corresponding author: 2630@hanmail.net

Publish Safety Research Institute (PSRI), Konyang University, 121 Daehak-ro, Nonsan, Chungnam 32992, Korea

·본 논문에 대한 토의를 2019년 **월 **일까지 학회로 보내주시면 2019년 **월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

성이 높은 건설재료이지만 휨 및 인장강도가 압축강도 대비 1/10 정도 수준이며, 휨 및 인장하중 작용하에 있어서 초기 균열이 발생한 이후 응력이 급격히 저하하는 취성적 성질을 가지고 있다. 이러한 단점을 보완하기 위해 각종 섬유를 혼입하여 취성적인 성질을 개선한 섬유보강 시멘트 복합재료가 주를 이루고 있으며, 이에 관한 연구가 북미, 유럽, 일본 등의 선진국을 중심으로 활발히 진행되어 왔다(Chung et al., 2005; Choi et al., 2015). 국내의 경우 콘크리트나 모르타르 분야에서 보강재로서 다양한 섬유를 사용한 시멘트 복합재료가 검토되었지만, 탄소섬유를 이용한 시멘트 복합재료에 대한 연구검토한 사례는 다소 미진한 실정이다.

따라서, 본 연구는 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 탄소섬유 보강시멘트 복합재료의 역학적 특성과 휨 거동을 분석하였으며, 또한 자연 낙하시험에 의한 모르타르 시편에 대한 내충격성을 측정하여 비교, 검토하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다. 먼저, 배합조건으로 보통 모르타르의 목표 압축강도는 재령 28일에서 약 35 MPa 인 W/C 47.8%로 계획하였으며, 목표 플로우는 190±10 mm가 되도록 배합설계 하였다. 또한 탄소섬유의 혼입률을 0.5%,

Table 1 Experimental plan

Item	Factors	Levels
Mix design condition	W/C (%)	47.8
	Plain	-
	Carbon fiber	Fiber contents (%)
		Fiber contents (kg/m ³)
		Fiber lengths (mm)
	C:S (cement:sand)	1:2
	Target flow (mm)	190±10
	Average of measured compressive strength at 28 age (MPa)	35
Experiment content	Fresh mortar state	- Flow test - Unit weight test
	Hardened mortar state	- Compressive strength(MPa) : 28 days - Flexural strength(MPa) : 28 days - Impact resistance : 28 days

1.0%, 2.0% 및 3.0%의 4수준과 탄소섬유의 길이가 6 mm와 12 mm의 변수로 실험을 계획하였다. 실험사항으로 굳지 않은 모르타르는 플로우 및 단위용적질량 측정하였으며, 굳은 모르타르는 압축강도와 휨 강도를 측정토록 계획하였다. 또한 모르타르 시편의 내충격성을 검토하고자 실험계획을 수립하였다.

2.2 재료 및 배합

2.2.1 시멘트

시멘트는 S사 제품의 보통 포틀랜드 시멘트(OPC)를 사용하였으며, 비중은 3.13이고 분말도는 3,860 cm²/g 이다. 시멘트의 물리적 특성은 Table 2와 같다.

Table 2 Physical properties of ordinary portland cement

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Stability (%)	Setting time (min)		Compressive strength (MPa)		
			Initial set	Final set	3 days	7 days	28 days
3.13	3,860	0.03	309	367	32.6	42.7	54.9

2.2.2 표준사

본 연구는 강원도 강릉시 주문진읍에서 생산된 표준사를 KS L ISO 679에서 규정하는 98% 이상의 이산화규소(SiO₂)가 함유되어 있는 표준사를 사용하였다. 표면건조포화상태 잔골재의 비중과 흡수율은 각각 2.65와 0.1%이었으며, 표준사의 물리적 특성은 Table 3과 같다.

Table 3 Physical properties of standard sand

Size (mm)	Unit weight (kgf/m ³)	Density (g/cm ³)	Percentage water absorption (%)	Fineness modulus (FM)
2 ≤	1,490	2.65	0.1	2.40

2.2.3 탄소섬유

본 연구에 사용된 아크릴로니트릴을 주성분으로 하는 고강도 PAN(polyacrylonitrile)계 탄소섬유는 일본의 T사에서 제조한 것으로 인장강도가 4,900 MPa, 인장탄성률은 230 GPa 이다. 탄소섬유의 길이는 6 mm와 12 mm로서 균일한 섬유길이를 확보하기 위해 국내 A사의 절단 섬유업체에서 장섬유를 절단하였다. 탄소섬유는 833 이상의 매우 높은 종횡비(aspect ratio)를 갖고 있다. PAN계 탄소 단섬유에 대한 공급원사의 물리적 특성은 Table 4와 같으며, Photo 1은 본 연구에 사용된 PAN계 탄소섬유의 원사를 및 절단형상을 나타낸 것이다.

Table 4 Physical properties of short carbon fibers

Lengths (mm)	Diameter (μ m)	Density (g/cm ³)	Tensile strength (MPa)	Tensile modulus (GPa)	Elongation (%)
6, 12	7.2	1.8	4,900	230	2.1



(a) Yarn rolls



(b) Chopped fiber

Photo 1 Shapes of carbon fibers used in this experiment

2.2.4 혼화제

혼화제는 탄소섬유의 유동성 확보를 위해 국내 D사 제품의 폴리카르복실산계로서, 액상이고 비중이 1.04, pH 5.0 $\pm$ 1.5인 연황색의 고성능 AE감수제를 사용하였다. 혼화제의 물리적 특성은 Table 5와 같다.

Table 5 Physical properties of superplasticizer

Specific (g/cm ³)	Type	Color	pH	Component	Brand
1.04	Liquid	Light original or light yellow	5.0 $\pm$ 1.5	Polycarboxylate	Flowmix 3000E

2.2.5 배합 및 혼합

시멘트 모르타르의 배합은 모든 물시멘트비(W/C)를 47.8%로 고정하였으며, 보통 모르타르의 목표 플로우는 190 $\pm$ 10 mm로 하였다. 탄소섬유의 길이가 6 mm와 12 mm인 2종류와 섬유혼입률을 각각 0.5%, 1.0%, 2.0% 및 3.0%의 4개의 수준으로 다양한 변화를 주어 배합비율을 정하였다. 이때 시멘

Table 6 Mix proportions of mortar

W/C (%)	C:S	Unit mass (kg/m ³)			Carbon fiber (V _f)		Content of SP (C $\times$ 1.0%)
		W	C	S	%	kg/m ³	
47.8	1:2	308	645	1,290	-	-	-
		308	645	1,290	0.5	9	6.45
		308	645	1,290	1.0	18	
		308	645	1,290	2.0	36	
		308	645	1,290	3.0	54	

* C:S : cement to fine aggregate ratio, V_f : fiber volume fraction, SP : superplasticizer

트와 잔골재의 비율(C:S)은 1:2의 비율로 선정하였다. 실험변수에 따른 모르타르의 배합설계는 Table 6과 같다. 또한 믹싱 방법은 먼저 시멘트와 잔골재를 투입하고 건비빔으로 90초 동안 혼합하였다. 섬유의 뭉침현상(fiber ball)방지 및 분산성을 확보하기 위해 탄소섬유를 투입하여 60초 동안 추가 믹싱하였다. 이후 배합수와 혼화제를 투입하고 즉시 90초 동안 혼합하고, 30초간 정지 후 붙은 모르타르를 제거하고 마지막으로 다시 혼합기를 작동시켜 60초 동안 혼합하였다. 믹싱하는 총 시간은 5분 정도 소요되었다.

2.3 실험방법

2.3.1 플로우 및 단위용적질량

시멘트 모르타르의 흐름성능을 평가하기 위해서 플로우 시험은 KS L 5111에서 규정하는 플로우 테이블을 이용하여 KS L 5105에 준하여 측정하였으며, 단위용적질량 시험은 KS F 2409 규정에 준하여 실시하였다.

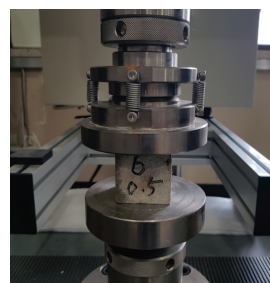
2.3.2 강도 시험방법

시멘트 모르타르의 압축 및 휨 강도 시험을 수행하기 위해 모르타르 공시체를 제작하여, 모두 재령 28일에서의 강도를 측정하였다. 압축강도 시험은 50 $\times$ 50 $\times$ 50 mm 정육면체 물드를 이용하여 각각 3개씩 제작하였으며, KS L 5105 규정에 준하여 측정하였다. 또한 휨 강도 시험은 3점 재하를 기반으로 실시하였으며, 이때 공시체 높이의 3배로 순지간은 150 mm, 높이 50 mm 이다. 중앙점 재하법에 의한 휨강도는 식 (1)과 같이 구하였다.

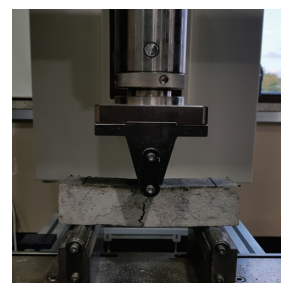
$$f_r = \frac{3PL}{2bh^2} \quad (1)$$

여기서, f_r 는 휨강도(MPa), P는 최대하중(N), L은 지점간 거리(mm), b는 시편의 폭(mm), h는 시편의 높이(mm)이다.

압축 및 휨 시험을 위하여 100 kN 용량의 만능시험기(Universal Testing Machine, UTM)를 사용하였으며, 모든 공시체에 가력속도는 3 kN/min의 일정한 속도로 가력하였다.



(a) Compressive test



(b) Flexural test

Photo 2 Compressive and flexural strength test

Photo 2는 본 실험에 사용된 장비와 시편의 설치모습을 나타낸 것이다.

2.3.3 내충격성 시험방법

내충격성 시험은 KS F 2221(건축용 보드류의 충격 시험방법)과 KS F 4041(시멘트계 자기 수평 모르타르)에 준하여 실시하였다. 시험장치를 제작한 후 모래 위 전체면 지지방법으로 수평으로 놓고, 시편 표면의 거의 중앙의 연직 위에서 구형 추 1,000 g의 쇠 구슬로 크기가 400×300×30 mm의 모르타르 시편에 낙하 높이 90 cm에서 자연 낙하시킨 후 초기균열이 발생한 횟수와 시편이 최종 파괴될 때까지의 횟수를 측정하였다. 또한 모르타르 시편에 대한 충격면(전면, 배면)의 파괴양상을 육안으로 관찰하였다. Photo 3은 내충격성 시험을 위한 모르타르 시편의 설치모습을 나타낸 것이다.

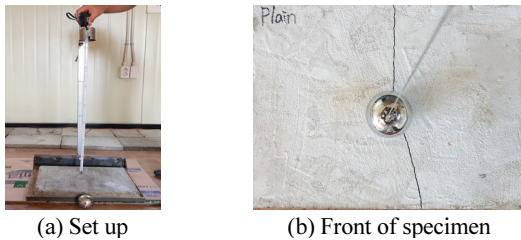
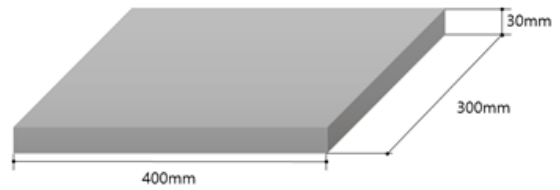


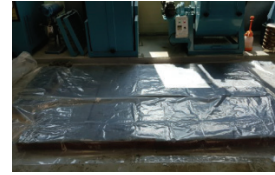
Photo 3 View of setup for impact resistance test

2.3.4 시편제작 및 각 단계별 시험흐름

내충격성 시험을 위한 시편의 크기는 400×300 mm의 직사각형이고 두께는 30 mm로 일정하게 하여 각각의 탄소섬유의 길이와 혼입률을 변화시켜 시편을 제작하였다. 시편 제작 후 플라스틱 시트로 덮어 상온에서 2일간 보관하고 성형체를 몰드에서 꺼내고 탈형하고, 시험일까지 재령 28일 동안 기건상태에서 양생하였다. Photo 4는 내충격성 시험용 모르타르 시편의 모식도 및 양생모습을 나타낸 것이다. 한편 Photo 5는 탄소섬유를 혼입한 CFRC의 시험수행을 위한 각 단계별 주요 시



(a) Schematic diagram



(b) Curing appearance

Photo 4 Schematic diagram and curing process of mortar specimens

험절차 및 진행 과정을 나타낸 것이다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 모르타르의 특성

3.1.1 유동성 변화

Fig. 1은 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC와 보통 모르타르의 흐름성능을 나타내었다. Fig. 1에서 보는 바와 같이 보통 모르타르의 배합에서는 199 mm로 목표 플로우 값 190 ± 10 mm를 만족하였다. 탄소섬유의 길이별 플로우 값의 변화는 미소하지만, 탄소섬유의 혼입량이 증가함에 따라 흐름성능이 상당히 감소하는 경향을 보이고 있었다. 또한 탄소섬유를 혼입하였을 때 모르타르 내 작은 lump가 관찰되었으며, 위커빌리티가 급격히 감소함을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 탄소벽 빈 구조를 가지고 있기 때문에 혼합수 일부 흡수로 인해 모르타르의 점성증가로 섬유의 뭉침현상에 의한 것으로 보통 모르타르에 비해 플로우 값 감소를 나

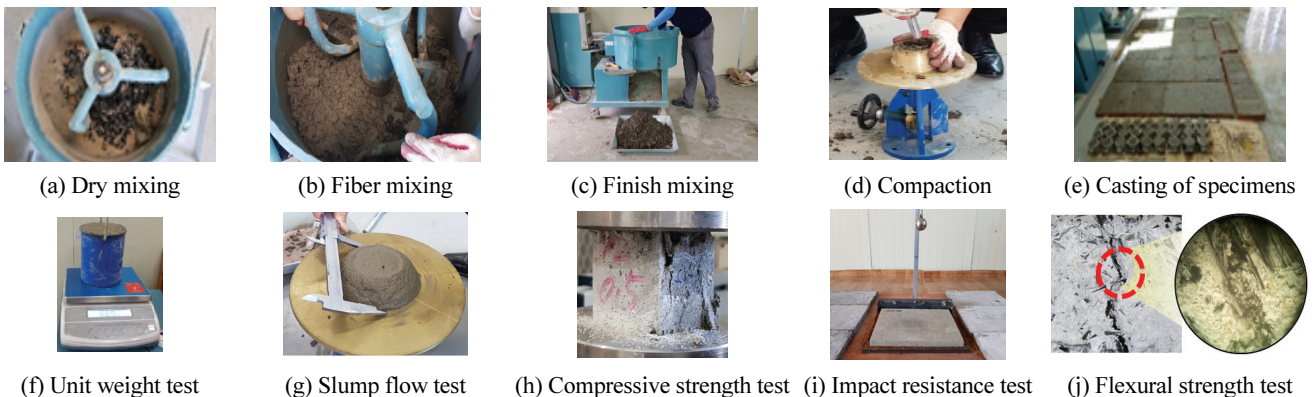


Photo 5 Test procedures and progress of CFRC by every stages

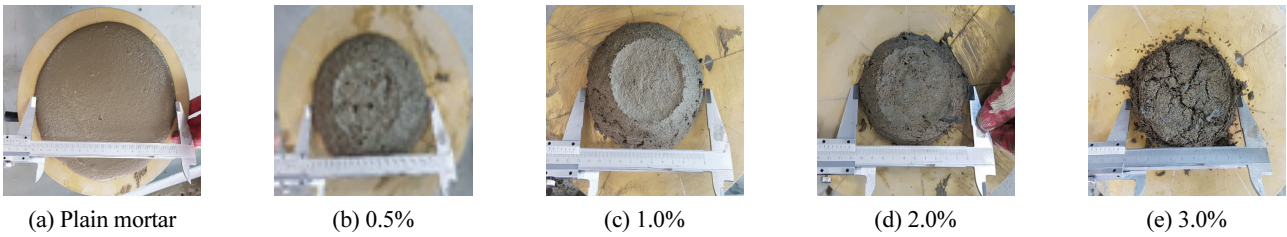


Photo 6 Ex perimental features of flow test due to various fiber contents

타낸 것으로 판단된다.

Photo 6은 굳지 않은 보통 모르타르와 섬유혼입물 변화에 따른 유동 특성을 사진으로 나타낸 것이다. 건식 혼합 시 섬유의 뭉침과 편재(偏在)가 일어나며 습식 혼합 시에도 원활한 분산성(dispersibility)이 어렵게 하는 경향이 있을 뿐만 아니라 섬유혼입량이 증가함에 따라 각 섬유간 엉킴이 쉽게 발생하여 작업성(workability)에도 큰 영향을 주었다. 특히, 3% 혼입한 경우 섬유의 재료분리와 뭉침 현상이 심하게 발생한 것으로 편재로 인해 갈라져 모르타르의 형성이 어려운 상황이었다.

3.1.2 단위용적질량 변화

Fig. 2는 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC와 보통 모르타르의 단위용적질량을 나타내었다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 탄소섬유의 혼입률이 증가함에 따라 단위용적질량은 다소 감소하는 경향을 보였으며, 탄소섬유길이와 관계없이 보통 모르타르에 비해 단위용적질량이 모두 감

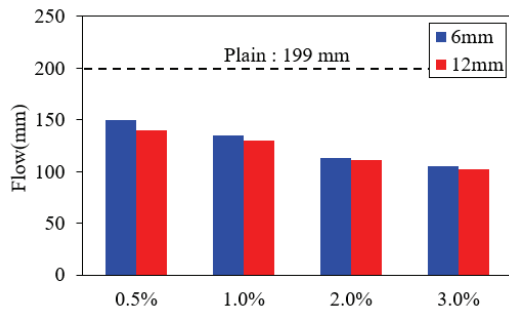


Fig. 1 Flow test results of CFRC and plain mortar

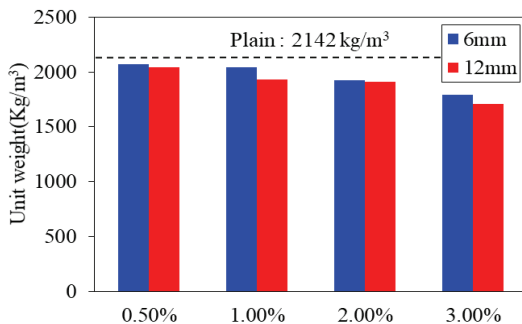


Fig. 2 Unit weight test results of CFRC and plain mortar

소하였다. 이와 같은 결과는 시멘트 밀도와 탄소섬유의 밀도 차이에 의한 것으로 밀도가 시멘트 보다 상대적으로 작은 탄소섬유가 다량으로 혼입되어 단위용적질량이 감소한 것으로 사료된다. CRFC의 단위용적질량은 탄소섬유의 혼입률이 증가함에 따라 약 4%씩 이상 감소시킬 수 있었으며, 보통 모르타르의 16~20% 정도 감소시킬 수 있었다.

3.2 굳은 모르타르의 특성

3.2.1 압축 및 휨 강도 특성

CFRC와 보통 모르타르에 대한 압축강도 및 휨강도의 시험 결과는 Table 7과 같다. Fig. 3은 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC와 보통 모르타르의 압축강도에 미치는 영향을 나타내었다. 이러한 연구결과는 기존의 다른 연구자들에 의해서도 보고되었다(Boulfiza, 2000 and Lee, 1994). 즉, 높은 혼입률은 섬유의 분산성 저하로 인해 뭉침현상이 발생하여 압축강도 저하에 따른 큰 영향을 받는 것으로 검토된 바 있다. Fig. 3에서 보는 바와 같이 CFRC의 압축강도는 보통 모르타르에 비해 탄소섬유의 혼입률이 증가함에 따라 점차 감소하는 경향이 더 크게 나타났다. 본 실험결과로부터 탄소섬유를 0.5% 혼입한 경우 보통 모르타르에 비해 압축강도가 3.3~3.9 MPa 감소하는 것으로 나타났으며, 1.0% 혼입한 경우

Table 7 Results of mortar strength tests

Type of mortar	Fiber volume fractions (%)	Concrete strength(MPa)		f_{cu}/f_r
		f_{cu}	f_r	
Plain	0.0	39.2	3.2	12.3
CFRC (6 mm)	0.5	35.9	3.2	11.2
	1.0	32.6	3.9	8.4
	2.0	25.0	3.8	6.6
	3.0	13.1	2.2	6.0
CFRC (12 mm)	0.5	35.3	3.8	9.3
	1.0	31.3	3.5	8.9
	2.0	29.8	4.7	6.3
	3.0	22.0	3.6	6.1

* f_{cu} : Average of measured compressive strength at 28 days,

f_r : Average of measured flexural strength at 28 days

6.6~7.9 MPa 감소하는 것으로 나타났다. 또한, 탄소섬유를 2.0% 혼입한 경우 보통 모르타르에 비해 압축강도가 9.4~14.2 MPa 감소하는 것으로 나타났으며, 3.0% 혼입한 경우 17.2~26.1 MPa 감소하는 것으로 나타났다. 즉, 압축강도는 0.5%와 1.0% 혼입한 경우 0.6~1.3MPa 정도 감소하여 약간 편차가 발생하였다. 하지만 2%와 3.0% 혼입한 경우 4.8~8.9MPa 정도 압축강도가 크게 감소함을 확인할 수 있었다. 특히, 탄소섬유 혼입률이 2.0% 이상인 경우 시멘트 매트릭스 내의 섬유가 균일하게 분산시키기가 어렵고 섬유끼리 엉키는 뭉침현상이 발생하며, 충분히 분산되지 않아 오히려 압축강도가 급격히 감소하였다. 또한 탄소섬유 길이 6mm와 12mm의 사용에 따른 압축강도는 0.5%와 1.0% 혼입한 경우 거의 비슷하거나 약간 차이가 있음을 보였는데, 2.0%와 3.0% 혼입한 경우 약 16.1~40.4% 크게 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 섬유길이가 6mm인 경우 보다는 12mm의 사용이 더 크게 나타나 효율적이었다. 따라서 CFRC의 경우 위커빌리티를 최대한 유지하면서 압축강도 확보 측면에서 0.5~1.0%일 때 가장 적절한 섬유혼입률인 것으로 판단된다. 높은 혼입률로 인해 압축강도가 급격히 감소하는 경향을 보여 강도개선을 위한 추가적인 연구가 필요한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC

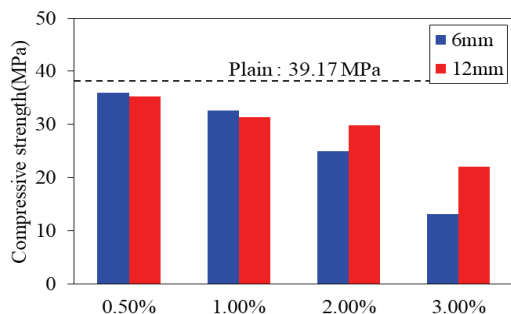


Fig. 3 Relationship between compressive strengths of CFRC and plain mortar

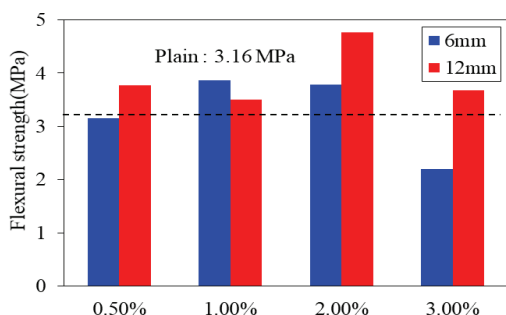


Fig. 4 Relationship between flexural strengths of CFRC and plain mortar

와 보통 모르타르의 휨 강도에 미치는 영향을 나타내었다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 휨 강도는 섬유길이가 6 mm이고 3% 혼입한 경우를 제외한 모든 종류에서 보통 모르타르에 비하여 같거나 다소 높은 휨 강도를 발휘하는 것으로 나타났다. 특히 섬유길이가 12 mm이고 2% 혼입한 경우 가장 우수한 휨 강도를 나타내었으며, 보통 모르타르에 비해 약 47% 높은 것으로 확인되었다.

이와 같은 결과는 혼입된 섬유가 가교역할을 함으로서 균열의 진전을 막아주고 응력의 재분배를 통해 휨 강도를 향상시켰기 때문이라고 판단된다. 섬유혼입률이 2% 까지 섬유혼입 시 휨 강도가 향상되었지만 그 이상 혼입 시에는 증가효과가 그리 크지 않으며, 섬유길이가 6 mm이고 3% 혼입한 경우 높은 혼입률로 인해 분산성 및 마감 성능면에서 양호하지 못하기 때문에 가장 낮은 휨 강도를 갖고 있음을 알 수 있었다. 또한 압축강도에 대한 휨 강도 비는 섬유혼입량 증가에 따라 섬유길이가 6 mm의 경우 1/11.2~1/6.0과 섬유길이가 12 mm의 경우 1/9.3~1/6.1 정도로 되어 보통 모르타르의 경우 1/12.3 정도 보다 압축강도에 대한 휨 강도가 크게 증가하는 것으로 나타났다.

3.2.2 휨 응력과 변위 곡선

Fig. 5는 각각의 공시체 3개에 대해 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC와 보통 모르타르의 휨 응력과 변위 곡선관계를 나타내었다. Fig. 5에서 보는 바와 같이 보통 모르타르의 경우 휨 응력은 초기에 거의 일정하게 선형거동으로 변위가 증가하다가 최대 휨 응력이 도달한 이후 변위 증가 없이 갑작스럽게 파괴되어 취성적인 거동을 뚜렷하게 나타내었다. 반면 CFRC의 경우 섬유길이 및 혼입률이 증가함에 따라 다른 특성을 보여 주었으나, 최대응력 이후 변위 곡선은 일정 변위까지 유지하다가 하강 기울기가 완만하게 떨어지면서 변위가 증가하는 연성적인 거동을 보여 주었다. 이와 같은 결과는 탄소섬유의 가교작용(bridging effect)으로 인해 균열발생과 균열진전을 막아주고 섬유의 제어효과로 급격한 취성파괴를 방지하기 때문으로 판단된다. 특히, 섬유길이가 12 mm이고 2% 혼입한 경우 가장 우수한 휨 성능을 보였으며, 섬유길이가 6 mm이고 3% 혼입한 경우에는 높은 혼입량으로 인해 섬유의 뭉침현상 등에 의해 오히려 휨 응력이 급격히 저하되었다.

3.3 내충격성 검토

탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC 시편과 보통 모르타르 시편에 대한 전면과 배면의 균열 및 파괴양상은 Table 8과 같다. 보통 모르타르 시편의 경우 수직 또는 사선 방향으로 갑작스런 미소균열의 발생과 동시에 취성적인 파괴

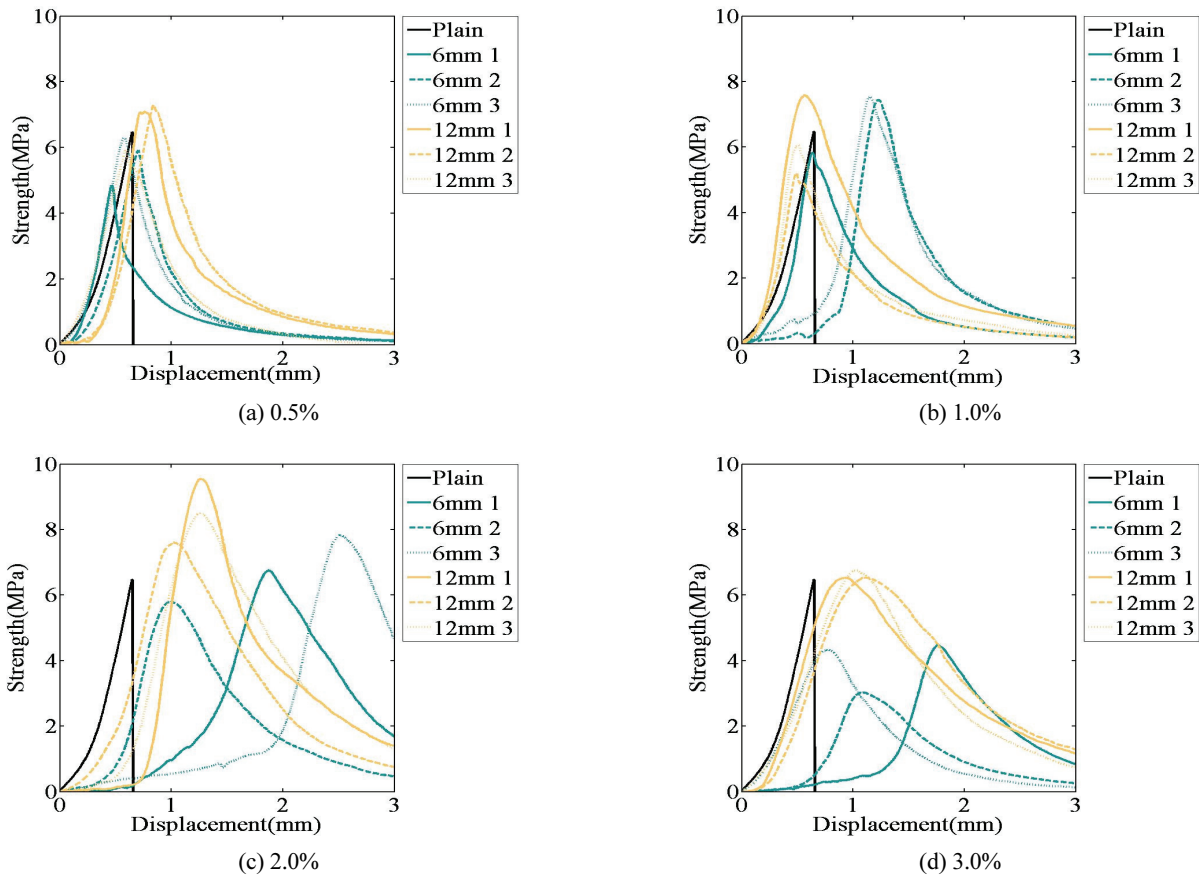


Fig. 5 Relationship between flexural stress-displacement curves of CFRC and plain mortar

양상을 보이는 반면 CFRC 시편의 경우 수직 또는 사선 방향으로 초기 균열의 성장과 진전현상을 보이는 것을 알 수 있는데, 이는 외부로부터 전해지는 충격을 시편 내의 섬유가 인장력을 발휘하여 충격에 대한 저항성이 증가한 것으로 검토되었다. 섬유길이에 관계없이 섬유혼입률 2% 이상인 경우 시편에 수직 또는 방사형의 균열이 발생하였으며, 초기 균열발생 후 인장응력이 감소하지 않고 연성거동을 보이고 미세한 복수균열(multiple micro cracking)을 생성하여 낙하횟수가 증가함에 따라 전면의 관통 또는 미소 박리와 함께 배면의 중앙부에 커다란 박리·박락이 형성되면서 뚜렷한 파괴양상을 보였다.

Fig. 6은 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 CFRC 시편과 보통 모르타르 시편에 대한 초기 균열 및 완전 파괴까지의 낙하횟수를 나타내었다. 보통 모르타르 시편의 경우 초기 균열발생에서 완전파괴까지의 낙하횟수는 1~2회 정도로 나타내어 시편 내에서 연성이 거의 작용하지 않는 것으로 나타났다. 반면에 CFRC 시편은 섬유혼입률 증가에 따라 낙하횟수는 상당히 증가되었으며, 섬유길이가 12 mm이고 2.0% 혼입한 경우 초기 균열 발생부터 완전파괴까지의 낙하횟수가 66회로서, 초기 균열이 발생한 후에 섬유의 연성이 시편에 작용하여 낙하횟수가 상당히 증가되었다. 이와 같은 결

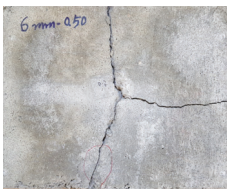
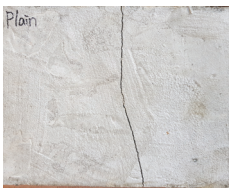
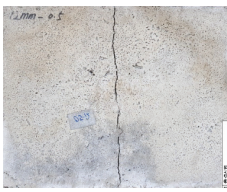
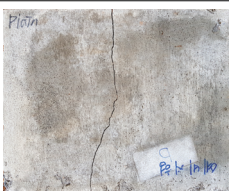
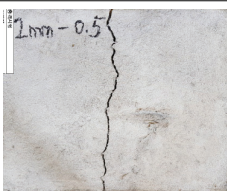
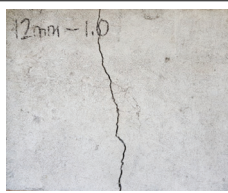
과는 CFRC 시편은 섬유의 가교작용에 의해 시편에 전체적으로 분산되어 초기 균열 발생부터 완전파괴까지 시기가 늦춰진 것으로 판단된다. 또한 섬유길이가 6 mm인 시편의 내충격성은 섬유길이가 12 mm인 시편의 내충격성 보다 낮은 것을 확인할 수 있었는데, 이는 섬유길이가 50% 감소함으로 인하여 12mm 섬유에 비하여 섬유사이의 가교현상이 충분히 일어날 수 없었기 때문으로 판단된다.

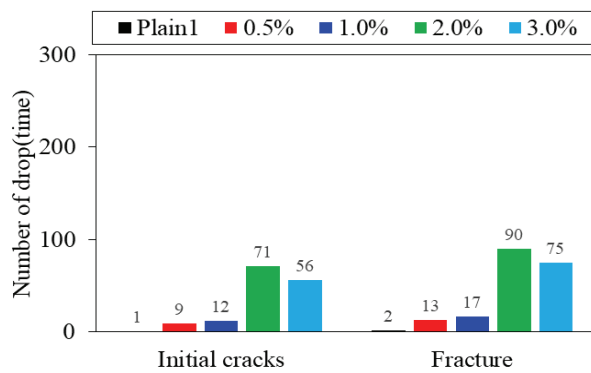
4. 결 론

본 연구는 탄소섬유의 혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 탄소섬유 보강시멘트 복합재료의 역학적 특성과 휨 거동을 분석하였으며, 또한 모르타르 시편에 대한 내충격성을 비교, 검토하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과를 요약하면 다음과 같다.

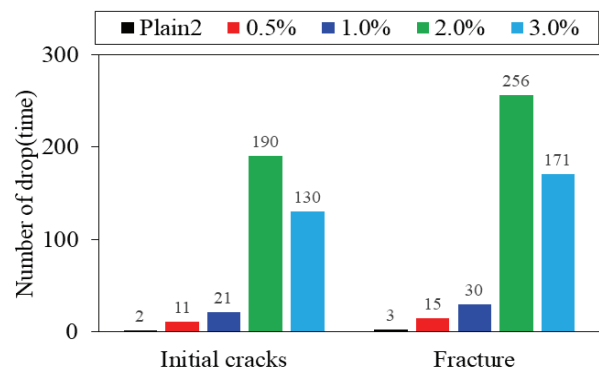
1. 보통 모르타르의 목표 플로우 값은 만족하였으나, 탄소 섬유혼입 시 혼합 수 일부 흡수로 인해 보통 모르타르에

Table 8 Observed failure pattern of specimens

Specimen	No.1 of plain mortar	CFRC 6mm-0.5%	CFRC 6mm-1.0%	CFRC 6mm-2.0%	CFRC 6mm-3.0%
Front					
Rear					
Specimen	No.2 of plain mortar	CFRC 12mm-0.5%	CFRC 12mm-1.0%	CFRC 12mm-2.0%	CFRC 12mm-3.0%
Front					
Rear					



(a) 6 mm with carbon fiber length



(b) 12 mm with carbon fiber length

Fig. 6 Number of drop for specimens of CFRC and plain mortar

비해 상당히 감소하는 것으로 나타내어 탄소섬유 혼입량 증가에 따른 유동성 확보대책이 요구된다. 또한 단위용적질량은 탄소섬유의 변화에 따라 보통 모르타르의 16~20% 정도 감소하는 것을 확인할 수 있었다.

- CFRC의 압축강도는 보통 모르타르에 비해 다소 감소하였으며, 탄소섬유 혼입량 증가에 따라 압축강도가 감소하는 경향이 더 크게 나타내었다. 특히, 탄소섬유를 3%

이상 혼입하는 경우 압축강도가 급격하게 감소되었다. 반면 CFRC의 휨 강도는 보통 모르타르에 비해 47% 정도 높게 측정되었으며, 섬유길이가 12 mm이고 2% 혼입한 것이 가장 높은 휨 강도를 나타내었다.

- 휨 응력과 변위 곡선에서 CFRC의 경우 보통 모르타르에 비해 최대 휨 응력을 얻었으며, 파괴에 도달할 때까지 길어지고 변위도 크게 증가하였다. 이것은 탄소섬유를 혼

입하였을 때 시편 내에서 가교역할을 함으로서 모르타르의 인성에 기여하였기 때문에 보통 모르타르 보다 휨 성능이 향상된 것으로 판단된다.

4. 내충격성 시험결과, 보통 모르타르의 시편은 완전파괴까지의 낙하횟수가 2~3회 정도 걸리는 반면 CFRC의 시편은 혼입량 증가에 따라 다소 차이가 있지만, 섬유길이가 12 mm이고 2% 혼입한 경우 초기 균열 발생부터 완전파괴까지 낙하횟수가 66회로 현저히 증가하는 것으로 나타내 섬유에 의한 연성이 시편에 작용하여 외부 충격에 가장 높은 저항성을 나타내었다. 따라서 보통 모르타르의 시편은 취성파괴의 거동을 보이는 반면 CFRC의 시편은 연성파괴의 거동을 보였다.

이러한 결과를 통하여 CFRC의 뭉침방지 및 유동성 확보를 위한 추가 연구가 요구되며, 탄소섬유와 시멘트 매트릭스 사이의 계면특성과 CFRC의 역학적 특성에 관한 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 입니다.(No. NRF-2018R1A6A1A03025542).

References

1. Boulfiza, M., Banthia, N., and Sakai, K. (2000), Application of Continuum Damage Mechanics to Carbon Fiber-Reinforced Cement Composites, *ACI Materials Journal*, 98(3), 245-253.
2. Chen, P., and Chung, D.D.L. (1996), A Comparative Study of Concrete Reinforced with Carbon, Polyethylene, and Steel Fibers and Their Improvement by Latex Addition, *ACI Materials Journal*, 93(2), 129-133.
3. Choi, J.I., Koh, K.T., and Lee, B.Y. (2015), Tensile Behavior of Ultra-High Performance According to Combination of Fibers, *Journal of the Korea Institute for Structural of Maintenance and Inspection*, 19(4), 49-56.
4. Chung, D.D.L. (2005), Dispersion of Shot Fibers in Cement, *Journal of Materials in Civil Engineering*, ASCE, 17(4), 379-383.
5. Heo, G.H., Park, J.G., Kim, C.G., Lee, H.J., and Choi, W.S. (2019), Impact Fracture Behavior under Temperature Variation and Compressive · Flexural Strength of Cement Composites using VAE Powder Polymer and PVA Fiber, *Journal of the Korea Institute for Structural of Maintenance and Inspection*, 23(1), 102-112.
6. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2007),

- Testing Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortar(KS L 5105), Korea Standards Association, KSA, 6(In Korea)
7. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2017), Flow Table for use in Tests of Hydraulic Cement(KS L 5111), Korea Standards Association, KSA, 6(In Korea)
8. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2009), Test Method of Impact for Building Boards(KS F 2221), Korea Standards Association, KSA, 6(In Korea)
9. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2016), Standard Test Method for Flexural Strength of oncrete(KS F 2408), Korea Standards Association, KSA, 7(In Korea)
10. Korea Agency for Technology and Standard (KATS) (2014), Standard Test Method for Density and Absorption of Fine Aggregate(KS F 2504), Korea Standards Association, KSA, 8(In Korea)
11. Lee, S.Y., and Park, Y.D. (1994), Mechanical Properties of High Strength Carbon Fiber Reinforced Cement Composites, *RIST Report*, 8(2), 321-330.
12. Li, V.C., Wang, S., and Wu, C. (2001), Tensile Strain-Harding Behavior of Polyvinyl Alcohol Engineered Cementitious Composite(PVC-ECC), *ACI Materials Journal*, 98(6), 483-492.
13. Lu, M., Xiao, H., Liu, M., Li, H., and Sun, L. (2018), Improved Interfacial Strength of SiO₂ Coated Carbon Fiber in Cement Matrix, *Cement and Concrete Composites*, 91, 21-28.
14. Min, K.H., Lee, J.Y., Kim, M.H., and Yoon, Y.S. (2011), Behavior of Concrete Segmented Composites using Polymer Mortar under Static and Impact Loadings, *Journal of the Korea Institute for Structural of Maintenance and Inspection*, 15(5), 169-177.
15. Oh, S.W., Jung, S.H., Chung, W.S., and Choi, Y.C. (2018), Investigation of the Effect of CNT Dosages on the Hydration and Heating Properties of Cement Composites with Low Water-to-Binder Ratio, *Journal of the Korea Institute for Structural of Maintenance and Inspection*, 22(6), 182-188.
16. Reda Tada, M.M., and Shrive, N.G. (2001), Enhancing Fracture Toughness of High-Performance Carbon Fiber Cement Composites, *ACI Materials Journal*, 98(1), 168-178.
17. Son, M.J., Kim, G.Y., Lee, S.K., Kim, H.S., and Nam, Y.S. (2017), Tensile Behavior of Hybrid Fiber Reinforced Cement Composite According to the Hooked Steel Fiber and Polyvinyl Alcohol Fiber Blending Ratio and Strain and Strain Rate, *Journal of the Korea Institute for Structural of Maintenance and Inspection*, 21(6), 98-105.
18. Wang, K., Shah, P.S., and Pariya. P. (2001), Plastic Shrinkage Cracking in Concrete Materials Influence by Fly and Fibers, *ACI Materials Journal*, 98(6), 454-464.
19. Wang, W., and Chouw, N. (2017), Behavior of CFRC Beams Strengthened by FFRP Laminates under Static and Impact Loading, *Construction and Building Materials*, 155(2017), 956-964.

Received : 02/22/2019

Revised : 04/13/2019

Accepted : 06/24/2019

요 지 : 탄소섬유는 경량이면서 높은 기계적 특성 때문에 우주항공, 선박, 자동차, 토목 및 건축과 같은 산업분야에서 그 어느 때 보다 더 광범위하게 적용되고 있다. 본 연구는 섬유혼입률 및 섬유길이 변화에 따른 탄소섬유 보강시멘트 복합재료(CFRC)의 역학적 특성과 휨 거동을 분석하였으며, 또한 자연 낙하시험에 의한 모르타르 시편에 대한 내충격성을 비교, 검토하였다. 더불어, 탄소섬유(CF)의 혼입률은 0.5%, 1.0%, 2.0% 및 3.0%로 변화를 주었으며, 각각의 섬유길이는 6 mm와 12 mm를 사용 하였다. 실험결과, 플로우 값은 탄소섬유의 뭉침현상으로 인해 유동성 측면에서 매우 불리하였으며, 단위용적질량은 다소 감소하였다. 특히, 압축강도는 탄소섬유 혼입량이 증가함에 따라 감소하는 것으로 나타내었다. 반면 휨 강도는 섬유 길이가 12 mm이고 2% 혼입한 것이 가장 높은 휨 강도를 보였다. 내충격성 시험결과, 보통 모르타르 시편은 완전파괴까지의 낙하횟수가 2~3회 정도 걸리지만 반면 CFRC 시편은 섬유혼입량이 증가함에 따라 다소 차이가 있지만, 섬유길이가 12 mm이고 섬유혼입량 2% 인 경우 충격에 대한 저항성이 가장 높았다.

핵심용어 : 탄소섬유(CF), 탄소섬유 보강시멘트 복합재료(CFRC), 플로우 값, 휨 강도, 내충격성 시험
