

# TBM 터널 세그먼트용 60 MPa급 강섬유보강콘크리트의 휨성능 평가

문도영<sup>1</sup> · 강태성<sup>2</sup> · 장수호<sup>3</sup> · 이규필<sup>4\*</sup> · 배규진<sup>5</sup>

<sup>1</sup>비회원, 경성대학교 토목공학과 조교수

<sup>2</sup>비회원, 삼표건설, 연구개발팀 과장

<sup>3</sup>정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 연구위원

<sup>4</sup>정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 수석연구원

<sup>5</sup>정회원, 한국건설기술연구원 Geo-인프라연구실 선임연구위원

## Flexural performance evaluation of SFRC with design strength of 60 MPa

Do-Young Moon<sup>1</sup>, Tae-Sung Kang<sup>2</sup>, Soo-Ho Chang<sup>3</sup>, Gyu-Phil Lee<sup>4\*</sup>, Gyu-Jin Bae<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Department of Civil Engineering, KyungSung Univ. Assistant Professor

<sup>2</sup>SAMPYO Construction & Engineering co. Ltd., R&D Department, Manager

<sup>3</sup>Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Research Fellow

<sup>4</sup>Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Researcher

<sup>5</sup>Geotechnical Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology, Senior Research Fellow

**ABSTRACT:** Based on Model Code 2010, flexural and residual strength, flexural toughness of SFRC with design strength of 60 MPa are evaluated. For comparisons, SFRC with design strength 40 MPa was tested. Distribution of steel fibers in crack surface of specimens was evaluated by visual inspection. The used steel fibers were hooked fibers with aspect ratio of 64, 67 and 80. In all specimens, mix ratio of steel fibers was 0.5% Vol. In results, only SFRC with the highest aspect ratio satisfied requirements specified in Model Code 2010. The results demonstrated that the use of high aspect ratio will provide enough flexural toughness for high strength concrete. Also, it is found that low slump of high strength concrete can help to enhance isotropic fiber distribution.

**Keywords:** Flexural Strength, SFRC, Fiber Distribution, High Strength

**초 록:** 본 연구에서는 Model Code 2010에 제시된 실험방법에 근거하여 설계강도 60MPa의 강섬유보강 콘크리트의 휨강도와 잔존강도, 휨인성을 평가하였다. 비교를 위하여 설계강도 40MPa의 강섬유보강 콘크리트도 실험하였다. 또한, 배합의 평가를 위하여 파괴된 시험체의 파괴면을 육안으로 관찰하여 강섬유의 분산도를 평가하였다. 본 실험에서 사용된 강섬유는 형상비 64, 67 및 80의 국내산 후크 강섬유이다. 강섬유 혼입률은 체적에 대하여 0.5%로 동일하다. 실험결과, 설계강도 60MPa에서는 형상비가 큰 강섬유가 혼입된 강섬유보강 콘크리트만이 Model Code 2010에서 제시된 요구성능을 만족하는 것으로 나타났다. 고강도 콘크리트에서는 큰 형상비의 강섬유가 심대한 균열에서 충분한 인성을 확보하는데 기여할 수 있는 것으로 판단된다. 또한, 섬유의 고른 분산도 확보를 위해서는 낮은 슬럼프가 유리한 것으로 나타났다.

**주요어:** 휨강도, 강섬유 보강콘크리트, 섬유분산, 고강도

## 1. 서론

TBM 터널에서 세그먼트는 영구적인 구조체로서 사용된다. 세그먼트는 터널의 시공중에는 TBM 장비의 전방추진력을 얻기 위한 반력 구조로 활용되므로 큰 압축력을 받게 된다. 이때 세그먼트 종방향 단부에

\*Corresponding author: Gyu-Phil Lee  
E-mail: freely@kict.re.kr

Received April 3, 2013; Revised April 26, 2013;  
Accepted May 10, 2013

는 국부적으로 파열력이 발생되고, 이로 인한 균열이 발생할 수 있다. 또한, 세그먼트의 운반 및 가설시 충격 등으로 인한 단면 손실이 자주 발생하며, 이는 세그먼트의 가설을 어렵게 하며 장기적인 내구성에도 영향을 줄 수 있다. 이상과 같은 문제점을 해결하기 위한 적극적인 해결방안의 하나로써 강섬유보강 콘크리트의 사용이 고려되고 있다. 강섬유보강 콘크리트는 강섬유가 콘크리트에 발생한 균열을 연결하여 우수한 균열저항능을 나타내기 때문에 파열력에 의한 균열 발생의 억제, 충격 등으로 인한 단면의 손실 등에 효과적이다(Chiaia et al., 2009; Rivaz, 2008; Grunewald and Walraven, 2009).

최근 콘크리트설계기준의 개정 내용에는 항복강도 400 MPa 이상의 고강도 철근을 주철근으로 사용할 수 있다는 내용을 포함하고 있다. 이와 같은 개정은 재료 및 시공기술의 개선에 근거하였으며, 각종 콘크리트 구조물의 구조최적화에 기여할 것으로 기대된다. 그러나 궁극적인 구조최적화를 위해서는 철근의 고강도화와 더불어 콘크리트의 고강도화가 필요하다. 물론 현재 일반 콘크리트의 기술은 압축강도 100 MPa 이상 발현이 가능한 상황이다. 그러나 강섬유보강 콘크리트는 압축강도의 발현도 중요하지만 휨인성(Toughness)이 더욱 중요하다. 강섬유의 고른 혼입상태가 휨인성을 좌우하는데 고강도가 될수록 단위수량이 적어지기 때문에 섬유的高 혼입을 확보하는 것이 어렵다(Zandi et al., 2011; Lee et al., 2013). 그러므로 설계강도 40 MPa 이상의 고강도 콘크리트에서 균일한 섬유혼입을 통한 적절한 휨인성을 확보하는 것이 쉽지 않다.

본 연구에서는 강섬유의 혼입률이 체적비에 대하여 1% 미만인 강섬유보강 콘크리트를 대상으로 하였다. ECC (Engineered Cementitious Composites)와 UHPC (Ultra-High Performance Cementitious Composites)의 경우에는 매우 높은 압축강도를 나타내지만, 굵은 골재가 매우 작으며, 강섬유의 양이 3% Vol. 사용되는 특수한 콘크리트로서, 본 연구의 범위에 해당하지 않는

다. 본 연구에서는 섬유의 혼입률 0.5%를 대상으로 하였다. 현재 전술한 바와 같은 고성능 콘크리트가 아닌 일반적인 구조체에 활용되는 강섬유의 혼입량은 최대 1% 미만이며, 대부분 0.5%이기 때문이다. 또한, 국외에서 개발된 강섬유보강 콘크리트 TBM 세그먼트도 대부분 0.5%의 섬유혼입률을 사용하고 있다(Rivaz, 2008).

본 연구에서는 TBM 터널의 고강도 세그먼트에 사용될 설계강도 60 MPa의 0.5% 함유 강섬유보강 콘크리트의 휨인성 및 강섬유 분산도에 대한 평가를 수행하였다. 비교를 위하여 압축강도 40 MPa의 0.5% 함유 강섬유보강 콘크리트도 실험하였다. 실험방법은 유로코드 BS EN 14651 (2005)에 규정하고 있는 노치가 있는 실험체를 사용하여 실험을 수행하였으며, Model Code 2010 (2010)에 제시된 평가기준에 근거하여 평가하였다. 또한, 강섬유의 혼입상태를 판단하기 위하여 실험 후 시험체를 파괴, 절단하여 내부단면의 정밀관찰을 수행하고 강섬유의 개수를 조사하였다.

## 2. 실험방법

### 2.1 강섬유 및 콘크리트

강섬유의 단부형태, 강섬유의 길이와 직경의 비는 휨인성에 영향을 미치는 매우 중요한 인자이다(Soulioti et al., 2011; Barros and Antunes, 2003). 본 연구에서는 단부가 후크형태의 강섬유가 사용되었다. 형상비에 따른 성능을 비교하기 위하여 형상비 64, 67 및 80의 강섬유를 사용하였다. 형상비 64의 강섬유는 길이가 35 mm, 직경이 0.55 mm, 67의 강섬유는 길이 60 mm, 직경 0.90 mm, 80의 강섬유는 길이 60 mm, 직경 0.75 mm이다. 강섬유의 혼입률은 40 kg/m<sup>3</sup>이며, 이는 체적에 대하여 0.5%에 해당한다.

시험체의 제작에 사용된 콘크리트의 골재는 최대치수 20 mm, 석산에서 채취한 부순모래를 사용하였다. 시멘트는 현대시멘트의 제 1종 포틀랜드 제품을 사용

Table 1. Mix proportion

Design strength (length/diameter)	W/B	S/a	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )								
			W	C	S/P	B	S	G	AD	Fibers	
										Fiber- $\alpha$	Steel fiber
40 MPa (35/0.55)	35.7	50	150	420	-	420	900	903	4.20 (1.0%)	0.414 (0.03%)	40
40 MPa (60/0.90)	35.7	48	150	420	-	420	864	939	4.20 (1.0%)	0.414 (0.03%)	40
40 MPa (60/0.75)	35.7	52	150	420	-	420	936	867	5.04 (1.2%)	0.414 (0.03%)	40
60 MPa (35/0.55)	28.0	48	140	350	150	500	838	911	5.50 (1.1%)	0.690 (0.05%)	40
60 MPa (60/0.90)	28.0	48	140	350	150	500	838	911	5.5 (1.1%)	0.690 (0.05%)	40
60 MPa (60/0.75)	28.0	50	140	350	150	500	873	876	6.00 (1.2%)	0.690 (0.05%)	40

Table 2. Compressive strength results

Design compressive strength	Specimen ID	Steel fibers [length/diameter=aspect ratio]	18hour (MPa)	7day (MPa)
40 MPa	A-40-0.5	35/0.55=64	38.9	47.5
	B-40-0.5	60/0.90=67	39.4	45.4
	C-40-0.5	60/0.75=80	38.7	45.5
60 MPa	A-60-0.5	35/0.55=64	52.2	65.4
	B-60-0.5	60/0.90=67	52.7	60.7
	C-60-0.5	60/0.75=80	52.4	64.2

하였으며, 고로슬래그 미분말은 삼표기초소재에서 생산한 제품을 사용하였다. 혼화제는 폴리카르본산계를 변형시켜 조기성능이 확보될 수 있도록 수정한 삼표준 PC 혼화제를 사용하였다. 상세한 강도별 콘크리트 배합표는 Table 1과 같다.

각 배합에 대하여 굳지 않은 콘크리트의 슬럼프와 공기량을 측정하였다. 슬럼프는 설계강도 60 MPa 강섬유보강콘크리트는 40 mm, 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트는 80 mm인 것으로 나타나 약 두배의 차이가 발생함을 확인하였으며, 공기량의 경우에는 1.5% ± 1%인 것으로 나타났다.

시험체 타설 중 각 배합에 대하여 150 mm×300 mm의 표준공시체를 제작하였다. 타설 후 모든 시험체와 압축공시체는 증기양생실에서 양생되었으며, 18

시간의 증기양생 후 즉시 3개의 압축시험편에 대하여 1차 압축강도 실험을 실시하였다. 이후 모든 시험체는 증기양생실에서 꺼내어져 항온항습실에서 양생되었으며, 7일 경과 후 3개의 압축시험편에 대하여 2차 압축강도 실험을 실시하였다. 압축강도 결과는 Table 2와 같다.

제시된 결과와 같이 18시간의 증기양생후 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트는 이미 설계강도의 90% 이상의 압축강도가 발현되었으며, 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 경우에는 설계강도의 약 87%에 달하는 것을 확인하였다. 7일 재령시에는 모두 설계강도 이상의 강도가 발현되었다. Table 1에서 W/B는 물-결합제비, S/a는 잔골재율을 나타내며, W는 물, C는 시멘트, S/P는 슬래그 치환량, B는 바인

더를 의미하는 것으로 시멘트와 슬래그의 총량을 이른다. S는 모래, G는 자갈, AD는 혼화제, Fiber- $\alpha$ 는 폴리프로필렌섬유를 의미한다.

## 2.2 시험체 및 시험방법

힘인성 평가시험은 최대하중에서의 변위가 0.1 mm 이하로 발생하기 때문에 매우 정밀한 시험이 요구되는 시험이다. 본 연구에서는 BS EN 14651 (2005)에서 표준하고 있는 시험방법을 사용하였다(Fig. 1 참고). 시험체는 150 mm×150 mm×550 mm로 제작되었으며, 인장부에 폭 4 mm, 높이 25 mm의 노치를 포함하고 있다. 동일한 변수에 대하여 3개의 시험체를 제작, 시험하였으며, 평균, 표준편차 및 변동계수를 제시하였다.

하중재하는 강재프레임에서 200 kN 용량의 액추에

이터를 사용하여 3등분재하를 실시하였으며, 액추에이터에 설치된 로드셀을 이용하여 하중을 측정하였다. 하중재하 속도는 BS 코드에서 규정하고 있는 변위 제어로 0.2 mm/min의 속도로 하중을 재하하였다.

시험체의 순수한 변형을 정확하게 측정하기 위하여 알루미늄 지그를 제작하였다. 균열개구변위(Crack Mouth Opening Displacement : CMOD) 측정을 위해서 Tokyo Sokki사의 PI-5-100 균열게이지를 사용하였으며, 노치에서 좌, 우측으로 50 mm 떨어진 위치에 fixing jig를 CN 순간접착제를 이용하여 부착 후 게이지를 설치하여 측정하였다. 시험은 CMOD값이 4 mm가 되는 시점까지 하중을 가하여 시험을 수행하였다. Fig. 2는 CMOD 변위계의 설치개념도와 사진을 나타내고 있다. 이와 같이 설치한 센서로부터 생성되는 데이터는 데이터로거(TDS-302)로 받아들여 컴퓨터를 이용하여 정리하였다.

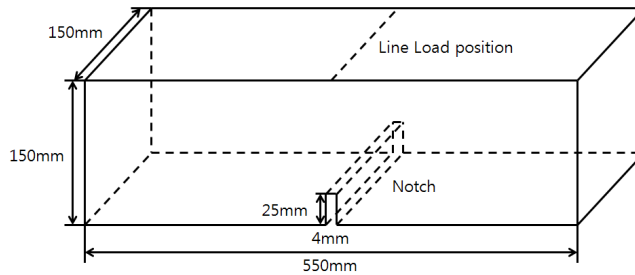


Fig. 1. Test specimen

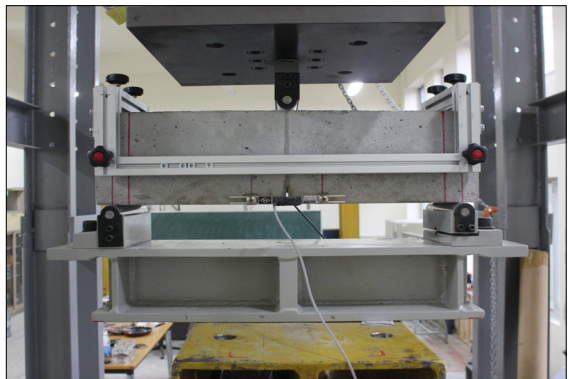
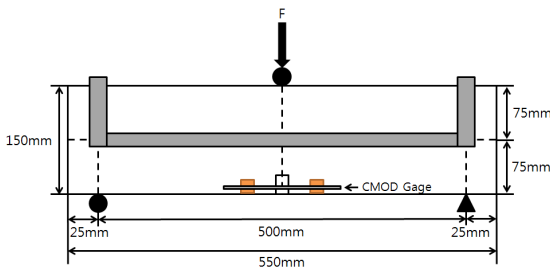


Fig. 2. Test setup for measurement of CMOD

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 선형구간 휨강도 및 잔존휨강도

Table 3은 각 시험체의 선형구간에서의 휨강도 ( $f_{LOP}$ ), CMOD가 0.5 mm와 2.5 mm일때의 잔존강도 ( $f_{R1}, f_{R3}$ )의 평균 및 표준편차를 나타내고 있다. Model code 2010 (2010)에 따르면,  $f_{R1}$ 은 사용하중조건에서,  $f_{R3}$ 는 극한하중조건에서 SFRC의 인성을 평가하는 주요한 잔존강도이다. A-60-0.5의 3번째 시험체의 경우 실험장비 조작오류로 인하여 실험결과를 획득하지 못하여 평균에서 제외하였다.

선형구간의 휨강도는 섬유의 형상비에 따른 영향 보다는 콘크리트 압축강도에 영향을 크게 받는 것을 알 수 있다. 압축강도 40 MPa인 실험체의 선형구간 평균 휨강도는 5.3 MPa~5.7 MPa, 설계강도 60 MPa 인 실험체의 평균 휨강도는 6.6 MPa~7.4 MPa로

30% 큰 것으로 나타났다. 한편, Table 2에 제시된 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 7일 평균압축강도는 63 MPa로 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트 평균압축강도의 37%가 큰 것을 알 수 있다. 결과적으로 평균 압축강도의 차만큼 휨강도의 차가 발생함을 알 수 있다. Lee et al. (2013)은 강섬유의 혼입량의 영향에 대한 실험적 연구결과를 제시하였으며, 그 결과에 따르면 강섬유 혼입량이 0.5% Vol. 이하로 적을 경우에 선형구간의 최대강도는 매질인 콘크리트의 강도에 지배되는 것으로 보고하였다. 본 실험의 결과도 이를 뒷받침하고 있다.

$f_{R1}$ 과  $f_{R3}$ 의 결과를 살펴보면, 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의  $f_{R1}$  잔존강도가 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트에 비하여 큰 경향을 보이는 반면,  $f_{R3}$ 는 유사한 것으로 나타났다. 이와 같은 결과는 최초 균열이후 CMOD가 0.5 mm 이하에서는 강섬유가 균열을 강력히 연결함으로써, 매질인 콘크

Table 3. Strength results

specimen ID	Serial No.	$f_{LOP}$ (MPa)	Mean S.D	COV (%)	$f_{R1}$ (MPa)	Mean (S.D)	COV (%)	$f_{R3}$ (MPa)	Mean (S.D)	COV (%)	$f_{R1}/f_{LOP}$	$f_{R3}/f_{R1}$
A-40-0.5	1	6.11	5.67 ± 0.57	10	4.81	4.63 ± 0.26	6	3.05	3.34 ± 0.38	11	0.79	0.73
	2	6.04			4.81			3.88			0.80	0.81
	3	4.86			4.26			3.09			0.88	0.73
B-40-0.5	1	5.79	5.42 ± 0.28	5	4.87	4.62 ± 1.13	24	4.69	4.28 ± 1.11	26	0.84	0.96
	2	5.11			3.13			2.76			0.61	0.89
	3	5.36			5.87			5.39			1.09	0.92
C-40-0.5	1	5.43	5.28 ± 0.28	5	5.48	6.01 ± 1.94	32	3.05	3.59 ± 1.30	36	1.01	0.56
	2	4.89			3.94			2.34			0.81	0.59
	3	5.53			8.6			5.39			1.56	0.63
A-60-0.5	1	6.92	6.61 ± 0.31	5	5.81	6.56 ± 0.75	11	3.31	3.38 ± 0.06	2	0.84	0.57
	2	6.3			7.31			3.44			1.16	0.47
	3	-			-			-			-	-
B-60-0.5	1	8.02	7.36 ± 0.49	7	6.76	6.87 ± 0.59	9	2.85	3.27 ± 0.33	10	0.85	0.42
	2	7.19			7.65			3.32			1.06	0.43
	3	6.86			6.21			3.65			0.91	0.59
C-60-0.5	1	6.54	6.90 ± 0.45	7	4.04	5.14 ± 1.17	23	3.45	4.43 ± 1.09	25	0.62	0.86
	2	7.53			6.77			5.95			0.90	0.88
	3	6.62			4.62			3.89			0.70	0.84

리트의 압축강도 차의 영향이 유지되다가 CMOD가 2.5 mm로 상당히 커졌을 때에는 과대한 변형에 의하여 균열을 연결하고 있는 강섬유의 뿔힘과 소성변형 등이 발생하면서 콘크리트의 영향이 제한되기 때문이다. 따라서, 초기 균열상태에서 강섬유의 정착이 콘크리트의 높은 압축강도로 인해 개선된다는 것을 확인할 수 있다.

일반적인 연구결과로는 강섬유의 형상비가 큰 경우 휨인성을 증진시키는 것으로 알려져 있으므로 A, B 강섬유 보다는 C 강섬유의 잔존강도결과가 크게 나타나야 한다. 그러나 본 실험에서는 강섬유의 형상비에 대한 영향은 콘크리트 압축강도 수준에 상관없이 모든 배합(40 MPa와 60 MPa 콘크리트)에서 동일하게 뚜렷한 경향성을 찾아볼 수 없다. 원인은 실험결과에서  $f_{R1}$  및  $f_{R3}$ 의 높은 변동계수에서 찾을 수 있다.  $f_{LOP}$ 의 변동계수는 10%를 초과하지 않는 반면  $f_{R1}$  과  $f_{R3}$ 의 변동계수는 상당히 큰 것으로 나타났다. 또한, 주목할 것은 A 타입 강섬유(형상비 64)와 B타입 강섬유(형상비 67)의 잔존강도에 대한 변동계수 보다 C타입 강섬유(형상비 80)의 변동계수가 매우 크다는 점이다. 더욱 확실한 일관된 경향을 확보하기 위해서는 더 많은 수의 실험체의 실험 및 분석이 필요한 것을 알 수 있다. Table 3에서 Mean과 COV는 평균과 변동계수를 의미한다.

Model code 2010 (2010)에서는 강섬유가 일반적인 이형철근을 대신하기 위해서는 휨실험결과로부터 획득한 강도가 식 (1)을 만족하여야 한다. 본 실험의 각 배합에 대한 식 (1)의 평가 결과는 Table 3에 제시된 바와 같다.

$$\begin{aligned} f_{R1}/f_{LOP} &> 0.4 \\ f_{R3}/f_{R3} &> 0.5 \end{aligned} \quad (1)$$

제시된 Table 3의 음영은 요구성능 기준을 만족하지 못한 시험체를 나타낸다. 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트의 경우 모든 강섬유가 상기 두 개의

기준을 모두 만족하는 것으로 나타난 반면, 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 경우에는 A와 B 강섬유가 기준을 만족하지 못하고 있는 것을 확인할 수 있다. 만족하지 못하는 기준은 모두 두 번째 기준으로 잔존강도간( $f_{R1}, f_{R3}$ )의 강도비가 0.5 이하인 것으로 나타났다. 따라서 A 및 B 강섬유가 혼입된 콘크리트의 경우 극한하중 조건에서 급격한 강도의 저하가 발생할 수 있다는 것을 알 수 있다. 이와 같은 결과를 통해, 높은 형상비의 강섬유 사용이 기준의 충족을 위해 필요한 것을 알 수 있으나 전술한바와 같은 높은 변동성의 문제를 해결해야 한다.

### 3.2 휨인성 평가

휨인성의 평가는 경간의 1/150에 해당하는 3 mm까지의 하중-CMOD 그래프의 하부면적으로 평가하였으며 결과는 Table 4와 같다. 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트 보다 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 인성이 전반적으로 큰 것을 볼 수 있지만 그 차이가 크진 않다. 특히, 강섬유의 형상비에 따른 경향을 살펴보면, 설계강도 40 MPa에서는 평균 인성이 A, B C의 순으로 커지는 것을 확인할 수 있다. 그러나 설계강도 60 MPa의 경우에는 차이가 거의 없다. 따라서, 본 실험의 결과에 근거할 때 강섬유의 형상비의 영향이 고강도콘크리트에서는 제한적인 것으로 판단된다.

한편, 휨인성 결과의 변동계수를 보면, 60 MPa SFRC가 40 MPa SFRC에 비하여 매우 적은 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 60 MPa SFRC의 휨인성거동이 안정적이며, 일관된 경향을 나타내고 있음을 의미한다. 휨인성거동은 강섬유의 분포상태에 큰 영향을 받기 때문에 본 결과와 강섬유의 분산도 평가 결과를 상호 비교해 볼 필요가 있다. Table 4에서 Mean, S.D, COV는 평균, 표준편차 및 변동계수를 의미한다.

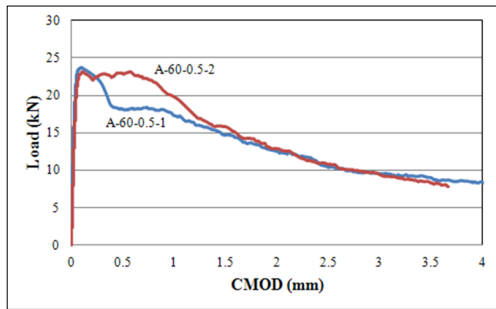
Table 4. Toughness results

specimen ID	Serial No.	Toughness (kN·mm)	Mean	S.D	COV (%)	specimen ID	Serial No.	Toughness (kN·mm)	Mean	S.D	COV (%)
A-40-0.5	1	41.05	39.92	3.84	9.61	A-60-0.5	1	45.02	46.83	2.55	5.45
	2	43.06					2	48.63			
	3	35.64					3	-			
B-40-0.5	1	47.15	43.31	12.02	27.74	B-60-0.5	1	43.65	47.74	4.08	8.55
	2	29.84					2	51.81			
	3	52.93					3	47.77			
C-40-0.5	1	41.09	45.87	18.65	40.66	C-60-0.5	1	38.04	47.25	12.47	26.40
	2	30.08					2	61.44			
	3	66.45					3	42.26			

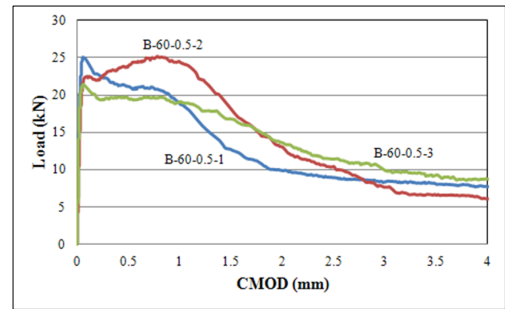
### 3.3 하중-CMOD 그래프

Fig. 3은 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 하중-CMOD 그래프를 나타내고 있다. 그림과 같이 B-60-0.5-2를 제외한 모든 실험체는 전형적인 연성거동을 나타내고 있다. CMOD가 0.05 mm까지 선형적

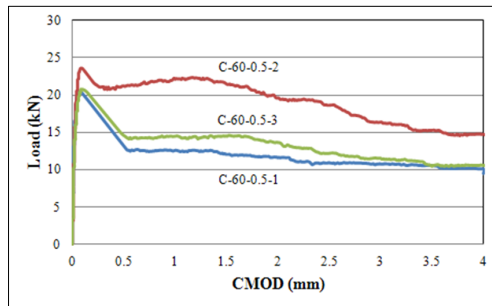
인 거동을 보이다가 노치에 균열이 발생하면서 하중의 감소가 나타나지만 강섬유가 균열을 연결, 제어하면서 급격한 하중저하는 발생하지 않고 점진적이며 지속적인 하중감소를 나타냄을 확인할 수 있다. 본 휨실험방법에서는 노치를 이용하여 취약부를 도입함으로써, 단일 균열을 유도한다. 따라서, 모든 변형은



(a) A series



(b) B series



(c) C series

Fig. 3. Load vs. CMOD curve

노치에 발생한 단일균열에 집중되며 전형적인 연성거동을 나타낸다.

B-60-0.5-2 시험체는 노치부에 단일균열발생에도 불구하고, 초기균열이후 경화거동을 나타내고 있다. 강섬유보강 콘크리트가 균열이후 경화거동을 나타내는 것은 섬유의 함유량의 2% 이상으로 높을 때 나타난다. 경화현상은 매질인 콘크리트의 인장강도 보다 강섬유보강 콘크리트의 인장강도가 커짐으로서 발생하며, 다수의 인장균열과 함께 발생한다. 그러나 본 실험체의 경우 섬유혼입률이 0.5%로 적고, 노치에 발생한 단일균열에 의하여 파괴되었기 때문에 이에 해당되지 않는다. Prisco et al. (2009)에 의하면, 직인장시험에서 연성거동을 나타내는 재료라 할지라도 휨시험에서는 경화거동을 나타낼 수 있으며, 이는 휨에 의한 균열의 진전이 매우 안정적일 때 발생할 수 있다고 주장하였다. 따라서, 본 실험에서 B-60-0.5-2 시험체의 경화거동은 실험방법의 큰 변동성에서 그 원인을 찾을 수 있으며, BS EN 14651 (2005) 시험방법을 적용한 Prisco et al. (2012)의 실험결과에서도 모든 실험체에서 이와 같은 거동이 나타남을 확인할 수 있다.

### 3.4 섬유분산도 평가

콘크리트내 강섬유의 분포는 휨성능을 크게 좌우한다(Zandi et al., 2011). 강섬유의 분산도를 평가하기 위하여 상기 휨실험 후 시험체를 파괴시까지 가력하여 시험체를 두 개로 분리하고 단면을 Fig. 4와 같이 9개의 구획으로 나누어 각 구획에 포함된 강섬유의 수를 육안 조사하였다. 파괴된 양단면에 포함된 강섬유의 수를 모두 조사하였으며, 결과를 평균하여 Table 5 ~ Table 6에 나타내었다. 강섬유의 수는 9개의 구획안에 포함된 강섬유의 개수 평균, 표준편차 및 변동계수(Fig. 4의 <by position> 참고), 타설면으로 3개의 층으로 분리하여 강섬유의 개수 평균, 표준편차 및 변동계수(Fig. 4의 <by layer> 참고), 한 개의 시험체 내에 포함된 강섬유의 개수 평균, 표준편차 및 변동계수(Fig. 4의 <by specimen> 참고)를 조사하여 제시하였다.

Table 5와 Table 6은 각각 설계강도 40 MPa 및 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 섬유분산도 평가결과를 나타내고 있다. 설계강도에 따른 분산도 비교를 위하여 Fig. 5에 정리하였다. Fig. 5(a)는 단면내에서

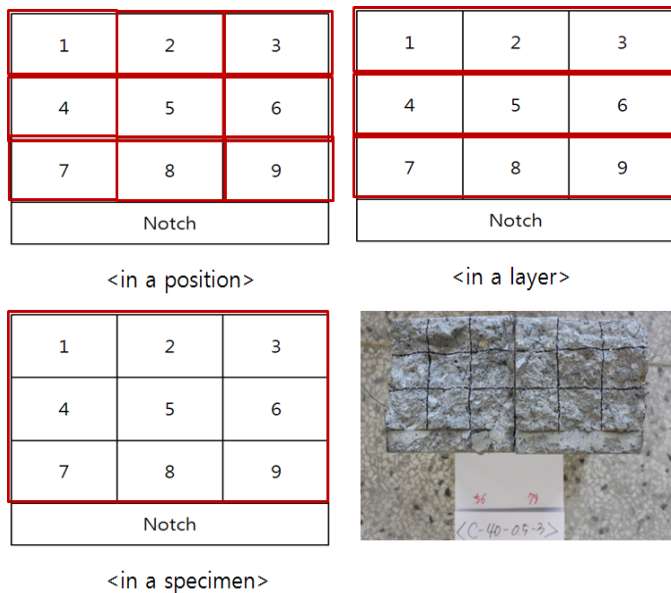


Fig. 4. Inspection for counting of steel fibers



섬유의 분산도를 나타낸다. 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트는 변동계수가 40%에서 60%에 달한다. 즉, 단면에서 섬유가 균일하게 분포되지 않고 한쪽에 치우쳐 있음을 의미한다. 단면내에서 강섬유의 분산도는 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트가 변동계수 48%로 상대적으로 낮아 우수한 것으로 나타났다. Fig. 4(b)는 시험체의 높이별 강섬유 분포 변동계수를 나타낸다. 40 MPa 강섬유보강 콘크리트가 33%~40%로 60 MPa 강섬유보강 콘크리트 보다 큰 것으로

나타났다. 설계강도 40 MPa에서는 콘크리트 타설 방향에 대하여 하부에 많은 강섬유가 분포되어 있음을 확인할 수 있다(Table 5 참조). 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트의 불균일한 강섬유 분포의 원인은 슬럼프 차에서 기인하는 것으로 판단된다. 슬럼프 치가 큰 설계강도 40 MPa 콘크리트에서 강섬유의 이동이 상대적으로 수월하기 때문에 타설 중 다짐 과정에서 강섬유가 아래쪽으로 몰리는 현상이 있는 것으로 판단되며, 된 반죽의 설계강도 60 MPa에서는

Table 5. Analysis of steel fibers distribution for SFRC with strength of 40MPa

Specimen ID	No. of fibers				Average no. of fibers			Standard deviation			COV(%)				
	in a position		in a layer	in a specimen	in a position	in a layer	in a specimen	in a position	in a layer	in a specimen	in a position	in a layer	in a specimen		
A-40-0.5-1	17	11	8	36	142	15.8	47.3	7.7	19.6	9.3	49.1	41.5	6.2		
	20	4	12	36											
	29	22	19	70											
A-40-0.5-2	7	11	12	30	147	16.3	49	7.6	23.3	9.3	46.6	47.6			
	15	20	7	42											
	26	24	25	75											
A-40-0.5-3	17	14	14	45	160	17.8	53.3	4.8	14.4	27.2	27.1				
	13	19	13	45											
	26	24	20	70											
B-40-0.5-1	15	1	5	21	96	10.7	32	5.9	9.8	54.9	30.8				
	18	11	6	35											
	11	11	18	40											
B-40-0.5-2	7	5	7	19	58	6.4	19.3	82.7	3.2	4.5	21.4	50.3		23.3	25.9
	2	9	4	15											
	9	3	12	24											
B-40-0.5-3	5	10	6	21	94	10.4	31.3	8.1	20.6	77.7	65.6				
	7	8	3	18											
	30	10	15	55											
C-40-0.5-1	5	10	4	19	81	9.0	27.0	3.7	10.6	41.6	39.2				
	7	9	7	23											
	12	11	16	39											
C-40-0.5-2	7	5	22	34	88	9.8	29.3	98.7	5.3	5.0	24.8	54.5	17.2	25.1	
	6	7	11	24											
	12	6	12	30											
C-40-0.5-3	13	3	8	24	127	14.1	42.3	6.0	17.6	42.6	41.5				
	12	13	19	44											
	21	18	20	59											

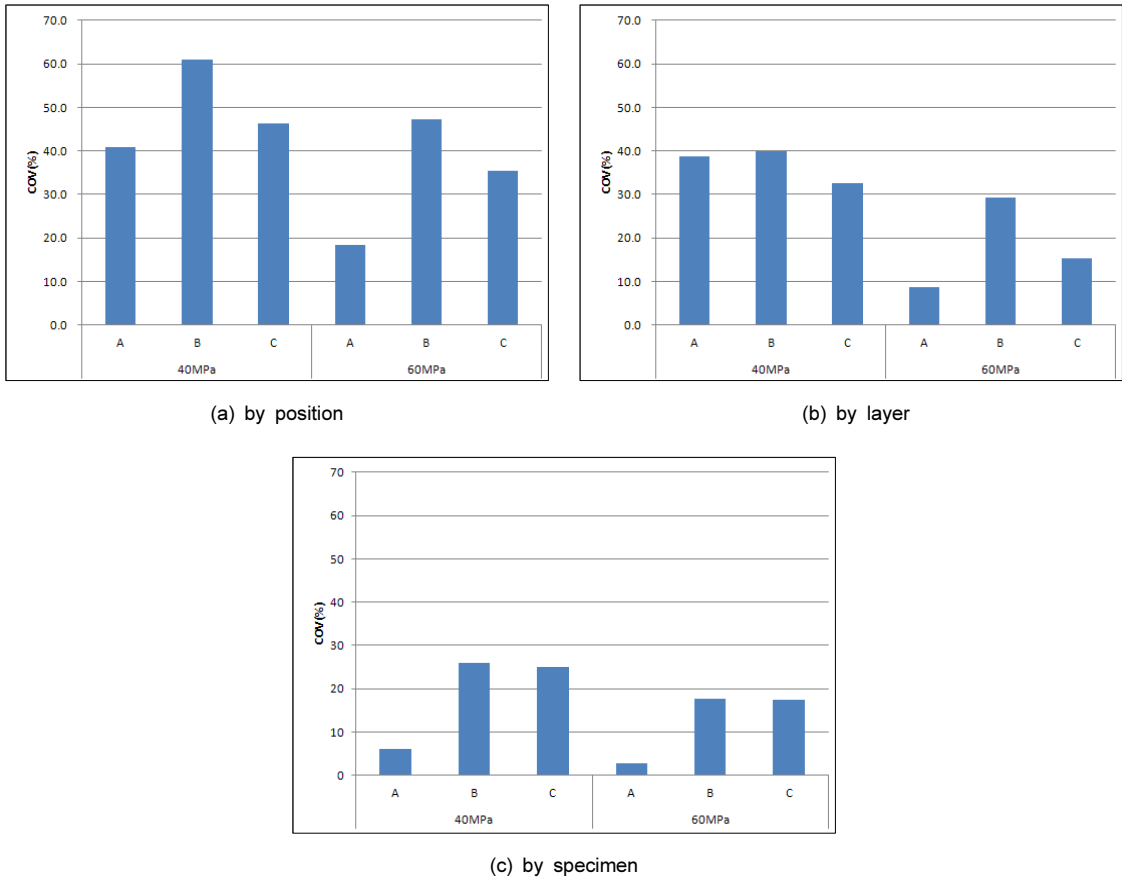


Fig. 5. Comparisons of COV

강섬유 이동이 제한되었기 때문이다. 시험체간의 섬유개수에 대한 변동계수도 동일한 경향을 나타내었다 (Fig. 4(c) 참조). 한편으로 강섬유의 형상에 따른 강섬유 분산 결과를 살펴보면, 형상비가 적은 A 타입 강섬유의 변동계수는 낮은 반면, B 및 C 타입 강섬유의 변동계수가 큰 것을 볼 수 있다.

이상의 결과로부터, 배합과정에서 섬유가 뭉치는 현상만을 충분히 제거한다면 유동성이 적은 고강도 콘크리트에서의 섬유분산도가 오히려 우수할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 본 연구에서 사용된 35 mm와 60 mm길이의 섬유중에서 길이 35 mm의 섬유를 사용하였을 때, 균일한 섬유의 분산이 가능한 것을 알 수 있다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 고강도 TBM 세그먼트 개발에 활용될 설계강도 60 MPa 강섬유보강콘크리트의 성능평가를 위하여 Model Code 2010에서 규정하고 있는 방법에 따라 휨실험을 수행하고, 휨강도 및 잔존강도, 휨인성 및 강섬유의 분산도를 평가하였다. 또한 비교를 위하여 설계강도 40 MPa의 강섬유보강콘크리트도 실험하였다. 본 실험을 통해 획득한 결론을 정리하면 다음과 같다.

1. 설계강도 40 MPa의 강섬유보강 콘크리트에 비하여 설계강도 60 MPa의 강섬유보강 콘크리트

**Table 6.** Analysis of steel fibers distribution for SFRC with strength of 60MPa

Specimen ID	No. of fibers				Average no. of fibers			Standard deviation			COV (%)			
	in a position		in a layer	in a specimen	in a position	in a layer	in a specimen	in a position	in a layer	in a specimen	in a position	in a layer	in a specimen	
A-60-0.5-1	14	20	11	45	142	15.8	47.3	145.0	3.2	3.2	4.2	20.5	6.8	2.9
	18	16	17	51										
	16	11	19	46										
A-60-0.5-2	16	11	18	45	148	16.4	49.3	145.0	2.7	5.1	4.2	16.1	10.4	2.9
	16	18	14	48										
	18	20	17	55										
B-60-0.5-1	4	3	14	21	75	8.3	25	76.7	3.5	4.0	13.6	42.0	16.0	17.7
	10	8	7	25										
	8	9	12	29										
B-60-0.5-2	6	3	3	12	64	7.1	21.3	76.7	3.1	8.1	13.6	43.6	38.2	17.7
	11	9	7	27										
	5	9	11	25										
B-60-0.5-3	15	3	15	33	91	10.1	30.3	76.7	5.7	10.3	13.6	56.3	33.8	17.7
	7	3	9	19										
	10	9	20	39										
C-60-0.5-1	4	5	3	12	51	5.7	17.0	53	2.0	4.6	9.2	35.3	27.0	17.4
	8	6	7	21										
	8	7	3	18										
C-60-0.5-2	8	7	4	19	63	7.0	21	53	2.3	2.6	9.2	33.5	12.6	17.4
	4	7	9	20										
	11	8	5	24										
C-60-0.5-3	7	4	3	14	45	5.0	15.0	53	1.9	1.0	9.2	37.4	6.7	17.4
	3	4	8	15										
	5	4	7	16										

의 휨강도와 CMOD 0.5 mm에 해당하는 잔존휨 강도가 증가하는 것으로 나타났다. CMOD 2.5 mm에 해당하는 잔존휨강도는 설계강도에 상관 없이 비슷한 것으로 나타났다. 이는 균열초기에 매질인 콘크리트의 강도가 강섬유의 부착에 영향을 미친다는 것을 의미하며, 2.5 mm 이상의 균열에서는 콘크리트 강도의 영향이 제한적임을 알 수 있다.

2. 설계강도 40 MPa의 강섬유보강 콘크리트는 모든 강섬유에 대하여 Model Code 2010에서 규정하고 있는 요구성능을 만족하는 것으로 나타났

으나, 설계강도 60 MPa의 강섬유보강 콘크리트의 경우 일부가 요구성능을 만족하지 못하는 것으로 나타났다. 요구 성능을 만족시키지 못한 강섬유는 형상비 64인 A 타입, 형상비 67의 B 타입 강섬유인 것으로 나타났다. 따라서, 고강도 콘크리트에서는 강섬유의 형상비의 영향이 중요하다라는 것을 확인할 수 있으며, 큰 형상비의 섬유가 필요하다는 것을 확인하였다.

3. 휨인성 고찰결과, 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트의 휨인성이 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트 보다 다소 크게 나타났다. 한편,

낮은 강도에서는 강섬유의 형상비가 커질수록 휨 인성이 증가되는 경향을 나타내었으나, 높은 강도에서는 강섬유 형상비의 영향이 명확하지 않다.

4. 강섬유의 분산도에 대한 평가를 수행한 결과, 설계강도 40 MPa 강섬유보강 콘크리트 보다 설계강도 60 MPa 강섬유보강 콘크리트에 혼입된 강섬유가 고른 분포를 나타내는 것으로 확인되었다. 높은 변동계수의 원인은 타설면에 대하여 하부로 강섬유의 몰림이었으며, 40 MPa 강섬유보강콘크리트에서 주로 관찰되었다. 이는 40 MPa 강섬유보강 콘크리트의 상대적으로 높은 슬럼프로 인하여 다짐중 강섬유 하향 몰림 현상이 발생한 것으로 판단된다. 따라서, 강섬유 분산도 확보 측면에서는 다짐시 낮은 슬럼프가 유리한 것을 확인할 수 있었다. 그러나 낮은 슬럼프는 작업성을 저해하는 문제가 있으므로 작업성을 확보한 슬럼프 수준에서 혼화제 첨가 등의 방법을 통한 강섬유의 분산성을 확보가 필요하다. 또한 강섬유분포 상태는 휨인성의 거동에도 영향을 미쳐 설계강도 60 MPa 강섬유보강콘크리트의 휨인성 거동의 변동계수가 적은 것을 확인하였다.

## 감사의 글

본 논문은 한국건설교통기술평가원의 건설기술혁신사업인 “TBM 핵심 설계부품기술 및 TBM 터널의 최적 건설기술(과제번호: 10기술혁신E091) - 2세부과제 : 고성능 세그먼트 라이닝의 개발”의 일환으로 작성되었습니다.

## 참고문헌

1. Barros, J., Antunes, J. (2003), “Experimental characterization of the flexural behavior of steel fibre reinforced concrete according to RILEM TC 162-TDF recommendations”, RILEM Proceedings PRO31-International RILEM Workshop, pp. 77-90.
2. BS EN 14651:2005+A1:2007 (2005), “Test method for metallic fibre concrete-measuring the flexural tensile strength”
3. Chiaia B., Fantilli, A.P., Vallini, P. (2009), “Combining fiber-reinforced concrete with traditional reinforcement in tunnel linings”, Engineering Structures, Vol. 31, Issue. 7, pp. 1600-1606.
4. FIB (2010), “Model Code 2010”, Vol. 1, p. 225.
5. Grunewald, S., Walraven, J. C. (2009), “Transporting fibres as reinforcement in self-compacting concrete”, HERON, Vol. 54, No. 2/3, pp. 101-125.
6. Lee, C.J., Lange, D.A., Lee, J.Y., Shin, S.W. (2013), “Effects of fiber volume fraction and water/cement ratio on toughness development of steel fiber reinforced concrete”, Journal of the Korean Institute of Building Construction, Vol. 13, No. 1, pp. 20-28.
7. Prisco, M., Plizzari, G., Vandewalle, L. (2009), “Fibre reinforced concrete : new design perspectives”, Materials and Structures, Vol. 42, Issue 9, pp. 1261-1281.
8. Rivaz, B. (2008), “Steel fiber reinforced concrete (SFRC): The use of SFRC in precast segment for tunnel linings”, World Tunnel Congress 2008-Underground Facilities for Better Environment and Safety-India, pp. 2007-2017.
9. Soulioti, D.V., Barkoula, N.M., Paipetis, A., Matikas, T.E. (2011), “Effects of fiber Geometry and volume fraction on flexural behavior of steel-fibre reinforced concrete”, Strain, Vol. 47, Issue 6, pp. 535-541.
10. Zandi, Y., Husem, M., Pul, S. (2011), “Effect of distribution and orientation of steel fiber reinforced concrete”, Recent Researches in Geography, Geology, Energy, Environment Biomedicine, World Scientific and Engineering, pp. 260-264.
1. Barros, J., Antunes, J. (2003), “Experimental characterization of the flexural behavior of steel