

강섬유 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트 건조수축 특성

백대일¹ · 한성민² · 최기봉³ · 윤현도⁴ · 최원창⁵

가천대학교 건축공학과 학사¹, 가천대학교 건축공학과 석사과정², 가천대학교 건축공학과 교수³,
충남대학교 건축공학과 교수⁴, 가천대학교 건축공학과 교수⁵

Characteristic of Drying Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete by Tensile Strength of Steel Fiber

Baek, Daeil¹ · Han, Sungmin² · Choi, Kibong³ · Yun, Hyundo⁴ · Choi, Wonchang⁵

¹Bachelor's Degree, Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea

²Master's Course, Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Chungnam National University, Daejeon, Korea

⁵Professor, Department of Architectural Engineering, Gachon University, Seongnam, Korea

Abstract: Much research has been conducted on steel fiber reinforced concrete (SFRC) to reduce cracks caused by drying shrinkage. Steel fiber can improve the early-age properties of concrete to increase the cracking resistance by acting as a stitch between crack faces. In this study, steel fibers with different tensile strengths were used to investigate the characteristics of drying shrinkage of SFRC. Free and restrained drying shrinkage tests were conducted, and the drying shrinkage rate was converted to the tensile strength of concrete and compared with the result of the tensile strength test. The results indicate that steel fiber has little influence on free drying shrinkage. However, for restrained drying shrinkage, as the tensile strength of steel fiber increases, it is effective in delaying the occurrence of cracks and reducing the width of cracks. In addition, steel fiber can effectively resist tensile stress caused by drying shrinkage and increases the tensile strength of SFRC, and its effectiveness increases with increasing tensile strength.

Key Words: steel fiber reinforced concrete, steel fiber, drying shrinkage, cracking resistance, tensile strength

1. 서 론

콘크리트는 양생 중 콘크리트의 내외부 습도 차로 인한 수분이동으로 건조수축이 발생하며 이후 재습윤을 하여도 원상태로 돌아오지 않는다. 콘크리트는 압축강도에 비해 휨, 인장강도가 매우 작아 균열에

대한 저항성이 낮으며 이로 인해 건조수축 시 콘크리트의 부피가 줄어들면서 균열이 발생하게 된다(Ahn and Kim, 1996). 콘크리트에 발생하는 균열은 콘크리트의 내구성을 저하하여 안정성과 사용성에 문제가 발생할 수 있기 때문에 설계 초기부터 콘크리트 배합 등에 주의를 기울일 필요가 있다. 또한 시멘트의 수화 반응에서 발생하는 수화열은 콘크리트를 팽창시켜 응력을 발생시키며 이는 콘크리트의 건조수축에 의한 응력에 영향을 준다. 이러한 문제점을 보완하고자 콘크리트 타설 시 온도철근 및 용접철망을 배근하여 콘크리트의 건조수축과 온도 균열을 억제하는 시공을 주로 실시하고 있다. 그러나 온도철근 및 용접철망을 사용한 시공 시 철근을 적재할 공간이 필요하며 타설 전 배근작업에 필요한 인건비 등 공사비 증가, 현장 시공 시 작업자의 작업능력에 따

Corresponding author: Choi, Wonchang
Department of Architectural Engineering, Gachon University,
1342, Seongnam-daero, Sujeong-gu, Seongnam-si, Gyeonggi-do,
Korea.
Tel: +82-31-750-5335, Fax: +82-31-754-5837
E-mail: wchoi@gachon.ac.kr

Received March 30, 2022 / Revised May 20, 2022 /
Accepted May 29, 2022

· 본 논문에 대한 토의를 2022년 07월 31일까지 학회로
보내주시면 2022년 08월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

른 불균일한 시공성 등의 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 건조수축에 의한 균열을 방지하는 강섬유 보강 콘크리트(Steel Fiber Reinforced Concrete)에 대한 연구가 진행되고 있다. 국내에서는 Park and Yun (1996)이 강섬유 보강 콘크리트의 배합설계 방법 및 역학적 특성을 제시하였고 Yeon et al. (2007)은 강섬유 종류 및 혼입을 변화에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 특성과 동결융해저항성에 대해 분석하였다. Kim et al. (2014)은 비정질 강섬유 보강 콘크리트와 일반 강섬유 보강 콘크리트의 구속건조수축 특성을 분석하여 구속된 콘크리트의 경우 강섬유를 혼입하였을 때 무보강 실험체와 비교하여 균열폭이 60% 감소하며 20-50%의 건조수축변형률 감소를 확인했다. 국외에서는 Zhang and Li (2001)가 섬유 강화 시멘트 복합체의 수축 성능을 모델링하기 위한 식을 제시하였으며 Afroughsabet and Teng (2020)은 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축성능과 크리프성능을 평가하여 강섬유 보강이 콘크리트의 건조수축과 크리프를 감소시킬 수 있음을 확인하였다. Shen et al. (2019)은 강섬유 보강 콘크리트의 균열 제어 성능을 평가하여 강섬유 혼입량이 높아질수록 높은 균열 제어 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

강섬유는 콘크리트의 균열단면에서의 가교 역할, 부착 작용을 통해 콘크리트의 균열 폭 감소, 균열 발생 억제하는 역할을 하는 것으로 알려져 있다 (Yousefieh et al., 2017). 또한 강섬유 혼입은 콘크리트의 인장강도 및 연성능력을 향상시키는 것으로 알려져 있다. 강섬유를 콘크리트에 혼입하여 타설하기 때문에 별도의 적재공간이 필요 없고 작업자의 능력에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다.

콘크리트의 구속건조수축을 실험하는 방법으로는 AASHTO와 ASTM에서 제시하고 있는 링형 실험방법과 ASTM에서 제시하는 아령형 실험방법이 대표적이다. Kim et al. (2008)은 아령형 실험방법은 균열 발생시점 및 구속수축응력을 평가하는 실험방법임으로 건조수축으로 인한 균열발생에 관한 평가는 링형 실험방법이 더욱 효과적임을 설명하고 있다. 따라서 본 연구에서는 AASHTO에서 제시하고 있는 링형 실험방법에 따라 구속건조수축 실험을 진행하였다. 링형 실험방법은 수축하는 링에 둘러싸인 강재 링의 변형률을 측정하는 방식이며 Hossain and Weiss (2004)는 측정된 강재의 변형률을 콘크리트의 인장응력으로 변환하는 식을 제시하였다.

본 연구에서는 강섬유의 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 제어성능을 평가하기 위하여 서로 다른 인장강도를 가진 강섬유를 실험에 사용하였으며 실험 결과로 얻은 구속건조수축률을

콘크리트의 인장응력으로 치환하여 콘크리트 인장실험 결과와 비교하였다.

2. 실험 계획

2.1 사용 재료 및 콘크리트 배합

강섬유의 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 제어성능을 평가하기 위하여 Fig. 1과 같이 각각 1,100MPa, 1,500MPa의 인장강도를 가진 두 종류의 강섬유를 실험에 사용하였다. 본 논문에서는 인장강도 1,100MPa 강섬유를 사용한 실험체를 SF-1100, 인장강도 1,500MPa 강섬유를 사용한 실험체를 SF-1500으로 작성하였다. 본 실험에서 사용한 두 종류의 강섬유는 모두 콘크리트와의 부착력을 증가하기 위해 단부가 후크(Hook)형으로 제작되었다. 또한 섬유길이(L=60mm), 직경(D=0.75mm), 형상비(L/D=80)으로 제작되었다. 실험에서 사용한 강섬유 제원은 Table 1과 같다.

콘크리트 슬래브 건조수축 및 온도 균열을 제어하기 위한 강섬유의 혼입량 관련 국외 기준은 미국 콘크리트 기준인 ACI에 명시되어 있다. ACI 544.4R-18 (2018)에서는 지반과 접해있는 슬래브의 경우 건조수축을 제어하기 위한 강섬유 최소 혼입량을 10~12kg/m³으로 명시하고 있으며 스틸데크와 합성하여 사용할 경우 강섬유 최소 혼입량을 15kg/m³으로 명



(a) SF-1100



(b) SF-1500

Fig. 1 Steel Fiber

Table 1. Mechanical Properties of Steel Fiber

Steel Fiber Type	Length (mm)	Diameter (mm)	Aspect Ratio (L/D)	Tensile Strength (MPa)
SF-1100	60	0.75	80	1,100
SF-1500	60	0.75	80	1,500

Table 2. Mix Proportions of SFRC

f _{ck} (MPa)	W/B (%)	S/a (%)	Unit Weight (kg/m ³)							AD/B (Cx%)	Steel Fiber (kg/m ³)
			W	C	FA	BS	S	CS	G		
24	50.4	53.7	175	226	69	52	379	568	818	1.4	15
W/B : Water-binder Ratio			W : Water		FA : Fly Ash		S : Sand		G : Aggregate		
S/a : Absolute fine aggregate percentage			C : Cement		BS : Blast-furnace Slag		CS : Crushed Sand		AD/B : Admixture-binder Ratio		

시하고 있다.

ACI 360R-06 (2006)에서는 강섬유를 혼입하여 균열을 억제할 경우 최소 혼입량을 $20 \sim 39 \text{kg/m}^3$ 로 명시하고 있다. 국외 기준에서 강섬유의 강도, 형상에 따른 기준은 세분화되어 있지 않으며 체적비로 보강으로서의 최솟값을 명시하고 있다. 국내의 경우 현재 강섬유 보강 콘크리트 활용에 관한 법적 기준이 없으며 콘크리트공사 표준시방서 KCS 14 20 22에서도 구체적인 활용방안이 제시되어 있지 않다. 따라서 본 실험에서는 국외 강섬유 혼입량 최소기준인 15kg/m^3 으로 실험을 진행하였다. 실험에 사용된 콘크리트의 배합강도는 24MPa로 설계하였으며 굵은 골재 최대치수는 25mm, 슬럼프는 180mm 수준으로 Table 2와 같이 배합하였다.

2.2 실험 방법

2.2.1 자유건조수축

강섬유 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 자유건조수축 특성을 파악하기 위하여 ASTM C157/C157M (2017)에서 제시하는 실험방법에 따라 자유건

조수축 실험을 진행하였다. Fig. 2와 같이 $100 \times 100 \times 400 \text{mm}$ 의 시편을 제작하였으며 시편 중앙부에 매립형 게이지를 설치하여 강섬유 보강 콘크리트의 자유건조수축 변형률을 측정하였다. 타설 후 24시간 동안 건조를 방지하기 위해 비닐을 덮어 양생 후 탈형하였으며 재령 28일까지 실험을 진행하였다. AASHTO PP 34-99(2005)에 따라 실험실의 온도는 $21 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 를 유지하였고 습도는 $50 \pm 4\%$ 를 유지하였다.

2.2.2 구속건조수축

콘크리트의 건조수축 시 콘크리트 구조물이 구속되어 있지 않다면 콘크리트에서 균일한 체적변화가 일어나 균열이 발생하지 않는다. 그러나 대부분의 콘크리트 구조물은 내외부적으로 구속되어 있기 때문에 콘크리트의 건조수축에 관한 연구에서 구속건조수축은 반드시 고려해야 하는 사항이다. 본 연구에서는 강섬유 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 구속건조수축 특성을 파악하기 위하여 AASHTO PP 34-99(2005)에서 제시하는 실험방법에 따라 구속건조수축 실험을 진행하였다.

Fig. 3과 같이 강재 링 외부에 콘크리트를 타설하여 시편을 제작하였으며 강재 링 내부 표면에 철근 게이지를 부착하여 콘크리트의 수축에 의한 강재 링의 변형률을 측정하였다. 타설 후 24시간 동안 비닐을 덮어 양생하였으며 탈형 후 콘크리트의 윗면에 알루미늄 테이프를 부착하여 콘크리트 윗면에서의 건조수축에 의한 변형을 최소화하였다. 실험실의 온도는 $21 \pm 1.7^\circ\text{C}$ 를 유지하였고 습도는 $50 \pm 4\%$ 를 유지하였다. 재령 28일까지 실험을 진행하였으며 실험 종료 후 균열 발생 유무 확인 및 균열 폭을 측정하였다.

2.2.3 인장실험

강섬유 보강 콘크리트의 인장강도를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 도그 본 형태의 시편을 제작하여 직접인장 실험을 진행하였다. 실험체의 목균열을 방지하고 중앙부 균열을 유도하기 위해 실험체 중앙 양 옆에 5mm의 노치를 설치하여 LVDT를 통해 CMOD(Crack Mouth Opening Displacement)를 측정하였으며 변위제어 방식(1mm/min)으로 실험을 진행하였다.



(a) Embedded Gauge



(b) Free Drying Shrinkage Specimen

Fig. 2 Free Drying Shrinkage Specimen

3. 실험 결과

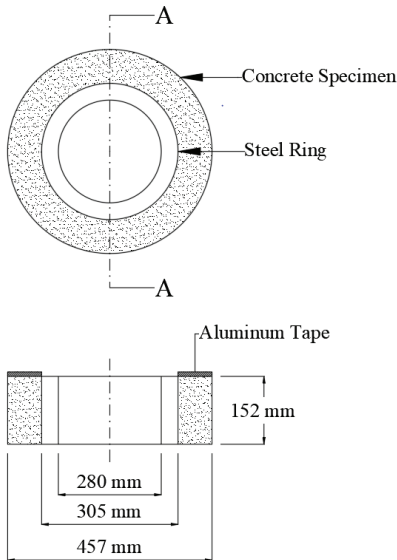
3.1 자유건조수축

자유건조수축 실험은 재령 28일까지 실험을 진행하였으며 자유건조수축률 그래프는 Fig. 5에 나타내었다. 재령 28일 기준 무보강 콘크리트는 $527\mu\epsilon$ 의 자유건조수축률을 기록하였고 SF-1100은 $455\mu\epsilon$, SF-1500은 $541\mu\epsilon$ 의 자유건조수축 변형률을 기록하였다. 강섬유 혼입에 따른 자유건조수축 변형률의 차이는 크지 않은 것으로 나타났으며 SF-1500의 경우 오히려 무보강 콘크리트보다 높은 자유건조수축 변형률을 기록하여 강섬유 보강에 따른 자유건조수축 감소는 효과가 미미한 것으로 나타났다. 또한 강섬유의 인장강도는 자유건조수축 감소 효과에 영향이 없음을 확인하였다. 이는 Choi et al. (2012)의 연구와 유사한 결과를 나타냈다.

3.2 구속건조수축

구속건조수축 실험은 실험 변수 별로 각각 2개의 시편을 재령 28일 까지 실험을 진행하였다. 구속건조수축률 그래프는 Fig. 6에 나타내었다. 콘크리트에 균열 발생 시 콘크리트 링의 이완으로 인해 변형률이 감소함으로 구속건조수축 변형률의 급격한 감소를 실험체의 균열 발생 시점으로 판단하였다.

재령 28일 기준 무보강 콘크리트는 각각 재령 20일차, 27일차에 균열이 발생하였으며 이때 각각 $61\mu\epsilon$, $58\mu\epsilon$ 의 구속건조수축 변형률을 기록하였다. SF-1100-1은 재령 28일차에 균열이 발생하였으며 이때 $88\mu\epsilon$ 의 구속건조수축 변형률을 기록하였다. SF-1100-2는 재령 28일차에 $91\mu\epsilon$ 의 구속건조수축 변형률을 기록하였으며 균열은 발생하지 않았다. SF-1500-1은 재령 28일차에 $82\mu\epsilon$ 의 구속건조수축 변형률을 기록하였으며 실험 기간이 끝난 뒤 재령 33일차에 균열이 발생



(a) Restrained Drying Shrinkage Specimen Size (AASHTO PP 34-99, 2005)



(b) Restrained Drying Shrinkage Specimen

Fig. 3 Restrained Drying Shrinkage Specimen

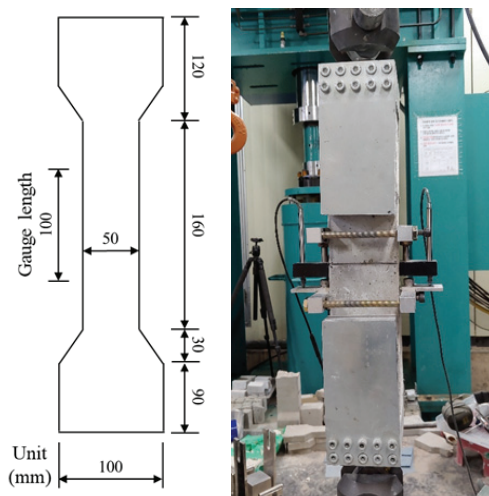


Fig. 4 Tensile Strength Specimen

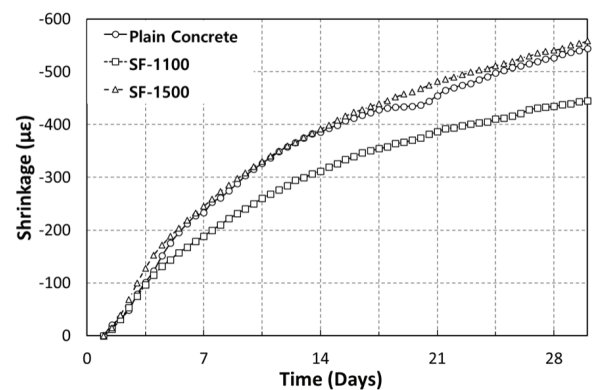
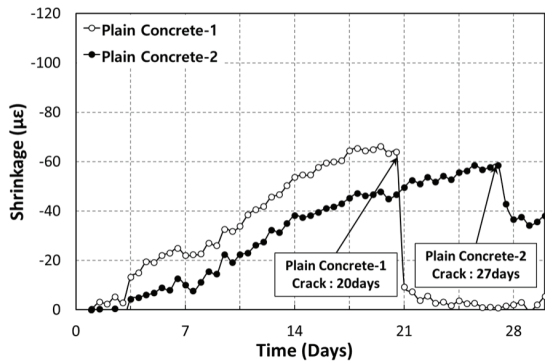


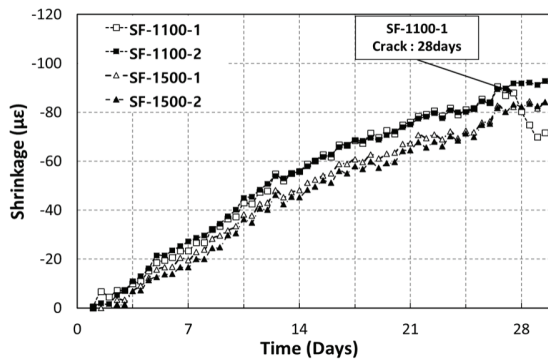
Fig. 5 Shrinkage-time Relationship of Free Drying Shrinkage Test

하였다. SF-1500-2는 재령 28일차에 $82\mu\epsilon$ 의 구속건조 수축 변형률을 기록하였으며 균열은 발생하지 않았다. 구속건조수축 실험 결과는 Table 3에 나타내었다.

이와 같은 결과를 통해 강섬유 보강이 콘크리트의 구속건조수축에 의한 균열 억제에 효과적임을 확인하였다. 무보강 콘크리트는 전부 균열이 20일, 27일차에 균열이 발생하는 반면 강섬유 보강 콘크리트는 1개의 시편을 제외하고는 균열이 발생하지 않았으며 강섬유의 인장강도가 증가함에 따라 구속건조 수축에 의한 균열 발생 시점을 늦출 수 있음을 확인하였다. 무보강 콘크리트는 각각 0.12mm, 0.1mm의 균열이 발생하였고 SF-1100-1은 0.1mm의 균열, SF-1500은 0.05mm의 균열이 발생하였다. 강섬유의 인장강도가 증가함에 따라 구속건조수축으로 인한 균열 폭 감소에도 효과적임을 확인하였다. 균열 양상은 Fig. 7과 같다.



(a) Shrinkage-Time Relationship of Restrained Drying Shrinkage of Plain Concrete

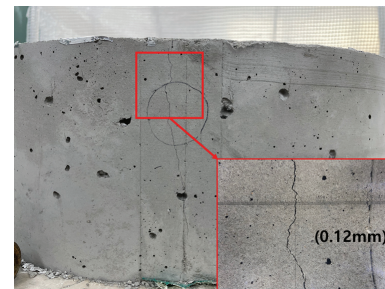


(b) Shrinkage-Time Relationship of Restrained Drying Shrinkage of Steel Fiber Reinforced Concrete

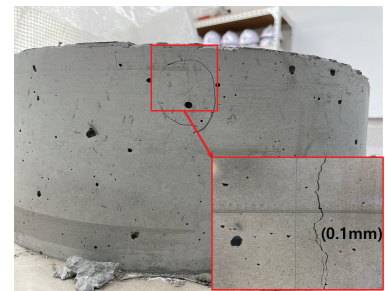
Fig. 6 Shrinkage-Time Relationship of Restrained Drying Shrinkage Test

Table 3. Result of Restrained Shrinkage Test

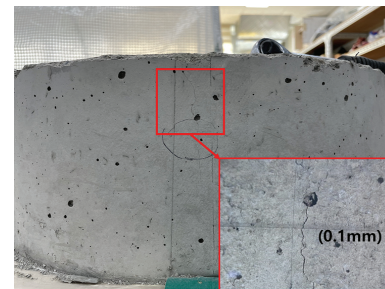
Specimen	Shrinkage at 28days ($\mu\epsilon$)	Crack Days (days)	Crack Width (mm)
Plain Concrete-1	61 (20days)	20	0.12
Plain Concrete-2	58 (27days)	27	0.1
SF-1100-1	88	28	0.1
SF-1100-2	91	-	-
SF-1500-1	82	33	0.05
SF-1500-2	82	-	-



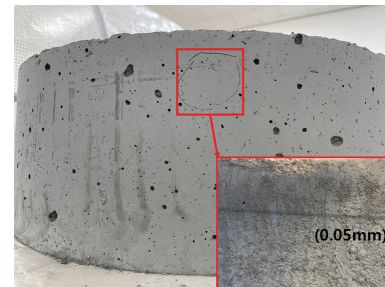
(a) Crack of Plain Concrete-1



(b) Crack of Plain Concrete-2



(c) Crack of SF-1100-1



(d) Crack of SF-1500-1

Fig. 7 Restrained Shrinkage Specimen

Table 4. Dimension of Ring Test Specimen

R _{IS} (mm)	R _{OS} (mm)	R _{IC} (mm)	R _{OC} (mm)
140	152.5	152.5	228.5

4. 해 석

철근콘크리트 구조물에서 건조수축 발생 시 철근의 콘크리트 건조수축 구속에 의해 콘크리트에 인장응력이 발생하게 되며 이는 콘크리트에 균열을 발생시키는 원인이 된다. AASHTO PP 34-99(2005)에서 제시하는 링형 테스트를 통한 구속건조수축 실험을 진행할 경우 강재 표면에 게이지를 부착하고 실험을 진행하기 때문에 강재의 변형률 값으로 결과를 판단해야 한다. 본 논문에서는 구속건조수축 실험에서 얻은 강재의 변형률을 콘크리트의 인장응력으로 치환하여 직접인장강도 결과와 비교하였다.

Hossain and Weiss (2004)는 링형 콘크리트 구속 건조수축 실험에서 측정된 강재 링의 변형률을 콘크리트의 인장강도로 치환하는 원리와 식을 제시하고 있다. 강재 링의 변형률을 콘크리트의 인장강도로 치환하는 식은 식 (1)과 같다.

$$\sigma_{Actual Max} = -\epsilon_{Steel}(t) \cdot E_{Steel} \left(\frac{R_{IC}^2 + R_{OC}^2}{R_{OC}^2 - R_{IC}^2} \right) \left(\frac{R_{OS}^2 - R_{IS}^2}{2R_{OS}^2} \right) \quad (1)$$

$\epsilon_{Steel}(t)$ 는 강재의 변형률로 Table 3의 재령 28일 혹은 균열 발생 직전의 구속건조수축 변형률 값을 사용하였고, E_{Steel} 은 강재의 탄성계수로 290GPa로 계산하였다. R_{IS} 는 강재 링의 내부 반지름, R_{OS} 는 강재 링의 외부 반지름을 의미한다. 또한 R_{IC} 는 콘크리트 링의 내부 반지름, R_{OC} 는 콘크리트 링의 외부 반지름을 의미한다. 각 제원의 값은 Table 4와 같다.

링 테스트를 통한 구속건조수축 실험에서 내부의 강재 링은 콘크리트의 건조수축을 구속하게 되며 이로 인해 콘크리트에 인장응력이 발생하게 된다. 이때 발생하는 인장응력이 콘크리트의 인장강도를 상회하게 될 때 콘크리트에 균열이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 구속건조수축 실험에서 콘크리트의 균열발생 시점의 구속건조수축 변형률을 인장응력으로 치환하여 강섬유 보강 콘크리트의 직접인장강도실험 결과와 비교하였다. 구속건조수축실험에서의 인장강도와 직접인장강도실험 결과의 비교 결과는 Table 5와 같다.

직접인장강도실험 결과 강섬유 보강과 강섬유 인장강도의 증가에 따라 강섬유 보강 콘크리트의 인장강도가 증가함을 확인할 수 있다. 균열시점 구속건조수축 변형률에서의 인장강도 또한 강섬유 보강과

Table 5. Comparison of Tensile Strength of SFRC

Specimen	Tensile Strength by Ring Test (at Crack days) (MPa)	Tensile Strength by Direct Tensile Strength test (MPa)	Error (%)
Plain Concrete	2.58	2.7	0.96
SF-1100	3.79	3.1	1.22
SF-1500	3.87	3.3	1.17

강섬유 인장강도의 증가에 따라 증가함을 확인할 수 있다. 식 (1)은 초기 균열 발생 시점의 변형률로 인장강도를 추정하는 예측이론식으로 대략적인 인장강도 값을 추정하는데 사용될 수 있으며 Hossain and Weiss (2004)에서도 비슷한 결과가 도출되었다. 이런 결과를 통해 강섬유 인장강도가 증가할수록 더 높은 건조수축으로 인한 인장응력에 저항할 수 있음을 확인하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 강섬유 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 특성을 파악하기 위하여 자유건조수축 실험, 구속건조수축 실험, 직접인장강도 실험을 진행하였으며 구속건조수축 실험을 통해 얻은 구속건조수축 변형률을 콘크리트의 인장강도로 치환하여 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축과 인장강도의 관계를 파악하였다. 본 연구를 통한 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 강섬유 보강 콘크리트의 자유건조수축 실험 결과 강섬유 혼입에 따른 자유건조수축 변형률 감소는 뚜렷하지 않았으며 강섬유의 자유건조수축 저항능력은 미미한 것으로 나타났다.
- (2) 강섬유 보강 콘크리트의 구속건조수축 실험 결과 강섬유의 혼입이 구속건조수축에 의한 균열 발생시점을 지연할 수 있음을 확인하였으며 강섬유의 인장강도가 증가할수록 구속건조수축에 의한 균열 억제에 더욱 효과적임을 확인하였다. 무보강 실험체와 비교하여 강섬유 혼입 시 구속건조수축에 의한 균열 폭이 17-58% 감소하였다. 강섬유의 인장강도가 증가할 시 균열 폭이 50% 감소하여 높은 인장강도의 강섬유가 구속건조수축에 의한 균열 폭 감소에 더욱 효과적임을 확인하였다.
- (3) 강섬유 보강 콘크리트의 직접인장실험 결과 무보강 실험체와 비교하여 강섬유 혼입 시 콘크리트의 인장강도가 15-22% 증가하였다.

강섬유의 인장강도가 증가할 시 6%의 콘크리트의 인장강도 증가를 보이거나 이는 추후 연구를 통해 다양한 콘크리트 배합강도에서의 강섬유 인장강도에 따른 변화를 확인할 필요가 있다고 판단된다.

- (4) 강섬유 보강 콘크리트의 구속건조수축 변형률을 콘크리트의 인장강도로 치환하여 분석한 결과 무보강 실험체와 비교하여 강섬유 혼입 시 45~48% 높은 구속건조수축으로 인해 발생하는 인장응력에 저항할 수 있음을 확인하였다. 강섬유의 인장강도가 증가할 시 2% 높은 인장응력에 저항하여 강섬유의 인장응력이 증가할수록 더욱 뛰어난 효과가 나타남을 확인하였다.
- (5) 추후 연구를 통해 강섬유 혼입량, 강섬유 형상, 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트 건조수축 특성을 비교하고자 한다.

감사의 글

본 논문은 2021년도 가천대학교의 연구비 및 ㈜코스틸의 지원을 받아 수행되었습니다.

REFERENCES

- AASHTO PP 34-99 (2005), "Standard Practice for Estimating the Cracking Tendency of Concrete," *American Association of State and Highway Transportation Officials (AASHTO)*, Washington, DC, USA.
- ACI 360R-06. (2006) *Design of Slabs-on-Ground*, American Concrete Institute, Indianapolis, IN, USA.
- ACI 544.4R-18 (2018), *Guide to Design with Fiber-Reinforced Concrete*, American Concrete Institute, Michigan, USA.
- Afroufhsabet, V. and Teng, S. (2020), Experiments on Drying Shrinkage and Creep of Hight Performance Hybrid-Fiber-Reinforced Concrete, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 106.
- Ahn, T. S. and Kim, J. C. (1996), "Tensile Behavior of Reinforced Concrete Member Due to Restrained Shrinkage," Highway Research Center, Seoul, Korea, pp. 4-5. (in Korean)
- ASTM C157/C157M-17 (2017), "Standard Test Method for Length Change of Hardened Hydraulic-Cement Mortar and Concrete," *American Society for and Materials (ASTM)*, West Conshohocken, PA, USA.
- Choi, H. J., Choi, K. K., Choi, O. C., and Hwang, Y. J. (2012), "A Prediction Model of Shrinkage Cracking of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 28, No. 6, pp. 59-66. (in Korean)
- Hossain, A. B., & Weiss, J. (2004). Assessing residual stress development and stress relaxation in restrained concrete ring specimens. *Cement and Concrete Composites*, 26(5), pp. 531-540. doi:10.1016/s0958-9465(03)00069-6
- Kim, G. Y., Park, Y. M., Nam, J. S., Kim, Y. D., Kim, H. D., and Kim, M. H. (2008), "A study on the Evaluation of Shrinkage Crack Properties of Concrete with Plat-Ring and Drying Restrained Shrinkage Cracking Test," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 24, No. 10, pp. 85-92. (in Korean)
- Kim, S. D., Choi, K. K., and Choi, S. J. (2014), "Chracteristics of Restraained Drying Shrinkage Cracking of Amorphous Steel Fiber-Reinforced Concrete," *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*, Vol. 30, No. 7, pp. 63-70. (in Korean)
- Korea Construction Standards Center, KCS 14 20 22.
- Park, S. B. and Yun, U. S. (1996), "Mix Design and Mechanical Property of Steel Fiber Reinforced Concrete," *Magazine of the Korea Concrete Institute*, Vol. 8, No. 4, pp. 14-14. (in Korean)
- Shen, D., Kang, J., Yi, X., Zhou, L., & Shi, X. (2019). Effect of double hooked-end steel fiber on early-age cracking potential of high strength concrete in restrained ring specimens. *Construction and Building Materials*, 223, 1095-1105. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.07.319
- Yeon, H. M., Kin, S. H., Ji, S. W., Yoo, T. D., and Seo, C. H. (2007), "A Study on the Drying Shrinkage and Frost Resistance of Steel Fiber Concrete according to the Kinds and Contents of Steel Fiber," *Proceedings of the Korea Concrete Institute Conference*, pp. 841-844. (in Korean)
- Yousefieh, N., Joshaghani, A., Hajibandeh, E., & Shekarchi, M. (2017). Influence of fibers on drying shrinkage in restrained concrete. *Construction and Building Materials*, 148, 833-845. doi:10.1016/j.conbuildmat.2017.05.093
- Zhang, J., and Li, V. C. (2001). Influences of Fibers on Drying Shrinkage of Fiber-Reinforced Cementitious Composite. *Journal of Engineering Mechanics*, 127(1), 37-44. doi:10.1061/(asce)0733-9399(2001)127:1(37)

주요어: 강섬유 보강 콘크리트, 강섬유, 건조수축, 균열 제어, 인장응력

국문초록: 콘크리트 경화 시 발생하는 수분증발로 인한 건조수축은 콘크리트의 균열을 발생시킨다. 콘크리트에 발생하는 균열은 콘크리트의 내구성을 저하하여 안정성과 사용성에 문제를 발생시킨다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 콘크리트에 강섬유를 혼입하여 건조수축으로 인한 균열을 방지하는 강섬유 보강 콘크리트 (SFRC)에 관한 연구가 진행되고 있다. 강섬유는 콘크리트의 균열단면에서 가교역할, 부작작용을 통해 건조수축으로 인한 균열발생을 억제하고 균열 폭을 감소시키는 효과가 있다. 본 논문에서는 강섬유의 인장강도에 따른 강섬유 보강 콘크리트의 건조수축 제어성능을 평가하였다. 자유건조수축 실험과 구속건조수축 실험을 진행하였으며 실험 결과를 콘크리트의 인장응력으로 변환하여 콘크리트 직접인장실험 결과와 비교하였다. 강섬유의 자유건조수축 저감 효과는 미미하지만 강섬유의 인장강도가 증가할수록 구속건조수축으로 인한 균열제어에 효과적임을 확인하였다. 또한 강섬유의 인장강도가 증가할수록 콘크리트의 인장응력이 증가함을 확인하였다.