

기포제 적용 및 감성 친화형 콘크리트의 휨 특성 예측 모델

Prediction Model of Flexural Properties of LEFC using Foaming Agent

김 병 일¹

서 승 훈^{2*}

Kim, Byoung-II¹

Seo, Seung-Hoon^{2*}

Assistant Professor, Department of Architectural Engineering, Seoul National University of Science and Technology, NoWon-Gu, Seoul, 01811, Korea ¹

Master's Course, Department of Design and Engineering, Seoul National University of Science and Technology, NoWon-Gu, Seoul, 01811, Korea ²

Abstract

Concrete, which is the most widely used building material in modern times, has been improved not only in strength but also in structural performance such as increase in toughness and ductility, weight reduction, and improvement in quality of human life. Due to the surge in demand for the building, there is a tendency to be used variously from architectural panel and architecture to interior accessories. In Korea, a light-transmitting concrete, LEFC(Light Emotion Friendly Concrete), that insert plastic rods to stimulate emotional sensation through the combination of light and concrete has developed. In previous research, it was confirmed that the use of a synthetic foam agent rather than an animal foam agent did not cause a fogging phenomenon. In this study, lightweight by applying foaming agent to LEFC and two types of fiber (Nylon Fiber, Polyvinyl Alcohol) were compared to achieve to investigate the fiber to be applied in future. An equation that can predict the loss and adhesion reduction of the concrete section according to the diameter of the rod (5mm, 10mm) and the interval (10mm, 15mm, 20mm) was proposed.

Keywords : foam, organic fiber, light transparent concrete, flexural strength, prediction model, light emotion friendly concrete

1. 서 론

1.1 연구의 목적

19세기 초 포틀랜드시멘트가 발명된 후 주변에서 흔히 볼 수 있는 물, 자갈, 모래를 섞어서 배합할 수 있는 장점으로 인하여 토목공사나 건축용 구조재료로서 콘크리트가 널리 쓰이기 시작하였고, 현대 건축에서도 필수적인 건축구성요소로

서 자리매김하였다. 최근에는 콘크리트의 구조적 성능을 증진시켜 초고층 건축물이나 장경간화된 교량을 건설해나가고 있고[1], 컬러 고성능콘크리트, 고성능 타이포그래피 등이 개발되고 있다[2,3]. 이뿐만이 아니라 커튼월 공법 등의 비구조체 패널의 생산 및 보급과 인간의 삶의 질 향상에 따라 콘크리트를 구조체로만 바라보지 않고 감성을 자극하는 건축 구성요소로서 수요가 증가하고 있다. 컬러 콘크리트를 개선하여 다양한 색을 표현하기 위한 온도반응 색변환 콘크리트도 개발되고 있고[4], 태양광을 이용한 자가 발광 콘크리트 [5] 그리고 2000년 초 헝가리 건축가 Aron Losoncz이 반투명콘크리트(light transparent concrete)인 Litracon 을 개발하여 2004년 미국 타임지 선정 ‘올해의 발명품 36’에 선정되었다[6].

Received : August 29, 2018

Revision received : November 27, 2018

Accepted : December 21, 2018

* Corresponding author : Seo, Seung-Hoon

[Tel: 82-2-970-6512, E-mail: hamteemo@seoultech.ac.kr]

©2019 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

Litracon은 광섬유를 전체 콘크리트 부피의 4~10% 정도 배설하여 콘크리트를 타설하여 빛의 투과성을 획득하는 방식이다. 광섬유의 삽입으로 우수한 빛 투과성은 물론이고 일반 콘크리트에 비하여 강도의 저하가 일어나지 않는 것도 장점이다. 유럽을 중심으로 하여 건축물에서의 신비감 및 감성적 요소로서 보급이 되고 있지만, 국내에는 잘 휘는 성질의 광섬유로 인하여, 투과방향으로의 직선배열의 어려움으로 제작기간이 상당히 길며, 또한 상대적으로 높은 단가 등으로 인하여 보급이 이루어지지 않고 있는 실정에 있다. 광섬유를 직선 배열하기 위해 수천에서 수만 개의 광섬유를 수작업으로 배열해야 하는 노동집약적인 특성으로 인하여 제작기간이 일반 콘크리트보다 몇 배 더 걸리게 된다. 또한 수많은 광섬유 적용으로 제작 단가 또한 기하급수적으로 상승하기 때문에, 국내 건설 현장 적용은 쉽지 않다.

이를 개선하기 위하여 국내에서는 광섬유 대신 상대적으로 저가의 투명재질인 플라스틱 봉을 삽입하여 빛 투과성을 갖는 빛 감성친화형 콘크리트(LEFC)를 개발하게 된다 [7]. 비구조체로서 현장에 적용하기 위해서는 사용자의 다양한 요구조건을 만족시켜야 한다. 따라서 투명 재질 다양화를 위하여 봉의 직경(5mm, 10mm)과 간격(10mm, 15mm, 20mm)을 달리하여 새롭고 다채로운 감성을 형상화 하고자 하였다. 플라스틱 봉 적용을 위한 LEFC 몰드를 새로이 제작하여 시공성을 비약적으로 상승시켰고, 기존 반투명 콘크리트의 무수한 광섬유의 직선 배열을 직관적이고 단순화된 플라스틱 봉 배열로 대체함으로써 투명성을 확보하였다.

선행된 연구에서 봉의 삽입에 따른 빛 투과 콘크리트의 역학성능 저하 및 높은 자중으로 인한 문제점을 개선하여 목표 휨 강도인 4~5MPa에 도달하고자 기포제[8,9,10]를 적용하여 단위중량을 감소시켰으며, 고성능의 유기섬유 [11,12]를 적용하여 휨 특성 개선의 가능성을 검토하였다. 빛 투과 콘크리트의 특성상 플라스틱 봉 삽입으로 인하여 콘크리트와 투명 플라스틱 간의 재료적 차이로 나타나는 부착력 감소가 필연적이다. 따라서 플라스틱 봉 직경 및 간격 등의 변수에 따라 휨 강도가 변화할 것이고, 이를 예측 모델을 이용하면 목표로 하는 형상 및 휨 강도에 도달할 수 있다. 이에 본 연구에서는 빛 감성친화형 콘크리트의 휨 특성의 평가 그리고 예측모델을 제안하여 직접 타설하지 않고도 각기 다른 요구조건에 알맞은 성능을 예측하고자 한다.

2. 실험방법

2.1 사용재료

빛 투과 콘크리트에 사용된 투명재료는 국내의 J사에서 생산된 투명 플라스틱 봉(5mm, 10mm)을 사용하였고, 이의 상세한 특성은 Figure 1에 나타내었다. 낮은 단위중량을 이용하여 경량화를 목적으로 본 연구에 사용된 합성 기포제는 Table 1에 나타내었다. 본 기포제는 합성 계면 활성제 혼합물로 pH 7 ± 0.5 , $1\pm 0.5(\text{kg}/\text{m}^3)$ 의 비중과 찬물에 쉽게 용해되는 특성이 있었다. 또한 취성 파괴의 방지 및 균열 지연 효과, 인성 증가 등 휨 성능 향상을 위하여 혼입되는 섬유는, 국내 N사의 나일론 섬유와 PVA 섬유(Polyvinyl Alcohol Fiber)을 사용하였으며, 상세한 내용은 Table 2에 나타내었다. 빛 투과 콘크리트 봉 간격을 고려하여 섬유 길이는 공통적으로 6mm로 제한하였다. PVA 섬유 직경은 $26\mu\text{m}$ 이고 비중 $1.3\pm 0.1(\text{kg}/\text{m}^3)$, 인장강도 1,200MPa 탄성계수 24.5GPa를 갖는 것으로 확인되었다. 그리고 Nylon 섬유는 직경 $23\sim 26\mu\text{m}$, 비중 1.13~1.16, 인장강도 800MPa, 탄성계수 3.5GPa를 갖는 것으로 확인되었다. 시멘트는 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 타설 시 유동성 증진을 위하여 본 연구에 사용된 혼화제로는 국내 D사에서 생산된 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하였다.

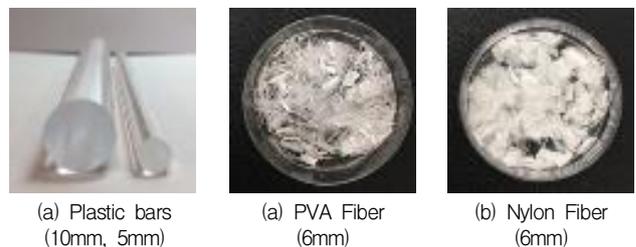


Figure 1. Detailed images of materials

Table 1. Properties of foaming agent

Factors	Properties
Appearance	Pale tan liquid
Composition	Synthetic surfactant mixture
pH (3%)	7 ± 0.5
Specific gravity (g/cm^3)	1 ± 0.5
Solubility	Easily soluble in cold water
Stability	Safe in light water

Table 2. Properties of fibers

Factors	PVA	Nylon
Status	Dry	Dry
Specific gravity (g/cm ³)	1.3±0.1	1.13 ~ 1.16
Diameter (μm)	26	12, 23 ~ 36
Length (mm)	6	6
Tensile strength (MPa)	1,200	800
Young's modulus (GPa)	24.5	3.5

2.2 실험방법

Table 3은 본 실험의 배합설계를 보여준다. 실험은 총 3단계를 거쳐서 수행되었다. 우선 물시멘트비 45%, 콘크리트에 대한 기포 용적비 50%, 시멘트에 대한 SP제의 혼입비 0.3%로 동일하게 설정한 후, Nylon 섬유를 0.3%, 0.6% 혼입한 배합과 동일한 설정 값에 PVA 섬유를 0.3%, 0.6% 혼입한 배합을 진행하였고, 마지막으로 각각 배합을 투명 재질의 직경 및 간격 변화에 따라 시험체를 제작하였다. 그러나, PVA 섬유를 0.6% 혼입한 시험체의 배합 과정에서 섬유가 뭉치는 현상이 발생하여 PVA 섬유의 혼입량을 0.2%, 0.3%로 제한하였다. 결국 섬유 종류별 최적 배합조건을 찾기 위해 섬유를 혼입하는 과정에서 섬유 뭉침 현상을 방지하여 좋은 유동성을 확보하기 위해 섬유 종류별 혼입률 차이가 발생하게 되었다. 이를 통하여 기포를 적용한 빛 투과 콘크리트의 각 섬유 혼입에 따른 역학 성능의 차이를 확인할 수 있을 것으로 사료된다.

균지 않은 콘크리트 시험들을 먼저 진행하였다. KS F 4039(현장 타설용 기포 콘크리트)에 준하여 플로 값을 측정하였고[13], KS F 2409:2016(균지 않은 콘크리트의 단위

용적 질량 및 공기량 시험방법(질량방법))에 따라 단위용적을 측정하였다[14]. 균지 않은 콘크리트 시험 후 타설을 실시하고 28일 양생한 시험체로 KS F 2405:2010(콘크리트 압축 강도 시험방법)에 준하여 공시체의 지름 100mm, 높이 200mm로 하여 제작한 후 연마기로 연마하고 980,000N 까지 시험 가능한 기기로 공시체의 파괴 시까지 하중을 가하여 식에 따라 값을 산출하였다[15]. 콘크리트 매트릭스와 플라스틱 봉의 물리적 결합에 요구되는 콘크리트 매트릭스만의 강도 평가를 위해 봉을 미삽입한 상태에서 수행되었다. 마지막으로 휨 강도 및 인성 평가를 위하여 KS F 2566:2014(섬유 보강 콘크리트의 휨성능 시험방법)에 따라 3등분 하중법에 의한 휨 성능 시험을 실시하였다. 100mm×100mm×400mm 의 시험체를 제작한 후 시험체에 충격이 가해지지 않도록 하중을 가하였고, 그 속도는 분당 지간의 1/1500으로 하였다. 처짐 측정 장치(LVDT)를 이용하여 중앙지점의 처짐 정도를 확인하여 KS 규격에 따라 시험으로 얻은 하중-변위 곡선에서 변위가 지간 1의 1/150이 되기까지의 면적으로 하여 유효 숫자 3자리까지 구하였다[16].

2.3 빛 투과 콘크리트 제작 과정

Figure 2는 빛 투과 콘크리트 제작 과정을 나타낸다. 다양한 투명 재질의 특성을 적용시킬 수 있도록 생산과정을 체계화하여 노동의 소모를 절약하여 최적의 생산 방법을 고려했다. 바닥판을 놓고 그 위에 정사각형 플레이트를 올린 후, 타공판을 이와 결속하고 나면, 플라스틱 봉을 삽입하여 봉이 이탈하지 않도록 걸판을 덧대고 나면 타설 준비가 마무리된다. 타설 이후, 이 과정을 역 순으로 수행하여 시험체를 각 변수별로 3개씩 제작하였다.

Table 3. Mix design

No.	Specimen	Fiber Type	Fiber Contents (%)	W/C (%)	Unit Weight (kg/m ³)		Foam (l/m ³)	Super-plasticizer (C*%)	Diameter (bars,mm)	Intervals (mm)
					W	C				
1	Foam_Nylon(0)	-	0	45	294	649	500	0.3	5, 10	10, 15, 20
2	Foam_Nylon(0.3)	Nylon	0.3	45	294	649	500	0.3	5, 10	10, 15, 20
3	Foam_Nylon(0.6)	Nylon	0.6	45	294	649	500	0.3	5, 10	10, 15, 20
4	Foam_PVA(0.2)	PVA	0.2	45	294	649	500	0.3	5, 10	10, 15, 20
5	Foam_PVA(0.3)	PVA	0.3	45	294	649	500	0.3	5, 10	10, 15, 20

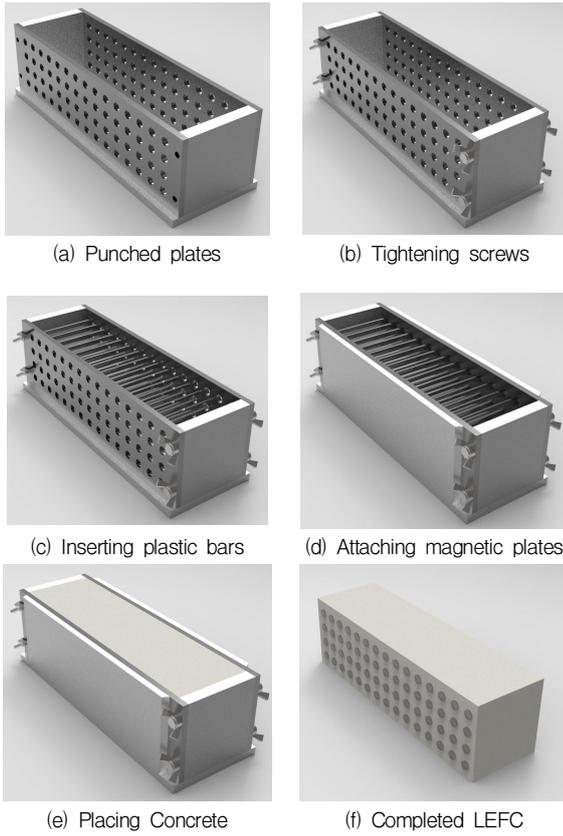


Figure 2. Production process of LEFC concrete

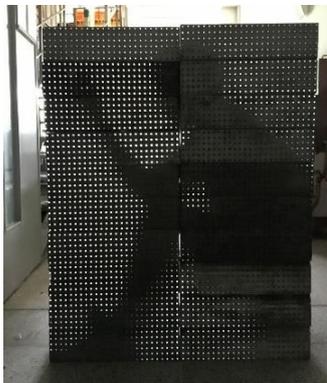


Figure 3. Completed LEFC block

Figure 3는 완성된 LEFC 블록 적용의 예를 보여주는 사진이고 Figure 4는 직경 및 간격에 따라 제작된 LEFC 휨 시험체의 사진이다. 빛이 투과되는 부분과 물체가 빛을 막으면 그림자가 형성되고, 이를 실내 인테리어에 적용할 경우 간벽으로서의 기능 뿐 아니라 감성을 자극하는 효과를 기대할 수 있다.

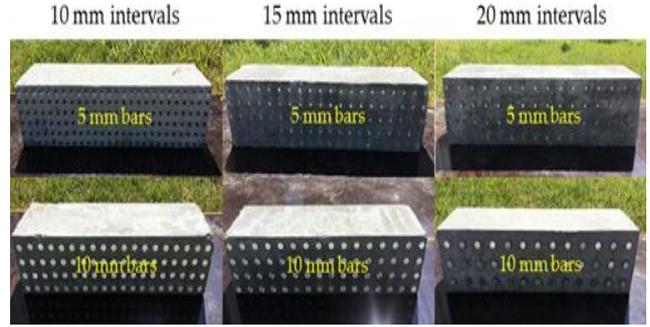


Figure 4. LEFC blocks with varying diameters and spacing

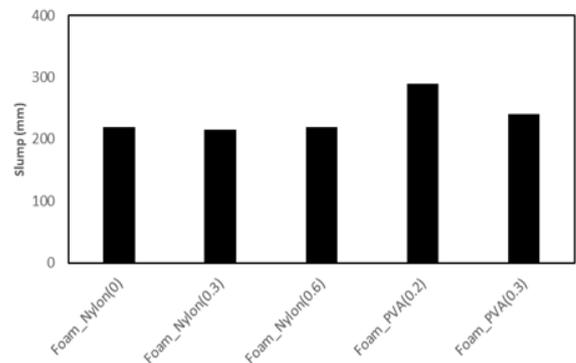


Figure 5. Slump test result

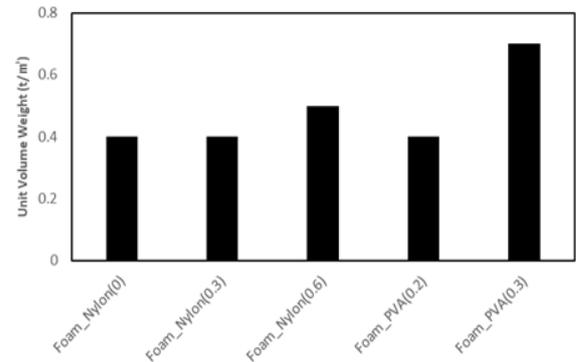


Figure 6. Unit volume weight test result

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트 시험

Figure 5, 6은 기포를 적용한 빛 투과 콘크리트의 섬유 종류 및 혼입비에 따른 플로우 및 단위중량의 결과를 나타낸 그래프이다. Nylon 섬유를 혼입한 시험체들은 220mm로 거의 일정한 플로우 값과 0.4t/m³의 일정한 단위중량을 가졌다. 이는 섬유 혼입량의 증가에도 섬유의 뭉침 현상이 없이 분산성이 우수하였음을 나타낸다. PVA섬유를 혼입한

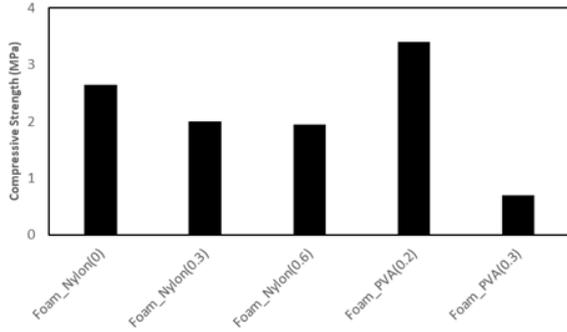
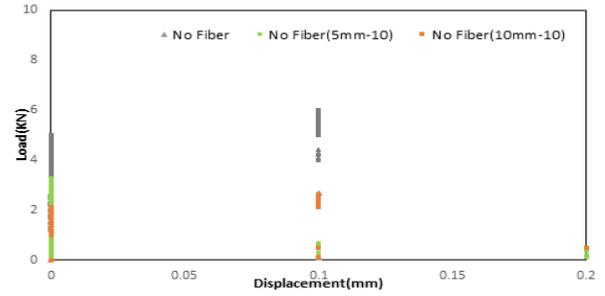


Figure 7. Compressive strength test result

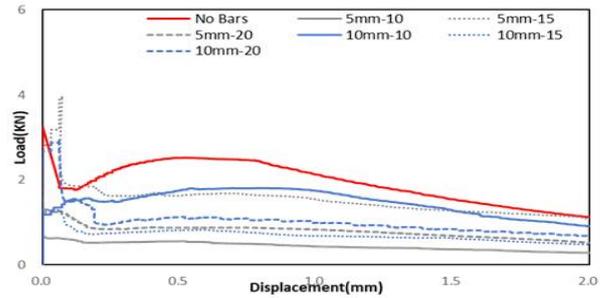
Foam_PVA(0.2)의 경우 상대적으로 우수한 플로 값을 갖지만 PVA섬유를 0.6% 혼입하였을 때 섬유 뭉침 현상이 나타나 분산성의 급격한 저하가 보여 배합에 실패한 점을 고려하면 Nylon 섬유가 기포제 적용 및 감성친화형콘크리트에는 더 적합할 것으로 판단된다. 그리고 Foam_PVA(0.3)은 0.7t/m³의 다소 높은 단위중량을 갖는 것으로 보아, 추후에 다시 실험할 필요가 있다고 판단된다.

3.2 압축강도 및 휨시험

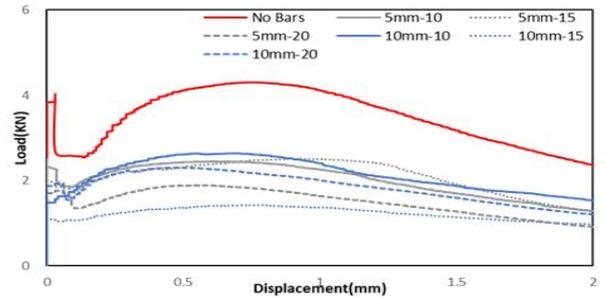
Figure 7은 시험체들의 압축강도 시험 결과를 나타낸 그래프이다. Nylon 섬유를 혼입한 시험체들과 PVA 섬유를 혼입한 시험체들 모두 섬유 혼입이 늘어날수록 압축강도 감소를 확인하였다. 일반적으로 섬유는 콘크리트에서 배합되어 섬유의 우수한 분산으로 휨성능을 발휘한다. 본 연구에서는 경량기포가 플라스틱 봉 사이에 혼입될 때 소포현상을 방지하고 적절한 유동성을 확보하기 위한 목적으로 섬유를 사용하였으나, 오차범위 이상의 큰 압축강도 변화가 있는 것으로 보아 압축파괴 시 콘크리트 계면에서의 영향이 있는 것으로 판단되며, 추후 연구를 통하여 밝혀야 할 것으로 사료된다. Figure 8은 시험체들의 하중-변위곡선을 보여준다. Figure 8(a)에서 확인할 수 있듯 섬유를 넣지 않은 시험체는 급격한 취성파괴로 인하여 곡선 형태를 띠지 못하는 것을 알 수 있다. 변위 0에서부터 0.2까지의 그래프도 취성파괴임을 나타낸다. Figure 8(b), (c)에서는 섬유 혼입량이 증가할수록 피크하중 이후에 완만한 형태의 곡선을 보이는 것을 알 수 있고, 봉을 삽입하지 않은 No Bar 시험체가 가장 우수한 연성을 나타낸다. 특히 Foam_Nylon(0.6) 시험체는 봉의 삽입에 따라 휨 성능이 크게 저하되고 섬유 혼입률 증가에 따라 뚜렷한 연성이 증가하는 것을 확인하였다. 섬유 혼입률이 0.6%로 증가하였기 때문에 이에 따라 봉이 삽입되지



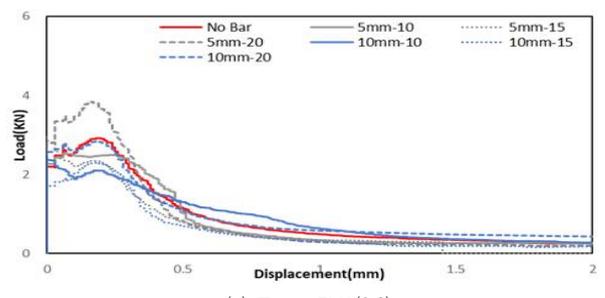
(a) Foam_No Fiber



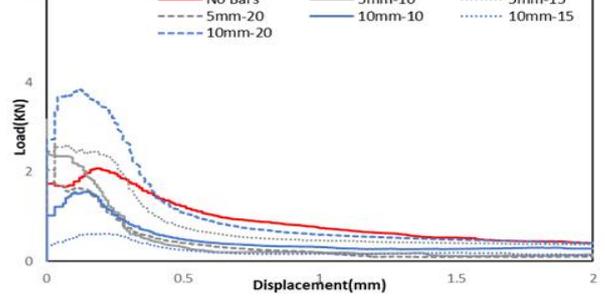
(b) Foam_Nylon(0.3)



(c) Foam_Nylon(0.6)



(d) Foam_PVA(0.2)



(e) Foam_PVA(0.3)

Figure 8. Flexural behavior characteristics

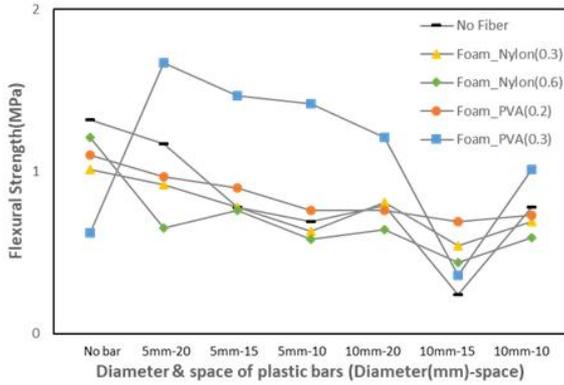


Figure 9. Flexural strength test result

얇은 No Bar 시험체가 우수한 인성을 보여주는 반면, 붕을 삽입한 다른 시험체들은 콘크리트 내부 플라스틱 붕과 콘크리트 매트릭스간의 부착력 감소로 인하여 인성 감소가 뚜렷이 관찰된다. PVA섬유를 혼입한 시험체들은 Figure 8(d), (e)에서 나일론 섬유를 혼입한 시험체에 비해 낮은 인성을 보이는 것을 확인할 수 있다. 섬유 혼입량의 변화가 작기 때문에 뚜렷한 연성 증가가 관찰되지 않는데, 이는 PVA섬유를 혼입한 배합에서 섬유가 뭉치는 현상이 일어났기 때문으로 보인다. 결과적으로 Nylon섬유의 분산성이 상대적으로 우수하여 고유동성을 확보하였고 우수한 휨 성능을 갖게 된 것으로 분석된다.

Figure 9는 시험체들의 휨 강도 시험 결과를 나타낸다. 휨 강도 측정 결과 직경 10mm보다 5mm 붕을 삽입하였을 때 다소 우수한 휨 강도를 나타내었고, 간격이 좁아질수록 휨 강도의 감소가 나타났다. 이는 붕 직경이 클수록 콘크리트 매트릭스와 접촉 면적의 증가로 접착력 저하를 가져오기 때문으로 사료된다. 또한 간격 감소는 더 많은 플라스틱 붕을 삽입하게 되기 때문에 재료적 차이로 인하여 자연스럽게 강도가 저하하게 되는 것으로 분석된다. 같은 맥락으로 그래프의 x축 증가에 따라 붕이 차지하는 단면적이 커지기 때문에 휨 강도의 감소가 나타났다. 반면, No Bar는 붕 미삽입으로 우수한 휨 강도를 나타낸다. Figure 10, 11은 시험체들의 인성을 나타낸다. 섬유 혼입량이 증가함에 따라 인성이 증가하였고, 콘크리트 매트릭스의 첫 피크하중에서부터 균열을 억제하여 가교 역할을 하는 것으로 나타났다[17,18,19,20,21]. 인성 측정 결과, Nylon 시험체들은 섬유의 혼입량 증가에 따라 인성의 증가가 뚜렷하게 관찰된 반면, PVA 섬유를 혼입한 시험체들은 섬유 혼입비의 변화가 적기 때문에 인성 차이가 뚜렷하지 않았다. Figure 12는 붕 직경에 따른 파괴 단면의 사진이다.

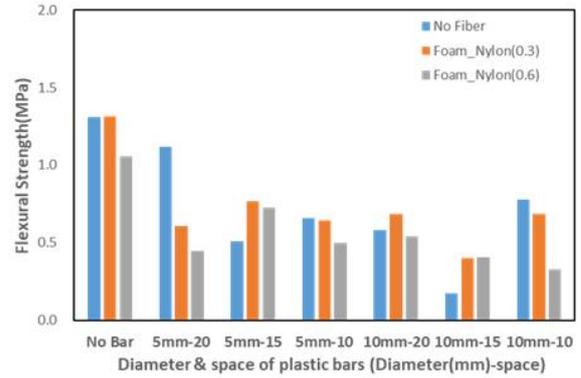


Figure 10. Toughness (0 ~ P₁₅₀) (Foam_Nylon)

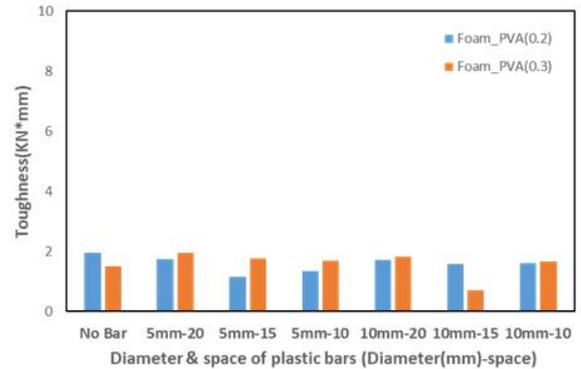


Figure 11. Toughness (0 ~ P₁₅₀) (Foam_PVA)

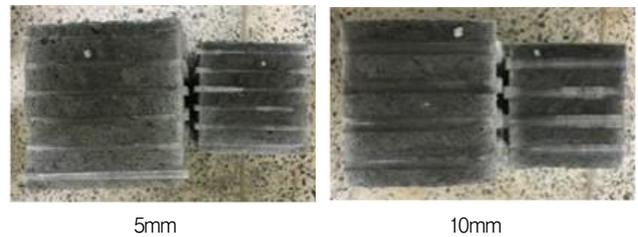


Figure 12. Cross sections of flexural test specimens

플라스틱 붕 계면을 따라 파괴 단면이 모두 연직 방향으로 형성되는 것을 확인하였다. 이는 하중의 방향과 붕 사이 단면적이 영향을 미친 것으로 분석된다.

3.3 LEFC 휨 강도 예측 모델

빛 투과 콘크리트를 제작하여 사용자의 감성을 이끌어내기 위해서는 콘크리트 내에 투명재질을 다양한 배열로 삽입하여 다채로운 투과성을 확보하여야 한다. 실험결과 붕을 삽입하지 않은 시험체보다 휨 강도의 감소가 확인되었다. 현장적용 시 직경과 붕 간격 변화를 유도하여 다양한 LEFC 제작이 가능하며, 투명재질을 적용하고자 할 때 플라스틱 붕 직경 및 간격 변화에 따른 휨 강도 감소 정도를 예측함으로써 최적화된 빛 투과 감성친화형 콘크리트를 제작할 수

있을 것이다. 다만, 본 연구에서 섬유 종류 및 혼입률에 대한 예측모델은 적용되지 않았는데, 이는 보다 개선된 배합설계를 통하여 추후 예측모델 산정에 사용할 예정이다.

$$f_r = \frac{Pl}{bh^2} \quad \text{----- (1)}$$

식 (1)은 KS F 2566 섬유보강콘크리트의 휨성능 시험방법에 따른 계산식이다[16]. LEFC 휨 강도 시험결과에서 봉 삽입으로 인한 여러 변수를 고려한 새로운 형태의 휨 강도 예측식이 가능할 것으로 판단되었다. 봉 직경이 커질수록 더 많은 면적이 콘크리트와 접하게 되어 부착력 저하, 즉 휨 강도 저하로 이어지게 된다. 또한 봉 간격이 작을수록 콘크리트 매트릭스 대비 봉 표면적 증가로 휨 강도 저하로 이어진다. 마지막으로 콘크리트 겉표면의 단면적에 대한 플라스틱 봉 단면적 비율이 증가할수록 휨 강도 저하를 가져오게 된다. Figure 13에 파라미터 정의를 그림으로 나타내었다. 봉 삽입에 따른 파라미터들을 정의하였고 각 파라미터 별로 실험에 적용한 값들을 Table 4에 정리하였다.

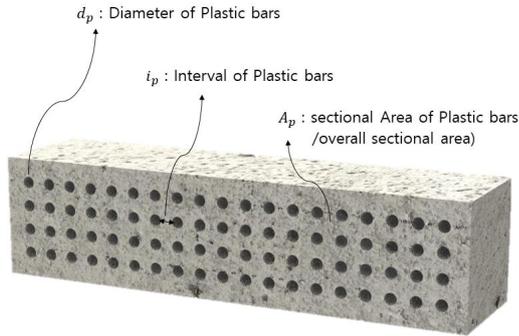
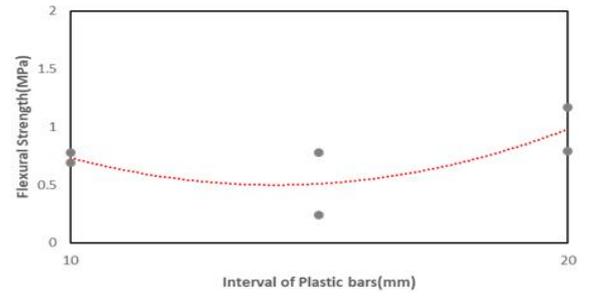


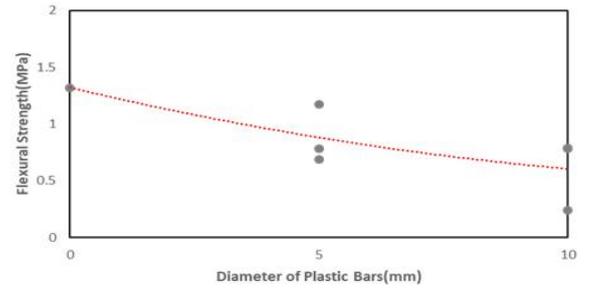
Figure 13. Parameter definition

Table 4. Parameter data

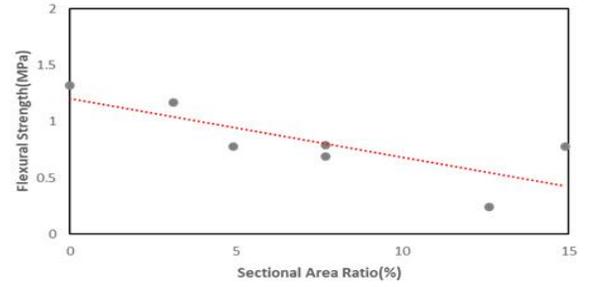
Specimen	i_p (mm)	d_p (mm)	A_p (%)
No Bar	-	0	0
5mm-20	20	5	3.1
5mm-15	15	5	4.9
5mm-10	10	5	7.7
10mm-20	20	10	7.7
10mm-15	15	10	12.6
10mm-10	10	10	14.9



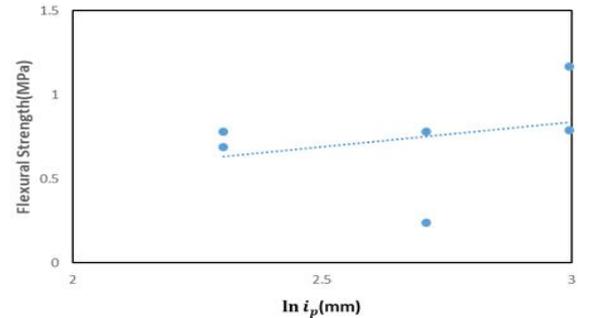
(a) i_p



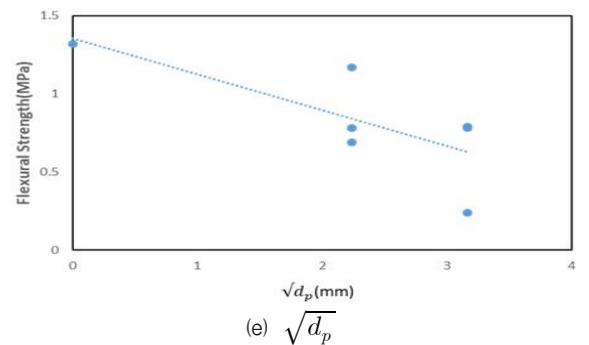
(b) d_p



(c) A_p



(d) $\ln i_p$



(e) $\sqrt{d_p}$

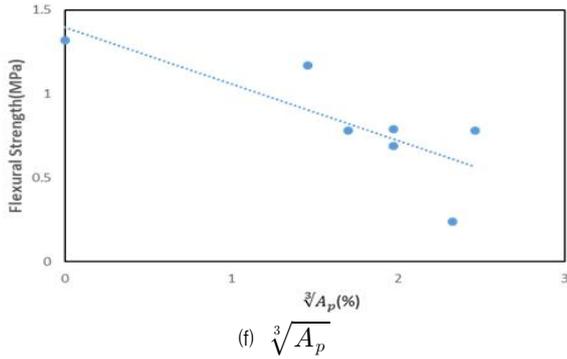


Figure 14. Trend line by parameter

Figure 14(a), (b), (c)는 플라스틱 봉 삽입으로 인한 파라미터 경향성을 파악하기 위한 그래프로서 각 파라미터를 독립적으로 휨 강도에 대한 분석을 진행하였다. Figure 14(a)는 봉 간격(i_p) 변화로 인한 경향성을 나타낸다. 비선형으로서 봉의 간격이 15mm일 때 휨 강도 감소는 다소 낮으나, 전체적으로 간격 증가에 따른 휨 강도 증가를 보여준다. Figure 14(b)는 봉 직경(d_p) 변화로 인한 경향성을 보여주는데, 직경이 커질수록 콘크리트 매트릭스 내부에서의 결합면적이 커지게 되어 결과적으로 부착력 감소로 휨 강도가 감소하였다. Figure 14(c)는 봉 단면적비(A_p)가 선형으로 감소함을 보여준다. 봉 직경과 마찬가지로 콘크리트 겉표면에서 콘크리트와의 접촉면적이 커짐에 따라 휨 강도가 감소함을 확인하였다.

그러나, 콘크리트 매트릭스 내에서 모든 파라미터가 복합적으로 작용하기 때문에 독립적인 파라미터 분석보다는 복합적으로 요소를 고려해야 한다. 따라서 예측에 적합한 모델링을 찾기 위한 경향성 분석을 Table 4와 Figure 14(a), (b), (c)를 바탕으로 실시하였다. Figure 14(d)는 봉 간격 파라미터를 수정한 $\ln i_p$ 의 경향성을 보여준다. Figure 14(e)는 봉 직경 파라미터를 수정한 $\sqrt{d_p}$ 의 경향성을 나타내고, Figure 14(f)는 봉 단면적비 파라미터를 수정한 $\sqrt[3]{A_p}$ 의 경향성을 나타낸다. 이와 같은 결과가 도출된 이유는 세 파라미터가 각각 독립적으로 영향을 끼치지 않고, 복합적으로 강도 변화에 영향을 미치기 때문이다.

이에 Figure 14의 세 가지 변수를 고려하여 식 (2)와 같은 새로운 형태의 LEFC 강도 변화를 예측할 수 있는 모델식을 제안하고자 한다.

$$f_r' = \frac{Pl}{bh^2} \cdot \frac{\ln i_p}{\sqrt[2]{d_p} \sqrt[3]{A_p}} \quad (2)$$

Table 5에는 변수들의 강도 변화 비와 예측모델의 값을 나타내었다. 봉을 삽입하지 않은 No Bar 시험체의 시험 값이 1.32MPa이며, 이 값을 고정하여 봉을 삽입한 시험체들의 시험 값으로 나누어 (No Bar/LEFC 시험 값) 휨 강도의 감소를 표현하였다. 제안식 (2)를 사용하여 플라스틱 봉을 삽입한 빛 투과 감성친화형콘크리트의 휨 강도를 예측한 결과와 변수들의 경향성을 Figure 15에서 보여주고 있다. 전반적으로, 일부 데이터 오차를 제외하고는 제안식에 의한 예측값이 실험값과 비교적 잘 맞는 것으로 보인다. 예측 모델의 R^2 이 0.96으로 높은 신뢰도를 나타내고, 특히 5mm 봉을 삽입한 시험체들의 예측 값은 본 실험값에 근사한 결과를 보여준다. 본 연구는 기초적인 실험을 통하여 예측가능한 모델을 제안한 식이기 때문에 본 식으로 봉의 직경 및 간격 변화로 인한 빛 투과 콘크리트의 휨 강도를 완전하게 예측할 수는 없다. 따라서 보다 향상된 재료구성과 배합설계를 실시 중에 있으며 보다 폭넓은 실험 데이터의 축적으로 실험에 사용된 직경 외의 플라스틱 봉을 사용하여 봉 직경, 간격 및 콘크리트에서의 겉표면적 변화에 대한 변수를 상세하게 고려한 추가적인 실험값을 활용한다면 보다 정확한 휨 강도 변화를 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

Table 5. Flexural strength analysis

Specimen	Experiment (MPa)	Percentage (No Bar / Exp)(%)	Prediction Model (MPa)
No Bar	1.32	-	-
5mm-20	1.17	88.6	1.21
5mm-15	0.78	59.1	0.94
5mm-10	0.69	52.3	0.69
10mm-20	0.79	59.8	0.63
10mm-15	0.24	18.2	0.49
10mm-10	0.78	59.1	0.39

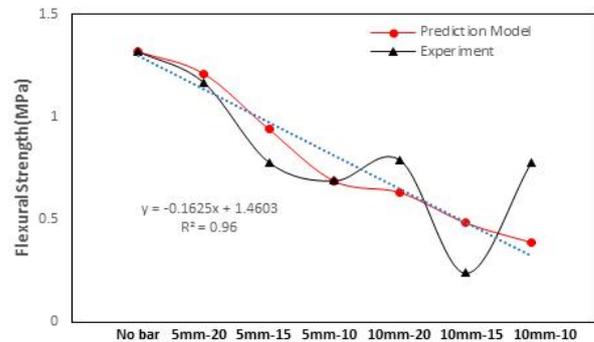


Figure 15. Prediction model

4. 결 론

기포제를 적용하여 경량화를 유도하고, 유기섬유를 혼입하여 휨 성능을 향상시킨 빛 투과 감성친화형콘크리트(LEFC)의 휨 강도 예측모델 결과는 다음과 같이 요약하였다.

- 1) PVA섬유 혼입한 경우 Nylon 섬유보다 우수한 작업성을 나타내었으며, 합성기포제의 혼입으로 단위중량 감소가 뚜렷하였다.
- 2) 섬유 혼입량 증가에 따라 섬유의 가교현상으로 휨 강도 및 인성의 증가를 보였고 동일한 배합 내에서도 붕의 직경과 간격에 따른 휨 강도의 차이가 존재하는 것을 확인하였다.
- 3) 콘크리트와는 다른 이질재료인 플라스틱 붕 삽입으로 인하여 콘크리트-붕 계면에서의 부착력변화로 휨 강도가 영향을 받는 것을 확인하였으며, 이를 추정하기 위해 고려해야 할 변수(직경, 간격 및 비표면적)들을 정의하고 LEFC 휨 강도를 예측할 수 있는 모델식을 제안하였다.
- 4) 빛 투과 감성친화형콘크리트(LEFC)의 휨 강도 예측모델이 R^2 이 0.96로, 양호한 신뢰도를 갖는 것을 확인하였다.
- 5) 본 연구는 기초적 실험을 통하여 예측가능한 모델을 제안한 식으로 현재 보다 향상된 재료구성 및 배합설계를 통하여 문제점을 극복할 수 있는 다량의 실험 데이터를 확보중에 있으며 추후 연구 결과에 따라 변수의 다양화와 함께 폭넓게 축적된 데이터를 바탕으로 모델식의 업그레이드가 필요할 것으로 판단된다.

요 약

현대에 가장 널리 쓰이는 건축 재료인 콘크리트는 기술의 지속적인 발전에 따라 고강도화 뿐만 아니라 인성 및 연성의 증가, 경량화와 같은 구조적 성능의 향상이 되었다. 또한 인간의 삶의 질이 향상됨에 따라 감성을 충족시킬 수 있는 것에 대한 수요의 급증으로 건축용 외장패널 그리고 건축의 경계를 넘어 인테리어 소품으로까지 다양하게 쓰이는 추세이다. 국내에서는 플라스틱 붕을 삽입하여 빛과 콘크리트의 결합으로 사용자의 감성을 자극하는 빛 감성친화형콘크리트(LEFC)를 개발하였으나, 높은 단위중량으로 인한 현장에서

의 시공성 한계를 보여주었다. 이에 본 연구에서는 LEFC에 기포제를 적용하여 단위중량을 감소시켜 경량화를 달성하고 휨 성능 향상을 위해 두 가지 유기섬유(Nylon Fiber, Polyvinyl Alcohol)를 혼입하여 비교분석하였다. 마지막으로 플라스틱 붕 삽입으로 인한 콘크리트 비표면적 손실 및 붕과의 부착력 감소로 인한 휨 강도 변화를 붕의 직경(5mm, 10mm)과 간격(10mm, 15mm, 20mm)에 따른 변수를 적용한 예측 모델을 제안하고자 한다.

키워드 : 기포, 유기섬유, 빛 투과 콘크리트, 감성, 예측모델, 휨 강도

Acknowledgement

This research was supported by a Grant (NRF-2016 R1C1B2009489) from the National Research Foundation of Korea (NRF).

References

1. Ryu HG, Son BS. Problems and suggestions for improvement derived from an analysis of the urban & residence environment improvement project. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, 2010 Jun;10(3):39-47.
2. Lee CD, Kim WJ, Cho KS, Kim JH. Design of UHPC(Ultra High Performance Concrete) girder cable stayed footbridge. *Journal of the Korea Concrete Institute*, 2011 Sep;23(5):38-44.
3. Kang SH, Youm, HS, Ha YJ, Hong SG. Development of hole-type typography technology using ultra-high performance concrete. *Proceeding of Korea Concrete Institute*; 2016 May 11-13; Yeosu, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2016, p. 697-8.
4. Kang SH, Kim SJ, Hong SG. Development of ultra high performance white concrete (UHPWC) for cladding of busan opera house. *Proceedings of the Korea Concrete Institute*; 2015 May 13-15; Gwangju, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2015, p. 337-8.
5. Lee JH, Park YK, Jeon IK, Yoon KW. Experimental study on the basic properties of concrete composition mixed with pigments having been color changed by the temperature. *Proceeding of the Korea Institute of Building Construction*; 2009 Nov 20; Cheongju, Korea, Seoul (Korea): The Korea Institute of Building Construction; 2009, p. 149-52.

6. Son HS, Roh YS, Development of self-illuminative concrete using solar energy. Autumn Annual Conference of AIK; 2016 Oct 4–6; Busan, Korea, Seoul (Korea): Architectural Institute of Korea; 2016. p. 1753–8.
7. Losoncz A, inventors. Building block comprising light transmitting fibres and a method for producing the same, United States patent US 8,091,315B2. 2012 Jan 10.
8. Kim BI, Kim SW. Future oriented light emotion friendly lightweight concrete(LEFLC). Magazine of the Korea Concrete Institute. 2016 May;28(3):35–9.
9. Nambiar K, Ramamurthy K. Air-void characterisation of foam concrete. Cement and Concrete Research. 2007 Feb;37(2):221–30.
10. Kim JM, Jeong JY, Hwang EH, Shin SC. Properties of foamed concrete according to types and concentrations of foam agent. Journal of the Korea Concrete Institute. 2012 Feb;24(1):61–70.
11. Han YJ, Kim SY, Kim BI. Application and evaluation of organic fibers for improving mechanical properties of LEFC with foaming agent. Proceedings of the Korea Concrete Institute; 2017 Nov 1–3; Andong, Korea, Seoul (Korea); Korea Concrete Institute; 2017. p. 469–70.
12. Noushini A, Samali B, Vessalas K. Effect of polyvinyl alcohol (PVA) fibre on dynamic and material properties of fibre reinforced concrete. Construction and Building Materials. 2013 Dec;49:374–83.
13. Han CG, Yoon GW, Han MC, Shin HS. A fundamental study on the nylon fiber concrete. Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction. 2007 Apr;23(4):95–102.
14. KS F 4039. Foamed concrete for cast-in-site. Korean Agency for Technology and Standards. 2004.
15. KS F 2409. Standard test method for unit weight and air content(gravimetric) of fresh concrete. Korean Agency for Technology and Standards. 2016.
16. KS F 2405. Standard test method for compressive strength of concrete. Korean Agency for Technology and Standards. 2010.
17. KS F 2566. Standard test method for flexural performance of fiber reinforced concrete. Korean Agency for Technology and Standards. 2014.
18. Han CG, Han MC, Shin HS. Effect of the nylon and cellulose fiber contents on the mechanical properties of the concrete. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2007 Sep;7(3):83–90.
19. Kim MH, Kim JH, Kim YR, Kim YD. An experimental study on the mechanical properties of HPFRCCs reinforced with the micro and macro fibers. Journal of the Korea Concrete Institute. 2005 Apr;17(2):263–71.
20. Won JP, Hwang KS, Park CG. Mechanical and early shrinkage crack of hydrophilic pva fiber reinforced concrete with fiber volume fraction and fiber length. Journal of the Korean Society of Civil Engineers A. 2005 Jan;25(1A):133–41.
21. Kim YW, Min KH, Yang JM, Yoon YS. Flexural and impact resisting performance of HPFRCCs using hybrid pva fibers. Journal of the Korea Concrete Institute. 2009 Dec;21(6):705–12.
22. Yang EH, Wang S, Yang Y, Li VC. Fiber-bridging constitutive law of engineered cementitious composites. Journal of Advanced Concrete Technology. 2008 Feb;6(1):181–93.