

고인성 섬유보강 콘크리트의 정적 및 피로 휨시험

Static and Fatigue Flexural Tests of Ductile High-performance Fiber Reinforced Cementitious Composites

신경준^{1*} · 이도근² · 이경찬³ · 김성일⁴

Kyung-Joon Shin^{1*} · Do-Keun Lee² · Kyoung-Chan Lee³ · Sung-Il Kim⁴

(Received November 12, 2021 / Revised December 13, 2021 / Accepted December 13, 2021)

Recently, research and development has been conducted to impart high performance and functionality to concrete materials by mixing various reinforcing materials into the matrix. Ductile fiber reinforced concrete using a large amount of fibers shows a distributed multiple cracking behavior, and various studies are being conducted on this material. However, research is focused on static behavioral analysis but studies on cyclic behaviors are not sufficient. In this study, beams were made of ductile fiber reinforced concrete with various fiber contents, and static and fatigue flexural tests were performed. As a result, the effect of fiber content on the flexural behavior was analyzed. Also, the applied load level and fatigue life relationship of ductile fiber reinforced concrete was proposed. Concrete with high ductile property could be achieved with a fiber content of 2%. When 0.5% fiber was more added, the maximum flexural strength was similar, but the flexural toughness is nearly doubled. On the other hand, there was no significant difference in the fatigue life of these two mixtures.

키워드 : 고인성, 섬유보강, 콘크리트, 모르타르, 피로

Keywords : High-ductile, Fiber reinforced, Concrete, Mortar, Fatigue

1. 서론

콘크리트로 대표되는 시멘트계 재료는 일반적으로 우수한 압축 강도를 가지고 있는 반면, 상대적으로 낮은 인장강도를 가지고 있으며, 인장 균열 발생 직후 대부분의 인장성능을 상실하는 취성적인 거동을 보인다. 이러한 취성적인 성질을 개선하기 위하여 다양한 방법이 사용되었으며, 주요한 한가지 방법으로 인장에 강한 섬유를 콘크리트에 혼입하는 섬유보강 콘크리트가 꾸준히 연구·사용되어 왔다(Balaguru and Surendra 1992; Bentur and Mindess 1990). 섬유보강콘크리트(Fiber Reinforced Concrete, FRC)는 인장 저항 능력을 향상시키고, 국부적인 균열의 생성과 진전을 억제하는 등 역학적 특성을 개선하는 효과를 얻을 수 있으나, 일반적으로 인장강도 자체의 향상보다는 균열이 발생한 후의 강성

(stiffness) 유지 및 인성(toughness) 증가를 위한 목적으로 사용된다.

섬유보강 콘크리트의 성능을 향상시키기 위하여 굵은 골재를 제외하고 잔골재만 사용하여 재료의 균질성을 높이고, 보강재로 사용되는 섬유의 성능을 최대한 이끌어내기 위하여 직경이 작은 마이크로 섬유를 사용하는 마이크로 섬유보강 모르타르에 대한 연구(Naaman and Reinhardt 1995; Bentur and Mindess 1990)도 수행되어왔다. 최근에는 마이크로 섬유보강 모르타르의 한 분야로서 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(Ductile High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites, DFRCC 이하 고인성 콘크리트)에 대한 연구(Naaman and Reinhardt 1995; Naaman and Reinhardt 2003; Fischer and Li 2006)가 활발히 진행되고 있다.

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

¹충남대학교 토목공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea)

²충남대학교 토목공학과 박사후 연구원 (Department of Civil Engineering, Chungnam National University, Daejeon, 34134, Korea)

³배재대학교 드론·철도·건설시스템공학과 교수 (Department of Civil Engineering, Pai Chai University, Daejeon, 35345, Korea)

⁴철도기술연구원 철도구조연구실 연구실장 (Korea Railroad Research Institute, Uiwang, Gyeonggi-do, 16105, Korea)

고인성 콘크리트는 기존의 FRC가 콘크리트의 부족한 인장강도를 보완하여 준다는 개념에서 한 단계 발전하여, 여러개의 균열을 순차적으로 발생시키는 동시에 개별 균열의 폭은 최소로 유지하여 전체적인 변형률을 증가시키는 다중균열분산(smearred multiple cracking)의 개념을 가지고 있다(Li et al, 1995). 미시건 대학(University of Michigan)의 연구진은 혼입되는 섬유의 양 뿐만 아니라 섬유 부착면의 특성과 매트릭스의 파괴특성을 조합하여 원하는 거동을 이끌어낸다는 개념에서 ECC(Engineered Cementitious Composite)란 명칭을 사용하기도 한다.

고인성 콘크리트는 균질한 성능을 얻고 파괴인성을 낮추기 위하여 모래에 비해 입경이 작은 규사를 잔골재로 사용하며 마이크로 섬유를 다량 혼합하여 균열가교(crack bridging) 능력을 최대화 하는 특징이 있다(Kim et al, 2003). 고인성 콘크리트의 특징인 미세균열 형성 및 변형경화 특성은 매질의 낮은 파괴인성과 크게 분산된 미세섬유의 가교(bridging) 능력에 의해 발생하는 것이다(Shin et al, 2008).

고인성 콘크리트에 대한 연구는 주로 정적 거동에 집중되어 있으며, 반복하중에 대한 연구는 충분하지 못한 실정이다. 특히 반복하중이 작용하는 상황에서 미세섬유의 가교 능력이 어떻게 영향을 받을 것이며, 그에 따라 인장성능 및 피로성능에 어떤 영향을 줄 것인지에 대하여 일부 연구자에 의하여 규명된 바가 있으나(Shin and Chang 2007; Matsumoto 1998; Suthiwarapirak et al, 2004) 아직 충분하지 않은 실정이다. 교량, 도로 등의 토목구조물은 공용 중에 지속적인 반복하중을 받기 때문에 구조물의 신뢰성을 확보하기 위해서는 반복하중에 의한 피로 거동의 이해가 필수적이다. 따라서, 본 연구에서는 고인성 콘크리트의 피로거동 대한 이해를 높이기 위하여 휨하중을 받는 보에 대한 일련의 실험을 진행하였다. 정적 휨거동에 대한 시험을 통해 피로시험의 기준을 결정하였고, 이어 여러 하중 수준에 대한 피로시험을 수행하였다.

2. 실험 연구

2.1 사용 재료 및 배합 설계

본 연구에서는 기존의 연구(Shin et al, 2008)에서 사용되어 균열분산 성능이 검증된 고인성 섬유보강 모르타르 배합을 사용하였다. Table 1은 실험에 사용된 배합비를 나타낸다. 균열분산을 위한 적정 섬유혼입량은 일반적으로 전체 모르타르 부피의 2% 이상이라 알려져 있으므로 섬유의 혼입량에 따른 고인성 콘크리트의 휨 인장거동을 알아보기 위하여 물-시멘트비(W/C)와 잔골재-시멘트

트비(S/C)를 0.46과 1.0으로 고정시키고 섬유 혼입량을 2.0%와 2.5%로 변화시켜 배합설계를 수행하였다.

배합에는 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 폴리카본산계의 액상 고성능감수제가 사용되었다. 길이 8mm, 직경 0.04mm인 PVA 섬유가 사용되었고, 물리적 특성을 Table 2에 나타내었다. 잔골재는 평균직경 0.125mm이고 비중 2.65의 규사가 사용되었다.

Table 1. Mixture proportions of matrix

	Cement	Water	Silica sand
Ratio by weight	1	0.46	1.0

Table 2. Fiber contents(volume fraction) and properties

Test ID		Length	Diameter	Elastic modulus	Tensile strength
PVA20	PVA25				
2.0%	2.5%	8mm	0.04mm	40GPa	1.4GPa

2.2 일축 압축시험

압축강도와 탄성계수를 측정하기 위하여 지름 100mm, 높이 200mm인 원통형 공시체를 제작하였으며, KS F 2405와 KS F 2438의 방법에 의하여 역학적 물성을 산정하였다. 축방향 변형률 측정을 위하여 수직변위 측정용 컴프레소미터를 부착하였고, MTS 815 시험기에서 변위제어의 방법으로 시험을 수행하였다. 각 배합 변수마다 3개의 시편이 사용되었다.

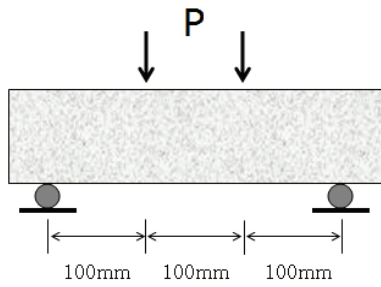
2.3 휨 시험

고인성 콘크리트의 휨성능을 평가하기 위하여 휨 강도시험을 수행하였다. 휨시험을 위하여 높이 100mm, 폭 100mm, 길이 400mm인 보 시편을 제작하였다. 시편은 탈형 후 수중에서 양생하였으며 28일이 지난 후 KS F 2566에 제시된 3등분점 재하 방법을 사용하여 휨거동을 측정하였다. 각 배합 변수마다 3개의 시편을 사용하였으며, 중앙부의 처짐은 JCI-SF4 (JCI)에 제시된 방법에 따라 변위계를 이용하여 측정하였다.

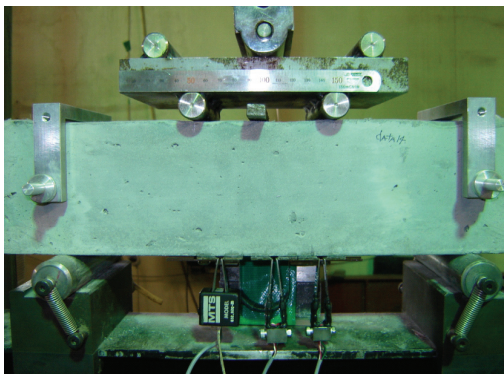
피로 시험의 하중 기준을 얻기 위하여 정적하중시험을 먼저 수행하였으며, 정적 휨시험을 통하여 얻은 강도를 기준으로 피로 시험을 수행하였다.

정적 시험의 하중은 변위제어 방법으로 0.01mm/sec의 속도로 가하였다. 하중단계에 따른 균열폭 변화를 측정하기 위하여 균열 발생여부를 관찰하여 육안 균열이 관찰된 시점에 균열폭을 측정하고 클립형 변위계(Crack Opening Displacement gauge, COD

gauge)를 설치하여 균열폭 변화를 함께 측정하였다.



(a) Test setup



(b) Measuring gauges attached to the specimen

Fig. 1. Test apparatus for four-point flexural experiment

피로시험은 정해진 구간의 하중을 반복해서 가력 하는 하중제어 방법을 사용하였으며, 이를 위하여 Closed loop control이 가능한 MTS 810 시험기를 사용하였다. 피로시험에 사용된 최대 가력 하중의 크기는 정적 강도의 65%, 75%, 85%로 설정하였으며, 최소 하중은 최대하중의 20%로 설정하였다. 처음 1회는 정적강도 시험과 같은 속도로 가력 하였고, 이후 10회는 0.5Hz의 주기로 반복 하중을 재하 하였으며, 이후 부재가 파괴될 때 까지 4Hz의 주기로 시험을 수행하였다.

반복하중의 가력과 함께 부재의 중앙부 처짐, 인장연단의 변형, 균열폭을 모니터링 하였다. 중앙부 처짐은 부재의 중앙부에 거치된 2개 변위계의 평균값으로 측정하였다. 변위는 JCI-SF4에 따라 시편의 내부에 기준점(reference point)을 설정하고 측정하였다. 인장연단의 변형은 부재의 하단 중앙부에 측정기준거리 100mm의 파이(π)형 변위계이치를 설치하여 측정하였다. 균열폭은 피로시험 진행 중에 시편을 육안으로 관찰하여, 균열이 발생한 시점에 균열폭을 측정하고, 균열폭 측정용 CMOD 게이지를 부착하였다. Fig. 1은 실험중인 시편으로 1개의 파이형 변위계이치와 3개의 균

열계이치가 부착된 모습이다. 사진 촬영을 위하여 처짐 변위계는 제거한 상태이다.

3. 실험 결과

3.1 일축 압축시험

측정된 고인성 콘크리트의 일축 압축응력-변형률 곡선을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 보듯이 고인성 콘크리트의 최대 압축응력에서의 변형률은 0.005~0.006 정도로 보통 콘크리트의 최대 압축응력 대한 변형률보다 큰 것을 확인할 수 있다. 최대강도이후 변위축정이 불안정한 부분은 제외한 그래프이다.

PVA20시편의 평균 압축강도와 탄성계수는 각각 76.3MPa 과 17.6GPa 이고, PVA25시편의 평균 압축강도와 탄성계수는 각각 66.8MPa 과 16.4GPa 이다. 섬유가 2.5% 혼입된 PVA25 배합의 강도와 탄성계수는 2.0%의 섬유가 혼입된 PVA20 배합보다 낮게 측정되었으며, 이는 섬유가 다량 혼입되는 배합과정에서 공극이 증가하였기 때문으로 추정되나, 이에 대한 정확한 분석을 위해서는 추가 연구가 필요하다.

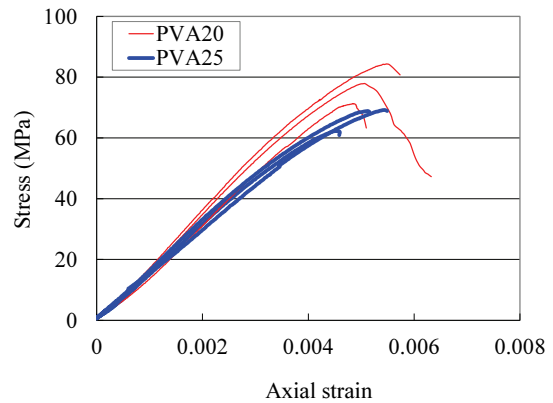


Fig. 2. Test result for compressive loading

3.2 정적 휨시험

정적 시험결과를 Fig. 3과 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 3은 시편의 종류에 따른 하중-처짐 곡선을 나타내었다. PVA 섬유를 2%이상 혼입한 PVA20과 PVA25 배합은 초기균열강도 및 거동이 유사하게 나타났다. PVA20 시편은 1.3mm의 처짐에서 최대하중에 도달하여 균열의 국부화(crack localization)가 시작되었으나, PVA25 시편은 3.0mm의 처짐에 이르러 균열의 국부화가 시작되었다. 0.5%의 추가 섬유량에 의하여 균열 후 파괴에 이르는 처짐이 2배

가까이 증가하였으나, 최대강도는 4%정도 증가하였다. 처짐-하중 곡선의 면적에 해당하는 인성은 2배이상 증가하였다.

두 배합은 물-시멘트비를 비롯한 기본배합이 동일하며, 섬유 혼입량만 다른 배합으로서, 고인성 콘크리트의 특징인 다중균열분산을 유발하는 조건을 만족시키는 배합이다. 따라서, 초기균열 강도는 섬유 혼입량의 차이에 따른 변화가 거의 없는 것으로 관찰되었고, 초기 균열패턴 및 휨거동도 유사하게 나타났다. 약 1.5mm 처짐에 이르기까지 두 배합의 거동은 거의 일치하였다. 그러나, 섬유가 0.5% 더 혼입된 PVA25 배합은 다중균열분산 조건을 충분히 만족시키기 때문에 극한인장변형을 성능이 향상되어 최대하중의 처짐이 크게 나타난 것으로 판단된다.

Fig. 4는 PVA20 시편에 대한 시험결과로서 약 0.7mm의 처짐에서 균열 변위계를 설치하여 균열폭 변화를 측정할 결과이다. 하중-처짐 곡선에 따르면 초기균열이후 급격한 변동없이 지속적으로 하중에 저항하는 처짐-경화 현상이 발생하였다. 처짐이 1.2mm에 도달한 시점의 균열폭은 0.39mm 이었으며, 이후 중앙부 처짐이 증가함에 따라 균열이 국부화되며 균열폭이 증가하면서 균열 국부

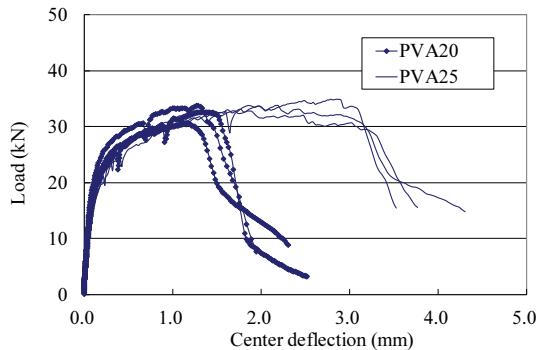


Fig. 3. Load-deflection relationship of tested specimens under static loading

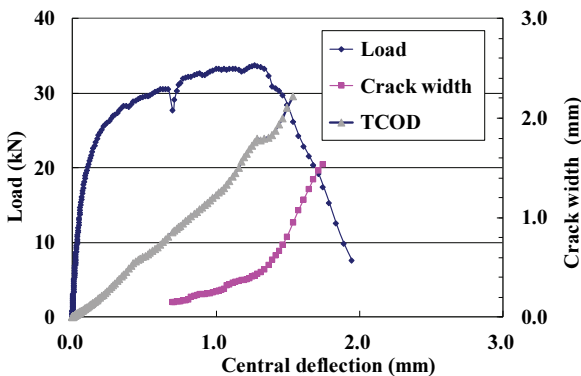


Fig. 4. Typical load and crack width or TCOD relationship for PVA20 specimen

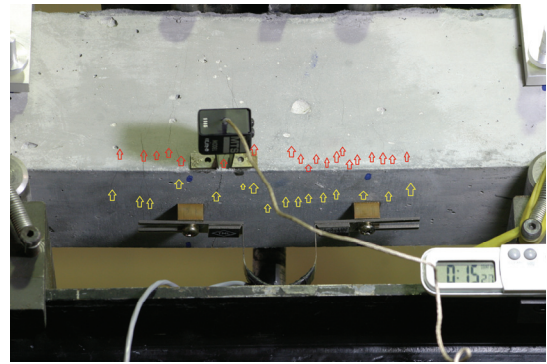


Fig. 5. Typical crack patterns after crack localization for PVA20 specimen

화 현상이 발생하여 부재가 파괴되는 것을 확인 할 수 있었다. 시편의 인장연단에 부착된 변위계에서 측정된 인장연단의 변형률 (Total Crack Opening Displacement, TCOD)도 그래프에 함께 나타내었다. TCOD 값은 중앙부 처짐의 증가와 함께 거의 선형으로 증가하는 것으로 나타났다. 즉, 수직처짐에 비례하여 인장연단 변형도 증가하는 것이다. 균열 국부화가 발생하여 균열이 벌어지고, 하중이 낮아지는 구간에서도 TCOD는 처짐의 증가에 비례하여 증가하는 것으로 나타났으며, 기울기가 크게 변화하지는 않았다. 이는 TCOD는 부재 인장연단의 평균적인 변형과 관계되는 값으로 처짐과 상관관계가 있는 값이기 때문이다. 균열이 국부화가 되어 특정 균열의 균열폭은 커지더라도, 부재의 하중이 낮아지면서 함께 발생한 다른 균열들의 균열폭은 작아진다(Shin et al, 2015). 따라서, 고인성 콘크리트는 균열 국부화가 인장연단 평균 변형률의 급격한 변화를 유발하지는 않는다.

Fig. 5는 균열국부화 과정의 모습이다. 육안관찰 가능한 균열의 위치를 화살표마크로 표시하였다. 시편에 발생한 다수의 균열이 확인되며, 균열계이지가 부착된 균열은 국부화 과정을 통해 벌어지고 있는 반면, 다른 균열들은 균열폭이 유지되거나 작아지는 것을 확인할 수 있다.

3.3 피로 휨시험

앞서 측정된 정적 휨강도를 기준으로 피로시험을 수행하였다. 반복하중의 최대값은 정적강도의 65%, 75%, 85%로 설정하였고, 최소값은 최대하중의 20%로 설정하였다. 시험에는 PVA20 시편 11개, PVA25 시편 9개가 사용 되었고, 자세한 하중 재하 조건은 Table 3에 나타내었다.

반복하중이 재하되는 동안 시편에 가해진 하중과 시편 중앙부의 처짐 변화를 모니터링 하였다. 시편의 인장연단에는 파이형 변

Table 3. Applied loads on the specimens for fatigue test

Specimen ID	PVA20	PVA25
Static strength	32.34kN	33.87kN
Stress level(S)	85%	27.49~5.49kN (3ea)
	75%	24.26~4.86kN (4ea)
	65%	21.02~4.20kN (4ea)

위게이지를 부착하여 인장 연단 변형률을 모니터링 하였다. 또한, 육안으로 식별 가능한 균열이 발생한 시점에 균열폭을 측정하고, 균열폭(CMOD) 측정 게이지를 부착하여(Fig. 1 참조) 균열폭의 변화 또한 모니터링 하였다.

3.3.1 반복하중 거동

Fig. 6과 7은 PVA20 시편을 대상으로 75%의 피로 하중이 가해진 시험 결과를 나타내었다. Fig. 6은 보부재의 처짐-하중 이력을 하중 재하 회수에 대하여 나타낸 그래프이다. 그림에서 알 수 있듯

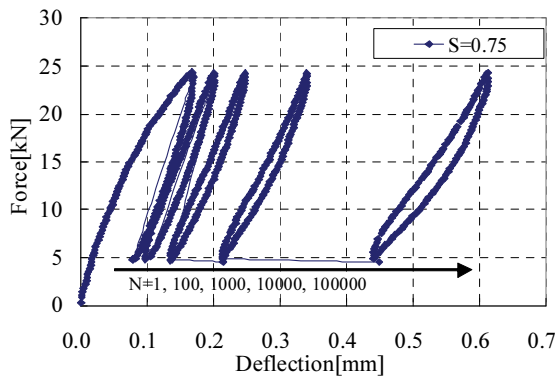


Fig. 6. Typical test result of load-deflection relationship for stress level S=0.75 and PVA20 specimen

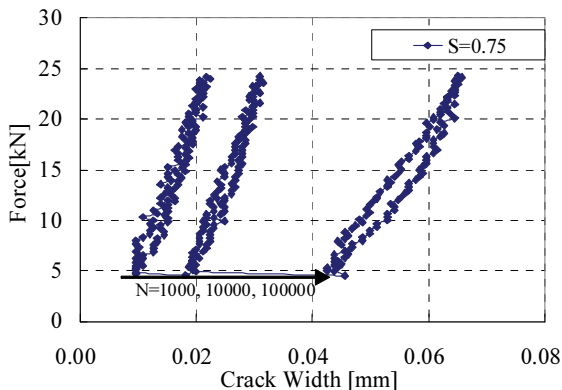


Fig. 7. Typical load and crack-width relationship for stress level S=0.75 and PVA20 specimen

Table 4. Applied loads on the specimens for fatigue test

Stress level(S)	Cycles to failure	
	PVA20	PVA25
85%	37,804	23,630
	52,136	86,628
	160,902	34,334
75%	73,539	46,030
	120,407	105,978
	161,927	239,138
	169,696	
65%	148,297	191,166
	324,406	286,724
	402,459	1,253,757
	634,333	

이 하중 반복 회수가 증가함에 따라 보부재의 처짐이 점차 증가하는 경향을 나타내었다. 또한, 하중-처짐 곡선의 기울기도 하중 재하 횟수 증가에 따라 감소함을 확인할 수 있다.

3.3.2 피로수명

피로 시험을 통해 하중 수준에 따른 파괴시 반복하중 재하회수를 측정하였다. 시편별로 응력수준에 따른 횡피로시험을 수행한 결과는 Table 4와 같다. 표는 시편별로 파괴된 반복하중 재하회수를 나타내며, 응력수준에 따른 평균파괴회수도 포함하였다. 전체적으로 하중 재하 수준이 낮을수록 부재의 파괴시까지 재하된 하중의 횟수는 높아지는 경향을 보였다.

결과의 비교를 위하여 하중 재하횟수와 재하하중 또는 하중수준의 관계를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다. 최대 재하 하중을 기준으로 나타낸 Fig. 8에 따르면 섬유가 많이 혼입된 PVA25 시편의 피로 강도가 PVA20 시편에 비하여 전체적으로 높게 나타난 것을 알 수 있다. 그러나, 정적강도에 대한 비율로 환산한 하중 수준으로 나타낸 Fig. 9의 경우, 두 배합시편 간의 피로 강도는 두드러진 경향 차이가 나타나지 않았다.

일반적으로 피로수명과 피로강도와의 관계식은 다음과 같은 지수형태의 함수인 식(1)로 나타낼 수 있다

$$S = \alpha + \beta \log N_f \tag{1}$$

여기서 S는 응력수준, N_f 는 파괴회수를 뜻한다. 한편, 본 연구의 범위내에서 회귀분석에 의한 피로 강도와 피로수명의 관계는 다음과 같은 직선식으로 나타낼 수 있다.

$$S = 1.653 - 0.176 \log N_f \quad (R^2 = 0.6142) \tag{2}$$

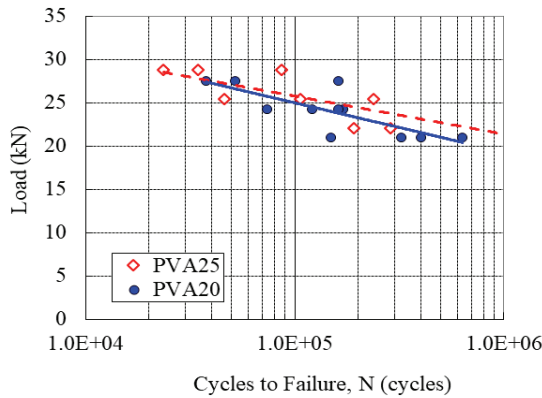


Fig. 8. Applied maximum load vs the number of cycles to failure relationship

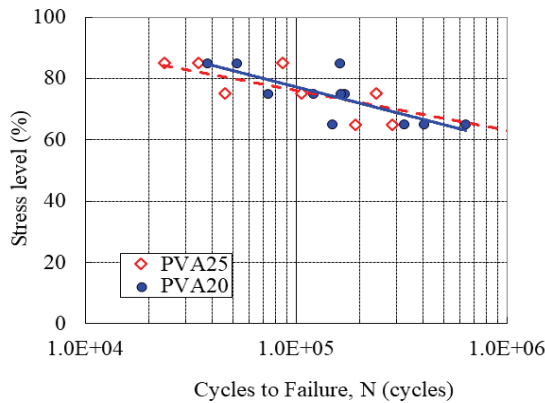


Fig. 9. S-N relationship expressed in terms of applied maximum stress level

2) PVA25 시험체

$$S = 1,411 - 0,130 \log N_f \quad (R^2 = 0,6475) \quad (3)$$

여기서 S는 응력수준, N_f는 파괴회수를 뜻한다.

회귀분석으로 S-N 관계를 직선으로 나타내면 두 배합간의 차이가 비교적 명확하게 나타난다. Fig. 9와 같이 응력수준을 기준으로 회귀직선식을 구한 경우 높은 응력수준(75% 이상)에서는 PVA20 배합의 피로수명이 길게 나타났고, 낮은 응력수준(75% 이하)에서는 반대로 PVA25 배합의 피로수명이 길게 나타났다. 그러나, Fig. 8과 같이 실제 가해진 최대하중을 기준으로 회귀직선식을 구한 경우 PVA25 배합의 피로수명이 더 길게 나타났다. 이는 응력수준의 기준값이 정적강도의 최대값이기 때문인 것으로 판단된다. PVA25 배합의 정적강도가 PVA20 배합보다 더 높기 때문에 상대적으로 높은 응력수준으로 피로수명을 표현할 경우 두 배합의 피로수명은 일관적인 경향을 보이지 않았다. 그러나 하중을 기준으로 피로

수명을 표현할 경우 섬유가 더 많이 혼입된 PVA25 배합의 피로수명이 더 뛰어난 것으로 나타났다.

식(2)와 식(3)에서 계산된 회귀 직선식의 결정계수는 다소 낮은 값을 나타냈다. 이는 고인성 콘크리트의 특성에 따른 결과로 판단된다. 고인성 콘크리트는 단위 시멘트량과 분체량이 많은 모르타르 배합을 기본으로 하며, 다량의 섬유가 혼입되며 적절한 유동성과 점성의 도움으로 분산되는 특징을 가지고 있다. 따라서, 배합의 품질이 분체와 섬유의 분산 정도에 따라 영향을 받으며, 배합 과정이 부적절할 경우 다소의 강도 편차가 나타나는 경우도 있다. 피로수명 시험 결과의 분산은 이러한 배합의 품질차이에 의한 편차로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체에 대한 정적 휨 시험과 피로 휨시험을 수행하였으며, 본 연구로부터 도출된 주요 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

1. 마이크로 PVA섬유를 2.0% 와 2.5% 혼입한 고인성 콘크리트 배합에 대하여 휨시험을 수행하였다. 기준 시편인 PVA 2.0% 시편은 정적시험 결과 균열이 여러개로 분산되는 전형적인 균열분산·고인성의 특성을 나타내었다.
2. 기준시편에 PVA 0.5%를 추가 혼입한 PVA 2.5% 시편은 기준 배합에 비하여 최대 처짐이 대폭 증가된 것으로 나타났다. 초기 균열강도는 거의 유사하게 나타났으나, 균열이 국부화되어 시편이 파괴되는 변위가 크게 증가하였다. 최대 휨강도는 5% 증가하였으나, 파괴시의 처짐은 2배가량 증가하여 휨인성이 두배 이상 증가하는 결과를 보여주었다.
3. 정적 강도시험결과를 기준으로 피로시험을 수행하였고, 그 결과를 활용하여 하중-수명(S-N) 관계를 도출하였다. PVA 2.0% 배합과 PVA 2.5% 배합에 대하여 응력수준에 따른 피로 수명식을 제안하였다.
4. 피로수명을 정적강도에 대한 비율(응력수준)로 표현할 경우 두 배합의 피로수명은 일관된 경향을 보이지는 않았다. 그러나, 피로수명을 응력 값으로 표현할 경우 섬유가 많이 혼입된 PVA 2.5% 배합의 피로수명이 높은 것으로 나타났다.

Conflicts of interest

None.

감사의 글

본 연구는 국토교통부/국토교통과학기술진흥원의 지원으로 수행되었음(과제번호 21CTAP-C152090-03).

References

ASTM C 1018 (1998), Standard Test Method for Flexural Toughness and First Crack Strength of Fiber Reinforced Concrete, American Society of Testing and Materials, Philadelphia.

Balaguru, P., Surendra, P. (1992). Fiber-Reinforced Cement Composites, Elsevier.

Bentur, A., Mindess, S. (1990). Fiber Reinforced Cementitious Composites, McGraw-Hill.

Fischer, G., Li, V.C. (2006). International RILEM Workshop on High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites (HPFRCC) in Structural Applications, E&Fn Spon.

JCI SF4, Method of Test for Flexural Strength and Flexural Toughness of Fiber Reinforced Concrete, Japan Concrete Institute.

Kim, Y.Y., Kim, J.S., Kim, H.S., Ha, G.J., Kim, J.K. (2005). Mechanical properties of an ECC(engineered cementitious composite) designed based on micromechanical principle, Journal of the Korea Concrete Institute, **17(5)**, 709-716 [In Korean].

Kim, Y.Y., Kong, H.J., Li, V.C. (2003). Design of engineered cementitious composite(ECC) suitable for wet-mix shotcreting, ACI Materials Journal, **100(6)**, 511-518.

KS, Korea Industrial Standards, <http://www.kssn.net/>.

Li, V.C., Mishra, D.K., Wu, H.C. (1995). Matrix design for pseudo strain-hardening fibre reinforced cementitious composites, Materials and Structures, **28**, 586-595.

Matsumoto, T. (1998). Fracture Mechanics Approach to Fatigue Life of Discontinuous Fiber Reinforced Composites, Ph.D Thesis, University of Michigan.

Naaman, A.E., Reinhardt, H.W. (2003). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 4(HPFRCC4), E&Fn Spon.

Naaman, A.E., Reinhardt, H.W. (1995). High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 2(HPFRCC2), E&Fn Spon.

Park, C.K., Nho, M.H., Park, D.H. (2005). Flexural and workable properties of high performance hybrid fiber reinforced concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, **17(4)**, 543-550 [In Korean].

Park, J.J., Kho, K.T., Kang, S.T., Kim, S.U. (2005). Influence of constitute factor on the compressive strength of ultra-high strength steel fiber reinforced cementitious composites, Journal of the Korea Concrete Institute, **17(1)**, 35-41 [In Korean].

Shin, K.J., Chang, S.P. (2007). Static and fatigue tests of high performance hybrid fiber reinforced cementitious composites under flexural loading, 2007 KCI Spring Convention, 771-774 [in Korean].

Shin, K.J., Jang K.H., Kim, E.S., (2008). Correlation between flexural toughness and cracking characteristics of micro-fiber reinforced mortar according to fiber contents, Journal of The Korean Society of Civil Engineers, **28(2A)**, 249-257.

Shin, K.J., Jang, K.H., Choi, Y.C., Lee, S.C. (2015). Flexural behavior of HPFRCC members with inhomogeneous material properties, Materials, **8(4)**, 1934-1950.

Suthiwarapirak, P., Matsumoto, T., Kanda, T. (2004). Multiple cracking and fiber bridging characteristics of engineered cementitious composites under fatigue flexure, Journal of Materials in Civil Engineering, **16(5)**, 433-443.

고인성 섬유보강 콘크리트의 정적 및 피로 휨시험

최근에는 다양한 보강재를 매트릭스에 혼입하는 방식으로 콘크리트 재료에 다양한 유형의 성능을 부여하는 연구 개발이 이루어지고 있다. 다량의 섬유를 사용하여 배합된 고인성 콘크리트는 다중균열분산 특성을 가지고 있으며, 이에 대한 다양한 연구가 수행되고 있다. 하지만 정적 하중에 대한 연구가 집중되고 있으며, 반복적인 하중에 대한 연구는 부족한 실정이다. 본 연구에서는 섬유비율을 달리한 고인성 콘크리트로 보를 제작하였고, 정적 휨시험과 피로 휨시험을 수행하였다. 그 결과 섬유 함량이 휨 거동에 미치는 영향을 분석하였고, 고인성 콘크리트의 하중-수명 관계를 S-N관계식으로 제안하였다. 2%의 섬유 혼입량으로 고인성 특성의 콘크리트를 배합할 수 있었다. 0.5% 섬유를 추가하는 경우 최대 휨강도는 유사하지만 휨인성은 2배 가까이 향상되는 것으로 나타났다. 반면, 두 배합의 피로수명은 큰 차이를 보이지 않았다.