

# 반복하중을 받는 섬유 보강 콘크리트의 해석적 접근

## Analytic Approach to Fiber Reinforced Composite under Cyclic Loading

신경준\*

장승필\*\*

Shin Kyung-Joon

Chang Sung-Pil

### ABSTRACT

Recently, large efforts have been made to develop and understand the behavior of Fiber Reinforced Concrete. As in the static loading cases, many researches have been done. However, a few studies have been conducted in cyclic behaviors of FRC. The main objective of the present work is to investigate the cyclic behavior of fiber reinforced concrete with theoretical method. First, cyclic constitutive relations which describe the crack bridging stress considering non-uniform interfacial bond degradation in short randomly oriented fiber reinforced matrix composites under uniaxial cyclic tension were considered. A cyclic degradation model of single fiber based on micromechanics also taken into consideration. As an example, fatigue analysis for ECC with PVA fiber was conducted using proposed equations. Results shows that proposed method can establish a basis for analyzing cyclic behavior of fiber reinforced composites.

#### 1. 연구배경 및 목적

교량, 도로 등의 토목구조물은 공용 중에 지속적인 반복하중을 받기 때문에 구조물의 신뢰성을 확보하기 위하여 반복하중에 의한 피로 거동의 이해가 필수적이다. 인장에 취약한 특성을 가진 콘크리트의 내피로 성능을 높이기 위하여 인장에 강한 섬유를 콘크리트에 혼입하여 주는 섬유보강 콘크리트가 꾸준히 연구, 사용되어 왔다.

반복하중을 받는 섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 꾸준히 이어져 왔으나, 주로 실험적 접근에 의한 방법이 사용되었다. 실험적 방법은 재료에 대한 Macro Level 에서의 거동을 쉽게 파악할 수 있으며, 공학적으로 유용한 결과를 도출할 수 있다. 그렇지만, 개별적인 섬유에 대한 응력 상태 등 미세역학 수준(Micro Level)에서의 거동은 알 수 없는 단점이 있다. 본 연구에서는 미세역학에 기반한 섬유의 구성방정식을 이용하여 반복하중을 받는 섬유 보강 콘크리트의 거동에 대한 해석적 접근을 수행하였다.

#### 2. 섬유의 반복하중에 대한 부착 거동 모델링

섬유와 시멘트 매질(Matrix)의 복합체(Composite)인 섬유 보강 콘크리트의 해석을 위해서는 섬유와 콘크리트에 대한 각각의 물성 및 거동을 파악하는 것 이외에, 섬유와 콘크리트의 상호작용에 대한 이해가 필수적이다. 기존의 몇몇 연구자(2)3)4)에 의해 반복하중에 대한 섬유 부착거동의 구성방정식이 연구되어져 왔다. 본 연구에서는 Cook-Gordon Effect 을 고려할 수 있으며, 부착강도의 저하 과정에서 발생하는 비균일 부착강도를 고려할 수 있는 구성방정식을 제안하여 사용하였다. Fig. 1 에 구성방정식의 유도과정에서 가정한 부착응력의 분포를 나타내었다. 그림에서 나타난 바와 같이 지속적으로

\* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 박사후 연구원

\*\* 정회원, 서울대학교 지구환경시스템 공학부, 교수

인발-압출 과정이 반복되면서 균일한 손상이 일어나는 구역을 Reversal Zone 이라 구분하였고, 하중의 증가-감소시에 부착응력 작용 방향의 변화가 생기지 않는 부분을 Non-reversal zone 이라 구분하여 부착강도의 변화가 없는 것으로 가정하였으며, 이러한 Non-reversal zone이 하중의 단계에 따라 감소하면서 생기는 비균질 부착강도 영역을 Transition zone으로 구분하여 reversal 영역과 non-reversal 영역의 부착강도를 선형보간하여 가정하였다.

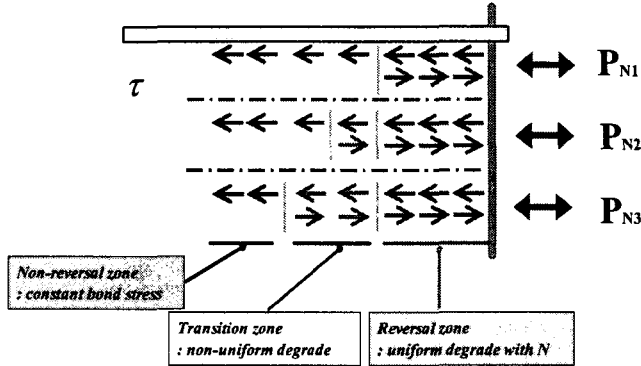


Fig. 1 Interfacial bond strength distribution of fiber in cyclic loading

### 3. 섬유 부착강도 손상 모델링

공용중의 지속적인 반복하중을 받는 섬유보강 콘크리트 구조물에서 섬유의 부착면은 인발-압축 거동을 반복하면서 손상이 발생한다. 이러한 부착면의 손상은 섬유의 부착강도에 영향을 주게 되어 섬유의 가교응력을 감소시키게 되며, 결과적으로 부재의 인장성능이 저하되게 된다. 이러한 섬유 부착면의 손상을 누적뺨힘(accumulated slippage)로 나타낼 수 있으며, 그 예를 Fig. 3에 나타내었다.

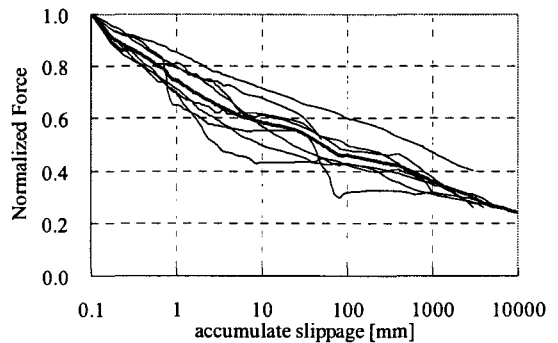
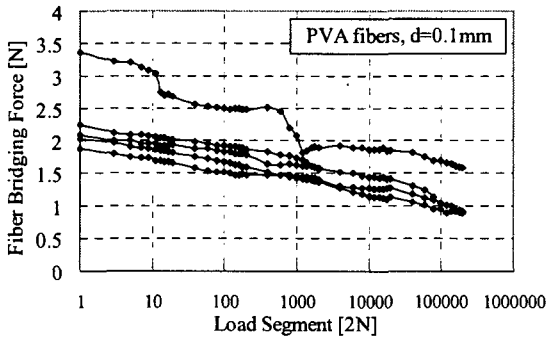


Fig. 2 Fiber pull-out Force in Cyclic Loading of PVA fiber with diameter 0.1mm

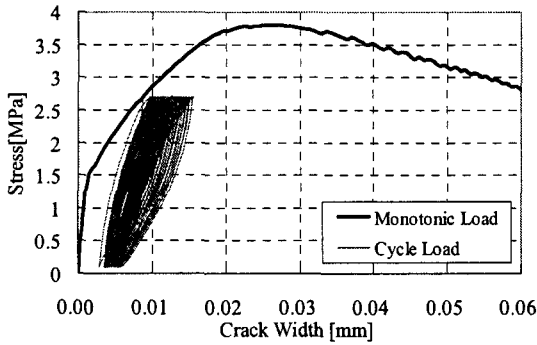
Fig. 3 Normalized pull-out force in cyclic loading of PVA fibers

### 4. 반복하중을 받는 균열 단면에서의 적용

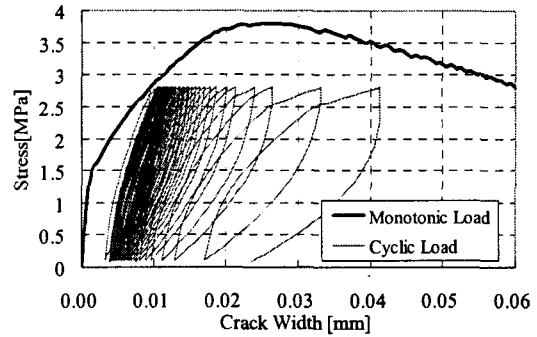
상기에서 제시된 반복하중에 대한 구성방정식과 부착강도 손상곡선을 이용하여 반복하중을 받는 균열 단면의 해석에 적용하였다. 섬유의 기본적인 물성치는 제조사에서 제시하는 값을 사용하였으며,

기타 매질과 부착면의 물성치는 기존 연구<sup>14)</sup>를 참조하였다.

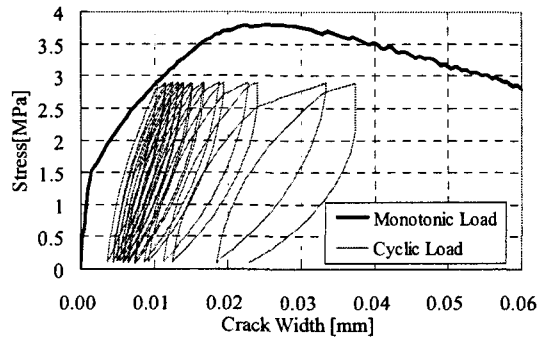
해석은 최대하중이 2.6-3.1 MPa 인 구간에 대하여 실시하였으며, 최저하중은 일정값을 사용하였다. 해석결과를 Fig. 4 에 나타내었다. 해석결과 최대 응력 값이 2.7 MPa이하인 경우에는 균열단면이 200 만회의 하중 이후에도 파괴되지 않고 계속해서 힘을 받고 있는 것으로 나타났다. 반면 최대 응력값이 2.8 MPa이상이 경우에는 200만번 이전에 부재의 파괴가 발생했으며, 최대응력이 2.9 MPa인 경우 2000번 정도의 하중 재하 회수에서 부재의 파괴가 발생하는 것으로 나타났다.



(a)  $\sigma_{max}=2.7$  MPa, not fail until 2,000,000 cycle



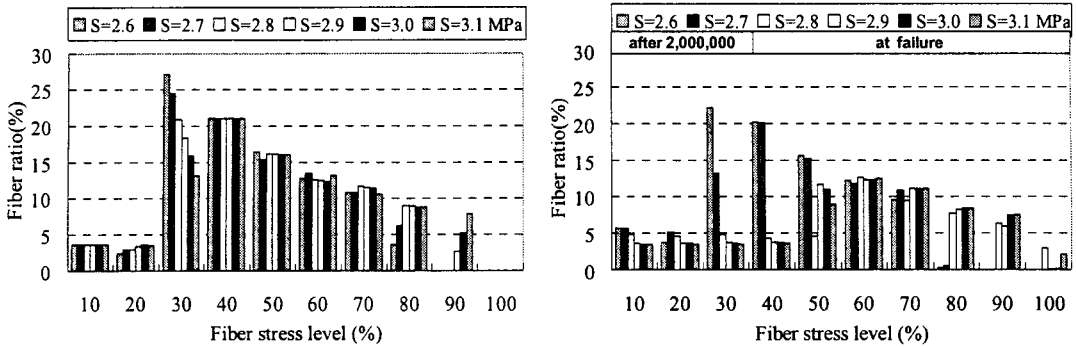
(b)  $\sigma_{max}=2.8$  MPa, fail about 1,000,000 cycle



(c)  $\sigma_{max}=2.9$  MPa ,  $w_{max, N=1}= 0.0104$  mm, fail about 2000 cycle

Fig. 4 Numerical analysis results for fatigue tension

균열 단면에서의 개발 섬유들의 응력분포를 Fig. 5 에 나타내었다. 그림 Fig. 5 (a)는 초기하중 재하시의 섬유의 분포를 나타내는 것이며, (b)는 해석이후의 응력분포를 나타낸 것이다. 그림에 따르면 최대 응력 2.7MPa 이하로 해석한 경우에는 개별 섬유가 받는 최대하중이 인장강도의 80% 이하였으며, 90%를 초과하는 섬유는 없었다. 반면 최대응력이 2.8 MPa을 넘어서는 경우에는 섬유 강도의 80%를 초과하는 응력을 받는 섬유의 분포가 증가하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 높은 수준의 응력을 받는 섬유의 경우 반복하중의 재하에 의하여 쉽게 파괴가 된다는 것을 알 수 있다. 마이크로 레벨의 해석을 통하여 부재수준에서의 응력거동에 대한 해석 뿐만 아니라, 개별 섬유가 받는 응력 수준을 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 마이크로 수준에서의 개별섬유의 응력분포가 전체부재의 거동에 밀접한 영향을 주는것을 확인 할 수 있었다.



(a) Fiber stress states at initial loading      (b) Fiber stress states at final loading  
 Fig. 5 Stress distributions of fibers at crack plane

### 5. 결론

본 연구에서는 반복하중을 받는 섬유 보강콘크리트의 균열면에 대한 해석적 접근을 수행하였으며, 그 과정과 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 반복 하중을 받는 섬유 보강 콘크리트의 균열면에 대한 구성방정식을 제시하였다. 반복하중에 의한 부착응력의 변화를 고려하기 위하여 부착응력의 분포에 대한 적절한 가정이 필요하였으며, 본 연구에서는 부착력의 변화를 고려하여 3구간의 영역을 고려한 방정식을 사용하였다.
- (2) 반복하중에 의한 섬유의 부착강도 저하를 고려하기 위하여 섬유의 부착면에 대한 손상관계식이 필요하였으며, 본 연구에서는 부착강도의 변화를 누적뽐힘량을 기준으로 제시한 식을 사용하였으며, 부착강도 뿐만 아니라 섬유자체의 손상을 고려하기 위하여 섬유 단면에 대한 손상을 고려한 관계식을 적용하였다.
- (3) 해석 예제로써 PVA섬유를 사용한 ECC 부재의 직접인장 단면에 대한 해석을 수행하였다. 해석 결과를 통하여 섬유보강 콘크리트 부재의 피로 거동을 해석적인 방법으로 접근하는 방법론에 대한 가능성을 확인하였으며, 해석결과 마이크로 수준에서의 개별섬유의 응력분포가 전체부재의 거동에 밀접한 영향을 주는것을 확인 할 수 있었다.

### 참고문헌

1. 신경준, 장승필, "단일 PVA섬유의 반복하중에 대한 인발 거동", 대한토목학회 학술발표회, 2006
2. Li, V.C. and Matsumoto, T., "Fatigue crack growth analysis of fiber reinforced concrete with effect of interfacial bond degradation", Cement and Concrete Composites 20, 1998, pp.339-351.
3. Jun Zhang, Henrik Stang, and Victor C. Li, "Experimental Study on Crack Bridging Bridging FRC under uniaxial fatigue tension", Journal of Materials in Civil Engineering, 12(1), 2000.
4. Matsumoto, T., Chen, P. and Suthiwarapirak, P. "Effect of fiber fatigue rupture on bridging stress degradation in fiber reinforced cementitious composites", FRAMCOS-5, 2004, pp.653-660.