

마이크로 섬유보강 모르타르의 휨 인성과 균열 특성의 상관관계

Correlation Between Flexural Toughness and Cracking Characteristics of Micro-fiber Reinforced Mortar According to Fiber Contents

신경준* · 장규현** · 김의성***

Shin, Kyung-Joon · Jang, Kyu-Hyou · Kim, Eui Sung

Abstract

Various methods have been used to reinforce the cementitious material such as mortar and concrete that have weak tensile strength. Major reinforcing method is to mix matrix with fibers which have strong tensile strength. Recently, micro-fiber reinforced mortar has been studied which removes coarse aggregate and uses micro-fiber with small diameter in order to homogenize the matrix properties and maximize the performance of fiber. Performance of micro-fiber reinforced mortar showing multiple cracking behavior is hardly represented only by the flexural toughness. Therefore, This paper reports the cracking behavior as well as mechanical behavior for various mixtures which have different fiber type and mixture proportions to find the proper parameter representing the cracking characteristic. Correlations between flexural toughness and various cracking characteristics such as cracking area, width and number are explored. As a result, it is found that flexural toughness, volume of fiber and number of cracks are suitable for representing the characteristics of micro-fiber reinforced mortar.

Keywords : microfiber reinforced mortar, cracking behavior, flexural behavior, HPRFRC

요 지

인장에 취약한 단점을 가지고 있는 시멘트계 복합재료인 모르타르와 콘크리트의 인장성능을 보강하기 위한 다양한 방법이 사용되고 있으며, 주요한 한가지 방법으로 인장에 강한 섬유를 혼입하는 섬유보강 콘크리트가 꾸준히 연구사용되어 왔다. 최근에는 재료의 균질성(homogeneous)을 높이고 보강재로 사용되는 섬유의 성능을 최대한 이끌어내기 위하여 굵은 골재를 제거하고 마이크로 섬유를 사용하는 마이크로 섬유보강 모르타르에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 마이크로 섬유보강 모르타르는 배합조건에 따라서 다중균열이 발생하기 때문에 성능평가의 지표로써 휨인성 만을 사용하기에는 부족함이 있다. 따라서, 본 연구에서는 마이크로 섬유보강 모르타르의 휨인성과 균열 특성을 고찰하여, 균열특성을 나타낼 수 있는 측정치에 대한 연구를 수행하였다. 실험에는 PVA섬유와 강섬유가 사용되었으며, 휨실험을 통하여 섬유의 종류 및 혼입량에 따른 휨인성과 균열관련 측정치의 상관관계를 규명하였다. 그 결과 마이크로 섬유보강 모르타르의 특성을 대표할 수 있는 측정치로는 휨인성과 섬유혼입량, 그리고 균열개수 등이 적절한 것으로 나타났다.

핵심용어 : 마이크로 섬유보강 모르타르, 균열특성, 휨거동, 고성능섬유보강복합체

1. 서 론

토목 및 건축의 주요 재료로써 널리 사용되는 모르타르 및 콘크리트는 내구성 및 경제적 특성 등의 여러 가지 장점을 가지고 있으나, 일반적으로 인장응력에 취약하여 인장강도에 도달하기 전에 이미 미세균열이 발생하기 시작하며, 최대응력에 도달한 이후에는 파단되는 취성적인 성질을 가지고 있다. 이러한 취성적인 성질을 개선하기 위하여 다양한 방법이 사용되고 있으며, 주요한 한가지 방법으로 인장에 강한 섬유를 콘크리트에 혼입하는 섬유보강 콘크리트가 꾸준

히 연구사용되어 왔다(Balaguru *et al.* 1992; Bentur *et al.* 1990). 섬유보강콘크리트(FRC)는 인장 저항 능력의 증대, 국부적 균열의 생성 및 성장을 억제하는 등 역학적 특성의 개선 및 보강 효과를 얻을 수 있으나, 일반적으로 인장강도 자체의 향상보다는 균열이 발생한 후의 강성유지 및 인성(toughness) 증가를 위한 목적으로 사용된다.

섬유보강 콘크리트의 성능을 향상시키기 위하여 굵은 골재를 제외하고 잔골재만 사용하여 재료의 균질성(homogeneous)을 높이고, 보강재로 사용되는 섬유의 성능을 최대한 이끌어내기 위하여 직경이 작은 마이크로 섬유를 사용하

*정회원 · 교신저자 · 성균관대학교 건설환경시스템공학과 (E-mail : kj12@snu.ac.kr)

**동부건설(주) 사원 (E-mail : addio0024@hanmail.net)

***정회원 · 현대산업개발(주) 부장 (E-mail : eskim@hyundai-dvp.com)

는 마이크로 섬유보강 모르타르에 대한 연구(Namman 1991; Bantia *et al.* 1996; Pierre *et al.* 1999)도 수행되어지고 있다. 최근에는 마이크로 섬유보강 모르타르의 한 분야로서 고성능 섬유보강 시멘트복합체(이하 HPFRCC, High Performance Fiber Reinforced Cementitious Composites)에 대한 연구(Naaman *et al.* 1995, 2003; Fischer *et al.* 2006)가 활발히 진행되고 있다. HPFRCC는 사용 용도에 따라 고강도(박정준 외 2005) 또는 고인성(김윤용 외 2005)을 목표로 하며, 최근에는 고인성을 추구하는 연구(Fischer *et al.* 2006)가 많이 행해지고 있다.

고인성 HPFRCC 배합들은 균질한 성능을 얻고 파괴인성을 낮추기 위하여 모래에 비해 입경이 작은 규사를 잔골재로 사용하고 있으며 또한 마이크로 섬유를 다량 혼합하는 특징을 가지고 있다(김윤용 외 2005; 김무한 외 2005; 박춘근 외 2004; Kim *et al.* 2003). 이러한 연구들은 주로 섬유의 종류나 배합의 종류에 따른 역학적 거동에 초점을 맞추어 수행되어 왔으며, 배합의 특성에 따른 인장강도, 휨강도 등의 역학적 물성치와 다중균열분산의 여부, 그리고 하중-변형곡선에 의한 인성의 비교에 중점을 두고 있다.

섬유보강 콘크리트의 경우 섬유 혼입으로 인한 성능의 향상을 측정하기 위하여 휨인성(ASTM C 1018, JCI SF4)을 주로 사용하여 왔으나, 이러한 규정들은 균열의 개수를 전혀 고려하지 않고 있다. 따라서, 배합에 따라 다중균열분산 특성을 보이기도 하는 마이크로 섬유보강 모르타르는 휨인성만을 이용하여 성능평가를 하면 부재의 대표적인 특성인 균열분산여부를 평가할 수 없게 된다. 즉, 균열분산을 통하여 인성이 향상된 경우와 단일 균열이 발생하였지만 그 균열면의 섬유가 견고히 브리징(bridging)을 하는 경우의 구분을 할 수 없게 된다.

이와 관련하여 본 연구에서는 마이크로 섬유를 이용한 섬유보강 모르타르의 역학적 거동과 함께 균열 특성에 대한 연구를 수행하였다. 부재에 대한 휨실험을 통하여 섬유의 종류 및 혼입량에 따른 휨인성과 균열관련 측정치의 상관관계를 규명하였다. 이를 통하여 마이크로 섬유보강 모르타르의 특징적인 거동인 균열분산을 나타낼 수 있는 지표에 대한 연구를 수행하였다.

실험에는 고인성 HPFRCC의 배합에 주로 사용되는 PVA섬유와 고강도 배합에 주로 사용되는 고인장 강섬유를 사용하였고, 매트릭스는 규사를 사용하여 파괴인성을 낮추는 다중균열의 발생이 가능한 배합(김윤용 외 2005; 신경준 외 2007)을 사용하였다. 본 연구에 사용된 섬유는 길이 12 mm 직경 0.2 mm이하의 섬유로써, 굵은 골재를 포함하는 콘크리트 또는 쏫크리트에 사용되는 섬유에 대비되는 개념으로 마이크로 섬유로 표기하였으며, 매트릭스(Matrix)는 섬유를 제외한 시멘트와 잔골재로 이루어진 매질을 뜻한다.

2. 실험연구

2.1 실험 계획

마이크로 섬유보강 모르타르는 매트릭스의 배합비와 섬유의 혼입량에 따라서 균열거동이 영향을 받는다. 본 연구에서는 섬유의 혼입량에 따른 휨거동과 인성에 대한 분석 및 그에 따른 균열거동을 고찰하기 위하여 마이크로 섬유의 종류 및 혼입량을 변수로 하여 실험을 수행하였다. 실험조건에 따라 다중균열이 발생할 수 있는 배합을 선정하기 위하여, 기존에 수행된 잔골재의 종류 및 배합에 대한 연구결과(Oh *et al.* 2005; 신경준 외 2007)를 분석하여 부피비 2%의 섬유 혼입량에 대해서 다중균열이 발생할 수 있도록 배합을 결정하였다.

2.2 사용재료 및 배합설계

배합에는 A사의 1종 보통 포틀랜드 시멘트와 폴리카본산계의 액상 고성능감수제가 사용되었으며, 2종류의 PVA섬유와 1종류의 강섬유가 사용되었다. 강섬유는 직경 0.2 mm이고 길이 12 mm의 강섬유가 사용되었으며, PVA섬유는 길이 12 mm이고 직경 0.04 mm와 0.1 mm의 섬유가 사용되었고, 각 섬유의 물리적 특성을 표 1에 나타내었다. 사용된 강섬유는 일반적인 강섬유의 두배에 가까운 2.0 GPa의 인장강도를 가지는 고강도강섬유가 사용되었다. 잔골재는 평균직경 0.125 mm이고 비중 2.65의 규사가 사용되었다.

균열분산을 위한 적정 섬유혼입량은 일반적으로 전체 페이스트 부피의 2% 이상이라고 알려져 있다(Li *et al.* 1995; Naaman *et al.* 1995). 따라서 본 연구에서는 섬유의 종류 및 혼입량에 따른 휨 인장거동을 알아보기 위하여 표 1에 제시된 세 종류의 섬유에 대하여 물-시멘트비(W/C)와 잔골재-시멘트비(S/C)를 0.46과 1.0으로 고정시키고, 섬유 혼입량(부피비)을 0.5, 1.0, 1.5, 2.0%로 변화시켜 배합설계를 수행하였다. 참고로 본 연구에 사용된 잔골재량은 시멘트량이 많은 부배합으로 고인성 섬유보강복합체에는 사용되는 배합이지만, 일반적인 모르타르 배합에는 적합하지 않은 배합조건이다.

2.3 휨 실험

섬유보강 모르타르의 인장 및 균열 거동을 평가하기 위한 휨실험을 실시하여 휨인성과 균열개수를 측정하였다. 두께 30 mm, 폭 100 mm, 길이 400 mm의 얇은 보 시편을 제작하였고, 시편은 탈형 후 수중 양생 하였으며 28일이 지난 후 강도를 측정하였다. 시편의 두께가 얇기 때문에 그림 1에 보인바와 같이 시편 외부에 측정기준점을 두고 전기저항식 변위계를 이용하여 중앙부 변형을 측정하였다. 측정결과를 이용하여 휨인성을 계산하였고 실험이 끝난 시편을 대상으로 균열개수를 측정하였다.

표 1. 사용된 섬유의 특성

Fiber ID	Diameter	Length	Tensile Strength	Elastic Modulus	Remark
PVA04	0.04 mm	12 mm	1.6 GPa	40 GPa	Resin-bundled type
PVA10	0.10 mm	12 mm	1.1 GPa	25 GPa	Resin-bundled type
mSteel	0.20 mm	12 mm	2.0 GPa	200 GPa	Straight, Brass Coating

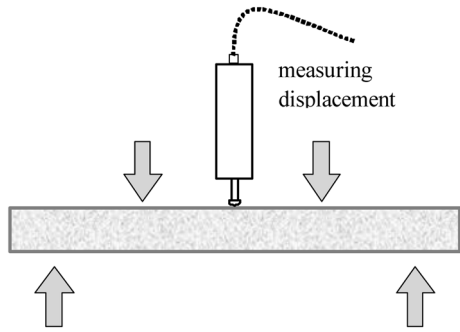


그림 1. 4점 재하에 의한 모르타르 보의 휨실험

2.4 균열특성 실험

2.4.1 개요

변위와 하중 등의 역학적 특성 외에 섬유 혼입량에 따른 균열 발생 특성의 연구를 위하여, 각 실험 변수 별로 흰색의 페인트를 도포한 한 개씩의 시편을 대상으로 균열면에 대한 영상촬영을 실시하였다. 실험 단계별로 균열면에 대한 사진자료를 촬영하였으며, 이를 이용하여 초기균열이 발생한 단계와 휨시간의 1/150의 처짐이 발생한 단계, 그리고 Post-Peak 단계의 균열폭과 균열면적을 산정하였다.

2.4.2 균열면적

영상촬영시 균열이 발생하는 부분의 명암이 어두워진다는 사실을 응용하여, 하중재하 전의 영상과 하중 재하 진행시 각 단계 영상의 명암분포를 비교하여 균열면적을 계산하였다. 그림 2에 균열발생 전과 후의 명암분포 예를 나타내었다. 그림에서 볼 수 있듯이, 균열이 발생하면 어두운 부분의 분포와 밀도가 증가함을 알 수 있다.

균열면적은 초기균열(initial crack) 발생 시점, 처짐이 휨 시간의 1/150(2.3 mm)인 경우, 균열후 최대하중 도달 시점(post-peak)의 3가지 시점에 대하여 측정하였다.

2.4.3 균열개수

마이크로 섬유를 혼입한 섬유보강 모르타르는 배합의 조건에 따라 여러 개의 미세 균열이 발생하기도 한다. 따라서, 섬유의 종류 및 혼입량에 따른 균열분산의 효과를 비교하기 위하여 균열의 개수를 측정하였다. 균열은 단면에서 불균일하게 분포하므로 다수의 측정 기준선을 정하고, 기준선을 통

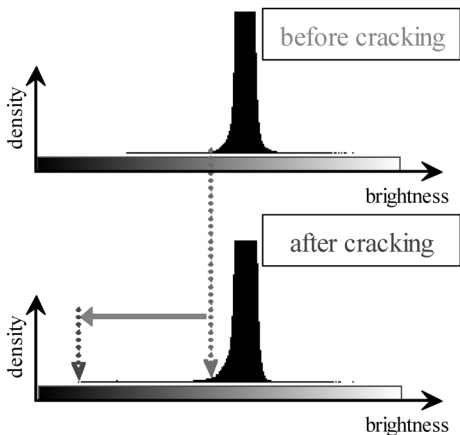


그림 2. 균열 면적 측정 방법

과하는 균열의 개수를 평균으로 계산하였다.

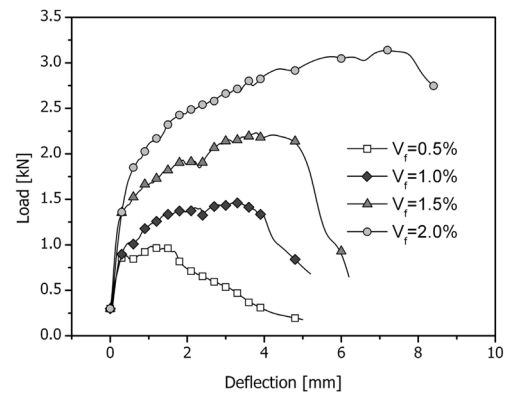
3. 실험결과

3.1 휨실험 결과

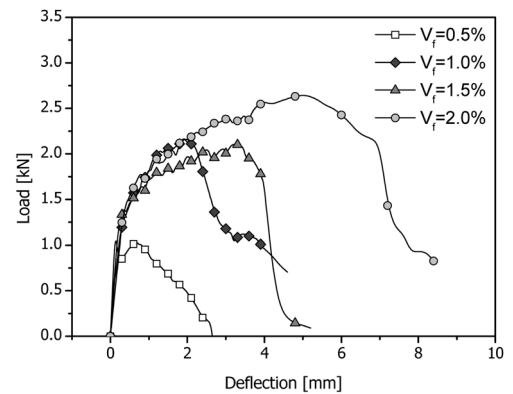
3.1.1 휨거동

그림 3에 섬유의 혼입비율에 따른 하중-처짐 곡선을 나타내었다. 각 그래프는 3개의 시편에 대한 결과를 평균한 값이며, 섬유 혼입량의 변화에 따른 특성 변화를 보여주고 있다. 섬유혼입량이 많을수록 휨-처짐 곡선의 강도와 연성이 증가하는 것을 알 수 있으며, 각 섬유별로 V_f 가 2.0% 인 경우의 시편의 강성과 연성이 가장 큰 것으로 나타났다.

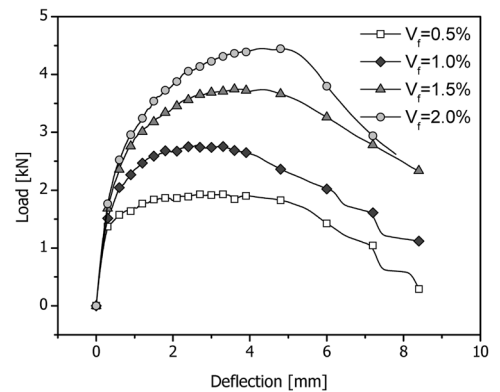
PVA 섬유를 혼입한 시편은 혼입량이 0.5%인 경우 초기균열 직후 처짐의 증가에 따라 하중이 급격히 저하되는 현상



(a) PVA04 series



(b) PVA10 series



(c) mSteel series

그림 3. 섬유의 종류와 혼입량에 따른 휨 부재의 평균 하중-변위 곡선

이 나타났으나, 0.5%의 강섬유를 함유한 mSteel 시편은 초기균열하중 직후의 하중저하 현상이 나타나지 않았다. 1% 이상의 섬유 혼입량에 대해서는 모든 시편이 초기 균열이 발생한 후에도 급격한 변화 없이 지속적으로 하중을 저항하는 것으로 나타났다.

기존의 섬유보강 콘크리트 부재에 대한 연구 결과(박춘근 외 2005; 원종필 외 2003; 오병환 외 2002)에 의하면 매크로 섬유를 1% 가량 혼입한 시편은 초기균열이후 급격한 하중의 감소가 생기는 것으로 보고되고 있으나, 본 실험의 결과에 따르면 마이크로 섬유를 1% 이상 사용한 모르타르 배합에서는 초기균열 직후 하중저하가 발생하지 않는 것으로 나타났다. 이는 본 실험의 배합이 규사를 사용하여 파괴인성을 낮춤으로써 균열분산을 목표로 하는 모르타르 배합이며, 마이크로 섬유의 성능발현에 효과적인 배합이기 때문이다. 따라서, 배합에 따라서는 작은 직경의 섬유를 사용하는 것이 섬유 사용의 효율을 높인다는 것을 알 수 있다. 그러나, 직경이 작고 형상비가 클수록 효율은 높아지는 반면 뽑힘시 파단될 가능성 또한 동시에 높아지기 때문에 마이크로섬유를 일반 콘크리트에 사용하면 배합에 따라서는 오히려 뽑힘 도중 섬유가 파단 되어 급격히 성능이 저하될 수도 있을 것이다.

3.1.2 휨인성

휨인성(Flexural toughness)은 섬유보강 콘크리트에서 섬유에 의한 인성 보강 특성을 나타내는 지표로써 하중-처짐곡선의 면적을 나타낸다(JCI-SF4; ASTM C 1018). 본 연구에서는 JCI-SF4의 방법에 준하여 휨지간의 1/150(2.3 mm)에 해당하는 처짐까지의 휨인성을 계산하였고, 추가로 휨지간의 2/150(4.7 mm)에 해당하는 처짐에 대한 휨인성과 초기균열 후 최대하중인 Post-Peak에서의 휨인성을 계산하여 표 2과 그림 4에 그 결과를 비교하였다.

그림 4에 의하면 2L/150에 대한 휨인성과 Post-Peak의 휨인성은 섬유 혼입량에 비례하여 명확하게 증가하는 현상을 확인할 수 있다. Post-Peak에 대한 처짐은 섬유의 혼입량에 따라서 달라지기 때문에, 섬유의 혼입량에 따라서 Post-Peak에 대한 휨인성의 기준 변위도 변하게 된다. 따라서, PVA섬유 0.5%를 혼입한 시편은 L/150보다 작은 변위

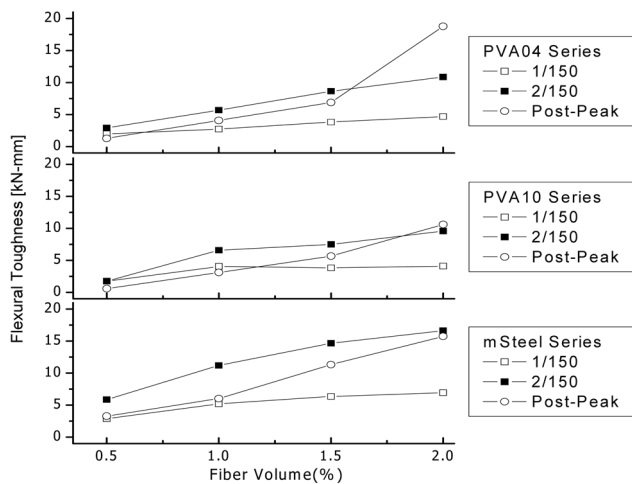


그림 4. 섬유의 종류와 혼입량에 따른 휨인성

표 2. 섬유의 종류와 잔골재 혼합비에 따른 휨인성 (kN-mm)

Fiber Type	Deflection V_f	2.33 mm (L/150)	4.67 mm (2L/150)	Post-Peak
		PVA04	0.5	
	1.0	2.72	5.68	4.07
	1.5	3.83	8.65	6.89
	2.0	4.69	10.87	18.77
PVA10	0.5	1.73	1.76	0.57
	1.0	4.06	6.59	3.12
	1.5	3.82	7.51	5.65
	2.0	4.10	9.57	10.62
mSteel	0.5	2.89	5.86	3.30
	1.0	5.19	11.20	6.01
	1.5	6.36	14.68	11.32
	2.0	6.94	16.63	15.74

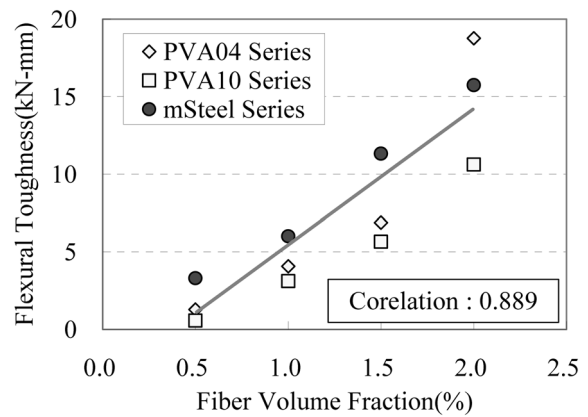


그림 5. 휨인성(Post-Peak)과 섬유혼입량의 상관관계

에서 Post-Peak에 도달하므로, Post-Peak의 휨인성이 L/150의 휨인성보다 작게 계산되었다. 그림 3에 의하면 mSteel 시편의 Post-Peak변위는 L/150과 2L/150의 구간에 위치하며, 그에 따라 Post-Peak의 휨인성도 L/150과 2L/150의 휨인성 범위 내에 포함된다는 것을 그림 4를 통해 확인할 수 있다.

섬유 혼입량과 Post-Peak의 휨인성의 상관관계를 분석하기 위하여 전체시편을 기준으로 상관계수(양영순 외 1999)를 계산하였다. 그림 5에서 나타나듯이 섬유의 혼입량이 증가할수록 휨인성도 증가하는 경향을 보여 0.889의 높은 상관계수를 보이는 것을 알 수 있다.

3.1.3 균열 패턴 및 개수

마이크로 섬유보강 모르타르는 배합의 특성에 따라서 기존의 매크로섬유를 사용한 섬유보강 모르타르나 콘크리트와는 다르게 여러 개의 균열이 발생하며 하중에 저항하는 특성을 보이기도 한다. 따라서, 휨실험 과정에서 발생한 균열에 대한 검토를 수행하였다. 실험이 끝난 후의 시편을 이용하여 표 3의 균열양상과 표 4의 균열 개수를 측정하였다.

기존의 고성능 섬유보강 복합체에 대한 연구(김무한 외 2005; 김윤용 외 2005; Li et al. 1995; Naaman 2003; Oh et al. 2005)에서 보고되었던 결과들과 마찬가지로 PVA 섬유를 사용한 시편은 섬유의 혼입량이 일정량 이상인 경우

표 3. 섬유 종류 및 혼입량에 대한 휨부재의 균열 양상

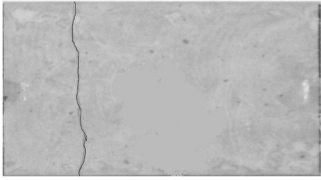



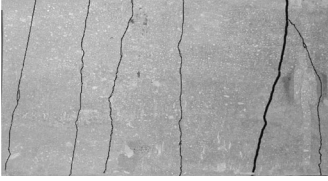
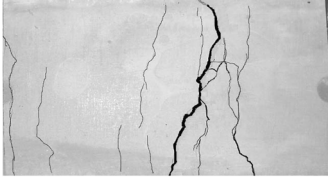

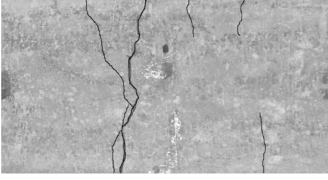

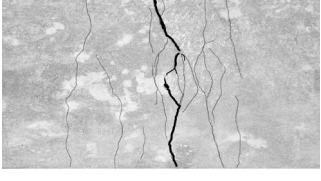


V_f	PVA04	PVA10	mSteel
0.5%			
1.0%			
1.5%			
2.0%			

표 4. 섬유 종류 및 혼입량에 대한 휨부재의 휨인장구간 평균 균열 개수

V_f	PVA04	PVA10	mSteel
0.5%	2.00	1.33	1.87
1.0%	3.90	4.00	4.07
1.5%	6.30	5.73	5.40
2.0%	7.07	5.80	5.73

여러개의 미세 균열이 발생하는 균열분산 현상이 발생하였다. 또한, 강섬유를 혼입한 시편도 균열분산효과가 발생하는 것으로 나타났다. 본 실험결과에 의하면 세 가지 섬유 모두 섬유혼입량이 1.5% 이상인 경우 5개의 이상의 균열이 유도되었다.

이후에 수행한 두께가 100 mm인 시편에 대한 휨실험에서 PVA04 시편은 균열이 분산되어 발생하였으나, PVA10과 mSteel 시편은 두께가 얇은 시편에 비하여 균열분산 효과가 상대적으로 적게 나타났으며, 이는 휨실험의 인장부인 시편 하부의 섬유 배열이 부재 두께에 따라 제작과정에서 영향을 받기 때문으로 추정된다. 섬유보강재료의 경우 시편을 제작하는 타설 및 면고르기 과정에서 움직이는 방향으로 섬유가 배열되는 현상이 발생하기도 하며, 주로 부재의 상하부가 영향을 많이 받게 된다. 특히, 강성이 커서 휘어지기 어려운 섬유를 사용한 경우 이러한 현상이 발생하게 될 것이다. 강 섬유를 사용한 시편은 기존 연구에 비하여(Namman 1991) 상대적으로 적은 2%의 섬유 혼입량으로도 다중균열이 발생하였는데, 이는 강섬유의 강성이 크고 시편의 두께가 얇기 때문에 타설 및 면고르기 과정에서 섬유가 방향성을 가지게 되었기 때문으로 추정된다. 직경이 0.1 mm인 PVA10 시편

도 섬유 강성의 영향을 받는 것으로 보이나, PVA04시편은 섬유가 유연(Flexible)하기 때문에 상대적으로 방향성에 대한 영향이 적은 것으로 판단되며, 이에 대한 명확한 근거는 추후 연구에 의하여 규명되어야 할 것이다.

3.1.4 휨인성과 균열개수의 상관관계

실험결과에 따른 휨인성과 균열 개수의 상관관계를 그림 6에 나타내었다. 전체 시편에 대한 휨인성과 균열개수의 상관계수는 0.811로 계산되었고, 그림 6에 의하면 특정 값을 기준으로 관계가 변화하는 것으로 나타났다. 휨인성이 약 7 kN·mm이하인 경우에는 균열의 개수와 휨인성의 비례관계가 명확하게 나타났으나, 초과하는 경우에는 휨인성의 변화에 따른 균열개수의 증감이 작아졌다.

섬유 혼입량과 섬유의 브리징은 비례하기 때문에 섬유의 혼입량이 증가할수록 인성은 커지게 되며, 다중균열분산에

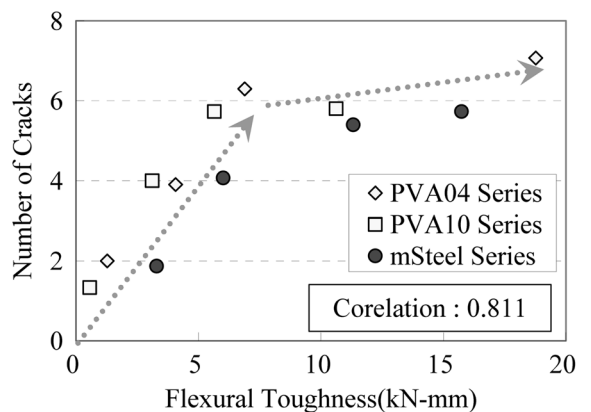


그림 6. 섬유혼입량에 따른 휨인성과 균열개수의 상관관계

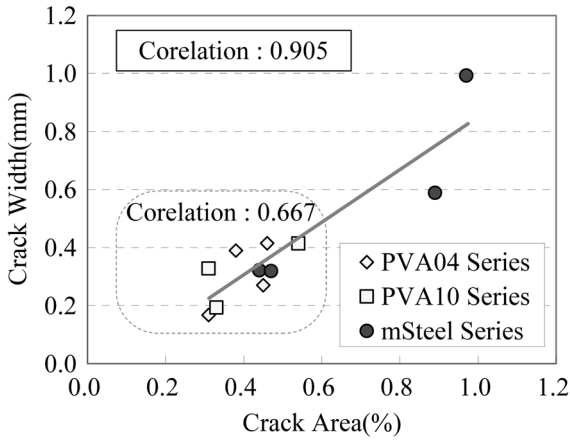


그림 7. 균열면적과 균열폭의 상관관계

유리한 조건이 성립된다. 그러나, 특정 매트릭스 조건에서 발생할 수 있는 최대 균열의 개수에는 제한(Wu *et al.*, 1995)이 있기 때문에 다중균열이 발생하기 이전 조건에서는 휨인성이 커질수록 균열개수도 증가하였으나, 충분한 개수의 균열이 발생한 이후에는 휨인성의 변화에 따른 균열개수의 변화가 적게 나타난 것으로 사료된다.

기존 연구(신경준 외 2007)에 의하면 섬유 혼입량이 일정하고 매트릭스의 배합을 변화시킨 경우에는 휨인성과 균열개수의 변화경향이 일치하지 않았다. 이는 매트릭스의 배합비가 실험변수로 사용되었기 때문에 변수에 따라 매트릭스의 파괴인성과 섬유의 부착특성이 동시에 바뀌게 된다. 그러나, 균열 분산을 위해서는 매트릭스 파괴인성은 낮을수록 유리하지만, 섬유의 부착강도는 최적강도가 존재한다. 따라서, 매트릭스 파괴인성에 대한 조건에서는 잔골재비가 낮을수록 유리하지만, 섬유의 부착강도는 잔골재비가 낮을수록 또는 높을수록 유리한 것만은 아니다. 그러므로, 균열분산을 위한 최적 조건이 잔골재 배합비와 선형적인 상관관계에 있지 않게 된다.

반면, 매질이 고정되어 있고 섬유의 혼입량을 변화시킨 본 연구 결과에 의하면 휨인성과 균열개수는 높은 상관관계를 보였다. 이는 배합비가 고정되어 있기 때문에 섬유의 혼입량의 변화가 매트릭스의 파괴특성에 영향을 주지 않으며, 실험변수인 섬유의 종류는 매트릭스와 섬유의 부착특성에만 영향을 주기 때문이다. 또한 섬유의 혼입량이 많을수록 균열분산을 위한 최적조건이 되기 때문에 섬유의 혼입량과 휨인성 그리고 균열개수의 상관관계가 높게 나타나는 것으로 사료된다.

따라서, 매트릭스의 배합비가 고정되어 있는 경우 시편의 성능과 균열개수에 대한 평가척도로써 휨인성값을 사용할 수도 있을 것이다. 그러나, 배합비가 서로 다른 재료의 경우 배합의 변화에 따라 균열발생 특성이 변화될 수 있기 때문에 시편의 성능과 균열개수에 대한 평가를 위하여 균열개수와 관련된 별도의 지수를 채택하는 것이 바람직할 것이다.

3.2 균열특성 실험결과

3.2.1 측정결과

각 실험 변수별로 흰색의 페인트를 도포한 한 개의 시편을 대상으로 균열면적과 균열개수 및 최대균열폭을 계산하

표 5. 섬유의 종류 및 혼입량에 대한 휨부재의 균열 면적

Fiber type	State		L/150	Post-Peak
	V_f	Initial Cracking		
PVA04	0.5%	0.01	*	0.17
	1.0%	0.00	0.26	0.41
	1.5%	0.00	0.02	0.39
	2.0%	0.01	0.04	0.27
PVA10	0.5%	0.00	*	0.33
	1.0%	-	-	-
	1.5%	-0.01	*	0.19
	2.0%	0.00	-0.01	0.41
mSteel	0.5%	0.00	0.26	0.99
	1.0%	0.00	0.05	0.59
	1.5%	0.00	0.01	0.32
	2.0%	0.00	0.00	0.32

- 측정오류 항목 *처짐 L/150이전에 Post-peak에 도달한 경우

표 6. 섬유의 종류 및 혼입량에 대한 휨부재의 균열 개수

Fiber type	State		L/150	Post-Peak
	V_f	Initial Cracking		
PVA04	0.5%	1	*	1
	1.0%	1	3.7	4
	1.5%	0.5	6.3	6.6
	2.0%	1.5	3	13
PVA10	0.5%	0	*	3.5
	1.0%	-	-	-
	1.5%	0	*	5
	2.0%	0	3	7
mSteel	0.5%	1.6	4	5
	1.0%	0.3	7	6.3
	1.5%	1	7.3	9.8
	2.0%	0	3.5	7.2

- 측정오류 항목 *처짐 L/150이전에 Post-peak에 도달한 경우

였다. PVA10 1.0% 시편은 측정값의 기록이 미비하여 산정되지 못했다. 다음의 표 5에 각 단계에 대한 균열면적을 나타내었고 표 6에 각 단계별 균열개수를 나타내었다. PVA04 0.5%, PVA10 0.5%, PVA10 1.5% 시편은 처짐이 휨지간의 1/150에 도달하기 전에 Post-Peak에 도달하였기 때문에 L/150에 대한 측정값은 표기하지 않았다.

결과에 따르면 균열개수는 섬유 혼입량과 하중의 단계에 따라 증가하는 일반적인 경향을 보였다. 초기균열이 발생한 단계에서는 한 개 정도의 균열이 측정되었으며 일부시편은 균열폭이 미세하여 사진 상에서 균열개수를 산정하지 못한 경우가 있었다.

초기균열단계의 균열면적은 0.01% 이하였으며 하중단계가 진행될수록 균열면적이 증가하는 경향을 나타내었다. PVA04 1.0%와 mSteel 0.5%시편은 섬유가 소량 혼입되어 다중균열 분산을 유발하지 못하기 때문에 초기균열이후 균열면적이 급격히 증가하여 L/150의 변형에서 0.26%의 균열면적이 측정되었으나, 그보다 섬유 혼입량이 많은 시편들은 처짐 L/150

표 7. 섬유 종류 및 혼입량에 따른 Post-Peak에 대한 휨부재의 균열 특성

Fiber type	Vf	Cracking Area	Flexural toughness (N-m)	Number of Crack	Maximum Crack Width	Area/Number
PVA04	0.5%	0.17	0.34	1	0.31	0.17
	1.0%	0.41	2.24	4	0.46	0.10
	1.5%	0.39	9.58	6.6	0.38	0.06
	2.0%	0.27	12.29	13	0.45	0.02
PVA10	0.5%	0.33	1.19	3.5	0.31	0.09
	1.0%	-	-	-	-	-
	1.5%	0.19	3.02	5	0.33	0.03
	2.0%	0.41	12.66	7	0.54	0.04
mSteel	0.5%	0.99	1.32	5	0.97	0.16
	1.0%	0.59	9.43	6.3	0.89	0.05
	1.5%	0.32	9.17	9.8	0.44	0.02
	2.0%	0.32	9.43	7.2	0.47	0.04

- 측정오류 항목

에 대한 균열면적이 0.05%이하로 유지되었다.

표 7에 초기균열이후 최대하중인 Post-Peak에 대한 측정 수치들을 나타내었다. 균열면적, 개수, 최대균열폭, 휨인성을 나타내었고, 한 개의 균열에 대한 평균 균열면적을 구하기 위하여 균열면적을 균열개수로 나눈 값을 계산하여 함께 나타내었다.

각 실험변수간의 상관관계를 수치적으로 표현하기 위하여 표 8에 각 변수들간의 선형적인 상관관계에 대한 지표를 나타내는 상관계수(양영순 외 1999)를 계산하여 표기하였다. 표 8의 결과에 따르면 일반적으로 알려진 바와 같이 휨인성과 섬유혼입량의 상관계수가 0.847로 가장 높게 나타났고, 균열개수와 휨인성과의 상관관계도 0.812로 높게 나타났다. 또한, 섬유혼입량과 균열개수의 상관계수보다는 섬유혼입량과 휨인성의 상관계수가 높게 나타났다.

3.2.2 균열면적

표 7에 따르면 Post-Peak의 균열면적은 0.17~0.99%의 범위를 보였으며 mSteel 시편은 섬유 혼입량이 증가함에 따라 균열면적이 감소하기도 하였으나 전체 시편을 대표할 수 있는 특성은 나타나지 않았다.

균열관련 측정치들의 상관관계를 나타낸 표 8에 의하면, 균열면적은 최대균열폭을 제외한 다른 변수들과의 상관계수가 0.36이하로써 상관관계가 낮은 것으로 나타났다. 또한, 균열은 시편에 가해진 외력에 의한 내부에너지에 의하여 발생하는 것이므로 동일한 조건에서 균열에 의한 에너지 소모량이 동일해야 하기 때문에 큰 폭의 균열이 소수 발생하기

나, 작은 폭의 균열이 다수 발생하는 경향이 있다. 따라서, 균열분산을 나타내는 지수로써 균열면적은 적절치 못하다는 것을 알 수 있다.

그림 7에 보인바와 같이 최대균열폭과 균열면적의 상관계수는 0.905로 1에 가까운 수치를 나타내었으나, mSteel 시편의 0.89 mm와 0.97 mm의 측정치를 제외할 경우 0.667의 상관계수를 나타내었다. 그러므로, 균열면적과 균열폭의 상관관계는 좀 더 많은 부재에 대한 실험을 통해 확인되어야 할 것으로 사료된다.

3.2.3 최대균열폭

실험결과에 의하면 PVA섬유를 혼입한 시편들은 Post-Peak 단계에서 0.31~0.54 mm의 최대균열폭을 보였으며, 강섬유를 혼입한 시편은 0.44~0.97 mm 범위의 최대균열폭을 나타내었다. 표 8에 의하면 최대균열폭은 균열면적을 제외한 다른 값들과 0.202이하의 낮은 상관계수를 보였다.

마이크로역학에 의한 가교응력-균열폭(bridging stress-crack width)관계에 의하면 섬유의 혼입량은 최대가교응력(maximum bridging stress)과는 직접적인 연관이 있지만, 최대가교응력에서의 균열폭은 섬유의 혼입량과는 관계가 적은 것으로 설명되고 있으며(김운용 외 2005), 실험결과에 의하면 섬유의 혼입량과 최대균열폭의 관계는 그림 8과 같이 0.202의 낮은 상관계수를 보였다.

따라서, Post-Peak에서의 최대균열폭은 섬유 자체의 특성에 관계가 있는 변수로써 섬유의 혼입량이나 휨인성과의 상관관계가 낮기 때문에 마이크로 섬유보강 모르타르의 특성

표 8. Post-Peak에 대한 균열관련 측정치들과 휨인성의 상관계수

All specimens	Fiber Volume	Crack Area	Number of Crack	Flexural Toughness	Crack Width
Fiber Volume	1.000	-0.353	0.744	0.847	-0.202
Crack Area	-0.353	1.000	-0.043	-0.110	0.905
Number of Crack	0.789	-0.042	1.000	0.812	0.093
Flexural Toughness	0.847	-0.110	0.812	1.000	0.093
Max. Crack Width	-0.202	0.904	0.093	0.093	1.000

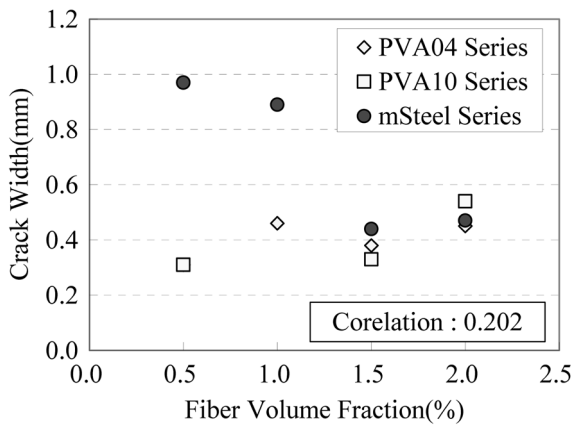


그림 8. 섬유 혼입량과 균열폭의 상관관계

을 대표하는 물성치로는 부적합하다는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로 섬유를 이용한 섬유 보강 모르타르에 대한 휨인장 실험을 섬유의 종류와 혼합비에 따라 수행하였고, 휨거동 및 균열특성을 분석하여 각 실험변수에 대한 상관관계를 규명하였다.

1. 마이크로 섬유보강 모르타르는 배합에 따라서 여러 개의 미세균열이 발생하여 하중에 저항하는 특징을 보였다. 본 연구의 휨실험 결과에 의하면 W/C가 0.46이고 S/C가 1.0이며 마이크로 섬유의 함유량이 1.5% 이상인 섬유보강 모르타르는 초기균열 후 하중의 감소가 없이 5개 이상의 균열이 분산되어 발생하였다.
2. 섬유의 혼입량이 일정하고 매트릭스의 배합비가 실험 변수인 경우 휨인성과 균열개수의 상관관계는 낮은 것으로 나타났다. 그러나, 매트릭스 배합비가 일정하고 섬유혼입량이 실험 변수인 경우에는 균열개수와 휨인성의 상관관계가 높게 나타났다. 섬유혼입량에 대한 실험결과에 따르면 섬유의 혼입량이 작아서 다수의 균열이 발생하기 이전에는 섬유의 혼입량이 증가할수록 휨인성과 균열개수도 함께 증가하였으나, 섬유 혼입량이 충분히 증가하여 균열분산 조건이 충족될 경우 섬유의 혼입량이 많아짐에 따라 휨인성은 증가하지만 균열개수의 변화량은 작아졌다.
3. 섬유보강 콘크리트의 성능향상을 나타내는 지표로서 휨인성이 유용하게 사용되고 있다. 그러나, 균열분산의 특징을 가지고 있는 마이크로 섬유보강 모르타르는 동일한 매트릭스를 사용한 경우에는 휨인성과 균열개수가 관련이 있었으나, 서로 다른 매트릭스를 사용한 배합의 경우 휨인성만으로 다중균열의 발생여부를 구분하기가 어려울 것으로 판단된다. 따라서, 마이크로 섬유보강 모르타르의 특징적 거동인 균열분산을 나타내기 위해서는 휨인성 이외에 균열과 관련된 별도의 지수가 병행되어야 할 것이다.
4. 휨인성과 균열관련 측정치간의 상관관계를 비교분석한 결과에 따르면 휨인성과 섬유혼입량, 균열개수와 휨인성의 상관관계가 비교적 높게 나타났다. 반면, 균열면적 및 Post-Peak의 최대균열폭은 다른 실험 변수와의 상관관계가 낮게 나타났다. 따라서, 마이크로 섬유보강 모르타르의 특성을 대표할 수 있는 측정치로는 휨인성과 섬유혼입량, 그

리고 균열개수 등이 적절할 것이며, 다중균열분산의 척도로써 균열면적이나 최대균열폭을 측정하는 것은 부적절한 것으로 판단된다.

참고문헌

- 김무한, 김재환, 김용로, 김영전(2005) 마이크로 및 매크로 섬유에 의해 보강된 고인성 시멘트 복합재료의 역학적 특성에 관한 실험적 연구, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제17권, 제2호, pp. 263-271.
- 김운용, 김정수, 김희신, 하기주, 김진근(2005) 마이크로역학에 의하여 설계된 ECC(Engineered Cementitious Composite)의 역학적 특성, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제17권, 제5호, pp. 705-716.
- 박정준, 고경택, 강수태, 김성욱(2005) 초고강도 강섬유 보강 시멘트 복합체의 구성인자가 압축강도에 미치는 영향, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제17권, 제1호, pp. 35-41.
- 박춘근, 노명현, 박대효(2005) 고성능 하이브리드 섬유 보강 콘크리트의 휨 및 유동 특성, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제17권, 제4호, pp. 543-550.
- 신경준, 장규현 (2007) 잔골체의 배합비에 따른 고성능 섬유 보강 시멘트 복합체의 휨 거동 및 균열특성, **대한토목학회논문집**, 제27권 제5A호, pp. 735-743.
- 양영순, 서용석, 이재욱(1999) **구조신뢰성공학**, 서울대학교출판부
- 원종필, 백철우, 박찬기, 한일영, 김방래 (2003) 구조용 합성섬유의 형상 및 단면적 변화에 따른 부차 및 휨 성능, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제15권, 제5호, pp. 643-649
- 원종필, 김명균, 박찬기(2005) 하이브리드 PVA 섬유보강 시멘트 복합체의 소성수축균열 특성, **대한토목학회논문집**, 대한토목학회, 제25권, 제4A호, pp.621-626.
- 오병환, 김지철, 박대균, 원종필(2002) 합성섬유보강 콘크리트 보의 균열 후 거동 예측, **한국콘크리트학회논문집**, 한국콘크리트학회, 제14권, 제6호, pp. 900-909
- 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. and Shah, S.P. (1992) *Fiber-reinforced cement composites*, Elsevier.
- Banitha, N. and Sheng, J. (1996) Fracture Toughness of Micro-Fiber Reinforced Cement Composites, *Cement and Concrete Composites*, Vol. 18, pp. 251-2699.
- Bentur, A. and Mindess, S. (1990) *Fiber reinforced cementitious composites*, McGraw-Hill.
- Fischer, G. and 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., Kong, H.J., and Li, V.C. (2003) Design of engineered cementitious composite(ECC) suitable for Wet-mix Shotcreting, *ACI Materials Journal*, Vol. 100, No. 6, pp. 511-518.
- Li, V.C. and Stang, H. (1997) Interface property characterization and strengthening mechanisms in fiber reinforced cement based composites, *J. Advanced Cement Based Materials*, Vol. 6, No. 1, pp. 1-20.
- Li, V.C., Mishra, D.K., and Wu, H.C. (1995) Matrix design for pseudo strain-hardening fibre reinforced cementitious composites, *Materials and Structures*, 28, pp.586-595.
- Naaman, A.E. (1991) SIFCON : Tailored Properties for Structural Performance, *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites*, E&Fn Spon.
- Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W (1995) *High Performance Fiber*

- Reinforced Cement Composites 2 (HPFRCC2)*, E&Fn Spon.
- Naaman, A.E. and Reinhardt, H.W. (2003) *High Performance Fiber Reinforced Cement Composites 4 (HPFRCC4)*, E&Fn Spon.
- Oh, B.H. and Shin, K.J. (2005) Cracking, ductility and durability characteristics of HPFRCC with various mixture proportions and fibers, *Proceedings of Int'l workshop on HPFRCC in structural applications*, pp. 213-222.
- Pierre, P., Pleau, R., and Pigeon, M. (1999) Mechanical properties of steel microfiber reinforced cement pastes and mortars, *Journal of Materials in Civil Engineering*, Vol. 11, No. 4, pp. 317-324
- Redon, C., Li, V.C., Wu, C., Hoshiro, H., Saito, T., and Ogawa, A. (2001) Measuring and modifying interface properties of PVA fibers in ECC matrix, *ASCE J. Materials in Civil Engineering*, Vol. 13, No. 6, Nov./Dec., pp. 399-406.
- Sanford, R.J. (2003) *Principle of Fracture Mechanics*, Prentice Hall.
- Wu, H.C. and Li, V.C. (1995) Stochastic process of multiple cracking in discontinuous random fiber reinforced brittle matrix composites, *Int'l of J. of Damage Mechanics*, Vol. 4, No. 1, pp. 83-102.
- (접수일: 2007.2.13/심사일: 2007.4.14/심사완료일: 2007.9.26)