고인성 섬유보강 시멘트 모르터의 직접인장성능
Direct Tensile Properties of Multiple-Cracking Type HPFRCCs

한병찬* 김재환* 임승찬** 권영진*** 임남형**** 이진옥**** 장승엽*****
Han,ByungChan Kim,JaeHwan Lim,SeungChan Kwan,YoungJin Lim,NamHyoung Lee,JinOk Jang,SeungYup

---

ABSTRACT

The synthetic fibers such as polyvilyl-alcohol(PVA) fiber are poised as a low cost alternative for reinforcement in structural applications. It has been reported that synthetic fiber in cement composites can control restrained tensile stresses and cracks and increase toughness, resistance to impact, corrosion, fatigue and durability. High performance fiber reinforced cementitious composite(HPFRCC) shows ultra high ductile behavior in the hardened state, because of the fiber bridging properties. In this study, it was proposed a direct tensile testing machine(DTTM) to be simple and to be applied to HPFRCC, and examined the tensile properties of HPFRCC by this machine. As a results, it was confirmed that a direct tensile test of HPFRCC could be certainly carried out DTTM to be developed in this study. Also, tensile strength and yield strength of HPFRCC were similar regardless of specimens thickness. And, all specimens revealed the stable strain-hardening behavior and multiple cracking in flexible and tensile loads. But, deviation of strain at ultimate tensile strength increased with the increase of specimen thickness.

---

1. 서론

강섬유, 유리섬유, 탄소섬유, 나일론, 폴리프로필렌, 폴리에틸렌 등의 유·무기계 섬유를 시멘트 매트릭스에 혼입한 섬유보강콘크리트의 개발 및 적용이 철도관련 구조물을 포함한 기반시설물의 신설, 보수보강에 활발히 적용되어 왔다. 그러나 이러한 재료는 콘크리트를 포함한 시멘트복합체의 취성적인 재료특성에 부분적인 인성을 부여한 것으로 부분적인 인성 개선효과를 기대할 수 있으나, 재료성능 자체의 향상 보다는 시공 효율성에 주안을 둔 것이 사실이다. 이러한 문제제기 및 해결을 목적으로, 고장력 폴리메닐알콜(이한 PVA) 섬유를 시멘트 체적비 대비 2~3% 투입하여 변형경화 특성 및 3%이상의 인장 변형능력을 갖게 하는 고인성 섬유보강 시멘트 복합체(High Performance Fiber Reinforced Cement Composites, 이하 HPFRCC)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다[1]. HPFRCC는 인장응력 및 휨모멘트 작용 하에 다수의 미세균열(Multiple Crack)을 발생시키고, 섬유의 가교작용에 의해 균열발생 후에도 변형의 증대에 따라 응력이 증하하는 변형경화특성을 가지며, 마치 강재와 같이 큰 인장 변형능력을 가짐으로써 구조물의 구조성능을 크게 향상시킬 수 있으며, 인장부재로의 활용 및 에너지 흡수재, 철도 터널이나 교량 하부 보수 및 보강재, 내피로성을 갖는 침목 등 다양한 분야에서의 적용이 가능하다고 판단된다.

---

* ㈜에이엠에스엔지니어링, 기술이사, 공학박사, 정회원
** 日本 ㈜DEROS 研究員, 工學博士
*** 호서대학교 소방방재학과, 교수, 공학박사, 정회원
**** 충남대학교 토목공학과, 교수, 공학박사, 정회원
***** 한국철도기술연구원 선임연구원, 공학박사, 정회원

이와 같은 기존의 모르타르나 콘크리트와 다른 특성을 이용목적이나 사용조건에 대응하여 유효하게 활용하기 위해서는 인장 극한변형(인장피크변형), 인장응력-변형곡선, 균열성상(폭, 개수, 간격) 및 이들 인장성능에 대한 치수효과 등을 명확히 함과 동시에 인장성능의 평가시험방법을 확립하는 것이 중요하다.

따라서, 본 연구에서는 변형경화거동을 나타내는 HPFRCC를 대상으로 단벨형상의 공시체를 이용한 간단한 인장시험방법을 제안하고, 또한 제안된 시험방법에 의해 HPFRCC의 1축 직접인장시험을 실시하여 HPFRCC의 인장성능이나 시험체 두께의 영향에 대하여 실험실증적으로 검토하였다.

2. 1축 직접인장시험과 시험장치의 제안

2.1 인장시험에 요구되는 성능과 문제점

HPFRCC의 인장성능 평가에는 균열(폭, 개수, 간격), 인장강도, 인장항복강도, 인장 극한변형이 매우 중요하다. 인장시험에 있어서 이들 항목을 안정적으로 계측하기 위해서는 이하의 3가지 문제에 대한 대책이 필요하다. 우선,

① 접합(고정)부분의 파괴를 일으키지 않고 시험기로부터 공시체에 인장력을 전달할 것,

② 공시체의 (<)자형 변형을 억제할 것,

③ 초기균열 발생후 변형경화 부분의 거동을 안정적으로 제어하는 것이 중요하다.

이에 본 연구에서는 상기의 문제점을 해결함과 동시에 공시체에 생기는 복수균열을 용이하게 관찰하는 것을 목적으로 하여, 조작성이나 안전성을 배려한 간단한 인장재하시험장치를 개발하였다.

2.2 인장시험장치와 조작순서

개발된 인장시험장치를 그림 1 및 사진 1에 나타내었다. 본 인장시험장치는 강제 프레임 상하의 접합구에 의해 단벨형상의 공시체 안쪽 모서리를 고정하여 인장력을 전달시키는 구조로 설계하였다. 또한, 공시체의 정착/탈착을 용이하게 하기 위해 상하의 접합구와 함께 한 쪽 접합구를 밑판에 고정시켰고, 다른 쪽의 접합구는 좌우로 슬라이드(약 5mm)할 수 있는 구조로 하였다.

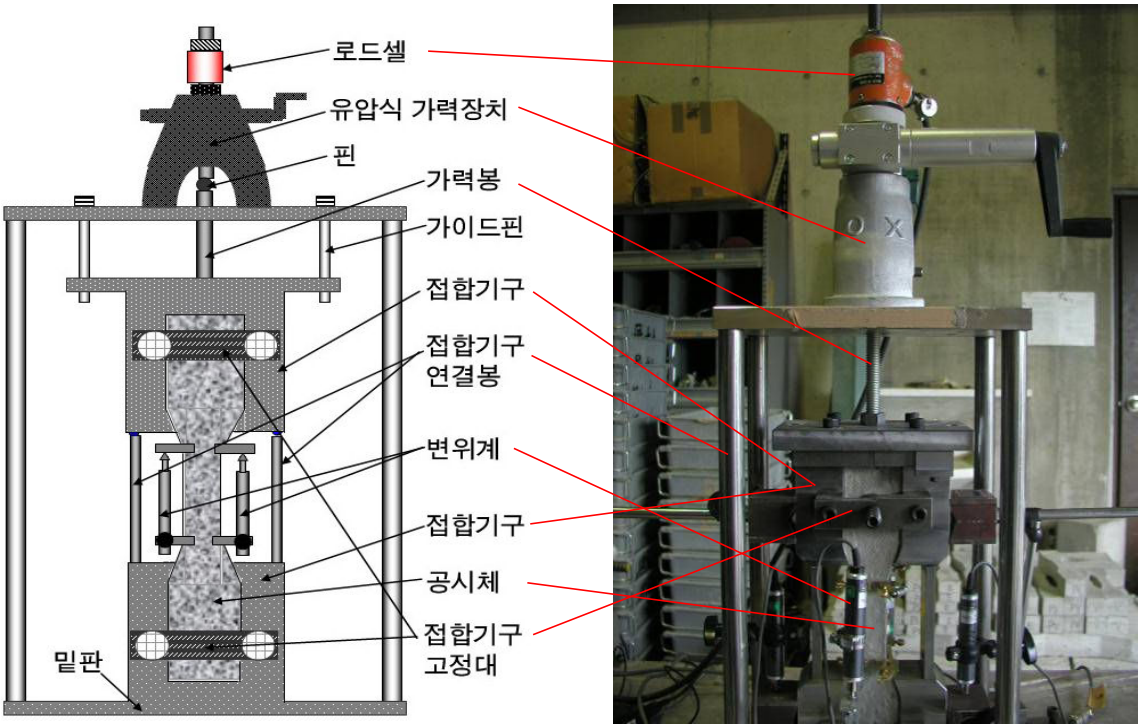

그림 1. 인장시험장치의 모식도

사진 1. 인장시험장치의 외관

더욱이, 부착시험장치의 가력부분을 강제 프레임 위에 설치하고, 가력봉을 연결하여 공시체에 인장력을 부여하였다. 인장시험의 경계조건으로서는 하측 접합구는 강제 프레임의 밑판에 고정시킨 “고정지지”로 하고, 상측 접합구는 가력봉에 힌지를 설치하여 “핀지지”로 하였다. 또한, 인장시험에 있어서 하중-변위 관계는 공시체에 직접 부착된 변위계와 프레임에 설치된 로드셀에 의해 측정할 수 있도록 하였다.

표 1. HPFRCC의 배합 및 물성

실험요인 및 수준		단 위 량 (kg/m^3)					Slump Flow (mm)	공기량 (%)	압축 강도 (MPa)	탄성 계수 (GPa)
샘플명	시험체두께 (mm)	분체재료[1)]	굵은골재	폴리머	물	PVA섬유				
PVA-13	13	1225	323	71	257	26	420	6.8	34.4	16.3
PVA-30	30									
PVA-50	50									

주1) 분체재료는 시멘트, 플라이애시, 실리카흄, 탄산칼슘, 규사, 수축저감제, 증점제로 구성됨

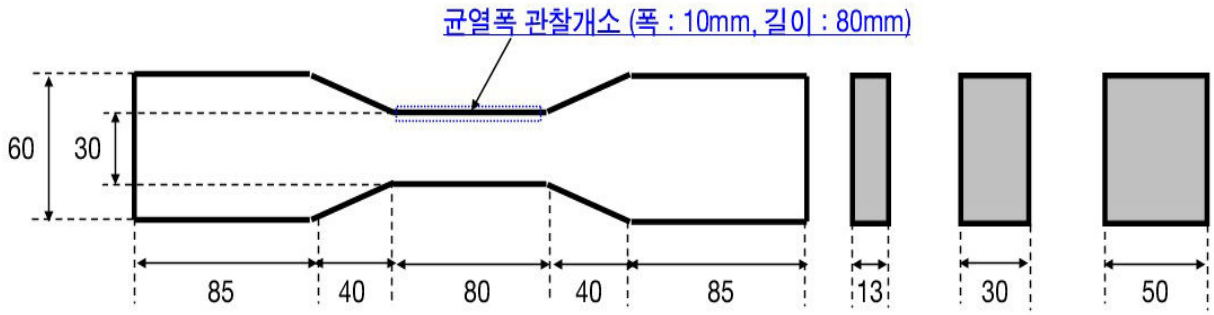

그림 2. 인장시험용 시험체의 형상과 치수

3. 인장성능과 치수효과 검증에 관한 실험

3.1 실험개요

(1) 사용재료 및 공시체 형상

HPFRCC의 배합 및 물성을 표 1에 나타내었다. HPFRCC의 매트릭스로는 프리믹스된 폴리머시멘트모르타르에 굵은골재(G_{max}=10mm, 단위량 323kg/m^3)를 혼입한 것을 이용하였다. 섬유(혼입율 2.0vol.%)로는 길이 12mm, 직경 40㎛의 고장력 PVA(Polyvinyl Alcohol) 섬유를 사용하였다. 단위수량은 257kg/m^{3}로 하였으며, 슬럼프플로우는 420mm, 공기량은 6.8%이었다. 한편, HPFRCC는 섬유 혼입율이 보통 섬유보강 시멘트 복합체(Fiber reinforced cementitious composites, FRCC)에 비하여 매우 크기 때문에 재료의 투입 순서 및 비빔시간에 따라 HPFRCC의 성능 및 시공성이 결정된다. 본 연구에서는 섬유가 균등하게 분산되어 HPFRCC의 소정의 성능을 발휘할 수 있도록 다수의 시행오차를 거쳐 그림 3과 같은 절차에 따라 시멘트 복합체를 제조하였다. 비빔시 믹서는 호밋형 믹서를 이용하였다(사진 2). 먼저 건비빔을 통해 시멘트매트릭스를 충분히 혼합한 후 물을 투입하였다. PVA 섬유를 1/2로 나누어 유동화제와 함께 투입하고 30초씩 비빔을 실시하였으며, 이후 1분 30초 동안 추가 비빔 후 토출하여 공시체를 제작하였다(총 비빔시간 4분). 공시체 제작시에는 나무망치로 진동을 부여하여 공시체를 제작하였으며, 2일후 탈형하여 시험재령까지 20±3℃에서 기중 양생하였다.

또한, 그림 1은 인장시험용 단벨형상 공시체의 형상과 치수를 나타낸 것이며, 공시체 치수는 평면치수를 일정하게 하고, 두께를 13, 30, 50mm의 3종류로 변화시켜 각각 공시체를 5개씩 제작하였다.

사진 2. 호밋형 믹서 전경

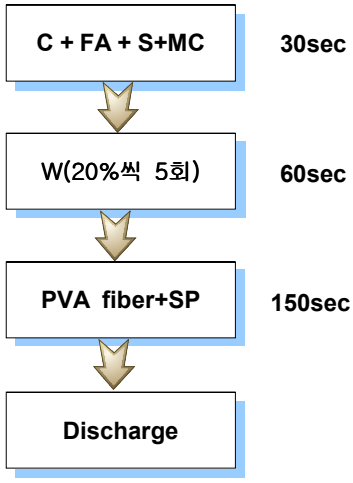

그림 3. HPFRCC의 비빔방법

(2) 인장재하시험 및 균열관찰의 개요

인장재하시험시 변위계측 길이는 중앙의 80mm로 하고, 공시체의 양측면에 설치된 고감도 변위계(1/1,000mm)에 의해 계측하였다. 하중재하속도는 직접인장시험에 대한 특별한 규정이 없으나, 인장시험장치의 제작이후 안정적인 실험결과 획득을 위한 보정과정에서 0.5mm/min로 설정하였다. 또한, 균열폭의 관찰은 마이크로스코프(VH-5000)를 이용하였으며, 인장변형율 0.25%, 0.63%, 0.95%, 1.25%, 1.88%, 2.5%, 3.13%, 3.75%, 5.0%의 단계에서 재하를 정지하고 관찰하였다. 관찰구간은 공시체 밑면(거푸집면)의 측면영역(폭 10mm, 길이 80mm)으로 설정하고, 디지털카메라(배율 25배)를 이동시켜 균열을 계측하였다.

3.2 압축 및 휨시험결과 및 고찰

표 1 및 그림 4에 HPFRCC의 압축 및 휨시험 결과를 각각 나타내었다. 시험결과 HPFRCC의 압축강도는 34.4MPa, 탄성계수는 16.3GPa로 평가되었으며, 모든 시험체에서 최대응력시 변형률이 0.4%를 초과하는 것을 알 수 있었다.

휨시험은 3등분점 재하시험에 의해 실시하였며, 그림 4와 같이 균열발생 후에 변위(처짐)의 증대와 함께 하중이 증가하는 변위경화특성이 명확하게 나타났다. 또한, 휨시험 후 시험체 하면에 복수의 미세균열이 발생하고 있는 것을 육안으로 확인할 수 있었다.

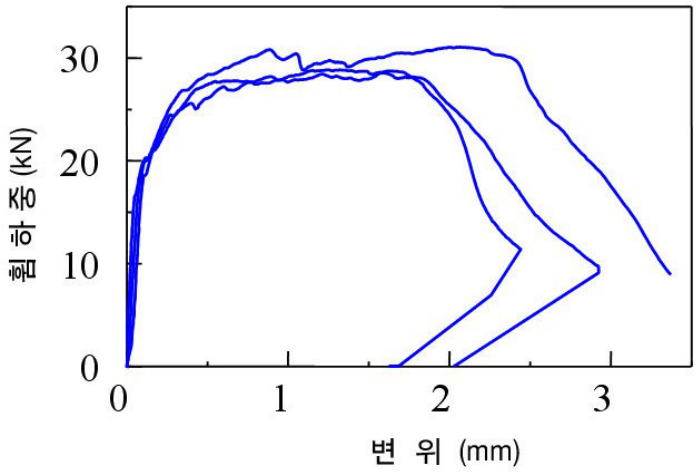

그림 4. 휨하중-변위곡선

3.3 인장시험결과 및 고찰

(1) 인장응력-변형관계의 치수효과

인장공시체의 두께에 따른 인장응력-변형의 관계를 그림 5에 나타내었다. 시험결과, 공시체의 두께에 관계없이 모든 공시체에는 초기균열 발생 이후에도 취성적으로 파괴되지 않고, 변형의 증대와 함께 인장응력이 증가하는 유사 변형경화(Pseudo Strain-Hardening)특성을 나타내었다.

그러나, 인장극한 변형율은 비교적 큰 편차를 보였다. 또한, 평균인장강도는 약 4MPa 정도로 공시체의 두께 차이에 따른 차이는 거의 확인되지 않았으나, 공시체 두께 13mm의 경우 다른 시험체에 비해 인장강도의 편차가 큰 것으로 나타났다.

한편, 공시체의 두께 차이에 따른 인장항복강도의 차이는 거의 확인되지 않았으며, 인장 극한변형은 두께 13 및 30mm의 경우, 대부분 3~4% 정도이었지만, 두께 50mm의 경우 2~6% 정도로 편차가 큰 것으로 나타났다. 이러한 현상은 공시체의 치수효과에 의한 것으로 판단되며, 즉 섬유의 방향성에 의한 인장강도의 증가효과, 향후 정량적인 표준시험체의 선정에 있어서는 섬유의 방향성에 관한 고려가 필요한 것으로 판단되었다.

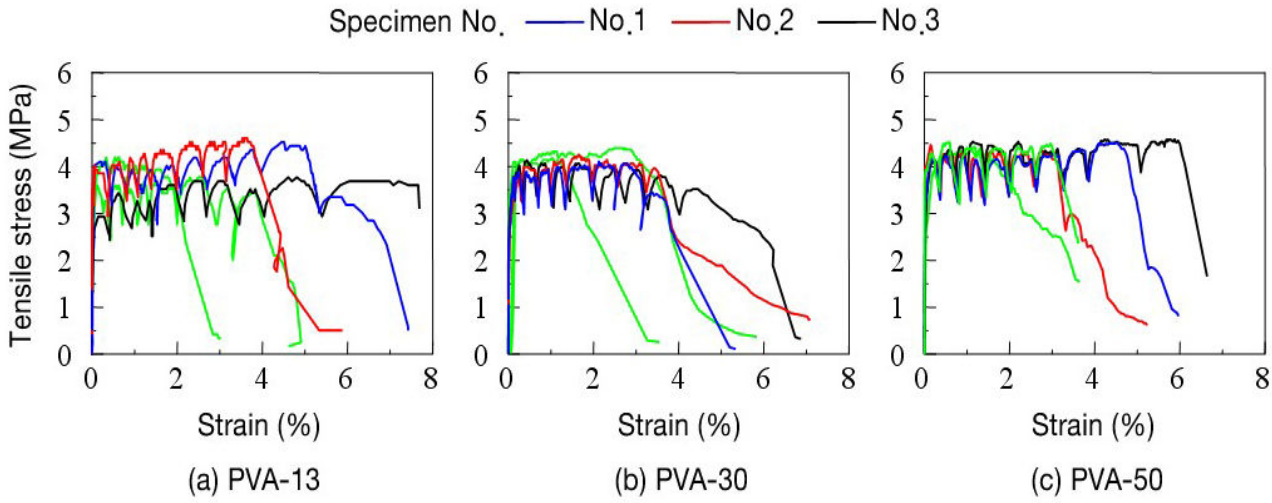

그림 5. 1축인장시험에 의한 인장응력-변형곡선

(2) 균열발생경향과 치수효과

인장변형이 0.63%, 1.88% 및 인장 극한변형 단계에서의 균열발생상황을 그림 6에 나타내었다. 모든 공시체에 있어서 멀티플크랙이 발생함과 동시에 변형의 증가에 따라 균열개수도 증가하였으며, 인장 극한변형이 클수록 균열개수도 증가하고, 균열발생영역도 확대되는 결과를 얻었다.

한편, 공시체 두께 13mm 중 No.3의 경우 인장극한변형율은 5% 이상이었지만, 3% 정도인 다른 공시체에 비하여 균열발생수가 적은 것으로 나타났다. 이는 공시체의 두께 차이에 의한 영향보다 마이크로스코프에 의한 균열의 관찰영역이 좁은 범위이었기 때문인 것으로 판단되었다.

4. 결 론

변형경화거동을 나타내는 HPFRCC를 대상으로 단벨형상의 공시체를 이용한 간단한 인장시험방법을 제안하고, 또한 제안된 시험방법에 의해 HPFRCC의 1축 직접인장시험을 실시하여 HPFRCC의 인장성능이나 시험체 두께의 영향에 대하여 실험실증적으로 검토하고자 한 본 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 본 연구에서 제안한 시험장치에 의해 인장시험을 실시한 결과, 모든 공시체가 검토길이 내에서 파괴가 발생되어 인장시험을 확실하게 실시하는 것이 가능하였다.

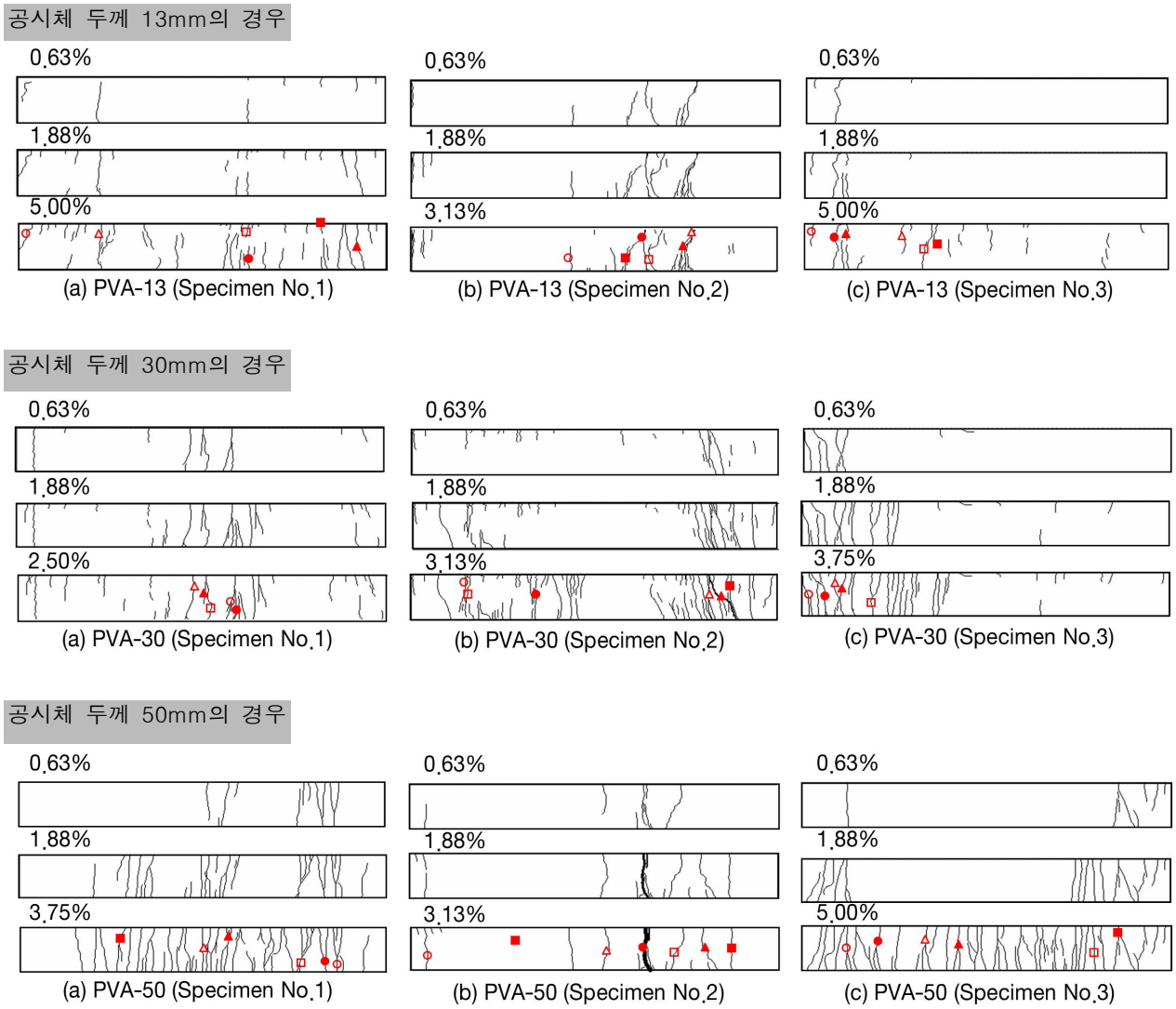

그림 6. 각 변형율에 있어서 균열발생 상황 (균열관찰영역 = 10 × 80 mm)

(2) 모든 시험체 두께에 있어서도 변형경화특성이 확인되었으며, 공시체 두께의 차이에 따른 인장강도나 인장항복강도의 차이는 거의 확인되지 않았지만, 인장 극한변형은 공시체 두께가 두꺼울수록 편차가 크다는 결과를 얻었다.

참 고 문 헌

1) 日本コンクリート工學協會, 高靭性セメント複合材料に関するシンポジウム, 高靭性セメント複合材料の性能評價と構造利用研究委員會, 2003.12

2) 김윤용, 김정수, 김희신, 김진근, 하기주(2004), “마이크로 역학에 의하여 설계된 고인성 섬유복합 모르타르의 1축 인장거동,”한국콘크리트학회학술발표회 논문집, 16(1), pp.284∽287

3) 윤현도, 양일승, 한병찬, 전에스더, 福山洋, 문연준, “Steel Cord 및 PVA 혼합섬유 보강 고인성 시멘트 복합체의 인장강도 특성,” 한국콘크리트학회학술발표회 논문집, 16(1), pp.18∽21