

# UHPC의 직접인장응력과 균열개구변위와의 관계에 관한 실험적 연구

## Experimental study on the relationship between direct tensile stress and crack opening displacement of UHPC

강 수 태\*      박 정 준\*      류 금 성\*      고 경 택\*\*      김 성 욱\*\*\*  
Kang, Su Tae    Park, Jung Jun    Ryu, Gum Sung    Koh, Gyung Taek    Kim, Sung Wook

### ABSTRACT

In order to estimate the mechanical properties of ultra high performance concrete, the most important is to evaluate its tensile behavior. The tensile behavior of concrete is generally characterized by the elastic behaviour before cracking and tensile stress-crack width relationship after cracking. We carried out the direct tensile and flexural tensile test and compared the tensile behaviors obtained by the direct tensile test and by inverse analysis of the flexural tensile test results. We compared the obtained tensile behavior with that of JSCE recommendations for ultra high performance concrete as well. we could see that the tensile stress-crack width relationship obtained from the flexural tensile test results using inverse analysis had good agreement with directly obtained tensile behaviour with direct tensile test and showed similar tensile softening behaviour introduced in JSCE recommendations for ultra high performance concrete.

### 요 약

초고성능 콘크리트의 재료적 특성을 평가하는데 있어 무엇보다도 인장거동의 평가가 우선적으로 수행되어야 한다. 일반적으로 콘크리트의 인장거동은 균열이전의 탄성거동과 균열이 발생한 이후의 응력과 균열폭과의 관계 특성에 의해 정의되어진다. 본 연구에서는 초고성능 콘크리트에 대해 직접인장실험 및 휨인장실험을 수행하고 휨인장실험 결과의 역해석을 통해 얻은 인장거동과 직접인장실험을 통해 구한 인장거동의 상관관계를 파악하였다. 또한 유사한 역학성능을 가진 초고성능 콘크리트에 대해 일본에서 제시하고 있는 초고성능 콘크리트 설계지침 중 인장거동 특성과의 비교평가를 실시하였다. 그 결과, 휨인장실험으로부터 역해석을 통해 구한 인장응력-균열폭 관계가 직접인장실험으로 구한 결과와 잘 일치함을 확인하였으며, JSCE에 제시하는 인장연화곡선과의 비교를 통해 본 연구에서의 초고성능 콘크리트가 유사한 연화거동을 보임을 확인하였다.

\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 연구원

\*\* 정회원, 한국건설기술연구원 구조재료연구실 책임연구원

## 1. 서론

초고성능 콘크리트의 가장 큰 특징 중의 하나는 인장강도의 증가와 균열 이후 연성거동의 향상이다. 초고성능 콘크리트의 인장거동 특성은 구조물이 휨과괴와 전단과괴에 도달할 때까지의 연성거동에 있어 매우 중요한 역할을 하게 된다. 초고강도 강섬유 보강 콘크리트를 이용한 구조물에서는 우수한 재료성능에 의해 구조부재의 축소 및 경량화를 도모할 수 있으므로 건설경비의 절감 등이 가능하다. 따라서 초고성능 콘크리트의 재료적 특성을 평가하는데 있어 무엇보다도 인장거동의 평가가 우선적으로 수행되어야 한다. 일반적으로 콘크리트의 인장거동은 균열이전의 탄성거동과 균열이 발생한 이후의 응력과 균열폭과의 관계 특성에 의해 정의되어진다. 초고성능 콘크리트의 인장거동 평가는 직접인장실험 또는 휨인장 실험을 통해 이루어진다. 직접인장실험은 실험을 통해 직접적으로 거동을 파악할 수 있는 장점이 있는 반면 안정적인 실험을 수행하기가 어렵고, 반면 휨인장실험은 실험이 용이하고 안정적으로 실험을 수행할 수 있는 장점이 있으나 휨인장실험 결과를 통해 초고성능 콘크리트의 인장거동을 파악하기 위해서는 역해석을 수행해야하는 번거로움이 있다.

본 연구에서는 초고성능 콘크리트에 대해 직접인장실험 및 휨인장실험을 수행하고 휨인장실험 결과의 역해석을 통해 얻은 인장거동과 직접인장실험을 통해 구한 인장거동의 상관관계를 파악하였다. 또한 유사한 역확성능을 가진 초고성능 콘크리트에 대해 일본에서 제시하고 있는 초고성능 콘크리트 설계지침 중 인장거동 특성과의 비교평가를 실시하였다.

## 2. 배합구성 및 실험방법

본 연구에서의 초고성능 콘크리트는 표 1과 같은 배합구성을 가진다. 본 연구의 실험에서 사용한 시멘트는 밀도 3.15g/cm<sup>3</sup>의 보통 포틀랜드 시멘트이며 반응성 분체는 비표면적 200,000cm<sup>2</sup>/g의 실리카폼을 사용하였다. 잔골재는 밀도 2.62g/cm<sup>3</sup>, 평균입경이 0.5mm이하의 모래를 사용하였고, 굵은 골재는 사용하지 않았다. 고성능 감수제는 폴리칼본산계의 고성능 감수제(밀도 1.01g/cm<sup>3</sup>, 암갈색)를 사용하였다. 충전재로는 SiO<sub>2</sub> 99%이상을 함유하고 평균입경이 약 2 $\mu$ m인 석영질 미분말을 사용하였다. 강섬유는 인장응력 및 휨응력이 작용할 때 인성향상을 목적으로 사용되는 고탄성용 강섬유(밀도 7.8g/cm<sup>3</sup>, 길이 13mm, 직경 0.2mm, 인장강도 2,500MPa)를 콘크리트 체적 대비 2%를 혼입 사용하였다.

본 연구에서는 직접인장실험은 그림 1의 인장실험체 및 인장시험장치를 이용하여 실험을 수행하였다. 인장실험장치는 실험 중 발생하는 2차 휨응력의 영향과 초기 시험체 거치 시의 정확성 등을 고려하여 일단힌지와 일단고정의 지지조건을 가진

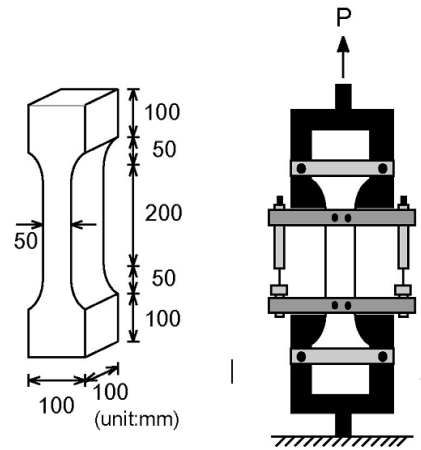


그림 1 직접인장 실험체 및 실험장치

형태로 제작되었으며, 직접인장 실험체는 총 9개를 제작하였다.

표 1 콘크리트 배합

콘크리트 배합(상대비*)						
시멘트	배합수	실리카폼	잔골재	충전재	SP제	강섬유
1.00	0.25	0.25	1.10	0.30	0.018	2% vol.

\* 상대비: 시멘트에 대한 질량비, 단 강섬유는 전체 체적에 대한 부피비로 나타냄.

휨인장거동 실험은 일본콘크리트공학회 (Japan Concrete Institute)의 섬유보강 콘크리트의 하중-변위곡선 시험법(JCI-S-002-2003)에 준하여 3점 휨시험을 수행하였다. 휨실험체는 100×100×400mm로 제작되었으며 순지간 300mm에 중앙부 노치의 깊이는 30mm로 하였다. 실험체는 시험변수별 5개씩 제작하였다.

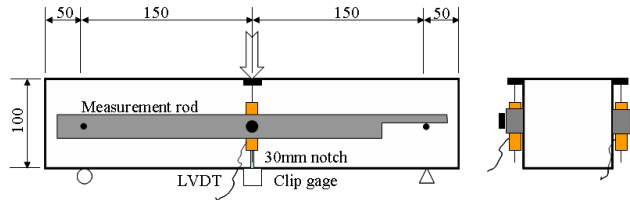


그림 2 휨인장 실험체와 실험장치

초고성능 콘크리트의 직접인장 실험은 250 kN 용량의 만능재료시험기를 사용하였으며 0.2mm/min의 재하속도로 재하하였으며 시험체에서 좁은 단면에서의 변위를 측정하기 위하여 2개의 LVDT를 설치하였다. 한편 휨인장 실험은 노치넨 보에 대해 3점 휨시험으로 실시하였다. 콘크리트 양생이 종료되고 시험을 수행하기 직전에 다이아몬드 커터기를 이용하여 시험체 중앙에 노치를 주었으며 노치의 폭은 4mm로 일정하게 유지하였다. 휨시험에 이용한 시험장치는 하중과 변위 조절이 가능한 2,000 kN 용량의 만능재료시험기이며, 하중은 변위조절 방식으로 분당 시편 지간(300mm)의 1/1500의 속도로 재하하였다. 또한, 시험중 시험체 중앙에서의 처짐을 측정하기 위해서 10mm 용량의 LVDT를 양면에 1개씩 설치하였다. 노치부의 균열폭을 측정하기 위해서는 크립게이지를 시험체의 하면에 부착하였다. 그림 2는 휨인장 실험체와 실험장치를 나타낸 것이다.

### 3. 실험결과 및 분석

그림 3은 9개의 인장시험체 중 균열이 유효범위 내에서 발생하여 파괴가 진행된 4개의 시험체에 대한 인장응력-균열폭 관계를 나타낸 것이다. 그림 3에서 보는 바와 같이 4개의 시험체에 대한 초기균열 발생 강도는 11.6MPa에서 15.2MPa까지의 값을 나타내었으며, 평균값은 약 13.6MPa, 표준편차 1.41MPa이었다. 인장강도는 13.7MPa에서 17.8MPa까지 나타났으며, 평균인장강도는 15.9MPa, 표준편차는 1.64MPa로 나타났다. 그림 4와 그림 5는 5개의 100×100×400mm 시험체에 노치넨 보 실험의 하중-CMOD 관계와 하중-처짐 관계를 나타낸 것이다. 휨인장강도는 32.3MPa에서 37.6MPa까지의 값을 보였으며 평균값은 34.7MPa이었으며 실험결과의 편차는 2.34MPa로 나타났다. 그림4에서 CMOD의 값은 약 4mm 이내까지 측정되었는데 이것은 본 연구에서 사용된 크립게이지의 용량이 5mm이기 때문에 그 이상의 균열폭을 측정

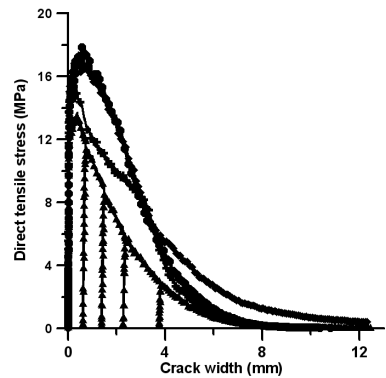


그림 3 인장응력-균열폭 관계

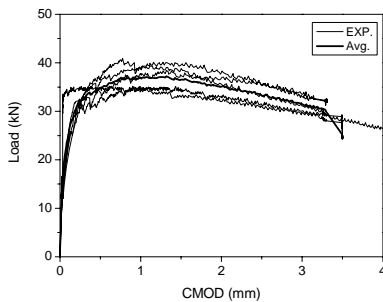


그림 4 하중-CMOD 관계

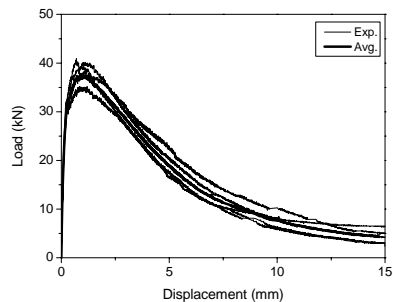


그림 5 하중-중앙처짐 관계

할 수 없었기 때문이다.

노치 낸 보에서의 휨실험결과를 근거로 하여 Uchida 등이 제안한 역해석법을 이용하여 초고성능 콘크리트의 인장응력-균열폭 관계를 구하였다. 역해석은 FEM모델을 이용하였으며 유한요소 모델은 684개의 절점과 1203개의 삼각형 평면응력요소로 구성하였으며, 시험체 중의 노치부는 균열진전 상태를 정확하게 평가하기 위해서 매우 세밀하게 모델링하였다. 그림 6은 휨인장실험에서 구한 하중-처짐관계 결과로부터 역해석을 통해 구한 초고성능 콘크리트의 인장응력-균열폭 관계를 나타낸 것이다.

그림 7은 역해석을 통해 구한 인장응력-균열폭 관계와 실제 인장실험을 통해 구한 인장응력-균열폭 관계를 비교하여 나타낸 것이다. 직접인장실험으로 구한 실험결과가 역해석으로 구한 인장응력-균열폭 관계가 잘 일치함을 알 수 있다. 그림 6에서 실선으로 나타낸 것은 일본 JSCE에서 제시하고 있는, 휨인장실험으로부터 역해석을 통해 구한 초고성능 콘크리트의 인장연화곡선을 나타낸 것이고, 점선으로 나타낸 것은 직접인장실험결과를 근거로 JSCE에서 제시한 인장연화곡선이다. JSCE에서 제시하고 있는 인장응력-균열폭 관계는 휨인장실험 결과로부터 역해석을 통해 구한 결과가 직접인장실험 결과보다 상대적으로 크게 나타난 반면, 본 실험에서는 해석적으로 구한 인장응력-균열폭 관계는 직접인장 결과와 비교할 때 거의 유사한 값을 보이는 경향을 보인다. 본 연구에서 구한 인장응력-균열폭 관계는 JSCE에서 제시하고 있는 휨인장실험 결과에 근거한 인장응력-균열폭 관계에 비해 인장강도가 더 크고 연화구간의 기울기는 비슷한 것으로 나타났다.

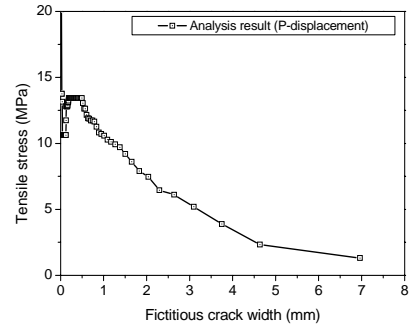


그림 6 역해석을 통해 구한 인장응력-균열폭 관계

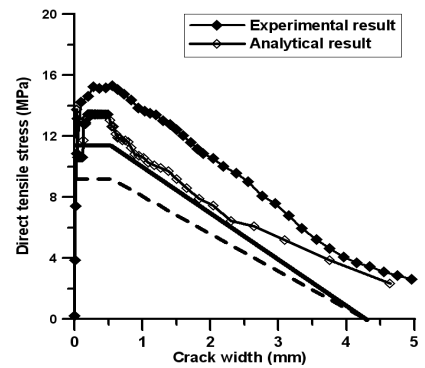


그림 7 실험결과와 해석결과와의 비교

#### 4. 결론

본 연구에서는 초고성능 콘크리트의 인장응력-균열폭 관계를 규명하기 위하여 직접인장실험과 휨인장실험을 수행하였으며, 휨인장실험으로부터 역해석을 통해 구한 인장응력-균열폭 관계가 직접인장실험으로 구한 결과와 잘 일치함을 확인하였으며, 유사한 배합과 성능을 가진 초고성능 콘크리트에 대해 JSCE에 제시하는 인장연화곡선과의 비교를 통해 본 연구에서의 초고성능 콘크리트가 유사한 연화거동을 보임을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 연구는 2005년도 건설교통부의 건설핵심기술연구개발사업인 고성능/다기능 콘크리트의 개발 및 활용기술 개발(과제번호: 05-CCT-D11)에 관한 일련의 연구로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

#### 참고문헌

1. 田中など (2005), “超高强度纖維補強コンクリートの引張特性と引張軟化曲線のモデル化”, 日本土木學會論文集, Vol. 67, No. 788, pp. 159-173.
2. 강수태, 박정준, 이시영, 박 건, 홍기남, 김성욱, “강섬유 혼입률이 초고강도 강섬유 보강 콘크리트의 인장연화거동에 미치는 영향”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 20권, 1호, 2008.