

강섬유 보강 UHPC의 직접인장 특성 및 신뢰성 검토에 관한 연구

Study on Direct Tensile Properties and Reliability Review of Steel Fiber Reinforced UHPC

박 지 웅¹

이 건 철^{1*}

고 경 택²

류 금 성²

Park, Ji Woong¹ Lee, Gun Cheol^{1*} Koh, Kyung Taek² Ryu, Gum Sung²

Department of Architecture, Korea National University of Transportation, Chungju, 27469, Korea¹

Structural Engineering Research Division, Korea Institute of Construction Technology (KICT), Goyang, 10223, Korea²

Abstract

In this study, a direct tensile test was planned to identify the tensile performance of UHPC, and the irregularity of cracks, which is a problem of the direct tensile test, was complemented through the introduction of notches at the center of a specimen. In this regard, a number of specimens divided by batch to reduce the deviation of direct tensile test values were fabricated to present reference data with respect to highly reliable direct tensile strength values. In addition, the mechanical properties and reliability of the specimens were examined under the curing conditions of the specified design strength of 120MPa for the steel fiber reinforced concrete with 1.5% fiber volume fraction, which is most suitable for the field application. As a result, the deviation of averages by batch between compressive strength and direct tensile strength did not show a large difference, and all cracks occurred within 20mm in the direct tensile test. At the 95% confidence interval of the direct tensile strength, the range was considerably small in the mean and the standard deviation, and there was no significant difference depending on the curing conditions. The results confirmed that a stable direct tensile test was performed, and highly reliable results were obtained through the fabrication of specimens by batch and test progress.

Keywords : UHPC, steel fiber, direct tensile test, reliability review

1. 서 론

최근 초고층 빌딩 및 장대교량과 같은 대규모 콘크리트 구조물의 건축 경향과 내구성 향상의 목적을 바탕으로 초고강도 콘크리트의 수요가 증가함에 따라 초고강도 콘크리트의 낮은 인장강도를 보완하고 각종 혼화재료를 혼합하여 시공성 및 성능을 개선시킨 초고성능 콘크리트(Ultra High

Performance Concrete, 이하 UHPC)가 개발되었으며, 초고성능 콘크리트의 우수성을 높이기 위해 국내 연구기관, 건설업체 및 대학 등에서 많은 연구가 진행되고 있다. 현재 국내에서는 압축강도 100~200MPa급 이상의 초고성능 콘크리트 수준을 목표로 하여 세계적 수준의 기술 확보를 목표로 하고 있다[1].

이러한 UHPC는 각종 강섬유를 혼입하여 인장강도 10MPa 이상을 기대하고 있으며 강섬유 보강 UHPC는 시험체의 균열이 발생한 이후에도 연성거동을 하는 특성이 있다. 이에 따라 휨인장시험, 쪼갬인장시험 등과 같은 간접인장시험 방법으로 균열 이후의 연성거동을 예측하고 있다. 그러나, 이러한 대부분의 시험방법은 오차가 발생할 수 있는데,

Received : December 27, 2017

Revision received : January 29, 2018

Accepted : February 26, 2018

* Corresponding author : Lee, Gun Cheol

[Tel: 82-43-841-5207, E-mail : gclee@ut.ac.kr]

©2018 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

Kim[2]의 연구에서는 강섬유 보강 UHPC의 휨인장시험의 경우 하중 재하 시 다수의 미세균열을 동반하기 때문에 변형 경화현상을 보여 인장거동을 측정하는데 적절하지 못하다고 지적하였으며, Choi[3]의 연구에서도 휨인장시험은 인장강도 값을 역해석하여 계산하는 번거로움 뿐만 아니라 인장강도 측면에서도 많은 편차가 발생하는 등의 신뢰성 낮은 결과에 대한 문제점을 지적하였다. 이와 같이 선행 연구에서의 문제점을 해결하기 위한 방안으로 강섬유 보강 UHPC의 인장거동은 직접인장시험으로 진행하는 것이 적절하다고 판단된다.

그러나 직접인장시험 또한 시험방법에 따라 직접인장 시험편의 균열 위치의 불규칙으로 인장강도 값의 편차가 크게 발생할 수 있다[4].

따라서 이러한 단점을 보완하기 위하여 국외의 경우 직접인장강도의 신뢰성 향상을 위해 시험체 중앙부에 노치(notch)를 도입한 시험체를 제작하여 직접인장 시험[5]을 실시하고 있고, 노치를 설치함으로써 중앙부 균열을 유도함으로써 신뢰성 높은 직접인장시험이 가능할 것으로 판단된다.

본 연구에서는 UHPC의 국내 보급을 위해 K연구기관에서 개발한 설계기준강도 120MPa의 UHPC를 대상으로 노치가 설치된 직접인장강도 시험체를 제작하였으며, 시험 검토를 통해 보다 신뢰성 높은 인장강도 값을 제시함으로써, 구조설계 반영 시 신뢰성 있는 참고자료 제공함을 목적으로 하였다. 또한, 본 연구에서는 UHPC의 우연오차의 발생요소를 최대한 제거하기 위하여 시험체 제작 및 측정과정을 일원화 하였으며, 측정값 또한, 통계상으로 신뢰성을 만족할 수 있는 다수의 시험체를 제작하여 시험을 진행하였다.

2. UHPC의 인장강도 특성

2.1 UHPC 직접인장시험의 적합성

초고성능 콘크리트의 활용기술에 대한 연구 보고서[6]에 따르면, UHPC는 강섬유의 작용에 의해 일반 콘크리트에 비해 인장강도가 높고 인장하중에 비해 균열 폭이 작게 형성되는 특성으로 인해 균열 검토가 불필요할 것으로 보이나 비록 균열폭이 작더라도 UHPC의 특성을 활용하기 위해서는 다양한 하중 조건에서의 균열거동을 파악할 필요가 있다고 언급하였으며, UHPC의 연성적인 인장거동으로 인해 사용하중 및 극한하중 하에서의 균열거동이 다를 수 있으므로

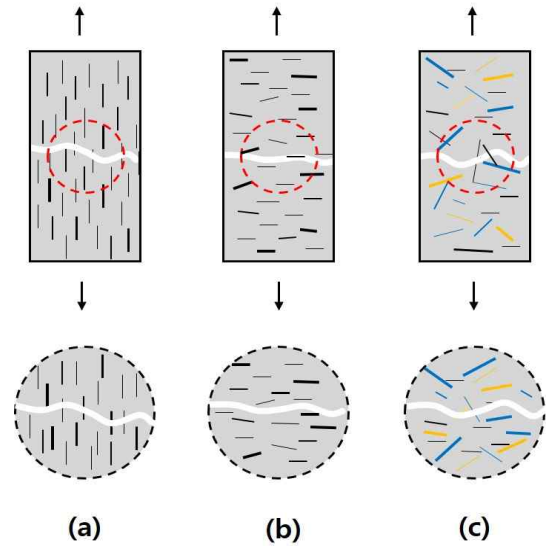


Figure 1. Steel fiber arrangement[7]

직접인장시험을 통해 기존 설계기준으로 UHPC의 균열을 검토하는 것이 타당한지 규명할 필요가 있다고 언급하였다. 또한 직접인장시험과 달리 힘을 통한 인장시험 등의 간접인장시험은 수치해석을 이용한 역해석을 필요로 하기 때문에 번거로운 방법이며 직접인장시험은 일반적으로 콘크리트의 인장거동 측정에는 널리 사용되지 않으나 균열 발생 후 연성 거동을 보이는 UHPC의 특성상 가장 직접적이고 적절한 방법으로 판단하였다.

2.2 UHPC의 강섬유 배열에 따른 인장거동

강섬유를 보강한 콘크리트는 강섬유의 방향에 대한 기층 배열 방향에 따라 역학적으로 그 성질을 변화시킨다. Figure 1은 강섬유를 보강한 콘크리트에서 발생할 수 있는 경우에 대하여 강섬유 배열 상태를 나열해 놓은 것이다.

(a)는 인장성능, 즉 강섬유의 보강 효과를 극대화시킬 수 있는 이상적인 상태이며, (b)는 인장방향과 직각으로 배열된 상태에서 인장응력 초과 시 균열확장을 억제하지 못하는 단점이 예상되고 (c)는 강섬유가 3차원적으로 배열된 상태에서 인장 보강 효과는 (a)에 비해 약 50% 정도로 예상된대[7].

이로써 UHPC는 강섬유 배열에 의해 그 성능의 차이가 발생하며, 강섬유의 배열을 균일하게 제어할 수 없으므로 일반 콘크리트의 인장시험에 비해 높은 시험체간의 편차가 예상된다.

3. 실험개요

3.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고 배합사항은 Table 2와 같다.

설계기준강도는 120MPa 단일수준으로 설정하였으며 강섬유는 직경 0.2mm의 19.5mm 타입 1.0% 및 16.3mm 타입 0.5%를 혼합사용한 1.5%의 혼입조건으로 설정하였다. 시험체의 양생은 20±2℃의 온도에서 수중양생 및 90℃의 온도에서 72시간동안 증기양생 후 소정의 재령까지 수중양생을 실시한 두 조건으로 진행하였다. 측정사항은 재령 28일의 직접인장시험 및 압축강도 측정으로 설정하였다. 또한 배합사항에서 용적 질량은 강섬유 부피 1.5%와 공기량 2.0%를 제외하여 나타내었다.

Table 1. Specimen condition

| Factor | Test Level |
|-----------------------------|---|
| Design strength (MPa) | 120 |
| Steel fiber mixed condition | Diameter 0.2mm, 16.3mm type 0.5% + 19.5mm type 1.0% |
| Specimen Condition | · Water curing to the specified age (20±2℃) · After high temperature steam curing for 72 hours at 90℃, Water curing to the specified age |
| Measurement item | · Notch type direct tensile strength (28 days) · Compressive strength (28 days) |

Table 2. Mix proportions

| Unit amount (kg/m ³) | | | | | | | | |
|----------------------------------|-------|------|------|-------|------|-----|------|-----|
| W | C | BS | SF | S | CKD | SRA | SP | DA |
| 204 | 782 | 137 | 59 | 860 | 234 | 7.8 | 18.0 | 0.7 |
| Volume mass (L) | | | | | | | | |
| W | C | BS | SF | S | CKD | SRA | SP | DA |
| 204 | 248.3 | 47.2 | 23.6 | 330.8 | 86.7 | 7.6 | 17.0 | 0.5 |

W: water, C: cement, BS: Blast Furnace slag, SF: silica fume, S: sand, CKD: cement kiln dust, SRA: shrinkage reducing agent, SP: superplasticizer, DA: defoaming agent

3.2 사용재료

본 연구에서 사용된 분체 중 시멘트는 국내 1종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 고로슬래그는 KS F 2563의 규정에 의해 생산된 B사의 3종 고로슬래그 미분말을 사용하였다. SF는 실리카흙 미분말로써 국내산 및 중국산을 사용하였다. 또한 충전재로는 콘크리트의 밀실한 충전을 위해 CKD를 사용하였다. Table 3~Table 5는 각각 시멘트 및 고로슬래그 미분말, 실리카흙, CKD의 물리·화학적 특성을 나타낸 것이다.

모래는 국내 7호사를 사용하였으며, 콘크리트의 성능개선을 위해 수축저감제, 고성능감수제 및 소포제 등을 사용하였다. 배합에 사용된 강섬유의 특성은 Table 6과 같다.

Table 3. Physical & chemical properties of OPC and blast furnace slag

| Factor | Specific surface area (cm ² /g) | Density (g/cm ³) | Chemical composition (%) | | | | | |
|--------|--|------------------------------|--------------------------|--------------------------------|--------------------------------|------|-----|-----------------|
| | | | SiO ₂ | Al ₂ O ₃ | Fe ₂ O ₃ | CaO | MgO | SO ₃ |
| OPC | 3 413 | 3.15 | 21.0 | 6.4 | 3.1 | 61.3 | 3.0 | 2.3 |
| BS | 3 850 | 2.90 | 34.2 | 14.1 | 0.7 | 6.5 | 6.3 | 1.8 |

OPC : ordinary portland cement, BS : Blast furnace slag

Table 4. Physical & chemical properties of SF

| Type | Chemical composition (%) | | Physical properties | | |
|------|--------------------------|------------------|-------------------------------|------------------------------|---------|
| | SiO ₂ | ZrO ₂ | Fineness (g/cm ²) | Density (g/cm ³) | LOI (%) |
| SF | 94.0 | 3.0 | 80 000 | 2.5 | 0.1 |

Table 5. Physical & chemical properties of CKD

| Factor | LOI (%) | Density (g/cm ³) | Chemical composition (%) | | | |
|--------|---------|------------------------------|--------------------------------|-------|------|------------------|
| | | | Al ₂ O ₃ | MgO | CaO | SiO ₂ |
| CKD | 0.01 | 2.7 | 0.15 | 0.004 | 0.03 | 99.3 |

Table 6. Properties of steel fiber

| Type | Diameter (mm) | Length (mm) | Aspect ratio | Tensile strength (MPa) |
|---------------|---------------|-------------|--------------|------------------------|
| Straight type | 0.2 | 20 | 100 | 2,700 |

* Aspect ratio (Length/Diameter)

3.3 실험 방법

3.3.1 양생

시험체의 양생조건은 수중양생과 고온증기양생으로 설정하였다. 초기양생 방법은 타설 후 1~2일 동안 습윤양생을 실시 후에 탈형을 하는 것으로 하며, 수중양생은 소정의 재령까지 20±2℃ 조건에서 양생을 실시하였다. 또한 고온증기양생의 경우에는 습윤양생 후 72시간 동안 90±2℃의 조건에서 고온증기 양생 후 시험체를 꺼내어 소정의 재령까지 20±2℃의 조건에서 수중양생을 실시하였다.

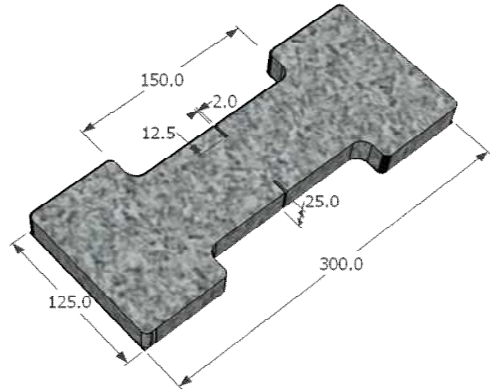


Figure 2. Direct tensile specimen of notch type

3.3.2 직접인장강도 시험방법

본 연구에서 UHPC의 직접인장시험은 K연구원에서 제안하는 K-UHPC의 직접인장 시험방법에 준하여 실시하였다. Figure 2와 같은 규격의 시험체 중앙부에 폭 2mm, 깊이 12.5mm의 노치를 두어 중앙균열 유도를 하도록 하였다.

시험체는 양생조건별로 60개씩으로 1배치당 10개의 시험체를 제작하였다.

직접인장시험은 Figure 3과 같이 양단은 핀으로 고정하여 LVDT를 연결 후 30 ton 용량의 만능재료시험기(UTM)로 진행되었다. 직접인장 데이터는 하중재하에 따른 LVDT의 변위가 입력되도록 하였다.

직접인장 데이터는 하중에 재하하중에 따른 균열개구변위(CMOD)에 의해 나타나며 직접인장강도는 아래의 식에 의해 계산된다.

$$f_{pc} = \frac{P}{bh} \quad \text{-----} \quad (1)$$

여기서, f_{pc} : 직접인장강도(MPa)

P : 최대하중(N)

b, h : 파괴 단면의 폭, 높이

직접인장강도 산정 이전의 하중과 균열개구변위(CMOD) 관계의 일례는 Figure 5와 같으며, 강섬유 혼입 콘크리트의 특성과 동일하게 항복 이후의 잔류응력이 존재하는 것을 확인할 수 있다.

3.3.3 압축강도 시험방법

UHPC의 압축강도는 KS F 2405에 준하여 Ø100×200mm



Figure 3. Direct tensile test



Figure 4. Compressive test

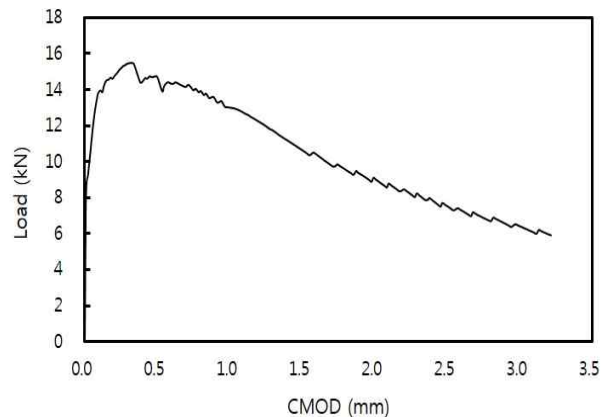
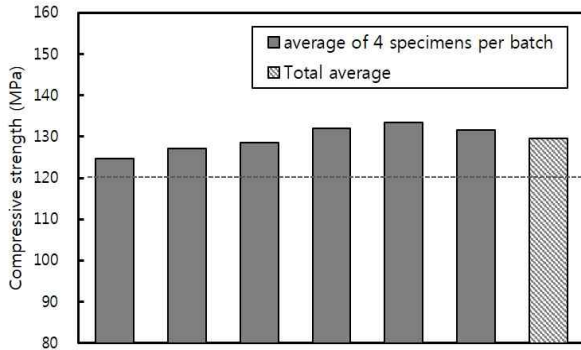


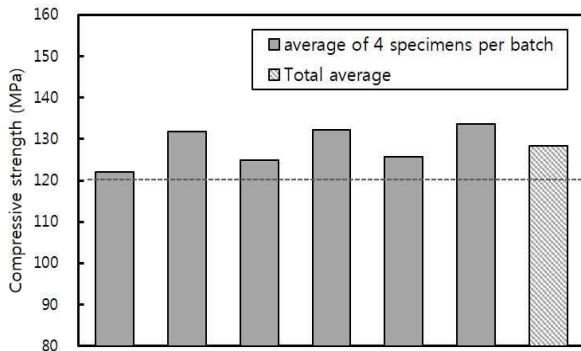
Figure 5. Instance of load-CMOD relation by direct tensile test

규격의 원주형 시험체를 제작하였으며, 매회 배치(batch)마다 4개의 압축강도 시험을 진행하였다.

Figure 4와 같이 압축시험은 2,000kN 용량의 만능재료시험기(UTM)를 사용하였으며, 변위제어 방식으로 하중을 가하여 진행되었다.



(a) Water curing



(b) Steam curing

Figure 6. Compressive strength (28 days)

4. 실험결과 및 분석

4.1 압축강도

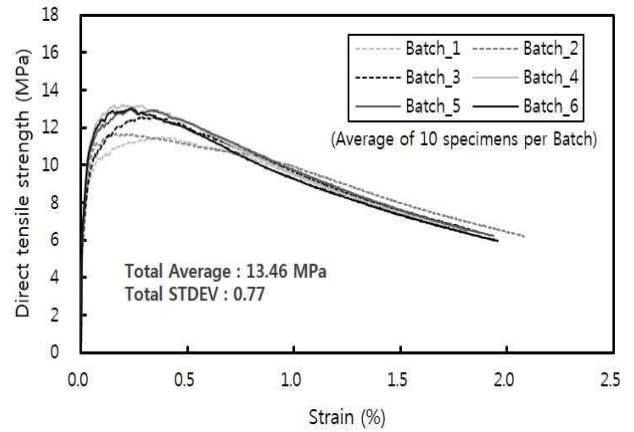
Figure 6은 UHPC의 양생조건별 재령 28일의 압축강도를 나타낸 것이며, 배치당 4개의 시험을 진행하였으며 각각의 배치에 대한 압축강도 값을 평균으로 하여 나타내었다.

본 연구에서 목표로 하는 압축강도는 120MPa로서 수중 및 증기양생의 경우 각 설계기준강도를 평균적으로 전부 만족하는 것으로 나타났다.

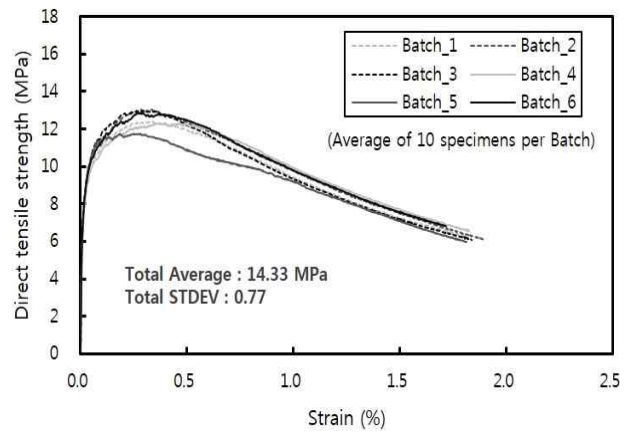
수중양생과 증기양생의 압축강도 평균값의 차이는 미비하나 수중양생의 경우보다 증기양생의 배치별 편차가 다소 높은 것으로 나타났다. 이러한 원인은 단순히 시험간 발생하는 우연오차에 의한 것으로 판단되며, 양생조건에 따른 압축강도의 편차는 거의 영향을 미치지 않을 것으로 사료된다.

4.2 양생조건별 직접인장강도-변형률 관계

본 연구에서의 직접인장 시험체는 1배치당 10개의 시험체를 제작하였으며, 양생조건별 6배치씩 총 120개의 시험체에 대한 직접인장시험을 진행하였다.



(a) Water curing



(b) Steam curing

Figure 7. Direct tensile strength-strain relation (28 days)

Figure 7은 양생조건별 직접인장강도-변형률 관계를 나타낸 것이다. 수중양생의 경우 전체평균은 13.46MPa, 배치별 표준편차는 0.77로 나타났으며, 증기양생의 경우 전체평균은 14.33MPa, 배치별 표준편차는 수중양생과 동일하게 0.77로 나타났다.

평균적으로 볼 때 두 양생조건 of 직접인장강도의 차이가 1MPa 이내의 차이를 보였으며, 증기양생의 특성상 수중양생보다 다소 높은 직접인장강도 값을 나타내었다.

두 조건의 그래프를 볼 때 증기양생의 경우 탄성영역에서의 변형률이 수중양생에 비해 다소 큰 것으로 나타났으며, 이는 증기양생 조건의 초기강도 발현에 따라 초기균열 발생 가능성이 높아졌기 때문으로 판단된다.

4.3 직접인장강도 분포 및 시험체의 균열 위치

Figure 8은 수중양생을 기준으로 각각의 시험체는 점,

전체평균 및 배치별 평균은 실선으로 표시하여 직접인장강도의 분포를 나타낸 것이다. 각각의 시험체는 12~16 MPa 까지 다소 큰 범위에 산발적으로 나타나며, 평균에서 크게 벗어나는 시험체가 다수 확인되었다. 그러나 배치별 평균으로 직접인장강도를 산정했을 때 평균과 1MPa 범위 내의 차이를 나타냈다. 결과적으로 직접인장강도의 값을 나타낼 때 각각의 배치에 따른 평균을 사용하는 것이 신뢰성 향상에 기여할 것으로 판단된다.

Figure 10은 Figure 9와 같이 직접인장 시험체 중앙부로부터 1mm 간격의 선을 표시하여 시험 후 균열 위치에 대한 빈도를 나타낸 것이다. 결과적으로 5mm 이하에서 균열이 가장 높은 빈도를 나타내었으며, 대부분 10mm 이하에서 균열 및 파괴가 발생하는 것을 확인하였다. 또한 양생조건에 관계 없이 20mm 내에서 모두 균열이 발생하였으며, 노치타입 직접인장 시험체는 중앙균열의 유도 및 작은 범위 내에서의 파괴가 이루어 질 것으로 판단된다.

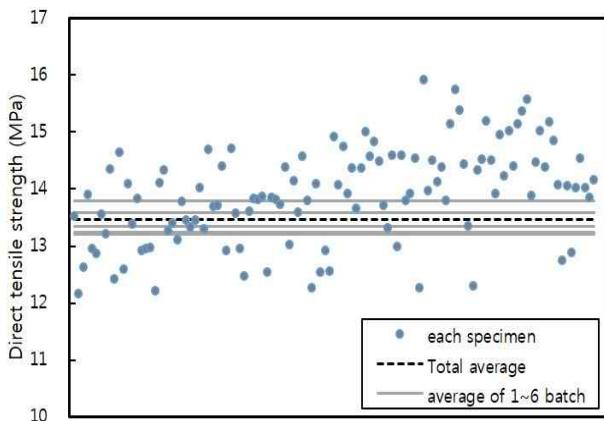


Figure 8. Distribution of direct tensile strength

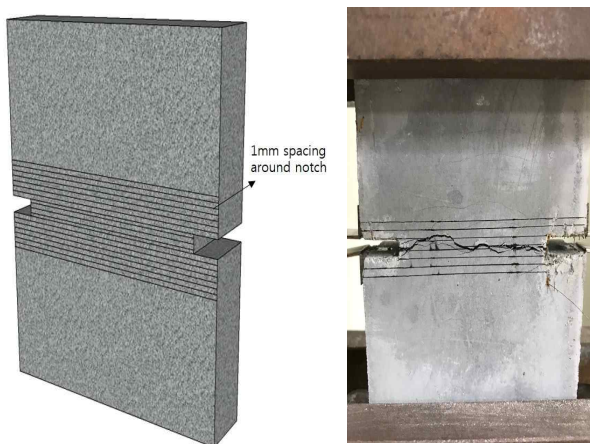


Figure 9. Specimen's spacing and crack

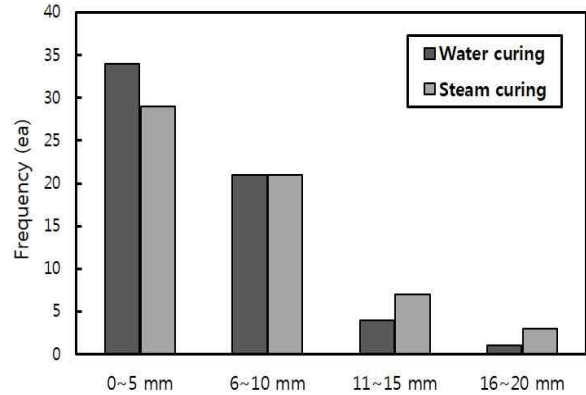


Figure 10. Frequency of crack location

4.4 직접인장강도 신뢰구간 추정

Figure 11은 통계 프로그램에 의한 직접인장강도의 양생 조건별 95% 신뢰구간을 나타낸 것이며, 정규성 검정치는 Table 7과 같다.

Table 7. Normality test value

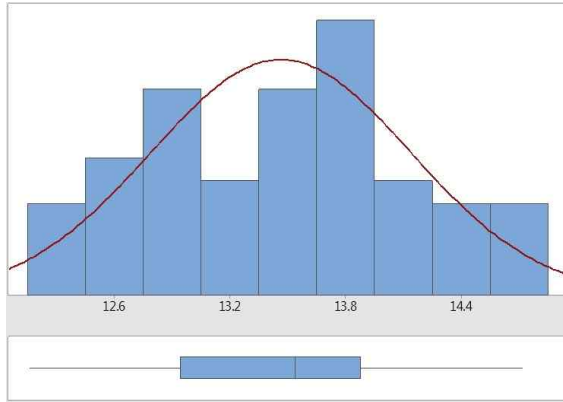
| Factor | Curing condition | |
|--|-------------------|-------------------|
| | Water curing | Steam curing |
| Variance | 0.456 | 0.599 |
| 95% confidence interval for average | 13.29 < X < 13.64 | 14.14 < X < 14.55 |
| 95% confidence interval for standard deviation | 0.57 < σ < 0.83 | 0.65 < σ < 0.95 |

분산은 수중 및 증기양생에서 각각 0.456, 0.599로 나타났으며, 평균에 의한 95% 신뢰구간은 수중양생의 경우 13.29~13.64로 0.35의 신뢰구간 범위를 나타내었으며, 증기양생의 경우 14.14~14.55로 0.41의 신뢰구간 범위를 나타내었다. 표준편차에 의한 95% 신뢰구간은 수중양생의 경우 0.57~0.83, 증기양생의 경우 0.65~0.95로 각각 0.26, 0.30의 신뢰구간 범위를 나타내었다.

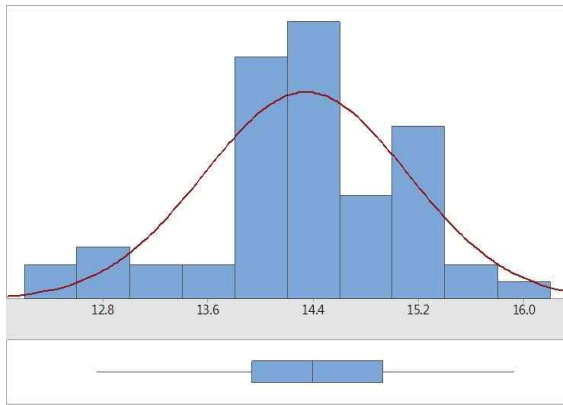
결과적으로 직접인장 값의 발생 구간은 증기양생의 경우가 높은 값의 분포에서 나타나지만 신뢰성 측면에서는 수중양생의 경우가 높게 나타났다. 그러나 양생조건별 신뢰구간의 범위는 크게 차이가 나지 않은 것으로 나타났다.

종합적으로 설계기준강도 120MPa 시험체에 대한 직접인장강도의 오차범위는 수중양생의 경우 13.45±0.75MPa, 증기양생의 경우 14.35±0.75MPa 정도로 볼 수 있다.

직접인장 시험의 신뢰성 측면으로 볼 때 전반적으로 강도 값의 분포가 크지 않으며, 작은 범위 내에서의 강도 값은



(a) Water curing



(b) Steam curing

Figure 11. Confidence interval of direct tensile strength (95%)

나타내는 것으로 판단된다. 본 연구에서 진행된 직접인장시험은 시험체 개수에 대하여 자유도가 30 이상이므로 측정불확도의 측면에서 검증할 수 없으나 양생조건별 60개 다수의 시험체를 대상으로 시험을 진행함으로써 신뢰성 높은 직접인장강도 값을 나타낸 것으로 판단된다.

5. 결 론

본 연구에서는 강섬유 혼입률 1.5%의 노치타입 직접인장 시험체에 대한 다량의 시험을 실시하였으며, 역학적 특성 및 신뢰구간에 대하여 검토하였으며, 결과는 다음과 같다.

- 1) 압축강도는 양생조건별 모두 설계기준강도 120MPa를 만족하였으며, 배치별 편차가 크지 않은 것으로 나타났다.
- 2) 직접인장강도-변형률 관계를 볼 때 배치별 평균 및 표준편차는 수중양생의 경우 13.46MPa, 0.77이며,

증기양생의 경우 14.33MPa, 0.77로 나타났다. 결과적으로 양생조건별 평균적인 차이는 1MPa이며, 표준편차는 동일한 값을 나타내었다.

- 3) 직접인장강도 분포에서 강도 값을 배치별 평균으로 나타내었을 때의 결과가 개별적인 값에 비해 전체 평균에 가까운 직접인장강도 값을 나타내었다.
- 4) 균열 위치에서 시험체는 대부분 시험체 중앙부로부터 10mm 이하에서 균열이 이루어지며, 모든 시험체가 20mm 이내에서의 균열 및 파괴를 나타내었다.
- 5) 신뢰구간 분석 결과 평균 95% 신뢰구간에서 수중양생의 경우 0.35, 증기양생의 경우 0.41의 신뢰구간 범위를 나타내었으며, 표준편차에 의한 95% 신뢰구간에서는 수중양생 및 증기양생에서 각각 0.26, 0.30의 신뢰구간 범위를 나타내었다. 양생조건별 큰 차이가 나타나지 않으며, 신뢰성 높은 직접인장 값이 측정된 것으로 사료된다.

종합적으로 볼 때 120MPa 직접인장강도의 오차범위는 수중양생의 경우 13.45 ± 0.75 MPa, 증기양생의 경우 14.35 ± 0.75 MPa 정도로 제시할 수 있을 것으로 판단된다.

요 약

본 연구에서는 UHPC의 인장성능을 파악하기 위해 직접인장시험을 계획하였으며, 직접인장시험의 문제점으로 나타나는 균열 부위의 불규칙성을 시험체 중앙부 노치 도입을 통해 보완하였다. 또한 직접인장 시험 값의 편차 발생을 줄이기 위해 배치별로 구분한 다량의 시험체를 제작하여 신뢰성 높은 직접인장강도 값에 대한 참고자료로서 제시하는 것을 목적으로 하였다. 또한 현장 적용에 가장 적합한 강섬유 혼입률 1.5%에 대한 설계기준강도 120MPa의 배합을 양생 조건을 두어 시험체의 역학적 특성 및 신뢰구간을 검토하였다. 결과적으로 압축강도 및 직접인장강도의 배치별 평균에 대한 편차는 큰 차이를 나타나지 않았으며, 직접인장 시험시 균열 위치는 모두 20mm 이내에서 발생하였다. 직접인장강도의 95% 신뢰구간에서는 평균 및 표준편차에서 범위가 상당히 작으며, 양생조건별 큰 차이가 발생하지 않았다. 결과를 통해 안전성 높은 직접인장시험이 이루어졌으며, 배치별 시험체 제작 및 시험진행에 따른 신뢰성 높은 결과가 도출되었다고 판단된다.

키워드 : UHPC, 강섬유, 직접인장시험, 신뢰성 검토

Acknowledgement

This research was supported by Smart Civil Infrastructure Research Program funded by Ministry of Land, Infrastructure and Transport(MOLIT) of Korea government and Korea Agency for Infrastructure Technology Advancement(KAIA) (16AUDPBO6962504000000).

References

1. Kim JM, A study on basic properties of ultra high-strength concrete according to kinds of cement and admixture [Master's thesis], [Cheonan (Korea)]: Dankook University; 2008, 85 p.
2. Kim DJ, Measurement of tensile properties of fiber reinforced concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, 2009 Nov;21(6):94-7.
3. Choi JG, A study on the mechanical properties of steel fiber reinforced ultra high strength concrete [Master's thesis], [Chungju (Korea)]: Korea National University of Transportation; 2016, 88 p.
4. Park JW, Lee GC, Effect of compressive strength and curing condition on the direct tensile strength properties of ultra high performance concrete, Journal of the Korea Institute of Building Construction, 2017 Apr 20;17(2):175-81.
5. AFNOR, NF P 18-470, France: AFNOR; 2016, 96p.
6. Super Bridge 200 Fourth Year Report [Design Specific Technology for Ultra High Performance Concrete], Gyeonggi (Korea): KICT; 2010, 107 vol, Korean.
7. Ahn YR, Effects of amorphous metal fiber on cement composites [Master's thesis], [Seoul (Korea)]: Korea University; 2013, 85 p.