

압축강도 및 양생조건에 따른 초고성능 콘크리트의 직접인장강도 특성

Effect of Compressive Strength and Curing Condition on the Direct Tensile Strength Properties of Ultra High Performance Concrete

박 지 웅 이 건 철*

Park, Ji Woong Lee, Gun Cheol*

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

Abstract

The purpose of this study is evaluating the characteristics of tensile strength of UHPC and examining tensile performance of notched specimens by direct tensile test. For test variables, 120, 150, and 180MPa of target design standard strength were aimed at. With general water curing and 90°C high temperature steam as curing conditions, the properties were reviewed. Overall, it was represented that the specimens of notch-type direct tensile strength concrete was effective in inducing central cracks compared with existing direct tension specimens. Through this, it was judged that data construction with high reliability was possible. Above all, in a graph of direct tensile strength and strain, in the case of steam curing at high temperature, there was great difference of initial tensile strength compared with water curing. As passing of ages, an aspect that the difference gradually decreased was shown. Maximum tensile strength was found to increase steadily with increasing age for all target design strengths in water curing, in the case of steam curing, the tendency to increase significantly due to the initial strength development effect at 7 days of age. The initial crack strength increases with age in case of underwater curing, in the case of steam curing, it was higher than that of water curing in 7 days, while the strength of 28 days was lowered. In this part, it is considered necessary to examine the arrangement condition of the steel fiber.

Keywords : UHPC, notch type, direct tensile strength test, compressive strength, curing condition

1. 서 론

최근 건설기술의 발달과 건물의 고층화 경향으로 인하여 100MPa 이상의 초고강도 콘크리트의 사용량이 증가하고 있다. 이를 이용한 구조물의 장점에는 구조물의 내구성이 증대되고, 부재의 단면을 축소할 수 있어 넓은 유효공간 확보가 가능하다는 점과 구조체의 자중을 경감하는 효과 등이 있다.

그러나 초고강도 콘크리트는 높은 압축강도에 비해 인장강도, 휨강도, 인성 등에 취약하며 균열에 대한 저항성이

작고, 무엇보다 초고강도 콘크리트는 최대 응력에 대한 취성적인 파괴의 본질적인 문제점이 있다. 이러한 문제점을 보완하기 위해 취성파괴를 연성파괴로 유도하는 강섬유 보강 콘크리트에 대한 연구가 진행되고 있다. 초고강도 섬유 보강 콘크리트(UHPC)의 인장강도 시험에는 휨인장 시험과 직접인장 시험 등이 있으며, 휨인장 시험은 안정적이지만 측정값을 이용하여 직접인장강도를 역해석하는 방식으로 수렴과정이 복잡하며, 수렴된 값 또한 적다는 단점을 가지고 있다. 이와 관련하여 Kim[1]의 연구 내용에서는 휨시험은 인장하중 시 다수의 미세균열을 동반하여 변형 경화 현상을 보이므로 인장 거동을 측정하는 데에 적절하지 못하며 미세균열의 폭을 측정하기 어렵다는 단점이 있다고 지적하였다. 또한 Choi et al.[2]의 연구에서 설계강도 150MPa의 휨인장강도가 120MPa의 경우 보다 낮게 측정되는 등의 오류가 나타

Received : February 15, 2017

Revision received : February 27, 2017

Accepted : February 28, 2017

* Corresponding author : Lee, Gun Cheol

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

©2017 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

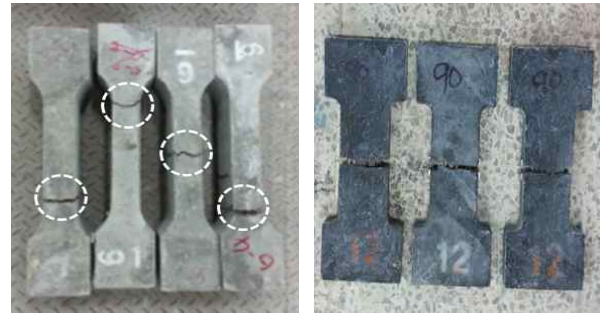
났고, 직접인장시험의 결과 활용이 휨인장시험 보다 신뢰성이 높다고 보고하는 등 직접인장시험이 상대적으로 신뢰성이 높은 것으로 보고하고 있다. 그러나 직접인장 균열 부위가 불규칙하다는 문제점이 지적되었다.

따라서, 본 연구에서는 초고성능 콘크리트의 직접인장강도 시험 시 발생하는 오차를 최소화하기 위하여 인장강도 시험체의 중앙부에 노치를 설치한 직접인장 시험을 실시하였으며, 목표압축강도 및 양생조건별 시험체를 제작하여 UHPC 직접인장 시험체의 파괴양상 및 인장성능에 대하여 검토하였다.

2. 직접인장시험 관련 기존 연구 고찰

Yang[3]의 강섬유 보강 콘크리트 부재의 휨인장시험 연구에서는 80MPa 이하에서는 균열 이후 연성거동 특성을 향상시키는 것으로 나타났으나 150MPa 이상의 부재에서는 구조거동 해석에 관한 연구가 상대적으로 미비하여 휨강도를 예측하는 데 한계가 있는 것으로 보고하였다. 또한 도로 교 표준 시방서에 따르면 섬유 보강 콘크리트의 인장강도는 KS F 2423 (할렬인장시험) 또는 직접인장시험에 의해 구하여야 한다고 명시되어 있으나[4], 할렬인장 시험은 초기균열을 균열 탐색 장비를 사용하지 않는 이상 찾아내는 데에 많은 어려움이 따르는 것으로 나타났다. 휨인장 시험은 섬유 보강 콘크리트 인장시험에 많은 어려움이 있으며, 직접인장 시험은 인발과정에서 시험체의 슬립현상 등의 문제로 휨인장 시험을 주로 실시하며, 이를 기반으로 인장강도를 추정해 왔다. 그러나 휨인장강도시험을 통해 인장강도를 추정하는 과정에는 여러 가정 조건이 존재하여 신뢰성이 떨어질 수 있기 때문에 직접인장시험에 대한 시도가 계속되고 있다. 한편 프랑스 규정에서는 이러한 문제점에 착안하여 직접인장시험체에 노치를 설치하여 시험을 실시하는 방안을 제시하고 있다[5]. Figure 1은 노치 유무에 따른 직접인장시험체의 파괴양상 일례를 나타낸 것으로, 무노치타입 시험체의 경우 멀티크랙이 다수 발생하여 안정적인 시험에 대한 어려움이 나타났으나, 노치타입 시험체의 경우는 중앙균열 유도로 인하여 멀티크랙을 최소화함으로써 비교적 안정적이며 신뢰성 높은 시험이 가능한 것으로 판단된다.

이는 Lee et al.[6]의 노치 유무에 따른 K-UHPC의 직접인장 시험결과에서는 노치가 있음에도 불구하고 시험체의 두께가 얇은 것의 강도가 조금 더 우수한 것으로 보고하였다.



(a) Without notch (b) With notch

Figure 1. Example of failure shape with and without notch

3. 실험 개요

3.1 실험 계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고 배합사항은 Table 2와 같다. 실험계획의 시험체 조건에서 설계강도는 120, 150, 180MPa으로 하였으며 강섬유 혼입조건은 이전 연구에서의 최적 배합조건인 직경 0.2mm의 길이 16mm 타입 0.5%와 20mm 타입 1.0%로 하였다[2]. 양생조건은 수중양생과 고온증기양생으로 계획하였으며 측정사항으로는 노치타입 직접인장시험의 직접인장강도 측정으로, 측정재령은 7, 28, 56 및 91일로 계획하였다.

Table 1. Experimental plan

Factor	Test Level
Design strength (MPa)	120, 150, 180
Steel fiber mixed condition	Diameter 0.2mm, 16mm type 0.5% + 20mm type 1.0%
Specimen Condition	·Water curing to the specified age (20±2°C)
Curing condition (°C)	·After high temperature steam curing for 48hours at 90°C, Water curing to the specified age
Measurement item	Notch type direct tensile strength (7, 28, 56, 91 Days)

Table 2. Mix proportions

Design strength (MPa)	Unit amount (kg/m ³)				
	W	Pmix	S	SP	AA
120	209.0	1,258.8	846.9	17.7	0.7
150	180.4	1,287.9	866.5	23.6	0.9
180	158.4	1,273.5	856.8	51.9	2.1

[Note] W : unit content of water, Pmix : pre mixing binder, S : sand, SP : superplasticizer, AA : antifoaming agent

3.2 사용재료

본 연구에서 사용된 프리믹싱 결합재는 시멘트, 고로슬래그미분말, 지르코늄 미분말, 충전재 및 기타 성능 개선재료로 구성되었다. 시멘트는 국내 A사의 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 고로슬래그미분말은 KS F 2563의 규정에 따라 생산된 B사의 3종 고로슬래그미분말을 사용하였고, 지르코늄미분말은 C사에서 제조된 것을 사용하였다. 시멘트 및 고로슬래그미분말과 지르코늄미분말의 물리·화학적 성질은 Table 3과 4와 같고 배합에 사용된 강섬유의 성질은 Table 5와 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	21.00	6.40	3.12	61.33	3.02	2.30
BS	3,850	2.13	34.20	14.10	0.72	6.49	6.25	1.84

[Note] OPC : ordinary portland cement, BS : Blast furnace slag

Table 4. Physical-chemical properties of zirconium micropowder

Type	Chemical composition (%)				Physical properties		
	SiO ₂	ZrO ₂	MgO	LOI	Specific surface area (cm ² /g)	Water vapor adsorption (cm ³ /g)	Water vapor desorption (cm ³ /g)
	Zr	95.60	3.90	0.02	1.01	8.76	10.80

Table 5. 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 분류된다. 초기양생 방법은 타설 후 1~2일 동안 습윤양생을 실시 후에 탈형을 하는 것으로 하며 수중양생은 습윤양생

후 소정의 재령까지 20±2℃ 조건에서 양생을 실시하였다. 또한, 고온증기양생의 경우에는 습윤양생 후 2~3일 동안 90±2℃의 조건에서 고온증기 양생 후 소정의 재령까지 20±2℃의 조건에서 수중양생을 실시하였다.

3.3.2 직접인장강도시험

본 연구의 초고강도 섬유보강 콘크리트의 직접인장시험은 K연구원에서 제안하는 시험방법에 의거하여 실시하였다. 시험체는 중앙부 균열을 유도하기 위해 Figure 2와 같이 폭 2mm, 깊이 12.5mm의 노치를 도입하였으며, 인장시험장치 사용시 공시체의 형상 및 시험하중에 적합한 부착용 그립을 사용하고, 게이지그립은 하중의 작용선과 시험체의 축선이 일치하도록 한다. 양단의 그립장치에서 한단은 고정, 다른 한단은 핀(힌지)조건으로 재하가 가능해야한다. 변위측정장치는 공시체의 변위를 1/1000mm 이상의 정도까지 측정할 수 있어야 하며, 중앙부 노치부위에 위치시킨다. 변위측정장치를 노치 부위의 게이지그립에 연결한 모습은 Figure 3과 같다.

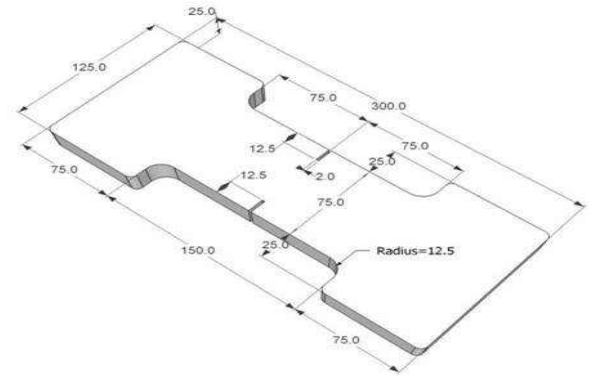


Figure 2. Notch type direct tensile specimen

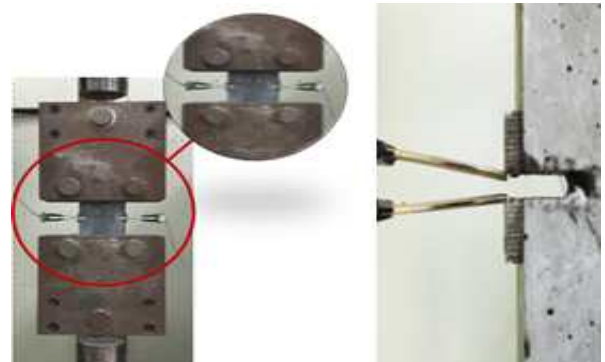


Figure 3. Gauge grib connection of notch section

3.3.3 직접인장강도 산정법

- 1) LVDT에 의해 얻어진 데이터를 통하여 응력-변형률 곡선을 산출한다. 여기서 변형률은 시험체 상하부 고정 부위 150mm에 대한 평균변위 값으로 산출하며, 노치의 폭은 계산값에 반영하지 않는다.
- 2) 응력-변형률 곡선에서 첫 변화 구간에서 기울기 값이 0인 지점을 초기균열 강도 지점으로 하고, Y축이 가장 높은 지점을 최대 직접인장강도 지점으로 하며 그 때의 신장량과 변형 능력을 산출한다.
- 3) 최대 직접인장강도는 직접인장 시험에서 얻어진 최대 하중 값을 사용하여 다음의 식에 의해 산출한다.

$$f_{pc} = \frac{P}{bh}$$

여기서, f_{pc} : 직접인장강도(MPa)

P : 최대하중(N)

b, h : 파괴 단면의 폭 및 높이(mm)

4. 실험결과 및 분석

4.1 압축강도 및 직접인장강도-변형률 곡선

Figure 4는 UHPC의 설계기준강도별 28일 압축강도를 나타낸 것이다. 본 연구에서 목표로 하는 압축강도는 120 MPa, 150MPa 및 180MPa로서 증기양생의 경우 각 설계기준강도별 목표치를 전부 만족하는 것으로 나타났다. 한편 수중양생의 경우 180MPa가 목표치를 약간 하회하는 것으로 나타났으나, 관리재령을 91일 등 장기재령으로 관리할 경우 목표치를 만족할 것으로 사료된다.

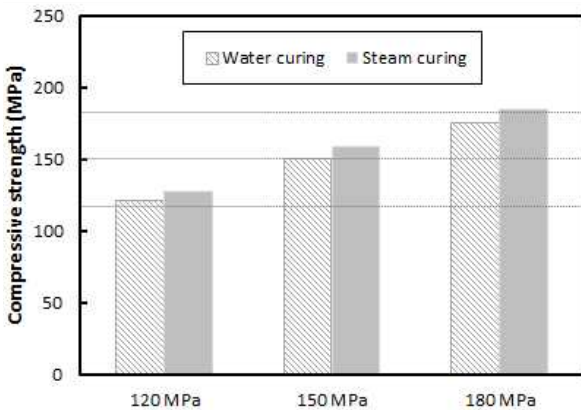


Figure 4. Average compressive strength by design strength

Figure 5 및 Figure 6은 노치타입 시험체의 파단 전후와 중앙부 파단에 의한 동일한 조건 3개 시험체의 직접인장강도-변형률 그래프를 나타낸 것이다. 중앙 균열이 발생한 시험체는 노치를 중심으로 5~10mm 이내에서 파괴되는 양상을 보였으며, 직접인장강도-변형률 관계 곡선의 형상이 시험체간 유사한 경향을 나타내었다.



Figure 5. Before and after fracture of specimen

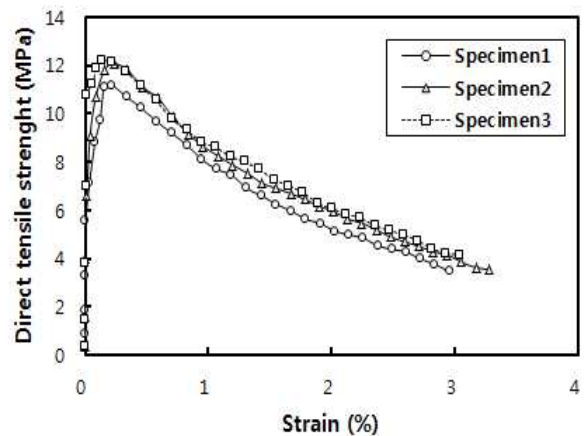
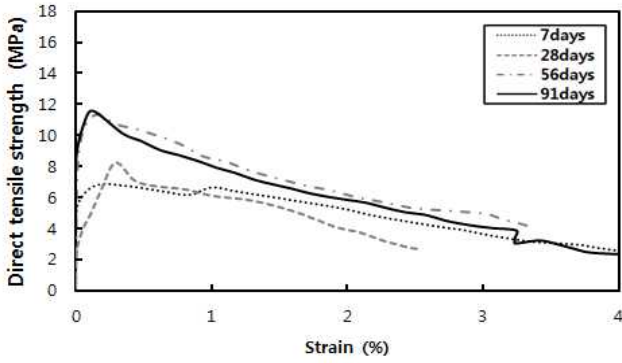


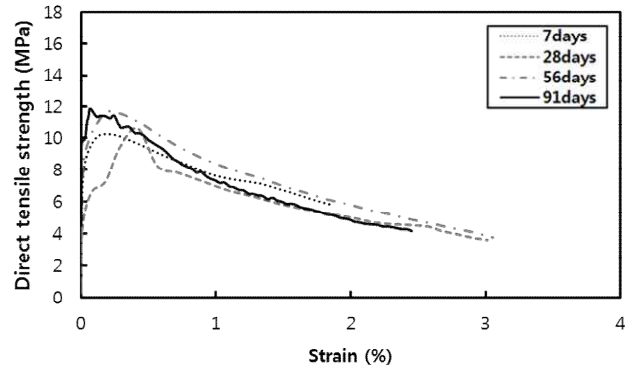
Figure 6. Tendency of direct tensile strength-strain relation (120MPa samples)

4.2 양생조건 및 재령별 직접인장강도-변형률 관계

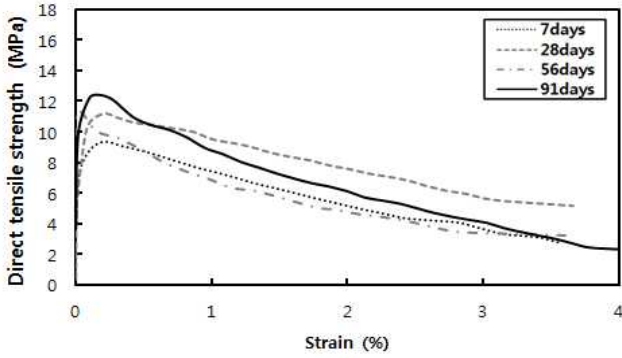
Figure 7 및 Figure 8은 각각 설계강도 별 수중양생과 고온증기양생 조건에서의 직접인장강도-변형률 관계를 재령에 따라 나타낸 것이다. 전반적으로 재령 28일에서 56일로 갈 때의 최대직접인장강도의 증진이 가장 높은 것으로 나타났으며 그 후 재령의 경과에 따라 강도는 상승하나 56일에서 91일로 접어들 때 강도 증진이 상당히 낮아지는 것으로 나타났다. 본 실험 결과에서 유추해볼 때, 장기재령에 따른 직접인장강도 값은 재령 56일 이전에 대부분 결정되는 것으로 추측된다. 또한 설계강도 증가에 따라 최대인장강도 또한 설계강도 증가에 따라 최대인장강도 지점이 높아지는 것을 볼 수 있다.



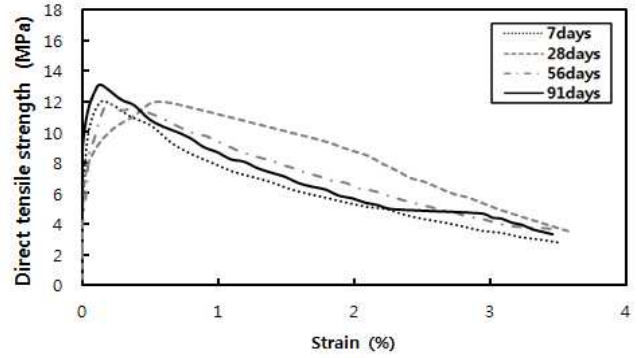
(a) 120MPa



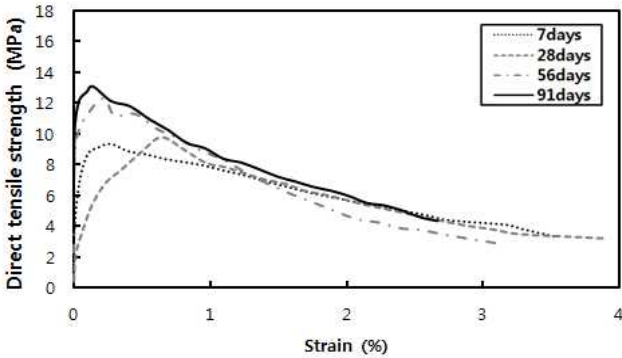
(a) 120MPa



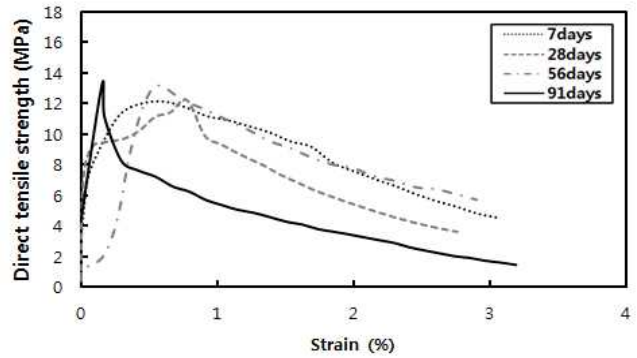
(b) 150MPa



(b) 150MPa



(c) 180MPa



(c) 180MPa

Figure 7. Water curing direct tensile strength-strain relation

Figure 8. Steam curing direct tensile strength-strain relation

양생조건에 따른 인장강도는 대체적으로 수중양생의 최대직접인장에 비해 고온증기양생의 경우가 초기재령에서 큰 강도 값을 나타내었다. 고온증기양생 조건에서는 재령별 최대직접인장강도 값의 차이가 수중양생에 비해 크지 않은 것으로 나타났다. 한편 180MPa의 경우 두 양생조건에서 다른 강도의 경우보다 변형률이 불규칙하며 150MPa와의 강도 차이가 크게 차이가 나지 않는 것으로 보아 점차적인 고강도화가 진행될수록 인장강도 값의 차이가 미비할 것으로 판단되며 추가적인 직접인장 시험을 통해 설계강도 증가에 따른

인장강도 증가의 경향을 파악해야 할 것으로 사료된다.

4.3 최대인장강도와 초기균열강도

Figure 9~11는 목표설계강도 별 최대인장강도 및 초기 균열강도를 나타낸 것이다. 목표설계강도별 최대인장강도는 수중양생의 경우 모든 목표설계강도가 재령이 증가할수록 일정하게 증가하는 것으로 나타났다. 반면, 증기양생의 경우 수중양생에 비해 7일 재령의 직접인장강도가 초기강도 발현 효과로 상당히 증가하는 것으로 나타났는데, 120MPa

의 경우 2.43MPa가, 150MPa의 경우 2.68가, 180MPa의 경우 2.82MPa가 증가한 것으로 나타났다. 28일 재령의 경우 최대직접인장강도는 120MPa에서 0.26MPa, 150MPa의 경우 0.77MPa, 180MPa의 경우 0.21MPa로 수중양생과 증기양생과의 차이가 아주 미비한 것으로 나타났다.

초기균열강도는 수중양생의 경우 재령이 증가할수록 초기 균열강도가 증가하는 것으로 나타났으며, 증기양생의 경우 120, 150, 180MPa에서 재령 7일 강도가 각각 2.7MPa, 2.51MPa, 0.68MPa 정도로 수중양생에 비해 높은 것으로 나타났다.

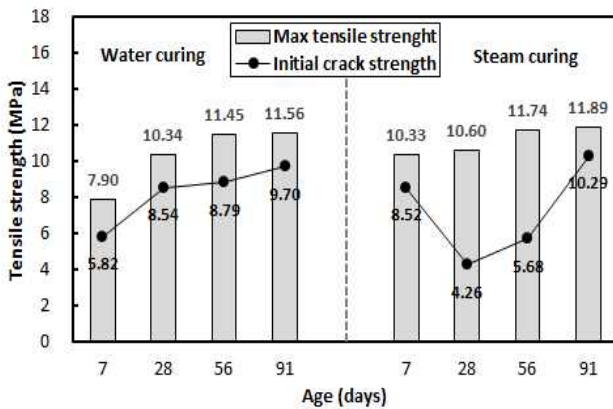


Figure 9. Maximum tensile strength & Initial crack strength (120MPa)

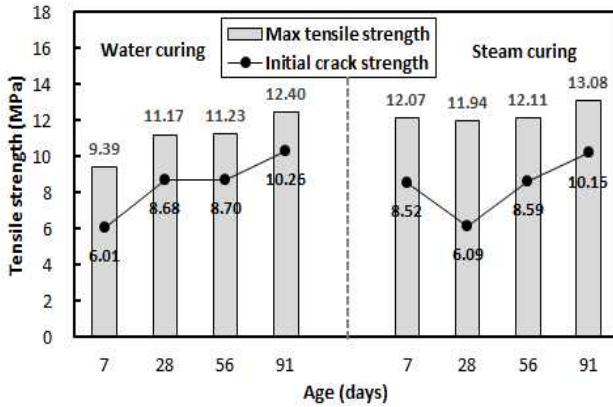


Figure 10. Maximum tensile strength & Initial crack strength (150MPa)

이처럼 증기양생을 실시한 시험체의 초기균열강도가 매우 높게 나타난 반면 재령 28일 강도는 저하하는 경향을 나타내었는데, 이는 강섬유의 배열상태 등으로 인한 오차로 사료되며 이 부분에 대한 검증에 대해서는 보다 구체적인 시험을 통한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

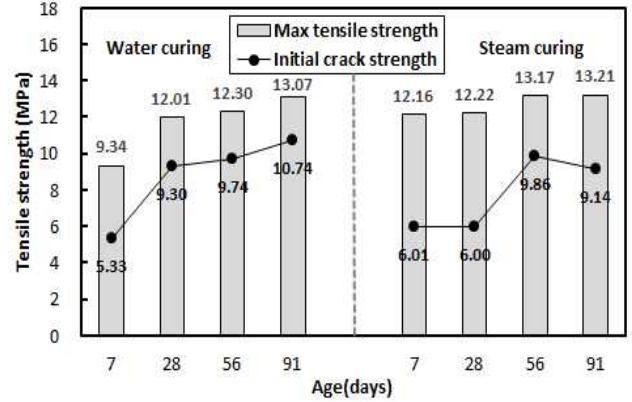


Figure 11. Maximum tensile strength & Initial crack strength (180MPa)

5. 결 론

본 연구에서는 노치타입의 직접인장시험을 통해 설계 강도, 양생방법, 재령에 따른 직접인장강도와 변형률의 관계와 이에 따른 최대인장강도와 초기균열강도의 관계를 파악하였으며, 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 직접인장 시험 이전의 압축강도 결과는 평균적으로 설계강도에 만족하는 것으로 측정되었다. 또한 중앙 균열 유도로 인해 파괴가 이루어진 시험체는 노치를 기준으로 5~10mm 이내에서 파괴되는 양상을 보였으며, 직접인장강도-변형률 곡선이 유사한 형태의 모습을 보이는 것을 확인하였다.
- 2) 양생방법 및 재령 측면에서의 결과를 비교할 때, 재령에 따른 강도 상승폭이 초기에는 고온증기양생의 경우가 상당히 높은 값을 나타내었으나 장기재령으로 갈수록 수중양생의 경우와 차이가 미비해지는 것을 확인하였다. 재령에 대한 측면으로만 보았을 때 두 가지 양생 방법에서 모두 전반적으로 56일에서 직접인장강도 값이 거의 결정되는 것으로 판단된다.
- 3) 최대인장강도에서는 최대인장강도의 경우 재령 7일에서 수중양생에 비해 증기양생이 초기강도 발현 효과로 인해 목표설계강도별(120, 150, 180MPa)로 각각 2.43MPa, 2.68MPa, 2.82MPa의 강도 증가를 나타낸 반면 재령 28일에서는 미비한 차이를 나타내었다.
- 4) 초기균열강도는 수중양생의 경우 재령이 증가할수록 증가하였으며, 증기양생의 경우 120, 150, 180MPa

에서 재령 7일 강도가 각각 2.7MPa, 2.51MPa, 0.68MPa 정도로 수중양생에 비해 높은 것으로 나타난 반면에 28일에서는 저하하는 경향을 나타내었다.

5) 시험체의 파괴양상을 확인한 결과 본 연구에서 채택한 노치타입의 직접인장시험이 비교적 인장성능을 잘 반영하고 있는 것으로 사료되나, 인장강도는 압축강도와 달리 강도가 작기 때문에 시험체의 형상, 지점조건, 노치 등이 시험결과에 미치는 영향이 크므로 향후의 연구에서는 다수의 시험체 및 변수를 통한 재현성 시험을 실시할 필요가 있다.

요 약

본 연구는 초고강도 섬유보강 콘크리트의 인장강도 특성을 파악하기 위한 일환의 연구로서 직접인장시험에 의한 노치가 도입된 시험체의 인장성능을 파악하기 위하여 시험변수는 목표 설계기준강도 120, 150 및 180MPa를 대상으로 하였으며, 양생조건을 일반 수중양생과 90℃ 고온증기 양생 조건으로 하여 그 특성을 검토하였다. 전반적으로 노치타입의 직접인장강도 시험체는 기존 직접인장 시험체에 비해 중앙균열 유도가 효과적인 것으로 나타났으며 데이터를 직접 인장강도-변형률 그래프로 나타낸 결과 먼저 재령 측면에서는 28일에서 56일로 진행할 때의 강도 상승이 가장 높은 것으로 측정 되었으며, 양생조건 측면에서는 고온증기 양생의 경우 수중양생의 비해 초기 강도가 높으나 장기 재령에 가까워질수록 두 가지 양생조건인 직접인장강도 차이가 미비해지는 것을 알 수 있었다. 최대인장강도는 수중양생의 경우 모든 목표설계강도가 재령이 증가할수록 일정하게 증가하는 것으로 나타났으며, 증기양생의 경우 재령 7일에서 초기강도 발현 효과로 인해 상당히 증가하는 경향을 나타내었다. 초기균열 강도는 수중양생의 경우 재령경과에 따라 증가하며, 증기양생의 경우 7일에서 수중양생에 비해 높은 것으로 나타난 반면에 28일 강도는 저하하는 경향을 나타내었다. 이부분에 대해서는 강섬유의 배열상태 등의 검토가 필요할 것으로 사료된다.

키워드 : UHPC, 노치타입, 직접인장강도, 압축강도, 양생조건

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 (KALA) (16AUDPB06962504000000).

References

1. Kim DJ, Measurement of tensile properties of fiber reinforced concrete, Journal of the Korea Concrete Institute, 2009 Nov;21(6):94-7.
2. Choi JG, Lee GC, Lee GY, Park DC. Characteristics of flexural behavior of high strength concrete according to the mixture rate of steel fiber. Proceeding of Korea Institute of Building Construction; 2015 May 28-29; Yeosu, Korea, Seoul (Korea): Institute of building Construction; 2015. p. 82-3.
3. Yang IH, Kim KC, Joh CB, Flexural strength of hybrid steel fiber-reinforced ultra-high strength concrete beams, Journal of the Korea Concrete Institute, 2015 Jun;27(3):280-7.
4. Ministry of Land, Infrastructure and Transport. Highway Bridge Standard Specification, 521st ed, Korea: Ministry of Land, Infrastructure and Transport; 2016, Chapter 3-8, Fiber reinforced concrete; p. 199.
5. AFNOR, NF P 18-470. France: AFNOR; 2016. 96p.
6. Lee JW, Joh CB, The effect of specimen size & shape on tensile strength of K-UHPC. Proceeding of Korea Concrete Institute; 2012 May 2-4; Gyeongju, Korea, Seoul (Korea): Korea Concrete Institute; 2012. p. 97-8.