



## 초고성능 콘크리트의 양생 조건에 따른 강도 발현 특성

박종섭<sup>1)</sup> · 김영진<sup>2)</sup> · 조정래<sup>1)</sup> · 전세진<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>한국건설기술연구원 SOC성능연구소 <sup>2)</sup>한국건설기술연구원 글로벌기술협력센터 <sup>3)</sup>아주대학교 건설시스템공학과

## Characteristics of Strength Development of Ultra-High Performance Concrete according to Curing Condition

Jong-Sup Park,<sup>1)</sup> Young-Jin Kim,<sup>2)</sup> Jeong-Rae Cho,<sup>1)</sup> and Se-Jin Jeon<sup>3)\*</sup>

<sup>1)</sup>SOC Research Institute, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

<sup>2)</sup>Global Technology Cooperation Center, Korea Institute of Construction Technology, Goyang 411-712, Korea

<sup>3)</sup>Dept. of Civil Systems Engineering, Ajou University, Suwon 443-749, Korea

**ABSTRACT** Ultra-High Performance Concrete (UHPC) has recently been one of the most active research fields in Korea as well as in foreign countries, because it can contribute to a longer life and economic efficiency of structures. Although precast-type UHPC fabricated in a factory is preferable in terms of quality control and reduction of construction period, there exist, even in the precast structure, some parts that need to be cast in-place such as the joints between precast segments. In the cast-in-place UHPC, however, it is probable that an optimum curing condition can hardly be realized in contrast to the factory production. In this study, therefore, the trend of compressive strength development of UHPC was experimentally investigated by assuming various inferior curing conditions that may be anticipated at a construction site. Concrete specimens were fabricated and cured under different conditions with the variables such as curing temperature, delay time before the initiation of curing, duration of curing time and moisture condition. The strengths were compared with those of the specimens cured by standard high temperature steam. Through the analysis of the test results, some minimum requirements for curing have been proposed that are required when the UHPC is cast in-place. It is expected, through this study, that practical use of UHPC in construction sites can be increased.

**Keywords** : ultra-high performance concrete, cast-in-place, strength, curing

### 1. 서 론

최근 국내에서도 기존의 고성능 콘크리트나 고강도 콘크리트의 범주를 훨씬 뛰어 넘는 초고성능 콘크리트(이하 UHPC: Ultra-High Performance Concrete)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 UHPC는 압축 및 인장강도, 유동성, 인성 및 연성 등의 역학적 측면에서 매우 우수한 성질을 보유하고 있는 반면 이를 목표 수준까지 확보하기 위해서는 생산 시 면밀한 품질관리가 필요하다. 일반 콘크리트와 같이 UHPC도 공장 제작되는 프리캐스트 부재와 현장타설 구조물로 나뉠 수 있다. 우수하고 안정적인 품질관리와 급속 시공이 가능한 프리캐스트 방식을 취하였다 하더라도 프리캐스트 세그먼트들 간

의 연결부와 같이 UHPC의 현장타설이 필요한 경우가 있다. 특히 이러한 현장타설 구간은 현장의 제한적이고 때로는 열악한 상황에서 시공되어야 하므로 구조물 전체의 품질 및 시공 속도에 영향을 미칠 수 있어 주의가 필요하다.

현장타설 UHPC의 품질은 현장에서의 배합 방법, 타설 방법, 양생 방법 등에 크게 영향을 받을 수 있다. 이 중 현장에서 UHPC를 배합할 때에는 품질관리에 필요한 조건들이 비교적 잘 제어된 상태인 실험실 또는 배치 플랜트에서 전용 믹서를 활용하기 어려운 경우가 많다. 이 때 UHPC의 배합 특성상 현장에서 기존의 일반 콘크리트에 사용되는 범용 믹서를 활용할 경우 품질에 변동성이 클 우려가 있으므로, UHPC 배합에 최적화되도록 제작된 이동식 현장타설 믹서를 사용하는 것이 바람직하다. 이에 대해서는 한국건설기술연구원의 연구<sup>1)</sup>를 참조할 수 있다. 한편 현장타설 UHPC에 영향을 미치는 또 다른 중요한 인자는 양생 방법으로서, 현장에서 가능한 양생 방법은 프리캐스트 부재의 공장 제작 시 가능한 양생 방법과 큰 차이가 발생할 수 밖에 없다. 따라서 이 연구에서는

\*Corresponding author E-mail : conc@ajou.ac.kr

Received November 12, 2012, Revised March 11, 2013,

Accepted March 13, 2013

©2013 by Korea Concrete Institute

현장에서 예상되는 여러 가지 열악한 양생 조건을 가정하였을 때 초고성능 콘크리트의 압축강도 발현 경향을 실험적으로 규명하였다. 양생온도, 양생 전 지연시간, 양생 지속시간, 수분 공급 조건을 변수로 두어 공시체를 제작한 후 표준적인 고온습윤양생으로 제작된 공시체의 강도와 비교하였다. 실험 결과를 분석하여 현장에서 초고성능 콘크리트를 양생할 때 요구되는 최소한의 조건을 제안하였다.

## 2. 초고성능 콘크리트의 양생

### 2.1 개요

초고성능 콘크리트(UHPC)의 배합 방법은 강도, 유동성, 인성 및 연성 등 요구되는 역학 특성에 따라 다양하지만 여기에서는 한국건설기술연구원에서 개발한 K-UHPC<sup>2)</sup>에 국한하여 논하기로 한다. Fig. 1은 K-UHPC의 구조를 보여주고 있고, Table 1은 질량비로 나타낸 배합표이다. 각 재료의 상세한 제원은 K-UHPC 구조설계지침<sup>2)</sup>을 참조하도록 한다.

K-UHPC의 설계기준압축강도는 180 MPa, 설계기준균열발생강도는 9.5 MPa, 설계기준인장강도는 13 MPa로서 이러한 목표 강도를 확보하기 위한 양생 방법으로 고온습윤양생을 추천하고 있다.<sup>2)</sup> 여기에서 고온습윤양생은 엄밀하게 말해 초기양생 및 고온습윤양생을 차례대로 실시하는 것을 의미한다. 초기양생은 20°C의 습윤조건에서 12~48시간 동안 실시되 기본적으로 24시간 정도가 추천된다. 한편 고온습윤양생은 90°C에서 조건에 따라 24~72시간 동안 실시되 기본적으로 48시간 정도가 적절하다. 이를 준수할 경우 양생이 종료되는 초기 재령에서

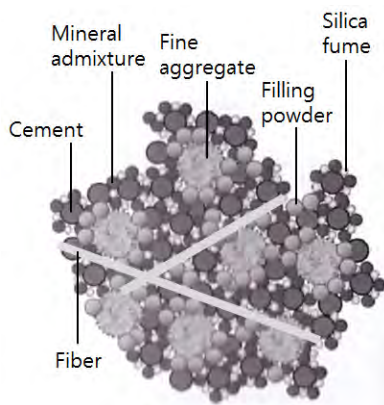


Fig. 1 Composition of K-UHPC

Table 1 Mix proportion of K-UHPC (ratio in mass)

Item	Water-binder ratio	Cement	Silica fume	Filling powder	Fine aggregate	Superplasticizer	Steel fiber (volume ratio)
Value	0.2	1	0.25	0.3	1.1	0.016	2%

도 설계기준강도를 상회하는 강도를 확보할 수 있음이 확인되었다. 이러한 규정은 주로 공장에서 프리캐스트 부재를 제작하는 경우를 염두한 것으로, 현장에서 타설되는 K-UHPC의 경우에는 여건상 이를 준수하기 어려운 경우가 많을 것으로 예상된다. 따라서, 이 연구에서는 이러한 표준적인 양생 방법을 완화하여 현실적으로 현장에서 가능한 양생 방법을 적용하였을 때 동일한 목표 강도를 확보하기 위한 최소한의 조건을 제안하는 데 주력하였다.

### 2.2 기존 연구

대부분의 UHPC는 수화 촉진을 위해 다량의 실리카폼을 사용하고 있으며, 실리카폼은 포졸란 반응을 통해 수분과 함께 수산화칼슘과 반응하여 결합성 화합물로 변하게 된다. 실리카폼의 포졸란 반응은 높은 온도에서 반응성이 급격히 증가하는 경향이 있다.<sup>3)</sup> 따라서 K-UHPC를 포함한 대부분의 UHPC에서는 고온양생을 통해 더욱 조기에 강도가 발현될 수 있도록 권장하고 있다. 실리카폼이 포함된 콘크리트는 일반적으로 물-결합재비가 낮기 때문에 양생 시의 수분 조건에 특히 주의를 기울여야 한다.<sup>3)</sup> 미국 실리카폼 협회(SFA: Silica Fume Association)에서는 실리카폼 콘크리트의 균열을 방지하기 위해 최소 7일간 습윤양생을 실시할 것을 권장하고 있으며, NYSDOT(New York State Department of Transportation)의 조사 결과에 따라 실리카폼을 사용한 고강도 콘크리트는 최소 15일까지 습윤양생하도록 제안하고 있다.<sup>4)</sup> 이와 같이 현장타설 UHPC에서 소정의 성능을 확보하기 위해서는 양생온도와 수분 조건에 대한 충분한 주의가 필요하다. 그러나 환경조건이 잘 제어될 수 있는 실험실이나 프리캐스트 부재 제작 공장에서는 달리 현장타설 시에는 다양한 상황이 발생할 수 있으므로 현장 조건에 따른 여러가지 양생 방법을 마련할 필요가 있다. 이러한 이유로 인해 양생 조건에 따른 UHPC의 재료적 특성에 대해서 많은 연구자들이 연구를 수행하였다. 온도 측면에서 기존 연구는 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 하나는 고온양생 시의 온도를 90°C 정도로 고정한 상태에서 고온양생 기간 또는 고온양생 실시 여부에 따른 특성을 고찰하는 연구이며, 다른 하나는 고온양생온도 조건을 상온에서 90°C까지 다양하게 변화시키며 재료적 특성 변화를 고찰한 연구이다.

몇몇 관련 연구 사례를 소개하면 다음과 같다. Ishii 등<sup>5)</sup>은 현장타설 시 90°C 고온양생이 불가능하여 70°C의 온도로 양생하였을 때의 압축강도는 147 MPa로, 90°C 고온

양생 시의 200 MPa보다 대폭 저하된 것으로 보고하였다. 고경택 등<sup>6)</sup>은 양생 조건에 따른 K-UHPC의 압축강도 특성 연구를 통해 20°C 양생을 실시한 시험체의 강도는 재령 7일에서 고온양생 시험체 대비 60% 정도만 발휘되지만, 습윤 상태를 유지한 경우라면 재령 90일 이상의 장기 재령에서는 고온양생 시험체와 동등한 수준인 200 MPa에 가까운 강도가 발현된다고 하였다. 그러나 같은 조건에서 습윤 상태를 유지하지 못하는 경우에는 장기 재령에서도 목표 강도의 약 80% 정도만 발현되므로 K-UHPC의 양생에 있어 수분 공급을 중요 요인으로 제시하였다. Ahlborn 등<sup>7)</sup>은 90°C 고온양생의 실시 시기에 따른 UHPC의 강도와 내구특성에 대한 연구를 수행하였으며, 탈형 즉시 고온양생을 48시간 동안 실시한 시험체를 기준으로 고온양생을 실시하지 않은 경우, 10일 또는 24일 지연 후 고온양생을 실시한 경우의 시험체에 대해 각각의 특성을 비교하였다. Ahlborn 등<sup>7)</sup>의 연구에서도 고경택 등<sup>6)</sup>의 연구와 마찬가지로 고온양생을 실시하지 않은 시험체는 기준 시험체 강도 대비 재령 7일에서는 약 65%, 재령 28일에서는 약 80%의 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 그의 연구에서는 고온양생이 지연될수록 UHPC의 압축강도가 저하되지만 그 감소량은 크지 않은 것으로 나타났다. Schachinger 등<sup>8)</sup>은 NMR(Nuclear Magnetic Resonance) 분석을 통해 UHPC의 수화도를 분석하고 20°C 수중양생 시험체를 기준으로 50, 65, 90°C 고온양생 시험체의 장단기 강도 변화에 대해 고찰하였다. 이 연구에 따르면 20°C로 수중양생을 실시하는 경우 UHPC 구성성분 중에서 시멘트는 재령 7일에 거의 최고 수화도에 도달하지만 실리카폼의 경우에는 재령에 따라 서서히 지속적으로 수화도가 증가한다. 이에 따라 90°C 표준 고온양생을 실시한 시험체가 재령 7일에 도달하는 225 MPa의 강도에 대해, 20°C 수중양생 시에는 약 3.5년 후에 도달하는 것으로 예상하고 있다. 이 연구에서는 UHPC의 재령이 8년 이상 경과하면 초기 양생 조건에 관계없이 모든 시험체에서 250 MPa 이상의 강도가 발현되는 것으로 나타났다. 그러나 이러한 몇 년의 기간은 실용적으로는 구조물 사용 전까지 허용되기 어려운 기간으로 볼 수 있다. Nakayama 등<sup>9)</sup>의 연구에서도 동일한 경향으로 고온양생온도가 낮을수록 초기 재령의 강도가 감소하는 것으로 나타났다. Matsubara 등<sup>10)</sup>은 UHPC 보도교를 시공하면서 프리캐스트 세그먼트와 세그먼트를 연결하는 이음부에 현장타설되는 UHPC의 양생을 위해 전열판을 이용한 가열박스를 구성하고 40°C 또는 60°C 양생 시의 압축강도를 고찰하였다. 이 연구에 사용된 UHPC는 양생온도 85°C에서 30시간 동안 양생될 경우 180 MPa 이상의 압축강도를 나타내는 재료로서, 7일간 40°C 또는 60°C로 양생을 실시하는 경우 압축강도는 모두 기준값인 180 MPa 이상에 도달하는 것으로 발표하였다. 한편 本間大輔 등<sup>11)</sup>은 150~200 MPa급 UHPC의 양생 방법과 압축강도 발현 성상의 관계를 연구하였다. 20°C 표준양생, 40°C 일정온도 양생, 90°C 증

기양생을 비교한 결과 7일 및 28일 재령에서는 각 양생 방법별로 강도 차이가 비교적 컸지만 91일에서는 상당 부분 차이가 좁혀진 결과를 얻었다. 또한, 90°C 증기양생을 재령 3일부터 실시하는 경우 재령 3일 이전 45°C로 3.5시간 정도 사전 양생을 추가적으로 실시한다면 초기 강도가 급속히 증진되어 탈형 강도 확보에 유리하지만, 재령 28일 이후의 강도는 거의 같아진다고 보고되었다.

### 3. K-UHPC의 양생 실험

앞서 언급한 바와 같이 UHPC의 품질은 양생 조건 즉, 양생온도와 양생 시 수분 조건에 크게 영향을 받는다. 최상의 UHPC 품질을 조기에 확보하기 위해서는 양생 초기에 고온이 유지되면서 충분한 수분을 공급받을 수 있어야 한다. 그러나 현장타설 시에는 프리캐스트 부재 제작 공장이나 실험실과 같은 완벽한 양생 조건을 구현하기 곤란한 경우가 많다. 또한 현장에서 UHPC의 양생을 위해 고온증기양생 설비를 추가로 갖추는 것은 경제성 측면에서도 불리한 조건이 될 수 있다. 따라서 현장타설을 통해 UHPC 구조물 전체를 시공하든, 프리캐스트 UHPC 구조물의 접합부 등 일부 부위를 시공하든, 현장 상황과 공사 기간 및 UHPC 성능을 고려한 적절한 양생 방법을 찾는 것은 현장타설 UHPC 구조물의 품질 및 시공성 확보를 위해 중요한 항목이라 할 수 있다. 따라서 이 장에서는 다양한 양생 조건에 따른 K-UHPC의 압축강도 특성을 고찰하여 현장타설 시의 양생에 필요한 시스템 개발의 기초 자료로 활용하고자 한다.

#### 3.1 실험 계획

이 연구에서는 선행 연구<sup>2,6)</sup>에서 제시된 바와 같이 K-UHPC의 설계기준압축강도 180 MPa를 발현하는데 충분한 조건으로 판명된 양생 방법에 대해 현장의 열악한 상황을 고려하여 양생 조건을 완화하였다 가정하고 실험을 계획하였다. 즉, 원래에는 타설 후 24시간동안 초기습윤양생 후 탈형하고 증기양생을 통해 90°C의 고온습윤양생을 48시간 동안 실시하는 것을 기준으로 삼았지만, 여기에서는 고온양생온도를 40°C와 60°C로 낮추는 경우, 고온양생 개시 시점을 각각 타설 후 12시간으로 단축하거나 48시간으로 연장하는 경우, 고온양생 지속시간을 각각 12시간과 24시간으로 단축시키는 경우 및 수분 조건의 변화를 실험 변수로 삼고 각각의 경우에 대한 압축강도 특성의 변화를 고찰하였다. 여기에서 양생 시 수분 조건은 총 4가지로 구분하였다. 공시체를 랩으로 밀폐시켜 공시체 내부의 수분이 증발하지 않도록 처리하여 밀폐 조건을 구현하였고, Fig. 2(a)와 같이 수분이 공급되지 않는 가열 챔버를 이용하여 건조 조건을 구현하였다. 한편, Fig. 2(b)와 같은 항온항습 챔버를 이용하여 수중 조건과 증기 조건을 구현하였다. 챔버를 이용한 양생에서 목표 온도까지



(a) Heating chamber



(b) Constant temperature and humidity chamber

Fig. 2 Chambers for curing test

지의 상승 또는 하강 속도는 시간당 15°C로 하였으며, 상승과 하강에 소요된 시간은 지속시간 계산에서 제외하였다. 한편, 고온양생 개시 시점까지의 처리 방법에 있어 표준 고온습윤양생에서는 습윤상태를 유지해야 하지만 이 연구에서는 현장에서의 열악한 상황을 고려하여 타설 후 12시간이 경과하여 탈형한 이후 고온양생 개시 시점까지의 잔여 시간 동안 건조 상태에 노출된 것으로 설정하였다. 다만 수분 조건 중 밀폐의 경우에는 탈형 이후 즉시 밀폐 상태로 전환했다는 차이가 있다.

여기에서 양생온도 조건에 40°C와 60°C 외에 20°C와 같이 상온에 가까운 온도를 포함시키지 않은 이유는 선행 연구<sup>6)</sup>에서 같은 배합에 대하여 Fig. 3과 같이 20°C 조건에 대한 거동이 어느 정도 규명되었기 때문이다. 즉, 선행 연구<sup>6)</sup>에 의하면 Fig. 3과 같이 20°C의 건조 조건에서는 초기 뿐 아니라 장기 강도도 표준적인 90°C 고온습윤양생을 통한 강도에 미치지 못한 반면, 20°C의 수중 조건에서는 비록 초기에는 강도 발현이 다소 늦었지만 91일 정도에는 표준 고온습윤양생 시의 강도와 유사한 수준까지 강도가 발현되었다. 하지만 이 연구의 목적은 현장에서의 공사 기간 및 후속 작업을 고려하여 비교적 초기 재령인 7일 정도의 시점에서 설계기준강도에 얼마만큼 근접할 수 있는지를 주로 평가하는 것이므로 20°C의 온도 조건을 배제하였으며, 강도 또한 7일 강도만을 측정하여 비교분석하였다. Fig. 3과 같이 K-UHPC에서 표준 고온습윤양생을 실시할 경우 7일 이전에 설계기준강도에 도달하여 그 이후에는 강도가 거의 증가하지 않는 경향을 보이므로<sup>6)</sup> 이 연구에서 7일 시점의 강도를 비교하는 것은 설계기준강도와 비교한다는 의미도 된다. 각 변수별로 공시체를 3개씩 제작하여 압축강도를 측정하였으며, 공시체의 형상은 관련 기준<sup>2)</sup>에서 규정한 지름 100 mm, 높이 200 mm의 원기둥형으로 하였다.

최종적으로 양생 실험에 선정된 변수는 양생온도 변수 3개, 양생 개시시간(또는 지연시간) 변수 및 양생 지속시간 변수 각 3개, 수분 조건 변수 4개이며, 이에 대한 설명을 Fig. 4 및 Table 2에 나타내었다. Fig. 4에 따르면 표준 고온습윤양생은 9-S-24-48에 해당되며, T, M, DT 및 CT 자체가 표시된 경우는 각 조건의 모든 변수가 포함되었

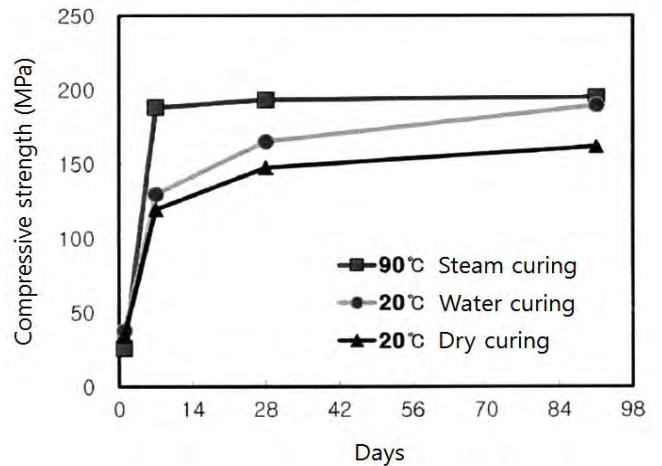


Fig. 3 Compressive strength of K-UHPC with different curing conditions

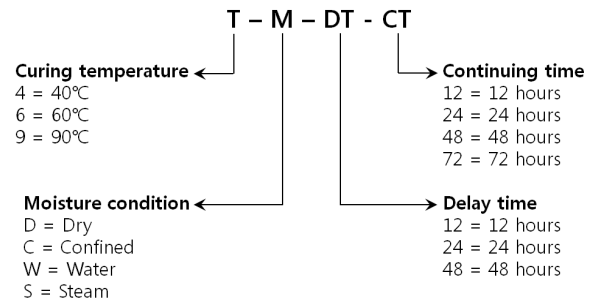


Fig. 4 Abbreviations of variables of curing test

음을 의미한다. 예를 들어, T-M-24-48은 타설 24시간 후 48시간 동안 양생된 모든 실험 변수를 포함한다.

### 3.2 실험 결과

타설 시점에서 24시간이 경과된 후부터 48시간 동안 90°C의 증기양생을 실시하는 표준 고온습윤양생 공시체의 7일 재령 평균압축강도는 201.0 MPa로 설계기준강도인 180 MPa의 112% 수준이었다. 이하에서는 기타 양생 조건을 적용하였을 때의 강도 수준을 이와 비교하였다.

### 3.2.1 양생온도의 영향

양생 전 지연시간과 양생 지속시간 및 수분 조건이 표준 고온습윤양생의 경우와 동일할 때, 양생온도 차이에 따른 실험 결과는 Table 3과 같다. 고온양생온도가 낮아질수록 평균압축강도는 낮아지고 표준편차는 커지는 결과를 얻었다. 양생온도가 60°C인 경우의 압축강도는 설계기준강도의 97%인 174.1 MPa이었고, 40°C로 더 낮아진 경우에는 설계기준강도의 76% 수준인 136.3 MPa로 측정되었다. 변수당 공시체 시험 횟수가 3회 밖에 되지 않으므로 표준편차의 신뢰도가 높지는 않으나, 양생온도가 낮아질수록 강도의 변동성이 증가하는 것으로 나타났다.

Fig. 5는 다른 조건은 동일한 상태에서 수분 조건과 양생온도에 따른 압축강도 발현 특성을 보여주고 있다. 수분 조건에 관계없이 양생온도가 낮아질수록 평균압축강도는 저하하는 것으로 나타났다. 수분 조건이 밀폐된 경

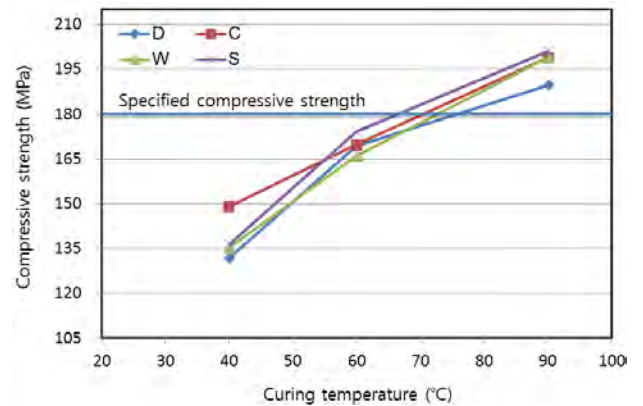
우를 제외하고는 양생온도가 90°C에서 60°C로 감소했을 때보다 60°C에서 40°C로 변화했을 때 강도가 더 큰 폭으로 감소하는 것으로 나타났다. 밀폐 조건인 경우에만 양생온도와 강도의 관계가 선형에 가까운 것으로 나타났다.

40°C로 양생된 경우 평균압축강도는 밀폐 조건에서 149.0 MPa로 가장 컸으며, 건조 조건에서 131.7 MPa로 가장 작게 나타났다. 40°C 양생에서는 밀폐 조건 시험체의 강도가 기타 수분 조건 시험체보다 약 10% 정도 증가된 것으로 나타났다. 이는 40°C의 양생온도는 기타 양생온도보다 비교적 낮은 수준이므로 강도가 온도 조건보다는 수분 조건에 더 크게 좌우되었기 때문으로 생각된다. 즉, 밀폐 조건의 경우 7일 재령에서 강도시험을 실시할 때까지 탈형 이후에는 계속적으로 밀폐 상태가 유지되어 콘크리트 내의 수분이 증발되지 않고 수화 반응에 사용될 수 있었다. 하지만 다른 수분 조건의 경우 고온양생 시간 동안만 해당 수분 조건이 유지되고 그 외의 기간, 즉, 고온양생 개시 전 지연시간 동안이나 고온양생 종료 후 7일 재령까지는 기건 상태에 노출되는 것으로 설정하였으므로 이러한 기건 상태 동안의 수분 증발량이 비교적 커서 강도 발현에 불리한 영향을 주었기 때문으로 사료된다. 이는 미국 실리카폼 협회가 권장한 바와 같이 실리카폼이 함유된 콘크리트는 최소 7일간은 습윤양생을 실시함이 바람직하다는 것을 암시하고 있다.<sup>4)</sup>

한편, 60°C 및 90°C로 양생된 경우에는 증기양생 조건의 압축강도가 가장 큰 것으로 나타났다. 이는 60°C 및 90°C 정도의 양생온도는 비교적 고온에 속하기 때문에

**Table 2** Variables of curing test

Curing temperature (°C)	Delay time (hours)	Continuing time (hours)	Moisture condition	
40	12	12	Dry, confined, water, steam	
		24		
		48		
	24	12		
		24		
		48		
	48	12		12
				24
		24		12
48				
60		12		12
				24
	48			
	24	12		
		24		
		48		
	48	12		12
				24
		24	12	
48				
90		24	48	
			72	



**Fig. 5** Compressive strength according to curing temperature (T-M-24-48)

**Table 3** Compressive strength according to curing temperature (T-S-24-48)

Variable	Compressive strength (MPa)			Average compressive strength (MPa)	Standard deviation (MPa)
	#1	#2	#3		
4-S-24-48	142.3	133.6	133.0	136.3	4.25
6-S-24-48	179.9	170.9	171.4	174.1	4.13
9-S-24-48	200.6	201.5	200.8	201.0	0.39

강도 발현에 있어 수분 조건보다 양생온도가 더 지배적이었기 때문으로 생각된다. 하지만, 수분 공급 내지 유지 측면에서 다른 경우보다 유리했던 밀폐된 조건에서의 강도는 여전히 높은 수준이었으며, 증기양생 조건과 비교할 때 60°C 양생온도에서는 2.4%, 90°C 양생온도에서는 1.0% 정도의 미소한 차이만큼 강도가 작았을 뿐이었다. 따라서 K-UHPC의 양생 시에는 수분을 적극적으로 공급하는 조치 외에 밀폐 등의 방법으로 자체의 수분을 유지하려는 노력만으로도 강도 발현에 비교적 충분한 수분이 공급될 수 있는 것으로 판단된다.

또 한가지 주목할 점으로 90°C 양생온도에서는 건조 조건 시험체의 강도가 증기양생 조건 시험체 강도의 94%인 189.7 MPa로 가장 낮은 것으로 나타났다. 이는 매우 높은 온도 및 건조 조건에 동시에 노출된 경우 내부 수분의 증발 현상이 두드러지기 때문으로 사료된다.

이상의 결과에서 양생온도가 높을 수록 K-UHPC의 압축강도 발현 현상이 촉진된다는 점은 자명하였으나, 60°C보다 낮은 경우에는 그 효과가 더더어져 수분 조건에 관계 없이 7일 재령을 기준으로 할 때 설계기준압축강도인 180 MPa에 미치지 못하였다. 하지만, Fig. 3 등의 기존 연구 결과를 참조할 때 7일 이후의 재령에서는 180 MPa에 도달할 수 있을 것으로 예상되므로 필요에 따라 시공 시 현장 양생 조건 하에서 설계기준압축강도의 도

달 시점을 늦추어도 설계, 공정, 공사기간상 문제가 없는 지 검토해 보는 것이 바람직하다. 또한 현장에서의 양생 온도가 낮아질수록 수분 조건이 강도 발현에 미치는 중요성이 커지므로 충분한 수분을 지속적으로 공급하든가 내부 수분이 증발하지 않도록 관리하는 조치가 필요할 것으로 생각된다. 특히 양생온도에 관계없이, 타설된 K-UHPC를 지속적으로 밀폐하는 것만으로도 강도 발현에 좋은 효과가 나타났으므로 현장 여건상 수분의 충분한 공급이 어려운 경우에는 밀폐 조건을 구현하는 것도 유력한 양생 방법인 것으로 판단된다.

한편 Fig. 6은 Fig. 5에서 각 수분 조건에 대하여 90°C 양생 시의 압축강도를 1.0으로 두고 기타 양생온도에서의 압축강도를 정규화한 결과이다. Fig. 6에서 보듯이 회귀식의 형태를 선형으로 가정하여도 결정계수( $R^2$ )가 수분 조건에 따라 0.92~1.0 사이이므로 충분히 신뢰성있는 결과를 준다고 생각된다. Fig. 6에서 제안된 양생온도에 따른 강도 발현식에서  $f_{ck}$ 는 압축강도,  $f_{ck,90}$ 은 90°C 양생 온도에서의 압축강도, T는 양생온도이다.

### 3.2.2 양생 지속시간의 영향

타설 24시간 후 40°C~90°C의 고온양생 조건으로 양생된 시험체의 평균압축강도는 Fig. 7과 같다. 양생온도에 관계없이 양생 지속시간이 증가함에 따라 강도도 증가하

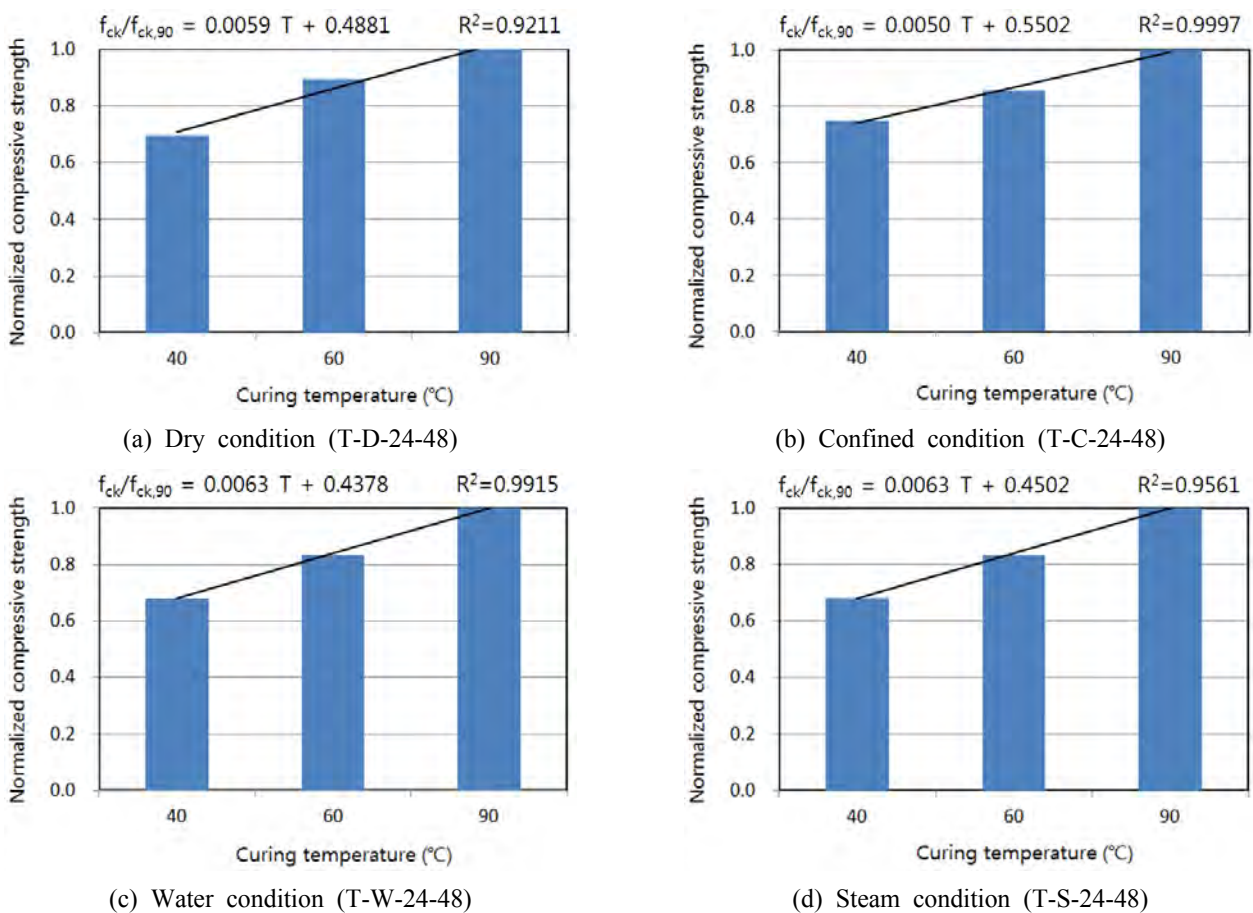


Fig. 6 Normalized compressive strength according to curing temperature (T-M-24-48)

는 경향이 나타났다. 하지만 양생온도 90°C에서는 양생 지속시간 48시간에서 수분 조건에 관계없이 이미 재령 7일 시점에서의 설계기준강도를 초과한 반면, 양생온도 40°C 및 60°C에서는 양생 지속시간을 48시간까지 늘려보아도 설계기준강도 180 MPa에 미치지 못하는 결과를 얻었다.

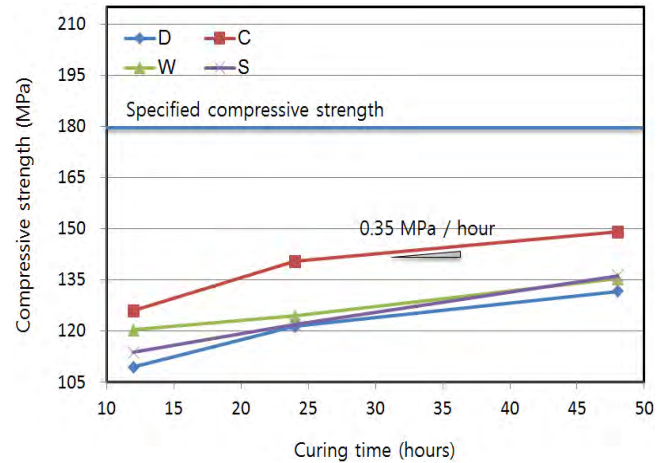
Fig. 7(a)와 같이 40°C로 양생된 경우에는 모든 양생시간대에서 밀폐 조건의 공시체 압축강도가 가장 크게 나타났다. 이는 3.2.1절에서 언급한 바와 같이 40°C라는 비교적 낮은 온도에서는 강도가 온도 조건보다는 수분 조건에 더 큰 영향을 받으며, 밀폐 조건이 수분 유지 측면에서 유리했기 때문으로 사료된다. Fig. 7(b)를 참조하면 60°C로 양생된 경우 24시간 이하의 양생시간에 대해서는 여전히 밀폐 조건의 강도가 기타 수분 조건의 강도보다 크게 산출되었으나 48시간 양생시간에서는 수분 조건별 압축강도가 거의 유사한 것으로 나타났다. 이는 60°C라는 비교적 높은 온도가 48시간이라는 긴 양생시간 동안 적용되었을 경우 수분 조건보다는 양생온도에 의한 강도 발현 효과가 지배적이었기 때문으로 판단된다.

양생온도 40°C 및 60°C에서는 지연시간 24시간을 적용했을 때 고온양생을 48시간까지 실시해도 설계기준강도에 미치지 못하는 것으로 나타났으므로, 양생시간을 얼마나 더 연장시키면 설계기준강도에 도달할 수 있을지 예측해 보았다. 이 때, 전체적으로 가장 양호한 강도 발현 성상을 나타낸 밀폐 조건을 기준으로, 양생시간이 24시간에서 48시간으로 연장될 때 압축강도가 선형적으로 증가한다 가정하고 구한 증가율을 적용하였다. 이러한 증가율이 Fig. 7(a) 및 (b)에 함께 나타내어져 있다. 계산 결과 40°C 양생온도에서는 총 136시간, 즉, 여유를 두어 6일 정도 양생하고, 60°C 조건에서는 총 71시간, 즉, 약 3일간 양생을 실시하면 설계기준강도에 도달할 수 있을 것으로 예측되었다. Matsubara 등<sup>10)</sup>의 연구에서도 40°C 또는 60°C로 7일 동안 양생을 실시할 경우 그 연구의 설계기준강도이기도 했던 180 MPa 이상에 도달하는 것으로 나타났으므로, 현장에서 비교적 용이하게 구현할 수 있는 40°C의 양생 조건의 경우 7일 정도까지 양생을 실시하면 180 MPa 내외의 K-UHPC 설계기준강도를 상회할 수 있을 것으로 예측된다. Fig. 7(b)에서는 강도 발현 경향이 비교적 선형에 가까운 밀폐 조건에 대하여 선형 회귀식을 제안해 보았다. 여기에서 t는 양생시간이다.

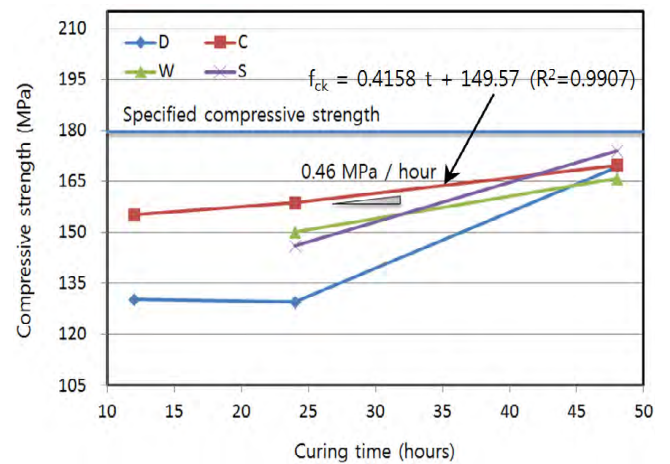
Fig. 7(c)와 같이 양생온도 90°C에서는 표준 고온습윤 양생 시의 양생시간인 48시간과 더불어 비교를 위해 72시간에 대해 추가로 실험을 실시하였는데, 건조 조건을 제외하고는 양생시간 증가에 따라 압축강도도 증진되는 것으로 나타났다. 이는 기존 실험 결과와도 부합하고 있으나, 72시간보다 양생시간을 더 늘리는 것은 내부 수분 소비에 따른 건조 현상이 유발하는 미세 균열로 인해 강도가 오히려 감소할 수도 있으므로 주의해야 한다.<sup>6)</sup> 한편, 건조 조건의 시험체에서는 90°C를 72시간 동안 유지

했을 때 오히려 강도가 다소 감소하는 것으로 나타났는데 이는 마찬가지로 외부에서 수분이 공급되지 않는 상태에서 고온이 유발하는 건조 및 미세 균열에 의한 것으로 사료된다.

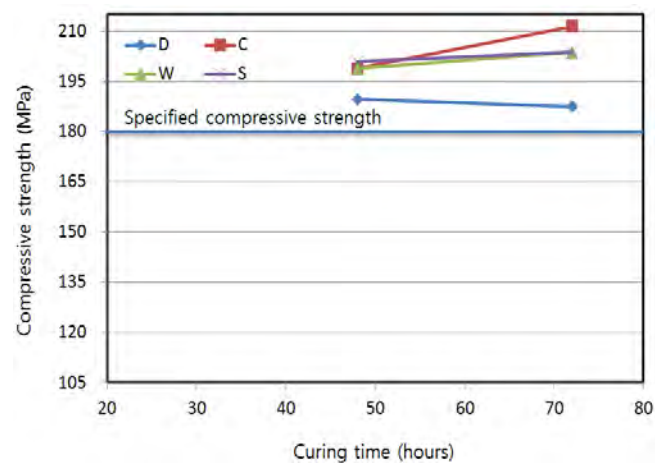
Fig. 8에서는 40°C 및 60°C의 양생온도 조건에서 양생



(a) Curing temperature=40°C (4-M-24-CT)



(b) Curing temperature=60°C (6-M-24-CT)



(c) Curing temperature=90°C (9-M-24-CT)

Fig. 7 Compressive strength according to continuing time (T-M-24-CT)

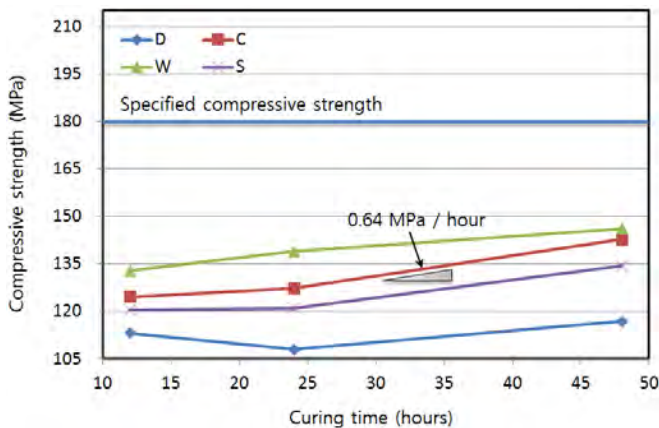
전 지연시간을 위에서 분석한 24시간 외에 12시간 및 48시간으로 두었을 때의 영향을 분석하였다. 지연시간 24시간에 대한 결과는 Fig. 7(a) 및 (b)를 참조하면 된다.

Fig. 8(a)를 참조하면 40°C, 지연시간 12시간일 때 밀폐 조건에서의 강도 증가 추세로 볼 때 5일 정도 경과하면 설계기준강도에 도달할 것으로 추정된다. 이때에는 수중 양생 조건에서 강도 발현이 가장 양호하였는데 이는 지연시간이 짧은 관계로 밀폐 조건의 장점이 크게 부각되지 못해서인 것으로 판단된다. 같은 온도 조건 하에서, Fig. 7(a)와 같은 지연시간 24시간에서는 설계기준강도 도달 시까지 6일이 소요되었으며, Fig. 8(b)와 같이 지연시간 48시간에서는 양생시간이 24시간을 경과해도 강도 변화가 거의 없으므로 비록 양생시간을 더 연장하더라도 설계기준강도에 도달하지 못할 것으로 예상되었다. 40°C에서 지연시간 48시간을 적용한 경우는 지연시간 24시간과 마찬가지로 밀폐 조건에서 강도 발현이 가장 양호하였으며 이는 앞서 설명했던 밀폐 조건이 유리한 이유와 동일하다. 이상과 같이 40°C 양생에서는 지연시간이 길어질수록 강도 발현 측면에서 불리한 결과를 얻었다.

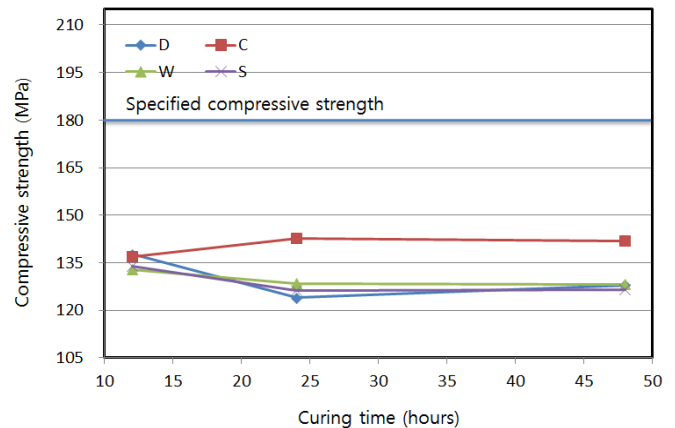
한편, Fig. 8(c)와 같이 60°C, 지연시간 12시간에서는 건조 조건을 제외하고 나머지 수분 조건의 압축강도가 유사하게 나타났으며, 건조 조건에서는 압축강도가 약

15% 정도 저하되었다. 밀폐 조건에서는 약 3일 경과 후 설계기준강도에 도달할 것으로 예상되었으며, 이러한 경향은 Fig. 7(b)에서 지연시간 24시간일 때에도 유사하였다. 같은 온도에서 Fig. 8(d)와 같이 지연시간 48시간을 적용하였을 경우에는 대체로 밀폐 조건이 유리하지만 양생시간이 48시간으로 길어진 경우에는 고온에 노출된 영향이 수분 조건의 영향보다 큰 관계로 모든 수분 조건에서의 강도가 유사하였다. 이는 Fig. 7(b)에서 나머지 조건들은 동일하고 지연시간만 24시간으로 다를 때에도 관찰되었던 현상이다. Fig. 8(d)는 밀폐 조건에 대하여 선형 회귀식을 제시한 예도 보여주고 있다.

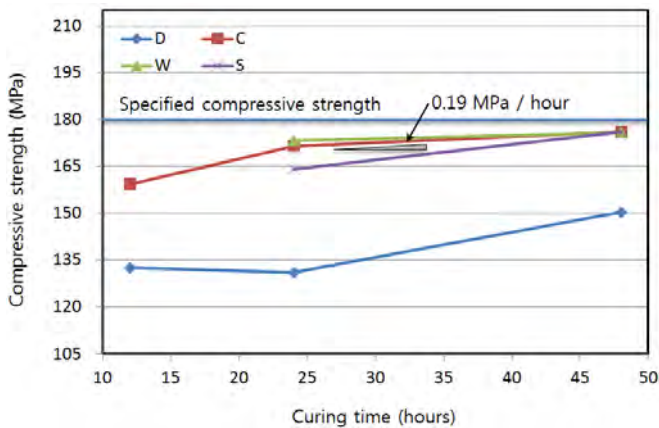
이처럼 60°C에서 지연시간 48시간을 적용했을 때에는 밀폐 조건에서 48시간 양생 시 설계기준강도를 약간 상회할 수 있었다는 점에 주목해야 한다. 이는 40°C 양생 온도에서는 기타 조건들을 조절하여도 빠른 시일 내에 설계기준강도에 도달하기는 어려운 반면, 60°C 양생 온도에서는 표준 고온습윤양생 시와 같은 48시간 양생시간만으로도 설계기준강도에 가까이 도달할 수 있으며, 이 때 양생 개시 전의 지연시간을 약간 늦추는 방식으로 설계기준강도를 상회할 수도 있음을 의미한다. 이러한 지연시간의 영향은 다음 절에서 좀 더 고찰해 보고자 한다.



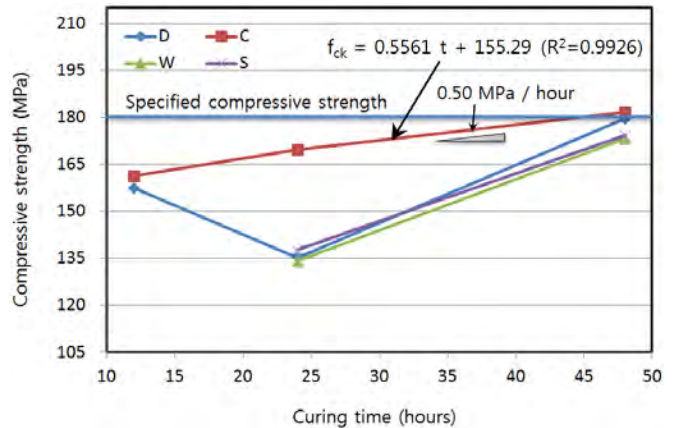
(a) Curing temperature=40°C and delay time=12 hours (4-M-12-CT)



(b) Curing temperature=40°C and delay time=48 hours (4-M-48-CT)



(c) Curing temperature=60°C and delay time=12 hours (6-M-12-CT)



(d) Curing temperature=60°C and delay time=48 hours (6-M-48-CT)

Fig. 8 Compressive strength according to curing time (T-M-DT-CT)



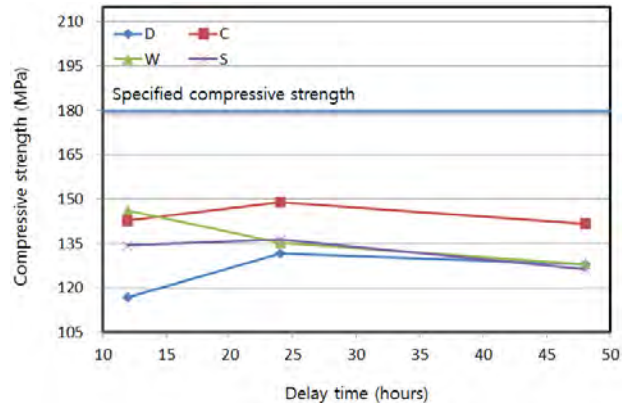
### 3.2.3 양생 전 지연시간의 영향

고경택 등<sup>6)</sup>의 연구에 따르면 K-UHPC의 경우 90℃ 고온양생 이전의 지연시간이 짧으면 시멘트 경화체의 조직이 밀실하지 못한 상태에서 고온 양생이 개시됨에 따라 내부에 미세균열 등이 발생하여 강도가 낮아질 수 있다고 보고되었다. K-UHPC의 표준 고온습윤양생 이전의 초기양생 기간을 24시간으로 설정한 것도 이러한 연구 결과에 근거하고 있다. 本間大輔 등<sup>11)</sup>은 150~200 MPa급 UHPC에서 관입저항값 5 MPa 정도의 초결이 지난 후 고온양생을 개시하면 지연시간의 길이에 관계없이 유사한 강도를 얻을 수 있다고 하였다. 참고로 국내의 경우 KS F 2436<sup>12)</sup>에 따르면 관입저항값 3.5 MPa에 해당하는 시점을 초결로 보고 있다. Ahlborn 등<sup>7)</sup>은 90℃ 고온양생 전 지연시간을 10일 또는 24일까지 길게 둘 경우 UHPC의 압축강도는 저하되지만 그 감소량은 크지 않은 것으로 보았다. 하지만, 이 연구에서 변수로 둔 양생 전 지연시간은 가장 짧은 경우에도 12시간이므로 초결이 지난 시점으로 볼 수 있고, 가장 긴 지연시간도 48시간이므로 Ahlborn 등<sup>7)</sup>의 연구와 같이 지연시간이 아주 길지도 않다. 그리고 양생온도 또한 기존에 지연시간의 영향에 대한 연구에서 적용된 90℃보다 낮은 40℃ 또는 60℃이므로 지연시간에 따른 경향이 명확하지는 않을 것으로 예상되었다.

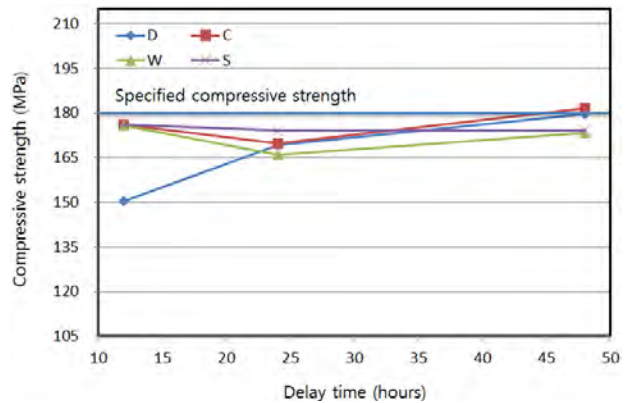
실제로 표준 고온습윤양생과 같은 48시간 동안의 고온양생을 전체한 Fig. 9(a)를 참조하면 전체적인 경향으로 볼 때 40℃ 양생온도에서는 12~48시간 사이의 지연시간에 따른 영향이 뚜렷하지 않은 것으로 나타났다. 즉, 수분 조건에 따라 지연시간이 연장되더라도 지속적인 증가나 지속적인 감소가 아닌 혼재된 경향을 나타내는 경우가 많았다. 다만 앞서 언급하였듯 양생온도가 비교적 낮은 경우 수분 조건이 강도에 미치는 영향이 커지므로 밀폐 조건의 강도가 다른 수분 조건의 강도보다 크게 나타났다. 지연시간이 12시간으로 짧은 경우에는 수중 조건과 밀폐 조건의 강도가 유사하였는데 이는 지연시간 12시간은 탈형 후 즉시 고온양생을 개시하는 것을 의미하므로 지연시간 동안 밀폐 조건이 기타 수분 조건보다 유리한 점이 사라지기 때문으로 생각된다. 한편, 양생온도 60℃에서는 수분 조건보다 온도 조건의 영향이 커짐에 따라 수분 조건별 강도 편차가 크지는 않았다. 또한 지연시간과 강도의 관계는 역시 명확하지 않은 것으로 나타났으나, 지연시간 48시간에서 강도 발현이 가장 우수한 것으로 나타났으며 밀폐 조건을 비롯한 일부 수분 조건에서는 설계기준강도에까지 도달할 수 있었다.

## 4. 결 론

이 연구에서는 초고성능 콘크리트 K-UHPC의 활용성을 높이기 위하여 공장에서 표준적인 고온습윤양생 방식으로 제작되는 경우 이외에 현장타설 방식으로 시공되는 경우를 가정하고, 현장에서의 양생 조건이 K-UHPC의 압축강도 발현에 미치는 영향을 실험적으로 규명하였다.



(a) Curing temperature=40℃ (4-M-DT-48)



(b) Curing temperature=60℃ (6-M-DT-48)

Fig. 9 Compressive strength according to delay time before curing (T-M-DT-48)

양생온도, 양생 전 지연시간, 양생 지속시간, 수분 공급 조건을 변수로 둔 실험 결과 다음과 같은 결론을 도출할 수 있었다.

- 1) 양생온도가 높을수록 K-UHPC의 압축강도 발현이 촉진되었으며, 양생온도가 40℃에서 60℃로 상승하면 평균 28%, 60℃에서 90℃로 상승하면 평균 15%의 압축강도가 증가되었다. 7일 재령을 기준으로 할 때 양생온도 60℃에서는 일부 조건에서 설계기준압축강도인 180 MPa에 도달하였으나, 40℃에서는 이에 미치지 못하였다. 하지만 기존 연구를 참조할 때 40℃의 경우에도 재령이 더 경과하면 설계기준강도에 도달할 것으로 예측되었다. 따라서, 현장에서의 공정이나 공사기간을 고려할 때 설계기준강도 도달 시점이 다소 늦어져도 큰 문제가 없을 경우에는 40℃ 정도의 양생온도도 가능하지만, 촉박할 경우에는 60℃ 정도의 양생온도가 필요할 것으로 사료된다. 또한 양생온도가 낮아질수록 수분 조건이 강도 발현에 미치는 중요성이 커지므로 충분한 수분을 지속적으로 공급하거나 내부 수분이 증발하지 않도록 관리하는 조치가 필요할 것으로 생각된다. 현상 여건상 지속적인 수분 공급이 어려울 경우에는 밀폐 조건 또한 K-UHPC의 강도 발현 측면에서 유리한 대안이 될 수 있음을 확인하였다. 한편, 양

생온도에 따른 압축강도 발현 경향은 선형에 가까웠으며 이를 고려한 수학적 모델을 제시하였다.

- 2) 양생온도에 관계없이 양생 지속시간이 증가함에 따라 강도도 증가하였다. 양생온도 40°C에서는 양생 지속시간을 48시간까지 늘려보아도 7일 재령을 기준으로 설계기준강도 180 MPa에 도달하지 못하였다. 그러나 60°C에서는 일부 조건에서 설계기준강도에 도달할 수 있었다. 양생시간 경과에 따른 강도 증가율을 가지고 7일 재령에서 설계기준강도에 도달할 수 있는 양생시간을 예측할 수 있었으며, 예를 들어 지연시간을 24시간으로 둘 때 40°C에서는 약 6일의 양생시간이 요구되었고, 60°C에서는 약 3일이 요구되었다. 이 경우 40°C에서는 기준재령 도달시까지 계속적으로 고온양생이 필요함을 의미한다. 즉, 양생온도 60°C에서는 양생 지속시간을 표준 고온습윤양생 시와 같은 48시간으로 두고, 추가적으로 지연시간이나 수분 조건을 적절히 조절하면 초기 재령에서도 설계기준강도에 도달할 수 있으나, 40°C에서는 같은 목적을 위해 비교적 긴 시간의 고온양생 기간이 필요하므로 현장에서의 공정이나 공사기간을 고려하여 양생온도를 설정할 필요가 있다.
- 3) 양생온도 60°C, 지연시간 48시간에서는 일부 수분 조건의 경우 7일 재령에서 설계기준강도에 도달한 것으로 나타났으나, 12~48시간 사이의 지연시간 및 40°C 또는 60°C의 양생온도에서는 지연시간에 따른 강도 발현 경향이 명확하지는 않았다. 따라서 현장에서 양생 시 고온양생 개시 전의 지연시간이 너무 짧거나 너무 긴 경우만 아니라면 강도 발현에 불리한 영향은 없을 것으로 예상되었다.

## 감사의 글

본 연구는 한국건설기술연구원 주요사업(PSC 교량의 스마트 긴장력 관리 기술 개발)의 연구비 지원에 의해 수행되었습니다.

## References

1. Korea Institute of Construction Technology (KICT), *Development of Design and Construction System Technology for Hybrid Cable Stayed Bridge*, KICT 2011-076, KICT, Korea, 2011, 253 pp.
2. Korea Concrete Institute (KCI), *Design Recommendations for Ultra-High Performance Concrete K-UHPC*, KCI-M-12-003, KCI, Korea, 2012, 66 pp.
3. ACI Committee 234, *Guide for the Use of Silica Fume in Concrete (ACI 234R-96)*, American Concrete Institute (ACI), Michigan, US, 1996 (Reapproved 2000), 51 pp.
4. Silica Fume Association (SFA), *Silica Fume User's Manual*, FHWA-IF-05-016, SFA, Virginia, US, 2005, 183 pp.
5. Ishii, T., Nishio, H., Matsuyama, T., Miyajima, A., Yokohata, K., Gotou, M., Xin, J., and Hirai, Y., "Manufacture and Construction of a PC Through Girder Type Pedestrian Bridge Using Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete," *Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*, Japan, 2008, pp. 1270-1275.
6. Koh, K. T., Park, J. J., Ryu, G. S., and Kang, S. T., "Effect of the Compressive Strength of Ultra-High Strength Steel Fiber Reinforced Cementitious Composites on Curing Method," *Journal of the Korean Society of Civil Engineers*, Vol. 27, No. 3A, 2007, pp. 427-432.
7. Ahlborn, T. M., Mission, D. L., Peuse, E. J., and Gilbertson, C. G., "Durability and Strength Characterization of Ultra-High Performance Concrete under Variable Curing Regimes," *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Germany, 2008, pp. 197-204.
8. Schachinger, I., Hilbig, H., and Stengel, T., "Effect of Curing Temperature at an Early Age on the Long-Term Strength Development of UHPC," *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Germany, 2008, pp. 205-212.
9. Nakayama, H., Ishinaka, M., Naruse, H., Fujii, K., and Nakase, H., "Development of Processing Technology of Super High-Strength Precast Concrete Column," *Proceedings of 8th International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete*, Japan, 2008, pp. 959-966.
10. Matsubara, N., Ohno, T., Sakai, G., Watanabe, Y., Ishii, S., and Ashida, M., "Application of a New Type of Ultra High Strength Fiber Reinforced Concrete to a Prestressed Concrete Bridge," *Proceedings of 2nd International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, Germany, 2008, pp. 787-794.
11. Honma, D., Kojima, M., and Mitsui, K., "Curing Methods and Strength Development of Ultra-High Strength Concrete with 150-200 N/mm<sup>2</sup> (150-200N/mm<sup>2</sup>級超高強度コンクリートの養生方法と強度発現性)," *Proceedings of the Japan Concrete Institute*, Vol. 34, No. 1, 2012, pp. 1234-1239.
12. Korean Agency for Technology and Standards (KATS), *Testing Method for Time of Setting of Concrete Mixture by Penetration Resistance (KS F 2436)*, KATS, Korea, 2007, 9 pp.

**요 약** 초고성능 콘크리트(UHPC: Ultra-High Performance Concrete)는 최근 국내외에서 연구가 가장 활발한 분야 중 하나로서 구조물의 장수명화와 경제성 제고에 기여하고 있다. 품질관리 및 공사기간 단축을 위해서는 공장에서 제작된 프리캐스트 방식의 초고성능 콘크리트가 유리하지만, 이 경우에도 프리캐스트 세그먼트 간의 이음부 등 부득이 현장타설로 시공되어야 하는 부분이 존재한다. 그러나 현장타설 시에는 공장 제작 시와는 달리 최적의 양생 조건을 구현하기 어려울 가능성이 크다. 따라서 이 연구에서는 현장에서 예상되는 여러 가지의 열악한 양생 조건을 가정하였을 때 초고성능 콘크리트의 압축강도 발현 경향을 실험적으로 규명하였다. 양생온도, 양생 전 지연시간, 양생 지속시간, 수분 공급 조건을 변수로 두어 공시체를 제작한 후 표준적인 고온습윤양생으로 제작된 공시체의 강도와 비교하였다. 실험 결과를 분석하여 현장에서 타설된 초고성능 콘크리트를 양생할 때 요구되는 최소한의 조건을 제안하였다. 이 연구를 통해 초고성능 콘크리트의 현장에서의 활용도를 더욱 높일 수 있을 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 초고성능 콘크리트, 현장타설, 강도, 양생