

Research Paper

UHPC 비정형 패널 제작 시 수화열에 의한 PCM 거푸집의 형상오차 분석

Evaluation of Shape Deviation in Phase Change Material Molds Subjected to Hydration Heat During Ultra-High Performance Concrete Free-form Panel Fabrication

김흥연¹ · 차재혁¹ · 윤종영² · 김성진³ · 이동훈^{3*}

Kim, Hong-Yeon¹ · Cha, Jae-Hyeok¹ · Youn, Jong-Young² · Kim, Sung-Jin³ · Lee, Donghoon^{3*}

¹Bachelor's Course, Graduate School, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

²PH.D Student, Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

³Professor, Department of Architectural Engineering, Hanbat National University, Daejeon, 34158, Korea

*Corresponding author

Lee, Donghoon
Tel : 82-42-821-1123
E-mail :
donghoon@hanbat.ac.kr

Received : March 28, 2023

Revised : April 20, 2023

Accepted : April 24, 2023

ABSTRACT

The construction of free-form structures with intricate curved exteriors necessitates the use of bespoke molds. To fulfill this requirement, a blend of Phase Change Material(PCM) and Ultra-High Performance Concrete(UHPC) is utilized. PCM endows the solution with recyclability, while UHPC facilitates the effortless execution of curvature in the mold fabrication process. However, it's worth mentioning that the melting point of PCM hovers around 58-64°C, and the heat emanating from UHPC's hydration process can potentially jeopardize the integrity of the PCM mold. Hence, experimental validation of the mold shape is a prerequisite. In the conducted experiment, UHPC was poured into two distinct mold types: one that incorporated a 3mm silicone sheet mounted on the fabricated PCM mold(Panel A), and the other devoid of the silicone sheet(Panel B). The experimental outcomes revealed that Panel A possessed a thickness of 3.793mm, while Panel B exhibited a thickness of 5.72mm. This suggests that the mold lacking the silicone sheet(Panel B) was more susceptible to the thermal effects of hydration. These investigations furnish invaluable fundamental data for the manufacturing of ultra-high strength irregular panels and PCM molds. They contribute substantially to the enrichment of comprehension and application of these materials within the realm of construction.

Keywords : free-form buildings, free-form concrete panels, ultra-high performance concrete, phase change materials, heat of hydration measurement

1. 서론

1.1 연구의 배경 및 목적

최근 기술의 급속한 발전에 따라 건축분야에서도 다양한 기술들이 도입되며 새로운 건축물이 시공되고 있다. 이 중 기존 건축물들과 다르게 외부 면이 다양한 곡선을 지닌 비정형 건축물이 있다. 비정형 건축물은 곡선을 지닌 외형으로 인해 전 세계적으로 랜드마크 역할을 수행하며 경제적, 사회적으로 이윤을 창출하는 등의 효과가 있다[1]. 국내의 경우 서울의 DDP(동대문 디자인 플라자)가 대표적인 비정형 건축물로 시공된 사례가 있다. DDP는 외부 패널 면의 곡선 및 비틀림 등, 기하학



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

적인 형태를 구현하기 위해 Plat, Curved, Double curved 타입이 사용되었으며 고난도의 기술력이 요구되었다[2,3]. 이러한 비정형 패널은 사용되는 위치에 따라 각기 다른 곡률 수치가 요구되어 비정형 거푸집을 맞춤형 제작하여 사용하고 있다. 그러나 맞춤형 제작된 비정형 거푸집은 재사용이 불가능하기 때문에 비정형 거푸집 제작에 재사용이 가능한 다양한 재료를 사용하는 연구가 수행되고 있다. 주로 목재, 철재, 발포 스티렌 수지(Expanded polystyrene; 이하 EPS) 등이 비정형 거푸집에 사용하고 있다[4]. 그러나 전술된 재료들은 가공에 용이하며 비정형 거푸집 재료로는 적합하지만 재사용이 불가능한 한계점이 있다. 또한 사용이 끝난 거푸집은 건설폐기물로 이어져 환경오염 및 처리비용 발생으로 총공사비를 증가시킨다. 따라서 본 연구에서는 이를 해결하기 위해 Phase Change Material(PCM)를 사용하고자 한다. PCM은 온도변화에 따라 액체와 고체로 변화가 자유로운 상변화물질이다[5]. 이를 활용하여 고체상태의 PCM으로 비정형 거푸집을 제작하며, 사용이 끝난 후 열에너지를 가하여 액체상태로 변화시킨다. 이러한 과정은 반복할 수 있기 때문에 반영구적으로 사용할 수 있으며, 재사용이 불가능한 비정형 거푸집 제작에 있어 해결방안으로 적합하다.

비정형 패널에 사용되는 재료 관련 연구도 수행되고 있다. 주로 금속, 유리, Fiber Reinforced Plastic(FRP), Glass Fiber Reinforced Concrete(GFRC) 등이 사용된다[6]. 그러나 비정형 패널에 사용되는 재료의 강도가 부족한 경우, 곡률이 요구되는 부분에서 균열이 발생하는 등 품질저하 및 시공오차가 발생한다. Ultra-High Performance Concrete(UHPC)는 압축에서 초고강도, 인장강도뿐만 아니라 균열 제어 및 연성능력 발현에 유리하다[7]. 이러한 특징으로 비정형 패널에 적절한 재료로 UHPC가 사용된다. 따라서 PCM 거푸집에 UHPC를 타설하면 재사용이 가능하며 고품질의 비정형 콘크리트 패널이 제작이 가능하다. 그러나 UHPC는 특성상 단위결합재량이 많아 높은 수화열이 발생한다[8]. UHPC의 수화열은 PCM의 용점인 약 58~64°C보다 높아 PCM 거푸집에 UHPC를 사용하는 경우, PCM이 녹아 비정형 콘크리트 패널에 오차가 발생한다. 따라서 본 연구에서는 재사용이 가능한 PCM 거푸집에 UHPC를 적용하기 위해 수화열에 의한 형상오차를 분석하고자 한다.

1.2 연구의 방법 및 절차

본 연구는 PCM 거푸집에 UHPC를 사용하여 고품질의 비정형 콘크리트 패널을 확보하고자 한다. UHPC에서 발생하는 수화열이 PCM 거푸집에 가하는 형상오차를 실험을 통해 확인하기 위해 Figure 1과 같은 프로세스로 연구를 수행한다. 첫째, 선행연구를 통해 본 연구에서 사용되는 PCM 및 UHPC 관련 연구를 분석한다. 실험에 앞서 PCM 거푸집을 제작하기 위해 CAD를 통해 설계하며 이에 맞추어 CNC 장비를 작동시켜 하부형상을 구현한다. 구현된 하부형상에 Silicone plate을 올린 후 extruded poly styrene(XPS) 측면 거푸집을 설치하여 PCM 거푸집을 제작한다. 이때 UHPC 수화열에 대한 데이터 확보를 위해 기초 실험을 실시한다. UHPC를 일반적인 거푸집에 타설한 후 온도계를 설치하여 시간 변화에 따른 수화열을 측정한다. 이후 패널 제작 실험은 제작한 PCM 거푸집에 수화열에 저항이 가능한 Silicone sheet를 설치한 비정형 거푸집과 수화열에 노출되는 일반적인 비정형 거푸집을 제작한다. 제작된 PCM 거푸집에 UHPC를 타설하여 두 패널의 형상에 3D 스캐닝 기술을 활용하여 설계형상과 제작형상을 비교하며 형상오차를 분석한다. 3D 스캐닝을 통해 확인된 오차는 UHPC 수화열에 의해 PCM 거푸집이 손상된 정도를 의미한다. 따라서 본 연구에서는 UHPC 수화열을 측정하고, 수화열이 PCM 거푸집에 미치는 영향과 Silicone sheet를 설치하였을 때 UHPC 수화열에 의한 오차의 개선여부를 확인하고자 한다.

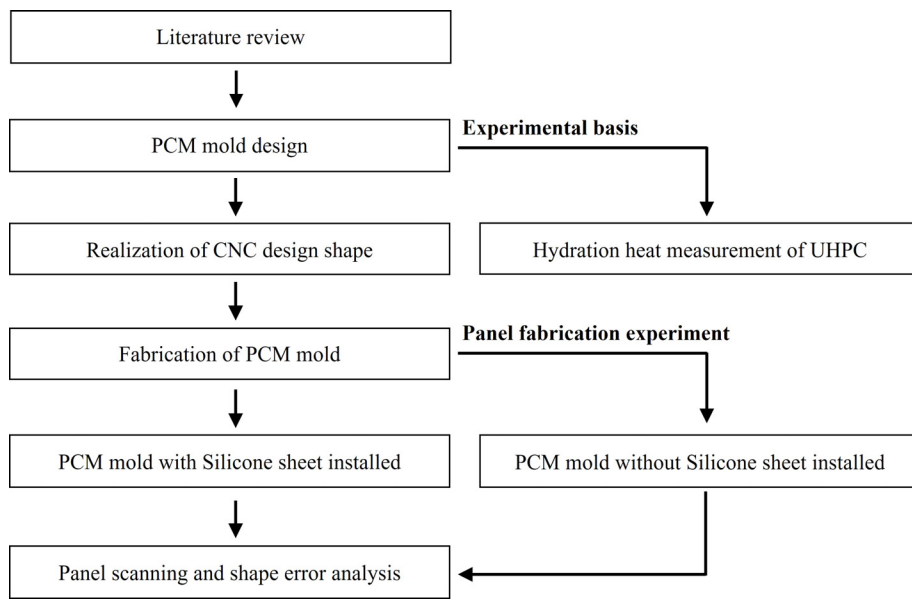


Figure 1. Process of research conduct

2. 이론적 고찰

2.1 비정형 거푸집 관련 선행연구 분석

본 연구는 재사용이 가능한 PCM 거푸집과 비정형 패널 제작에 용이한 UHPC 콘크리트를 같이 사용하기 위한 연구이다. 연구에 앞서 비정형 거푸집 관련 선행연구를 수행하고자 한다. 비정형 거푸집의 경우, 사용되는 위치에 따라 목재나 철재로 맞춤형 제작되어 사용된다. 그러나 이는 재사용이 불가하여 건설폐기물로 이어져 환경파괴 등의 문제가 있다[9]. Table 1은 이러한 비정형 거푸집을 재사용하기 위해 수행된 연구를 분석하였다. Gramazio et al.[10]는 Wax를 사용하여 재활용이 가능한 거푸집을 제작하였다. 이는 비정형 거푸집의 재활용이 가능하며 건설폐기물의 발생을 절감한 거푸집이다. 그러나 Wax 거푸집을 통해 비정형 형상을 구현하였지만 경화시간, 강도, 균열, 결정화 현상에 관하여 해결책이 요구되었다. 따라서 Wax 거푸집은 비정형 콘크리트 부재의 형상 정밀도가 낮아 실용성이 어려웠다. Lee and Kim[5]은 PCM을 활용하여 비정형 콘크리트 생산 프로세스 개발 연구를 수행하였다. PCM은 물보다 높은 온도에서는 액체가 되며 응고된 PCM은 단단한 강도와 점성이 있다. 또한 재사용이 가능하며 거푸집의 대량생산 및 신속한 제작이 가능하다. 이러한 특징을 Free-form Concrete Segment(FCS)에 적용하여 제작 기술 및 프로세스를 제시하며 검증하였다. 이러한 선행연구를 통해 비정형 거푸집 제작에 있어 PCM 활용사례를 분석하였으며 제작한 방법을 실험에 적용하고자 한다.

Table 1. Literature analysis on reusable mold[5,10]

Thesis title	Author(year)	Summarize
Zero waste free-form formwork	Gramazio et al.(2012)	Development of variable formwork technology that can use reusable on-site formwork materials
Development of PCM-enabled atypical concrete segment production process	Lee and Kim(2015)	Development of variable formwork technology with PCM, a recyclable and economical material

비정형 콘크리트 패널은 각기 다른 곡률을 요구하기 때문에 이를 구현하는 과정에서 강도가 부족할 경우 균열 및 시공오차가 발생한다. 이러한 한계점을 UHPC를 적용하여 해결한 사례를 Table 2와 같다. UHPC는 압축강도 150MPa 이상과 인장강도 8~20MPa의 고강도, 고인성을 지녔으며, 재료의 분말도가 높아 공극이 작고 밀실한 특성이 있다. 또한 일반 콘크리트에 비해 폭이 작은 균열이 고르게 분산되어 내구성이 뛰어나며 균열저항성, 유동성, 압축강도 등에 있어 우수한 점이 많다[11]. Cho et al.[7]은 UHPC를 활용하여 비정형 솔리드 및 트러스 보를 설계하여 제작한 시험체를 통해 보 재하시험을 수행하였다. 결과적으로 시험체는 다중 미세균열 제어 및 높은 압축 특성으로 전 하중 단계에서 안정적인 구조거동 양상을 보였다. 따라서 본 연구에서는 선행연구 분석으로 도출된 UHPC 배합비로 실험을 수행하고자 한다.

Table 2. Literature analysis on UHPC free-form fields[7,11]

Thesis title	Author(year)	Summarize
Impact resistance of UHPC exterior panels under high velocity impact load	Kang et al.(2016)	Impact resistance evaluation analysis of UHPC through comparison test of high-speed flying body collision between UHPC and granite panel
Conceptual approach to applications of reinforced UHPC non-uniform solid and truss beams	Cho et al.(2020)	UHPC free-form solid and truss beam design production using 3D finite element analysis and strut-tie method

3. PCM 거푸집을 활용한 UHPC 비정형 패널 제작 실험

3.1 PCM 거푸집 제작 실험

3.1.1 PCM 거푸집 디자인

파라픽 왁스는 상온보다 높은 약 58~64°C의 용점과 (174kJ/KG)으로 용해열이 작다[5]. 본 연구에서는 파라핀 왁스를 사용하여 PCM 비정형 거푸집을 제작하고자 CAD를 통해 Figure 2와 같이 설계하였다. 본 연구에서 사용하는 CNC 장비의 규격에 맞추어 설계하였으며, 곡률의 높이는 구현에 용이한 15mm로 설정하였다. 따라서 제작하고자 하는 패널의 규격은 400mm(가로)×400mm(세로)×35mm(높이)로 선정하였다. CNC 하부거푸집의 높이 35mm 중 15mm는 곡률의 시작점에서 중앙부 최고지점까지의 수직길이이다. PCM 거푸집을 제작하기 위해 CNC 장비를 사용한다. 이는 36개의 Rod가 Line 1~6으로 100mm 간격으로 설치되어 있으며, 이는 설계형상에 맞추어 상승시켜 Silicone plate를 밀어 비정형 하부형상을 구현한다. Silicone plate는 Silicone 재질로 유연하며 요구되는 비정형의 형상을 구현하기 용이한 재료이다. 이는 Figure 3과 같이 하부 CNC 장비 상부에 설치되며 규격은 600mm×600mm 실리콘 판이다.

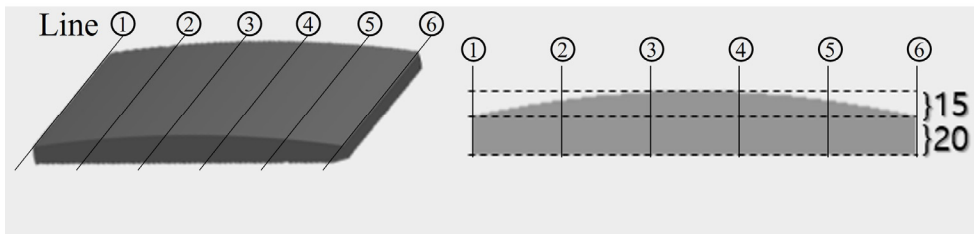


Figure 2. Free-form panel(400*400*35)



Figure 3. CNC and silicone plate(600mm*600mm)

PCM 거푸집 제작에 있어 CNC의 하부형상 구현을 위해 Rod 상승값을 Table 3과 같이 설정하였다. 비정형 형상의 곡률값을 Rod 회전수로 변환하여 계산값을 정리하였다. 방법은 Rod가 설치된 지점을 기준으로 100mm의 이격거리를 두어 총 36개의 Rod의 상승값을 정리한다. 이를 Rod 회전수와 회전 각도를 계산하여 한 바퀴당 2.45°나누어 산출된 값 만큼 Rod를 회전시켜 하부형상을 구현한다.

Table 3. Calculation of CNC Rod movement value

Line	1	2	3	4	5	6
Distance from ground to panel(mm)	30	42.83	49.2	49.2	42.83	30
Distance/2.45=1 Wheels	12.24 ≃ 12.2	17.48 ≃ 17.5	20.08 ≃ 20.1	20.08 ≃ 20.1	17.48 ≃ 17.5	12.24 ≃ 12.2
Covert the number of wheels to degrees	0.2wheels =360×0.2=72° ∴ 360-72=288°	180°	224°	224°	180°	288°
Number of wheels & Angle(°)	12Wheels 288°	17Wheels 180°	20Wheels 224°	20Wheels 224°	17Wheels 180°	12Wheels 288°

3.1.2 PCM 거푸집 제작

PCM 거푸집의 제작과정은 하부 CNC 장비의 Rod를 조절하여 하부 곡률을 구현한다. Rod 상부에 Silicone plate를 올리고 XPS 측면 거푸집을 설치한다. 거푸집에 액체 상태의 파라핀 왁스를 타설한 후 거푸집을 탈형하여 고체 상태의 PCM 거푸집을 제작하며 이는 Figure 4와 같다. 이러한 과정을 2회 반복하여 2개의 PCM 거푸집을 제작한다.



① CNC Rod Control

② XPS side mold installation

③ Paraffin wax pouring

④ PCM mold demolding

Figure 4. PCM mold manufacturing process

3.2 UHPC 비정형 패널 제작 실험

3.2.1 UHPC 수화열 측정 실험

본 연구의 목적은 UHPC 수화열에 의한 PCM 거푸집의 변형을 파악하는 것이다. 제작한 2개의 PCM 거푸집에 UHPC 타설 시 수화열에 의해 PCM 거푸집에 변형이 발생한다. 따라서 UHPC 수화열 측정 실험을 선행하여 수화열 온도를 측정한다. 이후 1개의 PCM 거푸집에 수화열에 저항이 가능한 Silicone sheet를 설치한다. Silicone은 재료적 특성상 단열성이 우수하며 열전도성이 낮아 UHPC 수화열로부터 차열 및 단열이 우수하다. 그러나 Silicone 두께에 따라 수화열에 저항 정도가 다르기 때문에 FCP 제작 실험 전에 수화열 측정 실험을 선행한다.

UHPC 수화열 측정 실험은 다음과 같이 수행한다. 설계한 UHPC 비정형 패널의 두께는 35mm이다. 수화열 분석을 위해 비정형 패널의 두께는 35mm를 기준으로 5mm 차이를 두어 30mm와 40mm의 수화열을 측정하였다. 수화열의 크기는 온도계를 UHPC 타설되는 실험체 중앙부에 온도계를 설치하여 측정하고자 한다. 배합비는 선행연구를 바탕으로 Table 4와 같이 본 실험과 동일하게 설정하였다. 측정 실험은 11:00시, 상온(22°C) 환경에서 UHPC를 타설한 후 중앙부에 온도계를 설치하였다. UHPC의 수화열은 30분 간격으로 약 13시간 동안 측정하였다.

Table 4. UHPC mixing proportion(5,600,000m³)

Panel size	W/C(%)	Cement(g)	Water(g)	Glass(g)
400×400×35m ³	0.13	11,000	1,430	22

UHPC 수화열 측정 그래프는 Figure 5와 같다. 수화열은 초반 비빔하여 타설한 온도에 비해 상승하였다. 초기 타설 8시간 경과 후 두께 40mm에서 최고 온도 55.3°C가 발현되었다. 두께 30mm는 8시간 30분 후 54.3°C가 발현되었으며 이후 두 실험체의 수화열은 점차 감소하였다. 두께 40mm인 실험체에서 수화열의 평균 및 최고 온도가 높게 측정하였기 때문에 두께가 두꺼울수록 수화열이 증가하는 것을 확인하였다.

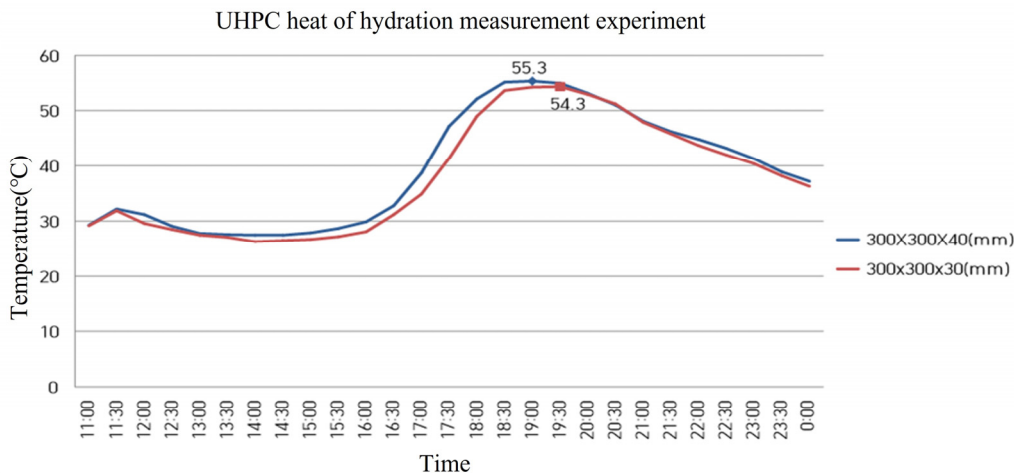


Figure 5. UHPC Hydration heat measurement

3.2.2 UHPC 비정형 패널 제작

패널을 제작하기 위해 제작된 PCM 거푸집에 UHPC를 타설한다. Silicone sheet를 설치한 거푸집을 (A), Silicone sheet를 설치하지 않은 거푸집을 (B)로 선정하였다. 수화열 측정실험에서 도출되었던 최고온도인 55.3°C에 저항이 가능한 Silicone sheet의 두께는 3mm로 설치하였다. 배합비는 전술된 실험과 동일하게 하였으며 UHPC 특성상 적은 수분이 들어가며 유동성 확보를 위해 타설 1시간 후 타설한 거푸집 상부에 폴리머 필름을 씌어 24시간 동안 습윤양생을 수행하였다. 패널의 제작 과정은 Figure 6과 같다.

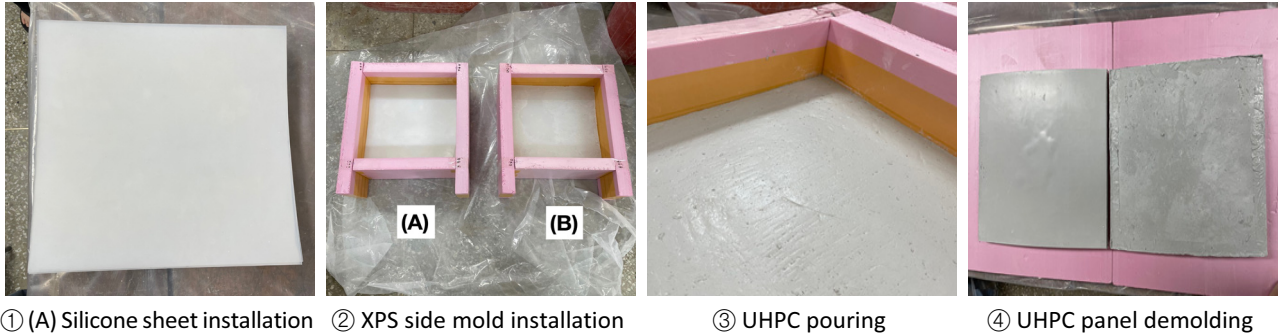



Figure 6. UHPC free-form panel manufacturing process

3.2.3 UHPC 비정형 패널 형상 분석

본 연구에서는 제작한 UHPC 패널을 3D 스캐닝을 통해 오차를 분석하고자 한다. 수화열에 의한 형상오차가 발생하는 경우 PCM 거푸집이 손상되어 기존 설계형상 보다 (-)값으로 측정될 것으로 예측된다. 본 연구에서는 광학식 스캐너 Proto 3000사의 Go! SCAN SPARK3D 스캐닝 장비를 사용하였다. 이는 Color map 기능이 있어 오차가 발생한 부분이 선명한 Color로 표시되어 확인에 용이하다. 기기의 사진 및 사양은 Table 5와 같다.

Table 5. Go! SCAN SPARK Specification

Picture	Hardware	
	Size	89×114×346mm ³
	weight	1.25kg
	Scan range	390mm×390mm
	Software program	VXelements
	Support file	STL/TXT/WRL/X3D/X3DZ

제작한 (A)와 (B)의 형상을 3D 스캔하여 스캔 분석 프로그램인 VXelements로 오차를 분석한다. CAD로 모델링하였던 설계형상과 (A), 설계형상과 (B)를 비교분석한다. 스캔에 있어 정밀한 오차 분석을 위해 스캔된 패널의 형상에서 배경, 요철, 공극 등을 보정을 통해 제거하였으며, 평탄화 작업을 통해 오차값을 추출하였다. (A)와 (B)의 패널 오차값을 Table 6에 정리하였다.

Table 6. UHPC panel deviation

Panel	Minimum(mm)	Maximun(mm)	Max + Min (mm)	Std. Deviation(mm)
(A)	-1.8	1.994	3.793	0.549
(B)	-2.997	2.724	5.72	0.767

(A) 패널 오차값은 3.793mm, (B) 패널의 오차값은 5.72mm로 도출되었다. 오차값은 설계도면을 기준으로 색으로 표현되었다. (+)값은 설계형상 밖으로 위치한 부분이며 붉은 계열로 표시되었다. (-)값은 설계형상 안으로 위치한 값으로 푸른 계열로 표시되었으며 수화열에 의해 발생한 오차를 의미한다. Figure 7(1)은 (A) 패널의 오차를 의미하며 붉은 계열로 돌출된 형상 오차가 발생하였다. 이는 PCM 거푸집 제작과정에서 곡면에서 발생한 함몰된 부위에서 발생한 오차값이며, UHPC 수화열에 의한 오차값이 아닌 것으로 확인되었다. 또한 (A) 패널 푸른 계열의 형상 오차가 발생하였다. 이는 Silicone sheet 3mm의 두께가 부족하거나 설치된 부분에서 모든 수화열을 차단하지 못해 발생한 것으로 판단된다. Figure 7(2)는 (B) 패널의 가장자리가 UHPC의 수화열에 의해 손상된 형상을 의미한다. 결과적으로 Silicone sheet가 들어가지 않은 (B) 거푸집에서 UHPC 수화열에 취약한 것으로 분석되었다.

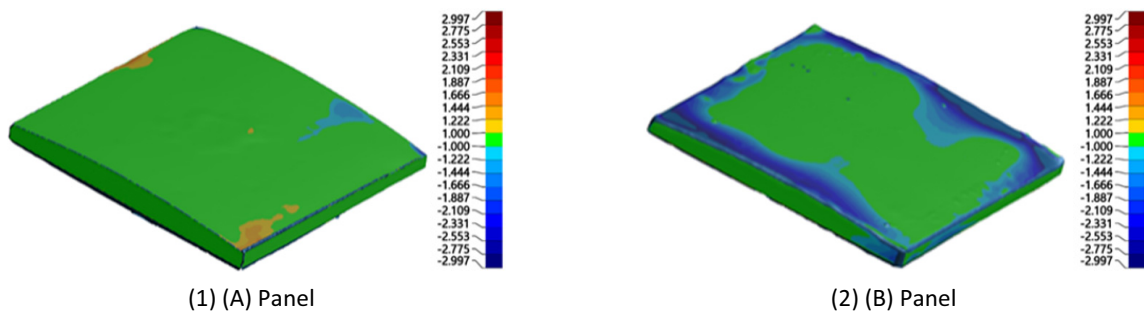


Figure 7. UHPC free-form panel deviation value

4. 결론

비정형 패널은 사용되는 위치에 따라 각기 다른 곡률을 요구하기 때문에 거푸집을 맞춤제작하여 사용한다. 이러한 비정형 거푸집은 사용이 끝난 후 재사용 불가 및 건설폐기물 증가 등의 한계점이 있었다. 이를 해결하기 위해 재활용이 가능한 PCM 거푸집 관련 연구가 수행되었다. 이에 맞추어 비정형 거푸집에 사용되는 재료 관련 연구도 수행되었다. 이때, 곡면 구현에 용이한 강도와 유동성을 지닌 UHPC가 적절한 재료로 선정되었다. 그러나 UHPC는 경화되는 과정에서 수화열이 발생하며 이는 PCM 거푸집의 용점보다 높기 때문에 비정형 형상에서 오차가 발생할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 PCM 거푸집을 활용한 UHPC 패널 제작 및 수화열에 의한 형상오차를 분석하기 위해 실험을 수행하였다.

실험은 PCM 거푸집에 수화열에 저항이 가능한 Silicone sheet를 설치한 (A)와 설치하지 않은 (B)를 제작하였다. 2개의 패널을 분석한 결과를 다음과 같이 정리하였다.

- 1) 스캔 분석 결과, (A)의 최대와 최소의 형상오차 값의 차이는 3.793mm, (B)는 5.72mm가 측정되었다. Silicone sheet를 설치하지 않은 (B)에서 더 큰 오차값이 발현되었다. 이는 UHPC의 수화열에 의해 PCM 거푸집이 녹아 발생한 것으로 확인되었다.
- 2) Silicone sheet를 설치한 (A) 패널은 3.793mm의 형상 오차가 발생하였다. 붉은 계열의 돌출된 형상 오차로 원인을 분

석해됐을 때, PCM 거푸집의 곡면 마감 불량으로 인해 발생, CNC의 수동조작으로 인한 오차값 발생, PCM 거푸집의 보관 불량으로 테두리 손상 등이 오차의 원인으로 판단된다. 패널의 테두리 위치에 푸른 계열의 함몰된 형상 오차가 발생하였다. 이는 UHPC 수화열에 저항하기 위해 Silicone sheet를 사용하였지만 3mm의 두께가 부족하였거나 거푸집과의 접착불량으로 인한 오차로 판단된다. 이는 추후 실리콘의 두께를 변경하는 등 추가적인 실험이 요구된다.

- 3) (A) 패널은 형상 오차가 거의 일어나지 않았다. 표면은 공극의 수가 적고 깔끔한 마감 상태가 구현되었다. (A) 패널에 비해 (B) 패널은 공극의 수가 더 많았으며 거친 표면 마감 상태가 구현되었다. 또한 PCM 거푸집의 마감 상태가 패널 형상에 구현 되었으며 수화열에 의해 손상된 형상이 구현되었다. Silicone sheet는 단열 및 차열 기능으로 사용되었으나 PCM 거푸집의 표면 마감 형태에도 영향을 미쳤다.

본 연구에서는 재사용이 가능한 PCM 비정형 거푸집에 비정형 형상 제작에 용이한 UHPC를 사용하기 위해 비정형 패널을 제작하여 형상오차 분석을 수행하였다. 이를 위해 Silicone sheet를 활용하여 수화열에 의한 오차측정 실험을 선행하였다. 수화열 최고온도는 두께 40mm에서 약 55.3°C가 발현되었다. 이러한 수화열 차단 및 형상오차 저감을 위해 Silicone sheet를 PCM 거푸집에 설치하여 패널 제작실험을 진행하였다. 현재 비정형 패널에 관한 오차값에 대한 규정은 없기 때문에 주로 비정형 패널이 벽체에 사용됨에 따라 건축공사 내력 벽체 허용오차 기준 3mm를 적용한다. 제작된 패널의 형상의 평균값은 3mm를 만족하였기 때문에 두 패널 모두 사용이 가능한 정도의 오차가 발생하였다. Silicone sheet를 설치한 패널의 경우 오차가 약 2mm가 개선되어 Silicone sheet와 유사한 수화열을 차단하는 소재를 거푸집에 적용 시 오차 개선이 가능한 것을 확인하였다. 그러나 Silicone sheet를 사용한 PCM 거푸집에서도 UHPC 수화열에 의한 오차가 측정되었다. 이를 해결하기 위해 Silicone sheet의 최적 두께선정 및 PCM 거푸집의 용융점 개선 등이 요구된다. 이러한 연구는 초고강도 비정형 패널 제작 및 PCM 거푸집 활성화 및 사용성에 있어 기초적인 자료로 활용될 것으로 기대된다.

요약


비정형 건축물은 외부면이 다양한 곡선이기 때문에 비정형 거푸집은 맞춤형제작되어 사용된다. 비정형 거푸집 제작에 있어 재활용이 가능한 Phase Change Material(PCM)과 곡률구현에 용이한 Ultra-High Performance Concrete(UHPC)가 사용된다. 그러나 PCM은 약 58~64°C가 용점이며, UHPC의 수화열로 PCM 거푸집이 손상될 수 있어 실험을 통해 형상을 확인한다. 실험은 제작한 PCM 거푸집에 Silicone sheet 3mm를 설치한 (A)와 설치하지 않은 (B) 거푸집에 UHPC를 타설한다. 실험 결과 (A) 3.793mm, (B) 5.72mm가 측정되었으며, (B) 거푸집이 수화열에 취약한 것으로 분석되었다. 이러한 연구는 초고강도 비정형 패널 및 PCM 거푸집 제작 관련 기초자료로 활용될 것으로 기대된다.


키워드 : 비정형 건축물, 비정형 콘크리트 패널, 초고성능 콘크리트, 상변화물질, 수화열 측정


Funding


This work was supported by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government (MSIT)(No. 2020R1C1C1012600).


ORCID

Hong-Yeon Kim,  <http://orcid.org/0009-0001-5183-748X>

Jae-Hyeok Cha,  <http://orcid.org/0009-0002-3002-1446>

Jong-Young Youn,  <http://orcid.org/0000-0001-8075-8943>

Sung-Jin Kim,  <http://orcid.org/0000-0002-4768-4206>

Donghoon Lee,  <http://orcid.org/0000-0002-4044-9959>

References

1. Kim JH, Kim JY. Effects of trip factors relating to dongdaemun design plaza & park (DDP) on visitor` satisfaction and revisit intention. Korean Society of Basic Design & Art. 2015 Apr;16(2):99-112.
2. Seo WS, Yu SJ. Design and construction for the free-form building - Focusing on the case of unstructured 3d exterior metal panel construction buildings through the dongdaemun design plaza -. Autumn annual conference of architectural institute of Korea; 2016 Oct 4-6, Busan, Korea. Seoul (Korea): The Architectural Institute of Korea; 2016. p. 1525-8.
3. Kim CK, Kim CJ. A study on expressive characteristics of informal form in the contemporary architecture. Journal of The Architectural Institute of Korea. 2003 Apr;19(4):101-8.
4. Ahn HJ, Lee DY, Ji WJ, Lee WJ, Cho HH. Development of method for manufacturing freeform EPS forms using sloped-LOM Type 3D Printer. Journal of the Korea Institute of Building Construction. 2020 Apr;20(2):171-81. <https://doi.org/10.5345/JKIBC.2020.20.2.171>
5. Lee DH, Kim SK. Development of PCM-enabled a typical concrete segment production process. Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea. 2015 Feb;17(1):219-24.
6. Park YM, Kim HW, Park KH, Kim SJ. Study on construction example of free formed curved facade using external UHPC panels -Focused on the remodeling construction of samsung-dong KEB hana bank -. Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference; 2017 May 17-19; Gyeongju, Korea. seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2017. p. 62-3.
7. Cho CG, Kim HY, Kim HG. Conceptual approach to applications of reinforced UHPC non-uniform solid and truss beams. Journal of the Korea Concrete Institute. 2020 Dec;32(6):593-600. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2020.32.6.593>
8. Cha SW, Kim KH, Kim SW, Park JJ, Bae GS. Models for hydration heat development and mechanical properties of ultra high performance concrete. Journal of the Korea Concrete Institute. 2010 Jun;22(3):389-97. <https://doi.org/10.4334/JKCI.2010.22.3.389>
9. Youn JY, Yun JY, Kim SJ, Han BJ, Do SL, Lee DH. An Analytical study of the latest trends of free-form molds. Sustainability. 2022 Mar;14(5):3084. <https://doi.org/10.3390/su14053084>
10. Gramazio F, Kohler M, Willmann J, Oesterle S, Vansteenkiste A, Mirjan A. Zero waste free-form formwork. Proceedings of the Second International Conference on Flexible Formwork; 2012 Jun 27-29; Bath, United Kingdom. Claverton Down (United Kingdom): BRE CICM, University of Bath; 2012. p. 258-67.
11. Kang HK, Kim SH, Kim MS, Hong SG. Impact resistance of UHPC exterior panels under high velocity impact load. Journal of the Korea Concrete Institute. 2016 Aug;28(4):455-62. <http://dx.doi.org/10.4334/JKCI.2016.28.4.455>