

# 등가재령을 활용한 초고성능 콘크리트의 압축강도 예측식 제안

## A Proposal for Predicting the Compressive Strength of Ultra-high Performance Concrete Using Equivalent Age

백성진<sup>1\*</sup> · 박재웅<sup>2</sup> · 한준희<sup>3</sup> · 김 종<sup>4</sup> · 한민철<sup>5</sup>

Baek, Sung-Jin<sup>1\*</sup> · Park, Jae-Woong<sup>2</sup> · Han Jun-Hui<sup>3</sup> · Kim, Jong<sup>4</sup> · Han, Min-Cheol<sup>5</sup>

**Abstract** : This study proposes the most suitable strength prediction model equation for UHPC by calculating the apparent activation energy of UHPC according to the curing temperature and deriving the integrated temperature and compressive strength prediction equation. The results are summarized as follows. The apparent activation energy was calculated using the Arrhenius function, which was calculated as 21.09 KJ/mol. A model equation suitable for UHPC was calculated, and when the Flowman model equation was used, it was confirmed that it was suitable for the properties of UHPC using a condensation promoting super plasticizing agent.

**키워드** : 초고성능 콘크리트, Plowman 모델식, Gompertz 모델식

**Keywords** : ultra high performance concrete, plowman model equation, gompertz model equation

### 1. 서론

최근 국내에서는 기존의 콘크리트에 비해 고성능, 고강도, 고유동 및 고인성을 가진 콘크리트인 초고성능 콘크리트(Ultra High Performance Concrete, 이하 UHPC)에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 이러한 UHPC는 다양한 요인들을 해결하고자 급속경화 양생설비를 사용하여 성능을 확보하고 있는 상황으로 그에 따른 압축강도 발현특성을 정량적으로 평가할 필요가 있다. 본 연구에서는 UHPC의 양생온도 변화에 따른 강도발현 특성을 평가하기 위해 적산온도 기법에 의한 강도발현 해석을 수행하고자 한다.

### 2. 실험계획 및 방법

표 1. 실험계획

실험항목		실험수준			
실험 요인	W/B (%)	1	• 23		
	UHPC		• SC120F <sup>1)</sup>		
	양생온도 (°C)	3	• 5	• 10	• 20
실험 사항	균지 않은 콘크리트	1	• 응결시간		
	경화된 콘크리트		• 압축강도 <sup>2)</sup>		
분석 방법	강도분석	2	• Plowman 모델식	• Gompertz 모델식	

1) 프리믹싱된 제품 사용

2) 종결시간의 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64배 시점에 측정

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다. UHPC는 프리믹싱 된 SC120F를 사용하였으며, 조강성 고성능감수제의 종류로는 국내 혼화제 제조사에서 생산되는 응결 촉진형 K사 감수제를 사용하였다. 또한, 목표 슬럼프 플로 600 ± 100에 목표 공기량 2.0 ± 1.0 %에 맞춰서 배합설계를 진행하였다. 또한, 양생온도는 ASTM C 1074에서 제안하고 있는 수준의 온도조건을 참고하여 선정하였다. 본 연구의 실험방법으로 응결시간은 KS F 2436에 의거하여 실시하였는데, 5, 10, 20°C가 유지되는 양생 챔버를 이용하여 종결시점을 측정하고 종결시점을 기준으로 하고 ASTM에서 제안하는 재령마다 각 온도별로 압축강도를 측정하였다.

1) 청주대학교, 석사과정, 교신저자(psj970616@gmail.com)

2) 청주대학교, 석사과정

3) 청주대학교, 박사과정

4) 청주대학교, 조교수, 공학박사

5) 청주대학교, 교수, 공학박사

### 3. 실험결과 분석 및 고찰

표 2. 양생온도에 따른 응결 및 압축강도

양생온도 (°C)	E <sub>a</sub> 결보기 활성화 에너지	응결시간 (h)		재령에 따른 압축강도 (MPa)				
		초결	종결	1일	3일	7일	28일	56일
20	21.09 KJ/mol	2.81	4.35	40.7	49.6	58.8	78.3	87.6
10		2.73	4.63	36.9	45.3	54.1	73.4	80.5
5		4.95	7.33	27.0	33.7	48.0	57.1	64.0

표 3. 압축강도 예측 모델식

모델식	결정계수 (R <sup>2</sup> )
(a) $S = a + b(\log(M))$	0.882
(b) $F_c = F_\infty * \exp[-a(1/M)^b]$	0.881

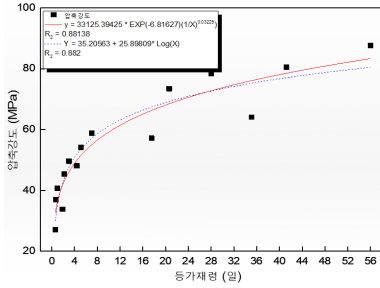
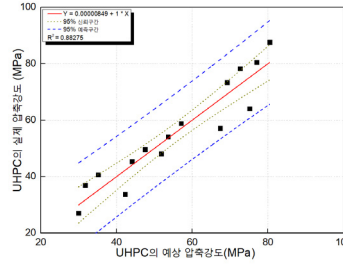
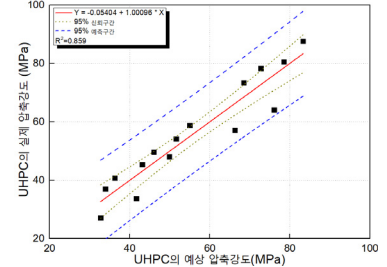


그림 1. 압축강도 예측 모델식에 따른 압축강도 예측



(a) Plowman식



(b) Gompertz식

그림 2. 모델식에 따른 예상 압축강도와 실제 압축강도 비교

Arrhenius 함수를 활용하여 온도 변화에 따른 활성화에너지(이하 E<sub>a</sub>)는 21.09 KJ/mol로 산정되었다. 이는 기존 혼화재료를 사용하지 않는 1종 시멘트의 E<sub>a</sub>=40~45 KJ/mol 보다 낮게 측정되었다. 이는 OPC 보다 UHPC 결합체가 수화반응 속도에 미치는 민감도 변화에 기인하여 낮아진 것으로 판단된다. 낮아진 E<sub>a</sub>는 수화 반응에 요구되는 최소 에너지가 작아져서 강도 발현이 빨라지는 것을 의미한다[1].

그림 1은 표 3에 (a)와 (b)에 해당하는 모델식을 활용하여 압축강도 예측식을 나타낸 것이다. 먼저 (a)에 해당하는 Plowman 모델식을 활용한 경우 R<sup>2</sup>가 0.882로 확인되었다. 이는 응결촉진형 감수제를 사용한 UHPC 특성의 경우 초기 재령은 급격하게 높아지지만 장기 재령으로 갈수록 초기 재령에 비해서 발현속도가 저하하는 특성을 가진 재료로서 Plowman 식에 Log함수에 특성에 의해서 높은 R<sup>2</sup> 값을 나타낸 것으로 사료된다[2]. (b)에 해당하는 Gompertz 모델식을 활용한 경우 R<sup>2</sup>가 0.881로 확인되었다. Gompertz 모델은 S자 형태의 성장곡선(S-curve)를 보인다는 특징을 가지고 있다. 이는 UHPC의 경우 초기에 급격한 수화반응을 일으키는 성질을 가지고 있어서 Gompertz 모델에는 적합하지 않는 것으로 판단된다[3].

### 4. 결론

본 연구에서는 UHPC의 양생온도 변화에 따른 강도발현 특성을 평가하기 위해 적산온도 기법에 의한 강도발현 해석을 수행하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) Arrhenius 함수를 이용하여 산정한 UHPC의 결보기활성화에너지는 21.09 KJ/mol로 계산되었다.
- 2) UHPC에 적합한 모델식을 검토한 결과에 Plowman 모델식이 Gompertz 식보다 양호하게 측정함을 확인할 수 있었다.

### 감사의 글

본 논문은 2023년 한국건설기술연구원(과제번호: 2023OO151)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사를 드립니다.

### 참고문헌

1. 한민철. 응결시간 및 ASTM 방법에 의한 결보기 활성화 에너지가 콘크리트의 응결 및 강도증진에 미치는 영향 비교. 대한건축학회 논문집-구조계. 2011. 제27권 1호. p. 153-160.
2. 최성용, 박영환, 정우태. 적산온도에 의한 FRC 기층의 강도발현 성능 분석. 한국도로학회논문집. 2016. 제18권 1호. p. 13-21.
3. 김형진, 김시곤. 고속철도차량의 기술격차 예측과 기술추격 전략. 대한토목학회국문논문집. 2023. 제43권 1호. p. 131-138.