

적산온도를 이용한 시멘트 종류별 고강도 콘크리트의 현장 적용성

Field Application of High Strength Concrete by Cement Types Using Maturity

김동백*

Dong Baek Kim*

Professor, Construction Engineering Research Institute/ Department of Civil & Environment Engineering, Hankyong National University, An Seong, Republic of Korea

*Corresponding author: Dong Baek Kim, dbkim@hknu.ac.kr

ABSTRACT

Purpose: The purpose of the study is to help economic and safe construction by accurately predicting the initial strength of high-strength concrete ($70MPa$) for each type of cement, securing reliability of concrete quality, and drawing accurately the timing of form deformed, tensioning time of PS concrete, and opening of traffic after road repair with maturity. **Method:** Calculate the maturity by measuring the hydration heat with cement type for each age, and measure the strength of concrete with age to predict the strength corresponding to the any maturity. **Result:** In estimating the time required for traffic opening in road repair, ASTM C1074 was theoretically estimated at 16.4 hours for high-strength concrete, but in this study, maturity was calculated at 307, 14.4 hours for OPC and maturity at 2700, 34 hours for LHPC and maturity 200, 8 hours for ESPC. **Conclusion:** The timing of form deformed of structures using high-strength concrete and the opening of traffic of road repair may be much faster than in the case of concrete using OPC below the design basis strength 40MPa applied by ACI Committee 347.

Keywords: Initial Strength, Maturity, High-strength Concrete, Hydration Heat, Opening of Traffic

요약

연구목적: 적산온도를 이용하여 시멘트 종류별로 고강도 콘크리트($70MPa$)의 초기 강도를 정확히 예측하여 콘크리트 품질의 신뢰성 확보, 거푸집 탈형 시기, PS 콘크리트의 텐서닝 타임, 도로 보수 후 교통의 진입 시기 등을 정확히 도출하여 경제적이고 안전한 건설공사에 도움을 주고자 한다. **연구방법:** 시멘트 종류별 수화열을 재령마다 측정하여 적산온도를 계산하고, 재령별 콘크리트의 강도를 측정하여 임의의 적산온도에 상응하는 강도를 예측한다. **연구결과:** 도로보수에서 교통개방에 필요한 시간을 추정하는데 있어서, ASTM C1074에서는 고강도 콘크리트의 경우에는 이론적으로 16.4시간으로 예측하였으나, 본 연구에서는 OPC인 경우의 적산온도 307, 14.4 시간, LHPC인 경우의 적산온도 2700, 34시간, ESPC인 경우의 적산온도 200, 8시간 정도로 계산되었다. **결론:** 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 거푸집 탈형시기 및 도로보수의 교통개방 시기는, ACI Committee 347을 적용한 설계기준강도 $40MPa$ 이하의 보통콘크리트의 경우보다 월등히 빨라질 수 있다.

핵심용어: 초기강도, 적산온도, 고강도 콘크리트, 수화열, 교통개방

Received | 13 May, 2020

Revised | 22 June, 2020

Accepted | 14 July, 2020

 OPEN ACCESS

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 noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

서론

최근에는 콘크리트의 많은 연구와 기술의 비약적인 발전으로 구조물의 목적별로 다양한 시멘트를 사용한 고강도 콘크리트를 이용하여 초고층 빌딩, 초장대 교량, 두꺼운 기초, 옹벽 및 터널 라이닝, 포장 등이 시공됨에 따라 콘크리트의 초기강도 발현을 정확히 예측하는 것은 공사비 절감과 안전시공을 위해 매우 중요한 사항이다(Wu et al., 2005). 따라서 시멘트의 수화열과 강도와의 관계인 적산온도(Maturity)를 이용하는 방법이 다시금 필요하게 됨에 따라 미국의 여러 주에서는 적산온도를 이용해서 교통개방 시기를 추정하고 있으며, 건축물이나 부재의 압축강도를 예측하여(Sin et al., 2018)공사를 수행하고 있다. 본 연구에서는 적산온도를 이용하여 시멘트의 종류별로 고강도 콘크리트의 초기강도를 정확히 예측하여(Kim et al., 2015) 콘크리트 품질의 신뢰성 확보(Ryu et al., 2015), 거푸집 제거 시기, PS 콘크리트의 텐서닝 타임, 도로보수 후 교통의 진입 시기, 줄눈 시공 시기 등을 정확히 도출하는데 데이터를 제공하고자 한다.

연구내용 및 방법

본 연구에서는 현재 많이 사용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 조강 포틀랜드 시멘트(ESPC), 중용열 시멘트(LHPC)의 3종류를 사용하여 설계기준강도 70MPa의 표준 공시체를 제작한 후 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 14일, 21일, 28일, 91일 압축강도를 각 5개씩 측정하였다. 또한, 수화열을 측정하기 위하여 한 변이 800mm인 매스 콘크리트를 시멘트 종류별로 각 2개씩 총 6개를 제작하여 30분 간격으로 4주간 수화열을 측정하였으며, 양생온도는 실내온도 25°C로 하였다. 특히 중용열 시멘트를 사용한 경우는 91일간 수화열을 측정한 후 시멘트 종류별 콘크리트의 적산온도와 강도와의 관계를 확인하였다. Carino의 지수함수 형태의 등가재령 식(1) 및 Nykanen의 지수함수 형태의 식(2), Hansen & Pedersen의 등가재령 모델 식(3)을 참고로 하여, 본 연구에서는 Plowman의 식(4)에 의한 적산온도와 실험에서 측정한 수화열을 이용하여 계산한 적산온도를 비교 및 검증하고, 적산온도에 해당하는 초기강도 발현을 정확히 예측하여(Jin et al., 2002)실무에서 응용할 수 있는 기초 자료로 제공하고자 한다.

$$t_e = \sum_0^t \exp \beta (T - t_r) \Delta t \quad (1)$$

$$S = a + b \cdot \log(M), \quad M = \sum (10 + T) \Delta t \quad (2)$$

$$t_e = \sum_0^t \left[e^{\frac{E}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_r} \right)} \right] \Delta t \quad (3)$$

$$B = \frac{E}{R} \frac{1}{296 \cdot (273 + T)} \quad (4)$$

수화열 및 강도 측정시험

배합설계

사용한 보통 시멘트는 비중 3.14, MgO 4.8%, SO₃ 3.4%, 강열감량 2.7%, 분말도 3,300인 1종 시멘트를 사용하였으며, 저발열시멘트는 비중 3.21, MgO 4.8%, SO₃ 2.8%, 강열감량 2.8%, 분말도 3,300인 2종 시멘트를 사용하였고, 조강 시멘트는 비중 3.12, MgO 4.7%, SO₃ 4.1%, 강열감량 2.8%, 분말도 4,200인 3종 시멘트를 사용하였고, 잔골재는 조립률은 2.68의 해사를 세척하여 사용하였으며 굵은 골재는 최대치수 25 mm의 쇄석을 사용하였다.

배합은 고강도인 압축강도 70 MPa를 기준으로 설계하였으며, 굵은 골재의 최대치수는 25 mm, 단위 중량 2,400 kg/m³, 잔골재율 43.8%, W/B 23.5%, 콘크리트 1 m³를 기준으로, 물 168 kg, 시멘트 717 kg, 모래 645 kg, 자갈 827 kg을 혼합했으며, fly ash를 포함하면 결합재의 양은 727.74 kg, 워커 빌리티 확보를 위해 감수제는 결합재(시멘트 등)의 1%를 혼합했다(Table 1).

Table 1. Mix. table for 70 MPa of f_{28}

Design Strength (MPa)	Slump Flow (mm)	W/B (%)	S/a (%)	Ingredients (kg)				Admixture (kg)		
				W	C	S	G	Water reducing agent	silica fume	fly ash
70	600	23.5	46.2	168	717	645	827	0.717	8.80	10.74

시험체의 제작

굳지 않은 콘크리트의 물성을 평가하기 위하여 공기량, 슬럼프 및 슬럼프 플로우 시험을 각각 실시하였다. 목표 공기량은 $1.5 \pm 0.5\%$ 로 설정하고 혼화제를 사용하여 공기량을 제어하였으며, 공기량은 KS의 굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법에 의하여 측정하였다. 목표 슬럼프 플로우는 600 ± 80 mm로 설정하였으며, 혼화제는 시험배합을 하여 투입량을 조절하였다(Kim et al., 2017). 슬럼프 플로우 값의 측정은 무너진 비빈 콘크리트의 최대 지름과 직교하는 두 지점의 지름을 측정하여 평균값으로 하였다(KS F 2423, 2015). 각 종류별 공시체의 제작은 다음과 같이 진행하였다. 단계별 강도 측정용 표준 공시체는 150 mm × 300 mm로 하여 사용한 시멘트 종류별로 2일, 3일, 5일, 7일, 10일, 14일, 21일, 28, 56일, 91일의 10단계 강도를 측정하기 위해 각 5개 × 10단계 × 3종류로 하여 총 150개를 제작하였으며, 수화열 측정용 시험체는 1번의 길이가 80 cm인 입방체로 시멘트 종류별로 각 2개씩 총 6개를 제작하였다(Table 2). 또한, 표준 공시체는 콘크리트의 강도시험용 공시체 양생방법인 KS F2403에 따라 $25 \pm 1^\circ\text{C}$ 의 수조에서 수중양생을 실시하였다.

Table 2. Types of specimen

Cement	Specimen	Cylinder Specimen		Cubic Specimen	
		Dimension (mm)	Numbers	Dimension (mm)	Numbers
OPC		150 × 300	50	800 × 800 × 800	2
LHPC		150 × 300	50	800 × 800 × 800	2
ESPC		150 × 300	50	800 × 800 × 800	2
Total			100		4

시멘트 종류별 수화열 및 강도측정

본 연구는 고강도 콘크리트($f_{ck} = 70MPa$)이기 때문에 물-결합재비(W/B)가 23.5% 이며 수화도가 낮아서 초기 수화 후에는 수화가 지연되기 때문에 수화열이 적게 발생할 수 있고 강도의 발현이 늦을 수 있다. 또한, 본 연구에서는(Fig. 1)과 같은 Smart System을 이용하여, 실험 당시의 평균온도인 25°C를 타설온도(양생온도)로 설정하여 타설 후 1일(24)시간 이후부터 수화열 Q1 및 Q2를 측정하고, 각 날짜에 따른 적산온도(Maturity)를 계산하였는데 그 결과는 Table 3과 같다.

공시체의 양생은 25 ± 1°C의 수조에서 표준의 수중양생을 실시하였으며, 콘크리트 공시체 연마기를 이용하여 양면을 연마한 후, 시멘트 종류별로 원주형 공시체의 1일, 3일, 5일, 7일, 10일, 14일, 21일, 28일 압축강도는 KS F 240511의 콘크리트의 압축강도 시험방법에 따라 측정하였다. 재하속도는 초당 0.6 ± 0.4 MPa로 하여 측정하였고, 이때의 압축강도는 다음의 식 (5)와 같이 계산하며 그 결과는 Table 4와 같다.

$$f_c = \frac{P}{A_c} = \frac{P}{\frac{\pi D^2}{4}} = \frac{P}{5,625\pi} \text{ (MPa)} \tag{5}$$



Fig. 1. Measurement of hydration heat

Table 3. Hydration heat and maturity of test specimens

Class Items Interval	OPC Hydration Heat.&Maturity (cal/g)				LHPC Hydration Heat & Maturity (cal/g)				ESPC Hydration Heat & Maturity (cal/g)			
	Q1	Q2	Qavg	Maturity	Q1	Q2	Qavg	Maturity	Q1	Q2	Qavg	Maturity
1	33.1	32.4	32.75	513	29.0	26.4	27.70	452	39.3	41.4	40.35	604
2	45.7	38.2	41.95	1,649	39.7	38.2	38.95	1,492	57.7	59.2	58.45	2,030
3	59.3	59.2	59.25	3,311	46.2	45.8	46.00	2,751	70.1	73.4	71.75	3,832
4	66.2	65.8	66.00	5,054	49.1	48.8	48.95	4,130	74.6	76.7	75.65	5,841
5	68.1	67.9	68.00	6,902	51.9	51.1	51.50	5,575	77.6	79.8	78.70	7,933
6	72.1	71.7	71.90	8,821	54.6	53.6	54.10	7,082	79.5	81.7	80.6	10,085
7	73.9	72.9	73.40	10,805	57.2	55.8	56.50	8,649	81.1	83.8	82.45	12,282
8	75.8	74.4	75.10	12,827	59.3	57.9	58.60	10,270	81.8	83.6	82.70	14,504

Table 3. Hydration heat and maturity of test specimens (Continue)

Class Items Interval	OPC Hydration Heat.&Maturity (cal/g)				LHPC Hydration Heat & Maturity (cal/g)				ESPC Hydration Heat & Maturity (cal/g)			
	Q1	Q2	Qavg	Maturity	Q1	Q2	Qavg	Maturity	Q1	Q2	Qavg	Maturity
9	77.2	76.7	76.95	14,892	61.1	59.5	60.30	11,937	82.6	84.3	83.45	16,738
10	78.1	77.6	77.85	16,990	62.8	61.2	62.00	13,645	83.5	85.3	84.40	18,992
11	79.2	78.8	79.00	19,112	64.5	63.8	64.15	15,399	84.3	86.0	85.15	21,267
12	79.9	79.4	79.65	21,256	65.7	64.6	65.15	17,191	84.6	86.4	85.50	23,555
13	80.3	80.0	80.15	23,414	66.2	65.3	65.75	19,002	85.1	86.9	86.00	25,853
14	81.1	80.7	80.90	25,587	66.9	66.0	66.45	20,828	85.7	87.5	86.60	28,164
15	81.6	81.2	81.40	27,775	67.1	66.4	66.75	22,666	86.5	88.1	87.30	30,491
16	82.2	81.7	81.95	29,975	67.8	66.9	67.35	24,515	87.2	88.7	87.95	32,834
17	82.4	82.1	82.25	32,185	68.5	67.4	67.95	26,379	88.1	89.2	88.65	35,193
18	83.1	82.6	82.85	34,406	68.9	67.9	68.40	28,255	89.3	89.5	89.40	37,570
19	83.7	83.0	83.35	36,640	69.1	68.3	68.70	30,140	90.1	89.7	89.90	39,962
20	84.4	83.5	83.95	38,888	69.7	68.9	69.30	32,036	90.6	90.2	90.40	42,366
21	84.9	84.0	84.45	41,149	70.4	69.5	69.95	33,947	91.0	90.6	90.80	44,780
22	85.5	84.6	85.05	43,423	71.2	70.2	70.70	35,875	91.5	91.1	91.30	47,205
23	85.7	85.0	85.35	45,708	72.4	71.1	71.75	37,824	92.1	91.6	91.85	49,643
24	86.2	85.7	85.95	48,004	72.9	71.8	72.35	39,793	92.6	92.2	92.40	52,094
25	86.6	86.2	86.40	50,312	73.1	72.3	72.70	41,774	93.1	92.8	92.95	54,558
26	87.3	86.9	87.10	52,634	74.1	72.9	73.50	43,768	93.6	93.4	93.50	57,035
27	87.9	87.4	87.65	54,971	74.6	73.4	74.00	45,778	93.9	94.1	94.00	59,525
28	88.6	87.8	88.20	57,321	75.8	73.9	74.85	47,804	94.1	95.2	94.65	62,029
56	93.3	93.2	93.25	125,008	77.1	77.1	77.10	105,579	101.2	101.2	101.20	134,555
91	95.9	95.8	95.85	212,830	82.6	82.1	82.35	180,948	104.1	103.9	104.00	229,139

Table 4. Strength of cylinder specimens with 3 type cement

f_c TIMES days	Strength of OPC (MPa)						Strength of LHPC (MPa)						Strength of ESPC (MPa)					
	1	2	3	4	5	avg	1	2	3	4	5	avg	1	2	3	4	5	avg
2	31.9	34.6	33.4	35.1	35.6	34.1	20.5	18.5	19.7	17.2	22.4	19.7	44.1	38.2	39.8	40.2	39.4	40.3
3	46.1	43.8	39.6	42.8	45.3	43.5	23.7	24.8	23.9	20.7	25.8	23.8	52.5	47.6	48.8	49.9	50.7	49.9
5	46.6	50.7	51.3	49.8	54.1	50.5	20.1	26.4	25.1	27.7	26.4	25.1	54.4	60.4	58.2	56.7	53.6	56.7
7	54.5	57.6	57.9	60.1	58.2	57.7	32.2	31.1	28.5	26.2	25.2	28.6	63.2	65.2	67.7	65.4	65.6	65.4
10	54.8	59.3	60.6	59.6	61.6	59.2	33	31.2	32.3	34.4	31.2	32.4	69.4	65.6	67.8	68.3	70.8	68.4
14	67.4	64.2	65.7	60.7	63.2	64.2	36.1	32.3	35.2	37.1	35.8	35.3	68.4	66.5	74.5	69.2	68.1	69.3
21	68.1	65.1	64.8	63.9	63.4	65.1	42.5	40.4	38.6	36.6	34.9	38.6	68.3	71.7	71.2	71.8	68.5	70.3
28	65.8	67.4	69.7	62.8	70.1	67.2	45.3	42.9	42.4	41.1	40.8	42.5	72.2	70.9	73.5	71.8	68.8	71.4
56	66.5	69.5	73.2	70.5	68	69.5	63.3	65.2	63.5	59.6	64.8	63.3	71.1	73.4	70.8	72.5	74.8	72.5
91	73.2	71.8	70.7	68.8	73.8	71.7	60.7	65.5	64.8	65.8	65.6	64.5	78.8	76.3	72.4	74.1	72.5	74.8

실험결과와 분석 및 고찰

적산온도는 $M = \Sigma(10 + T)\Delta t$ 로 나타낼 때, Plowman의 식 (4)를 이용하여 적산온도와 콘크리트의 강도와와의 관계를 계산하여 본 연구결과와 비교하면 다음의 Fig. 2와 같다. 즉, $M = \Sigma(10 + T)\Delta t$ 일 때 $f_c = a + b \cdot \log(M)$ 이다.

주어진 조건에 따라 보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 저발열 포틀랜드 시멘트(LHPC), 조강 포틀랜드 시멘트(ESPC)의 경우에 대한 상수 a, b를 계산한 후, Plowman의 식으로 적산온도와 강도와와의 관계를 분석한 결과 OPC의 경우, 7일 이내의 조기 강도 발현은 Plowman의 경우보다 실험치가 현저히 낮았으며, 7일부터 28일까지의 중기강도는 Plowman의 경우보다 높았다. LHPC의 경우, 7일 이내의 조기 강도는 Plowman의 경우보다 실험치가 높았으며, 중기강도는 서로 유사하고 28일 이후의 장기강도는 실험치가 높게 나타났다. ESPC의 경우, 7일 이전의 조기 강도가 Plowman의 경우보다 현저히 낮으며, 중기강도와 장기강도는 유사하게 나타났다. OPC, ESPC의 경우 7일 이전의 조기 강도가 Plowman의 경우보다 현저히 낮은 이유는 양생온도가 25°C로 비교적 낮고, 물-결합재비(W/B)가 적은 관계로 3일 이후의 공극수 부족하여 수화반응 속도가 저하되었기 때문으로 사료된다.

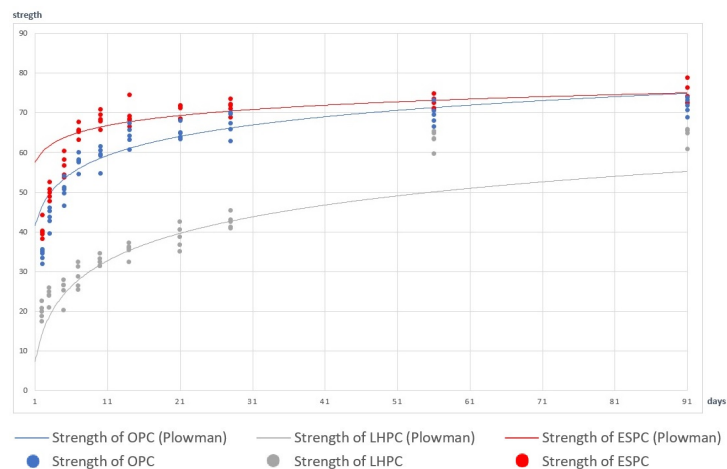


Fig. 2. Comparison of Test Results with Plowman's

결론

보통 포틀랜드 시멘트(OPC), 저발열 포틀랜드 시멘트(LHPC), 조강 포틀랜드 시멘트(ESPC)를 사용하여 설계기준강도 70MPa인 고강도 콘크리트의 공시체를 제작하여 각 일정별 압축강도를 측정하고, 일별로 수화열을 측정하여 적산온도(Maturity)를 계산한 후 적산온도와 강도와와의 관계를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 도출하였다.

- (1) OPC의 경우와 ESPC의 경우 7일 이전의 조기 강도가 Plowman의 경우보다 현저히 낮게 나타났는데, 이는 물-결합재비(W/B)가 23.4%로 매우 낮아 3일 이후 공극수의 부족으로 수화반응속도가 저하됨에 따른 것으로 사료된다.
- (2) LHPC의 경우, 7일 이내의 조기 강도는 Plowman의 경우보다 실험치가 높게 나타나고 91일의 장기강도도 설계기준강

도 보다 작게 나타났는데, 이는 양생온도(타설온도)가 $25\pm 1^{\circ}\text{C}$ 로 비교적 낮기 때문이라 사료되며, 저발열 시멘트를 이용하여 고강도 콘크리트를 제작하는 것은 추가적인 연구가 필요하다.

- (3) 고강도 콘크리트를 사용한 구조물의 거푸집 탈형 시기는, ACI Committee 347을 적용한 설계기준강도 40MPa 이하의 보통콘크리트의 경우보다 월등히 빨라질 수 있다.
- (4) 무근 콘크리트 도로포장에서 교통개방의 시기는 ASTM C1074를 적용할 경우, 70MPa 인 고강도 콘크리트를 사용하면 OPC의 경우는 적산온도 307, 14.4 시간, LHPC인 경우는 적산온도 2700, 34시간, ESPC인 경우는 적산온도 200, 8 시간 정도이므로 40MPa 이하의 보통콘크리트에 비해 그 시간을 크게 줄일 수 있다.
- (5) 이러한 연구결과를 현장 적용성을 높이기 위해서는 다양한 양생온도(타설온도)에 대한 추가적인 연구가 필요하다고 사료된다.

Acknowledgement

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업(No. 2018R1D1A1B07047803) 이며 이에 감사드립니다.

References

- [1] Wu, B., Zhang, J., Williams, M.S., Ou, J. (2005). "Hysteretic behaviour of improved pall-typed frictional dampers." *Engineering Structures*, Vol. 27, No. 8, pp. 1258-1267.
- [2] Sin, H.M., Lee, J.H. (2018). *Reinforced Concrete*. Dong Myeong Sa, pp. 147-149.
- [3] Kim, S.S. (2015). *Materials of Civil Engineering*. Gu Mi Seo Gwan, pp. 119-121.
- [4] Ryu, W.S., Park, W.Y. (2015). *Materials of Civil Engineering*. Hyeong Seol Book Company, pp. 451-458.
- [5] Jin, J.Y., (2002). "An experimental study on the relationship between the compressive strength of high strength concrete and high strength concrete." *Journal of Architectural Institute of Korea*, Vol. 2 No. 2, pp. 129-134.
- [6] Kim, D.B., Kim, M.G., Song, D.G. (2017). "An experimental study on the size and length effect of high strength concrete specimens." *Journal of the Korean Society of Disaster Information*, Vol. 13 No. 3, pp. 366-375.