

저온환경에서 타설되는 구조체 콘크리트의 등가재령 방법을 활용한 기온보정강도 설정

Strength Correction Factors due to Temperature Drop of Structural Concrete under Low Temperature by the Equivalent Age Method

최 윤 호¹

한 민 철^{2*}

이 영 준¹

Choi, Youn-Hoo¹

Han, Min-Cheol^{2*}

Lee, Young-Jun¹

Master Course, Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City,
28503, Korea ¹

Professor, Department of Architectural Engineering, Cheong ju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503,
Korea ²

Abstract

In this paper, strength correction factors of the concretes incorporating ordinary Portland cement(OPC), fly ash(FA) and blast furnace slag(BS) with 50% of water to binder ratio due to temperature drop for standard room temperature($20\pm 3^{\circ}\text{C}$) are provided. For this, strength development was done based on equivalent age method. For calculating the equivalent age, apparent activation energy was obtained with 24.69 kJ/mol in OPC, 46.59 kJ/mol in FA, 54.59 kJ/mol in BS systems. According to the estimation of strength development of the concretes, the use of FA and BS resulted in larger strength drop than that of OPC under low temperature compared to standard room temperature. Hence, strength correction factors(T_n) for OPC, FA and BS are suggested within $4\sim 17^{\circ}\text{C}$ with every 3MPa levels.

Keywords : curing temperature, equivalent age, apparent activation energy, strength correction factor with temperature level

1. 서 론

우리나라는 사계절이 뚜렷한 대륙성 기후로 인하여 연중 기온 거동이 분명한 형태로 나타난다. 이에 건설현장에서도 다양한 기후에 맞는 콘크리트의 설계 및 시공이 요구되고 있다. 즉, 일평균 기온이 4°C 이하인 경우는 한중 콘크리트, 일평균 기온이 25°C 이상인 경우는 서중 콘크리트를 적용하고 이외에 일평균 기온이 4°C 이상 17°C 미만의 기간은 한랭 기콘크리트[1]로서 특히 이 기간에는 한중조건보다는 심하

지 않지만 온도 저하에 따른 강도 저하를 고려해야한다.

한랭기 콘크리트와 관련한 외국의 사례로 미국의 경우는 배합과정에서 양생온도 저하에 따른 강도보정을 실시하고 있으며[2], 일본의 경우에는 호칭강도와 설계기준강도의 차이를 보정하기 위하여 기온보정강도를 배합강도의 결정 시기에 고려하고 있는 실정이다[3]. 우리나라도 건축공사 표준시방서에서는 배합강도 결정시 기온보정강도를 고려하는 방법을 규정하고 있었다[4]. 하지만 2016년 건설기준 통합코드 제정으로 인하여 현재 우리나라는 한랭기 콘크리트의 기온보정강도 개념이 삭제되었다.

그러나 기온보정강도의 고려와 같은 구조체 콘크리트의 강도증진 지연 대책은 구조물의 안전에 있어 매우 중요한 사항이다. 즉, 온도 저하에 따른 강도 지연은 구조체 콘크리트가 설계기준강도를 만족시키지 못하는 결과를 초래하여,

Received : November 30, 2019

Revision received : September 22, 2020

Accepted : October 7, 2020

* Corresponding author : Han, Min-Cheol

[Tel: 82-43-229-8484, E-mail: twhan@cju.ac.kr]

©2020 The Korea Institute of Building Construction, All rights reserved.

결국 구조물 및 인명의 안전에도 심각한 문제로 대두된다.

이에 본 연구진은 국내 기온조건 및 재료조건에 부합하는 한랭조건하 기온보정강도를 제안하기 위한 일련의 연구를 진행한 바 있는데, 저온조건에서 활용가능한 플라이애시(FA) 15% 및 고로슬래그(BS) 45%를 치환한 콘크리트와 FA와 BS를 복합하여 30%치환한 콘크리트를 대상으로 온도단계별 기온보정강도를 제시한 바 있다[5]. 그런데, 결합재 조건으로서 FA나 BS를 다양하게 치환한 콘크리트의 강도발현 패턴 및 외기온 저하에 따른 강도저하 경향이 다를 것으로 예상된다. 이에 다양한 결합재 치환률 변수에 따른 강도보정특성을 고찰할 필요가 있고, 향후 결합재 종류 및 치환률 변화에 따른 강도보정을 통합할 필요성이 제기된다.

그러므로 본 연구에서는 W/C 50%의 일반강도 조건에서 보통 포틀랜드시멘트(이하 OPC), 한랭환경에서 일반적으로 사용될 수 있는 플라이애시시멘트(이하 FA20) 및 고로슬래그시멘트(이하 BS20)로 시멘트 종류를 변화시켜 콘크리트의 강도증진 성상을 한랭기 온도인 4~17°C의 양생온도에서 검토하고, 등가재령에 의한 강도 해석모델을 이용하여 강도증진 해석을 수행한 후 콘크리트 배합강도 결정시 기온 저하에 따른 보정값을 제안하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

일반강도 영역에서의 기온보정강도 산정을 위한 본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합표는 Table 2와 같다. 즉, 실험요인으로 물시멘트비(W/C)는 50%에 대하여 Plain의 목표 슬럼프를 180±25mm, 목표 공기량을 4.5±1.5%로 배합설계 하였으며, 이를 모든 실험변수에 동일하게 적용하였다. 이때 결합재는 OPC, FA20, BS20을 사용하며 각각 양생온도 변수는 0, 5, 20°C의 3수준으로 하여 총 9 배치의 실험을 계획하였다.

실험사항으로는 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량, 응결시간, 경화 콘크리트에서는 응결(종결)시간×1, 2, 4, 8, 16, 32, 64배 재령의 압축강도를 측정하는 것으로 하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로써, 먼저 OPC는 국내산 1종 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였고, FA는 국내산 2종, BS는 국내산 3종을 사용하였는데, 각각의 물리·화학적 성질은 Table

3, 4, 5와 같다. 혼화제로 AE제는 국내산 C사의 음이온계를 사용하였으며, 물은 상수도를 사용하였다.

Table 1. Design of experiments

Test items		Variables	
	W/C		· 50%
	Slump (mm)	1	· 180 ± 25
	Air content (%)		· 4.5 ± 1.5
Mixture	Binder compositions	3	· OPC
			· FA20 (OPC:FA=80:20)
			· BS20 (OPC:BS=80:20)
			· 0
	Curing temperature (°C)	3	· 5
			· 20
			· Slump
	Fresh concrete	3	· Air content
			· Setting time
Experiment	Hardened concrete	1	· Compressive strength by curing temperature (Final setting time × 1, 2, 4, 8, 16, 32, 64 times)

Table 2. Mixture proportions of concrete

Mixture	W/C (%)	S/A (%)	Weight (kg/m ³)						
			W	C	FA	BS	S	G	AE
OPC			165	330	0	0	813	990	0.039
FA20	50	45	165	264	66	0	803	978	0.039
BS20			165	264	0	66	811	988	0.039

Table 3. Physical properties of OPC

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	Soundness (%)	Setting time (min.)		Compressive strength(MPa)		
			Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	3 390	0.05	230	345	24.8	39.3	56.9

Table 4. Physical properties of FA

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L. O. I. (%)	Absorption (%)	SiO ₂
2.22	3 850	4.2	0.3	49.2

Table 5. Physical properties of BS

Density (g/cm ³)	Blaine (cm ² /g)	L.O.I (%)	Moisture content (%)	Chemical composition(%)					
				CaO	SO ₃	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO
2.9	4 254	4.2	92	42.5	1.95	34.2	13.2	0.41	5.26

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 먼저 콘크리트의 슬럼프 시험은

KSF 2 402, 공기량 시험은 KSF 2 409 응결시간은 KSF 2 436의 관입 저항침에 의한 콘크리트 응결 시간 시험방법으로 하였으며, 몰드 제작 후 양생온도 0, 5 및 20°C로 유지되는 기중 양생조건에 배치하여 종결 시간을 측정하였다.

압축강도는 ASTM C 1074 방법에서 제시하고 있는 재령에서 KSF 2 405의 방법으로 압축강도 시험을 하였다. 이후 측정된 값을 Arrhenius를 이용하여 활성화 에너지(E_a)를 도출하고, 등가재령식인 Eq.(1)을 이용하여 등가재령(t_e)을 도출한 후 Plowman 식인 Eq.(2)에 적용하여 강도증진을 해석하였다. 이를 토대로 관리재령 28일 20°C 등가재령에서의 강도대비 여타 양생온도 및 재령에서의 강도 차이를 산출하여, 이를 단계별로 구분하여 기온보정강도[6-8]를 산정 및 제안하였다.

상기의 내용을 요약하여 본 연구의 프로세스를 도식화하면 Figure 1과 같다.

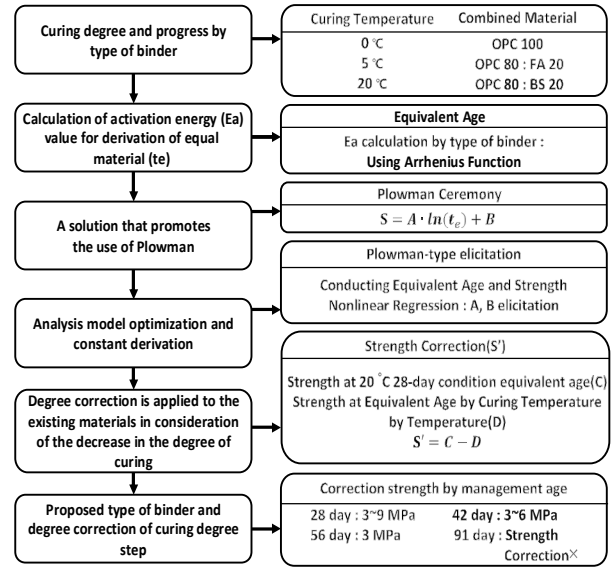


Figure 1. Process of this study

빠르게 나타났는데, 특히 혼화재를 치환한 콘크리트의 경우는 OPC 콘크리트보다 응결시간이 더욱 지연되는 경향을 나타내었다.

$$t_e = \int_0^t \exp \frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T} \right) \quad \text{----- (1)}$$

여기서,

- t_e : equivalent age(days@20°C)
- E_a : apparent activation energy(kJ/mol)
- R : gas constant(8.314J/mol)
- T_r : absolute temperature at 20°C(293K)
- T : absolute temperature(K, 273+°C)

$$S = A \cdot \ln(t_e) + B \quad \text{----- (2)}$$

여기서,

- S : Compressive strength(MPa)
- A, B : Plowman constant

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

Table 6은 굳지 않은 콘크리트의 실험결과를 나타낸 표이다. 슬럼프는 OPC 100%에서 170mm, FA 및 BS 20%에서 185mm가 측정되어 목표 슬럼프값에 만족하는 결과를 나타내었다. 공기량은 OPC에서 4.3%, FA에서 3.2%, BS에서 4.1%가 측정되어 목표값을 만족하였다. 응결시간은 전반적으로 양생온도가 높을수록 시멘트의 수화반응이 촉진되어

Table 6. Results of tests for fresh concretes

Type		Slump (mm)	Air contents (%)	Setting time (h)	
Binder (%)	Curing temperature (°C)			Initial	Final
OPC	100	0	4.3	13.3	21.9
		5		9.3	16.0
		20		4.6	7.9
FA	20	0	3.2	14.6	22.9
		5		9.5	16.0
		20		5.0	8.6
BS	20	0	4.1	15.6	22.8
		5		15.3	21.8
		20		5.1	9.0

3.2 경화 콘크리트의 특성

Figure 2, 3, 4는 양생온도별 재령 경과에 따른 경화 콘크리트의 압축강도 특성을 나타낸 것이다. 즉, 양생온도별 결합재 종류에 따라 ASTM C 1074에서 제시한 재령에 따라 압축강도를 측정된 값이다. 공시체를 제작 후 종결까지의 시간 × N 배수 시간의 강도에서 양생온도가 높을수록 압축강도 역시 더 높은 것을 확인할 수 있었으며, 장기재령으로 진행할수록 강도차이가 더 크게 나타났었다.

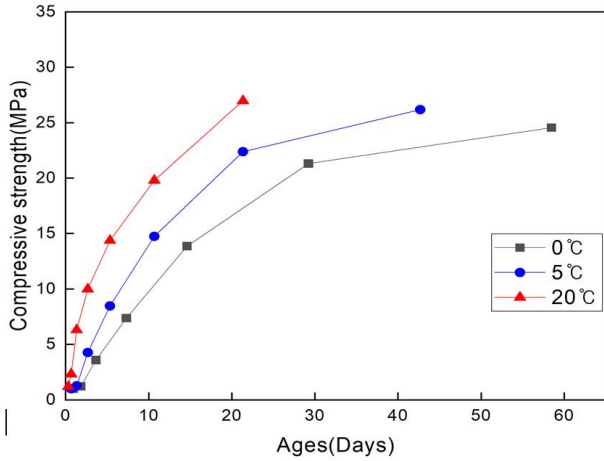


Figure 2. Strength development with curing temperature(OPC)

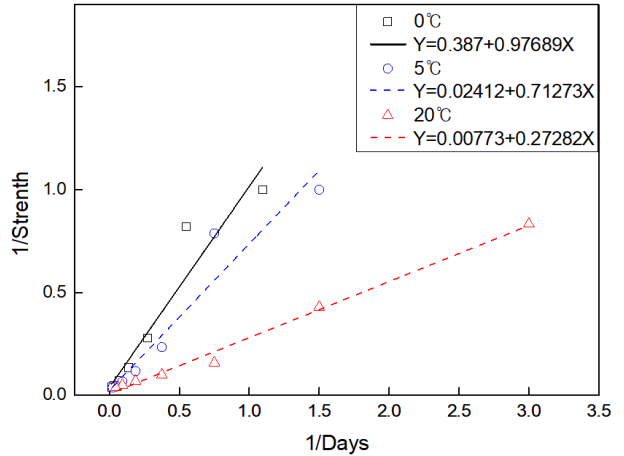


Figure 5. Relationship between reciprocal of strength and age(OPC)

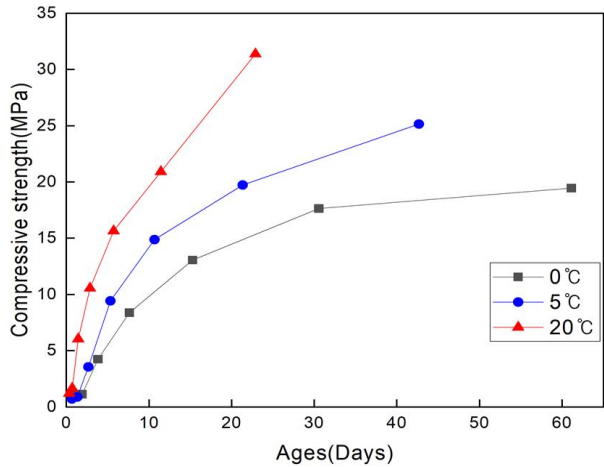


Figure 3. Strength development with curing temperature(FA20)

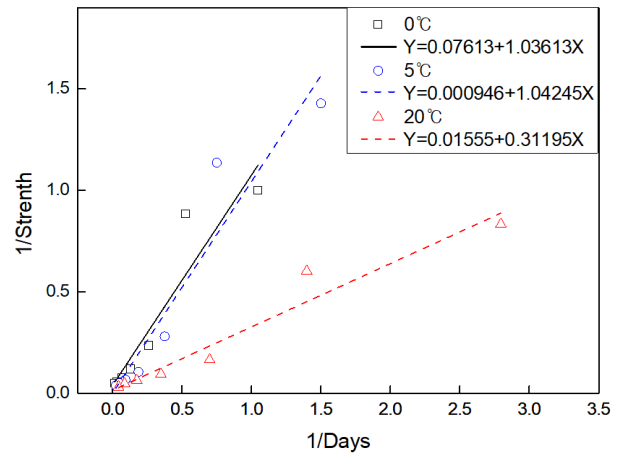


Figure 6. Relationship between reciprocal of strength and age(FA20)

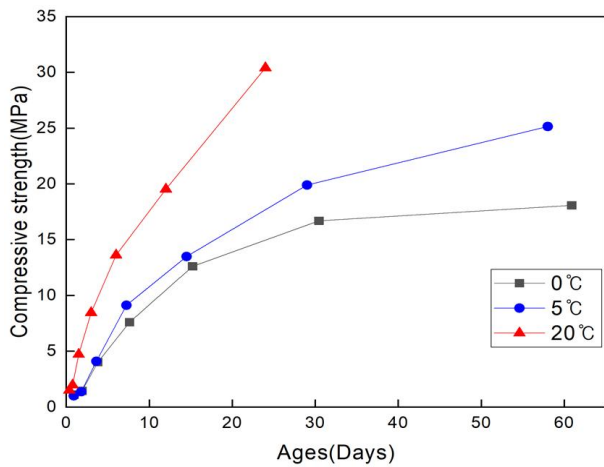


Figure 4. Strength development with curing temperature(BS20)

3.3 등가재령 방법의 강도발현 해석모델 구축을 위한 민감도 계수 도출(겉보기 활성화 에너지 E_a)

Figure 5, 6, 7은 양생온도별 재령의 역수에 대한 압축강도의 역수값으로 나타낸 그래프이다. 이는 등가재령 방법의 강도 발현 해석모델 구축을 위한 민감도 계수(E_a)를 도출하는 방법으로 ASTM C 1074[9]을 참조하여 양생온도 0, 5, 20°C의 3수준 조건에서 콘크리트의 종결시간 및 압축강도를 측정 후 재령의 역수와 강도의 역수를 회귀분석하고, 1차 회귀식을 구한 것이다. 후에 회귀선의 절편을 기울기로 나누어 반응속도상수(k_T)를 도출하였다.

Figure 8, 9, 10은 반응속도 상수(k_T)에 자연로그를 취한 값을 y축에 도시하고, 각 양생온도의 역수값을 x축으로 하는 그래프로서, 1차 회귀식으로 얻어진 회귀식의 기울기 값을

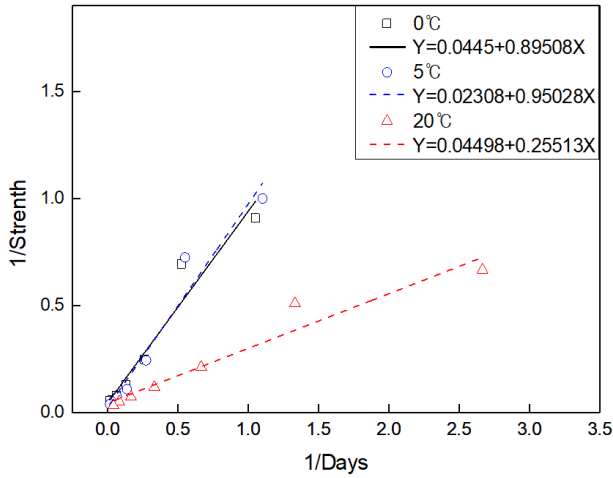


Figure 7. Relationship between reciprocal of strength and age(BS20)

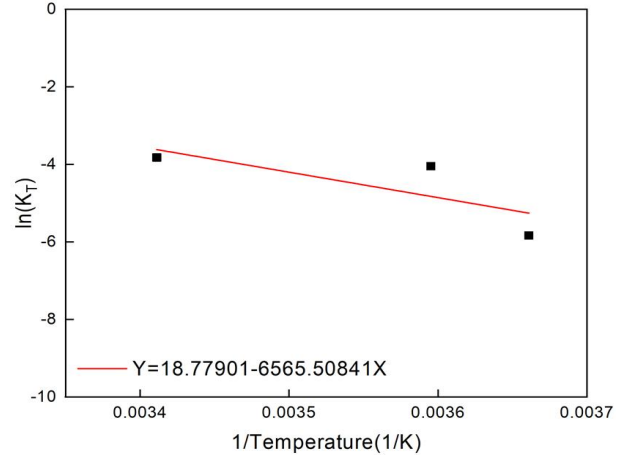


Figure 10. Arrhenius plot to achieve Ea-BS

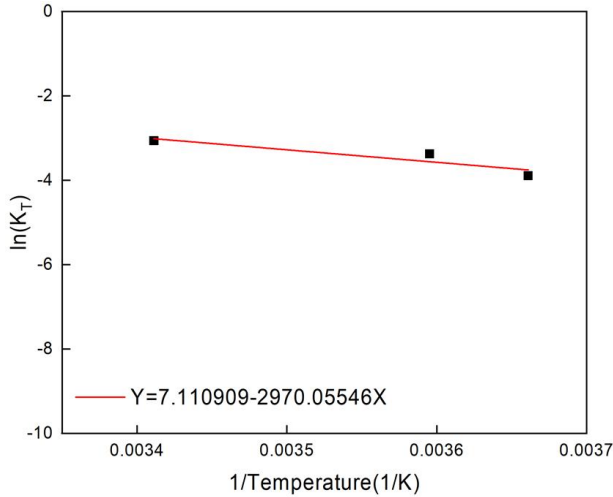


Figure 8. Arrhenius plot to achieve Ea-OPC

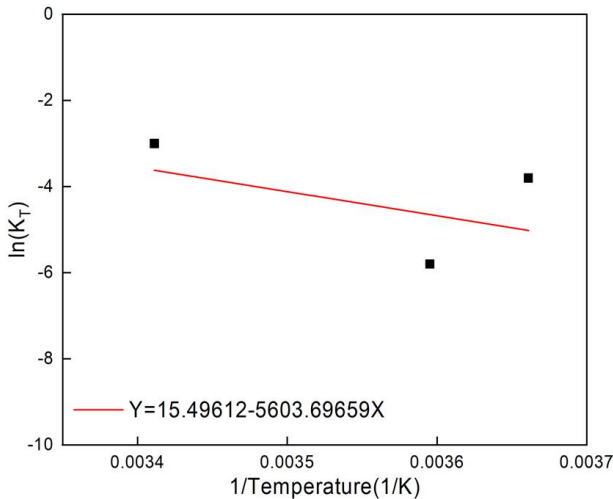


Figure 9. Arrhenius plot to achieve Ea-FA

기체상수 ($R=8.314 \text{ J/mol}\cdot\text{K}$)로 나누어 겔보기 활성화 에너지(E_a)를 산출하였고 결합재 종류에 따른 E_a 값은 Table 7과 같다.

Table 7. Apparent activation energies with binder types

Type Binder	Apparent activation energy E_a (kJ/mol)
OPC	24.69
FA	46.59
BS	54.59

3.4 Plowman 모델로 해석된 압축강도

Figure 11, 12, 13은 등가재령에 따라 측정된 압축강도를 Plowman 모델식으로 비선형 회귀분석한 그래프이고, Table 8은 비선형 회귀분석으로 구한 Plowman 상수값과 결정계수를 나타내었다. 이때 Plowman 상수값은 측정값을 가장 유사하게 추정하는 식으로 하였고, 해석된 그래프의 결정계수는 0.92958~0.90651로 나타났다.

Table 8. Plowman constant value

Type ($S=A\cdot\ln(x)+B$) Binder	Curing temperature ($^{\circ}\text{C}$)	Constant value		R-squared
		A	B	
OPC	0			0.92852
	5	4.02874	14.47035	
	20			
FA20	0			0.92958
	5	6.01632	14.16806	
	20			
BS20	0			0.90651
	5	5.94628	13.23389	
	20			

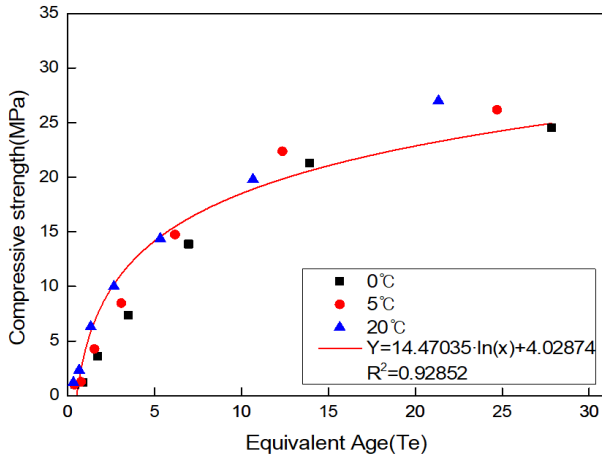


Figure 11. Compressive strength by equivalent age using plowman model(OPC)

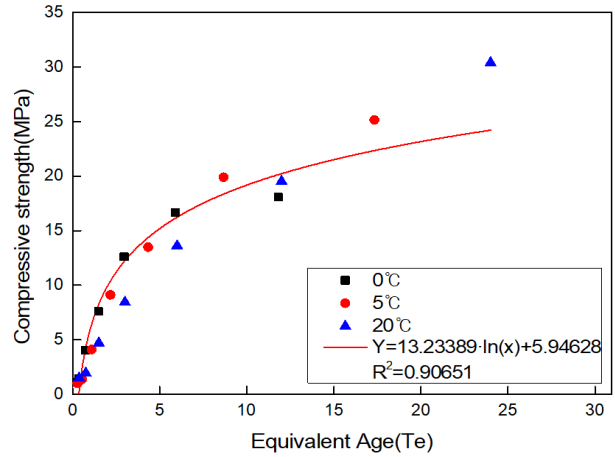


Figure 13. Compressive strength by equivalent age using plowman model(BS20)

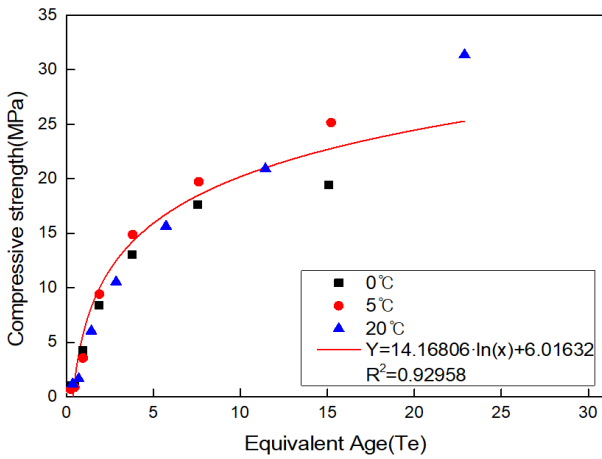


Figure 12. Compressive strength by equivalent age using plowman model(FA20)

3.5 기온보정강도 Tn 산정

Table 9 및 Figure 14, 15, 16은 결합재 종류별 해석모델에서 기온저하에 따른 강도보정값을 나타낸 것이다. 이때 강도 보정은 레미콘 호칭강도의 단위를 고려하여 3 MPa 단위로 보정을 실시하였다. 보정값의 범위로 하한치는 한랭기의 최저 범위인 4℃ 이상으로 하고, 상한치는 구조체의 표준양생(20 ± 3℃) 조건에서 표준 범위의 최저 온도인 17℃까지를 범위로 선정하였다.

대체로 관리재령을 연장할수록 기온강도보정의 필요가 줄어드는 경향이었는데, 재령 91일에서 OPC, FA20, BS20을 사용한 콘크리트 모두 기온보정강도를 고려하지 않아도 되는 것으로 판단된다. 즉, 양생기간이 길어질수록 등가재령 또한 증가하기 때문에 온도가 낮아져도 재령이 길어지면 등

Table 9. Strength correction factors with temperature level and binder types (T_n)

Binder(%)	Equivalent age(Day)	Estimated average temperature range from concrete construction to management ages n days (°C)				
OPC	100	28	4 ≤ θ < 6	6 ≤ θ < 12	12 ≤ θ < 17	17 and over
		42	-	-	4 ≤ θ < 8	10 and over
		56	-	-	4 ≤ θ < 6	6 and over
		91	-	-	-	4 and over
FA	20	28	4 ≤ θ < 10	10 ≤ θ < 12	12 ≤ θ < 17	17 and over
		42	-	4 ≤ θ < 5	5 ≤ θ < 8	10 and over
		56	-	-	4 ≤ θ < 6	6 and over
		91	-	-	-	4 and over
BS	20	28	4 ≤ θ < 10	10 ≤ θ < 12	12 ≤ θ < 17	17 and over
		42	-	4 ≤ θ < 5	5 ≤ θ < 8	10 and over
		56	-	-	4 ≤ θ < 6	6 and over
		91	-	-	-	4 and over
Strength correction(MPa)		9	6	3	0	

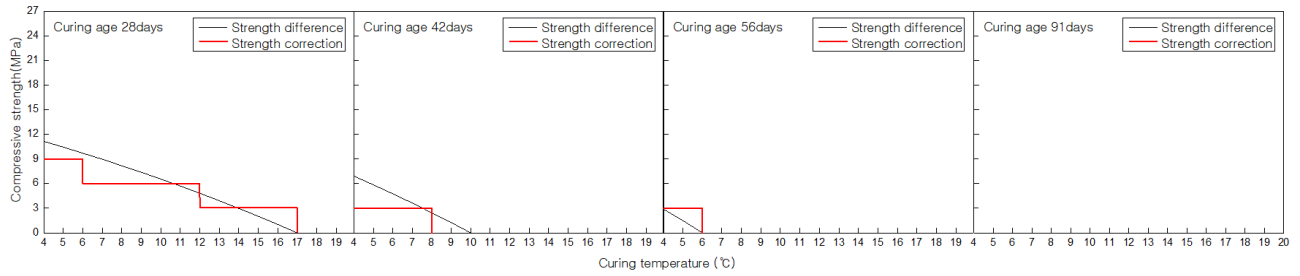


Figure 14. Strength correction factors with average curing temperature(OPC)

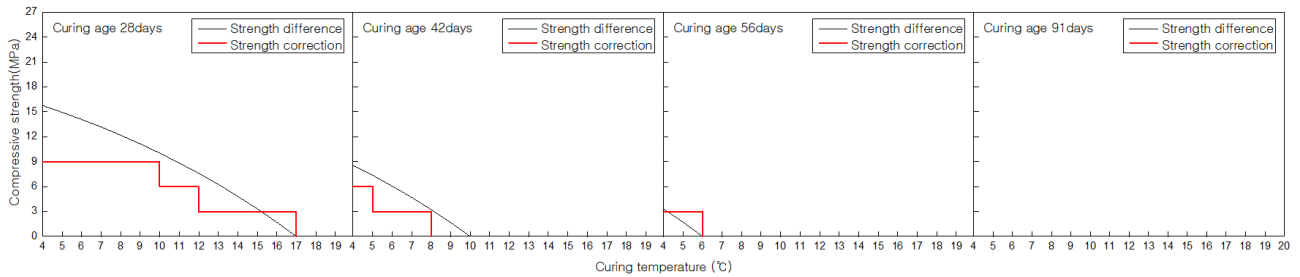


Figure 15. Strength correction factors by average curing temperature(FA20)

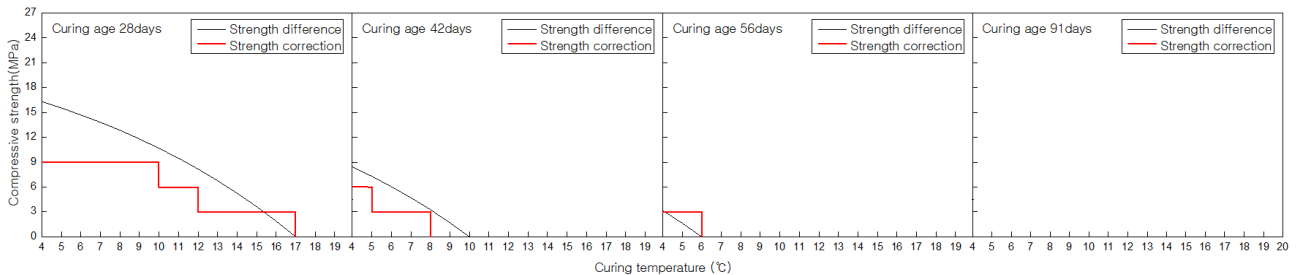


Figure 16. Strength correction factors by average curing temperature(BS20)

가재령이 증가하여 표준 양생온도 조건과 동등한 등가재령 값을 나타냈으며, 강도 또한 표준 양생온도 조건 이상의 강도를 나타내었다.

아울러 실무조건에서 혼화재료의 치환률이 기온, 지역 및 레미콘사 여건에 따라 다를 수 있기 때문에 단계별 기온보정 강도를 통합하여 적용할 수 있는 혼화재 종류별 치환률의 범위를 종합적으로 검토할 필요성이 제기된다. 및 레미콘사 여건에 따라 다를 수 있기 때문에 단계별 기온보정 강도를 통합하여 적용할 수 있는 혼화재 종류별 치환률의 범위를 종합적으로 검토할 필요성이 제기된다.

4. 결론

본 연구는 W/C 50%에서 OPC, FA 및 BS의 각 결합재 종류별 등가재령 방법으로 해석된 Plowman 모델을 관리재령 28, 42, 56, 91일에서 양생온도 저하에 따른 기온보정강

도를 제안하기 위해 진행하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 양생온도가 높을수록 응결 및 압축강도 증진이 촉진되는 것으로 나타났고, 양생온도가 낮을수록 응결 및 압축강도가 지연되는 경향이 나타났다.
- 2) 등가재령 산정을 위해 ASTM C 1074 방법으로 결보기 활성화 에너지를 측정한 결과 OPC는 24.69kJ/mol, FA20은 46.59kJ/mol, BS20은 54.59kJ/mol로 측정되었다.
- 3) 콘크리트 배합설계시 배합강도 결정 단계에서 외기온 저하에 따른 구조체 콘크리트의 강도저하를 보정하기 위해 기온보정강도를 3MPa 단위로 구분하여 관리재령별 평균 양생온도에 따른 기온보정강도(T_n)를 Table 9와 같이 제안하였는데, 관리재령 28일에서는 3~9MPa, 42일에서는 3~6MPa, 56일에서는 3MPa, 91일에서는 필요 없는 것으로 나타났다.

요 약

본 연구는 W/C 50%의 일반강도 조건에서 OPC, FA 및 BS 시멘트의 종류를 변화시켜 콘크리트의 강도 증진 성상을 한랭기 온도의 4~17°C의 평균 양생온도에서 검토하고, 등가재령에 의한 강도 해석모델을 이용하여 강도 증진 해석을 수행하고, 기온저하에 따른 기온보정강도를 제안하고자 하였다. 본 실험의 결과 등가재령을 이용하여 Plowman 모델 식으로 강도증진을 해석하였고, 대체로 양생온도가 낮을수록 강도증진이 지연되는 경향을 나타내었다. 이에 양생온도 저하에 따른 강도보정을 3MPa 단위로 실시하였고, 이를 토대로 배합강도 결정시 결합재 종류 및 관리재령별 기온보정 강도(T_n)을 제안하였다.

키워드 : 양생온도, 등가재령, 겔보기 활성화에너지, 관리재령, 강도보정

4. Architectural Institute of Korea. Building construction standard specification. Seoul: Kimoondang; 2006. p. 123-5.
5. Han MC, Lee YJ. Suggestion of strength correction factors due to temperature drop of blending cement concrete under low temperature at the design stage of specified strength. Journal of the Regional Association of Architectural Institute of Korea. 2020 Feb;22(1):107-14.
6. Malhotra VM, Carino NJ. The maturity method, crc handbook on nondestructive testing of concrete. USA: ASTM International; 1991. p. 101-46.
7. Hansen PF, Pederson EJ. Maturity computer for controlled curing and hardening of concrete. Sweden: Nordiska Betongfoerbundet; 1977. p. 21-5.
8. Carino NJ. Maturity method: theory and application. USA: ASTM International; 1984.
9. ASTM International. Standard practice for estimating concrete strength by the maturity method : ASTM C 1074. USA: ASTM International; 1988. p. 1-8.

Funding

Not applicable

Acknowledgement

This paper was carried out by the Korea Research Foundation's 2018 Research Fund Support(Task Number: NRF-2017R1D1A1A1B03030302).

ORCID

Min-Cheol Han, <http://orcid.org/0000-0002-2555-673X>

Youn-Hoo Choi, <http://orcid.org/0000-0001-5558-6035>

Young-Jun Lee, <http://orcid.org/0000-0003-3220-9469>

References

1. Han CG, Han MC. Temperature and Concrete. Seoul: Kimoondang; 2002. 181 p.
2. American Concrete Institute. ACI 306R-16 Guide to cold weather concreting. Mi (USA): American Concrete Institute; 2016. 6 p.
3. Japan Concrete Institute. Japanese architectural standard specification 5. Japan Concrete Institute; 2015. p. 234-40.