

# 등가재령 방법에 의한 플라이애시를 치환한 시멘트 모르타르의 강도 증진 해석

## Estimation of Compressive Strength of the Fly Ash Substitution Cement Mortar by Equivalent age

(Received December 10, 2012 / Revised December 14, 2012 / Accepted December 14, 2012)

한민철<sup>1)\*</sup>

<sup>1)</sup>청주대학교 건축공학과

Min-Cheol Han<sup>1)</sup>

<sup>1)</sup>Dept. of Architecture Engineering, Cheong-ju University, Cheong-ju, 360-764, Korea

### Abstract

This paper is to present the strength estimation of the cement mortar incorporating 20% of fly ash by equivalent age method. ASTM C 1074 was applied to achieve apparent activation energy( $E_a$ ). Cement mortar was cured at the temperature of 5°C, 20°C and 35°C respectively to measure the setting time and compressive strength at designed age. According to test results, it is found that an increase in curing temperature resulted in an acceleration of setting time.  $E_a$  was achieved to 34.75 KJ/mol. It was also found that by estimating strength development with Plowman and Gompertz model, good agreement between calculated value and measured one was achieved.

**키워드 :** 등가재령, 양생온도, 겔보기 활성화 에너지, 적산온도, 플라이 애쉬

**Keywords :** setting time, curing temperature, apparent activation energy, maturity, fly ash

## 1. 서론

최근 국가정책으로 저탄소 녹색성장이라는 타이틀에 발맞추어 기후변화협약 발효 및 고갈되는 자원에 대해 적극적으로 대응하기 위하여 많은 연구들이 활발하게 진행되고 있다.

이러한 녹색성장 정책에 이바지하는 일환으로써 콘크리트 산업의 경우도 산업부산물인 고로슬래그 미분말(Blast Furnac slag ; 이하 BS) 및 플라이애쉬(Fly ash ; 이하 FA) 등을 시멘트 대신 다량으로 치환하여 다각적으로 이용하고 있다. 특히, 산업부산물인 BS의 경우는 가장 많이 활용되고 있으며, 장점으로는 수화발열 속도 저감, 온도상승 억제 및 잠재 수경성 반응에 의한 장기강도 증진과 화학적 침식에 대한 저항성도 증대되어 우수한 효과를 발휘함

에 따라 많은 연구를 진행하고 있다. 또한, 화력발전소 등에서 포집할 수 있는 양질의 FA를 콘크리트와 접목시킬 경우 워커빌리티의 개선, 수화열 완화, 단위수량 및 물-시멘트 비 감소, 장기재령에서의 강도 증진 및 건조수축을 감소시켜주는 등 많은 장점을 가지고 있어 널리 이용하고 있다.

반면, 이러한 산업 부산물을 사용할 경우 응결지연 및 초기강도 저하에 따른 공기지연, 콘크리트의 블리딩, 슬럼프의 손실 및 내구성의 저하 등이 문제점으로 대두되면서 정확한 강도증진 예측은 원활한 공정을 위한 매우 중요한 사항으로 제시되고 있다.<sup>1)</sup>

따라서, 본 연구에서는 플라이애시를 치환하여 사용하는 콘크리트의 강도증진 해석을 위한 일련의 실험으로서 시멘트 모르타르의 양생온도별 강도증진 특성을 고찰하고 이를 토대로 온도와 재령을 복합적으로 고려하는 등가재령에 의한 강도증진 해석을 실시하고자 한다.

\* Corresponding author  
E-mail: twhan@cju.ac.kr

## 2. 이론적 고찰

### 2.1 적산온도

적산온도는 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생온도와 시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시하는 함수로서, 일정기준온도 이상에서의 양생온도와 시간함수의 조합을 의미한다. (식(1) 참조)

$$M = \int_0^t H(T) dt \quad (1)$$

여기서,

M : 적산온도(°C · day)

H(T) : 적산온도 함수

적산온도 식은 Saul에 의한 온도와 재령에 의한 선형관계식인 식 (2)와 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학 반응속도식 (3)을 이용한 적산온도식인 등가재령식으로 표현되는데, 등가재령은 식 (4)와 같이 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20°C)에서의 양생시간을 의미한다. 등가재령식은 식 (5)에 제시되어 있다.

#### 1) 온도와 재령에 의한 선형 적산온도

$$M = \int_0^t (T_c - T_0) dt \quad (2)$$

여기서,

M : 적산온도(°C · day)

T<sub>c</sub> : 시간 t동안의 온도(°C)

T<sub>0</sub> : 기준온도(일반적으로 10°C)

#### 2) Arrhenius의 화학 반응속도에 의한 적산온도

$$k_T = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad (3)$$

여기서,

k<sub>T</sub> : 속도상수

A : 빈도계수

E<sub>a</sub> : 겔보기 활성화 에너지(KJ/mol)

R : 가스 상수(8.314J/mol · K)

T : 절대온도(° K, 273+°C)

$$t_e = \frac{\int_0^t H(T) dt}{H(T_r)} \quad (4)$$

여기서,

H(T) : 양생온도 T에서의 적산온도 함수

H(T<sub>r</sub>) : 양생온도 20°C에서의 적산온도 함수

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \quad (5)$$

여기서,

t<sub>e</sub> : 등가재령(일)

T<sub>r</sub> : 20°C에서의 절대온도(293° K)

T : 양생온도 T<sub>0</sub>에서의 절대온도(° K, 273+°C)

### 2.2 겔보기 활성화 에너지(E<sub>a</sub>)

활성화 에너지란 반응에 필요한 최소한의 에너지를 의미한다. 그런데, 시멘트의 수화반응은 여러 광물이 동시에 여러 반응의 복합으로 진행되기 때문에 엄밀한 의미에서는 활성화 에너지라고 표현할 수 없고, 겔보기(apparent) 활성화 에너지라 칭한다.

Freisleben-Hansen과 Pederson (FHP)은 양생온도의 함수형태로 활성화 에너지를 산정하는 식(식 (6) 참조)을 제시하였다.<sup>1)2)3)</sup>

$$\text{양생온도 } T \geq 20^\circ\text{C} : E(T) = 33,500 \text{ J/mol} \quad (6)$$

$$\text{양생온도 } T < 20^\circ\text{C} : E(T) = 33,500 + 1,470(20 - T) \text{ J/mol}$$

상기의 FHP는 가장 일반적으로 사용되는 활성화 에너지의 하나로서 수화반응에 미치는 온도의 민감도를 설명할 때 주로 사용되는 식이다.

그러나 Carino는 활성화 에너지 값이 시멘트의 성분, 분말도, 종류, 양 그리고 혼화제에 따라 결정된다고 지적하였고, 다른 연구자들은 활성화 에너지 값이 물-시멘트비에 의하여 변하게 된다고 주장하였다.

Jonasson은 아래 식 (7)과 같은 활성화 에너지 식을 제시하였다.<sup>5)</sup>

$$E(T_c) = R \cdot 4600 \cdot \left(\frac{30}{10 + T_c}\right)^{0.39} \quad (7)$$

이 모델식은 20°C에서 FHP 모델식에 비하여 32% 정도 높은 활성화 에너지 값을 갖는 것으로 나타났고, 양생온도가 증가할수록 활성화 에너지 값은 작아지는 것으로 보고되고 있다. RILEM 119-TCE에서는 시멘트의 종류에 관계없이 동일한 활성화 에너지 값을 갖고 있으며 고로슬래그 미분말이 사용될 경우 48,804 J/mol를 갖는다고 제안하고 있다. 한편, ASTM C 1074에서는 활성화 에너지를 산정하는 방법을 제시하고 있으며, 이들 값은 41,000 J/mol에서 67,000 J/mol 사이의 값이라고 언급하고 있다.

김 등은 플라이애시를 사용한 콘크리트를 대상으로 양생온도에 대한 함수가 아닌 W/C에 대한 함수로 활성화

에너지를 구하는 식을 제시하였는데, W/C 0.4를 기준으로 다음 식 (8)과 식 (9)를 제안하였다.<sup>7)</sup>

$$W/C \leq 0.40 \quad E=39,722+119 \cdot FA \quad (8)$$

$$W/C > 0.40 \quad E=42,923+90 \cdot FA \quad (9)$$

### 2.3 강도증진해석 모델

적산온도에 의한 강도증진해석은 적산온도에 의하여 온도와 재령의 복합적인 효과가 정량화된 후 적산온도를 강도의 환산 지수로 적용하는 형태로 수행되는데, Bernhardt는 콘크리트의 상대강도가 콘크리트의 미수화된 부분의 크기와 비례하며 시멘트의 수화시 이를 지표화하는 비례상수로서 반응율 상수(k)를 도입하였다.<sup>1)</sup>

$$\frac{d(S/S_u)}{dt} = k(1 - \frac{S}{S_u}) \quad (10)$$

여기서,

S : 콘크리트강도

S<sub>u</sub> : 한계강도

k : 반응율 상수(rate constant)

이러한 강도증진해석 모델은 다양한 연구자들에 의해 보고되고 있는데, Plowman은 적산온도에 따른 강도증진을 직선으로 고려하여 아래 식 (11)과 같은 식을 제안하였다.<sup>1)</sup>

$$S_c = a \ln(M) + b \quad (11)$$

여기서 a, b : 실험상수

M : 적산온도

또한, Gamada는 성장곡선의 하나인 Gompertz곡선을 이용하여 아래 식(12)와 같은 S 곡선형태의 모델식을 제안하였다.

$$S = S_{\infty} \exp(-a(\frac{1}{M})^b) \quad (12)$$

여기서 S<sub>∞</sub>: 한계강도

a, b : 실험상수

M : 적산온도

Carino<sup>1)</sup>는 쌍곡선함수의 회귀모델은 지수함수보다 정확한 예측값을 얻을 수 있다는 것을 알아냈고, 시멘트의 수화반응 과정시 잠재기(dormant period)를 설명할 수 있는 세 번째 변수를 도입하여 다음과 같은 모델을 제시하였다. 이 식에서 강도증진은 t<sub>0</sub>에서 시작되며 응결기간 동안의 점진적인 강도증진은 고려되지 않는다. 여기서 S<sub>u</sub>, k<sub>r</sub>, t<sub>0</sub>는 최소제곱법에 의한 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{S_u k_r (t - t_0)}{1 + k_r (t - t_0)} \quad (13)$$

여기서,

S : 재령 t에서의 강도

S<sub>u</sub> : 한계강도

k<sub>r</sub> : 반응율 상수(rate constant)

t<sub>0</sub> : 강도증진이 시작되는 재령

## 3. 실험계획 및 방법

### 3.1 실험 계획

Table 1은 본 연구의 실험 계획을 나타낸 것이고, Table 2는 콘크리트의 배합사항을 나타낸 것이다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Levels	
Mixture	W/B(%)	1	50
	Target slump (mm)		150 ± 15
	Air content (%)		4.5 ± 1.5
Experiment	Curing temperature (°C)	3	5, 20, 35
	Fresh mortar	1	• Setting time
	Hardened mortar	1	• Compressive strength

Table 2. Mixture proportion of concrete

W/B (%)	S/a (%)	Weight(kg/m <sup>3</sup> )						
		W	C	FA	Agg	S	WRA	AEA
50	46.7	162	260	64	938	822	2.083	0.208

먼저 콘크리트는 W/B 50% 1수준에 플라이애시를 20% 혼입하였고, 목표 슬럼프는 150 ± 15mm, 공기량은 4.5 ± 1.5 % 수준을 만족하도록 Table 2와 같이 배합설계한 레미콘을 사용하였다. 또한, ASTM C 1074방법에 의한 양생온도별 강도증진을 해석하기 위하여 Table 2에서 제시된 콘크리트 중 5mm 체를 이용하여 모르타를 채취하고 이를 성

형한 후 이를 양생온도 5, 20, 35°C가 유지되는 챔버에서 각각 수중양생을 실시하였으며, 경화후 압축강도는 3 수준(5, 20, 35°C)의 양생온도에서 종결시간에 대해 ×2, ×4, ×8, ×16, ×32, ×64의 배수로 시간을 계산하여 각 재령 일수에 맞추어 압축강도를 측정하는 것으로 하였다.

### 3.2 실험 방법

본 연구에서 모르터의 응결시간은 3개의 응결몰드를 제작하여 5, 20, 35°C 양생온도 조건에서 각각 초결 및 종결을 KS F 2436에 의거하여 측정하였고, 또한, 모르터를 성형하여 익일 탈형한 후 5, 20, 35°C 조건에서의 수중양생을 실시하였고, ASTM C 1074 방법에서 제시하고 있는 재령에서 KS L 5105의 방법에 준하여 압축강도를 측정하였다.



(a) Setting time check (b) Compressive strength test  
Fig 1. Test set up

## 4. 결과 및 분석

### 4.1 기초 물성 평가

#### 4.1.1 응결시간

Fig. 2 및 3은 경과시간에 따른 관입저항치 및 양생온도별 초결, 종결 시간을 나타낸 것이다. 전반적으로 양생온도가 높을수록 시멘트의 수화반응이 촉진되어 응결시간이 단축되는 것으로 나타났으며, 5°C 양생의 경우 약 18시간 내외로 나타나 20, 35°C 양생에 비해 플라야에서 치환의 영향으로 저온에서 응결이 더욱 지연되는 것을 확인할 수 있었다.

#### 4.1.2 재령 경과에 따른 모르터 압축강도

Table 3은 양생온도별 종결재령의 배시간 경과에 따른 압축강도를 표로 나타낸 것이고, Fig 4는 이를 그래프로 나타낸 것이다. 이는 공시체 성형후부터의 재령이 아닌 종결 이후의 2배, 4배, 8배, 16배, 32배 및 64배 재령에 해당하

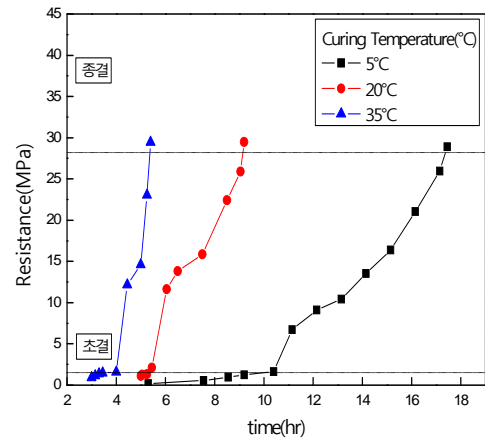


Fig 2. Penetration resistance with age

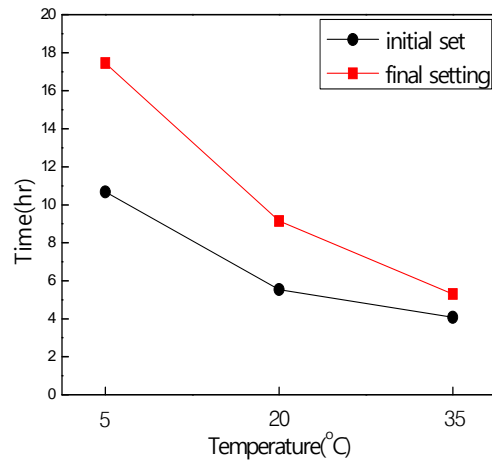


Fig 3. Initial and final setting time with age

는 시기에서의 강도값을 나타낸 것으로 이는 ASTM C 1074 방법에 따라서 측정된 것이다.

전반적으로 양생온도에 관계없이 종결이후 16배 재령까지는 강도값에 큰 차이가 없는 것을 알 수 있었다. 이를 성형후부터의 재령 값으로 환산할 경우 양생온도별 강도 차이가 나타나는데, 이미 알려진 바와 같이 초기재령에서는 35°C에서의 강도가 5°C보다 높게 나타나고 이후 재령이 경과함에 따라 강도의 역전현상이 발생함을 확인할 수 있다.

Table 3. Compressive strength results with curing temperature

Curing temperature (°C)	Compressive strength (MPa)					
	Elapsed times since final set					
	2 times	4 times	8 times	16 times	32 times	64 times
5	3.7	6.7	10.7	16.9	17.4	19.2
20	4.0	6.8	10.7	14.2	18.2	21.4
35	4.9	8.4	11.4	14.4	19.5	23.7

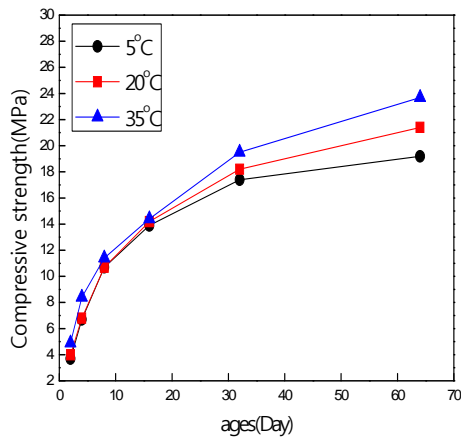


Fig 4. Strength gain with age since final setting time depending on curing temperature

#### 4.2 겉보기 활성화 에너지 산정( $E_a$ )

본 연구에서 산정한  $E_a$  값은 ASTM C 1074 방법을 참조하였는데, 먼저 전술한 바와 같이 5, 20, 35°C의 3 수준 조건에서 양생을 실시한 모르타르의 응결시간 및 압축강도를 측정 후 재령의 역수와 강도의 역수를 회귀분석하여 1차 회귀식을 구한 후 회귀선의 절편을 기울기로 나누어 반응속도 상수( $k_T$ )를 도출하였다. 그리고 반응속도 상수( $k_T$ )에 자연로그를 취한 값을 y축에 도시하고, 각 양생온도의 역수값을 x축에 도시하여 플롯트 한 후, 1차 회귀식으로 얻어진 회귀식의 기울기 값을 기체상수( $R=8.314 \text{ J/mol} \cdot \text{K}$ )로 나누어  $E_a$  값을 산출하였다.

Fig. 5는  $k_T$  산정을 위한 회귀방정식을 도출한 것이고, Fig.6은  $k_T$ 에 의한  $E_a$  값의 산정식과 분석으로써  $E_a$  값을 도출한 값으로써 이는 34.75 KJ/mol로 산정되었다.

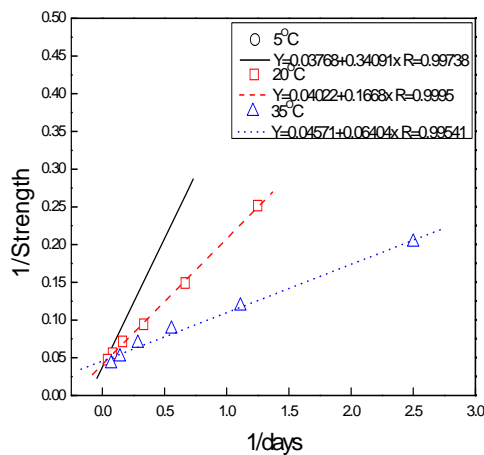


Fig 5. Relationship between reciprocal of strength and age

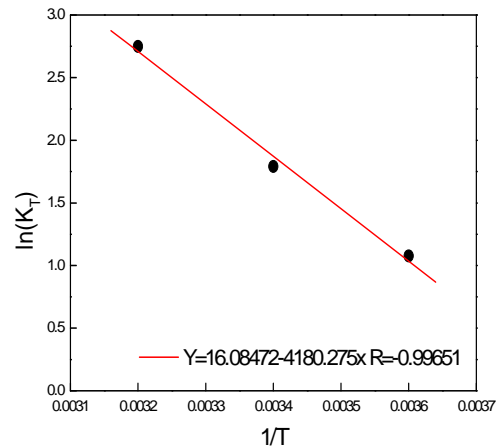


Fig 6. Arrhenius plot to achieve  $E_a$

#### 4.3 등가재령에 의한 강도증진 해석

Fig.7 및 Table 4는 회귀분석에 의한 Plowman 모델식을 이용하여 등가재령에 의한 강도증진해석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 먼저 결정계수는 0.945로 나타났고, 해석치가 측정치를 비교적 양호하게 추정하는 것으로 나타났다. 또한, Fig.8은 회귀분석에 의한 Gompertz 모델식을 이용하여 등가재령에 의한 강도증진해석을 실시한 결과를 나타낸 것이다. 결정계수는 0.975로 나타나 Plowman 모델식보다 양호한 값을 나타내고 있으며 해석치가 측정치를 양호하게 추정함을 확인할 수 있었다.

Table 4. Regression results

Model	Regression coefficient			$R^2$
	S	a	b	
Plowman	-	4.80	6.00	0.945
Gompertz	20.4	1.96	0.73	0.975

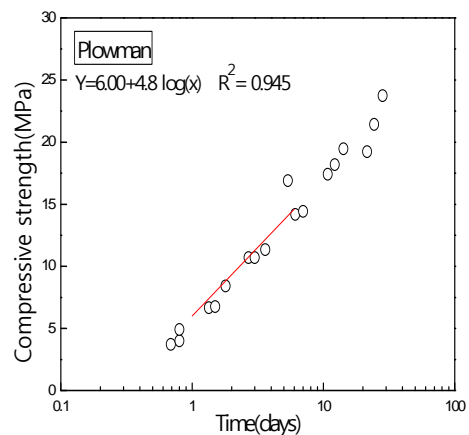


Fig 7. Strength development with equivalent age based on Plowman model

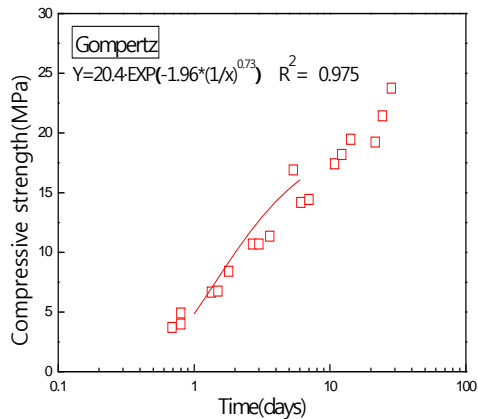


Fig 8. Strength development with equivalent age based on Gompertz model

Fig. 9 및 10은 압축강도 측정치와 해석치의 상호간 비교를 한 것으로써 Plowman 예측식은 비교적 큰 산포를 보이며 정확도가 떨어지는 것으로 나타났으나 Gompertz 예측식의 경우는 양호한 분포를 나타내며 추정함을 알 수 있었다.

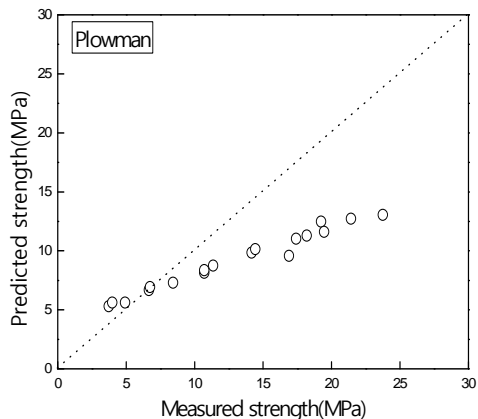


Fig.9 Relationship between calculated strength and measured one with Plowman model

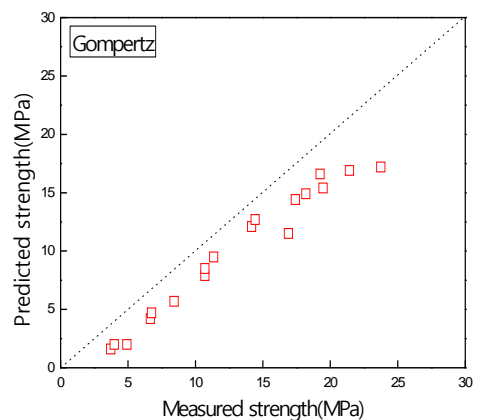


Fig.10 Relationship between calculated strength and measured one with Gompertz model

## 5. 결론

본 연구의 범위 내에서는 플라이애쉬를 치환한 시멘트 모르타르를 이용하여 등가재령에 의한 강도증진해석을 실시하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

1) 양생온도가 증가할수록 모르타르의 응결시간 및 압축강도는 촉진되는 것으로 나타났다.

2) 등가재령 산정을 위하여 ASTM C 1074 방법에 의한 겔보기 활성화 에너지( $E_a$ )를 산정한 결과  $E_a$ 는 34.75 KJ/mol로 산정되었다.

3) 등가재령에 의한 강도증진 해석을 실시한 결과 Plowman 예측식에 비해 Gompertz 예측식이 비교적 양호한 추정도를 나타냄을 확인할 수 있었다.

## 참고문헌

- 1) Carino, N. J., Maturity Method; Theory and Application Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984
- 2) 한천구, 한민철, 적산온도방식의 콘크리트 강도증진해석에 의한 기온보정강도의 검토, 대한건축학회 논문집 구조계, 15권 11호, pp.71~78, 1999. 11.
- 3) 한민철, 응결시간 및 ASTM 방법에 의한 겔보기 활성화 에너지가 콘크리트의 응결 및 강도 증진에 미치는 영향 비교, 대한건축학회 논문집, 제 27권, 제 1호(통권 267호), 2011. 1.
- 4) Ferisleben Hansen, P, Pederson, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength Nordisk Betong, 1977, pp.19~34
- 5) Jonasson, J., E, Early strength growth in concrete-preliminary test results concerning hardening at elevated temperatures, Proc. of 3rd International RILEM symposium on winter concreting, 1985, pp.249~254
- 6) Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method, ASTM C 1074-93
- 7) 한상훈, 김진근, 박연동, 새로운 겔보기 활성화 에너지 함수에 의한 플라이애시 콘크리트의 압축강도 예측, 한국콘크리트학회 논문집, 13권 3호, pp.237~243, 2001

### 등가재령 방법에 의한 플라이애시를 치환한 시멘트 모르타르의 강도 증진 해석

본 연구에서는 플라이애시를 치환한 시멘트 모르타르의 양생온도에 따른 강도증진을 검토하기 위하여 등가재령방법에 의한 강도증진해석을 실시하였다. 플라이애시를 30% 치환한 시멘트모르타르의 결보기활성화에너지를 ASTM C 1074 방법에 의하여 산정한 결과 34.75KJ/mol로 산정되었고, 이를 토대로 Plowman 모델과 Gompertz 모델을 이용하여 해석한 결과 해석치가 측정치를 양호하게 추정함을 알 수 있었고 특히 Gompertz 모델식이 보다 양호한 추정 정밀도를 갖는 것으로 확인되었다.