



성숙도 방법을 이용한 불포화 폴리에스터 수지 폴리머 콘크리트의 압축강도 예측

Prediction of Compressive Strength of Unsaturated Polyester Resin Based Polymer Concrete Using Maturity Method

최기봉* · 김남길** · 이윤수*** · 연규석****,†
Choi, Ki-Bong · Jin, Nan Ji · Lee, Youn-Su · Yeon Kyu-Seok

Abstract

This study investigated to predict the compressive strength of unsaturated polyester resin based polymer concrete using the maturity method. The test results show that the development of the compressive strength increased exponentially until an age of 24 hours. After 24 hours, the development of the compressive strength just increased gradually. This test result shows that the strength of unsaturated polyester resin based polymer concrete was developed mainly at the early age. Estimated datum temperature of unsaturated polyester resin based polymer concrete was $-20.67\text{ }^{\circ}\text{C}$ which was much lower than of datum temperature ($-10\text{ }^{\circ}\text{C}$) of Portland cement concrete. Also, this study result shows that the existing maturity index associated with Portland cement concrete was not applicable for polymer concrete because curing time of Portland cement concrete is different clearly with curing time of polymer concrete. The cause of different curing time was that there were different curing mechanisms between Portland cement concrete and polymer concrete. In order to best apply the experimental data to a model, CurveExpert Professional, the commercial software, was used to determine the predictive model regarding the compressive strength of unsaturated polyester resin based polymer concrete. As a result, Gompertz Relation or Weibull Model was an appropriate model as a predictive model. The proposed model can be used to predict the compressive strength, especially, it is more useful when the maturity is in the range between $40\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot h^{0.4}$ and $900\text{ }^{\circ}\text{C} \cdot h^{0.4}$.

Keywords: Maturity method, Compressive strength, Prediction model, Polymer concrete, Unsaturated polyester resin

1. 서 론

폴리머 콘크리트는 무기질인 골재와 유기질인 폴리머 수지로 구성되는 복합재료로서 빠른 경화와 고강도의 발현을 특징으로 한다. 뿐만 아니라 내화화성, 내마모성, 방수성, 부착성 등도 시멘트 콘크리트에 비해 우수하다 (Vipulanandan et al., 1988; Chandra et al., 1994). 이것은 주로 손상된 콘크리트 구조물의 보수나 노후된 교량상판의 덧씌우기와 같은 현장적용에 이용되며, 기계받침, 건물용 패널, 박스형 지하구조물과 같은 제품제조에도 이용된다 (Fowler, 1989).

폴리머 콘크리트용 결합재로는 불포화 폴리에스터 수지,

에폭시 수지, 아크릴 수지, 비닐 에스터 수지 등과 같은 열경화성 수지가 이용되고 있으며, 이러한 결합재의 종류에 따라 물리·역학적 성질이 다르게 나타난다 (Haddad et al., 1983; Hyun et al., 2012; Ohama et al., 1973). 이 중에서 불포화 폴리에스터 수지는 가격이 저렴할 뿐만 아니라 상온 경화가 가능하고 물리·역학적 성질이 우수하기 때문에 폴리머 콘크리트용으로 가장 널리 사용되고 있다.

성숙도 방법은 콘크리트의 강도발현에 대한 시간과 온도의 복합적인 영향을 구명하는 기법이다 (Pinto et al., 1999). 이 방법은 1940년대 말과 1950년대 초 영국에서 콘크리트의 증기양생을 하는데서 부터 시작되었다 (Carino et al., 2001). 이러한 성숙도 방법은 콘크리트의 강도 추정은 물론, 거푸집의 적정 탈형 시기를 결정하는데도 사용된다 (Hulshizer et al., 1984). 뿐만 아니라 콘크리트 포장의 신설이나 보수 시에는 줄눈의 컷팅 시기, 교통의 개방 시기 결정에도 유용하게 사용된다.

그런데 시멘트 콘크리트의 강도발현은 시멘트의 수화반응에 의해 일어나지만 폴리머 콘크리트는 폴리머 수지의 중합반응에 의해 일어난다. 그래서 폴리머 콘크리트의 강도발현은 온도의 영향만 받을 뿐 습도의 영향을 받지 않는다는 것이 특징적이다. 이러한 점에서 습도의 영향이 전혀 고려되지 않

* Department of Architectural Engineering, Gachon University
** Dongil Engineering Consultants Co., Ltd.
*** Department of National Defence Construction, Chungbuk Health & Science University
**** Department of Regional Infrastructure Engineering, Kangwon National University
† Corresponding author
Tel.: +82-33-250-6465 Fax: +82-33-250-5560
E-mail: ksyeon@kangwon.ac.kr

Received: September 4, 2017

Revised: September 18, 2017

Accepted: September 20, 2017

는 성숙도 방법이 폴리머 콘크리트의 강도 예측에 더 적합한 기법이라고 생각할 수도 있다.

그동안 시멘트 콘크리트에 대한 성숙도 방법 연구는 비교적 많이 이루어져 왔다. 대표적인 것 들을 살펴보면 조기재령에서의 예측에 대한 것들(Oluokun et al., 1990; Carino et al., 1983; Chengiu, 1989)이 많으며, 대형 콘크리트 구조의 현장 강도 추정(Li et al., Yikici et al., 2015)에 대한 것들도 있다. 이와 같이 시멘트 콘크리트에 대한 성숙도 연구는 많지만 폴리머 콘크리트에 적용하기 위한 연구는 Ohama et al. (2000)의 연구결과 외에는 찾아보기 어렵다. 특히 폴리머 콘크리트는 반응과정, 경화시간, 강도발현 속도 등이 빠르기 때문에 기존에 시멘트 콘크리트에 적용되고 있는 성숙도 관계식을 그대로 적용할 수 없다.

이상과 같은 점들에 근거하여 본 연구에서는 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 사용한 폴리머 콘크리트의 강도발현 특성과 성숙도 방법을 이용한 압축강도 예측에 대하여 구명하고자 한다.

II. 이론적 배경

1. 성숙도 예측 모델

시멘트 콘크리트의 강도발현과 깊은 관계가 있는 성숙도 이론은 Saul (1951)에 의해 제안되었으며, Bergstrom (1953)이 발전시켰다. Saul은 강도발현이 일어날 수 있는 가장 낮은 온도인 기준온도에 근거하여 성숙도를 계산 하였는데, 이 방정식이 바로 다음의 Nurse- Saul 성숙도 방정식이다(Carino et al., 2001; Topcu et al., 2005).

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t \quad (1)$$

여기서, M = maturity index, $^{\circ}\text{C} \cdot \text{hrs}$ (or $^{\circ}\text{C} \cdot \text{days}$)

T = average concrete temperature, $^{\circ}\text{C}$, during the time interval Δt

T_0 = datum temperature (usually taken to be -10°C)

t = elapsed time (hrs or days)

Δt = time interval (hrs or days)

시멘트 콘크리트의 경우 강도와 성숙도는 일정한 관계가 있고, 양생온도와 양생시간이 서로 다르더라도 성숙도가 동일하면 강도는 차이가 없다는데 이론의 기초를 두고 있다. 그러나 열경화성 수지를 결합재로 하는 폴리머 콘크리트는 시

멘트 콘크리트에 비하여 반응과정, 경화시간, 강도발현 속도 등이 현저히 다르기 때문에 기존의 성숙도 이론식을 그대로 폴리머 콘크리트에 적용하는 데는 무리가 있다. 무엇보다도 폴리머 콘크리트는 강도발현이 빠르며, 특히 24시간 이내의 강도 발현율이 높기 때문에 시멘트 콘크리트의 성숙도 산출식에 사용되는 Δt 의 영향을 줄여야 된다. 이에 대한 해결방법의 하나로 Ohama et al. (2000)은 폴리머 콘크리트의 경우 상기한 식 (1)에서 Δt 를 Δt^n 으로 치환하여 변형한 식 (2)를 성숙도 산출에 이용할 것을 제안 하였다. 여기서 폴리머 콘크리트는 경화시간이 시멘트 콘크리트 보다 짧기 때문에 재령 등 시간의 단위는 날짜(days)를 사용하지 않고 시간(hrs)을 사용한다. 그리고 시멘트 콘크리트의 경우는 $n=1$ 을 적용하면 되지만 폴리머 콘크리트는 강도발현이 빠르기 때문에 그 보다 작은 값이어야 한다.

$$M = \sum_0^t (T - T_0) \Delta t^n \quad (2)$$

여기서, M = maturity index ($^{\circ}\text{C hrs}$)

T = average concrete temperature during the time interval Δt ($^{\circ}\text{C}$)

T_0 = datum temperature ($^{\circ}\text{C}$)

t = elapsed time (hrs)

Δt = time interval (hrs)

n = constant

2. 예측 모델

성숙도 못지않게 중요한 것이 강도를 예측하기 위한 모델이다. 왜냐하면 아무리 성숙도를 정확하게 산출했다고 하더라도 압축강도의 예측이 부정확하면 아무 의미가 없기 때문이다. 시멘트 콘크리트의 성숙도로 부터 압축강도를 예측하는데는 다음과 같은 모델들이 이용되고 있다.

강도-성숙도 관계를 나타내는데 많이 이용되는 방법 중의 하나가 대수방정식(logarithmic equation)이다(Carino et al., 2001). 그리고 Plowman (1956)이 제안한 반대수 함수(semilogarithmic function)도 많이 이용된다.

$$S = a + b \log(M) \quad (3)$$

여기서, S = strength for maturity index

M = maturity index

a, b = regression coefficients

이 식은 간단하기 때문에 많이 사용되고 있지만 결점도 있다. 즉 이 식은 직선으로 표시되기 때문에 중간 부분의 성숙도 값은 비교적 정확하게 강도를 예측할 수 있으나 낮거나 높은 부분의 성숙도 값은 정확하게 예측할 수 없다는 결점을 가지고 있다 (Carino et al., 1983; Carino et al., 2001).

Lew et al. (1978)은 압축강도 시험결과와 성숙도의 관계를 분석하여 다음과 같은 비선형 회귀식을 제안 하였다.

$$S = \frac{K}{1 + Ka[\log(M - 30)]^b} \quad (4)$$

여기서, S = compressive strength of concrete

K, a, b = numerical constants

M = maturity of concrete

30 = maturity below which the strength is effectively 0

그리고 로지스틱 (logistic) 곡선 (<https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Logistic-curve.png>)도 이용되는데 이것은 인구 증가를 나타내는 수학적 모델로서 S형 곡선이며, $S = S_u/2$ 인 점에 변곡점이 형성되고 좌우 대칭 형태를 보인다.

$$S = \frac{a}{1 + be^{-cM}} \quad (5)$$

여기서, S = compressive strength

M = maturity index

a, b, c = parameter

상기한 식들은 한계강도가 성숙도나 등가재령 (equivalent age)의 영향을 받지 않는다는 가정 하에 만들어진 것이다. 그러나 많은 연구자들은 이 식들의 적용에 한계가 있다는 점을 지적하고 있다. 가장 중요한 것은 한계강도에 대한 성숙도의 영향을 반영하지 못한다는 점이다. 이러한 점들을 보완하여 만들어진 식에는 다음과 같은 것들이 있다.

Chin (1971)은 강도-성숙도 관계를 다음식에 의해 표현되는 쌍곡선으로 나타낼 수 있다고 하였다.

$$S = \frac{M}{\frac{1}{A} + \frac{M}{S_u}} \quad (6)$$

여기서, S = strength

M = maturity

A = initial slope of the strength-maturity curve

S_u = limiting strength

Freiesleben Hansen et al. (1985)은 콘크리트의 강도발현 예측에 적용할 목적으로 다음과 같은 지수 방정식을 제안하였다.

$$S = S_u e^{-\left[\frac{\tau}{M}\right]^\alpha} \quad (7)$$

여기서, S = strength

S_u = limiting strength

M = maturity

τ = time constant

α = shape parameter

이상에서 볼 수 있듯이 강도 예측을 위한 모델들은 많이 제시되어 있다. 그러나 이러한 모델들은 컴퓨터 프로그래밍 기술이 개발되기 전에 제안된 것들이다. 지금은 이와 관련된 많은 컴퓨터 프로그램들이 상용화 되어 있어서 최적의 모델들을 용이하게 구할 수 있다.

III. 실험

1. 사용재료

가. 불포화 폴리에스터 수지

불포화 폴리에스터 수지는 그 구성분자인 모노머가 에스테르 결합으로 중합된 고분자 화합물이다. 이것은 취급이 용이하고 상온에서 자유롭게 경화시간을 조절할 수 있을 뿐만 아니라 다른 열경화성 수지에 비하여 양호한 작업성, 절연성과 내약품성을 가지고 있다. 본 연구에 사용된 불포화 폴리에스터 수지는 울소 타입 (ortho type)으로서 코발트계 경화촉진제 (CoOc)가 첨가되어 있으며, 그 성질은 Table 1과 같다.

나. 개시제

촉진제가 첨가된 불포화 폴리에스터 수지는 개시제만 첨가하면 경화반응을 일으킨다. 개시제에는 속경형, 표준 경화형, 지연형의 3종류가 있으나 본 연구에서는 MEKPO 55 %,

Table 1 Properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity (20 °C)	Viscosity (25 °C, mPa·s)	Acid value	Styrene content (%)
1.138	300	20.0	40

DMP 45 %로 구성된 표준 경화형 개시제를 사용하였으며, 그 성질은 Table 2와 같다.

다. 충전재

충진재는 주로 결합재의 증량 및 내구성의 개선을 목적으로 사용되는데, 일반적으로 입경이 1~30 μm 정도인 중질 탄산칼슘, 실리카 분말, 플라이 애쉬 등이 이용된다. 본 연구에서는 수지를 적게 흡수하고 구입이 용이한 중질 탄산칼슘을 사용하였으며, 물리적 성질과 화학적 조성은 각각 Table 3 및 Table 4와 같다.

라. 골재

본 연구에 사용된 굵은골재는 화강암 쇄석이며, 잔골재는 강모래로서 이들 골재에 대한 물리적 성질은 Table 5와 같다.

Table 2 Properties of initiator

Component	Specific gravity (25 °C)	Active oxygen
MEKPO 55 %, DMP 45 %	1.12	10.0

Table 3 Physical properties of heavy calcium carbonate

Specific gravity	Absorption (%)	Water content	pH	Mean grain size (μm)	Retained percentage of 325 mesh sieve
2.75	0.20	≤ 0.3	8.8	13	0.03

Table 4 Chemical compositions of heavy calcium carbonate (by %)

CaO	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	SiO ₂	MgO	Ig. loss
53.7	0.25	0.09	2.23	0.66	42.4

Table 5 Physical properties of aggregate

Aggregate	Source	Max. size (mm)	Apparent specific gravity	Absorption (%)	FM of combined aggregate
Coarse	Crushed granite stone	13	2.62	0.65	4.19
Fine	River sand	5	2.60	0.75	

Table 6 Mix proportion of unsaturated polyester polymer concrete

Binder (UP+ST)	Filler	Coarse aggregate		Fine aggregate	
		10~13 mm	5~10 mm	1.2~5 mm	<1.2 mm
10.5	10.5	11.2	16.6	10.2	41.0

Table 7 Formulation of binder

UP resin	ST monomer	C ₆ O ₆	MEKPO
60 wt. %	40 wt. %	0.25 phb*	1.0 phb*

*phb : parts per hundreded parts of binder (UP+ST)

2. 시험체 제작

가. 폴리머 콘크리트의 배합비 결정

폴리머 콘크리트의 배합은 소정의 워커빌리티와 강도를 얻을 수 있는 범위 내에서 골재와 충전재의 양을 최대화 하고, 결합재인 폴리머의 양을 최소화 하는 것이 가장 이상적이다. 폴리머 콘크리트의 배합비는 사용목적, 수지의 종류, 골재의 형상 및 입도, 작업조건 등에 따라 달라지며, 그 결정방법이 정립되어 있지 않다. 본 연구에서는 반복시험에 의해 적정 배합비를 결정하였으며, 결정된 폴리머 콘크리트의 배합비는 Table 6과 같고, 결합재의 조성비는 Table 7과 같다.

나. 시험체 제작 및 시험방법

압축강도 시험용 시험체는 KS F 2419 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 강도시험용 공시체 제작 방법)에 규정된 방법에 의하여 제작 하였다 이 때 배합은 콘크리트용 강제식 믹서로 하였고, 다짐은 테이블 바이브레이터 (3,000 vpm)로 2분간 실시하였다.

압축강도 시험용 공시체는 원주형으로서 크기는 Φ7.5×15

cm로 하였으며, 시험은 KS F 2481 (폴리에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 따라 실시하였다. 양생온도는 20~70 °C로서 10 °C 간격으로 하고, 재령 3, 6, 9, 12, 24, 48, 72, 120 및 168 시간에서 압축강도를 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 압축강도 시험 결과

일반적으로 폴리머 콘크리트의 강도는 결합재의 종류나 양생온도와 같은 요인들에 의해 다르게 나타난다. 본 연구에서는 불포화 폴리에스테르 수지를 결합재로 사용하여 폴리머 콘크리트를 제조하고 20, 30, 40, 50, 60, 70 °C에서 168시간 동안 양생을 하였으며, 압축강도를 시험한 결과는 Table 8과 같고, 이를 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

재령에 따른 압축강도 발현 양상을 보면 재령 24시간 까지

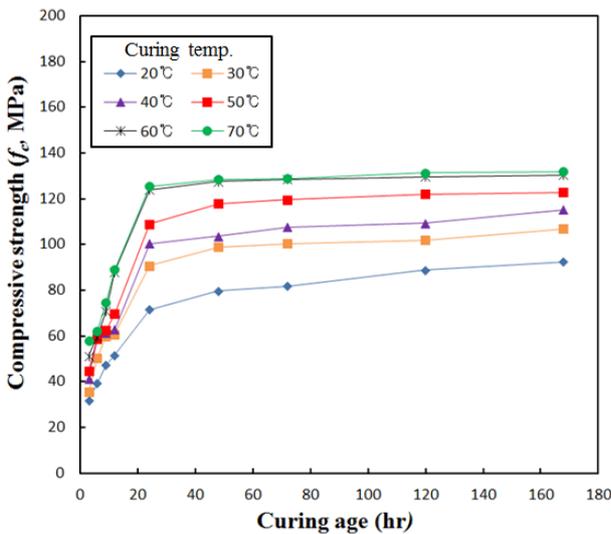


Fig. 1 Compressive strength versus curing age for various curing temperature

급격한 증가를 보여 조기강도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이 같이 조기강도가 가파르게 증가하는 경향은 양생온도가 높아 질수록 뚜렷하게 나타났다. 좀 더 구체적으로 살펴보면 압축 강도는 재령 24시간에서 92.3~132.0 MPa, 재령 168시간에서 71.4~125.5 MPa로 나타나, 재령 24시간에서 168 시간 강도의 77.3~95.0%가 발현됨을 알 수 있다.

양생온도에 따른 강도발현 양상을 보면 재령 168시간 일때 양생온도가 20 °C인 경우 압축강도가 92.3 MPa이었으나 70 °C인 경우는 132.0 MPa로서 매우 큰 차이를 보였다. 그러나 고온인 60 °C와 70 °C에서의 압축강도 차이는 매우 작게 나타났다. 특히 재령 12시간부터는 60 °C와 70 °C의 고온일 경우 압축강도 값이 거의 비슷하였다. 이러한 결과로부터 60 °C 이상 가열양생을 하는 경우에는 24시간 이상 양생시킬 필요가 없음을 알 수 있다. 그리고 70 °C에서 12시간 양생시켰을 때의 압축강도와 20 °C에서 120시간 양생시켰을 경우 압축강도가 같은 값을 갖는 것으로 나타났다. 이와 같은 결과들로부터 폴리머 콘크리트는 가열양생에 의해 양생시간을 크게 단축할 수 있으며, 이는 현장 적용이나 공장제품 제조 시 매우 유리함을 보여주는 결과라고 하겠다.

한편 불포화 폴리에스테르 수지를 사용한 경우 (Gorninski et al., 2004; Ohama et al., 1987), 에폭시 수지를 사용한 경우 (Oussma et al., 1987; El-Hawary et al., 2012), PMMA를 사용한 경우 (Ohama et al., 1981), MMA-PMMA를 사용한 경우 (Son et al., 2012), 폴리우레탄 아크릴 수지를 사용한 경우 (Agavrioloie et al., 2012), UP-MMA를 사용한 경우 (Hyun et al., 2012) 등과 같은 기존의 연구결과에 제시된 압축강도와 비교해 보면, 양생온도가 20~30°C일 때는 비슷하였으나 그 이상의 고온일 때는 현저히 높게 나타나는 경향을 보였다.

2. 기준온도 추정

시멘트 콘크리트의 성숙도 산정에 사용되는 기준온도는 시멘트의 수화반응이 일어날 수 있는 최저온도로서 -10 °C를 채택하고 있다 (Carino et al., 2001). 그러나 폴리머 콘크리트는

Table 8 Test results of compressive strength

(Unit : MPa)

Curing temperature (°C)	Curing age (hrs)								
	3	6	9	12	24	48	72	120	168
20	31.5	39.3	47.2	51.6	71.4	79.7	81.7	88.8	92.3
30	35.4	50.2	59.9	60.7	90.7	98.7	100.3	101.9	106.7
40	41.3	58.6	61.4	62.7	100.4	103.6	107.7	109.3	115.2
50	44.5	58.8	62.5	69.7	108.9	117.8	119.5	122.0	122.9
60	51.2	59.5	70.7	88.0	123.9	127.5	128.4	129.5	130.4
70	57.8	61.9	74.6	88.9	125.5	128.3	128.7	131.3	132.0

시멘트 콘크리트와 달리 초기에 높은 강도가 발현되는 특징이 있고, 특히 양생온도가 높아지게 되면 가사시간 (working life)과 경화시간 (hardening time)이 급격하게 짧아진다. 이와 같이 폴리머 콘크리트는 양생온도에 민감하게 반응하기 때문에 강도발현 속도에 큰 차이를 보이므로 성숙도를 산정할 때 시멘트 콘크리트에서 채택하는 기준온도를 그대로 적용할 수가 없다.

따라서 폴리머 콘크리트의 경우에는 별도로 기준온도를 정해야 한다. 이를 구하는데 필요한 기초자료를 얻기 위해 양생온도와 재령을 변수로 하여 재령 168 시간까지 압축강도를 측정하여 보았던 바 Table 8과 같다.

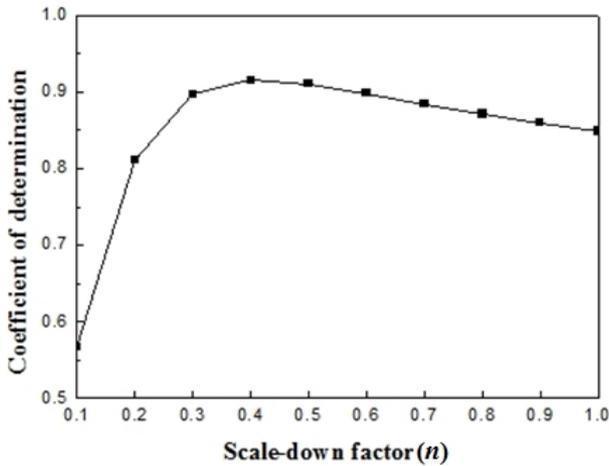


Fig. 2 Scale-down factor vs. coefficient of determination

Table 9 Computation results of slope coefficient of strength

Curing temperature (°C)	$f_c = a(t^{n=0.4}) + b$		
	Constants		R^2
	a	b	
20	9,785	24,537	0.9019
30	10,996	32,995	0.8252
40	11,531	36,982	0.8257
50	13,122	37,806	0.8076
60	13,090	47,103	0.7448
70	12,596	51,349	0.7534

Table 10 Computation results of datum temperature (n=0.4)

Slope coefficient of strength						$y = ax^2 + bx + c$				Datum temperature (T_0 , °C)
Curing temperature (°C)						a	b	c	R^2	
20	30	40	50	60	70					
9,785	11,00	11,53	13,12	13,09	12,60	-0.0019	0.2361	5.6933	0.9374	-20.67

기준온도를 추정하는데 있어서 가장 먼저 구해야 할 요소가 식(2)의 n이다. n은 감소계수로서 0.1부터 1.0까지 대입하여 산출된 성숙도와 압축강도 시험 데이터로 그려진 산포도 (scatter diagram)에서 가장 결정계수 (coefficient of determination)가 크게 나타나는 경우의 n값을 선택하면 된다. 이 결과를 나타낸 그림이 Fig. 2이며, 결정계수가 가장 크게 나타나는 경우의 n값은 0.4임을 알 수 있다.

다음에는 이들 n값을 이용하여 강도경사계수 (slope coefficient of strength)를 구하여야 한다. 이를 산출하기 위해 재령과 관련된 t^n 과 압축강도 (f_c)의 관계를 최소자승법에 의해 회귀분석하여 보았던 바, 그 결과는 Table 9와 같으며, 결정 계수 (R^2)는 0.7534~0.9019의 범위에 있다.

Table 9에 나타난 양생온도별 직선회귀방정식의 파라미터 중에서 강도경사계수를 의미하는 a와 양생온도의 관계로 부터 2차방정식이 얻어진다. 이 방정식에서 a = 0이 되는 점, 즉 y좌표의 값이 0이 되는 점을 x축에서 구하여 성숙도 산출식의 기준온도로 한다. 그러나 2차방정식은 a = 0이 되는 점이 2개로서 큰 값은 재령 168시간 이내에 강도발현이 종료될 수 있는 온도이며, 작은 값은 강도발현이 일어날 수 있는 최저온도로 해석할 수 있다 (Ohama et al., 2000). 그래서 기준온도 (T_0)는 이 두 값 중에서 작은 값이 된다. Table 10에는 2차 방정식에 대한 회귀분석 결과와 기준온도의 산정 결과를 나타낸 것이다. 이 결과에서 기준온도는 -20.67 °C임을 알 수 있다.

3. 성숙도 산출

성숙도는 재령과 양생온도의 곱으로 표시되며, 초기강도 예측에 주로 사용된다. 정확한 강도 예측을 위해서는 성숙도를 올바르게 산출하는 것이 무엇보다도 중요하다. 특히 경화 메카니즘이 초기반응과 강도발현에 큰 영향을 주기 때문에 주의를 해야 한다. 시멘트계 재료는 수화반응에 의해 강도가 발현되나 폴리머계 재료는 중합반응에 의해 강도가 발현된다. 이와 같이 이들 두 재료의 경화 메카니즘이 다르기 때문에 폴리머 콘크리트의 성숙도 산출에 기존의 시멘트계 재료에서 사용하고 있는 식을 그대로 사용할 수가 없다.

기존의 시멘트 콘크리트에 사용하는 성숙도 산출식을 적용할 경우 제기되는 모순점은 식(1)에서 기준온도 T_0 는 시멘트 콘크리트에 적용하는 -10 °C를 사용할 수 없고, 시간간격

Table 11 Estimation results of maturity index

Curing temperature (°C)	Maturity index (°C · h ^{0.4})								
	Curing age (hrs)								
	3	6	9	12	24	48	72	120	168
20	63.11	83.27	97.94	109.88	144.99	191.32	225.01	276.02	315.79
30	78.63	103.76	122.02	136.91	180.65	238.37	280.34	343.89	393.43
40	94.15	124.23	146.11	163.93	216.3	285.41	335.67	411.76	471.08
50	109.67	144.71	170.19	190.94	251.95	332.45	391	479.63	548.73
60	125.18	165.19	194.27	217.96	287.61	379.5	446.32	547.5	626.38
70	140.71	185.66	218.35	244.98	323.26	426.54	501.65	615.37	704.02

Δt 를 변형 없이 그대로 적용하면 성숙도가 과다하게 증가하게 된다는 점이다. 이와 같은 문제가 있기 때문에 기준온도 T_0 는 다시 산정해야 되고, 시간간격 Δt 는 작게 조정해야 된다.

따라서 본 연구에서는 식 (1)을 변형한 식 (2)를 사용하기로 한다. 이 식에서 기준온도 T_0 는 Table 10에서 산출한 -20.67 °C를 적용하고, 시간간격 Δt^n 에서 n 값은 앞에서 산출한 0.4를 적용한다. 이러한 값들을 식 (2)에 대입하여 산출한 성숙도는 Table 11과 같다. 이 결과만 놓고 보면 성숙도의 크기는 재령 보다 양생온도의 영향이 월등하게 크다는 것을 알 수 있다. 이와 같이 양생온도의 영향이 상대적으로 크게 나타나는 것은 재령이 시멘트 콘크리트의 경우는 Δt 인데 비하여(식 (1) 참조), 폴리머 콘크리트의 경우는 $\Delta t^n = 0.4$ 으로 (식 (2) 참조) 축소반영 되었기 때문이다.

4. 성숙도와 압축강도의 관계

압축강도 예측과 관련된 제안식들은 앞의 식 (3)~식 (7)에서 볼 수 있는 바와 같이 다양한 모델들이 제시되어 있다. 이 가운데 대수방정식인 식 (3)은 Plowman (1956)이 제안한 것으로 강도-성숙도 관계를 나타내는 인기 있는 식 중의 하나이다 (Carino et al., 2001). 이 식을 사용할 경우 중간의 성숙도에서는 강도를 비교적 정확하게 예측할 수 있으나 낮거나 높은 성숙도에서는 불일치하는 결점이 있다 (Carino et al., 1983; Carino et al., 2001).

이 식 외에 앞에서 제시한 식 (4), (5), (6), (7) 역시 시멘트 콘크리트에 대한 성숙도로부터 압축강도의 추정을 위해 제안된 식들이다. 이들 식 중에서 식 (4)는 비선형 회귀곡선, 식 (5)는 S형 곡선, 식 (6)은 쌍곡선, 식 (7)은 지수곡선으로 나타내어진다. 이들 식은 형태도 다르며, 특징과 장단점도 서로 다르다. 그래서 적합한 모델을 찾아내고 검정을 하여 사용 가능성을 판단하는 것은 중요한 작업 중의 하나이다. 과거에 컴퓨터 프로그램이 상용화되기 전에는 이러한 작업이 매우 복잡하고

어려웠다.

그러나 현재는 강도예측에 필요한 최적 모델을 찾아내는 것이 그리 어렵지 않다. 최적의 선형 모델을 찾아낼 수 있는 컴퓨터 프로그램들이 많이 개발되고 상용화 되어있기 때문이다. 최적 모델을 찾아내기 위해 본 연구에서는 선형 예측 관련 소프트웨어 중에서 CurveExpert Professional (<http://www.curveexpert.net/download/>)을 사용하였다.

이 소프트웨어를 적용하여 결정계수가 높은 순서에 의해 선정된 2개의 곡선형 모델은 다음 식 (8)과 같이 표현되는 Gompertz Relation과 식 (9)로 표현되는 Weibull Model 등 2가지인 것으로 확인 되었다. Gompertz Relation은 완전한 곡선 데이터의 분석에 적합한 것으로 인구학에서 성인수명 예측, 생물학에서 생존율 분석, 마케팅학에서 고객의 생애가치 모델링 등에 이용되며, Weibull Model도 유연하기 때문에 기계부품의 수명 예측, 신뢰성공학에서의 실패분석, 제품의 생산과 배달에 걸리는 시간의 추정 등에 이용되고 있다.

$$S = ae^{-e^{-cM}} \tag{8}$$

$$S = a - be^{-cM^d} \tag{9}$$

위의 식 (8), (9)에서, S = compressive strength (MPa)

M = maturity index (°C · hrs)

a, b, c, d = parameters

이들 2가지 식과 기준에 시멘트 콘크리트에 많이 이용되고 있는 Natural Logarithm에 의해 작성된 압축강도-성숙도 관계도는 Fig. 3과 같다. 그리고 식 (8)과 식 (9)에서의 파라미터는 각각 Table 12 및 Table 13과 같이 도출 되었다. 이 그림에서 보면 Natural Logarithm은 직선형으로 성숙도가 낮은 부분과 높은 부분에서는 데이터가 많이 분산되어 있어 정확한 예측이 불가능함을 알 수 있다. 이에 비해 곡선형 모델 2가지

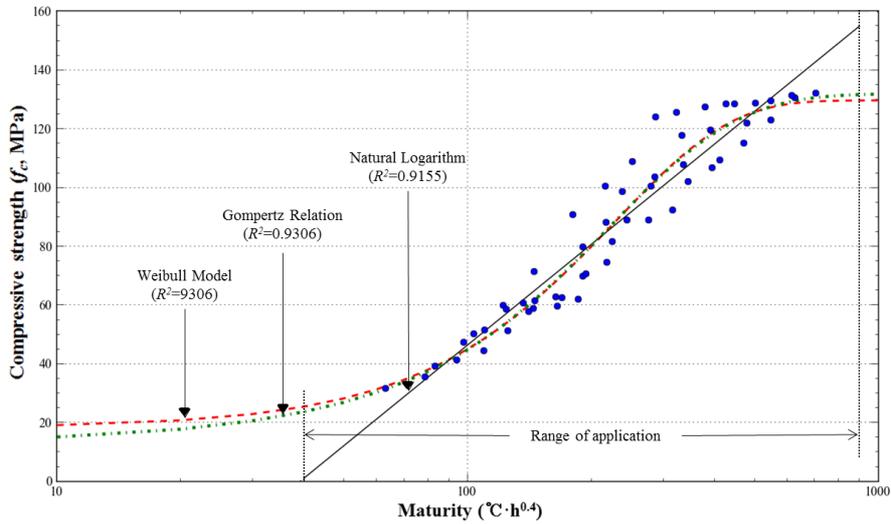


Fig. 3 Compressive strength – maturity curves

Table 12 Parameters and determination coefficient derived from Gompertz Relation model

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> ²
132,0090	0,8483	0,00747	0,9306

Table 13 Parameters and determination coefficient derived from Weibull Model

<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>d</i>	<i>R</i> ²
129,748	111,3686	0,0002	1,552	0,9306

는 실제적으로 강도발현이 안 되는 매우 작은 성숙도에서도 상당한 강도발현이 나타나는 약점을 보이고 있다. 그래서 곡선 모델 2가지를 적용할 수 있는 적정 구간을 추정하여 보았더니, 성숙도가 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{0.4}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{0.4}$ 의 범위에 있을 때 적용하는 것이 적당한 것으로 판단되었다. 이 값은 Table 11과 Fig. 13에서 가장 낮은 점과 가장 높은 점의 성숙도 데이터 값에 30%를 곱하여 산출한 것이다. 이렇게 하였을 경우, 낮은 점의 범위는 Natural Logarithm을 적용하였을 때 압축강도가 0이 되는 점과 거의 일치하게 된다.

V. 결 론

본 연구는 성숙도 방법을 이용한 불포화 폴리에스터 수지 폴리머 콘크리트의 압축강도 예측에 관한 연구로서 얻어진 결과는 다음과 같다.

1. 재령에 따른 압축강도 발현 양상을 보면 재령 24시간 까지 급격한 증가를 보였으며, 24시간 이후부터는 강도 증가가 완만하여 조기강도가 높게 나타남을 알 수 있다. 이와같이 초기강도가 가파르게 증가하는 경향은 양생온도가 높아 질수록 뚜렷하게 나타났다.
2. 양생온도에 따른 강도발현 양상을 보면 재령 168시간일 때 양생온도가 20 °C인 경우 압축강도가 92.3 MPa이었으나 70 °C인 경우 132.0 MPa로서 매우 큰 차이를 보였다. 그러나 고온인 60 °C와 70 °C에서의 압축강도는 그 차이 때 우 작게 나타났다.
3. Ohama et al.이 폴리머 콘크리트의 성숙도 산출을 위해 제시한 식 (2)에서 *n* 값은 0.4가 적합한 것으로 나타났으며, 기준온도는 시멘트 콘크리트의 경우에 적용되고 있는 -10 °C보다 훨씬 낮은 -20.67 °C인 것으로 추정되었다.
4. 성숙도 산출에는 기존에 시멘트 콘크리트에 사용하던 식들을 폴리머 콘크리트에 적용할 수 없음을 확인하였다. 근본 원인은 경화 메커니즘이 서로 달라 양생속도의 차이가 크게 기인한다고 볼 수 있다.
5. 적정 압축강도 예측모델 도출에는 기존에 상용화 되어 있는 선형 예측관련 소프트웨어 중에서 CurveExpert Professional을 사용하였으며, Gompertz Relation이나 Weibull Model 적합한 것으로 확인하였다.
6. 결론적으로 Gompertz Relation이나 Weibull Model을 사용하면 불포화 폴리에스터 수지 폴리머 콘크리트의 압축강도를 용이하게 예측할 수 있으며, 성숙도가 $40\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{0.4}\sim 900\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot\text{h}^{0.4}$ 의 범위일 때 유용한 것으로 판단되었다.

사 사

이 논문은 2017년도 가천대학교 교내연구비 지원에 의한 결과임. 또한 2016학년도 강원대학교 대학회계 학술연구비로 연구하였음 (관리번호-520160080).

REFERENCES

- Agavrioloie, L., S. Opreal, M. Barbuta, and F. Luca, 2012. Charaterisation of polymer concrete with epoxy polyurethane acryl matrix, *Journal of Construction and Building Materials* 37: 190-196.
- Bergstorm, S. G., 1953. Curing temperature, age and strength of concrete, *Magazine of Concrete Research* 5(14): 61-66.
- Carino, N. J., H. S. Lew, and C. K. Volz, 1983. Early age temperature effects on concrete strength prediction by the maturity method, *ACI Journal* 80(10): 93-101.
- Carino, N. J. and H. S. Lew, 2001. The maturity method : From theory to application, *Reprinted from the Proceedings of the 2001 Structures Congress & Exposition*.
- Chandra, S. and Y. Ohama, 1994. Polymers in concrete. CRC Press 81-102.
- Chengju, G., 1989. Maturity of concrete : Method for predicting early-stage strength, *ACI Materials Journal* 86(4): 341-353.
- Chin, F. K., 1971. Relation between strength and maturity of concrete, *ACI Journal Proceedings* 68(3): 196-203.
- El-Hawary, M. M., and H. Abdel-Fattah, 2000. Temperature effect on the mechanical behavior of resin concrete, *Journal of Construction and Building Materials* 14: 317-323.
- Fowler, D. W., 1989. Future trends in polymer concrete. *Polymers in Concrete: Advances and Applications*, ACI SP-116: 129-143.
- Freiesleben Hansen, P. and E. J. Pedersen, 1985. Curing of concrete structures”, CEB Information Bulletin 166.
- Gorninski, J. P., D. C. Dal Molin, and C. S. Kazimerczac, 2004. Study of the modulus of elasticity of polymer concrete compounds and comparative assessment of polymer concrete and portland cement concrete, *Journal of Cement and Concrete Research* 34: 2091-2095.
- Haddad, M. U., D. W. Fowler, and D. R. Paul, 1983. Factors affecting the curing and strength of polymer concrete. *ACI Journal Proceedings* 80(5): 396-402.
- Hulshizer, A. J., M. A. Edgar, R. E. Daniels, J. D. Suminsby, and G. E. Myers, 1984. Maturity concept proves effective in reducing form removal time and winter curing cost, ACI SP 82-18: 351-376.
- Hyun, S. H. and J. H. Yeon, 2012. Strength development characteristics of UP-MMA based polymer concrete with different curing temperature. *Construction and Building Materials* 387-397.
- Lew, H. S. and T. W. Reichard, 1978 Prediction of strength of concrete from maturity, ACI SP 56-14: 229-248.
- Li, Q., J. Guan, Z. Wu, W. Dong, and S. Zhou, 2016. Equivalent maturity for ambient temperature effect on fracture parameters of site-casting dam concrete, *Construction and Building Materials* 120: 293-308.
- Ohama, Y., 1973. Mix proportions and properties of polyester resin concretes. *Polymers in Concrete*, ACI SP-40: 283-294.
- Ohama, Y. and O. Demura, 1981. Mix proportioning and mechanical properties of polymethyl methacrylate resin concrete, *Transactions of the Japan Concrete Institute* 3: 441-448.
- Ohama, Y. and M. Hamatsu, 1987. Incombustibility of polymer concretes made with wet aggregates, ACI SP-99: 151-164.
- Ohama, Y., K. Demura, Y. S. Lee, and K. S. Yeon, 2000. Compressive strength prediction of polyester mortars by the maturity method, *Proc. Int. Symp. on Brittle Matrix Composites*, Warsaw, Poland 439-448.
- Oluokun, F. A., E. G. Burdette, and J. H. Deatherage, 1990. Early-age concrete strength prediction by maturity, *ACI Materials Journal* 87(6): 565-572.
- Oussama, E., G. Elhem, M. Valerie, and B. O. Mongi, 2012. Mechanical and physical properties of epoxy polymer concrete after exposure to temperature up to 250 °C. *Journal of Construction and Building Materials* 27: 415-424.
- Pinto, R. C. and K. C. Hover, 1999. Application of maturity approach to setting time, *Journal of the American Concrete Institute* 686-691.
- Plowman, J. M., 1956. Maturity and the strength of concrete, *Magazine of Concrete Research* 8(22): 13-22.
- Saul, A. G. A., 1951. Principles underlying the steam curing of concrete at atmospheric pressure, *Magazine of Concrete Research* 2(6): 127-140.
- Son, S. W. and J. H. Yeon, 2012. Mechanical properties of acrylic polymer concrete containing methacrylic acid as an additive, *Journal of Construction and Building Materials* 37: 669-679.
- Topcu, I. B. and M. U. Toprak, 2005. Fine aggregate and curing temperature effect on concrete maturity, *Journal of Cement and Concrete Research* 35: 758-762.
- Vipulanandan, C., N. Dharmarajan, and E. Ching, 1988. Mechanical behaviour of polymer concrete system. *Journal of Materials and Structures* 21: 268-277.
- Yikici, T. A. and H. L. Chen, 2015. Use of maturity method to estimate compressive strength of mass concrete, *Construction and Building Materials* 95: 802-812.