

적산온도법에 의한 경량 폴리머 모르타르의 초기강도 예측에 관한 연구

A Study on the Early Strength Prediction of Lightweight
Polymer Mortars by the Maturity Method



이윤수*

Lee, Youn-Su



大濱嘉彦**

Ohama, Yoshihiko



연규석***

Yeon, Kyu-Seok

ABSTRACT

The maturity method in which the strength increase of cement concrete is expressed as a function of an integral of the curing period and temperature of the concrete has often been applied to its strength prediction. For the purpose of the application of the maturity method to the compressive strength prediction for lightweight polymer mortars using an unsaturated polyester resin as a binder, the lightweight polymer mortars with various catalyst and accelerator contents, are prepared, tested for compressive strength, and the datum temperatures for the maturity equations are estimated. The maturity is calculated by using the maturity equations with the estimated datum temperature. The compressive strengths of the lightweight polymer mortars are predicted from the maturity-compressive strength relationships.

Keywords : Maturity, Strength prediction, Datum temperature, Unsaturated polyester resin, Catalyst, Accelerator, Lightweight polymer mortar

* 정희원, 강원대학교 농공학과 강사

** 일본대학 공학부 건축학과 교수

*** 정희원, 강원대학교 농공학과 교수

• 본 논문에 대한 토의를 1999년 4월 30일까지 학회로 보내
주시면 1999년 6월 호에 토의회답을 게재하겠습니다.

1. 서론

일반적으로 콘크리트의 결합체인 시멘트를 액상수지로 대체하여 제조되는 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트와 비교할 때 초기에 고강도를 발현할 뿐 아니라 접착성, 수밀성, 내약품성, 내동결융해성 등에 우수한 고성능 건설재료로서 그 용도가 확대되고 있다. 특히 액상수지의 비중은 시멘트 비중의 약 1/3이고, 여기에 양질의 경량골재를 사용하면 시멘트 콘크리트 보다 강도가 높은 경량 폴리머 콘크리트의 개발이 가능하다.

이와같은 경량 폴리머 콘크리트의 실용화를 위해서는 초기강도를 비파괴 방법으로 예측하는 것이 대단히 중요하다. 이러한 초기강도 예측을 목적으로 사용되어 온 방법중의 하나가 적산온도(Maturity)법이다. 그러나 현재 폴리머 콘크리트의 강도발현에 있어 적산온도법의 적용에 관한 연구는 전혀 찾아볼 수 없다. 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트에 비해 초기강도가 현저히 높기 때문에 재령 초기의 강도추정이 중요시되며, 이러한 이유에서 적산온도법에 의한 폴리머 콘크리트의 강도추정은 매우 편리한 방법이라 생각된다.

본 연구에서는 결합재로서 불포화 폴리에스터 수지, 골재로서 인공경량골재를 사용한 경량 폴리머 모르타르를 제조하고 축매와 축진제의 첨가량에 따른 초기강도 예측을 적산온도법에 의해 구명하여 보았던 바 그 결과를 여기에 보고한다.

2. 이론적 배경

2.1 적산온도법의 이론적 배경

시멘트 콘크리트의 강도발현과 깊은 관계가 있는 적산온도 이론은 1951년 Saul⁽¹⁾에 의해서 제안되었으며, 1953년 Bergstrom⁽²⁾에 의해 수정된 후 많은 연구자들에 의해 연구되었다. 현재는 한중콘크리트에 관한 일본건축학회시방서 및 토목학회시방서, RILEM지침서, ACI보고서 등에 제시되어 있다. 시멘트 콘크리트에서의 적산온도 이론은 강도발현율, 양생온도 및 양생시간을 함수로 하여, 양생시간 Δt 일때 강도발현율(ds/dt)은 강도(S) 및 양생온도(T)와의 관계는 다음과 같이 표시된다.

$$\frac{ds}{dt} = f(s) \cdot k(T) \quad (1)$$

여기서, $f(s)$: 강도함수, $k(T)$: 온도함수

이 식은 Bernhardt⁽³⁾가 실험에 의해 다음의 식과 같이 수정 제안했다.

$$f(s) = Su \left[1 - \frac{S}{Su} \right]^2 \quad (2)$$

여기서, S : 콘크리트의 강도,

Su : 콘크리트의 극한강도

식(1)과 식(2)로 부터 강도발현이 시작되는 때의 초기강도 발현율(S=0)을 구하면 다음식으로 변환된다.

$$\frac{ds}{dt} = Su \cdot k(T) \quad (3)$$

위 식들의 관계로부터 적산온도 함수식의 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$M(t, T) = \int_{t_0}^t k(T) dt \quad (4)$$

식(4)는 시간-온도관계의 계산을 위해 $k(T)$ 를 온도함수로 표시하면,

$$k(T) = A(T - T_0) \quad (5)$$

여기서, T_0 : 강도발현이 일어나지 않는 콘크리트의 최저온도(기준온도),

A : 실험상수

식(4)와 식(5)로 부터 적산온도 이론적인 시간-온도 함수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$M(t, T) = A \int_{t_0}^t (T - T_0) dt \quad (6)$$

식(6)은 시멘트 콘크리트의 적산온도에 대한 일반식이며, 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$M = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t \quad (7)$$

2.2 폴리머 콘크리트의 적산온도 이론식

전술한 바와같이, 식(6)의 적산온도 이론식은 1950년대에 한중시멘트 콘크리트와 증기양생 시멘트 콘크리트의 강도발현 추정에 사용되었다⁽¹⁾⁽²⁾⁽⁴⁾. 적산온도 이론의 기초는 시멘트 콘크리트의 강도와 적산온도와는 일정한 관계가 있고, 서로 다른 양생온도와 양생시간을 가진 경우라도 적산온도가 동일하면, 강도의 차이가 없다는데 있다⁽⁵⁾.

그러나, 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로서 사용하는 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트와

비교하여 반응과정, 경화시간, 강도발현 속도 등의 차이점 때문에 시멘트 콘크리트에 적용되어 사용된 적산온도 이론식을 수정없이 폴리머 콘크리트에 사용하는 것은 무리가 있다.

즉 폴리머 콘크리트는 초기강도가 높고, 24시간 이내에 거의 최종도달강도에 달하므로⁽⁶⁾, 장기재령인수록 폴리머 콘크리트의 적산온도 이론식에 사용되는 Δt 의 영향을 작게할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 식(4)의 Δt 를 Δt^n 으로 치환하여 폴리머 콘크리트의 적산온도 이론식의 기본식으로 사용코자 한다.

$$M(t, T) = \int_{t_0}^{t^n} k(T) dt \quad (8)$$

여기에, 식(5)을 대입하면,

$$M(t, T) = A \int_{t_0}^{t^n} (T - T_0) dt \quad (9)$$

식(9)를 정리하면, 폴리머 콘크리트의 적산온도 이론식의 일반식은 다음과 같이 나타낼 수 있다

$$Mp = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t^n \quad (10)$$

여기서, Mp : 폴리머 콘크리트의 적산온도($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^n$)

T : 폴리머 콘크리트의 양생온도($^{\circ}\text{C}$)

T_0 : 기준온도($^{\circ}\text{C}$)

Δt : 양생시간 (h)

n : 결합재의 종류에 의하여 결정되는 정수

본 연구에서는 식(10)을 경량 폴리머 모르타의 적산온도 이론식으로 사용하였으며, 식(10)을 사용할 경우에는 사용하는 폴리머의 종류에 따른 결합재의 경화반응 등을 고려하여 n 값을 결정해야만 한다.(시멘트 콘크리트의 경우 $n = 1$ 사용)

2.3 압축강도 추정의 이론적 배경

본 연구에서는 경량 폴리머 모르타의 압축강도와 적산온도의 관계를 추정하기 위해 Linear, Logistic Curve 및 Gompertz Curve 등 3가지 식을 사용하여 제안된 적산온도 이론식을 검토했다.

(1) Linear

이 식은 직선식으로 1950년대에 Plowman⁽⁴⁾ 등이 증기양생한 시멘트 콘크리트의 압축강도와 적산온도의 관계에 적용하여 압축강도를 추정하는데 사용한 것으로 일반식은 적산온도에 대수를

취하여 다음과 같이 표시한다.

$$S = a + b \cdot \log Mp \quad (11)$$

여기서, S : 경량 폴리머 모르타의 압축강도

Mp : 경량 폴리머 모르타의 적산온도

a, b : 실험상수

(2) Logistic Curve⁽⁷⁾⁽⁹⁾

Logistic Curve는 인구증가율 등을 표시할 때 사용되는 것으로 이 곡선으로 표현되는 강도발현 형태는 변곡점 $S = Su/2$ 까지는 발현속도가 가속적으로 증가하고 변곡점 이상에서는 그 속도가 둔화되면서 최종도달강도에 이르게 되며, 이 곡선은 변곡점을 중심으로 좌우대칭이 된다.

$$S = \frac{Su}{[1 + \exp(a - b \cdot \log Mp)]} \quad (12)$$

여기서,

S : 경량 폴리머 모르타의 압축강도

Su : Logistic Curve에 의한 경량 폴리머 모르타의 최종도달 압축강도

Mp : 경량 폴리머 모르타의 적산온도

a, b : 실험상수

(3) Gompertz Curve⁽⁷⁾

Gompertz Curve은 경제성장법칙 또는 인구사망율을 수학적으로 표시할 때 사용하는 것으로 이 곡선에 의한 강도발현은 $S = Su/e$ 에서 변곡점을 가지며, 좌우대칭은 아니다.

$$S = Su \cdot \exp(-a \cdot e^{-b \cdot \log Mp}) \quad (13)$$

여기서,

S : 경량 폴리머 모르타의 압축강도

Su : Gompertz Curve에 의한 경량 폴리머 모르타의 최종도달 압축강도

Mp : 경량 폴리머 모르타의 적산온도

a, b : 실험상수

3. 사용재료

3.1 결합재용 재료

결합재로서는 액상 불포화 폴리에스터 수지(UP)에 희석제로 스티렌 모노머(St)를, 촉진제로 옥탄산 코발트 8% mineral turpentine 용액(CoOc), 촉매제로서 methyl ethyl ketone peroxide (MEKPO)를 사용하였다. 사용된 액상수

지의 성질은 Table 1과 같다.

Table 1 Properties of unsaturated polyester resin

Specific gravity (20°C)	Viscosity (20°C, mPa · s)	Styrene content (%)	Acid value
1.13	325	38.0	16.9

3.2 충전재 및 경량골재

충전재는 중질탄산칼슘(CaCO₃), 골재는 JIS A 5002(구조용 경량콘크리트 골재)의 품질규격에 맞는 인공경량골재로 Expanded Shale(ES), Foamed Glass(FG), Hollow Fused Alumina(HFA), Hollow Mullite(HM)를 사용하였다. 충전재 및 경량골재의 함수율은 0.1% 이하로 하였으며, 그 성질은 Table 2와 같다.

Table 2 Properties of filler and lightweight aggregate

Type of filler and aggregate		Size (mm)	Specific gravity (20°C)	Water content (%)	Organic impurities
Filler	Heavy calcium carbonate (CaCO ₃)	<2.5×10 ⁻³	2.70	<0.1	Nil
	Expanded Shale (ES)	ES-1	2.5-5.0	1.35	<0.1
ES-2		<2.5	1.62	<0.1	Nil
Foamed Glass (FG)		FG-1	2.5-5.0	0.36	<0.1
	FG-2	1.2-1.5	0.42	<0.1	Nil
	FG-3	0.3-1.2	0.45	<0.1	Nil
Fine Agg.	Hollow Fused Alumina(HFA)	0.1-5.0	0.70	<0.1	Nil
	Hollow Mullite (HM)	150-300×10 ⁻³	0.40	<0.1	Nil

4. 시험방법

4.1 모르터의 제조

모르터를 배합하기 전에 결합재의 양을 가능한 적게하기 위하여 경량골재 종류별(ES, FG, HFA)로 JIS A 1104(골재의 단위용적중량 및 실적을 시험방법)에 따라 가장 작은 공극율을 갖는 비율을 찾아내었으며, 그 조성비를 용적비로 표시하면 다음과 같다.

- (1) ES 1 : ES-2 = 1 : 2
- (2) FG-1 : FG-2 : FG-3 = 2 : 1 : 1 : 1
- (3) HFA : HM = 4 : 1

위에서 제시한 3종류의 경량골재 조성비와

Table 3에 표시한 결합재 배합을 사용하여 Table 4에 표시된 배합비의 모르터를 제조하였다. 모르터 제조방법은 JIS A 1181(폴리에스터 레진 콘크리트의 강도 시험용 공시체의 제작방법)에 준하였다.

Table 3 Formulations of binders

Formulations by mass			
Unsaturated polyester resin	Styrene monomer	MEKPO (phr*)	CoOc (phr*)
100	12	0.25	0.25
			0.50
			0.75
		0.50	0.25
			0.50
			0.75
		0.75	0.25
			0.50
			0.75

Note, *phr : Parts per hundred parts of resin.

Table 4 Mix proportions of lightweight polymer mortars

Type of fine aggregate	Mix proportions by volume			Filler-binder ratio, Vf/Vb* (by volume)	Apparent specific gravity
	Binder (Vb)	Filler (Vf)	Fine aggregate		
ES	25.2	15.6	59.2	0.62	1.73
FG					0.98
HFA					1.26

Note, * : Filler binder ratio calculated by volume.

4.2 공시체의 제작 및 압축강도 시험

압축강도용 공시체는 40×40×160mm 각주형으로 시험온도 0, 10, 20, 30 및 40°C에서 6,12,24,72,120 및 168시간 양생시켰다. 제작된 공시체는 JIS A 1183(보의 절편에 의한 폴리에스터 레진 콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의하여 압축강도를 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 경량 폴리에스터 모르터의 기준온도

5.1.1 기준온도 추정방법

일반적으로 시멘트 콘크리트의 적산온도 이론식에 사용되는 기준온도는 시멘트의 수화반응이 일어날 수 있는 최저 온도로서 -10°C가 사용되고 있으며⁽⁵⁾⁽⁷⁾, 내한성 혼화재가 사용되었을 경우는 그 농도에 따라 -10~ -15°C로 낮아진다⁽⁸⁾.

그러나 시멘트 콘크리트와 달리 경량 폴리머 모르터는 속경성으로서 초기에 고강도가 발현될 수 있는 특징이 있고 촉매와 촉진제 첨가량에 의해 반응정도, 가사시간 및 경화시간이 큰 폭으로 변화한다. 따라서 경량 폴리머 모르터의 기준온도 추정을 위해서는 촉매 및 촉진제 첨가량에 따라 변화되는 기준온도를 구해야하며, 본 연구에서는 이것을 구하기 위해 일반적으로 사용되는 9종류의 촉매 및 촉진제 배합비를 사용하였다. 압축강도는 재령 168시간까지 측정하였으나 폴리머 모르터가 속경성이라는 점을 감안하여 재령 72시간(3일) 까지를 기준온도 추정 대상으로 하였다.

5.1.2 기준온도 추정순서

경량 폴리머 모르터를 시멘트 콘크리트와 같이 적산온도 이론식에 의해 기준온도를 추정할 경우 양생온도에 따라 압축강도 발현속도가 큰 차이를 보인다⁽⁸⁾. Table 5에는 촉매 및 촉진제 첨가량의 변화에 따른 경량 폴리머 모르터의 압축강도와 양생온도와의 관계를 나타낸 것이다.

이 실험결과에서 촉매 및 촉진제 첨가량이 각각 0.75p/hr, 0.50p/hr인 경우를 예로 들어보면 다음과 같다. 먼저, 경량 폴리머 모르터의 재령 168시간까지의 실험치 중에서 재령 72시간까지의 실험치를 대상으로 Fig. 1과 같이 X를 재령, Y축을 압축강도로 표시하고 양생온도별 회귀식을 $Y = A\sqrt{X} + B$ 로 하여 최소자승법에 의해 회귀분석 하면, Table 6을 얻을 수 있다. Table 6에서 양생온도별로 Fig. 1에서 구한 회귀식의 공배 A(이하 강도공배계수라 함)⁽⁸⁾와 양생온도의 상관도를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

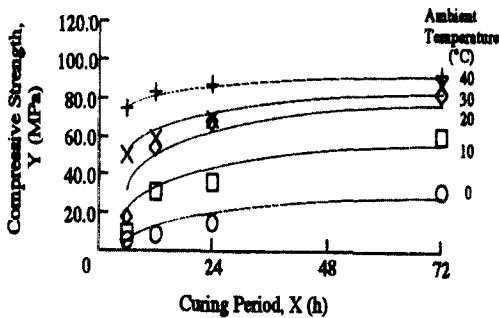


Fig. 1 Curing period vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.75p/hr and C_0O_c content 0.50p/hr at various ambient temperatures

이 그림으로 부터 $A=0$ 이 되는 양생온도를 2차방정식에 의해 구하고, 구해진 값을 적산온도 이론식의 기준온도로 한다. 그러나 2차 방정식의 경우 $A=0$ 가 되는 점은 2점으로, 온도가 높은 점은 재령 72시간 이내에 강도발현의 종료를, 온도가 낮은 점은 재령 72시간 이내에 강도발현이 되지 않는 온도로 해석할 수 있다. Table 7에는 2차 방정식에 대한 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 이상의 경량 폴리머 모르터의 기준온도 추정순서를 정리 하면, 다음과 같다.

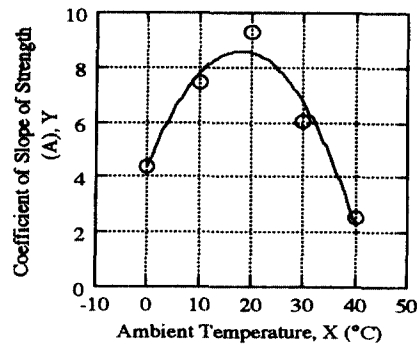
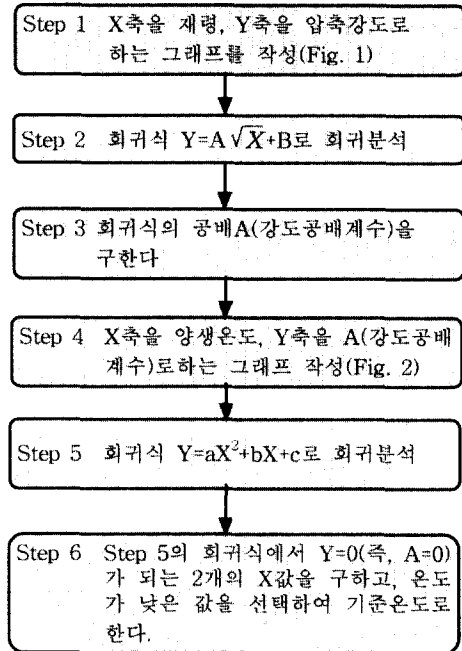


Fig. 2 Ambient temperature vs. coefficient of slope of strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.75p/hr and C_0O_c content of 0.50p/hr at various ambient temperatures

Table 5 Ambient temperature vs. compressive strength of lightweight polymer mortars with various catalyst and accelerator contents.

Catalyst and accelerator contents (phr*)		Ambient temperature (°C)	Compressive strength (MPa)					
CoOc	MEKPO		Curing period (h)					
			6	12	24	72	120	168
0.25	0.25	0	0**	0	0	0	0	0
		10	0	0	0	2.1	2.3	2.6
		20	0.9	5.0	24.7	49.5	59.9	67.8
		30	5.0	9.0	57.7	68.5	70.3	73.2
		40	5.9	10.2	60.9	70.5	72.0	74.5
	0.50	0	0	0	3.1	25.1	30.9	31.9
		10	0	5.4	12.7	48.8	52.2	56.8
		20	4.5	15.8	47.8	70.3	71.7	74.5
		30	14.6	44.4	64.4	84.5	84.2	85.3
		40	24.6	74.7	81.5	86.4	86.4	95.4
	0.75	0	0	5.8	13.7	29.5	36.9	38.7
		10	6.1	13.7	36.4	58.5	62.1	63.7
		20	10.8	47.5	57.8	68.2	75.2	82.7
		30	45.0	56.7	69.4	85.3	89.4	90.0
		40	63.9	82.8	86.0	87.8	90.6	96.4
0.50	0.25	0	0	0	1.0	7.2	14.0	15.7
		10	0	0	5.8	35.4	37.0	43.0
		20	1.6	5.4	27.9	99.0	68.8	68.8
		30	5.0	9.4	58.6	70.1	71.8	74.6
		40	5.9	10.9	62.5	71.0	72.2	76.5
	0.50	0	2.1	7.2	9.8	26.0	32.0	32.8
		10	8.8	34.7	38.1	68.0	69.2	71.1
		20	9.8	24.5	53.8	82.6	83.2	85.4
		30	15.0	60.3	70.8	82.9	84.2	87.6
		40	36.5	75.8	76.6	91.2	94.1	97.0
	0.75	0	5.3	8.7	14.6	31.5	38.0	41.0
		10	10.1	31.3	36.4	60.1	63.5	64.0
		20	16.6	53.1	66.7	82.2	82.9	85.9
		30	50.0	58.0	69.6	86.9	92.0	95.8
		40	74.5	83.8	86.9	92.0	100.0	100.5
0.75	0.25	0	0	0	1.5	7.6	13.0	21.6
		10	0.9	4.5	6.6	36.7	37.5	46.2
		20	2.1	6.2	31.7	68.4	70.8	72.5
		30	4.9	10.8	59.1	69.5	72.1	74.8
		40	6.0	11.6	65.8	71.5	79.2	79.7
	0.50	0	3.0	5.4	8.7	34.1	34.4	34.6
		10	5.5	14.2	20.0	47.8	48.1	49.3
		20	10.0	26.1	54.0	81.9	83.8	86.5
		30	16.9	49.0	76.4	85.9	85.5	88.1
		40	40.0	76.1	89.9	91.5	94.5	98.6
	0.75	0	6.0	12.5	15.8	36.0	39.0	41.5
		10	13.3	35.1	40.7	69.1	71.7	73.6
		20	17.0	53.6	67.0	90.9	91.2	93.5
		30	50.5	72.7	80.9	91.8	92.0	96.1
		40	75.9	84.9	89.5	94.2	99.8	101.8

Notes, *phr : Parts per hundred parts of resin.

** : Not to harden.

Table 6 Constants of regression equations for Fig. 1

Catalyst and accelerator contents(phr*)		Ambient temperature (°C)	Y = A√X + B		
CoOc	MEKPO		Constants		Coefficient of correlation
			A	B	
0.25	0.25	0	-	-	-
		10	0.55	-2.17	0.72
		20	15.18	-53.71	0.93
		30	22.32	-73.42	0.93
		40	22.85	-74.15	0.93
	0.50	0	4.41	14.22	0.96
		10	8.24	-23.04	0.99
		20	10.95	-18.21	0.96
		30	10.47	1.46	0.93
		40	7.77	29.33	0.73
	0.75	0	4.84	11.10	0.99
		10	8.79	-13.74	0.98
		20	7.83	8.28	0.83
		30	6.39	33.30	0.97
		40	3.04	65.48	0.72
	0.25	0	1.26	-4.05	0.97
		10	6.22	-19.72	0.97
		20	9.90	24.29	0.99
		30	11.31	18.78	0.89
		40	11.28	-16.85	0.88
0.50	0	5.15	11.34	0.99	
	10	8.79	-5.00	0.96	
	20	11.95	-14.99	0.98	
	30	9.14	13.13	0.82	
	40	7.20	37.78	0.77	
0.75	0	6.12	-10.45	0.99	
	10	8.67	-4.21	0.97	
	20	9.29	9.81	0.88	
	30	6.01	37.12	0.99	
	40	2.54	71.94	0.91	
0.25	0	2.68	-8.07	0.99	
	10	6.07	-16.21	0.99	
	20	11.45	-28.15	0.99	
	30	11.10	17.60	0.90	
	40	11.32	15.90	0.86	
0.75	0	7.10	-17.33	0.99	
	10	8.68	15.01	0.99	
	20	11.70	13.17	0.98	
	30	10.21	7.79	0.87	
	40	6.85	41.33	0.76	
0.75	0	7.23	-10.41	0.99	
	10	9.75	-4.65	0.98	
	20	10.74	5.31	0.92	
	30	5.90	45.52	0.89	
	40	2.67	73.25	0.91	

5.1.3 촉매 및 촉진제 첨가량이 기준온도에 미치는 영향

Fig. 3에는 경량 폴리머 모르타의 적산온도 이론식의 기준온도와 촉매 및 촉진제 첨가량의 관계를 나타낸 것이다.

촉매와 촉진제 첨가량이 증가할수록 기준온도가 낮아지는 경향을 보였다. 이 그림에서 촉매첨가량을 MEKPO, 촉진제 첨가량을 CoOc로 하면 둘은 경량 폴리머 모르타의 기준온도에 상호 영향을 미치는 복합요인으로서 둘의 관계는 $MEKPO + \sqrt{CoOc}$ 로 표시할 수 있다. 그 결과로서 경량 폴리머 모르타의 기준온도와 촉매 및 촉진제 첨가량의 복합요인 $MEKPO + \sqrt{CoOc}$ 와의 관계를 Fig.4에 나타내었다. 기준온도와 $MEKPO + \sqrt{CoOc}$ 의 관계에는 높은 상관성이있는 것으로 확인되었으며, 이로부터 MEKPO 및 CoOc 가 0.25~0.75phr의 범위일때 다음과 같은 실험식을 제안할 수 있다.

$$Y = 33.4X^2 - 104.1X + 67.8 \quad (r=0.97) \quad (14)$$

$$X = MEKPO + \sqrt{CoOc}$$

여기서, Y : 기준온도(°C)

MEKPO : 촉매첨가량(phr)

CoOc : 촉진제첨가량(phr)

r : 상관계수

5.2 적산온도법에 의한 경량 폴리머 모르타의 압축강도 추정

5.2.1 적산온도 이론식에서 Δt^n 의 n치 추정

앞에서 제시한 경량 폴리머 모르타의 적산온도 이론식을 적용하기 위해서는 식(10)에서 Δt^n 의 n치를 결정해야 한다. 본 연구에서는 n치 추정을 위해 촉매 및 촉진제 첨가량이 각각 0.75phr, 0.50phr인 결합재 배합을 사용하여 압축강도를 구하였다. 그 결과치를 이용하여 Δt^n 의 n치를 1, 1/2, 1/3, 1/4로 변화시키며 적산온도와 압축강도의 관계를 Linear, Logistic Curve 및 Gompertz Curve 3종류로 회귀분석한 후 상관계수로 살펴본바 Fig.5 와 같은 결과를 얻었으며, 폴리에스터 수지를 사용한 경우에 적산온도 이론식의 n치는 회귀곡선의 종류에 관계없이 1/2의 경우가 가장 상관성이 높았다. 따라서 본 연구결과로 부터 경량 폴리머 모르타의 적산온도 이론식을 다음과 같이 제안할 수 있다.

Table 7 Regression analysis of coefficient of slope of strength and datum temperature.

Catalyst and accelerator contents (phr)		Coefficient of slope of strength					Y = aX ² + bX + c for Fig. 2				Datum temperature (°C)
		Ambient temperature (°C)					a	b	c	Coefficient of correlation	
CoOc	MEKPO	0	10	20	30	40					
0.25	0.25		0.55	15.18	22.32	22.85	-0.0352	2.5024	-20.9040	0.99	9.7
	0.50	4.41	8.24	10.95	10.47	7.77	-0.0116	0.5536	4.2562	0.99	-6.7
	0.75	4.84	8.79	7.83	6.39	3.04	-0.0108	0.3712	5.2234	0.97	10.7
0.50	0.25	1.26	6.22	9.90	11.31	11.28	-0.0087	0.6010	1.2227	0.99	-2.0
	0.50	5.15	8.79	11.95	9.14	7.20	0.0122	0.5342	5.1073	0.96	-8.1
	0.75	6.12	8.67	9.29	6.01	2.54	-0.0114	0.3573	6.2146	0.99	-12.5
0.75	0.25	2.68	6.07	11.45	11.10	11.32	-0.0086	0.5692	2.3320	0.98	-3.9
	0.50	7.10	8.68	11.70	10.21	6.85	-0.0103	0.4214	6.6505	0.94	-12.2
	0.75	7.23	9.75	10.74	5.90	2.67	0.0124	0.3654	7.3759	0.97	-13.8

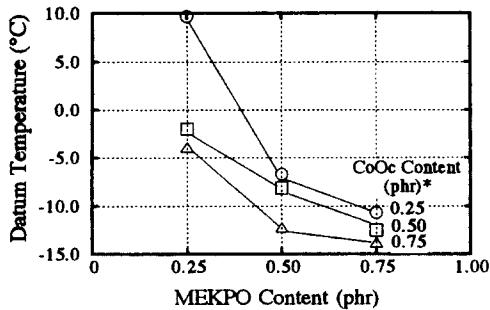


Fig. 3 MEKPO and Co₂O₃ contents vs. datum temperature

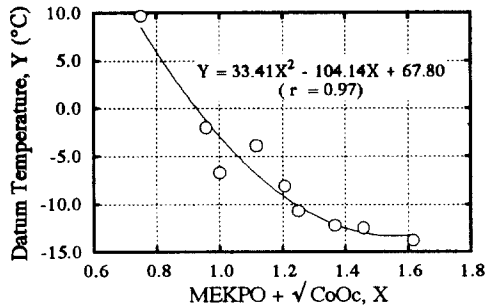


Fig. 4 MEKPO and Co₂O₃ contents vs. datum temperature

$$Mp = \sum (T - T_0) \cdot \sqrt{\Delta t} \quad (15)$$

여기서, Mp : 폴리머 모르타의 적산온도(°C · h^{1/2})

T : 폴리머 모르타의 양생온도(°C)

T_0 : 기준온도(°C)

Δt : 양생시간 (h)

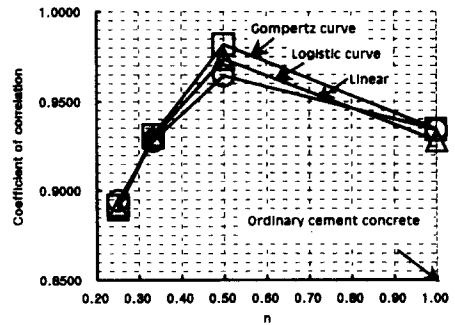


Fig. 5 n for M^p of maturity equation vs. coefficient of correlation calculated by relationships between maturity and compressive strength of polyester mortars

5.2.2 압축강도

Table 5에는 각 양생온도 및 양생시간의 변화에 따른 경량 폴리머 모르타의 압축강도를 나타내었다. 경량 폴리머 모르타의 압축강도는 양생시간의 경과, 촉매 및 촉진제첨가량의 증가, 양생온도의 상승에 따라 증가하는 경향을 보였다. 재령 6시간, 양생온도 40°C로 하고 촉매 및 촉진제를 0.75phr 첨가한 경량 폴리머 모르타의 압축강도는 약 76MPa로 촉매 및 촉진제를 0.25phr 첨가한 것의 약 10배의 압축강도를 보였다.

또한 촉진제첨가량에 관계없이 촉매첨가량의 증가에 따라 초기강도가 높게 나타났다. 촉매 및 촉진제첨가량이 일정할 경우는 재령이 짧고 양생온도가 낮을수록 압축강도가 작게 나타났는데, 이것은 촉매 및 촉진제 첨가량의 증가에 따르는 결합체의 중합속도의 증가 및 양생온도의 저하에 따른 중합반응의 제어에 기인한 것으로 판단된다.

5.2.3 압축강도와 적산온도의 관계

식(12), (13) 및 (14)에 제시된 3종류의 회귀식을 이용하여 Table 5에 나타난 경량 폴리머 모르타르의 압축강도와 식(15)에 의해 계산된 Table 8의 적산온도와와의 관계를 촉매 및 촉진제첨가량별로 나타내면 Fig.6 ~ Fig.14와 같다. Table 9에는 3종류의 회귀식에 의해 회귀분석한 결과로서

실험상수와 상관계수를 나타낸 것이다. 촉매 및 촉진제첨가에 관계없이 적산온도 이론식에 의한 경량 폴리머 모르타르의 강도발현을 Logistic Curve 및 Gompertz Curve에 의해 추정할 경우 높은 상관성을 보였으나, 시멘트 콘크리트에서 적용하는 직선식은 상관성이 떨어지는 경향을 보였다.

Table 8 Maturity of lightweight polyester mortars with vario us catalyst and accelerator contents.

Catalyst and accelerator contents (phr)		Ambient temperature (°C)	Maturity (°C · h ^{1/2})					
CoOc	MEKPO		Curing period (h)					
			6	12	24	72	120	168
0.25	0.25	0	-	-	-	-	-	-
		10	0.7	1.0	1.5	2.5	3.3	3.9
		20	25.2	35.7	50.5	87.4	112.8	133.5
		30	49.7	70.3	99.4	172.3	222.4	263.1
	0.50	40	74.2	104.9	148.4	257.1	331.9	392.7
		0	16.4	23.2	32.8	56.9	73.4	86.8
		10	40.9	57.9	81.8	141.7	182.9	216.5
		20	65.4	92.5	130.8	266.6	292.5	346.1
	0.75	30	89.9	127.1	179.8	311.4	402.0	475.7
		40	114.4	161.8	228.8	396.3	511.6	605.3
		0	26.2	37.1	52.4	90.8	117.2	138.7
		10	50.7	71.7	101.4	175.7	226.8	268.3
0.50	0.25	20	75.2	106.4	150.4	260.5	336.3	397.9
		30	99.7	141.0	199.4	345.4	445.9	527.5
		40	124.2	175.6	248.4	430.2	555.4	657.2
		0	4.9	6.9	9.8	17.0	22.0	25.9
	0.50	10	29.4	41.6	58.8	101.8	131.5	155.5
		20	53.9	76.2	107.8	186.7	241.0	285.2
		30	78.4	110.9	156.8	271.5	350.5	414.8
		40	102.9	145.5	205.8	356.4	460.1	544.4
	0.75	0	19.8	28.1	39.7	68.7	88.7	105.0
		10	44.3	62.7	88.7	153.6	198.3	234.6
		20	68.8	97.3	137.7	238.4	307.8	364.2
		30	93.3	132.0	186.7	323.3	417.4	493.8
0.75	40	117.8	166.6	235.4	408.1	526.9	623.5	
	0	30.6	43.3	61.2	103.1	136.9	162.0	
	10	55.1	77.9	110.2	190.9	246.5	291.6	
	20	79.6	112.6	159.2	275.8	356.0	421.3	
0.75	0.25	30	104.1	147.2	208.2	360.6	456.6	550.9
		40	128.6	181.9	257.2	455.5	575.1	680.5
		0	9.6	13.5	19.1	33.1	42.7	50.5
		10	34.1	48.2	68.1	118.0	152.3	180.2
	0.50	20	58.5	82.8	117.1	202.8	261.8	309.8
		30	83.0	117.4	166.1	287.7	371.4	439.4
		40	107.5	152.1	215.1	372.5	480.9	569.0
		0	29.9	42.3	59.8	103.5	133.6	158.1
	0.75	10	54.4	76.9	108.8	188.4	243.2	287.7
		20	78.8	111.5	157.8	273.2	352.7	417.4
		30	103.4	146.2	206.7	358.1	462.3	547.0
		40	127.9	180.8	255.7	442.9	571.8	676.6
0.75	0	33.8	47.8	67.6	117.1	151.2	178.9	
	10	58.3	82.4	116.6	202.0	260.7	308.5	
	20	82.8	117.1	165.6	286.8	370.3	438.1	
	30	107.3	151.7	214.6	371.7	479.8	567.7	
		40	131.8	186.4	263.6	453.5	580.4	697.3

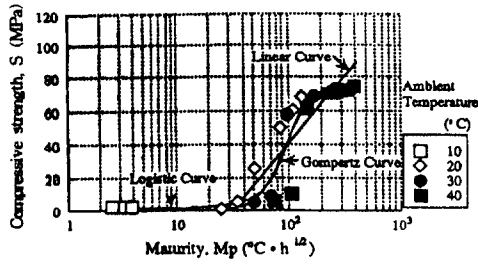


Fig.6 Maturity vs Compressive Strength of Lightweight Polyester Mortars with MEKPO Content of 0.25phr and CoCc Content of 0.25phr.

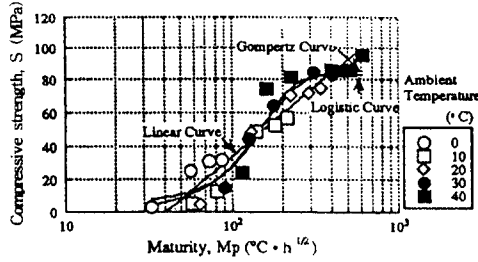


Fig. 7 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.50phr and C, O, content of 0.25phr

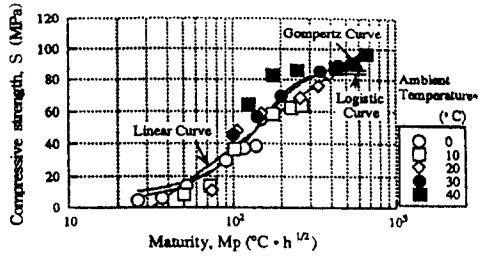


Fig. 8 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.75phr and C, O, content of 0.25phr

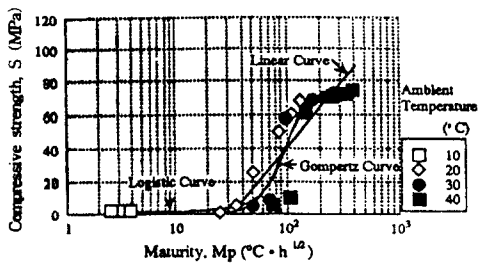


Fig. 9 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.25phr and CoCc content of 0.50phr

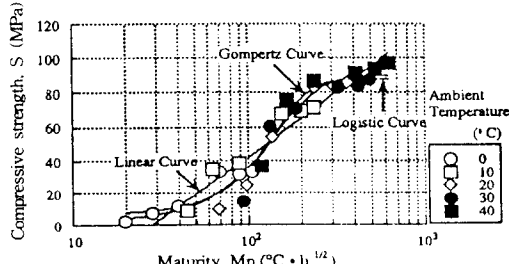


Fig. 10 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.50phr and CoCc content of 0.50phr

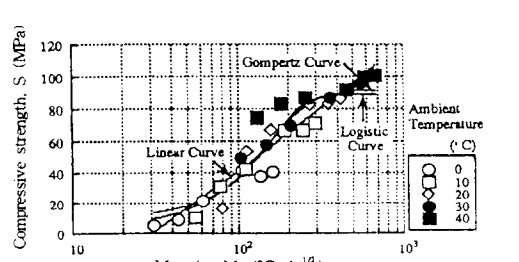


Fig. 11 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.75phr and CoCc content of 0.50phr

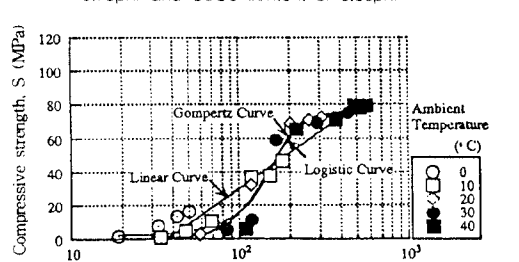


Fig. 12 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.25phr and CoCc content of 0.75phr

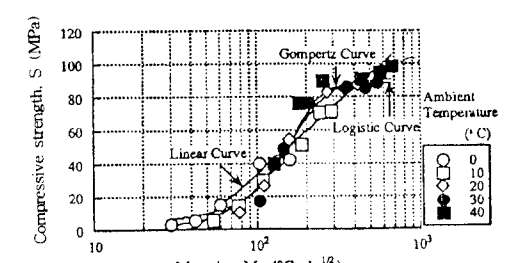


Fig. 13 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.50phr and CoCc content of 0.75phr

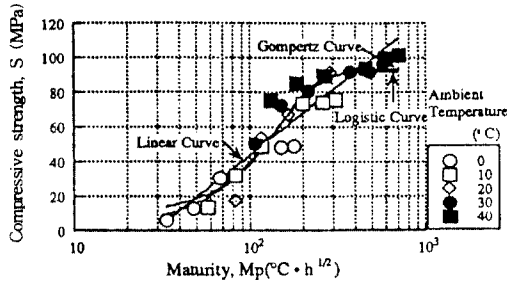


Fig. 14 Maturity vs. compressive strength of lightweight polyester mortars with MEKPO content of 0.75phr and CoOc content of 0.75phr

용되는 기준온도는 축재 및 축진제 첨가량의 복합요인 ($MEKPO + \sqrt{CoOc}$)을 사용하여 추정가능하며, 본 연구에서 구한 기준온도는 MEKPO 및 CoOc가 0.25~0.75phr 범위일때, 다음과 같은 실험식을 제안할 수 있다.

$$Y = 33.4X^{0.10411X} + 67.8 \quad (r = 0.97)$$

$$X = MEKPO + \sqrt{CoOc}$$

여기서, Y : 기준온도(°C)

MEKPO : 축재첨가량(phr)

CoOc : 축진제첨가량(phr), r : 상관계수

Table 9 Constants of regression analysis of logistic, Gompertz and Linear curves for maturity vs. compressive strength.

Accelerator and catalyst contents (phr)*		Number of Data (N)	Logistic curve				Gompertz curve				Linear curve		
CoOc	MEKPO		Su	a	b	γ^*	Su	a	b	γ	a	b	γ
0.25	0.25	21	71.8910	4.2022	0.0445	0.9304	73.1910	9.8394	0.0284	0.9281	113.4500	76.6060	0.8697
	0.50	27	83.2610	2.9699	0.0228	0.9538	85.6480	4.7507	0.01463	0.9565	135.9000	84.7590	0.9414
	0.75	30	83.8080	2.4617	0.0303	0.9511	86.3020	3.5510	0.01327	0.9611	114.1400	75.8740	0.9643
0.50	0.25	26	73.0470	4.0900	0.0283	0.9552	74.2960	10.1110	0.0188	0.9521	76.1000	54.6230	0.8446
	0.50	30	87.6880	2.8551	0.0239	0.9606	89.9940	4.1220	0.0151	0.9694	110.4000	76.3470	0.9445
	0.75	30	89.1680	2.2830	0.0192	0.9353	91.1600	3.3495	0.0133	0.9437	116.8000	79.0530	0.9456
0.75	0.25	28	74.6310	4.2110	0.0291	0.9749	76.0780	10.3720	0.0180	0.9713	110.1200	70.1510	0.9172
	0.50	30	87.9880	3.2315	0.0226	0.9744	90.1650	5.4270	0.0145	0.9765	139.81	86.5770	0.9535
	0.75	30	91.7650	2.3896	0.0207	0.9458	93.3850	3.6300	0.0146	0.9536	116.5000	80.1340	0.9416

Notes, *phr : Parts for hundred parts of resin. ** γ : Coefficient of correlation.

6. 결론

이 연구는 적산온도법에 의해 불포화 폴리에스터 수지를 이용한 경량 폴리머 모르타의 초기강도 예측에 대한 것으로서 얻어진 결과를 종합하면 다음과 같다.

1) 경량폴리머 모르타의 적산온도 이론식의 기본식은 다음과 같이 제시할 수 있다

$$Mp = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t^n$$

여기서, Mp : 폴리머 모르타의 적산온도(°C · hⁿ)

T : 폴리머 모르타의 양생온도(°C)

T₀ : 기준온도(°C)

Δt : 양생시간 (h)

n : 결합재의 종류에 의하여 결정되는 정수위의 식에서 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 사용한 경우 n치는 n=1/2로 산출되었다.

2) 경량 폴리머 모르타의 적산온도 이론식에 사

3) 본 연구에서 제안한 적산온도 이론식을 경량 폴리머 모르타에 적용가능함을 확인할 수 있었으며, 압축강도와 적산온도와의 관계에 상관계수를 보면 Logistic Curve와 Gompertz Curve은 0.93~0.98정도로 높은 상관성을 보인 반면 시멘트 콘크리트에 적용되고 있는 적산식은 상관성을 기대할 수 없었다.

4) 이상의 결과는 초기강도가 높은 불포화 폴리에스터 수지, 에폭시 수지 등과 같은 열경화성 수지를 결합재로 사용하는 폴리머 콘크리트의 강도 예측에도 유용하게 적용될 수 있을 것으로 판단된다.

5) 본 연구는 일본 유학기간 중 수행된 실험으로 JIS(일본공업규격) 규정에 의해 실시하였다.

참고문헌

1. Saul, A.G.A., "Principles Underlying the Stream Curing of Concrete at Atmospheric Pressure", Magazine of Concrete Research, Vol.2, No.6, Mar.1951, pp.127-140.
2. Bergstorm, S.G., "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol.5, No.14, Dec.1953, pp.61-66.
3. Bernhard, C.J., "Hardening of Concrete at Different Temperature", Proceedings of the RILEM Symposium on Winter Concreting, Danish National Institute for Building Research, Copenhagen, Feb. 1956, 18p.
4. Plowman, J.M., "Maturity and Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol.8, No.22, Mar.1956, pp.13-22.
5. Lew, H.S., and Reichard, T.W., "Mechanical Properties of Concrete at Early Ages", ACI Journal, Vol.75, No.10, Oct.1978, pp.533-542.
6. 李 命洙, 大濱嘉彦, 出村克宜, "積算溫度方式による輕量ポリエ스테ルモルタルの壓縮強さ算定の試み-積算溫度關數式における基準溫度の算定(その1)", 日本建築學會構造系論文集, 第498号, Aug. 1997, pp.7-12.
7. 吉田隆行, 岡永 建, 御廚 祐, "成長曲線によるコンクリート強度推定法の研究, コンクリート工学次報告集, 第14卷, 第2号, Apr. 1992, pp.555-560.
8. 千步 修, 韓 千求, 浜 幸雄, 鎌田英治, "耐寒劑を使用したコンクリートの積算溫度關數式の檢討", 自然環境とコンクリート性能に関するシンポジウム論文集, JCI C32, May 1993, pp.57-60.
9. 洪 悅郎, 鎌田英治, 田 雅幸, 浜 幸雄, "ロジスティック曲線を應用したコンクリート強度推定式の提案-普通ポルトランドセメントの場合", 日本建築學會構造系論文集, 第14号, Sept. 1986, pp.1-7.

요 약

콘크리트의 강도발현을 양생온도와 재령의 함수로 나타내는 적산온도 방법은 시멘트 콘크리트의 강도추정에 폭넓게 사용되어 왔다.

본 연구에서는 열경화성인 불포화 폴리에스터 수지를 결합재로 한 경량 폴리머 모르타를 대상으로 하여 적산온도법에 의한 초기강도 추정방법을 구명하였다. 폴리머 모르타의 압축강도는 가사시간 및 강도발현형에 영향을 미치는 촉매 및 촉진제 첨가량을 변화시켜 실험하였으며, 또한 적산온도 이론식에 사용되는 기준온도를 산출하였다. 적산온도는 추정된 기준온도를 적용시킨 적산온도 이론식에 의해 산출하였으며 경량 폴리머 모르타의 압축강도는 적산온도 압축강도의 관계로부터 추정할 수 있었다.

이 연구에서 얻어진 적산온도법에 의한 경량 폴리머 모르타의 강도추정식은 열경화성 수지를 이용한 각종 폴리머 모르타나 콘크리트에도 적용가능할 것으로 판단된다.

(접수일자 : 1998. 6. 14)