

적산온도법에 의한 에폭시 수지 모르터의 초기강도 예측에 관한 연구

A Study on the Early Strength Prediction of Epoxy Resin Mortars by the Maturity Method

김철영* 연구석** 大濱嘉彦*** 이윤수****
Kim, Cheol Young Yeon, Kyu Seok Yoshihiko Ohama Lee, Youn Su

ABSTRACT

The objectives of this study were to compare the development of compressive strength of epoxy resin mortars used as repairing materials with respect to maturity, and to propose a predictive model for strength development of epoxy resin mortar.

A series of tests were carried out for the hardener contents of 30, 40 and 50 percentage of resin and compressive strengths were measured at the age of 6, 12, 24, 72, 120 and 168 hours respectively under the cure temperature of 0, 10, 20 and 30°C. The datum temperature was estimated by measured strengths, and the maturity is calculated with the estimated datum temperature. The compressive strength of epoxy resin mortar could be predicted by regression analysis from the maturity-compressive strength relationship.

1. 서론

최근 고분자화학 분야의 발달로 인하여 수많은 합성 수지가 개발·이용되고 있으며 이러한 수지의 형태는 크게 열가소성(thermoplastic)과 열경화성(thermosetting)으로 구분된다. 콘크리트나 모르터의 결합재료 사용되는 것은 대부분 열경화성 수지에 속하는 것으로서 페놀수지(phenolic resins), 불포화 폴리에스터 (unsaturated polyesters), 에폭시 수지(epoxy resins) 등이 있다.

이와 같은 각종 열경화성 수지중 불포화 폴리에스터 수지는 구조물용 폴리머 콘크리트로, 에폭시 수지는 보수용 폴리머 모르터로 많이 이용되고 있다. 에폭시 수지의 특성은 종류에 따라 차이가 있으나, 일반적으로 내약품성, 내마모성, 강도 등이 일반 콘크리트용 수지보다 우수한 것으로 알려져 있으며, 특히 접착성이 우수하여¹⁾ 우리 나라에서도 콘크리트 구조물의 보수용이나 보강용으로 폭넓게 이용되고 있다. 그러나 에폭시 수지 모르터를 보수용으로 사용할 경우 거푸집의 회전율을 높임과 동시에 완전한 시공관리 차원에서 초기강도 예측에 관한 연구의 중요성은 지대하다고 할 수 있다.

* 강원대학교 농공학과 석사과정

** 정회원, 강원대학교 농공학과 교수

*** 일본대학 공학부 건축학과 교수

**** 강원대학교 석재복합신소재제품연구센터 전임연구원

따라서 본 연구에서는 결합재로서 에폭시 수지 모르터를 제조하고 경화제의 첨가량에 따른 초기강도의 변화를 적산온도 방법에 의해 예측하는데 목적이 있다.

2. 이론적 배경

2.1 적산온도 이론식

시멘트 콘크리트의 강도발현과 깊은 관계가 있는 적산온도 이론은 1951년 Saul²⁾에 의해서 제안되었으며, 1953년 Bergstrom³⁾에 의해 수정된 후 많은 연구자들에 의해 연구되었다. 시멘트 콘크리트에서의 적산온도 이론은 강도발현을, 양생온도 및 양생시간을 함수로 하여, 양생시간 Δt 일 때 강도발현을 $(\frac{ds}{dt})$ 은 강도(S) 및 양생온도(T)와의 관계로부터 다음과 같이 표시된다.

$$M = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t \quad \dots \dots \dots (1)$$

적산온도 이론의 기초는 시멘트 콘크리트의 강도와 적산온도와는 일정한 관계가 있고, 서로 다른 양생온도와 양생시간을 가진 경우라도 적산온도가 동일하면, 강도의 차이가 없다는데 있다.

그러나, 액상 에폭시 수지를 결합재로서 사용하는 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트와 비교하여 반응과정, 경화시간, 강도발현 속도 등의 차이점 때문에 시멘트 콘크리트에 적용되는 적산온도 이론식을 수정 없이 폴리머 콘크리트에 사용하는 것은 무리가 있다.

즉 폴리머 콘크리트는 초기강도가 높고, 24시간 이내에 거의 최종도달강도에 달하므로⁴⁾, 장기재령일수록 폴리머 콘크리트의 적산온도 이론식에 사용되는 Δt 의 영향을 작게 할 필요가 있다.

따라서 본 연구에서는 식(1)의 Δt 를 Δt^n 으로 치환하여 폴리머 콘크리트 적산온도 이론식의 기본식으로 사용코자 한다.

$$M_p = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t^n \quad \dots \dots \dots (2)$$

여기서, M_p 는 폴리머 콘크리트의 적산온도($^{\circ}\text{C} \cdot \text{h}^n$), T는 폴리머 콘크리트의 양생온도($^{\circ}\text{C}$), T_0 는 기준온도($^{\circ}\text{C}$), Δt 는 양생시간(h), n은 결합재의 종류에 의하여 결정되는 실험계수이다.

본 연구에서는 식(2)을 에폭시 수지 모르터의 적산온도 이론식으로 사용하였으며, 식(2)을 사용할 경우에는 사용하는 폴리머의 종류에 따른 결합재의 경화반응 등을 고려하여 n값을 결정해야만 한다. (시멘트 콘크리트의 경우 $n = 1$ 사용)

2.2 압축강도 추정식

본 연구에서는 에폭시 수지 모르터의 압축강도와 적산온도의 관계를 추정하기 위해 1950년대에 Plowman⁵⁾등이 증기양생 한 시멘트 콘크리트의 압축강도와 적산온도의 관계에 적용하여 압축강도를 추정하는데 사용한 적산온도에 대수를 취하여 구한 것으로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = a + b \cdot \log M_p \quad \dots \dots \dots (3)$$

여기서, S는 에폭시 수지 모르터의 압축강도, M_p 는 에폭시 수지 모르터의 적산온도를, a와 b는 실험계수를 나타낸다.

3. 사용재료

3.1 결합재

결합재로서는 반응성 회석제로 변성한 저점도형 Bisphenol-A계 액상 에폭시 수지를 사용하였으며, 경화제는 지방족 Amine 변성 경화제를 사용하였다. 사용된 액상수지의 성질은 Table 1과 같다.

Table 1. Properties of epoxy resin

Appearance	Epoxy equivalent (g/eq)	Viscosity (cps at 25°C)	Chlorine Content (wt%)	Specific Gravity (20°C)
transparent	195~215	800~1600	1.75~1.95	1.15

3.2 충전재 및 골재

충전재는 중질탄산칼슘(CaCO₃)을 사용하였으며, 잔골재는 홍천강에서 채취한 유기불순물이 비교적 적은 강모래를 사용하였다. 충전재 및 골재의 함수율은 0.1% 이하로 하였으며, 그 성질은 Table 2과 같다.

Table 2. Properties of filler and fine aggregate

Item	Specific gravity	Absorption(%)	Water content (%)	Unit weight(g/cm ³)	Size
Filler	0.75	0.20	0.1 and less	1.1	≤ 30 μm
Fine agg.	2.60	2.75	0.1 and less	1,500	≤ 5 mm

4. 시험방법

4.1 모르터 제조

모르터의 배합비는 작업성과 역학적 특성을 고려하여 Table 3과 같이 결정하였으며, 모르터의 제조 방법은 KS F 2419 (폴리 에스테르 레진 콘크리트의 강도 시험용공시체 제작 방법)에 따라 제작하였다.

Table 3. Mix proportions of epoxy resin mortars
(Unit : %)

Epoxy resin	Binder		Filler	Fine aggregate
	Epoxy resin	Catalyst agent (phr)*		
15		30	15	70
		40		
		50		

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

4.2 공시체의 제작 및 압축강도 시험

압축강도용 공시체는 $\varnothing 7.5 \times 15$ cm의 원형 공시체로 시험 온도 0, 10, 20, 및 30°C에서 6, 12, 24, 72, 120, 168시간 양생 시켰다. 제작된 공시체는 재령별로 KS F 2481(폴리 에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 의하여 압축강도를 측정하였다.

5. 결과 및 고찰

5.1 에폭시 수지 모르터의 기준온도

5.1.1 기준온도 추정방법

시멘트 콘크리트의 적산온도 이론식에 적용되는 기준온도는 시멘트의 수화반응이 일어날 수 있는 최저 온도로서 -10°C가 사용되고 있으며, 내한성 혼화제가 사용되었을 경우는 그 농도에 따라 -10~-15°C로 낮아지고⁶⁾, 폴리에스테르 폴리머 모르터의 경우 첨가하는 경화제의 양에 따라 9~-10°C로 변화하게 된다⁷⁾.

Table 4. Ambient temperature vs. compressive strength of epoxy mortar with various hardener contents.

Hardener content (phr)	Ambient temperature (°C)	Compressive strength (kg/cm ²)					
		Curing period (h)					
		6	12	24	72	120	168
30	0	0	0	4.2	256.9	416.2	510.8
	10	0	0	325.2	599	769.0	911.3
	20	15.8	214.1	523.4	803.9	936.6	1021.4
	30	690.2	728.3	818.7	915.2	926.3	975.8
40	0	0	0	4.3	395.1	503.6	575.6
	10	0	0	368.6	553.2	913.9	932.5
	20	290.4	436.9	564.3	770.3	954.5	947.8
	30	657.2	741.7	792.7	840.4	856.5	878.8
50	0	0	0	5.4	331.1	480.0	542.8
	10	0	0	261.1	467.5	746.9	736.5
	20	225.9	358.6	433.6	645.4	674.6	713.8
	30	414.8	472.8	538.8	612.9	661.1	688.4

그러나 시멘트 콘크리트와 달리 에폭시 수지 모르터는 초기에 고강도가 발현되는 특징이 있고 경화제 첨가량에 의해 반응정도, 가사시간 및 경화시간이 큰 폭으로 변화한다. 따라서 에폭시 수지 모르터의 기준온도 추정을 위해서는 경화제의 첨가량에 따라 변화되는 기준온도를 구해야하며, 본 연구에서는 이것을 구하기 에폭시 수지 첨가량의 30, 40, 50%의 경화제를 사용하였다. 압축강도는 재령 168 시간까지 측정하였으나 에폭시 수지 모르터가 숙경성이라는 점을 감안하여 재령 72시간(3일) 까지를 기준온도 추정 대상으로 하였다

5.1.2 기준온도 추정순서

에폭시 수지 모르터를 시멘트 콘크리트와 같이 적산온도 이론식에 의해 기준온도를 추정할 경우 양생온도에 따라 압축강도 발현속도가 큰 차이를 보인다. Table 4에는 경화제 첨가량의 변화에 따른 에폭시 수지 모르터의 양생온도와 압축강도와의 관계를 나타낸 것이다.

Table 5. Constants of regression equations for Fig. 1

Hardener contents (%)	Ambient temperature (°C)	$Y = A\sqrt{X} + B$		
		Constants		Coefficient of correlation
		A	B	
30	0	45.03	-151.95	0.86
	10	106.09	-280.78	0.94
	20	126.96	-223.21	0.94
	30	37.39	607.69	0.97
40	0	61.69	-221.19	0.96
	10	98.23	-243.43	0.88
	20	75.50	151.19	0.96
	30	27.08	627.36	0.83
50	0	56.27	-189.86	0.87
	10	84.58	-223.39	0.94
	20	65.59	99.429	0.97
	30	31.38	358.45	0.94

이 실험결과에서 경화제 첨가량에 따라 에폭시 수지 모르터의 재령 168시간까지의 실험치 중에서 재령 72시간까지의 실험치를 대상으로 Fig. 1과 같이 \sqrt{X} 를 재령, Y축을 압축강도로 표시하고 양생온도별 회귀식을 $Y = A\sqrt{X} + B$ 로 하여 최소자승법에 의해 회귀분석 하면, Table 5를 얻을 수 있다. Table 5에서 양생온도별로 Fig. 1에서 구한 회귀식의 공배 A(이하 강도공배계수라 함)⁷⁾와 양생온도의 상관도를 Fig. 2와 같이 나타낼 수 있다.

이 그림으로부터 A=0이 되는 양생온도를 2차 방정식에 의해 구하고, 구해진 값을 적산온도 이론식의 기준온도로 한다. 그러나 2차 방정식의 경우 A=0가 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 6에는 2차 방정식에 대한 회귀분석 결과를 나타낸 것이다.

5.2 적산온도법에 의한 에폭시 수지 모르터의 압축강도 추정

5.2.1 적산온도 이론식에서 Δt^n 의 n치 추정

앞에서 제시한 에폭시 수지 모르터의 적산온도 이론식을 적용하기 위해서는 식(2)에서 Δt^n 의 n치를 결정해야 만 한다. 본 연구에서는 n치 추정을 위해 경화제 첨가량을 각각 30, 40, 50%로 하여 압축강

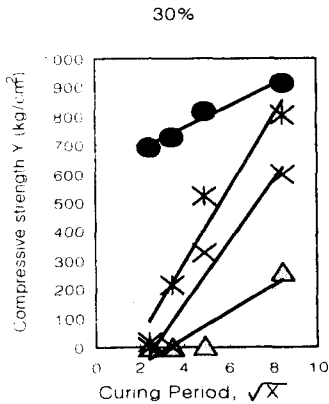


Fig 1. Curing period vs. compressive strength of epoxy mortar with hardener content of 30% at various ambient temperatures

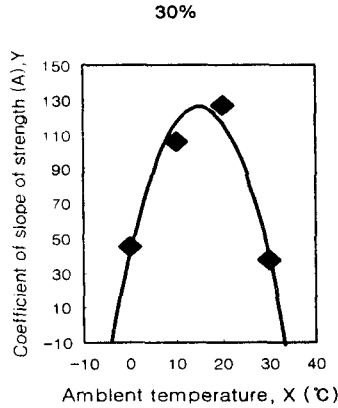


Fig 2. Ambient temperature vs. coefficient of slope of strength of epoxy mortar with hardener content of 30%

도를 산출하였다. 그 결과치를 이용하여 Δt^n 의 n 치를 변화시키며 적산온도와 압축강도의 관계를 Linear식으로 회귀분석한 후 상관계수를 비교해본바 에폭시 수지 모르터의 경우 적산온도 이론식의 n 치는 0.6의 경우가 가장 상관성이 높았다. 따라서 본 연구결과로부터 에폭시 수지 모르터의 적산온도 이론식은 다음과 같이 제안할 수 있다

$$M_p = \sum (T - T_0) \cdot \Delta t^{0.6} \dots (4)$$

5.2.2 압축강도

Table 4에는 각 양생온도 및 양생시간의 변화에 따른 에폭시 수지 모르터의 압축강도를 나타내었다. 에폭시 수지 모르터의 강도발현은 양생시간의 경과, 양생온도의 상승에 따라 증가하는 경향을 보였다.

그러나 경화제 첨가량의 증가에 따라 강도는 감소하는 경향을 보였으며, 경화제 첨가량이 일정할 경우 재령이 짧고 양생온도가 낮을수록 압축강도가 작게 나타났는데, 이것은 경화제 첨가량의 증가에 따른 결합재의 중합속도의 증가 및 양생온도의 저하에 따른 중합반응의 제어에 기인한 것으로 판단된다.

Table 6. Regression analysis of coefficient of slope of strength and datum temperature.

Hardener contents (phr)	Coefficient of slope of strength				Y = aX ^c + bX + c for Fig. 2				Datum temperature (°C)
	Ambient temperature (°C)				a	b	c	Coefficient of correlation	
	0	10	20	30					
30	45.03	106.09	126.96	37.39	-0.3766	11.277	41.514	0.9583	-3.31
40	61.69	98.23	75.50	27.08	-0.2124	5.1068	63.364	0.9788	-9.02
50	56.27	84.58	65.593	31.379	-0.1475	3.4546	59.276	0.9772	-11.51

5.2.3 압축강도와 적산온도의 관계

식(3)에 제시된 회귀식을 이용하여 Table 4에 나타난 에폭시 수지 모르터의 압축강도와 계산된 적산온도와의 관계를 경화제 첨가량 별로 나타내면 Fig.3 과 같다. Table 7에는 Linear식에 의해 회귀분석한 결과로서 실험계수와 상관계수를 나타낸 것이다.

6. 결 론

본 연구는 적산온도법에 의해 액상 에폭시 수지를 이용한 에폭시 수지 모르터의 초기 강도 예측에 관한 것으로 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

Table 7. Constants of regression analysis of Linear curves for maturity vs. compressive strength

Hardener content (phr)	Linear curve (Y = aLn(X) + b)		
	a	b	Coefficient of correlation
30	292.42	-881.16	0.83
40	338.64	-1223.1	0.86
50	273.18	-1040.5	0.87

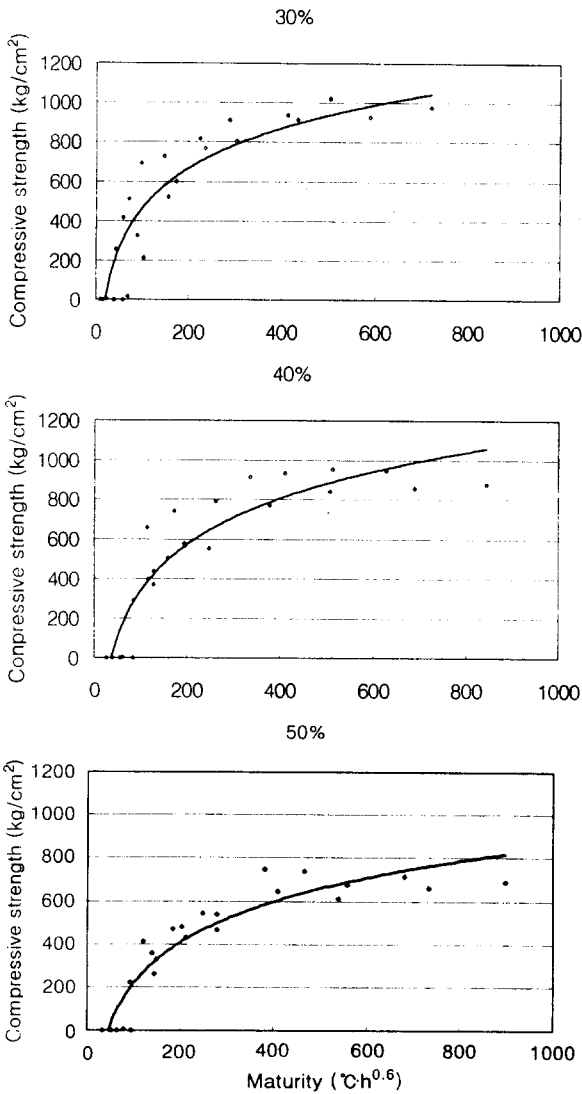


Fig 3. Maturity vs. Compressive strength of epoxy resin mortar with hardener content of 30, 40 and 50%

1) 에폭시 수지 모르타의 적산온도 이론식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

위 식에서 n값은 본 연구결과 0.6으로 산출되었다.

2) 에폭시 수지 모르타의 기준온도는 경화제 첨가량에 따라 30%일 때 -3.31°C , 40%일 때 -9.02°C , 50%일 때 -11.5°C 로 경화제의 첨가량이 증가하면 기준온도는 낮아짐을 알 수 있었다.

3) 경화제 첨가량에 따른 적산온도와 압축강도 사이의 강도 추정식은 다음과 같이 구할 수 있었다.

$$30\% : Y = 292.42 \ln(M) - 881.16$$

$$40\% : Y = 338.64 \ln(M) - 1223.1$$

$$50\% : Y = 273.18 \ln(M) - 1040.5$$

4) 이상의 실험결과를 결합재 종류에 따라 비교하면 다음과 같다

결합재 종류	n 치	기준온도(°C)
시멘트	1	-10
폴리에스터	0.5	9~-14
에폭시	0.6	-3~-11

감사의 글

본 논문은 강원대학교 석재복합신소재제품 연구센터의 연구비 지원에 의하여 이루어진 것으로 이에 깊은 감사를 드립니다.

참고 문헌

1. 金 博允, "에폭시 수지", 大光書林, 1992, pp.1-19.
2. 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.
3. Bergstorm, S.G, "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol.5, No.14, Dec.1953, pp.61-66.
4. 李 兪洙, 大濱嘉彦, 出村克宣, "積算溫度方式による輕量ポリエステ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.
5. Plowman, J.M, "Maturity and Strength of Concrete", Magazine of Concrete Research, Vol.8, No.22, Mar.1956, pp.13-22.
6. 千步 修, 韓 千求, 浜 辛雄, 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検討", 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.
7. 李 兪洙, "輕量ポリエステルモルタルの性質と調合設計", 日本大學博士學位論文, 1998.