

적산온도법에 의한 에폭시 모르터의 초기강도 예측

The Early Strength Prediction of Epoxy Mortars by the Maturity Method

연 규 석* · 김 철 영** · 이 윤 수***
Yeon, Kyu Seok · Kim, Cheol Young · Lee, Youn Su

Abstract

The objectives of this study are to compare the development of compressive strength of epoxy mortars used as repairing materials with respect to maturity, and to propose a model predicting strength development of epoxy mortars.

A series of tests are carried out for the hardener contents of 30, 40 and 50 percentage of epoxy resin and compressive strengths are 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 is estimated by measured strengths, and the maturity is calculated with the estimated datum temperature. The compressive strength of epoxy mortars can be predicted by regression analysis from the maturity-compressive strength relationship.

I. 서 론

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

이와 같은 각종 열경화성 수지 중 불포화 폴리에스터 수지는 구조물용 폴리머 콘크리트로, 에폭

시 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⁾ 우리나라에서도 콘크리트 구조물의 보수용이나 보강용으로 폭넓게 이용되고 있다. 그러나 에폭시 모르터를 보수용으로 사용할 경우 거푸집의 회전율을 높임과 동시에 효율적인 시공관리 차원에서 초기강도 예측에 관한 연구의 중요성은 지대하다고 할 수 있다.

따라서 본 연구에서는 경화제의 첨가량과 양생 온도에 따른 에폭시 수지 모르터의 초기강도를 적

*강원대학교 농업생명과학대학

**강원대학교 대학원

***주성대학교 제1공학부

키워드 : 적산온도, 에폭시 수지, 결합재 경화제, 폴리머 콘크리트

산온도 방법에 의해 예측함으로써 현장시공을 위한 기초자료로 제공코자 한다.

II. 이론적 배경

1. 적산온도 이론식

시멘트 콘크리트의 강도발현과 깊이는 관계가 있는 적산온도 이론은 1951년 Saul²⁾에 의해서 제안되었으며, 1953년 Bergström³⁾이 수정 발표한 후 많은 연구자들에 의해 연구되었다. 시멘트 콘크리트에서의 적산온도 이론은 강도발현율, 양생온도 및 양생시간을 함수로 양생시간(Δt)에 대해서 다음과 같이 표시된다.

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

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

그러나, 폴리에스터 및 에폭시와 같은 액상 수지를 결합제로 사용하는 폴리머 콘크리트는 시멘트 콘크리트에 비하여 반응과정, 경화시간, 강도발현 속도 등이 다르기 때문에 시멘트 콘크리트에 적용되는 적산온도 이론식을 수정 없이 폴리머 콘크리트에 사용하는 것은 무리가 있다.

즉 폴리머 콘크리트는 초기강도가 높고, 24시간 이내에 거의 최종도달강도에 달하므로,⁴⁾ 장기재령 일수록 폴리머 콘크리트의 적산온도 이론식에 사용되는 Δt 의 영향을 작게 할 필요가 있다.

따라서 식(1)의 Δt 를 Δt^n 으로 치환하여 폴리머 콘크리트에 대한 적산온도 산출에 적용할 수 있다.

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

여기서, M_p 는 폴리머 콘크리트의 적산온도 ($^{\circ}\text{C} \cdot h^n$), T는 폴리머 콘크리트의 양생온도($^{\circ}\text{C}$),

T_0 는 기준온도($^{\circ}\text{C}$), Δt 는 양생시간(h), n 은 결합제의 종류에 의하여 결정되는 실험상수이다.

본 연구에서는 식(2)를 풀리며 모르타의 적산온도 산출에 적용코자하며, 이 경우 폴리머의 종류에 따른 결합제의 경화반응 등을 고려하여 n 값을 결정하여야 한다. (시멘트 콘크리트의 경우 $n=1$ 사용)

2. 압축강도 추정식

본 연구에서는 적산온도법에 의해 에폭시 모르타의 압축강도를 추정하기 위해 1950년대에 Plowman⁵⁾등이 증기양생 한 시멘트 콘크리트의 압축강도 추정하는데 사용한 다음식을 이용하였으며, 이식은 적산온도에 대수를 취한 것이 특징이다.

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

여기서, S는 에폭시 모르타의 압축강도, M_p 는 에폭시 모르타의 적산온도를, a와 b는 실험상수를 나타낸다.

III. 재료 및 방법

1. 사용재료

가. 결합제

결합재로서는 반응성 희석제로 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

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

나. 충전재 및 골재

충전재는 중질탄산칼슘(CaCO_3)을 사용하였으며,

잔골재는 홍천강에서 채취한 강모래를 사용하였다. 충전재 및 골재의 함수율은 0.1% 이하로 하였으며, 그 성질은 Table 2와 같다.

Table 2. Properties of filler and fine aggregate

Item	Size	Specific gravity	Absorption (%)	Water content (%)
Filler	≤30μm	0.75	0.20	≤0.1
Fine agg.	≤5mm	2.60	2.75	≤0.1

2. 시험방법

가. 모르터 제조

모르터의 배합비는 작업성과 역학적 특성을 고려하여 Table 3과 같이 결정하였으며, 모르터의 제조방법은 KS F 2419 (폴리 에스테르 레진 콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작 방법)에 따라 제작하였다

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

Epoxy resin	Binder		Filler	Fine aggregate
	Hardener contents (phr)*			
15	30		15	70
	40			
	50			

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

나. 공시체의 제작 및 압축강도 시험

압축강도용 공시체는 $\phi 7.5 \times 15\text{cm}$ 의 원형 공시체로 시험 온도 0, 10, 20, 및 30°C에서 6, 12, 24, 72, 120, 168시간 동안 양생시켰다. 제작된 공시체는 재령별로 KS F 2481(폴리 에스테르 레진 콘크리트의 압축강도 시험 방법)에 의하여 압축강도를 측정하였다.

IV. 결과 및 고찰

1. 에폭시 모르터의 기준온도

가. 기준온도 추정방법

시멘트 콘크리트의 적산온도 이론식에 적용되는 기준온도는 시멘트의 수화반응이 일어날 수 있는 최저 온도로서 -10°C이며, 내한성 혼화재를 사용한 한중 콘크리트의 경우, 그 농도에 따라 -10~-15°C로 낮아지고,⁶⁾ 폴리에스테르 폴리머 모르터의 경우 첨가하는 경화제의 양에 따라 9~-10°C로 변화하게 된다.⁷⁾

그러나 시멘트 콘크리트와 달리 에폭시 모르터는 조기에 고강도가 발현되는 특징이 있고 경화제 첨가량에 의해 가사시간 및 경화시간이 큰 폭으로 변한다. 따라서 에폭시 모르터의 기준온도 추정을 위해서는 경화제의 첨가량에 따른 기준온도가 필요하므로, 본 연구에서는 이것을 구하기 위해 에폭시 수지양의 30, 40, 50%에 해당하는 경화제를 사용하였다. 압축강도는 재령 168시간까지 측정하였으나 에폭시 모르터의 강도가 조기에 발현된다는 점을 감안하여 재령 72시간(3일) 까지를 기준 온도 추정 대상으로 하였다.

나. 기준온도 추정순서

에폭시 모르터에 대한 기준온도를 시멘트 콘크리트와 같이 적산온도 이론식에 의해 추정할 경우 양생온도에 따라 압축강도 발현속도에 큰 차이가 있다. Table 4에는 경화제 첨가량과 양생온도의 변화에 따른 에폭시 모르터의 압축강도와 실험결과를 나타낸 것이다.

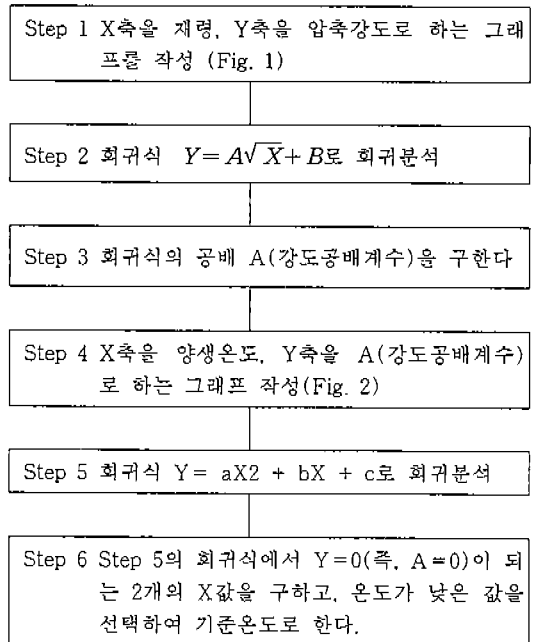
이 실험결과에서 기준온도를 추정하기 위해 재령 72시간까지의 실험치를 대상으로 그래프를 그리면 Fig. 1과 같고, 직선식을 $Y = A\sqrt{X} + B$ 에 대하여 최소자승법으로 회귀분석 하면, Table 5와 같은 상수들을 얻을 수 있다. Table 5에서 양생온도별로 Fig. 1에서 구한 회귀식의 공배 A(이하 강도공배계수라 함)⁷⁾와 양생온도의 상관도를 Fig. 2

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

Hardener content (phr)	Ambient temperature (°C)	Compressive strength (kgf/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

와 같이 나타낼 수 있다.

이 그림으로부터 $A=0$ 이 되는 양생온도를 2차 방정식에 의해 구하고, 구해진 값을 적산온도 이론식의 기준온도로 한다. 그러나 2차 방정식의 경우 $A=0$ 이 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 6은 Fig. 2의 2차 방정식에 대한 상수 및 회귀분석 결과를 나타낸 것이다. 이상의 에폭시 모르타의 기준온도 추정순서를 정리하면 다음과 같다.



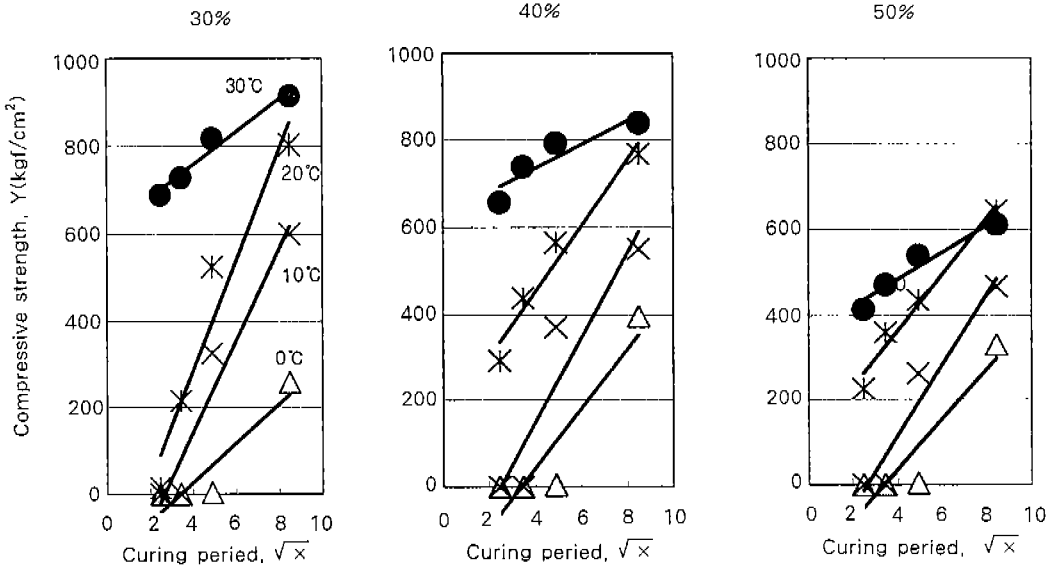


Fig. 1. Compressive strength vs. curing period of epoxy mortar with hardener content of 30, 40, 50% at various ambient temperatures

Table 5. Constants of regression equations for Fig. 1

Hardener contents (phr)	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

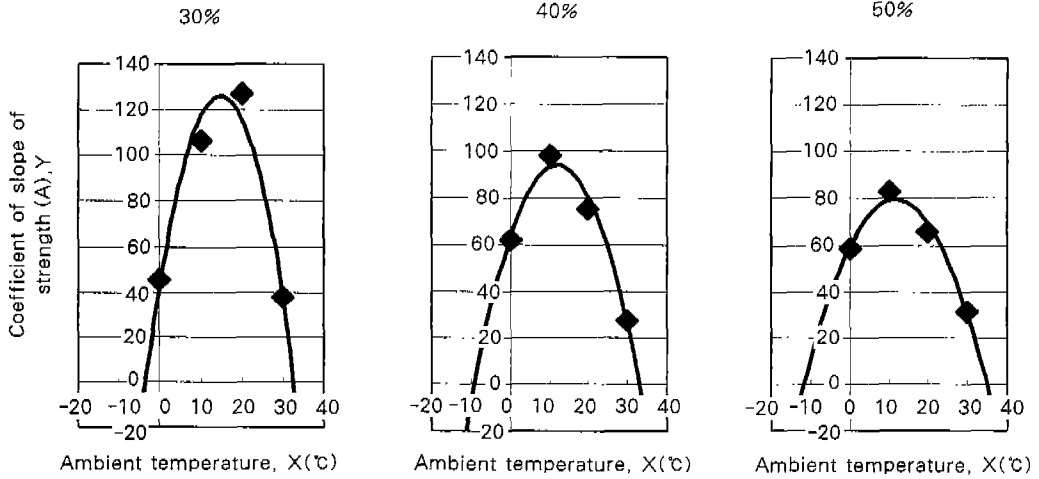


Fig. 2. Coefficient of slope of strength vs. ambient temperature vs. of epoxy mortar with hardener content of 30, 40, 50%

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

Hardener 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	
	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

2. 적산온도법에 의한 에폭시 모르터의 압축 강도 추정

가. 적산온도 이론식에서 Δtⁿ의 n치 결정

앞에서 제시한 식 (2)를 에폭시 모르터의 적산온도 산출에 적용하기 위해서는 tⁿ에서 n치를 결정해야만 한다. 본 연구에서는 n치 결정을 위해 경화제 첨가량이 각각 30, 40, 50%일 때의 압축강도를 구하였다. 실험 결과치를 이용하여 Δtⁿ의 n치를 0.1~1.0의 범위에서 변화시키며 계산된 적산온도와 압축강도의 관계를 대수식으로 회귀분석한

후 상관계수를 비교해 본 바 Fig. 3에서와 같이 n치는 0.6의 경우가 가장 높은 상관성을 보였다. 따라서 본 연구결과로부터 에폭시 모르터의 적산온도 이론식은 다음과 같이 제안할 수 있다.

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

식(4)의 적산온도 이론식을 사용하여 에폭시 모르터의 적산온도를 계산한 결과를 Table 7에 나타내었다.

Table 7. Maturity of epoxy mortar

Hardener contents (phr)	Ambient temperature (°C)	Maturity (°C · h ^{0.6})					
		Curing period (h)					
		6	12	24	72	120	168
30	0	9.71	14.72	22.31	43.13	58.60	71.71
	10	39.01	59.13	89.63	173.27	235.41	288.08
	20	68.31	103.55	156.95	303.41	412.22	504.44
	30	97.61	147.96	224.26	433.54	589.03	720.81
40	0	26.43	40.07	60.74	117.41	159.52	195.21
	10	55.74	84.48	128.05	247.55	336.33	411.57
	20	85.04	128.90	195.37	377.69	513.14	627.94
	30	114.34	173.31	262.69	507.82	689.95	844.30
50	0	33.71	51.10	77.46	149.74	203.44	248.95
	10	63.02	95.51	144.77	279.87	380.25	465.31
	20	92.32	139.92	212.09	410.01	557.06	681.68
	30	121.62	184.34	279.41	540.15	733.87	898.04

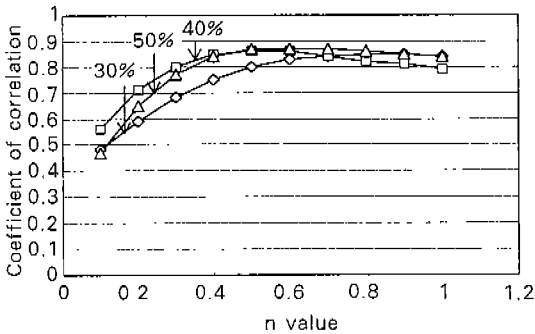


Fig. 3. Coefficient of correlation vs. n for Δt^n of maturity equation calculated by relationships between maturity and compressive strength of epoxy mortars

나. 압축강도

Table 4에는 각 양생온도 및 양생시간의 변화에 따른 에폭시 모르터의 압축강도 시험 결과를 나타내었다. 에폭시 모르터의 강도는 경화제 첨가량의 증가에 따라 초기의 강도발현속도는 증가하는 것으로 나타났으나 최종강도는 작게 나타났는데 이는 경화제의 첨가량이 증가함에 따라 에폭시 모르터의 강도를 좌우하는 결합제의 양이 상대적으로 낮아져 그 결합력이 작아진 결과라고 판단된다.

또한 양생온도에 따라서는 0, 10, 20°C에서는 양생온도의 증가에 따라 강도가 증가하는 경향을 보였으나 30°C에서는 다소 낮아지는 결과를 보였다.

다. 압축강도와 적산온도의 관계

식(3)에 제시된 강도 추정식을 이용하여 Table 4에 나타난 에폭시 모르터의 압축강도와 계산된 적산온도와의 관계를 경화제 첨가량 별로 나타내면 Fig. 4, 5, 6과 같다. Table 8에는 대수식에 의해 회귀분석한 결과로서 실험계수와 상관계수를 나타낸 것이다.

Table 8. Constants of regression analysis of logarithmic curves for maturity vs. compressive strength

Hardener content (phr)	Logarithmic curve ($Y = a \ln(X) + b$)		
	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

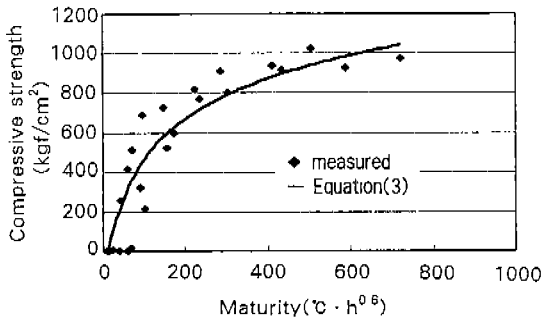


Fig. 4. Compressive strength vs. maturity of epoxy mortar with hardener content of 30%

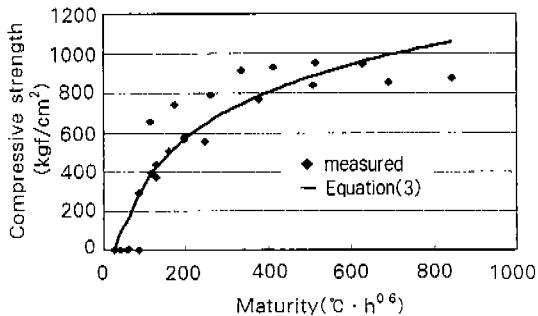


Fig. 5. Compressive strength vs. maturity of epoxy mortar with hardener content of 40%

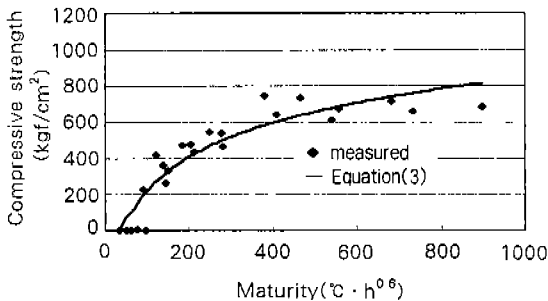


Fig. 6. Compressive strength vs. maturity of epoxy mortar with hardener content of 50%

V. 결 론

본 연구는 적산온도법에 의해 액상 에폭시 수지를 이용한 에폭시 모르타르의 초기 강도 예측에 관

한 것으로 그 결과를 종합하면 다음과 같다.

1. 에폭시 모르타르의 적산온도 이론식은 $M_p = \sum(T - T_0) \cdot \Delta t^n$ 로서 이 식에서 실험상수인 n 값은 0.6으로 산출되었다.

2. 에폭시 모르타르의 기준온도는 경화제 첨가량에 따라 30, 40 및 50%일 때 각각 -3.31, -9.02 및 -11.5°C로 경화제의 첨가량이 증가하면 기준온도는 낮아짐을 알 수 있었다.

3. 결합재료 에폭시 수지를 사용한 폴리머 모르타르에 있어서도 Plowman이 시멘트 콘크리트에 적용한 대수식($S = a + b \cdot \log M_p$)을 사용할 경우 적산온도와 압축강도 사이에 매우 높은 상관성을 나타냈으며, 결합재료 폴리머를 사용한 폴리머 콘크리트의 경우도 적산온도 이론을 적용하는데 무리가 없음을 알 수 있었다.

4. 이상의 실험결과를 결합재 종류에 따라 비교하면 시멘트 콘크리트의 경우 n치는 1, 기준온도는 -10°C이며, 폴리에스터 모르타르의 경우 n치는 0.5, 기준온도는 9~-14°C이며, 에폭시 모르타르의 경우 n치는 0.6, 기준온도는 -3~-11°C로 나타났다.

본 연구는 강원대학교 석재복합 신소재 제품 연구센터의 연구비 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

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, 2(6), Mar. 1951, pp. 127~140.
3. Bergstörn, S. G, "Curing temperature, age and strength of concrete", Magazine of Concrete Research, 5(14), Dec. 1953, pp. 61~66.
4. 李 倫洙, 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, 8(22), Mar. 1956, pp. 13~22.
6. 千歩 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.
7. 李 命洙, "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.