

적산온도 기법을 활용한 콘크리트구조물의 강도관리모델 개발에 관한 연구

A Study on the Development of Strength Control Model of Concrete Structure using Maturity Method

길 배 수*
Khil, Bae-Su
김 정 일***
Kim, Jung-Il

윤 종 기**
Yoon, Jong-Kee
남 재 현****
Nam, Jae-Hyun

김 재 환**
Kim, Jae-Hwan
김 무 한****
Kim, Moo-Han

ABSTRACT

The purpose of this study is to develop a strength control model for application of variety internal condition at construction field.

The results of this study were shown as follows ;

1) According to results of compressive strength of concrete by using equivalent age, new curve is applicable of construction field because there is similar relation with logistic curve.

2) It is shown that the construction period is shorten by reduction of the formwork removal time, because a predicted compressive strength of using the new curve is high than proposed compressive strength of standard.

1. 서 론

최근 국내외의 건설현장에서 콘크리트의 압축강도를 직접 측정하지 않고 추정하는 방법이 다양하게 연구·보고 되고 있으며 특히 공기단축을 위하여 초기재령에서의 강도를 예측하기 위해 적산온도의 개념을 도입하고 있다.

콘크리트의 초기 압축강도를 예측하기 위한 방법은 Bergstrom¹⁾, Saul²⁾에 의해 제안되고 일본의 洪³⁾에 의해 체계화된 적산온도식과 활성화에너지를 이용한 등가재령에 의한 방법으로 Freiesleben Hansen, Pederson^{4),5)} 등에 의한 Arrhenius식 2가지로 구별될 수 있다. 이중 후자의 방식이 강도예측에 있어 좀더 정확한 것으로 확인되고 있다.

한편 건설현장에서 콘크리트의 체계적인 품질 및 시공관리에 대한 강도관리가 필요하여 기존의 연구를 이용하려는 사례가 늘어나고 있지만 사계절이 변화가 뚜렷한 국내의 경우 다양한 현장환경의 변화와 기온에 대한 적절한 대응책 및 강도관리를 고려한 국내의 현실에 맞는 새로운 강도관리모델에

* 정회원, (주)유성테크 책임연구원 공학박사

** 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과

*** 정회원, 대전대학교 통계학과 교수·리학박사

**** 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수·공학박사

***** 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수·공학박사

표 1. 실험계획 및 배합

종류	W/C (%)	양생 온도 (°C)	목표 슬럼프 (cm)	목표 공기량 (%)	고성능 감수제 첨가율 (%)	S/a (%)	단위수량 (kg/m³)	단위중량 (kg/m³)			측정 항목	분석요인	
								C	S	G		등가재령합수	강도예측모델
실린더 모의부재	55	5 10	15±2	4.5±1.5	0.3	48	186	338	820	886	압축 강도 (kgf/cm²)	Freiesleben	Logistic Curve New Curve
	50	20 30						47	183	366			

대한 연구는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 물시멘트비 55, 50%의 콘크리트를 제조하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현 특성을 파악한 후 등가재령의 일종인 Freiesleben 함수를 이용한 새로운 강도예측모델을 제시하고 기존에 제시된 Logistic 식과 비교·검토를 통해 그 적용가능성을 확인하고자 한다. 또한 보통강도콘크리트의 강도예측에 관한 검증 및 모의부재 제작을 통한 실구조물 적용의 타당성 검토를 통해 국내의 현실에 맞는 건축공사현장에서의 거푸집제거시기결정 등의 강도관리를 위한 기초적 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 1에 나타낸 바와 같이 물시멘트비 55, 50% 2수준, 양생온도 5, 10, 20, 30°C 4수준으로 설정하고, Freiesleben의 활성화에너지를 이용하여 강도발현 특성을 검토한 후 새로운 강도예측모델과 Logistic 식을 비교·평가하고자 하였다.

또한 국내·외에 제시된 거푸집존치기간에 대해 새로운 강도 예측모델을 이용하여 건축공사현장에서의 거푸집제거시기를 검토하고자 하였다.

본 실험에서 이용된 등가재령함수인 Freiesleben 함수는 다음과 같다.

여기에서

Ta : 양생온도(°K)

Te : 표준온도와 같은 재령

$$Te = \int_0^t \exp[Ea/R \cdot (1/Ts - 1/Ta)] dt$$

Ea : 활성화에너지(KJ/mol)

Ts : 293(273+20 : K)

T ≥ 20°C : Ea=33.5KJ/mol

R : 기체 상수(8.314 J/mol)

T < 20°C : Ea=33.5+1.47(20-T)KJ/mol

2.2 사용재료

본 실험에서 사용한 각 재료의 물리적 성질은 표 2에 나타낸 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 혼화제는 폴리카르본산계 고성능감수제, 잔골재는 강모래, 굵은골재는 부순자갈을 사용하였다.

표 2. 사용재료의 물리적 성질

시멘트	O.P.C, 비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm²/g
고성능감수제	폴리카르본산계, 비중 : 1.10
잔골재	강모래, 최대치수 : 5mm, 비중 : 2.56
굵은골재	부순자갈, 최대치수 : 25mm, 비중 : 2.56

2.3 시험 방법

2.3.1 비빔방법

콘크리트의 비빔은 100ℓ 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 모든 재료를 일괄투입한 후 건비빔을 60초간 실시하고 물과 고성능감수제를 첨가하여 90초간 비빔을 실시하였다.

2.3.2 모의부재제작

그림 1과 같은 W60×D60×H60cm의 모의부재를 제작하여 콘크리트를 타설한 후 표면으로부터 5, 10, 15cm 3부분에 Maturity Meter에 연결된 온도계이지(Thermocouple)를 이용하여 내부온도를 측정하였다.

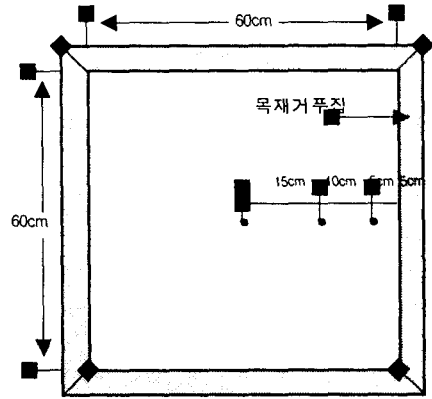


그림 1. 모의부재의 온도측정위치

2.3.3 공시체 제작 및 압축강도시험

콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 KS F 2403에 준하여 제작하였으며 양생은 양생온도 5, 10, 20, 30℃에서 측정재령까지 수중양생을 실시하였다. 또한 압축강도 시험은 KS F 2405에 준하여 실시하였고, 모의부재의 경우 3, 4, 7, 28일에 코어공시체를 채취하여 실시하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 Freiesleben함수와 압축강도비의 관계

그림 2는 물시멘트비별 양생온도에 따른 강도발현성상을 Freiesleben의 활성화에너지를 이용하여 양생온도 20℃를 기준으로 한 등가재령함수로 나타낸 것으로 초기재령에서 물시멘트비에 관계없이 유사한 경향을 보이고 있으나 장기재령으로 갈수록 압축강도 발현이 5, 10 가 20, 30℃보다 높게 나타났다.

3.2 강도예측식의 비교·평가

표 3은 각 강도예측모델식의 계수도출결과를 나타낸 것이고 그림 3은 Logistic식과 새로운 강도예측

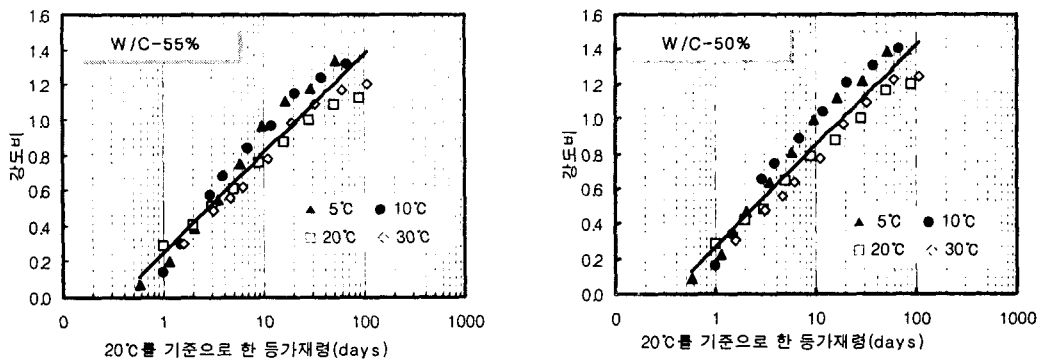


그림 2. Freiesleben 활성화에너지를 이용한 등가재령

모델을 이용한 압축강도의 예측결과를 나타낸 것으로 두 모델식은 모든 재령에 걸쳐 높은 상관성을 보이는 유사한 경향을 나타내고 있으나 새로운 강도 예측모델의 결정계수(R²)의 값이 Logistic식 보다 높은 값을 나타내고 있고 잔차(SSE)가 적게 나타나고 있어 본 연구의 개발모델을 사용하여 압축강도를 예측할 경우 우리나라 현실에 맞는 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

표 3. 각 강도 예측모델식의 계수도출 결과

Logistic Curve : $F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log T_e + m)}$											
물시멘트비 55%						물시멘트비 50%					
F _∞	K	m	SD ^{주1)}	SSE ^{주2)}	R ²	F _∞	K	m	SD ^{주1)}	SSE ^{주2)}	R ²
354.72	1.0254	1.6052	15.7065	17494	0.9526	445.03	0.9576	1.5362	25.3658	35343	0.9361

New Curve : $S = \frac{S_u (T_e - M_0)^k}{\theta + (T_e - M_0)^k}$													
물시멘트비 55%						물시멘트비 50%							
S _u	k	θ	M ₀	SD ^{주1)}	SSE ^{주2)}	R ²	S _u	k	θ	M ₀	SD ^{주1)}	SSE ^{주2)}	R ²
368.1	0.8561	3.7066	0.3811	24.7091	17137	0.9774	471.3	0.7602	3.4039	0.4580	42.0450	34173	0.9641

주1) SD : Standard deviation
 주2) SSE : Sum of square error

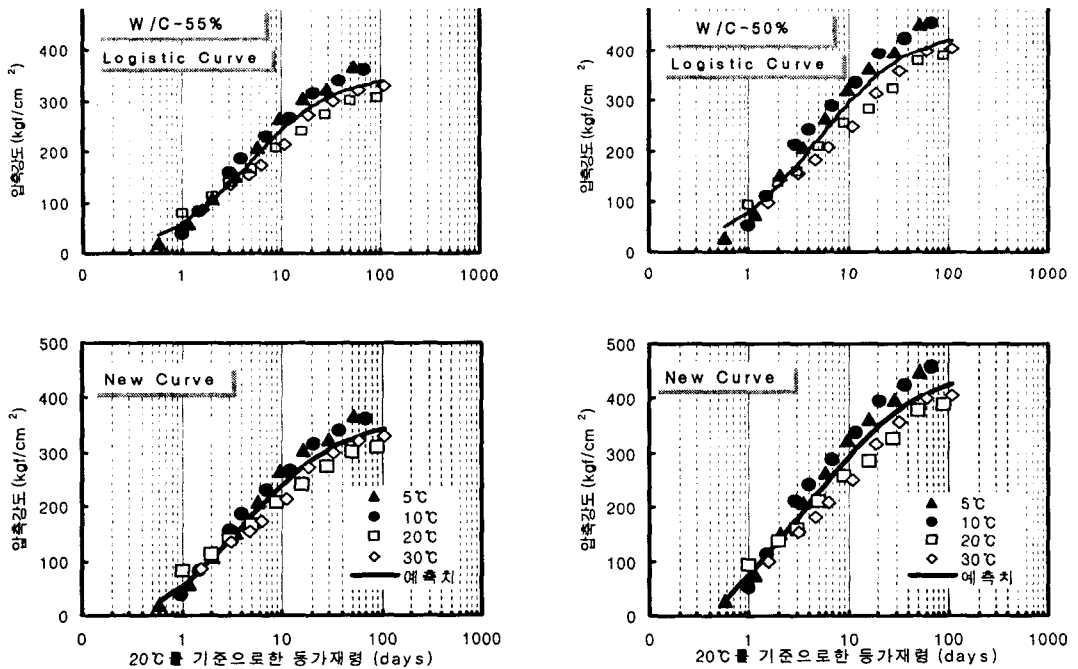


그림 3. 강도예측모델을 이용한 강도예측결과

표 4. 기초, 보열, 기둥 및 벽의 거푸집존치기간 및 압축강도 50kgf/cm²을 얻기위한 재령(O.P.C, 10℃ ≤ t < 15℃)

	KS	JASS 5	ACI	New Curve
존치기간(days)	6	6	0.5	-
50kgf/cm ² 을 얻기위한 소요재령(days) (w/c 55,50)	-	3.0, 2.5	-	0.91, 0.76

표 5. 모의부재 중앙부 온도, 대기온도와 압축강도 측정결과

측정재령 (days)	측정재령(Δt)까지의 온도 (℃)		대기온도(℃)	실측강도 (kgf/cm ²)	
	W/C 55%	W/C 50%		W/C 55%	W/C 50%
3	15.8	15.9	10	90	109
4	14.1	13.5	6	105	118
7	10.2	10.5	7	159	196
28	7.6	7.8	7	285	339

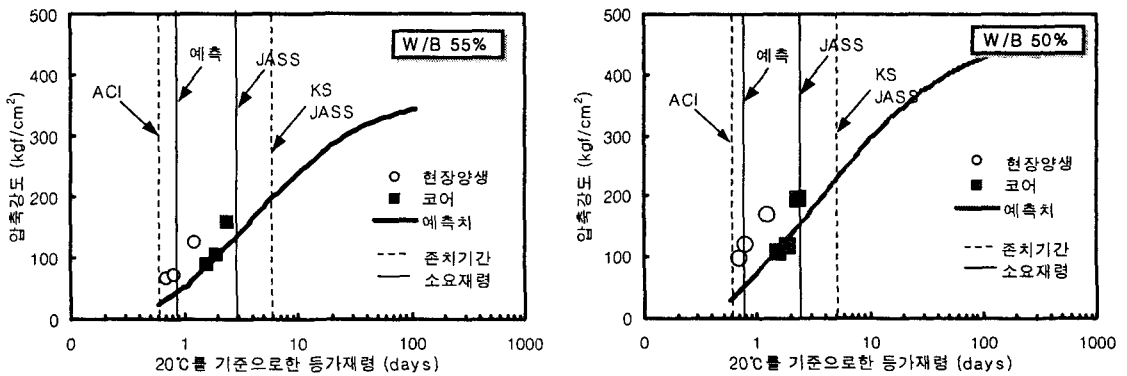


그림 4. 새로운 강도예측모델에 의한 거푸집제거 시기에 대한 비교

3.3 새로운 강도예측모델을 이용한 강도관리

Freiesleben함수를 활용한 등가재령의 새로운 강도예측모델을 이용하여 강도관리측면에서 거푸집제거시기를 예측할 수 있다. 이에 건축공사현장에서 기둥, 기초, 보열, 축벽의 거푸집을 제거할 수 있는 압축강도 50kgf/cm²가 발현하는데 소요되는 재령을 본 연구에서 이용된 새로운 예측모델로부터 산정한 압축강도 50kgf/cm² 발현재령과 KS, JASS 5, ACI에서 제시하고 있는 거푸집존치기간을 비교하면 표 4에 나타낸 바와 같다.^(6,7,8)

표 5는 모의부재의 압축강도와 중앙부 온도측정결과를 나타낸 것이고 그림 4는 양생온도 20℃에서 거푸집제거가 가능한 압축강도 50kgf/cm²을 발현하는데 소요되는 재령을 본 연구의 새로운 강도예측

모델에서 산정된 재령과 JASS 5에서 규정하고 있는 재령 및 KS, JASS 5, ACI에서 제시하고 있는 거푸집존치기간을 비교한 것으로 본 연구의 강도 예측을 이용한 결과 압축강도 50kgf/cm²을 발현하는데 소요되는 재령은 W/C 50%, 55%에서 각각 0.91일, 0.76일로 ACI에서 제시하고 있는 거푸집존치기간에 비해 다소 늦지만 JASS 5나 KS에 비하여 빠르게 나타나 이를 활용할 경우 건축공사현장에서 거푸집제거시기를 단축시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 코어 공시체 및 현장양생공시체의 강도가 예측모델보다 높게 발현하고 있어 새로운 강도예측모델에 의한 실구조물에서의 강도예측이 타당할 것으로 사료된다.

4. 결 론

1) 새로운 강도예측모델에 의한 강도예측결과 Logistic식과 유사한 상관성을 보이니 결정계수 값 (R^2)이 높고 잔차(SSE)가 적게 나타나고 있어 새로운 강도예측모델을 건설공사현장에 적용할 경우 보다 합리적일 것으로 판단된다.

2) 본 연구의 범위 내에서 양생온도 20℃의 경우 강도관리 측면에서 새로운 강도예측모델 사용시 압축강도 50kgf/cm² 발현시점이 기존에 제안된 기간과 비교하여 빠르게 나타나고 있어 이를 건축공사현장에서 사용할 경우 거푸집제거시기의 단축에 의한 공기단축이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구 과제 「적산온도기법을 활용한 콘크리트 구조물의 강도관리 프로그램 및 시공관리 시스템 개발」에 관한 일련의 연구 결과로 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Bergstrom, Sven G. : "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete," Magazine of Concrete Research (London), V.5, No. 14, Dec. 1953, pp. 61-66.
2. Saul, A.G.A : "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure" , Magazine of Concrete Research, Vol 2, No.6, March 1951, pp.127~ 140.
3. 洪悦郎 : "콘크리트의強度推定実用法とその応用" , セメント技術年報 X III, 昭和34年.
4. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J. : "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength" , Nordisk Betong, 1977, pp.19~ 34.
5. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J. : "Curing of concrete structure" , CEB Information Bulletin 166, May 1985
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 1999
7. 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5 鉄筋コンクリート工事, 1997
8. ACI Committee 347, Guide to Formwork for Concrete