

# Freiesleben 함수를 이용한 콘크리트구조물의 새로운 강도관리모델 적용에 관한 연구

## A Study on the Application of New Strength Control Model of Concrete Structure using Freiesleben Function

김 무 한\*      남 재 현\*\*      김 정 일\*\*\*      길 배 수\*\*\*\*  
Kim, Moo-Han    Nam, Jae-Hyun    Kim, Jeong-Il    Khil, Bae-Su

### Abstract

As a construction technique is developed recently, the construction space and construction period are considered to important matters. Especially, in case of construction period, several method is proposed for strength control in the construction field. However there are very little strength control models for application of internal condition.

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

- 1) According to the results of compressive strength of concrete evaluated by logistic curve and proposed curve, proposed curve is applicable of construction field because there is similar relation with logistic curve.
- 2) It is shown that the construction period is shortened by reduction of the formwork removal time, because a predicted compressive strength of using the new curve is higher than the proposed compressive strength of standard.

**Keywords :** strength control model, equivalent age, logistic curve, compressive strength of standard

### 1. 서 론

최근 경제성장에 따라 건설기술 및 시공기술이 발전되면서 시공공간과 공사기간의 문제가 중요한 관심사

로 대두되어 초기재령에서 현장콘크리트의 압축강도를 예측하는 방법이 선진국을 중심으로 다양하게 연구 보고되고 있으며 실제 현장에서 적용되고 있다. 특히 콘크리트의 초기 압축강도를 예측하기 위한 방법은

\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\* 대전대학교 건축공학과 교수, 공학박사

\*\*\* 대전대학교 정보통계학과 교수, 이학박사

\*\*\*\* Tripod Company 대표이사, 공학박사

E-mail : aim-2000@hanmail.net 019-9152-6281

• 본 논문에 대한 토의를 2003년 6월 30일까지 학회로 보내 주시면 2003년 10월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

Bergstrom<sup>(1)</sup>, Saul<sup>(2)</sup>에 의해 제안되고 일본의 洪<sup>(3)</sup>에 의해 체계화된 적산온도식과 활성화에너지를 이용한 등가재령에 의한 방법으로 Freiesleben Hansen, Pederson<sup>(4,5)</sup> 등에 의한 Arrhenius식 2가지로 구별될 수 있다. 이중 등가재령에 의한 방법이 강도예측에 있어 좀더 합리적인 것으로 확인되고 있다.

한편 건설현장에서 콘크리트의 체계적인 품질 및 시공관리를 위해 외국에서 제안된 강도예측식을 이용하고 있지만 외국의 사용재료나 외기환경조건에 적합한 것으로 사계절이 변화가 뚜렷한 국내의 경우 다양한 현장환경의 변화와는 차이가 있어 국내의 현실에 맞는 새로운 강도관리모델에 대한 연구개발의 필요성이 증대되고 있는 실정이다. 따라서 본 연구에서는 물시멘트비 55, 50%의 콘크리트를 제조하고 Freiesleben 함수를 이용하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현특성을 파악한 후 등가재령의 일종인 새로운 강도예측식의 적용 가능성을 검증하기 위해서 기존에 제시된 Logistic식과 비교·검토하였다. 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 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 Table 1에 나타난 바와 같이 물시멘트비 55, 50% 2수준, 양생온도 5, 10, 20, 30℃ 4수준으로 설정하고, Freiesleben의 활성화에너지를 이용하여 강도발현 특성을 검토한 후

새로운 강도예측식과 Logistic식을 비교·평가하고자 하였다. 또한 국내·외에 제시된 거푸집 존치기간에 대해 새로운 강도예측식을 이용하여 건축공사현장에서의 거푸집제거시기를 검토하고자 하였다.

본 실험에서 이용된 등가재령함수인 Freiesleben 함수는 식(1)과 같다.

### 2.2 사용재료

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

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

여기에서

T: 표준온도와 같은 재령

T: 양생온도.(K)

T: 293(273+20 :. K)

E: 활성화에너지(KJ/mol)

T≥20℃:E<sub>a</sub>=33.5KJ/mol

T<20℃:E<sub>a</sub>=33.5+1.47(20-T)KJ/mol

R: 기체 상수(8.314 J/mol)

Table 2 사용재료의 물리적 성질

시멘트	O.P.C, 비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm <sup>2</sup> /g
고성능 감수제	폴리카르본산계, 비중 : 1.10
잔골재	강모래, 최대치수 : 5mm, 비중 : 2.56
굵은골재	부순자갈, 최대치수 : 25mm, 비중 : 2.56

Table 1 실험계획 및 배합

종류	W/C (%)	양생 온도 (℃)	목 표 슬럼프 (cm)	목 표 공기량 (%)	고성능 감수제 첨가율 (%)	S/a (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			측정 항목	분석요인	
								C	S	G		등가재령함수	강도예측모델
실린더	55	5 10	15±2	4.5±1.5	0.3	48	186	338	820	886	압축 강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )	Freiesleben	Logistic Curve Proposed Curve
모의부재	50	20 30						47	183	366			

## 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

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

### 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 경

우 3, 4, 7, 28일에 코어공시체를 채취하여 실시하였다.

## 3. 실험 결과 및 분석

### 3.1 Freiesleben함수와 압축강도비의 관계

Table 3은 본 실험의 압축강도를 나타낸 것이고 Fig. 1은 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 강도에측식의 비교·평가

적산온도 방법에 의해 개발된 강도에측식을 검증하기 위해 본 실험에서는 기존의 강도에측식 중 식(2)와 같은 Logistic식과 비교하였다.

Table 3 압축강도 측정결과

5℃		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		10℃		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	
재령(days)	W/C (%)	55	50	재령(days)	W/C (%)	55	50
2		19	28	2		38	56
4		57	74	3		82	111
7		108	151	5		158	212
12		151	208	8		187	243
20		208	264	14		231	289
33		266	324	24		266	338
56		304	364	42		317	395
100		325	397	75		342	426
182		368	452	137		364	457

20℃		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )		30℃		압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )	
재령(days)	W/C (%)	55	50	재령(days)	W/C (%)	55	50
1		81	93	1		84	98
2		113	137	2		135	154
3		141	159	3		153	181
5		168	211	4		172	208
9		210	257	7		214	250
16		241	285	12		271	315
28		276	327	21		300	358
50		301	380	38		321	400
91		309	391	68		331	406

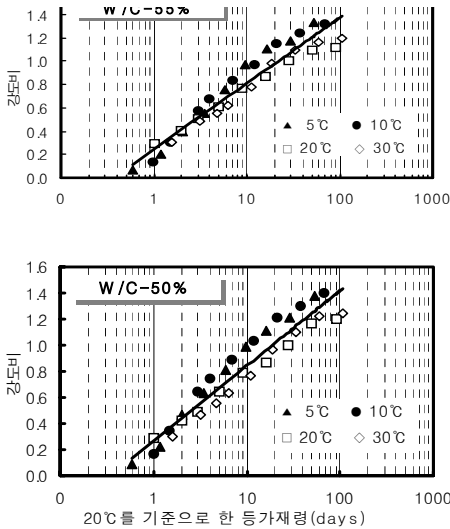


Fig. 1 Freiesleben 활성화에너지를 이용한 등가재령

또한 본 연구에서 제안한 강도예측모델은 식(3)과 같이 기존 ACI에서 제시하고 있는 쌍곡선 식을 토대로 본 실험데이터를 프로그램에 의해 최적화한 모델로서 초기 강도예측율을 향상시키기 위해서 강도가 발현되기 전까지의 시간인 종결도달시간까지의 적산온도는 제외하였다.

$$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log M + m)} \quad (2)$$

여기에서

$F_c$  : 예측강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$F_\infty$  : 종국강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$M$  : 적산온도  $K, m$  : 회귀계수

$$S = \frac{S_u (M - M_0)^k}{\theta + (M - M_0)^k} \quad (3)$$

여기에서

$S$  : 예측강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$S_u$  : 종국강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )

$M$  : 적산온도

$\theta, k$  : 회귀계수

$M_0$  : 종결시간까지의 적산온도

Table 4는 각 강도예측식의 계수도출결과를 나타낸 것이고 Fig. 2는 Logistic식과 새로운 강도예측식을 이용한 압축강도의 예측결과를 나타낸 것으로 두 식은 모든 재령에 걸쳐 높은 상관성을 보이는 유사한 경향을 나타내고 있으나 새로운 강도예측식의 경우 초기재령에 있어서 강도예측이 보다 더 정확한 것으로 나타났다. 새로운 강도예측식의 결정계수( $R^2$ )의 값이 0.9774, 0.9641로 나타나 Logistic식의 결정계수값 0.9526, 0.9361보다 높은 값을 나타내고 있다. 또한 새로운 강도예측식의 SSE가 17137, 34173으로 Logistic식의 SSE 17494, 35343보다 적게 나타나고 있어 본 연구의 강도예측식을 사용하여 압축강도를 예측할 경우 국내 현실에 맞는 보다 정확한 데이터를 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

### 3.3 새로운 강도예측식을 이용한 강도관리모델

Freiesleben함수를 활용한 등가재령의 새로운 강도

Table 4 강도 예측식의 계수도출 결과

Logistic Curve : $F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log T_e + m)}$						
W/C 55%						
$F_\infty$	K	m	$SD^{(1)}$	$SSE^{(2)}$	$R^2$	
354.72	1.0254	1.6052	15.7065	17494	0.9526	
물시멘트비 50%						
$F_\infty$	K	m	$SD^{(1)}$	$SSE^{(2)}$	$R^2$	
445.03	0.9576	1.5362	25.3658	35343	0.9361	
Proposed Curve : $S = \frac{S_u (T_e - M_0)^k}{\theta + (T_e - M_0)^k}$						
W/C 55%						
$S_u$	k	$\theta$	$M_0$	$SD^{(1)}$	$SSE^{(2)}$	$R^2$
368.1	0.8561	3.7066	0.3811	24.7091	17137	0.9774
W/C 50%						
$S_u$	k	$\theta$	$M_0$	$SD^{(1)}$	$SSE^{(2)}$	$R^2$
471.3	0.7602	3.4039	0.4580	42.0450	34173	0.9641

주1) SD : Standard deviation

주2) SSE : Sum of square error

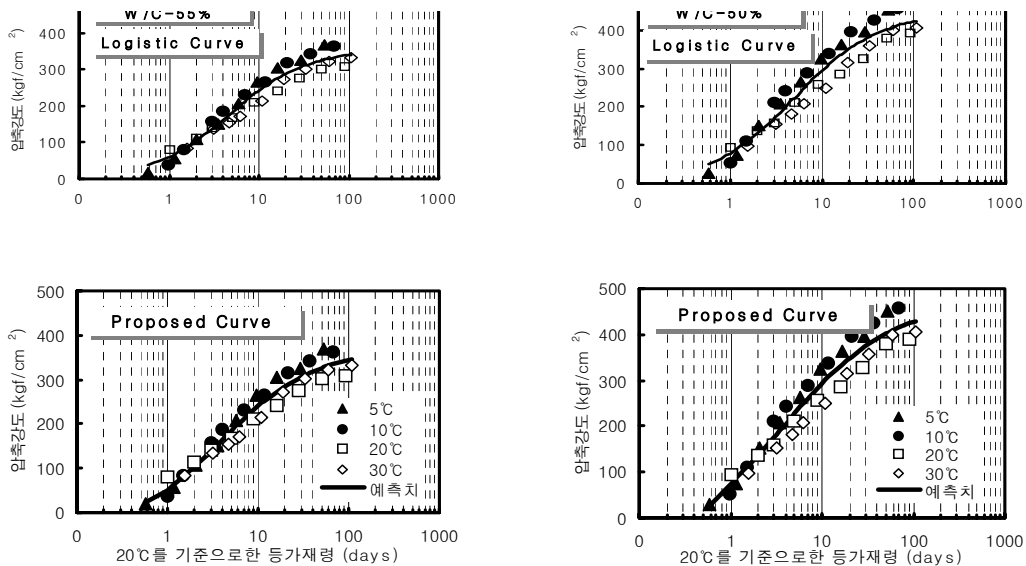


Fig. 2 강도에측모델을 이용한 강도에측결과

를 예측할 수 있다. 이에 건축공사현장에서 기둥, 기초, 보연, 축벽의 거푸집을 제거할 수 있는 압축강도  $50\text{kgf/cm}^2$ 가 발현하는데 소요되는 재령을 본 연구에서 이용된 새로운 예측식으로부터 산정한 압축강도  $50\text{kgf/cm}^2$  발현재령과 KS, JASS 5, ACI에서 제시하고 있는 거푸집 존치기간을 비교하면 Table 5에 나타난 바와 같다.<sup>(6),(7),(8)</sup>

Table 6은 모의부재의 압축강도와 중앙부 온도측정 결과를 나타낸 것이고 Fig. 3은 모의부재와 공시체의 온도변화곡선을 나타낸 것으로 측정된 모의부재의 온도이력을 이용하여 코어공시체의 등가재령을 산정하였다.

Fig. 4는 양생온도  $10\sim 15^\circ\text{C}$ 에서 거푸집제거가 가능한 압축강도  $50\text{kgf/cm}^2$ 을 발현하는데 소요되는 재령을 본 연구의 새로운 강도에측식에서 산정된 재령과 JASS 5에서 규정하고 있는 재령 및 KS, JASS 5, ACI에서 제시하고 있는 거푸집 존치기간을 비교하여 모델화한 것으로 본 연구의 강도 예측을 이용한 결과 압축강도  $50\text{kgf/cm}^2$ 을 발현하는데 소요되는 재령은 W/C 55%, 50%에서 각각 0.91일, 0.76일로 ACI에서 제시하고 있는 거푸집 존치기간에 비해 다소 늦지만

Table 5 기초, 보연, 기둥 및 벽의 거푸집존치기간 및 압축강도  $50\text{kgf/cm}^2$ 을 얻기 위한 재령 (O.P.C,  $10^\circ\text{C} \leq t < 15^\circ\text{C}$ )

	KS	JASS 5	ACI	Proposed Curve
존치기간(days)	6	6	0.5	-
$50\text{kgf/cm}^2$ 을 얻기 위한 소요재령(days)(w/c 55,50)	-	3.0, 2.5	-	0.91, 0.76

Table 6 모의부재 중앙부 온도, 대기온도와 압축강도 측정결과

측정 재령 (days)	측정재령( $\Delta t$ )까지의 온도 ( $^\circ\text{C}$ )		대기 온도 ( $^\circ\text{C}$ )	실측강도 ( $\text{kgf/cm}^2$ )	
	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

JASS 5나 KS에 비하여 빠르게 나타나 이를 활용할 경우 건축공사현장에서 거푸집 제거시기를 단축시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 코어 공시체 및 현장

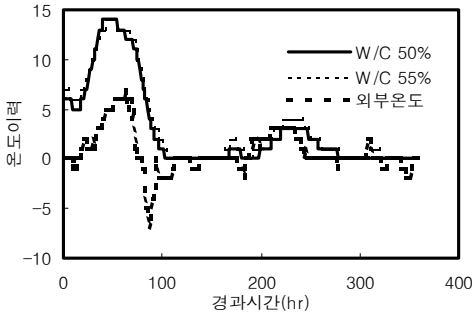


Fig. 3 모의부재의 온도변화곡선

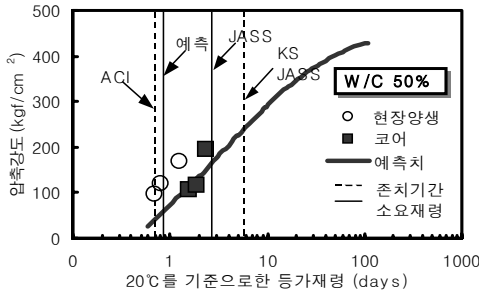
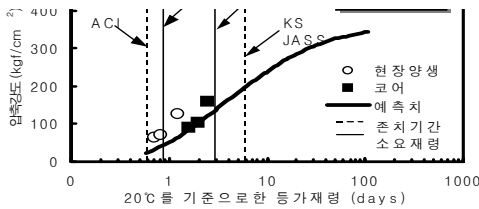


Fig. 4 새로운 강도예측식에 의한 거푸집제거 시기에 대한 비교

양생 공시체의 강도가 예측모델보다 높게 발현하고 있어 새로운 강도예측모델에 의한 실구조물에서 강도예측이 타당할 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

- 1) 새로운 강도예측식에 의한 강도예측결과 Logistic 식과 유사한 상관성을 보이나 새로운 강도예측식의 경우 초기재령에 있어서 강도예측이 보다 더 정확한 것으로 나타났으며 결정계수 값( $R^2$ )이 높고

SSE가 적게 나타나고 있어 새로운 강도예측모델을 건설공사현장에 적용할 경우 보다 합리적일 것으로 판단된다.

- 2) 강도관리 측면에서 본 연구의 범위인 양생온도 20°C에서 새로운 강도예측모델을 적용할 경우 압축강도 50kgf/cm<sup>2</sup> 발현시점이 기존에 제안된 거푸집 존치기간과 비교하여 빠르게 나타나고 있어 이를 건축공사현장에서 사용할 경우 거푸집 제거시기의 단축에 의한 공기단축이 가능할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구 과제 「적산온도기법을 활용한 콘크리트 구조물의 강도관리 프로그램 및 시공관리 시스템 개발」에 관한 일련의 연구로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. [과제번호:R01-2001-000-00456-0]

#### 참고문헌

1. Bergstrom, S. G., Curing Temperature, Age and Strength of Concrete, Magazine of Concrete Research (London), Vol.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. 洪悅郎, 콘크리트의 강도推定實用法とその応用, セメント技術年報 X III, 1959.
4. Freiesleben H. P. and Pederson, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, Nordisk Betong, 1977, pp.19~34.
5. Freiesleben H. P. and Pederson, J., Curing of concrete structure, CEB Information Bulletin 166, May 1985.
6. 한국콘크리트학회, 콘크리트표준시방서, 1999
7. 日本建築學會, 建築工事標準仕様書・同解説, JASS 5 鐵筋コンクリート工事, 1997.
8. ACI Committee 347, Guide to Formwork for Concrete, 2002.

(접수일자 : 2002년 6월 10일)