

적산온도 방법에 의한 강도예측모델 개발 및 건설생산현장에서의 강도관리에 관한 연구

김무한¹⁾ · 장종호^{1)*} · 남재현²⁾ · 길배수³⁾ · 강석표⁴⁾

¹⁾충남대학교 건축공학과 ²⁾대전대학교 건축공학과 ³⁾Tripod Company ⁴⁾한일시멘트(주) 중앙연구소

(2002년 6월 10일 원고접수, 2003년 1월 13일 심사완료)

A Study on the Development of Strength Prediction Model and Strength Control for Construction Field by Maturity Method

Moo-Han Kim¹⁾, Jae-Hyun Nam²⁾, Bac-Su Khil³⁾, Suk-Pyo Kang⁴⁾, and Jong-Ho Jang^{1)*}

¹⁾ Dept. of Architectural Engineering, Chungnam National University, Taejeon, Korea

²⁾ Dept. of Architectural Engineering, Taejeon University, Taejeon, Korea

³⁾ Tripod Company, Taejeon, Korea

⁴⁾ Central Research Center of Hanil Cement, Taejeon, Korea

(Received June 10, 2002, Accepted January 13, 2003)

ABSTRACT

Construction plan and strength control have limitations in construction production field because it is difficult to predict the form removal strength and development of specified concrete strength. However, we can have reasonable construction plan and strength control if prediction of concrete strength is available.

In this study, firstly, the newly proposed strength prediction model with maturity method was compared with the logistic model to test the adaptability. Secondly, the determination of time of form removal was verified through the new strength prediction model.

As the results, it is found that investigation of the activation energy that are used to calculate equivalent age is necessary, and new strength prediction model was proved to be more accurate in the strength prediction than logistic model in the early age. Moreover, the use of new model was more reasonable because it has low SSE and high decisive factor.

If we adopt new strength prediction model at construction field, we can expect the reduced period of work through the reduced time of form removal.

Keywords : activation energy, maturity, equivalent age, strength prediction model, the time of form removal

1. 서 론

현재 건설생산현장에서 이루어지고 있는 거푸집 제거 시기 결정, 설계기준강도 확보 등의 강도관리는 건축공사 표준시방서 등의 규준에 준하여 공사현장에 반입되는 콘크리트의 샘플을 채취하여 표준양생을 실시한 시험체의 압축강도시험을 통하여 이루어지고 있다^{1,2)}. 그러나 이러한 방법에 의해서는 거푸집 제거 가능강도 및 설계기준강도 발현의 확인은 가능하지만 그 시점을 예측할 수 없다는 단점이 있기 때문에 건설생산현장에서 공정계획 및 강도관리에서 한계가 있을 수밖에 없다. 이에 따라 콘크리트의 강도예측을 할 수 있으면 보다 합리적인 강도관리 및 공정계획이 가능하게 된다.

콘크리트의 강도를 예측하기 위한 기술적인 방법의 하나인 적산온도방식은 크게 Nurse-Saul 함수와 화학반응속도식의 일종인 Arrhenius 식을 응용한 등가재령 표현식의 두가지 방식이 있다. 이 중 등가재령의 표현식은 초기 시멘트 수화율에 대한 온도의 영향을 나타낸 것으로 임의재령에서의 콘크리트 강도예측에 많이 이용되어 왔다^{3~5)}.

한편 외국에서 제안된 기존 강도예측모델은 외국의 사용재료나 외기환경조건에 적합한 것으로 국내의 경우와는 다소 차이가 있어 국내의 환경조건에 맞는 강도예측모델에 대한 개발의 필요성이 증대되고 있다.

따라서 본 연구에서는 등가재령의 일종인 Freiesleben 함수를 이용하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현특성을 파악^{6~9)}한 후 새로운 강도예측모델의 적용가능성을 검증하기 위하여 기존에 제안된 강도예측모델 중 Logistic 모델과 비교·평가하였으며 모의부재 제작을 통한 실구조물 적용의 타당성 검토를 통해 거푸집제거시기 결정 등의 강

* Corresponding author

Tel : 042-821-7731 Fax : 042-823-9467

E-mail : kiikii-01@hanmail.net

Table 1 Experimental plan

Type	Curing temperature (°C)	W/C (%)	Target slump (cm)	S/a (%)	Unit water (kg/m ³)	Items of testing	Analysis factor	
							Equivalent age function	Strength prediction model
Cylinder	5	60	15±2	48	187	· Mixing temperature(°C) · Air content (%) · Slump (cm) · Compressive strength (kgf/cm ²)	· Freiesleben	· Logistic model · New prediction model
	10	55		48	186			
	20	50		47	183			
	30	45		46	179			
Mock-up	Field	55		48	186			
	Curing	50		47	183			

도관리를 위한 기초적 자료를 제시함으로써 건설생산현장에서 공정의 단축 및 합리화를 도모하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

본 실험의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같이 양생온도를 5, 10, 20, 30 °C 4수준, 물시멘트비를 60, 55, 50, 45 % 4수준으로 선정하여 콘크리트 강도와 적산온도의 상관성을 비교·검토하고자 하였으며 Freiesleben함수를 이용하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현특성을 파악한 후 새로운 강도예측모델의 적용 가능성을 검토하기 위해 기존의 강도예측모델인 Logistic 모델과 비교·검토하였다. 또한 거푸집 탈형시기 결정을 위해 물시멘트비 55, 50 % 2수준에서 60×60×60 cm의 입방형 모의부재를 타설하여 각 부위별 온도를 측정하고 등가재령을 계산하여 모의부재에서 채취한 코어공시체와 현장양생공시체의 압축강도를 비교·평가한 후 새로운 강도예측모델에 의해 강도를 예측하여 거푸집 탈형시기를 결정하는 것에 대한 합리성을 검증하고자 하였다.

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

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며 잔골재는 비중 2.56의 강모래, 굵은골재는 최대 치수 25 mm의 부순자갈을 사용하였다. 또한 고성능감수제는 폴리카르보산계를 사용하였다.

2.3 콘크리트 배합

본 실험의 콘크리트 배합은 Table 3에 나타난 바와 같이 건설생산현장에서 이용되는 배합을 수집, 분석하여 물

Table 2 Physical properties of used materials

Cement	Ordinary portland cement, Specific gravity : 3.15, Fineness : 3,200cm ² /g	
Fine aggregate	River sand, Specific gravity : 2.56,	Max. size : 5mm Fineness modulus : 2.3
Coarse aggregate	Crushed gravel, Specific gravity : 2.56,	Max. size : 25mm Fineness modulus : 6.95
Super-plasticizer	Synthetic polymer, Specific gravity : 1.10	

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

여기에서,

Te: 표준온도재령과 같은 재령

Ta: 양생온도(°K)

Ts: 293(273+20) : °K

Ea: 활성화에너지(KJ/mol)

T≥20°C : Ea=33.5KJ/mol

T<20°C : Ea=33.5+1.47(20-T)KJ/mol

R: 기체 상수(8.314 J/mol)

시멘트비를 60, 55, 50, 45 %의 보편적인 보통강도콘크리트의 배합을 선정하였으며 목표슬럼프를 15±2 cm로 설정하였다.

2.4 비빔방법

본 실험의 콘크리트의 비빔은 100 ℓ의 강제식 팬타입믹서를 이용하여 재료를 일괄투입한 후 건비빔을 60초간 실시하고, 물과 고성능감수제를 첨가하여 1분 30초간 비빔하여 총 비빔시간은 2분 30초 소요되었다.

2.5 공시체 제작 및 양생방법

콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 KS F 2403에 준하여 제작하였으며 양생은 온도조절이 가능한 고온, 저온 챔버를 사용하여 양생온도 5, 10, 20, 30 °C에서 측정재령까지 수증양생을 실시하였다.

2.6 모의부재 제작

Fig. 1과 같은 W60×D60×H60 cm의 모의부재를 제작하여 봉상바이브레이터를 이용하여 콘크리트를 타설한 후 표면으로부터 5, 10, 15 cm 3부분에 Maturity Meter에 연결된 온도게이지(Thermocouple)를 이용하여 내부온도를 측정하였으며 현장수증양생 공시체와 $\phi 10 \times 20$ cm의 코어공시체를 채취하여 측정재령에서 압축강도 시험을 실시하였다.

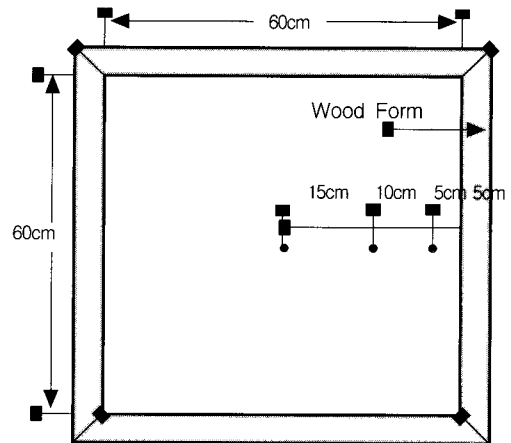


Fig. 1 Form of mock-up

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트

본 실험의 굳지않은 콘크리트 시험결과를 Table 4에 나타내었다.

3.2 콘크리트의 압축강도 발현성상

본 실험의 압축강도 측정결과를 Table 5에 나타내었다.

Table 3 Mix proportions of concrete

W/C (%)	Target slump (cm)	SP addition (%)	S/a (%)	Unit water (kg/m ³)	Absolute volume (ℓ/m ³)			Unit weight (kg/m ³)		
					Cement	Sand	Gravel	Cement	Sand	Gravel
60	15±2	0.3	48	187	99	324	350	312	828	896
55			48	186	107	320	347	338	819	887
50			47	183	116	311	350	366	795	897
45			46	179	126	301	354	398	771	905

Table 4 Test results of fresh concrete

5°C				10°C			
W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (°C)	W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (°C)
60	14.0	4.2	5.0	60	13.0	4.4	11.0
55	14.5	4.0	5.0	55	19.0	4.2	9.0
50	14.5	3.5	4.5	50	18.5	4.6	12.0
45	15.0	4.5	5.0	45	13.0	4.5	13.0

20°C				30°C			
W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (°C)	W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (°C)
60	13.0	4.1	22.0	60	9.5	5.7	25.0
55	17.0	4.5	22.5	55	10.9	4.9	25.0
50	15.4	5.5	22.0	50	16.5	6.2	24.5
45	19.4	5.6	23.0	45	12.1	6.6	25.0

Table 5 Test results of compressive strength

(Unit : kgf/cm²)

5℃					10℃				
Age(days)	W/C (%)				Age(days)	W/C (%)			
	60	55	50	45		60	55	50	45
2	19	19	28	38	2	30	38	56	73
4	61	57	74	108	3	60	82	111	148
7	102	108	151	187	5	123	158	212	253
12	142	151	208	246	8	148	187	243	298
20	173	208	264	325	14	183	231	289	343
33	207	266	324	408	24	215	266	338	392
56	257	304	364	444	42	265	317	395	451
100	289	325	397	479	75	295	342	426	494
182	315	368	452	540	137	312	364	457	520
20℃					30℃				
Age(days)	W/C (%)				Age(days)	W/C (%)			
	60	55	50	45		60	55	50	45
1	64	81	93	123	1	67	84	98	120
2	93	113	137	177	2	116	135	154	174
3	114	141	159	195	3	142	153	181	212
5	161	168	211	246	4	161	172	208	238
9	192	210	257	289	7	203	214	250	297
16	220	241	285	349	12	238	271	315	373
28	248	276	327	413	21	277	300	358	410
50	272	301	380	456	38	295	321	400	446
91	297	309	391	473	68	314	331	406	461

Fig. 2 (a)는 재령에 따른 각 물시멘트비에 있어서 양생 온도별 압축강도를 나타낸 것으로 모든 물시멘트비에서 재령 28일까지는 양생온도 20, 30℃의 경우가 5, 10℃의 경우에 비해 상대적으로 높은 강도수준을 보이고 있으나 재령 28일 이후에는 유사한 강도수준을 보이고 있다.

Fig. 2 (b)는 Freiesleben의 활성화에너지를 이용한 등가재령함수에 있어서 양생온도별 압축강도를 나타낸 것으로 Fig. 2 (a)에 비해 동일한 등가재령에서의 콘크리트 강도는 양생온도에 관계없이 유사한 강도수준을 나타내고 있어 이를 이용한 임의재령에서의 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

그러나 물시멘트비가 낮은 배합일수록 양생온도 20, 30℃에서의 콘크리트 강도가 5, 10℃의 강도보다 재령이 경과할수록 낮게 나타나고 있는데 이는 본 실험에서 사용된 활성화에너지 값에 의한 결과로 판단되며 온도에 대한 영향을 보다 정확하게 설명할 수 있는 활성화에너지에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

3.3 강도예측모델에 대한 비교·검토

적산온도 방법에 의해 새로 개발된 강도예측모델을 검증하기 위해 본 실험에서는 기존의 강도예측모델 중 Logistic 모델을 이용하였으며 이용식은 식(2)와 같다. 또한 본 실험에서 제안한 강도예측모델은 식(3)과 같이 초기 강도예측율을 향상시키기 위해서 강도가 발현되기 전까지의 시간인 종결도달시간까지의 적산온도는 제외시키는 것으로 하였으며 기존 ACI^(10~12)에서 제시하고 있는 쌍

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

여기에서,

F_c : 예측강도 (kgf/cm²)

F_∞ : 종국강도 (kgf/cm²)

M : 적산온도 (™ · D)

K, m : 회귀계수

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

여기에서,

S : 예측강도 (kgf/cm²)

S_u : 종국강도 (kgf/cm²)

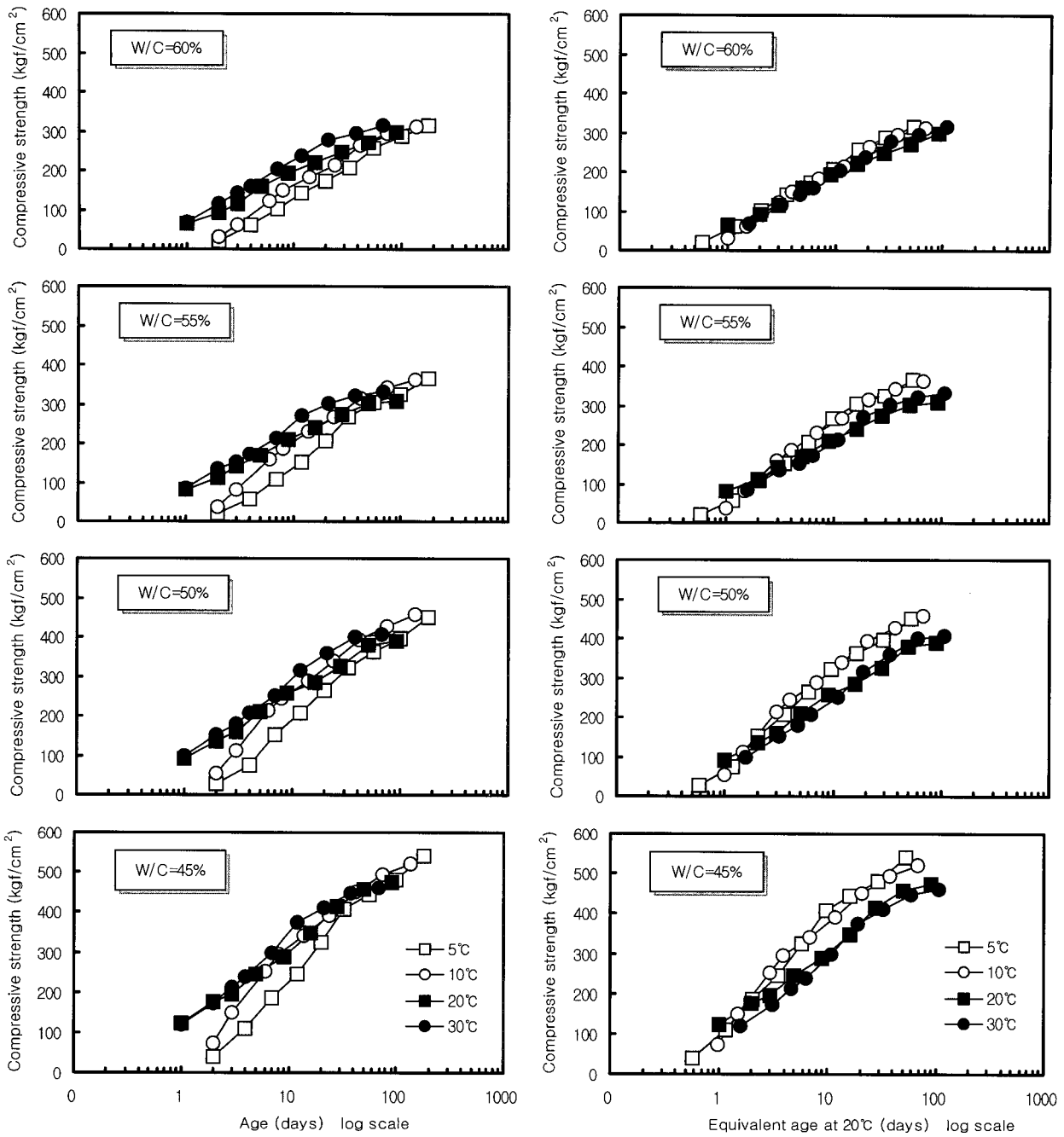
M : 적산온도 (™ · D)

M_0 : 종결시간 까지의 적산온도 (™ · h)

θ, k : 회귀계수

곡선 식을 토대로 본 실험데이터를 통계분석 프로그램에 의해 최적화한 모델이다.

Table 6은 물시멘트비별 각각의 강도예측 모델식의 계수도출결과를 나타낸 것으로 전체적으로 물시멘트비가 클수록 결정계수가 높게 나타나고 있다.



(a) Variation of compressive strength according to age (b) Variation of compressive strength according to equivalent age

Fig. 2 Variation of compressive strength

Table 6 Result of constant calculated of strength prediction model

W/C (%)	Logistic model						New prediction model						
	F_{∞}	K	m	$SD^{a)}$	$SSE^{b)}$	R^2	S_u	θ	k	Mo	$SD^{a)}$	$SSE^{b)}$	R^2
60	329.85	0.9535	1.6697	10.6193	5385	0.9887	348.4	3.9782	0.7772	0.4402	16.9881	4889.4	0.9907
55	354.72	1.0254	1.6052	15.7065	17494	0.9526	368.1	3.7066	0.8561	0.3811	24.7091	17137	0.9774
50	445.03	0.9576	1.5362	25.3658	35343	0.9361	471.3	3.4039	0.7602	0.4580	42.0450	34173	0.9641
45	521.23	0.9348	1.4400	31.3667	53337	0.9721	544.9	3.2557	0.7725	0.3736	51.8228	52623	0.9830

a) SD : Standard Deviation, b) SSE : Sum of Square Error

Fig. 3은 실측강도와 예측모델에 의한 예측강도의 관계를 나타낸 것으로 두 예측식 모두 유사한 강도예측을 보이고 있으나 물시멘트비가 낮은 배합의 경우 장기재령일수록 실측강도와 예측모델에 의한 예측강도의 차가 크게 나타나 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 사료된다. 그러나 새로 제안된 모델의 경우 Logistic 모델에 비해 초기재령에 있어서 강도예측이 보다 정확한 것으로 나타났으며 SSE는 작고 결정계수는 높게 나타나고 있어 이를 이용한 강도예측이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

3.4 강도예측모델에 의한 강도관리

Freiesleben함수를 이용한 등가재령의 새로운 강도예측 모델을 이용하여 강도관리측면에서 거푸집제거시기를 예측할 수 있다. 이에 건설생산현장에서 기동, 기초, 보요, 측벽의 거푸집을 제거할 수 있는 압축강도 50 kgf/cm²가 발현하는데 소요되는 재령을 본 연구에서 제안한 새로운 예측모델로부터 산정한 압축강도 50 kgf/cm² 발현재령과 KASS, JASS 5, ACI에서 제시하고 있는 거푸집존치기간을 비교하면 Table 7에 나타낸 바와 같다^{13~15)}.

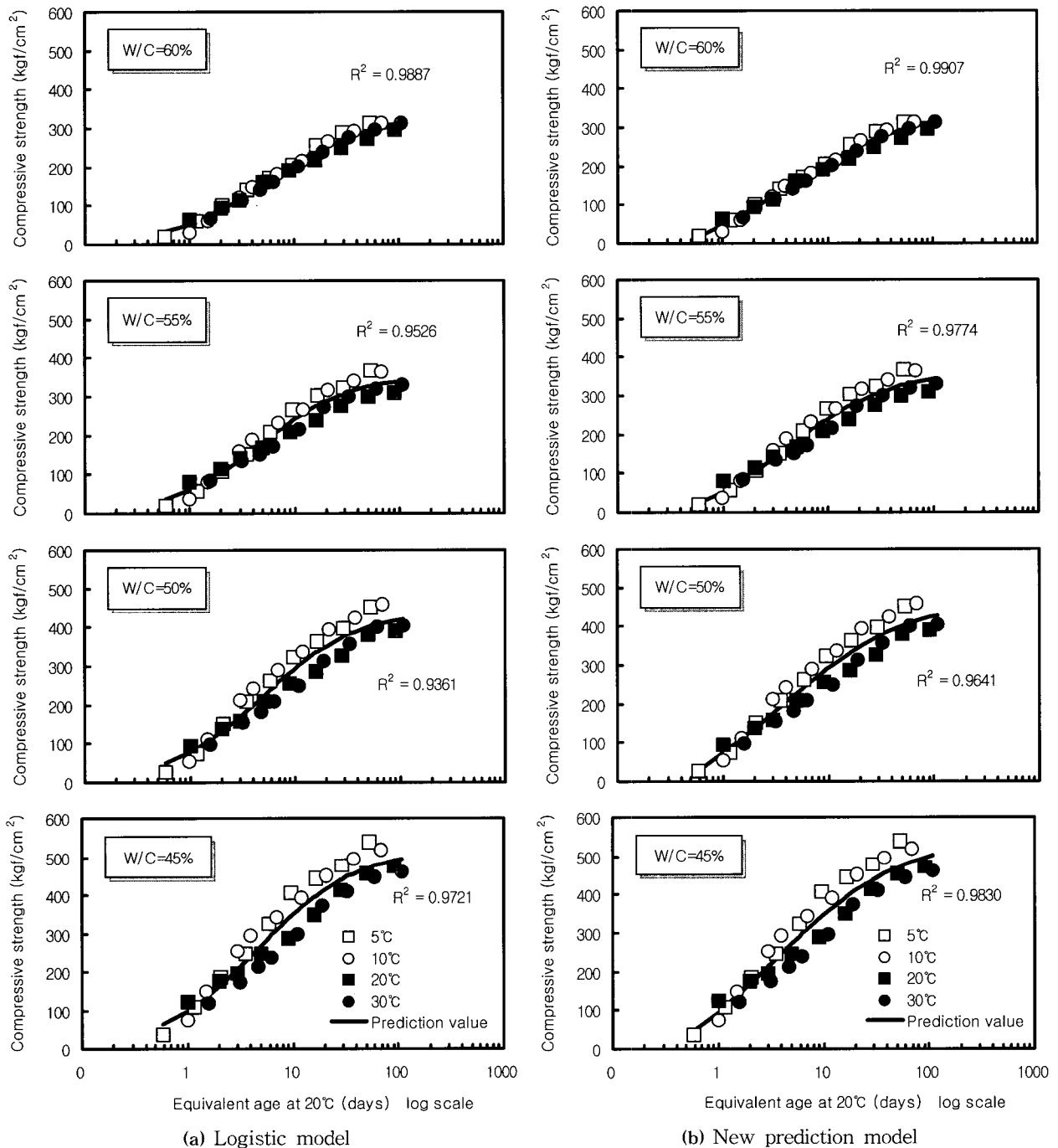


Fig. 3 Result of Strength prediction using strength prediction model

Table 7 The minimum time of form removal
(O.P.C, 10°C ≤ T < 15°C)

	KASS	JASS 5	ACI	New prediction model
Time (days)	6	6	0.5	-
Age 50kgf/cm ² (days) (w/c 55,50)	-	3.0, 2.5	-	0.91, 0.76

Table 8 Core strength and inside temperature of mock-up

Age (days)	Inside temperature (°C)		Ambient temperature (°C)	Compressive strength (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

Table 8은 모의부재의 압축강도와 내부온도 측정결과를 나타낸 것이며, Fig. 4는 양생온도 10~15 °C에서 거푸집 제거가 가능한 압축강도 50 kgf/cm²을 발현하는데 소요되는 재령을 본 연구의 새로운 강도예측모델에서 산정한 재령과 JASS 5에서 규정하고 있는 재령 및 KASS, JASS 5, ACI에서 제시하고 있는 거푸집 존치기간을 비교한 것으로 본 연구의 새로운 강도예측모델을 이용한 결과 압축강도 50 kgf/cm²을 발현하는데 소요되는 재령은 W/C 55%, 50%에서 각각 0.91일, 0.76일로 ACI에서 제시하고 있는 거푸집 존치기간에 비해 다소 늦지만 JASS 5나 KASS에 비하여 빠르게 나타나 이를 활용할 경우 건축공사현장에서 거푸집제거시기를 단축시킬 수 있을 것으로 사료된다. 또한 코어 공시체 및 현장 양생 공시체의 강도가 예측 모델보

다 높게 발현하고 있어 새로운 강도예측모델에 의한 실구조물에서의 강도예측이 타당할 것으로 사료된다.

4. 결 론

적산온도 방법에 의한 강도예측모델 개발 및 건설생산현장에서의 강도관리에 관하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- 1) Freiesleben의 활성화에너지를 이용한 등가재령함수에 있어서 콘크리트의 강도는 양생온도에 관계없이 유사한 강도수준을 나타내고 있으나 강도-적산온도의 상관성을 높이기 위해서는 등가재령 계산시 이용되는 활성화에너지에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.
- 2) Logistic 모델과 새로 제안된 모델은 유사한 강도예측을 보이고 있지만 새로 제안된 모델의 경우 Logistic 모델에 비해 초기재령에 있어서 강도예측이 보다 정확한 것으로 나타났으며, SSE는 작고 결정계수는 높게 나타나고 있어 이를 이용한 강도예측이 보다 합리적일 것으로 판단된다.
- 3) 본 연구의 범위 내에서 양생온도 10~15 °C의 경우 강도관리 측면에서 새로운 강도예측모델 사용시 압축강도 50 kgf/cm² 발현시점이 기존에 제안된 기간과 비교하여 빠르게 나타나고 있어 이를 건설생산현장에서 적용할 경우 거푸집제거시기의 단축에 의한 공기단축이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제 「적산온도 기법을 활용한 콘크리트 구조물의 강도관리 프로그램 및 시공관리 시스템 개발」에 관한 일련의 연구로 수행되었

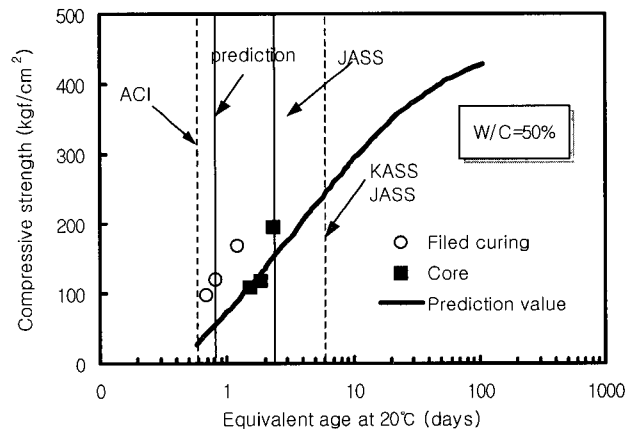
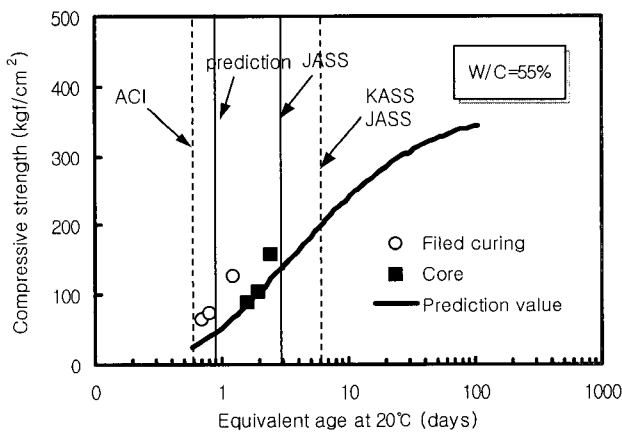


Fig 4. Time of form removal using new prediction model

----- The minimum time of form removal
 ——— Age 50kgf/cm²

으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. [과제번호 : R01-2001-000-00456-0]

참고 문헌

1. 김무한 외, "콘크리트 압축강도와 적산온도 관계에 관한 실험적 연구," 대한건축학회학술발표논문집 제19권 2호 1999. 10, pp.690~695.
2. 김무한 외, "등가재령을 이용한 콘크리트의 강도예측에 관한 실험적 연구," 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집 제 11권 2호 1999. 11, pp.337~340.
3. 김무한 외, 적산온도방식에 의한 콘크리트의 압축강도 증진해석에 관한 실험적 연구, 대한건축학회 논문집 구조계 14권 12호, 1998. 12, pp.103~110.
4. Moo Han Kim et al, Strength Prediction High Strength Concrete at Early Age by the Equivalent Age, *Japan Concrete Institute*, Vol.21, No.2, 2001. 7, pp.1045~1050.
5. Saul, AGA, "Principles Underlying the Steam Curing of Concrete at Atmospheric Pressure," *Magazine of Concrete Research*, Vol.2, No.6, March, 1951, pp.127~140.
6. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength," *Nordisk Betong*, 1977, pp.19~34.
7. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J., "Curing of concrete structure," *CEB Information Bulletin 166*, May, 1985.
8. Gue Chengju, "Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength," *ACI Material Journal*, July, 1989.
9. Bergstrom, Sven G., "Curing Temperature, Age and Strength of Concrete," *Magazine of Concrete Research* (London), Vol. 5, No. 14, Dec. 1953, pp.61~66.
10. "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method," *ASTM C 1074-93*.
11. Tank, R.C., and Cario, N.J., "Rate Constant Functions for Strength Development of Concrete," *ACI Materials Journal*, Vol.88, No.1, January-February, 1991, pp.74~83.
12. Cario, N.J., "Maturity Method: Theory and Application," *Journal of Cement, and Aggregates, ASTM*, Vol.6, No.2, Winter, 1984, pp.61~73.
13. 한국콘크리트학회, "콘크리트표준시방서," 1999, pp. 102~103.
14. 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, pp.315~318.
15. ACI Committee 347, "Guide to Formwork for Concrete," 2002.

요 약

현재 건설생산현장에서 이루어지고 있는 거푸집 제거 시기 결정, 설계기준강도 확보 등의 강도관리는 그 시점을 예측할 수 없다는 단점이 있기 때문에 건설생산현장에서의 공정계획 및 강도관리에서 한계가 있을 수밖에 없다. 이에 따라 콘크리트의 강도를 예측할 수 있으면 보다 합리적인 강도관리 및 공정계획이 가능하게 된다. 본 연구는 적산온도 방법에 의해 새로 제안된 강도예측모델의 적용가능성을 검증하기 위해 기존 강도예측모델 중 Logistic 모델과 비교·평가하였으며, 모의부재에서 채취한 코어공시체와 현장양생공시체의 압축강도를 비교·평가한 후 새로운 강도예측모델에 의해 강도를 예측하여 거푸집 제거시기를 결정하는 것에 대한 합리성을 검증하고자 하였다. 실험결과 Freiesleben의 활성화에너지를 이용한 등가재령함수에 있어서 콘크리트의 강도는 양생온도에 관계없이 유사한 강도수준을 나타내고 있으나 강도-적산온도의 상관성을 높이기 위해서는 등가재령 계산시 이용되는 활성화에너지에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다. 새로 제안된 모델의 경우 Logistic 모델에 비해 초기재령에 있어서 강도예측이 보다 정확한 것으로 나타났으며, SSE는 작고 결정계수는 높게 나타나고 있어 이를 이용한 강도예측이 보다 합리적인 것으로 판단된다. 본 연구의 범위 내에서 양생온도 10~15℃의 경우 강도관리 측면에서 새로운 강도예측모델 사용시 압축강도 50kgf/cm² 발현시점이 기존에 제안된 기간과 비교하여 빠르게 나타나고 있어 이를 건설생산현장에서 적용할 경우 거푸집제거시기의 단축에 의한 공기단축이 가능할 것으로 사료된다.

핵심용어 : 적산온도, 활성화에너지, 등가재령, 강도예측모델, 거푸집 제거시기