

적산온도 기법을 활용한 건설생산현장에서의 강도에측모델 개발에 관한 연구

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

김 무 한* 남 재 현** 길 배 수*** 최 세 진**** 장 종 호**** 강 용 식*****
Kim, Moo-Han Nam, Jae-Hyun Khil, Bae-Su Choi, Se-Jin Jang, Jong-Ho Kang, Yong-Sik

Abstract

The purpose of this study is to develop the strength prediction model by Maturity Method.

A maturity function is a mathematical expression to account for the combined effects of time and temperature on the strength development of a cementitious mixture. The method of equivalent ages is to use Arrhenius equation which indicates the influence of curing temperature on the initial hydration ratio of cement.

For the experimental factors of this study, we selected the concrete mixing of W/C ratio 45, 50, 55 and 60% and curing temperature 5, 10, 20 and 30°C. And we compare and evaluate with logistic model that is existing strength prediction model, because we have to verify adaption possibility of new strength prediction model which is proposed by maturity method.

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.

키워드 : 적산온도, 등가재령, 활성화에너지, 콘크리트 강도, 강도에측모델

Keywords : Maturity, Equivalent Age, Activation Energy, Concrete Strength, Strength Prediction Model

1. 서 론

콘크리트는 시멘트의 수화반응에 의하여 강도 및 내구성이 발휘되는 것으로서 콘크리트 양생과정에서의 다양한 온도 및 재령 등에 의하여 구조체 내부의 온도이력으로 영향을 받게 된다.¹⁾ 즉 기온이 낮은 겨울철에는 콘크리트의 초기동해, 응결 및 강도지연이 문제시되고 고온환경인 여름철의 경우는 수화반응의 지나친 촉진에 따른 문제점이 발생하며, 또한 구조체 내부는 수화열에 의한 온도변화로 품질관리에 세심한 주의가 필요하다.

이에 따라 콘크리트 공사에 있어서 외기온의 변화와 구조체 내부조건을 고려한 구조체 콘크리트의 강도발현에 대한 정확한 예측은 현장시공관리에서 한중 및 서중 콘크리트의 적용기간의 결정, 배합강도의 결정, 초기양생기간의 결정, 임의재령에서의 강도추정 등 안전하고 경제적인 공사계획의 추진을 가능하게 할뿐만 아니라 콘크리트의 품질관리 척도로서도 중요한 역할을 한다.

콘크리트의 강도를 예측하기 위한 기술적인 방법의 하나인 적산온도방식은 크게 Nurse-Saul 함수와 화학반응속도식의 일종인 Arrhenius식을 응용한 등가재령의 표현식 두가지 방식이 있다. 이 중 등가재령의 표현식은 초기 시멘트 수화율에 대한 온도의 영향을 나타낸 것으로 임의재령에서의 콘크리트 강도 예측에 많이 이용되어 왔다.²⁾

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

따라서 본 연구에서는 등가재령의 일종인 Freiesleben함수^{3),4)}를 이용하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현특성을 파악한 후 기존에 제안된 강도에측모델인 Logistic식과 새로운 강도에측 모델을 비교·평가함으로써 건설생산현장에서 구조체 콘크리트의 품질관리 및 공정관리에 활용할 수 있는 기초적 자료를 제시하고자 한다.

* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공학박사

** 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수, 공학박사

*** 정회원, Tripod Company, 대표이사, 공학박사

**** 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정

***** 정회원, 대전대학교 대학원 건축공학과, 석사과정

Table 1. Experimental plan

Curing temperature (°C)	W/C (%)	Target slump (cm)	Target air content (%)	S/a (%)	Unit water (kg/m ³)	Items of testing	Analysis factor	
							Equivalent age function	Strength prediction model
5 10 20 30	60	15±2	4.5±1.5	48	187	·Mixing temperature(°C) ·Air content (%) ·Slump (cm) ·Compressive strength (kgf/cm ²)	·Freiesleben	·Logistic model ·New prediction model
	55			48	186			
	50			47	183			
	45			46	179			

2. 실험계획 및 방법

잔골재는 비중 2.56의 강모래, 굵은골재는 최대치수 25mm의

2.1 실험계획 및 배합

본 실험의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같이 물시멘트비를 45, 50, 55, 60% 4수준으로 선정하였으며, 양생온도를 5, 10, 20, 30°C로 설정하여 콘크리트 강도와 적산온도의 상관성을 비교검토하고자 하였다. 또한 Freiesleben함수를 이용하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현특성을 파악한 후 새로운 강도예측모델의 적용 가능성을 검토하기 위해 기존 강도예측모델 중 Logistic 모델과 비교검토하였다.

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

$$T_e = \int_0^t \exp[Ea/R \cdot (1/T_s - 1/T_a)] dt \quad \text{식(1)}$$

여기에서

T_e : 표준온도재령과 같은 재령

T_a : 양생온도(°K)

T_s : 293(273+20 : °K)

Ea : 활성화에너지(KJ/mol)

$T \geq 20^\circ\text{C}$: $Ea=33.5\text{KJ/mol}$

$T < 20^\circ\text{C}$: $Ea=33.5+1.47(20-T)\text{KJ/mol}$

R : 기체 상수(8.314 J/mol)

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 Table 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며

Table 2. Physical properties of used materials

Cement	Ordinary portland cement Specific Gravity : 3.15, Fineness : 3,200cm ² /g
Fine aggregate	River sand, Max. size : 5mm Specific gravity : 2.56, Fineness modulus : 2.33
Coarse aggregate	Crushed gravel, Max. size : 25mm Specific gravity : 2.56, Fineness modulus : 6.95
Superplasticizer	Synthetic polymer, Specific gravity : 1.10

부순자갈을 사용하였다. 또한 고성능감수제는 폴리카르본산계를 사용하였다.

2.3 콘크리트 배합

본 실험의 콘크리트 배합은 Table 3에 나타난 바와 같이 건설생산현장에서 이용되는 배합을 수집, 분석하여 물시멘트비를 60, 55, 50, 45%의 보편적인 보통강도콘크리트의 배합을 선정하였으며 목표슬럼프를 15±2cm로 설정하였다.

2.4 비빔방법

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

2.5 공시체 제작 및 양생방법

콘크리트 압축강도 시험용 공시체는 KS F 2403에 준하여

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	351	312	830	896
55			48	186	107	320	347	338	820	886
50			47	183	116	311	350	366	796	895
45			46	179	126	301	354	398	772	904

Table 4. Test results of fresh concrete

5℃				10℃			
W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (℃)	W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (℃)
60	14.0	4.2	5.0	60	13.0	4.4	11.0
55	14.5	4.0	5.0	55	17.0	4.2	9.0
50	14.5	3.5	4.5	50	15.4	4.6	12.0
45	15.0	4.5	5.0	45	19.4	4.5	13.0
20℃				30℃			
W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (℃)	W/C (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Mixing temperature (℃)
60	13.0	4.1	22.0	60	9.5	5.7	25.0
55	19.0	4.5	22.5	55	10.9	4.9	25.0
50	18.5	5.5	22.0	50	16.5	6.2	24.5
45	13.0	5.6	23.0	45	12.1	6.6	25.0

Table 5. Test results of compressive strength

(Unit : kgf/cm²)

5℃	W/C (%)				10℃	W/C (%)			
Age(days)	60	55	50	45	Age(days)	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℃	W/C (%)				30℃	W/C (%)			
Age(days)	60	55	50	45	Age(days)	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

제작하였으며 양생은 온도조절이 가능한 고온, 저온 챔버를 사용하여 양생온도 5, 10, 20, 30℃에서 측정재령까지 수중양생을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트

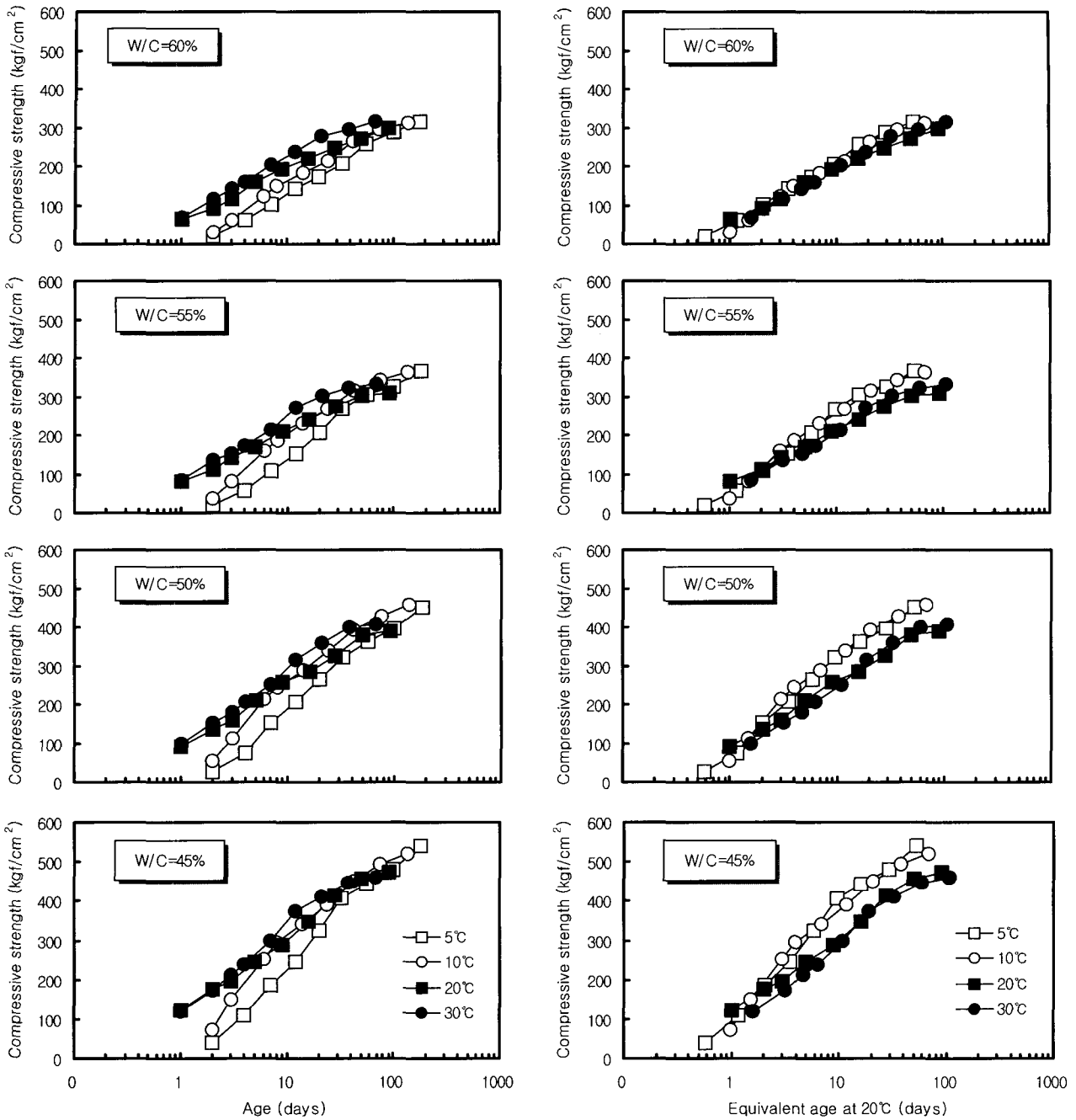
본 실험의 굳지않은 콘크리트 시험결과를 Table 4에 나타내었다.

3.2 콘크리트의 압축강도 발현성상

본 실험의 압축강도 측정결과를 Table 5에 나타내었다.

Fig. 1 (a)는 재령에 따른 각 물시멘트비에 있어서 양생온도별 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. 1 (b)는 Freiesleben의 활성화에너지를 이용한 등가재령함수에 있어서 양생온도별 압축강도를 나타낸 것으로 Fig. (a)에 비해 동일한 등가재령에서의 콘크리트 압축강도는 양



(a) Variation of compressive strength according to age

(b) Variation of compressive strength according to equivalent age

Fig 1. Variation of compressive strength

생온도에 관계없이 유사한 수준으로 나타나고 있어 이를 이용한 임의재령에서의 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

그러나 물시멘트비가 낮은 배합일수록 양생온도 20, 30°C에서의 콘크리트 강도가 5, 10°C의 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 강도에측모델에 대한 비교검토

적산온도 방법에 의해 새로 개발된 강도에측모델을 검증하기 위해 본 실험에서는 기존의 강도에측모델 중 Logistic 모델을 이용하였으며 이용식은 식(2)와 같다. 또한 본 실험에서 제안한 강도에측모델은 식(3)과 같이 초기 강도에측율을 향상시키기 위해서 강도가 발현되기 전까지의 시간인 종결도달 시간까지의 적산온도는 제외시키는 것으로 하였으며 기존 ACI⁵⁽⁶⁾에서 제시하고 있는 쌍곡선 식을 토대로 본 실험데이터를 통계분석 프로그램에 의해 최적화한 모델이다.

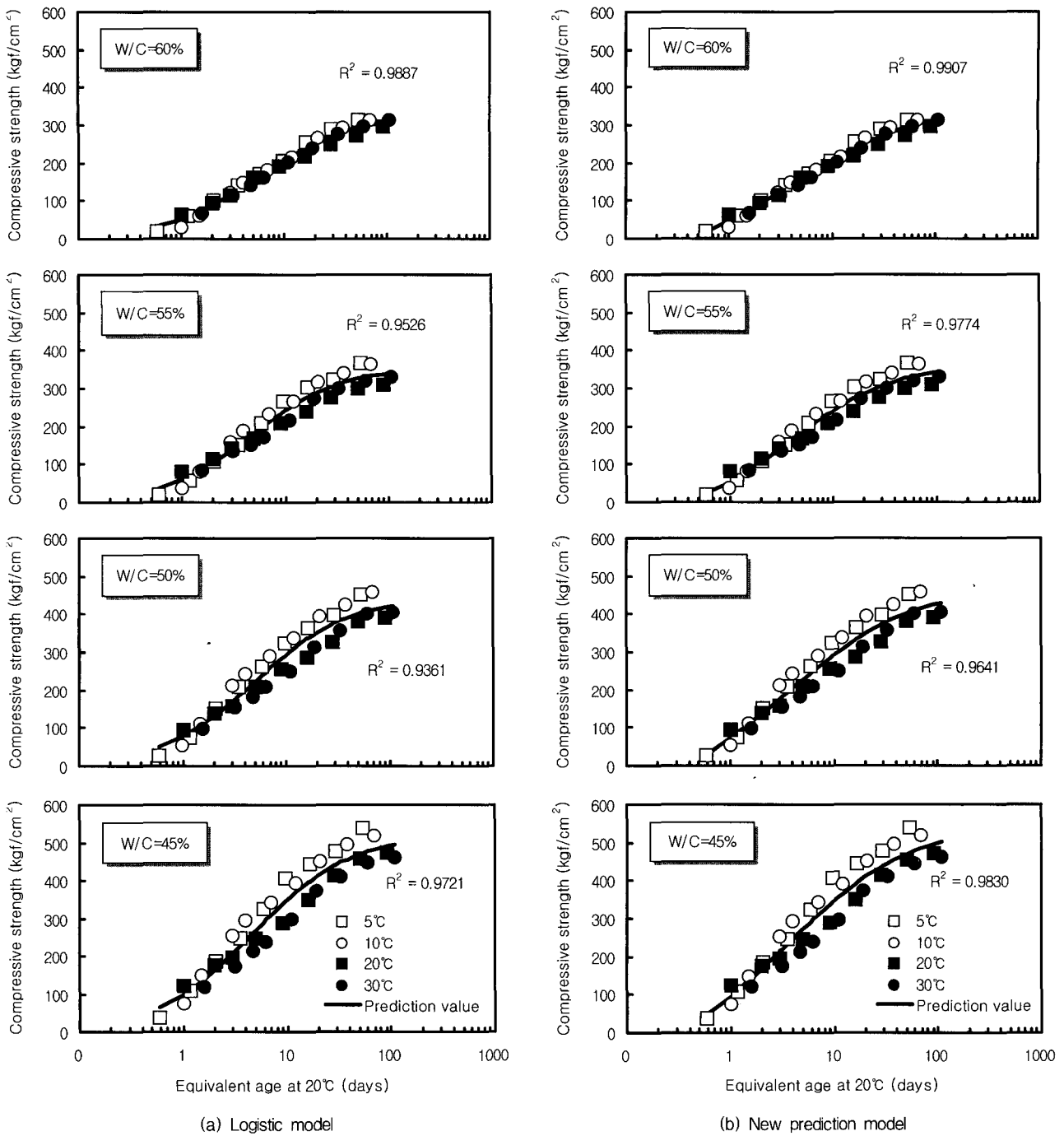


Fig 2. Strength prediction result by strength prediction model

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

여기에서

- F_c : 예측강도 (kgf/cm²)
- F_∞ : 종국강도 (kgf/cm²)
- M : 적산온도 (°D·D)
- K, m : 회귀계수

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

여기에서

- S : 예측강도 (kgf/cm²)
- S_u : 종국강도 (kgf/cm²)
- M : 적산온도 (°D·D)
- M_0 : 종결시간 까지의 적산온도 (°C·h)
- θ, k : 회귀계수

Table 6. The results of constant calculated of strength prediction model

W/C (%)	Logistic model						New prediction model						
	F ∞	K	m	SDa)	SSEb)	R2	Su	θ	k	Mo	SDa)	SSEb)	R2
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

또한 Table 6에 물시멘트비별 각각의 강도예측 모델식의 계수도출결과를 나타내었다.

Fig. 2는 예측모델에 의한 예측강도와 실측강도의 관계를 나타낸 것으로 두 예측모델 모두 유사한 강도예측을 보이고 있으나 새로 제안된 모델의 경우 Logistic 모델에 비해 초기재령에 있어서 강도예측이 보다 정확한 것으로 나타나고 있다. 또한 새로 제안된 모델의 경우 Logistic 모델에 비해 SSE는 작고 결정계수는 높게 나타나고 있어 이를 이용한 강도예측이 보다 합리적일 것으로 판단된다.

4. 결 론

적산온도 기법을 활용한 건설생산현장에서의 강도예측모델 개발에 관한 연구 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Freiesleben의 활성화에너지를 이용한 등가재령함수에 있어서 콘크리트의 강도는 양생온도에 관계없이 유사한 강도수준을 나타내고 있으나 강도-적산온도의 상관성을 높이기 위해서는 등가재령 계산시 이용되는 활성화에너지에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.
- 2) Logistic 모델과 본 연구에서 새롭게 제안된 모델은 유사한 강도예측을 보이고 있지만 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.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 목적기초연구과제 「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]

참 고 문 헌

1. 김무한 외, "콘크리트 압축강도와 적산온도 관계에 관한 실험적 연구", 대한건축학회학술발표논문집 제19권 2호 1999. 10, pp.690-695
2. 김무한 외, "적산온도방식에 의한 콘크리트의 압축강도 증진 해석에 관한 실험적 연구", 대한건축학회 논문집 구조계 14권 12호, 1998. 12, pp. 103-110
3. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J., "Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength", Nordisk Betong, 1977, pp.19-34.
4. Freiesleben Hansen, P. and Pederson, J., "Curing of concrete structure", CEB Information Bulletin 166, May 1985
5. 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
6. "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", ASTM C 1074-93
7. 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
8. 김무한 외, "등가재령을 이용한 콘크리트의 강도예측에 관한 실험적 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집 제 11권 2호 1999. 11, pp.337-340
9. Cario, N.J., "Maturity Method:Theory and Application," Journal of Cement, and Aggregates, ASTM, Vol. 6, No. 2, Winter, 1984, pp. 61-73
10. Gue Chengju, "Maturity of Concrete : Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI Material Journal", 1989. 7
11. 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.