

# 적산온도 방식을 이용한 고강도 콘크리트의 강도예측

## Prediction of Strength of High-Strength Concrete by the Maturity Method

길 배 수'	김 태 근'	한 장 현''
Khil, Bae-Su	Kim, Tae-Keun	Han, Jang-Hyun
권 영 진'''	남 재 현''''	김 무 한''''''
Kwan, Young-Jin	Nam, Jae-Hyun	Kim, Moo-Han

### Abstract

The aim of this study is to compare the development of compressive strength of high-strength concrete with maturity and investigate the applicability the strength prediction models. An experiment was attempted on the high-strength concrete mixes using portland cement replaced by silica fume of 10% by weight of cement, the water-binder ratios of mixes being 0.30 and 0.35, the curing temperatures being 30, 20, 10, 5°C. Test results of mixes are statistically analyzed to infer the correlation coefficient between the maturity and the compressive strength of high-strength concrete.

The constant of strength prediction equation were determined from test results, and the equation was adopted to predict the strength of slab(W80×D100×H20cm). The slab was cast in the laboratory from the same batch water-binder ratio of 0.30, and cores were cut from slab in order to estimate the actual strength. These values are used to compare with predicted value. The present study allows more realistic determination of early age compressive strength of high-strength concrete and can be efficiently used to control the quality in actual construction.

### 1. 서론

적산온도 함수는 기준온도를 결정해 콘크리트의 내부온도를 이용하는 방법과 기준온도를 -10°C로 정하고 양생온도를 이용하는 2가지 방법이 있다.

본 연구는 Nurse-Saul 함수인 식1에 후자를 이용하여 고강도콘크리트의 양생온도에 따른 강도발현성상과 적산온도와의 관계를 표준공시체를 통하여 비교·분석한 후 강도예측식으로 Logistic, Gompertz Curve를 이용하여 각 강도예측식의 계수를 결정하였다.

또한 적산온도 이론에 의한 강도예측식을 구조물에 적용하는데 있어 그 타당성을 검증하기 위해 80cm×100cm×20cm의 Slab를 제작하고, 임의 재령에 있어서 콘크리트강도를 예측하여 현장품질관리에 활용할 수 있는 기초자료를 제시하고자 한다.

\* 대전대학교 대학원 건축공학과

\*\* 충남대학교 대학원 건축공학과

\*\*\* 쌍용엔지니어링리프리트 팀장, 공박

\*\*\*\* 대전대학교 건축공학과 교수·공박

\*\*\*\*\* 충남대학교 건축공학과 교수·공박

Table 1. Experimental Plan

Series	W/B (%)	Curing temp. (°C)	Ages for compressive strength test (days)	Experimental Factors	
				Fresh Concrete	Hardened Concrete
Cylinder	30 35	30		<ul style="list-style-type: none"> <li>Mixing Temp.</li> <li>Air Content</li> <li>Unit Weight</li> <li>Slump</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Maturity</li> <li>compressive strength</li> <li>Core strength</li> </ul>
		20			
		10			
		5			
Slab	30	20			

$$M = \sum (\theta + 10) \Delta t \dots \dots \dots (1)$$

여기에서 M:적산온도(°D·D), θ:일평균온도(°C), Δt:시간간격(day), T<sub>0</sub>: -10(°C)이다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같다.

2.2 사용재료

본 실험에서 사용된 재료 및 그 특성은 Table 2, 3, 4, 5와 같다.

Table 2. Physical Properties of Cement

Kind of cement	Specific gravity	Brain's (cm <sup>3</sup> /g)	Setting Time (h-m)		Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		
			Initial	Final	3d.	7d.	28d.
O.P.C	3.15	3,200	4-20	6-40	200	285	375

Table 3. Physical Properties of SP agent

Type	Color	Main Component	Specific gravity
Liquid	Black	Synthetic Polymer	1.10

Table 4. Chemical & Physical Properties of Silica Fume

Main Component (%)							Brain's (cm <sup>3</sup> /g)	Specific gravity
H <sub>2</sub> O	SiO <sub>2</sub>	Na <sub>2</sub> O	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	CaO		
0.29	92.3	0.36	0.99	0.63	1.08	0.26	220,000	2.20

Table 5. Physical Properties of Aggregate

Kinds	Size (mm)	Specific gravity	F.M.	Percentage of absorption (%)	Unit Weight (kg/l)
Fine Agg.	5	2.55	2.72	1.21	1.58
Course Agg.	19	2.57	6.54	1.96	1.50

2.3 배합 및 비빔방법

본 실험에 관한 배합 및 비빔방법은 Table 6, Fig 1과 같다.

Table 6. Mixing Condition of concrete

Kinds	W/B (%)	S.P. (%)	S/A (%)	Unit Water (kg/m <sup>3</sup> )	Unit Weight (kg/m <sup>3</sup> )			
					C	SF	S	G
Cylinder	30	3.0	40	140	420	47	710	1073
	35	2.3	40	160	411	46	693	1047
Slab	30	3.0	40	140	420	47	710	1073

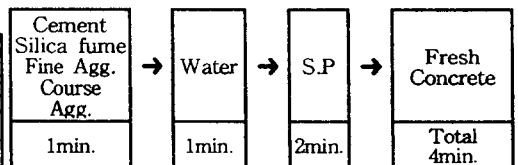


Fig 1. Mixing Method

## 2.4 실험방법

본 실험의 각종 실험방법은 KS 와 ASTM 규준에 준하여 행하였으며, 콘크리트는  $\varnothing 10 \times 20 \text{cm}$ 의 공시체를 제작하여 각 양생온도별로 유사한 적산온도가 되는 재령에서 KS F 2405의 규정에 따라 Shimadzu형 200ton 규격의 만능재료시험기를 사용하여 압축강도를 측정하였다.

## 3. Cylinder 실험결과와 분석 및 고찰

### 3.1 굳지않은 콘크리트

굳지 않은 콘크리트의 시험결과는 Table 7에 나타내었다. 슬럼프는 콘크리트의 비빔온도가 높을수록 높게 나타나는 경향을 보이고 있으며 공기량 및 단위중량은 비빔온도에 관계없이 비슷한 수준을 보여주고 있다.

Table 7. Test Result of Fresh Concrete

W/B (%)	Superplasticizer (%)	Curing temp. (°C)	Slump (cm)	Unit Weight (kg/ℓ)	Air Content (%wt)	Mixing Temperature (°C)
30	3	5	13	2.380	2.0	10
		10	15	2.364	2.9	12.5
		20	20	2.367	2.4	23
		30	19	2.363	2.9	27
35	2.3	5	12	2.350	2.2	10
		10	16	2.346	2.6	12.5
		20	22	2.357	1.9	23
		30	23	2.380	1.7	27

### 3.2 경화콘크리트의 압축강도 성장

경화콘크리트의 양생온도별 적산온도 및 압축강도 측정결과는 Table 8에 나타내었다. Fig 2는 양생온도 20°C를 기준으로 한 양생온도별 재령에 따른 강도비를 나타낸 그림이다. W/B 0.30, 0.35 모두 초기 재령인 경우 양생온도 30°C에서 높은 강도 발현 성상을 보여주고 있다. 또한 양생온도 5, 10°C의 경우 초기 재령에서 양생온도 20°C에 비해 낮은 강도 발현 수준을 보여주고 있으나 재령이 경과함에 따라 강도 증진율이 높게 되는 것을 알 수 있다.

Fig 3의 (a)는 재령에 따른 양생온도별 압축강도를 나타낸 것이고 (b)적산온도에 따른 양생온도별 압축강도를 나타낸 것이다. (a)의 그림은 동일한 재령이라도 콘크리트의 강도는 양생온도에 따라 큰 차이를 나타내고 있으나 적산온도에 따른 양생온도별 압축강도는 동일한 적산온도에서 유사한 강도수준을 보여주고 있어 적산온도 함수와 고강도콘크리트의 양생온도별 강도는 상관성이 있어 적산온도를 이용한 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

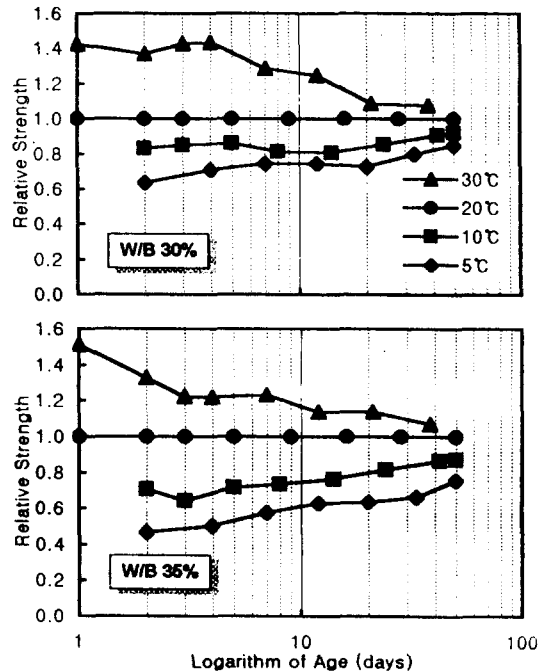


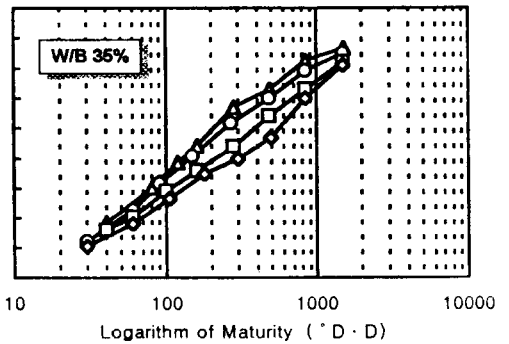
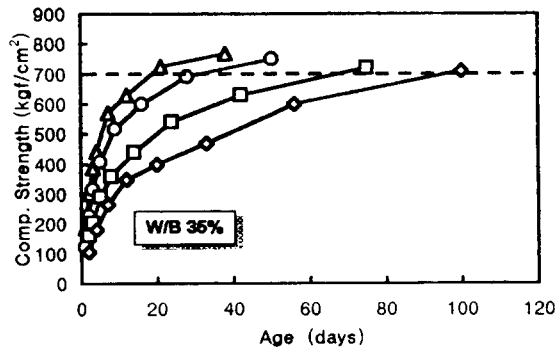
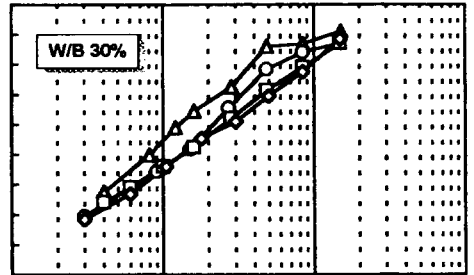
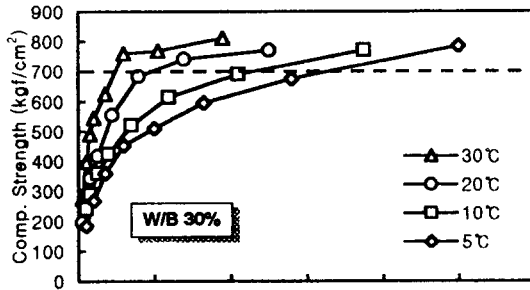
Fig 2. Relative Strength for the strength cured in 20°C

Table 8. Test Result of Hardened Concrete

30 (°C)				20 (°C)			
Age (days)	Maturity (°D · D)	Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		Age (days)	Maturity (°D · D)	Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		30%	35%			30%	35%
1	40	276	186	1	30	194	123
2	80	398	303	2	60	291	288
3	120	489	387	3	90	343	317
4	160	545	442	5	150	418	408
7	280	625	570	9	270	554	517
12	480	760	629	16	480	684	600
21	840	769	725	28	840	742	691
38	1520	811	767	50	1500	770	749

10 (°C)				5 (°C)			
Age (days)	Maturity (°D · D)	Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		Age (days)	Maturity (°D · D)	Compressive Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	
		30%	35%			30%	35%
2	40	242	161	2	30	185	106
3	60	291	204	4	60	270	182
5	100	359	292	7	105	361	267
8	160	423	360	12	180	454	348
14	280	520	440	20	300	511	400
24	480	615	540	33	495	596	468
42	840	690	630	56	840	675	600
75	1500	771	720	100	1500	785	710



(a) Relation between Comp. Strength and Age at different Curing Temperature

(b) Relation between Comp. Strength and Maturity at different Curing Temperature

Fig 3. Relation of Compressive Strength and Maturity by Logistic, Gompertz curve

### 3.3 적산온도-강도 함수 분석

鎌田에 의해 제시된 Logistic curve와 Gompertz curve를 이용하여 최적화 절차에 따라 얻어진 계수들을 Table 9에 나타내었다. Fig 4는 가로축을 적산온도, 세로축을 압축강도로 하여 각 예측식별로 하나의 그래프로 제시하고 이를 결정값과 함께 표시하였다. 그 결과 본 실험의 요인과 수준에 있어서는 Fig 4에서 보는 바와 같이 Logistic curve와 Gompertz curve의 결정계수 값이 0.9364~0.9474로 나타나 적산온도 이론에 의한 강도예측의 타당성은 입증되었고, curve에 따른 결정계수값의 차이는 나타나지 않았다.

Table 9. A constant calculated from various maturity equations

Logistic Curve					
$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log M + m)}$					
W/B 30%			W/B 35%		
$F_\infty$	k	m	$F_\infty$	k	m
977.8675	0.75275	3.91525	911.718	0.77881	4.29390

Gompertz Curve					
$F_c = F_\infty \cdot (\exp(-a(1/M)^b))$					
W/B 30%			W/B 35%		
$F_\infty$	a	b	$F_\infty$	a	b
1232.315	7.75025	0.40975	1153.90	8.32310	0.39860

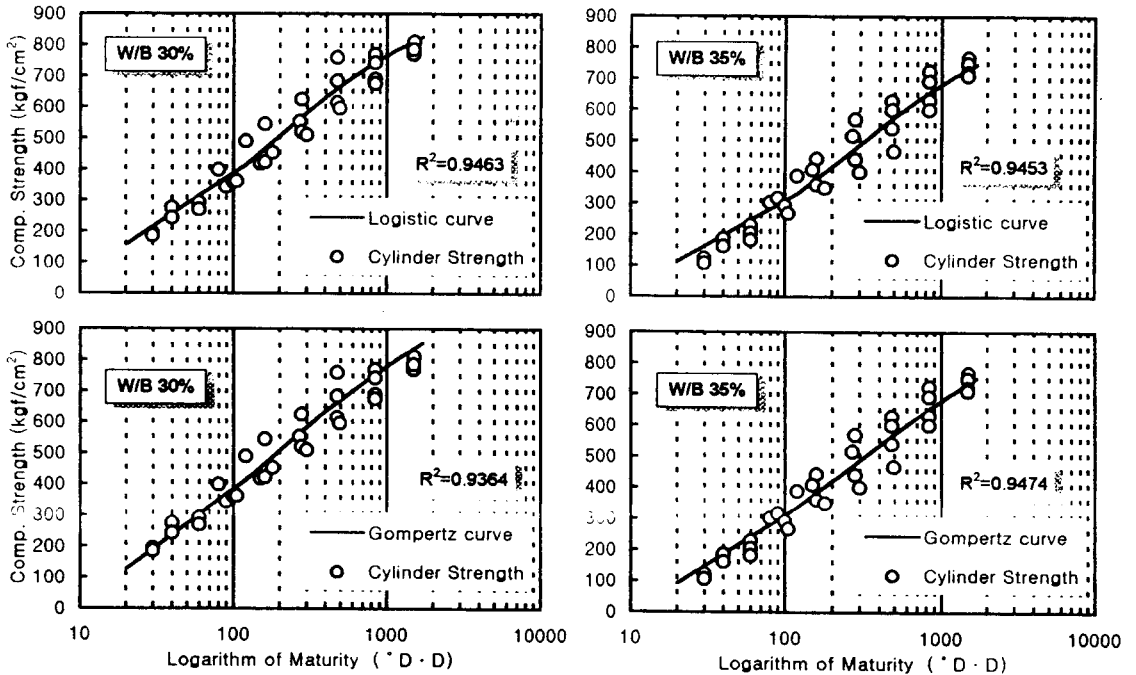


Fig 4. Relation of Compressive Strength and Maturity by Logistic, Gompertz curve

## 4. Slab 실험결과의 분석 및 고찰

### 4.1 개요

적산온도 이론을 구조물에 적용하는데 있어 그 타당성을 검증해 보기위해 Slab에 콘크리트를 타설하여 온도를 측정하고 적산온도를 계산하여, 표준공시체를 통해 Logistic curve와 Gompertz curve에

의해 얻어진 상수도출결과를 토대로 강도를 예측해 보았다.

#### 4.2 각 함수와 실험치와의 비교

Table 10 및 Fig 5는 표준공시체를 통해 강도예측식에 의해 얻어진 추정 값과 Core강도 값과 비교한 것인데 재령 28일 까지 Core강도 값이 예측 값보다 높은 경향을 보이고 있다. 이것은 초기양생온도 이력이 표준공시체보다 높았던 것에 기인한 것으로 사료된다. 또한 Logistic curve와 Gompertz curve의 예측율은 69%~96%로 나타나 실측강도값에 비해 일률적으로 낮게 평가해 안전측에 속하는 것으로 나타났다.

Table 10. Comparison Between Prediction Strength and Core Strength of Slab

Age (days)	Maturity · D · D	Prediction Strength (kgf/cm <sup>2</sup> )		Actual Strength (kgf/cm <sup>2</sup> ) Slab (Core Strength)
		Logistic curve	Gompertz curve	
1	29	181	176(83%)	212
2	77	280	286(82%)	350
3	109	351(69%)	358(70%)	512
5	169	447(75%)	450(76%)	595
9	289	557(89%)	553(88%)	626
16	499	654(96%)	646(95%)	680
28	860	731(96%)	726(95%)	745

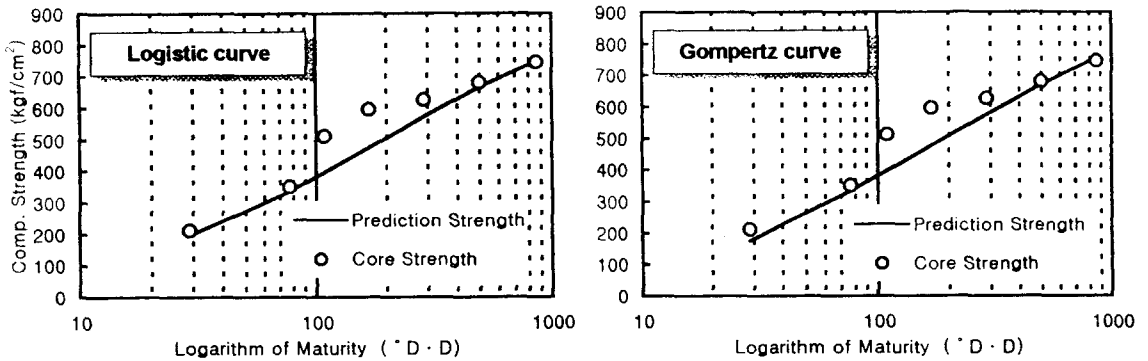


Fig 5. Comparison Between Prediction Strength and Core Strength by Logistic, Gompertz curve

#### 5. 결론

- 1) 적산온도에 따른 고강도콘크리트의 강도는 양생온도(5, 10, 20, 30℃)범위에서는 비슷한 강도수준을 보이고 있고, 적산온도를 이용한 강도관리가 고강도콘크리트에서도 적용가능한 것으로 사료되며, 기존의 예측식 모두 높은 강도예측 수준을 보여주고 있다.
- 2) 표준공시체를 통해 기존 압축강도 예측식의 상수도출결과를 이용하여 슬래브의 실측강도값과 비교·평가하여 본 결과 상관성이 높은 것으로 나타나 실제 현장에서 적산온도를 이용한 강도예측이 가능할 것으로 판단된다.

#### 参 考 文 献

- 1) 兼田外, 高温域を含む 各種養生温度での コンクリートの 強度増進性狀, セメント・コンクリート論文集, No. 45, pp.370~375. 1991
- 2) 金武漢外, モルタルおよびコンクリートの積算温度と壓縮強度發現に関する實驗的研究, 日本建築學會論文報告集, 第355, 昭和60年 9月
- 3) 남재현, 길배수. "적산온도에 의한 고강도콘크리트의 강도예측을 위한 예측모델의 적용성 검토", 대한건축학회 논문집, 13권, 7호, 1997 pp197~207