

# 적산온도에 의한 고유동콘크리트의 압축강도 예측

## Prediction of the Compressive Strength of High Flowing Concrete by Maturity

길 배수\* 한 장현\*\* 김 규용\*\*\* 권 영진\*\*\* 남 재현\*\*\*\* 김 무한\*\*\*\*  
Khil, Bae Su Han, Jang Hyun Kim, Gyu Yong Kwon, Young Jin Nam, Jae Hyun Kim, Moo Han

### Abstract

The aim of this study is to compare the development of compressive strength of high-flowing concrete with maturity and to investigate the applicability of strength prediction models of concrete. An experiment was attempted on the high-flowing concrete mixes using Ordinary portland cement, High belite cement, Blast furnace slag cement and replaced Fly-ash of 30% by weight of Ordinary portland cement, the water-binder ratios of mixes being 0.35 and 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-flowing concrete.

**Key-words** ; high-flowing concrete, maturity, strength prediction model

### 1. 서론

콘크리트의 강도 발현은 시멘트 수화 반응에 의하여 나타나는 것으로 수분이 충분히 존재하는 환경에서 콘크리트의 강도는 재령과 온도의 함수로써 나타낼 수가 있다. 따라서, 콘크리트의 강도와 재령·온도의 관계를 적절히 표현 할 수가 있으면 현장 콘크리트의 강도예측이 가능하고, 콘크리트의 강도발현에 대응한 시공을 행할 수가 있다. 즉 온도·시간의 함수인 적산온도에 의해 압축강도를 예측하면 거푸집 제거시기의 결정, 프리스트레스 부재에서의 긴장력 도입시기의 결정, 강도의 조기 판정에 의한 시공의 합리화 및 경제화를 가능하게 할 수 있다.

한편 최근 건설기술의 발달에 따라 콘크리트에 대한 요구성능이 다양화 되어지고 있다. 특히 굳지 않은 상태에서 유동성, 충전성 및 재료분리 저항성이 양호하고 경화후에는 고강도, 고내구성을 발휘하는 고유동콘크리트에 대한 인식이 높아지면서 그에 대한 제반물성에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있으나 그에 비해 강도발현특성에 대한 연구는 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 고유동콘크리트의 각 시멘트종류별 압축강도 발현 특성과 적산온도함수들과의 관계를 파악하고, 여러 가지 강도예측 모델과 비교·평가하여 최적의 강도예측 모델을 선정하여 고유동콘크리트의 강도관리에 대한 참고자료로 제시하고자 한다. 또한 분석방법은 SAS를 이용하였고 본 연구에 사용된 적산온도는 다음과 같이 구하였다.

$$M = \sum (\theta + A) \Delta t \quad \text{여기에서, ( M:적산온도(°D·D), } \theta \text{:일평균기온, } \Delta t \text{:시간, A:정수로서 } 10^\circ\text{C )}$$

- \* 정회원, 대전대학교 대학원 건축공학과
- \*\* 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과
- \*\*\* 정회원, 쌍용엔지니어링, 건설부분, 리프리트사업팀장, 공박
- \*\*\*\* 정회원, 대전대학교 건축공학과 교수, 공박
- \*\*\*\*\* 정회원, 충남대학교 건축공학과 교수, 공박

## 2..실험계획 및 실험방법

### 2.1 실험계획 및 조합

본 연구는 표 1과 같은 모든 조합으로 목표 슬럼프-플로우  $60 \pm 5$ cm의 고유동콘크리트를 제조하여 5, 10, 20, 30℃로 양생하였고, 압축강도 측정은 적산온도에 따라 각각의 비슷한 적산온도에서 측정하였다.

표 1. 실험계획 및 콘크리트 조합

시멘트 종류	양생 온도 (°C)	목 표 슬럼프-플로우 (cm)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m <sup>3</sup> )	절대용적 (ℓ/m <sup>3</sup> )				경화 콘크리트	
					C	FA	S	G	측정항목	측정적산온도(°D·D)
O.P.C	5 10 20 30	60±5	50	175	159	0	313	313	압축강도	
O.P.C+FA30					111	70	302	302		
H.B.C					156	0	314	314		
B.S.C					168	0	309	309		

O.P.C : Ordinary Portland Cement, H.B.C : High Belite Cement, B.S.C : Blast furnace Slage Cement

### 2.2 사용재료 및 비빔방법

#### 2.2.1 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트 및 사용재료의 물성은 표, 2, 3과 같다.

표2. 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	분말도 (cm <sup>2</sup> /g)	안정성	응결(h:m)		압축강도 (kgf/cm <sup>2</sup> )		
				초결	종결	3일	7일	28일
O.P.C	3.15	3,200	양 호	4:50	7:05	183	250	350
H.B.C	3.20	4,130	양 호	6:00	9:40	180	260	460
B.S.C	2.98	4,000	양 호	3:40	7:05			

표3. 사용재료

혼 화 제	플라이애시	비중: 2.31, 분말도: 3,228(cm <sup>2</sup> /g)
혼 화 제	SP-8N	성분 : Polycarboxylic Ether 비중 : 1.04~1.06
골재	잔 골재	비중: 2.54, 조립율: 2.60, 흡수율: 1.66
	굵은 골재	비중: 2.56, 조립율: 6.61, 흡수율: 1.88

#### 2.2.2 비빔방법

콘크리트의 비빔은 100ℓ 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 건비빔과 모르타르비빔을 행한 후, 골재를 투입하는 비빔방법으로 하였다. 먼저 모래, 시멘트, 혼화제를 혼합하여 30초간 건비빔을 한 후, 물을 투입하여 60초간 비빔하였으며, 고성능(AE)감수제를 첨가하여 60초간 비벼 고유동 모르타르를 만들었다. 그 후 조골재를 투입하여 60초간 비빔 후 목표 슬럼프-플로우  $60 \pm 5$ cm가 되도록 하여 비빔시간은 총 210초를 소요하였다.

### 2.3 실험방법

공시체는 KS F 2403의 규정에 따라 10 $\Phi$ ×20cm의 실린더형 강제물드를 사용하여 적산온도에 따라 3개씩 제작하고, 각 양생온도별로 소정의 적산온도까지 항온양생조에서 양생한 후 KS F 2405의 규정에 따라 Shimadzu형 200ton 규격의 만능재료시험기를 사용하여 강도를 측정하여 그 평균값을 구하였다.

### 3. 실험결과와 분석 및 고찰

#### 3.1 경화콘크리트의 성상

경화콘크리트의 양생온도별 적산온도 및 압축강도 측정결과는 표4와 같다.

표4. 경화콘크리트의 측정결과

5 (°C)					10 (°C)				
적산 온도 (°D·D)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )				적산 온도 (°D·D)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	시멘트종류					시멘트종류			
	O.P.C	OPC+FA30	H.B.C	B.S.C		O.P.C	OPC+FA30	H.B.C	B.S.C
30	151	68	48	90	40	146	55	51	85
60	277	163	123	202	60	211	97	89	121
105	304	210	153	234	120	325	177	157	211
180	385	254	198	302	160	364	217	195	253
300	457	338	234	371	300	448	275	226	327
495	468	377	285	430	480	504	315	248	378
840	533	424	319	469	840	545	378	316	444

20 (°C)					30 (°C)				
적산 온도 (°D·D)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )				적산 온도 (°D·D)	압축강도(kgf/cm <sup>2</sup> )			
	시멘트종류					시멘트종류			
	O.P.C	OPC+FA30	H.B.C	B.S.C		O.P.C	OPC+FA30	H.B.C	B.S.C
30	216	50	68	105	40	234	137	59	119
60	314	137	129	180	80	356	257	152	230
90	342	184	155	227	120	402	301	196	287
150	385	244	183	281	160	434	336	216	311
270	422	267	215	323	280	495	395	296	364
480	473	327	300	392	480	523	448	312	376
840	504	367	378	436	840	567	544	412	478

#### 3.2 시멘트종류별 압축강도 발현특성

그림 1은 시멘트종류별 재령 및 적산온도에 따른 강도증진의 경향을 나타낸 것이다. 그중 그림1의 (1), (2)는 재령의 균등치 및 대수치에 따른 압축강도 증진경향을 시멘트종류별 및 양생온도별로 구분하여 나타낸 것이다. 전반적으로 각 시멘트종류별 양생온도에 따른 강도발현 특성을 보면 양생온도 30°C의 경우 양생온도 5, 10, 20°C에 비해 높은 압축강도발현 특성을 나타내고 있고, 특히 플라이애시 30% 대체한 O.P.C+FA30의 경우에서 고유농콘크리트의 압축강도발현율이 크게 증가하는 것으로 나타났다.

그림 1의 (3)은 적산온도의 대수치에 따른 압축강도 증진경향을 적산온도 840°D·D까지 나타낸 것으로 전반적으로 적산온도가 증가함에 따라 강도증진이 이루어지고 있어 같은 배합조건에서 콘크리트가 동등한 적산온도에 이를 때 온도에 관계없이 내력적으로 같은 강도에 이르게 된다는 Saul이 제안한 적산온도 규칙에 맞는 것으로 나타났다. 그러나 시멘트종류 O.P.C+FA30의 양생온도 30°C 경우 동일한 적산온도에서 압축강도발현이 크게 증가하는 것으로 나타나 적산온도를 적용함에 있어 양생온도 영향을 고려해야 할 것으로 사료된다.

또한 각 시멘트종류에 따른 화학조성 및 혼화재료의 사용에 따라 동일 적산온도에서 고유농콘크리트의 강도발현이 다르게 나타나고 있어, 적산온도방법을 적용하기 위해선 각 시멘트종류별 강도발현 기준온도에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

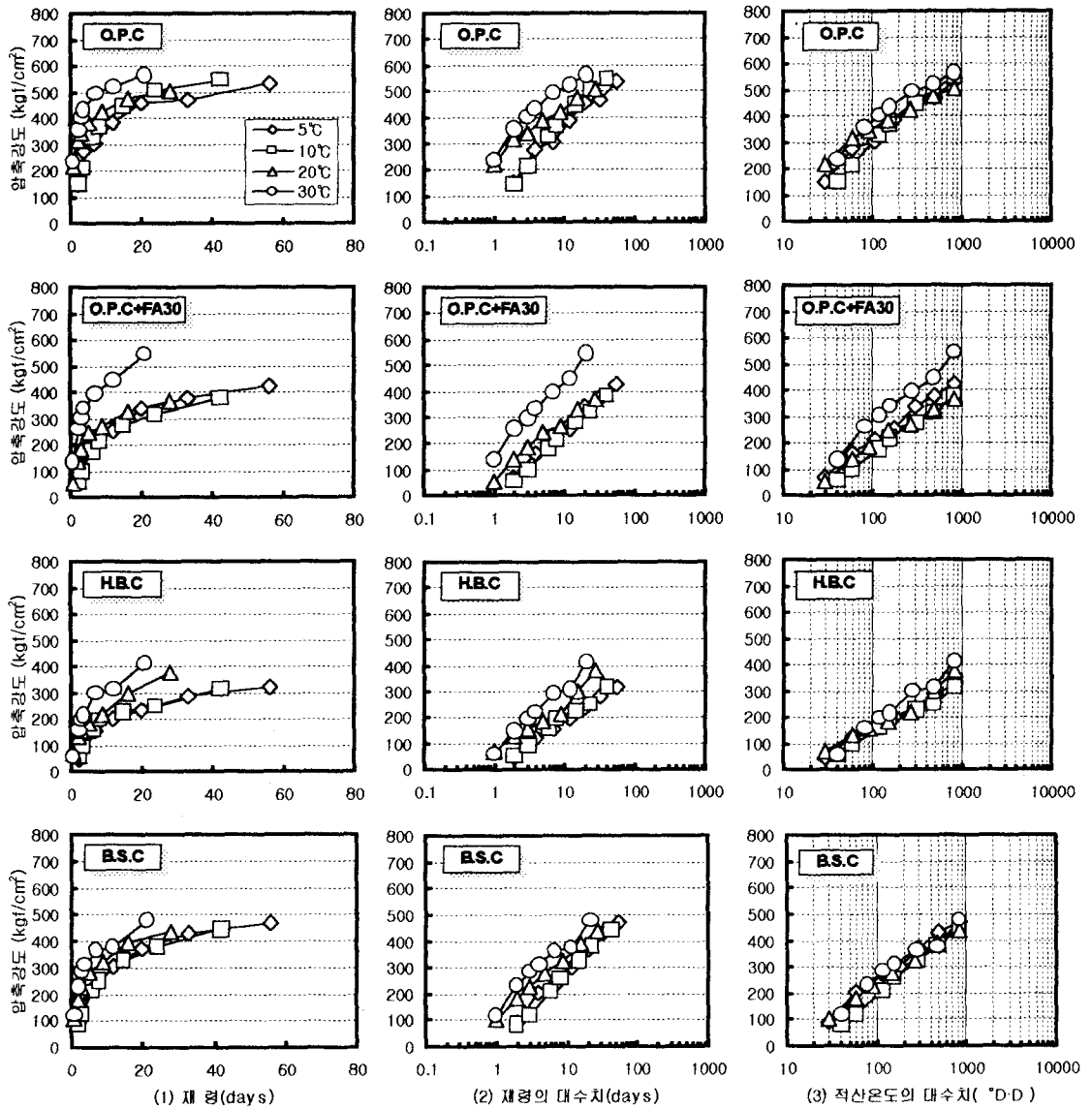


그림 1. 재령 및 적산온도에 따른 강도증진경향

표5. Plowman, Lew & Reichard, Logistic, Gompertz curve에 따른 계수도출 결과

Plowman curve	모델식		Lew & Reichard curve	모델식		
	$S = a + b \log(M)$			$S = \frac{k}{1 + D \times [\text{Log}(M - 16.7)]^b}$		
시멘트종류	a	b	시멘트종류	k	D	b
O.P.C	-184.4772	110.9291	O.P.C	1306	34.2173	-1.6720
OPC+FA30	-283.6407	104.6682	OPC+FA30	1936	196.4044	-2.1005
H.B.C	-223.3438	82.7583	H.B.C	1443	175.6500	-2.0772
B.S.C	-277.2215	109.9562	B.S.C	1932	136.5433	-1.9694

Logistic curve	모 델 식		
	$F_c = \frac{F_\infty}{1 + \exp(-K \log M + m)}$		
시멘트종류	F $\infty$	m	K
O.P.C	584	3.9663	0.9238
OPC+FA30	557	4.4565	0.8272
H.B.C	671	4.0353	0.6095
B.S.C	538	4.5128	0.996

Gompertz curve	모 델 식		
	$F_c = F_\infty \exp(-a(1/M)^b)$		
시멘트종류	F $\infty$	a	b
O.P.C	640	9.6769	0.5886
OPC+FA30	733	8.7714	0.4098
H.B.C	1144	6.1794	0.2436
B.S.C	652	10.1587	0.4934

### 3.3 강도예측모델에 의한 압축강도증진 성상의 검토

#### 3.3.1 적산온도와 강도함수의 분석

본 실험에서는 Plowman curve 이를 개선하여 이용한 Lew & Reichard curve와 鎌田등에 의한 Logistic, Gompertz curve를 회기분석을 통해 각 시멘트종류별 양생온도에 따른 계수를 산정한후 최적화절차에 따라 얻어진 인자들을 표시하면 표5와 같다.

#### 3.2.2 강도예측모델의 최적화

다음 그림2는 표5를 토대로 4가지 강도예측 모델에 따라 각 시멘트종류별로 하나의 그래프로 제시한 것이다.

#### 3.2.3 강도 예측모델의 상호비교

다음 그림3 및 표6은 각 시멘트종류별 실측치에 따른 Plowman, Lew & Reichard, Logistic, Gompertz curve에 의한 강도예측 및 결정계수 값을 나타낸 것이다.

본 실험 범위인 적산온도 840 $^{\circ}$ D · D까지는 4가지 강도예측 모델 모두 결정계수 값이 0.9680~0.9868로 나타나 고유동콘크리트의 압축강도 발현특성을 잘나타내주는 것으로 나타났다. 그러나 전체적으로 양생온도 30 $^{\circ}$ C의 추정율이 떨어지고, 특히 O.P.C+FA30의 경우 양생온도 30 $^{\circ}$ C의 추정율이 상당히 떨어지고 있어 양생온도의 한계온도로 고려해야할 것으로 사료된다.

Plowman, Lew & Reichard curve를 비교해보면 Lew & Reichard curve가 더높은 결정계수값을 나타내고 있고, S자를 그리는 성장곡선인 Logistic, Gompertz curve를 비교해보면 Gompertz curve가 Logistic curve에 비해 결정계수 값이 높게 나타나고 있어 본 실험범위에서 고유동콘크리트의 압축 강도예측에는 Gompertz, Lew & Reichard curve가 현장적용시 유효할것으로 판단된다.

## 4. 결론

시멘트종류 및 양생온도 5, 10, 20, 30 $^{\circ}$ C에 따라 적산온도 30~840 $^{\circ}$ D · D까지 고유동콘크리트를 4가지 강도예측 모델로 최적화 과정을 통해 비교 · 검토하여 본 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) O.P.C+FA30의 양생온도 30 $^{\circ}$ C경우를 제외하고는 전반적으로 동일한 적산온도에서 대개 비슷한 압축강도발현 특성을 보이고 있어 적산온도방법으로 고유동콘크리트의 강도관리가 가능하다고 사료된다.

(2) 본 실험 결과 적산온도와 압축강도와와의 관계를 이용하여 Plowman, Lew & Reichard, Logistic, Gompertz curve의 계수를 산정한후 최적화절차를 통해 각 시멘트종류별로 강도증진 해석식 및 도표를 제시할 수 있었다.

(3) 본 실험 결과 4가지 강도예측 모델 모두 결정계수 값이 0.9680~0.9868로 나타나 고유동콘크리트의 압축강도 발현특성을 잘나타내주는 것으로 나타났다. 특히 Gompertz, Lew & Reichard curve가 고유동콘크리트의 압축강도발현 특성을 잘나타내주고 있어 현장적용시 유효할것으로 판단된다

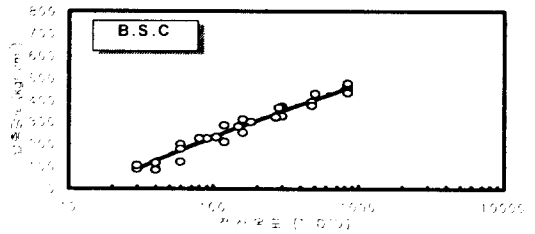
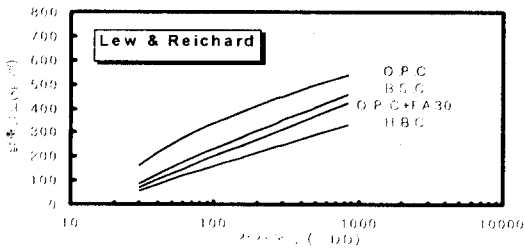
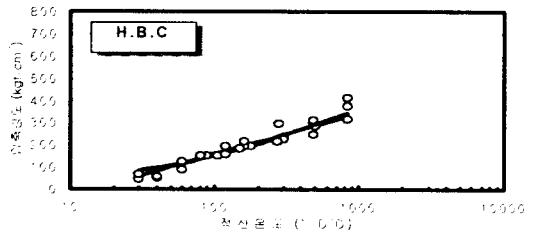
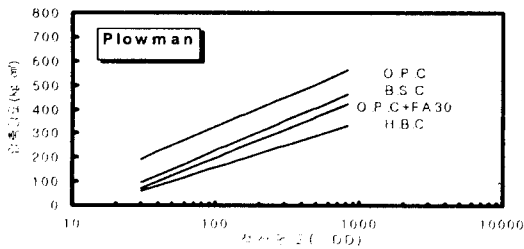
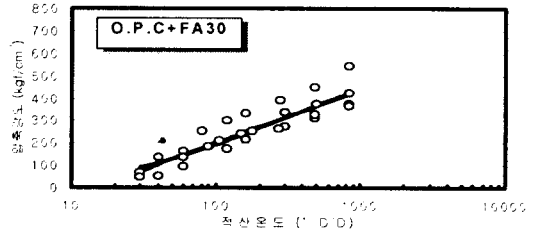
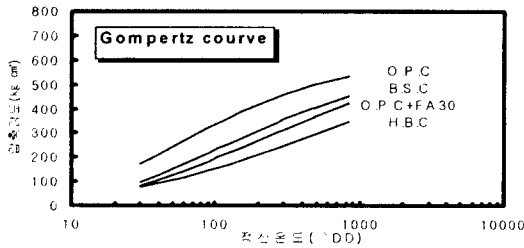
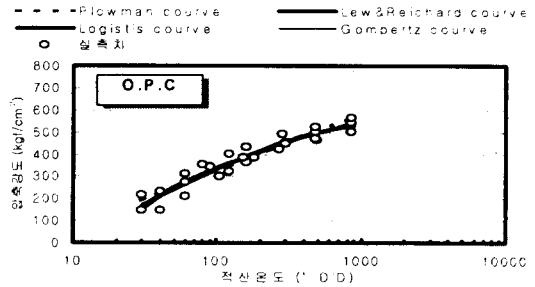
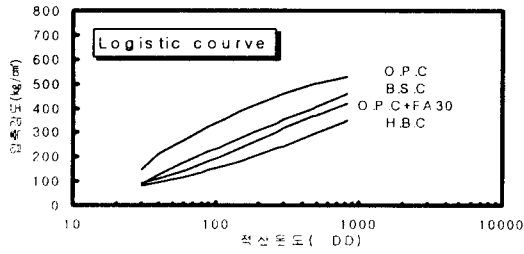


그림2. Plowman, Lew&Reichard, Logistic, Gompertz curve에 의한 강도증진해석

그림3. 각 결합재비별 실측치에 따른 Plowman, Lew&Reichard Logistic, Gompertz curve에 의한 강도증진해석

표6. 여러 가지 강도에측모델의 결정계수

시멘트종류	Plowman	Lew & Reichard	Logistic curve	Gompertz curve
	결정계수	결정계수	결정계수	결정계수
O.P.C	0.9715	0.9849	0.9849	0.9868
OPC+FA30	0.9749	0.9801	0.9718	0.9758
H.B.C	0.9719	0.9714	0.9680	0.9717
B.S.C	0.9832	0.9841	0.9789	0.9821

참고 문헌

- 1) 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.
- 2) Carino, Lew, "Early Age Temperature Effects on Concrete Strength Prediction by the Maturity Method" *ACI JOURNAL*, 1983.