

적산온도에 의한 고강도콘크리트의 압축강도 예측에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Compressive Strength Prediction of High-Strength Concrete by Maturity

길배수*
Kil, Bea Su

조민형*
Cho, Min Hyung

전진환**
Jeon, Jin Hwan

남재현***
Nam, Jae Hyun

Abstract

Prediction of the early-stage strength of concrete is useful for modernized concrete construction. An experiment was attempted on the high-strength of concrete produced by ordinary portland cement under the curing temperatures of 30, 20, 10°C and the various mixing proportions such as water-binder ratio of 0.30 0.35 and silica fume content of 10% by weight of cement. It is the aim of this study to investigate and compare the development of concrete strength with maturity and analyze the application of Maturity as a parameter to correlate and estimate test results of concrete. They are statistically analyzed to infer the correlation coefficient between the Maturity and the compressive strength of high-strength concrete.

1. 서 론

콘크리트의 강도 발현은 시멘트 수화반응에 의하여 나타나는 것으로 수분이 충분히 존재하는 환경에서 콘크리트 강도는 재령과 온도의 함수로써 나타낼 수가 있다. 따라서, 콘크리트의 강도와 온도-재령의 관계를 적절히 표현 할 수가 있으면 현장 콘크리트의 강도예측이 가능하고, 콘크리트의 강도발현에 대응한 시공을 행할 수가 있다.¹⁾ 즉, 온도-시간의 함수인 적산온도에 의해 압축강도를 예측하면 거푸집 제거시기의 결정, 프리스트레스 부재에서의 긴장력 도입시기 결정 및 강도의 조기 판정에 의한 시공의 합리화와 경제화를 이루어 낼 수 있다.²⁾

* 정회원, 대전대학교 대학원 건축공학과 석사과정

** 정회원, 대전대학교 대학원 건축공학과 박사과정

*** 정회원, 대전대학교 건축공학과 부교수, 공학박사

콘크리트의 압축강도와 온도-시간 함수의 관계에 관한 연구는 적산온도와 등가재령에 의한 방법이 있으며 온도-시간 함수를 이용한 다양한 강도증진 곡선식이 주로 보통콘크리트를 대상으로 한 연구가 국내의 연구자들에 의해서 발표되고 있다. 이에 본 연구는 국내·외 문헌을 바탕으로 보통콘크리트의 강도예측에 주로 사용되어온 기존의 강도증진 곡선식을 고강도콘크리트 영역(W/B:35% 이하)에 적용하여 강도 발현성상과 적산온도함수들과의 관계를 파악하고, 조기재령에 있어서 강도예측에 대한 적용성을 검토·비교함으로써 고강도콘크리트의 품질 및 시공관리에 대한 참고 자료로 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 실험방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같다.

표 1 실험계획

물 결합재비 (%)	실리카흙 (%)	양생 온도 (°C)	측 정 재 령 (일)														측 정 항 목			
			1	2	3	4	5	7	8	9	12	14	16	21	24	28	굳지않은 콘크리트	경화 콘크리트		
35	10	30	○	○	○	○	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	○	-	슬럼프/플로우 단위용적중량 공기량	압축강도
		20	○	○	○	-	○	-	-	○	-	-	○	-	-	○	-	○		
30		10	-	○	○	-	○	-	○	-	-	○	-	-	○	-	○	비빔온도	적산온도	

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 재료 및 그 특성은 각각 표 2, 3, 4, 5와 같다.

표 2 시멘트의 물리적 성질

종류	비중	분말도 (cm ² /g)	안정성	응결(h-m)		압축강도 (kg/cm ²)		
				초결	종결	3일	7일	28일
1종보통	3.15	3,200	양호	4-20	6-40	200	285	375

표 3 고성능감수제의 물리적 성질

외관	색상	성분	비중
액상	흑갈색	Synthetic Polymer	1.10

표 4 골재의 물리적 성질

종류	최대 입경 (mm)	비중	조립율 (FMI)	흡수율 (%)	실적율 (%)	단위용적중량 (kg/ℓ)
세골재	5	2.55	2.72	1.21	63.01	1.58
조골재	19	2.57	6.54	1.96	58	1.50

표 5 실리카흙의 물리 화학적 성질

주 성분 (%)								분말도 (cm ² /g)	비중
H ₂ O	SiO ₂	Na ₂ O	MgO	Al ₂ O ₃	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃		
0.29	92.36	0.36	0.99	0.63	1.08	0.26	0.73	220,000	2.2

2.3 콘크리트의 조합과 비빔방법

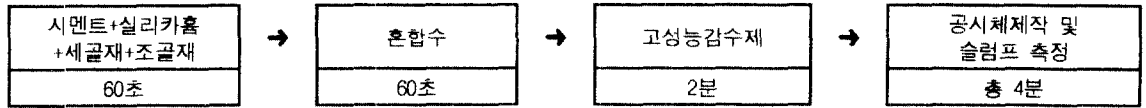
본 실험에 관한 조합표는 표 6과 같다.

표 6 콘크리트의 조합표

물 결합재비 (%)	실리카흙 (%)	최대 골재 크기 (mm)	목표 슬럼프 (cm)	고성능감수제 (%)	세골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	절대용적 (ℓ/m ³)				단위중량 (kg/m ³)			
							C	SF	S	G	C	SF	S	G
35	10	19	20±3	2.3	40	160	130	21	272	407	411	46	693	1047
3				140		133	21	278	418	420	47	710	1073	

비빔방법에 있어서는 고강도콘크리트 제조에 유리한 100 l 강제식 팬타입 믹서를 사용하였으며, 표 7과 같은 투입방법을 채택하여 총 소요시간을 4분으로 하였다.

표 7 비빔방법



2.4 시험방법

본 실험의 각종 실험방법은 KS F와 ASTM 기준을 따랐으며, 굳지 않은 콘크리트에서는 슬럼프, 공기량, 비빔온도를 측정하였고, 콘크리트의 내부온도측정은 Maturity meter에 연결된 Thermocouple을 사용하였다. 경화콘크리트에서는 $\phi 10 \times 20\text{cm}$ 의 공시체를 제작하여 10, 20, 30℃ 수중에서 양생한 후 각 적산온도별로 압축강도를 측정하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 굳지않은 콘크리트의 성상

표 8은 굳지않은 콘크리트의 시험결과를 나타낸 것으로 콘크리트의 비빔온도가 12.5℃인 경우 비빔 온도 23, 27℃에 비하여 슬럼프가 급격히 저하하고 있고, 또한 슬럼프가 증가함에 따라 공기량이 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 단위용적중량의 경우 양생온도별로 커다란 차이를 보이지 않으나 물결합재비 35%가 30%보다 약간 증가하는 경향이 있는데 이것은 공기량의 영향인 것으로 사료된다.

표 8 굳지않은 콘크리트의 시험결과

물결합재비 (%)	실리카흄 (%/C+S F)	최대골재크기 (mm)	목표 슬럼프 (cm)	세골재율 (%)	고성능감수제 (%)	양생온도 (℃)	슬럼프-플로우	단위중량 (kg/l)	공기량 (%/wt)	비빔온도 (℃)
							직 후 (cm)			
35	10	19	20±3	40	2.3	10	16 (20×18)	2.346	2.6	12.5
						20	22 (47×48)	2.357	1.9	23
						30	23 (55×56)	2.357	1.7	27
30	10	19	20±3	40	3	10	12 (10×9)	2.364	2.9	12.5
						20	20 (38×35)	2.367	2.4	23
						30	19 (30×32)	2.363	2.9	27

3.2 경화 콘크리트의 성상

경화콘크리트의 양생온도별 적산온도 및 압축강도 측정결과를 표 9와 같다.

3.2.1 물결합재비별 적산온도에 따른 압축강도 변화

물결합재비별 적산온도에 따른 고강도콘크리트의 압축강도 변화는 표 9 와 그림 1에서 알 수 있듯이 초기재령에서 양생온도 30, 20℃는 비슷한 수준의 압축강도 발현 특성을 보여주고 있으나 10℃의 경우는 30, 20℃에 비해 적산온도가 증가할수록 강도의 차이가 커지는 것을 알 수 있다. 이것은 초기에 높은 온도로 급격히 수화될 경우 그 이후의 수화 반응은 점차 지연되어 페이스트내의 수화생성물의 분포가 불균일하게 형성되어 장기강도에 불리하게 작용된다는 Verback과 Helmut의 연구²⁰⁾ 보고와

표 9 경화콘크리트의 양생온도별 적산온도 및 압축강도 측정결과

30 (°C)						20 (°C)						10 (°C)					
재령 (일)	적산온도 °C · h		압축강도 (kg/cm ²)		재령 (일)	적산온도 °C · h		압축강도 (kg/cm ²)		재령 (일)	적산온도 °C · h		압축강도 (kg/cm ²)				
	°DD	(35%)	(30%)	35(%)		30(%)	°DD	(35%)	30(%)		35(%)	30(%)	°DD	(35%)	30(%)	35(%)	30(%)
1	40	882	931	186	276	1	30	651	678	123	194	2	40	857	997	161	242
2	80	1613	1649	303	398	2	60	1302	1171	288	291	3	60	1336	1640	204	291
3	120	2473	2505	387	489	3	90	2076	1934	317	343	5	100	2379	2883	292	359
4	160	3650	3490	442	545	5	150	3325	3357	408	418	8	160	3604	4546	313	423
7	280	6597	6392	570	625	9	270	5935	5954	517	554	14	280	6294	7558	374	503
12	480	11893	11608	629	760	16	480	10098	10278	600	684	24	480	10040	10620	408	561
21	840	20533	20248	725	769	28	840	18738	18918	691	742	42	840	18680	18948	501	650

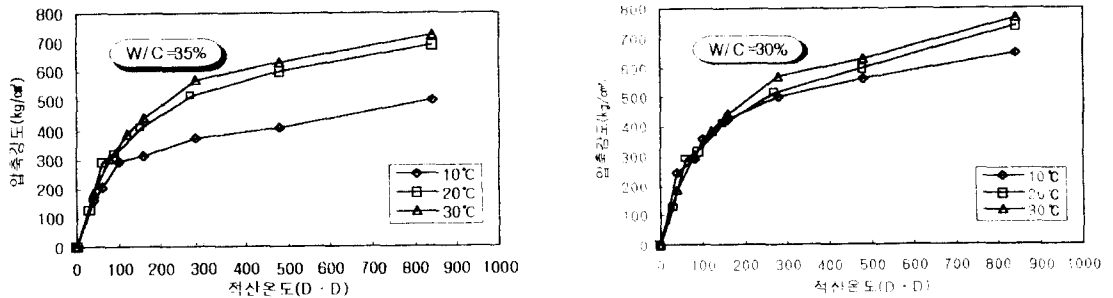


그림 1 물결합재비별 적산온도에 따른 압축강도의 증진

일치하지 않는 것으로 좀 더 깊은 연구가 필요하다고 사료된다.

3.2.2 양생온도별 적산온도에 따른 압축강도 변화

그림 2는 양생온도별 적산온도에 따른 압축강도의 증진을 나타낸 것으로 적산온도 480° DD 까지는 양생온도 30, 20, 10°C의 경우 적산온도가 증가할수록 물결합재비 35%와 30%의 강도차가 점점 커지는 경향을 보여주고 있으며 적산온도 840° DD에서는 강도차이가 적어지는 것으로 나타났다.

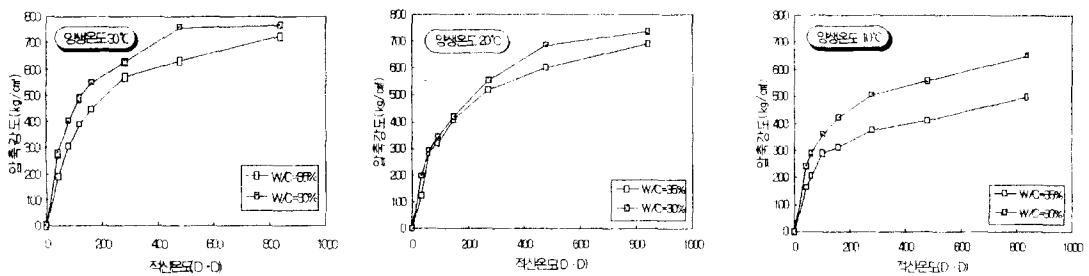


그림 2 양생온도별 적산온도에 따른 압축강도의 증진

3.2.3 적산온도에 따른 기존의 모델식과 압축강도의 관계

① 기존의 적산온도-강도 함수 분석

적산온도와 강도의 관계를 나타내는 함수는 오랜기간 동안 많은 학자들에 의해 다양한 형태로 제시되었다. 그 연구보고 중 Nurse-Saul 함수를 기초로 대수함수를 이용한 J. M. Plowman, H. S. Lew & T. W. Reichard식¹⁷⁾ 은 콘크리트의 내부온도를 측정하여 이용하였고, 鎌田 등에 의해 제안된 로지스틱(logistic)곡선과 고펜퍼쯔(gompertz)곡선¹⁸⁾에 의한 식은 일평균 기온을 이용하여 적산온도를

측정한 것으로 콘크리트의 압축강도를 추정하는데 사용되어지고 있다.

이에 본 실험에서는 기준온도(datum temperature)를 정하는데 있어서 널리 이용되는 -10°C 를 사용하였으며 표 10은 기준4가지식을 이용하여 계수도출 결과를 나타낸 것이다.

② 각 함수와 실험치와의 비교

그림 3은 물결합재비에 따른 양생온도별 압축강도 추정식을 각각 그래프로 나타내고 이를 실험치와 함께 표시하였다. 그 결과 강도추정식을 적용하는데 있어서 鎌田등에 의한 로지스틱 곡선과 고펜르쯔 곡선은 양생온도를 적산온도 값에 적용하였고, Plowman식과 Lew & Reichard식은 콘크리트의 내부온도를 측정하여 적산온도 값을 적용시켰을 경우 초기온도 이력이 서로 달랐지만 모두 높은 신뢰도 값을 나타내고 있어 본 실험 범위에서는 로지스틱 곡선과 고펜르쯔 곡선이 실용적인 것으로 나타났다.

표 10 각 곡선식에 따른 계수도출 결과

로지스틱 곡선	모 델 식 $F_c = \frac{F_{\infty}}{1 + \exp(-K \log M + m)}$	양생온도 (°C)	물결합재비 35%			물결합재비 30%		
			F_{∞}	K	m	F_{∞}	K	m
		10	669.1989	3.4996	0.6647	936.0644	3.2553	0.6011
		20	818.4375	4.5766	0.9170	1055.9167	4.0087	0.7321
		30	861.7291	4.8291	0.9635	888.5900	4.1548	0.9062

고펜르쯔 곡선	모 델 식 $F_c = F_{\infty} \exp(-a(1/M)^b)$	양생온도 (°C)	물결합재비 35%			물결합재비 30%		
			F_{∞}	a	b	F_{∞}	a	b
		10	830.0794	5.9158	0.3567	1295.0007	4.8463	0.2881
		20	983.3502	10.4935	0.4993	1633.6975	6.2579	0.3117
		30	1051.5904	11.6416	0.5134	1022.5131	9.8143	0.5455

Plowman 곡선	모 델 식 $S = a + b \log(M)$	양생온도 (°C)	물결합재비 35%		물결합재비 30%	
			a	b	a	b
		10	219.8059	106.8282	301.7218	140.8330
		20	422.6656	166.2177	418.5574	173.3490
		30	483.7380	181.9346	329.4865	168.5350

Lew & Reichard 곡선	모 델 식 $S = \frac{k}{1 + D \cdot [\text{Log}(M - 16.7)]^b}$ k는 the Limiting Strength.	양생온도 (°C)	물결합재비 35%			물결합재비 30%		
			k	D	b	k	D	b
		10	2050.9040	71.5609	1.6368	4878.0977	130.6565	1.5635
		20	2258.5396	99.3658	1.9637	2719.5576	92.9892	1.8734
		30	1696.1538	97.8057	2.2460	1325.0818	48.2226	2.2237

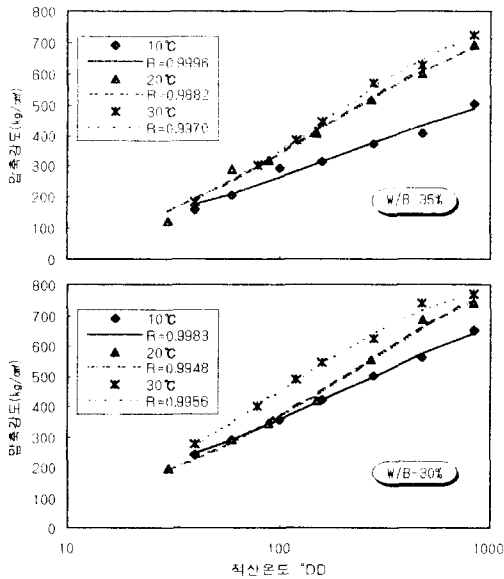
4. 결 론

보통콘크리트의 압축강도 예측에 주로 사용되어온 적산온도 방법을 기존의 강도추정식에 따라 고강도콘크리트에 적용하여 비교해 본 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

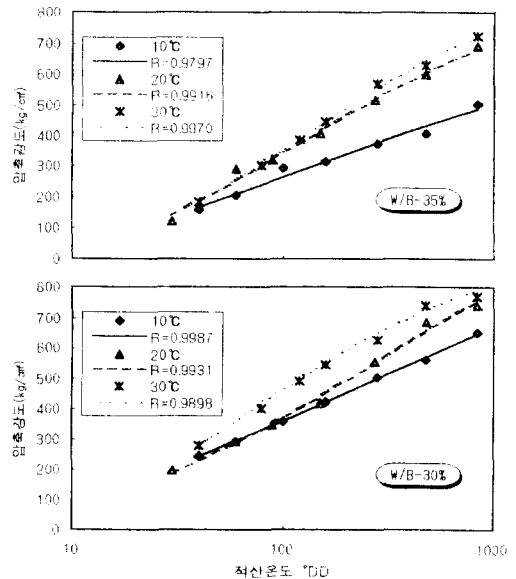
- 1) 조기재령범위의 동일한 적산온도에서 양생온도가 높을수록 높은 압축강도를 나타내고 있어 양생온도가 콘크리트의 압축강도 발현에 영향을 받는 것으로 나타났으며, 물결합재비에 따른 강도차이는 양생온도 30, 20, 10°C모두에서 적산온도가 증가할수록 적어지는 경향을 보여주고 있다.
- 2) 강도추정식을 적용하는데 있어서 鎌田식(로지스틱 곡선과 고펜르쯔 곡선)은 양생온도를 적산온도 값에 적용하였고 Plowman식과 Lew & Reichard식은 콘크리트의 내부온도를 측정하여 적

산온도값을 적용시켜 초기온도 이력이 서로 달랐지만 모두 높은 신뢰도 값을 나타내고 있어 본 실험 범위에서는 鎌田식이 실용적인 것으로 나타났다.

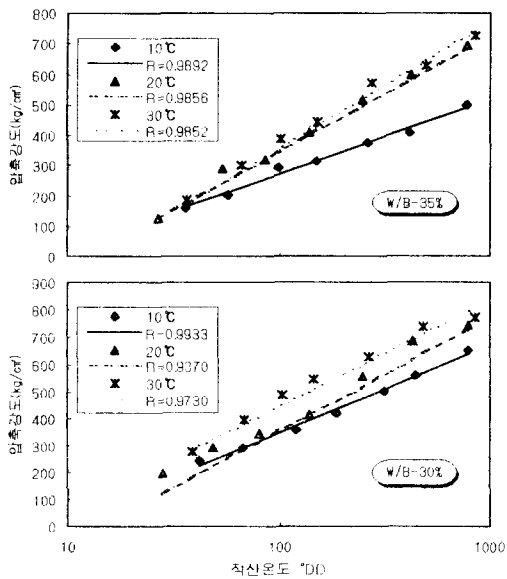
- 3) 고강도콘크리트의 초기재령 압축강도를 추정하기위해 여러 가지 강도추정곡선을 회귀분석을 통해 분석하여 본 결과 높은 추정값을 나타내므로 앞으로 다양한 배합 및 양생조건하에서 지속적인 연구 검토를 거쳐 실용화 시키는 것이 가능하다고 사료된다.



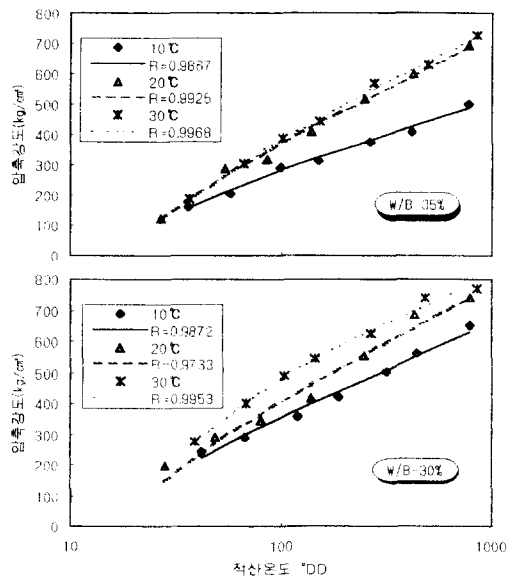
(a) 로지스틱곡선



(b) 곰페르쯔곡선



(c) Plowman



(d) Lew & Reichard

그림 3 물결합재비율 양생온도에 따른 로지스틱곡선, 곰페르쯔곡선, Plowman식, Lew & Reichard식에 의한 적산온도와 압축강도와의 관계

● 참고문헌 ●

1. J. M. Plowman, "Maturity and the strength of concrete", Mag. concr. Res. 8, No.22 March 1956, pp. 13-22
2. G. J. Verbeck and R. A. Helmuth, "Structures and physical properties of cement paste", Proc. 5th Int. Symp. on the Chemistry of Cement, Tokyo, Part III, 1968, pp.1-32
3. ASTM C 1074-87, Standard Practice for Estimating Concrete Strength by Maturity Method, pp.527~533.
4. 日本建築學會, 寒中콘크리트의 施工指針·同解説, 1989.
5. Carino N. J., Tank R. C., Maturity Function for Concrete Made with Various Cement and Admixtures, ACI Material Journal, Vol. 89, No. 2, 1992, pp.188~196
6. 권영진외, 미분말계 고유동콘크리트의 지온강도증진 특성, 日本建築學會, 고유동콘크리트의 응결성상 및 강도발현, 1994, pp.66~69.
7. 오병환, 이명규, 김광수, 전세진, 김의성, 김상섭, 최인혁 : 성숙도를 고려한 강도예측에 관한 실험적 연구, 한국콘크리트학회 가을 학술발표대회 논문집, 1994. 11, pp.77~82.