

적산온도 기법을 활용한 3성분계 콘크리트의 강도예측에 관한 연구

A Study on the Strength Prediction of Three-Component Concrete by Maturity Method

장 종 호* 김 영 덕* 길 배 수** 김 정 일*** 남 재 현**** 김 무 한*****

Jang, Jong Ho Kim, Young Duck Khil, Bae Su Kim, Jeong Il Nam, Jae Hyun Kim, Moo Han

ABSTRACT

The object of this study is to investigate the strength development properties and the strength prediction of three-component concrete using the fly ash and the blast-furnace slag by a maturity method.

The results were as follows.

The values of the activation energy on this experiment are calculated as 38.69, 36.47, 32.46, 30.99 KJ/mol in the W/B 60, 55, 50, 45%. And it is considered that the equivalent age can be used to predict strength of the three-component concrete in the optional age.

Also the strength of the three-component concrete can be predicted from the result of high correlation between predicted strength and measured strength.

1. 서 론

최근 콘크리트의 주요 구성재료인 시멘트 및 골재 등의 원재료값의 상승으로 인하여 레미콘의 제조 단가가 상승하고 있으나 실제 레미콘의 납품단가는 오히려 낮아지고 있어 레미콘 제조단가 절감이 절실히 요구되고 있는 상황이다. 이에 레미콘 업계에서는 레미콘의 제조단가 절감을 위하여 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말 등의 산업부산물을 시멘트 대체재로 사용하기 위한 기술개발이 이루어지고 있다¹⁾²⁾.

한편 임의재령에서의 콘크리트 강도를 예측하기 위한 기술적인 방법의 하나로 적산온도 기법이 이용³⁾되고 있으나 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 경우 적산온도 기법을 활용한 연구가 미비한 실정이다.

따라서 본 연구는 Freiesleben함수를 이용하여 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 양생온도에 따른 강도발현성상과 적산온도 방식에 의한 강도예측에 관하여 검토·분석함으로써 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 강도관리 및 품질관리를 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

* 정회원, 충남대학교 대학원 건축공학과

** 정회원, (주)트라이 포드, 대표이사·공박

*** 정회원, 대전대학교 정보통계학과, 교수·이박

**** 정회원, 대전대학교 건축공학과, 교수·공박

***** 정회원, 충남대학교 건축공학과, 교수·공박

표 1. 실험계획 및 배합

양생 온도 (°C)	W/B (%)	목 표 슬럼프 (cm)	FA ¹⁾ 치환율 (%)	BFS ²⁾ 치환율 (%)	S/a (%)	단 위 수 량 (kg/m ³)	단위중량 (kg/m ³)				측정항목	분석항목	
							시멘트	FA ¹⁾	BFS ²⁾	잔골재			굵은 골재
5 20 35	60	18±2	10	20	49.2	177	207	30	59	855	914	· 응결시간	· 활성화에너지
	55				48.3	178	227	32	65	826	916		
	50				47.6	178	249	36	71	801	913	· 압축강도	· 강도예측식
	45				46.5	180	280	40	80	763	908		

1) 플라이 애쉬, 2)고로슬래그 미분말

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 실험의 실험계획 및 배합은 표 1에서 보는 바와 같이 양생온도를 5, 20, 35°C 3수준에서 건설 생산현장에서 이용되는 배합을 수집·분석하여 물결합재비를 60, 55, 50, 45% 4수준, 플라이 애쉬 치환율 10%, 고로슬래그 미분말 치환율 20%로 설정하고 콘크리트를 제조하여 No.4 체로 굵은골재를 제거한 후 ASTM C 1074-93의 활성화에너지 결정방법⁴⁾에 준하여 활성화에너지 값을 구하였다. 또한 Freiesleben함수⁵⁾를 이용하여 양생온도별 콘크리트의 강도발현특성을 파악한 후 기존의 연구에서 보고된 강도예측식⁶⁾을 이용하여 플라이 애쉬 및 고로슬래그 미분말을 사용한 3성분계 콘크리트의 강도예측에 관하여 검토·분석하였다.

본 실험에서 사용한 등가재령 함수 및 강도예측식은 다음과 같다.

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

여기에서,

- Te : 등가재령
- Ta : 양생온도 (°K)
- Ts : 293(273+20 : °K)
- Ea : 활성화에너지(KJ/mol)
- R : 기체 상수(8.314 J/mol)

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

여기에서,

- S : 예측강도 (kgf/cm²)
- Su : 종국강도 (kgf/cm²)
- M : 적산온도
- M₀ : 종결시간까지의 적산온도
- θ, k : 회귀계수

2.2 사용재료 및 비빔방법

본 실험에 사용한 재료의 물리적 성질은 표 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 비중 3.15의 1종 보통 포틀랜드시멘트를 사용하였으며 혼화제는 비중 2.17의 플라이 애쉬와 비중 2.99의 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 또한 잔골재는 비중 2.56의 제염사, 굵은골재는 최대치수 20mm의 부순자갈을 사용하였으며 혼화제는 나프탈렌계 고성능감수제를 사용하였다.

콘크리트의 비빔은 100ℓ의 강제식 팬타입믹서를 이용하여 재료를 일괄투입한 후 건비빔을 60초간

실시하고, 물과 고성능감수제를 첨가하여 1분 30초간 비빔을 실시하였으며 총 비빔시간은 2분 30초 소요되었다.

2.3 활성화에너지 결정방법(ASTM C 1074-93)⁴⁾

- 1) 3수준의 온도조건에서 양생한 모르타르의 응결시간 및 압축강도를 측정한다. 여기서, 온도조건은 강도가 발현되는 기간동안 타설된 콘크리트에 예상되는 최저, 최고온도 및 그 중간온도로 하며, 압축강도는 각각의 시험체에 대해서 양생온도별 종결시간의 2, 4, 8, 16, 32, 64배에 해당되는 시간에 측정한다.
- 2) 3수준의 온도조건에 대하여 종결시간을 제외한 재령의 역수에 대한 강도의 역수 관계로부터 직선의 기울기와 절편을 구한다. 절편을 기울기로 나눈 값이 속도상수(K)이다.
- 3) 절대온도 역수에 대한 K값의 자연로그를 좌표에 나타내어 3점을 통하여 가장 적합한 직선을 결정하고 직선의 (-)기울기로부터 활성화에너지(Ea)를 구한다.
 직선의 (-)기울기 = 활성화에너지(Ea) / 기체상수(R)

3. 실험결과 및 고찰

3.1 활성화에너지 값 결정

표 3은 활성화에너지를 구하기 위한 모르타르 시험결과를 나타낸 것으로 활성화에너지(Ea)값은 물결합재비 60, 55, 50, 45%에 있어서 각각 38.69, 36.47, 32.46, 30.99KJ/mol로 물결합재비가 높을수록 높게 나타났다.

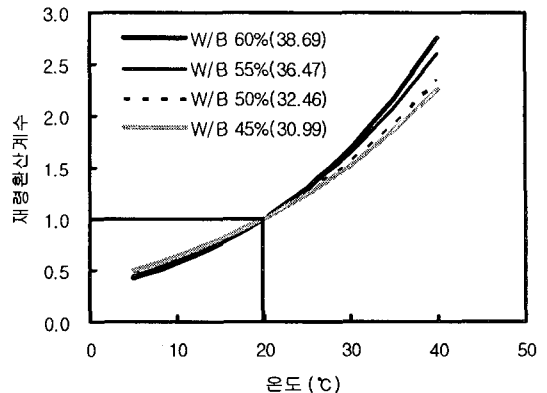


그림 1. 재령환산계수의 비교

3.2 재령환산계수의 비교

그림 1은 본 실험에서 구한 활성화에너지 값을 이용하여 재령환산계수로 나타낸 것으로 20°C 이

표 3. 모르타르 시험결과

W/B (%)	양생온도 (°C)	종결시간 (h : m)	압축강도* (kgf/cm ²)						속도상수 (K)	활성화에너지 (KJ/mol)
			×2	×4	×8	×16	×32	×64		
60	5	41 : 54	54	120	180	233	315	422	0.103	38.69
	20	16 : 09	58	139	162	294	378	393	0.269	
	35	10 : 30	75	157	232	305	324	407	0.553	
55	5	38 : 08	59	125	195	303	408	465	0.102	36.47
	20	17 : 10	66	139	242	364	405	429	0.232	
	35	09 : 55	77	163	258	356	395	426	0.500	
50	5	41 : 56	65	168	246	303	412	514	0.086	32.46
	20	16 : 36	68	176	286	386	442	464	0.196	
	35	10 : 36	72	156	294	374	458	496	0.350	
45	5	33 : 45	66	157	230	353	445	540	0.105	30.99
	20	15 : 58	75	198	305	370	436	494	0.231	
	35	09 : 57	82	186	337	392	475	526	0.400	

*종결시간 × 2, 4, 8, 16, 32, 64

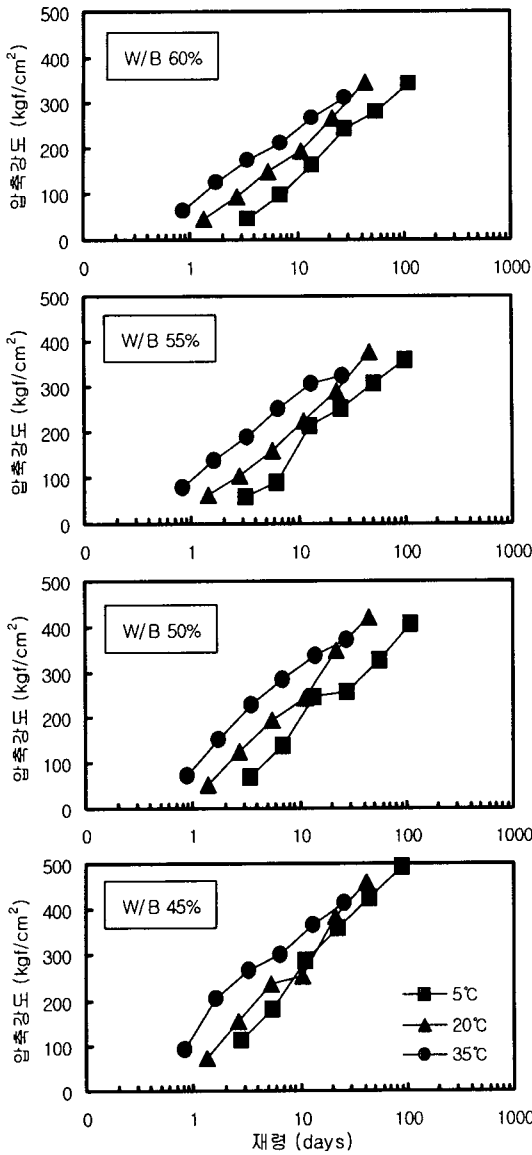


그림 2. 재령에 따른 압축강도 발현성상

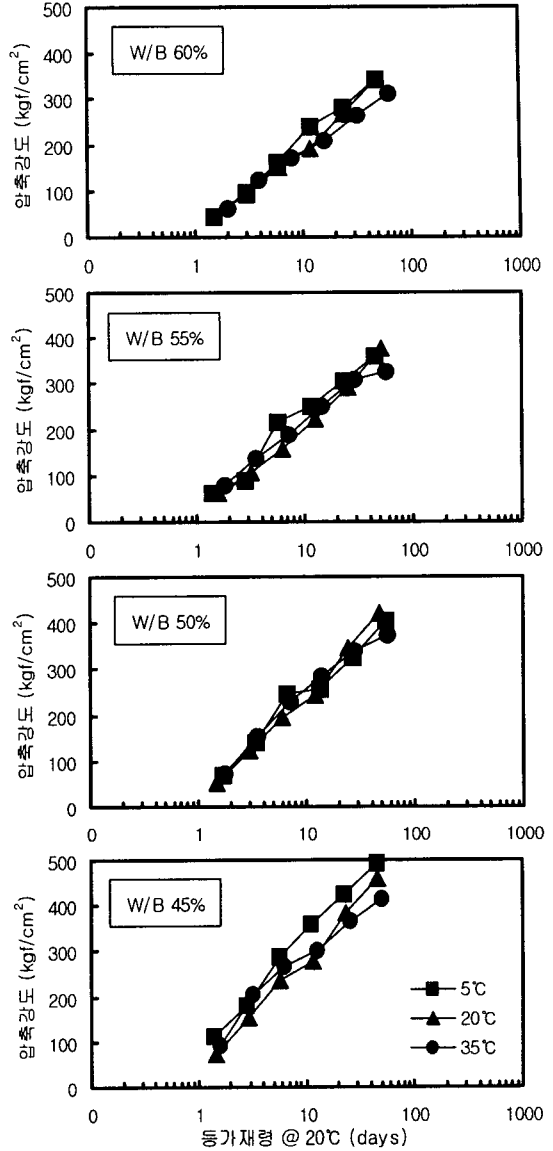


그림 3. 등가재령에 따른 압축강도 발현성상

상에서는 온도가 높아질수록 재령환산계수가 급격히 커지는 것을 알 수 있다. 또한 활성화에너지 값이 클수록 온도에 따른 재령환산계수는 상대적으로 크게 나타나고 있어 시간과 온도의 함수인 등가재령 값이 크게 될 것으로 사료된다.

3.3 강도-적산온도 관계

물결합재비별 양생온도에 따른 콘크리트의 압축강도 측정결과를 표 4에 나타내었다.

그림 2는 양생온도별 재령에 따른 압축강도를 나타낸 것으로 물결합재비 및 양생온도가 높을수록 높은

강도수준을 보이고 있으나 Freiesleben 함수를 이용하여 양생온도별 등가재령에 따른 강도발현 성상을 나타낸 그림 3은 그림 2에 비해 동일한 등가재령에서 양생온도에 관계없이 유사한 강도수준을 보이고 있어 임의재령에서 Freiesleben 함수를 이용하여 3성분계 콘크리트의 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

3.4 3성분계 콘크리트의 강도예측

표 5는 강도예측식의 물결함재비별 계수도출 결과를 나타낸 것으로 결정계수는 물결함재비 60, 55, 50, 45%에 있어서 각각 0.9940, 0.9937, 0.9961, 0.9914로 나타났다.

그림 4는 실측강도와 예측식에 의한 예측강도의 관계를 나타낸 것으로 예측강도와 실측강도의 상관성이 높게 나타나 이를 이용한 3성분계 콘크리트의 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

표 4. 콘크리트 압축강도 측정결과

W/B (%)	양생온도 (°C)	압축강도* (kgf/cm ²)					
		×2	×4	×8	×16	×32	×64
60	5	46	96	161	240	281	342
	20	46	92	149	192	266	343
	35	60	124	172	210	264	310
55	5	60	90	215	251	306	359
	20	61	105	158	223	291	375
	35	79	138	189	251	308	325
50	5	70	140	245	256	327	405
	20	52	125	195	242	346	420
	35	73	153	230	285	338	372
45	5	112	181	288	360	426	492
	20	70	156	235	276	385	457
	35	94	206	266	303	367	415

*종결시간 × 2, 4, 8, 16, 32, 64

표 5. 계수도출 결과

W/B (%)	Su	θ	k	Mo	SSE ^{a)}	R ²	F값
60	450	6.1020	0.6975	0.9300	4831	0.9940	581.34***
55	432	5.8759	0.8193	0.5597	6155	0.9937	555.25***
50	636	4.9346	0.5312	1.3148	4824	0.9961	901.60***
45	674	3.8096	0.5314	1.0842	14759	0.9914	404.33***

a) SSE : Sum of Square Error

***는 P값이 0.001 이하를 의미

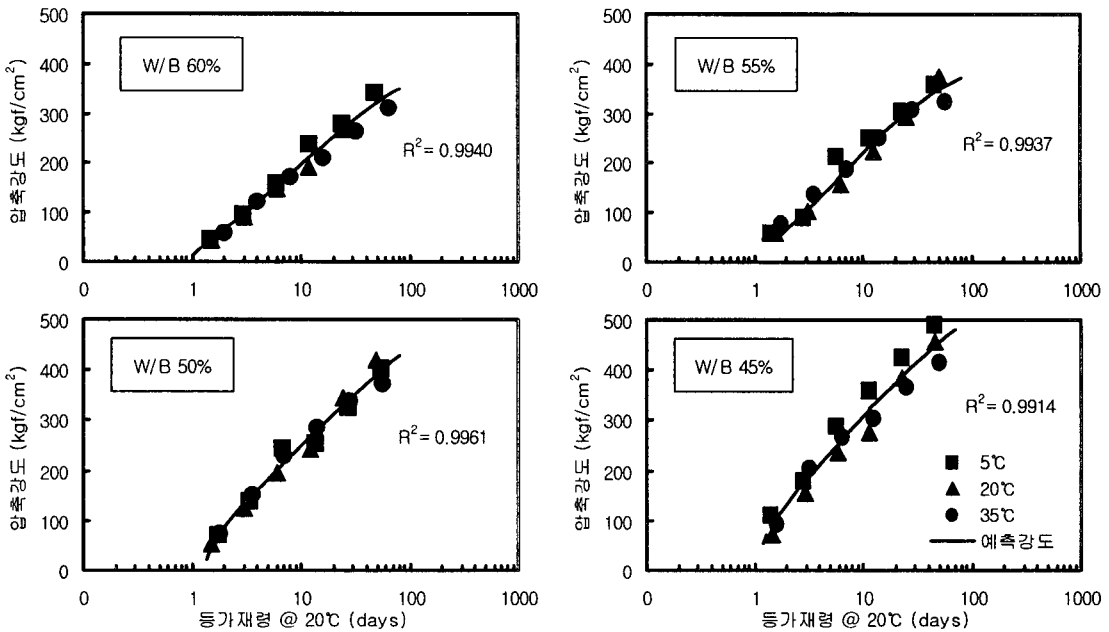


그림 4. 실측강도와 강도예측식에 의한 예측강도의 관계

4. 결론

적산온도 기법을 활용한 3성분계 콘크리트의 강도예측에 관하여 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 본 실험에서 구한 활성화에너지(Ea) 값은 물결합재비 60, 55, 50, 45%에 있어서 각각 38.69, 36.47, 32.46, 30.99KJ/mol로 나타났다.
- (2) 동일한 등가재령에서 양생온도에 관계없이 유사한 강도수준을 보이고 있어 임의재령에서 Freiesleben 함수를 이용하여 3성분계 콘크리트의 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.
- (3) 적산온도 기법을 활용한 3성분계 콘크리트의 강도예측에 있어서 예측강도와 실측강도의 상관성이 높게 나타나 이를 이용한 3성분계 콘크리트의 강도예측이 가능할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 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]

참고문헌

1. 김무한 외, “플라이 애쉬를 대량 사용한 콘크리트의 배합설계를 위한 기초적 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 13권 1호, 2001. 5, pp.641~646
2. 최성우 외, “동결기 초기양생방법 및 혼화제 종류에 따른 콘크리트의 강도발현특성에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집, 제 14권 1호, 2002. 5, pp.183~188.
3. 김무한 외, “적산온도방식에 의한 콘크리트의 압축강도 증진해석에 관한 실험적 연구”, 대한건축학회 논문집 구조계 14권 12호, 1998. 12, pp.103~110.
4. “Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method”, ASTM C 1074-93.
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. 김무한 외, “적산온도 방법에 의한 강도예측모델 개발 및 건설생산현장에서의 강도관리에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 논문집, Vol. 15, No. 1, 2003. 2, pp.87~94.