

시멘트종류에 따른 압축강도와 등가재령 관계에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Relation of Compressive Strength and the Equivalent Age according to the Kind of Cement

○ 나 철 성*	장 종 호**	길 배 수***	김 정 일****	남 재 현****	김 무 한*****
Na, Chul-Sung	Jang, Jong-Ho	Khil, Bae-Su	Kim, Jung-Il	Nam, Jae-Hyun	Kim, Moo-Han

Abstract

There is no study that application of the maturity using H.B.C and H.S.C. Also activation energy has different values according to the cement, admixture and water-cement ratio. Therefore to make accurate explanation for the effect of temperature on concrete strength development properties, it is necessary that activation energy value according to the kind of cement is reviewed.

This study compares and estimates equivalent age using activation energy value obtained by this experiment and Freiesleben activation energy value with compressive strength of concrete.

As the result of this study, activation energy value obtained by this study has more accurate explanation of temperature's influence on concrete strength development than Freiesleben activation energy value.

키워드 : 시멘트종류, 활성화에너지, 등가재령, 강도예측

Keywords : Kind of Cement, Activation Energy, Equivalent Age, Strength Prediction

1. 서 론

최근 콘크리트구조물의 대형화고기능화초고층화에 따라 대규모의 Mass시공 및 급속시공이 요구되어 저열·조강포틀랜드시멘트의 사용량이 급증하고 있다. 저열포틀랜드시멘트는 저발열화가 가능하고 장기강도증진 및 내구성이 우수하며, 조강포틀랜드시멘트는 조강특성은 물론 강도 및 내구성이 매우 우수하다.

한편 임의 재령에서 콘크리트 강도를 예측하기 위한 기술적인 방법의 하나로 적산온도 기법이 활용되고 있으나 저열·조강포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트의 적산온도기법 활용에 대한 연구는 전무한 실정이다. 또한 기존 연구의 경우 콘크리트 강도발현에 관한 온도의 영향을 설명하기 위해 활성화에너지 값이 사용되고 있으나 활성화에너지 값은 시멘트, 혼화재, 물시멘트비 등에 따라 다르게 나타나기 때문에 콘크리트 강도발현에 관한 온도의 영향을 정확하게 설명하기 위해서는 시멘트종류에 따른 활성화에너지 값에 관한 검토가 필요하다.¹⁾²⁾

따라서 본 연구에서는 실험을 통해 결정된 시멘트종류에 따른 활성화에너지 및 Freiesleben의 활성화에너지 값을 이용한 등가재령과 보통·저열·조강포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트 압축강도의 관계를 비교·평가함으로써 임의재령에서 보다 정확한 시멘트종류에 따른 콘크리트의 강도예측을 위한 기초 자료를 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 1에서 보는 바와 같이 건설현장에서 이용되는 배합을 수집·분석하여 시멘트종류를 보통, 저열, 조강포틀랜드시멘트의 3수준, 양생온도를 5, 20, 35℃ 3수준, 물결합재비를 45%로 설정하고, 보통·저열·조강포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트를 제조하여 No.4 체로 굵은골재를 제거한 후 ASTM C 1074-93³⁾에 준하여 활성화에너지를 구하였다. 또한 본 연구에서 결정된 활성화에너지 및 Freiesleben의 활성화에너지 값을 이용하여 등가재령과 콘크리트 압축강도의 관계를 비교·평가하였다.

본 연구에서 사용한 등가재령함수는 다음과 같다.

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

* 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 석사과정
 ** 정희원, 충남대학교 대학원 건축공학과, 박사과정
 *** 정희원, (주)트라이 포드, 대표이사·공박
 **** 정희원, 대전대학교 건축공학과, 교수·공박
 ***** 정희원, 충남대학교 건축공학과, 교수·공박

표 1. 실험계획 및 배합

양생온도 (°C)	시멘트 종류	물결합재비 (%)	목표 슬럼프 (cm)	잔골재율 (%)	단위수량 (kg/m ³)	절대용적(l/m ³)			단위중량 (kg/m ³)			측정항목
						시멘트	잔골재	굵은골재	시멘트	잔골재	굵은골재	
5	O.P.C1)	45	15±2	46	175	123	302	355	389	773	940	• 응결시간 (h : m) • 압축강도 (MPa) • 활성화에너지 (KJ/mol)
20	H.B.C2)					121	303	356	389	776	943	
35	H.S.C3)					125	301	354	389	771	937	

1) 보통포틀랜드시멘트, 2) 저열포틀랜드시멘트, 3) 조강포틀랜드시멘트

표 2. 사용재료

구분	사용재료	
시멘트	1종 보통포틀랜드시멘트	비중 : 3.15, 분말도 : 3,200cm ² /g
	3종 조강포틀랜드시멘트	비중 : 3.11 분말도 : 3430cm ² /g
	4종 저열포틀랜드시멘트	비중 : 3.22 분말도 : 3,500cm ² /g
골재	잔골재	계염사, 최대치수 : 5mm 비중 : 2.56, 조립율 : 2.90
	굵은골재	부순자갈, 최대치수 : 20mm 비중 : 2.65, 조립율 : 6.50
혼화제	나프탈렌계 고성능감수제	

여기에서,

Te : 표준온도재령과 같은 재령

Ta : 양생온도(K),

Ts : 293(273+20 : K)

Ea : 활성화에너지(KJ/mol),

T ≥ 20°C : Ea=33.5KJ/mol

T < 20°C : Ea=33.5+1.47(20-T)KJ/mol

R : 기체상수(8.314J/mol)

2.2 사용재료 및 비빔방법

본 연구에 사용한 재료의 물리적 성질은 표 2에 나타난 바와 같이 비중 3.15의 1종 보통포틀랜드시멘트, 비중 3.11의 3종 조강포틀랜드시멘트, 비중 3.22의 4종 저열포틀랜드시멘트를 사용하였다. 또한 잔골재는 비중 2.56의 계염사, 굵은골재는 최대치수 20mm의 부순자갈을 사용하였다.

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

2.3 활성화에너지의 결정방법(ASTM C 1074-93)

1) 3수준의 온도조건에서 양생한 모르타의 응결시간 및 압축강도를 측정한다. 여기서 온도조건은 강도가 발현되는 기간동안 타설된 콘크리트에 예상되는 최저, 최고온도 및 그 중간

온도로 하며, 종결도달시간 2배의 재령에서 압축강도를 측정 후 이전 측정재령의 2배 간격으로 다음 측정재령을 설정한다.

2) 재령의 역수에 대한 강도의 역수관계로부터 직선의 기울기와 절편을 구한다. 여기서 속도상수(K)는 절편/기울기이다.

3) 절대온도의 역수에 대한 K값의 자연로그를 좌표에 나타냈을 때 직선의 (-)기울기는 활성화에너지(Ea)/기체상수(R)이다.

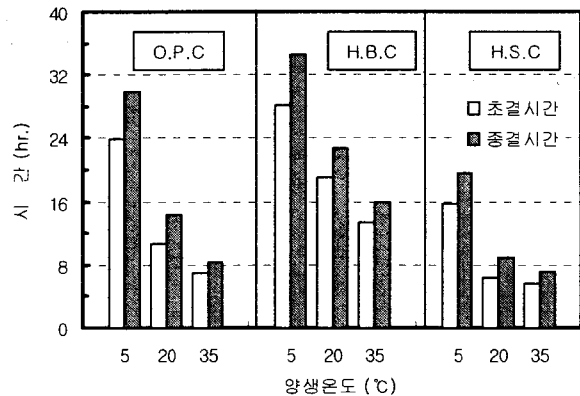


그림 1. 양생온도에 따른 초결 및 종결도달시간

3. 실험결과의 분석 및 고찰

3.1 초결 및 종결시간

그림 1은 시멘트 종류별 양생온도에 따른 초결 및 종결시간을 나타낸 것으로 초결 및 종결시간은 H.S.C→O.P.C→H.B.C의 순서로 빠르게 나타났으며, 동일 시멘트종류에서 양생온도가 높을수록 초결 및 종결시간이 단축되는 것을 알 수 있다.

3.2 활성화에너지 값 결정

표 3은 활성화에너지 값을 구하기 위한 모르타 시험결과를 나타낸 것으로 속도상수(K)는 동일 시멘트종류에서 양생온도가 높을수록 높은 값을 나타냈으며, 활성화에너지(Ea) 값은 보통·저열·조강포틀랜드시멘트에서 각각 38.53, 44.24, 34.00KJ/mol로 나타났다.

표 3. 모르터 시험결과

시멘트종류	양생 온도 (°C)	종결 시간 (h : m)	압축 강도 (MPa)						속도상수 (K)	활성화에너지 (KJ/mol)
			×2	×4	×8	×16	×32	×64		
O.P.C	5	29:52	7.3	13	22	33	42	50	0.169	38.53
	20	14:21	8.8	16	24	35	43	49	0.433	
	35	8:24	12	24	35	40	44	48	0.855	
H.B.C	5	34:31	3.0	7.3	13	22	36	49	0.055	44.24
	20	22:47	5.2	12	19	31	43	54	0.129	
	35	15:53	8.3	15	22	35	44	53	0.354	
H.S.C	5	19:41	9.8	17	31	44	49	55	0.283	34.00
	20	8:53	13	25	39	42	51	58	0.790	
	35	7:01	16	33	41	48	54	59	1.181	

※종결시간 ×2, 4, 8, 16, 32, 64

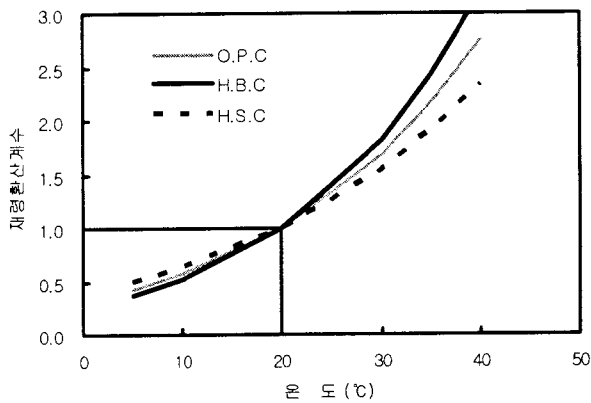


그림 2. 재령환산계수

3.3 재령환산계수의 비교

그림 2는 본 실험에서 구한 시멘트종류에 따른 활성화에너지 값을 이용하여 재령환산계수로 나타낸 것으로 20°C 이상에서는 온도가 높아질수록 급격히 커지는 것을 알 수 있으며, 활성화에너지 값이 클수록 온도에 따른 재령환산계수는 상대적으로 크게 나타나고 있어 시간과 온도의 함수인 등가재령 값이 크게 될 것으로 사료된다.

3.4 강도-적산온도 관계

그림 3은 양생온도별 재령에 따른 압축강도 변화를 나타낸 것으로 초기강도발현수준은 H.S.C > O.P.C > H.B.C로 나타났다

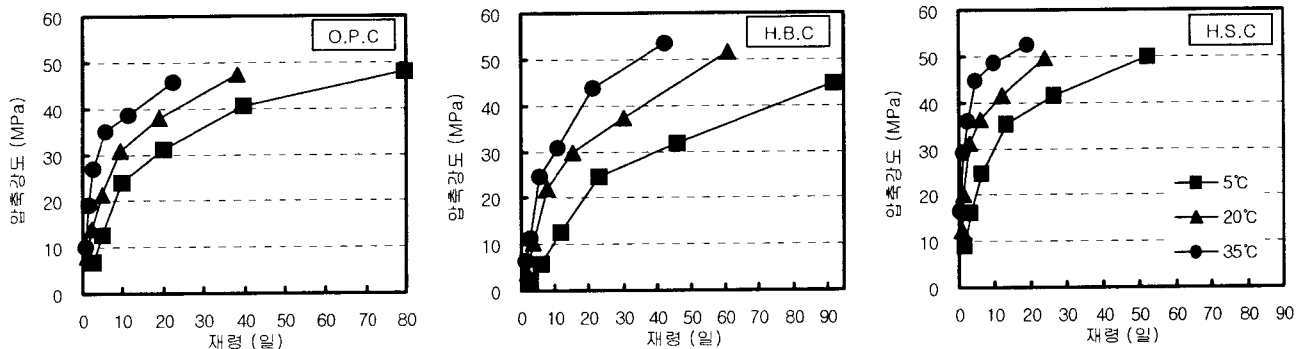


그림 3. 재령에 따른 압축강도의 변화

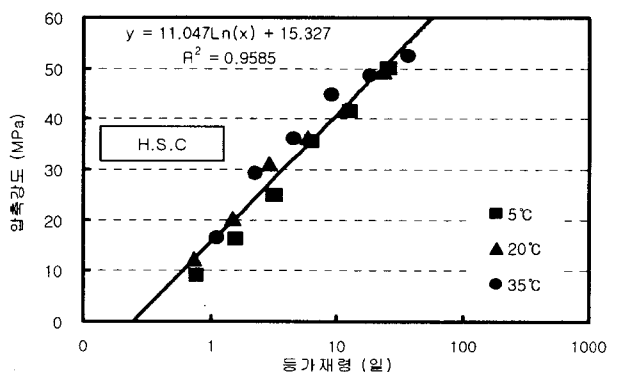
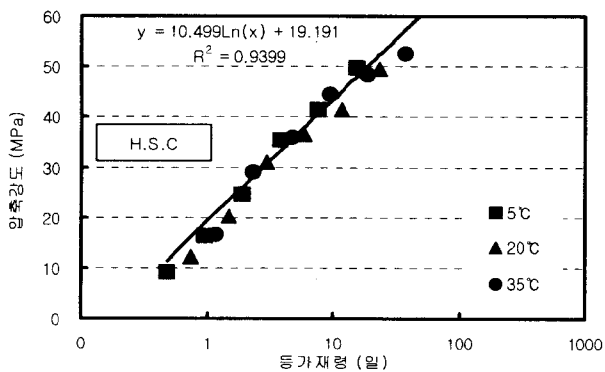
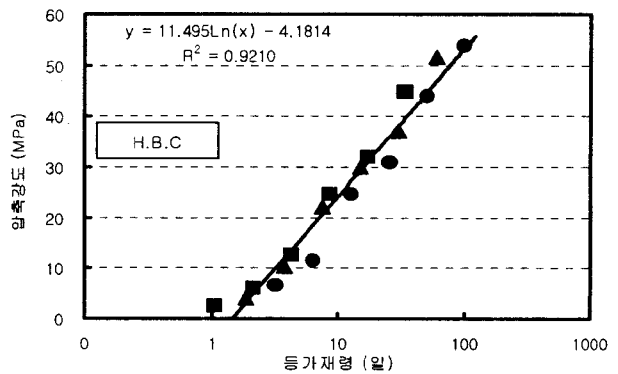
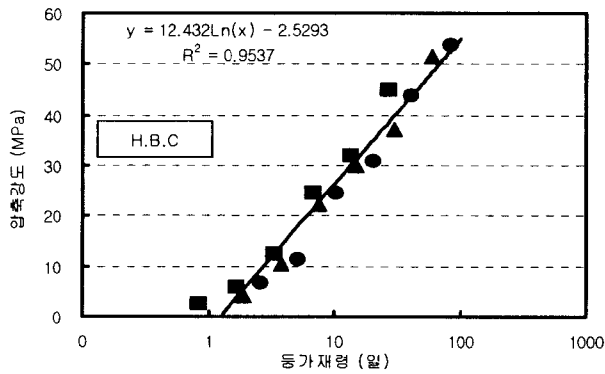
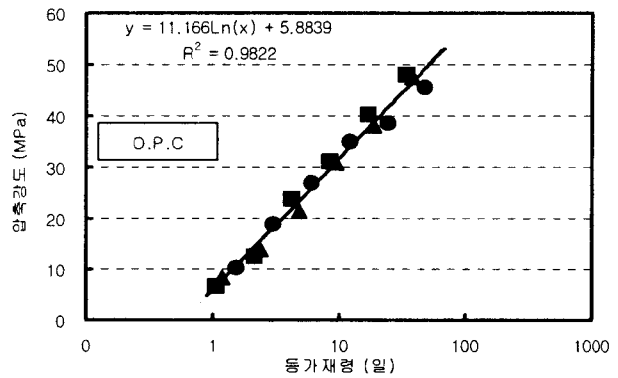
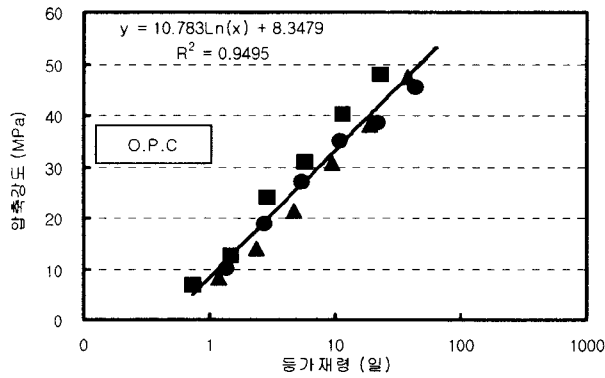
며, 동일 시멘트종류의 경우 양생온도가 높을수록 전반적으로 모든 재령에 있어서 높은 압축강도를 발현하는 것으로 나타났다.

그림 4는 Freiesleben의 활성화에너지 값과 본 연구에 의해 결정된 시멘트종류별 활성화에너지 값을 적용한 등가재령에 따른 압축강도의 변화를 나타낸 것이다. 그림 4(a), (b) 모두 시멘트 종류에 따른 동일한 등가재령에서의 콘크리트 강도는 양생온도에 관계없이 대체로 유사한 강도수준을 나타내고 있으며, 전반적으로 본 연구에 의해 결정된 시멘트종류에 따른 활성화에너지 값을 적용할 경우 Freiesleben의 활성화에너지 값을 적용한 경우보다 결정계수 값이 높게 나타나고 있어 시멘트종류에 따른 콘크리트 강도발현에 관한 온도의 영향을 보다 정확하게 설명하고 있는 것으로 나타났다.

4. 결 론

보통·저열·조강포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도와 등가재령 관계를 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 본 실험에서 구한 활성화에너지 값은 보통·저열·조강포틀랜드시멘트에서 각각 38.53, 44.24, 34.00KJ/mol로 나타났다.
- 2) 본 연구에 의해 결정된 시멘트종류에 따른 활성화에너지 값을 적용할 경우 Freiesleben의 활성화에너지 값을 적용한 경



(a) Freiesleben의 활성화에너지 값을 적용한 경우

(b) 본 연구에 의해 결정된 활성화에너지 값을 적용한 경우

그림 4. 등가재령에 따른 압축강도의 변화

우보다 결정계수 값이 높게 나타나고 있어 시멘트종류에 따른 콘크리트 강도발현에 관한 온도의 영향을 보다 정확하게 설명하고 있는 것으로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단의 목적기초연구과제 「적산온도기법을 활용한 콘크리트구조물의 강도관리 프로그램 및 시공관리 시스템 개발」에 관한 일련의 연구로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다. [과제번호 : R01-2001-000-00456-0]

참고 문헌

1. 김무한 외, "콘크리트 강도예측을 위한 적산온도 함수의 활성화에너지에 관한 연구", 한국콘크리트학회 가을학술발표회 논문집 제 14권 2호, 2002. 10, pp. 81~84
2. 김무한 외, "적산온도 기법을 활용한 3성분계 콘크리트의 강도예측에 관한 연구", 한국콘크리트학회 봄학술발표회 논문집 제 15권 1호, 2003. 5, pp. 237~242
3. "Standard Practice for Estimating Concrete Strength by the Maturity Method", ASTM C 1074-93
4. Carino, N. J., "The Maturity Method" Chapter 5 in Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, 1991, pp. 101~146