

고온조건하에서 플라이애시를 사용한 콘크리트의 압축강도증진 해석

Estimation of Compressive Strength of Fly Ash Concrete subjected to High Temperature

한민철*

Han Min-Cheol*

Abstract

In this paper, the estimation of compressive strength of concrete incorporating fly ash subjected to high temperature is discussed. Ordinary Portland cement and fly ash cement(30% of fly ash) were used, respectively. Water to binder ration ranging from 30% to 60% and curing temperature ranging from 20°C~65°C were also adopted for the experimental parameters. According to results, at the high temperature, FAC had higher strength development at early age than OPC concrete and it kept its high strength development at later age due to accelerated pozzolanic reaction subjected to high temperature. For strength estimation, Logistic model based on maturity equation and Carino model based on equivalent age were applied to verify the availability of estimation model. It shows that fair agreements between calculated values and measured values were obtained evaluating compressive strength with logistic curve. The application of logistic model at high temperature had remarkable deviations in the same maturity. Whereas, the application of Carino model showed good agreements between calculated values and measured ones regardless of type of cement and W/B. However, some correction factors should be considered to enhance the accuracy of strength estimation of concrete.

키워드 : 고온조건, 적산온도, 강도증진, 플라이애시, 로지스틱모델, 등가재령

Keywords : High temperature, Maturity, Strength development, Fly ash, Logistic model, Equivalent age

1. 서론

콘크리트의 강도증진은 시멘트의 수화반응에 의하여 이루어지는 것으로서 이러한 수화반응은 양생온도에 많은 영향을 받게 된다.

즉, 양생온도가 높을 경우 초기에 활발한 수화반응에 의하여 높은 강도증진을 보이거나, 양생온도가 낮을 경우 지연된 수화반응에 의하여 강도지연을 피할 수 없게 된다.

이러한 양생온도가 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위하여 양생온도와 재령과의 관계를 고려하는 적산온도 개념을 이용하는 방법으로 전세계 많은 연구자들이 강도증진해석에 관한 다양한 연구결과를 보고 하고 있다.¹⁾²⁾³⁾⁴⁾⁵⁾⁶⁾

이러한 적산온도는 온도와 재령의 선형관계를 이용하는 방법과 Arrhenius의 수화반응속도에 의한 등가재령개념이 주로 적용되고 있는데, 현재까지 적산온도를 이용한 콘크리트의 강도증진해석에 관한 대부분의 연구는 저온영역에서 이루어진 것이 대부분으로 이 경우 강도증진해석 결과는 매우 양호한 정밀도를 갖는 것으로 보고되고 있다.¹⁾²⁾³⁾

그러나, 서중환경조건에서 콘크리트 시공, 초고층 대형 구조물의 매스콘크리트 시공 및 콘크리트 2차제품의 증기양생 등

의 경우에 있어서는 콘크리트가 초기에 비교적 높은 온도이력을 받게 되고 이로 인하여 초기강도는 높아지나, 이후의 장기강도는 점차로 저하되는 경향을 보인다. 따라서, 고온조건에서는 일반적인 온도조건에서와는 다른 온도이력으로 인하여 다른 강도증진 경향을 보이게 되어 기존의 적산온도 방법에 의한 강도추정에 비정확성이 나타나는 것으로 보고되고 있다.⁷⁾⁸⁾

또한, 고강도, 매스 콘크리트 및 콘크리트 2차 제품 등의 경우 경제성 확보, 수화열 저감 및 물성개선 등의 목적으로 플라이애시와 같은 광물질 혼화재를 사용하는 경우가 일반적으로, 이러한 플라이애시는 고온에서 촉진된 포졸란 반응에 의하여 강도를 향상시키는 것으로 알려져 있다.

그러나, 이러한 고온조건이 콘크리트의 강도증진 및 강도추정에 미치는 영향에 관하여는 국외적으로 일부 연구자들이 보고된 사례가 있으나, 우리나라의 경우 이에 대한 연구가 부족한 실정이다.

그러므로 본 연구에서는 플라이애시를 사용한 콘크리트를 대상으로 고온양생조건에서의 강도증진 특성을 검토하고, 이를 토대로 적산온도기법에 의한 강도증진해석을 실시함으로써 궁극적으로는 고온조건이 콘크리트의 강도에 미치는 영향을 정량적으로 평가하고자 한다.

* 청주대학교 건축공학부, 전임강사, 공학박사

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

표 1. 실험요인 및 수준

실험요인		수준	
배합사항	W/B(%)	4	30, 40, 50, 60
	결합제	2	OPC FAC (플라이애시 30%치환)
	목표 슬럼프	2	21±1cm (W/B 30~40%) 18±1cm (W/B 50~60%)
	목표 공기량	1	4.5±1.5(%)
	양생온도(°C)	4	20, 35, 50, 65
실험사항	굳지않은 콘크리트	2	슬럼프, 공기량
	경화 콘크리트	1	압축강도

표 2. 콘크리트의 배합표

구분	W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m³)	용적배합 (ℓ/m³)			
						C	F.A	S	G
OPC	30	38	0.003	1.90	172	195	-	219	357
	40	39	0.002	0.84	179	146	-	244	382
	50	39	0.26*	-	182	116	-	256	401
	60	40	0.18*	-	181	96	-	264	414
FAC	30	36	0.004	2.30	171	137	83	198	352
	40	38	0.003	1.00	178	105	62	231	377
	50	39	0.3*	—	182	81	49	251	392
	60	40	0.4*	—	180	67	40	267	401

*는 AE 감수제를 의미한다.

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다.

2.2 사용재료

본 연구에 사용한 시멘트의 경우 OPC는 국내산 S사제로 시멘트의 물리적 성질은 표 3과 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

응결시간		압축강도 (MPa)			분말도 (cm²/g)	밀도 (g/cm³)	안정도 (%)	강열감량 (%)
초결(분)	종결(분)	3일	7일	28일				
237	341	24.5	30.1	34.6	3,412	3.15	0.05	0.9

한편, 플라이애시는 충남 보령 화력산을 사용하는데, 그 물리적 성질은 표 4에 제시되었다. 유동성 및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 표 5와 같다.

골재로써 잔골재는 충남 병천산 강모래(밀도:2.58 g/cm³, 조립률:2.43)를 사용하며, 굵은 골재는 충북 괴산산 20mm 화강암 부순돌(밀도:2.61 g/cm³, 조립률:6.70)을 사용한다.

표 4. 플라이애시의 물리적 성질

단위 수량비(%)	밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	압축강도 비(%)	SiO₂ (%)	강열감량 (%)	습분 (%)
99	2.23	3,519	97	97	3.4	0.3

표 5. 혼화제의 물리적 성질

구분	주성분	형태	색상	밀도
고성능감수제	술폰산멜라민계	분말	흰색	—
AE제	Synthetic tensides	액상	암갈색	1.02
AE 감수제	나프탈렌계	액상	암갈색	1.14

2.3 실험방법

본 연구의 실험방법으로 콘크리트의 혼합은 강제식 팬타입 믹서를 사용하여 혼합한다. 굳지않은 콘크리트의 실험으로 슬럼프는 KS F 2402 규정에 의거 실시하고, 슬럼프 플로우는 슬럼프 측정이 끝난 후 최대직경과 이에 직교하는 직경의 평균치로 한다. 공기량 및 단위용적질량은 KS F 2421 및 2409의 규정에 따라 실시하고, 응결시간은 KS F 2436의 프록터 관입저항 시험방법에 의거 측정토록 한다.

공시체의 양생방법은 콘크리트 타설후 소정의 양생온도가 유지되도록 1일간 기중 밀봉 양생을 실시한 후 탈형하여 소오의 재령까지 소정의 온도가 유지되는 수중양생조에서 수중양생을 실시하는 것으로 한다.

한편, 경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 KS F 2405 규정에 의거하여 실험계획된 소정의 양생온도에서 계획된 재령까지 양생한 후 측정하도록 한다.

표 6. 압축강도측정 재령 및 적산온도

W/B (%)	양생온도 (°C)	압축강도 측정재령 및 적산온도								
		일	3	7	14	21	28	56	96	
20	일	1	3	7	14	21	28	56	96	
	DD	30	90	210	420	630	840	1725	2730	
30	일	0.7	2	4.7	9.3	14	18.7	37.3	60.7	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
40	일	0.5	1.5	3.5	7	10.5	14	28	45.5	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
50	일	0.4	1.2	2.8	5.6	8.4	11.2	22.4	36.4	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
60	일	0.4	1.2	2.8	5.6	8.4	11.2	22.4	36.4	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	

3. 적산온도 및 강도증진 해석

3.1 적산온도

적산온도는 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생온도와 시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시하는 함수로서, 일정기준온도 이상에서의 양생온도와 시간함수의 조합을 의미한다.

$$M = \int_0^t H(T)dt \dots\dots\dots (1)$$

여기서,

M : 적산온도(°C·day)

H(T) : 적산온도 함수

적산온도 식은 Saul에 의한 온도와 재령에 의한 선형 관계식인 식 (2)와 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학반응속도

식 (3)을 이용한 적산온도식인 등가재령식으로 표현되는데, 등가재령은 식(4)와 같이 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20℃)에서의 양생시간을 의미한다. 등가재령식은 식 (5)에 제시되어 있다.

3.1.1 온도와 재령에 의한 선형 적산온도

$$M = \int_0^t (T_c - T_0) dt \quad \dots\dots\dots (2)$$

여기서,

- M : 적산온도(℃·day)
- Tc : 시간 t동안의 온도(℃)
- T0 : 기준온도(일반적으로 -10℃)

3.1.2 Arrhenius의 화학 반응속도에 의한 적산온도

$$k_T = A \cdot \exp\left(-\frac{E_a}{RT}\right) \quad \dots\dots\dots (3)$$

여기서,

- kT : 속도상수
- A : 빈도계수
- Ea : 결보기 활성화 에너지(KJ/mol)
- R : 가스 상수(8.314J/mol·K)
- T : 절대온도(° K, 273+℃)

$$t_e = \frac{\int_0^t H(T) dt}{H(T_r)} \quad \dots\dots\dots (4)$$

여기서,

- H(T) : 양생온도 T에서의 적산온도 함수
- H(Tr) : 양생온도 20℃에서의 적산온도 함수

$$t_e = \int_0^t \exp\left(\frac{E_a}{R} \cdot \left(\frac{1}{T_r} - \frac{1}{T}\right)\right) dt \quad \dots\dots\dots (5)$$

여기서,

- te : 등가재령(일)
- Tr : 20℃에서의 절대온도(293° K)
- T : 양생온도 T0에서의 절대온도(° K, 273+℃)

3.2 콘크리트의 강도증진해석 모델

본 연구에서 적용한 강도증진 해석모델은 2가지를 사용하였는데, 온도와 재령의 선형적산온도를 이용하는 로지스틱모델과, 등가재령을 이용하는 Carino 모델이 적용되었다.

3.2.1 로지스틱(Logistic) 모델

콘크리트의 강도증진 해석을 위한 로지스틱 모델은 복잡한 시멘트 수화반응을 일차의 단분자 자촉반응으로 판정하고, 반응속도를 고려하는 방법을 이용하여 강도증진 곡선으로 활용한다. 여기서 단분자 자촉반응이라는 것은 생성물 자체가 반응을 촉진하여 생성물의 양이 시간과 함께 증가하는 것을 말한다. 한편 반응속도식은 생성물의 양이 들어와 혼합되어 얻어지는 과정을 나타내는 식 (6)과 같이 표현된다.⁹⁾

$$\frac{dx}{dt} = k(a - x) \cdot x \quad \dots\dots\dots (6)$$

- 여기서, a : 반응에 의한 총량
- x : 시간 t에서의 반응량
- k : 반응속도 상수

이식을 변형하여 적산온도에 대응하는 압축강도증진곡선 식 (7)을 얻는다.

$$S = \frac{S_u}{1 + \exp(-k \cdot \log M + m)} \quad \dots\dots\dots (7)$$

- 여기서, S : 압축강도 (MPa)
- Su : 한계강도 (MPa)
- M : 적산온도 (℃·day)
- k, m : 실험상수

3.2.2 쌍곡선 모델

양생온도에 따른 콘크리트의 강도증진해석을 위하여는 강도와 적산온도와의 관계가 필요하다. 적산온도에 의한 강도증진해석은 적산온도에 의하여 온도와 재령의 복합적인 효과가 정량화된 후 적산온도를 강도의 환산 지수로 적용되기 시작하였다.

Bernhardt¹⁰⁾는 콘크리트의 상대강도가 콘크리트의 미수화된 부분의 크기와 비례하며 시멘트의 수화시 이를 지표화하는 비례상수로서 반응율 상수 (k)를 도입하였다.

$$\frac{d(S/S_u)}{dt} = k\left(1 - \frac{S}{S_u}\right) \quad \dots\dots\dots (8)$$

- 여기서, S : 콘크리트강도
- Su : 한계강도
- k : 반응율 상수(rate constant)

한편, Carino¹⁾는 쌍곡선함수의 회귀모델은 지수함수보다 정확한 예측값을 얻을 수 있다는 것을 알아냈다. 더욱이 그는 시멘트의 수화반응 과정시 잠재기(dormant period)를 설명할 수 있는 세 번째 변수를 도입하여 다음과 같은 모델을 제시하였다. 이식에서 강도증진은 to에서 시작되며 응결기간 동안의 점진적인 강도증진은 고려되지 않는다. 여기서 Su, k, to는 최소 제곱법에 의한 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{S_u(t - t_o)}{1 + k(t - t_o)} \quad \dots\dots\dots (9)$$

- 여기서, S : 압축강도
- Su : 한계강도
- k : 반응율 상수(rate constant)
- to : 강도증진이 시작되는 재령

4. 실험결과 및 분석

4.1 굳지않은 콘크리트의 기초물성

표 7은 시멘트 종류 및 W/B별 굳지않은 콘크리트의 기초물성을 나타낸 것이다. 전반적으로 슬럼프 및 공기량은 배합설계를 실시하여 모두 목표한 값을 만족시키는 것으로 나타났다.

한편, 응결시간의 경우 FAC가 OPC를 사용한 경우보다 약간 지연되는 것을 알 수 있었다.

표 7. 굳지않은 콘크리트의 기초물성

측정 항목	OPC				FAC			
	W/B(%)				W/B(%)			
	30	40	50	60	30	40	50	60
슬럼프 (cm)	22.3	21.5	17.6	16.7	21.8	23.5	18.5	17.0
공기량 (%)	3.8	3.9	4.1	4.9	3.6	3.7	3.7	3.5
응결시간 (hr.)	16.0	14.5	14.0	13.5	19.0	17.6	16.5	16.3

4.2 재령경과에 따른 압축강도증진

그림 1은 시멘트 종류별로 구분하여 W/B 및 양생 온도별로 재령경과에 따른 콘크리트의 강도증진 성상을 나타낸 것이다.

전반적으로 재령이 경과함에 따라 강도는 증진되고 W/B가 감소할수록 높은 강도를 나타내었는데, 양생온도별로는 온도가 높을수록 초기에 높은 강도증진을 나타내고 있었다.

시멘트 종류별로는 OPC를 사용한 경우 양생온도가 높을수록 초기재령에서는 높은 강도증진경향을 보이고 있으나, 재령이 경과할수록 강도증진이 둔화되는 것으로 나타나고 있는데, 대략 7일전후로 강도증진경향이 역전되어 20℃의 경우보다 강도가 저하하는 것을 알 수 있었다. 이는 초기에 고온을 받은 경우 콘크리트 내부의 전체 공극량을 증가시키고 이로 인하여 시멘트 매트릭스가 상대적으로 포러스한 구조가 되며 구성재료간의 열팽창계수 차이에 의한 미세한 균열의 형성으로 재령이 경과할수록 강도가 저하하는 원인으로 판단된다.⁷⁾⁸⁾

한편, FAC를 사용한 경우에는 OPC에 비하여 전반적으로 양생온도가 높을수록 초기에 높은 강도증진을 나타내고 있으며 재령이 경과하여도 지속적으로 높은 강도증진 경향을 보이고 있다. 이는 고온에 의하여 촉진된 포졸란 반응에 기인한 것으로 판단된다.

4.3 적산온도에 의한 강도증진해석

4.3.1 로지스틱 모델에 의한 강도증진해석

표 8은 회귀분석에 의한 로지스틱 모델식의 실험상수값을 나타낸 것이다.

표 8. 로지스틱모델식의 실험상수값

실험 상수	OPC				FAC			
	W/B(%)				W/B(%)			
	30	40	50	60	30	40	50	60
S_0	60.4	42.5	28.1	21.9	65.6	37.5	32.4	27.8
k	0.79	0.74	1.12	0.70	0.71	1.17	1.03	0.78
m	2.68	2.86	4.34	3.09	2.95	4.64	4.51	3.98
R^2	0.929	0.920	0.938	0.777	0.899	0.901	0.787	0.766

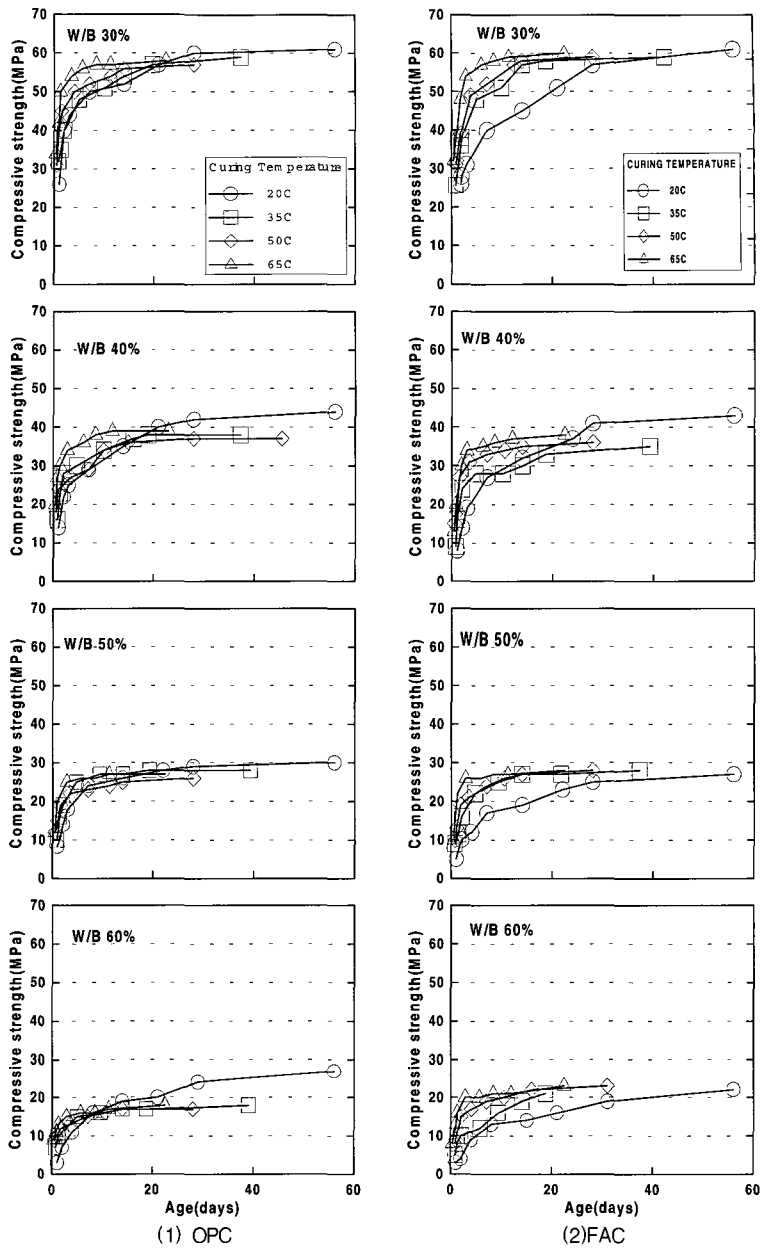


그림 1. 시멘트종류별 적산온도경과에 따른 강도증진 성상

전반적으로 W/B가 증가할수록 최종도달강도(S_u)값은 작아지는 것으로 나타났고, 결정계수의 경우 0.77~0.93의 범위로 나타났는데, 이는 20℃이하의 온도영역에서의 결정계수값인 0.97 이상의 값보다 적은 것임을 알 수 있고¹²⁾, 특히 W/B 50 및 60%의 경우 0.78이하의 값으로 상관성이 높지 않음을 알 수 있다. 이는 표준온도 조건과 고온조건에서 동일적산온도의 경우 온도조건별로 강도증진의 차이가 크기 때문에 나타난 결과로 사료된다.

그림 2는 시멘트 종류 및 W/B별 적산온도 경과에 따른 로지스틱모델에 의한 강도증진해석 결과를 나타낸 것이다.

전반적으로 초기적산온도 및 장기적산온도에서 양생온도별로 강도증진경향의 차이가 크기 때문에 데이터값들이 큰 편차를 보이고 있으며, 특히 840° D·D 이후의 장기적산온도로 갈수록 이러한 경향은 더욱 증가됨을 볼 수 있다.

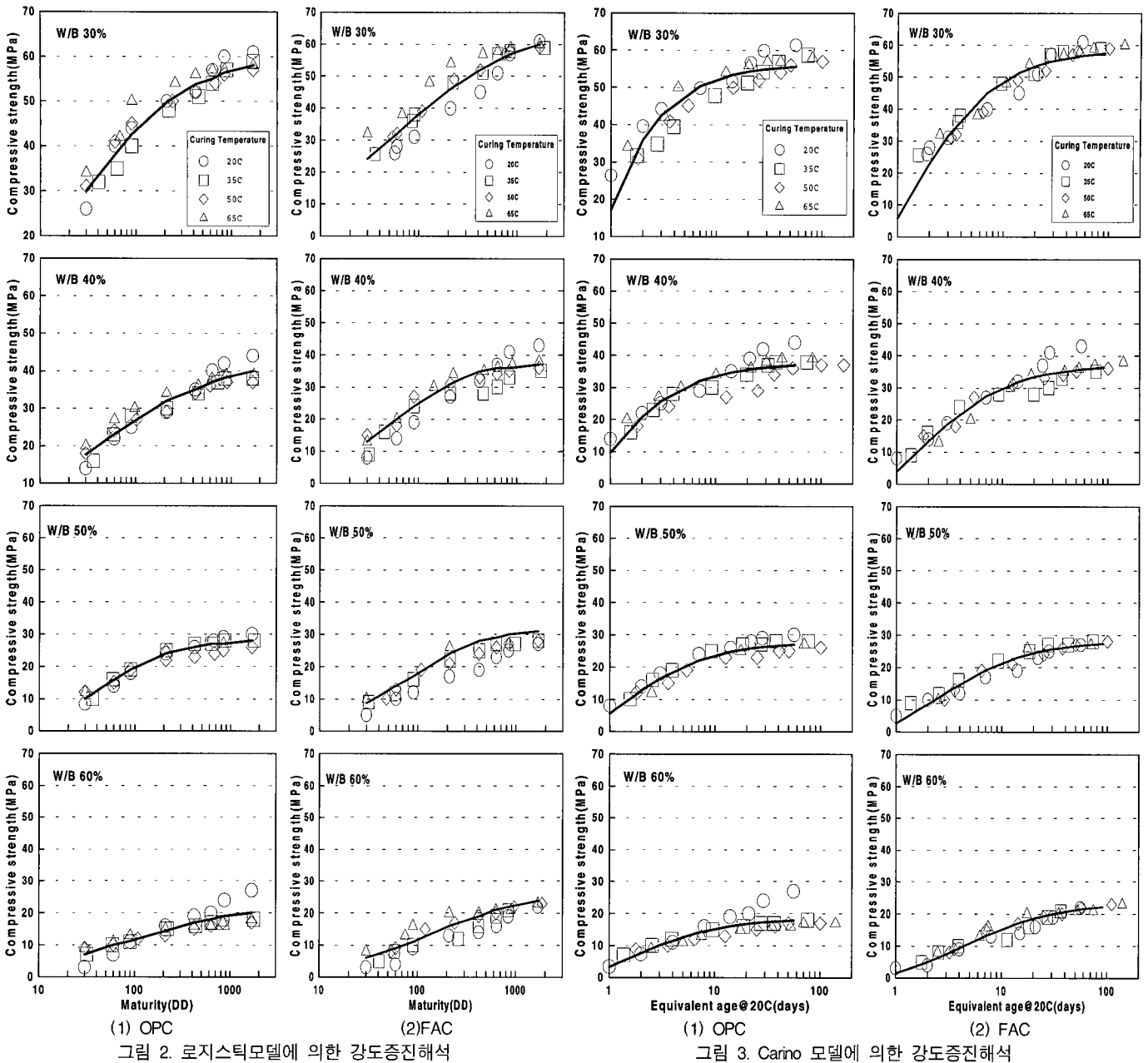


그림 2. 로지스틱모델에 의한 강도증진해석

그림 3. Carino 모델에 의한 강도증진해석

이는 저온에서의 강도증진해석을 실시한 기존의 연구결과와 비교할 경우 그 차이가 극명하게 나타나 고온조건에서 적산온도에 의한 강도증진해석의 경우 정확성이 그다지 크지 않다는 기존의 연구결과와 유사한 경향을 보였다.⁹⁾

4.3.2 Carino model에 의한 강도증진 해석

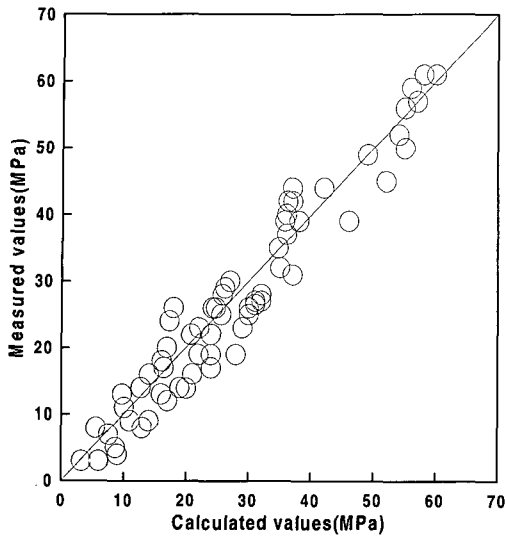
본 연구에서 적용한 등가재령 해석모델은 Carino의 모델로서, 우선 등가재령 산정시 결보기 활성화 에너지(E_a)는 OPC를 사용한 경우 아래 식 (10)과 같이 Freisleben Hansen Pederson의 제안식을 이용하였으며, FAC의 경우는 Carino가 제시한 30 KJ/mol 값을 적용하였다.¹¹⁾

- 1) $T < 20^\circ\text{C}$ 일 경우 $E = 33.5 + 1.47(20 - T)$ KJ/mol (10)
- 2) $T \geq 20^\circ\text{C}$ 일 경우 $E = 33.5$ KJ/mol

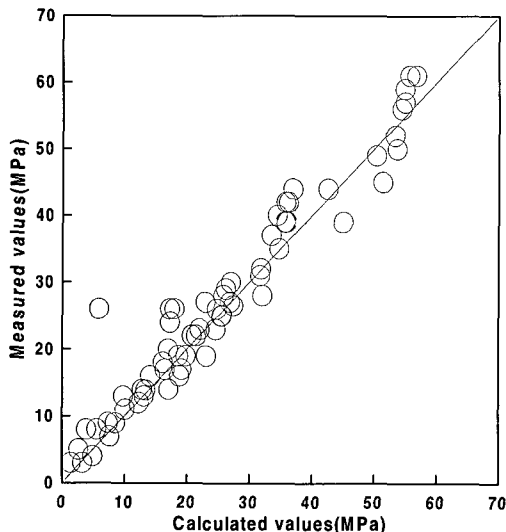
표 9. Carino 모델의 실험상수값

계수 값	OPC				FAC			
	W/B(%)				W/B(%)			
	30	40	50	60	30	40	50	60
Su	56.4	37.7	27.8	18.6	58.7	37.3	28.3	23.39
k_r	1.32	0.88	0.59	0.48	0.53	0.44	0.33	0.20
t_0	0.667	0.604	0.583	0.563	0.792	0.733	0.688	0.679
R^2	0.917	0.923	0.914	0.743	0.920	0.910	0.946	0.914

표 9는 등가재령을 이용한 Carino 모델의 실험상수값을 나타낸 것이다. 전반적으로 W/B가 증가할수록 최종도달강도 (S_u)값은 감소하는 것으로 나타났다. 한편, 결정계수의 경우는 전반적으로 0.91이상의 양호한 값을 갖는 것으로 나타났으나, OPC를 사용한 경우 W/B 60%에서는 0.743으로 작게 나타났다.



(1) 로지스틱 모델식에 의한 측정치와 해석치 비교



(2) Carino 모델에 의한 측정치와 해석치의 비교
그림 4. 해석모델별 강도 측정치와 해석치의 비교

한편, 로지스틱 모델식에 의한 경우와 비교를 해보면 전반적으로 OPC를 사용한 경우는 거의 유사한 수준의 결정계수값을 갖고 있으나, FAC를 사용한 경우는 등가재령에 의한 Carino 모델식이 훨씬 양호한 상관성을 갖는 것으로 판단된다. 이는 등가재령의 경우 온도가 수화반응에 미치는 영향을 고려할 수 있는 변수가 삽입되어 다양한 온도영역에서 비교적 양호한 강도 추정이 가능한 것으로 사료된다.

그러나, 고온영역으로 올라갈수록 등가재령식 역시 일반 온도조건에서의 강도추정정밀도를 갖지는 못하는 것을 알 수 있어 이에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

그림 4는 시멘트 종류에 관계없이 적산온도에 의한 로지스틱 모델식과 등가재령에 의한 Carino 모델식의 측정치와 해석치를 비교한 것이다.

먼저, 로지스틱 모델식에 의한 경우는 해석치와 측정치간에 비교적 큰 차이를 보이고 있음을 알 수 있는 반면에 Carino 모델에 의한 경우는 저강도 영역에서는 해석치와 측정치간의 비슷한 강도를 나타내는 것으로 나타나고 있어 등가재령에 의한

방법이 고온영역에서 재령과 온도의 적산온도에 의한 방법보다 양호한 강도추정이 가능할 것으로 판단된다.

금후의 과제로는 겉보기 활성화에너지값의 결정을 통한 등가재령의 평가와 아울러 표준양생온도 및 저온영역에서의 얻어진 정확성 수준을 확보하기 위한 고온영역에서의 등가재령 및 강도증진 해석모델의 수정이 필요할 것으로 판단된다.

5. 결론

본 연구는 고온영역에서 플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트의 강도증진을 적산온도 및 등가재령 방식으로 해석하므로 양생온도가 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향에 대하여 정량적으로 평가하고자 하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 재령경과에 따른 콘크리트의 강도증진성상으로 FAC혼입 콘크리트는 OPC사용 콘크리트에 비하여 양생온도가 높아질수록 초기에 높은 강도발현을 보이고 있으며, 촉진된 포졸란 반응에 기인하여 재령이 경과하여도 높은 강도증진을 보이는 것으로 나타났다.
- 2) 양생온도가 높아질수록 OPC사용 콘크리트의 경우 초기에는 높은 강도증진을 보이나, 재령이 경과할수록 강도증진이 둔화하여 20℃양생조건보다 낮은 강도를 나타내는데, 이는 고온으로 될 수록 구성재료간의 열팽창계수의 차이에 의한 미세균열의 증가에 기인된 것으로 분석된다.
- 3) 적산온도에 따른 로지스틱모델을 이용한 강도증진해석결과 표준양생온도조건에 비하여 결정계수가 저하하고 동일 적산온도에서 양생온도별 강도편차가 크게 발생하는 등 전반적으로 해석의 정밀도는 높지않은 것으로 나타났다.
- 4) 등가재령에 의한 Carino모델을 이용하여 강도증진해석을 수행한 결과 로지스틱모델에 의한 해석결과보다는 양호한 상관성을 갖는 것을 확인하였으나 역시 저온영역에서의 해석정밀도 수준을 갖기 위한 별도의 수정항이 필요할 것으로 사료된다.

참고 문헌

- 1) Carino, N. J., Maturity Method; Theory and Application., Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984
- 2) Tairun R. Naik, Maturity of Concrete ; its application and limitations, CANMET, pp.329~359, 1992.6
- 3) Plowman, J. M., Maturity and Strength of Concrete. Magazine of Concrete Research (London), Vol. 8, No. 22, Mar. 1956, pp. 13-22
- 4) Freisleben Hansen, P., Pederson, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, Nordisk Betong, 1977, pp.19~34

- 5) Guo Chengju, Maturity of Concrete, Method for Predicting Early-Stage Strength, ACI, Materials Journal, Vol.86, No.4, pp.341~353, 1989
- 6) H.Kada-Benameur, E. Wirquin, B.Duthoit, Determination of apparent activation energy of concrete by isothermal calorimetry, Cement and concrete research, Vol.30, 2000, pp.301~305
- 7) Kjellsen, K.O, Heat curing and post-heat curing regimes of high performance concrete ; influence of microstructure and C-S-H composition, Cem. Concr. Res., Vol.26, No.2, 295~307
- 8) Escalante-Garcia, J. I. and Sharp, J. H., The micro-structure and mechanical properties of blended cements hydrated at various temperatures, Cem. Concr. Res., Vol.31, pp. 695~702
- 9) 鎌田英治, 洪悦郎, 林直樹, 寒中콘크리트를對象とした콘크리트強度増進曲線の検討, セメント技術年報, 1990.
- 10) Bernhardt, Hardening of concrete at different temperatures, RILEM Symposium on Winter Concreting, Institute for Building Research, 1956
- 11) Carino N. J. and Tank R. C., Maturity functions for concretes made with various cements and admixtures, ACI materials journal, 1992, pp.188~196
- 12) 한천구, 한민철, 적산온도방식의 콘크리트 강도증진해석에 의한 기온보정강도의 검토, 대한건축학회 논문집 구조계, 15권 11호, pp.71~78, 1999. 11.
- 13) 寺田米男, 各種セメントを用いたモルタルコンクリートの強度推定方法について, セメント技術年報, Vol. 35.
- 14) 笠井芳夫, 콘크리트의 初期強度初期養生に関する研究, 學位論文.
- 15) 友澤史紀, 콘크리트의 促進養生とその建築生産工業化への利用- 第Ⅲ編 콘크리트의 強度發現關する速度論的研究, 學位論文.
- 16) 한천구, 한민철, 기온과 콘크리트, 기문당, pp.1~100, 2002.