

분말도 변화를 고려한 미분시멘트 사용 콘크리트의 압축강도증진 해석

Estimation of Compressive Strength of Concrete Incorporating Fine Particle Cement Considering Blaine Fineness

한 민 철*

Han Min-Cheol

Abstract

This study presents an estimation of the strength development of concrete considering the equivalent age using fine particle cement (FC), which is manufactured according to the classification process. Contents and W/B were considered as experimental parameters. The strength considering the equivalent age is gradually increased, and the deviation of the strength according to W/C is increased with decrease of W/C in accordance with the replacement of the fine particle cement. For estimating the apparent activation energy (E_a) considering setting time and blaine fineness of cement, E_a of the FC based on setting time is calculated with 27.6~28.9 KJ/mol, which is somewhat similar to that of OPC, while by applying E_a based on blaine fineness, E_a is increased with increase of FC contents, and is calculated with 40~56 KJ/mol. Good agreement is obtained by applying E_a based on setting time, while there was remarkable variation between calculated value and measured value when E_a based on blaine fineness. Therefore, it is necessary to add influencing factors in existing E_a to enhance the accuracy of the estimation.

Keywords : High temperature, Maturity, Strength development, Fine particle cement, Equivalent age, Blaine fineness

1. 서 론

최근 들어 우리나라 건축공사 현장에서는 초고층 주상복합 아파트 등 대형 건축 프로젝트가 증가함에 따라 건설사에서는 공기 단축에 대한 관심과 노력이 집중되고 있다.

이러한 초고층 건축공사에 있어 공기단축의 핵심은 골조콘크리트 공사의 총당 사이클 공기를 절감하는데 있는데, 이를 위해 중점적으로 검토되어야 할 사항이 콘크리트의 조기강도 발현기술을 어떻게 확보하는가에 관한 것이다. 즉, 콘크리트의 조기강도 발현을 통한 거푸집 탈형 가능 시기를 단축하여야만 이로 인해 총당 사이클 공기를 절감시킬 수 있게 된다.

결국, 콘크리트의 조기강도 발현기술의 핵심은 시멘트의 성능 향상이 우선되어야 하는데, 이를 위하여 필자는 시멘트 제조설비 라인 중 시멘트 분쇄공정을 통하여 입자크기별로 분급된 시멘트를 별도의 바이패스웨이(bypass way) 설비로 분말도가 큰 미분시멘트(이하 FC)를 포집하여(분말도 6,000~7,000 cm^2/g) 콘크리트의 조기강도 발현성을 확보하도록 하는 일련의 연구를 진행 중

에 있다. 이 경우 FC를 사용함에 따라 콘크리트의 초기강도는 보통 포틀랜드 시멘트(이하 OPC)를 사용한 경우에 비해 높아지나, 이후 재령이 경과함에 따라 OPC와 대등하거나 약간 높아지는 것으로 나타났고, OPC에 일부 치환 할 경우 그에 비례하여 초기강도도 변화하는 것을 알 수 있었으며, 현장의 요구수준에 맞게 FC를 OPC에 적정량 치환하게 되면 요구한 콘크리트의 조기강도 발현 성능을 충분히 확보할 수 있음을 보고한바 있다.¹⁾

또한, 양생온도가 FC를 사용한 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 정량적으로 평가하기 위해 등가재령 방법을 이용한 강도 발현 해석을 실시한바 있었는데, FC를 치환함에 따라 시멘트의 분말도가 비례적으로 증가하여 수화반응속도에 영향을 미치게 된다. 그러나 기존의 등가재령방법에서는 겔보기활성화에너지에 영향을 미치는 분말도를 고려하지 못하는 문제가 제기되어 FC사용이 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 보다 정확히 평가하지 못하는 문제가 있음을 확인할 수 있었다.²⁾

이와 관련하여 Schindler는 시멘트의 C_3A , C_4AF 및 분말도가 수화반응 속도의 산정에 커다란 영향을 미치며, 이를 토대로 분말도 영향을 고려할 수 있는 겔보기 활성화 에너지(이하 E_a) 산정 모델을 제시하여 등가재령 방법에 의한 강도발현 해석결과를 제

* 청주대학교 건축공학과, 조교수, 공학박사

시하였다.³⁾

따라서 본 연구에서는 FC를 사용한 콘크리트의 강도 발현해석에 있어 FC 치환률 증가에 따른 분말도 변동이 콘크리트의 강도 발현에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기존 등가재령방법에 분말도의 영향을 고려할 수 있는 겔보기 활성화 에너지 모델을 이용하는 방법으로 FC 치환 콘크리트의 강도발현해석을 실시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 표 1과 같고, 배합사항은 표 2와 같다. 먼저, 배합사항으로 W/C는 40 및 50%의 2수준과, OPC 및 FC 치환률 0, 25, 50, 75, 100%의 5수준에 대하여, 목표 슬럼프 150±25 mm, 목표 공기량 4.5±1.5%를 각각의 실험수준이 모두 만족할 수 있도록 배합 설계하여 총 10배치를 실험 계획하였다.

FC 치환률에 따른 분말도는 25% 치환의 경우 4,214 cm³/g, 50%의 경우 5,127 cm³/g, 75%의 경우 6,040 cm³/g 및 100%의 경우 6,953 cm³/g으로 하였고, 양생온도는 건설공사 현장에서 일반적으로 접하게 되는 저온조건부터 고온조건을 고려하여 5, 20 및 35℃의 3수준으로 결정하였으며, 양생온도별로 종결시간 이후부터 2배되는 재령에서 압축강도를 측정하고 이후는 측정재령의 배수 간격으로 압축강도를 측정하였다.

FC의 제조공정과 관련하여 그림 1은 포틀랜드 시멘트 생산과정 중 분쇄 공정도를 나타낸 것으로 이 공정 중 가장 미분인 ④라인의 시멘트 시료를 채취하였는데, 즉, 시멘트 분쇄기에 의해 충분히 분쇄된 시멘트는 사이클론 세퍼레이터(②)로 이동되고,

표 1. 실험계획

실험요인		실험수준	
배합사항	W/C(%)	2	40, 50
	목표슬럼프(mm)	1	150±25
	목표공기량(%)	1	4.5±1.5
	FC치환률(%)	5	0, 25, 50, 75, 100
	FC 치환률에 따른 분말도 (cm ³ /g)	5	3302(FC 0%), 4214(FC 25%), 5127(FC 50%), 6040(FC 75%), 6,953(FC 100%)
	양생온도(℃)	3	5, 20, 35
실험사항	굳지않은 콘크리트	3	슬럼프, 공기량 양생온도별 응결시간
	경화콘크리트	1	양생온도별 압축강도 (종결시간×2, 4, 8, 16, 32, 64배 재령, 28, 91일)

표 2. 콘크리트의 배합표

W/C (%)	FC 치환률(%)	분말도 (cm ³ /g)	S/a (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m ³)	용적배합(ℓ / m ³)			
							C	FC	S	G
40	0	3,302	42	0.02	0.40	178	141	-	267	368
	25	4,214	42	0.024	0.43	178	106	36	267	368
	50	5,127	45	0.024	0.57	179	71	72	285	348
	75	6,040	46	0.028	0.66	180	36	108	290	340
	100	6,953	47	0.036	0.85	181	-	145	296	333
50	0	3,302	43	0.016	0.35	178	113	-	286	379
	25	4,214	43	0.010	0.45	178	85	29	285	378
	50	5,127	46	0.018	0.60	179	57	57	304	357
	75	6,040	47	0.024	0.65	180	29	87	310	349
	100	6,953	48	0.024	0.70	181	-	116	315	342

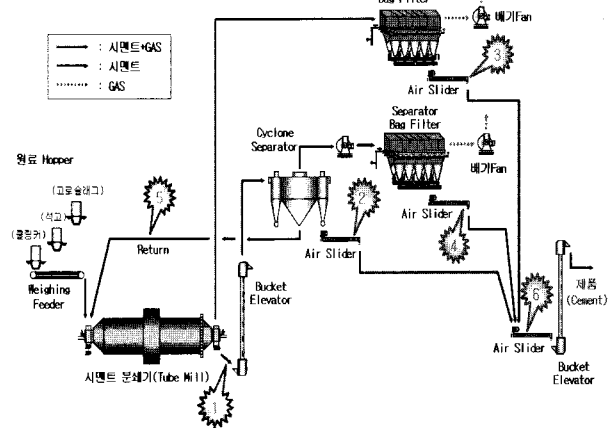


그림 1. 포틀랜드 시멘트의 분쇄 공정도

이중 초미립분이 세퍼레이터 백필터(④)에서 포집되어 FC로 사용되게 된다. 콘크리트의 배합과 관련하여는 FC 치환률 증가에 따라 점성증대로 유동성 확보를 위해 단위수량과 SP제량을 증가시켰고 이에 따라 잔골재율도 증가시켰다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용한 재료로서 먼저, 시멘트는 국내산 A시멘트사 산 OPC를 사용하였고, FC는 OPC 제조과정 중 발생하는 것을 백필터로 포집한 국내 A시멘트사산을 사용하였는데, 화학성분 및 구성광물의 성분비는 기존 OPC와 큰 차이가 없는 것으로 나타났고, 이는 FC의 경우 기존 OPC 생산라인에서 포집한 것으로 기본적인 성분은 OPC와 큰 차이가 없기 때문이며, 단, 미분쇄 과정에서 연질인 SO₃성분이 많이 분쇄되어이성분이 증가하는 것으로 나타났다.

한편, 골재는 국내 B사의 골재를 사용하였으며, SP제는 국내 E사의 고성능 감수제(폴리칼본산계)를 사용하였고, AE제는 국내 E사의 제품을 사용하였다. 각 사용재료의 물리적 성질은 표 3~6과 같다.

표 3. 시멘트의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm³)	분말도 (cm²/g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도(MPa)		
				초결	종결	3일	7일	28일
OPC	3.15	3,302	0.08	208	351	20.4	29.4	38.7
FC	3.12	6,953	-	180	279	35.6	42.5	48.6

표 4. 시멘트의 화학성분 구성

시멘트	화학성분 (%)											구성광물(%)			
	LOI	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	C ₃ S	C ₂ S	C ₃ A	C ₄ AF			
OPC	0.35	21.88	5.02	3.66	64.18	2.01	1.83	0.92	51	25	8	9			
FC	0.54	21.24	5.01	3.68	62.91	2.00	3.17	1.31	51	25	8	9			

표 5. 골재의 물리적 성질

구분	밀도 (g/cm³)	조립률	흡수율(%)	0.08mm체 통과량(%)
잔 골재	2.59	2.67	1.11	1.12
굵은골재	2.71	7.01	1.18	0.11

표 6. 혼화제의 물리적 성질

구분	형태	주성분	색상	PH	밀도(g/cm³)
고성능감수제	액상	폴리칼본산계	미백색	6.5±2.0	1,060±0.05
AE 감수제	액상	음이온계	미백색	-	1,040

2.3 실험방법

본 연구의 실험 방법으로 콘크리트의 혼합은 트윈샤프트 믹서를 사용하여 콘크리트를 제조하였고, 공시체의 양생방법은 Ø 100×200 mm 공시체를 양생온도 5℃, 20℃ 및 35℃가 유지되도록 공시체 성형 후 1일간 해당온도가 유지되는 챔버에서 기중 봉합 양생을 실시하였고, 이후 탈형하여 해당 양생온도가 유지되는 수중 양생조에서 소요재령까지 양생하였다.

그리고, 굳지 않은 콘크리트 및 경화 콘크리트의 실험은 KS의 관련규격에 의거하여 실험을 진행하였다.

3. 실험결과 및 분석

3.1 굳지 않은 콘크리트의 특성

표 7은 W/C 및 FC 치환별 굳지 않은 콘크리트의 기초물성을 나타낸 것으로 모든 수준에서 슬럼프 및 공기량은 배합설계를 실시하여 모두 목표 값을 만족시키는 것으로 나타났다.

표 7. 굳지 않은 콘크리트의 기초물성

W/C (%)	목표 슬럼프 (mm)	FC 치환율 (%)	슬럼프 (mm)	공기량 (%)	응결시간(hr.)		
					5℃	20℃	35℃
40	150 ±25	0	140	3.7	18.1	7.9	5.4
		25	160	4.5	17.8	7.9	5.2
		50	145	3.7	17.7	7.8	5.1
		75	147	4.8	17.4	7.4	5.3
		100	147	3.6	17.0	7.0	5.6
50	150 ±25	0	153	5.2	20.6	9.8	7.0
		25	155	4.4	18.0	9.1	6.5
		50	140	4.0	16.5	8.5	6.0
		75	145	5.1	16.4	8.0	6.0
		100	157	5.5	16.0	7.5	6.0

3.2 재령경과에 따른 압축강도증진

그림 2는 W/C와 양생온도 및 FC 치환율 별 재령경과에 따른 압축강도를 나타낸 그래프이다.

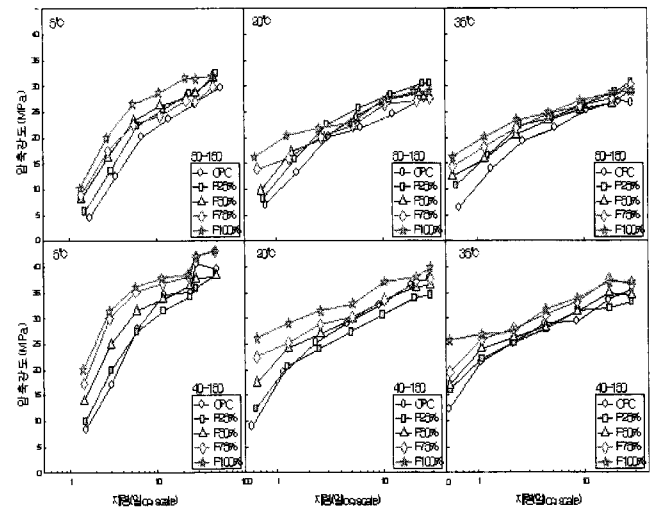


그림 2. W/C와 양생온도 및 FC 치환율별 재령경과에 따른 압축강도

먼저, W/C가 감소할수록 압축강도는 증가하는 경향을 나타냈으며, 양생온도에 따라서는 양생온도가 낮아질수록 초기강도는 낮게 나타났으나, 후기재령에서는 고온 양생보다 전체적으로 높은 압축강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다.

한편, FC 치환율 변화에 따른 압축강도는 FC 치환율이 증가할수록 초기 압축강도 값이 비례적으로 증가하는 것으로 나타났으나, 재령이 증가하면서 FC 치환율에 따른 강도 증가는 점차로 둔화되는 경향을 나타냈다. 이는 FC의 고분말도로 인해 혼합수와의 접촉 면적이 증가하여 수화가 촉진되고 초기에 활발한 반응을 일으키지만, 수화 반응에 이용되는 시멘트의 절대량 및 화학적 성분은 OPC와 거의 동일하므로 시멘트 절대량에 따른 수화작용의 총량은 결국 같다고 할 수 있다. 따라서 FC의 경우 장기재령으로 진행될수록 OPC에 비하여 수화에 이용될 수 있는 여분의 시멘트

감소로 더 이상의 활발한 수화가 이루어지지 못해 강도증진 성능이 감소하게 된 것으로 사료된다.

3.3 등가재령에 의한 강도증진 해석

3.3.1 등가재령

등가재령은 실제 콘크리트의 양생에서 동일한 적산온도가 되는 표준온도(20℃)에서의 양생시간을 의미하는데, 등가재령 식은 식(1)에 제시되어 있다.

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

여기서,

t_e : 등가재령(일)

E_a : 겔보기 활성화 에너지(KJ/mol)

R : 기체상수

T_r : 20℃에서의 절대온도(293° K)

T : 양생온도 T0서의 절대온도(° K, 273+°C)

3.3.2 겔보기 활성화 에너지(E_a)

활성화 에너지란 반응에 필요한 최소한의 에너지를 의미한다. 그런데, 시멘트의 수화반응은 여러 광물이 동시에 여러 반응의 복합으로 진행되기 때문에 엄밀한 의미에서는 활성화 에너지라고 표현할 수 없고, 겔보기(apparent) 활성화 에너지라 칭한다.³⁾

이러한 활성화 에너지는 화학반응에 의한 열을 측정하는 Calorimeter를 이용하거나 콘크리트의 양생온도와 강도의 관계를 이용한 ASTM C1074법이 활용되고 있는데, 이 방법의 유효성에 대하여는 연구자들마다 각자 다른 결과를 보고하고 있으며, Calorimeter에 의한 결과 치와 ASTM 방법에 의한 결과치가 차이가 있고, ASTM의 방법은 시멘트자체의 수화반응 과정을 고려하지 않고 강도라는 역학적인 특성에 의한 통계적 절차로 구해져서 엄밀한 의미에서의 E_a 값을 결정하는 데에는 한계가 있다고 보고 있어 아직까지 연구자들 간의 뚜렷한 일치점을 찾기는 어려운 실정이다.

Freisleben-Hansen과 Pederson (FHP)은 양생온도의 함수 형태로 활성화 에너지를 산정하는 식(2)를 제시한바 있다.⁴⁾

$$\begin{aligned} \text{양생온도 } T < 20^\circ\text{C}, \\ E &= 33.5 + 1.47(20 - T) \text{ KJ/mol} \\ \text{양생온도 } T \geq 20^\circ\text{C}, \\ E &= 33.5 \text{ KJ/mol} \end{aligned} \quad (2)$$

한편, Carino는 활성화 에너지 값이 시멘트의 성분, 분말도, 종류, 양 그리고 혼화제에 따라 결정된다고 지적하였고, 특히, 그는 온도민감도 계수(B)가 겔보기 활성화 에너지보다 중요한 물리적 의미를 갖고 있다고 제안한 바 있다.⁵⁾ 이 경우 FHP 함수에 의

한 활성화 에너지보다 온도민감도계수 B를 사용하므로써 훨씬 간편하게 온도의존성을 평가할 수 있다고 언급하고 있다.

또한, Pinto는 응결시간을 이용하여 겔보기 활성화 에너지를 산정하는 방법을 제안한 바 있는데, 즉 응결단계에서도 수화반응에 의한 미세구조가 어느 정도 생성되는 (어느 정도의 수화가 일어남) 것으로 고려하였다. 즉, a_i 를 초결에서의 수화도라 표현하고, a_f 를 종결에서의 수화도라 표현하여 수화반응이 빨리 일어날수록 초결과 종결시간은 짧아지기 때문에 초결과 종결에 도달하는 시점은 수화반응 속도 상수(rate constant ; kT)와 반비례한다고 할 수 있고(kT ∝ 1/ti), 상기의 조건과 가정하에서 Arrhenius 함수에 의한 초결과 종결시점에서의 겔보기 활성화 에너지를 구할 수 있는데, ASTM C 1074에서 제안하고 있는 방법을 이용하여, ln(kT) 대신 ln(1/ti)로 대체하고, 이를 절대온도(T)의 역수와의 함수관계식으로 나타낼 수 있는 것으로 보고하고 있다.⁶⁾

한편, Schindler는 시멘트의 구성광물 중 C₃S, C₂S, C₃A 및 C₄AF의 구성비와 SO₃, MgO 및 시멘트의 분말도등을 변수로 하여 일련의 실험을 토대로 시멘트 수화도 예측을 위한 겔보기 활성화 모델에 대한 제안을 한 바 있는데, 이 중에서 C₃A와 C₄AF의 함량비와 분말도가 겔보기 활성화 에너지에 핵심적인 영향을 끼친다는 점을 발견하고, 이를 토대로 아래 식(3)과 같은 겔보기 활성화 에너지 식을 제안하였다.³⁾

$$E = 22100 \cdot P_{C_3A}^{0.30} \cdot P_{C_4AF}^{0.25} \cdot Blaine^{0.35} \quad (3)$$

여기서, P_{C_3A} : C₃A 함량

P_{C_4AF} : C₄AF 함량

Blaine : 시멘트의 분말도(m²/kg)

본 연구에서는 위의 식 (3)을 이용하여 FC 치환률 변화에 따른 분말도의 영향을 고려한 등가재령을 산정한 후 이를 이용하여 강도증진 해석을 수행하였다.

3.3.3 콘크리트의 강도증진 해석 모델

Carino⁵⁾는 쌍곡선함수의 회귀모델은 지수함수보다 정확한 예측 값을 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 t_0 에서 시작되며 응결기간 동안의 점진적인 강도증진은 고려되지 않는다. 여기서 Su, k, t_0 는 최소제곱법에 의한 회귀분석을 통하여 구할 수 있다.

$$S = \frac{S_u(t - t_0)}{1 + k(t - t_0)} \quad (4)$$

여기서, S : 압축강도 (MPa)

Su : 한계강도 (MPa)

k : 반응을 상수

to : 강도증진 시작되는 재령(일)

3.3.4 강도증진 해석 결과 및 분석

1) Ea값 산정결과

본 연구에서는 Pinto⁶⁾에 의해 제안된 응결시간을 이용한 Ea값을 산정한 결과와 분말도를 고려하는 방법에 의한 Ea값을 상호 비교하였는데, 표 8은 응결시간을 이용한 Ea값을 나타낸 것이고, 표 9는 분말도를 고려하여 산정한 Ea 값(식(3)이용)을 나타낸 것이며 이를 비교한 것이 그림 3에 제시되어 있다.

전반적으로 응결시간을 이용한 Ea값은 FC 치환률 변화에 따라서 큰 차이를 나타내지 않고, 23~30 KJ/mol 정도로 산정되었으나, 분말도를 이용한 Ea값은 FC 치환률이 증가함에 따라 비례적으로 증가하는 것으로 나타났다. 이는 응결시간에 의한 Ea값 산정에 있어서 분말도는 고려 대상이 되는 변수가 아니기 때문에 FC 치환률에 따른 분말도 변화와 Ea가 독립적인 것으로 판단되나, 분말도 변화에 의한 Ea값 산정모델에 따르면 분말도와 Ea가 비례적인 관계이기 때문에 분말도가 증가함에 따라 Ea값이 증가하는 것으로 판단된다.

2) 강도발현 해석결과

본 연구에서 적용한 강도발현 해석 모델은 식(4)에 제시된 Carino 모델식을 적용하였다.

표 10은 응결시간에 의한 Ea 값을 적용하여 비선형 회귀분석한 Carino 모델의 실험상수값을 나타낸 것이다. 전반적으로 회귀 분석에 의한 결정계수 값이 0.676~0.960 정도로 비교적 높게 나타나 해석 값이 측정값을 양호하게 추정하는 것을 알 수 있었으나, FC 치환률이 증가함에 따라 결정계수값은 감소하는 경향을 나타냈다. 이는 결국 FC 치환률에 따른 수화반응 속도의 변동을 충분히 평가할 수 없음을 보여주는 것으로 특히 FC 치환률 75% 이상에서는 결정계수 값이 0.71이하로 상당부분 낮아지는 것을 알 수 있었다.

표 8. 응결시간을 이용한 Ea 값 산정결과

W/C (%)	FC 치환율(%)	회귀계수			Ea (KJ/mol)
		$\ln\left(\frac{1}{t_i}\right) = A - B \cdot \frac{1}{T}$			
		A	B (Ea/R)	결정계수	
40	0	9.73	3482.7	0.919	28.9
	25	9.91	3534.6	0.956	29.3
	50	10.01	3567.6	0.977	29.7
	75	9.46	3408.9	0.975	28.3
	100	8.69	3187.1	0.966	26.5
50	0	8.17	3097.8	0.966	25.8
	25	7.66	2932.7	0.973	24.4
	50	7.67	2900.1	0.978	24.1
	75	7.65	2888.3	0.955	24.0
	100	7.46	2823.0	0.926	23.5

표 9. 분말도를 이용한 Ea 값 산정결과

W/C (%)	FC 치환율(%)	$E = 22100 \cdot P^{0.30_{GA}} \cdot P_{GAP}^{0.25} \cdot Blaine^{0.35}$			Ea (KJ/mol)
		PC ₃ A(%)	PC ₄ AF(%)	Blaine (㎥/g)	
40	0			3302	43.1
	25			4214	47.0
	50	0.08	0.09	5127	50.3
	75			6040	53.3
	100			6953	56.0
50	0			3302	43.1
	25			4214	47.0
	50	0.08	0.09	5127	50.3
	75			6040	53.3
	100			6953	56.0

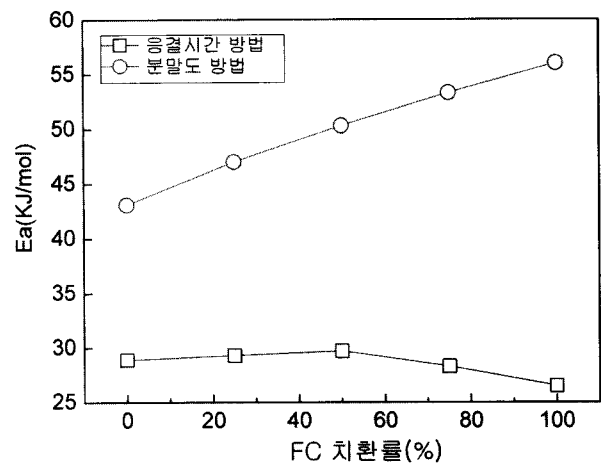


그림 3. FC 치환률에 따른 Ea 값 비교

따라서 FC 치환률 변화에 따른 수화반응속도의 변동을 고려할 수 있는 새로운 변수를 추가한 모델의 개발이 필요하다고 사료되는데, 결국 FC 치환률 변화에 따라 분말도가 증가하므로 Ea 산정에 있어 분말도의 영향을 고려할 필요성이 제기된다.

표 10. 응결시간에 의한 Ea값을 이용한 강도증진 해석모델의 실험상수값

W/C (%)	목표 슬럼프 (mm)	FC 치환률 (%)	실험상수				
			Su	kr	to	Ea	R ²
40	150 ±25	0	39.2	0.74	0.291	28.9	0.916
		25	36.1	1.01	0.308	29.3	0.912
		50	37.6	1.38	0.325	29.7	0.829
		75	38.7	1.93	0.329	28.3	0.751
		100	38.6	2.99	0.329	26.5	0.676
		50	150 ±25	0	29.9	0.51	0.408
25	32.3			0.66	0.379	24.4	0.956
50	32.0			0.75	0.354	24.1	0.957
75	29.7			1.10	0.333	24.0	0.866
100	30.8			1.56	0.312	23.5	0.803

표 11. 분말도에 의한 Ea를 이용한 강도증진 해석모델의 실험 상수값

W/C (%)	FC 치환율(%)	실험상수				Ea (KJ/mol)
		Su	kr	to	R ²	
40	0	37.1	0.945	0.291	0.866	43.1
	25	34.0	1.439	0.308	0.848	47.0
	50	34.3	2.648	0.325	0.691	50.3
	75	35.3	5.122	0.329	0.493	53.3
	100	35.6	10.99	0.329	0.439	56.0
50	0	28.5	0.639	0.408	0.895	43.1
	25	30.5	0.891	0.379	0.884	47.0
	50	27.9	1.514	0.354	0.761	50.3
	75	26.9	2.182	0.333	0.745	53.3
	100	27.7	4.352	0.312	0.630	56.0

한편, 표 11은 전술한 바와 같이 FC 치환율 변화에 따른 분말도 변동을 고려한 식 (3)을 이용하여 강도발현 해석을 수행한 결과이다. 여기서 식 (3)은 Schindler에 의하여 제시된 모델로서 C₃A, C₄AF 함량 및 분말도를 이용하여 Ea 값을 산정하는 것이다.

그런데, 예상한바와 다르게 오히려 응결시간에 의한 방법보다 강도발현 해석의 정밀도가 상당히 저하함을 확인하였다. 즉, OPC를 사용한 경우도 결정계수가 0.89정도로 나타났고, FC 치환율이 증가함에 따라 비례적으로 결정계수 값도 저하하여 FC 100% 치환의 경우 결정계수가 0.439~0.630 정도로 매우 낮게 나타남을 알 수 있었다. 또한, 실험상수 값중 kr값의 변동이 큰 것을 알 수 있는데, kr은 수화반응 속도를 의미하는 것으로 이는 FC 치환율 증가에 따라 Ea값이 비례적으로 증가하고 그에 따라 수화반응 속도의 대폭적인 증가를 가져왔기 때문으로 분석된다. 이와 관련하여 Schindler의 Ea 산정 모델은 콘크리트의 수화도를 평가하기 위하여 사용된 모델 식으로 그의 연구결과에 따르면 이를 강도발현에도 접목을 시킬 수 있다고 하고 있으나,³⁾ 본 연구의 범위 내에서는 FC 치환 콘크리트의 강도발현에 적용하기에는 무리가 있음을 알 수 있다.

결국, 콘크리트의 수화도와 큰 연관이 있는 수화반응속도의 변동은 Schindler의 모델 식으로부터 구한 Ea값의 변동이 kr값을 민감하게 변화시켜 수화도의 영향을 보다 정확하게 평가할 수 있는 것은 알 수 있으나, 이를 역학적 특성인 강도발현에 까지 접목시키기에는 어렵다고 사료된다.

따라서, 금후의 연구과제로서 FC 치환율 변화에 따른 분말도의 영향을 보다 합리적으로 고려하여 콘크리트의 역학적 특성인 강도발현 해석의 영역까지 적용할 수 있도록 기존 식(3)에 적절한 영향 요인을 추가하는 방법을 통해 Ea 모델식의 개발이 필요할 것으로 사료된다.

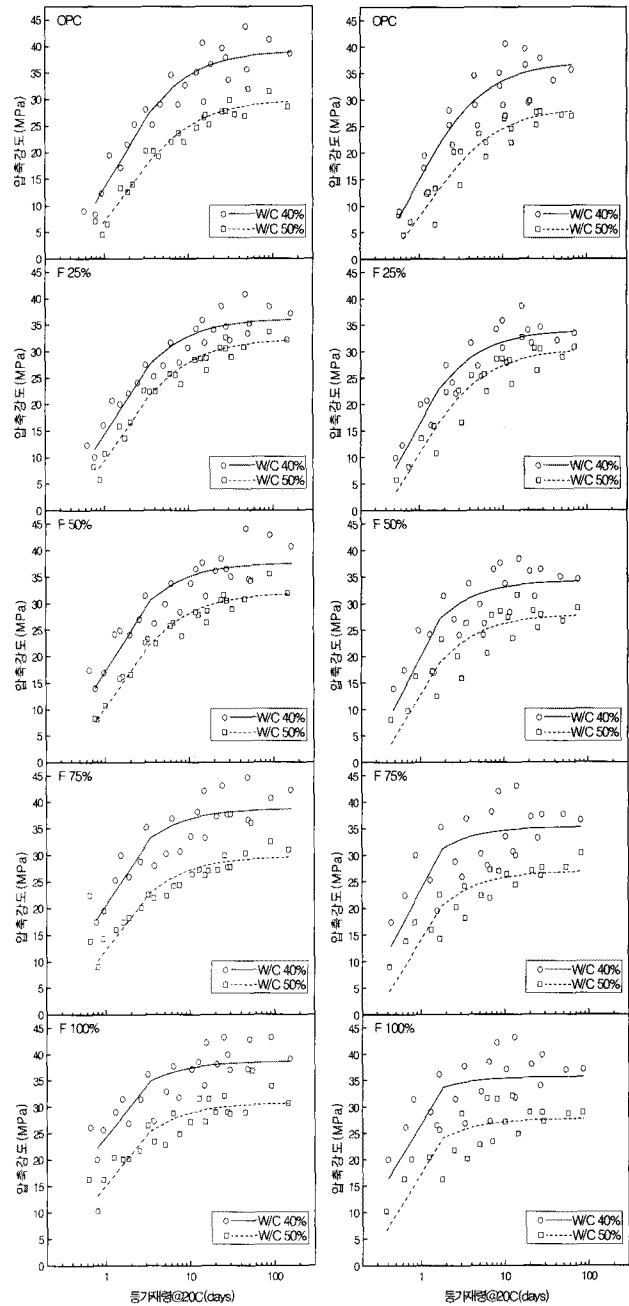


그림 4. 등가재령에 의한 FC 치환 콘크리트의 강도증진 해석 결과 비교

4. 결론

본 연구에서는 FC를 사용한 콘크리트의 분말도를 고려한 등가재령에 의한 강도발현 해석을 수행하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 온도가 수화반응속도에 미치는 영향을 평가할 수 있는 Ea는 응결시간에 의하여 산정할 경우 FC 치환율 변화에 따라 큰

변동이 없는 것으로 나타났으나, 분말도를 고려하는 모델을 이용할 경우 FC 치환률 변화에 따라 분말도가 증가하여 비례적으로 증가하고, 대략 44~56 KJ/mol의 범위로 산정되었다.

- 2) FC 치환률 변화에 따른 콘크리트의 강도발현을 등가재령 방법으로 해석한 결과 응결시간에 의한 E_a 를 적용한 경우 전반적으로 FC 치환률이 낮은 경우 0.90이상의 양호한 결정계수 값을 갖고 있으나, FC 치환률이 75%이상에서는 정확성이 저하하는 것으로 나타나 FC 치환에 따른 영향인자를 추가적으로 고려할 필요성이 제기된다.
- 3) FC 치환률 변화에 따른 시멘트의 분말도 증가를 수화반응 속도에 반영한 E_a 식을 이용하여 강도발현 해석을 수행한 결과 예상과 다르게 FC 치환률이 증가함에 따라 상당부분 정확도가 저하하는 것으로 나타났고, 기존의 응결시간에 의한 방법보다도 역시 정확도가 저하함을 알 수 있었다.

금후의 과제로서 분말도의 영향을 보다 합리적으로 고려할 수 있는 E_a 산정모델의 개발을 통해 FC 치환률에 따른 콘크리트의 정확한 강도발현 해석을 수행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2007년 정부(교육인적자원부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (KRF-2007-331-D00530)

참 고 문 헌

1. 한민철, 한천구, 최성용, 노동현, 등가재령에 의한 미분 시멘트 사용 콘크리트의 강도 증진 해석, 대한건축학회논문집 구조계, 제24권 제4호, pp.99~108, 2008.4
2. 한천구, 한민철, 김성환, 입도분급에 의하여 제조된 시멘트의 분말도 변화가 콘크리트의 공학적 특성에 미치는 영향, 대한건축학회논문집 구조계, 제23권 제8호, pp.123~131, 2007.8
3. Carino N. J., Maturity Method; Theory and Application., Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984
4. Freisleben Hansen, P., Pederson, J., Maturity Computer for Controlled Curing and Hardening of Concrete Strength, Nordisk Betong, pp.19~34, 1977
5. Roberto C. A. Pinto, Kenneth C. Hover, Application of Maturity Approach to Setting Times, ACI Materials Journal, Vol.96, No.6, p.p.686~691, 1999
6. Schindler A.K, Concrete hydration, temperature development, and setting at early ages, Ph.D. Dissertation, The university of Texas, pp.30~321, 2002

(접수 2009. 6. 30, 심사 2009. 7. 23, 게재확정 2009. 7. 30)

요 약

본 연구에서는 입도분급에 의한 미분시멘트(FC)를 사용한 콘크리트의 강도 발현해석에 있어 FC 치환률 증가에 따른 분말도 변동이 콘크리트의 강도발현에 미치는 영향을 분석하기 위하여 기존 등가재령방법에 분말도의 영향을 고려할 수 있는 결보기 활성화 에너지 모델을 이용하는 방법으로 FC 치환 콘크리트의 강도발현해석을 실시하고자 한다.

연구결과에 따르면 FC 치환률 변화에 따른 시멘트의 분말도 증가를 수화반응속도에 반영한 결보기 활성화 에너지(E_a)식을 이용하여 강도발현 해석을 수행한 결과 예상과 다르게 FC 치환률이 증가함에 따라 상당부분 정확도가 저하하는 것으로 나타났고, 기존의 응결시간에 의한 방법보다도 역시 정확도가 저하함을 알 수 있었다.

금후의 과제로서 분말도의 영향을 보다 합리적으로 고려할 수 있는 E_a 산정모델의 개발을 통해 FC 치환률에 따른 콘크리트의 정확한 강도발현 해석을 수행할 필요가 있을 것으로 사료된다.

키워드 : 고온조건, 적산온도, 강도증진, 미분시멘트, 등가재령, 분말도