

새로운 겉보기 활성화에너지 함수에 의한 플라이애시 콘크리트의 압축강도 예측

한상훈^{1)*} · 김진근²⁾ · 박연동³⁾

¹⁾한국해양연구원 ²⁾한국과학기술원 ³⁾경산대학교

(2000년 11월 9일 원고접수, 2001년 4월 26일 심사완료)

Prediction of Compressive Strength of Fly Ash Concrete by a New Apparent Activation Energy Function

Sang-Hun Han^{1)*}, Jin-Keun Kim²⁾, and Yon-Dong Park³⁾

¹⁾ Coastal & Harbour Engineering Research Center, Korea Ocean Research & Development Institute, Ansan, 425-744, Korea

²⁾ Dept. of Civil Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology, Taejeon, 305-701, Korea

³⁾ Dept. of Civil Engineering, Kyungsan University, Kyungsan, 712-715, Korea

(Received on November 9, 2000, Revised on April 26, 2001)

ABSTRACT

The prediction model is proposed to estimate the variation of compressive strength of fly ash concrete with aging. After analyzing the experimental result with the model, the regression results are presented according to fly ash replacement content and water-cement ratio. Based on the regression results, the influence of fly ash replacement content and water-cement ratio on apparent activation energy was investigated.

According to the analysis, the model provides a good estimate of compressive strength development of fly ash concrete with aging. As the fly ash replacement content increases, the limiting relative compressive strength and initial apparent activation energy become greater. The concrete with water-cement ratio smaller than 0.40 shows that the limiting relative compressive strength and apparent activation energy are nearly constant according to water-cement ratio. But, the concrete with water-cement ratio greater than 0.40 has the increasing limiting relative compressive strength and apparent activation energy with increasing water-cement ratio.

Keywords : compressive strength, fly ash, aging, apparent activation energy

1. 서 론

화력발전소에서 석탄의 연소과정에서 발생하는 플라이애시는 막대한 처리비용과 환경오염을 유발시키는 산업폐기물이다. 이러한 플라이애시를 콘크리트의 혼화재료로 사용함으로써 콘크리트에 대한 원가절감과 더불어 산업폐기물의 처리에 의한 환경오염물질의 감소에도 기여하고 있다.

일반적으로, 플라이애시를 혼화재료로 사용하게 되면 수화열의 감소, 장기강도의 증진, 내구성 향상, 작업성 증가 등 콘크리트의 품질을 개선하는 여러 장점을 지니고 있어 특히, 수화열 발생이 문제가 되는 구조물이나 고강도 콘크리트가 필요한 구조물에 많이 사용되고 있다^{1,2)}. 따라서 플라이애시 콘크리트의 강도변화를 파악하고 그 값을 예측하는 것이 필요한데, 앞선 연구¹⁾에서는 국산 플라이애시를

사용하여 초기 및 장기 강도의 특성을 실험적 방법으로 분석하였다.

본 연구에서는 앞서 행해진 플라이애시 콘크리트의 압축강도 실험결과를 바탕으로 재령에 따라 플라이애시 콘크리트의 압축강도를 예측할 수 있는 모델식을 제시하고자 하였다. 또한 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 겉보기 활성화에너지와 플라이애시 콘크리트의 겉보기 활성화에너지를 비교하였다.

2. 실험결과

실험에 대한 결과는 참고문헌 1의 논문에서 발표하였는데 그 내용을 요약하면 다음과 같다. 시멘트는 2종 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 혼합된 플라이애시는 KS L 5405의 규격과 ASTM C 618-94a를 만족시키는 F급 플라이애시이다. 공시체를 제작한 후의 양생은 재령 28일까지 21 ± 2 °C의 온도로 수중양생을 하였으며, 그 이후에는 습윤양생을

* Corresponding author

Tel : 031-400-6345 Fax : 031-408-5823

E-mail : shhan@kordi.re.kr

실시하였다. 플라이애시 대체량은 각각 10, 20, 30 %이고 물-시멘트비는 0.27, 0.32, 0.35, 0.40, 0.55, 0.60을 선택하여 실험을 실시하였다. 그 실험결과들은 Table 1과 같다.

3. 예측 모델식의 적용

콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 온도와 재령의 복합 영향을 모델링하기 위해 참고문헌 3에서는 결보기 활성화 에너지를 재령의 함수로 가정하여 등온양생 조건의 콘크리트 인 경우에는 식 (1)과 같은 모델식을 제시하였다³⁾.

식 (1)의 모델식을 이용하여 압축강도의 실험결과를 분석한 후에 결보기 활성화에너지에 대한 예측식을 제시하였고 이 예측식을 탄성계수와 쪼갠인장강도에도 그대로 적용하였었다. 식 (1)의 모델식에 대한 기존의 분석들은³⁻⁵⁾ 양생온도와

재령의 강도와 탄성계수에 대한 영향을 연구한 것으로 혼화재의 차이나 물-시멘트비의 차이에 의한 결보기 활성화에너지와 한계상대강도의 변화를 고찰하지는 못 하였다. 이에 본 연구에서는 혼화재인 플라이애시의 대체량과 물-시멘트비에 따른 강도의 변화를 식 (1)을 이용하여 모델링하였다.

식 (1)을 이용하여 Table 1의 실험결과들을 회귀분석하여 Table 2와 같은 결과를 얻었고, 실험값과 회귀분석에 의한 곡선들은 Fig. 1에 나타내었다. 사전에 실시한 회귀분석에서 t_0 값이 거의 모든 경우에 0에 가까운 값을 나타내었으므로 t_0 는 0으로 가정하여 실험결과를 회귀분석하였다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 물-시멘트비가 0.35이상인 시멘트의 경우에는 실험값과 예측값이 잘 일치하고 있음을 알 수 있다. 물-시멘트비가 0.32와 0.27인 경우에는 플라이애시

$$\frac{S}{S_{28}} = R_u \left[1 - \frac{1}{\sqrt{1 + A \left(e^{-\frac{E_0}{RT}} e^{-\alpha t} + e^{-\frac{E_0}{RT}} e^{-\alpha t_0} \right) (t - t_0)}} \right] \quad (1)$$

여기서, S : 강도

R_u : 한계상대강도 ($= S_u/S_{28}$, S_u : 한계강도)

E_0 : 초기 결보기 활성화에너지 (J/mole)

T : 양생온도 (Kelvin)

t_0 : 강도발현이 시작되는 재령 (days)

S_{28} : 재령 28일의 강도

A, α : 비례상수

R : 가스상수 (8.3144 J/K-mole)

t : 재령 (days)

Table 1 Experimental results of compressive strength

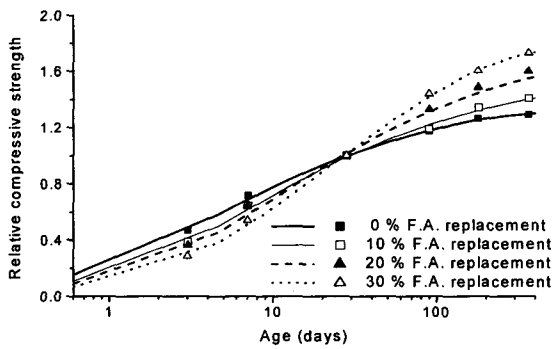
Water-cement ratio	Fly ash replacement content (%)	Compressive strength (MPa)					
		3 days	7 days	28 days	90 days	180 days	365 days
0.60	0	15.4	23.6	32.9	38.6	41.6	42.5
	10	13.1	21.8	33.8	40.3	45.4	47.6
	20	10.2	18.0	28.0	37.2	41.6	44.8
	30	7.16	13.5	25.0	36.0	40.1	43.2
0.55	0	18.7	26.6	36.1	40.2	46.3	46.5
	10	16.0	25.4	38.3	45.8	49.6	51.8
	20	14.6	22.6	33.8	43.5	50.0	52.1
	30	12.7	18.3	30.9	39.3	47.0	48.2
0.40	0	34.0	43.6	49.7	56.3	60.4	61.9
	10	31.5	42.1	50.3	57.5	62.8	66.5
	20	29.4	38.0	48.0	56.5	61.4	65.4
	30	24.2	33.7	42.8	53.5	57.6	61.3
0.35	0	45.0	49.1	56.3	59.7	66.6	68.8
	10	39.5	50.2	55.7	64.3	72.4	74.8
	20	34.1	44.9	56.0	61.3	71.4	75.3
	30	27.0	39.1	51.8	59.5	68.9	73.9
0.32	0	45.9	52.2	62.1	63.3	71.2	71.4
	10	43.4	51.9	61.7	65.3	75.4	77.6
	20	39.6	46.6	58.6	66.1	78.1	78.9
	30	28.8	36.5	44.2	57.7	67.5	72.8
0.27	0	56.5	61.2	71.8	73.8	82.0	83.4
	10	49.9	56.6	67.7	75.4	85.2	87.4
	20	44.0	50.5	65.0	72.8	81.3	85.2
	30	34.5	40.0	51.9	60.4	70.8	78.6

대체율이 증가할수록 실험값과 예측값의 오차가 증가함을 관찰할 수 있었다. 이러한 오차는 플라이애시의 단위량과 고 유동화제와 같은 혼화제의 첨가량이 증가하여 7일이하의 초기재령과 180일 이상의 장기재령에서의 강도의 발현양상이 다른 콘크리트와 달라져서 나타나는 것으로 사료된다⁶⁾. Fig. 2는 실험값과 예측값을 서로 비교하고 있는데 그림에 나타난 바와 같이 두 값은 일정오차내에서 잘 일치함을 알 수 있다.

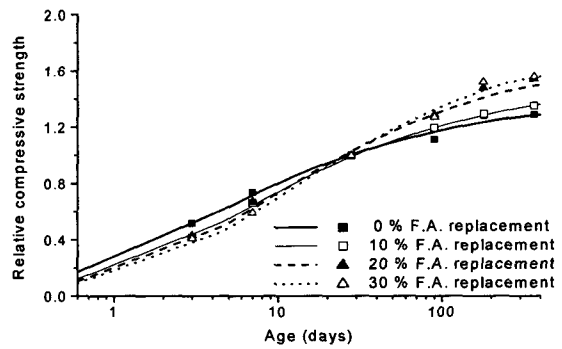
4. 일반식들의 제안

Fig. 3에서 5는 Table 2의 회귀분석결과들을 플라이애

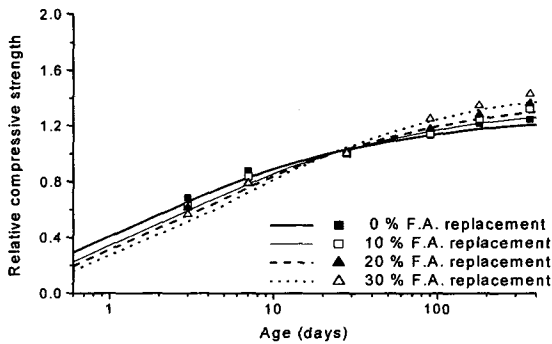
시 대체량과 물-시멘트비에 따라 나타내었다. Fig. 3은 한 계상대압축강도의 결과를 나타내고 있는데 그림에 나타난 바와 같이 플라이애시 대체량이 증가할수록 한계상대압축강도가 증가함을 알 수 있다. 이것은 플라이애시에 대한 기존의 연구결과와 일치한다. 기존의 연구들^{6,7)}에서는 플라이애시 대체량이 증가할수록 장기재령강도가 증가한다는 연구결과를 발표하였고 그 원인을 다음과 같이 설명하였다. 플라이애시는 공극수의 pH값이 13.2이상 되지 않으면 반응이 일어나지 않는데 공극수의 알칼리성이 증가하기 위해서는 포틀랜드 시멘트가 어느 정도 수화반응이 일어나야 한다. 따라서 초기재령에서는 플라이애시에 의한 포졸란 반응



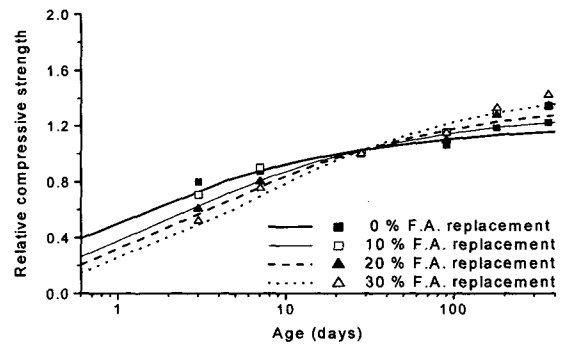
(a) Water-cement ratio=0.60



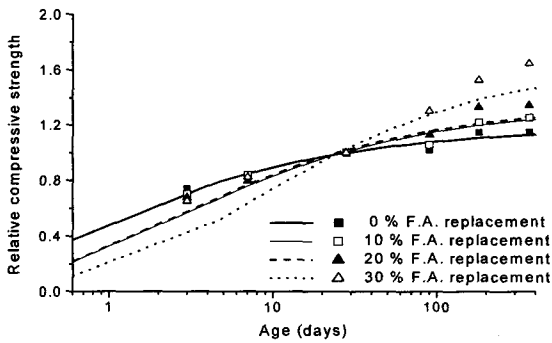
(b) Water-cement ratio=0.55



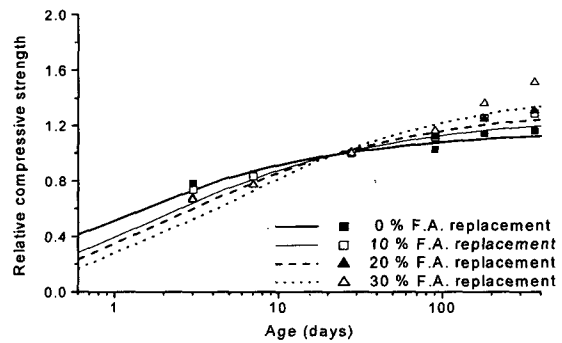
(c) Water-cement ratio=0.40



(d) Water-cement ratio=0.35



(e) Water-cement ratio=0.32



(f) Water-cement ratio=0.27

Fig. 1 Experimental and calculated relative compressive strength

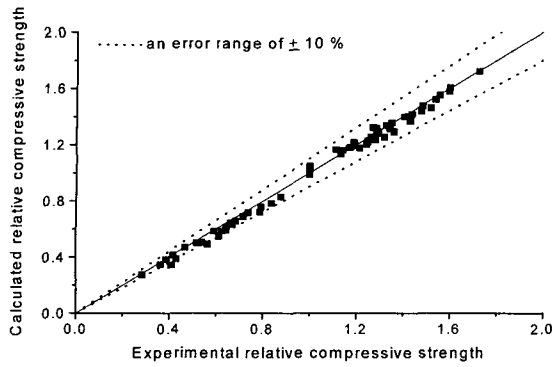


Fig. 2 Comparison of experimental and calculated relative compressive strength

Table 2 Regression results

Water-cement ratio	Fly ash replacement content (%)	E_o (J/mole)	α	R_u
0.60	0	42,953	0.000855	1.309
	10	44,205	0.000428	1.453
	20	45,036	0.000471	1.640
	30	46,061	0.000698	1.767
0.55	0	42,611	0.000609	1.306
	10	43,816	0.000335	1.417
	20	44,470	0.000568	1.563
	30	44,979	0.000594	1.596
0.40	0	40,626	0.000720	1.217
	10	41,661	0.000615	1.275
	20	42,226	0.000612	1.315
	30	43,017	0.000638	1.391
0.35	0	39,215	0.000709	1.162
	10	41,031	0.000691	1.271
	20	42,008	0.000570	1.291
	30	43,190	0.000527	1.383
0.32	0	39,403	0.000665	1.139
	10	41,811	0.000653	1.295
	20	41,811	0.000653	1.295
	30	44,254	0.000597	1.530
0.27	0	38,898	0.000634	1.133
	10	40,709	0.000712	1.232
	20	41,515	0.000645	1.260
	30	42,798	0.000566	1.392

이 일어나지 않고 공극수의 pH가 충분히 높아지면 플라이애시의 반응이 플라이애시 입자와 그 주변에서 일어난다. 재령이 더 경과하면 반응생성물이 주변으로 확산되고 모세공극 시스템으로도 들어간다. 이러한 영향으로 모세공극이 감소되어 전체공극에서 미세공극이 차지하는 비율이 높아진다. 모세공극량이 줄어들면 Beaudoin과 Ramachandran⁸⁾의 연구결과와 같이 압축강도는 증가하게 되는 것이다.

Fig. 3(b)는 물-시멘트비에 따른 한계상대압축강도의 변화를 나타내고 있다. 그림에 나타난 바와 같이 0.35이하의 물-시멘트비에서는 물-시멘트비 증가에 따른 한계상대압축강도의 변화가 작지만 0.40이상의 물-시멘트비에서는 물-시멘트비가 증가하면 한계상대압축강도의 크기가 조금 증

가한다. 물-시멘트비의 증가에 따른 한계상대압축강도의 증가는 물-시멘트비가 증가할수록 시멘트 입자들의 간격이 멀어져 시멘트겔의 전체 시스템이 좀 더 늦게 형성되기 때문으로 사료된다⁸⁾. 상대적으로 물-시멘트비가 낮은 콘크리트는 시멘트겔의 시스템이 좀 더 빨리 완성됨으로 인해 재령 28일 강도로 나눈 장기재령의 상대강도가 높은 물-시멘트비를 가진 콘크리트보다 작아지게 되는 것이다. 또한 그림에 나타난 바와 같이 플라이애시 대체량이 증가할수록 물-시멘트비에 따른 한계상대압축강도의 증가량이 커진다. 0.40의 물-시멘트비를 기준으로 실험결과를 두 부분으로 분리하여 한계상대압축강도에 대한 다음과 같은 모델식을 제시하였고 그 곡선들을 Fig. 3에 나타내었다.

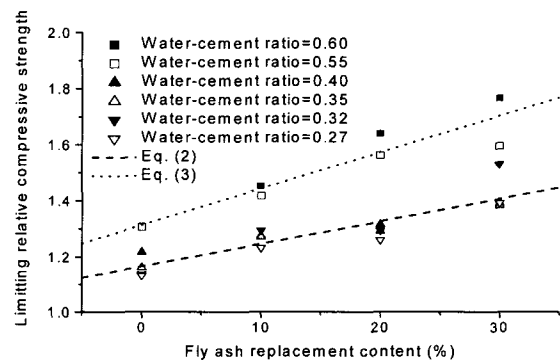
Water-cement ratio ≤ 0.40

$$R_u = 1.166 + 0.008 FA \quad (2)$$

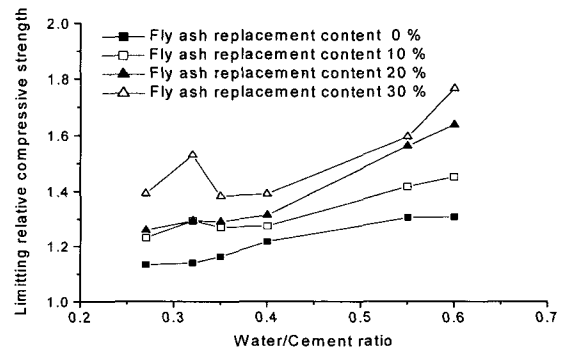
Water-cement ratio > 0.40

$$R_u = 1.313 + 0.013 FA \quad (3)$$

여기서, FA : 플라이애시 대체량 (%)



(a) Fly ash replacement content

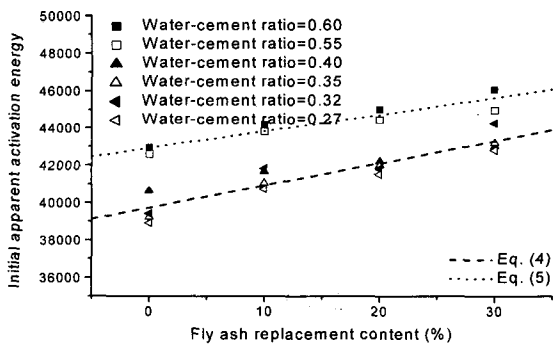


(b) Water-cement ratio

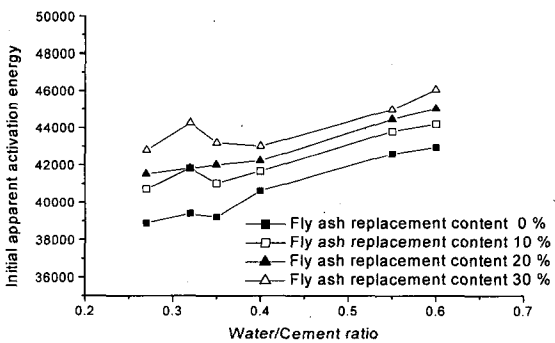
Fig. 3 Limiting relative compressive strength

참고문헌 3에서 21°C로 양생한 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 한계상대압축강도를 1.16정도로 제시하였는데 이것은 물-시멘트비가 대략 0.35~0.55사이일 때이다. 플라이애시가 첨가되지 않고 물-시멘트비가 0.35~0.55인 2종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 한계상대압축강도의 평균값은 1.23 정도로 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트보다 조금 크다. 이것은 일반적으로 2종 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 장기재령강도가 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트보다 조금 크기 때문인 것으로 사료된다.

Fig. 4는 초기 결보기 활성화에너지의 물-시멘트비와 플라이애시 대체량에 따른 변화를 나타내고 있다. Fig. 4(a)에 나타난 바와 같이 플라이애시 대체량이 증가할수록 초기 결보기 활성화에너지 값은 증가한다. 또한 Fig. 4(b)와 같이 물-시멘트비가 0.35이하인 경우에는 물-시멘트비에 따른 초기 결보기 활성화에너지의 값이 서로 비슷하고 0.40이상의 물-시멘트비에서는 물-시멘트비가 증가할수록 초기 결보기 활성화에너지가 증가한다. 이러한 경향은 Fig. 3의 한계상대압축강도와 유사하다. 이러한 경향의 원인은 기존의 양생온도에 따른 초기 결보기 활성화에너지의 연구결과들에서^{3,9)} 유추해 볼 수 있다. 기존의 많은 연구들에서는 결보기 활성화에너지의 개념을 양생온도의 콘크리트에 대한 영향을 모델링하는데 주로 사용



(a) Fly ash replacement content



(b) Water-cement ratio

Fig. 4 Initial apparent activation energy

하였고 이 연구결과들을 바탕으로 양생온도에 따른 결보기 활성화에너지의 변화를 나타내는 여러 예측식들을 제시하였는데 대부분의 모델식들은 양생온도가 증가할수록 결보기 활성화에너지가 감소한다. 즉 콘크리트의 수화반응이 빨리 일어날수록 초기 결보기 활성화에너지값이 작아짐을 알 수 있다. 마찬가지로 플라이애시 대체율이 작아지거나 물-시멘트비가 감소하게 되면 앞에서 언급한 이유로 수화반응의 속도가 빨라지게 되어 초기 결보기 활성화에너지값이 감소하게 된다. 한계상대압축강도의 경우와 마찬가지로 실험결과를 두 부분으로 나누어 다음과 같은 모델식을 제시하였다.

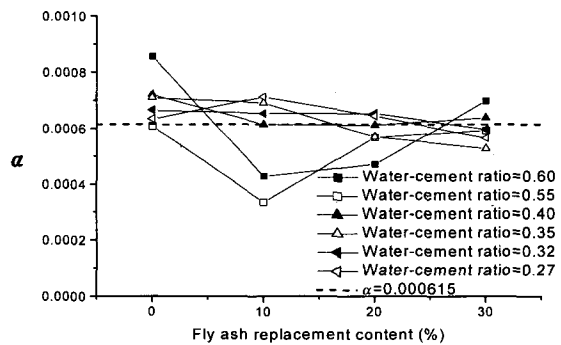
Water-cement ratio ≤ 0.40

$$E_o = 39,722 + 119 FA \quad (4)$$

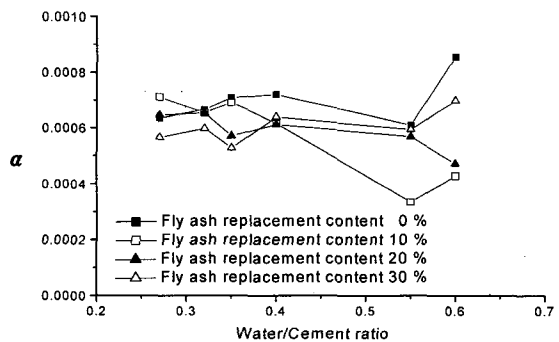
Water-cement ratio > 0.40

$$E_o = 42,923 + 90 FA \quad (5)$$

Fig. 5는 식 (1)의 α 값의 변화를 나타내는데 이것은 다음과 같은 결보기 활성화에너지의 재령에 따른 감소율을 나타낸다.



(a) Fly ash replacement content



(b) Water-cement ratio

Fig. 5 Variable α

$$E = E_0 e^{-\alpha t} \quad (6)$$

기존의 연구에서는 α 값이 양생온도가 증가함에 따라 증가하였다. 그러나 Fig. 5에서 보는 바와 같이 플라이애시 대체량과 물-시멘트비에 따른 α 값의 변화는 일정한 경향을 나타내지 않았다. 따라서 모든 α 값을 플라이애시 대체량과 물-시멘트비에 관계없이 평균하면 다음과 같다.

$$\alpha = 0.000615 \quad (7)$$

이 값은 참고문헌 3에서 구한 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트의 값보다 조금 작는데 이것은 2종 포틀랜드 시멘트 콘크리트가 1종 보통 포틀랜드 시멘트 콘크리트와는 조금 다른 강도발현 속도에서 기인한 것으로 사료된다.

식 (1)은 재령 28일 압축강도에 대한 각 재령의 압축강도비를 나타내지만 직접적인 압축강도값을 제시하지는 못한다. 그러나, 플라이애시 대체량과 물-시멘트비에 따른 재령 28일의 압축강도가 있으면 압축강도를 직접 예측할 수 있다. 이에 본 논문에서는 Bolomey의 식을 이용하여 재령 28일의 플라이애시 콘크리트의 압축강도를 회귀분석하였고 그 결과는 다음과 같다⁷⁾.

$$\begin{aligned} S_{28} &= X \frac{c}{w} + Y \frac{f}{w} + Z \quad (8) \\ &= X \left(\frac{c}{w} + k_s \frac{f}{w} \right) + Z \\ &= 16.8 \frac{c}{w} - 34.2 \frac{f}{w} + 9.20 \\ &= 16.8 \left(\frac{c}{w} - 2.04 \frac{f}{w} \right) + 9.20 \end{aligned}$$

여기서, c : 단위시멘트량 (kg/m^3)
 w : 단위수량 (kg/m^3)
 f : 단위플라이애시량 (kg/m^3)

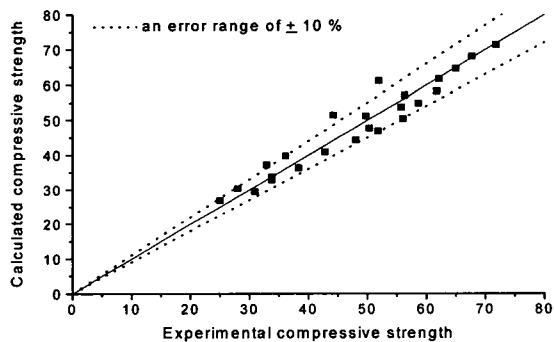


Fig. 6 Comparison of experimental and calculated 28-day compressive strength

이 식을 이용하여 예측한 28일 압축강도와 실험값은 일정 오차내에서 잘 일치함을 Fig. 6에서 확인할 수 있다. 식 (8)에서 k_s 는 일반적으로 시멘트에 대한 플라이애시의 반응률의 비를 나타낸다. 본 논문에서는 플라이애시 대체율이 증가할수록 28일 압축강도가 감소하기 때문에 k_s 값은 (-)값을 가지게 된다. 그러나 분말도가 더 높은 플라이애시를 사용하거나 재령이 증가하여 플라이애시의 첨가량에 따라 강도가 증가하게 되면 k_s 값은 (+)값을 가지게 된다. 예를 들어, k_s 값이 0.2라면 플라이애시는 시멘트의 0.2배에 해당하는 반응성을 가지고 있다고 설명될 수 있다.

5. 결 론

플라이애시 콘크리트의 재령에 따른 압축강도 변화를 새로운 결보기 활성화에너지 개념을 도입한 모델식을 이용하여 모델링한 후에 다음의 결론을 내릴 수 있었다.

1) 예측 모델식은 실험결과를 일정오차내에서 잘 모델링하였다. 그러나, 물-시멘트비가 0.32이하인 경우에는 플라이애시 대체량이 증가하면 실험값과 예측값의 오차가 조금 증가하는 경향을 나타내었다.

2) 플라이애시 대체량이 증가할수록 한계상대압축강도의 크기가 증가하였다. 그러나, 그 증가량의 크기는 물-시멘트비 0.40이상과 이하에서 조금씩 다르게 나타났다. 초기 결보기 활성화에너지도 한계상대압축강도와 같이 플라이애시 대체량이 증가할수록 그 값이 증가하였다. 결보기 활성화에너지의 모델식에 사용되는 변수인 α 는 플라이애시 대체량의 변화에 따라 일정한 경향을 나타내지 않았다.

참고문헌

1. 김진근, 박연동, 성근열, "고강도 플라이애시 콘크리트의 장기 강도 특성에 관한 연구," 한국콘크리트학회 논문집, 제3권 4호, 1991. 12, pp.107~115.
2. ACI Committee 226, "Use of Fly Ash in Concrete," ACI 226.3R-87, American Concrete Institute, Detroit, 1987.
3. 한상훈, 김진근, 문영호, "수정 반응률 상수 모델에 의한 콘크리트 압축강도의 예측," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 2호, 2000. 4, pp.31~42.
4. 한상훈, 김진근, 송영철, "콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과 (I)," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 6호, 2000. 12, pp.23~34.
5. 한상훈, 김진근, 양은익, "콘크리트의 재료역학적 성질에 대한 양생온도와 재령의 효과 (II)," 한국콘크리트학회 논문집, 제12권 6호, 2000. 12, pp.35~42.
6. Neville, A. M., "Properties of Concrete," The

- 4th edition, Longman, 1995.
7. Hedegaard, S. E., and Hansen, T. C., "Modified Water/Cement Ratio Law for Compressive Strength of Fly Ash Concretes," *Materials and Structures*, Vol. 25, No.149, 1992, pp.273~283.
 8. Beaudoin, J. J., and Ramachandran, V. S., "A New Perspective on the Hydration Characteristics of Cement Phases," *Cement and Concrete Research*, Vol.22, No.4, 1992, pp.689~694.
 9. Kjellsen, K. O., and Detwiler, R. J., "Later Ages Strength Prediction by a Modified Maturity Method," *ACI Materials Journal*, Vol.90, No.3, 1993, pp.220~227.

요 약

본 논문에서는 플라이애시 콘크리트의 재령에 따른 변화를 예측하기 위한 모델식을 제시하고 그 모델식의 유효성을 검토하였다. 기존에 행해졌던 실험결과를 모델식을 이용하여 회귀분석한 후에 그 결과를 플라이애시 대체량과 물-시멘트비에 따라 분석하였다.

해석결과에 의하면 예측 모델식은 실험결과를 일정오차내에서 잘 모델링하였다. 그러나 물-시멘트비가 매우 작은 경우에는 플라이애시 대체량이 증가하면 실험값과 예측값의 오차가 조금 증가하는 경향을 나타내었다. 플라이애시 대체량이 증가할수록 한계상대압축강도의 크기가 증가하였고 초기 겔보기 활성화에너지도 한계상대압축강도와 같이 플라이애시 대체량이 증가할수록 증가하였다. 0.40이하의 물-시멘트비에서는 한계상대압축강도와 겔보기 활성화에너지의 크기가 일정하고 물-시멘트비가 0.40을 초과하면 물-시멘트비의 증가에 따라 한계상대압축강도와 겔보기 활성화에너지가 조금씩 증가하였다.

핵심용어 : 압축강도, 플라이애시, 재령, 겔보기 활성화에너지