한국환경과학회지 제19권(제1호), 105~114, 2010
Journal of the Environmental Sciences

양생온도가 플라이애시를 사용한 콘크리트의 초기강도발현에 미치는 영향

한민철 · 신병철*

청주대학교 건축공학과, *중부대학교 환경조경학과

(2009년 11월 10일 접수; 2009년 11월 27일 수정; 2009년 12월 15일 채택)

Effect of Curing Temperature on Early Age Strength Development of the Concrete Using Fly Ash

Min-Cheol Han and Byung-Chuel Shin*

Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Cheongju 360-764, Korea
**Department of Landscape Architecture, Joongbu University, Chungnam 312-940, Korea*

(Manuscript received 10 November, 2009; revised 27 November, 2009; accepted 15 December, 2009)

Abstract

The objective of the paper is to experimentally investigate the compressive strength of the concrete incorporating fly ash. Ordinary Portland cement(OPC). Water to binder ratio(W/B) ranging from 30% to 60% and curing temperature ranging from -10℃~65℃ were also adopted for experimental parameters. Fly ash was replaced by 30% of cement contents. According to the results, strength development of concrete contained with fly ash is lower than that of plain concrete in low temperature at early age and maturity. In high curing temperature, the concrete with fly ash has higher strength development than that of low temperature regardless of the elapse of age and maturity. Fly ash can have much effect on the strength development of concrete at the condition of mass concrete, hot weather concreting and the concrete products for the steam curing.

Key Words : Curing temperature, Maturity, Strength development, Fly ash

1. 서 론

최근 전세계적으로 저탄소 녹색성장에 대한 국가 사회적 관심이 집중되면서 건설 산업 활동에 있어 환경문제가 차지하는 비중이 현격히 증가하고 있는 상황이다. 특히, 건설 산업의 경우 건설구조물의 기획에서부터 해체단계에 이르는 전 생애기간(Life cycle) 동안 CO_2 발생을 포함한 각종 환경오염을 유발하는 인자들이 다른 산업분야에 비해 월등히 많이 발생하고 있는 실정으로서 현재 이를 해결하기위한 설계, 시공 및 유지관리차원의 각종 친환경 및 재활용 소재의 사용 및 환경 친화적인 시공기술의 수요가 급증하는 추세이다.

이와 연관하여 건설공사에 있어 레미콘 산업의 경우도 환경파괴 문제와 자원의 유효한 재활용이라는 문제를 해결하기 위함에 더 많은 초점이 맞춰져서 관리되고 있는 것이 현실이고, 이러한 맥락에서 이전부터 제로에미션(Zero emission)이란 용어가 레미콘산업에 있어 환경과 연관하여 화두로 등장하고 있는데, 이는 배출제로를 의미하는 것으로 유상이든 무상이든 매립되는 최종 처분량을 제로화 시키는 운동으로 정의될 수 있다. 즉, 폐기물을 타 산업의 자원으로 재이

Corresponding Author : Byung-Cheol Shin, Department of Landscape Architecture, Joongbu University, Chungnam 312-940, Korea
Phone: +82-41-750-6718
E-mail: bcshin@joongbu.ac.kr

용하고 산업관련만으로 폐기물이 나오지 않게 네트워크시스템을 구축하는 것을 말한다. 레미콘 산업의 경우도 타 산업 및 레미콘 자체적으로 발생하는 폐기물을 재활용할 수 있고, 자체적으로도 폐기물의 발생을 최소화하는 방안도 존재한다.

이러한 폐기물 자원의 재활용과 연관하여 콘크리트 제조시 시멘트의 대체재로서 플라이애시를 사용하는 것이 일반화되어 있는데, 이러한 플라이애시는 화력발전소에서 발생되는 유연탄을 포집한 것으로서 주성분은 SiO_2와 CaO성분이며, 시멘트의 수화반응에 의한 $Ca(OH)_2$가 플라이애시의 SiO_2와 Al_2O_3와 2차 반응을 유발하는 포졸란 작용에 의하여 C-S-H나 C-A-H를 생성하므로서 콘크리트의 장기강도 향상, 내화학성 증가 그리고 수화열을 저감시키는 역할을 한다. 그리고, 경제성 측면에서도 일반 시멘트의 60~80%수준에 불과하기 때문에 실무 레미콘 업계에서는 시멘트의 대체재로서 각광을 받고 있다.

그런데, 이러한 플라이애시는 겨울철과 같은 낮은 온도조건에서는 응결지연 및 초기압축 강도가 저하하는 문제가 발생하여 거푸집 탈형 시기가 늦어짐으로 인한 공기지연 문제 등으로 동절기에는 실무 레미콘 제조 및 콘크리트 타설시 플라이애시의 사용을 기피하고 있는 실정이다. 반면에 여름철과 같은 고온에서는 플라이애시의 촉진된 포졸란 반응에 기인하여 초기강도의 향상 뿐만 아니라 장기강도의 향상을 기대할 수 있는 것으로 보고되고 있다[1,2].

그러나, 플라이애시를 사용한 콘크리트가 양생온도변화에 따른 제반 강도발현 성상에 대한 연구는 제한적으로 보고되고 있어 이에 대한 보다 폭넓은 연구가 필요할 것으로 사료된다.

따라서 본 연구에서는 플라이애시를 사용한 콘크리트의 양생온도 변화에 따른 초기 강도발현 특성을 평가하고자 실무현장의 온도조건을 반영한 양생온도 및 콘크리트의 강도수준변화 따른 재령(材齡) 및 적산온도(積算溫度)별 강도발현 성상을 실험적으로 분석하여 플라이애시의 효율적 활용에 기여하고자 한다.

2. 재료 및 방법

2.1. 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항은 Table 2와 같다. 먼저 배합사항으로 콘크리트의 강도수준은 고강도 및 일반강도를 고려하여 물-결합재비(이하 W/B) 30, 40, 50 및 60%의 4수준으로 결정하였다. 결합재로서는 일반적으로 사용되고 있는 보통 포틀랜드 시멘트와 여기에 산업부산물인 플라이애시를 30%치환한 플라이애시 시멘트의 2종류를 변수로 선정하였다. 콘크리트의 유동성은 고강도 콘크리트의 경우 점성을 고려하여 목표 슬럼프 21±1 cm, 일반강도 콘크리트는 건축공사 표준시방서 규제치인 18±1 cm로 계획하였다.

본 연구의 중점 고려사항인 양생온도는 건설공사 현장의 다양한 온도조건을 고려하여 동절기조건에서부터 공장제품의 증기양생 수준에 해당하는 -10℃ ~65℃범위의 7수준을 계획하였다. 실험항목으로는 굳지않은 상태에서의 목표 슬럼프와 공기량을 만족하는가를 측정하였고, 경화상태에서는 양생온도별로 재령 및 적산온도에 따른 압축강도를

Table 1. Experimental design

Factors			Variables
Mixture	W/B(%)	4	30, 40, 50, 60
	Binder	2	Ordinary Portland cement (OPC) Fly ash cement (30% of fly ash substitution ; FAC)
	Target slump	2	21±1 cm (W/B 30~40%) 18±1 cm (W/B 50~60%)
	Target air content	1	4.5±1.5(%)
	Curing temperature(℃)	7	-10, 5, 10, 20, 35, 50, 65
Test	Fresh concrete	2	Slump, Air content
	Hardened concrete	1	Compressive strength

Table 2. Mixture proportions of the concretes

Binder	W/B (%)	S/a (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	Water (kg/m³)	Absolute volume (ℓ/m³)			
						Cement	Fly ash	Sand	Gravel
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[1)]	-	182	116	-	256	401
	60	40	0.18[1)]	-	181	96	-	264	414
FA	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[1)]	—	182	81	49	251	392
	60	40	0.4[1)]	—	180	67	40	267	401

[1)]AE water reducing admixture

측정하였다.

2.2. 사용재료

본 연구의 사용재료로서 시멘트는 국내산 A사의 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 3과 같다. 플라이애시는 충남 보령 화력발전소에서 발생된 것을 사용하며 물리적 성질은 Table 4에 제시되었으며, 유동성 및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 Table 5와 같다. 골재로써 잔골재는 충남 병천산 강모래를 사용하였으며, 굵은 골재는 충북 괴산산 20 mm 화강암 부순돌을 사용하였는데, 그 물리적 성질은 Table 6과 같다.

2.3. 실험방법

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

공시체의 양생방법은 콘크리트 타설 후 소정의 양생온도가 유지되도록 1일간 기중봉함 양생을 실시한 후 탈형하여 소요의 재령까지 소정의 온도가 유지되

Table 3. Physical properties of cement

Setting time (Min.)		Compressive strength (MPa)			Blaine fineness (cm^2/g)	Density	Soundness (%)	L.O.I (%)
Ini.	Fin.	3ds.	7ds.	28ds.				
237	341	24.5	30.1	34.6	3,412	3.15	0.05	0.9

Table 4. Physical properties of fly ash

Ratio of water content(%)	Density (g/cm^3)	Blaine fineness (cm^2/g)	Ratio of compressive strength (%)	SiO_2 (%)	Loss on ignition (%)	Moisture contents (%)
99	2.23	3,519	97	97	3.4	0.3

Table 5. Physical properties of chemical agents

Type	Basis	Appearance	Color	Density
Superplasticizer	sulfonic acid melamine based	grain	white	—
AE agent	Synthetic tensides	liquid	brown	1.02
AE water reducing agent	Naphthalene	liquid	brown	1.14

는 수중 양생조에서 수중양생을 실시하였다. 한편, 경화 콘크리트의 실험으로 압축강도는 KS F 2405 규정에 의거하여 실험 계획된 소정의 양생온도에서 계획된 재령까지 양생한 후 측정하였다(Table 7 참조).

3. 결과 및 고찰

3.1 기초물성 및 재령경과에 따른 강도증진

먼저, 굳지않은 콘크리트의 물성으로 슬럼프 및 공기량은 배합설계에 의하여 목표 슬럼프인 21±1 cm와 18±1 cm를 만족하는 것으로 나타났고, 공기량 역시 4.5±1.5%의 범위를 만족함을 알 수 있었다.

한편, Fig. 1은 보통 포틀랜드 시멘트와 플라이애시를 혼입한 콘크리트의 W/B별 및 양생온도별 재령경과에 따른 강도증진 성상을 나타낸 것이다. 전반적으로 재령이 경과함에 따라 강도는 증진되고 W/B가 감소할수록, 양생온도가 높아질수록 초기에 높은 강도증진을 보이고 있다.

시멘트의 종류별로는 먼저, 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 양생온도가 높을수록 초기재령에서는 높은 강도증진을 보이고 있으나, 재령이 경과할수록 오히려 저온양생의 경우보다 강도증진이 둔화되는강도증진의 역전현상이 나타남을 알 수 있었고, 저온양생의 경우는 초기재령에서는 강도증진이 미약하나 장기재령으로 진행할수록 높은 강도증진이 이루어짐을 알 수 있었다. 특히, 양생온도 -10℃의 경우 W/B 40~60%에서는 재령이 경과하여도 극저온의 효과로 강도증진은 미미한 것으로 나타났으나, W/B 30%에서는 재령이 경과함에 따라서 어느 정도의 강도증진을 나타내고 있는데, 국내 건축공사 표준시방서, 콘크리트 표준시방서 그리고 ASTM C 1074에 따르면 콘크리트의 강도증진은 -10℃이하에서는 이루어지지 않게 되고 이를 적산온도개념에서는 기준온도라 칭하고 있다[3,4]. 그런데, 전술한 바와 같이 고강도 콘크리트의 경우 -10℃에서도 강도증진이 이루어지고 있어 적산온도 개념에서의 기준온도 설정에 있어 고강도 영역에서 추가적인 검토가 필요할 것으로 사료된다.

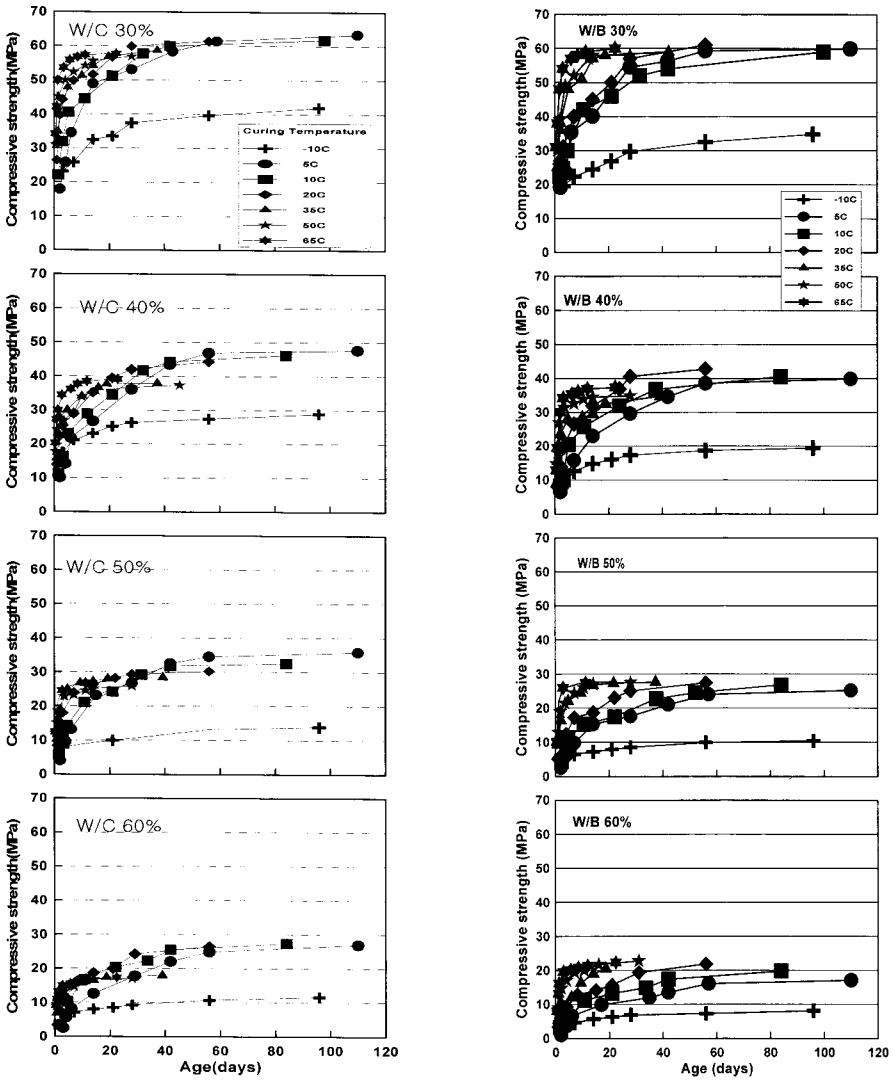
한편, 플라이애시 시멘트를 사용한 경우는 보통 포

Table 6. Physical properties of aggregates

Aggregates	Density (g/cm^3)	Fineness Modulus	Absorption (%)	Unit volume weight (kg/m^3)	Void ratio (%)
Crushed stone	2.69	6.70	1.15	1,647	40.80
River sand	2.58	2.43	1.90	1,502	42.13

Table 7. Age and maturity for measuring the compressive strength

W/B (%)	Curing temperature (℃)		Age and maturity							
30 40 50 60	-10	Age(days)	3	7	14	28	56	96	-	-
		°D·D	45	45	45	45	45	45	-	-
	5	Age(days)	2	6	14	28	42	56	110	182
		°D·D	30	90	210	420	630	840	1725	2730
	10	Age(days)	1.5	3	4.5	10.5	31.5	42	84	136.5
		°D·D	30	90	210	420	630	840	1680	2730
	20	Age(days)	1	3	7	14	21	28	56	96
		°D·D	30	90	210	420	630	840	1680	2730
	35	Age(days)	0.7	2	4.7	9.3	14	18.7	37.3	60.7
		°D·D	31.5	90	211	418	630	841	1678	2731
	50	Age(days)	0.5	1.5	3.5	7	10.5	14	28	45.5
		°D·D	30	90	210	420	630	840	1680	2730
	65	Age(days)	0.4	1.2	2.8	5.6	8.4	11.2	22.4	36.4
		°D·D	30	90	210	420	630	840	1680	2730



(1) OPC (2) FAC

Fig. 1. Strength development of concrete depending on curing temperature.

플랜드 시멘트에 비하여 35℃, 50℃ 및 65℃의 고온양생의 경우 양생온도가 높을수록 초기에 높은 강도증진을 나타내고 있는데, 특히 재령 20일 이전에서는 20℃조건보다 80%이상의 높은 강도증진을 확인 할 수 있었으며, 재령이 경과하여도 고온에 의해서 촉진된 포졸란 반응에 기인하여 지속적으로 높은 강도증진을 나타내고 있었다. 따라서, 매스콘크리트, 서중(暑中) 콘크리트 및 증기양생 등 콘크리트가 고온이력을 받는 경우 플라이애시를 혼입하게 되면 높은 강도의 발휘와 그에 따른 경제성을 성취할 수 있음을 시사해주는 것으로 판단된다. 반면에, 양생온도 5, 10℃의 저온조건에서는 전반적으로 초기재령에서는 낮은 강도증진을 나타내고 재령이 경과하여도 강도의 역전현상이나 커다란 강도의 증진은 없는 것으로 나타나고 있어 한중콘크리트와 같은 저온환경에서 플라이애시의 사용은 신중해야 할 것으로 사료된다.

3.2. 적산온도(積算溫度)경과에 따른 강도증진성상

먼저, 적산온도는 콘크리트의 강도증진에 있어서 양생온도와 시간이 미치는 영향을 정량적으로 표시하는 함수로서, 일정기준온도이상에서의 양생온도와 시간함수의 조합을 의미한다. (식(1) 참조) 적산온도는 콘크리트의 강도증진에 미치는 영향을 단순한 재령의 요인뿐만 아니라 양생온도의 요인과 수화반응속도의 요인을 복합적으로 고려할 수 있어 이를 이용하여 강도증진 해석을 할 경우 정확도가 상당히 향상되는 것으로 보고되고 있다[5].

$$M = \int_0^t H(T)\,dt \tag{1}$$

여기서, M : 적산온도(℃ · day)

H(T) : 적산온도 함수

이러한 적산온도 식은 Saul에 의한 온도와 재령에 의한 선형 관계식인 식 (2)와 Freisleben-Hansen에 의한 Arrhenius 화학반응 속도식을 이용한 적산온도식인 등가재령식으로 표현된다.

$$M = \int_0^t (T_c - T_0)dt \tag{2}$$

여기서, M : 적산온도(°D · D)

T_c : 시간 t동안의 온도(℃)

T_0 : 기준온도(일반적으로 -10℃)

Fig. 2는 보통 포틀랜드 시멘트 및 플라이애시 혼입 콘크리트의 적산온도경과에 따른 강도증진성상을 양생온도별로 구분하여 W/B별로 나타낸 것이다. 전반적으로 적산온도가 증가함에 따라 강도는 증진되는 것으로 나타났다.

먼저, 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트는 양생온도 5℃, 10℃ 및 20℃의 저온양생의 경우 동일 적산온도에서는 W/B별로 약간의 차이는 있지만, 거의 유사한 강도를 갖는 것으로 나타나 "동일 적산온도에서는 양생온도에 관계없이 동일한 강도를 갖는다."는[5] 적산온도 개념에 부합하는 것을 알 수 있었다. 반면에 35℃이상의 고온영역의 경우 초기적산 온도에서는 높은 강도증진을 보이나 840°D·D이상의 후기 적산온도에서는 강도증진이 둔화되는 강도의 역전현상이 발생하는 등, 저온양생 온도이력과는 다른 강도증진을 보이고 있어 적산온도를 이용한 강도증진 해석의 정확도가 저하될 것으로 판단된다. 이는 기존의 연구자들과 동일한 결과를 보여주는 것으로서, 초기재령에서 콘크리트가 고온이력을 받게 되면 수화과정에서 내부 조직에 미세한 균열이 발생하게 되어 강도저하가 발생되고, 또한 초기고온에 의해 생성된 수화생성물 입자표면에 단단한 막(shell)이 형성되면서 추가적인 수화작용을 방해하게 되어 정상적인 화학반응속도에 근간을 두고 도입된 적산온도 개념이 적용되는 것이 어려울 것으로 사료된다[5]. 한편, 플라이애시 혼입 콘크리트의 경우는 양생온도가 낮을수록 초기 적산온도에서는 보통 포틀랜드 시멘트의 경우보다 낮은 강도증진을 보이고 있으며, 적산온도가 증가하여도 압축강도의 커다란 증진이나 역전현상은 나타나지 않았다.

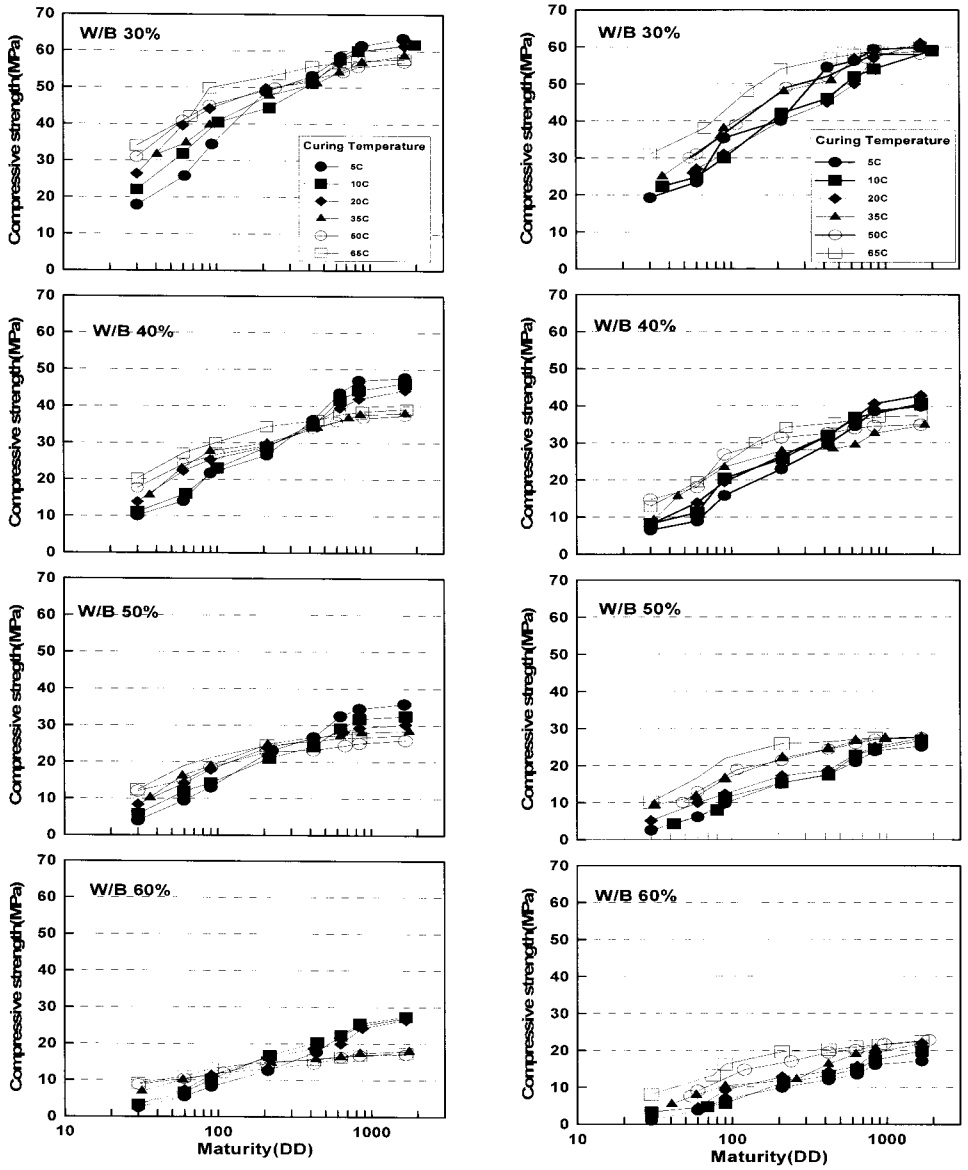
또한, 35℃이상 고온양생의 경우 동일 적산온도에서의 강도증진은 저온양생의 경우보다 높게 나타나고 있는데, 적산온도가 증가됨에 따라 강도도 높게 유지되어 보통 포틀랜드 시멘트의 경우와는 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 플라이애시가 고온조건에서 양생될 경우 포졸란 반응이 촉진되어 강도가 높게 나타나고 있는 결과로 사료된다. 이상의 결과로 보아 보통 포틀랜드 시멘트와 플라이애시 혼입 콘크리트를 대상으로 한 적산온도 경과에 따른 강도증진 성상은 특히 고온영역에서 서로 다른 양상으로 나타나고 있어 추후 이 부분에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

3.3. 양생온도에 따른 강도증진성상

Fig. 3은 보통포틀랜드 시멘트 및 플라이애시 혼입 콘크리트의 양생온도변화에 따른 압축강도를 W/B 및 재령별로 나타낸 것이다. 먼저, 재령 3일의 초기재령에서는 양생온도가 증가함에 따라 보통 포틀랜드 시멘트 및 플라이애시 혼입 콘크리트 공히 직선적으로 증가하는 것으로 나타나고 있으나, 재령이 경과함에 따라 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우 35℃이상의 고온양생에서 강도가 저하하여 양생온도증가에 따른 강도증진 경향은 포물선 형태를 나타내고 있다. 이는 양생온도가 증가할수록 동일재령에서 적산온도가 증가하여 그에 따른 높은 강도를 나타내야 하는 적산

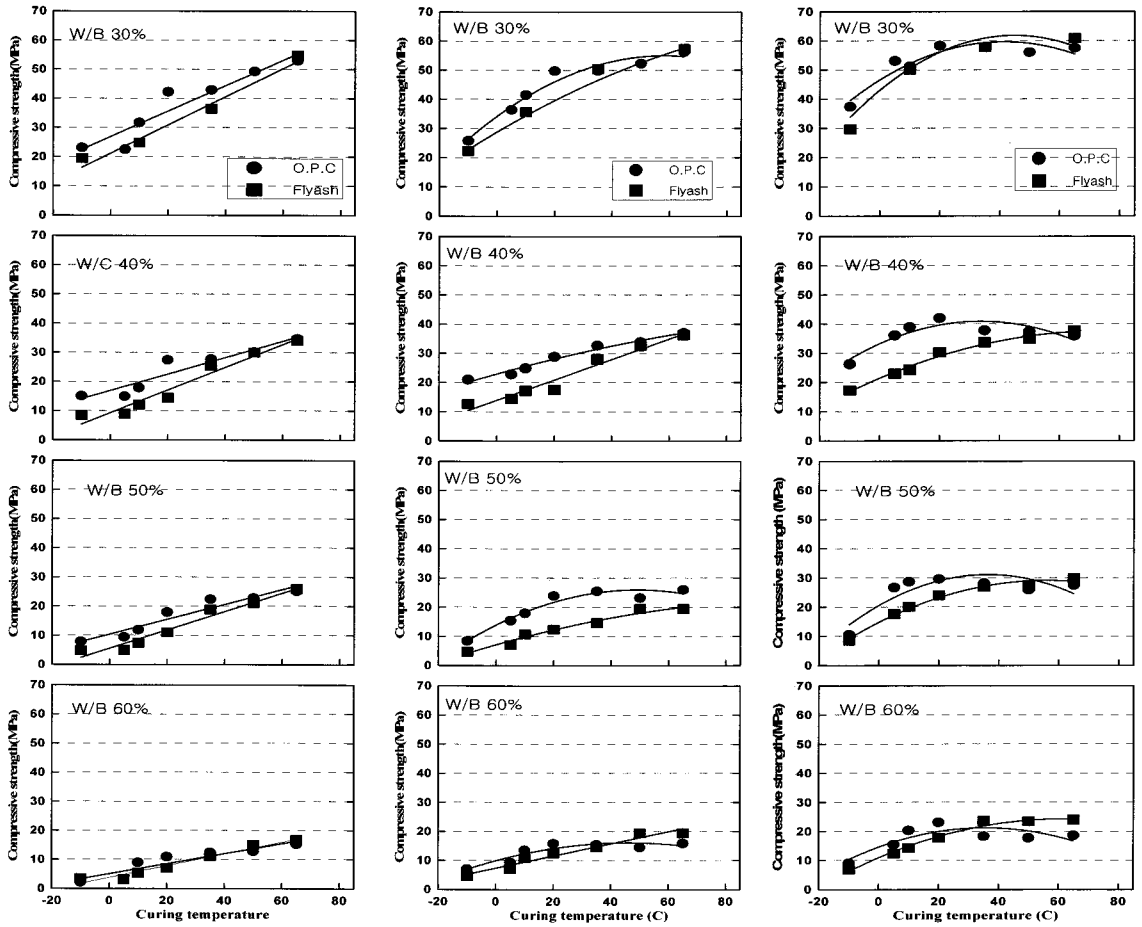
온도 개념을 고려할 경우 초기재령에서는 비교적 일치하고 있으나, 재령이 경과함에 따라 고온영역의 경우 강도가 저하하고 있어 적산온도 개념이 불일치하는 것으로 이 부분에 대한 재검토가 필요함을 시사해 주고 있다.

한편, 플라이애시 혼입 콘크리트의 경우 양생온도 증가에 따른 강도증진 경향은 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와는 부분적인 차이를 보이고 있는데, 즉 재령이 경과하여도 고온양생의 경우 강도저하 현상이 덜하므로 W/B별로 약간의 차이는 있지만, 거의 직선적인 강도 증진현상을 보이고 있어 적산온도 개념을 비교적 충족하는 것으로 나타났으며, 재령



(1) OPC (2) FAC

Fig. 2. Strength development of concrete with maturity.



(1) 3 days (2) 7days (3) 28 days

Fig. 3. Compressive strength at specific age depending on curing temperature.

28일에서는 고온양생 조건에서 오히려 보통 콘크리트보다 강도가 증가하는 강도의 역전현상을 보이고 있었다.

Fig. 4는 Fig. 3을 또 다른 각도에서 나타낸 것으로 보통 콘크리트와 플라이애시 혼입 콘크리트의 압축강도를 W/B 및 적산온도별로 나타낸 것이다. 먼저 초기 적산온도에서는 고온양생의 경우 양생온도가 증가함에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 동일 적산온도에서는 동일한 강도를 갖는다는 적산온도 개념에 불일치하는 것으로 판단된다. 또한, 적산온도가 증가함에 따라 보통 포틀랜드 시멘트의 경우 35℃ 이상의 고온양생에서는 오히려 강도가 저하하는 것으로 나타나고 있어, 이 역시 적산온도 개념과는 일치하지 않음을 알 수 있었다.

한편, 플라이애시 혼입 콘크리트의 경우 적산온도가 증가함에 따라 동일 적산온도에서의 양생온도별 강도값도 거의 유사한 것으로 나타나고 있고, 이는 결국 적산온도의 개념을 충족시키는 것으로 보통 포틀랜드 시멘트의 경우와는 다른 양상을 나타내 적산온도 개념을 고려할 경우 보통 포틀랜드 시멘트와는 부분적으로 차이를 두어야함을 시사해주는 것이라 사료된다.

Fig. 5는 재령 3, 7, 28일에서의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트의 압축강도를 산점도로서 상호 비교한 결과를 나타낸 것이다. 전반적으로 초기재령인 28일까지

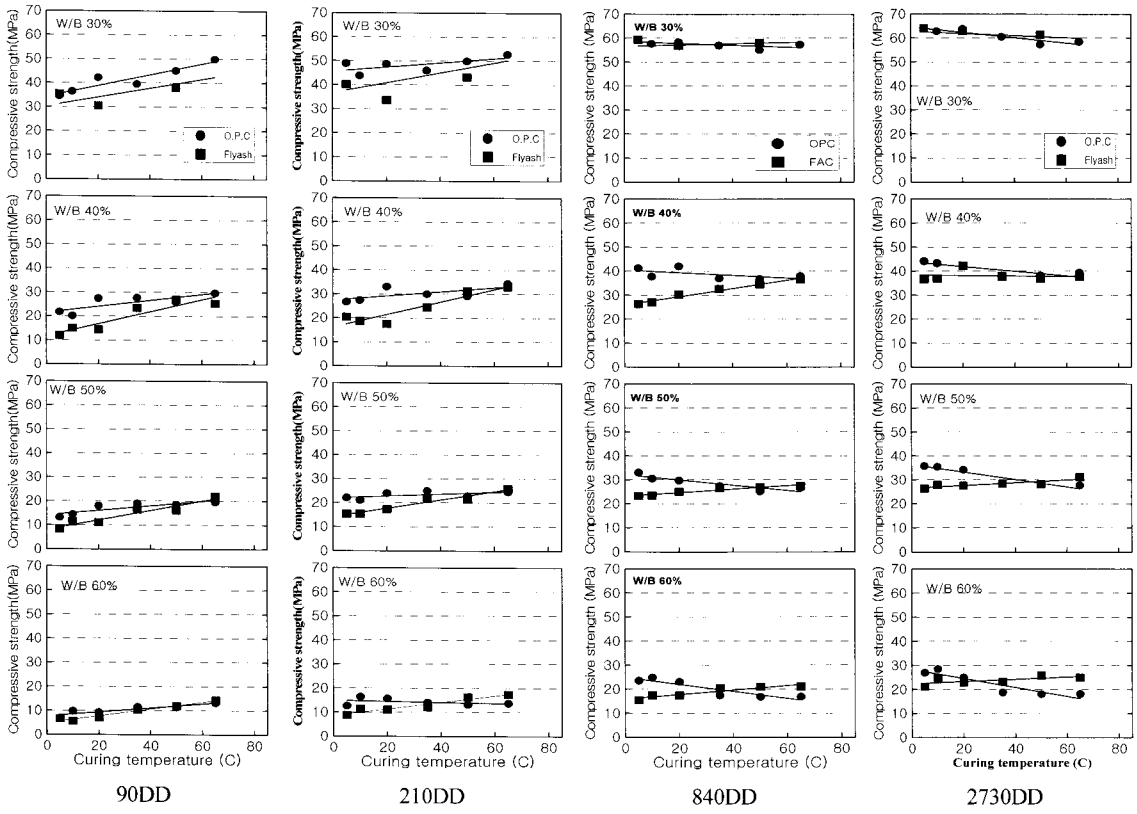


Fig. 4. Compressive strength at specific maturity depending on curing temperature.

는 보통포틀랜드 시멘트 사용한 콘크리트의 압축강도가 플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트에 비해 3~5%정도의 높은 압축강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 특히, 상관성 검토를 위해 회귀식을 도출한 결과 재령 3일에서의 1차식의 추세계수는 0.945, 재령7에서는 0.958 그리고 재령 28일에서는 1.01로 나타나 재령이 경과함에 따라 증가함을 보이고 있는데, 이는 재령이 경과함에 따라 플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트가 포졸란 반응을 일으키며 강도가 향상되어 보통 포틀랜드 시멘트에 필적하거나 더욱 높을 강도를 갖게 됨을 시사해준다.

이상을 종합해보면, 본 연구 범위에서는 플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트의 경우 양생온도 10℃ 이하의 저온 양생조건에서는 초기재령에서 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 경우보다 낮은 강도증진을 보이고 있으며, 재령이 경과하여도 강도증진의 저하는 회복되지 않는 것으로 나타나, 동절기 콘크리트 시공시 주의가 필요할 것으로 사료된다. 반면에 35℃이상의 고온조건에서는 초기재령에서도 포졸란 활성반응에 의하여 OPC에 필적하는 압축강도를 발휘하고 있으며, 이후 장기재령에서는 OPC보다 높은 압축강도를 발휘하는 것을 알 수 있어 고온이력을 받는 매스콘크리트, 서중콘크리트 및 증기양생 조건에 플라이애시가 적용될 경우 높은 강도증진을 기대할 수 있을 것으로 사료된다.

4. 결 론

본 연구에서는 다양한 양생온도 변화에 따른 플라이애시 혼입 콘크리트의 강도증진 성상을 보통 포틀랜드 시멘트를 사용한 콘크리트와 상호 비교하여 분석하였는데, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

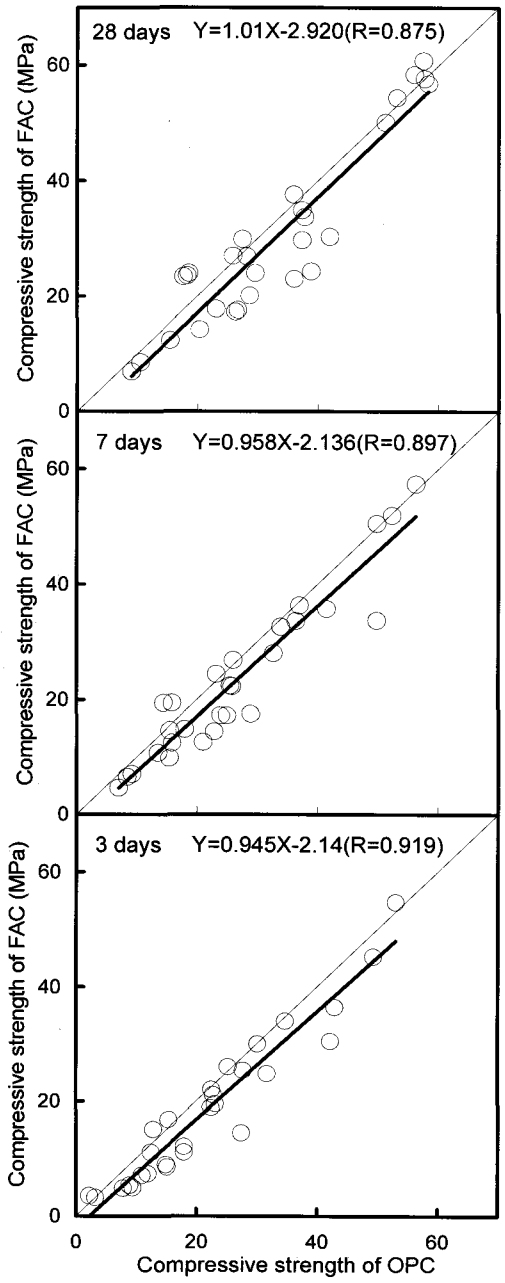


Fig. 5. Comparison of compressive strength of OPC and FAC concrete depending on age.

1) 양생온도에 따른 강도증진 특성으로 시멘트 종류에 관계없이 전반적으로 양생온도가 높을수록 초기강도는 향상되는 것으로 나타났고, 저온조건에서는 수화반응 지연에 따라 강도증진이 저하되는 것으로 나타났다. 단, 보통포틀랜드시멘트를 사용한 경우 저온양생에서 재령이 경과함에 따라 강도증진이 활발히 이루어져 오히려 고온양생조건의 콘크리트보다 높은 강도증진을 보였으나, 플라이애시 시멘트 사용 콘크리트는 재령이 경과하여도 강도증진이 미미하여 이에 대한 주의가 필요함을 알 수 있었다.

2) 적산온도에 따른 강도증진 경향으로 온도와 재령만을 고려하는 기존 적산온도식은 35℃이상의 고온조건에서는 양생온도별 강도편차가 크게 나타나고 있어 적산온도적용을 통한 강도증진 해석에 정밀도가 저하될 것으로 판단된다.

3) 플라이애시 시멘트를 사용한 콘크리트는 저온조건에서는 재령경과에 관계없이 강도증진이 둔화되는 것으로 나타나 동절기 공사에 불리할 것으로 판단되나, 고온조건에서는 재령에 관계없이 상온 혹은 저온조건보다 높은 강도증진을 보이고 있어 매스콘크리트, 서중콘크리트 및 증기양생 제품 등의 고온 환경에 사용하게 되면 강도의 증가와 그에 따르는 경제성을 추구할 수 있어 매우 유효할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1) Dodson V. H., 1981, The effect of fly ash on the setting time of concrete-chemical and physical, Proceedings of the Symposium, Effects of fly ash incorporation in cement and concrete, 166-171.
2) Brooks J. J., 2006, Prediction of setting time of fly ash concrete, ACI Materials Journal, 99, 591-597
3) Carino N. J., 1984, Maturity method; theory and application., Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1-20.
4) 한국콘크리트학회, 2009, 콘크리트 표준시방서, 1-150.
5) Tairun R. N., 1992, Maturity of concrete ; its application and limitations, CANMET, 329-359.