



양생온도 변화에 따른 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 강도증진 성상에 관한 연구

한 천 구(청주대학교 건축공학과 교수, 공학박사)

1. 서 론

일반적으로 콘크리트의 강도증진은 시멘트의 수화 반응에 의존하는 것으로 이러한 수화반응은 양생온도에 많은 영향을 받게 된다. 즉, 양생온도가 높을 경우 강도증진은 크게 되나, 양생온도가 낮을 경우는 둔화되는 경향을 띤다. 따라서, 콘크리트의 강도증진은 이러한 온도이력을 고려하는 적산온도를 이용할 경우 비교적 정확한 추정이 가능한 것으로 알려져 있으며 이와 관련한 다양한 연구들이 보고되어져 왔다.

그러나, 이러한 양생온도 변화 및 적산온도에 따른 콘크리트의 강도증진 성상과 관련한 기존의 대부분 연구들은 주로 보통 포틀랜드시멘트(이하 포틀랜드시멘트)를 대상으로 진행되어 왔는데, 최근 우리나라의 건축공사 현장에서도 공사비의 절감, 자원의 재활용 및 콘크리트의 품질향상이라는 측면에서 산업부산물의 일종인 플라이애쉬를 사용하는 경우가 많아진 실정이지만, 실제적으로 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 양생온도 변화에 따른 강도증진과 관련한 연구는 거의 없었다.

그러므로 본 연구에서는 플라이애쉬를 비교적 다량 혼입한 콘크리트를 대상으로 양생온도 및 적산온도 변화에 따른 콘크리트의 강도증진 성상을 검토하

므로써 추후 플라이애쉬를 혼입한 콘크리트의 실무 적용시에 한 참고자료로 제시하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

가. 실험 계획

본 연구의 실험계획은 <표-1>과 같고, 배합사항은 <표-2>와 같다.

나. 사용 재료

본 연구에 사용한 시멘트는 국내산 A사의 1종 포

<표-1> 실험요인 및 수준

실험요인		수준	
배합사항	W/B (%)	4	30, 40, 50, 60
	결합재	2	보통 포틀랜드시멘트 플라이애쉬 B종 시멘트 (B종 : 30% 치환)
	목표슬럼프	1	21±1cm (W/B 30~40%) 18±1cm (W/B 50~60%)
	목표공기량	1	4.5±1.5(%)
	양생온도(°C)	7	-10, 5, 10, 20, 35, 50, 65
실험사항	굳지 않은 콘크리트	2	슬럼프, 공기량
	경화콘크리트	1	압축강도



<표-2> 콘크리트의 배합표

구분	W/B (%)	S/A (%)	AE/C (%)	SP/C (%)	W (kg/m ³)	용적배합 (l/m ³)			
						C	F.A	S	G
O.P.C	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
FA B종	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

* 주 : *는 AE 감수제를 의미한다.

<표-3> 시멘트의 물리적 성질

비 중	분말도 (cm/g)	안정도 (%)	응결시간(분)		압축강도 (kg/cm ²)		
			초 결	종 결	3일	7일	28일
3.15	3,519	0.06	236	340	244	303	389

<표-4> 골재의 물리적 성질

골 재 종 류	비 중	조립 율	공극 율 (%)	흡수 율 (%)	단위용적중량 (kg/m ³)
부순돌	2.61	6.70	40.80	1.15	1,647
강모래	2.58	2.43	42.13	1.90	1,502

<표-5> 플라이애쉬의 물리적 성질

단위수량비 (%)	비 중	분말도 (cm/g)	압축강도비 (%)	SiO ₂ (%)	강열감량 (%)	습분 (%)
99	2.23	3,519	97	97	3.4	0.3

틀랜드시멘트를 사용하고 그 물리적 성질은 <표-3>과 같으며, 골재로써 잔골재는 충남 병천산 강모래를 사용하며, 굵은 골재는 충북 괴산산 20mm 화강암 부순돌을 사용하는데, 각각의 물리적 성질은 <표-4>와 같다. 플라이애쉬는 충남 보령 화력산을 사용하며 물리적 성질은 <표-5>에 제시되었으며 유동성

및 공기량 확보를 위하여 사용되는 혼화제는 <표-6>과 같다.

다. 실험 방법

콘크리트의 혼합, 굳지않은 콘크리트의 슬럼프, 공기량 시험 및 경화콘크리트의 압축강도 시험은 KS 규격에 의거 실시하고 압축강도 측정재령은 <표-7>과 같다.

<표-6> 혼화제의 물리적 성질

구 분	주 성분	형 태	색 상	비 중
고 성 능 감수 제	솔 폰 산 멜 라 민 계	분 말	흰 색	-
A E 제	Synthetic Tensides	액 상	암갈색	1.02
AE 감수제	나프탈렌계	액 상	암갈색	1.14 ± 0.02

<표-7> 압축강도 측정 재령 및 적산온도

W/B (%)	양생온도 (°C)	압축강도 측정재령 및 적산온도								
		일	3	7	14	28	56	96	-	-
-10	일	3	7	14	28	56	96	-	-	
	DD	45	45	45	45	45	45	-	-	
5	일	2	6	14	28	42	56	110	182	
	DD	30	90	210	420	630	840	1725	2730	
10	일	1.5	3	4.5	10.5	31.5	42	84	136.5	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
30	일	1	3	7	14	21	28	56	96	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
40	일	1	3	7	14	21	28	56	96	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
50	일	0.7	2	4.7	9.3	14	18.7	37.3	60.7	
	DD	31.5	90	211	418	630	841	1678	2731	
60	일	0.5	1.5	3.5	7	10.5	14	28	45.5	
	DD	30	90	210	420	630	840	1680	2730	
65	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. 실험결과 및 분석

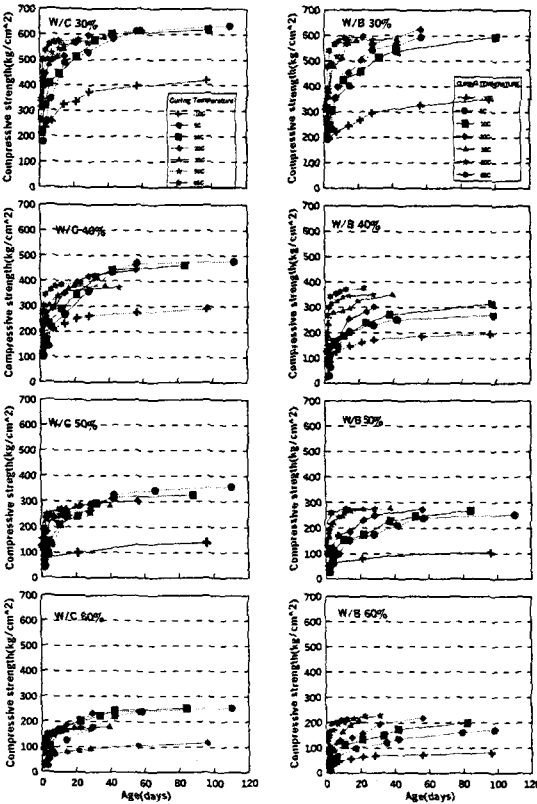
가. 재령경과에 따른 강도증진

〈그림-1〉은 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬를 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, 포틀랜드시멘트의 경우 양생온도가 높을수록 초기재령에서는 높은 강도

증진을 보이고 있으나, 재령이 경과할수록 오히려 저온양생의 경우보다 강도증진이 둔화되는 강도증진의 역전현상이 나타남을 알 수 있었고, 저온양생의 경우는 초기재령에서는 강도증진이 미약하나 장기재령으로 진행할수록 강도증진이 높게됨을 알 수 있었다. 한편, -10°C의 경우 W/B 40~60%에서는 재령이 경과하여도 강도의 증진은 미미한 것으로 나타났으나, W/B 30%의 경우는 재령이 경과함에 따라 어느 정도의 강도증진을 나타내고 있어 고강도 콘크리트의 경우 적산온도 개념에서의 기준온도 설정에 대한 재검토가 필요할 것으로 사료된다.

한편, 플라이애쉬를 30% 치환(FA B종시멘트)한 콘크리트의 경우는 포틀랜드시멘트에 비하여 35°C, 50°C 및 65°C의 고온양생의 경우 양생온도가 높을수록 초기에 높은 강도증진을 나타내며 재령이 경과하여도 고온에 의해서 촉진된 포졸란 반응에 기인하여 지속적으로 높은 강도증진을 나타내고 있었는데, 이는 매스콘크리트, 서중콘크리트 및 증기양생의 경우 플라이애쉬를 혼입하게 되면 높은 강도의 발휘와 그에 따른 경제성을 성취할 수 있음을 시사해주는 것으로 판단된다. 단, 저온양생의 경우 전반적으로 초기재령에서는 낮은 강도증진을 나타내고 재령이 경과하여도 강도의 역전현상이나 커다란 강도의 증진은 없는 것으로 나타나고 있어 한중콘크리트와 같은 저온환경에서 플라이애쉬의 사용은 재고되어야 할 것으로 사료된다.



(1) 보통 포틀랜드시멘트

(2) 플라이애쉬 B종

〈그림-1〉 재령경과에 따른 콘크리트의 강도증진 성상

나. 적산온도 경과에 따른 강도증진 성상

본 연구에서 적용된 적산온도식은 현행 건축공사 표준시방서에서 규정하고 있는 식으로 식 (1)과 같다.

$$M = \sum_{z=1}^n (\theta_z + 10) \dots\dots\dots (1)$$

※ 주 z : 재령(일).



n : 콘크리트의 강도관리 재령.
 θ_z : 재령 z (일)에 있어서 콘크리트의 일평균 양생온도($^{\circ}\text{C}$).

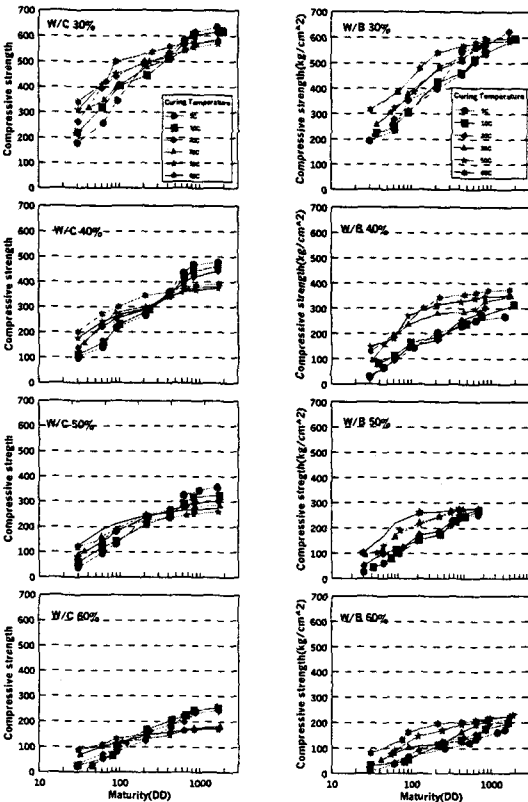
〈그림-2〉는 포틀랜드시멘트 및 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 적산온도 경과에 따른 강도증진 성상을 양생온도별로 구분하여 W/B별로 나타낸 것이다. 전반적으로 적산온도가 증가함에 따라 강도는 증진되는 것으로 나타났다. 우선 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트는 양생온도 5 $^{\circ}\text{C}$, 10 $^{\circ}\text{C}$ 및 20 $^{\circ}\text{C}$ 의 저온양생의 경우 동일 적산온도에서는 W/B별로 약간의 차이는 있지만, 거의 유사한 강도를 갖는 것으로 나

타났으며 35 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온영역의 경우 초기 적산온도에서는 높은 강도증진을 보이거나 장기 적산온도에서는 강도증진이 둔화되는 강도의 역전현상이 발생하고 있음을 알 수 있었다.

한편, 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 경우 양생온도가 낮을수록 초기 적산온도에서는 포틀랜드시멘트의 경우보다 낮은 강도증진을 보이고 적산온도가 증가하여도 강도의 커다란 증진이나 역전현상은 나타나지 않았다.

또한, 35 $^{\circ}\text{C}$ 이상 고온양생의 경우 동일 적산온도에서의 강도증진은 저온양생의 경우보다 높게 나타나고 있는데, 적산온도가 증가됨에 따라 강도도 높게 유지되어 포틀랜드시멘트의 경우와는 차이가 나타나는 것을 알 수 있었다. 이는 플라이애쉬가 고온 조건에서 양생될 경우 포졸란 반응이 촉진되어 강도가 높게 나타나고 있는 결과로 사료된다.

이상의 결과로 보아 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬 혼입 콘크리트를 대상으로 한 적산온도경과에 따른 강도증진 성상(〈그림-2〉)은 특히 고온영역에서 다른 양상으로 나타나고 있어 추후 이 부분에 대한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

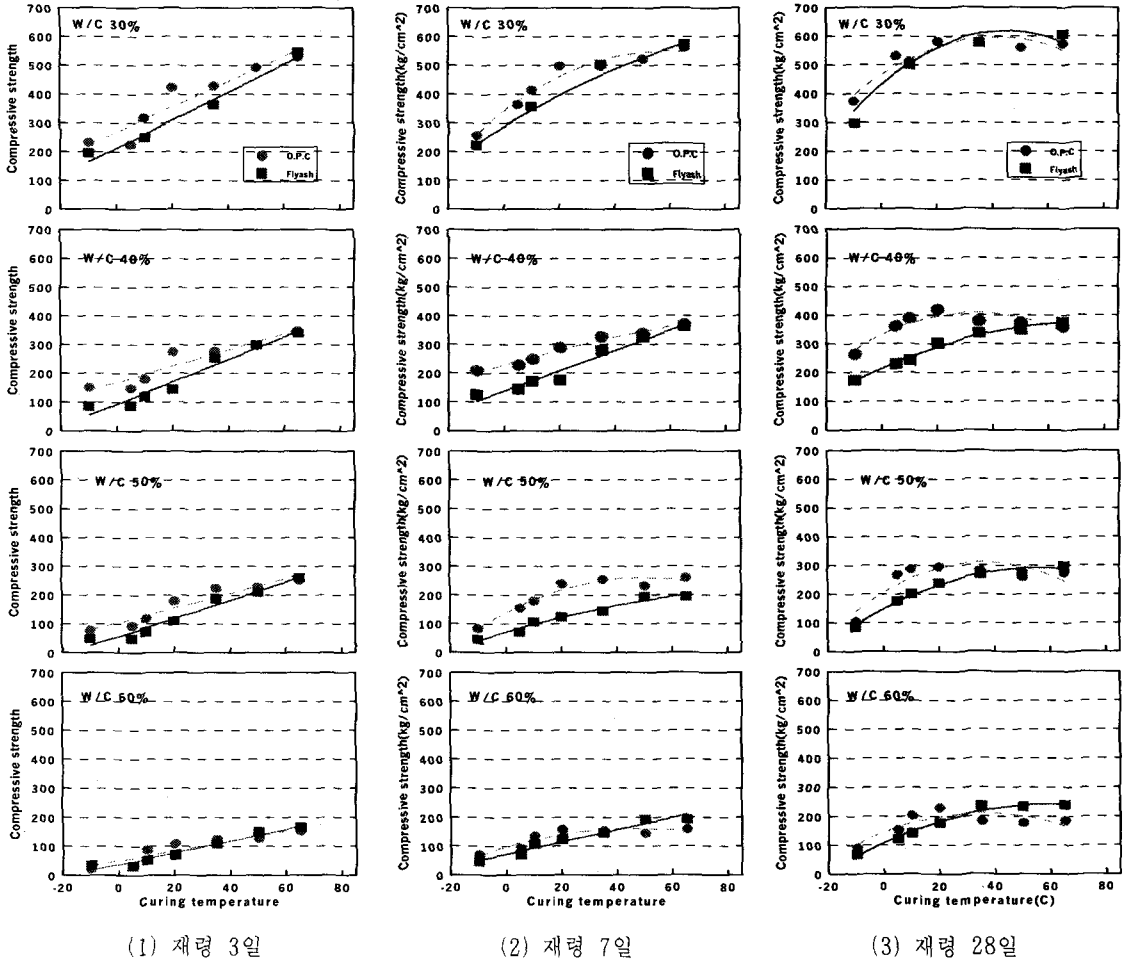


(1) 보통 포틀랜드시멘트 (2) 플라이애쉬 B종

〈그림-2〉 적산온도 변화에 따른 콘크리트의 강도증진 성상

다. 양생온도에 따른 강도증진 성상

〈그림-3〉은 포틀랜드시멘트 및 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 양생온도 변화에 따른 압축강도를 W/B 및 재령별로 나타낸 것이다. 먼저 재령 3일의 초기 재령에서는 양생온도가 증가함에 따라 포틀랜드시멘트 및 플라이애쉬 혼입 콘크리트 공히 직선적으로 증가하는 것으로 나타나고 있으나, 재령이 경과함에 따라 포틀랜드시멘트를 사용한 경우 35 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 고온양생에서 강도가 저하하여 양생온도 증가에 따른 강도증진 경향은 포물선 형태를 나타내고 있다. 이는 양생온도가 증가할수록 높은 강도증진을 보여야 하는 적산온도 개념을 고려할 경우 초기재령에서



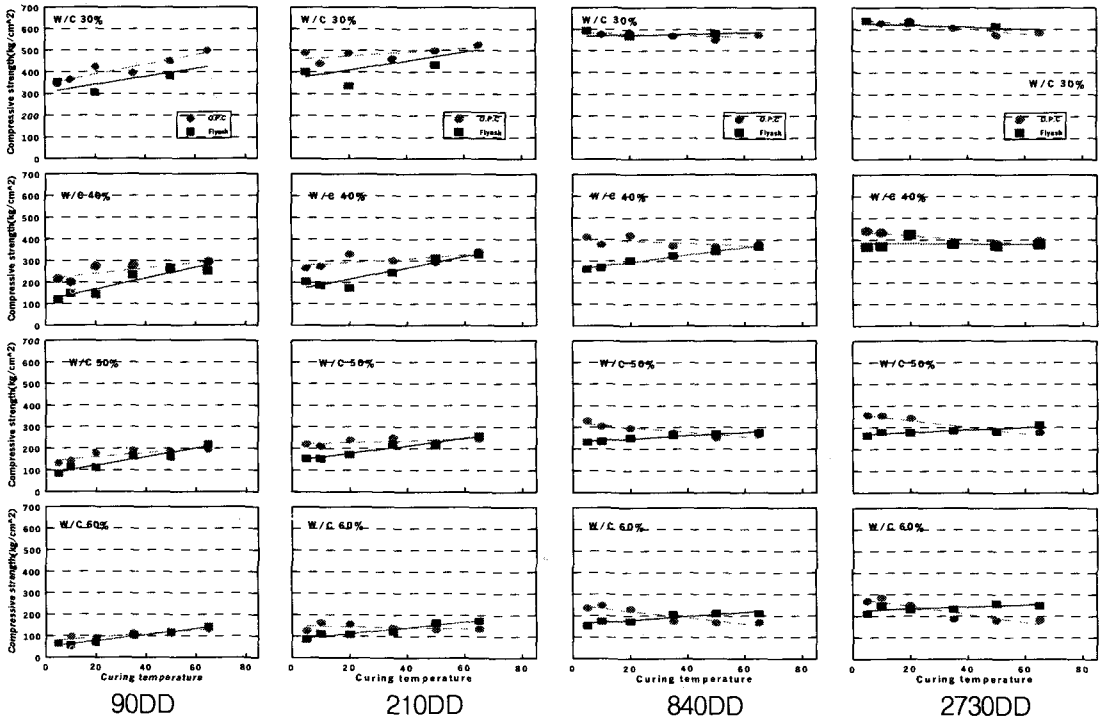
〈그림-3〉 양생온도 변화에 따른 W/B 및 재령별 압축강도

는 비교적 일치하고 있으나 재령이 경과함에 따라 고온영역의 경우 적산온도 개념이 불일치하는 것으로 이부분에 대한 재검토가 필요함을 시사해 주고 있다.

한편, 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 경우 양생온도 증가에 따른 강도증진 경향은 포틀랜드시멘트를 사용한 콘크리트와는 부분적인 차이를 보이고 있는데, 즉 재령이 경과하여도 고온양생의 경우 강도저하 현상이 덜하므로 W/B별로 약간의 차이는 있지만 거

의 직선적인 강도증진 현상을 보이고 있어 적산온도 개념을 비교적 양호하게 충족하는 것으로 나타났으며, 재령 28일에서는 고온양생 조건에서 오히려 보통콘크리트보다 강도가 증가하는 강도의 역전현상을 보이고 있었다.

〈그림-4〉는 〈그림-3〉을 또다른 각도에서 나타낸 것으로 보통콘크리트와 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 압축강도를 W/B 및 적산온도별로 나타낸 것이다. 먼저, 초기 적산온도에서는 고온양생의 경우 양생온



〈그림-4〉 양생온도 변화에 따른 W/B 및 적산온도별 압축강도

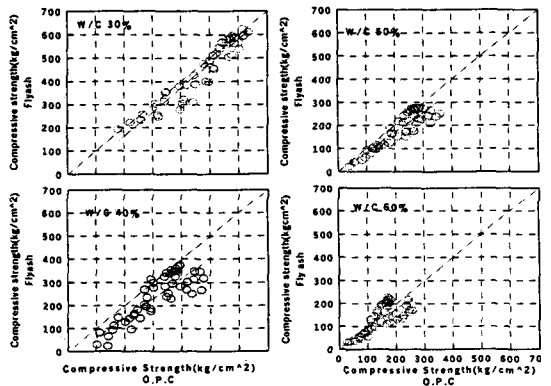
도가 증가함에 따라 강도가 증가하는 것으로 나타났는데, 이는 동일 적산온도에서는 동일한 강도를 갖는다는 적산온도 개념과는 상이한 결과로 나타났다.

그러나, 적산온도가 증가함에 따라 포틀랜드시멘트의 경우 고온양생에서는 오히려 강도가 저하하고 있으며 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 경우보다 강도가 저하되는 경향을 보이고 있다.

한편 플라이애쉬 혼입 콘크리트는 초기 적산온도에서 낮은 양생온도의 경우 비교적 낮은 강도를 갖으나 적산온도가 증가함에 따라 고온양생의 경우 포졸란 반응에 기인하여 오히려 포틀랜드시멘트의 경우보다 높은 강도를 나타내고 있었다.

〈그림-5〉는 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 강도를 산점도로 나타낸 것인데, 전반적

으로 포틀랜드시멘트의 경우가 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 경우보다 W/C별로 약간의 차이는 있지



〈그림-5〉 보통 포틀랜드시멘트와 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 강도 비교

만, 약 10% 정도 높은 강도를 발휘하고 있었는데, 강도가 증가함에 따라 일부 플라이애쉬 혼입 콘크리트가 고온양생에 의한 포졸란 촉진반응으로 높은 강도를 나타내고 있었다.

4. 결 론

양생온도 변화에 따른 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 강도증진 성상을 검토한 결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 플라이애쉬 혼입 콘크리트는 보통콘크리트에 비하여 초기재령 및 초기 적산온도의 경우 저온양생에서는 낮은 강도를 갖으나 재령이 경과함에 따라 강도의 차이가 감소하며 특히 고온양생의 경우는 장기재령 및 장기 적산온도로 진행할수록 고온에 의한 포졸란 반응의 촉진작용으로 오히려 높은 강도를 발휘함을 알 수 있었다.

(2) 양생온도 변화에 따른 강도증진 성상으로 전 반적으로 초기재령에서는 보통콘크리트 및 플라이애쉬 혼입 콘크리트 공히 고온에서는 높은 강도를 나타내나, 재령이 경과함에 따라 보통콘크리트의 경우는 강도증진이 둔화되어 적산온도 개념과는 불일치하고 있었으며, 플라이애쉬 혼입 콘크리트의 경우는 고온양생 조건에서도 높은 강도를 발휘하고 있어 보통콘크리트와는 다른 경향으로 나타났다.

(3) 결국, 플라이애쉬를 이용한 콘크리트는 매스 콘크리트, 서중콘크리트 및 증기양생 제품 등의 고

온환경에 사용하게 되면 강도의 증가와 그에 따르는 경제성을 추구할 수 있어 매우 유효할 것으로 사료된다.

참 고 문 헌

1. 한천구, 기온과 콘크리트, 한국건자재시험연구원, 1996.
2. 한천구, 한민철, 최훈, 황인성, 전충근: 적산온도 방식에 의한 콘크리트의 강도증진 해석에 관한 연구, 대한건축학회 학술발표대회, 1998. 4.
3. 한천구, 한민철, 전충근, 윤기원, 이진철: 적산온도 방식에 의한 콘크리트 강도증진 해석에 있어 한계온도 범위의 검토, 한국콘크리트학회 추계 학술발표대회, 1997. 11.
4. 韓千求 外 3人: 耐寒劑を使用したコンクリートの積算溫度關數式の檢討, 自然環境とコンクリート性能に關するシッポゾウム論文集, 1993. 5.
5. 寒中コンクリート施工指針・同解説, 日本建築學會, 1997.
6. 寺田米男: 各種セメントを用いたコンクリートの強度推定法について, セメント技術年報 35.
7. Carino, N. J: Maturity Method; Theory and Application, Journal of Cement Concrete and Aggregate, ASTM, 1984.
8. A. M. Neville: Properties of Concrete, Pitman, 1981. 