

플라이 애쉬 혼입 저발열 콘크리트를 이용한 철근 콘크리트 구조물의 균열 제어

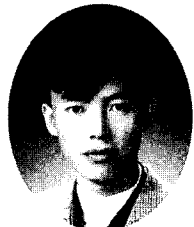
- Crack Control of RC Structures Using the Low Heat
Concrete Mixed with Fly Ash -



김영진*



이상수**



이순환***

1. 서 론

콘크리트 구조물에는 하중 재하 전에도 부착 균열 (bond crack)이라는 형태로 골재와 시멘트 풀의 경계면에 균열이 존재하는데, 이는 시멘트가 수화물로 존재하는 한 피할 수 없는 것이라고 여겨진다.

실제 시공 현장에서 가장 많이 존재하는 균열은 건조 수축 및 온도 변화에 의한 체적의 팽창·수축이 구속을 받아 발생하는 것이 대부분을 차지하고 있다.¹⁾

특히 매시브한 매트 구조물을 시공할 경우, 시멘트 수화열에 따른 온도 응력이 해당 재령에서의 콘크리트의 인장 강도보다 크면 콘크리트 구조물에 온도 균열이 발생되는데²⁾, 특히 통로·수로 박스, 지하철 박스 구조물, 옹벽, 교대, 원형·사각형 RC 수조, 방호벽

및 터널 라이닝 콘크리트 등과 같이 외부 구속이 큰 철근 콘크리트 구조물에 있어서는 온도 균열 및 건조 수축 균열의 발생이 두드러져 이에 대한 대책이 절실한 실정이다. 이를 위한 대책으로는 설계, 재료 및 시공 분야의 다양한 대책이 있을 수 있지만, 재료의 특성을 개선하는 방법이 실제 현장에서 적은 노력으로 최대의 효과를 얻을 수 있는 가장 시공성 있는 방법으로 생각된다.

따라서, 본고는 수화열에 의한 온도 균열 및 건조 수축 균열을 제어할 수 있도록 개선된 저발열 콘크리트의 현장 적용성을 확인한 것으로, 건물의 매트 기초 및 지하에 건설되는 철근 콘크리트 박스 구조물 등에 적용함으로써 얻을 수 있었던 균열 제어 효과에 대하여 기술하고자 한다.

2. 저발열 콘크리트의 개념 및 반응 메커니즘

2.1 저발열 콘크리트의 개념

저발열 콘크리트는 아직까지 국내의 각종 시방서에

* 정회원, 대우건설기술연구소 책임연구원

** 정회원, 대우건설기술연구소 선임연구원

*** 정회원, 대우건설기술연구소 주임연구원

서 명확한 정의를 내리지는 않고 있지만, 수화 반응을 일으키지 않는 혼화재를 시멘트의 대체재로서 사용하여 콘크리트의 수화열을 감소시킴으로써 결국은 콘크리트의 온도 균열을 줄이기 위한 콘크리트라고 정의할 수 있다.

일반적으로 저발열 콘크리트에 사용되는 혼화재로서는 플라이 애쉬 및 고로 슬래그 미분말 등 여러 가지를 들 수 있지만, 그 중에서도 플라이 애쉬가 수화열 저감 효과 및 장기 강도 발현이 우수할 뿐만 아니라 경제적인 효과가 크기 때문에 많이 이용되고 있다.

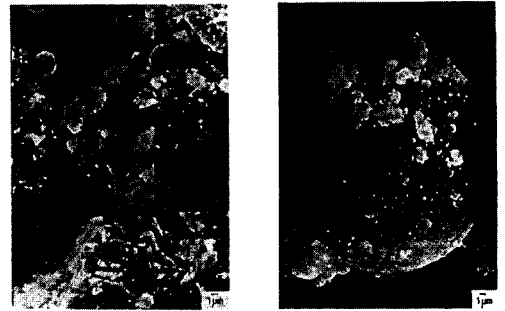
2.2 저발열 콘크리트의 반응 메커니즘

포틀랜드 시멘트가 콘크리트 내에서 물과 수화 반응을 하여 생성하는 1차 반응물은 수산화칼슘 [Ca(OH)₂]이며, 1차 반응물과 플라이 애쉬의 규소 및 알루미늄 성분이 2차 반응을 하게 된다. 이러한 반응을 포졸란 반응이라 하며, 여기서 생성되는 2차 반응물은 C-S-H 및 C-A-H 형태를 갖는다. 이러한 2차 반응물은 포틀랜드 시멘트의 수화 생성물보다 조밀한 겔(gel) 상태를 이루고 있다.

플라이 애쉬에 의한 2차 반응은 시멘트의 수화 반응으로 인하여 발생하는 열과 수화이온에 의한 유리 구조의 분해에 따라 달라지게 되는데, 시멘트-페이스트의 공극에 수산화칼슘이 존재하는 한 C-S-H 및 C-A-H를 형성하기 위한 2차 반응이 계속적으로 수산화칼슘을 소비하면서 일어나게 된다.

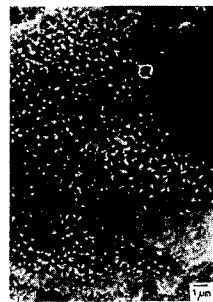
플라이 애쉬에 의한 2차 반응은 시멘트와 물이 반응하는 수화 초기에는 반응도가 매우 낮지만, 수화 반응이 어느 정도 진행된 후에는 매우 활발하게 반응하기 시작한다. 따라서, 이러한 포졸란 반응은 콘크리트 내에 알칼리 또는 수산화칼슘, 황산염 등이 존재할 경우에 효과적으로 발생한다는 것을 알 수 있다.

한편, 시멘트와 플라이 애쉬를 혼합한 페이스트의 화학 반응 단계를 SEM 사진으로 나타내면 (사진 1)과 같다. 사진에서 플라이 애쉬와 시멘트로 페이스트를 제조하여 1시간 정도 경과한 경우에는 2차 석고의 결정체와 함께 미세한 수화 생성물과 에트린자이트가 침상 구조 상태로 시멘트 입자와 반응하고 있다는 것을 알 수 있다. 구형을 띤 플라이 애쉬의 일부는 자체에 수화물을 갖는 경우도 확인된다. 그러나, 표면의 수화에 의한 것인지 아니면 기공이 용해된 것인지 판단하기 어렵다.

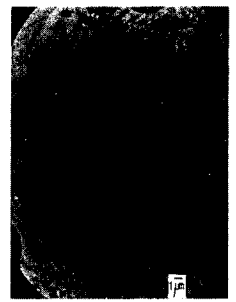


1시간 후

4시간 후



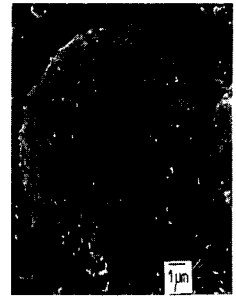
12시간 후



1일 후



3일 후



2개월 후

사진 1. 시멘트와 플라이 애쉬의 화학 반응 단계

4시간이 경과한 후에는 표면에 형성된 수산화칼슘 및 에트린자이트와 더불어 수화 생성물의 표면에 플라이 애쉬의 일부가 나타나고 있다. 12시간 후에는 구형의 플라이 애쉬가 수화 생성물의 표면에 균일하게 덮혀 일종의 막을 형성한다. 1일 후에는 수산화칼슘 결정체와 플라이 애쉬가 서서히 반응하는 단계를 나타내고 있으며, 3일 후에는 국부적으로 코팅된 플라이 애쉬 구형이 나타나기 시작한다. 또한 2개월 이후부터 플라이 애쉬와 수화물의 다양한 반응이 일어나기 때문에 포졸란 활성도가 활발해진다.

이와 같이 저발열 콘크리트에 사용되는 플라이 애

쉬는 포졸란 반응이라는 특성이 장기 재령에 일어나기 때문에 충분한 실험을 통해서 그의 특성을 제대로 파악한 후에 적용하는 것이 바람직하다고 하겠다.

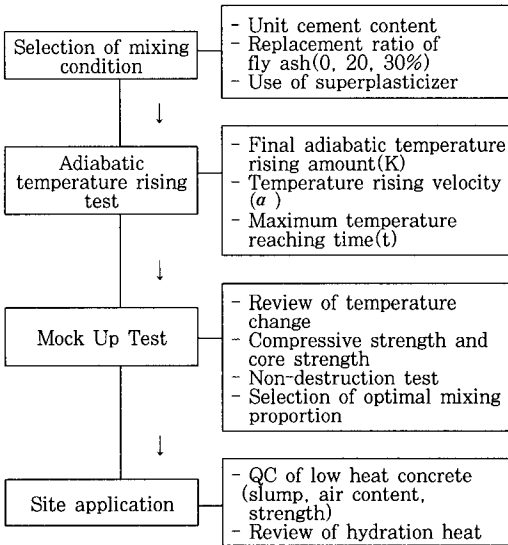
3. 저발열 콘크리트의 균열 제어 사례

3.1 건물의 매트 기초

3.1.1 공사 개요

적용 현장은 교보생명에서 발주하고, 대우건설에서 시공 중인 교보생명 수원사옥의 매트 기초 부위이다. 적용 부위의 크기는 폭 35 m, 길이 42 m, 두께 1.5 m인 매시브한 구조물(콘크리트 물량 : 2,200 m²)로서 수화열에 의한 온도 균열의 발생이 예상되었기 때문에 균열 제어를 위해 플라이 애쉬를 사용한 저발열 콘크리트를 적용하였다. 저발열 콘크리트의 성능 평가는 <표 1>과 같은 방법으로 수행하였다.

표 1. 저발열 콘크리트의 성능 평가 계획



3.1.2 사용 재료 및 콘크리트의 배합

플라이 애쉬 치환율에 따른 저발열 콘크리트의 온도 이력을 분석하여 최적의 배합 조건을 선정 한 후, 이를 현장에 적용하기 위해 사용된 재료로서 시멘트는 비중이 3.14인 국내 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종)를 사용하였으며, 플라이 애쉬는 보령 화력발전소에서 생성되는 F급 플라이 애쉬를 사용하였다. 각각의

품질 시험 결과는 <표 2>와 같다. 잔골재는 남양만산 세척사, 굵은 골재는 비봉석산의 25 mm 쇄석을 사용하였다. 또한, 혼화제는 나프탈렌계 AE 감수제를 사용하였다.

한편, 적용하고자 하는 현장의 설계 기준 강도가 240 kgf/cm²으로서 이에 대한 콘크리트의 배합은 레미콘 공장에서 수 차례의 시험 비빔을 통하여 <표 3>과 같이 선정하였으며, 매스 구조물에서의 수화열 억제 효과를 최대한 발휘시키기 위하여 플라이 애쉬의 대체율을 0, 20, 30(%)로 구분해서 비교·검토하였다. 한편, AE 감수제는 목표 슬럼프치를 12 cm 및 목표 공기량 4.5 ± 1.5%를 확보하기 위하여 결합재량의 0.3%를 첨가하였다.

표 2 시멘트 및 플라이 애쉬의 품질 시험 결과

Items	L.O.I (%)	Fine-ness (cm/g)	Sound-ness (%)	Setting time (hr:min)		Compressive strength(kg/cm ²)		
				Initial	Final	3D	7D	28D
Cement	0.71	3,260	0.05	3:83	6:10	195	293	397
Fly ash	3.91	3,187	0.03*	6:25*	9:05*	121*	193*	325*

주 : * Blended cement replaced 30% of fly ash

표 3. 저발열 콘크리트의 배합 조건

Mixing condition				Unit weight content(kg/m ³)				
FA (%)	W/B (%)	S/a (%)	W (kg)	C	FA	S	G	AEA
0				366	0	773	971	
20	48.1	44.3	176	293	73	761	956	1.098
30				256	110	755	949	

3.1.3 실험 결과 분석 및 검토

(1) 단열 온도 상승 시험

플라이 애쉬를 혼합한 저발열 콘크리트의 수화열 저감 정도를 확인하기 위하여 플라이 애쉬 치환율 0, 20, 30(%)에 따라 적용 현장에 사용될 재료와 동일한 재료를 사용하여 사전에 단열 온도 상승 시험을 실시하였고 시험 결과는 <그림 1>과 같다.

이러한, 단열 온도 상승 시험의 결과는 $Q(t) = K(1 - e^{-at})$ (여기서, $Q(t)$ 는 재령 t일에서의 단열 온도 상승량, K 는 최종 단열 온도 상승량, a 는 온도 상승 속도)과 같은 e함수 형태로 표현되어 온도 해석에 이용된다.³⁾

시험 결과, 플라이 애쉬 치환율이 증가함에 따라 단위 온도 상승량(K)과 온도 상승 속도(α)는 감소하였으며, 최고 온도로 수렴되는 시간도 90시간을 전후하여 미소하나마 플라이 애쉬 치환율이 증가할수록 길어지는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 플라이 애쉬를 치환함에 따라 단위 시멘트량이 비례적으로 감소한 것과 플라이 애쉬의 포졸란 물질에 따른 수화 지연 효과 등이 복합적으로 작용한 것으로 분석된다.

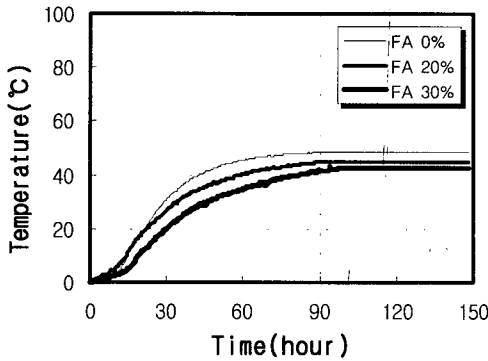


그림 1. 단위 온도 상승 시험 결과

(2) 모의 부재 시험

① 모의 부재의 형상

레미콘 공장의 배치 플랜트에서 예비 시험 및 단위 온도 상승 시험을 수행하여 얻어진 결과를 바탕으로, 동일한 배합 조건에서 Mock up Test를 실시하였다. 콘크리트의 수화열 측정을 위하여 플라이 애쉬 치환율 별로 1,200 mm × 1,200 mm × 1,400 mm(가로 × 세로 × 높이) 크기의 시험체를 각각 제작하였고, 각 시험체를 상, 중, 하로 구분하여 열전대(thermocouple)를 설치하였다. 시험체의 형상 및 열전대 배열 위치는 <그림 2>와 같다.

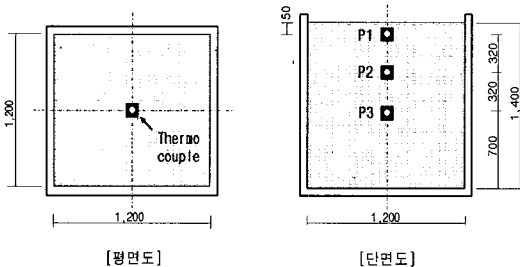


그림 2. 실대 부재 시험체의 형상

한편, 시험체 부위별 강도를 측정하기 위하여 코어를 채취하였으며, 적용 현장의 공정을 고려하여 7, 14, 28(일) 재령에서 압축 강도를 측정하였다. 또한, 각 재령에서 슈미트 해머에 의한 비파괴 시험도 실시하였다.

② 굳지 않은 콘크리트의 성상 및 강도 특성 분석 및 검토

레미콘 공장에서 실시한 모의 부재 시험의 결과로, 각 배합별 굳지 않은 콘크리트의 성상 및 경화 상태 강도 특성은 <표 4>와 같이 나타났다.

표 4. 실대 부재 시험 결과

FA (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)							
			Standard curing			Core strength		Schmidt hammer		
			7D	14D	28D	Location	14D	28D	14D	28D
0	13	4.2	206	266	313	Upper	264	283	249	272
						Middle	245	302		
						Bottom	223	277		
20	11	2.8	196	254	301	Upper	249	264	228	268
						Middle	233	288		
						Bottom	227	285		
30	11	0.5	186	238	284	Upper	205	234	215	252
						Middle	219	251		
						Bottom	229	248		

굳지 않은 콘크리트의 실험 결과, 슬럼프는 플라이 애쉬 치환율에 관계없이 거의 유사한 것으로 나타났으나, 공기량은 미연소 카본에 의한 AE제의 흡착 효과로 인하여 플라이 애쉬 치환율이 증가할수록 감소하였다. 한편, 표준 양생, 코어 채취 및 슈미트 해머에 의한 비파괴 시험으로 측정된 압축 강도는 플라이 애쉬 치환율이 증가함에 따라 감소하였으나 재령 28일에서의 압축 강도는 공히, 적용 현장의 설계 기준 강도 (240 kgf/cm²)를 모두 상회하였다. 한편, 측정 방법에 따른 압축 강도는 '비파괴 시험 <코어 강도 <표준 양생>'의 순서로 나타났다.

③ 수화열 측정 결과

중양부에서의 플라이 애쉬를 치환한 저발열 콘크리트의 수화열 특성은 <그림 3>과 같다.

시험 결과, 최고 상승 온도는 콘크리트의 초기 온도 상승에 기인하여 단위 온도 상승 시험보다 높은 것으로 나타났으나, 최종 온도 상승량은 각각 36.2 °C(FA 0%), 28.6 °C(FA 20%), 24.3 °C(FA 30%)로서 단위 온도 상승량(K)에 비해 평균 16 °C 정도가 낮은

것으로 나타났다.

플라이 애쉬 치환율에 따른 특성으로는 치환율이 증가할수록 저발열 콘크리트의 중앙부 최고 온도와 온도 상승 속도 및 하강 속도는 낮아져, 플라이 애쉬 치환율이 0%의 경우, 저발열 콘크리트의 중앙부 최고 상승 온도는 61.5℃를 나타낸 반면, 치환율 20%에서는 52.6℃, 치환율 30%에서는 47.9℃인 것으로 나타났다.

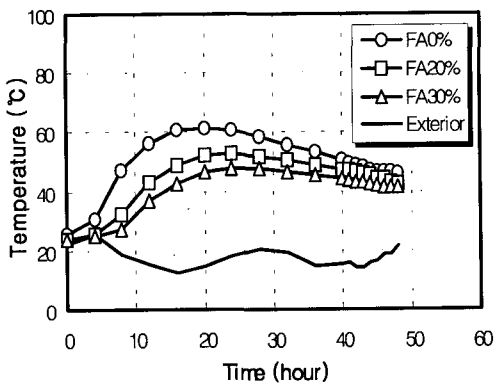


그림 3. 저발열 콘크리트의 온도 이력 곡선

따라서, 플라이 애쉬를 첨가함으로써 각각 8.9℃와 13.6℃의 수화열 저감 효과를 얻을 수 있었다. 그러나, 적용 현장에 타설될 콘크리트의 배합은 레미콘사의 생산 설비, 압축 강도 및 경제성 등을 고려하여 플라이 애쉬 치환율이 20%인 경우를 최적의 배합 조건으로 선정하였다.

(3) 현장 적용 시험

① 굳지 않은 콘크리트의 성상 및 강도 특성 결과 분석

적용 현장에 타설된 저발열 콘크리트의 굳지 않은 상태 및 경화 상태 품질 시험은 KS의 표준적인 방법으로 실시하였으며, 압송 후의 경시 변화에 따른 품질 변화를 평가하기 위한 시험도 수행하였다.

압송 후 경시 변화 시험에서는 <표 5>에서와 같이 굳지 않은 상태 및 경화 상태에서 비교적 우수한 품질 관리가 가능하였는데, 특히 슬럼프와 공기량은 펌프 압송 후 30분까지도 품질 변화가 거의 없었으며, 또한, 콘크리트의 타설 온도를 25℃ 정도로 온도 관리할 수 있었던 것은 냉각수를 사용하였기 때문이다.

표 5. 펌프 압송 후 경시 변화 시험 결과

Mixing condition			Slump (cm)	Air content (%)	Compressive strength (kgf/cm ²)	Exterior temp. (Con c)
Time (min.)	W/B (%)	FA (%)				
0	48.1	20	13.0	2.7	302	23.7℃ (25.3℃)
30			11.0	2.4	328	22.2℃ (25.2℃)
60			7.0	1.8	316	22.4℃ (24.4℃)
90			4.8	1.1	320	22.3℃ (24.0℃)
120			5.0	1.1	311	21.4℃ (22.8℃)

② 수화열 측정 결과

콘크리트의 수화열을 측정하기 위하여 "T" type의 열전대를 매립하고, data logger에 연결하여 온도 계측을 수행하였다. <그림 4>는 콘크리트 타설 부위에 매립된 열전대의 설치 위치를 나타낸 것으로서 적용 현장의 시공 여건상 매스 구조물의 두께가 다른 2개소에 설치하였으며, 외기온을 포함하여 총 8개소의 온도 변화를 1시간 간격으로 8일간 측정하였다.

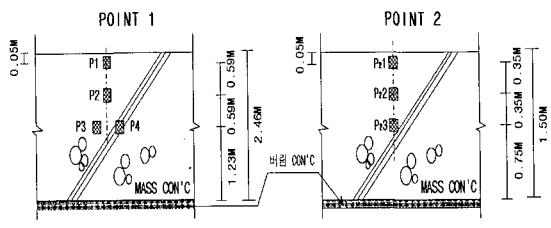
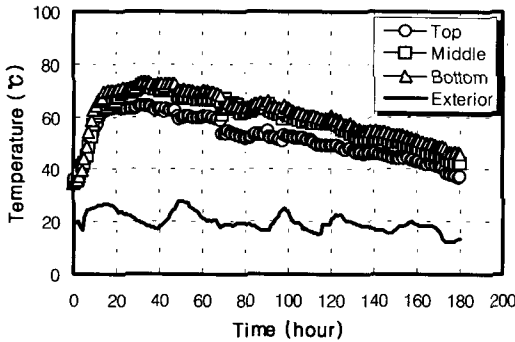


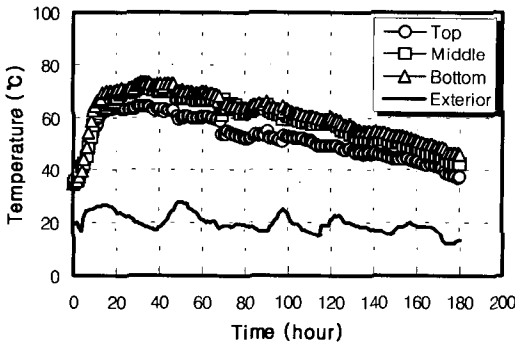
그림 4. 열전대 위치

수화열 측정 결과, <그림 5>와 같이 적용 현장에서 두께가 상이한 두 지점의 수화열 특성은 유사한 경향으로 나타났다. 그 중 두께 2.4m인 지점의 수화열은 측정 개시 34시간 후, 최고 75.6℃까지 상승하였으며, 표면부는 67.5℃까지 상승함으로써 약 8℃ 정도의 온도차가 있는 것으로 나타났다. 그러나, 동일 지점에서 외기온은 18.4℃로서 중앙부의 수화열 최고 상승 온도와 약 57℃ 정도의 다소 큰 온도 차가 있는 것으로 나타났다. 이러한 결과는 사전에 수행된 단열 온도 상승 시험이나 외부에 노출됨으로써 최종 온도 상승량이 낮은 Mock up Test의 시험 조건과는 달리, 적용 현장의 콘크리트 타설 부위가 지하 약 18m 지점이고, 타설 물량이 약 2,200m³인 것 등의 영향으로 분석된다.

그러나, 습윤 양생을 통해 대기와의 직접적인 접촉을 차단하였고, 시간당 온도상승률이 1.09 ℃/h, 온도 하강률이 0.17 ℃/h인 것으로 나타남으로써 온도 균열을 방지하기 위한 콘크리트 온도 하강률의 관리 기준⁴⁾이 1 ℃/h 이하인 것을 고려하여 볼 때 급속한 온도 하강에 의해 발생하는 온도 응력에 의한 균열 발생의 위험성은 매우 적을 것으로 판단되었다.



(a) Depth of concrete : 2.4m



(b) Depth of concrete : 1.5m

그림 5. 저발열 콘크리트의 수화열 시험 결과

더욱이, 수화온도이력에 의해서 나타난 중앙부의 최고 온도 도달 시간은 콘크리트의 두께에 관계없이 약 30시간 정도인 것으로 나타났다. 이는 일반 콘크리트의 12~15시간보다 상대적으로 오래 소요되는 것으로서 콘크리트의 균열 방지에 유리한 결과이다.

거푸집을 제거한 후, 저발열 콘크리트 타설 부위의 온도 균열 발생 여부를 판단하기 위하여 육안 관찰을 실시한 결과, 수화열에 따른 온도 균열은 발견되지 않았다. 이것은 사전에 수행한 단열 온도 상승 시험이나

Mock up Test의 수화열 측정 결과 등을 통해 예측된 결과로서, 수화열에 의한 온도 균열을 저발열 콘크리트로 적용함으로써 제어할 수 있었다는 것을 시사해 주고 있다.

3.2 지하 철근 콘크리트 박스 구조물

3.2.1 공사 개요

적용 현장은 대전국도개발청에서 발주하고, 대우건설에서 시공 중인 증평~괴산 간 고속도로를 횡단하여 통과하는 고속도로의 하부에 설치되는 철근 콘크리트 박스 구조물 등을 시공하는 현장이다. 대상이 되는 구조물은 벽체 두께 70 cm이고, 길이가 약 54 m가 되어 건조 수축 및 수화열에 의한 균열이 우려되었기 때문에 콘크리트의 배합 측면에서 기존 배합에서 시멘트의 일부를 플라이 애쉬로 취환함에 따른 균열 제어 효과를 검토하고자 하였다.

3.2.2 사용 재료 및 콘크리트의 배합

저발열 콘크리트에 사용된 재료로서 시멘트는 S사의 보통 포틀랜드 시멘트(1종)을 사용하였고, 플라이 애쉬는 보령 화력발전소에서 생성되는 F급 플라이 애쉬를 사용하였으며, 굵은 골재는 25 mm의 쇄석을, 잔 골재는 하천 모래를 사용하였다. 또한, 혼화제는 고성능 AE 감수제를 사용하였다.

표 6. 박스 구조물의 배합 조건

Mixing condition				Unit weight content(kgf/m ³)				
FA (%)	W/B (%)	S/a (%)	W (kg)	C	FA	S	G	AD
0	48.0	47.7	186	390	0	788	934	1.17
20	44.4	46.9	186	288	72	839	948	6.48

또한, 콘크리트의 배합은 적용하고자 하는 현장 설계 기준 강도가 240kgf/m²이기 때문에 레미콘 공장에서 사용한 배합을 기준으로 수 차체의 시험 비빔을 통하여 플라이 애쉬 20%인 배합을 선정하였다.

3.2.3 시험 시공 및 결과 분석^{5,6)}

일반 및 저발열 콘크리트의 영향을 분석하기 위하여 통로 박스 구조물을 선정하여 약 15 m 간격으로 신축 이음부를 두고 이를 기준으로 각 블록의 시공 조

건을 달리하여 시험 시공하였다. 박스 구조물은 우선 기초 슬래브를 타설하고 충분한 양생을 실시한 후 <그림 6>에 나타낸 바와 같이 균열 유발 줄눈 및 콘크리트 종류를 변화시켜 벽체와 상부 슬래브를 동시에 타설하였다. 콘크리트의 타설은 외부 기온이 높아 콘크리트 균열 방지가 가장 어려운 7, 8월 중에 모두 시공 완료하였으며, 비교적 외부 온도가 일정한 오전에 타설 작업을 중점적으로 실시하였다. 각 구조물에 선정된 변수 이외의 다른 타설 및 양생 조건은 동일하게 시행하였다.

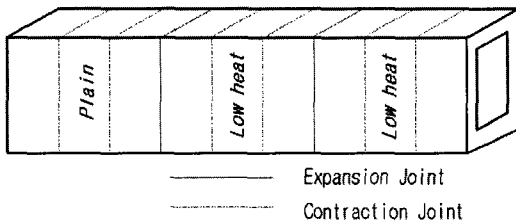


그림 6. 박스 구조물의 시험 시공 방법

수화열에 의한 철근 콘크리트의 온도 균열을 방지하기 위하여 시멘트의 일부를 플라이 애쉬 미분말로 치환한 저발열 콘크리트를 플라이 애쉬를 사용하지 않은 일반 콘크리트와 비교·검토한 결과, 고성능 AE 감수제의 사용으로 배합수량을 감소시킴으로써 건조 수축량을 저감시킬 수 있었고 플라이 애쉬를 사용하여 수화열을 낮출 수 있어서 박스 구조물의 균열 발생 개소는 물론 총 균열 길이를 현저히 저감시킬 수 있었다. 총 균열 길이의 저감은 발생한 균열의 진전을 억제할 수 있다는 간접적인 효과도 있는 것으로 판단된다. <표 7>에서 나타낸 바와 같이 균열 발생 개소는 일반 콘크리트에 비해 50% 정도 줄일 수 있었고 총 균열 길이는 약 40% 가까이 저감할 수 있었다.

표 7. 사용 재료에 따른 균열 저감 효과

Item	Crack occurrence number	Total crack length
Conventional concrete	4	14.69
Low heat concrete	2	6.07

4. 결 론

콘크리트 구조물의 균열을 제어하기 위한 일련의

실험을 통하여 얻은 결과를 정리하면 다음과 같다.

- (1) 저발열 콘크리트는 철근 콘크리트 구조물에서 발생하는 수화열에 의한 온도 균열과 건조 수축 균열을 제어하기 위한 적절한 재료로 판단되며, 시공시 시멘트를 플라이 애쉬로 대체함으로써 자원의 재활용 및 공사비 절감 효과도 기대된다.
- (2) 플라이 애쉬를 사용한 저발열 콘크리트를 건축 구조물의 매트 기초에 적용한 결과, 플라이 애쉬 치환율이 증가할수록 단열 온도 상승 시험, 모의 부재 실험 및 현장 적용에 의한 계측 등에서 온도 상승 기울기 및 최고 온도는 감소하는 경향을 나타내고 있었다. 따라서, 플라이 애쉬를 사용한 저발열 콘크리트를 사용함으로써 수화열에 의한 온도 균열을 제어할 수 있었다.
- (3) 토목 구조물의 지하 철근 콘크리트 박스 구조물에 균열 제어를 위해 저발열 콘크리트를 타설한 결과, 균열 발생 개소를 50% 정도 줄일 수 있었으며, 총 균열 길이도 약 40% 정도 저감하는 것으로 나타났다. □

참고문헌

1. (주)대우건설기술연구소, 콘크리트 구조물의 시공시 발생하는 균열 저감대책, 기술논문, 1998.
2. (주)대우건설기술연구소, “메스콘크리트의 溫度龜裂 豫測 및 施工制御 시스템 研究”, 技術論文, 1995.12.
3. 김진근 외 5인, “고강도콘크리트 단열온도상승에 관한 실험적 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제6권 1호, 1994.5, pp.209~214.
4. 윤영수, 장일영 외 2인, “1400kgf/cm²의 초고강도 콘크리트의 배합, 타설 및 수화온도 이력에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제9권 2호, 1997.11, pp.430~435.
5. 이순환, 김영진, 김성운 외 2인, “지하 철근콘크리트 박스 구조물의 균열제어 시공기술개발”, 한국콘크리트학회 학술발표회논문집, 제11권 2호, 1999. 11, pp.809~812.
6. 김성운, 김영진, 이순환 외 2인, “철근콘크리트 박스형 구조물의 균열저감 시공기술 개발 및 현장적용”, 대우기술보 통권 제22호, 2000.3.