

열병합 플라이애쉬를 사용한 高品質 콘크리트의 現場適用

朴 沘 林
〈(株) 大宇建設 技術研究所 所長, 工博〉

權 寧 鎬
〈(株) 大宇建設 技術研究所 前任研究員〉

李 相 洙
〈(株) 大宇建設 技術研究所 主任研究員〉

1. 머리말

1.1 연구배경

정부의 에너지 공급원의 다변화 및 효율화 정책에 따라 화력발전소 외에 공업단지 및 인구밀집 주거단지내에 열병합발전소가 건설되어 가동중에 있으며, 이에 따른 플라이애쉬의 발생량이 계속적으로 증대되고 있는 실정이다.

이러한 산업부산물은 환경오염을 유발시킬 뿐만 아니라 처리에 소요되는 비용증대 및 재활용 방안이 극히 제한되어 있기 때문에, 해결해야 할 과제로 대두되고 있다. 특히, 통상 산업부에서 제정한 "자원절약과 재활용 촉진에 관한 법률(제9조)"에 따르면, 산업부산물의 년도별 재활용율을 명문화하여 이를 정책적으로 권장하고 있기 때문에, 산업부산물이

배출되는 관련분야에서는 이에 대한 처리 및 재활용 방안을 모색해야 하는 실정이다.

본 연구에서는 울산석유화학 공단내에 있는 열병합발전소(울산석유화학지원(주))에서 생성되는 산업부산물인 C급 플라이애쉬를 건설산업에 활용하기 위한 연구를 2년에 걸쳐 다각적으로 검토하여 왔다.⁽¹⁾ 특히, 울산 열병합발전소에서 생성되는 플라이애쉬는 일반 화력발전소의 플라이애쉬에 비해 잠재수경성 및 포졸란 반응성이 높은 것으로 평가되었기 때문에, 이를 콘크리트 재료로 실용화하기 위한 방안을 검토하였다.

따라서, 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트의 기본특성과 레미콘 플랜트의 제조 및 운반특성, 그리고 현장에서의 품질관리 특성을 검증한 후 현장적용을 통해 실용화 방안을 제시하고자 하였다.

1.2 연구목적

본 연구는 울산석유화학 단지내 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬를 사용한 高品質 콘크리트에 대해 실내실험에서 도출된 최적배합 조건을 대상으로 현장시공 및 품질관리를 실시하고, 이를 통해 콘크리트의 재료로서 현장 실용화의 가능성을 검증하기 위한 것이다.

따라서, 현장에서 실제 사용되는 재료를 대상으로 실내실험 및 레미콘 플랜트의 수정배합을 실시하였으며, 고품질 콘크리트의 제조·운반·타설 등의 품질관리 결과를 토대로 현장 구조물에 적용하여 실용화 방안을 제시하고자 한다.

高品質 콘크리트의 실용화를 위한 세부사항은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- (1) 실내실험 및 현장시험의 최적배합비 선정
- (2) 레미콘 플랜트의 제조 및 생산설비 시스템에 대한 적합성 검증
- (3) 레미콘 플랜트에서 현장까지의 경시변화 특성 및 타설·다짐·마감 등과 같은 품질관리 방안검토
- (4) 고품질 콘크리트의 실용화방안 제시

2. 高品質 콘크리트의 실내실험

2.1 사용재료 특성

高品質 콘크리트의 제조를 위해 사용된 재료는 현장적용시 레미콘을 공급할 쌍용레미콘 울산공장에서 사용하는 것을 기본으로 하였다.

사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트 (Type I)이며, 굵은골재는 함월석산의 25 mm 쇄석, 잔골재는 혼합모래를 사용하였다. 골재의 품질시험 결과는 [표 1]과 같으며, 대

[표 1] 골재의 품질시험 결과

구분	종류	잔골재		굵은골재	
		측정값	품질기준	측정값	품질기준
비중		2.61	2.5 이상	2.72	2.5이상
조립율(F.M)		2.59	-	6.70	-
흡수율(%)		0.92	3.0 이하	0.51	3.0이하
마모율(%)		-	-	7.04	40이하
실적율(%)		64.0	60 이상	57.0	57이상
단위중량(kg/m ³)		1,665	-	1,536	1,250이상

부분 KS기준²⁾을 만족하고 있다.

고성능 감수제는 진용화학의 나프탈렌계를 사용하였으며, 사용된 혼화재는 울산 열병합발전소에서 생성되는 C급 플라이애쉬로 품질시험 결과는 [표 2]와 같다.

[표 2] 플라이애쉬 특성시험 결과

화학적 성분 (%)							물리적 특성	
산화물	MgO	CaO	Na ₂ O	SO ₃	K ₂ O	Ig Loss	비중	분말도 (cm ² /g)
58.5	1.3	27.8	0.6	5.9	0.6	4.7	2.69	2,470

(주) 산화물은 SiO₂+Al₂O₃+Fe₂O₃

2.2 배합조건 및 변수

C급 플라이애쉬를 사용한 高品質 콘크리트의 실내실험 배합조건 및 변수는 [표 3]과 같다.

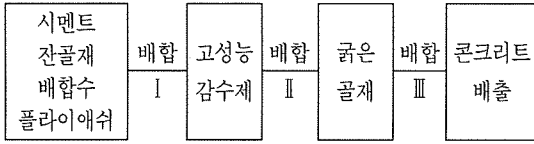
[표 3] 배합조건 및 변수

W/S (%)	S/a (%)	W (kg/m ³)	Fly Ash (%)	SP제 (B×%)	목표 슬럼프
40~53	45~47	180~190	30	1.0~1.8	18±2.5cm

2.3 배합방법

실내실험의 콘크리트 배합은 100 l 용량의 강제식 믹서를 사용하였으며, 배합방법은 실내실험의 경우 선-모르타르 배합방법을 채택하였으며 레미콘 플랜트의 경우 일괄투입 방법으로 콘크리트를 제조하였다. [그림 1]은

선-모르타르 방법을 나타낸 것이다.



(그림 1) 콘크리트의 배합방법

동일한 배합조건에서 선-모르타르 배합방법은 일괄투입 방법에 비해 流動性, 經時變化 특성이 우수할 뿐만 아니라, 실내실험 및 레미콘 플랜트의 배합효율을 고려하여 콘크리트의 배합방법을 각각 선정하는 것이 현장 수정배합에 유리하기 때문에 실내실험에서는 선-모르타르 배합방법을 선정하였다.

실내실험의 배합시간은 rpm 및 배합믹서의 효율을 고려하여 3분으로 하였으며, 高性能 減水劑의 첨가량은 목표 슬럼프(18±2.5 cm)를 얻기 위한 범위에서 조정하였다.

2.4 배합강도 산정

高品質 콘크리트의 배합강도는 건축공사표준시방서(KASS 5)에서 제시한 다음식으로 산정하였다.

KASS 5 설계식(단위 : kg/cm²)

$$F \geq 0.9 \cdot (F_c + T) + 3 \cdot \sigma$$

$$F \geq F_c + T + 2 \cdot \sigma$$

여기서, F는 配合強度, F_c는 設計基準強度, T는 온도보정강도, σ는 표준편차를 의미한다. 본 연구에서 현장적용을 위한 콘크리트의 설계기준강도는 210kg/cm²으로 배합강도를 선정하기 위한 표준편차는 KASS 5에서 제시한 35kg/cm²로 하였다.

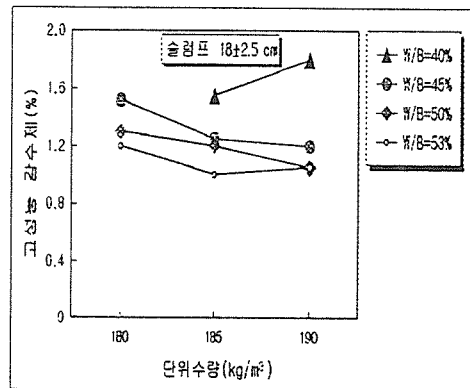
따라서, 설계기준강도에 따른 배합강도는 300kg/cm²이상을 목표로 하였다.

2.5 실내실험 결과분석

레미콘 공장에서 사용하는 콘크리트 재료 및 본 연구에서 선정한 배합조건, 배합강도를 대상으로 실내실험을 수행하였다. 실내실험의 경우, 주로 슬럼프, 공기량 및 배합강도 등과 같은 특성을 만족하는 범위에서 최적배합조건을 도출하기 위한 것으로 실험결과를 요약하면 다음과 같다.

(1) 슬럼프 특성

[그림 2]는 목표슬럼프(18±2.5cm)를 얻기 위한 단위수량과 고성능 감수제의 첨가율을 나타낸 것이다.



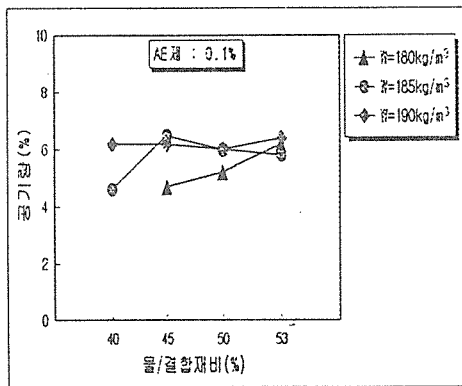
(그림 2) 단위수량에 따른 고성능 감수제 첨가율

실험결과, 물/결합재비가 동일할 때 단위수량이 증가할수록 고성능 감수제의 첨가율은 감소하는 경향을 나타내고 있다. 특히, 울산 열병합발전소의 C급 플라이애쉬는 연소온도가 낮은 관계로 입자형상이 불규칙하기 때문에, 구형입자에 비해 콘크리트의 流動性을 확보할 수 있는 방안이 필요하다.⁽³⁾ 따라서, 단위수량과 고성능 감수제의 첨가율을 선정할 때는 강도 및 경제성을 함께 고려하여 최적배합조건을 선정해야 하며, C급 플라이애쉬와 고성능 감수제의 적합성을 고려한 임계점을

만족하도록 해야 한다.

(2) 공기량 특성

[그림 3]은 물/결합재비에 따른 공기량의 특성을 나타낸 것으로 목표공기량($4.5 \pm 1.5\%$)을 확보하기 위하여 AE제량을 동일하게 결합재의 0.1%로 첨가하였다.



(그림 3) 배합조건별 공기량 특성

실험결과, 배합변수에 따른 공기량 특성은 명확한 경향은 아니지만, 물/결합재비가 증가할수록 단위수량에 따른 공기량 편차는 감소하는 것으로 나타났다.

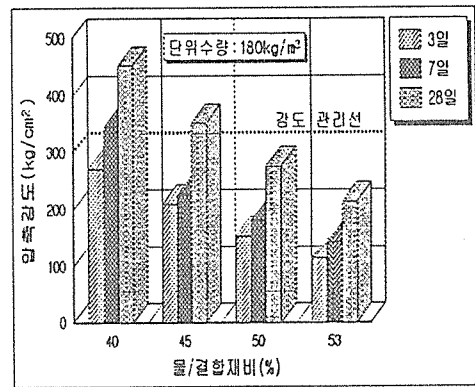
일반적으로 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 미연탄소의 흡착작용으로 공기량 확보가 어렵지만 C급 플라이애쉬의 공기량 확보에는 큰 문제가 없을 것으로 평가된다. 따라서, 내구성이 요구되는 구조물의 경우에는 AE제로 공기량을 확보하는 것이 좋다.

(3) 강도특성

C급 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 유동성 및 재료분리 저항성이 우수하기 때문에 워커빌리티에는 문제가 없는 것으로 나타났다. 따라서, 최적배합 조건은 현장에서 요구되는 설계기준강도 및 목표강도를 만족하는 범위에서 선정하는 것이 필요하다.

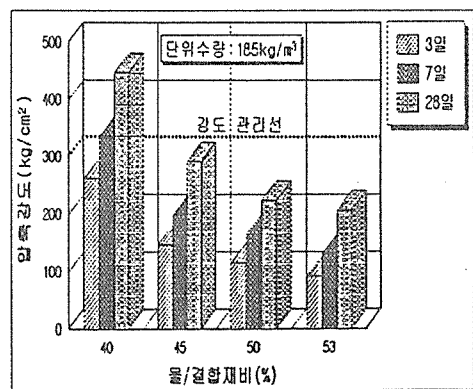
지금까지의 실내실험 결과⁽⁴⁾를 토대로 플라이애쉬의 치환율은 30%, 잔골재율은 47%로 선정하였으며, 물/결합재비와 단위수량에 따른 강도특성을 검토하였다.

[그림 4]~[그림 6]은 단위수량별 물/결합재비에 따른 열병합 플라이애쉬를 사용한 고품질 콘크리트의 강도특성을 나타낸 것이다.



(그림 4) W/B비에 따른 강도특성 (W = 180kg/m³)

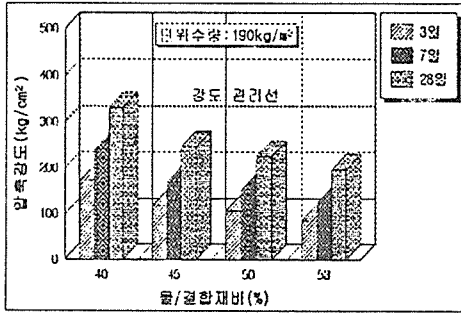
단위수량이 180kg/m³인 경우에는 현장강도 관리선인 300kg/m³를 만족하는 배합조건은 물/결합재비가 50%이하가 바람직한 것으로 나타났다.



(그림 5) W/B비에 따른 강도특성 (W = 185kg/m³)

또한, 단위수량이 185kg/m³인 경우에는 물/결합재비가 45%이하의 범위에서 현장강도

관리선을 만족하는 것으로 나타났다.



(그림 6) W/B비에 따른 강도특성(W=190kg/m³)

그러나, 단위수량이 190kg/m³일 경우에는 현장강도 관리선을 만족하기 위해서는 물/결합재비를 40%이하로 선정해야 하는 것으로 나타났다.

따라서, 강도특성 및 고성능 감수제의 첨가량, 공기량, 경제성 등을 고려하여 열병합발전소 플라이애쉬를 시멘트 중량비로 30% 치환한 고품질 콘크리트의 실내실험 최적배합 조건은 물/결합재비 45%, 단위수량 185kg/m³으로 선정하였다.

3. 현장 시험배합 및 결과분석

3.1 고품질 콘크리트의 제조방안

열병합 플라이애쉬를 사용한 고품질 콘크리트의 제조는 쌍용레미콘 울산공장에서 수행하였으며, 적용현장까지의 운반시간은 약 30분정도 소요되었다. 레미콘 플랜트의 제조설비는 일반적인 레미콘 공장의 조건과 동일하며, 배합믹서는 최대용량이 120m³/hr인 2축형식 Twin Shaft이다. 특히, 레미콘 플랜트에는 플라이애쉬의 저장사이로 및 계량장치가 설치되어 있었기 때문에 C급 플라이

애쉬를 사용한 고품질 콘크리트의 제조 및 생산에는 큰 문제가 없었다.

3.2 레미콘 플랜트의 시험배합

현장에 적용할 고품질 콘크리트의 최적배합 조건을 도출하기 위하여 현장재료를 사용한 레미콘 플랜트의 시험배합을 실시하였다. 실내실험의 최적배합 조건을 토대로 현장재료의 품질, 특히 골재의 표면수율 및 배합효율에 따른 현장 배합조건은 [표 4]와 같다.

(표 4) 시험배합에 따른 현장 최적배합 조건

배합조건		단위재료량 (kg/m³)					고성능 감수제 (B×%)
W/B (%)	S/a (%)	시멘트	배합수	혼합 모래	굵은 골재	Fly Ash	
45	47	288	185	760	894	123	1.45

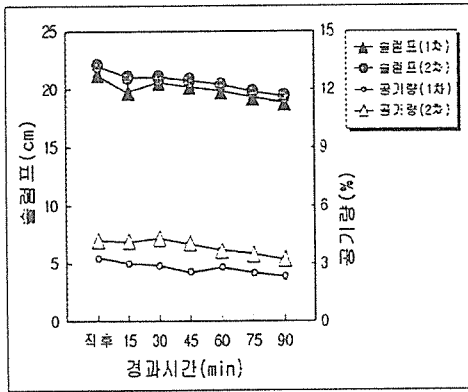
레미콘 플랜트의 시험배합에서 나타난 콘크리트의 특성은 슬럼프가 21.4cm, 공기량 4.3%, 콘크리트 온도 30.1℃, 그리고 3일 재령의 압축강도는 127kg/cm²이었다. 따라서, 현장적용에서 목표성능으로 선정할 조건을 만족하였기 때문에, 현장배합으로 선정하였다.

3.3 운반시간에 따른 경시변화 시험

레미콘 플랜트에서 목표성능을 만족하더라도 현장까지의 운반시간에 따른 품질변동을 최소화시키는 방안이 필요하다.

따라서, 최적배합 조건으로 레미콘 플랜트에서 4m³의 콘크리트를 제조하여 에지데이터 트럭에 적재한 후 15분간격으로 슬럼프 및 공기량의 경시변화를 측정하였으며, 결과는 [그림 7]과 같다.

실험결과, 레미콘 제조시에 초기 슬럼프를 20±1.5cm로 하였을 경우, 운반시간이 90분



(그림 7) 슬럼프 및 공기량의 경시변화 특성

을 경과한 후에도 현장타설시의 목표슬럼프 (18±2.5cm)를 만족하였다. 공기량의 경시변화는 약간 감소하는 경향이 있지만, 초기에 4.5%이상의 공기량을 연행하면 현장에 도착한 후의 목표공기량을 확보하는데 문제가 없는 것으로 나타났다.

(표 5) 高品質 콘크리트의 경시변화에 따른 특성

항목	경과시간							
	직후	15분	30분	45분	60분	75분	90분	
콘크리트 온도(°C)	28.0	28.5	28.7	28.6	28.8	28.5	28.4	
압축강도 (kg/cm ²)	289	291	295	290	297	296	294	

또한, 高品質 콘크리트의 경시변화에 따른 콘크리트 온도 및 강도특성은 (표 5)와 같다.

경시변화에 따른 콘크리트 온도는 외기온이 23°C로서 약 5°C정도 높은 것으로 경시시간에 따른 온도증가는 거의 없는 것으로 나타났다. 이는 플라이애쉬의 응결지연 현상에 기인한 것으로 CaO함유량에 따른 초기 수화열은 매우 안정된 것을 알 수 있다.

또한, 경시변화에 따른 재령 28일 압축강도의 평균값은 293kg/cm²로 경시변화로 인한

강도변화는 없는 것으로 판단된다.

따라서, 경시변화에 따른 슬럼프, 공기량, 콘크리트 온도 및 압축강도가 高品質 콘크리트의 목표성능을 만족하고 있기 때문에 현장의 품질관리를 할 수 있는 배합조건으로 선정하였다.

4. 현장적용 및 결과분석

4.1 일반사항

레미콘 플랜트의 시험배합을 통해 선정된 최적배합 조건으로 高品質 콘크리트의 제조·운반·타설·양생에 따른 품질관리 및 현장적용을 실시하였다.

현장 품질관리는 레미콘 출하시 및 현장 받아들이기 시점에서 슬럼프, 공기량, 콘크리트 온도를 중심으로 실시하였으며, 압축강도 측정용 공시체 및 코아강도 채취용 시험체를 제작하였다.

또한, 바닥 슬래브는 구조물 조건(경사구배 1/10)을 고려하여 Sliding현상이 일어나지 않도록 품질관리에 유의하였으며, 벽체의 경우에는 1회 타설높이를 1m이하로 하고 상부 캔틸레버 부분의 침하균열에 유의하도록 하였다.

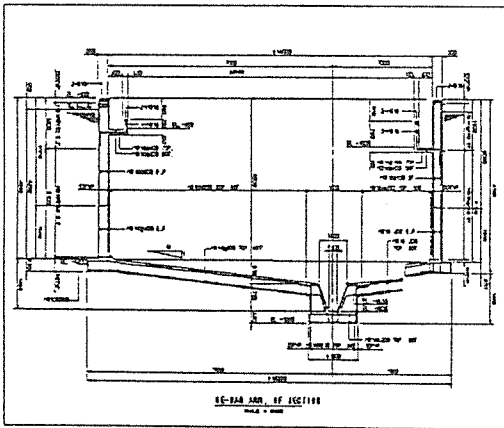
4.2 현장개요

高品質 콘크리트의 적용현장 개요는 (표 6)과 같으며, 현장 구조물의 단면도는 (그림 8)과 같다.

현장시공할 콘크리트의 물량은 126m³로 작업공정에 따라 2회로 나누어 타설하였다. 먼저, 바닥 슬래브를 타설한 후에 벽체의 철근 배근 및 거푸집 작업을 실시하고, 이어 벽체에 타설하도록 공정계획을 하였으며 후속공정은 타설후 7일째 시작하는 것으로 하였다.

(표 6) 高品質 콘크리트 적용현장 개요

구 분	내 용
현 장 명	울산석유화학지원(주)
타설부위	No.4 슬러지 침전조
적용기간	1996/9. 6. ~ 1996. 9. 21.
건물구조	철근 콘크리트구조
설계강도	210kg/cm ² (배합강도 300kg/cm ²)
발 주 처	울산석유화학지원(주)
시 공 사	코오롱 엔지니어링(주)



(그림 8) 적용구조물의 단면도

4.3 高品質 콘크리트의 제조 및 운반

高品質 콘크리트의 제조는 일괄투입방법으로 1배치당 2m³씩 하였으며, 이때의 배합시간은 믹서의 부하가 일정하게 되는 40초로 하였다. 콘크리트를 제조하여 출하하기 전에 슬럼프 시험을 실시하였으며, 에지테이터 트럭에 6m³씩 적재하여 현장으로 운반하였다.

현장 받아들이기 시점에서의 품질관리 항목은 슬럼프, 공기량 및 콘크리트 온도 등이며, 시험빈도는 에지테이터 트럭 1대당 1회를 원칙으로 하였다.

또한, 강도측정용 공시체는 에지테이터 트럭 2대당 1회로 한 번에 9개를 제작하여 강도

를 측정하였다.

4.4 高品質 콘크리트의 타설 및 양생

바닥 슬래브의 경우에는 시공조건이 중앙부를 중심으로 1/10 경사구배가 있었기 때문에, 목표 슬럼프값을 18±2.5cm로 할 경우에는 다짐진동에 따른 콘크리트의 미끄러짐(Sliding)현상이 발생하게 된다.

따라서, 목표 슬럼프값을 15±2.5cm로 조정된 후에 타설하도록 관리하였다. 콘크리트의 압송시험결과, 펌프카에 소요되는 압송압은 평균 120kg/cm²정도로 일반 콘크리트에 비해 약 10~20% 증가하였다.

즉, 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 점성이 증대되기 때문에 재료분리 및 블리딩의 발생이 거의 없는 반면에 압송성 및 다짐성에 유의해야 한다.

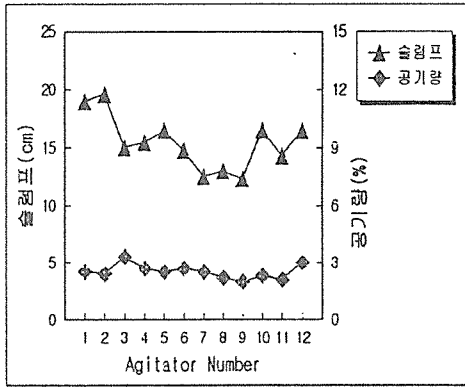
또한, 슬래브의 경우에는 Sliding방지를 위해 타설후 경화전에 리템퍼링을 실시하였으며, 노출부위에 철저한 습윤양생을 실시하였다. 벽체의 타설은 3회에 걸쳐 타설높이 및 토출량을 조절하여 다짐작업을 원활히 할 수 있도록 하였다.

4.5 高品質 콘크리트의 적용결과 분석

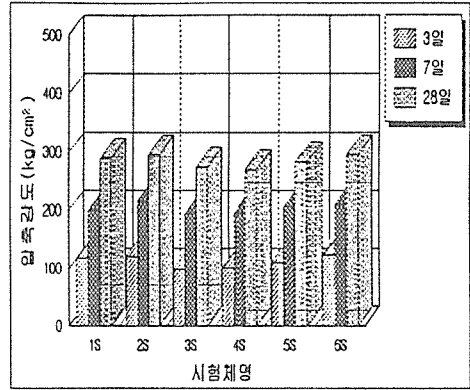
현장 목표슬럼프는 바닥 슬래브가 15±2.5cm, 벽체는 20±1.5cm로 관리하였으며, 공기량은 4.5±1.5%로 하였다. 현장 적용결과를 분석하면 다음과 같다.

(1) 슬럼프 및 공기량 특성결과

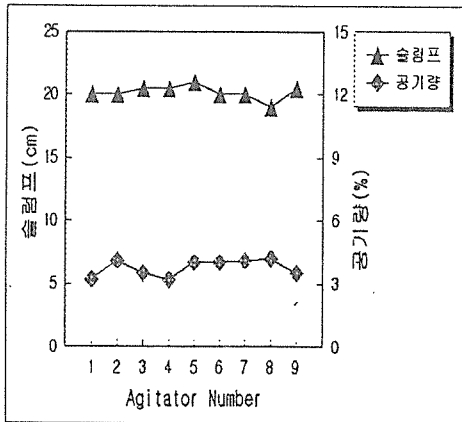
[그림 9]는 바닥 슬래브에 타설한 콘크리트의 슬럼프 및 공기량 특성결과를 나타낸 것이며, [그림 10]은 벽체에 타설한 콘크리트의 결과이다.



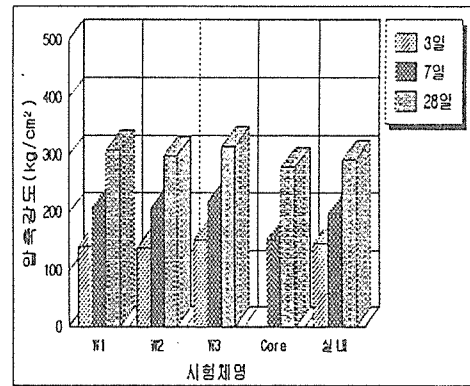
(그림 9) 슬럼프 및 공기량 특성결과(슬래브)



(그림 11) 바닥슬래브의 재령별 강도특성



(그림 10) 슬럼프 및 공기량 특성결과(벽체)



(그림 12) 벽체의 재령별 강도특성

바닥 슬래브의 경우에는 경사구배에 따른 Sliding현상을 방지하기 위해 슬럼프를 15±2.5cm로 조절하였으며, 벽체의 경우에는 편차가 거의 없는 상태에서 슬럼프와 공기량의 측정값이 관리목표를 만족하였다.

(2) 압축강도 특성결과

현장타설 콘크리트의 재령별 강도특성은 [그림 11] 및 [그림 12]와 같다.

바닥 슬래브에 타설한 콘크리트의 경우, 재령 28일 평균강도는 강도관리선보다 약간 낮은 273kg/cm²를 나타내었으며, 28일에 대한 7일강도 발현은 약 72%로 측정되었다. 따라서, 벽체의 경우에는 플라이애쉬의 치환율을 27%로 조정하였으며, 이에 따른 28일 평균

강도는 307kg/cm²로 측정되었다. 또한, 코아 강도는 압송전후에 관계없이 평균 279kg/cm² 정도로 나타나 설계기준강도를 만족하는 것으로 나타났다.

향후, 품질관리가 명확히 이루어 진다면, 설계기준강도에 대한 불량률 및 안전계수를 감소시켜 더욱 경제적인 콘크리트의 생산이 가능할 것으로 기대된다.

4. 결론

울산 열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 高品質 콘크리트에 대한 배합설계, 제조, 운반 및 타설의 현장적용을 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 高品質 콘크리트의 배합강도 산정식 제안
 배합강도 산정식은 불량율을 2.3%(일반 4%), 최소강도의 보증값을 90%로 적용하였다.

(2) 高品質 콘크리트의 최적배합

배합강도가 300kg/cm²인 콘크리트의 현장 배합조건은 물/결합재비 44~45%, 잔골재율 45±2%, 단위수량 185kg/m³범위로 한다.

(3) 高品質 콘크리트의 제조 및 운반

배합시간은 일괄투입시 40초가 가장 적합하며, 운반시간에 따른 슬럼프 유지성능이 매우 우수하기 때문에 현장 품질관리를 대폭 개선할 수 있었다.

(4) 高品質 콘크리트의 시공관리

열병합발전소의 플라이애쉬를 사용한 콘크리트는 높은 슬럼프에도 재료분리 저항성 및 블리딩 저감으로 현장의 시공관리에 매우 효과적이다.

(5) C급 플라이애쉬에 대한 KS기준 도입
 현재, KS기준으로 제정된 플라이애쉬의 품질기준은 F급 플라이애쉬에 국한되어 있기 때문에, C급 플라이애쉬를 재활용하기 위한 기준도입이 필요하다.

참고 문헌

- (1) 朴七林, 安宰鉉, 權寧鎬, 李相洙, 元澈, “고칼슘 플라이애쉬의 品質特性 및 콘크리트의 力學的 特性”, 대한건축학회 추계학술발표논문집, 제 15권 2호, 1995.11. pp.757~760
- (2) KS F 2526, “콘크리트용 골재” 1993.
- (3) 朴七林, 李輔根, 權寧鎬, 李相洙, 元澈, “열병합발전소 플라이애쉬의 特性 및 活用方案에 관한 실험적 研究”, 대한건축학회 춘계학술발표논문집, 제 15권 1호, 1995. 4. pp.639~644
- (4) 울산석유화학지원(주), “열병합발전소의 플라이애쉬 활용방안에 관한 연구”, 1차년도 연구보고서, (주)대우건설기술연구소, 1996.

