

고성능 콘크리트의 실용화를 위한 시공특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on Workability for Practical Use of High-Performance Concrete

양 근 혁*

이 영 호**

Yang, Keun-Hyeok

Lee, Young-Ho

Abstract

The special requirements of high-performance concrete(HPC) could be enhanced property over others such as compressive strength, durability, and construction practices. In order to satisfy these requirements a series of laboratory trial mixes and following mock-up test of reinforced concrete wall at field were performed in this study. The objective of this study was to quantitatively evaluate the workability, compressive strength, and the increased heat of hydration caused by the increase of the specific weight of cement according to various variables. Six example series designed about a minimum compressive strength of 500kgf/cm² at 28 days, and an approximately slump and slump flow of 25cm and 60cm respectively were tested. The selection process of the specific weight of water and the percentage of fly-ash transposition determined to be most suitable for the production of HPC is presented in the following paper.

키워드 : 고성능 콘크리트, 압축강도, 슬럼프, 시공성, 수화열

Keywords : high-performance concrete, compressive strength, slump, workability, heat of hydration

1. 서 론

시멘트 콘크리트는 철강재와 더불어 현대건축에서 가장 많이 쓰이고 있는 구조재료로서, 작업성, 성형성 및 내화성이 좋고 재료구입이 용이하며 제조원가가 저렴하다는 등의 여러 가지 장점으로 인해 건설현장에서 광범위하게 사용되고 있다. 특히 다른 구조재료와는 달리 “개발의 가능성”이라는 가장 큰 장점으로 인해 앞으로도 그 사용성은 증가할 것이다.

그러나 최근 산업기술의 발달과 함께 건축물의 대형화, 초고층화, 장스팬화, 자동화 추세로 인하여 구조재료인 콘크리트에 요구되는 기능도 다양해지고 있는데, 기존의 콘크리트로는 이러한 건설산업의 요구에 부응할 수 없는 실정이다. 기존의 콘크리트는 압축강도가 낮고, 유동성이 좋지 않아 타설 시 품질관리에 많은 어려움이 있으며, 재료분리 현상이 빈번히 발생하고, 매우 위험하고 많은 노동력이 필요한 진동다짐 작업을 반드시 실시하여야 하는 등 많은 문제점이 있어 변화하는 건설환경에 유효하게 대처하지 못하고 있다.

이러한 기존 콘크리트가 갖고 있는 문제점들을 보완하기 위하여 개발된 것이 고성능 콘크리트이다. 고성능 콘크리트란 기존 콘크리트의 가장 큰 단점 중 하나인 낮은 압축강도를 개선하여 400kgf/cm² 이상의 높은 강도를 발현시켜 초고층장스팬의 구조물 시공 시 구조 부재단면의 증가로 인한 가용면적의 감소라는 문제점을 제거하고, 유동성을 증가시켜 콘크리

트 타설 시 별도의 진동다짐 없이도 스스로 밀실하게 충전이 되며, 또한 내구성도 증대된 콘크리트를 말한다. 이렇게 성능이 개선된 고성능 콘크리트는 작업여건의 개선, 우수한 품질, 인력 절감, 구조물의 장기 사용성 제공으로 인한 환경보호 등으로 인하여 앞으로 고성능 콘크리트의 응용분야는 엄청나게 확장될 것이다.

미국과 일본, 유럽 등 선진국에서는 1980년대 초부터 기존 콘크리트가 갖고 있는 문제점들을 해결하고 그 성능을 향상시키기 위한 연구를 시작하여, 1989년 ACI9)에서 처음으로 고성능 콘크리트라는 개념을 정립하는 등 이에 대한 연구를 활발히 진행하고 있다. 일본에서는 1973년 처음으로 도로와 교량에 설계 강도 600~800kgf/cm²의 고강도 콘크리트를 사용하였으며, 1976년 일본 건축학회3)에서는 설계강도 270~360 kgf/cm² 이상의 고강도 철근 콘크리트조 설계·시공 지침을 제정하였다. 그 후 New RC Project5)에서 360~600kgf/cm² 정도의 고강도 콘크리트 실용화를 위한 연구를 중심으로 진행되고 있다.

국내에서는 1980년대까지만 하여도 몇몇 대학 연구소에서 만 고강도 콘크리트에 대한 개발연구가 진행되었으나2), 이제 실용화 단계에 접어들어 93년 이후 각 건설회사에서 슬럼프 20cm 이상, 설계강도 400~500kgf/cm² 정도의 고성능 콘크리트를 구조물에 부분적으로 적용하고 있다.

그러나 물시멘트비의 저감과 단위 시멘트량의 증가로 작업성의 저하, 건조수축 증가 및 내부 수화열의 증가 등이 문제점으로 지적되었다. 또한 콘크리트 제조업체들의 영세성으로 인하여 고성능 콘크리트 배합설계 및 시험방법에 대한 미비한 연구가 실용화에 큰 장애요인이 되고 있는 실정이므로 고

* 북포대학교 건축공학과 전임강사, 공학박사

** 동원대학 건축과 전임강사, 공학박사

본 연구는 경기지방 중소기업청 산·학·연 공동기술 개발 컨소시엄의 연구비 지원으로 수행되었음.

성능 콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 미치는 요인을 규명하고 이에 따른 배합설계 및 품질관리 지침에 대한 기초적 자료를 제시하는 것이 시급한 과제로 등장하고 있다.

따라서 본 연구의 목적은 각종 배합요인이 콘크리트의 강도, 수화열 특성 및 유동성에 미치는 영향을 비교분석하여 고성능 콘크리트의 적정 배합비를 유도하고, 현장실험을 통한 작업성을 평가하여 압축강도가 500kgf/cm² 이상이며, 진동다짐이 필요 없는 고성능 콘크리트의 실용화를 위한 기초자료의 제시에 있다.

2. 연구방법 및 범위

2.1 실내실험을 위한 기본 배합설계

고성능 콘크리트를 제조하고 이를 실제 구조물에 적용하기 위해서는 최적의 배합설계법과 각종 물리적, 역학적 특성에 대한 연구가 필요하다. 콘크리트의 강도 및 유동성에 영향을 미치는 인자들은 사용 재료의 특성뿐만 아니라 온도, 습도 등의 환경적 요인, 콘크리트 타설 위치와 타설 시간 등 매우 다양하기 때문에 배합설계는 과학적이고 산술적인 방법보다는 실험 데이터들을 비교, 분석하여 반 경험적인 방법에 의하여 설계된다.

본 연구에서도 콘크리트 강도 500kgf/cm², 슬럼프 값 25cm 이상, 슬럼프 플로우 값 60cm 수준의 고성능 콘크리트에 대한 최적의 배합설계를 작성하기 위하여 우선 기존 실험 결과들에서 콘크리트의 강도 및 유동성과 각 배합요인들과의 상관관계를 평가하였다. 콘크리트 압축강도가 500kgf/cm² 정도인 고성능 콘크리트의 배합설계에서 사용된 주요 재료들의 혼입율에 대한 기존 배합을 분석한 결과 일반적으로 물결합재 비는 31~40%, 잔골재율은 41~50%, 그리고 고성능 감수제 첨가율은 1.0~2.0 범위에 각각 있었다. 수화열을 억제하고 재료분리를 방지하기 위해 사용되는 플라이 애쉬의 치환범위는 10% 정도에 있었다.

기존 배합설계를 바탕으로 본 연구에서는 물결합재비를 32.2%, 잔골재율을 42%로 일정하게 하고 단위수량과 플라이

애쉬 치환율에 따른 압축강도, 수화열 및 유동성상을 평가하였다. 기존 실험결과들에서 단위수량이 160kgf/m³ 이하로 있는 경우 유동성이 매우 나쁘게 있었기 때문에 최적의 단위수량을 찾기 위하여 165~175kgf/m³으로 단위수량을 변화시켰다. 또한 플라이 애쉬 치환율이 10% 이상에서 유동성과 압축강도에 미치는 영향을 파악하기 위하여 플라이 애쉬 치환율은 결합재 양 대비 0~25%로 변화시켰다. 고성능 감수제 혼입율은 1.0%를 기준으로 하여 콘크리트의 비빔 작업 시 콘크리트의 상태에 따라 추가량을 결정하였으며, 공기량은 4±1.0%를 기준으로 하였다.

표 1에 본 연구의 실내실험을 위한 단위수량과 플라이 애쉬 치환율 변화에 따른 기본 배합표를 나타내었다. 모든 배합요인들의 조합에 따른 역학적 특성을 확인하는 것은 현실적으로 어렵다. 본 연구에서는 표 1의 기본 배합표에서 가장 유동성이 좋고 슬럼프 손실이 적은 단위수량을 파악하기 위하여 플라이 애쉬가 치환되지 않은 시편체 165-0, 170-0 및 175-0 등을 우선 실험하였다. 이들 중에서 유동성 및 7일 강도가 가장 좋게 나타나는 단위수량을 기준으로 플라이 애쉬를 시멘트량 대비 0%, 15% 및 25%를 각각 치환하여 유동성과 압축강도를 평가하였다.

2.2 사용 재료의 특성

본 실험에서 사용된 시멘트는 H사의 보통 포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 플라이 애쉬와 골재는 일반적으로 레미콘 현장에서 사용하는 제품을 사용하였다. 플라이 애쉬 비중은 2.2, 분말도는 3840(cm²/g)이다. 굵은 골재의 최대직경은 현장에서 가장 많이 사용하는 25mm를 사용하였다. 물은 일반 수도물을, 혼화제는 D 사의 나프탈렌계인 2000R를 각각 사용하였다. 각 배합재료들의 일반적 특성을 표 2~표 4에 각각 나타내었다.

2.3 고성능 콘크리트의 성능 평가

일반적으로 굳지 않은 콘크리트의 유동성을 평가하기 위하여 슬럼프 값과 플로우 값을 사용한다. 본 연구에서도 진동다짐 없는 우수한 시공성(workability)을 얻기 위하여 고유동 콘

표 1. 실내실험을 위한 기본 배합설계표

Specimen*	단위용적중량(kgf/m ³)					물-시멘트비 W/C (%)	물-결합재비 W/B (%)	물-결합재 용적율 W/P (%)	플라이 애쉬 치환율 (%)	잔골재율 S/A (%)	S.P 혼입율 (%)
	W	C	F/A	S	A						
165-0	165	512.4	0	695.8	971.9	32.2	32.2	101.4	0	42	1.0 (±0.7)
165-15		435.5	76.8	683.7	954.9			95	15		
165-25		384.3	128.1	675.6	943.6			91.1	25		
170-0	170	527.9	0	684.9	956.6			101.4	0		
170-15		448.7	79.2	672.4	939.2			95	15		
170-25		395.9	131.9	664.0	927.5			91.1	25		
175-0	175	543.5	0	673.9	941.3			101.4	0		
175-15		461.9	81.5	661.1	923.4			95	15		
175-25		407.6	135.8	652.5	911.4			91.1	25		

* 165-0 : (단위수량-플라이 애쉬 혼입율)

크리트의 시험방법을 적용하였다. 콘크리트 비빔은 중앙대학교 소재 0.3m³ 용량의 강제식 믹시기를 이용하였다.

슬럼프와 슬럼프 플로우는 KS F 2402규정에 따라 슬럼프 콘을 이용하였다. 이때 슬럼프는 콘을 수직으로 끌어 올려 콘크리트 상면에서 낙하된 양을, 슬럼프 플로우는 가로, 세로로 흐른 유동 거리를 각각 측정하였다.

표 2. 시멘트의 일반적 특성

비중	분말도 (cm ³ /g)	응결도(h:m)		압축강도 (kgf/cm ²)		
		초결	종결	3일	7일	28일
3.15	3,267	3:55	5:46	202	301	416

표 3. 골재의 일반적 특성

종류	조립율(F.M)	비중	흡수율(%)	압축강도 (kgf/cm ²)
잔골재	2.82	2.62	0.98	-
굵은 골재	6.69	2.65	0.96	1,061

표 4. 혼화제(고성능 감수제)의 특성

제품명	유형	색상	주성분	pH	비중
2000R	액상	암갈색	나프탈렌계	5.66	1.18

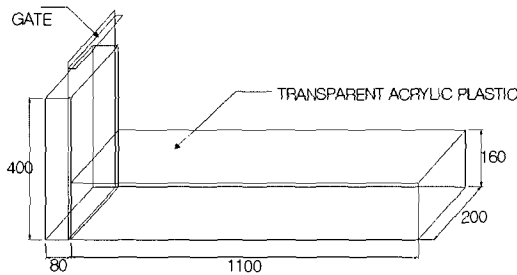
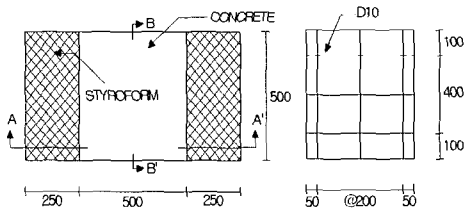
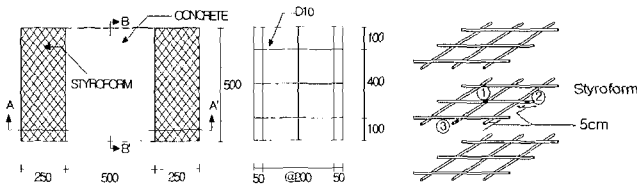


그림 1. L 플로우 시험기 형상



(a) 평면도



(b) 단면도

(c) 온도 게이지 위치

그림 2. 시험체 형상 및 온도 게이지 위치

L 플로우 시험에서는 그림 1에 나타난 8×20×40cm 크기의 미끄러운 박스 속의 콘크리트를 순간적으로 16×20cm 크기의 문으로 흘려 보내 유동 거리 및 유동 속도를 측정하였다. 유동속도는 30cm 및 50cm를 통과할 때 그리고 최대 거리에 도달하였을 때의 시간을 측정하였다.

시간의 경과에 따른 유동성 저하를 측정하기 위하여 비빔 직후(0분), 비빔 후 40분, 60분 및 90분에서 슬럼프와 플로우는 측정하였다. 이때 비빔 후 콘크리트는 외부 공기와의 접촉을 방지하여 보관하였다.

콘크리트의 재료분리 정도를 평가하기 위하여 슬럼프 플로우 실험이 종료한 시점에서 중심부와 외주부로부터 각각 2kgf 정도의 콘크리트를 시료로서 채취하였다. 채취된 시료의 중량과 시료를 5mm 체를 사용하여 깨끗한 물로 씻어내서 남은 골재의 중량을 측정하여 비교하였다.

플라이 애쉬 치환율에 따른 콘크리트 내부의 수화열과 건조수축을 측정하기 위하여 50×50×60cm 크기의 시험체를 3개 제작하였다. 시험배합은 165-0, 165-15 및 165-25를 적용하였다. 시험체 길이 방향은 실제 부재에서처럼 외기와 차단할 위해 두께 25cm인 스티로폼으로 단열하였다. 스티로폼은 수분흡수를 방지하기 위하여 비닐로 방수처리 하였다. 철근배근은 극한강도 설계기준에 의한 최소 온도철근비($\rho=0.2\%$)를 유지하도록 D10 철근을 15~20cm 간격으로 배근하였다.

콘크리트 내부 수화열 이력을 파악하기 위하여 T-type의 온도 게이지를 매립하였다. 온도게이지는 시험체 중앙부, 단열재 방향 및 외기와 접하는 단부에서 5cm 이격된 위치에 각각 설치하였다. 콘크리트 타설 시 위치변화가 없게 하기 위하여 철근에 결속하였다. 이상에서 설명한 시험체 형상 및 온도 게이지 위치를 그림 2에 자세히 나타내었다.

시간이력에 따른 콘크리트 건조수축을 측정하기 위하여 단열재 방향에서 PML-60-2L 게이지를 매립하였다. 매립깊이는 콘크리트 윗면에서 5cm로 하였다. 수화열 및 건조수축 측정 데이터 기록은 TDS-302를 이용하여 20분 간격으로 자동 저장하였다.

각 배합의 재령에 따른 압축강도를 측정하기 위하여 공시체를 제작하였다. 재령강도는 3일, 1주, 4주 및 13주 강도로 하였다. 공시체는 $\phi 10 \times 20$ cm 크기의 방수처리 된 종이 몰드를 이용하여 각 재령에 3개씩 제작하였다. 양생은 대기양생하였으며 48시간 후 몰드탈형을 하였다. 몰드와 실제 부재의 28일 압축강도를 비교하기 위하여 50×50×60cm 시험체에서 $\phi 10 \times 20$ cm 크기로 각각 3개의 코어를 채취하였다. 몰드 및 코어의 하중 가력면 처리는 시멘트 페이스트를 이용할 경우 편심 및 페이스트 강도가 시험체 강도보다 낮게 있을 우려가 있기 때문에 연마기를 이용하여 면처리를 하였다. 압축강도 시험은 100tonf 용량의 UTM을 이용하여 <KS F 2405 콘크리트 압축강도 시험규정>에 따라 실시하였다.

표 5. 굳지 않은 콘크리트의 유동성 및 슬럼프 손실

Specimen	S.P 혼입 율 (%)	슬럼프(cm)				슬럼프 플로우*(cm)				L 플로우 도달시간(sec)												공 기 량 (%)	비고
		0분	40분	60분	90분	0분	40분	60분	90분	30cm				50cm				최종도달거리 (cm)/시간					
										0분	40분	60분	90분	0분	40분	60분	90분	0분	40분	60분	90분		
165-0	1.71	27	26	24	23	64.0	63.5	60	54.5	1.88	3.5	6.4	6.1	3.5	6.5	14.3	14.4	90/ 8.2	80/ 41	70/ 69.1	68/ 63	4.0	단위 수량에 따른 시공성 평가 플라이 애쉬 치환율 에 따른 시공성 평가
170-0	1.0	24.5	23.5	23	21	60.0	51.0	42.5	35.0	2.95	3.1	12	-	5.5	8.0	-	-	65/ 24.8	55/ 20.8	44/ 25.3	-	2.7	
175-0	1.1	25	22.5	20	17	53.0	42.5	37.0	30.0	3.19	3.45	6.86	-	11	-	-	-	52/ 11.4	40/ 12.3	31/ 11.0	-	5.0	
165-0	1.0	26	23	20	18	57.5	44.0	35.0	31.5	1.2	2.5	-	-	6.3	-	-	-	53/ 15.4	39/ 11.4	29/ 10.6	-	2.7	
165-15	1.17	25.5	25	24	22.5	58.5	49.5	44.0	41.0	0.7	1.3	1.7	4.0	2.3	6.9	-	-	72/ 15.6	53/ 13.0	43/ 13.5	35/ 10.2	3.2	
165-25	1.0	27	26	25	23	68.0	56.0	53.5	45.5	0.6	0.8	1.5	2.8	1.1	2.6	6.4	-	110/ 38	72/ 21.3	53/ 14.8	37/ 9.7	3.0	

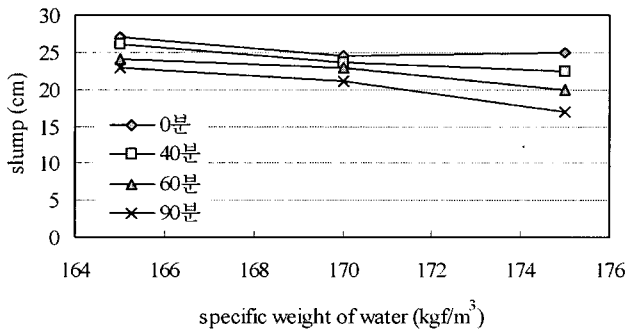
* 슬럼프 플로우는 최대 값과 최소 값의 평균 값이다.

3. 실험결과 및 분석

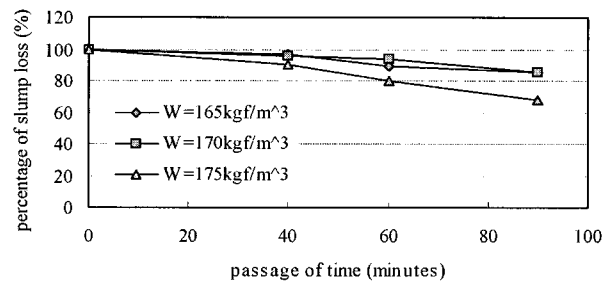
3.1 유동성 평가

표 5에 각 배합설계 요인에 따른 굳지 않은 콘크리트의 유동성에 대한 실험결과를 나타내었다. 표 5에서 최적의 단위수량을 결정하기 위한 165-0 시험체와 최적의 플라이 애쉬 치환율을 결정하기 위한 165-0 시험체의 실험결과가 다소 차이가 나는 이유는 콘크리트 타설 시 상대습도 영향이라 판단된다. 즉 단위수량에 따른 각 배합설계의 실험 시 날씨는 매우 맑았었지만 7일 후 플라이 애쉬 치환율에 따른 각 배합설계 실험 시 날씨는 우천이었다. 따라서 본 실험결과 분석에서 단위수량 및 플라이 애쉬 치환율에 따른 유동성 및 압축강도는 각각의 165-0 시험체를 이용하였다.

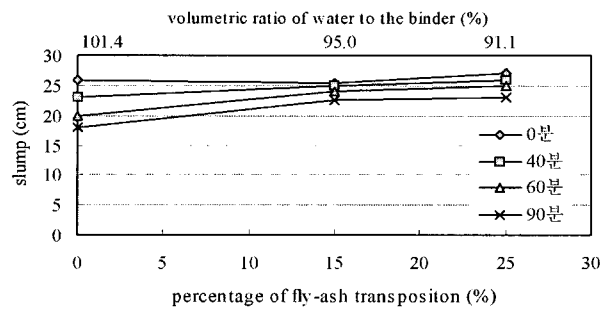
고성능 감수제(S.P)는 콘크리트 배합 시 적정의 슬럼프 및 슬럼프 플로우 값에 도달 할 때까지 첨가하였다. 재료분리를 일으키지 않으면서 고 유동성을 갖기 위한 고성능 감수제의 적절한 혼입율은 1.0~1.2% 범위에 있었으며, 이때 공기량도 허용범위 이내인 3% 이하로 있었다.



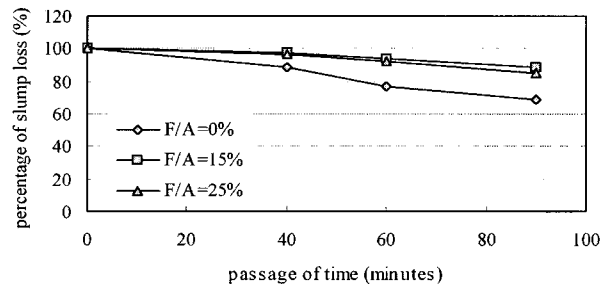
(a) 물의 단위 용적중량과 슬럼프의 관계



(b) 시간경과에 따른 슬럼프 손실을
그림 3. 물의 단위 용적중량과 시공성과의 관계



(a) 플라이 애쉬 치환율과 슬럼프의 관계

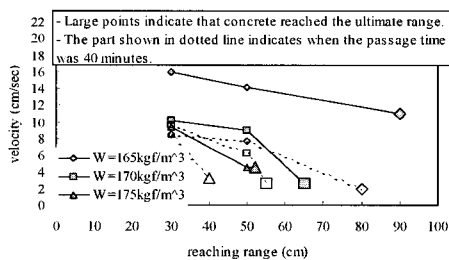


(b) 시간의 경과에 따른 슬럼프 손실을
그림 4. 플라이 애쉬 치환율과 시공성의 관계

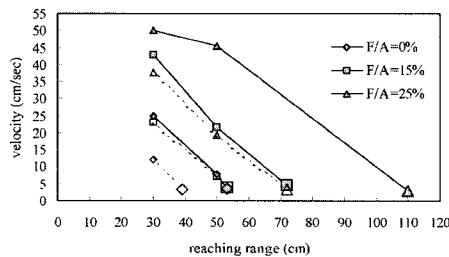
그림 3에 단위수량에 따른 시공성을 비교하기 위한 시험체에서 단위수량에 따른 슬럼프와 시간의 경과에 따른 슬럼프 손실율을 나타내었다. 고성능 콘크리트의 배합설계 시 적절한 물결합재비와 잔골재율을 결정하게 되면 단위 수량에 따라 각 배합재료들의 단위 용적중량이 결정되게 되므로 적절한 단위 수량을 파악하는 것은 매우 중요하다. 그림에서 단위수량이 증가할수록 슬럼프는 감소하고 있으며 특히 시간의 경과에 따른 슬럼프 손실율도 크게 증가하고 있음을 알 수 있다. 즉 단위수량이 175kgf/m³인 경우 40분, 60분 및 90분 경과 후 슬럼프 손실율은 각각 10%, 20% 및 32%로 있었다. 반면, 단위수량이 165kgf/m³인 경우 40분 경과시 슬럼프 손실은 거의 보이지 않고 있으며, 60분과 90분이 경과할 때도 슬럼프 손실율은 각각 12%와 15%로 손실율은 적었다. 따라서 유동성 확보 및 시간의 경과에 따른 유동성 손실의 방지는 단위 수량이 165kgf/m³ 정도에서 최적으로 있다고 판단된다.

그림 4에 단위 수량이 165kgf/m³일 때 플라이 애쉬 치환율에 따른 슬럼프 및 슬럼프 손실율의 관계를 나타내었다. 플라이 애쉬 치환율이 증가할수록 슬럼프는 증가하지만 치환율이 15% 이상에서는 거의 일정한 슬럼프를 나타내고 있음을 알 수 있다. 시간이 40분, 60분 및 90분 경과 후의 슬럼프 손실율은 플라이 애쉬가 치환되지 않았을 때 각각 12%, 24%, 31%인 반면, 플라이 애쉬가 15% 치환되었을 때에는 각각 2%, 6%, 12%로 일정한 시간 경과 후에도 유동성을 유지하고 있었다. 또한 플라이 애쉬가 25% 치환되어도 슬럼프 손실율은 플라이 애쉬 15% 치환되었을 때와 거의 비슷하게 나타나고 있었다. 즉 시간의 경과에 따른 슬럼프 손실은 플라이 애쉬가 일정량만 치환되면 확연히 개선되고 있음을 알 수 있다.

Izumi Itoshi⁴⁾는 콘크리트의 유동성은 물-결합재 용적율에 의해 크게 영향을 받으며 그 범위는 90~100%에 있음을 실험을 통하여 밝히고 있다. 본 연구에서도 그림 4-(a)에 나타낸 바와 같이 물-결합재 용적율이 95% 정도에서 유동성 및 슬럼프 손실 방지가 우수하게 나타나고 있었다.



(a) 단위수량에 따른 유동속도



(b) 플라이 애쉬 치환율에 따른 유동속도

그림 5. L 플로우 실험에서 도달거리에 따른 유동 속도

그림 5에 L 플로우 시험에서 30cm, 50cm 및 최종 도달거리에 따른 유동속도를 나타내었다. 그림에서 실선은 콘크리트 비빔 직후일 때, 점선은 40분 경과 후인 때를 각각 나타낸다. 그리고 큰 표식(Lagre points)은 더 이상 콘크리트가 흐름을 보이지 않는 최종 거리에 도달하였을 때를 나타낸다. 일반적으로 유동성이 좋은 콘크리트는 L 플로우 값이 60~75cm의 범위에 있으며, L 플로우 유동속도는 사용재료의 배합에 따라 값이 다르기 때문에 최적 값의 설정은 어렵다. 그림에서 단위수량이 165kgf/m³일 때 최종 도달거리 및 유동속도가 가장 우수하게 나타나고 있지만 40분 경과 후 유동속도는 급격히 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 플라이 애쉬 치환율이 25%일 때 플라이 애쉬가 치환되지 않았을 때에 비해 최종 유동거리 및 유동속도는 약 2배 증가하며 시간의 경과에 따른 유동속도 감소율도 작게 나타나고 있다.

따라서 굳지 않은 콘크리트의 유동성, 유동속도 및 시간의 경과에 따른 유동성 감소방지는 단위수량이 165kgf/m³일 때 그리고 플라이 애쉬 혼입율 25%까지는 양호하다고 판단된다.

3.2 재료분리성 평가

슬럼프 플로우 측정 시 재료분리 현상을 육안 관찰하였으며, 이를 정량적으로 평가하기 위하여 중심부와 외주부에서의 굵은 골재 함유율을 측정하여 표 6에 나타내었다. 중심부의 굵은 골재 함유율에 대한 외주부의 굵은 골재 함유율의 비율은 96~99%로서 재료분리는 거의 발생하지 않고 있었다. 즉 단위수량 175kgf/m³, 플라이 애쉬 치환율 25%까지는 콘크리트가 유동할 때 골재를 함께 끌고가는 점성을 발휘함으로써 재료분리 저항측면에서는 우수하게 있다고 판단된다.

3.3 수화열에 의한 온도이력

그림 6에 플라이 애쉬 치환율에 따른 수화열에 의한 콘크리트 내부 온도이력을 나타내었다. 수화열을 측정할 각 위치는 그림 2-(c)에 자세히 나타내었다. 수화열에 의한 콘크리트 내부 온도는 타설 초기에 급격히 증가한 후 감소하며 약 160시간 후 외기 온도와 거의 같은 온도를 보이고 있다. 내부 최고온도는 시험체 중심부에서 가장 크게 발생하고 있으며 외기와 가까운 내부온도는 중심부보다 약 3°C가 작게 있었다. 타설 후 내부 최고온도에 도달하는 시간은 플라이 애쉬를 치환하지 않았을 경우, 15% 치환했을 경우, 그리고 25% 치환했을 경우 각각 23시간, 25시간 및 30시간으로서 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 최고 온도에 도달하는 시간도 늦게 나타났다.

표 6. 굵은 골재 함유율을 통한 재료분리성 평가

specimen	중심부 (kgf)			외주부 (kgf)		
	콘크리트	굵은 골재	굵은 골재 함유율(%)	콘크리트	굵은 골재	굵은 골재 함유율(%)
165-0	2.1	0.85	40.5	2.1	0.83	39.5
170-0	2.3	0.95	41.3	2.1	0.85	40.5
175-0	2.2	0.89	40.4	2.2	0.86	39.1
165-0	2.3	0.97	42.2	2.2	0.91	41.4
165-15	2.1	0.89	42.4	2.2	0.90	40.9
165-25	2.2	0.91	41.4	2.1	0.86	40.9

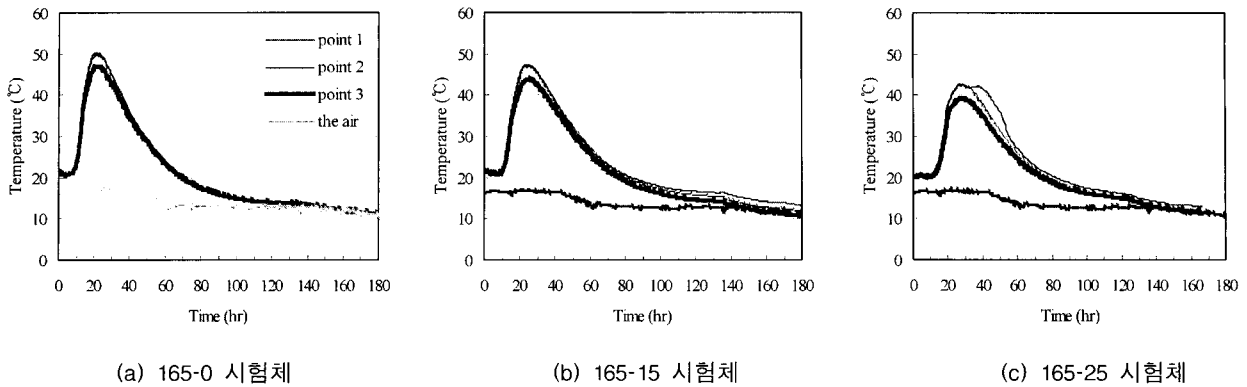


그림 6. 플라이 애쉬 치환율에 따른 수화열 이력 특성

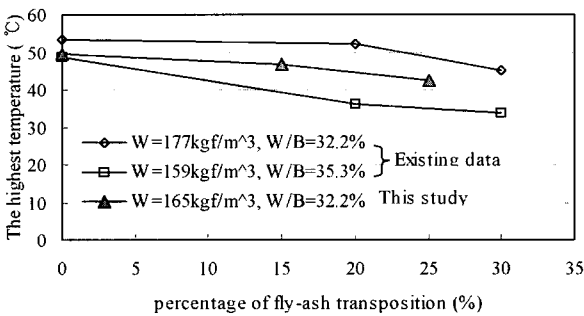


그림 7. 플라이 애쉬 치환율과 최고온도의 관계

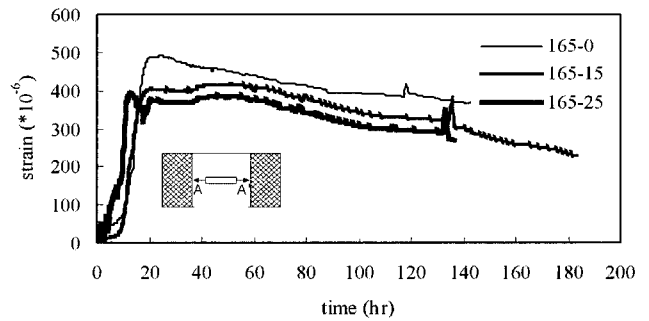


그림 9. 플라이 애쉬 치환율에 따른 건조수축 변형이력

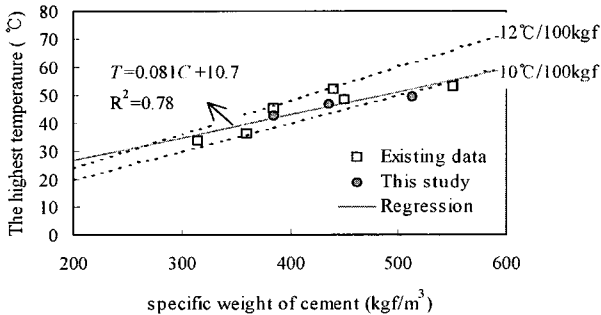


그림 8. 단위 시멘트량과 최고 온도의 관계

그림 7에 플라이 애쉬 치환율과 콘크리트 내부 최고온도의 관계를 나타내었다. 함께 이용한 기존 실험데이터는 정현수 등¹⁾의 연구로서 실험조건이 본 연구와 동일한 경우이다. 본 연구에서 내부 최고 온도는 플라이 애쉬를 치환하지 않았을 경우, 15% 치환했을 경우, 그리고 25% 치환했을 경우 각각 49.5°C, 46.8°C 및 42.4°C로서 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 내부 최고온도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 이는 플라이 애쉬 치환량만큼 수화반응을 일으키는 시멘트량이 감소하기 때문이라 판단된다.

그림 8에 단위 시멘트량과 시험체 콘크리트 내부 최고온도의 관계를 나타내었다. 시험체 내부 최고온도는 단위 시멘트량에 비례하여 증가하며, 시멘트 100kgf당 10~12°C 범위를 만족하고 있었다. 따라서 고성능 콘크리트 제조시 수화열 발생으로 인한 균열제어를 위해서는 적절 양의 플라이 애쉬를 치환할 필요가 있다고 사료된다.

3.4 건조수축 특성

플라이 애쉬 치환율에 따른 건조수축 변형이력을 그림 9에 나타내었다. 그림에서 콘크리트 타설 후 수화열에 의한 팽창(+)으로 초기 변형율이 급격히 증가하지만 시간의 경과에 따른 건조수축(-)으로 인해 변형율은 감소하는 경향을 보이고 있다. 내부 수화열에 의한 팽창은 플라이 애쉬 치환량이 적을수록 크게 있지만 최대 변형율 이후 건조수축에 의한 감소 기울기는 플라이 애쉬 치환율에 관계없이 거의 일정하게 나타나고 있다. 따라서 내부 수화열에 의한 팽창을 무시한다면 플라이 애쉬가 콘크리트의 건조수축에 미치는 영향은 거의 없다고 판단된다.

3.5 재령에 따른 압축강도

본 연구의 기본 배합설계표에서 재령에 따른 압축강도 및 강도 발현율을 표 7과 그림 10에 각각 나타내었다. 강도 발현율은 28일 압축강도를 기준으로 하였다. 표 7에서 단위수량이 압축강도에 미치는 영향은 단위수량이 165kgf/m³에서 170kgf/m³과 175kgf/m³로 증가할 때 압축강도는 각각 5%와 10% 감소하고 있었다. 이것은 물/시멘트비가 일정하더라도 고성능 콘크리트에서는 단위수량이 증가하면 점성 및 충전성의 저하로 압축강도가 감소할 수 있음을 나타내는 것으로 고성능 콘크리트의 배합설계 시 단위수량 결정은 이러한 경향도 고려하여야 할 것으로 판단된다.

그림 10에서 재령 7일 강도는 보통강도 콘크리트에 비해 크게 있으며 28일 이후 압축강도의 증가는 거의 없었다. 또한

7일 이후 재령에 따른 압축강도는 보통강도 콘크리트 실험결과에 근거하고 있는 ACI 기준식과 잘 일치하고 있다. 따라서 콘크리트 강도가 600kgf/cm² 이하인 고성능 콘크리트의 재령에 따른 압축강도는 ACI 기준을 적용하여 적절히 예측할 수 있다고 판단된다.

표 7. 재령에 따른 압축강도 및 강도발현율

specimen	압축강도 fck(kgf/cm ²)					압축강도 발현율 (fck/f28)			
	3일	7일	28일		91일	3일	7일	28일	91일
			몰드	코아					
165-0	-	419	515	-	-	-	0.81	1.0	-
170-0	-	414	489	-	-	-	0.85	1.0	-
175-0	-	403	463	-	-	-	0.87	1.0	-
165-0	256	456	541	541	552	0.47	0.84	1.0	1.02
165-15	212	377	529	563	550	0.40	0.71	1.0	1.04
165-25	198	356	509	499	538	0.39	0.70	1.0	1.06

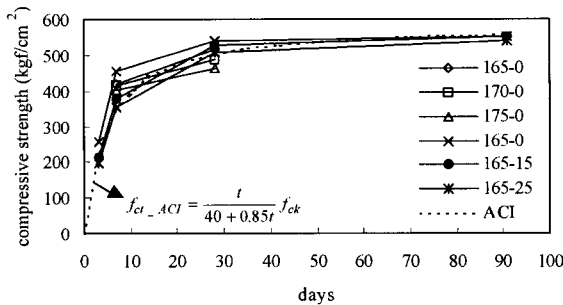


그림 10. 재령에 따른 압축강도

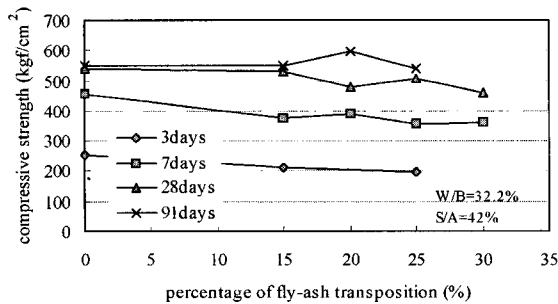


그림 11. 플라이 애쉬 치환율과 압축강도의 관계

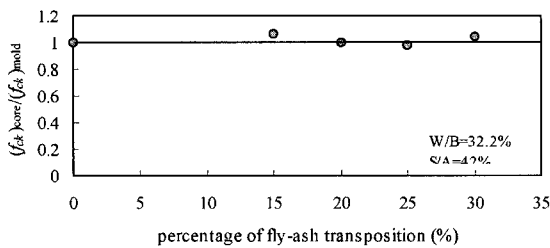


그림 12. 콘크리트 몰드와 코아 강도의 관계

재령에 따른 강도발현율은 단위수량보다는 플라이 애쉬 치환량에 의해서 크게 영향을 받고 있었다. 그림 11에 물결합재비가 32.2%일 때 플라이 애쉬 치환율과 압축강도의 관계를

나타내었다. 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 압축강도는 감소하며 특히 초기재령에서 강도발현이 낮게 있음을 알 수 있다. 하지만 91일 강도에서는 플라이 애쉬 치환량에 관계없이 거의 일정한 강도발현을 보이고 있어 장기강도 측면에서 플라이 애쉬 치환량이 콘크리트 강도에 미치는 영향은 거의 없다고 사료된다.

그림 12에 플라이 애쉬 치환율에 따른 콘크리트 몰드와 코아의 재령 28일 압축강도의 관계를 나타내었다. 세로축은 실제 부재의 코아강도를 몰드강도로 무차원하여 나타내었다. 그림에서 코아강도는 플라이 애쉬 치환량에 관계없이 몰드강도와 거의 일치하게 나타나고 있다. 즉 부재 크기가 다르고 온도도 차이가 나는 경우에도 압축강도는 거의 동등하게 있다고 판단된다.

4. 실제 현장적용 실험

4.1 실험개요

본 연구의 기본 배합설계표에 대한 실내실험 결과들을 분석하여 본 연구목표에 적합한 최적의 설계배합표를 도출하였다. 도출된 설계배합표의 현장적용성을 파악하기 위하여 경기도 광주 시공현장에서 철근콘크리트 벽체를 대상으로 콘크리트를 타설하였다. 그림 13에 줄기초에 지지되는 철근콘크리트 벽체의 상세를 나타내었다. 벽체의 크기는 10×3×0.3m이며 수직 수평 철근은 D19철근을 20cm 간격으로 배근되었다. 콘크리트의 충전성을 육안으로 파악하기 위하여 벽체 하부와 중간지점에 투명 아크릴을 설치하였다.

본 실제 구조물 적용실험에 사용한 시멘트, 플라이 애쉬, 골재 및 고성능 감수제는 기본 배합설계 실험에 사용한 재료와 동일하게 있다. 배합설계는 실내실험에서 가장 우수한 성능을 보이는 165-15 시험체의 배합설계를 이용하였다. 레미콘 배합에 앞서 고성능 감수제 첨가량을 결정하기 위하여 레미콘 공장 실험실에서 예비 실험배합을 우선 수행하였다.

4.2 현장적용 실험결과

실제 현장적용 콘크리트에 이용된 배합설계의 실험결과를 표 8에 나타내었다. 슬럼프 및 플로우 실험은 레미콘 공장 출하시점과 현장 타설 시점에서 수행하였다. 레미콘 공장에서 출발하여 현장에 도착하는 시간은 약 35~40분이 소요되었다. 표에서 알 수 있듯이 40분 경과 후 슬럼프는 25cm를 유지하며 슬럼프 손실은 거의 보이지 않고 있다. 또한 재령에 따른 압축강도도 165-15 배합표의 실내실험 결과와 거의 비슷하게 나타나고 있으며 28일 강도도 500kgf/cm² 이상을 유지하고 있었다.

콘크리트 타설은 레미콘 슈트를 이용하여 벽체의 한쪽 끝에서 직접 수직 타설하였다. 철근 콘크리트 벽체 타설 시 유동성과 충전성의 자세한 모습을 사진 1에 나타내었다. 타설시 진동기는 전혀 사용하지 않았지만 높은 점성과 유동성으로 벽체 길이방향의 끝까지 콘크리트가 충전되었다. 타설 시 재료분리 현상은 보이지 않았으며 철근이 배근되어도 충전성이

표 8. 실제 현장적용 콘크리트의 실험결과

배합명	S.P. 첨가율 (%)	슬럼프 (cm)		슬럼프 플로우 (cm)		L-flow 도달시간(sec)						공기량 (%)	압축강도 (기전양생) (kgf/cm ²)		
		0분	40분	0분	40분	0분			40분				3일	7일	28일
						30 cm	50 cm	Max (sec)	30 cm	50 cm	Max (sec)				
165-15	1.2	26.0	25.0	61*62	56*57	0.7	2.1	77cm 15.2	1.1	6.5	59cm 14.5	3.1	230	381	543

매우 우수함을 투명 아크릴을 통해 확인할 수 있었다. 또한 거푸집 탈형 후 모습을 사진 2에 나타내었으며, 곰보같은 품질저하는 보이지 않았다.

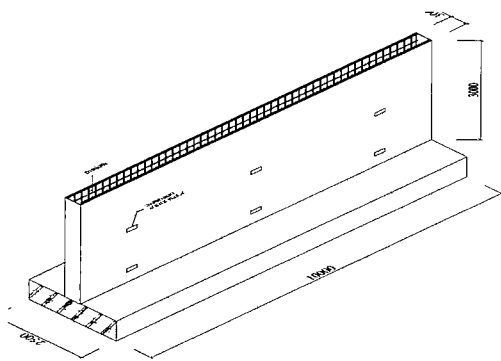


그림 13. 실제 현장타설에 이용된 철근콘크리트 벽체 상세(단위 : cm)

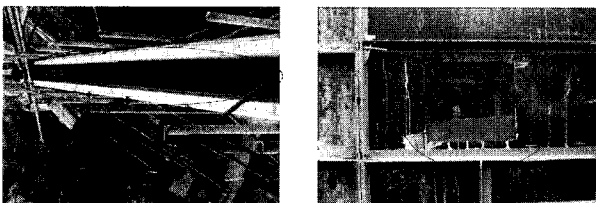


사진 1. 벽체 타설 시 콘크리트 충전 모습

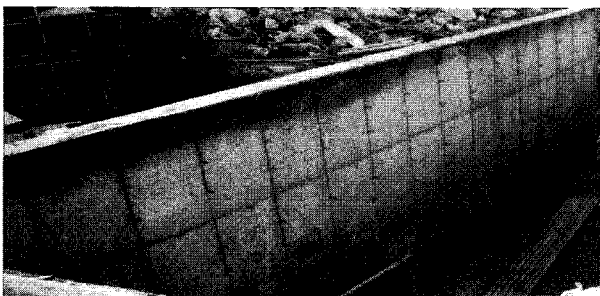


사진 2. 철근콘크리트 벽체의 거푸집 탈형 후 모습

5. 결론

본 연구는 압축강도 500kgf/cm², 슬럼프 값 25cm 이상, 슬럼프 플로우 값 60cm 이상 수준의 고성능 콘크리트 실용화를 위해 시공성에 대한 각 변수들의 영향을 평가하고 현장적용을 한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재료분리를 일으키지 않으면서 고 유동성을 갖기 위한 고성능 감수제의 적절한 혼입율은 1.0~1.2% 범위에 있었으며, 유동성, 유동속도 및 시간의 경과에 따른 유동성 감소방지는 단위수량이 165kgf/m³일 때 그리고 플라이 애쉬 치환율 25%까지는 양호하게 나타났다.
2. 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 수화열에 의한 최고 온도에 도달하는 시간이 길었으며, 건조수축 변형은 플라이 애쉬 치환량에 거의 관계가 없었다.
3. 시험체 내부 최고온도는 단위 시멘트량에 직접 비례하며, 시멘트 100kgf당 10~12℃ 범위에 있었다.
4. 고성능 콘크리트의 유동성과 충전성을 확보하기 위하여는 물/결합재 중량비보다는 용적비가 중요하며, 용적비 95%에서 적당한 충전성과 유동성을 확보할 수 있었다.
5. 플라이 애쉬 치환량이 증가할수록 압축강도는 감소하며 특히 초기재령에서 강도발현이 낮게 있지만 91일 강도에서는 플라이 애쉬 치환량에 관계없이 일정한 강도발현을 보였다.
6. 본 연구에서 제안한 배합설계에 따라 레미콘을 이용하여 실제 철근콘크리트 벽체 타설시 진동기는 전혀 사용하지 않았지만 슬럼프 유지, 유동성 및 충전성이 우수하였으며, 콘크리트 강도발현도 실내 실험결과와 비슷한 경향을 보였다.

본 연구에 도움을 주신 CKI(주)와 덕천건설(주)에 감사드립니다.

참고문헌

1. 정현수, "고강도 콘크리트의 실용화를 위한 적정 배합 및 실대 구조물 실험연구", 중앙대학교 구조연구실, 1997.
2. 신성우, "고강도 콘크리트의 개발현황과 방향", 한국레미콘공업협회지, 제40호, 1994.7, pp.18-26
3. 日本建築学会, 建築工事標準仕様書・同解説, 1979
4. Izumi Itoshi 外6人, "高流動コンクリート'実大施工'実験", 日本建築学会学術講演概集, pp.319-324, 1994. 8
5. 国土開発技術研究センター `New RC Project, 5巻, 1993
6. 超流動コンクリート研究委員会, "超流動コンクリート研究委員会報告集(II)", 日本コンクリート工学協会, 1994.5, pp11-37,
7. ACI Committee 318, "Building Code Requirements for Reinforced Concrete and Commentary (ACI 318-02), American Concrete Institute, 2002.
8. M, N. Haque, B. W. Langan, and M. A. Ward, "High Fly Ash Concretes," ACI Journal, Jan.-Feb. 1984. pp.54-60,
9. ACI Committee 363, "State-of-the-Art Report on High-Strength Concrete," ACI Journal, Jul.-Aug. 1984, pp364-411,