

노출 구조물 벽체에 적용하기 위한 무다짐 콘크리트의 최적배합설계

Mix Design of Exposed Concrete Wall using Self Compacting Concrete

손유신^{*}
Sohn, Yu Shin

이승훈^{**}
Lee, Sung Hoon

김규동^{***}
Kim, Gyu Dong

김한준^{*}
Kim, Han Joon

ABSTRACT

The structure of Chosun-ilbo Boopyung factory was desined as exposed concrete. The slef compacting concrete(non-vibrating concrete) must be applied to this case because the exposed concrete wall is very thin(200mm) and high(6m). Laboratory tests and semi mock-up test were performed for optimum mix design of the self compacting concrete. As a result, the optimum mixes were observed at the 3-component types(opc, fly-ash, slag powder) that $V_p \geq 0.175$, $V_w/V_p \geq 0.95$, $W=170 \sim 175 \text{kgf/m}^3$ and $B=500 \sim 540 \text{kgf/m}^3$. Based on this result, we make plan that the pilot productions of batcher plant, the full-scale mock up tests and site application.

1. 서론

노출 콘크리트란 철근 콘크리트 구조물의 시공 후 마감재료를 따로 시공하지 않고 콘크리트 자체의 질감과 색상으로 그 표면을 마감하는 시공기술로서 건축설계의 예술성 및 작품성을, 시공측면의 종합적 콘크리트 시공 기술성을, 발주 측면의 유지관리 편리성과 유일성을 표현할 수 있는 기술이므로 건축 및 토목에 종사하는 기술자라면 한 번쯤은 도전해 보고 싶은 매우 우수한 시공기술이다.

현재까지 국내에서 노출 콘크리트가 적용된 실적은 2002 월드컵 경기장, 인천 신공항, 고속철도 역사, 연구소, 종교시설 등의 건축, 토목 구조물을 들 수 있으며, 그 특유의 매력 때문에 적용 개소는 더욱더 확대될 것으로 판단된다. 그러나, 실제로 노출 콘크리트에 대한 인식이 부족하고, 품셈의 미정립에 따른 적절한 시공단가 책정이 어려우며, 성공적 노출 콘크리트 시공을 위한 국내 연구성과, 시방서 및 지침서 등이 없고, 시공 경험이 풍부한 시공기술자가 부족한 점 등의 한계를 나타내고 있다.

본 연구에서는 노출콘크리트로 설계되어 있는 "조선일보 부평사옥 현장"에 적용하기 위한 무다짐 콘크리트의 최적배합도출을 목적으로 하고 있다. 당 현장은 건물 내·외벽이 노출 콘크리트로 설계되었으며, 특히 내·외부 벽의 두께는 90% 이상이 20cm 정도로 그 두께가 매우 얇은 벽으로 되어 있어서 피복 및 철근의 두께를 고려하면 실제 유효 폭은 10cm 미만으로서 콘크리트 타설 후의 다짐이 거의 불가능하게 된다. 따라서, 당 현장의 경우 노출 콘크리트의 적용과 더불어 다짐을 하지 않고서도 타설이 가능한 무다짐 콘크리트의 적용이 필수적이라 할 수 있다.

일본의 경우 이러한 무다짐(고유동) 콘크리트를 노출 구조물에 다수 적용하였지만, 국내에서는 당사가 시공한 "속초 관광박람회 주체관"에 불과하며, 배근이 밀실한 장소나 복잡한 형상의 부위 등 콘크리트 충전이 어려운 구석구석까지 확실히 채워줄 수 있는 장점이 있어 노출 콘크리트 공법에는 매우 유효할 것

* 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 주임연구원
** 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 선임연구원
*** 삼성물산(주)건설부문 기술연구소 전임연구원

으로 판단되었다. 또한 대상 구조물은 신문사의 운전기 시설로 인해 1층 층고가 6.0m 이고, 2.3층은 5.3m 로서 일반 구조물에 비해 상당히 높은 층고의 건물이므로, 낙하높이에 의한 콘크리트 타설시의 재료분리에 대한 저항성을 높이기 위해서는 고유동 즉 무다짐 콘크리트의 적용이 필수적이라 할 것이다.

무다짐 콘크리트를 노출 구조물에 적용하기 위해서는 시험배합과 현장 Mock-Up Test 등을 통한 성능 평가가 이뤄져야 하고, 현장에서의 콘크리트 타설, 다짐 및 양생 등의 시공성을 모두 고려한 최적배합의 도출이 필요할 것으로 판단되며, 아울러 본 연구결과를 통해 향후 무다짐 콘크리트를 노출 구조물에 적용할 경우의 재료·시공적 기술에 대한 그 기초자료를 제공하고자 한다.

2. 최적배합 도출을 위한 실내실험

2.1 실험계획 및 배합설계 흐름

노출콘크리트에 적용할 무다짐(고유동) 콘크리트의 최적배합을 결정하기 위한 실험변수로서 크게 분체계 고유동 콘크리트와 증점계 고유동 콘크리트의 2가지로 구분하여 실험을 계획하였으며, 분체계(결합재형)배합과 증점계(증점제형)배합에 적용할 혼화제(고성능 감수제)를 선정하여 그 사용량을 결정하고, 각 배합별 결합재의 양(B), 굵은골재 절대용적비(Gv), 잔골재율(S/a), 단위수량(W) 및 증점제의 종류와 첨가량 등을 변수로 하여 배합실험을 계획하였으며, 이러한 무다짐 콘크리트의 최적배합도출을 위한 배합설계 흐름을 도식화하여 그림 1에 나타내었다.

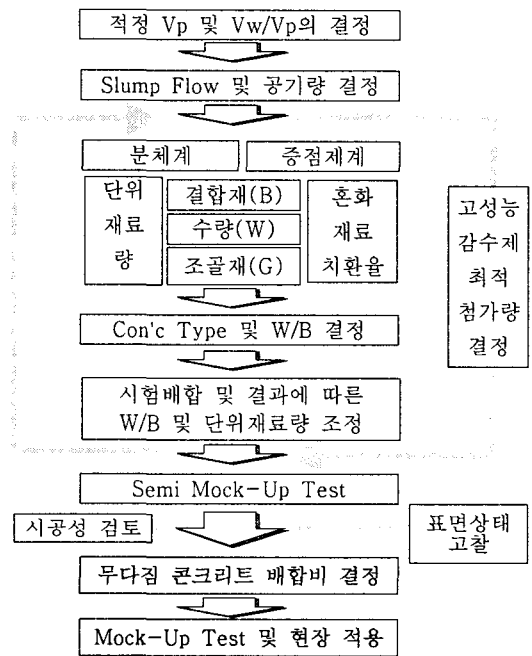


그림 1 무다짐 콘크리트 배합설계 흐름도

2.2 무다짐 콘크리트 품질관리 기준

당 현장에 적용할 무다짐 콘크리트의 최적배합 도출을 위한 품질관리는 표 1과 같이 굳지 않은 상태 및 경화된 상태로 구분하여 관리하며, 특히 얇은 벽체의 시공성 향상을 위해 굳지 않은 상태의 콘크리트 품질관리에 더 중점을 두고 배합을 실시하였다.

표 1 무다짐 콘크리트 품질관리 기준

구분	시험항목	기준값	
경화 콘크리트	압축강도(kgf/cm ²) : 제령 28일기준	240	
굳지 않은 콘크리트 (경시변화 : 60분)	슬럼프 플로우 (cm/cm)	분체계	65±5
		증점계	60±5
	50cm 플로우 도달시간 (sec)	4~10	
	V-lot 유하시간 (sec)	10~20	
	U형 충전높이 (mm)	300 이상	
	공기량 (%)	3.0±1.0	

2.3 사용재료의 검토

고품질의 무다짐 콘크리트의 제조를 위해서는 시멘트, 골재 및 혼화재료에 대한 사전검토를 통해 재료 선정 및 관리에 상당한 주의를 기울여야 하며, 특히 잔골재의 품질변동에 대한 원자재 관리를 철저히 해야만 소요의 유동성 기준을 만족할 수 있을 것으로 판단되었다. 표 2에 사용재료의 특성을 나타내었다.

표 2 사용재료의 특성

구분	종류	비중	분말도(cm/g)	강열감량(%)	SiO ₂ (%)	조립율(%)	흡수율(%)
시멘트	1종보통	3.15	3,267	0.8	20.5	-	-
플라이애쉬	보령산	2.2	3,610	3.2	61.0	-	-
슬래그 미분말	기초소재	2.9	4,340	0.6	-	-	-
세골재	인천세척사	2.59	-	-	-	2.8~2.9	0.9
조골재	쇄석(태산)	2.63	-	-	-	6.5~6.7	1.0

2.4 1차 실내배합

2.4.1 실험계획

1차 실내배합에서는 무다짐 콘크리트의 기존 배합자료와 예비실험을 통해 설정된 결합재량, 단위수량의 적정범위를 기초로 하여 분체체적(Vp)과 물/분체 체적비의 범위를 결정하여 이를 근거로 하여 분체계에 대한 배합을 실시하고, 이와 비교대상으로 증점제계에 대한 실내배합을 실시하였으며, 그 배합표는 표 3과 같다.

표 3 1차 실내배합표

실험구분	W/B(%)	Vp	Vw/Vp	S/a(%)	단위 재료량 (kg/m ³)					비고	
					W	C	F/A(%)	S/G(%)	S.P(%)		
분체계	No.1	34.0	0.176	0.97	49.5	170	375	125(25)	-	N-1.9	F/A치환
	No.2	35.0	0.176	0.99	49.1	175	375	125(25)	-	N-1.8	
	No.3	33.6	0.176	0.95	49.7	168	375	125(25)	-	P-1.5	
	No.4	34.2	0.167	1.07	49.6	178	442	-	78(15)	N-1.9	Slag치환
	No.5	33.3	0.167	1.04	50.0	173	442	-	78(15)	N-1.9	
	No.6	33.6	0.167	1.05	52.2	175	442	-	78(15)	P-1.5	
	No.7	35.3	0.177	1.02	51.9	180	280	77(15)	153(30)	N-1.6	3성분계
	No.8	34.6	0.180	1.00	51.6	180	286	78(15)	156(30)	N-1.7	
증점제계	No.9	40.2	-	-	51.2	173	322	108(25)	-	M-1.8	고점도
	No.10	40.2	-	-	49.6	173	322	108(25)	-	M-1.8	고점도
	No.11	40.2	-	-	49.6	173	322	108(25)	-	M-1.9	저점도

* S.P.제 구분 : N(나프탈렌계), M(멜라민계), P(폴리카르본산계)

2.4.2 실험결과

표 3의 배합에 의한 실험결과를 표 4에 나타내었다. 표 4에 나타난 바와 같이 대부분의 배합이 초기 및 60분 경시변화 후의 유동성 및 충전성 관리기준을 만족하는 양호한 실험결과를 나타내었다.

표 4 물성시험결과 (기준배합)

실험구분	슬럼프플로우 (cm/cm)		50cm플로우 도달시간(sec)		공기량 (%)		V-lot (sec)	U형충전고 (mm)	압축강도 (kgf/cm ²)		
	0분	60분	0분	60분	0분	60분	60분	60분	7일	28일	
분체계	No.1	66/67	66/67	5.3	8.7	5.2	2.8	16.2	352	438	588
	No.2	66/65	64/64	4.5	7.2	4.5	3.2	13.8	350	411	564
	No.3	64/65	66/67	4.4	4.3	3.9	4.0	13.2	345	421	570
	No.4	66/65	66/65	5.2	7.3	4.5	3.5	15.5	350	458	612
	No.5	66/65	66/65	6.1	8.1	4.0	3.2	14.7	352	449	601
	No.6	61/62	67/67	3.0	3.8	5.1	3.8	10.6	345	450	582
	No.7	65/66	66/66	4.5	5.4	6.0	3.5	12.7	357	432	574
	No.8	66/65	67/65	4.8	6.6	6.7	4.0	14.5	357	461	586
증점제계	No.9	62/62	65/65	4.0	4.5	4.6	3.3	8.7	350	289	412
	No.10	63/63	66/64	3.8	5.0	4.0	3.2	10.2	335	318	435
	No.11	65/65	63/62	5.3	6.8	5.5	4.5	12.8	340	307	431

하지만, 증점제계의 경우 분체계에 비해 V_p 의 값이 상대적으로 낮기 때문에 창틀하부나 모서리 부위의 충전성능이 떨어질 것으로 판단되었고, 래미콘의 원활한 현장수급과, 증점제 투여에 따른 번거로움 등을 고려하여 노출용 무다짐 콘크리트에는 다소 부적합한 것으로 사료되었다. 분체계에서는 고유동화에 따른 분체량의 증가에 대해 수화열을 고려하고, 전체적인 노출 콘크리트의 색상과 분체 채적의 증가에 따른 충전성 확보 등을 고려하여 3성분계 배합이 적절한 것으로 판단되었으며, 고성능 감수제는 나프탈렌계 고성능 감수제로 충분히 소요 품질기준을 만족할 것으로 판단되었다.

2.5 2차 실내배합

2.5.1 실험계획

1차 실내배합의 결과를 근거로 하여 단위수량은 170~175kg/m³, 결합재량은 500~540kg/m³의 각 단계별로 혼화재료의 치환율을 변수로 한 3성분계 배합에 대하여 2차 실내배합을 실시하였으며, 소요의 물성을 만족하는 대표적인 배합에 대해, 그 배합표를 표 5에 나타내었다.

표 5 2차 실내배합표

실험구분	W/B(%)	V_p	V_w/V_p	S/a(%)	단위 재료량 (kg/m ³)						비고	
					W	B	C	F/A(%)	S/G(%)	S.P(%)		
3성분계	No.1	33.0	0.184	0.95	50.9	175	530	291	80(15)	159(30)	1.6	
	No.2		0.186	0.94	51.0	175		318	106(20)	106(20)	1.6	
	No.3		0.185	0.95	50.8	175		344	106(20)	80(15)	1.6	
	No.4		0.188	0.93	50.6	175		344	133(25)	53(10)	1.7	
	No.5	33.7	0.178	0.97	51.6	172	510	331	102(20)	77(15)	1.6	
	No.6		0.181	0.96	51.4	172		331	128(25)	51(10)	1.6	
	No.7	33.3	0.178	0.96	51.8	170		331	102(20)	77(15)	1.5	
	No.8		0.181	0.95	51.5	170		331	128(25)	51(10)	1.6	
	No.9	34.0	0.177	0.96	51.0	170	500	325	125(25)	50(10)	1.6	

2.5.2 실험결과

표 5의 배합표에 의한 실험결과를 표 6에 나타내었다. 표 6에서 알 수 있듯이 대부분의 배합이 초기 및 60분 경시변화 후의 유동성 및 충전성 관리기준을 만족하는 양호한 실험결과를 나타내었다. 단, 플라이애쉬 치환율에 따른 공기량 변동폭이 크게 나타났으며, 이는 수급되는 플라이애쉬의 철저한 품질관리와 적절한 AE제의 사용을 통해 안정시킬 수 있을 것으로 판단되었다. 경화 콘크리트의 압축강도는 설계기준강도를 상회하였으며, 이는 설계기준강도를 만족하기 보다는 소요의 유동성을 만족하기 위한 분체계 무다짐 콘크리트의 특성에 의한 것임을 알 수 있다.

표 6 물성시험결과 (2차 실내배합)

실험구분	슬럼프플로우 (cm/cm)		50cm플로우 도달시간(sec)		공기량 (%)		U형충전고 (mm)	압축강도 (kgf/cm ²)		
	0분	60분	0분	60분	0분	60분	60분	7일	28일	
3성분계	No.1	68/68	68/69	2.9	3.5	5.6	3.5	355	435	587
	No.2	67/67	66/67	2.8	3.5	5.1	3.3	355	441	594
	No.3	68/68	68/68	2.9	4.6	6.8	2.4	350	455	581
	No.4	69/70	68/68	2.5	3.6	10.0	4.9	350	438	608
	No.5	70/70	68/68	2.9	4.8	4.9	4.3	350	425	582
	No.6	70/69	70/69	2.5	3.5	6.4	3.0	355	396	572
	No.7	67/67	65/65	2.9	5.0	7.6	2.5	335	419	597
	No.8	68/69	68/68	3.1	4.1	9.2	3.8	340	430	585
	No.9	68/68	67/66	2.9	4.0	7.9	3.3	350	375	559

2.6 실내 최적배합 도출

최적배합도출을 위해 실내배합을 실시하고 그 결과를 근거로 당 현장의 노출 구조물에 적용할 무다짐 콘크리트로써 3성분계 배합을 사용하기로 결정하였으며, 실내 최적배합의 범위를 도출하였다.

실내 최적배합의 범위는 표 7에 나타내었으며, 이 배합범위를 기준으로 하여 레미콘 Pilot Test와 현장 Mock-Up Test를 실시한 후 최종 배합을 결정하고자 하였다.

표 7 실내 최적배합 범위

규격	W/B(%)	Vp	Vw/Vp	S/a(%)	단위 재료량 (kgf/m ³)						비고
					W	B	C (B×%)	F/A (B×%)	S/G (B×%)	S.P (B×%)	
19-240-65(SF)	33.0 ~34.0	0.175 이상	0.95 이상	51.0 ~52.0	170 ~175	500 ~540	60 ~75	15 ~25	10 ~30	1.5 ~1.7	

3. Semi Mock-Up Test

3.1 Semi mock-up test 실험계획

실내축소모형실험(Semi mock-up test)은 노출용 무다짐콘크리트의 현장 적용에 앞서 실내에서 축소 모형부재를 제작하고 이에 사전 적용해 봄으로써 거푸집 제거 후의 콘크리트 표면상태, 기포발생정도 및 색상 등을 사전 검토하기 위한 실험을 의미한다. Semi mock-up test는 실내배합과 동시에 진행되었으며, 실험변수는 콘크리트의 type, 거푸집 종류, 외부진동 다짐의 방법 및 시간과 혼화재료의 종류 등으로 설정하였다. 그림 2에는 실험체 형상 및 치수를, 표 8에는 실험변수를 나타내었다.

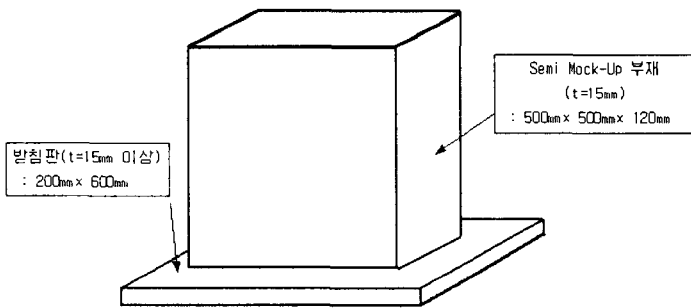


그림 2. Semi Mock-Up Test 실험체 형상 및 치수

표 8. Semi Mock-Up Test 실험변수

실험변수	실험내용
콘크리트 종류	- 중점제계 - 분체계
거푸집 종류	- 코팅 거푸집 - PP 거푸집 등
다짐위치 (거푸집진동기)	- 중앙부 - 4면 모서리
다짐시간	- 10 ~ 30 초
기타	- F/A (%) - Slag (%) - 3성분계 (%)

3.2 Semi mock-up test 결과

각각의 실험변수별로 시험부재에 콘크리트를 타설하고, 내부 무다짐이므로 외부에서 거푸집진동기(Form Vibrator)를 사용하여 표면의 공기포를 제거하고자 하였으며, 3일간 양생을 실시하고, 거푸집을 해체한 후 그 때의 표면 경화율, 공기포 발생정도 및 색상 등을 평가하였으며, 그 대표적인 표면상태를 사진 1에 나타내었다.

(1) 콘크리트 종류에 따른 표면상태 비교

분체계 배합이 중점제계 배합에 비해 표면기포 발생정도 측면에서 보다 양호한 표면상태를 나타내었으며, 중점제계은 다짐시간을 60초 정도로 하여도 공기포가 완전히 제거되지 않았다.

(2) 결합재의 종류에 따른 표면상태 비교

슬래그미분말을 사용한 경우의 부재표면이 플라이애쉬를 사용한 경우보다 표면기포 발생정도나 색상

분체계(F/A)	분체계(S/G)	분체계(PP 거푸집)	분체계(4모서리 다짐)
증점제계(F/A)	분체계(3성분계)	분체계(코팅 거푸집)	분체계(양면중앙부 다짐)

사진 1 Semi mock-up test 거푸집 해체후 표면고찰

면에서 다소 양호하였으며, 3성분계 배합을 사용한 부재 표면도 양호한 것으로 나타났다.

(3) 거푸집의 종류 및 다짐방법에 따른 표면상태 비교

코팅 거푸집과 PP 거푸집이 양호한 표면상태를 나타내었으며, 거푸집의 전용을 고려한다면 PP 거푸집과 유사한 종류를 선택하는 것이 유리할 것이라 판단되었고, 현장의 시공여건 등을 고려할 때 외부 거푸집 진동기로 다짐간격을 40~50cm하고 다짐시간을 30초이상으로 한다면 양호한 표면상태를 나타낼 수 있을 것이라 판단되었다.

4. 결론

조선일보 부평사옥의 노출 구조물 외부 벽체에 적용할 무다짐(고유동)콘크리트의 최적배합설계를 위한 실내배합 및 semi mock-up test의 일련의 과정을 수행하였으며, 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 증점제계는 분체계에 비해 노출용 무다짐 콘크리트로는 다소 부적합한 것으로 나타났으며, 분체계에 서는 수화열 문제, 색상 및 분체 체적 등을 고려하여 3성분계 배합이 적절한 것으로 판단되었다.
- (2) 실내배합 결과를 근거로 결정된 실내 최적배합은 3성분계 배합으로서, V_p 가 0.175이상, V_w/V_p 가 0.95이상 이며, 단위수량이 170~175kg/m³, 결합재량이 500~540kg/m³의 범위가 적절한 것으로 나타났다.
- (3) 실내축소모형실험(semi mock-up test)결과, 분체계(Slag, 3성분계)배합으로서, PP 거푸집을 사용하고, 현장 여건상 외부다짐 간격을 40~50cm정도 하여, 30초 이상 다짐할 경우 양호한 품질관리가 가능할 것으로 판단되었다.
- (4) 본 실험결과를 근거로 하여 레미콘 시험생산 및 현장 Mock-Up Test 가 수행되어야만 하며, 이를 통해 현장에 공급될 최종배합을 결정하여, 원활한 현장 품질관리가 가능하도록 해야 할 것으로 사료된다.

참고문헌

1. “超流動콘크리트 研究委員會 報告書(1)(2)”, 日本 콘크리트 工學協會, 1993, 1994.
2. 이한승, 유성현 “노출 콘크리트 배합 설계 및 제조”, 한국콘크리트 학회 학회지, 제13권 4호, 2001. 7.
3. 신성우, 안종문 “노출 콘크리트 실험 및 현장 적용”, 한국콘크리트 학회 학회지, 제13권 4호, 2001. 7.