

초고강도 콘크리트(130MPa)에 대한 실험적 연구

조춘환^{1,*} · 양동일²

¹경기대학교 & 한국환경산업기술원
²유탑엔지니어링 & 한국건설안전학회

Experimental study on ultra-high strength concrete(130 MPa)

Cho Choonhwan^{1,*}, Yang Dong-il²

¹Kyonggi University, KEITI
²UTOP engineering

Abstract : High-rise, large-scale, and diversification of buildings are possible, and the reduction of concrete cross-sections reduces the weight of the structure, thereby increasing or decreasing the height of the floor, securing a large number of floors at the same height, securing a large effective space, and reducing the amount of materials, rebar, and concrete used for designating the foundation floor. In terms of site construction and quality, a low water binder ratio can reduce the occurrence of dry shrinkage and minimize bleeding on the concrete surface. It has the advantage of securing self-fulfilling properties by improving fluidity by using high-performance sensitizers, making it easier to construct the site, and shortening the mold removal period by expressing early strength of concrete. In particular, with the rapid development of concrete-related construction technology in recent years, the application of ultra-high-strength concrete with a design standard strength of 100 MPa or higher is expanding in high-rise buildings. However, although high-rise buildings with more than 120 stories have recently been ordered or scheduled in Korea, the research results of developing ultra-high-strength concrete with more than 130 MPa class considering field applicability and testing and evaluating the actual applicability in the field are insufficient. In this study, in order to confirm the applicability of ultra-high-strength concrete in the field, a preliminary experiment for the member of a reduced simulation was conducted to find the optimal mixing ratio studied through various indoor basic experiments. After that, 130 MPa-class ultra-high-strength concrete was produced in a ready-mixed concrete factory in a mock member similar to the life size, and the flow characteristics, strength characteristics, and hydration heat of concrete were experimentally studied through on-site pump pressing.

Keywords : Ultra-high strength Concrete, Optimal mixing ratio, Change over time, Heat of hydration, Compressive strength, 130MPa, Quality safety, Ultra-high-rise

1. 서론

1.1 연구 목적 및 배경

건설기술의 발전에 따라 더 크고 높은 건축물을 건설하고

자 하는 인류의 욕망은 더욱 커지고, 이를 실현하기 위한 건축 재료 중의 하나인 콘크리트 강도 증진에 대한 연구가 지속적으로 진행되어 왔으며, 많은 발전을 거듭하고 품질과 기술력의 향상으로 초고층 구조물과 대형화가 가능해졌다. 그러나 이러한 노력에도 최근 인천 검단아파트 구조물 붕괴 사고와 일산아파트 지하주차장 기둥 부설시공에 대한 안타까운 소식은 국민의 실망과 우려를 자아내고 있다.

이에 본 연구에서는 구조물의 안전성을 높이기 위한 초고강도 콘크리트의 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 여러

* Corresponding author: Cho Choonhwan, Department of Construction Safety, Kyonggi University, KEITI, Seoul Korea
E-mail: cho387@naver.com
Received December 13, 2023
Revised December 27, 2023
Accepted December 28, 2023

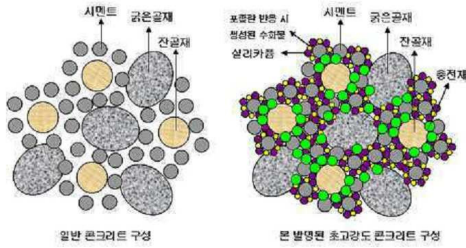


Fig. 1 Composition of binder for ultra-high strength concrete

가지 방법의 실험치로 실험으로 연구되어진 최적의 배합비를 찾아서 축소모의 부재 예비 실험을 실시하였다. 그 후 실물 크기와 유사한 모의부재에 130MPa급 초고강도 콘크리트를 레미콘 공장에서 생산하여 현장 펌프 압송 타설을 통해 콘크리트의 유동특성, 강도특성, 수화열에 관한 <Fig.1>의 표현처럼 고강도 콘크리트를 만들기 위해서 실험을 통해 연구하였다.

2. 이론 및 선행연구 고찰

2.1 초고강도 콘크리트의 역학적 특성

압축강도에 영향을 미치는 재료배합 조건의 사용재료는 시멘트, 골재, 혼화제, 혼화제가 선정되었으며, 본연구는 시멘트의 수화를 충분히 촉진시켜 공극을 감소시키는 것으로 적절한 혼화제의 사용으로 시멘트 입자를 분산시키고 적당한 온도와 환경에서 충분한 양생과 공극을 고강도 충전물, 무기질의 미분말로 메우는 방법에 있어서 고분자계 수지 및 고강도용 혼화재료, 실리카폼, 고로슬래그 미분말, 플라이애시 등의 혼화재료를 혼입하여 공극을 감소시키는 방법으로 진행하였다. 그리고 배합은 물시멘트비, 단위수량, 단위시멘트량, 잔골재율, 공기량을 고려하였다.

2.2 압축강도에 영향을 미치는 재령 및 양생조건

고강도 콘크리트에 있어서도 압축강도의 발현은 양생조건의 영향을 받으며 표준 수증양생으로 약 120MPa의 압축강도가 얻어지는 콘크리트지만 기중양생으로는 20%정도, 밀봉 양생으로는 3 ~8%의 강도저하가 나타나고 장기재령이 될수록 양생조건의 영향은 크게 된다. 또한 양생온도가 20°C까지의 범위에는 적산온도와 압축강도와의 사이에는 상관관계가 있음을 확인이 가능하지만 양생온도가 고온이 될수록 동일 적산온도에 있어서 압축강도는 낮게 나타난다. 즉 지속적인 온도 상승 및 온도 급상승 등 초기의 최고온도가 높은 것일수록 장기 강도 증진은 낮아진다.

2.3 압축강도에 영향을 미치는 시험조건

공시체의 치수 및 형상에 따라 오차가 발생할 수 있지만 고강도 콘크리트에 적절한 단면처리 방법으로는 시멘트 페이스트에 맞는 캐핑을 시공하는 경우 평면도가 0.05mm 이내가 되도록 유의할 필요가 있다. 하지만 공시체의 단면 처

리는 연마기로 연마에 의한 방법이 가장 신뢰성이 있다.

2.4 초고강도 콘크리트 국내적용 사례

1995년 서초동오피스(K건설, 55MPa) 지하 23m 깊이 4개 층 기둥 및 코아월에 대하여 대량으로 현장 적용 타설하였으며, 이후 국내 건설사에서 트럼프 월드(D건설, 40MPa), 아크로빌(D산업, 40MPa), I-Park(H건설, 60MPa) 타워팰리스 I, II(S건설, 50MPa), 타워팰리스III(S건설, 80MPa) 등의 초고층 주상복합 건축물에서도 고강도 콘크리트 현장적용이 증가하였다. L건설은 국내 최초 120MPa급을 시험 타설하였다.

3. 기초적 배합실험 및 재료선정

3.1 재료선정 및 배합

배합에 앞서 사용 재료선정에서 시멘트는 비표면적이 3,200 cm²/g인 국내 S사 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 인천산 세척사로 최대크기를 5mm이하로 입도조정하였다. 굵은 골재는 경기도 이천산 쇄석, 강원도 원주산 쇄석, 강원도 원주산 강자갈을 사용하였다. 혼화제는 유동성 확보를 위해 강도에 따라 국내 D사 및 국외 A, B사의 폴리 카본산계 고성능감수제를 사용하였으며, 플라이애시는 당진산으로서 KS L 5405 규정에 적합한 것으로 했으며, 실리카폼은 노르웨이산을 사용하였다. 물은 유해한 기름, 산, 알칼리, 염류 등을 함유하지 않은 상수도 물을 사용하였다.

배합은 높은 강도 발현을 위해서 <Table 1>과 같이 14.3%까지 아주 낮은 물결합재비도 실험에 적용하였다. 현장 시공성을 위한 유동성과 강도확보를 위하여 슬럼프플로우는 65±5cm, 공기량 2% 이하, 관리용 공시체 압축강도 130MPa를 목표로 정하고 5가지 방법으로 실험하였다. 혼합은 미분말인 실리카폼의 원활한 분산을 위하여 보통콘크리트보다 조금 길게 혼합하였다. 배합순서는 시멘트와 혼화제(플라이애시, 실리카폼)를 투입하여 1분간 건비빔한 후, 잔골재를 투입하여 1분간 비빔을 실시하였다. 그리고 물과 고성능감수제를 혼합하여 투입 후 1분간 재믹싱을 실시하였다. 고성능감수제의 혼입 및 반응 상태를 확인하기 위해 1분간 비빔을 정지하였다. 최종적으로 굵은 골재를 투입 후 1분간 비빔으로써 합계 5분간에 걸쳐서 혼합을 완료하였다.

3.2

굳지 않은 콘크리트의 유동특성을 평가하기 위하여 공기량, 슬럼프, 슬럼프플로우에 대한 실험을 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 (굳지 않은 콘크리트의 압력법에 의한 공기 함유량 시험방법)에 의한 방법으로 측정하였다. 슬럼프 시험은 KS F 2402 (포틀랜드시멘트 콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 의하여 실시하였으며, 슬럼프플로우는 슬럼프 시험 후 내려앉아 슬럼프평판에 퍼진 콘크리트의 최대 지름과 직교하는 두 지점의 지름을 측정하여 그 두 값의

평균으로 구하였다. 압축강도는 KS F 2405 (콘크리트의 압축강도 시험방법)의 시험방법에 따라 측정하였다. 압축강도는 콘크리트공시체 연마기를 이용하여 공시체를 연마한 후, 300tf 용량의 U.T.M (만능시험기)을 이용하여 측정하였으며, 3개 공시체의 평균값을 시험결과로 채택하였다. 압축강도 공시체는 Ø10cm×20cm의 원형몰드를 사용하였으며, 시험체의 제작은 KS F 2403(콘크리트의 강도 시험용 공시체 제작방법)에 따른 방법에 의해 각각의 공시체에 채워 넣고 다짐봉을 이용하여 제작하였다. 이들 공시체의 양생은 20±3°C의 수조에서 표준 수중양생 등을 하였으며, 실험항목별 공시체의 제작 수량은 각 배합별 재령 3일, 7일, 28일에 따라 3개씩 시리즈별로 총 246개를 제작하였다.

목표공기량 및 슬럼프플로우를 만족하여 선정된 배합에 대하여 슬럼프플로우, 공기량 등의 경시변화실험을 실시하였다. 레미콘공장에서 생산되어 콘크리트의 운반 및 타설 시까지 충분한 유동성과 재료분리 저항성이 유지되어야 하는데 이를 평가하기 위하여 공기량 및 슬럼프플로우 실험에 대한 경시변화를 120분 동안 30분 간격으로 측정하였다.

3.3

초고강도콘크리트 제조를 위한 기초 실험과 물결합재비 14.3~24% 범위에서의 초고강도 콘크리트 유동특성, 강도특성, 경시변화에 대한 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 동일한 물결합재비인 경우에 단위수량이 감소할수록 콘크리트 압축강도는 미미하게 증가되었고, 단위수량 160~170kg/m³에서 플라이애시 사용량 증감에 따른 28일 강도는 최저74.2~최고82.7MPa로서 강도의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.

(2) 플리카본산계 고성능감수제는 JB사 제품이 높은 슬럼프플로우와 낮은 공기량, 높은 강도를 나타내어 초고강도콘크리트에서는 고성능감수제의 선정이 중요하다는 것을 알 수 있었으며, 특히 시리즈 V에서 BW5-SP2.6과 BW7-SP4.0%의 배합실험 결과 슬럼프플로우 73cm에서 재료분리가 발생하였는데, 이는 분체(시멘트, 실리카폼 등)와 고성능감수제 간의 친화성 부족 현상으로 사료 된다.

(3) 유동특성평가 실험에서 BW5-SP2.2%, BW6-SP3.0%, BW7-SP3.6%의 배합이 목표 공기량을 만족하였으며 120분 경과시점에서 슬럼프플로우를 확인한 결과 BW5-SP2.2%가 가장 양호하게 나타났으며, 경시변화 실험에서는 시간의 경과에 따라 슬럼프플로우 및 공기량은 감소하는 경향을 나타냈다. 압축강도 실험에서는 BW7-SP3.6%의 배합이 재령 28일에 116MPa로 가장 높은 강도 특성을 나타냈다.

4. 최적배합 결정을 위한 실험

4.1

초고강도콘크리트 적정배합을 도출하기 위하여 물결합재

비, 단위수량, 혼화제 치환율 및 고성능감수제의 첨가율에 따른 영향을 평가하고 기초적 물성을 검토함으로써 현장적 용에 가능한 최적의 배합비를 찾기 위한 실험이다. 130MPa급의 초고강도콘크리트 적정 배합을 도출하기 위하여 4가지 방식의 시리즈를 계획하여 공기량, 슬럼프플로우, 압축강도 등의 기초 물성을 측정하고자 하였다. 실험인자로 물결합재비 변화, 단위수량 변화, 실리카폼 치환율, 플라이애시 치환율, 무수석고 치환율에 따른 유동특성 및 강도특성을 검토하고자 하였다. 유동특성 실험에서는 공기량, 슬럼프플로우를 측정하였고, 강도특성 실험에서는 3, 7, 28, 56일

Table 1. Concrete mixing for basic mixing experiments

구분	시리즈	W	C	SF	FA	S	G	SP(%)
W170-FA00		170	567	142	-	741	743	2.3
W170-FA05		170	531	142	35	736	738	2.3
W170-FA10		170	496	142	71	730	733	2.2
W170-FA15		170	460	142	106	725	728	2.1
W165-FA00		165	550	138	-	756	759	2.5
W165-FA05	S1	165	516	138	34	751	754	2.4
W165-FA10		165	481	138	69	746	749	2.4
W165-FA15		165	447	138	103	741	744	2.2
W160-FA00		160	533	133	-	772	775	2.7
W160-FA05		160	500	133	33	767	770	2.6
W160-FA10		160	467	133	67	762	765	2.4
W160-FA15		160	433	133	100	757	760	2.3
Sa40 - SF10		160	600	67	-	625	945	2.5
Sa40 - SF15		160	567	100	-	622	940	2.5
Sa40 - SF20	S2	160	533	133	-	618	934	2.5
Sa45 - SF10		160	600	67	-	704	867	2.5
Sa45 - SF15		160	567	100	-	699	861	2.5
Sa45 - SF20		160	533	133	-	695	856	2.7
G1 (경기 색석)		155	659	116	-	589	891	2.7
G2 (강원 색석)	S3	155	659	116	-	589	891	2.7
G3 (경기 자연석)		155	659	116	-	589	891	2.7
KD (고성능감수제)		155	659	116	-	589	918	2.5
JA (고성능감수제)	S4	155	659	116	-	589	918	3.3
JB (고성능감수제)		155	659	116	-	589	918	2.2
BW 5			155	659	116	-	589	887
BW 6	S5	155	789	139	-	509	834	2.2/2.6/3.0
BW 7		155	921	163	-	389	811	3.2/3.6/4.0

Table 2. Experimental plan and level of optimal combination

No	실험계획 및 수준	측정항목
S 1	물결합재비 (14.3, 16.7, 20%) 단위수량 (150, 155, 160kg/m ³) 실리카폼 치환율 (10, 15%)	공기량, 슬럼프플로우 압축강도
S 2	No1도출 배합의 실리카폼 치환율 (10, 15%)	공기량, 슬럼프플로우 압축강도
S 3	No2도출 배합의 실리카폼 치환율 (10, 15%) 무수석고 치환율 (10, 20%)	공기량, 슬럼프플로우 압축강도
S 4	No3도출 배합의 실리카폼 치환율 (10, 15%) 플라이애시 치환율 (10, 20%)	공기량, 슬럼프플로우 압축강도

동안 표준수중양생한 공시체에 대해 압축강도를 측정하였다. 본 실험의 실험계획 및 수준을 <Table 2>에 표현하였다.

4.2 최적배합

실험계획에 따라 4단계로 진행하였으며 시리즈 I은 단위수량 150, 155, 160kg/m³ 변화와 실리카퓌름 10, 15% 치환, 물결합재비 20, 16.7, 14.3%로 변화를 주어 압축강도와 유동성을 평가하였다. 시리즈 II는 시리즈 I에서 도출한 단위수량 155kg/m³과 물결합재비 16.7%를 조건으로 실리카퓌름 10, 15% 치환에 따른 유동성 및 압축강도의 증진을 비교하였다. 시리즈 III은 3성분계로 시리즈 II의 조건에서 무수석고물 10, 20% 치환하여 압축강도 및 유동성을 평가하였고 시리즈 IV는 3성분계로 시리즈 II의 조건으로 플라이애시를 10, 20% 치환하여 압축강도 및 유동성을 평가하였으며, 콘크리트의 혼합은 KS F 8009에 규정된 강제식 혼합믹서(용량 100 l)를 사용하여 다음과 같이 혼합하였다. 초고강도콘크리트에 대한 혼합은 미분말인 실리카퓌름의 원활한 분산을 위하여 보통콘크리트의 혼합시간보다 조금 길게 혼합하였다. 배합순서는 시멘트와 혼화재료(실리카퓌름, 플라이애시 or 무수석고)를 투입하여 1분간 건비빔한 후, 잔골재를 투입하여 1분간 비빔을 실시하였다.

4.3 최적배합 실험방법

실험은 기초적 배합실험과 동일하게 공기량, 슬럼프플로우 시험기준을 따랐으며, 압축강도는 콘크리트공시체 연마기를 이용하여 공시체를 연마한 후, 300tf 용량의 U.T.M을 이용하여 측정하였으며, 3개 공시체의 평균값을 시험결과로 채택하였다. 압축강도 공시체는 Ø10cm×20cm의 원형물드를 사용하였다. 시험체의 제작은 KS F 2403에 따른 방법에 의해 각각의 공시체에 채워 넣고 다짐봉을 이용한 다짐으로 제작하였다.

공시체의 양생은 20±3°C의 수조에서 표준수중양생을 하였으며, 실험 항목별 공시체의 제작 수량은 기초적 배합실험에서 56일을 추가하여 각 배합별 재령 3, 7, 28, 56일에 따라 3개씩 총 264개를 제작하여 실험하였다.

4.4 최적배합 실험결과

130MPa급 초고강도 콘크리트의 최적배합비를 결정하여 현장적용 가능성을 알아보기 위해 여러 가지 실험방법을 통해 슬럼프플로우, 공기량, 압축강도에 대한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 초고강도콘크리트 제조에 있어서 130MPa에 가장 근접한 혼화재의 치환은 실리카퓌름 15%, 플라이애시 20%가 56일 공시체 압축강도 측정에서 128MPa로 가장 높게 나타났다. 그러나 많은 실리카퓌름 사용에 따른 공사비용을 고려할

때 실리카퓌름10%, 플라이애시 10%가 공사비용 절감 측면에서 가장 적합한 배합이라고 판단하였고 그 뿐만 아니라 실리카퓌름의 치환을 증가에 따른 강도 증진은 조기강도에서만 나타났을 뿐 장기강도에서는 크지 않은 것으로 나타났다.

(2) 실험방식 4가지에서 공기량을 확인한 결과 실험방법 모두 0.6~1.6% 범위였으며, 슬럼프플로우도 65~68cm를 나타내어 관리목표치인 공기량 2% 이하, 슬럼프플로우 65±5cm를 모두 만족하여 콘크리트 현장 타설 시 펌프 압송에는 문제가 없는 것으로 나타났다.

5. 축소모형 부재 실험

5.1 축소모형 부재 제작

축소모의 부재 실험을 위해서 사용재료와 배합은 최적배합 실험과 동일하게 진행하였으며, 단지 실험에 사용한 축소모의 부재 크기의 6면 길이는 동일하게 500×500×500mm 크기이며 거푸집은 12mm 합판을 사용하여 제작하였고, 6면 전체를 발포폴리스티렌 1호(두께 100mm)로 처리하였다. 온도 센서는 축소모의부재 옆면을 굽은 철선을 이용하여 관통시켜서 축소모의 부재 중앙에 견고히 매립하였고, 타설 후 28, 56일 경과 후 코어채취기를 사용하여 수직으로 코어 공시체를 채취하였다. 아래의 <Fig.2>과 같이 채취된 코어 공시체의 압축강도 시험은 Ø10cm×20cm의 크기로 절단하여 공시체를 연마하여, 만능시험기로 압축강도 시험을 측정하였으며, 4개 공시체의 평균값을 시험결과로 채택하였다.

수화열 특성을 검토하기 위하여 축소모의부재 바닥으로부터 250mm높이의 중심부와 가장자리로부터 250mm의 중심부에 온도 센서를 견고히 설치하였고, 수화열 설치위치는 <Fig.3>과 같이 설치하였다.

온도 센서 매설 후 콘크리트를 타설 직후부터 외기온과

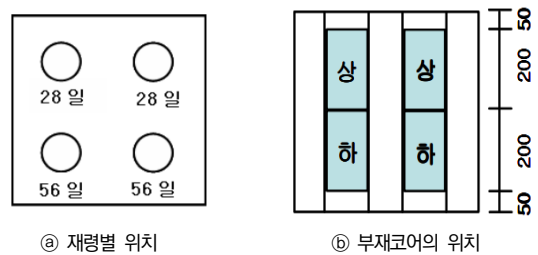


Fig. 2. Absence of scale model

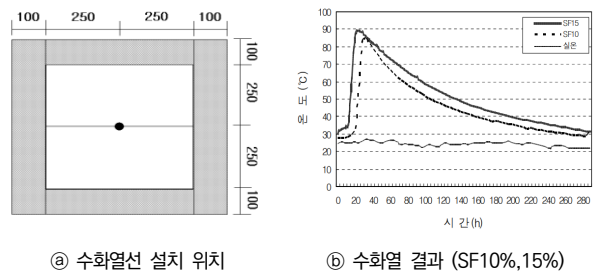


Fig. 3. Heat of hydration test of reduced material

비슷해지는 시간까지 자동온도 기록장치를 축소모의 부재 10개에 설치하여 280시간에 걸쳐서 장기간 부재 내부 온도를 측정하였다.

5.2 축소모형 부재 실험결과

실험결과 130MPa급의 초고강도 콘크리트의 축소모의 부재 실험을 실시하여 재령별 코어의 압축강도와 수화열을 측정된 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 실리카폼 10%와 15%를에 대한 실험결과 코어의 압축강도에서 큰차이가 없었으며, 동일한 배합 비율에서 실리카폼과 무수석고를 치환한 배합보다 실리카폼 과 플라이애시를 치환한 배합이 높은 강도를 나타냈으며 실리카폼 10% , 플라이애시 10% 치환이 재령 56일에서 가장 높은 압축강도 값을 나타내었다. 따라서 초고강도콘크리트 제조에 있어서 실리카폼 5% 차이의 범위, 플라이애시 10% 차이의 범위 에서는 콘크리트 압축강도 증감에 큰 영향을 미치지 못했는데 이는 초고강도콘크리트 에서는 여러 가지 방법의 제조 및 배합에 적용된 사용재료의 품질에 따라서 압축강도가 달라질 수 있기 때문으로 사료 된다.

(2) 초고강도콘크리트의 3성분계 배합을 축소모의부재에 적용시킨 결과 초기강도 증진 효과가 있는 무수석고보다는 장기강도에 유리한 플라이애시를 치환한 것이 높은 강도를 발현하였으며 수화열 저감 효과뿐만 아니라 경제성 측면에서도 유리한 것으로 나타났다.

6. 현장적용을 위한 부재 실험

6.1 실험계획 및 실험방법

레미콘 공장에서 콘크리트를 제조하여 현장에서 펌프압송으로 타설을 실시하였다. 공장과 현장에서 유동특성과 경시변화를 30분 간격으로 120분간 측정하였으며, 타설 후 2주일간 침하량 측정, 수화열 측정, 강도특성으로 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 따른 6가지의 관리용 공시체 압축강도 측정, 재령 7, 28, 56, 91일에 모의 부재 코어의 압축강도 측정, 강도편차측정을 실시하였으며, 기동모의부재(600 × 600 × 2,000mm) 코어 공시체 단면의 위치별 골재분포, 내구성 특성으로는 동결융해 측정을 실시하였다. 그 외 <Table 3>

Table 3. Field application experiment plan and experiment level

압축강도 (MPa)	모의부재 크기(mm)	측정항목
130	600×600×2,000 1,000×1,000×2,000 1,000×1,000×1,000	<ul style="list-style-type: none"> · 공장과 현장의 유동특성 및 경시변화 · 침하량 측정 · 수화온도이력측정 · 양생별 관리용 공시체 압축강도 · 코어 공시체 압축강도 · 강도편차측정 · 코어채취 후 골재분포 · 동결융해측정 · 정탄성계수측정

Table 4. Simulation member production status

종류	부재 크기(mm)	사용 거푸집
기동부재	600 × 600 × 2,000	합판
매스기동부재	1,000 × 1,000 × 2,000	합판
매스부재	1,000 × 1,000 × 1,000	합판 + 단열재

과 같이 모의부재의 압축강도와 측정항목을 정하였다.

모의부재는 기동부재와 매시브한 부재를 기준으로 선정하였다. 기동부재는 일반기동과 기동매스로 크기를 조정하여 제작하였으며 매시브한 부재는 매스크기에 전면 두께 200mm로 단열하여 평가하였다. 거푸집 제작은 합판을 사용하였으며 매스부재의 단열재는 두께 100mm인 발포폴리스티렌(1호) 2매를 사용하였다. 초고강도콘크리트 타설 후 측압에 의한 거푸집의 파손을 막기 위해서 거푸집 주위를 견고히 긴결하여 <Table 4>과 같이 제작하였다.

공장(배치 플랜트)생산 후, 구리 S양회를 출발하여 서울 ○○시 현장까지 약 30분이 소요되어 도착하였고, 도착시간 오전 11시 외기온도 최고 12℃, 최저 6℃, 습도 78% 조건 하에서 레미콘을 펌프압송에 의해 현장타설 되었다. 굳지 않은 콘크리트의 유동특성을 평가하기 위하여 펌프압송으로 타설된 초고강도 콘크리트의 시료를 받아 공기량 및 슬럼프 플로우 측정을 실시하였다. 실제 건축물에 콘크리트 타설 시 필요한 적정시간 확보를 위한 경시변화를 평가하기 위하여 120분 동안 30분 간격으로 측정하였으며, 공장과 현장을 합하여 총 240분 동안 측정하였다.

물결합재비는 16.7%로서 낮기 때문에 콘크리트의 초결 이후 시멘트 수화반응 시 결합재의 체적감소로 자기수축에 의한 침하를 일으키기 쉬우므로 초고강도 콘크리트의 경화 시간에 따른 침하량을 평가하기 위해서 기동 매스부재 (1,000×1,000×2,000mm) 상부면에 이크랄판(150×150×12mm)을 부착하고 마그네틱 베이스를 이용하여 0.001mm의 다이얼게이지를 설치하여 침하량을 측정하였으며, 측정은 14일간 실시하였다.

온도상승 및 부재의 조건에 따른 온도특성을 파악하기 위

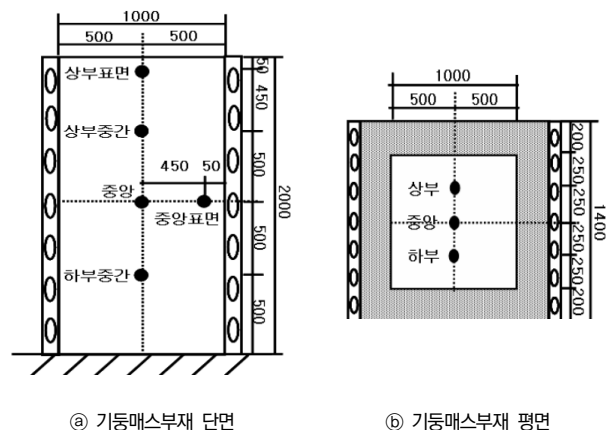


Fig. 4 Temperature sensor installation location

하여 (Fig.4)와 같이 기둥매스, 일반기둥 그리고 단열매스부재의 수화열을 측정하였다. 온도측정은 초고강도콘크리트를 타설 전 모의부재에 온도센서를 설치하고 자동온도 기록장치를 이용하여 수화열을 측정하였다.

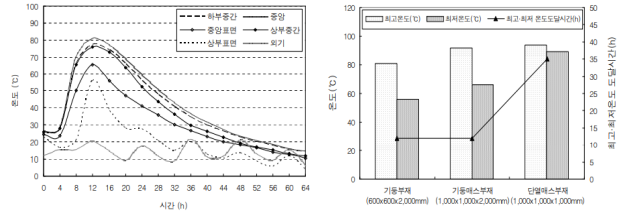
굳은 콘크리트의 양생 조건별 압축강도의 특성을 평가하기 위하여 표준수중양생, 표준밀봉양생, 현장밀봉양생, 현장수중양생, 단열양생, 모래양생 등 총 6가지의 양생 방법으로 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 300tf 용량의 U.T.M (유압식 만능시험기)을 이용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 시험방법에 따라 측정하였으며, 3개 공시체의 평균값을 시험결과로 채택하였다. 공시체 개수는 6가지양생 방법별로 15개씩 총 90개를 현장에 제작하였고, 공시체 연마기를 이용하여 공시체를 연마한 후, 300tf 용량의 U.T.M 를 이용하여 압축강도 시험하였다.

6.2 현장적용 부재 실험결과

굳지 않은 콘크리트의 공기량과 슬럼프플로우를 측정하고 결과 공기량은 목표치인 2%미만을 만족하였으며 슬럼프플로우 결과도 목표치인 65±5cm를 만족하였다. 적용배합인 SF10 FA10%은 콘크리트 믹싱을 통해서도 현장 적용까지 적합한 유동성을 만족하는 것으로 나타났다.

경시변화는 공기량과 슬럼프플로우를 모두 만족하였다. 슬럼프플로우는 시간의 경과에 따라 5cm 감소하는 것으로 나타났다. 공기량은 60분까지 0.1%의 미미한 증가를 보였으며, 90분에서 120분을 경과할 때마다 0.3%씩 증가하는 것으로 나타났으며, 공장(배치플랜트)생산 및 현장 펌프압송의 유동특성 및 경시변화 결과는 <Table 5>에 표현하였다.

기둥모의부재(600×600×2,000mm)는 측정시작 12시간 후에 중앙부에서 최고온도 81℃까지 상승하였고, 상부의 온도는 56℃로 측정되었다. 외기의 평균 온도는 14℃ 정도 이었다. 부재 내부의 온도차는 25℃로 이는 한랭기 타설로 인해 외기에 가장 근접한 상부의 온도가 저하되었기 때문으로 사료된다. 아래의 (Fig.5)와 같이 기둥 매스모의 부재(1,000×1,000×2,000mm)는 측정시작 12시간 후에 중앙부에서 최고온도 92℃까지 상승하였고, 상부의 온도는 66℃로 측정되었다. 외기의 평균 온도는 14℃ 정도 이었다. 부재 내부의 온도차는 26℃로 나타났다. 단열 매스모의 부재(1000×1000×1000)는 측정시작 36시간 후에 중앙부에서



㉑ 기둥매스부재(1,000×1,000×2,000mm) ㉒ 부재별 수화열 변화
Fig. 5 Changes in heat of hydration of field application materials

최고온도 94℃까지 상승하였고, 상부의 온도는 89℃ 이었다. 외기의 평균 온도는 14℃ 정도 이었으며 부재내부의 온도차는 5℃로 나타났다. 전체적으로 중앙부에서 발생한 열과 하부측에서 상부로 올라오는 열이 합하여 가장 높은 수화열을 나타내는 것으로 판단된다.

본 연구는 130MPa급의 초고강도콘크리트를 현장에 적용하기 위해서 기초실험을 통한 최적의 배합비를 결정하고 축소 모의부재실험 이후 초고 증진축물에 실제 적용 될 유사한 모의부재를 현장에 제작하여 레미콘 공장에서 초고강도콘크리트를 생산하고 현장에서 펌프압송 타설하여 모의부재 실험결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 레미콘 공장 출발 전 현장 도착 후 각각 120분간에 걸친 슬럼프플로우 손실, 공기량 증감 상태를 측정하고 결과 목표관리 값에 모두 근접하였으므로 현장 시공 시 문제가 없는 것으로 나타났다.

(2) 목표 압축강도 130MPa은 관리용 공시체의 경우 표준양생 시 91일에 달성하였으며, 표준양생 및 단열양생은 유사하였으며, 모의부재의 코어압축강도 측정 결과 단열매스부재는 28일에, 기둥매스부재는 91일에 만족하는 것으로 나타났다.

(3) 기둥모의부재 (600×600×2000), 기둥매스모의부재 (1000×1000×2000), 단열매스부재(1000×1000×1000) 전체에 대한 재령 28일 평균 압축강도는 128MPa였고, 91일 평균 압축강도는 132MPa로서 91일에 대한 강도 차이는 97%로서 차이가 거의없는 것으로 나타났다. 초고강도콘크리트 강도 평가에서 56일, 91일, 365일 장기 강도까지 많은 증가를 보이고 있는 외국 사례와 큰 차이를 보이고 있는데, 이는 초고강도 콘크리트의 재료선정 및 품질의 정도, 특성, 혼화제 치환 방법, 고성능감수제의 첨가비율 변화에 따라서 28일 강도와 91일 차이가 크게 발생된 것으로 사료된다.

(4) 침하량 측정결과 콘크리트 타설 4일 후 4mm의 침하를 보였으며 총침하량은 4.297mm였다. 이를 통해 초고강도 콘크리트에서의 자기수축에 따른 초기 침하량에 대한 품질관리가 필요한 것으로 판단된다.

(5) 초고강도 콘크리트의 동결융해 측정결과 300사이클 동안에 97%이상을 나타냈으며 동결융해에 대한 영향은 없는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 초고강도화에 따른 강도의 증진이 동결융해에 대한 저항성을 향상시켰기 때문이다.

Table 5. Measurement results of changes over time in the field and field

시간 (분)	Air (%)		Flow (cm)	
	공장	현장	공장	현장
0	0.8	0.9	65 / 65	65 / 66
30	0.9	1.1	64 / 65	64 / 65
60	0.9	1.2	60 / 60	59 / 60
90	1.2	1.3	60 / 60	59 / 60
120	1.5	1.5	60 / 59	59 / 59

7. 결론

초고강도 콘크리트의 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 여러 가지 방법의 실내 기초실험으로 연구되어진 최적의 배합비를 찾아서 축소모의부재 예비실험 후 실물크기와 유사한 모의부재에 130MPa급 초고강도 콘크리트를 레미콘 공장에서 생산하여 현장 펌프압송 타설을 통하여 콘크리트의 유동특성, 강도특성, 수화열에 관한 실험 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

최적배합비 결정은 공사비와 시공성을 고려할 때 실리카 폼 및 플라이애시 각각 10%, 물결합재비 16.7%, 단위수량 155kg/m³, 고성능감수제 2.5% 배합이 최적의 배합으로 나타났다. 특히 본 연구 결과 초고강도 콘크리트 배합시 적용 배합의 미세한 오차에도 압축강도, 유동성 및 콘크리트 품질에 큰 영향을 미치므로 제조 배합에서 현장시공 및 재령에 이르기까지 전 단계에 대한 세심한 주의가 필요하다.

슬럼프플로우 및 공기량에 대한 경시변화 측정은 레미콘 공장과 현장에서 각각 120분 동안 측정하였는데 공장과 현장 모두 슬럼프플로우는 5cm 감소하여 관리목표 65±5cm를 만족하였으며, 공기량은 0.3% 증가하여 적용 목표치 2% 이내로서 모두 목표값을 만족하였다. 따라서 130MPa급 초고강도콘크리트를 레미콘 공장 출발시간을 포함하여 현장타설 종료 시까지 120분 이내에 펌프압송에 의한 현장타설이 가능하다고 판단된다.

수화열 평가에서 초고강도 콘크리트는 신뢰성의 3성분계 배합에서 실리카폼과 플라이애시의 적용이 실리카폼과 무수 석고 치환에 비해 수화열 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 단열양생을 제외하고 모의부재 내부의 수화열 차이가

25℃ 정도 발생됨에 따라서 현장적용 시 적절한 보온대책이 필요성을 실험으로 확인하였다.

연구에서 제시한 최적의 배합으로 균일한 130MPa급 초고강도 콘크리트 생산과 향후 보다 더 높은 초고강도 콘크리트 개발을 위한 참고 자료로 활용해 줄 것을 기대하며, 이번 연구를 통하여 콘크리트를 대량 생산하여 초고층건축물의 품질과 콘크리트 강도 연구에 도움이 되었으면 한다.

References

- Yang Dong-il. "On-site application to 130 MPa ultra-high strength concrete." Domestic doctoral thesis Dankook University, Seoul, 2006
- Kim Ji-man. "Study on the basic properties of ultra-high strength concrete according to types of cement and admixtures." Domestic Master's Thesis, Gyeongguk University, 2008. Gyeonggi-do
- Lee Jong-seok. "Early estimation of ultra-high strength concrete strength using hot water curing." Domestic master's thesis, Dankook University Graduate School, 2011. Gyeonggi-do
- Lee Tae-Gyu. "Correlation between internal water vapor pressure and bursting characteristics of ultra-high strength concrete." Proceedings of the Korea Concrete Society Conference Vol.2011, No.11, pp259-260, 2011
- Youngjun Son. "Experimental study on the basic properties of ultra-high strength concrete with a design standard strength of 100 MPa." Domestic Master's Thesis Dankook University, 2005. Seoul

요약 : 건축물의 초고층화, 대형화, 다양화가 가능하고 콘크리트 단면의 축소로 구조물 자중이 경감되어 보와 슬래브 두께를 얇게 함으로 층고를 증가하거나 같은 높이에서 많은 층수를 축조할 수 있고 넓은 유효공간이 확보되며, 기초 저면 지정에 사용된 자재 및 철근과 콘크리트 양을 절감하는 효과를 기할 수 있다. 현장시공 및 품질측면에서는 낮은 물결합재비 배합으로 건조수축 발생 저감 효과와 콘크리트 표면의 블리딩 최소화 효과를 얻을 수 있으며, 고성능감수제 사용에 의한 유동성 증진으로 자체 충전성이 확보되어 현장시공이 용이해지며, 콘크리트의 조기 강도 발현으로 거푸집 탈형 기간을 단축시킬 수 있는 장점이 있다. 특히 근래에 들어 콘크리트와 관련한 건축기술의 비약적인 발전에 따라 초고층 건축물에서는 설계기준강도 100MPa급 이상의 초고강도콘크리트의 적용이 확대되고 있다. 그러나 최근 국내에서도 120층 이상의 초고층 건축물들이 발주 또는 발주 예정되어 있으나, 현장 적용성이 고려된 130MPa급 이상의 초고강도 콘크리트를 개발하여 현장에서 실제 적용 가능성 여부를 실험, 평가한 연구실적은 미흡하다. 본 연구에서는 초고강도콘크리트의 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 여러 가지 방법의 실내기초 실험으로 연구되어진 최적의 배합비를 찾아서 축소모의부재 예비실험을 실시하였다. 그 후 실물크기와 유사한 모의부재에 130MPa급 초고강도콘크리트를 레미콘 공장에서 생산하여 현장 펌프압송 타설을 통해 콘크리트의 유동특성, 강도특성, 수화열에 관하여 실험 연구하였다.

키워드 : 초고강도 콘크리트, 최적배합비, 경시변화, 수화열, 압축강도, 130MPa, 품질안전, 초고층