

## 초고강도(130MPa) 콘크리트의 현장적용성 평가에 관한 실험

## Field Applicability Evaluation Experiment for Ultra-high Strength (130MPa) Concrete

조춘환\*

Choonhwan Cho\*

PhD, Construction Safety, Kyonggi University, Suwon, Republic of Korea

\*Corresponding author: Choonhwan Cho, cho387@naver.com

## ABSTRACT

**Purpose:** Research and development of high-strength concrete enables high-rise buildings and reduces the self-weight of the structure by reducing the cross-section, thereby reducing the thickness of beams and slabs to build more floors. A large effective space can be secured and the amount of reinforcement and concrete used to designate the base surface can be reduced. **Method:** In terms of field construction and quality, the effect of reducing the occurrence of drying shrinkage can be confirmed by studying the combination of low water bonding ratio and minimizing bleeding on the concrete surface. **Result:** The ease of site construction was confirmed due to the high self-charging property due to the increased fluidity by using high-performance water reducing agents, and the advantage of shortening the time to remove the formwork by expressing the early strength of concrete was confirmed. These experimental results show that the field application of ultra-high-strength concrete with a design standard strength of 100 MPa or higher can be expanded in high-rise buildings. Through this study, we experimented and evaluated whether ultra-high-strength concrete with a strength of 130 MPa or higher, considering the applicability of high-rise buildings with more than 120 floors in Korea, could be applied in the field. **Conclusion:** This study found the optimal mixing ratio studied by various methods of indoor basic experiments to confirm the applicability of ultra-high strength, produced 130MPa ultra-high strength concrete at a ready-mixed concrete factory similar to the real size, and tested the applicability of concrete to the fluidity and strength expression and hydration heat.

**Keywords:** Optimum Mixing Ratio, Change Over Time, Hydration Heat, 130 MPa, High Rise

## 요약

**연구목적:** 고강도 콘크리트 연구개발은 건축물의 고층화를 가능케 하고, 단면 축소로 구조물 자중이 경감되어 보와 슬래브 두께를 얇게 함으로 보다 많은 층수를 축조할 수 있었으며, 넓은 유효공간이 확보되고, 기초 저면 지정에 사용된 자재 및 철근과 콘크리트 양을 절감하는 효과를 가져올 수 있다. **연구방법:** 현장 시공 및 품질측면에서는 낮은 물결합재비 배합을 연구하므로 건조수축 발생 저감 효과를 확인할 수 있고, 콘크리트 표면의 블리딩 최소화 연구를 통하여 그 효과를 검증할 수 있다. **연구결과:** 고성능감수제 사용에 의한 유동성 증진으로 자체 충전성이 높아 현장 시공 용이성을 확인하고, 콘크리트의 조기 강도 발현으로 거푸집 탈형 시간을 단축시킬 수 있는 장점을 확인하였다. 이러한 실험결과 자료는 초고층 건축물에서는 설계기준강도 100MPa급 이상의 초고강도콘크리트의 현장 적용이 확대될 수 있다. 본 연구를 통하여 국내에서도 120층 이상의 초고층 건축물 현장 적용성이 고려된 130MPa급 이상의 초고강도 콘크리트를 현장에서 실제 적용 가능성 여부를 실험, 평가하였다. **결론:** 본 연구에서는 초고강도의 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 여러 가지 방법의 실내 기초 실험으로 연구되어진 최적의 배합비를 찾아서 모의부재 예비 실험 후 실물크기와 유사한 모의부재에 130MPa 초고강도콘크리트를 레미콘 공장에서 생산하여 현장 펌프 압송 타설하고, 콘크리트의 유동성 및 강도 발현과 수화열에 관하여 현장 적용성을 실험한 연구다.

**핵심용어:** 최적배합비, 경시변화, 수화열, 130MPa, 초고층, 초고강도

Received | 27 November, 2023

Revised | 5 February, 2024

Accepted | 14 March, 2024

OPEN ACCESS



This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted noncommercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

© Society of Disaster Information All rights reserved.

## 서론

건설기술의 발전에 따라 더 크고 높은 건축물을 건설하고자 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 붕괴사고와 일산아파트 지하주차장 기둥 부실사공에 대한 안타까운 소식은 국민의 실망과 우려를 자아내고 있다.

이에 본 연구에서는 구조물의 안전성을 높이기 위한 초고강도 콘크리트의 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 여러 가지 방법의 실내 기초 실험으로 연구되어진 최적의 배합비를 찾아서 축소 모의 부재 예비 실험을 실시하였다. 그 후 실물 크기와 유사한 모의부재에 130MPa급 초고강도 콘크리트를 레미콘 공장에서 생산하여 현장 펌프 압송 타설을 통해 콘크리트 실험으로 유동특성, 강도특성, 수화열에 관하여 <Fig. 1>에 표현된 것처럼 고강도 콘크리트를 만들기 위해서 실내실험과 현장 실험을 통하여 그 작용성을 연구하였다.

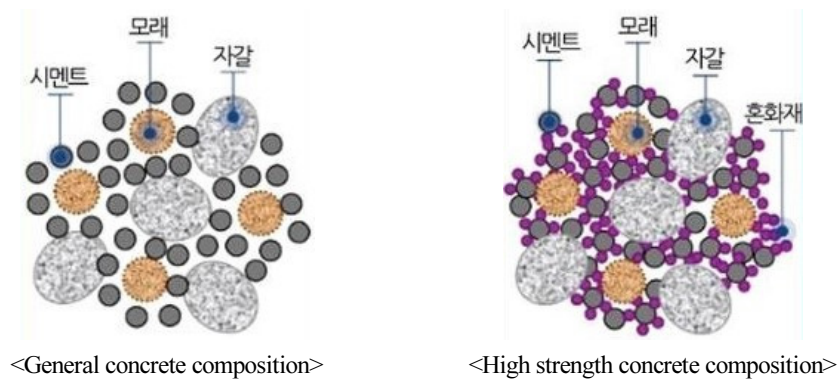


Fig. 1. Composition of general concrete and high strength concrete

## 이론적 배경

### 초고강도 콘크리트의 역학적 특성

압축강도에 영향을 미치는 재료배합 조건의 사용재료는 시멘트, 골재, 혼화제, 혼화제가 선정되었으며, 본연구에서는 시멘트의 수화를 충분히 촉진 시키면서 공극이 감소되는 것을 확인하기 위해서 적절한 혼화제의 사용으로 시멘트 입자를 분산될 수 있도록 고려하였고, 적당한 온도와 작업환경에서 충분한 양생과 공극이 고강도 충전물과 무기질의 미분말로 메워지는 방법에 있어서 고분자계 수지 및 고강도용 혼화재료, 실리카폼, 고로슬래그 미분말, fly ash 등의 혼화재료를 혼입하여 공극을 감소시키는 방법으로 진행하였다. 그리고 배합 조건은 물시멘트비, 단위수량, 단위시멘트량, 잔골재율, 공기량 등을 고려하였다.

### 압축강도에 영향을 미치는 재령 및 양생조건

고강도 콘크리트에 있어서도 압축강도의 발현은 양생 조건의 영향을 받으며 표준 수중양생으로 약 120MPa의 압축강도

가 얻어지는 콘크리트지만 수중양생으로는 20%정도, 밀봉 양생으로는 3~8%의 강도 저하가 나타나고 장기 재령이 될수록 양생조건의 영향은 크게 된다. 또한 양생온도가 20°C까지의 범위에는 적산온도와 압축강도 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.

### 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 처리는 연마기로 연마에 의한 방법이 가장 신뢰성이 있었다.

### 초고강도 콘크리트 국내적용 사례

90년대 후반부터 적용사례가 증가하였고, 서초동오피스(K건설, 55MPa) 지하 23m 깊이 4개층 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.

## 기초적 배합실험 및 재료선정

### 재료 선정 및 배합

배합에 앞서 사용 재료선정에서 시멘트는 비표면적이 3,200cm<sup>2</sup>/g인 국내 S사 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였으며, 잔골재는 인천산 세척사로 최대크기를 5mm이하로 입도조정 하였다. 굵은 골재는 경기도 이천산 쇄석, 강원도 원주산 쇄석, 강원도 원주산 강자갈을 사용하였다. 혼화제는 유동성 확보를 위해 강도에 따라 국내 D사 및 국외 A, B사의 폴리카본산계 고성능 감수제를 사용하였으며, fly ash는 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 혼화재(fly ash, 실리카폼)를 투입하여 1분간 건비빔한 후, 잔골재를 투입하여 1분간 추가비빔을 실시하였다. 그리고 물과 고성능 감수제를 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.

### 실험방법

굳지 않은 콘크리트의 유동특성을 평가하기 위하여 공기량, 슬럼프, 슬럼프플로우에 대한 실험을 실시하였으며, 공기량 시험은 KS F 2421 (굳지 않은 콘크리트의 시료 채취)에 의한 방법으로 측정하였다. 슬럼프 시험은 KS F 2402 (포틀랜드시멘

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
Sa 40 - SF10		160	600	67	-	625	945	2.5
Sa 40 - SF15		160	567	100	-	622	940	2.5
Sa 40 - SF20	S2	160	533	133	-	618	934	2.5
Sa 45 - SF10		160	600	67	-	704	867	2.5
Sa 45 - SF15		160	567	100	-	699	861	2.5
Sa 45 - SF20		160	533	133	-	695	856	2.7
G1 (경기 쇄석)		155	659	116	-	589	891	2.7
G2 (강원 쇄석)	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	1.8/2.2/2.6
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

※ WB: 물결합재비, Sa: 잔골재율, W: 단위수량, C: 단위시멘트량, SF: 실리카퓌, FA: fly ash, S: 잔골재, G: 굵은골재, SP: 고성능감수제

트 콘크리트의 슬럼프 시험방법)에 의하여 실시하였으며, 슬럼프플로우는 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, 3,000kN 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℃의 수조에서 표준 수중양생 등을 하였으며, 실험 항목별 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 측정하는 기준을 준수하였다.

### 실험결과

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 160~170 kg/m<sup>3</sup>에서 fly ash 사용량 증감에 따른 28일 강도는 최저74.2~최고82.7MPa로서 강도의 변화가 크지 않은 것으로 나타났다.
- (2) 폴리카본산계 고성능감수제는 JB사 제품이 높은 슬럼프플로우와 낮은 공기량, 높은 강도를 나타내어 초고강도콘크리트에서는 고성능감수제의 선정이 중요하다는 것을 알 수 있었으며, 특히 시리즈 S5에서 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) 유동특성 평가 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 특성이 나타났고, 이를 통해 초고층 콘크리트 실험 경험치를 얻을 수 있었다.

## 최적배합 결정을 위한 실험

### 최적배합 실험계획

초고강도콘크리트 적정배합을 도출하기 위하여 물결합재비, 단위수량, 혼화재 치환율 및 고성능감수제의 첨가율에 따른 영향을 평가하고 기초적 물성을 검토함으로써 현장적용에 가능한 최적의 배합비를 찾기 위한 실험이다. 130MPa급의 초고강도콘크리트 적정 배합을 도출하기 위하여 4가지 방식의 시리즈(S1~S4)를 계획하여 공기량, 슬럼프플로우, 압축강도 등의 기초 물성을 측정하고자 하였다. 실험인자로 물결합재비 변화, 단위수량 변화, 실리카폼 치환율, fly ash 치환율, 무수석고 치환율에 따른 유동특성 및 강도특성을 검토하고자 하였다. 유동특성 실험에서는 공기량, 슬럼프플로우를 측정하였고, 강도특성 실험에서는 콘크리트 재령 3, 7, 28, 56일 동안 표준수중양생한 공시체에 대해 압축강도를 측정하였다. 본 실험의 실험계획 및 수준을 <Table 2>에 표현하였다.

### 최적배합

실험계획에 따라 4단계로 진행하였으며 시리즈(S1)은 단위수량 150, 155, 160kg/m<sup>3</sup> 변화와 실리카폼 10, 15% 치환, 물결합재비 20, 16.7, 14.3%로 변화를 주어 압축강도와 유동성을 평가하였다. 시리즈(S2)는 시리즈(S1)에서 도출한 단위수량 155kg/m<sup>3</sup>과 물결합재비 16.7%를 조건으로 실리카폼 10, 15% 치환에 따른 유동성 및 압축강도의 증진을 비교하였다. 시리즈

**Table 2.** Experimental plan and level of optimal combination

No	실험계획 및 수준	측정항목
S 1	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 물결합재비 ( 14.3, 16.7, 20% )</li> <li>• 단위수량 ( 150, 155, 160kg/m<sup>3</sup> )</li> <li>• 실리카폼 치환율 ( 10, 15% )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공기량, 슬럼프플로우</li> <li>• 압축강도</li> </ul>
S 2	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No1도출 배합의</li> <li>• 실리카폼 치환율 ( 10, 15% )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공기량, 슬럼프플로우</li> <li>• 압축강도</li> </ul>
S 3	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No2도출 배합의</li> <li>• 실리카폼 치환율 ( 10, 15% )</li> <li>• 무수석고 치환율 ( 10, 20% )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공기량, 슬럼프플로우</li> <li>• 압축강도</li> </ul>
S 4	<ul style="list-style-type: none"> <li>• No3도출 배합의</li> <li>• 실리카폼 치환율 ( 10, 15% )</li> <li>• fly ash 치환율 ( 10, 20% )</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 공기량, 슬럼프플로우</li> <li>• 압축강도</li> </ul>

(S3)은 3성분계로 시리즈(S2)의 조건에서 무수석고를 10, 20% 치환하여 압축강도 및 유동성을 평가하였고 시리즈(S4)는 3성분계로 시리즈(S2)의 조건으로 fly ash를 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 실리카폼의 원활한 분산을 위하여 보통콘크리트의 혼합시간보다 2배 정도 길게 혼합하였다. 배합순서는 시멘트와 혼화재료(실리카폼, fly ash, 무수석고)를 투입하여 1분간 건비빔한 후, 잔골재를 투입하여 1분간 추가비빔을 실시하였다.

### 최적배합 실험방법

실험은 기초적 배합실험과 동일하게 공기량, 슬럼프플로우 시험기준을 따랐으며, 압축강도는 콘크리트공시체 연마기를 이용하여 공시체 표면을 연마한 후, 3,000kN 용량의 U.T.M을 이용하여 측정하였으며, 3개 공시체의 평균값을 시험결과로 채택하였다. 압축강도 공시체는 Ø10cm×20cm의 원형몰드를 사용하였다. 시험체의 제작은 KS F 2403에 따른 방법에 의해 각각의 공시체에 채워 넣고 다짐봉을 이용한 다짐으로 실험용 공시체를 제작하였다.

공시체의 양생은 20±3℃의 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.

### 실험결과

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

- (1) 초고강도콘크리트 제조에 있어서 130MPa에 가장 근접한 혼화재의 치환은 실리카폼 15%, fly ash 20%가 56일 공시체 압축강도 측정에서 128MPa로 가장 높게 나타났다. 그러나 다량의 실리카폼 사용에 따른 공사비 상승을 고려하면 적정량 실리카폼 10%, fly ash 10%가 공사비용 절감 측면에서 가장 적합한 배합이라고 판단하였고 그 뿐만 아니라 실리카폼의 치환율 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 나타

내어 관리목표치인 공기량 2% 이하, 슬럼프플로우 65±5cm를 모두 만족하였고, 콘크리트 현장 타설 시 펌프 압송에는 문제가 없는 것으로 분석되었다.

### 축소모형 부재 실험

#### 축소모형 부재 제작

축소모의 부재 실험을 위해서 사용재료와 배합은 최적배합 실험과 동일하게 진행하였으며, 실험에 사용한 축소모의 부재 크기의 6면 길이는 동일한 500×500×500mm 크기이며 거푸집은 12mm 합판을 사용하여 제작하였고, 6면 전체를 발포폴리스티렌 1호(두께 100mm)로 처리하였다. 온도 센서는 축소 모의부재 옆면을 굽은 철선을 이용하여 관통시켜서 흔들리지 않도록 축소 모의 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 채택하는 방안을 설정하였다.

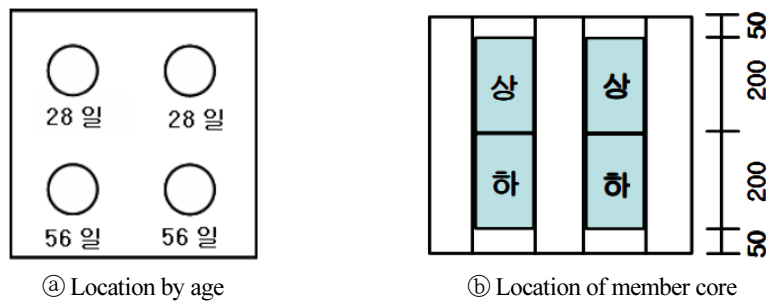


Fig. 2. Absence of scale model

수화열 특성을 검토하기 위하여 센스를 축소 모의부재의 바닥으로부터 250mm높이의 중심부와 가장자리로부터 250mm의 중심부에 온도 센서를 흔들리지 않도록 견고히 설치하였고, 수화열 측정 센서의 설치 위치는 <Fig. 3>과 같다.

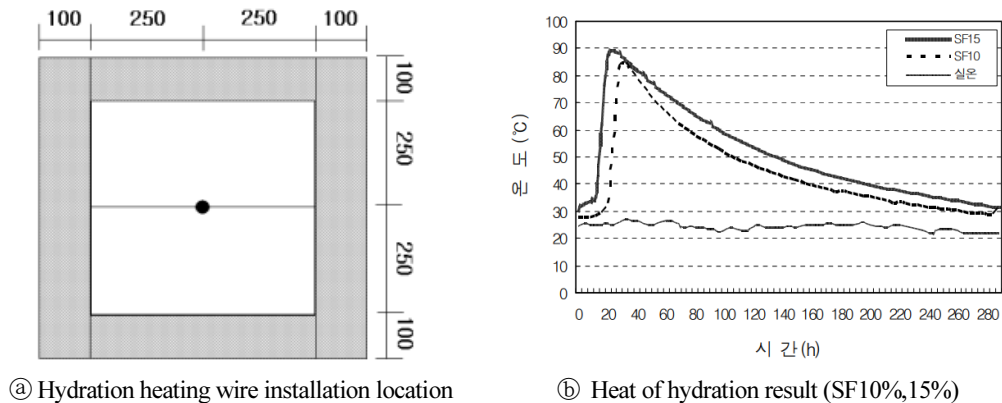


Fig. 3. Heat of hydration test of reduced material

온도 센서는 콘크리트를 타설 직후부터 외부 기온과 비슷해지는 시간까지 자동온도 기록장치를 축소 모의 부재에 총 10개를 설치하여 280시간에 걸쳐서 장시간 동안 부재 내부 온도를 측정하였다.

### 축소모형 부재 실험결과

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

- (1) 실리카폼 10%와 15%에 대한 실험 결과 코어의 압축강도에서 큰 차이가 없었으며, 동일한 배합 비율에서 실리카폼과 무수석고를 치환한 배합보다 실리카폼과 fly ash를 치환한 배합이 높은 강도를 나타냈으며, 특히 실리카폼 10% ,fly ash 10% 치환이 재령 56일에서 가장 높은 압축강도 값을 나타내었다.  
따라서 초고강도콘크리트 제조에 있어서 실리카폼 5% 차이의 범위, fly ash 10% 차이의 범위에서는 콘크리트 압축강도 증감에 큰 영향을 미치지 못했는데 이는 초고강도콘크리트에서는 여러 가지 방법으로 제조 및 배합에 적용된 사용재료의 품질에 따라서 압축강도가 달라질 수 있다는 이유로 판단되었다.
- (2) 초고강도콘크리트의 3성분계 배합을 축소모의부재에 적용시킨 결과 초기강도 증진 효과는 무수석고보다는 장기강도에 유리한 fly ash를 치환한 것이 높은 강도 발현에 유리한 것으로 분석되었으며, 수화열 저감 효과뿐만 아니라 경제성 측면에서도 효율적인 것으로 분석되었다.

## 현장 적용을 위한 부재 실험

### 실험계획 및 실험방법

레미콘 공장에서 콘크리트를 제조하여 현장에서 펌프압송으로 타설을 실시하였다. 공장과 현장에서 유동특성과 경시변화를 최적배합실험 경험치에 따라 30분 간격으로 120분간 측정하였으며, 타설 후 2주일간 침하량 측정, 수화열 측정, 강도특성으로 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 따른 6가지의 관리용 공시체 압축강도를 측정하였고, 재령 7, 28, 56, 91일에 모의 부재 코어의 압축강도 측정, 강도편차 측정을 실시하였다. 실험은 기둥모의부재(600×600×2,000mm) 코어 공시체 단면의 위치별 골재분포, 내구성 특성으로는 동결융해 측정을 기준에 맞게 실시하였다. 그 외 <Table 3>과 같이 모의부재의 압축강도와 측정

**Table 3.** Field application experiment plan and experiment level

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



항목을 정하였다.

모의부재는 기둥부재와 매시브한 부재를 기준으로 선정하였다. 기둥부재는 일반기둥과 기둥매스로 크기를 조정하여 제작하였으며 매시브한 부재는 매스 크기에 전면 두께 200mm로 단열하여 평가하였다. 거푸집 제작은 일반적인 합판을 사용하였으며 매스부재의 단열을 위한 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.

**Table 4.** Simulation member production status

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

콘크리트는 공장(배치 플랜트)생산 후, 구리 S양회를 출발하여 서울 OO시티 현장까지 약 30분이 소요되어 도착하였고, 도착시간 오전 11시 외기온도 최고 12°C, 최저 6°C, 습도 78% 조건하에서 레미콘을 펌프압송에 의해 현장타설 되었다. 굳지 않은 콘크리트의 유동특성을 평가하기 위하여 펌프압송으로 타설된 초고강도 콘크리트의 시료를 받아 공기량 및 슬럼프플로우 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 경화시간에 따른 침하량을 평가하기 위해서 기둥 매스부재(1,000 × 1,000 × 2,000mm) 상부면에 아크릴판(150×150×12mm)을 부착하고 마그네틱 베이스를 이용하여 0.001mm의 다이얼게이지를 설치하여 침하량을 측정하였으며, 측정은 총 14일간 실시하였다.

온도상승 및 부재의 조건에 따른 온도특성을 파악하기 위하여 <Fig. 4>와 같이 기둥매스, 일반기둥 그리고 단열매스부재의 수화열을 측정하였다. 온도측정은 초고강도콘크리트를 타설 전 모의부재에 온도센서를 설치하고 자동온도 기록장치를 이용하여 수화열 측정을 기록 관리하였다.

굳은 콘크리트의 양생 조건별 압축강도의 특성을 평가하기 위하여 표준수중양생, 표준밀봉양생, 현장밀봉양생, 현장수중양생, 단열양생, 모래양생(일본 사례적용) 등 총 6가지의 양생 방법으로 재령 3, 7, 28, 56, 91일에 3,000kN 용량의 U.T.M(유압식 만능시험기)을 이용하여 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)의 시험방법에 따라 측정하였으며, 실험용 3개 공시체의 평균값을 시험결과로 채택하였다. 공시체 개수는 6가지양생 방법별로 15개씩 총 90개를 현장에 제작하였고, 공시체 연마기를 이용하여 공시체 표면을 연마한 후, 3,000kN 용량의 U.T.M 장비를 이용하여 압축강도 시험하였다.

**현장적용 부재 실험결과**

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

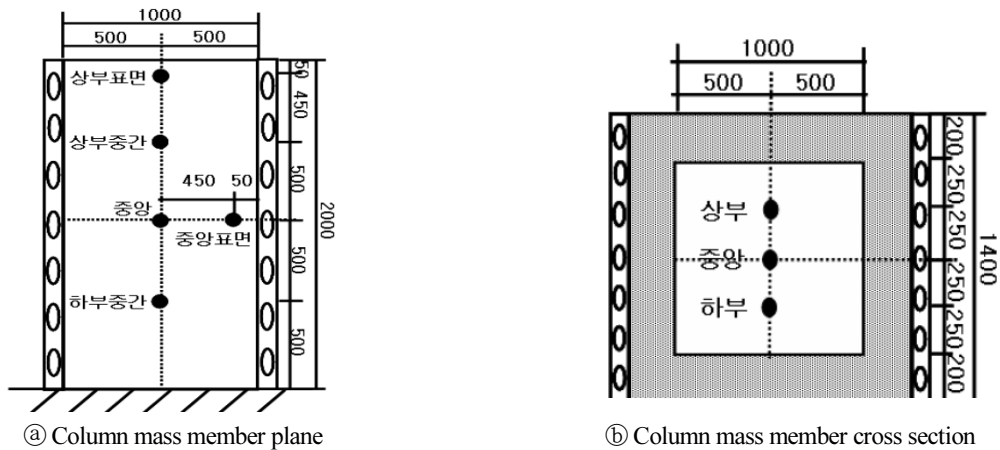


Fig. 4. Temperature sensor installation location

경시변화는 공기량과 슬럼프플로우를 모두 만족하였고, 슬럼프플로우는 시간의 경과에 따라 5cm 감소하는 것으로 나타났으며, 오차범위 내에서 관리되었다. 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.

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

기둥모의부재(600×600×2,000mm)는 측정시작 12시간 후에 중앙부에서 최고온도 81℃까지 상승하였고, 상부의 온도는 56℃로 측정되었다. 그리고 외기의 평균 온도는 14℃ 정도로 유지되었다. 부재 내부의 온도차는 25℃로 이는 한랭기 타설로 인해 외기에 가장 근접한 상부의 온도가 저하되었기 때문으로 사료되었다. 부재별 수화열 변화는 <Fig. 5>와 같이 기둥 매스 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 매스부재(1000×1000×1000)는 측정시작 36시간 후에 중앙부에서 최고온도 94℃까지 상승하였다. 그리고 상부의 온도는 89℃ 였다. 외기의 평균 온도는 14℃ 정도 되었으며, 부재 내부의 온도차는 5℃로 나타났다. 전체적으로 중앙부에서 발생한 열과 하부측에서 상부로 올라오는 열이 합하여 가장 높은 수화열을 나타내는 것으로 분석되었다.

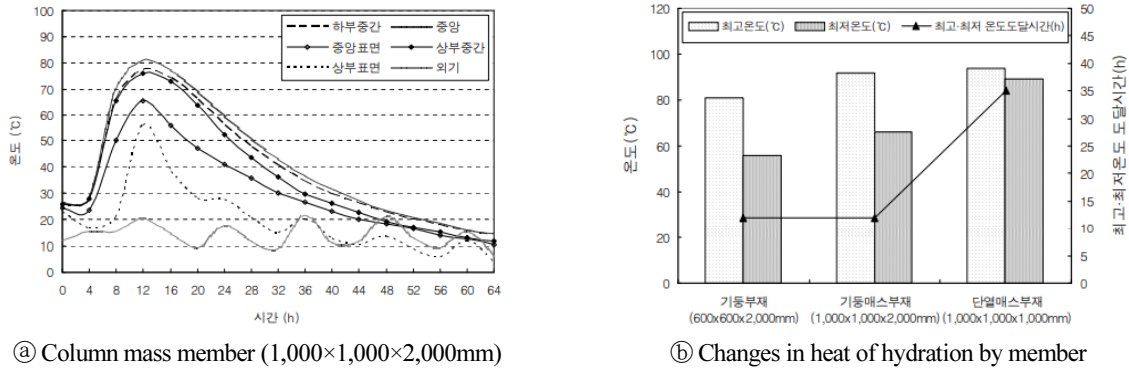


Fig. 5. Changes in heat of hydration of field application materials

연구에서 130MPa급의 초고강도콘크리트를 현장에 적용하기 위해서 기초실험을 통한 최적의 배합비를 결정하고 축소모의부재실험 이후 초고층 건축물에 실제 적용될 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 측정된 결과 목표관리 값에 모두 근접하였으므로 현장 시공에 문제가 없는 것으로 분석되었다.
- (2) 목표 압축강도 130MPa는 실험용 공시체의 경우 표준양생 조건에서 91일이 지난 후에 달성되었으며, 표준양생 및 단열양생의 압축강도는 유사하게 나타났다. 그리고 모의부재의 코어압축강도 측정 결과 단열매스부재는 28일에, 기동매스부재는 91일 지난 후에 목표 압축강도를 만족하는 것으로 확인되었다.
- (3) 기동모의부재 (600×600×2000), 기동매스모의부재(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 있었으며, 이는 외국 사례와 큰 차이가 있는 것으로 분석되었는데, 그 이유는 초고강도콘크리트의 재료선정 및 품질의 정도, 특성, 혼화재 치환 방법, 고성능감수제의 첨가 비율 변화에 따라서 28일 강도와 91일 강도 차이가 발생하는 것이 원인으로 분석된다.
- (4) 침하량 측정결과 콘크리트 타설 4일 후 4mm의 침하를 보였으며, 14일간 총침하량은 4.297mm였다. 이를 통해 초고강도콘크리트에서의 자기수축에 따른 초기 침하량에 대한 품질관리가 필요한 것으로 판단된다.
- (5) 초고강도콘크리트의 동결융해 측정결과 300사이클 동안에 97%이상을 나타냈으며 동결융해에 대한 영향은 없는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 초고강도화에 따른 강도의 증진이 동결융해에 대한 저항성을 향상시켰기 때문으로 분석되었다.

## 결론

초고강도 콘크리트의 현장적용 가능성을 확인하기 위하여 여러 가지 방법의 실내기초 실험으로 연구하였으며, 최적의 배

합비를 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.

- (1) 최적배합비 결정은 공사비와 시공성을 고려할 때 실리카폼 및 fly ash 각각 10%, 물결합재비 16.7%, 단위수량 155kg/m<sup>3</sup>, 고성능감수제 2.5% 배합이 최적의 배합으로 나타났다. 특히 본 연구 결과 초고강도콘크리트 배합 시 적용배합의 미세한 오차에도 압축강도, 유동성 및 콘크리트 품질에 큰 영향을 미치므로 제조 배합에서 현장시공 및 재령에 이르기 까지 전 단계에 대한 세심한 주의가 필요하다는 결과를 얻었다.
- (2) 슬럼프플로우 및 공기량에 대한 경시변화 측정은 레미콘 공장과 현장에서 각각 120분 동안 측정하였는데 공장 및 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 현장 타설 종료 시까지 120분 이내에 펌프압송에 의한 현장타설이 가능한 것으로 판단 되었다.
- (3) 수화열 평가에서 초고강도 콘크리트의 3성분계 배합에서 실리카폼과 fly ash의 적용이 실리카폼과 무수석고 치환에 비해 수화열 저감효과가 있는 것으로 나타났으며, 단열양생을 제외하고 모의부재 내부의 수화열 차이가 25℃ 정도 발생됨에 따라서 현장적용 시 적절한 보온대책의 필요성을 실험으로 확인할 수 있었다.

끝으로 연구에서 제시한 최적의 배합으로 균일한 130MPa급 초고강도 콘크리트 생산이 가능한 것을 실험으로 증명하였고, 이러한 연구 내용이 향후 보다 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

- [1] Cho, C.-H. (2023). "A study on behavior changes in workers who completion of experiential safety education." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 19, No. 1, pp. 161-172.
- [2] Cho, C.-H. (2023). "A study on the necessity of reducing industrial accidents through the introduction of the fair wage system." *Journal of the Society of Disaster Information*, Vol. 19, No. 1, pp. 1-9.
- [3] Kim, J.-m. (2008). Study on the Basic Properties of Ultra-high Strength Concrete according to Types of Cement and Admixtures." Domestic Master's Thesis, Gyeongbuk University.
- [4] Lee, J.-s. (2011). Early Estimation of Ultra-high Strength Concrete Strength Using Hot Water Curing. Domestic Master's Thesis, Dankook University Graduate School.
- [5] Lee, T.-G. (2011). "Correlation between internal water vapor pressure and bursting characteristics of ultra-high strength concrete." *Proceedings of the Korea Concrete Society Conference*, Seoul, Vol. 2011, No. 11, pp. 259-260.
- [6] Son, Y. (2005). 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.
- [7] Yang, D.-i. (2006). On-site Application to 130 MPa Ultra-high Strength Concrete. Domestic Doctoral Thesis, Dankook University.