

1400kg/cm² 초고강도 콘크리트의 배합, 타설 및 수화온도 이력에 관한 연구

Experimental Study on Mixing, Placing and Hydration Temperature of 1400kg/cm² Ultra High-Strength Concrete

윤영수^{*} 장일영^{**} 원종필^{***} 최응규^{****}
Yoon, Young-Soo Jang, Il-Young Won, Jong-Pil Choi, Eung-Kyoo

ABSTRACT

This paper presents the material properties and production of 1400kg/cm² ultra high-strength concrete in consideration of the history of hydration temperature for the practical utilization. A series of laboratory tests were conducted to optimize the mix proportion and then the full-scale mock up tests were performed to investigate the practicability. The thermal sensors were installed prior to concrete casting into the walls and columns, to measure the hydration temperature during the hardening process, which is inevitable to select the most appropriate curing scheme.

1. 서론

1.1 연구배경 및 목적

구조물의 특수화, 대형화 및 복합화 추세에 따라 기존 콘크리트 재료의 단점을 개량한 고강도·고성능 콘크리트의 연구가 한창 진행되고 있으며,⁽¹⁻³⁾ 그에 따른 시공성 문제와 타설후 내부수화온도의 문제점 등이 대두되고 있다. 구조체 콘크리트의 수화열은 시멘트량, 물-시멘트비, 부재의 크기, 주변온도, 환경 등에 의해서 영향을 받고, 타설당시의 콘크리트의 온도와 외기온도 등에 의해서 콘크리트의 강도에 영향을 미치는 것으로 알려져 있다.⁽⁴⁻⁷⁾

1)*정회원, 고려대학교 토목환경공학과 조교수

2)**정회원, 금오공과대학교 토목공학과 조교수

3)***정회원, 건국대학교 농공학과 조교수

4)****정회원, 삼성물산(주) 종합기술연구소 수석연구원

본 연구의 목적은 실험실에서 도출된 최적배합비로 현장실물 모형실험을 통해 1,400kg/cm²의 초고강도 콘크리트를 현장 배치플랜트(B/P)에서 생산 및 타설함으로써 현장적용을 위한 실용적인 콘크리트를 생산할 수 있도록 하며, 초고강도 콘크리트로 타설된 기둥과 고강도의 보 접합부의 내민길이를 확보하고 이로 인한 시공성 문제를 검토하며, 또한 타설후 구조체 콘크리트에서 높은 수화열에 의한 내부온도 이력에 대해 분석해보고자 한다.

2. 실험

2.1 최적 배합비

최적 배합비 설계에서는 작업성과 경제성을 동시에 만족하는 강도발현에 주안점을 두어,⁽⁸⁻⁹⁾삼성물산(주) 건설부문의 중앙시험실에서 수행한 27가지 경우에 대한 실내배합을 통해 도출해 낸 최적배합비를 기준으로 사용하였다. 그 배합의 내용과 강도발현 결과는 표 1과 같다.

표 1 최적배합비 및 압축강도

W/B (%)	S/A (%)	F/A (%)	S/F (%)	Water (kg)	Cement (kg)	F/A (kg)	S/F (kg)	C.Agg (kg)	F.Agg (kg)	AD (%)	압축강도(kg/cm ²)			
											3일	7일	28일	56일
18	35	0	25	140	583	0	194	997	518	5.4	768	918	1208	1362

전체 바인더량 중에 S/F 치환율은 25%로서 이는 단위시멘트량을 줄임으로써 경화 초기의 급격한 수화반응으로 인한 부재온도의 급격한 상승·하락을 방지하여 온도균열을 억제하기 위한 목적이다. 또한 조골재와 시멘트 페이스트의 접합면이 넓을수록 강도발현에 유리하므로 강자갈보다는 각이진 쇄석 골재를 사용하기로 하였으며, 그 중에서도 쇄석골재의 품질관리 사항에서는 편석에 의한 강도저하를 방지하기 위해 편석율의 관리가 용이한 아스팔트용 쇄석골재를 사용하였다.

실제 배합설계시에는 국내에서 일반적으로 생산되는 골재의 편석율인 15~20%를 10% 이내로 줄여서 사용하였다. 특히 세골재의 경우는 초고강도 콘크리트의 배합 자체의 W/C가 20% 이하인 점을 감안하여 작업성을 유지하기위해 조립율을 3.0정도로 유지하였다.

2.2 실험부재제작

실험부재의 제작은 벽체·기둥부재와 보·기둥부재 2개로 구분하여 제작하였으며, 벽체부분과 기둥부분은 전체를 1,400kg/cm² 강도로 타설하도록 계획되었으며, 보는 내민길이 확보를 위한 부분을 제외하고는 500kg/cm² 강도의 콘크리트를 타설하도록 계획하였고, 실물모형부재의 형태는 기존 현장의 실제 단면의 크기와 배근량을 선정하였다. 이에 관련된 실험의 인자들은 표 2과 표 3에 나타난 바와 같다.

2개의 부재 모두 현장실물모형 부재의 코아강도를 측정하기위한 무근부위와 배근 작업이 되어 있는 상태에서 콘크리트의 충전성 및 현장시공성을 확인하기 위한 배근부위로 구성하였다. 다음의 그림 1과 그림 2는 부재의 형상과 치수를 나타낸 것이다.

수화온도 측정을 위해 벽체·기둥 연결부재에는 센서를 매입하였는데, Wall의 경우 두께는 400mm로 제작되었으며 센서의 위치는 2개의 센서를 1쌍으로하여 1m 높이에서 기둥접합부를 기준으로하여 5cm, 50cm, 150cm위치에 설치하여 총 3쌍을 매입하였고, 측정은 타설이후 50시간 동안 실시하였다. Column의 경우는 단면은 1,000mm²이고, 높이는 2,000mm으로 제작되었으며 센서는 기둥의 중심부인 1m 높이에서 기둥의 평면을 기준으로 중심부와 양단부 5cm 지점에 1개씩을 설치하여 3개를 설치하였고, 같은 형태로 중심부에서 750mm떨어진 기둥 상하부위에 설치하여 총 9개의 센서를 설치하였다. 측정은 타설이후 144시간동안 실시하였다.

센서의 매입 위치를 부재의 중심부위와 같은 선상의 표면부위로 선정 한 이유는 부재내부의 적극적인 수화열 억제대책의 결과를 확인하기 위해서이다. 모형부재 제작에 사용된 초고강도 콘크리트는 초기 재료균열을 제어하기 위해 배합자체에서 실리카흄을 사용하였고, 그 비율은 시멘트와 실리카흄의 중량비로 3:1이다. 즉, 이러한 실리카흄 치환의 목적은 초기에 시멘트의 급속한 수화반응으로 인한 과도한 온도상승과 급격한 온도하강으로 인한 부재내부의 온도응력에 의해 발생하는 재료균열을 억제하면서, 동시에 지속적인 수화반응을 유지하여 소기의 강도를 발현시키기 위해서이다.⁽¹⁰⁻¹¹⁾

표 2 실험인자

실험인자	종류		
	1	2	3
설계기준강도(kg/cm ²)	500	1,400	1,400
W/B(%)	37	18	18
부재의 종류	보	벽체	기둥
공시체의 종류	표준수중양생, 현장양생, 코아공시체		
관리 재령(日)	1, 3, 7, 28, 56		

표 3 실물모형부재의 크기 및 강도

부재의 종류	부재의 크기(mm)	적용강도(kg/cm ²)	부재개수	
보 · 기둥	보	700×800×1300	500	1
	기둥	1,000×1,000×2,000	1,400	2
벽체 · 기둥	벽체	400×2,000×2,000	1,400	1
	기둥	1,000×1,000×2,000	1,400	2

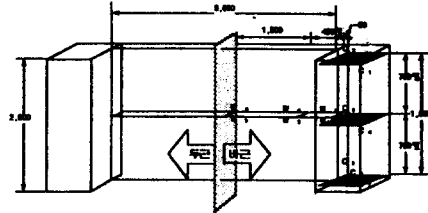
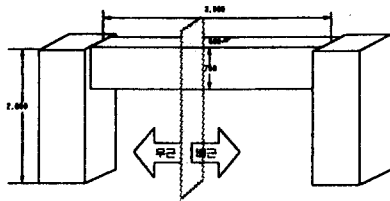


그림 1 Beam-Column 부재의 형상 및 치수(단위: mm) 그림 2 Wall-Column 부재의 형상 및 치수 (단위: mm)

2.3 현장타설

현장실용화를 위한 실험은 실용화시범 현장을 선정하여 현장적용하는 것이 가장 좋은 방법이나, 국내의 제반여건상 1,400kg/cm²의 초고강도 콘크리트 현장타설이 용이하지 않은 관계로 현장실물모형실험을 실시하기로 하였고, 그 장소는 자체 배치플랜트를 보유하고 있어 도출된 최적배합비에 의한 배합을 실시할 수 있는 여건을 갖추고 있는 삼성물산(주) 건설부문의 음성 PC공장으로 결정하였다.

현장타설은 실험실에서 수행된 최적배합비를 근거로 하여 B/P에서 Pilot-test를 거친다음 수행되었는데, 기둥 및 벽체와 보부재에 1,400 및 500 kg/cm²강도의 초고강도 및 고강도 콘크리트를 PC공장 내부에 있는 B/P에서 생산하고 이를 현장까지 트럭으로 운반한 후 버렐을 이용하여 타설하는 것으로써, 현장품질시험에서 공기량은 2.2%, Slump치는 21cm를 유지하였다. 실제 모형부재를 제작하는 과정에서 관찰된 바로는 Slump치 21cm는 초고강도 콘크리트의 높은 점성에도 불구하고 진동다짐을 이용한 타설작업이 일반 콘크리트 작업과 비교하여 특별한 차이점 없이 진행되었다. 사진 1은 보와 기둥의 강도차에 따른 분리타설을 위해 Wire Mesh 설치모습을 나타낸 것이다.

3. 수화온도이력

3.1 wall의 수화온도이력

Wall의 중심부(W₁, W₂, W₃)에서 부재내부의 최고온도 도달시간 및 최고온도는 각각 W₁센서는 측정 20시간 경과 후 69.2℃에 도달했으며, W₂센서는 측정 18시간 경과 후 68.2℃가 측정되었다. W₃센서는 W₂센서와 같은 시간경과 후에 68.8℃가 측정되었다. 측정센서중 최고온도는 W₆센서에서 측정시간 18시간후의 온도인 70.2 ℃이다. 그리고, 시간당 온도상승률은 1.99-2.38℃/h이고, 시간당 온도하강률은 0.43-0.53℃/h이다.

각 센서에서 측정된 온도이력을 살펴보면 기둥부위와 가까운 W₁센서의 온도가 W₂와 W₃에 비해 다소 높은 결과를 나타내었고, 도달시간은 2시간 늦은 것으로 관찰되었다. 또한 최고온도 도달이후 온도하강 추이는 유사한 결과를 보이나, 측정종료시점까지 같은 시간대의 온도는 W₁센서의 온도가 W₂와 W₃센서의 온도보다 2.5-4℃정도 높은 결과를 보인다. 이는 W₁센서가 기둥부재와 접해있는 관계로 기둥부재의 수화온도의 영향에 의해 나타난 결과로 생각된다.

그림 3은 50시간동안 측정된 각 센서의 온도를 Wall의 중심부 온도내용을 중심으로 나타낸 그림이고, 그림 4는 각 센서의 최고온도와 측정시간대의 온도상승폭과 최고온도에 도달하까지의 시간을 표시한 그림이고, 그림 5는 각 센서에서 측정된 온도이력을 기본으로 계산된 시간당 온도상승률과 시간당 온도하강률을 나타낸 그림이다. 시간당 온도하강률이 1℃/h 이하인 것을 알 수 있다. W₆의 온도하강률이 표시되어있지 않은 이유는 최고온도에 도달한 이후 온도가 감소되지 않고 있어, W₆센서 Data의 신뢰도가 상실되었기 때문이다.

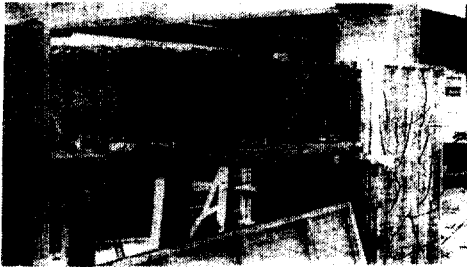


사진 1 내민길이 확보를 위한 Wire Mesh 설치작업

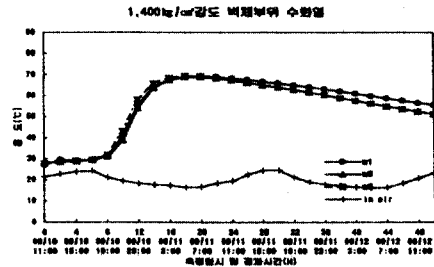


그림 3 수화온도 측정결과(Wall)

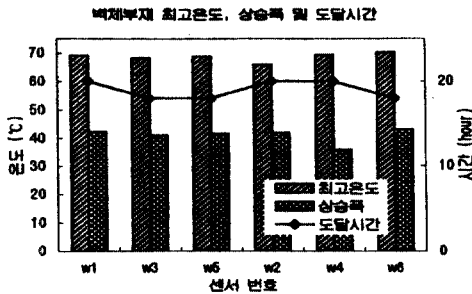


그림 4 Wall의 최고수화온도, 상승폭 및 도달시간

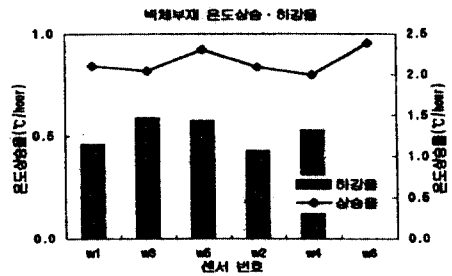


그림 5 Wall 부위의 시간당 온도변화율

이상의 결과를 살펴보면, 벽체부위에서의 최고온도 도달시 대기온도와 부재와의 온도차는 50-54℃의 차이를 보이고 있으나, 양생을 통해 대기와의 직접적인 접촉을 차단하였고, 시간당 온도하강률은 0.43-0.59℃/h 이므로 온도응력에 의한 균열의 우려는 매우 적은것으로 판단된다.

3.2 Column의 수화온도이력

그림 6는 Column 중심부에서의 높이별 온도변화를 나타낸 것으로써, 총 200cm높이에서 C₂센서는 높이 175cm 지점, C₃센서는 높이 100cm, C₈센서는 높이 25cm지점에 설치되었다. 또한 그림 7은 기둥의 중간 높이에서의 중심부와 외곽부의 온도변화를 나타낸 것으로써, 최고온도 도달시간이 거의 동일함을 알 수 있다.

그림 8은 기둥부재에서 측정된 최고온도 및 초기온도에서의 상승폭, 최고온도까지의 도달시간을 나타낸것이고, 그림 9은 각 센서에서 측정된 온도이력을 기본으로 전체 측정시간(144시간)동안의 온도하강율과 상승율을 계산하여 나타낸 것이다. 온도 하강율은 약 0.2-0.4℃/h 의 범위로서 급속한 온도하강에 의한 부재의 온도균열의 우려는 없다고 판단된다.

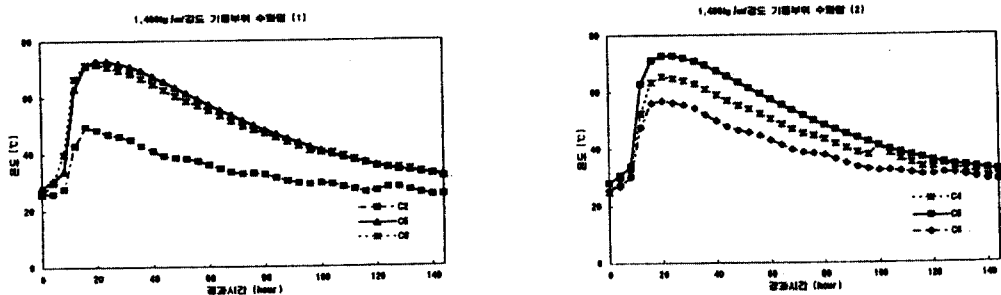


그림 6 기둥의 높이별 수화온도 측정값 (기둥 중심부) 그림 7 기둥 중앙부의 중심부 및 외곽부 수화온도 측정값

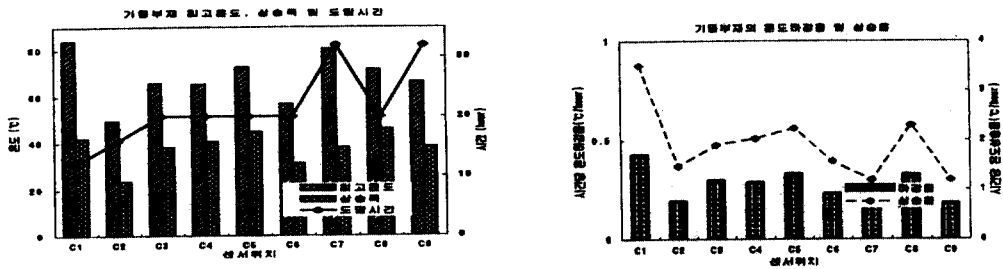


그림 8 기둥부위의 시간당 온도변화율그림

9 기둥부위의 최고온도, 상승폭 및 도달시간

4. 결론

재료적인 측면에서 본 연구는 고품질의 1,400kg/cm²의 초고강도 콘크리트를 만들기 위하여 각 재료의 선정에서부터 골재의 종류 및 크기, 혼화재 및 혼화제의 종류 및 적절한 투입량, 시멘트의 종류 및 투입량, 결합수의 양 등에 따른 적절한 시험변수를 선정하여 시험을 수행하여 보다 효율적인 최적배합을 도출하였다.

초고강도 콘크리트의 재료성질상 높은 점성을 가지고 있으므로 일단 Slump Loss가 발생하게 되면 현장에서 시공할 경우에는 작업에 심각한 지장을 초래하게 된다. 그러므로 초고강도 콘크리트의 현장 시공시 레미콘차량을 통한 운반에는 생산후 타설작업까지의 소요시간을 철저히 관리하여야 한다. 현장 사정에 따라 대규모 물량을 시공하게 될 경우에는 현장 B/P를 운영하는 것도 현장품질관리 적정한 방안이 될 것으로 판단된다.

온도균열은 온도변화에 따른 인장응력에 의해 발생하므로 시간당 온도 상승률보다는 시간당 온도하강율을 기준으로 평가하게 되는데, 급변 모형부재는 타설직후 온도하강을 제어하기 위해 PE필름과 양생포를 사용하여 보양을 실시하였으며, 측정된 온도이력에 의한 시간당 온도하강률은 콘크리트 온도하강을 관리기준인 1.0℃/h이하이므로 모형부재 벽체는 급속한 온도하강률에 의해 발생된 온도응력에 의한 균열 우려는 없는 것으로 판단되었다.

수화온도이력에 의해서 나타난 최고온도 도달시간은 20시간이므로 일반 콘크리트의 12-15시간보다 상대적으로 오래 소요되었다. 이는 최고온도를 제어하고 수화반응을 지속적으로 유지하기 위해 사용한 2차 반응재료인 실리카흙의 영향으로 판단된다.

이상의 측정결과를 통해 1,400kg/cm² 초고강도 콘크리트의 현장 시공시의 유의할 사항으로는, 초고강도 콘크리트의 높은 점성을 고려하여 철저한 사전실험을 통해 Slump치를 관리하고 이를 통해 콘크리트의 작업성을 유지해야 한다. 또한 경화초기의 재료균열을 방지하기 위한 수단으로 실리카흙 등을 사용하여 수화온도의 최고치를 격감시키며 부재의 급속한 냉각으로 인한 부재의 균열을 막기 위해서는 일반강도 콘크리트와 마찬가지로 보양을 철저히 해야 될 것으로 사료된다.

5. 감사의 글

본 논문은 건설교통부의 건설기술연구개발사업과제(R&D/94-0015)로서 수행된 연구결과를 토대로 작성되었으며, 주관연구기관인 삼성물산(주) 종합기술연구소의 박희민 시험실장, 이승훈 선임연구원, 백승준 전임연구원, 협동연구기관인 한양대학교의 신성우 교수, 또한 본 연구 과제를 지원해준 건설교통부와 한국건설기술연구원에 감사의 뜻을 표합니다.

참 고 문 헌

- 1) 변근주, "고성능 콘크리트의 연구동향 및 전망", 한국콘크리트학회지, 제 6권, 1호, 1994. 2, pp. 2-23.
- 2) 신성우, "고강도 콘크리트의 개발현황과 방향", 한국레미콘공업협회지, 제 40호, 1994. 7, pp. 18-26.
- 3) 일본건축학회, "고강도콘크리트 기술의 현황", 1991.
- 4) Smeplass S., Maage M., "Heat of Hydration of High-Strength Concrete" ACI SP121, 1990, pp. 433-456.
- 5) Mukid A. Samrai 외 2인, "Influence of Mixing Temperature on the Properties of High Strength Concrete", Proceedings on Symposium in Stavanger, Norway, 1987, pp.432-472.
- 6) Steinar Helland, "Temperature and Strength Development in Concrete with W/C Less Than 0.40" Proceedings on Symposium in Stavanger, Norway, 1987, pp. 473-486.
- 7) 윤영수 외 3인, "實物模型實驗을 통한 高強度 콘크리트의 強度發現에 관한 研究" 1994년도 학술발표회 논문집(I), 1994. 10, 대한 토목학회, pp. 441-444.
- 8) 윤영수 외 5인, "현장실용화를 위한 고강도 콘크리트의 레미콘 제조 및 생산" 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 제 7권, 1호, 1995, pp. 189-194.
- 9) 윤영수 외 3인, "초고강도 콘크리트로 타설된 내부 코아 벽체의 균열제어에 관한 실험적 연구" 한국콘크리트학회, 봄 학술발표회 논문집, 제 7권, 1호, 1995, pp. 201-206.
- 10) 오병환 외 1인, "대형 콘크리트 구조물의 수화열 예측 및 균열제어 연구" 한국콘크리트학회지, 제 7권, 1호, 1995.3, pp. 97-107.
- 11) 윤영수 외 6인, "고강도 콘크리트의 내부온도이력과 경화 콘크리트의 특성에 관한 실험적 연구" 가을학술발표회 논문집, 제 6권 2호, 1994. 11, 한국콘크리트학회, pp. 127-132.