

초고강도 콘크리트의 물리적·역학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the physical-mechanical Properties of Ultra-High-Strength-Concrete

박희곤* 이진우** 배연기*** 김우재**** 이재삼***** 정상진*****
Park, Hee-Gon Lee, Jin-Woo Bae, Yeoun-Ki Kim, Woo-Jae Lee, Jae-Sam Jung, Sang-Jin

Abstract

As high-rise buildings with 100 or more stories are being constructed, it is inevitable to use high-performance materials including high-performance concrete. What is most important in high-performance concrete is extremely high strength in order to reduce the section of members in high-rise buildings. During the last several years, there have been active researches on Ultra-high-strength concrete. While these researches have been mostly focused on strength development, however, other accompanying physical properties have not been studied sufficiently.

Thus, this study purposed to obtain and analyze data on the physical-mechanical properties of Ultra-high-strength concrete through experiments and to use the results as basic information on required performance of concrete used in high-rise buildings.

키 워 드 : 초고강도 콘크리트, 정탄성계수, 포아송비
Keywords : Ultra-High Strength Concrete, Static Modulus of Elastic, Poission's Ratio

1. 서 론

2000년대에 들어서면서 고층아파트가 등장하기 시작하였으며, 서울 강남을 중심으로 초고층 주상복합 건물이 축조되기 시작하였다. 이러한 초고층 주상복합 건물의 등장으로 인하여 도시 집중화 및 인구 과밀화 현상이 도심으로 집중되는 문제점으로 인하여 최근 초고층 주상복합 건물은 바닷가 주변으로 분산되어 인천과 부산을 중심으로 집중적으로 등장하기 시작했다.

주상복합 건물은 기존의 60층 규모에서 80층, 이후 100층 이상이 되는 초고층 건축물이 등장하게 된다.

100층 이상의 초고층 건축물이 현실로 다가오면서 이에 수반되는 것이 구조체에 사용되는 재료의 고성능화이며, 콘크리트 재료 또한 고성능 콘크리트의 사용이 불가피하게 되었다. 이러한 고성능 콘크리트에서 가장 중요한 것은 초고층 건축물에서 부재 단면 축소를 위해서 매우 높은 강도를 수반되어야

한다. 따라서 최근 몇 년 사이 초고강도 콘크리트의 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 하지만 이러한 초고강도 콘크리트에 대한 연구가 강도 발현에만 주안점을 두고 있어 이에 대하여 수반되는 기타 물리적 특성에 대한 자료가 매우 미미한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 초고강도 콘크리트의 물리적·역학적 특성에 대하여 실험을 통한 데이터를 확보하고 분석하여 초고층 건축물에 사용함에 있어 요구되는 성능을 파악하는데 기초적인 자료로 사용하고자 하는데 그 목적이 있다.

2. 실험개요

2.1 실험계획

본 실험에서는 초고강도 콘크리트 100, 120, 150MPa 대한 균질한 콘크리트 물성, 건조수축, 압축강도, 응력변형 및 간이단열온도상승을 통한 역학적 특성에 대하여 시험을 실시하였다.

2.2 사용재료

본 연구에 사용된 시멘트는 4성분계로 혼합하여 국내 H사

* (주)렉스콘 연구개발팀, 선임연구원, 공학박사, 정회원
** (주)렉스콘 연구개발팀, 전임연구원, 정회원
*** (주)렉스콘 연구개발팀, 과장, 정회원
**** 포스코건설 기술연구소, 과장, 공학박사, 정회원
***** (주)렉스콘 연구개발팀, 팀장, 정회원
***** 단국대학교 건축대학, 교수, 공학박사, 정회원

에서 제조되어진 분말도 약 7,000cm²/g의 Premixed Cement를 사용하였다. 또한 혼화제는 국내B사의 폴리카르본산계 고성능 AE감수제를 사용하였으며, 골재는 잔골재 5mm이하, 굵은골재 13mm이하를 사용하였다. 사용골재의 물리적 성질은 표 1에 제시하였다.

표 1. 잔골재와 굵은 골재의 물리적 성질

항목	생산지	최대 치수 (mm)	표견 밀도 (g/cm ³)	흡수율 (%)	단위용적 질량 (kg/m ³)	실적율 (%)	조립율 (%)
잔골재	인천산 세척사	5.0	2.59	0.98	1,590	61.2	2.87
굵은골재	경북 군위	13.0	2.68	0.19	1,570	58.55	5.84

2.3 실험방법

시료 제작은 강제식 2축 믹서(Twin Shaft Mixer)를 사용하였다. 굳지않은 콘크리트 실험으로 공기량, 슬럼프 플로, O-Lot, L플로(유근)와 경화 콘크리트 실험으로는 길이변화, 압축강도, 탄성계수 및 포아송비 시험을 실시하였다.

L-Flow시험은 현장여건과 유사한 조건으로 하기 위하여 유근 L-Flow시험기를 사용하였다. O-Lot, L-Flow시험의 경우 국내의 기준이 따로 되어 있지 않아 일본건축학회의 고유동 콘크리트 지침서를 기준으로 측정하였다.

압축강도 시험시 Strain Gage를 종횡 방향으로 부착하여 응력변형을 측정하여 정탄성계수 및 포아송비를 도출 하였다. 압축강도 재령은 3, 7, 14, 28, 56일에 측정하였으며, 응력변형은 7일 28일에 측정하였다.

길이변화 실험을 매립형 Strain Gage를 이용하여 시험체 제작 초기부터 데이터 로거를 사용하여 요구 재령까지 실시간으로 변형을 측정하였다. 실험 방법 및 규격을 표 2에 나타내었다.

표 2. 실험방법 및 규격

실험방법	규격	비고
공기량 및 슬럼프 플로	KS F 2421 KS F 2594	-
O-Lot L-Flow	일본건축학회	고유동 콘크리트의 컨시스턴스의 평가시험방법(안)
길이변화	-	매립형 Strain Gage사용
압축강도	KS F 2405	재령 3, 7, 14, 28, 56일
정탄성 계수 및 포아송비	KS F 2438	Strain Gage사용
간이 단열양생	-	300×300×300mm

2.4 배합

본 실험에 사용한 배합은 목표강도 100, 120, 150MPa이며, W/B는 13~22%, W(단위수량) 150~165kg/m³, 결합재량은 750~1,154kg/m³로써 3가지 목표강도에 준하여 배합을 설정하였다. 배합 범위 및 수준은 표 3에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 물리적 성질

3.3.1 공기량 및 슬럼프 플로

공기량 및 슬럼프 플로 시험결과 그림 1에 나타내었다. 공

표 3. 배합 범위 및 수준

항목	배합 범위	수준	기타
물결합재비 (W/B)	13~22%	* 배합 : 3개 * 재령 : 3,7,14,28,56일	* 목표강도 100, 120, 150MPa
단위수량 (W)	150~165kg/m ³		
단위결합재량 (B)	750~1,154kg/m ³		

기량 실험결과 0.2~1.2%로 나타났으며, 슬럼프 플로는 650~770mm에서 측정되었다. 하지만 150MPa(이하 150으로 칭함)에서는 100, 120MPa(이하 100, 120으로 칭함)에 비하여 슬럼프 플로우가 약 15%낮게 나타나고 있다. 이는 100, 120에 비하여 결합재량이 약 20%높고, 낮은 단위수량으로 인하여 점성이 증대되었기 때문으로 판단된다.

슬럼프 플로 시험시 500mm 도달시간을 Check하여 슬럼프 플로와의 상관관계를 그림 2에 제시하였으며, 그래프에서 나타난 것과 같이 슬럼프 플로우가 감소할수록 500mm도달시간이 길어지는 반비례 관계임을 알 수 있었다.

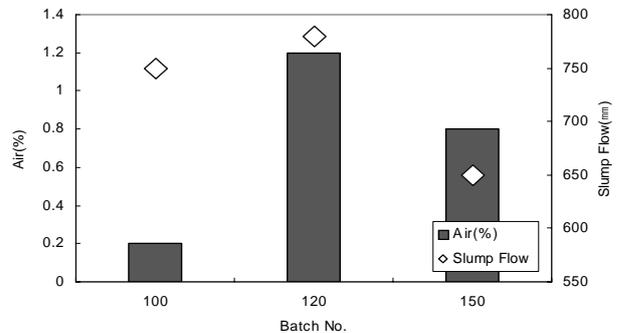


그림 1. 공기량 및 슬럼프 플로 실험결과

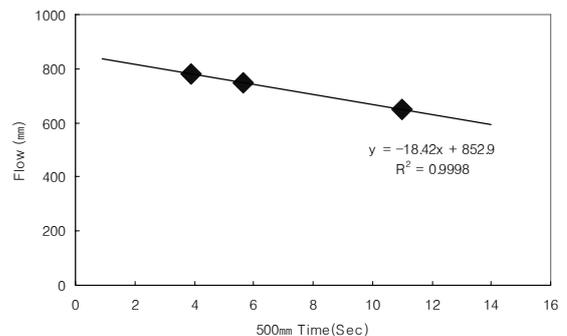


그림 2. S/F 및 500mm도달시간과의 상관관계

3.1.2 L-Flow 및 O-Lot 유하시험

L-Flow 실험은 300mm도달시간을 Check하고 최종 도달하는 시간에 따른 흐름속도를 검토한다.

그림 3에 제시한 L-Flow 실험결과 300mm도달시간 시간과 L-Flow 속도와의 관계에 있어서 도달시간이 오래 걸릴수록 속도는 느리게 나타나고 있어 도달시간과 속도에 있어서는 문제가 없을 것으로 판단된다.

또한 L-Flow 시간과 슬럼프 플로의 상관관계를 그림 4에 나타내었다. 그 결과 슬럼프 플로치가 높은 것이 L-Flow 도달시간이 적게 나타나고 있어 반비례적인 관계를 보이고 있었다.

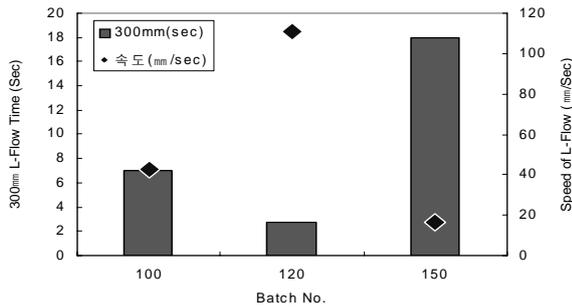


그림 3. L-Flow 실험결과

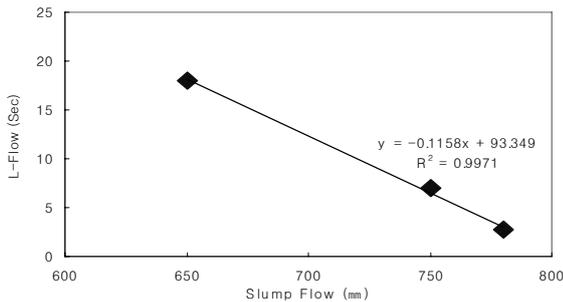


그림 4. L-Flow와 슬럼프 플로와의 관계

O-lot 유하시간에 있어서 슬럼프 플로와 슬럼프 플로 500mm도달시간과에 있어서 상당한 연관성이 있음을 알 수 있다. 그림 5에 나타낸바와 같이 O-lot 유하시간이 증가함에 따라 슬럼프 플로 500mm도달시간 증가와 슬럼프 플로값의 증가로 나타나고 있었다. 이러한 결과로 미루어 보아 현장에서 초고강도 콘크리트를 타설할 경우 높은 플로 확보와 플로 500mm도달시간을 단축시킬수록 현장 타설에 있어서 다소 유리할 것으로 판단된다.

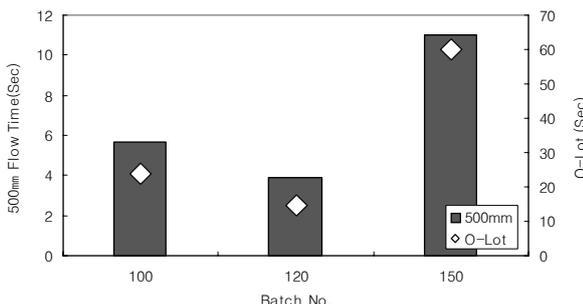


그림 5. O-Lot 유하시간 및 500mm플로 도달시간

3.2 역학적 성질

3.2.1 압축강도

압축강도 시험결과 그림 6에 나타낸바와 같이 재령 56일에 목표강도를 모두 만족하고 있었으며, 100의 경우 120과 거의 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 유사한 단위수량에 결합재 양의 차이를 두었던 배합에서 다소 문제가 있는 것으로 판단되며, 강도 영역에서는 결합재량 보다는 단위수량의 영향이 더욱 큰 것으로 사료된다.

3.2.2 응력변형, 탄성계수 및 포아송비

탄성계수 실험은 재령 7일과 28일 실시하였으며, 응력 변형

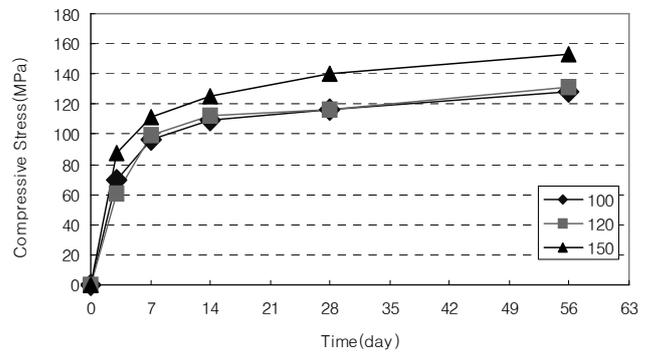


그림 6. 압축강도 실험결과

곡선을 그림 7, 8에 나타내었다.

초고강도 콘크리트에서 응력변형은 일반 콘크리트의 곡선에서 나타나는 곡선의 형태보다는 직선에 가까운 형태를 나타내고 있었으며, 항복점에서 파괴강도에 이르는 부분이 일반 콘크리트에 비하여 다소 짧게 나타나고 있었다. 이는 일반콘크리트의 파괴 양상에 비하여 초고강도 콘크리트는 그 파괴 양상이 다소 크게 나타나고 있어 이러한 결과를 보이고 있는 것으로 사료된다.

그림 9에 압축강도와 정탄성계수의 관계와 그림 10에는 포아송비와의 관계를 나타내었다.

압축강도가 증가함에 따라 정탄성계수는 증가하는 경향을 보이고 있었으며, 이에 대한 상관식은

$$y = 2.9241 \ln(x) - 10.609$$

으로 나타났으며 이에 대한 상관성은 약 86%로 다소 높게 나타났다.

포아송비는 0.3~0.45에서 나타나고 있다. 하지만 일반적으로 60MPa를 초과하고 있는 고강도 콘크리트는 약 0.2정도임을 감안하였을 때 다소 높은 결과를 보이고 있다. 이는 본 실험에 사용된 골재의 영향으로 판단된다.

3.2.3 건조수축

초고강도 콘크리트의 건조수축 실험결과를 그림 11에 나타내었다. 실험결과 건조축이 100, 120, 150순으로 높게 나타나

고 있었다. 기존의 연구 동향에서 보면 보통 콘크리트의 경우 단위수량이 높을수록 건조축이 큰 것으로 나타나고 있지만, 초고강도 콘크리트에서는 이러한 경향과는 다르게 반대의 경향이 나타나고 있다. 이는 초고강도 콘크리트에서 단위 수량이 결합재양에 비하여 상대적으로 작기 때문에 단위 수량의 영향성 보다는 결합재양에 대한 영향성이 크기 때문인 것으로 사료된다.

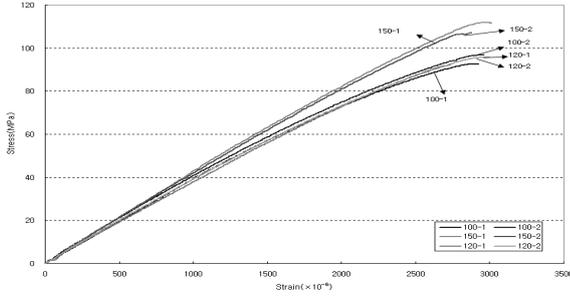


그림 7. 재령 7일 응력변형 곡선

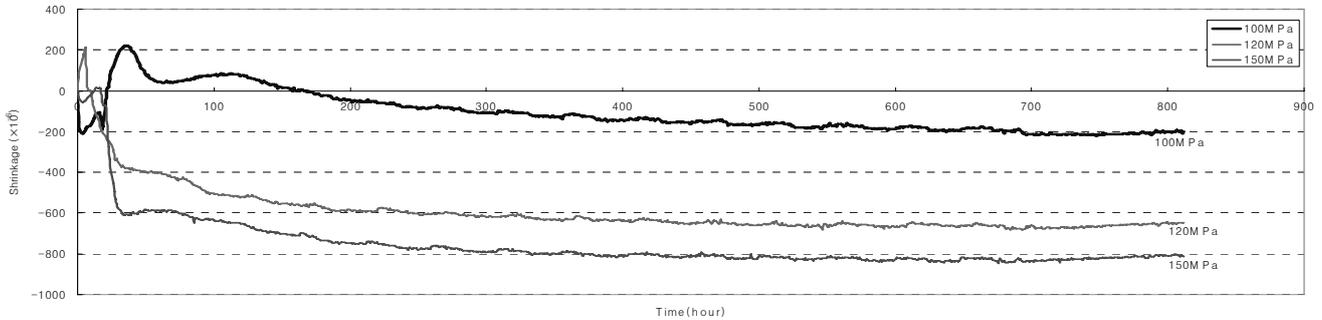


그림 11. 건조수축 실험결과

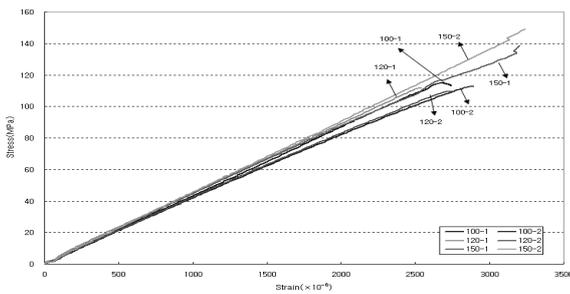


그림 8. 재령 28일 응력변형 곡선

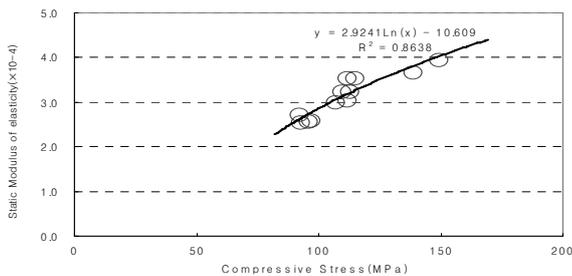


그림 9. 압축강도와 정탄성계수와의 관계

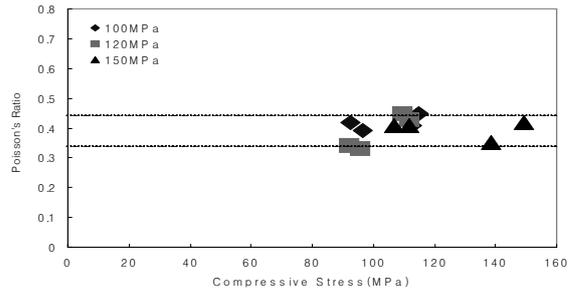


그림 10. 압축강도와 포아송비와의 관계

3.2.4 간이단열양생

간이단열양생 실험결과를 그림 12에 나타내었다. 실험결과 모든 시료에서 최고 온도는 모두 유사하게 나타나고 있었다.

최고온도 상승 시간에 있어서 150이 가장 높게 나타나고 있었으며, 100, 120 순으로 나타나고 있었다.

이는 압축강도 실험결과에서와 비교해 보면 재령 7일 까지 100이 120보다 다소 높게 나타나고 있어, 단열온도 상승에서도 100이 120 보다 다소 빠르게 최고온도 상승되는 것이 옳을 것으로 판단된다. 이는 굳지않은 콘크리트에서 나타난 바와 같이 플로와 공기량 실험결과와도 상관성이 있는 것으로 사료된다.

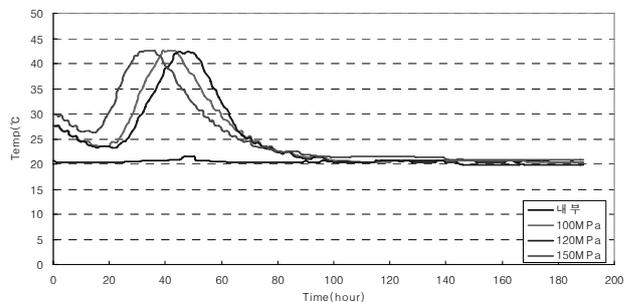


그림 12. 간이단열양생 실험결과

4. 결 론

초고강도 콘크리트영역에서의 물리적·역학적 성능을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다.

- (1) 현장에서 사용하기 위한 초고강도 콘크리트에 있어서는 슬럼프 플로를 크게, 500mm도달시간, O-Lot 및 L-Flow은 빠르게 굳지않은 콘크리트의 성능을 설정하는 것이 매우 중요하다.
- (2) 역학적 특성에 있어서 초고강도 콘크리트는 일반 콘크리트에 비하여 상반되는 경우가 발생하였다. 이러한 것은 초고강도 콘크리트의 적은 단위수량과 높은 결합재량으로 인하여 일반 콘크리트와 상반되는 경향이 발생하는 것으로 사료된다. 따라서 초고강도 콘크리트의 현장 적용을 위해서는 더 많은 자료가 축적 되어야만 안정적으로 현장에서 사용 할 수 있을 것으로 판단된다.
- (3) 초고강도 콘크리트 영역에서는 사용되는 원재료인 시멘트, 기타 결합재, 골재, 심지어는 사용수 까지도 성능이 우수해야 하며, 이러한 원재료의 성능에 따라 요구성능을 좌우하는 매우 중요한 역할을 하고 있어 원재료에 대한 성능 확보와 관리가 철저히 이루어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

1. 최신콘크리트공학, 한국콘크리트학회, 2001
2. 高強度コンクリート施工指針(案)同解説, 日本建築學會, 2005
3. 高流動コンクリートの材料調合製造施工指針(案)同解説, 日本建築學會, 1997