

고온을 받은 고강도 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Mechanical Behavior of High-Strength Concretes Subjected to High Temperature

양 근 혁* 홍 성 우**

Yang, Kuen Hyeok Hong, Seong Woo

ABSTRACT

The experimental results on the mechanical behavior of high-strength concretes subjected to high temperature were presented. Main variables were heating temperature, heating continuance time, and cooling condition. The compressive strength properties of high strength concrete(HSC) varied differently with temperature than those of normal strength concrete(NSC). HSC had higher rates of strength loss than NSC in the temperature range of between 20°C and 400°C. Especially, HSC exploded in 400°C of high temperature.

1. 서 론

일반적으로 콘크리트는 다른 구조재료에 비해서 열전도율이 현저히 낮아서 구조체의 내화구조 또는 방화구조 재료로 널리 사용되며, 고온을 받은 콘크리트의 역학적 특성 변화에 대해 활발한 연구 진행이 이루어지고 있다. Sarshar²⁾의 연구결과에 따르면 약 500~600°C에서 상온에서의 콘크리트 강도는 50% 수준으로 감소하고 있으며, Schneider³⁾는 콘크리트의 탄성계수는 약 300~500°C에서 상온 탄성계수의 50% 수준으로 저감되고, Furamura⁴⁾에 의한 콘크리트의 열적특성은 500°C와 700°C에서의 변형의 폭은 상온 변형폭의 2~4배 이상으로 증가하고 있는 것으로 보고하고 있다. 국내 강병희¹⁾는 가열온도 400°C 이상에서 급격히 강도 저하하여 약 700°C에서는 약 20~40%의 잔존률을 나타낸다고 보고 되고 있다. 하지만 이들 연구 대부분은 보통강도 콘크리트에서 진행되고 있어, 고강도 콘크리트의 역학적 특성을 규명하는 데는 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 상온~800°C까지의 온도 범위에서 실험을 실시하여 고온을 받은 고강도 콘크리트의 폭열 특성파악을 위한 기초적인 자료를 제공하고자 하였다.

2. 연구 방법 및 범위

2. 1 시험 계획

주요변수는 가열온도, 지속시간 및 냉각방법이다. 콘크리트 시험체(Ø10×20cm)를 상온에서 5주간 보온 양생하여 설정온도를 100°C, 200°C, 450°C, 600°C, 800°C로 가열하여 시험체를 30분, 60분 120분 지속 가열하였다. 가열을 끝낸 시험체의 냉각은 가열로에서 꺼내어 1일간 상온에서 냉각시키는 서냉법과 꺼내는 즉시 물에 담가 냉각시키는 급냉법에 대하여 강도실험을 실시하였다. 실험항목은 가열온도, 가열지속시간 및 냉각조건 변화, 가열실험 전·후의 중량변화, 압축강도, 인장강도, 응력-변형률 관계, 탄성계수 등이다.

*정회원, 목포대학교 건설공학부 건축공학전공 조교수

**정회원, 목포대학교 건축공학전공 석사과정

2. 2 재료의 역학적 특성

콘크리트의 취성특성이 고온하에서 역학적 특성에 미치는 영향을 파악하기 위하여 설계강도 60MPa, 물시멘트비 32.1%, 잔골재를 45%로 계획하였다. 표 1에는 배합표를 나타내었다.

표 1 배 합 표

| 설계강도 (MPa) | W/C (%) | S/A (%) | Gmax (mm) | 중량배합(kg/m ³) | | | | SP (%) | Slump (cm) | slumpflow (cm) | Air (%) | 압축강도 (MPa) |
|------------|---------|---------|-----------|--------------------------|-------|-------|-------|--------|------------|----------------|---------|------------|
| | | | | W | C | S | G | | | | | |
| 60 | 32.1 | 45 | 25 | 175 | 544.8 | 733.4 | 896.4 | 1.5 | 22 | 22.42 | 3 | 67.3 |

2. 3 가력 및 측정방법

그림 1에는 내부온도 측정용 시험체를 나타내었다. 본 연구에 사용된 가열로의 가열조건은 현재 국내 건축구조부재의 내화시험방법인 KS F 2257-1, 4, 5, 6, 7에서 규정하고 있는 표준가열온도곡선 조건에 따라 콘크리트 시험체를 가열하였다. 시험체 중심부 온도는 K타입 열전대 (NiCr-Ni, 온도측정 범위 -200~1370℃)를 사용하여 측정하였다.

콘크리트의 압축강도는 KS F 2405(콘크리트의 압축강도 시험방법)에 의해 1000KN 용량의 U.T.M(만능 시험기)을 사용하여 Dial Gage를 장착한 고강도용 컴프레서미터로 시험체에 고정하여 측정하였다.

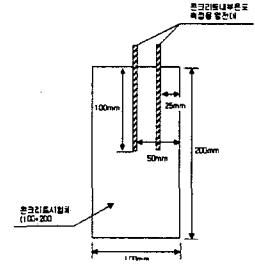


그림 1 내부온도 측정용 시험체

3. 실험결과 및 비교·분석

3. 1 가열 및 냉각시 내부온도

그림 2에는 가열시간에 따른 공시체 내부의 온도 변화를 나타내었다. 콘크리트 시험체 가열시 내부온도가 190~200℃에서 감소하는 현상을 볼 수 있는데, 이는 콘크리트 내부의 잉여수와 모세관수, 흡착수, 층간수 및 결합수의 일부가 수증기로 증발하게 됨으로서 콘크리트의 내부온도 상승이 억제되고 있는 것으로 판단된다.

그림 3에는 냉각시간에 따른 공시체 내부의 온도 변화를 나타내었다. 급냉법인 경우는 20분만에 시험체 내부온도가 상온까지 떨어지고 서냉법인 경우는 180분경과 후 상온까지 떨어졌다.

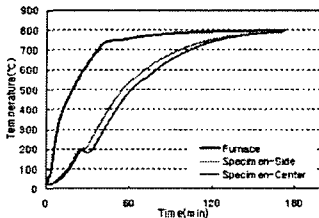


그림 2 시험체 가열곡선

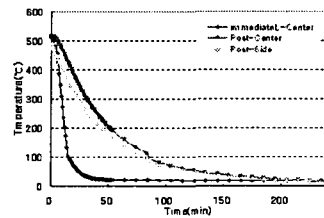


그림 3 시험체 냉각곡선

3. 2 중량 감소률

그림 4에서 가열온도에 따른 중량 감소률을 나타내었다.

고강도 콘크리트의 중량은 가열온도 및 가열지속시간이 길어질수록 중량 감소률이 크게 증가하는 경향을 보이고 있다.

이는 콘크리트 내부에 수분을 포함한 공극이 열을 받게 되면 수분은 팽창하여 콘크리트 내부응력을 급격하게 상승시키거나 증발되며, 증발되지 않는 수분은 내부공극으로부터 이탈되는 등 역학적 관점에서 치수 불안정을 발생시키게 된다. 따라서 가열된 콘크리트 내부의 수분 이동과 흐름에 따른 중량 감소률은 고온에서의 콘크리트 열적 특성 변화에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

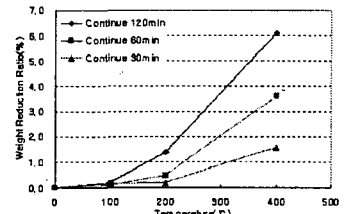


그림 4 가열 온도에 따른 중량 감소률

3. 3 압축강도

그림 5에는 가열온도에 따른 압축강도 잔존률을 나타내었다. 급냉조건에서 상온~400℃까지 고강도 콘크리트는 가열지속시간에 거의 영향 없이 잔존률 65%까지 일정하게 감소하였고, 서냉조건에서 가열지속시간이 30분, 60분, 120분에 따라 100℃에서는 94.49%, 99.47%, 100%이고 200℃에서는 94.95%, 87.02%, 75.83%이며 400℃에서는 79.01%, 77.21%, 75.76% 정도를 나타냈다.

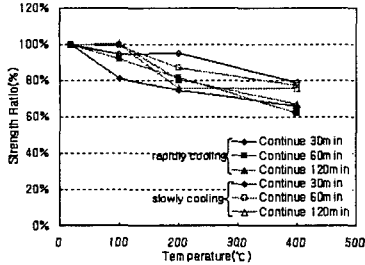


그림 5 냉각조건에 따른 압축강도 잔존률

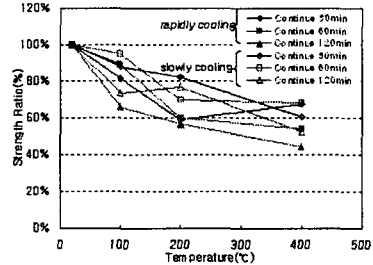


그림 6 냉각조건에 따른 인장강도 잔존률

3. 4 인장강도

그림 6에는 가열온도에 따른 인장강도 잔존률을 나타내었다. 급냉조건에서 가열지속시간 30분, 60분, 120분에 따라 100℃에서는 81%, 89%, 66%이고 200℃에서는 59%, 60%, 56%이며 400℃에서는 68%, 54%, 44%로 나타났다.

서냉조건에서 가열 지속시간에 30분, 60분, 120분에 따라 100℃에서는 88%, 95%, 73%이고 200℃에서는 82%, 70%, 77%이며 400℃에서는 61%, 68%, 55%로 나타났다.

3. 5 탄성계수

그림 7에는 가열온도에 따른 탄성계수 잔존률을 나타내었다. 급냉조건에서 상온~200℃까지 탄성계수 잔존률은 100℃까지는 완만한 감소를 보이다 100℃~200℃는 오히려 상온에서보다 6%~16%까지 탄성계수가 증가하고 200℃ 이후 다시 급격히 저하하여 400℃에 약 24%~42%까지 저감하였다.

서냉조건에서의 잔존률은 가열 지속시간 30분, 60분, 120분에 따라 89.71%, 96.27%, 103.45%이고 200℃에서는 113.8%, 108.77%, 108.25%이며 400℃에서는 79.44%, 81.11%, 76.17% 정도로 나타났다.

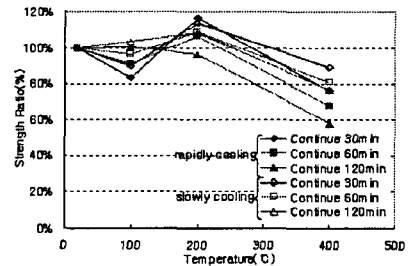


그림 7 냉각조건에 따른 탄성계수 잔존률

3. 6 응력-변형률

그림 8에서 냉각조건에 따른 가열온도별 응력-변형률 관계를 나타내었다.

고강도 콘크리트는 100℃까지는 탄성재료 특성을 보이고 있지만 200℃이후부터는 직선적인 기울기를 갖는 경향을 보이고 있다. 이는 콘크리트 내부의 열응력이 증가하여 약한 면에 있는 골재와 모르타르 경계면에 있는 천이대에 응력이 작용하여 마이크로균열 폭의 확대 등에 기인된 것으로 판단된다.

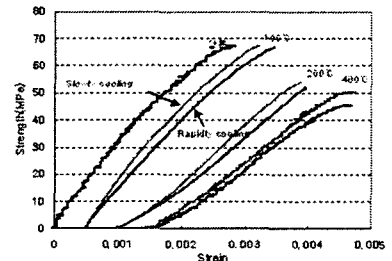


그림 8 냉각조건에 따른 응력-변형률 관계

3. 7 콘크리트 폭열

그림 9에는 고강도 콘크리트 가열시 폭열 장면을 나타내었다

설정온도 450℃, 지속시간 120분에서 전기로 내부에서 폭발음과 함께 파괴하였다. 이는 고강도 콘크리트의 밀실한 구조에서 수증기나 습기가 이동하기 어려워 콘크리트의 표면근처에 높은 수증기압을 일으켜 폭열하는 것으로 판단된다. 콘크리트의 폭열은 함수량의 정도, 콘크리트의 밀도, 외부하중에 의한 압축응력과 프리스트레스(prestress), 가열온도의 속도, 비대칭적인 온도분포, 보통 상태에서의 고강도콘크리트의 강도, 시험체의 치수와 형상 등에 따라 그 경향이 달라진다.

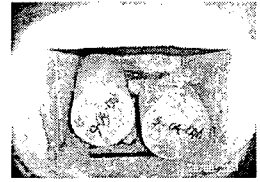
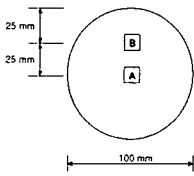


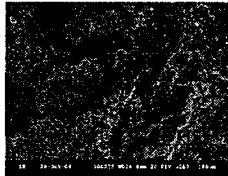
그림 9 450℃ 가열온도에서 시험체 폭열

3. 8 콘크리트의 가열 전·후 SEM 분석

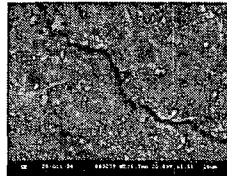
그림 10에는 시험체 가열 전·후 SEM 분석 사진을 나타내었다. 이러한 분석을 통하여 300℃미만의 온도에서는 CH 결정체와 미수화 시멘트 입자의 경계면을 따라 생기는 작은 균열을 제외하면 큰 균열은 발생하지 않는다는 것을 알 수 있다. 즉, 저온에 노출된 콘크리트는 오직 경계면의 국부균열이 생긴다는 것을 알 수 있고, 고온에 노출되면 수화생성물들은 분해되는 현상을 보이며 시멘트 페이스트는 내부에서, 골재는 입자 주위에서 큰 균열이 발생한다.



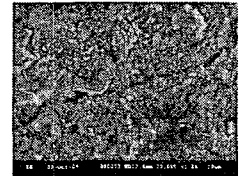
b) 시험체 촬영 부위



a) 가열전 A-부분



c) 가열후 A-부분



d) 가열후 B-부분

그림 10 시험체 가열 전·후 SEM 사진

4. 결 론

- 1) 고온에 노출된 고강도 콘크리트의 열적거동은 재료 자체의 밀실한 구조와 높은 포텐셜 에너지에 의한 취성적 성질로 인해 가열온도 450℃에서 폭열이 발생하였다.
- 2) 고강도 콘크리트의 압축강도는 급냉조건에서 잔존률 65%까지 일정하게 감소하였고, 서냉조건에서는 75.76%까지 감소하였다.
- 3) 인장강도는 급냉조건에서 잔존률이 44%, 서냉조건에서 55%까지 감소하였고, 가열지속시간에 따라 6~23%의 편차를 보였다.
- 4) 가열 전·후의 SEM 분석 결과 고온에 노출된 고강도 콘크리트는 높은 수증기압을 일으켜 콘크리트 내부 모르타르 부분에서 큰 균열이 발생하였다.

5. 참고문헌

1. 강병희, "화재와 콘크리트의 재료성능", 콘크리트학회지 제 14권 2호, 2002. 3
2. R. Sarshar, "Material and environmental factors influencing the compressive strength of unsealed cement paste and concrete at high temperatures". Magazine of concrete research, No.162, 4. 51-61. 1998
3. Schneider, U., "Behavior of concrete under thermal steady state and non-steady conditions", Fire and Material, 1, 103-115, 1976.
4. Furumura, F., "Stress-strain curve of Concrete at high temperatures", Transactions of the Architectural Institute of Japan, 1996.