

C-10

함수량에 따른 고강도콘크리트의 폭열현상에 대한 고찰

이충선, 지남용*

한양대학교 대학원 *한양대학교 건축공학부

Spalling Phenomena of High-Strength Concrete According to Moisture Content

Lee, ChungSeon, Jee, NamYong*

Hanyang Univ. Graduate School, *Division of Architectural Engineering, Hanyang Univ.

1. 서론

일반적으로 콘크리트는 내화성이 좋은 구조재료이지만, 고온에 노출되면 물리적, 화학적 변화로 내화성능이 저하된다. 콘크리트의 내화성능에 대한 기존의 연구는 보통콘크리트의 열적 특성 및 보통콘크리트를 이용한 부재의 내화성에 대한 것이 주종을 이루었다. 최근 고성능콘크리트의 사용이 증가함에 따라 고성능콘크리트의 내화성능에 대한 연구가 진행되고 있으나, 주로 부재가열시험을 통한 부재의 내력저하여부에 관한 것이며, 폭열 등 재료 자체의 성능저하측면에 대한 연구는 부족한 실정이다. 폭열은 콘크리트의 외력조건 및 물리적 특성에 따라 표면의 파편비산, 박리, 망상균열 발생 및 모서리 부분의 탈락 등 주로 재료 표면부에서 열응력과 수증기압이 주원인으로 작용하여 다양한 형태로 나타나며, 콘크리트의 강도가 증가할수록 격렬해진다고 알려져 있다.

따라서, 본 연구에서는 고강도콘크리트를 대상으로, 압축강도와 함수율을 변화시켜 고온가열시 콘크리트 폭열시점의 콘크리트 내부온도구배 및 표층온도를 측정, 검토하고, 내부수분과 열응력이 콘크리트의 폭열에 미치는 영향을 고찰하여 폭열제어를 위한 기초자료를 확보하고자 한다.

2. 실험개요

2.1 실험인자 및 수준

본 연구에서는 표 1과 같은 실험인자 및 수준으로 실험을 진행하였다.

2.2 사용재료

콘크리트 제작에 필요한 재료 중, 시멘트는 KS L 5201의 규정을 만족하는 국내 S사의

표 1. 실험인자 및 수준

실험인자	수준	수준수
압축강도(MPa)	26, 40, 59	3
함수율(%)	0(절건), 5, 10	3

표 2. 콘크리트 배합표(중량배합)

배합강도(MPa)	w/c	s/a (%)	단위중량(kg/m ³)				혼화제(C×%)	슬럼프(cm)	공기량(%)	굵은골재 최대치수(mm)
			W	C	S	G				
26	0.54	46	170	315	822	995	0.5	17	6.0	13
40	0.43	46	170	395	792	958	0.6	20	5.8	
59	0.33	46	170	515	746	903	0.7	19	5.7	

보통포틀랜드 시멘트를 사용하였고, 굵은골재는 화강암계 부순돌을, 잔골재는 세척해사를 사용하였다.

2.3 콘크리트 배합

시험체 제작을 위한 배합은 단위수량을 170kg/m³, 잔골재율을 0.46으로 고정하고, 단위시멘트량과 단위골재량을 변화시켜 배합강도를 만족하도록 하였다. 슬럼프는 18±2.5cm, 공기량은 4.5±1.5%를 만족하도록 고성능AE감수제의 양을 조절하였다. 이에 따른 배합표는 표 2와 같다.

2.4 시험체 제작 및 양생

KS F 2403에 따라 압축강도 측정용 시험체(Φ10×20cm)와 내부온도측정용 시험체(Φ15×30cm)를 제작하였다. 내부온도 측정용 시험체는 타설 직후 그림 1과 같이 K타입 열전대(CA, Φ1.02 1쌍, 크로멜-알루멜, 온도측정범위 -200~1370℃)를 시험체 중심(중심부)과 중심에서 원주방향으로 3.5cm지점(중양부) 및 6.5cm지점(표층부)에 15cm 깊이로 각각 삽입하였다. 또한 제작 24시간 후 탈형하여 재령 28일까지 23±2℃로 수중양생하였다.

2.5 실험방법

2.5.1 함수율 조정

28일간 양생한 시험체를 105±5℃로 향량이 될 때까지 건조시켜 절건상태(함수율 0%)로 만들고, 이 때까지의 중량감소를 연속적으로 측정하여 동일 배합의 시험체가 실험에 소요되는 소정의 함수율(함수율 5%, 10%)으로 되는 시점을 구하고, 그 시간만큼 건조시켜 함수율을 조정하였다.

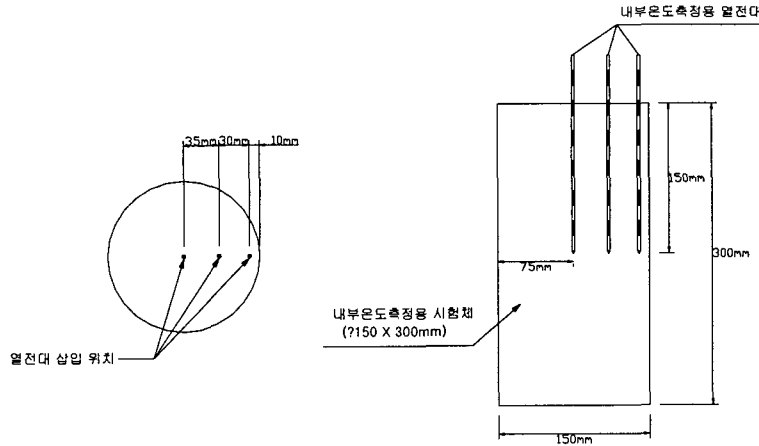


그림 1. 내부온도측정용 시험체(횡단면, 종단면).

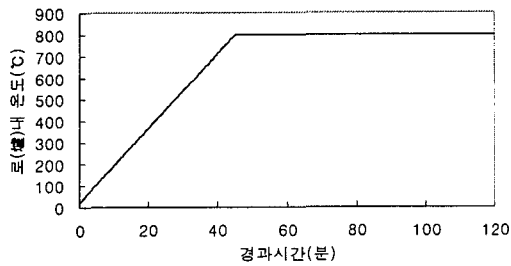


그림 2. 실험에 사용한 시간-가열온도곡선.

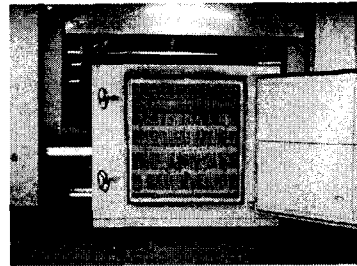


그림 3. 전기로.

2.5.2 가열방법

시험체를 전기로에 넣은 후, 그림 2와 같이 로(爐)내 온도를 18°C분의 비율로 800°C까지 상승시킨 후, 총 가열시간이 120분이 될 때까지 800°C를 유지시키는 방법으로 가열하였다. 실험에 사용한 시간-온도가열곡선의 120분까지의 시간-온도면적(단위 : °C·분)은 KS F 2257의 표준시간-가열온도곡선의 식*1)에 의거하여 90분간 가열했을 때까지의 시간-온도면적과 거의 같다. 전기로 내부의 온도와 시험체 내부의 온도는 데이터 로거(Tokyo Sokki Kenkyujo사의 TDS-601A)를 이용하여 측정하였다.

* $T = 345\log(8t+1) + 20$ (단, T 는 로내평균온도(°C), t 는 시간(분))

3. 실험결과 및 고찰

3.1 폭열개시시점

가열도중 시험체의 최초폭열음이 발생했을 때의 온도를 폭열개시시점이라 보았을 때, 그림 4에서처럼 강도가 크고 함수율이 작을수록 폭열개시시점은 늦게 나타나는 경향을 보였다. 또한, 26MPa 시험체의 경우 17~22분 경과 후 모두 폭열하기 시작하였다. 40MPa 및 59MPa인 시험체는 함수율 0%일 때를 제외하고는 함수율 5%일 때에는 30~33분경, 함수율 10%일 때에는 22~24분경에 폭열이 시작되어, 동일 함수율일 경우 강도에 따른 폭열개시시점에 큰 차이가 없는 것으로 나타났다. 이는 콘크리트의 강도가 증가할수록 내부수분의 영향을 크게 받기 때문이라고 판단된다.

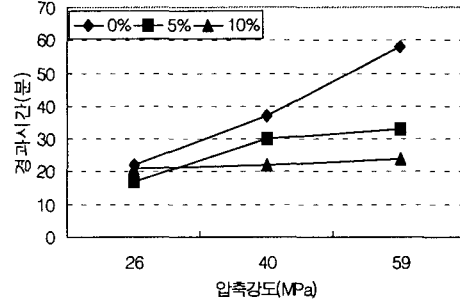


그림 4. 폭열개시시점.

3.2 폭열개시시점의 표층부 온도

폭열개시시점의 표층부 온도를 그림 5에 나타내었다. 그림에서 보이는 바와 같이 전 함수율 범위에서 강도가 증가할수록 높은 온도에서 폭열이 발생하였다. 그러나 함수율 5% 및 10%의 경우에는 0%일 때보다 표층부 온도가 낮게 나타났고, 동일 강도에서 함수율에 따른 온도차이는 강도가 증가할수록 크게 나타났다. 한편 그림 6에서처럼 깊이에 따른 폭열시점의 온도는 강도가 증가할수록 높게 나타났다. 일반적으로 고강도콘크리트일수록 밀실한 구조를 가지므로, 내부 수분의 영향이 적을수록 골재와 시멘트페이스트간의 상호구속력이 상대적으로 강하게 작용하여 열응력에 대한 저항성이 커지기 때문이라고 판단된다.

3.3 폭열개시시점의 온도구배

폭열개시시점의 표층부와 중앙부의 온도차이를 보면, 그림 7과 같이 함수율이 증가할수

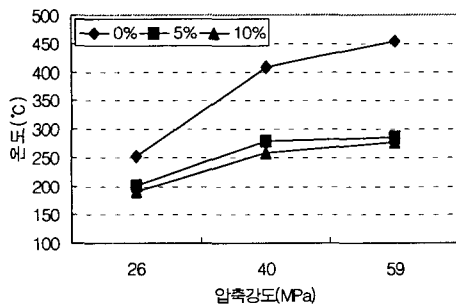


그림 5. 폭열시점의 표층부 온도.

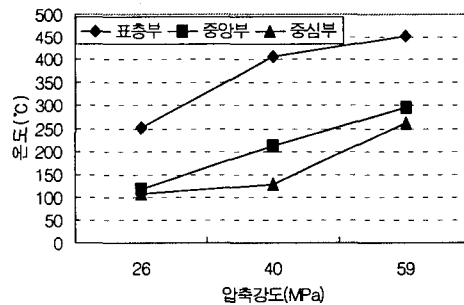


그림 8. 폭열시점의 깊이별 온도(함수율 0%).

록 온도차가 작아지는 경향을 알 수 있다. 이는 콘크리트 내 수분량이 많을수록 콘크리트에 공급된 열이 수분의 증발에 필요한 열로 소비된 것으로 보이며, 그로 인하여 수증기압이 폭발유발인자로 작용하게 된 것으로 판단된다. 또한 압축강도 26MPa인 시험체는 거의 비슷한 폭발시점을 나타낸 것으로 볼 때, 콘크리트 내에 수분이 존재하면 온도가 상승할수록 콘크리트의 비열도 증가하므로 온도구배가 상대적으로 작게 나타난 것으로 보인다. 이러한 현상은 동일 강도에서는 함수율이 높고, 동일 함수율에서는 강도가 높은 시험체에서 나타날 것으로 예상되지만, 압축강도 40MPa인 시험체가 59MPa인 시험체보다 큰 온도차를 보였다. 따라서 온도구배와 폭발과의 관계는 시험체 내부의 수분이동 및 열에너지의 총량을 함께 고려하여야 할 것으로 사료된다.

3.4 가열 후 파괴 형상 및 균열폭

가열 후 모든 시험체에서 그림 9에서 처럼 폭발에 의한 망상균열이 관찰되었는데, 고강도일수록, 함수율이 높을수록 밀집되어 있었다. 그 밖에 관찰된 파괴 형태는 표 3과 같다. 함수율이 0%인 경우에는 세 시험체 모두 유사한 폭발양상을 보였고, 그림 8과 같이 최대균열폭은 함수율 10%, 압축강도 26MPa인 시험체에서 측정되었고, 이 시험체를 제외하고는 전체적으로 함수율과 강도가 증가할수록 폭발에 의한 것이라 판단되는 박리 및 모서리 탈락현상이 심한 것으로 관찰되었다. 이는 고강도콘크리트일수록 골재와 시멘트페이스트 상

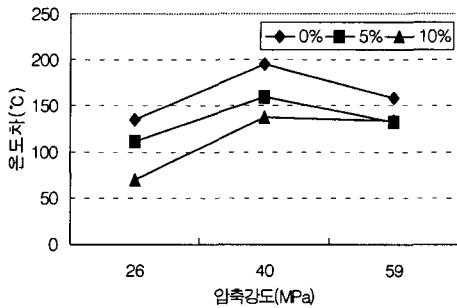


그림 7. 표층부-중앙부의 온도차.

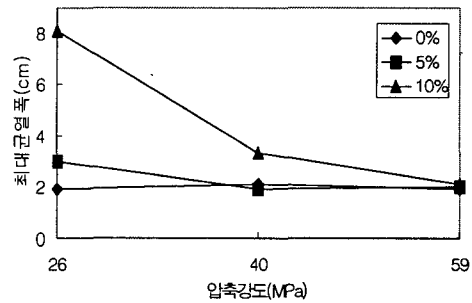


그림 8. 가열 후 최대균열폭.

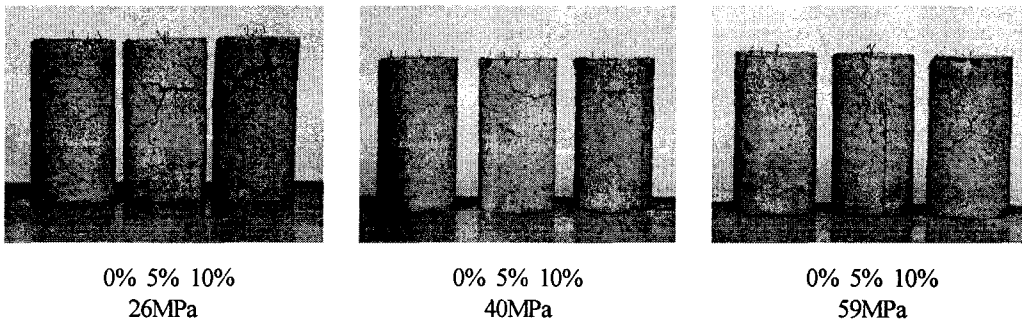


그림 9. 가열 후 시험체의 균열양상.

호간의 구속력이 크기 때문에, 이 구속력으로 시험체 내부에 발생한 열응력이 어느 정도 상쇄되어 격렬한 폭열은 일으키지 않았지만, 상호구속력이 약한 모서리와 표면에 박리, 탈락이 발생한 것으로 판단된다.

4. 결론

실험결과를 바탕으로 고강도콘크리트의 고온가열시 폭열현상에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 폭열시점은 강도가 크고 함수율이 작을수록 늦게 나타났지만, 고강도콘크리트 시험체는 함수율에 따라 비슷한 시점에서 폭열을 일으켰는데, 이는 콘크리트의 강도가 증가할수록 내부수분의 영향을 크게 받기 때문이라고 판단된다.

(2) 콘크리트 내에 수분이 존재하게되면 절건상태일 때보다 낮은 표층부 온도에서 폭열하게 되지만, 전 함수율 범위에서 강도가 증가할수록 높게 나타났다. 이는 콘크리트 강도가 증가할수록 내부구조가 밀실해져 내부 수분의 영향이 적을 경우 골재와 시멘트페이스트간의 상호구속력이 상대적으로 강하게 작용하여 열응력에 대한 저항성이 커지기 때문이라고 판단된다.

(3) 폭열개시시점의 표층부와 중앙부의 온도차는 함수율이 증가할수록 작아지는 경향을 띤다. 이는 콘크리트 내 수분량이 많을수록 콘크리트에 공급된 열이 수분의 증발에 필요한 열로 소비되고, 온도 상승에 따라 비열이 증가하기 때문에 나타나는 현상으로 보이지만, 시험체 내부의 수분이동 및 열에너지의 총량을 함께 고려하여야 할 필요가 있을 것으로 사료된다.

(4) 골재와 시멘트페이스트 상호간의 구속력이 강한 고강도콘크리트 시험체의 경우 내부에 발생한 열응력이 다소 상쇄되어 폭발성 폭열은 일으키지 않았지만, 구속력이 약한 모서리와 표면에 박리, 탈락이 다수 발생한 것으로 판단된다.

본 연구는 폭열을 정량적으로 파악하기 위한 기초단계로서, 향후 구속조건, 내부수분이동 및 가열시의 열에너지와 폭열과의 관계 등을 검토하여야 할 것이다.

표 3. 가열 후 강도 및 함수율에 따른 파괴 형태

강도(MPa) 함수율(%)	26	40	59
0	박리 골재폭열	골재폭열	골재폭열
5	박리 골재폭열	박리 모서리 탈락	박리 모서리 탈락
10	골재 폭열 파괴 폭열에 근접	박리, 골재폭열 모서리 탈락	박리 모서리 탈락

■ 본 연구는 한양대학교 초대형구조시스템연구센터의 연구비 지원으로 수행된 연구결과
의 일부이며, 지원에 감사드립니다.

참고문헌

1. 有政紘, 寺井俊夫, “骨材およびの加熱による爆裂,” 日本建築學會 學術講演概要集, pp. 77-78(2000. 9.).
2. 姜丙熙, “超音波에 의한 高溫受熱콘크리트의 強度推定에 관한 實驗的 研究,” 한양대 박사학위 논문(1989. 12.).
3. Castillo, C., Durrani, A. J., “Effect of Transient High Temperature on High-Strength Concrete,” ACI Materials Journal, Vol. 87, No. 1, pp. 47-52(1990).