

## 콘크리트의 압축강도 및 함수율에 따른 폭렬특성에 관한 연구

이재영\* · 김동준\* · 권영진\* · 原田和典\*\*

호서대학교 소방방재학과\* · 京都大學\*\*

### An Experimental Study on the Explosive Spalling Properties of Concrete according to Concrete Compressive Strength and Moisture rate

Lee, Jae-Young · Kim, Dong-Jun · Kwon, Young-Jin · Kazunori Harada\*  
Hoseo Univ.\*, Kyoto Univ.\*\*

#### 요 약

화재와 같은 고온의 환경에서 콘크리트의 고강도화는 폭렬(Explosive Spalling)이라는 큰 위험성을 가지고 있으며, 이러한 폭렬의 원인으로는 콘크리트 내부의 수증기압이 가장 큰 원인으로 제기되고 있다. 본 논문은 콘크리트의 폭렬발생 있어서 압축강도 및 함수율이 초기 폭렬특성에 미치는 영향을 실험적으로 검토하기 위하여 건축구조물의 화재 온도조건인 ISO834 화재온도이력곡선을 15분, 30분 적용하여 콘크리트의 초기 폭렬특성을 검토하였다. 그 결과 압축강도·가열시간·함수율이 증가할수록 폭렬발생 및 폭렬현상이 증대되는 경향이 나타났으며, 15분, 30분 가열시간에 따른 잔존강도율을 나타내었다. 또한, 압축강도 및 함수율에 따른 폭렬발생영역을 분석하였으며, 압축강도 50~100 MPa의 경우 함수율 3%이하, 100 MPa이상의 경우는 1%이하로 제어할 경우 폭렬현상이 발생하지 않을 것으로 판단되었다.

#### 1. 서 론

최근의 건축구조물은 초고층화 초대형화의 추세로 인하여 고강도콘크리트사용이 점차 증가하고 있으며, 국내에서는 최근 60층 정도 규모의 고급주거 복합기능 시설을 비롯한 초고층건축물에 고강도 콘크리트가 적용되어 활발히 건설되고 있다. 고강도 콘크리트(High Strength Concrete, 이하 HSC)는 구조적 장점 뿐 만 아니라 내구성 및 사용성이 우수하여 건축·토목 구조물에서의 활용이 점차적으로 증대되고 있다<sup>1,2)</sup>.

이러한 HSC의 경우 보통강도콘크리트(Normal strength concrete, 이하 NSC)와 비교할 경우 화재와 같은 고온의 환경에서 강도의 저하율이 더욱 크며, 심각한 폭렬현상이 발생하는 것으로 잘 알려져 있다. 이러한 급작스런 폭렬현상은 철근콘크리트 부재 파편의 비

산뿐만 아니라 부재단면감소로 인한 구조내력의 감소, 철근의 노출로 인한 부재의 내력 성능 저하를 일으켜 구조물의 안전에 있어 큰 위험을 가지고 있다.

그러나 이러한 폭렬의 원인으로는 수증기압설, 열응력설, 수증기압-열응력 복합설 등이 제시되고 있으나 아직까지 그 메커니즘에 대한 정량적인 연구결과는 제시되고 있지 않은 실정이다<sup>3,4,5</sup>.

따라서 본 연구는 화재와 같은 고온의 환경에서 콘크리트의 압축강도 및 함수율이 초기 폭렬특성에 미치는 영향을 실험적으로 분석하고자 한다.

## 2. 폭렬에 관한 실험

### 2.1 실험계획 및 방법

콘크리트의 압축강도 및 함수율에 따른 폭렬을 실험적으로 검토를 위한 실험계획은 표 1과 같다.

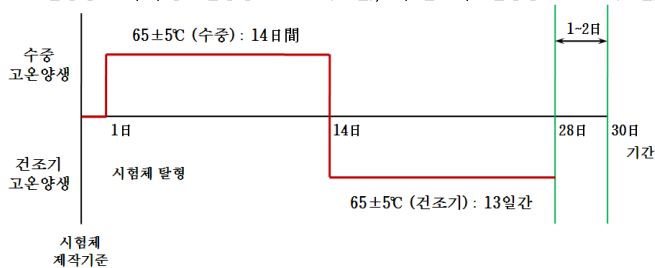
표 1. 실험계획

F <sub>ck</sub> (MPa)	시험체 양생조건	가열조건 (ISO834)	Fresh State	Hardened State (28日)	가열 후
21	- 기중양생	15 min. & 30 min.	- 공기량 - Slump (Slump-Flow)	- 압축강도 - 함수율	- 압축강도 - 폭렬특성
50	- 봉함양생				
80	- 고온양생				
100	- 건조양생	30 min.			

본 연구는 ø100\*200 mm의 공시체를 대상으로 하였으며, 실험변수는 콘크리트의 설계강도 21, 50, 80, 100 MPa의 4종류로 하였으며, 함수율에 따른 조건은 양생조건을 기중양생, 봉함양생, 고온양생, 건조양생의 4종류로 설정하여 함수율의 변화를 설정하였다.

또한, 본 연구에서의 화재하중은 내화시험 방법인 KS F 2257-1 및 ISO 834 표준가열곡선<sup>6,7</sup>에 준하여 15분, 30분 가열시험을 실시하였으며, 가열시험 후 폭렬성상, 균열특성 및 압축강도를 측정·평가하였다. 그림1은 각각의 시험체의 양생조건을 나타낸 것이며, 시험체 제작과정 및 내화시험전경을 사진1에 나타내었다.

1. 기중양생 : 20±3℃ / RH 60%
2. 봉함양생 : 온도조건 고려 (X)
3. 고온양생 : 1차 수중고온양생 65±5℃ (14일), 2차 건조고온양생 65±5℃ (13일)



4. 건조양생 : 28일 양생 후 - 고온건조 (100±5℃) 84일

그림 1. 시험체 양생조건



사진 1. 시험체 제작, 양생방법 및 가열로 전경

## 2.2 사용재료 및 배합

본 연구에 사용된 콘크리트의 배합은 표2와 같으며, 본 연구에서의 배합은 폭렬의 원인으로 제기되고 있는 혼화제(Silica-fume 및 Fly-ash)를 모두 일정배합으로 넣는 것을 전제로 하였으며, 사용된 혼화제로는 FA (Fly-ash) 4000급, SF(Silica-fume) 200000급 그리고 고성능감수제(AE)는 폴리카르복산계(Polycarboxylate)를 사용하였다.

표 2. 사용재료 및 배합

F <sub>ck</sub> (MPa)	W/B (%)	Unit weight (kg/m <sup>3</sup> )						Slump (Slimp-Flow) (mm)
		Water	Cement	FA	SF	S	G	
21	60	168	244	28	8	750	1014	120
50	35	163	373	70	23	740	818	540
80	25	160	480	96	64	640	707	565
100	15	160	800	160	107	416	459	530

※ S : Sand, G : Gravel, FA : Fly-ash, SF : Silica-fume

## 3. 가열실험 결과 및 분석

### 3.1 함수율 측정결과

함수율 측정은 양생 28일 후 중량변화 없는 24~84일간 100±5 °C에서 건조기에 건조하여, 측정된 중량감소량을 이용하여 함수율을 측정하였으며, 그 결과 양생조건에 따라서 봉합양생, 고온양생, 기중양생의 수순으로 함수율이 높게 측정되었으며, 그 측정결과는 그림 2와 표3와 같다.

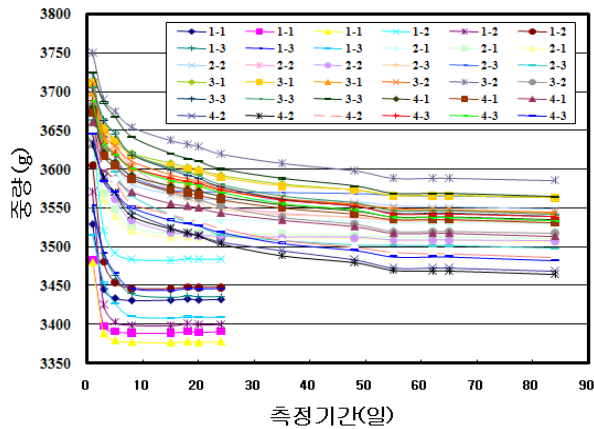


그림 2. 함수율 측정결과

표 3. 함수율 측정결과

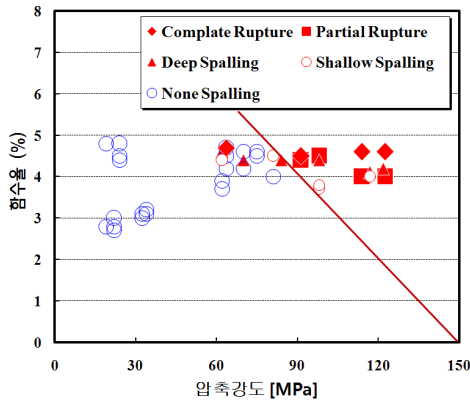
시험체 구분		측정결과		
F <sub>ck</sub> (MPa)	No.	측정기간 (g)	함수율 측정결과 (%)	평균함수율 (%)
21	1-1(기중)	24日 후	2.79, 2.69, 2.96	2.811
	1-2(봉함)		4.45, 4.81, 4.43	4.565
	1-3(고온)		3.23, 3.09, 3.03	3.115
50	2-1(기중)	84日 후	3.86, 4.01, 3.74	3.868
	2-2(봉함)		4.63, 4.62, 4.71	4.654
	2-3(고온)		4.48, 4.33, 4.51	4.440
80	3-1(기중)	84日 후	4.06, 3.98, 4.21	4.084
	3-2(봉함)		4.48, 4.41, 4.53	4.476
	3-3(고온)		4.48, 4.41, 4.29	4.394
100	4-1(기중)	84日 후	3.94, 3.85, 4.02	3.937
	4-2(봉함)		4.57, 4.62, 4.50	4.562
	4-3(고온)		4.06, 4.20, 4.47	4.240

### 3.2 가열시간에 따른 폭렬특성(15분, 30분)

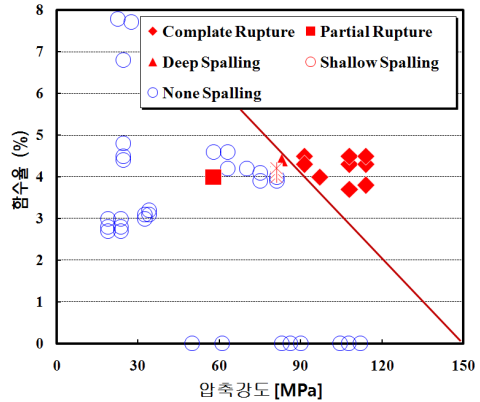
가열시간에 따른 폭렬발생특성은 그림3과 표4에 나타난 바와 같다. 설계강도 21 MPa의 NSC는 가열시간과 양생방법과 관계없이 폭렬이 발생하지 않았다. 그러나 50 MPa의 HSC는 압축강도와 양생조건 및 함수율에 따라서 폭렬발생의 차이가 발생하였다.

특히, 80 MPa의 경우, 함수율이 비교적 높은 봉함양생에서 가열시간에 관계없이 폭렬현상이 발생하였으며, 함수율이 낮은 기중양생 및 고온양생의 경우 30분 가열조건에서 비교적 경미한 폭렬현상이 발생하였다. 또한, 100 MPa이상의 경우 양생조건에 관계없이 심각한 폭렬이 발생하였으며, 30분 가열조건에서는 시험체가 완전 붕괴되는 현상이 발생하였다. 반면, 84일간 건조함으로서 함수율이 0%인 시험체에서는 폭렬이 발생하지 않았다.

이러한 실험결과 압축강도, 가열시간, 함수율이 높을수록 초기폭렬발생 및 폭렬현상이 증대되는 경향이 나타났다.



a. 15분 가열시 폭렬특성



b. 30분 가열시 폭렬특성

그림 3. 가열시간에 따른 폭렬특성

표 4. 압축강도 및 가열시간에 따른 폭렬성상

설계강도 &양생조건	가열시간		설계강도 &양생조건	가열시간	
	15분	30분		15분	30분
21 MPa	붕합		붕합		
	기중		기중		
	고온		고온		
50 MPa	붕합		붕합		
	기중		기중		
	고온		고온		
80 MPa	붕합		붕합		
	기중		기중		
	고온		고온		
100 MPa	붕합		붕합		
	기중		기중		
	고온		고온		

### 3.3 폭발성상에 미치는 압축강도 및 함수율의 영향

본 연구의 실험결과와 기존연구의 비교분석을 통하여 압축강도 및 함수율에 따른 폭발 발생영역을 도출하여 그림4에 나타내었다<sup>8)</sup>. 압축강도 50~100 MPa의 경우 함수율을 3%이하, 100 MPa이상의 경우에는 1%이하로 제어함으로서 폭발현상을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

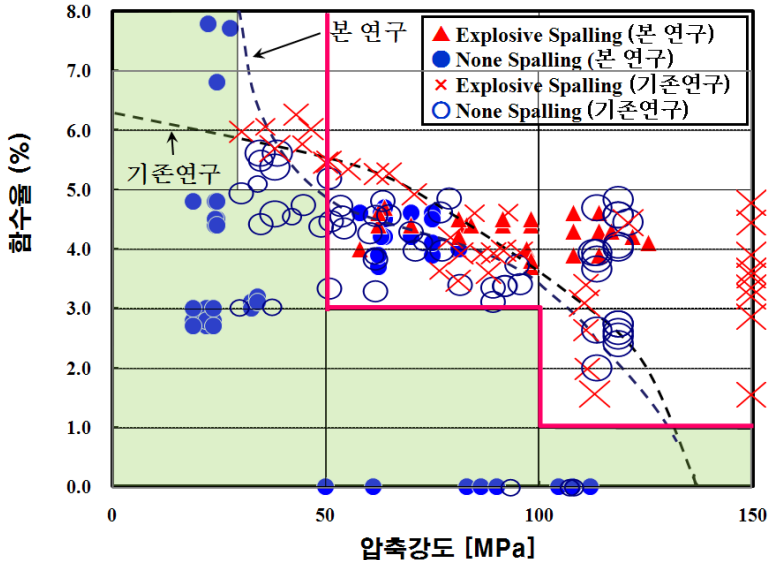


그림 4. 압축강도 & 함수율에 따른 폭발 발생영역

### 3.4 가열 후 잔존강도율의 측정결과

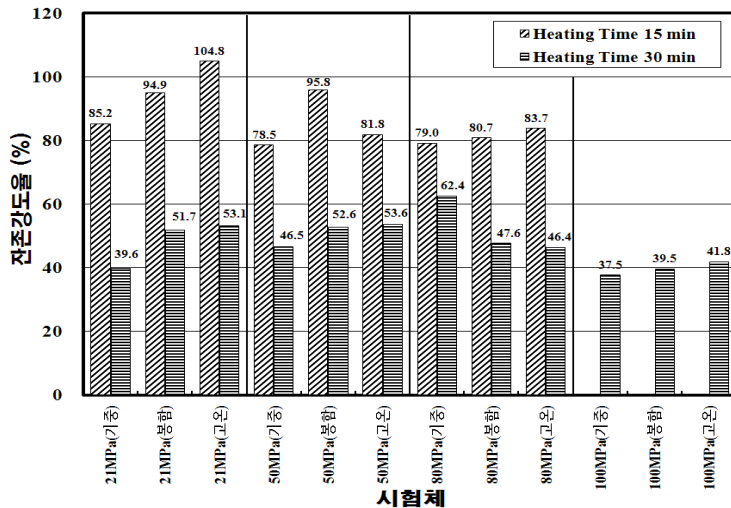


그림 5. 15분-30분 가열조건에 따른 잔존강도율(%)

가열전 압축강도 측정값과 대비하여 가열후의 잔존강도율을 그림5와 표5에 나타내었다. 15분가열후의 잔존강도율은 압축강도수준과 관계없이 약 80%이상의 높은 잔존강도율을 보였으나, 30분 가열후 잔존강도율은 21~50MPa의 경우 약 52%, 80 MPa의 경우 약 47%, 100 MPa의 경우 약 39%로 측정됨으로서, 압축강도가 증가함에 따라 잔존강도의 저하가 보다 증대되는 경향을 보였다.

표 5. 가열 전·후 압축강도 측정데이터

$f_{ck}$ (MPa)	가열전 압축강도 (MPa)	가열 15분후 압축강도 (MPa)	가열 30분후 압축강도 (MPa)
21(MPa)	22.5	18	15.2
	27.5	23	15.9
	24.5	32	16.6
50(MPa)	61.1	44	29.0
	50.0	57	31.5
	66.7	59	31.5
80(MPa)	98.9	61	36.3
	83.0	72	39.5
	86.2	79	37.4
100(MPa)	111.9	-	40.5
	104.4	-	42.0
	107.7	-	45.0

한편, 15분과 30분의 가열시간에 따른 폭렬발생 유·무의 차이는 크지 않았으나, 잔존강도 저하율은 15분가열조건과 비교하여, 30분가열한 경우가 약 30%이상 크게 저하하는 것으로 나타났다. 이러한 경향은 그림6에 나타낸 것과 같이 균열진전 및 균열분포와의 관련성을 보임으로, 향후 공극조직 등에 대하여 면밀한 검토가 필요할 것으로 사료된다.

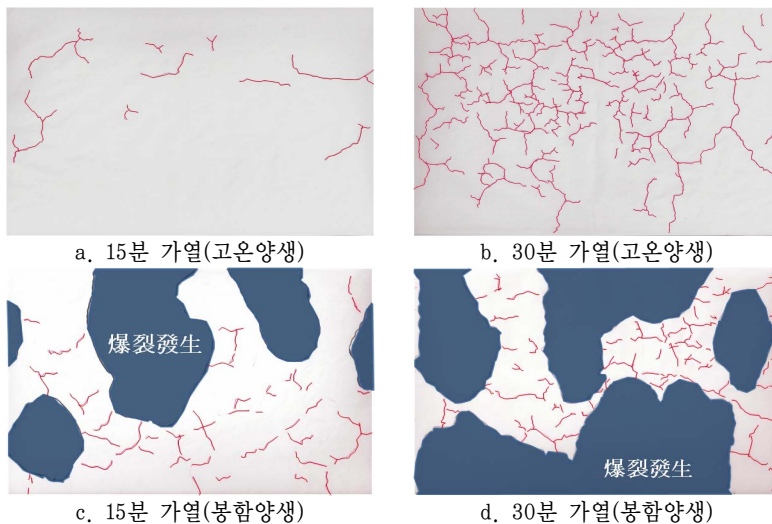


그림 6. 가열시간에 따른 폭렬 및 균열특성의 일례(80MPa)

#### 4. 결론

콘크리트의 폭발성상에 미치는 압축강도 및 함수율을 검토한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 압축강도·가열시간·함수율이 증가할수록 폭발발생 및 폭발현상이 증대되는 경향이 나타났으며, 압축강도 및 함수율에 따른 폭발발생영역은 압축강도 50~100 MPa의 경우 함수율 3%이하, 100 MPa이상의 경우는 1%이하로 제어할 경우 폭발현상이 발생하지 않을 것으로 판단된다.

2. 15분 가열후의 잔존강도율은 약 80%이상의 높은 잔존강도율을 나타냈다. 반면, 30분 가열후의 잔존강도율은 15분가열후 보다 약 30%정도 낮게 측정되었다. 이러한 경향은 고강도화 될수록 증대되는 경향을 보였으며, 향후강도에 따른 열특성 및 공극구조 등의 관한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

#### 감사의 글

본 연구는 2008년 한국과학재단 특정기초연구과제 R0120080002052702008 지원에 의하여 수행하였으며, 관계자에게 감사를 드립니다.

#### 참고문헌

1. 권영진, “내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시설의 화재안전성”, 콘크리트학회지, Vol.17, No.5, 2005. 9, pp.8-13
2. 권영진, “국내 초고층 주거시설의 화재안전상의 과제”, 한국초고층건축포럼, 2007.04.10
3. 권영진 외, “고성능 콘크리트의 폭발 현상”, 콘크리트학회지 특집기사, Vol.17, No.3, 2005. 5, pp.19-44.
4. 권영진, 이재영, “고강도콘크리트의 폭발메커니즘과 성능적 구조내화설계(PBD)의 동향”, 국립방재연구원 방재연구지, 2008.06, pp.43-55
5. 李在永, “鐵筋콘크리트 構造物의 爆裂現狀을 고려한 構造耐火 性能設計를 위한 研究”, 湖西大學校, 碩士學位論文, 2009.02
6. 韓國 技術標準院 告示 第99-401號, “建築 構造 部材의 耐火試驗方法” - 一般要求事項 KS F 2257-1(1999)
7. ASTM C 215-91, “Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens”
8. 原田和典, “性能設計(PBD)&高強度콘크리트의 爆裂메커니즘에 관한 研究”, 湖西大學校 세미나, 2008.05.17