

압축강도 및 함수율이 콘크리트의 폭발에 미치는 영향 The Influence of Compressive Strength and Moisture Contents on Explosive Spalling of Concrete

김동준[†] · 한병찬* · 이재영** · 原田和典** · 권영진

Dong-Joon Kim[†] · Byung-Chan Han* · Jae-Young Lee** ·
Kazunori Harada*** · Young-Jin Kwon****

호서대 소방방재학과, *(주)AMS 기술연구소, **교토대 건축학과
(2010. 11. 26. 접수/2011. 2. 11. 채택)

요 약

화재와 같은 고온 환경에서 고강도화 된 콘크리트는 폭발(Explosive Spalling)이 발생할 가능성이 있으며, 이러한 폭발의 원인으로는 콘크리트 내부의 수증기압이 가장 큰 원인으로 제기되고 있다. 본 논문은 콘크리트의 압축강도 및 함수율이 초기 폭발특성에 미치는 영향을 실험적으로 규명하는 것을 목적으로 하였다. 실험변수는 양생방법, 압축강도, 함수율로 설정하였으며, KS F 2257 화재온도이력곡선을 15분, 30분 적용하여 콘크리트의 초기 폭발특성을 실험적으로 검토하였다. 그 결과 압축강도 · 함수율이 증가할수록 폭발발생이 증대되는 경향이 나타났으며, 초기 15분 이내에서 대부분의 폭발이 발생하는 것으로 나타났다. 또한 압축강도 및 함수율에 따른 폭발발생영역을 분석하였으며, 압축강도 50~100MPa의 경우 함수율 3% 이하, 100MPa 이상의 경우는 1% 이하로 제어할 경우 폭발현상이 발생하지 않을 것으로 판단되었다. 공극구조에 대한 분석 결과 고강도화 될수록 공극이 세공화됨으로써 탈수현상이 지연되었으며, 이러한 원인으로 인한 수분의 위상변화에 따른 폭발압 증가는 고강도콘크리트의 심각한 폭발에 대한 원인중 하나가 될 것으로 판단되었다.

ABSTRACT

In the high temperature situation like in a fire, the high strength of concrete (HSC) has extreme danger named explosive spalling. It is assumed that the major cause of explosive spalling is water vapour pressure inside concrete. This paper examines the effect of the compressive strength and the moisture content on the initial occurrence of explosive spalling. For the effective experiment of the initial explosive spalling, the curve of ISO834 temperature profile is applied on the basis of 15 minute and 30 minute. As a result, the more increase the compressive strength and the moisture content, the more increase the occurrence and phenomenon of explosive spalling. This paper analyzes the territory of explosive spalling depending the compressive strength and the moisture content. The explosive spalling is not examined in the case of the compressive strength 50~100 MPa and the moisture content below 3% and the compressive strength over 100 MPa and the moisture content below 1%. Also, due to the HSC, which makes it more difficult to transport vapour and moisture, very high vapour-pressure may occur close to the surface, there is a greater risk that HSC spalls compared with normal strength concrete (NSC).

Key words : Explosive spalling, High strength concrete, Cumulative pore volume, Fire, Moisture content

[†]E-mail: capwns@naver.com

1. 서 론

콘크리트는 대표적인 무기질계 건설재료로서 우수한 내화성을 발현한다. 즉 21MPa급 보통강도콘크리트(Normal strength concrete, 이하 NSC)의 경우 슬래브(피복두께 20mm 이상)는 2시간, 기둥 및 보(피복두께 40mm 이상)는 3시간 내화시간을 인정받고 있다.¹⁾ 한편 콘크리트의 최신기술은 건축물의 초고층화 추세와 함께, 압축강도 50MPa급 이상의 고강도콘크리트(High Strength Concrete, 이하 HSC)에 대한 개발 및 적용이 빠르게 진행되고 있다.²⁾ 그러나 HSC의 경우에는 NSC와 다르게, 화재 등과 같은 고온 환경에서 심각한 폭발(Explosive spalling)이 발생하는 것으로 알려져 있으며, 이러한 심각한 폭발은 콘크리트 파편의 비산뿐만 아니라 부재단면 감소로 인한 구조내력의 감소, 철근 노출로 인한 부재의 내력 성능 저하를 일으켜 구조물의 안전에 큰 위험을 일으킬 수 있다.^{3,4)}

지금까지 콘크리트가 내화재료로 인식되었기 때문에 목재 및 강재와 같은 비내화 구조재료에 비하여 상대적으로 연구가 많이 진행되지는 않았지만, 고온을 받는 콘크리트의 열적특성과, 압축강도, 탄성계수 및 인장강도 등과 같은 재료적인 특성에 관한 연구는 1940년대부터 시작되었으며, 대부분의 연구방향은 고온 환경이 철근콘크리트 부재의 구조성능에 끼치는 영향에 관한 것 이었다.⁴⁾ 또한 이러한 연구결과는 유럽 CEB 내화설계기준¹⁾ 및 각종 규준 제정의 기초자료로 활용되기도 하였다. 그러나 대부분의 기존 연구 및 내화설계기준은 NSC의 제한적인 내화실험결과를 근거로 하고 있으며, 콘크리트에 대한 최신 연구 또한 HSC의 폭발의 발생 여부 파악에 그치고 있다. 한편 HSC의 폭발 원인 및 메커니즘에 대한 최신 연구결과는 그 원인으로 수증기압설, 열응력설, 수증기압-열응력 복합설 등이 제시되고는 있지만, 아직까지 가설에 그치고 있으며 그 메커니즘에 대한 정량적인 연구결과는 제시되고 있지 않은 실정이다.^{5-7,11)}

HSC는 낮은 물시멘트비, 고강도, 재료의 고밀도화, 낮은 투수성 등에서 NSC와 차이를 보이기 때문에, HSC의 심각한 폭발은 강도와 함수율이 가장 큰 요인 중 하나일 것으로 판단된다. 따라서 본 연구는 화재와 같은 고온환경에서 콘크리트의 압축강도 및 함수율이 초기 폭발특성에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위하여 물시멘트비 및 양생조건을 임의 조정하여 구현된 콘크리트의 압축강도와 내부의 함수율을 주요 변수로 하여 초기 폭발특성을 실험적으로 규명하였으며, 또한 이러한 폭발특성이 재료 강도에 미치는 영향을 분석함으로써, 심각한 폭발의 메커니즘 분석 및 기존 내화설계기준의 개정을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

2. 실 험

2.1 실험계획 및 방법

콘크리트의 압축강도 및 함수율이 폭발에 미치는 영향을 검토하기 위한 실험계획은 Table 1과 같다. 시험체 크기는 콘크리트의 품질관리 기준이 되는 $\phi 100 \times 200\text{mm}$ 로 하였으며, 각 변수별 3개씩 총 144개를 제작하였다. 실험변수는 콘크리트 압축강도와 함수율로, 압축강도의 경우 21, 50, 80, 100MPa의 4종류로 하였으며, 함수율에 따른 조건은 양생조건을 기중양생, 봉합양생, 고온양생, 건조양생의 4종류로 설정하여 함수율의 변화를 주었다. 또한 동일조건에서 충분한 건조를 통해 함수율을 0%의 시험체도 제작하였다. 양생방법 중 기중양생(ACC)은 콘크리트 타설 이후 공기중(온도 $20 \pm 3^\circ\text{C}$, 습도 RH 60%)에서 실험시까지, 봉합양생(SCC)은 콘크리트 타설 이후 표면을 실링처리 하였으며, 고온양생(WCC)은 타설 이후 수중 고온양생(온도 $65 \pm 5^\circ\text{C}$)을, 건조양생(DCC)은 28일 표준양생 이후 고온($105 \pm 5^\circ\text{C}$) 건조기에서 실험시까지 실시하였다. 시험체 전경 및 각각의 양생조건을 Figure 1에 나타냈다.

Table 1. Details of Experiment

f_{ck} MPa	Curing Conditions	Heating Condition (ISO834)	Fresh State	Hardened State (28 days)	After Heating
21	- ACC				
50	- SCC	- 15 min.	- Air Content	- f_{ck}	- $f_{ck, n}$
80	- WCC	- 30 min.	- Slump Flow	- Moisture content	- Explosive spalling
100	- DCC				

Note: ACC = Air curing condition, SCC = Sealed curing condition, WCC = Water curing condition (65°C), DCC = Drying curing condition (100°C), f_{ck} = Compressive strength of concrete, $f_{ck, n}$ = Residual compressive strength of concrete.

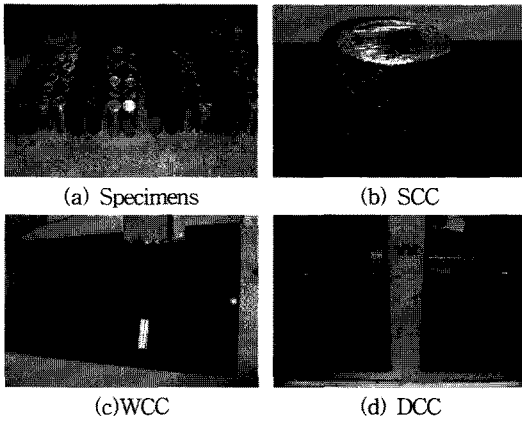


Figure 1. Detains of specimens and curing condition.

실험은 Figure 2와 같이 방재시험연구원에 소재한 가열로를 이용하였으며, 화재하중은 건축물 표준 내화시험 방법인 KS F 2257-1⁸⁾에 준하여 15분, 30분을 도입하였다. 가열 실험 이후 폭발성상, 균열특성, 그리고 잔존압축강도를 측정·평가하였다. 콘크리트의 세공구조 측정은 수은 압입법에 의해 포로시메타를 이용하여 측정하였다. 상온시험체 및 가열시험체는 상온으로 냉각·밀봉하여 2주간 건조한 후 측정하였다.

2.2 사용재료 및 배합

사용재료의 특성은 Table 3~5와 같고, 콘크리트의 배합은 Table 2와 같다. HSC의 심각한 폭발의 한 원인으로 보고되고 있는 실리카 흙(Silica fume) 및 기타

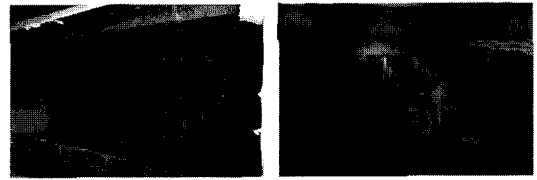


Figure 2. Test equipments (heating furnace).

혼화재(Fly ash 등)의 경우⁴⁾에는 실제 HSC에 사용되는 적정 비율을 모든 시험체에 동일하게 적용함으로써 그 영향 요인을 제거하였다. 시멘트는 보통포틀랜드 시멘트(OPC)를, 잔골재는 천연사, 굵은골재는 최대크기 15mm 이하의 쇄석을 이용했으며, 혼화재의 경우에는 플라이애쉬 4000급, 실리카흙 200,000급을 이용하였다. 또한 유동성을 확보하기 위하여 폴리카르본산계(Polycarboxylate) 고성능감수제(AE)를 사용하였다. 콘크리트의 혼합은 강제식 믹서를 사용하였으며, 시멘트와 잔골재를 투입하여 선 혼합한 후, 물과 혼화재, 굵은 골재의 순서로 투입하여 각각 90초간 혼합하였다. 실험 중 슬럼프 플로우는 21MPa급 콘크리트의 경우 120mm로 나타났으며, 50MPa 이상급에서는 500mm 이상의 고유동성을 나타냈다. 모든 시험체는 양생 증재령 28일에 KS F 2405 콘크리트의 압축강도 시험방법에 준하여 압축강도를 측정하였으며, Table 2에 나타났다. 배합별로 압축강도는 목표강도에 도달하였으며, 기건양생(ACC) < 봉합양생(SCC) < 고온수중양생(WCC) 순으로 높게 나타났다. 이는 초기 양생에서 수분 이탈을 막아 충분한 수화반응이 이루어졌기 때문으로 분석되었다. 특히 수중 고온양생(WCC)의 경우 배합강도를

Table 2. Concrete Mix Proportion

f _{ck} (MPa)	W/B (%)	Air	FA/B (wt.)	SF/B (wt.)	Unit weight (kg/m ³)						Slump Flow (mm)	f _{ck,28} (MPa)		
					Water	Cement	FA	SF	Sand	Gravel		ACC	SCC	WCC
21	60	4	0.10	0.03	168	244	28	8	750	1,014	120	21.5	23.8	30.1
50	35	4	0.15	0.05	163	373	70	23	740	818	540	56.3	58.9	72.5
80	25	4	0.15	0.10	160	480	96	64	640	707	565	77.7	89.2	94.9
100	15	4	0.15	0.10	160	800	160	107	416	459	530	106.5	106.8	121.4

Note: f_{ck} = Compressive strength of concrete, f_{ck,28} = Average compressive strength of concrete in 28 days, W/B = Water/binder ratio, FA = Fly ash, SF: Silica fume.

Table 3. Chemical Properties of Cement

구분	밀도 [g/cm ³]	분말도 [l/g]	용결시간		안정도 (%)	압축강도 [f/cm ²]			화학성분(%)				
			초결	종결		3일	7일	28일	K ₂ O	Na ₂ O	MgO	SO ₃	강열감량
시멘트	3.15	5,585	4:20	6:35	0.14	211	282	387	0.3	1.0	4.0	2.2	2.0

Table 4. Chemical Properties of Silica Fume

밀도[g/cm ³]	분말도[cm ² /g]	SiO ₂ [%]	Al ₂ O ₃ [%]	Fe ₂ O ₃ [%]	MgO[%]	CaO[%]	SO ₃ [%]
2.2	200,000	90	1.5	3.0	2.0	0.7	0.2

Table 5. Physical Properties of Aggregate

구분		최대입경 [mm]	조립율 [F.M]	밀도 [g/]	흡수율 [%]	0.08[mm] 체통과량	실적률 [%]	단위중적 질량 [kg/l]
잔골재	세척사(50[%])	5	2.5	2.60	0.60	0.40	-	1.577
굵은 골재	부순 자갈	20	7.05	2.64	0.86	0.75	59.6	1.549

Table 6. Test Results of Moisture Contents

Specimens		Test results		
f _{ck} (MPa)	No.	Days	Moisture contest (%)	Averg. (%)
21	1-1(ACC)	84	2.79, 2.69, 2.96	2.811
	1-2(SCC)		4.45, 4.81, 4.43	4.565
	1-3(WCC)		3.23, 3.09, 3.03	3.115
50	2-1(ACC)	84	3.86, 4.01, 3.74	3.868
	2-2(SCC)		4.63, 4.62, 4.71	4.654
	2-3(WCC)		4.48, 4.33, 4.51	4.440
80	3-1(ACC)	84	4.06, 3.98, 4.21	4.084
	3-2(SCC)		4.48, 4.41, 4.53	4.476
	3-3(WCC)		4.48, 4.41, 4.29	4.394
100	4-1(ACC)	84	3.94, 3.85, 4.02	3.937
	4-2(SCC)		4.57, 4.62, 4.50	4.562
	4-3(WCC)		4.06, 4.20, 4.47	4.240

20% 이상 상회하였다.

2.3 함수율 측정결과

함수율 측정은 양생 28일 이후, 시험체를 100 ± 5°C의 건조기에 넣어 중량변화가 없을때까지 충분히 건조한 이후(약 84일), 이를 기준으로 측정된 중량감소량을 이용하여 측정하였으며 측정결과는 Table 6과 같다. 표로부터 양생조건에 따른 함수율의 추이는 봉합양생, 고온양생, 기중양생의 순으로 높게 나타남을 알 수 있다. 특히 실제 콘크리트 구조물의 건조조건과 유사한 기중양생(ACC)의 경우, 21MPa급의 NSC는 2.811% 정도인데 반하여 50MPa 이상의 HSC는 3.868~4.084%로 높게 나타나고 있으며, 이는 HSC의 유동성 개선을 위해 첨가한 고성능감수제에 의해 발생한 공극내 존재하는 수분이, 밀실한 표면 조직구조의 영향으로 밖으로 이동하지 못했기 때문으로 분석되었다.

3. 가열 실험 결과 및 고찰

3.1 전반적인 폭렬특성

KS F 2257 표준가열곡선에 따른 콘크리트의 초기 15분 및 30분 경과 시 폭렬 발생과 균열 특성을 Table 6에 정리하였다. 압축강도가 21MPa급의 NSC 시험체는 가열시간, 양생방법 및 함수율에 관계없이 폭렬이 발생하지 않았다. 그러나 50MPa급 이상의 HSC는 심각한 폭렬이 발생하였으며, 그 추이는 압축강도와 양생조건 및 함수율에 따라서 다르게 나타났다. 특히 80MPa급의 HSC 경우, 함수율이 비교적 높은 봉합양생(SCC)에서 가열시간에 관계없이 폭렬현상이 발생하였으며, 함수율이 낮은 기중양생 및 고온양생의 경우 30분 가열조건에서 비교적 경미한 폭렬현상이 발생하였다. 또한 100MPa 이상 HSC 시험체의 경우에는 양생조건 및 함수율에 관계없이 심각한 폭렬이 발생하였으며, 시험체가 완전 붕괴되는 현상도 발생하였다. 가열시간 15분 및 30분이 폭렬에 미치는 영향을 유의성을 찾아볼 수 없었다. 다만 100MPa 이상급 HSC의 경우에는 가열시간 15분 보다 30분에서 완전붕괴 경향이 큰 것을 알 수 있었다. 반면 84일간 건조함으로써 함수율이 0%에 가까운 시험체에서는 모든 압축강도 조건에서 폭렬이 발생하지 않았다. 이러한 실험결과 3% 이상의 함수율을 갖는 HSC의 폭렬은 대부분 가열초기 15분 이내에서 발생하여 확산되고, 30분에 완전 붕괴까지도 도달할 수 있으며, 압축강도가 증가할수록, 함수율이 증가할수록 그 크기 및 세기가 커진다는 사실을 알 수 있었다.

3.2 압축강도 및 함수율에 따른 폭렬특성

압축강도 및 함수율이 콘크리트의 심각한 폭렬에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 실험종료후 시험체의 폭렬 등급을 5단계로 구분하였다. 즉 폭렬이 없는 등급(None), 심각하지 않은 폭렬(Shallow spalling, SS), 심

Table 7. Explosive Spalling Test Results of Specimens

Heating Time (min.)		21 MPa Grade				50 MPa Grade			
		ACC	SCC	WCC	DCC	ACC	SCC	WCC	DCC
15	Photo								
	Spalling*	None	None	None	None	PR+CR	None	SS	None
	Crack**	I	I	I	I	I	III	II	
30	Photo								
	Spalling	None	None	None	None	SS	SS+CR	SS	None
	Crack	I	I	I	I	I	II	I	I
Heating Time (min.)		80 MPa Grade				100 MPa Grade			
		ACC	SCC	WCC	DCC	ACC	SCC	WCC	DCC
15	Photo								
	Spalling	DS+CR	DS	DS	None	PR+CR	DS+CR	DS	None
	Crack	I	IV	II		II	IV	III	
30	Photo								
	Spalling	PR+CR	PR	DS+PR	None	CR	CR	PR	None
	Crack	IV	IV	IV	I	IV	IV	III	I

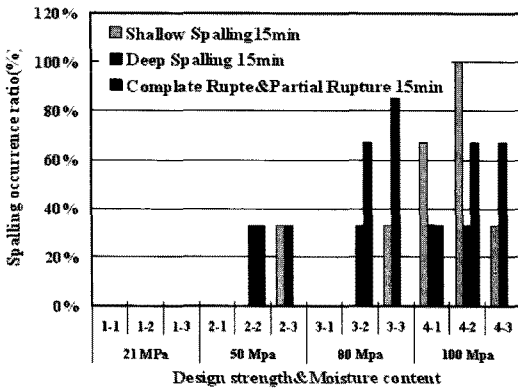
Note: *None = none spalling, SS = shallow spalling (depth < 10 mm), DS = deep spalling (depth > 10 mm), PR = partial rupture, CR = complete rupture).

**Number of crack (I = none, II = less than 5, III = 6-10, IV = 11-20, V = 21 or more).

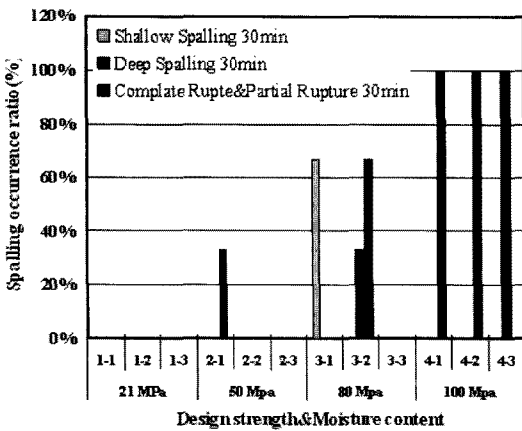
각한 폭렬(Deep spalling, DS), 부분 붕괴(Partial rupture, PR), 완전붕괴(Complete rupture, CR)로 구분하였으며, Figure 3에 가열시간 15분 및 30분에 함수율과 압축강도의 관계를 나타냈다. Table 7에서 21MPa급 NSC의 경우는 양생조건에 관계없이 폭렬이 발생하지 않았다. 50-80MPa급 HSC의 경우는 폭렬이 발생하는 경우와 발생하지 않는 경우가 혼재함을 알 수 있었으며, 양생 조건에 따른 함수율과의 관련성도 찾을 수 없었다. 이러한 원인은 콘크리트 재료가 혼합물로서 균질하지 않으며, 다양한 미세공극 및 균열을 가지고 있기 때문에, 폭렬 시작 시점에서의 초기결함(Initial imperfection) 요인이 더욱 중요한 요인이라 판단할 수 있다. 그러므로 50-80MPa급의 콘크리트를 실제 구조물에 적용하는 경

우 폭렬이 발생한다고 가정하는 것이 타당할 것으로 판단된다. 100MPa 이상급 HSC의 경우에는 모든 시험체에서 심각한 폭렬이 발생하였으며, 더욱이 콘크리트의 일부 또는 전부가 폭렬에 의해 비산, 붕괴하는 현상도 나타났다.

가열시간에 의한 요인을 분석해 보면, 50-80MPa급 HSC의 경우 가열시간 15분과 30분에서 특이한 차이점을 찾을 수 없었다. 이는 가열시간 15분에서 대부분의 폭렬이 발생한 이후 30분까지는 지속적인 폭렬의 증가는 크게 발생하지 않는다는 사실을 의미한다. 그러므로 콘크리트의 폭렬제어에 있어서는 초기 온도 상승영역에서의 폭렬제어가 보다 효과적인 방법에 될 수 있을 것으로 판단되었다. 다만 100MPa급 이상 HSC 시

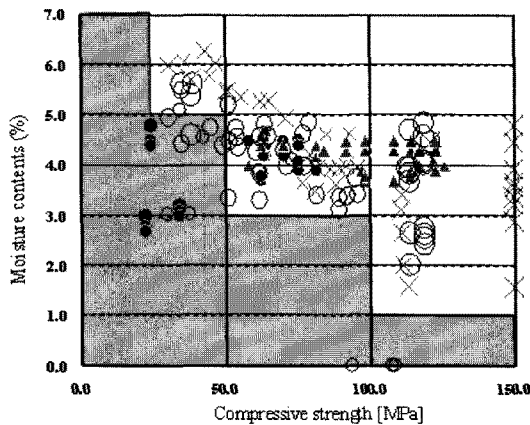


(a) Heating time(15 min.)



(b) Heating time(30 min.)

Figure 3. Test results of specimens.



▲ Explosive spalling (in paper), ● None spalling (in paper), × Explosive spalling (Ref. 9), ○ None spalling (Ref.9)

Figure 4. Explosive spalling characteristics of specimens by compressive strength vs. moisture contents.

험체의 경우에는 15분 이후에도 폭렬이 증가하여 완전 붕괴되는 경향도 나타났기 때문에, 폭렬제어에 보다 주의가 필요하다고 판단되었다.

콘크리트 강도별 함수율에 따른 폭렬 발생 영역을 도출하기 위하여, 본 연구의 실험결과와 기존연구⁹⁾를 정리하여 Figure 4에 나타냈다. 그림으로부터 함수율에 따른 폭렬 성상을 살펴보면, 압축강도 50~100MPa급 HSC의 경우에는 함수율 3% 이하, 100MPa 이상급 HSC의 경우에는 함수율 1% 이하인 경우 폭렬현상이 발생하지 않는 것을 알 수 있다. 그러므로 콘크리트를 이상과 같은 함수율로 제어할 수 있다면, 심각한 폭렬현상을 억제할 수 있을 것으로 판단된다.

3.3 가열 후 잔존강도를 분석

고온을 경험한 콘크리트의 가열이후 잔존강도는 재사용 및 보수·보강을 위한 중요한 요소가 된다. 가열이후의 잔존강도율을 Table 8 및 Figure 5에 나타냈다. 잔존강도율은 $f_{ck, fr(min)}/f_{ck, 28} \times 100$ 으로 하였으며, 여기서 $f_{ck, 28}$ 은 가열전 측정된 공칭압축강도(Nominal compressive strength)를, $f_{ck, fr(min)}$ 은 가열 이후 시험체의 공칭압축강도를 나타낸다.

표 및 그림에서 측정되지 않은 시험체는 실험 종료시 심각한 폭렬이 발생하였거나, 부분/완전 붕괴되어 측정이 불가능한 시험체이다. 화재초기 특성을 보기 위해 15분 가열 시의 실험결과와 폭렬이 발생하지 않은 경우, 압축강도 수준에 관계없이 약 85% 이상의 높은 잔존강도율을 보였다. 폭렬이 발생한 50MPa급 이상 HSC 시험체의 경우에도 단면감소에 따른 잔존강도율

Table 8. Average Compressive Strength of Concrete Specimens

f_{ck} (MPa)	$f_{ck, 28}$ (MPa)	$f_{ck, fr15}$ (MPa)	$f_{ck, fr30}$ (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

Note: $f_{ck, fr15}$, $f_{ck, fr30}$: Residual compressive strength of specimens after heating time 15 min. and 30 min.

저하를 보였으나, 80% 이상의 강도잔존율을 보였다. 그러나 30분 가열 후의 잔존강도율은 21~50MPa의 경우 약 52%, 80MPa의 경우 약 47%, 100MPa의 경우 약 39%로 측정됨으로서, 압축강도가 증가함에 따라 잔존강도의 저하가 보다 증대되는 경향을 보였다. 또한 15분과 30분의 가열시간에 따른 폭발발생 유·무의 차이는 크지 않았으나, 잔존강도 저하율은 15분가열조건과 비교하여, 30분 가열한 경우가 약 30% 이상 크게 저하하는 것으로 나타났다.

이러한 화재초기 폭발의 경향은 Figure 6에 나타낸

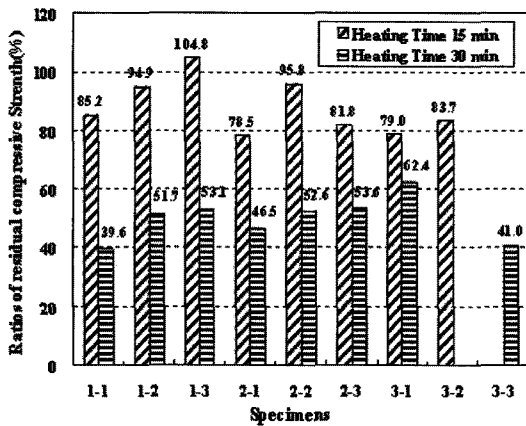


Figure 5. Ratios of residual compressive strength of specimens.

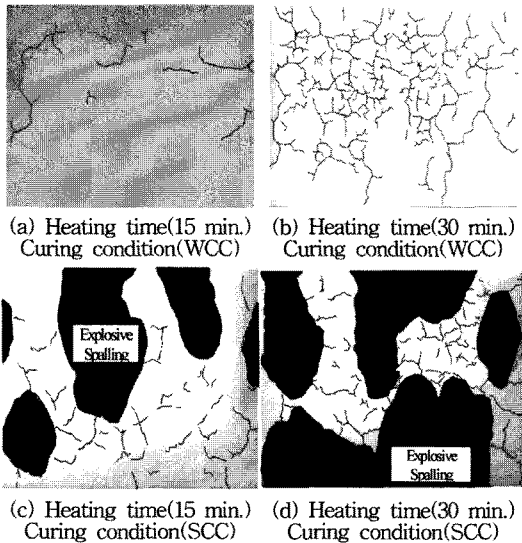
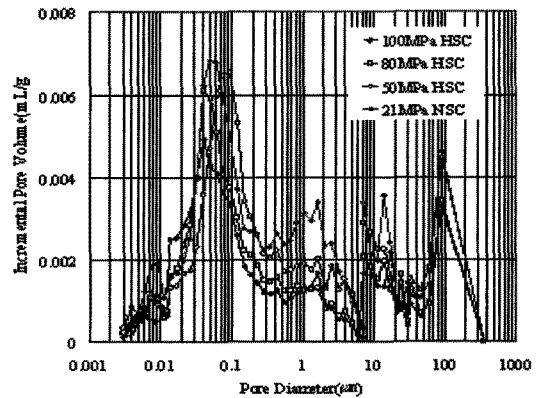


Figure 6. Crack and spalling distribution of specimens (In case of 80 MPa grade HSC).

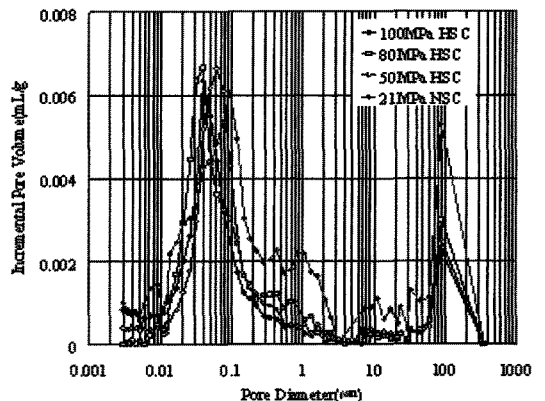
바와 같이 가열시간에 따른 수열온도가 증가와 함께 균열 수 및 분포가 빠르게 증가했기 때문에 판단된다.

3.4 공극구조 분석

콘크리트는 시멘트 수화물과 흡착수, 수화물을 구성하는 세공내에 존재하는 모세관수, 겔수, 잉여수로 구성되는 다공체인 동시에 초기 미세균열이 존재하기 때문에 고온 상태에서 수분의 이동이나, 이와 관련된 공극구조는 폭발에 영향을 미칠 수 있다.¹⁰⁾ 그러므로 본 연구에서는 콘크리트 내부의 세공구조를 포로시메타를 이용해 측정하였으며, 기건양생한 콘크리트의 강도별 세공구조측정결과를 Figure 7에 나타냈다. 그림으로부터 콘크리트 강도가 증가할수록 전공극률이 작았으며 0.05 μ m 이하의 공극이 증가하는 것을 알 수 있었다. 가열 이후의 공극구조를 살펴보면 0.1~0.5 μ m의 공극변화가 현저히 증가하였으며 이는 100~550°C에서의 물



(a) before heating (28 days)



(b) after heating(15min)

Figure 7. Incremental pore volume of specimens (in ACC curing condition).

의 탈수 및 C-S-H계 수화물 및 수산화칼슘(Ca(OH)₂)의 분해에 의한 것으로 판단되었다. 또한 10μm 이상의 공극도 증가하는 경향을 보였다. 그러나 50MPa급 이상의 HSC 시험체의 경우에는 가열 이후에도 0.05μm 이하의 공극이 상당수 존재하고 있음을 알 수 있다. 이러한 원인은 고강도화 될수록 공극이 세공화되고, 조적이 밀실하기 때문에 고온에 의한 콘크리트내의 수분 이동 및 탈수현상이 지연되었기 때문으로 분석되었다. 이러한 원인으로 HSC는 수분의 위상변화에 따른 폭렬압이 NSC에 비해 상대적으로 크게 증가하게 되며, 증가된 폭렬압이 심각한 폭렬 발생의 원인 중 하나로 판단되었다.

4. 결 론

물시멘트비 및 양생조건을 임의 조정하여 콘크리트의 압축강도와 내부의 함수율을 주요 변수로 살펴본 초기 폭렬특성 실험연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 콘크리트 압축강도가 21MPa 급의 보통강도 콘크리트는 KS F 2257 화재하중에 대한 가열시간, 양생방법 및 함수율에 관계없이 초기 30분간 폭렬이 발생하지 않았다.
2. 콘크리트 압축강도가 50~80MPa급의 고강도콘크리트는 폭렬의 발생여부 및 정도에 있어 함수율이나 강도와의 상관성을 찾을 수 없었으며, 오히려, 콘크리트 재료가 가지고 있는 폭렬시작 시점에서의 결함(Initial imperfection) 요인이 더욱 중요한 변수가 된다고 판단되었다.
3. 압축강도가 100MPa급의 고강도콘크리트는 3% 이상의 함수율 상태에서 심각한 폭렬이 발생하였으며, 완전봉괴한 경우도 관찰되었다.
4. 압축강도 · 가열시간 · 함수율이 증가할수록 폭렬 발생 및 폭렬현상이 증대되는 경향이 나타났으며, 압축강도 및 함수율에 따른 폭렬발생영역은 압축강도 50~100MPa의 경우 함수율 3% 이하, 100MPa 이상의 경우는 1% 이하로 제어할 경우 폭렬현상이 발생하지 않을 것으로 판단된다.
5. 가열시간에 따른 폭렬 정도는 초기 15분 및 30분에서 유사하게 나타났으며, 이를 통해 콘크리트의 폭렬은 초기 15분 이내에서 대부분 발생함을 알 수 있었다.
6. 화재초기 콘크리트의 잔존강도율은 15분시 약 80% 이상의 높은 잔존강도율을 나타냈다. 반면, 30분 가열 후의 잔존강도율은 15분 가열후 보다 약 30% 정도 낮게 측정되었으며, 이러한 경향은 고강도화 될수록 증대되는 경향을 보였다.

7. 공극구조에 대한 분석 결과 고강도화 될수록 공극이 세공화됨으로써 탈수현상이 지연되었으며, 이러한 원인으로 인한 수분의 위상변화에 따른 폭렬압 증가는 고강도콘크리트의 심각한 폭렬에 대한 원인중 하나가 될 것으로 판단되었다.

감사의 글

본 연구는 2010년 한국연구재단 특장기초연구과제 20100027581지원에 의하여 수행하였으며, 관계자에게 감사사를 드립니다.

참고문헌

1. EC2, 2002. Eurocode 2, "Design of Concrete Structures. ENV 1992, Part1-2: General Rules-structural Fire Design", European Committee for Standardization, Brussels.
2. 권영진, "내화재료 및 구조로서 콘크리트의 한계성능과 초고층 주거시설의 화재안전성", 콘크리트학회지, Vol.17, No.5, pp.8-13(2005).
3. 권영진, "국내 초고층 주거시설의 화재안전상의 과제", 한국초고층건축포럼(2007.04.10).
4. 권영진, 장재봉, 나철성, 김무한, "고성능 콘크리트의 폭렬 현상과 대책에 관한 연구 동향", 콘크리트학회지, Vol.17, No.3, pp.20-25(2005).
5. 한병찬, 윤현도, 김규용, "고온을 받은 고강도 콘크리트의 강도 특성", 한국콘크리트학회 논문집, Vol.14, No.5, pp.698-707(2005).
6. L.T. Phan, "Fire Performance fo High-Strength Concrete: A Report of the State-of-the-Art", US Department of Commerce(1996).
7. A.N. Noumowe, P. Clastres, G. Debicki, and J.L. Costaz, "Thermal Stresses and Water Vapor Pressure of High Performance Concrete at High Temperature", Proceedings, 4th International Symposium on Utilization of High-Strength/High-Performance Concrete, Paris, France(1996).
8. ASTM C 215-91, "Standard Test Method for Fundamental Transverse, Longitudinal, and Torsional Frequencies of Concrete Specimens".
9. 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).
10. 송훈, 문경주, 소양섭, "고온하의 시멘트 경화체의 물리적 특성 및 세공구조", 대한건축학회 논문집 구조계, Vol.20, No.1, pp.107-114(2004).
11. 한천구, 한민철, 김원기, 이주선, "고강도 콘크리트의 폭렬방지에 미치는 혼화재 및 PP 섬유영향", 대한건축학회 논문집(구조계), Vol.25 No.11(2009.11).