

고온에 노출된 실리카폼 혼입 고강도 콘크리트의 공극구조 변화

송 훈^{1)*} · 소양섭²⁾

¹⁾ 전북대학교 공업기술연구센터 ²⁾ 전북대학교 건축도시공학부

(2003년 12월 20일 원고접수, 2004년 8월 30일 심사완료)

Variation of Pore Structure of High Strength Concrete Including Silica Fume Exposed to High Temperature

Hun Song¹⁾ and Yang-Seob Soh²⁾

¹⁾ Research Center of Industrial Technology, Chonbuk National University, Chon-ju, Korea

²⁾ Faculty of Architecture & Urban Engineering, Chonbuk National University, Chon-ju, Korea

(Received December 20, 2003, Accepted August 30, 2004)

ABSTRACT

This work involves quantitatively investigating the correlation between reductions in strength and variations in pore structure under high temperature that can be utilized as estimation for predicting the inner temperature of member damaged by fire.

The experimental results were remarkably affected by micro-filling effect of silica fume and the different water-binder ratios. The increase of the exposure temperature caused the increase of porosity, which resulted from the reason that evaporable water in gel pore or capillary pores as well as chemically bound water was eliminated from hardened cement paste due to the dehydration of C-S-H and Ca(OH)₂. Thermal shrinkage of hardened cement paste gives rise to micro-crack, which cause the increase of porosity. Based on the experimental result that the increase of porosity is in charge of exposure temperature, how porosity is distributed can predict temperature-time history and assess the performance of concrete damaged by fire.

KeyWords : fire, high temperature, porosity, high strength concrete, silica fume

1. 서 론

건축물의 고층화 및 거대화 등을 배경으로 고강도 콘크리트에 대한 많은 연구가 진행되고 이루어져 설계기준강도 80 MPa급의 콘크리트를 사용한 건축물이 소개되고 있으며, 외국의 경우는 100 MPa급의 건축물도 점점 증가하고 있는 추세이다. 또한, 고강도 콘크리트의 제조기술도 실리카 폼을 사용한 경우의 문제점으로 지적되던 단위수량의 증가도 고성능 혼화제의 점용으로 해결되어 손쉬운 제조가 가능하여 고강도 콘크리트의 사용은 일반화되는 추세이다.

실리카폼은 오래전부터 북유럽이나 캐나다에서 시멘트와 콘크리트에 소량을 혼입하여 사용되었으며, 현재는 마이크로 필러 효과에 의한 고밀도 충전성과 실리카 성분에 의한 포졸란 반응성 등의 특성을 지닌 기능성 재료로서

고내구성과 고강도화에 대량으로 사용되고 있다. 실리카폼은 비표면적이 크고, 높은 포졸란 반응성을 지내고 있어 밀실한 시멘트 경화체를 형성하며 이러한 조직구조는 동결융해 저항성, 중성화 저항성, 강재의 부식저항성, 화학저항성 등이 우수하여 내구성 향상에도 기여한다^{1,7)}.

한편, 실리카폼 콘크리트는 고밀도 충전성에 의한 효과도 있는 반면, 화재에 의한 고열을 단시간에 받는 경우 콘크리트의 표층부가 비산하며 탈락하는 폭발이 발생하기 쉽다. 콘크리트의 내화성능에 영향을 미치는 폭발은 압축강도와 함수율이 높을수록 발생하기 쉬운 것이 일반적인 경향이지만, 실리카폼을 혼입한 경우는 저 함수율임에도 불구하고 폭발이 발생하여 실리카폼을 이용한 고강도화는 내화성능의 개선 및 시공상의 주의가 필요하다. 또한, 폭발이 발생하지 않더라도 장시간 화재에 의한 화열을 받는 경우, 콘크리트 내부의 시멘트 수화물의 탈수 및 열팽창 등으로 인한 미세균열이 발생한다. 이러한 미세균열은 강도를 저하시키며 내화성능의 손상을 유발하기 때문에 내화성능을 명확히 파악하기 위한 많은 연구가 진행되고 있

* Corresponding author

Tel : 063-270-4273 Fax : 063-270-2285

E-mail : songhun@chonbuk.ac.kr

는 실정이다^{2-6,9-11)}

본 연구는 실리카폼을 사용한 고강도 콘크리트의 가열에 의한 강도 감소와 공극구조와의 관련성에 관한 기초적 자료를 제공함과 동시에, 실리카폼을 이용한 고강도 콘크리트의 고온하의 공극특성을 미세공극 변화를 통하여 정량적으로 검토하고자 하였다. 또한, 고온하의 미세구조의 변화를 충분히 설명할 만한 연구결과가 거의 없는 것이 현 실정이므로 미세구조 변화와 고온 수열에 의한 성능저하를 설명할 수 있는 기초적 데이터를 제공하고자 하였다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험개요

본 실험은 실리카폼에 혼입에 따른 고강도 시멘트 경화체의 공극구조의 변화를 파악하기 위해 실리카폼을 혼입하지 않은 플레인 시험체(이하 PM 시험체)와 혼입한 시험체(이하 SFM 시험체)로 구분하여 비교하였다. 또한

Table 1 Physical properties of portland cement

Cement type	Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time(min)		Soundness
			Initial	Final	
Ordinary portland cement	3.16	3,350	145	220	good

Table 3 Properties of materials

Cement	C	Ordinary portland cement, Density : 3.16
Fine aggregate	F.A.	River sand, Density : 2.60
Coarse aggregate	C.A.	Crushed stone, Density : 2.65
Admixture	SF	Silica fume, Density : 2.2
Super plasticizer	S.P.	Polycarbonic acid

Table 2 Properties of silica fume

Density (g/cm ³)	Specific surface area (cm ² /g)	Particle size (μm)	Chemical composition (%)							pH (20℃)
			SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Al ₂ O ₃	CaO	MgO	K ₂ O	L.O.I	
2.2	200,000	0.15	94.8	1.06	0.66	0.19	0.61	0.73	1.00	5.9

Table 4 Mix proportions of concrete

Type of specimens	W/B (%)	Slump (cm)	Air content (%)	Water content (kg/m ³)	s/a (%)	S.P. (B×%)	Unit weight (kg/m ³)						
							Binder		F.A.	C.A.			
							C	SF					
PM	35	18±3	4±1	170	45	0.7	485.7	-	744.5	927.4			
	45					0.7	377.8	-	819.3	941.6			
	55					0.6	309.1	-	845.9	972.2			
SFM	35				18±3	4±1	170	45	0.9	437.1	48.6	736.6	917.7
	45								0.9	340.4	38.7	819.3	934.3
	55								0.8	278.2	30.9	845.9	966.2

각각의 가열온도에서 2시간 가열하여 가열온도에 따른 공극의 변화를 정량적으로 파악하였다.

2.2 사용재료

본 실험에 사용된 시멘트는 보통 포틀랜드 시멘트이며 물리적 성질은 Table 1과 같다. 혼화제는 실리카폼을 사용하였으며 물리적 성질 및 화학적 조성은 Table 2와 같다. 잔골재 및 굵은골재는 강모래와 경질사암의 쇄석을 사용하였다. 본 실험에 사용된 재료는 Table 3과 같다.

콘크리트의 배합은 Table 4와 같다. 배합의 단위수량은 170kg/m³이며 물-결합재비를 각각 35, 45, 55%로 변화하였다. 실리카폼은 시멘트 중량에 대해 내할로 10%를 사용하였다. 또한, 적절한 시공성을 유지하기 위해 폴리카본산계 고성능 AE감수제를 사용하였고 슬럼프의 목표치는 18±3cm로 하였다.

콘크리트의 혼합은 강제식 믹서를 이용하였으며 시멘트와 실리카폼과 잔골재를 투입하여 선 혼합한 후 물과 혼화제, 굵은골재의 순서로 투입하여 각각 90초간 혼합하였다. 혼합 후 공기량과 슬럼프를 측정하였고 굵은 골재의 영향 및 작업의 편의를 위해 5mm체를 이용하여 굵은골재를 제거하였다. 시험체는 굵은골재를 제거한 시멘트 모르터를 이용하여 제작하였고 20±2℃의 양생실에서 28일간 밀봉하여 양생하였다.

2.3 시험체의 가열 및 시험방법

상온 및 고온하의 압축강도의 측정은 모르터 시험체를 이용하여 측정하였다. 시험체는 전기로에서 가열속도 약 13℃/min으로 가열 후 다시 상온으로 냉각하여 측정하는 냉간법을 사용하였다. 시험체의 가열온도는 200, 400, 600, 800℃이며 각각의 측정온도에서 2시간 가열하였다.

세공구조는 시험체를 28일간 양생한 후 다이어본드 컷터를 이용하여 5mm의 입방체로 절단하여 아세톤에 침적시켜 수화를 정지시켜 측정하였다. 20 °C의 상온하의 시험체는 2주간 드라이아이스를 이용한 건조를 실시하여 세공구조를 측정하였다. 또한, 고온하의 측정은 절단된 시험체는 전술한 온도에서 2시간 가열한 후 상온으로 냉각하여 측정하였다. 세공구조의 측정은 수은압입 포로시미터를 이용하여 측정하였다.

3. 실험 결과 및 분석

3.1 압축강도와 가열온도

고온가열에 따른 시험체의 압축강도의 변화를 Fig. 1에 나타내었다. 상온에서의 PM 시험체는 각각 72.6, 54.5, 42.2MPa의 압축강도를 보였고, 실리카폼을 혼입한 SFM 시험체는 76.3, 68.8, 53.9MPa으로 실리카폼의 혼입에 따른 강도 증진을 확인할 수 있었다.

가열에 따른 압축강도의 변화는 물-결합재비나 실리카폼 혼입의 유무에 관계없이 가열온도가 증가할수록 강도는 감소하는 일반적인 경향을 보였다. PM 및 SFM 시험체의 압축강도는 상온과 비교하여 직선적으로 저하하는 경향을 보였다. 이러한 경향은 기존의 냉간 시험에 의한 연구결과와 동일하다. 열간 시험의 경우, 압축강도는 200 °C까지는 상온과 비교하여 큰 차이를 보이지 않으며 200 °C이상의 온도에서 급격히 감소하는 경향을 보인다. 이러한 강도감소의 주된 요인은 콘크리트 내부의 수축팽창의 구속에 대한 미세균열의 발생이나 시멘트 수화물의 탈수 요인에 의한 것으로 보고된다⁵⁶⁾.

시멘트 수화물의 온도에 의한 영향은 30~200 °C에서 물리적 결합수의 증발이 발생하는데 공극의 크기에 따라 증발온도는 다르게 나타난다. 또한, 30~600 °C의 범위에서 시멘트 수화물의 붕괴와 탈수 및 화학 흡착수가 방출된다. 일반적으로 C-S-H계 수화물이 100~130 °C, 에트링자이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 3CaSO_4 \cdot 32H_2O$)가 100 °C이하 및 100 °C, 160~180 °C, 250~270 °C에 걸쳐 단계적으로 탈수한다. 또한, 모노설페이트($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot CaSO_4 \cdot 12H_2O$), 알루미늄이트계 수화물($3CaO \cdot Al_2O_3 \cdot 6H_2O$), 이수석고($CaSO_4 \cdot 2H_2O$) 등도 약 250~550 °C의 범위에서 단계적으로 탈수하며 수산화칼슘($Ca(OH)_2$)은 450~550 °C의 범위에서 탈수한다⁴⁾.

기존의 연구보고에 의한 고온하의 콘크리트의 압축강도 저하는 골재의 종류에 의해 크게 좌우되며, 냉간이나 열간 등의 가열방법에 의해서도 다소 차가 발생한다. 500 °C에서는 약 60%, 800 °C에서는 15% 정도의 상대압축강도를 보이는 것이 일반적인 경향으로 보고되고 있다^{6,11)}.

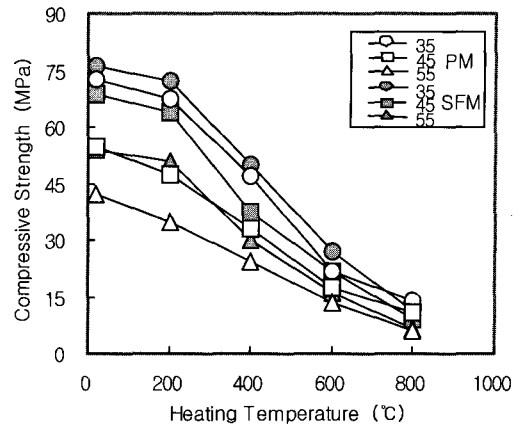


Fig. 1 Compressive strength vs. heating temperature of cement mortars(PM, SFM series)

본 시험체의 압축강도 잔존률은 400 °C, 600 °C의 온도범위는 유로코드에서 제시한 강도 잔존률 보다 다소 작은치를 나타냈지만, 800 °C의 강도 잔존률 15%와는 거의 동일한 결과를 보였다. 유로코드에서 제시하고 있는 강도 잔존률과는 기준이 되는 콘크리트나 가열방법에 따른 차로 인해 직접적인 비교는 어려우나 고온하의 콘크리트에 대한 동일한 물성 변화를 추정할 수 있었다¹²⁾.

3.2 가열온도에 따른 세공구조의 변화

3.2.1 세공구조의 변화

(1) PM 시험체

가열온도에 따른 PM 시험체의 세공공극 분포의 변화를 Fig. 2에 나타내었다. 상온에서의 PM 시험체는 각각 13.8, 16.9, 18.4 Vol.%의 공극률을 보였다. 물-결합재비가 작을수록 공극률도 작게 나타났으며 압축강도와 상관관계를 가지는 0.05 μm이하의 공극은 크게 나타나는 경향을 보였다. 단계적인 가열온도의 상승에 따라 공극률도 점진적으로 증가하는 경향을 보였으며 특히 0.1~0.5 μm의 공극의 증가가 현저하였다. 또한, 콘크리트의 압축강도와 밀접한 상관관계를 지니는 0.05 μm이하의 공극은 현저하게 감소하는 경향을 보였다. 압축강도에 영향을 미치는 0.05 μm이하 공극은 가열온도의 상승에 따른 시멘트 수화물의 탈수와 밀접한 관계를 지니며 물-결합재비와 상관없이 동일한 경향을 보이며 감소하였다.

(2) SFM 시험체

가열온도에 따른 SFM 시험체의 세공공극 분포의 변화를 Fig. 3에 나타내었다. 상온에서의 SFM 시험체는 각각 13.8, 15.6, 18.9 Vol.%로 PM 시험체보다 작은 공극률을 보여 실리카폼의 혼입에 따른 공극의 충전효과를 확인할 수 있었다. 동일 물-결합재비의 경우, 실리카폼의 혼입에

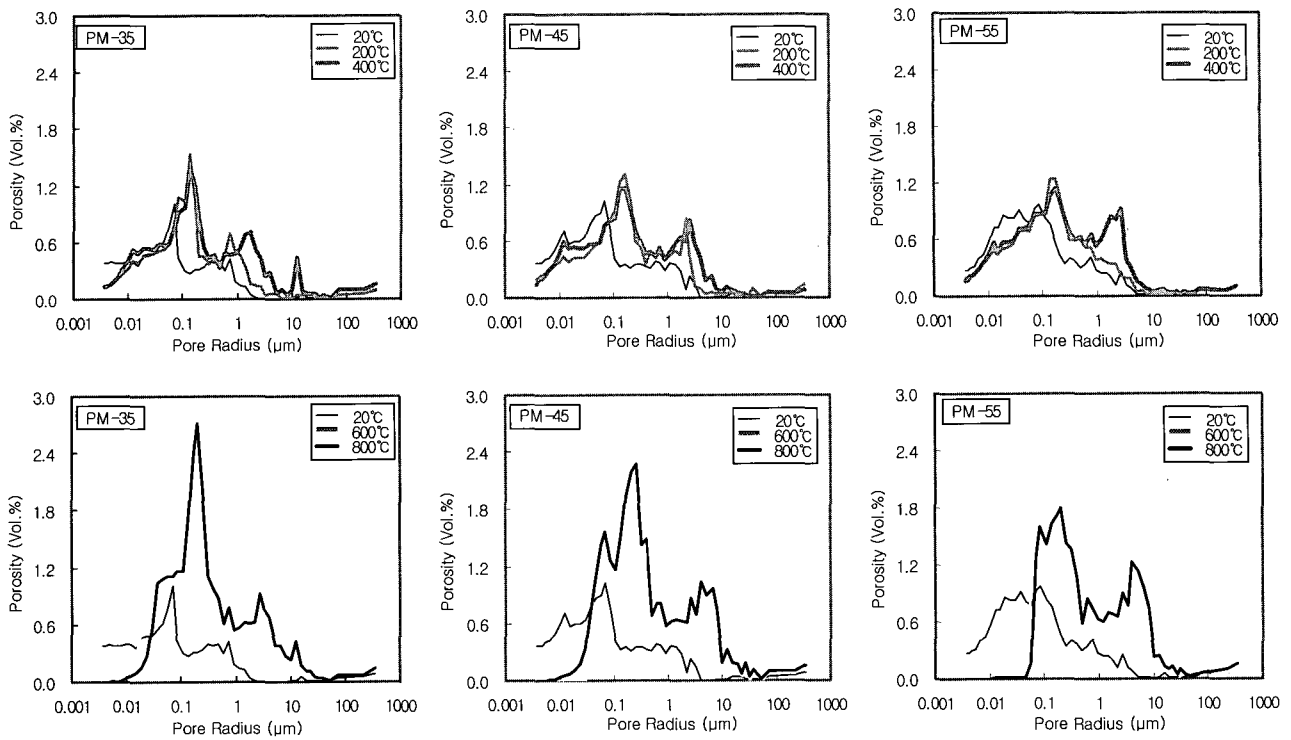


Fig. 2 Porosity vs. pore radius of cement mortars(PM series)

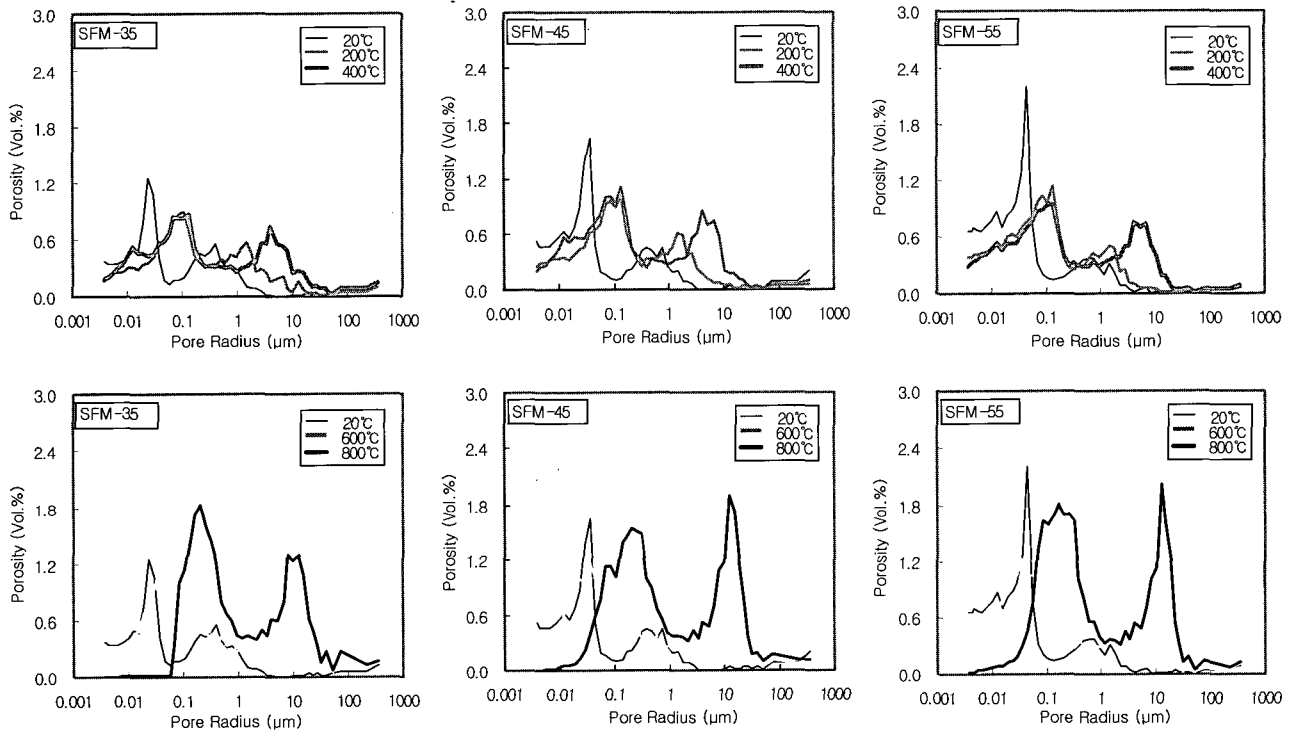


Fig. 3 Porosity vs. pore radius of cement mortars(SFM series)

다른 공극률의 차이는 크지 않았지만, 실리카폼의 혼입 효과로 인해 0.05 μm 정도의 공극경이 많이 나타나는 결과를 보였다. 이러한 공극경 분포는 입경이 0.15 μm 인 실리카폼이 잔골재와 시멘트 겔의 사이에 존재하는 모세관 공극에 충전된 결과이다. 이러한 필러 효과에 의한 모세관 공극의 고밀도 충전성은 서론에서 기술한 내구성에 향상에 기인한다.

가열온도 상승에 따른 공극률의 변화는 혼입의 유무에 상관없이 온도의 상승에 따라 공극률도 증가하고, 압축강도에 영향을 미치는 0.05 μm 이하의 공극은 감소하는 동일한 경향을 보였다. 또한, SFM 시험체 경우 이러한 공극의 감소현상은 더욱 현저하였다. 특히, 600 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서의 0.05 μm 이하 공극은 상온의 공극분포와는 현저히 다른 분포를 보였고 일부 시험체의 경우 거의 발견되지 않았다.

3.2.2 세공경 분포의 변화

세공경 분포의 변화는 20 $^{\circ}\text{C}$ 에서 PM 및 SFM 시험체의 공극경 분포로부터 각 가열온도에의 분포를 빼낸 결과로부터 평가하였다. 공극경 분포의 증감은 PM 및 SFM 시험체에 상관없이 각 가열온도가 증가함에 따라 0.1 μm 부근의 공극이 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, PM 시험체의 경우 2~5 μm 의 공극에서 두 번째 피크점을 보였고, SFM 시험체의 경우는 10 μm 를 전후하여 가열온도의 상승에 따라 점진적으로 증가하였다. SFM 시험체의 경우는 0.1 μm 의 공극의 증가와 동일하게 10 μm 의 공극도 증가하였고 600 $^{\circ}\text{C}$ 이상의 온도에서는 그 차가 현저하였다. PM 시험체의 경우, 가열온도가 상승함에 따라 0.05 μm 의 공극에서는 현저한 감소경향과 0.1~0.5 μm 의 공극에서는 현저한 증가경향을 보였다. SFM 시험체의 경우도 유사한 경향을 보였지만, 0.05 μm 의 공극에서는 PM 시험체에 비하여 조금은 완만한 감소 경향을 보였다. 또한 0.1~0.5 μm , 10 μm 전후의 공극에서는 증가경향을 보여 실리카폼의 혼입에 따른 약간의 차를 보였다.

이러한 0.05 μm 및 0.1~0.5 μm 공극의 변화는 겔공극과 모세관 공극이 고온 가열에 의한 물의 증발 및 수산화칼슘과 C-S-H계 수화물의 붕괴와 탈수에 의한 결과로부터 기인한다. 또한, 수산화칼슘 및 C-S-H계 수화물의 경우는 0.5~2 μm 의 크기이므로 가열에 의한 탈수가 발생할 수 있는 공극에서의 변동이 크게 나타난다. 수산화칼슘이 열분해하여 탈수되는 온도는 약 450~550 $^{\circ}\text{C}$ 이므로 600 $^{\circ}\text{C}$ 이상 온도범위의 공극 변동은 현저하게 발생한다. 또한, 800 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열한 일부 시험체의 경우 0.05 μm 이하의 공극이 거의 발견되지 않았는데 이는 C-S-H상의 분해와 수화물의 수분이 탈수하면서 발생하는 입자간의 결합으로부터 기인된 결과이다. C-S-H상의 분해는 일반적으로 600~700 $^{\circ}\text{C}$ 의 범위에서 발생한다고 보고된다⁴⁵⁾.

가열에 의해 시멘트 경화체를 구성하는 재료에서 발생하는 열팽창과 고온에서 상온으로 낮아지면서 발생하는 수축에 의한 미세균열의 발생도 공극의 증감을 유발한다⁹⁾. 이러한, 공극의 증감은 각 가열온도에 따라 현저한 차를 보이기 때문에 고온하의 공극구조의 특성으로부터 화재시의 콘크리트의 수열온도나 손상정도를 파악할 수 있는 중요한 인자로 이용이 가능하다.

3.2.3 누적 공극률

각 세공경의 누적공극률의 변화를 Fig. 4에 나타내었다. 시험체는 가열온도의 증가에 따라 10 μm 이상의 공극은 거의 변화하지 않았지만 10 μm 이하 세공경의 누적공극률은 급격히 증가하는 경향을 보였다. 공극률의 증가는 각 시험체의 종류나 배합조건에 따른 재료특성에 따라 조금은 다르게 나타났지만 가열온도의 증가와 함께 누적공극률도 증가하는 일반적인 경향을 보였다.

누적공극률 또한 물-결합재비나 실리카폼의 혼입보다는 가열온도에 상관하여 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 800 $^{\circ}\text{C}$ 로 가열된 PM 시험체의 경우 상온과 비교하여 약 11~16% 정도의 증가를 보였다. 또한, SFM 시험체의 경우도 점진적 증가의 경향을 보여, 800 $^{\circ}\text{C}$ 에서는 약 13~16% 정도의 공극률 증가를 보였다.

3.3 공극률과 압축강도

3.3.1 가열온도와 공극률

가열온도와 공극률과의 관계를 Fig. 5 및 Table 5에 나타내었다. 공극률은 물-결합재비나 실리카폼의 유무에 상관없이 가열온도에 따라 점진적으로 증가하였다. 이러한 경향은 콘크리트 가열에 따른 겔 및 모세관 공극으로부터 물의 탈수 및 화학적으로 결합한 C-S-H계 수화물 및 수산화칼슘이 분해되어 결합수가 증발한 결과에 의한 것으로 사료된다. 콘크리트를 구성하는 재료의 열적성질의 차이로 인한 재료의 신축에 의한 미세균열의 발생도 세공구조에 영향을 미치므로 이러한 가열에 의한 수분의 탈수나 신축에 의한 미세균열의 발생은 공극구조에 영향을 미치며 물-결합재비, 혼화재의 종류 및 가열조건 등에 따라 조금은 다르게 나타난다⁵⁾.

일반적으로 콘크리트를 구성하는 수화물은 시멘트의 수화정도나 물-결합재비에 따라 다른 체적비율을 구성하게 되며 물-결합재비가 작은 경우는 모세관수와 공극률이 작으며 클수록 모세관수가 증가한다. 경화된 시멘트 페이스트의 경우, 고체부분의 약 60~70% 정도를 C-S-H계 수화물이 점유하며 약 20~30% 정도를 수산화칼슘이 점유한다¹³⁾. 전체 체적비율에서 모세관수는 물-결합재비에 따라 다르지만 겔 수까지 증발하는 경우 거의 유사한 체적비율을 유지하므로 공극률의 증가범위도 유사하게 증가한다.

Table 5 Porosity and compressive strength of cement mortars

Specimens		Porosity (Vol.%)					Compressive strength (MPa)				
		20℃	200℃	400℃	600℃	800℃	20℃	200℃	400℃	600℃	800℃
PM	35	13.8	17.3	21.0	24.8	30.2	72.6	67.5	47.1	21.8	13.8
	45	16.9	19.3	21.3	23.3	32.0	54.6	47.6	33.2	17.5	10.9
	55	18.4	20.0	23.4	22.1	27.9	42.2	35.0	24.4	13.4	5.9
SFM	35	13.8	16.2	19.7	25.7	27.2	76.3	72.0	50.0	27.1	11.5
	45	15.6	17.4	21.6	26.3	30.2	68.8	63.7	37.3	21.6	9.2
	55	18.9	19.1	21.2	26.1	32.2	53.9	51.0	30.0	16.0	6.4

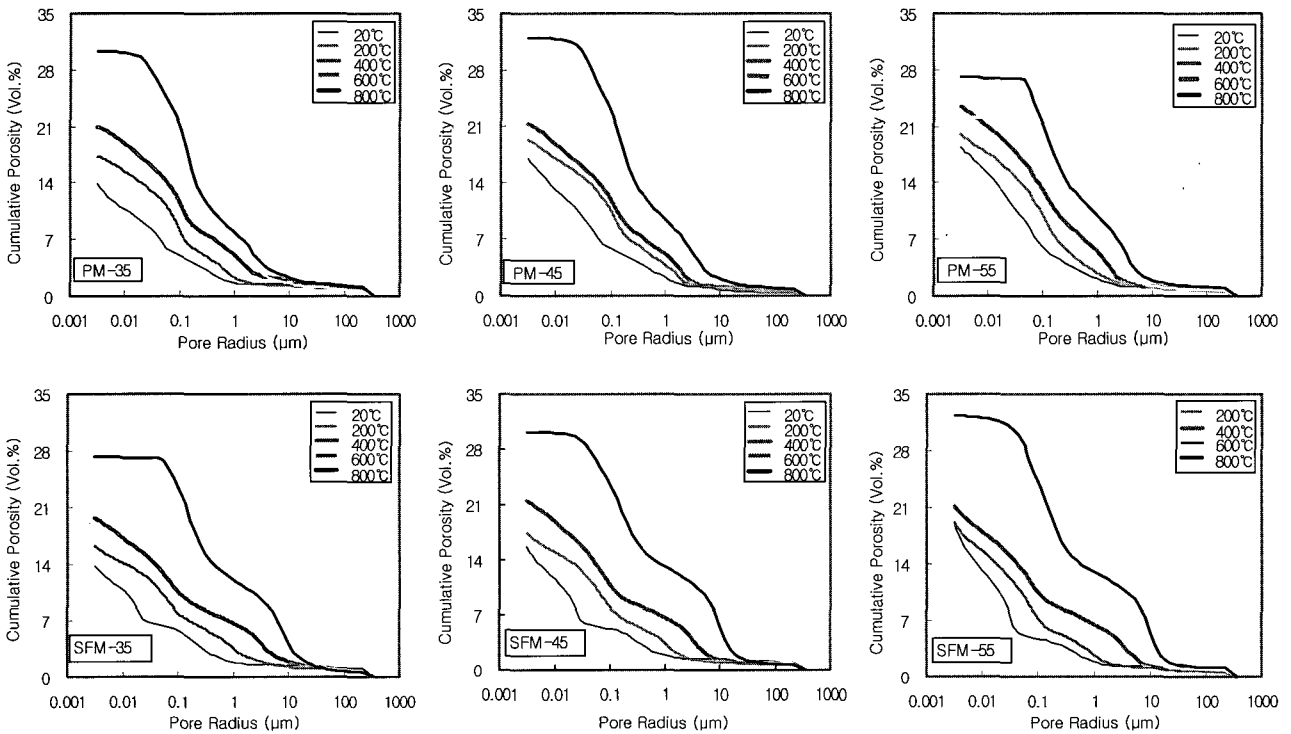


Fig. 4 Cumulative porosity vs. pore radius of cement mortars(PM, SFM Series)

그러므로 가열온도에 따른 공극률의 증가도 물-결합제비나 콘크리트의 종류에 상관없이 유사한 증가경향을 보였다. 공극률의 증가는 물의 증발 및 수화물의 탈수 및 변태온도에 의존하는 결과를 보이게 된다. 이러한 공극률의 증가로 인해 시멘트 경화체의 조직이 포러스해졌으며 콘크리트의 물성에도 영향을 미쳐 압축강도의 저하 등의 물리적 성질에 영향을 미쳤다.

3.3.2 공극률과 압축강도

공극률과 압축강도와의 관계를 Fig. 6 및 Table 5에 나타내었다. 공극률의 증가 및 미세균열이 발생으로 인해 압축강도는 감소하였다. 또한, 물-결합제비와 실리카폼의 유무에 상관없이 거의 동일한 경향을 보였다. 이러한 경향은 가열온도와 압축강도와 밀접한 상관관계를 보이고

있어 기존에 제시된 외관에 의한 콘크리트 및 기타 재료를 통한 부재의 수열온도 추정방법 및 분석장치를 이용한 수열온도의 추정방법과 더불어 콘크리트의 수열온도 예측이 가능할 것으로 사료된다⁴⁾.

일반적으로 통용되고 있는 열에 의한 중성화 판정방법인 열열화 깊이는 수산화칼슘의 열에 의한 탈수정도를 비교하여 판단하므로 손쉽게 내화성능을 예측할 수 있는 장점이 있다. 하지만 일정 정도의 온도가 유지되지 않으면 정확히 예측하기 어려운 단점이 있으므로 공극률을 통한 비교 분석 방법은 콘크리트의 내화성능에 영향을 미치는 수열정도를 파악하는데 보다 유효하리라 판단된다. 특히, 화재에 의한 화해를 입지 않은 부분과의 비교판단이 가능하여 성능감소의 정도를 분석하여 유출해 낼 수 있기 때문에 국부 가열에 의한 성능저하의 예측도 가능하다.

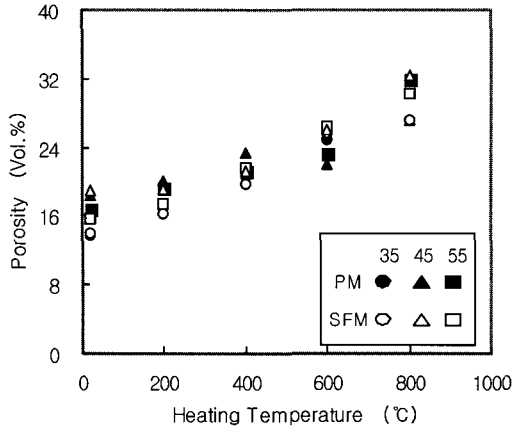


Fig. 5 Relation between porosity and heating temperature of cement mortars

현재, 고온하에 대한 콘크리트 부재의 내화성능 파악은 주로 화재지속시간이나 수열온도를 추정하여 부재가 받는 내부 온도를 계산하게 되며 주로 열열화 깊이로서 이를 산정한다. 열열화 깊이의 판정 및 평가는 여러 방법들이 제시되어 페놀프탈레인 용액에 의한 중성화 시험 방법 및 분석장치를 이용한 UV(자외)스펙트럼 분석이나 화학혼화제의 성분분석을 통한 방법들이 이용되고 있다⁴⁾.

4. 결 론

실리카폼 혼입의 유무에 따른 고강도 콘크리트의 고온 가열에 의한 세공경 분포 및 공극률의 변화를 통해 비교 분석하여 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 물-결합재비의 차이 및 실리카폼의 혼입에 따른 필러 효과로 인해 공극 분포는 다르게 나타나며 가열온도의 증가에 따라 물의 증발 및 시멘트 수화물의 탈수는 심화되어 공극 분포의 증감의 폭은 커진다.
- 2) 물-결합재비의 차이 및 실리카폼의 혼입에 유무에 상관없이 가열온도의 증가에 따라 공극률은 동일한 경향을 보이며 증가한다.
- 3) 공극률의 증가는 각 가열온도에 따라 현저한 차를 보이므로 공극구조의 분포 및 공극률로부터 수열정도의 추측이 가능하여 콘크리트 부재의 성능저하 정도를 예측 할 수 있다.

참고문헌

1. 社団法人セメント協會, “シリカフェ움を用いたコンクリートに関する調査報告,” 海洋開發専門委員會報告, 1986.

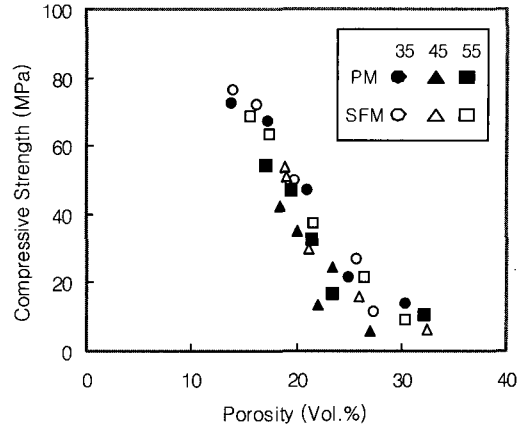


Fig. 6 Relation between compressive strength and porosity of cement mortars

2. 日本建築學會, 火災とコンクリート, “シンポジウム資料”, 2001.
3. 日本コンクリート工學協會, “コンクリート構造物の火災安全性委員會報告集”, 2002.
4. 日本建築學會, “構造部材の火害診断および補修補強方法”, シンポジウム資料, 2002.
5. 森 實, “建築材料の火災時における高温性状に関する研究”, 博士學位論文, 東京大學, 1975.
6. 安部武雄ほか, “高温度における高强度コンクリートの力學的的特性に関する基礎的研究”, 日本建築學會構造系論文集, No.515, 1999, pp.163~168.
7. ACI Committee, “Silica Fume in Concrete, Draft 2,” American Concrete Institute, 1998.
8. P.K. Mehta, Concrete, “Structure, Properties, and Materials,” Prentice Hall Interals, Prague, Vol.1, 1973, B25pp.
9. Wei-Ming Lin, “Microstructures of Fire-Damaged Concrete,” *ACI Materials Journals*, Vol.93, No.3, 1996, 199pp.
10. Ulrich Schneider, “Behavior of Concrete at High Temperatures,” Vertrieb durch verlag von wilhelm ernst & sohn, Berlin, 1982.
11. Zdenek P. Bazant, Maurice F. Kaplan, “Concrete at High Temperatures : Material Properties and Mathematical Models,” Prentice Hall, England, 1996.
12. Eurocode 4, “Design of composite steel and concrete structures,” Structural Fire Design, BSI, 1994.
13. 植田後郎, “ポルトランドセメントの水和反応と水和生成物”, 分かりやすいセメントとコンクリート知識, 1989.

요 약

본 연구는 실리카폼을 사용한 고강도 콘크리트의 고온하의 압축강도의 저하 및 공극률 변화를 통하여 강도 감소와 공극구조와의 연관성을 검토하였다. 또한, 실리카폼 혼입의 유무와 각 가열온도에서의 시멘트 수화물의 탈수에 의한 공극특성의 변화에 관한 기초 데이터를 제공하고자 하였다.

연구결과, 실리카폼의 혼입에 따른 필러효과 및 물-결합재비의 차로 인해 공극률 및 공극분포는 다르게 나타났다. 가열온도가 상승함에 따라 공극률도 점진적으로 증가하는 경향을 보였다. 또한, 600 °C 이상의 고온에서의 경향성은 더욱 현저하였다. 가열온도의 상승에 따라 0.1~0.5 μm 공극의 증가는 현저하였으며 이는 모세관 공극의 수분의 증발 및 C-S-H계 수화물 및 수산화칼슘이 분해되어 결합수가 탈수한 결과이다. 고열에 의한 신축도 콘크리트 내부의 미세균열을 발생시켜 공극률 증가를 유발한다. 이러한 공극률 증가는 가열온도에 따라 일정한 경향성을 띠므로 화해를 입은 콘크리트의 수열온도 및 국부적인 성능 저하를 예측할 수 있을 것으로 기대된다.

핵심용어 : 화재, 고온, 공극률, 고강도 콘크리트, 실리카폼
