



화재에 노출된 RC기둥 시멘트 매트릭스의 구성성분 변화

김정중¹⁾ · 염광수^{2)*}

¹⁾경남대학교 건축학과 ²⁾GS건설 인프라구조팀

Composition Changes in Cement Matrix of RC Column Exposed to Fire

Jung-Joong Kim¹⁾ and Kwang-Soo Youm^{2)*}

¹⁾School of Architecture, Kyungnam University, Changwon 631-701, Korea

²⁾Dept. of Infra Structure Team, Technical Division, GS E&C, Seoul 110-130, Korea

ABSTRACT This study examined the changes of microstructural compositions in cement matrix according to the depth from the surface of a reinforced concrete (RC) column exposed to fire. The RC column was exposed to a standard fire for 180 minutes. After the fire test, core samples passing through the column section were obtained. Using the core samples, the remaining fractions of calcium-silicate-hydrates (C-S-H) and calcium hydroxide in cement matrix at the surface, the depth of 40 mm and 80 mm and the center (175 mm) were examined using thermal gravimetric analysis (TGA) and X-ray diffraction analysis (XRDA). Using nuclear magnetic resonance (NMR) technique, the silicate polymerization of C-S-H in cement matrix was also evaluated. The experimental results indicated that the amount of C-S-H loss at the center of column experiencing the transferred fire temperature of 236 °C has been underestimated as the TGA results showed the highest C-S-H contents are located at the depth of 80 mm, where the transferred fire temperature is 419 °C. Moreover, the destruction of silicate connections at the center was observed as similar as that at the depth of 40 mm, where the transferred fire temperature was 618 °C. This might be attributed to the temperature changes during cooling time after the fire test was neglected. Due to the relatively low thermal conductivity of concrete, the high temperature, which can affect the change of microstructure in cements, will hold longer at the center of the column than other depth.

Keywords : RC column, fire test, cement matrix, microstructures, NMR

1. 서 론

철근콘크리트(reinforced concrete, RC) 구조물이 화재에 노출되면, 콘크리트와 철근의 온도가 상승하고 구조부재의 변형에 대한 강성도와 강도가 저하된다. 화재에 노출되었던 RC 부재의 강도와 강성도 저하를 고려하기 위하여 일반적으로 화재시 온도에 따른 시방기준을 제시하고 있다.^{1,2)} 선택적으로, 유효 단면적을 고려하는 방법이 사용될 수 있는데, 500°C 이상의 온도에 노출되었던 콘크리트의 단면적을 구조부재의 강도 계산에서 배제하는 방법이다.²⁾ 국내의 경우 50 MPa 이상의 고강도콘크리트의 내화성능을 평가하기 위해서 내부 종방향철근의 온도를 관리기준으로 선정하였다.³⁾ 이러한 국내의 내화기준을 만족하기 위해서 폴리프로필렌(polypropylene) 섬유나 2종류 이상의 섬유를 혼입하는 방법, 내화 모르타르 또는 방화

석고보드 등을 사용한 패시브 내화보강(passive protection)법이 제안 및 연구되었다.^{4,5)}

이러한 설계방법 또는 관리기준은 단순히 콘크리트나 철근의 온도만으로 내화성능을 평가하기 때문에, 온도상승에 따른 콘크리트 시멘트 매트릭스의 화학적 조성 변화를 고려하지 못하는 단점이 있다. 특히, 실제 구조물에 화재 발생 시 콘크리트나 철근의 내부온도를 정확히 측정 또는 평가할 수 없기 때문에, 화재 후 구조물의 잔존강도나 손상여부를 파악하기 어렵다. 특히, 콘크리트는 온도 500°C에서 콘크리트의 시멘트 매트릭스를 구성하는 칼슘 실리케이트 수화물(calcium silicate hydrates, C-S-H)이 모두 분해되는 것으로 알려져 있고,⁶⁾ 이를 고려하여 500°C 이상의 온도에 노출되었던 콘크리트는 시멘트 매트릭스가 모두 파괴된 것으로 간주하고 그 강도를 무시하는 것이다. C-S-H는 콘크리트 시멘트 매트릭스의 67%를 차지하는 미세구조로써,⁷⁾ 콘크리트의 강도와 파괴특성에 가장 중요한 역할을 담당하고 있다. 더욱이, 시멘트 매트릭스의 장기 거동과 관련된 크리프와 건조수축 특성은 C-S-H에 의해 지배되는 것으로 알려져 있다.^{8,9)} C-S-H에서 물이 제거되

*Corresponding author E-mail : ksyoum@gsconst.co.kr

Received April 14, 2014, Revised May 15, 2014,

Accepted May 29, 2014

©2014 by Korea Concrete Institute

는 온도의 범위과 구성에 대해서는 다양한 의견이 존재한다.^{10,12)} Odelson 등은 200℃~400℃의 범위를 제시하였으며,¹⁰⁾ Alonso와 Fernandez는 100℃~250℃,¹¹⁾ Alarcon-Ruiz 등은 180℃~300℃,¹²⁾ 그리고 Jain과 Neithalath는 150℃~400℃⁶⁾의 온도에서 C-S-H가 분해되는 것으로 보고하고 있다.

이 연구에서는 RC 기둥을 표준 화재 곡선에 따라서 내화실험을 실시한 후 대기 온도 조건에 노출시켜 내화 실험된 RC기둥의 온도를 상온까지 낮추었다. 표면과 표면으로부터 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 그리고 중심부(175 mm)에서 온도의 변화를 측정 한 후, 표면과 깊이 40 mm, 80 mm, 그리고 중심부(175 mm) 지점에서 총 3가지 방법을 통해 시멘트 매트릭스의 미세구조의 구성성분 변화를 조사하였다. 열중량분석(thermal gravimetric analysis, TGA)을 이용하여 시멘트 매트릭스내의 C-S-H, 수산화칼슘(calcium hydroxide, Ca(OH)₂), 탄산칼슘(calcium carbonate, CaCO₃)의 상대적인 변화량을 분석하였다. X선 회절 분석(X-ray diffraction analysis, XRDA)을 통하여 표면으로부터 깊이에 따른 C-S-H와 수산화칼슘의 상대적인 감소량을 파악하였다. 29-실리케이트 마자 핵자기공명기(²⁹Si magic angle spinning nuclear magnetic resonance, ²⁹Si MAS NMR)를 이용하여 C-S-H의 중합도를 산정하였다. 이러한 분석 결과를 종합하여 화재시 온도상승에 따른 시멘트 매트릭스 내의 C-S-H와 수산화칼슘의 구성변화를 파악하여, 화재에 의한 콘크리트의 손상을 정량적으로 평가하고자 한다.

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험개요

설계기준강도를 30 MPa로 설정하여 Table 1과 같이 배합하였다. 결합재료는 KS L 5201 규정을 만족하는 1종 보통포틀랜드 시멘트 및 KS L 5405 규정에 적합한 플라이애쉬를 사용하였다. 잔골재는 밀도 2.62 g/cm³, 조립률 2.83의 세척사를 사용하였으며, 최대치수는 25 mm, 밀도는 2.65 g/cm³의 굵은골재를 사용하였다.

2.2 실험체 제작

콘크리트 기둥의 내화성능을 평가하기 위해 기존연구에서 사용했던 동일한 제원의 높이 1524 mm, 단면 350 mm×350 mm인 실험체를 제작하였다.^{4,5)} Fig. 1의 실험체 단면에 묘사한 바와 같이, 직경 22 mm인 8개의 종방향 철근(longitudinal reinforcement)과 직경 10 mm인 띠철근(tie bar)

Table 1 Mix proportion

W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kg/m ³)				
		Water	Cement	Fly ash	Sand	Gravel
39	45	152	351	39	807	982

을 300 mm 간격으로 배근하였으며, 사용된 철근의 항복강도는 420 MPa이다.

콘크리트의 온도는 표면과 표면으로부터 깊이 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 그리고 중심부(175 mm)에서 각각 2기의 열전대(thermocouple)를 설치하여 측정하였다. 종방향철근의 온도는 각 철근의 중심부에 열전대를 삽입하여 측정하였다. Fig. 2에 콘크리트 온도측정을 위해 설치

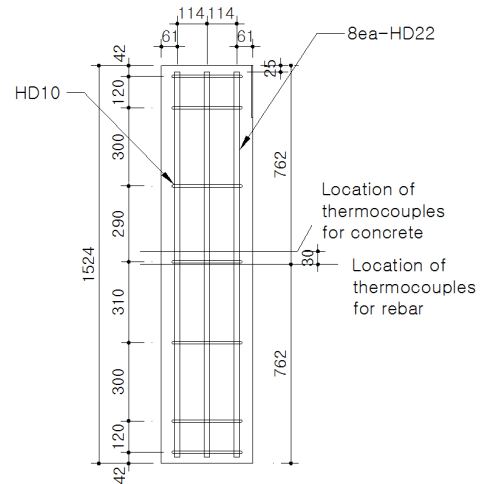


Fig. 1 Details for RC column (unit : mm)

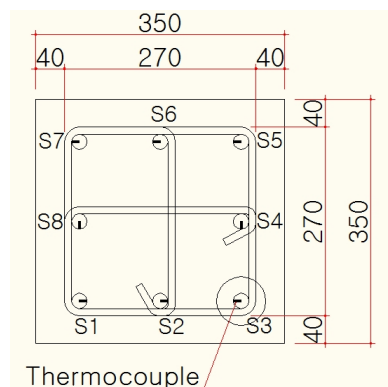
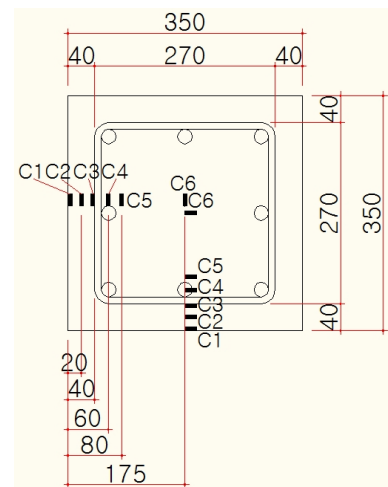


Fig. 2 Location of thermocouples to measure the temperatures of concrete (top) and reinforcements (bottom) in the RC columns (unit : mm)



Fig. 3 Fire test set-up of RC columns



Fig. 4 Sample cored from RC column after fire test

한 총 12개의 열전대와 종방향철근 중심부에 설치된 총 8개의 열전대 위치를 표기하였다.

제작된 콘크리트실험체를 표준화재조건에 노출시킨 내화시험방법(KS F 2257-1)에 따라 방재시험연구원 방내화실험실에서 내화실험을 실시하였다. ISO-834 표준화재 가열곡선¹³⁾을 적용하였으며, 180분간 비재하 내화시험을 실시하였다. 콘크리트의 28일 압축강도는 35.2 MPa였으며, 내화실험 당일 실험체의 압축강도는 40.6 MPa로 측정되었다. Fig. 3은 내화실험 실시 전 내화로에 설치된 실험체 전경이다.

내화 실험에 사용된 RC 기둥을 대기 온도 조건에 노출시켜 온도를 상온까지 낮춘 후, Fig. 4와 같이 기둥의 단면을 가로 지르는 코어 공시체를 얻었다. 표면과 깊이 40 mm, 80 mm, 그리고 중심부(175 mm) 지점에서 시료를 채취하여 시멘트 매트릭스의 미세구조 변화를 측정하였다.

2.3 분석방법

2.3.1 열중량분석(TGA)

열중량분석은 장치내에서 온도를 높이면서 그에 따른 시편의 중량 손실을 측정하는 방법이다. 일반적으로 25°C 부터 1000°C까지 분당 10°C씩 온도를 높여서 중량의 손실을 기록한다. 시멘트 화학분야의 적용에 있어서, 중량의 손실은 일반적으로 물의 증발과 이산화탄소의 발생으로 일어난다. 정확한 분자식을 알고 있다면, 분자 구조내의 물의 손실량을 측정함으로써 물질의 손실량을 구할 수 있다. 예를 들어 Ca(OH)₂의 경우 분자구조내의 물(H₂O)이 500°C부터 600°C사이에서 분리되는 것으로 알려져 있다. 그러므로 500°C부터 600°C사이의 중량비의 손실은

Ca(OH)₂로부터 분리된 물의 손실로 고려할 수 있고, 식 (1)에 보인 분자량과 중량비간의 비례식을 이용하여 물질내의 Ca(OH)₂의 중량비를 결정할 수 있다.

$$\begin{aligned} &Ca(OH)_2 \text{ 분자량}(74 \text{ g/mol}) : H_2O \text{ 분자량}(18 \text{ g/mol}) \\ &= Ca(OH)_2 \text{ 중량비} : \text{중량변화율}(500^\circ\text{C} \sim 600^\circ\text{C}) \end{aligned} \quad (1)$$

C-S-H에 대하여도 위와 같은 방법을 적용할 수 있으나, C-S-H 분자구조내의 물의 양과 그 범위가 일정하지 않기 때문에 아직까지 C-S-H에 대한 정확한 분자식은 결정되지 않고 있으며, TGA 온도 범위도 일정하지 않다.^{6,10-12)}

2.3.2 X선 회절분석(XRDA)

XRD는 일반적으로 결정화된 물질의 특성을 파악하는데 쓰이며, 시멘트 화학 분야에서도 시멘트의 구성성분을 파악하기 위하여 널리 사용되어 왔다.¹⁴⁾ 결정화된 물질은 반복적인 원자층을 가지고 있다. 이를 고려하여, 일정한 파동의 길이 λ 를 가지는 X선을 θ 의 각도로 입사시키면, 원자층간의 거리 d 에 따라 입사된 X선이 원자층을 통과하거나 원자에 부딪혀 반사된다. 원자층간의 거리 d 를 ‘d-spacing’ 또는 ‘basal spacing’이라 부른다. X선의 회절은 다음의 식 (2)의 브래그(Bragg) 법칙에 의해 발생한다.

$$n\lambda = 2d \sin\theta \quad (2)$$

여기서, n 은 정수이다. 일반적으로 구리(Cu)를 이용한 파장의 길이 0.15 nm의 X선이 주로 쓰인다. 2°~30°의 각도로 입사된 X선에 대하여 물질의 특성을 반영하는 독특한 회절 스펙트럼을 구할 수 있다. 수화된 시멘트내에 존재하는 다양한 미세구조 성분이 XRD 스펙트럼을 분석하여 파악될 수 있다.¹⁵⁻¹⁷⁾

2.3.3 핵자기공명기(NMR)

NMR은 물질의 화학적 연결구조를 파악하는 연구분야에서 오랫동안 사용되어 왔다.¹⁸⁾ 특히 ²⁹Si NMR은 규산염 사면체(silicate tetrahedron)의 중합(polymerization)구조를 파악하기 위하여 널리 사용되고 있다.¹⁹⁻²¹⁾ 고체상태 물질의 NMR분석에는 마각회전(magic angle spinning, MAS)방법이 사용되는데, 이는 다양한 핵 상호 작용에 의한 스펙트럼 피크의 확장을 방지하기 위함이다. 자기장 방향에 대하여 54.7° 기울여 진동수 1 kHz~35 kHz로 시편을 회전시키는 방법이다.²²⁾ 규산염 사면체 연결구조내에서 공유하는 산소수에 따른 규산의 상대량을 결정할 수 있으며, 이러한 정보를 바탕으로 규산염 사면체의 연결구조를 파악한다. 공유 산소의 수 0, 1, 2, 3, 4개를 가지는 규산의 ²⁹Si MAS NMR 화학이동(chemical shift)의 위치는 각각 -74, -80, -84, -95, -110으로 알려져 있다. 그렇지만 규산염 사면체에 연결된 다른 구조가 화학이동에 영향을 주기 때문에, 일반적인 화학이동 스펙트럼은 구간에 걸쳐 분

포한다.^{23,24)} 그러므로, 일반적인 ^{29}Si MAS NMR 화학이동 스펙트럼은 정규분포함수의 합으로 이루어진 곡선의 모양을 나타낸다. 스펙트럼을 분석하여 공유 산소의 수 0, 1, 2, 3, 4개를 가지는 규산의 상대량 Q^0, Q^1, Q^2, Q^3, Q^4 를 산정할 수 있다. 수화된 시멘트의 ^{29}Si MAS NMR 화학이동 스펙트럼으로부터 결정된 공유 산소의 수 0, 1, 2, 3, 4개를 가지는 규산의 상대량을 이용하여, 수화도 D_h 를 아래의 식 (3)으로 추정할 수 있다.²⁵⁾

$$D_h = Q^1 + Q^2 + Q^3 \quad (3)$$

플라이 애쉬, 실리카폼과 같은 포졸란을 사용했을 경우, 포졸란의 반응정도 D_{pa} 는 다음 식 (4)로 추정할 수 있다.²⁵⁾

$$D_{pa} = \frac{Q^4(t) - Q^4(t_0)}{Q^4(t_0)} \quad (4)$$

여기서, $Q^4(t)$ 는 포졸란의 반응정도 D_{pa} 를 산정하는 시간에서의 Q^4 비율이고, $Q^4(t_0)$ 는 포졸란 반응전 Q^4 비율이다. C-S-H내의 규산염 사면체 사슬의 평균길이 l_c 는 다음 식 (5)로 결정되며.²⁵⁾

$$l_c = 2 \left(1 + \frac{Q^2}{Q^1} \right) \quad (5)$$

C-S-H내의 규산염 사면체 사슬층간의 연결까지 고려한 중합도 D_c 는 다음 식 (6)과 같다.²⁵⁾

$$D_c = \frac{Q^1 + 2Q^2 + 3Q^3}{Q^1 + Q^2 + Q^3} \quad (6)$$

D_c 와 l_c 값이 클수록 C-S-H의 중합도는 높음을 나타낸다. 기존의 연구에 따르면, C-S-H의 중합도는 칼슘과 규산의 비율(C/S ratio)에 영향을 받고 또한 연결층간의 물의 양에 영향을 받는 것으로 알려져 있다.^{26,27)} 이 연구에서는 $\text{Si}(\text{CH}_3)_4$ (tetramethylsilane, TMS)이 0 ppm을 기준으로 ^{29}Si 화학이동량을 결정하였다. 보조 기준으로는 $\text{Si}[(\text{CH}_3)_3]_8 \text{Si}_8\text{O}_{20}$ 을 사용하여 TMS기준으로 11.6 ppm에서 화학이동 피크를 확인하였다.

3. 실험 결과 및 분석

Fig. 5는 180분간 내화실험이 종료된 후 내화로에서 24시간 후 외부로 반출된 실험체의 외관전경으로, 실험체표면에 온도상승에 따른 균열이 발생하였으나, 폭렬 또는 피복 등의 탈락이 발생하지 않았음을 확인하였다.

Fig. 6은 표면과 표면으로부터 깊이 20 mm, 40 mm, 60 mm, 80 mm, 그리고 중심부(175 mm)에서 각각 2기의 열전대(thermocouple)에 의해 측정된 시간에 따른 온도의 증가를 보여주고 있다. Fig. 6의 온도이력에 따르면, 표면

에서 40 mm 깊이부터의 온도 상승곡선은 100°C에서 물(자유수)의 증발을 위하여 일정 시간 동안 온도의 상승이 지체되는 것을 볼 수 있다. 시간 180분에서 표면에서의 온도는 932°C, 기둥 중앙에서의 온도는 236°C까지 온도가 상승하였다.



Fig. 5 Appearance observation of the specimen after fire test

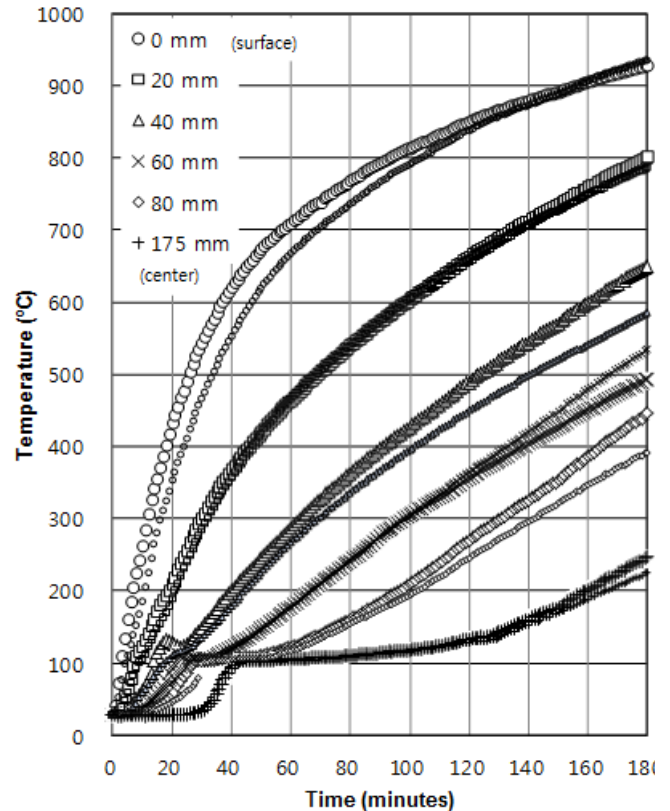


Fig. 6 Temperature evolution in RC column during the fire test

Fig. 7은 각각 표면과 표면으로부터 깊이 40 mm, 80 mm, 그리고 중심부(175 mm)에서 채취된 시멘트 매트릭스의 TGA 결과이다. 초기 100% 중량에 대하여 온도의 증가에 따른 상대 중량비를 나타내고 있다.

이 연구에서는 TGA 실험에서 C-S-H로부터 물이 증발하는 시작온도를 고려하여¹⁴⁾ 145°C ~ 400°C, 수산화칼슘으로부터 물이 증발하는 온도의 범위를 400°C ~ 600°C, 탄산칼슘으로부터 이산화탄소가 증발하는 온도의 범위를 600°C ~ 825°C로 고려하여, 해당 온도범위에서의 중량의 손실률을 Table 2에 정리하였다. Table 2에 정리된 결과로부터 RC 기둥의 중앙에서 수산화칼슘과 탄산칼슘으로부터 증발된 물의 양과 이산화탄소의 양이 각각 2.6%와 2.1%로 가장 크게 나타난 반면, C-S-H로부터 손실된 물의 양은 1.9%로 깊이 80 mm에서의 2.2% 보다 작게 나타남을 볼 수 있다. C-S-H에 대한 이러한 결과는 내화실험에서 최고 수열온도 419°C까지 상승한 깊이 80 mm에서의 C-S-H

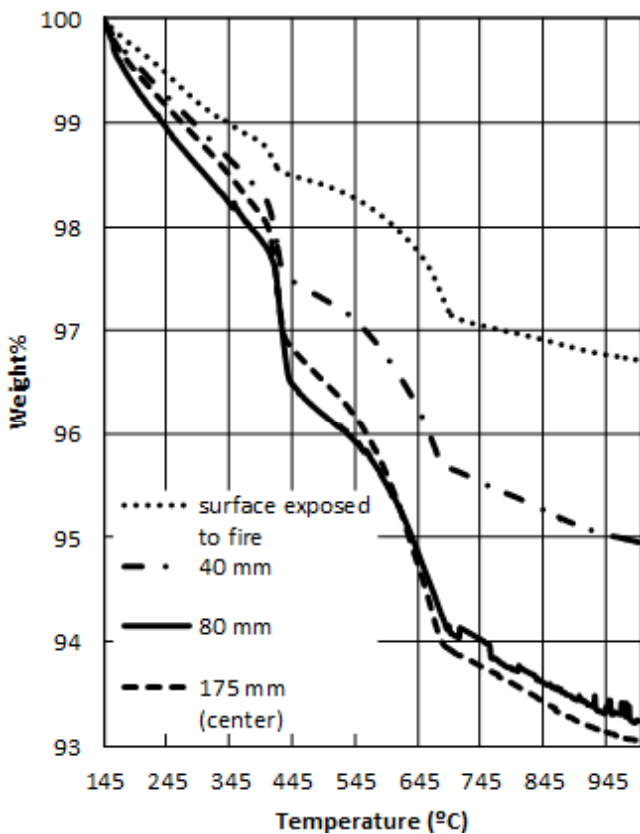


Fig. 7 TGA results

Table 2 Mass loss at the characterized temperature range

Depth (mm)	Experienced temperature	C-S-H 145°C ~ 400°C	Ca(OH) ₂ 400°C ~ 600°C	CaCO ₃ 600°C ~ 825°C
0	932 °C	1.2%	0.8%	1.1%
40	618 °C	1.7%	1.6%	1.4%
80	419 °C	2.2%	2.3%	1.8%
175	236 °C	1.9%	2.6%	2.1%

의 양이 최고 수열온도 236°C를 기록한 기둥중앙(175 mm)에서의 C-S-H의 양보다 더 많음을 나타낸다. 이러한 결과는 콘크리트의 낮은 열전도도로 인한 결과로 판단된다. 즉, 내화실험 후 기둥을 식히는 과정에서 기둥 중앙부의 온도는 표면이나 깊이 80 mm 지점보다 상당히 오랜 시간 C-S-H로부터 탈수현상이 발생할 수 있는 145°C 이상을 유지하였을 것이고, 더 많은 양의 C-S-H가 분해되었을 것이다. 이러한 연구 결과는 500°C 이상의 화재 온도에 노출되었던 콘크리트의 단면적을 구조부재의 강도 계산에서 배제하는 내화기준²⁾과 관련하여, 비록 콘크리트가 500°C 이하의 화재온도에 노출되었다 할지라도 콘크리트의 강도를 고려하는데 있어서 주의가 필요함을 환기시킨다.

Fig. 8은 XRDA 결과를 보여주고 있다. 수산화칼슘의 대표적인 피크의 위치인 18.2°에서 XRDA 스펙트럼 피크의 크기를 살펴보면, 표면과 깊이 40 mm 지점에서의 피크의 크기가 깊이 80 mm 지점과 중심부(175 mm)에서의 피크의 크기와 비교하여 매우 작음을 볼 수 있으며, 수산화칼슘에 대한 TGA분석 결과와 일치한다. 마찬가지로, C-S-H의 대표적인 피크의 위치인 54.9°에서 XRDA 스펙트럼 피크의 크기를 살펴보면, TGA결과와 같이 깊이 80 mm 지점에서의 피크의 크기가 최고임을 확인하였다.

²⁹Si MAS NMR의 분석 결과를 Fig. 9에 정리하였다. 이 연구에서는 화학이동범위 -65 ppm ~ -75 ppm, -75 ppm

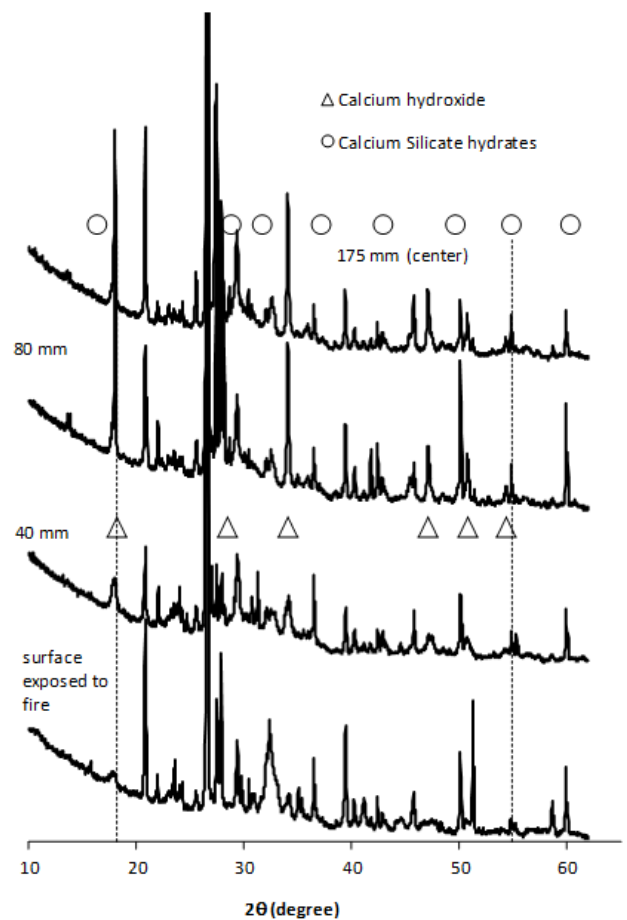


Fig. 8 XRDA results

~82 ppm, -82 ppm~-90 ppm, -90 ppm~-102 ppm에서 각각 Q⁰, Q¹, Q², Q³의 상대량을 산정하였다.

Table 3에 계산된 Q의 상대량을 정리하였고, 중합도 D_c는 식 (6)에 의해 계산하였다. 일반적으로 Q³는 정상조건 하에서 양생된 포틀랜드 시멘트 매트릭스의 실리케이트 연결구조에서는 나타나지 않으므로 이를 제외한 Q⁰, Q¹, Q²의 상대량을 괄호안에 재산정하였다. NMR분석에서 나타난 Q³ 연결은 골재에 의한 것으로 판단된다. 표면에서의 NMR분석 결과를 살펴보면, 연결 없이 존재하는 실리케이트의 상대량 Q⁰가 91.5%로 대부분의 실리케이트 연결이 파괴되었음을 알 수 있다. 깊이 80 mm 지점에서 Q⁰의 양이 가장 적고, 중합도도 1.49로 표면에서의 1.92를 제외하고는 가장 큰 중합도를 보이고 있다. 표면에서는 Q¹과 Q²의 양이 0.7%와 7.8%로 매우 작기 때문에 이로부터 계산된 중합도 1.92는 C-S-H의 중합도로 의미가 없는 것으로 판단된다.

Table 3 Qⁿ Intensities from NMR spectra

Depth (mm)	Q ⁰	Q ¹	Q ²	Q ³	D _c
0	56.2 (91.5)	0.4 (0.7)	4.8 (7.8)	38.5	1.92
40	21.8 (30.3)	28.6 (39.7)	21.6 (30.0)	27.8	1.43
80	15.1 (24.5)	23.6 (38.4)	22.8 (37.1)	38.6	1.49
175	21.7 (30.5)	27.1 (38.0)	22.4 (31.5)	28.7	1.45

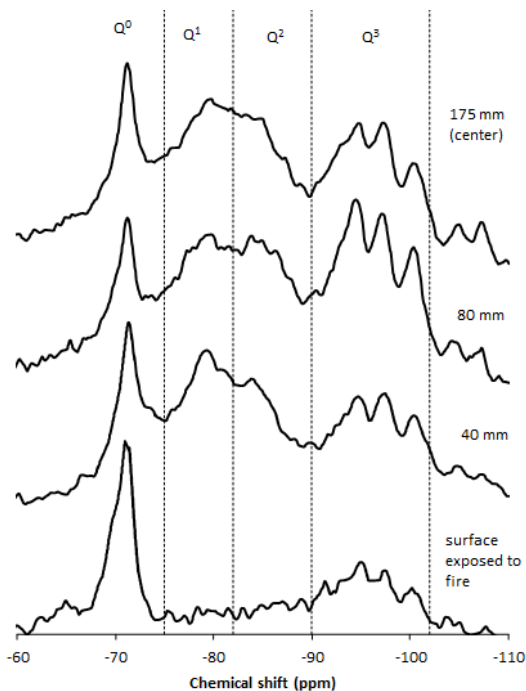


Fig. 9 NMR results

4. 결 론

이 연구에서는 다양한 분석방법을 이용하여 화재 후 RC 구조물의 손상을 평가할 수 있는 방안을 검토하였다.

- 1) 기둥 350 mm×350 mm의 화재시험 후 TGA 결과로부터 내화실험에서 최고 수열온도 419°C를 경험한 깊이 80 mm에서의 C-S-H의 양이 최고 수열온도 236°C를 경험한 기둥중앙(175 mm)에서의 C-S-H의 양보다 더 많음을 확인하였다. 이로부터 기둥의 중앙부가 깊이 80 mm지점보다 최고 수열온도는 낮지만 C-S-H가 분해될 수 있는 이상의 온도에 대한 수열시간은 길었을 것으로 사료된다.
- 2) XRDA 및 NMR 분석 결과, TGA 결과와 같이 깊이 80 mm 지점에서의 C-S-H의 양이 가장 많고, C-S-H의 중합도가 가장 높음을 확인하였다.
- 3) TGA, XRDA, NMR에 의한 분석 결과는 내화실험 후 기둥을 식히는 과정에서 콘크리트의 낮은 열전도도로 인하여 기둥 중앙부의 온도가 표면이나 깊이 80 mm 지점보다 오랜 시간 C-S-H를 분해할 수 있는 온도 145°C 이상을 유지함에 의한 것으로 판단된다.
- 4) 상기의 현상은 실제의 화재 후 RC 구조물의 평가와 유사한 경우로, 콘크리트나 철근의 화재시 온도로 RC 구조물의 내화기준을 설정하는 것은 화재에 의한 콘크리트 시멘트 매트릭스의 C-S-H 구조의 파괴를 과소평가할 수 있음을 보여준다. 그러므로, 기둥의 단면 크기를 고려하여 수열온도 이력을 고려하는 연구가 필요할 것으로 사료된다.

따라서, 이 연구에서 제안된 C-S-H의 손실에 대한 연구는 향후 초고층건축물의 내화기준을 마련하는데 유용하게 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

감사의 글

이 연구는 국토교통부 첨단도시개발사업의 연구비 지원(과제번호#‘09 첨단도시 A01)에 의해 수행되었습니다.

References

1. ACI Committee 216, *Standard Method for Determining Fire Resistance of Concrete and Masonry Construction Assemblies*, ACI, Detroit, 1997.
2. AS3600, *Concrete Structures Standards*, Australia, 2009.
3. *Fire Performance Management Standard for High Strength Concrete Column and Beam*, 2008-334, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korea, 2008, pp. 1-8.
4. Youm, K. S., Jeon, H. K., and Kim, H. Y., "Fire Test of Fiber Cocktail Reinforced High Strength Concrete Columns without Loading," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 21, No. 4, 2009, pp. 465-471.

5. Youm, K. S. and Jeon, H. K., "Fire Resistance Performance of High Strength Concrete Columns with Fireproof Gypsum Board," *Journal of the Korea Concrete Institute*, Vol. 22, No. 2, 2010, pp. 229-235.
6. Jain, J. and Neithalath, N., "Physico-Chemical Changes in Nano-Silica and Silica Fume Modified Cement Pastes in Response to Leaching," *International Journal of Materials and Structural Integrity*, Vol. 3, 2009, pp. 114-133.
7. Diamond, S., *Cement Paste Microstructure-an Overview at Several Levels*, in: *Hydraulic Cement Pastes; Their Structure and Properties*, Tapton Hall, University of Sheffield, 1976, pp. 2-30.
8. Larbi, J. A., "Microstructure of the Interfacial Zone Around Aggregate Particles in Concrete," *Heron*, Vol. 38, No. 1, 1993, pp. 1-69.
9. Jennings, H. M. and Tennis, P. D., "Model for the Developing Microstructure in Portland Cement Pastes," *Journal of the American Ceramic Society*, Vol. 77, No. 12, 1994, pp. 3161-3172.
10. Odelson, J. B., Kerr, E. A., and Vichit-Vadkan W., "Young's Modulus of Cement Paste at Elevated Temperatures," *Cement and Concrete Research*, Vol. 37, No. 2, 2007, pp. 258-263.
11. Alonso, C. and Fernandez, L., "Dehydration and Rehydration Processes of Cement Paste Exposed to High Temperature Environments," *Journal of Materials Science*, Vol. 39, No. 9, 2004, pp. 3015-3024.
12. Alarcon-Ruiz, L., Platret, G., Massieu, E., and Ehrlicher, A., "The Use of Thermal Analysis in Assessing the Effect of Temperature on a Cement Paste," *Cement and Concrete Research*, Vol. 35, No. 3, 2005, pp. 609-613.
13. Fire Performance Management Standard for High Strength Concrete Column and Beam, 2008-334, Ministry of Land, Infrastructure and Transportation, Korea, 2008, pp. 1-8.
14. Taylor, H. F. W., *Cement Chemistry*, London, Thomas Telford Publishing, 1997.
15. Kim, J. J., Rahman, M. K., Al-Majed, A. A., Al-Zahrani, M. M., and Reda Taha, M. M., "Nanosilica Effects on Composition and Silicate Polymerization in Hardened Cement Paste Cured under High Temperature and Pressure," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 43, 2013, pp. 78-85.
16. Kim, J. J., Foley, E. M., and Reda Taha, M. M., "Nano-Mechanical Characterization of Synthetic Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) with Varying CaO/SiO₂ Mixture Ratios," *Cement and Concrete Composites*, Vol. 36, 2013, pp. 65-70.
17. Emmy, M. Foley, Kim, J. J., and Reda Taha, M. M., "Synthesis and Nano-Mechanical Characterization of Calcium-Silicate-Hydrate (C-S-H) Made with 1.5 CaO/SiO₂ Mixture," *Cement and Concrete Research*, Vol. 42, No. 9, 2012, pp. 1225-1232.
18. Günther, H., *NMR Spectroscopy: Basic Principles, Concepts, and Applications in Chemistry*, Wiley, 1995.
19. Kim, J. J., Rahman, M. K., and Reda Taha, M. M., "Examining Microstructural Composition of Hardened Cement Paste Cured under High Temperature and Pressure Using Nanoindentation and ²⁹Si MAS NMR," *Applied Nanoscience*, Vol. 2, No. 4, 2012, pp. 445-456.
20. Lippmaa, E. and Mägi, M., "Structural Studies of Silicates by Solid-State High-Resolution ²⁹Si NMR," *American Chemical Society*, Vol. 102, No. 15, 1980, pp. 4889-4893.
21. Grutzeck, M. and Benesi, A., "Silicon-29 Magic-Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance Study of Calcium Silicate Hydrates," *American Cermaic Society*, Vol. 72, No. 4, 1989, pp. 665-668.
22. Macomber, R. S., *A Complete Introduction to Modern NMR Spectroscopy*, John Wiley & Sons., 1998.
23. Wieker, W., Grimmer, A. R., "Solid-State High-Resolution ²⁹Si NMR Spectroscopy of Synthetic 14Å, 11Å and 9Å Tobermorites," *Cement and Concrete Research*, Vol. 12, No. 3, 1998, pp. 333-339.
24. Young, J. F., "Investigations of Calcium Silicate Hydrate Structure Using Silicon-29 Nuclear Magnetic Resonance Spectroscopy," *American Cermaic Society*, Vol. 71, No. 3, 1988, pp. 118-120.
25. Jupe, A. C., Wilkinson, A. P., Luke, K., and Funkhouser, G. P., "Class H Oil Well Cement Hydration at Elevated Temperature in the Presence of Retarding Agents: An in Situ High-Energy X-Ray Diffraction Study," *Industrial Engineering Chemistry Research*, Vol. 44, No. 15, 2005, pp. 5579-5584.
26. Bell, G. M. M. and Benstedm, J., "Study of Calcium Silicate Hydrates by Solid State High Resolution ²⁹Si Nuclear Magnetic Resonance," *Advanced in Cement Research*, Vol. 3, 1990, pp. 23-37.
27. Cong, X. and R. J. Kirkpatrick, R.J., "²⁹Si MAS NMR Study of the Structure of Calcium Silicate Hydrate," *Advanced Cement Based Materials*, Vol. 3, 1996, pp. 144-156.

요약 이 연구에서는 RC기둥의 내화실험 후 콘크리트 시멘트 매트릭스의 구성성분의 변화를 조사하였다. 표준화재곡선에 따라 내화실험을 수행하고 상온에서 기둥을 식힌 후, 표면과 깊이 40 mm, 80 mm, 단면중심(175 mm) 지점에서의 샘플을 채취하였다. 수화된 시멘트의 대표적인 구성성분인 칼슘-실리케이트 수화물(C-S-H)와 수산화칼슘의 구성성분 변화를 열중량분석기(TGA)와 X선 회절분석기(XRDA)를 이용하여 분석하였다. 핵자기공명기(NMR)를 이용하여, C-S-H의 실리케이트 중합도변화를 관찰하였다. 세 가지 분석 결과를 종합해 본 결과 내화실험에서 236℃를 경험한 중심부(175 mm)에서의 시멘트 매트릭스의 상태가 618℃를 경험한 깊이 40 mm에서의 시멘트 매트릭스의 상태와 유사하며, 가장 견건하다고 판단되는 시멘트 매트릭스는 419℃를 경험한 깊이 80 mm 지점에서의 시멘트 매트릭스였다. 이는 콘크리트의 경험 온도와 철근의 온도제한에 의한 내화규정은 RC구조물의 내화성능을 과대평가할 수 있음을 나타내며, 향후 내화규정의 마련에 유용하게 활용될 것으로 판단된다.

핵심용어 : RC기둥, 내화실험, 시멘트 매트릭스, 미세구조, 핵자기공명