

Research Paper

화재로 손상된 고강도 콘크리트의 손상 깊이 측정을 위한 수중침지 건조방법의 활용 Utilization of Immersion-Drying Method for Measuring Damage Depth of Fire-Damaged High-Strength Concrete

김종¹ · 임군수² · 백승복³ · 한민철^{4*}

Kim, Jong¹ · Lim Gun-Su² · Beak, Seung-Bok³ · Han, Min-Cheol^{4*}

¹Assistant Professor, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

²Doctor's Course, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

³Doctor's, Dept. of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, Cheongju University, Naduk-Dong, Cheongju-City, 28503, Korea

*Corresponding author

Han, Min-Cheol

Tel : 82-43-229-8484

E-mail : twan@cju.ac.kr

Received : March 29, 2024

Revised : May 7, 2024

Accepted: May 12, 2024

ABSTRACT

This study presents a novel approach for evaluating fire-induced damage depth in concrete. The methodology leverages the principle that exposure to high temperatures causes internal expansion within concrete, leading to increased voids and microcracks in the damaged zones. This heightened porosity results in greater absorption rates compared to undamaged areas. By immersing fire-damaged concrete samples in water and subsequently monitoring the drying process, the depth of damage can be assessed. Differences in drying rates and color variations between damaged and undamaged areas serve as visual indicators for determining the extent of the damage. Experimental results from this water immersion method revealed damage depths of 38.7mm and 37.5mm for two different concrete mixtures. These measurements notably surpass the damage depths estimated using traditional phenolphthalein-based methods. This discrepancy suggests that utilizing the absorption rate principle, which is directly linked to the physical changes caused by thermal expansion, offers a more accurate and sensitive assessment of fire damage depth compared to methods relying solely on the presence of Portlandite for colorimetric indication.

Keywords : fire damage, damage depth of concrete, immersion-drying method, phenolphthalein

1. 서론

최근 도심지의 주거용 건축물이 고층화, 과밀화되는 경향으로 변화하면서 고층건축물의 잠재적인 화재 발생의 위험성도 증대되고 있다. 국내 연간 화재발생은 2010~2020년 기준으로 평균 40,000건이며, 그중 60% 이상이 건축물의 화재로써 인명 및 재산 피해규모가 매년 상승하고 있다[1]. 화재 시 고강도 콘크리트를 사용한 고층 건축물의 경우, 일반 규모의 건축물보다 그 피해 규모가 더 커질 수 있는데, 고강도 콘크리트는 콘크리트 내부 조직이 치밀하여 고열을 받게 되면 보통 콘크리트에서는 나타나지 않는 폭발 현상을 포함한 단면 균열, 박리 결손 및 심할 경우 붕괴의 위험도 있다[2]. 이러한 화재손상을 입은 구조물의 피해 규모에 따른 정확한 진단평가는 구조물의 안전성 확보 및 보수·보강 공법, 선정 등에 미치는 영향이 크다. 특히, 콘크리트의 수열상태에 따른 손상 깊이는 매우 중요한 인자로 평가되고 있다. 국외의 경우 화재피해를 입은 콘크리트의 수열온도 단계별 강도 및 내구성 저하등급을 구분하고 그에 따른 보수보강 방법을 제시하고 있으나[3,4], 국내에는 화재



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

손상을 입은 구조물의 안전성을 진단·평가하는 기술이 명확하게 확립되어 있지 않아 무분별하게 화재로 손상된 구조물을 해체하는 사례들도 발생하고 있다.

현재 화재 시 콘크리트의 손상 깊이를 측정하는 방법으로는 페놀프탈레인 용액에 의한 중성화 깊이 평가가 일반적으로 활용되며, 이 방법은 적용이 간단하고 즉각적인 판단이 가능하다는 장점이 있으나, 콘크리트의 수열온도가 500°C를 초과하였음에도 콘크리트 조직내에 존재하는 미량의 수산화칼슘($\text{Ca}(\text{OH})_2$)에 의해 색상이 발현되어 손상 범위가 과소평가되는 것으로 보고 되고 있다[5-7]. 또한, Lim et al.[8]의 연구결과에 따르면 화재피해를 정량적으로 분석할 수 있는 화학적 분석방법으로 XRD, TG-DTA 및 공극구조 분석 등을 들 수 있으나 분석에 장시간이 소요되고, 비용이 고가이므로 비효율적인 측면이 있고 기술하고 있다.

따라서, 화재피해 콘크리트의 손상깊이를 보다 정확하고 간편하게 측정평가할 수 있는 기법의 개발이 요구되는 상황으로 본 연구진에서는 Figure 1과 같은 원리를 이용하여 화재로 손상된 콘크리트의 손상깊이를 정확하고 간편하게 평가할 수 있는 방법을 제안하고자 한다[8]. 즉, Figure 1에서와 같이 콘크리트가 고온에 노출되면 450~550°C에서는 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 분해되지만, 콘크리트 조직내에 존재하는 미량의 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 에 의해 페놀프탈레인 용액에 의해 색상이 발현되어 손상 범위가 명확하지 않다. 그러나, 고온에 노출된 콘크리트의 경우 내부의 수분 및 골재 팽창에 의해 치밀하였던 조직이 손상되면서 미세균열과 공극팽창이 발생하여 물리적 손상이 발생한다. 내부에서 발생한 물리적 손상의 경우 육안으로는 관측하기 어렵지만, 이를 물속에 침지하여 내부 포화상태를 만든 후 건조 상태를 유지하면 건조되는 과정 중 물리적 손상 부위를 명확히 관측할 수 있다. 이는, 건조 과정 중 공극 팽창에 의한 물리적 손상부위가 건전한 부위보다 높은 공극률을 가지게 되며, 높은 공극률에 의한 수분 흡수율이 높아져 동일한 시간동안 건조하여도 손상부위의 건조 속도는 건전한 부위보다 늦게 건조되어 손상부위의 짙은 명도를 유지하게 되는 원리이다.

그러므로, 본 연구에서는 화재로 열화된 콘크리트가 흡수율이 높아지는 원리를 이용한 수증침지 건조방법을 활용하여 고강도 콘크리트의 정확한 화재 손상 깊이를 평가하고자 한다.

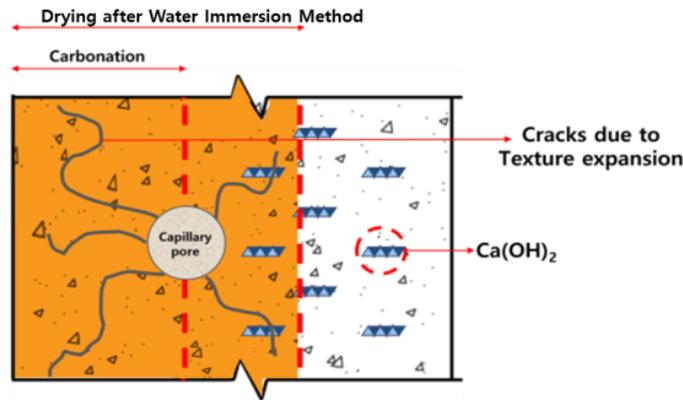


Figure 1. Conceptual diagram of immersion drying method for measuring concrete fire damage depth

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획

본 연구의 실험계획은 Table 1과 같고, 배합사항으로 Table 2와 같다. 먼저, 본 연구에 사용된 콘크리트의 규격은 40MPa, 60MPa 모두 고강도 콘크리트로 계획하였다. 내화실험을 위한 Mock-up부재 제작은 750×750×1,200mm 크기의 기둥부재를

모사한 시험체를 제작하였다[9].

실험항목으로 경화 콘크리트의 실험사항은 Table 1과 같이 계획하였다. Mock-up부재의 내화실험은 KS F 2257-1 표준가 열곡선에 의한 고온에 3시간 노출하여, Mock-up부재가 화재손상을 받게 한 후 손상 깊이를 측정하였다. 화재 손상깊이 측정 방법으로는 $\varnothing 50\text{mm}$ 코어시료를 채취하여 본 연구에서 제안한 수중 침지방법과 비교군으로 기존 페놀프탈레인 용액을 이용하는 것으로 계획하였다. 화재시험 후 콘크리트 내부 손상과 조직구조 변화를 평가하기 위하여 화재시험후 재령 1일에서 전자주사현미경(이하 SEM)을 이용한 미세구조 분석을 실시하였다.

Table 1. Experimental plan

Factors		Variables	
Experiment variables	Ready-mixed concrete specifications	2	· 40MPa · 60MPa
	Test specimen(mm)	1	· Column : 750×750×1,200
	High temperature exposure time(hr)	1	· 3
Test items	Hardened concrete	6	· SEM observations with depth from surface (0~20mm, 20~40mm, 40~60mm, 60~80mm, 80~100mm)
			· Compressive strength (3, 7, 28days)
			· Heating temp
			· Carbonation
			· Immersion-Drying Method
			· Absorption ratio

Table 2. Mix proportions of concrete

Ready-mixed concrete specifications	W/B (%)	S/a (%)	Weight mixing(kg/m ³)							
			W	OPC	FA	BS	Aggregate			AD1
							25mm	S1	S2	
40MPa	32.6	48.8	164	353	75	75	874	240	575	4.02
60MPa	23.3	46.0	160	481	103	103	837	205	492	5.50

2.2 사용재료

본 연구의 사용재료로 시멘트는 S사의 보통포틀랜드 시멘트를 사용하였다. 잔골재는 부순모래와 강모래를 혼합하여 사용하였고, 굵은골재는 25mm 부순 굵은골재를 사용하였는데, 시멘트 및 골재의 물리적 성질은 Table 3, 4와 같다.

또한, 광물질 혼화재료로 FA와 BS는 국내산을 사용하였고, 화학 혼화제는 고성능 AE감수제 표준형으로 폴리카본산계를 사용하였으며, 각 혼화재료의 물리적 성질 및 화학성분은 Table 5, 6과 같다.

Table 3. Physical properties of cement

Density(g/cm ³)	Blaine(cm ² /g)	Setting time(min)		Compressive strength(MPa)		
		Initial set	Finale set	3day	7day	28day
3.15	3,800	210	300	32.7	44.4	56.6

Table 4. Physical properties of aggregates

Type	Density(g/cm ³)	Absorption ratio(%)	Fineness modulus	Passing ratio of 0.08mm sieve(%)
CG ^{a)}	2.67	0.7	6.89	0.1
CS ^{b)}	2.62	1.0	2.92	3.2
NS ^{c)}	2.55	1.2	2.90	2.3

a) CG : Coarse gravel

b) CS : Crushed sand

c) NS : Natural sand

Table 5. Physical properties of mineral admixtures

Type	Density(g/cm ³)	Blaine(cm ² /g)	Loss on ignition(%)
FA	2.23	3,431	2.9
BS	2.91	4,350	1.4

Table 6. Physical properties of chemical admixtures

Type	Appearance	Main ingredient	Color	Density(g/cm ³)
Air entraining and superplasticizer	Liquid phase	Polycarboxylate	Dark brown	1.06

2.3 실험방법

경화 콘크리트에서의 압축강도는 3일, 7일 및 28일 재령에서 KS F 2405에 의거하여 측정하였다. 또한, Mock-up부재 제조는 Figure 2의 순서에 따라 제작 하였고, 내화실험은 Figure 3(a)와 같이 진행 하였으며, 150일 기증양생 후 KS F 2257-1의 표준가열곡선에 의한 내화시험을 통해 고온에 3시간 노출시켜 화재 손상을 받게 하였다.

내화시험을 진행하는 동안 Mock-up부재의 표면으로부터 각 깊이별 온도이력을 측정하였다. 화재 손상 깊이 측정은 Table 7과 같이 Mock-up부재의 4면을 각각 화재시험 후 재령 1일에 \varnothing 50mm 코어시료를 채취하여 페놀프탈레인에 의한 중성화 깊이, SEM에 의한 미세구조 분석, 본 연구에서 제안한 수중 침지후 흡수율을 측정하였다. SEM에 의한 미세구조 분석은 내화시험전 시험체를 측정하였고 내화시험후 표면으로부터 20mm, 20~40mm, 40~60mm, 60~80mm, 80~100mm 깊이별로 측정을 실시하였다.

수중 침지후 건조 방법의 경우 화재손상 Mock-up 시험체로부터 \varnothing 50mm 코어시료를 채취하여 수중에 24시간 동안 침지를 시킨후 포화상태의 시료를 젖은 수건으로 표면을 닦고, 평평한 테이블 위에 코어시료의 단부를 위로하여 수평으로 올려 놓는다. 그 이후 20°C 온도조건의 환경에서 건조과정을 사진촬영하여 단부와 내부의 흡수율 차이에 따른 색상차를 육안으로 확인하고 손상깊이를 측정하였다.

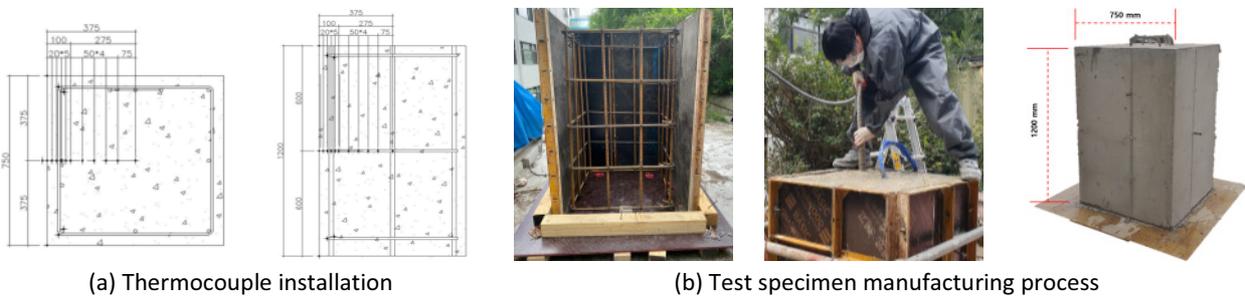
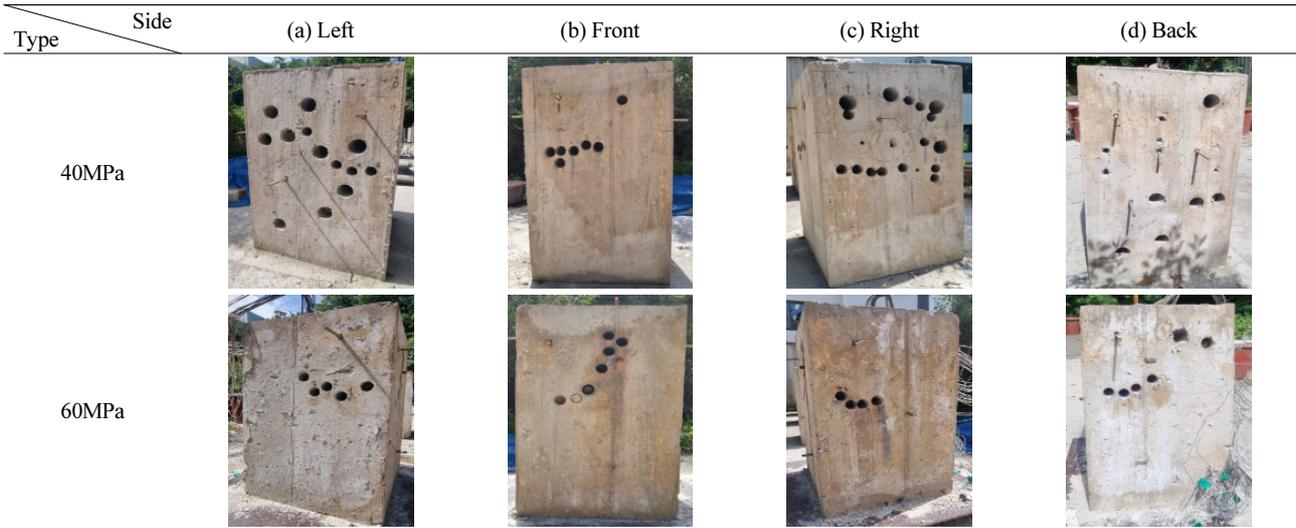


Figure 2. Thermocouple installation and manufacturing process



Figure 3. Experimental process

Table 7. Core extraction process for test specimens


3. 실험결과 및 분석

3.1 경화 콘크리트의 특성

3.1.1 압축강도 및 온도이력 특성

Figure 4는 배합 종류별 재령결과에 따른 압축강도를 나타낸 것이다. 각 배합별 압축강도는 재령 경과에 따라 증가하였으며, 28일 재령에서 목표 강도치를 만족하는 것으로 확인하였다.

Figure 5는 Mock-up 부재별 가열시간에 따른 표면부 온도와 표준온도 및 노내온도를 나타낸 것이다. 시간에 따라 부재의 온도가 지속적으로 상승했는데, 450°C 전·후로 온도가 급격하게 감소하였다. 이는 고강도 콘크리트의 치밀한 구조로 인하여, 내부의 수분들이 고온에 기화하는 과정에서 외부로 방출 되어질 때, 내부의 수증기가 외부로 이동하는 과정에서 기화열에 의한 일시적 온도감소로 보여진다.

Figure 6은 내화시험을 실시한 Mock-up부재의 각각 표면으로부터 깊이별 최고온도를 나타낸 것이며, 온도측정 결과로는 표면으로부터 깊이가 깊어질수록 공히 온도가 낮아지는 것으로 나타났다. 먼저, 표면으로부터 깊이 20~60mm의 경우 온도가 급격히 감소하는 것으로 나타났고, 150mm 이상의 깊이부터는 온도 감소율이 작거나 일정온도로 유지되는 것으로 나타났다.

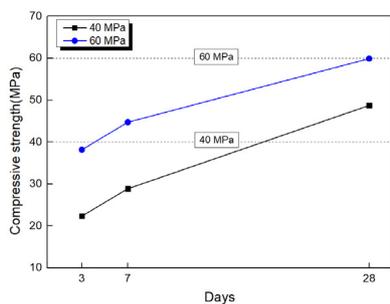


Figure 4. Compressive strength of concrete

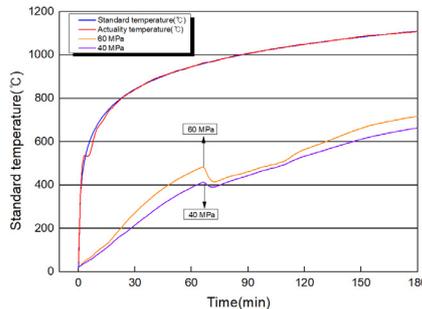


Figure 5. Surface temperature of test specimens

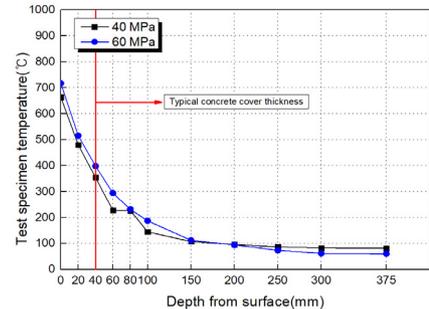


Figure 6. Temperature of profile of test specimens at varying depths from the surface

3.1.2 페놀프탈레인 용액기반 중성화시험에 의한 화재손상 깊이 특성

Figure 7과 Table 8은 3시간 표준가열 시험에 의해 화재손상을 입은 Mock-up 부재를 강도수준별로 4면에 대하여 중성화 깊이를 측정된 것이다. 먼저, 40MPa의 경우 4면의 중성화 깊이는 20, 25, 25 및 15mm로 측정되어 평균 21.5mm로 확인되었으며, 60MPa의 경우 25, 25, 20 및 20mm로 측정되어 평균 22.5mm 확인되었다. 이는 페놀프탈레인에 반응하는 물질인 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 해당 깊이에서 분해되어 중성화 깊이로 측정된 것인데 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 경우 450~550°C에서 분해가 된다고 알려져 왔고[5-7], Figure 8에서 알 수 있듯이 표면으로부터 깊이가 20mm범위에서 450~515°C의 화재손상을 받아 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 분해된 것으로 판단된다.

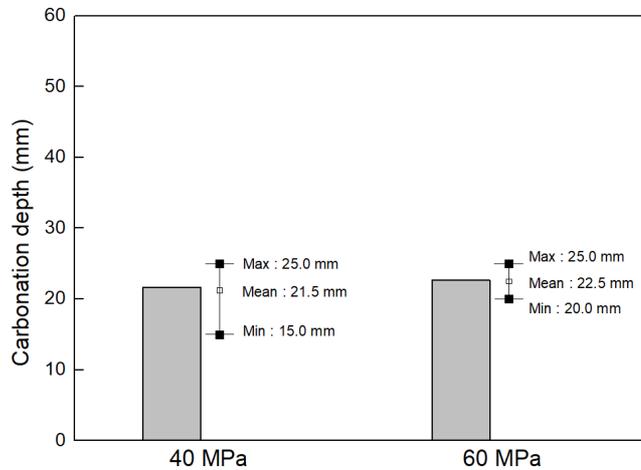


Figure 7. Average carbonation depth compared to concrete specifications

Table 8. Carbonation depth measurement of fired test specimens

Type	(a) Left	(b) Front	(c) Right	(d) Back
40MPa				
60MPa				

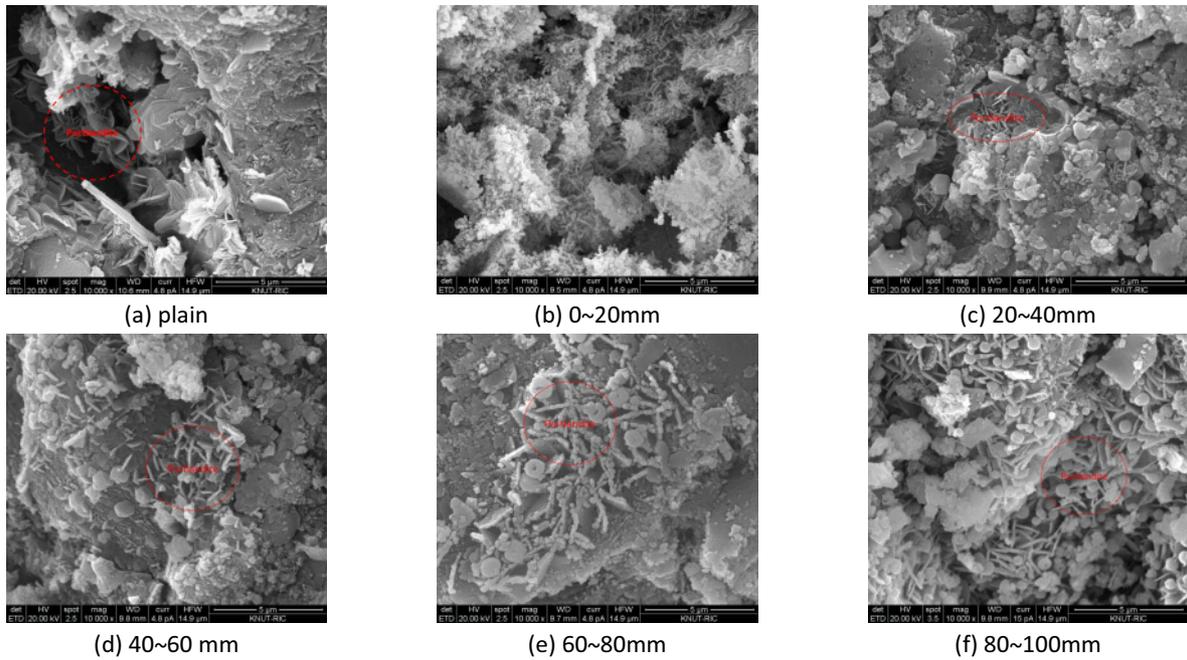


Figure 8. SEM images of fine structure at varying depths for 40MPa concrete(magnification: 10,000x)

3.1.3 전자주사현미경(Scanning Electron Microscope)측정에 따른 화재손상 깊이 특성

Figure 8 및 Figure 9는 40, 60MPa의 고강도 콘크리트 표면으로부터 깊이별로 SEM을 통해 10,000배율로 촬영한 미세구조 분석결과를 나타낸 것이다. SEM에 의한 미세구조 분석은 내화시험전 시험체를 측정하였고, 내화시험후 표면으로부터 20mm, 20~40mm, 40~60mm, 60~80mm, 80~100mm 깊이에서 채취한 시편을 이용하여 화재노출후 깊이별 생성물의 변화

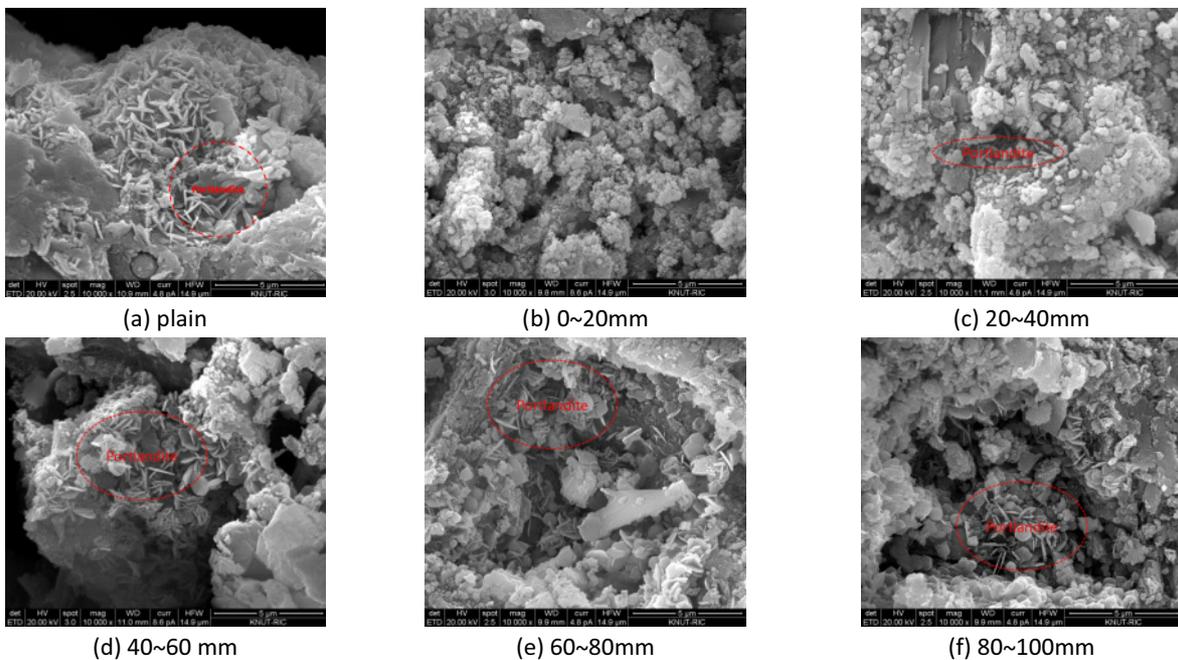


Figure 9. SEM images of fine structure at varying depths for 60MPa concrete(magnification: 10,000x)

를 분석하였다.

40, 60MPa 공히 유사한 결과로 확인되었으며, Byun and Ryu[6] 및 Tae and Lee[10]의 연구결과와 같이 수열온도에 따른 시멘트 수화물을 확인할 수 있었다. 먼저, Plain의 경우 화재손상을 받지 않은 실험체로서 SEM 측정결과 다수에서 Portlandite ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 생성물을 확인할 수 있었다. 반면, 표면으로부터 깊이 0~20mm 구간의 경우 페놀프탈레인 시험을 통해 알 수 있듯이, Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 생성물이 분해되어 SEM 사진을 통해 관찰되지 않았으나, 그 이상의 깊이에서는 깊이별 최고 온도를 참고하였을 때 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 생성물이 존재할 것으로 예상하였고, SEM 사진 관찰 결과 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 생성물이 존재하는 것을 확인하였다.

이를 통해 SEM 사진을 통해서도 페놀프탈레인에 의한 중성화 측정방법과 유사한 손상깊이까지 측정이 가능할 것으로 판단된다. 그러나, 수열온도 450°C 이하에 노출된 콘크리트의 손상여부를 보다 정밀하게 판단하기에는 다소 무리가 있을 것으로 판단된다.

3.1.4 수중침지 건조방법에 따른 화재 손상깊이 특성

Figure 10은 Table 9와 같이 화재 손상된 고강도 콘크리트를 수중침지 건조방법으로 손상 부위를 측정한 것이다. 40, 60MPa 규격의 콘크리트 코어시료 모두 화재시험 종료후 24시간동안 수중 침지한 다음 20°C, 60%의 항온항습 조건에서 최대 110분 기건 상태로 존치하였다. 이후 육안관찰을 통해 색상차이를 평가하여 손상부위 및 건전부위를 구분하여 측정하였는데, 손상부위 콘크리트는 미세균열 및 조직이완으로 흡수율이 높아져서 건조하여도 흡수율이 상대적으로 높게 나타나 어두운 색으로 보였고, 건전한 콘크리트는 상대적으로 흡수율이 낮아져서 밝은색을 띠었다. 측정결과 시험체 강도별 손상깊이는 40MPa의 경우 평균 38.7mm 및 60MPa의 경우 평균 37.5mm로 확인하였다.

한편, Figure 11은 콘크리트 강도수준별 화재 손상 부위와 건전 부위의 흡수율을 측정한 것이다. 강도수준별 손상 부위의 평균 흡수율은 40MPa의 경우 9.71%, 60MPa의 경우 9.35%인 것으로 나타났고, 건전 부위의 평균 흡수율의 경우 40MPa의 경우 7.25% 및 60MPa의 경우 6.92%인 것으로 확인하였다. 즉, 손상 부위와 건전 부위의 흡수율 차이는 각각 2.46 및 2.43%로 나타났고, 손상 부위가 건전 부위보다 흡수율이 더 높다는 결과를 확인할 수 있었다. 이는 콘크리트가 고온에 화재손상을 입어 내부 생성물들의 분해와 조직의 팽창으로 인해 건전 부위에 비해 손상 부위의 공극이 다량 발생 및 공극의 크기가 커짐에 따라 흡수율 차이가 발생하여 나타난 결과로 판단된다.

Table 10은 본 연구에서 수행한 측정 방법별 손상깊이를 비교한 결과를 나타낸 것이다. 수중침지 건조방법에 의한 손상깊이 평가가 여타 다른 방법에 의하여 평가된 손상 깊이가 보다 더 깊은 화재손상 깊이로 나타났다. 이는 내화시험시 표면으로부터 깊이 40mm에서 최고온도가 310.2°C가 나타난 것과 관련이 있는 것으로 사료되는데, 기존연구에 따르면 온도상승으로 시멘트의 수화반응 촉진과 수열에 의한 콘크리트 경화체 내의 수분증발에 의해서 수열전 보다 치밀해진 결과로 압축강도가 상승하는 것으로, 수열온도가 300°C가 넘는 시점부터는 압축강도가 감소하는 것으로 보고되고 있다[11]. 300°C 이상에서는 고온에 의해 콘크리트 조직이 팽창하여 미세한 균열이 발생하고 이에 따라 압축강도가 저하하는 것으로 알려져 있는바, 해당 온도에서도 콘크리트는 화재시 고온에 의한 피해를 받게 된다고 판단된다. 그러나 기존 페놀프탈레인 방법의 경우 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 의 존재 여부에 따른 발색 차이로 손상깊이를 측정하는 원리로서 화재손상을 입어 콘크리트 내부조직에 균열 및 손상이 가해졌더라도 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 가 소량이라도 존재하는 환경에서는 발색이 이루어져 화재 손상 부위를 판정할 수 없는 문제점이 있어 이 정도의 온도조건에서의 열화를 감지할 수 없는 것으로 피해범위를 과소 추정하는 것으로 판단된다.

반면에 수중 침지방법의 경우 화재손상에 따른 균열 및 조직의 이완으로 인한 흡수율의 차이를 이용하여 화재손상 깊이를 측정하는 것으로 기존의 일반적인 페놀프탈레인 용액에 의한 화학적 변화를 측정하는 경우보다 정확하게 손상 깊이를 측정할 수 있는 것으로 판단된다.

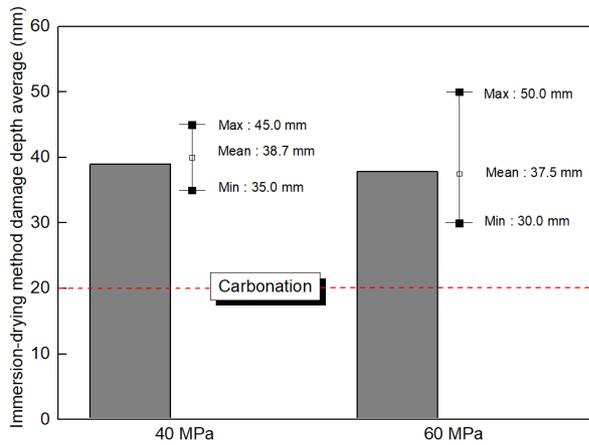


Figure 10. Immersion-drying method damage depth average

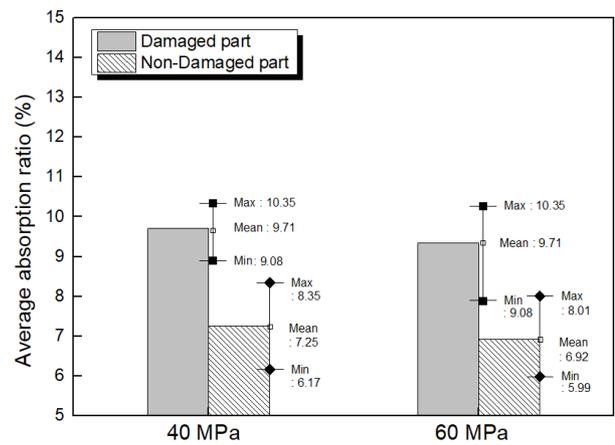


Figure 11. Average absorption ratio of damaged and non-damaged parts compared to concrete specifications

Table 9. Fire damage depth measurement using the drying after water immersion method

Type	40MPa Elapsed time(min)				60MPa Elapsed time(min)			
	0	50	80	110	0	50	80	110
(a) Left				 35mm (red line), 115mm (blue line)				 50mm (red line), 110mm (blue line)
(b) Front				 45mm (red line), 85mm (blue line)				 30mm (red line), 130mm (blue line)
(c) Right				 40mm (red line), 100mm (blue line)				 40mm (red line), 60mm (blue line)
(d) Back				 35mm (red line), 85mm (blue line)				 30mm (red line), 170mm (blue line)

Table 10. Comparison data of damage depth measurements

Type	Damage depth(mm)	
	40MPa	60MPa
Phenolphthalein measurement results	21.5	22.5
Drying after water immersion method	38.7	37.5

4. 결론

본 연구에서는 화재로 손상된 고강도 콘크리트의 손상 깊이 판정방법을 평가하고자 기존의 일반적인 방법과 개발중인 수중침지 건조방법의 흡수율 측정방법을 활용하여 일련의 실험을 진행하였는데, 그 결과를 제시하면 다음과 같다.

- 1) 본 연구에서 제작한 Mock-up 기둥부재는 KS 2257-1의 표준가열 곡선에 의한 내화시험을 통해 고온조건에 노출시켰는데, 40MPa 기둥부재의 표면부는 노출시간 180분에서 663°C, 60MPa 기둥부재의 표면부는 노출시간 180분에서 717°C까지 상승시켜 화재 손상을 유발하였는데, 이때 부재의 중심으로 갈수록 수열온도는 낮아지는 것으로 확인되었다.
- 2) 페놀프탈레인 용액을 이용한 화재 손상깊이 측정방법으로 중성화 깊이를 측정하였는데, 40MPa급 Mock-up 부재의 경우 평균 21.5mm, 60MPa급 Mock-up 부재의 경우 평균 22.5mm로 나타났다. 이는 표면에서 20mm 위치의 온도측정 결과 440~515°C로 나타났는데, 해당온도 조건에서는 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$)가 분해되어 알칼리성이 소실되어 나타난 결과로 판단된다.
- 3) 표면부터 깊이별로 SEM을 10 000배율로 촬영하여 미세구조를 분석하였는데, 화재손상을 받지 않은 Plain의 경우 모든 단면에서 온전한 수화생성물들을 확인할 수 있었으나, 화재손상을 받은 Mock-up 시험체의 경우 0~20mm 깊이에서는 고온에 의해 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 생성물이 분해되어 SEM 사진을 통해 관찰되지 않았으며, 그 이상의 깊이 구간의 경우 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$) 생성물이 존재하는 것을 확인하였다.
- 4) 콘크리트 강도 수준별 화재 손상부위와 건전한 부위의 흡수율을 측정하였는데, 흡수율 차이는 각각 2.46 및 2.43%로 확인되었다. 화재에 의한 손상 부위는 고온에 의해 콘크리트 조직이 팽창하여 공극이 다량 발생하고 미세균열이 발생됨에 따라 건전한 부위보다 흡수율이 더 높아진 것으로 판단된다.
- 5) 본 연구에서 제안한 수중침지 건조방법에 의한 화재 손상 깊이 측정결과는 배합별로 각각 38.7 및 37.5mm로 나타났는데, 기존 페놀프탈레인에 의한 중성화 측정방법보다 손상깊이를 더 정확하게 측정할 수 있었다. 이는 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 존재여부에 따라 발색이 되는 페놀프탈레인법에 비해 콘크리트의 조직이완에 따른 흡수차 원리를 이용한 손상 깊이를 측정하는 방법이 더 정확한 손상 깊이를 측정할 수 있음을 확인하였다.

요약

본 연구에서는 화재로 손상된 콘크리트의 손상 깊이 판정방법을 제안하고자 하였다. 고온에 노출된 콘크리트의 경우 내부 조직이 팽창하여 건전한 부위보다 손상부위의 공극이 다량 발생하고 미세균열이 발생됨에 따라 흡수율이 더 높아져 수중 침지후 건조를 하는과정에서 건전부위보다 손상부위의 낮은 건조속도와 이에 따른 명도차이에 의한 색상차이를 이용하여 손상 깊이를 측정하는 것이다. 수중 침지방법의 경우 배합별로 각각 38.7 및 37.5mm로 나타났는데, 기존 페놀프탈레인에 의한 중성화 측정방법보다 손상깊이를 깊게 추정하는 것을 알 수 있었다. 이는 Portlandite($\text{Ca}(\text{OH})_2$)의 존재여부에 따라 발색이 되는 페놀프탈레인법에 비해 조직이완에 따른 흡수율 원리를 이용한 손상 깊이를 측정하는 방법이 더 민감도가 높아 얻어진 결과로 사료된다.

키워드 : 화재피해, 콘크리트 손상깊이, 수중침지 건조방법, 페놀프탈레인

Funding

This research was partially supported by the Cheongju University Research Scholarship Grants in 2024.

Acknowledgement

This study is a revision and supplementation of the content of the 2022 degree.

ORCID

Jong Kim,  <https://orcid.org/0000-0001-9802-3726>

Gun-Su Lim,  <https://orcid.org/0000-0001-9197-2988>

Seung-Bok Beak,  <https://orcid.org/0000-0002-7194-029X>

Min-Cheol Han,  <https://orcid.org/0000-0002-2555-673X>

References

1. National fire agency statistical year book [Internet]. Sejong (Korea): National fire agency. 2020 Jul 9. Available from: <https://www.nfds.go.kr/stat/general.do>
2. Sim SR, Ryu DW. The effect of surface treatment materials on the carbonation resistance of fiber-mixed high strength concrete in fire damage. *Journal of the Architectural Institute of Korea*. 2021 Sep;37(9):199-207. <https://doi.org/10.5659/JAIK.2021.37.9.199>
3. Architectural institute of Japan. *Diagnosis and repair methods of fire-damaged buildings*. Tokyo (Japan): Architectural institute of Japan; 2009. 207 p.
4. Kang H, Kweon OS. Analysis of problems in the heating temperature estimation method by discoloration of fire-damaged concrete. *Journal of the Korean Society of Hazard Mitigation*; 2020 Dec;20(6):127-33. <https://doi.org/10.9798/KOSHAM.2020.20.6.127>
5. Kim JH. *Recovery of the performance of the high strength concrete subjected to high temperature depending on repair materials [master thesis]*. Cheongju (Korea): Cheongju university; 2014. 151 p.
6. Byun YH, Ryu DW. An experimental study on the diagnosis and evaluation of damage characteristics of fire damaged concrete by strength level: In relation to carbonation depth. *Journal of the Korean Society Of Hazard Mitigation*. 2017 Dec;17(6):19-27.
7. Lee JW, Choi GH, Hong KP. A study on the thermal properties and the heat transfer in concrete exposed to high temperature. *Journal of the Architectural Institute of Korea Structure & Construction*. 2007 Dec;23(12):51-8.
8. Lim GS, Han JH, Hyun SY, Kim J, Han MC, Han CG. Assessment of impaired depth due to fire of mock-up concrete with 21mpa using drying method after water immersion. *Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference*. 2021 May 20-21; Jeju, Korea. Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2021. p. 241-2.
9. Lee SH, Kim DH, Choi DH. An explanation of fire resistance performance management standard for high strength concrete. *Magazine of the Korea Concrete Institute*. 2008 Sep;20(5):22-5. <https://doi.org/10.22636/MKCI.2008.20.5.22>
10. Tae SH, Lee BK. Microstructure characteristics of concrete exposed to high temperature. *Journal of the Fire Science and Engineering*. 1998 Dec;12(4):31-40.

11. Lim GS, Han SH, Hyun SY, Kim j, Han MC, Han CG. Analysis of fire damaged concrete $\text{Ca}(\text{OH})_2$ by heating temperature using scanning electron microscope and x-ray diffraction. Proceedings of the Korean Institute of Building Construction Conference; 2022 Nov 10-11; Busan, Korea. Seoul (Korea): the Korea Institute of Building Construction; 2022. p. 149-50.