

# 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 수열온도 추정을 위한 실험적 연구

## An Experimental Study for Supposed Heating Temperature of Deteriorated Concrete Structure by Fire Accident

권영진<sup>†</sup>

Young-Jin Kwon<sup>†</sup>

호서대학교 소방학과 교수 · 공박  
(2004. 5. 8. 접수/2004. 8. 24. 채택)

### 요 약

철근콘크리트구조물에 화재가 발생하게 되면 콘크리트내의 시멘트 수화물과 골재의 상반된 거동으로 조직이 연화되며 열응력 등으로 균열이 발생하여 부분적 혹은 전체구조시스템에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 손상이 발생하여, 철근 콘크리트 구조물의 내구성을 현저히 저하시키게 된다. 콘크리트의 화재피해 상황은 콘크리트에 사용된 혼화재료 및 골재 등 사용재료의 영향을 받게 되며 설계기준 강도에 따라 그 피해 상황역시 다르게 나타나기 때문에 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 열화 진단은 화재에 의한 열화 메커니즘을 바탕으로 이루어져야 하며, 이를 위해서는 고온에 노출된 콘크리트의 공학적 특성에 관한 기초자료가 반드시 필요하다. 그러므로 본 연구에서는 설계기준 강도 및 사용재료에 따라 콘크리트를 제조하여 고온환경에 노출시켜 폭열상태, 초음파속도, 압축강도 등을 측정하여 화재로 열화된 콘크리트 구조물의 재사용 여부 및 피해 등급 결정을 위한 정밀 진단과 보수·보강공법의 선정을 위한 기초 자료로 제시하고자 한다.

### ABSTRACT

A fire outbreak in a reinforcement concrete structure looses the organism by the different contraction and expansion of hardened cement pastes and aggregate, and causes cracks by thermal stress, leading to the deterioration of the durability. So concrete reinforcement structure is damaged partial or whole structure system. Therefore diagnosis of deterioration is needed based on mechanism of fire deterioration in general concrete structures. Fundamental information and data on the properties of concrete exposed to high temperature are necessary for accurate diagnosis of deterioration. In this study, it was presented data for the accurate diagnosis and selection of repair and reinforcement system for the deteriorated concrete heated highly, various concrete such as standard design compressive strength, fine aggregate and admixture were exposed to a high temperature environment. And fundamental data were measured engineering properties such as explosive spalling, ultrasonic pulse velocity and compressive strength.

**Keywords :** Fire damage, Concrete, Engineering properties, Explosive spalling, Ultrasonic pulse velocity

## 1. 서 론

통계에 의하면 국내 화재 건수는 평균 30,000건/년으로서 주택 및 아파트, 차량, 공장, 음식점 등 주로 건축물에 많이 발생하고 있고,<sup>1)</sup> 건축물의 주요 구조 부재를 이루는 콘크리트는 다른 구조 재료에 비해 열전

도율이 낮고 완전 붕괴에 도달하기까지의 에너지소산 능력이 우수하기 때문에 화재등과 같은 비상상황에서 충분한 대피시간을 확보할 수 있게 한다.

그러나 콘크리트구조부재가 화재 등과 같은 고온에 장시간 노출될 경우 부분적 혹은 전체구조시스템에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 손상이 발생할 수 있으며, 콘크리트에 사용된 혼화재료 및 골재 등 사용재료와 설계기준 강도에 따라 화재 피해 상황역시 다르게 나

<sup>†</sup> E-mail: refrete@lycos.co.kr

타나기 때문에<sup>2)</sup> 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 재사용 여부 및 피해 등급을 결정하기 위해서는 각종 콘크리트의 화재에 의한 성능저하 정도에 관한 데이터가 축적되어야만 한다.

또한 화재를 입은 철근 콘크리트 구조물의 재사용 여부를 결정하는 가장 중요한 요소는 구조물의 성능저하를 정확히 측정해내는 일이다.<sup>3)</sup> 화재피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 성능저하 조사는 육안조사를 주로 하는 1차 조사와 재료시험 혹은 구조시험에 의한 2차 조사로 나누어 실시하는 것이 일반적이며, 콘크리트의 변색, 폭열의 유무와 크기·깊이, 균열의 유무와 폭·깊이, 들뜸이나 박리의 유무, 부재의 휨이나 변형 철근의 상태 등에 주안점을 두어 피해 등급을 판정하고 재사용여부를 판정하게 된다.<sup>4)</sup>

이러한 조사를 통해 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 재사용이 결정되면 적합한 보수 공법 및 보수부위를 결정하여야 하는데 이는 화재피해를 입은 콘크리트의 열화정도 추정을 통해 이루어지게 된다. 그러나 국내의 경우 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 조사 및 진단에 관한 실험 실증적인 연구가 전무하여 화재피해를 입은 콘크리트의 열화정도를 추정하기 위한 기초데이터가 확보되지 못한 실정이며, 화재피해를 입은 콘크리트의 열화정도의 추정을 위한 구체적인 기법역시 구축되어있지 않은 실정으로서 이에 관한 연구가 반드시 필요하다.

그러므로 본 연구에서는 화재피해를 입은 철근 콘크리트구조물의 열화메커니즘을 바탕으로 각종 콘크리트의 화재에 의한 성능저하 정도에 관한 데이터 및 열화정도를 추정하기 위한 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획

본 연구의 프로세스는 Fig. 1에 나타난 바와 같이 콘크리트의 화재에 의한 성능저하 정도에 관한 데이터 확보를 목적으로 잔골재 종류 및 혼화재 종류, 물결합재비 등의 요인에 따라 시험체를 제작하여 표준가열곡선에 따라 각각 30분, 60분 가열한 다음 폭열성상을 관찰하였고, 열화정도의 추정을 위한 데이터를 확보를 목적으로 각종 설계기준강도별로 시험체를 제작하여 다양한 목표수열온도로 각각 3시간 가열한 다음 잔존 압축강도, 잔존 압축강도율, 초음파속도 등을 측정하였다.

본 연구의 실험계획은 Table 1에 나타난 바와 같이 잔골재 종류 및 혼화재 종류, 물결합재비에 따른 콘크리트의 폭열성상을 검토하기위한 시리즈 I와, 수열온도 추정을 위한 데이터를 확보하기위해 설계기준 강도를 210, 240, 300, 400, 500, 600, 800 kgf/cm<sup>2</sup>의 7수준으로 설정한 후 각각 100, 200, 300, 400, 600, 800°C의 가열온도로 3시간 가열한 다음 잔존압축강도 및 초음파 속도를 측정하는 시리즈 II로 계획하였다.

또한 본 연구에 사용된 재료의 물리적 성질은 Table 2에 나타내었다.

### 2.2 실험 방법

본 연구에 사용된 시험체는 Table 1 실험 계획에 따라 콘크리트를 배합하여  $\phi 10 \times 20$  cm의 원주형 시험체를 제작·성형하고 24시간 후 탈형한 다음  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , RH 60%의 대기중에서 28일간 기건양생하여 제작하고, 바닥용 내화시험 가열로를 사용하여 가열하였다.

시리즈 I는 KS F 2257 건축 구조 부재의 내화 시험

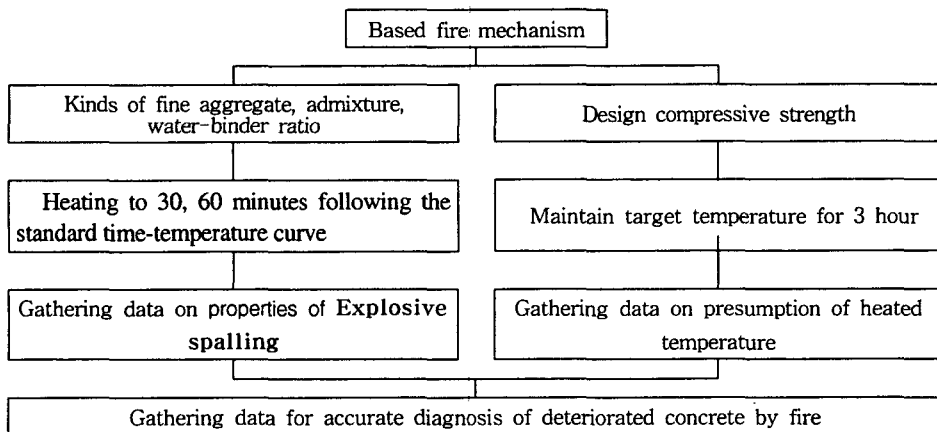


Fig. 1. The process of the study.

Table 1. Experimental program

Series	Mix type	W/C (%)	Kinds of fine aggregate	Kinds of admixture	Heating time (min.)
I	SS	55	SS	-	30 60
	N		L		
	RS50 <sup>1)</sup>		RS50 <sup>1)</sup>		
	RS		RS		
	CS		CS		
	PL	30.5	SS	-	30 60
	FA			FA <sup>2)</sup>	
BFS	BFS <sup>3)</sup>				
II	Mix type	design compressive strength (kgf/cm <sup>2</sup> )	Kinds of fine aggregate	Heating temperature (°C)	Heating time (h.)
	210	210	SS	100 200 300 400 600 800	3
	240	240			
	300	300			
	400	400			
	500	500			
	600	600			
	800	800			

Table 2. Physical properties of materials

Materials	Physical properties
Cement	Ordinary portland cement (Type I), Specific gravity 3.15, Blaine 3630 cm <sup>2</sup> /g
Admixture	Fly ash : Ignition loss 4.10%, Specific gravity 2.12, Fineness 2,976 cm <sup>2</sup> /g,
	Blast furnace slag : Specific gravity 2.99, Fineness 4,379 cm <sup>2</sup> /g
Fine aggregate (Maximum size 5 mm)	SS : Sea Sand, Specific gravity 2.57, Absorption ratio 1.25%, F.M. 2.41
	L : Sea Sand, Specific gravity 2.56, Absorption ratio 1.48%, F.M. 3.04
	RS : Recycled Sand, Specific gravity 2.49, Absorption ratio 7.97%, F.M. 2.74
	CS : Crushed Sand, Specific gravity 2.63, Absorption ratio 1.5%, F.M. 2.66
Coarse aggregate	Crushed Stone, Maximum size 20 mm, Specific gravity 2.65, Absorption ratio 1.39%, F.M. 6.02

방법에 준하여 표준 가열곡선에 따라 각각 30분, 60분 동안 가열하여 Fig. 2 및 Fig. 3에 나타난 바와 같이

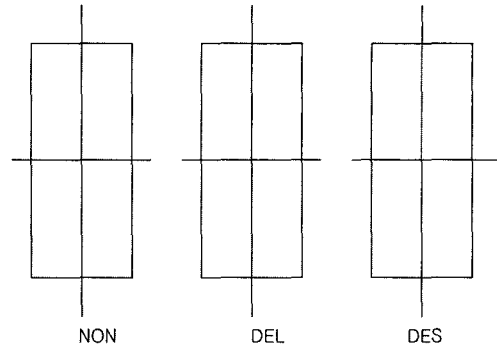


Fig. 2. Diagram for degree of explosive spalling.

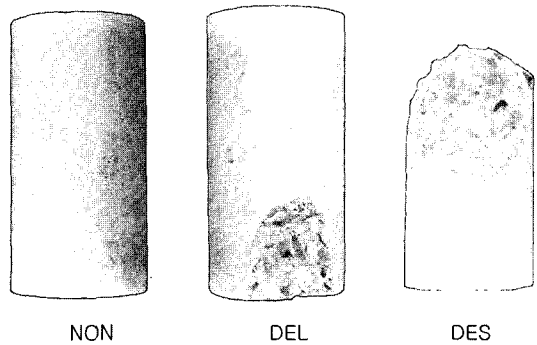


Fig. 3. Example for degree of explosive spalling.

외관상 비폭열을 NON(Non spalling), 국부폭열 및 박리폭열을 DEL(Delamination), 파괴폭열 및 단면방향의 점진폭열을 DES(Destruction)로 나누어 콘크리트의 폭열성상을 검토하였다.

시리즈 II는 각각 100, 200, 300, 400, 600, 800°C의 목표 온도로 3시간 동안 일정하게 유지하여 가열한 다음 초음파속도, 압축강도 등의 공학적 특성을 측정하였으며, 압축강도는 KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법에 준하여 측정하였고, 초음파속도는 영국 C.N.S Electronics 사의 Pundit를 사용하여 측정하였다.

### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 폭열 성상

화재피해를 입은 구조물의 보수 보강에 있어서 폭열에 의한 유효단면의 손실을 간과할 수 없는데, 폭열에 영향을 미치는 것으로 알려진 W/C 및 단위수량, 골재 종류, 혼화재의 종류 등에 따라 시험체를 제작하여 각각 30, 60분 가열하였으며 공시체의 폭열 상태는 각각 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다.

본 연구의 범위에서 잔골재 종류에 따른 폭열 성상

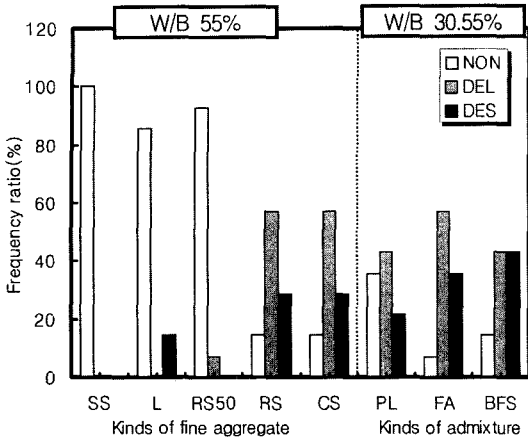


Fig. 4. Properties of explosive spalling at heating to 30 min.

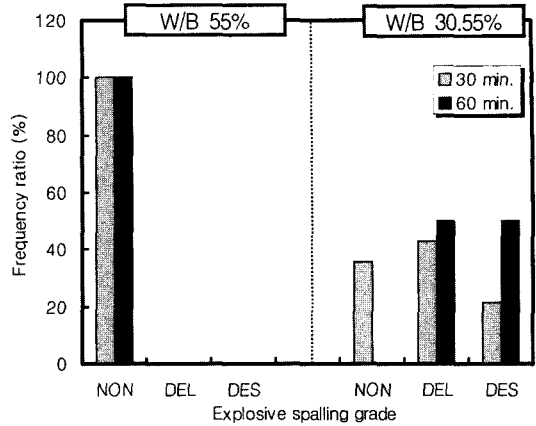


Fig. 6. Properties of explosive spalling according to water cement ratio.

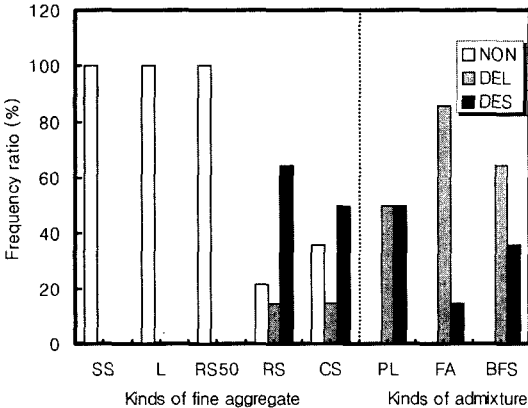


Fig. 5. Properties of explosive spalling at heating to 60 min.

으로는 바다모래를 사용한 경우 잔골재의 입도 및 가열시간에 관계없이 폭열이 발생하지 않았다. 또한 바다모래 50%를 재생 잔골재로 대체한 경우에는 바다모래만을 사용한 경우와 유사한 폭열 성상을 나타내었다. 부순모래 및 재생 잔골재만을 사용한 경우는 바다모래를 사용한 경우에 비하여 폭열에 대해 안정하지 못한 것으로 나타났으며 가열시간이 경과할수록 폭열상태가

심해지는 것으로 나타나 부순모래 및 재생잔골재의 사용에 앞서 화재안전성에 관한 검토가 이루어져야 할 것이다.

혼화재 종류에 따른 폭열 성상은 대체로 유사하게 나타났다. 혼화재료 무혼입(PL)의 경우 30분 가열에 있어서는 혼입의 경우보다 양호한 것으로 나타났으나, 60분 가열시는 혼화재료를 사용한 경우가 다소 양호한 폭열 성상을 나타내고 있다.

또한 물시멘트비에 따른 콘크리트의 폭열 성상을 나타낸 Fig. 6에 따르면 W/C 55%의 보통 강도 영역에서는 폭열에 대해 안정한 것으로 나타났으나 W/C 30.5%의 고강도 영역에서는 가열 30분을 전후하여 폭열이 발생하여 가열 60분 이전에 모든 시험체에서 폭열이 발생한 것으로 나타나 고강도 영역의 콘크리트를 사용한 구조물의 화재피해조사는 반드시 폭열에 관한 고려를 해야 할 것으로 판단된다.

3.2 가열온도별 압축강도 및 초음파속도

Photo 1은 설계기준강도별로 100°C~800°C의 온도에서 3시간 동안 가열한 시험체의 외관 일례를 나타낸

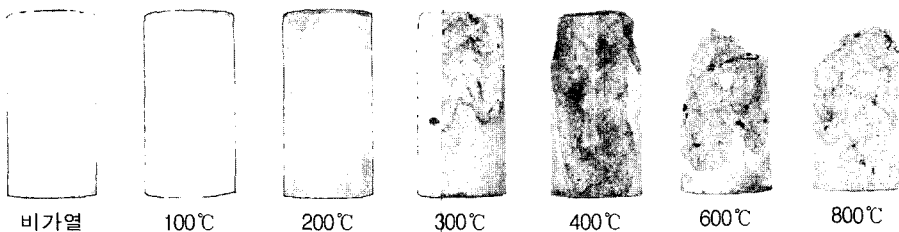


Photo 1. Example for heated specimen.

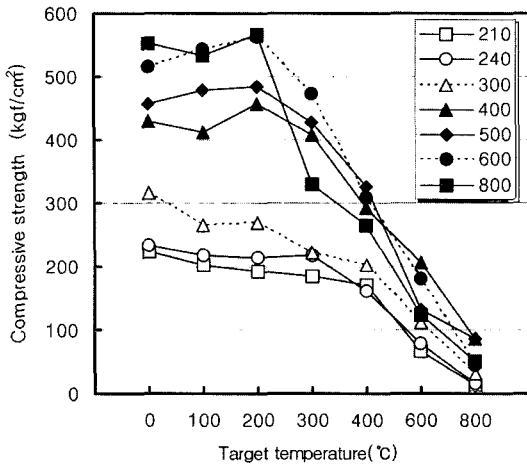


Fig. 7. Remain compressive strength according to target temperature for each design compressive strength.

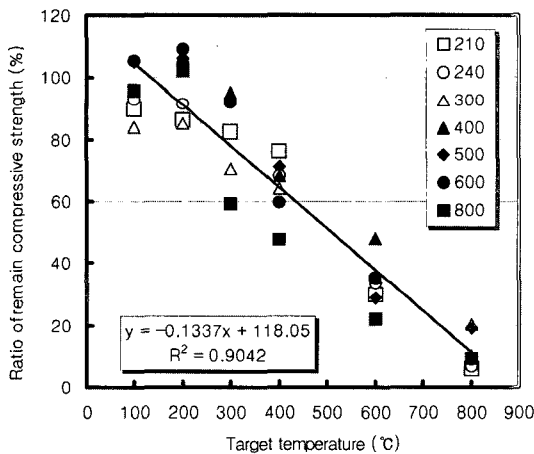


Fig. 8. Relationship between target temperature and ratio of remain compressive strength.

것이며, Fig. 7은 설계기준강도별로 100°C~800°C의 온도에서 3시간 동안 가열한 시험체의 잔존 압축강도를 나타낸 것으로 설계기준강도 300 kgf/cm<sup>2</sup> 이하의 경우에는 가열온도 400°C까지도 강도 저하가 크게 나타나지 않았으나 설계기준 강도 400 kgf/cm<sup>2</sup> 이상에서는 가열온도 300°C부터 압축강도의 저하가 나타났으며 가열온도 400°C 이상에서는 모든 경우에 있어서 강도저하를 나타내고 있다. 또한 800°C에서 3시간 가열한 경우에는 설계기준강도에 관계없이 잔존 압축강도율이 20% 이하로 나타났으며 압축강도는 13~87 kgf/cm<sup>2</sup>로 나타났다.

Fig. 8은 잔존 압축강도율과 가열온도와의 관계를 나

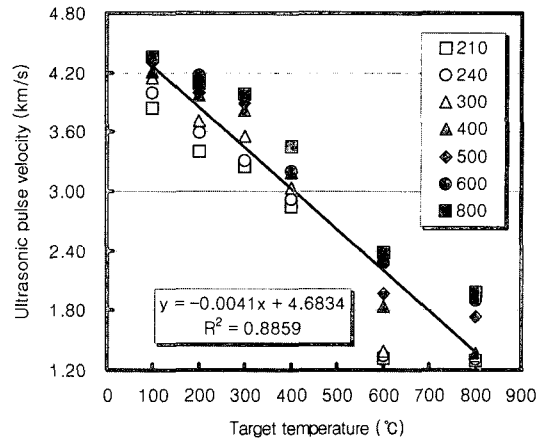


Fig. 9. Relationship between target temperature and Ultrasonic pulse velocity.

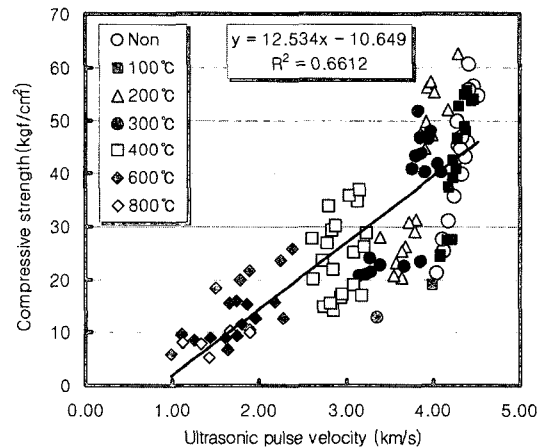


Fig. 10. Remain compressive strength and ultrasonic pulse velocity according to target temperature.

타낸 것으로 가열온도별 평균 잔존 압축강도율은 96, 98, 83, 65, 33, 11%로 나타났으며, 결정계수가 0.9042로 나타나 수열온도를 추정함으로써 잔존 압축강도율의 추정이 가능한 것으로 나타났다.

또한 Fig. 9는 초음파속도와 가열온도와의 관계를 나타낸 것으로서 결정계수가 0.8859로 나타나 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 초음파속도를 측정함으로써 수열온도를 간단히 추정할 수 있는 것으로 나타나 초음파속도법이 수열온도 추정을 위한 기법으로서 유용하게 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

그러나 수열온도에 따른 잔존 압축강도와 초음파속도의 관계를 나타낸 Fig. 10에서 보는 바와 같이 결정계수가 0.6612로 나타나 초음파속도로부터 압축강도의

추정이 불가능하지는 않으나 합리적이지 못하여 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 압축강도 추정을 위해서는 초음파속도법 뿐만 아니라, 여러 가지 비파괴검사를 복합적으로 활용해야 할 것이며,<sup>5)</sup> 초음파속도법을 통한 수열온도의 추정을 통해 잔존 압축강도율을 구하고 이를 통해 잔존 압축강도를 추정하는 간접적인 방법으로 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 보다 정밀한 압축강도의 추정이 가능할 것으로 기대된다.

#### 4. 결 론

이와 같이 화재에 의한 콘크리트의 열화 메커니즘을 이해하고 그에 따라 나타나는 현상들을 고려한 화재피해를 입은 콘크리트구조물의 수열온도 추정을 위한 실험을 통해 다음과 같은 결론을 얻었다.

폭열상태의 보다 정밀한 측정을 위해서는 사용재료 및 물결합재비 등과 같은 콘크리트의 이력을 활용하여야 하고, 열화도의 보다 정밀한 측정을 위해서는 초음파속도법을 적용한 수열온도의 추정을 통해 잔존 압축강도율을 추정하고, 여러 가지 비파괴검사를 복합적으로 활용하여 건전부의 압축강도를 추정함으로써 화재피해 후의 콘크리트 구조물의 잔존 압축강도를 정밀하게 추정할 수 있을 것으로 판단되며 이를 통해 화재피해를 입은 콘크리트의 열화정도를 보다 정확하게 평가할 수 있을 것으로 기대된다.

#### 참고문헌

1. 행정자치부, “화재통계연보” (2000).
2. 김무한, 권영진, 강석표, 김용로, 조봉석, “화재피해를 입은 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적연구”, 한국화재·

- 소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp10-14(2002).
3. 日本コンクリート工學協會, 콘크리트 診斷技術'01[基礎編] (2001).
4. 김무한, 권영진, 장재봉, 김용로, 김재환, 장종호, “화재에 의해 성능저하된 콘크리트 구조물의 진단 및 보수공법에 관한 연구”, 한국화재·소방학회추계학술논문발표회논문집, pp230-235(2002).
5. 김무한, 오시덕, 최세진, 장종호, 이태희, 이종호, 이성일, “고강도 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구”, 한국구조물진단학회학술발표 논문집, 제 6권, 제1호, pp67-72(2002. 5).
5. 김무한, 권영진, 장재봉, 김용로, 김재환, 김갑수, “잔골재 및 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 폭열 성상에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제 15권, 제 2호, pp667-670(2003).
6. 김무한, 권영진, 김용로, 윤종기, 장재봉, 송민섭, “화재로 인해 성능저하된 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 제 7권, 제 2호, pp241-244(2003. 11).
7. 권영진, 김무한, 이춘하, 오규형, 박용환, “화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 수열온도 평가에 관한 문헌적 고찰”, 한국화재·소방학회 추계학술논문발표회논문집, pp297-301(2002).
8. 권영진, “화재피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 조사, 평가 및 리헤빌리테이션 방안”, 한국화재·소방학회 하계 심포지움, pp1-24(2002).
9. 권영진 김무한, 김용로, 장재봉, “고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성”, 한국화재·소방학회지, Vol. 18, No. 1, pp1-6(2004. 3).
10. T. D. Lin, R. I. Zwiers, R. G. Burg, T. T. Lie, and R. J. McGrath, “Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns”, Portland Cement Association, PCA R&D Serial Nos. 1870 and 1871(1992).