

## 고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성

# The Engineering Properties of Concrete Exposed at High Temperature

권영진<sup>†</sup> · 김용로\* · 장재봉\*\* · 김무한\*\*\*

Young-Jin Kwon<sup>†</sup> · Moo-Han Kim\* · Yong-Ro Kim\*\* · Jea-Bong Jang\*\*\*

호서대학교 소방학과 교수 · 공박, \*충남대학교 건축공학과 교수 · 공박,  
\*\*충남대학교 건축공학과 박사과정, \*\*\*충남대학교 건축공학과 석사과정  
(2003. 12. 29. 접수/2004. 3. 3. 채택)

### 요 약

본 연구는 잔골재 및 혼화재 종류, W/C에 따른 콘크리트의 폭열성상 및 압축강도 초음파속도 등의 공학적 특성을 검토함으로써 폭열 방지 및 화재 피해를 입은 콘크리트 구조물의 재사용과 보수보강, 안전도 평가 등에 기초적인 자료를 제시하고자 한다. 폭열성상을 살펴보면, 잔골재에 따라서는 바다모래를 사용한 경우 폭열이 발생하지 않았거나 약간의 폭열이 나타나는 정도이나 재생잔골재나 부순모래를 사용한 경우에는 폭열이 심하게 나타났다. 또한 혼화재 종류에 따라서는 대체로 유사한 폭열성상을 나타내었다. 한편, W/C 30.5%의 고강도 영역에서는 대부분 폭열하였으나 W/C 55%의 보통강도 영역에서는 대부분 폭열하지 않았다. 잔존 압축강도는 W/C 55%의 경우 평균 45%로 나타났으며, W/C 30.5%의 경우에는 평균 64%로 나타났다. 초음파속도는 잔골재 종류 및 W/C, 가열시간에 따라 다르게 나타났으며, 가열후 3개월이 가열후 1개월보다 약 1.3~8.4%의 초음파속도 회복을 보였다.

### ABSTRACT

The purpose of this study is to present data for the reusing, rehabilitation and estimation of safety of RC structure damaged by fire, and for the prevention of explosive spalling by investigation the properties of explosive spalling, compressive strength and ultrasonic pulse velocity according to kinds of fine aggregate, admixture and water-cement ratios. In explosive spalling properties with kinds of aggregate, explosive spalling does not appear or little at surface in the case of used sea sand, but the case of using recycled sand or crushed sand is worse. Property with the kind of admixture does not appear specially. And high strength concrete with W/C 30.5% was taken spalling, but 55% does not appear. It is found that residual compressive strength after exposed at high temperature showed 45% in W/C 55%, and 64% in W/C 30.5% of its original strength averagely. Ultrasonic pulse velocity is different with kinds of aggregate, W/C, and heating time. When 3 month age after heating ultrasonic pulse velocity is recovered about 1.3%~8.4% of its 1 month age after heating.

**Keywords :** Heated concrete, Ultrasonic pulse velocity, Compressive strength, Explosive spalling

## 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> 건축물구조 부재의 대부분을 차지하고 있는 콘크리트는 다른 구조 재료에 비

해 열전도율이 낮고 완전 붕괴에 도달하기까지의 에너지소산 능력이 우수하기 때문에 화재와 같은 비상상황에서 충분한 대피시간을 확보할 수 있게 된다. 그러나 콘크리트구조부재가 화재 등과 같은 고온에 장시간 노출될 경우 부분적 혹은 전체구조시스템에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 손상이 발생할 수 있다.

이러한 이유로 일반적인 콘크리트 구조물에서의 화재 메커니즘을 바탕으로 화재피해를 입은 콘크리트 구

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

조물의 재사용 여부 및 피해 등급을 결정하기 위해 콘크리트 구조물의 성능저하를 정확히 진단할 필요가 있다. 이를 위해서는 고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성에 관한 데이터가 반드시 확보되어야만 한다. 또한 화재를 입은 콘크리트 구조물의 정확한 성능저하 상황을 파악함으로써 화재 후 콘크리트 구조물의 안전도를 결정할 수 있게 되어 이의 재사용 및 보수 보강의 판정을 합리적으로 할 수 있게 된다.

이렇게 화재를 입은 콘크리트 구조물의 재사용 및 보수·보강이 판정되면 가장 경제적이고 효율적인 보수·보강공법을 선정하여 적용하는 것은 필연적이라고 할 수 있다.

따라서 본 연구는 고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성의 검토 및 각종 콘크리트의 폭열 성상에 관한 실험적 연구를 통해서 화재 피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 정확한 진단과 보수공법에 관한 기초 자료를 제시하고 아울러 화재를 입은 콘크리트 구조물의 성능저하진단 및 보수에 관한 규정의 마련에 지표로 활용하고자 한다.

## 2. 화재피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 열화 메커니즘

일반적으로 철근 콘크리트 구조는 콘크리트가 철근을 피복함으로써 철근의 방청과 좌굴 방지, 그리고 상대적으로 인장력에 취약한 콘크리트를 철근이 보강함으로써 구조적으로 매우 합리적인 시스템이 된다. 또한 열전도율이 낮은 콘크리트가 철근을 피복함으로써 화재시 일정시간동안 직접적인 고온으로부터 철근을 보호하게 된다. Fig. 1은 그 일례로서 화재시 콘크리트 내부의 온도분포를 나타낸 것이다.

그러나 콘크리트가 고온을 받게 되면 일반적으로 두 가지 경로로 구조 기능상 손상이 발생하여 최종적으로 구조물이 붕괴될 수 있다.

첫째는 콘크리트의 수열온도 상승에 따른 화학적 열화로서 100°C 이상에서는 자유공극수가 방출되며, 100°C~200°C에서는 물리적 흡착수가 방출되므로 이들의 분리·소실에 따라 콘크리트 중의 시멘트수화물이 수축하기 시작하며 300°C 이상이 되면 화학적으로 변질된다. 수열온도 400°C 이상에서는 화학적 결합수가 방출되고 500°C를 넘으면 가열에 의한 콘크리트의 강도저하가 50%까지 나타난다. 수열온도 500°C~580°C에서는 콘크리트의 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 열분해 되어 알칼리성이 소실되는 화학적 피해를 입게 되므로 철근을 방식하는 능력이 저감되어 철근콘크리트 구조물의 내구

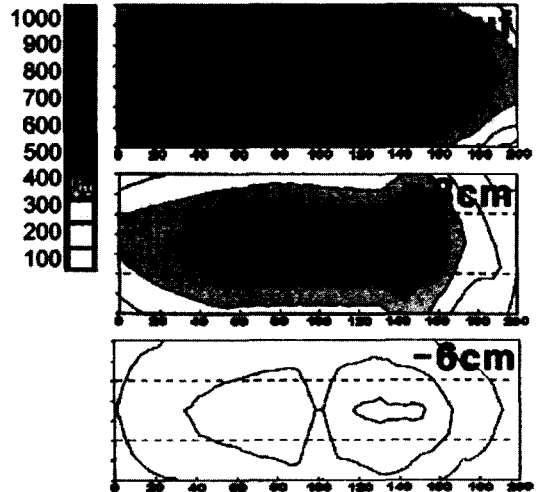
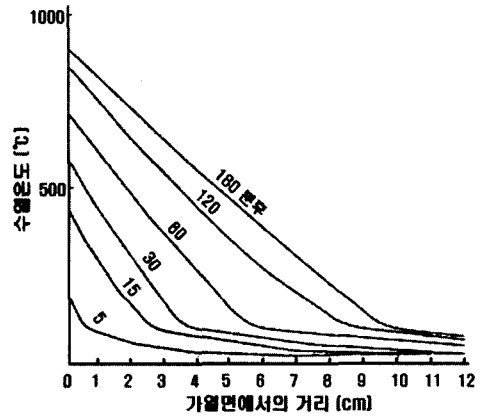


Fig. 1. 화재시 콘크리트 내부의 온도 일례.

성이 현저하게 감소된다.<sup>2)</sup> 수열온도 600°C까지는 시멘트 페이스트가 수축하고 골재는 팽창하는 상반된 거동을 나타내며, 600°C~800°C에서부터는 파열하여 손상되기 시작한다.<sup>3)</sup>

다른 한 경로는 폭열에 의한 물리적 열화로서 열팽창계수가 상이한 시멘트경화물과 골재가 각각 다른 팽창수축거동을 하여 콘크리트의 조직이 연화되고, 단부의 구속 등에 의해 나타난 열응력 및 공극수의 증기압 등에 따라 균열이 나타나고 박락하는 등 피복콘크리트가 결손되며 철근이 노출될 수 있으며 구조적 유효 단면의 손실로 이어진다. 이러한 일련의 과정을 폭열이라 하며, 이로 인해 철근이 직접적으로 고온에 접하게 되어 구조물에 치명적인 손상을 줄 수 있으며 화재시 구조물 붕괴의 원인이 되기도 한다.

이러한 폭열에 영향을 미치는 요인은 W/C 및 단위수량, 골재 종류, 혼화재의 종류 등이 있으며 이러한

요인들이 복합적으로 관계되어 발생하는 것으로 알려져 있다. 또한 그 형태상 박리·박락폭열, 파괴폭열 등이 있으며 국부폭열 및 단면방향의 점진폭열 등으로 분류하기도 한다.

### 3. 실험계획 및 방법

#### 3.1 실험계획 및 배합

콘크리트의 화재피해 상황은 콘크리트에 사용된 혼화재료 및 골재 등 사용재료의 영향을 받게 되며 설계기준 강도에 따라 그 피해 상황역시 다르게 나타난다. 따라서 각종 콘크리트의 화재에 의한 성능저하 정도를 확인할 필요가 있으며, 특히 지역적인 특성을 배제할 수 없는 골재 등과 같은 사용재료에 관한 검토가 반드시 이루어져야 한다. 더욱이 안전하게 생각되는 500°C이상의 고온을 받게 되면 수산화칼슘(Ca(OH)<sub>2</sub>)이 열분해하여 알칼리성을 소실하는 화학적 피해를 입게 되므로 수열온도를 추정할 필요가 있다. 또한 철근을 직접적인 고온에 노출시키며, 유효단면의 결손을 일으키게 되어 화재시 구조물 붕괴의 원인이 되기도 하는 콘크리트의 폭열에 관한 기본적인 데이터를 확보할 필요가 있다.

그러므로 본 연구에서는 물시멘트비 55%와 30.5%의 일반강도영역과 고강도 영역으로 나누어 잔골재 및 혼화재 종류에 따라 Table 1과 같이 실험 계획 및 배합을 설정하였다. 측정 항목으로는 폭열성상 및 압축강도를 측정하고 대표적인 비파괴 시험 방법인 초음파속도를 측정하였다.

#### 3.2 사용재료 및 시험방법

본 연구에 사용된 재료는 콘크리트용 혼화재로서 현

재 가장 일반적으로 사용되고 있는 플라이 애시 및 고로슬래그 미분말을, 대표적인 잔골재로서 인천산 세척사와 향후 사용량이 증가할 것으로 주목받고 있는 재생모래 및 부순모래를 사용하였고 그 물리적 성질은 Table 2와 같다.

본 연구에 사용된 시험체는 Table 1과 같이 콘크리트를 배합하여 ø10×20 cm의 원주형 시험체를 제작·성형하여 24시간 후 탈형하고 20±3°C, RH 60%의 대기중에서 28일간 기건양생을 실시한 다음 바닥용 내화시험 가열로를 사용하여 KS F 2257 건축 구조 부재의 내화시험 방법에 준하여 표준 가열곡선에 따라 각각

Table 2. 사용재료의 물리적 성질

종 류	물리적 성질	
시멘트	1종 보통포틀랜드시멘트 비중 3.15, 분말도 3630 cm <sup>2</sup> /g	
혼 화 재 료	보령산 플라이애시	강열 감량 : 4.10% 비중 2.12, 분말도 2976 cm <sup>2</sup> /g,
	고로슬래그 미분말	비중 2.99, 분말도 4379 cm <sup>2</sup> /g
잔골재 (최대 치수 5 mm)	SS : 인천산 세척사	비중 2.57, 흡수율 1.25%, 조립율 2.41
	L : 인천산 세척사	비중 2.56, 흡수율 1.48%, 조립율 3.04
	RS : 재생모래	비중 2.49, 흡수율 7.97%, 조립율 2.74
	CS : 부순모래	비중 2.63, 흡수율 1.5%, 조립율 2.66
굵 은 골 재	퇴촌산 부순자갈, 최대치수 : 20mm 비중 2.65, 흡수율 1.39%, 조립율 6.02	

Table 1. 실험 계획 및 배합

잔골재 종류	혼화재 종류	가 열 시 간	배합명	W/C (%)	잔 골 재 율 (%)	단 위 수 량 (kg/m <sup>3</sup> )	단위중량 (kg/m <sup>3</sup> )			
							시멘트	혼화재	잔골재	굵 은 골 재
SS	무혼입	30분 60분	SS	55	43	185	336	0	784	1039
L			N					0	801	1061
RS50 <sup>1)</sup>			RS50					0	772	1045
RS			RS					0	764	1013
CS			CS					0	814	1080
SS	무혼입	30분 60분	PL	30.5	43	171	561	0	720	954
	FA <sup>2)</sup>		FA				477	84	705	935
	BFS <sup>3)</sup>		BFS				308	252	715	947

1) SS와 RS를 중량비 1:1로 혼합한 잔골재 2) 결합재 중량 15%를 FA로 대체 3) 결합재중량 45%를 BFS로 대체

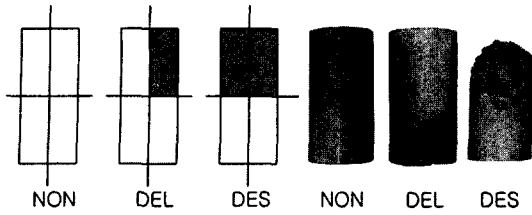


Fig. 2. 폭열등급분류 모식도 및 등급분류 일례.

30분, 60분 가열하여, 폭열성상을 관찰하고 초음파속도, 압축강도 등의 공학적 특성을 가열 전 및 가열 후 재령 1개월과 3개월에 각각 측정하였다.

가열된 공시체는 Fig. 2와 같이 외관상 비폭열을 NON(Non spalling), 국부폭열 및 박리폭열을 DEL(Delamination), 파괴폭열 및 단면방향의 점진폭열을 DES(Destruction)로 나누어 콘크리트의 폭열성상을 검토하였다. 또한 초음파속도는 영국 C.N.S Electronics 사의 Pundit를 사용하여 측정하였고, 압축강도는 비폭열시험체를 기준으로 KS F 2405 콘크리트의 압축 강도시험 방법에 준하여 측정하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 폭열성상

화재피해를 입은 구조물의 보수 보강에 있어서 폭열에 의한 유효단면의 손실은 구조 기능상 간과할 수 없다. 그러므로 본 실험을 통해 폭열성상을 관찰한 결과<sup>4)</sup> 표준 가열곡선에 따라 30분 가열한 경우 Fig. 3과 같이 나타났으며 60분 가열시는 Fig. 4와 같이 나타났다.

잔골재 종류에 따른 폭열 성상으로는 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 나타났다.

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 나

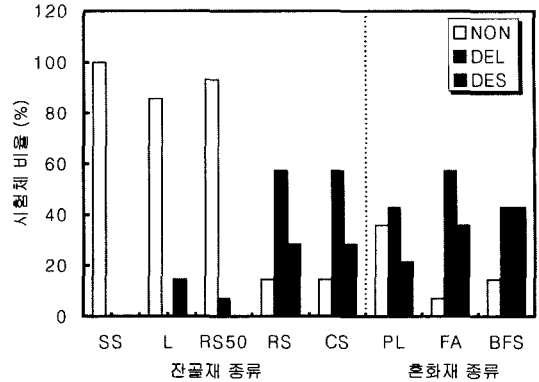


Fig. 3. 30분 가열시 잔골재 및 혼화재 종류에 따른 폭열성상.

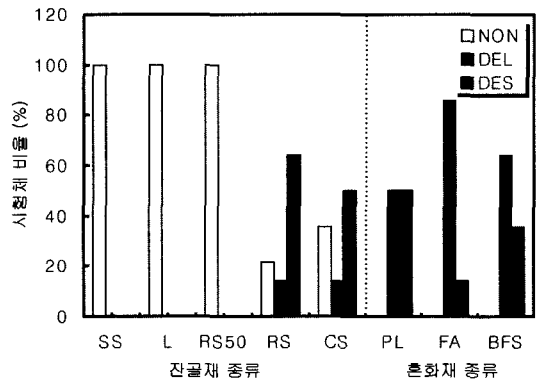


Fig. 4. 60분 가열시 잔골재 및 혼화재 종류에 따른 폭열성상.

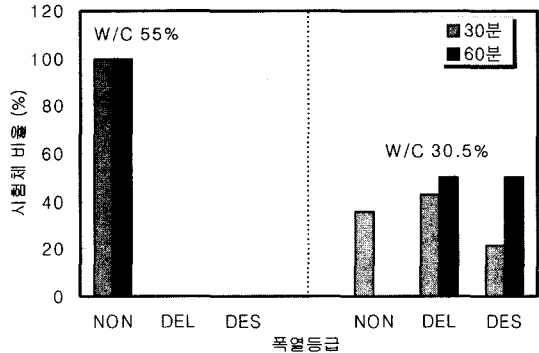


Fig. 5. W/C에 따른 폭열성상.

타낸 Fig. 5에 따르면 W/C 55%의 보통 강도 영역에서는 폭열에 대해 안정한 것으로 나타났다. 그러나 W/C 30.5%의 고강도 영역에서는 가열 30분을 전후하여 폭열이 발생하여 가열 60분 이전에 모든 시험체에서 폭열이 발생한 것으로 나타나 반드시 폭열에 관한 고려를 하여야 할 것으로 판단된다.

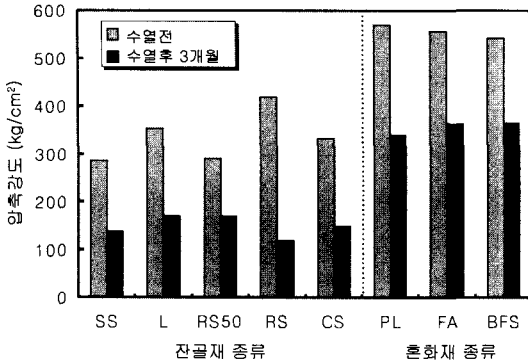


Fig. 6. 가열전과 30분 가열 후 재령 3개월의 압축강도.

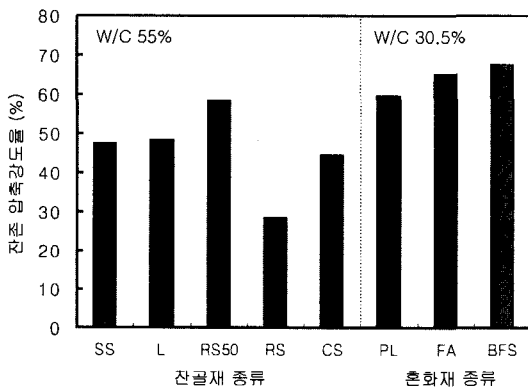


Fig. 7. 30분 가열 후 재령 3개월의 잔존 압축강도율.

#### 4.2 압축강도

Fig. 6은 가열전과 가열 후 재령 3개월의 비폭열 시험체의 압축강도를, Fig. 7은 가열전의 압축강도를 기준으로 가열후 재령 3개월의 잔존 압축강도율을 나타내었다.

30분 가열 후 3개월 경과시 W/C 55%의 잔존 압축강도율은 45.5%, 평균 압축강도는 149 kg/cm<sup>2</sup>로 나타나 W/C 30.5%에서의 잔존 압축강도율 64.2%, 평균 압축강도 356 kg/cm<sup>2</sup>보다 낮게 나타났다.

잔골재의 종류별로는 RS50의 경우 잔존 압축강도율이 58.4%로 가장 높게 나타났으며 L 및 SS는 각각 48.4%와 47.5%, CS는 44.7%로 나타났고, RS의 경우 28.5%로 가장 낮은 결과를 보였다. 또한 잔존 압축강도는 L 및 RS50에서 각각 171 kg/cm<sup>2</sup>와 170 kg/cm<sup>2</sup>로 가장 높게 나타났다. CS는 149 kg/cm<sup>2</sup>, SS는 136 kg/cm<sup>2</sup>로 측정되었으며 RS의 경우 119 kg/cm<sup>2</sup>로 나타나 재생 잔골재만을 사용한 콘크리트를 구조물에 적용할 경우 화재에 취약할 것으로 판단되어 일정비율을 바다모래 등으로 대체하여 사용하는 것이 합리적일 것으로

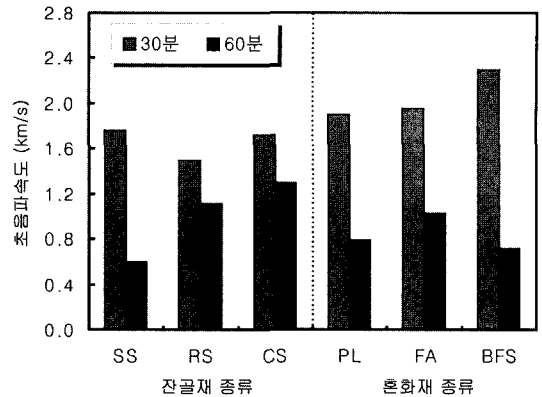


Fig. 8. 가열시간별 잔골재 종류 및 혼화재 종류에 따른 초음파속도.

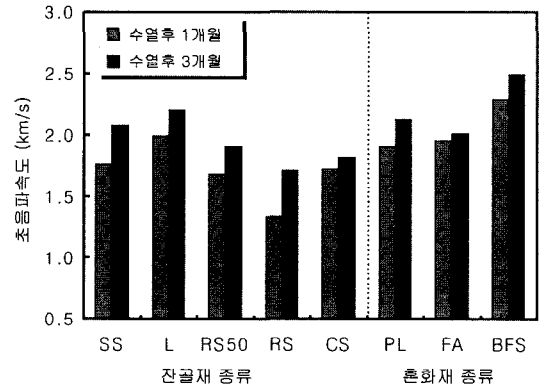


Fig. 9. W/C에 따른 폭열성상.

판단된다. 또한 잔골재의 입도와 화재 후의 잔존 압축강도는 유의할만한 경향을 보이지 않았다.

혼화재 종류에 따른 잔존 압축강도율은 FA 65.2%, BFS 67.6%로 59.7%를 나타낸 무혼입의 경우에 비하여 높게 나타났으나 잔존 압축강도에 있어서 FA 363 kg/cm<sup>2</sup>, BFS 365 kg/cm<sup>2</sup>, PL 341 kg/cm<sup>2</sup>로 측정되어 잔존 압축강도 및 잔존압축강도율은 혼화재 종류에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

#### 4.3 초음파속도

Fig. 8은 가열 후 1개월 경과시의 가열시간에 따른 초음파 속도를 나타낸 것으로서 바다모래만을 사용한 경우 재생잔골재 및 부순모래를 사용한 경우에 비하여 가열시간에 따른 초음파속도의 감소가 상대적으로 크게 나타났다. W/C에 따라서는 55%보다 30.5%의 경우가 가열시간에 따른 초음파속도의 감소가 큰 것으로 나타났고, 혼화재료의 영향은 적은 것으로 나타났다.

Fig. 9는 30분 가열 후 1개월 및 3개월 경과시의 가열시간에 따른 초음파 속도를 나타낸 것으로서 30분 가열 후 재령에 따른 잔골재 및 혼화재 종류별 초음파 속도를 나타낸 것으로서 모든 배합에서 초음파속도의 회복을 보이고 있다. W/C 55%의 경우 평균 5.4%, W/C 30.5%에서는 평균 3.4%의 회복을 보이고 있으며 잔골재의 종류에 따라서는 RS의 경우 8.4%로 가장 크게 나타나고 있으며 SS에서는 7.0%, L과 RS50은 각각 4.7%와 4.9%로 나타났다. 또한 CS의 경우 2.1%로 가장 적은 회복을 보이고 있으며, 혼화재료의 종류별로는 BFS 4.1%, FA 1.3%의 초음파속도 회복을 보이고 있다.

## 5. 결 론

고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성을 검토한 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 폭열성상의 경우, 잔골재에 따라서는 바다모래를 사용한 경우가 폭열에 가장 안정하였다. 재생골재를 50% 혼입한 경우에도 유사한 성상을 보였으며, 부순모래 및 재생골재만을 사용한 경우 폭열에 가장 취약한 것으로 나타났다.

2) 혼화재 종류에 따라서는 대체로 유사한 폭열성상을 나타내었으며 고강도영역에서 30분 가열시에는 무혼입의 경우가 혼입의 경우보다 다소 안정하게 나타났으나, 30분 이상의 가열에서는 혼화재료를 첨가한 경우의 폭열성상이 양호하게 나타났다.

3) W/C에 따라서는 30.5%의 고강도 영역에서 대부분 폭열이 발생하였으나 55%의 보통강도 영역에서는 폭열이 나타나지 않았으므로 고강도 영역의 콘크리트를 사용할 경우에는 반드시 폭열에 대한 고려가 필요하다.

4) 압축강도는 30분 가열시 재생잔골재 및 부순모래만을 사용한 경우가 바다모래를 사용한 경우에 비하여 잔존 압축강도율이 낮게 나타났으나 바다모래 50%를 재생 잔골재로 대체한 경우에는 바다모래만을 사용한 경우에 비하여 양호하게 나타나고 있어 재생잔골재나 부순모래를 사용할 때는 일정비율 이상의 천연골재를 사용하는 것이 화재에 보다 안정적인 것으로 사료된다.

5) 또한 W/C에 따라서는 30.5%의 고강도 영역에서 잔존 압축강도율 및 잔존 압축강도가 55%에 비하여 모두 높게 나타나고 있어 고강도 콘크리트의 화재피해는 폭열이 주 요인인 것으로 판단된다.

6) 초음파속도는 잔골재 종류 및 혼화재 종류, 가열 시간에 따라 다르게 나타나고 있어 보다 정확한 화재 피해 조사 및 진단을 위해서는 사용재료에 대한 사전 조사가 반드시 필요할 것으로 사료된다.

7) 잔골재 종류 및 혼화재 종류에 따라 가열 후 3개월의 초음파속도가 가열 후 1개월보다 약 1.3~8.4% 높게 나타나고 있어 가열후 재령 경과에 따라 초음파속도가 회복되는 것으로 판단된다.

## 감사의 글

본 연구는 “호서대학교 학내연구비 지원”으로 수행 되었으므로, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

## 참고문헌

1. 행정자치부, “화재통계연보”(2000).
2. 日本コンクリート工學協會, 콘크리트 診斷技術'01[基礎編](2001).
3. 김무한 외, “화재피해를 입은 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적연구”, 한국화재·소방학회 추계학술논문발표회 논문집, pp.10-14(2002).
4. 김무한 외, “잔골재 및 혼화재 종류에 따른 콘크리트의 폭열 성상에 관한 연구”, 한국콘크리트학회 가을 학술발표회 논문집, 제15권, 제2호, pp.667-670(2003).
5. 김무한 외, “화재로 인해 성능저하된 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구”, 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 제7권, 제2호, pp.241-244(2003. 11).
6. 김무한 외, “고강도 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구”, 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 제6권, 제1호, pp.67-72(2002. 5).
7. 김무한 외, “화재에 의해 성능저하된 콘크리트 구조물의 진단 및 보수공법에 관한 연구”, 한국화재·소방학회추계 학술논문발표회논문집, pp.230-235(2002).
8. 권영진 외, “화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 수열온도 평가에 관한 문헌적 고찰”, 한국화재·소방학회 추계 학술논문발표회논문집, pp.297-301(2002).
9. 권영진, “화재피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 조사, 평가 및 리해빌리테이션 방안”, 한국화재·소방학회 하계 심포지움, pp.1-24(2002).
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).