

C-05

## 고온을 받은 콘크리트의 잔골재 및 혼화재 종류에 따른 공학적 특성에 관한 실험적 연구

장재봉, 송민섭, 장종호\*, 김용로\*, 권영진\*\*, 김무한\*\*\*  
충남대학교 대학원 건축공학과, 충남대학교 대학원 건축공학과\*,  
호서대학교 환경안전 공학부 소방학과\*\*, 충남대학교 건축공학과\*\*\*

### An Experimental Study on the Engineering Properties of Heated Concrete According to Kinds of Fine Aggregate and Admixture

Jang, Jea Bong, Song, Min Seob, Jang, Jong Ho\*, Kim, Yong Ro\*, Kwon, Young Jin\*\*,  
Kim, Moo Han\*\*\*

Chungnam National University Master's Course of the Architectural Engineering, Chungnam  
National University Doctor's Course of the Architectural Engineering\*, Hoseo University Professor  
of Department of Fire Protection Engineering\*\*, Chungnam National University Professor of the  
Architectural Engineering\*\*\*

#### 1. 서론

콘크리트구조물은 화재에 대하여 비교적 우수한 성능을 발휘하는 것으로 보고되어 있으며, 이를 바탕으로 수많은 구조물이 화재피해 후 보수·보강을 통하여 재사용되고 있으나, 현재까지는 화재발생 후 구조물의 재사용과 보강여부의 판단 및 신뢰성 있는 안전성 평가를 위한 이론적·실험적 연구가 매우 부족한 실정이다.

특히 최근 사용되고 있는 고성능 콘크리트의 경우 화재시 폭열이 발생하기 쉬운 것으로 나타나 콘크리트 구조물의 화재에 대한 성능을 재고해야 할 것이다. 이러한 콘크리트의 화재 피해 성상에 영향을 미치는 배합요인으로는 W/C 및 단위수량, 골재 종류, 혼화재의 종류 등이 있으며 이러한 요인들이 복합적으로 관계되어 있는 것으로 알려져 있다.<sup>1)</sup>

그러므로 본 연구는 잔골재 종류 및 혼화재 종류, 물결합재비의 종류에 따라 콘크리트를 제작한 후 화재를 상정한 고온환경에 노출시켜 그 공학적 특성을 검토함으로써 콘크리트의 화재 피해 성상을 고찰하여 화재발생 후 구조물의 재사용과 보수·보강여부의 판단 및 신뢰성 있는 안전성 평가를 위한 자료로 제시하고자 한다.

## 2. 실험계획 및 방법

### 2.1 실험계획 및 배합

본 연구의 실험계획 및 배합은 표 1에 나타난 바와 같이 잔골재 및 혼화재 종류에 따라 물시멘트비를 각각 55%와 30.5%의 2수준으로 설정한 후  $\phi 10 \times 20\text{cm}$  시험체를 제작·성형하여 24시간 후 탈형하고  $20 \pm 3^\circ\text{C}$ , RH 60%의 대기중에서 28일간 기건양생을 실시하였으며, 양생종료 후 표준 가열곡선에 의해 30분 및 60분 가열하여 폭열성상, 초음파속도, 중량, 압축강도 등의 공학적 특성을 검토하였다.

표 1. 실험 계획 및 배합

시리즈	잔골재 종류	혼화재 종류	가열 시간 (분)	배합명	W/C (%)	S/a (%)	단위중량 ( $\text{kg/m}^3$ )					가열전 함수량 (%)	가열 전 압축강도 (Mpa)
							W	C	PA	S	G		
I	SS	무혼입	30 60	SS	55	43	185	336	0	784	1039	1.1	31.7
	L			N					0	801	1061	1.4	35.3
	RS50 <sup>1)</sup>			RS50					0	772	1045	1.4	29.1
	RS			RS					0	764	1013	1.4	41.8
	CS			CS					0	814	1080	1.3	33.3
II	SS	무혼입	30 60	PL	30.5	43	171	561	0	720	954	0.8	57.1
		FA <sup>2)</sup>		FA				477	84	705	935	0.8	59.3
		BFS <sup>3)</sup>		BFS				308	252	715	947	0.8	54.1

1) SS와 RS를 중량비 1:1로 혼합한 잔골재

2) 결합재 중량 15%를 플라이애시로 대체

3) 결합재중량 45%를 고로슬래그 미분말로 대체

### 2.2 사용 재료

사용 재료는 표 2와 같이 시멘트는 1종 보통포틀랜드시멘트를 사용하였으며, 혼화재로는 보령산 플라이애시와 고로슬래그 미분말을 사용하였다. 잔골재로서 바다모래는 조립율 2.41의 중간모래와 조립율 3.04의 굵은 모래를 사용하였으며, 재생모래는 비중 2.49 흡수율 7.97%의 KS F 2573 콘크리트용 재생골재 2종의 규준을 만족하는 재생 잔골재를 사용하였고 부순모래로 비중 2.65의 전동산 부순모래를 사용하였다. 굵은 골재는 비중 2.65의 퇴촌산 부순자갈을 사용하였다.

표 2. 사용재료의 물리적 성질

종 류	물 리 적 성 질
시멘트	1종 보통포틀랜드시멘트 비중 3.15, 분말도 3630cm <sup>2</sup> /g
혼 화 재 료	보령산 플라이애시 강열 감량 : 4.10% 비중 2.12, 분말도 2976cm <sup>2</sup> /g,
	고로슬래그 미분말 비중 2.99, 분말도 4379cm <sup>2</sup> /g
잔골재	SS : 인천산 세척사 최대치수 : 5mm 비중 2.57, 흡수율 1.25%, 조립율 2.41
	L : 인천산 세척사 최대치수 : 5mm 비중 2.56, 흡수율 1.48%, 조립율 3.04
	RS : 재생모래 최대치수 : 5mm 비중 2.49, 흡수율 7.97%, 조립율 2.74
	CS : 부순모래 최대치수 : 5mm 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

### 2.3 시험 방법

이상과 같이 제작된 시험체를 바닥용 내화시험 가열로를 사용하여 KS F 2257 건축 구조 부재의 내화 시험 방법에 준하여 그림 1에 나타낸 바와 같이 표준 가열곡선에 따라 각각 30분, 60분 가열하였다. 가열된 공시체는 외관상 비폭열을 NON (Non spalling), 국부 폭열 및 박리폭열을 DEL (Delamination), 파괴 폭열 및 단면방향의 점진폭열을 DES (Destruction)로 나누어 콘크리트의 폭열성상을 검토하였다.

초음파속도는 영국 C.N.S Electronics 사의 Pundit를 사용하여 측정하였으며 시험체의 중량은 폭열로 손실된 부분의 중량을 고려하여 외관상 폭열이 발생하지 않은 시험체를 기준으로 측정하고, 압축강도는 KS F 2405 콘크리트의 압축 강도 시험 방법에 준하여 측정하였다.

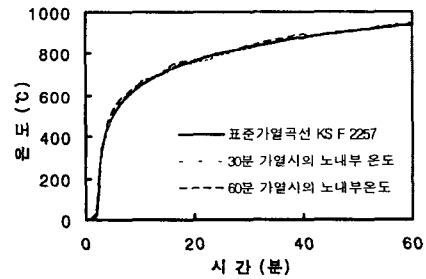


그림 1. 표준 가열 곡선과 가열시 가열로 내부 온도

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 폭열성상

그림 2 및 그림 3은 가열시간에 따른 잔골재 및 혼화재 종류별 콘크리트의 폭열 성상

을 나타낸 것으로서 바다모래를 사용한 경우 잔골재의 크기에 관계없이 폭열이 발생하지 않았으며, 부순모래 및 재생 잔골재만을 사용한 경우는 바다모래를 사용한 경우에 비하여 폭열에 대해 안정하지 못한 것으로 나타났다. 또한 바다모래 50%를 재생 잔골재로 대체한 경우에는 바다모래만을 사용한 경우와 유사한 폭열 성상을 나타내었다.

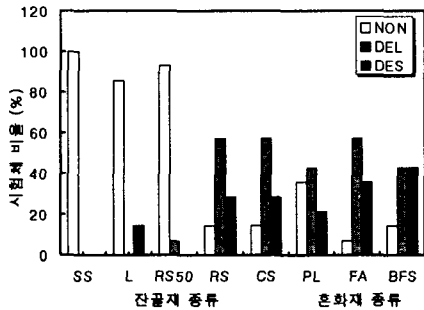


그림 2. 30분 가열시 잔골재 및 혼화재 종류에 따른 폭열성상

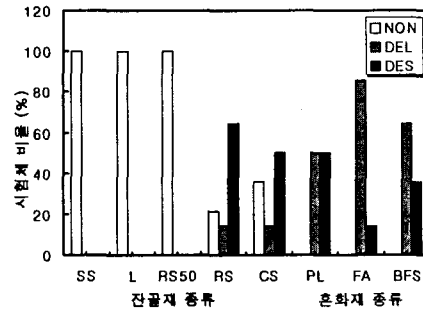


그림 3. 60분 가열시 잔골재 및 혼화재 종류에 따른 폭열성상

혼화재 종류에 따른 폭열 성상은 유사하게 나타났으며, 혼화재료 무혼입(PL)의 경우 30분 가열에 있어서는 혼입의 경우보다 폭열 성상이 양호한 것으로 나타났으나 60분 가열의 경우에는 무혼입의 경우보다 혼화재료를 사용한 경우가 다소 양호한 폭열 성상을 나타내었다.

물시멘트비에 따른 콘크리트의 폭열 성상은 W/C 55%의 일반 강도 영역에서는 폭열에 대해 안정한 것으로 나타났으며 W/C 30.5%의 경우 가열 30분을 전후하여 폭열이 발생하여 가열 60분 이전에 모든 시험체에서 폭열이 발생한 것으로 나타났다.

### 3.2 초음파 속도의 변화

그림 4는 가열 후 1개월 경과시의 가열시간에 따른 초음파 속도를 나타낸 것으로서 바다모래의 경우 재생잔골재 및 부순모래를 사용한 경우에 비하여 가열시간에 따른 초음파 속도의 감소가 상대적으로 크게 나타났다. 또한 W/C 55%보다 W/C 30.5%의 경우 초음파 속도의 감소가 크게 나타났으며 혼화재료의 영향은 적은 것으로 나타났다.

30분 가열 후 재령에 따른 잔골재 및 혼화재 종류별 초음파 속도를 나타낸 그림 5에서 보는바와 같이 모든 배합에서 초음파속도의 회복을 보이고 있으며 W/C 55%의 경우 평균 5.4%, W/C 30.5%에서는 평균 3.4%의 회복을 보이고 있다. 또한 잔골재의 종류에 따라서는 RS의 경우 8.4%로 가장 크게 나타났고 SS에서는 7.0%, L과 RS50은 각각 4.7%와 4.9%로 나타났으며 CS의 경우 2.1%로 가장 적은 회복을 보였다. 그리고 혼화재료의 종류별로는 BFS 4.1%, FA 1.3%의 회복을 보이고 있다.

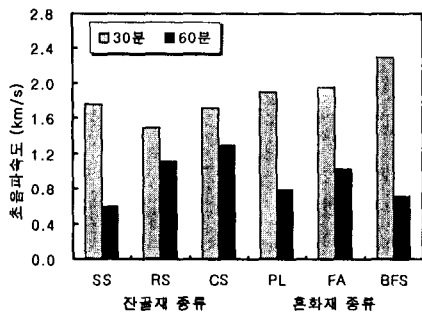


그림 4. 가열 후 재령 1개월의 잔골재 및 혼화재 종류별 초음파 속도와 속도

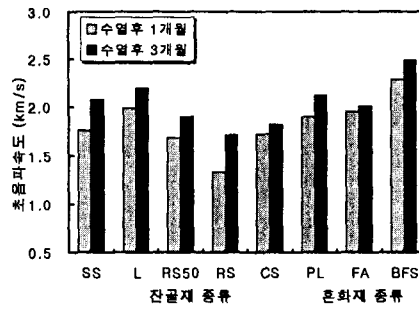


그림 5. 30분 가열 후 재령에 따른 잔골재 및 혼화재 종류별 초음파 속도와 속도

### 3.3 중량 변화

그림 6은 30분 가열한 시험체의 재령 1개월 및 3개월의 중량감소율을 나타낸 것으로서 모든 배합에서 재령이 경과할수록 중량이 증가하는 것으로 나타났으며 그 폭은 평균 1.5% 정도로 나타났다.

수열 후 재령 1개월의 중량감소율은 잔골재 종류에 따라 SS의 경우 4.5%로 가장 적게 나타났으며 RS50에서 7.2%로 가장 크게 나타났다. 또한 W/C에 따른 중량감소율의 변화는 적은 것으로 나타났으며 30분 가열시 평균 6.0%, 60분 가열시에는 30분 가열의 경우보다 평균 0.8%더 감소하는 것으로 나타났다.

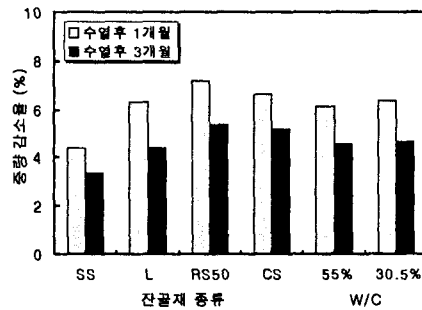


그림 6. 30분 가열 후 재령별 잔골재 및 W/C에 따른 중량감소율

### 3.4 압축강도의 변화

그림 7은 30분 가열한 시험체의 3개월 경과시 압축강도와 가열전의 압축강도를 나타낸 것으로서 30분 가열 후 3개월 경과시 W/C 55%의 잔존 압축강도 비율은 45.5%, 평균 압축강도는 14.9MPa이고 W/C 30.5%에서의 잔존 압축강도 비율은 64.2%, 평균 압축강도는 35.6MPa로 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 결

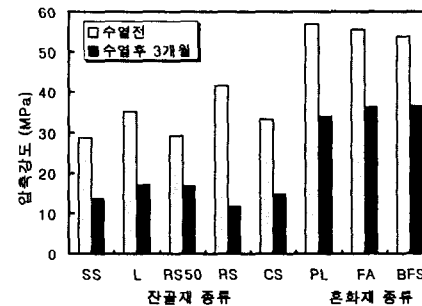


그림 7. 가열전과 30분 가열 후 재령 3개월의 잔골재 및 혼화재 종류별 압축강도

과를 보였다. 또한 잔존 압축강도는 L 및 RS50에서 각각 17.1MPa와 17.0MPa로 가장 높게 나타났으며, CS는 14.9MPa, SS는 13.6MPa, RS의 경우 11.9MPa로 나타나 재생 잔골재만을 사용한 콘크리트를 구조물에 적용할 경우 화재에 취약할 것으로 판단되며 일정비율을 바다모래 등으로 대체하여 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한 잔골재의 크기와 화재 후의 잔존 압축강도는 유의할만한 경향을 보이지 않은 것으로 나타났다.

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 36.3MPa, BFS 36.5MPa, PL 34.1MPa로 측정되어 잔존 압축강도 및 잔존압축강도율은 혼화재 종류에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

### 3.5 초음파속도와 압축강도의 관계

초음파 속도에 의한 압축강도 추정은 구조물에 손상을 주지 않고 신속한 방법으로 압축강도 추정을 위한 몇 가지의 강도추정식이 제안되어 있으며 반발도측정 등과 함께 물결합재비, 재령 양생조건 등의 조건을 고려하여 강도 추정이 가능한 것으로 보고되고 있다.<sup>2)</sup> 그림 8은 30분 가열 후 3개월 경과시의 초음파 속도와 압축강도를 나타낸 것으로서 기존의 초음파속도법으로 고온을 받은 콘크리트의 압축강도를 보다 정확하게 추정하기 위해서는 W/C, 혼화재 및 잔골재 종류 등의 사전 조사가 필요할 것으로 판단되며, 초음파 속도에 의한 압축강도 추정에 있어서 잔골재의 크기는 크게 영향을 미치지 않는 것으로 나타났다.

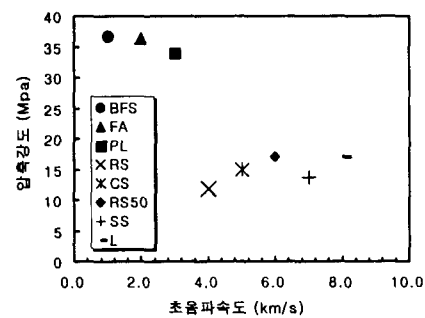


그림 8. 30분 가열후 재령 3개월의 잔골재 및 혼화재 종류별 초음파 속도와 압축강도

## 4. 결론

고온을 받은 콘크리트의 잔골재 및 혼화재 종류에 따른 공학적 특성에 관한 실험적 연구의 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) W/C 55%의 일반강도 영역에서 바다모래를 사용한 경우와 바다모래 50%를 재생 잔골재로 치환한 경우 폭열에 대해 안정한 것으로 나타났고 재생 잔골재 및 부순모래만을 사용한 경우는 폭열에 취약한 것으로 나타났으며, 잔골재 크기의 영향은 미소한 것으로 나타났다. 플라이애시를 사용한 경우와 고로슬래그 미분말을 사용한 경우의 폭열 성상은 유사하게 나타났으며, W/C 30.5%의 경우 가열 30분을 전후하여 폭열이 발생하여 가열 60분 이전에 모든 시험체에서 폭열이 발생하였다.

2) 가열시간에 따른 초음파 속도의 감소는 바다모래의 경우 재생잔골재 및 부순모래를

사용한 경우에 비하여 상대적으로 크며 W/C 55%의 경우보다 W/C 30.5%의 경우가 크게 나타났으며 혼화재료의 영향은 적은 것으로 나타났다. 또한 모든 배합에서 재령의 경과에 따라 초음파속도의 회복을 보이고 있다.

3) 중량감소율은 30분 가열시 평균 6.0%, 60분 가열시 평균 6.8%로 나타났으며 모든 배합에서 재령 경과시 1.5% 정도의 중량이 증가하였다.

4) 30분 가열 후 3개월 경과시 W/C 55%의 잔존 압축강도율은 45.5%, 평균 압축강도는 14.9MPa이고 W/C 30.5%에서의 잔존 압축강도율은 64.2%, 평균 압축강도는 35.6MPa로 측정되었으며, 재생 잔골재를 콘크리트 구조물에 적용할 경우 화재에 취약할 것으로 판단되어 일정비율을 바다모래 등으로 대체하여 사용하는 것이 합리적일 것으로 판단된다. 또한 잔골재의 크기와 화재 후의 잔존 압축강도는 유의할만한 경향을 보이지 않은 것으로 나타났으며, 잔존 압축강도 및 잔존 압축강도율은 혼화재 종류에 영향을 받지 않는 것으로 나타났다.

5) 화재피해를 입은 콘크리트의 초음파 속도에 의한 압축강도 추정을 위해서는 W/C 및 혼화재 종류에 관한 사전조사가 필요할 것으로 판단된다.

## 참고문헌

1. L.T. Phan, "Fire Performance of High-Strength concrete : A Report of the State-of-the-Art", Building and fire research laboratory national institute of standards and technology, 1996. 10.
2. 김무한 외 "고강도 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구", 한국구조물진단학회 학술발표 논문집 제 6권 1호, pp.67-72, 2002. 5.
3. 윤현도 외 "고온을 받은 고강도 콘크리트의 강도특성", 콘크리트학회 논문집, 제 14권 5호, pp.698-707, 2002. 10.
4. 김상규 외, "고강도 콘크리트의 시공 및 품질관리 지침작성에 관한 연구" 대한주택공사 주택도시연구원 2002. 6.
5. 長尾 覺博 外, "火災時における高強度コンクリートの爆裂防止に関する試験結果", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1999. 9, pp.245-246.
6. 森田 武 外, "火災時における高強度コンクリートの爆裂性状に関する基礎的實驗", 日本建築學會大會學術講演梗概集, 1999. 9, pp.41-44.