

재생잔골재를 활용한 화재피해를 입은 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Engineering Properties of Deteriorated Concrete
using Recycled Fine Aggregate by Fire Damage

권 영 진*

Kwon Yung-Jin

Abstract

In the existed study, a fire outbreak in a reinforced 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 accurate 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. Therefore, This study is willing to propose fundamental data for quick and accurate diagnosis of deteriorated concrete structure by fire damage with making variable concrete test specimen, exposing high temperature environment, observing the explosive spalling and examining engineering property.

요 지

기존 연구에서 살펴보면, 철근콘크리트구조물에 발생한 화재로 인해 경화된 시멘트 페이스트와 골재의 수축과 팽창의 차이에 따라 조적이 와해되고, 열응력에 의해 균열이 발생하여 내구성이 저하한다. 그래서 성능저하의 정확한 진단은 일반적인 콘크리트구조물에서 방화성능저하의 매커니즘에 관한 기초가 요구되며, 고온에 노출된 콘크리트의 특성에 대한 기초 정보와 데이터는 성능저하의 정확한 진단을 위해 필요하다. 따라서, 본 연구는 다양한 콘크리트 시험체를 제작하여, 고온 환경에서 노출시켜, 폭열을 관찰하고, 공학적인 특성을 평가함으로써 화재피해를 입은 콘크리트구조물 성능저하의 빠르고 정확한 진단을 위한 기초적인 데이터를 제공하고자 한다.

Keywords : Fire Damage, Recycled Fine Aggregate, Engineering Properties, Explosive Spalling, Compressive Strength

핵심 용어 : 화재피해, 재생잔골재, 공학적 특성, 폭열, 압축강도

* 호서대학교 소방학과 교수

E-mail : refrete@lycos.co.kr 042-821-7731

•본 논문에 대한 토의를 2006년 2월 28일까지 학회로 보내 주시면 2006년 5월호에 토론결과를 게재하겠습니다.

1. 서 론

국내 화재 건수는 연평균 약 30,000건이 발생하고 해액은 연간 1,400억에 이르며, 주택 및 아파트, 공장, 음식점, 호텔 등 건축물에서 전체 화재의 50%가 발생하고 있는 상황이다. 이러한 건축물의 주요 구조부재를 이루는 콘크리트는 다른 구조 재료에 비해 열전도율이 낮고 완전 붕괴에 도달하기까지의 에너지소산능력이 우수하기 때문에 화재 등과 같은 비상상황에서 충분한 대피시간의 확보가 가능하다고 보고되고 있다.

그러나 콘크리트 구조물이 화재 등과 같은 고온에 장시간 노출될 경우 부분적 혹은 전체 구조 시스템에 심각한 영향을 끼칠 수 있는 손상이 발생할 수 있으며, 이러한 콘크리트의 화재피해 상황은 콘크리트에 사용된 혼화재료 및 골재 등 사용재료와 설계기준 강도 등에 따라 영향을 받게 되며 그 피해 상황 역시 다르게 나타난다. 이러한 이유로 일반적인 콘크리트 구조물에서의 화재 메커니즘을 바탕으로 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 재사용 여부 및 피해 등급을 결정하기 위해 콘크리트 구조물의 성능저하를 정확히 진단할 필요가

있다. 이를 위해서는 고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성에 관한 데이터 확보가 반드시 필요하다.

그러나 국내의 경우 굵은골재는 굵은골재를 암질에 따라 구분하여 내화 실험을 실시하여 CEB등의 기준 정립에 적용한 예가 있으며 국내에서도 이와 같이 활용 가능하나, 건축용 잔골재의 경우 암질 또는 성분별로 구분하는 것이 합리적이지 못하기 때문에 잔골재의 경우에는 이의 확대 적용이 어렵다.

또한 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 성능저하를 보다 신속하고 정밀하게 진단하기 위해서는 다양한 콘크리트의 화재피해에 관한 자료가 필요하며, 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 성능저하 상황을 신속하고 정밀하게 측정할 수 있는 기법이 필요하다.

따라서 본 연구는 다양한 콘크리트를 제작하여 고온 환경에 노출시켜 이에 따른 폭열 성상을 관찰하고 시공성 및 공학적 특성을 실험·실증적으로 검토 및 분석함으로써 화재피해를 입은 콘크리트의 성능저하에 관한 기초 자료를 확보하여 화재피해를 입은 콘크리트 구조물 성능저하에 대한 보다 신속하고 정밀한 진단을 위한 기초자료를 제시하고자 한다.

Table 1 실험계획

Series	Mix name	W/C (%)	Design compressive strength (MPa)	Kinds of fine aggregate	Heating temp (°C)	Heating time (Min.)
I	SS ¹⁾	55	21	SS	841 945	30 60
	L ²⁾			L		
	RS 50 ³⁾			RS 50		
	RS ⁴⁾			RS		
	CS ⁵⁾			CS		
II	21	55	21	SS	비가열 100 200 300 400 600 800	180
	24	50	24			
	30	45	30			
	40	40	40			
	50	30	50			

1) Sea Sand

2) Thick Sea Sand

3) Sea Sand : Recycled Sand = 1:1

4) Recycled Sand

5) Crushed Sand

2. 실험계획 및 방법

2.1 실험계획 및 사용재료

본 연구의 프로세스는 콘크리트의 폭열 및 화재피해를 입은 콘크리트의 성능저하 특성에 관한 데이터 확보를 목적으로 Table 1과 같이 I 시리즈와 II 시리즈로 나누어 실험을 계획하였다.

사용 재료는 Table 2에 나타난 바와 같이 시멘트는 1종 포틀랜드시멘트를 사용하였다. 또한 잔골재는 천연 잔골재로서 조립률 2.41 및 3.04의 인천산 세척사와 조립률 2.66의 진동산 부순모래를 사용하였으며, 재생 잔골재로는 2종 콘크리트용 재생잔골재를 사용하였고, 굵은골재는 최대치수 20mm의 퇴촌산 부순자갈을 사용하였다.

2.2 시험 방법

시리즈 I에서는 바닥용 내화시험 가열로를 사용하여 KS F 2257 (건축 구조 부재의 내화 시험 방법에 준하여 표준 가열곡선에 따라 각각 30, 60분간 시험체를 가열하여 폭열성상을 관찰하였다. 가열된 공시체는 콘크리트 표준시방서상의 피복 두께규정 및 화재시 외관

Table 2 사용재료의 물리적 성질

Materials	Physical properties
Cement	Ordinary Portland Cement (Specific gravity 3.15, Fineness 3630 cm ² /g)
	River sand SS (Specific gravity 2.57, Absorbion 1.25%, F.M. 2.41)
Fine aggregate	River sand L (Specific gravity 2.56, Absorbion 1.48%, F.M. 3.04)
	Recycled sand RS (Specific gravity 2.49, Absorbion 7.97%, F.M. 2.74)
	Crushed sand CS (Specific gravity 2.63, Absorbion 1.5%, F.M. 2.66)
Coarse aggregate	Crushed pebbles (Specific gravity 2.65, F.M. 6.02)

상의 피해에 따른 화재 등급분류에 근거하여 화재시 철근 노출가능성을 검토하였는데, 폭열시험체의 분류 개념은 Fig. 2와 같고, 그 일례를 Fig. 3에 나타내었다. 외관상 비폭열을 1등급, 폭열깊이 2.5cm 미만의 시험체를 2등급, 폭열깊이 2.5~5cm의 시험체를 3등급, 그 이상의 폭열깊이가 관찰된 시험체를 4등급으로 하는 4단계로 구분하였으며 2등급 폭열은 철근의 노출은 없으나 보수가 필요한 피해상태이며, 3등급 폭열은 철근이 노출되어있으며 보강이 필요한 상태이고 4등급 폭열의 경우는 부재의 교환 또는 새로운 부재의 설치가 필요한 상태로 진단할 수 있다.

시리즈 II에서는 공시체 내·외부의 온도차를 최소화하여 온도 응력을 줄이고 균일한 수열온도를 유지하기 위해서 각 목표 수열 온도에서 시험체를 3시간 가열한 후 압축강도를 측정하였다. 시리즈 II의 목표수열

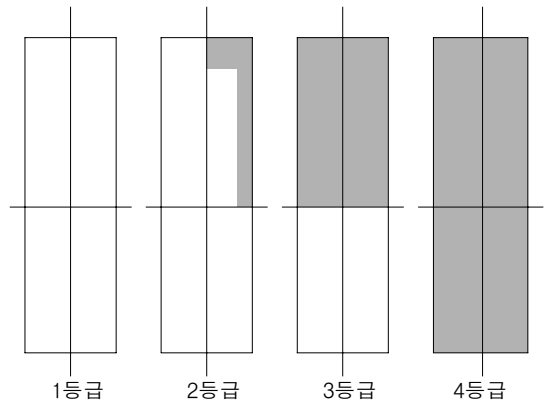


Fig. 1 폭열 등급의 개념



Fig. 2 폭열 등급의 일례

온도는 비가열, 100, 200, 300, 400, 600 및 800°C의 7수준으로 설정하였다.

또한 시험체는 콘크리트를 배합하여 $\phi 10 \times 20 \text{cm}$ 의 원주형 시험체를 제작·성형하고 24시간 후 탈형한 다음 $20 \pm 3^\circ \text{C}$, RH 60%의 대기중에서 28일간 기건양생을 실시하였으며, 압축강도는 비폭열시험체를 기준으로 KS F 2405 (콘크리트의 압축 강도시험 방법)에 준하여 측정하였고 잔존 압축강도는 가열 한 시편체를 3개월 경과시 측정하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 폭열성상 검토 및 분석(시리즈 I)

본 연구의 I 시리즈에 있어서 잔골재, 혼화재 종류 및 물시멘트비에 따른 시험체를 표준 가열곡선에 의해 각각 30, 60분간 가열한 다음 시험체의 폭열성상을 관찰하였는데, 실험 결과는 다음과 같다.

3.1.1 잔골재 종류에 따른 콘크리트의 폭열 특성

Fig. 3은 30분 가열시의 잔골재 종류에 따른 폭열성상을 나타낸 것으로 L 및 SS의 경우 1등급으로 분류된 시험체가 85.71% 및 100%를 차지하고 있어 바다모래를 사용한 경우 폭열에 대해 상대적으로 안정한 것으로 나타났다. 바다모래(SS)와 재생잔골재(RS)를 중량비 1:1로 혼합한 RS50의 경우에도 1등급으로 분류된 시험체가 92.86% 2등급으로 분류된 시험체가 7.14%로 나타나 폭열 성상은 바다모래와 유사한 것으로 나타났다.

또한 부순모래 및 재생 잔골재만을 사용한 경우 1등급 시험체 14.29%, 2등급 시험체 57.14%의 비율로 동일하게 나타났고 3등급은 부순모래를 사용한 경우 7.14%, 재생 잔골재만을 사용한 경우 21.42%로 나타났으며 4등급 시험체의 비율은 각각 21.42, 7.14%로 나타나 부순모래 및 재생 잔골재를 사용한 경우의 폭열성상은 유사한 것으로 나타났으며 바다모래만을 사용한 경우 보다 폭열에 취약한 것으로 나타났다.

이를 통해 본 연구의 범위에서 잔골재의 조립 및 비중이 콘크리트의 폭열에 미치는 영향은 적은 것으로

판단되며, 이에 반해 콘크리트내 함수율과 관련된 잔골재의 흡수율에 대한 영향이 큰 것으로 사료된다.

3.1.2 가열시간에 따른 콘크리트의 폭열 특성

Fig. 4는 잔골재 종류별 가열시간에 따른 콘크리트의 폭열 성상을 나타낸 것으로서, 바다모래의 경우 30분 및 60분 가열에서도 폭열이 나타나지 않으며 부순모래 및 재생 잔골재만을 사용한 경우에는 가열 개시 후 30분 이전에 폭열이 발생하며 가열이 계속되는 동안 지속적으로 폭열이 진행되어 폭열의 상태가 심해지는 것으로 나타났다.

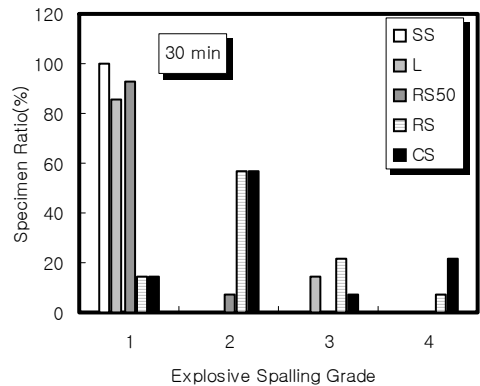


Fig. 3 잔골재 종류에 따른 콘크리트 폭열 성상

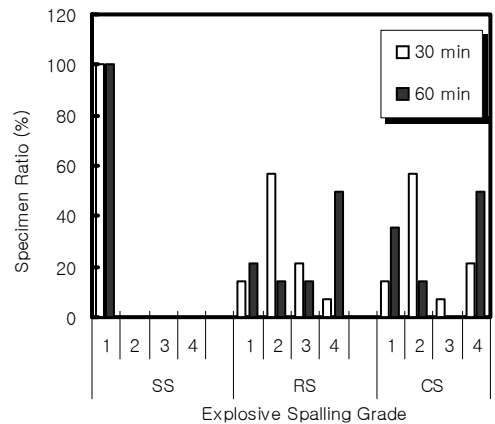


Fig. 4 잔골재 종류별 가열시간에 따른 콘크리트의 폭열 성상

3.2 수열온도와 공학적 특성과의 관계 (시리즈 II)

수열온도는 화재온도와는 다른 개념으로 콘크리트 내부의 위치에서 콘크리트가 직접적으로 받는 온도를 의미하며 본 연구에서는 가열온도별 잔존 압축강도 및 잔존 압축강도율을 통해 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 수열온도 추정을 위한 기초자료를 확보하고자 Table 1의 시리즈 II에 나타난 바와 같이 실험을 계획하여, 설계기준 강도별로 시험체를 제작한 다음 다양한 목표 수열온도로 3시간 가열한 후 잔존 압축강도, 잔존 압축강도율 등을 측정하였으며 그 결과는 다음과 같다.

3.2.1 가열온도별 잔존 압축강도 및 잔존 압축강도율

Fig. 5는 설계기준강도별로 각각 100, 200, 300, 400, 600, 800℃의 목표수열온도로 3시간 동안 가열한 시험체의 잔존 압축강도를 나타낸 것으로서 수열온도가 높아질수록 잔존 압축강도가 낮아지는 것으로 나타나 수열온도가 높아질수록 콘크리트 내부조직의 파괴가 심화되는걸 확인할 수 있었으며, 설계기준강도 30MPa 이하의 경우에는 400℃에서 3시간 가열한 경우에도 강도 저하가 크게 나타나지 않았으나 설계기준강도 40MPa 이상에서는 300℃로 가열한 시험체에서도 압축강도의 저하가 나타났으며, 400℃이상으로 가열한 경우에 있어서는 모든 시험체에서 강도저하를 나

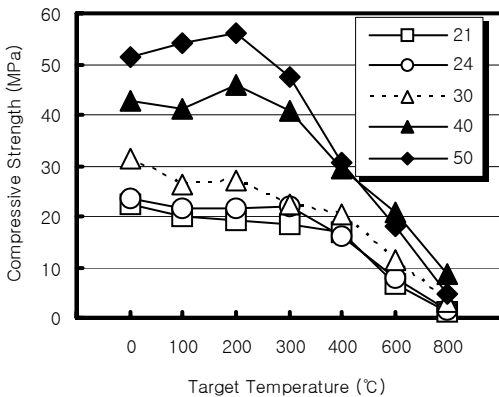


Fig. 5 설계기준강도별 가열온도에 따른 잔존압축강도

타났다. 이는 고강도 콘크리트의 경우 가열에 따른 취성과파괴에 기인한 것으로 판단된다.

또한 잔존 압축강도율은 Fig. 6에 나타난 바와 같이 각 목표 수열온도별로 평균 96, 98, 83, 65, 33, 11%로 나타났으며 800℃에서 3시간 가열한 경우 설계기준강도에 관계없이 잔존 압축강도율이 20% 이하로 나타나 수열온도가 증가할수록 잔존 압축강도율이 낮아지는 것으로 판단된다.

가열온도별 설계기준 강도에 따른 잔존 압축강도율을 나타낸 Fig. 7에서 보는 바와 같이 설계기준강도 40, 50MPa의 경우에는 각 가열온도에서 잔존 압축강

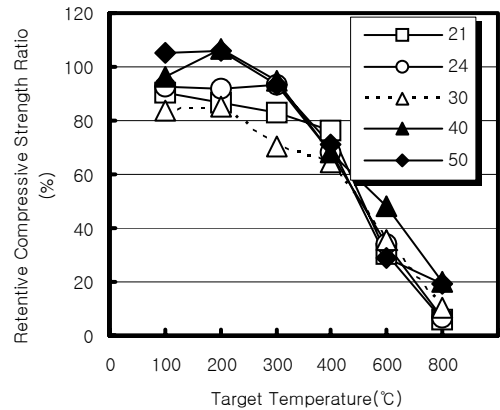


Fig. 6 가열온도에 따른 잔존압축강도

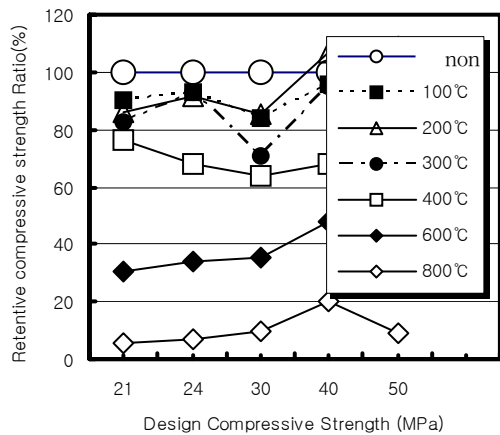


Fig. 7 가열온도별 설계기준 강도에 따른 잔존 압축강도율

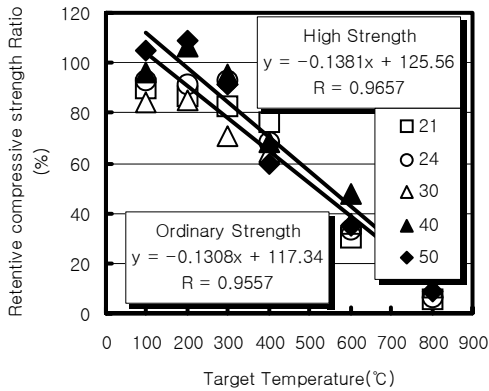


Fig. 8 잔존압축강도율과 목표 수열온도의 관계

도율이 다소 높게 나타나는 경향을 나타내고 있다.

3.2.2 가열온도와 잔존 압축강도율의 관계

Fig. 8은 잔존 압축강도율과 목표 수열온도의 관계를 나타낸 것으로서 목표 수열온도 200°C로 가열한 경우에는 목표수열온도 100°C로 가열한 시험체보다 잔존 압축강도율이 평균 2.58% 높게 나타났으며, 설계기준 강도 21, 24Mpa의 경우에는 100°C로 가열한 시험체보다 각각 3.82, 1.26% 낮게 나타났다. 또한 모든 설계기준강도에 있어서 600°C 이상의 수열온도에서는 50%이하의 잔존 압축강도율을 보였다.

또한 수열온도가 높아질수록 잔존 압축강도율은 낮아지는 경향을 보였으며, 가열온도와 잔존 압축강도율의 상관계수는 고강도 영역에서 0.9657, 일반강도 영역에서 0.9557로 나타나 수열온도는 잔존 압축강도율과 매우 밀접한 관계가 있는 것으로 나타났다.

따라서 정밀한 수열온도의 추정으로부터 간단한 방법을 통해 잔존 압축강도율을 구할 수 있을 것으로 기대된다.

4. 결론

화재피해를 입은 재생잔골재를 활용한 콘크리트의 공학적 특성에 관한 실험적 연구결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 잔골재 종류에 따른 콘크리트의 폭열 특성으로는 본 연구의 범위 내에서 잔골재의 조립률에 따른 영향은 거의 없는 것으로 나타났고, 바다모래가 폭열에 대해 상대적으로 안정한 것으로 나타났으며, 재생골재를 50% 대체한 경우에도 폭열 성상은 바다모래와 유사한 것으로 나타났다. 또한 부순모래 및 재생 잔골재만을 사용한 경우는 바다모래만을 사용한 경우보다 폭열에 취약한 것으로 나타났다.
- 2) 바다모래의 경우 60분 가열시에도 대부분 폭열하지 않은 것으로 나타났으며 재생골재를 50% 대체한 경우에도 유사하게 나타났고 부순모래 및 재생 잔골재만을 사용한 경우에는 대부분 폭열이 발생하였으며 가열 개시 30분 이후에도 지속적으로 폭열이 진행되는 것으로 나타났다.
- 3) 압축강도 및 잔존 압축강도율은 수열온도가 높아질수록 낮아지는 것으로 나타났으며 400°C 이상으로 가열한 경우에 있어서는 모든 시험체에서 강도저하를 나타내었고, 600°C 이상의 수열온도에서는 50% 이하의 잔존 압축강도율을 보였으며 목표 수열온도 800°C에서 3시간 가열한 경우 설계기준강도에 관계 없이 잔존 압축강도율이 20% 이하로 나타났다.

감사의 글

본 연구는 학내연구비 지원으로 수행되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

1. 행정자치부(2000). 화재통계연보.
2. 한국콘크리트학회(2003). 콘크리트표준시방서 해설. 기문당.
3. 김무한 외(2002). 화재피해를 입은 콘크리트의 물성 변화에 관한 실험적 연구, 한국화재·소방학회 추계 학술논문발표회 논문집.
4. 김무한 외(2002). 고강도 콘크리트의 압축강도 추정을 위한 비파괴시험식에 관한 연구, 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 제6권 1호.
5. 김무한 외(2003). 화재로 인해 성능저하된 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구, 한국구조물진단학회 학술발표 논문집, 제7권 2호.

-
6. 김무한 외(2003). 잔골재 및 혼화제 종류에 따른 콘크리트의 폭열 성장에 관한 연구, 한국콘크리트학회가을 학술발표회 논문집, 제15권 2호.
 7. 김무한 외(2002). 화재에 의해 성능 저하된 콘크리트 구조물의 진단 및 보수공법에 관한 연구, 한국화재·소방학회 춘계 학술논문발표회 논문집.
 8. 권영진 외(2002). 화재피해를 입은 콘크리트 구조물의 수열온도 평가에 관한 문헌적 고찰, 한국화재·소방학회 추계 학술논문발표회 논문집.
 9. 권영진(2002). 화재피해를 입은 철근 콘크리트 구조물의 조사, 평가 및 리해빌리테이션 방안, 한국화재·소방학회 하계 심포지움
 10. 건설교통부(1999). 콘크리트구조 설계기준.
 11. 대한주택공사(1993). 부순모래의 실용화방안에 관한 연구.
 12. 日本コンクリート工學協會(2001). 콘크리트診斷技術'01[基礎編].
 13. L.T. Phan(1996). "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.
 14. Comites Euro-International Du Beton(1991). "Fire design of concrete structures in accordance with CEB/FIP Model Code 90 (Final Draft)," CEB Bulletin D'Information, No. 208, July 1991, Lausanne, Switzerland.
 15. N.G.Zoldners(1990). Effect of High Temperature on Concrete Incorporating Different Aggregate. ASTM, Material Journal, Vol. 87, No. 1.
 16. T.D.Lin, R.I.Zwiers, R.G.Burg, T.T.Lie, and R.J.McGrath (1992). Fire Resistance of Reinforced Concrete Columns. Portland Cement Association, PCA R&D Serial Nos. 1870 and 1871

(접수일자 : 2005년 8월 8일)