



자연모래와 부순모래를 사용한 콘크리트의 고온 하에서 특성연구

김주석¹⁾ · 최 열^{1)*}

¹⁾경북대학교 건축토목공학부

A Study on Properties of Concrete Made of Natural and Crushed Sand in High Temperatures

Joo-Seok Kim¹⁾ and Yeol Choi^{1)*}

¹⁾School of Architecture and Civil Engineering, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

ABSTRACT The main object of this paper is to investigate the effects of high temperatures on the physical and mechanical properties of natural sand concrete(NSC) and crushed sand concrete(CSC). Test samples were exposed to high temperature ranging from 200°C to 800°C. After exposure, various tests were conducted. Color image analysis and weight losses were determined and compressive strength test and splitting tensile strength test were conducted. The results indicated that weight losses increased as exposure temperature increased with comparable decreasing rate. The results also showed that compressive strength and splitting tensile strength and modulus of elasticity decreased as exposure temperature increased. The results also showed that residual compressive strength of NSC decreased more drastically than that of CSC at 200°C and 400°C. Residual splitting tensile strength of NSC decreased more than that of CSC at 200°C, while NSC and CSC showed comparable residual strength ratio at 800°C.

Keywords : natural sand, crushed sand, high temperature, mass loss, residual strength

1. 서 론

급속한 경제성장에 따른 건설경기 활성화와 도로, 항만과 같은 사회간접자본사업은 풍부했던 자연골재, 특히 강모래의 고갈을 불러왔고, 이에 따른 부족량을 해소하기 위하여 바다모래를 세척하여 사용하거나, 부순모래를 강모래의 대체골재로 이용하기 시작했다.¹⁾ 그러나 바다모래의 경우 염화물에 따른 철근콘크리트의 피해와 환경피해를 야기한다는 목소리가 높아짐에 따라 비교적 구하기 용이한 부순모래의 사용량이 급격히 증가해왔다. 하지만 부순모래는 강모래에 비해 입형이 불량하며 흡수율이 커 모르타르의 빠른 응결을 유도하기 때문에 시공에 적절한 워커빌리티를 확보하기가 어렵다는 단점이 있다. 또한 재료분리와 곰보현상을 유발하는 등 콘크리트 품질관리에도 어려움이 따른다. 하지만 혼화재와 혼화제의 적절한 사용으로 워커빌리티와 유동성을 개선할 수 있으며, 강도 또한 자연모래와 비슷한 강도를 발현하며 많은 시공사례에서 보여주듯이 경제성도 뛰어나다.^{2,3)}

최근 건축물의 대형화에 따라 화재의 피해도 대형화되어 가고 있으며, 콘크리트 구조물은 화재피해에 비교적 우수한 내화성능을 지닌 것으로 보고되어 있어 화재피해

후 적절한 보수·보강을 통해 재사용되고 있다. 하지만 콘크리트가 고온에 노출되게 되면 불규칙적인 폭열 현상과 강도저하를 보이게 됨으로 화재피해를 받은 콘크리트 구조물의 효율적이고 경제적인 보수·보강을 위해서는 다양한 노출온도 및 실험조건하에서의 실험데이터 확보가 필요하다.⁴⁾ 하지만 고온에 노출된 콘크리트의 연구는 주로 강모래와 바다모래와 같은 천연골재를 사용한 콘크리트에 대해 주로 행해졌으며, 최근 사용량이 많은 부순모래에 관한 연구는 부족한 실정이다. 잔골재는 콘크리트 전체 용적의 30% 내외를 차지함으로써 콘크리트의 특성 및 품질에 큰 영향을 미친다고 볼 수 있으므로 이 연구에서는 자연모래와 부순모래를 사용한 콘크리트 공시체를 제작하여 여러 수준의 온도에 노출시킨 후 증량손실, 잔존강도, 탄성계수 등을 비교 평가하여 자연모래와 부순모래가 콘크리트의 역학적 특성에 미치는 영향에 대하여 연구하고자 한다.

2. 이론적 고찰

2.1 고온에 노출된 콘크리트의 메커니즘

콘크리트가 고온에 노출되면 콘크리트의 자유수가 팽창하여 내부응력을 증가시킴으로서 내부조직이 파괴되어 강도 및 탄성 등의 역학적 성질이 저하한다. 온도에 따

*Corresponding author E-mail: choiyel@knu.ac.kr
 Received October 5, 2011, Revised December 6, 2011,
 Accepted December 27, 2011
 ©2012 by Korea Concrete Institute

른 특성을 살펴보면 100°C이상에서 자유공극수가 방출되기 시작하며, 뚜렷한 강도저하는 나타나지 않는다. 200°C에서 물리적 흡착수가 방출되므로 이들의 분리·소실에 따라 콘크리트 중의 시멘트수화물이 수축하기 시작하며 강도 저하가 나타난다. 300°C 이상이 되면 화학적으로 변질되기 시작하며, 표면도 분홍색으로 변색된다. 400°C 이상에서는 화학적 결합수가 방출되고, 500°C가 넘으면 콘크리트의 수산화칼슘(Ca(OH)₂)이 열분해되어 알칼리성이 소실되는 화학적 피해를 입게 되므로 내구성이 현저하게 감소하여, 강도저하가 50%까지 나타난다. 600°C 이상에서는 콘크리트 표면이 회백색으로 되며, 950°C를 초과하면 담황색을 띠게 된다.^{4,6)}

2.2 콘크리트의 내화 특성 연구현황

Anne-Lise Beaucour는 물시멘트비 60%인 보통 콘크리트와 30%의 고성능 콘크리트를 대상으로 내화실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시험체는 Ø160 × 320 mm와 Ø110 × 220 mm의 원주형 공시체이며, 1°C/min의 속도로 목표온도(상온, 300°C, 600°C, 750°C)까지 가열한 후 비재하 내화실험을 실시하였다. 실험 결과 300°C까지는 압축강도와 할렐 인장강도의 감소가 비교적 작으며, 600°C에 노출되었을 경우 급격하게 강도저하가 나타남을 보여주고 있다. 탄성계수의 변화도 300°C에서 600°C 사이에서 큰 변화를 나타내어 300°C에서 600°C 구간을 콘크리트의 역학적 특성에 큰 영향을 미친다고 보고하고 있다.⁷⁾ Metin Husem은 고온이 보통 콘크리트와 고성능 콘크리트의 압축강도와 휨강도에 어떠한 영향을 미치는지에 대한 연구를 실시하였다. 노출온도(상온, 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1,000°C)와 냉각 방식(공기, 물)을 주요 변수로 비재하 잔존강도 내화실험을 하였다. 실험 결과 400°C에 노출 되었을 때 잔존 압축강도가 급격하게 감소하여 1,000°C에 노출 되었을 때는 약 10%의 잔존강도를 나타낸다고 보고하였다.⁸⁾ Omer Arioz는 자연골재와 부순 골재를 사용하여 제작한 70 × 70 × 70 mm의 공시체를 28일간 수중양생한 후 200°C에서부터 1,200°C까지 20°C/min의 속도로 가열한 후 2°C/min의 속도로 냉각시킨 후 중량손실, 압축강도를 평가하였다. 실험 결과 800°C에 노출된 후 약 10%의 중량손실률을 보였으며, 800°C 이상에서 중량손실이 급격하게 증가하였다. 압축강도의 경우 200°C까지는 강도에 큰 영향이 없으나 400°C에서부터 800°C까지 급격한 손실률을 나타내 400°C에서 약 80%, 600°C에서는 40%, 800°C에서 약 20%의 잔존율을 나타낸다고 보고하였다.⁹⁾ Ivica Guljas는 강골재, 제강슬래그, 부순 벽돌, 부순 타일 등을 골재로 사용한 콘크리트의 비재하 잔존강도 내화 실험을 실시하였다. 40 × 40 × 160 mm 시험체를 타설 후 24시간 후 탈형하여 20 ± 2°C로 28일간 수중양생한 후 고온에 노출시켰다. 온도수준은 200°C, 400°C, 600°C, 800°C, 1,000°C이며 목표온도 도달 후 1시간 30분 동안 목표온도를 일정하게

유지시킨 후 상온에서 냉각시켰다. 실험 결과 400°C에서 약 80%의 잔존율을 나타내었으며, 800°C에 노출되었을 때까지 급격하게 감소하여 약 30%의 잔존 압축강도율을 나타내었다.¹⁰⁾ 김홍열은 실제 화재조건과 같이 콘크리트의 고온에서의 역학적 특성 구명을 목적으로 콘크리트를 상온에서 800°C까지 가열하면서 압축강도, 탄성계수, 응력-변형곡선, 크리프 등을 평가하여, 이를 바탕으로 고온 가열시 콘크리트의 역학적 특성 파악을 위한 기초적인 자료를 제공하고 있다. 실험 결과 100°C에서 미세한 압축강도 저감을 나타내지만 전체적으로 200°C까지는 강도저감 없이 일정한 압축강도를 보이지만 200°C 이후부터 급격한 압축강도 저감을 보여 200°C, 400°C, 600°C, 800°C에서 각각 88%, 64%, 36%, 20%의 압축강도 수준을 나타낸다고 보고하고 있다.¹¹⁾ 조복성은 화재피해를 입은 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구에서 설계기준강도 21 MPa에서 80 MPa에 이르기까지 7수준으로 제작하여 100°C, 200°C, 300°C, 400°C, 600°C, 800°C로 3시간동안 가열하여, 초음파속도 및 잔존 압축강도를 측정하였다. 실험 결과 300°C에서 약 90%의 잔존 압축강도를 나타내고 있으며 300°C 이상에서 급격한 강도저하를 나타내고 600°C에서 30%의 잔존강도를 나타낸다고 보고하고 있다.⁴⁾

3. 실험 개요

3.1 재료 특성

3.1.1 시멘트

이 실험에서 사용한 시멘트는 국내 H사 보통 포틀랜드 시멘트로 그 물리적 성질은 Table 1과 같다.

3.1.2 골재

실험에 사용된 자연모래는 경북 고령산 강모래를 사용하였고, 부순모래는 경북 칠곡산 부순모래를 사용하였다. 굵은골재의 최대 치수는 19 mm이다. 부순모래의 정량분석, 압축강도 및 암석의 종류를 Table 2에 나타내었다. 분석 결과 구성 성분 및 조직 형태상으로 석영의 비율이 높은 미화강암이며 지하 깊은 곳에서 생성되는 심성암과 달리 지표 얕은 곳에서 생성된 반심성암으로 나타났다. 대부분 알칼리장석과 석영으로 되어 있으며, 불투명광물이 소량 함유되어 있다. 물리적 특성에서 압축강도는 123 MPa이고, 건설부 표준품셈의 암분류기준의 A 그룹에 속하는 암종으로 보통암의 구분이다. 화학성분은 SiO₂와 Al₂O₃가 주성분으로 각각 60.7% 및 14.8%로 나

Table 1 Properties of portland cement

Density (g/cm ³)	Fineness (cm ² /g)	Setting time (h:m)		Compressive strength (MPa)		
		Initial	Final	3 days	7 days	28 days
3.15	3,430	3:40	5:40	27.1	39.7	56.5

Table 2 Physical properties of crushed sand

Test item	Unit	Value
Quantitative analysis	Al ₂ O ₃	14.8
	CaO	5.2
	Fe ₂ O ₃	6.4
	MgO	2.3
	Na ₂ O	4.8
	K ₂ O	4.3
	SiO ₂	60.7
	P ₂ O ₅	0.4
	TiO ₂	0.9
	SrO	0.1
ZrO ₂	0.1	
Compressive strength	MPa	123
Type of rock	-	Microgranite

Table 3 Physical properties of aggregates

Item	Density (g/cm ³)	Absorption (%)	Fineness modulus	Unit weight (kg/m ³)
Natural sand	2.56	2.14	2.52	1,554
Crushed sand	2.78	2.47	2.83	1,734
Coarse aggregate	2.69	1.83	6.67	1,422

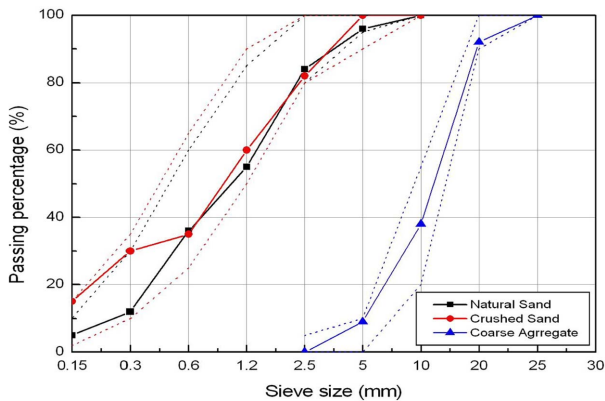


Fig. 1 Grading curves of aggregate

타났다. 잔골재와 굵은골재의 물리적 성질을 Table 3에 나타내었고, 골재의 입도분포 곡선을 Fig. 1에 나타내었다.

3.2 실험 계획

3.2.1 콘크리트 배합

콘크리트 배합은 Table 4에 나타내었으며 자연모래와 부순모래 모두 물시멘트 비를 50%로 일정하게 하였으며, 콘크리트의 목표설계강도는 24 MPa로 설정하였다. 슬럼프테스트와 공기량 측정 결과 국토해양부에서 제정한 콘

Table 4 Mixing design

Type	W/C (%)	S/a (%)	Unit weight (kgf/m ³)			
			W	C	S	G
NSC	50	45	184	368	780	927
CSC	50	45	179	358	769	958



Fig. 2 Electronic furnace

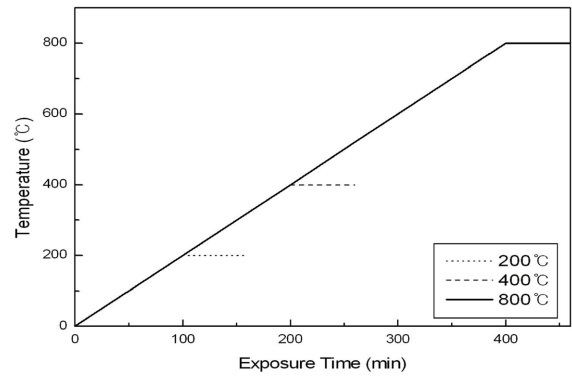


Fig. 3 Time-temperature curve

크리트표준시방서에 제시하는 일반 콘크리트 슬럼프 값 50~50 mm, 공기량은 4.5 ± 1.5%의 기준을 만족하는 것으로 나타났다.

3.2.2 시험체 제작

콘크리트 배합은 100ℓ 강제식 믹서를 사용하였으며, 배합 후 KS F 2421에 준하여 균지 않은 콘크리트의 공기량을 측정하였으며, KS F 2402에 준하여 슬럼프테스트를 실시하였다. 압축, 활렬 인장강도 시험을 위해 Ø100 × 200 mm 형틀을 사용하여 원주 시험체를 제작 후 24시간 후에 형틀을 탈형한 뒤 28일간 20 ± 2°C의 수중에서 표준양생을 실시하였다.

3.2.3 전기로 가열

Ø100 × 200 mm 원주 시험체를 Fig. 2의 전기로 내에 수직으로 배치한 후 Fig. 3에 나타난 가열곡선에 준하여 가열하였다. 목표온도(200°C, 400°C, 800°C)까지 도달하면 60분간 목표온도를 유지한 후 상온까지 서서히 냉각

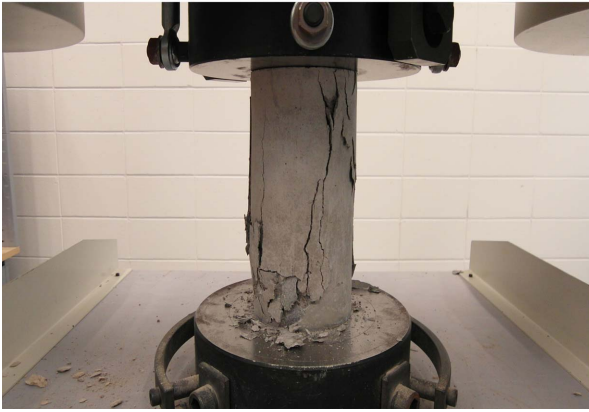


Fig. 4 Compressive strength test



Fig. 5 Splitting tensile strength test

시켰다.

3.2.4 잔존강도 특성 평가

이 연구에서는 고온에 노출된 콘크리트의 강도특성 변화를 알아보기 위해 압축강도와 할렬 인장강도시험을 실시하였다. 콘크리트 압축강도시험과 할렬 인장강도시험을 KS F 2405와 KS F 2423에 준하여 실시하였으며 Figs. 4와 5에 나타내었다. 일반적으로 콘크리트는 인장강도를 무시해서 설계되기 때문에 구조설계상 콘크리트의 인장강도가 문제가 되는 일은 거의 없지만 기능유지 및 미관의 관점에서 균열의 발생이 문제가 되기도 하며, 압축강도에 비해 공시체 내부의 잠재적인 결함에 민감하므로 가열에 의한 영향을 보다 쉽게 받게 되기 때문에 실시하였다.

일반적으로 노출온도에 따른 콘크리트의 강도특성 평가를 위한 방법으로 재하 내화실험, 비재하 내화실험 및 비재하 잔존 압축강도 내화실험이 주로 적용되고 있는데 이 연구에서는 비재하 잔존 압축강도 내화실험 방법으로 시험하였다. 이는 시험체에 먼저 하중을 재하하지 않고 목표온도까지 설정된 속도로 가열한 후 시험체가 균일한 온도분포 상태에 이르면 가열속도와 동일한 속도로 상온까지 서서히 냉각시킨 후 상온상태에서 파괴 시까지 시험체에 응력 또는 변형률을 증가시키는 방법으로 화재 발생 후 콘크리트가 보유한 강도 특성을 평가하는데 적

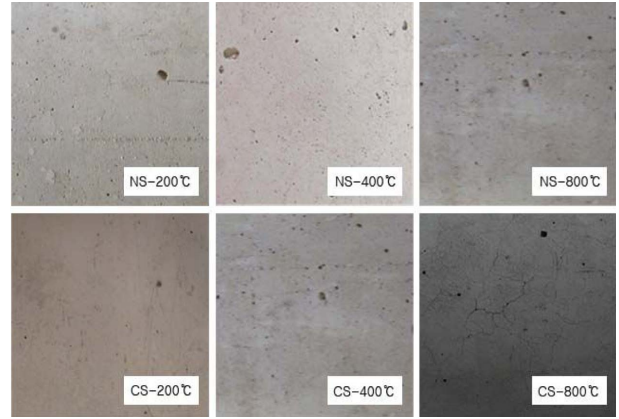


Fig. 6 Surface texture of the concrete samples exposed to high temperatures

절한 실험방법이라 할 수 있다.¹²⁻¹⁴⁾

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 고온에 노출된 콘크리트의 물리적 특성

4.1.1 육안검사

고온에 노출된 콘크리트는 외관을 살펴봄으로 노출된 온도를 추측할 수 있다. 일반적으로 300°C이하에서는 표면에 그을음이 부착하지만 변색되지 않으며, 300~600°C에서는 분홍색을 띠며, 600~950°C에서는 회백색으로 변색한다고 알려져 있다. 자연모래를 사용한 콘크리트(이하 NSC)와 부순모래를 사용한 콘크리트(이하 CSC)의 노출 온도별 콘크리트 표면을 Fig. 6에 나타내었다. 공히 200°C에서는 변색되지 않았으며 균열을 찾을 수 없었다. 400°C에 노출시켰을 때 NSC의 외관은 옅은 분홍색으로 변색되었고 CNC는 변색되지 않았다. 두 시험체 모두 표면에서 조그만 공극을 발견할 수 있었으며 눈에 띄는 균열은 없었다. 800°C에 노출시켰을 때 NSC의 외관은 짙은 분홍색을 띠었고 CNC는 변색되지 않았다. 또한 표면에서 상당히 많은 공극을 발견할 수 있었으며 육안으로도 많은 균열을 발견할 수 있었다. 이처럼 NSC와 CSC가 노출온도에 따라 다른 변색양상을 나타내어 정확한 원인을 구명하기 위해 시험체를 가열했던 동일한 조건으로 자연모래와 부순모래를 고온에 노출 시킨 후 각 모래의 변색유무를 살펴보았다. 자연모래는 200°C에서는 변색되지 않았으나 400°C 부터 변색되어 800°C에서는 짙은 분홍색을 띠었다. 반면 부순모래는 400°C까지는 거의 변색되지 않았으며 800°C에 노출되었을 때 상온에 비해 약간 밝은색을 띠었다. 자연모래와 부순모래의 고온에서 변색되는 양상이 NSC와 CSC의 변색되는 양상과 거의 일치하는 것으로 보아 NSC와 CSC의 외관의 변색의 차이는 잔골재의 차이에 기인한다고 사료된다.

4.1.2 중량손실률

Table 5에는 노출온도에 따른 NSC와 CSC의 평균중량

Table 5 Average mass loss and standard deviation values for NSC and CSC

Type	200°C		400°C		800°C	
	Average mass loss (%)	Standard deviation	Average mass loss (%)	Standard deviation	Average mass loss (%)	Standard deviation
NSC	3.7	0.44	6.6	0.27	9.1	0.07
CSC	4.3	0.40	6.6	0.27	8.8	0.29

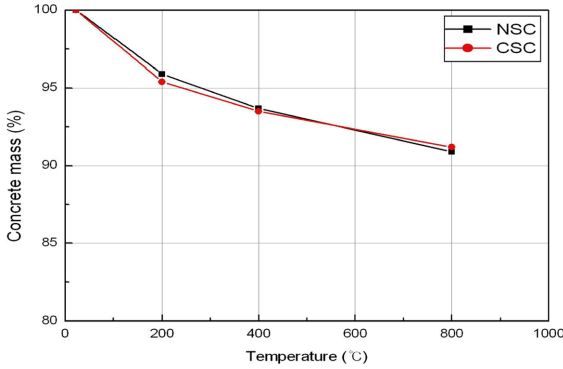


Fig. 7 Weight loss of the concrete specimens exposed to high temperature

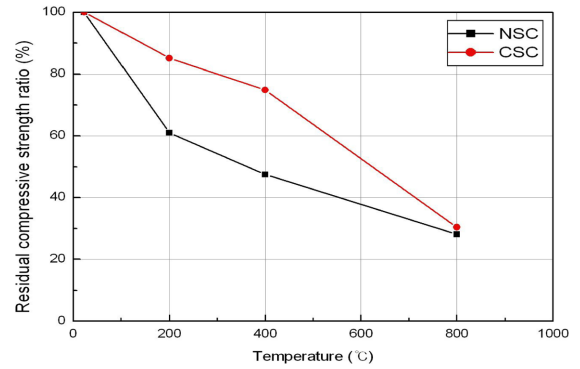


Fig. 8 Residual compressive strength exposed to high temperature

손실과 표준편차를 나타내었다. 각각의 중량손실률은 다음 식으로 계산되어 졌으며 Fig. 7에 노출온도에 따른 중량손실률의 변화를 나타내었다. 200°C에 노출되었을 때 NSC와 CSC는 상온에서의 중량과 비교했을 때 각각 3.7%와 4.3%의 중량손실률을 나타내었다. 400°C에 노출되었을 때는 NSC, CSC 모두 동일하게 6.6%의 중량손실률을 나타냈다. 800°C에 노출되었을 때는 약 9%의 중량손실률을 보여주었다. 각 공시체마다 표준편차 또한 작은 값을 보여주고 있어 중량손실률은 대체적으로 일정한 것으로 사료된다. 이는 노출온도에 따른 중량손실률 증가에 가장 큰 영향을 미치는 것은 잔골재의 종류에 따른 흡수율의 차이보다는 노출온도 단계에서의 증발하는 자유수와 결합수라는 것을 말해주며 잔골재 종류에 따른 흡수율 차이에 따른 영향은 미미하다고 할 수 있다.

$$\text{중량손실률(\%)} = 1 - \frac{\text{가열 후 중량}}{\text{상온에서의 중량}} \times 100 \quad (1)$$

4.2 고온에 노출된 콘크리트의 강도 특성

4.2.1 압축강도의 변화

상온과 고온에 노출된 NSC와 CSC의 압축강도를 나타내면 Table 6과 같다. NSC와 CSC가 동일하게 노출온도가 증가할수록 압축강도가 감소하는 것을 알 수 있다. 상온에서 NSC는 36 MPa의 강도를 나타내었으며 200°C에 노출되자 목표설계강도 24 MPa 이하의 강도를 보였

Table 6 Average compressive strength exposed to high temperature

Type	23°C (MPa)	200°C (MPa)	400°C (MPa)	800°C (MPa)
NSC	36.9	22.5	17.2	10.0
CSC	28.2	24	21.1	8.6

다. CSC는 상온에서의 강도는 28 MPa로 NSC보다 작았으나 200°C에 노출되었을 때 강도가 24 MPa로 NSC보다 큰 강도는 나타내었다. 고온에 노출되었을 때의 강도변화를 조금 더 명확하게 알기 위해 잔존 압축강도율을 그래프로 나타내면 Fig. 8과 같다. 잔존 압축강도율은 식 (2)로 계산되었다.

$$\text{잔존 압축강도율(\%)} = \frac{\text{가열 후 압축강도}}{\text{상온에서의 압축강도}} \times 100 \quad (2)$$

잔존 압축강도율의 변화를 살펴보면 NSC의 경우 200°C에 노출되었을 때부터 급격한 압축강도 저하가 나타났으며, 400°C에 노출되었을 경우에는 약 50%의 잔존 압축강도율을 나타내었다. CSC는 200°C와 400°C에서 NSC와 비교해 약 25~30%가량 더 큰 잔존 압축강도율을 나타내고 있다. 하지만 800°C에 노출되었을 때는 급격히 감소해 NSC와 비슷한 약 30%의 잔존율을 나타내었다. NSC와 CSC가 200°C와 400°C에서 큰 잔존율의 차이를 나타내는 것은 부순모래의 입형이 자연모래보다 크고, XRD(X-ray diffraction) 분석 결과 고온에 노출시 자연모래는 부피가 증가하는데 반해 부순모래의 경우에는 부피가 감소하는 것으로 나타났다. 이는 부순모래의 주 성분인 석영이 고온에 노출되면 재결정작용을 받아 석영의 결정구조가 밀실하게 다져지기 때문으로 사료된다. 그리고 800°C에서 NSC와 CSC가 비슷한 잔존율을 나타내는 것은 잔골재의 영향으로 인한 강도저하보다 골재와 시멘트 페이스트의 상이한 열팽창계수로 인한 강도저하요인이 지배적이기 때문으로 사료된다.

4.2.2 활렬 인장강도의 변화

고온에 노출된 NSC와 CSC의 활렬 인장강도를 나타내

Table 7 Average splitting tensile strength exposed to high temperature

Type	23°C (MPa)	200°C (MPa)	400°C (MPa)	800°C (MPa)
NSC	3.7	2.5	2.4	0.8
CSC	3.6	3.1	2.3	0.7

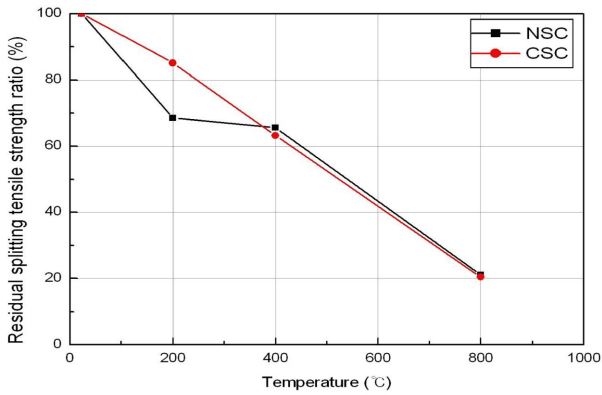


Fig. 9 Residual splitting tensile strength exposed to high temperature

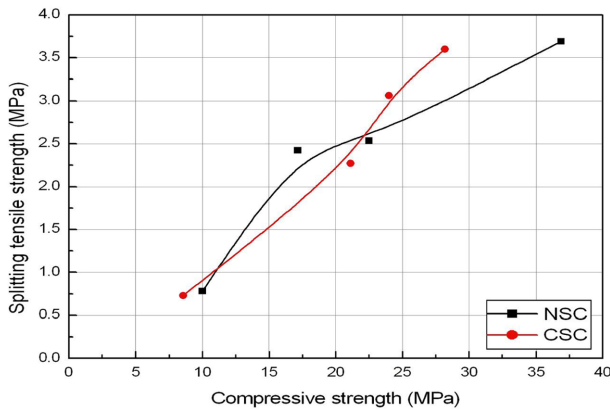


Fig. 10 Relationship between compressive strength and splitting tensile strength

면 Table 7과 같다.

잔존 할렬 인장강도율은 식 (3)을 사용하였으며 Fig. 9에 그래프로 나타내었다.

$$\begin{aligned} & \text{잔존 할렬 인장강도율(\%)} \\ &= \frac{\text{가열 후 할렬 인장강도}}{\text{상온에서의 할렬 인장강도}} \times 100 \end{aligned} \quad (3)$$

200°C에 노출되었을 때 NSC는 잔존율이 급격하게 감소하여 약 70%의 잔존율을 나타내었고, CSC는 약 90%의 잔존율을 나타내었다. 하지만 400°C와 800°C에 노출되었을 때는 NSC와 CSC가 비슷한 수준을 보였는데 400°C에서는 약 68%, 800°C에서는 약 20%의 잔존율을 나타내었다. 이는 압축강도 시험 결과와 비슷하게 200°C까지는 부순모래에 의해 할렬 인장강도가 개선되었다고 볼 수 있으나 400°C 이상에서는 큰 영향을 미치지 못하는 것으로 사료된다. 또한 이는 콘크리트의 할렬 인장강

Table 8 Average modulus of elasticity exposed to high temperature

Type	23°C (GPa)	200°C (GPa)	400°C (GPa)	800°C (GPa)
NSC	30.2	26.6	24.9	22.3
CSC	28.1	27.0	26.1	21.7

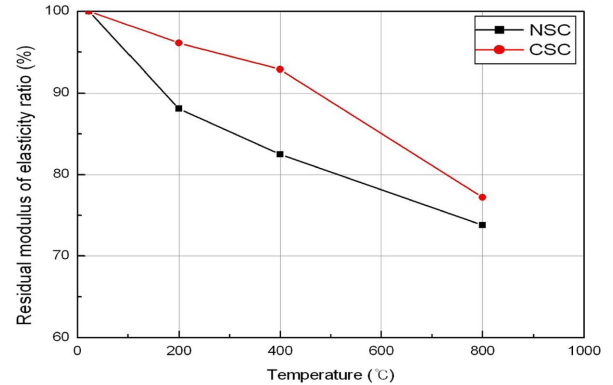


Fig. 11 Residual modulus of elasticity ratio

도값은 압축강도에 비해 매우 작은 값을 나타내기 때문에 시험값의 작은 차이에도 잔존율은 큰 차이를 나타내기 때문으로 사료된다.

상온에서 할렬 인장강도는 일반적으로 압축강도의 1/8~1/13정도로 알려져 있다.¹⁵⁾ 압축강도와 할렬 인장강도와의 관계를 나타내면 Fig. 10과 같다. 고온에 노출되었을 때에도 NSC와 CSC 모두 압축강도의 약 1/10 정도의 강도를 나타내고 있다.

4.2.3 탄성계수의 변화

고온에 노출된 NSC와 CSC의 탄성계수를 나타내면 Table 8과 같다. 탄성계수는 설계기준에서 제시된 식을 이용하여 탄성계수 값을 구하였다. 탄성계수의 변화 또한 강도변화와 비슷하게 노출온도가 증가할수록 감소하는 경향을 나타내었다.

$$E_c = 8,500 \sqrt[3]{f_{cu}} \text{ (MPa)} \quad (4)$$

여기서, $f_{cu} = f_{ck} + 8 \text{ MPa}$ 이고 f_{ck} 는 콘크리트의 압축강도를 나타낸다.

고온에 노출된 NSC와 CSC의 탄성계수 값의 변화를 파악하기 위해 잔존 탄성계수를 산정식을 사용하였다.

$$\text{잔존탄성계수율(\%)} = \left(\frac{\text{가열 후 탄성계수}}{\text{상온에서의 탄성계수}} \right) \times 100 \quad (5)$$

잔존탄성계수율의 변화를 나타내면 Fig. 11과 같다. 잔존 탄성계수율의 변화양상은 압축강도와 비례적인 관계로 나타났으며, 200°C와 400°C에 노출되었을 경우 CSC가 더 높은 잔존율을 나타내었다. 800°C에 노출되었을 때는 NSC와 CSC 모두 약 75%정도의 잔존율을 나타내었다.

자연모래와 부순모래를 사용한 콘크리트의 고온 하에서 역학적 특성 파악을 목적으로 상온, 200°C, 400°C, 800°C의 수준으로 콘크리트를 가열한 후 중량손실률, 압축강도, 할렬 인장강도, 탄성계수 등을 평가한 결과를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 노출 온도가 증가 할수록 콘크리트 표면의 공극과 균열이 증가하였으며, NSC는 고온에 노출되었을 때 기존의 연구 결과에 부합하게 변색되었으나, CSC는 변색되지 않았다. 이는 잔골재의 구성성분 차이에 기인한다고 사료된다. 따라서 NSC를 사용한 건축물의 피해정도를 판단하는 경우 콘크리트 표면의 변색정도만을 가지고 판단하는 것은 무리가 있다고 사료된다.
- 2) 200°C, 400°C, 800°C에서 NSC와 CSC는 비슷한 중량손실률을 나타내었으며, 200°C에 노출되었을 때 손실률 변화가 가장 큰 것을 알 수 있었다. 이는 100°C와 200°C에서 다량의 수분이 증발하기 때문인 것으로 사료된다.
- 3) 200°C에 노출된 경우 NSC는 잔존 압축강도율은 급격히 감소하였으며, 400°C에 노출된 경우 약 50%의 잔존율을 나타내었다. 반면 CSC는 200°C와 400°C에서 비교적 작은 감소폭을 보여, 200°C와 400°C에 노출되었을 때 잔존율은 CSC가 더 큰 잔존율을 나타내었다. 이는 부순모래의 주 성분인 석영의 재결정작용으로 석영의 결정구조가 밀실하게 다져지기 때문으로 사료된다. 하지만 공히 800°C에 노출되었을 때는 약 30%의 잔존 압축강도율을 나타내었으며 이는 골재와 시멘트페이스트와의 상이한 열팽창계수로 인한 강도저하로 사료된다.
- 4) 할렬 인장강도 또한 압축강도와 비슷하게 NSC의 경우 200°C까지 급격하게 감소해 약 70%의 잔존율을 나타냈다. 반면 CSC의 경우는 200°C에서 약 90%의 잔존율을 나타내어 CSC가 200°C까지 고온에 강한 것으로 나타났다. 하지만 할렬 인장강도 값이 매우 작기 때문에 부순모래로 인한 직접적인 성능향상은 크지 않다고 볼 수 있다. 400°C와 800°C에서는 NSC와 CSC가 비슷한 수준을 나타내었다.
- 5) 가열조건에 따른 NSC와 CSC의 탄성계수의 변화는 잔존 압축강도율과 비슷하게 나타났다. 200°C와 400°C에서 CSC의 잔존 탄성계수율이 NSC보다 크게 나타났으나 800°C에서는 NSC와 CSC가 비슷한 잔존율을 보여주고 있다. 이는 고온에 노출되면서 수분의 증발에 따른 균열과 골재와 시멘트페이스트의 다른 거동에 의해 상온으로 냉각된 후에도 잔류응력이 시험체에 가해지기 때문으로 사료된다.

이 연구는 한국연구재단 2010년도 기초연구사업(기본 유형 I)에 의해 지원되었고 이에 감사드립니다.

참고문헌

1. 소강호, 박상준, “부순모래를 다량 사용한 고강도콘크리트의 유동성 및 역학적 특성에 관한 연구,” 대한건축학회논문집 구조계, 25권, 6호, 2009, pp. 83~90.
2. 류현기, 조명근 “부순모래 치환율별 목표슬럼프 값 고정 에 따른 화학혼화제의 특성에 관한 연구,” 한국건축시공학회 논문집, 8권, 4호, 2008, pp. 87~93.
3. 김기훈, Jin Hu-Lin, Jin Guang-Hua, 윤기원, 한천구, “국내 레미콘사의 부순모래 사용실태 조사,” 대한건축학회 학술발표논문집, 24권, 1호, 2004, pp. 347~350.
4. 조봉석, 김용로, 강석표, 권영진, 김무한, “화재피해를 입은 콘크리트의 물성변화에 관한 실험적 연구,” 한국화재·소방학회 추계학술논문발표회, 2012, pp. 10~14.
5. 한천구, 김경민, “섬유 종류 및 혼입률 변화에 따른 고성능 콘크리트의 물리적 성질 및 폭열방지,” 대한건축학회 지회연합논문집, 7권, 4호, 2005, pp. 73~80.
6. 권영진, 김용로, 장재봉, 김무한, “고온을 받은 콘크리트의 공학적 특성,” 한국화재·소방학회, 18권, 1호, 2004, pp. 31~36.
7. Xing, Z., Beaucour, A. L., Hebert, R., Noumowe, A., and Ledesert, B., “Influence of the Nature of Aggregates on the Behaviour of Concrete Subjected to Elevated Temperature,” *Cement and Concrete Research*, Vol. 41, No. 4, 2011, pp. 392~402.
8. Husem, M., “The Effects of High Temperature on Compressive and Flexural Strengths of Ordinary and High-Performance Concrete,” *Fire Safety Journal*, Vol. 41, No. 2, 2006, pp. 155~163.
9. Ariozi, O., “Effects of Elevated Temperatures on Properties of Concrete,” *Fire Safety Journal*, Vol. 42, No. 8, 2007, pp. 516~522.
10. Netinger, I., Kesegic, I., and Guljas, I., “The Effects of High Temperatures on the Mechanical Properties of Concrete Made with Different Types of Aggregates,” *Fire Safety Journal*, Vol. 46, No. 7, 2011, pp. 425~430.
11. 김홍열, 서치호, 신현준, “고온 영역에서 강도영역별 콘크리트의 역학적 특성에 관한 실험적 연구,” 대한건축학회논문집 구조계, 21권, 7호, 2001, pp. 55~66.
12. 김형두, “화재시 고강도 콘크리트의 폭열현상에 관한 고찰,” 한국화재소방학회 논문집, 20권, 2호, 2006, pp. 80~86.
13. 윤현도, 김규용, 한병찬, “고온을 받은 고강도 콘크리트의 강도특성,” 콘크리트학회 논문집, 14권, 5호, 2002, pp. 698~707.
14. 정웅, 최열, “고온을 받는 고유동 콘크리트의 물리적 특성 평가,” 대한건축학회논문집 구조계, 26권, 8호, 2010, pp. 63~70.
15. 한국콘크리트학회, 최신콘크리트공학, 기문당, 2011, 932 pp.
16. 국토해양부, 콘크리트표준시방서, 한국콘크리트학회, 2009, 360 pp.

요 약 이 연구의 목적은 자연모래를 사용한 콘크리트(NSC)와 부순모래를 사용한 콘크리트(CSC)의 고온 하에서의 물리, 역학적인 특성을 조사하는 것이다. 시험체를 23°C에서 800°C 범위에 노출시켜 육안검사와 중량손실을 측정하였으며, 압축강도 시험과 활렬 인장강도 시험을 수행하였다. 그 결과 중량손실률은 노출 온도가 증가할수록 감소하였으며, NSC와 CSC의 감소율은 비슷하였다. 압축강도, 활렬 인장강도와 탄성계수 또한 노출온도가 증가할수록 감소하였다. NSC의 잔존 압축강도는 200°C와 400°C에서 CSC보다 급격히 감소했으며, NSC의 잔존 활렬 인장강도 또한 200°C에서 CSC보다 급격하게 감소했다. 하지만 CSC와 NSC 공히 800°C에 노출되었을 때는 비슷한 잔존강도를 나타내었다.

핵심용어 : 자연모래, 부순모래, 고온, 중량손실, 잔존강도