

화재손상 된 콘크리트의 냉각방법에 따른 재료성능분석

Analysis of Material Performance According to the Cooling Method of Fire Damaged Concrete

강 현* · 권오상**

Kang, Hyun*, and Kweon, Oh Sang**

Abstract

In this study, material performance was analyzed depending on the cooling method of concrete damaged by fire. Various non-destructive and destructive tests were conducted for material performance analysis. Further, the influence of cooling methods was assessed according to each test. As a result of the evaluation, it was confirmed that the residual performance of the concrete was significantly different according to the cooling method (air cooling and water cooling), and the performance difference according to the cooling method was also observed depending on the exposure temperature. Through this study, it was possible to understand the impact of water used in firefighting on fire-damaged RC structures, and it is deemed necessary to further study various concrete mixing models.

Key words : Fire Damage, Concrete, Cooling, Non-destructive Test, Material Performance

요 지

이 연구에서는 화재피해를 입은 콘크리트의 냉각방법에 따라 달라지는 재료성능을 분석하고자 하였다. 재료성능분석을 위하여 다양한 비파괴 시험 및 파괴시험을 함께 수행하였으며, 각 평가 방법에 따른 냉각방법의 영향성을 평가하였다. 평가결과, 냉각방법(공랭 및 수냉)에 따라 콘크리트의 잔존성능이 크게 다르게 나타났으며, 노출온도와 냉각방법에 따른 성능차이 또한 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 이 연구를 통하여 화재진압 시 사용되는 소화수가 화재손상 된 RC구조물에 미치는 영향성을 파악할 수 있었으며, 추후 다양한 콘크리트 배합모델에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

핵심용어 : 화재피해, 콘크리트, 냉각, 비파괴시험, 재료성능

1. 서 론

강재에 비하여 상대적으로 낮은 열전도율과 온도변형률을 갖고 있어 일반적으로 내화구조로써 인식되고 있는 철근 콘크리트 구조는 ‘건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙’에 따라 법정내화구조로써 사용되고 있다. 그러나 다양한 선행연구자들의 실험 및 이론적 연구에 의하면 화재에 노출된 콘크리트는 화재노출 온도에 따라 강도 및 강성저하현상이 발생되어 부재의 취성적인 파괴현상을 야기할 수 있다(Purkiss, 2007; Dwaikat and Kodur, 2010; Kang et

al., 2016, 2017, 2020; Kang, 2018). 따라서 화재손상 된 콘크리트 구조부재는 반드시 체계적인 진단과정을 통하여 손상규모를 파악하고, 적절한 복구방안을 마련하여야 한다. 다만, 화재피해를 입은 건축물에서 화재를 진압하기 위하여 사용되는 다량의 소화수에 대한 영향을 충분히 파악을 하는 것이 중요하다. 콘크리트는 골재, 모래, 시멘트 등의 혼합재료가 물에 의한 수화(Hydration)작용을 통하여 성형되며 구조적인 성능을 갖게 된다. 이와 같은 콘크리트에 화재와 같이 고온이 작용하게 되면 특정온도 이상에서 콘크리트는 탈수작용이 발생되어 구조성능이 크게 저하될 수 있다. 이와

*정회원, 공학박사. 한국건설기술연구원 화재안전연구소 전임연구원(E-mail: kanghty@kict.re.kr)

Member, Ph.D., Research Specialist, Fire Research Institute, KICT

**교신저자, 정회원, 공학박사. 한국건설기술연구원 화재안전연구소 수석연구원(Tel: +82-31-369-0546, Fax: +82-31-369-0540, E-mail: oskweon@kict.re.kr)

Corresponding Author, Member, Ph.D., Senior Researcher, Fire Research Institute, KICT

같이 고온에 의하여 탈수된 콘크리트에 수분을 공급할 경우 재수화반응을 일으키게 되어 일부 강도회복이 발생된다(Li et al., 2020).

따라서 이 연구에서는 전기, 유류 등에 의한 화재사고와 같은 특수화재를 제외한 대다수의 화재현장에서 진압 시 사용되는 소화수에 의하여 달라지는 콘크리트 재료성능 특성을 파악하고자 하였다. 이를 위하여 일반적으로 실무에서 널리 사용되고 있는 비파괴 시험과 UTM을 활용한 파괴 실험을 통하여 재료성능 분석을 실시하였다.

2. 콘크리트 재료가열시험 및 재료성능 시험

2.1 콘크리트 재료가열시험

이 연구에서는 화재피해를 입은 콘크리트의 냉각방법에 따른 재료성능분석을 위하여 콘크리트 재료가열시험을 실시 한 후, 공냉 및 수냉 방식으로 각각 냉각된 시험체를 대상으로 비파괴 시험 및 파괴시험을 실시하였다. 시험체 제작 후 양생은 3개월 동안 실시하였으며, 콘크리트 재료가열시험은 Table 1과 같이 4가지의 설계압축강도를 갖는 콘크리트 공시체를 대상으로 6가지(상온, 200, 300, 500, 700, 800 °C)의 목표가열온도를 설정하여 실시하였다. 각 노출 온도별 콘크리트 시험체의 수량은 설계압축강도를 기준으로 3개씩 가열로에 배치하여 가열시험을 실시하였으며, 가열시험 중 폭렬현상은 관측되지 않았다. 다만, Fig. 1과 같이 수증냉각을 하는 과정에서 고온(800 °C)에 노출되었던 일부 시험체가 파괴되는 현상을 나타내었다. 이는 고온에 노출되었던 콘크리트를 수증냉각 시키는 과정에서 콘크리트 내부와 외부의 온도차이가 급격하게 발생되고 부재 내·외부의 변형 차이가 나타나는 과정에서 발생된 현상이다. 그 결과, 냉각방법별 총 72개의 실험체를 제작하여 실험을 수행하였으나, 수냉시험체의 경우 냉각 과정에서 발생된 부재손상으로 인하여 63개의 시험체만 재료성능시험을 실시할 수 있었다. 재료 가열시험 시 가열속도는 5 °C/min으로 설정하였으며, 가열로의 내부 평균온도가 목표가열온도에 도달 한 후 2시간 동안의 가열 지속시간을 두고 종료하였다. 공냉시험체는 Fig. 2의 가열이력곡선과 같이 가열종료 후 가열로내부에서 일정시간 동안 냉각이 진행되도록 하였다. 다만, Figs. 2(a) 및 2(b)의 시험체는 온도측정 장비의 오작동으로 인하여 온도측정이 조기에 종료되어 냉각 시간동안의 온도이력 일부가 누락되었다. 수냉시험체는 Fig. 3의 가열이력곡선에서 확인할 수 있듯이 목표온도 500 °C 이하의 시험체의 경우 가열종료 후 수조에서 냉각을 실시하였으나, 목표 온도 700 °C 이상의 시험체의 경우 가열로의 급격한 냉각에 의한 손상을 방지하기 위하여 가열로 내부 온도가 약 500 °C에 도달한 후에 가열로를 개방하고 시험체를 수조에 옮겨 냉각을 실시하였다. Figs. 2 및 3에서 확인할 수 있듯이 대부분의 시험에서 목표온도 보다 실제 가열로의 온도가

높게 측정된 것을 확인 할 수 있다. 이는 해당 가열로의 특성에 따라 컨트롤러 온도측정 위치와 시험 시 추가적으로 설치한 가열로 내부 열전대의 측정위치가 상이하여 발생된 것으로 파악된다.

Table 1. Mixture Proportions of Concrete

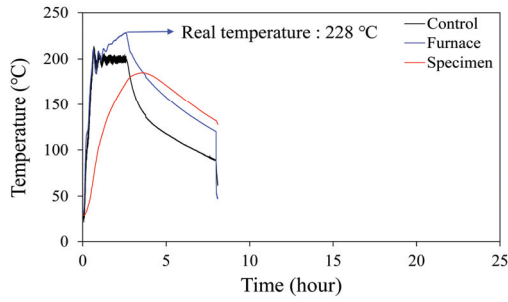
Design Strength (MPa)	Water (kg/m ³)	Cement (kg/m ³)	Sand (kg/m ³)	Coarse (kg/m ³)
24	170	335	870	956
30	169	392	825	952
50	171	580	695	920
55	146	632	681	922



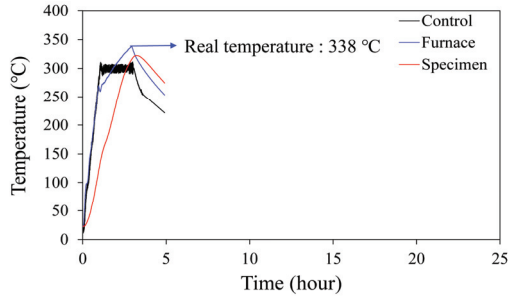
Fig. 1. Specimens Failure Under Water Cooling

2.2 콘크리트 재료성능 시험

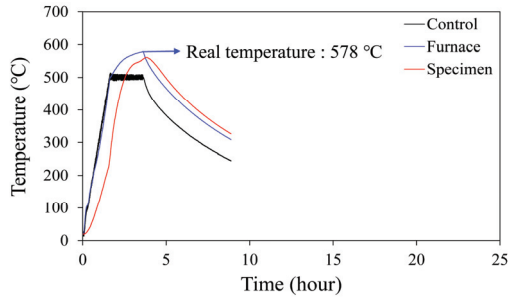
콘크리트 재료가열시험을 실시 한 후, 각각 공냉방식과 수냉방식의 냉각방법에 따라 상온상태 까지 냉각된 화재손상 콘크리트의 재료성능 시험을 실시하였다. 재료성능 시험은 비파괴 시험방법인 초음파속도 측정법과 타격형 콘크리트 압축강도 측정방법 및 파괴시험장비인 UTM을 활용하여 실시하였다. 상온시험체의 압축강도는 설계압축강도가 낮은 순서대로 41, 44, 51 및 59 MPa로 측정되어 설계강도보다 높게 측정되었다. Fig 4는 각 시험방법에 따라 화재손상된 콘크리트의 재료성능시험 장면을 나타낸 것으로써, 모든 재료성능 시험은 콘크리트 가열 및 냉각시험이 종료된 후 5일 이내에 진행되었다. 일반적으로 콘크리트는 상온상태에서도 수화반응이 일어나며, 양생기간 이후에도 수분조건에 따라 지속적인 수화반응을 일으키게 된다. 따라서 이 연구에서는 이와 같은 재 수화반응을 최소화하기 위하여 가열 및 냉각 시험 이후 가능한 빠른 시간 내에 재료성능 시험을 실시하고자 하였다.



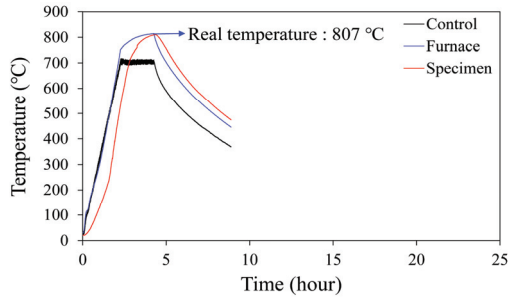
(a) Target temperature: 200 °C



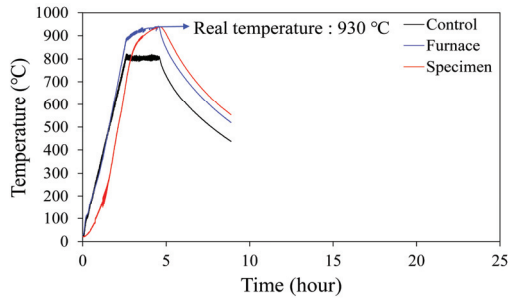
(b) Target temperature: 300 °C



(c) Target temperature: 500 °C

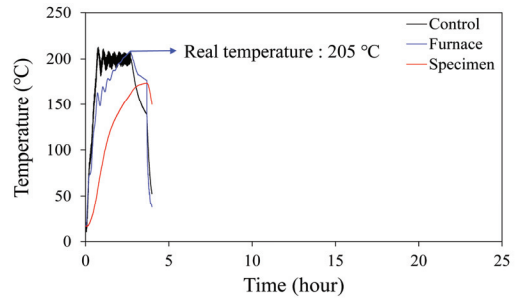


(d) Target temperature: 700 °C

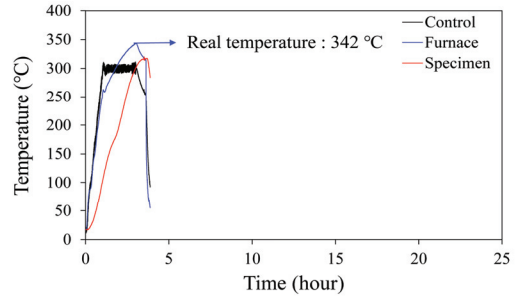


(e) Target temperature: 800 °C

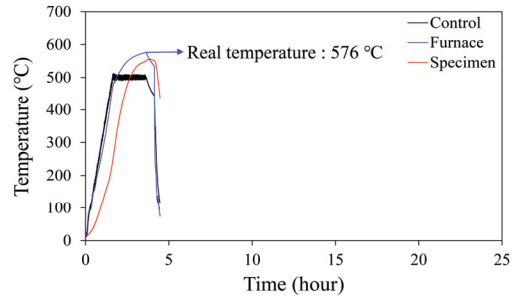
Fig. 2. Air Cooling Specimens Temperature Historic Curves



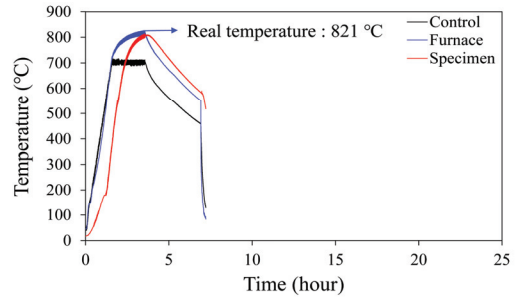
(a) Target temperature: 200 °C



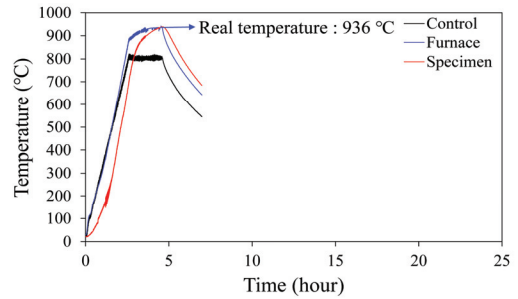
(b) Target temperature: 300 °C



(c) Target temperature: 500 °C



(d) Target temperature: 700 °C



(e) Target temperature: 800 °C

Fig. 3. Water Cooling Specimens Temperature Historic Curves

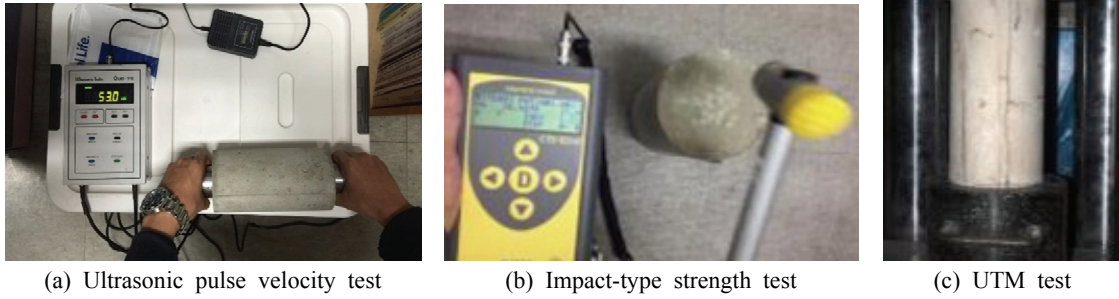


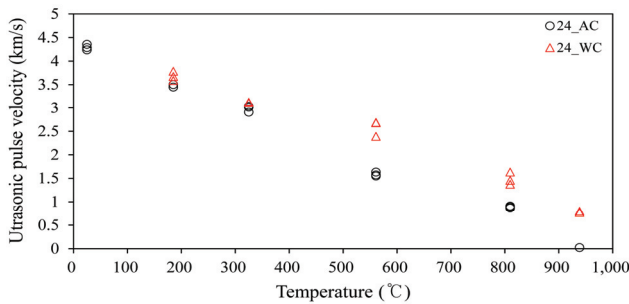
Fig. 4. Material Performance Test of Fire Damaged Concretes

3. 화재손상 된 콘크리트의 재료성능 분석

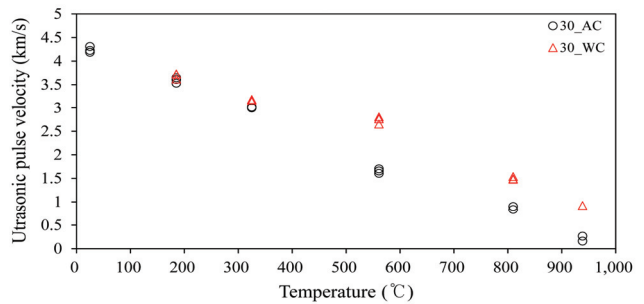
Fig. 5는 냉각된 콘크리트 시험체를 대상으로 초음파속도를 측정하여 데이터를 나타낸 것으로, 화재 노출온도가 높을수록 초음파전달 속도가 감소하는 경향을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 초음파 속도측정은 기존에도 많은 연구자에 의하여 콘크리트의 잔존성능 평가에 활용된 시험방법으로 콘크리트의 열화정도가 클수록 콘크리트 시험체의 양 끝단에서 전달되는 초음파속도가 저하되는 특징을 나타낸다. 이와 같은 현상은 화재손상을 받지 않는 콘크리트의 밀실한 내부 구조가 고온에 노출되어 콘크리트 내부의 자유수 증발 및

수화(Hydration)작용에 사용된 결합수의 탈수(Dehydration) 반응에 의하여 발생된다. 콘크리트의 탈수반응은 시멘트페 이스트의 구성물질인 C-S-H (Calcium Silicate Hydrate) 및 설포알루미늄하이드레이트 등이 분해되어 콘크리트 수화작용에 사용된 결합수가 분리되는 현상으로, 이 과정에서 콘크리트 내부에는 미세공극 및 균열이 발생 된다(Mehta and Monteiro, 2006; Kang, 2018; Kang et al., 2019). 그 결과로써 콘크리트의 압축강도 및 초음파전달속도가 저하된다.

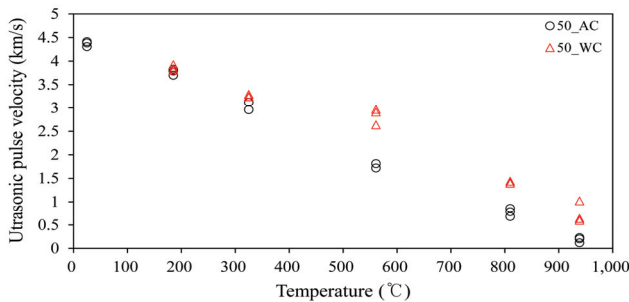
화재손상 된 콘크리트의 잔존압축강도는 비파괴 시험방법인 타격형 콘크리트 압축강도 측정과 대표적인 파괴시험 방법인 UTM장비를 활용하여 측정하였다. UTM장비를 활용한 시험체의 압축강도 시험은 냉각 시 파괴된 시험체를



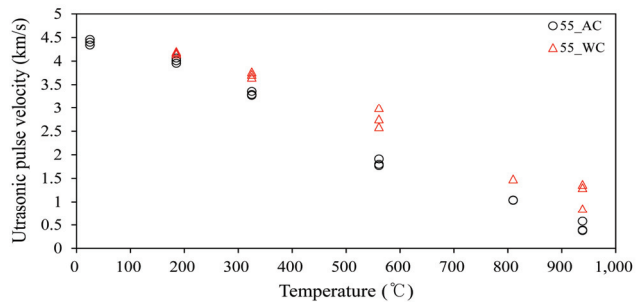
(a) Design compressive strength: 24 MPa



(b) Design compressive strength: 30 MPa



(c) Design compressive strength: 50 MPa



(d) Design compressive strength: 55 MPa

Fig. 5. Ultrasonic Pulse Velocity Test Results of Fire Damaged Concretes

- AC : Air Cooling specimen
- WC : Water Cooling specimen

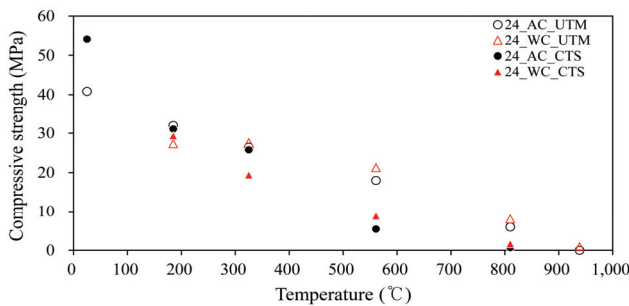
제외한 모든 시험체를 대상으로 실시할 수 있었다. 다만, 타격형 콘크리트 압축강도 측정장비는 Fig. 4(b)와 같이 해머형태의 측정기를 콘크리트 표면에 타격하여 압축강도를 측정할 수 있는 장비이므로, 목표온도 800 °C에 노출되었던 Fig. 6의 시험체와 같이 표면의 열화가 심각하게 발생된 모든 시험체는 측정이 불가능하였다.

Fig. 7은 타격형 콘크리트 압축강도 측정결과와 UTM을 활용한 파괴시험결과를 비교하여 나타낸 것으로서, 전반적으로 타격형 압축강도 측정결과가 UTM장비를 활용한 파괴시험결과보다 상대적으로 낮게 측정된 것을 확인할 수 있다. 이는 고온에 노출된 콘크리트는 내부 보다는 상대적으로 외부표면이 고온에 의한 손상이 상대적으로 크게 발생되기 때문에 나타나는 현상이다. 즉, 시험체 표면의 반발저항력을 이용하여 강도를 측정하는 타격형 시험장비는 시험체의 외부 표면강도에 따라 화재손상 된 콘크리트의 잔존압축강도 평가결과를 도출하게 된다. 동일한 이유로 Fig. 6과 같이 표면열화가 많이 발생된 일부 시험체에서는 타격형 시험장비로 잔존강도 측정이 불가능하였다.

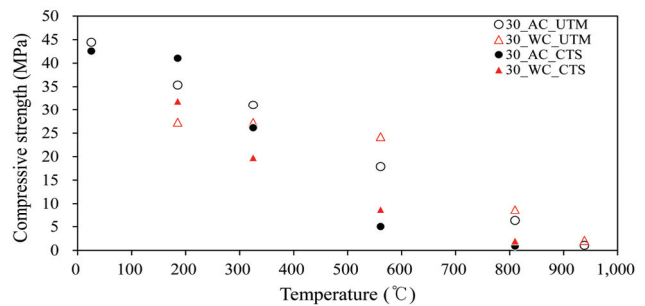
Fig. 7에서 확인할 수 있듯이 500 °C 이하의 온도에 노출된 공냉시험체의 잔존강도가 수냉시험체의 잔존강도보다 높거나 유사하게 측정된 것을 확인할 수 있다. 반면에, 500 °C가 넘는 목표온도에 노출된 시험체는 수냉시험체의 잔존강도가 높게 측정된 것을 확인할 수 있다. 콘크리트는 고온에 노출될 경우 시험체 표면에 위치한 자유수의 증발을 시작으로 노출온



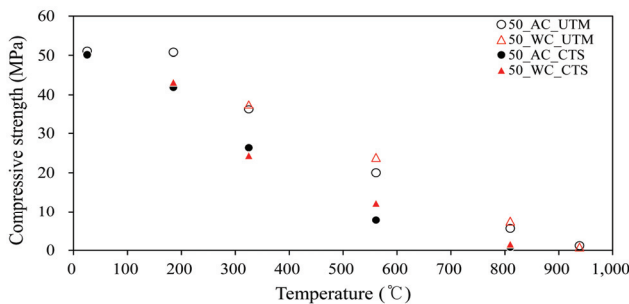
Fig. 6. Fire Damaged Specimens (Target temperature: 800 °C)



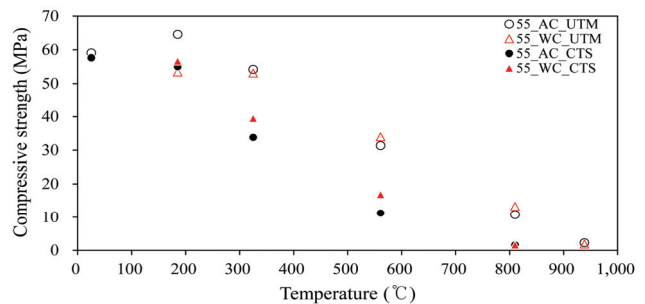
(a) Design compressive strength: 24 MPa



(b) Design compressive strength: 30 MPa



(c) Design compressive strength: 50 MPa



(d) Design compressive strength: 55 MPa

Fig. 7. Residual Strength of Fire Damaged Concretes

- UTM: Destructive test results
- CTS: Non-Destructive test results

도가 약 500 °C에 도달하는 순간부터 C-S-H와 같은 시멘트 페이스트 구성물질의 분해과정을 통하여 탈수(Dehydrate)반응이 나타나게 된다. 이후 노출온도가 지속적으로 높아져 900 °C 이상에 도달하게 되면, C-S-H가 완전 분해되어(Mehta and Monteiro, 2006) 작은 충격에도 콘크리트가 쉽게 파괴될 수 있다. 이와 같은 고온에 노출된 콘크리트의 특성에 따라 500 °C 이상에 노출된 콘크리트 시험체는 자유수 증발 및 수화반응에 사용된 결합수의 탈수(Dehydrate)현상에 의하여 재료성능이 크게 저하된 상태이며, 수생방식으로 냉각된 시험체는 냉각 시간 동안 공급된 수분이 시험체의 재수화(Re-hydrate)반응을 일으키는 과정에서 강도회복이 발생되었다고 판단된다. 이와 같은 현상에 대한 결과는 앞서 소개한 Fig. 5의 초음파속도 측정결과에서도 확인할 수 있다.

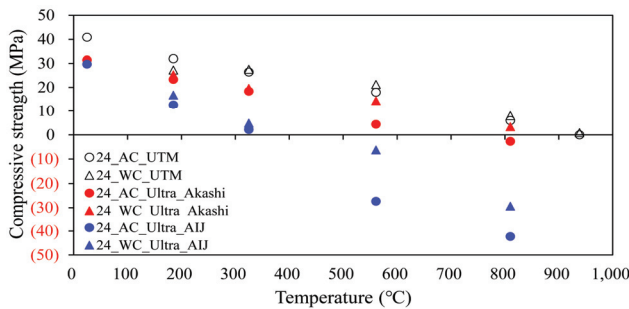
일반적으로 화재피해를 입은 콘크리트를 대상으로 널리 사용되고 있는 진단항목은 초음파속도측정, 비파괴 잔존압축강도 측정, 변색상태 확인, 균열, 폭렬 규모 등이 있다. 각 항목들은 화재손상 된 콘크리트의 잔존성능을 평가하기 위하여 수행되고 있으며, 특히 기존에 널리 사용되고 있는 초음파속도 측정방법의 경우 다양한 연구자들에 의하여 제안된 잔존압축강도 평가 식을 활용하여 성능평가를 수행하기도 한다. 이 연구에서는 앞서 모든 시험체를 대상으로 측정된 화재손상 된 콘크리트의 초음파전달속도 측정결과를 활용하여 Table 2와 같이 기존에 제시되고 있는 다양한

압축강도 산정식을 활용하여 시험체의 잔존압축강도를 산정하였다. Fig. 8은 Fig. 5의 초음파속도 측정결과를 활용하

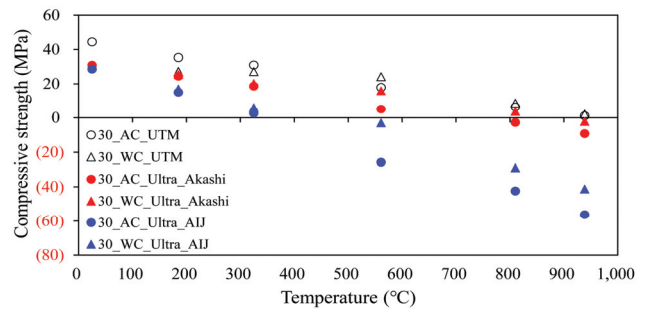
Table 2. Compressive Strength Estimation Models Using Ultrasonic Pulse Velocity

No.	Proposer	Equation of strength (MPa)
1	AIJ (1983)	$21.5V_p-62$
2	Atici (2011)	$0.0316e^{1.3V_p}$
3	Del Rio et al. (2004)	$\exp[(-5.4+0.8)+(1.85+0.18)V_p]$
4	Han and Kim (1999)	$60.977V_p-234.2$
5	Lim (2007)	$18.7V_p-61.3551$
6	Khan (2012)	$(0.5208V_p)^5$
7	Kim et al. (2002)	$50.163V_p-178.2$
8	Kim et al. (2016)	$56.974V_p-206$
9	Yoon et al. (1999)	$32.565V_p-113.5$
10	Lee et al. (2015)	$0.06e^{0.0015V_p}$
11	Akashi (1988)	$10.2V_p-11.7$
12	Mohammed et al. (2011)	$0.7586e^{0.8V_p}$
13	Qasrawi (2000)	$36.72V_p-129.077$
14	Trtnik et al. (2009)	$0.0854e^{1.2882V_p}$
15	Won et al. (2000)	$537.96V_p-2000$

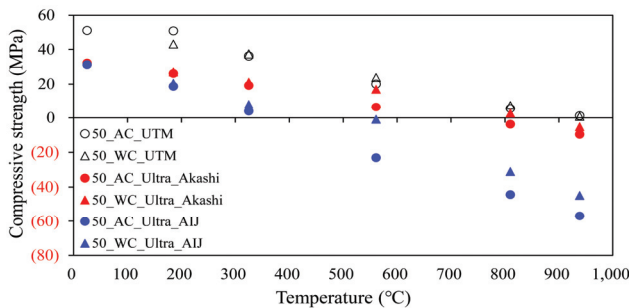
V_p : Ultrasonic pulse velocity (km/s)



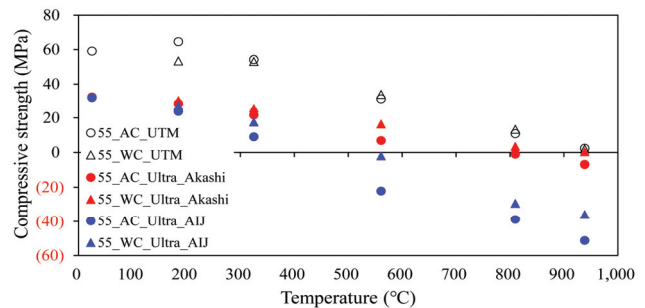
(a) Design compressive strength: 24 MPa



(b) Design compressive strength: 30 MPa



(c) Design compressive strength: 50 MPa



(d) Design compressive strength: 55 MPa

Fig. 8. Residual Strength of Fire Damaged Concretes Using Ultrasonic Pulse Velocity

- UTM: Destructive test results
- Ultra: Estimated results of strength using the Ultrasonic pulse velocities

- Akashi: Results by Akashi, T. (1988) equation
- AIJ: Results by AIJ (1983) equation

여 잔존압축강도를 평가한 결과를 나타낸 것이다. 초음파속도를 활용한 압축강도 추정 식은 Table 2의 기존 연구자들에 의하여 제안된 다양한 제안식 중에서 파괴시험결과와 가장 유사한 값을 도출하는 Akashi (1988) 제안식을 활용하였다. 또한, 대표적인 일본의 건축학회(AIJ, 1983)에서 제안한 압축강도 추정식과 함께 비교하여 나타내었다. Fig. 8에서 확인할 수 있듯이 두 가지 제안식에 따른 초음파속도 측정결과로 도출된 화재손상 된 콘크리트 시험체의 잔존압축강도 평가 결과는 전체적으로 UTM 시험결과와 차이를 보이고 있는 것을 확인할 수 있다. Akashi (1988) 제안식보다 AIJ (1983) 제안식에 따른 콘크리트 압축강도 추정결과가 UTM 시험결과와 비교하였을 때 더욱 큰 차이를 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 두 제안식 모두 상대적으로 높은 온도에 노출되었던 시험체에 대하여 잔존강도가 음수로 산정되는 경향도 나타나고 있기 때문에 화재손상 된 콘크리트를 대상으로 초음파속도 측정 결과를 활용한 잔존강도 평가가 합리적이지 못한 결과를 도출할 수 있다고 판단된다. 이는 Table 2의 압축강도 산정식이 각 연구자들에 의하여 수행된 시험결과에 근거한 시험식으로써 제안되었기 때문에 콘크리트를 구성하는 배합재료의 차이와 화재손상 된 콘크리트의 구성조직의 변화로 인하여 발생하는 것으로 판단된다. 따라서 화재손상 된 콘크리트를 대상으로 초음파속도 측정결과를 진단 항목을 선정할 시에는 Table 2와 같이 압축강도 산정식을 통한잔존강도 평가가 아닌 Fig. 5와 같이 초음파속도를 통한 열화정도를 파악하고 대략적인 수열온도를 유추하는 범위에서 사용하는 것이 바람직하다고 판단된다.

4. 결론

이 연구에서는 건축물의 화재 진압 시 사용되는 소화수에 의한 콘크리트 재료의 성능평가 및 분석을 실시하기 위하여 다양한 재료시험방법을 활용하였으며, 다음과 같은 결론을 도출 할 수 있었다.

- (1) 화재손상 된 콘크리트를 대상으로 냉각방법을 달리하여 잔존강도 평가를 실시한 결과, 500 °C 이상의 고온에 노출된 수냉시험체의 잔존강도가 공냉시험체의 잔존강도보다 높게 평가되었다. 이는 500 °C 이상의 고온에 노출된 콘크리트 재료의 탈수반응이 나타난 시험체가 냉각과정에서 수분의 영향으로 재수화되는 과정으로 인한 결과로 판단되었다. 다만, 해당 결론은 시험체의 양생기간, 배합, 양생 환경에 따라 달라질 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.
- (2) 화재손상 된 콘크리트를 대상으로 초음파속도 측정으로 한 결과, 상대적으로 높은 온도에 노출된 시험체의

초음파전달 속도가 감소하는 경향이 나타났다. 또한, 잔존강도 평가결과와 동일하게 수냉시험체의 초음파속도가 공냉시험체 보다 높게 측정된 것을 확인할 수 있었다. 이는 수분에 의하여 화재손상 후에도 지속적인 수화반응이 발생하는 콘크리트의 특성에 기인한 것으로써, 냉각 방법에 따라 콘크리트의 재료성능이 달라질 수 있음을 실험적으로 확인할 수 있었다.

- (3) 초음파속도 측정결과를 통하여 콘크리트의 압축강도를 산정한 결과, 실제 잔존강도와는 큰 차이를 나타내었다. 이와 같은 결과를 통하여 화재손상 된 콘크리트를 대상으로 측정된 초음파속도는 진단 항목으로써 열화정도의 판단 및 대략적인 수열온도 유추 목적으로 활용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.
- (4) 건축물의 화재 시 사용되는 소화수의 영향성을 냉각방법 변수를 통하여 간접적으로 확인할 수 있었으며, 이를 통하여 화재피해 건축물의 진단과정에서 보다 합리적인 평가방법을 도출하는 데에 활용할 수 있을 것이다.
- (5) 다만, 이 연구에서 수행된 모든 실험 및 분석결과들은 한정적인 콘크리트 배합만을 활용하였으므로, 추후 다양한 콘크리트 배합 모델이 고려된 연구가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 국토교통부 도시건축연구사업의 연구비지원 (20AUDP-B100356-06)에 의해 수행되었습니다.

References

- Akashi, T. (1988). *Studies on nondestructive testings of concrete. Doboku Gakkai Ronbunshu*, Japan Society of Civil Engineers, No. 390, pp. 1-22.
- Architectural Institute of Japan (AIJ). (1983). *Manual of nondestructive test methods for the evaluation of concrete strength*.
- Atici, U. (2011). Prediction of the strength of mineral admixture concrete using multivariable regression analysis and an artificial neural network. *Expert Systems with Applications*, Vol. 38, No. 8, pp. 9609-9618.
- Del Río, L.M., Jiménez, A., López, F., Rosa, F.J., Rufo, M.M., and Paniagua, J.M. (2004). Characterization and hardening of concrete with ultrasonic testing. *Ultrasonics*, Vol. 42, No. 1-9, pp. 527-530.
- Dwaikat, M.B., and Kodur, V.K.R. (2010). Fire induced spalling in high strength concrete beams. *Fire*

- Technology*, Vol. 46, pp. 251-274.
- Han, M.Y., and Kim, D.W. (1999). A study on the pull-out test for non-destructive evaluation of concrete strength. *Proceedings of 1999 Fall Conference*, Korea Concrete Institute, Vol. 11, No. 2, pp. 639-642.
- Kang, H. (2018). *Assessment for fire damaged reinforced concrete structures based on fuzzy theory*. Ph.D. dissertation, University of Seoul, Seoul, Korea.
- Kang, H., Cheon, N.R., Lee, D.H., Lee, J., Kim, K.S., and Kim, H.Y. (2017). P-M interaction curve for reinforced concrete column exposed to elevated temperature. *Computers and Concrete*, Vol. 19, No. 5, pp. 537-544.
- Kang, H., Cho, H.C., Choi, S.H., Heo, I., Kim, H.Y., and Kim, K.S. (2019). *Estimation of heating temperature for fire-damaged concrete structures using adaptive neuro-fuzzy inference system*. *Materials*, Vol. 12, No. 23, 3964. doi:10.3390/ma12233964
- Kang, H., Lee, D.H., Hwang, J.H., Oh, J.Y., Kim, H.Y., and Kim, K.S. (2016). Structural performance of prestressed composite members with corrugated webs exposed to fire. *Fire Technology*, Vol. 52, No. 6, pp. 1957-1981.
- Kang, H., Lee, J., Kim, M., Heo, I.W., Oh, J.Y., and Kim, K.S. (2020). Fire behaviour of non-welded CFT columns with strip connectors. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Structures and Buildings*, Vol. 173, No. 1, pp. 17-30.
- Khan, M.I. (2012). Evaluation of non-destructive testing of high strength concrete incorporating supplementary cementitious composites. *Resources, Conservation and Recycling*, Vol. 61, pp. 125-129.
- Kim, M.H., Choi, S.J., Kang, S.P., Kim, J.H., and Jang, J.H. (2002). A study on the application of non-destructive testing equation for the estimation of compressive strength of high strength concrete. *Journal of the Korea Institute of Building Construction*, Vol. 2, No. 3, pp. 123-130.
- Kim, M.W., Oh, H., and Oh, K.C. (2016). Estimating the compressive strength of high strength concrete using surface rebound value and ultrasonic velocity. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 20, No. 2, pp. 1-9.
- Lee, H.K., Lee, B.J., Oh, K.C., and Kim, Y.Y. (2015). Reliability evaluation for prediction on concrete compressive strength through impact resonance method and ultra pulse velocity method. *Journal of the Korea Institute for Structural Maintenance and Inspection*, Vol. 19, No. 4, pp. 18-24.
- Li, L., Shi, L., Wang, Q., Liu, Y., Dong, J., Zhang, H., and Zhang, G. (2020). A review on the recovery of fire-damaged concrete with post-fire-curing. *Construction and Building Materials*, Vol. 237, 117564. doi:10.1016/j.conbuildmat.2019.117564
- Lim, S.Y. (2007). *A study on the estimation of compressive strength of concrete by non-destructive test*. Master thesis, Daegu University.
- Mehta, N.K., and Monteiro, P.J.M. (2006). *Concrete: Microstructure, properties and materials* (3rd ed.). New York, NY: McGraw-Hill.
- Mohammed, B.S., Azmi, N.J., and Abdullahi, M. (2011). Evaluation of rubbercrete based on ultrasonic pulse velocity and rebound hammer tests. *Construction and Building Materials*, Vol. 25, No. 3, pp. 1388-1397.
- Purkiss, J.A. (2007). *Fire safety engineering: Design of structures* (2nd ed.). Elsevier.
- Qasrawi, H.Y. (2000). Concrete strength by combined non-destructive methods simply and reliably predicted. *Cement and Concrete Research*, Vol. 30, No. 5, pp. 739-746.
- Trtnik, G., Kavčič, F., and Turk, G. (2009). Prediction of concrete strength using ultrasonic pulse velocity and artificial neural networks. *Ultrasonics*, Vol. 49, No. 1, pp. 53-60.
- Won, J.P., Park, S.K., and Ahn, T.S. (2000). A study on the concrete strength prediction by ultrasonic pulse velocity method. *Proceedings of 2000 Annual Conference*, Korea Society of Civil Engineers, Vol. 1, pp. 391-394.
- Yoon, Y.H., Lee, D.H., Jun, M.H., and Park, S.S. (1999). *Standardization for concrete compressive strength estimation equation by experiment for specimen and wall type structure*. Research Report, Korea Research Institute of Standards and Science (KRISS).

Received	April 2, 2020
Revised	April 3, 2020
Accepted	April 14, 2020