온도 상승에 따른 콘크리트의 물리적 특성에 관한 실험적 연구

An Experimental Study on the Mechanical Properties of Concrete at Elevated Temperatures

김대회* · 이승재** · 서희원*** · 최동호****

Kim, Daehoi*, Lee, Seungjae**, Seo, Heewon***, and Choi, Dongho****

Abstract

For the structural analysis of reinforced concrete structures, the mechanical properties of concrete at different temperatures are required. These mechanical property values relative to specific concrete temperatures can be presented in design regulations and codes. In this study, the mechanical properties of concrete were experimented by using 35 MPa concrete produced in Korea from 20 °C to 900 °C. Comparing the results with previous domestic papers, we aimed to contribute to the construction of a database of the mechanical characteristics of domestically produced concrete at elevated temperatures, which can be used for structural analysis in case of fire emergencies.

Key words : Concrete, Mechanical Property at the Elevated Temperature, Fire

요 지

화재시 건축물의 구조적 거동을 평가하기 위해서는 건축물을 구성하고 있는 구조재료의 온도에 따른 물리적 특성(압축강도, 강도저감계수 등)이 필요하며, 다량의 실험결과를 바탕으로 해외 설계자료 또는 Code에서 제시하고 있다. 그러나, 국내에서 생산되고 있는 구조재 특히 콘크리트에 관한 실험결과는 제한적으로 본 연구에서는 국내에서 생산된 35 MPa급 콘크리트를 대상으로 하여 온도별 기본 물리적 특성 및 압축강도를 제시함으로써 기존 연구결과와 함께 국내 생산 콘크리트의 열적 특성 데이터베이스 구축에 기여하고자 하였다.

핵심용어 : 콘크리트, 온도별 물리적 특성, 화재

1. 서 론

화재시 건축물의 구조적 거동을 평가하기 위해서는 건축물을 구성하고 있는 구조재료의 온도에 따른 물리적 특성(열팽창율, 비열, 온도별 열전도율, 강도 및 강도저감계수)이 필요하며, 해외에서는 다년간의 실험결과를 바탕으로 설계자료 또는 Code에서 제시하고 있다. 그러나, 국내에서 생산되고 있는 구조재 특히 콘크리트에 관한 실험결과는 화재

시 구조설계 또는 해석에 사용할 수 있도록 대상 콘크리트에 대한 기본적인 열물성 실험보다는 섬유혼입, 혼화제사용, 사용재료의 변화와 같은 성능구명을 위한 제한적인 부분에 대한 연구가 진행되어 왔다.

국내에서 콘크리트의 기본배합에 대한 종합적인 열물성 실험은 2002년 김홍열의 박사학위논문에서 진행되었으며(Kim, 2003), 일반강도콘크리트와 고강도콘크리트의 질량감소, 열팽창율, 열전도율, 비열 및 각 온도별 압축강도 등을

*교신저자, 정회원, 한국화재보험협회부설방재시험연구원 방내화팀 책임연구원(Tel: +82-31-887-6685, Fax: +82-31-887-6680, E-mail: dhkim@kfpa.or.kr)
Corresponding Author, Member, Senior Researcher, Fire Resistance Research Team, Fire Insurers Laboratories of Korea

**정회원, 한국화재보험협회부설방재시험연구원 방내화팀 선임연구원

Member, Senior Researcher, Fire Resistance Research Team, Fire Insurers Laboratories of Korea

***정회원, 한국화재보험협회부설방재시험연구원 방내화팀 책임연구원

Member, Senior Researcher, Fire Resistance Research Team, Fire Insurers Laboratories of Korea

****정회원, 한국화재보험협회부설방재시험연구원 화재환경시스템팀 수석연구원

Member, Principal Researcher, Fire Safety & Building Environment System Team, Fire Insurers Laboratories of Korea

종합적으로 제시하였다. 그러나, 그 이후 단편적인 연구만이 진행되어 국내 콘크리트에 대한 설계 및 해석시 사용할 자료가 부족한 것이 현실이다.

이에 연구에서는 국내에서 생산된 설계기준강도 35 MPa급 콘크리트를 대상으로 하여 상온에서 900 °C까지 100 °C 단위로 온도가 상승됨에 따른 기본 물리적 성질과 압축강도에 대하여 실험을 수행하여 종합적인 데이터를 제시하며, 기존 Kim (2003)의 연구에서 제시한 압축강도 29 MPa, 49 MPa 콘크리트의 실험결과와 비교함으로써 국내에서 생산되는 콘크리트의 열적 특성 데이터베이스 구축에 기여하고자 하였다.

2. 실험방법 및 실험체 제작

온도별 콘크리트의 물리적 특성을 확인하기 위하여 질량 감소율, 열전도율, 비열, 열팽창율과 같은 기본 물리적 성질과 콘크리트의 대표적인 역학특성인 압축강도로 나누어 실험 및 분석하였다.

실험방법은 다음과 같다.

2.1 기본 물리적 성질 실험방법

열전도율 및 비열은 Netzsch TCT426 장비를 이용하여 ISO 8894-2 (2007), ASTM C1113 (2013)에 따라 실험하였다 (Fig. 1).

열팽창율은 DIL402C 장비를 이용하여 ASTM E228 (2017), ISO 17562 (2016)에 따라 실험하였다(Fig. 2).

질량감소율은 공시체를 이용하여 실험 전·후의 질량을 측정하여 감소율을 산출하였다.

Fig. 1. Thermal Conductivity Tester

실험체의 크기는 열팽창율은 (5×5×50) mm, 열전도율 및 비열은 (100×200×70) mm를 사용하였다.

Fig. 2. Thermal Expansion Rate Tester

2.2 압축강도 실험방법

화재에 노출되는 동안 콘크리트는 내부온도의 상승에 따라 수분의 이동, 공극압의 증가, 골재와 모르타르 경계면의 분리 등 콘크리트 내부조직이 변화하게 되며, 이러한 변화는 변형을 발생시켜 콘크리트의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 실제 화재조건과 같이 열에 노출되는 동안 콘크리트의 열적 특성 변화를 파악하기 위해서는 콘크리트를 가열하면서 목표온도에 도달시 재료물성을 평가할 수 있는 가열장비가 요구된다. 그러나 기존의 콘크리트 가열로는 고정형 가열로로써 가열로의 이동 운반이 어렵기 때문에 콘크리트 열적 특성에 관한 실험이 열을 가한 후 상온까지 냉각시킨 콘크리트를 대상으로 한 잔존성능 평가에만 국한되고 있어 화재에 노출되는 동안의 콘크리트 열적 특성 분석에 적합하지 않았다.

따라서 본 연구에서는 가열 중 콘크리트의 온도 변화 및 열적 특성 변화를 파악하기 위하여 콘크리트 압축강도 실험장비(UTM)에 탈부착이 가능한 이동식 가열로를 제작하여 실험을 실시하였다.

실험은 콘크리트가 인장측에 사용되는 것을 가정한 사전 비재하실험과 압축측에 사용되는 것을 가정한 사전재하실험 및 화재 후 잔존성능을 평가하기 위한 사전비재하 잔존실험 3가지로 구분하여 실험을 실시하였다. 실험체의 크기는 직경 100 mm, 높이 200 mm의 공시체를 사용하였다.

2.2.1 사전비재하 실험방법

사전비재하 실험(Fig. 3)은 콘크리트 공시체에 하중을 가하지 않고 가열하여 목표온도에 도달시 역학실험을 실시하는 방법으로 가열조건은 분당 5 °C의 온도로 상승시켜 목표온도에 도달한 후 목표온도로 계속 가열하여 실험체 전체가 목표온도로 열평형이 되도록 하였다.

Fig. 3. Condition of Pre-unloading Test

실험체가 목표온도로 열팽형이 되면 하중을 가하여 압축강도를 측정하였다.

2.2.2 사전재하 실험방법

사전재하실험은 예상되는 콘크리트의 강도의 20~40%를 콘크리트 공시체에 사전재하 한 상태에서 공시체를 가열하여 목표온도에 도달시 역학실험을 실시하는 실험이다. 실험방법은 Fig. 4와 같이 공시체를 UTM에서 설계기준강도의 30%를 재하 및 유지한 상태에서 가열을 시작하여 분당 5 °C의 온도로 상승시켜 목표온도에 도달한 후 목표온도로 계속 가열하여 실험체가 목표온도로 열팽형이 된 후 압축강도를 측정하였다.

본 실험에서는 설계기준강도의 30%인 10.5 MPa를 사전재하 하여 실험을 하였다.

Fig. 4. Condition of Pre-loading Test

2.2.3 사전비재하 잔존 실험방법

사전비재하 잔존 실험은 화재가 발생 및 진화 된 후 건축물이 상온으로 냉각되었을 경우 남아있는 강도를 측정하기 위한 방법이다. 실험조건은 가열로내에서 분당 5 °C를 상승시켜 목표온도에 도달 및 열팽형을 이룬 후 가열로를 끄고 가열로내에서 상온까지 서서히 냉각시킨 후 압축강도를 측정하였다.

2.3 실험체 제작

열팽창율, 열전도율 및 비열은 2.1절에서 제시한 실험체의 규격을 따랐으며, 각 온도별 압축강도 측정을 위하여 직경 100 mm, 높이 200 mm의 공시체를 사용하였다.

온도측정용 실험체는 Fig. 5와 같이 콘크리트 내부 및 표면에서 온도측정을 하여 실험체가 목표온도에서 평형상태가 되었는지 확인 할 수 있도록 제작하였다.

콘크리트는 국내산 골재와 보통 포틀랜드 시멘트를 이용하여 설계기준강도 35 MPa의 배합설계에 따라 제작하였다.

Fig. 5. Location of Measured Temperature for Specimens

3. 실험결과

3.1 기본 물리적 특성 실험결과

화재시 콘크리트의 기본 물리적 특성 실험결과는 Table 1에 나타냈으며, 각 특성별 내용은 다음과 같다.

3.1.1 질량감소율

내부에 수분을 포함한 공극을 지니고 있는 콘크리트는 열을 받게 되면 공극내의 수분이 팽창하여 콘크리트 내부응력을 급격하게 상승시키거나 증발되며, 증발되지 않은 수분은 내부 공극으로부터 이탈되는 등 역학적 관점에서 치수불안정을 발생시키게 된다. 따라서 가열된 콘크리트 내부의 수분 이동과 흐름에 따른 질량감소율은 고온에서 콘크리트 열적 특성 변화에 영향을 미치는 중요한 인자이다.

Table 1. Results Basic Physical Properties

Temp. (°C)	Mass loss (%)	Expansion rate (mm/mm)×10 ⁻⁴	Thermal conductivity (W/m · K)	Specific heat (J/(g · K))
20	0	0	1.55	0.64
100	0.53	6.85	1.76	0.73
200	2.95	14.50	1.31	0.69
300	4.21	22.84	1.31	0.74
400	4.96	31.53	1.25	0.81
500	5.55	41.07	1.37	0.88
600	6.04	59.50	1.16	0.97
700	6.28	66.06	1.10	1.08
800	7.22	70.32	1.09	1.15
900	7.58	75.77	0.95	1.49
1000	-	84.56	0.74	3.04

본 실험에서는 공시체 제작 후 28일간 수증양생 후 실험직 전까지 20℃, 60%R.H.의 항온항습실에서 기건양생을 실시하여 기존의 실험전 수증양생을 실시한 경우에 비하여 함수율이 작은 상태에서 실험을 실시하여 질량감소율의 절대값은 작게 나타났으나, Fig. 6과 같이 온도의 상승에 따라 질량감소율이 증가되는 현상을 나타냈다.

Fig. 6에서와 같이 내부온도 100℃에서 질량감소율은 0.53%를 나타내고 있지만 200℃에서는 2.95%로 급격한 질량감소율을 보이고 있음. 이후 질량감소율은 완만히 증가하여 900℃ 도달시는 상온과 비교하여 7.58%의 질량감소율을 나타냈다.

Fig. 6. Mass Loss by Temperature

3.1.2 열팽창율

콘크리트가 가열되면 콘크리트의 내부에 존재하는 시멘트페이스트와 경계면 및 골재 자체의 공극압력 상승에 따라 콘크리트는 팽창하게 되며, 열적 성능저하가 발생하게 된다.

목표온도별 열팽창율은 Fig. 7과 같이 100~500℃까지 6.85×10^{-4} mm/mm에서 41.07×10^{-4} mm/mm로 100℃ 당 8×10^{-4} ~ 10×10^{-4} mm/mm의 범위에서 꾸준히 증가하고 있으며, 500~600

℃에서는 18.43×10^{-4} mm/mm의 높은 증가 폭을 나타내고 있다.

그러나, 600℃ 이후부터는 다시 열팽창율 증가가 둔화되어 100℃ 당 4×10^{-4} ~ 8×10^{-4} mm/mm의 증가를 보이고 있다.

Fig. 7. Thermal Expansion by Temperature

3.1.3 열전도율

온도상승에 따른 열전도율은 Fig. 8과 같이 전반적으로 감소하는 것으로 나타났다.

Fig. 8. Thermal Conductivity by Temperature

열전도율은 100 ℃에서 상온에 비하여 증가하는 것으로 나타났으나, 200 ℃에는 급격히 감소하는 것으로 나타났으며, 이후 500 ℃에서 상승 후 다시 감소하는 경향을 나타냈으며, 800 ℃ 부터는 급격한 감소현상을 보였다.

이 결과는 기존연구에서 열전도율은 온도증가에 따라 감소한다는 전체적인 경향과는 일치하는 것으로 나타났다.

3.1.4 비열

비열은 콘크리트의 가열시 열용량을 평가하는 인자로서 고온시 비열 측정결과는 Fig. 9와 같은 결과를 얻었다.

Fig. 9. Specific Heat by Temperature

비열은 100 ℃에서 상온에 비해 약간 증가하다가 200 ℃에서 감소한 후 300 ℃, 400 ℃에서 소폭 증가한 후, 꾸준히 증가하며 800 ℃부터는 급격히 증가하는 현상을 나타냈다.

이와 같은 양상은 콘크리트는 400 ℃ 이전에는 콘크리트 내부의 결정질의 물은 증기 등 기타 전이에 의해 손상되지 않기 때문에 비열은 일정하고, 400 ℃ 이후에서는 결정질 물은 화학적 성상의 변화와 물의 이동 및 수증기의 증발로 인해 비열은 증가하며, 온도상승에 따라 증가한다는 기존 연구 결과와 유사한 경향을 나타냈다.

3.2 압축강도 실험결과

3가지 실험조건에 따른 온도상승에 따른 콘크리트의 압축강도 실험결과는 Table 2와 같으며, 각 실험조건별로 결과는 다음과 같다.

3.2.1 사전비재하 실험

재하를 하지 않은 상태에서 목표온도까지 가열 후 압축강도 실험을 실시한 결과 내부온도와 압축강도의 관계는 Figs. 10, 11과 같다.

Fig. 10. Compressive Strength (Pre-unloading)

Fig. 11. Reduction Factor (Pre-unloading)

Table 2. Results of Compressive Strength Test

Temp. (°C)	Pre-unloading		Pre-loading		Remaining Pre-unloading	
	Compressive Strength (MPa)	Reduction Factor (fc/fc(20°C))	Compressive Strength (MPa)	Reduction Factor (fc/fc(20°C))	Compressive Strength (MPa)	Reduction Factor (fc/fc(20°C))
20	35.3	1	35.3	1	37.1	1
100	25.9	0.73	25.2	0.71	31.4	0.85
200	26.9	0.76	27.7	0.78	29.1	0.78
300	34.7	0.98	32.6	0.92	24.8	0.67
400	33.2	0.94	35.0	0.99	22.0	0.59
500	25.1	0.71	32.8	0.93	19.8	0.53
600	18.9	0.54	26.3	0.74	13.7	0.37
700	15.2	0.43	23.5	0.67	9.9	0.27
800	11.0	0.31	13.8	0.39	3.6	0.10
900	6.1	0.17	-	-	1.2	0.03
1000	-	-	-	-	-	-

사전비재하 실험결과 압축강도는 100 °C에서는 25.9 MPa로 상온압축강도의 73%수준으로 하락하였으며, 200 °C부터 점차 회복하는 경향을 나타내어 300 °C, 400 °C에서는 34.7 MPa와 33.2 MPa로 상온강도의 90%이상으로 회복되는 경향을 보였다.

그러나 500 °C에 25.1 MPa로 감소하기 시작하여 온도상승에 따라 직선적으로 압축강도가 감소하였으며, 700 °C에는 상온강도의 50%이하로 압축강도가 저하되었으며, 900 °C에서는 상온압축강도의 17% 수준인 6.1 MPa를 나타냈다.

이에 따라 기준강도의 30%를 재하하여 실험하는 사전재하 실험시 900 °C 이상에서의 실험이 불가능한 것으로 확인되었으며, 설계기준강도의 30%를 사전재하 한 본 실험에서 목표온도 800 °C에서도 3개의 실험체 중 2개는 가열 중 파괴되어 그 이상의 온도에서는 실험이 불가능 하였다.

일반적으로 복합재료인 콘크리트는 가열되면 콘크리트를 구성하는 골재가 팽창하고 동시에 시멘트 수화물은 100 °C 근방에서 수축하여 자기변형 응력이 발생하며, 이 자기변형응력에 의해 콘크리트 내부에 미세 균열이 증가해서 강도를 저하시킨다. 반면, 200~400 °C에서는 콘크리트 구성인자의 열팽창이 오히려 콘크리트 매트릭스의 공극을 채워주기 때문에 콘크리트의 강도에 유리하게 작용하는 것으로 기존 연구(Kim, 2003)에서 분석하고 있다.

400 °C 이후의 고온 영역에 있어서 콘크리트의 압축강도 감소에 영향을 미치는 시멘트 수화물의 화학적 결합수 상실, 수산화칼슘의 분해, 골재 및 시멘트페이스트의 팽창에 의한 내부공극 압력 상승 등에 의해 압축강도는 저하되는 것으로 보고되고 있다.

3.2.2 사전재하 실험

압축하중을 받고 있는 구조물을 가정하여 가열 전 실험체에 설계기준강도의 약 30%인 10.5 MPa에 해당하는 하중을 사전재하한 후 목표온도까지 가열하여 압축강도 실험을 실시한 결과 목표온도별 압축강도의 결과는 Figs. 12, 13과 같다.

Fig. 12. Compressive Strength (Pre-loading)

Fig. 13. Reduction Factor (Pre-loading)

500 °C 부터는 다시 압축강도가 저하되기 시작하여 이후 직선적으로 감소하는 유사한 경향을 나타내고 있으나, 사전재하에 의한 구속 및 압밀효과에 의해 고온에서의 압축강도가 사전비재하 실험에 비하여 약 10~20% 정도 더 발현되는 현상을 보였다.

따라서, 400 °C까지의 강도변화 추이는 유사하며, 500 °C 이상의 고온영역에서는 사전재하의 경우 상대적으로 높은 강도유지율을 확인하였다.

사전재하 실험결과 100 °C, 200 °C에서는 25.2 MPa, 27.7 MPa로 상온도강도의 70%대 중반의 압축강도를 나타내어 사전비재하 실험결과와 유사하게 나타났으며, 300 °C, 400 °C에서도 32.6 MPa, 35.0 MPa로 상온강도의 92%, 99%를 나타내어 사전비재하 실험보다 만회폭은 차이가 있으나 압축강도가 회복되는 유사한 경향을 나타냈다.

3.2.3 사전비재하 잔존실험

실험체를 목표온도까지 가열 후 상온으로 서서히 냉각시켜 압축강도 실험을 실시한 결과 온도별 압축강도 실험결과는 Figs. 14, 15와 같이 온도가 상승함에 따라 압축강도는 지속적으로 감소하는 것으로 확인되었다.

Fig. 14. Compressive Strength (Remaining pre-unloading)

사전비재하 잔존실험의 경우 가열시 열팽창 및 고온에 의한 강도저하가 발생되며, 냉각시에도 수축에 의한 2차

강도저하가 발생되어 고온시 압축강도를 측정하는 경우에 비하여 상대적으로 낮은 결과가 도출되었다.

Fig. 15. Reduction Factor (Remaining pre-unloading)

각 온도별 압축강도는 선적으로 저하되었으며, 500 °C 이후 급격히 저하되는 것이 확인되었다. 이는 수화물의 분해로 인해 발생하는 강도저하로 판단된다.

4. 기존 연구결과와의 비교

본 연구를 통하여 도출된 결과와 기존 연구(Kim, 2003)의 결과를 비교함으로써 데이터의 경향을 확인하고 상온기준의 설계기준강도에 따른 연관성을 확인하고자 하였다.

비교항목은 질량감소율과 3가지 평가방법에 따른 압축강도를 다음과 같이 비교하였다.

기존 연구와 비교항목에 대한 실험결과값은 Table 3과 같으며, 본 연구의 설계강도인 35 MPa 콘크리트와 기존 연구(Kim, 2003)의 일반강도콘크리트(29 MPa), 고강도콘크리트(49 MPa)의 결과값을 사용하여 비교하였다.

4.1 질량감소율 비교

질량감소율의 비교 결과 Fig. 16과 같이 온도상승에 따라 일정한 간격을 두고 유사한 비율로 증가하는 경향을 나타냈다.

Fig. 16. Comparison of Mass Loss

이와 같은 질량감소율의 절대값의 차이는 기존 연구의 경우 수증양생 후 실험을 실시한 반면, 본 연구에서는 항온항습실에서 기건양생 후 실험을 실시하여 기존 연구의 실험체 내의 함수량이 본 연구에 비하여 많기 때문에 발생한 현상이며, 그 외의 경향은 유사한 것으로 나타났다.

4.2 압축강도 비교

4.2.1 사전비재하 실험결과 비교

사전비재하 실험에서 본 연구와 기존 연구(Kim, 2003)의 결과를 비교한 결과 Fig. 17과 같이 기존 연구의 일반강도콘크리트(29 MPa)의 실험결과와 본 연구(35 MPa)의 결과가 고강도콘크리트(49 MPa)의 실험결과 사이에 위치함을 확인

Table 3. Comparison with Previous Research

Temp. (°C)	Mass loss(%)			Compressive Strength(MPa)								
				Pre-unloading			Pre-loading			Remaining Pre-unloading		
	35MPa	29MPa	49MPa	35MPa	29MPa	49MPa	35MPa	29MPa	49MPa	35MPa	29MPa	49MPa
20	0	0	0	35.3	31.6	48.9	35.3	31.6	48.9	37.1	31.6	48.9
100	0.53	0.89	0.87	25.9	27.6	30.2	25.2	27.3	35.7	31.4	30.6	36.3
200	2.95	4.67	5.01	26.9	28.2	40.1	27.7	30.2	40.6	29.1	32.0	46.3
300	4.21	5.41	5.99	34.7	29.3	38.7	32.6	33.0	49.0	24.8	27.8	36.8
400	4.96	6.57	6.94	33.2	26.8	36.3	35.0	30.5	40.9	22.0	20.3	23.7
500	5.55	-	-	25.1	-	-	32.8	-	-	19.8	-	-
600	6.04	7.79	8.33	18.9	14.2	14.3	26.3	16.3	15.2	13.7	11.3	17.1
700	6.28	-	-	15.2	-	-	23.5	-	-	9.9	-	-
800	7.22	8.89	9.62	11.0	6.0	4.0	13.8	-	-	3.6	6.2	6.7
900	7.58	-	-	6.1	-	-	-	-	-	1.2	-	-

할 수 있었으며, 600 °C 이후에는 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 이는 본 연구의 경우 가열을 5 °C/분의 속도로 가열한 반면, 기존 연구에서는 ISO 834-1(Fire-resistance tests – Elements of building construction – Part 1: General requirements)의 표준시간 온도가열곡선을 이용하여 초기에 급속한 가열로 인해 발생한 열충격의 영향으로 사료된다.

Fig. 17. Comparison of Compressive Strength (Pre-unloading)

4.2.2 사전재하 실험결과 비교

사전재하실험결과 Fig. 18과 같이 보 연구와 기존 연구 모두 100 °C에서 강도저하 후 강도를 서서히 회복한 후 400 °C 이후 다시 급격히 강도가 저하되는 현상을 나타내는 등 유사한 경향을 나타냈으나, 기존 연구가 상대적으로 강도 저하폭은 더 큰 것으로 나타났다.

Fig. 18. Comparison of Compressive Strength (Pre-loading)

이는 사전비재하 실험 결과와 같이 가열속도 차이에 따른 시험체 내부온도가 본 연구에 비하여 급격하게 상승됨에 따른 영향으로 판단된다.

4.2.3 사전비재하 잔존실험결과 비교

사전비재하 잔존실험결과 Fig. 19와 같이 기존연구의 경우 200 °C에서 강도회복 현상이 나타났으나 콘크리트의

강도가 지속적으로 하락하는 유사한 경향을 나타내고 있으며, 강도가 400 °C 이후 초기 콘크리트의 강도와 관계없이 수렴하고 있는 현상을 보였다.

Fig. 19. Comparison of Compressive Strength (Remaining pre-unloading)

본 연구와 같이 국내 재료를 이용한 기존 연구(Kim, 2003)의 결과를 비교해 본 결과 설계기준강도가 상대적으로 유사한 일반강도콘크리트(29 MPa)와 유사한 경향을 보였으며, 일반강도콘크리트(29 MPa)와 고강도콘크리트(49 MPa) 사이에 위치하여 가열조건 등 세부실험조건에서는 일부 차이가 있었으나 콘크리트 압축강도 증가에 따른 경향을 확인할 수 있었다.

5. 결 론

콘크리트의 온도상승에 따른 물리적 특성을 파악하기 위하여 실험을 실시한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- (1) 온도가 상승됨에 따라 콘크리트 내부의 잉여수, 모세관수, 흡착수, 충전수 및 화학적 결합수의 일부가 수증기로 방출됨에 따라 콘크리트의 질량은 감소하는 경향을 나타냈으며, 이로 인한 공극의 증가로 인해 열전도율도 온도가 상승함에 따라 작아지는 경향을 보였다. 열팽창율은 시멘트페이스트와 천이대 및 골재 자체의 팽창 등으로 인해 온도가 상승함에 따라 증가하는 것으로 나타났으며, 비열은 온도상승에 따라 완만한 증가를 보이다가 800 °C 이후 급격한 상승을 나타냈다.
- (2) 온도상승에 따른 압축강도는 사전비재하 실험결과 100 °C에서 강도저하 현상이 나타난 이후 400 °C까지 압축강도가 회복되었으며, 500 °C 이후에서는 압축강도가 급격히 저하되었다. 사전재하 실험결과와 사전비재하 실험결과와 경향은 유사하였으나, 사전재하에 따른 압밀현상 등으로 인해 측정된 압축강도는 상대적으로 높은 값을 나타냈다. 사전비재하 잔존실험결과와 가열시와 냉각시 모두 콘크리트에 손상이 발생되어 압축강도는

지속적으로 감소하는 것으로 나타나, 온도상승에 따라 강도저하 후 회복현상을 보인 사전비재하 실험, 사전재하 실험과는 다른 경향을 나타냈다.

- (3) 국내산 재료를 이용하여 제작된 콘크리트의 열물성 실험에 대한 기존연구(Kim, 2003)와 실험결과를 비교한 결과 기존 연구의 일반강도콘크리트(29 MPa)의 결과와 유사하였으며, 고강도콘크리트(49 MPa)의 결과값의 사이에 위치하여 콘크리트 강도별 특성을 예상할 수 있는 결과를 얻었다.

향후 보다 다양한 강도의 콘크리트에 대한 열물성 실험이 이루어진다면 고온시 각 강도별 특성값 예측이 가능할 것이며, 응력변형률곡선, 탄성계수에 대한 체계적인 실험값 수집 및 처리가 이루어져야만 화재 시 콘크리트 구조물의 설계 및 해석에 사용할 수 있는 국내 콘크리트에 대한 데이터베이스 구축이 가능할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2015년 산업통상자원부 산업기술혁신사업 중 에너지기술개발사업인 ‘원전 광역화재를 고려한 정량적 화재영향평가 기술개발’(과제번호: 20161510400110)의 일환으로 수행된 연구임을 밝히며 이에 감사드립니다.

References

- ASTM C1113. (2013). *Standard test method for thermal conductivity of refractories by hot wire (Platinum resistance thermometer technique)*.
- ASTM E228. (2017). *Standard test method for linear thermal expansion of solid materials with a push-rod dilatometer*.
- ISO 17562. (2016). *Fine ceramics (advanced ceramics, advanced technical ceramics -Test method for linear thermal expansion of monolithic ceramics by push-rod technique*.
- ISO 834-1. (2014). *Fire-resistance tests - Elements of building construction - Part 1: General requirements*. International Organization for Standardization.
- ISO 8894-2. (2007). *Refractory materials - Determination of thermal conductivity - Part 2: Hot-wire method (parallel)*.
- Kim, H.Y. (2003). *An experimental study on the mechanical properties of high strength concrete at high temperature*. Ph.D. dissertation, Konkuk University.

Received	■	June 29, 2018
Revised	■	July 6, 2018
Accepted	■	July 19, 2018