

화재 후 냉각방식에 따른 철근의 직경 및 강도별 역학적 특성에 관한 실험적 연구

이수현, 강철규*
경기대학교 건축공학과

Experimental Study on the Mechanical Properties by Diameter and Strength of Rebar according Cooling Method after Fire

Su-Hyeon Lee, Cheol-Kyu Kang*
Department of Architectural Engineering, Kyonggi University

요약 화재는 건축물에 대한 심각한 잠재위험 중 하나이다. 일반적으로 내화설계에 대한 연구는 화재 시의 연구에 치중되어 있으나, 보수 및 보강 측면에서의 화재 후 연구도 매우 중요하다. 건축물은 철근콘크리트(RC)구조가 많이 사용되기 때문에, 고온에서 철근과 콘크리트에 대한 재료특성 파악이 매우 중요하다. 따라서 본 연구에서는 화재 후 냉각방식에 따른 철근의 직경 및 강도별 역학적특성에 대한 실험자료를 제시하였다. 실험 데이터는 상온인장실험, 상온냉각(CIA)후 인장실험, 수중냉각(CIW)후 인장실험조건의 결과를 포함한다. 본 연구에서 수행된 철근의 강종은 SD400 D10, SD500 D10, D16, D22, SD600 D22이며, 직경은 10, 16, 22 mm를 사용하였다. 응력-변형률 곡선 및 강도감소계수는 CIA 및 CIW 실험을 통해 도출 되었다. SD400에서 SD500, SD600으로 철근이 고강도가 될수록 냉각 후 변형률이 급격히 감소하였다. 또한 CIA에 의한 냉각방식보다 CIW에 의한 냉각방식이 조직의 변화로 인해 변형률이 상당히 감소하였다. 다만, 동일한 강도에서 직경에 따른 강도 차이는 크지 않았다. 이러한 실험의 응력-변형률 곡선 및 강도감소계수와 같은 데이터는 다양한 화재 시나리오를 가정 한 내화 설계 방정식 및 유한요소해석에 반영될 수 있다.

Abstract Fire is one of the serious potential hazards to buildings. Hence, post-fire research in terms of repair and reinforcement is important. Since reinforced concrete (RC) structures are widely used in construction, it is important to understand the material properties of reinforced concrete at high temperatures. Therefore, this study tested the mechanical properties of rebars of various diameters and strengths according to the cooling method after fire. The steel reinforcing bars used in this study were SD400 D10, SD500 D10, D16, D22, and SD600 D22, and diameters of 10, 16, and 22 mm were used. Stress-strain curves and strength reduction factors were derived through cooling in the air (CIA) and cooling in water (CIW) tests. From SD400 to SD500 to SD600, the strain rate after cooling had rapidly decreased as the reinforcing bar became stronger. In addition, the strain rate significantly reduced in CIW than in CIA due to the change in the internal structure of the rebar. However, there was no significant difference in strength according to the diameter at the same designated strength. Data such as stress-strain curves and strength reduction factors from these experiments can be used to frame fire resistance design equations and perform finite element analysis assuming various fire scenarios.

Keywords : Cooling in Air (CIA) Test, Cooling in Water (CIW) Test, Rebar Properties After Fire, Rebar Reduction Factor, High Temperature Tensile Test

본 논문은 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2019R1F1A1062642).

*Corresponding Author : Cheol-Kyu Kang(Kyonggi Univ.)

email: steel999@kyonggi.ac.kr

Received December 1, 2021

Revised December 27, 2021

Accepted January 7, 2022

Published January 31, 2022

1. 서론

화재는 건축물에 대한 심각한 잠재위험 중 하나이다[1]. 일반적으로 건축물에는 철근콘크리트(RC: Reinforced Concrete, 이하 RC) 구조가 많이 사용되기 때문에, 화재 시 RC구조의 안전성을 확보하기 위한 철근과 콘크리트 재료특성이 매우 중요하다. 화재 조건에서 RC구조의 안전성은 철근과 콘크리트 재료의 온도별 역학적특성에 의해 좌우된다. 철근과 콘크리트는 온도가 증가함에 따라 강도와 강성이 크게 변하고, 특정 온도까지 가열된 철근과 콘크리트는 냉각 후에도 원래 강도로 회복할 수 없다. 콘크리트는 화재 시, 화재 후 재료특성에 대한 연구가 많지만, 철근은 상대적으로 연구가 오래되거나 매우 부족하다[2]. 철근은 콘크리트로 내화피복을 하기 때문에 화재 피해를 입지 않는다고 가정하거나, 종종 무시하기 때문이다. 하지만, RC구조에 균열이 발생하면, 화염이 콘크리트의 균열 사이에 침투하여 철근의 온도를 빠르게 상승시켜 큰 피해를 발생시킨다[3,4]. 더불어 콘크리트는 초기 100 ℃ 내외의 온도에서 폭발(spalling effect) 발생가능성이 있다. 폭발로 인해 피복콘크리트가 탈락하면 철근이 화재에 직접 노출되고, 전체 구조물의 내력이 저하된다[4]. 특히, 고온에서 가열된 콘크리트는 냉각 후에도 원래 강도까지 회복되지 않으며, 이러한 사실은 기존 연구들을 통해 잘 알려져있다[5-7]. 따라서 화재 후 RC 구조물에 적절한 보수 및 보강 없이 화재가 재발한다면, 건축물이 큰 피해를 입을 수 있다. 일반적으로 화재에 노출된 철근과 같은 철강재료는 상온에서 다시 강도가 회복되는 것으로 알려져있으나, 상대적으로 낮은 온도(400 ℃ 이하)에서만 회복하는 것으로 밝혀졌다[8,9]. 고온(600 ℃ 이상)에서는 냉각 방식에 따라 철강재료의 강도 회복정도가 다르다[10]. 특히 수중냉각(CIW: Cooling In Water, 이하 CIW) 방식으로 냉각된 철강재료는 담금 질효과(quenching effect)로 인해 600 ℃ 이상 가열 후에 오히려 강도가 증가하게 된다[10]. CIW가 되는 경우는 주로, RC구조물에서 화재로 인해 콘크리트 폭발로 철근이 노출될 때 소화수에 의해 급격하게 냉각되는 경우이다. 이런 경우 고온의 철근이 물에 의해 급격하게 냉각되기 때문에 공기 중에 냉각되는 상온냉각(CIA: Cooling In Air, 이하 CIA)과는 다른 양상이 나타날 수 있다.

현재 국내 건축구조기준(KBC 2016)은 국가건설기준(KDS: Korean Design Standard, 이하 KDS)로 통합되었고, 강구조설계는 KDS 41 31 00(하중저항계수 설계법)에 의거한다. KDS 41 31 00에는 내화설계에 관한

기준이 포함되었으나, 고온에서의 재료적 특성과 부재별 내화설계방법을 제시하고 있는 국외기준(Eurocode, ACI, AISC)에 비해 매우 부족하다. 내화설계 방법은 일반적으로 '사양적설계방법(prescriptive rules)'과 '성능기반 내화설계방법(PBFD: Performance-Based Fire Design, 이하 PBFD)' 두 가지가 있다. 국내에서는 주로 사양적설계방법을 택하고 있으며, 국외에서는 사양적설계방법과 PBFD를 병행하고 있다. 국내의 주요구조부(보, 기둥, 벽체, 슬래브 등)는 건축법시행령 제56조(건축물의 내화구조)에 따라 내화설계를 실시하도록 하고 있다. 건축물의 피난·방화구조 등의 기준에 관한 규칙 제3조(내화구조)에서는 법정내화구조(1호에서 7호)에 따른 사양적설계방법과 인정내화구조(8호에서 10호)에 따른 성능기반내화설계(PBFD)를 제시하고 있다. 국외에서 제시하는 PBFD와 같이, 국내에서도 부재별 PBFD를 제시하기 위해서는 재료의 온도별 특성 파악이 필수적으로 선행되어야한다.

국내·외 통틀어 화재후 철근의 역학적 특성 및 직경이나 강도별, 냉각 방식에 따른 세부적인 연구결과는 매우 부족하다. 따라서 본 연구에서는 국내에서 많이 사용되는 철근 3종(SD400, SD500, SD600)의 화재 후 냉각방법에 따른 온도별 역학적 특성을 도출하였다. 또한 SD500 철근을 기준으로 직경별(D10, D16, D22) 온도별 역학적 특성의 차이를 확인하였다. 본 연구는 추후 KDS의 내화설계에 철근 특성을 반영하기 위한 데이터베이스를 제공하고, 국외 기준에 의존하여 해석과 설계를 수행하고 있는 국내 내화관련 구조 엔지니어들에게 도움이 될 것이다.

2. 가열 후 냉각인장실험

2.1 실험종류 및 방법

고온에서 가열 후 냉각된 철근의 역학적 특성을 도출하기 위해 Fig. 1과 같이 가열 후 상온에 냉각하는 '상온냉각(CIA)실험' 그리고 물로 냉각하는 '수중냉각(CIW)실험'으로 나누어 실험을 진행하였다. 두 실험은 모두 가열 후 충분히 식힌 뒤, 응력-변형률곡선(stress-strain curve)을 도출하기 위해 인장가력으로 수행하였다.

실험방법은 KS D 0026(철강재료 및 내열합금의 고온인장 시험 방법)와 KS B 0802(금속 재료 인장 시험 방법)을 참고하였으며, 냉각실험에 관한 실험 절차나 방법은 현재 기준에 없으므로, 기존에 수행된 연구내용을 참고하였다[10]. KS D 3504에 따른 SD400, 500, 600 철

근의 상온에서 화학성분과 역학적특성은 각각 Table 1, 2와 같다. CIA와 CIW의 실험방법은 Fig. 2에 정리하였다. CIA와 CIW 실험 모두 Fig. 2의 Step 1(a) 과 같이 철근의 가열속도는 분당 10 ℃(10 ℃/min)이고, 목표온도(Target temperature)는 상온 (20 ℃)을 포함하여 100 ℃에서 100 ℃단위로 1,000 ℃까지 가열하였다. Step 2(b)와 같이 목표온도에 도달하면 최소 30분 이상 가열로에서 온도를 유지하여 철근의 내부까지 온도가 도달할 수 있도록 하였다. Step 3에서 CIA 실험은 Fig. 2에서 (a)(b)(c)(e)순서로 가열된 철근은 1주일 이상 상온에서 냉각한 뒤, 변형률게이지(Strain gauge)를 부착하고 변위제어 0.005 /min 변형률 속도로 인장실험(Step 4)을 수행하였다. 또한 CIW 실험은 Fig. 2에서 (a)(b)(d)(e)순서로 가열된 철근은 물에 바로 넣어 10분 이상 급속냉각한 뒤, 한달이상 충분히 상온에서 식힌 다음에 변형률게이지를 부착하고 변위제어 0.005 /min 변형률 속도로 인장실험(Step 4)을 수행하였다. 위의 실험 조건들을 Table 3에 정리하였다.

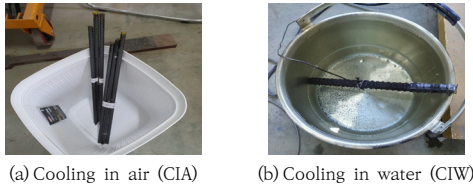


Fig. 1. Cooling test method of rebar

Table 1. Chemical composition of rebar (SD400, 500, 600) at room temperature (20℃)

Type	Chemical composition (%)							
	C	Si	Mn	P	S	Cu	N	Ceq*
SD400	-	≤ 0.60	-	≤ 0.050	≤ 0.050	-	-	-
SD500	-	≤ 0.60	-	≤ 0.045	≤ 0.045	-	-	-
SD600	-	≤ 0.60	-	≤ 0.040	≤ 0.040	-	-	≤ 0.67

$$*Ceq : C + \frac{Mn}{6} + \frac{(Cr + V + Mo)}{5} + \frac{(Cu + Ni)}{15}$$

Table 2. Mechanical properties of rebar (SD400, 500, 600) at room temperature (20℃)

Type	Mechanical properties		
	Yield strength (N/mm ²)	Tensile strength (N/mm ²)	Elongation (%)
SD400	400 ~ 520	More than 1.15 times the yield strength (≥ 1.15 × yield strength)	≥ 16 ~ 18
SD500	500 ~ 650	More than 1.08 times the yield strength (≥ 1.08 × yield strength)	≥ 12 ~ 14
SD600	600 ~ 780	More than 1.08 times the yield strength (≥ 1.08 × yield strength)	≥ 10

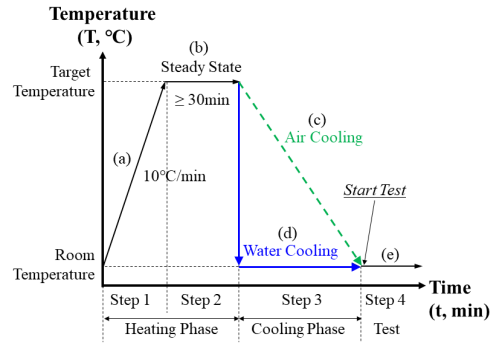


Fig. 2. The procedure of cooling in air test (CIA) and cooling in water test (CIW)

Table 3. Test conditions and set values

Step	Test condition		Setting value
1	Heating rate		10 ℃/min
2	Holding temperature time (at target temperature)		≥ 30 min
3	CIA	Air cooling period	≥ 7 days (at room temperature)
	CIW	Water cooling temperature	≤ 10 ℃
		Water cooling period	≥ 10 min
		Cooling period in air after water cooling	≥ 30 days (at room temperature)
4	Loading rate (displacement control)		0.005 /min

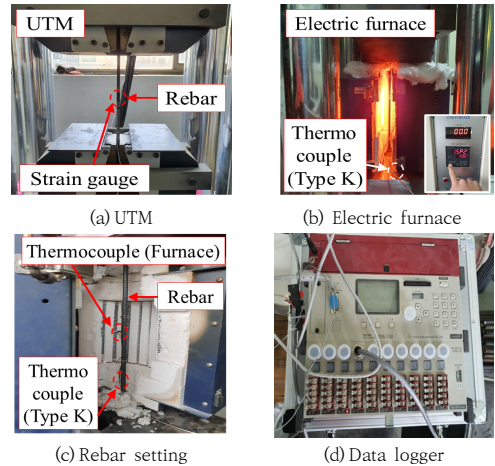


Fig. 3. Test equipment and settings

인장실험에 사용된 실험장비 및 변형률 게이지는 Fig. 3에 정리하였다. 만능시험기(UTM: Universal Testing Machine, 이하 UTM)의 로드셀(load cell)은 Fig. 3(a)와 같이 최대 2,000 kN의 하중용량(load-capacity)을

가지며, 변위는 최대 250 mm까지 측정할 수 있다. 철근을 가열하는 전기가열로(electric furnace)는 Fig. 3(b)와 같이 UTM의 지그(jig) 사이에 설치되며, 실험을 위해 별도의 특허를 받아 제작된 장치이다(특허등록번호 : 10-1904000).

전기가열로는 최대 1,200 °C까지 가열할 수 있으며 장기간 일정한 온도를 유지할 수 있다. 또한 Type K 열전대를 철근에 부착하여 실시간 온도를 측정하였으며, 수시로 SDT25(Type K Thermocouple) 장비를 이용하여 철근 표면온도를 직접 측정하였다. 가열 후 철근의 변형률을 측정하기 위해 철근 표면에 변형률게이지(strain gauge)를 부착하였다. 사용된 Tokyo Measuring Instruments Lab.의 변형률게이지는 YF계열의 YFLA게이지이며, 철근과 같은 금속재료의 고변형률(15~20 %) 측정이 가능하다. UTM의 하중-변위 데이터와 전기가열로의 온도, 변형률게이지의 변형률 측정 데이터를 데이터로거(data logger) 장치를 통해 수집한 후, 컴퓨터로 전송하였다. 데이터로거는 Tokyo Sokki Kenkyujo Co., Ltd.의 TDS-150을 이용하여 측정하였다.

2.2 실험범위

실험에 사용된 철근의 종류와 직경은 SD400 D10, SD 500 D10, D16, D22, SD600 D22로 총 5종이며, 각 목표온도 별로 최대 3개씩 수행하였다. 철근의 길이는 모두 400 mm 이며, 실험결과를 최대 3개씩 수행한 결과의 평균값으로 도출하였다. 실험방식은 Fig. 1과 같이 CIA와 CIW 로 각각 수행하였다. 목표온도는 상온(20 °C)과 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1,000 °C 이며, 100 °C 단위로 수행하였다. 목표온도에 따른 철근 종류와 개수를 Table 4에 정리하였다.

Table 4. Type and number of rebars according to target temperature (CIA, CIW)

Test : Cooling in air (CIA), Cooling in water (CIW)		Target temperature (°C)										
Type	Diameter (mm)	20	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1,000
SD400	D10(9.53)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	D10(9.53)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SD500	D16(15.9)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	D22(22.2)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
SD600	D22(22.2)	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3

3. 실험결과

3.1 시간-온도곡선

수중냉각(CIW)실험으로 인한 시간-온도곡선(time-temperature curve)을 SD400 D10 철근의 실험결과를 대표로 Fig. 4에 나타내었다. 시간-곡선은 Fig. 3의 가열로로 인한 철근의 표면온도를 열전대(Type K)로 측정하는 곡선을 나타낸다. 이는 Table 4의 다른 철근(SD500, SD600)의 결과와 동일하기 때문에 다른 철근의 결과는 생략하였다. 가열로에서 설정한 온도 값과 다르게 전기가열로의 코일에서 발산하는 온도와 철근의 온도가 차이가 있을 수 있다. 따라서 철근의 표면에서 내부까지 균일하게 온도가 분포되도록 30분 이상 목표온도에서 유지하였다. 충분히 가열된 철근은 Fig. 2의 (b)(d) 순서와 같이 10분이상 10 °C 미만의 물에 냉각시켰다. 이렇게 냉각된 철근은 수분을 제거하고, 온도안정화를 시키기 위해 약 30일 이상 상온에 충분히 방치하였다.

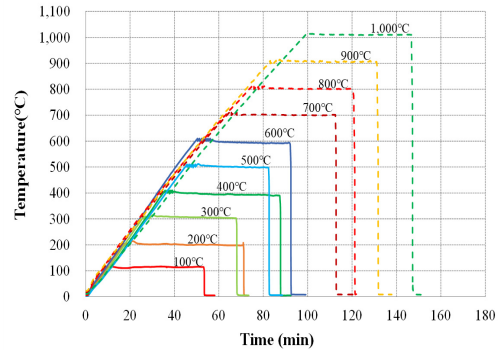


Fig. 4. Time-temperature curve of SD400 D10 in cooling in water(CIW) test

3.2 응력-변형률 곡선

일반적인 철강재료의 응력-변형률 곡선(stress-strain curve)은 Fig. 5와 같으며, 응력-변형률 곡선을 통해 항복강도($f_{y,\theta}$, MPa) 및 인장강도($f_{u,\theta}$, MPa), 탄성계수(E_θ , MPa)를 도출하였다. 항복점이 뚜렷하지 않은 경우, 0.2 % offset method를 이용하여 항복강도를 도출하였으며, 응력-변형률 곡선에서 최대강도를 인장강도(tensile strength)로 하였다(Fig. 5의 D점). CIA와 CIW실험으로 수행된 철근들의 응력-변형률 곡선을 Fig. 6에서 Fig. 10까지 정리하였다. 응력-변형률 곡선의 변형률(strain, mm/mm)은 최대 0.2(20 %)까지 나타내었

다. 응력-변형률 곡선에서 실선은 600 ℃ 이하에서 수행한 결과를 나타내며, 점선은 700 ℃ 이상에서 수행한 결과를 나타낸다.

SD400 D10 철근의 응력-변형률 곡선을 Fig. 6(a)의 CIA와 Fig. 6(b)의 CIW로 비교하였다. SD400 D10 철근의 CIA 실험은 Fig. 6(a)와 같이 300 ℃를 제외하고 600 ℃ 이하에서 상온대비 강도가 증가한 것을 확인할 수 있다. 100 ℃에서는 상온대비 강도가 가장 많이 증가하였으나, 완전소성구간(perfect plasticity)과 연신률(elongation)이 감소하였다. 700 ℃ 이상에서는 상온대비 내력이 감소하였으나, 그래프의 형태는 유지하였다. 700 ℃에서 1,000 ℃까지 온도가 상승할수록 강도가 감소하였다. 그러나, CIW 실험은 Fig. 6(b)와 같이 700 ℃ 이상에서 강도가 증가하고, 연신률이 감소하는 취성파괴가 나타났다. 실험 초기부분에서 소성구간 없이 급격히 파단되었다. 특히 1,000 ℃ 이상에서는 담금질효과(quenching effect)가 발생하여 강도와 연성이 증가하였다.

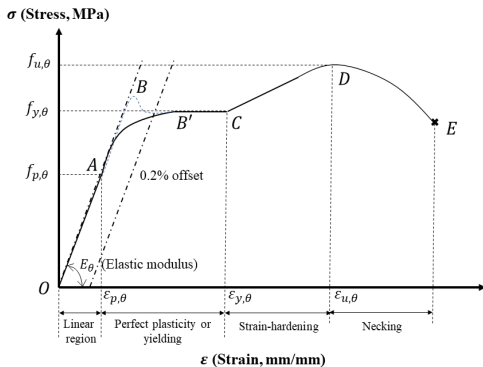
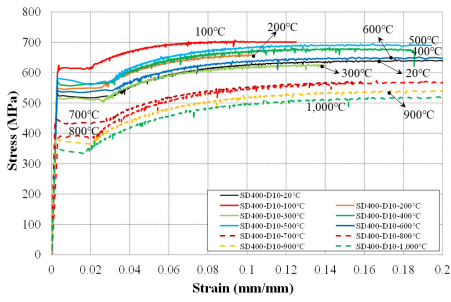


Fig. 5. Typical stress-strain curve of steel(rebar)

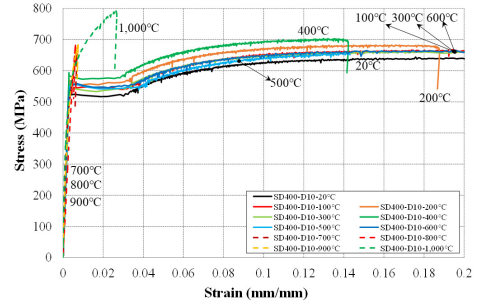
고온에서 가열된 철근과 같은 철강재료가 물 또는 기름에 급속냉각 될 때 강도가 증가하는 현상은 기존 연구들에서 보고되었다[10-12]. SD500 D10 철근의 응력-변형률 곡선을 Fig. 7(a)의 CIA와 Fig. 7(b)의 CIW로 비교하였다. SD500 D10 철근의 실험은 동일한 직경을 가지고 낮은 강도의 SD400 D10와 비교하였다. SD500 D10 철근의 CIA 실험은 Fig. 7(a)와 같이 100℃를 제외하고 500 ℃ 이하에서 상온대비 강도가 증가한 것을 확인할 수 있다. SD400 D10 철근과 달리, 400 ℃에서 강도가 가장 높게 나왔다. 700 ℃ 이상에서는 SD400 D10 CIA 실험 결과와 같이 상온대비 내력이 감소하였으나, 그래프의 양상은 유지하였다. 900, 1,000 ℃에서는 강도

가 가장 낮게 나타났다. CIW 실험은 Fig. 7(b)와 같이 900 ℃이상에서 강도가 증가하고, 연신률이 감소하는 취성파괴가 나타났다. SD400 D10의 CIW실험과 달리, 700 ℃에서는 응력-변형률 곡선형태를 유지한 채 강도만 다소 감소하였으며, 800 ℃에서 소성구간 없이 취성파괴가 발생하였다. 1,000 ℃ 이상에서는 SD400 D10 CIW실험과 같이 담금질효과가 발생하여 강도가 증가하였다. SD500 D16과 D22 철근의 응력-변형률 곡선을 각각 Fig. 8과 Fig. 9로 나타내었다. SD500 D16과 D22 철근의 CIA 실험은 각각 Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)이고, CIW 실험은 각각 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)이다. SD500 D10, D16, D22 철근의 CIA 실험의 결과인 Fig. 7(a), Fig. 8(a) 그리고 Fig. 9(a)을 비교하면, 600 ℃ 이상에서 강도가 감소하였다. 특히 700 ℃ 이상에서는 급격히 강도가 감소한 것을 응력-변형률 곡선을 통해 확인할 수 있다. SD500 D16 철근의 400 ℃와 SD500 D22 철근의 500 ℃ 실험과 같이 상대적으로 낮은 온도에서 다소 강도의 감소가 있는 경우가 있었다. SD500 D10, D16, D22 철근의 CIW실험결과를 각각 정리한 Fig. 7(b), Fig. 8(b) 그리고 Fig. 9(b)을 비교하면, SD500 D10의 700 ℃ 곡선을 제외하고 700 ℃ 이상에서 모두 조기파단과 함께 취성파괴가 나타났다. SD500 D10 철근은 1,000 ℃에서 담금질효과로 인해 강도가 증가하였으나, SD500 D16과 D22 철근은 오히려 강도가 감소하였다. 이를 통해 직경이 증가할수록 고온에서 담금질 효과가 감소하는 것을 확인하였다. 또한 SD500 철근의 CIW 실험은 상온대비 100 ℃에서 400 ℃까지 인장강도가 증가한 것을 확인할 수 있었다.

SD600 D22 철근의 응력-변형률 곡선을 Fig. 10(a)의 CIA와 Fig. 10(b)의 CIW로 비교하였다. SD600 D22 철근의 실험은, 동일한 직경을 가지고 낮은 강도의 SD500 D22와 비교하였다. SD600 D22 철근의 CIA 실험은 Fig. 10(a)와 같이, 500 ℃를 제외하고 100 ℃부터 600 ℃까지 상온 강도와 비슷하게 도출되었다. 700 ℃ 이상에서는 SD500 D22 CIA 실험결과와 같이 상온대비 내력이 크게 감소하였으나, 그래프의 형태는 유지하였다. 또한 1,000 ℃에서 강도가 가장 낮게 나타났다. CIW 실험은 Fig. 10(b)와 같이 전체적으로 응력-변형률 곡선에서 변형률이 감소하였다. 응력-변형률 곡선의 아래 면적은 인성(toughness)이며, 재료에너지를 의미한다. 상대적으로 SD500에 비해 고강도 특성을 지닌 SD600 철근은 물로 냉각(CIW)할 경우, 재료가 흡수할 수 있는 에너지가 상당히 감소할 수 있음을 나타낸다.

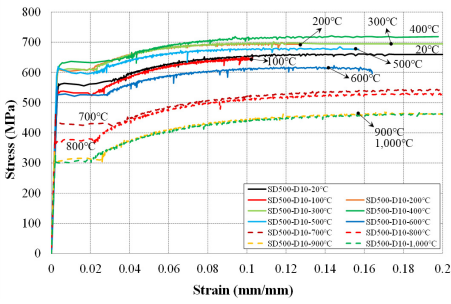


(a) CIA

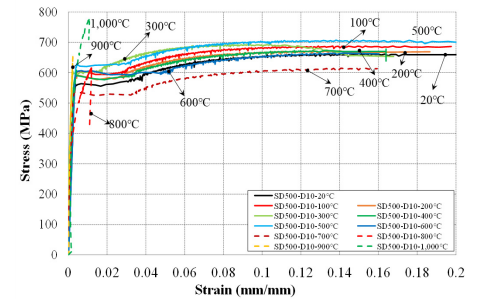


(b) CIW

Fig. 6. Stress-strain curve of SD400 D10 rebar(CIA, CIW tests)

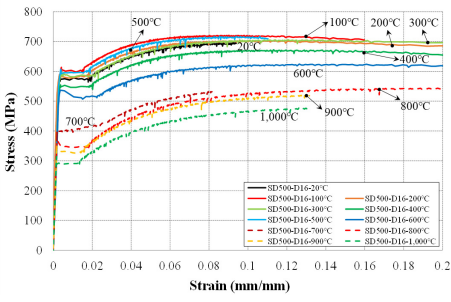


(a) CIA

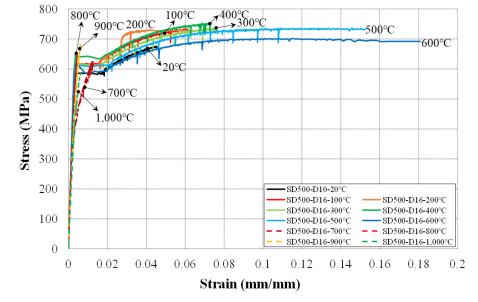


(b) CIW

Fig. 7. Stress-strain curve of SD500 D10 rebar(CIA, CIW tests)

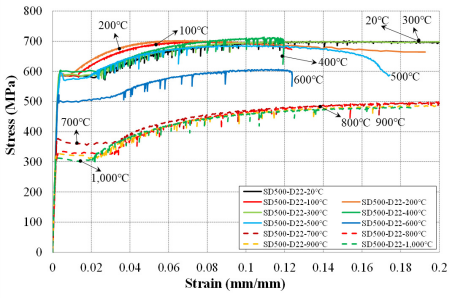


(a) CIA

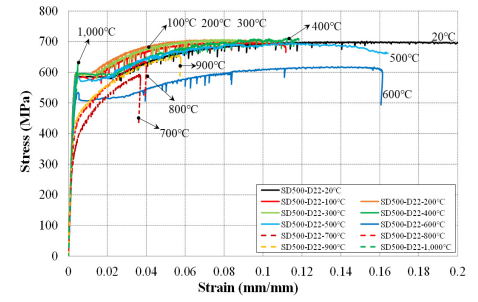


(b) CIW

Fig. 8. Stress-strain curve of SD500 D16 rebar(CIA, CIW tests)



(a) CIA



(b) CIW

Fig. 9. Stress-strain curve of SD500 D22 rebar(CIA, CIW tests)

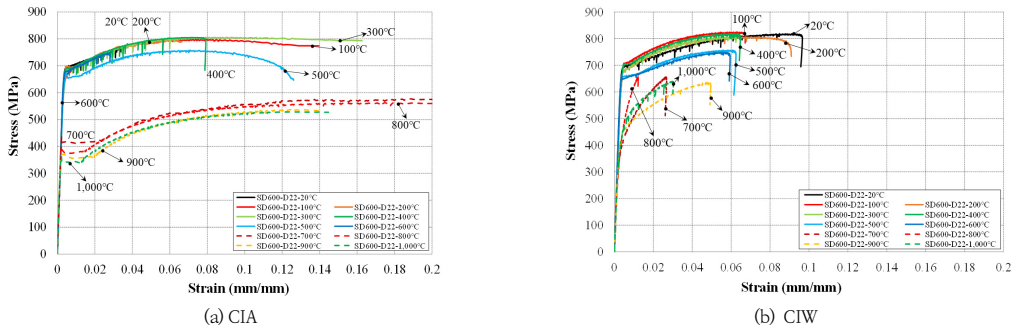


Fig. 10. Stress-strain curve of SD600 D22 rebar (CIA, CIW tests)

Table 5. The yield strength(MPa) and reduction factor of rebar cooling test(CIA, CIW)

Temp. (θ , $^{\circ}\text{C}$)	SD400 D10		SD500 D10				SD500 D16				SD500 D22				SD600 D22					
	CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW	
	Y.S*	R.F**	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F	Y.S	R.F
20	529.70	1.00	529.70	1.00	575.37	1.00	575.37	1.00	543.09	1.00	543.09	1.00	577.77	1.00	577.77	1.00	611.65	1.00	611.65	1.00
100	582.06	1.10	557.29	1.05	527.23	0.92	559.49	0.97	598.22	1.10	509.68	0.94	562.12	0.97	578.26	1.00	647.16	1.06	703.05	1.15
200	531.82	1.00	570.86	1.08	608.19	1.06	587.89	1.02	565.20	1.04	528.15	0.97	562.16	0.97	594.12	1.03	638.38	1.04	674.12	1.10
300	515.40	0.97	553.31	1.04	604.62	1.05	603.80	1.05	575.04	1.06	511.26	0.94	573.20	0.99	594.32	1.03	635.18	1.04	679.29	1.11
400	562.44	1.06	579.67	1.09	594.90	1.03	590.59	1.03	518.67	0.96	495.86	0.91	595.61	1.03	591.43	1.02	612.41	1.00	642.45	1.05
500	550.51	1.04	548.46	1.04	630.38	1.10	632.10	1.10	566.22	1.04	464.94	0.86	578.56	1.00	581.10	1.01	584.44	0.96	664.75	1.09
600	566.10	1.07	547.03	1.03	553.04	0.96	607.12	1.06	494.08	0.91	536.64	0.99	517.74	0.90	516.70	0.89	525.41	0.86	655.07	1.07
700	439.20	0.83	555.19	1.05	438.47	0.76	534.92	0.93	353.84	0.65	438.08	0.81	386.18	0.67	360.90	0.62	383.54	0.63	411.31	0.67
800	386.29	0.73	541.35	1.02	366.95	0.64	451.22	0.78	345.84	0.64	600.44	1.11	335.29	0.58	439.89	0.76	368.51	0.60	451.74	0.74
900	358.78	0.68	584.26	1.10	327.43	0.57	405.38	0.70	288.61	0.53	632.63	1.16	317.27	0.55	450.63	0.78	357.22	0.58	449.51	0.73
1,000	331.92	0.63	588.07	1.11	302.58	0.53	639.76	1.11	276.81	0.51	583.85	1.08	308.91	0.53	599.18	1.04	339.06	0.55	435.53	0.71

*Y.S : Yield strength(MPa), **R.F : Reduction factor

Table 6. The tensile strength(MPa) and reduction factor of rebar cooling test(CIA, CIW)

Temp. (θ , $^{\circ}\text{C}$)	SD400 D10		SD500 D10				SD500 D16				SD500 D22				SD600 D22					
	CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW	
	T.S*	R.F**	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F
20	641.94	1.00	641.94	1.00	676.05	1.00	676.05	1.00	690.80	1.00	690.80	1.00	707.39	1.00	707.39	1.00	782.88	1.00	782.88	1.00
100	695.12	1.08	667.88	1.04	635.24	0.94	688.11	1.02	729.66	1.06	741.56	1.07	701.40	0.99	699.05	0.99	795.72	1.02	824.85	1.05
200	653.40	1.02	683.07	1.06	699.38	1.03	672.83	1.00	715.50	1.04	743.04	1.08	701.45	0.99	706.95	1.00	808.34	1.03	806.61	1.03
300	622.32	0.97	661.77	1.03	690.26	1.02	693.78	1.03	716.39	1.04	741.26	1.07	697.39	0.99	707.00	1.00	817.58	1.04	806.36	1.03
400	678.80	1.06	703.76	1.10	704.11	1.04	678.15	1.00	683.25	0.99	757.96	1.10	707.30	1.00	712.32	1.01	772.97	0.99	819.08	1.05
500	680.72	1.06	675.30	1.05	705.57	1.04	707.81	1.05	729.96	1.06	736.03	1.07	685.06	0.97	695.09	0.98	758.12	0.97	757.11	0.97
600	651.01	1.01	665.64	1.04	634.74	0.94	671.58	0.99	607.30	0.88	701.66	1.02	607.57	0.86	618.18	0.87	628.36	0.80	748.70	0.96
700	573.89	0.89	655.61	1.02	557.95	0.83	617.36	0.91	557.08	0.81	624.63	0.90	506.23	0.72	593.00	0.84	556.28	0.71	656.69	0.84
800	575.46	0.90	683.28	1.06	513.02	0.76	616.37	0.91	539.31	0.78	654.26	0.95	502.41	0.71	634.65	0.90	564.12	0.72	656.69	0.84
900	551.53	0.86	684.39	1.07	493.21	0.73	652.99	0.97	533.53	0.77	682.31	0.99	491.01	0.69	655.22	0.93	542.22	0.69	635.36	0.81
1,000	531.00	0.83	792.15	1.23	447.73	0.66	775.40	1.15	488.01	0.71	657.81	0.95	488.07	0.69	635.41	0.90	529.98	0.68	641.29	0.82

*T.S : Tensile strength(MPa), **R.F : Reduction factor

3.3 항복강도

응력-변형률에서 항복점이 뚜렷하지 않은 경우 Fig. 5와 같이 비례한도의 기울기(OA)와 동일하게 0.2 % offset method를 이용하여 항복강도를 도출하였다. 항복강도 값은 실험결과와 평균값이다. CIA와 CIW 실험에 따른 항복강도와 항복강도 감소계수(reduction factor)를 Table 5에 정리하였다. CIA와 CIW 실험에 따른 항복강도 감소계수 그래프를 각각 Fig. 11과 Fig. 12에 나타내었다. 여기서, $f_{y,\theta}$ 는 목표온도(θ)별 항복강도, $f_{y,20}$ 은 상온항복강도이다. CIA실험에서 모든 철근의 항복강도는 Fig. 11과 같이 강도와 직경에 상관없이 700 ℃이상에서 급격하게 감소하였다. SD400 D10 철근은 700 ℃에서 상온항복강도대비 최대 17% 감소하였으며, SD600 D22 철근은 700 ℃에서 상온항복강도 대비 최대 37%까지 감소하였다.

CIW 실험결과, Fig. 12와 같이, 700 ℃에서 상온항복강도 대비 냉각 후 항복강도가 최소 7 %(SD500 D10)에서 최대 38 %(SD500 D22)까지 감소하였다. 상대적으로 저강도인 SD400 D10 철근은 Fig. 12의 CIW실험결과와 같이, 모든 온도에서 항복강도가 회복되었으며, 1,000 ℃에서는 상온대비 냉각 후 항복강도가 11 % 증가하였다. 반면, SD500 D10 철근은 SD400 D10 철근과 달리 700 ~ 900 ℃에서 항복강도가 감소하였으며, 900 ℃에서 최대 30 % 항복강도가 감소하였다. 1,000 ℃에서는 다시 항복강도가 회복되어, 상온대비 11 % 강도가 증가하였다. 앞서 언급한 것과 같이, 고온에서 가열된 철근이 물에 급격하게 냉각될 경우, ‘담금질효과’로 인해 강도가 회복되거나 증가할 수 있다. SD500 D16 철근은 700 ℃에서 항복강도가 최대 38 % 감소하였으나, 800 ℃부터 강도가 회복되었다. 900 ℃에서는 상온항복강도 대비 항복강도가 16 % 증가하였으며, 1,000℃에서는 8 % 증가하였다. SD500 D22 철근은 700 ~ 900 ℃에서 항복강도가 감소하였으며, 900 ℃에서는 22 % 감소하였다. 1,000 ℃에서는 다시 항복강도가 회복되어, 상온항복강도 대비 4 % 강도가 증가하였다. 반면, SD600 D22 철근은 1,000 ℃에서도 항복강도가 회복되지 않았다. 이는 기존 연구[11]에서도 보고되고 있으며, 상대적으로 저강도인 강은 고온에서 항복강도가 원래강도까지 회복되거나 오히려 증가되는 반면에, 고강도강은 원래 강도까지 회복되지 못하고 강도와 연신률이 감소하였다.

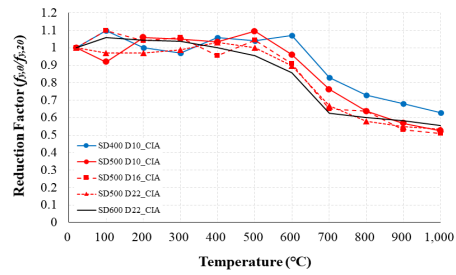


Fig. 11. The yield strength reduction factor of CIA test

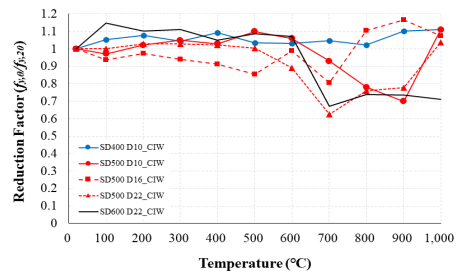


Fig. 12. The yield strength reduction factor of CIW test

3.4 인장강도

응력-변형률에서 최대응력(최대강도)을 인장강도($f_{u,\theta}$, MPa)로 설정하였다. 인장강도 값은 항복강도와 같이 실험결과 들의 평균값이다. CIA와 CIW 실험에 따른 인장강도와 인장강도 감소계수를 Table 6에 정리하였으며, 인장강도감소계수 그래프를 각각 Fig. 13과 Fig. 14에 정리하였다. 여기서, $f_{u,\theta}$ 는 목표온도(θ)별 인장강도, $f_{u,20}$ 은 상온인장강도이다. CIA실험에서 모든 철근의 인장강도는 Fig. 13과 같이 강도와 직경에 상관없이 700 ℃이상에서 감소하였다.

SD400 D10 철근은 700 ℃에서 상온인장강도대비 최대 11 % 감소하였으며, SD600 D22 철근은 700 ℃에서 상온인장강도 대비 최대 29%까지 감소하였다. CIW 실험에서는 CIA실험과 달리 Fig. 14와 같이 700 ℃이상에서도 대체로 인장강도가 회복되었다. SD400 D10과 SD500 D10 철근의 경우, 1,000 ℃에서 각각 23 %, 15 % 인장강도가 증가하였으며, 나머지 SD500 D16, D22 철근과 SD600 D22 철근의 인장강도는 상온인장강도까지 다소 회복되는 경향을 보였다.

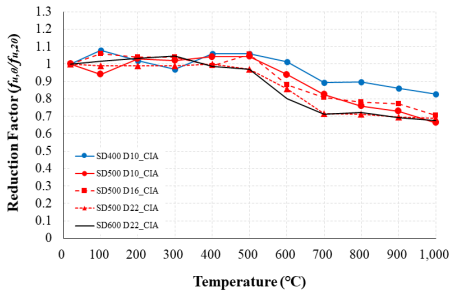


Fig. 13. The tensile strength reduction factor of CIA test

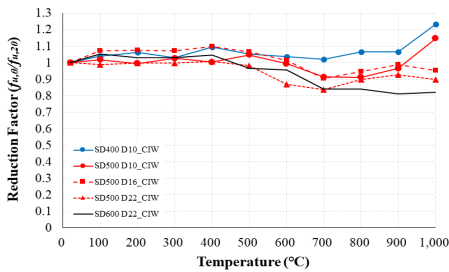


Fig. 14. The tensile strength reduction factor of CIW test

3.5 탄성계수

응력-변형률에서 Fig. 5의 초기 탄성구간(OA)구간의 기울기는 탄성계수(E_{θ} , MPa)이다. 탄성계수의 값은 앞서 살펴본 항복 및 인장강도와 같이 실험결과 들의 평균 값이다. CIA와 CIW 실험에 따른 탄성계수와 탄성계수 감소계수를 Table 7에 정리하였으며, 탄성계수 감소계수 그래프를 각각 Fig. 15와 Fig. 16에 나타내었다. 여기

서, E_{θ} 는 목표온도(θ)별 탄성계수, E_{20} 은 상온탄성계수이다. CIA실험에서 모든 철근의 탄성계수는 Fig. 15과 같이 상온탄성계수(1.0)까지 회복되었으나, SD400 D10과 SD500 D10 철근의 경우 800 °C에서 급격히 탄성계수가 감소하였다. 800 °C에서 상온탄성계수대비 SD400 D10 철근은 최대 24 % 감소하였으며, SD500 D10 철근은 최대 34 % 감소하였다. 또한 SD500 D10 철근은 다른 철근에 비해 800 °C이후에서 제일 낮은 탄성계수를 나타냈다. CIW실험은 Fig. 16과 같이 700 °C이상에서 대체로 탄성계수가 회복되었다. 그러나, SD400 D10 철근은 800 °C에서 탄성계수가 34 % 이상 크게 감소하였다. SD500 D10 철근은 오히려 700 °C이상에서 탄성계수가 증가하였다. SD500 D16, D22와 SD600 D22 철근의 탄성계수는 700, 800 °C에서 소폭 감소하였다. 이러한 탄성계수의 경향은 기존 연구들에서도 확인할 수 있다[10,11]. 특히 직경이 제일 작은 SD400 D10, SD500 D10 철근은 700 °C 이상에서 SD400 D10 800 °C를 제외하고 탄성계수가 대체로 증가하는 경향을 나타냈다. 탄성계수는 온도에 따라 차이가 크게 발생하였다.

앞서 3.2절의 응력-변형률 곡선결과와 같이, 고온에서 물로 냉각하는 방식(CIW)은 '담금질효과'로 인해 강도를 증가시키고 연신률을 감소시킨다. 일반적으로 응력-변형률 곡선에서 파생된 탄성계수 값은 해석자에 따라 측정의 오류로 인해 약간의 차이가 있을 수 있다. 온도에 따른 탄성계수는 관찰된 변화가 가열 및 냉각, 변형 측정 오류 또는 이들의 일부 조합으로 인한 철근내부의 구조적 변화로 인한 것인지 여부에 대해 추가적인 연구가 필요하다.

Table 7. The elastic modulus(MPa) and reduction factor of rebar cooling test(CIA, CIW)

Temp. (θ , °C)	SD400 D10				SD500 D10				SD500 D16				SD500 D22				SD600 D22			
	CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW		CIA		CIW	
	E.M*	R.F**	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F	T.S	R.F
20	192,530	1.00	192,530	1.00	177,563	1.00	177,563	1.00	187,323	1.00	187,323	1.00	196,668	1.00	196,668	1.00	206,990	1.00	206,990	1.00
100	193,712	1.01	180,775	0.94	190,170	1.07	184,569	1.04	170,836	0.91	210,037	1.12	179,746	0.91	182,752	0.93	222,807	1.08	195,354	0.94
200	198,443	1.03	192,102	1.00	183,137	1.03	207,116	1.17	181,234	0.97	216,379	1.16	179,746	0.91	207,622	1.06	196,872	0.95	191,492	0.93
300	201,489	1.05	172,560	0.90	181,142	1.02	174,493	0.98	167,284	0.89	207,291	1.11	189,807	0.97	194,106	0.99	211,218	1.02	207,230	1.00
400	195,744	1.02	200,822	1.04	185,341	1.04	170,709	0.96	184,018	0.98	209,321	1.12	192,050	0.98	199,233	1.01	187,063	0.90	201,693	0.97
500	197,890	1.03	185,578	0.96	176,896	1.00	171,184	0.96	199,787	1.07	206,160	1.10	184,592	0.94	178,173	0.91	188,601	0.91	205,622	0.99
600	177,977	0.92	195,305	1.01	186,937	1.05	170,188	0.96	189,027	1.01	194,442	1.04	193,648	0.98	174,383	0.89	204,215	0.99	214,678	1.04
700	180,961	0.94	210,611	1.09	185,788	1.05	229,611	1.29	204,716	1.09	164,107	0.88	184,809	0.94	185,758	0.94	192,381	0.93	169,134	0.82
800	145,770	0.76	126,437	0.66	142,070	0.80	204,915	1.15	194,345	1.04	177,590	0.95	179,825	0.91	161,365	0.82	205,409	0.99	185,523	0.90
900	161,005	0.84	213,038	1.11	195,644	1.10	241,746	1.57	200,387	1.07	183,486	0.98	196,464	1.00	191,703	0.97	201,460	0.97	171,695	0.83
1,000	160,253	0.83	226,811	1.18	172,389	0.97	237,081	1.34	200,402	1.07	194,125	1.04	184,866	0.94	206,492	1.05	202,893	0.98	189,217	0.91

*E.M : Elastic Modulus(MPa), **R.F : Reduction factor

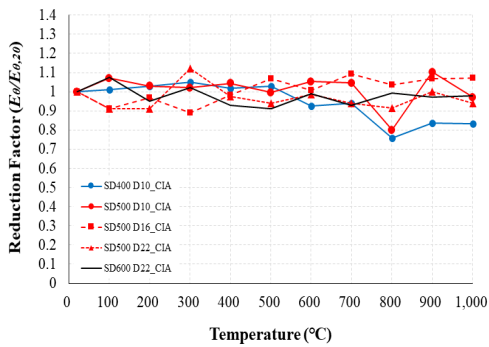


Fig. 15. The elastic modulus reduction factor of CIA test

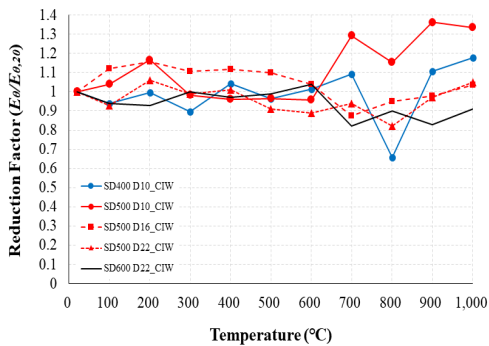


Fig. 16. The elastic modulus reduction factor of CIW test

3.6 결과분석 및 비교

CIA 실험에서 철은 727 °C에서 Fig. 17과 같이 페라이트(ferrite)에서 오스테나이트(austenite)조직으로 변형되는 특성이 있다 [13-15]. Fig. 18은 SD400 D10 철근의 CIA 실험 800 °C 결과이며, 이러한 고온에서는 조직변화로 인해 변형률이 증가되는 현상을 보인다. 고강도와 큰 직경을 가진 SD500 D22와 SD600 D22의 응력-변형률 곡선을 살펴보면(Fig. 9, Fig. 10), 700 °C 이상에서 강도는 감소하나, 변형률이 급격히 증가한 것을 확인할 수 있다. 이 조직변경점을 공석점(eutectoid point)이라하며, 공석점을 지나게 되면 강도는 급격히 떨어지고 반대로 변형률은 급격히 증가되는 특성이 있다 [13-15]. 철근과 같은 철강재료는 700 ~ 800 °C 에서 공석점이 주로 보이는 특성이 있다. CIW 실험에서 철은 700 ~ 800 °C 고온에서 급격히 냉각되면 Fig. 17과 같이 마르텐사이트(martensite) 조직으로 변하게 된다. 마르텐사이트는 강도는 증가되나 연신률이 감소하므로, 700 °C 이상에서 응력-변형률 곡선의 변형률이 급격히

감소되는 현상을 보이게 된다. 철근의 강도와 직경별 차이에 따라 Table 8과 같이 그룹(Group)으로 나누어 분류하였다.

SD400 D10과 SD500 D10, SD500 D22와 SD600 D22와 같이 직경은 같지만 강도가 다른 그룹(Group 1, 2)과 SD500 D10, D16, D22와 같이 직경은 다르지만 강도가 같은 그룹(Group 3)으로 나누었다. 온도는 차이가 크게 발생하는 600 °C 부터 비교하였다. 각 그룹에서 제시하는 그래프의 y축은, Fig. 6에서 Fig. 10까지의 온도별 응력-그래프에서 Table 5의 상온(20 °C) 평균항복강도($f_{y, 20}$)를 나눈 정규화된 응력(normalized stress)이다. 예를 들어, Fig. 19의 SD400 D10의 정규화된 응력-변형률 그래프는 Fig. 6의 SD400 D10의 온도별 응력-변형률 그래프에서 Table 5의 SD400 D10의 상온평균항복강도인 529.70 MPa를 나눈 그래프이다. 이렇게 정규화된 응력-변형률 곡선을 통해 동일한 조건에서 강도 및 직경에 따른 상대비교를 수행할 수 있다.

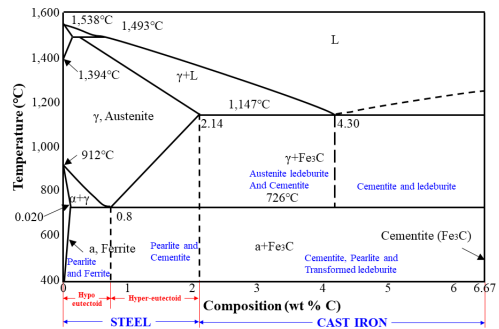


Fig. 17. Fe-C phase diagram (reproduced) [13-15]



Fig. 18. Test results of SD400 D10 800 °C in cooling in air(CIA) test

Group 1은 SD400 D10과 SD500 D10 철근을 비교하였다. 동일한 직경(D10)에서 철근이 고강도가 될수록 Fig. 19와 같이 냉각효과에 의한 항복 및 인장강도의 회복이 감소하였다. 가열 후 상온냉각(CIA)했을 때, Fig. 19(a)와 같이 600 °C 이상에서는 항복 및 인장강도의 회복(recovery)이 감소하였다(decreased). SD400보다 고

Table 8. Changes in mechanical properties after cooling (CIA, CIW) according to the strength and diameter of rebar

Group	Comparison target	Comparison rebar	CIA			CIW		
			As the strength of the rebar increase, recovery					
			Yield strength	Tensile strength	Elastic modulus	Yield strength	Tensile strength	Elastic modulus
1	Strength difference	SD400 D10	Decreased ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	Decreased ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	Increased ($\theta \geq 700^\circ\text{C}$)	Decreased ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	Decreased ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	Increased ($\theta \geq 700^\circ\text{C}$)
SD500 D10								
2	Strength difference	SD500 D22	Increased ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	Increased ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	No difference ($\theta \geq 600^\circ\text{C}$)	No difference ($\theta \geq 700^\circ\text{C}$)	No difference ($\theta \geq 700^\circ\text{C}$)	No difference ($\theta \geq 700^\circ\text{C}$)
SD600 D22								
3	Diameter difference	SD500 D10 SD500 D16 SD500 D22	As the diameter of the rebar increase, recovery					
			Yield strength	Tensile strength	Elastic modulus	Yield strength	Tensile strength	Elastic modulus
			No difference	No difference	No difference	No difference	No difference	Decreased ($\theta \geq 700^\circ\text{C}$)

* θ is the temperature of the rebar

강도 SD500 철근의 그래프가 아래에 위치하는 것을 확인할 수 있다. 반면, SD500의 탄성계수는 700 °C 이상에서 SD400 보다 증가하였다(increased). 수증냉각(CIW)에서는 Fig. 19(b)와 같이 SD400 보다 SD500 철근의 항복 및 인장강도의 회복이 600 °C 이상에서 감소하였다(decreased).

반면, 탄성계수는 700 °C 이상에서 SD400 보다 SD500 철근이 증가하였다(increased). 앞서 Fig. 17의 Fe-C Diagram 과 같이 철근이 고강도가 될수록, 700 °C 이상에서 변형률은 감소하나 강도가 증가하므로 탄성계수가 증가한 것으로 보인다.

Group 2는 SD500 D22와 SD600 D22 철근을 비교하였다. 앞서 Group 1과 다르게, Fig. 20과 같이 고강도가 될수록 냉각효과에 의해 강도가 많이 회복되었다. 따라서, SD500보다 SD600 철근의 그래프가 위에 위치하였다. 가열 후 상온냉각(CIA)했을 때, Fig. 20(a)와 같이 600 °C 이상에서는 항복 및 인장강도의 회복이 증가하였다. 또한 탄성계수는 700 °C 이상의 고온에서도 상온탄성계수(1.0)까지 회복하였으며, 강도에 따른 회복 차

이가 없었다(no difference).

반면 수증냉각(CIW)에서는, Fig. 20(b)와 같이 600 °C를 제외하고 700 °C 이상 온도에서 SD500 D22와 SD600 D22 철근의 냉각 후 강도회복의 큰 차이가 없었다. SD500에 비해 SD600 철근의 변형률이 상당히 감소하였다. 따라서 변형률을 제외하고 SD500과 SD600 철근의 항복 및 인장강도의 차이는 크게 발생하지 않았다.

600 °C 에서는 SD600 철근의 냉각 후 항복 및 인장강도가 증가하였다. Group 1, 2의 결과와 비교할 때, SD400에서 SD500 그리고 SD600 철근까지 고강도가 될수록 냉각 후 변형률이 감소하는 것을 확인하였다.

Group 3은 Fig. 21과 같이 SD500 D10, D16, D22 철근을 비교하였다. 600 °C 이상에서 가열 후 상온냉각(CIA)했을 때, Fig. 21(a)와 같이 SD500 D16 철근의 항복 및 인장강도의 회복이 다른 직경(D10, D22)에 비해 가장 크게 나타났다. 직경이 증가하거나 감소함에 따라 항복 및 인장강도가 감소하거나 증가하는 등의 경향 및 차이는 발생하지 않았다 (no difference). 직경별 탄성계수의 차이는 크게 없었으나, SD500 D10 철근의 경우

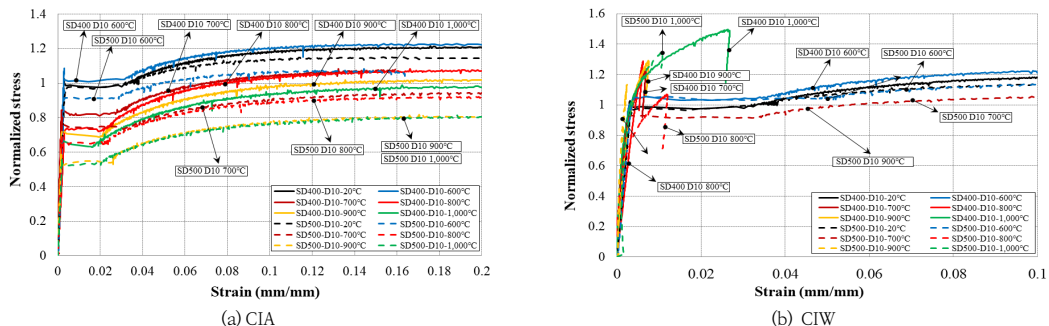


Fig. 19. Comparison of test of Group 1 (over 600 °C)

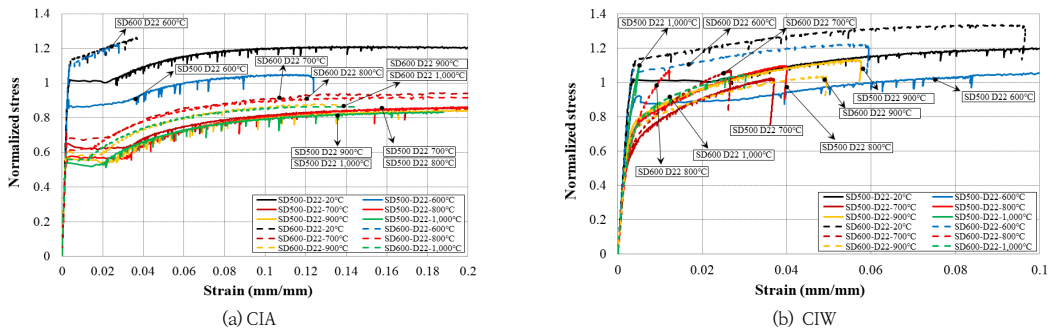


Fig. 20. Comparison of test of Group 2 (over 600 °C)

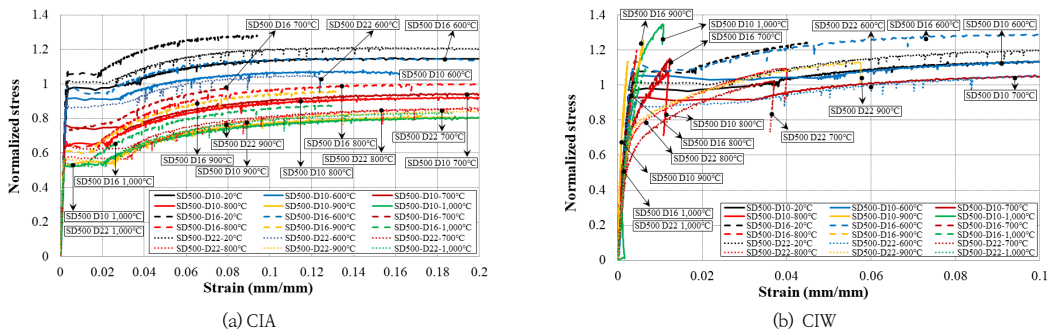


Fig. 21. Comparison of test of Group 3 (over 600 °C)

CIA에 의해 800 °C에서 탄성계수가 20 % 이상 급격히 감소하였다. 그리고 900, 1,000 °C에서 다시 탄성계수가 회복되었다. 이러한 현상은 앞서 3.5절에서 설명한 것과 같이, 기존 연구결과에서도 보고되고 있다 [10, 11].

수증냉각(CIW)했을 때, Fig. 21(b)와 같이 SD500 D10, D22 철근에 비해 SD500 D16의 철근의 항복 및 인장강도의 회복이 제일 크게 나타났다. 이는 CIA의 결과와 유사했다. SD500 D10 철근의 인장강도는 1,000 °C에서 담금질효과로 인해 15% 이상 증가하였다. 700 °C 이상에서 탄성계수는, SD500 D10 철근이 D16, D22 철근에 비해 탄성계수가 높게 도출되었다.

4. 결론

본 연구는 고온에서 가열된 철근의 냉각방법에 따라 직경과 강도별 역학적 특성을 도출하였다. 냉각방법은 상온냉각(Cooling In Air, CIA)방법과 수증냉각(Cooling In Water, CIW)방법을 이용하였다. 철근의 종류는 SD400 D10, SD500 D10, SD500 D16,

SD500 D22, SD600 D22로 총 5종이다. 고온에서 가열 후 냉각된 철근은 응력-변형률 곡선, 항복 및 인장강도와 탄성계수 등을 도출하고, 데이터로 제시하였다. 도출된 데이터는 철근의 직경과 강도에 따라 그룹(Group)으로 분류하고, 냉각방법에 따라 비교하였다. 연구에서 도출된 결과는 다음과 같다.

- (1) SD400 D10과 SD500 D10 철근과 같이, 동일한 직경에서 철근이 고강도가 될수록 냉각효과에 의한 강도회복이 탄성계수를 제외하고 대체로 감소하였다. 탄성계수는 오히려 700 °C 이상에서 SD400보다 SD500 철근이 증가하였는데, 철근의 조직이 마르텐사이트로 변하여 변형률은 감소하나 강도가 증가하므로 탄성계수가 증가한 것으로 보인다.
- (2) 하지만, SD500 D22와 SD600 D22 철근과 같이, 강도와 직경이 상대적으로 큰 두 철근을 비교하였을 때, 상온냉각(CIA)에서는 강도가 증가할수록 항복 및 인장강도의 회복이 증가하였다. 그러나 수증냉각(CIW)에서는 700 °C 이상에서 강도에 따른

항복 및 인장강도, 탄성계수 회복에는 차이가 없었다. 또한 고강도가 될수록 냉각 후 변형률이 급격히 감소하는 것을 확인하였다.

- (3) SD500 D10, D16, D22 철근과 같이, 동일한 강도에서 직경이 작아지거나 커질수록 냉각효과에 의한 강도회복의 차이는 발생하지 않았다. 다만, SD500 D10과 D22에 비해 SD500 D16 철근의 경우, CIA 및 CIW 냉각효과에 따라 강도회복이 제일 크게 나타났다.
- (4) 본 연구를 통해, Group 1, 2와 같이 SD400에서 SD500, SD600 으로 철근이 고강도가 될수록 냉각 후 변형률이 급격히 감소함을 확인하였다. 또한 CIA에 의한 냉각방식보다 CIW에 의한 냉각방식이 조직의 변화로 인해 변형률이 상당히 감소하였다. Group 3과 같이, 동일한 강도에서 직경에 대한 차이에 따른 차이는 보이지 않았다. 그러나, SD500 D10, D22 보다 D16의 강도가 크게 회복하였으며, 직경 차이에 따른 강도 회복에 대한 파악은 추후 연구가 더 필요할 것으로 보인다.

References

- [1] V. Kumar, U. K. Sharma, B. Singh, P. Bhargava, "Effect of temperature on mechanical properties of predamaged steel reinforcing bars", *Construction and Building Materials*, Vol.46, pp.19-27, 2013.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.03.051>
- [2] R. Felicetti, P. G. Gambarova, A. Meda, "Residual behavior of steel rebars and RC sections after a fire", *Construction and Building Materials*, Vol.23, No.12, pp.3546-3555, 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2009.06.050>
- [3] H. Mostafaei, T. Kabeyasawa, "Performance of a six-story reinforced concrete structures in post-earthquake fire", *10th Canadian Conference on Earthquake Engineering*, Institute for Research in Construction Toronto, Ontario, July 2010.
- [4] Q. Ma, R. Guo, Z. Zhao, Z. Lin, K. He, "Mechanical properties of concrete at high temperature—A review", *Construction and Building Materials*, Vol.93, No.4, pp.371-383, Sep. 2015.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.05.13>
- [5] A. Nassif, "Postfire full stress-strain response of fire-damaged concrete", *Fire and Materials: An International Journal*, Vol.30, No.5, pp.323-332, Sep. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1002/fam.911>
- [6] Y. F. Chang, Y. H. Chen, M. S. Sheu, G. C. Yao, "Residual stress-strain relationship for concrete after exposure to high temperatures", *Cement and Concrete Research*, Vol.36, No.10, pp.1999-2005, Oct. 2006.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2006.05.029>
- [7] V. Kodur, "Properties of concrete at elevated temperatures", *International Scholarly Research Notices*, Vol.2014, pp.1-15, March 2014.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2014/468510>
- [8] J. Y. Hwang, H. G. Kwak, "A numerical model of reinforced concrete members exposed to fire and after-cooling analysis", *Journal of the computational structural engineering institute of Korea*, Vol.28, No.1, pp.101-113, Feb. 2015
DOI: <https://doi.org/10.7734/COSEIK.2015.28.1.101>
- [9] A. Y. Elghazouli, K. A. Cashell, B. A. Izzuddin, "Experimental evaluation of the mechanical properties of steel reinforcement at elevated temperature", *Fire Safety Journal*, Vol.44, No.6, pp.909-919, Aug. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.firesaf.2009.05.004>
- [10] J. Lee, *Elevated-temperature properties of ASTM A992 steel for structural-fire engineering analysis*, PhD thesis, University of Texas at Austin, Austin, USA, 2012.
- [11] X. Q. Wang, Z. Tao, M. K. Hassan, "Post-fire behaviour of high-strength quenched and tempered steel under various heating conditions", *Journal of Constructional Steel Research*, Vol.164, pp.1-17, Jan. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcsr.2019.10578>
- [12] C. Ren, L. Dai, Y. Huang, W. He, "Experimental investigation of post-fire mechanical properties of Q235 cold-formed steel", *Thin-Walled Structures*, Vol. 150, pp.1-16, May 2020.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2020.106651>
- [13] J. Ågren, "A thermodynamic analysis of the Fe-C and Fe-N phase diagrams", *Metallurgical Transactions A*, Vol.10, No.12, pp.1847-1852, Dec. 1979.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02811728>
- [14] J. Chipman, "Thermodynamics and phase diagram of the Fe-C system", *Metallurgical and Materials Transactions B*, Vol.3, No.1, pp.55-64, Jan. 1972.
DOI: <https://doi.org/10.1007/BF02680585>
- [15] O. Ostrovski, D. K. Belashchenko, "Thermophysical properties and structure of liquid Fe-C alloys", *High Temperatures-High Pressures*, Vol.42, No.2, pp.137-149, Jan. 2013.

이 수 현(Su-Hyeon Lee)

[정회원]



- 2016년 2월 : 경기대학교 플랜트·건축공학과(학사)
- 2018년 2월 : 경기대학교 일반대학원 건축공학과(석사)
- 2018년 3월 ~ 현재 : 경기대학교 일반대학원 건축공학과(박사수료)

〈관심분야〉

건축, 건축구조

강 철 규(Cheol-kyu Kang)

[정회원]



- 2003년 8월 : 경기대학교 건축공학과 졸업(박사)
- 2006년 9월 ~ 2010년 8월 : 경기대학교 도시·교통공학과(겸임교수)
- 2012년 3월 ~ 2019년 8월 : 경기대학교 건축공학과(조교수)
- 2019년 9월 ~ 현재 : 경기대학교 건축공학과(부교수)

〈관심분야〉

건축, 건축구조