



인장강도 490급(FR355B) 내화강의 고온크리프 특성 및 거동

김선희¹ · 안재권² · 여인환³ · 최성모^{4*}

¹연구교수, 서울시립대학교, 건축공학과, ²수석연구원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소,

³연구위원, 한국건설기술연구원 화재안전연구소, ⁴교수, 서울시립대학교, 건축학부

High Temperature Creep Characteristics and Behavior of Fire Resistance Steel(FR355B)

Kim, Sun Hee¹, Ahn, Jae Kwon², Yeo, In Hwan³, Choi, Sung Mo^{4*}

¹Research Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, 02504, Korea

²Senior Researcher, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18544, Korea

³Research Fellow, Department of Fire Safety Research, Korea Institute of Civil Engineering and Building Technology, Hwaseong-si, Gyeonggi-do, 18544, Korea

⁴Professor, Department of Architectural Engineering, University of Seoul, 02504, Korea

Abstract - The creep limit temperature of the SN steels observed from the high temperature tests was below 538°C. The FR steels showed stable creep behavior until 600°C and maintained lower level of deformation for a longer period of time when compared with what was observed from previous studies. It is deduced that the FR steels are very effective in resisting deformation at high temperatures. As stress ratio increased, strain increased almost tenfold. Since strain increased very rapidly approximately from 1%, it is required not only to compare difference in final strain but also to quantitatively analyze creep behavior when strain is 0.5~1% and build up critical deformation data.

Keywords - Creep, Fire Resistance Steel, Stress Ratio, High Temperature State, SN Steel

1. 서 론

1.1 연구의 필요성 및 목적

대공간화 및 다 기능화에 따라 화재 시 피해 규모는 점차 증가되고 있다. 이에 따라 화재 안전기술 중요성에 대한 인식은 높아지고 있다. 화재로 인해 발생하는 피해수준은 막대하다. 국가 손실은 물론 파급여파가 큰 주요 시설물에서는 더욱 더 화재에 대한 유지/관리 대책마련이 명확해질 필요가 있다. 이러한 노력의 일환으로 최근 몇 년 사이에 실험을 통해 검증하기 어려운 부분을 해소하고자

시물레이션 기법이 다양해지면서 성능적 내화설계를 유도하는 연구가 소개되었다. 경계조건이 자유로워졌고 다양한 변수에 의해 예측이 가능하지만 그럼에도 실제 건물에 적용하기에 어려움이 있어 한계점을 들어내고 있다. 그 원인은 시물레이션을 하기 위한 요구조건 데이터들을 대부분 이상적으로 가정하거나, 일반적인 값(default)으로 설정하는데 문제가 있다. 그렇다 보니 오히려 과대 설계를 유도하거나, 현장에 적합하지 않은 결과물을 제공하게 된다. 따라서 실제 구조물의 변화를 인식하고 데이터를 누적할 수 있는 합리적인 근거자료 제시가 시급하다.

내화설계에 있어 가장 기준이 되는 것은 강재의 임계점이라 할 수 있다. 강재가 갖는 강도는 온도 상승에 따라 반비례 관계에 있으며 고온 시 크리프는 550~600°C 사이에서 구조물의 변형을 초래하는 거동을 보인다. 또한 강재의 탄소계수의 경우 600°C에서 상온대비 60~65% 수준을 보이고, 600°C 이상에서는 탄소계수가 급격하게 떨어지는 현상을 나타냈다. 이러한 선행연구^{[1][2]}를 근거로 각 국가기관별 또는 협회에서는 Table 1과 같이 화재 시 강재가 갖

Note.-Discussion open until December 31, 2019. This manuscript for this paper was submitted for review and possible publication on February 11, 2019; revised April 02, 2019; approved on May 03, 2019.

Copyright © 2019 by Korean Society of Steel Construction

*Corresponding author.

Tel. +82-2-6490-2759 Fax. +82-2-6490-3749

E-mail. smc@uos.ac.kr

는 허용 온도를 설정하여 내화성능 평가에 활용기준으로 삼고 있다. 한편 이런 기준은 성능설계를 유도함에 있어 강종에 따른 역학적 성질을 고려하지 않고 일률적으로 부재 표면 허용(538℃) 및 한계(649℃)온도로 내화성을 평가하고 있는바, 내화성능설계에 한계를 갖고 있다.

내화강(Fire Resistance steel, FR)의 경우 고온노출 상태에서도 강도 유지가 가능하고, 강재 허용 온도가 일반강재에 비하여 상대적으로 높으므로 정량적인 내화성을 분석할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 내화강을 기준으로 응력비와 온도 변수에 따른 고온 크리프 실험을 통해 화재 시 역학적 특성과 거동을 분석하고자 한다.

Table 1. Allowable and Limit temperature^{[6],[7]}

KS, ASTM, NEFA	DIN
Allowable : 538℃(1000°F) Limit : 649℃(1200°F)	Limit : 500℃

1.2 국내의 연구동향 분석

1.2.1 고온상태의 강재 특성

일반적으로 강재는 고온에 노출되면 기계적 특성이 변화하는 단점을 갖고 있다. 강재 인장강도는 100~300℃ 사이에서 청열취성(Blue Shortness) 효과에 의해서 일시적으로 소폭 증가하는 특이한 현상을 보이나 그 이상의 온도에서는 강도가 감소하며 약 600℃ 정도에서 인장강도와 항복강도는 상온에서의 강도에 절반정도로 감소된다. 강성의 변화는 강재의 변형과 직접적인 관계가 있으므로 매우 중요하다. 약 600℃에서 강성은 상온에서의 60% 정도로 감소된다.

강재의 재료성능 변화는 강종에 따라 차이가 있겠지만, 일반적으로 약 720℃를 초과 할 경우 항복점이 불명확해지는 것으로 조사됐다. 선행연구에 의하면 600℃이하의 고온에 노출됐을 경우 원래 강도로 회복되므로 재료상 커다란 문제가 없다고 평가되었다. 즉 강재의 재료강도에 관해 600℃가 재사용의 기준온도가 되고 있다. 강재는 고온에 노출된 뒤 냉각된 후에는 어느 정도 강도를 회복한다.

FR강의 제조는 일반강의 성분에 합금성분인 Mo, Nb, B등의 첨가 및 C, Mn 양을 감소하여 결정입도 조정과 소입성 향상 등의 조직제어를 통하여 고온내력을 향상하며 상온내력의 최대증가와 용접성을 개선하도록 제조된다. FR강의 화학성분을 Table 1, 2에 정리하였다.

Table 2. Chemical Composition of Steel(FR and SN Steel)

Steel grade	Thk. (mm)	Chemical composition (unit:%.max)						
		C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo
FR355B (FR490B)	t < 50mm	0.18	0.55	1.60	0.03	0.015	0.70	0.30~0.90
SN355B (SN490B)	6 < t < 100	0.18	0.55	1.60	0.03	0.015	-	-

고온에서의 내화강의 특징은 일반강과 대비했을 때 Fig. 1.과 같이 약 30%이상 고온에 저항하는 것으로 나타났다. 실험 보고서에 의하면 약 600℃까지 상온 내력의 2/3정도 보증된다고 조사되고 있다.

Reduction factor for yield strength

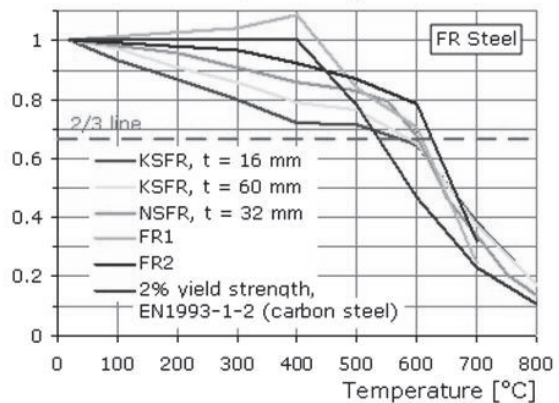


Fig. 1. Yield strength ratio after fire

1.2.2 크리프 거동

크리프(Creep)라 하면 온도가 높은 경우 일정 하중하에서 시간과 더불어 변형률이 증가하는 현상을 말한다. 일반적으로 전형적인 고온 크리프 곡선은 크게 3부분으로 나누어 해석된다. 크리프 곡선은 Fig. 2.와 같이 일반적으로 3구간으로 나뉜다. 1차 크리프

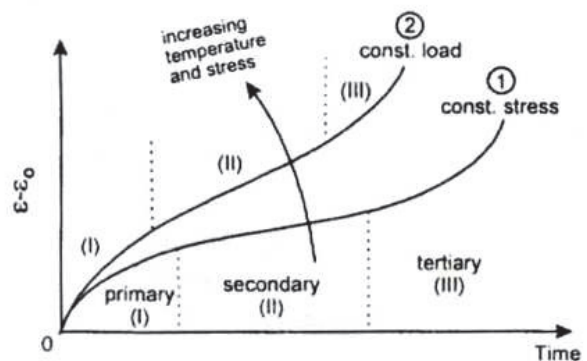


Fig. 2. Creep-time Curve on high temperature

구간(Primary)에서는 변형률 속도가 감소하고, 2차 크리프 구간(Secondary)에서는 변형률 속도가 상대적으로 일정하다. 마지막으로 3차 크리프 구간(Tertiary)에서는 속도가 증가하여 뚜렷하게 구간 변화를 나타낸다. 즉 일정응력 방식의 크리프 시험에서는 크리프 곡선 거동은 외력의 크기와 시험온도 그리고 재료의 특성에 따라 다르게 나타난다.

Anderberg(1986), Srpic(1995), Poh and Benetts(1995)의 연구에서는 크리프의 영향과 부재의 Hardening 변형성질 고온거동에 중요한 영향을 줄 수 있다는 것을 증명함으로써 고온상태의 크리프 거동에 대한 근본적인 내용이 제시되고 있다. 또한 永田외5인(2006)연구에서는 강재는 350~450℃에서 크리프 현상이 발생되며 응력이 크고 고온일수록 변형률이 증가하고 파단에 이르기까지 시간이 짧다고 언급되었다. 일반강에서는 약간의 하중(예를 들어 10kgf/mm²)에서도 고온 크리프 변형이 짧은 시간에 진행하지만 FR강에서는 15kgf/mm²에서도 변형의 진행은 적다. 이러한 성질로부터 FR강을 사용하면 화재시의 건축물의 변형을 최소화할 수 있는 장점이 있다.

Cowan and Khandelwal(2014)^[14] ASTM(American Society for Testing and Materials) A992^[10] 구조용 강재의 고온 시 크리프 거동 연구는 고온에서 구조물에 크리프가 자주 발견됐지만 실험에서의 크리프 수치가 부족하므로 크리프 현상에 있는 물리적 메커니즘을 토론하고 가장 적합한 한계를 제공함으로써, ASTM A992 steel이 고온과 하중에 대해 어떤 역할을 하는지 보여주는 것을 목적으로 하고 있다. 온도가 올라갈수록 변형률이 커지는데 특히, 온도가 700도 이상 응력비 0.9F_y 이상일 때 가파르게 커진다. 특히 700도와 800도에서 변형이 빠르게 일어나므로 화재 구조안전설계에 이 점이 고려돼야한다고 언급되어있다.

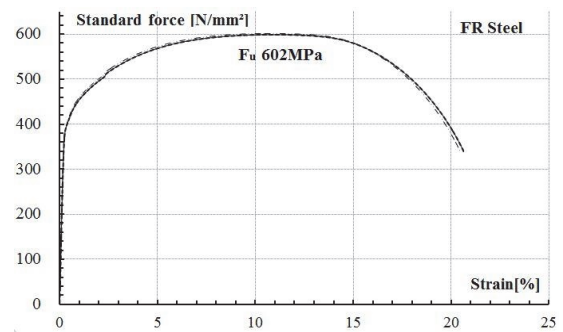
Azhari et al.(2017)^[11]의 초고강도 강재(UHSS1200, HSS800 그리고 연강(MS350)의 화재 후 냉각단계에서 크리프 변형이 강도에 미치는 영향연구에 의하면 모든 실험체는 온도가 올라갈수록 변형률은 올라가고 강도는 낮아졌다. HSS와 비교하여 크리프는 UHSS의 미세구조를 변형시켜 연화를 가속화시켰다.

Maraveas and Fasoulakis(2014)^[8]연구자는 기존 설계 코드에서는 화재 후 냉각된 강재들의 성능에 대해 믿을만한 권장 사항을 제공하지 못하고 있으므로 화재 후 강재의 특성 평가를 수행하였다. 그 결과, 600℃ 이상의 화재에 노출된 후 냉각된 강재는 크게 영향을 받지 않았다. 열간 압연, 냉간 가공된 강재는 40%까지 강도가 감소한다. 1000도 이상의 온도는 미세 구조 조정에 영향을 준다는 결론을 내렸다.

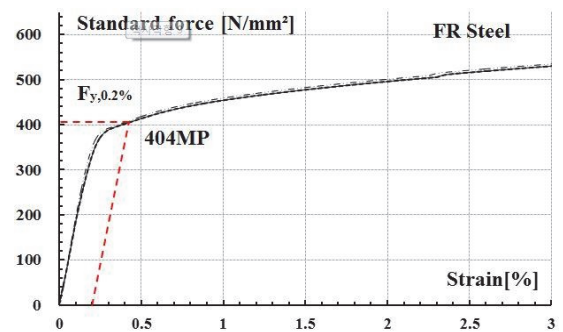
2. 고온 크리프 실험

2.1 개요

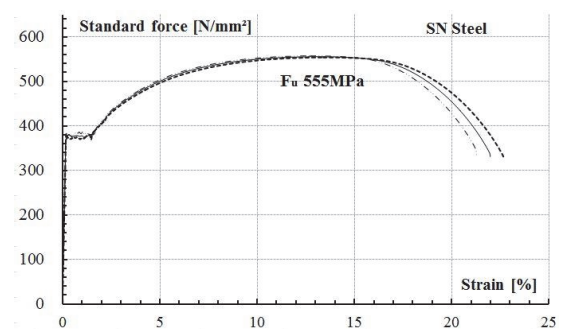
강구조 건축물의 내화성능 확보를 위한 연구로, 일반강재(SN)와 내화강(FR강)을 대상으로 하고 있다. 실험에 사용된 내화강은 FR355B(FR490B)이며, 비교되는 일반강은 SN355B(SN490B)이다^[3-5]. 두 강재 모두 13mm의 일정 한정된 두께를 갖고 있으며, 설계 공칭항복강도는 355MPa이다. Fig. 3.은 FR, SN 강의 재료시험에 의해 얻어진 상온 시 응력-변형률 선도이다. FR강의 경우 SN강에 비해 항복강이 잘 나타나지 않는 것이 특징이다. 두 강종 모두



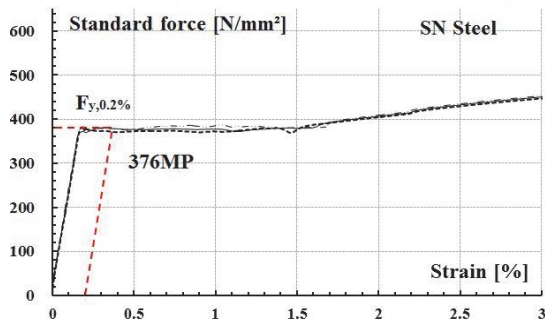
(a) σ - ε Curve (FR steel)



(b) Decision on Yield Strength (FR)



(c) σ - ε Curve (SN steel)



(d) Decision on Yield Strength (SN)

Fig. 3. Stress-Strain Relation of Room Temperature

공칭항복강도는 355MPa이며, 그 결과 모두 상회한 결과를 보여주고 있다. 또한 항복비 역시 약 67~68% 수준으로 유사하게 나타났다. 항복강도 선정 방법은 0.2% off-set 법을 사용하였으며, 상온 시인장시험을 통해 얻은 항복강도와 인장강도 결과를 Table 3과 같이 정리하였다. 결과적으로 FR강은 SN 강에 비해 약 1.07배 높게 측정되었다.

Table 3. Result of Material test

Case		FR355B	SN355B
Fy (Yield strength)		404	376
Standard	above 355MPa		
Fu (Tensile strength)		602	555
Standard	410~610MPa		
Yield Ratio (%)		67	68
Standard	below 80		
elongation Ratio (%)		18	17
Standard	17		

강종에 따른 고온상태의 크리프거동을 응력변화에 따라 비교 분석하고, 고온 크리프 곡선으로부터 크리프 평가인자 즉, 강종에 따른 거동양상, 응력비 변화에 따른 크리프시간, 온도변화에 따른 거동 비교 분석하여 정량적인 평가를 유도하고자 한다.

2.2 실험방법 및 계획

실험 장소는 창원소재 재료연구소(KIMS) 내열재료연구팀에 의뢰되어 수행되었으며, 실험체는 Table 4와 같이 총 10개로 크게 강종(FR, SN)에 따라 나뉘고, 노출 온도는 3가지 타입(350, 538, 600℃)로 설정하였다. 1개의 시험편당 최대 600시간 동안 크리프 실험을 수행되며, 파단 즉시 실험은 종료가 된다. 한편 600시간 동안

크리프 파단이 발생되지 않을 경우 그 상태에서 실험을 종료 하였다. 상당히 많은 시간과 비용이 드는 실험이며, 또한 신뢰성이 높은 연구소 내 실험 장비를 사용하여 실험 조건별 1개씩 결과를 도출하였다. 단, 실험장비 결함 및 시편 가공에 관련 문제로 인해 실험결과값이 매우 상이하게 나오는 경우를 대비하여 각 동등한 시편 하나를 추가로 제작되었다.

Table 4. Specimens plan

No.	Specimens	Temperature (°C)	stress ratio	Applied load (MPa)
1	350 FR 60	350	0.60	214.5
2	350 SN 60	350	0.60	214.5
3	538 FR 60	538	0.60	214.5
4	538 SN 60	538	0.60	214.5
5	538 FR 40	538	0.40	143.0
6	538 FR 27	538	0.27	97.5
7	600 FR 60	600	0.60	214.5
8	600 SN 60	600	0.60	214.5
9	600 FR 40	600	0.40	143.0
10	600 FR 27	600	0.27	97.5

응력비의 경우 강구조부재의 허용응력설계법 개념에 근거하여 안전율(1.5)을 고려했다. 응력비 산정을 위해 사용된 상온시 항복강도는 한국산업규격에 의거하여 355MPa를 적용하였다. 실험방법은 시험은 시험편의 상부에 $\Phi 2.4\text{mm}$ 의 Si3N4 세라믹 강구(鋼球)를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로서 시간에 따른 시험편의 크리프 변형 거동을 조사하였다. 하중조건은 214.5MPa, 143.0MPa, 97.5MPa로 제어하였다. 시험도중 시험편의 중앙변위 (central displacement : δ)는 LVDT 시스템을 이용하여 최소 1mm 까지 정밀 계측하였다. 초기 변위량은 하중을 부하한 후 1분이 경과되었을 때의 변위값으로 정의하였다.



(a)

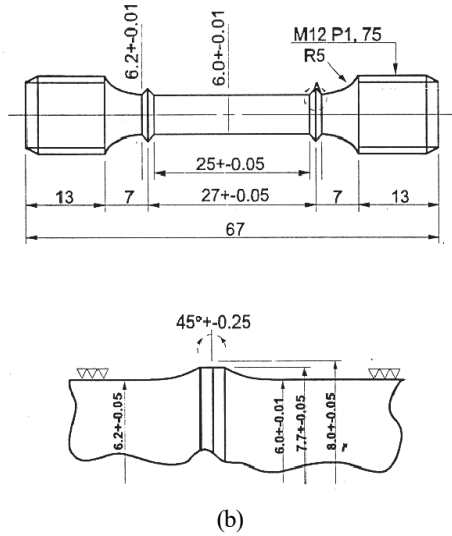


Fig. 4. Creep equipment and detail

2.3 실험결과

각 시편에 대한 최종 중국상태를 Fig. 5.에 정리하였다. 총 10개의 시편 중에 6개는 파단 없이 네킹 형상이 발생되었다. 마찬가지로 그 중 83%에 해당하는 5개의 시편은 FR강이다. 최종 중국상태와 크리프 발생시점, 발생된 변형률을 정리하여 Table 5에 정리하였다.



(a) 350FR60 (b) 350SN60 (c) 538FR60 (d) 538SN60



(e) 538FR40 (f) 538FR27 (g) 600FR60 (h) 600SN60



(i) 600FR40 (j) 600FR27

Fig. 5. Failure behavior each specimen

Table 5. Experiment Result and limit state

No.	Specimens	Rupture time (hr)	Strain rate (%)	limit state
1	350 FR 60	600	<0.1	Necking
2	350 SN 60	600	<0.1	Necking
3	538 FR 60	600	0.37	Necking
4	538 SN 60	1.7	27.2	Fracture
5	538 FR 40	600	<0.1	Necking
6	538 FR 27	600	<0.1	Necking
7	600 FR 60	56.6	5	Necking
8	600 SN 60	0.1	37.1	Fracture
9	600 FR 40	493	4.5	Fracture
10	600 FR 27	600	0.5	Fracture

최대 600시간 동안 변형률 0.5% 미만의 시편은 총 6개이며, 그 중 83%에 해당하는 5개 시편이 모두 FR강이다. 600℃에서 214.5MPa가력된 시편은 내화성능 발휘에서 가장 안 좋은 변수임에도 56.6시간이라는 비교적 안정적인 크리프 거동이 나타났다. 한편, SN강재의 경우 총 3개의 시편이 제작되었고 가력하중이 모두 214.5MPa이다. 즉 응력비가 0.6인 상태로 동일하고 온도변화에 따른 크리프 거동을 비교하고자 계획되었다. 그 결과 538℃ 이상의 경계조건에서는 2시간 도달 전에 파괴거동을 나타내어 고온 상태의 한계성을 보여주는 결과였다.

3. 분석 및 고찰

3.1 강종에 따른 크리프 거동 분석

강종에 따른 크리프 거동차이는 Fig. 6.과 같이 확연하게 발생되었다. 동일한 응력비(0.6, 214.5MPa)에서 350℃상태에서의 크리프는 모두 0.1%미만의 변형으로 안정적인 거동을 나타낸 반면, 538℃부터 양상이 매우 극적으로 나타났다. SN강의 경우 1.7시간

내에 과도변형으로 인해 종국상태에 이르렀고, 600℃ 결과도 마찬가지로 단시간에 변형이 발생되었다.

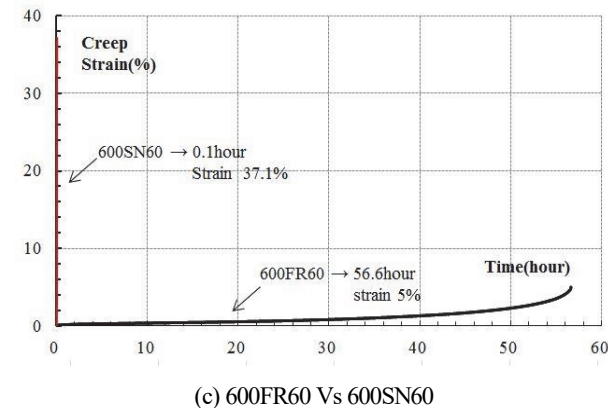
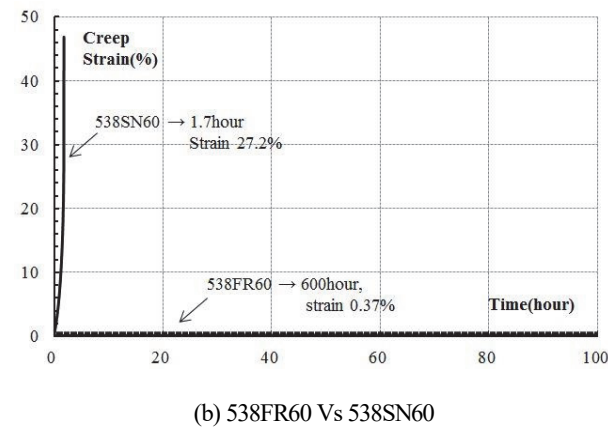
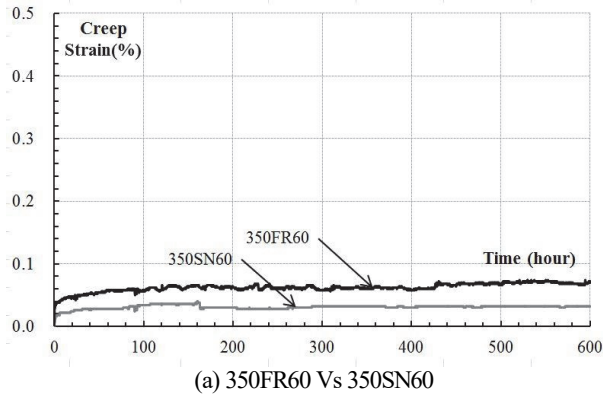


Fig. 6. Behavior Comparison according to steel type

이와 같은 실험 결과를 통해 SN강의 크리프 한계온도는 538℃ 미만으로 추정된다. 내화강의 경우 600℃까지 안정적인 크리프 거동양상을 나타내고 있는데, 그 중 600℃ 상태에서의 최종 변형시점 5%에 도달 크리프 시간은 약 56시간으로 나타났다. 응력비 0.6의 경우 600℃ 상태에서 약 50시간에서 과도한 크리프 변형이 발생되는 것으로 보아, FR강의 고온 시 변형은 매우 우수한 것으로 판단된다.

3.2 응력비에 따른 거동분석

내화강에서 동일한 온도조건에서 응력비 조건만 상이할 경우 크리프 거동 변화를 비교하고자 한다. 538℃의 경우 응력비가 0.27(97.5MPa)과 0.40(143MPa)의 경우 크게 다르지 않았다. 두 시편결과 모두 0.1%미만의 변형을 갖고 있었다. 그럼에도 응력비가 0.6(214MPa)인 경우 변형이 0.37%로 증가되었지만, 종국상태까지 유도되는 변형률이라고 보기에 미소하므로 모든 시편은 안정적인 거동을 유지한 것으로 보여진다. 600℃ 상태에서 FR강 크리프 거동양상은 상이한 결과를 보여주고 있다. 응력비 0.27의 경우 0.5% 미만의 변형률상태에서 600시간까지 유지되었지만 응력비 0.4의 경우 493시간에서 4.5%변형으로 종국상태에 도달되었다. 응력비 0.6의 경우 약 56시간 내에서 최종 변형에 도달되었는데 그 차이를 보면 응력비가 커질수록 크리프 거동 시간은 83%, 9%까지 감소되는 것을 알 수 있다. 변형률의 경우 응력비가 커질수록 가파르게 진행되며 약 10배 가깝게 증가되었다. Fig. 7.(c), (d)는 FR강 실험체 중 600℃ 일정 온도에서 응력비(0.6, 0.4, 0.27) 변화를 갖는 3개의 실험결과를 중점적으로 분석하고자 나타냈다. 크리프 저항성과 파단변형률 모두 가장 작은 값을 나타내었다. 또한 일정 온도에서 초기 하중이 증가함에 따라 초기 변형률(ϵ_0)의 값이 증가하는 것을 볼 수 있다. 이는 결국 크리프 변형률 자체가 응력과 비례하고, 온도와의 반비례 관계에 있는 수식이기 때문에 발생하는 현상으로 볼 수 있다. 변형률은 약 1% 이상부터 매우 급격하게 진행되므로 종국상태의 변형률의 차이보다는 변형률 진행 0.5~1% 시점의 크리프 거동분석이 보다 정량적으로 분석되어 임계 변형시점에 대한 자료가 구축될 필요가 있다.

선행연구동향 및 크리프 이론의 수명예측에서는 고온 구조물에 대한 실제 수명과 동일한 시간에 대한 크리프 시험은 불가능하므로 단시간의 크리프 특성을 이용한 수명 예측이 현재 크리프 연구의 대다수를 이루고 있다. 비교적 단시간의 시험결과를 이용하여 장시간의 수명을 예측하다 보니 자연히 사용 조건보다도 더 나쁜 가속화된 조건에서 시험이 실시되기 때문에 금속 조직학적 측면에서 고려하면 시험 중 발생하는 조직상의 변화는 설계 조건에서의 사용 중의 조직과는 차이가 있을 수 있다. 그러므로 비록 단시간의 시험결과를 사용할지라도 장시간의 수명을 매우 근접된 정확도의 범위 내에서 예측할 필요가 절실하고 이것이 잘되면 설계가 완벽하게 되고, 품질관리 및 수명평가가 쉽게 될 것이다. 이것을 위하여 시간, 응력 및 온도의 세변수가 하나의 식으로 표현되어서 복합적인 효과를 줄 수 있는 하나의 파라미터를 찾을 수 있다면 단시간의 시험 결과를 이용하여 장시간의 수명예측이 매우 정확하고 유용하게 될 수 있을 것이다.

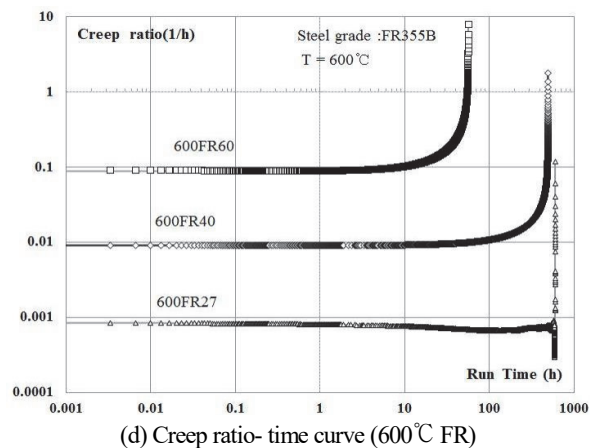
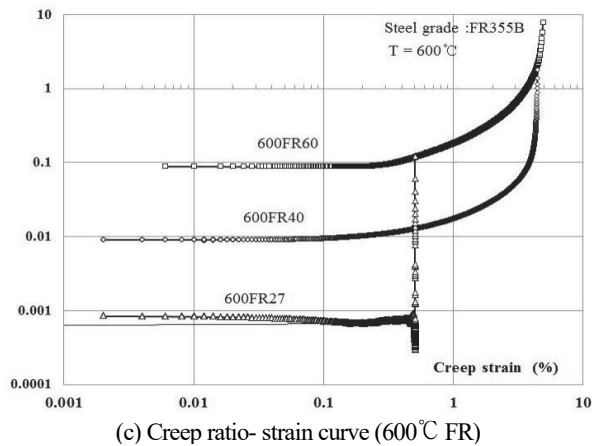
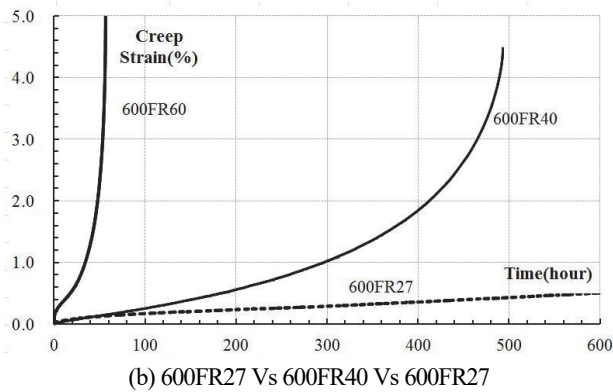
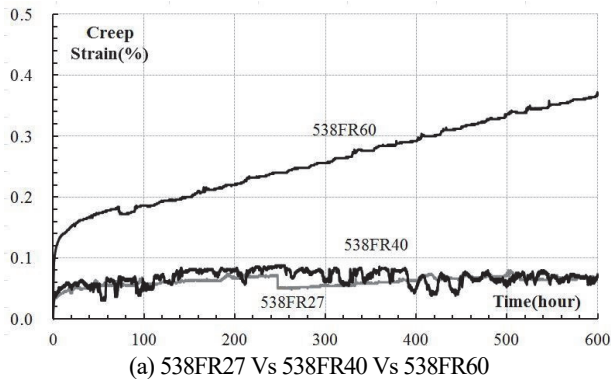


Fig. 7. Behavior Comparison according to stress ratio

3.3 목표 고온변화에 따른 변형관계

동일한 응력비(0.6, 214MPa) 조건에서 온도조건만 상이할 경우 크리프 거동 변화를 비교하고자 한다.

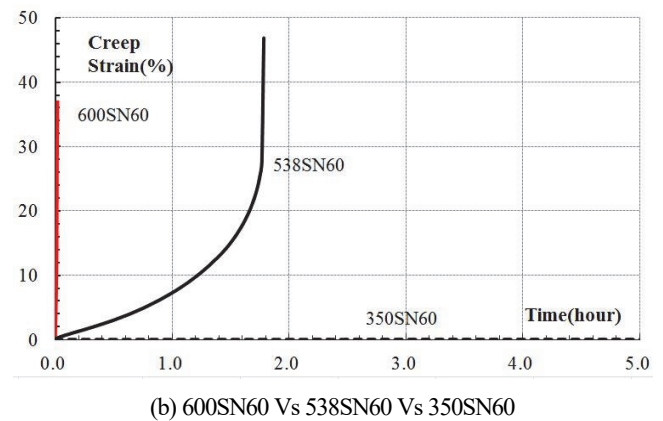
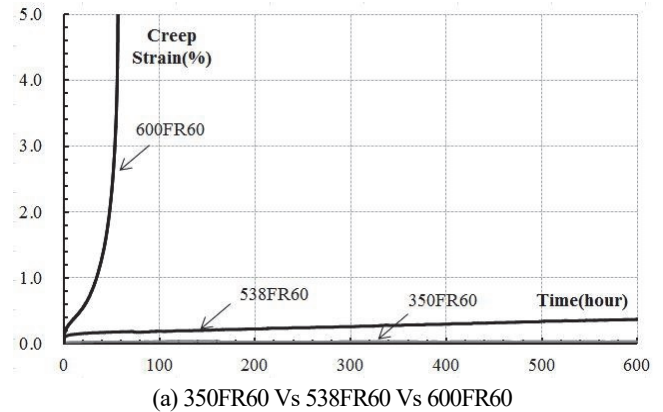


Fig. 8. Behavior Comparison according to Temperature

FR강의 경우 600°C를 제외한 모두 안정적으로 거동되었다. 앞서 온도 조건은 동일하고 응력비가 변화되었을 때 경우와 비교했을 경우 FR강의 크리프 거동은 응력비보다 노출 온도에 더 민감하게 반응하는 것을 알 수 있다. 다시 말해, FR강의 표면 온도가 600°C 이상 노출되지 않는 경우 고온변형에 대해서 비교적 매우 안정적임을 다시 한 번 눈여겨 볼 수 있는 결과이다. 한편 SN강재의 경우 538°C 이상부터는 단시간에 과도한 크리프 변형이 발생되므로 부재 설계에 있어 주의해야 할 것으로 판단된다.

4. 결론

강종에 따른 고온상태의 크리프거동을 응력변화에 따라 비교 분석하고, 고온 크리프 곡선으로부터 크리프 평가인자 즉, 강종에 따른 거동양상, 응력비 변화에 따른 크리프시간, 온도변화에 따른 거동 비교 분석하여 아래와 같은 결론이 도출되었다.

- 1) 고온 크리프 실험을 통해 SN강의 크리프 한계온도는 538℃ 미만으로 추정되며, FR강의 경우 600℃까지 안정적인 크리프 거동양상을 나타내고 있으며 선행연구 자료와 비교되어도 장시간 낮은 변형상태를 유지하고 있는바 고온변형에 매우 효과적인 것으로 비교되었다.
- 2) 변형률의 경우 응력비가 커질수록 가파르게 진행되며 약 10배 가깝게 증가되었다. 변형률은 약 1% 이상부터 매우 급격하게 진행되므로 중국상태의 변형률의 차이보다는 변형률 진행 0.5~1% 시점의 크리프 거동분석이 보다 정량적으로 분석되어 임계 변형시점에 대한 자료가 구축될 필요가 있다.
- 3) FR강의 경우 크리프 거동에 있어 온도와 응력비의 변화를 비교해 볼 때 응력비보다 노출 온도에 더 민감하게 반응하는 것으로 나타났다. 즉 FR강의 표면 온도가 600℃ 이상 노출되지 않는 경우 고온변형에 대해서 비교적 매우 안정적임을 확인할 수 있었다.

감사의 글

이 연구는 현대제철(주)와 현대엔지니어링(주)의 지원(과제명: 차세대 건축 구조용 복합성능강재의 내화성능 평가기술개발)을 받아 수행되었으며, 한국연구재단 이공계 신진연구지원사업(NRF-2018R1C1B3009109)함께 감사드립니다.

참고문헌(References)

- [1] 권인규(2007) 제조방식에 따른 건축용 내화강재의 고온 시 거 특성 평가, 한국강구조학회논문집, 한국강구조학회, 제 19권, 제2호, pp.181-190.
Kwon, I.K. (2007) Evaluation on the Mechanical Properties of Fire Resistant Steels at High Temperature Conditions with Manufacturing Processes, *Journal of Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.19, No.2, pp. 181-190 (in Korean).
- [2] 김종성(2000) 건축구조용 내화강재(FR강)의 특징, 한국강구조학회지, 한국강구조학회, 제12권, 제2호, pp.18-25.
Kim, J.S. (2000) Characteristic of Fire Resistance Steel for Building Structure, *Magazine of the Korean Society of Steel Construction*, KSSC, Vol.12, No.2, pp.18-25 (in Korean).
- [3] 국가기술표준원(2007) 금속 재료 인장 시험편(KS B 0801: 2007).
Korean Agency for Technology and Standards (2007) *Test Pieces for Tensile Test for Metallic Materials* (KS B 0801: 2007), Korea (in Korean).
- [4] 국가기술표준원(2001) 금속 재료의 인장 크리프 시험방법(KS B 0814: 2001).
Korean Agency for Technology and Standards (2001) *Method of Tensile Creep for Metallic Materials* (KS B 0814: 2001), Korea (in Korean).
- [5] 국가기술표준원(2002) 금속 재료용 크리프 시험기(KS B 5536: 2002).
Korean Agency for Technology and Standards (2002) *Creep Testing Machines for Tensile Stress of Metal Materials* (KS B 5536: 2002), Korea (in Korean).
- [6] 국가기술표준원(2016) 건축 구조용 내화 강재(KS D 3865: 2016).
Korean Agency for Technology and Standards (2016) *Fire Resistance Steels for Architectural Structures* (KS D 3865: 2016), Korea (in Korean).
- [7] British Standard Institution (2003) *Structural Use of Steelwork in Building, Part 8: Code of Practice for Fire Resistant Design* (BS 5950-8), UK.
- [8] Maraveas, C., and Fasoulakis, Z. (2014) *Post-Fire Mechanical Properties of Structural Steel*, Paper presented at the 8th Greek National Steel Structures Conference, Greece.
- [9] Park, D.-B. Hong, S.-M., Lee, K.-H., Huh, M.-Y., Suh, J.-Y., Lee, S.-C., and Jung, W.-S. (2014) High-Temperature Creep Behavior and Micro Structural Evolution of an 18Cr9Ni3CuNbVN Austenitic Stainless Steel, *Materials Characterization*, Elsevier, Vol.93, pp.52-61.
- [10] American Society for Testing and Materials (2009) *Standard Test Methods for Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials* (ASTM E21), USA.
- [11] Azhari, F., Heidarpour, A., Zhao, X.-L., and Hutchinson, C.R. (2017) Effect of Creep Strain on Mechanical Behaviour of Ultra-High Strength (Grade 1200) Steel Subject to Cooling Phase of a Fire, *Construction and Building Materials*, Elsevier, Vol.136, pp.18-30.
- [12] Outinen, J., and Mäkeläinen, P. (2004) Mechanical Properties of Structural Steel at Elevated Temperatures and After Cooling Down, *Fire and Materials*, Wiley, Vol.28, pp.237-251.
- [13] Guguloth, K., and Roy, N. (2017) Creep Deformation Behavior of 9Cr1MoVNb (ASME Grade 91) Steel, *Materials Science & Engineering A*, Elsevier, Vol.680, pp.388-404.

- [14] Cowan, M., and Khandelwal, K. (2014) Modeling of High Temperature Creep in ASTM A992 Structural Steels, *Engineering Structures*, Elsevier, Vol.80, pp.426-434.
- [15] Harmathy, T.Z. (1967) A Comprehensive Creep Model, *Journal of Basic Engineering*, American Society of Mechanical Engineers, Vol.89, No.3, pp.496-502.

요 약 : 내화강의 경우 고온노출 상태에서도 강도 유지가 가능하고, 강재 허용 온도가 일반강재에 비하여 상대적으로 높은 강재이다. 강구조 건축물의 내화성능 확보하기 위해 강재의 구조적 거동을 정확하게 평가하기 위해 온도비와 응력비에 따른 크리프거동과 변형률의 특성치가 요구된다. 따라서 본 연구에서는 SN과 FR강의 기계적 특성 도출을 위해 고온인장시험을 수행하였으며, 그 결과 변형률은 온도와 응력비를 비교했을 때 응력비가 커질수록 가파르게 변형하지만 크리프 거동에 있어서는 응력비보다 노출 온도에 더 민감하게 반응한다.

핵심용어 : 크리프, 내화강, 응력비, 고온상태, SN강
