

SP-Creep 시험에 의한 고온 크리프 특성 평가 기술 개발 (II) - 보일러 헤더 -

백승세* · 이동환* · 하정수** · 유효선†
(2001년 2월 16일 접수, 2001년 9월 24일 심사완료)

Development of Evaluation Technique of High Temperature Creep Characteristics by Small Punch-Creep Test Method (II) - Boiler Header -

Seung-Se Baek, Dong-Hwan Lee, Jeong-Soo Ha and Hyo-Sun Yu

Key Words: SP-Creep Test(소형펀치-크리프시험), SP-Creep Rate($\dot{\epsilon}_{sp-ss}$, SP-크리프 속도), Creep Rupture Life(t_r , 크리프 파단수명), Load Exponent(n , 하중지수), Monkman-Grant Relation(몬크만-그렌트 관계), Lath Tempered Martensite(래쓰 템퍼드 마르텐사이트), Creep Deformation Behavior(크리프 변형거동), Boiler Header(보일러 헤더), 1Cr-0.5Mo Steel

Abstract

For the development of a new creep test technique, the availability of SP-Creep test is discussed for 1Cr-0.5Mo boiler header material. And some results are also compared with those of 2.25Cr-1Mo steel which widely uses as boiler superheater tube. The results can be summarized as follows. The load exponents(n) obtained by SP-Creep test for 1Cr-0.5Mo steel are decreased with increasing creep temperature and the values are 15.67, 13.89, and 10.13 at 550°C, 575°C and 600°C, respectively. The temperature dependence of the load exponent is given by $n = 107.19 - 0.1108T$. This reason that load exponents show the extensive range of 10~16 is attributed to the fine carbide such as $M_{23}C_6$ in lath tempered martensitic structures. At the same creep condition, the secondary creep rate of 1Cr-0.5Mo steel is lower than the 2.25Cr-1Mo steel due to the strengthening microstructure composed by normalizing and tempering treatments. Through a SEM observation, it can be summarized that the primary, secondary, and tertiary creep regions of SP-Creep specimen are corresponding to plastic bending, plastic membrane stretching, and plastic instability regions among the deformation behavior of four steps in SP test, respectively.

1. 서 론

국내에서 가동중인 화력발전설비 및 석유화학 설비 등은 상당수 표준 설계수명을 초월하여 운

전되고 있는 것을 볼 수 있다.⁽¹⁾ 이러한 설비 부재의 내열재료로는 Cr-Mo강 및 Cr-Mo-V강 등이 널리 사용되고 있으나, 이들 재료들도 고온·고압 하에서 장시간 사용됨으로써 다양한 형태의 재질열화 현상을 일으킨다. 그 현상 중 크리프 (creep)는 고온부재의 대표적인 열화 기구로써, 사용시간에 따라 점진적으로 변형이 발생하게 되어 최후에는 파단에 이르게 된다.^(2,3) 따라서 노후된 설비의 안전성 및 효율적인 운전조건을 확보하기 위해 크리프 특성 및 손상정도를 정량적으로 평

* 회원, 전북대학교 대학원 정밀기계공학과

** 회원, 한국전력연구원(KEPRI)

† 책임저자, 회원, 전북대학교 기계공학부, 자동차 신기술 연구소

E-mail : yuhs@moak.chonbuk.ac.kr

TEL : (063)270-2346 FAX : (063)270-2388

Table 1 Chemical compositions of 1Cr-0.5Mo steel (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Fe
0.12	0.01	0.46	0.02	0.027	1.10	0.45	bal.

Table 2 Strengthening heat treatment conditions for 1Cr-0.5Mo steel

Normalizing	Tempering
925 °C, 20min, AC	725 °C, 30min, AC

가하는 것은 매우 중요하다.

종래 내열재료의 크리프 특성을 평가하기 위한 방법들 중 파괴시험을 통한 방법으로는 단축 인장 크리프 시험이 널리 수행되어져 오고 있다. 이러한 파괴적인 시험법은 다른 비파괴 시험법이나 해석적인 방법과 비교해 크리프 특성을 정량적으로 보다 정확하게 평가할 수 있는 큰 장점을 가지고 있다. 그러나 파괴시험시 비교적 대형의 시험편을 필요로 하기 때문에 내열재료의 사용전 상태의 크리프 특성 평가에는 적용 가능하나, 사용중인 부재의 크리프 특성 평가를 위한 실기 부재로부터의 시험편 채취는 많은 제약을 받고 있다. 이러한 이유로 최근에는 부재의 강도에 영향을 미치지 않는 범위에서 미소시험편을 채취하여 이를 이용한 파괴시험 방법들이 개발되어지고 있다.^(4,5)

본 연구에서는 전보⁽⁶⁾에 이어 본 대학이 특허출원한 소형편치-크리프(SP-Creep) 시험기법⁽⁷⁾을 사용하여 발전소 보일러 헤더 재료인 NT(normalizing + tempering) 강화 처리된 1Cr-0.5Mo 강을 대상으로 고온 크리프 특성을 평가하고, 시험결과를 토대로 내열재료에 대한 새로운 크리프 시험기법의 개발을 위한 데이터 베이스(D/B) 확보와 SP-Creep 시험기법의 유용성을 검토하였다. 또한 전보의 보일러 파열기 튜브 재료인 2.25Cr-1Mo강의 시험결과와 비교 검토하였다.⁽⁶⁾

2. 재료 및 실험방법

2.1 시험재료와 시험편

본 연구에서 사용된 시험재료는 현재 화력 발전설비의 보일러 헤더 재료로 널리 사용되는 1Cr-0.5Mo 강인 신재이다. Table 1에 시험재의 화학적 조성을 나타내었다. 본 시험재의 강화 열처

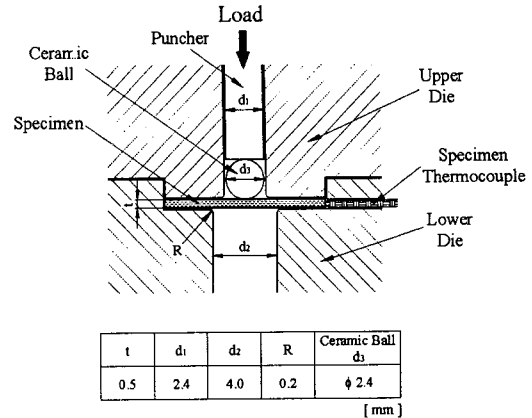


Fig. 1 The detailed diagram of SP-jig and its dimensions

리 조건은 Table 2와 같다. 고온 크리프 시험편의 크기는 소형편치 시험편의 규격인 10X10X0.5mm로 하였다.

2.2 SP-Creep 시험장치의 구성과 실험방법⁽⁷⁾

Fig. 1은 SP-Creep 시험장치의 구성 중 시험편의 체결부위의 상세도를 나타낸 그림이다. 준비된 미소시험편은 상부다이와 하부다이 사이에 일정한 힘으로 고정되며, 시험편 상부에 $\phi 2.4$ mm의 Si₃N₄ 세라믹 강구를 놓고 이를 통하여 하중을 가함으로서 시간에 따른 시험편의 크리프 변형 거동을 조사하였다. 이때 크리프 시험온도는 550~600 °C로 하였으며, 부하조건은 40~100kg 범위에서 정하중 상태로 크리프 시험을 수행하였다. 모든 시험은 시험편의 표면산화 방지를 위해 아르곤(Ar) 분위기에서 수행되었으며, 크리프 변위(δ)는 최소 1 μ m까지 정밀 계측하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 보일러 헤더 재료의 SP-Creep 곡선과 초기 변형률 거동

Fig. 2와 3은 크리프 시험온도 550 °C와 575 °C에서 NT 강화 처리된 1Cr-0.5Mo강의 SP-Creep 변형률(ϵ_p)⁽⁸⁾ 곡선을 나타낸 것이다. 크리프 곡선의 변형거동은 시험조건에 뚜렷하게 의존함을 알 수 있으며, 또한 전체적인 변형거동이 종래의 단축 인장 크리프 곡선의 3단계 거동을 보이고 있다. 그리고 동일 시험온도에서 크리프 하중이 감소함

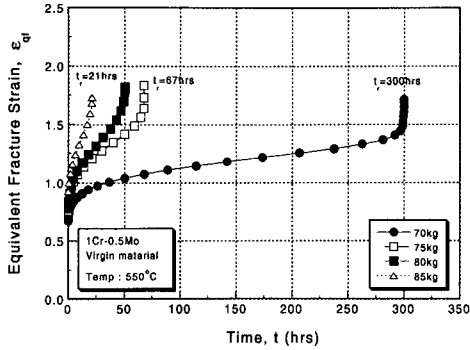


Fig. 2 The SP-Creep curves for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel at 550°C

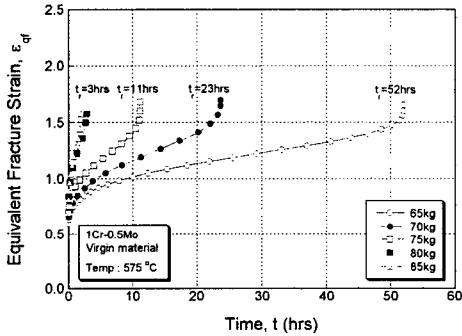


Fig. 3 The SP-Creep curves for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel at 575°C

에 따라 정상상태의 2차 크리프 거동은 크게 증가되고 있음을 알 수 있다.

일반적으로 정상상태의 크리프 변형은 소성변형에 기인한 전위밀도의 증가에 따른 가공경화 속도($d\sigma/d\epsilon$)와 원자들의 국부적인 확산과 동적 연화에 따른 회복속도($d\sigma/dt$)가 균형을 이루는 단계이다. 시험재료의 정상상태의 크리프 거동은 이들에 의해 결정되며, 시험온도와 하중, 그리고 재료의 고용 강화원소(Cr, Mo, V, Nb, W 등)에 크게 의존한다. 본 연구의 미소시험편에 의한 크리프 거동 역시 하중이 증가함에 따라 재료 내에서는 전위의 활성화로 인해 반대부호의 전위 결합에 의한 전위의 소멸 및 재배열 등에 의해 크리프 변형속도는 회복속도에 의해 지배를 받게 되고, 결국 크리프 속도의 증가와 함께 파단에 이르게 되는 것으로 생각된다. 이 같은 거동은 크리프 시험온도가 증가함에 따라 더욱 뚜렷하게 나타났다.

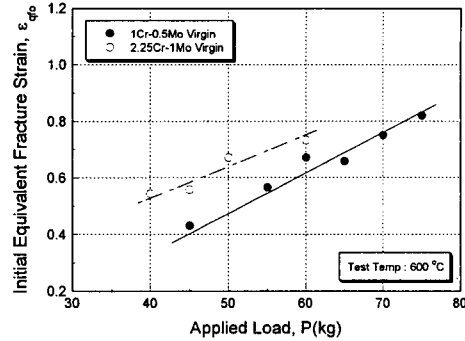


Fig. 4 The relationship between initial equivalent fracture strain and applied load for virgin material of 1Cr-0.5Mo and 2.25Cr-1Mo steels

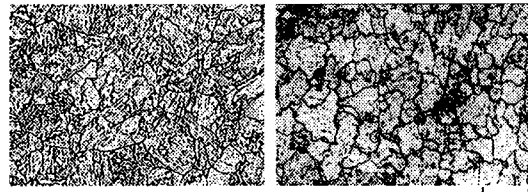


Fig. 5 Microstructure of 1Cr-0.5Mo and 2.25Cr-1Mo steels

한편, 크리프 곡선에서의 초기 변형률(ϵ_0)은 외력이 작용할 때 순간적으로 나타나는 변형량으로 시간과는 독립적인 변수이나 크리프 응력과 온도에는 매우 민감한 변수이므로 이를 이용한 크리프의 변형속도 및 잔여수명 평가기술이 개발되고 있다.

Fig. 4는 본 연구의 시험재인 1Cr-0.5Mo강의 작용하중에 따른 초기 변형률 거동을 나타낸 그림이다. 또한 비교를 위해 보일러 과열기 튜브 재료인 2.25Cr-1Mo강의 결과도 함께 나타내었다. 이때 초기 변형률은 하중을 부하한 후 1분이 경과되었을 때의 변형률 값이다. 시험결과, 크리프 하중의 증가에 따라 초기 변형률은 증가하고 있다. 또한 동일하중에서 초기 변형률은 1Cr-0.5Mo강의 경우가 2.25Cr-1Mo강보다 낮음을 관찰할 수 있어, 고온 환경에서 1Cr-0.5Mo강의 내 크리프 변형 특성을 예견할 수가 있다. 이와 같은 실험 결과가 나타난 이유는 Fig. 5에 보이는 바와 같이 두 시험재의 열처리 차이에서 오는 미세조직에 기인한 결과로 사료된다. 본 연구에서 사용된 보

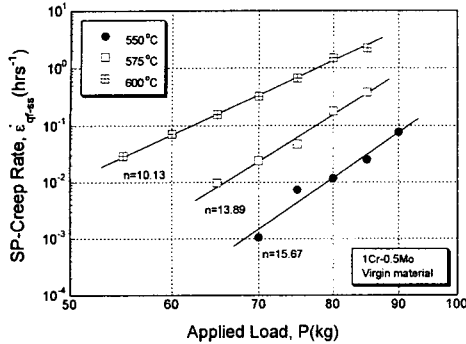


Fig. 6 The relationship between SP-Creep rate and applied load for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel

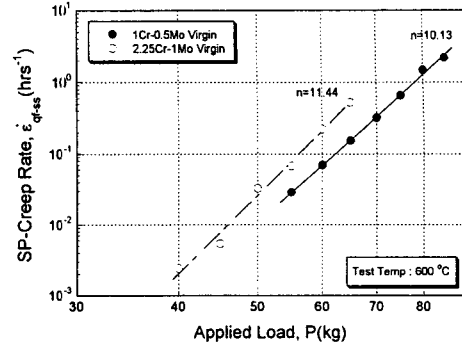


Fig. 8 The relationship between SP-Creep rate and applied load for virgin material of 1Cr-0.5Mo and 2.25Cr-1Mo steel

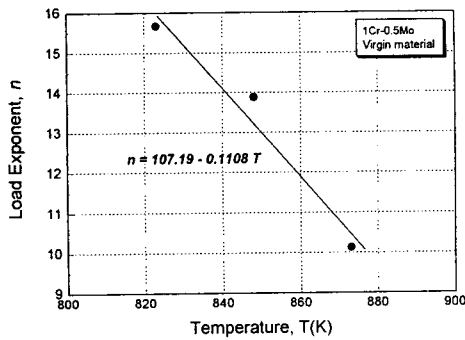


Fig. 7 The relationship between load exponent and test temperature for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel

에 따라 크리프 변형속도는 크게 증가함을 알 수 있으며, 두인자 사이의 관계는 다음과 같은 멱수 법칙(power law)이 성립되었다.

$$\begin{aligned}
 550^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 1.79 \times 10^{-32} P^{15.67} \\
 575^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 5.81 \times 10^{-28} P^{13.89} \\
 600^\circ\text{C} : \dot{\epsilon}_{qf-ss} &= 6.69 \times 10^{-20} P^{10.13}
 \end{aligned} \quad (1)$$

Fig. 7은 크리프 속도에 대한 하중지수(n)의 온도의존성을 설명한 그림이다. 이때 크리프 하중지수는 550°C, 575°C 그리고 600°C에서 각각 15.67, 13.89 그리고 10.13을 나타내어, 단축 인장 크리프 시험의 응력지수 거동과 같이 크리프 온도가 증가함에 따라 하중지수는 감소하고 있다. 이때 시험온도에 따른 하중지수는 $n = 107.19 - 0.1108 T$ 의 관계식으로 표현되었다.

일러 헤더용 1Cr-0.5Mo강 시험재는 NT (Normalizing + Tempering) 강화열처리를 행하여 구성된 조질강 형태인 페라이트와 레스 템퍼드 마르텐사이트(lath tempered martensite) 조직인 반면, 과열기 튜브재인 2.25Cr-1Mo강은 NT처리를 행하지 않은 비조질강인 어닐링(annealing) 상태의 퍼일라이트와 페라이트 조직으로 구성되어 있다.⁽⁸⁾ 따라서 NT처리를 수행한 1Cr-0.5Mo강이 동일 하중조건에서 낮은 초기 변형률 거동을 보인 것으로 사료된다.

일반적으로 단축 인장 크리프 시험에서 응력지수(n_t)는 순금속의 경우 5정도의 값을 갖고, 고용체 합금의 경우는 3~5정도의 값을 갖는다. 또 지수식에 의해 결정되는 Class I, Class II 합금에 있어 Class I 합금의 n_t 값은 4~5정도이며, 이 경우 크리프 변형은 원자들의 확산에 의한 전위의 상승(climbing)에 의해 가속된다. 이에 대해 Class II 합금은 3정도의 n_t 값을 가지며, 용질원자와 전위의 상호작용에 의해 전위 활주(glide)가 방해되어, 결국 크리프 변형은 전위의 활주에 의해 가속된다고 알려져 있다.⁽⁹⁾ 또한 이러한 응력지수는 시험온도 및 미세조직내의 석출물 거동에 의해 크게 영향을 받는다. 본 연구에서도

3.2 작용하중과 SP-Creep 변형속도의 관계

미소시험편을 이용한 SP-Creep 시험에서 부하하중에 대한 정상 상태의 크리프 속도(steady state creep rate : $\dot{\epsilon}_{qf-ss}$)의 의존성을 Fig. 6에 나타내었다. 모든 시험온도에서 부하하중이 증가함

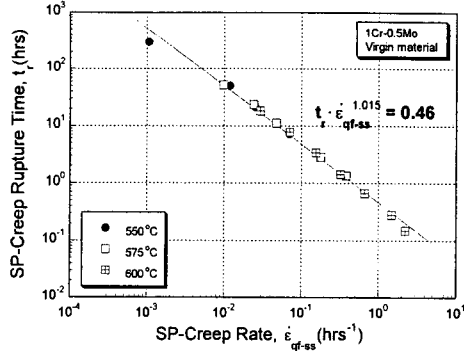


Fig. 9 The Monkman-Grant relationship in SP-Creep test for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel

SP-Creep 시험에서 구한 하중지수가 10~16 정도의 넓은 범위를 갖는 것은 NT 강화 열처리된 Cr-Mo강계에서 나타나는 레쓰(lath) 형태의 마르텐사이트 조직내의 $M_{23}C_6$ 와 같은 미세 탄화물에 기인한 결과로 사료된다.

Fig. 8은 크리프 시험온도 600°C에서 1Cr-0.5Mo강과 2.25Cr-1Mo강의 2차 크리프 속도를 비교하여 나타낸 결과이다. 동일 하중조건에서 크리프 변형 속도는 2.25Cr-1Mo강과 비교해 볼 때 1Cr-0.5Mo강이 보다 낮음을 알 수가 있는데, 이는 앞서 설명한 미세조직의 차이 즉, 탄화물과 용질원자에 의한 전위 활주속도의 차이에 따른 결과로 사료된다. 따라서 NT 처리재는 어닐링 재료보다 내 크리프 변형 특성을 보이는 것으로 판단된다.

3.3 SP-Creep 시험의 Monkman-Grant 관계

Fig. 9는 1Cr-0.5Mo강의 미소시험편에 대한 Monkman-Grant 관계를 살펴본 결과이다. 3종류의 크리프 시험온도 조건에서 얻은 작용하중에 따른 크리프 파단수명과 변형속도 사이에는 양호한 Monkman-Grant 관계가 성립하였다. 이때 두인자 사이의 관계는 다음과 같은 식으로 표현되었다.

$$t_r \cdot (\dot{\epsilon}_{gf-ss})^{1.015} = 0.46 \quad (2)$$

그리고 위의 관계식에서 지수 값은 1에 가까운 약 1.02임을 알 수 있다. 이 같은 데이터는 SP-Creep 시험법이 보일러 헤드 재료의 크리프 특성 평가에 적용 가능성을 뒷받침해 주는 중요한 실험결과라 사료된다.

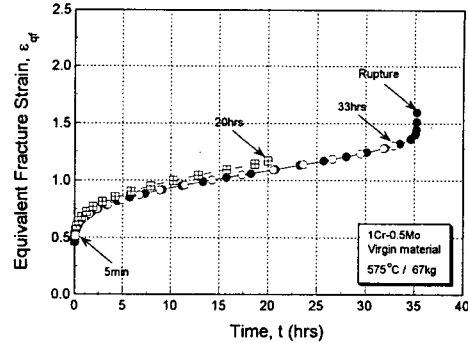


Fig. 10 The SP-Creep curves obtained from interrupted test for virgin material of 1Cr-0.5Mo steel at 575°C under 67kg

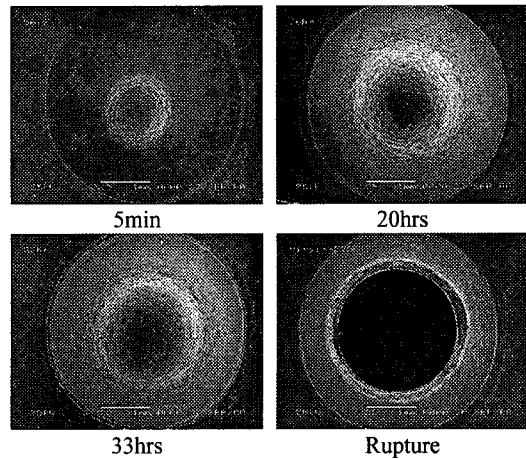


Fig. 11 The SEM macro-fractography obtained from interrupted SP-Creep test(x25)

3.4 SP-Creep 시험편의 변형 거동

본 절에서는 SP-Creep 시험의 미소시험편에 대한 변형 거동을 관찰하기 위해 크리프 시험을 중단하고 그의 변형거동을 전자현미경(SEM)으로 관찰한 결과에 대해 논한다. 크리프 중단시험(interrupted test)은 온도 575°C, 하중 67kg 조건에서 수행하였으며, 시험이 중단된 위치는 Fig. 10에 나타낸 것과 같이 크리프 변형의 3단계를 고려하여 시험 시작 후 5min, 20hrs, 그리고 33hrs으로 하였으며, 각각의 거시적 SEM 관찰 사진은 Fig. 11과 같다. 크리프의 초반부인 5분에서는 소형편치시험의 4단계 파괴거동⁽⁵⁾ 중 소성굽힘영역(plastic bending region : PBR)에 해당됨을 알 수 있다. 그리고 정상 상태 크리프의 중단단계인

20hrs에서는 미소시험편의 큰 소성유동과 함께 SP시험의 소성막신장영역(plastic membrane stretching region : PMSR)에 해당됨을 그리고 가속 크리프 영역에 해당되는 33hrs에서는 원주방향 및 두께방향의 균열개시와 함께 소성불안정영역(plastic instability region : PIR)에 해당됨을 알 수 있다. 또한 최종적으로 시험편 두께의 감소와 함께 화산구 모양으로 파괴되었음을 알 수 있다. 현재까지의 시험결과 SP-Creep 시험에 있어 정상상태의 크리프 거동은 SP시험의 4단계 파괴거동 중 소성막신장영역(PMSR)에 해당됨을 알 수 있다. 그러나 이 같은 거동은 시험재료의 종류 및 크리프 시험조건에 따라 변화됨을 고려할 때 보다 정확한 SP-Creep 시험편의 변형 및 파괴기구의 정립을 위해서는 향후 저하중 장시간 크리프 시험재에 대한 보다 많은 실험적, 해석적 데이터 베이스(D/B)의 구축이 필요하다고 사료된다. 현재 이에 대한 연구가 본 대학에서 수행 중에 있다.

4. 결론

본 연구에서는 미소시험편을 이용한 새로운 크리프 평가 기술의 개발과 데이터 베이스(D/B)의 확보를 위해 SP-Creep 시험기법을 이용하여 보일러 헤더 재료인 1Cr-0.5Mo강을 대상으로 다양한 시험조건에서 크리프 시험을 수행하였다. 본 연구를 통해 얻은 결과는 다음과 같다.

(1) 미소시험편을 이용한 1Cr-0.5Mo강의 초기 변형률(ϵ_{eff})은 크리프 하중이 커짐에 따라 증가하였으며, 동일 온도와 하중조건에서 2.25Cr-1Mo강보다 낮은 초기 변형률 값을 보였다.

(2) 작용하중에 따른 크리프 속도는 단축 인장 크리프 시험의 응력과 크리프 속도사이의 멱수 법칙과 같은 관계식이 성립되었으며, 정상상태의 크리프 속도에 의한 하중지수는 550℃, 575℃ 그리고 600℃에서 각각 15.67, 13.89 그리고 10.13을 나타내었다.

(3) 동일 크리프 시험온도와 하중조건에서 2차 크리프 변형 속도는 NT(Normalizing + Tempering) 강화처리된 1Cr-0.5Mo강이 2.25Cr-1Mo강 보다 낮았으며, 이는 시험재의 미세조직의 차이에 의한 전위 활주(glide)속도의 차이에 따른 결과로 사료된다.

(4) 1Cr-0.5Mo강의 SP-Creep 시험으로부터 얻어진 Monkman-Grant 관계에서 지수 값은 약 1.02를

보여 일반 금속 재료의 단축 인장 크리프 시험에서 얻어지는 값인 1에 접근함을 확인할 수 있었다.

(5) SP-Creep 시험편의 제 1차 크리프 변형은 SP 시험의 소성급형영역(PBR), 정상상태의 2차 크리프 변형은 시험편의 큰 소성유동의 증가와 함께 소성막신장영역(PMSR), 그리고 제 3차 가속 크리프 변형은 소성불안정영역(PIR)에 해당되었다.

후 기

본 연구는 서울대학교 기초전력공학공동연구소 지원(과제번호 : 99-지-04)으로 수행되었으며, 관계자 여러분께 감사를 드립니다.

참고문헌

- (1) 하정수, 백수곤, 강명수, 1997, "발전설비의 안전진단 및 상태평가기술," 대한기계학회논문집, Vol. 37, No. 8, pp. 43~49.
- (2) 青木滿, 角屋好邦, 1994, "火力·原子力およびプラント機器·構造部材の経年劣化と壽命豫測," REALIZE INC., pp. 49~96.
- (3) Webster, G.A. and Ainsworth, R.A., 1993, "High Temperature Component Life Assessment," CHAPMAN & HALL, pp. 1~319.
- (4) 박종진, 정용근, 김효진, 2000, "발전소 고온부의 수명 평가를 위한 소형 시험용 크리프 시험기의 개발," 대한기계학회논문집, Vol. 24, No. 10, pp. 2597~2602.
- (5) JAERI-memo 62-192, 1987, "小型ペンチ試験法(案)," 日本原子力研究所.
- (6) 백승세, 나성훈, 나의균, 유효선, 2001, "SP-Creep 시험에 의한 고온 크리프 특성 평가 기술 개발 (I) - 보일러 과열기 튜브 -, " 대한기계학회 논문집, Vol. 25, No. 12, pp. 1995~2001.
- (7) 유효선, 백승세, 이송인 외 2인, 2000, "소형편치-크리프 시험기 및 고온부재의 크리프 특성 평가 방법," 특허출원 24756호.
- (8) 유효선, 1999, "Cr-Mo강 시효재의 취화손상 평가를 위한 전기화학적 분극시험에 관한 연구," 한국비파괴검사학회, Vol. 9, No. 6, pp. 411~419.
- (9) 한국과학기술원, 1996, "재료물성 DB용 고 크립강의 크리프 실험," 보고서.