

## 고온 구조물의 한계응력강도 결정을 위한 크리프 일-시간 관계식의 유용성

김우곤<sup>†</sup> · 이경용\* · 류우석\*\*

(2002년 6월 28일 접수, 2003년 3월 19일 심사완료)

### Usefulness of Creep Work-Time Relation for Determining Stress Intensity Limit of High-Temperature Components

Woo Gon Kim, Kyung Yong Lee and Woo Seog Ryu

**Key Words:** Isochronous Stress-Strain Curve(등시 응력-변형률 곡선), Type 316 Stainless Steel (Type 316 스테인리스강), Stress Intensity Limit(한계응력강도), Strain Energy (변형 에너지), Creep Work(크리프 일)

#### Abstract

In order to determine creep stress intensity limit of high-temperature components, the usefulness of the creep work and time equation, defined as  $W_c t^p = B$  (where  $W_c = \sigma \epsilon$  is the total creep work done during creep, and  $p$  and  $B$  are constants), was investigated using the experimental data. For this purpose, the creep tests for generating 1.0% strain for commercial type 316 stainless steel were conducted with different stresses; 160 MPa, 150 MPa, 145 MPa, 140 MPa and 135 MPa at 593°C. The plots of  $\log W_c - \log t$  showed a good linear relation up to  $10^5$  hr, and the results of the creep work-time relation for  $p$ ,  $B$  and stress intensity values showed good agreement to those of isochronous stress-strain curves (ISSC) presented in ASME BPV NH. The relation can be simply obtained with only several short-term 1% strain data without ISSC which can be obtained by long-term creep data. Particularly, this relation is useful in estimating stress intensity limit for new and emerging class of high-temperature creeping materials.

#### 1. 서 론

향후 개발될 액체금속로(liquid metal reactor, LMR)등의 원자력 발전소에 사용될 많은 구조물들은 크리프를 유발하는 고온에서 작동되므로 시간-의존 크리프 파손이 중요한 설계 기준이 된다.<sup>(1-3)</sup> 크리프 변형이 지배하는 고온 구조물의 경우는 단지 허용강도만을 설계기준으로 하는 저온과 달리 시간 변화에 따라 파괴가 진행되기 때문에 일정 변형률이 발생되기까지의 시간과 응력을 정해주어야 한다. 따라서 고온 부품의 설계 시에는 주어진 온도 하에서 일정 변형률을 일으키는

데 필요한 크리프 강도나 파단수명을 넘지 않도록 제한한다.<sup>(4-7)</sup>

고온 구조물의 파손을 방지하기 위한 설계응력 지침으로는 ASME BPV (boiler and pressure vessel) Code Section-II-PART D<sup>(8)</sup>에 요구되는 재료성질이 잘 기술되어 있으며, 설계시 아래의 항들로 정해진 허용응력값을 제한한다. 즉 크리프가 일어나지 않는 저온 범위의 경우의 최대허용응력(maximum allowable stress,  $S_m$ ) 값은 (1) 실온에서 측정된 최소 인장강도의 1/3.5 수준, (2) 고온에서 인장강도의 1/3.5 수준, (3) 실온에서 측정된 최소 항복강도의 2/3 수준, (4) 고온에서 항복강도의 2/3 수준의 응력값을 초과하지 않도록 정하고 있다. 반면 크리프가 지배하는 고온의 경우는 일정시간  $t$ 에서의 크리프 한계응력강도(stress intensity limit,  $S_t$ ) 값은 (1) 1,000 시간 동안에 0.01%의 크리프 변형률(creep rate)을 발생시키는 평균응력의 100% 수

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 한국원자력연구소, 원자력재료기술개발부  
E-mail : wgkim@kaeri.re.kr

TEL : (042) 868-2493, FAX : (042) 868-8346

\* 중앙대학교 기계공학과

\*\* 한국원자력연구소, 원자력재료기술개발부

준, (2) 100,000 시간에 크리프 파단을 발생시키는 평균응력의 67% 수준, (3) 100,000시간에 크리프 파단을 발생시키는 최소응력의 80% 수준을 초과하지 않아야 한다. 따라서 시간-의존 크리프 변형을 받고 있는 고온 재료의 설계시에는 예상되는 서비스 수명 시간 동안 과도한 변형을 피하고 구조적 강성을 보존 위해서 응력-변형률-시간의 세 관계를 함께 반영하는 등시 응력-변형률 곡선 (isochronous stress-strain curve, ISSC)이 반드시 필요하다.<sup>(9~12)</sup> 이 곡선은 예상되는 사용수명 동안에 과도한 변형을 막기 위하여 조건 (1)로 부터 설계 응력 강도값을 결정할 때 반드시 필요한 곡선이 되며, 설계자는 이 곡선을 이용하여 일정 서비스 시간에서의 일정 변형률을 취하여 설계응력값을 결정할 수 있다. 그러나 현재 등시곡선은 ASME BPV NH<sup>(10,11)</sup>에 대표적인 몇몇 고온재료들에 대하여만 나타낼 뿐 그 자료는 매우 제한되어 있다.

등시 응력-변형률 곡선을 만드는데 있어서 수천 시간대의 비교적 짧은 시간 경우는 단시간의 시험만으로 크리프 데이터를 얻을 수 있어 등시곡선을 만들 수 있다. 그러나 원자력 발전소와 같이 설계수명이 30년 이상이 되는 경우는 다수의 크리프 곡선을 얻기 위하여 10<sup>5</sup>시간 (약 11.4년)에 해당하는 장시간 시험을 하는 경우가 없으며, 주로 10<sup>4</sup>시간 이내의 시험 결과를 외삽하여 추정하고 있다. 따라서 많은 시간과 경비를 소요로 하는 등시 응력-변형률 곡선 없이 단시간의 몇몇 크리프 데이터만으로 한계응력 강도값을 편리하게 결정할 수 있는 방법들이 개발되고 있다.<sup>(12)</sup> 그 중에서 변형 에너지(strain energy, SE) 이론에 바탕을 둔 크리프 일(creep work)과 시간 관계식을 이용하는 방법이 있다. 이 방법은 일정 크리프 변형률을 일으키는 시간 동안에 행해진 크리프 일의 양을 구하여 응력강도값을 추론하는 것으로 단지 몇몇 단시간의 크리프 시험 데이터만으로 가능한 이점이 있다. 그러나 이 관계식을 실 구조물에 응용하기 위해서는 장시간에 대하여 실험적으로 그 유용성을 검증할 필요가 있다.

본 연구에서는 고온 구조물의 크리프 설계시 한계응력 강도를 결정하는데 사용될 크리프 일-시간 관계식의 유용성에 대하여 실험 자료를 사용하여 검증 고찰하였다. 이를 위해 변형 에너지 이론에 바탕을 둔 크리프 일-시간 관계식을 도입하고 316 스테인리스강에 적용하여 10<sup>5</sup>시간에서 1% 크리프 변형률을 일으킬 때의 크리프 일을 구하여 크리프 한계응력 강도값을 구하였다. 이들 결과들은

**Table 1** Chemical composition of J316 stainless steel(wt.%)

S.P.	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo
J316	0.50	0.58	1.26	0.032	0.001	16.77	10.75	2.06

ASME BPV NH의 등시곡선 결과와 비교하여 크리프 일-시간 관계식의 유용성을 확인하였다.

## 2. 실험

시험에 사용된 시편은 상용 316 스테인리스강 (이하 "J316"으로 표기)이며 화학적 조성은 Table 1 과 같다. 크리프 시편은 게이지 길이가 36mm이고, 직경이 6mm 인 봉상으로 가공하였으며, 압연 방향이 시편의 길이방향이 되도록 하였다.

크리프 시험은 레버비(arm ratio) 1/20인 일정 하중 방식 시험기를 사용하여 시간변화에 따른 변위 데이터를 얻었다. 1% 크리프 변형률 시험전 시편의 가열시간은 시편을 목표온도에 도달한 후 충분히 유지시켜 온도의 영향이 없도록 하였다. 그리고 시편 가열시에 가하는 초기하중은 시험하중의 10%를 동일하게 적용하여 초기 변형률에 의한 오차가 발생되지 않도록 하였다. 크리프 시험 온도는 크리프 한계응력 강도를 결정하는데 있어서 ASME BPV NH에 보고된 등시 응력-변형률 곡선 자료와 비교하고자, ASME 자료와 같은 온도인 593°C (1100°F) 를 택하여 수행하였고, 온도는 시편 게이지 길이부에 열전대를 부착하여 온도편차를 ASTM 오차 범위인 ±2°C 내로 제어하였다.<sup>(13)</sup>

크리프 시험응력은 593°C에서 160 MPa, 150 MPa, 145 MPa, 140 MPa, 135 MPa로 하여 각 응력에서의 1% 변형률 범위의 크리프 변형 곡선을 얻었다. 이를 이용하여 해당 변형률에서의 시간에서의 크리프 일을 구하여 이를 응력값으로 환산하여 크리프 한계응력 강도값을 얻었다.

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 ASME NH 등시곡선 자료 수집 및 분석

등시 응력-변형률 곡선은 여러 응력 조건에서의 변형률-시간 크리프 곡선군에 대하여 일정시간을 고정축으로 취할 때 축적된 총 변형률의 궤적을 응력과 변형률의 관계로 바꾸어 나타낸 것이다.

이러한 등시 응력-변형률 곡선은 크리프 설계나 해석 시에 매우 유용하게 사용된다. 고온 플랜트 설계자는 이 곡선을 이용하여 예상되는 서비스 수명동안 일정 변형률을 취하여 응력값을 결정할 수 있다. 따라서 고온 구조물의 크리프 설계 시에는 등시 응력-변형률 곡선 자료가 반드시 필요하며, 고속 증식로(fast breeder reactor, FBR)의 크리프 설계를 위한 중요한 자료로 사용되고 있다.

등시 응력-변형률 곡선을 만드는데 있어서 단시간의 경우는 여러 크리프 곡선군에 대하여 일정 시간의 응력값을 취하면 쉽게 얻을 수 있다. 그러나,  $10^5$ 시간(11.4년)에서 1% 변형률을 얻는 장기시험일 경우는 다수의 장시간 크리프 시험으로 얻어지는 크리프 곡선군을 이용하여 등시 응력-변형률 곡선을 만드는 것은 많은 시간과 노력이 요구되므로 쉬운 일이 아니다. 또한 정확한 등시 응력-변형률 곡선을 얻기 위해서는 신뢰할 수 있을 정도의 정밀한 실험과 계산 이론들이 필요하다.

Fig. 1은 상용 316 스테인리스강의 ASME BPV NH에 수록된 593°C에 대한 등시 응력-변형률 곡선 자료를 나타낸 것이다. 본 등시곡선 자료는 결과 및 고찰에서 후술할 상용 316강의 크리프 일-시간 관계식의 타당성을 검증하는데 사용한다. 이러한 등시곡선은 등시 시간이 증가됨에 따라 응력-변형률 곡선 이하의 면적이 적어지므로 등시곡선 이하의 면적으로 표시되는 크리프 저장 에너지도 적어진다는 의미를 준다.

한편, 원자력 발전소에 사용되는 고온 구조물의 설계수명은 30년 이상까지 이르기 때문에  $10^5$ 시간에 해당하는 장시간 등시 응력-변형률 곡선은 설계자에게 매우 중요한 자료가 된다. 그러나 현재까지 보고된 등시 응력-변형률 곡선 자료는 ASME BPV NH에 원자력 발전소의 "Class 1" 부품에 사용되는 대표적 고온 재료들인 304SS, 316SS, 인코넬 합금 800H, 2.25Cr-1Mo에 대하여만 보고되고 있을 뿐이다.<sup>(10,11)</sup> 따라서 다양한 재료에 대하여 크리프 설계자가 이용할 수 있는 장시간 등시곡선 자료가 필요하지만 이러한 장시간 등시곡선을 실험적으로 얻는 것은 매우 어렵다.

Fig. 2는 상용 316 스테인리스강의 426°C~815°C까지의 고온 범위에서  $10^5$ 시간에 해당하는 등시 응력-변형률 곡선들을 ASME BPV NH 자료를 모두 수집하여 나타낸 것이다. 온도별 등시 응력-변형률 변화 곡선의 모양을 보면 온도가 증가

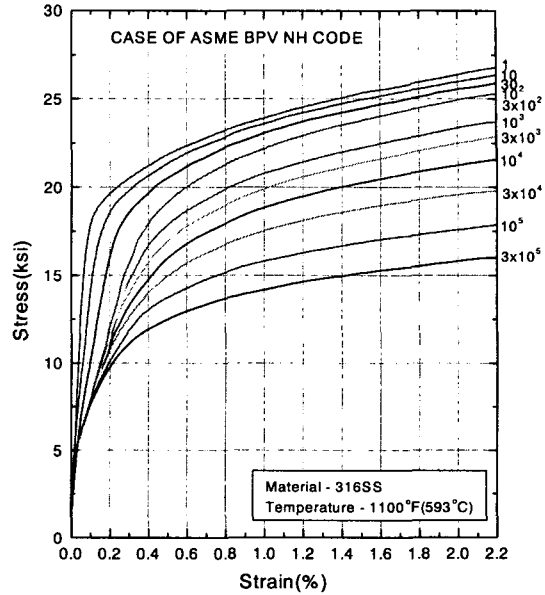


Fig. 1 Average isochronous stress-strain curves of commercial type 316 stainless steel at 593°C (1100°F), presented in ASME BPV NH<sup>(10,11)</sup>

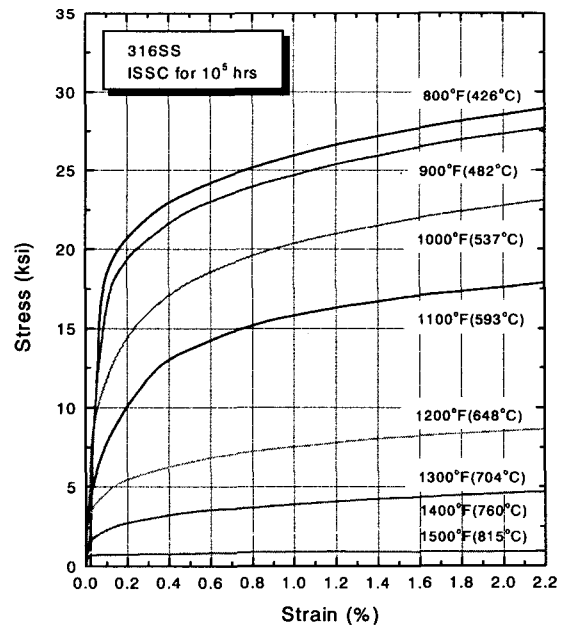


Fig. 2 The ISSC in  $10^5$ h with different temperatures of type 316 stainless steel whose data were collected in ASME BPV NH<sup>(10,11)</sup>

할수록 크리프 저장에너지가 적어지고 있음을 잘 보인다. 본 그림의 온도별 등시곡선 자료는 온도별 변형경화지수  $n$  값을 구할 때 사용되며, 316 스테인리스강의 해당 온도 조건에서  $10^5$ 시간에서의 각 변형률에 따른 크리프 한계응력 강도값을 예측하는데 이용할 수 있다.

3.2 크리프 일-시간 관계식의 도입

등시 응력-변형률 곡선에서 크리프 변형 시간  $t$  동안에 저장된 에너지(creep stored energy)  $W$ 는 변형 에너지 이론(strain energy)에 의하여 등시곡선 이하의 면적의 크기로서 나타내며,  $W$ 와 시간  $t$ 와의 관계는 경험적으로 다음의 관계가 있다.<sup>(9,14)</sup>

$$W t^m = C \text{ (Constant)} \quad (1)$$

여기서,  $m$ 과  $C$ 는 변형률의 크기와 온도를 의존하는 상수이다. 상수  $m$  값은 정해진 변형률에서  $\log W - \log t$ 로 나타낼 때 두 관계의 기울기 값이다.  $W-t$ 의 관계는 단기간의 크리프 응력-파단 시험에 의하여 장기수명을 예측하기 위하여 외삽하여 얻는  $\log \sigma - \log t$  직선의 기울기와는 같지 않다. 즉  $W-t$ 의 관계는 조사하고자 하는 크리프 일정 변형률에 대하여 양 대수 좌표로 나타낼 때 그 관계가 직선일 경우 얻어지는 기울기 값이기 때문에 크리프 파단시험에서의  $\log \sigma - \log t$  기울기와 그 의미가 완전히 다르다. Samuel, Rodriguez<sup>(9)</sup> 등은 304SS, 316SS, 2.25Cr-1Mo에 대하여 여러 변형률에 대하여  $\log W - \log t$ 로 나타낼 때  $10^5$ 시간까지 선형 관계에 있음을 보고하였다.

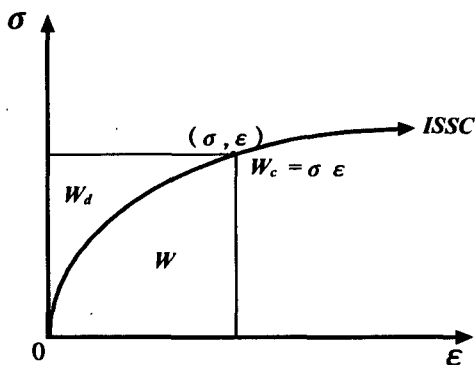


Fig. 3 Schematic plot of the creep work in isochronous stress-strain curve(ISSC)

여기서, 본 연구에서 적용하고자 식 (1)의  $W-t$  관계의 유사성을 이용하여 변형에너지 이론을 보다 확장시켜 크리프-일 시간식을 도입한다.

시간  $t$ 에서 변형률  $\epsilon$ 과 응력  $\sigma$ 을 받고 있는 재료를 생각하면,  $W_c$ 는 Fig. 3에서 처럼

$$W_c = \sigma \cdot \epsilon \quad (2)$$

이 되고, 시간  $t$ 에 대한 등시 응력-변형률 곡선을 지나는 점  $(\sigma, \epsilon)$ 에 도달된다. 등시 응력-변형률 곡선의 아래의 면적이 크리프 변형 동안 저장된 에너지의 량으로 정의할 수 있고, 그 면적은

$$\begin{aligned} W &= \int_0^\epsilon \sigma d\epsilon \\ &= \sigma \epsilon - \int_0^\sigma \epsilon d\sigma = W_c - \int_0^\sigma \epsilon d\sigma \quad (3) \end{aligned}$$

이 된다. 여기서  $W_c$ 는 총 크리프 일(total creep work)이고,  $W$ 는 크리프 동안 저장된 에너지가 된다. 식 (3)에서 우측 항은 방출일의 성분  $W_d$ 이다. 등시 응력-변형률 곡선에서 응력과 변형률의 관계가 Hollomon의 식<sup>(15)</sup>,  $\sigma = K \epsilon^n$ 의 관계식을 따른다고 가정한다. 여기서,  $K$ 는 재료강도상수,  $n$ 은 변형경화지수 (strain hardening exponent)이다. 위 식을 미분하면,

$$d\sigma = K \cdot n \cdot \epsilon^{(n-1)} d\epsilon \quad (4)$$

이 되고, 식 (4)를 식 (3)에 대입하고 정리하면,

$$W = \sigma \epsilon - [K \cdot n / (n+1)] \epsilon^{(n+1)} \quad (5)$$

$$W = \sigma \epsilon / (n+1) = W_c / (n+1) \quad (6)$$

로 된다. 여기서,  $\sigma$ 는 크리프 응력이고,  $W_c$ 는 변형률  $\epsilon$ 까지의 변형을 위한 총 크리프 일이 되고,  $W$ 는 작용응력  $\sigma$ 하에서의 변형률  $\epsilon$ 에 도달하는데 소요되는 시간  $t$ 에서의 등시 응력-변형률 곡선 이하의 면적으로 크리프 저장 에너지이다.  $n$  값을 알 수 있다면 총 크리프 일로부터 크리프 저장 에너지 쉽게 구할 수 있다. 그러나  $n$ 값은 등시 응력-변형률 곡선의 기울기 데이터로부터 얻어지기 때문에 등시 응력-변형률 곡선이 반드시 있어야만

구할 수 있다.

식 (6)에서  $W_c$ 와  $W$ 는 비례 관계가 성립됨을 알 수 있다. 결국  $W_c$ 는 식 (1)과 같은 풀의 시간 관련 식 (7)로 나타낼 수가 있다.

$$W_c t^p = B \tag{7}$$

여기서  $B = (n+1)$  이고,  $W_c = \sigma \epsilon = W (n+1)$  이다. 식 (7)의 관계식은 변형 에너지 이론에 바탕을 둔 것으로 단지 몇몇 단시간의 크리프 시험으로 크리프 일을 구할 수 있기 때문에 등시 응력-변형률 곡선없이 대상재료의 응력강도 값을 편리하게 결정하는데 사용하자 한다.

3.3 크리프 일-시간 관계식의 적용

Fig. 4는 상용 316강의 593°C의 온도에서 응력 별 크리프 곡선의 시험 결과를 나타낸 것이다. 본 연구가 크리프 일-시간 관계식의 타당성을 검증하는 것이므로, ASME BPV NH에 등시 응력-변형률 곡선 자료와 같은 상용 316강과 같은 온도인 593°C에서 크리프 시험을 실시하여 얻은 결과이다. 크리프 응력을 160 MPa, 150 MPa, 145 MPa, 140 MPa, 135 MPa로 변화시킬 경우 일정 크리프 변형률에 도달되는 총 소요되는 시간은 각 응력의 크기에 잘 의존되고 있음을 보여준다. 시험 응력이 낮아질수록 크리프 변형은 낮아지며, 일정 변형률에 도달되는 시간도 응력이 낮아질수록 길어지고 있다.

Table 2는 Fig. 1의 크리프 결과로부터 얻은 것으로 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%의 각 변형률에 도달되는 시간을 요약한 결과이다. 이들 결과로부터 식 (7)을 이용하면 본 연구에서 구하고자하는 크리프 일-시간 관계의 결과를 얻을 수 있다.

Fig. 5는 316 스테인리스강의 593°C에서 ASME BPV NH에 나타낸 등시 응력-변형률 곡선의 데이터와 본 실험에서 얻은 변형 에너지(SE) 결과를 각 변형률에 대하여  $\log W_c - \log t$ 의 관계로 함께 나타낸 것이다. 본 실험에서 얻은 변형 에너지 이론을 이용하여 얻은 단시간 결과들은 0.6%, 0.8%, 1.0%, 1.2%의 변형률 별로 ASME BPV NH의 등시 곡선결과와 비교하면 동일 직선 상위에서 잘 일치하고 있음을 확인할 수 있다. 그리고 등시 곡선의 각 변형률 데이터를  $10^5$ 시간까지 최소 자승법으로 선형피팅(linear fitting)하여 얻은 기울기 상수  $p$ 값을 얻었다. 변형률별  $p$ 값의 변화 경향은 Table 3에 나타낸 것처럼 변형률이 증가할수록 낮

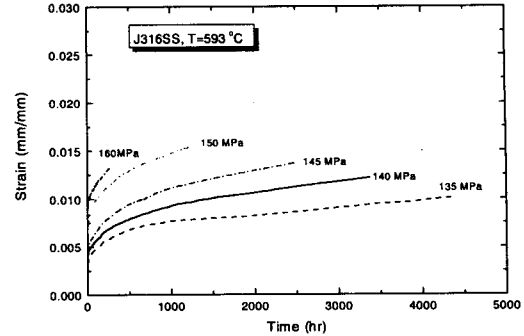


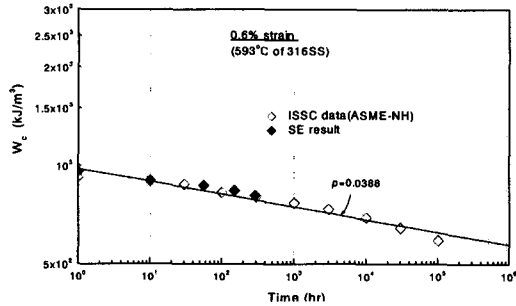
Fig. 4 Creep curves with various stresses at 593°C of the J316 stainless steel

Table 2 Creep time for generating constant strains under various stresses at 593°C of the J316 stainless steel

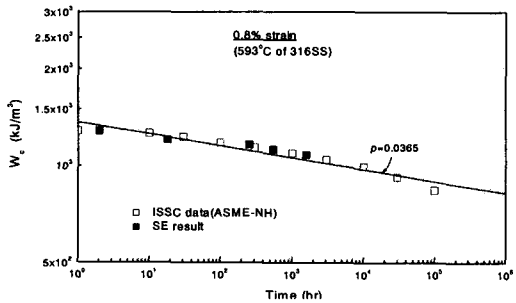
Strain (%)	Applied stress				
	160 MPa	150 MPa	145 MPa	140 MPa	135 MPa
0.6	1 hr	10 hr	56 hr	149 hr	289 hr
0.8	2 hr	18 hr	251 hr	540 hr	1,558 hr
1.0	22.9 hr	120 hr	734 hr	1,500 hr	4,218 hr
1.2	137 hr	327 hr	1,488 hr	3,251 hr	

아지는 경향을 보인다. 이러한 것은 높은 변형률 조건에서는 안정된 소성영역에 해당되므로 크리프 일과 시간별 변화 폭이 점점 작아지고 있음을 의미한다. 크리프 일-시간 관계를 이용하여  $p$ ,  $B$  및 응력 변화의 결과를 변형률에 따라 요약한 결과를 Table 3과 같다.

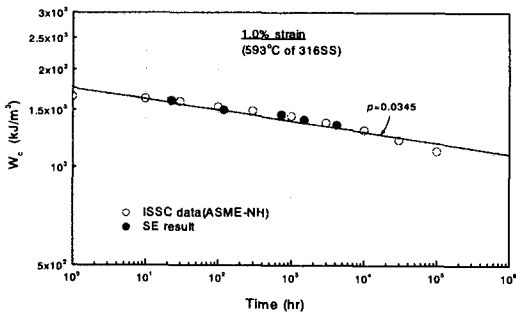
ASME BPV NH 등시곡선 자료값을 총 크리프 일로 환산하고, 이들 모든 데이터를  $10^5$ 시간까지 1 선형 피팅한 결과인 Fig. 5에서 처럼  $10^4$ 시간까지는 변형률 별로 모두 선형 관계가 있음을 잘 보였다. 그러나  $10^5$ 시간의 장시간에서는 선형 피팅한 응력 예측값이 실제값 보다 다소 높은 값으로 예측하여 오차가 발생되고 있음을 볼 수 있다. 오차 정도는 Table 3에서 보인 것처럼  $10^5$ 시간 동안에 1.0% 이하의 변형률을 발생시키는 조건에서는 약 7.0% 미만이고, 1.0% 변형률 이상 범위에서는 약 8.0% ~ 9.0% 오차 범위로 변형률이 증가할수록 높아지는 경향을 보인다. 이러한 것은  $10^5$ 시간의 장시간 영역, 즉 크리프 변형률이 높은 영역으로 가면 크리프 열화 손상이 크기 때문에 예측값에서 오차를 가져오기 때문이다. 그러나 크리프



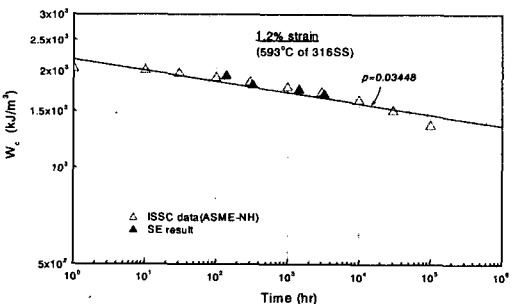
(a) For 0.6% strain



(b) For 0.8% strain



(c) For 1.0% strain



(d) For 1.2% strain

**Fig. 5** Comparison between ASME ISSC data and SE results data for various strains at 593°C of type 316 stainless steel

**Table 3** Constants  $B$ ,  $p$  and the stress determined for various strains in  $10^5$  hr at 593°C of the J316 stainless steel

Strain (%)	$P$	$B$ (KJ/m <sup>3</sup> )	$\sigma$ in $10^5$ hr (MPa)		
			Predicted by SE	ISSC data	Error (%)
0.6	0.0388	978.58	104.33	98.58	5.5
0.8	0.0365	1362.23	111.85	104.78	6.7
1.0	0.0345	1764.67	118.62	110.92	6.9
1.2	0.03448	2167.45	121.44	112.37	8.0
1.4	0.0344	2588.13	124.41	114.44	8.7
1.6	0.0340	3003.82	126.92	117.19	8.3
2.0	0.0338	3895.93	132.00	121.33	8.7

구조물은 기본적으로 소성변형 영역이 아닌 탄성 영역 이내의 비교적 낮은 변형률 조건에서 사용되므로 1.0% 이상의 변형률은 상당히 높은 조건이 된다. 따라서 크리프 구조물의 설계를 위한 공학적 관점에서 보면 1.0% 변형률에서  $10^5$  시간의 장시간 조건에서 6.9% 오차 정도의 사용에 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

결국  $W_c-t$ 의 본 관계식을 이용하면 장시간이 소요되는 등시 응력-변형률 곡선 없이 몇몇 단시간 크리프 데이터만으로 크리프 한계응력을 선형 관계로 추론할 수 있으므로, 특히 크리프 데이터가 부족한 원자력 발전소에 사용되는 고온 구조물의 크리프 설계시 본 관계를 사용하여 응력강도값을 추론하는데 유용하게 사용될 수 있을 것으로 판단된다. 향후 본 연구의  $W_c-t$  관계식을 이용하여 원자력 구조재료로 새롭게 개발된 type 316LN 스테인리스강에 적용하여 한계응력 강도값을 추론하는데 활용하고자 한다.

### 3.4 등시곡선의 변형경화 지수

식 (6)을 편리하게 응용하기 위해서는 등시 응력-변형률 곡선의 데이터를 이용하여 변형경화지수  $n$ 값을 구하는 것이 필요하다. 식 (6)에서 처럼  $W/W_c$ 는  $n$ 과 비례관계를 갖기 때문에  $n$ 값을 구하고 총 크리프 일의 양을 알면 크리프 동안 저장된 에너지  $W$ 를 예측하는데 편리하게 이용할 수 있다.

Fig. 6은 상용 316 강에 대하여  $n$ 값을 결정하기 위하여 ASME BPV NH에 있는  $10^5$ 시간에 해당하는 Fig. 2의 등시 응력-변형률 곡선 자료를 수집하여  $\log \sigma - \log \epsilon$  좌표로 변환하여 온도별로 나타낸

것이다. 그림에 나타난 소성역의 변형률 범위는 대략 0.1%~2.2% 영역까지의 자료이다. Hollomon 식  $\sigma = K\epsilon^n$  에서 처럼  $n$ 값은 등시 응력과 변형률의 기울기로부터 결정할 수 있다. 상용 316 스테인리스강의 여러 온도별로 얻은  $n$ 값의 변화 결과를 그림에서 잘 나타내고 있다.

얻어진  $n$ 값 중에서 액체금속로의 운전 온도영역에 해당하는 593°C를 택하여 식 (6)을 사용하여  $W_c$ 값을 계산하였다. 593°C에서 얻은  $n = 0.24$  값으로 총 크리프 일을 구하면  $W_c = 124 \text{ KJ/m}^3$ 가 되고, 크리프 저장된 에너지  $W = 100 \text{ KJ/m}^3$ 로서 총 크리프 일의 80%를 차지하였다. 그리고 방출일  $W_d = 24 \text{ KJ/m}^3$ 로서 총 크리프 일의 20%가 됨을 알 수 있었다. 이를 확인하기 위하여 ASME BPV NH 에 보고된 316강에 대하여 10<sup>5</sup>시간에서 1% 변형률을 일으키는 593°C 등시 응력-변형률 곡선 이하의 면적비를 이용하여  $W$ 와  $W_d$ 를 구하면 약 80%와 20%로 식 (6)의  $n$ 값을 이용하여 얻은 값과 잘 일치하고 있음을 확인하였다.  $n$ 값을 이용한 크리프 저장 에너지를 구하는 것은 등시곡선 없이 가능하고, 또한 식 (3)과 같이 등시곡선의 적분과정 없이 간단히 얻을 수 있다.

그러나,  $n$ 값은 실제로 주어진 온도조건에서 재료의 수명에 해당하는 장시간 동안의 등시 응력-변형률 곡선이 필요하기 때문에 실험적으로 구하는 것은 매우 어렵다. 그래서 Fig. 2에서 나타난 것처럼 처럼 316강의 426°C~815°C 여러 온도에 대하여 10<sup>5</sup>시간의 등시곡선으로부터  $n$ 값을 구하면 약 0.1~0.3 범위내에 있음을 알 수 있었다.  $n$ 값의 온도별 변화 경향은 815°C의 고온을 제외한

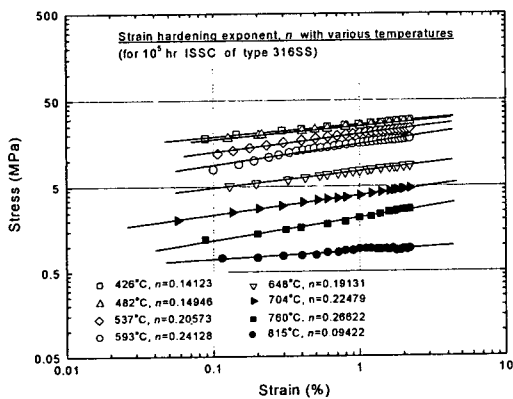


Fig. 6 The  $n$  values determined from ASME BPV NH ISSC data with various temperatures in 10<sup>5</sup> hr of type 316 stainless steel

모든 온도구간에서 온도가 증가할수록 증가되는 경향을 보였으며, 그 값의 차이는 온도별로 그다지 크지 않음을 파악할 수 있다. 이러한 등시 응력-변형률 곡선의  $n$ 값에 대하여 316 스테인리스강의 인장시험에서 보고된  $n = 0.45 \sim 0.55$ <sup>(15)</sup> 범위의 값에 비하면 상당히 낮은 값을 알 수 있다.

#### 4. 결론

원자력 발전소에 사용되는 고온 구조물의 크리프 한계응력 강도값을 추론하는데 사용할 목적으로  $W_c t^B = B$  관계식을 도입하고, 316 스테인리스강에 적용하여 본 관계식의 유용성을 검증하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 변형 에너지 이론에 기초한 크리프 일-시간 관계식의 단시간 시험 결과들은 ASME BPV NH 결과들과 선형 관계로 잘 일치함을 확인하였다. 크리프 일-시간 식을 사용하여 10<sup>5</sup>시간까지 선형 예측한 결과 10<sup>5</sup>시간의 장시간에서는 실제값보다 다소 높은 응력값을 예측하였다. 그러나 1.0% 변형률에서 6.9%의 오차를 보였으므로, 본 관계식의 사용에는 큰 무리가 없을 것으로 판단된다.

(2) 크리프 일-시간 관계식을 이용하면 장시간 시험에 의해서만 얻을 수 있는 등시 응력-변형률 곡선 없이 단시간의 크리프 시험만으로 크리프 일을 구하여 크리프 한계응력 강도값을 결정할 수 있다. 특히 본 방법을 사용하면 크리프 데이터가 없는 새롭게 개발된 재료의 크리프 한계응력 값을 추론하는데 유용하게 사용될 수 있다.

(3) 316 스테인리스강의 426°C~815°C의 여러 온도 범위에서 10<sup>5</sup>시간에 해당하는 등시 응력-변형률 곡선의 변형경화지수  $n$ 값은 약 0.1~0.3 범위 이내로 온도별 변화 경향은 분명하지만, 그 값의 차이는 온도별로 크지 않음을 알 수 있었다.

(4) 본 관계식을 이용하면  $n$ 값 만으로 크리프 저장 에너지를 등시곡선의 적분과정 없이 쉽게 얻을 수 있는 이점이 있다.

#### 후기

본 연구는 파기처에서 시행한 원자력중장기연구개발사업중 원자력재료 내환경특성평가 및 향상기술개발 과제내의 고온강도평가 및 신재료기술개발 분야에서 수행한 것입니다.

## 참고문헌

- (1) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2002, "Evaluation of Monkman-Grant Parameters for Type 316LN and Modified 9Cr-Mo Stainless Steels," *KSME International Journal*, Vol. 16, No. 11, pp. 1420~1427.
- (2) Kim, W. G., Kim, D. W. and Ryu, W. S., 2001, "Creep Design of Type 316LN Stainless Steel by K-R Damage Theory," *KSME Journal*, Vol. 25, No. 2, pp. 296~303.
- (3) Kim, W. G., Kim, S. H. and Ryu, W. S., 2001, "Creep Characterization of Type 316LN and HT-9 Stainless Steels by the K-R Creep Damage Model," *KSME International Journal*, Vol. 15, No. 11, pp. 1463~1471.
- (4) Viswathanathan, R., 1989, "Damage Mechanisms and Life Assessment of High-Temperature Components," *ASM International*, pp. 10~15.
- (5) Diter, G. E. and Bacon, D., 1988, "Mechanical Metallurgy," *McGraw-Hill Book Co. 3rd Edition*, London, pp. 459~461.
- (6) Nam, S. W., 1997, "Measurement and Application of Creep Properties," *Bulletin of the Korean Inst. of Met. & Mat.* Vol. No. 3, pp. 233~246.
- (7) Penny, R. K. and Marriott, D. L., 1995, "Design for Creep," *Chapman & Hall*, p. 355.
- (8) ASME BPV Code, 2001, Section II-Part (D), Appendix I, July, pp. 762~766.
- (9) Samuel, K. G. and Rodriguez, P., 1998, "An Empirical Relation Between Strain Energy and Time in Creep Deformation," *Int. Journal Pressure Vessels and Piping*, Elsevier, Vol. 78, pp. 939~943.
- (10) ASME Boiler Pressure Vessel Code, 2001, "Rules for Construction of Nuclear Facility Components," Class 1 Components in Elevated Temperature Service, Section III, Division 1-Subsection NH, New York, July, pp. 159~173.
- (11) ASME Boiler and Pressure Vessel Code, 1992, N-47-29 Nuclear Components, New York, pp. 16~253.
- (12) Blackburn, L. D., 1972, "Isochronous Stress-Strain Curves for Austenitic Steels," New York, pp. 14~48.
- (13) ASTM, 1983, "Standard Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials," *ASTM E139*, pp. 305~315.
- (14) Ugural, A. C. and Fenster, S. K., 1994, "Advanced Strength and Applied Elasticity," 3rd Ed., *Prentice Hall PTR*, New Jersey, pp. 77~78.
- (15) Hertzberg, R. W., 1976, "Deformation and Fracture Mechanics of Engineering Materials," *John Wiley & Sons*, pp. 16~22.