

## 316L(N) 스테인리스강의 Monkman-Grant 크리프 수명식의 적용성

김우곤\* · 김대환\*\* · 류우석\*\*

(2000년 1월 21일 접수)

### Applicability of Monkman-Grant Relationships to Type 316L(N) Stainless Steel

Woo-Gon Kim, Dae-Whan Kim and Woo-Seog Ryu

**Key Words:** Monkman-Grant Relationship(M-G 관계), Modified Monkman-Grant Relationship(수정 M-G 관계), 316L(N) Stainless Steel(316L(N) 스테인리스강), Creep Curve(크리프 곡선), Creep Rupture(크리프 파단), Minimum Creep Rate(최소 크리프속도), Intergranular Fracture(입계파괴), 크리프 기공(Creep Cavity)

#### Abstract

Creep tests for type 316L(N) stainless steel were carried out using constant-load creep machines at 550°C, 575°C and 600°C. Material constants necessary to predict creep rupture time were obtained from the experimental creep data. And the applicability of Monkman-Grant(M-G) and modified M-G relationships was discussed. The log-log plot of M-G relationship between the rupture time( $t_r$ ) and the minimum creep rate ( $\dot{\epsilon}_m$ ) was dependent on test temperatures. The slope of  $m$  was 1.05 at 550°C and  $m$  was 1.30 at 600°C. On the other hand, the log-log plot of modified M-G relationship between  $t_r/\epsilon_r$  and  $\dot{\epsilon}_m$  was independent on stresses and temperatures. That is, the slope of  $m'$  was approximately 1.35 in all the data. Thus, modified M-G relationship for creep life prediction could be utilized more reasonably than that of M-G relationship for type 316L(N) stainless steel. It was analyzed that the constant slopes regardless of temperatures or applied stresses in the modified relationship were due to an intergranular fracture grown by wedge-type cavities.

#### 1. 서론

316계 스테인리스강은 고온 크리프 특성 및 중성자 조사 등에 대한 내구성이 양호하여 차세대 원자로, 액체금속로, 핵융합로 등의 고온 구조재료로 유망하다. 특히 316L(N) 스테인리스강은 탄소량을 0.03% 이하로 낮춘 316L 강에 질소를 0.07% 이상 첨가하여 탄화물 석출에 따른 예민화 거동을 안정화시키고 고온강도와 크리프 특성을 향상시킨 재료로서 원자력 발전소의 일차계 고온 구조재료로 주목받고 있다.<sup>(1)</sup>

차세대 원자로나 액체금속로 등은 가동온도가 550°C에 이르기 때문에 사용되는 재료는 고온 열하중 설계를 행하며, 이때 여러 설계 변수중 크리프 성질이 중요하게 고려된다.<sup>(2)</sup> 고온 플랜트의 설계시 장시간 크리프 곡선 데이터들이 필요하게 되지만 크리프 시험이 수십만 시간 이상이 되는 경우는 크리프 곡선을 직접 실험에서 구하는 것이 불가능한 경우가 많고 경제적이지 않으므로 비교적 단시간의 파단 실험자료로부터 크리프 강도를 설계목적에 충분할 정도로 정확히 유추해 낼 수 있는 방법이 사용된다. 가장 많이 사용되는 방법중의 하나는 크리프 파단시간( $t_r$ )과 최소 크리프 속도( $\dot{\epsilon}_m$ ) 또는 정상상태 크리프 속도) 실험 데이터를 이용한 Monkman-Grant(이하 M-G 로 표기) 경험 관계식이 있다.<sup>(3)</sup>

\* 회원, 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

E-mail : wgkim@kaeri.re.kr

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

\*\* 한국원자력연구소 원자력재료기술개발팀

$$\log t_r + m \log \dot{\epsilon}_m = C \quad (1)$$

M-G 관계식 (1)은 최소크리프 속도,  $\dot{\epsilon}_m$ 와 파단 시간,  $t_r$ 과의 관계를 log-log 대수좌표로 나타내면 선형관계가 있으며,  $t_r$ 은  $\dot{\epsilon}_m$ 에 반비례 한다. 그리고 상수  $m, C$  만 알면 단시간 파단시간으로부터 최소 크리프속도를 또는 최소 크리프 속도로 부터 파단시간을 장시간에 외삽하여 얻을 수 있다. 실제 M-G 관계식은 여러 금속재료에 잘 일치되는 것으로 알려져 왔다. 한편, Dobe와 Milicka<sup>(4)</sup>는 최소 크리프속도에 대하여 파단시간을 크리프 연신율의 비( $t_r/\epsilon_p$ )로 나타내면 기울기 상수  $m \approx 1$  에 근접한다는 수정된 M-G 관계식을 제안하였으며, 몇몇 금속에서 이 식이 잘 일치됨을 입증하였다. 그러나 고속증식로나 액체금속로의 구조재료로 주목되는 316L(N) 강에 대하여는 M-G 크리프 수명 예측식을 적용하여 그 적용성 관계를 분석한 결과는 없으며, 또한 고온기기 설계시 사용될 크리프 특성과 관련된 재료 물성치 및 수명예측에 사용될 크리프 상수들의 자료는 제한되어 있다.

본 연구에서는 원자력 구조재료의 후보재료로 주목되는 316L(N) 스테인리스강에 대하여 크리프 시험을 수행하여 얻은 파단시간과 최소 크리프속도 데이터를 이용하여 M-G 관계식과 수정된 M-G 관계식으로 크리프 수명을 예측시 그 적용성을 조사하고자 하였다. 이를 위하여 수명예측에 필요한 상수  $m, C$  를 각각 얻고, 크리프속도에 대한 재료의 조성, 온도, 응력의 의존성과 크리프 변형 과정에서의 기공(cavity) 형성과 성장에 영향을 미치는 크리프 파손기구를 분석하였다.

## 2. 실험

시험에 사용된 316L(N) 강의 화학적 조성은 Table 1과 같이 0.1% 질소(N) 첨가를 기준으로 인(P)의 량을 미량 조절한 3 종류의 시편이다. 시편의 제조는 진공유도용해로 30Kg 잉곳을 용해 제조하여 이것을 1270°C의 알곤 분위기에서 2시간 유지한 후 열간 압연으로 두께를 15mm까지 줄여 가공하였다. 열연된 판재는 1100°C에서 1시간 동안 알곤 분위기에서 용체화 처리하여 수냉하였다. 크리프 시편의 가공은 압연 방향이 시편의 길이 방향이 되도록 하여 봉상 형태로 가공하

Table 1 Chemical compositions of type 316L(N) stainless steel(wt.%)

Elements	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Mo	N
PO	0.019	0.64	0.97	0.002	0.006	17.25	12.41	2.39	0.05
PL	0.018	0.65	0.97	0.009	0.004	17.22	12.44	2.39	0.10
PH	0.019	0.63	0.97	0.018	0.004	17.26	12.35	2.41	0.10

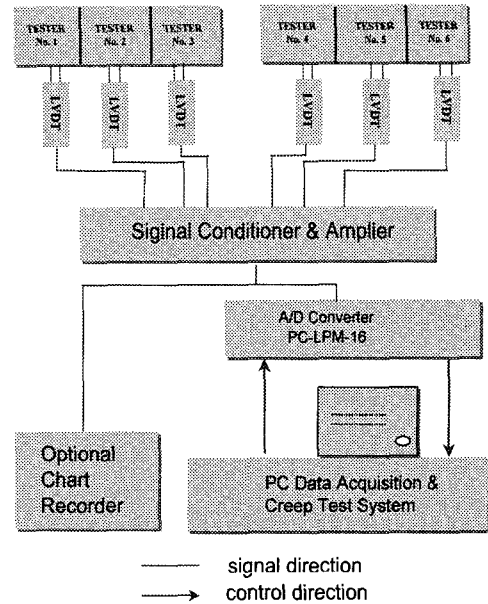


Fig. 1 Block diagram of creep data acquisition system

였다.<sup>(5)</sup> 최종치수는 게이지길이 36mm, 직경 6mm이다. 크리프 시험은 하중비가 20:1인 일정하중 시험기를 사용하였고, 시간경과에 따른 크리프 변형량의 측정은 LVDT(linear variable differential transformers)를 사용하여 Fig. 1과 같이 시간에 따른 변위 데이터를 PC로 받아들였다. 시험온도는 550°C, 575°C, 600°C로 하였으며, 온도제어는 시편의 게이지길이 중앙부에 열전대를 사용하여 온도편차를 ASTM 허용오차 범위 내인 ±2°C 이내로 제어하였다.<sup>(6)</sup>

최소크리프 속도는 식 (2)를 이용하여 정상상태 크리프 영역에서의 시간변화에 따른 변형량을 측정 후 계산하여 얻었다.

$$\dot{\epsilon} = \frac{d[(l-l_0)/l_0]}{dt} = \frac{1}{l_0} \cdot \frac{dl}{dt} \quad (2)$$

여기서  $l_0$  는 초기 표점거리이다. 크리프 파단면은 주사전자현미경을 이용하여 관찰하였고, 크리프 기공의 관찰은 파단된 시편의 균일 단면부를 잘라내어 응력이 가해진 길이방향으로 절단하여 에칭 후 광학현미경으로 관찰하였다.

### 3. 시험결과 및 검토

#### 3.1 크리프 시험 데이터 분석

본 실험에서 사용한 316L(N) 강에 대하여 크리프 수명 예측식으로 사용하고자 하는 M-G 기본식은  $\dot{\epsilon}_{\min}^m \cdot t_r = C$ 이다. 여기서 상수  $m=1$  이면 스트레인( $\epsilon^*$ )은  $\epsilon^* = \epsilon_s - \epsilon_0 = t_r \cdot \dot{\epsilon}_{\min}$  로 되며 Fig. 2 와 같이 표현되는 값이 된다. 그림에서 보듯이 크리프 파단수명은 영역 II 에서의 정상상태 크리프 속도만 고려하고 있다. 이에 비해 Dobe 와 Milicka가 제안한 수정 관계식은

$$\log\left(\frac{t_r}{\epsilon_r}\right) + m' \log \dot{\epsilon}_m = C \quad (3)$$

로 제2기 영역(II)의 크리프속도는 물론 제3기 영역(III)의 크리프 파단 연신율( $\epsilon_r$ ) 을 포함하고 있는 식임을 알 수 있다. 따라서 수정 식을 적용하려면 크리프 파단 연신율을 측정하여야 하는 번거로움이 있지만, 파단 연신율을 반영하므로 M-G 식의 기본식 보다 정확한 결과를 얻을 수 있을 것으로 판단되고 있다.

그리고 크리프 곡선에서 제2기의 정상상태 크리프 속도는 실험 값의 신뢰도가 높고 해석이 용이하기 때문에 고온재료의 설계 시 정상상태 크리

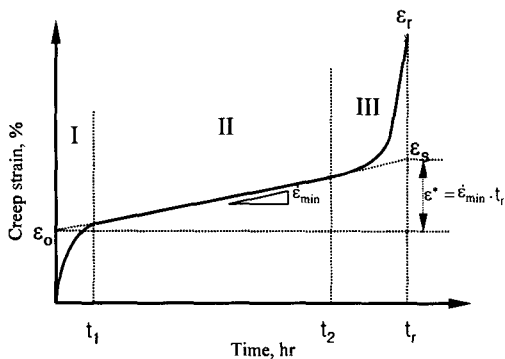


Fig. 2 Schematic representation of a creep rupture curve representing M-G relationship

프 속도를 기준으로 사용하고 있으며, 재료의 수명을 평가하는 대표적인 측정 인자가 된다. 이러한 최소 크리프속도는 크리프 시험 온도와 응력에 의존하므로 식(4) 와 같이 표시되고,

$$\dot{\epsilon}_m = \dot{\epsilon}_m(T, \sigma) \quad (4)$$

크리프속도에 의한 응력 의존성은 power-law<sup>(8)</sup>의 식 (5) 로 표시할 수 있다.

$$\dot{\epsilon}_m = A \sigma^n \quad (5)$$

$$n' = \left( \frac{\partial \ln \dot{\epsilon}_m}{\partial \ln \sigma} \right)_T \quad (6)$$

여기서, A는 크리프 상수이고, n은 크리프 지수이다. 식 (5)의 n 은 크리프 변형이 power-law 에 의한 전위 크리프인 경우 식 (5) 의 n'과 같은 의미를 갖는다. 그 의존성 정도는 민감지수 n'로 정량화 된다. 확산 크리프인 경우 순금속은 n'=1 이고, 전위 크리프인 경우 순금속은 n'=4-5이며, 석출·분산강화 금속의 경우 10 이상이 된다.<sup>(7)</sup> 316 스테인리스강의 본시험 조건에 해당하는 온도 및 응력에서의 크리프 변형 기구도를 조사하면 power-law의 영역에 해당된다.<sup>(8)</sup> 따라서 최소 크리프 속도와 응력과의 관계는 power-law 식으로 나타낼 수 있고 이로부터 응력 지수 n 값을 구할 수 있다.

Fig. 3은 최소 크리프속도와 응력과의 관계를 log-log로 나타낸 것으로 절편 최소자승법으로 직선의 기울기를 구하면 n 값은 7.3-8.0 범위의 값을 보였다. 316 스테인리스강에서의 이 값은 전위 상승에 의한 power-law를 만족하는 크리프 변형기구임이 확인이 되고 있다. 그림에서 인의 함량 변화에 따른 크리프 속도는 분명한 차이를 보이지만, 3 종류의 시편에 대한 n 값이 거의 같으므로 크리프 변형기구가 동일함을 알 수 있다. 650°C에서 상용 316 스테인리스강의 지수 n 값은 7.9로 보고되는데,<sup>(9)</sup> 이 값과 비교할 때 거의 유사한 결과를 보인다.

Fig. 4는 응력과 파단 시간의 관계를 log-log로 나타낸 것으로 이 관계를 식 (7)로 나타내면

$$t_r \cdot \sigma^k = K \quad (7)$$

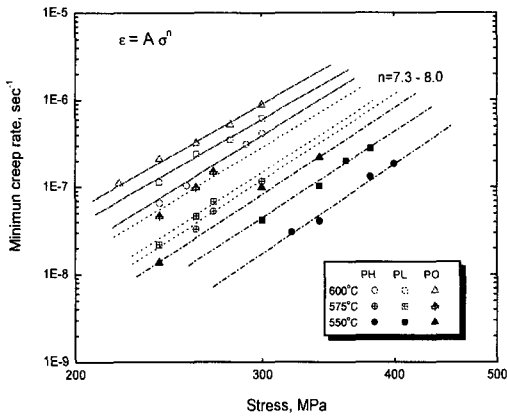


Fig. 3 Minimum creep rate vs. applied stress at each temperature and phosphorus content for type 316L(N) stainless steel

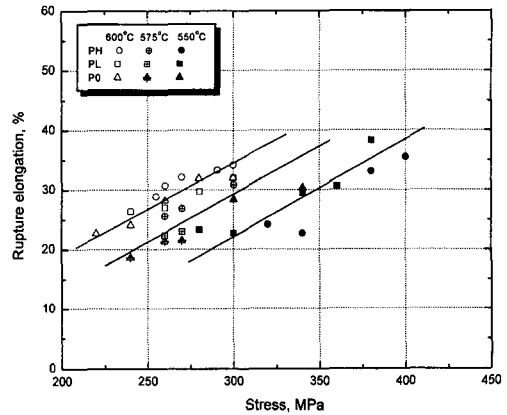


Fig. 5 Rupture time vs. applied stress at each temperature and phosphorus content

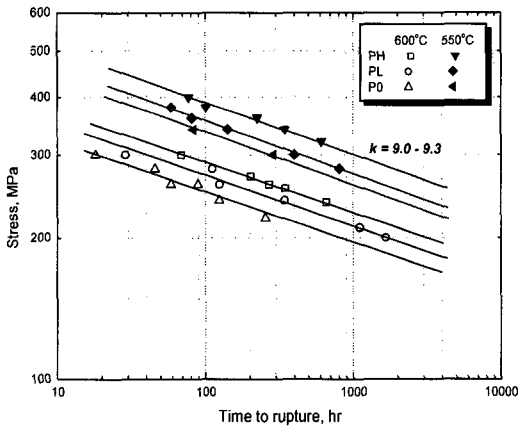


Fig. 4 Applied stress vs. time to rupture at each temperature and phosphorus content

이 되고, 파단시간과 응력의 log-log 관계로부터 지수  $k$  값을 구하면 9.0-9.3 범위로 계산된다. 이 값은 Hosoi<sup>(10)</sup>가 316 강에서 보고한 9.0의 값보다 약간 높으나 거의 같다. 그림에서 응력과 파단수명의 자연 로그는 선형관계로서 파단수명은 인의 첨가량과 온도 및 응력의 의존성을 보인다. 인의 함량변화에 따라서 크리프 수명이 차이가 분명히 있지만, 전체적인 직선의 기울기는 조성이나 온도, 응력에 관계없이 같으므로 크리프 변형 기구가 변화되지 않음을 알 수 있다.

Fig. 5는 크리프 파단 연신율과 응력의 관계를 나타낸 것으로 전체적인 경향은 온도별 의존성을 보이고 있으며, 인의 함량에 따른 큰 차이는 발

견할 수 없다. 크리프 파단 연신율은 동일한 응력 조건에서 온도가 높을수록 크며, 응력이 증가할수록 연신율은 비례 관계로 증가한다.

### 3.2 M-G 수명식의 적용 및 고찰

M-G 관계식을 적용하기 위해서는 실험적으로 크리프 거동을 확인하여 두 상수가 결정된 후에 이용할 수가 있다. 즉 상수  $m, C$ 를 알면,  $t_r$ 로부터  $\dot{\epsilon}_m$ 를 또는  $\dot{\epsilon}_m$ 로부터  $t_r$ 를 알 수 있는데,  $m$  값은 최소 크리프속도와 파단시간의 관계에서 직선의 기울기로부터 구함으로써  $C$  값도 계산된다.

본 시험에서의 316L(N) 강에서 얻은 비교적 단시간의 크리프 데이터를 이용하여 M-G 관계의 두 인자인 최소 크리프속도와 파단시간을 log-log로 나타내면 Fig. 6과 같다. 그림에서의 모든 데이터들은 각 온도별 의존성을 보이고 있으며, 모든 데이터 값을 최소 자승법으로 fitting 후 상수  $m$  값을 계산하면, 550°C 인 경우는  $m=1.05$ 이고, 600°C인 경우는  $m=1.30$ 로 계산된다. 또한 상수  $C$ 를 계산하면 550°C인 경우  $C=-1.58$ 이며, 600°C인 경우  $C=-2.99$ 로 계산된다. 이러한 이유는 Fig. 3 및 4의 크리프 시험 결과의 데이터 분석에서 서술한 바와 같이 최소크리프 속도나 파단시간은 온도에 크게 의존하기 때문이다.

따라서 상수  $m$  값이 온도 의존성을 보이므로 크리프 수명을 예측하기 위해서는 온도별로 상수

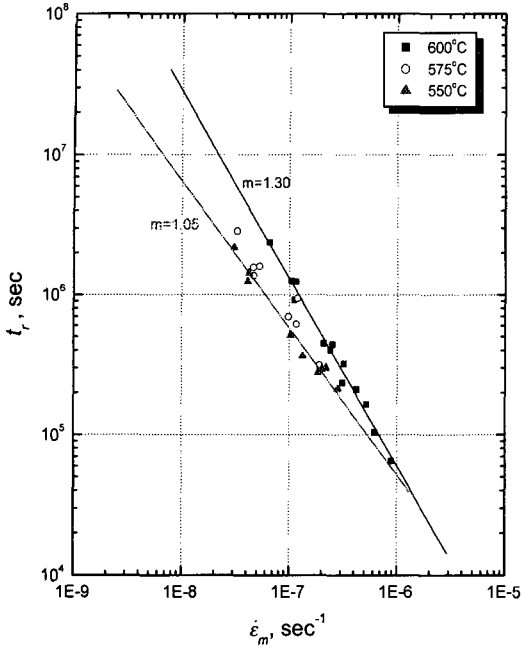


Fig. 6 Time to rupture vs. minimum creep rate for type 316L(N) stainless steel

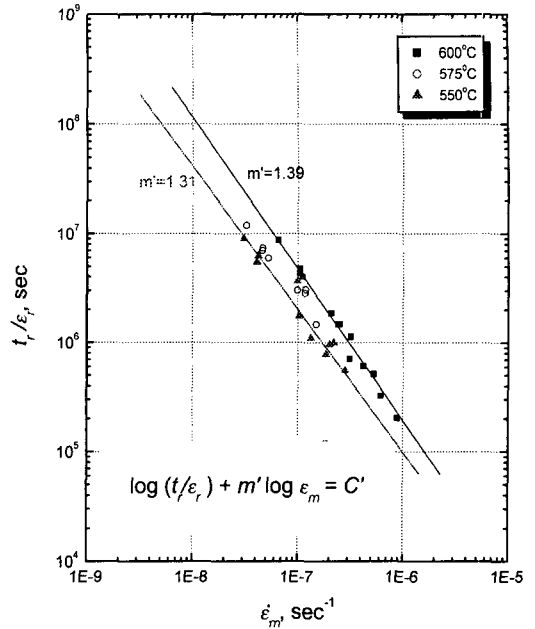


Fig. 7 Dependence of ratio of rupture time to creep rupture elongation on minimum creep rate for 316L(N) stainless steel

$m$  값을 정확히 구하여야 함을 알 수 있다. 그리고 인의 함량에 따라서 기율기에 영향을 주지 못하는 것은 3 종류의 시편이 크리프 기구가 변화하지 않기 때문이다. 여러 금속의 경우  $m$ 은 0.8-0.95,  $C$ 는 2-15 범위로 알려지고 있으나<sup>(11)</sup> 본 결과에서  $C$  값이 다소 낮은 것은 식 (1)에서 처럼 파단수명에 대한 최소 크리프속도가 316LN 강이 다른 재료에 비해 매우 낮은 속도를 보이기 때문이다. 결국 316L(N) 강에서의 주어진 온도 및 응력조건에서  $m$ ,  $C$ 의 상수를 알므로 크리프 수명을 예측할 수 있다.

식 (1)에 대하여 Dobe와 Milicka가 제안한 수정 Monkman-Grant 식 (3)을 적용하면 Fig. 7과 같은 결과를 얻을 수 있다. Fig. 7의 수정 M-G 관계로 표현된 데이터들은 Fig. 6의 결과와는 달리 각 온도별로  $m'$ 의 기율기 변화가 거의 없는 선형 관계를 보여주고 있다. 즉 550°C인 경우는  $m'=1.31$ ,  $C'=-2.86$ 이며, 600°C인 경우는  $m'=1.39$ ,  $C'=-3.04$ 로서 거의 같은 값으로 계산되었다. 기율기  $m'$ 가 Fig. 5의 결과와는 달리 수정 M-G에서는 온도에 관계없이 같은 기율기를 갖는다. 이유는 Fig. 8의 파단 연신율과 최소 크리프 속도 관

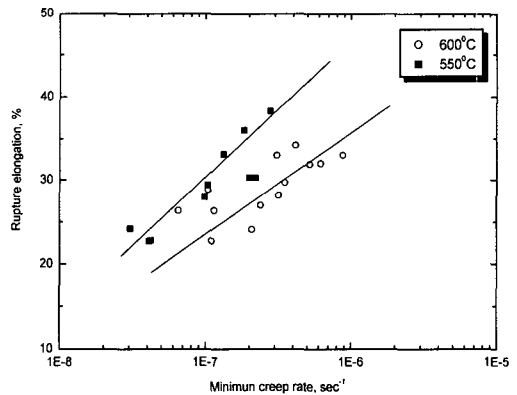


Fig. 8 Relation between minimum creep rate and rupture elongation for type 316L(N) stainless steel

계에서 볼 수 있듯이 같은 크리프 속도에 대한 파단 연신율이 온도별로 기율기가 다르기 때문이다. 즉 M-G 식의 기본 가정은 시간변화에 따른 크리프 연신율이 일정한 비례관계에 있게 되는데, 크리프 파단 연신율을 적용하는 수정 M-G 식에서는 온도에 따른 비례상수에서 차이가 발생하여 그 차이만큼 일정량 보정시키므로 온도별 기율기 변화가 없는 것으로 분석된다. 결국 316L(N) 강에서 수정 M-G 식으로 크리프 수명을

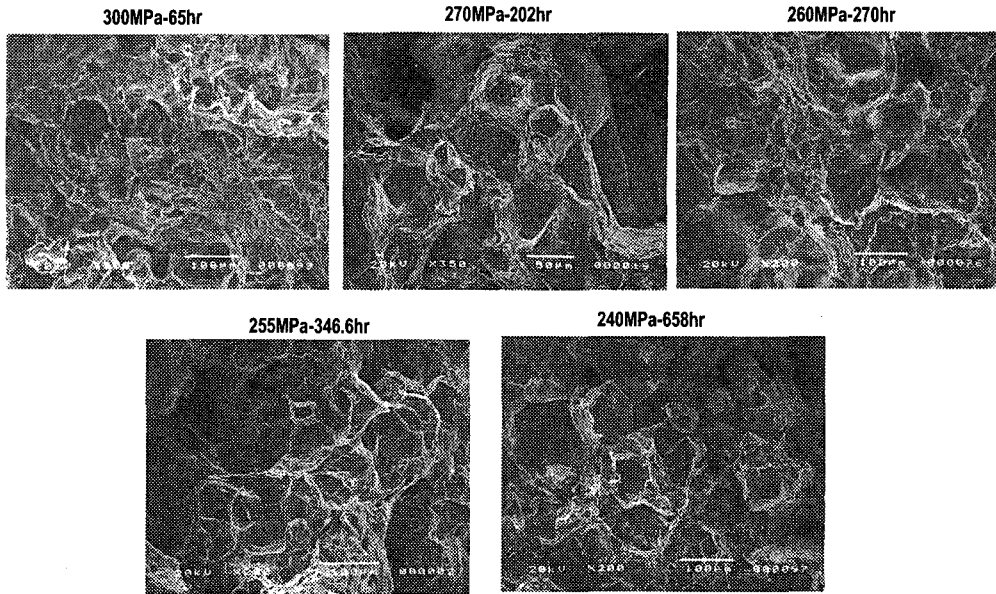


Fig. 9 Typical SEM fractographs observed on the crept PH specimens under various stresses at 600°C of type 316L(N) stainless steel.

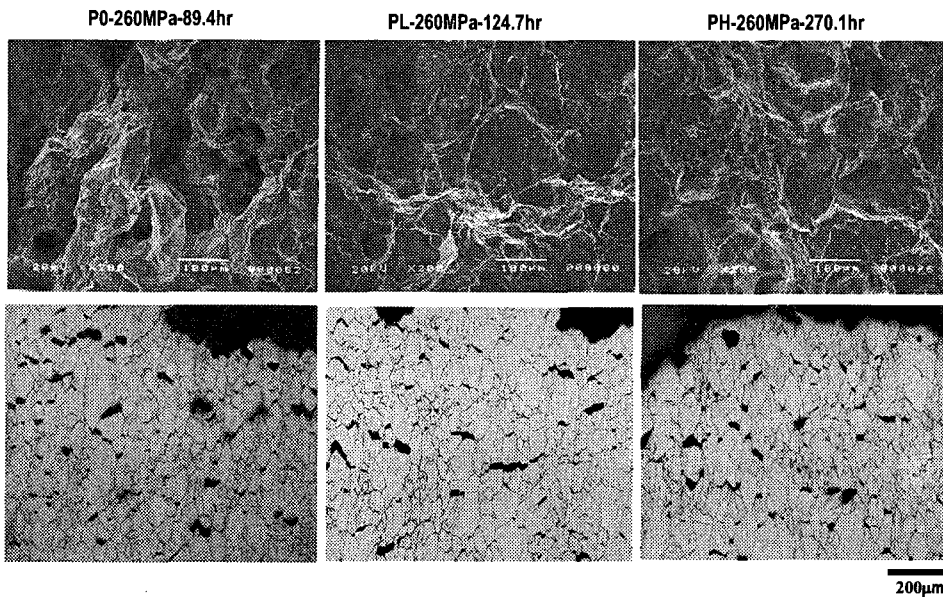


Fig. 10 Typical SEM fractographs and cavities observed on the crept three specimens under 260MPa and 600°C of type 316L(N) stainless steel.

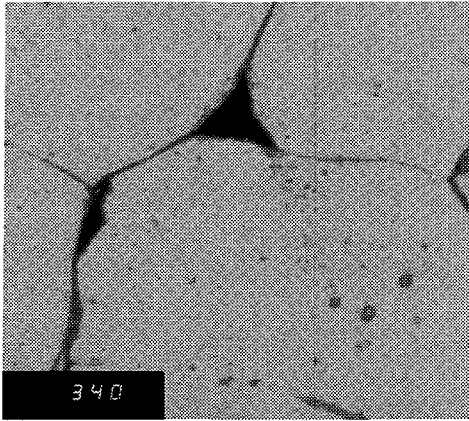


Fig. 11 W-type cavities observed from the ruptured specimens under 340MPa and 600°C(x1000)

예측하는데 있어서 최소 크리프 속도에 대한  $t_r/\epsilon_r$  비로 나타내면 온도별 절대값의 편차는 약간 있지만, 전체적으로 보면 거의 같은 기울기를 보이므로 M-G 식보다 용이하게 활용될 수 있음을 알 수 있다.

이와 같이 크리프 연신율은 전 크리프 변형과정을 잘 묘사하므로 크리프속도와 파단시간과 밀접한 관계를 갖는다. 즉 균열과 크리프 기공의 생성과 성장 그리고 최종 파단에 이르는 크리프 변형 과정의 이들 관계로부터 크리프 파단 기구를 알 수 있게 되는데, 이러한 것을 관찰하기 위하여 크리프 파면조직을 관찰하였다.

Fig. 9는 응력변화에 따른 파면을 관찰한 것으로 고응력 조건에서는 입계와 입내파괴가 혼재하는 양상을 보이며, 크리프 효과가 분명히 나타나는 저 응력조건으로 갈수록 입계파괴(intergranular fracture)가 우세하게 나타나는 경향을 보인다. 또한 3종류의 시편에 대하여 동일한 응력 및 조건에서의 크리프 기공을 관찰하면 Fig. 10과 같이 파단 수명에서는 차이가 있으나 전체적인 파면의 형태는 입계 기공들에 의한 균열을 보이고 있으며 비슷하다.

그리고 파면 직하부분의 단면방향에 대하여 크리프 기공을 관찰하면 Fig. 11과 같이 입계의 3중점(triple junction point)에서 생성되어 성장하는 wedge-type 기공<sup>(12,13)</sup>들이 관찰되고 있다. 이러한 wedge-type 기공 균열은 높은 응력 및 변형속도, 중간 온도구간에서 지배적이며, 기공의 생성은

입계의 응력집중이 일어나는 입계중에서 기하학적으로 불규칙적인 곳인 triple-point 나 입계석출물 등과 밀접한 관련이 있다. 따라서 M-G 관계식의 적용성 관계는 크리프 기공의 생성과 성장에 영향을 주는 탄화물의 석출거동과 관련이 되는 것으로 분석된다. M-G 식의 경우 온도별로 다른 기울기를 갖는 것은 600°C와 550°C에서의 입계 탄화물의 석출속도 차이가 기공에 영향을 미쳐 다른 기울기를 갖는 것으로 판단된다. 반면, 수정식의 경우는 wedge-type의 입계균열이 파단 연신율과 크리프 속도에 온도별로 영향을 주어 같은 기울기를 갖는 것으로 분석된다.

#### 4. 결 론

316L(N) 스테인리스강의 크리프 수명을 예측하고자 크리프 파단 시험을 수행하여 얻은 데이터를 이용하여 수명예측에 필요한 재료상수들을 얻었다. Monkman-Grant의 수명 관계식을 적용한 결과 파단시간,  $t_r$  과 최소 크리프 속도,  $\dot{\epsilon}_m$  는 550°C에서  $m = 1.05$ , 600°C에서  $m = 1.30$ 로 온도의존성을 갖는 각기 다른 기울기를 갖는 선형관계를 보였다. 그러나  $t_r/\epsilon_r$  과  $\dot{\epsilon}_m$  로 표현되는 수정 M-G 관계식에서는 온도별 절대값에서의 약간의 편차는 갖지만 최소 크리프속도에 대한  $t_r/\epsilon_r$ 의 기울기는 온도나 응력에 관계없이 약  $m' = 1.35$ 의 기울기를 보였다. 따라서 316L(N) 스테인리스강에서의 크리프 수명 예측식으로 크리프 연신율을 반영하는 수정된 M-G 관계식을 적용하는 것이 보다 합리적인 것으로 판단되었다. 이러한 결과는 power-law 크리프에 의한 wedge-type 균열의 입계파괴기구 때문으로 분석되었다.

#### 후 기

본 연구는 과학기술부에서 시행한 원자력중장기 사업중 원자력재료기술개발 노심재료 및 종합DB 구축분야에서 수행한 것입니다.

#### 참고문헌

- (1) Nakazawa, T., 1988, "Effects of Nitrogen and Carbon on Creep Properties of Type 316 Stainless

- Steels," *Proc. High Nitrogen Steels Conf., HNS 88*, pp. 218~224.
- (2) 류우석 외, 1998, "액체금속로 구조재료 개요," KAERI/State-of-the Art Report(AR)-487/98.
- (3) Nabarro, F.R.N. and Villers, H.L., 1995, *The Physics of Creep*, Taylor & Francis Ltd., p. 22.
- (4) Dobes, F. and Milicka, K., 1976, "The Relation Between Minimum Creep Rate and Time to Fracture," *Metal Science*, Vol.10, pp. 382~384.
- (5) 김우곤, 김대환, 류우석, 국일현, 1998, "AISI 316L(N) 스테인리스강의 Creep 특성에 미치는 인(P)의 효과," 한국원자력학회 추계학술대회, pp. 216~222.
- (6) ASTM, 1983, "Standard Practice for Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials," *ASTM E139-83*, pp. 305~315.
- (7) 김우곤, 김대환, 홍준화, 국일현, 류우석, 1999, "Monkman-Grant 관계식에 의한 316L(N) 강외 크리프 수명예측," 대한기계학회 '99 추계학술대회 논문집, KSME99R27, pp. 175~180.
- (8) Peny, R.K. and Marriott, D.L., 1995, "Design for Creep," *Champan & Hall*, p. 141.
- (9) Riedel, H., 1986, "Fracture at High Temperature," *Spring-Verlag Berlin Heidelberg New York London Paris Tokyo*, p. 390.
- (10) Hosoi, Y. and Wade, N., 1984, "Improvement of Creep Properties and Cavity Formation of Modified Type 316 Austenitic Stainless Steel by Microalloying with Phosphorus and Carbon," *Proc. 2nd Int. Conf. on Creep and Fracture of Engineering Materials and Structures Part III*, pp. 763~773.
- (11) Cadek, J., 1988, "Creep in metallic materials," *Elsevier*, pp. 335~339.
- (12) Evans, R.W. and Wilshire, B., 1985, "Creep of Metals and Alloys," p. 10.
- (13) 김건영, 이강용, 1996, "금속조직 대비법에 의한 고온고압부 크리프손상의 수명평가," 대한기계학회 '96 재료 및 파괴부문 학술대회논문집, KSME 96MF14, pp. 90~96.