

論 文

大韓熔接學會誌  
第1卷第2號 1983年12月  
Journal of the Korean  
Welding Society  
Vol. 1, No. 2, Dec., 1983

SUS 316 鋼의 溫度依存性 結晶粒徑이 크리이프  
舉動에 미치는 影響

吳世旭\*·姜郁\*\*

Effect of the Grain Size of Temperature Dependence  
on the Creep Behavior of SUS 316

by

Sae Wook Oh\*, Oug Kang\*\*

Abstract

Austenitic stainless steel has been investigated widely for creep strength of heat resistant material and effects of grain sizes due to various solution treatment time under constant temperature.

It was studied that effects of grain sizes subject to solution treatment temperature 1100°C, 1125°C, 1175°C, 1250°C, and 1300°C respectively on the creep strength, fracture behaviour and fractography of SUS 316 stainless steel.

The experimental results obtained were as follows.

1. The optimum grain size for the maximum creep strength did not vary with creep testing temperatures and stress levels.
2. Among various grain sizes due to different solution treatment temperature, the optimum grain size for the creep strength was found 0.044mm. Also the size showed the minimum initial strain regardless creep temperature.
3. Garofalo's equation of creep rupture life was applied well to SUS 316 stainless steel.
4. The fractography of optimum size was ductile intergranular fracture of dimple type and showed along with the increase of grain size intergranular fracture of w type.

1. 序 論

最近의 産業發展으로 高溫, 高壓 또는 強酸, 알카리 등의 苛酷한 環境 霧圍氣 속에서 使用되는 高級材料의

需要가 增大되었으므로, 오오스테나이트系 스테인레스 강은 이들의 代表的인 것으로 들 수 있다. 이와 같은 高價材料의 節減을 위하여 使用條件下의 最適條件에 의한 設計製作이 必要하며, 이에는 많은 研究結果의 集積이 要望되고 있다.

\* 東亞大學校 工科大學 教授, 정회원

\*\* 東亞大學校 大學院

合金材料的 機械的 性質 및 크리이프 強度에 미치는 因子가 많으나 結晶粒徑의 影響은 近來 關心事가 되고 있다. Parker<sup>1)</sup>에 의하면 구리는 400°C(0.5Tm)에서 結晶粒徑이 增加할수록 크리이프 速度는 增加한다고 하였다. Feltham<sup>2)</sup>에 의하면 黃銅은 500°C(0.6Tm)에서 同一한 結果를 나타낸다. 그러나 Mekeown<sup>3)</sup>에 의하면 납은 25°C(0.5Tm)에서 크리이프 速度가 結晶粒徑의 增加에 따라 減少하다가 어떤 限界點에서 부터는 反對로 增加하여 最小 크리이프 速度를 나타내는 結晶粒徑이 存在한다. Shahnian<sup>4)</sup>의 monel과 Garofalo<sup>5)</sup>의 Fe—Mn—Ni—Cr 合金鋼에서는 結晶粒徑이 0.1mm 이상에서 크리이프 速度가 增加한다고 하였다. Parker<sup>6)</sup>는 구리의 結晶粒徑과 크리이프 速度와의 關係는 結晶粒徑을 얻기 위한 熱處理 方法에 依存하고 結晶境界의 性質을 變化시킨다고 하였다. Takahashi<sup>7)</sup>는 25Cr—20Ni 오오스테나이트系 스테인레스 鋼의 結晶粒徑이 增加함에 따라 크리이프 速度는 減少하는 傾向이 있으며, 이것은 粒徑의 크기에 따라 定常 크리이프를 主導하는 機構가 相異하기 때문이라고 하였다. 結晶粒徑의 影響은 合金에 따라 相異한 學動을 보이고 있으므로 各種 合金의 特性을 明白하게 할 必要가 있다.

筆者는 時效處理한 SUS 316 鋼을 600°C에서 同一 結晶粒徑 하의 크리이프 實驗을 하여 應力 레벨과 時效時間에 의한 析出物이 크리이프 強度 및 破壞學動에 미치는 影響을 發表하였다.<sup>8)</sup> 이어서 同材料에 대한 1100°C의 熔體化 處理時間을 變化시켜 時間依存性的 相異한 結晶粒徑을 얻어, 最適 結晶粒徑에 미치는 크리이프 溫度의 影響을 實驗하여 溫度의 影響이 크다는 結果를 報告하였다.<sup>9)</sup>

本 研究는 오오스테나이트系 스테인레스 鋼인 SUS 316을 1100°C, 1125°C, 1175°C, 1250°C 및 1300°C에서 각각 1時間 維持시켜 熔體化 處理하여 얻은 強度 依存性的 相異한 結晶粒徑이 크리이프 學動에 미치는 影響에 關하여 크리이프 溫度와 應力の 效果를 통하여 考察하였다. 그리고 크리이프 破斷面의 SEM 觀察을 통하여 이들의 影響을 微視的으로 考察하였다.

2. 結晶粒徑에 의한 크리이프 理論

크리이프 實驗曲線은 1次, 2次 및 3차 크리이프로 大別할 수 있다.<sup>10)</sup> 크리이프 破損要因은 slip에 의한 變形, 粒界 미끄럼 및 空孔의 擴散 등 要素들이 많다.<sup>17)</sup>

크리이프 破斷後의 變形率  $\epsilon_r$ 는

$$\epsilon_r = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 + \epsilon_4 \dots \dots \dots (1)$$

- $\epsilon_1$  : 初期 變形率
- $\epsilon_2$  : 1차 크리이프 變形率
- $\epsilon_3$  : 2차 크리이프 變形率
- $\epsilon_4$  : 3차 크리이프 變形率

不安정한 加速狀態의 3차 크리이프  $\epsilon_3$ 를 除外한 全變形率  $\epsilon$ 은 다음과 같다.

$$\epsilon = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_4 \dots \dots \dots (2)$$

一般的으로  $\epsilon_1$ 과  $\epsilon_2$ 를 無視한 2次 크리이프  $\epsilon_4$ 가 重要하며 이에 미치는 因子中의 하나가 結晶粒徑이다.<sup>5)</sup> 各種 材料의 結晶粒徑이 2次 크리이프 速度  $\dot{\epsilon}_s$ 에 미치는 影響에 關한 廣範圍한 研究<sup>5)</sup>가 되고 있으며 이의 關係式은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_s = \frac{k}{l} + Kl^2 \dots \dots \dots (3)$$

여기서  $l$ 은 結晶粒徑이며  $k$ 와  $K$ 는 溫度 및 應力 레벨에 따라 決定되는 常數이다. 式 (3)을 微分하여 極值를 구하면

$$\dot{\epsilon}_s = -kl^{-2} + 2Kl = 0$$

$l$  : 結晶粒徑

$k, K$  : 溫度 및 應力 레벨에 의하여 결정되는 상수

$$\therefore k = 2Kl^3$$

$l$ 은 2次 크리이프 速度가 最小 값을 나타내는 結晶粒徑  $l_m$ 로 表示할 수 있으므로  $k = 2Kl_m^3$ 을 式 (3)에 代入하면

$$\dot{\epsilon}_s = K \left( \frac{2l_m^3 + l^3}{l} \right) \dots \dots \dots (4)$$

이다. 여기서  $l_m$ 가 微小한 경우 즉, 低溫 크리이프에서는  $\dot{\epsilon}_s$ 는  $l^2$ 에 비례하나  $l_m$ 가 큰 高溫 크리이프에서는  $\dot{\epsilon}_s$ 는  $\frac{1}{l}$ 에 비례할 것이다. 中間 溫度에서는  $\dot{\epsilon}_s$ 의 最小가 式 (4)에 의하여 表示 됨을 Fe—Cr—Ni—Mm 合金에 대한 Garafalo<sup>12, 13)</sup>이 實驗, 그리고 monel에 대한 Shahnian<sup>4)</sup>의 實驗 結果에서 알 수 있다. Garafalo는 920°K에서 알루미늄, 鋼, 3.1% 알루미늄—마그네슘合金, 스테인레스 鋼 및 Fe—Cr—Mn—Mn 合金의 實驗에서 다음과 같은 2次 크리이프 速度實驗式 (5)와 結晶粒徑의 關係式 (6)이 成立된다고 하였다.<sup>12), 13), 14)</sup>

$$\dot{\epsilon}_s = A^n (\sinh \alpha \sigma)^n \dots \dots \dots (5)$$

여기서  $n$ 은 應力指數,  $A^n$ 는 溫度와 結晶粒徑에 의한 常數,  $\alpha$ 는 溫度常數이며 高應力 레벨과 低應力 레벨에서의 實驗值를 利用하여 구할 수 있다.  $A^n$ 는 2次 크리이프 速度에 關係되는 結晶粒徑의 關係式이며 式 (4)와 類似한 形態로 表示된다.

$$A = K_A \left( \frac{2l_m^3 + l^3}{l} \right) \dots \dots \dots (6)$$

$K_A$ 와  $l_m$ 는 應力 레벨에 無關係한 常數이고 溫度와 結晶粒徑에 의하여 變化하며  $A^n$ 가 最小值가 될 때  $l_m$

는  $I$ 과 같다. 2次 크리이프 速度  $\dot{\epsilon}_2$ 는 2次 크리이프가 始作하는 時間을  $t_1$ , 變形率을  $\epsilon_1$ 이라 하고, 끝나는 時間을  $t_2$ , 變形率을  $\epsilon_2$ 라고 할 때 關係式은 다음과 같다.

$$\dot{\epsilon}_2 = \frac{\epsilon_2 - \epsilon_1}{t_2 - t_1} \dots \dots \dots (7)$$

2次 크리이프 速度  $\dot{\epsilon}_2$ 와 破斷 壽命 時間  $t_r$ 와의 關係式은 다음과 같다.<sup>15)</sup>

$$t_r = A(t_2 - t_1)^\alpha \dots \dots \dots (8)$$

여기서  $A$ 는 溫度에 依存되는 變數,  $\alpha \approx 1$ 이며 式 (8)을 式 (7)에 代入하여

$$t_r = \frac{A(\epsilon_2 - \epsilon_1)}{\dot{\epsilon}_2} \dots \dots \dots (9)$$

이다. 式 (5)와 式 (9)로부터 破斷 壽命式을 얻을 수 있다.

$$t_r = \frac{\alpha_0 (\sinh \alpha \sigma)^{-n}}{A^n} \dots \dots \dots (10)$$

여기서  $\alpha_0$ ,  $\alpha$ ,  $n$  등의 값은 實驗에 의하여 구할 수 있다.

### 3. 實驗裝置 및 方法

試驗片의 素材는 國內産 SUN 316 鋼이며 化學的 成分은 Table 1과 같다. 素材를 1100°C, 1125°C, 1175°C, 1250°C 및 1300°C에서 각각 1時間 維持시켜 熔體化 處理하였을 때 ASTM 結晶粒徑은 7, 6, 5, 4 및 3 이고 平均 結晶粒徑은 0.032, 0.044, 0.062, 0.091 및 0.125mm이었다. 室內溫度에서의 機械的 性質은 Table

Table 1. Chemical composition (wt%)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	Cu
0.071	0.423	1.363	0.029	0.016	13.4	17.3	2.02	0.39

Table 2. Heating temperature and mechanical properties.

Heating Temperature	Grain Size (No)	Tensile Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yield Strength (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation (%)	Reduction of Area (%)	Vickers Hardness Vc (50g)
Room temp		59.07	34.19	56.25	76.41	125
1100	7	55.74	29.75	58.93	77.65	125
1125	6	55.38	29.23	59.34	75.71	125
1175	5	54.15	29.15	60.00	75.65	125
1250	4	54.10	29.07	60.71	75.18	125
1300	3	54.08	27.61	62.00	75.00	125

2와 같으며 熔體化 處理 溫度에 의한 結晶粒徑의 크기는 機械的 性質에 影響을 미치고 있음을 알 수 있다. 結晶粒徑이 커질수록 引張強度와 降伏強度 및 斷面 減少率은 떨어지나 延伸率은 增加하였고, 降伏強度가 減少하는 傾向은 Hall-Petch 式의 傾向과 一致하였으며 硬度는 結晶粒徑에 關係없이 一致하였다.

Fig. 1은 각 熔體化 試驗片을 glycergia 液(HNO<sub>3</sub> : HCl : glycerine=1 : 2 : 3)으로 腐食시켜 얻은 金屬顯微鏡 寫眞이며 熔體化 處理 溫度의 增加에 따라 結晶粒徑이 粗大함을 알 수 있다.

試驗片은 Fig. 2와 같은 形狀과 치수로 機械加工하고 鏡面 研磨하였다. 平行部의 直徑은 7mm이고 標点距離는 30mm로 하였다.

크리이프 試驗機는 東京試驗機製(CR-3)를 使用하였고 最大 荷重은 3000kgf이고 lever 비는 20 : 1이다. 머플爐는 900°C의 것을 使用하였고 電位차계(potentiometer)로써 使用 中の 校正을 하였다.

크리이프 應力 레벨은 試驗溫度 600°C에서 36, 34, 32, 28 및 26kgf/mm<sup>2</sup>, 650°C에서 30, 28 및 26kgf/mm<sup>2</sup>,

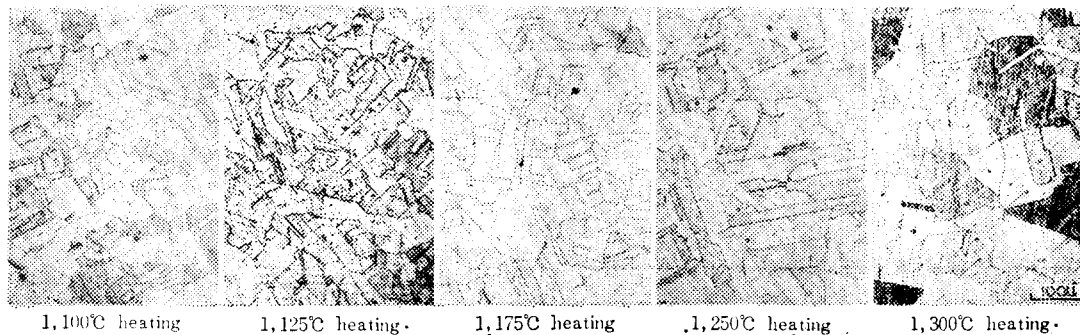


Fig. 1. Microstructure of SUS 316 (etchant glycergia)

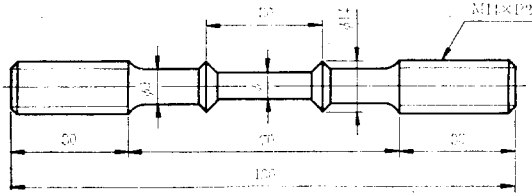


Fig. 2. Shape and dimensions of specimen

700°C에서 26, 24 및 22kgf/mm<sup>2</sup>을 가하였다.

變形量은 수시로 測定하였고 破斷 壽命 時間은 破斷 될 때까지의 時間으로 하였다. 破斷面의 觀察은 走査型 電子 顯微鏡(JEOL 35 CF)을 使用하였다.

#### 4. 實驗結果 및 考察

##### 4.1 結晶粒徑과 實驗溫度 및 크리이프 強度와의 關係

###### 4.1.1 크리이프 曲線

Fig. 3은 600°C에서의 크리이프 曲線이며 結晶粒徑이 0.04mm의 경우가 가장 작은 初期 變形率과 큰 破斷 壽命 時間을 나타낸다. 0.062mm와 0.032mm의 두 曲線은 410 時間 근처에서 서로 交叉하며 0.032mm의 경우 破斷

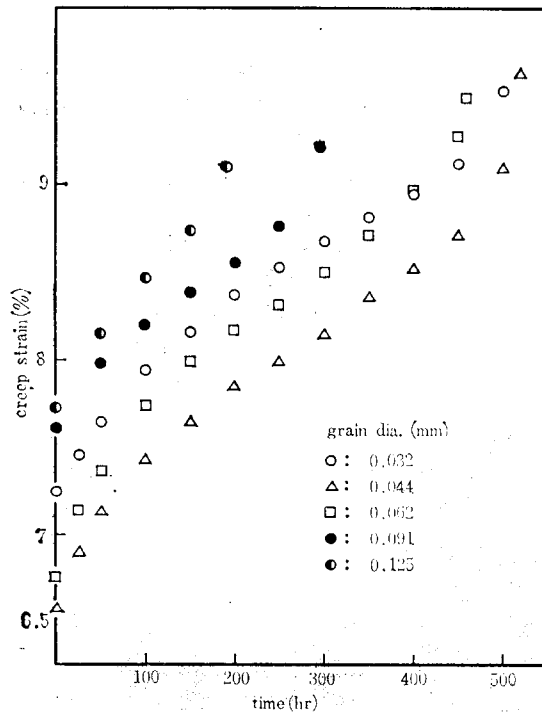


Fig. 3. Creep curve of SUS 316 (26kgf/mm<sup>2</sup>, 600°C)

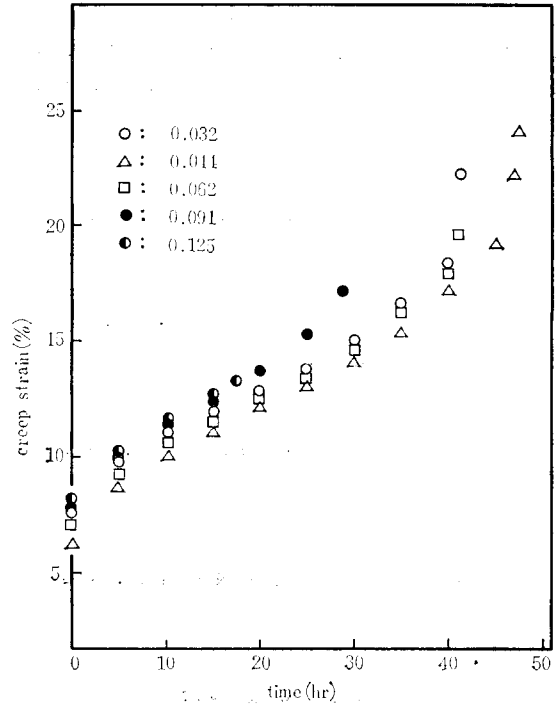


Fig. 4. Creep curve of SUS 316 (26kgf/mm<sup>2</sup>, 650°C)

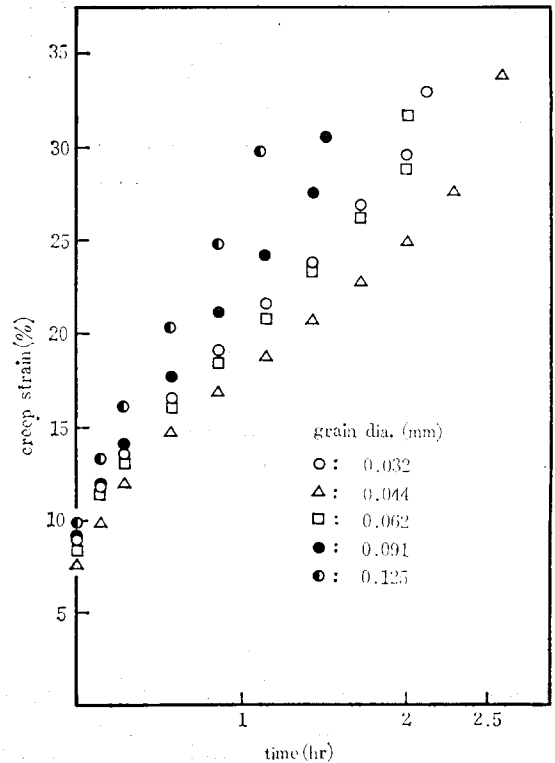


Fig. 5. Creep curve of SUS 316 (26 kgf/mm<sup>2</sup>, 700°C)

壽命 시간이 크다. 0.091mm와 0.125mm는 큰 쪽이 크리이프 曲線의 기울기가 크므로 破斷 壽命 時間은 작은 값을 나타낸다. 破斷 壽命 時間은 0.125, 0.091, 0.062, 0.032 및 0.044mm 순으로 增加하였다.

Fig. 4 및 Fig. 5에서도 Fig. 3과 類似한 樣相을 나타내었고 共通의인 現象으로 初期 變形率은 結晶粒徑 0.044, 0.062, 0.032, 0.091 및 0.125mm 순으로 增加하였으며 破斷 變形率은 0.125, 0.091, 0.062, 0.032 및 0.044mm 순으로 增加하였다. 그리고 結晶粒徑 0.032와 0.062mm 의 各 曲線은 Fig. 3에서는 410 時間, Fig. 4에서는 41 時間, Fig. 5에서는 2時間 근처에서 各 各 交叉하였고 粒徑이 작은 0.032mm 쪽이 큰 破斷 壽命 時間과 破斷 變形率을 갖는다.

初期 變形率부터 破斷 變形率까지의 크리이프가 進行되는 變形率 幅은 實驗溫度가 上昇함에 따라 점점 增加하고 있다.

Fig. 6은 各 實驗溫度에서의 相溫한 結晶粒徑에 대한 初期 變形率을 圖示한 것이다. 初期 變形率은 實驗溫度가 上昇함에 따라 增加하고 結晶粒徑에 따라 變化한다. Fig. 3, 4 및 5에서 考察한 바와 같이 破斷 壽命 時間은 初期 變形率에 關係가 있는 것으로 생각되며 各 結晶粒徑에서 實驗溫度에 關係없이 가장 작은 初期 變形率을 갖는 0.044mm의 경우 가장 큰 破斷 壽命 時間을

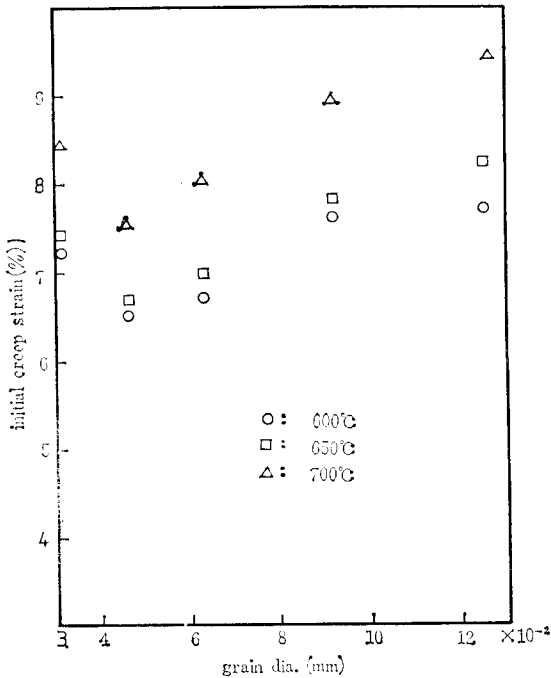


Fig. 6. Initial creep strain vs. grain diameter of SUS 316 (26kgf/mm<sup>2</sup>)

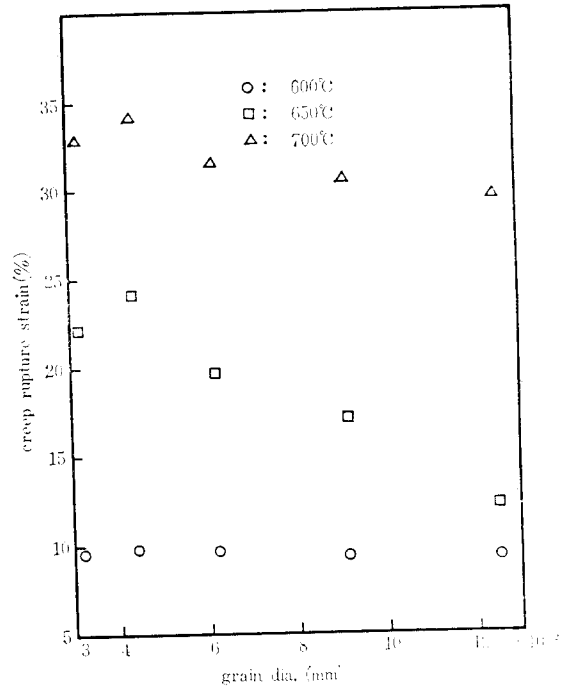


Fig. 7. Creep rupture strain vs. grain diameter. (26kgf/mm<sup>2</sup>)

나타내었다.

Fig. 7을 各 實驗溫度에서 結晶粒徑이 破斷 變形率에 미치는 影響을 나타내었고 溫度 上昇에 따라 破斷 變形率은 增加하였다. 各 結晶粒徑의 破斷 變形率은 600°C에서는 變化가 작으며 650°C에서는 700°C의 경우 보다 큰 變化를 나타내었다. 破斷 變形率은 初期 變形率에 比하여 溫度의 影響을 크게 받는 溫度 依存性을 갖는다.

Fig. 8은 各 實驗溫度에서 相異한 結晶粒徑의 破斷 壽命 時間이 溫度에 크게 의존하여 變化함을 알 수 있으며 初期 變形率 및 破斷 變形率에 比하여 溫度 依存性이 크다. 各 實驗溫度에서 가장 큰 破斷 壽命 時間을 갖는 結晶粒徑은 0.044mm이며 이 때의 破斷 變形率과 初期 變形率도 가장 크게 나타난다.

#### 4.1.2 結晶粒徑과 2次 크리이프 速度 및 應力 레벨과의 關係

Fig. 9는 結晶粒徑과 2次 크리이프 速度와의 關係를 式 (4)에 의한 理論曲線과 實驗值를 各 實驗溫度와 應力 레벨에 따라 나타낸 것이다. 實驗 結果는 Garofalo의 理論式에 의한 曲線에 잘 一致되었음을 나타낸다. 一定한 應力 레벨 및 溫度에서 2次 크리이프 速度는 結晶粒徑의 影響을 받아 變化하고 모두 0.044mm의 경우가 最小 2次 크리이프 速度를 나타낸다. 한편

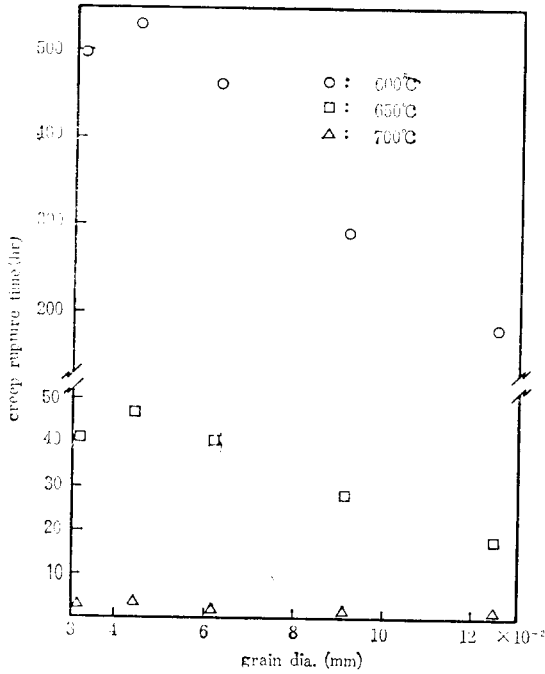


Fig. 8. Creep rupture time vs. grain diameter. (26kgf/mm<sup>2</sup>)

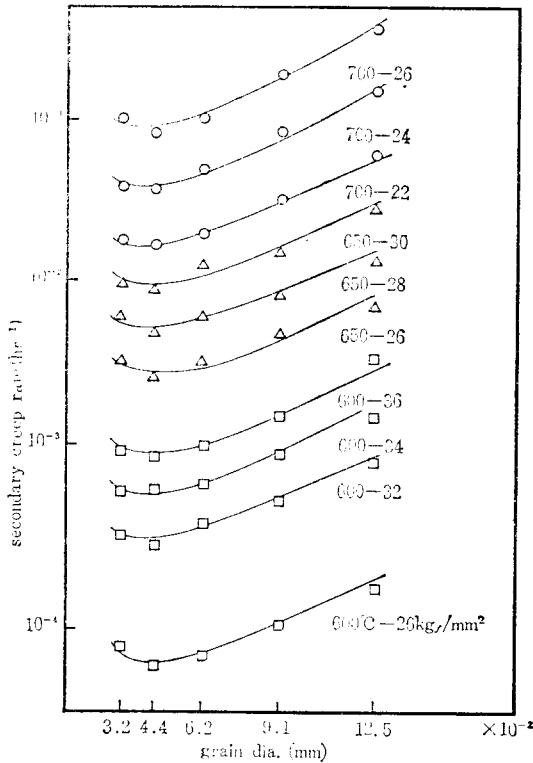


Fig. 9. Secondary creep rate vs. grain diameter of SUS 316.

Garofalo<sup>10)</sup>는 704°C에서 오오스테나이트系 스테인레스 鋼의 最小 2次 크리이프 速度는 最適 結晶粒徑이 應力 依存性을 가진다고 報告하였고, Oh<sup>9)</sup>는 600~650°C에서 SUS 316 鋼의 경우 應力 依存性은 작으나 溫度 依存性이 크다고 하였다. 따라서 이들은 實驗溫度가 變化할 때 最小 2次 크리이프 速度를 가지는 最適 結晶粒徑은 低溫에서 微細한 粒徑, 高溫에서 粗大한 粒徑 쪽에 각각 나타나고 있다. 本 實驗의 結晶粒徑은 Oh의 1100°C에서 時間 依存型 結晶粒徑 調整에 반하여 熱處理 溫度를 變化시켜 얻은 것이므로 實驗溫度 및 應力이 變化하더라도 最適 結晶粒徑의 크기가 거의 變化하지 않고 있으며 모두 最適 結晶粒徑이 0.044mm 근처에서 存在하였다. 이것은 熱處理 過程에서 結晶粒徑을 時間 依存性 또는 溫度 依存性에 대한 同一 範圍의 結晶粒徑이라 할지라도 最適粒徑에 미치는 크리이프 溫度의 影響이 相反되는 結果를 나타내었으며 이의 事由는 아직 明確하지 않다.

Fig. 10은 結晶粒徑을 파라미터로 하여 2次 크리이프 速度에 미치는 溫度의 影響을 半對數紙上에 나타내었다. 結晶粒徑이 0.125, 0.032, 0.062 및 0.044mm의 순으로 2次 크리이프 速度가 溫度 減少에 따라 直線의

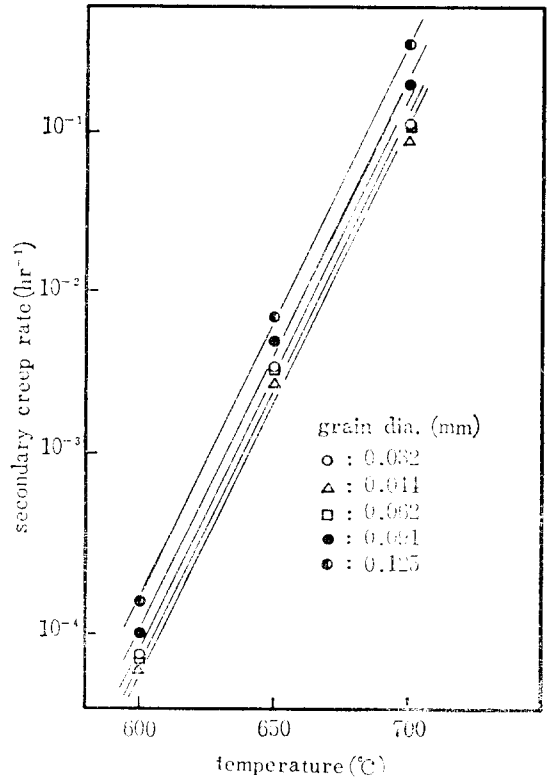


Fig. 10. Secondary creep rate vs. grain diameter of SUS 316 (26kgf/mm<sup>2</sup>).

로 減少하였으며 따라서 破斷 壽命이 增加함을 나타내었다.

4.1.3 溫度와 結晶粒徑에 의한 破斷 壽命式

實驗值들을 式 (3), (4), (5), (6) 및 (10)에 代入하여 破斷 壽命을 얻기 위한 各 常數들을 計算하고 Table 3 및 Table 4에 表示하였다. 結晶粒徑의 關係式

Table 3. Calculated values of various parameters for different temperature and grain size.

Temp (°C)	Grain dia. (mm)	Parameters					
		n	A'' (sec <sup>-1</sup> )	K <sub>A</sub> (mm <sup>-2</sup> hr <sup>-1</sup> )	α (mm <sup>2</sup> kgf)	α <sub>0</sub>	l <sub>m</sub> A (mm)
600	0.032	3.5675	6.2889 × 10 <sup>-7</sup>				0.0436
	0.044	3.5668	5.7813 × 10 <sup>-7</sup>				
	0.062	3.5659	6.6067 × 10 <sup>-7</sup>	1.01367 × 10 <sup>-4</sup>	7.80 × 10 <sup>-2</sup>	3.3058 × 10 <sup>-2</sup>	
	0.091	3.3887	6.813 × 10 <sup>-7</sup>				
	0.125	3.5646	1.7182 × 10 <sup>-6</sup>				
650	0.032	3.4827	2.0926 × 10 <sup>-5</sup>				0.0453
	0.044	3.4770	1.8866 × 10 <sup>-5</sup>				
	0.062	3.4682	2.0953 × 10 <sup>-5</sup>	3.06205 × 10 <sup>-3</sup>	8.40 × 10 <sup>-2</sup>	1.3736 × 10 <sup>-1</sup>	
	0.091	3.4596	3.1612 × 10 <sup>-5</sup>				
	0.125	3.4556	5.2398 × 10 <sup>-5</sup>				
700	0.032	3.3574	3.3441 × 10 <sup>-5</sup>				0.0412
	0.044	3.3603	3.1705 × 10 <sup>-5</sup>				
	0.062	3.3642	3.7812 × 10 <sup>-5</sup>	6.1937 × 10 <sup>-3</sup>	1.18 × 10 <sup>-1</sup>	2.4781 × 10 <sup>-1</sup>	
	0.091	3.3674	6.0858 × 10 <sup>-5</sup>				
	0.125	3.3688	1.0379 × 10 <sup>-4</sup>				

(6)에서 A'' 값이 溫度와 結晶粒徑에 따라 變化하는 것은 Table 4에서도 나타나며 A'' 값이 破斷 壽命에 큰 影響을 미치는 것을 式 (10)으로부터 알 수 있다. 常數 A'', α<sub>0</sub>, α 및 n 값을 求하기 위하여 實驗에서 最高 크리이프 速度를 나타내는 結晶粒徑 l<sub>m</sub>을 求하고 式 (4)에 의하여 一定溫度에서 應力이 變化할 때 各 結晶粒徑의 理想的인 理論曲線에 一致하는 2次 크리이프 速度를 求한다. 그리고 式 (5)를 使用하여 α, A'' 및 n 값

Table 4. Calculated values of parameters for different temperature and Creep Stress.

Temperature (°C)	Creep Stress (kgf/mm <sup>2</sup> )	K	l <sub>m</sub> (mm)
600	36	1.96975 × 10 <sup>-1</sup>	0.0429
	34	1.0980 × 10 <sup>-1</sup>	0.0433
	32	1.1106 × 10 <sup>-2</sup>	0.0437
	26	1.0584 × 10 <sup>-2</sup>	0.0445
650	30	1.7848	0.0448
	28	9.6324 × 10 <sup>-1</sup>	0.0452
	26	5.0373 × 10 <sup>-1</sup>	0.0461
700	26	18.3976	0.0407
	24	8.0995	0.0411
	22	3.4946	0.0418

을 求한다. 다음에 實驗值의 破斷 壽命 時間을 式 (10)에 代入하여 α<sub>0</sub>의 값을 求하여 모든 常數의 값을 活定한다. 따라서 式 (10)에 의하여 任意의 크리이프 溫度와 結晶粒徑에 대한 크리이프 破斷 壽命을 求할 수 있다. 本 實驗에 使用된 各 實驗常數에 있어서 溫度의 增加에 따라 平均指數 n은 600°C에서 3.5711, 650°C에서 3.4686 및 700°C에서 3.3636 등으로 減少하였다.

4.2 크리이프 破斷面의 파단 사진

Fig. 11은 크리이프 溫度 650°C, 應力 레벨이 26kgf/mm<sup>2</sup>일 때 各 結晶粒徑의 破斷面을 觀察한 走査型 電子顯微鏡(SEM) 寫眞이다. 一定溫度와 一定應力 레벨 하에서 結晶粒徑이 破壞舉動에 미치는 파단면 사진은 結晶粒徑이 커짐에 따라 確實한 粒界破壞로 變化하는 傾向을 나타낸다.

Fig. 11(a), (b) 및 (c)는 크리이프 實驗의 粒界破壞에서 볼 수 있는 r型 空洞에 의한 딤플(dimple)이 散在한 徑破壞이며 本 實驗에서 가장 有利한 크리이프 強度인 Fig. 11의 (b)는 (a)와 (c)보다 더욱 많은 딤플을 갖는 粒界 延性 破壞를 나타내고 있다.

한편 (d)와 (e)는 크리이프 實驗에서 나타나는 代表的인 W型 粒界破壞 形狀을 나타내며 結晶粒徑이 가장 큰 (e)의 경우 더욱 큰 凹凸面을 가진다.

Fig. 12는 크리이프 溫度 650°C, 應力 레벨 26kg/mm<sup>2</sup> 및 結晶粒徑이 0.062mm일 때 Fig. 11 (C)에서 粒界에 散在한 딤플의 模樣을 擴大한 SEM 寫眞이다. 延性粒界 破壞로 보이는 空孔으로부터 發生한 딤플은 γ型 임을 確認할 수 있다.

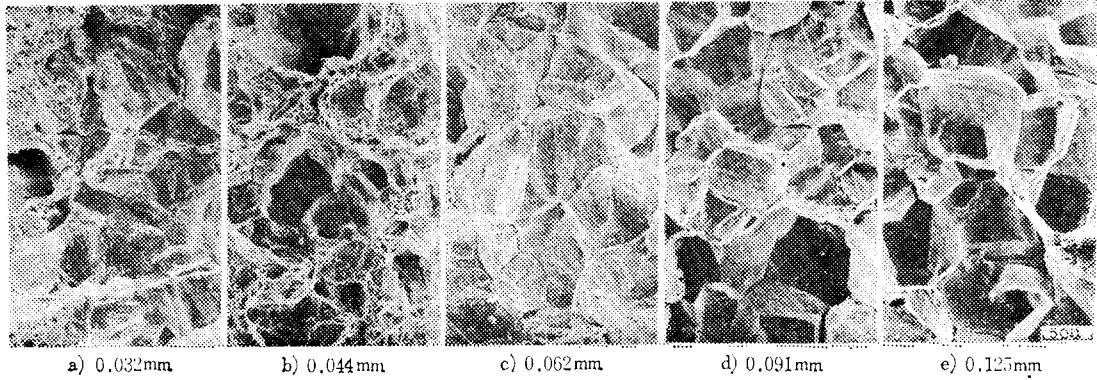


Fig. 11. Fractography of SEM at 650°C, 26kgf/mm<sup>2</sup>

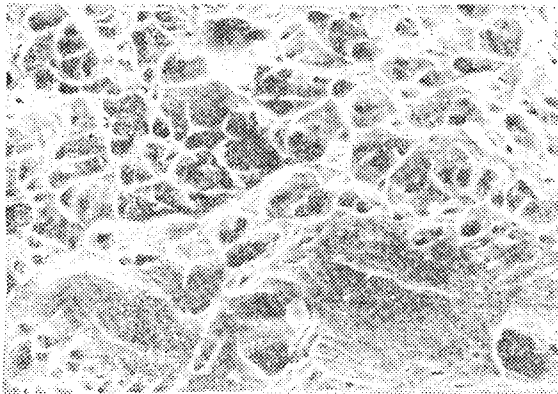


Fig. 12. Fractography of SEM showing dimple.

### 參 考 文 獻

1. E. R. Parker, *Trans. ASM*, Vol. 50, (1958), pp. 52.
2. P. Feltham, J. D. Meakin, *Acta. Met.*, Vol. 1, (1959), pp. 614.
3. J. Mckeown, *J. Inst. Met.*, Vol. 60, (1937), pp. 201.
4. T. R. Shahinian, J. R. Lane, *Trans. ASM*, Vol. 45, (1953), pp. 177.
5. F. Garofalo, "*Fundamentals of Creep and Creep Rupture in Metals*" Macmillan Co. (1966), pp. 28, pp. 204.
6. E. R. Parker, *ASTM Proc.*, Vol. 60, (1960), pp. 849.
7. Y. Takahashi, *J. of Materials Science*, Vol. 14, (1979), pp. 2818.
8. 吳世旭 外 4名, "Austenite Stainless 鋼의 高溫強度 및 破壞舉動에 관한 研究 (I)" 東亞論叢, Vol. 17, (1980), pp. 165.
9. 吳世旭, 金晉坤, "SUS 316 L의 크리이프 強度 및 破壞舉動에 미치는 結晶粒도와 溫度의 影響", 東亞論叢, Vol. 20, (1983), pp. 129~140.
10. E. D. George, "*Mechanical Metallurgy*", McGraw-Hill Co. (1976), p. 448, p. 455.
11. 李東寧, 金屬強度學, 文運堂, (1980), pp. 267~274.
12. F. Garofalo, W. Domis, F. Gemmigen, *Trans. AIME*, Vol. 230, pp. 1464.
13. F. Garofalo, *Trans. AIME*, Vol. 227, (1963), pp. 351.
14. F. Garofalo, R. W. Whitmore, W. Domis, F. Gemmigen, *Trans-AIME*, Vol. 221, (1961), pp. 310.

### 5. 結 論

本 研 究 是 SUS 316 鋼 을 相 異 한 溫 度 中 於 熔 體 化 處 理 後 引 入 結 晶 粒 徑 大 小 及 크리이프 溫 度 及 應 力 水 平 等 에 미 치 는 影 響 을 實 驗 的 으 로 考 察 한 結 果 다 음 과 같 은 結 論 을 얻 었 다.

1. 最 大 크리이프 強 度 를 갖 는 最 適 結 晶 粒 徑 은 크리이프 溫 度 及 應 力 水 平 의 影 響 을 거 의 받 지 않 는 다.

2. 熔 體 化 溫 度 에 의 한 溫 度 依 存 性 의 結 晶 粒 徑 中 0.044mm의 것 이 크리이프 溫 度 에 關 係 없 이 가 장 작 은 初 期 變 形 率 및 큰 크리이프 強 度 를 나 出 示 了 了. 이 것 은 時 間 依 存 性 에 의 하 여 얻 은 結 晶 粒 徑 이 크리이프 溫 度 에 따 라 變 化 한 다 는 報 告 와 는 相 反 反 對 的 矣.

3. Garofalo의 破 斷 壽 命 式  $t_r = \alpha_0 (\sinh \alpha \sigma)^{-n} / A^n$  은 SUS 316 鋼 에 도 잘 適 用 可 能 矣.

4. 最 適 結 晶 粒 徑 인 0.044mm의 破 壞 舉 動 은 鷓 鴒 型 의 r型 粒 界 延 性 破 壞 였 으 며 粒 徑 이 增 加 할 수 록 W型 完 全 粒 界 破 壞 로 나 出 示 了 了.