

## Zr-4의 高溫 크리프 및 應力弛緩 特性에 關한 研究

吳世奎 · 朴正培\* · 韓相德\*\*

釜山水產大學校 工大, \*古里 原子力發電所, \*\*統營水產專門大學(講師)

(1992年 2月 22日 接受)

### A Study on High Temperature Creep and Stress Relaxation Properties of Zr-4

Sea-Kyoo OH, Chung-Bae PARK\* and Sang-Deok HAN\*\*

College of Engineering, National Fish. Univ. of Pusan

\*Ko-Ri Atomic Power Plant

\*\*National Tongyeong Fisheries Junior College

(Received February 22, 1992)

Zr-4 used for a cladding and an end plug of reactor component has creep deformation under operation at high temperature. Creep is regarded as the time dependent deformation of a material under constant applied stress. Although the major source of the deformation of zirconium component in water-cooled reactors is irradiation creep, the thermal creep may give a rise to significant deformation in reactor component especially at relatively high temperatures and at various constant stresses, and therefore it must be predicted accurately. Stress relaxation is the time dependent change of stress at constant strain and it is a process related intimately to creep.

In this paper, the creep behavior and stress relaxation of Zr-4 is examined at the temperature of 500°C that is 40% of the absolute melting temperature of Zr-4 under the stress below yield stress and under the various constant strains.

The results obtained are summarized as follows:

1) With an increase of stress, the steady state creep rate increases and the creep rupture time decreases.

2) The steady state creep rate  $\dot{\epsilon}$  (%/s) for the stress  $\sigma_c$  ( $kgf/mm^2$ ) of Zr-4 increases outstandingly. All the empirical equations computed for Zr-4 are in accord with Norton's model equation ( $\dot{\epsilon} = K\sigma_c^n$ ). The constants of materials computed are as follows:

$$K = 3.9881 \times 10^{-5}, \quad n = 1.9608$$

3) The rupture time  $T_r$  (hr) decreases linearly with the increase of stress on the log-log scaled graph. The empirical equations computed for Zr-4 are in accord with Bailey's model equation ( $T_r = K_1 \sigma_c^m$ ). The constants of materials computed are as follows:

$$K_1 = 1,2875 \times 10^{16}, \quad m = -3.467$$

4) It seems clear that the strain could be quantitatively dependent on the high temperature creep properties such as creep stress, rupture time, steady state creep rate and total creep rate. It is found that these relationships are linear on the log-log graph.

5) In stress relaxation test, as the critical constant strain that can be allowed to the specimen is larger, stress relaxation becomes more rapid, and as the constant strain is smaller, the stress relaxation becomes slower.

### List of symbols

$\phi$	: angle of inclination
$K$ and $K_1$	: material constants
$\epsilon_0$	: initial strain(%)
$\epsilon$	: strain(%)
$\dot{\epsilon}$	: steady state creep rate(%/sec)
$\epsilon_t$	: total creep strain(%)
$\dot{\epsilon}_t$	: total creep rate(%/sec)
$T_r$	: rupture time(hr)
$\sigma_c$	: creep stress(kgf/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_y$	: yield strength(kgf/mm <sup>2</sup> )
$\sigma_T$	: tensile strength(kgf/mm <sup>2</sup> )
$n$	: stress exponent for steady state creep rate
$m$	: stress exponent for rupture
$H_R B$	: Rockwell hardness(B scale)
$T_m$	: temperature of melting point (°K)

覆管(fuel cladding), 燃料管마개(fuel end plug)등으로 쓰이고 있다. 核燃料 被覆管은 核燃料를 감싸서 核燃料(fuel)가 冷却材와 직접 接할 때 일어나는 腐蝕이나 機械的 寢食을 防止하고 燃燒中에 生成된 核分裂 生成物(fission product)이 冷却材(reactor coolant)中에 옮겨 가는 것을 防止하기 위한 역할을 한다<sup>1)</sup>.

이는 지르칼로이의 熱中性子(thermal neutron)吸收 斷面積이 적고 原子爐 稼動條件下에서 이 材料의 強度와 延性이 비교적 優秀하며, 冷却材에 대한 耐蝕性이 비교적 優秀하며 良好하기 때문이다. 이 외에도 核燃料(UO<sub>2</sub>)와의 共存性 및 熱傳導度가 비교적 좋고 中性子 照射에 의한 손상도 적어 核燃料 被覆管 및 爐心構造用 材料로써 要求하는 條件을 잘 만족시키고 있다.

그러나 재료가 高溫(320°C)에서 사용되는 경우에 應力을 받게되면 크리프(creep)變形이 생기게 된다. 고온에 있어서는 어떠한 재료라 할지라도 長時間에 걸쳐서 荷重을 받아 서서히 변형하는 성질이 있는데 이러한 現象을 크리프(creep)라고 한다. 이러한 材料에 一定한 應力 또는 荷重下에서 塑性變形이 생기면 static creep라 하고 應力이 週期的으로 變하면 cyclic creep라고

### 1. 序 論

지르코늄합금중에서 zircaloy-2(Zr-2)와 zircaloy-4(Zr-4)는 原子力 發電所 爐心構造物의 主要部에 쓰이고 있는데 그 中에서 核燃料 被

한다. 많은 高溫資料들이 zirconium의 크리프 (creep)機構를 파악하기 위해 使用되고 있다<sup>2-4)</sup>. 高溫 크리프는 또한 假想事故 狀態下에서 zircaloy의 舉動 豫測에 重要하다<sup>2)</sup>. 美國의 T. M. I 事故 후 核燃料 被覆材인 Zr-4의 高溫크리프 해석이 더욱 더 需要하게 되었다. 高溫크리프란  $0.5T_m$ 의 溫度 이상에서 나타나는 크리프 현상으로, 高溫( $0.6T_m \sim 0.7T_m$ )에서는 크리프舉動에 뚜렷한 差異가 없기 때문에 最近에는 高溫에서 얻은 資料들을 使用하여 中間溫度의 크리프舉動을 豫測하려는 試圖가 이루어지고 있다<sup>5)</sup>. 한편 크리프에 關한 研究는 Andrade<sup>6)</sup>를 비롯하여 Norton<sup>7)</sup> 및 Bailey<sup>8)</sup>등에 의해 많은 進歩가 있었으며, 제 II차 世界大戰을 起點으로 본격적으로 進歩되어 왔다. 原子爐 構造物로 使用되고 있는 材料는 放射線 照射에 의한 照射크리프 (irradiation creep) 變形이 생기는데 이를 理解 하려면 熱에 의한 크리프舉動이 정확히 豫測되어야만 한다. 그리하여 中性子 照射로 인한 被覆材 재료의 크리프와 應力弛緩에 대한 많은 研究가 있어 왔으나<sup>2-4)</sup>, 크리프파단 수명예측을 위한 初期延伸率과의 相關關係 研究는 아직 없는 실정이다.

따라서 본 연구는 Zr-4의 高溫( $500^{\circ}C$ )에서의 크리프特性 및 應力弛緩 舉動特性을 實驗的으로 調查研究하여 照射크리프(irradiation creep)를 이해하고, 특히 고온 크리프 특성과 연신률과의 상관성을 정량적으로 조사하여, 크리프수명 예측을 하는데 基礎 資料가 되게 하였다.

## 2. 크리프 材料定數 決定에 대한 理論解析

一定한 크리프 條件下에서 材料에 따라서는 각기 다른 固有의 變形이 發生한다. 따라서 第II期 段階의 定常 크리프 速度  $\dot{\epsilon}$ 는 作用된 應力에 比例하는데 Norton<sup>7)</sup>은 다음과 같은 式을 提案하였다.

$$\dot{\epsilon} = K\sigma_c^n \dots\dots\dots(1)$$

여기서  $K$ 와  $n$ 은 一定 溫度 및 材料 常數이다. 式(1)의 兩邊에 代數를 取하면

$$\log \dot{\epsilon} = \log K + n \log \sigma_c \dots\dots\dots(2)$$

로 되고  $\log \dot{\epsilon}$ 와  $\log \sigma_c$ 사이에는 直線的인 關係가 성립한다.

또한, 溫度 條件을 一定하게 하면  $K$ 는 一定常數가 되어  $\log K$ 는 常數  $B$ 로 둘 수 있다.

이 때, 直線이 從軸과 만나는 절편을  $B (= \log \sigma_c)$ , 기울기를  $A$ , 橫軸에 대한 傾斜角을  $\phi$ 라 하고, 直線의 方程式을  $y = Ax + B$ 形式으로 置換하면, 式(2)에서 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\log \sigma_c = \frac{1}{n} \log \dot{\epsilon} - \frac{1}{n} \log K \dots\dots\dots(3)$$

여기서

$$A = \frac{1}{n} = \tan \phi, \quad n = \cot \phi \dots\dots\dots(4)$$

$$B = -\frac{1}{n} \log K = \log \sigma_c \dots\dots\dots(5)$$

따라서

$$K = \sigma_c^{-n}, \quad K = 10^{-nB} \dots\dots\dots(6)$$

여기서, 크리프 온도와 재료의 정수인  $n$  및  $K$ 는 式(4)와 式(6)에서 구할 수 있다.

## 3. 試驗片 및 實驗方法

### 3-1. 試驗片

본 實驗에서 使用한 材料는 Zr-4 환봉으로 지름은 약 10mm이며 그 化學的 成分과 기계적 성질은 각각 Table 1과 Table 2에 나타낸다.

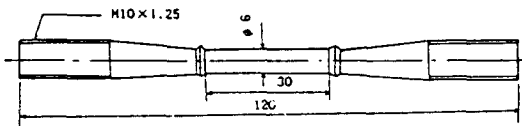
크리프 試驗片은 Fig. 1과 같이 兩端을 시험편의 rod 선단에 있는 홀더(holder)에 固定할 수 있도록 나사(thread) 加工하였다. 한편 延伸率을 測定하기 위해 標點距離위치에 flange部를 加工하였으며 形狀 치수에 따라 旋削 및 研削 加工한 後에 鏡面 研磨한 후 實驗을 수행하였다.

**Table 1.** Chemical composition of Zr-4

Element	Composition	Element	Composition
Sn	1.54%	Mg	<10ppm
Fe	0.20%	Mn	<10ppm
Cr	0.11%	Ni	<35ppm
Al	41ppm	N	39ppm
B	<0.25ppm	Si	75ppm
Cd	150ppm	W	<50ppm
Co	<10ppm	Ti	<25ppm
Cu	15ppm	U	<1.0ppm
Hf	64ppm	O	1,360ppm
H	<5ppm	Zr	Balance

**Table 2.** Mechanical properties of material used

Material	Tensile strength $\sigma_T$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Yield strength $\sigma_y$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elongation $\epsilon_L$ (%)	Hardness $H_{RB}$
Zr-4	56.67	34.44	24	85~96



**Fig. 1.** Shape and dimension of creep and stress relaxation test specimen (mm).

### 3-2. 實驗裝置 및 實驗方法

本實驗에서 사용한 크리프 시험機는 容量 5 ton의 SATEC Model DLF-10 servomaster creep/stress relaxation machine 이다. 爐 (furnace)는 垂直型 3區域 形態의 開閉式 電氣 爐로 control console에 附着된 爐의 溫度를 制御하는 自動溫度 調節 裝置는 1200°C까지 全範圍의  $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 의 正確度를 가지며 爐의 安定度는  $\pm 1.5^\circ\text{C}$ 이다. 試片의 溫度를 一定하게 維持하기 위하여 3대의 溫度 調節機를 使用하였으며, 實驗 中에도 試片에 K type인 3個의 熱電帶를 附着시켜 디지털溫度 測定機를 통하여 確認하였다. 그 결과 溫度偏差는 實驗溫度의  $\pm 1^\circ\text{C}$  이내 임을 알 수 있었다. 試片의 加熱工程은 試片에 負荷를 주지 않은 狀態에서 500°C까지 約 5°C/min으로 加熱하였으며 負荷하기 前에 爐의 溫度

分布가 均一하게 維持되도록 500°C에서 30分間 均一하게 加熱시킨 다음 荷重을 가하였다.

크리프 試驗時 試片길이의 變化量을 測定하기 위하여, 試驗片의 中央部 표점거리 30mm의 兩端에 flange를 만들었으며 延伸率은 伸張機 (extensometer)와 LVDT (linear variable differential transformer) Model No. 9234S를 使用하여 測定하여 control console에 附着된 記錄計에 의해 記錄하였으며 爐 全體 3區間의 溫度 分配는 2°C 程度이었다. 이 실험결과로 부터 最小自乘法을 이용한 回歸解析法에 의해 實驗式들을 도출하였다.

## 4. 結果 및 考察

### 4-1. Zr-4의 크리프 曲線

一定溫度(500°C)下에서 應力을 變化시켰을 때 實驗的으로 구한 Zr-4의 크리프 曲線은 Fig. 2에 表示한 바와 같다. 그림에서 알 수 있듯이 크리프 變形은 應力이 클수록 增加함을 알 수 있다.

또한 應力이 1,621kgf/mm<sup>2</sup>에서 4,24kgf/mm<sup>2</sup>까지 증가함에 따라 0.12~0.36%의 初期 延伸率이 나타남을 알 수 있었다.

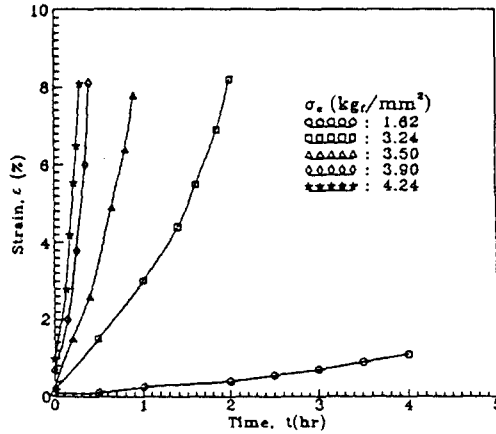


Fig. 2. Creep curves of Zr-4 according to various stress at constant temperature of 500°C.

#### 4-2. Zr-4의 定常 크리프 速度와 應力과의 關係

高温(500°C)크리프 試驗에서 Zr-4 試驗片에 대한 應力別 初期 延伸率( $\epsilon_0$ %), 크리프 速度( $\dot{\epsilon}$  %/s), 破斷 時間( $T_r$ , hr)을 測定한 結果는 Table 3과 같다. 또, Fig. 3은 크리프 應力 $\sigma_c$  ( $kgf/mm^2$ )와 定常 크리프 速度( $\dot{\epsilon}$ %/s)의  $\log$  값인  $\log\sigma_c$ 와  $\log\dot{\epsilon}$ 와의 사이의 相關關係 그래프를 나타낸 것으로 여기서 直線的인 相關關係가 成立하는 것은 Norton<sup>7)</sup>에 의해 提案된 바와 一致한다. 이들 값에서 直線的의 기울기  $A$ 와 縱軸의 切片 값  $B$ 를 구하기 위해 最小自乘法을 이용하여  $\log\sigma_c$ 를  $y$ ,  $\log\dot{\epsilon}$ 를  $x$ 라 놓으면 다음과 같은 電算式이 구해진다.

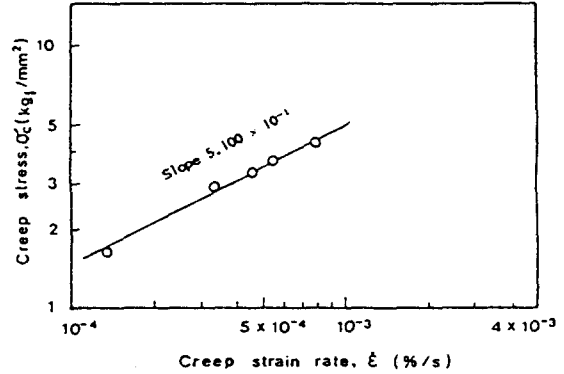


Fig. 3. Relationship of creep rate versus creep stress of Zr-4 at 500°C.

$$y_{Zr-4} = 5.100 \times 10^{-1}x + 2,2436 \quad \dots\dots\dots (7)$$

이들 값에서 (4)式과 (6)式을 이용하여  $n$ 과  $K$ 값을 구하면 (1)式으로 부터 다음과 같은 定常 크리프 速度式이 얻어진다.

$$\dot{\epsilon}_{Zr-4} = 3.9881 \times 10^{-5} \sigma_c^{1.9608} \quad \dots\dots\dots (8)$$

#### 4-3. Zr-4의 高温 크리프 應力과 破斷壽命과의 關係

Zr-4에 대한 크리프 設計 데이터 線圖(creep design data diagram)를 얻기 위해 應力( $\sigma_c$ )과 破斷壽命( $T_r$ )과의 關係를 나타낸 것이 Fig. 4이다.

이들 相關性에 대해서 最小自乘法을 이용한 回歸解析法에 의해 轉산한 實驗式은

$$T_{rZr-4} = 1.2875 \times 10^{16} \sigma_c^{-3.467} \quad \dots\dots\dots (9)$$

Table 3. Data of creep test under uni-axial tension at 500°C

Specimen	No	Stress $\sigma_c$ ( $kgf/mm^2$ )	Initial strain $\epsilon_0$ (%)	Steady state creep rate $\dot{\epsilon}$ ( $10^{-4}\%/s$ )	Rupture time $T_r$ (hr)	Total creep strain $\epsilon_t$ (%)	Total creep rate $\dot{\epsilon}_t$ ( $10^{-4}\%/s$ )
Zr-4	1	1.62	0.12	1.2	18.00	35.98	5.6
	2	3.24	0.18	2.3	5.20	33.10	19.6
	3	3.50	0.24	4.1	3.80	31.75	23.2
	4	3.90	0.30	5.4	1.50	27.51	50.9
	5	4.24	0.36	8.5	0.75	25.40	94.1

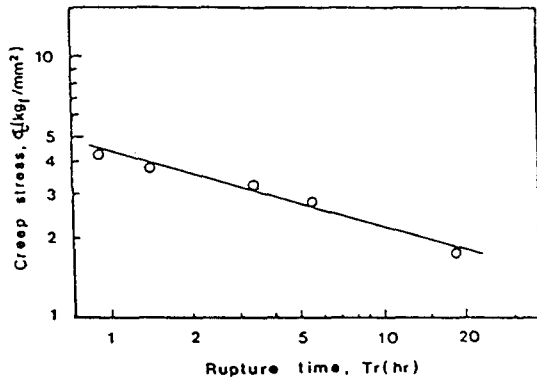


Fig. 4. Relationship of creep stress versus creep rupture time at 500°C.

이다.

Fig. 4에서 應力에 대한 破斷 壽命의 關係가 兩代數 그래프에서 모두 直線的인 相關性이 있음을 알 수 있으며 이들 式은 다음과 같이 모델화 되므로 Bailey<sup>8)</sup>의 式과 一致한다.

$$Tr = K_1 \sigma_c^m \dots \dots \dots (10)$$

$K_1$ : 材料 常數  $m$ : 破壞 應力指數

4-4. Zr-4의 初期 延伸率과 高溫 크리프 特性과의 相關性

Table 3에서와 같이 應力을 變化시켜서 500°C에서 크리프 試驗한 경우, 初期延伸率이 高溫 크리프 特性에 미치는 影響을 實驗으로 調査한 結果를 Fig. 5와 Fig. 6에 나타내었다. 크리프 應力  $\sigma_c$ (kgf/mm<sup>2</sup>), 破斷時間  $T_r$ (hr), 初期延伸率  $\epsilon_0$ (%)와 全 크리프 延伸率  $\epsilon_t$ (%), 定常 크리프 速度  $\dot{\epsilon}$ (%/sec), 全 크리프 速度  $\dot{\epsilon}_t$ (%/sec)와의 사이에는 定量的인 相關性이 존재하며 이들은 log-log 座標 平面上에서 直線으로 나타나며, 이들 相關性에 關하여 最小自乘法을 利用하여 구한 實驗式은 다음과 같다.

$$(\sigma_c - \epsilon_0)_{Zr-4} : \sigma_c = 1.7548 \times 10 \epsilon_0^{0.8227} \dots (11)$$

$$(Tr - \epsilon_0)_{Zr-4} : Tr = 5.2646 \times 10^{-2} \epsilon_0^{-2.7662} \dots \dots \dots (12)$$

$$(\epsilon_t - \epsilon_0)_{Zr-4} : \epsilon_t = 1.9104 \times 10 \epsilon_0^{-0.3125} \dots (13)$$

$$(\dot{\epsilon} - \epsilon_0)_{Zr-4} : \dot{\epsilon} = 4.4271 \times 10 \epsilon_0^{1.6477} \dots (14)$$

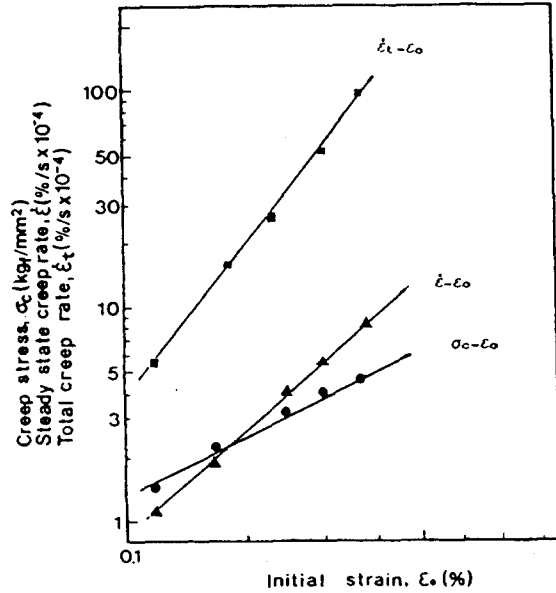


Fig. 5. Relationship of initial strain versus various creep properties of Zr-4 at 500°C.

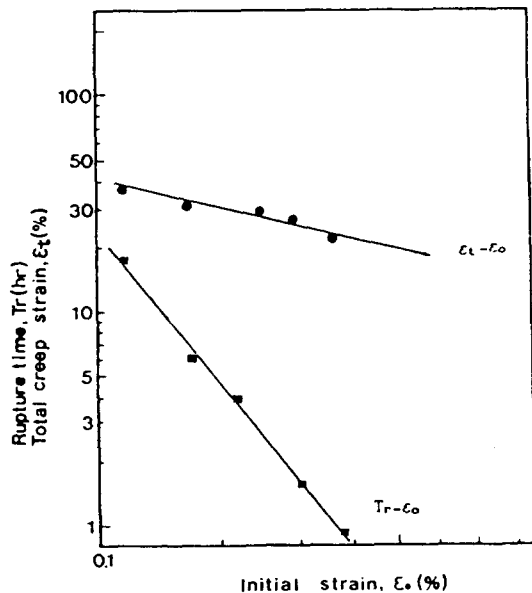


Fig. 6. Relationship of initial strain versus various creep properties of Zr-4 at 500°C.

$$(\dot{\epsilon}_t - \epsilon_0)_{Zr-4} : \dot{\epsilon}_t = 9.7465 \times 10^2 \epsilon_0^{2.4165} \dots \dots \dots (15)$$

따라서 以上에서 알 수 있는 바와 같이 初期

延伸率은 高溫크리프의 諸特性, 즉, 크리프應力, 破斷壽命, 定常크리프速度, 全크리프延伸率 및 全크리프速度和 定量的인 相互 聯關性이 존재함을 알 수 있으며, 이는 Oh<sup>9)</sup>등의 發表와 一致한다. 한편 Fig. 5에서 보면 初期延伸率  $\epsilon_0$ 가 增加함에 따라  $\sigma_c - \epsilon_0$ ,  $\dot{\epsilon} - \epsilon_0$ ,  $\dot{\epsilon}_i - \epsilon_0$ 곡선에서  $\sigma_c$ ,  $\dot{\epsilon}$ ,  $\dot{\epsilon}_i$ 등이 각각 증가하고, Fig. 6에서는 初期延伸率  $\epsilon_0$ 가 增加함에 따라  $\epsilon_i - \epsilon_0$ ,  $T_r - \epsilon_0$  그래프에서  $\epsilon_i$ 와  $T_r$ 이 각각 減少한다.

4-5. 破斷壽命 豫測의 初期 延伸率法모델 導出

Zr-4 크리프 變形의 研究는 窮極의으로 應力狀態 및 一定溫度에 대한 材料의 크리프 壽命을 豫測하여 最適設計 條件을 決定하는데 있으나, 이러한 많은 壽命 豫測의 研究는 주어진 應力 및 溫度下에서 豫測되므로 時間的, 經濟的 努力이 必要하다. 그러므로 初期 延伸만 알 수 있으면 바로 長時間 크리프 特性值를 豫測 할 수 있으므로<sup>9)</sup> 모델을 式(11)~式(15)로부터 導出하면 다음과 같다.

$$\sigma_c, T_r, \epsilon_i, \dot{\epsilon} \text{ \& \ } \dot{\epsilon}_i = a \epsilon_0^b \dots\dots\dots (16)$$

또한 破斷壽命 豫測을 위한 初期 延伸率에 대한 實驗式에서 다음과 같이 모델화할 수 있다.

$$T_r = a \epsilon_0^{-b} \dots\dots\dots (17)$$

$\epsilon_0$ 와  $\sigma_c$ 와의 相關性을 나타내는 計算된 모델식은

$$\epsilon_0 = c \sigma_c^d \dots\dots\dots (18)$$

이다.

위의 式들은 溫度가 一定할 때의 溫度 및 材料定數 a, b, c, d를 實驗을 통하여 求하면 앞으로 활용할 수 있는 모델식이 될 것이다. 즉, 溫度, 應力, 初期 延伸率 및 破斷 壽命간의 相關性을 앞으로 定量的으로 實驗을 통해 導出해 둔다면 매우 편리하게 實驗式을 이용할 수 있으며, 長時間 壽命 豫測에 있어서 有用할 것이라고 생각된다.

4-6. Zr-4의 應力弛緩 曲線

負荷되고 있는 部材의 應力(彈性 스트레인)이 時間의 經過와 함께 생기는 크리프 塑性變形 때문에 減少해 나가는 現狀을 應力弛緩이라고 하는데, 原子爐 被覆材와 管마개로 쓰이는 Zr-4의 경우는 運轉變數가 갑자기 變하는 경우에 생길 수 있다. 즉 出力調節을 위한 中性子束의 變化에 의해 應力變化로 인한 일정한 스트레인 한계치, 또는 燃料 再裝填으로 인한 應力の 變化에 의한 일정한 스트레인 한계치에서 應力 弛緩이 생길 수 있으므로 이는 正確히 豫測 할 수 있어야 한다.

Fig. 7은 一定溫度(500°C)下에서 時間에 따른 應力變化를 나타내는 Zr-4의 應力弛緩 曲線으로서, 부하되고 있는 스트레인 한계치가 클 수록 짧은 時間내에 應力이 減少함을 나타내고 있고 應力값이 작을 수록 천천히 應力減少가 일어남을 알 수 있다. 時間이 어느 정도 經過하면 스트레인 한계치가 크거나 작을 때도 類似한 應力弛緩을 取하게 된다.

또한 연신을 1.27%에서는 1.5時間이 지난 후 應력값이 일정해졌으며, 延伸率 0.36%, 0.012%에서는 각각 2.1時間, 4.5時間이 지난 후 應力값이 일정해 짐을 알 수 있다.

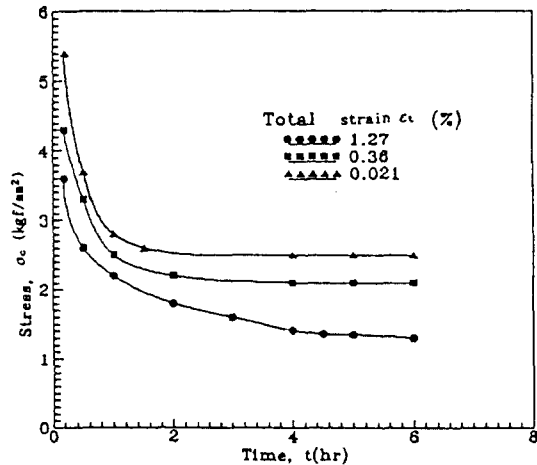


Fig. 7. Stress relaxation curve of Zr-4 according to various constant strains at 500°C.

이는 재료에 負荷되고 있는 응력이 클 수록, 즉 스트레인 한계치가 클 수록 빨리 응력이완이 일어남을 알 수 있다.

## 5. 結 論

高溫(500°C)에서 Zr-4에 대한 크리프 및 應力弛緩 試驗을 실시하여 얻은 크리프 特性和 應力弛緩 特性은 다음과 같다.

(1) 應力이 증가함에 따라 定常 크리프 速度가 증가하고 破斷壽命이 짧아진다.

(2) 應力 증가로 인한 定常크리프速度  $\dot{\epsilon}$ 는 더욱 빠르게 변한다. 여기서  $\dot{\epsilon}$ 와 크리프 應力  $\sigma_c$  ( $kgf/mm^2$ )와의 相關關係는 Norton의 모델 식( $\dot{\epsilon} = K\sigma_c^n$ )과 一致하며 決定된 材料常數는

$$K = 3.9881 \times 10^{-5}, n = 1.9608 \text{이다.}$$

(3) 應力 增加에 따른 破斷壽命  $T_r$ (hr)은 兩代數 그래프에서 거의 直線의으로 減少한다. 여기서  $T_r$ 과 크리프 應力  $\sigma_c$ 와의 相關關係가 Bailey의 모델 ( $T_r = K_1 \sigma_c^m$ )과 一致하며 決定된 材料常數는

$$K_1 = 1.2875 \times 10^{16}, m = -3.467$$

이다.

(4) 初期延伸率과 크리프 應力, 破斷時間, 全 크리프 延伸率, 定常크리프速度 및 全크리프速度 사이에는 兩代數 座標에서 直線의인 定量的 相關性이 存在한다.

(5) 應力弛緩 試驗에서 負荷되고 있는 應力에 의한 일정 스트레인 한계치가 클 수록 應力弛緩이 빠르고, 작을 수록 應力弛緩이 느리게 나타난다.

## 參 考 文 獻

- 1) 韓國原子力學會(1989) : 核材料工學. 308-321.
- 2) Franklin, D.G., G. E. Lucas, A. I. Bement (1983): Creep of Zirconium Alloys in Nuclear Reactors, 1-39.!
- 3) Benjamin, M. MA. (1983): Nuclear Reactor Materials and Applications. VAN Nostrand Reinhold Company, 299-307.
- 4) Harvey, W. Graves, Jr (1979): Nuclear Fuel Management. John Wiley & Sons, New York, 168-172.
- 5) Nam, S. W., S. I. Hong. (1983): Steady State Creep Characteristics of Ni-22 at % Cu Alloy at High and Intermediate Temperature. Journal of Materials Science, 1743-1750.
- 6) Andrade, E. N. (1910): On the Viscous Flow of Metals and Allied Phenomena. Proc. Royal Soc. London, Ser. A, 84. 1.
- 7) Norton, F.H. (1929): The Creep of Steel at High Temperature. Mc Graw-Hill, New York, 67.
- 8) Bailey, R.W. (1929): Creep of Steel under Simple and Compound Stresses and the Use of High Initial Temperature in Steam Power Plant. Trans. World Power Conference, 3, 1089.
- 9) Oh, S. K., T. Kunio and A. Hasui (1986): Effect of Initial Strain on Evaluation of High Temperature Creep Properties of Friction Welded Joint. Proceeding of APCS (Asian - Pacific Congress on Materials Strength Evaluation)-86, 549-554.