

高温腐蝕을 받는 SUS 304 스테인레스鋼의 크리이프 破斷壽命에 관한 研究

吳世旭* · 朴寅錫** · 姜相薰***

* 東亞大學校 工科學 機械工學科

** 韓國動力資源研究所 보일러研究室

*** 東亞大學校 大學院 機械工學科

A Study on the Creep Rupture Life of SUS 304 Stainless Steel Subjected to Hot Corrosion

Sae-Wook Oh* In-Seok Park** Sang-Hoon Kang***

* *Dep't. of Mechanical Eng., Dong-A Univ.*

** *Korea Institute of Energy & Resources, Boiler Lab.*

*** *Dep't. of Mechanical Eng., Dong-A Univ.*

In order to predict the creep life of SUS 304 stainless steel being used as boiler superheater tubes under hot corrosion and creep environment, the creep tests were carried out at the temperature range of 630 to 750°C in static air for the specimens with or without coating of double layer corrosives according to the new hot corrosion test method.

Finally, the equation for creep life prediction of SUS 304 stainless steel under hot corrosion condition was derived by method extrapolating creep rupture data. From the investigations of the creep rupture properties, it was also clarified that the creep life of SUS 304 stainless steel subjected to hot corrosion is chiefly determined by the aggressive intergranular penetration of sulfides and tube wall thinning, and that the creep rupture life is remarkably shortened at temperature near the melting point of the corrosive products.

1. 序 論

最近, 보일러를 비롯한 各種의 高温機器 및 構造物은 日수록 大型化, 高効率化, 高温高压化 추세에 있고 稼動環境도 苛酷化되어 짐에 따라 材料強度에 미치는 環境效果의 解明과 環境強度設計基準의

確立이 절실히 要望되고 있다.

특히 보일러는 經濟性 追求와 熱效率 向上을 위하여 蒸氣條件이 168~255kg/cm², 566°C로 設計되는 것이 많고, 過熱器 및 再熱器 등의 管表面 溫度가 上昇함에 따라 여러가지 損傷이 발생되고 있다. 더구나 보일러用 燃料로 使用되고 있는 重油중에

는 高温腐蝕과 밀접한 관계가 있는 V, Na, S 등의 腐蝕性 不純物이 含有되어있으며, 이러한 元素들은 相互 化学的으로 反應하여 活性的인 低融点 化合物을 形成하여 腐蝕反應을 더욱 促進시킨다.

한편, 보일러의 過熱器나 再熱器 등에는 여러 種類의 耐熱鋼이 사용되며, 管 設計時 크리이프 損傷에 대하여 充分한 壽命을 갖도록 設計되고 있으나, 반드시 設計한 대로의 壽命(約 11.4年)을 달성치 못한 場合交替되고 있다. 그 原因은 주로 크리이프 強度의 經年劣化와 高温腐蝕으로 인한 減肉障害에 基因되는 것이 많다.

高温腐蝕은 보일러에서 뿐만 아니라 高温에서 사용되는 가스 터빈, 디젤 엔진, 原子炉 등의 各種 主要構成裝置의 壽命을 減少시키는 重要한 現象으로, 대부분의 耐熱合金은 高温腐蝕을 받을 경우 粒界侵蝕을 일으키는 傾向이 많으므로, 크리이프 破壞와 같이 粒界破壞가 支配的인 경우에는 高温強度와 壽命에 惡影響을 미칠 危險性이 크다.

近年에 와서 高温腐蝕과 高温強度의 相關關係가 상당히 注目되어 重要한 研究對象으로 浮刻되고 있고, 이를 中心으로 많은 研究가 進行되고 있다. 또한 오스테나이트系 스테인레스鋼의 크리이프 舉動과 크리이프 壽命에 대해서도 많은 研究者에 의해 考察되었으나, 特別한 腐蝕環境 즉 實際 高温腐蝕現象을 묘사한 腐蝕雰圍氣에서의 크리이프 破斷壽命에 관한 研究는 아직까지 充分하다고는 말할 수 없다.

本 研究에서는 보일러의 過熱器 및 再熱器 등의 管材料로 널리 사용되는 SUS 304 스테인레스鋼에 대하여 630~750℃의 溫度範圍와 腐蝕環境下에서 크리이프試驗을 實施하고, 高温腐蝕雰圍氣에서의 크리이프 破斷特性和 破斷壽命을 高温大氣中과 比較 考察하였다.

2. 實驗方法

本 研究에 使用한 材料는 보일러의 過熱器나 再熱器 등의 管材料로 널리 사용되는 SUS304 스테인

레스鋼材로 그 化學的 成分과 機械的 特性은 Table 1과 같다

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of the used material.

Chemical compositions (wt.%)							
Composition	C	Si	Mn	P	Ni	Cr	Fe
SUS 304 Stainless Steel	0.06	0.52	1.78	0.029	8.7	18.55	Bal

Mechanical properties			
Tensile Strength (Kgf/mm ²)	Elongation(%)	Reduction of Area(%)	Hardness(H _B)
72	58	68	184

크리이프 試驗片은 1080±5℃에서 1시간동안 溶体化處理한 後 Fig. 1과 같이 加工하였으며, φ10×50mm의 平滑部 表面을 0/4까지 에머리 研磨하여 아세톤으로 완전히 脱脂한 다음, 試驗片 平滑部 表面에 内層 및 外層 腐蝕劑를 各各 40mg/cm²의 比率로 均一하게 塗布하였다.

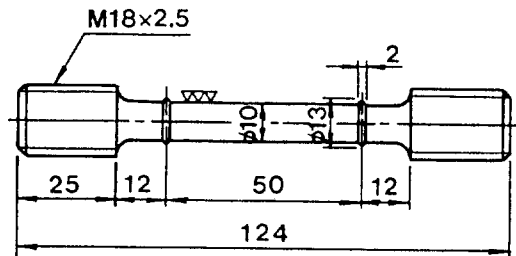


Fig. 1. Creep test specimen

腐蝕劑는 實際보일러에서 발생하는 高温腐蝕現象을 再現하기 위하여 開發된 複層合成灰 腐蝕試驗法에 따라서 内層 및 外層 腐蝕劑를 各各 다음과 같은 方法으로 組成하였다.

(1) 内層 腐蝕劑: 特級 試藥으로 調整된 85%V₂O₅+10%Na₂SO₄+5%Fe₂O₃ 混合物을 900℃의 電氣炉中에서 1시간 유지시킨 後 粉碎機로 粉碎하였다.

이 腐蝕劑의 X線 回析分析은 주로 融點 620~630°C 의 $\text{Na}_2\text{O} \cdot \text{V}_2\text{O}_4 \cdot 5\text{V}_2\text{O}_5$ 이다.

(2) 外層 腐蝕劑: 同一 試藥으로 10% V_2O_5 + 85% Na_2SO_4 + 5% Fe_2O_3 로 混合하였다.

크리이프 試驗機는 最大使用荷重 3톤, 最高使用 炉溫 850°C, 레버比 1:10인 東京試驗機製作所의 모델 CRL-3000을 사용하였으며, 設定된 炉溫은 自動溫度調節裝置와 디지털 멀티메타에 의하여 室內溫度를 補正하여 $\pm 2^\circ\text{C}$ 以內가 유지 가능하며, 試驗片의 變形은 디지털 延伸計와 記錄紙에 炉溫 및 試驗片 溫度가 自動적으로 記錄된다.

크리이프 試驗은 630~750°C 溫度範圍의 停止大氣中에서 複層 腐蝕劑를 塗布하여 試驗하였으며, 比較를 위하여 同一溫度範圍에서 腐蝕劑를 塗布하지 않은 試驗片에 대한 停止大氣中의 試驗도 동시에 行하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1. 크리이프破斷舉動

高温大氣中과 高温腐蝕環境中에서 各 試驗溫度에 대한 代表的인 크리이프曲線을 Fig. 2에 圖示하여 比較 考察하였다.

전반적으로 高温腐蝕環境中에서의 破斷壽命이 大氣中에 비하여 상당히 減少되었으며, 破斷壽命에 대하여 加速크리이프領域(accelerated creep stage)이 차지하는 比率도 작게 나타난 것으로 볼 때, 本試驗材料는 高温腐蝕으로 인하여 매우 脆性的으로 破斷한다는 것을 암시해 주고 있다.

또 Fig. 3에는 高温大氣中과 高温腐蝕環境中에서의 負荷應力과 破斷壽命과의 關係를 圖示하였으며, 各各의 試驗溫度에 있어서, 高温腐蝕環境中에서의 破斷壽命은 高温腐蝕에 의해 約 10~70%까지 低下되었음을 나타내고 있다.

먼저, Fig. 2의 高温腐蝕環境中에서의 크리이프 變形이 高温大氣中 경우보다 약간 큰 傾向을 나타내고 있는 것은 試驗材料가 크리이프 初期에 全面腐蝕을 받아 試驗片 表面損失이 크리이프時間에 대

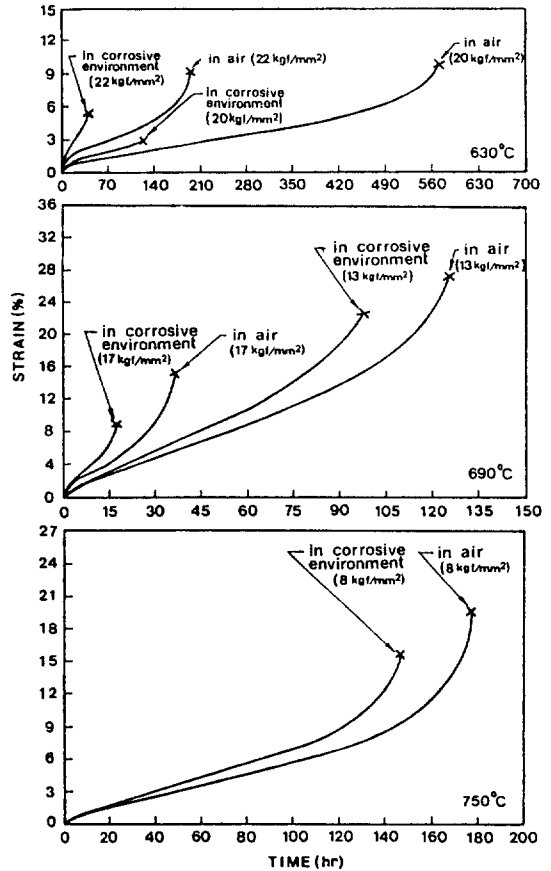


Fig. 2. Typical creep curves of specimen in air and in hot corrosive environment.

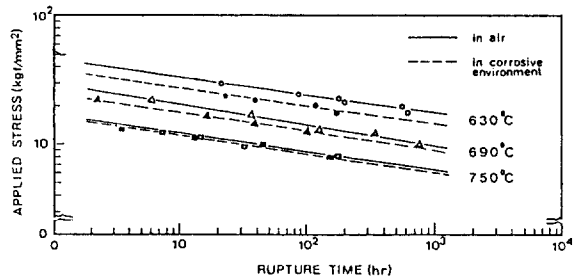


Fig. 3. Relation between the applied stress and the rupture time in air and hot corrosive environment.

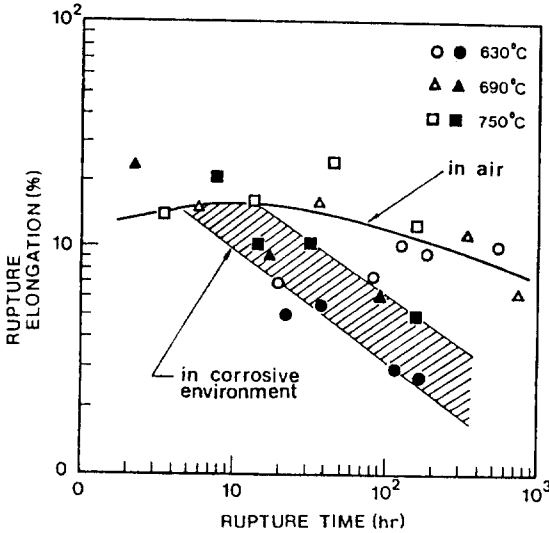


Fig. 4. Relation between the rupture elongation and the rupture time.

하여 拋物線의 으로 增加하고, 應力을 부담할 수 있는 有效斷面積이 크리프時間과 함께 연속적으로 減少하여 眞應力이 增加하는 데에서 起因하였다고 생각된다.

Fig. 4는 各 試驗溫度에 있어서 高温大氣中과 高温腐蝕環境中에서의 破斷延伸率과 크리프破斷壽命과의 關係를 圖示한 것으로, 腐蝕環境中에서의 破斷延伸率이 大氣中에 비해 1/2 정도까지 低下한 傾向은 Fig. 2의 脆性破斷傾向과도 잘 一致하고 있음을 보여 주고 있다.

以上の 結果를 各 試驗溫度別로 考察해 보면, 試驗溫度 630°C에서 腐蝕環境中의 크리프破斷壽命이 大氣中에 비해 가장 극단적으로 減少되었음을 알 수 있으며, 이것은 高温腐蝕이 溫度 630°C 부근에서 試驗材料의 壽命에 가장 큰 影響을 미친다는 것을 의미하고 있다. 다시 말하면, 本 實驗에 있어서 實際보일러의 高温腐蝕現象을 再現하기 위해 사용한 內層 腐蝕劑는 X線 回析分析에 따르면 融點 620~630°C의 $Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot 5V_2O_5$ 化合物⁵⁾이며, 이 化合物은 重油를 사용하는 實際보일러의 過熱器管 등

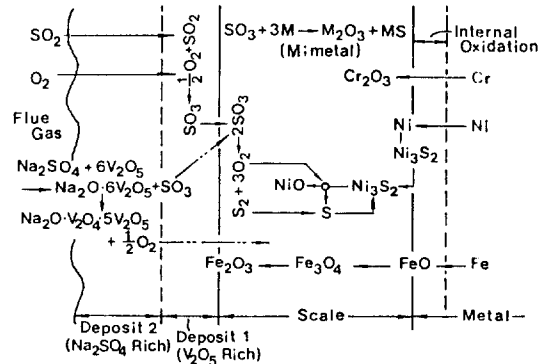


Fig. 5. Hot corrosion processes including oxidation and sulfidation on the double layer deposits⁵⁾

에서 形成되는 腐蝕生成物인 V, Na, S 등의 化合物, 즉 $NaVO_3$, Na_2SO_4 및 $Na_2O \cdot V_2O_4 \cdot V_2O_5$ 系 化合物⁶⁾과 同 一系에 속한다.

따라서, Fig. 5의 高温腐蝕過程⁵⁾에서와 같이 試驗溫度 630°C에서는 試驗片에 塗布한 腐蝕劑가 試驗材料 表面에서 gel狀으로 溶解한 Vanadine 酸鹽이 되어 SO_3 와 O_2 를 遊離시키며, 이 SO_3 는 스케일層 (scale layer)에서 O_2 와 S_2 를 放出하여 氣體/固体 反應으로부터 腐蝕이 더욱 促進하게 된다. 이러한 反應으로부터 形成된 酸化合物과 黃化合物은 選択的으로 粒界를 侵蝕시키며, 粒界侵蝕部중에서 가장 우선적인 것이 早期크리프破斷을 유발시키게 한다.

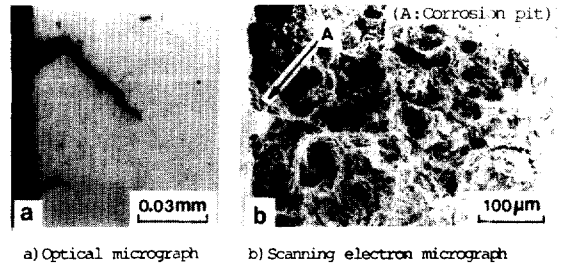


Photo. Fracture morphologies of creep ruptured specimen in not corrosive environment in hot corrosive environment ($T=630^\circ C$, $\sigma=18 \text{ kg/mm}^2$, $t_r=174.5 \text{ hr}$).

Photo. 1에서와 같이 粒界侵蝕部中에서 가장 優先的인 것[Photo. 1(a)]은 一般的으로 加速크리이프 段階階(accelerated creep stage)에서 크게 開口하게 되며, 이러한 粒界開口部를 따라서 前記한 腐蝕反應過程으로 부터 放出되는 S와 O 등이 侵入 하게 되고, 또 粒界侵蝕部는 應力集中이 發生하여 主龜裂(main crack) 作用을 일으키게 하므로 Photo.1(b)와 같이 脆性的으로 早期에 크리이프破斷을 일으키는 主要因이 된다.

따라서 試驗片에 塗布한 腐蝕劑의 融點부근의 溫度 630°C에서 破斷壽命 減少幅이 가장 크게 나타난 것은 高溫腐蝕을 받는 試驗材料의 壽命과 腐蝕生成物의 融點과는 매우 깊은 關係가 있다는 것을 의미하고 있다.

3.2. 定常크리이프變形速度와 크리이프破斷壽命과의 關係

最近, 長時間의 크리이프壽命을 予測하기 위한 方法으로 短時間의 크리이프破斷 試驗結果를 外插하는 여러가지 方法⁷⁾이 提案되고 있으나, 비교적 誤差가 적은 時間-溫度 媒介變數法(Time-Temperature Parameter)과 最小拘束法(Minimum Commitment Method)이 널리 使用되고 있다.

그러나 時間-溫度 媒介變數法은 一定 應力下에서 크리이프破斷壽命과 溫度의 關係가 線形이고, 또 各 等應力線들이 한점에 만나거나 平行해야 하는 등의 拘束條件이 다르나, 實驗結果에 따라서는 이러한 拘束條件을 만족하지 않는 경우가 있으므로 이러한 경우에는 媒介變數法에 의하여 實驗結果를 外插하면 상당히 큰 誤差가 생기게 된다.

따라서 Manson과 Ensign 등⁸⁾은 이러한 拘束條件을 最小化하여 모든 경우의 實驗結果에 대하여 일반적으로 適用할 수 있는 새로운 媒介變數法인 最小拘束法을 提案하여 다음과 같이 表示하였다.

$$[1 + AP(T)] \log tr + P(T) = G(\log \sigma) \dots\dots (1)$$

여기서 P와 G는 各 溫度 및 應力の 函數이다.

이 式은 材料常數 A의 값에 따라서 여러가지 時間-溫度 媒介變數로 變換될 수 있으며, 函數 P(T)와 G(log σ)는 實驗結果로 부터 직접 산출적으로 결정되는 값이므로, 이 式은 各 實驗結果에 대하여 가장 適當한 媒介變數가 되며, 最近 많은 研究에서

이 式을 이용한 비교적 精確한 크리이프破斷壽命 予測이 보고되고 있다.

그러나 近年에 와서는 腐蝕雰囲気나 크리이프條件 및 材料에 따라서 보다 精確한 壽命予測에 관한 研究가 계속적으로 檢討되고 있으나 아직까지 一般化 되지 못한 실정에 있다

크리이프破斷壽命의 대부분은 定常크리이프 期間에 해당되므로 크리이프破斷壽命은 定常크리이프變形速度와 밀접한 關係가 있으며, Monkman과 Grant 등⁹⁾은 實驗的으로 다음과 같이 提案하였다.

$$\log tr = m \log \dot{\epsilon}_s + C \dots\dots\dots (2)$$

또 White와 LeMay 등¹⁰⁾은 이 式이 복잡한 산입용 합금에 대하여 實驗的으로 有效하다는 것을 입증하였다.

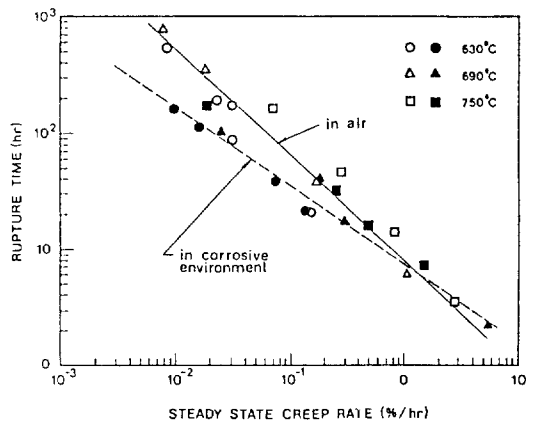


Fig. 6. Relation between the rupture life and the steady state creep rate in air and in hot corrosive environment.

Fig.6은 본 研究에 있어서 大氣中과 高溫腐蝕環境中에서의 定常크리이프變形速度와 破斷壽命과의 關係를 兩對數로 圖示한 것으로, 大氣 및 腐蝕環境 모두 應力 및 溫度에 關係없이 하나의 直線關係를 만족하고 있으며¹¹⁾ 이들의 直線式을 表示하면 다음과 같다.

$$\left. \begin{aligned} \text{高溫大氣: } \log tr &= -0.84 \log \epsilon_s + 8.99 \\ \text{高溫腐蝕環境: } \log tr &= -0.63 \log \epsilon_s + 9.35 \end{aligned} \right\} \dots\dots (3)$$

이 式에서 高溫腐蝕環境中에서의 기울기 m값이 高溫大氣中보다 작게 나타났으며, 이것은 高溫腐蝕

環境中에서의 破斷寿命이 高温大氣中보다 짧은 것을 의미하고 있고, 또 $\dot{\epsilon}_s$ 는 破斷寿命 予測 Parameter가 됨을 알 수 있다. 즉, $\dot{\epsilon}_s$ 는 試驗材料의 크리이프曲線으로부터 破斷時間의 10~20% 時間範圍內에서 구할 수 있으므로¹²⁾ 早期에 破斷寿命을 予測할 수 있는 parameter가 된다.

그러나, 式(2)에 의하면 一定크리이프變形速度가 同一한 경우에는 溫度나 應力 등의 試驗條件에 관계없이 一定한 크리이프破斷寿命을 얻을 수 있으나, 크리이프變形速度는 일반적으로 溫度와 應力에 比例하는 관계가 있으므로 溫度와 應力을 적당히 조절하면 同一한 一定크리이프變形速度를 얻을 수 있는 溫度와 應力關係가 存在할 수 있다.

또한 이러한 溫度와 應力條件에 따라서 크리이프變形機構가 달라지므로, 同一 一定크리이프變形速度下에서도 크리이프變形段階別 變形量과 持續時間 등이 달라져, 결국에는 크리이프破斷寿命도 다르게 나타날 것이다.

따라서 式(2)에 대해서는 材料나 試驗條件 등을 고려한 材料科學의인 側面에서 理論적으로 충분한 뒷받침에 의해 再檢討되어야 할 것으로 생각한다.

3.3. 크리이프破斷寿命과 應力 및 溫度와의 關係

Fig. 7은 高温大氣中 및 高温腐蝕環境 중에서의 各 試驗溫度에 대한 크리이프破斷寿命과 負荷應力과의 關係를 圖示한 것이다.

이 그림에서, 最小自乘法에 의해 線形化된 各 等溫線의 方程式을 구하여 다음과 같다.

$$\begin{aligned} 630^{\circ}\text{C} : \log t_r &= -7.94 \log \sigma + 13.03 \\ \text{高温大氣 } 690^{\circ}\text{C} : \log t_r &= -6.23 \log \sigma + 9.18 \\ 750^{\circ}\text{C} : \log t_r &= -7.74 \log \sigma + 9.28 \end{aligned} \quad (4)$$

高温腐蝕環境

$$\begin{aligned} 630^{\circ}\text{C} : \log t_r &= -7.58 \log \sigma + 11.81 \\ 690^{\circ}\text{C} : \log t_r &= -7.28 \log \sigma + 10.15 \\ 750^{\circ}\text{C} : \log t_r &= -7.41 \log \sigma + 8.86 \end{aligned} \quad (5)$$

먼저, 高温大氣中의 경우에 있어서 式(4)로부터 各 等溫線의 平均 기울기 n은 -7.30이 되고, log

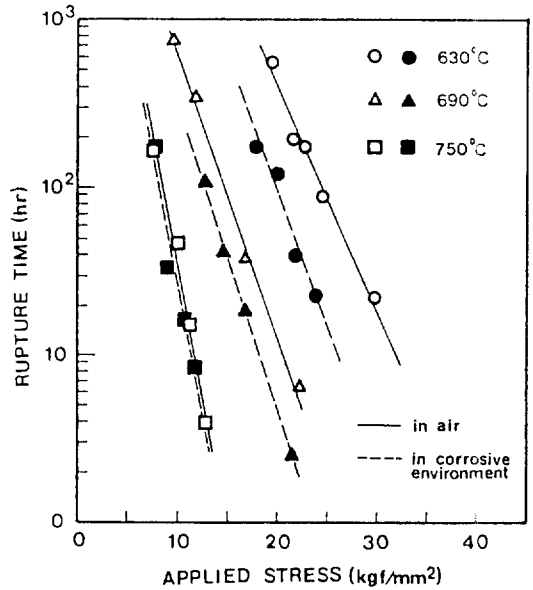


Fig. 7. Relation between the creep rupture life and the applied stress in air and in hot corrosive environment.

t_r 軸의 切片은 溫度의 函数이므로 最小自乘法으로 線形化하여 直線 方程式을 구하면,

$$F(T) = 29.74 \times 10^3 \frac{1}{T} - 20.46 \quad (6)$$

이 되고 式(4)를 고쳐 쓰면,

$$\log t_r = -7.30 \log \sigma + 29.74 \times 10^3 \frac{1}{T} - 20.46 \quad (7)$$

이 되므로, 이 式은 試驗溫度와 負荷應力으로 부터 직접 크리이프破斷寿命을 구할 수 있는 實驗式이 된다.

또한 高温腐蝕環境中의 경우에서도 마찬가지로, 式(5)에서 各 等溫線의 平均 기울기 n'는 -7.42가 되고 log t_r 의 切片 값을 最小自乘法으로 線形化 하면,

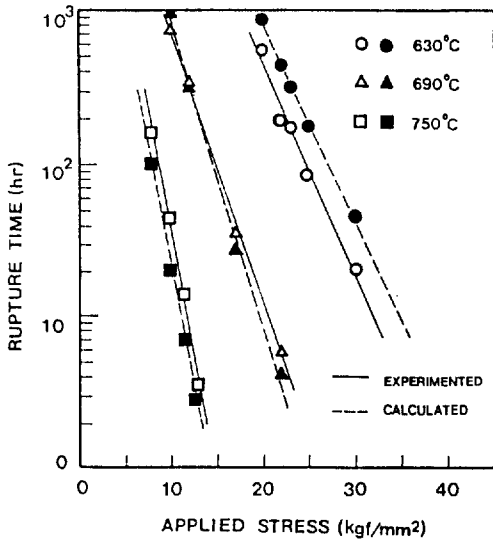
$$F'(T) = 22.88 \times 10^3 \frac{1}{T} - 13.55 \quad (8)$$

이 되고 따라서

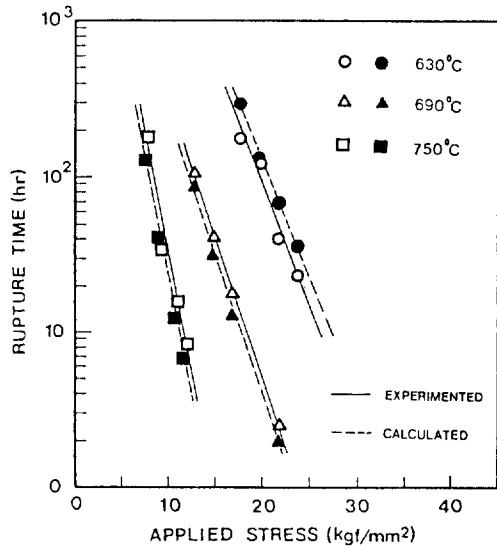
$$\log t_r = -7.42 \log \sigma + 22.88 \times 10^3 \frac{1}{T} - 13.55 \quad (9)$$

가 되어, 式(9)는 高温腐蝕環境中에서의 試驗溫度와 負荷應力으로 부터 크리이프破斷寿命을 구할 수가 있다.

Fig. 8은 式(7)과 式(9)로부터 구한 高温大氣中



(a) Comparison of creep rupture life between the calculated and the experimented in air.



(b) Comparison of creep rupture life between the calculated and the experimented in hot corrosive environment.

Fig. 8. Relation between the calculated values and the experimented values of creep rupture life.

및 高温腐蝕環境中에서의 크리이프破斷壽命에 대한 實驗値와 計算値를 比較한 것으로서, 모든 試驗範圍에 걸쳐서 잘 一致하고 있음을 보여 주고 있다.

그러나, 最小拘束法을 나타내는 式(1)에서 材料常数 A가 0이 되는 특별한 경우를 생각하면, 이 式은

$$\log t_r = G(\log \sigma) - P(T) \dots\dots\dots(10)$$

이 되고, 一定 溫度下에서 $\log t_r$ 와 $\log \sigma$ 의 사이에 線形 關係가 있다고 하면 式(10)은 다시

$$\log t_r = n' \log \sigma - P(T) - C' \dots\dots\dots(10')$$

이 되며, 또 이 式에서 새로운 溫度函數 $P'(T)$ 를

$$P'(T) = -P(T) + C' = B'/T + C'' \dots\dots\dots(11)$$

라 두고, 式(10')를 다시 고쳐 쓰면

$$\log t_r = n' \log \sigma + \frac{B'}{T} + C'' \dots\dots\dots(12)$$

가 되어, 이 式은 式(7)과 式(9)의 一般式이 되므로 결국 式(7)과 式(9)는 最小拘束法과 一致하게 된다.

따라서 各 試驗條件에 대하여 크리이프破斷壽命

과 應力 및 溫度와의 適切한 函數關係를 구하면 결국에는 最小拘束法에 귀착하게 되며, 이 方法에 의하여 高温大氣 및 高温腐蝕環境中에서의 크리이프破斷壽命 予測方法은 本 試驗材料에 대하여 매우 有效함을 알 수 있다.

4. 結 論

보일러 過熱器 등의 管材料로 使用되는 SUS 304 스테인레스鋼에 複層 腐蝕劑인 85% V_2O_5 + 10% Na_2SO_4 + 5% Fe_2O_3 및 10% V_2O_5 + 85% Na_2SO_4 + 5% Fe_2O_3 를 各各 內層 및 外層 腐蝕劑로 塗布하고, 630~750°C의 溫度範圍에서 크리이프 試驗을 행하여 高温大氣中과 高温腐蝕環境中에서의 크리이프破斷特性和 크리이프破斷壽命에 관하여 比較檢討한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 高温腐蝕環境中에서의 크리이프破斷壽命은 高温大氣中에 비해 約 10~70%까지 低下하며, 有效

斷面積 減少로 인하여 眞應力이 增加하여 加速크리이프領域의 占有比가 減少하고 破斷延伸率 低下와 脆性的으로 破斷하는 傾向을 나타낸다.

(2) 高温腐蝕環境中에서는 燃料중에 含有되어 있는 V, Na, S 化合物인 黃化物和 酸化物的 選択的 粒界侵蝕 및 腐蝕促進反應으로 인하여 早期크리이프破壞를 유발시키며, 크리이프破斷壽命은 腐蝕生成物的 融點과 상당한 關係가 있는 것으로 나타났다.

(3) 高温大氣 및 高温腐蝕環境 모두, 크리이프破斷壽命과 定常크리이프變形速度와의 兩對數 關係는 直線函數를 만족하며, 壽命予測을 위한 直線 方程式은 各各 다음과 같이 表示될 수 있다.

$$\text{高温大氣: } \log t_r = -0.84 \log \dot{\epsilon}_s + 8.99$$

$$\text{高温腐蝕環境: } \log t_r = -0.63 \log \dot{\epsilon}_s + 9.35$$

(4) 高温大氣 및 高温腐蝕環境에서의 크리이프破斷壽命은 各各 다음과 같은 實驗式에 의하여 應力 및 溫度條件으로 부터 직접 구할 수 있다.

高温大氣:

$$\log t_r = -7.30 \log \sigma + 29.74 \times 10^3 \frac{1}{T} - 20.46$$

高温腐蝕環境:

$$\log t_r = -7.42 \log \sigma + 22.88 \times 10^3 \frac{1}{T} - 13.55$$

参 考 文 献

- Mimino, T., "Present Status of Steel for Boiler Tube uses," J. Japan Inst. Metals, Vol. 19, No. 6 (1980), PP. 413-419.
- Shoji, T., et al., "Prediction of Service Life of Boiler Superheater Tubes under Hot Corrosion and Creep Environment," Boshoku Gijutsu(in Japanese), Vol. 31, No. 3 (1981), PP. 196-201.
- Saito, Y., et al., "Hot Corrosion and Creep Problem of Type 316 Stainless Steel and its Weldment for Power Plant Boilers," IIW Document No. IX-1107-79 (1979), PP. 1-28.
- Yoshihara, M., et al., "Creep Rupture Properties of Some Nickel-Base and Nickel-Iron-Base Superalloys Subjected to Hot Corrosion," Boshoku Gijutsu(in Japanese), Vol. 31, No. 3 (1982), PP. 187-195.
- Saito, Y., et al., "High Temperature Corrosion Test Method in Simulated Oil Fired Boiler Environment for Service Life Evaluation of Boiler S/H Tubes," Boshoku Gijutsu(in Japanese), Vol. 31, No. 3 (1982), PP. 232-238.
- Harada, Y., "Present Status and Problem of High Temperature Corrosion in Oil Firing Boilers and Gas Turbines," Material, Vol. 25, No. 278 (1976), PP. 1086-1098.
- White, W. E., et al., "On the Minimum-Commitment Method for Correlation of Creep-Rupture Data," Journal of Engineering Materials and Technology, Vol. 100 (1978), PP. 333-335.
- Manson, S. S., and Ensign, C. R., "A Specialized Model for Analysis of Creep-Rupture Data by the Minimum Commitment, Station-Function Approach," NASA TM. X-52999, 1971, PP. 1-14.
- Monkman, F.C. and Grant, N.J., "An Empirical Relationship between Rupture Life and Minimum Creep Rate in Creep-Rupture Test", Proceedings ASTM, vol. 56, (1956) PP. 593-605.
- Iain Le May, "Developments in Parametric Methods for Handling Creep and Creep-Rupture Data", Trans, ASME, Vol. 101 (1979), PP. 326-330.
- Furillo, F.T., et al., "Understanding the Larson-Miller Parameter", Metallogica, Vol. 11, (1977), PP. 493-496.
- Nishimura, R., et al., "Effect of Temperature on SCC of SUS 304 and SUS 316 Austenitic Stainless Steels in 0.82 Kmole⁻³ Hydrochloric Acid Solution - Parameter for Prediction of Time to Failure and Critical Temperature," Boshoku Gijutsu(in Japanese), Vol. 36 (1987), PP. 228-233.