

摩擦熔接된 國産耐熱鋼(SUH3-SUS303)의 時効熱處理가 高溫疲勞強度 및 破壞舉動에 미치는 影響에 關한 研究

李圭用* · 吳世奎* · 金亨資**

The Effect of Aging Treatment on the High Temperature Fatigue Strength and Fatigue Fracture Behavior of Friction Welded Domestic Heat Resisting Steels (SUH3-SUS 303)

Kyu Yong LEE* · Sae Kyoo OH* · Hyung Ja KIM**

It is well-known that nowadays heat resisting and anti-corrosive materials have been widely used as the components materials of gas turbines, nuclear power plants and engines etc. in the fields of machine production industry. And materials for engine components, like as the exhaust valve of internal combustion engine, have been required to operate under the high temperature range of 700°C-800°C and high pressured gas with repeated mechanical load for the high performance of engines.

For these components, friction welding for bonding of dissimilar steels can be applied for in order to obtain process shortening, production cost reduction and excellent bonding quality. And age hardening recently has been noticed to the heat resisting materials for further strengthening of high temperature strength, especially high temperature fatigue strength.

However, it is difficult to find out any report concerning the effects of age hardening for strengthening high temperature fatigue strength to the Friction welded heat resisting and anti-corrosive materials.

In this study the experiment was carried out as the high temperature rotary bending fatigue testing under the condition of 700°C high temperature to the friction welded domestic heat resisting steels, SUH3-SUS303, which were 10hr., 100hr. aging heat treated at 700°C after solution treatment 1hr. at 1,060°C for the purpose of observing the effects of the high temperature fatigue strength and fatigue fracture behaviors as well as with various mechanical properties of welded joints.

The results obtained are summarized as follows:

- 1) Through mechanical tests and micro-structural examinations, the determined optimum welding conditions, rotating speed 2420 rpm, heating pressure 8kg/mm², upsetting pressure 22kg/mm², the amount of total upset 7mm (heating time 3 sec and upsetting time 2 sec) were satisfied.
- 2) The solution treated material SUH 3, SUS 303 and SUH3-SUS 303, have the highest inclination gradient on S-N curve due to the high temperature fatigue testing for long time at 700°C.
- 3) The optimum aging time of friction welded SUH3-SUS 303, has been recognized near the 10hr. at

*釜山水産大學; National Fisheries University of Busan.

**釜山工業專門大學; Busan Technical Junior College.

700°C after the solution treatment of 1hr. at 1,060°C.

- 4) The high temperature fatigue limits of aging treated materials were compared with those of raw material according to the extender of aging time, on 10hr. aging, fatigue limits were increased by SUH 3 75.4%, SUS 303 28.5%, friction welded joints SUH 3-SUS 303 44.2% and 100hr. aging the rates were 64.9%, 30.4% and 36.6% respectively.
- 5) The fatigue fractures occurred at the side of the base metal SUS303 of the friction welded joints SUH 3-SUS 303 and it is difficult to find out fractures at the friction welding interfaces.
- 6) The cracking mode of SUS 303, SUH 3-SUS 303 is intergranular in any case, but SUH 3 is fractured by transgranular cracking.

緒 論

機械工業이 發展함에 따라 耐熱鋼은 널리 쓰이고 있으나, 高溫強度의 限界性 때문에 使用範圍가 制限되고 있다.

核反應爐, 가스 터빈, 化學反應裝置, 火力發電設備 및 機關 등과 같은 많은 機械裝置의 高性能化를 위해서는 高溫의 熱雰囲気에서도 各種應力에 견딜 수 있는 耐熱材料의 開發과 高溫疲勞設計에 의한 實驗의 研究와 解析이 絶실하게 要望되고 있는 實情이다. 特히 機關의 valve用 材料 등은 700°C~800°C의 高溫高壓¹⁾의 腐蝕性 gas의 激流中에서 高速度의 機械的 反覆荷重을 받으면서 作動된다. 이 때문에 耐蝕性, 耐磨耗性 및 熔接性 등과 함께 高溫疲勞強度 등의 高溫強度가 높은 耐熱材料가 要求되며, 이러한 異種材質의 熔接에는 摩擦熔接에 의존하는 경우가 많다.

耐熱材料의 高溫強度에 대한 研究는 대단히 活發하여 Kuwahara²⁾ 등은 $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo鋼 파이프材를 高溫疲勞-크리이프實驗을 하였고, 吳·國尾³⁾ 등은 時効處理에 의해 粒界에 炭化物을 析出し킨 SUS316의 高溫和 사이클 疲勞舉動에 대한 粒界析出物의 溫度依存性을 밝혔다.

摩擦熔接材에 대해서는 적절한 熔接條件의 選擇에 따라 引張強度를 母材와 同等한 強度로 얻을 수 있다는 T.H. Hazlett⁴⁾, 森井⁵⁾, 中村⁶⁾, 蓮井⁷⁾ 등의 研究가 있으며 Shioya^{8,9)}는 S20C 및 S45C와 SUS27-45C에 대하여 疲勞強度를 研究한 바 있다.

한편 異種 摩擦熔接材의 高溫疲勞強度에 관한 研究는 400°C에 대한 S20C-SUS27B의 $U_m^{10)}$ 등의 報告 등이 있고, 筆者들의 前報¹¹⁾가 있을 정도로서 그다지 많지 않으며, 특히 利用度가 점차 넓어져 가고 있는 國產 耐熱鋼 SUH3 및 SUS303의 異種 摩擦熔接材의 高溫疲勞強度에 대한 時効 熱處理의 效果를 다룬 實驗報告 資料 등은 찾아보기 힘들다.

本 研究에서는 國產 耐熱鋼 SUH3와 SUS303의 異種 摩擦熔接材에 대하여 時効 熱處理를 하고 高溫 回轉굽힐 疲勞試驗을 하여 高溫 疲勞強度에 미치는 時効效果를 檢討하고 疲勞限度式을 誘導하고 時効處理材 熔接部에 대한 疲勞破壞舉動을 明白히 하여 高溫疲勞強度設計의 資料로 提示코자 하였다.

方 法

1. 試 驗 片

本 實驗에 使用한 試驗片의 素材는 國產(KISCO製)으로서 Si-Cr系의 martensite系인 耐蝕, 耐熱鋼 SUH3과 Cr-Ni系의 austenite系인 耐蝕鋼 SUS303이며, 그 化學組成과 機械的 性質은 各各 Table 1 및 Table 2와 같다.

素材의 試驗片은 處女材의 상태에서 Fig.1(a)의 形狀과 치수로 旋削 및 研削하여 精密加工하였다. 摩擦熔接材는 素材를 切斷後 斷面을 旋削하고 Table 3의

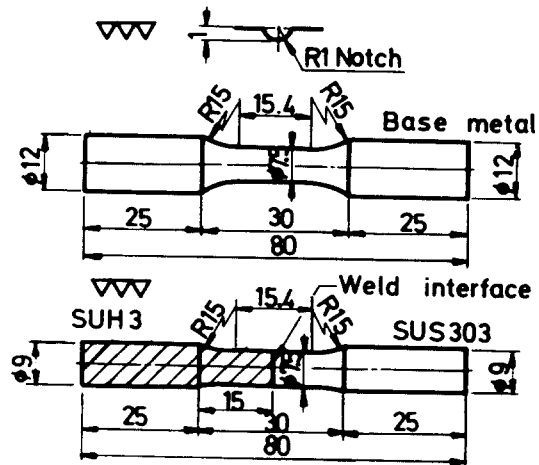


Fig. 1 Shapes and dimensions of rotary bending fatigue test specimens.

마찰용접된 국산내열강의 시효열처리가 고온피로강도 및 파괴거동에 미치는 영향에 관한 연구

Table 1 Chemical compositions of the tested materials (%)

materials	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni
SUH3	0.43	2.20	0.33	0.027	0.009	20.26	0.87	—
SUS303	0.66	0.49	1.56	0.026	0.296	17.65	—	8.85

Table 2 Mechanical properties of base materials

materials	tensile strength (kg/mm^2)	yield strength (kg/mm^2 -0.2% off set)	elongation (%)	hardness (mHv)
SUH3	102	70	15	254
SUS303	63.3	26.3	59.3	206

Table 3 Optimum friction welding conditions

materials	rotating speed (rpm)	heating pressure (kg/mm^2)	upsetting pressure (kg/mm^2)	total upset (mm)	heating time (sec)	upsetting time (sec)
SUH3 to SUS303	2420	8	22	7	3	2

Table 4 Mechanical properties according to heat treatments

materials	heat treatment	tensile strength (kg/mm^2)	yield strength (kg/mm^2)	elongation (%)	hardness (mHv)
SUH3	Solution t.	124.7	80.0	13.8	300
	10hr. aging	94.0	69.7	19.4	262
	100hr. aging	86.8	34.3	12.6	252
SUS303	Solution t.	66.9	28.1	59.6	211
	10hr. aging	71.1	25.6	53.6	206
	100hr. aging	55.3	19.0	53.2	218

最適條件으로 摩擦溶接하였으며 溶接部の 加工性 때문에 Fig.1 (b)의 形狀으로 加工하였다.

試料의 熱處理는 機械加工된 試料를 1,060°C에서 1時間 加熱한 後 水冷시켜 溶体化處理를 하고, 이를 700°C에서 各各 10時間 및 100時間으로 再加熱한 後 水冷시켜 時効 硬化 處理하였다.

時効 熱處理 條件에 다른 各 試驗材의 機械的 性質의 變化는 Table 4와 같다.

한편 準備된 試驗片의 平行部는 emery paper #4/0까지 polishing하고 酸化크롬으로 buffing하여, 常溫과 高溫의 疲勞強度에 대한 試驗片의 表面거칠기의 影響을 最小로 하였다.

그리고 顯微鏡組織의 觀察에는 HNO₃ 10cc HCl, 20cc, glycerol 10cc 組成의 腐蝕液을 使用하였고, 電解研磨에는 HClO₄:CH₃COOH=2:7에 Al을 電解研磨에 의하여 約 0.5%를 溶解시킨 組成의 電解液을 使用하였다.

2. 實驗裝置 및 方法

本 實驗에 使用한 疲勞試驗機는 自動溫度調節裝置의

加熱爐가 付着된 Ono's high temperature rotary bending fatigue testing machine(Shimadzu Model H5)으로서 그 能力은 最大荷重 모우먼트 10kg·m, 每分回轉數 3,400이다.

試驗片의 熱處理에는 electric muffle furnace(Shimadzu Model SMF-14)를 使用하였으며, 硬度試驗과 試驗片의 顯微鏡組織의 觀察은 Kogaku micro Vickers hardness tester와 Nikon metallurgical microscope에 의하여 하였다.

또 引張試驗에는 Instron type의 容量 25ton의 Tensilon(Toyo Baldwin Model UT-25,000)를 使用하였으며, 實驗式의 係數計算에는 FACOM U-300의 computer를 利用하였다.

高溫回轉급힘 疲勞試驗은 試驗片이 받는 溫度가 700°C로 上昇한 後에 試驗片에 荷重을 加하였으며, 引張強度의 2/3 程度를 最初 作用 試驗荷重으로 잡고 먼저 2個의 試驗片에 대한 實驗值($N_1=1\sim 2.5\times 10^4$, $N_2=5\times 10^4\sim 5\times 10^5$ 範圍)에서 Pantereb¹²⁾의 疲勞限度 決定式인 式(2)에 代入하여 疲勞限度를 推定한 假 S-N 曲線을 作成하고 이 曲線에 根據를 두어 荷重을 調整

하여 最終的으로 實驗值에 의한 S-N 曲線을 完成시켰다.

또한 이들의 實驗值에 대하여 2次多項式的 最小自乘法에 대한 programming을 하여 2次多項式的 係數를 computer로 計算하고 各 S-N 曲線의 實驗式을 만들어 그 信賴度를 調査하였다.

疲勞破壞學的의 微示的 觀察을 試料를 電解研磨하고 光學顯微鏡의으로 考察하였다.

結果 및 考察

1. 疲勞限度 曲線

處女材 및 各 時効 熱處理材의 高溫疲勞強度에 대한

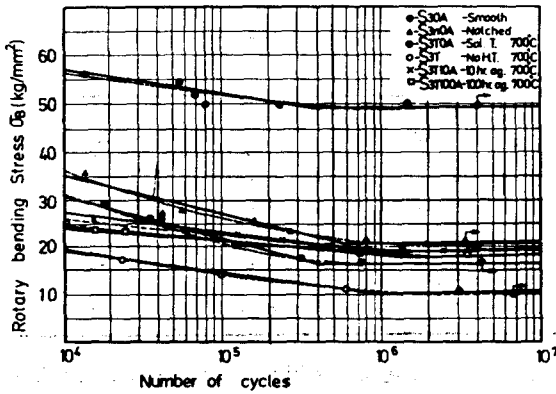


Fig. 2 S-N curves of SUH3.

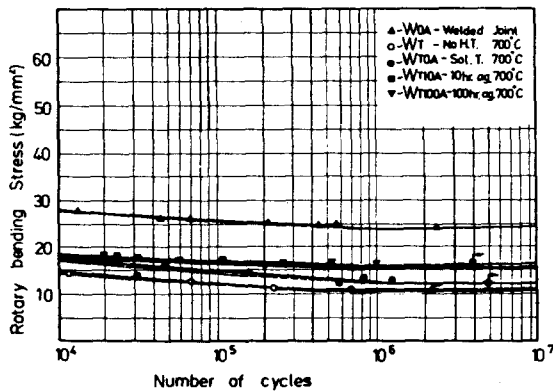


Fig. 4 S-N curves of friction Welded SUH3-SUS303.

時効熱處理의 效果를 알기 위하여 700°C에서 高溫回轉굽힘疲勞試驗을 하여 Fig. 2의 SUH3에 대한 S-N曲線과 Fig. 3의 SUS303 및 Fig. 4의 摩擦熔接材에 대한 S-N曲線을 얻었다.

이들 S-N曲線으로 부터 SUS303은 時効 處理時間의 增加와 함께 疲勞強度가 높아지는 傾向을 나타내고 있으나, SUH3에 있어서는 100時間의 時効材보다 疲勞強度가 低下하는 現象이 있으며, 摩擦熔接材를 SUH3의 性質과 비슷한 樣相을 나타내고 있음을 알수 있었다.

2. 高溫 疲勞限度와 時効 熱處理의 影響

本 實驗의 경우 時効 熱處理 時間과 常溫 및 高溫 疲勞限度의 關係는 Fig. 5와 같다.

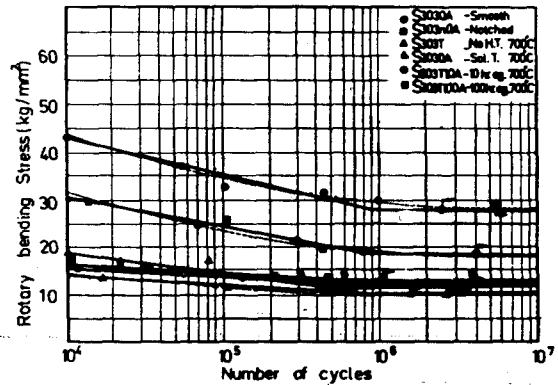


Fig. 3 S-N curves of SUS 303.

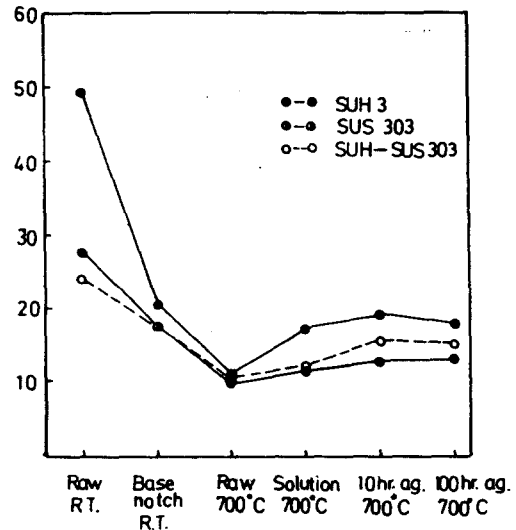


Fig. 5 Fatigue limits vs. heat treatments.

마찰용접된 국산내열강의 시효열처리가 고온피로강도 및 파괴거동에 미치는 영향에 관한 연구

Fig. 2, Fig. 3, Fig. 4와 Fig. 5에서도 알 수 있는 바와 같이 SUH3의 경우 시효 열처리에 의한 700°C의 고온 회전굽힘 피로限度的 증가율은素材에 대하여 용体化處理材는 54.95%, 10時間 시효材는 75.39% 100時間 시효材는 64.94%였으며, 이들 가운데 시효處理의 效果가 가장 뚜렷한 것은 10時間 시효材이다.

SUS 303의 경우에 있어서도 시효 열處理의 影響은 SUH3의 경우와 비슷한 傾向을 나타내고 있으나 SUH3에 있어서 10時間 시효材의 疲勞限度가 가장 높은 것에 비하여 SUS 303은 시효 열處理 時間의 增加에 따라 疲勞限度도 增加하여 700°C의 素材에 대하여 용体化處理材, 10時間 시효材 및 100時間 시효材는 각각 17.88%, 28.57% 및 30.47%의 增加 現象을 보이고 있다. 이러한 關係는 SUS303 stainless鋼에 있어 시효 열處理 時間의 增加에 따라 高溫 크리이프強度가 增加한다는 報告¹³⁾의 結果와 一致하고 있다.

한편 SUH3-SUS303의 摩擦熔接材의 各 熱處理에 의한 疲勞限度의 增加율은 SUH3의 傾向과 유사하여 700°C의 素材의 疲勞限度에 대하여 各各 9.73%, 44.27%, 36.64%의 增加를 나타내고 있다.

한편 各 未熱處理材試驗의 常溫 疲勞限度에 대한 700°C의 高溫疲勞限度는 SUH3이 22.22%, SUH303이

35.95%, SUH3-SUS303이 45.72%이나 이들은 시효 열處理에 의하여 SUH3은 38.96%, SUS303은 46.93% SUH3-SUS303의 摩擦熔接材는 65.96%까지 增加하며, 특히 SUH3은 1R노치材의 常溫疲勞限度에 近接하게 向上시킬 수 있어 이는 高溫疲勞設計 時에 考慮되어야 할 事項이라고 생각된다.

또한 高溫에 대한 疲勞限度를 比較하여보면 SUS303의 溶体化處理材의 高溫 疲勞限度는 素材의 常溫에 대한 疲勞限度의 42.4%가 되어 SUH3의 34.4%보다 幅이 훨씬 좁게 나타나고 있다. 이는 常溫과 高溫에서의 強度의 差異를 表示하는 耐熱性은 SUH3보다 SUS 303이 優秀함을 뜻하나, 700°C의 高溫疲勞限度는 SUH3이 SUS303보다 53.9%나 높다.

3. 時間強度와 疲勞限度의 關係

Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4로부터 一定한 反覆回數에 대한 時間強度는 시효 熱處理材에 있어서도 SUH3, SUH3-SUS303, SUS303의 順序로 나타나고 있어서, SUH3 및 SUH3-SUS303은 10時間 시효材가 가장 높고 SUS303은 시효 熱處理 時間의 增加와 함께 높아지고 있다.

한편 S-N曲線에 있어 傾斜線이 水平線으로 되는 점

Table 5 Comparison of various coefficients

Specimens	S-N curves	β	η	K	N_F	σ_F
SUH3	S30A	—	—	6.31	3.4×10^5	49.56
SUH3 with 1R notch	S3noA	2.38	1.97	4.01	5.8×10^5	20.86
SUH3 (700°C specimen)	S3T	—	—	7.12	9.0×10^5	11.61
SUH3 Solution treated (700°C specimen)	S3TOA	—	—	3.73	4.9×10^5	17.66
SUH3 10hr aging treated (700°C specimen)	S3T18A	—	—	8.14	1.0×10^5	19.31
SUH3 100hr aging treated (700°C specimen)	S3T100A	—	—	11.43	1.3×10^6	18.65
SUS303	S3030A	—	—	4.17	9.4×10^5	27.83
SUS303 with 1R notch	S303noA	1.57	0.87	5.40	8.0×10^5	17.71
SUS303 (700°C specimen)	S303T	—	—	14.30	8.5×10^5	10.01
SUS303 Solution treated (700°C specimen)	S303TOA	—	—	7.12	5.0×10^5	11.80
SUS303 10hr aging treated (700°C specimen)	S303T10A	—	—	16.34	6.11×10^5	12.87
SUS303 100hr aging treated (700°C specimen)	S303T100A	—	—	14.30	6.9×10^5	13.06
F.W.J. (SUH3-SU303)	W0A	—	—	14.30	1.0×10^6	24.06
F.W.J. (SUH3-SUS303) (700°C specimen)	WT	—	—	12.71	4.2×10^5	11.00
F.W.J. Solution treated (700°C specimen)	WT0A	—	—	11.43	1.1×10^6	12.67
F.W.J. 10hr aging treated (700°C specimen)	WT10A	—	—	19.08	7.0×10^5	15.87
F.W.J. 100hr aging treated (700°C specimen)	WT100A	—	—	16.35	6.0×10^5	15.63

의 應力 反覆回數인 限界 反覆回數¹⁴⁾는 SUH3-SUS303 이 時効 熱處理의 時間의 增加에 따라 high cycle 쪽으로 向하는 傾向이 있으나, SUS303은 程度가 弱하기는 하나 反對의 現象을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그러나 SUS303, SUH3 및 SUH3-SUH303에 共通적으로 나타나는 現象으로서 溶体化處理材의 S-N曲線의 기울기가 가장 급하게 나타났다.

이는 溶体化處理를 위하여 1,060°C로 加熱하였다가 急冷시켜 얻은 過飽和固溶體의 溶体化處理材로부터 가장 높은 引張強度와 硬度를 얻었으나 그 후 高溫 疲勞 試驗에서 700°C의 高溫에 놓여지게 되어 不安定한 固溶體狀態에서 平衡相이 析出하기 위한 析出核의 生成과 成長 및 中間相¹⁵⁾의 析出이 進行하는 析出過程의 初期에 應力이 걸리므로 時効時間이 不足함과 同時에 高溫回轉 疲勞에 의한 高速度의 過大한 反覆引張壓縮應力을 받게 되어 時間強度의 低下率이 급격히 크게 되었다고 생각된다. 그러나 低應力의 level에서는 時効現象이 同時에 進行하여 破斷까지의 反覆數가 길어진다.

그리고, Table 5에서 알 수 있는 바와 같이 疲勞壽命係數 K는 時効 熱處理材에 있어 SUH3과 SUS303에 비하여 SUH3-SUS303이 平均 約 2배 程度 높았으며 SUS303은 時効 熱處理 時間의 增加에 따라 壽命係數도 增加하였다.

4. S-N曲線의 實驗式

Fig. 2, Fig. 3 및 Fig. 4의 S-N 曲線들에 관한 實驗式을 求하는 方法에는 Weibull's method 및 Stüssi's method¹⁶⁾ 등이 있으나, 本 研究에서는 σ -log N의 座標에서 反覆數 10⁶과 10⁷사이의 fatigue phase II와 phase III이 直線에 가까운 完滿한 2次曲線의 一部로 보고 Gauss의 最小自乘法를 適用하여 筆者들이 前報¹¹⁾에 提案한 다음의 式(1)을 利用하였다.

$$\log N = C - \sqrt{m\sigma_F + p} \dots\dots\dots(1)$$

여기서

N : 反覆數

σ_F : 疲勞限度

C, m, p : 材料定數

式(1)에 各各의 實驗值를 代入하고 computer로서 計算하여 얻은 實驗式들은 Table 6과 같으며, 本 實驗과 같은 時効 熱處理材의 高溫 回轉 疲勞 試驗에 의한 S-N 曲線에도 式(1)을 適用할 수 있을 것인지에 대한 信賴度를 調査한 結果는 約 98.7%로서 Weibull式에 의한 98.2%, Stüssi式에 의한 97.04%와 거의 一致하는 傾向을 보였다. Table 6에서 phase II는 反覆數 10⁶과 疲勞限度 사이의 領域이며, phase III은 疲勞限度 以下의 領域을 表示한다.

Table 6 Empirical equations for S-N curves

S-N curves	Empirical eq. by the method of applied least squares	
	Eq. phase II & III	σ_B limit for phase II
S30A	$\log N = 6.4297 - \sqrt{0.7135\sigma_B - 35.1897}$	$\sigma_B \geq 49.56$
S3noA	$\log N = 6.4445 - \sqrt{0.3629\sigma_B - 7.4633}$	$\sigma_B \geq 20.86$
S3T	$\log N = 6.8421 - \sqrt{0.8772\sigma_B - 9.1593}$	$\sigma_B \geq 11.01$
S3T0A	$\log N = 5.9639 - \sqrt{0.2511\sigma_B - 4.2837}$	$\sigma_B \geq 17.06$
S3T10A	$\log N = 10.8901 - \sqrt{3.5522\sigma_B - 46.9105}$	$\sigma_B \geq 19.31$
S3T100A	$\log N = 7.7615 - \sqrt{1.9321\sigma_B - 33.7735}$	$\sigma_B \geq 18.05$
S3030A	$\log N = 6.8211 - \sqrt{0.5285\sigma_B - 15.0457}$	$\sigma_B \geq 28.47$
S303noA	$\log N = 7.0694 - \sqrt{0.6232\sigma_B - 10.4763}$	$\sigma_B \geq 17.71$
S303T	$\log N = 20.0000 - \sqrt{100.0000\sigma_B - 789.0000}$	$\sigma_B \geq 10.01$
S303T9A	$\log N = 8.0540 - \sqrt{1.8568\sigma_B - 19.1058}$	$\sigma_B \geq 11.80$
S303T10A	$\log N = 8.5510 - \sqrt{5.4362\sigma_B - 66.7375}$	$\sigma_B \geq 12.87$
S303T100A	$\log N = 7.3500 - \sqrt{2.7275\sigma_B - 33.9424}$	$\sigma_B \geq 13.06$
W0A	$\log N = 6.9262 - \sqrt{1.8057\sigma_B - 42.5854}$	$\sigma_B \geq 24.06$
WT	$\log N = 6.5094 - \sqrt{1.8868\sigma_B - 20.6084}$	$\sigma_B \geq 11.00$
WT0A	$\log N = 8.2457 - \sqrt{3.0473\sigma_B - 34.2933}$	$\sigma_B \geq 12.07$
WT10A	$\log N = 9.5961 - \sqrt{8.7566\sigma_B - 130.4816}$	$\sigma_B \geq 15.87$
WT100A	$\log N = 8.0382 - \sqrt{4.2247\sigma_B - 61.8575}$	$\sigma_B \geq 15.03$

마찰용접된 국산내열강의 시효열처리가 고온피로강도 및 파괴거동에 미치는 영향에 관한 연구

한편 S-N曲線을 效果的인 方法으로 얻기 위하여 처음 얻은 2個의 實驗値를 Pantereb¹²⁾가 提案한 疲勞限度 決定式

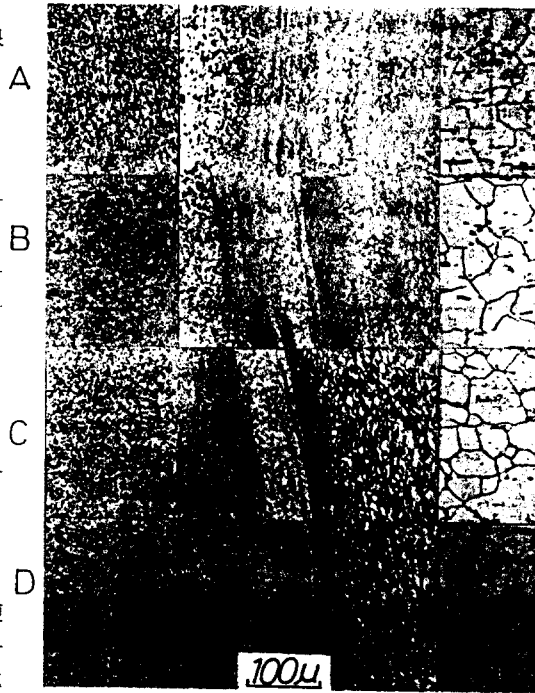
$$\sigma_{FC} = \sqrt{\frac{(N_2 - N_1)\sigma_1^2 \cdot \sigma_2^2}{N_2\sigma_1^2 - N_1\sigma_2^2}} \dots \dots \dots (2)$$

에 代入하여 疲勞限度를 推定하여 假想的 S-N 曲線을 作成하고 이에 準하여 Fig. 3와 Fig. 4를 얻었는데, 疲勞限度値의 式(2)에 依한 計算値와 實驗値의 差는 Table 7에서 알 수 있는바와 같이 平均 7.45%를 나타내어 比較的 正確하였다.

5. 疲勞限度와 時効 熱處理 組織의 關係

本 實驗의 母材와 時効 熱處理 條件으로부터 얻은 顯微鏡組織은 Fig. 6와 같다. SUH3에 대한 Fig. 2의 S-N 曲線과 Fig. 6의 組織에서 알 수 있는 바와 같이 疲勞限度가 가장 높은 10時間 時効材는 溶体化處理의 炭化物이 時効處理로 인하여 母相中에서 減少하여 硬度和 靱性이 回復되므로서 試驗片의 表面에 反覆되는 高速의 引張壓縮 應力을 오래동안 甘受하여 高溫回轉 屈曲 疲勞限度가 向上되었다고 생각된다. 이러한 原因은 Fig. 7의 硬度値로 부터로 알 수 있다.

또한 100時間 時効材는 時効溫度가 너무 높거나 時効時間이 너무 길며 析出物의 生成으로 인한 粒界의 간격이 넓어져서 轉位는 orwan mechanism에 의해 낮



SUH3 SUH3-SUS303 SUS303

Fig. 6 Micro-structures of SUH3, SUS303 and friction welded SUH3-SUS303. (A:raw. B:sol. t., C:10hr. ag. D:100hr. ag.)

Table 7 Comparison of fatigue strength between Pantereb's and the empirical values

Specimens	Number of cycles		Rotary bending stress (kg/mm ²)		Fatigue limit (kg/mm ²)		
	N ₁	N ₂	σ ₁	σ ₂	calculated σ _{FC}	empirical σ _{FE}	%difference of σ _{FE} from σ _{FC} mean(%)
S30A	1.51×10 ⁴	2.33 ×10 ⁵	56.85	51.49	51.17	49.56	7.45
S3noA	5.99×10 ⁴	2.852×10 ⁵	28.98	23.30	22.27	20.86	
S3T	2.35×10 ⁴	6.02 ×10 ⁵	17.46	11.50	11.37	11.01	
S3T0A	3.84×10 ⁴	3.158×10 ⁵	26.25	18.19	17.56	17.06	
S3T10A	1.61×10 ⁴	1.359×10 ⁵	26.55	23.19	22.83	19.31	
S3T100A	1.02×10 ⁴	4.483×10 ⁵	25.12	20.07	19.99	18.05	
S3030A	5.70×10 ⁴	4.651×10 ⁵	37.11	31.84	31.27	27.83	
S303noA	7.14×10 ⁴	4.128×10 ⁵	24.43	18.97	18.23	17.71	
S303T	1.86×10 ⁴	7.02 ×10 ⁵	10.45	10.02	10.01	10.01	
S303T0A	2.36×10 ⁴	1.272×10 ⁵	16.84	14.73	14.05	11.80	
S303T10A	1.21×10 ⁴	5.99 ×10 ⁴	15.92	14.48	14.17	12.87	
S303T100A	2.58×10 ⁴	3.35 ×10 ⁴	15.61	15.38	14.68	13.06	
W0A	1.41×10 ⁴	2.281×10 ⁵	27.89	25.12	24.97	24.06	
WT	1.12×10 ⁴	2.25 ×10 ⁵	14.05	11.40	11.40	11.00	
WT0A	1.91×10 ⁴	1.665×10 ⁵	17.06	14.78	14.55	12.07	
WT10A	2.41×10 ⁴	1.248×10 ⁵	18.19	17.01	16.76	15.87	
WT100A	1.99×10 ⁴	6.01 ×10 ⁴	18.10	17.79	16.00	15.03	

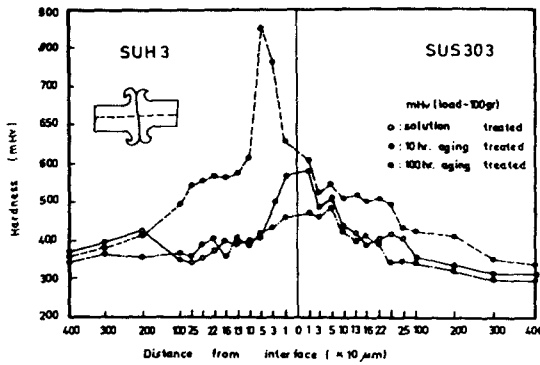


Fig. 7 Hardness distribution near the weld interface of SUH3-SUS303.

은 應力에서도 析出物사이를 빠져 나올 수 있어 軟化한다는 過時効影響에 관한 解析과 같은 傾向을 나타내고 있다. 이는 高 Cr鋼을 600~700°C에서 長時間加熱

하면 σ 相의 金屬間化合物¹⁷⁾이 形成되어 粗大한 析出을 일으켜서, σ 相이 析出하기 쉬워 鋼質을 脆性化시키는 σ 脆性에도 原因이 있다고 생각된다.

따라서 SUH3는 本 實驗과 같은 熱處理條件에 대하여 10時間 前後의 時効時間에 最適値가 있다고 할 수 있다.

그리고 Fig. 6에서 SUS303은 SUH3와 달리 時効時間이 길어짐에 따라 오스테나이트 結晶粒의 크기가 粗大하여 지고 있으며, 析出은 粒界에서 粒內로 析出하는 不連續析出의 形을 이루고 있다.

一般적으로 常溫에서는 結晶粒이 微細한 쪽이 強度가 크지만 高溫에서는 結晶粒이 微細해지면 많은 수의 原子空孔이 結晶粒界에 存在하여 이것을 中間 役割로 한 轉位の 相昇運動과 空孔의 移動이 高溫破壞의 基點을 이루므로 結晶粒이 큰 쪽이 高溫強度가 높아진다¹⁸⁾.

이러한 것은 Fig. 6의 오스테나이트 結晶粒이 粗大

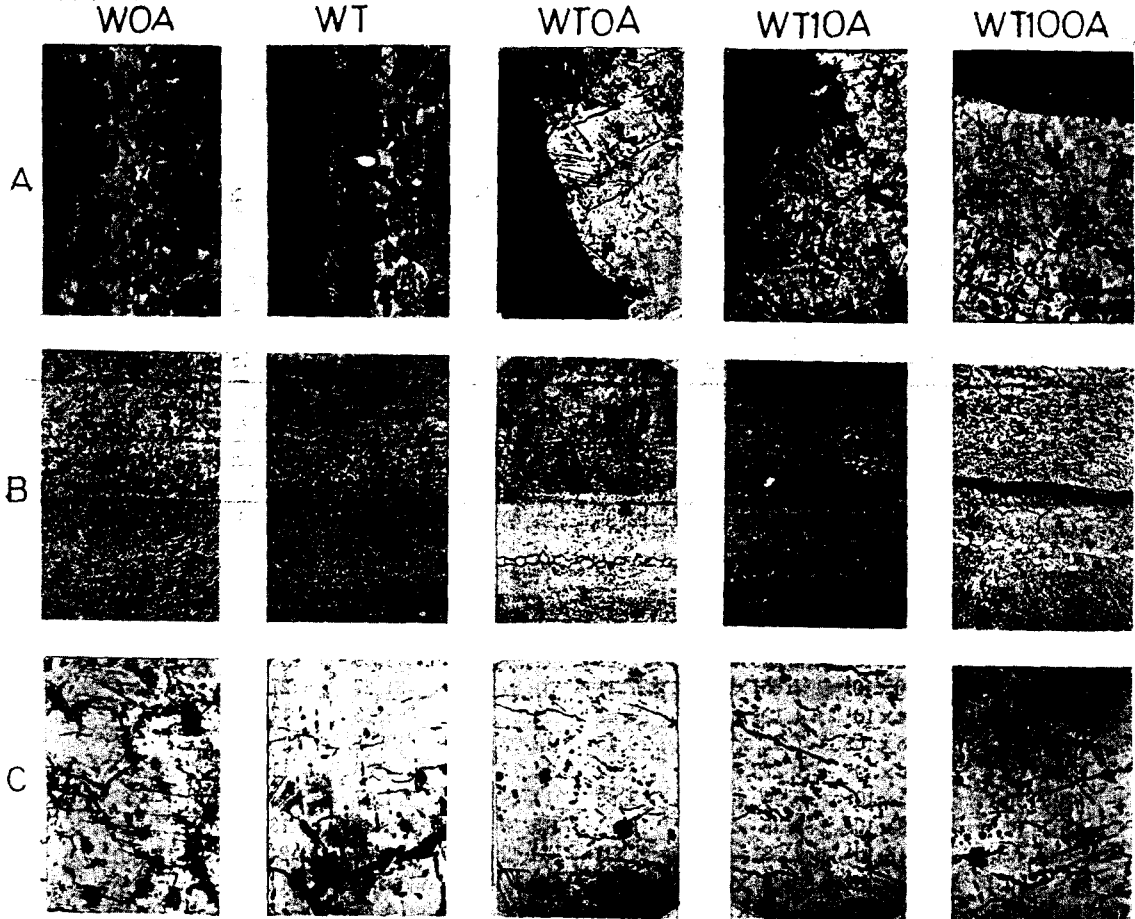


Fig. 8 Microstructures of the fractured surfaces (A), interfaces (B) and cracks on fractured specimen surfaces (C).

마찰용접된 국산내열강의 시효열처리가 고온피로강도 및 파괴거동에 미치는 영향에 관한 연구

하여 점에 따라 Fig. 3의 疲勞限界가 增加하는 것으로 부터도 알 수 있었다.

따라서 SUS303은 100時間 以後의 時効時間에 最適 値가 있음을 알 수 있다.

한편 摩擦溶接材 SUH3-SUS303의 時効處理의 高溫 疲勞限度에 대한 時効의 效果는 SUH3과 같은 傾向을 나타내었으며, 이는 摩擦溶接時에 생긴 熱影響部에 대한 時効組織에 關係가 있다고 생각된다.

즉 Fig. 6에서도 알 수 있는 바와 같이 摩擦溶接時에 摩擦熱로 인하여 溶接面의 SUS303側에는 過대한 炭化物에 의한 weld decay¹⁹⁾가 일어나며 SUH3側은 硬化한다.

그러나 溶体化處理에 따른 炭化物의 固溶으로 SUH3과 SUS303側이 거의 비슷한 硬度值를 갖게 되어 靱性이 回復된다. 이를 時効處理하므로서 SUH3側은 時効硬化로 인한 炭化物이 析出하여 硬度值가 上昇하고 SUH3의 合金元素의 SUS303側 擴散과 炭化物의 析出로 高溫疲勞強度가 높아지나 100時間의 경우에는 SUS303側에 過時効가 생긴다

6. 破壞舉動에 대한 微視的 觀察

Fig. 8에 摩擦溶接材 SUH3-SUS303의 各熱處理 條件에 對한 代表的인 破壞樣相을 表示하였다.

어느 경우이거나 破斷된 이후의 試驗片에 대한 破斷面 가까운 破壞樣相은 큰 差異가 없이 비슷하였으며 항상 SUS303의 母材側에 破壞가 發生하였다. 다만 處女材의 상태로 常溫試驗이나 高溫試驗을 하였을 경우에는 溶接面의 熱形響部에서 破斷하는 傾向이 있으며 熱處理를 한 경우에는 大部分 熱影響部에서 비교적 먼 곳에서 破斷하였다.

破斷 以後의 溶接部의 組織은 高溫疲勞試驗에 長時間露出되어서 溶接面 境界가 絶차 識別하기 어렵게 되었고 SUS303側의 結晶粒度가 粗大해지고 있었다.

한편 高溫疲勞試驗을 한 處女材와 溶体化處理材의 경우 電解研磨하여 酸化膜을 除去하고 熱影響部를 觀察한 結果 Fig. 8 (B)(C)와 같이 熱影響部의 SUS303側 母材에 대단히 많은 數의 크랙들을 찾아 볼 수 있었으나, 10時間 時効材와 100時間 時効材의 경우에는 그 數가 현저히 작아 거의 볼 수 없었다. 이것은 疲勞強度가 增加하는 理由와 같다고 생각된다.

이러한 크랙들은 大部分 SUS303의 結晶粒界를 貫通하는 粒內破壞이었으며 眞空中에서 時効處理한 SUS316鋼을 高溫低사이클 疲勞實驗한 結果³⁾에서 Cr23C6 型的 크롬 炭化物을 析出시킨 時効效果 때문에 粒界破



Fig. 9 Crack propagations on the fractured surface.

- a) S30A, $\sigma=56.85$, $\frac{\sigma}{\sigma_F}=1.15$, $N_f=1.51 \times 10^4$
- b) S3030A, $\sigma=30.19$, $\frac{\sigma}{\sigma_F}=1.08$, $N_f=1.06 \times 10^6$
- c) W0A, $\sigma=25.74$, $\frac{\sigma}{\sigma_F}=1.07$, $N_f=7.12 \times 10^4$
- d) W0A, $\sigma=25.05$, $\frac{\sigma}{\sigma_F}=1.04$, $N_f=6.67 \times 10^5$

壞를 抑制하고 粒內破壞로 誘導하여 粒界크랙 發生時期로 부터 粒內크랙 發生時期까지의 破斷壽命이 延長된다고 하는 것은 本 實驗의 경우 認定되지 않았다.

이것은 引張壓縮에 의한 高溫低사이클과 回轉굽힘에 의한 高溫 高사이클 試驗의 差異라고 생각된다.

Fig. 9은 常溫試驗에 있어서의 母材와 熔接材의 處女材에 대한 破斷된 試驗片 表面의 크랙 傳播過程을 나타낸 것이다.

Fig. 9(a)는 SUH3에 高應力の 負荷를 加했을때 破壞된 것으로 完全한 粒界破壞를 보여주고 있으며 粒內破壞는 전혀 볼 수 없다. 이러한 粒界破壞에 대해서 Kuwahara¹⁹⁾는 SUS304의 熱疲勞試驗에서 strain hold time를 크게 주므로서 나타난다고 報告했다.

그러나 SUS303과 SUH3-SUS303의 경우인 Fig. 9 (b)(c)(d)는 오스테나이트의 方向성에 따른 무수한 slip band를 동반한 塑性變形과 함께 크랙은 粒界와 粒內를 傳播하는 粒內크랙이었다.

要 約

Si-Cr系 耐熱鋼 SUH3와 Cr-Ni系 stainless鋼 SUS 303 및 이들의 摩擦熔接材 SUH3-SUS303을 1,060°C에서 溶体化處理하고 다시 700°C에서 10, 100時間 時効熱處理한 各 試驗片의 高溫 疲勞強度에 대한 時効熱處理의 效果를 알기 위하여 700°C에서 高溫 回轉굽힘 疲勞試驗을 하고 破壞學動을 微視적으로 觀察하여 다음과 같은 結果를 얻었다.

- 1) SUH3材와 SUS303材의 最適摩擦熔接條件은 回轉數 2420rpm, 摩擦加壓力 $8kg/mm^2$, 全 upset量 7mm(摩擦加壓時間 3sec, upset時間 2sec)이었다.
- 2) 700°C 高溫에서 長時間 이루어지는 高溫疲勞試驗에 있어, 溶体化處理材의 S-N 曲線 傾斜部の 기울기가 가장 급하게 나타났다.
- 3) SUH3-SUS303 摩擦熔接材는 1,060°C에서 1時間 溶体化 處理하고, 700°C에서 時効處理하는 경우 最適時効時間은 10時間이었다.
- 4) 10時間 時効材의 高溫疲勞限度는 母材보다 SUH3은 75.4%, SUS303은 28.5% 높았으며, 熔接材 SUH3-SUS303은 44.2% 정도 높았다. 100時間 時効材는 母材보다 SUH3은 64.94% SUS303은 30.4% 높았으며, SUH3-SUS303은 36.6% 높았다.
- 5) 摩擦熔接材의 常溫 및 高溫의 疲勞破斷은 모두 SUS303의 母材側에 發生하였으며, 熔接面에서의 破斷은 전혀 없었다.

6) SUS303材와 摩擦熔接材 SUH3-SUS303材의 크랙은 粒內破壞型이었으나 SUH3은 粒界크랙의 傳播로 破壞한다.

本 研究는 產學協同財團의 研究支援에 의하여 遂行되었음을 밝히며 關係諸氏에서 深甚한 謝意를 表하는 바입니다.

參 考 文 獻

- 1) 田中良平(1972) : 最近における耐熱鋼の動向(2), 機械の研究, 24-2, p. 261-264.
- 2) Kuwahara, K. and A. Nitta(1979) : On high temperature fatigue and creep strength of a $2\frac{1}{4}$ Cr-1Mo steel pipe material used for a long period, Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI Report No. E279002, p. 1-45.
- 3) 吳世奎, 國尾武, et al(1980) : SUS316鋼의 高溫 低 사이클 疲勞舉動에 미치는 粒界析出物의 影響, 大韓機械學會論文集, 4-4 p. 152.
- 4) Hazlett, T.H.(1962) : Property of friction welding between dissimilar metals, W.J., 41-10, p. 444-450.
- 5) 森井泰, et al(1971) : アルミニウムと異種金屬の摩擦壓接による継手の性質, 輕金屬熔接, 15-10, p. 457-463.
- 6) 中村虔一, et al(1970) : 摩擦壓接法に關する研究 (第2報), 日本機械試驗所所報, 21-4, p. 185.
- 7) 蓮井淳, 田中英樹(1979) : クロムモリブデン鋼と炭素鋼の摩擦壓接について, 熔接學會誌, 48-3, p. 195.
- 8) Shioya, T., et al(1966) : Movement of C, Cr and Ni in SUS27 and S45C welded by friction welding and mechanical properties of the joint, JWS, 35-6, p. 429-438.
- 9) 鹽谷敏祐, et al(1965) : 摩擦熔接されたS20Cおよび S45C の機械的性質に關する檢討, 熔接學會誌, 34-11, p. 1197-1203.
- 10) Um, D.S.(1973) : Study on fatigue strength of friction welded joint S20C-SUS 27B, Bull. of PNU, 15, p. 215-280.
- 11) 吳世奎, 李圭用(1980) : 航空機 및 船用機關部品用異種 耐蝕 耐熱鋼의 摩擦壓接과 壓接部의 疲勞強度에 關한 研究, 釜山水大研報, 20(2) p.

마찰용접된 국산내열강의 시효열처리가 고온피로강도 및 파괴거동에 미치는 영향에 관한 연구

49-87.

- 12) Pantereb, B. M. (1970) : Fracture of metals (Ivanova), Trans. by T. Yokobori, p. 190.
- 13) 吳世旭, 周原植, 崔炳國(1980) : SUS316鋼의 高溫 크라이프強度에 미치는 時効處理의 影響. 1980年度 大韓機械學會秋季學術大會抄錄集, p. 131-136.
- 14) 日本機械學會(1977) : 金屬材料疲れ強さの設計資料, p. 147.
- 15) 日本鐵鋼協會(1970) : 鋼の熱處理, p. 560.
- 16) Weibull, W. and T. stüssi(1971) : Fatigue design of of machine components, L. Sors, p. 6-9.
- 17) 日本金屬學會編(1971) : 金屬便覽(改訂3版), 丸善, p. 806.
- 18) 摩擦壓接研究會編(1979) : 摩擦壓接, 日ナ社, p. 50.
- 19) Kuwahara, K. and Nitta, A. (1976) : Effect of strain hold-time at high temperature on the rmal fatigue behavior of type 304 Stainless steel, Central Research Institute of Electric Power Industry, CRIEPI Report No. E276002, p. 15.