

〈技術論文〉

# 12%크롬 로터鋼의 疲勞壽命 豫測 모델에 관한 研究

蔣允石\* · 吳世旭\*\* · 吳世圭\*\*\*

(1990년 6월 8일 접수)

## Fatigue Life Prediction Model of 12% Cr Rotor Steel

Yun Souk Chang, Sae Wook Oh and Sae Kyu Oh

**Key Words:** Low Cycle Fatigue(低사이클 疲勞), Elastic Strain Range(彈性變形量), Plastic Strain Range(塑性變形量), Real Stress(眞應力), Equivalent Maximum Stress(等價最大應力), Fatigue Life(疲勞壽命)

### Abstract

By examining the fatigue deformation properties of 12% Cr rotor steel which has been proved to have high fatigue and creep rupture strength around 600°C, authors reviewed major fatigue life prediction models such as Manson, Langer and Morrow equations, and following results were obtained.

(1) A simple life prediction model for 12% Cr rotor steel was obtained as follows:

$$\Delta\epsilon_t = 2.18 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.065} + e^{0.6} N^{-0.725}$$

This equation shows that fatigue life,  $N$ , can be easily determined when total strain range,  $\Delta\epsilon_t$  and ultimate tensile strength,  $\sigma_u$ , are known by simple tension test on the given test conditions.

(2) Life prediction equation with equivalent maximum stress,  $\Delta\sigma/2$ , corresponding maximum strain in one cycle at room temperature is as follows:

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = -7.01 \log N + 96.69$$

### 1. 서 론

發電所의 터빈 로터材로는 1%Cr-Mo-V鋼이 通常으로 使用되고 있으나 熱效率을 向上시키기 위하여 스팀 제너레이터의 스팀 條件을 從來의 3500 psi/1000°F(538°C)에서 4500psi 以上の 보다 高壓과 1100°F(590°C)以上の 보다 高溫으로 上昇시키기

僞하여 高溫에서 보다 强度가 우수한 12%Cr 鋼으로 代置하고자 研究되고 있다<sup>(1~4)</sup>.

12%Cr 로터鋼의 特性에 대하여 지금까지 研究 結果에 依하면 550°~680°C 溫度 범위에서 疲勞强度, 크리프 强度가 1%Cr-Mo-V 鋼보다 우수하였으며<sup>(4)</sup>, 背應力 增大에 有效한 合金元素 添加에 따라 高溫에서의 크리프 强度가 改善되었다<sup>(5)</sup>.

本 論文에서는 12%Cr 로터 鋼의 疲勞의 變形 特性을 究明하고, 現在 알려져 있는 代表的인 몇가지 疲勞壽命 豫測 모델을 檢討하였으며, 각 應力과 特히 高溫에서 우수한 强度 條件에 適合한 모델을 研究하였다.

\* 정회원, 한국중공업(주) 기술연구소

\*\* 정회원, 동아대학교 공과대학 기계공학과

\*\*\* 정회원, 부산수산대학 박용기계공학과

2. 試驗片 및 實驗方法

2.1 試驗片

試驗片은 65톤 鋼塊를 鍛造比(鋼塊 斷面積/製品 斷面積) 3.86으로 鍛造하여 25톤 試製作 로터를 만 들었으며 鍛造 後에 鑄造組織이 남아 있지 않도록 微細化하였다. 熱處理는 粒度 微細化와 機械的 性質의 最適條件을 求하여 適用하였다<sup>(4)</sup>. Fig. 1에 各種 熱處理 方法을 表示한다.

本 研究에 使用된 低사이클 疲勞(low cycle fatigue; L.C.F)試驗片은 試製作 로터의 表面部에 서 接線方向으로 採取하였다. Fig. 2에 로우터의 形象 및 寸수를 表示하였고, Table 1에 試驗片의 化學成分을 나타내었다. 試驗片의 表面은 #1200 연 마지로 研磨하여 疲勞 균열의 發生에 表面 거칠기 의 影響을 最小化하였다. Fig. 3에 試驗片의 形象 및 寸수를 表示하였다.

2.2 實驗方法

本 實驗에 使用된 疲勞試驗機는 10톤 容量의 전기유압식 서보 피로시험기(Instron Model 1350)을 使用하였으며, 高溫疲勞 實驗은 反射爐를 使用하여 500℃와 600℃를 유지하였고, 低사이클 疲勞實驗을

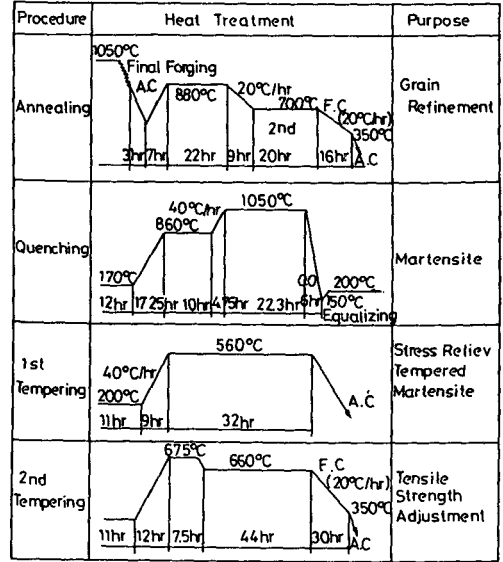


Fig. 1 Heating & cooling cycles of heat-treatment for 12% Cr rotor

Table 1 Chemical composition of 12%Cr rotor steel (Wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V	Nb
0.16	0.24	0.67	0.005	0.003	0.58	11.01	0.92	0.23	0.05

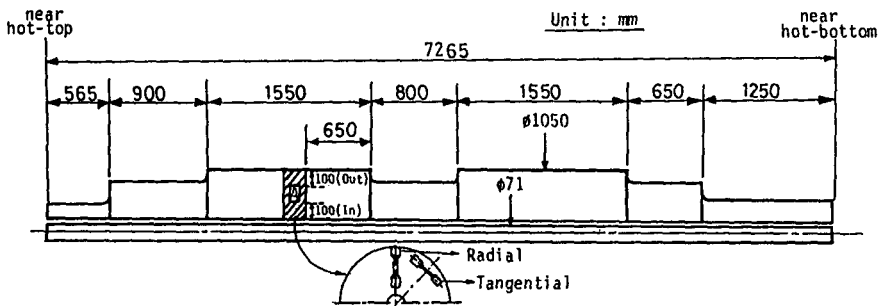


Fig. 2 External shape and mechanical property test part (A) of 12%Cr trial rotor

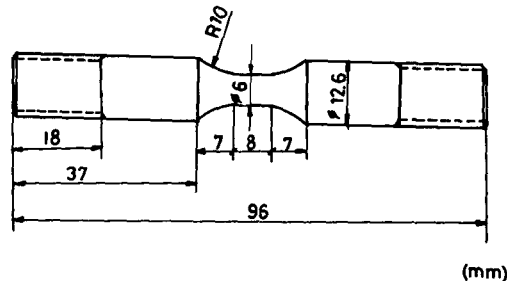


Fig. 3 Fatigue test specimen(smooth bar type)

하기전에 K-type 열전대를 사용하여 溫度補正을 실시하여 試驗片의 標點길이의 溫度偏差를 +3K 以內로 調節하였다. 變形量制御 및 測定을 변형률 신장계 (strain extensometer)를 反射爐 外部에 附着하여 試驗片의 標點길로부터 塑性變形量을 換算하였다. 變形速度는  $4 \times 10^{-3}$ /sec로 하여 三角波型 連續疲勞 實驗을 하였으며, 疲勞壽命은 20% 應力減少 時點으로 하는 것이 적당하다고 보고되고 있는바(2) 本 實驗에서도 引張飽和 應力으로부터 應力減少가 20%되는 사이클 數를 疲勞數目으로 하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3.1 既存疲勞壽命 豫測 모델의 檢討

지금까지 모델화하여 發表된 代表的인 低사이클

疲勞(L.C.F)壽命 豫測式들을 Table 2에 표시하였다. 여기서 Manson-Coffin式(6)은 소성변형량(plastic strain range)  $\Delta\epsilon_p$ 와 疲勞壽命(N)의 關係式으로서 전변형량(total strain range)  $\Delta\epsilon_t$ 를 疲勞壽命(N)에 考慮하지 않은 特徵이 있으며 다음과 같다.

$$N^k \Delta\epsilon_p = C \tag{1}$$

Langer式(7)은  $\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p$ 의 關係에서  $\Delta\epsilon_p$ 는 Manson-Coffin式과 같이 적용하고 있으며, 탄성변형량(elastic strain range)  $\Delta\epsilon_e$ 는 一定한 常數값으로 나타나는데 일반식은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_t = \frac{C}{N^k} + \frac{2S_D}{E} \tag{2}$$

여기서,  $S_D$ 는 疲勞限度이고  $E$ 는 彈性係數이다. Fig. 4의 소성변형량  $\Delta\epsilon_p$ 와 전변형량  $\Delta\epsilon_t$ 와의 관계

Table 2 Determination of coefficient in various life prediction equations

Manson-Coffin $N^k \Delta\epsilon_p(\%) = C$				Langer $\Delta\epsilon_t(\%) = \frac{C}{N^k} + \frac{2S_D}{E} \times 100$			Morrow $\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\sigma_f'}{E} N^b + \epsilon_f' N^c$			Manson $\Delta\epsilon_t = 3.5$ $\frac{\sigma_u}{E} N^{-0.12} + e^{0.6} N^{-0.6}$					
	Room temp.	500°C	600°C		Room temp.	500°C	600°C		Room test	500°C	600°C		Room temp.	500°C	600°C
K	0.7117	0.7904	0.6730	C	86.970	178.40	87.30	$\sigma_f'$	148.0	143.6	127.3	$\sigma_u$	91.0	73.0	50.0
				K	0.7117	0.7904	0.6730	E	22700	19600	18200				
C	86.97	178.40	87.30	$S_D$	46.0	28.0	16.1	b	-0.0870	-0.0502	-0.0832	E	22700	19600	18200
				E	22700	19600	18200	$\epsilon_f'$	0.775	0.942	1.273				
								c	-0.7886	-0.7982	-0.8284	e	0.775	0.942	1.273

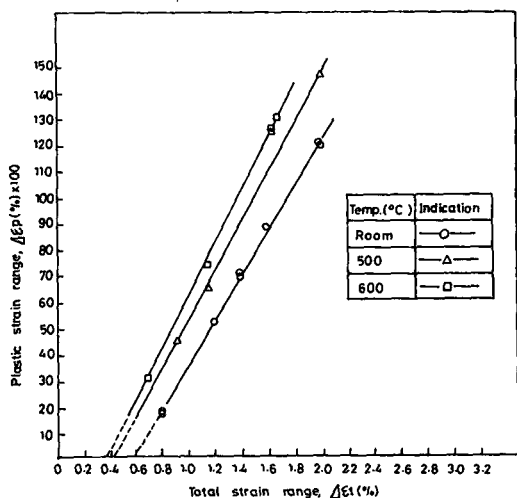


Fig. 4 Relation between plastic and total strain range at each test temperature

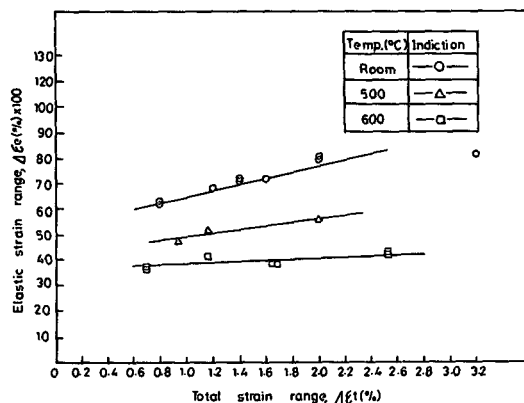


Fig. 5 Relation between elastic and total strain range at each test temperature

와 Fig. 5의 탄성변형량  $\Delta\epsilon_e$ 와  $\Delta\epsilon_t$ 와의關係를比較할때  $\Delta\epsilon_t$ 가 증가함에 따라  $\Delta\epsilon_e$ 는  $\Delta\epsilon_p$ 에 비하여 변화가 매우 완만하므로 하나의 상수로 고려된 특성이 있다.

Morrow式<sup>(8)</sup>은 최근에 제안된 式으로 변형량의關係를 역시  $\Delta\epsilon_t = \Delta\epsilon_e + \Delta\epsilon_p$ 로 보고  $\Delta\epsilon_e - N$ 의 해석시에는 1사이클 후에 파괴되는 진응력(real stress)  $\sigma'_r$ 를 탄성계수( $E$ )로 나누어 표준화한 값을 종축( $\Delta\epsilon_e$ )의 절편(intercept)으로 취하고 實驗 데이터에 의하여 기울기(slope)를 결정하며,  $\Delta\epsilon_p - N$ 의 해석시에는 1사이클 후에 파괴되는 진변형량(real stain)  $\epsilon'_r$ 를 종축( $\Delta\epsilon_p$ )의 절편으로 하고  $C$ 는 實驗 데이터에 의해 계산되는 기울기를 의미하며, 그 一般式을 다음과 같이 表示하였다.

$$\frac{\Delta\epsilon_t}{2} = \frac{\sigma'_r}{E} N^b + \epsilon'_r N^c \quad (3)$$

또한, Manson式은 다음과 같이 表示하였다.

$$\Delta\epsilon_t = 3.5 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.12} + e^{0.6} N^{-0.6} \quad (4)$$

여기서,  $\sigma_u$ 는 인장강도(ultimate tensile strength)이다. 이 식은 여러 鋼種에 대하여 疲勞實驗을 한 후 統計적으로  $\Delta\epsilon_p$ 와  $\Delta\epsilon_e$ 領域에서 로그 그래프에서의 기울기를 求하여 式(4)의 우변의 제1항 탄성역의指數와 제2항 소성역의指數로 常數化하였다. 위에서 言及한 式(1), (2), (3)의 壽命關係式은 低사이클 피로 實驗 데이터를 필요로 하는 式이지만 式(4)의 Manson式은 單純引張試驗 데이터만으로도 이용할 수 있기 때문에 매우 편리한 式이라고 할 수 있겠다.

3.2 實驗結果 및 壽命豫測 모델에 대한 考察

앞에서 언급한 式(2), (3), (4)의 3가지 壽命豫測 모델式의 係數를 求한 후 常溫에서  $\Delta\epsilon_e - N$ 關係를 Fig. 6에 圖示하였으며,  $\Delta\epsilon_p - N$ 關係를 Fig. 7,  $\Delta\epsilon_t - N$ 關係를 Fig. 8에 圖示하였다. 500°C 및 600°C에서의  $\Delta\epsilon_t - N$ 關係를 Fig. 9와 Fig. 10에 圖示하였다. 여기서 나타난 바와 같이 常溫 및 高溫(500°C, 600°C)에서 Morrow式이 가장 實驗 데이터에 近接하며, Langer式은 實際實驗데이터보다 壽命이 짧게 表示되고, Manson式은 반대로 실제보다 壽命이 길게 表示된다.

따라서, 本 研究에서는 壽命豫測에 適用이 容易한 Manson式의 係數를 修正하여, 試製品으로 製

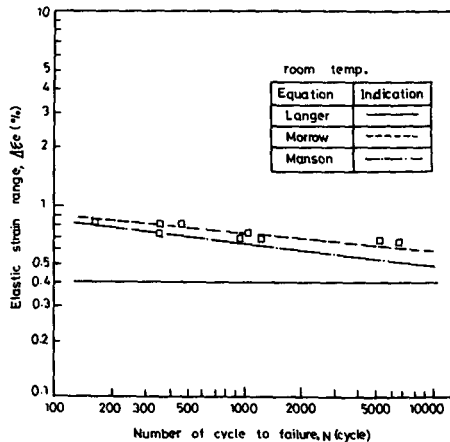


Fig. 6 Relation between elastic strain range and fatigue life at room temperature, (air)

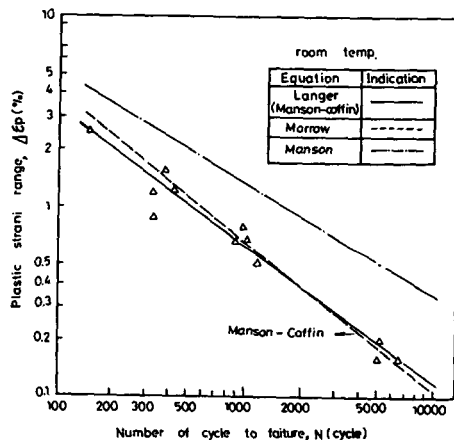


Fig. 7 Relation between plastic strain range and fatigue life at room temperature, (air)

作한 12% Cr 로티 鋼에 適合하도록 式을 導出하여 보았다.

Table 3에서 表示하는 바와 같이 引張試驗結果로부터 溫度別로 Manson式의 係數를 求하고, 低사이클 疲勞實驗 데이터에 最小自乘法을 適用하여 實驗데이터 自體의 截片 및 기울기를 求하였다. 各溫度에서 引張試驗 데이터로 求한 Manson式의 기울기 및 截片을 計算하여 實驗式을 求하고 이것을 modified Manson式이라 表示하여 Table 3의 下段에 나타냈다. 溫度가 높아짐에 따라  $\Delta\epsilon_e$ 項의 係數들은 漸次로 減少하나 큰 差異는 없으며,  $\Delta\epsilon_p$ 項의 plastic ductility( $e$ )는 大概 1보다 작은 값이므로 數式에 큰 影響을 미치지 않고 있으며, 反復數( $N$ )

Table 3 Comparison of coefficient

Strain	Temp.	Room		500		600	
	Constant	Manson	Exact	Manson	Exact	Manson	Exact
$\Delta\epsilon_e$	Intercept	1.403	1.206	1.304	1.015	1.962	0.459
	Slope	-0.12	-0.077	-0.12	-0.097	-0.12	-0.022
$\Delta\epsilon_p$	Intercept	84.48	86.97	96.48	178.40	115.58	87.39
	Slope	-0.6	-0.712	-0.6	-0.790	-0.6	-0.673

- \* Manson's equation :  $\Delta\epsilon_t = 3.5 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.12} + e^{0.6} N^{-0.6}$
- \* Modified Manson's equation of 12% Cr rotor steel
- Room temperature :  $\Delta\epsilon_t = 3.01 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.077} + e^{0.497} N^{-0.712}$
- 500°C :  $\Delta\epsilon_t = 2.72 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.097} + e^{-9.69} N^{-0.790}$
- 600°C :  $\Delta\epsilon_t = 0.82 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.022} + e^{-0.558} N^{-0.673}$
- \* Mean value :  $\Delta\epsilon_t = 2.18 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.065} + e^{0.6} N^{-0.725}$

의 指數도 거의 變化가 없음을 알 수 있다. 따라서, 指數의 平均값을 取하면 다음과 같은 式을 얻을 수 있다.

$$\Delta\epsilon_t = 2.18 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.065} + e^{0.6} N^{-0.725} \quad (5)$$

이 式을 便利上 12% 크롬鋼의 modified general Manson式이라 하고, 溫度별로 求한 modified Manson式과 함께 Fig. 8~Fig. 10에 나타내었다.

여기서, 既存의 Manson式과 比較할 때 modified Manson式이 實際 實驗 데이터에 매우 近接함을 알 수 있고, modified general Manson式도 대체로 實驗데이터와 잘 一致함을 알 수 있다.

한편, Fig. 4 및 Table 4에서 全變形量( $\Delta\epsilon_t$ )이 增加함에 따라 塑性變形量( $\Delta\epsilon_p$ )은 급격히 增加함을 알 수 있으며, 常溫에서  $\Delta\epsilon_t$ 가 0.6% 以下이면 完全彈性 舉動을 하는 것을 豫測할 수 있으며( $\Delta\epsilon_p$

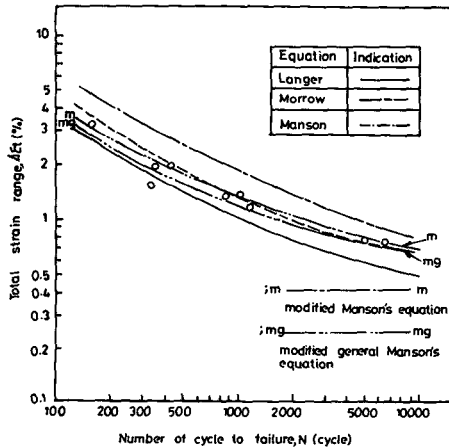


Fig. 8 Relation between total strain range and fatigue life at room temperature

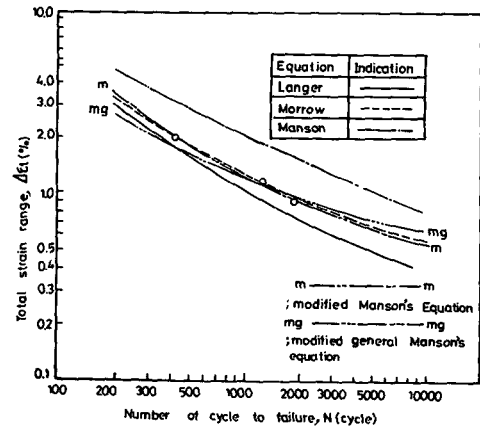


Fig. 9 Relation between total strain range and fatigue life at 500°C

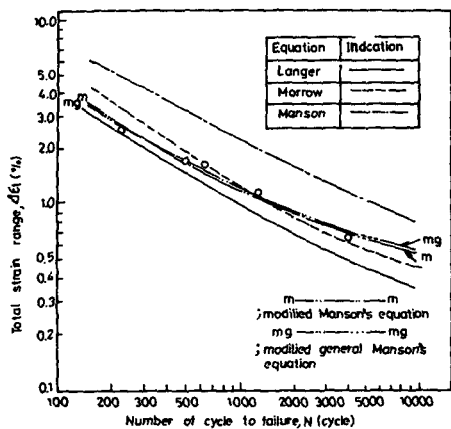


Fig. 10 Relation between total strain range and tail-gue life at 600°C

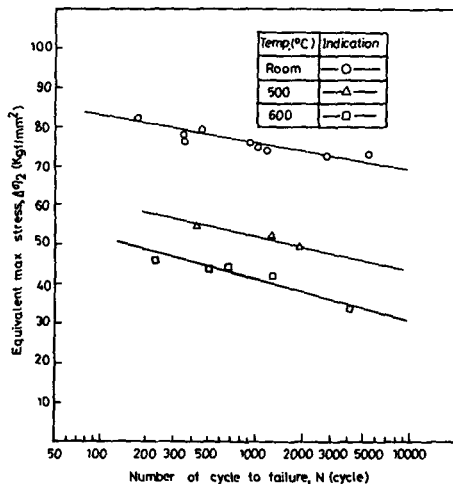


Fig. 11 Relation between equivalent max. stress and fatigue life

Table 4 Results of low-cycle fatigue test at room and high temperature

Temp.	Total Strain range, $\Delta\epsilon_t$ (%)	Equivalent max. range, $\Delta\sigma/2$ (kgf/mm <sup>2</sup> )	Elastic Strain range, $\Delta\epsilon_e$ (%)	$\frac{\Delta\epsilon_e}{\Delta\epsilon_t} \times 100$ (%)	Plastic Strain range, $\Delta\epsilon_p$ (%)	$\frac{\Delta\epsilon_p}{\Delta\epsilon_t} \times 100$ (%)	Fatigue life, $N$ (Cycle)
Room	3.200	81.82	0.820	25.63	2.380	74.37	173
	2.000	79.05	0.800	40.00	1.200	60.00	454
		78.86	0.800	40.00	1.200	60.00	350
	1.600	76.42	0.720	45.00	0.880	55.00	350
	1.400	76.14	0.700	50.00	0.700	50.00	925
		74.89	0.710	50.71	0.690	49.29	1032
	1.200	73.94	0.680	56.67	0.520	43.33	1191
		0.800	71.57	0.628	78.50	0.172	21.50
	71.42		0.628	78.50	0.172	21.50	4970
500°C	2.030	54.87	0.560	27.59	1.470	72.41	430
	1.170	52.12	0.520	44.44	0.650	55.56	1250
	0.930	49.38	0.480	51.61	0.450	48.39	1900
600°C	2.520	45.72	0.420	16.67	2.100	83.33	230
	1.680	43.89	0.380	22.62	1.300	77.38	505
	1.640	43.87	0.390	23.78	1.250	76.22	650
	1.150	42.06	0.410	35.65	0.740	64.35	1250
	0.690	33.83	0.380	55.07	0.310	44.93	4050

=0), 500°C 및 600°C에서는 이보다 낮은  $\Delta\epsilon_t$ 가 0.42%와 0.38%以下에서 完全彈性인 것으로 예측된다. 그리고, 1 사이클의 最大變形에서의 應力을 等價最大應力(equivalent maximum stress)  $\Delta\sigma/2$ 로 할 때 疲勞壽命( $N$ )과의 關係를 Fig. 11에 나타냈다. 여기서, 溫度가 上昇할수록  $\Delta\sigma/2$ 값은 점차 낮아짐을 알 수 있으며, 高사이클 疲勞(high cycle fatigue)實驗 結果와 同一한 傾向을 보이므로 低사이클 疲勞實驗데이터에 의한 高사이클 疲勞壽命을 豫測하여 보았다. Fig. 11의 常溫曲線의 方程式은 다음과 같이 表示된다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = -7.01\log N + 96.69 \quad (6)$$

常溫 高사이클疲勞 實驗에 依한 疲勞限度는 약  $1.0 \times 10^7$  cycles,  $46.0 \text{ kgf/mm}^2$ 였다. 따라서,  $10 \times 10^7$  cycle을 式 (6)에 代入하면 疲勞 限度는  $47.6 \text{ kgf/mm}^2$ 으로 計算되고, 이 應力값은 誤差가 3.5%로써 實際 疲勞限度 實驗에서 데이터의 分散이 甚한 것을 考慮하면 충분히 設計上에 使用 可能한 것으로 思料된다.

#### 4. 결 론

12% 크롬 로터鋼의 低사이클 疲勞實驗 結果를 가지고 疲勞壽命 豫測 모델을 檢討한 結果는 다음과 같다.

(1) 高溫 引張試驗 結果로 부터 Manson方程式을 가지고 12% 크롬 로터鋼의 疲勞壽命을 豫測할 수 있는 一般式은 다음과 같다.

$$\Delta\epsilon_t = 2.18 \frac{\sigma_u}{E} N^{-0.065} + e^{0.6} N^{-0.725}$$

(2) 全變形量(total strain range)에 相應하는 等價最大應力을 作用應力으로 볼때 그 應力에 대한

疲勞壽命도 豫測이 可能하며 常溫의 境遇 다음 式으로 表示된다.

$$\frac{\Delta\sigma}{2} = -7.01\log N + 96.69$$

(3) 12% 크롬 로터鋼의 疲勞 實驗 結果에서는 Morrow가 提示한 모델이 全區域에서 實驗式에 가장 近似值로 接近하고 있다.

#### 참 고 문 헌

- (1) Newhouse, D.L., Boyle, C.J., Curran, R.M., 1965, "A Modified 12% Chromium Steel for Large High Temperature Steam Turbine Rotors", ASTM 68th Meeting, June 13~18.
- (2) Curran, R.M., Newhouse, D.L., Newman, J.C., 1982, "The Development of Improved Rotor Forgings for Modern Large Steam Turbines", 82-JPGC-Pwr-25.
- (3) Fumi Ito et. al, 1986, "Improved 12% Cr Rotor Forgings for Advanced Steam Turbines", JPGC, pp. 1~6.
- (4) 蔣九石, 吳世旭, 1989, "12% 로터鋼의 強度 改善에 관한 研究" 韓國海洋工學會誌, 제3권, 제2호, pp. 625~637.
- (5) Chang, Y.S., Oh, S.W., 1990, "Effect of Alloying Elements on Back Stress in the Creep Behavior of 12% Chromium Steel", Proceedings of the First Pacific Asia Offshore Mechanics Symposium, Vol 3. pp. 123~129.
- (6) Manson, S.S., 1953, "Behavior of Metals under Conditions of Thermal Stress", NACA TN-2993.
- (7) Kocanda, S., 1978, "Fatigue Failure of Metals", Vol. 1, pp. 5~6.
- (8) Fuchs, H.O., and Istephens, R., 1980, "Metal Fatigue in Engineering", A Wiley-Interscience Publication, pp. 77~78.