

軸系用 鍛造鋼材 補修肉盛 熔接部の 疲勞強度에 關한 研究

金永植¹⁾ · 金宗鎬²⁾ · 韓名洙³⁾

A Study on the Fatigue Behavior of Forged Steel Shaft Reclaimed by Built up Welding

Young-Sik Kim, Jong-Ho Kim, Myoung-Soo Han

< 目 次 >	
Abstract	4. 實驗結果 및 考察
1. 序 論	4.1 SF60圓棒母材試驗片의 疲勞特性
2. 應力세기係數(K_t)의 修正	4.2 熔接硬化 試驗片의 疲勞特性
3. 實驗材料 및 實驗方法	5. 結 論
3.1 實驗材料 및 試驗片	참고문헌
3.2 實驗 方法	

Abstract

In this paper, a series of experiments were conducted for the purpose of clarifying the fatigue fracture behaviour of the reclaimed shafts which were made by building up welding method according to various welding and heat-treatment procedures.

Moreover, those behaviour was compared with that of original SF60 class forged steel. The obtained results from the above experiment are summarized as follows :

- 1) The surface crack growth rate, dl/dn , in a round bar subjecting to cyclic tension-compression stresses can be evaluated with the stress intensity factor value, K , which was calculated in this paper.
- 2) The crack propagation rate of the reclaimed shaft appears to be less than that of original SF60 class forged steel shaft.
- 3) The surface hardened forged steel after built up welding shows the superiority in

1) 한국해양대학 2) 한국 선급 3) 한국해양대학 대학원

crack resisting behaviour over original SF60 class forged steel.

- 4) The fatigue strength of surface hardened steel even having a weld defect is the same as that of original SF60 class forged steel, or greater.

1. 序 論

動力傳達用 軸系가 磨耗, 表面缺陷등의 발생으로 인해, 그 使用이 불가능하게 되었을 경우, 補修熔接에 의해 재생시키는 것은 임시수리 方法들 중의 하나로서 오래전 부터 채용되어져 왔다.

그러나, 이와같은 補修方法은 熔接時 발생하는 熔接缺陷, 引張殘留應力 등으로 인해 補修部 疲勞強度의 저하가 초래되기 때문에 대부분의 규칙에서는 이러한 補修方法을 원칙적으로 허용하지 않는 것을 규정화하고 있다.¹⁾

이에 반해, 補修熔接時에 적절한 熔接 施工法, 運棒法 등을 채택하여 疲勞強度低下의 주된 요인이 되는 熔接缺陷, 引張殘留應力 등의 발생을 가능한 억제시킴으로써 母材軸과 거의 동일한 疲勞強度를 가지는 축을 얻을 수 있다는 연구사례도 발표되어 있다.²⁾

또한, 圓棒形狀의 요소에서 발생한 表面龜裂의 成長舉動을 定量的으로 評價하는 것은 그 해석상의 어려움 때문에 다수의 연구에도 불구하고 아직 많은 문제점을 가지고 있다.³⁾

이와같은 관점으로부터, 본 논문에서는 平板에서 발생한 表面龜裂에 대한 Newman-Raju의 應力세기係數(K_I)式⁴⁾을 修正하여 圓棒노치試驗片에서 발생·성장하는 表面 疲勞龜裂의 성장거동을 정량적으로 評價하는 역학적 변수를 얻었다. 또한 동력전달용 軸系材料로 널리 이용되고 있는 圓棒形狀의 鍛造鋼의 表面에 肉盛熔接을 행한후, 硬化處理를 행한 熔接硬化材料에서의 表面疲勞龜裂의 成長舉動을 위에서 얻은 역학적 변수에 의해 定量的으로 評價하고, 이것을 鍛造鋼 母材의 그것들과 比較, 考察하였다. 아울러 補修熔接으로 인해 熔接硬化材料에 缺陷이 존재할 때의 疲勞強度를 缺陷이 존재하지 않을 때의 그것과 比較하고, 이들을 母材의 疲勞強度와 각각 比較, 考察하였다.

2. 應力세기 係數(K_I)의 修正

Fig. 1(a)에 나타난 半橢圓 表面龜裂을 가진 平板의 應力세기 係數에 대한 Newman-Raju式은,

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi a} \cdot Q \cdot F(a/t, a/c, c/b, \phi) \quad (1)$$

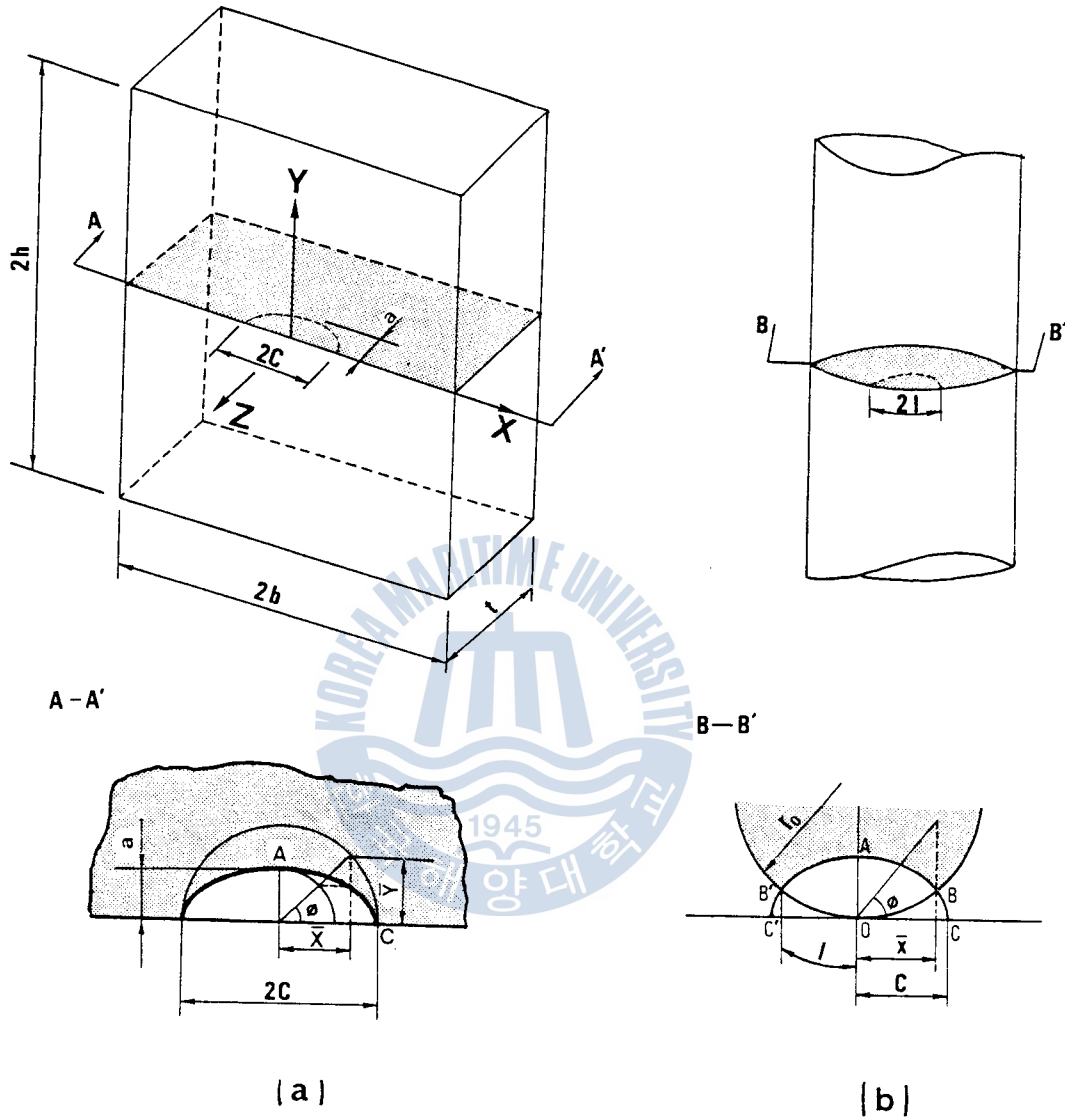


Fig. 1 Configuration of a flat and a round bar.

로 표시된다. 식(1)을 Fig. 1(b)에 보여주고 있는 圓棒形狀의 물체에 존재 하는 半橢圓 表面龜裂에 적용하기 위하여 다음과 같은 가정을 둔다.

- 1) 平板의 半幅(b)은 圓棒의 半径(r_0)로 치환할수 있다.
- 2) 平板의 판두께는(t)는 圓棒의 直徑($2r_0$)로 치환할수 있다.

위의 두 가정에 의해 식(1)은

$$K_I = \sigma \cdot \sqrt{\pi} \cdot a \cdot Q \cdot F(a/2r_0, a/c, c/r_0, \phi) \quad (2)$$

로 표현된다. 여기서 Q 는 제2종 橢圓積分으로서,

$$\begin{aligned}
 Q &= \left[\int_0^{\frac{\pi}{2}} \{1 - (c^2 - a^2)/c^2 \cdot \sin^2 \phi\}^{1/2} \cdot d\phi \right]^{-1/2} \\
 &= [\pi/8 \cdot \{3 + (a/c)^2\}]^{-1} \\
 &= \{\pi/8 \cdot (3 + \lambda^2)\}^{-1}
 \end{aligned} \tag{3}$$

으로 되고, F는 境界修正係數 (boundary correction factor)로서

$$F = \{M_1 + M_2 \cdot (a/t)^2 + M_3 \cdot (a/t)^4\} f_\phi \cdot g \cdot f_w \tag{4}$$

로 표현한다. 여기서, 係數 $M_1, M_2, M_3, f_\phi, g, f_w$ 는 각각

$$\begin{aligned}
 M_1 &= 1.13 - 0.09\lambda \\
 M_2 &= -0.54 + 0.89/(0.2 + \lambda) \\
 M_3 &= 0.5 - 1.0/(0.65 + \lambda) + 14(1.0 - \lambda)^{24} \\
 g &= 1 + \{0.1 + 0.35(a/2r_0)^2\} (1 - \sin\phi)^2 \\
 f_\phi &= (\lambda^2 \cos^2 \phi + \sin \phi)^{1/4} \\
 f_w &= \sec(\pi c/2r_0 \cdot a/2r_0)
 \end{aligned}$$

로 된다.

3. 實驗材料 및 實驗方法

3.1 實驗材料 및 試驗片

實驗에 사용한 材料는 0.35%C를 포함한 鍛造加工한 SF60級의 鋼材로서 그 化學的成分 및 機械的性質을 Table.1에 나타내었다.

Fig.2는 實驗에 사용한 試驗片들의 形狀 및 치수를 나타내고 있다. Fig.2(a)는 SF60母材의 疲勞試驗에 사용한 것으로서, 圓棒에서의 表面疲勞龜裂의 傳播舉動을 관찰하기 위해 試驗片 중앙에 $\phi 0.5$ -깊이 0.5mm의 드릴홈을 加工하였다. Fig.2(b), (C)는 試驗片의 圓周方向으로 SAW용접을 행하여 加工된 용접試驗片들의 形狀 및 치수를 나타내고 있다. Table.2는 이때 용접금속으로 채용된 재료의 化學的成分을 나타내고 있으며, Table.3은 SAW용접條件을 나타내고 있다.

Fig.3은 용접試驗片의 表面硬度를 높이기 위하여 試驗片에 채용된 담금질方法을 나타

Table 1. Chemical composition & mechanical properties of material

Material	Chemical composition					Mechanical properties				
	C	Si	Mn	P	S	Y.S (MPa)	T.S (MPa)	E.L (%)	R.A (%)	Hs
SF60	0.32	0.25	0.71	0.008	0.01	345	640	24	50	28

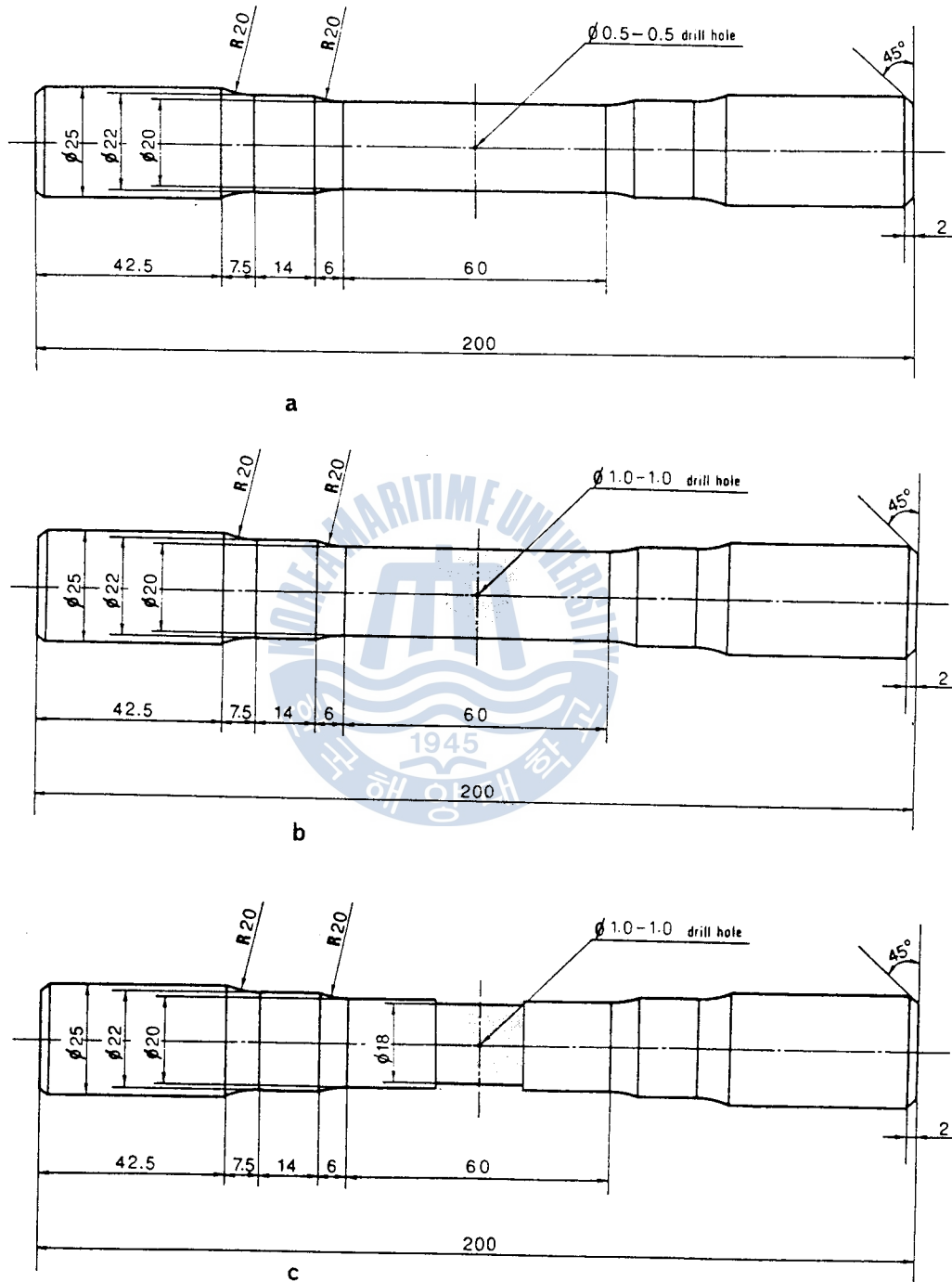


Fig. 2 Configuration and dimension of specimens.

Table 2 Chemical composition of weld deposit

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	V
0.16	0.44	1.30	0.009	0.016	0.04	0.05	0.014	0.012

Table 3 Welding condition

Welding procedure	Voltage (V)	Speed (Cm/min)	Heat input (KJ/Cm)
SAW	29	40	3,263

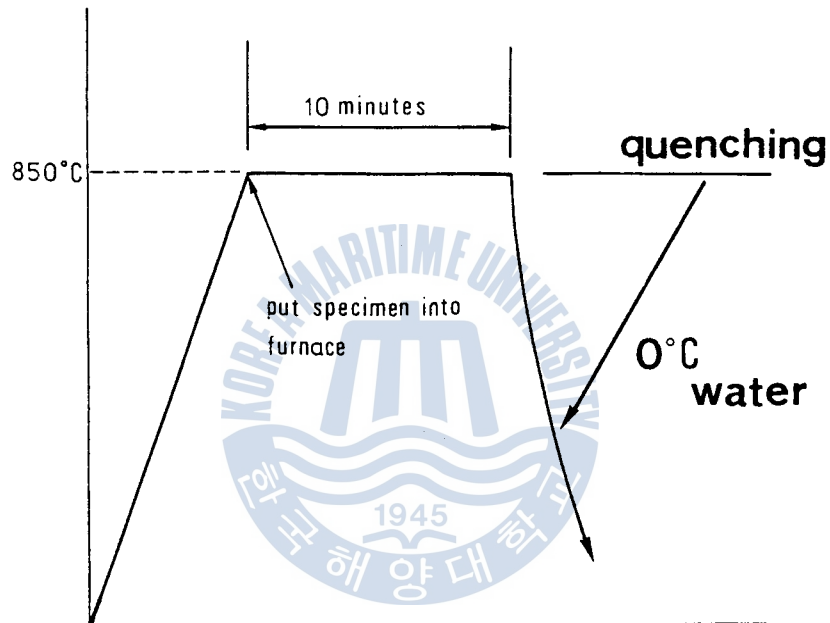
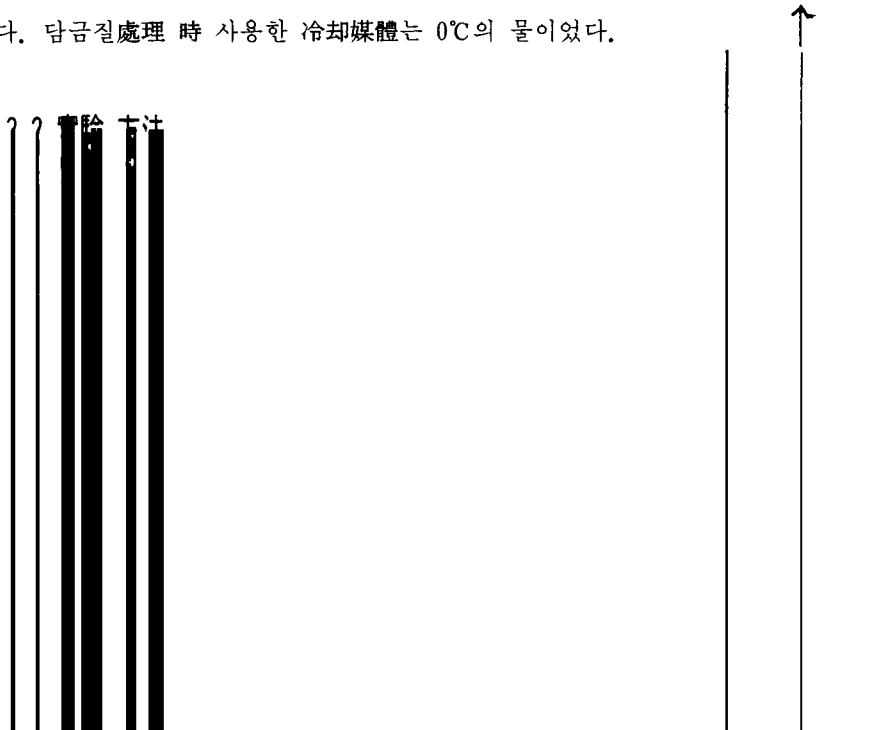


Fig. 3 Schematic illustration of heat treatment of test specimen.

내고 있다. 담금질處理時 사용한 冷却媒體는 0°C의 물이었다.



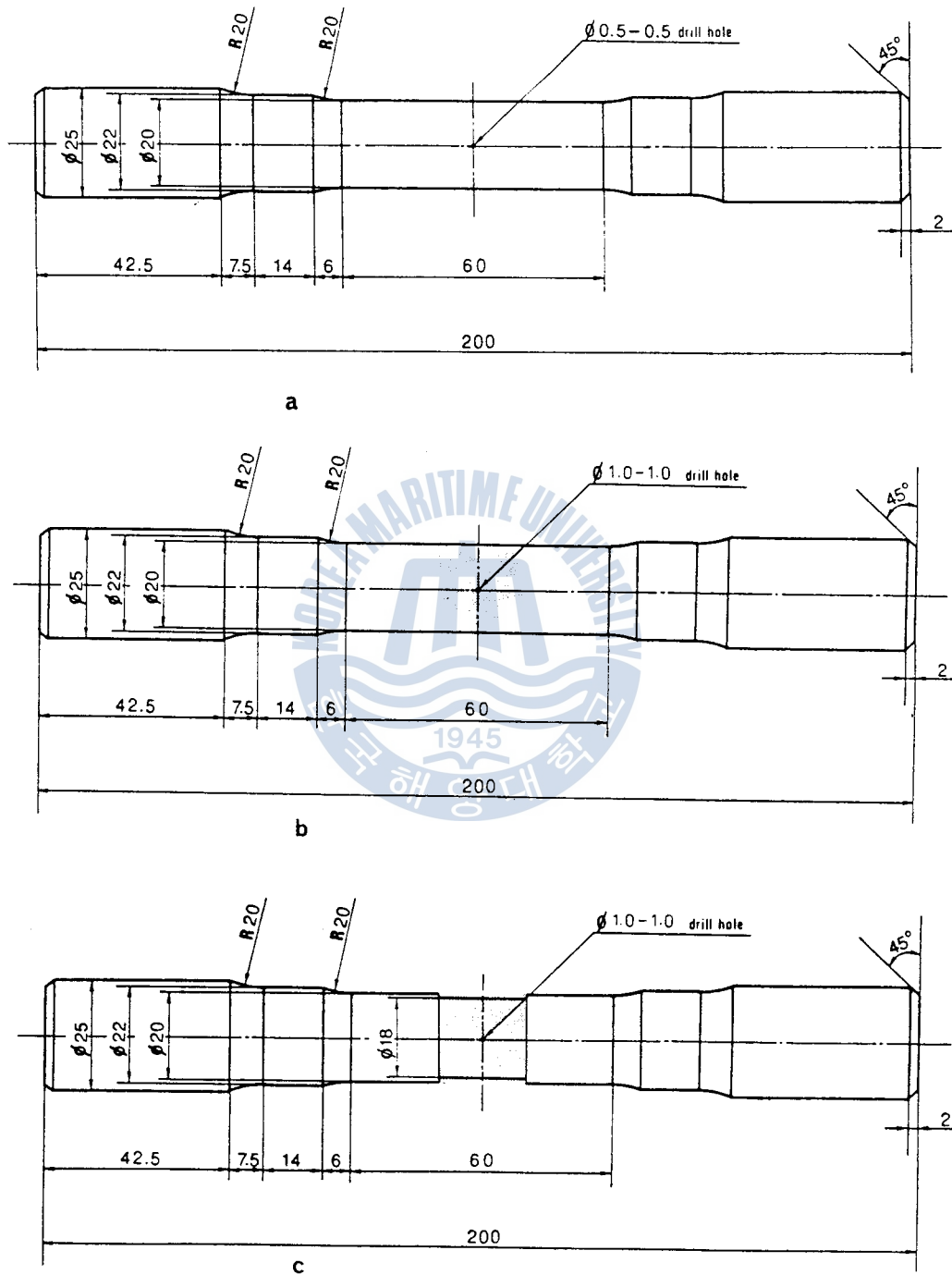


Fig. 2 Configuration and dimension of specimens.

Table 2 Chemical composition of weld deposit

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Ti	V
0.16	0.44	1.30	0.009	0.016	0.04	0.05	0.014	0.012

Table 3 Welding condition

Welding procedure	Voltage (V)	Speed (Cm/min)	Heat input (KJ/Cm)
SAW	29	40	3.263

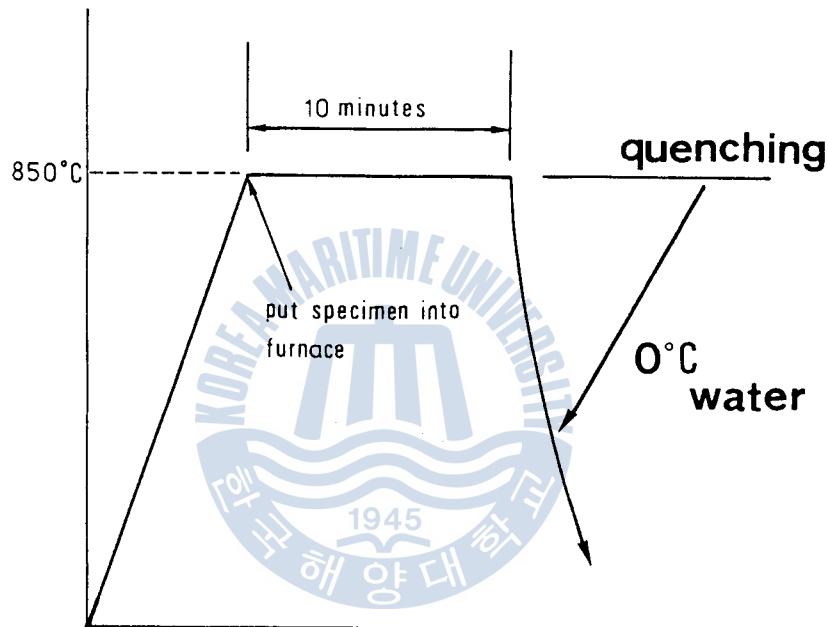


Fig. 3 Schematic illustration of heat treatment of test specimen.

내고 있다. 담금질處理時 사용한 冷却媒體는 0°C의 물이었다.

3.2 實驗 方法

實驗은 靜的 最大荷重 250KN, 動的 最大荷重 ±125KN용량의 材料試驗機에서 일정 진폭의 完全兩振(R=-1) 軸疲勞荷重을 加하여 行하였다.

한편, Fig. 4에 보여지고 있는 바와같이, 試驗片에 加工된 노치위에 軸荷重과 直각방향으로 抵抗線變形率 게이지(포점거리; 0.3mm, 저항 120Ω)를 부착하여, 除荷탄성 Compliance 방법(unloading elastic compliance method)에 의해 龜裂의 開閉 舉動을 관찰하였다.

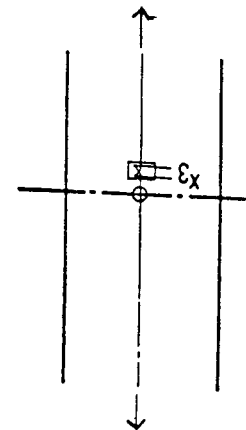


Fig. 4 Attachment of strain gauge.

龜裂길이는 60배의 移動式 현미경에 의해 측정되었다. 이때, 圓棒試驗片의 龜裂길이는 投影龜裂 길이를 측정한 다음, 이것을 다시 圓周龜裂 길이로 환산하였다. 본 實驗은 실온의 공기 중에서 행해졌으며, 實驗結果들은 SI단위계로 정리되었다.

4. 實驗結果 및 考察

4.1 SF60圓棒母材試驗片의 疲勞特性

Fig. 5는 반복수의 변화에 따른 圓周龜裂길이 변화양상을 나타낸 것이다. $\Delta\sigma \geq 528$ MPa에서는 試驗片 全斷面에 걸쳐 塑性變形이 발생하여, 소위, 소규모 항복조건(small scale yielding condition)이 만족되지 않는 상태에서 급속한 龜裂成長이 관찰되었다. 이와 같이, 荷重應力振幅(σ_a)이 鋼材의 단순인장 시의 降伏應力보다 낮음에도 불구하고 塑性變形이 발생하는 것은 反復軟化現象의 발생으로 인해 재료의 反復降伏應力(cyclic yield stress)이 單純引張時의 降伏應力보다 낮아지기 때문이라 思料된다.⁵⁾⁶⁾

Fig. 6는 $dl/dn-\Delta K$ 의 관계를 塑性變形의 발생이 현저한 부하응력범위의 결과를 제외하고, 나타낸 것이다. $\Delta\sigma=528$ MPa조건의 실험점들이 S-곡선상에서 벗어나는 것은 反復軟化로 인한 塑性變形의 발생 때문이라 思料된다.

Fig. 7은 龜裂의 開閉現象을⁷⁾⁸⁾ 제하탄성 콤프라이언스법에 의해 측정된 결과를 나타내고 있다. Fig. 7의 결과를 이용하여 $dl/dn-\Delta K$ 의 관계를 $dl/dn-\Delta K_{eff}$ 로 나타낸 것이 Fig. 8이다. 그림에서 알 수 있는 바와 같이 ΔK_{eff} 로 정리함에 의해 ΔK 로 정리했을 때

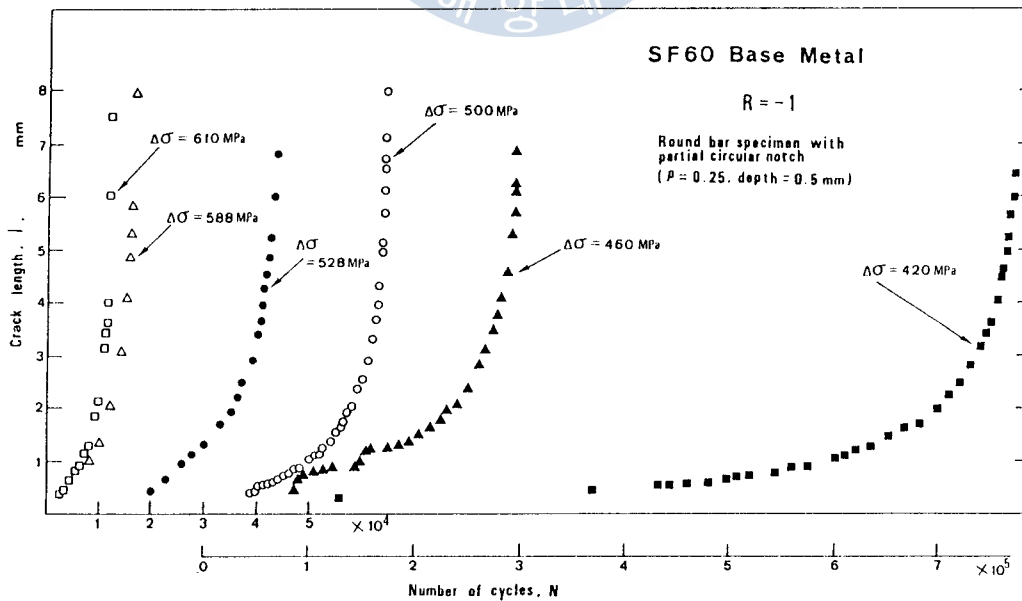


Fig. 5 Surface crack growth properties of round bar specimen for SF60.

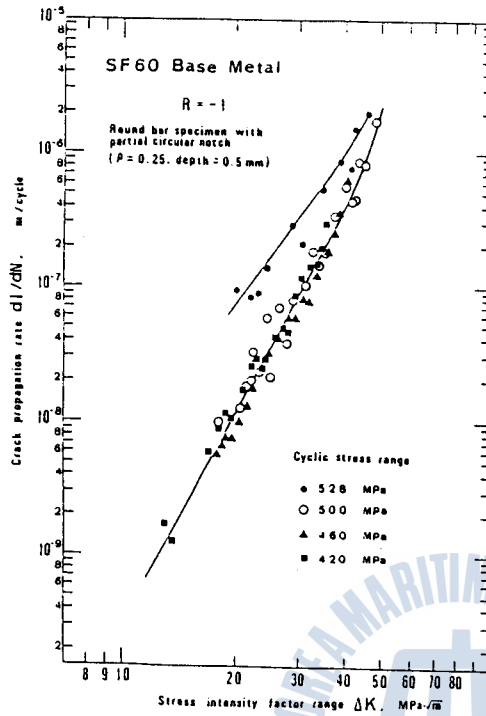


Fig. 6 Crack growth rate(dl/dN) of surface crack in round bar as a function of ΔK .

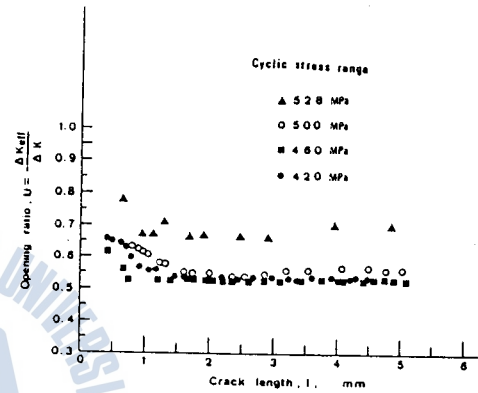


Fig. 7 Variation of crack opening ratio(U) with circumferential crack length(l).

나타났던 균열 傳播曲線의 應力依存性이 없게 되며, 이로부터 본 實驗에서 負荷한 應力範圍 이내에서의 龜裂傳播舉動은 ΔK_{eff} 를 변수로 하여 하나의 곡선으로 정리할 수 있음을 알 수 있다.

4.2 熔接硬化 試驗片의 疲勞特性

Fig. 9는 熔接硬化 試驗片(Weld Hardened Speimen; 이하 WHS로 표기함)으로 疲勞試驗을 행할 時, 負荷된 각각의 應力範圍에 대한 반복수의 변화에 따른 圓周龜裂길이(l)의 변화 양상을 동일조건인 SF60 母材의 結果와 함께 나타낸 것이다. 負荷된 두가지의 應力範圍에 대하여 SF60 母材에 있어서는 급속한 龜裂成長이 관찰되었다.

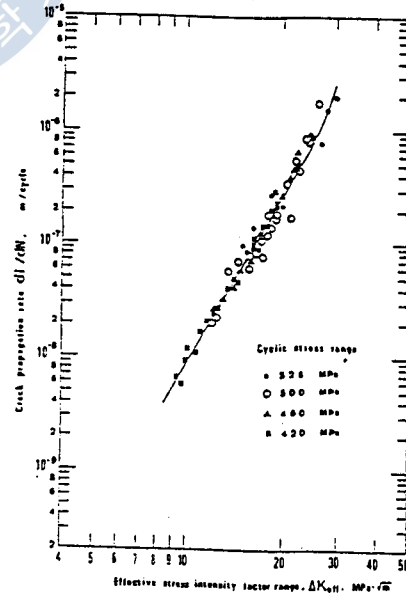


Fig. 8 Crack growth rate(dl/dN) of surface crack in round bar as a function of ΔK_{eff} .

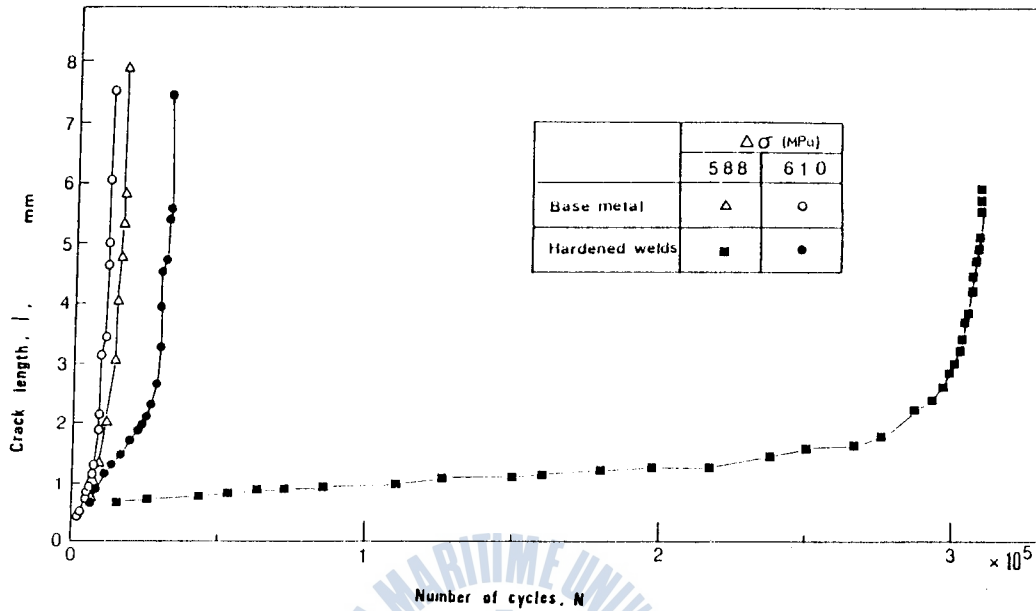


Fig. 9 Comparison of surface crack growth properties between the base metal and the welded and hardened specimen.

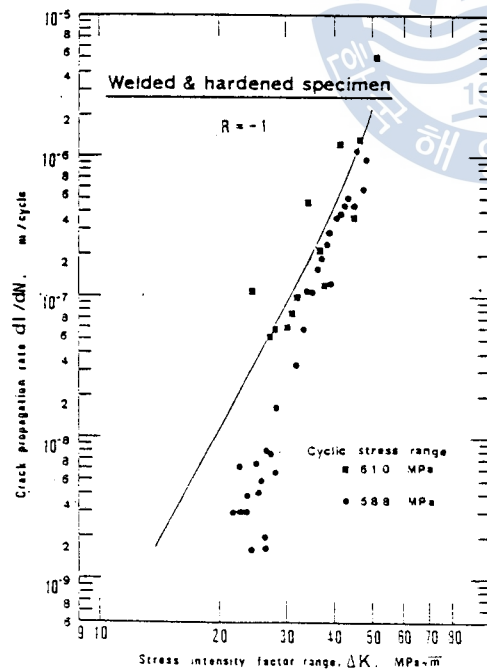


Fig. 10 Crack growth rate (dl/dN) of surface crack as a function of ΔK in specimen.

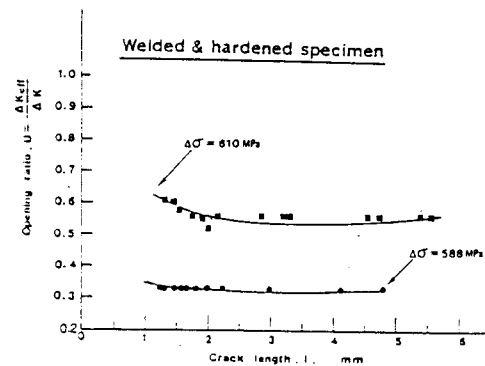


Fig. 11 Variation of crack opening ratio (U) with circumferential crack length (l) in weld hardened specimen.

한편 WHS는 동일負荷조건하에서 임의의 龜裂길이로 성장하기 까지의 壽命이 SF60 母材에 비해 길어짐을 알 수 있고, 특히, $\Delta\sigma=588\text{MPa}$ 인 경우 그 경향이 매우 현저함을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9로부터 얻어진 WHS의 dl/dn 과 ΔK 와의 관계를 兩對數座標上에 나타낸 것이다. 그림중에서 실선으로 표시된 곡선은 SF60 母材의 $dl/dn-\Delta K$ 관계를 나타내고 있다. 그림으로부터 WHS의 龜裂傳播速度는 SF60 母材의 그것에 비해 느림을 알 수 있고, 특히 $dl/dn \leq 7 \times 10^{-8}$ ($\Delta K=28\text{MPa}/\text{m}$)이하에서는 양자간의 차이가 더욱 현저해짐을 알 수 있다. 이와 같이 WHS의 龜裂傳播速度가 SF60 母材의 그것에 비해 느린 요인은 WHS에 채용된 담근질처리에 의한 WHS의 경도 상승 및 압축잔류응력의 영향이라고 思料된다.

Fig. 12는 Fig. 11의 결과를 이용하여 WHS의 dl/dn 과 ΔK_{eff} 와의 관계를 나타낸 것이

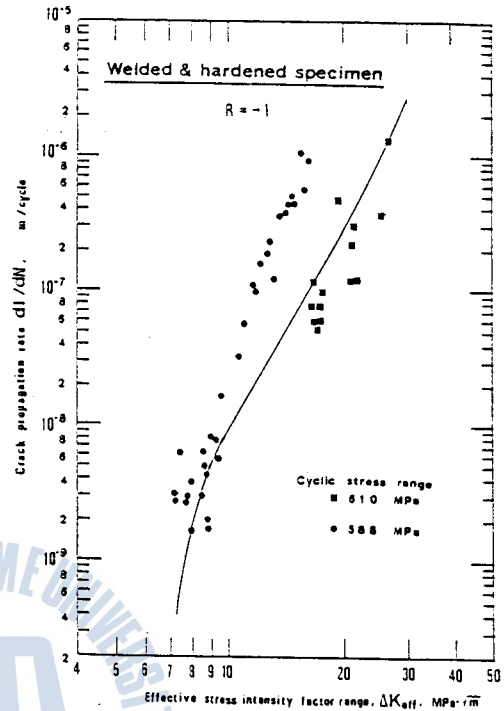
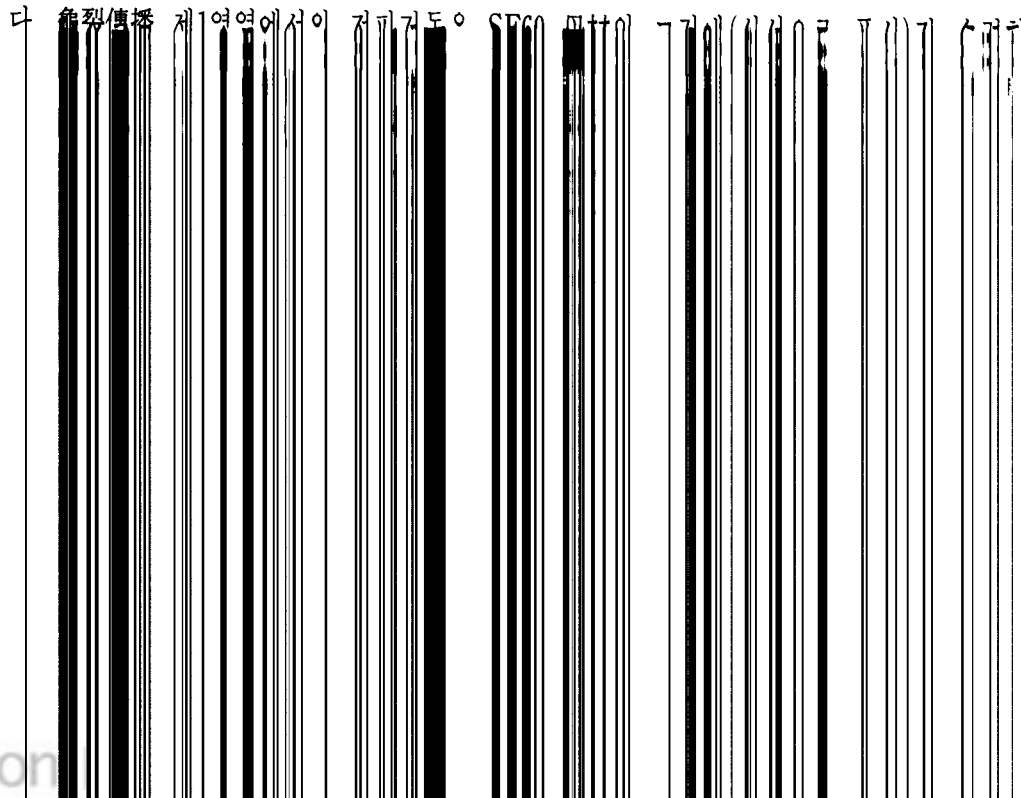


Fig. 12 Crack growth rate(dl/dn) of surface crack as a function of ΔK_{eff} in weld hardened specimen.



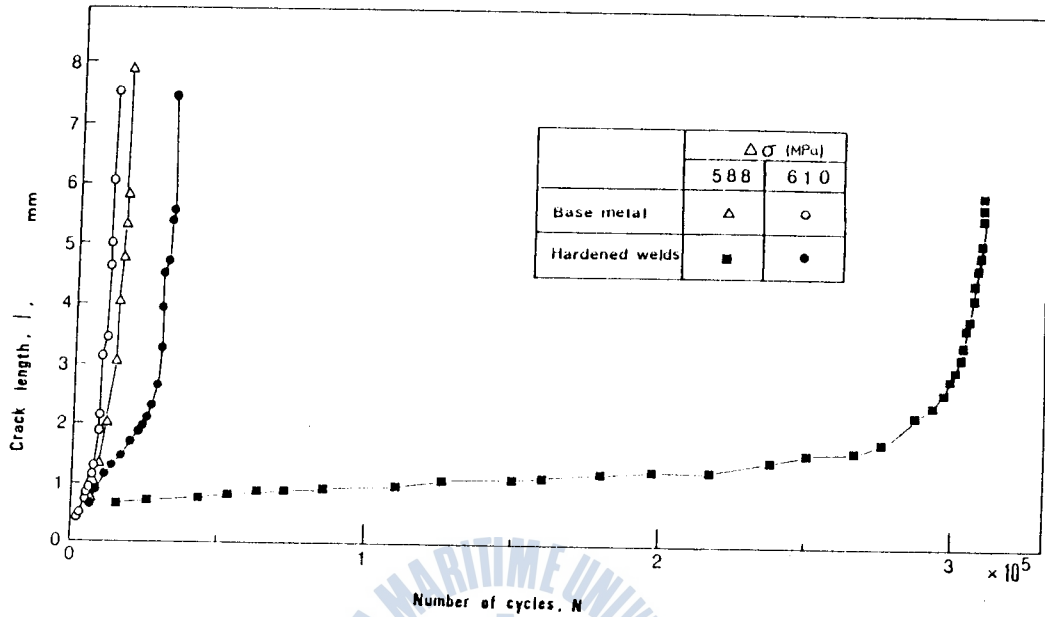


Fig. 9 Comparison of surface crack growth properties between the base metal and the welded and hardened specimen.

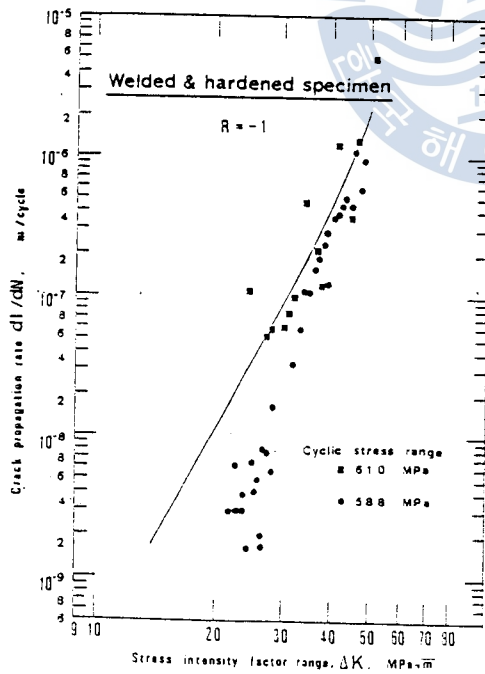


Fig. 10 Crack growth rate(dl/dN) of surface crack as a function of ΔK in specimen.

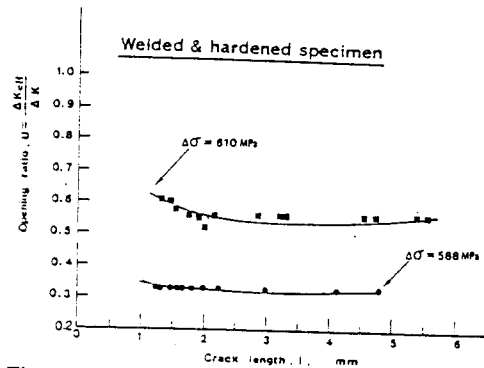


Fig. 11 Variation of crack opening ratio(U) with circumferential crack length(l) in weld hardened specimen.

한편 WHS는 동일負荷조건하에서 임의의 龜裂길이를 성장하기까지의 壽命이 SF60 母材에 비해 길어짐을 알 수 있고, 특히, $\Delta\sigma=588\text{MPa}$ 인 경우 그 경향이 매우 현저함을 알 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9로부터 얻어진 WHS의 dl/dn 과 ΔK 와의 관계를 兩對數座標上에 나타낸 것이다. 그림중에서 실선으로 표시된 곡선은 SF60 母材의 $dl/dn-\Delta K$ 관계를 나타내고 있다. 그림으로부터 WHS의 龜裂傳播速度는 SF60 母材의 그것에 비해 느림을 알 수 있고, 특히 $dl/dn \leq 7 \times 10^{-8}$ ($\Delta K=28\text{MPa}/\text{m}$)이하에서는 양자간의 차이가 더욱 현저해짐을 알 수 있다. 이와 같이 WHS의 龜裂傳播速度가 SF60 母材의 그것에 비해 느린 요인은 WHS에 채용된 담근질처리에 의한 WHS의 경도 상승 및 압축잔류응력의 영향이라고 思料된다.

Fig. 12는 Fig. 11의 결과를 이용하여 WHS의 dl/dn 과 ΔK_{eff} 와의 관계를 나타낸 것이다. 龜裂傳播 제1영역에서의 전파거동은 SF60 母材의 그것에(실선으로 표시) 잘 수렴함을 알 수 있지만, $\Delta\sigma=588\text{MPa}$ 을 負荷時 龜裂傳播 제2영역에서의 전파거동은 SF60 母材의 그것과 상당한 차이를 나타내고 있다.

Fig. 13은 WHS의 破斷壽命基準 疲勞强度를 SF60 母材의 그것과 比較하여 나타낸 것이다. 그림중에서 일점쇄선으로 나타낸 선이 SF60 母材의 疲勞强度線이다. 먼저, 熔接缺陷이 없는 WHS의 疲勞强度(\blacktriangle 로 표시)는 SF60母材의 그것보다 상당히 상승하고 있다. 한편, 熔接缺陷을 가진 WHS의 疲勞强度(\triangle , \circ 로 표시)도 SF60母材의 强度와 거의 같은 수준이거나, 약간 높은 것으로 나타나고 있다. 따라서 缺陷의 존재로 인한 疲勞强度의 저하는 熔接部 表面硬化處理를 통하여 얼마간 억제시킬 수 있다는 것을 알 수 있지만, 熔接缺陷의 定量的評價를 통한 疲勞强度의 검토가 차후 뒤 따라야 할 것으로 思料된다.

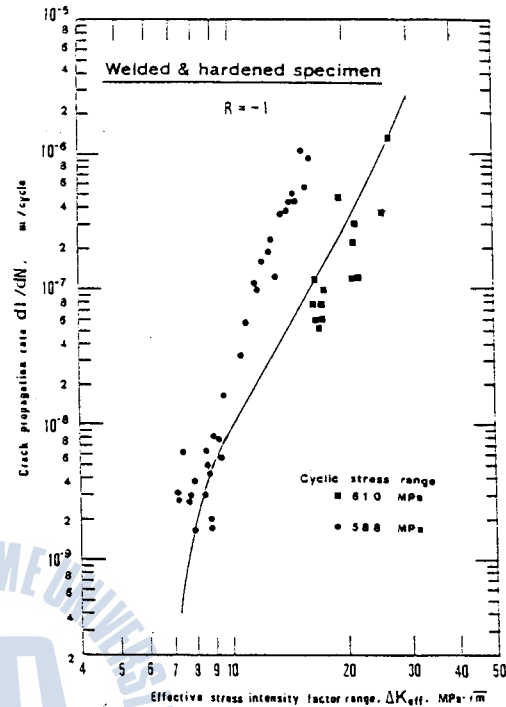


Fig. 12 Crack growth rate(dl/dn) of surface crack as a function of ΔK_{eff} in weld hardened specimen.

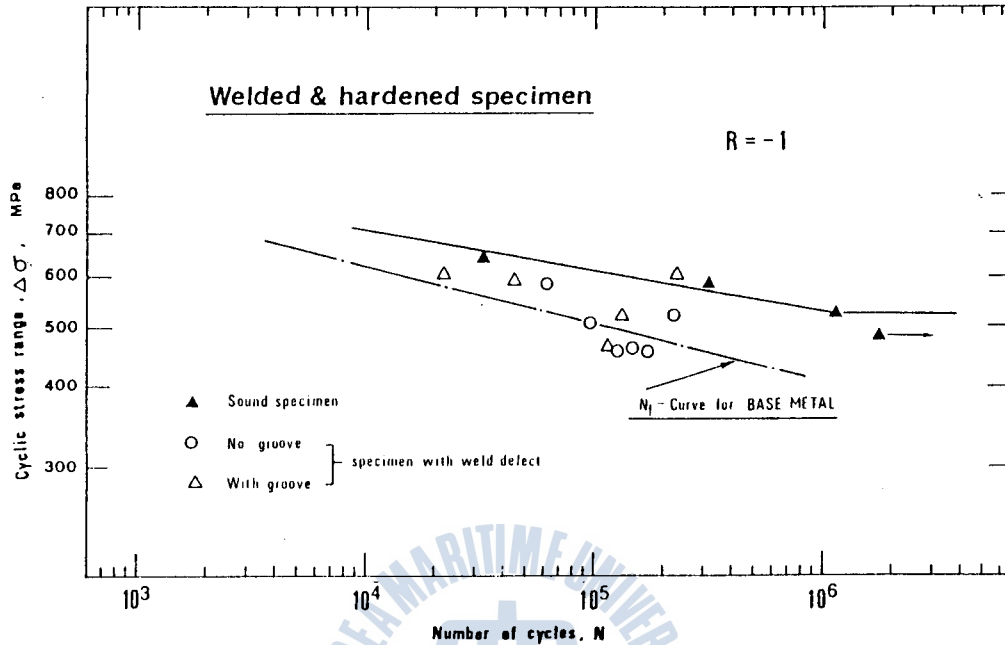


Fig. 13 Fatigue strength of weld hardened specimen.

4. 結 論

本 研究에서는 平板에 존재하는 半橢圓形狀의 表面龜裂에 대한 Newman-Raju의 應力 세기계수(K_1)式을 圓棒形狀의 要素에 존재하는 半橢圓形狀의 表面龜裂에서의 應력세기계 수로 修正하여, 疲勞龜裂進展驅動力으로서의 力學的變數를 얻었다. 이와 같은 力學的變數 에 의해 SF60鋼 母材 및 熔接硬化材의 疲勞龜裂傳播舉動을 각각 評價하여 그 차이를 比較, 考察하였다.

또한, SF60鋼 母材 및 용접硬化材의 疲勞強度에 관한 比較도 行하였다.

以上の 實驗을 行한 結果, 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) 평판의 表面에서 發生하여 성장하는 表面龜裂에 대한 應력세기 계수를 圓棒에서의 그 것으로 수정한 應력세기계수로서 底應力 下에서 傳播하는 圓棒中の 表面疲勞龜裂의 傳播 舉動을 評價 할 수 있다.
- 2) 高應力下에서의 龜裂傳播舉動($dl/dn-\Delta K$)은 底應力일 때의 그것으로 부터 벗어나지 만, 龜裂開口比를 고려한 有效應력세기계수범위의 도입에 의해 底應力負荷 時의 傳播曲線 에 수렴시킬 수 있다.
- 3) 용접硬化材의 疲勞龜裂傳播壽命은 SF60鋼 母材의 그것에 비해 우수하다.

- 4) 熔接缺陷이 없는 용접硬化材의 試驗片破斷壽命基準 疲勞強度는 SF60鋼 母材의 경우보다 훨씬 우수하다.
- 5) 용접缺陷이 존재하고 있는 용접硬化材의 疲勞強度는 SF60鋼 母材의 疲勞強度와 거의 비슷하거나, 약간 우수하다.

참고문헌

- 1) Gurney, Fatigue of Welded Structure, Cambridge univ. Press, pp.276-281, 1979
- 2) Grainger S.: Repair and Reclamation Surfacing by Welding, Repair and Reclamation, Welding Institute, pp.21-38, 1984
- 3) Broek D., Elementary Engineering Fracture Mechanics(4th ed.), Martinus Nijhoff Publishers, p.88, 1986
- 4) Newman J.C., Jr, Raju I.S., Analysis of Surface Crack in Finite Plate under Tension or Bending Loads, NASA T.P.1578, 1978
- 5) 김영식, 한명수, 노재충, 構造用 低炭素鋼의 低사이클 疲勞特性에 관한 研究, 대한기계학회 논문집, 제13권 제2호, pp.307-315, 1989
- 6) 한명수, TMCP鋼材 및 그 용접부의 低사이클 疲勞特性에 관한 研究, 한국해양대학 석사학위논문
- 7) Jono M., Song J.H., Growth and Closure of Short Fatigue Crack, Current Research on Fatigue Crack, MRS, Vol.1, JSMS, pp.35-56, 1985
- 8) Ogura K., et al., Fatigue Crack Growth and Closure of Small Crack at Notch Root, Current Research on Fatigue Crack, MRS, Vol.1, JSMS, pp.57-78, 1985