

構造用 鋼의 굽힘 疲勞強度에 미치는 Notch의 影響

The Effect of Notch on Bending Fatigue Strength of Structural Steel

朴 魯 奭*
Park Noh Suck

Summary

This experimental work was carried out to investigate the fatigue bending strength on various shapes and sizes of notches of the domestically manufactured steel plate. The notch types tested were a circular hole, U- and V-notches. The S-N diagram for different notch shapes were discussed in relation to plane bending strength and stress concentration factor of notches. The results of the experiments are summarized as follows:

- (1) The difference between stress concentration factor and notch factor was greater as the radius of notch root became smaller, and these values approached to an identical value as the radius of notch root increased.
- (2) It was shown that the plane bending fatigue limit of bar without notch for the hot-rolled steel having the tensile strength of 33.1kg/mm² was 17.0kg/mm².
- (3) U- and V-notch had a greater effect of stress concentration factor on the endurance limit, but O-hole showed the same effect only for $\phi \leq 2\text{mm}$.
- (4) For the same radius of notch root, U-notch showed a lower value of fatigue limit compared to V-notch and O-hole.

1. 緒 論

急速한 經濟發展과 더불어 重化學工業의 育成은 必要하며 特別히 需要가 많은 構造用 鋼의 量産과 質의 向上을 위한 開發과 研究가 要請되고 있다.

農業用 機械로서 트랙터, 動力耕耘機를 비롯하여 各種 農用機械에 利用되며 기타 工業分野에서 많이 쓰이는 構造用鋼들은 降伏 應力보다 낮은 反覆 荷重의 應力 下에서도 豫期치 못한 破壞가 發生하여 經濟的 및 人命의 莫重한 損失을 끼친다는 것은 매우 重要한 問題이다.

構造用 鋼의 適當한 生産方法과 成分含量에 따라

* 晉州農林專門學校 副教授

靜的 強度는 充分한 지라도 反覆荷重을 받음으로 因하여 許容強度 內이면서 壽命을 다하지 못하고 破壞되는 경우가 많다. 實際上 機械 또는 構造物에서 使用中の 破壞은 荷重의 反覆作用에 依한 材料의 疲勞破壞에 基因하는 것이 大部分이다. 따라서 材料의 破壞와 疲勞等 強度上的 諸 問題는 農業機械材料, 構造物의 製造, 加工, 設計, 製修 등 모든 工業分野에서 매우 큰 比重을 차지하게 되었다.

疲勞強度에 關한 研究는 1886年 Wöhler²⁾가 疲勞試驗을 實施한 以來 많은 進前을 보았고 特別히 R.E. Peterson³⁾은 應力 集中率에 依한 應力 分布를 計算하였고 Neuber⁴⁾는 Notch部의 應力集中에 關한 三角公式을 發表하였다.

A.K. Head⁵⁾가 1953年 疲勞크랙(crack)의 傳播速度를 처음 研究한 以來 本格的인 疲勞破壞에 關한

研究가 活潑하여 졌다. 平面 韌性 疲勞에 關한 研究로는 Kobayashi¹¹⁾ 等이 軟鋼의 殘留應力과 疲勞에 對하여 研究하였고 Terasawa¹²⁾ 들은 Tufftrided 鋼의 平面 韌性 疲勞試驗에서 殘留應力에 對한 研究分野에 큰 功獻을 하였으며 Tatsukawa¹³⁾는 銲接部 各領域의 疲勞에서 銲接金屬은 初期 段階에서 硬化現象이 보인다고 發表하였다. 또한 Takabashi¹⁴⁾ 등은 高引張 構造用 鋼의 應力集中 係數와 Notch係數와의 關係를 實驗 調查하였으며 그 外 많은 研究^(15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100)가 活潑하게 이루어 지고 있으나 農業機械 및 工業材料의 構造用으로 널리 使用된 는 國產 鋼板의 平面 韌性에 對한 疲勞破壞에서 各 notch별 影響에 關한 報告는 別로 찾아볼 수 없었다. 따라서 本 研究에서는 平面 反覆 韌性을 받는 國產 構造用 鋼의 疲勞破壞限度에 미치는 notch의 影響을 究明하기 위하여 遂行되었다.

2. 試驗片과 實驗方法

가. 試驗片

本 實驗에 使用된 試驗片의 材料는 浦項製鐵의

SB41 平鋼板으로서 熱間壓延鋼板이다. 試驗片의 化學的成分은 表(1)과 같고 機械的 性質은 表(2)와 같다.

Table 1. Chemical composition of the specimens tested(%)

chemical ingredients content (%)	C	Si	Mn	P	S
	0.09	0.15	0.48	0.023	0.017

Table 2. Mechanical properties of the specimens tested

tensile strength (kg/mm ²)	yield stress (kg/mm ²)	elongation (%)	rockwell A scale
33.1	24.7	47.4	33.8

試驗片의 製作方法은 1,800×900×3.4mm의 鋼板을 壓延方向으로 89×34×3.4mm의 크기로 切斷하여 그림(1)~(4)와 같이 平滑, 圓孔 notch, U-notch 및 V-notch 試驗片을 各各 機械加工 및 平面研削하였다.

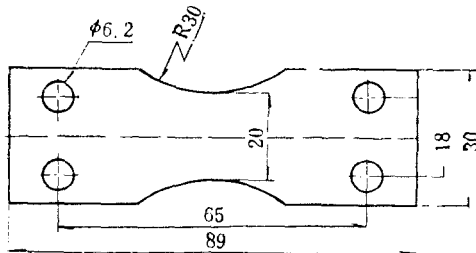


Fig. 1. Smoothed specimen

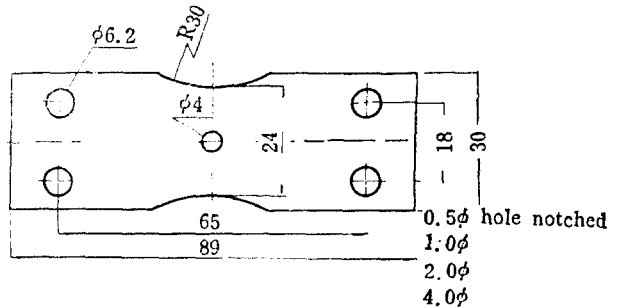


Fig. 2. O-hole notched specimen

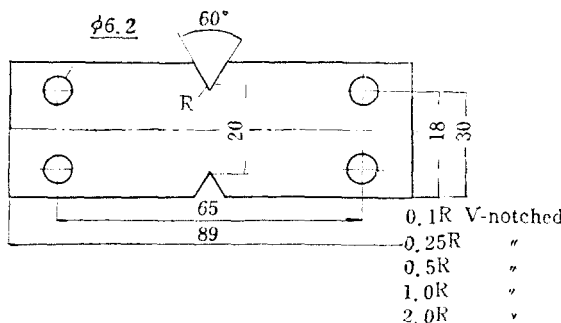


Fig. 3. U-notched specimen

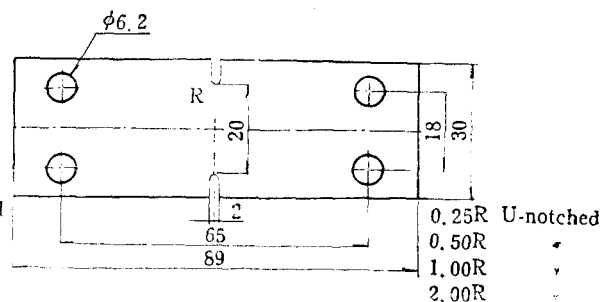


Fig. 4. V-notched specimen

各 notch의 加工에 있어서 0.5φ 圓孔 notch 및 0.25R U-notch는 放電加工하였고 其他 圓孔, U-notch

및 V-notch는 機械加工하였다. U-notch와 V-notch에 있어서 바이트 先端의 반지름과 角度를 optical

camparator를 사용하여 精密하게 研削하고 milling machine에 依하여 fly cutter 方法으로 加工하였다.

Table 3. No. of Specimen

type of notch	notch size(mm)	specimen No.
smoothed		1-1-12
O-hole notched	0.5φ	2-1-1~12
	1.0φ	2-2-1~10
	2.0φ	2-3-1~10
	4.0φ	2-4-1~10
U-notched	0.25 R	3-1-1~12
	0.50 R	3-2-1~10
	1.0 R	3-3-1~10
	2.0 R	3-4-1~10
V-notched	0.1 R	4-1-1~10
	0.25 R	4-2-1~10
	0.50 R	4-3-1~10
	1.0 R	4-4-1~10
	2.0 R	4-5-1~10

나. 實驗裝置

本 實驗에 使用한 疲勞試驗機는 Schenck type의 平面굽힘 疲勞試驗機로서 偏心裝置와 크랭크 裝置의 機構로 棒材의 비틀림 疲勞 및 板材의 굽힘疲勞 試驗을 할 수 있는 것이었으며 그림(5)에 보인것과 같고 最大모우멘트는 4kg·m 이며, 最大 回轉數는 3, 415 c.p.m.였다.

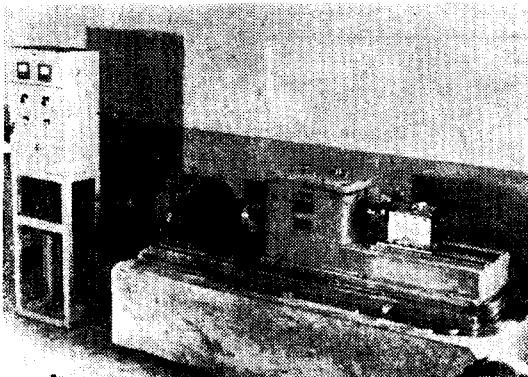


Fig. 5. Schenck type plane bending test machine.

다. 實驗方法

平板의 平面굽힘 疲勞試驗法(JIS)¹²⁾에 依據하여 試驗片이 純粹굽힘 應力을 받는다고 假定하고 다음

과 같은 式(1)을 適用하였다.

$$M = \sigma \cdot Z \dots\dots\dots(1)$$

$$Z = \frac{bh^2}{6}$$

여기서 M : 平面굽힘 모우멘트(kg·mm)
 Z : 試驗片의 斷面係數(mm³)
 b : 試驗片의 最少部分의 幅(mm)
 h : 試驗片의 두께(mm)
 σ : 굽힘應力(kg/mm²)

表(3)과 같은 各試驗片을 各各 平面굽힘 應力레벨 로서 反覆疲勞荷重을 作用시켜 破斷時까지 繼續 運轉하였으며 作用荷重과 破斷壽命 回數로서 疲勞限度曲線을 그릴 수 있도록 하였다.

3. 實驗結果 및 考察

가. notch의 應力集中係數, 形狀係數 및 感度係數 notch를 가진 試驗片이 平面굽힘 모우멘트를 받을 때 notch의 先端에 周邊應力集中이 發生하며 應力集中係數는 式(2)와 같이 表示할 수 있다.

$$\alpha = \frac{\sigma_{max}}{\sigma_0} \dots\dots\dots(2)$$

여기서 α : 應力集中係數
 σ₀ : 平滑 試驗片의 굽힘應力
 σ_{max} : notch 試驗片 先端의 굽힘 應力

圓孔 notch의 應力集中係數는 Kawada¹³⁾와 Nishitaka¹³⁾의 應力集中係數表 中에서 中央에 1圓孔을 갖는帶板의 平面굽힘을 받는 경우의 것을 利用하여 求하였다.

U-notch의 應力集中係數는 金屬材料 疲勞試驗便覽¹²⁾의 應力集中係數表를 利用하여 求하였고 V-notch 試驗片의 應力集中係數는 (3)式과같은 Nishitaka¹³⁾의 應力集中公式를 使用하여 計算하였다.

$$\alpha_g = 1 + f(\theta)(\alpha_0 - 1) \dots\dots\dots(3)$$

여기서 α_g : V-notch 試驗片의 應力集中係數
 f(θ) : " " notch 角 係數
 α₀ : U-notch 試驗片의 應力集中係數

但 α : 應力集中係數
 β : notch 係數
 q : notch 感度係數

notch係數는 式(4)와 같이 表示할 수 있다.

$$\beta = \frac{\sigma_{w0}}{\sigma_{wh}} \dots\dots\dots(4)$$

여기서 β : notch 係數
 σ_{w0} : 平滑 試驗片의 疲勞限度
 σ_{wh} : notch 試驗片의 疲勞限度

Table 4. Characteristics of specimen notch type.

O-hole notched					U-notched					V-notched				
notch size (mm)	fatigue limit (kg/mm ²)	α	β	q	notch size (mm)	fatigue limit (kg/mm ²)	α	β	q	notch size (mm)	fatigue limit (kg/mm ²)	α	β	q
0.5 ϕ	15.0	2.9	1.13	0.07	0.25R	8.5	3.0	2.0	0.50	0.1 R	8.5	8.35	2.0	0.14
1.0 ϕ	11.0	2.55	1.55	0.36	0.5 R	9.0	2.4	1.89	0.64	0.5 R	10.0	2.96	1.70	0.36
2.0 ϕ	10.0	2.27	1.70	0.55	1.0 R	9.5	1.9	1.79	0.88	1.0 R	11.0	1.88	1.55	0.63
4.0 ϕ	11.0	1.9	1.55	0.61	2.0 R	12.0	1.57	1.42	0.74	2.0 R	11.5	1.56	1.48	0.86

表(4)의 應力集中係數 및 notch係數를 그림(6)과 같이 橫軸에 notch 반지름을 縱軸에 應力集中係數 또는 notch 係數를 表示하였다.

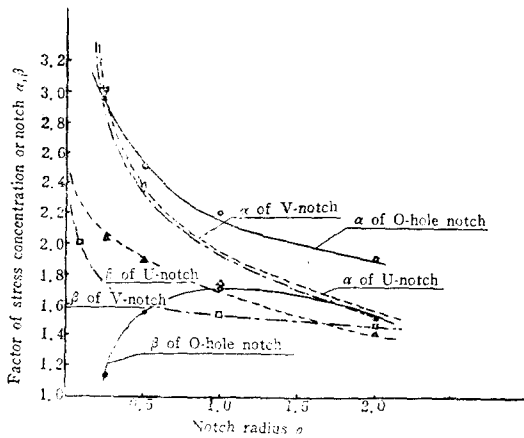


Fig. 6. Stress concentration factor and notch factor vs. notch radius

應力集中係數와 notch係數사이의 關係는 疲勞現象에 있어서 重要한 問題로 다루어져 많은 研究가 遂行되었으며 研究結果 主應力에 關한 應力集中係數가 2以下의 경우에는 應力集中係數와 notch係數는 거의 一致한다고 報告되어 있다. Hoshino⁽⁴⁾의 軟鋼에 對한 實驗 回轉급힘 疲勞試驗結果에서 이를 立證하고 있는바 表(4)와 그림(6)의 應力集中係數와 notch係數 사이에는 notch先端의 반지름이 적을수록 顯著한 差異가 있고 클수록 같은 값으로 接近함을 나타내고 있다. 이것은 Shuji⁽¹⁰⁾의 冷間壓延 加工을 한 低炭素鋼의 疲勞試驗에서도 같은 경향이 있음을 보여 주었다. 表(4)와 그림(6)의 notch圓孔에 있어서 圓孔notch 試驗片의 應力集中係數는 1.0 ϕ 以下에서 增加하고 있으나 notch 係數는 反對로 減少하므로 圓孔 notch 1.0 ϕ 以下에서는 應力集中係數의 影響을 작게 받고 있음을 立證하고 있다.

U-notch와 V-notch의 notch 係數는 notch크기가 極히 작으면 無限大이고 커질수록 1에 接近한다. notch 端의 반지름 $\rho > 1.0$ 인 경우에는 U-notch가 V-notch에 比하여 notch係數가 급격히 減少하고 V-notch는 水平에 가까운 減少率을 나타내고 있으나 $\rho < 1.0$ 인 경우에는 거의 같은 變化率을 나타내고 있다. 이것은 V-notch와 U-notch는 $\rho < 1.0$ 의 경우에는 notch의 影響을 거의 同一하게 받고 있음을 보여 준다.

notch 係數와 應力集中係數를 알므로서 notch 感度係數인 式(5)를 求할 수 있으며 이의 關係圖를 그리면 그림(7)과 같다.

$$q = \frac{\beta - 1}{\alpha - 1} \dots\dots\dots(5)$$

여기서 q : notch 感度係數

β : notch 係數

α : 應力集中係數

notch 感度係數는 各 notch 試驗片의 notch 先端의 반지름이 增大할수록 感度係數의 句配가 完滿하여 지면서 1.0에 接近할 것으로 推定된다.

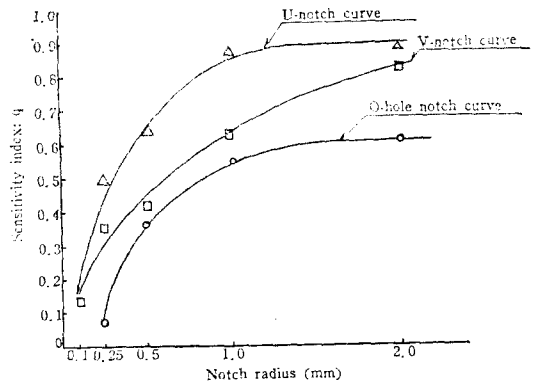


Fig. 7. Notch sensitivity index diagram

Kawada⁽⁵⁾⁽¹¹⁾는 鋼에 있어서 感度係數는 notch 반지름이 增大함에 따라 1.0에 接近한다는 事實을 밝힌바 있는바 熱處理한 材料일수록 感度係數는 높은

값을 보이고 있음을 알 수 있다. 그림 (7)의 각 notch 共히 notch 先端의 반지름이 1.0mm 以下에서 急激한 句配로 減少하여 1.0mm 以上에서 完만한 句配를 이루며 增加하고 있음을 보여주고 있다.

이 現象은 各 notch 共히 notch 先端의 반지름이 1.0mm 以下에서는 반지름이 더욱 작아질수록 應力 集中係數는 크게 增大되나 이에 比하여 notch 係數는 小幅으로 增加하여 感度係數의 變化率이 커짐을 나타낸다. 卽 應力集中係數가 各 notch 先端의 크기가 작을수록 感度係數가 減少함을 알 수 있다.

圓孔 notch의 感度係數曲線이 U-notch 및 V-notch 感度係數曲線보다 낮은 것은 應力集中係數에 比하여 notch 係數가 大端히 작기 때문이다. 그림 (7)에서 U-notch의 경우가 가장 큰 感度係數를 나타내고 있고 다음은 V 및 圓孔 notch의 順序로 나타났다. 感度係數가 높을 수록 notch 및 크랙先端의 結晶粒子內의 塑性變形 및 Silpol 작은 狀態에서 疲勞破壞가 進行 되는 것을 確認할 수 있었다.

나. 平滑試驗片의 疲勞限度

平滑試驗片의 平面굽힘 疲勞試驗의 結果는 表(5)와 같으며 疲勞限度曲線을 그림(8)~(10)에 表示하여 各 notch 別 試驗片과 比較檢討하였다.

Table 5. Results of fatigue test in smoothed specimens

notch size ρ(mm)	no. of specimen	σ (kg/mm ²)	b (mm)	h (mm)	Nf
smoothed	1-1	34.0	20.73	3.01	1.030 × 10 ⁴
	1-2	32.0	20.90	2.96	2.380 × 10 ⁴
	1-3	30.0	20.60	3.03	6.280 × 10 ⁴
	1-4	26.0	20.70	2.98	1.505 × 10 ⁵
	1-5	22.0	20.86	3.02	5.074 × 10 ⁵
	1-6	20.0	20.80	3.00	1.485 × 10 ⁶
	1-7	19.0	20.77	3.00	1.887 × 10 ⁶
	1-8	18.0	20.90	2.97	2.048 × 10 ⁶
	1-9	17.0	20.80	3.02	1.000 × 10 ⁷
	1-9(a)	30.0	20.80	3.02	4.730 × 10 ⁴

平滑試驗片은 그림(1)과 같이 平行部의 半徑 R을 30mm, 로 幅이 20mm가 되도록 兩面 旋盤加工 하였다. 이에 따른 疲勞限度의 크기는 差異가 없는 것으로 假定하였다. 機械研削한 試驗片의 平面을 샌드페이퍼(sandpaper) 320, 600, 800 및 1,000번의 順序로 表面研磨하였다.

굽힘應力(bending stress)의 값은 34.0kg/mm²부터

漸次로 應力을 減少시켜 反覆굽힘回數 1.0 × 10⁷까지의 非破壞의 應力레벨中 最大의 것을 疲勞限度로 規定하였다.

本 試驗에 使用한 鋼材는 表(1) 및 (2)에 보인바와 같이 炭素含有量이 KS規格에 未達일 뿐아니라 引張強度도 33.1kg/mm²으로서 KS規格인 41kg/mm²보다 大端히 작은 값을 나타내고 있었다. 疲勞限度는 17.0kg/mm²으로 引張強度의 51%程度였다. 表(5)에 表示된 試驗片 1-9(a)中 1.0 × 10⁷의 反覆荷重에서 疲勞破壞를 發生하지 않는 試驗片에는 1-3에 作用시킨것과 同一한 應力레벨을 再次 作用시킨 結果 反覆굽힘 應力에 對한 疲勞壽命이 顯著히 減少함을 알 수 있었다. 疲勞限度內에서 非破壞된 材料라 할지라도 内部에 蓄積된 塑性變形과 slip 등으로 다시 高應力 레벨로서 反覆荷重을 加하면 疲勞壽命이 短縮됨을 알 수 있었다. 또한 材質의 種類와 熱處理方法에 따라서 反對現象을 나타내는 것도 있었다.

다. 圓孔 notch 試驗片의 疲勞限度曲線

圓孔 notch 加工을 한 構造用 鋼에 反覆굽힘應力을 加하였을때 各 notch 圓孔의 크기別로 疲勞時間 壽命과 疲勞限度를 求하여 表(6)에 表示하였다. 또 이 實驗 結果를 橫軸에는 平面굽힘 荷重의 反覆回數, 縱軸에는 應力레벨을 나타내어 疲勞限度曲線 그리면 것이 그림(8)이다.

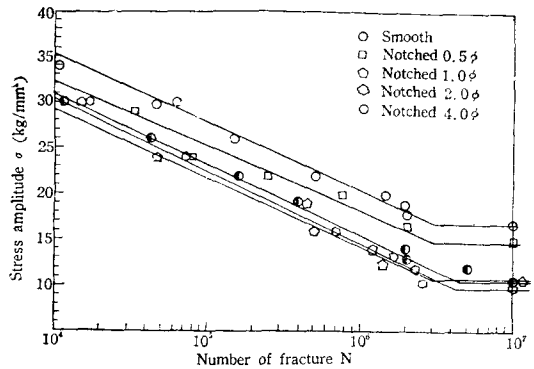


Fig. 8 O-hole S-N curve diagram

그림(8)에서 볼 수 있는 바와 같이 平滑試驗片의 疲勞限度에 比하여 圓孔 notch 試驗片의 疲勞限度가 낮은 값을 보여주고있고 이 中에서도 notch 지름이 2.0φ인 境遇의 疲勞限度가 10.0kg/mm²으로 가장 낮은 값을 나타내고 있으며 1.0φ와 4.0φ는 11.0kg/mm²

Table 6. Results of fatigue test in O-hole notched specimens

notch size ρ (mm)	no. of specimen	σ (kg/mm ²)	b (mm)	h (mm)	N_f
0.5	2-1-1	28.0	$b=b'-0.5$ 19.9	3.06	3.410×10^4
	2-1-2	24.0	20.2	2.90	7.950×10^4
	2-1-3	22.0	20.0	3.00	2.513×10^5
	2-1-4	20.0	20.0	2.90	7.683×10^4
	2-1-5	17.0	20.0	2.84	2.146×10^5
	2-1-6	15.0	20.1	7.00	1.000×10^7
1.0	2-2-1	30.0	$b=b'-1.0$ 20.2	3.04	1.510×10^4
	2-2-2	24.0	20.1	3.00	4.700×10^4
	2-2-3	19.0	20.2	3.00	4.447×10^5
	2-2-4	16.0	20.6	2.90	4.939×10^5
	2-2-5	14.0	20.4	3.00	1.224×10^6
	2-2-6	12.5	20.3	3.00	1.414×10^6
	2-2-7	11.0	20.2	3.00	1.000×10^7
2.0	2-3-1	30.0	$b=b'-2.0$ 20.1	3.00	1.710×10^4
	2-3-2	24.0	20.0	3.00	7.270×10^4
	2-3-3	19.0	20.0	2.90	4.597×10^5
	2-3-4	16.0	20.2	2.90	6.865×10^5
	2-3-5	13.5	20.1	3.00	1.721×10^6
	2-3-6	12.0	20.3	3.00	2.314×10^6
	2-3-7	10.5	20.0	3.00	2.460×10^6
	2-3-8	10.0	19.8	3.00	1.000×10^7
4.0	2-4-1	34.0	$b=b'-4.0$ 18.2	2.98	0.500×10^4
	2-4-2	30.0	18.3	2.99	1.170×10^4
	2-4-3	26.0	18.5	2.96	4.310×10^4
	2-4-4	22.0	18.4	2.92	1.578×10^5
	2-4-5	19.0	18.5	2.92	4.426×10^5
	2-4-6	16.0	18.5	3.04	6.840×10^5
	2-4-7	14.0	18.3	3.02	1.998×10^6
	2-4-8	13.0	18.5	3.00	2.013×10^6
	2-4-9	12.0	18.5	3.00	5.099×10^6
	2-4-10	11.0	18.4	2.99	1.000×10^7

mm³으로 疲勞限度가 같게 나타났으나 0.5 ϕ 에서 오히려 15.0kg/mm²으로 높게 나타났다. 이것은 notch 影響을 圓孔 2 ϕ 가 가장 크게 받고 있고 應力集中係數가 圓孔이 작아짐에 따라 增大하여 最大應力이 增加하므로 疲勞限度가 減少되어야 할 것이나 0.5 ϕ 圓孔에서는 오히려 높은 값을 나타내고 있다. 이것은 應力集中係數에 의한 影響을 작게 받고 있기 때문인 것으로 推定된다.

Nishitani는 回轉굽힘의 軟鋼을 使用하여 實驗한 結果 $\phi \leq 1.0$ 에서는 應力集中係數가 疲勞限度에 미치는 影響이 작다고 報告한바 있다. 그러나 本實驗에

使用된 構造用 鋼은 圓孔 notch의 境遇 $\phi \geq 2.0$ 에서는 疲勞限度가 높게 나타났으며 $\phi \leq 2.0$ 에서도 높은 값을 보였다. 특히 $\phi \geq 2$ 인 境遇中 1 ϕ 와 0.5 ϕ 에서는 높은 疲勞限度를 나타내고 있는 바 이것은 應力集中係數가 높음에도 不拘하고 높은 疲勞限度를 나타내고 있다는 事實을 말하여 주는 것으로서 應力集中係數가 疲勞限度에 미치는 影響이 작음을 意味한다.

Oh⁽²⁾는 回轉굽힘을 받는 스프링 鋼과 같이 合金元素가 含有되어 있는 境遇 應力集中係數가 疲勞限度에 미치는 限界 notch지름은 5 ϕ 라고 報告한바 있으나 本實驗 結果 判明된 限界 notch 2 ϕ 와는 多少의

差異가 있었다.

라. U-notch 疲勞限度曲線

U-notch 試驗片의 平面굽힘 疲勞實驗을 實施하고 各 notch 크기別 疲勞時間, 壽命 및 疲勞限度를 表(9)에 表示하였으며 橫軸에 疲勞荷重의 反覆回數, 縱軸에 應力레벨을 表示하여 疲勞限度曲線을 그린것이 그림(9)이다.

Table 7. Results of fatigue test in U-notched specimens

notched size ρ (mm)	no. of Specimen	σ (kg/mm ²)	b (mm)	h (mm)	Nf
0.25R	3-1-1	28.0	19.7	2.98	2.680 × 10 ⁴
	3-1-2	23.0	20.2	2.98	7.640 × 10 ⁴
	3-1-3	19.0	20.2	2.99	2.150 × 10 ⁵
	3-1-4	16.0	20.2	2.99	8.369 × 10 ⁵
	3-1-5	14.0	20.1	2.99	1.849 × 10 ⁶
	3-1-6	12.0	19.9	2.98	1.945 × 10 ⁶
	3-1-7	10.0	20.0	2.96	2.145 × 10 ⁶
	3-1-0	8.5	20.3	2.96	1.000 × 10 ⁷
0.5R	3-2-1	28.0	19.6	3.00	2.190 × 10 ⁴
	3-2-2	22.0	20.2	3.00	1.060 × 10 ⁵
	3-2-3	18.0	20.2	2.90	3.530 × 10 ⁵
	3-2-4	14.5	20.4	3.00	1.185 × 10 ⁶
	3-2-5	12.0	20.3	2.90	2.129 × 10 ⁶
	3-2-6	10.0	20.2	3.00	5.144 × 10 ⁶
	3-2-7	9.0	20.4	2.86	1.000 × 10 ⁷
1.0R	3-3-1	32.0	20.64	2.96	1.040 × 10 ⁴
	3-3-2	24.0	20.4	3.00	6.530 × 10 ⁴
	3-3-3	20.0	20.5	3.00	2.081 × 10 ⁵
	3-3-4	17.5	20.5	2.99	3.030 × 10 ⁵
	3-3-5	15.0	20.5	3.00	7.525 × 10 ⁵
	3-3-6	12.5	20.5	3.00	1.892 × 10 ⁶
	3-3-7	10.5	20.4	2.90	2.573 × 10 ⁶
	3-3-8	9.5	20.5	3.00	1.000 × 10 ⁷
2.0R	3-4-1	28.0	20.5	3.00	1.900 × 10 ⁴
	3-4-2	24.0	20.4	3.10	1.219 × 10 ⁵
	3-4-3	20.0	20.5	3.00	5.730 × 10 ⁵
	3-4-4	17.5	20.5	3.00	1.060 × 10 ⁶
	3-4-5	15.0	20.3	2.90	1.519 × 10 ⁶
	3-4-6	13.0	20.0	2.90	7.340 × 10 ⁶
	3-4-7	12.0	20.3	3.00	1.000 × 10 ⁷

그림(9)에서 볼수 있는 바와 같이 notch 先瑞의 반지름이 2.0R인 試驗片의 境遇 notch先瑞 반지름이 작아 질에 따라 疲勞限度는 減少된것이며 notch 先瑞의

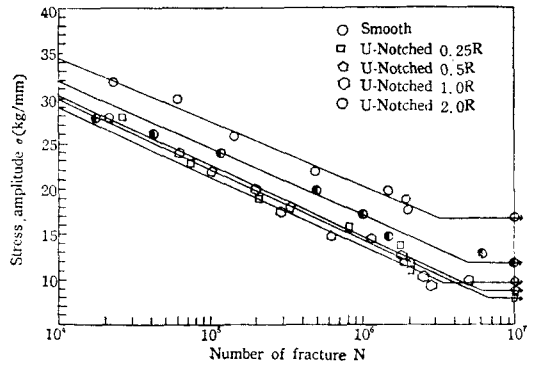


Fig. 9. U-notched S-N curve diagram.

반지름이 0.25R의 것이 最低值인 8.5kg/mm²을 나타내고 있음을 알 수 있다' 이것은 U-notch에 對한 應力集中係數가 작아짐에 따라 增大하므로 最大 應力이 增加되었기 때문이라고 推定할 수 있겠다. 그림(8)에서 지름이 5φ인 圓孔 notch 試驗片의 疲勞限度가 增加하고 있음에 反하여 notch 지름이 0.25R인 U-notch의 境遇 疲勞限度가 減少되고 있음은 notch 形態에 의한 影響때문인 것으로 判斷되었다.

마. V-notch 疲勞限度曲線

그림(4)에서 볼 수 있는 바와 같이 V-notch의 notch 角은 60°로서 各 試驗片의 notch先瑞 반지름別 平面굽힘 疲勞實驗結果는 表(8)에 表示된것과 같고 이에 따라 疲勞限度曲線을 그린것이 그림(10)이다. notch 先瑞의 반지름이 0.1R인 V-notch의 疲勞限度는 8.5kg/mm²로서 平滑試驗片의 疲勞限度에 比하여 顯著하게 낮았으며 notch 係數는 2.0으로 나타났다. notch 先瑞의 반지름이 2R에서 0.1R로 減少함에 따라 應力集力係數는 커짐과 同時에 疲勞限度는 減少하고 있음을 알수가 있었다. 이것은 U-notch의 경우와 同一한 傾向을 보이고 있으며 圓孔 notch와는 反對現象을 나타내고 있다. 持히 notch 先瑞 반지름이 0.5R 以上인 경우는 거의 비슷한 疲勞限度를 나타내고 있음을 알 수 있다.

Table 8. Results of fatigue test in V-notched specimens

notch size ρ (mm)	no. of specimen	σ (kg/mm ²)	b (mm)	h (mm)	Nf
	4-1-1	28.0	20.0	2.97	2.130 × 10 ⁴
	4-1-2	24.0	20.0	2.95	4.980 × 10 ⁴

0.1R	4-1-3	20.0	20.2	2.98	1.619×10^6
	4-1-4	16.0	20.0	3.00	6.185×10^6
	4-1-5	12.0	20.0	2.92	1.674×10^6
	4-1-6	10.0	20.0	2.52	3.990×10^6
	4-1-7	8.0	20.0	2.56	5.407×10^6
	4-1-8	85.0	20.0	2.55	1.000×10^7
0.25R	4-2-1	26.0	20.0	3.00	4.170×10^4
	4-2-2	23.0	20.1	3.00	7.010×10^4
	4-2-3	20.0	20.0	3.00	1.556×10^5
	4-2-4	17.0	20.2	3.01	5.060×10^5
	4-2-5	14.0	20.1	3.00	1.035×10^6
	4-2-6	12.0	10.0	3.02	2.970×10^6
	4-2-7	10.0	20.2	3.00	1.000×10^7
0.5R	4-3-1	28.0	20.0	2.86	2.600×10^4
	4-3-2	24.0	20.0	3.00	4.280×10^4
	4-3-3	20.0	20.0	2.90	2.419×10^5
	4-3-4	17.0	20.0	2.90	6.445×10^5
	4-3-5	15.0	20.0	2.90	7.189×10^5
	4-3-6	13.5	20.0	2.94	2.450×10^6
	4-3-7	12.0	20.0	2.94	4.270×10^6
	4-3-8	11.0	20.0	2.90	1.000×10^7
1.0R	4-4-1	28.0	20.0	2.59	2.410×10^4
	4-4-2	24.0	20.01	2.58	8.990×10^4
	3-4-3	20.0	20.2	2.64	2.936×10^5
	4-4-4	16.0	20.0	2.61	1.208×10^6
	4-4-5	14.0	20.0	2.64	2.004×10^6
	4-4-6	12.0	20.02	2.63	3.836×10^6
	4-4-7	11.0	20.0	2.65	1.000×10^7
2.0R	4-5-1	28.0	19.34	3.00	3.230×10^4
	4-5-2	24.0	19.34	2.97	8.520×10^4
	4-5-3	20.0	19.28	3.00	3.817×10^5
	4-5-4	16.0	19.26	2.96	7.850×10^5
	4-5-5	13.0	19.34	2.98	2.110×10^6
	4-5-6	12.0	19.5	2.98	4.329×10^6
	4-5-7	11.5	19.28	2.93	1.000×10^7

바. 各 notch 사이의 關係

平滑試驗片과 圓孔 notch U-notch 및 V-notch 試驗片의 平面 굽힘 疲勞實驗結果부터 各 notch別 試驗片의 疲勞限度를 比較한結果 그림(8)~(9)에 表示된 半對數紙 S-N曲線에서 各 notch가 共히 作用應力을 減少시킴에 따라 試驗片의 破壞狀況이 直線의으로 거의 平行하게 減少되고 있음을 알 수 있었으며 平面 굽힘 疲勞限度는 notch 形態에 따라 各各 相異한 값을 나타내므로 應力集中係數의 影響을 받고 있음이 確認되었다. 各 notch에 있어서 notch 先瑞의 반지름

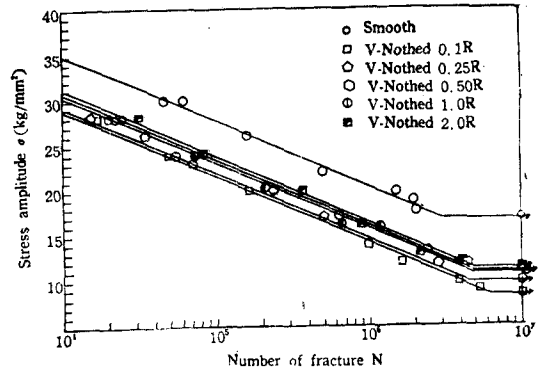


Fig. 10. V-notched S-N curve diagram

이 같을 경우 U-notch 試驗片의 疲勞限度가 가장 낮았음을 알 수 있었다.

圓孔 notch 試驗片의 境邊 notch의 지름이 $\phi < 2.0$ mm 일때에는 應力集中係數이 影響을 작게 받고 있음을 알 수 있었고 이에 反하여 U-notch 및 V-notch 試驗片일境邊 $R < 0.5$ 에서 應力集中係數가 增大하면 노치先瑞의 最大應力이 增加하여 疲勞限度가 減少하고 notch 係數도 增大하나 圓孔 notch는 notch 係數가 減少한다는 것이 對照의이었다.

V-notch에 比하여 U-notch의 疲勞限度가 若干 낮게 나타나고 있는바 이는 U-notch의 경우 notch 先瑞 周邊이 應力集中係數가 V-notch에 比하여 크기 때문인 것으로 思料되었으며 또한 이것이 疲勞限度를 減少시키는 直接的인 原因이라고 判斷되었다.

4. 結 論

國產 一般 構造用 鋼의 平面 굽힘을 받는 平滑, 圓孔 notch, U-notch 및 V-notch 試驗片에 對한 notch 形狀의 影響을 究明하기 위하여 實驗을 實施한 結果 다음과 같은 結論을 얻었다.

1. 應力集中係數와 notch 係數 사이에는 notch 先瑞의 반지름이 작을수록 顯著한 差異가 있었고 클수록 같은 값으로 接近함을 알 수 있었다.
2. 引張強度 33.1 kg/mm^2 인 熱間壓延 構造用 鋼板의 平滑 試驗片의 平面 굽힘 疲勞限度는 17 kg/mm^2 정도임을 알 수 있었다.
3. U-notch 및 V-notch는 應力集中係數가 疲勞限度에 미치는 影響이 크나 圓孔노치는 $\phi < 2$ 에서 應力集中係數의 影響과 달리 疲勞限度가 上昇하였다.
4. notch 先瑞의 반지름이 같은 경우 U-notch 試驗

片이 V-notch 및 圓孔 notch 試驗片에 比하여 疲勞限度가 낮게 나타나고 있는것은 notch의 影響에

문인 것으로 判斷되었다.

References

1. 菊川眞, 佐藤芳久. 1974. 引張りモレくは 曲げを受ける 帯板, 丸棒의 切缺眞による 應力集中 (第3報, V形 切缺きのある帯板, V形みある 丸棒 および 段付丸棒). 日本機械學會誌 第一部 38卷 311號
2. 吳世旭, 廉永夏. 1974. 回轉 굵힘을 받는 스프링鋼의 疲勞強度와 크랙 傳播에 關한 研究 (第一報) 大韓機械學會誌 第14卷 第2號
3. 吳世旭, 廉永夏. 1974. 回轉 굵힘을 받는 스프링鋼의 疲勞引度와 크랙 傳播에 關한 研究 (第2報). 大韓機械學會誌 第14卷 第3號
4. Itsuro Tatsaukaw & Arira Oda. 1974. HT80 高引張力 溶接部の 低サイクル 疇勞. 日本 溶接學會誌 第43卷 第2號 p. 147.
5. Akira Yoshida, Hideaki Kawabe & Tomo haru Yamada. 1973. Annealedと 表面壓延 低炭素鋼의 疲勞破壞, 傳播機構. 日「材料」第20卷 第219號 p. 1272
6. Kenji Takahashi, Hironor Takashima, Akinori Ito & Youich Yazahi. 1973. Fatigue strength of high tensile structural steel and welded joint. 日本機械學會誌 第16卷 92號 p. 161.
7. 西原利夫, 小林篤郎. 1972. 疲勞破壞篤假說, 日本機械學會論文集: 12-47 p. 57
8. 吉擇武男, 根律紀久雄. 1971. 鋼板의 疲勞試驗, 日本機械學會論文集 第一部 35卷 第276號 p.539-543.
9. Masao Terasawa, Yasuo Yoshika & Katstoshi Asami. 1971. Tufftrided (タフトライト)處理鋼의 疲勞破壞에 關する 研究 (平均應力의 影響について). 日本「材料」第 18卷 第195號 p. 1081
10. Shuji Taira & Keinke Tanka., 1970. 疲勞試驗 オーム社 p.620
11. Takuro Kobayashi & Toshihiro Matsumodo-Oto. 1969. 軟鋼의 殘留應力と 疲勞. 日本金屬學會誌 第33卷 第8號 p. 916
12. 日本材料學會. 1968. 金屬材料 勞試驗便覽. 養賢堂, p. 30,
13. 西田正孝. 1963. 應力集中, 森北出版(株) p.309
14. J.Hoshino & J. Arai. 1961 JSME France, p.25
15. 川田一雄. 1961. 金屬의 疲勞と 設計 オーム社 p. 120
16. N. Enomoto. 1955, Proc. ASTM 55 p. 903
17. Metal process, 1954. Science of Machine. p. 97
18. 中西不利夫. 1954. 鋼板의 疲れ試驗, 日本機械學會誌 18-65
19. A.K. Head. 1953. The growth of fatigue cracks. The philosophical magazine Vol. 44 Series 7. p. 925
20. 西原利夫, 小林篤郎. 1947. 疲勞限界의 假說. 養賢堂 p. 212
21. 小野鑑正. 1945. Fatigue Strength of High Tensile structural steel. 日本機械學會誌 6-25
22. Z. Drowan. 1939. Proc. Roy. Soc. A p. 171
23. H. Neuber. 1937. Kerbspannungslehre Ist, Springer-Verlag.
24. H.J. Gough & W.A. 1936. Proc. Roy. Soc.A 154
25. R.E. Peterson & A.M. Wahl. 1936. Trans. of Asme Vol. 58, p. 75
26. A. Wöhler & Z. Bauw. 1866. Fatigue limit test p.16~67,