

超音波探傷法을 利用한 Double Edge Notch 先端의 龜裂發生에 關한 研究

A Study on the Crack Initiation from Double Edge Notch Tips by Ultrasonic Testing

임 창 현* · 최 용 식**
Chang-Hyun Lim · Yong-Shick Choy

ABSTRACT

This study was done by ultrasonic testing. The proves used in this study were 5Z10X10A70. The useful fatigue life of structural components is determined by the sum of the elapsed load cycles required to initiate a fatigue crack and to propagate the crack from subcritical size to critical dimensions. Thus, to predict the service life of many steel structures and to establish safe inspection intervals, an understanding of the Fatigue Crack Initiation and Fatigue Crack Propagation behavior in the steel is required. In the present study, the Fatigue Crack Initiation Life in SPS 5A steel was investigated by testing specimens having widely varying notch acuities. The variation in the notch acuity covered the range from notch root raidus 0.5mm to 2.5mm, and Fatigue Crack Initiation Life data were obtained in that range.

記號說明

D. E. N.	; Double Edge Notch	a	; d+c
r	; 노치뿌리 半徑	W	; 試片幅의 半길이
d	; 노치깊이	L	; 試片길이
c	; 노치先端에서 發生된 龜裂의 길이	d/W	; 試驗片의 幅에 對한 노치깊이 比

* 대림전문대학 공업재료과

** 성균관대학교 기계공학과

1. 서 론

機械, 構造物 및 産業施設物 等 의 破壞事故에 對한 破損解析結果들을 檢討해보면 大部分의 境遇 事故의 直接的原因은 各種 缺陷에서 發生, 派生한 波勞龜裂의 成長에 基因한 것으로 分析되고 있다^{1), 2)}. 部材나 構造物의 破壞現象은 應力 集中源이 되고 있는 缺陷의 存在를 前提로 하고 있으며, 現實적으로 人間社會에서 製造되어 使用되는 모든 材料는 內外부에 檢査者나 使用者의 認知與否에 關係없이 龜裂이나 노치 等의 缺陷이 形狀과 크기를 달리 하는 여러 種類의 缺陷으로 存在하기 마련이다. 이들 缺陷材의 全體波勞壽命은 波勞龜裂의 發生壽命, 微少龜裂(Short Crack)과 긴 龜裂(Long Crack)의 成長壽命 모두를 包含한 것이라 할 수 있다.

非破壞檢査는, 機械나 構造物의 內部에 存在하는 缺陷을 破壞하지 않고 檢査하는 方法으로, 産業現場의 事故를 미연에 防止하기 위한 필수적인 技法이라 하겠다. 機械, 構造物 및 産業施設物 等의 安全管理 및 保守管理基準뿐만 아니라 缺陷의 發生 및 成長舉動을 研究하는데 이러한 非破壞檢査(Nondestructive Testing : NDT) 方法이 많이 利用되어 왔으며, 이러한 非破壞檢査 技法을 破壞力學의 解析에 適用하면 信賴性 및 經濟性向上과 安全性을 더욱 向上시킬 수 있겠다.

즉, 産業災害를 防止하기 위하여는 信賴性和 安全性 높은 破壞解析이 必要하며, 이를 위해서는 非破壞檢査를 適用한 破壞力學의 評價解析이 切實히 要求된다 하겠다.

本 研究에서는 波勞荷重을 받는 構造物의 破壞事故를 防止하기 위한 波勞壽命 評價의 一環으로 全體波勞壽命中 가장 긴 壽命을 갖는 波勞龜裂의 發生壽命에 對하여 考察하여 보고자 한다. Double Edge Notch 材를 모 델로하여 波勞壽命을 評價하고 非破壞檢査法^{3), 4)}의 하나인 超音波探傷試驗法^{5), 6)}을 使用하여 波勞龜裂發生壽命을 評價하고, 다음 事項에 對하여 重點考察하고자 한다.

- 1) 波勞龜裂에서 발생, 成長舉動研究에서 超音波探傷法(U. T.)의 效用性檢討

- 2) 노치先端에서 發生하는 龜裂의 進展舉動에 對한 考察
- 3) 全體 波勞破壞壽命(Nf)과 波勞龜裂發生壽命(Ni)과의 關係
- 4) 波勞龜裂發生壽命(Ni)과 노치뿌리 半徑(Notch Root Radius : r)크기와의 關係
- 5) 波勞龜裂發生壽命(Ni)과 노치깊이(d)와의 關係

2. 초음파 탐상법의 이용

2.1 超音波探傷裝置

超音波探傷에서는 一般的으로 0.5MHz~15MHz의 周波數가 實用되고 있다.

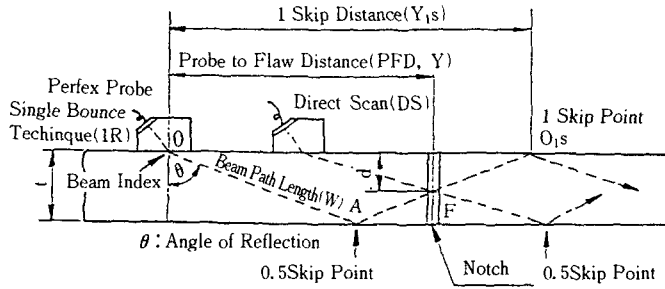
따라서 可聽音보다 波長이 훨씬 짧고 빛의 直進性和 비슷한 性質이 있다. 또 波長이 짧으므로 작은 缺陷에서도 잘 反射되어 쉽게 觀察된다고 하겠다. 超音波探傷器는 探傷目的에 따라서 專用화된 것도 있을 뿐만 아니라 形式이 多樣하다. 本 研究에서는 標準形探傷器를 使用하였고, 傾斜角法을 適用하였으며, 接觸子는 5Z10X10A70의 것을 使用하였다. 探傷方法은 基本的인 方法으로서 透過法, 共振法 및 펄스反射法이 使用되고 있는데 가장 많이 使用되고 있는 펄스反射法을 適用하였다. 探傷方式은 傾斜角探傷方法에서 1回反射法을 適用하였고, 波動樣式은 橫波를 使用하였다. 接觸子の 接觸方法으로는 直接 接觸方法을 使用하였고, 接觸子和 試片表面과의 공극을 없애기 위하여 接觸媒質을 使用하였다. 接觸媒質은 垂直面에서도 잘 흘러내리지 않고 -10℃부터 +80℃까지 使用 가능한 接觸媒質을 使用하여 超音波가 安定되게 走査되도록 하였다. 接觸子를 試片表面에 完全하게 잘 接觸시키는 것이 극히 重要하므로 接觸媒質을 바른 뒤 接觸子에 2kg 程度의 壓力이 가해지도록 하였다. 超音波探傷試驗을 하기 前에 豫備實驗을 通하여 標準試驗片을 使用하여 接觸子和 探傷器의 性能을 確認調整한 後 試驗하였다.

2.2 試片的 龜裂發生感知

노치先端의 龜裂發生測定은 超音波探傷器에서 얻어지는 探傷圖形으로부터 感知된다. 에코우 位置의 測定은 에코우의 上昇位置에서 測定한다. 試

片 두께의 中央部에 超音波가 走査되도록 Fig.1과 같은 방법으로 探觸子의 位置를 定하였다. 探觸子는 Fig.2와 같은 지그를 만들어서 探觸子를 固定

하였고 龜裂의 發生 및 成長을 測定할 수 있도록 하였다.



Beam Path Length of 0.5 Skip : $W_{0.5s} = t/\cos \theta$
 Beam Path Length of 1 Skip : $W_{1s} = 2W_{0.5s} = 2t/\cos \theta$
 0.5 Skip Distance : $Y_{0.5s} = t \cdot \tan \theta$
 1 Skip Distance : $Y_{1s} = 2Y_{0.5s} = 2t \cdot \tan \theta$
 Depth of Flaw(Direct Scan) : $d = W \cdot \cos \theta$
 Depth of Flaw(Sngle Bounce of Technique) : $d = 2t - W \cdot \cos \theta$
 Relation Between Y and W : $W = Y/\sin \theta$
 Probe to Flaw Distance : $Y = W \cdot \sin \theta$

Fig. 1 Angle beam technique

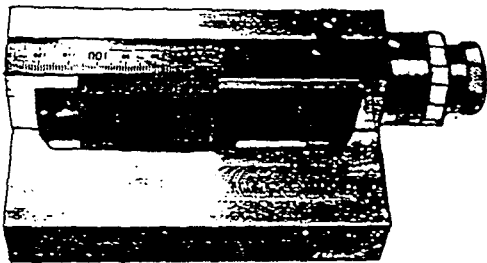


Fig. 2 Jig for ultrasonic testing system

2.3 龜裂길이의 測定

龜裂길이 測定은 Fig.2와 같이 지그를 製作하여, Fig.1과 같은 原理로서 探觸子의 位置를 정한後, 지그에 부착된 버어니어를 利用하여 龜裂길이를 매우 精度 높게 測定하였다. 노치 先端의 境界에서의 에코우 높이를 0%로 맞춘 後 試驗하였다.

3. 시 험

3.1 試驗片

試驗片材料로는 SPS 5A 鋼素材를 使用하였으며 化學成分과 機械的性質은 各各 Table 1, Table 2와 같다.

Table 1 Chemical compositions(wt.%) (Wt.%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Cu	Mo
0.56	0.21	0.72	0.015	0.018	0.77	0.10	0.01

Table 2 Mechanical properties

Yield Strength(MPa)	493
Tensile Strength(MPa)	933
Young's Modulus(MPa)	2.05×10^5

SPS 5A, 두께 7mm의 壓延材料에서 試驗片을 採取하였으며, 試驗片의 노치깊이(길이)와 龜裂의 發生, 成長方向은 壓延方向에 對하여 垂直하게 하였다. 試驗片은 Double Edge Notch를 가진 試驗片을 使用하였으며, 形狀 및 치수는 Fig.3과 같다.

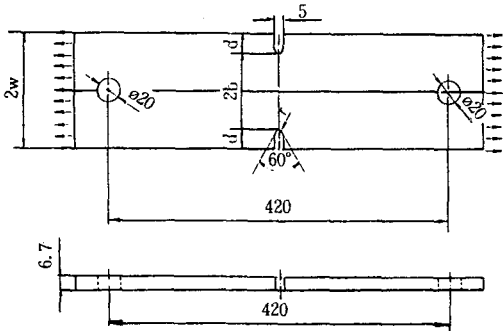


Fig. 3 Dimensions of the specimen for crack initiation

노치는 폭 깊이비(d/W)를 0.3, 0.35, 0.4, 0.5, 0.55의 5단계로 하여 기계가공하였고, 노치 반경의 크기(r)는 0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5mm의 5단계로 기계가공하였다. 두께는 6.7mm로 하였다.

3.2 試驗裝置

試驗機로는 Instron 社의 25Ton 容量의 Servo-hydraulic computer controlled materials testing system을 사용하였다. 波勞龜裂發生實驗 및 測定시스템의 構成圖는 Fig. 4와 같다.

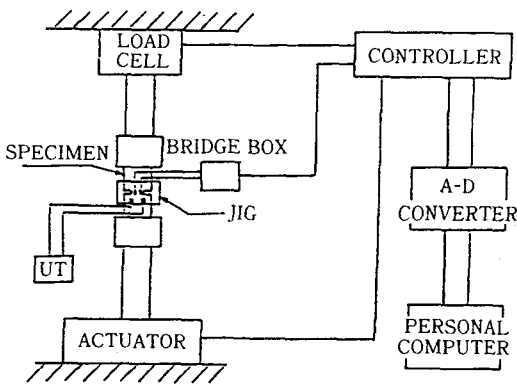


Fig. 4 Schematic diagram of fatigue crack initiation testing system

3.3 實驗方式

實驗은 一定荷重幅制御方式으로 荷重比

(P_{min}/P_{max})를 0.1로 하여 周波數 15Hz의 Sine형으로 室溫에서 實驗을 하였다. 龜裂發生과 龜裂길이 測定은 豫備實驗을 통하여 精確度를 確認하였고, 노치 先端(Notch Tip)近方의 內外面의 龜裂發生, 成長길이를 超音波探傷方法을 使用하여 波勞實驗途中에 停止하지 않고 連續的으로 測定하였다. 豫備試驗에서는 測定精確度를 높이고 信賴性을 얻기 위하여 染色浸透探傷法을 同時에 使用하여 龜裂길이를 測定하였다.

3.4 實驗結果

Fig. 5는 非破壞檢査方法인 超音波探傷試驗方法에 의해 測定된 波勞龜裂의 成長學動을 나타낸 것이다. Fig. 6은 노치先端에서 發生하는 龜裂의 進展學動을 나타낸 것으로서 大部分의 境遇 內部에서 發生成長하여 약 1mm 進展後表面龜裂이 發生됨을 觀測할 수 있었고 대개의 境遇 1.5mm 程度 進展되면 內外面의 龜裂길이가 同--하게 測定되었다. 各種形狀의 試驗片에 따른 波勞龜裂發生壽命과 全體波勞破壞壽命은 Table 3과 같다. Fig. 7과 Fig. 8은 노치半徑(r)의 變化와 노치깊이비(d/W)의 變化에 따른 波勞龜裂發生壽命(N_i)을 整理한 것이다.

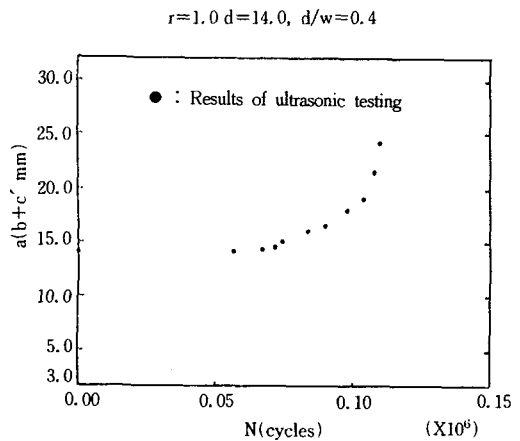


Fig. 5 Crack length(a) vs. number of cycles

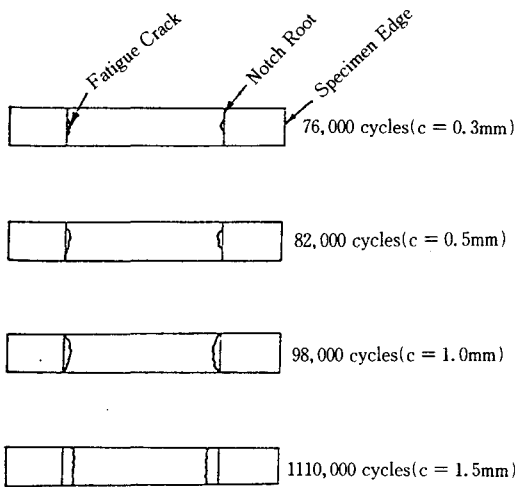


Fig. 6 Fatigue crack growing feature
($r = 1.5$, $d = 14.0$, $d/W = 0.4$, $f = 15\text{Hz}$)

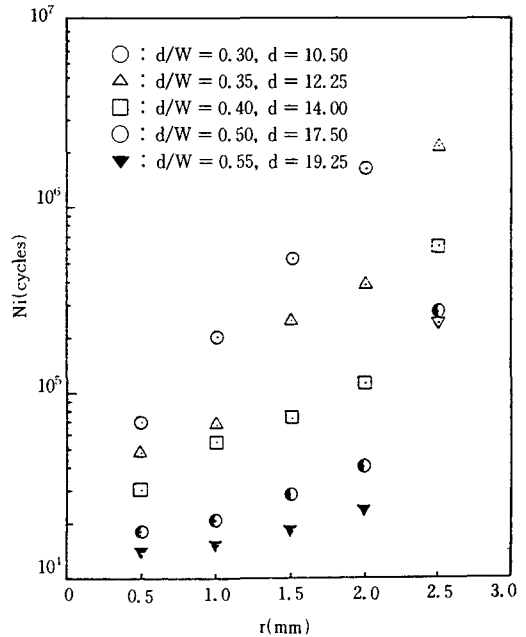


Fig. 7 Relation between N_i and $r d/W$

Table 3 Summary of fatigue crack i

d/W	0.30	0.35	0.40	0.50	0.55
	d	10.5mm	12.25mm	14.0mm	17.5mm
$r(\text{mm})$	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5
Δa	328.30mm^2	304.85mm^2	281.40mm^2	234.50mm^2	211.05mm^2
	$N_i = 67,500$ $N_f = 130,000$	$N_i = 48,000$ $N_f = 100,000$	$N_i = 30,000$ $N_f = 60,000$	$N_i = 18,000$ $N_f = 40,000$	$N_i = 13,500$ $N_f = 34,000$
	$N_i = 189,000$ $N_f = 319,420$	$N_i = 58,500$ $N_f = 118,000$	$N_i = 56,700$ $N_f = 110,000$	$N_i = 20,000$ $N_f = 42,000$	$N_i = 15,000$ $N_f = 35,500$
	$N_i = 516,000$ $N_f = 639,500$	$N_i = 252,000$ $N_f = 502,000$	$N_i = 72,000$ $N_f = 128,030$	$N_i = 28,700$ $N_f = 68,000$	$N_i = 17,500$ $N_f = 37,000$
	$N_i = 1,596,700$ $N_f = 1,754,900$	$N_i = 276,000$ $N_f = 420,500$	$N_i = 110,000$ $N_f = 210,660$	$N_i = 40,500$ $N_f = 70,870$	$N_i = 23,400$ $N_f = 38,780$
	$N_i = \infty(4 \times 10^6)$ $N_f = \infty$	$N_i = 2,115,220$ $N_f = 2,158,240$	$N_i = 580,000$ $N_f = 713,570$	$N_i = 247,500$ $N_f = 381,850$	$N_i = 237,000$ $N_f = 288,270$

σ_n (Nominal stress) = 81.5MP_a (0.15 Yield strength)

4. 고 찰

4.1 초음파탐상법의 효용성

一般的인 波勞試驗의 境遇 移種式顯微鏡을 使用하여 龜裂길이를 測定한다. 이 境遇 試驗片內部和 外部의 龜裂길이 差異만큼의 誤差가 發生하게 된다. 이러한 誤差는 龜裂發生初期에는 더욱 커지

게 되므로 表面龜裂의 觀察만으로 龜裂發生을 評價할 수는 없겠다. 따라서 内部의 龜裂를 觀察할 必要가 있으며, 이를 위하여 超音波探傷法을 利用하였다. 超音波探傷法의 傾斜角探傷法을 利用할 境遇 試片内部의 龜裂發生을 容易하게 觀察할 수 있었으며 Fig.3과 같은 버어니어가 있는 지그를 使用하여 0.05mm의 精密度로 内部의 龜裂길이를 測定할 수 있었다.

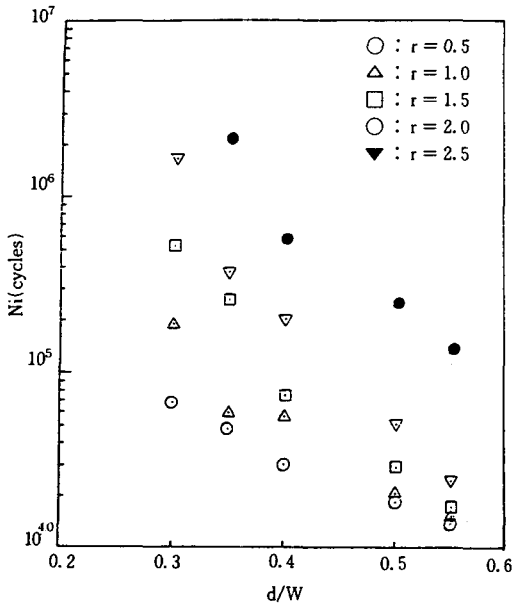


Fig. 8 Relation between Ni and d/W r

4.2 龜裂의 發生 및 進展舉動

Fig. 6에서 보는바와 같이 龜裂發生은 試片內部에서 表面龜裂의 形態로 發生하여 龜裂길이 약 1mm 程度進展後 試片表面上에 龜裂의 發生이 始作되었다. 龜裂길이 1.5mm 程度進展後 內外面의 龜裂길이가 同一함을 測定할 수 있었다. 이러한 原因은 試片두께의 拘束에 의하여 試片內部에 더 큰 應力이 作用하였기 때문이라 生覺된다.

4.3 全體疲勞壽命과 疲勞龜裂發生壽命과의 關係

全體疲勞壽命中 龜裂의 發生壽命이 全體疲勞壽命의 大部分이라고 報告되고 있으므로, 本研究의 實驗 데이터를 考察하여 全體疲勞壽命中 龜裂發生壽命이 차지하는 時間을 比較하였다. Table 3은 노치의 깊이와, 노치半徑의 變化에 따른 全體疲勞破壞壽命과 龜裂發生壽命을 整理한 것이다. 여기에서 보이는 바와 같이 發生壽命이 차지하는 比率은 40%~98% 정도로 나타났으며, 노치半徑이 작을 境遇보다 노치半徑이 클 경우에 크게 나타났다. 또 노치의 깊이가 클 때보다는 작을 境遇에 發生壽命이 차지하는 比率이 크게 나타났다.

4.4 疲勞龜裂發生壽命(Ni)과 노치뿌리半徑(r)의 關係

Fig. 7은 疲勞龜裂發生壽命(Ni)과 노치뿌리半徑(r)과의 關係를 나타낸 그림이다. 本研究에서 使用된 試驗片의 條件下에서는 노치의 半徑이 增加할수록 龜裂發生壽命이 增加함을 볼 수 있으며, $r = 2.0\text{mm}$ 以上이 되면 龜裂發生時間이 顯著하게 길어짐을 알 수 있었다. 이러한 노치 半徑의 影響은 d/W 가 比較的 적은 境遇($d/W = 0.3$) 顯著하게 나타났다.

4.5 疲勞龜裂發生壽命(Ni)과 노치깊이(d)와의 關係

Fig. 8은 疲勞龜裂發生壽命(Ni)과 노치깊이比 d/W 의 關係를 나타낸 것이다. 이 그림에서 보는 바와 같이 d/W 가 增加할수록 龜裂發生壽命(Ni)이 減少하는것으로 나타났으며 노치半徑이 클 境遇($r = 2.5\text{mm}$) 그 影響이 적게 나타났다. 노치깊이比 $d/W > 0.4$ 인 境遇 Ni의 減少가 顯著하게 나타났다.

5. 결 론

- 1) 疲勞龜裂發生과 成長舉動研究에서 非破壞試驗方法인 超音波探傷法을 活用하여 試片內部的 龜裂發生을 感知함으로써 보다 精度 높은 疲勞龜裂發生壽命을 測定할 수 있었다.
- 2) 龜裂의 發生은 試片의 內部에서 發生하여 表面龜裂의 形態로 成長하였으며 內部龜裂길이 약 1mm 程度일때 表面에도 龜裂이 發生하였고, 1.5mm 以上에서는 內外部의 差異가 없어졌다.
- 3) Double Edge Notch 材의 全體疲勞壽命中 疲勞龜裂發生壽命이 차지하는 比率은 노치半徑이 比較的 적은 境遇($r \leq 1\text{mm}$)는 40~59%이고, 노치半徑이 比較的 큰 境遇($r \geq 2.0\text{mm}$)는 52~98% 程度로 나타났다.
- 4) 노치뿌리의 半徑이 增加할수록 疲勞龜裂發生壽命은 增加하였고, 노치뿌리의 半徑이 2.0mm 以上에서는 疲勞龜裂發生壽命의 增加가 顯著하게 나타났다.
- 5) 노치깊이가 클수록 疲勞龜裂發生壽命은 減少하였다. 노치깊이비(d/W)가 0.4以上에서는 그

影響이 크게 나타났고, 노치깊이의 影響은 半徑이 增加할수록 크게 나타났다.

이 論文은 1991學年度 學校法人 大林學園 學術 造成費에 依하여 研究되었다. 研究 遂行을 할 수 있도록 支媛해준데 對하여 感謝의 뜻을 表하는 바이다.

참 고 문 헌

1) T.P. Rich and D.J. Cartwright, Case Studies In

F.M., Monograph Series AMMRC MS 77-5, Army Material and Mechanics Research Center, Massachusetts, 1977.

2) 西田新一, 機械·器具破損의 原因と 對策, 日刊工業新聞社, 1986.

3) Ronnie K. Miller, Nondestructive Testing Handbook, ASNT, Vol.5, pp.11~44, 1987.

4) A. S. Kobayashi, Handbook on Experimental Mechanics, Prentic-Hall, Inc. pp.555~585, 1987.

5) Metals Test Methods & Analytical Procedures, ASTM, Vol.03.03, pp.156~178, 1991.

6) 超音波探傷試驗, 日本非破壞檢査協會, pp.180~178, 1985.