

# 光干涉法에 의한 Crack 先端의 Strain 分布의 測定

—塑性域 및 두께 方向의 Strain과 COD值와의 關連性—

金 永 植

## Measurements of Strain Distribution near the Notch Front by Optical Interference Method

—Plastic Zone, Through-the-thickness Deformation and their Relation to COD Value—

Kim Young Sik

### 目 次

- |                              |                                      |
|------------------------------|--------------------------------------|
| 1. 序 論                       | 3.2.1 試片表面에 있어서 塑性 Strain의 全面 降伏 舉動  |
| 2. 實驗裝置 및 供試材                | 3.2.2 試驗片 表面 및 内部에 있어서의 塑性 Strain 舉動 |
| 2.1 實驗裝置                     |                                      |
| 2.2 供試材                      | 3.3 塑性域 및 두께 方向의 變形量과 COD와의 關係       |
| 3. 實驗結果 및 考察                 | 4. 結 論                               |
| 3.1 光干涉法에 의한 塑性域의 測定         |                                      |
| 3.2 Crack 先端에서의 塑性 Strain 舉動 |                                      |

### 1. 序 論

鎔接構造用鋼과 같은 延性材料의 破壞舉動을 解明하기 爲해서는 材料内部에 存在하는 欠陷, 또는 Crack의 先端領域에 있어서 그의 應力과 Strain分布를 把握할 必要가 있다. Crack 先端의 Strain 分布를 解析하기 爲한 理論解法으로서는 Green<sup>1)</sup>, Bilby<sup>2)</sup> 등, Irwin<sup>3)</sup>, Tuba<sup>4)</sup>, Rice<sup>5)</sup>, 등 많은 數의 研究結果가 있고, 또한 Swedlow<sup>6)</sup>에 依해 開發된 有限要素法과 같은 數值解法이 있다.

그러나, 이러한 理論 및 數值解法은 Plane stress 또는 Plane Strain 狀態와 같은 理想的인 Model의 假定아래 行하여 졌기 때문에, Crack 先端과 같이 複雜한 要素가 섞여 있는 곳에서는 그대로 適用할 수 없으므로 Strain의 直接 測定의 必要가 있다. Crack 先端의 Strain 分布를 直接 測定하는 方法으로서는, 光彈性皮膜法, Strain 塗料法, Morie法, 및 特殊한 材料에 限하는 Etkins 方法 등이 많이 使用되어 왔다. 그러나, 이러한 方法은 어느것이나, 平面上에서의 測定法으로, 應

力集中에 의해 Crack 先端에서 發生하는 두께方向의 Strain 測定에 對해서는 適合하지 않다.

一方, 延性材料의 破壞 Criterion으로서 COD 또는 J積分値가 많이 使用되고 있다. 그러나 破壞 條件을 決定하는 보다 重要한 因子인 Crack 先端領域에 있어서 平面上 및 두께方向의 Strain과 이러한 破壞 Criterion과의 關係는 充分히 밝혀지지 않고 있다.

加藤, 田村<sup>7)</sup>는 光干涉을 利用해서 鎔接部의 殘留應力分布를 調査한바 있다. 本 研究에서는 이러한 光干涉法을 利用해서 Crack 先端의 Strain 分布의 測定法을 提示한다. 이 方法에 依하면 두께 方向의 Strain과 平面上에서의 Strain의 同時測定이 可能하고, 測定精度 및 實驗의 簡單等 매우 우수한 長點을 갖고 있다. 이 方法에 依해 3點 靜的 荷重 試驗의 境遇, Crack 先端에서 塑性 Strain 이 發生하여 全面降伏에 이르기까지의 塑性 Strain 舉動을 連續觀察하여 그의 舉動을 밝혔다.

또한, Etching法에 依해 塑性領域이 나타나기 쉬운 材料를 使用하여 表面部와 内部의 塑性 Strain 의 差異를 밝히고, 이러한 塑性 Strain 舉動 및 Crack先端에 發生하는 두께方向의 變形量과 COD 와의 關係를 밝혔다.

## 2. 實驗裝置 및 供試材

### 2.1 實驗裝置

Fig.1에 實驗裝置의 全体를 보이고 있다. 그리고 Fig.2에 3點 靜的 荷重 試驗裝置 및 Fig.3에 光干涉縞攝影의 原理圖를 보이고 있다.<sup>7)</sup> Load cell과 變位檢出器의 出力은 X-Y recorder에 連結하



Fig. 1

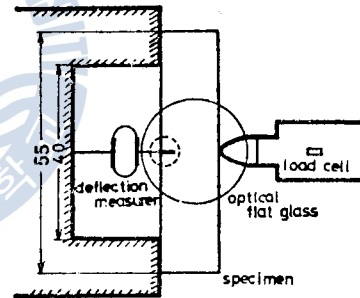


Fig. 2

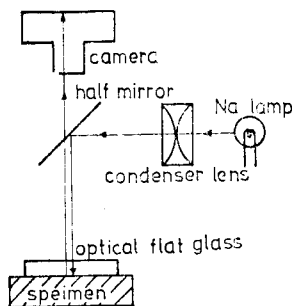


Fig3

여 荷重-變位曲線으로 記錄되도록 했다. 또한 荷重은 油壓 Valve에 依해 微少調整이 可能하다. 試驗片의 表面에 나타나는 光干涉縞는 荷重-變位曲線上의 一定한 間隔點에서 負荷狀態 및 除荷狀態에서 連續적으로 撮影이 可能하도록 되어있다.

### 2.2 供試材

主要한 實驗에 利用한 窒素含有軟鋼과, HT80鋼의 化學成分 및 機械的 性質을 Table.1에 보인다. 그리고 外에 光干涉法과 比較하기 爲한 etching法에는, Fe-3% Si鋼(0.024%C, 3.1% Si, 0.15% Mn, 0.008% P, 0.004% S)을, 窒素含有軟鋼과 함께 使用

했다.

3點 荷重 試驗片은 Fig.4에 보이는 形狀으로, 中央部에 깊이 2mm, 幅 0.2mm의 slit notch를 加工했다. 試驗片은 殘留應力除去 및 粒度調整을 爲해, 窒素含有軟鋼의 境遇에는 900°C에서 1時間 加熱

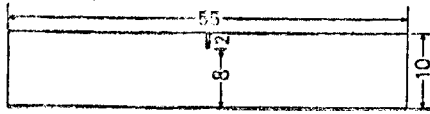


Fig. 4

後 空冷하여, 다시 650℃에서 1時間加熱하여 空冷했다. HT80鋼은 殘留應力을 除去하기 爲해 600℃에서 1時間加熱하여 空冷했다. 熱處理 後 試驗片은 表面을 珉핑하였다. 또한 Fe-3% Si鋼은 800℃에서 1時間 加熱 後 空冷해서 使用했다.

### 3. 實驗結果 및 考察

#### 3.1 光干涉法에 의한 塑性域의 測定

Fig. 5(a)는 HT80 鋼의 負荷時 Crack 先端에 發生하는 光干涉縞의 形態이고, (b)는 (a)의 干涉縞로부터 計算된 두께方向의 變形量, 및 試驗片 表面의 凹凸의 形態를 보인 것이다. 두께方向의 變

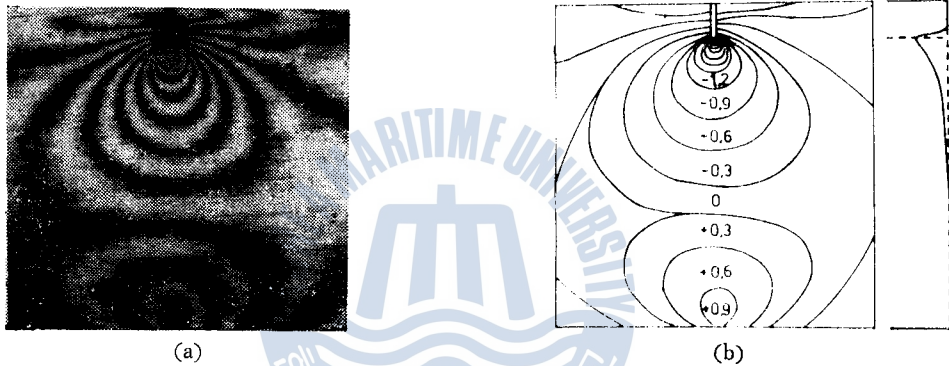


Fig. 5

形量  $\Delta Z$ 는, 平平한 領域에서부터 세어온 光干涉縞의 次數를  $n$ , 光源의 波長을  $\lambda$ 라고 하면 次式으로 表現된다

$$\Delta Z = \frac{n\lambda}{2}$$

本 實驗에서는 Na 光源( $\lambda=0.59\mu m$ )를 使用했기 때문에 두께方向의 變化量을 約  $0.3\mu m$ 의 order 로 測定이 可能하다.

Fig. 6은 窒素含有軟鋼과 Fe-3% Si 鋼에 對해서 一定의 荷重을 加한 다음, 荷重을 除去한 後 그 의 表面에 나타나는 光干涉縞의 形態 (a)와 etching法에 依해 나타난 塑性域(b)을 比較한 것이다. 光干涉法에 있어서, 窒素含有軟鋼의 境遇는 彈-塑性 變形 遷移 境遇가 鮮明하므로, 그 模樣으로부터 塑性域이 直接 判別된다. 一方, Fe-3% Si鋼의 境遇, 光干涉縞로서는 彈-塑性域의 境界가 明瞭하지 않다. 그러나 이 境遇는 縞密度가 急激히 높아지는 領域이 etching 法에 依해 나타난 塑性域과 一致하고 있으므로 Crack 先端에 나타나는 두께方向 變形量의 勾配를 利用하여 塑性域을 判定할 수가 있다. Fig. 7은 Crack 先端에서 부터의 距離와 除荷時 두께方向의 變形量을 各 應力 level에 對해서 圖示한 것이다. 이와같이 圖面上에서 깊이勾配가 急히 增加하는 變曲點을 Crack 先端에서 부터 모든 方向으로 求하여 이들을 連絡하면, 實際의 塑性域을 알 수 있다.

#### 3.2 Crack先端的 塑性 Strain 舉動

##### 3.2.1 試片表面에 있어서 塑性Strain의 全面降伏舉動

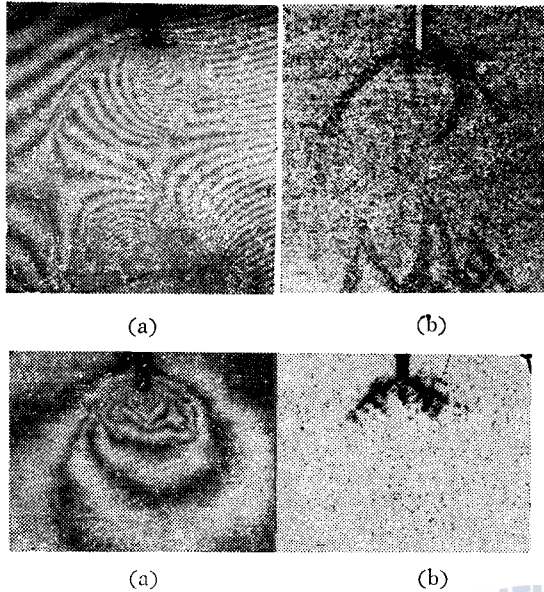


Fig. 6

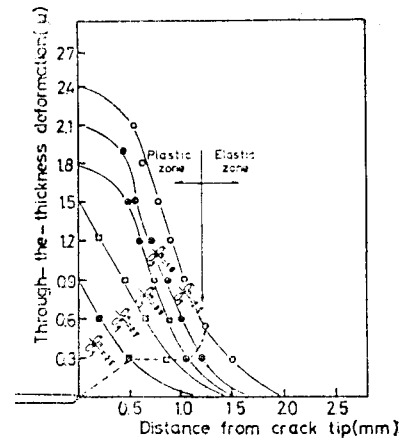


Fig. 7

Fig. 8은 窒素含有軟鋼 및 HT80鋼에 있어서 光干涉法에 의해 觀察된 全面降伏에 이르기까지의 塑性 Strain의 學動을 보인 것이다. 또한 Fig. 9는, Crack 先端의 塑性 strain 傳播學動의 模式圖이다. 負荷應力의 增加와 함께 最初로 Crack 先端 A點에서부터 局部降伏이 일어나고, 이것이 AB

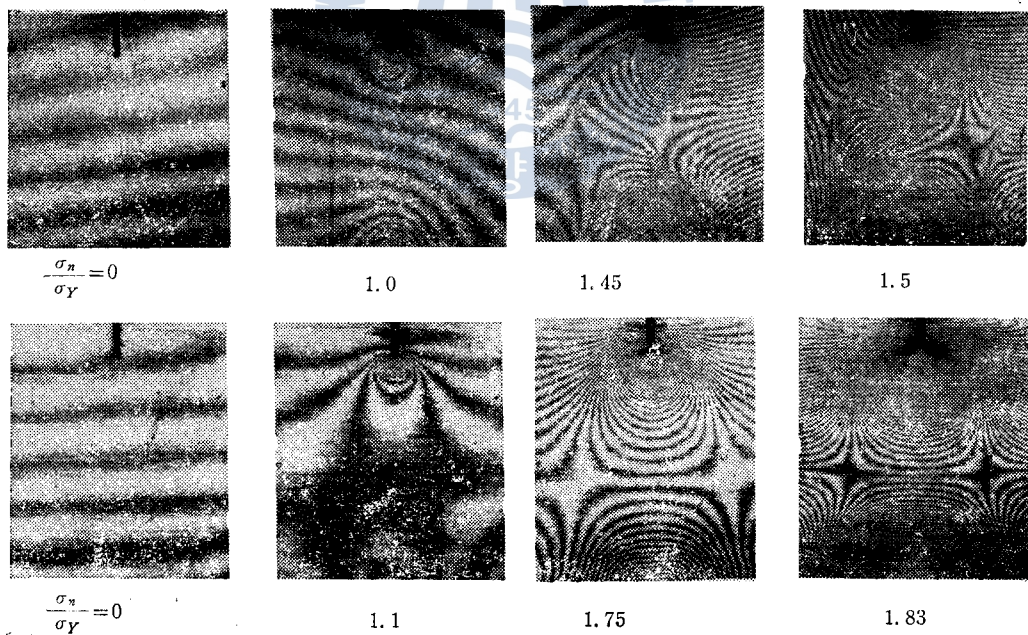


Fig. 8

와 같이 傳播한다. 支點側에서는 支點의 壓縮荷重에 의해 頂點에서 最初로 塑性 Strain이 發生하여 荷重에 아울러 넓혀간다. 다음에 Crack 底에서부터 Green<sup>8)</sup>, Hahn<sup>9)</sup> 등이 定義한 Hinge 形 塑性 Strain AD, AH가 最小斷面에 對해서 約 45° 方向으로 發生하여 中央 剛性域 ADJH를 回轉軸으

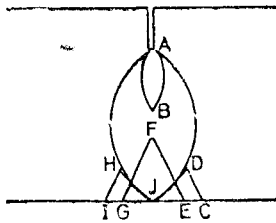


Fig. 9

로 하는 板의 回轉에 依해 支點側으로 傳播해 간다. 또한 이와 함께 支點의 兩側에서는 JDC, JHI의 剪斷 塑性 Strain이 發生하여 傳播하여, 이것과 Crack 先端에서 부터 傳播하여 온 Hinge 形 塑性 Strain이 板의 中央部에 가까워 오면 急激히 成長하여 全面降伏에 이른다.

窒素含有軟鋼과 HT80鋼의 全面降伏에 到達한 狀態를 比較하면 後者는 Crack 先端에서 發生한 局部降伏 Strain 이 前者에 比해 아주 작고 또한 支點側의 J 點에서 最初로 일어나는 降伏 Strain이거의 觀察되지 않는다. 따라서 窒素含有軟鋼보다도 HT80鋼이 Green<sup>8)</sup> 등의 Slip line

理論에 依한 Plane Strain 狀態의 解析結果에 보다 가까운 傾向을 보이고 있다.

### 3.2.2 試驗片의 表面 및 內部에 있어서의 塑性 Strain 舉動.

Fig. 10은 窒素含有軟鋼의 境遇, Crack 先端部에 一定한 크기의 局部降伏이 發生하여, Hinge 形 塑性 Strain이 發生하기 前의 段階에서 試驗片의 表面과 內部的 塑性域을 etching 法에 依해 나타

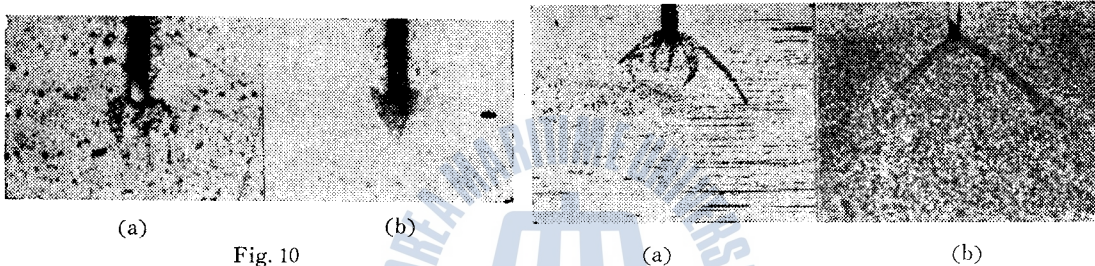


Fig. 10

낸 것이다. 이 段階에 있어서는 內部的 塑性域은 外部的 塑性域보다도 작고, 內部的 塑性 Strain의 形態는 Wilshaw<sup>10)</sup> 등이 觀察한 것과 같은 對數 나선形으로 認定된다. 또한 Fig. 11은 一定한 크기의 局部降伏後, Crack 에서부터 Hinge 形 塑性 Strain이 發生하여 板全體로 傳播하는 段階에서의, 表面 및 內部的 塑性 Strain의 形狀을 窒素含有軟鋼 및 Fe-3%Si 鋼에 對해서 보인 것이다. 이 段階에서는 窒素含有軟鋼의 境遇는 表面에 比해 內部的 塑性 Strain은 가늘고 긴 것이 觀察된다. Fe-3% Si 鋼에 있어서는 Crack 先端的 對數 나선形으로서 認定되는 塑性 Strain은 內部的 것이 表面부의 것보다도 작으나, 그 외의 塑性域은 內部的 것이 表面부의 것보다도 큰 것이 觀察된다.

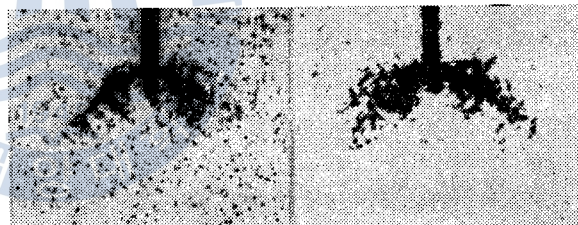


Fig. 11

試驗片의 表面과 內部的 塑性域의 差異는 一定한 荷重下에서는 各各의 應力分布의 差異 및 塑性拘束力에 依해 發生하는 降伏強度의 上昇率에 依存한다고 생각된다. Crack 先端的 表面과 內부에 있어서 塑性 Strain의 傳播舉動과 COD와의 關係의 概略을 Fig. 12(a)에 보이고 있다. 또한 各 段階에 있어서 彈性應力分布과 降伏強度와의 關係의 概略을 Fig. 12(b)에 보인다.

(1)의 段階에서는 內부와 表面部, 어느쪽도 Crack 先端的 最大 彈性應力은 아직 降伏強度에 이르지 않았으므로 塑性 Strain은 어느쪽도 나타나지 않는다.

(2)의 段階에서도 表面의 最大 彈性應力은 降伏強度 以上으로 되므로 塑性 Strain은 나타나지만 內부에서는 그의 最大 彈性 應力이 拘束狀態의 降伏強度  $\sigma_{Y'S}$ 에 到達해 있지 않으므로, 塑性 Strain은 나타나지 않는다.

(3)의 段階에서는 內부와 表面部 兩쪽에서 塑性 Strain은 나타난다. 表面에서는 Fig. 12(b)의 (3)

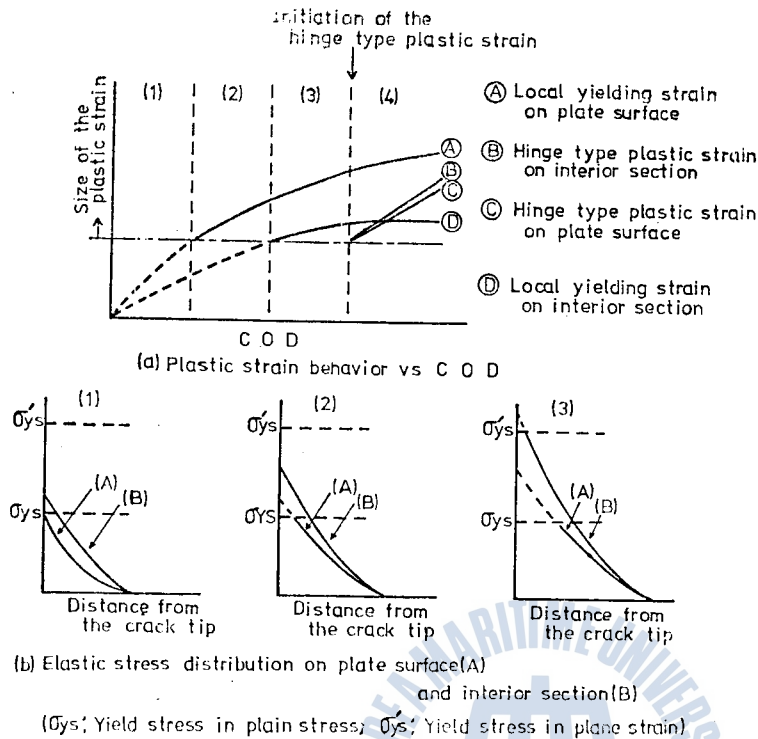


Fig. 12

는 가해진 應力은 局部 降伏 塑性 Strain과 Hinge 形 塑性 Strain의 成長에 吸收된다. 그러나 内部에서는 (3)의 段階에서 成長한 對數 나선形 塑性 Strain의 先端에서는 拘束力에 依한 降伏 強度가 彈性應力分布에 比하여 充分히 높기 때문에, 對數 나선形 塑性 Strain은 그 以上 成長하지 않고, 主로 Crack 先端에서부터 45° 方向으로 進行하는 Hinge 形 塑性 Strain 만이 成長한다. 이 現象은 窒素含有軟鋼의 境遇, Fe-3% Si鋼에 比하여 一層 門隙하므로 内部의 Hinge 形 塑性 Strain이 表面部의 그것 보다도 크게 나타나는 것으로 생각된다.

### 3.3 塑性 Strain 領域 및 두께 方向의 變形量과 COD와의 關係.

Fig. 13에서는 塑性域의 크기와 COD와의 關係를 보이고 있다. 여기서 塑性域의 크기는 Crack 先端에서 부터 가장 긴 塑性域의 크기를 取한 것이다. 또한 COD는 Crack의 가장 큰 곳의 開口量을 2倍로 擴大 撮影하여 그 Film을 60倍의 Comparator上에서 測定한 後 有限要素法으로 計算한 Rotational factor<sup>11)</sup>를 利用하여 Crack 先端의 COD로 換算했다. 이 圖面에 依하면 塑性域의 크기와 COD와의 關係는 Hinge 形 塑性 Strain이 發生하기 前의 段階와 發生한 後의 段階에서 各各 다른 直線性을 갖고 있는 것을 알수 있다. 即, Crack 先端에서 局部 降伏을 일으키는 段階에서는 一定한 COD 値에 對해서 塑性域의 크기는 작은 値를 보이고 있지만 Hinge 形 塑性 Strain의 發生 段階에서는 塑性拘束力은 作用하지 않으므로, 一定한 COD 値에 對한 塑性域은 크게 된다.

Fig. 14에서는 Crack 先端의 두께 方向의 變形量과 COD와의 關係를 보인 것이다. 이에 依하면 두께 方向의 變形量과 COD와의 關係는 彈性限度 以內에서도 直線性을 認定 할 수 없지만, Crack 先端에서 塑性 Strain이 發生한 後에는 全面降伏에 이르기 까지 直線性이 認定된다. 彈性限度 以內에서 直線性이 認定되지 않는 것은 Crack 入口의 開口量을 測定하여 Crack 先端의 COD로 換算 하

에 보이는 것과 같이 그의 彈性應力分布가 平面應力狀態에서의 降伏強度  $\sigma_{ys}$ 를 滿足하는 領域까지 塑性 Strain은 傳播한다. 一方 内部에서는 그의 彈性應力 分布狀態에 比하여 拘束力에 依한 降伏強度  $\sigma_{y's}$ 는 充分히 높기 때문에 表面의 塑性域은 内部의 그것보다도 크게 된다. 이 段階에서, 表面에서는 Hinge 形 局部降伏이 内部에서는 對數 나선形 局部降伏이 일어난다.

(4)의 段階는 一定한 크기의 局部降伏後, 새로이 Hinge 形 塑性 Strain이 内部와 表面에서 同時에 Crack 先端에서 부터 發生한다. 그래서 板의 中央 剛性域의 周圍로 傳播해 간다. 表面에서

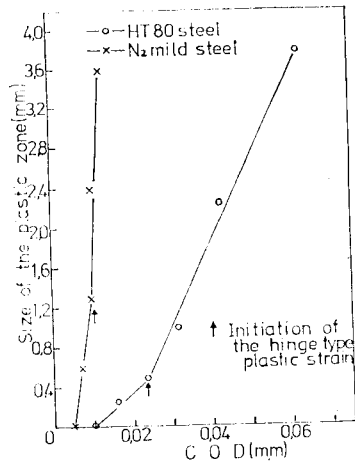


Fig. 13

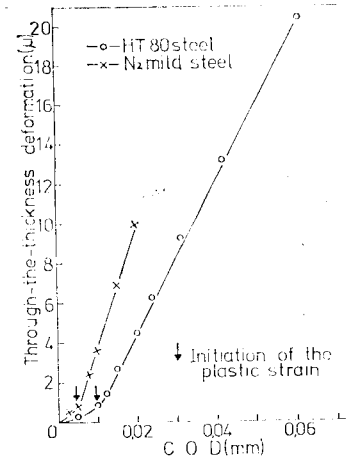


Fig. 14

였기 때문에 開口量이 比較的 작은 範圍에서는 換算 COD가 Crack 先端的 眞實의 變形量에 對해 過大한 値를 보이고 있는 것으로 생각된다.

#### 4. 結 論

彈一塑性 變形 遷移境界가 鮮明한 窒素含有軟鋼과 不鮮明한 HT80鋼에 對해서 3點 靜的 彎힘 試驗을 行하여 光干涉法에 依해 Crack 先端的 Strain 舉動을 連續的으로 觀察했다. 또한 etching法에 依해 그 塑性域이 나타나는 窒素含有軟鋼 및 Fe-3% Si鋼을 利用하여 表面과 内部에서의 塑性 Strain 領域을 比較했다. 또한 이러한 塑性 Strain 舉動 및 Crack 先端的 두께方向의 變形量과 COD와의 相關性에 對해서 考察했다. 主要한 結果를 定理하면 다음과 같다.

(1) Na 光源을 使用한 光干涉法을 利用함으로써 塑性域의 測定 및 負荷時 또는 除荷時, Crack 先端에서 發生하는 두께方向의 變形量을 0.3μm Order로 測定이 可能하다.

(2) 全面降伏에 이르기까지의 塑性 Strain 舉動은 大略 다음과 같다. 即 Crack 先端에서 一定한 크기의 對數 나선形 局部降伏이 일어난 後, Crack 先端에서 부터 새로이 成長한 Hinge形 塑性 Strain이 支點側으로 부터의 壓縮에 依한 塑性 Strain과 板의 最少斷面의 中央部에서 連結하여 全面降伏에 到達한다.

(3) Crack 先端에서 나선形 局部 塑性 Strain이 成長하는 段階에서는 表面部보다 内部의 塑性領域은 작지만, Hinge形 塑性 Strain이 成長하는 段階에서는 表面부와 内部의 塑性域의 크기는 大略같거나, 오히려 内部의 塑性域이 더 크다.

(4) Crack 先端的 두께方向의 Strain과 COD는 比例한다. 또한 COD와 塑性域의 크기와의 關係는 Crack 先端에서 나선形 塑性 Strain이 成長하는 段階에서 各各, 다른 直線性을 갖는다.

끝으로 本 研究를 指導하여 주신 東京工業大學, 田村 博教, 授加 藤昇助授께 깊이 感謝드리며 實驗材料를 提供하여 주시고 여러가지 助言을 주신 橫濱國立大學 安藤 柱 助教授께 感謝드린다.

## 參 考 文 獻

- 1) A. P. Green: Quarterly J. Mech. Appl. Maths., 6, (1953) 223
- 2) B. A. Bilby and K. H. Swinden: Representation of Plasticity at Notches by Linear Dislocation Arrays, Proc. Roy. Soc., Ser. A, 285, (1965) 22
- 3) G. R. Irwin: Dimensional and Geometric Aspects of Fracture, Fracture of Engineering Material, (1964) 211, ASM, Ohio
- 4) I. S. Tuba: A Method of Elastic-Plastic Plane Stress and Strain Analysis, J. Strain Analysis, 1, (1966) 115
- 5) J. R. Rice and G. F. Ronsengren. Plane Strain Deformation near a Crack Tip in a Power-Law Hardening Material, J. Mech. Phys. Solids, 16, (1968) 1
- 6) J. L. Swedlow, M. L. Williams and W. H. Yang: Elasto-Plastic Stresses and Strains in Cracked Plates, Proc. 1st Internatl. Conf. on Fracture, 1, (1965) 259
- 7) 加藤・田村・小林: 光干渉を利用した溶接部の残留應力分布測定 (第1報), 投稿中日本溶接學會誌
- 8) A. P. Green and B. B. Hundy: Initial Plastic Yielding in Notch Bend Tests, J. Mech. Phys. Solids, 4 (1958) 128
- 9) G. T. Hahn and A. R. Rosenfiels: Local Yielding and Extention of a Crack Under Plane Stress, Acta. Metallurgica, 13 293
- 10) T. R. Wilshaw and P. L. Pratt: On the Plastic Deformation of Charpy Specimen Prior to General Yield, J. Mech. Phys, 14, (1966) 7
- 11) 金澤. 町田. 萩原: 工業的 試験として 曲げ COD試験について 日本造船學會誌. 132(1972) 362



圖面題目 및 說明

- Fig. 1. General view of the experimental equipment
  - Fig. 2. Statical bending equipment
  - Fig. 3. Principle for observing optical interference fringes
  - Fig. 4. 3-point bending specimen
  - Fig. 5. Optical interference fringes pattern (a) and through-thickness deformation profile calculated from the fringes (b) (HT 80 steel,  $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 0.95$ ,  $\sigma_n$ : nominal skin stress,  $\sigma_Y$ : yield stress)
  - Fig. 6. Plastic zone pattern revealed by optical interference method (a) and etching technique (b) for nitrogen containing mild steel (above,  $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.45$  and Fe-3% Si steel, below,  $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.32$ )
  - Fig. 7. Through-the-thickness deformation vs. plastic zone(Fe-3% Si steel, unloading,  $\sigma_n$ : nominal skin stress.  $\sigma_Y$ : yield stress)
  - Fig. 8. Plastic strain behaviours observed by optical interference technique for nitrogen containing mild steel (above) and HT 80 steel (below). ( $\sigma_n$ : nominal skin stress).  $\sigma_Y$  yield stress)
  - Fig. 9. Plastic strain propagation pattern
  - Fig. 10. Plastic zone on specimen surface (a) and interior section (b) at local yielding stage(nitrogen containing mild steel,  $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.05$ )
  - Fig. 11. Plastic zone on specimen surface(a) and interior section (b) at hinge type plastic strain stage for nitrogen containing mild steel (above,  $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.35$  and Fe-3% Si steel, below,  $\frac{\sigma_n}{\sigma_Y} = 1.32$ )
  - Fig. 12. Schematic picture of the plastic strain behaviour on specimen surface and interior section
  - Fig. 13. Size of the plastic zone vs. COD (under load)
  - Fig. 14. Through-the-thickness deformation vs. COD (under load)
- Table 1. Test steels

Table 1 Test steels

|                                       | Chemical composition (%) |     |     |      |      |                             | Y. S.<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | T. S.<br>(kg/m <sup>2</sup> ) | Elong.<br>9(%) |
|---------------------------------------|--------------------------|-----|-----|------|------|-----------------------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|                                       | C                        | Si  | Mn  | P    | S    | Other                       |                               |                               |                |
| N <sup>2</sup> containing mild steel* | .08                      | —   | .32 | .010 | .015 | .019 N <sub>2</sub>         | 25                            | 36                            | 40             |
| HT80                                  | .15                      | .25 | .99 | .013 | .006 | .26Cu, .51Cr<br>.45Mo, .04V | 80                            | 85                            | 32             |

\*900°C×1 hr. A. C. & 650°C×1 hr. A. C.

