

Fillet Welding Joint 의 破壞機構와 強度에 관한 研究

嚴 東 錫*

Study on Deformation and Strength of Fillet Welds

by

Dong-suk Um*

Abstract

The distribution of stress and strain in elastic and plastic stages is investigated by the experiments of two dimensional photoelasticity, photoelastic coating and Moiré fringe method.

Center block type and cover plate type of fillet welds are used as specimens in the test.

The results are as follows.

- 1) Center block type gets less uniform stress distribution than cover plate type. And its stress concentration factor, especially at root, is larger than that at toe.
It is the same with stress slope.
- 2) When main plate and cover plate closely contact and it causes friction, stress concentration decreases more than that in case of slit. That is because stress can be transmitted on the contact surface.
- 3) When slit is made, the outside of fillet gets more stress than the inside of it.
- 4) While the plastic strain distribution of center block type reaches the maximum at root and differs very slightly from that under lower loading, the plastic strain distribution of cover plate type is inclined to get the maximum at the outside of fillet rather than at root.
- 5) When the plastic strain value of cover plate type is compared with that of center block type at toe and root, the relations between the former and the latter shows root < toe and root > toe.
- 6) Because stress distribution becomes changed according to loading, fracture angle cannot be estimated by the peaks of elastic stress distribution.
- 7) The strain distribution just before fracture can be found by Moire fringe method.

1. 緒 言

fillet welding joint 에 對한 應力分布 塑性歪(plastic strain) 舉動에 關係서는 理論的, 實驗的으로 많이 研究되었으나 [1], [2] 理論的으로는 fillet 斷面內의 應力分布를 適當히 假定한 平面應力問題로서 取扱되었으며 實驗的으로는 彈性的應力分布도 root 및 toe 부에 對해서만 大體의인 傾向을 알고있을 뿐이며 特히 塑性歪舉動

接受日字 1970. 11. 2.

* 正會員, 釜山大學校 工科學

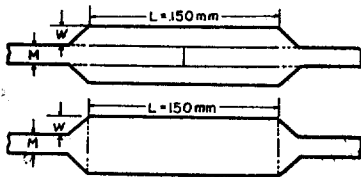
에 대하여는 研究된 것이 稀少하다.

또 從來의 熔接接手設計方法에 있어서 接手的 許容應力은 破壞強度와 安全係數로서 定해지고 있으며 特히 接手形式의 特性을 充分히 考慮되었다고 할 수 없다. 著者는 前回 [3],[4] 研究에 뒤이어 fillet welding joint의 形式에 따른 彈性乃至 塑性 strain 分布의 舉動 및 特性을 比較함과 同時 破壞機構에 對하여 研究코져 試圖하였다. 實驗의인 方法으로서는 光彈塑性法 및 最近 Moiré 干涉 fringe 에 依한 相對變位를 測定하므로하여 破斷直前에 있어 塑性 strain 分布를 알 수 있었으며 前面 fillet welding joint 中 特히 cover plate type 와 center block type 인 T-type 의 特性을 彈性에서 塑性域에 걸쳐 stress 및 strain 의 舉動에 對하여 比較研究하였다.

2. 實驗方法 및 試驗片

2-1. 光彈性實驗

光彈性實驗에는 6 mm 인 epoxy 樹脂板(日本理研製品)을 使用하여 Fig. 1 과 같은 模型을 cover plate type 과 center block type 인 두 種類의 試驗片을 製作하였다. 不熔着部의 面壓을 考慮에 넣기 위하여 熔着部에는 熱硬化性 epoxy 樹脂의 prepolymer 를 浸透시켜 130°C에서 約 20時間 유지 시키므로하여 接着시켰으며 不熔着部에 浸透을 막기 위하여 미리 이 部分에 離型用 silicon wax 를 칠하였다. 負荷時 試驗片에 荷重이 偏心 되지 않게 pin 을 通하여 平行部의 fringe 를 보아가며 調整하였으며 試驗片 內部의 各點에 있어 主應力의 合은 各點에 있어서의 두께의 變化를 測定하므로하여 主應力의 合을[3] 求하여 等色線으로부터 求한 主應力差로부터 主應力의 各값(σ_1, σ_2)을 分離하여 求할수 있었다.



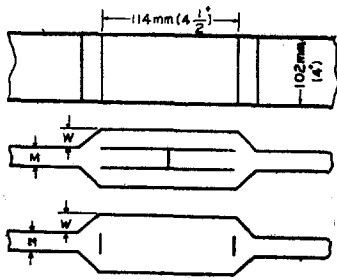
Type of joint	Number of specimen	Thickness of cover plate W mm	Thickness of main plate M mm	2W/M
Cover plate	C-1*	10	16	1.25
	C-2*	26	26	2
T-type	T	10	16	1.25

* With slit on same dimension of specimens

Fig. 1. Dimension of specimens for two dimensional photoelasticity.

2-2. 光塑性法 및 Moiré fringe method

板厚 8 mm, 13 mm 인 SM41 材를 鐵粉酸化鐵系熔接棒을 使用하여 手熔接하여 Fig. 2 와 같은 cover plate type 와 center block type 인 두 種類의 實物試驗片을 製作하였다. 餘盛(reinforcement) 때문에 fillet 부에 一定角을 얻을수 없어 角이 135° 로되게 機械加工하였다. 이 熔接接手的 側面에 두께 3mm 인 常溫硬化性 epoxy 樹脂板(重量比; epoxy prepolymer 100, diethylene triamin 8)을 cyanoacrylate 系 接着劑로서 接着하여 反射型光彈塑性裝置에 依하여 負荷時의 fillet 部에 있어서 等色線을 관찰해석 하였다. epoxy 被膜은 main plate 와 cover plate 사이의 不熔着部에 相當하는 部分을 실패므로 미리 끊었다. 다음으로 Moiré fringe method 는 上記試驗片의 反對側에 直交 grid 150 lines/inch 를 transparent film(Kodak 製品) 燒付시켜, 燒付된 film 을 cyanoacrylate 系 接着劑로서 帖付하여 負荷時의 直交 grid 를 接寫하여 master screen 과 포갠으로써 얻 어지는 所謂 Moiré fringe 로부터 strain 을 解析하였다. 解析法은 K. Tanaka, M. Nakashima[5]가 提案한 rotational mismatching 法을 使用하여 strain 크기에 따라 適當한 回轉角을 選擇하므로하여 精度 높은 解析을 할수 있었다. 또 gage length 3 mm 인 塑性用 polyester strain gage 및 dial gage 에 依하여 toe 및 root



Type of joint	Thickness of cover plate W mm	Thickness of main plate M mm	2W/M
C-type	13	8	3.25
T-type	10.5	13	1.615

Fig. 2. Dimension of welded joints

Table 1. Chemical composition and mechanical properties of the test material and electrode

Material	Chemical Composition					Mechanical Properties		
	C	Si	Mn	P	S	Yield Point kg/mm ²	Tensile Strength kg/mm ²	Elongation %
Mild Steel	0.17	0.30	0.87	0.017	0.020	26	44	29
Electrode	0.16	0.18	0.40	0.020	0.016	41	46	30

부의 strain 을 測定하여 上記實驗을 確認하였다. 이때 引張試驗機는 Armsler 200 ton 萬能試驗機에 依하였다.

3. 實驗結果 및 考察

3-1. 光彈性實驗

Fig. 3, 4, 5, 6 은 cover plate type 인 C-1 및 C-1-S 模型의 ①②③ station 에 있어 $\sigma_{nom} = 0.4748 \text{ kg/mm}^2$ ($P = 46.96 \text{ kg}$) 인 때의 $\sigma_1, \sigma_2, (\sigma_1 - \sigma_2)$ 의 應力分布圖이다. 먼저 Fig. 1 을 주목하면 σ_1 의 分布가 main plate 中央에 있어서는 C-1 편이 C-1-S 보다 應力値가 크고 toe 부에 갈수록 逆으로되어 C-1 보다 C-1-S 의 편이 크며 應力勾配가 slit 가 있는 편이 큼을 알 수 있다. 이는 slit 가 없을 경우 마찰력에 의한 抵抗이 없어 bending 이 이러한을 말해주고 있다. 이는 또 Fig. 4 에서 현저하게 잘 表現되고 있으며 또 σ_2 가 負의 값을 가짐을 알 수 있다. Fig. 5 에서 σ_2 의 集中率이 모두 負의 값을 가지며 slit 가 있는 C-1-S 편이 root 部に 있어 크며 σ_1 보다 σ_2 의 값이 큼을 알 수 있다. σ_1 은 slit 有無에 따라 값의 差가 近소하나 σ_2 값의 差는 크다. Fig. 6 은 fillet 部に 있어 root 에서 45° 인 station 에 있어서의 分布圖이며 σ_1 의 分布 傾向이 현저하게 달라져 slit 가 있을 경우는 fillet 外側部가 훨씬 應力値가 큼을 알 수 있다.

Fig. 7, 8, 9, 10 은 C-2 및 C-2-S 模型의 ①②③ station 에 있어 $\sigma_{nom} = 0.4787 \text{ kg/mm}^2$ 인 때의 應力分布圖이다. Fig. 7 의 ①station 인 경우는 C-1, C-1-S 의 경우와 傾向이 비등하나 Fig. 8 에 있어 應力勾配가 C-1, C-1-S 보다 크다 이는 2W/M 가 크기 때문 즉 剛性이 크기 때문이라 生覺된다. 이 현상은 Fig. 7 의 ② station 의 σ_1 分布에서도 認볼수 있다.

다음으로 Fig. 11, 12, 13 은 T-type 인 T-1 模型의 ①②③ station 에 있어 $\sigma_{nom} = 0.256 \text{ kg/mm}^2$ 인 때의 應力分布圖이다. Fig. 12 의 ② station 에 있어 cover plate type 에서는 σ_2 의 값이 負의 값이었으나 T-type 에서는 正의 값을 가짐을 알 수 있다. 이는 center block 로 되어 bending 이 전혀 作用치 않기 때문이며 $\sigma_{nom} = 0.256 \text{ kg/mm}^2$ 인 때 fillet 부의 應力分布狀態가 cover plate 인 경우 fillet 外部의 應力値와 root 부의 應力値의 差가 近소하였으나 T-type 인 경우는 應力値의 差가 大端히 甚하게 되어 root 부의 應力値가 大端히 크다.

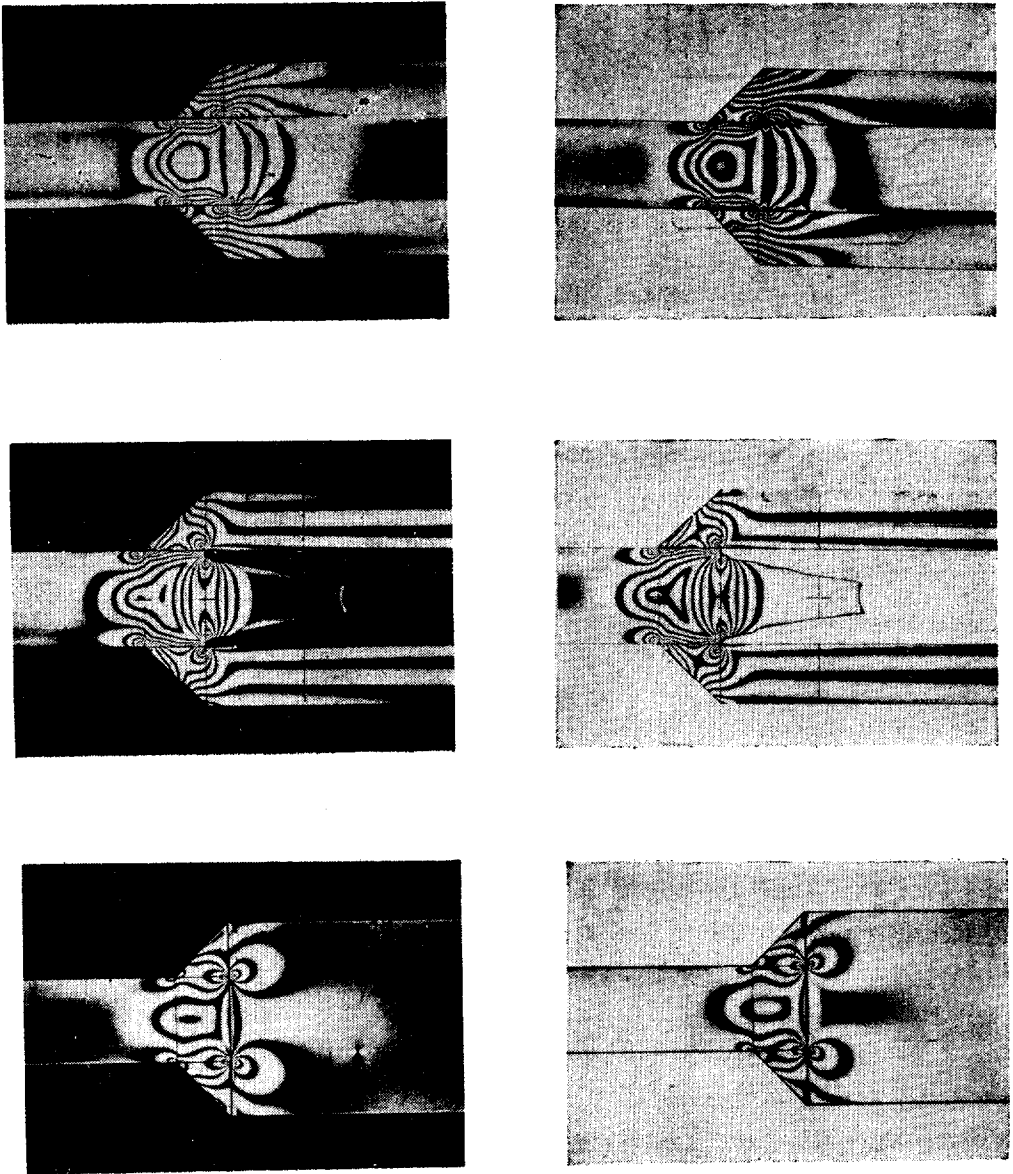


Photo 1. Isochromatic Lines by Photoelasticity for Specimen C-1, C-1-S, T-1.

Fig. 14, 15 은 ②③ station 에 있어 主應力差($\sigma_1 - \sigma_2$) 曲線을 比較하였다. $2W/M$ 의 比가 큰 C-2, C-2-S의 편이 C-1, C-1-S의 편보다 slit 有無에 따라 ② station 에 있어 應力差가 적고 이는 ③ station 에 있어서도 같은 傾向을 보이나 특히 C-2-S인 경우 自由境界面과 root 間의 應力差는 근소함을 알 수 있다.

上述한 主應力의 흐름을 考察키 위하여 Fig. 16, 17, 18은 cover plate type 인 C-2, C-2-S와 T-type 인 T-1 specimen 에 對한 等傾線 및 主應力線의 方向을 圖示하였다. Fig. 16, 17은 同一한 model로서 slit가 있는 변이 없는편에 比하여 root 부에 있어 主應力線이 密集되어 集中率이 높음을 잘 볼 수 있고 특히 T-type

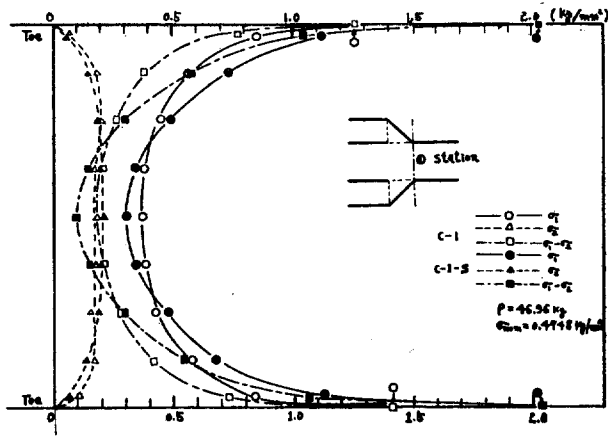


Fig. 3. C-1, C-1-S Distribution of Stress at ① Station

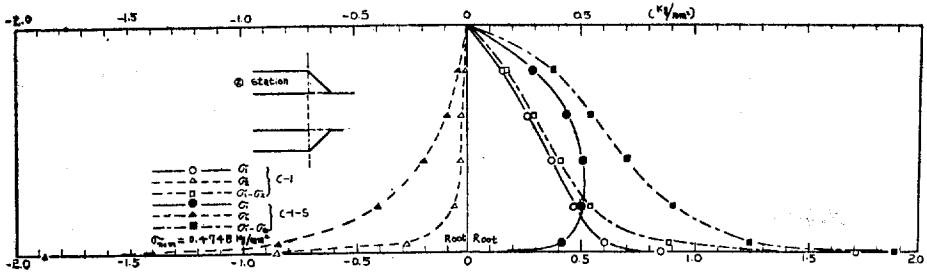


Fig. 4. C-1, C-1-S Distribution of Stress at ② Station

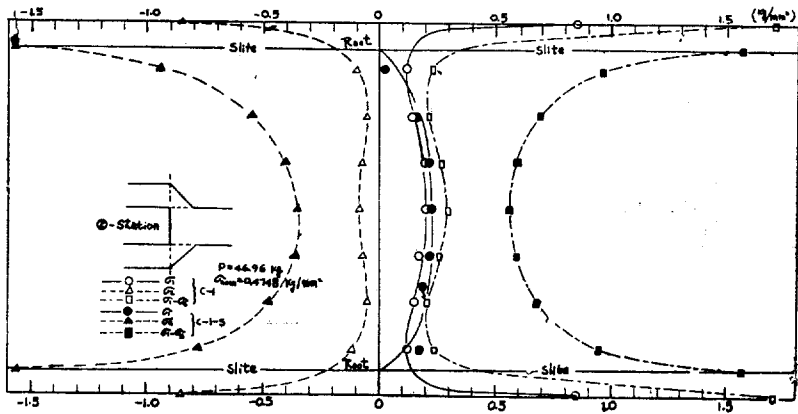


Fig. 5. C-1, C-1-S Distribution of Stress at ② Station

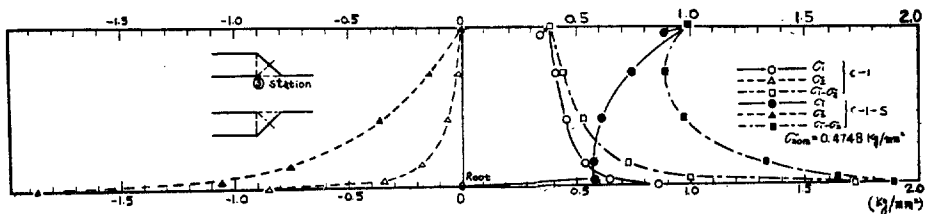


Fig. 6. C-1, C-1-S Distribution of Stress at ③ Station

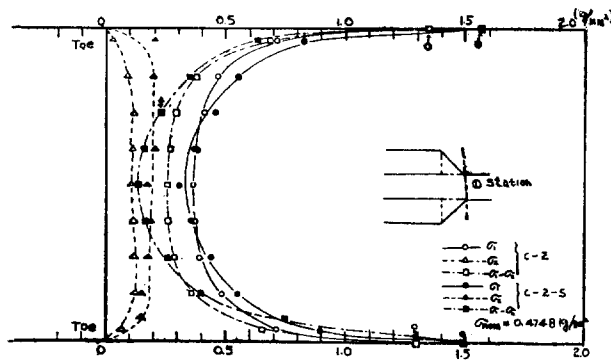


Fig. 7. C-2, C-2-S Distribution of Stress at ① Station

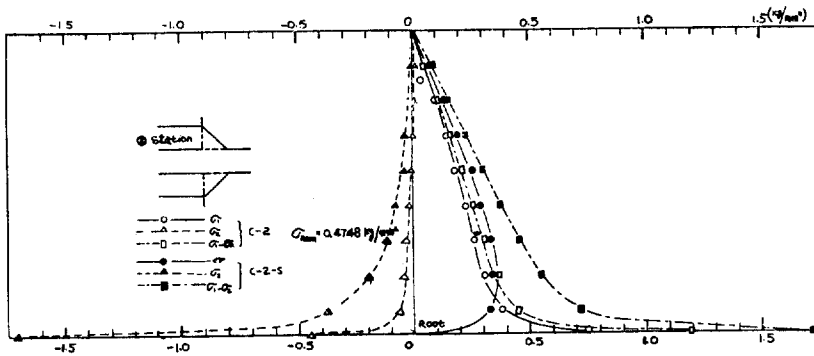


Fig. 8. C-2, C-2-S Distribution of Stress at ② Station

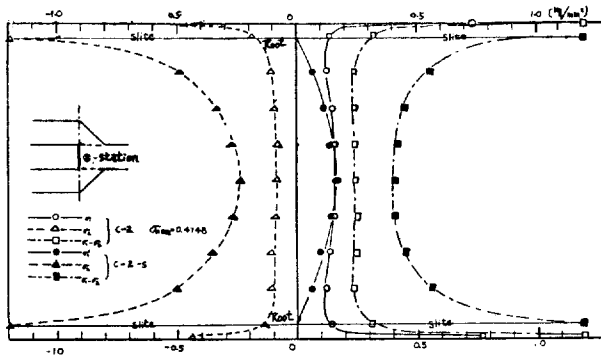


Fig. 9. C-2, C-2-S Distribution of Stress at ② Station

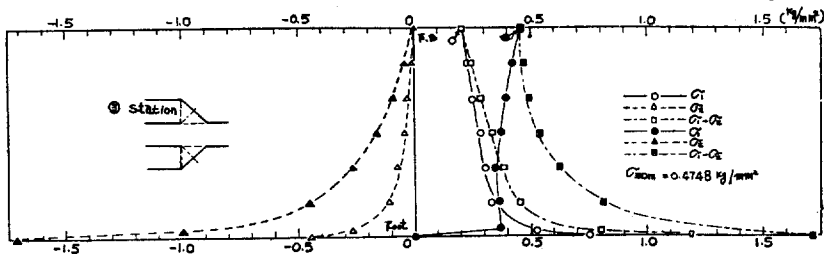


Fig. 10. C-2, C-2-S Distribution of Stress at ③ Station

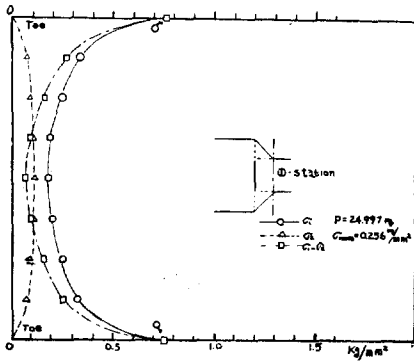


Fig. 11. T-1, Distribution of Stress at ① Station

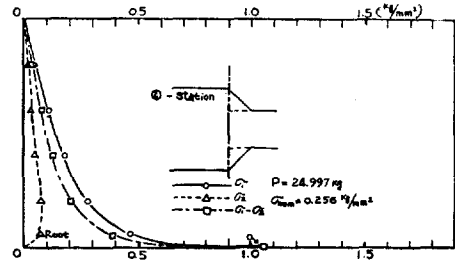


Fig. 12. T-1, Distribution of Stress at ② Station

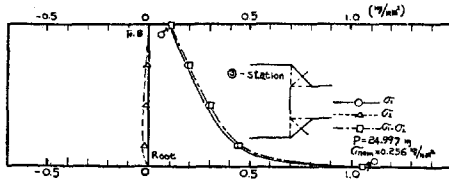


Fig. 13. T-1, Distribution of Stress at ③ Station

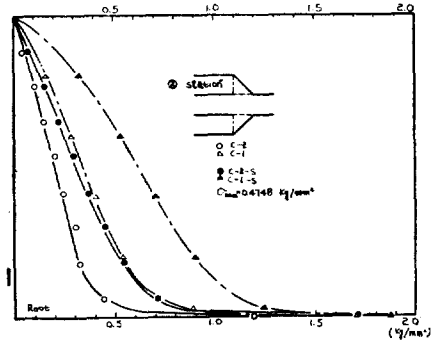


Fig. 14. Distribution of $\sigma_1 - \sigma_2$ at ② Station

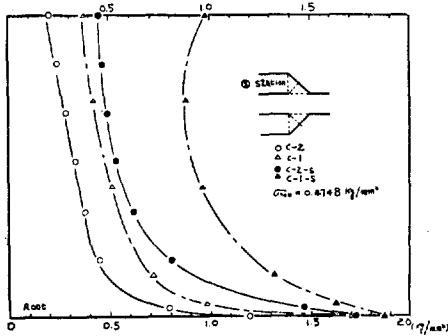


Fig. 15. Distribution of $\sigma_1 - \sigma_2$ ② Station

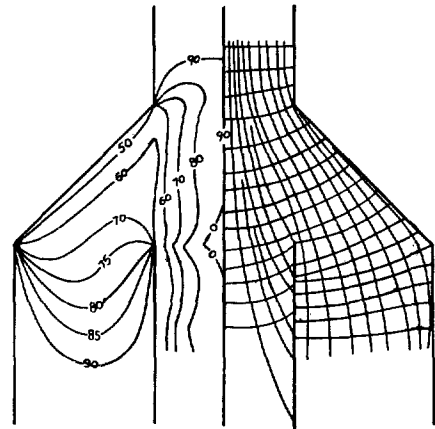


Fig. 16. Isopachics and Lines of Principal Stress for C

인 경우는 C-type 인 경우와는 對照的으로 應力分布狀이 완전히 틀림을 알 수 있다.

이는 Stress concentration in plate with ellipse hole[6]과 같은 類似性에서 오는 것이라 生覺된다. 이는 理論上 σ_{max} 의 값이 큰값으로 된다는 事實과 잘 一致되고 있다.

3-2. 光塑性 및 Moiré Fringe Method

Fig. 19, 20은 光塑性法에 依한 C-type 및 T-type의 實物試驗片에 對한 主歪差($\epsilon_1 - \epsilon_2$)의 分布圖이다. 圖示한 바와 같이 fillet 부에 있어 主歪差의 分布는 C-type 인 경우 45° 即 center line 부근에서 peak를 이루나

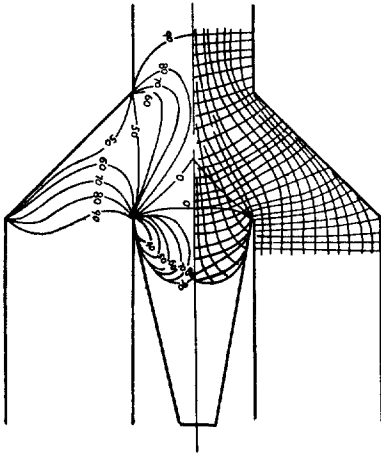


Fig. 17. Isopachics and Lines of Principal Stress for C-2-S

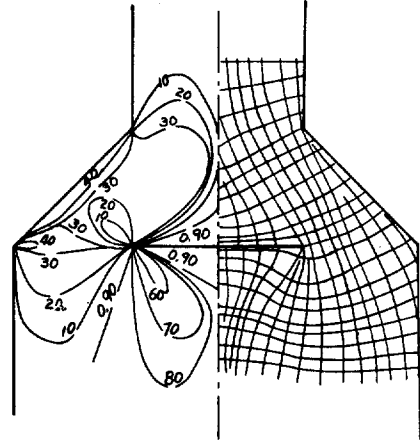


Fig. 18. Isopachics and Lines of Principal Stress for T Specimen

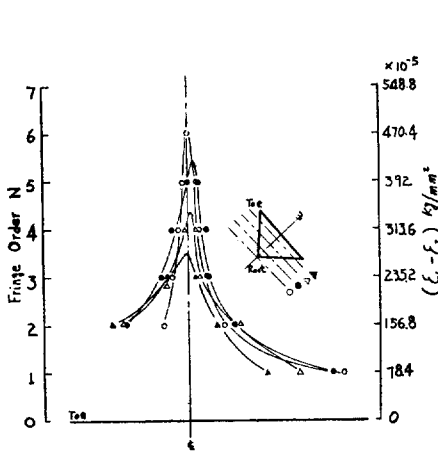


Fig. 19. Distribution of $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ at Fillet for C-type (Load 23 ton)

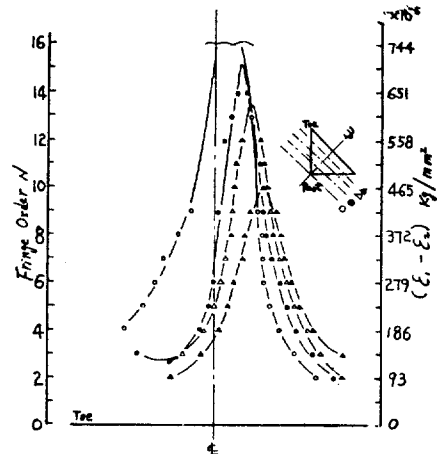


Fig. 20. Distribution of $(\epsilon_1 - \epsilon_2)$ at Fillet for T-type (Load 34 ton)

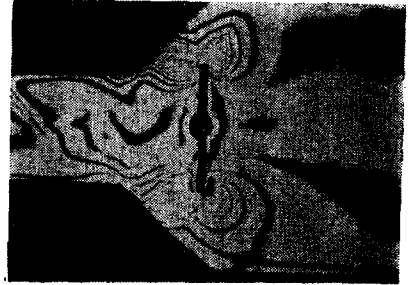
T-type 인 경우의 peak 는 center line 으로 부터 fillet 外側 即 自由境界面으로 分布되어 root 에 근접할때 center line 으로 向하게 됨을 알 수 있다.

Fig. 21, 22 는 Moiré fringe method 에 의한 plastic strain 分布圖로서 光塑性法에 依하여 測定할 수 없는 높은 荷重 即 破斷直前에 있어서의 strain 을 測定할 수 있었다.

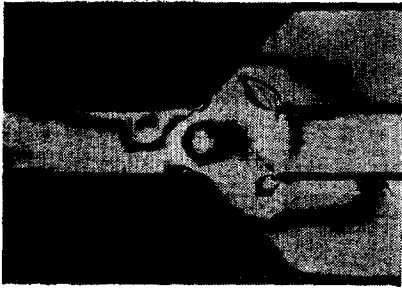
T-type 의 塑性歪($\epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}, \gamma_{max}$) 分布는 root 에서 最大의 값을 가져 低荷重일때의 경우와 큰 差가 없으나 C-type 인 경우의 塑性歪의 最大값은 root 부 보다 fillet 부의 自由境界面쪽으로 치우쳐 있으며 이는 Fig. 23, 24 의 wire strain gage 로서 root 및 toe 에 있어 塑性歪를 測定한 다음 傾向과 一致되고 있다. 即 toe 및 root 부에 있어 塑性歪의 크기를 比較하면 C-type 인 경우는 $root < toe$ 이고 T-type 인 경우는 $root > toe$ 인 관계 를 가지고 있다. 그리고 塑性歪分布는 荷重의 增加와 더불어 分布傾向이 一定치 않고 變化하며 彈性應力の peak 로서 破斷角度를 推定할 수 없음을 알 수 있다.



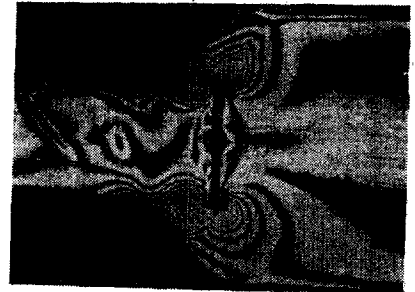
$P = 16$ Ton



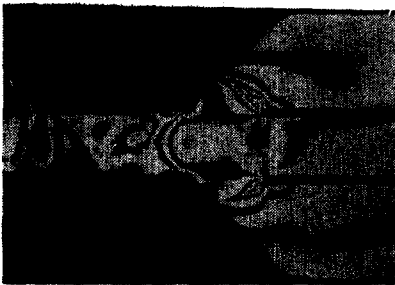
$P = 34$ Ton



$P = 21.5$ Ton



$P = 35$ Ton



$P = 23$ Ton



$P = 36$ Ton

Photo 2. Isochromatic Lines by Photoelastic Coating Method for Specimen C. T-type

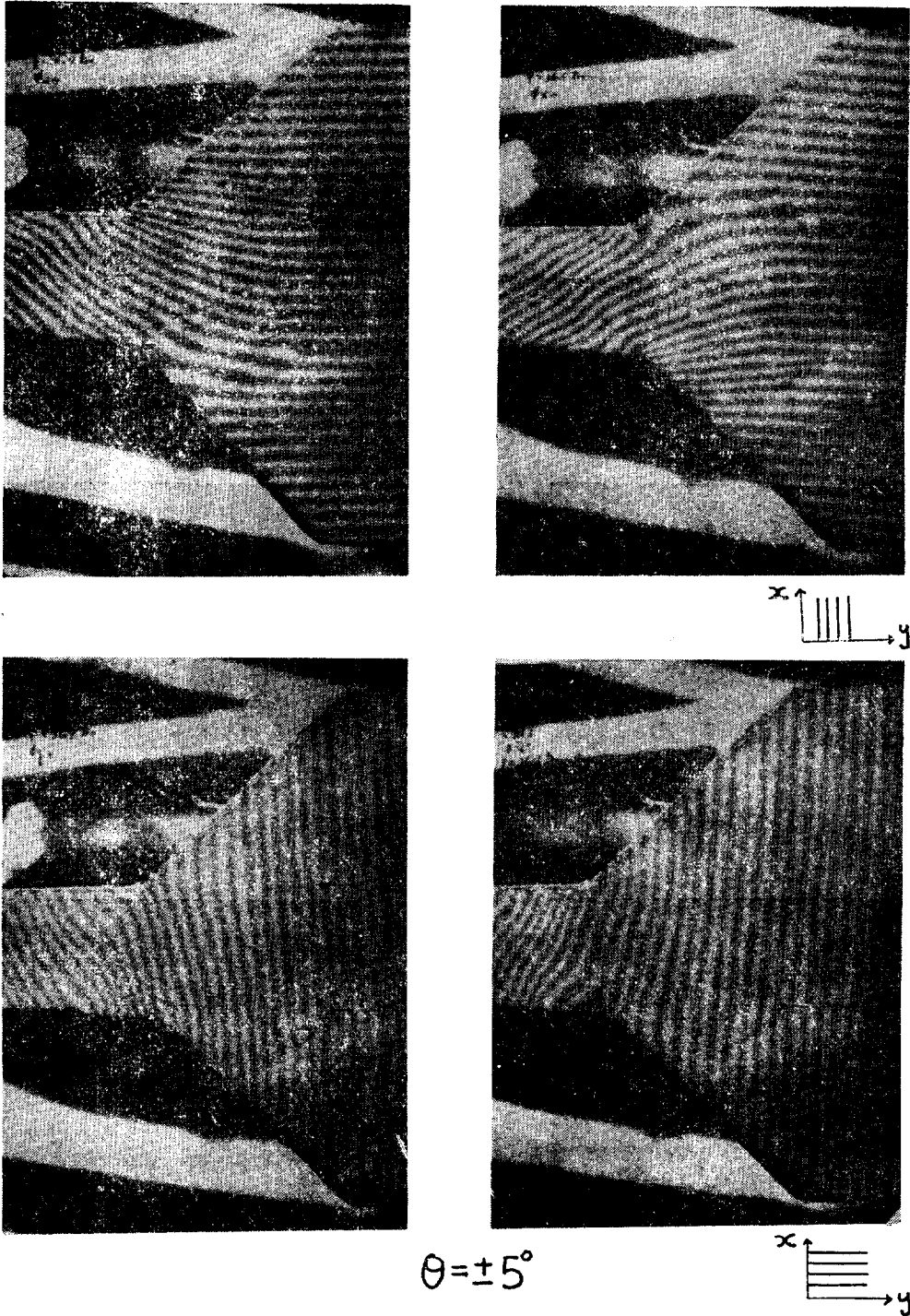
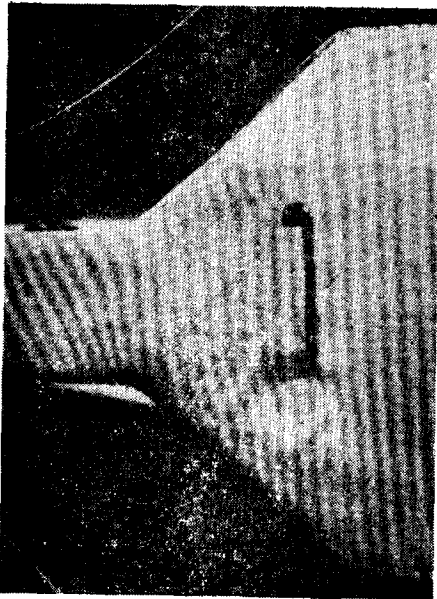
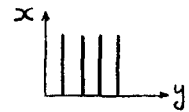


Photo 3. Moiré Fringe—Horizontal and Vertical Displacement from Rotational Mismatching for Specimen C-type at Loading



$\theta = \pm 5^\circ$

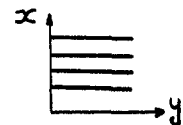


Photo 4. Moiré Fringe—Horizontal and Vertical Displacement from Rotational Mismatching for Specimen T type at Loading.

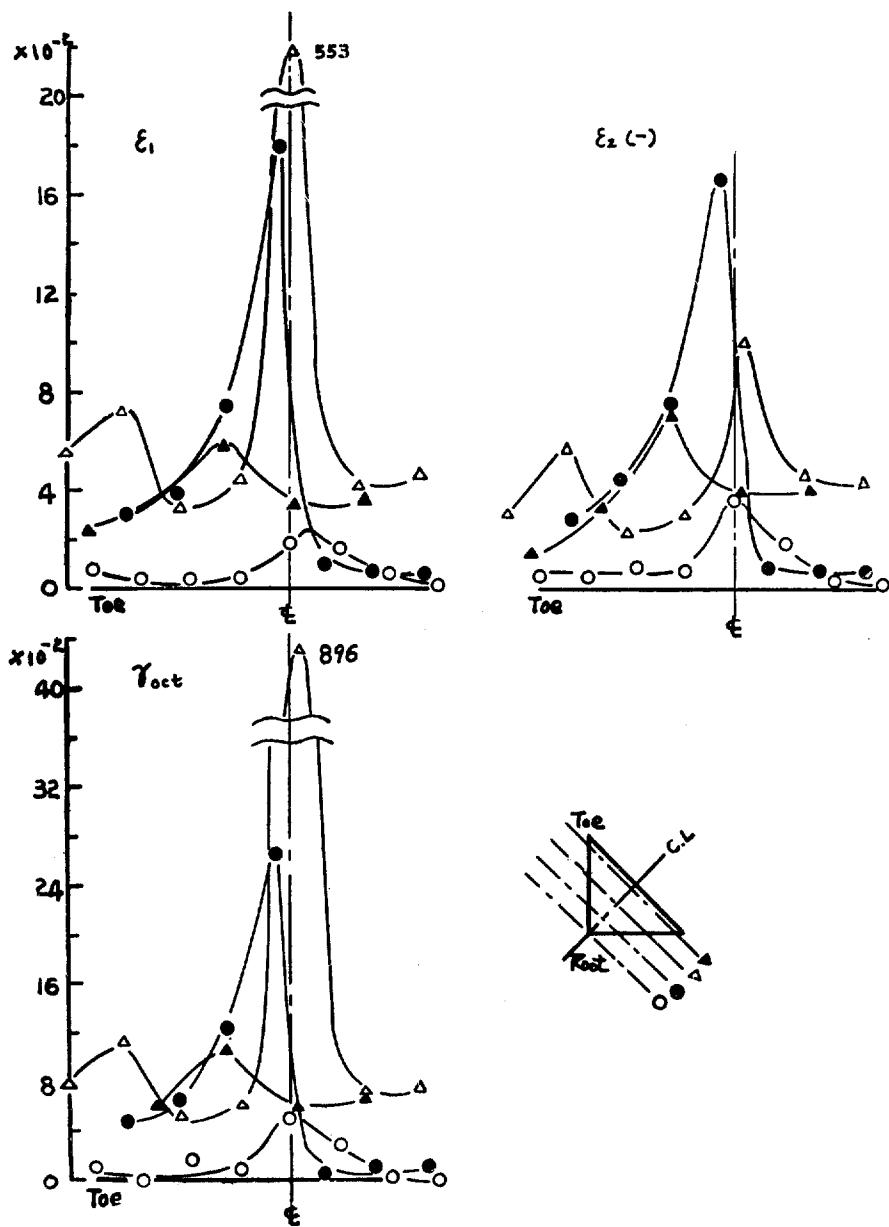


Fig. 21. Distribution of Plastic Strain for Specimen C-type (Load 36.7 ton)

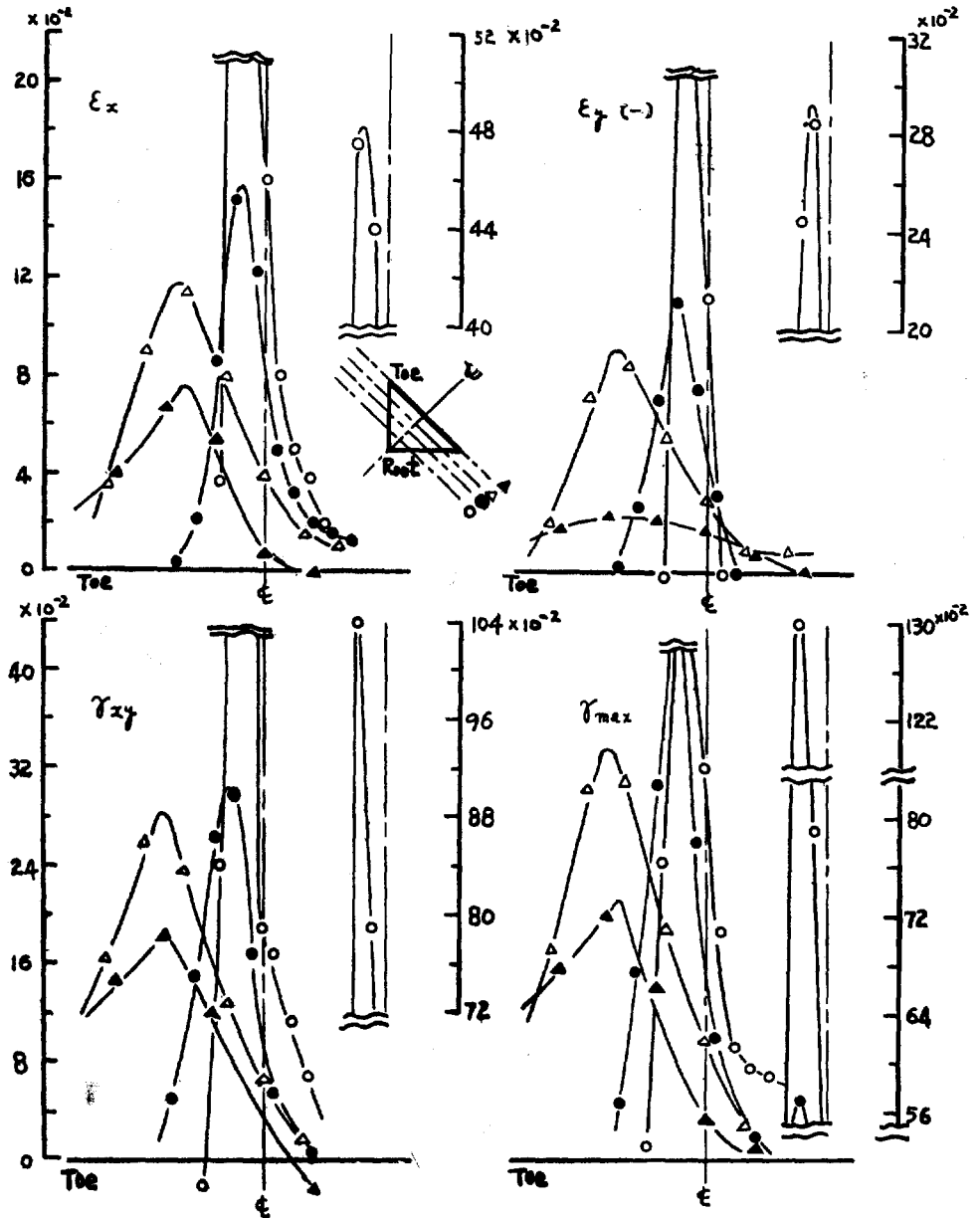


Fig. 22. Distribution of Plastic Strain for Specimen T-type (Load 53.2 ton)

4. 結 論

以上을 要約하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

- 1) center block type 와 cover plate type 를 比較할때 前者의 핀의 應力分布가 나쁘고 특히 root 에 있어 應力集中率이 toe 보다 크며 應力勾配도 크다.

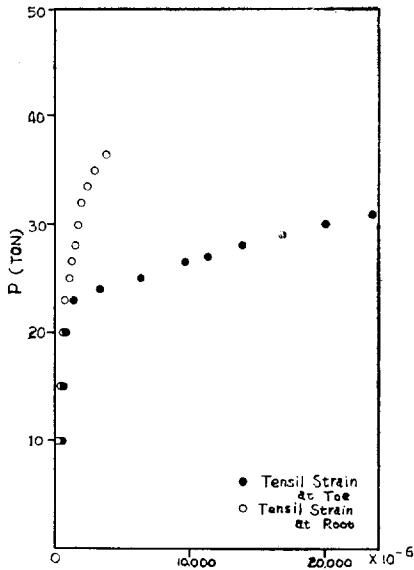


Fig. 23. Relations between Load and Strain at Root and Toe for Specimen C-type

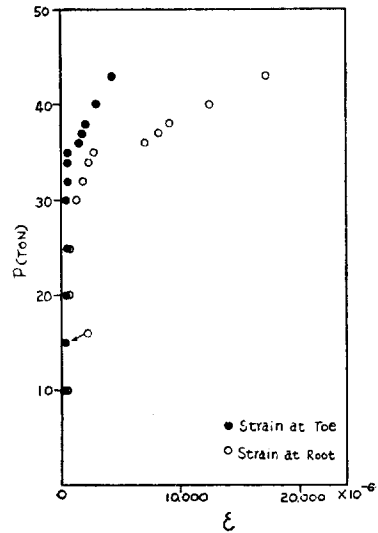


Fig. 24. Relations between Load and Strain at Root and Toe for Specimen T-type

- 2) main plate 와 cover plate 가 密着하여 摩擦이 存在할 경우는 slit 가 있을 경우에 比하여 接觸面에서 應力傳達이 可能하므로 應力集中이 減少한다.
- 3) slit 가 있을 경우는 fillet 의 內側部 보다 外側部(自由境界面)의 應力値가 크다.
- 4) T-type 의 塑性歪分布는 root 에서 最大의 값을 가져 低荷重일때의 경우와 큰差가 없으나 C-type 인 경우의 塑性歪의 最大값을 root 보다 fillet 부의 自由境界面편으로 치우친다.
- 5) toe 및 root 부에 있어 塑性歪 크기를 比較하면 C-type 인 경우 root < toe 이고 T-type 인 경우 root > toe 인 關係를 가지고 있다.
- 6) 應力分布는 荷重에 따라 流動的이라 彈性應力の peak 로서 破斷角度를 推定할 수 없다.
- 7) Moiré fringe method 에 依하여 破斷直前에 있어서의 strain 分布를 알 수 있었다.

參 考 文 獻

- [1] A.G. Solakian: "Stress in Transverse Fillet welds by photoelastic Methods" *J. Amer. Weld. Soc.* Feb. 1934.
- [2] Midori Otani, Yukio Ueda, Yoshihiko Koya and Toshiharu Hirata: "Strength of Welded Connections" *J. Japan Weld. Soc.* Vol. 38, 1969.
- [3] 嚴東錫, 永井欣一, 橋本 剛 "前面すみ肉溶接の彈性應力集中について" 日本西部造船會報 35號 Feb. 1968.
- [4] 嚴東錫 "前面 Fillet welding joint 의 plastic strain 分布에 對하여" 釜山大學校 論文集 第10輯 1969年 12月
- [5] K. Tanaka, M. Nakashima "Method of Experimental Strain Analysis by Photograting" 日本材料試驗 第10卷 89號 1960年 9月
- [6] Timoshenko; "Strength of Materials" Vol. 2