

<論 文>

알루미늄 합금 異材熔接部の 變形率 測定

邕章祐\* · 全齊春\*\* · 吳相鎮\*\*\*

(1986年 2月 15日 接受)

The Strain Measurement on the Aluminum Alloy Welded Transition Joint

Jang Woo Ong, Jae Choon Chun and Sang Jin Oh

Key Words; Strain Distribution(변형율분포), Transition Joint(천이이음), Moiré(모아레), Photoelastic Coating(광탄성 피막), Weld(용접), Aluminum Alloy(알루미늄 합금)

Abstract

The strain distribution on a welded aluminum alloy transition joint produced by a static tensile load has been measured using a moiré method combined with photoelastic coating method.

The test specimens were made of aluminum alloy 6061-T6 and 2014-T6 butt welded with ER-4043 filler metal, and were post welded heat treated(solid solution heat treatment 502°C 70min.) and precipitated(artificial aging 171°C 600min.) to cause an abrupt change of mechanical properties between the base metals and weld metal.

The photoelastic epoxy rubber was cemented on the specimen grating which had been reproduced on the specimen surface by using an electropolishing.

The measurements were compared with strains computed by Finite Element Analysis. The following results were obtained.

- (1) The maximum strain were distributed along the center line in the transverse direction of the weld metal.
- (2) The strain gradient along the fusion line increased approaching the V-groove tip and the maximum value was observed at a quarter of width from the V-groove tip.
- (3) The moire method combined with photoelastic coating was proved very useful for real time strain measurement in the welded aluminum alloy transition joint.

1. 序 論

알루미늄 합금은 무게에 대한 比強度가 鋼에 비해 높

기 때문에 航空, 船舶用 材料로 많이 使用되고 있다. 알루미늄 熔接은 構造物의 製作時에 經濟的인 이음方法으로 燃料탱크, 파이프, 실린더 또는 원추형 構造物의 外皮 등의 이음부위에서 密閉가 필요할 때 더욱 有用하게 使用된다. 알루미늄 합금 異材熔接의 長點은 強度가 要求되는 부위에는 高強度 알루미늄 합금을, 強度보다는 耐蝕性이 더 重要時되는 부위에는 耐蝕性이 강한

\* 正會員, 忠南大學校 工科大學 機械設計學科

\*\* 正會員, 大田機械廠

\*\*\* 正會員, 中京工業專門大學 機械科

材料를 使用할 수 있도록 熔接하므로써 用途에 適合한 材料를 選定하여 設計를 可能케 할 수 있다.

그러나 알루미늄 合金 異材熔接은 이런 長點에도 불구하고 熔接性이 나쁘며 熔接후에는 熱膨脹 係數의 差異로 因한 疲勞破壞, 壓力腐蝕 等の 問題가 있어 이에 對한 研究가 進行되고 있다.

熔接이음부에 對한 이음強度的 研究<sup>(1-5)</sup>로는 K. Nishio<sup>(6)</sup>가 軟質의 母材에 硬質金屬을 熔接角度를 變化시켜서 熔接한 後 引張에 依한 變형을 分布를 測定하였고, J.M. Webster<sup>(7)</sup>는 두꺼운 파이프의 遷移이음부를 모아레法으로 測定해서 有効性を 提示했다. 또한 Y. Ueda<sup>(8)</sup> 등은 熔接 綫을 한 點에서 야기되는 應力과 Strain이 臨界值에 到達할 때 開始한다는 觀點에서 보고 熔接過程에서 發生된 應力과 變形度를 有限要素法으로 解析하였다. 現在 熔接이음부에서의 應力變形度 分布를 測定하는 方法으로 많이 使用되고 있는 變형을 계이치는 길이 가 길어 急히 變化하는 變형을 勾配에서는 適當하지 않고 全視野의 測定이 곤란한 缺點을 가지고 있다.

따라서 本 研究에서는 알루미늄 合金인 알루미늄 2014 와 6061 의 異材를 V형 맞대기 이음을 한 後 靜的 引張荷重을 加하여 모아레法에 光彈性 皮腹法을 組合한 方法에 의해 變형을 實時間(real time)에서 測定하고 有限要素法으로 解析한 結果와 比較檢討하였다.

2. 材料 및 實驗片

2.1 材料 및 試驗片

알루미늄 合金 6061 과 2014 材料를 Fig. 1 과 같이 加工하여 60° V형 맞대기 TIG 熔接을 하였다. 使用된 熔接棒은 AWS 推薦品인 ER-4043 을 選擇하였다. 熔接缺陷의 檢査는 X-線 및 浸透試驗(dye test)하였고, Fig. 1 과 같이 試片을 切斷 加工하였다. 熔接部에 發生되는 熱影響部의 除去와 熔接時에 發生되는 殘留應

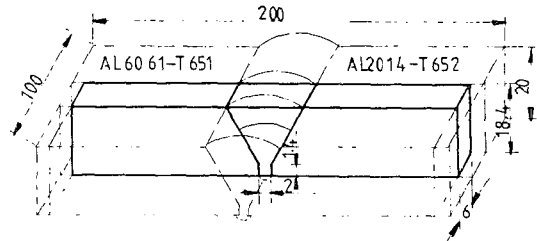


Fig. 1 Position and Configuration of Specimen butt welded joint

力의 影響을 除去하기 위해 溶體化 處理를 行한 後 時効處理를 했다. 알루미늄 合金 2014 가 6061 보다 處理 溫度가 낮기 때문에 알루미늄 合金 2014 를 基準하여 502°C에서 70 分間 維持시켰다. 時効硬化 處理는 171°C에서 9 時間을 實施하였다.

使用된 材料의 熔接前 化學的 成分은 Table 1 과 같고 機械的 性質은 Table 2 와 같다.

Table 1 Chemical compositions of the materials (wt%)

Element	Si	Fe	C	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Al
A Al 2014	0.90	0.36	3.96	0.86	0.56	0.02	0.07	0.05	Bal.
B Al 6061	0.57	0.41	0.81	0.08	0.93	0.17	0.08	0.03	Bal.
C ER 4043	0.50	0.08	0.30	0.05	0.05	—	0.10	0.20	Bal.

Table 2 Mechanical properties of materials

Properties	Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Elongation (%)	Poisson's ratio (ν)	Young's modulus E (MPa)
A Al 2014	474.6	397.2	7.1	0.33	72392
B Al 6061	289.3	220.6	17.0	0.33	68254
C ER 4043	133.4	115.7	12.7	0.33	13729

熔體化 製理 後의 試片 中心線上을 기준해서 硬度를 測定한 結果는 Fig. 2 와 같다.

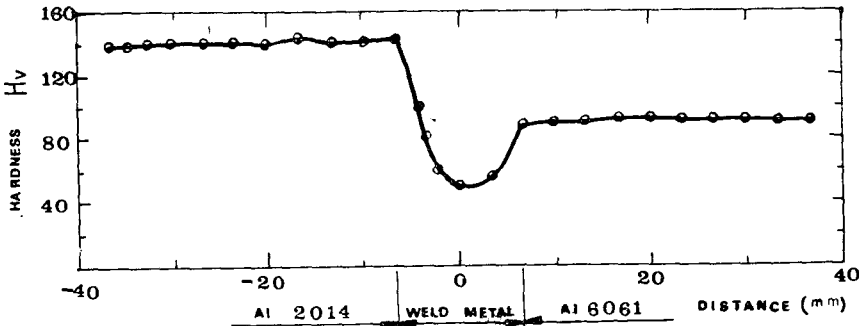


Fig. 2 Hardness distribution over welded joint section along the center line

2.2 모아레 格子의 製作

加工된 試驗片을 耐水研磨紙로 表面을 연마한 後 異種의 母材와 熔着金屬으로 된 試片을 均一하게 電解 研磨할 수 없어 試片의 表面에 순수 알루미늄을 1~5 $\mu$ m 두께로 眞空蒸着機에서 蒸着시켰다. 알루미늄이 蒸着된 試片에 感光液을 도포한 後 적의선 燈으로 乾燥하여 1000 line/in 直交格子板으로 眞空狀態에서 露光, 現像, 洗淨, 乾燥해서 모아레 格子를 만들었다. 이를 다시 電解研磨하여 모아레 格子를 完成하였다. Fig. 3은 電解研磨된 格子가 제작된 斷面을 圖示하고 Fig. 4는 제작된 試片의 格子寫眞이다.

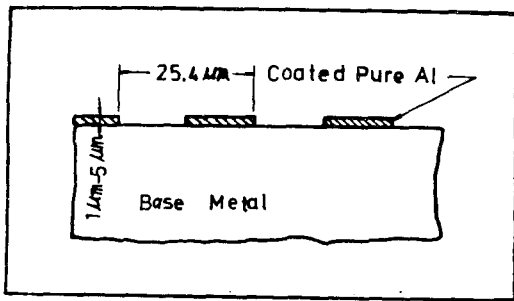


Fig. 3 Cross section of moiré grating

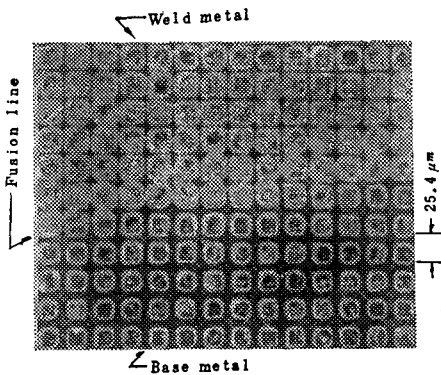


Fig. 4 Electropolishing grating in fusion line

2.3 光彈性 樹脂의 接着

光彈性 皮腹은 Resin epoxy와 경화제를 配合하여 2 mm 두께의 樹脂板을 만든 後 試片의 치수보다 1 mm 정도 크게 切斷한 後 풀립處理를 하였다. 試片形態로 切斷된 樹脂板을 電解研磨로 모아레 格子가 새겨진 試片 위에 接着시켰다. 樹脂板의 切斷時 發生하는 應力을 막기 위해 冷却水 속에 잠긴 狀態에서 高速回轉 드릴을 利用해서 加工하였다. Fig. 5는 光彈性 樹脂板을 接着시켜 完成된 試片 모양을 나타낸다.

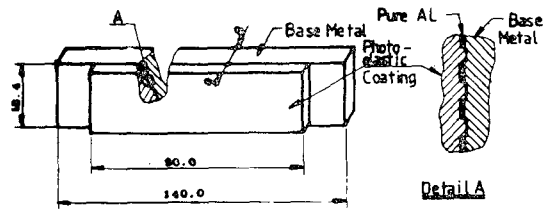
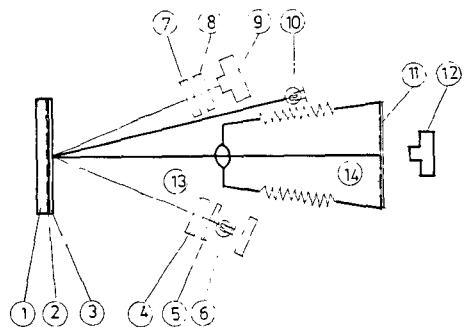


Fig. 5 Completed test specimen

3. 實驗裝置 및 實驗方法

3.1 實驗裝置

모아레 무늬 測定裝置는 Fig. 6의 짧은 線으로 表示된 部分이고 光彈性 皮膜무늬 測定裝置部는 Fig. 6의 가는 線으로 表示된 部分이다. 使用된 引張試驗機는 荷重檢出이 load cell에 의해 行해지는 Tensilon (Model UTM-1-10000 C)으로 하였다.



① specimen, ② EP-grating, ③ photoelastic epoxy rubber, ④ quarter-wave plate, ⑤ polarizer, ⑥ light source, ⑦ quarter-wave plate, ⑧ analyzer, ⑨ camera, ⑩ light source, ⑪ screen, ⑫ camera ⑬ projection lens, ⑭ reference grating

Fig. 6 Schematic view of optical setup

3.2 實驗方法

모아레 무늬 間隔測定에는 測定誤차를 줄이기 위해 Misalignment는 固定시키고 mismatch만 適當한 測定 間隔이 되게 變化시켰다. 光彈性 皮腹에 依한 測定裝置는 偏光子和 Analyzer를 90°로 直交시키고 第1의 1/4 波長板과 第2의 波長板을 45°로 固定시켰다. 引張荷重 速度는 0.4mm/min로 一定하게 維持하였다. 무늬寫眞의 撮影은  $\sigma=55.47$  MPa부터 무늬의 變化를 보면서 變化點에서 荷重을 일시 一定하게 維持시켜 모

아래 및 光彈性 무늬를 寫眞機로 撮影해서 현상하였다. 變位測定은 撮影된 모아레 무늬 필름을 擴大機로 20배 擴大해서 무늬 간격을 3회 反復 測定하였다. 測定位置는 Fig. 7의 AA', BB', CC', DD', EE', FF', GG', HH', II' 線上이다. 이 測定值를 Lagrange 補間法으로 무늬의 變位에 對한 次數를 一定間隔으로 整理한 後 最小자승법을 使用해서 變位曲面을 求하고 이로부터 勾配  $\partial N/\partial y$ 를 求하여 變형율을 다음 近似式에 依해 算出하였다.

$$\epsilon = 1 - (1 + \lambda) \cos \theta + (1 + \lambda) P \partial N / \partial y$$

여기서,  $\epsilon$ : x 方向의 變형율

$\lambda$ : 各 荷重에서 mismatch

$\theta$ : Misalignment

P: 格子의 피치

N: 무늬의 次數

y: 試片길이 方向의 變位를 나타낸다.

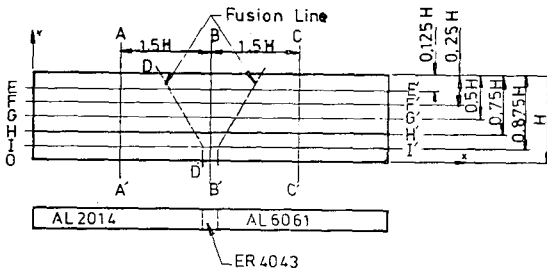


Fig. 7 Gage area of the tensile specimen

光彈性皮膜의 무늬로 부터 微小한 變形을 定量的으로 測定하기는 極히 힘들고 不可能하여 定性的으로 觀察하였다.

#### 4. 實驗結果 및 考察

##### 4.1 모아레 法의 實驗

Fig. 8은 荷重增加에 따른 各 荷重段階에서 mismatch를 調節하여 撮影한 모아레 무늬 사진의 一部를 表示한다.

Fig. 9, 10은 모아레 무늬 寫眞中에서 荷重이  $\sigma=55.47$  MPa,  $\sigma=99.08$  MPa,  $\sigma=144.16$  MPa,  $\sigma=178.26$  MPa 일 때 荷重 方向에 따라 Fig. 7의 EE', FF', GG', HH', II' 線上 變形율 分布를 測定한 例를 圖示한 것이다. 測定結果  $\sigma=55.47$  MPa 에서는 母材와 熔着金屬에서 變形율 이 彈性限度內의 變形으로 均一하게 나타난다. 그러나,  $\sigma=99.08$  MPa 에서는 熔着金屬에서의

變形율이 母材에서의 變形율 보다 크게 나타났으며 또 V 홈 下段으로 내려 올수록 差異가 더욱 크게 나타나기 始作하고 있다. 特히  $\sigma=144.16$  MPa 以上에서 應力의 增加와 더불어 漸進的으로 變形율 勾配가 커지고 있다.

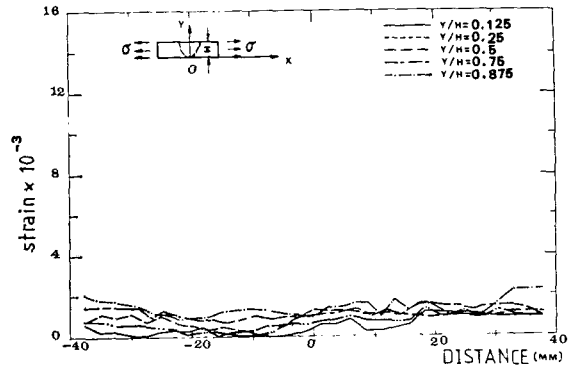


Fig. 9 Strain distribution along the longitudinal section of the specimen for the loading ( $\sigma=55.47$ MPa) step

Fig 10 에서는 Fusion line 近方에서 勾配가 最大值를 나타내는 곳은 HH' 線上이다. 그러나 Fusion line 에서의 不連續인 變形율 變化를 볼 수 없고 Fusion zone에서 線形的 變化를 하고 있음을 알 수 있다. 또 熔着金屬이 많은 V 홈 上段 中心 附近에서는 大體的으로 均一한 變形율이 나타나고 있었다. 母材의 變形율 差異도 이때부터 確實하게 나타나고 있었다. 以上에서 荷重의 增加와 더불어 異材間의 變形을 差異가 深化되고 特히 硬度가 적은 熔着金屬部에서 集中的 變形율이 發生하고 있었으며 最大 變形율은 항상 V 홈의 中心線을 따라 나타나고 있다.

Fig 11, 12는 荷重變化에 對한 EE', FF', GG', HH', II' 線上의 變形율 分布를 圖示한 例이다. 그림에서 荷重의 增加와 더불어 熔着金屬內의 變形율 增加率이 增大하며 變形율 分布 變化는 深化 되고 最大 變形율은 항상 中央部에 位置하고 있다. 荷重增加에 따라 母材에서 變形율은 V 홈 下段으로 내려 갈수록 점점 增加하며 熔着金屬에서는 中心線까지는 增加하다 다시 감소하게 되며 root 부에서 最小值가 된다. Bond 部에서 變形율 勾配는 V 홈 上단에서 最大值로 나타나며 알루미늄 合金 6061 보다 2014 쪽이 bond 部에서 變形율 勾配가 더 크다.

Fig. 13 에서는 母材 알루미늄 2014 의 斷面 AA' 에서 變形율 勾配가 荷重增加에 따라 完滿하게 變化하는 것을 나타내며 V 홈 上단에서 變形율이 가장 적고 하단으로

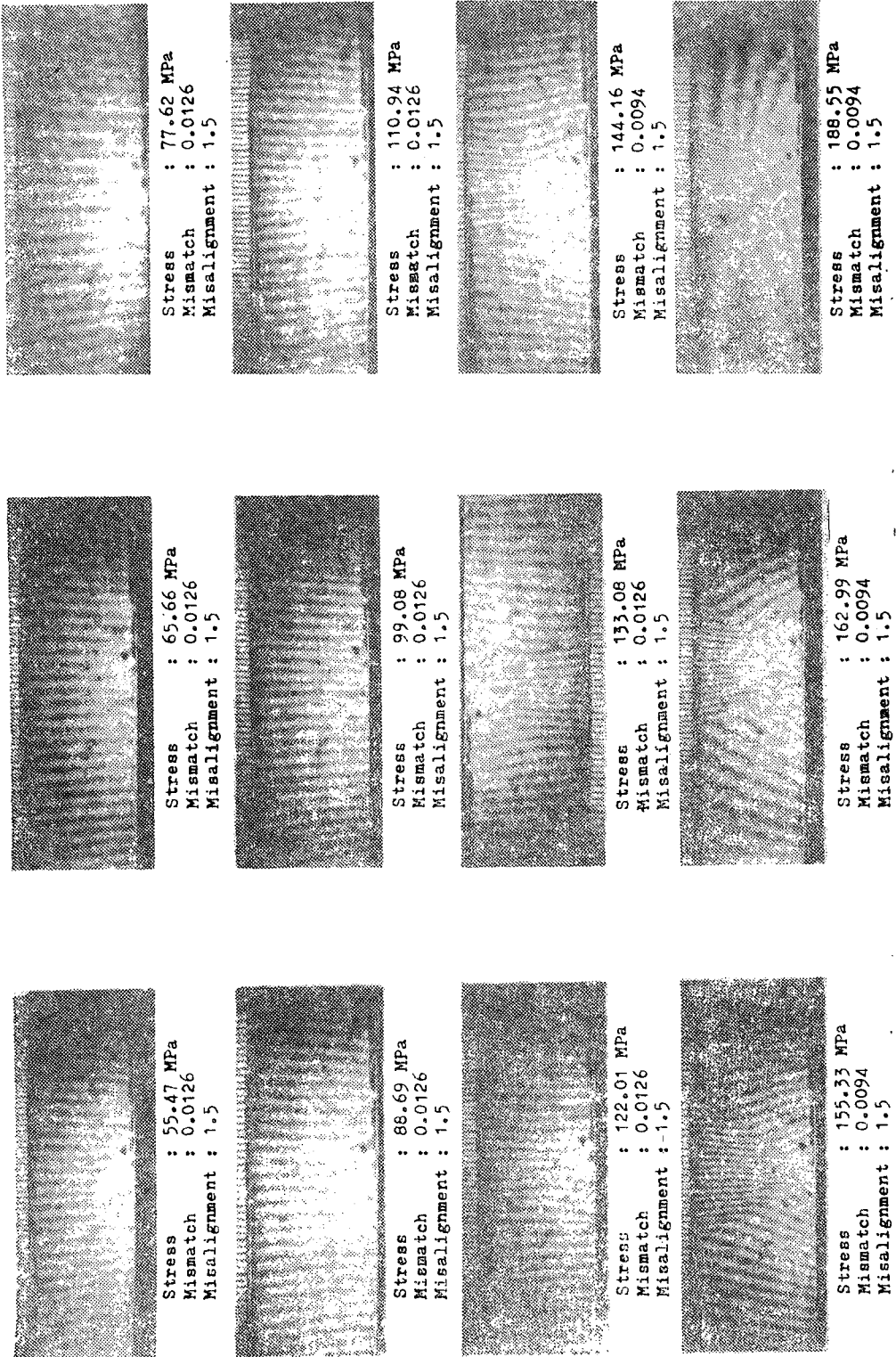


Fig. 8 Moiré fringe patterns

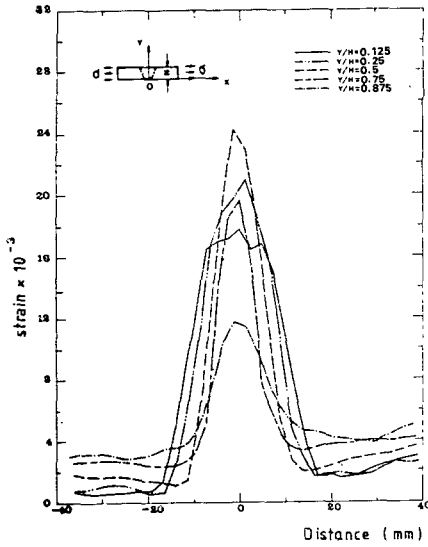


Fig. 10 Strain distribution along the longitudinal section of the specimen for the loading ( $\sigma = 178.26\text{MPa}$ ) step

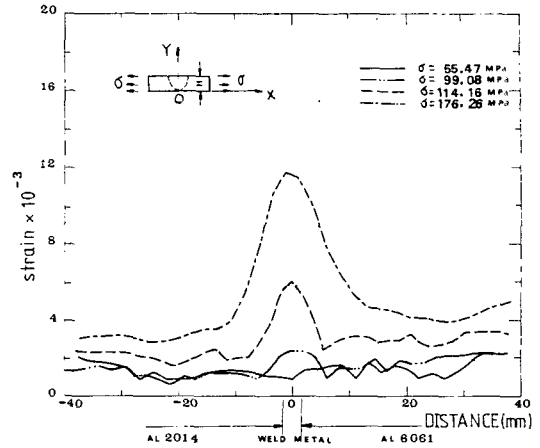


Fig. 12 Strain distribution along the longitudinal section II' ( $Y/H=0.875$ ) of the specimen for the four loading steps

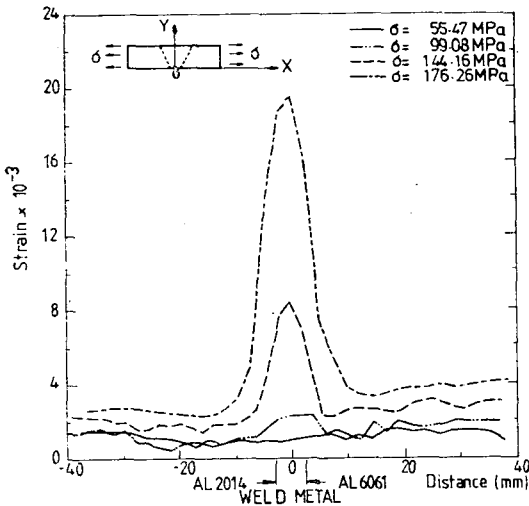


Fig. 11 Strain distribution along the longitudinal Section HH' ( $Y/H=0.75$ ) of the specimen for the four loading steps

내려올 수록 점점 增加해서 試片 下段에서 最大値를 나타낸다. Fig. 14 에서와 같이 母材 알루미늄 合金 6061 에서는 2014 에서와 같은 傾向을 나타내며 변형을 값이 약간 크게 나타난다. Fig. 15 은 熔着金屬의 中心線을 따라 나타나는 변형을 荷重의 增加에 따라 변

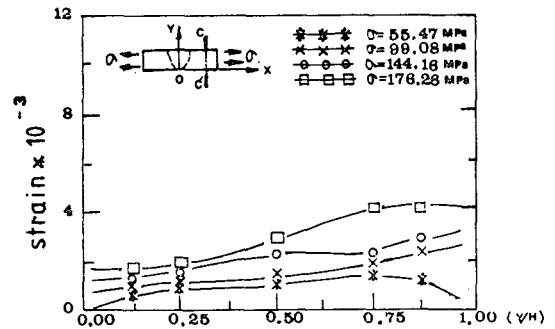


Fig. 13 Strain distribution along the transverse section AA' of the specimen for the four loading steps

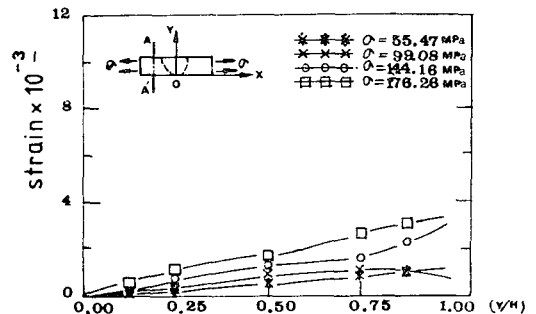


Fig. 14 Strain distribution along the transverse section CC' of the specimen for the four loading steps

형율이 線型的으로 增加하여  $Y/H=0.5$  位置에서 最大 値를 나타낸다.  $\sigma=99.08$  MPa 以下の 荷重에서는  $BB'$  斷面을 따라 나타나는 變形율 分布는 거의 均一하다.

Fig. 16 은 fusion line 을 따라 나타나는 變形율 分布를 表示한다. 變形율 分布는  $\sigma=55.47$ MPa 및 99.08 MPa 에서는 母材에서와 같은 傾向을 나타내며 荷重이 增加된  $\sigma=144.16$ MPa 에서는 熔着金屬에서와 같은 傾向을 나타내며 最大荷重狀態에서는 V 홈 上段에서 最大 變形율을 나타낸다. 以上과 같이 最大 變形율 分布가 最大를 나타내는 理由는 다음과 같다. 彈性限界 內에서는 Table 2 에서와 같이 母材에서 Young's modulus 가 熔着金屬에서의  $E$  값의 5 倍에 達하므로 母材

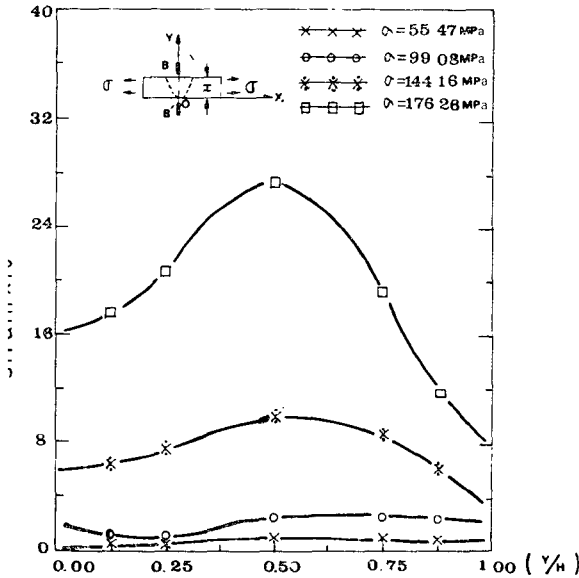


Fig. 15 Strain distribution along the transverse Section  $BB'$  of the specimen for the four loading steps

는 變形量이 적고 熔着金屬에서는 變形이 크게 나타난다. 또한 彈塑性 領域에서는 항복강도도 母材에서 熔着金屬보다 2 倍 以上 크므로  $\sigma=99.08$  MPa 以上の 領域에서는 熔着金屬은 두 母材에 依해 구속되어 熔着金屬 中心에서 最大 變形율을 나타낸다.

#### 4.2 光彈性 皮膜法에 의한 觀察과의 比較考察

Fig. 17 는 光彈性 皮膜法에 依한 實驗結果의 무늬 寫眞이다. Fig. 17 에 나타나는 것 처럼 應力  $\sigma=55.47$  MPa 以上에서는 무늬가 나타나지 않았으나  $\sigma=55.47$

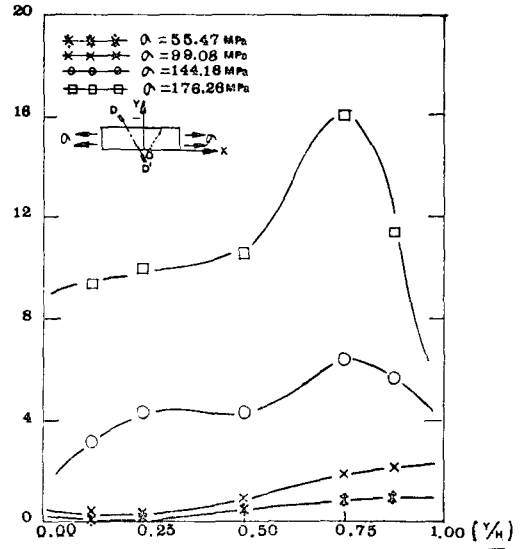


Fig. 16 Strain distribution along the transverse section  $DD'$  of the specimen for the four loading steps.

MPa 부터 무늬가 發生해서 微小한 應力變化로부터 점진적으로 變化되어 나타나고 있다. Fig. 18 은 光彈性 皮膜무늬와 모아레무늬 寫眞을 比較한 것이다. Fig. 18 의 比較 그림에서 微小한 變形量의 分布에 對해 光彈性 皮膜의 무늬 形象은 예민하게 變化를 하여 쉽게 感知할 수 있고 重要한 應力變化를 實時間에서 感知할 수 있었다. 그러나 應力測定이 어렵고 이로부터 變形율測定은 많은 問題點이 있었다. 따라서 本 研究에서는 變化의 定性的인 觀察方法으로 光彈性 皮膜法을 使用하고 定量的인 測定方法으로 모아레法을 使用하여 熔接部의 變形을 擧動을 明確히 알 수 있었다.

#### 4.3 有限要素法에 의한 解析比較 考察

모아레法 實驗結果와 解析의 有限要素法에 依한 結果를 比較하기 위해 MSC/NASTRAN 프로그램을 利用하였다. Fig. 20 은 사각형 要素로 나눈 값이다. 變形을 勾配가 큰 熔着金屬 부위에서는 더 치밀한 要素로 나누었다. 要素의 各 節點에서 2 個의 自由度로  $x, y$  方向의 變位만을 考慮했다. 境界條件은 다음과 같이 適用하였다.

(1) Fig. 19 의 左測 끝단에서는  $x, y$  向의 變位는 영이다. 즉  $U_x = V_y = 0$

(2) 右測 끝단에서는 鋼板으로 拘束되어 荷重이 作用한다고 생각했다.

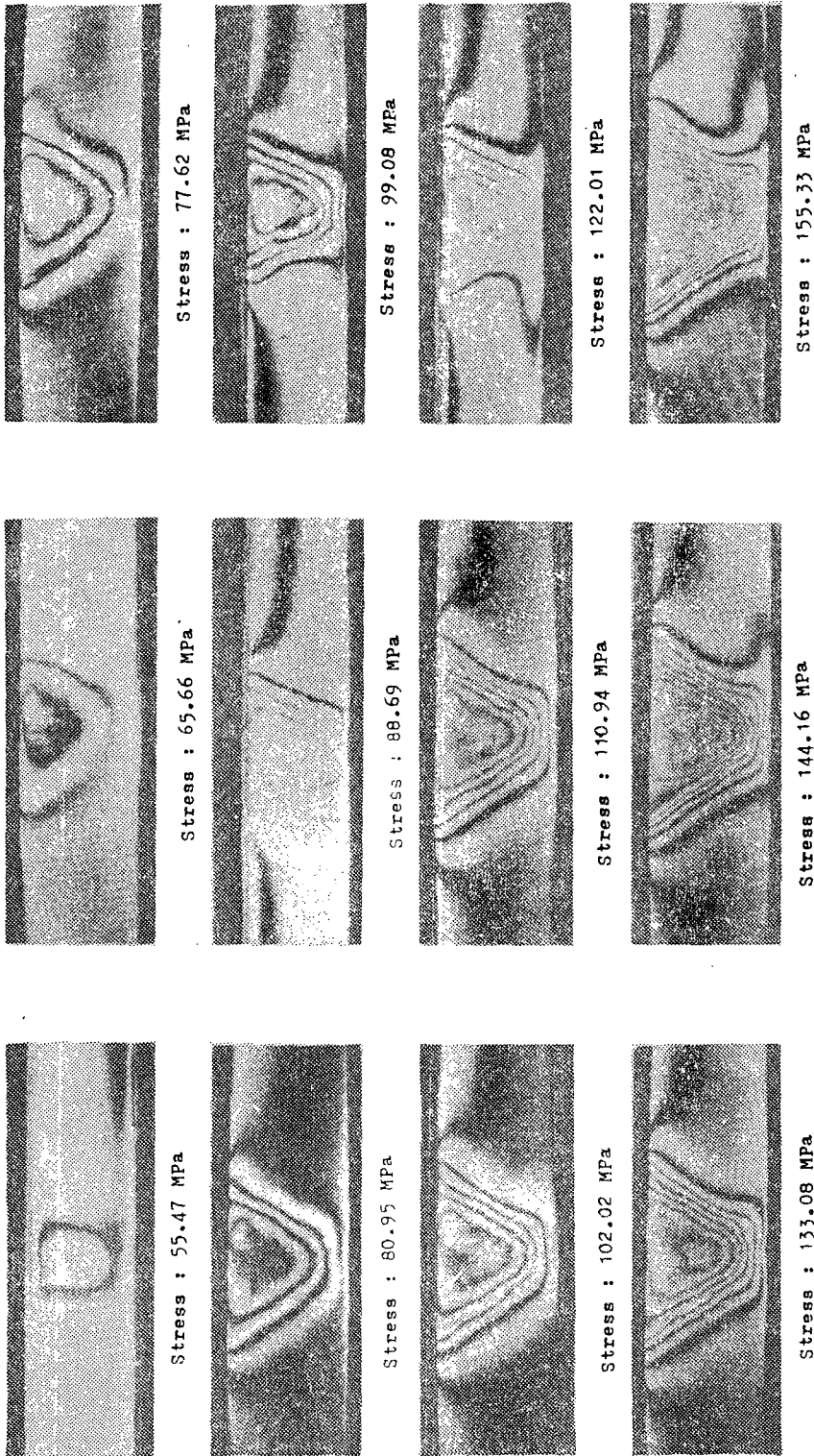


Fig. 17 Isochromatic fringe pattern



Fig. 19에서 A, B, C 材料는 等方性 材料로 看做했으며  $E, \nu$  값은 Table 2 와 같다. 外力는 實驗條件에서와 같이 4 段階에서 計算하고 實驗測定한  $\sigma = 55.47 \text{ MPa}$

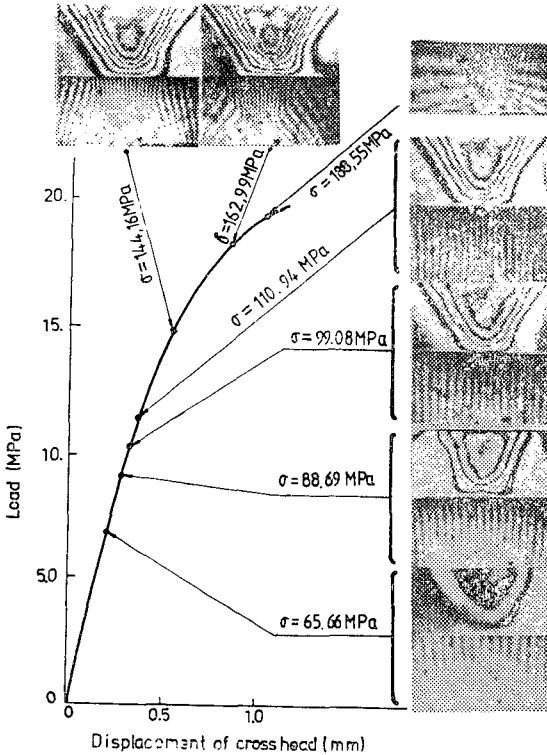


Fig. 18 Typical Moiré and isochromatic fringe patterns

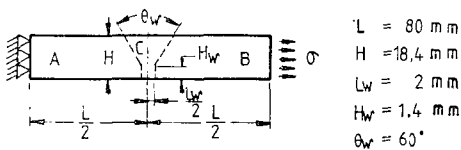


Fig. 19 Basic concepts of loaded specimen



Fig. 20 Finite element for analysis

Pa에 對해 解析結果를 그림으로 그리면 Fig. 21와 같이 나타난다.

Fig. 21의 解析結果는 彈性限度內에서의 變形을 分布를 나타내고 있다. Fig. 21과 Fig. 9를 比較할 때 모아레법에 의해 測定한 變形을 값은 母材 近方에서 荷重 增加에 따라 變形을 增加가 線型的으로 增加하지 않고 있다. 이것은 測定誤差에 의한 것으로 생각된다. 有限要素法에 의한 結果는 線型的으로 增加하고 있어 더 正確한 傾向을 나타내는 것으로 생각된다. 따라서 荷重이 적은 경우 즉 두개의 母材나 熔着金屬의 變形을 彈性限度內에서 應力과 線型的인 범위일 때는 모아레법에 의한 測定은 極히 微小한 變形의 差를 測定함이 어려워 正確한 結果를 얻기 어렵다. 그러나 解析的인 有限要素法에 의한 結果는 比較的 正確한 結果를 얻을 수 있어 效果의이다. 그러나 두개의 母材와 熔着金屬의 變形을 應力과 非線型的인 範圍일 때는 有限要素法의 解析은 매우 復雜하고 많은 電算處理 時間을 所要하게 되며 正確한 結果를 얻기 어려우나 모아레법에 의한 測定은 變形의 差異가 크므로 測定에 正確性을 얻을 수 있어 보다 正確한 結果를 얻는데 效果의이다.

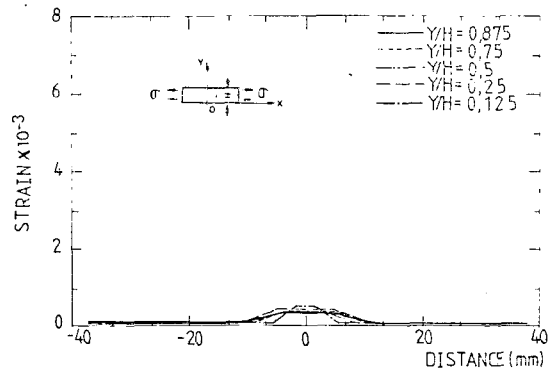


Fig. 21 Strain distribution along the loading direction by F.E.M.

### 5. 結 論

알루미늄 합금 2014 와 6061 의 異材를 ER-4043 용접봉으로 熔接한 후 502°C에서 溶體化 處理를 하고 171°C에서 時効處理를 한 試片에 靜的荷重을 加하고 모아레法和 光彈性皮膜法을 利用해서 變形을 測定하였다. 測定結果는 有限要素法에 의한 解析的 方法의 結果와 比較考察하여 다음과 같은 結論을 얻었다.

(1) 변형율은 항상 용접金屬에서 크게 발생하고 있으며 용접金屬內의 변형을 分布는 試片의 中央部에서 항상 最大가 되었다.

(2) Fusion line 을 따라 나타나는 변형을 勾配는 알루미늄 合金 6061 보다 2014 쪽이 약간 크며, V 홈 上段에서 하단을 向해 점점 增加하여 最大荷重 狀態는 V 홈 上段에서 나타났다.

(3) 모아레法에 光彈性皮膜法을 組合시켜 光彈性皮膜法에 依해 무늬 變化를 定性的 方法으로 利用하고 定量的 方法으로 모아레法에 依해 무늬를 測定하면 용접部의 변형율을 實時間에서 測定하는데 매우 有用한 方法이었다.

(4) 용접金屬의 변형율이 彈性限界內에서 低荷重狀態에서는 변형율의 定量的 測定은 有限要素法에 依한 解析의 方法이 보다 有效하나 塑性領域에서는 모아레法에 依한 測定이 効果的이다.

#### 參 考 文 獻

- (1) K. Satoh and M. Toyode, Size Effect on Static Tensile Properties of Welded Joints Including Soft Interlayer, J. of Japan Welding Society, Vol. 37, pp. 1214~1226, 1986
- (2) K. Satoh and M. Toyoda, Effect of Mechanical Heterogeneity on the Static Tensile Strength of Welded Joint, J. of Japan Welding Society, Vol. 40, 1971
- (3) K. Satoh and M. Toyoda, Static Strength of Welded Plates Including Soft Interlayer under Tension across a Weld Line, Trans., Japan Welding Society, Vol. 1, pp. 10~6, 1970
- (4) K. Satoh and M. Toyoda, Joint Strength of Heavy Plates with Lower Strength Weld Metal, Welding Research Supplement, 1975
- (5) 秋田好雄, 田和之, 耐食アルミニウム合金加工硬化部をもつ熔接継手の強度に 關한 研究, 造船協會論文集, 第 118 號, pp. 221~233, 1965
- (6) K. Nishio and T. Shimada, Tensile Deformation Behavior of Aluminum Alloys with Modeled Segregation Layers, Trans. of the Japan Welding Society, Vol. 12, pp. 42~50, 1981
- (7) J.M. Webster et. al., Strain in Transition Joints Measured by High-Resolution Moire Photography, Experimental Mechanics, Vol. 21, pp. 195~200, 1981
- (8) Y. Ueda and T. Yamakawa, Mechanical Characteristics of Cracking of Welded Joints, J. of Strain Analysis, No. 7, pp. IC5. 1~IC5. 13, 1979
- (9) A. Arbel, Some Mechanical Properties of Electron Beam Welds with Unconventional Geometries, Welding Research Suppl., Vol. 48, pp. 258S~268S, 1969
- (10) T.R. Gurney, Influence of Overlays on Stresses in Fillet Welded Joints, J. of Strain Analysis, Vol. 12, pp. 16~22, 1977
- (11) B.J. Brongraber, et. al., Effect of Welding Variables on Aluminum Alloy Weldments, Welding Research Suppl., pp. 97S~103S, 1973
- (12) 邕章祐, Moiré 法에 依한 異材熔接이음의 熱膨脹測定, 忠南大學校 工業教育研究所 論文集, 第 3 卷, 1980
- (13) H. Shimada, et. al., Moire Method Combined with Photo-Elastic Coating Method, Technology Reports, 25 Tohoku Univ., Vol. 43, pp. 127~135, 1978