

## 알루미늄합금의 용접부에서의 기공

朴 鍾 殷\* · 尹 英 燮\*\*

### Porosity in Aluminum-Alloy Weld

by

J. E. Park, Y. S. Yoon

#### 1. 序 論

最近 美國이나 日本을 비롯한 先進諸國에는 알루미늄과 그 합금에 의한 大型構造物의 建造가 증가되고 있으며, 특히 알루미늄합금에 의한 超低溫 tank나 鐵道車輛의 製作은 매우 各광을 받고 있다. 이러한 것들을 위하여 종래의 것보다 더욱 強度가 높은 새로운 熔接構造用 알루미늄 합금材가 개발되고 있으며, 또한 熔接器機의 改良, 특히 각종 MIG 熔接法과 그 機器의 開發에 의하여 두께 40mm 정도의 알루미늄板도 高能率의 熔接할 수 있게 되었다. 이런 점에 비추어 보아 앞으로 우리나라에서도 알루미늄이나 그 합금에 의한 構造物의 요구는 급속히 늘어날 것이 豫測되며 이 시점에서 이미 증가추세는 시작되고 있다.

그러나 현재 國內에서는 이러한 要求에 응하기 위한 알루미늄과 그 합금의 熔接法에 대한 研究가 전혀 되어 있지 못한 실정이다. 이러한 現實下에서 알루미늄과 그 합금의 熔接部에서 發生하는 중요한 缺陷中的 하나인 기공의 形成과 그 原因에 대하여 基本的인 面부터 考察하여 본다는 것은 금후의 發展을 위하여 반드시 必要한 것으로 생각된다.

本 報文은. 最近까지 報告된 研究結果를 검토, 정리하여 기공이 熔接金屬의 機械的 性質에 미치는 영향, 기공의 形成機構, 기공發生의 原因이 되는 水素源, 熔接條件과 기공의 形成과의 關係 등을 다루었다.

#### 2. 기공이 熔接金屬의 機械的 性質에 미치는 影響

一般的으로 알루미늄합금 熔接部の 靜的인 機械的 性質은 기공의 量이 적은 때는 별로 영향을 받지 않고 어느 量 이상이 되면 기공이 증가할수록 급격히 減少하는 것으로 알려져 있다. Fig. 1은 Al-Mg합금 熔接部에서의 기공과 靜的인 機械的 性質의 關係를 나타낸 것이다[2]. Green 등 [3]도 降伏應力이 40,000 psi.인 mild steel의 熔接部에서는 7%의 기공까지는 원래의 性質에 영향을 끼치지 않는다고 報告하였고, Bradley 등[4] 역시 降伏應力이 100,000 psi.인 steel의 熔接部에서는 5~6%의 기공까지는 원래의 性質을 얻을 수 있다고 報告하였다. 또 Baysinger[5]도 5356 filler wire로 熔接한 5083 알루미늄합금의 熔接部에서 機械的 性質에 큰 變化가 있기까지는 상당한 量의 기공이 存在해야 한다고 報告하였다. 그러나 이러한 報告 들은 靜的인 機械的 性質만을 대상으로 한 것이다.

實際에 있어서 기공의 量을 측정하기 위해서는 X-線 檢査를 많이 이용하고 있으나 X-線 檢査에서 發見되는 기공은 지름이 0.4mm 이상인 기공들 뿐이고 지름이 0.4mm 이하인 微細한 기공 들은 檢出되기가 매우 어려운 실정이다. 또한 이러한 微細한 기공들은 靜的인 機械的 性質에는 별로 영향을 끼치지 못한다고 인식되어왔기 때문에 微細한 기공에 대한 注意는 별로 기울이지 않았다. Dinsdale 등[6]은 두꺼운 材料에 비해 얇은 材料에서는 微細한 기공보다는 같은 vol.%의 큰 기

接受日字: 1978年 3月 15日

\* 正會員: 서울大學校 工科大學

\*\* 正會員: 韓國船舶海洋研究所

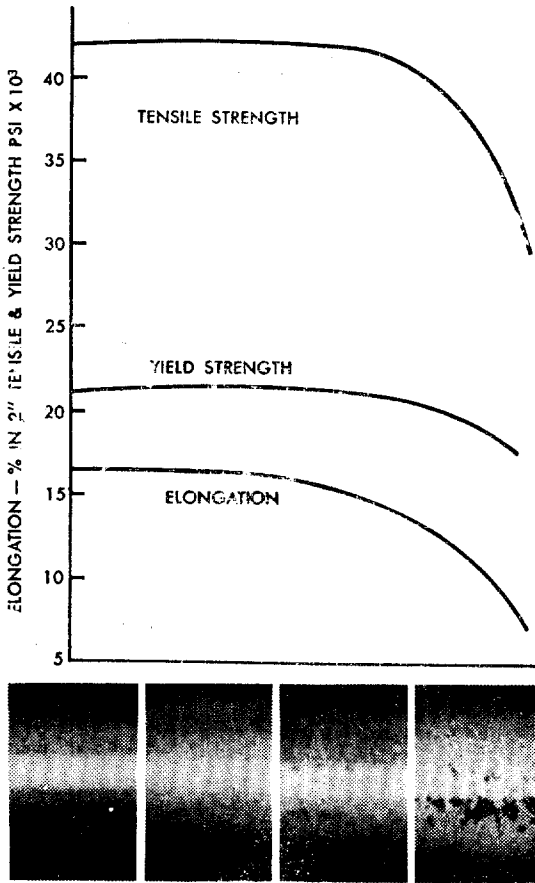


Fig. 1. General relationship between porosity and Mechanical properties of welds

공이 더 심각한 영향을 끼치며 靜的強度에 害가 없는 실질상의 acceptance criteria는 매우 높다고 報告하였다.

그러나 최근에 와서 굽힘성(bending)에 대해서는 微細한 氣孔이 상당한 영향을 준다는 사실이 報告되었다 [7]. 또한 Rudy 등[8]은 熔接氣孔으로 인한 破斷面의 面積減少는 橫軸引張強度(transverse tensile strength)나 疲勞壽命(fatigue life)을 直線의 減少시키는데 氣孔의 크기분포는 強度의 減少와 氣孔에 의한 面積減少와의 관계에 영향을 끼치지 못한다고 하였다. 즉, 微細한 氣孔이라도 이상에 의한 面積減少나 이에 상당한 큰 氣孔에 의한 面積減少에 의한 영향은 같다는 사실을 報告한 것이다. Shore 등[9]도 氣孔에 의한 破斷面의 面積減少에 의해 熔着金屬에서의 橫軸引張強度는 거의 直線의 減少되는데 微細한 氣孔도 역시 큰 氣孔과 마찬가지로의 效果가 있음을 報告하였다. 또한

그는 熔着金屬에 있어서 降伏強度(yield strength)는 氣孔에 의한 영향을 크게 받지 않으나 延性(ductility)이 높은 應力水準(high stress level)에서의 疲勞壽命(fatigue life)은 少量의 氣孔에 의해서도 상당한 영향을 받는다고 하였다.

熔接金屬의 機械的 性質이 氣孔에 의해 영향을 받는 이유는 이상의 報告에서와 같이 주로 氣孔에 의한 斷面積의 減少때문인 것으로 생각되나 이외에 應力集中의 效果도 있으리라 생각된다. 일정한 引張應力을 받고 있는 無한한 길이의 均일한(homogeneous) 彈性體에서 球形의 氣孔과 길다란 실린더형의 cavity에 대한 應力解析에 의하면 각각의 모서리에 걸리는 應力集中은 前者가 2.05, 後者가 3이 됨이 報告되었다. [10][11] 그러나 Masubuchi[11]는 引張荷重下에 놓여있는 ductile한 材料의 behaviour에 미치는 氣孔의 영향은 直接的인 것은 못된다고 하였다. 즉 ductile한 材料는 破斷이 일어나기 전에 많은 塑性變形이 일어나게 되는데 이때의 塑性變形은 氣孔 주위에 생기는 應力集中을 減少시킨다는 것이다. 따라서 熔接部의 機械的 性質은 氣孔들의 주위에 생기는 應力集中에 의하여 直接的으로는 영향을 받지 않는다는 것이다. Masubuchi[11]는 이러한 ductile한 材料에서의 破斷은 剪斷破斷(shear failure)이고 항상 正味應力(net stress)이 最終引張應力(ultimate tensile stress)에 포괄되었을 때 일어나며 비교적 천천히 전파됨을 注視하였다. 이러한 Masubuchi[11]의 理論에 비추어 볼 때 보통의 ductile한 알루미늄 合金의 熔接部에서는 氣孔이 機械的 性質에 미치는 영향중, 應力集中에까지는 效果는 적으리라 생각된다. 그러나 높은 強度를 요구하는 構造用 알루미늄 合金에서는 이를 위한 強度強化處理로 인하여 延性(ductility)이 상당히 減少되므로 應力集中의 效果가 상당히 크리라 추측된다.

氣孔에 의한 強度의 低下가 斷面積의 減少에 의해 주로 결정된다고 하면 부피에 대한 斷面積의 比가 最小가 되는 氣孔의 크기가 最適적함을 알 수 있다. 이에 대해 Martin 연구원 들[12]은 球形 氣孔의 부피에 대한 斷面積의 比에 의한 見地에서, 주어진 부피의 오염된 shielding gas는 freezing puddle內에 큰 氣孔들을 形成할 때보다 작은 氣孔들을 形成할 때 더 큰 斷面減少를 보인다고 報告하였다.

Dinsdale 등[6]은 Al-Mg 合金의 熔接部에서 一定한 量의 氣孔이 引張疲勞試驗(zero to maximum load)에 미치는 영향을 補強部(reinforcement)가 남아있는 경우와 削除된 경우 각각에 대해 實驗하였는데 補強部가

남아있는 경우, 모든 破斷은 補强部の 토우부(toe)로부터 시작되고 氣孔은 아무런 영향을 끼치지 않음이 관찰되었다. 補强部가 削除된 경우는 氣孔의 量보다는 위치가 주요 기준이 됨을 즉 氣孔이 表面에 있느냐 表面 밑에 있느냐는 것은 疲勞強度(fatigue strength)에 미치는 critical한 問題임을 報告하였다.

3. 氣孔의 形成機構

알루미늄이나 알루미늄합금의 熔接部에 發生하는 氣孔은 shielding gas나 熔接될 알루미늄 母材의 表面 또는 filler wire의 表面에 存在하는 水蒸氣나 炭化水素의 分解에 의해서 發生되는 水素에 의한 것으로 알려지고 있다. 水蒸氣나 炭化水素의 分解에 의해 發生된 水素는 溶融池(molten weld pool)에 溶解되는데 溶融點에서의 液狀 알루미늄의 水素溶解度는 固狀 알루미늄의 水素溶解度보다 훨씬 크므로(Fig. 2) 凝固時에 水素氣體的 放出이 생기게 된다. 이러한 水素氣體的 放出은 液狀에서 水素방출을 發生시킬 정도까지 過飽和되고 水素방출을 들은 凝固過程이 進行됨에 따라 熔接部에 氣孔을 形成하게 되는 것으로 보통 설명된다. 그러나 이와 같은 설명은 熔接에 의한 특수한 條件은 고려되어 있지 않다.

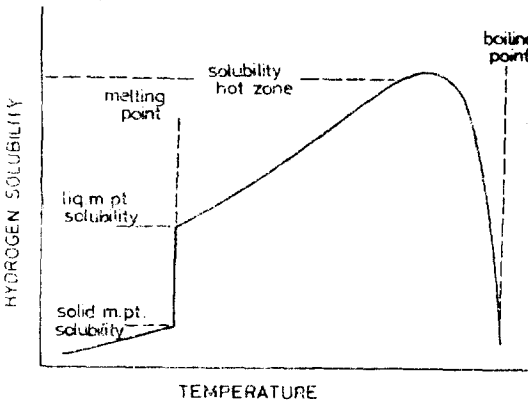


Fig. 2. Characteristic relationship of hydrogen solubility with temperature for endothermic adsorption

Howden[13]은 알루미늄이나 알루미늄합금의 熔接時 水素에 대한 예민성은 溶融點에서의 液狀과 固狀사이의 水素溶解度の 차이보다 arc 熱에 의하여 溶解된 溶融池에서의 독특한 溫度分布에 의해 더 크게 영향을 받기 때문에 지적하였다. Arc熱에 의한 溶融池에서의 溫度分布의 특징은 대략 Fig. 3과 같다. 溶融池에서의 最高點은 arc 熔接時 electro-magnetic force가 작용함을 나타낸다. 이 electro-magnetic에 의해서 高溫部에

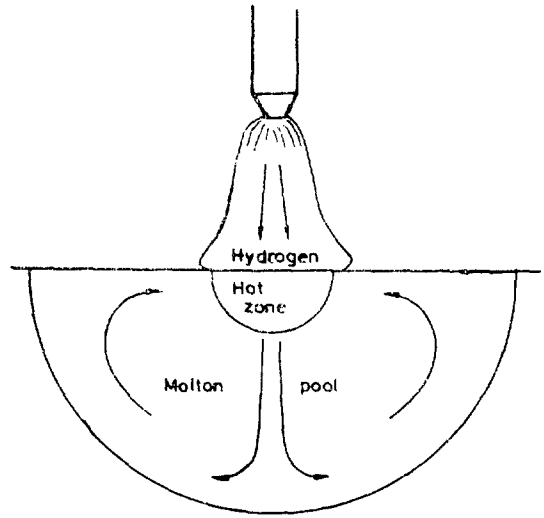


Fig. 3. Schematic representation of hydrogen adsorption in the molten pool

서 溶解된 水素氣體가 低溫部로 더욱 잘 分散되어 높은 水素濃度가 이루어진다. 더군다나 알루미늄과 같이 낮은 溶融點을 갖는 金屬에서는 arc 밑部分의 溫度가 대단히 過熱되어 溶融池가 보다 많은 水素를 함유하게 되므로 溶融池주위의 液狀에서 凝固의 도움없이 氣體방출을 들이 形成되게 된다.

Fig. 4는 알루미늄과 철의 溶融池에서의 溫度分布를 나타낸 것이고 Fig. 5는 알루미늄과 철의 溫度에 따른 水素溶解도를 나타낸 것이다. Fig. 4와 Fig. 5에서 알 수 있듯이 철의 溶融池의 경우 水素濃度は 溶融點에서의 溶解度の 1.6배 정도까지 증가되나 알루미늄의 溶融池의 경우는 거의 70배까지 水素를 함유하게 된다. 一般의 경우 Table 1과 같다. 이러한 이유때문에 알루미늄이 철보다 熔接時 水素에 의한 氣孔形成이 더욱 예민하게 되는 것이고 arc 下에서의 過熱에 의해 야기되는 過飽和보다 더 중요하게 된다.

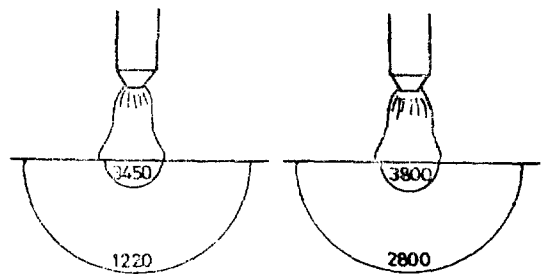


Fig. 4. Typical temperature variations in arc-melted pools of aluminum and iron

Table 1. Data for Hydrogen Contents and Estimated Temperatures for Arc-Melted Pools in Iron and Aluminium

	Melting point, °F	Typical estimated temperature, °F under arc (T)	Gas composition-1% H <sub>2</sub> in argon		Solubility(T)
			H <sub>2</sub> solubility liq. melting point, ml/100gm	Solubility (T) at temperature under arc, ml/100gm	Solubility (M. Pt.)
Iron	2798	3800	3.0	4.2	1.4
Aluminum	1220	3450	0.07	3.7	53.0

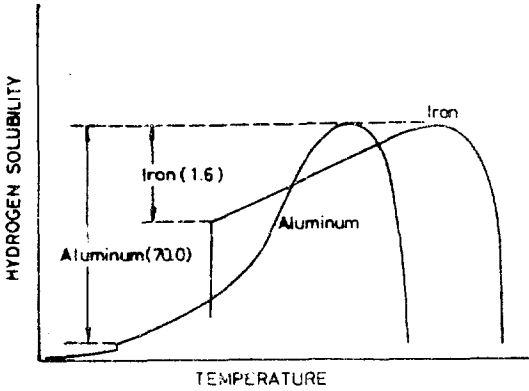


Fig. 5. Comparison of abilities of aluminum and iron to absorb hydrogen gas

Saperstein 등[14]은 shielding gas의 露點에 다른 氣孔의 生成에 대한 實驗을 한 結果 氣孔의 生成에 대한 shielding gas의 臨界露點이 存在한다는 事實과 氣孔의 濃度分布가 熔接部의 길보기 冷却速度에 의해 영향을 받는다는 事實을 報告하였다. 이로부터 그들은 氣孔發生現象이 氣孔核生成(pore nucleation)과 氣孔成長(pore growth)의 두 관계로 설명되어 질 수 있다고 하였다. 이를 熱力學的으로 설명하면 다음과 같다.

氣孔이 生成됨으로써 일어나는 Gibbs 자유에너지의 變化는

$$\Delta F = \Delta F_s + \Delta F_g + \Delta F_m + \Delta F_c \quad (3.1)$$

여기서

$\Delta F$ : 총 Gibbs 자유에너지의 변화

$\Delta F_s$ : 氣孔의 成長에 따른 氣體擴散에 의한 에너지의 변화

$\Delta F_g$ : 氣孔의 成長에 따른 표면에너지의 변화

$\Delta F_m$ : 氣孔의 生成에 따른 화학적 자유에너지의 변화

$\Delta F_c$ : 氣孔의 生成에 따른 변형에너지(strain energy)의 변화

그런데 변형에너지  $\Delta F_c$ 는 氣孔이 溶融狀態에서 形成

되므로 무시될 수 있다. 또 여기서

$r$ : 氣孔의 半徑

$\sigma$ : 溶融 알루미늄의 단위면적당 표면에너지

$P_H$ : 氣孔內的 水素의 部分壓

$K$ : precipitate된 氣體의 단위부피당 화학적 자유 에너지

$[H]_P$ : 溶融金屬中の 平衡水素 濃度

$[H]_P = P_{H_2} = 1$ 일 때 水素의 溶解度

이라고 하면

$$\Delta F = 4\pi r^2 \sigma - P_{H_2} \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) - K \left( \frac{4}{3} \pi r^3 \right) \quad (3.2)$$

$r$ 에 대해 微分하면

$$\frac{d\Delta F}{dr} = 8\pi r \sigma - 4\pi r^2 (P_{H_2} + K) \quad (3.3)$$

未成長의 氣孔(embryonic pore)이 안정한 狀態 또는 成長할 수 있는 狀態가 되려면

$$\frac{d\Delta F}{dr} \leq 0 \quad (3.4)$$

$$\text{즉 } r \geq \frac{2\sigma}{P_{H_2} + K} \text{ 또는 } P_{H_2} = \left( \frac{[H]_P}{[H]_{P0}} \right)^2 \geq -K + \frac{2\sigma}{r} \quad (3.5)$$

式(3.5)로부터 氣孔發生에 대한 shielding gas의 臨界露點이 존재하는 이유를 알 수 있다. 주어진 合金의 成分이라든가 溫度에서는  $\sigma$ 와  $K$ 는 常數이므로 이 경우 式(3.5)는  $r$ 과  $P_{H_2}$ 의 관계만으로 이루어지게 된다. 즉  $P_{H_2}$ 의 臨界값이 존재하게 됨을 알 수 있고  $P_{H_2}$ 는 arc 분위기에서의 水素의 部分壓과 정비례하므로 (Sievert's law) 氣孔發生에 대한 shielding gas의 臨界露點이 존재함을 알 수 있다.

氣孔의 核(embryo)에 대해서는 接合部(bond) 부근에서 柱狀晶(dendrite)의 notch 部分이 核으로 作用하는 것도 想像되지만 一般的으로는 核으로서 有效한 것의 定量的 評價는 아직 報告되어 있지 못하다.

일단 안정된 狀態의 氣孔이 形成되면 이 氣孔들은 표면에너지를 極小化시키기 위해서 成長하게 된다. 成長은 안정된 狀態의 氣孔으로의 水素擴散에 의하거나

이웃한 氣孔끼리의 重合(coalescence)에 의하여 진행된다. Saperstein 등[14]은 氣孔成長의 전체속도(over all rate)는 용착금속(weld deposit)의 冷却速度, 水素의 擴散速度 溶融池에서의 전체 水素濃度, 안정된 pore nuclei의 濃度, 凝固되는 熔着金屬과 연관된 凝固現象 등의 요소 들에 의하여 좌우된다고 하였다.

4. 氣孔의 原因으로 되는 水素源

氣孔의 原因인 水素源으로써는 1) 大氣中の 濕氣 2) 母材 및 filler metal 表面에 부착된 有機物, 水分, 酸化膜에 함유된 水分, 3) shielding gas 中の 불순물인 水素, 水蒸氣 또는 有機 gas 4) 母材 및 filler metal 内部에 함유된 水素 등을 들 수 있다.

1) shielding gas의 大氣中の 濕氣에 의한 오염

大氣中の 濕氣가 shielding gas中에 섞어 들어가는 것은 氣孔形成의 가장 큰 原因으로 現場에서 특히 問題되는 사항이나 Saperstein 등[14]은 shielding gas의 露點(dew point)에 따른 氣孔의 生成에 미치는 영향을 實驗하여 氣孔의 生成에 대한 shielding gas의 臨界露點이 存在한다는 事實을 報告하였다. 이 事實은 shielding gas가 大氣에 의하여 어느정도 이상 오염되면 氣孔의 過多生成으로 극히 해로운 영향을 끼치게 됨을 나타낸다. 실제로 Kurihara[15]는 相對濕度가 80%를 넘는다거나 shielding gas의 flow rate가 25l/min을 넘으면(亂流에 의한 大氣가 shielding gas에 혼입됨) 氣孔이 증가함을 報告하였다. 반면 Gobayashi는 水蒸氣가 포함되어도 酸素, 窒素에 의한 効果가 우세하여 大氣의 혼입에 의한 氣孔은 저절로 減少된다고 주장하였으나 이는 다른 연구결과들에 비추어 보아 實際적으로 타당성이 적은 것으로 판단된다. 大氣濕度가 높은 경우는 직접 shielding gas에 혼입되는 외에 spool에 감긴 wire의 表面 혹은 torch의 水冷部分 등에 水分이 응결하여 그것이 arc 분위기內에 流入되는 경우도 있으리라 여겨진다.

Collins[17]는 shielding gas의 분위기 오염은 주로 熔接時 不正確하게 調節된 아아크 電壓이나 아아크 電流에 의해서 야기되는 不安定한 아아크의 發生에 의한 것이라 하였다. 또 그는 shielding gas로 argon이나 helium의 단일 gas를 使用하기보다는 helium-argon의 혼합 gas를 使用하는 것이 metal flow를 좋게하고 arc를 안정하게 함으로써 shielding gas의 분위기 오염을 極小化하여 氣孔의 生成을 억제하는 데 큰 效果가 있음을 報告하였다.

2) 母材 및 filler wire 의 表面狀態

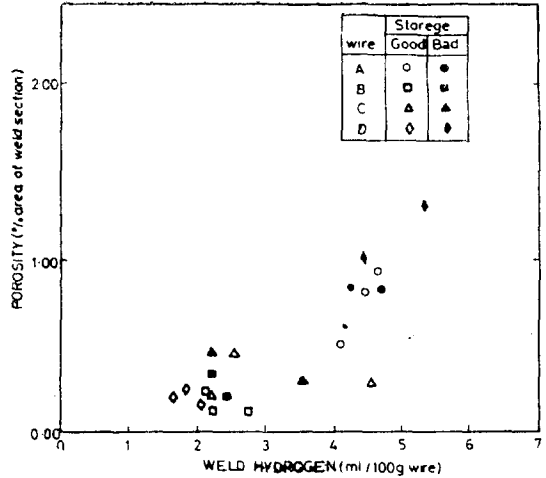


Fig. 6. Relation between filler metal hydrogen and weld porosity for NG6 alloy.

材料의 表面狀態는 氣孔生成의 原因으로써 가장 強調되는 것으로서 특히 가는 filler wire는 表面積이 相對적으로 크기때문에 영향이 크다. wire 表面은 NaOH로 洗淨한 것이 使用되었으나 現在는 광채가 날 정도로 연마한 것이 많이 使用되며 後者의 方法이 保存中에 表面오염도가 적다고 한다.

Coe[18]는 wire의 함유 gas는 熔接金屬의 氣孔量에 대하여 Fig. 6과 같이 거의 直線的인 關係를 보여 준다고 報告하였다. Kammer[19]는 filler wire의 internal hydrogen은 熔接部에서의 氣孔形成에는 별로 영향을 끼치지 않지만 filler wire의 表面에서 hydrated oxide 形態로 있게되는 external hydrogen은 매우 심한 영향을 끼친다고 報告하였다. 또 그는 filler wire의 external hydrogen을 제거하는 데는 眞空燒鈍(vacuum annealing)은 큰 效果가 없고 機械적으로 제거하는 것이 보다 바람직하다고 하였다.

母材 開先部(groove)에 부착된 물, 油脂類는 少量이라도 무시할 수 없다. Uchida[20]는 이에 대해 다음과 같이 언급하였다. “開先部에 고의로 물 등을 묻히면 현저하게 氣孔이 發生하지만 이것은 熔着金屬, 上部에 생기며(氣泡가 浮上하기때문) 補強部를 깎아내면 대부분의 氣孔은 제거되어 X-線 등급이 향상되는 결과로 된다. 반면 機械切削을 하여 脫脂 또는 wire brush로 닦아 내지도 않고 그대로 熔接한 경우 氣孔은 적으나 그것이 接合部(bond) 附近에 發生하여 補強部를 깎아내도 없어지지 않는다. 이러한 水素源은 量뿐만 아니라 그 종류 즉 물, 기름, 水酸化物을 함유한 것 등의

分解, 溶解時期나 場所 등이 문제가 되어 氣泡의 成長 條件이나 結晶의 凝固樣相 등도 함께 고려해 볼 필요가 있다.

### 3) Shielding gas의 不純物

현재 shielding gas로 쓰이고 있는 Argon이나 Helium은 매우 높은 純度の gas가 공급되고 있으므로 配管系統에 不良한 곳이 없는한 不純物의 問題는 없다.

한편 Argon이나 Helium gas에 다른 活性 gas( $Cl_2$ ,  $O_2$ ,  $N_2$ ,  $CO_2$  등)를 少量 첨가하면 氣孔이 減少되는 效果를 볼 수 있다는 報告가 多數 있다[14][17][21][22][3][24][25][26].

Collins[17], Kasen 등[21]은 shielding gas에 少量의  $Cl_2$  gas를 첨가함으로써 氣孔을 減少시키는 效果를 보았다고 報告하였으나  $Cl_2$  gas는 腐蝕性, 有毒性 gas이므로 實用化되지 못하고 있다. saperstein 등[14]은  $O_2$ 를 少量 첨가함으로써 arc의 길이를 짧게 하고 arc 電流를 증가시키는 作用을 하는데 아마도 이것이 氣孔의 形成을 減少시키는 것이라고 추측하였다. Fukui 등[22]은  $O_2$ 를 약 5%까지 첨가시키면 溶入의 깊이를 증가시키고 氣孔을 減少시키는 效果가 있으나 그 이상 첨가하면 bead 표면에 puckering 現象이 일어나고 또 酸化皮膜이 形成되어 해롭다고 주장하였다. 또 그들은  $O_2$ 를 첨가함으로써 溶込이 증가되는 이유는 酸化物이 形成되거나 또는 二原子 分子(diatom molecule)가 單一原子로 分離될 때 생기는 反應熱때문일 것으로 추측하였다.

Saperstein 등[14]은  $O_2$ 의 첨가와 마찬가지로  $N_2$ 의 첨가도 arc의 길이를 짧게 하고 arc 電流를 증가시키며 또한 氣孔의 防止에 效果가 있다고 報告하였다. Fukui 등[22]은 약 10%까지  $N_2$  gas를 첨가함으로써 引長強度가 증가되는 이유는  $N_2$  gas 첨가에 의한 grain refining 效果와 窒化物(nitride)의 形成에 기인하는 것으로 추측하였다. Mantani 등[23]은  $N_2$  gas 첨가에 의한 grain refining 現象은 titanium이나 zirconium이 함유되어 있을 경우에만 일어난다고 그 이유는 fusion zone에  $TsN$ 이나  $ZrN$ 이 形成되어 凝固할 때 그것들이 核(nuclei)의 역할을 하기때문이라고 설명하였다. 그러나 Fukui 등[22]은 titanium이나 zirconium이 함유되어 있지 않은 경우에도  $N_2$  gas에 의한 grain refining 現象이 약간 일어나며 비후이 보아  $TsN$ 이나  $ZrN$ 의 形成에 의한 이유외에도  $N_2$  gas의 첨가에 의한 凝固速度의 變化和 熔融金屬의 攪亂(disturbance)에 의한 效果도 있을 것이라 하였다. 한편 Allen[24]은 Mg와  $N_2$  사이에는 發熱反應이 일어나 氣孔의 減少를 妨害하

로 Al-Mg 合金에서는 오히려 氣孔의 量이 증가된다고 報告하였다. 이 밖에  $N_2$  gas의 첨가에 의한 效果에 대해서 corrosion resistance[24] weld cracking[23] 등[22][24]에 대한 效果가 報告되고 있으나 실제적인 使用를 위해서는 더욱 많은 實驗의 研究가 요구된다고 하겠다.  $CO_2$  gas의 첨가에 대해서는 Jen Chia-lich 등[26]은 TIG 熔接에서 Argon shielding gas에  $N_2$  gas를 첨가하면 氣孔의 減少에 매우 效果의 實을 報告하였으나 Nanba 등[26]은  $CO_2$  gas가 氣孔의 形成을 防止하고 溶込(penetration)을 증가시키거나 bead 모양에 害를 끼침을 報告하였다.

### 4) 母材 및 filler metal 内部에 함유된 水素

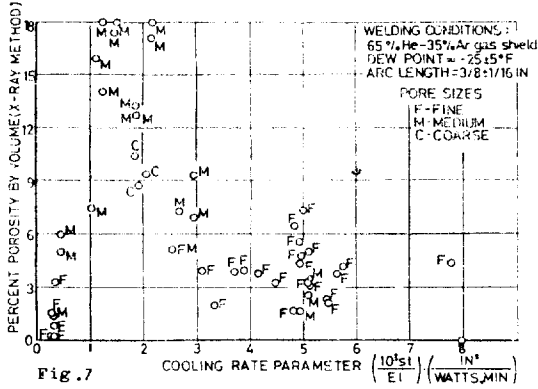
母材中の gas는 보통 熔着金屬에 함유된 gas量에 비하면 問題가 아니라고 생각된다. Terentév[27]에 의하면 母材 AMg6에 0.4ml/100g 이상의  $H_2$ 가 있으면 電子 beam 熔接 또는 filler metal을 쓰지않는 TIG 熔接에서 氣孔이 發生된다고 하였다. 또한 母材中の gas量을 반대로 늘려서( $\sim 0.9$ ml/100g) 氣泡의 成長浮上을 빠르게 하여 氣孔을 減少시킬 수 있다고 하는 착상이 몇가지 實驗 data와 함께 報告되었다[28]. 이 착상은 흥미가 있는 것이긴 하지만 이를 뒷받침할만한 報告는 달리 찾아 볼 수 없다.

Kammer[19]는 5454 알루미늄合金 母材에 5356 알루미늄合金 filler wire를 使用한 實驗에서 filler wire의 internal hydrogen 含量의 최대한도는 20ppm 정도로 熔接部에서의 氣孔形成에는 별로 영향을 끼칠 수 없다고 報告하였다. Collins[17] 또한 市中の 보통 알루미늄 板이나 filler wire는 氣孔發生의 直接的인 原因이 될 정도의 gas 量을 함유하고 있지는 않다고 하였다.

### 5. 熔接條件과 氣孔發生

熔接條件이란 一般의 熔接할 때 熔接入熱 熔接金屬의 到達最高溫度, 冷却速度 등을 直接的으로 左右하는 條件 들을 말한다. 그러므로 熔接條件이 氣孔發生에 미치는 영향을 考察하기 위해서는 위에 열거한 諸 要素를 통해 살펴보는 것이 타당하다.

熔接入熱이나 熔接金屬의 到達最高溫度, 冷却速度 등은 서로 從屬되는 變數 들이나 이중 冷却速度가 氣孔發生에는 가장 直接的인 영향을 끼친다고 알려져 있다. 一般의 冷却速度가 매우 느리면 porosity level은 낮고 크기는 크며 그 數는 적다. 반대로 매우 빠르면 역시 porosity level은 낮으나 작은 氣孔이 大部分을 차지한다. 이들 사이의 어느 冷却速度에서는 氣孔



의 생성이 극대화되며 크고 작은 기공들로 이루어진다. 이는 Saperstein[14]이 실험으로 확인하였는데 (Fig. 6) 그는 그 이유를 다음과 같이 설명하였다. 안전할 상태의 pore(기공의 생성機構 참조)가 형성된 후 이 pore들이 계속하여 성장하기 위해서는 수소가 기공 안으로 확산되어 들어가거나 또는 주변의 pore들과重合(coalescence)되어야 한다. 그런데 냉각속도가 매우 빠르면 수소의 확산이나 pore끼리의重合이 일어날 시간의 여유가 없기 때문에 기공이 성장을 못하게 되므로 기공의 농도는 낮게 된다. 반대로 냉각속도가 매우 늦으면 수소가 외기로 방출될 시간의 여유가 충분하므로 기공의 농도는 낮게 된다. 냉각속도가 너무 빠르지도 느리지도 않고 어느 중간값을 가지면 기공들이 잘 성장할 수 있어 기공의 농도가 극대값을 갖게 된다.

한편 냉각속도와 용접조건과의 관계를 유도하기 위해서 Rosenthal[29]은 이동熱源으로부터의 熱傳達을 數學적으로 解析하였고 그후 이 解析은 Adams[30]에 의해서 實際에 쉽게 적용될 수 있도록 보완 발전되었다. Adams는 平板에서 熱源이 直線적으로 一定하게 움직이고 있을 때 fusion interface(on the solid state)에서의 냉각속도를 다음과 같이 解析하였다.

$$\begin{aligned} \text{Cooling Rate} &= 2\pi K \rho C_p \times \left(\frac{St}{q}\right)^2 (T - T_0)^3 \text{ } ^\circ\text{F/sec} \\ &= 2\pi K \rho C_p \times \left(\frac{St}{\pi EI}\right)^2 (T - T_0)^3 \text{ } ^\circ\text{F/sec} \end{aligned}$$

- 여기서  $K$ : thermal conductivity of plate
- $\rho$ : density of the plate
- $C_p$ : specific heat of the plate
- $S$ : travel speed of moving heat source
- $t$ : plate thickness
- $q$ : energy output of source

- $\eta$ : efficiency of power transfer to the plate
- $E$ : arc voltage
- $I$ : arc current
- $T$ : initial plate temperature
- $T'$ : instantaneous temperature at which it is desired to determine the cooling rate at a point on the centerline of the heat source path

Adams의 냉각속도식을 통해 우리는 용접할 때 어떤 조건들이 기공 발생에 영향을 끼치는가 알 수 있다. 즉 熱源의 移動速度(welding speed) 板의 두께 아아크電流 아아크電壓, 板의 初期溫度 등의 조건들이 냉각속도에 영향을 미치고 따라서 기공 발생에도 영향을 미치게 됨을 알 수 있다.

이러한 여러 용접조건들의 가장 알맞은 상태를 알아내는 것은 매우 중요한 일이나 이에 대한 研究結果가 報告된 것은 매우 드물다. 더군다나 같은 조건하에서 용접하더라도 알루미늄합금의 종류가 다르면 수소의 固溶解度와 용접부에서의 수소흡入能力이 다르게 되어 合金의 종류마다, 그 適定條件을 알아내야 하는 어려움이 있다.

## 6. 結 論

알루미늄 용접에서의 기공은 微細한 기공이라도 動的인 機械의 性質에는 상당한 영향을 끼치게 됨이 多數 報告된 것으로 보아 일반 알루미늄 용접뿐만 아니라 특히 長時間 維持되어야 할 알루미늄 構造物의 용접에서는 기공의 形成은 禁物이라 하겠다. 알루미늄의 용접에서의 기공의 生成機構는 아직 완전히 究明된 것 같지는 않으나 대체적인 原因은 本 報告에서와 같이 밝혀진 것으로 생각된다. 그러므로 기공 발생에 대한 效果의인 對策은 本報에서 論한 點들을 검토하면 쉽게 講究될 것으로 생각된다. 용접조건이 기공 발생에 미치는 영향 또한 매우 중요한 것으로 Adams[30]의 냉각속도식을 이용한 適定 용접조건들의 算出은 특히 現場에서 중사하는 engineer들이 주의를 기울여야 할 것이다.

本報에서는 알루미늄의 용접에서 기공의 形成에 대해서만 論하였지만 shielding gae를 비롯한 용접조건과의 관계에서는 기공의 形成뿐만 아니라 용접부 또는 熱影響部의 微細組織의 變化와 더불어 研究되어야 할 것이다. 특히 熱의 영향을 받기 쉬운 알루미늄합금의 용접에서는 이 점이 가장 核心的인 問題이므로 추후 이 점에 대해서는 깊은 研究가 遂行되어야 할 것이다.

## 參 考 文 獻

- [1] Kitani; "Modern Alluminum Alloy for Welded Structure" *Journal of the Japan Welding Society* Vol. 38, No. 4, p. 326-342, 1969. (in Japanese)
- [2] *Welding Handbook, Sect. 4, 6th ed.*; American Welding Society, 1976.
- [3] W. L. Green, M. F. Hamad, and R. B. McCanly; "The Effects of Porosity on Mild Steel Weld" *Welding Journal* Vol. 37, No. 5, Research Suppl. 206-S to 209-S, 1958.
- [4] J. W. Bradley; "The Effects of Porosity on High-Strength Steel Welds" *Welding Journal* Vol. 43, No. 9, Research Suppl. 408-S to 414-S, 1964.
- [5] F. R. Baysinger "Observations on Porosity in Aluminum Weldments" Kaiser Aluminum and chemical Corporation (unpublished)
- [6] W. O. Dinsdale, and J. G. Young; "Significance of Defects in Aluminum Fusion Welds" *Common Wealth Welding Conference Document* M6, 1965.
- [7] Datas of Japanese Committee of Standard Operation of Welding of lightmetal.
- [8] J. F. Rudy and E. J. Rupert; "Effects of Porosity on Mechanical Properties of Aluminum Welds" *Welding Journal* Vol. 49, No. 7, Research Suppl. 322-S to 336-S, 1970.
- [9] R. J. Shore and R. B. McCanly; "Effects of Porosity on High Strength Aluminum 7039" *Welding Journal* Vol. 49, No. 7, Research Suppl. 311-S to 321-S, 1970.
- [10] R. B. McCanly; "Standard for the Acceptance of Weld Defects" *Proceedings of the Fifth International Conference on Nondestructive Testing* p. 472-477, 1967.
- [11] K. Masubuchi; "Integration of NASA Sponsored Studied on Aluminum Welding" *Redstone Scientific Information Center*, September, 1967.
- [12] The Martin Marietta Company Results of NASA Sponsored study NASA-11335 as Noted from Ref., 3.
- [13] D. G. Howden; "An Up-to-Date Look at Porosity Formation in Aluminum Weldments" *Welding Journal*, Vol. 50, No. 2, p. 112-114, 1971.
- [14] Z. P. Saperstein, G. R. Prescott and E. W. Moore; "Porosity in Aluminum Welds" *Welding Journal* Vol. 43, No. 10, Research Suppl. 433-S to 453-S, 1964.
- [15] Kurihara; "The Study of Inhibition of Blowhole in Corrosion-Resistant Aluminum Alloy Weld" *Welding of Light Metal* Vol. 68, p. 381-390, 1968.
- [16] Gobayasi; "The Effect of Water Vapor and Alloying Elements on the Porosity of Aluminum Weld" *Abstracts of the Lecture at the Wole Nation Meeting of the Japan Welding Society*(1968 Spring) Vol. p. 37-38. as noted from Ref. 20
- [17] F. R. Collins "Porosity in Aluminum-Alloy Welds" *Welding Journal* Vol. 37, No. 6, p. 582-593, 1958.
- [18] F. R. Coc; "The Quality Assacement of Gas Metal-Arc Welding Wire" *Welding Journal* Vol. 47, No. 8, Research Suppl. 355-S to 363-S 1968.
- [19] P. A. Kammer, M. O. Randall, R. E. Monroe and W. G. Groth; "The Relation of Filler Wire Hydrogen to Aluminum-Weld Porosity" *Welding Journal* Vol. 42, No. 10, Research Suppl. 433-S to 441-S 1963.
- [20] A Uchida; "Welding of Aluminum Alloys" *Journal of the Japan Welding Society* Vol. 38, No. 9, p. 955-969, 1969. (in Japanese)
- [21] M. B. Kasen and A. R. Pfluger; "Chlorine Additions for High-Quality Inert-Gas Metal-Ace Welding of Aluminum Alloys" *Welding Journal* Vol. 37, No. 6 Research Suppl. 269-S to 276-S 1958.
- [22] Toshiyasu Fukui, Yoshihiko Sugiyama and Shiro Terai; "Effects of Nitrogen, Oxygen and Hydrogen Gases Added to Argon Gas on MIG-Welding of Aluminum Alloys" *Transactions of the Japan Welding Society* Vol. 1, No. 1, p. 19-27, 1970.
- [23] T. Mantani and H. Notani; "Addition of Nitrogen to shielded Gas (He, Ar-He) in MIG Welding of Aluminum Alloys" *J. Japan Inst. Light Metals* Vol. 18, No. 12, p. 617-621, p. 622-626, 1968. (in Japanese)
- [24] G. Allen; "Aluminum Welding Using the Inert-Plus-Nitrogen Gas Metal-Arc Process" *Welding Journal* Vol. 38, No. 3, Research Sulpp. 132-S to 141-S, 1959.
- [25] Jen Chia-Lieh, Lo Chin-Ch'any and Chen Wu-Chie "Porosity in TIG Welded Aluminum and Aluminum Alloys" *Journal of SNAK* Vol. 15, No. 1, March 1978



- inum-Magnesium Alby Welds" IIW. Doc. ZII-325-66, IX-508-66 as noted from ref. 20.
- [26] K. Nanba, T. Fukui and Y. Sugiyama; to be published, as noted from ref. 22.
- [27] I. M. Terentév et al; "Thermal Diffusion of Hydrogen and Porosity in the Welding of Aluminum Aluminum Alloys" *Weld Prod.*(Svar Proiz.) No. 3, p. 1-3, 1968. as noted from ref. 20.
- [28] G. D. Nikiforox and A.G. Makhortova; "The conditions for Pore Formation when Welding Aluminum and Its Alloys" *Weld Prod.*(Svar. Proiz.) No. 3, p. 5-8, 1961. as noted from ref. 20
- [29] D. Rosenthal and R. Schmerber "Thermal Study of Theoretical Formulas" *Welding Journal* Vol. 17, No. 4, Research Suppl. 2-S to 8-S 1938.
- [30] Jr C. M. Adams "Cooling Rates and Peak Temperature in Fusion Welding" *Welding Journal* Vol. 23, No. 5, Research Suppl. 210-S to 215-S, 1958.