

## 技術報告

大韓造船學會誌  
第15卷 第1號 1978年 3月  
Journal of the Society of  
Naval Architects of Korea  
Vol. 15, No. 1, March 1978

### 알루미늄합금의 용접龜裂

朴 鍾 殷\* · 趙 大 植\*\*

#### Cracking in Aluminum Alloy Weld by

J.E. Park, D.S. Cho

#### 1. 序 論

最近 各 先進國에서는, 構造物의 輕量化 傾向으로 因하여, aluminum과 그 合金은 適用 範圍가 顯著하게 擴大되고 船舶, 陸上 車輛, 建築, 橋樑, 化學 容器, 農產物 貯藏用 silo 및 原子力 plant等과 같은 大型 構造物에 많이 使用되고 있다.

그런데 aluminum 材料의 使用上의 難點은 現場에서 的 熔接施工中에 熔接 龜裂을 包含한 여러가지 缺陷이 자주 發生하는 것이며, 이러한 缺陷의 形成을 效果의 으로 防止하는 方案의 開發이 매우 重要한 工學的 問題로 擡頭되고 있다.

現在 世界 各 先進國에서는 이와 같은 難題를 解決하기 爲하여, 熔接性이 良好한 새로운 aluminum 合金材의 開發, 從來부터 使用해 오던 熔接 施工法의 改善, 電子 beam 또는 laser 熔接法과 같은 새로운 施工機器의 開發等 많은 研究가 遂行되고 있다. 우리나라의 各 產業 分野에서도 早晚間 先進國과 같이, aluminum 材料의 使用이 急速한 趨勢로 늘어날 것이라는 것은 明若觀火한 일이라 생각된다.

이러한 時點에서, aluminum과 그 合金의 熔接 龜裂에 關하여, 現在까지 研究 된 여러가지 報告를 綜合 檢討하고, 熔接 龜裂의 原因과 防止法을 살펴봄으로써 現場에서 當面하고 있는 여러가지 問題에 對한 解決의 실마리를 찾아보는 것은 매우 뜻있는 일이라고 믿어진다.

여기서는 構造用 aluminum 合金을 주로 하여 여러

接受日字 : 1978. 3. 10

\* 正會員 : 서울大學校 工科大學

\*\* : 韓國船舶海洋研究所

가지 合金을 熔接할 때 일어나는 熔接 龜裂의 發生 原因과 그 防止法에 關하여 考察하기로 한다.

#### 2. Aluminum 合金 熔接部의 龜裂

##### 2.1. 熔接 龜裂의 種類

一般的으로 aluminum 合金 熔接部에서 發生하는 龜裂은 鑄造 龜裂과 같이 高溫龜裂 現象으로 알려져 있고, 이것은 熔接部가 凝固 收縮될 때 非平衡의 으로 形成되는 液膜(liquid film) 部分에서 發生된다고 한다. (1) (2)

熔接 龜裂은 그 發生 溫度에 따라 偏析 龜裂과 延性 低下 龜裂로 크게 나눌 수 있다. 前者는 結晶 粒界의 偏析 液膜으로 因하여 일어나는 龜裂이고, 後者는 液膜이 없는 새로운 結晶 粒界에서 延性이 低下되기 때문에 發生하는 龜裂이라 생각되고 있다. (3)

Fig. 1은 aluminum을 包含한 工業用 金屬 및 그 合金의 高溫에 있어서의 延性은 溫度 變化와 關聯지어 나타낸 것이다. (3)

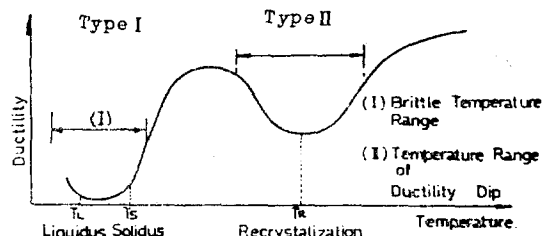


Fig. 1. Low ductility range in commercial metals

이 그림을 보면, 金屬의 延性は 液相線 및 固相線 사이와 再結晶 溫度 附近의 兩 領域에서 크게 低下되고 있음을 알 수 있다. 前者를 脆性 溫度 範圍(brittle temperature range)라 하고, 後者를 延性 低下(ductility dip) 溫度 範圍라고 부른다.<sup>(3-5)</sup> 그리고, 前者에서 일어나는 龜裂을 Type I 龜裂, 後者에서 發生하는 龜裂을 Type II 龜裂이라 하고, 이 兩 溫度域에서 일어나는 모든 熔接 龜裂을 일컬어 高溫龜裂이라 부른다.<sup>(3)</sup> 이 그림에서 Type I 龜裂은 凝固 溫度에서 發生하는 龜裂로서, 이것은 또 熔接金屬中에 形成되는 凝固龜裂과 熱影響部 또는 多層 熔接部의 前層에서 일어나는 融解龜裂로 分類된다. Type II 龜裂은 再結晶될 때 固相線 以下의 溫度에서 生成되는 龜裂로서, 熔接金屬 熱影響部의 延性 低下 龜裂과 多層 熔接部에서 일어나는 延性 低下 龜裂로 나누어진다.<sup>(3,4,6)</sup> 그런데, Type II 龜裂은 Type I 龜裂에 比하여 그다지 많지 않으며, 여러가지 aluminum 合金中에서 單只 Al-Cu-Mg, 系, Al-Cu-Mg-Si系, Al-Zn-Mg系 및 Al-33%Mg 合金 等の 熔接部에서만 가끔 나타난다고 한다.<sup>(3)</sup>

以上과 같이 aluminum 合金의 熔接 龜裂은 大部分이 Type I에 屬하는 凝固龜裂이고, 凝固龜裂은 모두 高溫龜裂이므로 Type I 龜裂을 普通 高溫龜裂이라 부른다.<sup>(7)</sup> 그러나 Type I의 龜裂中에서 融解龜裂은 高溫龜裂의 範疇에 屬하기는 하지만, 그 形成 機構가 다른 高溫龜裂과 若干 相異하기 때문에 따로 區分하여 微小龜裂(microfissuring)이라 하는 境遇가 많다.<sup>(8)</sup>

그런데, 熔接으로 因하여 aluminum 合金에서 發生하는 龜裂은 低溫龜裂과 應力腐蝕龜裂이란 것이 있다. 前者는 低溫에서 材料의 延성이 低下되기 때문에 일어나는 龜裂이고, 後者는 熔接할 때 熔接部에 內在하는 殘留應力과 使用 環境 條件의 相互 作用에 依하여 發生하는 龜裂이라고 알려져 있다.<sup>(9)</sup> 그러나 低溫龜裂은 aluminum이 他金屬에 比하여 卓越한 延性을 가지고 있기 때문에 特殊한 合金 또는 不適當 施工法으로 熔接하는 境遇外에는 別로 나타나지 않는다고 생각되고 있으며,<sup>(5)</sup> 應力腐蝕龜裂은 熔接 龜裂의 範疇에 包含시키기 보다 腐蝕에 依한 龜裂에 넣어 取扱하는 것이 一般的인 通例이므로,<sup>(10)</sup> 이에 對하여는 더 以上 言及하지 않기로 한다.

2.2 熔接 龜裂의 發生 機構

aluminum 合金 熔接部의 高溫龜裂 機構에 關하여 現在까지 여러가지 學說이 發表되어 있다. 이러한 學說 가운데 有名한 것은 shrinkage brittleness theory (Pumphrey, W.I.), strain theory (Pellini, W.S.) 및 gen-

eralized theory (Borland, J.C.) 등을 들 수 있으나,<sup>(11)</sup> 가장 一般的으로 받아들여지는 것은 generalized theory라 한다.<sup>(3)</sup> 그러나, 現在까지 發表된 많은 學說中 어느 한가지도 高溫龜裂의 機構를 正確하고 完壁하게 說明할 수 있는 理論을 提示한 學說은 없으며,<sup>(7)</sup> 全般的으로 高溫龜裂에 關한 概略의 또는 局部的 舉動의 說明에 머물고 있는 實情이다.

i) 高溫龜裂

Young<sup>(12)</sup>은 高溫龜裂을 가르켜 熔接金屬의 粒界에서 微視的 偏析(micro-segregation)이 생기기 때문에 일어나는 現象이라 하였고, Robinson<sup>(1)</sup>과 Liptak<sup>(13)</sup>는 熔接金屬의 合金 組成이 變化되기 때문에 發生하는 것이라고 報告하였다.<sup>(3)</sup>

Sugiyama<sup>(5)</sup>, Dudas<sup>(6)</sup>, Gibbs<sup>(14)</sup>, Minoda<sup>(15)</sup> 및 Fuku<sup>(16)</sup> 등의 研究에 依하면, 高溫龜裂은 熔接金屬의 結晶 粒界에 偏析된 共晶組成과 結晶 粒度가 主要原因이 되어 發生하며 此外 熔接部의 最高 溫度 및 冷却 速度 等を 原因으로 들 수 있다고 하였다.<sup>(11) (13)</sup>

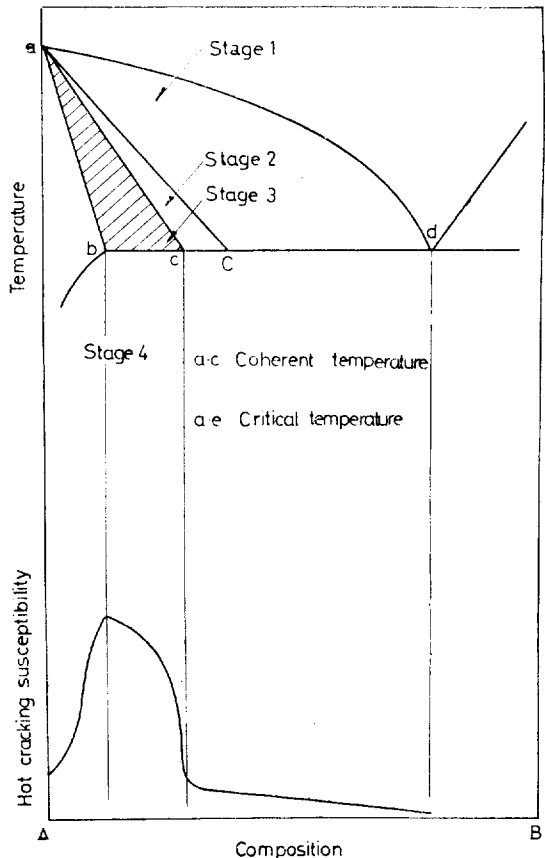


Fig. 2. The binary diagram and crack sensitivity on welds in aluminum alloys

Fig. 2는 aluminum 二元 合金에 있어서 高溫龜裂의 機構에 關한 Borland의 generalized theory를 說明하기 위한 狀態圖이다.<sup>(17)</sup> 이 그림에서 Stage 1과 Stage 2는 液相에 dendrite 組織이 分散, 存在하다가 凝固하기 始作하는 段階이며, Stage 3은 凝固가 大略 完了되고, 一部 粒界에서 共晶 組成 또는 低融點의 化合物 등이 液膜(liquid film)狀으로 存在하여 龜裂이 發生하는 段階이다. 이때, 龜裂은 固相 및 液相의 界面과 結晶 粒界 界面의 energy比에 依해 左右되어 일어 난다는 것이다.<sup>(17,18)</sup>

그러나, 다만 이 學說은 二元 合金에 關한 平衡論의 假定에 依하여 理論이 展開되고 있다는 點에 注目할 必要가 있다. 왜냐하면, 一般 實用 aluminum 合金 中에서 正確한 意味에서 純粹히 二 元素로만 이루어진 二元 合金은 아주 드물고, 實質的으로는 棼의 多寡를 不問하고 여러가지 元素가 添加된 擬似 二元 또는 多元 合金이 大部分이기 때문에, Borland의 假定과는 달리 熔接後의 凝固 速度가 大端히 빠르고,<sup>(18)</sup> 實用 合金 中에는 高融點의 金屬間 化合物이 熔接中 生成되는 것도 적지 않을 것이기 때문이다.<sup>(19)</sup>

한편, Fukui<sup>(18)</sup>는 高溫龜裂은 熔接金屬의 粒界에 不平衡의 形成된 共晶의 偏析과 結晶 粒度의 影響을 받아 發生하는 粒界 龜裂로서, 共晶 組成이 一定한 範圍의 粒界에 液膜狀으로 多量 存在하기 때문에 일어나는 것이라고 報告하였다.

一般的으로 aluminum 合金의 熱影響部 또는 熔接金屬의 粒界에는, 一定한 範圍에 걸쳐서 液膜狀의 共晶이 多量 存在한다고 알려져 있다.<sup>(17)</sup> 이와 같은 液膜은 急冷 凝固할 때, 非平衡의 形成되는 共晶 組成으로서, 주로  $Mg_2Al_3$  (Al-Mg系),  $Mg_2Si$  (Al-Mg-Si系),  $CuAl_2$  및 硫化物(Al-Cu-Mg系),  $Zn_2Mg$  (Al-Zn-Mg系),  $FeAl_3$ (全 aluminum 合金) 등이 含有되어 있다고 한다.<sup>(18)</sup> 이러한 共晶의 分布量은 結晶 粒度, 結晶 形狀 溫度 效果, 冷却速度 및 固相 溫度에 依해 變化된다. 高溫龜裂은 熔接部가 冷却 凝固할 때 일어나는 큰 收縮力을 이 液膜狀의 共晶이 局部的으로 勘當해야 하는 分布 狀態로 되기 때문에 發生하는 것이라고 생각되고 있다.<sup>(17)</sup> 다시 말하면, 高溫龜裂은 結晶粒이 粗大化되는 過程에서 液膜狀의 共晶 組成이 不平衡의 形成되어, 熔接部가 冷却될 무렵 合金 組成이 不均一하게 溶體化되기 前에, 液膜狀의 共晶이 粒界에 局部的으로 偏析하기 때문에 粒界面의 energy가 低下되고, 凝固 收縮할 때 일어나는 應力과 外部 拘束力이 相互 作用하여 發生한다는 것이다.<sup>(7,17)</sup>

ii) 高溫龜裂에 影響을 주는 要因

以上과 같은 여러가지 研究 報告를 綜合하여 볼 때, 高溫龜裂은 熔接金屬이 不平衡의 凝固하여 發生하는 粒界 龜裂로서, 一般的으로 熔接金屬의 凝固 速度, 合金 組成 및 熔接物의 拘束力에 依해 크게 左右된다고 생각된다. 그러나, 이 3가지 原因外에도 高溫龜裂에 影響을 주는 要因은 多様な 것으로 報告되고 있다. 即, 熔接部의 最高 溫度, 結晶 粒度, 凝固域의 面積, 凝固할 때의 收縮量, 熔融金屬의 流動性, 冷却 速度, 粒界 偏析, 金屬間 化合物의 粒界 析出, 亞粒界 形成, 熔融 金屬中의 gas量 및 水素 化合物의 形成等 여러가지가 있다.<sup>(17,18,20)</sup> 이들 中에서 結晶 粒度, 合金 組成 및 粒界 偏析은 金屬學的으로 重要한 因子이고,<sup>(20)</sup> 凝固할 때의 收縮量, 冷却速度, 拘束은 熱力學的 및 機械的인 面에서 各各 主要한 要因이라 생각되고 있다.<sup>(1,12,15)</sup>

iii) 微小龜裂(Microfissuring)

Yong의 研究에 依하면, 微小龜裂은 水素가 많이 含有된 熔接金屬 또는 熱影響部의 粒界에 여러가지 金屬間 化合物이 融解하여, 金屬學的 notch를 惹起시키기 때문에 發生한다고 하였다<sup>(12)</sup>.

이와는 달리 Steenbergen은 微小龜裂도 一般 高溫龜裂과 같이 Type I에 屬하는 龜裂이므로, 熔接部의 最高 溫度, 拘束 및 冷却 速度의 影響을 받아 일어나는 것이라고 報告하였다<sup>(7)</sup>. Fig. 3은 aluminum 合金을 TIG 熔接할 때 發生하는 收縮力을 時間에 따라 나타낸 것이다.<sup>(7)</sup> 曲線 ①은 微小龜裂이 일어나지 않은 健全한 熔接金屬을 나타내고, 曲線 ②는 微小龜裂이 發

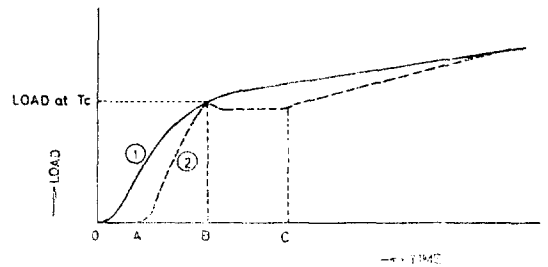


Fig. 3. Load-Time curve on welds in Al-Mg 7075 alloy 生한 境遇를 보여준다. 曲線 ①의 OB 區間에서 收縮力은 急上昇하다가 固相 冷却 溫度( $T_c$ )에 이르러 매우 緩慢하게 增加하고 있다. 이것은 塑性 變形이 大端히 적게 일어나는 것을 표시하며, 熔接部의 最高 溫度에서 液相 %가 매우 낮아, 粒度가 큰 顯微鏡 組織으로 될 을 나타낸다는 것이다. 曲線 ②는 熔接層間 溫度를 높게 하고, 冷却 速度를 빠르게 한 境遇이다. 이 曲線의

OA 區間은 dendrite 組織의 形成이 이루어지지 않고 있으므로 收縮力의 發生이 없으나, AB 區間은 dendrite 組織이 生成되어, 收縮力이 急激히 發生한다. 이 dendrite 組織은 B 點에서 完全히 凝固하게 되는데, 이때 液相의 凝固가 빠르면, 粒界에서 微小龜裂이 일어나서 BC 區間과 같이 傳播된다는 것이다.

한편, Fukui<sup>(20)</sup> 등은 熔接金屬의 粒界에 여러가지 共晶이 顯著하게 偏析하여, 다른 部分보다 低溫에서 熔融되기 쉬운 狀態로 되기 때문에, <sup>(11)</sup> 過度한 入熱로 熔接하거나 높은 層間 熔接熱을 받으면, 粒界의 共晶이 局部的으로 熔融하여 微小龜裂이 發生하게 되는 것이라고 하였다. <sup>(16)</sup>

以上 說明한 바와 같이, 微小龜裂은 熔接部의 過大 入熱, bead의 層間 溫度, 熔接部의 拘束, 強制 冷却, 熔接材의 두께 및 熔接 條件의 影響을 받아 形成되며 結晶 微細化를 위한 添加 元素와 合金 組成에 의해서도 크게 左右된다고 알려지고 있다. <sup>(11,21)</sup>

2.3 熔接 龜裂에 影響을 주는 要因

i) 金屬 組織의 影響

aluminum 合金의 熔接 金屬 組織은 普通 急冷 鑄造 組織으로서, 等軸晶, 柱狀晶, 粒狀晶 및 羽毛狀晶 組織이 大部分이라 생각되고 있다. <sup>(19)</sup> 그런데, 熔接金屬은 熔接할 때 入熱, 溫度 均配, 冷却 速度 및 添加 元素의 影響에 의해 母材와 隣接된 部分은 微細한 柱狀晶 組織이 되고, <sup>(4,15)</sup> bead의 中央部는 粒狀晶 또는 羽毛狀晶 組織으로 된다고 한다. <sup>(19)</sup> 그런데, 이때 熔接 入熱은 各 組織의 形成과 成長에 顯著한 影響을 주고, <sup>(19)</sup> 溫度 均配는 結晶의 成長 方向을 決定하는 役割을 한다고 하였다. <sup>(22)</sup> 또 冷却 速度는 結晶 粒度에 큰 影響을 미치게 되며, <sup>(4)</sup> 添加 元素는 結晶의 成長을 防止乃至는 抑制하는 效果를 나타낸다고 하였다. <sup>(15)</sup>

一般的으로, 熔接 龜裂은 結晶 組織의 影響을 크게 받으며, 大皆 柱狀晶, 等軸晶 및 羽毛狀晶 組織에서 發生한다고 알려져 있다. <sup>(23)</sup> 그런데, 熔接 龜裂은 各 組織中에서도 結晶의 會合部, 結晶의 境界 또는 粒界의 粗大화된 部分에서 主要 일어나기 때문에, <sup>(22)</sup> 粗大한 粒度를 가지고 있는 組織은 龜裂의 發生 可能性이 매우 큰 것으로 생각되고 있다. <sup>(24)</sup> 또 同一한 程度로 粗大한 粒度를 가지고 있을 때는 柱狀晶, 羽毛狀晶, 等軸晶 및 粒狀晶 組織의 順으로 龜裂의 發生 頻도가 높고, <sup>(22)</sup> 柱狀晶과 羽毛狀晶과 같이 龜裂의 發生 順位가 큰 組織이 共存할 때는 두 組織의 境界에서 熔接 龜裂이 일어난다고 하였다. <sup>(24)</sup>

ii) 添加 元素의 影響

1) Zirconium

一般的으로, Zr은 鐵(Fe)과 共存할 때, 熔接金屬의 高溫龜裂을 遲延시키는 效果를 나타낸다고 알려져 있다. <sup>(14)</sup> Dudas<sup>(6)</sup>에 依하면, Zr은 熔接金屬의 流動性을 改善하고, 結晶 粒度를 微細化시키며, 高溫龜裂에 對한 耐抗性을 높여 주는 效果를 나타낸다고 하였다.

한편, Fukui<sup>(18,19,24)</sup>의 研究에 依하면, Zr은 熔接部의 柱狀晶 또는 羽毛狀晶과 같은 粗大한 結晶組織의 發生을 抑制하고 微細한 粒狀 組織의 形成을 돕기 때문에 結晶粒과 形狀이 微細하고 均一하게 되어 龜裂發生이 抑制되는 것이라 하였다. Fig. 4는 Al-Zn-Mg 系 合金 熔接部의 高溫龜裂에 關한 Zr의 添加效果를 나타낸 것이다. <sup>(6)</sup> 이 그림에서, 龜裂길이는 Zr의 添加量이 커질수록 減少한다는 것을 쉽게 알 수 있다.

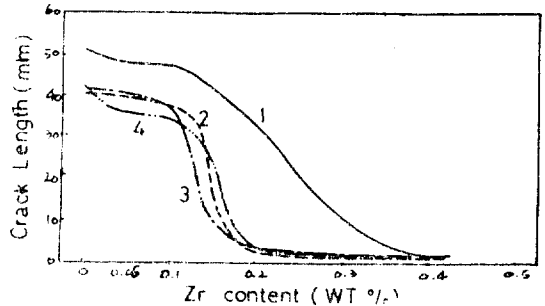


Fig. 4. Effects of Zr contents on hot cracking of bead-on-plate welds with filler wire in Al-Zn-Mg Alloy

以上과 같이, Zr의 添加는 熔接部의 耐龜裂性에 顯著한 效果를 나타내고 있는데, 이것은 熔接金屬中에서 Zr의 水素에 對한 反應 活性化 energy가 다른 金屬 元素보다 越等하게 우수하기 때문이라 생각되고 있다. <sup>(14)</sup> 即, Zr이 熔接金屬中의 水素를 강한 親和力으로 拘束하여 安定된 水素 化合物로 만들기 때문에, 單體로 獨立하여 存在하던 水素와 같이 粒界 energy를 低下시키지 못하게 되어, 高溫龜裂의 發生이 抑制된다는 것이다. <sup>(18,20,24,25)</sup>

2) Titanium

Ti와 B를 各各 個別的으로 aluminum 合金 熔接部에 添加하면, 耐高溫龜裂 效果를 그다지 나타내지 못한다고 한다.

Sugiyama의 研究에 依하면, Ti의 單獨 添加는 Mg 量이 많은 filler wire를 使用할 때만 龜裂 抑制 效果를 나타내는데 Ti의 含量이 0.02~0.04%일 때 가장 效果가 현저하다고 하였다. <sup>(20)</sup>

한편, Fukui<sup>(18)</sup>는 Ti가 Zr 또는 B와 같은 다른 結晶 微細化 元素와 함께 添加되어야 비로소 顯著的 耐龜裂 效果를 發揮하게 된다고 報告하였다. Fig. 5는 Al-4.5%Zn-1.5%Mg 합금을 各種 filler wire로 熔接 하였을 때 龜裂길이에 對한 Ti의 添加 效果를 나타낸 것이다.<sup>(18)</sup>

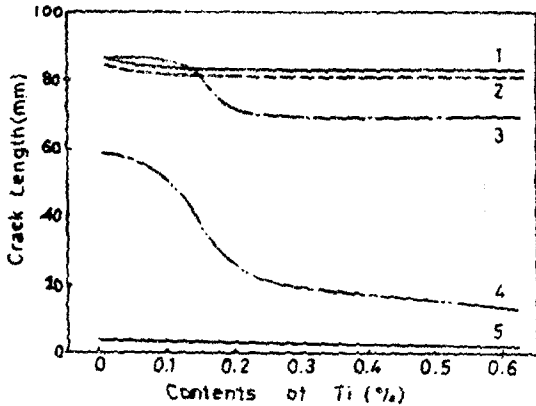


Fig. 5. Effects of Ti contents on crack length of TIG welds with filler wire in Al-4.5% Zn-1.5% Mg alloy

이 그림에서 Ti의 添加 效果는 그 含量이 0.2% 이상일 때 나타남을 알 수 있다.

Ti가 다른 結晶 微細化 元素와 함께 添加할 때 顯著的 耐龜裂 效果를 보이는 現象은, 熔接金屬의 固相線 以下 一定한 溫度域에, 不平衡의 形成된 結晶成分에 依해 準固相線(sub-solidus)이 存在하여 液膜狀으로 되어 있기 때문이라 하였다.<sup>(20)</sup> 이 共晶 成分에 Ti가 單獨으로 添加되면, 液膜이 얇고 넓게 分散되어 高溫 龜裂이 發生하기 좋은 條件이 形成되나, Zr 또는 B와 함께 添加되는 境遇에는 어느 程度 液膜의 分散이 抑制되어 龜裂이 일어날 條件의 形成이 어려워지기 때문에 耐龜裂 效果를 나타내게 되는 것이라 생각되고 있다.<sup>(15, 19, 26)</sup>

### 3) Magnesium과 Zinc

Rabkin<sup>(4)</sup>의 研究에 依하면, Mg의 添加는 高溫龜裂을 抑制하는 效果를 나타내며, Zn의 添加는 龜裂 發生을 促進하는 役割을 한다고 하였다. 一般의 으로, Mg의 添加量은 많을수록 顯著的 耐龜裂 效果를 나타낸다고 하는데,<sup>(4)</sup> 그 量이 過多하여 7% 以上이 되면, 어떤 種類의 合金에서나 많은 微小龜裂을 일으킨다고 하였다.<sup>(10, 25)</sup> 또 이러한 龜裂은 Mg와 Zn의 總 添加量이 7%를 超過할 境遇에도 자주 發生한다고 報告되었다.

Fig. 6은 Al-Zn-Mg系 合金 熔接部의 Zn 및 Mg 含量에 對한 龜裂 傾向을 나타낸 것이다.<sup>(4)</sup>

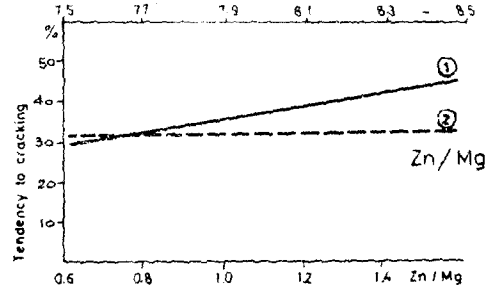


Fig. 6. Tendency to cracking on Zn and Mg contents in Al-Zn-Mg alloys

이 그림에서 直線 ①은 Zn과 Mg의 總量에 對한 龜裂 傾向이고, 直線 ②는 Zn과 Mg의 含量比에 對한 龜裂 傾向을 나타낸 것이다. 龜裂 傾向은 Zn과 Mg의 量 增加와 比例하여 增大하지만 ①, Zn과 Mg의 比 0.7이 될 때는 두 元素의 總量이 8.5% 程度가 되어 龜裂 傾向은 큰 變化가 없다는 것을 알 수 있다. ②

一般的으로 Mg는 高溫龜裂을 抑制하는 效果가 있고 알려져 있으나 그렇다고 하여 그 含量을 無限定 여줄 것은 못되고, Zn과 그 總量을 大略 7% 以下 되는 線에서, Zn을 3% 以下로 하고, Mg量이 Zn量 다 크게 해주어야 된다고 한다.<sup>(4, 9, 21)</sup>

## 3. 各 合金의 熔接 龜裂

### 3.1 龜裂 發生 合金

aluminum 合金中 純粹 aluminum과 Al-Mn系, Al-Si系 合金은 高溫龜裂에 對한 龜裂 感受性이 거의 없고,<sup>(3, 11)</sup> Al-Mg-Si系, Al-Mg系, Al-Cu系, Al-Zn-Si系, Al-Zn系, Al-Mg-Zn系, Al-Cu-Mg系 및 Al-Zn-Mg-Cu系 合金은 어느 程度 龜裂 傾向이 있다고 알려져 있다.<sup>(18, 27, 28)</sup>

한편, Al-Cu系 및 Al-Zn-Mg-Cu系 合金은 微小龜裂에 對한 龜裂 感受性이 顯著的 便이고, Al-Cu-Mg系, Al-Mg系 및 Al-Mg-Si系 合金은 微小龜裂 傾向이 지 않으며, Al-Zn-Mg系 合金의 境遇는 中間 程度 한다.<sup>(11)</sup> 그러나, 微小龜裂이 잘 일어나지 않는 合金이라 하더라도 높은 層間 溫度로 不良한 熔接 條件에서 熔接할 때는 龜裂이 發生하는 경우가 많다고 한다.<sup>(8)</sup>

### 3.2 Al-Cu系 合金

이 系統의 合金은 熔接 龜裂을 助長하는 元素인

가 주합금 성분이므로, 高溫龜裂에 對한 龜裂 感受性이 크다고 알려져 있으나,<sup>(1,9)</sup> 母材와 filler wire의 組合이 適切한 境遇는 優秀한 耐龜裂性을 나타낸다고 한다.<sup>(30)</sup> Fig. 7은 aluminum 合金 熔接部의 Cu 含量에

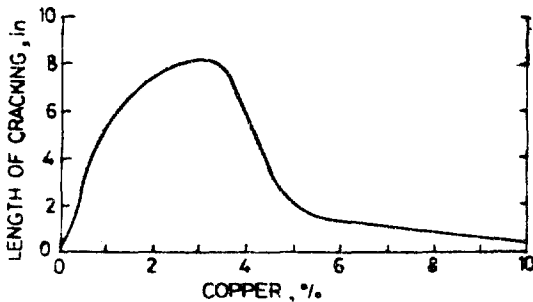


Fig. 7. Relation between Cu contents and length of cracking in aluminum alloy welds

對한 高溫龜裂 길이의 關係를 나타낸 것이다.<sup>(13)</sup> 이 合金을 熔接할 때는, 結晶 微細化 元素인 Zr, Ti 및 V 등이 添加되고, Mg 또는 Si가 含有되지 않은 filler wire를 選定하여, 龜裂 發生이 最大로 되는 Cu含量이 되지 않도록 熔接金屬의 合金 組成에 特別히 注意하여야 된다고 한다.<sup>(1)</sup> 이 까닭은 熔接金屬中에서 Mg와 Si이 低融點의 共晶을 形成하여 高溫龜裂을 助長하고, Fig. 7에서와 같이 4.4% Cu가 되면 高溫龜裂을 最大로 發生시킬 憂慮가 있기 때문이라는 것이다.<sup>(1,3)</sup>

### 3.3 Al-Mg系 合金

一般的으로, 이 合金은 熔接에 對한 耐龜裂性이 큰 構造用 材料이므로 熔接할 때 特別히 不適當한 施工法으로, 熔接하지 않는 限, 龜裂 發生은 實際로 큰 問題가 되지 않는다고 알려져 있다.<sup>(22)</sup>

그러나, 熔接金屬에 龜裂의 發生을 助長하는 Si과 같은 元素가 固溶限 以上으로 添加될 境遇는 Mg<sub>2</sub>Si라는 共晶이 粒界에 偏析하여 耐高溫龜裂性을 阻害한다.<sup>(4, 10, 23)</sup> 그러므로, 이 合金의 熔接에는 Si이 含有된 filler wire의 使用을 삼가하는 것이 좋고, 반드시 써야 할 境遇는 結晶 微細化 元素를 含有하고 있는 filler wire를 選擇하는 것이 바람직하며,<sup>(10, 22)</sup> 될 수 있는 限 filler wire의 Mg含量이 母材의 Mg含量보다 높은 것으로 組合해야 된다고 한다.<sup>(3)</sup>

### 3.4 Al-Mg-Si系 合金

이 合金은 Mg와 Si를 同時에 含有하고 있으므로 다른 合金보다 龜裂이 자주 發生한다고 한다. Mg와 Si은 各各 2.5% 및 0.5%에서 高溫龜裂을 最大로 發生시킨다고 報告되었다.<sup>(3, 13)</sup> 이것은 Mg와 Si이 共晶을

形成하여 熔接金屬의 粒界에 析出하기 때문이라 생각되고 있다.<sup>(3)</sup> 이 系統의 合金은 約 1%程度의 Mg<sub>2</sub>Si 共晶을 含有하고 있으므로, 一般的으로 高溫龜裂의 發生이 아주 容易한 成分 範圍에 있는 것이 普通이다. 그러므로, 같은 系統의 合金 filler wire는 Mg 또는 Si를 含有하고 있어서, 龜裂 發生의 憂慮가 많아 不適當하고, Al-Mg系나 Al-Si系 filler wire를 使用하는 것이 바람직하다고 생각되고 있다.<sup>(3)</sup> 그런데, Al-Si系 合金을 獎勵하는 것은 이 合金이 高溫龜裂에 有害한 Si를 含有하고 있지만, 熔接할 때 filler wire가 母材보다 若干 낮은 溫度에서 熔融 또는 凝固되는 性質이 있으므로, 다른 合金을 熔接할 때와는 달리, 母材가 多少 冷却된 後에도 어느 程度 可塑性을 維持하여, 熔接部에서 發生하는 收縮 應力을 弛緩시키는 作用을 하기 때문이다.<sup>(1, 23)</sup>

### 3.5 Al-Zn-Mg系 合金

一般的으로 이 系統의 合金은 熱處理를 하여 만든 高强度 合金으로 機械의 性質이 매우 優秀하다고 알려져 있다. 그러나, 熔接性이 大端히 不良하여, 熔接部의 機械의 性質은 熔接 條件의 變動에 따라 左右된다고 한다.<sup>(1)</sup> 特別히 이 合金을 熔接하면, 熔接龜裂이 頻發하고 強度가 急激히 低下되므로<sup>(4, 9)</sup> 構造用 材料로 使用할 때는 慎重을 기하는 것이 좋다고 한다.<sup>(9)</sup> 이 合金의 熔接 龜裂은 Zn과 Mg含量과 結晶 微細화를 위한 Zr 및 Ti 등의 添加 元素에 依해 큰 影響을 받는다고 한다.<sup>(16, 13, 21)</sup> 그러므로, 이 合金을 熔接할 때 龜裂을 防止하려면, Zn과 Mg의 比가 0.7이 되게 하고, 두 元素의 總含量이 7%以下가 되도록 材料 組合을 適正히 하며,<sup>(4)</sup> filler wire는 될 수 있는 限, 結晶 微細化 元素가 添加된 것을 使用해야 한다.<sup>(21)</sup>

## 4. 結 論

aluminum 合金 熔接部의 龜裂은 龜裂의 種類 또는 그 크기에 關係없이 熔接金屬의 延伸率, 引張 強度, 疲勞 強度, 耐座屈 強度 및 衝擊值 등의 機械의 性質을 低下시키고 脆性을 誘發하는 가장 有害하고 致命的인 缺陷이므로, 어떠한 熔接 構造物에도 이와 같은 龜裂이 發生하지 않도록 慎重히 對策을 講究하는 것이 바람직하다. aluminum 合金 熔接部의 이러한 龜裂은 앞에서 說明한 바와 같이 여러가지 複雜한 原因의 相互作用에 依하여 多樣한 形態로 發生되는 것이므로, 熔接 施工에 들어가기 前에 母材와 filler wire의 適正한 組合 適用할 熔接法과 熔接 裝備 選定 및 이에 對한 熔接 條件을 綿密히 檢討할 必要가 있다. 또, 熔接部의

冷却 速度 調節을 위한 jig의 選定, 熔接物 拘束을 위한 fixture 使用에 關한 對策, 熔接에 依해 發生하는 殘留 應力과 變形 防止法 講究 및 適用 熔接 順序의 決定等を 慎重히 考慮해야 한다. 이 中에서도, 熔接 現場에서 가장 손 쉽게 採擇할 수 있는 龜裂 防止法은 材料의 選擇과 組合이라는 것이 一般의인 原則이다. 왜냐하면 母材와 filler wire의 選定은 가장 容易하게 熔接 龜裂을 防止하는 方法일 뿐 아니라, 金屬學的 觀點에서 보더라도 合金 組成 및 組織形成을 合理的으로 調整하여, 龜裂의 發生을 抑制할 수 있는 方法이기 때문이다.

여기서는 單只 aluminum 合金을 熔接할 때 일어나는 高溫龜裂의 原因과 그 對策에 關하여만 考察하였으나, 熔接 條件의 여러가지 variables가 高溫龜裂의 感受性에 미치는 影響, 熔接으로 因한 應力腐蝕龜裂 및 熔接部の 低溫 破斷等에 對하여도, 많은 研究가 遂行되어야 할 것이다.

### 參 考 文 獻

- (1) Robinson, I.B., Collins, F.R., and Dowd, J. D., "Welding High Strength Aluminum Alloys" *Welding Journal*, 221s-228s, May. 1962.
- (2) George E. Linnert, "Welding Metallurgy, AWS, 3rd Edition, Vol. 2 Chapter 13, 229-238, 1967.
- (3) Japanese Welding Society, "Welding Handbook", 3rd Edition, Chapter 4, Section 5, 819-821, Section 8, 837-840 and Section 10, 1036-1040.
- (4) Rabkin, D.M., "Nature of Hot Cracks Initiating in Welding the Aluminum Alloys and Some Methods of Crack Prevention", Cracking and Fracture in Welds, *Proceedings of the First International Symposium, sub-session II-D1 to II-D5*, Nov, 1971.
- (5) Sugiyama, Y. and Fukui, T., "Effect of Additional Elements on Weld-Crack Susceptibility of Al-Zn-Mg Alloys", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, 19-27, Vol. 8(2), 1967.
- (6) Dudde, J.H., "Joining New High-Strength Aluminum Alloy X7075", *Welding Journal*, 358s-364s, Aug. 1965.
- (7) Steenbergen, J.E. and Thornton, H.R., "A Quantitative Determination of the Conditions for Hot Cracking During Welding for Aluminum Alloys", *Welding Journal*, Research Supplement, 61s-68s, Feb. 1970.
- (8) Uchida, A., "Welding of Aluminum Alloys", *Journal of the Japan Welding Society*, 3-16, Vol. 38(9), 1969.
- (9) Terai, Z., "Stress Corrosion Cracking of Aluminum Alloy", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, Research Supplement, 89-103, Jan. 1970.
- (10) Baba, Y., Hagiwara, M. and Hamada, J., "Stress Corrosion Cracking of Commercial Al-Mg Alloys and its Prevention", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, 22-28, Oct. 1973.
- (11) Fukui, T., "Study on Eutectic-Melting and Micro-fissuring of Welds in Aluminum Alloys", *Journal of the Japan Welding Society*, 20-29, Vol. 38(6), 1969.
- (12) Young, J.G., "BWRA Experience in the welding Al-Zn-Mg Alloys", *Welding Journal*, 451s-461s, Oct. 1968.
- (13) Liptak, J.A. and Baysinger, F. R., "Welding Dissimilar Aluminum Alloys", *Welding Journal*, 173s-180s, Apr. 1968.
- (14) Gibbs, F.E., "Development of Filler Metals for Welding Al-Zn-Mg Alloys 7039", *Welding Journal*, Research Supplement, 445s-453s, Oct. 1966.
- (15) Minoda, K. and Fukui, T., "Effect of Aluminum Alloy Storage Tank for Cryogenic Service", *Journal of the Japan Welding Society*, 35-47, Vol. 44(1), 1975.
- (16) Sugiyama, Y., Fukui, T. and Terai, S., "On the Weld-Cracking and Micro-fissuring of Weldable Al-Zn-Mg Alloys", *IJW, Doc. IX-624-69*, 1969.
- (17) Borland, J.C., "Generalized Theory of Super-Solidus Cracking in Welds", *British Welding Journal*, 7(8), 508-512, 1960.
- (18) Fukui, T., "Effects of Small Amounts of Additional Elements on Hot-Cracking of Aluminum Alloys", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, 19-31(18), 1968.
- (19) Fukui, T., Namba, K. and Sugiyama, Y., "Weld-Solidified Structure of Commercial 5083 Aluminum Alloy and its Mechanical Behavior", *Journal of the Japan Welding Society*, 71-78, Vol. 42(12), 1973.
- (20) Sugiyama, Y. and Fukui, T., "Study on Weldable

- A-Zn-Mg Alloys Report 2", *Journal of the Japan Welding Society*, 70-77, Vol. 35(11), 1966.
- (21) Sugiyama, Y. and Fukui, T., "Study on Weldable Al-Zn-Mg Alloys Report 1", *Journal of the Japan Welding Society*, 26-35, Vol. 35(9), 1966.
- (22) Minoda, K., Irisawa, T. and Nagoka, H., "Weldability of Al-Mg Alloy 5083-O Thick Plates Report 2", *Journal of the Japan Welding Society*, 46-53, Vol. 46(10), 1977.
- (23) Hay, R.A., "No. 3 of a Series on Welding Aluminum", *Welding Journal*, Practical Briefs, 225-226, Apr. 1974.
- (24) Sugiyama, Y. and Fukui, T., "Lap Joint Fillet-Weld Cracking Test of Aluminum Alloys", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, 56-62, (10), 1973.
- (25) Dudas, J.H. and Collins, F.R., "Preventing Weld Cracks in High-Strength Aluminum Alloys", *Welding Journal*, 241s-249s, Jun. 1966.
- (26) Tanaka, E., "Study on Cryogenic Characteristics of Al-Mg Alloy", *Sumitomo Light Metal Technical Reports*, 56-63(3), 1943.
- (27) Sugiyama, Y. and Fukui, T., "Study on Weldable Al-Zn-Mg Alloys Report 3", *Journal of the Japan Welding Society*, 38-46, Vol. 36(11), 1967.
- (28) Sugiyama, Y. and Fukui, T., "Study on Weldable Al-Zn-Mg Alloys Report 4", *Journal of the Japan Welding Society*, 79-85, Vol. 38(1), 1969.
- (29) AWS, "Specification for Aluminum and Aluminum Alloy Welding Rods and Bare Electrodes", AS. 10-69, Apr. 1973.
- (30) Saperstein, Z.P. and Eyring, C.L., "Fracture Strength and Micro-Structure and Welds in 2014 Aluminum", *Welding Journal*, 90s-96s, Feb. 1968.