

**研究論文**

## Varestraint Test법에 의한 Al-Li합금의 용접성 평가

김형태\* · 이창배\* · 신현식\*\* · 서창제\*\*\*

### An Evaluation on the Weldability of Al-Li Alloys by Varestraint Testing Method.

H. T. Kim\*, C. B. Lee\*, H. S. Shin\*\* and C. J. Shur\*\*\*

**key words** : Al-Li alloy(알루미늄-리튬 합금), Gas Tungsten Arc Welding (GTAW),  
Varestraint Test(고온균열시험), Total Crack Length (TCL:총균열길이),  
Maximum Crack Length (MCL:최대균열길이)

#### Abstract

The weldability of high purity aluminum-lithium binary alloys has been investigated using the Varestraint test. Autogenous GTAW (gas-tungsten-arc-welds) were run along specimens of different lithium concentration using three sets of welding parameters. Welding voltage was held constant at 10 volts. Welding current (70~100 amps) and travel speed (23~33 cm/min) were the parameter varied.

Hot-tearing susceptibility varied with lithium content and exhibited a steep peak at 2.6 weight percent lithium. Depth of penetration increased with increasing heat input and lithium concentration. The susceptibility is influenced by the wettability of dendrites by the interdendritic eutectic liquid as well as the time available for back-filling by eutectic liquid. The welding condition of welding current 70A and travel speed 23 cm/min was showed good resistance to cracking in aluminum-lithium alloys. Suggestions for improving weld cracking resistance are also provided.

\* 학생회원, 성균관 대학교 금속공학과

\*\* 비회원, 성균관 대학교 금속공학과

\*\*\* 정회원, 성균관 대학교 금속공학과

## 1. 서 론

최근 산업 구조가 점차 고도화 됨에 따라 우주 항공, 자동차 등의 분야에서는 보다 좋은 물성을 지닌 새로운 재료의 요구가 증대되고 있으며 이들에 사용되는 재료들이 지녀야 될 기본 특성으로는 고강도화, 고강성화, 저밀도화 등이다.<sup>1,2)</sup> 이러한 추세에 발맞추어 최근 주목받고 있는 것이 알루미늄에 Li를 첨가한 Al-Li계 합금이다.<sup>3,4)</sup> 최근 선진국에서 상용화된 Al-Li계 합금으로는 8090, 8091, 2090 및 Weldlite™ 049 등의 합금들이 있다.<sup>3,5,6)</sup>

알루미늄에 Li의 첨가는 다른 원소와 다르게 밀도와 탄성계수에 현저한 효과를 주는 것으로 알려져 있다. 예를 들면 Li를 1 wt%를 첨가 하였을 경우 알루미늄의 밀도는 ~3% 씩 감소하고 탄성계수는 ~6% 씩 증가한다. 그 결과 비탄성 계수는 다른 합금에 비하여 현저한 증가를 나타내게 된다. 따라서 기존의 항공기용 구조재료를 Al-Li계 합금으로 대체할 경우 약 10%의 질량 감소 효과가 예측되고, 적용 분야에 적절한 설계를 할 경우에는 15~20% 까지의 질량 감소 효과가 기대되고 있다.<sup>6)</sup> 그러나 Li첨가에 의한 우수한 성질에도 불구하고 Al-Li합금의 용접성은 다른 알루미늄 합금에 비하여 떨어지는 단점이 있기 때문에 우주·항공기 분야 외에 고압가스용기, 잠수함, 로봇 등 그 적용 범위가 제한되고 있다.<sup>7,8,9,10)</sup> 따라서 광범위하게 Al-Li합금을 적용하기 위하여는 이러한 재료들의 효율적인 접합법과 용접야금학적인 철저한 이해와 발전이 요구되어진다.

본 연구에서는 Li함량을 1~5wt% 변화시킨 Al-Li계 합금을 제조하여 Al-Li계 합금내에서 Li함량이 GTAW특성에 미치는 영향을 고찰하였다. 그리고 Li함량과 용접조건과의 연관성 및 이를 통한 Varestraint 시험의 고온균열감수성과 용접부 조직과의 상관관계를 분석하여 Al-Li 이원 합금의 적정 용접조건을 제시하고자 하였다.

## 2. 실험 방법

### 2.1 사용 재료

본 실험에서는 Li함량을 1~5wt%까지 변화시켜 시료를 ingot로 제조하였고 그 조성은 table 1에 나타내었다. 초기 두께 21.6mm 의 Al-Li계 합금을 muffle로에 490℃에서 1시간 동안 안정화 처리한 후 로울러를 이용하여 10.5mm로 열간 압연하였다. 이것을 다시 460℃에서 1시간 동안 재차 안정화 처리하여 3.2mm까지 multi-pass로 열간 압연을 실시하였다.

Table 1. Chemical composition of alloys (wt%)

Alloy	A	B	C	D	E
Nominal composition	1	2	3	4	5
Chemical composition	1.167	1.995	2.697	3.155	5.209

### 2.2 Varestraint고온 균열시험 및 균열관찰

Al-Li 이원계 합금의 고온균열감수성을 조사하기 위하여 TIG-A-MA-JIG Varestraint (LT 1100 Serial 9102) 실험장치를 이용하여 고온균열시험을 transverse방향으로 실시하였다. 이 실험에 사용되는 시편의 형상은 Fig.1에 나타낸 바와 같으며 시편을 압연방향(L방향)과 평행한 방향으로 채취하였다.

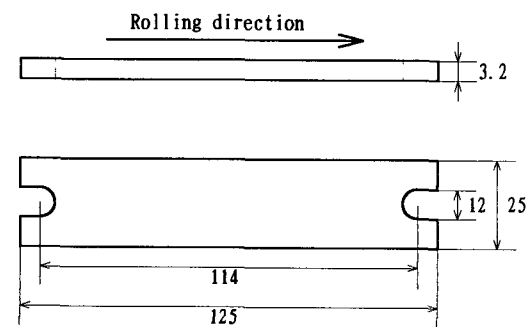


Fig.1 Dimension of Varestraint test specimen

고온균열시험을 하기 전에 모든 시편에 충분한 연성을 주기 위하여 1시간 동안 530℃에서 고용화 처리 후 수냉처리를 하였으며, 또한 시편 표면의 불순물과 산화 피막을 제거하기 위하여 wire

brush로 시편 표면을 약 0.2mm정도 연마한 후 아세톤으로 탈지하였다.

고온균열시험 용접조건은 table 2에서 나타낸 바와 같이 용접전류(70~100A)는 교류를 사용 하였다. 이것은 같은 규격의 일반 Al 합금의 용접전류(약 90~120A)보다 낮는데 그 이유는 Li 첨가에 의하여 Al-Li 합금의 열전도도가 일반 Al 합금 보다 낮기 때문이다. 용접속도는 traveller를 이용하여 조절하였고 용접 시작시 용융지가 형성될 때까지 traveller를 정지하였다가 적정한 용융지가 형성되면 traveller를 이동시켰다. 보호 가스는 아르곤을 사용하였으며 용접시 가스 공급량은 9 l/min로 하였다. 또한 Al-Li 이원 합금의 용접성은 기존의 알루미늄 합금보다 용접성이 우수하기 때문에 augmented strain은 4.0%로 하였다.

**Table 2.** Welding Conditions for Varestraint test

Welding Variable	Welding Condition
Welding method	GTAW
Electrode polarity	Alternative
Electrode	1% Th-W (2, 4 $\phi$ )
Voltage (V)	10
Arc current (A)	70~100
Welding speed (cm/min)	24~33
Shielding gas	Argon
Shielding gas flow (l/min)	9
Augmented strain (%)	4.0
Press (psig)	20

Varestraint시험을 실시한 각 시편은 SEM을 사용하여 균열의 길이, 조직 및 파단면을 관찰하였다. 파단면은 아세톤으로 깨끗이 닦아 알콜속에 보관하였고, SEM 관찰을 하기 전에 초음파 세척으로 완전히 세척시킨 후 관찰하였다.

### 2.3 조직 관찰 및 경도 시험

GTA용접한 다음 시편을 bead 길이 방향에 수직하게 절단한 후 표면을 연마하여 Keller시약으로

에칭한 후 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 용접 부위에 형성된 석출상 ( $\delta'$ )을 TEM으로 관찰하여 그 분포 및 크기가 Al-Li계 합금의 GTA용접 특성에 미치는 영향을 고찰하였다.

경도 시험은 Micro-vickers 경도시험기를 이용하여 100gf의 하중을 주어 용접부의 중심에서 모재까지 0.4mm 간격으로 경도 분포를 측정하였으며 GTA용접 후 용접부의 급냉에 따른 조직 변화와 열영향부(Heat affected zone)의 형성 및 열처리에 의한 경도 변화를 조사하였다.

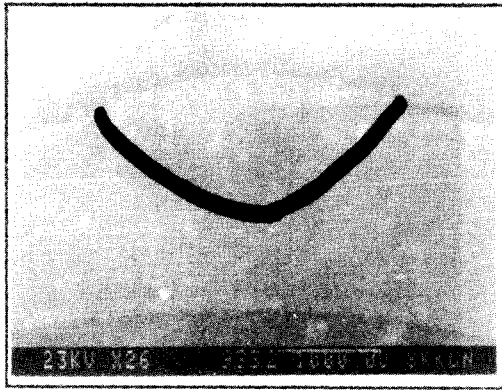
## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 조직 관찰

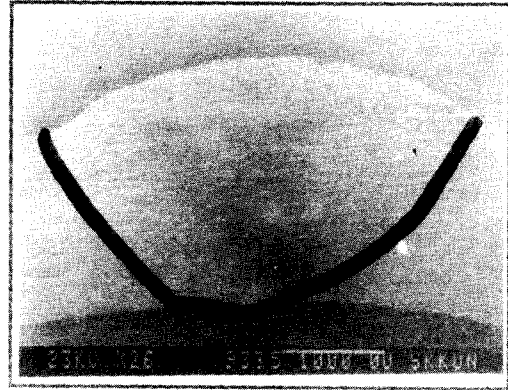
#### 3.1.1 용접부의 단면 조직 관찰

Photo. 1은 Li 함량 및 입열량의 변화에 의한 Al-Li 합금의 용입깊이의 차이를 나타내는 사진(용접부 단면 사진)으로서 사진 (a)와 (b)는 Li함량이 증가함에 따라 용입깊이가 더 증가됨을 나타내고 있는데 이것은 순 알루미늄에 Li의 첨가는 알루미늄 합금의 열전도도를 감소시키는 것으로서 설명되어 질 수 있다.<sup>11)</sup> 또한 사진 (a)와 (c)는 동일용접전류에서 travel speed를 변화시킨 경우이고, 사진 (c)와 (d)는 동일 travel speed에서 용접전류를 변화시킨 경우를 나타내는 것으로서 시편의 용입깊이는 입열량이 증가함에 따라 더 깊어짐을 알 수 있었다.

Photo. 2는 용접전류 90A에서 용접한 Al-Li합금의 용접 중앙부(cross section)로서 사진 (a)에서는 등축입자내에 작은 cell의 존재와 용접방향에 대해 수직으로 성장하고 있는 cellular조직의 명확한 입자경계를 확인할 수 있었다. 사진 (b)에서는 Li농도가 2wt%에서 3wt%로 증가한 경우로 cellular조직에서 cellular dendrite조직으로 변화하는 과정을 확인할 수 있었으며 입자는 (a)의 경우보다 조대하였고 입계에는 공정상의 얇은 막이 형성되었다. 사진 상의 지인은 이 공정상을 가리킨다. 사진 (c)에서는 cell이 용접방향에 평행하게 성장하였기 때문에 입자 경계의 구분이 어려웠으나 조직내 공정상의 존재는 관찰할 수 있었다. 용융부 중앙에는



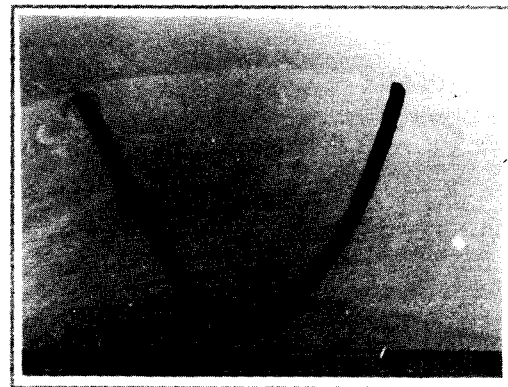
(a) weld metal composition : 2wt%Li  
weld condition : 90A, 33cm/min  
heat input : 1636 joule/cm



(b) weld metal composition : 5wt%Li  
weld condition : 90A, 33cm/min  
heat input : 1636 joule/cm



(c) weld metal composition : 2wt%Li  
weld condition : 90A, 27cm/min  
heat input : 2000 joule/cm



(d) weld metal composition : 2wt%Li  
weld condition : 100A, 27cm/min  
heat input : 2222 joule/cm

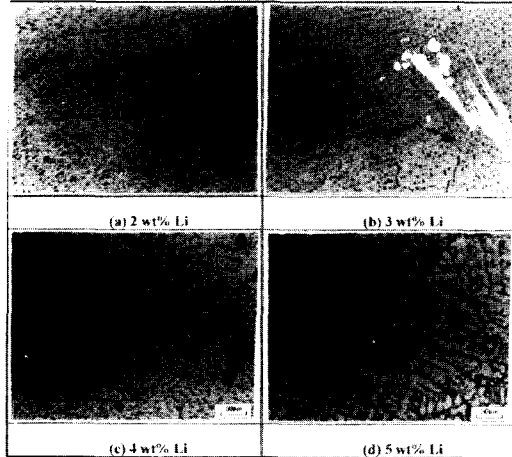
**Photo. 1** The effect of Li concentration and heat input on weld profile.

dendrite 층들에 의한 등축정조직들이 잘 나타나 있으며 사진(d)에서는 가지가 잘 발달한 dendrite 조직과 dendrite 가지 사이에 존재하는 공정상이 관찰되었다.

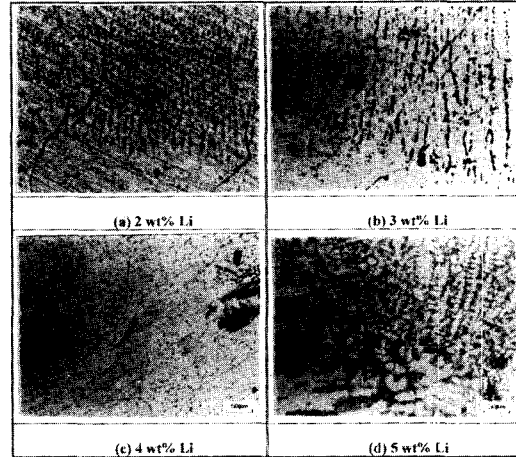
Photo. 3은 용접전류 70A에서 용접한 Al-Li 합금의 용접부로서 (a)에서는 용접전류 90A에서 용접한 조직보다 큰 등축정의 입자를 나타내고 보다 명확한 입자 경계를 볼 수 있었다. 사진상의 지인은 큰 등축정의 입계를 가리키고 있다. (b)에서는

planar에서 cellular로 변하고 있는 입자 경계부가 존재하고 중앙 윗부분에서는 입자의 경계를 명확히 구분할 수 없었다. (c)에서는 용접부 전체에 걸쳐 미세한 cellular 조직을 형성하였고 입계에는 공정상이 존재하였으나 (d)에서는 4wt%Li를 함유한 조직과는 대조적으로 가지가 잘 발달한 dendrite 조직을 관찰 할 수 있었다.

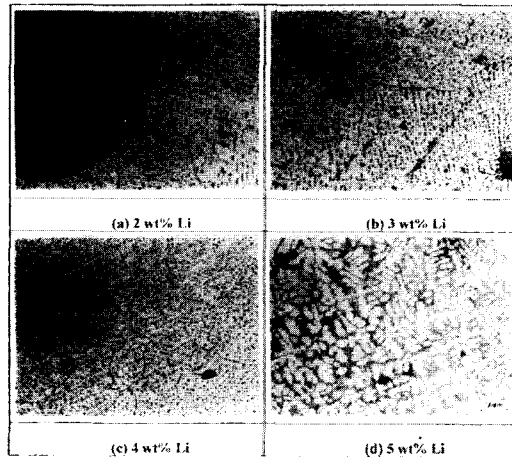
Photo. 4는 용접전류 70A, travel speed 23cm/min에서 용접한 Al-Li합금의 열영향부 조직 사진



**Photo. 2** Optical microstructure of weldments in Al-Li alloys (Weld condition : current 90A, travel speed 33cm/min)



**Photo. 4** Optical microstructure of HAZ in Al-Li alloys (Weld condition : current 70A, travel speed 23cm/min)



**Photo. 3** Optical microstructure of weldments in Al-Li alloys (Weld condition : current 70A, travel speed 23cm/min)

으로 (a)에서는 재결정부가 나타나지 않았으나 모재 조직과 평행하게 성장한 planar 조직이 형성되었으며 입자 경계가 명확하였다. (b)에서는 Li농도가 3wt%인 경우로 (a)의 조직 사진에 비하여 cell 간격이 다소 넓어진 것을 알 수 있었다. 이것은 Li농도 증가에 의한 열전도도의 감소의 효과이다. (c)에서는 재결정부 형성이 있었으며 입자의

성장은 cellular에서 cellular dendritic으로 변화하는 것을 나타내고 있다. (d)는 재결정부와 dendrite를 둘러싼 공정상을 나타내고 입자는 columnar하게 성장하고 있음을 나타내었다. 그러므로 용접부의 조성적 과냉 정도에 따라 용접 계면의 용고 양상은 planar → cellular → cellular dendritic → columnar dendritic로 변화하는 것을 알 수 있었다.

이상에서 조직에 대한 우선적인 성장 방향은 Li 농도에 의존함을 알 수 있었으며 낮은 농도에 대해서는 용접방향에 수직으로 성장하여 입자의 성장 방향을 뚜렷하게 구별할 수 있었으나 고농도에 대해서는 입자의 성장이 용접방향에 평행하게 성장하므로 입계의 구별이 어려웠다.

### 3.1.2 용접부의 균열 조직 관찰

Photo. 5는 Li 함량과 용접조건에 따른 Al-Li합금의 균열 양상을 나타낸 조직 사진으로서 crack의 전파는 전체적으로 입계를 따라 전파되었음을 나타내고 있다. 사진 (a), (b) 그리고 (c)는 동일용접 조건에서 Li함량 변화에 따른 균열 양상으로서 (a)는 crack이 진전됨에 따라 입자의 떨어짐을 볼 수 있었으며 crack은 다소 날카로우며 폭은 고농도에 비하여 작은 경향을 나타내었다. (b)는 (a)에 비하여 많은 crack이 형성되었음을 나타내고 이것은 입

자 경계부에 존재하는 공정상을 따라 일어났음을 알 수 있었다. (c)의 crack의 폭은 (a)와 (b)에 비해 증대되었으나 날카로운 crack 발생은 나타나지 않았고 crack 발생 부위에서 공정상의 존재를 관찰할 수 있었다. 그리고 (a), (d)와 (f)는 용접조건은 다르나 동일 Li함량인 경우로서, crack 전파는 비슷한 양상을 나타내었으나 (d)는 (a)에 비하여 구별이 명확하여 입계를 따라 crack의 발생이 용이하였음을 알 수 있었으며 crack의 폭도 넓었다. 사진 (b)와 (e)는 동일 Li 함량일 때 다른 용접조건인 경우로 (e)가 (b)의 경우에 비하여 공정상이 입내에 고루 분포함으로써 공정상이 입계를 따라 잘 발달한 (b)의 경우보다는 crack의 전파가 용이하지 않았음을 알 수 있었다. Crack의 형상은 (e)의 경우가 다소 작게 형성되었다.

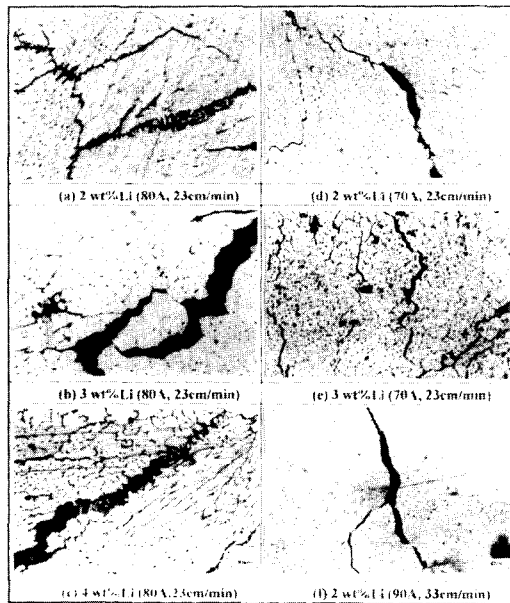


Photo. 5 Crack microstructure of weld zone in Varestraint test specimen

### 3.2 용접부의 경도 분포

Fig. 2는 각각 Li함량이 2wt%, 3wt%인 합금의 경도 분포를 나타낸 그림으로서 용접조건에 관계없이 용접 중심부의 경도값이 가장 낮은 값을 나

타내었으며 전체적으로 모재쪽으로 갈수록 큰 경도분포를 나타내었다. 열영향부인 HAZ(I)에서는 경도값이 증가하다가 감소한 후, HAZ(II)에서 다시 증가하는 경향을 나타내었다. 이와 같은 경향은 HAZ(I)는 용접시 반응용부로서 고용화처리되어 자연시효가 된 부분으로 경도값이 증가하고 HAZ(II)에서는 용접시 용접열 cycle에 의해 석출상이 재고용되어 석출경화 효과가 감소하여 경도가 낮아진다고 사료된다.<sup>12)</sup>

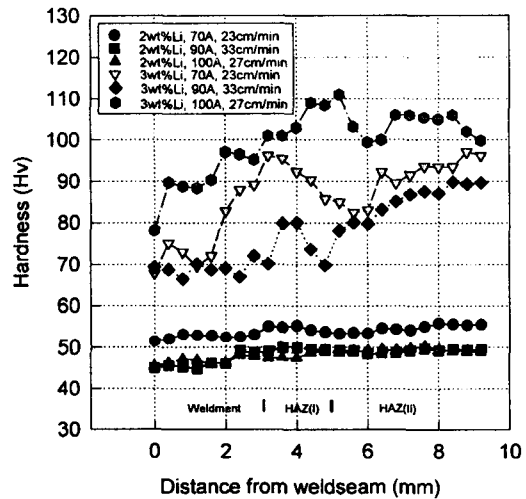


Fig. 2 Micro-Hardness variations weldseam of Al-Li alloys

Li 함량이 2wt%일 때 용접조건 변화에 따른 경도 분포는 용접조건이 70A, 23cm/min인 경우가 다른 용접조건에 비해 용접 중심부 뿐 만 아니라 전체적으로 높은 경도값을 나타내었으며 다른 세 가지 조건에 대하여는 비슷한 경도값을 나타내었다. Li 함량이 3wt%에서는 전체적으로 경도값의 경향이 유사하였으나 용접조건이 100A, 27cm/min일 때 용접중심부에서 큰 경도값을 나타내었다. 이와 같은 경도 값의 변화는 용접전류와 이동속도의 변화에 의한 미세조직의 변화에 의한 것으로 사료된다.

Fig. 3은 동일용접조건(70A, 23cm/min)에서 Li 함량 변화에 따른 경도분포곡선을 나타내었다. 용접부는 Li농도의 증가와 더불어 경도값이 상승하

였으며 3,4wt%인 경우는 2wt%의 경우보다 큰 경도값을 나타내었다. 4wt%의 경우는 용융부에서의 경도값이 3wt%의 경우와 유사하였으나 5wt%의 경우는 용융부의 경도값이 가장 크고 열영향부, 모재쪽으로 갈수록 경도값은 감소됨을 나타내었다.

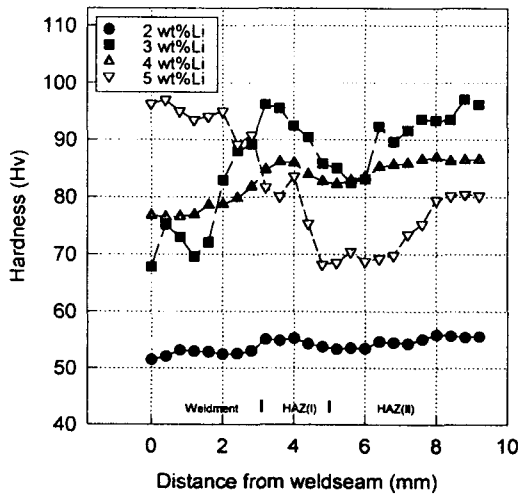


Fig. 3 Micro-Hardness variations weldseam of Al-Li alloys (condition : 70A, 23cm/min).

### 3.3 Vareststraint 시험 후 고온 균열 거동

Fig. 4는 Vareststraint 시험 후 각 용접조건에서 조성 변화에 대한 TCL값의 변화를 나타낸 것으로 용접조건에 관계없이 Li농도가 3wt%에서 가장 나쁜 용접성을 나타내었다. 고온균열 시험시 발생하는 균열은 용접시 급냉에 의하여 처음으로 기계적 강도를 갖는 온도(즉 Coherent 온도)와 nil-ductility 온도 사이의 취성온도구간에 의하여 좌우 되므로 Li농도가 3wt%일 때 가장 나쁜 용접성을 나타내는 이유는 가장 넓은 취성온도구간을 갖기 때문인 것으로 사료된다.

Al에 Li의 첨가는 표면장력을 현저히 감소시키는 것으로 알려져 있다.<sup>13)</sup> Li함량이 3wt%이상 첨가하는 경우에는 Li이 wettability를 개선시키고 동시에 고/액 계면 근방의 용융금속에 편석이 일어나 응고가 진행됨에 따라 Li과 저용점 solute-rich상이 미세한 입체를 따라 편석된다. 결과적으로 입체에 존재하는 Li이 부유한 용융금속이 균열 발생시 용융금속 재충진을 통하여 균열에 대한 치료가 빠르게 진행되어 균열의 전파가 저지되는 것으로 사료

된다.

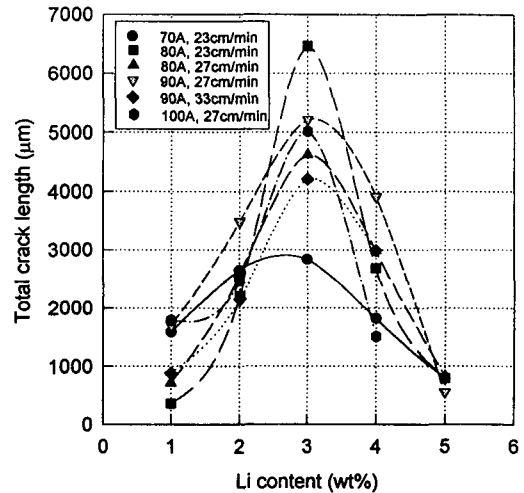


Fig. 4 Change of Total crack length of Al-Li alloys with Li content.

용접전류 70A, travel speed 23cm/min에서 Li함량의 변화(특히, 2~3wt%구간)에 대한 TCL값의 변화는 다른 용접 조건들과 비교할 때 전체적으로 큰 격차가 없었다. 이것은 Fig. 2와 Photo. 3의 경도 및 조직관찰결과 2wt%Li합금의 높은 경도값은 crack 발생을 용이하게 하며 동일 용접조건에서 3wt%, 4wt%Li합금에 비해 2wt%Li합금은 조대한 입자들의 경계부를 통한 crack의 전파가 진행되었을 것으로 사료된다.

Li함량이 3wt%인 경우 용접전류 70A, travel speed 23cm/min에서 가장 좋은 고온균열감수성을 나타냄을 알 수 있었는데 이것은 Photo. 3의 용융금속 조직관찰결과, cellular dendrite 조직의 불명확한 입자경계가 crack 전파에 대해 완충작용을 한 것으로 사료된다.

Fig. 5는 MCL(Maximum Crack Length)을 측정 한 결과로 MCL값은 Fig. 4의 TCL값과 전체적으로 유사한 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 Vareststraint 시험에서 구한 Al-Li합금의 TCL과 MCL의 관계를 나타낸 것으로서 정비례관계를 나타내고 있으며 이로 보아 Al-Li 합금에서 MCL은 TCL과 유사한 경향을 나타냄을 알 수 있었다.

Photo. 6은 용접전류 70A, travel speed 23cm/min에서 조성에 대한 균열양상을 나타낸 사진으로

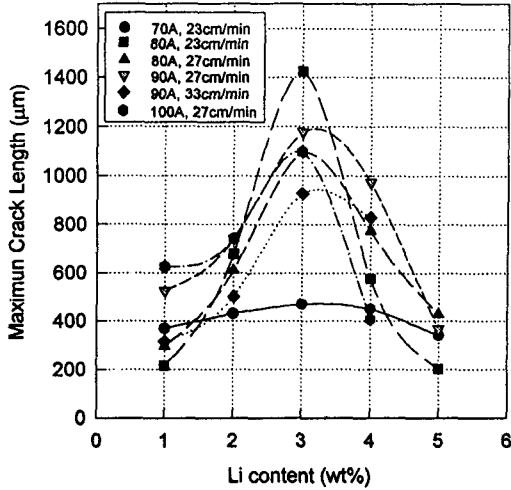


Fig. 5 Change of Maximum crack length of Al-Li alloys with Li content.

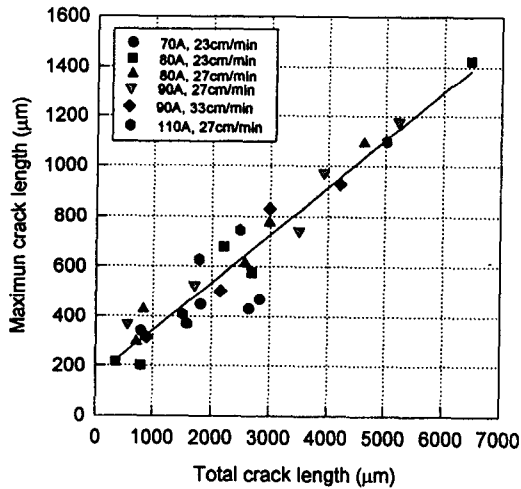


Fig. 6 Relationship between Total crack length and Maximum crack length.

서 용융부의 crack은 고상선에서 발생하여 이미 응고가 끝난 고상부분으로 전파하는 경향을 나타내었으며 crack 형상은 저농도일수록 균열이 작고 예리하였으며 Li농도가 증가할수록 조대한 균열이 생성되었으나 무딘형상을 나타내었다. 또한 2wt% Li에서는 균열이 비드부 전체에 균일하게 분포하여 3wt%Li보다 많은 균열이 발생하였음을 알 수

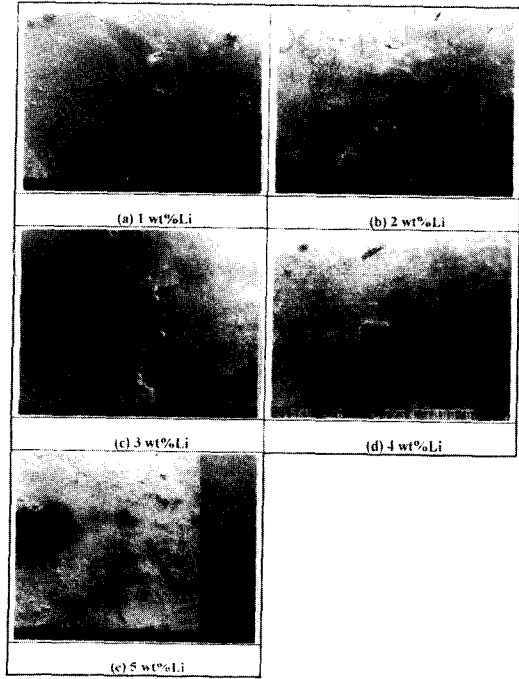


Photo. 6 Crack shapes of the top surface of Varestraint test samples (Weld condition : current 70A, travel speed 23cm/min)

있었다.

Photo. 7은 Al-Li계 합금의 용접 조건에 따른  $\delta'$  석출상 및 초격자점을 표시하는 SADP(selected area diffraction pattern)을 나타내었다. Photo. 7(a)와 (b)는 용접조건(70A, 23cm/min)은 같고 Li함량이 2wt%, 3wt%인 시료의 용접부에서 생성된  $\delta'$  석출상을 나타낸 사진으로써 Li함량이 3wt%인 시료에서  $\delta'$ 이 훨씬 미세하게 형성되었으며 이 경우에 Fig 4에 나타난 용접성과 비교하여 볼 때 미세한  $\delta'$ 이 형성됨으로써 용접성이 향상 되었음을 알 수 있었다. 그 원인은 미세한  $\delta'$ 이 응력을 받았을때 planar slip이 일어날 확률이 적기 때문에 파괴인성이 향상되어 crack 발생이 억제되었을 것으로 사료된다. Photo. 7 (c)는 90A, 33cm/min시료의 Z=(100)<sub>Al</sub> zone axis의 (110)ppt의 초격자점에서 관찰한 SADP로서 matrix의 회절점 이외에  $\delta'$  석출상에 의하여 형성된 초격자 회절점들이 잘 나타나 있으며 (d)는 이러한 초격자 회절을 이용하여 얻은 DF(dark field)상을 보여 주고 있다. Photo. 7 (a)와



(d)는 Li함량이 2wt%로 같고 각각 용접조건이 70A, 23cm/min과 90A, 33cm/min로 다른 경우 용접부의  $\delta'$  석출상을 나타낸 사진이다. (a)에 비해 (d)의 경우가  $\delta'$ 이 훨씬 미세하게 형성되었음을 나타내고 있는데 이 경우에 용접조건이 다르므로 용접입열량이 (a)의 경우 1826 joule/cm이고 (d)의 경우는 1636 joule/cm로서 용접입열량이 작은 (d)의 경우  $\delta'$ 의 성장시간이 (a)의 경우보다는 짧기 때문에 미세하게 형성되었을 것으로 사료된다. 따라서 Fig. 4에 나타난 용접성과 비교하여 볼 때 (d)의 경우가 훨씬 용접성이 좋은 것을 알 수 있었다.

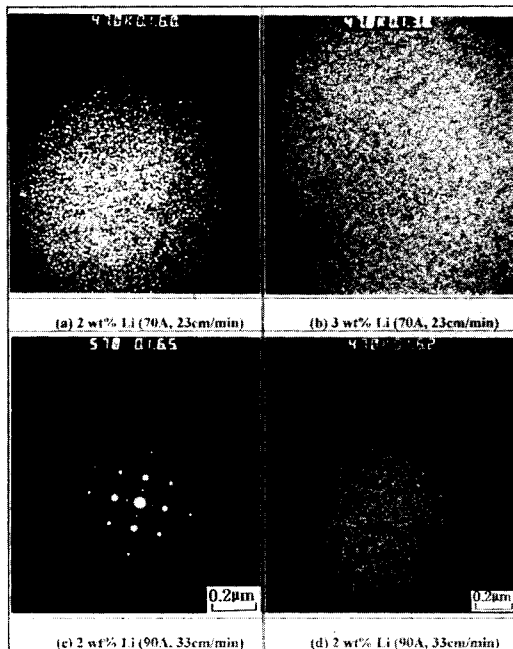


Photo. 7 TEM microstructure of Vareststraint test samples in Al-Li alloys.

Photo. 8은 Al-Li 합금의 용접 조건에 따른 TEM 조직 사진이다. (a)와 (b)는 동일용접조건에서 Li함량이 2, 3wt%인 시료의 용접부에서의 결정립계 사진으로서 Li함량이 2wt%인 경우 결정립계의 폭이 3wt%에 비해 입계의 폭이 감소됨을 알 수 있었다. (a)의 경우에는 결정립계내에  $\delta'$ 으로 추정되는 미고용 석출물의 존재가 crack 전파에 대하여 완충작용을 할 수 있는 결정립계 미끄러짐(G.

B sliding)에 나쁜 영향을 미치므로 용접성이 좋지 않음을 알 수 있었다. 이것은 Fig. 4에 나타난 결과와 일치한다. 사진 (a)와 (c)는 동일 Li함량 (2wt%)에서 용접조건에 따른 결정립계의 차이를 나타내고 있는데 (a)경우가 결정립계내의 미고용석출물의 크기가 더 크고 연속적이다. 이와 같이 결정립계에 생성된 미고용석출물의 발생의 차이는 용접입열이 큰 (a)의 경우 Li이 입계로 쉽게 확산되어 미고용석출물을 많이 생성시키기 때문으로 사료된다. 그러므로 (c)의 경우가 (a)의 경우보다 용접성이 더 좋을 것으로 사료되었다. (b)와 (d)는 동일 Li함량(3wt%)에서 용접조건에 따른 결정립계 차이를 나타내고 있는데 (b)의 경우는 결정립계를 따라 slip band를 형성하고 있는 반면 용접입열이 큰 (d)의 경우는 결정립계내에 넓은 폭으로 미고용석출상이 존재하는 것을 나타내고 이것은 Fig. 4에 나타난 결과와 일치하며 다른 것과 비교하여 좋지 않은 용접성을 나타내었다.

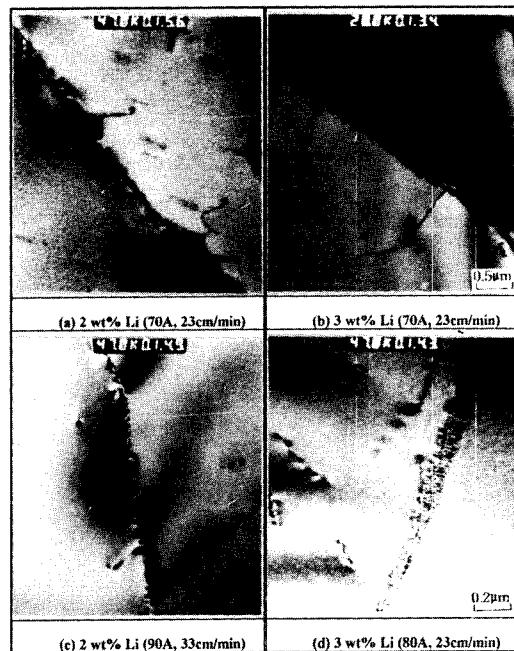


Photo. 8 TEM microstructure of Vareststraint test samples in Al-Li alloys

## 5. 결 론

Li함량을 1~5wt% 변화시킨 Al-Li계 합금을 제조하여 Varestraint Test법에 의한 용접특성을 평가한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) Li농도의 증가로 인한 열전도도의 감소에 따라 용접계면과 용접금속조직이 변화 하였으며, 응고 양상은 입열량의 감소 또는 Li 농도의 증가에 의하여 cell 간격의 감소와 함께 cellular 또는 cellular dendritic을 나타내었다.

2) 용접조건 90A, 33cm/min은 시효경화능이 뚜렷하게 나타나는 Li농도 2wt%에서는 좋은 용접성을 나타내었으나 3wt%에서는 용접성이 좋지 않았다. 용접조건 70A, 23cm/min은 Li농도 3wt%에서도 좋은 용접성을 나타내었다.

3) 용접부의 균열은 용융부가 응고할 때 액상과 고상의 계면에서 발생하여 응고된 고상 방향으로 전파하였으며 용접부의 crack은 Li농도 3wt%에서 조대한 균열이 생성되었다.

4) 용접성이 전반적으로 양호한 조건인 70A, 23cm/min 에서는 Li함량에 따른 TCL값의 차이는 거의 없었으며 Al-Li 합금의 용접부에 형성된  $\delta$  석출상은 Li함량이 2wt%인 경우보다 3wt%의 경우가 훨씬 더 미세하게 형성되었다.

5) Al-Li 합금의 용접부 결정립계에 존재하는 미고용 석출물 ( $\delta$ )은 용접성에 나쁜 영향을 미치며 결정립계에 존재하는 공정상의 양은 Li농도 3wt%을 기준으로 공정상이 적거나 많을수록 용접성이 좋았다.

## 참 고 문 헌

1. R. Grimes, T. Davis, H. J. Saxty and J. E. Fearon: "Progress to Aluminum-Lithium Semi-Fabricated Products", Journal de Physique, 4th intl. Aluminum Conference, (1987), p10-12.
2. P. E. Bretz : "Alithalite Development and Production", Journal de Physique, 4th intl. Aluminum Conference, (1987), p10-12.
3. J. R. Pickens, F. H. Heubaum, L. S. Kramer, T. J. Langan, and K. S. Kumar : "Ultra-High Strength Weldable Al-Li Alloy Development by Martin Marietta Laboratories", in Proceedings of M. L. Handbook 5 Meeting, (1988).
4. G. Leroy, R. Mace, Marchive, P. Meyer, R. Nossent, F. Schlecht : "Status Report on the Development of Aluminum-Lithium at Pechiney", Journal de Physique, 4th intl. Aluminum Conference, (1987) p10-12.
5. Pannel discussion on Al-Li alloys. AGARD Netting, Mierlo, Netherlands. (1988), p3-5.
6. J. R. Pickens, :the weldability of lithium-containing aluminum alloys. Journal of Material Science 20, (1985) p4247-4258.
7. W. E. , Narayanan, G. H. , Wingert : Aluminum - Lithium alloys for aircraft structure - an overview, Aluminum - Lithium Alloys II : TMS-AIME Co nferece Proceedings. (eds.) T. H. Sanders and E. A. Starke, Jr. , New York, NY, (1983), p 313-334.
8. M. Ramula, M. P. Rubbert : "Gas Tungsten Arc Welding of Al-Li-Cu Alloy 2090" 1990. march Welding reseach supplement, (1990), p109-114.
9. Pickens, J. R. , Langan, T. J. , Barta, E. : Weldability of Al-5Mg-2Li-0.1Zr Alloy 01420. Aluminum Lithium Alloys III: Proc. Third Intl. Aluminum Conf. eds. C. Baker, P. Gregson, S. J. Harris and C. J. Peel, (1986), p137-146.
10. Lenz, D. : Opportunities for aluminum with innovative technology. Aluminum 61(1) E1-E9(1985).
11. L. F. Monolfo : Aluminum Alloy Structure and Properies, butterworths, (1979), p. 309.
12. He Yunjia, Gao Dalu Sun Zhixiong, Wulu : 6th Aluminum-lithium conference (1992), p 1203-1208.
13. A. M. Korolkov, Foundary Properties of Metals and Alloys, 1960, p43.