# 알루미늄 합금 레이저 용접부의 고온균열감수성 ( I )

## Solidification Crack Susceptibility of Laser Welded Aluminum Alloys ( I )

**윤종원**

동의대학교 신소재공학과

## 1. 서론

Al-Mg 및 Al-Mg-Si 합금은 승용차 구조재 및 바디 패널로 사용되고 있다. Al-Mg 및 Al-Mg-Si 합금의 아아크 용접시 균열 감수성은 여러 종류의 균열시험 방법에 의해 평가되어왔으나, 레이저 용접시 응고균열 감수성의 정량적인 평가는 아직 체계적으로 보고되고 있지 않다. 본 연구에서는 Al-Mg 및 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접부의 응고 균열 감수성을 정량적으로 평가할 수 있는 균열시험 방법을 선정, 개발하기 위해 이들 알루미늄 합금레이저 용접부의 균열 감수성을 정성적으로 조사하였다.

## 2. 소재 및 실험방법

본 실험에서는 Al-Mg 및 Al-Mg-Si 합금의 균열 감수성을 비교하기 위해 1200 및 1050 알루미늄을 함께 사용하였다. 사용한 소재의 화학조성 및 두께는 Table 1과 같다. 직경 1.2 ㎜의 용접 wire를 용가재로 사용하였으며 용접 wire의 화학조성은 Table 2와 같다. 1.6~2.2 ㎜ 두께의 판재는 레이저 출력 5kW에서, 6~6.4㎜ 두께의 판재는 레이저 출력 10kW에서 완전용입을 얻도록 용접속도를 선정하여 용가재 없이 bead-on-plate (구속없이) 및 I-square butt (구속 상태에서) 용접을 행하였다. 또 1.6㎜ 두께 6061 판재 및 6.4㎜ 두께 6082 판재는 자동 용접에 더하여 용접 와이어를 사용하여 butt 용접을 행하였다. 용접 비드에서의 횡균열 및 종균열 발생을 조사하였으며, 용접부를 절단, 폴리싱, 에칭 또는 전해 에칭하여 광학현미경을 이용하여 용접부 횡단면 및 종단면에서의 균열 발생을 조사하였다. 주사전자현미경 및 EDX를 이용하여 균열부위를 조사하였다.

| Alloy | Thickness (㎜) | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Zr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 1200 | 2.0 | 0.06 | 0.27 | <0.01 | <0.01 | <0.02 | <0.01 | 0.01 | 0.01 | - |
| 1050 | 6.0 | 0.12 | 0.33 | - | - | - | - | - | 0.01 | - |
| 5251 | 2.0 | 0.05 | 0.16 | <0.01 | 0.23 | 1.91 | <0.01 | 0.04 | - | - |
| 5251 | 6.0 | 0.14 | 0.36 | 0.03 | 0.25 | 2.19 | 0.02 | 0.05 | - | - |
| 5083 | 2.0 | 0.14 | 0.29 | 0.02 | 0.63 | 4.46 | 0.05 | 0.01 | - | - |
| 5083 | 6.0 | 0.18 | 0.37 | 0.02 | 0.80 | 4.08 | 0.15 | 0.03 | 0.04 | - |
| 6061 | 1.6 | 0.62 | 0.25 | 0.23 | <0.01 | 0.92 | 0.17 | <0.01 | 0.02 | - |
| 6061 | 6.4 | 0.63 | 0.38 | 0.30 | 0.05 | 0.87 | 0.20 | 0.10 | 0.02 | - |
| 6111 | 2.2 | 0.63 | 0.48 | 0.31 | 0.10 | 1.06 | 0.20 | 0.14 | 0.02 | - |
| 6082 | 2.0 | 0.92 | 0.42 | 0.05 | 0.50 | 0.90 | 0.02 | 0.05 | 0.02 | - |
| 6082 | 6.4 | 0.99 | 0.29 | 0.03 | 0.67 | 0.82 | 0.01 | 0.05 | 0.06 | - |

Table 1 Nominal chemical compositions (in wt.%) of aluminum alloys used (balance aluminum).

| Filler | diameter (㎜) | Si | Fe | Cu | Mn | Mg | Cr | Zn | Ti | Zr |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 4043A | 1.2 | 4.65 | 0.36 | 0.01 | 0.01 | 0.01 | - | 0.01 | - | - |
| 4047A | 1.2 | 12.0 | 0.8 | 0.3 | 0.15 | 0.1 | - | 0.2 | - | - |

Table 2 Nominal chemical compositions (in wt.%) of filler wires used (balance aluminum).

## 3. 실험결과 및 고찰

균열발생

Al-Mg-Si 합금 레이저 용접부는 용접 비드에서 횡균열 및 종균열 발생이 관찰되었다. 구속을 하지 않은 상태에서 용접된 bead-on-plate 용접에 비해 구속상태에서 용접된 butt 용접부에서 용접 비드 횡균열 및 종균열 발생이 감소되었다 순 알루미늄(1200, 1050) 및 Al-Mg 합금(5251, 5083) 레이저 용접 비드에서는 횡균열 및 종균열이 발견되지 않았다.

거의 모든 6061 및 6082 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접금속 단면에서 균열이 발생되었으며 (Fig.1), 6㎜ 두께 5083 합금 레이저 용접금속 단면에서도 고온균열이 관찰되었다. 그러나 1200 및 1050 알루미늄 및 2㎜ 두께 5251 및 5083 Al-Mg 합금 레이저 용접금속 단면에서는 고온균열이 발생되지 않았다. Al-Mg-Si 합금 레이저 용접부 용융금속에서 응고균열이 발생되는 것과 아울러 열영향부에서는 결정입계를 따라 liquation 균열이 관찰되었으며, 이 liquation 균열은 종종 용융금속 응고균열과 연결되어 있다. 1200 및 1050 알루미늄 및 5251 및 5083 Al-Mg 합금 레이저 용접부 열영향부에서는 liquation 균열이 발생되지 않았다.

모재 조성의 영향

위에서 기술한 균열발생 경향을 모재 조성과 관련시키면, 1200 및 1050 순 알루미늄 레이저 용접부의 경우 좁은 응고 온도 범위와 공정조성의 액상의 분율이 매우 적기 때문에 응고중 더 많은 solid-solid interlocking 이 가능하여 조사된 알루미늄 합금중 응고균열 감수성이 제일 낮은 것으로 추정된다. 반면에 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접부는 응고균열 감수성이 제일 높은 것으로 관찰되어 Dudas 및 Borland가 보고한 이 합금들의 아크용접시의 균열 감수성과 유사한 경향을 보이고 있다. Al-Mg 합금 레이저 용접부의 균열 감수성은 순 알루미늄과 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접부 그것의 중간에 있다.

용접 조건이 균열 감수성에 미치는 영향

6.4㎜ 두께 6061 Al-Mg-Si 합금 판재를 완전용입을 만드는 여러 용접 조건에서 레이저 용접했을 때 용융금속 응고균열 및 열영향부 liquation 균열은 용접조건에 의해 영향을 받으며 용접속도가 느릴수록 응고균열 및 liquation 균열이 감소하였다.(Fig.2)

모재 두께와 균열 감수성의 관계

조성이 유사한 경우 두꺼운 판재의 레이저 용접부 균열감수성이 얇은 판재의 그것에 비해 높게 관찰되었다. 6㎜ 두께의 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접시 용접 fusion line에 수직한 방향으로 발달해 있는 cellular조직을 따라 응고균열이 발생할 뿐 아니라 용접 단면 중심부에도 응고균열이 발생되는 경향이 있는 것을 관찰하였다. 대부분의 경우 6㎜ 두께 Al-Mg-Si

합금 레이저 용접부에서는 열영향부 liquation 균열이 발생되는 반면, 2㎜ 두께 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접시에는 열영향부 liquation 균열이 발생되지 않았다. Al-Mg 합금 레이저 용접부의 경우에는 2㎜ 두께 박판 용접부에서는 용접금속의 균열 발생이 없으나, 6㎜ 두께 후판 용접금속에서는 응고균열이 발견되고 있다.

용접 wire 사용시 용접부 균열 발생

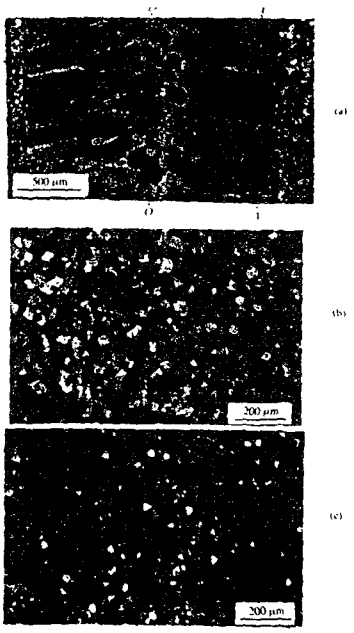
1.6㎜ 두께 6061 Al-Mg-Si 합금 레이저 용접시 4047A wire (Al-12wt%Si)를 사용하여 응고균열의 발생이 감소됨을 확인하였다. 4047A wire를 사용하여 레이저 용접한 6061 합금 용접금속의 Mg과 Si의 분포를 EDX mapping으로 조사하였다. Si가 interdendrite 위치에 편석되어 있음을 확인하였다(Fig.3). 용가재를 사용한 경우 용가재 없이 용접한 경우에 비해 열영향부 결정립계 liquation 균열 감수성이 증가함을 확인하였다(Fig.4).

## 4. 결론

조사된 알루미늄 합금 중 6061 및 6082 Al-Mg-Si 합금이 용접금속 응고균열 및 열영향부 결정립계 liquation 균열 감수성이 가장 높고, 1050 및 1200 알루미늄의 균열 감수성이 가장 낮다. 5251 및 5083 Al-Mg 합금의 균열 감수성은 1050 및 1200 알루미늄 및 Al-Mg-Si 합금의 중간에 있다. 모재 두께 및 용접조건 또한 균열 감수성에 영향을 미치고 있다. 용접속도가 감소할수록 균열 감수성이 감소하였으며, 박판에서보다 후판에서 균열 발생 경향이 크다. 적절한 조성의 용가재를 사용하면 용접금속 응고균열은 감소시키나 열영향부 결정립계 liquation 균열은 감소되지 않았다.

참고문헌


1. Savage W.F. and Lundin C.D., "The Varestraint Test", Welding Journal, Vol. 44, No. 10, 1965, pp433s-442s.
2. Lundin C.D. et al., "The Varestraint test", WRC Bulletin 280, Welding Research Council, August 1982.
3. Houldcroft P.T., "A simple cracking test for use with argon-arc welding", British Welding Journal, Vol. 2, No. 10, 1955, pp471-475.
4. Borland J.C. and Rogerson J.H., "Examination of the patch test for assessing hot cracking tendencies of weld metal", British Welding Journal, Vol. 9, No. 8, 1962, pp494-499.
5. Dowd J.D., "Weld cracking of aluminum alloys", Welding Journal, Vol. 31, No. 10, 1952, pp448s-456s.
6. Dudas J.H. and Collins F.R., "Preventing weld cracks in high strength aluminium alloys", Welding Journal, Vol. 45, No. 6, 1966, pp241s-249s.




(a) Polished and etched top bead. Cracking occurred along grain boundaries
(b) O-O section. Equiaxed grains developed along the weld centre of longitudinal sections. No cracking is observed in this region. The fine equiaxed grain structure seems to be resistant to cracking
(c) A-A section. Cellular structure developed in this region and cracking is observed.

Fig.1 Typical weld metal solidification structures and cracking observed in the top bead and in weld longitudinal sections for 1.6 ㎜ thick 6061 alloy.

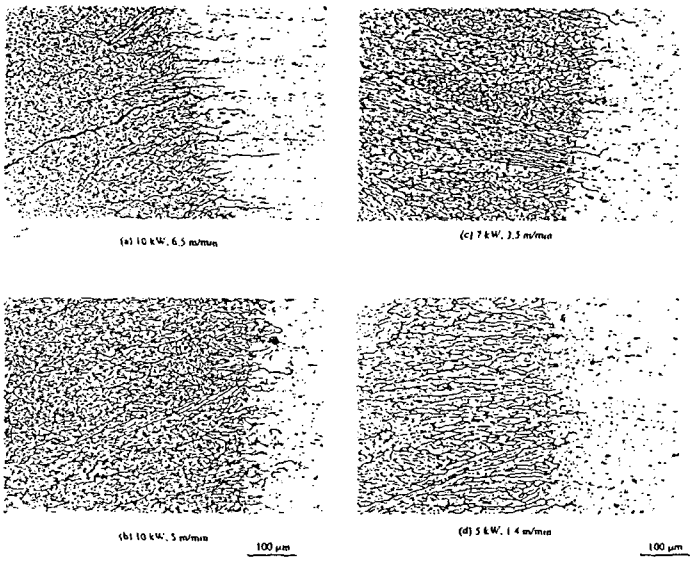



Fig.2 Variation of weld metal solidification cracking and HAZ grain boundary liquation cracking with welding conditions (6.4 ㎜ thick 6061 alloy).

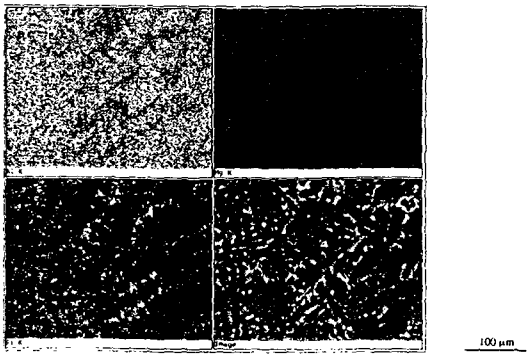



Fig.3 EDX mapping image of wire feed welds in 1.6 ㎜ thick 6061 alloy made with 4047A(Al-12wt.%Si) filler wire. Si is segregated at the interdendritic sites, while Mg is uniformly distributed.

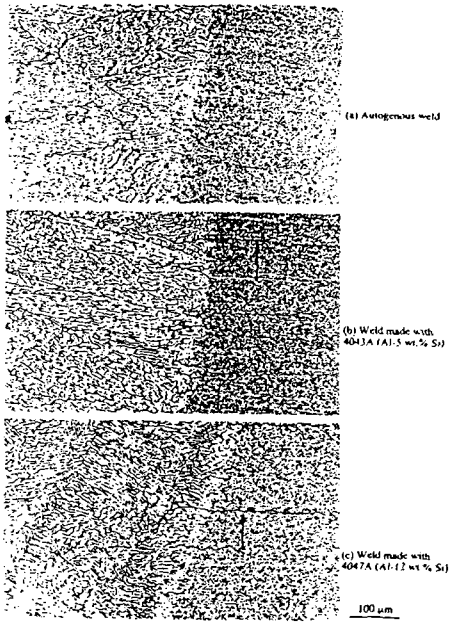



Fig.4 Variation of HAZ grain boundary liquation with filler wire composition for 1.6㎜ thick 6061 alloy.