

고강도 Al합금의 CW CO₂ 레이저 용접시 용접조건에 따른
기공 및 균열 등의 용접결함에 대한 연구

The Effects of Welding Conditions on the Weld Defects of Porosity and Crack
in CW-CO₂ Laser Welding of High Strength Al Alloy.

김장량, 윤재정, 김경남, 하용수, 강정윤, 이상래
부산대학교 금속공학과

I. 서론

수송기기의 “경량화기술”은 고속화·대량수송의 효율화 등과 함께 지구환경에 대한 문제점을 해결하는 중요한 기술과제로 인식되고 있다. 고강도 Al합금으로 구성된 구조물의 대형화, 고품질 및 고정밀화 추세에 따라 레이저빔 용접의 수요가 급증하고 있다. 그러나, 고강도 Al합금의 용접시에 발생하는 문제점들은 파악되어 있으나, 발생 원인과 이에 대한 대책방안이 확립되어 있지 않기 때문에 실용화 단계에 들어가지 못하고 있다. 특히, Al합금은 레이저에 대해서 반사율이 높고 열확산율이 크기 때문에 충분한 용입깊이를 얻기가 힘들뿐만 아니라, 기공 및 균열과 같은 결함이 발생하기 쉽다는 것으로 보고되고 있다. 따라서, 본 연구에서는 A5083합금과 A7N01합금에 CO₂ 레이저빔 용접을 행하여, 빔 조사조건에 따라 용접부에 발생하는 기공 및 균열 등의 제 결함들에 대하여 조사하여 보았다.

II. 실험방법

본 연구에서는 모재로써 비열처리형 합금인 Al-Mg계의 A5083과 열처리형 합금인 Al-Zn-Mg계의 A7N01의 2종류를 사용하였다. 사용한 시험편은 120(L)×100(W)×4(T)mm 크기로 절단하여, 에머리 페이퍼 400번까지 연마하고 아세톤 세척을 한 후 사용하였으며, 이때 사용한 레이저 장치는 50kW 급 5-axis 3-dimensional Processing Machine CO₂ 레이저 용접기로서 빔 mode는 Ring mode, 레이저 출력은 4, 5, 6, 7 (kW), 용접속도는 1, 2, 3, 4 (m/min), 초점거리는 ±0 (mm), 실드가스는 He를 70 (l/min)로 사용하여 압출방향에 평행하게 Bead-on-plate용접을 실시하였다. 각 빔 조사 조건(출력, 속도)에 따른 용접부의 형상은 광학현미경으로 관찰하고, 용접결함을 파악하기 위해 용접한 시편을 액체질소에 담근 후, 강제적으로 파단하여 그 파면을 SEM을 이용하여 용접부의 기공 및 균열 등을 관찰하였고, 합금원소의 상동정을 분석하기 위해 EDX 및 EPMA 분석을 행하였다.

III. 실험결과 및 고찰

Fig. 1은 용접부의 기공발생 정도를 조사하기 위하여, A7N01합금을 대상으로 X-ray투과 시험으로 측정된 결과를 투과사진과 결함부위에 대한 스케치로 나타낸 것이다. 여기서, 기공의 발생위치는 주로 용접부의 중앙부에 나타남을 알 수 있으며, 용접속도가 1m/min으로 느릴 경우 출력이 4,5,6,7kW로 증가할수록 기공 감수성이 감소하지만 레이저 출력이 7kW로 일정할 경우 속도가 1,2,3,4m/min으로 빨라질수록 기공 감수성은 높아짐을 알 수 있다.

1. 기공의 발생현상과 그 특성

기공은 Mg, Zn의 함유량이 많은 5000계 및 7000계 합금에서는 많이 발생하지만, 이들 원소가 미량으로 함유된 6000계 합금에서는 기공이 발생하지 않는다고 보고되고 있다. 따라서, 큰 기공이 존재하는 A5083합금과 A7N01합금을 액체질소에 담근 후 강제적으로 파단하여 파단면을 관찰하고, EPMA분석을 행하여 그 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 기공내부에서 수지상이 관찰되며, 미소균열이 존재한다. 이 미소균열은 용접부 중앙의 균열과 연결되어 있다. A5083합금의 경우는 용접부 하부에 큰 기공이 존재하며, A7N01합금의 경우에는 용접부 중부와 상부에 기공이 존재함을 알 수 있다. Fig. 3은 Fig. 2에 나타난 기공부의 확대사진과 EPMA 분석결과를 나타낸 것이다. A5083합금의 경우 기공부의 Mg농도가 모재보다 낮다. 이는 Al보다 증기압이 높은 Mg의 증발에 의해 기공이 발생하는 것으로 생각된다. 그러나 A7N01합금에서는 기공부의 Zn농도가 모재보다 오히려 높음을 알

수 있다. 이는 Zn은 Al보다 증기압이 높지만, atomic weight가 Al보다 3배정도 높기 때문에 Zn은 증발하다가 최종 응고시에 기공부에 증착되는 것으로 생각된다. 이로부터 Mg, Zn의 증발에 의한 기공이 발생하는 것으로 생각된다.

레이저빔 용접은 고밀도 에너지빔의 조사에 의해 모재 내부가 급격히 가열되어 Al보다 증기압이 큰 Mg, Zn 등의 합금원소가 증발하면서 용접이 되는 기공현상에 의해 일어난다. 즉 기공형성으로 금속중기가 증발하면 구멍이 뚫리고, 그 반발력으로 용융금속의 교반이 일어나 빔의 조사가 끝나면 기공이 함몰되면서 빈 공간을 채우려고 한다. 만일, 용융부 내부에 Mg, Zn 등의 합금원소의 증발로 증기압이 커지면 빈 공간을 채우지 못한 상태로 응고되어 용접부 하단에서 기공이 발생한다. 용접부 상부에 형성된 기공은 기공 선단부에 증기압이 높은 금속의 증발, 실드가스 등이 혼입되어 생성된 기포가 용융금속의 교반에 의해 상부로 이동하면서 소실되거나 최종 응고시에 용접부 상부에 갇혀 기공이 발생하는 것으로 생각된다.

2. 용접균열의 발생현상과 그 특성

Al합금의 레이저빔 용접에서는 용접부에 응고균열, HAZ의 액화균열 등의 고온균열이 발생하고, 그 원인으로서는 합금원소가 입계에 편석되거나, 저용점상이 입계를 따라 액막이 형성되어 발생한다고 보고되고 있으나 아직 불분명하다. 따라서, 이들 균열의 발생기구와 그 특성에 대해서 조사하였다. Table 1은 균열의 발생장소와 형상을 분류한 것이다. Fig. 5에서는 Table 1.에서 분류한 균열의 실예를 나타내었다. 여기서 용접금속내의 수직상간 균열(C_{wd}), HAZ의 수평균열(C_H)은 균열의 발생장소와 형태로 보아 전형적인 응고균열일 것으로 예상된다. 또한, 용접부 하단의 U자형 균열(C_{wu})과 본드라인을 따라 발생한 균열(C_B)은 전자빔 용접에서 주로 나타나는 necklace형태의 기공형 크랙으로 생각된다. Al합금의 용접부에서 발생하는 균열은 주로 고온(응고)균열이며, 결정립계를 따라 액막(liquid film)이 형성되어 균열이 발생한다고 알려져 있다. 따라서 이 액막의 거동을 알아보기 위해 시편을 연마 후에 화학처리를 하지 않은 상태로 SEM 및 EDX 분석을 행하였다. Fig. 6은 A5083 합금에 나타난 균열을 나타낸 것이다. (a)는 균열의 표면을 확대한 SEM사진으로 사진상의 A로 표시된 하얀 부분에 대한 EDX 분석결과(c) Fe, Mn, Cu 등의 peak가 나타나고 있으며 (b)사진에서 균열 내부의 B부분에 나타난 회색 상에 대한 EDX분석결과 Al, Si, Fe, 등의 peak가 나타났다. Fig.7은 A7N01 합금에 나타난 균열을 나타낸 것이다. (a)는 균열의 표면을 확대한 SEM사진으로 사진상의 C로 표시된 하얀 부분에 대한 EDX 분석결과Zn, Fe, Mn, Cu, Al 등의 peak가 나타나고 있으며 (b)사진에서 균열 내부의 D부분에 나타난 회색 상에 대한 EDX분석결과 Al, Si, Zn 등의 peak가 나타났다. 이상의 결과로부터, A5083합금은 최종 응고부에 Mn, Fe, Si 등이 마이크로 편석이 일어나 응고가 완료된 후에도 저용점 액상으로 잔류하여 최종 응고시에 발생하는 급격한 응고 strain에 의해 균열(응고균열)이 발생하는 것으로 생각된다. A7N01합금에 대해서도 크랙을 따라 흰색막이 형성됨을 알 수 있었다. 이 흰색막을 EPMA로 점분석한 결과, Zn, Mg, Mn, Fe, Cu 등의 정성적인 분석량이 용접금속보다 더 높게 나타나고 있다. A7N01합금은 주용질인 Zn, Mg 및 (Fe, Mn, Si, Cu) 등의 불순물이 최종 응고부에 저용점상을 형성하는데 흰색막에 대한 EPMA 분석결과와 일치하므로 흰색막은 저용점상으로 생각된다.

IV. 결 론

1. 기공은 A5083합금의 경우는 주로 용접부 하부에 큰 기공이 존재하며, A7N01합금의 경우에는 용접부 중·상부에서 관찰되고 있다. 기공부에서 Zn의 농도가 모재보다 높은 것으로 보아, 기공의 발생 원인 중에 하나는 Mg, Zn의 증발에 의한 것으로 생각된다.
2. 균열은 용접금속의 중심부와 HAZ에 존재하는 응고 균열과 용접금속 하부에 존재하는 균열, 본드 라인을 따라 생긴 균열 등의 기공형 균열이 발생하였다. 용접금속 중심부의 수직균열과 HAZ의 수평균열은 균열의 발생장소와 형태로 보아 전형적인 응고균열일 것으로 예상된다.
3. 응고균열은 입계에서 Zn, Mn, Fe, Si 등 합금원소의 편석이 일어나 응고가 완료된 후에 저용점 액막으로 잔류하여 최종 응고시에 발생하는 급격한 응고 strain이 이 지역에 부가되어 발생하는 것으로 생각된다.

| A7N01 : V = 1m/min, Fd = 0mm, Shilding gas= He, Rg = 70 ℓ /min | | | A7N01 : P0 = 7kW, Fd = 0mm, Shilding gas = He, Rg = 70 ℓ /min | | |
|--|--------------------------|--------------------------|---|--------------------------|--------------------------|
| | X-ray transmission photo | Schematic representation | | X-ray transmission photo | Schematic representation |
| P ₀ = 4kW | | | V=1m/min | | |
| P ₀ = 5kW | | | V=2m/min | | |
| P ₀ = 6kW | | | V=3m/min | | |
| P ₀ = 7kW | | | V=4m/min | | |

Fig.1 X-ray transmission photographs and schematic representation of A7N01 alloy showing porosity formation.

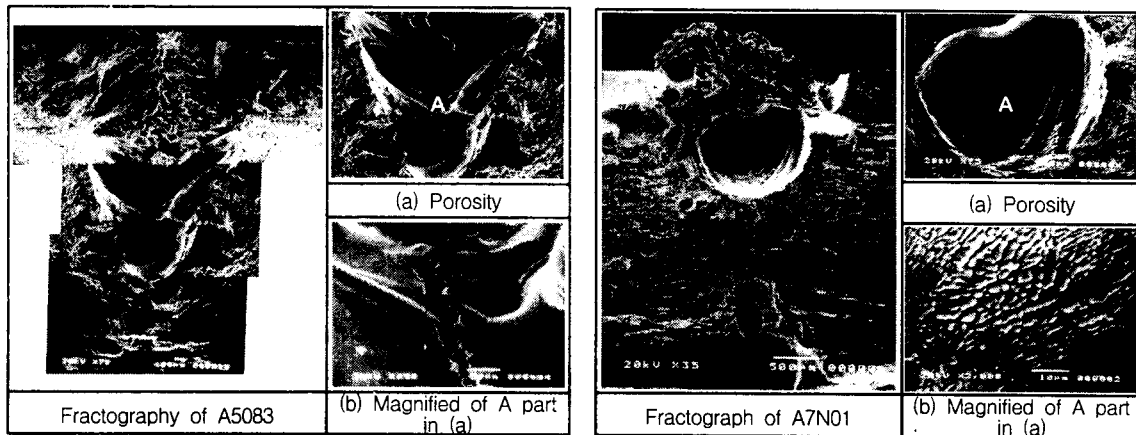


Fig. 2 SEM fractographys of weld fusion zone in A5083 and A7N01 alloy.

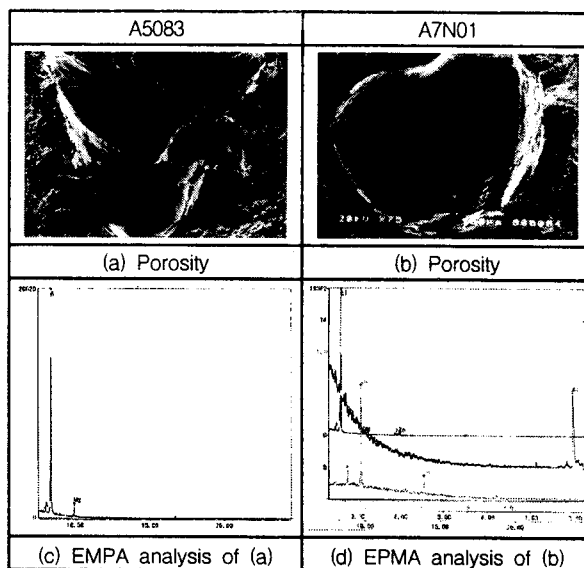


Fig. 3 Fractographys and EPMA of porosity occurred in A5083 and A7N01 alloy.

Table 1. Occurrence position and type of crack.

| Cross Section | Schematic of bead | Type | Position | Shape |
|---------------|-------------------|-----------------|-------------|-----------------------|
| | | C _{WD} | WM | Diagonal |
| | | C _{WU} | WM | Ripple line (U shape) |
| | | C _H | WM / HAZ | Horizontal |
| | | C _B | Fusion line | Fusion line |

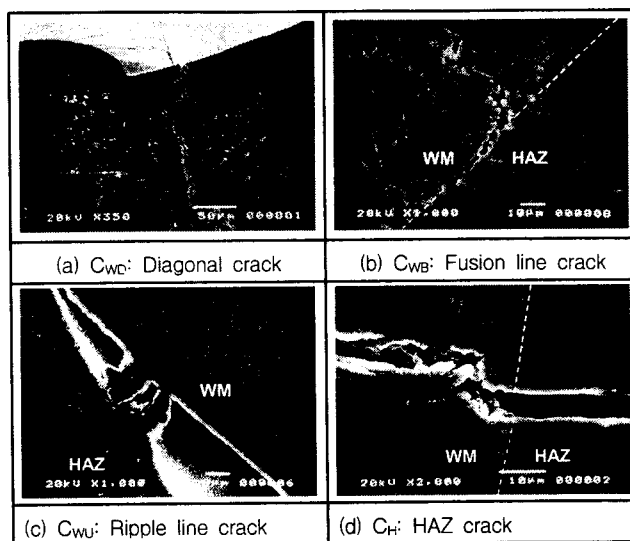


Fig. 5 The types of crack occurred in weld metal.

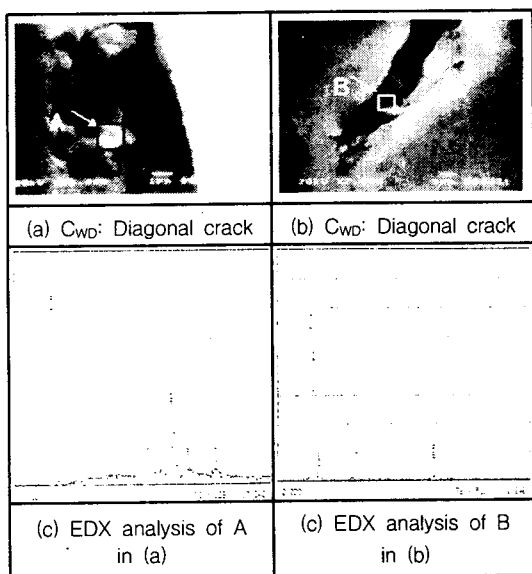


Fig. 6 SEM and EDX of crack occurred in A5083 weld metal.

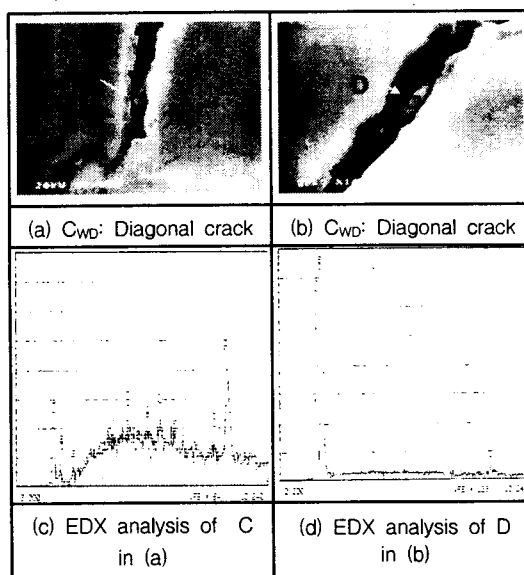


Fig. 7 SEM and EDX of crack occurred in A7N01 weld metal.