

고강도 Al합금의 펄스형 레이저 용접부에 있어서 용접결함에 관한 연구

Study on defects in pulsed laser welds of high strength Al alloys

부산대학교 금속공학과 **하용수, 김장광, 윤제정, 강정운**

I. 서론

자동차·차량·선박 등의 수송기기의 「경량화기술」은 고속화·대량수송의 효율화 등과 함께 지구환경에 대한 문제점을 해결하는 중요한 기술과제로 인식되고 있다. 이러한 경량화를 목적으로 고강도 Al합금의 사용빈도가 커지고 있고, 5000, 6000, 7000계 합금이 경량 구조용 재료로서 주목을 받고 있다. 이 중에서도 A5083(Al-Mg-Si)합금과 A7N01(Al-Zn-Mg)합금은 고속전철, 고속선, 자동차 등에 사용되고 있다.

한편, 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, Al이 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 모재로 A5083, A7N01합금을 사용하여 펄스형 YAG 레이저로 스폿(spot) 용접을 행한 후, 재료의 종류와 빔의 조사조건에 따라 용접부에 발생하는 기공 및 균열 등 용접결함의 발생원인, 발생기구 및 저감화에 대한 기초적인 데이터를 얻고자 하였다.

II. 실험방법

본 연구에서는 모재로서 5083 비열처리형 합금(Al-Mg-Si)과 7N01 열처리형 합금(Al-Zn-Mg)을 사용하였다. 이 합금들을 에머리 페이퍼 400번까지 연마하고 아세톤 세척을 한 후, Ar 분위기에서 여러 가지 레이저빔 조사조건으로 스폿 용접을 행하였다. 이때 사용한 레이저 장치는 MIYACHI TECHNOS제 펄스 파형 제어형 Nd:YAG 레이저($\lambda=1.06\mu\text{m}$) 장치로서 최대출력에너지 90J/p, 최대피크출력 5kW이며, 펄스 조사시간을 1~20ms, 여기램프전압을 200~495V 범위내에서 변화시킬 수 있다. 각각의 합금 및 빔 조사조건변화(출력에너지, 펄스시간, 펄스형상)에 따른 용접부의 형상은 광학현미경으로 관찰하고, 용접결함을 파악하기 위해 용접한 시편을 액체질소에 담근 후, 강제적으로 파단하여 그 파면을 SEM을 이용하여 용접부, 기공 및 균열 등을 관찰하였고, 합금원소의 상동정을 분석하기 위해 EDX, Micro-XRD 및 EPMA분석을 행하였다.

III. 실험결과 및 고찰

그림 1은 펄스시간을 20ms로 고정하고 출력에너지를 변화시켜 용접한 경우의 용접비드 형상을 나타낸 것이다. 그림 1에서 알 수 있는 바와 같이 용접결함으로는 기공과 균열이 존재하고, 용접조건에 따라 발생위치와 형태가 각각 상이함을 알 수 있다.

1. 기공의 발생현상과 그 특성

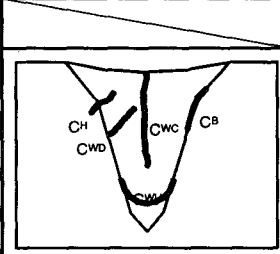
기공은 그림 2와 같이 용접부 하부에 발생하는 큰 기공(P_A)과 상부에 존재하는 구형의 작은 기공(P_B)이 있다. 기공내부는 평활한 면이며, 미소균열이 존재함을 알 수 있다. 기공의 발생 원인으로서는 Mg, Zn의 함유량이 많은 5000계 및 7000계 합금에서는 기공이 발생하지만, 이들 원소가 미량으로 함유된 6000계 합금에서는 기공이 발생하지 않는다고 보고되고 있다. 따라서, 큰 기공이 존재하는 5083, 7N01합금을 액체질소에 담근 후 강제적으로

파단하여 파단면을 관찰하고, EPMA분석을 행하였다. 그 결과를 그림 3에 나타내었다. 기공 내부에 수지상이 관찰되며, 미소균열이 존재한다. 이 미소균열은 용접부 중앙의 수직균열과 연결되어 있다. 5083합금에서는 기공부의 Mg농도가 모재보다 낮다. 이는 Al보다 증기압이 높은 Mg의 증발에 의해 기공이 발생하는 것으로 생각된다. 7N01합금에서는 기공부의 Zn농도가 모재보다 오히려 높음을 알 수 있다. 이는 Zn은 Al보다 증기압이 높지만, atomic weight가 Al보다 3배정도 높기 때문에 Zn은 증발하다가 최종응고시에 기공에 증착되는 것으로 생각된다. 이로부터 Mg, Zn의 증발에 의해 기공이 발생하는 것으로 생각된다. 레이저 빔 용접은 고밀도 에너지빔의 조사에 의해 모재 내부가 급격히 가열되어 Al보다 증기압이 큰 Mg, Zn 등의 합금원소가 증발하면서 용접이 되는 키흔현상에 의해 일어난다. 즉 키흔에 의해 금속증기가 증발하면 구멍이 뚫리고, 그 반발력으로 용융금속의 유동이 일어나 빔의 조사가 끝나면 키흔이 함몰되면서 빈 공간을 채우려고 한다. 만일, 증기압이 크다면 빈 공간을 채우지 못한 상태로 응고되어 용접부 하단에서 기공이 발생한다. 용접부 상부이 기공은 키흔 선단부에 증기압이 높은 금속의 증발, 실드가스 등이 혼입되어 기포가 발생용융금속의 유동에 따라 상부로 이동하면서 소실되거나 최종응고시에 용접부 상부에 갇혀 기공이 발생하는 것으로 생각된다.

2. 용접균열의 발생현상과 그 특성

Al합금의 레이저빔 용접에서는 용접부에 응고균열, HAZ의 액화균열 등의 고온균열이 발생하고, 그 원인으로는 합금원소가 입계에 편석되거나, 저용점상이 입계를 따라 액막이 형성되어 발생한다고 보고되고 있으나 아직 불분명하다. 따라서, 이들 균열의 발생기구와 그 특성에 대해서 조사하였다. 표 1은 균열의 발생장소와 형상을 분류한 것이다.

Table 1. Occurrence position and type of crack

	Type	Position	Shape
	C _{WC}	WM	Vertical
	C _{WD}	WM	Diagonal
	C _H	WM / HAZ	Horizontal
	C _{WU}	WM	U-shape curve
	C _B	Fusion line	Line

용접금속 중심부의 수직균열과 수지상간 균열, HAZ의 수평균열은 균열의 발생장소와 형태로 보아 전형적인 응고균열일 것으로 예상된다. 또한, 용접부 하단의 U자형 균열과 본드 라인을 따라 발생한 균열은 전자빔 용접에서 주로 나타나는 necklace형태의 기공형 크랙으로 생각된다. 그림 4는 5083합금을 강제적으로 파단한 파면조직을 나타낸 것이다. 파면에서 수지상이 나타나는 것으로 보아 중심부의 수직균열과 용접부 하단의 균열은 응고균열임을 알 수 있다. 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 강제 파단시킨 시편을 NaOH 수용액(10%NaOH)에 용해시켜 SEM 및 EPMA분석을 행하였다. 그림 5에서 보는 바와 같이, 균열을 따라 흰색으로 보이는 막이 형성되었다. 이 흰색막에 대한 EPMA 분석결과, Al, Mg, Mn, Fe 등의 피크가 나타나고 있다. 5083합금은 Al-Mg₂Al₃의 공정생성물(450℃ 이하), (Mg, Si, Fe, Mn, Cr) 등을 함유하는 금속간화합물(630~660℃ 이하)이 최종응고부에 저용점상을 형성하는데 흰색막에 대한 EPMA 분석결과와 일치하므로 흰색막은 Al-Mg-Mn-Fe의 저용점 액막으로 생각된다. 그림 6은 저용점 액막이라고 생각되는 부분을 micro-XRD로 상분석한 결과로서, Mg₂Al₃, MnAl₆, Mg₂Si, (Al-Fe-Si) 등이 관찰되고 있다. 이상의 결과로부터, 5083합금은 최종 응고부에 Mg, 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 생각

된다. 7N01합금에 대해서도 10%NaOH에 용해시켜 SEM 및 EPMA분석을 행한 결과, 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. 7N01합금은 주용질인 Zn, Mg 및 (Fe, Mn, Si, Cu) 등의 불순물이 최종응고부에 저용점상을 형성하는데 흰색막에 대한 EPMA 분석결과와 일치하므로 흰색막은 저용점상으로 생각된다.

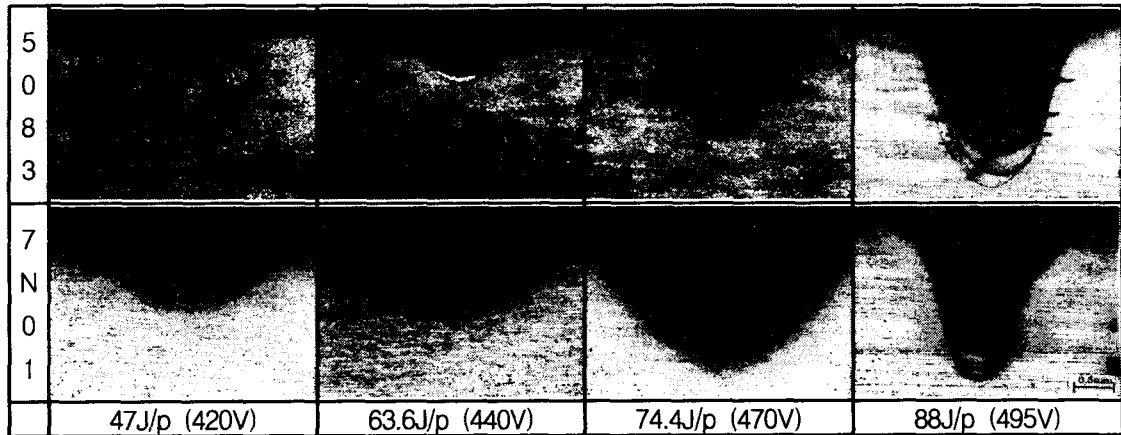


Fig. 1 Bead shapes of laser spot weldig in Al alloy with various output energy(J/p)

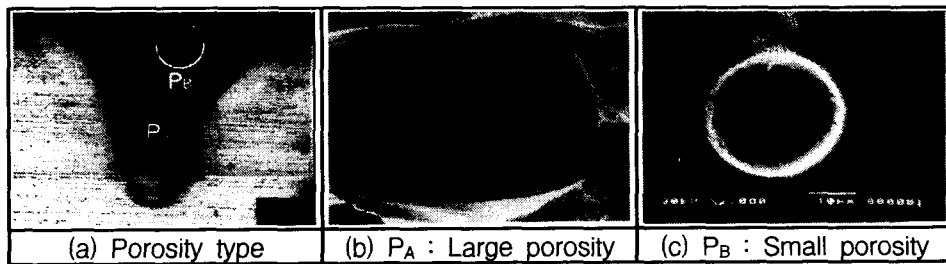


Fig. 2 Porosity type and SEM micrograph of A7N01 showing porosity

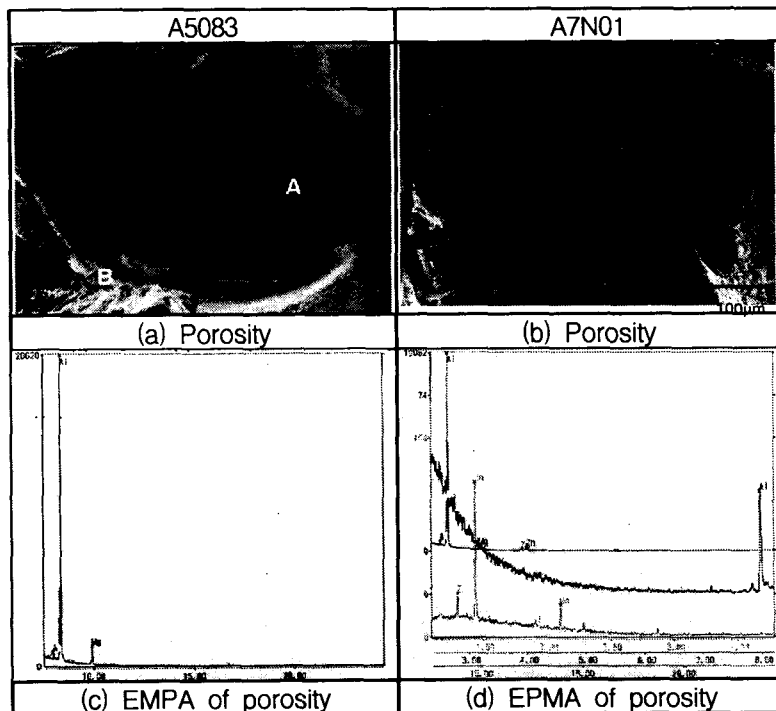


Fig. 3 Fractographs and EPMA analysis of porosity occurred in A5083 and A7N01

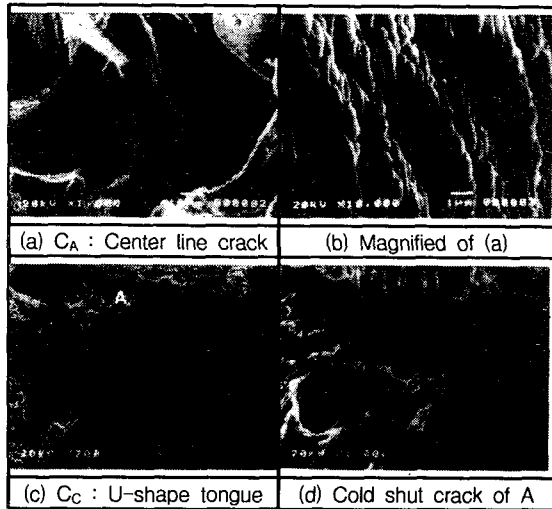


Fig. 4 Fractographs of solidification crack occurred in A5083 weld metal

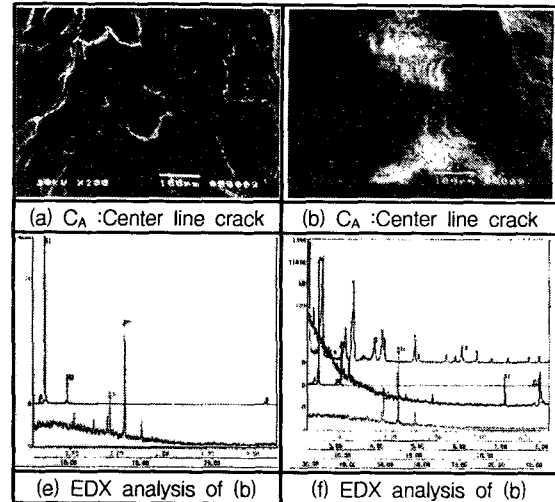


Fig. 5 Fractographs and EPMA analysis of A5083 after chemical treatment

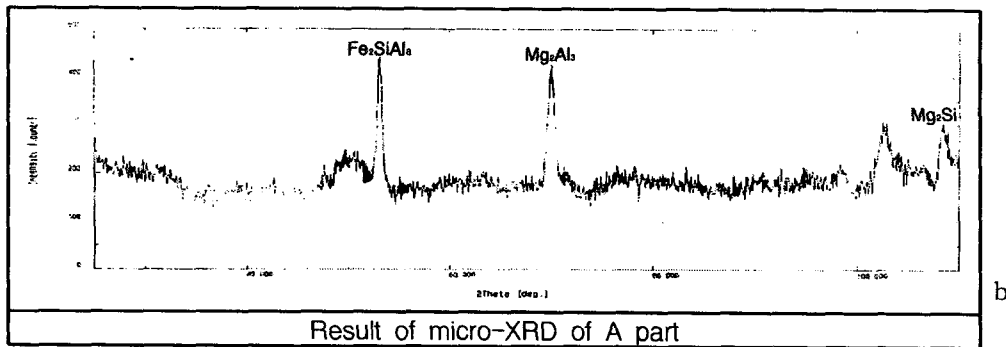


Fig. 6 Micro-XRD pattern of weld fusion zone in A5083 after chemical treatment

IV. 결 론

1. 기공은 루트부 근방에 생긴 아주 큰 기공과 용접부의 상부에 존재하는 구형의 작은 기공이 관찰되었다. 기공부에서 Mg의 농도가 모재보다 낮은 것으로 보아, 기공의 발생원인 중에 하나는 Mg, Zn의 증발에 의한 것으로 생각된다.

2. 균열은 용접금속의 중심부와 HAZ에 존재하는 응고 균열과 용접금속 하부에 존재하는 균열, 본드라인을 따라 생긴 균열 등의 기공형 크랙이 발생하였다. 용접금속 중심부의 수직 균열과 HAZ의 수평균열은 균열의 발생장소와 형태로 보아 전형적인 응고균열일 것으로 예상된다.

3. 응고균열은 입계에서 Mg, Si, Mn, Fe 등 합금원소의 편석이 일어나 응고가 완료된 후에도 저응점 액막이 잔류하여 최종 응고시에 발생하는 급격한 응고 strain이 이 지역에 부가되어 발생하는 것으로 생각된다.

V. 참고문헌

1. 杓名宗春 : 溶接學會全國大會講演概要, 第58集, 96-4, 132
2. 片山聖二 他 : 溶接學會全國大會講演概要, 第63集, 98-10, 250
3. 이창희, 조상석 : 대한용접학회지, Vol.14, No.3(1996), 192
4. 杓名宗春 : 溶接學會全國大會講演概要, 第54集, 94-4, 72
5. 太田省三郎 他 : 溶接學會全國大會講演概要, 第56集, 95-4, 178