

2차전지용 알루미늄합금의 펄스 Nd:YAG레이저 용접성(II)

- 전해액 주입구의 볼 용접조건 최적화-

The Weldability of Aluminium Alloy for Secondary Battery by Pulsed Nd:YAG Laser(II)

-The Optimization of Ball Welding Conditions in Electrolyte Injection Hole-

한국해양대학교 기관시스템공학부 김종도
한국해양대학교 대학원(현, 엠에스 오토텍) 유승조
한국해양대학교 대학원 김장수

I. 서론

본 연구에서는 현재 알루미늄을 사용하여 만들어지고 있는 전해액 주입구(ball-cap)를 밀봉하는 용접에 있어서 펄스 Nd:YAG레이저를 이용한 용접시 발생하는 균열을 방지하기 위하여 개선된 크레이터(crater)의 처리방식을 이용하여 용접부의 결함 억제 및 방지법에 대한 근본적인 대안을 제시하고자 하였다

II. 실험방법

(1) 용접부 크레이터 처리법 개선

균열이 발생하는 1차 비드와 2차 비드의 교차점을 제거하기 위해 Fig. 1과 같은 레이저 출력파형의 램프다운(ramp down) 기능을 이용한 크레이터 처리방식을 도입하였으며, 그림 중 1cycle(2 π)의 의미는 볼의 원주방향으로 1회전하면서 용접하는 경로를 말한다

Fig. 2에는 볼이 압입되는 캡의 전해액 주입구 형상과 치수를 도시하며 캡의 두께가 0.8mm인 경우와 1mm인 경우의 두 조건에서 A1090 어닐링처리 볼을 사용하였다 여기서 레이저 출력파형의 램프다운 기능에 대해 설명을 덧붙이면 다음과 같다 일반적으로 펄스레이저의 전형적인 파형은 구형(矩形)으로서 짧은 일정시간동안 출력을 급속히 상승시켰다가 하강시키는 형태를 취하게 되는데, 이 때 알루미늄

과 같은 열전도율이 큰 합금의 경우 용융금속은 급속응고하게 되며 그 와중에 균열이 발생하게 된다 이러한 용융금속의 급속응고속도를 지연시키기 위해 Fig 1의 오른쪽 파형과 같이 출력의 후반부를 서서히 하강시키는 준 펄스파형 제어 기법(램프다운)을 사용하였다

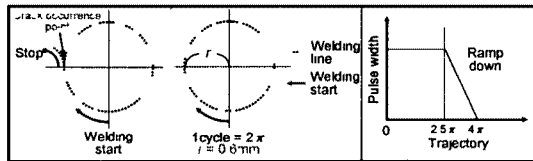
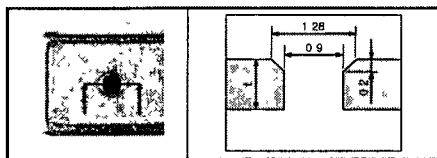


Fig 1 Processing method of crater for leak prevention



* t=0.8 mm and 1 mm

Fig 2 Schematic diagram and measure of electrolyte injection hole

(2) 볼 재료의 변경

전해액 주입구의 밀봉용접 공정에서는 험핑비드(humping bead), 스파터, 기공 및 편홀 등의 많은 용접결함이 발생되어 왔다 여기에서는 급속학적 측면에서 관점을 달리하여 용접성 개선을 위한 또 하나의 대안으로서 볼의 사용재료를 현재의 A1000계열에서 A4000계열로 바꿀 경우에 고려될 수 있는 이점에 대하여 이론적·실무적 차원에서 정리하고자 하였다

Table 1 Chemical compositions of A4047 (wt%)

Element Material	Si	Mn	Fe	Mg	Cu	Zn	Al
A4047	11~13	0.15	0.8	0.15	0.30	0.20	Bal

A4000계열의 대표적인 알루미늄합금인 A4047의 화학적 조성을 Table 1에 나타낸다 11~13wt% Si를 함유하고 있는 알루미늄합금 A4047은 Al-Si계 평형상태도 상에서 확인할 수 있듯이

Si함량이 약 12%까지는 용점이 저하하므로 용융액의 흐름을 좋게 하여 응고수축응력이 작아져 크랙 등의 균열발생이 억제된다 그리고 열팽창률이 억제되며 내마모성을 개선하는 효과가 있다 본 실험에서는 A4047 불을 조속한 시간에 구할 수 없어서 대신 A4047 와이어를 이용하여 전해액 주입구를 용접하였다

III. 결과 및 고찰

(1) 용접부의 단면형상과 누설상황

Fig. 3은 불 용접부의 경도 변화를 나타낸다 캡 모재의 경도인 $H_v=50.7$ (그림의 a, g)에 비하여 불은 $H_v=33.79$ 로써 현저히 낮은 값을 보이고 있으나, 이 값은 압입과 용접 전의 불 경도 $H_v=23.26$ 에 비해 약 43% 증가한 수치이다 이러한 경도상승은 용접시의 열적 영향보다는 불의 압입에 의한 가공경화 현상에 기인한 것으로 판단된다 또한 용접후 수축응력이 작용할 경우, 비교적 경도가 높고 노치에 노출되어 있는 캡과 불의 경계부인 열영향부(HAZ)에서 균열발생가능성이 높을 것으로 판단된다

Fig. 4는 A1090 어닐링처리 불을 사용하여 용접을 행하고 150MPa로 수중압력 누설시험을 행한 후 누설이 발생한 시편의 비드외관과 단면형상을 나타낸다 누설이 발생하는 부위를 관찰하여 보면, 비드가 중첩되는 부분 중 균열감수성이 높은 크레이터를 처리하기 위해 1차 비드 위에 2차 비드가 외주로 빠져 나가는 교차점에서 균열이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 그 위치를 그림의 비드 외관 상부에 화살표로써 표시하였다 이러한 균열발생의 원인으로는 재용융에 의한 경도의 상승과 응고시의 수축응력에 기인한 것으로 사료된다

(2) 용접부 크레이터의 처리방법 개선

캡의 두께별 램프다운에 의한 크레이터 처리효과를 검증하기 위한 실험결과를 Fig. 5에 나타낸다 펄스레이저 출력파형으로서, (a)는 5/4cycle(25π) 구형펄스 + 3/4cycle(15π) 램프다운, (b)는 1cycle(2π) 구형펄스 + 1/4cycle(0.5π) 램프다운의 조사조건이다 여기서 구형펄스 후반부의 램프다운시간을 조정하는 것은 캡의 미소한 두께차이에 따라 용융금속의 급속응고거동 및 그에 수반되는 응력집중상태를 정성적으로 평가하기 위해서 정한 조건이다 관찰결과 (a)의 경우, 캡의 두께가 0.8mm인 경우에는 실제 균열에는 이르지 않았다 하더라도 균열의 징후를 보이고 있었으며, 1mm인 경우에는 균열이 발생하였다 이것은 Fig 5(a)의 상부 우측의 개략도와 같이 용접후 냉각시의 응고수축응력에 기인한 것으로 판단되며, 이를 감소시키기 위해 구형펄스의 5/4cycle(25π)를 1cycle(2π)로 줄이고, 램프다운시간을 3/4cycle(15π)에서 1/4cycle(0.5π)로 짧게 하여, 용접후 캡에 흡수되는 입열량을 감소시키고자 하였다 그 결과를 Fig 5(b)

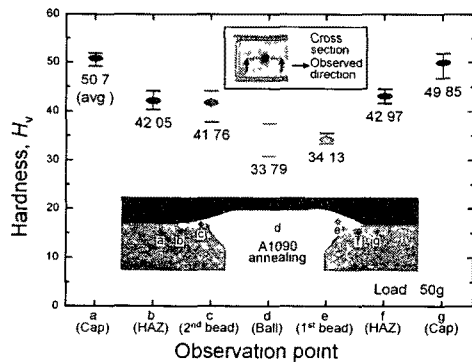


Fig 3 Variation of hardness in ball-cap weldments (A1090 annealed ball)

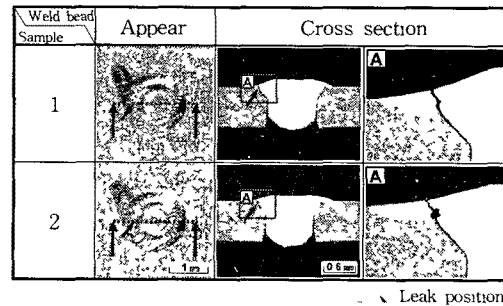
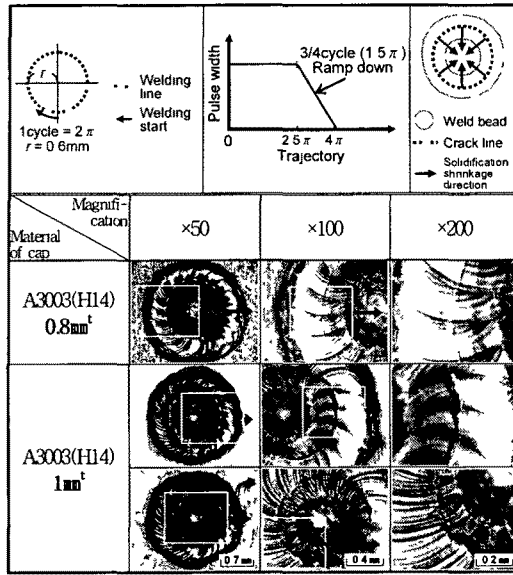
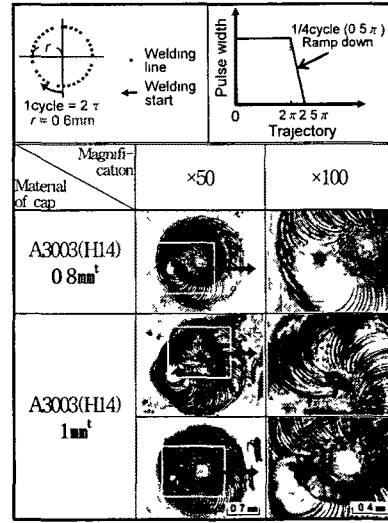


Fig 4 Cross section of welds and leak position by improved press head (A1090 annealed ball, 150MPa)



(a) 5/4cycle(2.5π) square shape pulse + 3/4cycle(1.5π) ramp down



(b) 1cycle(2π) square shape pulse + 1/4cycle(0.5π) ramp down

Fig 5 The effect of crater processing by ramp down of each cap thickness

에 나타내고 있다 캡 두께 0.8mm^t의 경우에는 매우 양호한 비드를 얻을 수 있었으며, 캡의 두께가 두꺼운 1mm^t의 경우에는 다소 개선되기는 하였으나 여전히 균열이 발생하였다 이것은 캡의 두께가 0.2mm 두꺼운 만큼 냉각속도가 빨라지게 되며 급속응고현상을 수반하면서 불의 내측으로 응고수축응력이 크게 작용하기 때문이라고 사료된다

이러한 문제를 해결하기 위해서 나머지 용접조건은 그대로 유지하되 용접궤적의 반경(r)만을 0.6mm에서 0.5mm로 줄여 불 표면 전체를 거의 용융시키는 형태를 취하여 불 내측으로 작용하는 수축응력을 감소시키고자 하였다 Fig. 6에 그 결과를 나타내고 있는데, 캡 두께 1mm^t의 경우에는 균열이 없는 매우 양호한 용접결과를 얻을 수 있었으나 0.8mm^t의 경우 오히려 거대한 핀홀이 발생하였다 이러한 핀홀 결함의 발생원인은 상대적으로 캡의 두께가 얇은 0.8mm^t의 경우 같은 출력의 빔 에너지라 하더라도 캡과 불의 경계면에 직접적으로 조사하는 형태가 되어 형성된 것으로 판단된다

이와 같은 핀홀이 형성되는 결함을 해결하기 위해 캡 두께 0.8mm^t의 경우에는 나머지 조건은 그대로 유지하면서 집광레이저 빔의 파워밀도를 낮추어 실험을 행하였으며 Fig 7에 집광광학계의 비초점거리에 따른 크레이터의 처리결과를 나타낸다

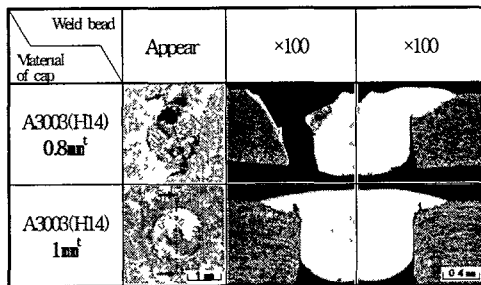


Fig 6 Result of crater processing by reduction of welding trajectory radius of each cap thickness

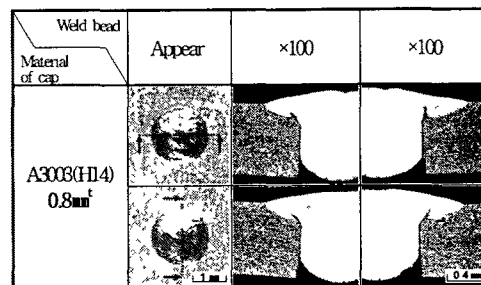


Fig 7 Crater processing by defocused distance of focusing optics ($f_0=+0.7mm$)

이렇게 용접을 하여 얻은 모든 전지를 150MPa의 압력으로 15초간 수중압력 누설시험을 행한 결과 모두 누설이 발생하지 않는 매우 양호한 용접결과를 얻을 수 있었다

(3) 불 재료의 변경

A4047 와이어를 이용하여 밀봉용접한 예를 Fig. 8에 나타낸다 단면관찰결과, 불을 압입하지 않고 와이어를 임의로 녹여 용접하였으므로 부정형의 용접금속 단면에는 많은 기공을 보이고 있다 그러나 용접금속부의 접합상태는 매우 양호하였으며 150MPa로 15초간의 수중압력 누설시험에서 17개의 모든 시험편에서 누설은 발생하지 않았다

이 실험은 재료학적 근거에 의해 이루어진 것으로써, A4047은 현재의 와이어 형태가 아닌 기존의 원형으로 압입하여 용접에 적용할 경우 불의 재질형상이 서로 다른데 기인하여 용접결과에 다소 차이가 날 수도 있다 일반적으로 피용접재의 형상인자는 용접결과에 영향을 미치는 주된 지배인자 중 하나이기 때문이다

IV. 결론

1) 수중압력 누설시험을 통하여 1차 비드 위에 2차 비드가 의주로 빠져나가는 교차점에서 균열이 주로 발생한다는 것을 확인하였는데, 이는 재용융에 의한 2차 비드의 경도 상승과 응고수축응력에 의한 것으로 판단된다

2) 불 용접시 램프다운 기능을 이용하여 5/4cycle 구형펄스 + 3/4cycle 램프다운하여 균열이 주로 발생하는 1차 비드와 2차 비드의 교차점이 없는 용접을 행한 결과, 캡의 두께가 0.8mm인 경우에는 균열의 가능성을 보였으며 1mm인 경우에는 비드 중앙에 원주방향으로 균열이 발생하였다 이것은 두께 차이에 따른 응고속도 증가에 의한 수축응력의 증가에 기인하는 것으로 판단된다

3) 입열량을 감소시키기 위해 용접시간을 줄여 용접한 결과, 캡 두께 0.8mm의 경우에는 양호하였지만 1mm의 경우에는 여전히 균열이 발생하였다 이에 대하여 용접체적의 반지름을 0.5mm로 변경하여 불 중앙으로의 수축응력을 감소시켜 용접을 행한 결과, 캡 두께 1mm의 경우에는 양호하였지만, 0.8mm의 경우에는 핀홀이 발생하였다 이것은 용접체적의 반경을 줄임으로써 레이저빔의 조사위치가 캡과 불의 맞대기 면에 가까워졌고 캡의 두께가 보다 얇은 경우 용이하게 관통이 이루어져 핀홀이 발생한 것으로 판단된다

4) 핀홀이 발생하는 결함을 해결하기 위해 캡 두께 0.8mm의 경우 비초점거리를 +0.7mm로 변경하여 집광빔의 파워밀도를 줄여 용접을 행한 결과, 핀홀·균열 등의 결함이 없는 매우 양호한 용접결과를 얻을 수 있었다 또한 수중압력 누설시험 결과, 모두 누설이 발생하지 않았다

5) A4047은 용접이 낮아 용융액의 흐름을 좋게 함으로서 응고수축응력이 작아져 균열발생이 억제되는 효과가 있다 A4047 와이어를 이용하여 용접한 결과 용접금속부의 접합상태는 양호하였으며, 150MPa의 수중압력 누설시험 결과에서도 누설이 발생하지 않았다

V. 참고문헌

1 김중도, 유승조 2차전지용 알루미늄합금의 펄스 Nd YAG 레이저 용접성(I) -전지 케이스 및 전해액 주입구의 용접-, 2005년도 춘계학술발표대회 논문집, 한국레이저가공학회, pp 45-47, (2005)

2 H Simidzu, F Yoshino, S Katayama, A Matsunawa Pulsed Nd YAG Laser Spot Welding of Aluminum Alloys, Proceedings of LAMP'92, pp 511-516, Nagaoka(June, 1992)