

## 리튬이온전지의 전해액 주입구 불에 대한 Nd:YAG 레이저 용접성

김종도† · 유승조\* · 김장수\*\*

(원고접수일 : 2006년 8월 2일, 심사완료일 : 2006년 9월 28일)

### The Weldability of Aluminum Ball in Electrolyte Injection Hole by Nd:YAG Laser

Jong-do Kim† · Seung-jo Yoo\* · Jang-soo Kim\*\*

**Abstract** : This study suggested the occurrence source of weld-defects and its solution methods in a welding of Electrolyte injection hole by pulsed Nd:YAG laser. In experiment, the ramp down was used in order that solidification crack was removed. Furthermore, shrinkage stress and heat input were reduced by changing of weld trajectory and defocused distance. As a results of a experiment, a sound weld bead shape and crack-free weld bead can be obtained. In conclusion, this show that the welding stability is greatly affected by modulation of laser pulse shape for the same laser energy and welding parameters.

**Key words** : Pulsed Nd:YAG laser(펄스 Nd:YAG레이저), Aluminum ball(알루미늄 볼), Electrolyte injections hole(전해액 주입구), Solidification crack(응고 균열), Shrinkage stress(수축 응력)

#### 1. 서 론

Nd:YAG레이저는 광화이버(optical fiber)로 광을 전송할 수 있는 특성을 이용하여 자동화라인으로의 적용이 가능하게 되었으며, 그 출력이 최근에 이르러 고효율화가 이루어짐으로써 실용화가 더욱 가속화 되고 있다<sup>(2~5)</sup>. 또한 기술의 고도화·고정도화를 위해서, 원자·분자 레벨에서의 제어를 목표로 하여 개발을 진행하고 있으며, 이들의 연구 개발에 대한 획기적인 약진을 가져오기 위해서 보

다 고정도의 제어를 요구하는 하이브리드 기술(hybrid technology)의 개발이 중요하게 대두되고 있다<sup>(6~8)</sup>.

본 연구에서는 현재 알루미늄을 사용하여 만들어지고 있는 리튬이온전지의 전해액 주입구를 밀봉하는 용접에 있어서 펄스 Nd:YAG 레이저를 이용한 용접시 발생하는 균열을 방지하기 위하여 개선된 크레이터(crater)의 처리방식을 이용하여 용접부의 결함 억제 및 방지법에 대한 근본적인 대안을 제시하고자 하였다.

† 책임저자(한국해양대학교 기관시스템공학부), E-mail: jdkim@hhu.ac.kr, Tel : 051)410-4253

\* 한국해양대학교 대학원(현, (주)엠에스 오토텍)

\*\* 한국해양대학교 대학원

## 2. 실험방법

### 2.1 용접부 크레이터 처리방법

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

그리고 Fig. 2에는 볼이 압입되는 캡의 전해액 주입구 형상과 치수를 도시하며 캡의 두께가 0.8mm<sup>t</sup>인 경우와 1mm<sup>t</sup>인 경우의 두 조건에서 A1090 어닐링처리 볼을 사용하였다. 일반적으로 펄스레이저의 전형적인 파형은 구형(矩形)으로서 짧은 일정시간동안 출력을 급속히 상승시켰다가 하강시키는 형태를 취하게 되는데, 이 때 알루미늄합금과 같은 열전도율이 큰 합금의 경우 용융급속은 급속응고하게 되며 그 와중에 균열이 발생하게 된다. 이러한 용융급속의 급속응고속도를 지연시키기 위해 Fig. 1의 오른쪽 파형과 같이 출력의 후반부를 서서히 하강시키는 출력과형의 램프다운기능을 가지는 펄스파형제어 기법이라 할 수 있다.

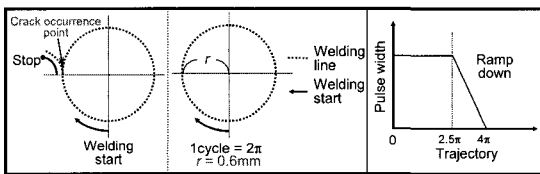
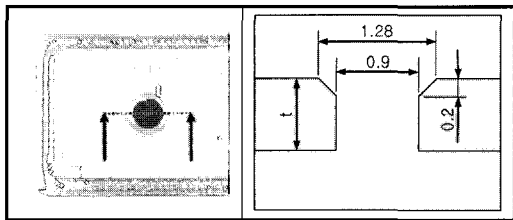


Fig. 1 Processing method of crater for leak prevention



\* t=0.8mm and 1mm

Fig. 2 Schematic diagram and measure of electrolyte injection hole

### 2.2 볼 재료의 변경에 따른 용접현상의 분석

전해액 주입구의 밀봉용접 공정에서는 험핑비드(humping bead), 스페터, 기공 및 편홀 등의 많은 용접결함이 발생되어 왔다. 여기에서는 금속학적 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.

A4000계열의 대표적인 알루미늄합금인 A4047의 화학적조성을 Table 1에 나타낸다. 11~13wt% Si를 함유하고 있는 알루미늄합금 A4047은 Al-Si계 평형상태도에서 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 A4000계열의 용접현상을 재료학적인 측면에서 분석하였으며, 그 대표적인 재료인 A4047와이어를 이용하여 전해액 주입구를 용접하였다.

Table 1 Chemical compositions of A4047 (wt%)

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

## 3. 결과 및 고찰

### 3.1 용접부의 단면형상과 누설상황

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

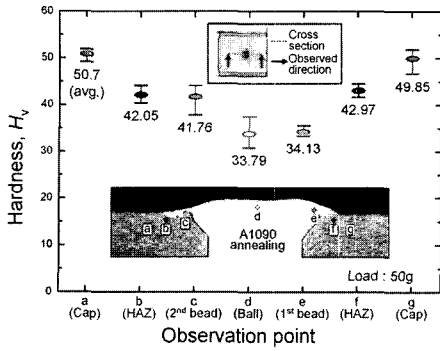


Fig. 3 Variation of hardness in ball-cap weldments (A1090 annealed ball)

Fig. 4는 A1090 어닐링처리 볼을 사용하여 용접을 행하고 150MPa로 수중압력 누설시험을 행한 후 누설이 발생한 시편의 비드외관과 단면형상을 나타낸다<sup>[1]</sup>. 누설이 발생하는 부위를 관찰하여 보면, 비드가 중첩되는 부분 중 균열감수성이 높은

크레이터를 처리하기 위해 1차 비드 위에 2차 비드가 외주로 빠져나가는 교차점에서 균열이 발생하고 있음을 알 수 있으며, 그 위치를 그림의 비드 외관 상부에 화살표로써 표시하였다. 이러한 균열 발생의 원인으로서는 재용융에 의한 경도의 상승과 응고시의 수축응력에 기인한 것으로 사료된다.

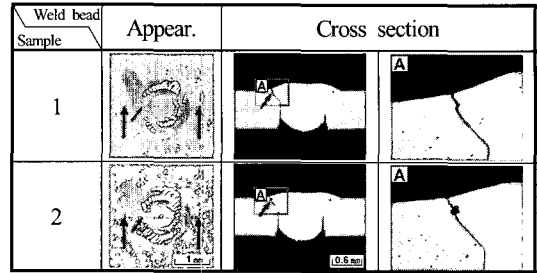
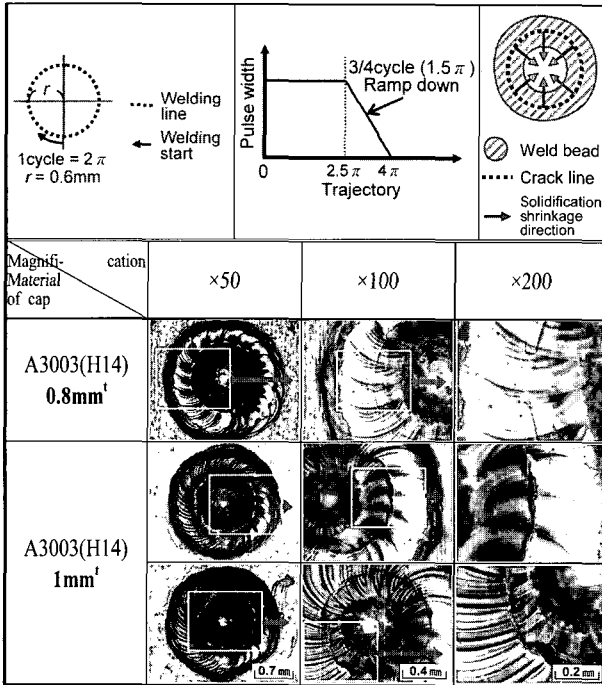
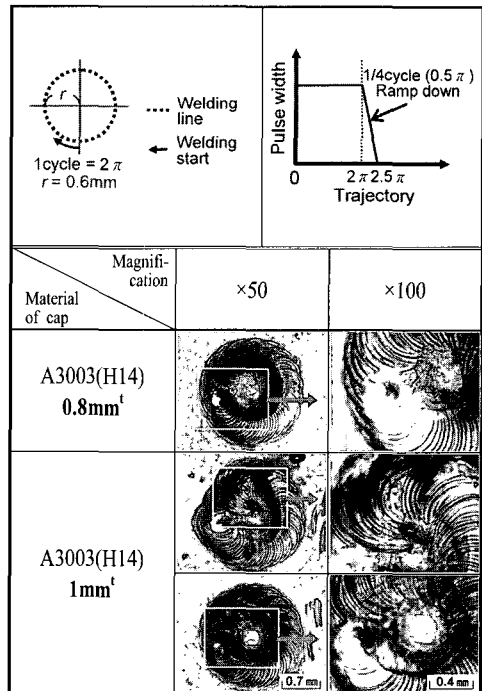


Fig. 4 Cross section of welds and leak position by improved press head (A1090 annealed ball, 150MPa)



(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

3.2 용접부 크레이터의 처리방법 개선효과

캡의 두께별 램프다운에 의한 크레이터 처리효과를 검증하기 위한 실험결과를 Fig. 5에 나타낸다. 펄스레이저 출력파형으로서, (a)는 5/4cycle(2.5π) 구형펄스 + 3/4cycle(1.5π) 램프다운, (b)는 1cycle(2π) 구형펄스 + 1/4cycle(0.5π) 램프다운의 조사조건이다. 여기서 구형펄스 후반부의 램프다운 시간을 조정한 것은 캡의 미소한 두께차이에 따라 용융금속의 급속응고거동 및 그에 수반되는 응력집중상태를 정성적으로 평가하기 위해서 정한 조건이다. 관찰결과 (a)의 경우, 캡(A3003(H14))의 두께가 0.8mm<sup>t</sup>인 경우에는 실제 균열에는 이르지 않았다 하더라도 균열의 징후를 보이고 있었으며, 1mm<sup>t</sup>인 경우에는 균열이 발생하였다. 이것은 Fig. 5(a)의 상부 우측의 개략도와 같이 용접후 냉각시의 응고수축응력에 기인한 것으로 판단되며, 이를 감소시키기 위해 구형펄스의 5/4cycle (2.5π)를 1cycle(2π)로 줄이고, 램프다운 시간을 3/4 cycle(1.5π)에서 1/4cycle(0.5π)로 짧게 하여, 용접후 캡에 흡수되는 입열량을 감소시키고자 하였다. 그 결과를 Fig. 5(b)에 나타내고 있다. 캡 두께 0.8mm<sup>t</sup>의 경우에는 매우 양호한 비드를 얻을 수 있었으며, 캡의 두께가 두꺼운 1mm<sup>t</sup>의 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 용접계적의 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<sup>t</sup>의 경우에는 균열이 없는 매우 양호한 용접결과를 얻을 수 있었으나 0.8mm<sup>t</sup>의 경우 오히려 거대한 편홀이 발생하였다. 이러한 편홀 결함의 발생원인은 상대적으로 캡의 두께가 얇은 0.8mm<sup>t</sup>의 경우 같은 출력의 빔 에너지라 하더라도 캡과 불의 경계면에 직접적으로 조사하는 형태가 되어 형성된 것으로 판단된다.

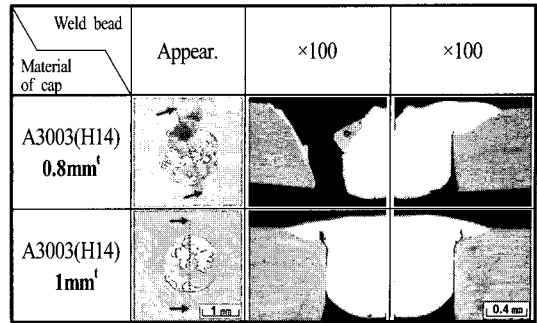


Fig. 6 Result of crater processing by reduction of welding trajectory radius of each cap thickness

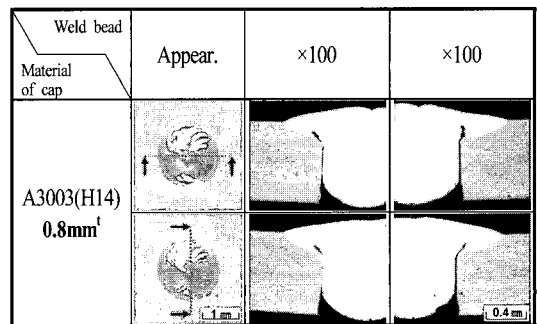


Fig. 7 Crater processing by defocused distance of focusing optics (f<sub>a</sub>=+0.7mm)

이와 같은 편홀이 형성되는 결함을 해결하기 위해 캡 두께 0.8mm<sup>t</sup>의 경우에는 나머지 조건은 그대로 유지하면서 집광레이저 빔의 파워밀도를 낮추어 실험을 행하였으며 Fig. 7에 집광광학계의 비초점 거리에 따른 크레이터의 처리결과를 나타낸다.

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

3.3 불 재료 변경에 따른 용접부의 단면 관찰결과

A4047 와이어를 이용하여 밀봉용접한 예를 Fig. 8에 나타낸다. 단면관찰결과, 불을 압입하지 않고 와이어를 임의로 녹여 용접하였으므로 부정형의 용접금속 단면에는 많은 기공을 보이고 있다. 그러나 용접금속 부의 집합상태는 매우 양호하였으며 150MPa로 15초간 수중압력 누설시험

한 결과 17개의 모든 시험편에서 누설은 발생하지 않았다.

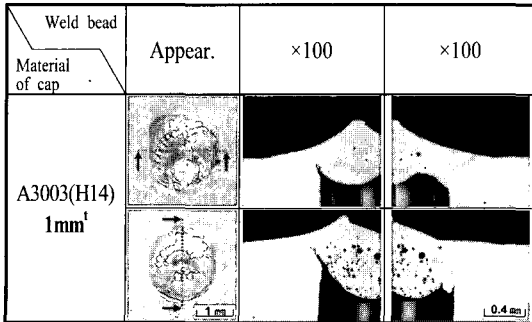


Fig. 8 Welding of electrolyte injection hole by A4047 wire

이 실험은 재료학적 근거에 의해 이루어진 것으로서, 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.

#### 4. 결 론

- 1) 수중압력 누설시험을 통하여 1차 비드 위에 2차 비드가 외주로 빠져나가는 교차점에서 균열이 주로 발생한다는 것을 확인하였는데, 이는 재용융에 의한 2차 비드의 경도 상승과 응고수축응력에 의한 것으로 판단된다.
- 2) 불 용접시 램프다운 기능을 이용하여 용접을 행한 결과, 캡의 두께에 따라 다른 결과를 보였으며, 캡의 두께가 두꺼운 1mm<sup>t</sup>인 경우에는 비드 중앙에 원주방향으로 균열이 발생하였다. 이것은 두께 차이에 따른 응고속도 증가에 의한 수축응력의 증가에 기인하는 것으로 판단된다.
- 3) 입열량을 감소시키기 위해 용접시간을 줄이고 용접케직의 반지름을 0.5mm로 변경하여 불 중앙으로의 수축응력을 감소시켜 용접을 행한 결과, 캡 두께가 0.8mm<sup>t</sup>인 경우에는 핀홀이

발생하였다. 이것은 용접케직의 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 비초점 거리를 변경하여 집광빔의 파워밀도를 줄여 용접을 행한 결과, 핀홀·균열 등의 결함이 없는 매우 양호한 용접결과를 얻을 수 있었다.
- 5) A4047은 용접이 낮아 용융액의 흐름을 좋게 함으로서 응고수축응력이 작아져 균열발생이 억제되는 효과가 있다. A4047 와이어를 이용하여 용접한 결과 용접금속부의 접합상태는 양호하였으며, A4000계열을 이용한 용접성을 정성적으로 확인할 수 있었다.

#### 참고문헌

- [1] 김중도, 유승조, 김장수, "리튬이온전지의 밀봉용접을 위한 펄스 Nd:YAG레이저 용접조건 최적화", 한국마린엔지니어링학회지 제30권, 제5호, pp. 623-628, 2006.
- [2] I. Norris, T. Hoult, C. Peter and P. Wileman, "Material Processing with a 3kW Nd:YAG Laser", Proceedings of LAMP'92, pp. 489-494, Nagaoka (June, 1992).
- [3] J. Y. Gascoin, Y. Juguet, P. Aubert, P. Bouilly and A. Crettiez, "Pulsed YAG Laser Welding and Cutting with Energy Transmission in Optical Fibre", Proceedings of LAMP'87, pp. 113-118, Osaka(May, 1987).
- [4] G. Notenboom, C. Nonhof and K. Schilbach, "Beam Delivery Technology in Nd:YAG Laser Processing", Proceedings of LAMP'87, pp. 107-111, Osaka(May, 1987).
- [5] S. P. Edwardson, K. G. Watkins, G. Dearden and J. Magee, "Generation

of 3D Shapes Using a Laser Forming Technique", ICAREO'02.

- [6] W. M. Steen, "Arc Augmented Laser Processing of Materials", J.Appl. Phys. Vol. 51 No. 11, pp. 5636-5641 (November, 1980).
- [7] G. S. Booth, D. S. Howse, A. C. Woloszyn and E. D. Howord, "Applying Laser-arc Hybrid Welding Technology for Land Pipelines", pp. 169-175, IWC'02.
- [8] S. H. Lee, M. A. Rahimi, C. E. Albright and W. R. Lempert, "Development of Combind Welding with an Electric Arc and Low Power CO Laser", pp. 176-180, IWC'02.

## 저 자 소 개



### 김중도 (金鍾道)

1963년 1월생, 1985년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1993~1997년 일본 오사카대학 생산가공공학과 응용고온 공학코스(공학석사 및 공학박사), 2003년 1월~현재, 대한용접학회 사업이사 겸 고에너지연구위원회 위원장, 2004년 1월~한국레이저가공학회 운영이사, 1998년 3월~현재, 한국해양대학교 기관시스템공학부 교수, 당학회 편집위원, 관심분야 : 레이저용접, 가공현상의 고분해능 계측과 실시간 해석



### 유승조 (俞承助)

1978년 2월생, 2003년 부경대학교 재료공학과 졸업, 2005년 한국해양대학교 기관시스템공학과 재료전공(공학석사), 2005년~현재, (주)엠에스오토텍 신기술연구팀 연구원, 관심분야 : 레이저용접, 레이저절단, 마찰용접



### 김장수 (金長壽)

1960년 7월생, 1985년 울산대학교 기계공학과 졸업, 1985~2004년 명신산업(주) 공장장, 2005년~현재 (주)엠에스오토텍 연구소장, 2005년~현재 한국해양대학교 기관시스템공학과 석사과정, 관심분야 : 레이저용접, 레이저경화, 소성가공