한국정밀공학회지 제 32 권 제 10 호 pp. 891-896 October 2015 / 891
J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 10, pp. 891-896 http://dx.doi.org/10.7736/KSPE.2015.32.10.891
ISSN 1225-9071(Print), ISSN 2287-8769(Online)

도금 강판 CMT 용접부위의 재료특성평가

Characterization of Cold Metal Transfer Welding Coated Steel

송현수 [1,✉], 최보성 [1], 윤존도 [2], 박승태 [3]
Hyun Soo Song[1,✉], Bo Sung Choi[1], Jondo Yun[2], and Seung Tae Park[3]

1 울산테크노파크 (Ulsan Techno Park)
2 경남대학교 나노신소재공학과 (Department of Nanomaterials Science and Engineering, Kyungnam University)
3 (주)나재 (NaJae Co., Ltd.)
✉ Corresponding author: wonsoo4214@utp.or.kr, Tel: +82-52-219-6760

Manuscript received: 2014.11.27. / Revised: 2015.8.5. / Accepted: 2015.8.17.

In order to protect the environment, using light material is becoming more and more attractive within the automobile industry. Aluminum alloys are the best and lightest metallic materials used in the automotive, electron, and aerospace industries. Al alloy and SGARC were joined by cold metal transfer (CMT) welding, using AlSiMn4 as a filler. Results showed that dissimilar metals from the Al 6000 series/SGARC could be successfully joined by CMT under proper processing parameters. The micro-hardness value of 125Hv was obtained at an interface.

KEYWORDS: CMT (CMT 용접), Welding (용접), Evaluation (평가), Properties (물성)

1. 서론

최근 자동차 시장에서는 차체의 경량화가 많이 이루어지고 있다. 특히 국소부위 또는 특정부위에만 용접이 가능한 기법을 연구하여 차체 전체의 무게를 줄이고 연비를 향상 시키는 연구들이 행해지고 있다.

본 실험에서는 신기술로 대두 되고 있는 CMT 용접법을 이용하여 박판 성형에 대한 용접 기술을 개발하는데 그 목적을 두었다. 전류, 전압 그리고 용접속도를 변수로 두어 각각 시험하였다. 일반적으로 알루미늄의 용융용접은 MIG, TIG 및 레이저 응용 용접 등이 가능하다. 이 중 최근 개발된 레이저 응용 용접의 경우, 여러 연구 결과가 있으며 효율적인 용접 방법으로 사료되나 초기 장비 투자비가 고가이며 갭(gap)에 매우 민감하여 엄정한 갭 관리가 필요하다. 그리고 TIG 용접의 경우, 생산성이 매우 낮아 제품의 경쟁력이 근본적으로 저하된다. MIG 용접의 경우, 후판에서는 우수한 용접성 및 고속용접이 가능하지만, 박판 용접에서는 소모전극을 사용하기 때문에 아크에 의한 열량과 이행하는 용적이 보유하는 열량이 더해져 모재에 입열되고, 이로 인해 박판의 경우 용락이 발생할 가능성이 매우 높으며 적정 용접 조건에서 용접을 실시하더라도 열변형이 매우 크다는 단점이 있다.

이와 같은 용접의 한계를 극복하기 위해 선진 용접기 제조회사에서는 알루미늄 박판 용접을 가능케 하는 프로세스 개발에 주력해 왔으며 최근 이에 대한 결과로서 CMT 용접기법이 Fronious 社(AUS)에서 개발되었다. 본 논문에서는 최신 저입열

Copyright ⓒ The Korean Society for Precision Engineering
This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

용접기술인 CMT 용접공정을 적용하여 자동차 차체 부품간의 이종재료 접합에 대한 기반기술을 확보하고자 CAE 해석을 통해 CMT 용접 열원을 구현하고 시편에 대한 변형을 예측하였다.

차체부품의 용접부 비파괴 시험과 용접조건 도출을 위한 선행해석과 변형도 검사를 실시하고, 용접이 실시된 후 열영향부 등의 영향을 조사하기 위하여 모재-열영향부-접합부의 경도를 조사하여 그 데이터를 확보하였다. 또한 용접부의 미세조직을 EPMA와 OM으로 관찰하여 용접시 발생할 수 있는 개재물의 혼입 또는 제2상의 생성 또는 금속조직의 변화 등을 금속학적 관점에서 관찰하였다.

2. 실험방법

2.1 CMT 용접 시편의 제작

자동차 차체로 사용하고 있는 알루미늄 박판과 SGARC340박판(자동차 차체용 아연도금강판)을 Fig. 1에서 보는 바와 같이 1.2t Al과 0.7t SGARC 강판을 접합하여 사용하였다. CMT 용접에 사용된 시험편은 Fig. 2(b)에서 보는 바와 같이 클램핑을 실시하여 샘플을 고정하여 CMT 용접을 실시하였다. 용접후 단면의 형상은 Fig. 2(a)와 같았다. 용접 샘플을 각 조건 별로 1, 2, 3, 4 그리고 5로 구분한 다음, 각 샘플에 대해 물성평가를 실시하였다.

이종재료 시험편으로 사용한 알루미늄의 강종은 Table 1에서 보는 바와 같이 Al 6021를 사용하였다.

용접 조건은 Table 2에서 보는 바와 같이 총 9조건으로 실행하였다. No. 1-5의 조건은 용융아연도금 강판으로 용접 조건별로 5가지를 실시하였다.

용융아연도금 시험편에 용접한 결과 전류 59A, 전압 11.5V 그리고 용접속도 75cm/min일 때 용접부 단면에 기공이 존재 하지 않았으며 용접부의 외관상 용접 비드 높이나 단면의 이종재료 두 박판에 충분히 용입이 되어 있는 것을 확인하였으며 이를 기반으로 하여 A-2 조건이 가장 이상적이라는걸 알 수 있었다. A-2 조건이 제일 이상적인 조건으로 판단되어 용융아연도금 두께가 각각 다른 B~E 강판에 각각 CMT용접을 실시하였다.

2.2 산업용 단층 촬영기를(CT X-RAY) 이용한 내부 구조 분석

본 연구에서는 용접 조건이 제일 좋은 C 샘플(SGARC340 0.5mm, 59A, 11.5V, 75cm/min)에 대해서 내부구조를 분석하였다. 내부 기공 및 크랙 등 구조 결함 관찰을 위해 용접부의 근접 부위로 절단을 하여 CT X-RAY(SMX-225CTS, SHIMADZU) 관찰을 실시하였다. 실시 조건은 가속전압 160V, 전류 30μA로 수행하였다.

내부 구조의 이미지를 3D로 측정하여 X, Y, Z 축으로 각각의 내부 구조에 대한 결함을 관찰하였다. 결함 인식 조건은 크기에 상관없이 빈 공간이면 모두 결함으로 인식하도록 조건을 설정하여 내부 구조 결함 분석을 실시하였다.

2.3 마이크로 비커스 경도기를 이용한 경도 분석

본 연구에서는 용접 조건이 제일 좋은 C 샘플

Table 1 Chemical composition of Al 6021

No.	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
6021	0.8/1.5	0.05/0.20	0.01/0.11	0.02/0.10	0.45/0.70

Table 2 Welding parameters

Name of sample	NO.	Amp. (A)	Voltage(V)	Speed (cm/min)
A	1	66	11.8	75
	2	59	11.5	75
	3	52	11.3	75
	4	52	11.3	60
	5	66	11.8	60
B(0.3mm)	6	59	11.5	75
C(0.5mm)	7	59	11.5	75
D(0.7mm)	8	59	11.5	75
E(1.2mm)	9	59	11.5	75

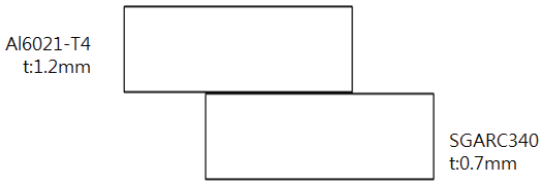
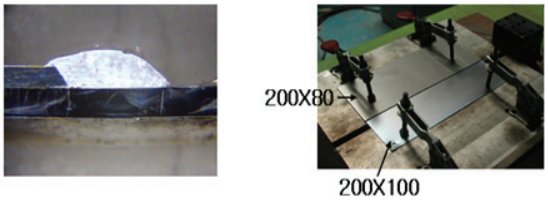


Fig. 1 Schematic of CMT



(a) Section of welding part (b) Test specimen

Fig. 2 Section of welding part and test specimen

(SGARC340 0.5mm, 59A, 11.5V, 75cm/min)에 대해서 비커스경도로 경도측정을 실시하였다. 비커스 경도 측정용 시험편은 용접부와 모재의 영역에 따른 경도 변화를 관찰하기 위하여 마이크로 비커스 경도계(HMV-2, SHIMADZU)로 경도 시험을 실시하였다.

경도 시험 조건은 0.98N, 압입 시간은 15초로 하여 측정하였으며, 경도 변화 추이를 정확하게 관찰하기 위하여 각 열영향부 영향을 받지 않는 순수모재에서부터 용접부까지 50μm씩 이동 시키면서 4개 부위에서 경도를 측정하였다.

2.4 조직 관찰

본 연구에서는 용접 조건이 제일 좋은 C 샘플(SGARC340 0.5mm, 59A, 11.5V, 75cm/min)에 대해서 조직을 관찰하였다. 조직을 관찰하기 위하여 연마된 샘플에 에칭 작업을 실시하였다.

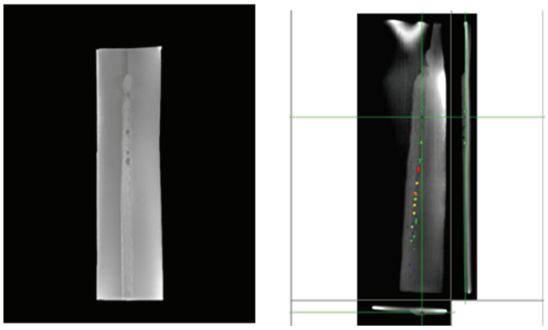
에칭 조건은 나이탈 3%에 15초로 용접부와 열영향부 그리고 모재가 육안으로 구분이 될 수 있도록 하였다. 에칭이 끝난 샘플은 세척 후, 광학현미경 100배에서 조직을 관찰 하였다.

3. 결과 및 고찰

3.1 CMT 용접 샘플의 CT X-RAY 측정 결과

내부 단면을 분석한 결과 내부의 용접부에 작은 홀들이 많이 잔존하는 것으로 관찰되었다. 결함은 길이방향으로 용접부 단면을 타고 전체적으로 잔존하는 것을 알 수 있었다. 용접부의 결함을 분석한 결과 내부의 용접부에 홀들이 점형태가 아니라 작은 원형태로 공극이 큰 것을 확인 할 수 있었다. 용접을 하는 과정에서 자연냉각방식이므로 냉각하는 과정에서 이러한 탈가스들이 충분히 빠져나갈 시간이 주어지지 않았으므로 기공들의 형태가 길다란 타원형태가 아니라 동그란 원상을 가지는 것을 알 수 있었다. 이러한 핀홀들은 용접 하는 과정에서 가스들이 빠져나간 흔적으로 사료된다.

여러 가지 용접 조건 중에서 기공 발생에 직접적인 영향을 주는 인자는 냉각 속도로 사료된다. 냉각속도가 빨라지면 용융이 되는 과정에서 탈가스 진행이나 용접이 제대로 되지 않아 기공이 발행하기 때문이다. 이러한 냉각속도는 용접 전류, 용접 전압, 용접 속도, 모재의 두께 등에 의해 결정된다. 즉 용접 전류, 용접 전압이 증가하면 냉각속도는 느려지고, 용접 속도와 모재 두께가 증가하면 냉각 속도는 빨라진다. 9가지 샘플의 공극률



(a) (b)

Fig. 3 Defect analysis of CMT sample; (a) Defect analysis of CMT sample (name of sample No. A1) (b) Defect size color coding of CMT sample (name of sample No. A1)

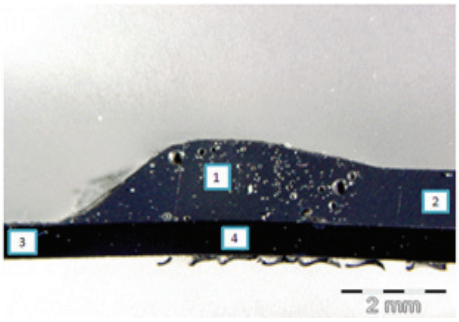


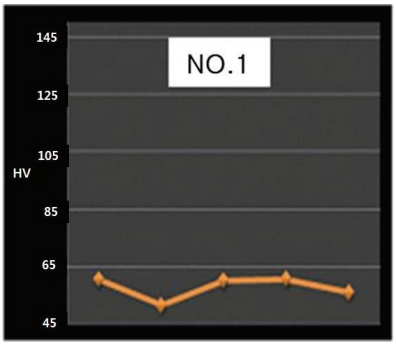
Fig. 4 Measurement points of vickers hardness; (1) Welding (2) Al6021-t4 (3) SGARC (4) HAZ

을 계산한 결과 A1번이 0.25%가 제일 높았으며 대부분 0.1%의 공극률을 가지는 것으로 나타났다. 그 중에서도 C 시험편이 0.07%로 최소값을 가지 가지는 것으로 나타났다.

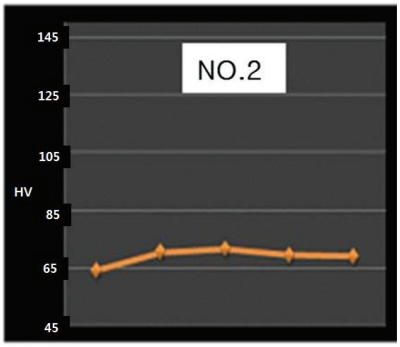
용접부 내부의 기공들은 Fig. 3(a)에서 보는 바와 같이 용접진행방향으로 탈가스들이 빠져 나가면서 기공을 형성하는 것을 알 수 있었다. Fig. 3(b)에서 보는 바와 같이 기공들은 가장 자리 보다는 중간 지점의 기공들의 크기가 더 큰 것을 알 수 있었다.

3.2 마이크로 비커스 경도 측정

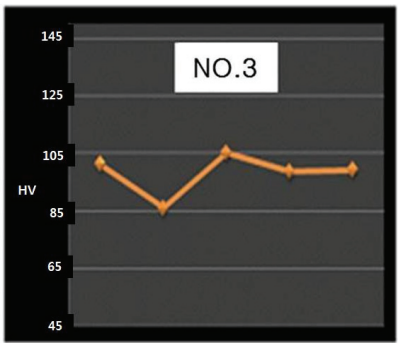
용접 샘플중에 가장 기공률이 적었던 샘플C의 단면에 각 부위별로 비커스 경도를 측정하였다. 측정 부위는 용접부(1), 알루미늄 모재(2), 스틸 모재(3) 그리고 용접부의 계면 부분(4)에 대하여 Fig. 4에서 보는 바와 같이 네 부위에 대하여 경도를 측정한 결과 용접부와 알루미늄 모재에서는 비슷한



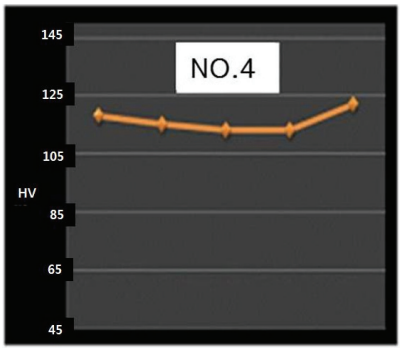
(a) Vickers micro-hardness of welding



(b) Vickers micro-hardness of Al6021-t4



(c) Vickers micro-hardness of SGARC



(d) Vickers micro-hardness of HAZ

Fig. 5 Vickers micro-hardness of welding part

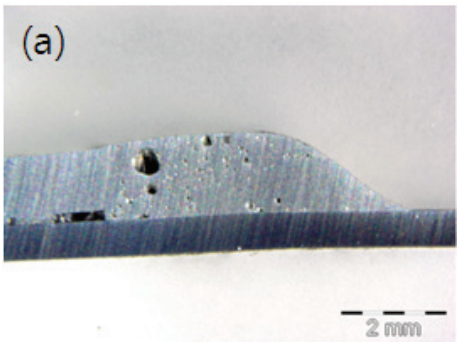
경도값을 나타내는 것을 알 수 있었다. 측정 시 용접부 단면에 기공들이 많이 잔존하여 측정 시 기공을 압입할 경우 경도값이 상이할 수 있으므로 홀을 피해서 측정하였다. 측정은 각 부위별로 5회 실시하였으며 각 측정 시 소성 및 탄성으로 변형될 수 있는 영역을 고려하여 한번 측정 후 압흔의 4배 정도 벗어난 곳에서 측정하였다. 용접부와 스틸이 만난 부위에서 경도를 측정한 결과 스틸모재보다 더 높은 경도를 가지는 것을 알 수 있었다. 경도값은 Figs. 5(a)-(d)에서 보는 바와 같이 스틸 모재의 경우 97.8±7.2HV0.1, 60.4±6.1HV0.1, 용융부 계면 아랫부분은 116.2±3.8HV0.1인 것으로 나타났다. 이는 용융 후 냉각하는 과정에서 경도값이 상승한 것으로 사료된다

용접부는 알루미늄 대비 83% 경도가 향상되어 목표치인 105±2.0HV0.1 원하는 경도 값까지 상승한 것으로 나타났다.

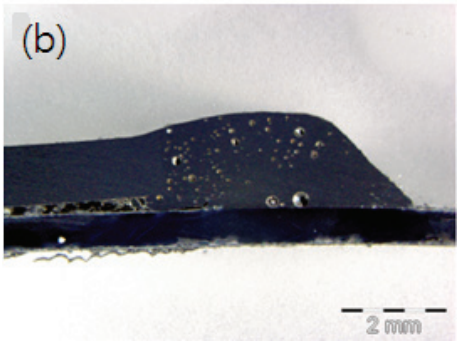
3.3 용접 샘플의 조직 및 성분 분석

3.3.1 CMT 용접 샘플의 조직 분석(OM)

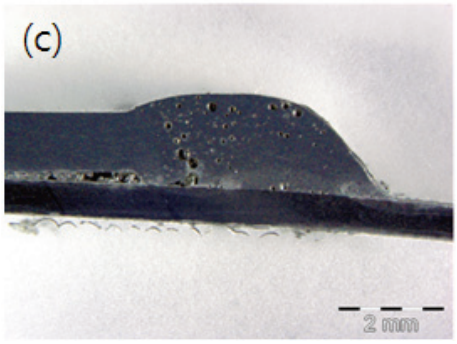
용접샘플을 1-9번까지 각 조건별로 용접부 단면을 관찰한 결과 Fig. 6에서 보는 바와 같이 용접부위에서 다량의 미세 기공들이 관찰되었다. 1, 3, 4, 5, 7, 8, 9번에 대해서는 가운데에 기공들이 존재하는 것을 알 수 있었으며 2번의 샘플은 큰 기공이 부분적으로 용접부에서 존재하는 것을 알 수 있었다. 6, 7, 8, 9번의 경우 모재 부분과 완전 용융이 되지 않고 부분 용융만 일어나 모재와 용접시 완전 융착이 되지 않은 것을 확인 할 수 있었다. 이러한 기공들은 알루미늄 합금의 용접시 용접부에서 발생하는 기공은 수소가 직접적인 원인인 것으로 알려져 있다. 그러므로 알루미늄 합금의 용접시 무수한 가스 기공들을 제어하는 기술은 가능하나 무결점 상태로 만들기는 힘든 것으로 사료된다. 이러한 기공들은 용해된 알루미늄이 냉각되어 응고점에 도달하면 액상과 고상의 용해도 차이에 의해 응고된 용접 금속은 과포화 상태가 된다. 과포화 수소의 일부는 용접 금속의 표면을 통해서 대기 중으로 방출되며 일부는 알루미늄 합금의 빠른 냉각 속도에 의해 용접 비드에 잔류하여 기공을 형성하게 된다. 기공 발생에 영향을 주는 용접 조건은 용접 입열량, 최고 온도 및 냉각 속도 등이며 이들은 서로 상관관계를 갖고 있다. 따라서 하나의 변수가 바뀌게 되면 다른 요인들이 함께 변화하는 것을 알 수 있었다.[1,2]



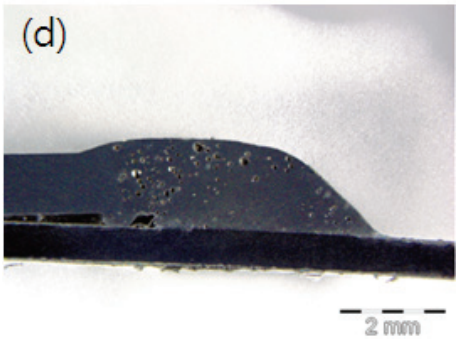
(a) No. 2



(b) No. 3



(c) No. 7



(d) No. 8

Fig. 6 OM of CMT cross-section

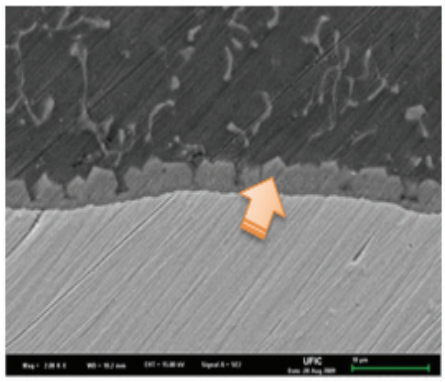


Fig. 7 SEM of interface (Sample No. 6)

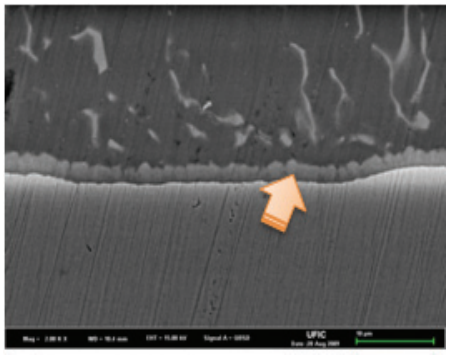


Fig. 8 SEM of interface (Sample No. 7)

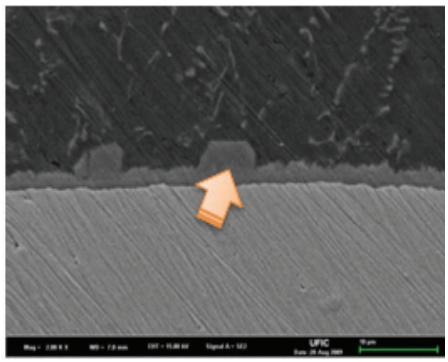


Fig. 9 SEM of interface (Sample No. 8)

3.3.2 CMT 용접 샘플의 조직 분석(SEM/EDS)

이종 접합 재료를 용접 한 후 용접부 단면을 관찰한 결과 EM상에서 이종 재료 사이에 계면이 존재하는 것을 확인하였다. Figs. 7-9에서 보는 바와 같이 계면은 균일하게 일자로 형성된 것이 아니라 부위별로 동그랗게 부분적으로 용융된 것을 확인할 수 있었다.

Table 3 EDS of interface (Sample No. 6)

Element	Content (wt%)
Si	64.6
Al	3.3
Fe	32.1

Table 4 EDS of interface (Sample No. 7)

Element	Content (wt%)
Si	65.4
Al	3.9
Fe	30.6

Table 5 EDS of interface (Sample No. 8)

Element	Content (wt%)
Si	65.2
Al	5.5
Fe	29.2

계면에 생성된 2차상을 EDS로 분석한 결과 Tables 3-5에서 보는 바와 같이 SGARC의 Fe 성분과 Al 합금의 Al 성분 및 Si 성분인 것으로 나타났다. Si 성분의 검출은 CMT 용접시 용접 필러로 사용된 AlSi3Mn의 Si 성분과 Al 성분이 혼입되어 검출된 것으로 사료된다. 또한 계면에서 관찰된 2차상은 Si 가 집중되면서 계면에 확산되어 관찰된 것으로 사료된다.[3,4]

계면에 생성된 2차상은 침상이 아니라 등축정 형태로 계면이 안정한 상태로 구성되어 있는 것을 알 수 있었다.[5]

4. 결론

CMT 용접을 실시한 Al6021-T4/SGARC340 이종접합 재료에 대한 용접부 단면의 조직 및 경도를 측정한 결과 다음과 같은 결론을 내릴 수 있었다.[6]

본 연구를 통하여 자동차부품용 알루미늄 강판에 기존에 실시하는 spot 용접으로 처리했던 부분들은 굴곡이 있는 부분에서는 작업이 용이하지 않고 용접이 제대로 이루어지지 않았으나 CMT 용접은 로봇이 작업을 하는 부분이므로 굴곡 부분에 대해서도 정확하게 용접을 실시함으로써 용접 불량으로 인해 발생하는 벌어짐이나 휘어짐, 크랙의 불량율을 줄일 수 있다.

CMT 용접을 통하여 계면 부위에 Si 재결정상들이 분포되면서 원래 본 소재가 가지는 경도보다 85% 향상된 경도값을 가지므로 spot 용접에 비해 재료의 강성이 더 좋아진것으로 나타났다.

Thermal 및 Mechanical 해석을 수행하여 실제 변형량 대비 해석에 의한 변형량을 예측할 수 있었다. 해석과 실제 변형은 그 경향은 매우 유사함을 알 수 있으나 변형량에서는 차이를 보임을 확인할 수 있었다(해석상의 변형량: 5.82mm, 실제 변형량: 10.28mm). 용접부 계면에서는 Al, Si, Fe가 검출되었다. 이는 필러의 Si 성분과 Al 합금의 Si 성분이 용접하는 과정에서 계면으로 이동한 것으로 보인다. 비커스 경도계를 이용하여 압입 시험을 실시한 결과 용접부는 알루미늄 모재의 경도값과 83% 일치하는 것을 보였다. 스틸 모재와 알루미늄 모재의 용융 계면에서는 모재들보다 더 높은 경도값을 나타냈다. 스틸의 경우 경도값이 평균 100HV이었으나 용융부 계면 아래에서는 평균 118HV 정도 인 것을 확인할 수 있었다.

REFERENCES

1. Park, J. W., “Welding Technology,” Iljinsa, 1999.
2. Elrefaey, A. and Ross, N. G., “Microstructure and Mechanical Properties of Cold Metal Transfer Welding Similar and Dissimilar Aluminum Alloys,” Acta Metallurgica Sinica, Vol. 28, No. 6, pp. 715-724, 2015.
3. Cao, R., Feng, Z., Lin, Q., and Chen, J., “Study on Cold Metal Transfer Welding-Brazing of Titanium to Copper,” Materials and Design, Vol. 56, pp. 165-173, 2014.
4. Cong, B., Ding, J., and Williams, S., “Effect of ARC Mode in Cold Metal Transfer Process on Porosity of Additively Manufactured Al-6.3% Cu Alloy,” The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol. 76, No. 9-12, pp. 1593-1606, 2015.
5. Cao, R., Feng, Z., and Chen, J., “Microstructures and Properties of Titanium-Copper Lap Welded Joints by Cold Metal Transfer Technology,” Materials and Design, Vol. 53, pp. 192-201, 2014.
6. Ahn, S. D., Cho, Y. T., and Jung, Y. G., “Analysis of Induction Heating according to Coil Shapes on the V-Groove Weld Joint,” J. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 32, No. 2, pp. 167-172, 2015.