델타스폿용접을 이용한 이종소재의 웰드본딩 공정 조건 최적화

김영현^{*,**} · 김영곤^{**} · 김동철^{***} · 주성민^{*,†}

^{*}조선대학교 공과대학원 선박해양공학과

^{**}한국생산기술연구원 스마트가공공정그룹

^{***}한국생산기술연구원 용접접합그룹

Optimization of Weld-bonding Process Conditions of Dissimilar Materials using Delta Spot Welding

Young-Hyun Kim^{*,**}, Young-Gon Kim^{**}, Dong-Cheol Kim^{***}, and Sung-Min Joo^{*,†}

^{*}Dept. Naval Architecture and Ocean Engineering, Graduate School, Chosun University,
Gwangju, 61452, Korea

^{**}Smart Manufacturing Process R&D Group, KITECH, Gwangju, 61012, Korea

^{***}Joining R&D Group, KITECH, Incheon, 21999, Korea

[†]Corresponding author : joo@chosun.ac.kr

(Received March 15, 2019 ; Revised April 4, 2019 ; Accepted April 11, 2019)

Abstract

In the automobile industry, studies have been made on spot welds of non-ferrous metals such as aluminum, which has lightweight, high-strength, and excellent impact properties, in order to improve fuel efficiency through lightening of vehicle body weight. However, these dissimilar welds cause intermetallic compound formation and the galvanic corrosion in corrosion environments at the weld interface. On the other hand, it is known that the weld bonding process has the property of improving strength of spot welds by applying a structural adhesive between two metals and increasing the surface adhesive force.

In this study, Al 6061-T6 with a thickness of 1mm and galvanized steel sheet (GA) with a grade of 440 MPa were used as target materials. As a process method, delta spot welding equipment was used for reducing the heat input using a special process tape and the weld bonding process by the D type structural adhesive was done. As a result, tensile shear strength after salt spray test for 1920 hours was more than twice that of spot welding condition and it was confirmed that the corrosion amount of the welds was lowered.

Key Words : GA440, Al6061-T6, Shearing stress, Weld nugget, Resistance spot welding, Delta-spot welding, Weld-bonding process

1. 서 론

세계적으로 자동차 연비 및 배기가스 규제가 강화됨에 따라 전기자동차 등의 친환경차량이 도입되고 있으며, 전장부품의 증가로 인해 무거워진 차체 경량화를 위해 알루미늄 합금의 적용이 빠르게 증가하고 있다¹⁾. 국내에서도 완성차 업체에서 적극적으로 추진중인 알루미늄

미늄 판재 확대 적용을 위해 관련 용접 기술 개발이 필요한 시점이다. 자동차 산업에서 가장 많이 쓰이는 용접기술은 1877년 Elihu Thomson에 의해 발명된 저항 점용접이다^{2,3)}. 저항 점용접 즉, 스폿용접은 작업의 자동화 적용이 뛰어나며 용접속도가 빨라 대량생산에 적합하다³⁻⁵⁾.

하지만 일반적인 저항 발열을 이용한 스폿용접을 알루미늄 합금과 고강도강에 적용 하는 경우 용융점, 열

전도도, 전기저항의 차이로 용접성이 나쁘고, 취성이 큰 금속간 화합물 생성, 전위차에 의한 갈바닉 부식이 발생한다^{6,7)}. 알루미늄 합금은 고강도강에 비해 탄소와 같은 합금 성분의 첨가량이 적어 낮은 고유 저항을 갖고, 전기 전도도가 높아 단시간 대전류를 필요로 하며, 스폿 용접시 표면 산화물이 전극에 용착되는 현상 때문에 입열량 제어가 필요하다⁷⁻⁹⁾. 따라서, 최근에는 전류, 가압력, 통전시간에 의해 입열량 제어가 가능하고, 전극과 모재 사이에 프로세스 테이프를 삽입하는 델타스폿 용접과 같은 방법들이 적용되고 있다^{10,11)}.

본 연구에서는 열처리형 알루미늄 소재인 Al6061-T6과 합금화 아연도금강판인 GA440소재를 대상으로 장시간의 부식환경 속에서도 용접부 강도를 확보할 수 있도록 웰드본딩 공정을 적용하였고, 염수분무 시험시간에 따른 내식전단강도를 공정 조건별로 조사하였다. 또한, 내식전단강도에 미치는 공정 인자의 영향 검토 및 시험편 부식상태 관찰도 진행하였다.

2. 실험 방법

2.1 델타스폿용접 및 웰드본딩 원리

본 연구에서는 알루미늄 스폿용접시 전극과 모재 사이에 프로세스 테이프를 삽입하여 접촉저항의 증가로 인해 용접 입열량과 너짓 크기를 제어하고, 전극 오염 방지, 스패터 저감의 효과, 기존 인버터 방식의 스폿용접 보다 저전류 범위에서도 적정 용접부를 확보할 수 있는 특징을 가진 Fronius사의 델타스폿 용접기를 사용하였다. 장비와 그 원리를 Fig. 1에 나타내었다. 그리고, 용접부 강도 향상과 전위차에 의한 갈바닉 부식을 억제하기 위해 Fig. 2와 같이 시험편 표면에 C를 주로

Fig. 1 Delta spot welding principle and appearance

Fig. 2 Method of weld-bonding process

Fig. 3 Tensile shear test specimen (ISO14273)

함유하고 있는 D type의 구조용 접착제를 얇게 도포한 후 스폿용접을 하는 웰드본딩 공정을 실시하였다.

2.2 소재 및 용접 조건

본 연구에서는 우수한 내식성, 가공성, 강도, 용접성을 갖는 Al6061-T6과 440MPa급의 합금화 아연도금강판(GA)을 사용하였다. ISO 14273 규격과 같이 시험편을 제작하였으며 Fig. 3에 나타내었다. 시험편은 두께 1mm의 Al6061-T6과 GA440이 사용되었다. Table 1는 대상 소재의 화학적 조성을 나타내었다.

용접 조건은 입열량에 영향을 미치는 주요 공정 변수인 전류, 가압력, 용접시간의 변경에 따른 실험을 진행하였다. 먼저 프로세스테이프(PT)의 종류에 따른 열적특성이 다르므로 적정 용접조건 확보를 위한 실험으로 PT-3000(Al측), PT-2000(Steel측)과 PT-3000(Al측), PT-1407(Steel측)의 가압력(1.9kN), 용접시간(240ms)은 고정하고, 전류값(9kA, 10kA, 11kA)의 변경에 따른 실험을 진행하였다. 또한, 웰드본딩 공정은 Fig. 3의 겹침여유 L부분에 D type의 구조용 접착제만 도포한 것과 알루미늄 시험편을 수동 연마후 구조용 접착제를 도포한 것을 각각 비교하였다. 이와 같이 웰드본딩을 적용한 시험편에 대해서는 열처리(170℃,

Table 1 Chemical composition and mechanical properties of Al6061-T6 and GA440 alloys

Chemical composition(at%)							Mechanical property		
Material	Fe	C	Mn	Si	Mg	Al	TS(MPa)	YS(MPa)	El(%)
Al6061-T6	0.4	-	1.0	0.3	2.8	Bal.	328	281	14
GA440	Bal.	0.08	1.30	0.12	-	0.04	475	368	29

Table 2 Weld-bonding welding condition

No.	Welding condition	Heat treatment (170°C, 30min)
1	1.9kN-9.5kA-240ms	X
2	4.5kN-13kA-180ms+structural adhesive	O
3	4.5kN-13kA-240ms+structural adhesive	O
4	4.5kN-13kA-240ms +polishing +structural adhesive	O

Table 3 Salt spray test conditions

	KS D 9502	Condition
NaCl concentration(g/L)	50±10	50
Density	1.029~1.036	1.031
pH	6.5~7.2	6.59
Spray pressure(kPa)	98±10	100
Temperature(°C)	35±2	35.1
Air saturation temperature(°C)	47±2	47.2
Sprayed capacity (mL/h)	1.5±0.5	1.8

30분)를 하여 경화시켰다. Table 2에 상기 용접 조건을 나타내었다.

2.3 용접부 특성평가

알루미늄과 강판의 스폿용접부에 대해서 용접부 조직 관찰, 너짓경 비교와 함께 부식환경에서의 전단강도특성을 조사하기 위해 염수분무 시험시간(0h, 640h, 1280h, 1920h)에 따른 용접 조건별 시험편(No.1~No.4)을 각 3개씩 준비하여 시험하였다. 내식전단강도시험은 KS D9502 (중성염수분무시험) 및 KS B0802(인장시험)에 따라 평가하였다. Table 3은 상기 염수분무시험 조건을 나타내었다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 델타스폿용접 적용 결과

이종소재의 델타스폿용접시 프로세스 테이프의 선정을 위해서 PT3000(Al측)&PT2000(Steel측)계조합과 PT3000(Al측)&PT1407(Steel측)계 조합에 대해서 각각 조사하였다. 주요 공정 변수에 따른 전단강도 비교 결과와 프로세스 테이프의 SEM 성분분석 결과를 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 4(a)를 보면 전체적으로 전자의 조합인 PT3000(Al측)&PT2000(Steel측)에 비해 후자의 PT3000(Al측)&PT1407(Steel측)계에서 높

(a) Tensile strength test result

(b) PT2000

(c) PT3000

(d) PT1407

Fig. 4 Result of tensile shear strength at different current and process tape component analysis

은 전단인장강도를 나타내었다. 예를 들어, 일정한 가압력과 통전시간을 갖는 동일 용접 조건 전류 9kA, 10kA, 11kA에서 전단강도가 각각 0.3kN, 0.5kN, 0.4kN으로 약 10~14% 더 높은 값을 나타내었다. 따라서, PT3000(Al측)&PT1407(Steel측)계 조합이 이종 소재 용접부의 전단강도를 더 향상시킬 수 있는 것으로 판단된다. 또, 프로세스테이프에 물성 및 조성 조사결과 Cu보다 Fe, Ni이 함유된 PT1407에서 외부입열량이 높은 것으로 분석되었다. 이것은 델타스폿용접시 형성되는 너짓경의 크기에 영향을 미치며 이로인해 PT2000계보다 PT1407에서 높은 전단인장강도가 나타난 것으로 추정된다.

3.2 웰드본딩 공정조건 최적화

Al6061-T6과 GA440의 Table 2 용접조건(No.1~No.3)에 대해 대표적인 단면 너짓경 측정 결과와 염수분무시험 시간에 따른 전단강도 결과를 Fig. 5에 나타내었다. 일반적으로 너짓경이 커짐에 따라 용접부의 전단강도가 증가한다고 알려져 있다.

No.1, No.2의 너짓경을 서로 비교해 보면 접착제도 포 유무에 따라 가압력, 전류, 통전시간을 다르게 설정했지만 두 조건의 거짓경 측정 결과는 약 8mm로 거의 같음을 확인 할 수 있다. 너짓경은 유사 했지만, 염수분무시험후 No.1에 비해 No.2는 1920h에서 내식전단강도가 약 6배 증가되어 현저한 차이가 발생했다. 따라서 스폿용접과 달리 너짓경의 크기와 상관없이 접착제의 도포에 의해 동시에 면접착효과가 존재해 내식전단강

도를 향상시키는 것으로 판단된다. 그리고, No.2, No.3를 비교해 보면 1280h, 1920h에서 내식전단강도는 큰 차이가 없었으며, 웰드 본딩조건에서 입열량(통전시간의 변화)에 따른 내식전단강도의 향상 효과는 거의 없었다고 추정된다. 또한, 전체적으로 공정조건에 상관없이 염수분무시험시간이 증가함에 따라 내식전단강도가 감소하는 경향을 보였다.

한편 Fig. 6은 웰드본딩조건 No.2, No.3의 비커스

(a)

(b)

Fig. 5 Results of (a) tensile shear strength on salt spray test and (b) relationship between nugget diameter and tensile shear strength

Fig. 6 Vicker's hardness results of No.2 and No.3

경도 측정 결과를 그래프로 나타내었다. 경도측정은 용접부를 중심으로 대각선 방향으로 $\pm 6\text{mm}$ 까지 측정하였다. 그 결과 상대적으로 통전시간이 더 많은 No.3조건에서 용접 중앙부의 경도값이 더 높게 측정되었지만 그 차이는 크지 않았다. 내식전단강도와 경도 측정 결과에서 보듯이 통전시간 변화에 따른 입열량에 비해 구조용 접착제의 사용 유무에 따른 영향이 더 큰 것으로 판단된다.

3.3 내식전단강도 특성 향상

구조용 접착제의 도포가 내식전단강도에 영향을 미치는 것으로 판단되어 접착제의 표면 접착력을 증가시키기 위해 Al6061-T6 표면에 수동 연마를 실시하였다. Fig. 7은 두 개의 Al6061-T6 시편 중 연마를 하지 않은 비연마조건과 거칠기 #60의 사포(SiC연마지)로 100회 연마한 조건의 표면조도를 측정된 값을 나타낸다. 표면조도는 각 시편에 대해 길이방향 양끝부분에서 20mm

Fig. 7 Surface roughness results of polishing and non-polishing

Fig. 8 Comparison of tensile shear strength at No.3 and No.4 conditions

Fig. 9 Image of Al6061-T6 and GA440 according to salt spray test time

와 중앙부에서 측정하여, 산술평균 거칠기(Ra)값을 표시하였다. 두 시편의 표면 조도를 비교 했을 때 100회 연마를 실시한 경우가 약 3배정도 높은 표면 조도 평균 값을 나타내었다.

기존 No.3조건과 가압력, 용접 전류, 통전시간이 동일하지만 수동 연마를 통해 표면 접착력을 크게 한 No.4 조건의 염수분무시험 후 내식전단강도를 측정한 결과를 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 8에서와 같이 수동 연마를 실시한 No.4조건이 640h 이후 내식전단강도가 현저히 증가하였으며, 특히 No.3조건의 내식전단강도(3.25kN)에 비해 5.88kN을 나타내 약 81% 향상된 것을 알 수 있다. 이와 같이 표면조도에 따른 접착량의 차이가 내식전단강도에 영향을 미치는 것으로 생각된다.

시간 변화에 따른 부식 시험편 외관을 Fig. 9에 나타내었다. 관찰 결과 No.1조건에서 시간이 지남에 따라 용접부와 용접부 주변에서 부식이 진행된 적청 현상이

Fig. 10 Measurement of average corrosion rate at each condition

많이 발생하였고, 웰드본딩조건을 적용한 시험편에서는 용접부 주변에서 약간의 적청현상을 관찰 할 수 있었다. 정확한 부식량을 측정하기 위해, 부식량(%)=(부식 면적/웰드 본딩 면적)×100으로 계산하여 각 조건에 따른 평균 부식량을 Fig. 10에 나타내었다.

그 결과 웰드본딩조건을 적용한 시험편이 델타스폿용접만 실시한 시험편 보다 매우 낮게 부식량이 측정되었고, 수동 연마까지 실시한 시험편은 가장 낮은 것을 알 수 있었다. 수동 연마와 같이 표면 접착력의 효과가 클수록 강도 증가와 동시에 용접부에 부식액의 침투가 방지되어 갈바닉 부식이 억제된 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 Al6061-T6과 GA440의 이종소재 용접시 내식전단강도 향상을 위한 웰드본딩공정 조건을 최적화 하였고, 염수분무시험을 통한 용접부 기계적특성 평가를 조사해 다음과 같은 결론을 도출하였다.

염수분무 시험 결과 D type의 구조용 접착제를 사용한 웰드본딩조건이 기존 델타 스폿용접조건에 비해 높은 내식전단강도를 나타냈지만, 통전시간에 변화에 따른 강도 증가 효과는 미비하였다. 하지만, 동일 용접조건에서 비연마조건인 No.3의 내식전단강도 3.25kN에 비해 표면 연마를 부여한 No.4의 내식전단강도는 5.88kN으로 약 2.63kN의 내식전단강도의 차이를 나타내었다. 표면 조도값이 높을수록 접착저항의 크기와 접착제 접촉면적의 증가가 내식전단강도에 영향을 미친 것으로 판단된다.

파단시험 관찰결과 No.1 조건은 장시간 염수분무시험으로 적청이 발생하여 부식량이 높게 측정되었다. 하지만, 구조용 접착제를 도포한 시험편은 상대적으로 부식이 거의 일어나지 않았고, EDAX 분석결과 접착제 성

분인 C가 검출된 것을 확인하였으며 매우 낮은 부식량을 나타냈다. 이를 통해,접착제의 도포로 인해 용접부 틈새부식이 억제되는 경향을 보였다. 따라서, 웰드본딩 공정과 함께 표면 연마의 적용이 내식전단강도 및 부식의 억제에 영향을 미친 것으로 판단되며 추후 이중 소재 용접부의 내식전단강도 향상을 위한 표면 가공 방법에 대한 연구도 필요할 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 정부(기획재정부)의 재원으로 한국생산기술연구원의 기관주요사업 지원을 받아 수행되었습니다. (과제번호: EO190015)

ORCID: Young-Hyun Kim: <http://orcid.org/0000-0001-7296-9687>

ORCID: Young-Gon Kim: <http://orcid.org/0000-0002-1344-5725>

ORCID: Dong-Cheol Kim: <http://orcid.org/0000-0001-6667-2094>

ORCID: Sung-Min Joo: <http://orcid.org/0000-0002-8794-5896>

References

1. A. Richter, Smart Weighting, *Cutting tool engineering*, 60(9) (2008), 38-49
2. X.Wan, Y.Wang, P.Zhang, Modelling the effect of welding current on resistance spot welding of DP600 steel, *Materials processing technology*, 214(11) (2014), 2723-2729
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.06.009>
3. M.H.Razmpoosh, M.Shamanian, M.Esmailzadeh, The microstructural evolution and mechanical properties of resistance spot welded Fe-31Mn-3Al-3Si TWIP steel, *Materials and Design*, 67 (2015), 571-576
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2014.10.090>
4. M. Pouranvari and S.P.H. Marashi, Critical review of automotive steels spot welding : process, structure and properties, *Science and Technology of welding and joining*, 18(5) (2013), 361-403
<https://doi.org/10.1179/1362171813y.00000000120>
5. O.Martin, M.Pereda, J.I.Santos, J.M.Galan, Assessment of resistance spot welding quality based on ultrasonic testing and tree-based techniques, *Materials processing technology*, 214(11) (2014), 2478-2487
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.05.021>
6. H. Laukant, E. Guimaraens, U. Glatzel, Laser Beam Aluminum-Steel Joints - Mechanical and Dynamical Properties and Detailed Microstructural Analysis of Intermetallic FeAl-Phases, *International Congress on Applications of Lasers & Electro-Optics*, 1006 (2007), 588-595
<https://doi.org/10.2351/1.5060983>
7. O. E. Guengoer and C. Gerritsen, Effect of Filler Wire Composition and Metallic Coating on the Joint Performance of Aluminium/Steel Braze-Welds, *Welding and Cutting*, 7(5) (2008), 303-312
8. J. Ruge , Handbuch der Schweißtechnik, *Springer verlag Berlin Heidelberg New York*, 2 (1980), 188-199
9. F. Ostermann, Widerstandspunktschweißne von Aluminiumwerkstoff, *Springer berlin heidelberg*, 16 (1998), 469-489
10. Seun Rhee, Youngsoo choi, Joonghyun Yem, Youngjoon Cho, Soyung Lee, Study of Al alloy welding using Delta Spot, *Proceedings of KWJS*, 50(2008), 79-82
11. Beom-Ji Jo, Ji-Sun Kim, Hyo-Sang Yoo, In-Ju Kim, Seong-Hui Lee, Young-Gon Kim, Characterization of resistance spot welded Al5052/DP590 dissimilar materials and processing optimization, *Journal of Welding and Joining*, 33(2) (2015). 56-61
<https://doi.org/10.5781/jwj.2015.33.2.56>