Al/Fe 셀프피어싱 리벳 접합부의 부식특성 및 파괴거동

강 상 훈^{*,**} · 윤 진 영^{*,***} · 김 철 희^{*,†}

^{*}한국생산기술연구원 용접접합그룹

^{**}조선대학교 용접접합과학공학과

^{***}한양대학교 대학원 기계공학과

Corrosion Properties and Failure Behavior of Al/Fe Self-Piercing Rivet Joint

Sanghoon Kang^{*,**}, Jin Young Yoon^{*,***}, and Cheolhee Kim^{*,†}

^{*}Joining R&D group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon, 21999, Korea

^{**}Welding and Joining Science Engineering, Chosun University, Kwangju, 61452, Korea

^{***}School of Mechanical Engineering, Hanyang University, Seoul, 04763, Korea

[†]Corresponding author : chkim@kitech.re.kr

(Received June 4, 2018 ; Revised June 12, 2018 ; Accepted June 19, 2018)

Abstract

In the automotive industry, light-weighting of chassis and car body is an inevitable trend to meet the fuel efficiency regulation. Therefore, the use of Al alloy is increasing and also joining with the conventional steel sheets is getting an important issue. The SPR(self-piercing rivet) joining kinds of mechanical fastening is preferred in Al/Fe joint due to different material properties between the Al and steel as like melting temperature, heat conduction coefficient and thermal expansion coefficient. However galvanic corrosion between rivet and materials is still a big issue to be solved in the SPR joint. In this study, salt spray test (SST) was performed for Al/Fe SPR joint in which 1 mm-thick of Al 6014-T4 and 1.2 mm-thick of GA 590DP steel sheets were joined with PFZn-Ni5L-B coated SPR. The steel sheet was electro-deposition coated prior to the SPR process. In SST up to 80 days, bearing load for tensile-shear test increased with increasing of exposure time, and fracture mode was not varied within the experimental period.

Key Words : SPR (Self-piercing Rivet), Al/Fe, Galvanic corrosion, Crevice corrosion, Neutral salt spray test

1. 서 론

경량화를 통한 연비향상을 위해 차체에 강판 대신 경금속인 알루미늄, 마그네슘 등의 합금 사용이 증가하고 있다¹⁻⁴⁾. 알루미늄은 경량화가 가능하지만 성형성이 강(steel)에 비해 낮아 차체 적용을 위해서 강과 복합적으로 사용하려는 연구가 이루어지고 있다. 기존의 용융용접을 적용하는 경우, 접합 계면에 취성이 강한 금속간화합물(Intermetallic compound)이 형성되어 물성을 저하시킬 수 있어 이를 대체하고자 클린칭(clinching), 셀프피어싱리벳 (SPR, self-piercing rivet) 등 기계

적 접합과 접착을 채용하고 있다. 그 중 SPR 접합은 홀가공없이 리벳을 사용하여 상판과 하판을 접합시키는 성형기반의 기계적 접합법으로 금속간의 체결 이외에도 난 용접재인 비금속, CFRP, 플라스틱에도 적용할 수 있다. 또한 기계적 강도 및 피로 강도가 우수하며 접합 속도가 빠르고^{2,5,6)}, 접합부의 열변형이 없으며 친환경적이기 때문에 많은 연구가 이루어지고 있다^{5,6)}.

알루미늄 프레임에 강으로 된 리벳을 사용할 경우 알루미늄과 강의 전위차에 의해 부식에 취약하다고 보고된 바 있다. 부식은 금속이 그 주위환경의 여러 가지 물질과의 화학적 또는 전기화학적 반응에 때문에 발생하는 현상이다. 부식은 전면부식과 국부 부식으로 구분

할 수 있으며, 국부 부식에는 공식, 선택 부식, 입계 부식, 갈바닉 부식(Galvanic corrosion), 틈새 부식, 응력 부식 균열 등이 있다. 이 중 기계적 접합에서는 갈바닉 부식과 틈새 부식, 응력 부식이 발생할 수 있으며, 부식현상으로 인한 접합부의 성능 및 수명의 저하가 발생할 수 있다^{7,8)}.

Zheng등은 이종소재 접합을 대상으로 부식시험을 진행한 바 있으며, 희생 양극 역할을 하는 금속이 산화되고 이로 인하여 기계적 성능이 저하된다고 발표하였다⁷⁾. 반면에 Calabrese등은 기계적 접합한 시편을 염수 분무 시험(Salt spray test)하였을 때, 부식 초기에 접합부 틈새에 염이 침적되고 틈새 부식으로 인해 부식 생성물이 형성되는데 이러한 얇은 염의 침적 층과 산화물(Al_2O_3) 및 수산화물($Al(OH)_3$) 층이 판재 간의 접촉제 역할을 하면서 접합부의 접합력을 향상해준다고 언급하였다^{10,11)}. 이처럼 선행연구 사이에도 역설이 존재하여 SPR 접합에 대한 기계적 물성 및 부식특성에 대한 검증이 요구된다. 또한 상기의 연구결과 등은 전착도장을 하지 않은 상태로 진행되었기 때문에, 실제 부품과의 괴리가 존재한다.

때문에 본 연구에서는 차체 적용을 목적으로 알루미늄과 강종의 이종소재 SPR 접합을 수행하고, 접합부의 기계적 특징 및 접합부 부식 거동을 검토하였다. 시험편의 경우 부식시험 전 전착도장을 선행하였다.

2. 실험 방법

시험편은 KS B 0854 규격을 기준으로 제작되었다. 제작된 시험편을 Fig. 1에 나타내었다. 상판에 Al 6014-T4, 1.0 mm를 배치하였으며, 전착 도장한 SGAF 590 DP, 1.2 mm를 하판에 위치시키고 빌호프사의 Rivset Gen 2를 사용하여 시험편을 제작하였다. 리벳은 PFZn-Ni5L을 사용하였으며, 리벳 머리의 지름은 8.7 mm, 다리의 길이는 4.6 mm이다. 리벳 코팅층의 형상 및 주요 성분을 Fig. 2와 Table 1과 같다. 모든 시험편은 접합 전 전착도장을 수행한 후 기계적 체결을 하여, 최대한 실제 부품과 유사한 환경을 모사하고자 하였다. 시험편은 부식특성을 중점적으로 고찰하기 위하여 모두 동

Fig. 1 Dimensions of prepared specimen

Fig. 2 SEM image of coating layer deposited on SPR

Table 1 Chemical composition of coating layer. Measured point was indicated in Fig. 2-a

Element	Wt.%
O	3.31
Mo	2.26
Fe	3.23
Ni	10.57
Zn	80.64

Table 2 Salt spray test conditions

Operating temperature (°C)	35
Relative humidity (%)	95
Average collection rate for a horizontal collecting area of 80 cm ² (ml/h)	2.0
Concentration of sodium chloride (g/l)	50
pH	7.0

일조건에서 제작되었다. 적용한 가압력은 5,000 kgf·cm이며, 톨전진 시 160 mm/s, 가압 시 5 mm/s의 속도로 체결하였다.

부식시험은 KS D 9502:2009 (염수분무시험방법 - 중성, 아세트산 및 캐스 분무시험)과 ISO 9227:2006 (Corrosion test in artificial atmosphere - Salt spray test)를 참고하여 수행하였으며, 세부 테스트 조건은 Table 2와 같다. 부식특성 분석은 초기 상태에서부터 10, 20, 40, 80일 간격으로 시험편을 꺼내어 실시하였다. 광학현미경을 이용하여 단면 분석을 수행하였으며, SEM-EDS 분석을 통하여 염수층의 침투 깊이 및 리벳 코팅층 상태를 확인하였다. 이를 통해 부식시간에 증가에 따른 부식의 침투경로에 대해 고찰하고자 하였다. 제작된 시험편의 기계적 특성을 평가하기 위하여, 염수 분무 경과일에 따른 인장강도의 변화를 분석하였다. 인장시험 결과는 조건별로 3회 반복 실시하여 평균값으로 나타내었다.

Fig. 3 SEM images of SPR coating layer after riveting

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 SPR 공정이 리벳 코팅층에 미치는 영향

알루미늄 프레임에 강으로 된 리벳을 사용할 경우 알루미늄과 강의 전위차에 의해 전위차 부식이 발생하게 되는데, 리벳에 코팅하면 전위차 부식을 억제할 수 있다. 그러나 SPR공정은 소성변형 기반의 기계적 체결법이기 때문에 코팅층이 SPR 공정 중 손상 혹은 박리될 수 있다. Fig. 3에 SPR 리벳공정 중 많은 변형이 발생할 것으로 예측되는 영역을 임의로 선별하여 코팅층의 형상을 나타내었다. SEM 이미지를 통하여 가압이 가해지는 리벳 헤드 (Fig. 3(a))와 압축응력이 가해지는 리벳 다리 (Fig. 3(b)-(c))의 외벽에는 균일한 두께의 코팅층이 잔존하고 있음이 확인되었다. 반면 다이에 의해 벌어지는 인장 응력이 작용하는 리벳 다리 (Fig. 3(d)) 안쪽에서는 코팅층의 손상이 존재하였다.

3.2 SPR 접합부의 기계적 특성

SPR 기계적 접합부의 염수 분무 경과일에 따른 인장 전단시험 결과는 Fig. 4와 같다. 접합 직후의 강도는 KS B 0850:2016 (점 용접부의 검사 방법)에 제시된 270 MPa급 알루미늄 합금의 점용접부 요구 강도와 같

Fig. 4 Measured tensile-shear load results according to exposure time of corrosion environment

다. 접합부의 강도는 염수 분무 시간이 경과함에 따라 인장 강도가 상승하였다. 이러한 결과는 L.Calabrese의 연구와 같은 결과를 보인다^{10,11)}.

L.Calabrese은 부식 초기에는 판재 사이에서 형성된 부식생성물의 파괴팽창으로 인해 언버튼(unbuttoning) 파단이 주요하게 발생한다고 하였으며³⁾, 접합부의 두께가 얇은 경우는 베어링(bearing) 파단이 발생하고 부식이 더욱 진행되면서 균열의 전파로 인해 인장(net-tension) 파단 또는 전단(shear out)파단도 함께 발생한다고 하였다^{3,8,10,11)}. 그러나 해당 연구에서 접합부의 파단은 염수분무기 노출 시간과 무관하게 베어링 파단 모드가 발생하였다. 이는 볼트 또는 리벳이 삽입된 구멍 주변에 응력이 집중되어 발생하는 파단으로써, 실험이 진행된 80일 기간 내에서의 부식 정도가 기계적 특성에 큰 영향을 미치지 못하였음을 의미한다. 염수 분무 노출 시간에 따른 인장 파단시험편의 계면 사진을 Fig. 5에 나타내었다.

3.3 SPR 접합부의 부식특성

SPR 접합에서 염수가 침투할 수 있는 경로를 Fig. 6에 나타내었다. 알루미늄판과 강판 사이 또한 전위차에 의한 갈바닉 부식과 틈새 부식이 발생할 수 있으나, 실험에서 사용된 강재는 전착 도장을 하여 해당 영역에서의 전위차 부식을 배제할 수 있기 때문에 조사되지 않았다. 전위차 부식과 틈새 부식이 발생할 수 있는 I-영역과 II-영역을 중심으로 분석을 수행하였다. I-영역은 리벳 헤드 부분으로 리벳과 접촉한 부재와의 전위차로 갈바닉 부식이 발생할 수 있으며, II-영역은 리벳과 강판, 알루미늄판이 교차하는 영역으로 틈새부식 주로

Fig. 5 Fracture images at interfacial surface between aluminum and steel sheet after tensile-shear test

Fig. 6 Schematic diagram of corrosion propagation route

확인되는 곳이다.

I-영역의 부식 진행도는 Fig. 5의 파단부 계면 사진을 통해 확인할 수 있었다. 20일이 경과한 시험편까지 SPR 홀 주변에 손상이 없음이 확인되었다. 부식시간이 40일 이상으로 증가하면 부식환경의 영향을 받아 알루미늄 표면이 검게 산화되는 것을 관찰할 수 있다. 그러나 앞서 언급한 것과 마찬가지로 SPR 홀주변의 부식

정도는 풀아웃 파단이 발생하지 않을 정도로 미미하였다.

염수 침투 경로인 I, II-영역 및 리벳 다리 첨단에서의 O 성분을 SEM-EDS 분석하고 Fig. 7에 나타내었다. 염수 환경 노출 시간의 증가에 따라 I, II-영역에서는 O 성분이 증가하는 경향이 뚜렷이 나타났다. 그러나 리벳의 끝단에서는 노출 시간과 무관하게 O 성분이 균일하게 분포되어 있음이 확인되었다. 부식은 리벳 내부로 침투하지 못했으며, 이것은 리벳의 코팅층 손상이 없기 때문으로 판단된다. 성분분석 결과를 통해 염수가 I-영역과 II-영역을 통해서 침투되지만, 실험범위인 80일의 시간 이내에서는 리벳 끝단까지 전파되지 못함을 알 수 있었다. 부식은 리벳의 코팅층-알루미늄, 강재-알루미늄과의 접촉부에서 시작되며 알루미늄 내부로 확장된다.

4. 결 론

후드 등의 무빙계를 중심으로 알루미늄의 차체 적용이 증가하는 추세에 있다. 때문에 알루미늄/강의 이종접합 공정기술에 대한 수요가 증가하고 있으며, 그 중 기계적 체결법은 소재의 특성에 민감하지 않아 이종재료 접합에 유용하다고 알려져 있다. 그러나 SPR을 이종접합에 적용하는 경우, 리벳과 알루미늄, 리벳과 강재, 강재와 알루미늄 사이의 전위차 부식 및 틈새 부식이 발생할 수 있기 때문에 기계적 물성 및 부식특성에 대한 검증이 요구된다.

본 연구에서는 알루미늄/강 이종소재 SPR 접합에서 부식 노출시간에 따른 기계적 물성 및 부식특성을 확인하는 것을 목표로 하였다.

1) 부식은 리벳의 코팅층-알루미늄, 강재-알루미늄과의 접촉부에서 시작되며 알루미늄 내부로 확장된다. 도금된 리벳을 이용하여 SPR 공정을 하는 경우, 인장 응력이 작용하는 리벳 다리 안쪽의 코팅층이 손상된다. 그러나 성분분석결과, 리벳 다리 끝단에서는 노출 시간과 무관하게 O 성분이 균일하게 분포되어 있음이 확인되었다. 이것은 부식이 리벳 내부로 침투하지 못하였음을 의미한다.

2) 실험 범위 이내에서는 염수분무 노출 시간이 경과함에 따라 인장강도가 상승하는 경향이 나타났다. 이것은 판재 사이의 접합부 틈새에 얇은 염의 침적 층과 산화물 및 수산화물이 접착제 역할을 하였기 때문이다. L.Caabrese등은 부식 초기와 후기에 파단모드가 변경된다고 하였으나, 이러한 현상은 확인되지 않았다. 이것은 해당 실험범위인 80일 내에서 알루미늄의 부식으로 인한 두께손실이 나타나지 않았기 때문으로 판단된

Fig. 7 SEM-EDS mapping analysis of arbitrary region according to the corrosion exposure time

다. 즉, 강재에 전착도장을 처리하는 방법만으로도 부식을 상당 부분 억제할 수 있다.

ORCID: Sanghoon Kang: <http://orcid.org/0000-0002-2566-4570>

ORCID: Jin Young Yoon: <http://orcid.org/0000-0001-6362-3086>

ORCID: Cheolhee Kim: <http://orcid.org/0000-0003-4127-3171>

References

1. K. Martinsen, S. J. Hu and B. E. Carlson, Joining of dissimilar materials, *CIRP Annals*, 64(2) (2015), 679-699
<https://doi.org/10.1016/j.cirp.2015.05.006>
2. L. Han and A. Chrysanthou, Evaluation of quality and behaviour of self-piercing riveted aluminium to high strength low alloy sheets with different surface coatings, *Materials & Design*, 29(2) (2008), 458-468
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2006.12.020>
3. L. Calabrese, E. Proverbio, G. Di Bella, G. Galtieri and C. Borsellino, Failure behaviour of SPR joints after salt spray test, *Engineering Structures*, 82 (2015), 33-43
<https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2014.10.020>
4. T.-H. Kim, J. Suh, H.-S. Kang, Y.-S. Lee and C.-D. Park, Fatigue Assessment Using SPR and Adhesive on Dissimilar Materials, *Journal of the Korean Society for Precision Engineering*, 28(10) (2011), 1204-1209
5. J.-H. Bae, J.-W. Kim, I. Choi, D.-G. Kim and Y.-D. Park, A study on Tensile Shear Characteristics of Dissimilar Joining Between Pre-coated Automotive Metal Sheets and Galvanized Steels with the Self-Piercing Rivet and Hybrid Joining, *Journal of Welding and Joining*, 34(1) (2016), 59-67
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.1.59>
6. D. Kim, Y. Qiu and H.-Y. Cho, Design of self-piercing rivet to joint in advanced high strength steel and aluminium alloy sheets, *Journal of Welding and Joining*, 33(3) (2015), 75-80
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.3.75>
7. L. Calabrese, L. Bonaccorsi, E. Proverbio, G. Di Bella and C. Borsellino, Durability on alternate immersion test of self-piercing riveting aluminium joint, *Materials & Design*, 46 (2013), 849-856
<https://doi.org/10.1016/j.matdes.2012.11.016>
8. L. Calabrese, E. Proverbio, E. Pollicino, G. Galtieri and C. Borsellino, Effect of galvanic corrosion on durability of aluminium/steel self-piercing rivet joints, *Corrosion Engineering, Science and Technology*, 50(1) (2014), 10-17
<https://doi.org/10.1179/1743278214Y.0000000168>
9. W. Y. Zheng, C. Derushie, J. Lo and E. Essadiqi, Corrosion protection of joining areas in magnesium die-cast and sheet products, in *Materials Science Forum*, (546, Trans Tech Publ, City, 2007), 523-528
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/MSF.546-549.523>
10. L. Calabrese, E. Proverbio, G. Di Bella, G. Galtieri and C. Borsellino, Assessment of ageing effect on the me-

chanical behaviour of steel/aluminium self-piercing riveted joint, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 10(1) (2015)
<https://doi.org/10.1186/s40712-015-0034-y>

11. L. Calabrese, E. Proverbio, G. Galtieri and C. Borsellino, Effects of ageing on mechanical durability of round clinched steel/aluminium joints, *International Journal of Mechanical and Materials Engineering*, 9(1) (2014), 23
<https://doi.org/10.1186/s40712-014-0023-6>