프루브 길이에 따른 A5052 겹치기 마찰교반접합 특성

고영봉^a, 강채원^b, 최준웅^c, 박경채^b

^a한국화학시험연구원, ^b경북대학교 금속신소재공학과, ^c중소조선연구원

Characteristics of Friction Stir Lap Welded A5052 with Probe Length

Young-Bong Ko^a, Chae-Won Kang^b, Jun-Woong Choi^c, Kyeong-Chae Park^b

^aKorea Testing & Research Institute

^bMaterials Science and Metallurgical Engineering of Kyungpook National University

^cResearch Institute of Medium & Small Shipbuilding

(Received November 2, 2009 ; revised November 26, 2009 ; accepted December 30, 2009)

Abstract

The Friction Stir Welding (FSW) has mainly been used for making butt joints in Al alloys. The development of Friction Stir Lap Welding (FSLW) would expand the number of applications. In this study, for effective application on thin aluminum alloy lap joint, non-heat treatment A5052 alloys were joined by FSLW with the length of probe 2.3 mm and 3.0 mm. Investigating the characteristics of joint area showed the results were as below ; When the length of probe was 2.3 mm, good joint area was formed at all welding condition except for 600 rpm-700 mm/min. In the case of 3.0 mm probe length, there was formed good joint area without defects at 1500 rpm-100 mm/min. The width of joint area, position and size of defects were very important factors for FSLW, due to heat input and stirring intensity.

Keywords : Friction stir lap welding, Probe length, Heat input, Stirring intensity, A5052

1. 서 론

겹치기 접합(lap joint)은 맞대기 접합(butt joint)이 어려운 박판의 접합에 적용되고 있으며, 그 대표적인 것이 저항 점용접(resistance spot welding), 필릿 용접 등이 있다. 하지만 용접이 낮은 알루미늄 합금 박판의 경우 저항 점용접이 현실적으로 어렵기 때문에 겹치기 접합이 실용적인 면에서 거의 전무한 상태이다¹⁾.

그러나 최근 들어 항공, 자동차분야 등의 구조물에 사용되는 기계적 접합인 리벳접합 대신 겹치기 마찰교반접합(Friction Stir Lap Welding: FSLW)²⁾이 많이 주목받고 있는데, 이는 리벳구멍이 균열핵생성과 틈새부식의 원인이 되기 때문이다. 또한 겹치기 마찰교반접합은 리벳접합에 비해 무게를 감소시킬 수 있으며, 검사주기를 늘릴 수 있어 물리적 작

업을 개선할 수 있다³⁾.

한편 가까운 장래에 실용화될 전기자동차 등 환경친화형 자동차는 차체의 경량화가 필수적으로 요구되기 때문에 차체 및 새시 부품에 알루미늄 합금이 다량 적용될 예정이며, 알루미늄 합금 중에서도 비열처리형 합금인 5000계 합금 판재가 가장 많이 사용될 것으로 예상된다⁴⁾.

이에 본 연구에서는 A5052-H112 합금에 대해서 겹치기 마찰교반접합을 실시하여 접합조건(회전속도, 접합속도, 프루브 길이)에 따른 겹치기 마찰교반접합의 미세조직, 결함 크기, 결함 위치를 관찰하였고, 기계적 성질에 대해 검토하였다.

2. 실험

2.1 사용재료

본 실험에서는 비열처리형 합금인 A5052-H112를 사용하였으며, 합금의 조성은 표 1에 정리하였고

*Corresponding author. E-mail : kcpark@knu.ac.kr

Table 1. Chemical composition of A5052-H112 (wt %)

Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Others	Al
0.25	0.4	0.1	0.1	2.5	0.65	0.1	0.15	bal.

Table 2. Mechanical properties of A5052-H112

Tensile strength (MPa)	Yield strength (MPa)	Hardness (HV)
275	240	68

표 2는 기계적 성질을 나타내었다. 시편 제작은 A5052를 아세톤으로 초음파 세척하여 이물질을 제거하고 100 mmL × 70 mmW × 2 mmT의 두 판재를 35 mm씩 겹치도록 접합하였다.

2.2 실험방법

접합 장비는 자체 제작하였으며 회전속도 - 최대 2100 rpm, 이송속도 - 최대 2000 mm/min, 하중 - 최대 15 kN까지 제어가 가능하다. 숄더(shoulder)의 지름은 15 mm, 프루브(probe)의 지름은 윗지름이 5 mm 아래지름이 3 mm인 원통형으로 제작하였으며 프루브 길이는 모재 두께보다 길게 2.3, 3.0 mm으로 제작하였다. 그림 1은 툴의 모식도를 나타내었다. 접합 툴(tool)의 재질은 SKD51종을 사용하였다.

그림 2는 겹치기 마찰교반접합의 개략도이고, 접합 조건은 표 3에 나타내었다. 재료 측면에 백킹 플레이트(backing plate)를 제작하여 프루브 삽입시 걸리는 하중에 의해 시편의 밀림현상을 방지하였다.

Fig. 1 Schematic of tool.

Fig. 2. Schematic of friction stir lap welding process.

Table 3. Friction stir lap welding conditions

Rotating speed (rpm) : ω	Welding speed (mm/min) : v	Load (ton)	Tilting angle (°)
600, 900 1200, 1500	100, 400, 700	1	3

Fig. 3. Schematic of tensile test specimen for FSLW.

이때 마찰교반접합의 조건으로서 재하하중을 9.8 kN, 시편과 툴 사이의 각도를 3°로 고정하였고 접합속도(welding speed), 회전속도(rotating speed)와 프루브 길이(probe length)를 변수로 하였다.

접합부 마크로 조직을 관찰을 위해 연마된 시편을 Keller 용액(150m/H₂O + 3m/HNO₃ + 6m/HCl + 6m/HF at 0°C)으로 에칭한 후 실측현미경을 이용하여 관찰하였으며, 접합부 내부의 결함유무, 크기, 건전성 파악을 위하여 시편의 상측에서 방사선 투과시험을 행하였다.

마찰교반접합된 시편 접합부에서의 결정립크기를 관찰하기 위하여 SiC 연마지, 버핑 연마 장치를 이용하여 거울면 연마를 행하였다. 2% HBF₄·2H₂O 수용액에서 전압 25 V, 유지시간 150초의 조건에서 전해에칭을 실시한 후, 편광현미경(NIKON EPIPHOT 2000)을 사용하여 조직을 관찰하였다.

접합 조건에서의 접합부 특성 평가를 위해 인장시험을 실시하였다. 겹치기 마찰교반접합의 인장시험인 경우 맞대기 접합과는 달리 뒤틀림을 방지하기 위해 시편 양쪽 끝에 알루미늄으로 덧붙인 후 시험하였다. 시편은 접합부 수직한 방향으로 나비 15 mm인 인장시편을 제작한 후 시험 속도는 $1.6 \times 10^{-4} \text{sec}^{-1}$ 로 실시하였다. 그림 3은 인장시편 모식도이다.

3. 결과 및 검토

3.1 접합부의 방사선 투과 시험 및 마크로 조직

그림 4는 접합부의 건전성 파악을 위하여 프루브 길이에 따른 방사선투과시험 사진이다. FSLW 조건 중 입열량이 제일 작은 600 rpm-700 mm/min과 입열량이 제일 큰 1500 rpm-100 mm/min을 사용하였는데 이는 입열량을 $\omega(\text{rotating speed})/v(\text{welding speed})$ 으로 나타낼 수 있기 때문이다⁹⁾.

프루브 길이 2.3 mm의 경우 전 조건에서 결함이 없는 양호한 접합부를 나타내고 있으며, 프루브 길이 3.0 mm의 경우 1500 rpm-100 mm/min을 제외한 모든 조건영역에서 결함이 나타났으며, 모두 접합부의 advancing side(이하 AS)에서 나타났다.

이러한 결함의 발생원인은 크게 두 가지로 나눌

Fig. 4. Radiograph at FSLW conditions in 2.3 mm, 3.0 mm of probe length.

수 있다. 첫 번째 원인으로는 톨의 저속회전 과 고속 접합에 따른 입열량 부족으로 인하여 소성유동과 마찰열이 충분하지 못해 발생한 경우이고⁶⁾, 두 번째 원인은 톨의 고속 회전과 저속 접합으로 인해 접합부내의 재료가 과도하게 교반되어 솔더의 압착이 효과적으로 이루어지지 못할 뿐더러 입열량이 증가되고 plunge depth도 증가됨에 따라 표면 모재 일부가 날림(flash) 형태의 결함이 발생한 경우이다⁷⁾. 그림 3에 날림현상이 없는 것으로 보아 입열량과 교반 부족에 의한 결함인 것으로 판단된다.

그림 5, 6은 프루브 길이 2.3, 3.0 mm에서 접합 변수에 따른 접합부의 거시적인 단면을 나타내었다. 전체적으로 톨과 시편의 마찰 교반작용에 의해, 두 판재의 접촉계면을 기준으로 상부는 넓고 하부는 좁은 컵형의 접합부가 생성되었다.

프루브 길이 2.3 mm의 경우 접합 속도 700 mm/min 조건에서 접합부에 미소 결함이 관찰되었으며,

그 외 다른 조건에서는 모든 영역에 걸쳐 결함은 없었고, 계면 영역에서 접합부 폭이 프루브 폭 3.0 mm보다 상대적으로 좁게 형성되어 있다. 이는 프루브 길이에 따른 입열량 및 교반세기가 작아서 소성 유동이 상판에서만 형성되어 건전한 접합이 이루어지지 않았기 때문이라고 사료된다.

프루브 길이 3.0 mm의 경우 1500 rpm-100 mm/min의 조건을 제외한 모든 조건에서 AS계면에 입열량 및 교반 부족으로 인한 공공(void)이 관찰되었다. 접합속도와 회전속도에 따라 공공 크기 및 공공 위치가 상이함을 확인할 수 있었다. 회전속도가 증가할수록, 접합속도가 감소할수록 공공 위치는 접합부 AS의 상·하부에서 하부로 이동하였고, 공공 크기는 줄어들었다. 일반적으로 공공이 생기는 원인은 두 가지가 있는데, 상판에서 발생한 공공은 shoulder flow zone, 교반부, TMAZ가 만나는 지점에서 주로 발생하는데 이는 불충분한 shoulder flow

Fig. 5. Cross sectional views of FSLW zone on 2.3 mm probe length.

Fig. 6. Cross sectional views of FSLW zone on 3.0 mm probe length.

zone이 원인이 된다. 이는 회전속도의 증가로 없어지고, 하판에 발생한 공공은 swirl zone, 교반부, 하판 TMAZ이 만나는 지점에서 발생하는데 이런 결합은 slightly higher plastic flows에 의해 없어진다고 보고되었다⁸⁾.

3.2 접합부 인장전단하중

그림 7, 8은 프루브 길이 2.3 mm, 3.0 mm에서 접합조건 따른 인장 전단 하중을 나타낸 것이다. 프루브 길이 2.3 mm의 경우는 회전속도가 증가하고, 접합속도가 감소할수록 인장 전단 하중이 증가하였다. 반면 프루브 길이 3.0 mm의 경우는 입열량 증가에 따른 인장 전단 하중이 증가하였으나, 일부 고입열 조건에서 인장 전단 하중은 오히려 감소하였다. 프루브 길이에 따른 최대 인장 전단 하중은 프루브 길이 3.0 mm에서 1500 rpm-100 mm/min의 접합 조건이 가장 높은 645 kgf로 모재 인장 하중의 약 79%를 나타내었다.

파단 형태는 프루브 길이 2.3 mm의 경우 접합부의 상하판의 접합계면에서 파단이 일어났으며(이하 전단파단), 프루브 길이 3.0 mm의 경우 접합부 상판의 모재부에서 파단이 일어났다(이하 인장파단).

프루브 3.0 mm의 경우 고입열량에 대한 파단 하중을 알아보기 위하여 1800 rpm-100 mm/min을 추가 실험하였고, 590 kgf의 인장 전단 하중을 얻었다. 회전속도의 증가에 따른 인장 전단 하중은 증가하였으나, 회전속도 1800 rpm에서 인장 전단 하중은 다소 감소하였다. 이는 접합변수에 따른 접합성 차이를 고려하여 본 실험에서는 접합성 특성 파악을 위하여 접합부 폭, 접합부 결합과 접합부 조직을 관찰하였다.

Fig. 7. Tensile shear load in the case of 2.3 mm probe length.

Fig. 8. Tensile shear load in the case of 3.0 mm probe length.

3.3 겹치기 마찰교반접합의 접합성에 미치는 접합부 폭의 영향

그림 9, 10은 프루브 길이 2.3 mm, 3.0 mm에서

Fig. 9. Relationship between joint area width and tensile shear load according to heat input (2.3 mm).

Fig. 10. Relationship between joint area width and tensile shear load according to heat input (3.0 mm).

입열량에 따른 계면에서의 접합부 폭과 인장 전단 하중을 나타낸 것이다. 전단 파단이 일어난 프루브 길이 2.3 mm의 경우 입열량이 증가할수록 접합부 폭이 늘어나며, 접합부 폭과 비례하여 인장 전단 하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 이는 접합 계면에서 파단이 일어난 경우 동일한 가압력에서 입열량 증가로 인한 재료의 연화정도가 커짐에 따라 소성 변형이 쉬우므로, 접합계면에서의 접합부 폭은 증가되어 인장 전단 하중 또한 증가하였다고 사료된다.

프루브 길이 3.0 mm의 경우 입열량이 증가할수록 접합부 폭이 증가함에도 불구하고, 최대 고입열량 조건영역에서 최대 인장 전단 하중이 낮게 나타났다. 이는 인장 파단이 일어났으므로, 접합부 폭과 상관관계가 없음을 확인하였고, 다른 추가적인 요인이 접합성에 큰 영향을 미치는 것으로 판단된다.

3.4 겹치기 마찰교반접합의 접합성에 미치는 결함 및 미세조직의 영향

그림 11은 프루브 길이 3.0 mm일 때 접합속도가 100 mm/min에서 회전속도에 따른 접합부의 AS측 단면을 거시적으로 나타내었다. 동일한 접합속도에서 회전속도 증가에 따른 결함은 상·하판 접합 계면 영역에서 점차 하부로 내려오는 경향을 보였다. 따라서 입열량이 증가할수록 결함은 접합부의 AS측 상·하부에서 하부로 내려오고, 그 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 1800 rpm 이상에서 접합부의 AS측 하판에서 결함이 나타났다.

가장 높은 인장 전단 하중을 보이고, 결함이 발생하지 않은 1500 rpm을 기준으로 1800 rpm에서는 회전속도의 증가에 따른 프루브의 과도한 교반에 의해, 1200 rpm 이하는 솔더의 회전속도 감소에 따른 입열부족이 결함의 원인으로 판단된다. 그림 12는 프루브 길이 3.0 mm의 경우 접합속도가 100

Fig. 11. Defects position of AS region at 900, 1200, 1500, 1800 rpm fixed 100 mm/min.

Fig. 12. POM images in SZ fixed 100 mm/min (a) 900 rpm, (b) 1200 rpm, (c) 1500 rpm, (d) 1800 rpm.

mm/min에서 회전속도에 따른 교반부의 미세조직을 나타내었다. 900 rpm에서 1800 rpm으로 회전속도가 증가할수록 입열량이 증가함에 따라 교반부의 결정립크기는 증가하였다. 결합의 위치가 다름에도 불구하고, 1800 rpm에서 인장 전단 하중은 입열량 증가함에 따라 결정립 조대화로 인해 결합이 발생한 1200 rpm에서 결합이 발생한 인장 전단 하중과 비슷하다고 사료된다. 이는 겹치기 마찰교반 접합에 의한 기계적 특성은 결합, 결정립 미세화 정도, 입열량에 의해 다소 차이가 있는 것으로 판단된다⁹⁾.

4. 결 론

본 연구에서는 알루미늄 합금 박판에 대한 겹치기 접합의 효율적인 적용을 위해 비열처리 합금인 A5052 합금 판재를 프루브 길이 2.3 mm, 3.0 mm으로 달리하여, 겹치기 마찰교반접합하고 그 접합부의 특성을 조사하여 다음의 결론을 얻었다.

1) 방사선 투과 시험 및 접합부의 단면 마크로 조직을 분석한 결과, 프루브 길이 2.3 mm인 경우 600 rpm-700 mm/min을 제외한 모든 접합조건에서 결합이 없는 양호한 접합부를 형성했다. 프루브 길이가 3.0 mm인 경우 1500 rpm-100 mm/min의 접합조건에서 결합이 없는 양호한 접합부가 형성되고, 그 외 접합조건에서는 접합부의 advancing side에서 결합이 나타났다. 또한 접합 조건에 따라 접합부 폭, 결합 위치, 결합 크기를 확인할 수 있었으며, 이는 접합 조건에 따른 입열량과 교반세기에 기인되기 때문이다.

2) 인장시험 결과, 전단 파단이 일어난 프루브 길이 2.3 mm의 경우 접합부 폭과 비례하여 인장전단 하중이 증가하였다. 인장 파단이 일어난 프루브 길이 3.0 mm의 경우 접합부의 결합 및 조직의 연화 정도에 따라 인장 전단 하중이 결정되었다. 또한 결합이 없고, 인장 파단 된 프루브 길이 3.0 mm, 1500 rpm-100 mm/min의 접합 조건에서 가장 높은 인장 전단 하중을 나타내었다. 이 값은 이음효율 약 79%에 해당한다.

3) 프루브 길이 3.0 mm일 때 회전속도 증가에 따른 결합은 따라서 입열량이 증가할수록 결합은 접합부의 AS측 상·하부에서 하부로 내려오고, 그 크기가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러나 1800rpm 이상에서 접합부의 AS측 하판에서 결합이 나타났다.

4) 회전속도 1500 rpm을 기준으로 1800 rpm에서는 회전속도의 증가에 따른 프루브의 과도한 교반에 의해, 1200 rpm 이하는 솔더의 회전속도 감소에 따른 입열 부족이 결합의 원인으로 판단된다. 접합부의 인장 전단 하중이 비슷한 조건인 1200 rpm, 1800 rpm의 경우는 입열량에 대한 미세조직의 결정립 크기 때문인 것으로 사료된다.

참고문헌

1. 장석기, 한국박용기관학회지, 27(6) (2003) 728.
2. Y. C. Chen and K. Nakata, Metallurgical and Materials Transactions A, 39A (2008) 1985.
3. D. Fersini, A. Pironi, Engineering Fracture Mechanics,

- 74 (2007) 468.
4. 이창길, 김성준, 한홍남, 대 한금속 · 재료학회지, 43(11) (2005) 718.
 5. Fomotake Hirata, Material Science & Engineering A, 456 (2007) 344.
 6. Won-Bae Lee, Journal of KWS, 22(3) (2004) 265.
 7. Vijay Soundararajan, JMEPEG, 16 (2007) 477.
 8. Z. W. Chen, Materials Science and Engineering A, 474 (2008) 312.
 9. 박재철, 김성중, 한국표면공학회지, 42(1) (2009) 13.