

A5052-H112 합금의 겹치기 마찰교반접합 건전성

고영봉*† · 최준웅** · 박경채***†

*한국화학시험연구원 시험연구팀

**중소조선연구원 해양레저장비개발센터

***경북대학교 금속신소재공학과

Joining Ability and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded A5052-H112 Alloy

Young-Bong Ko*†, Jun-Woong Choi** and Kyeong-Chae Park***†

*Dept. of Testing and Research Team, Korea Testing & Research Institute, Daegu 702-845, Korea

**Dept. of Ship Technology Research Division, Research Institute of Medium & Small Shipbuilding, Pusan 618-270, Korea

***Dept. of Materials Sciences and Metallurgy, Kyungpook National University, Daegu 702-701, Korea

†Corresponding author : kcpark@knu.ac.kr

(Received September 9, 2009 ; Revised November 24, 2009 ; Accepted November 25, 2009)

Abstract

In Friction Stir Lap Welding(FSLW), the movement of material within the weld was more important than the microstructure, due to the interface present between the sheets. Thus, The soundness of free defect, Effective Sheet Thickness(EST) and width of joint were most important factor of mechanical properties.

Specimens by lap joint types that were 'A-type' and 'R-type' were made in this study. A-type tensile specimen was loaded at advancing side and R-type tensile specimen was loaded at retreating side. Macro-, micro-structural observation and mechanical properties of FSLW A5052-H112 alloy were investigated under varying rotating and welding speed. The results were as follows:

Material hook formed decreasing after sharply increasing was appeared at the end interface of joint area in advanced side, and material hook formed decreasing after smoothly increasing was observed at that in retreated side. Tensile load had no relation with defects. As rotating speed was higher, tensile strength was increasing and EST was decreasing regardless of joint types. joint efficiency was over 70%. In a result of fractography, fracture in A-type was partially occurred by dimple in SZ, and fracture in R-type was generally occurred by dimple in HAZ.

Key Words : FSLW(Friction Stir Lap Welding), Joint type, Material hook, EST(Effective Sheet Thickness), Soundness

1. 서 론

마찰교반접합(Friction Stir Welding:FSW)은 1991년 영국용접연구소(TWI)에서 개발된 고상접합 기술로서 지금까지 조선이나 항공 등 다양한 산업분야 활용되고 있다^{1,2)}.

마찰교반접합의 공정원리는 겹치기한 접합면에 회전

틀을 고속으로 회전시키고, 프루브(probe)를 고정된 모재에 삽입하게 되면 회전 틀(tool)과 접합모재 사이에 마찰열이 발생하게 된다. 이러한 마찰열로 인해 접합 모재는 연화되면서 변형저항이 낮아지게 되고, 기계적인 힘을 가하여 회전 틀은 접합 선에 따라 이동되고 프루브의 앞부분(Advancing Side:AS)에서 뒷부분(Retreating Side:RS)으로 모재를 밀어내면서 숄더(shoulder)에 의해 단조 된다. 이러한 공정이 연속적

으로 일어나면서 접합된다.

국내의 경우 마찰교반접합은 접합부의 특성을 개선하고, 산업 분야에 다양하게 적용하기 위하여 대학 및 연구소에서 이에 대한 연구개발을 활발히 진행하고 있으나, 산업계 현장에서의 실제적인 활용은 선진국들에 비해 상대적으로 많이 뒤쳐져있는 실정이다. 그리고 마찰교반접합에 관한 연구개발은 주로 맞대기 마찰교반접합에 집중되어 있는 반면, 겹치기 마찰교반접합(Friction Stir Lap Welding:FSLW)³⁾에 대해서는 거의 보고된 바가 없다.

최근 들어 항공, 조선, 자동차분야 등의 구조물에 사용되는 리벳접합 대신 겹치기 마찰교반접합이 많이 주목받고 있는데, 이는 리벳구멍이 균열핵생성과 틈새부식의 원인이 되기 때문이다. 또한 겹치기 마찰교반접합은 리벳접합에 비해 무게를 감소시킬 수 있으며, 검사 주기를 늘릴 수 있어 물리적 작업을 개선할 수 있다⁴⁾.

한편 앞으로의 산업분야에는 가공경화형 알루미늄 소재인 5000계 합금판재와 같은 경금속 소재들이 다양하게 활용될 것이다. 이에 본 연구에서는 A5052-H112에 대해서 겹치기 마찰교반접합을 실시하여 접합조건과 접합형태에 따라 접합의 건전성을 평가하였고, 기계적 성질과 파단 형태에 대해 검토하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용한 모재는 A5052-H112이고, 기계적 특성은 table 1에 나타내었다.

접합조건은 table 2와 같다. 100*100*2mm(가로*세로*두께)의 시편 2개를 각각 35mm 겹치게 두고 겹치기 마찰교반접합을 실시하였다. 이때 겹치기 마찰교반접합의 조건으로써 부하하중을 9.8kN, 시편과 툴 사이의 각도를 3°로 고정하였고 회전속도(Rotating Speed:RS)

Table 1 Mechanical properties of A5052-H112

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

Table 2 Friction stir lap welded conditions

Parameter	Conditions
Rotating speed(rpm)	600,900,1200,1500
Welding speed(mm/min)	100,400,700
Tool force(kN)	9.8
Tool tilt(°)	3

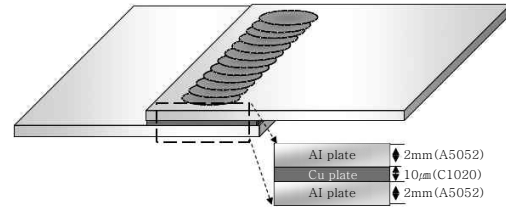


Fig. 1 Schematic of specimen for interfacial observation. (inserting Cu sheet)

및 접합속도(Welding Speed:WS)를 변수로 하였다.

접합 조건을 간략하게 RS-WS순으로 표시하였고, 단위는 생략하였다. 예를 들어 1500rpm-100mm/min을 1500-100로 나타내었다.

프루브의 지름은 5mm, 길이는 3.7mm의 나선형 태로 자체 제작하였으며, 솔더의 지름은 15mm로 폭과 시편의 두께를 고려하여 제작하였다.

접합부 마크로 조직을 관찰을 위해 연마된 시편을 Keller용액 (150mlH₂O+3mlHNO₃+6mlHCl+6mlHF at 0°C)으로 에칭한 후 실측현미경을 이용하여 관찰하였다. 방사선 투과시험을 실시하여 결함유무, 크기를 조사하였다. 접합계면은 구리 박판을 알루미늄 상, 하판 사이에 Fig. 1과 같이 삽입하여 겹치기 마찰교반접합 후 EDS(Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy)를 이용하여 구리 분포를 통해 관찰하였다.

접합 형태에 따른 접합 특성 평가를 위해 ‘A-형태’ 및 ‘R-형태’로 시편을 제작하였다. A-형태는 앞부분, R-형태는 뒷부분에서 인장 하중을 받도록 겹치기 마찰교반접합을 하였다. Fig. 2는 A-형태와 R-형태의 모식도를 나타내었다.

이렇게 제작한 시편을 접합부 수직인 방향으로 너비 15mm인 인장시편을 제작한 후 시험속도 1mm/min로 인장시험을 수행하였다. Fig. 3은 인장시편 모식도이며 뒤틀림을 방지하기 위해 시편 양쪽 끝에 알루미늄으로 덧붙인 후 시험하였다.

그리고 주사 전자 현미경(Scanning Electron Microscopy : SEM)을 이용하여 접합 형태에 따라 파단면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부의 건전성 평가

접합의 건전성을 평가하기 위해서 접합 단면 마크로 조직 및 방사선투과시험에 의한 결함 그리고 접합형태에 따라 유효두께를 분석하였다.

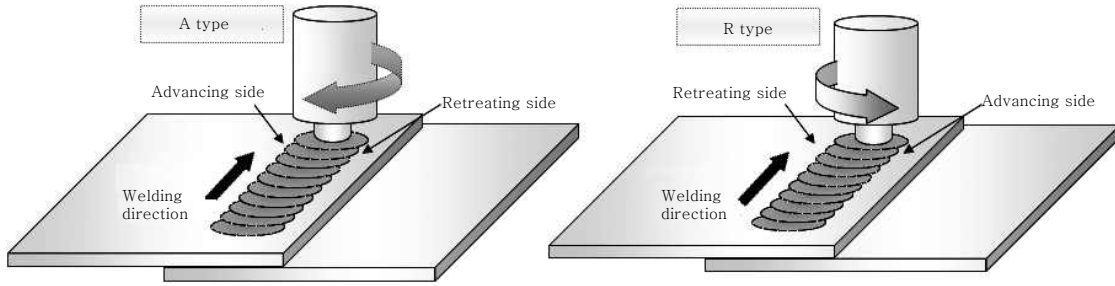


Fig. 2 Schematic of lap joint constructions : 'A-type' - fractured in advancing side, 'R-type' - fractured in retreating side for tensile test

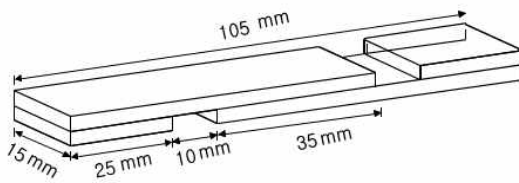


Fig 3 Schematic of tensile test specimen

Fig. 4는 접합 조건에 따른 접합 단면 마크로 조직 사진이다. 단면 마크로 조직사진은 접합형태(A-형태, R-형태)에 따라 좌우 위치만 바뀌므로 구분하지 않았다. 겹치기 마찰교반접합의 교반부 위치는 프루브의 용입깊이에 따라 결정되므로 하판의 접합부 아래에 반 타원형 교반부가 생성되었다⁵⁾. 또한 앞부분에서 영역별 경계면이 뒷부분의 경계면보다 뚜렷하였다. 이는 뒷부분의 경계면이 툴의 회전방향과 접합방향이 상반되는 운동으로 인해 교반효과가 감소되어서 계면 형성이 원활하게 이루지 못했기 때문으로 사료된다⁶⁾. 또한 교반부 영역에 마찰열과 소성유동에 의한 onion ring 형태가 나타났다.

생성된 결함은 900-100, 1200-100 및 접합속도와 상관없이 1500rpm을 제외한 조건에서 나타났으며, 회전속도가 증가하고 접합속도가 감소함에 따라 공공의 크기가 감소하였다. 이는 접합 조건에 따라 결함의 생성 및 크기가 다르며, 이는 접합시 발생한 입열량 차이 때문인 것으로 사료된다⁷⁾.

Fig. 5는 접합 조건에 따라 방사선투과시험을 실시한 후 투과사진이다. 결함은 회전속도가 증가하고 접합속도가 감소함에 따라 결함이 감소하였고, 단면 마크로 조직에서 무결함 생성 조건인 900-100, 1500-700에서도 확연히 나타났다. 이러한 결함 발생원인은 두 가지로 나눌 수 있는데, 첫 번째 원인으로서는 저속 회전과 고속 접합 속도에 따른 입열량 부족으로 소성유동과 마찰열이 충분하지 못해 발생한 결함이고⁸⁾, 두 번째 원인은 툴의 고속 회전과 저속 접합 속도로 인해 입열량이 증가되고 plunge depth도 증가됨에 따라 표면 모재 일부가 날림(flash) 형태의 결함이 발생한 경우이다⁹⁾. 여기서의 결과는 날림현상이 없는 것으로 보아 입열량과 교반 부족에 의한 결함인 것으로 판단된다.

단면 마크로 조직과 방사선투과시험의 결과를 토대로

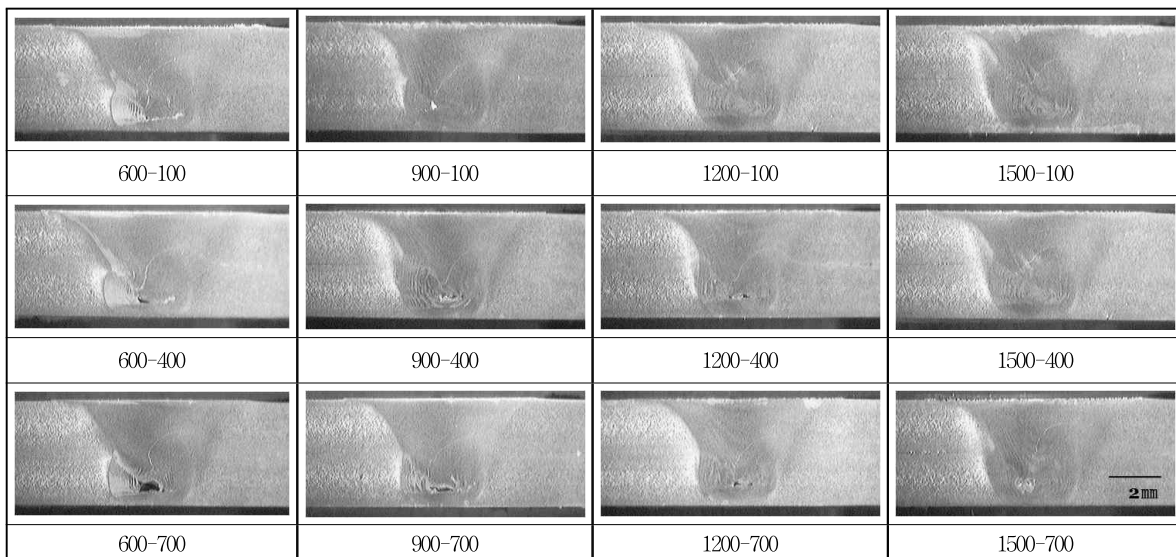


Fig. 4 Macrostructures at FSLW conditions : Right area is advancing side, left area is retreating side

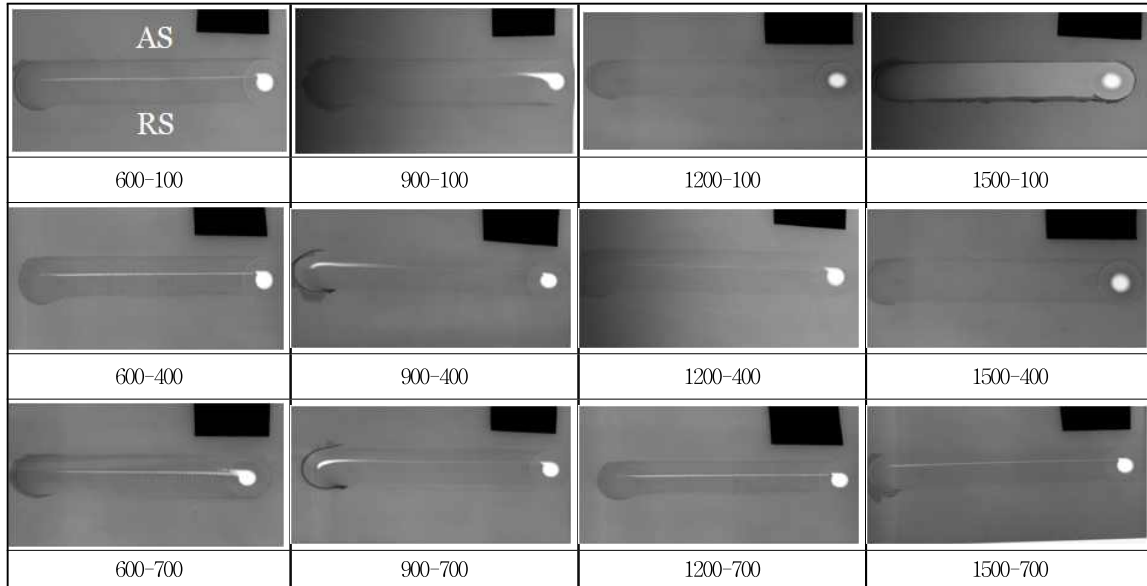


Fig. 5 Radiographs welded at FSLW conditions

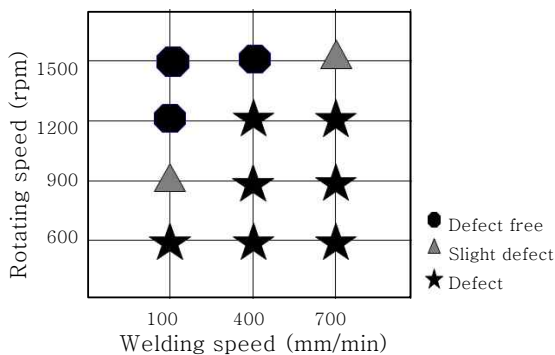


Fig. 6 Defect map for FSLW conditions

접합 조건에 따른 접합 결함조건을 Fig. 6에 나타내었다. 단면 마크로 조직과 방사선투과시험에서 모두 우수한 접합조건이 나타날 경우 ‘양호’로 표기하였고, 둘 중 어느 하나에서만 우수한 경우 ‘보통’으로 표기하였으며, 두 시험에서 결함이 발견된 경우를 ‘결함’으로 표기하였다. 회전속도가 증가할수록 접합속도가 감소할수록 결함 발생 가능성이 낮아졌다.

Fig. 6의 결과 중 접합속도 100mm/min인 경우에서 접합의 결함상태가 양호, 보통, 결함이 모두 나타났으므로 앞으로 100mm/min 대해서 접합형태에 따른 접합계면, 유효두께, 인장강도, 파단면 등을 검토하고자 한다.

Fig. 7은 접합계면을 관찰하기 위해 대표적으로 1200-100의 접합조건에서 알루미늄 상,하판 사이에 구리박판을 삽입하였고, 접합 후 접합부의 SEM과 EDS를 이용하여 구리 분포를 나타낸 것이다.

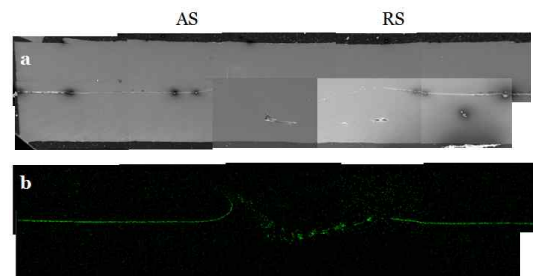


Fig. 7 Cross-sectional macroscopic view FSLW A5052-H112 inserting Cu:(a)SEM microstructure, (b)Cu-mapping image, (1200rpm-100mm/min)

접합계면 앞부분에서 급격한 상승 후 하강하는 형태가 관찰되었고, 뒷부분에서 완만한 상승 후 하강하는 형태가 되었다. 이는 모든 조건에서 동일하게 나타났다. 건전한 겹치기 마찰교반접합을 위해서는 입열량에 따른 결함, 소성유동, 접합두께, 유효두께 등을 고려해야 한다.

접합조건을 적절히 제어하여 솔더에서 발생한 입열량이 상판으로부터 하판까지 전달될 수 있어야 하며, 교반에 의한 소성유동은 틀 이동으로 인해 생성된 공간으로 물질이 채워질 수 있도록 빨라야 한다⁹⁾. 접합두께는 틀의 형상에 따라 크게 좌우하는데, 시편두께보다 더 넓게 만들어야만 접합면에서 파단되지 않고 모재에서 파단된다⁴⁾.

또한 겹치기 마찰교반접합에서는 상판과 하판 사이에 계면이 존재하기 때문에 미세조직보다는 물질이동이 더 중요한 요소라고 할 수 있다. 특히 뒷부분에서 앞부분

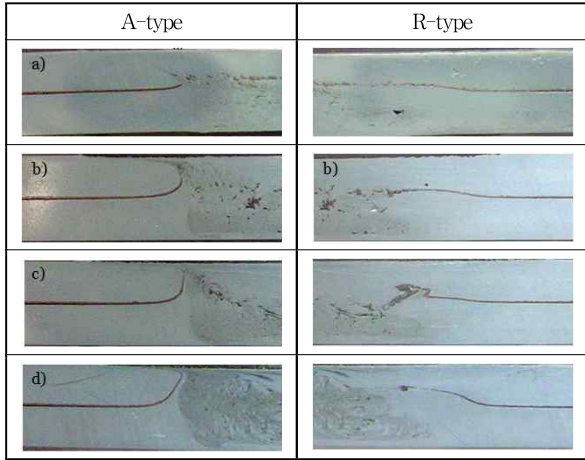


Fig. 8 Cross-sectional macroscopic view and EST according to joint types : a) 600rpm, b)900rpm, c)1200rpm, d)1500rpm (fixed 100mm/min)

으로의 물질이동으로 인해 수직 물질이동이 발생한다. 이러한 수직 물질이동이 프루브의 바깥면에서 발생한다면, 미접합 계면의 물질도 수직 물질이동이 발생한다. 이렇게 생성된 미접합 계면을 material hook이라고 상판 혹은 하판과 미접합 계면과의 최소 거리를 유효두께 (Effective Sheet Thickness:EST)라고 한다¹⁰⁾.

접합 형태에 따른 단면조직은 Fig. 8에 나타내었고, 유효두께는 Fig. 9에 나타내었다. A-형태인 경우는 회전속도가 증가할수록 유효두께가 감소하였다. R-형태인 경우는 회전속도가 증가할수록 감소는 하였으나, A-형태와 비교하면 감소폭은 월등히 줄었다. 이는 회전속도가 증가함에 따라 프루브 바깥면의 수직 물질이동이 활발하여 material hook 또한 급격하게 상승한 것으로 판단된다.

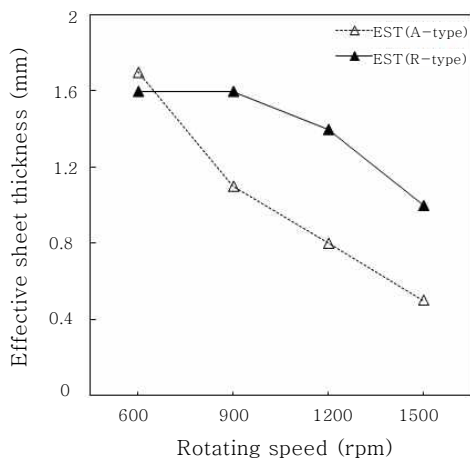


Fig. 9 Effective sheet thickness according to joint types and rotating speed of FSLW (fixed 100mm/min)

유효두께는 접합형태와 접합조건을 제어하여 가장 두꺼운 유효두께가 만들어야 접합건전성을 확보할 수 있을 것이라고 판단된다.

3.2 인장강도 및 파단면관찰

Fig. 10은 A-형태 및 R-형태의 경우 회전속도에 따른 인장하중을 나타낸다. 접합속도 100mm/min에서 회전속도가 증가함에 따라 접합형태에 상관없이 인장하중은 감소하였고, A-형태의 인장하중이 R-형태의 인장하중보다 더 낮은 값이 나타났다. 이는 앞에서 설명한 무결함 발생조건인 1200-100, 1500-100의 인장하중이 결함 발생조건인 600-100, 900-100의 인장하중보다 더 낮은 값을 나타내었다.

여기서 알 수 있듯이 겹치기 마찰교반접합에서 인장하중은 결함과는 무관한 것으로 사료된다. Fig. 11은 A-형태일 때, Fig. 12는 R-형태일 때 회전속도에 따른 인장파단형상이다. 파단은 접합면에서가 아니라 더

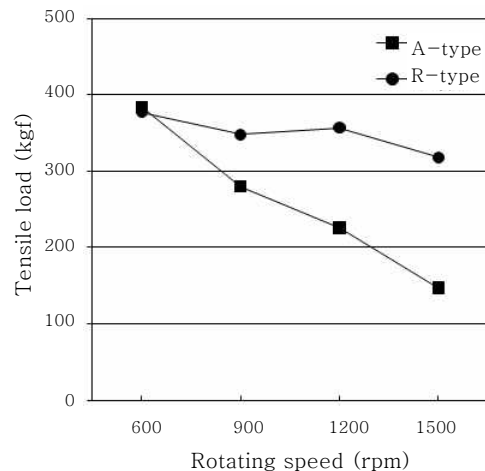


Fig. 10 Tensile load according to joint types and rotating speed (fixed 100mm/min)



Fig. 11 Fracture appearances of A-type joint after tensile test : a) 900rpm, b) 1200rpm, c) 1500rpm(fixed 100mm/min)



Fig. 12 Fracture appearances of R-type joint after tensile test : a) 900rpm, b) 1200rpm, c) 1500rpm(fixed 100mm/min)

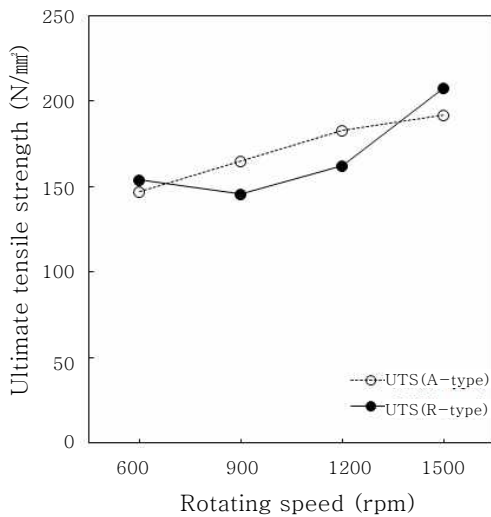


Fig. 13 Ultimate tensile strength according to joint types and rotating speed of FSLW (fixed 100mm/min)

얇은 유효두께에서 일어남을 알 수 있었다. 이리하여 유효두께에서의 인장강도를 검토해 보았다. Fig. 13은 접합형태와 회전속도에 따른 인장강도를 나타내었다.

접합형태에 상관없이 인장강도는 증가하였다. A-형태, R-형태에 대한 최대 인장강도는 192, 208MPa를 나타냈다. 이는 모재 인장강도의 70%, 76% 접합효율을 나타내었다. 그러나 A-형태가 접합효율은 우수하나, 실생활에 적용하기 위하여 인장강도와 유효두께를 함께 고려한 R-형태가 A-형태보다 유익할 것이다.

다음으로 인장파단 후 파단형상을 검토하였다. 앞에서 설명하였듯이 Fig. 11의 A-형태일 때, 회전속도가 증가함에 따라 편이 지나는 경계지점인 교반부에서 파단 되었다. Fig. 12의 R-형태일 때, 회전속도가 증가함에도 불구하고 가장 연화가 심한부분인 열영향부에서 파단이 발생했다.

Fig. 14는 A-형태일 때 가장 유효두께가 얇은

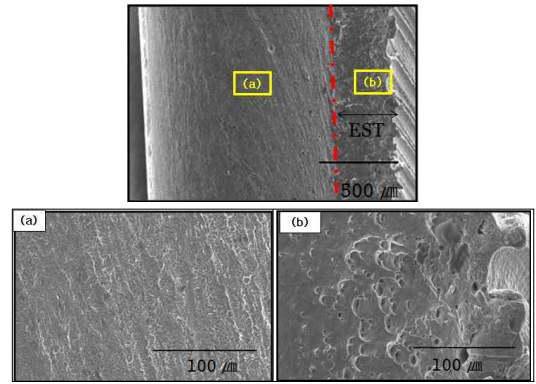


Fig. 14 Fracture characteristics of A-type joint at 1500rpm-100mm/min

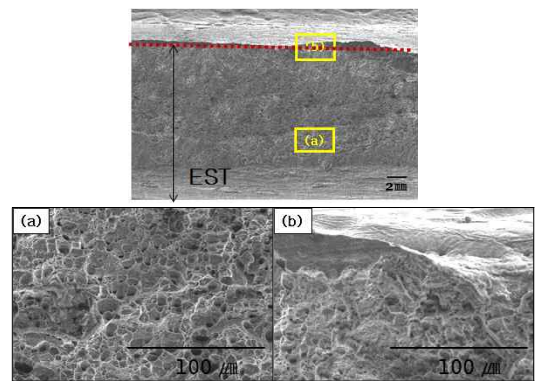


Fig. 15 Fracture characteristics of R-type joint at 600rpm-100mm/min

1500-100에서의 인장파단면 사진이다. 미접합면과 준벽개(quasi-cleavage) 취성과파면이 넓게 발생하였고, 일부 연성과파괴형태인 딴플(dimple) 형상이 보이고 있다. 이는 접합계면의 변형이 심하기 때문이라 여겨진다. Fig. 15는 R-형태일 때 가장 유효두께가 두꺼운 600-100에서의 인장파단면 사진이다. 전 영역에서 딴플(dimple)과 쉬어립(shear lip)현상이 나타났다. 이는 접합계면의 변형이 없어 미접합면이 없기 때문이라 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 A5052-H112소재를 이용하여 겹치기 접합 형태에 따른 마찰교반접합의 건전성 및 기계적 특성에 대해 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 마크로 조직 및 방사선 투과시험 결과 무결함을 나타내는 조건은 100-1200, 100-1500, 400-1500이었다.

2) 동일조건에서의 유효두께는 A-형태보다 R-형태가 더 넓었고, 접합형태와 관계없이 회전속도가 증가함에

따라 유효두께는 감소하였다. 그리고 유효두께가 넓을수록 건전한 접합성을 확보할 수 있었다.

3) 접합 형태에 상관없이 회전속도를 증가함에 따라 인장강도 값은 증가하였다. 이는 모재 인장강도의 70% 이상 접합효율을 나타내었다.

4) 접합형태에 따른 파단면을 검토한 결과, A-형태일 때는 미접합면과 준벽개(quasi-cleavage) 취성파면이 넓게 분포하였고 일부에서 연성파괴형태인 딴플(dimple) 형상을 보이고, R-형태인 경우는 전 영역에서 딴플형상을 나타내었다.

참 고 문 헌

1. Lohwasser D: DaimlerChrysler : Application of Friction Stir Welding for Aircraft Industry, The Second International Symposium on Friction Stir Welding (2000), Sweden
2. O T Midling, J S Kvåle and O Dahl : Industrialisation of The Friction Stir Welding Technology in Panels Production for The Maritime Sector, The First International Symposium on Friction Stir Welding (1999), USA
3. Y.C. Chen and K. Nakata : Effect of the Surface State of Steel on the Microstructure and Mechanical Properties of Dissimilar Metal Lap Joints of Aluminum and Steel by Friction Stir Welding, Metallurgical and Materials Transactions A 39A (2008), 1985-1992
4. D. Fersini, A. Pirondi : Fatigue behaviour of Al2024-T3 friction stir welded lap joints, Engineering Fracture Mechanics 74(2007), 468-480
5. D. Jandric, C. Chen, M. Valant and R. Kovacevic : Characterization of weld quality by different sensing techniques in friction stir welding of lap joints, The 4th International Symposium on Friction Stir Welding (2003), USA
6. Jae-Cheul Park, Seong-Jong Kim : Evaluation of mechanical characteristic and investigation on optimum condition in friction stir processing for 5456-H116 Al alloy, J. Kor. Inst. Surf. Eng, 42-1(2009), 13-20
7. M. Peel, A. Steuerer, M. Preuss, P.J. Withers : Microstructure, mechanical properties and residual stresses as a function of welding speed in aluminium AA5083 friction stir welds, Acta Materialia 51 (2003), 4791-4801
8. Won-Bae Lee et al : Effects of welding parameters on the friction stir weldability of 5052 Al alloy, Journal of KWS, 22-3 (2004), 265-272 (in Korean)
9. Vijay Soundararajan, Eswar Yarrapareddy, and Radovan Kovacevic : Investigation of the Friction Stir Lap Welding of Aluminum Alloys AA5182 and AA6022, JMEPEG 16 (2007), 477-484
10. L. Cederqvist and A. P. Reynolds : Factors Affecting the Properties of Friction Stir Welded Aluminum Lap Joints, The Welding Journal Research Supplement 80 (2001), 12, 281-287