연 구 논 문

이종 알루미늄 합금 A6K31/A5J32 겹치기 마찰교반 접합부의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향

윤태진*,† · 김상주* · 송상우** · 홍재근** · 강정윤*

*부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심센터(NCRC)
**한국기계연구원 부설 재료연구소

The effects of Welding Conditions on Tensile Properties of Friction Stir Lap Welded of Dissimilar Al Alloy, A6K31/A5J32

Tae-Jin Yoon*,†, Sang-Ju Kim*, Sang-Woo Song**, Jae-Keun Hong** and Chung-Yun Kang*

*National Core Research Center, Pusan National University, Busan 609-735, Korea
**Korea Institute of materials Science, Changwon 642-831, Korea

†Corresponding author : tjyoon@pusan.ac.kr
(Received October 28, 2010 ; Revised December 14, 2010 ; Accepted April 14, 2011)

Abstract

The scope of this investigation is to evaluate the effect of joining parameters on the microstructural features and mechanical properties of dissimilar aluminum alloys, 1mm-thickness fixing AA6K31 at the top position and fixing AA5J32 at the bottom position. The friction stir lap welds were studied under various welding conditions, rotation speed of 1000, 1250, 1500rpm and welding speed of 100, 300, 500, 700mm/min, respectively. Mechanical test has been investigated in terms of tensile shear test and hardness test. The results showed that three type nugget shapes such as onion ring, zigzag type, hooking with the void, have been observed with revolutionary pitch. All welding conditions fractured at the HAZ of top plate, A6K31 and also the strength compare with base metal of lap joints were low efficiency, 52~63%. The thickness of fractured position was decreased with the lower heat input conditions. The relationships were excellent due to linear between the effective thickness of fractured position and peak load. The fractured position was the interface between joint area and not joint area. Also the strength efficiency compared with base metal was lower than decreasing rate of thickness because the hardness was decreased at fractured position due to softened material.

Key Words : Friction stir welding, Lap joint, Dissimilar aluminum alloy, A6K31, A5J32, Tensile shear test.

1. 서 론

자동차 산업에서 후드, 도어, 트렁크 덮개 패널 등에 경량화와 회수율이 우수한 알루미늄 합금 사용량이 증가하고 있다. 자동차 패널용 알루미늄 합금은 초기에는 강도가 높은 2000계(Al-Cu-Mg)와 7000계(Al-Mg-Zn)가 주로 사용되었지만, 현재는 성형 가공 시 발생하는 주름 결함을 방지하기 위해 성형성이 좋은 5000계(Al-Mg)재료를 내부 패널에 사용[1]하고 충격 강도가 중요한 외부 패널에는 고강도의 6000계(Al-Mg-Si)를 적용한 이종 알루미늄 합금 재료의 사용되고 있다.

덮개류 알루미늄 패널은 주로 겹치기 이음부를 채택하고 있는데, 자동차 산업은 대부분 High volume production 이기 때문에 모재 두께의 사용에 제한이 있어 맞대기 이음부의 적용이 어렵고[2], 또한 맞대기의

경우 양쪽의 패널 분리 방지를 위해 부수적인 클램프 장치가 필요[3]하기 때문에 접합부 형태가 기존의 맞대기(Butt)에서 겹치기(Lap Joint) 또는 T-Joint 이음부로 사용이 확대 되고 있다[4].

자동차용 알루미늄 패널의 접합은 주로 저항점용접(Resistance Spot Welding)과 기계적 접합방법(self-piercing rivet)이 이용되고 있으나[5], 용융용접 시 응고과정에서 결함이 발생하고[6], 기계적 체결체 사용으로 경량화 효과가 저하하며, 생산 가격이 높은 단점이 있다[7].

따라서, 이종 알루미늄 합금의 대체 접합 방법으로 마찰교반접합이 주목받고 있다. 마찰교반접합은 마찰열과 소성유동현상을 이용하여 접합하는 고상접합 공정으로서 기존의 문제점이었던 기계적 체결체 사용을 줄여 경량화 효과뿐만 아니라 rivet법의 2.4배 이상의 강도를 가지는 장점이 있고[7], 용융용접에서 용접성이 좋지 않은 2000, 5000, 6000, 7000계열의 알루미늄 합금 접합에도 주로 사용되고 있다[7,8].

알루미늄 맞대기 마찰교반접합에 대한 연구 보고는 많으며, 결과 또한 접합 효율이 모재대비 90% 이상으로 우수하다[9,10,11,12,13].

알루미늄 겹치기 마찰교반접합에 대한 연구는 다소 보고 되고 있다. 겹치기 마찰교반접합 시 발생하는 대표적인 결함으로 Hooking과 Void가 있지만, 접합조건에 따른 발생 유무만 제시 되어 있을 뿐 생성 과정에 대한 연구는 전무하고, 주로 이런 결함 발생을 방지하기 위하여 MX-triflute™, Flare-triflute™[14], A-Skew™[15], Cornical Cylinderical[16] 등의 툴의 형상을 변화 하거나 멀티패스[14]를 이용하여 접합부 강도를 향상시키는 연구에 집중되어 있다.

그러나 전술한 연구 결과 대부분이 동종 알루미늄에 관한 내용이고, 회전속도와 접합속도 또한 국한된 범위의 변수만을 사용되었기 때문에 이종재료의 사용과, 넓은 범위의 접합조건을 이용하여 입열량 단위(Revolutionary Pitch)로 환산하여 입열량에 따라 변화하는 현상에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

따라서 본 연구에서는 자동차 도어용 이종 알루미늄 합금 A6K31과 A5J32의 겹치기 마찰교반 접합부의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향을 알아보기 위하여, 회전속도와 접합속도를 일정한 범위로 변화 시키고, 접합변수들을 입열량 단위로 환산한 후, 입열량에 따른 비드형상변화와 인장성질과의 상관관계에 대하여 고찰하였다.

2. 사용 재료 및 실험 방법

본 연구에서 사용한 재료는 도장 소부(paint baking) 처리 후 석출강화에 의한 강도저하를 방지하고, 성형성이 우수한 A5J32와 다른 처리 없이 도장 소부 강화 특성을 가짐으로 성형성이 좋고 가격적으로 우수하여 자동차 외부 패널로 적용하고 있는 A6K31 합금을 접합재로 사용하였으며, 합금의 화학조성과 인장성질은 Table 1에 나타내었다.

시험편 제작은 두께 1.0mm, 크기 300mm×100mm로 절단한 두 판재를 40mm씩 •겹쳐 두 모재가 겹쳐진 부분을 중심으로 마찰교반접합을 실시하였다. 실험에 적용한 접합변수는 툴의 회전속도 1000, 1250, 1500rpm과 접합속도 100, 300, 500, 700mm/min으로 변화 시켜 실험을 진행하였다. 사용된 툴은 Cylindrical threaded 형상으로서 Shoulder 직경 8mm, Probe의 직경과 길이는 각각 3mm, 1.45mm로 나사산 형태로 가공하여 사용하였고, 툴에 대한 자세한 정보는 Table 2에 나타내었다.

접합부의 미세조직은 접합 방향과 수직으로 절단한 후 연마하여 Keller (Distilled water 190ml + Nitric acid 5ml + HCl 3ml + HF 2ml)용액으로 부식하고 광학현미경(OM, Optical Microscope)과 주사전자현미경(SEM, Scanning Electron Microscope)으로 관찰하였고, EPMA(Electron Probe Micro

Table 2 Designated parameters of welding tool

Item	Tool Dimension
Shoulder diameter	8mm
Probe diameter	3mm
Probe length	1.45mm
Shoulder angle	3°
Shoulder-tool R	0.5mm
Probe taper	0°
material	SKD61

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of material(wt%)

Material	Mg	Si	Ti	Mn	Cu	Fe	Al	T.S(MPa)	E(%)
A6K31	0.592	1.041	-	0.066	0.803	0.036	Bal.	288	31
A5J32	5.68	0.11	0.09	0.005	0.20	0.09	Bal.	298	38

Analyser)를 이용하여 Mg과 Si의 성분 분포를 조사하였다.

접합부 기계적 특성을 관찰하기 위해 마이크로 비커스 경도기(Mitutoyo hardness test machine 810-126K)를 사용하여 하중 200g, 유지시간 10초로 접합부 경도 분포를 측정하였다. 만능시험기(Instron-8501)를 사용하여 2mm/min의 크로스 헤드속도(Crosshead speed)로 인장전단시험을 실시하였고, 그 때의 인장전단시험편은 Fig. 1에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합조건에 따른 비드형상

Fig. 2는 A6K31를 상부에 A5J32합금을 하부에 놓고, 각각 1000rpm, 1250rpm 및 1500rpm에서 접합속도 변화에 따른 접합부의 단면조직을 나타낸 것이다. 회전속도 1000rpm 및 1250rpm의 접합속도가 빠른 접합부를 자세히 관찰하여 보면, 접합부 중앙부 A, B 및 C로 표시된 영역에서 결함이 관찰되었다.

Fig. 3은 이 결함의 형상을 파악하기 위하여, A, B 및 C로 표시된 영역을 확대한 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 결함은 보이드로서 모두 공통적으로 너깃 중앙부의 상판(A6K31)/하판(A5J32) 계면에서 발생하고 있다.

Fig. 2에서 너깃형상은 교반부의 특징으로부터 크게 3가지 형으로 분류되고, 교반현상은 미세조직보다 성분

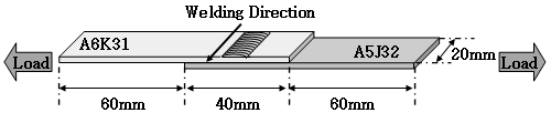


Fig. 1 The specimen for tensile test

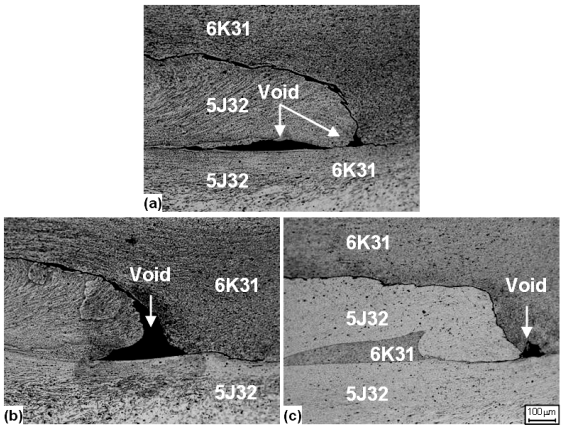


Fig. 3 Optical microstructures. (a), (b) and (c) microstructures indicated by A, B and C in Fig. 2 respectively

의 분포를 알면 쉽게 파악할 수 있을 것으로 예상되어, A5J32에 많은 Mg과 A6K31에 많은 Si의 분포를 측정하여 보았다. Fig. 4는 Fig. 2의 (a), (d) 및 (i)에 각각 P, B 및 Q로 표시된 영역에 대하여 EPMA로 Mg과 Si의 분포상태를 조사한 것이다. 마찰교반접합의 경우, tool의 회전속도와 접합속도는 재질에 따라서 차이는 있지만 비교적 넓은 범위에서 선택이 가능하다. 이 두 인자는 아크용접에서 용접전류, 아크전압과 용접속도와 유사한 접합변수이다. 이들 변수의 조합에 의해 정의되는 아크용접 입열량에 필적하는 FSW 파라메타는 접합속도(V)를 공구의 회전속도(N)로 나눈 회전피치(Revolutionary Pitch(RP) = V/N)를 FSW 입열량의 파라메터로서 사용할 수 있다[17,18]. 즉, 회전피치는 툴이 1회전하는 사이에 이동하는 거리로 마찰교반접합후의 접합부 표면에 형성하는 줄무늬의 간극에 상당한다. 회전피치가 크다고 하는 것은 줄무늬의 간극이

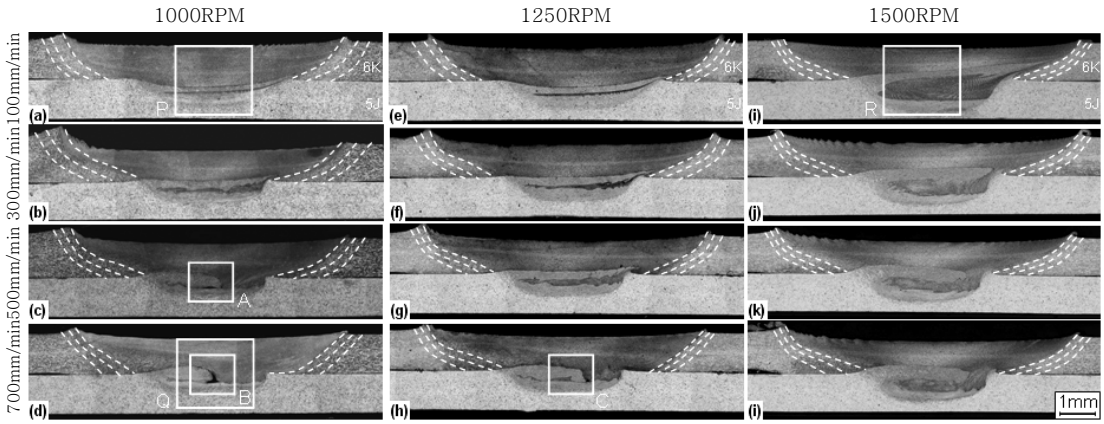
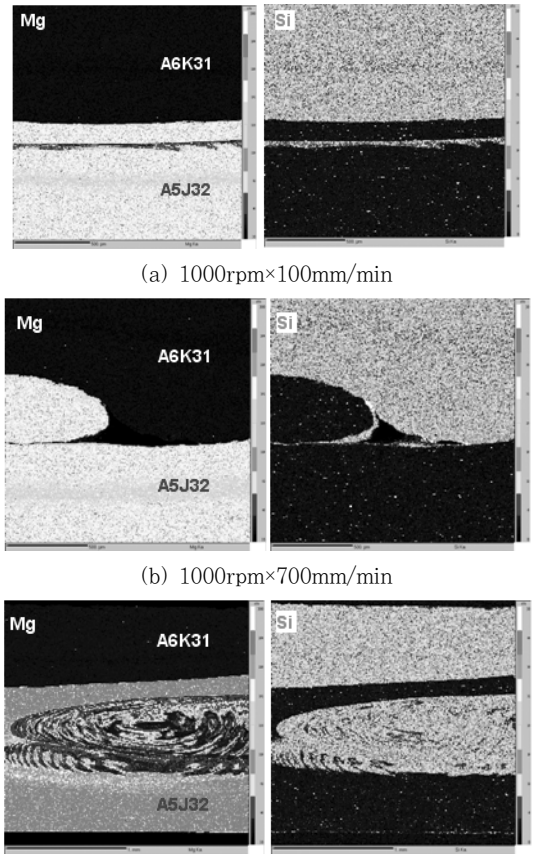


Fig. 2 Macrostructures of joints with welding speed(100mm/min~700mm/min) at rotation speed of 1000rpm, 1250rpm and 1500rpm



(a) 1000rpm×100mm/min

(b) 1000rpm×700mm/min

(c) 1500rpm×100mm/min

Fig. 4 EPMA analysis of weld nugget. (a), (b) and (c) microstructures indicated by P, Q and R in Fig. 2 respectively

크고, 1회전 사이에 이동하는 거리가 큰 것에 상당하기 때문에 입열량은 회전피치에 반비례 한다. 1500rpm × 100mm/min 조건의 시편은 회전피치가 0.07로 가장 입열이 높은 시편으로 Fig. 4의 (c)와 같이 하판인 A5J32에 2재료가 교반된 전형적인 어니언링이 형성되어 있음을 볼 수 있다. 한편 회전피치가 0.1(1000rpm × 100mm/min)인 시편은 Fig. 4의 (a)와 같이 하판 A6K31 쪽에 A5J32가 띠상의 형태로 존재하는 것을 볼 수 있다. 한편 입열이 가장 낮은 회전피치 0.7인 시편(1000rpm × 700mm/min)은 상판의 A6K31과 하판의 A5J32가 전혀 섞이지 않고, A5J32가 A6K31 쪽으로 밀려 올라가는 것을 알 수 있다.

이 결과를 근거로 하여 접합조건에 따른 너깃형상을 분류하여 모식도를 그리면 Fig. 5와 같다. (a)는 FSW 전형적 너깃형상인 어니언링 형태로서, 교반속도 1500rpm, 100mm/min속도의 접합재에서만 나타났다. 이외 조건의 접합부에서는 (b)와 같이 A6K31층이 하판의 A5J32 쪽으로 들어간 지그재그형태와 입열이 부족한 경우에는 재료의 소성유동이 어렵기 때문에 하부의 A5J32가 전

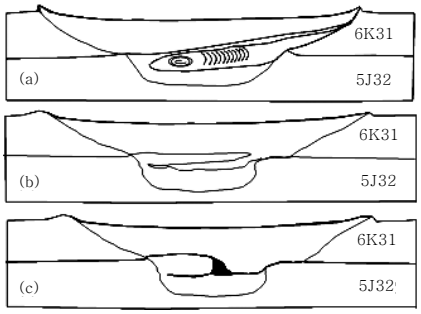


Fig. 5 schematic diagram for shape of nugget zone with welding condition. (a) Onion-ring type (Type A), (b) Zigzag type(Type B) (c) Hooking type with void(Type C)

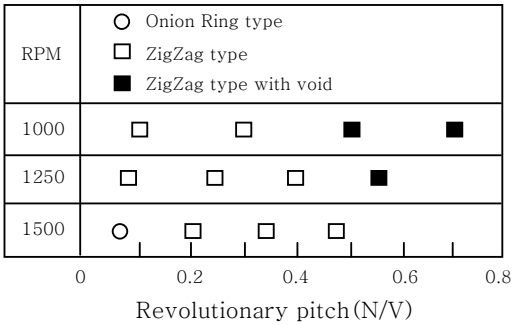


Fig. 6 Relationship between revolutionary pitch and nugget shape(void formation)

반부(Advancing side : AS)까지 유동하지 못하고 (c)와 같이 접합부 중앙까지만 훅킹되어 갈고리 모양을 하고 너깃 중앙의 프로브바닥에 보이드가 존재하는 형태로 나누어진다.

입열량에 따른 너깃형상과 접합결함 발생과의 상관관계를 조사하였다. Fig. 6은 회전피치(R.P)와 너깃형상과 접합결함 발생과의 상관관계를 나타낸 것이다. 회전피치 값 0.5 이상에서는 갈고리 모양으로 훅킹된 형상이면서, 보이드가 존재하는 형상임을 알 수 있다. 또한 입열량이 아주 높은 R.P=0.07에서는 어니언링형을 가지지만, 회전피치 값이 0.08~0.47인 경우는 하판인 A5J32에 A6K31재료가 띠상으로 들어가 양 재료가 층상을 이루는 형상을 하고 있다.

3.2 접합부의 인장성질과 저하원인 분석

Fig. 7은 인장전단시험 한 경우의 회전속도와 접합속도에 따른 피크하중의 변화를 나타낸 것이고, Fig. 8은 회전속도와 접합속도가 포함된 함수인 회전피치에 따른 피크하중의 변화를 나타낸 것이다. 여기서 오픈 마크들은 결함이 없는 경우이고, 솔리드 마크들은 보이드 결함이 존재하는 시편을 나타낸다. 인장전단시험 후 파단

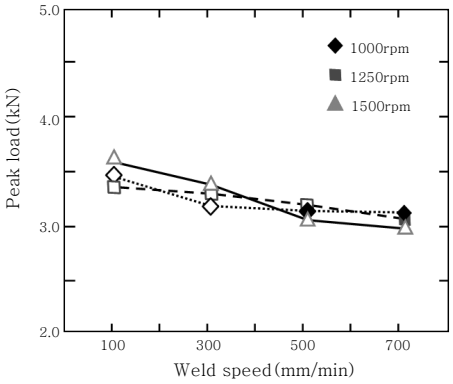


Fig. 7 Relation between peak load and welding speed

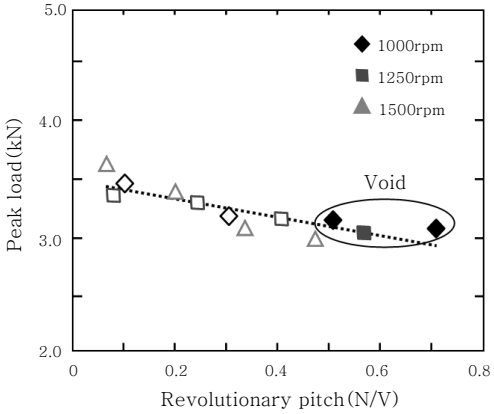


Fig. 8 Relation between peak load and revolutionary pitch

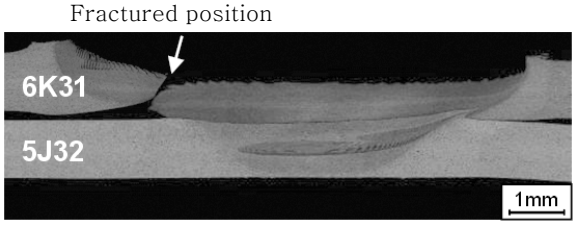


Fig. 9 Typical cross section of fractured specimen

형태를 조사한 결과, 모든 시편이 Fig. 9와 같이 상판 A6K31의 후퇴부(Retreating side : RS) HAZ 동일한 곳에서 인장응력으로 파단 되었다. Fig. 8로부터, 피크하중은 회전피치 값이 클수록(입열이 낮을수록) 직선적으로 저하하는 것을 알 수 있다.

A6K31과 A5J32의 모재 인장강도는 각각 288MPa과 298MPa이고, 이들 합금의 최고인장하중을 인장강도와 인장전단시편의 단면적(20mm(w)×1mm(t))으로부터 계산하면, A6K31과 A5J32의 최고인장강도는 각각 5.76kN과 5.96kN이었다. 접합부의 인장하중은 모재의 것과 비교하여 약 63%~약 52% 수준이었다. 인장전단시험한 시편이 접합부 계면에서 전단파단하지 않고, A6K31의 인장응력에 의해 파단된 이유를 고찰하면 다음과 같다. 일반적으로 재료의 전단응력(τ)과 인장응력(σ)과의 관계는 $\sigma=(\sqrt{3}\sim2)\tau$으로 알려져 있다[19]. 이 가정으로부터 A6K31의 인장강도로부터 전단응력(τ)을 구하면 144MPa ~166.3MPa이다. Table 2는 피크하중이 가장 높은 1500RPM × 100mm/min의 시편과 가장 낮은 1000RPM × 700mm/min의 시편에 대하여 접합부 단면으로부터 측정한 접합부 폭과 τ로 접합부의 최대전단하중을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 또한 A6K31 모재강도로부터 계산한 최대인장하중(5.76kN)과 최대전단하중과의 비도 함께 나타내었다. 이 표로부터 전단하중에 의해 파단 되기 위해서는 인장하중의 약 1.77배 이상 부가되어야 함으로, 모두 A6K31의 모재에서 인장파단 되는 것으로 생각된다. 즉 접합부 폭이 너무 넓기 때문에 모재에서 인장파단 되는 것을 알 수 있다.

한편 인장파단 한 시편들이 회전피치 값이 증가함에 따라 강도가 저하하는 이유를 고찰하면 다음과 같다. Fig. 9에서 알 수 있는 바와 같이 A6K31의 후퇴부에서 파단하고, 그 두께가 원래 두께보다 얇다. 각 파단 시편의 파단위치와 대응하는 곳의 단면형상을 비교하여 보았다. Fig. 10은 회전속도 1000rpm에서 접합속도를 변화시킨 경우, 파단시편(A5J32)의 위에서 촬영한

Table 2 Measured width of welded interlayer and calculated maximum shear load

Specimen	Welded Area $W_{WI} \times W_{SP}$	$\sigma=\sqrt{3}\tau$		$\sigma=2\tau$	
		SL_{max}	SL_{max}/TL_{BM}	SL_{max}	SL_{max}/TL_{BM}
1000RPM 700mm/min	$70.6mm^2$ 3.53(mm) × 20(mm)	10.2kN	1.77	11.7kN	2.03
1500RPM 100mm/min	$77.2mm^2$ 3.86(mm) × 20(mm)	11.1kN	1.92	12.8kN	2.22

W_{WI} : Width of welded interlayer, WSP : Width of test specimen
SL_{max} : Maximum Shear Load,
TL_{BM} : Maximum Tensile Load of base metal(A6K31 : 5.76kN)

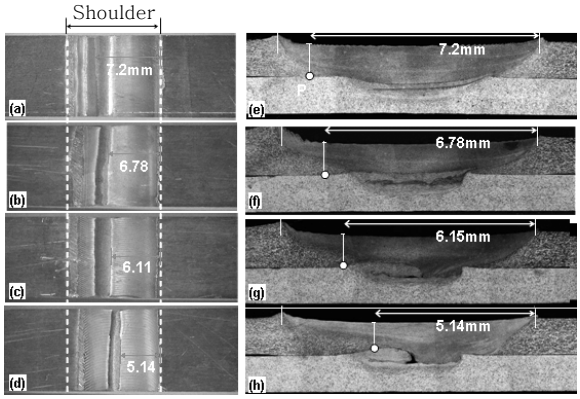


Fig. 10 Relation between cross section and macro-structure of fractured specimen with increasing welding speed at the same rotation speed(1000rpm): (e) 100mm/min, (f) 300mm/min, (g) 500mm/min, (h) 700mm/min

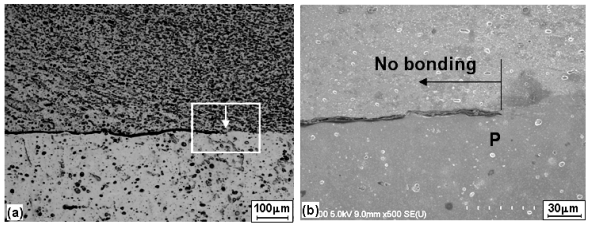


Fig. 11 Typical cross section of fractured position : (a) OM image and (b) SEM image

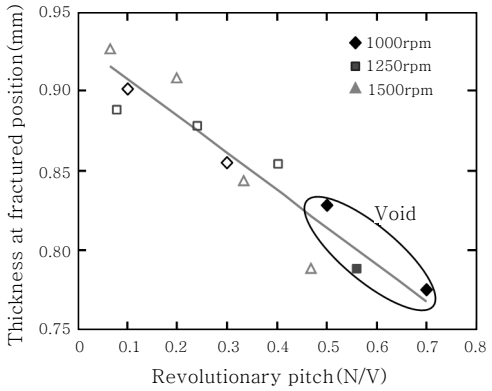


Fig. 12 Relation between revolutionary pitch and thickness of A6K31 at fractured position

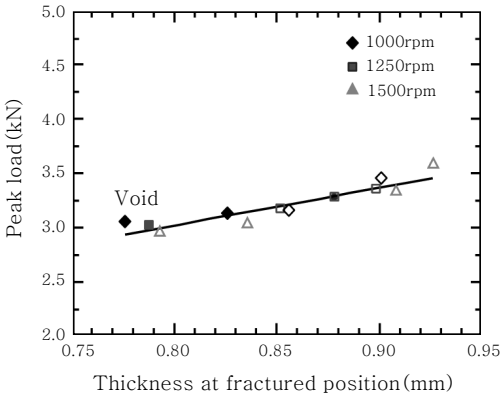


Fig. 13 Relation between thickness of A6K31 at fractured position and peak load

접사사진과 이에 대응하는 단면을 나타낸 것이다. 접합속도가 증가함에 따라 파단위치는 너깃 내부로 들어가는 경향이 있다. 이러한 파단위치의 특징을 알아보기 위하여, 단면을 고배율로 관찰하여 보았다.

Fig. 11의 (a)는 (f)에 □로 표시한 영역을 확대한 광학현미경 조직이고, (b)는 (a)의 □로 표시한 영역을 확대한 SEM조직이다. 이것으로부터 접합된 영역과 미접합부의 경계(P)에서 균열이 형성되고, 인장응력에 의해 강도가 약한 A6K31쪽으로 성장하여 파괴에 도달하는 것으로 생각된다. 따라서 P지점에서 A6K31의 두께가 인장하중에 영향을 미칠 것으로 예상된다. Fig. 12는 회전피치 변화에 따른 파단위치에서 두께 변화를 나타낸 것이다. 회전피치 값과 두께 변화의 상관관계는 약간의 편차가 있지만, 대체로 회전피치가 증가할수록 두께가 감소하는 경향이 있다고 볼 수 있다.

한편 회전피치에 따라 A6K31 후퇴부의 두께가 감소하는 이유는 다음과 같다. 입열이 적은 경우 후퇴부의 A5J32가 프로브 회전에 의해 서로 교반되지 않고, Fig. 2의 (c)와 (d)에서 볼 수 있는 바와 같이 A6K31쪽으로 밀려올라(훅킹)가지만, 온도가 낮아 서로 접합되지 않는다. 따라서 A6K31이 얇아진 상태(훅킹상태)이므로 두께가 감소한다. 그러나 입열이 크면, A5J32가 훅킹되지만, 온도가 높아 접합이 이루어지고, 미접합부는 너깃 외부에 존재하기 때문에 두께 감소가 적은 것으로 생각된다.

Fig. 13은 A6K31의 파단위치에서 두께와 피크하중과의 상관관계를 나타낸 것이다. Fig. 11과 Fig. 12로부터 회전피치 값이 증가할수록 A6K31의 두께가 감소하고, 시편의 폭이 일정하기 때문에 단면적이 감소하여 피크하중이 저하하는 것을 알 수 있다.

실제 모재인 A6K31에서 파단 되고, Fig. 12에서 알 수 있는 바와 같이 두께가 약 18%~23%정도 감소됨에도 불구하고, 접합재의 인장하중은 A6K31의 52%~63% 밖에 되지 않는다. 즉 인장하중의 감소는 37~48%로 두께 감소폭보다 아주 크다. 이러한 이유는 마찰교반접합의 열사이클에 의해 모재의 미세조직과 경도가 변화할 가능성이 높다. 그래서 접합부 근방의 경도분포를 조사하여 보았다. Fig. 14는 1000rpm-100mm/min 의 조건으로 마찰교반접합한 접합부의

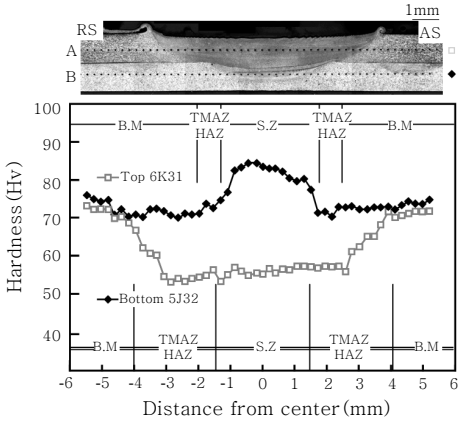


Fig. 14 Hardness distribution of friction stir lap welded plate at 1000rpm-100mm/min

경도분포를 나타낸 것이다. A-A(□)의 경도분포는 상판인 A6K31 쪽의 경도분포이고, B-B(◆)는 A5J32 쪽의 경도분포이다. 이것으로부터 A6K31은 접합에 의해 접합부는 연화가 일어나는 반면 A5J32의 교반부(Stir Zone;SZ)에서는 오히려 경화가 일어난다. 이 결과로부터 A6K31의 파단위치에서는 경도가 감소하고, 강도가 낮아지기 때문에, 두께 감소분보다 더욱 인장하중이 낮아지는 것으로 생각된다.

한편 A6K31 접합부 HAZ에서 연화가 생기는 이유는 접합 시 발생한 마찰열에 의해 접합부의 석출물이 조대화되고, 전위밀도가 상대적으로 낮아지기 때문에 경도가 저하[20]한다.

4. 결 론

이종 알루미늄 합금 A6K31과 A5J32의 겹치기 마찰교반접합 한 경우 접합조건에 따른 인장성질과 그 저하 원인을 파단분석과 경도변화 등으로 규명한 결과로부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 접합조건에 따른 인장성질을 비교한 결과, 모든 조건의 파단위치는 강도가 약한 상부 A6K31의 후퇴부(Retreating side : RS) HAZ 동일한 곳에서 파단되었고, 입열이 적을수록(R.P가 클수록)강도는 직선적으로 감소하였으며, 접합효율은 A6K31모재와 비교하여 약 63%~52% 수준이었다.

2) 접합부 강도 저하 원인은 두 가지로 생각되었다. 첫째, 모든 조건에서 하부의 A5J32가 상부의 A6K31 쪽으로 훅킹되지만 입열이 크면 온도가 높아 접합이 이루어지고, 미접합부는 너깃 외부에 존재하기 때문에 두께 감소가 적었다. 반면에 입열이 적은 경우 A5J32가 프로브 회전에 의해 서로 교반되지 않고 A6K31쪽으로 밀려올라(훅킹)가기 때문에 A6K31이 얇아진 상태이므로 두께가 감소하였고, 온도가 낮아 접합되지 않기 때문에 훅킹부분에 미접합부가 존재하기 때문이다. 둘째, 파단부위인 A6K31의 HAZ가 연화되었기 때문으로 판단된다.

3) 입열이 가장 작은 세 접합조건(R.P 0.5이상)에서 접합부 내부에 보이드가 발생하지만 인장성질에는 영향을 미치지 않고, 인장전단시험에서 계면 파단이 없는 이유는 접합부 폭이 너무 넓어 전단하중에 의해 파단할 수 응력이 부가 되지 않기 때문이다.

후 기

본 연구는 과학기술부/한국과학재단 국가핵심연구센터사업(No, R15-2006-022-02004-0) 지원으로 수행되었으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. Masahiko Jinta, Yoshinori Sakai, Masafumi Oyagi, Shigenori Yoshizawa, uniaki Matsui, Kenji Noda, Press forming analysis of aluminum auto body panel:wrinkle behavior in 5000 and 6000 series aluminum alloy sheet forming, Technical Notes/ JSAE Review **21** (2000) 385-416
2. Christopher B. Smith, Wade Crusan, Jonathan R. Hootman, John F. Hinrichs, Robert. J. Heideman, and Jeffrey S. Noruk, FRICTION STIR WELDING IN THE AUTOMOTIVE INDUSTRY, Tower Automotive - Technology Application 3533 N. 27th St. Milwaukee WI, 53216
3. Martin W, Anderson B, Jones R, Loftus Z, FS lap welding methods for manufacturing large scale spaceflight vehicles, 6th International Symposium on Friction stir welding, St Sauveur, Canada on 10-13 October 2006, SESSION 11B, **8**, 1430-1500
4. T. DebRoy and H. K. D. H. Bhadeshia, Friction stir welding of dissimilar alloys a perspective, Science and Technology of Welding & Joining, **15-4**
5. F.Hunt, H.Badarinarayan and K.Okamoto, Design of Experiments for Friction Stir Stitch Welding of Aluminum Alloy 6022-T4 - Friction Stir Welding of Alumium for Automotive Applications(3)
6. Vijay Soundararajan, Eswar Yarrapareddy, and Radovan Kovacevic, Investigation of the Friction Stir Lap Welding of Aluminum Alloys AA 5182 and AA 6022, JMEPEG (2007) 16:477-484, DOI: 10.1007/ s11665-007-9081-8
7. L. Dubourg, A. Merati, M. Jahazi, Process optimisation and mechanical properties of friction stir welds of 7075-T6 stringers on 2024-T3 skin, Materials and Design **31** (2010) 3324-3330
8. R. Johnson and S.W. Kallee, Stirring Stuff from Friction Welding., Mater. World, **7-12** (1999), 751-53

9. I. SHIGEMATSU, Y.-J. KWON, K. SUZUKI, T. IMAI, N. SAITO, Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding, JOURNAL OF MATERIALS SCIENCE LETTERS **22** (2003), 353-356
10. Hua-Bin Chen, Keng Yan, Tao Lin, Shan-Ben Chen, Cheng-Yu Jiang, Yong Zhao, The investigation of typical welding defects for 5456 aluminum alloy friction stir welds, Materials Science and Engineering **A 433** (2006), 64-69
11. Saad Ahmed Khodir, Toshiya Shibayanagi, Friction stir welding of dissimilar AA2024 and AA7075 aluminum alloys, Materials Science and Engineering **B 148** (2008), 82-87
12. E.Aldanondo, A.A.M da Silva, P.Alvarez, A.Lizarralde, A. Echeverria, Dissimilar friction stir welding of AA2024-T3 and AA7075-T6 aluminum alloys, Friction stir welding and processing V TMS, 2009
13. Chang Keun Chun, Woong Seong Chang, Chung Yun Kang, Yong Jai Kwon and Dong Hwan Park, Friction Stir Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks, Journal of KWJS, **27-5** (2009), 486-490 (in Korean)
14. O.K. Mishina, A.Norlin, Lap Joints produced by FSW on Flat aluminum EN AW-6082 profiles
15. G.M.D Gantin, S.A David, E. Lara-Curzio, S.S Babu and W.M. Thomas. "Microstructural Charateristics and Mechanical Properties of Friction Skew-Stir TM Welded Lap Joints in 5083-O Aluminum." Proceedings of the 7th International Conference on Trends in Welding Research, May **16-20** (2005), Callaway Resort, Pine Mountain, Georgia, USA
16. G. Buffa, G. Campanile, L. Fratini, A. Prisco, Friction stir welding of lap joints: Influence of process parameters on the metallurgical and mechanical properties, Materials Science and Engineering **A 519** (2009), 19-26
17. LIMING KE, LI XING, and J.E. INDACOCHEA : Metall. Mater. Trans. B, **35B**, February 2004- 153
18. Z.W. Chen, T. Pasang, Y. Qi : Materials Sci. Engin. **A, 474** (2008), 312-316
19. Yasunobu MIYAZAKI, Seiji FURUSAKO, Tensile Shear Strength of Laser Welded Lap Joints, NIPPON STEEL TECHNICAL REPORT **95**, January 2007
20. K. Elangovana, V. Balasubramanianb, Influences of post-weld heat treatment on tensile properties of friction stir-welded AA6061 aluminum alloy joints, Materials characterization **59** (2008), 1168-1177