연 구 논 문

5052 알루미늄 합금 마찰교반접합부 특성에 미치는 접합인자의 영향

이원배* · 김상원* · 이창용* · 연윤모** · 장웅성*** · 서창제* · 정승부*

*성균관대학교 공과대학 신소재 공학과
**수원과학대 자동화 시스템과
***포항산업과학연구원 (RIST) 용접센터

Effects of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al alloy

Won-Bae Lee*, Sang-Won Kim*, Chang-Young Lee*, Yun-Mo Yeon**
Woong-Seong Chang***, Chang-Chae Shur* and Seung-Boo Jung*

*Dept. of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-740, Korea
**Dept. of Automated System, Suwon Science College, Whasung 445-742, Korea
***Welding Research Center, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-600, Korea

Abstract

Effects of friction stir welding parameters such as tool rotation speed and welding speed on the joints properties of 5052 Al alloys were studied in this study. A wide range of friction stir welding conditions could be applied to join 5052 Al alloy without defects in the weld zone except for certain welding conditions with a lower heat input. Microstructures near the weld zone showed general weld structures such as stir zone (SZ), thermo-mechanically affected zone (TMAZ) and heat affected zone (HAZ). Each zone showed the dynamically recrystallized grain, transient grain and structure similar to base metal's, respectively. Hardness distribution near the weld zone represented a similar value of the base metal under wide welding conditions. However, in case of 800 rpm of tool rotation speed, hardness of the stir zone had a higher value due to the fine grain with lots of dislocation tangle, a higher angle grain boundary and some of Al3Fe particles. Except joints with weld defects, tensile strength and elongation of the joints had values similar to the base metal values and fracture always occurred in the regions approximately 5mm away from the weld center.

* Corresponding author : sbjung@skku.ac.kr
(Received March 17, 2004)

Key Words : Friction stir welding, 5052 Al alloy, Hall-Petch equation, Tool rotation speed, Welding speed

1. 서 론

알루미늄 합금은 경량이지만 기계적인 특성이 우수하므로 종래의 철강 재료를 대신할 수 있는 경량 구조용 재료로서 각광을 받고 있다. 경량의 알루미늄 합금이 구조물 및 운송수단에 적용되기 위해서는 재료의 성형, 가공 기술의 발전이 필수적이며 우수한 접합부 특성을 나타내는 용접 및 접합기술이 적용되어야 한다. 알루미늄 합금의 경우, 우수한 기계적인 특성을 달성하기 위한 합금 원소의 첨가 및 다양한 열처리 및 중간 소성가공공정의 도입으로 인해 종래의 용융용접법을 적용할 경우 가장 큰 문제점은 기공 및 균열 등 용접결함이 발생하기 쉽다는 점이다. 알루미늄 합금은 다른 합금에 비해, 액상에서의 수소의 용해도가 고상에 비해 현저히 높다. 따라서 모재 또는 용가재 등에 수분 또는 유기물이 부착되거나 보호가스 중에 수소 또는 수분이 함유된 경우, 용접 시 용융응고과정에서 액상에서 고용되어 있던 수소가 고상에서는 고용되지 못하고 증발하여 기공이 형성되기 쉽다. 또한 알루미늄 합금은 용접 후 응고 시, 고상과 액상이 공존하는 응고온도범위가 넓은 경우가 많으며 온도범위 내에서는 응고 시 발생하는 수축응

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

력 등이 작용하여 용접부에 고온결함(응고결함)이 발생할 가능성이 매우 높다. 실용 알루미늄 합금 중에서도 2000계 (Al-Cu계), 6000계 (Al-Mg-Si계) 또는 7000계(Al-Zn-Mg)는 응고온도범위가 넓고 고온결함이 발생하기 쉽다. 또 다른 문제점은 용접변형이 크다는 점으로 선팽창계수가 철에 비해 약 2배정도이다. 따라서 용접 후 변형이 용접부에 잔류하기 쉽다. 또한 용융용접 시 용접부의 기계적인 특성이 현저히 저하하는 점을 들 수가 있다. 용융용접 시 다량의 열이 유입되어 취약한 응고조직의 형성으로 인해 가공경화성의 손실 및 미세석출물의 고용현상 등이 발생하여 강도가 현저히 저하한다. 그 외에도, 열전도율이 높고 알루미늄 합금의 표면에 고 융점의 산화피막이 발생하기 때문에 용융이 어렵다는 점 등이 있다. 이러한 이유로 신뢰성이 높은 알루미늄 합금의 접합부를 얻는다는 것은 매우 어렵다[1]. 따라서 알루미늄 합금의 용접 시 용융용접이 아닌 고상상태에서 접합을 행 할 경우, 접합부의 용융에 따른 문제점을 해결할 수 있으리라 기대된다.

이러한 문제점을 해결하기 위해 1991년 영국 용접연구소(TWI)에서 기존의 마찰용접법 (Friction Welding)을 응용하여 철강계 공구강을 접합 툴로 이용하여 견고하게 맞댄 재료에 소성변형 및 마찰열을 부가하여 고상상태에서 접합이 이루어지는 마찰교반접합법 (Friction Stir Welding)을 개발하였다[2-3]. 개발된 이래 모든 알루미늄 합금의 접합에 적용하여 결함이 없는 우수한 접합부를 나타냈다[4-10]. 기본적인 접합 공정을 Fig. 1에 나타낸다. 마찰교반접합이 도입된 이래 유럽, 미국, 일본 등을 중심으로 활발한 연구가 진행되고 있으며 산업적으로는 우주항공 로켓의 외부 연료탱크[11], 항공기의 프레임, 고속전철 차체[12], 고속 선박의 패널[13] 및 자동차의 서스펜션 암 (suspension arm)등에 적용되고 있다. 또한 학교 및 연구소의 경우도 마찰교반부의 접합현상에 대한 논문이 다수 보고 되고 있다. 국내의 경우 기본적인 접합부특성에 대한 연구는 진행되고 있으나[14-21] 응용연구 및 실용화연구가 매우 부족한 상황이다.

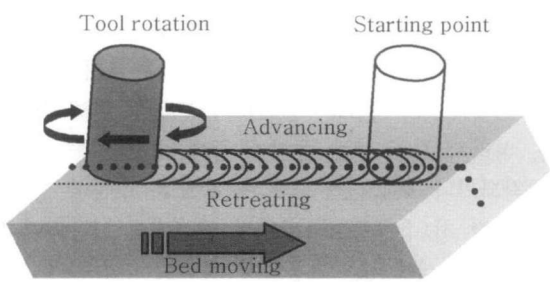

Fig. 1 Schematic illustrations of friction stir welding process and geometry of welded specimens

현재까지 마찰교반접합에 관련한 논문의 경우, 접합시 접합온도이력에 민감한 제2상들의 거동 및 기계적인 특성의 변화가 심한 석출경화형 알루미늄 합금에 대해 주로 보고 되었지만[22], 가공경화형 합금에 대한 논문은 상대적으로 적으며 이에 대한 연구는 미흡한 실정이다. 따라서 본 연구에서는 선박용 구조 부재, 연료 탱크, 고층 건물의 외장 등 다양한 구조용 재료로 사용되고 있으며, 우수한 부식 저항성, 기계적인 특성 및 탁월한 성형성을 보유하고 있어, 특히 자동차 차체 재료로서 각광을 받고 있는 5052 알루미늄 합금의 마찰교반접합부의 미세조직 및 경도 변화에 미치는 접합인자의 영향을 조사하여 접합부 인장특성과 비교 검토하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 실험에 사용된 재료는 5052 알루미늄 압출재(4t)를 사용했으며, 재료의 화학적 조성은 Table 1에 나타낸다. 접합용 시편의 크기는 길이 140, 너비 70mm로 가공하여 마찰교반접합을 실시하였다.

2.2 실험방법

2.2.1 접합 조건

마찰교반접합은 상업적으로 사용되고 있는 밀링 장비를 개조하여 행하였으며 접합하고자하는 시험편을 밀링 베드 (bed)위에 탄소강으로 제작한 백킹 플레이트 (backing plate)로 견고히 고정시켰다. 마찰교반접합 변수로는 접합 툴의 회전수, 베드의 이송속도, 툴과 시편이 이루는 전진각 및 툴의 형상 등이 있다. 본 연구에서는 접합 툴의 전진각을 3° 로 고정시키고 툴의 회전수과 이송속도를 변수로 정하여 접합 변수에 따른 접합부의 특성을 연구 하였다. 본 실험에 적용된 마찰교반접합의 조건을 Table 2에 나타낸다.

2.2.2 용접부의 미세조직 관찰

각각의 조건에서 접합을 실시한 후 접합부 단면을 광학 현미경 (Optical Microscopy)과 투과 전자현미경 (Transmission Electron Microscopy)을 이용하여

Table 1 Chemical compositions of 5052 Al alloy(wt %)

Mg	Cr	Fe	Mn	Mg	Cr	Al
2.5	0.25	0.4	0.1	0.2	0.15	balance

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

Table 2 Friction stir welding conditions applied in this study

Parameters	condition
Tool material	SKD 11
Angle of tool	3°
Rotation speed(rpm)	800, 1600, 2500
Welding speed(mm/min)	127, 267, 567

각각의 영역별 미세조직을 관찰하였다. 광학현미경 관찰을 위해 일반적인 연마법을 이용하여 시편을 제작하였고 증류수, 불산, 염산, 질산액으로 구성된 켈러 에칭액을 이용하여 시편을 부식 시킨 후 결정립형상 등을 관찰하였다. 접합부의 각 영역의 TEM을 이용한 미세구조 관찰을 위해 방전가공기를 이용하여 직경 3mm의 봉 형태로 시편을 채취한 후 일정두께로 절단하여 연마하였다. 기계적인 연마법으로 약 30 μm 박막을 형성시킨 후 최종적으로 쌍익식 전해연마기 (Twin Jet Polisher)를 이용하여 TEM 관찰 영역을 만들었다. 전해 연마는 나이탈 액을 이용하였으며, 액체질소를 이용하여 연마액의 온도를 -50도로 유지한 후 TEM 관찰용 투과 시편을 제작하였다. 투과전자 현미경은 300KV 고 분해능 투과 전자현미경 (HRTEM)을 이용하였으며 접합부내의 형성된 상은 EDS (Energy Dispersive Spectroscopy)를 이용하여 분석하였다.

2.2.3 기계적 특성 평가

접합부 수직 단면의 경도 분포는 마이크로 비커스 경도기를 사용하였으며 측정 조건은 100g의 하중으로 10초 동안 실시하였다. 각각의 조건에 따른 접합부의 인장강도를 평가하기 위해 접합부에 수직한 방향으로 인장시편을 가공한 후 5mm/min의 실험속도로 인장시험을 실시하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 미세조직

Fig. 2는 각각의 접합조건에서 접합을 행한 후 접합부 수직 단면의 마크로 조직을 나타낸다. 접합부의 형상은 일반적인 용융접합부와는 상당히 다르고, 용융과 관련한 조직은 형성되지 않았으며 고상상태에서 접합이 이루어 졌음을 확인 할 수 있다. 접합부의 형상은 반원 (semisphere) 및 와인컵 (wine cup)형상을 나타내며 접합부 윗면이 아랫면에 비해 넓음을 알 수 있다. 이는 접합부의 윗면 (upper surface)이 회전하고 있는 접합툴의 숄더(shoulder)부위와 직접적인 접촉으로 인해

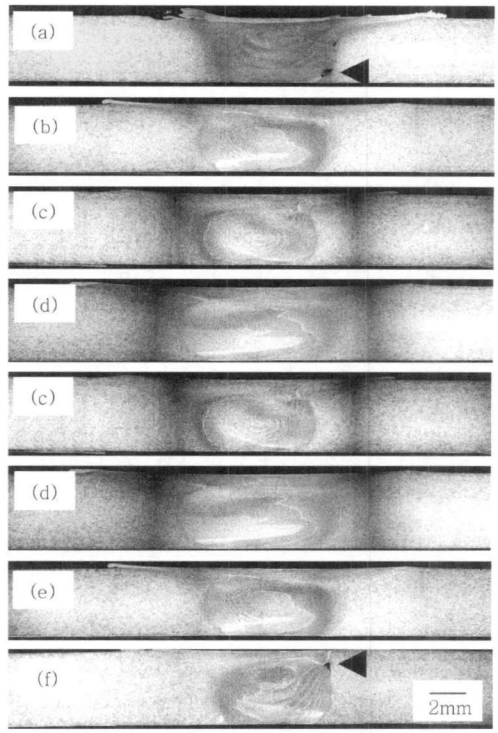

Fig. 2 Macrostructural variation with various welding conditions: (a) 800 rpm, (b) 1600 rpm, (c) 2500 rpm : constant welding speed 267 mm/min (d) 127 mm/min, (e) 267 mm/min, (f) 507 mm/min : constant tool rotation speed 1600 rpm

극심한 소성 변형을 받기 때문이다. 전체적으로 넓은 접합 범위에서 결함이 없는 우수한 접합부를 얻을 수 있었으나, 저 입열량 접합 조건인 낮은 툴 회전속도 (a)와 빠른 접합속도 (f)의 조건하에서는 접합부의 천이영역 (transient zone)에서 결함이 존재함을 알 수 있다. 본 연구 그룹의 실험 결과에 의하면 알루미늄 합금의 마찰교반접합부에 생성되는 결함은 크게 두 가지의 원인에 기인한다고 판단하였다[23]. 첫 번째의 원인은 접합 툴에 의해 접합하고자 하는 재료에 유입되는 입열량 부족 및 빠른 냉각 속도에 기인한다. 일반적으로 접합 툴의 회전속도가 느린 경우 접합부에 부가되는 입열량이 부족하고 용접속도가 빠르면 접합 후 접합부의 냉각속도가 빠르다. 따라서 이러한 조건에서는 접합부내의 재료의 소성유동 및 마찰열이 충분하지 못해 결함이 존재하게 된다. 두 번째는 과도한 접합 툴의 회전속도로 인한 접합부내의 재료가 과도하게 교반되어 접합 툴 숄더부의 압착이 효과적으로 이루어지지 못해 접합부 윗면으로 과도한 재료의 배출로 인한 접합부내의 결함이 생성되는 경우이다. 알루미늄 합금의 경우 툴 회전수 3600 rpm 이상의 조건에서 이러한 현상이 관찰되

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

었다. Fig. 2 (a)와 (f)의 조건에서 관찰된 결함은 첫 번째 원인으로 인해 생성된 것으로 사료된다.

Fig. 3은 2500rpm 툴 회전수, 267mm/min 접합속도의 조건에서 접합한 접합부의 각 영역별 미세조직을 나타낸다. 일반적인 마찰교반접합부 조직분류와 일치하는 조직을 나타내고 있음을 알 수 있다. 마찰교반접합부는 각각의 열 및 기계적인 영향에 의해 교반부(Stir Zone), 열 및 기계적인 영향부 (Thermo-Mechanically Affected Zone), 열 영향부(Heat Affected Zone) 와 모재 (Base Metal)로 분류된다. 교반부 (a)는 모재에 비해 미세한 등축정의 결정립형태를 나타내고 있음을 알 수 있다. 교반부는 회전하는 툴과 재료의 상호작용으로 인한 마찰열 및 극심한 소성변형에 기인한 재결정 조직이 형성된다. 이러한 재결정 조직은 재료가 소성변형을 받는 동안 형성되기 때문에 동적 재결정 (dynamic recrystallization)조직이며 접합 툴이 지나고 난 후 냉각하는 동안에는 접합열에 의해 정적 결정립성장 (static grain growth)을 거치게 된다[10,24]. 전체적으로 미세하고 균일한 결정립을 나타내고 있지만 부분적으로는 조대한 조직이 형성됨을 통해 접합 후 냉각 시 교반부에 부분적으로 비정상결정립성장(abnormal grain growth, secondary recrystallization)이 일어났음을 예상할 수 있다. 열 및 기계적인 영향부 (b)의 경우, 일반적으로 툴의 회전에 기인한 연신된 조직 및 미시적으로는 동적회복(dynamic recovery)이 형성된다고 알려지고 있으며 입내에는 많은 저 경각 입계의 아 결정립 셀(subgrain cell)이 형성된다고 보고 되고 있다[22]. 그러나 본 실험에서는 현저하게 연신된 조직은 관찰 되지 않았으며 재결정이 일어난 영역과 모재와 유사한 조직의 천이 영역(transient zone)의 형태로 관찰됨을 알 수 있다. 이는 5000계 가공경화형 합금이 타 알루미늄 합금계에 비해 소성유동에 대한 저항성이 높기 때문으로 사료된다. 접합 중심부로부터 약 5mm 떨어진 영역 (c)은 모재와 유사한 결정립 크기를 가지고 있으며 툴의 접촉 없이 마찰열의 영향만을 받는 영역이다. 그러나 마찰열의 영향에도 현저한 결정립성장은 관찰되지 않았다.

Fig. 4는 모재(a, b)와 툴의 회전수에 따른 교반부의 조직을 TEM을 이용하여 관찰한 사진이다. (a)와 (b)는 각각 모재의 결정립경계 (grain boundary) 및 입내 (intragranular)의 조직을 나타낸다. 5052 알루미늄 합금 모재의 경우, 제한시야전자회절상(Selected Area Electron Diffraction Pattern) 및 조직 관찰을 통해 중간상(intermediate phase)의 형태는 관찰할 수 없었으며 결정입계 및 입내에 전위 원(dislocation loop)형태의 전위들이 관찰됨을 알 수 있

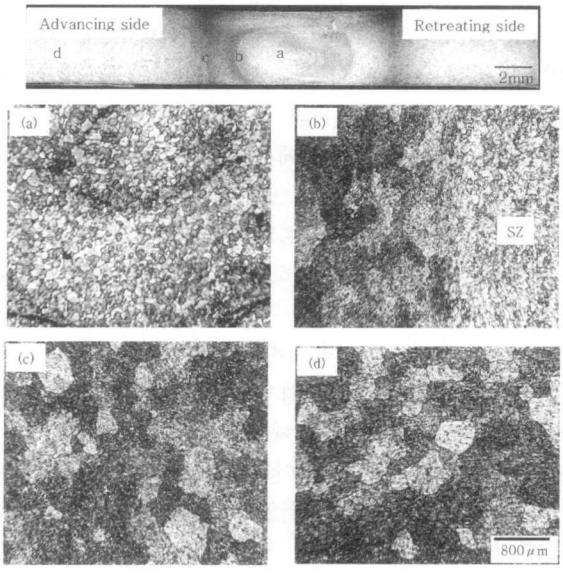

Fig. 3 Cross-sectional macrostructures of the weld zone and related microstructures indicated in the macrograph : (a) SZ (Stir Zone), (b) TMAZ (Thermo-Mechanically Affected zone), (c) HAZ (Heat Affected Zone), (d) B M (Base Metal)

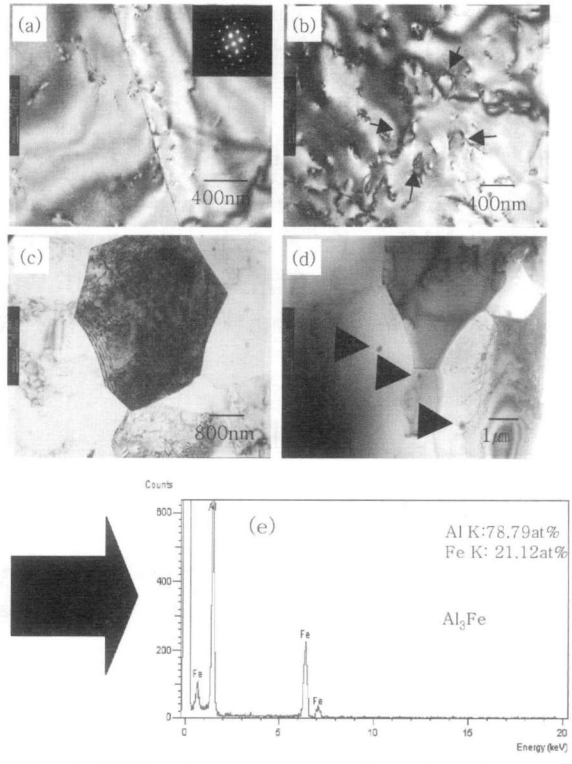

Fig. 4 TEM microstructures of each region and EDS analysis of particles (→: dislocation loop, ▶: particle) (a) and (b) : BM of 5052, (c) SZ of 800 rpm, (d) SZ of 2500 rpm and (e) EDS spectrum

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

다. 각 결정립간의 이미지 컨트라스트를 이용하여 간접적으로 방위차를 관찰한 결과 각 결정립간 컨트라스트(grain contrast)차이가 작은 것으로 각 결정립은 저경각 입계(low angle grain boundary)를 이루고 있다고 판단하였다. 툴 회전수 800 rpm인 경우 (c)의 교반부는 모재에 비해 현저하게 미세화된 등축정 결정립이 관찰됨을 알 수 있다. 결정립 크기는 1.6 μm 정도였으며 재결정립 내에 다수의 엉킨 전위(dislocation tangle)가 관찰되었다. 또한 각 결정립간 컨트라스트의 차이가 모재에 비해 현저하게 큼을 알 수 있다. 일반적으로 재료가 열간 및 냉간 가공공정을 거친 후 재결정 온도에서 일정시간 유지시킨 경우, 재료는 회복 단계를 거친 후 소성변형동안 재료에 축적된 에너지 (stored energy)가 크기 때문에 불안정(unstable)하여 재결정의 핵 생성이 용이하다. 따라서 회복 단계 후 재결정 핵생성 및 재결정립들이 성장하게 된다. 이 경우 재결정립내에는 전위 등 결함이 없는 결정립이 주로 관찰된다고 알려 졌다[25]. 그러나 마찰교반접합부의 경우 극심한 소성변형 및 마찰열에 의해 재결정이 이루어지지만 결정립내에는 다수의 전위 셀 (dislocation cell), 엉킴 현상 및 고 경각 입계들이 관찰된다. 따라서 마찰교반접합부는 동적인 거동에 의해 재결정이 생성된다고 할 수 있다[10-22]. 재결정립계의 3중점에서 2면체 (bihedral) 입계가 주로 관찰되는데 이는 열간가공(hot working) 중의 동적 재결정에서 나타나는 특징이며, 재결정립의 변수가 6각형(hexagon, 6-sided grain)보다 많은 것으로 보아 결정립 성장 단계를 거친 것으로 사료된다. 또한 미세한 제 2상의 석출물들이 입내에 부분적으로 관찰됨을 알 수 있다. 툴 회전수 2500 rpm인 경우의 교반부 (d)는 모재에 비해 미세한 결정립을 나타내고 있으나 800 rpm인 경우와 비교해서는 결정립의 크기 및 형태가 불규칙하며 전위밀도가 감소함을 알 수 있다. 특이한 점은 모재 및 800 rpm인 경우 부분적으로 관찰되었던 미세한 제2상들의 밀도의 증가 및 조대화 현상을 관찰할 수 있었다. TEM-EDS를 통해 관찰한 결과 이러한 제2상은 Al과 Fe로 주로 구성됨을 알 수 있으며 정량 분석 및 상태도를 통해 Al_3Fe상으로 확인하였다. 툴 회전수 2500rpm은 상대적으로 접합부에 고 입열량을 부가하기 때문에 접합부의 온도가 상승하여 냉각도중에 Al 과 Fe가 반응하여 교반부에 석출이 일어났다고 사료된다. 2500 rpm의 조건에서 전위 밀도의 감소 및 불규칙한 재결정립의 분포는 높은 입열에 의한 냉각 도중 소둔 (annealing) 및 부분적인 비정상 결정립성장(abnormal grain growth)에 의한 것으로 판단된다. 이러한 비정상결정립성장은 교반부에서 동적 재결정에 의해 결정립내에 다수의 전위들이 생성되며 소성변형에 기인한 변형에너지가 축적되어 있기 때문이다. 따라서 다수의 전위 분포는 접합부에서 석출이 일어날 수 있는 석출시작점 (precipitation site)으로 작용하며 축적된 변형 에너지는 부분적으로 높은 전위밀도를 포함하고 있는 영역에서는 냉각 도중, 다른 미세한 등축정의 결정립과는 다르게 동일한 냉각 속도에서 결정립이 비정상적으로 조대해졌다고 사료된다.

3.2 접합부의 경도 분포 및 결정립경

Fig. 5는 각각의 접합조건에 따른 접합부 단면의 경도 분포를 나타낸 그래프이다. 5052모재는 약 58Hv 경도를 나타내며 접합부의 경도 분포는 접합 조건 및 접합부 각 영역에 따라 상이한 열 및 기계적인 영향을 받기 때문에 약간의 차이가 존재한다. 전체적으로 저입열량의 조건인 느린 툴 회전속도 및 빠른 접합속도의 조건을 적용시킨 경우가 그 외의 조건에 비해 교반부의 경도가 약간 상승하였다. 특히 툴 회전수 800 rpm인 경우는 약 62Hv 정도의 경도를 나타내고 있는데, 이는 앞서 TEM 사진을 통해 알 수 있듯이 교반부에 다수의 전위 엉킴 조직 및 고 경각 입계를 형성시키는 저 툴 회전수 조건이 전위밀도가 낮고 약간 조대한 결정립을 포함하고 있는 고 입열량 조건에 비해 경도가 높음을 확인 할 수 있으며 Al_3Fe의 제2상의 밀도차는 경도 분포에 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있다. 접합부 중심으로부터 약 5mm 정도 떨어진 영역이 모든 접합조건에서 경도가 약간 저하하였다. 본 실험에 사용된 5052 알루미늄 합금은 H112(400℃열간압출 후 공냉처리)의 열처리 조건에서 제조되었기 때문에 열영향부에서 접합 시 발생하는 접합열에 의한 어닐링(annealing) 효과에 기인한다고 사료된다.

알루미늄 합금의 교반 접합부의 경도 분포는 석출경

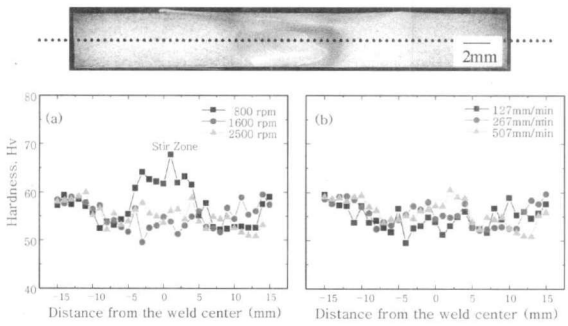

Fig. 5 Hardness distribution near the weld zone with various welding conditions: (a) tool rotation speed, (b) welding speed

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

화형 합금의 경우, 접합 입열에 의한 석출물의 고용 등의 원인으로 모재에 비해 현저하게 낮아지고, 가공경화형 알루미늄 합금의 경우는 모재와 거의 유사하거나 접합 조건에 따라서는 모재 이상의 경도값을 나타낸다[26]. 본 실험의 결과도 이와 유사한 경향을 나타내고 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 각각의 접합조건에 따른 교반부의 결정립크기와 경도와의 관계를 나타낸 그래프이다. 교반부의 경도(Hv)는 결정립크기 ($d^{-1/2}$)에 선형적으로 비례하며 Hall-Petch식을 만족하고 있음을 알 수 있다. 일반적으로 금속재료는 항복강도(σ_y)와 결정립크기(d)의 관계를 나타내는 Hall-Petch 식 ($\sigma_y = \sigma_0 + K_y d^{-1/2}$)을 만족 한다[27-28]. 이 관계식에 의하면 항복강도는 결정립의 크기가 감소할수록 증가한다고 알려 졌다. 현저한 가공경화효과가 없다면, 재료의 경도값은 항복강도와 $Hv \fallingdotseq 3\sigma_y$의 관계를 만족한다고 보고하고 있다[28]. 따라서 Hall-Petch식은 결정립크기와 경도의 관계를 나타내는 다음 식(1)으로 수정 될 수 있다.

$$H_v = H_0 + K_H \; d^{-1/2} \qquad (1)$$

여기서 H_0 와 K_H는 상수이며 재료의 특성 및 가공방법에 따라 달라지는 값이다. 본 실험에서 서로 다른 접합 조건하에서 교반부의 결정립크기는 1.4~2.0 μm 정도로 변하며 이에 따른 경도도 다양하게 변화한다. 선형회귀 분석 및 외삽법을 통해 5052 알루미늄 합금의 교반부의 경도 및 재결정 결정립크기는 다음과 같은 관계로 Hall-Petch 방정식을 만족한다.

$$H_v = 48.12 + 23.32 \; d^{-1/2} \qquad (2)$$

Hall-Petch 방정식의 기울기(K_H)는 알루미늄 합금의 경우, 전위밀도는 물론이고 고용원소, 결정립의 분포 등에 영향을 받는다고 알려져 있다. 특히 5000계 고용강화형 알루미늄 합금의 경우 알루미늄 기지 내에 고용된 Mg이 전위의 이동을 방해하여 기울기가 상승된다고 보고 되고 있다[30]. 본 실험의 5052 알루미늄 합금의 경우는, 마찰교반접합한 1050 알루미늄 합금의 기울기 값[26], (K_H= 약 19 $Hv\mu m^{-1/2}$)에 비해 현저하게 높은 값을 나타내고 있는데 제2상의 생성은 미미하기 때문에 알루미늄 기지내에 고용되어 있는 Mg에 의해 전위 이동의 방해가 주 원인이라고 사료된다. 따라서 위의 관계식을 통해 마찰교반접합된 5052 알루미늄 합금의 교반부의 경도는 재결정립크기에 영향을 받는다고 사료된다.

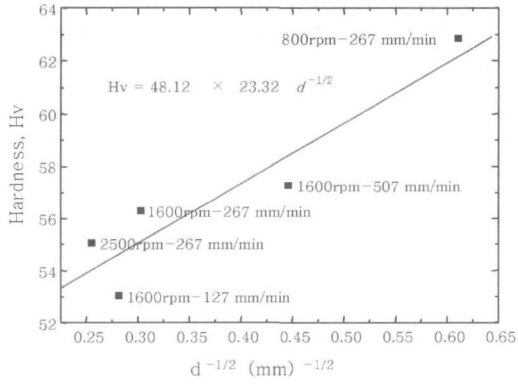

Fig. 6 Relationship between hardness and grain size in the stir zone with various welding conditions

3.3 접합부의 인장특성

Fig. 7은 각각의 조건별 접합부 수직방향의 인장강도 및 연신율을 나타내는 그래프이다. 접합부에 결함이 존재하는 800 rpm, 267mm/min 인 경우와 1600 rpm, 507 mm/min 인 경우를 제외하고 모재 (인장강도: 198MPa, 연신율: 15%)와 거의 유사한 인장특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 접합부에 결함이 없는 조건 중 과도한 입열량 조건인 2500rpm, 267mm/min 인 경우를 제외하고 모두 190MPa이상의 인장강도를 나타내고 있음을 알 수 있으며, 연신율의 경우도 13% 이상이었다. 또한 접합조건에 따른 인장시험 후 시험편의 파단위치도 Fig. 8에 나타냈듯이 결함이 존재하는 조건 (a, f)을 제외하고는 모두 접합부에서 약 5mm이상 떨어진 열영향부에서 파단이 발생함을 알 수 있다. 즉 경도가 가장 낮았던 영역에서 파단이 일어났다. 접합부의 인장시험 테스트결과, 적절한 접합조건하에서 접합을 한 시험편은 모재와 거의 유사한 기계적인 특성을 얻을 수 있었으며, 5052 알루미늄 합금에 마찰교반접합법을 적용하여 매우 넓은 범위에서 결함이 없는 접합부를 얻을 수 있었다.

4. 결 론

가공경화형 5052 알루미늄 합금을 마찰교반접합법을 적용하여 툴 회전수, 접합속도의 변화에 따른 접합부 특성을 평가하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 본 실험에 적용된 여러 접합 조건 중, 저 입열량 조건인 낮은 툴 회전수 및 빠른 용접속도 하에서 접합을 행한 경우, 접합부의 천이영역(transient region)에서 결함이 존재하였으나 그 이외의 조건에서는 결함이 없는 건전한 접합부를 얻을 수 있었다.

2) 5052 마찰교반접합부는 일반적인 교반접합부의

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

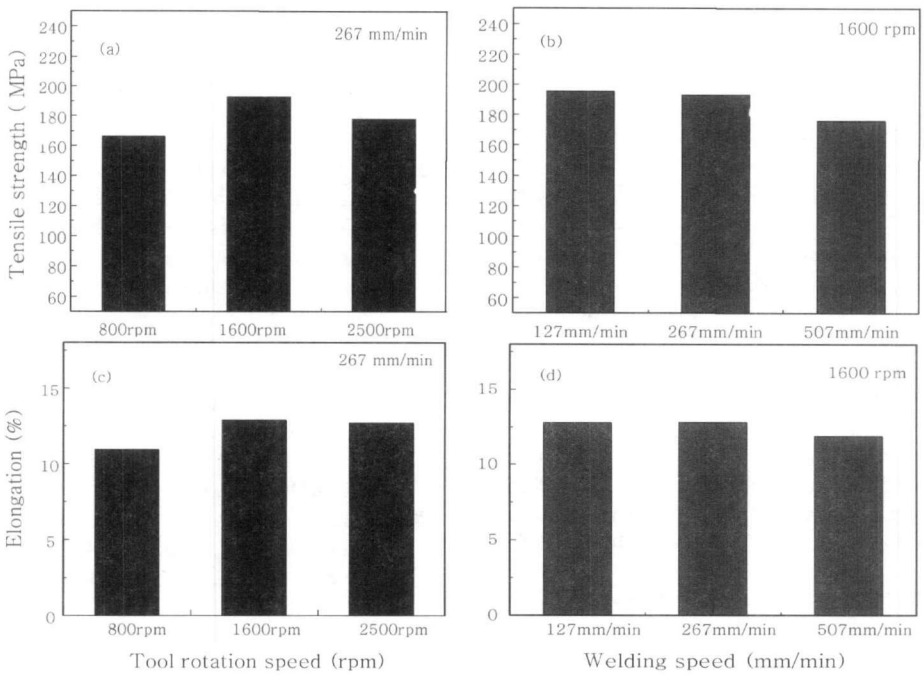

Fig. 7 Tensile strength and elongation with various welding conditions

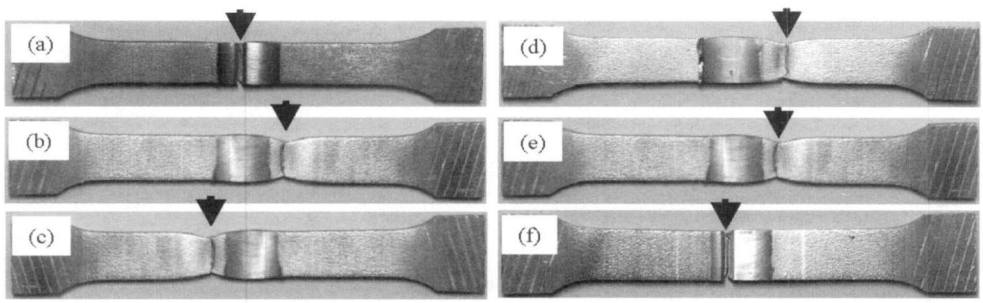

Fig. 8 Fractured specimens after transverse tensile test with various welding conditions (a) 800 rpm, (b) 1600 rpm, (c) 2500 rpm : constant welding speed 267mm/min (d) 127 mm/min, (e) 256 mm/min, (f) 507 mm/min : constant tool rotation speed 1600 rpm

미세조직을 나타냈으며 열 및 기계적인 영향부(TMAZ)의 경우 현저한 재료의 연신 없이 미세한 재결정립으로 이루어진 교반부와 모재와 유사한 조직의 사이의 천이 영역(transient region)을 이루어져 있다.

3) 5052 모재의 경우, 부분적으로 전위 원 (dislocation loop)을 포함하며 각 결정립간은 저 경각 입계로 구성됨을 알 수 있다. 교반부(SZ)는 모재와는 달리 미세한 동적 재결정입이 관찰되었으며 입내에서 고 밀도의 엉킨 전위 구조(dislocation tangle) 및 고 경각 입계를 나타내고 있었는데 이러한 경향은 낮은 툴 회전수인 경우 더욱 현저하였다.

4) 800 rpm의 툴 회전수 조건의 교반부 경도는 모재에 비해 상승하였는데 이는 모재에 비해 미세한 결정립크기, 고 전위 밀도 및 고 경각 입계 등과 관련이 있다.

5) 교반부에 결함이 존재하는 접합조건을 제외하고는 전 접합 조건하에서 모재와 거의 유사한 인장강도 및 연신율을 나타냈으며 파단은 접합부 중심에서 약 5mm 정도 떨어진 영역에서 발생하였다.

참 고 문 헌

1. Y.S. Sato : アルミニウム 合金 Friction Stir 接合部の 材料組織學的 研究, Doctorial Thesis (in Japanese)
2. C.J. Dawes : Weld. Met. Fabrication, **63** (1995), 13-16
3. C.J. Dawes and W.M.Thomas : Weld. J., **75** (1996), 41-45
4. C.G. Rhodes, M.W.Mahoney, W.H. Bingel, R.A. Spurling and C.C.Bampton : Scripta Mater., **36** (1997), 69-75
5. G. Liu, L.E.Murr, C-S Niou, J.C.McClure and F.R.

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.

Vega : Scripta Mater. , **37** (1995), 355-361
6. L.E.Murr, G. Liu and J.C.McClure : J. Mater. Sci., **33** (1998), 1243-1251
7. M.W. Mahoney, C.G.Rhodes, J.G.Flintoff, R.A. Spurling and W.H. Bingel : Metall. Mater. Trans., **29A** (1998), 1955-1964
8. Y.S.Sato, H. Kokawa, M.Enomoto and S.Jorgan : Metall. Mater. Trans., **30A** (1999), 2429-2437
9. K.V.Jata, K.K.Sankaran and J.J. Ruschau : Metall. Mater. Trans., **31A** (2000), 2181-2192
10. K.V.Jata and S.L.Semiatin : Scripta Mater., **43** (2000), 743-749
11. M. R. Johnsen : Weld. J., **78** (1999), 35-39.
12. H. Okamura, K. Aoba, and M.Ezumi : J. Jpn. Inst. Light Met., **50** (2000), 166-171
13. S. Kallee, D. Richardson and I. Henderson : Schweissen Schneiden (Welding cutting), **49** (1997), 904-909.
14. Wonbae Lee, Jongwoong Kim, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : Mater. T. (JIM), **44-5** (2003), 917-923
15. Wonbae Lee, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : Scripta Mater., **49** (2003), 423-428
16. Wonbae Lee, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : Mater. Sci. Eng., **A 355** (2003), 154-159
17. Wonbae Lee, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : Mater. Sci. Tech., **19** (2003), 785-790
18. Wonbae Lee, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : J. Meter. Sci, **38** (2003), 4183-4191
19. Wonbae Lee and Seungboo Jung : Mater. Lett., **58** (2004), 1041-1046
20. Woongseong Chang, Hansur Bang, Seungboo Jung, Yunmo Yeon, Heungju Kim and Wonbae Lee : Mater. Sci. Forum, **426-432** (2003), 2953-2958
21. Wonbae Lee, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : Mater. Sci. Tech., **19** (2003), 1513-1518
22. J.-Q.Su, T.W.Nelson, R. Mishra and M. Mahoney : Acta Mater., **31-3** (2003), 713-729
23. Wonbae Lee, Yunmo Yeon and Seungboo Jung : Mater. T. (JIM) in press
24. Y. S. Sato, H. Kokawa, K. ikeda, M. Enomoto, S. Jorgan and T. Hashimoto : Metall. Mater. Trans., **A32** (2001), 941-948
25. F.J.Humphreys and M. Hatherly : Recrystallization and Related Annealing Phenomena(1st Edition), PERGAMON press, 1995, 1-9
26. Y.S.Sato, M.Urata, H.Kokawa and K.Ikeda : Mater. Sci. Eng., **A354** (2003), 298-305
27. E.O.Hall : Proc. Phys. Soc. London, **643** (1951), 747
28. N.J.Petch : J. Iron Steel Inst. London, **173** (1953), 25
29. M.F.Ashby and D.R.H. Jones : Engineering Materials 1, PERGAMON press, 1980, 105
30. H.Hasegawa, S.Komura, A.Utsunomiya, Z.Horita, M.Furukawa, M.Nemoto and T.G.Langdon : Mater. Sci. Eng., **A265** (1999), 188-196

Copyright (C) 2003 NuriMedia Co., Ltd.