KS5J32 Al합금 마찰교반접합부의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향

윤태진* · 김상주* · 김남규** · 송상우**† · 강정윤****

*부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터

**한국기계연구원 부설 재료연구소

***부산대학교 재료공학부

The Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Welds of KS5J32 Al Alloy

Tae-Jin Yoon*, Sang-Ju Kim*, Nam-Kyu Kim**, Sang-Woo Song**† and Chung-Yun Kang****

*National Core Research Center, Pusan National University, Busan 609-735, Korea

**Korea Institute of materials Science(KIMS), Changwon 642-831, Korea

***Pusan National University, Busan 609-735, Korea

†Corresponding author : swsong@kims.re.kr

(Received October 7, 2011 ; Revised October 19, 2011 ; Accepted October 27, 2011)

Abstract

The effect of welding condition on tensile properties of KS5J32 Al Alloy was investigated under various welding conditions. The 1.6 mm thick KS5J32 alloy sheets were joined by friction stir welding (FSW) technique with butt joint. The tool rotation speeds were 1000, 1250 and 1500 rpm, and the welding speeds were varied within the range from 100 to 600 mm/min. Voids mainly occurred at the advancing side of the tool probe, when the tool rotation speed was low, due to insufficient materials flow. When the weld pitch exceeded 0.4 mm/rev, voids were observed under all welding conditions and the area of voids increased with increasing weld pitch. For void-free specimens, fracture always occurred at base materials. However voids affected the location of fractures, base metal or welded zone, when the voids existed within the welds.

Key Words : Friction stir welding, A5023, KS5J32, Weld pitch

1. 서 론

최근 자동차산업은 이산화탄소 및 NO_x 배출에 대한 엄격한 규제에 직면하여 중량감소가 자동차 산업의 주요한 문제가 되고 있는 반면, 각종 첨단기기들의 장착과 충돌특성, 운전성 및 안정성을 향상시키기 위하여 자동차의 중량은 증가될 수 밖에 없는 경향도 있다. 따라서 Al 합금의 사용이 이러한 특성을 유지하면서 자동차의 중량감소 및 연비향상에 기여할 수 있는 가장 유효한 재료로서 제시되어 왔고, 마찰교반접합은 Al합금의 용접에 관한 문제를 해결할 수 있는 프로세스로

사용되고 있다¹⁾.

자동차용 Al 합금의 연구 및 개발은 1970년대부터 시작되었고, 유럽, 북미, 일본에서 서로 다른 방향으로 개발되었다. 유럽 및 북미에서는 2000계 및 6000계 Al 합금을 중심으로 연구되어 A2036, A6111, A6016, A6022 합금이 사용되어 왔으며, 일본에서는 5000계 합금을 중심으로 연구되어 A5022, A5023과 같은 합금이 개발되었다.

5000계 Al 합금 중 널리 사용되는 KS5J32 합금은 Al-5.5Mg-0.3Cu의 화학조성을 가지고 있으며, 일본의 Kobe철강사에서 개발한 재료로서 세계알루미늄협회 분류 중 A5023에 해당한다. 자동차 도어의 내부 패널

로 사용하기 위하여 개발되었으며, 연신율이 매우 높아 성형성이 뛰어나다. 기존 5000계 Al 합금과 마찬가지로 주된 강화기구는 Mg에 의한 고용강화이지만 도장 후 열처리공정에서 강도가 약간 증가하는 소부경화(bake hardening) 특성도 가지고 있다. 고순도 1차지급 알루미늄으로 제조하고, 적당한 Cu 함량을 가지고 있어 높은 성형성을 얻고, 중간 정도의 소부경화 효과를 얻을 수 있다. 보통 이러한 베이킹은 유럽 및 미국에서는 180-200℃에서, 일본에서는 170℃ 부근에서 20분 정도 수행한다^{2,3)}. 베이킹 전에는 인장강도와 항복강도가 각각 285와 135 MPa 정도이며, 베이킹 후에는 항복강도가 155 MPa 정도로 증가한다⁴⁾.

기존 5000계 Al 합금인 A5052나 A5182의 마찰교반접합에 대한 연구와 마찰교반 점접합에 대한 연구는 다수가 보고되어 왔으나⁵⁻⁹⁾, KS5J32 합금의 맞대기 접합에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 상기 합금들은 전형적인 5000계 비열처리계 Al 합금의 마찰교반접합 특성을 나타내고 있다. 즉, 교반부(Stirred zone, 이후부터 SZ로 표기), 열/기계적 영향부(Thermomechanically affected zone, 이후부터 TMAZ로 표기), 열영향부(Heat affected zone, 이후부터 HAZ로 표기)로 분류되는 미세조직을 가지고 있으며, 마찰교반접합 전에 가지고 있는 합금의 결정립 조직이나 집합조직이 변형을 심하게 받는 교반부에 미치는 영향은 거의 없다. 교반부에서는 심한 변형과 온도로 인하여 동적재결정이 발생하며^{10,11)}, 이때의 재료특성은 발생되는 최대온도와 냉각속도에 의하여 결정된다. 접합 전 템퍼(temper)가 O일 경우, 접합부의 특성은 모재와 유사하며, 교반부의 결정립이 미세해지면 강도가 모재보다 높다. 모재가 가공경화를 받은 상태이면 재결정된 교반부는 일반적으로 모재보다 경도값이 낮은 경향을 나타낸다. 이는 재결정으로 인하여 냉간가공으로 인한 가공경화가 제거되며, 결정립 미세화로 인한 강도 증가가 가공경화의 감소를 보상하지 못하기 때문이다¹²⁾.

HAZ의 경우 O 템퍼 합금은 거의 영향을 받지 않는데, 이는 재료가 이미 연화되어 있기 때문이며, 경도값의 저하는 발생하지 않지만, 결정립 성장의 가능성은 있다. 가공경화 합금의 HAZ는 접합중심부의 거리에 따라 미세조직이 변화하게 된다. 교반부와 가까운 지점에

서부터 완전한 재결정이 발생하고, 거리가 증가함에 따라 그 비율이 점차 감소하여 0이 되어 회복이 발생한다.

따라서 본 연구에서는 KS5J32 합금의 기본적인 마찰교반접합 특성에 대하여 조사하여 틀 회전속도 및 접합속도에 따른 기계적 특성의 변화를 알아보았다. 또한 마찰교반접합 시 발생하는 보이드 결함과 틀의 한 회전당 유동하는 재료의 양^{13,14)}을 나타내는 웰드피치(weld pitch)와의 관계를 살펴보았다.

2. 사용재료 및 실험방법

본 실험에 사용된 KS5J32-T4 시험편의 두께는 1.6 mm이며, 합금의 화학조성 및 기계적 특성을 표 1에 나타낸다. 마찰교반접합을 위하여 판재를 300mm×100mm의 크기로 가공한 후, 두 판재를 틀 회전속도 1000, 1250, 1500 rpm과 접합속도 100, 200, 300, 400, 500, 600 mm/min으로 접합조건을 변화시켜가며 맞대기 접합하였다. 사용된 틀의 솔더 직경은 8mm, 프로브 직경과 길이는 각각 3mm, 1.45mm이었으며, 원나사산 형태로 가공하여 사용하였다.

모재와 접합부의 조직 관찰을 위하여 각각의 접합조건으로 수행한 시험편을 접합부 축과 수직으로 절단한 후 연마하여 Keller시약을 이용하여 부식시킨 후, 실체현미경, 광학현미경으로 관찰하였다. 또한 주사전자현미경을 사용하여 조직 및 인장시험편의 파면을 관찰하였다.

접합부의 경도를 측정하기 위하여 각각의 접합조건으로 수행한 시험편을 접합축과 수직으로 절단한 후, 미소경도시험기를 사용하여 하중을 300 gf, 하중유지시간을 10초로 설정하여 경도를 측정하였다. SZ, TMAZ, HAZ 및 모재의 경도 분포는 판재 상부와 하부 표면으로부터 각각 500 μ m 떨어진 지점에서 400 μ m 간격으로 측정하였으며, 필요에 따라 간격을 좁혀 측정하였다.

맞대기 마찰교반접합부의 인장시험에 사용한 시험편은 접합 후 상부 및 하부 표면은 가공하지 않은 상태로 ASTM E8을 적용하여 가공하였고, 접합부의 축이 인장방향과 수직이 되게 가공하여 시험편 표점거리의 중심에 위치하도록 하였다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of the KS5J32-T4 base materials

Chemical Compositions (mass %)								Mechanical Properties		
Mg	Cu	Si	Fe	Mn	Zn	Ti	Al	Tensile Strength, MPa	Yield Strength, MPa	Elongation, %
5.68	0.20	0.11	0.09	0.01	0.03	0.02	Bal.	304	156	43

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 조직 및 결함

KS5J32 합금의 동종 맞대기 마찰교반접합을 1000, 1250, 1500 rpm에서 여러 접합속도로 수행한 후, 접합부의 단면조직을 관찰한 결과를 Fig. 1~3에 나타낸다. 각각의 틀 회전속도에서 접합속도가 빠른 경우, 전진부(advanced side)에서 A, B, C, D로 표시된 영역에서 결함이 관찰된다. Fig. 4는 이 결함의 형상을 파악하기 위하여 확대한 사진으로서, Fig. 1~3에 A, B, C, D로 표시된 영역의 광학현미경 조직(a, c, e, g)과 SEM 조직(b, d, f, g)을 나타낸 것이다. 결함은 재료의 유동부족으로 인하여 발생하는 보이드로서, 모두 전진부쪽 프로브의 모서리부에서 발생하는 것이 공

Fig. 1 Macrostructures of joints with welding speed at rotation speed of 1000 rpm: (a) 100 mm/min, (b) 200 mm/min, (c) 400 mm/min and (d) 600 mm/min

Fig. 2 Macrostructures of joints with welding speed at rotation speed of 1250 rpm: (a) 100 mm/min, (b) 200 mm/min, (c) 400 mm/min and (d) 600 mm/min.

Fig. 3 Macrostructures of joints with welding speed at rotation speed of 1500 rpm: (a) 100 mm/min, (b) 200 mm/min, (c) 400 mm/min and (d) 600 mm/min

Fig. 4 Optical microstructures and SEM structures. (a), (c), (e) and (g) : microstructures indicated by A, B, C and D in Fig. 1 and Fig. 2, (b), (d), (f) and (h) : SEM structures

통적인 특징이며, 회전속도가 느리면서 접합속도가 빠른 경우에는 Fig. 4(c)와 같이 전진부쪽 모서리 부위에서 프로브 밑 부분의 중심까지 걸쳐 발생하고 있다.

표 2는 접합조건과 보이드의 발생 관계를 정리한 것이다. 틀 회전속도가 증가할수록 보이드 발생 확률이 낮은 것을 알 수 있다. 일반적으로 마찰교반접합에서 접합인자로서 접합속도(V)를 틀의 회전속도(N)로 나눈 회전피치(revolutionary pitch)^{15,16)}를 사용하고 있으

Table 2 Formation of void with welding condition

Rotation speed (rpm)	Welding speed (mm/min)					
	100	200	300	400	500	600
1000	●	●	●	○	○	○
1250	●	●	●	●	○	○
1500	●	●	●	●	●	○

● void free ○ void formation

며, 톨의 한 회전 당 진행거리를 나타낸다. 본 실험에서는 이에 대한 용어를 웰드피치(weld pitch)로 통일하였다. 일반적으로 동일한 톨 회전속도에서 웰드피치가 작을수록 입열 및 최대 온도가 높으며, 동일 웰드피치에서 톨 회전속도가 증가할수록 단위 길이당 입열은 감소하고 최대 온도는 증가한다¹⁷⁾.

Fig. 5는 웰드피치와 접합결함 발생과의 관계를 나타낸 것으로, 웰드피치가 0.4 mm/rev 이상인 경우에 보이드가 발생함을 알 수 있다. 한편 Fig. 6은 웰드피치와 보이드 면적과의 관계를 정리한 것이다. 여기서 보이드 면적은 각 조건 당 5시야에서 100배율로 면적을

Fig. 5 Effect of weld pitch on the formation of void **Fig. 6** Void size with welding condition

측정하여 평균한 것이다. 보이드 크기는 웰드피치와 직선적인 상관관계가 없지만, 각 회전속도 별로 웰드피치가 증가함에 따라, 결함 크기가 증가하는 경향을 나타내고 있다. 웰드피치가 크면, 톨의 한 회전 당 전진한 거리가 상대적으로 길기 때문에 톨이 전진한 후 생기는 빈 공간을 채우기 위해서 요구되는 재료의 양이 더 많아지지만, 그 때의 접합 최대 온도는 감소하게 된다¹⁸⁾. 그에 따라 재료의 유동응력은 높아져 소성유동이 어렵기 때문에 재료가 충분히 교반되지 않고, 프로브의 빈 공간을 완전히 채울 수가 없어서 보이드가 발생한다고 생각된다. 또한 웰드피치 증가에 따라 톨의 전진거리의 증가로 인해서 빈 공간의 면적도 커지지만, 유동응력은 높아져 재료의 유동성은 저하하기 때문에 보이드의 크기도 증가되는 것으로 생각된다.

3.2 인장성질

Fig. 7은 회전속도와 접합속도에 따른 인장강도 및 연신율의 변화를 나타낸 것이다. 1250 rpm 이상의 회전속도에서는 접합속도에 따른 인장강도 및 연신율의 변화가 거의 없지만, 1000 rpm 회전속도에서는 접합속도가 증가할수록 인장강도와 연신율이 급격히 감소하는 것을 볼 수 있다. Fig. 8은 1000 rpm의 톨 회전

Fig. 7 Tensile properties with rotation speed and welding speed

Fig. 8 Fractured position of the specimens (1000 rpm) after tensile test; (a) base metal (100 mm/min), (b) bonded interlayer (400 mm/min)

Table 3 Fractured position with rotation speed and welding speed

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)					
	100	200	300	400	500	600
1000	BM	BM	BM	BI	BI	BI
1250	BM	BM	BM	BM	BM	BI
1500	BM	BM	BM	BM	BM	BM

속도로 마찰교반접합하고 인장시험을 수행한 후 발생한 전형적인 파단형상을 나타낸 것으로, 접합속도에 따라 모재 (a)에서 또는 접합부 (b)에서 파단 되었다. 표 3은 각 접합조건에 따른 파단위치를 나타낸 것이다. 이 표로부터 1500 rpm의 회전속도로 접합된 시험편은 모두 모재에서 파단 되고, 1250 rpm의 회전속도에서 접합속도가 빠른 600 mm/min의 시험편과 1000 rpm에서 400 mm/min 이상의 빠른 접합속도로 접합된 시험편은 접합부에서 파단 되는 것을 알 수 있다. 한편 모재에서 파단 된 모든 시험의 파단위치는 동일하게 접합부에서 약간 떨어진 모재(Fig. 8의 (a))에서 파단 되었다. Fig. 9는 웰드피치와 인장강도와의 관계를 정리한 것이며, 보이드 존재 유무와 파단위치와의 관계도 함께 표시하였다. 여기서 오픈 심볼(○, ◇, □)은 보이드가 존재하는 시험이고, ●는 1000 rpm, ■는 1250 rpm, ◆는 1500 rpm의 회전속도를 나타내며, 화살표로 표시된 것은 접합부에서 파단된 것을 나타낸다. 이 결과를 살펴보면 낮은 1000rpm 회전속도에서는 웰드피치가 증가함에 따라 인장강도가 감소하며, 이것은 보이드 결합의 형성과 관계가 있음을 알 수 있다. 1250과 1500 rpm의 높은 회전속도에서는 웰드피치와 관계없이 거의 일정한 인장강도 및 연신율을 나타내고 있다.

틀 회전속도가 높아짐에 따라 최대 온도가 증가하고, 따라서 재료의 유동이 원활하게 되어 보이드의 형성이 억제되어, 모두 모재에서 파단(Fractured at base metal:BM)되었기 때문에 이들 시험편들의 인장강도는

Fig. 9 Plots of tensile properties versus the weld pitch

거의 동일하다. 보이드가 존재하는 경우, 보이드가 발생하는 부분을 따라 즉, TMAZ와 SZ의 경계가 되는 접합부에서 파단(Fractured at bonded interlayer:BI) 되는 것이 대부분이지만, 모재에서 파단 되는 것도 있었다.

특히 접합부에서 파단 된 시험편은 접합조건에 따라 인장성질에 차이가 났다. 즉 1250 rpm-600 mm/min의 시험편의 인장강도 및 연신율은 모재에서 파단된 것보다 조금 낮지만, 1000 rpm-400 mm/min 이상 속도의 시험편들은 접합속도가 증가할수록 강도가 급격히 저하하는 것을 볼 수 있다.

이와 같이 1000 rpm의 회전속도에서 접합속도가 증가할수록 인장강도 및 연신율이 감소하는 원인을 파악하기 위하여 인장시험편의 파면을 관찰하여 보았다. Fig. 10과 Fig. 11은 1000 rpm에서 각각 400mm/min와 600mm/min의 접합속도로 마찰교반접합한 시험편을 인장시험한 후 단면(a) 및 파면(b-g)을 관찰한 것이다. (b)와 (c)는 서로 대응되는 영역을 각각 광학현미경과 SEM으로 매크로 관찰한 조직이고, (d)~(g)는 각각 A~D로 표시된 영역을 확대한 사진이다. 단면(a)와 파면(b, c)은 서로 대응되는 것을 알 수 있고, 공통적으로 하부에는 보이드가 있던 부분에 깊은 홈이 웰드피치와 같은 간격으로 주기적으로 존재하며, 보이드의 상부 파면은 접합속도에 따라서 미시 파면이 다르다는 것을 알 수 있다.

400 mm/min의 파면은 단면에서 지그재그 모양과 대응하여 요철모양의 파면(Fig. 10(c))을 나타내고 있으며, 요철 내부는 줄무늬의 파면(d)과 딥플파면(e)으로 구성되어 있다. 여기서 줄무늬의 파면은 소성유동형상을 나타내는 것으로 추측된다.

반면에 600 mm/min의 경우, 보이드 위의 파면은 Fig. 11의 (b), (d)의 B 및 (e)에서 볼 수 있는 것처럼

Fig. 10 Cross section(a) and fractographs (b, c) of fractured tensile specimen. (rotation speed: 1000 rpm, welding speed: 400 mm/min)

Fig. 11 Cross section (a) and fractographs (b, c) of fractured tensile specimen. (rotation speed: 1000 rpm, welding speed: 600 mm/min)

아주 평탄한 것으로부터 거의 소성변형이 없이 파괴된 부분임을 알 수 있다. 또한 (a)에서 파단은 교반부와 TMAZ의 경계 부분을 따라 일어났음을 알 수 있다. 일반적으로 전진부에서 시작한 재료유동이 톨의 회전에 의해 다시 전진부로 돌아와 접합되는데, 600mm/min의 빠른 접합속도의 조건은 교반부와 TMAZ의 접합이 완전히 이루어지지 않았거나, 계면에 결함이 존재하기 때문인 것으로 판단된다.

인장시험 시 보이드는 균열의 핵으로 작용하여 인장성질이 저하하는 주요 원인임을 알 수 있다. 그러나 보이드가 존재함에도 불구하고 모재에서 파단되고 강도가 높은 경우도 있기 때문에 보이드 크기(면적)과 인장강도와의 관계를 조사하여 보았다. Fig. 12는 그 결과를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 보이드 면적이 $1\mu\text{m}^2 \times 10^4$ 이하인 경우는 모재에서 파단되고 강도도 높지만, $1\mu\text{m}^2 \times 10^4$ 보다 큰 경우에는 보이드가 클수록 강도가 급격히 감소하는 것을 알 수 있다. 이것으로부터 보이드 크기가 $1\mu\text{m}^2 \times 10^4$ 이하인 것은 균열 핵생성의 요인이 아닌 것으로 추측된다.

한편 모재에서 파단된 시험편 모두는 거의 Fig. 13

Fig. 12 Tensile strength and fractured position with void size

Fig. 13 Cross section (a) and fractographs (b, c) of fractured tensile specimen. (rotation speed : 1000 rpm, welding speed : 100 mm/min)

의 (a)와 같은 동일한 위치에서 파단 되었다. Fig. 13은 1000rpm의 회전속도와 100mm/min의 접합속도로 마찰교반접합 한 시험편을 인장시험한 후, 광학현미경으로 관찰한 단면(a), SEM으로 관찰한 파면 (b, c)을 나타낸 것이다. (a)는 모재에서 파단 한 인장시험편의 전형적인 양상으로, 화살표로 표시한 것처럼 접합부 근방의 모재 쪽에서 파단 하였고, 파면은 (c)에서 볼 수 있는 것처럼 전형적인 덩플파면을 나타내고 있다.

Fig. 14는 1000rpm의 회전속도와 100mm/min의 접합속도로 마찰교반접합 한 시험편을 인장시험 하는 과정에서 완전히 파단되기 전에 A (Fig. 14(b))와 B (Fig. 14(c)) 지점에서 멈추고, 단면을 광학현미경으로 관찰한 결과를 나타낸 것이다. 하중이 A까지 부가되면 Fig. 13(a)와 같이 파괴된 동일한 곳에서 넥킹현상이 발생하여 국부 연신이 일어나고, B로 하중이 가해지면, Fig. 14(c)와 (d)에서 볼 수 있는 바와 같이 내부에서 균열이 발생하여 최종적으로 파단 된다.

모재에서 파단 되는 모든 시험편이 접합부 근방 모재, 즉 HAZ에서 파단 되는 원인을 파악하기 위하여 접합부 근방의 경도를 조사하여 보았다. Fig. 15는 1000rpm의 회전속도와 100mm/min의 접합속도로 마찰교반접합한 시험편의 단면조직과 A(◆)와 B(○)로 표시된 위치에서 경도분포를 나타낸 것이다. SZ와 TMAZ는 모재보다 높지만, 솔더로부터 약 2mm 떨어진 전진부(Advancing side)의 HAZ부 경도는 모재보다 낮고, 후퇴부(Retreating side)보다도 낮다. 즉 경도가 가장 낮은 연화부에서 파단 되는 것을 알 수 있다.

이상의 단면과 파면의 해석결과로부터 접합부에서 파괴가 일어나는 기구를 정리하면 다음과 같다. 마찰교반

Fig. 15 Hardness profiles of weld

접합에서는 프로브가 지나가고 난 후의 프로브가 머물렀던 빈 공간을 채워야 하는 데, 웰드피치가 0.4mm/rev 이상인 경우, 즉 최대 온도가 상대적으로 낮은 경우에는 전술한 바와 같이 소성유동이 불충분하게 되어 보이드가 형성된다. 특히 단면상의, 보이드 크기가 $1\mu\text{m}^2 \times 10^4$ 이상인 경우에는 이것이 균열의 기점으로 작용하고, 그 이하인 경우에는 후술하는 바와 같이 모재의 연화부에서 균열이 발생하여 파단 한다. 또한 1000rpm-600mm/min 접합조건의 경우, 보이드 크기도 클 뿐만 아니라, 교반부와 TMAZ의 계면에서 완전한 접합이 이루어지지 않아서 Fig. 11에 표시한 바와 같이 계면에 따라 균열이 전파되어 파괴되므로 강도가 아주 낮은 것으로 판단된다. 한편 400mm/min인 시험편은 보이드가 존재하지만, 교반부와 TMAZ의 계면에서 접합이 완전히 이루어졌기 때문에 교반부 내의 교반층의 경계에 따라 균열이 지그재그로 전파되어 파단 되므로 다소 강도가 높은 것으로 생각된다.

4. 결 론

KS5J32 Al합금의 동종 맞대기 마찰교반접합부의 인장성질에 미치는 회전속도(1000, 1250, 1500rpm)와 접합속도(100~600mm/min)의 영향을 검토한 결과, 얻어진 주요한 결론은 다음과 같다.

1) 결함은 재료의 유동부족으로 인하여 발생하는 보이드로서, 모두 AS 쪽 프로브의 모서리부에서 발생하는 것이 공통적인 특징이며, 회전속도가 느리면서 접합속도가 빠른 경우에는 AS쪽 모서리 부위에서 프로브 밑 부분의 중심까지 걸쳐 발생하였다. 특히 웰드피치(weld pitch)가 0.4mm/rev 이상인 경우에 보이드가 집중적으로 발생하였다. 또한 각 회전속도 별로 웰드피치가 증가함에 따라, 보이드의 면적도 증가하였다.

2) 인장시험 결과, 보이드가 없는 시험편들은 모두 모

Fig. 14 Displacement-Load curve (a), cross sections of specimens (b, c) cut at A during tensile test and microstructure of area denoted by □ in (b) (1000 rpm, 100 mm/min)

재에서 파단 되었으며, 이들 시편들의 인장강도는 거의 동일하였다. 보이드가 존재하는 경우, 접합부에서 파단 되는 것이 많지만, 모재에서 파단 되는 것도 있었다.

3) 접합부에서 파단 된 시편의 파면에는 보이드가 웰드 피치와 같은 간격으로 주기적으로 존재하였다.

후 기

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

참 고 문 헌

1. S.W. Song, B.C Kim, T.J. Yoon, N.K. Kim, I.B. Kim and C.Y. Kang : Effect of Welding Parameters on Weld Formation and Mechanical Properties in Dissimilar Al Alloy Joints by FSW, *Materials Transactions*, **51-7** (2010), 1319-1325
2. T. Sakurai : The Latest Trends in Aluminum Alloy Sheets for Automotive Body, *Kobelco Technology Review*, **28** (2008), 22-28
3. T. Inaba, K. Tokuda, H. Yamashita, Y. Takebayashi and T. Minoura : Wrought Aluminum Technologies for Automobiles, *Kobelco Technology Review*, **26** (2005), 56-62
4. B. Cantor, P. Grant and C. Johnston : Automotive engineering - lightweight, functional, and novel materials, Taylor & Francis, 2008, 22-24
5. Y.J. Kwon, S.B. Shim, D.H. Park : Friction stir welding of 5052 aluminum alloy plates, *Transactions of Nonferrous Metals Society of China*, **19** (2009), s23-s27
6. W.B. Lee, S.W. Kim, C.Y. Lee, Y.M. Yeon, W.S. Chang, C.C. Shur and S.B. Jung : Effect of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al alloy, *Journal of KWS*, **22-3** (2004), 265-272 (in Korean)
7. Y.M. Yeon, W.B. Lee, C.Y. Lee, S.B. Jung and K. Song : Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet, *Journal of KWS*, **24-1** (2006), 71-76 (in Korean)
8. C. Leitao, B. Emilio, B.M. Chaparro, D.M. Rodrigues : Formability of Similar and Dissimilar Friction Stir Welded AA 5182-H111 and AA 6016-T4 Tailored blanks, *Materials and Design*, **30** (2009) 3235 - 3242
9. V. Soundararajan, E. Yarrapareddy, and R. Kovacevic : Investigation of the Friction Stir Lap Welding of Aluminum Alloys AA 5182 and AA 6022, *Journal of Materials Engineering and Performance*, **16-4** (2007), 477-484
10. K.V. Jata and S.L. Semiatin : *Scripta Materialia*, **43** (2000), 743 - 749
11. B. Heinz, B. Skrotzki : Characterization of a friction-stir-welded aluminum alloy 6013, *Metallurgical and Materials Transactions B*, **33** (2002), 489-498
12. R.S. Mishra and M.W. Mahoney : *Friction Stir Welding and Processing*, ASM International, 2007
13. T.U. Seidel and A.P. Reynolds : Visualization of the material flow in aa2195 friction-stir welds using a marker insert technique, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **32A** (2001), 2001-2879
14. L. Ke, L. Xing And J.E. Indacochea : Material flow patterns and cavity model in friction-stir welding of aluminum alloys, *Metallurgical and Materials Transactions B*, **35B** (2004), 153-160
15. K. Nakate, Y.G. Kim, M. Ushio, T. Hashimoto, and S. Jyogan, Weldability of high strength aluminum alloys by friction stir welding, *ISIJ International*, **40** (2000) S15-S19
16. M.A. Gharacheh, A.H. Kokabi, G.H. Danehsi, B. Shalchi and R. Sarrafi, The influence of the ratio of "rotational speed/traverse speed"(w/v) on mechanical properties of AZ31 friction stir welds. *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **46** (2006) 1983-1987
17. Y.S Sato, M. Urata, H. Kokawa, Parameters controlling microstructure and hardness during friction-stir welding of precipitation-hardenable aluminum alloy 6063, *Metallurgical and Materials Transactions A*, **33** (2002) 625-635
18. Kh.A.A. Hassan, P.B. Prangell, A.F. Norman, D.A. Price and S.W. Williams, Effect of welding parameters on nugget zone microstructure and properties in high strength aluminum alloy friction stir welds, *Science and Technology of Welding and joining*, **8** (2003) 257-268