

## A6061-T6/AZ31 이종금속 마찰교반접합부의 기계적 특성에 미치는 툴 삽입 위치의 영향

이 광 진\*<sup>†</sup> · 김 상 혁\*

\*한국생산기술연구원 친환경부품소재센터

### Effects of Tool Plunge Position on Mechanical Properties of Friction-stir-welded Region in A6061-T6/AZ31 Dissimilar Metals

Kwang-Jin Lee\*<sup>†</sup> and Sang-Hyuk Kim\*

\*Environmental Materials & Components Center, Korea Institute of Industrial Technology

<sup>†</sup>Corresponding author : kjlee@kitech.re.kr

#### Abstract

Butt-joints of A6061-T6 and AZ31 plates were successfully manufactured by using a friction stir welding method. Off-set free joints and off-set joints were fabricated to investigate the effect of the tool plunge position on the mechanical properties of the joints. Hardness test, tensile test and Charpy impact test was performed to evaluate the mechanical properties of the joints. Off-set condition resulted in increase of mechanical properties of the joints. The variation of the hardness distribution in the SZ was also stabilized in the off-set condition. Tensile strength of the off-set joint was about 85% against to that of the AZ31 base metal. Impact absorption energy by Charpy-Impact-Test of the off-set joint also increased by almost 2 times against to that of the AZ31 base metal.

Key Words : Friction stir welding, Tool plunge position, Mechanical properties, A6061-T6, AZ31

#### 1. 서 론

2009년, 미국 및 유럽 등 서방 선진국들의 금융위기를 기점으로 그동안 세계 자동차 시장을 주도해 오던 선진국들의 자동차 생산량이 급격히 감소하였으나, 한국과 중국을 비롯한 후발국들의 자동차 생산량은 꾸준히 증가하여 선진국들의 생산량을 추월할 뿐 아니라, 향후 자동차 시장을 주도할 것으로 예상되고 있다. 또, 하이브리드자동차, 전기자동차 및 연료전지자동차 등의 미래형 친환경자동차의 생산 확대에 힘입어 세계 자동차 시장은 지속적으로 성장할 것으로 예상된다.

최근 자동차 시장의 최대 관심사가 배기가스 환경규제 충족과 연비 향상을 위한 '차체경량화' 라는 것에는 이견이 없을 것이다. 이에 따라 차체를 경량화하기 위하여 경량소재 및 성형기술, 최적구조 설계기술 및 용접·접합기술 등을 포함하는 종합적인 연구개발이 전

세계적으로 활발하게 진행되고 있다. 국내에서도 대표적인 경량소재인 알루미늄합금(Al Alloy), 마그네슘합금(Mg Alloy) 및 초고강도강(AHSS)과 그들을 적용한 고효율 경량부품의 개발을 위하여 기업, 대학 및 연구기관 등이 컨소시엄을 구성하여 국제 연구과제들을 수행중이다. 이와 같이, 요구되는 특성에 맞춰 다양한 종류의 소재를 적용하여 차체를 경량화 하는 'Multi-Materials Concept'가 차체경량화의 가장 효과적인 방법 중의 하나로 인식되기 시작한 후 글로벌 트렌드(Global Trend)가 되었다.

차체를 경량화 함과 동시에 필수적으로 확보되어야 할 성능이 '내구 및 충돌 안전' 성능이다. 이는 유사시 승객의 생명과 직결되는 사안으로서 아무리 강조해도 지나치지 않을 것이다. '내구 및 충돌 안전' 성능의 확보에 있어서의 핵심기술이 각각의 부품을 체결하여 차체를 구성하기 위한 요소기술인 '용접·접합기술'임은 차

명한 사실이다. 특히, Al/Steel, Mg/Steel 및 Al/Mg 등과 같은 이종금속의 경우 종래의 용융 용접법으로는 건전한 용접부를 얻기가 곤란한 것으로 판단되어 왔다. 이는 용융점을 비롯한 물성 차이가 클뿐 아니라, 접합 계면에 취성의 금속간화합물(Intermetallic Compound)이 형성되기 때문으로 알려져 있다<sup>1-4)</sup>. 최근에는 공정 중에 피용접재의 용융반응을 수반하지 않는 고상(Solid State)접합 공정 중의 하나인 마찰교반용접(Friction Stir welding) 공정을 적용한 이종금속 용접의 성공 사례가 보고되고 있다<sup>5-8)</sup>. 그러나, 자동차 생산라인에 적용하여 양산 모델에 적용이 가능한 수준의 접합강도는 확보되지 않은 상태이다.

본 연구에서는 각각 가장 대표적인 상용 알루미늄합금과 마그네슘합금인 A6061-T6와 AZ31 판재에 대하여 마찰교반용접을 실시하였으며, 접합 툴의 삽입 위치가 접합부의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하였다.

### 2. 실험 방법

본 연구에서는 두께 2.0mm의 A6061-T6 판재와 AZ31 판재를 사용하였으며, 이들의 기계적 특성과 화학성분을 Table 1에 나타내었다. 이 판재들에 방전가공을 적용하여 150mmL X 75mmW 시편을 채취하였으며, 마찰교반용접 시공 직전 아세톤 세척 및 건조 과정을 거쳐 사용하였다. Fig. 1에 마찰교반용접에 대한 모식도를 나타내었다. Fig. 1 (a)에 나타낸 바와 같이, A6061-T6 판재와 AZ31 판재를 각각 Retreating side와 Advancing side에 위치시켰고, 두 판재가 맞닿은 경계면을 따라 Butt-welding을 실시하였으며, 접합 툴의 삽입위치에 따라 두 종류의 접합시편을 제작하였다. 하나는 기존의 일반적인 방법과 같이 두 판재의 경계면의 중앙에 접합 툴을 삽입하여 제작한 시편(이하 Off-set free joint)이며, 다른 하나는 접합 툴을 두 판재의 경계면으로부터 AZ31 판재 쪽으로 1mm 이동시켜 삽입하여 제작한 시편(이하 Off-set joint)이다. 접합 툴은 SKD61종 소재를 가공하여 제작하였고, AIP(Arc Ion Plating) 공법을 적용하여 툴 표면에

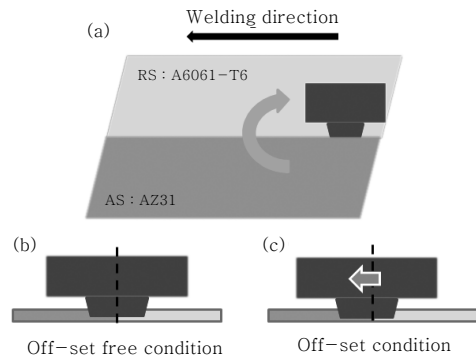


Fig. 1 Schematic illustration of the friction stir welding process and tool plunge position

AlTiN 층을 형성하였다. 프로브(Probe)의 형상은 마찰교반용접 시공 중의 하중의 집중을 피하기 위하여 원뿔대 형상으로 설계하였고, 프로브 선단부(Tip)와 뿌리부(Root)의 직경을 각각 4mm와 5mm로 하였으며, 프로브의 길이는 모재 두께의 90%인 1.8mm로 가공하였다. 쇼울더(Shoulder)의 직경은 10mm로 하였고, 교반력을 강화하기 위하여 표면에 스크로(Scroll) 가공을 실시하였다. 이와 같은 접합 툴의 형상과 세부 내용을 Table 2에 나타내었다. A6061-T6와 AZ31의 이종판재에 대한 마찰교반용접 최적 공정조건을 도출하기 위하여 접합 툴의 회전속도 500~1800RPM, 진행속도 50~100mm/min의 범위에서 예비실험을 진행한 결과, 1200~1300RPM, 100mm/min의 조건에서 결함이 없는 용접부가 얻어졌으며, 본 실험에서는 1200RPM, 100mm/min의 조건으로 접합시편을 제작하였다. 접합 툴의 전진각(Tilting angle)은 2°로 하였다.

접합시편의 단면의 미세조직 관찰을 위하여 광학현미

Table 2 Tool geometry and detail dimensions


	Material	SKD61
	Surface coat	AlTiN
	Probe dia., mm	Root: 5 Tip: 4
	Probe length, mm	1.8
	Shoulder dia., mm	10

Table 1 Mechanical properties and chemical compositions of the base metals

Mechanical Properties	Tensile Strength (MPa)		Yield Strength (MPa)		Hardness (HV)	
	A6061-T6	310	275		108	
	AZ31	230	175		55	
Chemical Composition (mass%)	Al	Mg	Zn	Si	Others	
	A6061-T6	bal.	1.0	0.2	0.6	2.2
	AZ31	3.0	bal.	1.0	-	0.2

경(OM, Nikon Epiphot 200)을 사용하였다. 미세조직의 관찰을 위해 경면연마를 실시한 후, 각각 불산-질산-염산-증류수로 구성된 용액과 에탄올-아세트산-피클링산-증류수로 구성된 용액을 사용하여 A6061-T6와 AZ31 부분을 부식처리 하였다. 접합부 경도의 측정에는 마이크로비커스 경도계(Mithutoyo, AAV-502)를 사용하였으며, 100g의 하중을 5초간 적용하였으며, 인접 측정부위의 영향을 피하기 위하여 측정점 간 거리를 200 $\mu$ m로 유지하였다. 인장강도의 측정에는 Instron-type 인장시험기(SHIMADZU, AG-IS, 5ton)을 사용하였으며, 상온에서 크로스헤드(Cross-head) 속도 1mm/min의 조건에서 인장시험을 실시하였다. 인장시험편은 접합시편의 크기를 고려하여 JIS Z 2201 Sub-size 시험편을 사용하였다. 충격특성의 평가를 위하여 샤르피충격시험(Instron, Charpy Ceast 9050)을 실시하였으며, 최대하중은 270kg, 각도는 150°로 설정하였고, KS B 0810 시험편을 사용하였다.

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 접합단면의 미세조직

각 접합시편의 단면에 대한 광학현미경 관찰 사진을 Fig. 2에 나타내었다. off-set 여부에 관계없이 두 시편의 접합부에서는 어떠한 결함도 관찰되지 않았으며, 접합이 성공적으로 이루어졌음을 확인할 수 있었다. 한편, 동종재 마찰교반용접의 교반부(SZ: Stir Zone)와 달리 이종재의 경우에는 두 소재가 서로 완전히 혼합되지 않고 각각의 영역 내에서 교반되며, 결과적으로 두 소재 간의 접합계면을 형성하는 것을 확인할 수 있었다. 또, AZ31 판재 쪽으로의 off-set 공정에 의해 AZ31의 SZ 영역이 확대될 뿐 아니라, 단순하고 안정적인 SZ의 형성이 가능한 것으로 확인되었다. 이 결과로부터 off-set 공정이 그렇지 않은 경우에 비하여 보다 안정적이고 균질한 접합부의 형성에 유효하다는 것

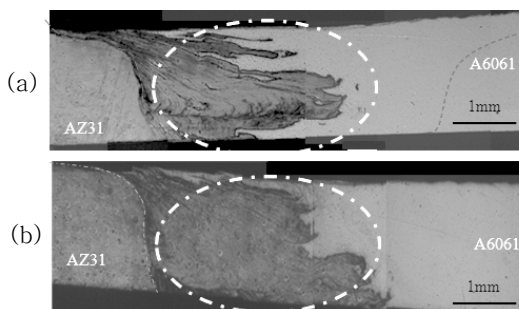


Fig. 2 Optical microstructure of the welding cross section. (a) off-set free joint, (b) off-set joint

이 밝혀졌으며, 접합부의 기계적 특성의 향상 가능성을 시사하였다.

#### 3.2 접합부 경도분포

3.1 절에서 관찰한 각 접합단면의 1/2t 지점에서의 경도분포를 Fig. 3에 나타내었다. 전반적으로, 교반영역 및 경도분포가 접합 틀의 off-set 방향으로 시프트(Shift) 한 것으로 확인되었다. 또, SZ 내의 경도분포에 있어서 off-set joint의 경우가 off-set free joint 대비 균일한 분포를 나타내었다. 이것은 Fig. 2의 접합단면 미세조직 관찰결과에 부합하는 것으로서, off-set 공정에 의해 보다 안정한 AZ31 SZ가 형성하였기 때문인 것으로 판단되었다. 마찰교반용접 공정 중에 발생한 열에 의한 상변태에 의해 경도가 감소했을 것으로 예상되는 A6061-T6 판재 쪽의 열영향부(HAZ: Heat Affected Zone) 또한 off-set 공정에 의해 다소 감소하는 것으로 확인되었다.

#### 3.3 접합부 인장강도

각 접합시편에 대한 인장시험 결과를 각 모재 및 기준의 용융용접에 의한 용접시편의 인장시험 결과와 비교하여 Fig. 4에 나타내었다. 접합 틀 삽입위치의 off-set 여부와 관계없이 마찰교반용접을 실시한 시험편의 인장

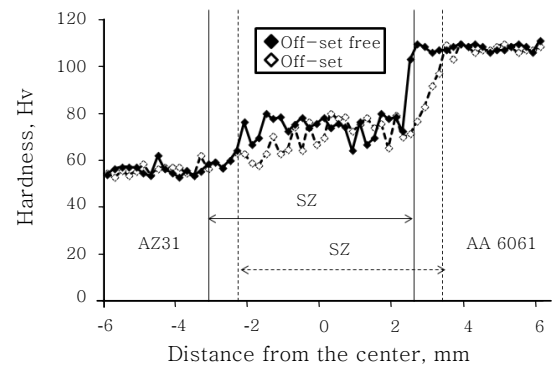


Fig. 3 Hardness distribution of the welding region

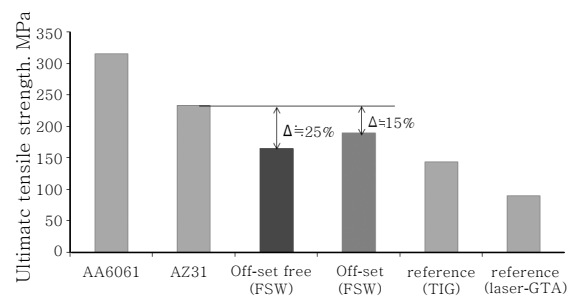


Fig. 4 Tensile strength of the joints manufactured by several welding process and base metals

강도가 기존의 TIG 및 Laser-GTA 하이브리드용접 시험편의 인장강도보다 높은 값을 나타내었다<sup>9-10)</sup>. 또한, off-set 공정에 의한 시험편의 경우 AZ31 모재 대비 85% 수준의 인장강도를 나타내었고, off-set free 시험편의 인장강도 대비 약 15% 향상되는 것으로 확인되었다. 이 결과로부터, A6061-T6 판재와 AZ31 판재의 맞대기 이종 마찰교반용접의 경우에는 접합 틀 삽입 위치를 AZ31 판재 쪽으로 약간 이동하여 시공하는 off-set 공정이 접합부 인장강도의 향상에 유효함이 명백히 밝혀졌다.

### 3.4 접합부 충격특성

Figure 5에 나타난 바와 같이, 해머의 충격에 의해 파단이 시작될 노치(Notch)를 마찰교반용접부 중앙에 위치하도록 가공하여 시험편을 제작하였다. 각 접합시험편에 대한 샤르피충격시험 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 이 그래프는 해머에 의한 충격 직후부터 파단까지의 순간에 시험편에 가해진 힘과 시간(milli-second)으로 구성된다. 힘 즉, 하중이 최고점에 이르렀을 때, 하중과 시간 그래프가 그리는 면적 즉, 에너지(Joule)가 해머의 충격에 의해 균열이 발생하는 순간까지 시험편에 흡수된 에너지( $E_i$ : Crack Initiation Energy)이

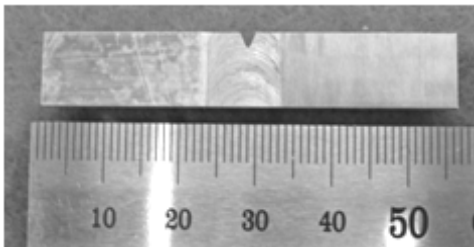


Fig. 5 Appearance of the Charpy impact test specimen

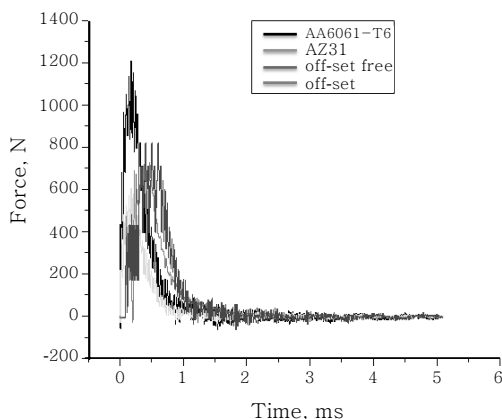


Fig. 6 Force-Time curves of the joints and base metals by Charpy impact test

Table 3 Absorbed energy into the joints and base metals by Charpy impact test

	$E_t$ (J)	$E_i$ (J)	$E_p$ (J)
A6061-T6	1.42	1.29	0.13
AZ31	0.61	0.57	0.05
off-set free joint	1.09	0.79	0.32
off-set joint	1.19	0.83	0.36

며, 나머지가 균열의 발생 이후 파단이 일어날 때까지 시험편에 흡수된 에너지( $E_p$ : Crack Propagation Energy)이고, 이들의 합이 전체 흡수된 에너지( $E_t$ : Absorbed Total Energy)이다. 접합 틀의 삽입위치의 off-set 여부와 관계없이 마찰교반용접 시험편이 AZ31 모재보다 높은 충격흡수에너지 값을 나타내었다. 샤르피충격시험에 의해 흡수된 에너지 값을 Table 3에 정리하였다. AZ31의 경우, 균열전파에너지가 균열생성에너지 대비 10% 이하로서, 균열이 생성되면 바로 파단이 일어나는 것으로 확인되었다. 이에 반하여, 마찰교반용접 시험편의 경우는 off-set free 및 off-set 공정에 관계없이, 균열전파에너지가 균열생성에너지의 약 40% 수준까지 큰 폭으로 향상되는 것으로 확인되었고, 균열생성에너지 역시 향상되는 결과를 나타내었다. 이와 같은 결과는 마찰교반용접 공정 중의 접합 틀의 교반작용과 발열에 의해 교반부에서 연속적 동적재결정이 일어나 결과적으로 매우 미세한 결정립조직이 형성되었기 때문인 것으로 판단된다. 또한, off-set 공정에 의하여 충격흡수에너지가 약 10% 정도 향상되는 것으로 확인되었다. 이 결과로부터, A6061-T6 판재와 AZ31 판재의 맞대기 이종 마찰교반용접부의 충격특성이 AZ31 모재보다 우수한 것으로 확인되었으며, 접합 틀 삽입 위치를 AZ31 판재 쪽으로 약간 이동하여 시공하는 off-set 공정을 적용할 경우 접합부 충격특성이 더욱 향상되어 AZ31 모재대비 약 200% 수준까지 향상되는 것으로 확인되었다.

## 4. 결 론

본 연구에서는 각각 가장 대표적인 상용 알루미늄합금 A6061-T6 판재와 마그네슘합금 AZ31 판재에 대하여 이종 마찰교반용접을 실시하였으며, 접합 틀의 삽입 위치가 접합부의 기계적 특성에 미치는 영향을 조사하여 아래와 같은 결론을 얻었다.

1) 마찰교반용접에 의하여 기존의 용융용접 또는 하이브리드용접에 의한 용접부보다 인장강도 및 충격특성이 향상된 용접부를 얻을 수 있다.

2) AZ31 판재 쪽으로 접합 틀을 시프트(Shift)하여

시공하는 off-set 공정에 의해 off-set free joint 대비 인장강도 및 충격특성이 약 10% 향상된 joint를 얻을 수 있다.

3) 이종금속에 대한 마찰교반용접의 경우, off-set 공정에 의하여 보다 안정하고 균질한 접합부를 얻을 수 있을 뿐 아니라, 향상된 기계적 특성을 확보할 수 있는 매우 유용한 공정인 것으로 확인되었다.

## 후 기

본 연구의 일부는 한국생산기술연구원 산업계연계형 사업의 지원으로 수행되었습니다.

## 참 고 문 헌

1. kwang-jin Lee, Shinji Kumai and Takashi Arai : Materials Transactions, **46** (2005) 1847-1856



- 이광진
- 1973년생
- 한국생산기술연구원
- FSW & FSP, 이종접합 및 분석
- e-mail: kjlee@kitech.re.kr

2. kwang-jin Lee and Shinji Kumai : Materials Transactions, **47** (2006) 1178-1185

3. kwang-jin Lee, Shinji Kumai, takashi Arai and Tomokatsu Aizawa : Materials Science and Engineering A, **471** (2007) 95-101

4. Shinji Kumai, Hiromasa Sato, Kenta Suzuki, Takeshi Ookawa, Kwangjin Lee and Mitsuhiro Watanabe : Journal of Japan Institute of Light Metals, **57** (2007) 529-535 (in Japanese)

5. R. Ayer, H. W. Jin, R. R. Mueller, S. Ling and S. Ford : Scripta Materialia, **53** (2005) 1383-1387

6. Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai : Materials Science Forum, **654-656** (2010) 755-758

7. Shinji Kumai, Mitsuhiro Watanabe and Keyan Feng : Materials Science Forum, **654-656** (2010) 596-601.

8. Keyan Feng, Mitsuhiro Watanabe and Shinji Kumai : Materials Science Forum, **654-656** (2010) 970-973

9. Liu Xu-he : Transactions of Nonferrous Metal Society of China, **21** (2011) 477-481

10. L. M. Liu : Materials Characterization, **59** (2008) 1279-1284



- 김상혁
- 1981년생
- 한국생산기술연구원
- FSW
- e-mail : qlidus@kitech.re.kr