

## 이종 알루미늄 합금 KS5J32/AA6K31 겹치기 마찰교반 접합부의 인장성질에 미치는 접합조건의 영향

김상주\* · 윤태진\* · 송상우\*\* · 강정윤\*,†

\*부산대학교 하이브리드 소재솔루션 국가핵심연구센터(NCRC)

\*\*한국기계연구원 부설 재료연구소(KIMS)

### Effect of Welding Condition on Tensile Properties of Friction Stir Lap Joint of Dissimilar Al Alloy, KS5J32/AA6K31

Sang-Ju Kim\*, Tae-Jin Yoon\*, Sang-Woo Song\*\* 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 : kangcy@pusan.ac.kr

(Received November 20, 2012 ; Revised December 6, 2012 ; Accepted December 7, 2012)

#### Abstract

The focus of this investigation is to evaluate the effect of joining parameter on the microstructure and mechanical properties of welds produced by friction stir lap welding. The dissimilar Al alloys, KS5J32 and AA6K31, were joined by friction stir lap welding technique under several welding conditions, and KS5J32 alloy was placed on the top of AA6K31 alloy. The tool rotation speeds were 1000, 1250, and 1500rpm, and the welding speeds were 100, 300, 500, 700mm/min, respectively. The results showed that two shapes of nugget, such as onion ring and irregular vortex type, were observed with various revolutionary pitch. In all welding conditions, fracture occurred at the soften region of bottom sheet(AA6K31) and the strengths were 64~78% of those of base metal. Fractured positions were classified into three types : HAZ, triple point, void depending on the revolutionary pitch. The actual thickness of specimen at the fractured location was decreased with decreasing heat input. A linear relationship exists between the effective thickness of fractured position and peak load.

Key Words : Friction stir welding, Lap Joint, Dissimilar aluminum alloy, KS5J32, AA6K31, Tensile shear test

#### 1. 서 론

본 연구에 사용된 KS5J32-T4 합금은 기존 5000계열 합금에 소량의 Cu를 첨가하여 도장 소부(paint baking) 처리 시 중간정도의 소부경화 효과를 얻을 수 있고, 성형성을 향상 시켜 프레스 성형 후 표면에 주름이 발생하는 문제점을 해결한 합금으로, 주로 자동차 내부 패널에 적용하고 있다<sup>1,2)</sup>. 한편 AA6K31-T4합금은 Al-Mg-Si합금에 Cu를 첨가하여 인발가공성을 향상시킨 알루미늄으로, 다른 처리 없이 도장 소부 경화 특

성을 가짐으로 성형성이 좋고 찍힘저항성 및 가격 대비 표면품질이 매우 높아 외부 패널로 주로 사용되고 있다<sup>3)</sup>.

이종 알루미늄에 마찰교반접합을 사용한 연구는 주로 소성유동<sup>4)</sup>, 잔류응력<sup>5)</sup>, 미세조직변화<sup>6,7)</sup>에 관한 내용이 다수 발표 되고 있고, 특히 5xxx계열과 6xxx계열의 이종 마찰교반접합을 적용한 경우는 맞대기 접합<sup>8,9)</sup>, TWB 접합<sup>10)</sup>, 마찰교반점접합(Friction Spot Stir Welding : FSSW)<sup>11)</sup>에 대한 연구가 발표되었으나, 겹치기 접합에 대한 연구는 적은 편이다.

이종 알루미늄 합금의 겹치기 마찰교반접합에 대한 연구를 살펴보면, 후킹(hooking)된 부위에서 유효두께

(Effective Sheet Thickness: EST)가 감소하여 인장성질에 가장 큰 영향을 미치, 이곳에서 파단이 발생하는 것으로 보고하고 있다<sup>12-16</sup>. 그러나 멀티패스를 하게 되면, 후킹결합이 제거되어 유효두께가 증가하기 때문에 인장성질이 증가하는 것으로 보고하고 있다<sup>12</sup>. 또한 이종 합금의 겹치기 마찰교반접합시 상판과 하판의 재료배열에 따라 재료의 고온항복강도 차이로 인해 후킹결합의 높이가 달라져, 인장성질의 차이가 발생한다고 보고하고 있다<sup>13,14</sup>.

그러나 마찰교반접합의 주요 접합조건인 공구 회전속도와 접합속도를 포함하는 입열의 관점에서 결합 발생의 유무, 미세조직과 인장성질에 미치는 영향에 대한 체계적인 연구는 찾아 볼 수 없다. 그래서 저자들은 AA6K31을 상판에, KS5J32를 하판에 둔 겹치기 마찰교반접합의 인장성질에 미치는 입열의 영향과 접합부의 강도 저하 원인에 대하여 검토한 결과, 접합강도는 모재의 52~63%로 낮은 강도가 얻어졌고, 입열이 가장 작은 조건에서 보이드가 발생하였지만 인장성질에는 영향을 미치지 않았으며, 저하 원인으로는 후킹과 더불어 AA6K31의 연화에 의해 감소되는 것으로 파악되었다<sup>17</sup>.

본 연구에서는 선행연구와 반대의 재료배열인 KS5J32를 상판에, AA6K31합금을 하판에 두고 겹치기 마찰교반접합을 한 경우에 접합조건 및 입열에 따른 접합부 형상과 결합, 경도, 인장성질의 변화를 검토하고, 인장성질 저하의 원인을 고찰하였다.

## 2. 사용 재료 및 실험 방법

본 연구에서는 알루미늄 KS5J32와 AA6K31합금 판재(1.0mmt)를 사용하였고, 합금의 화학조성 및 기계적 성질은 Table 1과 같다. KS5J32는 Kobe Steel에서 생산되는 합금 코드에 따른 분류기호이며, AA5023합금과 유사한 성분을 가진다. 사용된 알루미늄 합금의 화학조성을 Table 1에 나타내었다.

시험편 제작은 두께 1mm, 크기 300mm×100mm로 절단한 두 판재를 40mm씩 겹쳐 두 모재가 겹쳐진 부분을 중심으로 100mm길이를 마찰교반접합을 실시하였다. 솔더 직경 8mm, 프로브 직경 3mm, 길이 1.45mm 크기의 틀을 사용하였고, 삽입깊이는 0.45mm로 고정하였으며, 마찰교반접합에서 가장 많이 사용되는 3°의 전

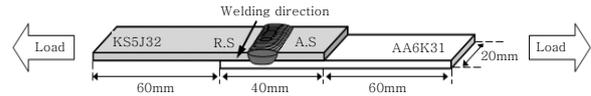


Fig. 1 The specimen for tensile test

진각으로 실험하였다. 틀의 회전속도 1000, 1250, 1500rpm과 이동속도 100, 300, 500, 700mm/min으로 변화시켜 실험하였다. 미세조직은 연마 후 Keller (Distilled water 190mL + Nitric acid 5mL + HCl 3mL + HF 2mL)용액으로 부식하고 광학현미경 및 SEM으로 관찰하였다. 인장전단시험을 위한 시험편은 Fig. 1과 같으며 100mm의 중심부에서 3개의 인장시편을 채취하였다. 크로스 헤드속도는 2mm/min로 인장시험을 수행하였다. 경도는 마이크로 비커스 경도기를 사용하여 하중 200g, 유지시간 10초로 측정하였다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1 접합조건에 따른 너깃 형상과 결합

Fig. 2는 KS5J32를 상부에 AA6K31합금을 하부에 배열하는 경우, 각각 1000rpm 및 1500rpm에서 접합속도 변화에 따른 접합부의 단면조직을 나타낸 것이다. 접합속도가 빠른 접합부를 자세히 관찰하여 보면, 전진부(advancing side : AS, 이하 AS로 표현)에 ○로 표시된 영역에서 결합이 관찰된다. Fig. 3은 이 결합의 형상을 파악하기 위하여 A 및 B로 표시된 영역을 확대한 광학현미경 조직을 나타낸 것이다. 결합은 보이드로서 모두 공통적으로 AS쪽 프로브 모서리부의 KS5J32/AA6K31 경계부에서 발생하고 있음을 볼 수 있다.

한편 접합조건에 따른 너깃 형상을 자세히 관찰하여 보면, Fig. 4와 같이 형상은 크게 2가지로 분류되었다. 접합속도가 느린 100mm/min의 너깃 형상은 (A)와 같이 재료가 서로 교반이 이루어진 전형적인 오니언링(Onion ring) 형태를 하고 있다. 접합속도가 300mm/min 이상 빠른속도로 접합된 너깃 형상은 (B)와 같이 교반작용이 적어, 오니언링 형상이 보이지 않는 단순히 접합된 형태를 하고 있다.

마찰교반접합의 경우, 입열량의 파라미터로서 접합

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

Material	Mg	Si	Ti	Mn	Cu	Fe	Al	T.S(MPa)	EL(%)
KS5J32-T4	5.68	0.11	0.09	0.01	0.20	0.09	Bal.	298	38
AA6K31-T4	0.59	1.04	-	0.01	0.80	0.04	Bal.	288	31

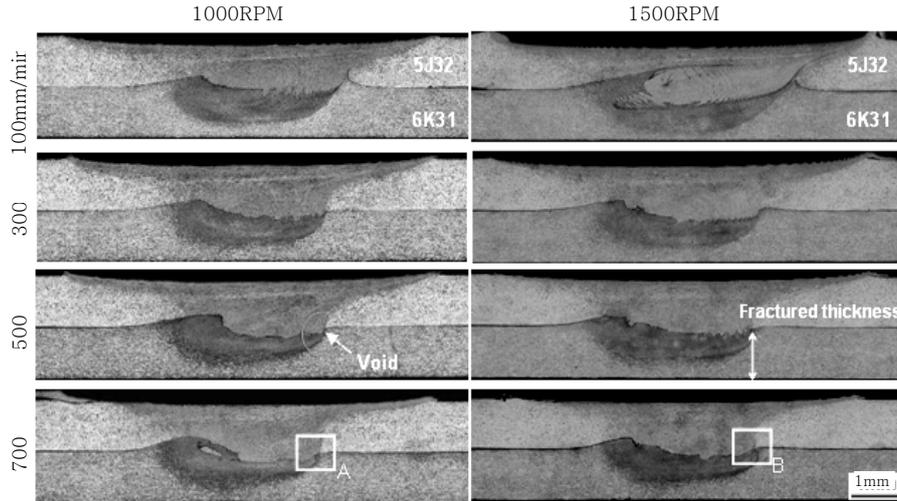


Fig. 2 Macrostructures of joints with welding condition

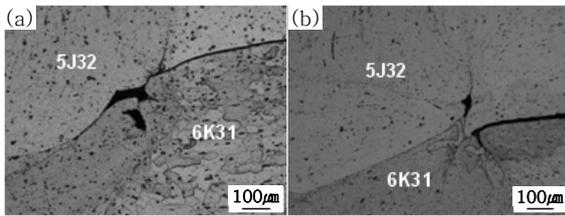


Fig. 3 Optical microstructures. (a) and (b) is microstructures indicated by A and B in Fig. 2 respectively

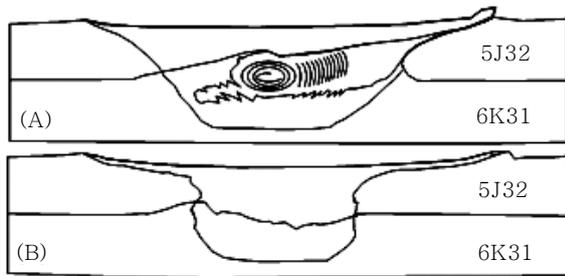


Fig. 4 Schematic diagram for shape of nugget zone with welding condition. (a) Onion-ring type (Type A), (b) Irregular vortex type (Type B)

속도(V)를 공구의 회전속도(N)로 나눈 회전피치 (Revolutionary Pitch(RP) = V/N)를 사용한다<sup>18,19</sup>. 입열량은 회전피치값과 반비례 하고, 일반적으로 보이 드는 입열량이 적은 경우에 발생하기 쉽기 때문에 회전 피치(이하 RP로 표현)와 너깃 형상과 접합결합 발생과 의 상관관계를 조사하여 보았다<sup>20</sup>. Fig. 5는 그 결과 를 나타낸 것으로, RP값 0.15 이하인 입열이 높은 너 깃은 A(오니어링) 형태를 나타내지만, 그 이상에는 오

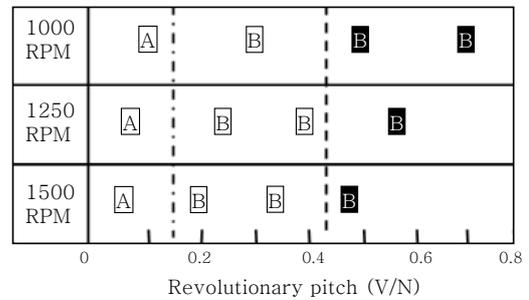


Fig. 5 Relationship between revolutionary pitch and nugget shape(void formation)

니어링이 보이지 않는 B형태로 나타남을 볼 수 있다. RP값 0.5 이상인 저입열 조건에서는 보이드가 존재하 면서 상판과 하판이 명확히 구분된 형태(B형)인 너깃 형상이 나타났다. 재료유동을 보면, R.S쪽에서는 A.S 에서 밀려온 재료가 모양 그대로 안쪽으로 들어오지만, A.S에서는 하판의 재료가 상승하고 상판의 재료가 하 강하면서 두 재료가 동시에 안쪽으로 밀려들어가 채워 지는 것이 특징이다. 즉 입열량이 부족한 경우에는 소 성유동이 어려워 재료의 교반이 완전히 일어나지 못하 고, 프로브가 전진하면서 생긴 빈공간을 완전히 채우지 못해 A.S쪽에 보이드가 생성되는 것으로 추측된다<sup>21</sup>.

### 3.2 접합부의 인장성질과 파단양상

Fig. 6은 회전속도와 접합속도에 따른 인장하중의 변 화를 나타낸 것이고, 여기서 솔리드 마크는 결합이 없 는 경우이고, 오픈 마크들은 보이드 결합이 존재하는 시편을 나타낸 것이다. AA6K31과 KS5J32의 인장강 도는 각각 288MPa과 298MPa이고, 이들 합금의 최

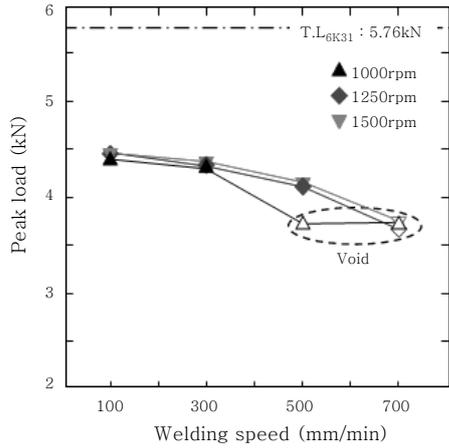


Fig. 6 Relation between peak load and welding speed

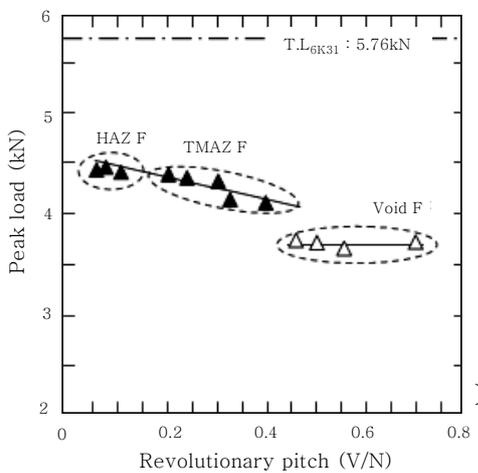


Fig. 7 Relation between peak load and Revolutionary pitch

고인장하중을 인장강도와 인장시편의 단면적(20mm(w)×1mm(t))으로부터 계산하면, 각각 5.76kN과 5.96kN이었으며, 그림에 강도가 낮은 AA6K31의 하중을 모재의 하중으로 표시하였다. 접합속도의 증가에 따라 인장하중이 감소하고, 보이드가 존재하는 조건에서는 하중이 가장 낮으며, 강도가 거의 동일하다.

한편 입열량의 파라미터로서 사용되며, 접합속도와 회전속도가 함께 함수로 표현되는 회전피치(RP)와 인장강도와의 관계를 조사하고, 파단형태와의 관계도 함께 정리하여 보았다. 이 결과로부터 보이드가 존재하지 않으면, 인장강도와 RP와는 양호한 직선관계를 나타내고, RP값이 클수록, 즉 입열량이 낮을수록 인장하중은 직선적으로 감소하는 경향이 있으며, AA6K31 모재 하중의 71%~78%이었다. 또한 RP값이 약 0.45 이상인 입열이 낮은 조건에서는 보이드가 존재하고, 모재대비 인장하중이 약 64%로 낮으며, 입열과 관계없이 인장하중이 거의 동일한 값을 갖는 것이 특징이다. 또한 HAZ에서 파단한 것이 가장 하중이 높음을 알 수 있다. 결론적으로 접합부 인장하중은 회전피치에 반비례 즉 입열량에 비례함을 알 수 있다.

접합조건에 따라 인장하중이 차이가 나는 이유를 파악하기 위하여, 파단면 분석을 실시하여 보았다. Fig. 8~Fig. 10는 1000rpm으로 각각 100mm/min(Fig. 8), 300mm/min(Fig. 9) 및 500mm/min(Fig. 10)로 마찰교반접합한 시편을 인장시험한 후의 파단면을 나타낸 것이다. 파단 형태는 크게 Fig. 8의 (a)와 같이 AA6K31 모재의 HAZ에서 파단한 형상(HAZ형)과 Fig. 9 (a) 및 Fig. 10 (a)와 같이 상하 모재와 접합부와의 3중점에서 AA6K31 두께 방향으로 파단한 것

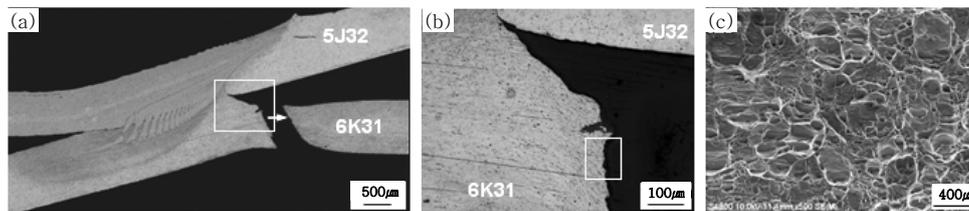


Fig. 8 Cross section(a), enlarged fracture position(b) and fractograph of the HAZ(c); 1000rpm-100mm/min

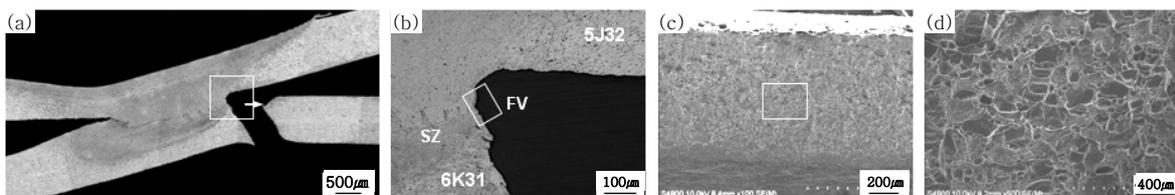


Fig. 9 Cross section(a), enlarged fracture position(b) and fractograph of the triple point(c)(d); 1000rpm-300mm/min

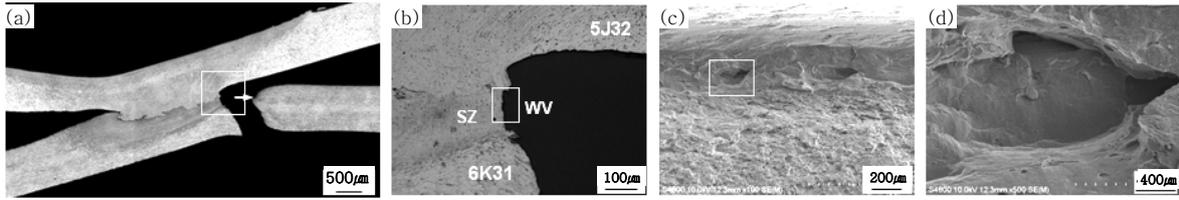


Fig. 10 Cross section(a), enlarged fracture position(b) and fractograph of the void(c)(d): 1000rpm-500mm/min

2가지로 분류된다. Fig. 8의 (b)는 HAZ에서 파단된 부위를 확대한 광학현미경 사진이고, (a)에 화살표로 표시한 AA6K31 시편의 파면(b)을 관찰한 결과이다. 이것으로부터 완전히 연성 파단한 것을 알 수 있다. Fig. 9와 Fig. 10의 파단 단면사진((a)과 (b))을 비교하여 보면, 3중점에서 파단된 형태로 거의 유사하다. 그러나 각각 (b)에 □로 표시한 부분을 확대한 SEM사진((c)와 (d))를 비교하여 보면, 유사하지만 2가지 형태로 나눌 수 있다. Fig. 9과 같이 응력이 집중되는 3중점에서 균열이 발생하고, 균열이 강도가 약한 AA6K31 두께 방향으로 전파하여 파단하는 형상(Triple Point 형)과 Fig. 10와 같이 3중점 근처에 보이드가 존재하므로, 이것을 기점으로 균열이 성장하여 파단하는 형상(Void형)으로 나누어진다.

### 3.3 접합조건에 따른 인장성질 변화에 대한 고찰

일반적으로 접치기 접합부의 인장전단시험의 경우, 균열이 접합계면에 따라 전파하여 계면파단 할 것인지, 아니면 모재에 수직방향으로 전파하여 모재에서 인장파단 할 것인지는 각각 계면에 작용하는 전단응력( $\tau$ )과 계면 면적의 곱인 하중 값과 모재에 작용하는 수직응력( $\sigma$ )과 모재의 단면적의 곱인 하중 값의 크기에 의해 결정될 것이다. 접합계면의 길이를 측정된 결과 3.88mm~4.36mm이었다. 인장시편의 폭은 일정하기 때문에 인장응력이 작용하는 단면적보다 전단응력이 작용하는 단면적이 3.5배~3.9배임을 알 수 있다. 일반적으로 소성이론에서 재료의 전단응력( $\tau$ )과 인장응력( $\sigma$ )과의 관계는  $\sigma = (\sqrt{3} \sim 2)\tau$ 로 알려져 있다<sup>22)</sup>. 따라서 전단응력이 작용하는 단면적이 훨씬 넓기 때문에 모두 모재에서 파단되는 것으로 생각된다.

입열에 따라 인장하중이 다른 이유를 살펴보면 다음과 같다. Fig. 2의 접합부 형상과 파단면(Fig. 8~Fig. 10)에서 알 수 있는 바와 같이, 모재와 미접합부의 3중점에서 수직으로 파단부 두께를 측정하면, 파단기점에서 두께가 접합조건에 따라 변화한다. 결국 인장시편의 폭은 일정하지만, 실제 파단부의 두께가 접합조건에 따라 변화함으로써 파단이 일어나는 단면적은 각각

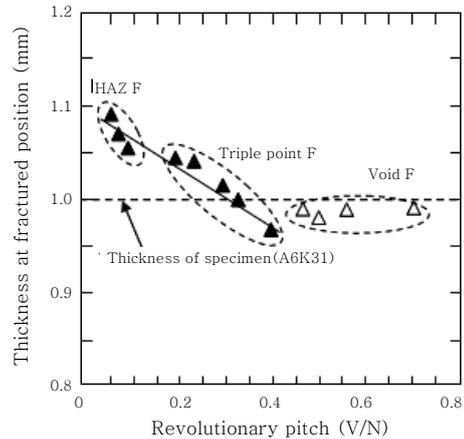


Fig. 11 Relation between revolutionary pitch and thickness at fractured position

다르게 된다. 그래서 입열(RP)에 따른 파괴기점에서 AA6K31의 두께 변화를 조사하여 보았다. Fig. 11은 그 결과를 나타낸 것으로, 입열이 클수록(RP값이 낮을수록) 오히려 후킹에 의해 AA6K31 두께가 두꺼워지는 것을 알 수 있으며, 보이드가 형성되는 시편은 접합조건과 관계없이 원모재 두께와 거의 동일함을 알 수 있다.

여기서 입열이 높은 경우, 파괴 기점에서 두께가 AA6K31의 원래 시편의 두께 1mm보다 큰 이유를 검토하면 다음과 같다. Fig. 12의 (a)는 RP가 0.1인 시편(1000rpm×100mm/min)의 단면조직이고, (b)는 (a)의 AS에 □로 표시한 부분을 확대한 광학현미경 조직이며, (c)는 (b)의 □로 표시한 영역을 EDX로 Mg을 mapping한 것(c)이고, (d)는 (b)의 아래 □를 확대한 SEM조직이다. (e)는 이들 사진을 바탕으로 파괴 기점이 접합/미접합부 경계 P점임을 모식적으로 그린 것이다. 이것으로부터 고입열인 경우에 KS5J32에 비하여 강도가 약한 AA6K31이 소성유동에 의해 상부 쪽으로 올라가는 후킹현상이 일어나고, 이 지점에서 AA6K31의 두께가 100 $\mu$ m정도 커지는 효과가 생긴다. 또한 접합부와 양모재의 3중점에서도 건전한 접합이 이루어짐에 따라 3중점에서 균열 핵이 발생하지 않고, 미접합부 교점인 p지점에서 균열이 발생하여 두께 방향으로 파괴되는 것을 알 수 있다.

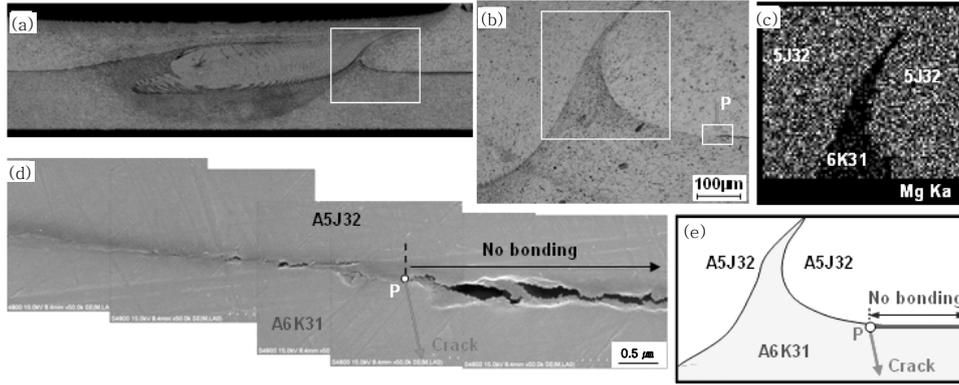


Fig. 12 Starting point of fractured position: (a) OM image, (b) Enlarged (a), (c) EDX Mapping (Mg), (d) SEM image at P, (e) Schematic of fractured position

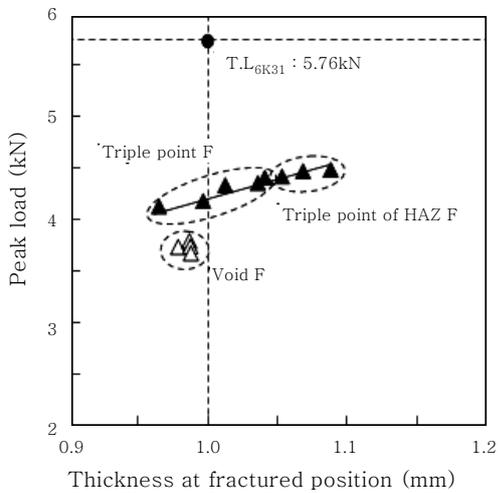


Fig. 13 Relation between thickness at fractured position and peak load

Fig. 13는 파괴지점에서 AA6K31의 두께와 인장하중과의 관계를 정리한 결과이다. 보이드가 존재하는 시편을 제외하고, 파단 형상 별로 두께가 증가함에 따라 인장하중이 약간 증가하는 것을 알 수 있다.

한편 파단위치의 AA6K31의 두께가 원소재 두께 1mm 보다 높지만, 피크하중이 모재보다 낮은 이유는 다음과 같은 2가지 원인으로 생각된다. 첫 번째로 Fig. 14는 각 접합조건에서 마찰교반접합부의 경도분포를 나타낸 것이고 Fig. 15은 입열량과 파단부 경도와의 상관관계를 나타낸 것이다. 이 결과로부터 파단부(F)는 모재보다 경도가 낮고, 입열량이 증가할수록 HAZ부 경도가 감소함을 알 수 있다. 일반적으로 AA6000계열의 강화상은  $Mg_2Si$ 지만 Cu가 첨가되면 Q phase (Cu-Mg-Si-Al phase)가 생성되어 강화된다. 이 석출물이 접합 열영향을 받아 고용됨에 따라 연화된 것으로 판단된다

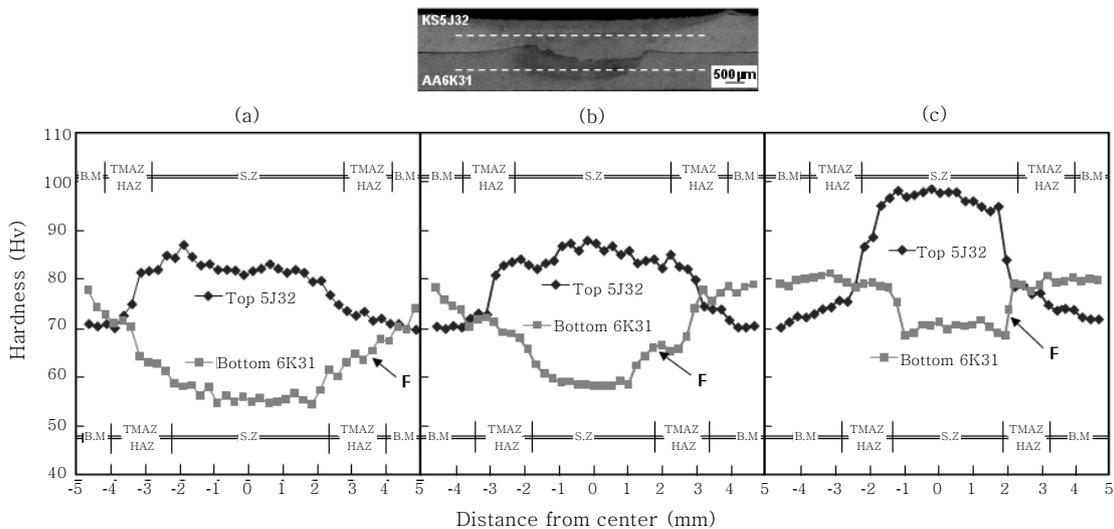
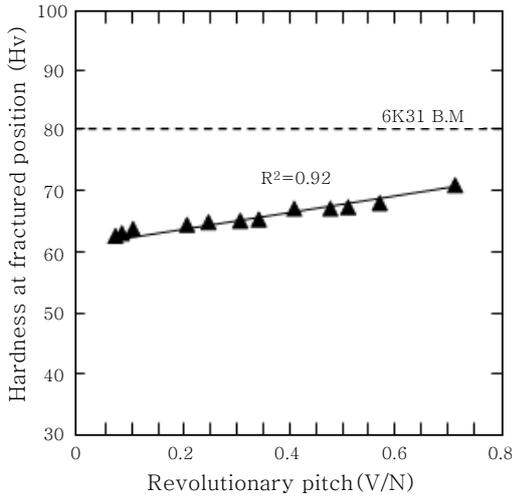


Fig. 14 Hardness distribution of friction stir lap welded (a) 1000rpm-100mm/min, (b) 1000rpm-300mm/min, (c) 1000rpm-700mm/min



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

<sup>23,24)</sup> 이와 더불어 미접합부의 기점(Fig. 12의 P점)이 응력집중부로 작용하여, 균열이 쉽게 형성되기 때문인 것으로 생각된다.

#### 4. 결 론

KS5J32를 상판에, AA6K31합금을 하판에 두고 겹치기 마찰교반접합을 한 경우, 접합조건 및 입열에 따른 접합부 형상과 결합, 경도, 인장성질의 변화를 검토하고, 인장성질 저하의 원인을 고찰한 결과, 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) 회전피치(RP)가 0.15 이하인 입열이 높은 조건에서는 접합부 형상이 오니언링 형태를 나타내었고, 그 이상에는 오니언링이 보이지 않았으며, 더욱이 RP값 0.5 이상에서는 전진부(AS) 프로브 모서리 하단부에 보이드가 형성되었다.

2) 인장전단시험결과, 모든 접합조건에서 하판인 AA6K31에서 파단이 일어났고, RP값이 0.15이하인 고입열에서는 HAZ 연화부에서 파단이 일어났으며, 0.15이상에서는 양모재/미접합부 3중점에서 파단기점이 되어 파괴가 일어났다.

3) 보이드가 없는 접합부의 인장하중(피크하중)은 입열이 증가함에 따라 직선적으로 증가하였고, AA6K31 모재의 78%~64% 수준이었다. 이것은 AA6K31의 파단기점(미접합부 기점)에서 입열이 증가할수록 후킹 현상이 발생하지만, 완전한 접합이 이루어져 판두께가 원래 두께(1.0mm)보다 증가하여 접합하중은 증가하지만, 접합열영향으로 연화되었기 때문에, 원모재보다는 낮았다.

4) 보이드가 존재하는 RP값이 0.45 이상인 저입열

에서는 모든 인장하중이 동일하고, 가장 낮았다. 이것은 보이드가 파괴기점이 되고, AA6K31 파단부 두께도 가장 많이 감소하였기 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 : Technical Notes/ JSAE Review, **21** (2000) 385-416
2. J. A. van der Hoeven, L. Zhuang, B. Schepers, P. De Smet and J. P. Baekelandt : Society of Automotive Engineers, Inc. 01-2128 (2002)
3. Takashi INABA, Kenji TOKUDA, Hiroyuki YAMASHITA, Yoshiki TAKEBAYASHI, Tadayuki MINOURA, Seiji SASABE : KOBELCO Technology Review, **26** (2005), 55-62
4. K. COLLIGAN : Welding Research Supplement, **7** (1999), 229-237
5. P. Staron, M. Koçak, S. Williams : Applied Physics A Materials Science & Processing, **74** (2002), 1161-1162
6. Y.C. Chen \*, K. Nakata : Materials and Design, **30** (2009), 469-474
7. Jamshidi Aval, H, Serajzadeh, S, Kokabi, A H, Loureiro, A : Science and Technology Welding and Joining, **16-10** (2011), 597-604
8. Sang-Woo Song, Byung-Chul Kim, Tae-Jin Yoon, Nam-Kyu Kim, In-Bae Kim and Chung-Yun Kang : Material Transactions, **51-7** (2010), 1319-1325
9. Tae-Jin Yoon, Sang-Ju Kim, Nam-Kyu Kim, Sang-Woo Song, and Chung-Yun Kang : Journal of KWJS **29-5** (2011), 580-587 (in Korean)
10. Smith, C.B. : 2nd Friction Stir Welding International Symposium, **6** (2000)
11. Zhaohua Zhang, Xinqi Yang, Jialong Zhang, Guang Zhou, Xiaodong Xu and Binlian Zou : Materials and Design, **32** (2011), 4461 - 4470
12. L. Dubourg, A. Merati, M. Jahazi : Materials and Design, **31** (2010), 3324-3330
13. Vijay Soundararajan, Eswar Yarrapareddy, Radovan Kovacevic : Journal of Materials Engineering and Performance, **16-4** (2007), 477-484
14. Chang-Yong Lee, Won-Bae Lee, Jong-Woong Kim, Don-Hyun Choi, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung : Journal of Materials Science, **43** (2008), 3296-3304
15. Hee Sang Park, Jun Bin Ko, Won Doo Choi and Man Young Choi : Journal of the Korean Society for Precision Engineering, **27-3** (2010), 66-72

16. L. CEDERQVIST, A. P. REYNOLDS : *Welding Journal*, 2001
17. Tae-Jin Yoon, Sang-Ju Kim, Sang-Woo Song, Jae-Keun Hong and Chung-Yun Kang : *Journal of KWJS*, **29-2** (2011), 72-79 (in Korean)
18. M.A. Gharacheh, A.H. Kokabi, G.H. Danehsi, B. Shalchi and R. Sarrafi : *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, **46** (2006), 1983-1987
19. K. Nakata, Y.G. Kim, M. Ushio, T. Hashimoto, and S. Jyogan : *ISIJ International*, **40** (2000), 15-19
20. LIMING KE, LI XING, and J.E. INDACOCHEA : *Metallurgical and Materials Transactions B*, **35B** (2004), 153-160
21. P. Edwards, and M. Ramulu : *Science and Technology of Welding and Joining*, **14** (2009), 669-680
22. George E. Dieter : *Mechanical Metallurgy (SI Metric Edition)*, McGraw Hill Book, 1988, 76-78
23. W.Gan, K.Okamoto, S.Hirano, K.Chung, C.Kim and R.H.Wagoner : *Journal of Engineering Materials and Technology*, **130-7** (2008), 1-15
24. Shinji Matsuda, Tsutomu Hattori, Masahito Katsukura, Tadashi Minoda : *United States Patent*, 6464805, 2002