J. Kor. Powd. Met. Inst., Vol. 20, No. 4, 2013
DOI: 10.4150/KPMI.2013.20.4.302

# A5J32/A5052 이종 알루미늄 합금 겹치기 마찰교반접합부의 인장성질에 미치는 재료배열 및 접합조건의 영향

**윤태진 · 강명창 · 강정윤***
부산대학교 하이브리드소재솔루션 국가핵심연구센터(NCRC)

# Effects of Welding Conditions and Material Arrangement on Tensile Properties of Friction Stir Lap Welded of Dissimilar Al Alloy, A5J32/A5052

**Tae-Jin Yoon, Myung-Chang Kang and Chung-Yun Kang***
*National Core Research Center for Hybrid Materials Solution, Pusan National University, San 30, Jangjeon-Dong, Geumjeong-Gu, Busan 609-735, Korea*
(Received August 20, 2013; Accepted August 26, 2013)

**Abstract** A5J32-T4 and A5052-H32 dissimilar aluminum alloy plates with thickness of 1.6 and 1.5 mm were welded by friction stir lap welding (FSLW). The FSLW were studied using different probe length tool and various welding conditions which is rotation speed of 1000, 1500 rpm and welding speed of 100 to 600 mm/min and material arrangement, respectively. The effects of plunge depth of tool and welding conditions on tensile properties and weld nugget formation. The results showed that three type nugget shapes such as hooking, void, sound have been observed with revolutionary pitch. This plunge depth and material arrangement were found to effect on the void and hooking formation, which in turn significantly influenced the mechanical properties. The maximum joint efficiency of the FSLWed plates was about 90% compared to base metal, A5052-H32 when the A5052-H32 was positioned upper plate and plunge depth was positioned at near interface between upper and lower plates.

**Keywords :** Friction stir lap welding, Dissimilar aluminum alloy, A5052, A5J32, Tensile shear test

## 1. 서 론

알루미늄 합금은 경량 합금이면서도 비강도가 높기 때문에 차체 무게 절감에 따른 연비 향상효과가 우수하고, “에너지 은행”이라 불릴 정도로 폐기 시 재활용성이 우수하므로 2차 산업의 지속적인 성장을 유지하고 있다[1]. 2차 산업 중에서도 특히 자동차산업에서는 A5xxx A6xxx series가 차체의 Main body frame[2], Stringer, Closure panel, Firm panel, Beam assemblies[3] 등 다양한 부분에 적용되고 있다. 따라서 복잡한 형상의 제품을 접합하기 위해서 맞대기 이음부보다 다양한 형상에 적용이 가능한 겹치기 이음부가 적용이 확대되고 있다.[4]

겹치기 형상의 구조물을 접합하기 위해서는 주로 저항 점용접(Resistance Spot Welding)법과 기계적 체결법인 Self Pierce Rivet법이 사용되고 있지만, 알루미늄 합금은 용융용접 적용 시 응고 결함 등의 결함이 발생하고, Rivet 적용 시 틈부식이 발생하므로 난용접성(Unweldable) 재료로 분류되고 있다[5].

알루미늄 합금 접합 시 발생하는 문제점을 해결하기 위해 고상접합방법인 마찰교반접합(Friction Stir Welding)법이 주목받고 있다. 알루미늄 맞대기 마찰교반접합에 대한 연구는 접합 효율이 모재대비 90% 이상의 우수한 연구들이 많이 보고되었지만[6], 겹치기 마찰교반접합에 대한 연구는 미진하고 접합 효율 또한 맞대기에 비해 현저히 떨어진다. 겹치기 마찰교반접합부의 접합효율이 더 낮은 이유는 전진부(Advancing side)와 후진부(Retreating side)의

*Corresponding Author : Chung-Yun Kang, **TEL:** +82-51-510-2428, **FAX:** +82-51-510-4457, **E-mail:** kangcy@pusan.ac.kr

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

| Material | Mg | Si | Cr | Mn | Cu | Zn | Fe | T.S(MPa) | EL.(%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| A5052-H32 | 2.51 | 0.28 | 0.15 | 0.16 | - | 0.08 | Bal. | 234 | 11 |
| A5J32-T4 | 5.68 | 0.11 | 0.09 | 0.005 | 0.20 | 0.09 | Bal. | 298 | 38 |

비대칭적인 소성유동 현상이 맞대기 보다 더 복잡하고 접합 후 접합계면의 변형에 의해서 발생되는 보이드(Void), 훅킹(Hooking) 등의 결함 때문이다. 따라서 겹치기 마찰교반접합부의 결함 발생을 억제함으로서 접합효율을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행 중이다.

C.Y Lee *et al*.[7]는 이종 알루미늄 A5052-H112와 A6061-T6에 툴 회전속도, 접합속도와 재료배열을 변화시켜 겹치기 마찰교반접합을 실시하였다. 이 실험에서 상대적으로 경질인 A6061-T6재료가 상판에 있을 경우가 강도가 상대적으로 더 높고, 접합속도가 빠르고, 회전속도가 느릴 때 강도가 더 높다고 보고하였다. O.K. Mishira *et al*.[8]는 이종 알루미늄 A6082-T6와 A6083-T4에 Flaredute$^{TM}$ 툴을 사용하여 툴의 회전방향을 변화시켜 겹치기 마찰교반접합을 실시하였다. 툴의 회전방향을 반시계 방향으로 회전할 경우 훅킹이 감소하여 접합강도가 증가한다고 보고하였다. Arthur Scafe *et al*.[9]은 알루미늄 A6061-T6와 A5754-T6에 겹치기 마찰교반접합을 실시하였다. 접합부의 강도저하 원인은 상판의 두께가 얇아지는 훅킹 때문이고, 툴 디자인에 의해서 생성되는 접합 계면 변형(Interface deformation)에 의한 결함이라고 보고하였다. 두께가 얇아지는 훅킹을 줄이기 위해서는 툴 삽입깊이를 조절하는 것이 필요하다고 보고 하였다. 그러나 전술한 연구 결과 대부분이 국한된 범위의 접합변수만 사용하였고, 겹치기 마찰교반접합의 대표적인 결함인 훅킹과 보이드의 발생조건에 대한 체계적인 설명이 부족하다. 따라서 이종재료의 폭넓은 적용을 위해서 넓은 범위의 접합조건을 이용하고, 입열량단위(Revolutionary Pitch)로 환산하여 입열량에 따라 변화하는 현상과 프로브길이가 다른 툴을 사용하여 삽입깊이에 따라 변화하는 현상에 대한 체계적인 연구가 필요하다.

본 연구에서는 자동차 도어용 이종 알루미늄 합금 A5J32와 A5052의 겹치기 마찰교반 접합부의 인장성질에 미치는 재료배열 및 접합조건의 영향을 알아보기 위하여, 재료배열과 툴 삽입깊이를 변화하고 회전속도와 접합속도를 일정한 범위로 변화 시켜 입열에 따른 결함, 인장성질, 경도, 파단분석을 검토하고자 한다.

## 2. 실험장치 및 방법

본 연구에서 사용한 재료는 자동차용으로 널리 사용되고 있는 5000계 알루미늄 합금 중 가공경화형 전신재 합금인 A5052-H32 합금과 도장 소부(Paint baking) 처리 후 석출강화에 의한 강도저하를 방지하고, 성형성이 우수한 A5J32 합금을 접합재로 사용하였으며, 두 합금의 두께는 각각 1.5 mm, 1.6 mm를 사용하였다. 두 합금의 화학조성과 인장성질은 표 1에 나타내었다. 시험편 제작은 크기 150 mm × 150 m로 절단한 두 판재를 60 mm씩 겹쳐 두 모재가 겹쳐진 부분을 중심으로 마찰교반접합을 실시하였고, 이 모식도는 그림 1에 나타내었다. 실험에 적용한 접합변수는 툴의 회전속도 1000, 1500 rpm과 접합속도 100~600 mm/min으로 변화 시켜 실험을 진행하였다. 사용된 툴은 일반적으로 많이 사용되는 나사산을 가지는 원통형 (Cylindrical threaded) 형상으로서 숄더직경 10 mm, 프로브 직경 3.2 mm, 프로브 길이가 1.6, 1.7, 1.8, 1.9 mm인 네 가지 다른 툴을 사용하였다. 모재 및 접합부의 조직관찰은 다음과 같이 실시하였다. 접합조건과 툴에 대한 정보는 표 2에 나타낸다.

**Table 2. Welding conditions and tool shape**

| Rotation speed(RPM) | 1000, 1500 |
|---|---|
| Welding speed(mm/min) | 100,200,300, 400,500,600 |
| Shoulder Dia.(mm) | 10 |
| Probe Dia.(mm) | 3.8 |
| Probe Length(mm) | 1.6,1.7,1.8,1.9 |
| Tool shape | Cylindrical threaded |
| Tool material | SKD61 |

각각의 접합조건으로 실험한 시편을 FSW 진행방향과 수직으로 절단하여 연마한 후, 평균 입경 0.1 μm의 산화알루미늄 분말과 메틸계 윤활제를 연마포에 도포하여 정마를 하였다. 접합부 단면의 마이크로 조직은 켈러(Keller's

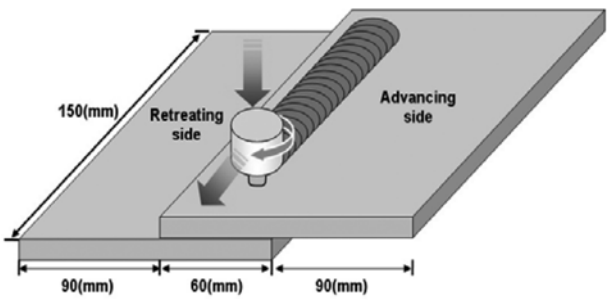


**Fig. 1. Schematic drawing of joining materials.**

reagent) 용액을 이용하여 수십 초간 부식 시킨 후 광학현미경(Olympus-BX51M)을 사용하였다. 접합부 기계적 특성을 관찰하기 위해 마이크로 비커스 경도기(Mitutoyo 810-126K)를 사용하여 하중(load)을 100 gf, 하중유지시간을 10초로하여 단면에 평행하게 측정하였다. 인장시험 시험편은 박판재의 인장시험에 적합한 ASTM A 370호 시험편을 선택하였고, 접합부가 인장방향과 수직인 시편으로 가공하여 사용하였다. 시험기는 만능시험기(Instron-8501)를 사용하여 크로스 헤드속도(Crosshead speed)를 2 mm/min으로 설정하고 시험하였다. 선택된 조건의 시험편을 5번씩 인장시험을 실시한 후 최소값과 최대값을 제외한 3개 값의 평균을 나타내었다.

## 3. 실험결과 및 고찰

### 3.1. 접합조건에 따른 결함발생 유무

그림 2는 접합 조건 및 툴 삽입깊이의 변화에 따른 겹치기 마찰교반접합부의 대표적인 단면조직을 나타낸 것이다. 그림 2(a)는 겹치기 마찰교반접합부에서 나타나는 전형적인 결함 중의 하나인 보이드(Void)결함을 나타내고, 그림 2(b)는 훅킹(Hooking) 결함을 나타낸다. 일반적으로 보이드 결함은 접합 시 입열이 부족할 경우 재료의 유동성이 부족하여 프로브가 지나간 자리를 채우지 못하고 발생하는 일종의 충진불량 결함이고[10], 훅킹결함은 접합계면이 미접합된 상태로 툴 나사산에 의해 상판으로 밀려올라가거나 하판으로 밀려내려가서 모재의 두께보다 얇아지는 결함이다[11]. 한편 그림 2(c)는 결함이 없는 건전한 접합부를 나타낸다. 모든 결함의 생성 위치는 접합부의 오른쪽인 전진부(Advancing side)에서 발생하고 있다.

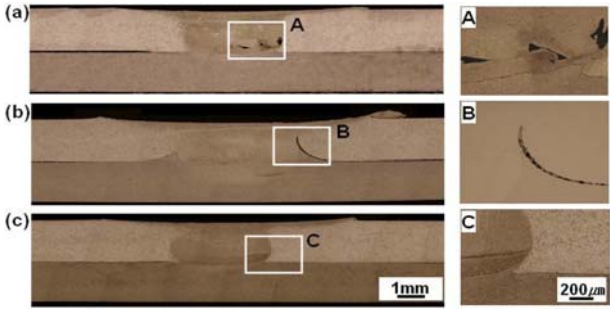


**Fig. 2. Cross-section of shape of nugget zone. (a) Void Defect, (b) Hooking defect, and (c) Defect free nugget**

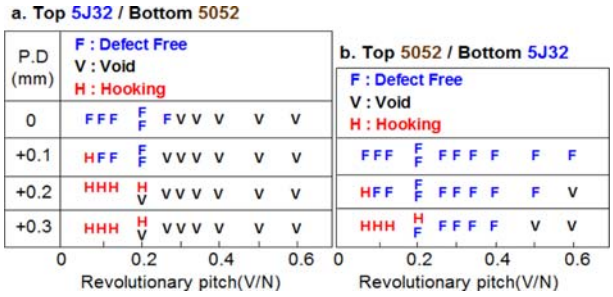


**Fig. 3. Relationship between revolutionary pitch and nugget shape (Void, Hooking, Defect free).**

일반적으로 툴의 회전방향과 접합진행 방향이 반대인 위치를 후방부(Retreating side), 툴의 회전방향과 접합진행 방향이 같은 위치를 전진부(Advancing side) [12]로 나타낸다.

마찰교반접합의 경우, tool의 회전속도와 접합속도는 아크용접에서 용접전류, 아크전압과 용접속도와 유사한 접합변수이다. 이들 변수의 조합에 의해 정의되는 FSW 파라메타는 접합속도(V)를 공구의 회전속도(N)로 나눈 회전피치(Revolutionary Pitch(RP)=V/N)를 FSW 입열량의 파라메터로서 사용할 수 있다[13, 14]. 이것으로부터 입열량과 접합부 결함 발생과의 상관관계를 조사하였다. 그림 3은 회전피치와 접합부 결함 발생과의 상관관계를 나타낸 것이다. 상판에 A5J32를 위치할 경우, 툴 삽입깊이가 0.2 mm이상일 때 모든 접합조건에서 결함이 발생하였고, 회전피치 0.2를 기준으로 회전피치 값이 작은 경우 즉, 입열이 큰 경우 훅킹 결함이 발생하였고, 회전피치 값이 클 경우 즉, 입열이 작은 경우 보이드 결함이 발생하였다. 한편 회전피치가 0.2일 경우 회전속도가 상대적으로 빠른 1500 rpm일 경우 훅킹 결함이, 1000 rpm일 경우 보이드 결함이 발생하였다. 툴 삽입깊이가0.1 mm인 경우, 회전피치가 0.07인 조건(1500 rpm-100 mm/min)에서만 훅킹 결함이 발생하였고, 회전피치가 0.27이상인 접합조건에서는 보이드 결함이 발생하였고, 회전피치가 0.1~0.2인 경우는 결함이 없는 접합부를 가진다. 프로브 위치가 계면에 위치하는 툴 삽입깊이가 0 mm인 경우, 회전피치가 0.27이상인 접합조건에서 는 보이드 결함이 발생하였고, 그 이하인 경우는 결함이 없는 건전한 접합부를 가진다. 한편, 두 재료를 반대 배열로 위치한, A5052판재를 상판에 위치했을 때, 건전한 접합부를 가지는 영역이 넓어졌음을 알 수 있다. 툴 삽입깊이가 0.3 mm인 경우, 회전피치값이 0.3~0.4의 좁은 영역에서 결함이 없는 건전한 접합부를 얻을 수 있었지만 툴 삽입깊이가 0.2 mm인 경우, 입열이 가장 큰 0.07과 입열이 가장 작은 0.6의 결함조건을 제외하고 모든 조건에서 건전한 접합부를 얻을 수 있었다. 또한 툴 삽입깊이가 0.1 mm인 경우 모든 접합조건에서 건전한 접합부를 얻을 수 있는 것이 특징이다. 이 결과로부터 재료배열에 관계없이 툴 삽입깊이가 짧을수록 즉, 툴 삽입위치가 접합계면에 가까이 위치할수록 결함이 없는 건전한 접합부를 얻을 수 있는 영역이 넓어짐을 알 수 있었다. 한편 상대적으로 연질인 A5052가 상판에 위치할 때 상대적으

로 결함 발생이 작은 것을 알 수 있었고 결함 발생이 작은 이유는 다음과 같다. 두 재료 중 상대적으로 연질재료인 A5052가 상판에 위치하였을 때, 재료가 숄더와 직접적인 마찰로 인해 충분한 연화가 발생하여 너깃 내부에서의 유동성이 좋아지기 때문에 충진 불량인 보이드 발생이 적은 것으로 생각된다.

### 3.2. 접합부의 피크하중과 파단형태 분류

그림 4는 인장전단시험 한 경우의 회전속도와 접합속도에 따른 피크하중의 변화를 나타낸 것이고, 그림 4(a)는 상판에 A5J32를 위치하였을 경우, 그림 4(b)는 상판에 A5052를 위치하였을 경우를 각각 나타낸다. 입열량의 파라미터로서 사용되며, 접합속도와 툴의 회전속도가 함께 함수로 표현되는 회전피치(R.P.)와 피크하중과의 관계를 조사하고, 피크 하중에 해당하는 파단형태를 분류하여 함께 Fig. 5에 나타낸다. 여기서 솔리드 마크들은 결함이 존재하지 않는 건전한 접합부를 가지는 시편을 나타내고, 오픈마크들은 결함이 있는 경우이고 훅킹 결함과 보이드 결함 두 가지로 나누어진다.

A5J32와 A5052의 모재 인장강도는 각각 298 MPa과 234MPa이고, 상대적으로 낮은 인장강도를 가지는 A5052를 기준으로 피크하중을 계산하였다. A5052 모재 인장시험편의 단면적(20 mm(w) × 1.5 mm(t))과 인장강도로부터 4.38 kN의 피크하중을 계산하여 비교 모재 하중으로 표시하였다. 이 결과로부터 보이드 결함이 존재하지 않으면 회전피치값이 증가할수록 피크하중은 직선적으로 감소하는

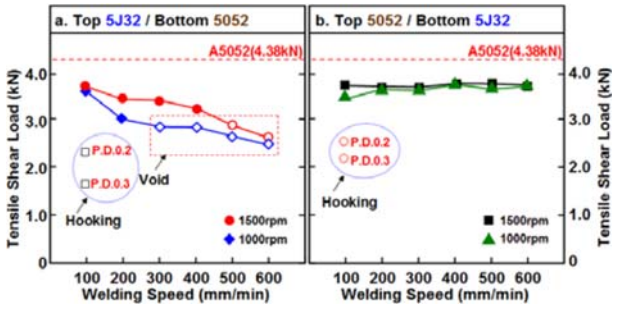


**Fig. 4. Relation between peak load and welding speed.**

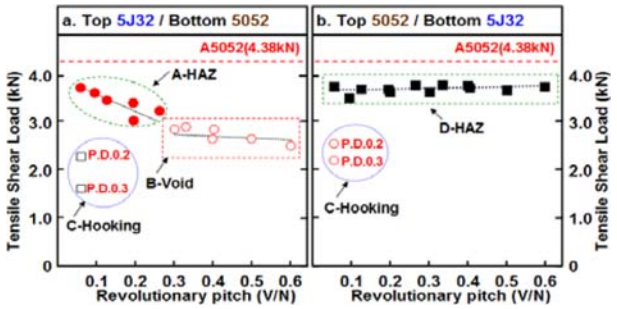


**Fig. 5. Relation between peak load and revolutionary pitch.**

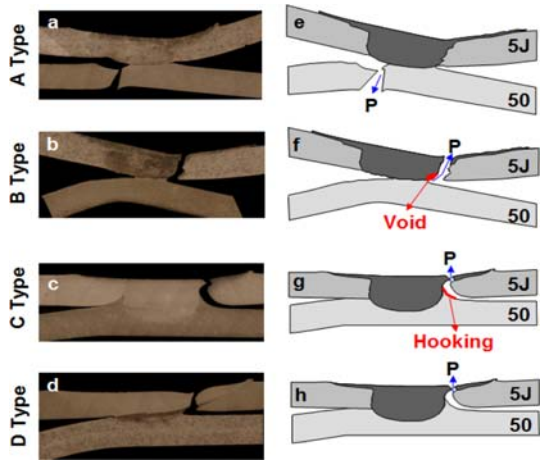


**Fig. 6. Classification of fracture type on all condition.**

경향을 나타내었고, A5052 모재 대비 약 71%~90%이었다. 또한 회전피치 값이 0.3이상인 조건에서 보이드가 발생하였고, 피크하중은 A5052 모재 대비 약 51%~62%로 낮다. 또한 툴 삽입깊이가 0.2, 0.3 mm일 경우는 약 48%~37%로 매우 낮다. 한편 반대 배열인 A5052가 상판에 위치할 경우 모든 조건에서 피크하중은 A5052 모재대비 약87% 이상으로 높게 나타났다. 접합조건에 따라 피크하중이 차이가 나는 이유를 파악하기 위하여, 파단형태를 분류하여 그림 6에 나타낸다. 그림 6의 (a)와 같이 하판 A5052의 HAZ에서 파단한 형상(A-Type)과 (b)와 같이 A5052의 전진부의 보이드에서 상판으로 파단한 형상(B-Type)과 (C)와 같이 A5052의 전진부의 훅킹을 따라 상판으로 파단한 형상(C-Type)과 (d)와 같이 상판 A5052의 HAZ로 파단한 형상(D-Type) 4가지로 분류된다. 그림 5과 그림 6으로부터 훅킹 결함이 발생하여 피크하중이 가장 낮은 조건은 C-Type파단, 보이드 결함이 발생하는 조건은 B-Type파단, A5J32가 상판에 위치할 경우 결함이 없는 조건은 A-Type 파단 그리고 반대배열인 A5052가 상판에 위치할 경우 결함이 없는 조건은 D-Type 파단이 발생되었다.

### 3.3. 접합조건에 따른 피크하중 저하에 대한 고찰

접합조건에 따라 인장하중이 다른 이유를 살펴보면 다음과 같다. 그림 2의 접합부 형상과 그림 6의 파단 위치에서 알 수 있는 바와 같이, 파단부위의 두께가 접합조건에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 따라서 회전피치에 따른 파단지점의 두께 변화를 조사하여 A5J32를 상판에 위치한 결과와 A5052를 상판에 위치한 결과를 그림 7에 각각 나타낸다. 보이드 발생조건과 훅킹 발생조건을 제외하면 A5052 HAZ에서 파단된다. 여기서 회전피치가 커질수록 두께는 감소하게 된다. 한편 입열이 높은 경우, 파단부의 두께가 모재 두께1.5 mm보다 더 두꺼워지는데 이것은

A5J32에 비하여 상대적으로 강도가 약한 A5052가 소성유동에 의해 위쪽으로 밀려올라가는 일종의 훅킹현상이 발생하지만 툴과 재료의 마찰과 그에 따른 높은 접합온도로 인해 접합이 되기 때문에 원모재보다 두께가 증가하는 것으로 생각된다.

한편 반대 배열에서는 입열에 따른 파단부의 두께 차이가 0.1 mm 미만으로 두께차이가 거의 없는 것이 특징이다. 두께 차이가 없는 이유는 전술했듯이 상판에 위치한 A5052가 상대적으로 유동성이 좋기 때문에 숄더의 좌우 회전유동의 영향을 더 많이 받아 두께차이가 거의 없는 것으로 생각된다. 또한 같은 접합속도와 회전속도 조건임에도 불구하고 툴 삽입깊이에 따라서 피크 하중저하가 일어나는 이유를 그림 7에 나타낸다.

툴 삽입깊이와 재료배열에 따라서 훅킹이 발생하는 길이와 형상이 다르게 발생한다. 그림 8(a), (b)는 A5J32가 상판에 위치한 경우, 하판으로 0.2 mm, 0.3mm 삽입한 경우를 각각 나타낸다, 훅킹의 형상은 상하로 길게 늘어가는 형태를 나타내었고, 삽입깊이가 0.2 mm일 경우 0.492 mm, 삽입깊이가 0.3 mm일 경우 1.011 mm까지 미접합부가 모재의 약 30%~60%이상 밀려 올라갔다. 한편 재료배열이 반대인 경우 즉, A5052가 상판에 위치한 경우, 하판으로 0.2 mm, 0.3 mm 삽입한 경우를 각각 그림 8(c), (d)에 나타낸다. 훅킹형태는 상하로 밀려올라가기 보다는 좌우로 휘어지는 형태를 나타내었다. 삽입깊이가 0.2 mm일 경우 0.380 mm, 삽입깊이가 0.3 mm일 경우 0.493 mm까지 미접합부가 모재의 약 25%~32%이상 밀려 올라갔다. 여기서 훅킹형태가 다른 이유는 다음과 같다. 상대적으로 연질인 A5052가 하판에 위치하는 경우, 프로브의 나사산에 의한 상하응력을 많이 받아 훅킹형태가 상하로 밀려올라가는 형태를 나타내고, A5052가 상판에 위치하는 경우는 숄더의 좌우응력을 많이 받아 좌우로 휘어지는 훅킹형태를 나타내는 것으로 생각된다.

그림 9는 파단부의 두께와 피크하중과의 상관관계를 나타낸 결과이다. 결함이 존재하는 접합조건을 제외하면, 파단부 두께가 증가함에 따라 피크하중이 증가하는 것을 알 수 있다. 한편 두께 감소분보다 피크하중이 낮아지는 이유를 알아보기 위하여 파단부분의경도분포를 측정하였다. 그림 10은 회전피치에 따른 파단위치의 경도값의 변화를 나타낸다. 이것으로부터 파단부는 모재보다 경도가 낮고 입열이 증가함에 따라 경도값이 낮아짐을 알 수 있다. A5052-H32 합금은 열처리형 합금으로서 열간 압출 후 열

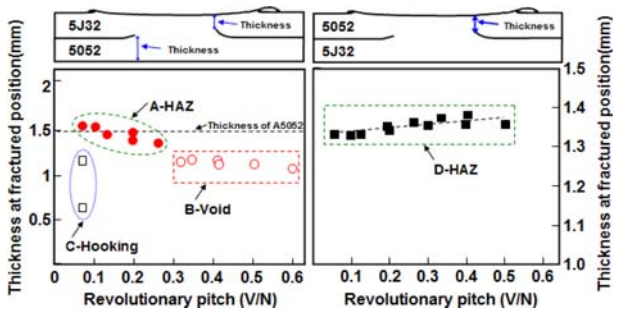


**Fig. 7. Relation between revolutionary pitch and thickness at fractured position.**

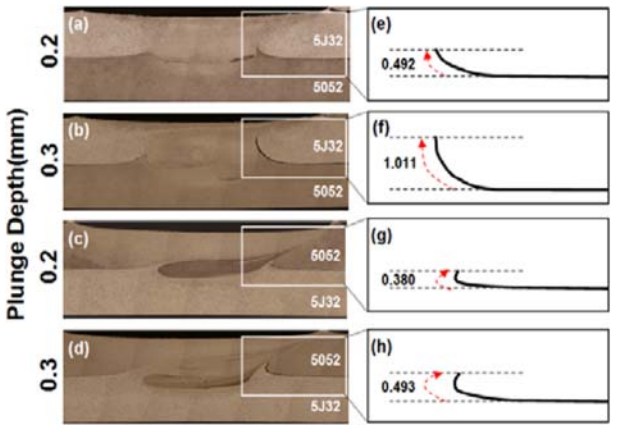


**Fig. 8. Variations of hooking height with welding conditions.**

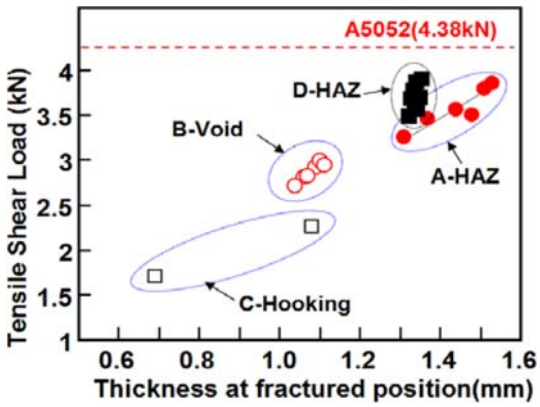


**Fig. 9. Variations of hooking height with welding conditions.**

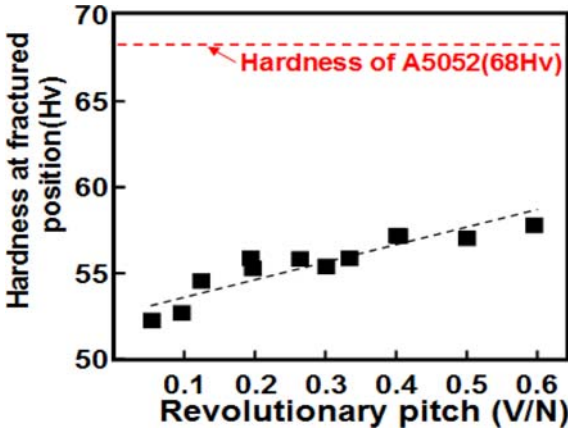


**Fig. 10. Relation between hardness at fractured position and revolutionary pitch.**

처리 조건에서 제조되었기 때문에 열영향부에서 접합 시 발생하는 높은 접합온도에 의한 어닐링(Annealing)효과에 의해 경도 저하가 일어난 것으로 판단된다[7].

## 4. 결 론

이종 알루미늄 합금 A5J32와 A5052를 겹치기 마찰교반 접합 한 경우 재료배열과 접합조건 및 입열에 따른 결함, 인장성질, 경도, 파단분석을 검토한 결과로 부터 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 재료배열에 관계없이 툴 삽입깊이가 짧을수록 즉, 툴 삽입위치가 접합계면에 가까이 위치할수록 결함이 없는 건전한 접합부를 얻을 수 있는 영역이 넓어짐을 알 수 있었다.

2. 이종 재료 중 상대적으로 연질인 A5052재료가 상판에 위치할 때 결함발생이 상대적으로 적은 것을 알 수 있었다. 결함 발생이 적은 이유는 상대적으로 연질인 A5052가 숄더와 직접적인 마찰로 인해 충분한 연화가 발생하여 유동성이 좋아지기 때문에 충진 불량인 보이드 발생이 적은 것으로 생각된다.

3. A5J32가 상판에 위치할 경우, 결함이 존재하지 않으면 회전피치값이 증가할수록 피크하중은 직선적으로 감소하는 경향을 나타내었고, A5052 모재 대비 약 71%~90%의 높은 접합강도를 얻을 수 있다.

4. 모든 파단위치는 A5052에서 파단되었으며, 하판 HAZ에서 파단한 형상, 상판의 HAZ에서 파단한 형상, 전진부의 보이드를 기점으로 파단한 형상, 전진부의 훅킹을 따라 상판으로 파단한 형상 4가지로 분류된다.

5. 접합부 피크하중 저하 원인은 첫째, 접합조건에 따라서 파단부위의 두께가 변하기 때문이다. A5J32가 상판에 있을 때 하부의 A5052가 상부로 훅킹되지만 입열이 클 경우 온도가 높아 접합이 되어 두께가 오히려 증가하였다. 반면 입열이 작은 경우 미접합부가 밀려올라가기 때문에 두께가 감소한다. 둘째, 파단부위인 A5052 HAZ가 높은 접합온도에 의한 어닐링(Annealing)효과에 의해 경도 저하가 일어났기 때문이다.

## 감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2012R1A5A1048294)

## 참고문헌

[1] A. S. John: Green, Editor, ASM international. December, 2007.
[2] J.-W. Lee, S. S. Yang and Y.-J. Kim: Journal of Korean Powder Metallurgy Institute, **14**(6) (2007).
[3] L. Dubourg and A. Merati: M. Jahazi, Mater. Des., **31** (2010) 3324-3330.
[4] Wesley Martin, Bob Anderson, Ron Jones and Zach Loftus: Lockheed Martin Space Systems.
[5] R. Johnson and S. W. Kallee: Mater. World, **7**(12) (1999) 751-53.
[6] E. Aldanondo, A. A. M da Silva, P. Alvarez, A. Lizarralde and A. Echeverria: Friction stir welding and processing V TMS (2009).
[7] C.-Y. Lee, W.-B. Lee, J.-W. Kim, D.-H. Choi, Y.-M. Yeon and S.-B. Jung: J. Mater Sci, **43** (2008) 3296-3304.
[8] O. K. Mishira and A. Norlin: 4th International Symposium on Friction Stir Welding (2003).
[9] Arthur Scafe: Armondo Joaquin, SAE Technical Paper, 2004-01-1333.
[10] T. J. Yoon, S. J. Kim, S. W. Song, N. K. Kim and C. Y. Kang: Journal of KWJS, **29**(5), (2011) 82 (*Korean*).
[11] T. J. Yoon, S. J. Kim, S. W. Song, J. K. Hong and C. Y. Kang: Journal of KWJS, **29**(2) (2011) 72 (Korean).
[12] S. Babu, G. D. Janaki Ram, P. V. Venkitakrishnan, G. Madhusudhan Reddy and K. Prasad Rao: J. Mater. Sci. Technol., **28**(5) (2012) 414-426.
[13] Liming Ke, Li Xing and J. E. Indacochea: Metall. Mater. Trans. B, 35B, February 2004-153.
[14] Z. W. Chen, T. Pasang and Y. Qi: Materials Sci. Engin. A, **474** (2008) 312-316.