

# 알루미늄 합금 5052-H34/5J32-T4의 TWB 마찰교반용접 특성에 관한 연구 A Study on the Characteristics of TWB Friction Stir Welding for Aluminum Alloy 5052-H34 and 5J32-T4

박 현준\*, 이 문용\*, 김 홍주\*\*, 박근환\*

\* (주)성우하이텍 기술연구소

\*\* (재)포항산업과학연구원 용접센터

## 1. 서 론

현재 유럽, 일본, 미국 등 자동차 선진국에서는 자동차 경량화를 위해 Al합금의 차체 및 부품 적용 비율이 점차 확대되고 있으며 이들 Al합금에 대한 효율적이고 신뢰성이 높은 접합 기술 개발에 박차를 가하고 있는 실정이다. 지금까지 Al합금의 용접은 주로 GMA 용접에 의해 수작업과 반자동 용접에 의하여 제작되고 있으나 용접부 외관이 나쁘고 불균일할 뿐만 아니라 프레스 가공 시 용접부 균열이 발생하여 불량률이 높고 불균일 소성변형이 존재하는 등 많은 문제점을 내포하고 있다. 특히, 자동차 차체와 같이 사용 소재가 열전도도가 큰 Al 박판재일 경우 일반 용접으로 용접 시 입열량을 정확하게 제어하기 곤란하여 용입 불량이나 용락과 같은 용접상의 결함이 생기기 쉬운 특성이 있다.

따라서 본 연구에서는 최근에 세계적으로 각광 받고 있는 소입열 고속 용접법인 FSW 방법을 이용하여 용접후 가공이 필요 없을 뿐만 아니라 용입 불량이나 용락이 발생하지 않으면서도 미려한 외관을 가지는 차체 TWB용 시험편 제작기술을 개발하고자 한다. 그리고 자동차 차체용 5J32 및 6K21 알루미늄 판재의 동종 및 이종, 동두께 및 이두께의 맞대기접합 및 TWB 접합 공정기술을 개발하고 공정 중 핵심기술인 FSW 접합 Tool의 최적공정조건을 확립하기 위해서 박판 Al소재의 접합부 특성 평가를 통한 FSW 공정의 최적화 조건을 확립하고자 한다.

## 2. 실험 방법

본 연구에 사용된 마찰교반용접 재료는 자동차용 알루미늄 합금인 5J32 및 6K21으로서 두께

와 그 화학적 조성 및 물리적 특성을 Table 1에 나타낸다.

Table 1 Chemical compositions of aluminum

Alloy	Temp.	Thick.	Si	Mg	Cu	Mn	Cr
5J32	T4	1.0/1.6t	-	5.5	0.3	-	-
6K21	T4	1.0/1.5t	1.0	0.6	-	0.08	-

Table 2 Physical properties of aluminum

Alloy	Temp.	TS N/mm <sup>2</sup>	YS N/mm <sup>2</sup>	EL. %	n- value	r- value
5J32	T4	290	140	34	0.36	0.61
6K21	T4	260	145	30	0.27	0.57

본 연구에 사용된 마찰교반용접기와 고정 지그 및 용접틀을 Fig. 1에 나타낸다. 이 장비는 접합속도, 톨의 회전속도 및 톨의 삽입속도를 제어할 수 있으며 3개의 서보모터로서 3축 제어가 가능하다. 또한 톨의 기울기(Tilting angle)를 두 방향에서 조절 가능하도록 함으로서 소재형상 및 이종두께의 접합이 가능하도록 제작되었다.

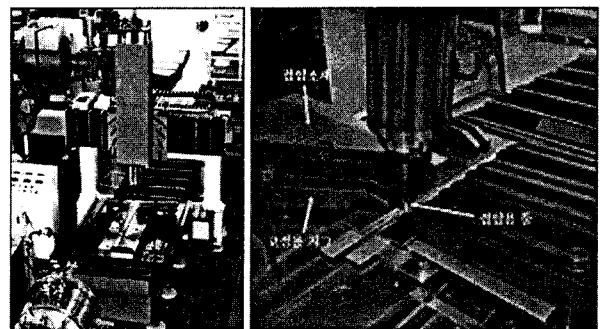


Fig. 1 FSW system and experimental setup

실험에 사용된 시험편은 단면관찰, 인장시험 및 성형성 시험 등의 재료시험을 고려하여 Fig. 2와 같이 300×75(mm)의 크기로 절단하여 사용되었으며 적용된 조건의 범위를 Table 3에 나타낸다. 본 연구에서는 용접진행방향에 대하여 시험편의 위치를 구분하였으며 틀의 회전방향에 대한 정의는 Fig. 2에 나타낸다. 즉 틀의 회전방향을 시계방향(clockwise) 또는 반시계방향(reverse)으로 정의하며 틀의 기울기에 대해서는 용접선과 틀이 이루는 각도인 전진각을 X방향이라 하고 그 수직인 기울기를 Y방향이라고 정의 한다. 용접실험에 있어서는 마찰교반 맞대기 용접특성을 분석하기 위하여 1.0t 박판의 동종 및 이종재료의 조합으로 마찰교반용접을 실시하였다. 또한 본 연구의 목표인 이종두께의 용접을 위해서는 두께 1.6t와 1.0t의 조합으로 동종 및 이종재료의 마찰교반용접을 행하였으며 최적의 용접조건을 도출하기 위하여 틀의 기울기 및 회전방향 등을 다양하게 변화시켰다.

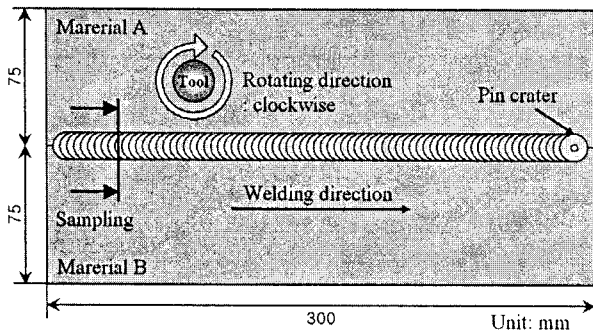


Fig. 2 Schematics of FSW Specimen and condition

Table 3 FSW parameter and range

Parameter	Range	Main
Material	5J32, 6K21	5J32, 6K21
Joining type	Butt, Lap, TWB	Butt, TWB
Rotating speed(RPM)	800~2000	1000, 1500
Rotating direction	clockwise, reverse	clockwise, reverse
Welding speed(mm/min)	100~400	200
Tilting angle	X	3°
	Y	0°~3°

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 맞대기 마찰교반용접 특성

##### 3.1.1 마찰교반용접부의 경도 분포

Fig. 3 및 Fig. 4는 접합부 단면의 비커스 경도 결과를 나타낸 것이다. 마이크로 비커스 경도를 측정해 본 결과 용접부의 경도값이 모재에 비하여 다소 높게 나타났으며 5J32의 경우가 현저하게 나타났다. 6K21의 경우 열영향부에서 현저하게 연화되는 현상이 관찰되었다. 이는 상대적으로 석출강화 효과가 큰 6000 계 합금인 6K21은 접합 시 발생하는 열로 인해 이러한 석출물들의 재용융이 발생하게 되어 현저하게 연화되는 것으로 판단된다.

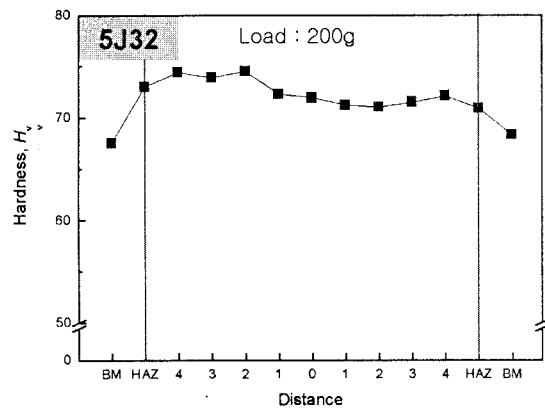


Fig. 3 Vickers hardness of 5J32 by FSW

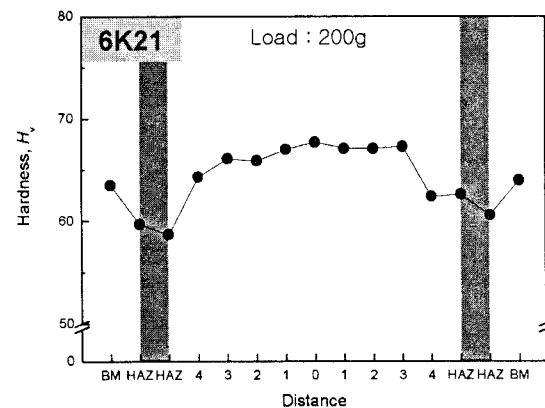


Fig. 4 Vickers hardness of 6K21 by FSW

##### 3.1.2 재료에 따른 맞대기 접합 특성

Fig. 5는 5J32 및 6K21의 맞대기 마찰교반 용접 결과를 나타낸다. 실험 결과 용접비드의 관은 6K21의 경우보다 5J32의 쪽이 미려한 모습을 보이고 있으며 이종재료의 용접에서는 RPM

의 변화에 관계없이 재료조합의 방향에 따라 큰 차이를 보이고 있다. 이는 용접단면에서도 차이를 확인할 수 있는데 5J32+6K21의 조합에 비하여 6K21+5J32조합 쪽이 소성유동에 의한 재료의 혼합이 원활히 이루어지고 있음을 알 수 있다. 다시 말해 Advancing side 쪽에 5J32를 위치시키는 경우가 교반의 정도가 더 좋은 것임을 알 수 있다. 이는 두 합금간의 고온에서의 초소성성의 차이에서 오는 것으로 판단된다. 이로 미루어 볼 때 이종재료의 용접 시 미려한 비드 외관을 얻기 위해서는 재료의 조합 방향도 반드시 고려해야 할 사항으로 볼 수 있다. 인장시험 결과에서는 5J32+5J32경우가 모재의 인장강도 대비 97.6%에 육박하며 가장 높은 값을 나타내었고 연신을 또한 모재의 88.2%에 이르고 있었다. 그 외 조합의 경우는 인장강도 및 연신율이 현저하게 감소하였다. 즉 5J32의 용접성은 비교적 양호한데 반하여 6K21의 용접성은 다소 떨어졌고, 이종재료의 용접에 있어서는 보다 열악한 재료의 용접특성을 따라간다는 사실을 알 수 있었다.

3.2 TWB 마찰교반용접 특성

TWB 이종두께 용접을 위해서는 맞대기 이음면에 단차가 존재하게 되므로 틀을 기울이는 것이 기본적인 개념으로 생각되어 진다. 또한 동두께의 재료조합과 달리 틀의 회전방향에 따라 단차부위의 재료 소성거동이 다르게 되므로 실험 변수로 선정하여 그 특성을 평가하고자 하였다.

Fig. 6은 각 재료조합별 기울기 및 틀 회전방향의 변화에 따른 접합단면, 비드외관 및 인장시험 결과를 보여준다. 틀의 회전속도 및 이송속도

FSW Butt : 200mm/min, clockwise rotation  
 Tilting angle : X axis=3°, Y axis=0°  
 Material : A=5J32, B=6K21

RPM	Photo. Material	Bead appearance	Cross section of bead
1000	A+A		
	B+B		
	B+A		
	A+B		
1500	A+A		
	B+B		
	B+A		
	A+B		

Fig. 5 Variation of FSW weld bead according to the material and welding condition

는 1000RPM 및 200mm/min으로 고정하고 Y축방향 기울기를 3.0°에서 2.5°로 변경하고 틀 회전방향을 변화시키며 접합특성을 분석하였다.

실험 결과 접합부 비드의관은 틀 회전방향이 반시계 방향인 경우가 시계방향인 경우보다 더 미려한 모습을 지니고 있었으며, 6K21의 경우보다 5J32의 쪽이 미려한 모습을 보이고 있었다. 단지 특이한 점은 6K21 동종의 경우와 6K21+5J32 이종의 경우는 비드 중심부에 두 소재의 단차의 흔적으로 보이는 라인이 희미하게 남아 있는 것을 관찰할 수 있었다. 또한, 틀 회전방향이 시계방향인 경우는 반시계방향인 경우보다 burr의 양이 더 많은 것을 알 수 있었다.

최초 설정조건에 대하여 기울기를 3.0°에서

FSW TWB 조건: 1000RPM, 200mm/min

재료 사진	틀 반시계방향 회전, X축 방향 Tilting 3°, Y축 방향 Tilting 3°	Y축 방향 Tilting 각의 변화 (3.0° → 2.5°), 틀 반시계방향 회전	틀 회전방향의 변화 (반시계방향 → 시계방향), Y축 방향 Tilting 3°
5J32+5J32			
6K21+6K21			
6K21+5J32			-

Fig. 6 Variation of FSW weld bead according to the tilting angle and rotation speed

2.5°로 변경한 경우 접합단면으로부터 표면의 기울기가 완만하게 된 것을 확인할 수 있었는데 그 이외에 접합단면 및 비드외관상의 특별한 차이점은 발견할 수 없었다. 최초 설정조건으로부터 툴의 회전방향을 시계방향으로 변경하였을 경우 물결모양의 연속된 burr가 후판쪽으로 부착되는 모습을 관찰할 수 있다. 이것은 재료의 소성유동이 후판쪽으로 이루어짐으로서 보다 풍부해진 재료들이 다량으로 밀려나오는 것으로 사료된다. 최초 설정조건인 반시계방향의 조건에서는 재료가 부족한 박판쪽으로 소성유동이 일어남으로서 burr의 발생이 감소된 것이다.

이상의 조건에 대한 인장시험 결과, 툴 회전방향의 경우는 반시계 방향이 시계방향에 비해 더 높은 인장강도와 연신율을 보였다. 특히 연신율이 시계방향에 비해 반시계 방향의 경우가 두 배 이상의 연신율을 나타내었다. 반시계 방향의 경우는 연신에 의해 네킹이 발생하였으나 시계방향의 경우는 네킹을 거의 관찰할 수 없었다. 한편 툴 기울기를 변화시킨 경우는 X축 3° 및 Y축 2.5°인 경우가 X축 3° 및 Y축 3°인 경우보다 높은 인장강도와 연신율을 나타내었다. 5J32 합금의 경우는 연신율에서 어느 정도 기울기 변화에 따른 차이를 보였으나 6K21 동종간, 6K21 + 5J32 이종간의 경우는 큰 차이를 나타내지 않았다. 최초 설정조건으로부터 툴의 회전방향을 시계방향으로 변경하였을 경우 물결모양의 연속된 burr가 후판쪽으로 부착되는 모습을 관찰할 수 있다. 이것은 재료의 소성유동이 후판쪽으로 이루어짐으로서 보다 풍부해진 재료들이 다량으로 밀려나오는 것으로 사료된다. 최초 설정조건인 반시계방향의 조건에서는 재료가 부족한 박판쪽으로 소성유동이 일어남으로서 burr의 발생이 감소된 것이다.

#### 4. 결 론

자동차용 알루미늄 합금인 5J32 및 6K21의 1.6t와 1.0t 판재에 대하여 마찰교반용접기술을 이용한 알루미늄 TWB 차체부품개발을 위한 접합 실험을 행하여 접합특성을 평가하였으며 그 실험 결과를 아래와 같이 정리한다.

1) 자동차용 Al 박판인 5J32-T4와 6K21-T4 합금에 대한 FSW 공정기술의 적용을 위한 맞대기한 동두께에 대한 예비실험 결과 5J32의 경우 툴 회전속도 1500rpm, 접합속도 200mm/min, 6K21의 경우 1500rpm, 300mm/min에서 가장 우수한 접합부를 얻을 수 있었다.

2) 맞대기 FSW실험 결과 접합단면에는 기공이나 크랙, 미접합부 등의 결함은 발견할 수 없었으나 비드 에지를 따라 많은 burr가 발생하였다. 이종재료의 butt 접합에 있어서는 재료의 조합 방향에 따라서 큰 차이를 나타내었는데, 6K21(툴진행방향의 왼쪽) + 5J32(툴진행방향의 오른쪽)의 조합이 그 역의 조합에 비하여 소성유동에 의한 재료의 혼합이 원활히 이루어지고 있었으며 인장강도 및 연신율이 값도 다소 높게 측정되었다.

3) 5J32 동종 butt 접합시 1500RPM 및 300mm/min의 조건에서 인장강도는 모재 대비 97.6%에 이르는 가장 높은 값을 보였으며 연신율은 88.2%에 이르고 있었다. 6K21의 경우에는 동일 조건에서 모재대비 78% 인장강도, 30% 연신율을 나타내고 있었다. 이종재료의 조합에서는 열악한 재료인 6K21의 특성과 유사한 결과를 얻었다.

4) 두 합금의 TWB 공정에 FSW 기술을 적용하기 위한 실험에서 툴 회전방향은 반시계방향, 툴 기울기가 X축 3° 및 Y축 2.5°의 조건에서 두 합금 모두 접합변수인 툴 회전속도 1500rpm, 접합속도 200mm/min의 경우에 가장 건전한 접합부를 얻을 수 있었다.

#### 참 고 문 헌

1. W.M. Thomas, E.D. Nicholas, J.C. Needham, M.G. Nurch, P. Temple-Smith, C. Dawes: Patents on Friction Stir Butt Welding, PCT British 9125978.8, 1995
2. S. Sheikhi, J.F. dos Santos, S. Losch: On the formability of friction stir welded aluminum tailored welded blanks, Final 5th FSW Symposium Metz France 2004
3. H.J. Liu, H. Fuji, M. Maeda, K. Nogi, J. Mater. Process. Technol. 142(2003) 692-696