

마찰교반 점용접(FSJ)을 이용한 자동차용 Al 합금의 접합성 평가

조현진* · 김홍주* · 천창근* · 장웅성* · 방국수**

*포항산업과학연구원(RIST) 용접센터

**부경대학교 일반대학원 소재프로세스공학과

Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Al Alloys for Automotive

Hyeon-Jin Cho*, Heung-Ju Kim*, Chang-Keun Cheon*, Woong-Seong Chang and Kook-Soo Bang**

*Welding Research Center, Research Institute of Industrial Science and Technology, Pohang 790-600, Korea

**Materials Processing Engineering, Pukyong University, Busan 608-739, Korea

Abstract

In an attempt to optimize friction spot joining process of Al alloys for automobiles, effects of joining parameters such as tool rotating speed, plunging depth, and joining time on the joints properties were investigated. A wide range of joining conditions could be applied to join Al alloys for automobile without defects in the weld zone except for certain welding conditions with a lower heat input. For sound joints without defects, tensile shear strength of joints was higher than acceptable criteria of tensile shear strength of resistance spot welded joints for aluminum.

* Corresponding author : balliant@nate.com

(Received July 25, 2005)

Key Words : Friction spot joining, Aluminum alloys, Al 5052, Al 6061, Tensile shear test, Hardness

1. 서 론

자동차 산업에서 알루미늄 합금은 엔진, 열교환기, 휠, 서스펜션 암, 범퍼빔 등에 사용되고 있다. 오늘날, 알루미늄의 적용분야는 차체분야에 까지 확대되어졌고 그 적용부분은 점점 넓어지고 있다. 현재 강재의 차체 조립을 위해 저항점용접(Resistance spot welding ; RSW)이 널리 쓰이고 있으나 알루미늄의 경우에는 높은 전기 에너지의 소모와 이에 따른 변형을 동반하는 문제점을 지니고 있다¹⁾.

FSW 공정을 응용한 새로운 기술인 마찰교반 점용접(Friction spot joining ; FSJ)는 이러한 점에서 최근 자동차 산업 등에서 주목받고 있다. 비용융 고상접합공정인 FSJ는 기존의 전기저항 점용접에서 발생하는 높은 에너지 소비량과 용융 용접된 접합부의 기계적 성질이 저하하는 등의 문제점을 해결할 수 있는 접합방법이다. 또한 기계적인 틀 기술에 기초하는 공정이므로

용접공정의 변화에 따른 생산성과 품질 편차가 적고 자동화가 용이한 이점을 지니고 있다. 현재 쉽게 연화되어질 수 있는 저용점 경량합금의 접합에 이 기술이 적용되어지고 있으며 폭넓은 적용을 위해 많은 연구들이 이루어지고 있다. 따라서 이 접합방법을 이용하여 최근 자동차 경량화 재료로서 각광을 받고 있는 5052와 6061 알루미늄 합금의 마찰교반 점용접부의 접합특성을 검토하였다.

2. 사용재료 및 실험방법

2.1 사용재료

본 연구에서 사용한 재료는 Al-Mg계 비열처리 가공 경화형 전신재 합금 Al5052-H34 합금(1t)과 Al-Mg-Si계 열처리 석출경화형 전신재 합금 Al6061-T6 합금(1t)를 이용하여 접합을 실시하였다. 사용된 재료의 화학성분과 기계적인 특성을 Table. 1에 나타내었다.

Table. 1 Chemical compositions and mechanical properties of Al6061-T6 and Al5052

Chemical composition (wt)(%)								
	Mg	Si	Cr	Mn	Cu	Zn	Fe	Al
Al 6061	1.0	0.7	0.2	0.15	0.2	0.25	0.7	bal.
Al 5052	2.6	0.25	0.25	0.1	0.1	0.1	0.4	bal.
Mechanical properties								
	Tensile Strength(MPa)		Elongation(%)		Yield Strength(MPa)			
Al 6061	289		10		241			
Al 5052	234		4		179			

2.2 실험방법

FSJ 접합공정은 Fig. 1에서 보이는 바와 같이 겹쳐진 모재에 회전하는 비소모식 접합 틀이 적절한 축 하중으로 일정한 시간동안 삽입되어 마찰열을 발생시켜 틀에 인접한 모재를 연화시킨다. 그 후 삽입된 틀에 인접한 모재에 소성 유동현상이 발생되어 접합이 이루어진다²⁾.

알루미늄 소재에 대한 접합 실험은 FSJ 장치를 이용하여 접합인자 즉, 접합용 틀의 회전속도(rotating speed), 접합시간(joining time), 틀의 삽입깊이(plunging depth)를 변화시켜 결함이 없는 건전한 접합부를 얻고자 하였다. 사용한 틀은 평평한 형상을 지닌 직경 9mm 솔더와 직경 3mm, 길이 1mm인 핀을 지닌 것을 사용하였다.

건전한 접합부의 결함 유무는 육안에 의한 접합부 관찰 및 접합한 재료를 절단하여 마운팅을 한 다음 폴리싱 연마 후 keller 시약과 barker 시약을 사용하여 예칭한 후 광학 현미경을 사용하여 접합부 조직을 관찰하였다.

또한 건전한 접합부의 기계적 특성을 평가하기 위하여 경도시험(0.3kgf, 12sec) 및 인장전단시험을 실시

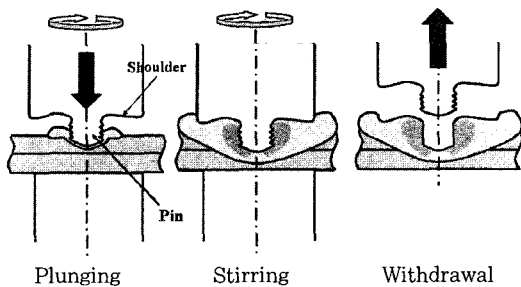


Fig. 1 Schematic diagram of friction spot joining process

하였다. 접합부 인장전단시험은 JIS Z 3140 규격에 맞추어 시편을 제작하여 실시하였으며, 미세 조직적 특징은 광학현미경(OM : Optical Microscopy) 이용하여 관찰하였으며, SEM(Scanning Electron Microscopy)을 이용하여 파단면을 관찰하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 접합부 조직 및 접합성 평가

3.1.1 접합부 조직

Fig. 2와 Fig. 3은 각각 Al 5052 합금과 Al 6061

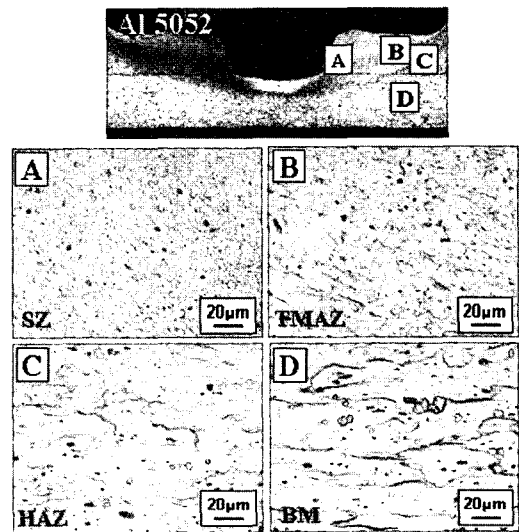


Fig. 2 Macro and microstructures of friction spot joined Al 5052 joint (1500rpm, 2440N, 6.5 sec, 1.4mm, 6.5sec)

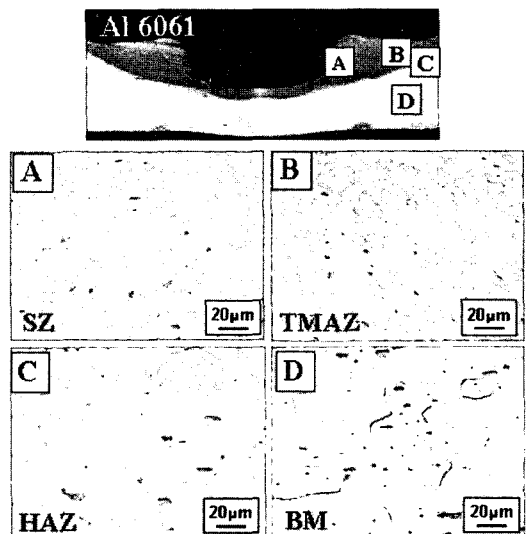


Fig. 3 Macro and microstructures of friction spot joined Al 6061 joint (2500rpm, 1.4mm, 6.5 sec, 2565N)

합금을 접합용 툴을 이용하여 Al5052의 경우 회전속도 1500rpm, 삽입깊이 1.4mm, 축하중 2440N, 접합시간 6.5sec의 조건과 Al6061의 경우 회전속도 2500rpm, 삽입깊이 1.4mm, 축하중 2656N, 접합시간 6.5sec조건에서 마찰교반 접합 후 접합되어진 각 합금의 단면 조직을 나타낸 것이다. 접합부 단면은 일반적인 FSW 접합부와 유사하게 교반부(Stir Zone ; SZ) A, 기계적 열영향부(Thermo-Mechanically Affected Zone ; TMAZ) B, 열영향부(Heat Affected Zone ; HAZ) C, 모재부(Base Metal ; BM) D로 구분되어진다.

Al 5052와 Al 6061 합금 모두 유사한 미세구조 변화를 보였다. A영역은 접합 중 접합 솔더면과의 접촉으로 발생한 마찰열에 의해 접합부가 가열되어지고 핀에 의한 기계적인 교반으로 발생하는 소성유동으로 인한 동적 재결정이 일어나 미세한 결정립을 지니고 있다. B 영역에서는 기계적인 변형에 의해 조직이 연신되어졌고 C영역에서는 열의 영향을 받아 결정립이 조대해졌으며 D영역은 전신재를 사용하였으므로 압연되어진 알루미늄 합금의 모재조직인 압연조직을 나타내고 있다.

3.1.2 접합부 기계적 특성

접쳐진 Al 5052 합금과 Al 6061 합금에 회전속도에 따른 FSW 접합부의 경도를 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. Al 5052 합금의 경우 핀에 인접한 부분에서 경도값이 모재에 비해 상승하고 솔더면 끝부분에서 일부 경도값이 낮아지는 것을 알 수 있다. 핀 주변에서 경도값이 상승하는 것은 Fig. 4에서 볼 수 있듯이 툴의 기계적인 교반에 의해 소성유동이 일어나고 이로 인한 동적 재결정이 일어나 매우 미세한 결정립이 핀 주변에 형성되었기 때문에 상승한 것으로 사료된다. 또한 직접적인 교반이 일어나지 않은 TMAZ 부분의 경우 소성유동으로 인해 발생한 가공경화의 정도가 커져 전위의 집적으로 인해 경도값이 상승한 것으로 사료된다. 솔더면 끝부분에서 일부 경도값이 낮아지는 것은 본 실험에 사용된 5052 알루미늄 합금은 가공경화를 통해 모재의 물성을 부여한 합금이므로 열영향부 부근에서 접합 시 발생하는 접합열에 의한 어닐링(annealing)효과에 기인한다고 사료된다.

Al 6061 합금의 경우 모재에서 툴에 가까워질수록 경도가 낮아졌으며 핀에 인접한 부위에서는 경도가 약간 상승하였다. 이는 마찰열의 영향으로 인해 석출물의 재고용이 발생하여 재료가 연해지는 연화현상(Softening)에 의한 것으로 판단된다.³⁾ 또한 회전속도가 빨라질수록 유입되는 입열량이 커져 접합부의 연화현상이 커지는 것을 알 수 있다.

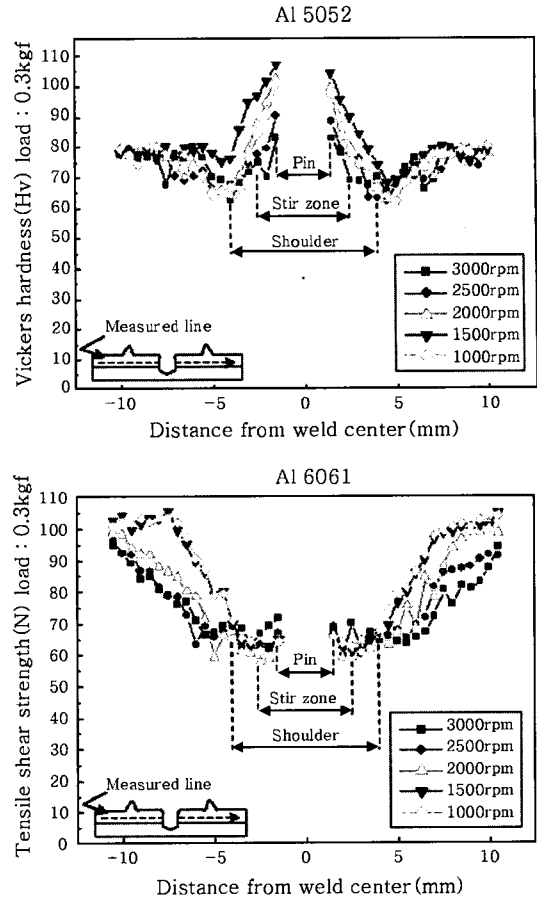


Fig. 4 Vickers hardness profile of FSJ Joint of Al 5052 and 6061 in cross section

두 합금의 회전속도에 따른 FSW 접합된 접합부의 인장전단강도를 Fig. 5에 나타내었다. Al 5052 합금의 경우는 회전속도 1500rpm에서 Al 6061 합금은 회전속도 2500rpm에서 가장 높은 인장전단강도를 보이는 것을 알 수 있다. 이와 같이 최고 인장전단강도가 차이가 나는 것은 두 합금간의 열소성 차이에서 오는 것으로 판단된다. Fig. 6은 두 합금의 온도상승에 따른 열소성성을 나타낸 것이다.⁴⁾ 여기서 볼 수 있듯이 상온에서 유사한 정도의 연신율을 지닌 두 합금이 접합온도 부근으로 갈수록 연신율의 차이가 증가하는 이유로서는 두 합금이 소성유동 될 수 있는 온도의 범위가 다르다는 점을 들 수 있다. 이로 인해 두 합금의 최고 인장전단강도의 조건이 다른 것으로 판단되어진다.

Fig. 7은 삽입깊이에 따른 인장전단강도를 나타낸 것이다. 접쳐진 두 판의 상판에서 툴이 1.4mm 삽입되었을 때 가장 높은 인장전단강도를 나타내는 것을 알 수 있다. 적절한 접합부를 형성하기 위해서는 툴의 핀에 의한 좌우 및 상하 교반이 이루어져야 한다. 하지만 삽입 깊이가 얇을 경우 상하 교반이 충분치 못하게 되고 깊을 경우에는 솔더에 의해 과도하게 모재부위가 늘

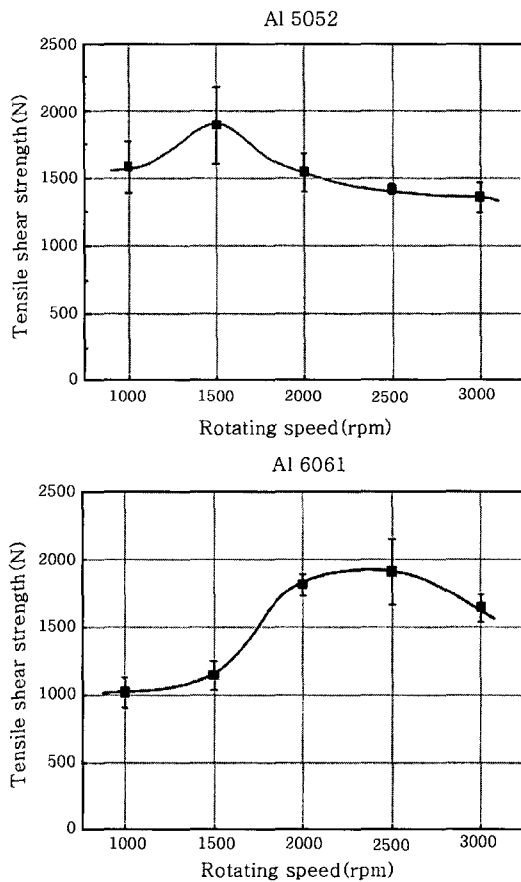


Fig. 5 Tensile shear strength of Al 5052 and 6061 alloys as a function of rotating speed (plunging depth : 1.4mm, Joining time : 6.5sec)

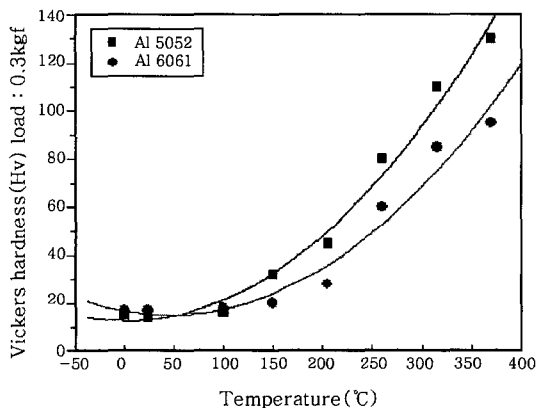


Fig. 6 Mechanical properties of various wrought Al alloys at elevated temperatures

리게 되어 단면적의 감소를 가져오게 된다. 따라서 인장전단강도는 적절한 깊이일 경우에 가장 높은 인장전단강도를 나타내는 것으로 사료된다. 또한 이는 사용되어진 틀의 형상에 따라 최적조건이 달라질 것으로 보인다.

Fig. 8은 최초 회전하는 틀이 시편에 닿는 순간부터

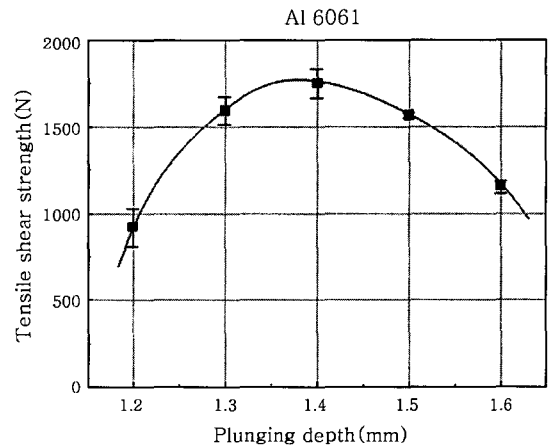


Fig. 7 Tensile shear strength in Al 6061 as a function of plunging depth (Rotating speed : 2500rpm, Joining time : 6.5sec)

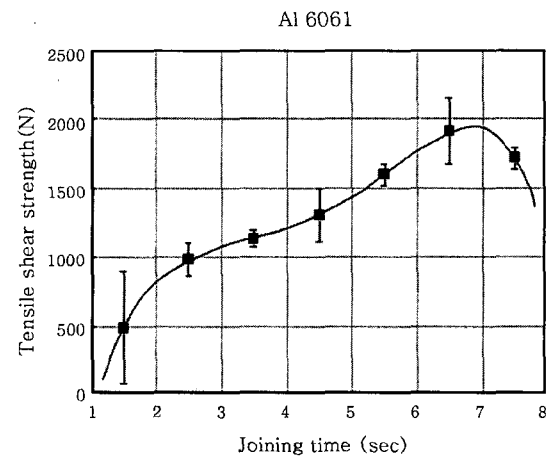


Fig. 8 Tensile shear strength in Al 6061 as a function of joining time (Rotating speed : 2500rpm, plunging depth : 1.4mm)

삼입되어지고 일정시간 유지시킨 후까지의 시간을 나타내는 접합시간에 따른 인장전단강도 분포를 나타낸 것이다. 접합시간이 길어질수록 인장전단강도는 증가하다 특정시간을 넘으면 오히려 감소하는 것을 볼 수 있다.

이는 틀이 일정시간 이상까지는 소성유동으로 인한 동적 재결정 및 기계적인 변형으로 접합부의 강도를 높이거나 일정량 이상의 소성유동은 오히려 접합부의 강도를 낮추는 것으로 판단된다. 시간이 증가함에 따라 접합부의 온도가 상승하게 되고 이로 인해 Al 6061의 경우는 석출상의 고용량 증가, Al 5052의 경우는 어닐링에 의한 연화에 기인하여 인장전단강도의 감소가 초래되는 것으로 사료된다.

Fig. 9는 위의 여러 조건 중 최적의 조건에서 접합되어진 접합부의 인장전단강도를 나타낸 것이다. 여기서 알 수 있듯이 FSJ 접합부의 인장전단강도는 기존의 알

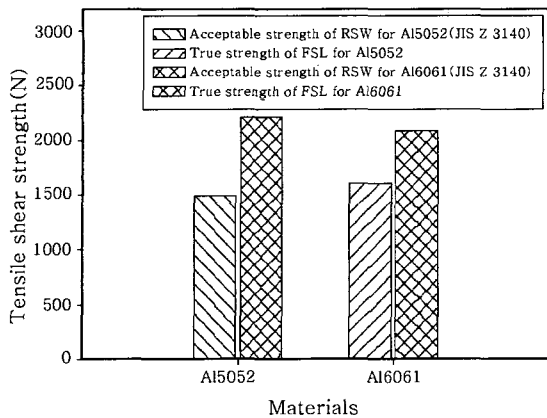


Fig. 9 Comparison of tensile shear strength of RSW joint and FSJ joint

루미늄 합금의 전기저항 점용접(RSW) 접합부에 비해 더 높은 값을 가지는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 용융용접이 지니고 있던 기공 및 균열 등의 용접결함과 용융으로 인해 취약한 응고조직의 형성, 가공 및 석출 경화성의 손실 등의 문제점을 최소화시킬 수 있기 때문으로 사료된다.

Fig. 10에 파단된 시험편의 형상과 단면을 나타내었다. 파단의 형상은 두 합금 모두의 경우에서 플러그 파단(plug fracture)과 전단 파단(shear fracture)으로 구분 지을 수 있다. 플러그 파단의 경우 파단위치는 접합부 중심에서 약 4mm 떨어진 HAZ 영역에서 일어나고 전단 파단의 경우는 겹쳐진 두 재료의 경계면에서 일어난다. 두 파단 형상 중 플러그 파단이 일어날 때의 인장전단강도가 전단파단이 일어날 때에 비해 더 높은 값을 나타내었다. 대부분의 마찰교반조건에서 플러그 파단을 보였으나, 일부 낮은 인장전단강도를 지니는 조건(예를 들면, 틀 삽입깊이가 얇은 경우 등)의 경우에서 전단 파단을 나타내었다.

Fig. 11은 SEM을 이용한 파단면의 사진이다. 파단면의 형상은 두 합금 모두 대부분 전형적인 연성파괴의 형상에 나타나는 요철 형상(cup and corn) 지니고 있

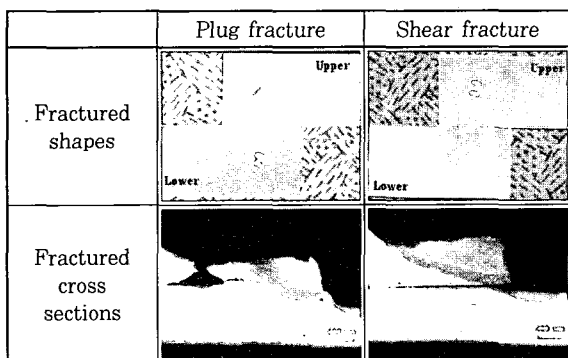


Fig. 10 Appearance of fractured specimen

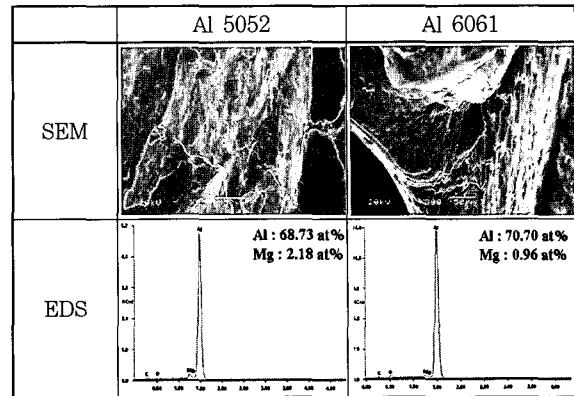


Fig. 11 SEM micrograph of friction spot joined Al 5052 and Al 6061 joints

는 것을 볼 수 있다. 마찰교반용접의 경우 높은 연신율을 지니고 있는 알루미늄 재료에 비소모식 틀을 이용하여 접합된 접합부는 모재와 유사한 연신율을 대부분 지니고 있는 것으로 알려져 있다⁵⁾. 이러한 이유로 파괴된 파단면은 알루미늄 모재의 파단 유형과 유사한 연성파괴를 나타내는 것으로 사료된다.

4. 결 론

FSJ를 이용한 Al5052, Al6061 합금의 접합을 실시하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) Al 5052 합금은 회전속도 1500rpm에서 Al 6061 합금 2500rpm에서 최고 인장전단강도를 가졌으며 삽입깊이 1.4mm, 접합시간 6.5sec에서 두 합금 모두 최고 인장전단강도를 가졌다.
- 2) 두 합금 모두 모든 조건의 접합부에서 결함은 발견되지 않았고, 교반부(Stir zone)의 경우 모재와는 달리 미세한 동적 재결정립이 관찰되었다.
- 3) 인장전단시험결과 HAZ영역에서 파단이 일어났으며 인장강도는 알루미늄의 전기저항 점용접의 허용기준(JIS Z 3140)에 비해 Al5052의 경우 142%, Al6061의 경우 114%의 인장전단강도를 지닌다.
- 4) Al 5052 합금의 경우 핀에 인접한 교반부에서 가장 높은 경도를 나타내었고 Al 6061 합금의 경우는 마찰열의 열이력에 의한 연화현상이 크므로 경도의 감소가 큰 것으로 나타났다.

참 고 문 헌

1. R. Sakano, K. Murakami, K. Yamashita, T. Hyoe, M. Fujimoto, M. Inuzuka, Y. Nagao, H. Kashiki : Development of Spot FSW Robot System for Automobile Body Members, 3rd International

- Friction Stir Welding Symposium, September (2001), 27-28
2. M. Fujimoto, M. Inuzuka, M. Nishio and Y. Nakashima : Development of Friction Spot Joining, Quarterly Journal of Japan Welding Society, 74-4 (2004), 4-7 (in Japanese)
 3. Y.S.Sato, H.Kokawa, M.Enomoto, S.Jogan : Metall. & Mater. Transaction A, 30-9 (1999), 2429-2437
 4. ASM Specialty Handbook, Aluminum and Aluminum Alloys, ASM International. (1994), 76-78
 5. Pan, T., Joaquin, A., Wilkosz, D.E., Reatherford, L., Nicholson, J.M., Feng, Z., and Santella, M.L. : Spot Friction Welding for Sheet Aluminum Joining, Proc. 5th International Symposium on Friction Stir Welding, Metz, France