

마찰교반 점용접한 A 5052 알루미늄 합금판재의 접합부 특성

연윤모* · 이원배** · 이창용** · 정승부** · 송 건***

*수원과학대학 자동화시스템과

**성균관대학교 신소재공학과

***수원과학대학 신소재응용과

Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet

Yun-Mo Yeon*, Chang-Yong Lee**, Won-Bae Lee**, Seung-Boo Jung** and Keun Song***

*Dept. of Automated System, Suwon Science College, Whasung 445-742, Korea

**Dept. of Advanced Materials Engineering, Sungkyunkwan University, Suwon 440-746, Korea

***Dept. of Advanced Materials Application, Suwon Science College, Whasung 445-742, Korea

Abstract

In this study, the microstructure and mechanical properties of spot friction stir welded A 5052 alloy were investigated. Especially, the effect of insertion depth of welding tool on microstructural changes and mechanical properties was investigated in order to obtain the optimum spot friction stir welding condition. The lap shear load of spot friction stir welded A 5052 alloy plates showed lower value at the shallowest insertion depth and increased with tool insertion depth. At 1.6mm, the maximum value of 3.35 kN was obtained, and then dropped to lower load when the insertion depth was deeper. Spot friction stir welded joints showed shear fracture mode at shallower insertion depths and fracture mode changed to plug fracture mode as the insertion depth was deeper.

* Corresponding author : ymyeon@ssc.ac.kr

(Received September 20, 2005)

Key Words : Spot friction stir welding, A 5052 alloy sheet, Lap joints, Solid state joining process, Automotive, Al alloy spot welding

1. 서 론

자동차의 연료소비를 절감시켜 CO₂배출가스를 저감시키기 위한 방안의 하나로 자동차의 경량화가 진행됨에 따라 종래재료를 대체할 수 있는 경량화 재료로서 알루미늄(Al)합금의 역할이 중요하게 되었다. 이에 따라 최근 자동차분야에서 Al합금의 사용비율 및 사용부위가 점차 증대되고 있다.

Al합금은 강판에 비해 열전도도 및 비열이 높고 전기저항이 낮아 발열하기 어려우면서도 열이 방출되기 쉬워 용접하기가 쉽지 않았다. 이 때문에 기존의 점용접 기술로 Al합금판재를 용접하는 경우, 고전류·고가압력·단시간의 용접이 필요하여¹⁾ 용접주변설비의 대형화

가 요구된다. 또한, Al합금 표면상에 존재하는 산화피막과 전극과의 반응에 의해 전극수명이 저하하는 문제점이 있어²⁾ 이를 극복할 수 있는 새로운 점용접기술이 요구되어 왔다.

한편 2001년에 마찰교반접합법(Friction Stir Welding: FSW)의 원리를 응용한 마찰교반 점용접(Spot Friction Stir Welding: Spot FSW)³⁻⁵⁾기술이 개발되어 자동차 차체용 Al합금을 고상상태로 접합할 수 있는 새로운 점접합기술로서 주목받고 있다. 마찰교반 점용접기술은 접합 톨을 회전시키면서 겹치기 이음부의 상판 및 하판에 삽입시켜 상·하판을 소성유동시킴에 의해 접합계면을 활성화시켜 접합하는 접합법이다. 전력소비가 매우 적고 톨 수명이 길며 환경친화적 점접합기술이라는 장점을 갖고 있어 선진국의 경우,

자동차 패널용 Al합금의 점용접에 적용되어 승용차의 후드, 트렁크, 도어 및 루프 등의 용접분야에서 실용화 되고 있다. 그러나 국내에서는 마찰교반 점용접기술에 관한 보고⁶⁻⁸⁾는 있지만, 아직 이러한 기술을 자동차 Al 합금 판재의 점용접에 적용하고 있지는 못하다.

따라서 본 연구에서는 자동차 패널용 Al재료로서 적용도가 높은 Al-Mg계 Al합금 판재의 마찰교반 점용접에 관한 기초적 연구의 일환으로 A 5052합금을 선정하여 툴 삽입깊이의 변화에 따른 마찰교반 점용접 접합부의 조직 및 기계적 특성을 조사하였다.

2. 실험 방법

본 실험에 사용된 A 5052-H32 합금(압연재)의 화학성분 및 기계적 성질을 Table 1 및 2에 나타낸다. 접합용 툴 소재로서는 SKD11을 사용하였다. 접합시의 툴 각도는 0°로 하였으며 겹치기 점접합하고자 하는 면을 밀착시켜 접합용 지그(Jig)로 견고하게 고정시킨 후 마찰교반 점용접실험을 행하였다. 핀의 삽입깊이의 영향을 조사하기 위하여 2500rpm의 회전속도 하에서 삽입깊이를 1.45~1.65mm로 변화시켰으며 접합시간은 1초로 하였다. 마찰교반 점용접 접합부의 경도는 마이크로 비커스 경도 시험기를 사용하여 접합중심부로부터 0.25mm 간격으로 측정하였으며 시험하중은 25gf로 하였다. 마찰교반 점용접부의 인장전단강도평가에는 90×30×1mm 크기의 시편을 사용하여 1.67×10⁻⁵m/sec의 변형속도로 하중을 가하여 시험을 행하였다.

마찰교반 점용접재의 표면 및 이면 상태를 광학현미경으로 관찰하여 접합부의 외관상태를 조사하였다. 또한, 접합부 미세조직을 관찰하기 위하여 버후(buff)연마 후 에칭용액(Keller 용액)으로 약 10초간 부식시킨 후 광학현미경으로 마찰교반 점용접부 상태, 접합조직 및 접합결함유무 등을 상세히 관찰하였다. 인장전단시험 후, 파괴거동을 파악하기 위해 파단면을 주사전자현미경(SEM)을 이용하여 관찰하였다.

Table 1 Chemical composition of A 5052 alloy

Elements	Mg	Si	Cu	Fe	Cr	Zn	Ti	Mn	Al
wt%	2.53	0.14	0.03	0.36	0.17	0.01	0.01	0.04	Bal.

Table 2 Mechanical properties of A 5052 alloy

Mechanical Properties	Value
Tensile Strength	276.6(MPa)
Yield Strength	224.1(MPa)
Elongation	16.67(%)

3. 실험 결과

3.1 마찰교반 점용접부 조직

툴 회전속도 2500rpm에서 접합 툴의 삽입깊이 변화에 따른 접합부의 외관을 Fig. 1에 나타낸다. 핀의 삽입깊이가 증가함에 따라 표면의 툴압흔이 비교적 깊어지지만 이면은 평활한 상태를 나타낸다.

핀의 삽입깊이 변화에 따른 접합부의 단면 마크로 조직을 Fig. 2에 나타낸다. 접합 툴의 삽입깊이가 증가함에 따라 핀 주위의 교반영역이 비교적 넓어지면서 상하판의 계면이 교반에 의해 소멸된다. 또한 솔더부와 접하는 상판부의 두께는 얇아지고 솔더 주변부의 버(burr)의 양이 증가하는 경향을 나타내었다. 툴 삽입깊이 1.65mm인 경우, 과도한 압입 및 변형에 의해 계면 근방의 상판과 하판사이가 과도하게 벌어지고 상판의 두께가 감소하는 현상을 관찰 할 수 있었다.

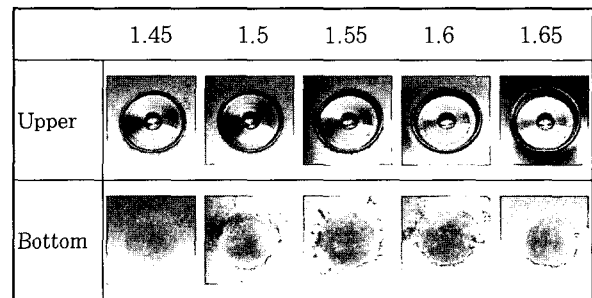


Fig. 1 Images of upper and bottom surface of spot FSW joints with tool insertion depth

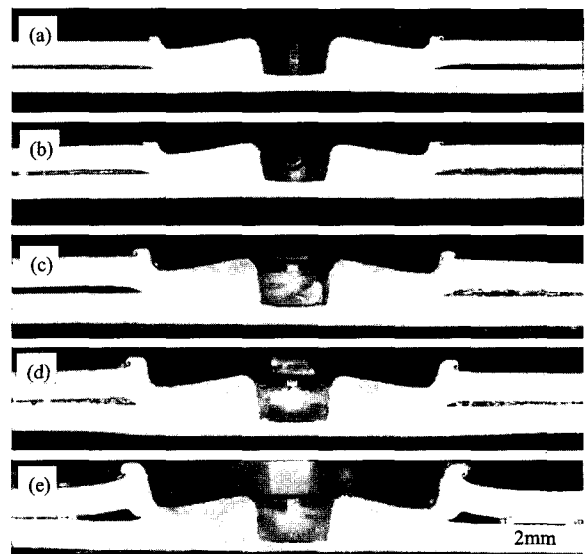


Fig. 2 Cross-sectional macro images of spot FSW joints with tool insertion depth at 2500 rpm: (a)1.45, (b)1.5, (c)1.55, (d)1.6 and (e)1.65 mm

Fig. 3은 모재 및 접합부 교반영역의 미세조직을 나타낸다. 모재(a)에 비해 교반영역(b)에서는 틀의 회전 및 압입에 의해 교반되어 미세화된 조직이 관찰되었는데 이는 마찰교반접합(FSW)의 경우에서와 같이 소성 유동 및 마찰열에 의한 동적재결정에 기인한 것으로 사료된다.

Fig. 4는 Fig. 2에 나타난 접합부 단면의 접합 틀이 삽입되었던 부분의 좌측 주변에 형성된 계면의 고배율 형상을 나타낸다. 틀 삽입깊이가 얇은 경우(1.45mm, a)에는 상·하판사이의 계면이 뚜렷이 존재하며 원래 맞댄 면에서 수직방향으로 상승된 양상을 나타내고 있지만, 틀 삽입깊이가 1.55~1.65mm로 증가함에 따라 (b, c, d) 상·하판재사이의 계면이 점차적으로 소멸됨을 알 수 있다. 틀 삽입깊이가 깊어짐에 따라 소성변형량의 증가 및 접합부의 온도상승으로 인해 계면이 소멸되어 더욱 견고하게 접합이 이루어졌음을 예상할 수 있다.

Fig. 5는 삽입깊이의 변화에 따른 접합 틀의 핀과 솔더사이에 형성된 접합 계면의 변화를 나타낸다. 틀 삽입깊이가 얇은 1.45mm의 경우는 계면이 비교적 직선

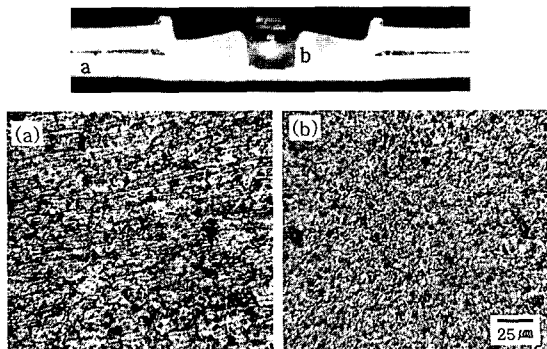


Fig. 3 Microstructures of A 5052 base metal (a) and spot FSW zone (b) at 2500 rpm and 1.6mm of tool insertion depth

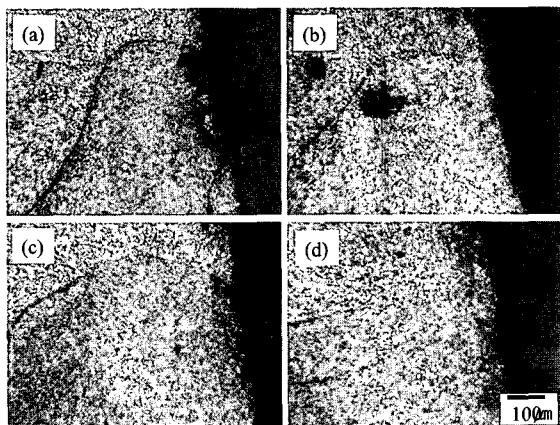


Fig. 4 Configuration of spot FSW joints line with tool insertion depth: (a) 1.45, (b) 1.55, (c) 1.6 and (d) 1.65mm

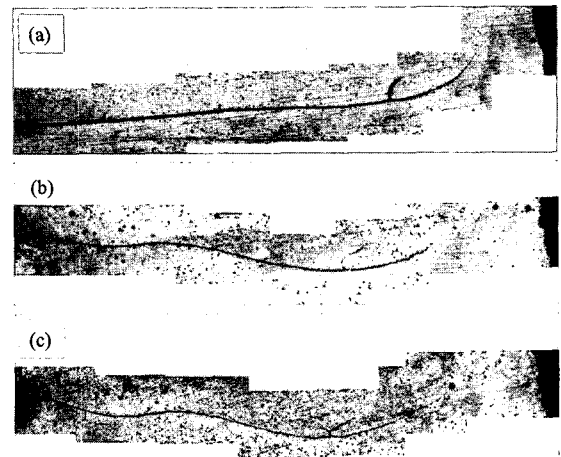


Fig. 5 Variation of spot FSW interface between upper and lower plates with tool insertion depth: (a) 1.45, (b) 1.6 and (c) 1.65 mm

의 형태를 보이고 있으나, 틀 삽입깊이가 증가되어 1.6과 1.65mm의 경우는 상·하 판재사이의 계면이 교반 영역의 증가와 솔더의 압축력의 증가로 인해 비교적 유선형으로 변화되는 경향을 나타내었다.

Fig. 6은 틀 삽입깊이의 변화에 따른 접합부의 경도 변화를 나타낸다. 5052 알루미늄 합금 모재에 비해 접합부근방의 경도는 상당히 감소하는 경향을 나타내고 있으며 일반적인 가공경화형 알루미늄 합금의 마찰교반 접합부의 경도 거동과 상이한 결과를 나타내고 있다. 마찰교반접합한 가공경화형 알루미늄 합금의 접합부 근방의 경도 분포는 제2상의 소멸 없이 전위 밀도의 증가와 미세결정립의 형성에 의해 모재와 거의 유사하거나 약간 연화한다고 보고^{9,10)} 되고 있다. 그러나 본 실험 결과에서는 모재에 존재하고 있던 전위들이 마찰교반작용에 의해 회복 및 재결정립이 생성되는 과정에서 대부분 소멸되었기 때문에 연화되었을 것으로 사료된다. 틀 삽입깊이의 변화에 관계없이 틀 핀에 매우 인접되었던

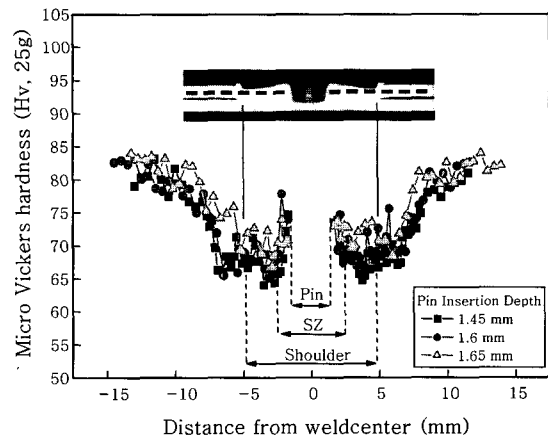


Fig. 6 Hardness distribution of spot FSW joint with tool insertion depth

s부분, 즉 SZ부의 경도는 접합부 주위에 비해 약간 증가되었다. 접합핀부에 인접한 영역의 경도증가는 더욱 미세한 재결정립의 형성에 의한 것으로 사료된다. 틀 삽입깊이가 깊어질수록 그 연화정도는 적게 나타나는데 이는 보다 큰 변형이 도입되어 삽입깊이가 얇은 경우에 비해 재결정립 내에 전위밀도가 약간 상승하였을 것으로 예상할 수 있다.

3.2 접합부의 기계적 특성

Fig. 7은 핀 삽입깊이 변화에 따른 접합재의 인장전단시의 파단하중을 나타낸다. 파단하중은 핀 삽입깊이가 증가함에 따라 증가하여 1.6mm의 삽입깊이에서 최대값(평균값 3351N)을 나타내었으며 삽입깊이가 더 깊어지면 약간 저하하였다. 본 실험에서 얻어진 최대인장 전단하중값은 마찰교반 점용접된 기타 합금 즉, 6114-T4 Al합금(3.0kN, 0.94t)¹¹⁾, 5754 Al합금(2.5kN, 1.1t)¹²⁾ 및 6000계 Al합금(2.6kN, 1t)¹³⁾의 경우보다 우수한 결과를 얻을 수 있었다.

Fig. 8은 틀 삽입깊이의 증가에 따른 솔더 근방의 상판의 두께변화를 나타낸다. 틀 삽입 깊이가 1.45mm인 경우에는 두께가 약 0.8mm 정도지만, 틀 삽입깊이가 증가함에 따라 두께는 감소하여 1.65mm의 경우에는 솔더부의 상판두께가 약 0.4mm로 감소하였다. 따라서 틀 삽입깊이가 1.65mm인 경우, 인장전단강도가 오히려 감소하는 것은 솔더 압입의 영향에 의한 상판의 두께가 감소되어 전단파단저항이 저하하기 때문으로 판단된다.

접합부의 전단인장 하중은 틀 삽입깊이가 1.6mm까지 증가하는 동안에는 접합 면적의 증가에 의해 전단인장하중이 상승하여 최대 값을 나타낸다. 그러나 틀 삽입깊이가 더 깊어질수록 접합 면적은 증가하지만 변형량의 증가로 인한 상판 두께가 얇아져 응력 집중에 의해 접합 계면보다 접합강도가 저하하여 전단인장하중이 다소 감소한다.

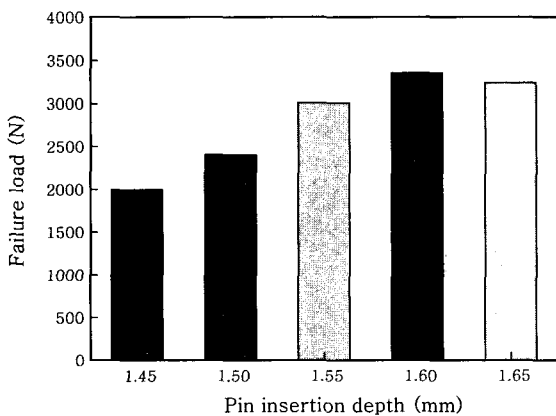


Fig. 7 Relation between pin insertion depth and tensile shear failure load

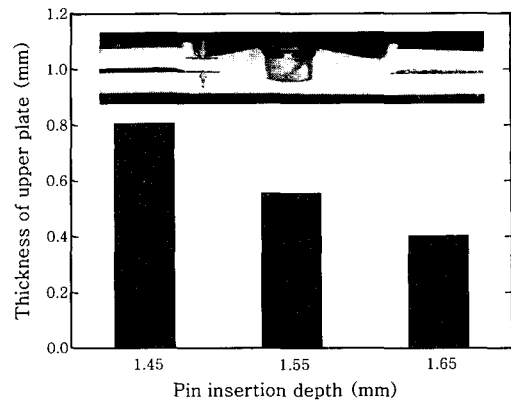


Fig. 8 Thickness variation of upper plate below the tool shoulder with tool insertion depth

Fig. 9는 인장전단시험 후의 파단상태를 나타낸다. 인장전단 시 파단하중이 낮았던 틀 삽입깊이가 1.45mm인 경우 핀 주변을 제외하고는 거의 접합되어 있지 않아 틀 압흔 중앙부인 핀 주위에서 파단 되는 형태를 나타내었다. 그러나 인장전단파단하중이 높았던 틀 삽입깊이 1.6mm의 경우에는 솔더 압흔 주변에서 파단이 일어남을 알 수 있다.

Fig. 10은 인장전단시험 후의 파면상태를 SEM으로 관찰한 결과이다. 1.45mm의 틀 삽입깊이의 경우, 틀 솔더의 압입력이 충분히 가해지지 않아 접합 핀의 교반 작용을 주로 받아 접합이 이루어 졌던 영역에 하중이 가해져 주로 판재의 길이방향으로 파단하는 전단파단 (shear fracture type) 형태를 나타낸다. 또한 그 주변부는 솔더 하중이 가해진 흔적은 보이지만 접합이 충분히 이루어지지 않았음을 알 수 있다. 그러나 틀 삽입깊이가 1.6mm 이상인 경우에는 틀 솔더의 압입에 의해 상판 및 하판이 견고히 접합되어 판 두께방향으로 파단하는 너깃 풀 혹은 플러그 파단(nugget pull or plug fracture type) 형태를 보여준다.

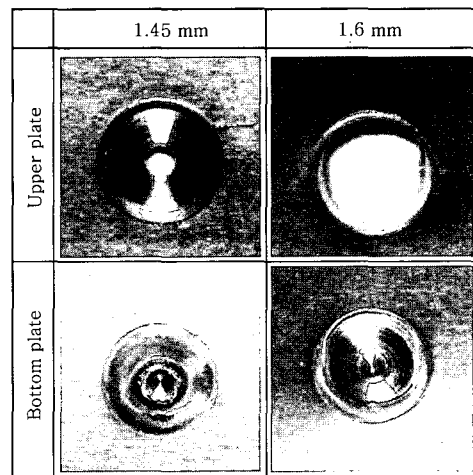


Fig. 9 Appearances of joints after tensile shear test

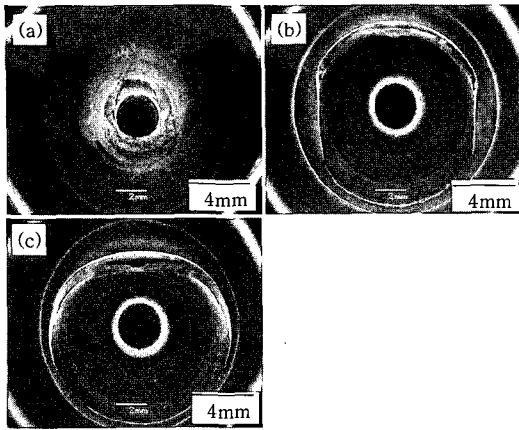


Fig. 10 Low magnification SEM images of fracture surfaces of bottom plate with tool insertion depth: (a) 1.45, (b) 1.60 and (c) 1.65mm

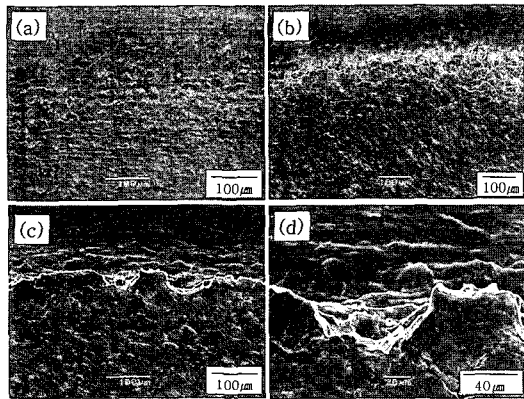


Fig. 11 High magnification SEM images of fracture surfaces after tensile shear test with tool insertion depth: (a) 1.45, (b) 1.5, (c) and (d) 1.65mm

Fig. 11은 Fig. 10의 상판과 하판이 접합되었던 핀 외주부를 SEM으로 확대 관찰한 것으로서 인장전단하중이 비교적 낮았던 툴 삽입깊이 1.45mm의 경우에는 접합흔적이 거의 미미하지만 툴 삽입깊이 1.5mm의 경우에는 인장전단 시 생성된 돌기도 관찰되었다. 또한, 1.65mm의 경우, 인장전단에 의해 돌기가 크게 형성되고 그중의 일부분이 파단되어 있음을 알 수 있다. 이와 같은 툴 삽입깊이의 증가는 접합 면적을 증가시킬 뿐만 아니라 솔더에 의한 압입에의 계면을 밀착시켜 접합부 강도를 증가시키는 것으로 판단된다. 그러나 과도하게 깊이 삽입한 경우는 접합면적을 증가시키지만 과도한 변형의 도입으로 접합부 주위의 모재 두께를 얇게 하여 접합 강도를 오히려 저하시킨다.

4. 결 론

본 연구에서 접합툴의 삽입깊이를 변화시켜 5052 알

루미늄 합금의 마찰교반점용접부의 특성을 조사한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

1) 툴 삽입깊이가 증가함에 따라 접합부 표면에는 툴 압흔이 약간 깊게 나타나지만 이면은 삽입깊이의 변화에 관계없이 평활한 상태를 나타내었다.

2) 툴 삽입깊이가 증가함에 따라 핀 주위의 교반영역이 비교적 증가되었으며 이에 비례하여 소성유동에 의한 버의 양이 증가되고 솔더부와 접하는 상판부의 두께는 얇아졌다. 또한, 핀 주위의 교반영역에서는 모재의 조직에 비해 미세화되는 경향을 나타내었다.

3) 인장전단하중은 접합 툴의 삽입깊이가 증가함에 따라 증가하여 1.6mm의 삽입깊이에서 최대인장전단하중(3351N)을 나타내었으며 솔더의 압입이 작용하는 영역에서 파단 되었다. 그러나 그 이상의 삽입깊이에서는 인장전단하중이 감소하였다.

4) 인장전단시험 후의 파단부를 관찰한 결과, 툴의 삽입깊이가 얇은 경우에는 shear 파단 형상을 나타냈으나 툴의 삽입깊이가 깊은 경우에는 plug 파단형상이 관찰되었다.

참 고 문 헌

1. 대한용접학회편 : 용접·접합편람, 대한용접학회 (1998) 256-257 (in Korean)
2. 溶接學會編 : 溶接·接合便覽, 日本溶接學會 (1990) 1016-1017 (in Japanese)
3. R.Sakano, K.Murakami, K.Yamashita, T.Hyoe, M.Fujimoto, M.Inuzuka, H.Nagao, H.Kashiki : Development of Spot FSW Robot System for Automotive Body Members, Friction Stir Welding, Third International Symposium, Kobe(2001.9), Japan
4. S.Koga : Development of Friction Spot Joining, Journal of Light Metal Welding & Construction, 42-1(2004), 523-529
5. R.Sakano, R. Kato : Development of SFW, Welding Technology, 52-2(2004), 99-103 (in Japanese)
6. Y.M.Yeon, C.Y.Lee, W.B.Lee, S.B.Jung, W.S.Chang : Spot Friction Stir Welding and Characteristics of Joints in Aluminium Alloys, Journal of KWS, 23-3 (2005), 228-232 (in Korean)
7. H.J.Cho, H.J.Kim, J.S.No, W.S.Chang, G.S.Bang : Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Al Alloys for Automotive, Proceedings of the 2005 Spring Annual Meeting of KWS, 44(2005), 177-179 (in Korean)
8. Y.M.Yeon, C.Y.Lee, W.B.Lee, S.B.Jung : Spot Friction Stir Welding of 5052Al Alloy, Proceedings of the 2005 Spring Annual Meeting of KWS, 44(2005), 235-237 (in Korean)
9. Y.S.Sato, S.H.C. Park, H. Kokawa : Microstructural Factors Governing Hardness in Friction-Stir Welds of Solid-Solution-Hardened Al alloys, Metallurgical

- and Materials Transaction A, 32A(2001), 3033- 3042.
10. W.B.Lee, S.W. Kim, C.Y.Lee, Y.M.Yeon, W.S. Chang, C.C.Shur, S.B.Jung: Effects of Welding Parameters on the Friction Stir Weldability of 5052 Al alloy, *Journal of KWS* 22-3 (2004), 265-272
 11. T.Y.Pan, A.Joaquin, D.E.Wilkosz, L.Rearherford, J.M.Nicholson : Spot Friction Welding for Sheet Aluminium Joining, *Proceedings of 5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz(2004,9), France*
 12. J.F.Hinrichs, C.B.Smith, B.F.Orsini, R.J.DeGeorge, B.J.Smale, P.C.Ruehl : Friction Stir Welding for the 21st Century Automotive Industry, *Proceedings of 5th International Friction Stir Welding Symposium, Metz(2004,9), France*
 13. M.Fujimoto, M.Inuzuka, M.Nishio, Y.Nakashima : Development of Friction Spot Joining(Report 2), *Proceedings of the 2004 Spring Annual Meeting of JWS, 74 (2004), 6-7 (in Japanese)*