

알루미늄 합금의 이종겹치기 마찰교반용접시 판재의 위치설계가 기계적 강도에 미치는 영향에 관한 연구

A Study on the Effect of Metal Plate Position Design on Mechanical Strength during Lap Joint Dissimilar Friction Stir Welding Process of Aluminum Alloys

박희상^{1,✉}, 고준빈², 최원두³, 최만용¹
Hee Sang Park^{1,✉}, Jun Bin Ko², Won Doo Choi³ and Man Young Choi¹

1 한국표준과학연구원 안전그룹 (Safety Measurement Center, Korea research institute of standards and science)

2 한밭대학교 기계설계공학과 (Department of Mechanical Engineering, Hanbat Univ.)

3 한밭대학교 공동실험실습관 (Central laboratory, Hanbat Univ.)

✉ Corresponding author: m55nrng@naver.com, Tel: 042-868-5257

Manuscript received: 2009.10.9 / Accepted: 2010.1.16

Recently, the use of means of transportation of the lightweight aluminum to temper the trend is increasing. More efficient use of lightweight aluminum material to Friction stir welding has been widely attempted. Types of welding tools at the right screw to rotate anti-clockwise direction, when the tensile stress exerted on the location of the top plate to the left in the direction of the welding process to the installation was able to obtain high tensile strength. A5052 to the top of the left in the direction of the welding process to install and, when you installed the right under the A6061 was not easily come up to the top of the A5052. Conversely, at the bottom left to install on top of the A6061 and A5052 have been installed at the bottom of the upper area of the A6061 and A5052 intrude easily form the shape of the hill you can see that it was formed.

Key Words: A5052 (알루미늄합금 재질 5052), A6061 (알루미늄합금 재질 6061), Lap Joints (겹치기 용접)

1. 서론

최근 들어 지구온난화에 따른 환경파괴가 심각한 문제로 대두되고 있는 가운데 이러한 문제를 일으키는 가장 큰 원인으로 화석연료를 주로 사용하는 수송수단의 과도한 연료소비가 꼽히고 있다. 전세계가 하나의 마을과 같은 지구촌이라는 개념이 만들어진 이후 물동량은 과거에 비해 비약적으로 증가하였으며, 이러한 운송수단의 경량화는 과도한 연료의 소비를 막는데 중요한 역할을 한다 하겠다. 크게 자동차, 철도, 선박으로 대표되는 운송수단의 경량화에 이용되는 재료로 가장 각광 받

고 있는 재료로는 알루미늄이 널리 사용되고 있다.^{1,2} 이러한 알루미늄은 다양한 첨가물의 가감과 열처리 등을 통하여 그 가벼운 무게에도 불구하고, 강도가 일반적인 강에 뒤지지 않는 성능을 나타내 기도하는 알루미늄 합금형태로 사용하며, 알루미늄 합금을 산업현장에서 활용하는 가장 흔한 접합법으로 TIG, RSW 등과 같은 용융 용접법을 현재는 많이 사용하고 있지만 이 또한 열전도가 높아 열확산이 빠르고, 이에 따라 모재의 팽창이 일어나 열변형을 유발하며, 산화피막은 그 내부에 함유된 결정수가 아크용접 중 분해되어 수소를 방출함으로써 기공이 발생하여 부도체로 저항용접시 전도성

을 방해하는 등의 문제를 발생시킨다. 또한 철에 비해 4 배정도 큰 전기전도율에 따라 저항용접시 대전류를 사용해야 하는 등의 문제점이 발생하고 있다.³ 이와 같은 용융용접의 단점을 극복하는 기술로 고상접합 방법인 마찰교반용접법(Friction Stir Welding)이 활용되고 있다. FSW 는 1991 년 영국의 TWI 에서 개발된 최신 용접법으로 모재를 용융점 아래에서 고상용접시키는 방법으로 용융에 따른 열변형과 흠가스(hume gas)와 스패터(spatter)를 억제시켜 주는 친환경적인 용접법이다.^{4,6} 본 연구는 이러한 FSW 를 활용하여 겹치기 용접을 시행하였다. 기존의 겹치기 용접의 경우 용융부가 윗 부분 모재는 충분이 용융되는 반면 아랫부분의 용융부가 불량한 경우가 발생하지만 마찰교반용접을 통하여서는 불량을 억제할 수 있는 장점이 있다. 본 실험은 열처리 경화형 알루미늄 A6061-T6 과 가공경화형 A5052-H32 알루미늄 합금 재질의 이중 겹치기 용접을 실험하였다. 두 종류의 알루미늄합금의 특성을 고려하여 시험편의 위치와 공구회전수 등에 변화를 주어 마찰교반용접시 이중재료의 용접에 따른 용접부의 용접특성과 기계적 성질을 파악하는데 그 목적을 두었다.

2. 실험재료 및 실험방법

2.1 실험 재료

본 실험에서는 가공경화형 A5052-H32 알루미늄 압출재를 길이 250mm, 너비 80mm, 두께 3.2mm 로 제작하여 실험하였다. 시편을 맞대어 고정할 수 있는 고정장치에 시편을 설치하여 겹치기 용접이 가능하도록 수평을 맞춘 후 양단을 일정간격으로 고정하여 움직이지 못하게 하였다. 각각의 고정압은 일정할 수 있도록 나사의 회전비율을 맞추었으며 실험재료의 화학성분과 기계적 물성치는 Table 1 과 Table 2 와 같다.

2.2 실험 방법

2.2.1 용접조건

알루미늄 판재를 마찰교반용접의 실험조건을 수행할 수 있는 조건을 갖춘 수직밀링머신의 베드 위에 알루미늄판재를 고정하여 용접 작업 시 발생하는 열을 효율적으로 배출해 줄 수 있는 백킹 플레이트와 고정장치를 결합한 고정기구에 알루미늄 판재를 겹치게 하여 위치시킨 후 판재 옆면에 틀이 회전할 때 발생하는 회전력에 의해 판의 움직

Table 1 Chemical composition of materials (Wt. %)

Materials	Si	Mn	Mg	Cu	Cr	Fe	Al
A6061-T6	0.60	0.15	1.0	0.22	0.20	0.35	Bal.
A5052-H32	0.25	0.10	2.4	0.10	0.28	0.40	Bal.

Table 2 Mechanical properties of material

Mechanical properties	Tensile strength (MPa)	Yield strengt (MPa)	Elongation (%)	Hardness (Hv)
A6061-T6	359	330	16	125
A5052-H32	240	210	23	77

임을 막기 위한 가이드 판을 옆면에 밀착시킨 후 양쪽 옆의 간격조절나사를 이용하여 알루미늄 모재 판과 판사이의 간격을 없는 상태로 만든 후 Fig. 1 과 같이 용접한다.

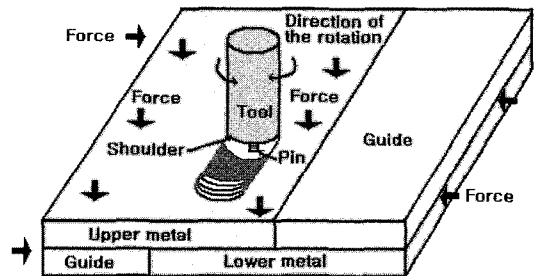


Fig. 1 Typical weld tool and process parameters used in the FSW process

열처리 경화형 알루미늄 A6061 과 가공경화형 A5052 재질의 이중 겹치기 용접시 두 가지 재료의 물성치를 고려하여 실험조건에 변화를 주어 실험을 진행하였다. 실험조건은 Table 3 과 같다. 시편위치표기 방법은 수학의 분수표기방식을 응용하여 틀의 진행방향을 기준으로 좌우를 구분하여 A5052 가 좌측 위에, A6061 이 우측 아래 위치 할 때는 A5052/A6061 로 표기 하고 반대인 경우 A6061/A5052 로 표기하였다. 실험은 좌측 판을 위에 우측 판을 밑에 위치한 후 용접을 수행하였다.

500mm/min 의 용접속도로 회전수 만을 달리하여 조건별 실험값을 구한 후 가장 양호한 회전수에서 용접속도에 변화를 주어 더 나은 용접조건을 찾아보았다. 압입은 틀의 슬더부가 닿는 순간을

기준으로 하였다. 툴의 재질은 SKD61 공구강으로 오른나사형(threaded cylindrical) 편을 갖은 툴(tool)의 편 길이는 4.5mm 직경은 나사형 툴 기준으로 5mm의 직경을 갖도록 제작하여 반시계방향으로 회전하며 용접하였고, 형상은 Fig. 2와 같다.

Table 3 FSW lap joint condition of A6061 and A5052

Aluminum	Pressing depth (mm)	Tilting Angle (°)	Welding speed (mm/min)	Spindle (rpm)
A6061/A5052	0.6	2.5	500	1340
A6061/A5052				1600
A6061/A5052				1800
A6061/A5052				2380

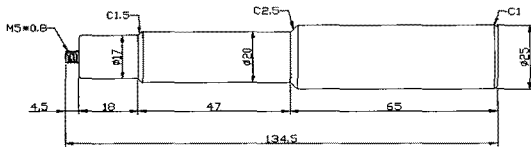


Fig. 2 The dimensions of tools

2.2.2 기계적 강도 측정 장치

시험에 사용한 마이크로 경도 시험기는 Matsuzawa 사의 MMT-7으로 배율은 400 배로 하여 하중은 200gf, 하중시간은 10sec 로 하여 경도를 측정하였고, 인장강도를 측정하기 위하여 Fig. 3과 같은 시편을 제작하였고, 시험에 사용된 시험기는 INSTRON 4484 만능시험기를 이용하여 인장속도를 2mm/min 로 하여 인장시험을 하였다.

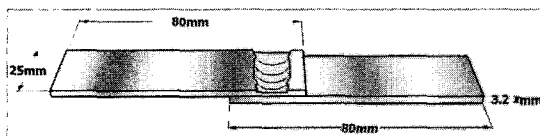


Fig. 3 The Dimensions of specimen and tensile specimen

2.2.3 용접부의 미세조직 관찰

다른 조건에서 실험한 시편의 단면을 광학현미경을 이용하여 각각의 용접조직들을 미세 관찰 하였다. 광학현미경 관찰을 위해 일반적인 연마법을 이용하여 시편을 제작하였고, 증류수 120ml, 질산 3ml, 염산 2ml, 불산 2ml 를 사용한 켈러시약을 사용하여 50 초 동안 1 차부식 후 20 초 동안 2 차 부식하여 각각의 조직영역을 관찰하였다.

3. 실험

3.1 A6061 과 A5052 의 이종 마찰교반용접시의 조직거동 및 인장시험

각각의 실험조건에서 진행한 실험결과 인장강도의 차이는 Fig. 4와 같은 결과로 나타났다. 이를 통해 A6061/A5052 와 A5052/A6061 의 용접시 가장 높은 인장강도값을 보인 실험조건은 1600rpm, 500mm/min 으로 A5052/A6061 에서의 최대 인장강도값은 149.09MPa 이었고, A6061/A5052 에서의 인장강도값은 154.17MPa 로 A6061 재질이 위 A5052 재질의 위쪽에 위치할 때 인장강도값이 A5052 가 위에 위치할 때 보다 상대적으로 인장강도가 높았다.⁷ 파단부분은 인장응력이 가해질 때 위아래 모재의 용접부 사이의 경계를 따라 파단이 일어나게 된다. 이와 같은 현상은 앞선 A5052, A6061 의 동종 접이기 마찰교반용접에서 나타난 현상으로⁸ 이종 접이기 마찰교반용접시에도 동일한 현상이 나타났다. Fig. 5는 Fig. 4를 통하여 가장 높은 인장강도값을 나타냈던 회전수인 1600rpm 에서 용접속도를 400, 600mm/min 를 추가하여 실험한 결과 1600rpm 에서는 500mm/min 가장 좋은 인장강도값을 나타냈다. Fig. 6의 (a), (b)와 Fig. 7의 (a), (b)를 비교해보면 아래쪽의 모재가 위쪽 모재로 침범하는 경계를 더욱 확연하게 파악할 수 있는데, 툴의 회전속도가 빠를 수록 너깃의 형태는 동심원 형태에 가까워지며 아래쪽 모재가 밀려 올라가는 것이 심해지는 것을 볼 수 있었다. 용접에 사용된 두 모재의 기계적 강도가 다르기 때문에 A6061/A5052 에서는 A6061 에 비하여 기계적 강도가 약한 아래쪽의 A5052 는 적은 회전수에서도 유동이 쉽게 일어 나기 때문에 1340rpm, 500mm/min 의 낮은 회전수에서도 너깃(nugget) 형태의 교반부를 쉽게 만들어 내지만 A5052/A6061 의 경우는 A5052 에 비해 강도가 높은 A6061 재질이 아래쪽에 위치하여 상대적으로 교반이 쉽게 일어나지 않는 현상을 보였으나, 툴의 회전수가 늘어날 수록 입열과 회전력에 의한 유동이 더욱 늘어남에 따라 아래쪽의 A6061 도 위쪽 모재 영역으로 밀려 올라가는 모습을 보였다. 그러나, 1340rpm 보다 상대적으로 높은 회전수인 2380rpm, 500mm/min 에서는 A6061/A5052 와 A5052/A6061 모두에서 교반이 충분히 일어남을 경계의 위치를 통하여 알 수 있었다. 이는 두 모재의 기계적강도 차이를 넘어서는 회전수의 증가와 이로 인한 입열량의 증가가 용접부의 유동성이

늘어 나게 하여 아래판과 위판의 교반이 쉽게 일어나는 현상을 보였다. 결국 회전수와 입열량의 증가는 아래판의 모재가 위쪽으로 밀려 올라가는 양이 많아져 위쪽 모재의 두께가 얇아지게 되고, 틀의 솔더 부분에서 발생한 마찰열로 인해 위쪽에 위치한 시편의 용접부에 연화를 가져와 다른 용접 조건에 비해 상대적으로 인장강도값이 현저하게 낮아지는 결과를 나타냈다.

Fig. 8 은 1340rpm, 500mm/min 과 2380rpm, 500mm/min 로 용접한 시편을 파단되기 전까지 인장시켜 파단이 발생하는 부분의 과정을 보여주고 있다. 앞선 Fig. 6~7 의 용접부의 경계형태에 따른 마찰교반 접치기 용접시의 모재의 파단은 두 모재가 용접이 된 경계 부근 교반부의 좌측에 형성된 언덕을 따라 파단이 일어남과⁹ 회전속도가 높을수록 언덕 형태의 경계면이 발달하여 파단이 발생함을 Fig. 8 을 통하여 명확히 파악할 수 있었다.

Fig. 6~8 을 통해 우측에 형성된 경계선은 위쪽

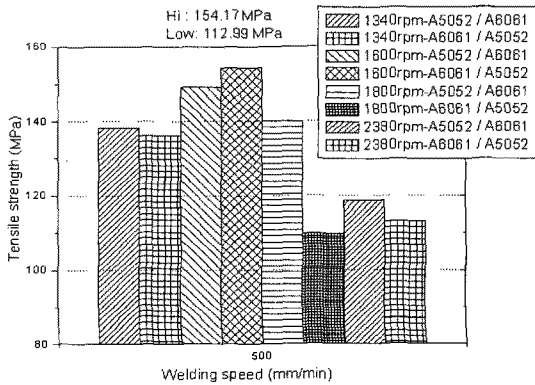


Fig. 4 Tensile strength of FSW lap joint : A6061 & A5052

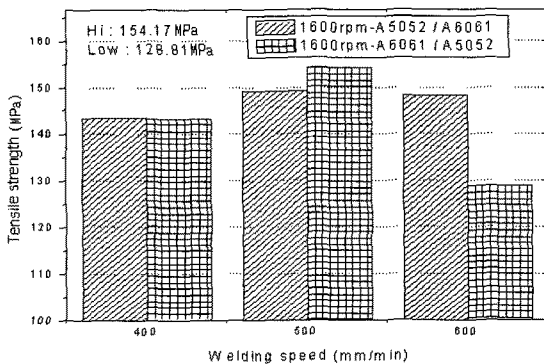


Fig. 5 Welding speed according to changes in tensile strength compared : A6061 & A5052

모재의 최상층부근까지 연결이 된 경계선 모양이 나타났다. 이는 나선형 핀의 틀을 이용하여 반시계 방향으로 용접을 하였을 때 위쪽에 위치하는

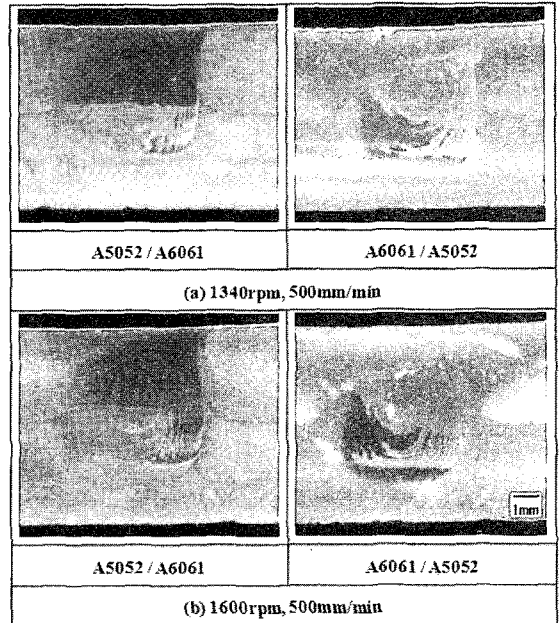


Fig. 6 Macro structural variation with various welding conditions : (a)1340rpm (b)1600rpm

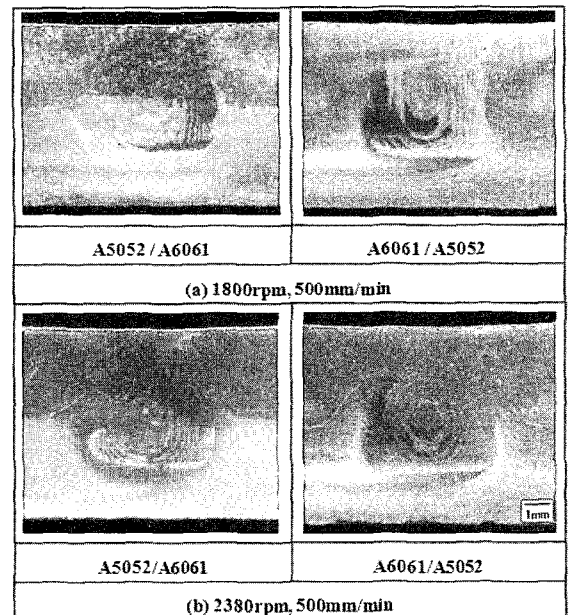


Fig. 7 Macro structural variation with various welding conditions : (a)1800rpm (b)2380rpm

모재에 인장력이 가해지게 되면 용접 진행방향의 우측에 만들어 지는 가파른 형태의 경계선을 따라 파단이 진행되어 용접 진행방향의 좌측방향에 위치시켜 인장력 가해질 때 보다 용접성능이 떨어지게 되는 결과를 나타내게 된다.¹⁰ 이러한 현상으로 봤을 때 오른나사형태 핀의 틀을 활용한 겹치기 마찰교반용접시에는 반시계 방향으로 틀이 회전을 할 때 용접진행 방향의 우측에 수직으로 급격한 경계면이 발생하게 되고, 이는 완만한 경계면에 비해 용접부에 인장력이 가해질 때 파단에 취약할 수 있음을 조직관찰을 통하여 판단할 수 있다.

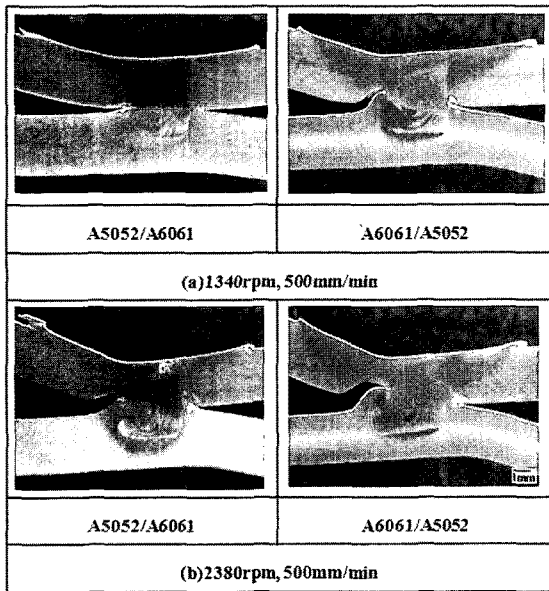


Fig. 8 Macro structural variation with various welding conditions : (a)1800rpm (b)2380rpm

3.2 A6061 과 A5052 의 이중 마찰교반용접시의 경도시험

마찰교반용접을 이용한 이중 겹치기 용접시 가장 인장강도가 높았던 1600rpm, 500mm/min 에서 A6061/A5052 와 A5052/A6061 의 용접부의 시편을 채취하여 경도를 측정하였다. Fig. 8 에서 나타난 것처럼 교반부와 기계적 열영향부 사이에 조직의 경계가 만들어지며 좌측의 A6061 조직이 우측에 위치한 A5052 에 섞여 존재하는 모습을 보여주고 있다. Fig. 9 는 A6061/A5052 의 경도 그래프로 위쪽에 위치한 A6061 의 경우는 전체적으로 앞서서 실시한 A6061 겹치기 용접부의 경도 그래프와 큰 차이가 없었다. 솔더부에서 경도가 떨어지는 현상을

보여주었으며 “A”로 표시된 부분에서 경도값이 크게 떨어진 이유는 Fig. 9 조직단면에서 보는 것처럼 A6061 과 A5052 의 두 가지 재질중에 교반부에 포함되어 있던 A5052 의 경도값이 측정된 것으로 교반부에는 두 모재가 혼재되어 있음을 나타낸다 하겠다. 또한 “B”로 표시된 부분의 경도가 80Hv 까지 급격히 높아지는 이유는 A5052 와 A6061 이 혼재되어 있는 교반부중에서도 A6061 부분의 교반부를 측정하였기 때문에 A5052 의 경도 값보다 높은 경도값을 나타냄을 조직단면의 관찰하여 알 수 있었다.

Fig. 10 은 A5052/A6062 의 경도값을 나타낸 것으로 A5052 의 경도값은 교반부(Stir zone)와 기계적 열영향부(Thermo-mechanically affectde zone)에서 경도값이 모재부에 비하여 값이 낮아지는 A5052 의 맞대기 마찰교반용접과 비슷한 거동을 보였고, A6061 의 거동은 교반부에서 경도값을 회복하는 일반적인 마찰교반용접부의 거동 형태가 아닌 교반부에서 만 경도가 떨어지는 현상을 나타내었다. 이와같은 차이는 아래쪽에 위치한 A6061 이 교반된 영역에 포함된 짧은 구간에서만 경도값이 하락한 후 바로 원래의 A6061 의 경도값으로 회복하는 모습으로 틀의 솔더와 프로브에 의하여 발생한 마찰열이 아래쪽 판에 있는 A6061 방향으로 입열이

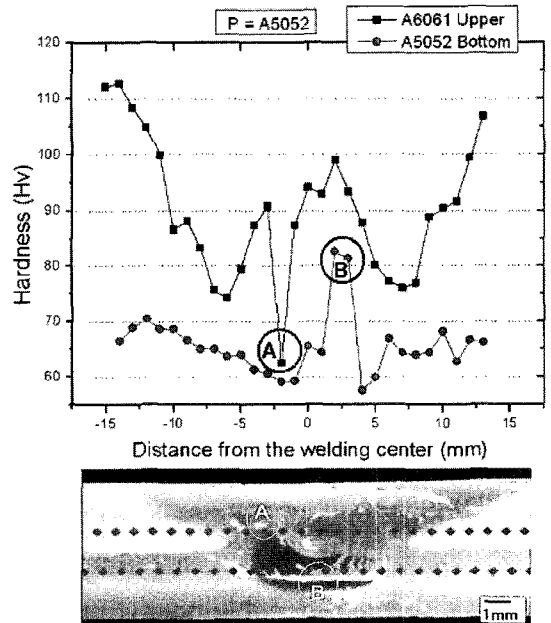


Fig. 9 Hardness comparison of FSW lab joint (A6061/A5052)

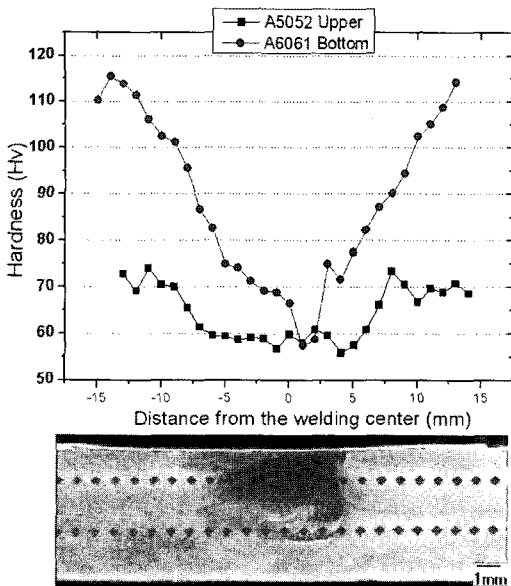


Fig. 10 Hardness comparison of FSW lab joint (A5052/A6061)

충분히 전달이 되지 않은 것으로 판단되며, 앞선 연구들의 맞대기 마찰교반용접시에 나타났던 열영향부와 기계적 열영향부 부근에서의 경도하락이 나타났지만,¹⁰ 겹치기용접시 뚜렷하게 나타나지 않았다. 그러나 편에 의해 마찰열이 충분히 발생하는 교반부 부분의 열처리 효과가 연화되는 영역을 만들어 A6061의 교반부 중심의 경도값은 크게 낮아 졌다.

4. 결론

1) 마찰교반겹치기 용접시 틀의 오른나사 프로브 틀의 회전방향이 반시계 방향일 때 인장력이 가해지는 모재의 위치는 공구 진행방향에서 좌측이 위로 올라오게 설치를 해야만 인장시 완만한 경계면을 따라발생하는 파단의 취약성을 막을 수 있다.

2) A5052/A6061 과 A6061/A5052 의 이중 마찰교반용접시 가장 높은 인장강도 값을 나타낸 조건은 1600rpm, 500mm/min 으로 평균 152MPa 이고, 2380rpm, 500mm/min 으로 용접을 수행하였을 때 평균 117MPa 인장강도의 낮았다.

3) 이중겹치기 마찰교반용접시 A5052 을 용접 진행방향의 좌측 위에 두고 우측 밑에 A6061 을 두었을 경우 A6061 이 쉽게 A5052 이 있는 위쪽으

로 올라오지 못하였으며, 반대로 위쪽에 A6061 이 위치하고 아래쪽에 A5052 가 위치하였을 경우 A5052 은 쉽게 A6061 쪽으로 언덕형 모양을 형성하며 거동하는 조직을 관찰할 수 있었다.

참고문헌

1. Kallee, S. and Nicholas, D., "Application of Friction Stir Welding to Lightweight Vehicles," Proc. of IBEC, 1998.
2. Chang, W. S., Choi, K. Y., Kim, S. H. and Kweon, Y. G., "Some Aspects of Friction Stir Welding and Its Application Technologies," Journal of KWS, Vol. 19, No. 6, pp. 7-15, 2001.
3. Starke, E. A. Jr. and Staley, J. T., "Application of modern aluminum alloys to aircraft," Progress in Aerospace Sciences, Vol. 32, No. 2, pp. 131-172, 1996.
4. Thomas, W. M., Nicholas, E. D., Needham, J. C., Murch, M. G., Temple Smith, P. and Dawes, C. J., "Friction Stir Butt Welding," GB Patent No. 9125978.8, International Patent Application No. PCT/GB92/02203, 1991.
5. John, R., Jata, K. V. and Sadananda, K., "Residual stress effects on near-threshold fatigue crack growth in friction stir welds in aerospace alloys," International Journal of Fatigue, Vol. 25, No. 9-11, pp. 939-948, 2003.
6. Hinrichs, J. F., Smith, C. B., Orsini, B. F., DeGerge, R. J., Smale, B. J. and Ruehl, P. C., "Friction Stir Welding for the 21st Century Automotive Industry," Proceeding of the 5th International Symposium on Friction Stir Welding, 2004.
7. Soundararajan, V., Yarrapareddy, E. and Kovacevic, R., "Investigation of the Friction Stir Lap Welding of Aluminum Alloys AA 5182 and AA 6022," Journal of Materials Engineering and Performance, Vol. 16, No. 4, pp. 484-491, 2007.
8. Thomas, W. M., Johnson, K. L. and Wiesner, C. S., "Friction stir welding -Recent developments in Tool and Process Technologies," Advanced Engineering Materials, Vol. 5, No. 7, pp. 485-490, 2003.
9. Cederqvist, L. and Reynolds, A. P., "Factors affecting the properties of friction stir welded aluminum lap joints," Weld J.(Res. Suppl.), Vol. 80, No. 12, pp.

281-287, 2001.

10. Park, H. S., Choi, W. D., Ko, J. B. and Choi, M. Y.,
“A Study on the effect of probe shape and plate
position on the mechanical strength during lap joint
friction stir welding process of aluminium alloys,”
Proc. of the KSMTE Spring Conference, pp. 280-284,
2009.