

< 기술논문 >

# 마찰교반용접된 겹치기 및 맞대기 용접부 특성에 대한 실험

장 석 기<sup>†</sup> · 전 정 일<sup>\*</sup>

(2005년 1월 31일 접수, 2005년 12월 14일 심사완료)

## Experimental Behaviors of Weld Zone Property of the Butt and the Lap Jointed Specimen Friction-Stir-Welded with 2mm<sup>t</sup> 1050 Aluminum Alloy Sheet

Seok-Ki Jang and Jeong-il Jeon

**Key Words:** Friction Stir Welding(FSW;마찰교반 용접), Weld Zone(용접부), HAZ(열영향부), Lap Joint(맞대기 이음), Butt Joint(겹치기 이음)

### Abstract

The butt and the lap welding by friction stir welding performs with 2mm<sup>t</sup> 1050 aluminum alloy sheet. This paper shows behaviors of property such as vickers hardness, yielding and ultimate stresses, and macrostructures for weld zone cross section of the butt and the lap jointed specimens. It is also carried out making comparison with maximum loads, stress-strain diagrams, and deformation after the guided bending test and fracture behaviors between the butt and the lap jointed specimens. It is found that the weldability of the butt jointed specimen is better than that of the lap jointed specimen.

### 1. 서 론

가스메탈 아크용접(GMAW)이나 저항용접 및 레이저용접으로 알루미늄을 접합<sup>(1)</sup>하는 경우에는 용접속도가 느리고 생산성이 낮으며 용접성이 저하된다. 반면에, 토마스<sup>(2)</sup>에 의해 발명되었고 영국 캠브리지의 TWI<sup>(3,4)</sup>에 의해 발전되었으며, 현재는 미국의 USC의 실험실에서도 연구중인 마찰교반용접은 전통적인 마찰용접<sup>(5-7)</sup>에서 연유되었으며, 용접 후에 비틀림이 매우 적고, 용접선이 긴 맞대기(butt)와 겹치기(lap) 이음의 제작에 적용될 수 있는, 고체 상태(solid phase)에서 용접이 가능한 잇점이 있다.

이러한 우수한 기법을 2mm<sup>t</sup> 박판재에 적용하기 위하여, 용접용 공구를 제작하고 마찰교반 용접법으로 맞대기이음<sup>(8)</sup> 및 겹치기이음접합<sup>(9)</sup>을 실시한 후 시편을 제작하여 각각의 용접법에 대한 용접부의 비커스 경도, 최고하중, 항복응력 및 극한강도, 응력-변형률선도, 용접부의 형틀 굽힘시험(guided bending test)후 변형결과 및 인장 후 파괴상태를 비교하고, 용접접합부 횡단면 용접거동에 대한 거시적 관찰을 실시한다. 동시에 2mm<sup>t</sup> 판상 알루미늄 합금재에 대한 우수한 용접법을 제안하고자 한다.

### 2. 실험재료 및 실험방법

#### 2.1 실험 재료 및 용접방법

이 실험에 사용된 재료는 두께가 2mm<sup>t</sup>인 알루미늄 A1050 판재를 사용하였으며, 화학성분과 기계적 성질은 Table 1과 Table 2와 같으며, 제작된 마찰교반 용접용 공구를 밀링머신에 장착하여 맞대기이음 및 겹치기이음을 실시하였다.

<sup>†</sup> 책임저자, 회원, 목포해양대학교 기관시스템공학부

E-mail : jangsk@mmu.ac.kr

TEL : (061)240-7093 FAX : (061)240-7282

<sup>\*</sup> 회원, 목포해양대학교 대학원 기관시스템공학부

**Table 1** Chemical composition (wt%) of A1050 aluminum alloy

Element	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
wt(%)	0.15	0.14	0.029	0.06	0.018	0.36	0.017	98.99

**Table 2** Mechanical properties of A1050 aluminum alloy

Yield strength (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)	Hardness (HMV)
93.1	103.61	10	68

맞대기이음에 사용한 공구<sup>(8)</sup> 치수는 어깨지름 7Φmm, 핀 길이 1.5mm, 핀 지름 3Φmm이며, 겹치기이음에 사용한 공구 치수는 어깨지름 7Φmm, 핀 길이 3.6mm, 핀 지름 3Φmm이다.

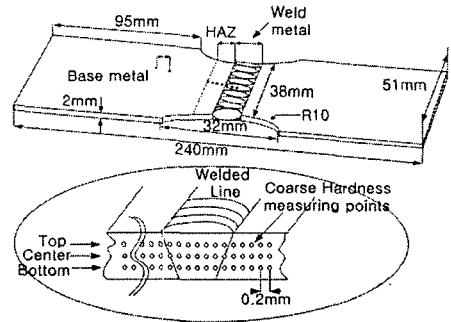
용접성 실험을 위하여 밀링머신의 회전속도를 2500rpm으로 하고 밀링머신의 이송속도를 257mm/min ~ 15mm/min으로 다양하게 실시한 후, 이들 중 표면비드상태가 양호하고 횡단면상에 균열이 나타나지 않는 접합 상태를 갖는 124mm/min의 이송속도를 선정하였다. 또한, 맞대기 및 겹치기이음 시에 모재 속으로 공구의 어깨가 압입되지 않은 상태에서 접합시켰다.

2.2 시험방법

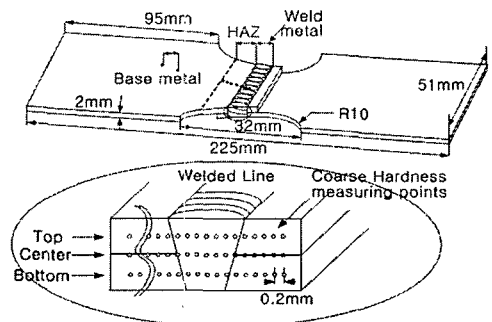
2.2.1 경도시험

시험에 사용된 마이크로 비커스 경도시험기는 SHIMADZU사의 HMV-2시험기로서 배율은 X40으로, 136°의 다이아몬드 피라미드 압자를 사용하여 하중과 하중시간을 각각 0.98N 및 10sec로 측정하였다.

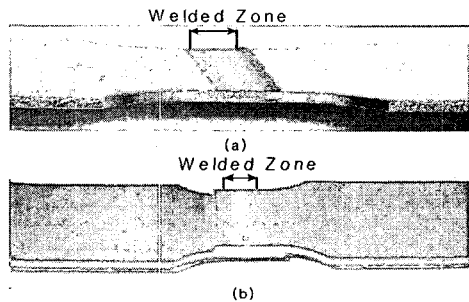
Fig. 1과 Fig. 2는 각각 맞대기이음 시편 및 겹치기이음 시편에 대한 마이크로 비커스경도 측정 위치를 나타낸 그림이다. 맞대기이음 시편에서의 마이크로 비커스 경도값 측정위치는 용접부 횡단면에 대해 용접부 표면으로부터 상부 0.5mm, 중간부 1.0mm, 하부 1.5mm로 나누어 가로방향 0.2mm 간격으로, 단면상부와 중간부에서는 용접부 경계면 사이에서 35개소, 하부에서는 25개소를 측정하였으며, 겹치기이음에서는 용접부 표면으로부터



**Fig. 1** Vickers hardness measuring points of welding zone on Butt-jointed specimen



**Fig. 2** Vickers hardness measuring points of welding zone on Lap-jointed specimen



**Fig. 3** Photo of tensile test specimens configuration Butt-jointed(a) and Lap-jointed(b) by FSW

상부 1.0mm, 중간부 2.0mm, 하부 3.0mm위치에서 맞대기이음과 동일한 측정개소를 측정하였다.

또한, 용접부 표면에서의 경도측정은 용접부의 중심을 기준으로 1(mm)간격으로 용접부 내에서 7개소, 용접부경계선 밖에서 각각 5개소씩 측정하였다.

2.2.2 인장시험

이 시험에 사용된 동적재료 인장시험기는 유압식 (INSTRON8516)이며, IX series 프로그램을 이용하여 컴퓨터 제어로 인장 속도가 2.54mm/min로 실시하였다. Fig. 3(a),(b)은 인장시험에 사용된 맞대기이음과 겹치기이음 시편의 모습을 각각 보여준다.

2.2.3 형틀 굽힘시험

형틀폭에 따른 용접부 결합 유. 무를 확인하기 위하여 형틀굽힘시험을 실시하였다. 시험에 사용된 형틀 굽힘 시험기는 DYHU-100TC-A/D 만능인장시험기로서 U자형 형틀 폭을 14.5mm로 고정하고 형틀 위에 맞대기 및 겹치기 이음 시편을 올려놓은 후  $\Phi 10\text{mm}$  형 굽힘 지그를 사용하여 40mm/min의 속도로 시편이 180°까지 변형되도록 형틀 굽힘 시험을 실시하였다. 또한, 형틀 폭을 30.5mm로 고정하고  $\Phi 28\text{mm}$ 의 형 굽힘 지그를 사용하여 같은 방법으로 형틀 굽힘시험을 실시하였다.

2.2.4 부식시험

맞대기이음 및 겹치기이음 시편의 용접부 횡단면의 마찰교반용접 거동과 용접결합의 유.무를 관찰하기 위해 100ml증류수, 5.8g수산화나트륨을 사용하여 실온에서 10(min)동안 표면을 부식시킨 후 광학현미경( $\times 100$ )을 사용하여 거시적으로 관찰하였다.

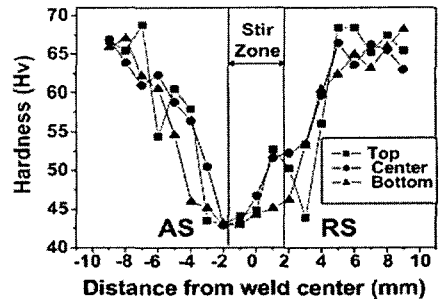
3. 시험결과 및 고찰

3.1 경도비교

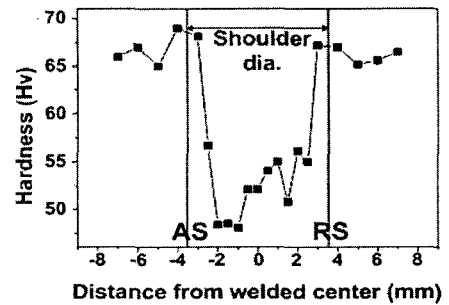
각각 동일한 4개의 맞대기이음 및 겹치기이음 시편에 대한 용접부 횡단면 및 표면의 평균 경도값의 크기 경향을 비교하기 위하여 Fig. 4(a),(b)와 Fig. 5(a),(b)에 나타내었다.

Fig. 4의 맞대기 접합부(SZ; Stir-Zone) 횡단면에서의 경도값은 상부, 중간부, 하부에서의 경도값은 거의 일정한 거동을 보였다. 또한, 접합부 주변은 모재보다 낮은 경도값을 보이고, 접합부인 교반영역(SZ)에서는 모재영역보다 20Hv정도 낮은 경도값을 보였다.

주목할 만한 것은 상부와 중간부에서 용접부중심을 기준으로 교반영역 안에서 추적면(RS;



(a)



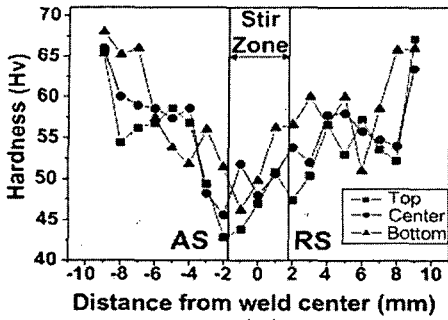
(b)

Fig. 4 Comparison of micro vickers hardness profiles on the cross-section(a) and surface(b) of Butt-jointed specimen

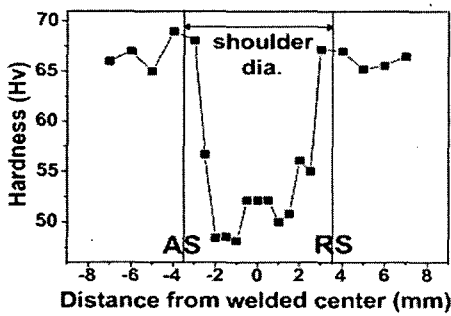
Retreating side)의 경도값이 진행면(AS; Advancing side)의 경도값 보다 높음을 알 수 있다. 이는 마찰교반용접용 공구가 모재를 용접할 때 발생하는 마찰열이 추적면 보다 진행면에서 높아 용접부의 미세조직 결정립 크기의 차이가 발생한 것으로 사료되어진다.

또한, 접합부 표면 경도값은 공구어깨가 닿아 용접되어진 부분(교반부)의 경도가 공구어깨가 닿지 않고 열의 영향만을 받은 부분(열영향부)의 경도값 보다 10Hv 정도 낮은 경도값을 나타내었으며, 특히 횡단면 경도값과 같이 추적면의 경도값이 진행면의 경도값 보다 높았다. 모재의 평균경도 68Hv에 비해 용접부 횡단면과 표면의 경도값은 교반마찰 용접공구에 의해 열의 영향을 많이 받는 부분 일수록 경도값이(용접부: 50Hv, 열영향부: 57.5Hv)낮게 나타났다.

Fig. 5의 겹치기이음 접합부 횡단면에서의 경도값은 맞대기 이음과 같이 상부, 중간부, 하부에서 유사한 거동을 보였으나, 교반영역에서의 경도값은 맞대기이음에서와 달리 상부측의 경도값이 하부측의 경도값 보다 높게 나타남을 보였다. 이는



(a)



(b)

Fig. 5 Comparison of micro vickers hardness profiles on the cross-section(a) and surface(b) of Lap-jointed specimen

겹치기이음으로 모재의 두께가 맞대기 이음의 2배로 공구의 길이가 길어짐에 따라 하부측의 교반영역이 상부측의 교반영역 보다 마찰교반용접시 공구어께에 의한 열의 영향을 적게 받았기 때문인 것으로 사료되어진다. 겹치기이음의 용접부 표면에서의 경도값은 맞대기이음의 경도값과 같이 추적면에서의 경도값이 진행면에서의 경도값보다 높게 나타났다.

3.2 맞대기이음 및 겹치기이음의 항복강도 및 인장강도

2mm' 알루미늄 모재를 마찰교반용접으로 가공된 맞대기이음 및 겹침이음, 그리고 4점 리벳<sup>(9)</sup> 접합된 인장시편에 대한 인장시험 후 하중-변위선도에서 최고하중의 결과를 Fig. 6에 나타내었다.

그림에서 모재의 최고인장하중 7869N을 100%라 했을 때, 맞대기이음 7085N으로 90%정도 겹치기이음은 6948N으로 88%정도, 4점 리벳 접합은 2342N으로 30%정도를 나타내었다. Fig. 7은 맞대기이음 및 겹치기이음 시편에 대한 항복강도

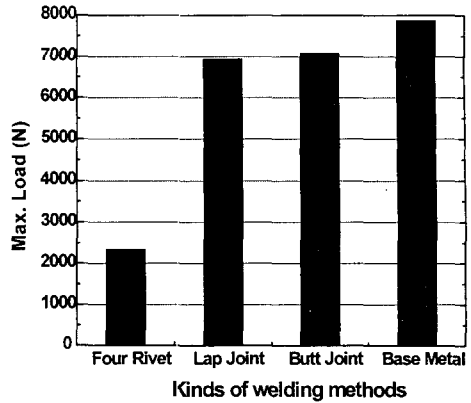


Fig. 6 Maximum loads for different welding methods after tensile test

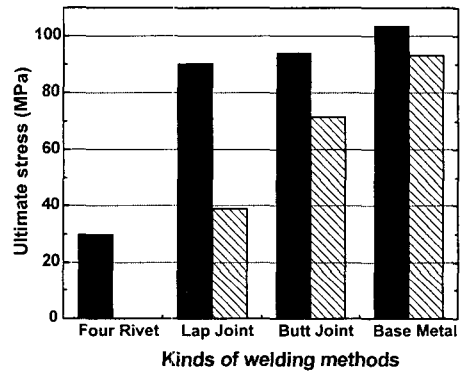


Fig. 7 Comparison of ultimate and 0.2% offset stress between Butt-jointed and Lap-jointed specimen

와 인장강도를 비교한 그림이다. 모재강도의 인장강도는 103.61MPa이고 맞대기이음은 모재강도의 91%정도인 94.01MPa이며, 겹치기이음은 모재강도의 87% 정도인 90.27MPa이다.

다음으로 모재의 항복강도는 93.1MPa로서 맞대기이음은 71.54MPa의 모재 77% 정도이며, 겹치기이음은 38.94MPa로서 모재의 42%정도를 나타내었다. 맞대기이음이 겹치기이음보다 인장강도와 항복강도가 약간 크게 나타났다.

Fig. 8(a),(b)는 각각 맞대기이음 및 겹치기 이음 시편에 대한 응력-변형률 선도를 나타낸 것이다. 맞대기 이음 시편에 대한 응력-변형률 선도는 모재의 것과 거동이 비슷하였으나, 겹치기 이음 시편에서는 낮은 항복강도와 흡수에너지를 나타내었다. 그러나, 최고 인장응력은 두 용접법에서 거의 비슷한 값을 보였다.

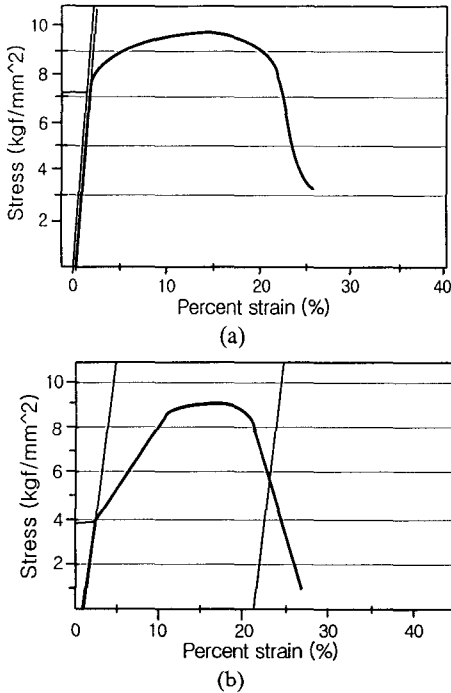


Fig. 8 Stress-strain diagrams for Butt-jointed and Lap-jointed tensile test specimen

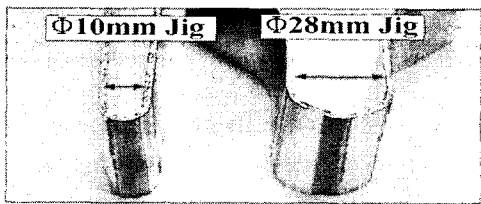


Fig. 9 Appearance after the guided bending test for Butt-jointed specimen

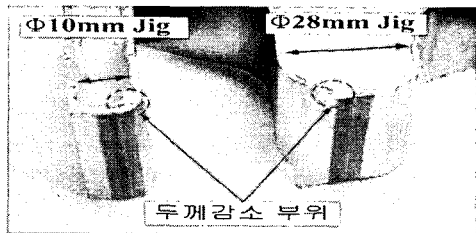


Fig. 10 Appearance after the guided bending test for Lap-jointed specimen

3.3 형틀 굽힘시험 결과

Fig. 9와 Fig. 10은 Φ10mm과 Φ28mm의 지그를 사용하여 맞대기이음 및 겹치기이음 시편의 형틀 굽힘시험 후 모양을 나타낸 사진이다.

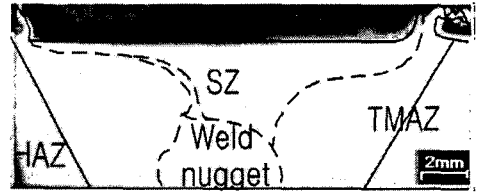


Fig. 11 Transverse cross-section macrostructure of FSW Butt-jointed specimen

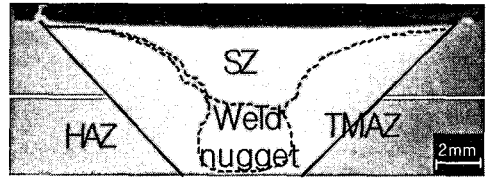


Fig. 12 Transverse cross-section macrostructure of FSW Lap-jointed specimen

용접부의 표면상태는 사용한 지그의 직경에 관계없이 맞대기이음 및 겹치기이음 시편들의 외표면 용착금속에서 균열이나 파단의 흔적은 찾을 수 없었다. 그러나 겹치기이음의 경우 맞대기이음에 비하여 용접부의 두께가 두배정도 두껍기 때문에 형틀 굽힘시험 과정에서 작용한 굽힘모멘트에 대한 저항의 차이로 인하여 시편두께가 다소 감소함을 나타내었다.

3.4 맞대기이음 및 겹치기이음 횡단면의 용접 거동

Fig. 11과 Fig. 12는 마크로적 에칭에 의해 맞대기이음과 겹치기이음 시편의 용접부 횡단면의 용접거동으로써 교반부, 열영향부 등을 거시적으로 나타내었다.

두 시편에서 마찰교반용접에 의한 용접부의 결합은 없었으며, 교반부(SZ), 열-기계적영향부(TMAZ; Thermo-mechanically Affected Zone) 및 열영향부(HAZ; Heat Affected Zone)가 뚜렷하게 나타났다. 또한, 마찰교반용접에 의한 교반부와 용접너깃부의 거시적 조직분포가 열-기계적 영향부나 열영향부 보다 조밀하였다.

3.5 맞대기이음 및 겹치기이음시편의 파괴거동 비교

Fig. 13은 맞대기이음 시편의 파괴모습을 나타낸 것이다. 여기서, 파손시편위의 용접부에서 두

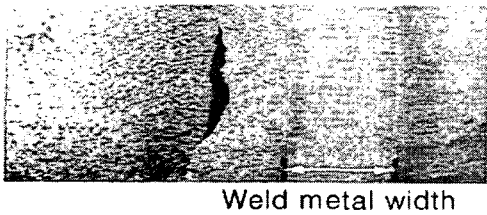


Fig. 13 Enlarged fracture shape of the tensile test specimen Butt-jointed by FSW

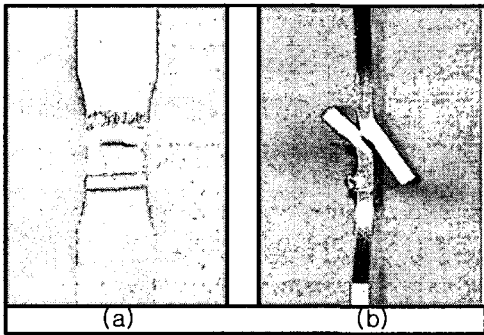


Fig. 14 Fracture front(a) and lateral(b) face of tensile shear test specimen Lap-jointed by FSW

점선은 공구어깨가 지나간 추적흔적인 용접금속부이다.

Fig. 14(a)은 겹치기이음 시편의 파단 전면을 나타내고, Fig. 14(b)는 파단된 측면 사진을 보여 준다. Fig. 14(a)의 용접금속부위에서 파단은 인장 하중에 의하여 시편이 상.하로 인장시 시편의 좌.우로 가해진 굽힘모멘트에 의해 굽힘변형이 크게 발생하여 균열이 일어난 것으로 사료된다.

#### 4. 결론

1050 알루미늄 2mm'의 판재에 대해 교반마찰 용접된 겹치기이음 및 맞대기이음 용접부 특성에 대한 실험결과와 다음과 같다.

(1) 교반마찰용접된 용접부 근방의 경도비교결과 두 용접법 모두 열영향부에서는 모재에 비하여 14-16%, 교반부에서는 25-27% 정도 낮은 경도를 보였다.

(2) 맞대기이음은 겹치기이음 보다 최고하중과

인장강도 및 항복강도가 전반적으로 높게 나타났다.

(3) 형틀 굽힘시험 결과 용접금속부에서는 결합, 균열이나 파단이 일어나지 않았다.

(4) 대체적으로 횡단면의 유동에 대해 부식에 의한 거시적 관찰 결과 교반부가 열-기계적 영향부나 열영향부 보다 조적이 조밀하였다.

(5) 맞대기이음에서는 열영향부에서 파단이 일어났으나, 겹치기이음에서는 용접부에서 파단이 일어났다.

이 실험에 사용된 두 용접법 모두 신뢰할만한 용접성을 나타냈으며, 2mm' 판재의 용접에는 맞대기이음 마찰교반용접을 사용하는 것이 바람직하다고 사료된다.

#### 참고문헌

- (1) Park, S. T., Jung, J. P. and Suhr, C. J., 1994, "Weldabilities of 7000 Aluminium Alloys(I)," *Journal of KWS*, Vol. 12, No. 1, pp. 38-43.
- (2) Thomas, W. M., et al., 1991, "Friction Stir Butt Welding," *International Patent Application* No. PCT/GB 92/02203 and GB Patent Application No 9125978.8.
- (3) Dawes, C. J., 1996, "Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys," *Welding Journal*, Vol. 75, No. 3, pp. 41-45.
- (4) Hinrichs, J. F., Noruk, J. S., McDonald, W. M. and Heideman, R. J., Svetsaren, No. 3, 1995.
- (5) Lee, C. H., Chang, R. W. and Yoon, E. P., 1992, "Weldability of Al Alloys: Cracking and Porosity," *Proc. of the KWS-KIM Symposium'92*, pp. 69-93.
- (6) Kim, H. T., Hwang, S. H. and Nam, S. W., 1992, "Weldability of High Strength Aluminum Alloy," *Proc. of the KWS-KIM Symposium '92*, pp. 29-38.
- (7) Kim Hee Jin and Baek Kwang Ki, 1988, "Mechanical and Stress Corrosion Cracking Properties of AA7019 Alloy Gas Metal Arc Weldment," *Journal of the Korean Inst. of Metals*, Vol. 26, No. 11, pp. 1075-1082.
- (8) Jang, S. K. and Shin, S. H., 2001, "A Development of Optimizing Tools for Friction Stir

Welding with 2mm Thick Aluminum Alloy using a Milling Machine,” *Journal of The Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 25, No. 4, pp. 791~796.

(9) Jang, S. K., Lee, D. C., Kim, S. J. and Jeon,

J. I., 2002, “An Experiment of Optimizing Tools for Lap Joint with 2Tmm Aluminum Alloy Plate Using FSW,” *Proc. of The Korean Society of Marine Engineers*. Spring Conf. pp. 153~160.