

1050 Al판재의 핀 마찰 교반용접에 의한 실험적 연구

장석기† · 박종식* · 한민수*

(원고접수일 : 2006년 12월 10일, 심사완료일 : 2007년 4월 30일)

Weldability and properties of lap joints by pin FSW with 1050 Al sheet

Seok-Ki Jang† · Jong-Seek Park* · Min-Su Han*

Abstract : The properties and weldability of lap joints by PFSW with 1050 Al sheet was investigated according to tool shape, dimension and welding condition. Tensile shear test was carried out for lap jointed specimen, and the hardness in the joint regions was examined. Moreover interfacial joining length, metallograph and failure location of the lap-jointed cross section were discussed. Two tool types were a simple cylindrical type and a notched cylindrical type. Under joining conditions such as plunging depth of 2.2mm, rotating speed of 1600rpm and dwelling time of 3s, the tensile shear strength of lap-jointed specimen by the notched type tool was superior to that by simple cylindrical type tool. The maximum tensile shear load of lap jointed specimen was 5807N. Optimal dimensions of the notched type tool were as follows: diameters of the shoulder and pin were 18Φmm and 10Φmm, and pin length was 2.2mm.

Key words : PFSW(Pin Friction Stir Welding : 핀마찰교반용접), Plunging depth(공구 압입 깊이), Rotating speed(회전 속도), Dwelling time(접합 시간), Metallograph(금속표면 확대도)

1. 서 론

최근 한정된 에너지 자원의 효율적인 이용과 환경오염 저감에 대한 관심과 규제로 기존 재료의 경량화와 재활용 측면에 대한 관심이 고조되고 있다. 특히 Al합금은 자동차와 조선분야에서 대체 재료로 주목받고 있다. Al합금은 강판에 비해 열전도도 및 비열이 높고 전기저항이 낮아 발열은 어렵고 방열은 쉬워 용접에 어려움이 있다. 또한, Al표면

의 산화피막은 저항점용접(Resistance spot welding : RSW) 과정에서 전극수명을 단축시키는 원인으로 보고되고 있다^{(1),(2)}.

차체의 사시 같은 두께가 얇은 박판재의 용접에 있어서 저항점용접이 사용되는데 Al합금의 저항점용접의 경우 높은 전기적 에너지가 필요하며 그로 인해 경제적 부담과 함께 용접설비의 대형화를 가져오는 단점이 있다. 그리고 용접 시 발생하는 고열로 인해 재료의 변형은 물론 유해가스발생으로

† 교신저자(목포해양대학교 기관시스템공학부 교수), E-mail: jangsk@mmu.ac.kr, Tel: 061)240-7093

* 목포해양대학교 대학원 응용역학 · 재료공학전공

용접작업의 어려움을 가져다준다⁽³⁾.

마찰교반용접(Friction Stir Welding : FSW)⁽⁴⁾⁻⁽⁷⁾의 원리를 응용한 마찰교반점용접(Spot Friction Stir Welding : Spot FSW)은 마찰교반용 공구를 재료에 국부적으로 삽입하여 짧은 시간에 공구회전력으로 마찰교반을 일으켜 재료를 소성유동 시킴으로써 재료를 고상상태에서 접합하도록 하는 기술이다⁽⁸⁾⁻⁽¹⁰⁾. 이 기술은 공구를 회전시킬 수 있는 회전설비와 고정 장치만 있으면 Al 합금의 저항점용접법의 대안으로 사용하는 것이 가능하다.

TIG 나 MIG같은 용접과 비교하여 상대적으로 매우 적은 접합부를 갖는 점용접이나 저항점용접을 판재의 Al 합금에 적용하는 것이 물리적으로 어려우며, 저항점용접의 전극과 같은 아주 작은 핀을 사용하여 마찰교반점용접으로 올바른 접합을 하는 것 또한 거의 불가능하다.

따라서 본 논문에서는 두 가지 형상의 공구에 대해 공구 핀의 직경을 6 또는 10Φmm로 제작하여 두께 2mm인 1050 Al판재에 핀 마찰교반용접(Pin Friction Stir Welding : PFSW)을 적용한다. 공구 형상과 치수 및 접합조건에 따라 겹침이음 접합실험을 실시하였다. 그리고 겹침이음 접합부의 기계적 성질, 매크로적 거동 및 미세 조직 등의 관찰을 실시하여 핀 마찰교반용접성을 평가하고 최적 공구치수 및 접합조건 등을 제시한다.

2. 사용재료 및 실험 방법

2.1 사용 재료

Table 1은 실험에 사용된 Al 1050 알루미늄 합금의 화학적 조성비와 재료의 물리적 성질을 표로 나타낸 것이다. 표에 나타난 것과 같이 Al 함량 98.99%, Si함량 0.14%, 마이크로비커스 경도 값이 32.56인 두께 2mm의 판재를 사용하였다.

Table 1 Chemical compositions and mechanical properties of Al 1050 alloy

Chemical compositions (wt.%)								
Element	Cu	Si	Mg	Zn	Mn	Fe	Ti	Al
wt(%)	0.15	0.14	0.03	0.06	0.02	0.36	0.02	98.99
Mechanical properties								
Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)		Elongation (%)		Hardness (Hv)			
78.09	89.29		10.71		32.56			

2.2 실험 방법

Fig. 1은 핀 마찰교반용접(PFSW)에 사용된 공구의 형상을 나타낸 것이다.

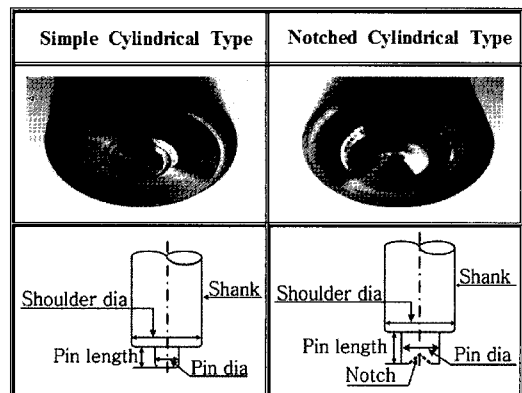


Fig. 1 A scheme and photograph of tools for lap-joints by pin FSW

공구의 재질은 공구강(SK)으로서 어깨직경이 16Φmm이고 핀 직경이 6Φmm인 단순원통형(Simple cylindrical type:이하 단순형 이라함)공구와 어깨직경이 18Φmm, 핀 직경이 10Φmm이며 핀 저부 내측에 직경 6Φmm, 깊이 3mm를 삭정하여 노치를 가공한 노치형(Notched cylindrical type)공구를 사용하였다.

접합조건으로서 회전속도를 1250, 1600 그리고 2500rpm, 압입 깊이를 2.2와 3.0mm, 접합시간을 1, 3 그리고 5s로 겹침이음접합을 실시하였다. 인장전단시험에 사용된 시험편의 치수는 Fig. 2에 나타내었다.

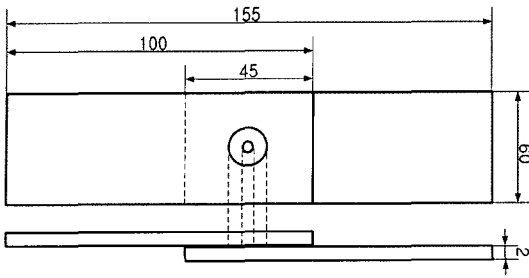


Fig. 2 lap-joined for tensile shear test specimen by PFSW

또한 핀 마찰교반용접 접합부의 기계적 성질을 고찰하기 위하여 인장전단하중 시험과 비커스경도 시험 즉, 접합부 횡단면의 상면에서 1mm, 1.8mm, 3mm 깊이 마다 시편의 축 방향으로 1mm의 등 간격으로 경도를 측정하였다. 또한 접합부 거동 및 미세조직관찰을 위하여 단면을 에칭한 후 현미경 및 SEM으로 조직을 관찰하였으며 EDX로 검출된 화합물의 성분을 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 겹침이음 단면의 접합성

Table 2는 공구형상과 치수 및 접합조건에 따른 접합부에 대해 나안과 광학현미경으로 접합부위의 접합상태 및 계면 겹침 접합길이의 측정을 통하여 용접결함 및 용접성을 관찰하였다.

그 결과 용접성이 우수한 시험편에 사용된 공구와 접합조건을 대체적으로 확인할 수 있었으며 이들 공구와 조건들로 다시 용접을 실시하였다.

재용접된 시편의 단면에서 공구의 회전수가 1600rpm일 때가 다른 회전수에 비하여 우수한 접합성을 나타내었으며, 공구회전수 1600rpm에서 압입깊이, 접합시간을 다르게 하여 실험한 후 핀 마찰교반 이음단면에서 측정된 계면접합부(sheet interfacial joining length)의 길이를 Table 2에 나타내었다.

Table 2를 보면, 단순형 공구의 경우 압입깊이가 2.2mm, 접합시간을 3초로 하였을 때 계면접합 길이가 5.8mm로 가장 큰 겹침이음 계면접합부 길이를 나타내었으며, 마찬가지로 노치형공구의 경우

도 압입깊이가 2.2mm, 접합시간이 3초일 때 겹침이음 계면접합길이가 6.1mm로 가장 크게 나타났다. 즉, 계면접합 길이로 판단했을 때 노치형공구가 원통형공구보다 약간 우수한 접합성을 나타내는 것으로 평가되었다.

Table 2 Sheet interfacial joining length for cross-section at 1600rpm by Pin FSW

Type	Plunging depths (mm)	Dwelling time (sec)	Interfacial joining length(mm)
Simple cylindrical	2.2	1	1.5
		3	5.8
		5	5.0
	3.0	1	1.7
		3	3.6
		5	3.3
Notched cylindrical	2.2	1	2.1
		3	6.1
		5	4.6
	3.0	1	2.2
		3	4.2
		5	3.5

3.2 최대하중 및 접합부 경도 거동

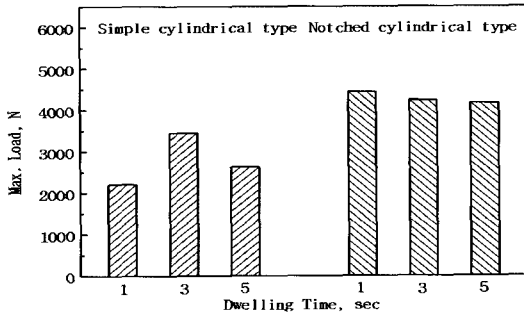
Fig. 3은 인장전단 실험 후 공구형상과 접합시간에 따른 최대인장하중을 나타낸 그래프이다.

공구의 압입깊이가 3.0mm인 Fig. 3의 (a)를 보면, 노치형공구가 단순형공구 보다 다소 높은 하중을 나타냈으며 노치형공구는 접합시간에 크게 영향을 받지 않았다. 최대 하중은 4107N으로 노치형공구로 1초의 접합시간으로 실험한 때였다.

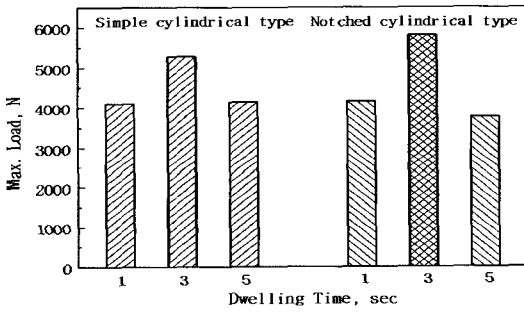
공구의 압입깊이가 2.2mm인 Fig. 3의 (b)를 보면, 단순형 공구 및 노치형 공구 모두 접합시간에 따른 영향이 비교적 크다는 것을 알 수 있다. 단순형의 경우 압입깊이가 감소함에 따라 인장하중이 크게 증가하는 경향을 보였다. 노치형의 접합시간이 3초일 때가 5807N으로 최대인장하중 값을 나타내었다.

공구 압입깊이 및 접합시간에 따른 인장전단최대하중을 비교할 때 노치형공구를 압입깊이 2.2mm

로 하여 집합시간 3초로 하여 핀-마찰교반용접 할 때 가장 큰 하중을 나타내기 때문에 상기 조건에서 우수한 집합성을 나타낸 것으로 판단하였다.



(a) Plunging depth 3.0mm



(b) Plunging depth 2.2mm

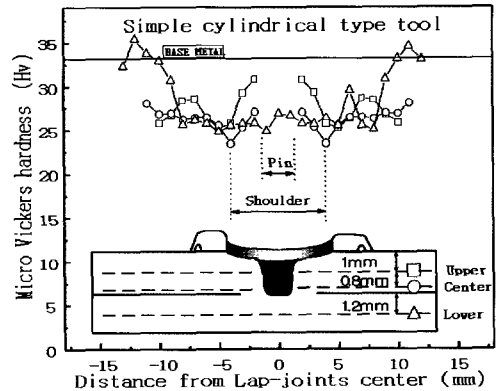
Fig. 3 Comparisons of max. load according to Dwelling time and plunging depth at 600rpm by different tool type

Fig. 4는 단순형 공구와 노치형 공구에서 각각 최대 인장하중 값을 나타낸 집합 조건에 따른 집합부의 단면형상과 경도거동을 나타낸 것이다.

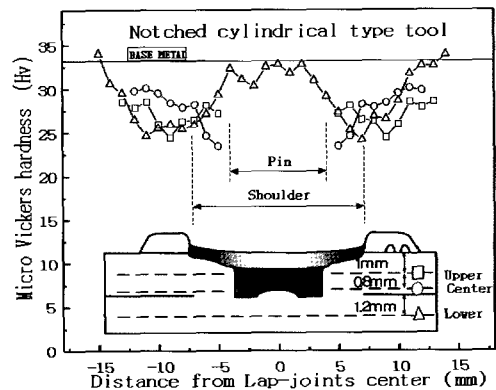
Fig. 4의 (a)를 보면 단순형 공구를 이용하여 공구압입깊이가 2.2mm, 집합시간이 3초, 회전속도 1600rpm에서 경도 거동을 나타낸 것이다. 1mm 깊이의 경도 거동은 위치(-5,1)로부터 접침이음접합부 중앙에 가까워질수록 경도(Hv)약 27에서 모재의 경도와 비슷한 30정도로 상승하는 경향을 보였다.

이는 핀과 어깨의 영향으로 핀이 모재에 삽입되는 과정에서 모재가 마찰교반에 의해 밀려올라온 고상상태의 Al합금이 공구어깨 하면의 교반마찰에 의하여 넓은 교반영역(Stir Zone)이 형성되기 때

문으로 판단된다. 반면 깊이 1.8mm의 단면 중앙은 경도가 계면접합부 근방에서 약간 낮아졌다. 이는 두 모재의 계면이 접합하면서 발생한 미소한 공동 때문에 경도가 상대적으로 낮아지는 경향을 보이는 것으로 사료된다. 깊이 3.0mm인 하부의 경도분포를 살펴보면 경도값(Hv)이 대략 25정도로 모재보다 상당히 적은 값이며 일정하다. 이는 측정 위치 전반에 걸쳐 열영향부가 존재하기 때문인 것으로 사료된다. Fig. 4의 (b)는 노치형공구를 사용하여 공구압입깊이가 2.2mm, 집합시간이 3초, 회전속도 1600rpm으로 용접한 접합부의 단면경도거동을 나타낸 것이다. 단면 상부 깊이 1mm의 측정에서는 접합부 중앙에 가까워질수록 경도거동은 단순형 공구와 유사한 거동을 하였으나 그 경향은 경도 값이 다소 낮은 값을 나타냈다.



(a) Simple cylindrical type



(b) Notched cylindrical type

Fig. 4 Behaviors of micro vickers hardness on the cross-section by Pin-FSW according to tool type

또한 두께중앙부근에서의 경도거동은 계면접합부에서 핀 쪽에 가까워질수록 두 모재의 겹침이음 접합과정에서 생긴 미소공동으로 인해 경도가 낮아지는 경향을 보였으나 전반적으로 단순원통형공구에 비해 경도 값이 높게 분포하였다. 이것은 단순원통형공구에 비해 노치형 공구가 마찰교반되는 과정에서 상대적으로 더 넓은 교반영역과 기계적 열 영향부를 만들어 재결정과정을 거쳐 조직이 미세화되기 때문으로 추정된다. 깊이 3mm인 두께하부의 경도분포에 있어서는 단순원통형공구와 달리 거의 모재의 경도와 유사한 경도분포를 보인다. 이것은 핀 저부의 노치 영향으로 공구 노치부위에서 많은 마찰교반과 열로 인해 화합물의 제거 및 조직의 미세화로 경도가 크게 나타난 것으로 사료된다.

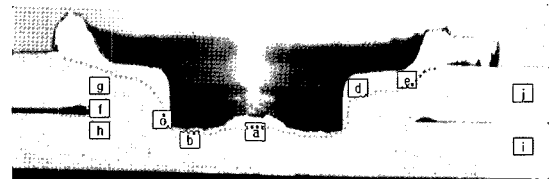
3.3 용접부 횡단면의 매크로적 거동과 미세조직

Fig. 5는 노치형 공구를 사용한 핀 마찰교반접합부 횡단면의 매크로적 거동(a)과 조직(b)을 나타낸 것이다.

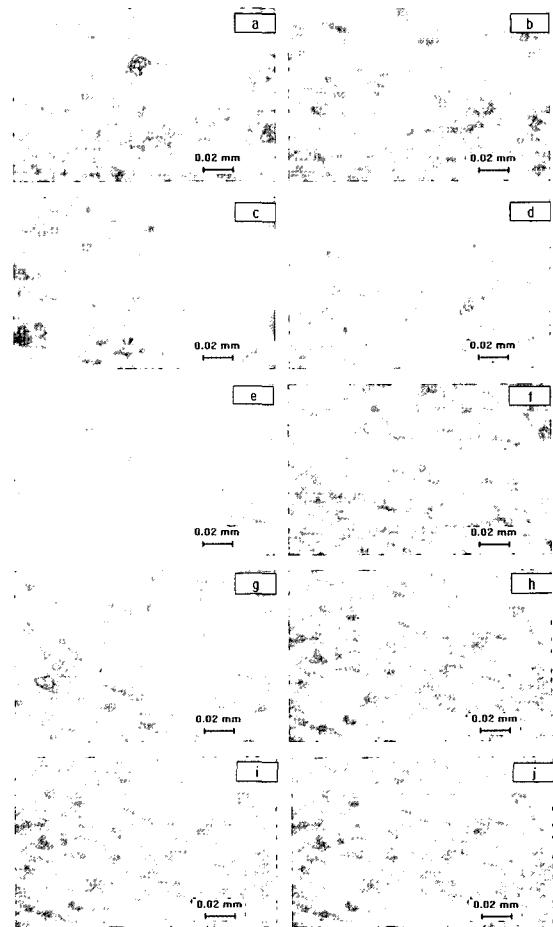
현미경사진(a)에 점선 위쪽은 교반영역을 나타낸다. 핀 저부 쪽은 교반영역이 적으며, 핀 가장자리 전연에서 공구 어깨 바로 밑으로 갈수록 교반영역은 확대됨을 보였다. 이러한 교반영역(Stir Zone)의 분포는 핀이 모재로 압입되는 과정에서 마찰 교반된 모재가 고상상태의 용융금속으로 밀려나면서 공구어깨 밑면에 의해 발생한 것으로 추정된다.

공구영향을 받지 않는 영역 i와 j에 넓게 분포하는 검은 부분은 Al-Si화합물이다. 공구 핀의 저부영역 a, b 및 전연인 c 영역은 Al-Si화합물의 분포가 i와 j 영역과 비교하여 적게 존재한다. 또한 핀에 가까운 영역일수록 Al-Si화합물은 적게 분포한다. 이는 공구의 핀이 모재에 회전하며 삽입되는 과정에서 생긴 마찰열과 교반으로 Al-Si화합물이 분쇄되고 조직이 더욱 미세화된 것으로 사료된다. 공구어깨의 영향을 크게 받아 교반영역으로 추정되는 d와 e에서는 Al-Si화합물은 거의 찾아보기 힘들다. 계면접합부 근방인 f와 그의 상·하부 쪽의 Al-Si 화합물의 분포를 살펴보면 하부

h 영역에서 보다 상부g 영역에서 Al-Si 화합물의 분포가 적게 나타났다. 이것은 마찰열의 영향이 상대적으로 높아서 일어난 현상으로 판단되며 조직상으로 명확한 구분이 어려우나 기계적 열 영향영역으로 사료된다.



(a) Macrostructure



(b) Microstructure

Fig. 5 Photograph of macro-structure on the lap-jointed cross-section by notched cylindrical type tool

또한 인장전단시험과정에서 시편의 파단은 열영향부로 추정되는 \bar{h} 바로 아래와 공동(void)이 존재하는 계면접합부 끝 근방 f 사이에서 균열성장 및 파손이 관찰되었다.

Fig. 6은 Fig. 5에서 교반영역인 c 와 계면접합부 영역 f 에 대한 EDX(Energy Dispersive X-ray Spectroscopy)에 의한 화합물의 성분을 나타낸 것이다. Al-Si 화합물은 교반영역 c 에서 거의 존재하지 않았지만 화합물의 크기는 상대적으로 조대하였다. 이것은 핀-마찰교반용접 과정에서 대부분의 화합물은 분쇄되었으나 마찰열에 의하여 재결정과정에서 화합물의 크기가 조대하여진 것으로 추정된다. 반면 직접적인 마찰열이나 기계적 열영향이 상대적으로 적은 영역 f 와 같은 계면접합부 영역에서는 상대적으로 미세한 다량의 Al-Si 화합물과 일정방향으로 생긴 미소공동(void)이 존재하였다. 이러한 미소공동은 계면접합부에서만 나타나며 마찰교반과 열이 상대적으로 높게 작용한 공구 핀 주위에서는 미소공동은 나타나지 않았다. 이러한 미소공동의 생성은 핀 마찰교반용접의 접합시간이 짧기 때문에 핀의 압입과 인출과정을 거치면서 핀의 회전 에 따른 용융된 고상 Al합금이 유동하기 때문으로 추정된다.

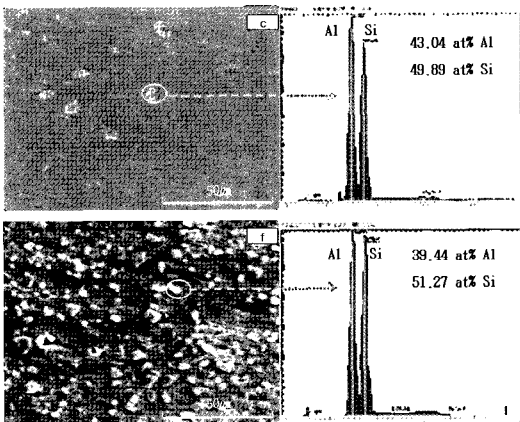


Fig. 6 SEM/EDX Analysis of Al-Silicide

Fig. 7은 인장실험 후 파단된 시편을 촬영한 사진이다. 파손은 접합단면에서 판재계면접합부 선단으로부터 열영향부로 추정되는 시편의 배면사이에서

균열이 시작되며 배면에서는 시편 중앙의 열영향부에서부터 균열의 성장과 진전과정을 거쳐 분리 파단 되는 것을 확인할 수 있었다.



Fig. 7 Photograph of rupture of tensile-shear test specimen lap-jointed by PFSW

4. 결 론

이 논문에서 핀 마찰교반용접의 접합성 평가는 공구형태 및 공구의 회전수와 공구 압입깊이 그리고 접합시간이 주요한 인자임을 알 수 있었다. 최대하중과 경도거동에 있어서 핀의 접촉 단면적이 큰 노치형공구가 단순 원통형공구보다 접합성이 우수하였으며, 실험결과 두께가 2mm인 Al 1050 판재의 겹침이음용 최적의 공구는 노치형공구로써 공구어깨 및 핀의 지름은 18Φmm 및 10Φmm이며 접합조건은 압입 깊이 2.2mm, 공구 회전수 1600rpm, 접합시간은 3초였다. 최대인장하중은 5807N이다.

또한 많은 마찰교반과 열이 모재에 가해질수록 교반영역은 커지며 그 결과 Al-Si화합물의 제거와 조직의 미세화 및 판재계면접합부의 길이의 증가로 인해 우수한 접합성을 갖는 것으로 사료된다.

참고문헌

[1] H.I.Shin, Y.S.Park, S.S.Kang, "A Study on the Fatigue Behavior of Resistance Spot Welded Part of 5182 Aluminum Alloy Sheet", Journal of KWS, Vol. 16, No. 2, pp. 84-92, 2006.
 [2] Yong-Seop Han, "Effect of Welding Current Type on Weldability in Spot Welding of Aluminum Alloy", Journal of KWS, Vol. 15, No. 2, pp. 89-99, 1997.

- [3] S.P. Kim, T.M. Hong, H.S. Chang, "A Study on the Resistance Spot Welding of Aluminum Alloy(1)", Journal of KWS, Vol. 12, No. 4, pp. 128-140, 1994.
- [4] S.K.Jang and S.H.Shin, "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, 2001.
- [5] Won-Bae Lee, Chang-Young Lee, Woong-Seong Chang, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung, "Microstructural investigation of friction stir welded pure titanium", Journal of Materials Letters 59, pp. 3315-3318, 2005.
- [6] Joong-Suk Noh, Heung-Ju Kim, Woong-Seong Chang, Kook-Soo Bang, "Evaluation of Joint Properties of Friction Stir Welded AZ31B Mg Alloy", Journal of KWS, Vol. 22, No. 3, pp. 56-61, 2004.
- [7] Heung-Ju Kim, Chang-Keun Cheon, Sook-Hwan Kim, Woong-Seong Chang, "Microstructures and Mechanical Properties of the Friction Stir Welded Dissimilar Joint of AZ31B/A6061", Journal of KWS, Vol. 24, No. 4, pp. 6-10, 2006.
- [8] Won-Bae Lee, Chang-Young Lee, Yun-Mo Yeon, Seung-Boo Jung, "Spot Friction Welding of 5J32 Al alloy", autumn of KWS, pp. 192-194, 2005.
- [9] Hyeon-Jin Cho, Heung-Ju Kim, Chang-Keun Cheon, Woong-Seong Chang, Kook-Soo Bang, "Evaluation of Friction Spot Joining Weldability of Al Alloys for Automotive", Journal of KWS, Vol. 24, No. 1, pp. 50-55, 2006.
- [10] Yun-Mo Yeon, Chang-Yong Lee, Won-Bae Lee, Seung-Boo Jung, Keun Song, "Joint Characteristics of Spot Friction Stir Welded A 5052 Alloy Sheet", Journal of KWS, Vol. 24, No. 1, pp. 71-76, 2006.

저 자 소 개



장석기(張石基)

1973년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1988년 전남대학교 대학원 기계공학과 졸업(박사), 1998. 1~1999년 2 University of South Carolina 연수 현재 목포해양대학교 기관시스템공학부 교수



박종식(朴鍾植)

1969년생, 2005년 대불대학교 컴퓨터응용기계과 졸업(공학사), 현재 목포해양대학교 대학원 기관시스템학부 응용역학·재료공학 석사과정.



한민수(韓民洙)

1974년 4월생, 1997년 목포해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 2004년 목포해양대학교 대학원 기관시스템공학부 응용역학·재료공학과 졸업(공학석사), 현재 동대학원 박사과정