

알루미늄 철도차량 적용 마찰교반용접 기술개발 현황

천창근 · 장웅성 · 강정윤 · 권용재 · 박동환

Friction Stir Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks

Chang Keun Chun, Woong Seong Chang, Chung Yun Kang, Yong Jai Kwon and Dong Hwan Park

1. 서 론

최근 녹색 성장을 주제로 수송산업을 비롯한 산업전반에 걸쳐 에너지 절감에 대한 요구가 높아지고 있다. 철도차량 분야도 대표적인 수송산업으로서 종래에는 주로 엔진을 이용하여 구동되었으나 최근 전기에너지를 이용하는 전동차의 보급이 확산되어 이산화탄소 저감에 기여를 하고 있다. 에너지 절감이라는 측면에서 볼 때 전동차 제조 기술 중 가장 큰 이슈 중 하나는 차체의 무게를 가볍게 할 수 있는 경량 금속의 사용을 증가시키는 것이다. 따라서 종래에 주로 사용하던 스테인리스를 대신하여 알루미늄 소재 사용이 꾸준히 증가하고 있으며 가장 최근에는 차량 부품의 일부분을 마그네슘 소재로 대체하고 있다. 현재 전동차의 차체 판넬은 대부분 알루미늄 합금을 압출하여 사용하고 있으며 일부 압연재를 사용하고 있다. 전동차 차체에 적용되는 알루미늄 차체 구조는 single skin과 double skin으로 나누어지며 구조에 상관없이 국내에서 사용되는 알루미늄 소재는 주로 압출성이 좋은 Al 6005 압출재와 Al 5083 압연재가 대세를 이룬다. Al 6005 합금 압출재는 강도를 향상시키기 위하여 제조하는 과정에서 T6 열처리를 주로 실시한다¹⁾. 따라서 MIG(metal inert gas) 용접과 같은 용융 용접을 실시하면 어닐링 효과 때문에 접합부 강도가 모재 강도에 비하여 약 60% 정도로 떨어지는 단점이 있다²⁾. 따라서 일본을 중심으로 해외 선진 알루미늄 철도차량 회사에서는 가장 최근 개발된 고상 용접기술 중 하나인 마찰교반용접을 철도차량 차체 제조에 적용하고 있거나 적용하려고 추진하고 있다³⁾. Fig.1은 알루미늄 6000계열을 종래에 주로 사용하던 MIG 용접과 마찰교반용접을 적용하였을 때 접합부 경도 분포를 비교하는 것으로 마찰교반용접부의 경도가 MIG 용접부에 비하여 HAZ부의 폭이 좁아짐과 동시에 경도 하강이 작아지는 특성을 관찰할 수 있다.

이러한 장점 때문에 일본의 Hitachi, Nippon Sharyo,

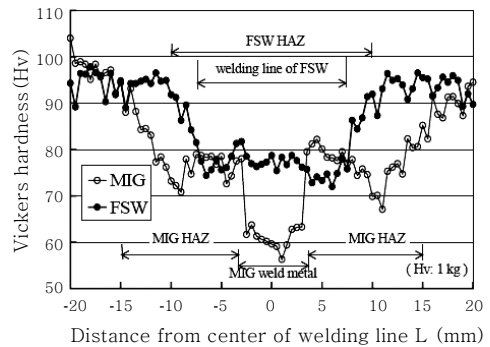


Fig. 1 Comparison of FSW and MIG (A6N01-T5)

Kawasaki, Siemens 등에서 알루미늄 철도차량 차체 제조에 마찰교반용접을 적용하고 있거나 확대를 시도하고 있다. 특히 Hitachi의 경우 TWI에서 주관한 마찰교반용접 기술개발 프로젝트에 참여한 후 본 기술을 철도차량 차체 제조에 가장 먼저 적용하였다. 이후 철도차량 차체 제조에 마찰교반용접 응용 기술 개발을 꾸준히 추진하여 많은 특허기술을 취득하였다. 이후 Kawawaki를 비롯한 기타 철도차량 제조사들도 Hitachi와 차별화된 특허기술을 발명함과 동시에 자사 알루미늄 차체 제조에 적용 중이거나 시도하고 있다. 그 중 가장 두드러진 기술은 Nippon Sharyo의 하중제어 SRPT(self reacting pin tool)로서 현재 본 기술을 사용하여 제품 생산을 진행하고 있다.

본 보고에서는 이러한 해외 전동차 제작 회사에 대응하여 국내 알루미늄 전동차에 마찰교반용접을 적용하기 위한 기술개발 사례와 현황에 대하여 소개하고자 한다.

2. 해외 철도차량 마찰교반용접기술 현황

마찰교반용접을 철도차량 차체 제조에 적용한 최초 회사는 일본의 히다치로서 1995년에 처음으로 기술개발을 시작하였다. 이후 1999년에는 25m 차체를 용접할 수 있는 시스템을 개발 완료하여 차체 생산에 적용

하였다. 이후 꾸준히 기술개발을 실시하여 일본 국내 및 해외에 약 70여편의 특허기술을 획득하였다. 가장 대표적인 특허기술은 Fig. 2의 (a)와 (b)와 같이 double skin 구조에 마찰교반용접을 적용할 수 있는 차체 제작 방법으로 (a)는 차체를 뒤집지 않고 접합할 수 있는 방법이며 (b)는 차체 내부에 리버가 있는 구조일 때 뒤집어서 마찰교반용접할 수 있는 방법이다.

Nippon Sharyo에서는 종래 마찰교반용접에서 가지고 있던 단점인 용접 중에 발생하는 큰 하중 발생을 지지할 수 있는 구조물 설치를 해결하기 위하여 MTS사의 SRPT(self reacting pin tool)를 도입하였다. 종래 MTS사의 SRPT 방법에서는 tool shoulder 사이의 간격을 일정하게 유지하여 용접하는 일정 위치제어 방법을 사용하였다. 이러한 일정 위치제어 SRPT 방법의 경우에는 넓은 공정인자 윈도우를 설계할 수 있으나 압출재의 두께가 일정하지 않을 경우 접합부 결함이 쉽게 발생하므로 보다 정밀한 두께의 압출재를 요구하는 문제가 있었다. 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Nippon Sharyo에서는 하중제어 SRPT 기술을 개발하였다. 하중제어 SRPT 방법은 양호한 접합부를 형성하는 공정인자 윈도우는 매우 좁으나 최적의 공정인자를 도출하여 적용할 수 있다면 정밀한 압출재 두께가 필요 없어 전체 제작비 절감 효과를 기대할 수 있다. Fig. 3은 MTS사의 SRPT 마찰교반용접용 tool 형상과 Nippon

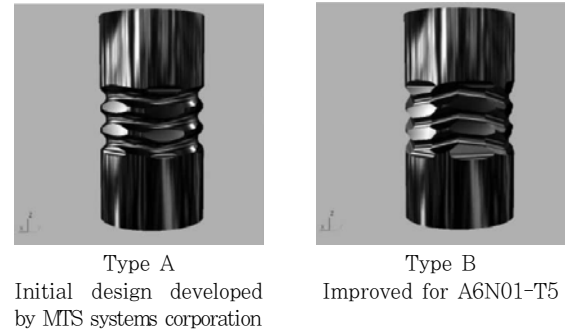


Fig. 3 Comparison of SRPT tool

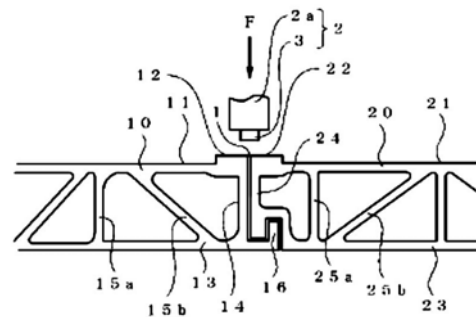
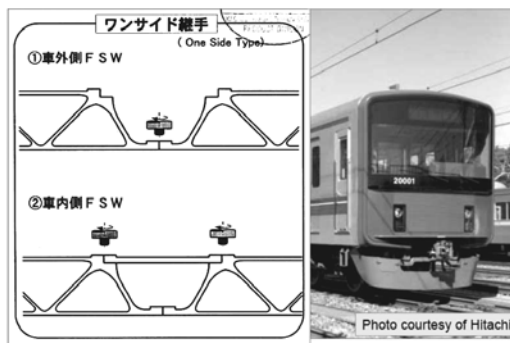


Fig. 4 Kawasaki one side welding

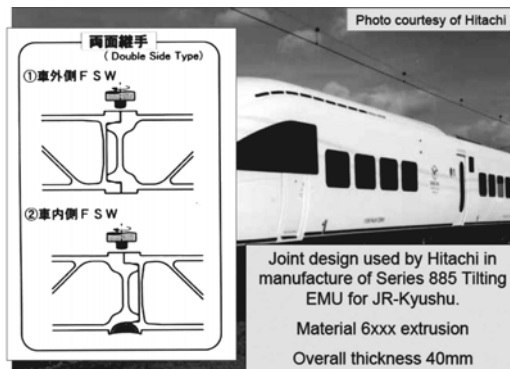
Sharyo에서 개선한 SRPT 마찰교반용접 Tool을 보여 주고 있다.

Kawasaki는 Fig. 4와 같이 double skin 구조를 가진 차체 압출재를 상부와 하부 양면에 용접하지 않고 끼우는 방식을 도출하여 상부에만 용접할 수 있는 방법을 개발하였다. 그 외 Kawasaki의 강점 기술인 마찰교반 점용접을 사용하여 차체를 제작할 수 있는 방법들도 활발히 연구하고 있는 것 같다.

Siemens는 Hitachi 특허를 회피할 수 있는 구조로 Fig. 5와 같이 hollow type의 double skin 구조를 도출하였다. 이와 같이 철도차량에 마찰교반용접을 적용할 수 있는 효율적인 방안을 도출하기위하여 많은 해외 선진 철도 차량사에서도 활발한 기술 개발을 수행하고 있는 것으로 추정된다⁴⁻⁵⁾. 따라서 국내 철도차량 제작사에서도 종래 MIG 용접방법보다 여러 가지 측면에



(a) One side welding without turning



(b) Double side welding

Fig. 2 Hitachi FSW in aluminum train

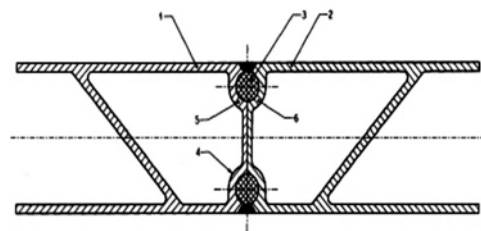


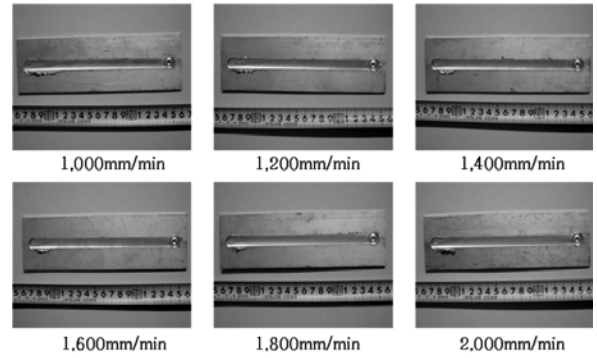
Fig. 5 Siemens hollow section welding

서 경쟁력이 있는 마찰교반용접을 철도차량에 적용할 수 있도록 기술개발을 서둘러야 할 것으로 판단된다.

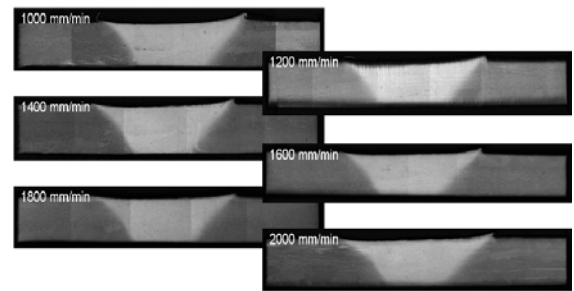
3. 국내 철도차량 마찰교반용접기술 현황

국내 철도차량 차체 제조에 마찰교반용접기술을 적용하려는 시도는 2000년대 초에 철도기술연구원과 포항산업과학연구원 등에서 시작되었다. 이후 꾸준한 기술개발을 실시하여 철도차량용 알루미늄 압출재에 마찰교반용접을 적용한 연구사례가 많이 발표되고 있다⁶⁻⁸⁾. Fig. 6과 같이 종래에는 주로 마찰교반용접을 적용하였을 때 접합부 조직 변화나 경도분포 분석, 공정인자에 따른 접합부 내부 결함 등과 같은 기초 연구를 주로 수행하였다.

이후 이러한 마찰교반용접을 실제 차체 제작공정에 적용하기위해 필요한 용접속도 상승에 관한 연구와 두께 편차가 있는 알루미늄 압출재에도 결함없이 양호한 접합을 수행할 수 있는 하중제어 마찰교반용접에 관한 연구, 길이 20m 이상 압출재를 맞대었을 때 필연적으로 발생하는 gap을 메울 수 있는 마찰교반용접기술 개발 등이 수행되어지고 있다. 일반적으로 고속 용접을 실시할 때 발생 가능한 용접결함은 크게 표면 크랙과 내부 홀 발생으로 나누어진다. 표면 크랙은 용접 시작 시 툴의 고속회전으로 tool shoulder 직하에 소재의 소성유동이 커져 연화된 소재가 shoulder 내부에 잔류하지 않고 shoulder 밖으로 나가버리기 때문에 발생한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해서는 툴 회전속도와 용접속도의 적합한 관계식을 구하여 적용할 필요가 있다. Fig. 7의 (a)는 tool 회전속도 5,000rpm에서 고속 마찰교반용접을 적용하였을 경우 표면 비드의 관을 나타내는 것으로 용접속도 2,000mm/min까지 양호한 비드가 관측되었으며 (b)는 단면 사진으로 내부에 홀이나 kissing bond와 같은 결함이 관측되지 않았다.



(a) Surface bead



(b) Cross section

Fig. 7 High speed FSW

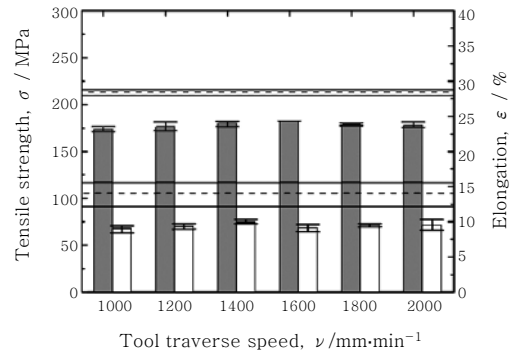


Fig. 8 Tensile strength and elongation

Fig. 8은 고속 마찰교반용접을 적용하였을 때 기계적인 물성을 나타내는 것으로 인장강도와 연신율을 나타낸다. 인장강도는 모재강도의 약 80% 정도, 연신율은 모재 연신율의 65%의 특성을 나타내고 있어 고속 마찰교반용접을 적용해도 기계적인 물성이 나빠지지 않았음을 알 수 있다.

국내 알루미늄 철도차량 차체에 사용되는 압출재의 두께는 약 2.5~3.2mm를 사용하고 있다. 이러한 두께의 알루미늄 압출재를 실제 국내 압출재 회사에서 압출하였을 때 나타나는 두께 편차는 약 0.4mm이다. 이러한 두께 편차가 발생하였을 경우에도 이상적인 마찰교반용접을 수행하기위한 가장 좋은 방법은 하중제어를 실시하는 것이다. 하지만 이러한 하중제어를 수행하면

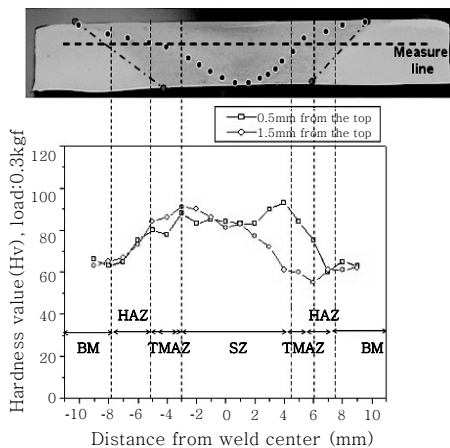
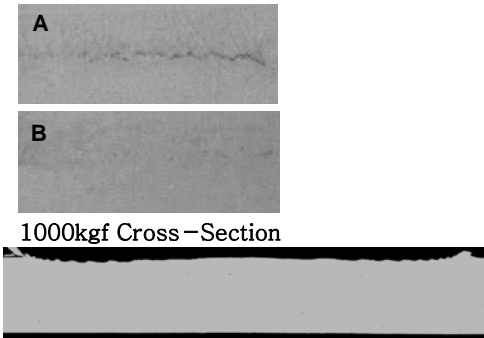


Fig. 6 Cross section and hardness in FSW

Plate t : 3.12mm		1500rpm - 1200mm/min Probe Length : 2.65mm	
	950kgf	1000kgf	
Front Bead			
Back Bead			
Crack Test	A	B	

(a) Bead and crack test



(b) Cross section

Fig. 9 하중제어 마찰교반용접부

tool probe 길이의 최적 설정과 결합이 없는 양호한 용접 공정인자 윈도우가 좁아져 정밀한 작업관리가 요구되어진다. Fig. 9는 두께 3.12mm 알루미늄 압출재를 하중제어 마찰교반용접을 적용한 결과를 나타내는 것으로 (a)는 접합부 비드와 crack test 결과를 나타내며 (b)는 단면사진을 나타내고 있다. 사진에서 관측되듯이 약 50kgf 하중 차이에 미세한 결합 유무가 판정난다. 하중제어의 핵심기술은 정밀한 하중제어 메카니즘과 최적 probe 길이 설정이다.

일반적인 철도차량 차체 길이는 약 20~25m이므로 알루미늄 압출재도 본 길이에 맞게 압출하여 절단한다. 절단한 압출재를 접합하기 위하여 맞대어보면 통상적으로 2~3mm정도의 gap이 발생한다. 종래 MIG 용접의 경우에는 용가재가 있어 이러한 gap이 발생해도 문제가 되지 않았다. 하지만 마찰교반용접의 경우 추가적인 용가재가 없으므로 tool의 삽입 깊이를 조절하여 모재의 일부분이 접합부를 채우게 하여야 한다. 따라서 통상 접합부가 예상되는 부분은 압출할 때 타 부분보다 조금 두껍게 설계 및 제작하여야 한다.

Fig. 10은 이러한 gap발생 시 마찰교반용접을 적용하는 모습을 보이고 있는 것으로 두께 2.2mm 알루미늄 압출재를 인위적으로 0~2mm gap 조절하면서 마찰교반용접 시험을 수행하였다. Fig. 11은 gap 증가에 따라 tool 삽입 깊이를 증가시키면서 용접한 접합부 단

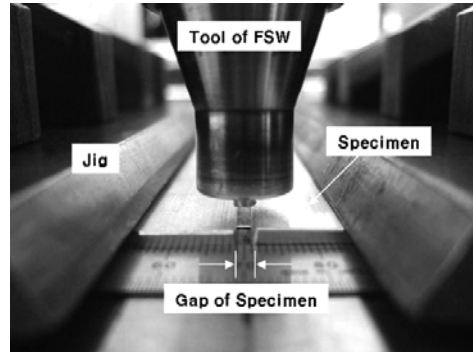


Fig. 10 FSW with the gap

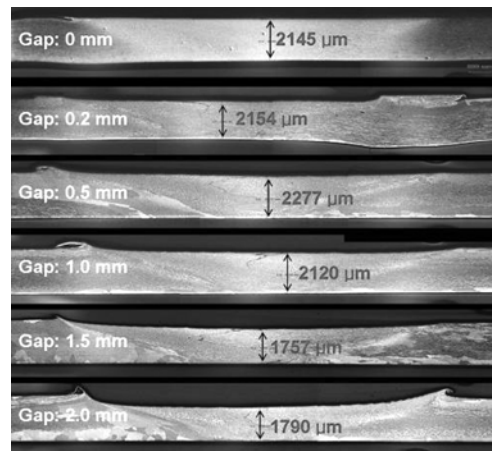


Fig. 11 Cross section of FSW with gap

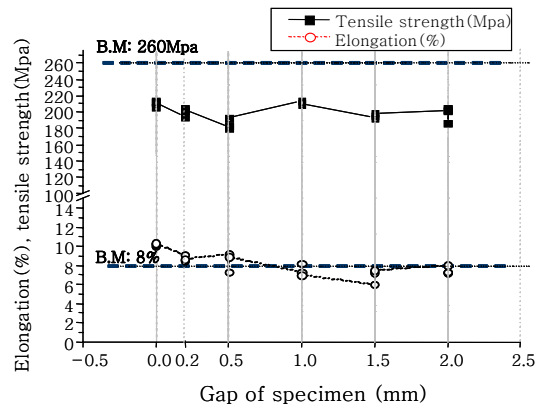


Fig. 12 Tensile strength and elongation of FSW with gap

면 사진으로 접합 후 소재 내부에 홀이 관측되지 않는 양호한 접합이 이루어짐을 알 수 있었다. 본 실험 결과에서는 gap이 약 2mm 이상이 되면 약간의 용접결합이 관측되기 시작하여 3mm가 되면 용접이 불가능하였다. Gap 증가에 따른 접합부의 기계적 물성을 조사한 결과 Fig. 12와 같이 인장강도와 연신율은 gap의 증가

에 따라 약간 감소하는 특성을 보이고 있었으나 급격한 물성변화는 관측되지 않았다. 따라서 20m 이상 길이의 장거리 용접을 수행할 때 필수적으로 발생하는 gap 발생에 따른 용접결함 또는 기계적 특성 저하는 극복할 수 있을 것으로 판단된다.

그 외 마찰교반용접이 차체 용접라인에 실기 적용되기 위해서는 용접과 동시에 용입 부족과 소재 내부터널 발생과 같은 결함을 연속적으로 검출할 수 있는 방법에 대한 기술개발과 tool 부러짐을 방지할 수 있는 공정기술 개발이 향후에 필요할 것으로 판단된다⁹⁾.

4. 결 론

현재 국내 철도산업은 차세대고속철도와 자기부상열차사업 등 정부 주도로 활발한 기술개발이 이루어지고 있다. 이러한 철도차량 기술개발의 필수 항목 중 하나는 차체 경량화로서 최근 개발 및 제조되는 거의 모든 차체 외관은 알루미늄 합금이다. 이러한 알루미늄합금 차체 용접에는 마찰교반용접이 많은 장점이 있어 해외 철도차량 선진사에서는 철도차량 제조에 본 기술을 활발히 적용하고 있다. 국내에서는 일부 연구소와 대학을 중심으로 알루미늄 합금 마찰교반용접에 대한 기술개발을 꾸준히 진행하고 있으며 국내 철도차량 제작사에서도 본 기술을 적용하려는 움직임이 서서히 진행되고 있다. 조만간 국내에서도 알루미늄 철도차량 제조에 마찰교반용접기술을 적용될 것으로 전망된다.

참 고 문 헌

1. Sungil Seo : Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks, Journal of KWS, **22-3** (2004), 228-234 (in Korean)
2. D. Rosenthal : Mathematical Theory of Heat Distribution during Welding and Cutting, Welding Journal, **20-5** (1941), 2205-2345
3. Hideo Takai, Masakuni Ezumi, Kinya Aota : Progress in Rolling Stock Body Shell & FSW Application, The 10th International Conference on Joints in Aluminum, 2007, 18-35
4. H. Ohaba, C.Ueda and K.Agatsuma : Innovative Vehicle - the A-train, Hitachi Review, **50-4** (2001), 130-133
5. Yasutomo ODA, "Fatigue Design Diagram for Weld Joints on Aluminum Alloy Railcar Body Shells", The 10th International Conference on Joints in Aluminum, proceedings, 292-297
6. Changkeun Chun, Hyengju Kim, Ingyu Park, Kyungsu Umm, Woongseong Chang : The Effect of Strength by Changing Tool Shape in the Friction Stir Welding, 2009 Spring Conference of KSR, 2009 Spring Conference of KSR, 1613-1617
7. Woongseong Chang, Changkeun Chun, Hyengju Kim, Ingyu Park : Friction Stir Welding in Extrusion Aluminum Carbody of HEMU-400X, 2008 Spring Conference of KSR, 966-971
8. Hyengju Kim, Changkeun Chun, Woongseong Chang : Friction stir welding of extrusion aluminum alloy for railway vehicles and Fatigue characteristic, Proceeding of 2008 Autumn Annual Meeting of KWS, Volumn **50** (2008), 22
9. Hiramatsu Hideki, "Investigation of Predominant Mechanical Parameters and its Prediction in Joint Strength of Friction Spot Joining", Journal of Light Metal Welding and Construction, **43-9**, 23-33



- 천창근
- 1968년생
- 포항산업과학연구원
- 마찰교반용접, 초음파, 용접공정 기술
- e-mail : ckchun@rist.re.kr



- 권용재
- 1968년생
- 울산대학교 첨단소재공학부
- 비철경량금속재료, 마찰교반접합
- e-mail : yongjaikwon@mail.ulsan.ac.kr



- 장용성
- 1959년생
- 포항산업과학연구원
- 철강 및 비철 용접성, 신용접응용기술
- e-mail : wschang@rist.re.kr



- 박동환
- 1951년생
- 울산대학교
- 용접야금, 재료피로특성
- e-mail : dhpark@ulsan.ac.kr



- 강정운
- 1953년생
- 부산대학교 재료공학부
- 마찰교반접합, 브레이징, 용접야금
- e-mail : kangcy@pusan.ac.kr