

◆특집◆ 하이브리드 프로세스

밀링기반 마찰교반접합 신기술동향: 공구, 장비 및 응용부품

노중석*, 김주호*, 고건호**, 강명창#

(*(주)태광테크, **, #부산대학교 융합학부)

New technology Trends on Friction Stir Welding Based on Milling Process in terms of Tools, Machine and Applied Parts

Joong-Suk Noh*, Ju-Ho Kim*, Gun-Ho Go**, Myung-Chang Kang#

(Received 19 December 2013; received in revised form 22 December 2013; accepted 23 December 2013)

ABSTRACT

Friction stir welding (FSW) is a solid state joining technique that has expanded rapidly since its development in 1991 and has numerous applications in a wide variety of industries. This paper introduces the basic principles of friction stir welding (FSW) and presents a survey of the latest technologies and applications in the field. The basic principles that are discussed include the terminology, tool/workpiece processes, FSW merits and process variants. In particular, the process variants including the rotation speed and traveling speed are discussed, which include the defect-free zone in an oxygen free copper and Al alloy, respectively. Multiple aspects of the FSW machine are developed, including a horizontal 2D FSW machine and a hybrid complex FSW machine. The latest applications are introduced, with an emphasis on the recent advances in the aerospace, automotive, and IT display industries. Finally, the direction for future research and potential applications are examined.

Key Words : Friction Stir Welding(마찰교반접합), Process variants(공정변수), FSW Machine(마찰교반 장비), FSW Tool(마찰교반 공구), FSW Parts(마찰교반 부품)

1. 서 론

최근 지구환경보호와 에너지 절감에 대한 요구가 높아짐에 따라 자동차, 항공기, 철도차량 및 선박 등의

수송기기 산업에서 친환경 경량부품의 사용이 빠른 속도로 확대되어지고 있다. 뿐만 아니라, IT 디스플레이 산업, 플랜트산업, 우주산업에서도 고강도 경량화를 위하여 새로운 비철소재들이 개발되어지고 있다^[1-2]. 이러한 비철소재의 산업분야에 적용은 대개 용접공정에 의해 이루어지는데, Al, Cu, Mg, Ti등의 합금은 기술적, 경제적, 환경적 측면에서 여러 가지 문제를 가지고 있다. 일반적으로 대부분의 비철금속에 용융용접을 적용할 경우, 용융으로 인한 결함(응고균열, 액화균열, 기공 등)의 발생이 쉽고, 고온으로 인한 열 변형이 매우

* R&D center, Taekwang Tech Co., LTD

** Pusan National Univ., Graduate School of Convergence Science

Corresponding Author : Pusan National Univ., Graduate School of Convergence Science

E-mail : kangmc@pusan.ac.kr

심각하게 발생되어진다^[3]. 또한, 용접 금속 내에 각종 취약한 금속간화합물이 발생함으로써, 접합부의 기계적 강도가 저하되어, 부품으로서의 사용이 다소 어렵다. 한편, 비철금속 합금의 용융 용접 문제는 고상접합법인 마찰교반접합(Friction Stir Welding) 공정이 개발되어짐에 따라, 상당히 많은 부분이 해결되어졌고^[4-5], 최근 국내외의 다양한 분야에서 접합방법, 개별소재 및 이종소재의 접합, 접합부 결함방지, 최적 접합조건, 접합부 강도향상 등의 많은 연구가 진행되고 있다^[6-8]. 그러나 이러한 대부분의 연구는 영국 용접연구소(The Welding Institute, TWI)의 독점 특허권인 주축계의 틸팅에 의한 교반특성을 기본으로 한 접합공정을 적용하고 있다. 또한 FSW에 대한 연구는 거의 대부분 재료공학 중심으로 보고되고 있으며, 기계공학 관점에서 충분히 접근할 수 있는 공구 형상설계 및 평가 그리고 장비설계 및 제작에 대한 다양한 연구결과가 거의 보고되고 있지 않다.

따라서 본 논문에서는 밀링기반으로 한 마찰교반접합공정의 기본원리를 관련 용어들과 함께 설명하고, 그와 관련된 공구회전속도 및 이동속도에 의한 접합공정변수들의 무결함범위에 대한 연구결과를 소개하고, FSW의 공구, 장비 그리고 최신 응용부품에 대한 동향을 제시하여 재료와 기계공학간의 다양한 학제간 FSW 연구의 필요성을 제시하고자 한다.

2. 밀링기반 마찰교반접합 원리와 주요 변수

마찰교반접합 기술은 1991년 영국의 TWI (The Welding Institute)에서 특허 출원된 기술로써, 밀링가공기(Milling Machine)의 기본원리를 채택하고 있다. Fig. 1은 밀링공정을 기반으로한 마찰교반접합의 원리를 설명하고 있다. 먼저, Fig. 1(a)처럼 공구(tool)를 회전시키고 Fig. 1(b)와 같이 공구의 핀(pin)을 가공물에 해당하는 접합부에 삽입시키면 Fig. 1(c)에서 모재와 공구 숄더(Shoulder)부의 마찰에 의해 모재에 마찰열이 발생되어진다. 그리고 Fig. 1(d)와 같이 공구를 용접선을 따라 전진시켜 접합을 하게 된다. 모재에 삽입된 핀에 의해 연화된 모재는 교반되어 핀의 후부로 밀리면서 접합이 완료되어진다. 이는 기존의 알루미늄 합금에 이용되던

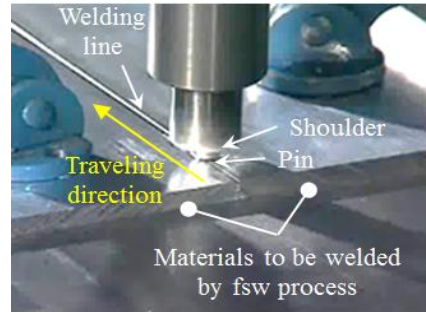
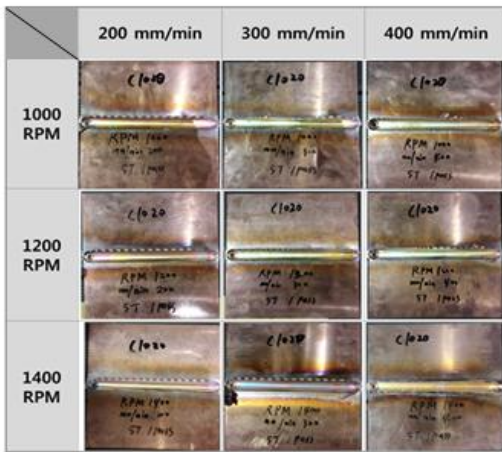


Fig. 1 The principle of friction stir welding method based on milling operation process; (a) rotation, (b) plunging, (c) heating and (d) welding

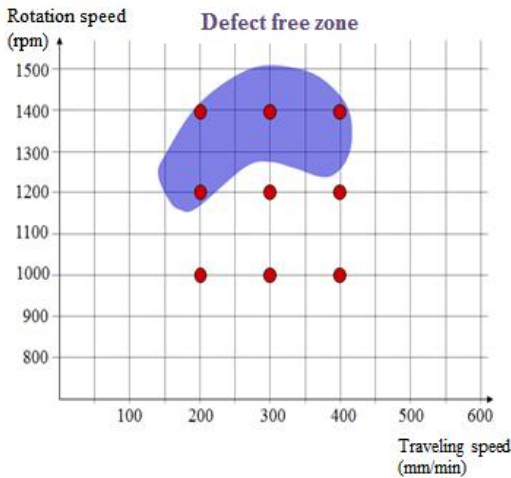
가스메탈 아크용접 (Gas Metal Arc Welding, GMAW), 가스텅스텐 아크용접 (Gas Tungsten Arc Welding, GTAW), 플라즈마 아크용접 (Plasma Arc Welding, PAW) 및 레이저 용접 (Laser Welding) 등과 달리 전기적 에너지의 열원이 불필요하며, 별도의 용가재나 용제의 공급도 불필요하다. 이러한 마찰교반접합의 대표적인 장점으로는 고상접합으로 용융을 동반하지 않기 때문에 용접결함으로부터 자유롭다.

그리고 접합시 용가재(Filler metal)와 같은 삽입재를 사용하지 않기 때문에, 접합부의 화학적 조성은 원 소재와 동일하다. 끝으로 아크(arc), 흠(fume) 및 스패터(splatter)와 같은 기존 공정에서의 문제가 발생하지 않기 때문에 친환경적인 공정이다. 마찰교반접합공정에서의 주요 변수는 회전속도 (Rotation speed, rpm), 이동속도 (Traveling speed, mm/min), 틸팅각도 (0~5°) 등의 공정변수와 FSW 공구 소재 및 형상, FSW 장비 등의 생산

변수가 있다^[9]. 이들은 생산 제품의 형상과 특징에 따라 다르게 결정되어진다. 일반적으로 회전속도, 이동속도, 틸팅각도에 대한 내용은 여타 다른 논문에서도 많이 연구되었기 때문에, 본 논문에서는 공정변수에 따른 비철금속 소재별 무결합 관점에서의 실험결과를 소개한다.



(a) Surface shape of oxygen-free copper



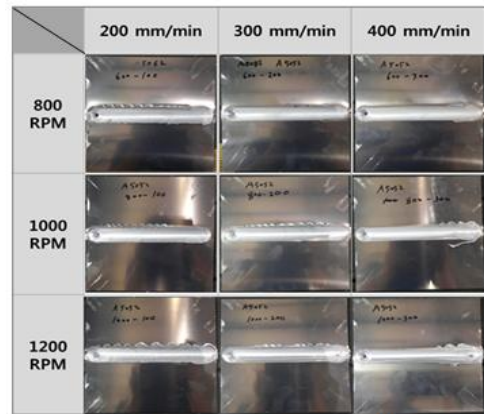
(b) Defect free zone range of oxygen-free copper

Fig. 2 Surface shape and defect free zone range for oxygen-free copper (C1020) according to FSW process conditions; (a) surface shape and (b) defect free zone

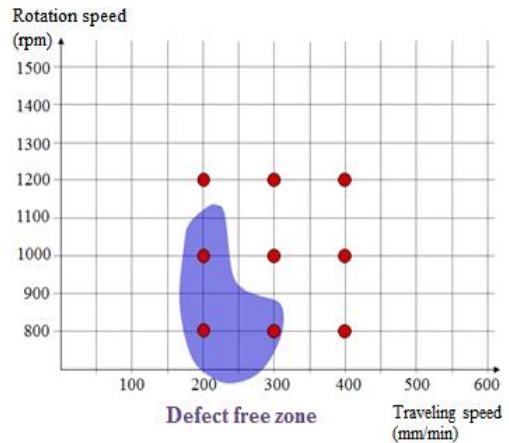
3. 무산소동과 알루미늄합금 소재의 FSW 공정조건과 무결합영역

일반적으로 최적 공정조건은 접합대상소재에 따라 틀리며, 생산성에 따라서도 조금씩 달라진다. 공구 회전속도(rpm)와 이동속도(mm/min)는 상호보완적인 역할을 한다^[10].

Fig. 2와 Fig. 3은 비철금속 중 대표적으로 많이 사용



(a) Surface shape of aluminum alloy



(b) Defect free zone range of aluminum alloy

Fig. 3 Surface shape and defect free zone range for Al5052 alloy according to FSW process conditions; (a) surface shape and (b) defect free zone

되는 무산소동(C1020)과 알루미늄(Al5052)합금에서의 무결합영역조건(defect free zone)에 관한 결과를 보여준다.

무산소동은 구리가 99.95%이상 10 ppm 이하의 산소를 함유하고 있는 소재로, 용점이 1,083℃로 알루미늄 보다는 높은 용점을 가진다. 이러한 무산소동은 비교적

마찰교반접합이 매우 잘되는 금속으로, 마찰교반접합의 최적조건은 회전속도 1,200~1,400 rpm, 이동속도 200~400 mm/min의 구간에서 결함이 없는 영역을 보여주고 있다. 1,200 rpm과 200 mm/min 이하의 조건에서는 입열량 및 교반력이 부족하여 접합부 비드 표면 및 내부에 미접합부처럼 보이는 교반불량이 발생한다. 한편, 1,400 rpm과 400 mm/min이상의 조건에서는 과도한 입열량 및 교반력으로 인해 표면에 많은 버(burr)가 발생할 뿐만 아니라 표면 결함이 발생한다.

Al5052 합금은 비열처리합금으로 Al과 Mg가 주요성분으로 이루어진 알루미늄 합금이다. 기본적으로 Al6061합금보다는 마찰교반접합이 어렵다. 조건별 FSW 최적화 접합 테스트 결과, 회전속도 600 rpm~1,100 rpm, 이동속도 200~300 mm/min 구간이 최적화된 무결합영역으로 관찰된다. 여기서는 실험결과를 제시하지 않았지만, 다른 알루미늄 합금보다는 매우 적은 무결합 영역을 보여주고 있다.

4. 마찰교반접합용 공구

비철소재 중에서도 알루미늄합금(Al2219), 구리합금(Cu-Ni alloy), 타이타늄 합금처럼 고강도 소재가 사용되고, 최근에는 구조용 연강, 고장력강, 니켈기합금 등의 고온재료까지 그 적용을 확대하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^[11-13]. 그러나 실험실수준에서는 좋은 결과들이 많이 보고되고 있지만, 실용화를 위해서 해결해야 하는 과제들이 많이 존재하고 있는 것이 일반적이다.

그 원인은 고강도 고융점 소재를 마찰교반접합하기 위해 사용되는 공구는 강도, 경도, 인성, 내마모성 및 비반응성 등의 고성능이 요구되어지기 때문이다. 따라서 이러한 소재를 개발하기 위해서 국내외 많은 연구자들이 개발에 몰두하고 있다^[14].

Fig. 4의 SKD61 공구강은 전 세계에서 마찰교반접합

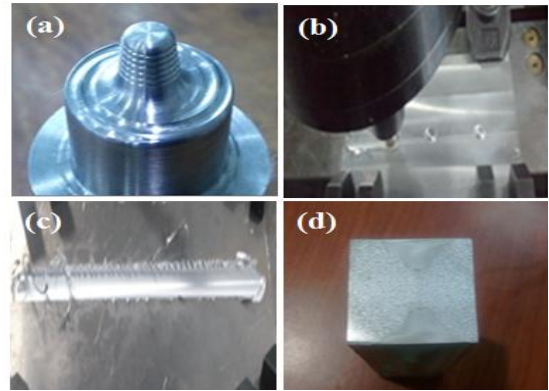


Fig. 4 The surface shape and defect free FSWed by SKD61 tool; (a) SKD61 tool, (b) FSW progress, (c) FSW completion and (d) nondefect



(a) WC-12%Co (b) FSW progress (c) Pin breakage

Fig. 5 Pin breakage of FSW tool fabricated by WC-12%Co alloy after FSW process

용 공구로 가장 많이 사용되는 소재이다. 단, 700~800℃ 이상에서는 열처리가 풀리게 되어, 공구강으로서의 고강도 특성이 소멸되어지게 됨으로써, 동합금 이상의 금속에는 적용할 수 없으며, 알루미늄합금/마그네슘합금등과 같은 저융점소재 용도만 사용가능하다. 마찰교반접합공정은 소재의 강도 및 경도도 매우 중요하지만, 공정시 핀의 파손 현상을 막기 위해서는 인성이 매우 중요하다.

Fig. 5는 초경소재 공구로 마찰교반접합한 결과로서, 초경소재의 특성상 강도는 매우 높은 반면, 인성이 낮은 이유로, 공정시 핀의 파손이 매우 잦은 편이다.

인코넬 738의 경우, -250℃ 저온에서 700℃ 고온까지 우수한 강도를 나타내는 시효경화합금으로 980℃까지 내산화성이 우수한 합금으로, 소재의 사이즈가 한정적이지 않고 다양하며, 수급 또한 용이하고 가격도 저렴



Fig. 6 PCBN tool for FSW of Megastir maker

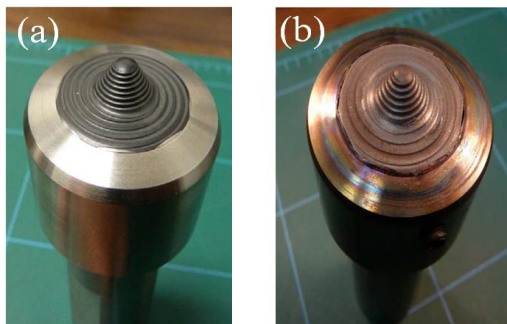


Fig. 7 Tungsten and rhenium composite tool developed by Megastir maker; (a) new Q60 tool (b) after 35.6m in mild steel

하지만, 난삭재(difficult to cut material)로 가공이 어렵고 시간이 많이 소요된다는 단점이 있다.

Fig. 6의 PCBN 공구는 현재까지 개발된 FSW 공구 중에 가장 높은 강도를 가지는 것으로 분류되어, 현재 철강(Steel) FSW에 적극적으로 테스트되어지고 있다. 매우 높은 강도와 내마모성으로 인해 고용점 소재의 FSW에 적합하나, 가공성이 매우 어렵고, 핀 파손이 잦을 뿐만 아니라, 미국의 Megastir사에서만 제작되어지기 때문에 수급의 용이성이 떨어지는 단점이 있다.

이러한 문제를 해결하기 위해서 최근 Megastir사에서는 Fig. 7과 같이 PCBN에 레늄(Rhenium, Re)을 융합한 소재로 만든 톨인 Q60을 제작하여 시장에 출시하였다. 나아가, 텅스텐(W)-레늄(25% Re) 톨은 현재 학계에서 사용하고 있는 공구소재 중에서 가장 FSW 안정성이 높은 소재이다. 국내에서는 레늄을 공급받을 수 없기 때문에 전량 해외수입을 해야 하는 소재이고, 가격 역시 매우 고가(1,000만원/EA)이다. 고강도, 고인성, 고내열성과 같은 특성을 모두 보유하고 있어서 마찰교반접합용 공구로 가장 적합한 소재이나, 가격적/수급적 측

면이 문제가 되어, 실제로 사용하기는 쉽지 않다.

나아가, 고강성을 가지며, 교반을 잘 발생시킬 수 있도록 기계공학적인 구조설계 및 해석기술을 통하여 다양한 공구형상을 최적화하여 고성능의 FSW 공구를 개발해야 할 것이다.

5. 마찰교반접합용 장비

마찰교반접합 장비는 1990년대 후반부터 영국과 일본을 중심으로 개발 및 제작되어지고 있다. 초기에는 1차원(1-Dimension) 모션타입의 학교 및 연구소 R&D 목적의 장비가 많이 개발되어졌고, 2000년대 초반에 2차원(2-D.) 모션타입의 양산형 장비가 개발되어졌다. 최근 일부 국가에서는 3차원(3-D.) 모션을 구현하기 위해 로봇형식의 FSW 장비를 개발하고 있다.

국내의 경우, 태광테크 주식회사는 Fig. 8(a)의 전용 FSW장비를 기본으로 하여, Fig. 8(b)의 마찰교반접합과 기계정밀가공이 가능한 마찰교반접합 복합가공기를 유일하게 개발하여 양산에 적용하고 있다. 이러한 복합가공기는 기존의 고성능 머시닝센터기능에 마찰교반접합기능을 탑재함으로써, 기계적 안정감과 사용의 편리성, 우수한 용접성과 특징을 얻을 수 있게 되었다. 또한, 기계식 2단 변속구조를 채용함으로써 저속 고토크(마찰교반접합) 및 고속 저토크(기계가공)를 차별화해서 채택할 수 있도록 주축을 개발하였다. 이러한 장비를 통하여, 제품을 FSW 전 가공부터 FSW 후 가공까지 One-step으로 작업이 가능하게 되었다.

그리고, 최근에는 기존의 수직형(Vertical type)의 FSW 장비가 아닌, Fig. 8(c)와 같이 수평형(Horizontal type)의 FSW 복합가공기 장비를 개발하여, 해외의 선진사들이 1-D. 수평형 FSW장비에 집중할 때, 2-D. 수평형 FSW 장비를 선행 개발하였다. 또한, 마찰교반접합 장비는 전처리타입의 대형 고정식 타입의 장비라는 개념을 뛰어넘어, on-site에 적합한 이동식 마찰교반접합 장비의 개발도 다양하게 진행되고 있다. 해외의 경우, 포터블 FSW 장비 개발을 시도한 곳은 영국의 TWI와 미국의 브리검영대학교 (Brigham Young University), 일본의 Kawasaki 정도이지만, 대부분 실험실 수준의 연구였고, 실제로 상업화 되지는 못한 것으로 알려지고 있다. 한편, 태광테크 주식회사는 그동안 축적된 제어 알고리즘과 기구특성 설계에 축적된 Know-how를 최대

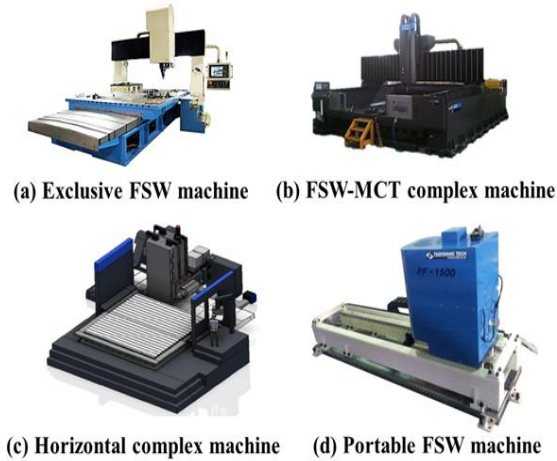


Fig. 8 New FSW machines developed by Taekwang Tech Co., LTD

한 활용하여 Fig. 8(d)와 같이 새로운 개념의 이동식 FSW 장비를 설계하여 개발 중에 있다.

이처럼, 국내기업인 태광테크 주식회사는 기존의 일률적인 형식을 가지는 마찰교반접합 장비 타입에서 벗어나, 하이브리드 복합 FSW장비, 수평형 복합 FSW 장비 등을 개발하여, 국내수준을 세계수준 이상으로 발전시켜나가고 있다.

6. 마찰교반접합의 응용부품

마찰교반접합은 영국, 미국 및 일본을 중심으로 부품 시장이 형성되어 왔으며, 전 세계적으로 마찰교반접합의 응용분야는 Table 1과 같다. 미국의 경우에는 에어버스(AIRBUS)사와 보잉(Boeing)사를 중심으로 한 우주항공분야와 군수분야에 주로 적용하여, 항공기 및 발사체 동체 및 각종 연료탱크, 수륙양용장갑차 도어 등에 적용하고 있다^[15-16]. 일본의 경우에는 히타치(Hitachi)사를 중심으로 철도 및 자동차 분야에 주로 적용하고 있다. 주요 적용 부품은 열차외장프레임 및 자동차 내부샤시 등에 적용하고 있다^[17-18]. 유럽의 경우에는 크루즈선과 같은 조선분야에 선박용 Deck, 헬리포트, 각종 탱크 등에 적용하고 있다^[19].

한국의 경우에는 대부분의 마찰교반접합이 IT/디스플레이산업에 적용되어지고 있다. 이는 한국이 IT 강국

Table 1 Typical applications for FSW process

| Industry | Applied Parts |
|------------------|--|
| Automotive | - Center Tuner, Frame, Aluminum wheel - Supporter Mount, Tailored Blank, |
| Railway vehicles | - Trim frame, Indoor chassis |
| Ship & Offshore | - Deck, Partition, Refrigerator, Cooling plate, Helipot, Tank |
| Aerospace | - Aircraft, Central fuselage, Armored door |
| IT Display | - Backing Plate, Mask water-cooler plate, Frame - Vacuum chamber housing, Cooling and heating plate |

이기 때문이기도 하지만, IT 산업의 빠른 변화 특성으로 인해서 적용이 빨리 되었다고 생각하고 있다^[20]. 한국에서 적용하고 있는 주요 부품들은 디스플레이 액정을 제조하는 대형진공장비에 핵심부품으로 사용되어진다. 알루미늄 일부 부품의 사진이 Fig. 9에 제시되어 있다.

대표적인 부품인 Fig. 9(a)의 백킹플레이트(backing plate)는 LCD(Liquid Crystal Display) 또는 OLED(Organic Light Emitting Diodes)등과 같은 디스플레이 기기의 제조에 사용되는 부품으로서, 금속막을 증착시키는 스퍼터링(Sputtering) 공정 중 타겟소재(Target materials)에 부착되어 스퍼터링 챔버 내부에 장착되어진다.

이러한 백킹플레이트의 냉각효율을 극대화시키기 위해서 내부에 냉각수를 흘릴 수 있는 수로(Water path)를 만든 후 덮개를 덮고 마찰교반접합을 통하여 밀봉시키게 된다. 마찰교반접합의 고품질 접합특성을 통하여 기존에 문제시 되었던, 누설(leakage) 부분을 완전히 극복할 수 있게 되었다.

Fig. 9에서 보는 바와 같이 현재 한국에서 생산되어지고 있는 FSW 부품 대부분은 스퍼터링 진공부품이다. 현재는 디스플레이 산업 군에서 철도산업, 항공산업, 조선산업으로 그 적용군을 확대하고 있고, 그 적용부품은 크게 증가할 것이다. 뿐만 아니라, 적용 소재도 알루미늄, 동소재에만 그치는 것이 아니라, 마그네슘, 티타

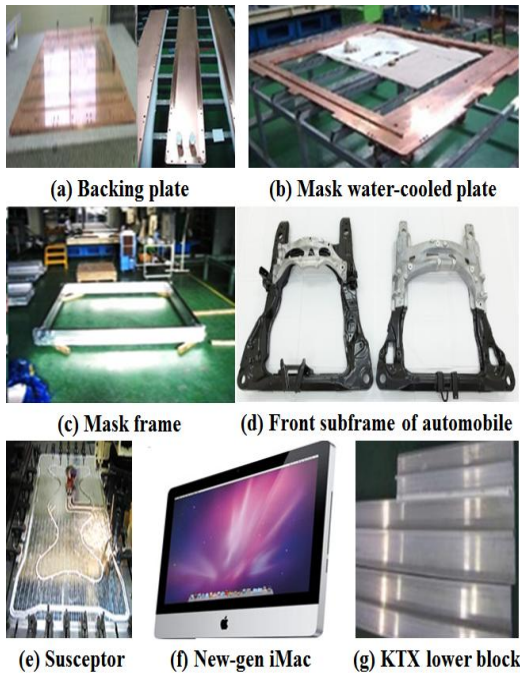


Fig. 9 Various application parts fabricated by FSW process^[18,20]

늄, 인바, 고장력강까지도 멀지 않아서 FSW가 가능할 것으로 기대하고 있다.

7. 결 론

마찰교반접합 (FSW) 기술은 그간의 축적된 많은 공정노하우 기술과 FSW 공구 재질 및 형상, FSW 장비 개발과 같은 복합적인 요인의 발달과 함께 가일층 발전할 것으로 생각된다. 현재, FSW 적용처는 디스플레이 산업에 국한되어 있지만, 디스플레이 산업에서의 성공적인 정착 및 성장으로 인해 타산업으로의 진입은 향후 크게 가속도가 붙을 것으로 판단된다. 이러한 마찰교반접합기술이 타산업으로의 실용화가 성공적으로 이루어지기 위해서는 향후 아래와 같은 연구를 조속히 진행해야 할 것이다.

첫째, 고강도 소재의 FSW에 적합한 공구소재 개발이 필요하다. PCBN, Q60, W-Re와 같은 수급이 어렵고, 고가인 소재가 아닌, 수급이 용이하면서, 저가인 복합소재를 개발해야만 한다. 아울러, 기계공학적인 구조설

계 및 해석기술을 통하여 다양한 공구형상을 최적화해야 할 것이다.

둘째, 각 산업군에 적합한 마찰교반접합 장비를 다양한 기능을 가지도록 설계 및 제작하는 기술 개발을 지속적으로 진행해야 한다. 장비의 다양성 및 특화성이야말로 타산업으로 확대시 가장 필요한 요소 중의 하나일 것이다.

셋째는, 마찰교반접합 전문인력 양성이다. 국내에는 아직 충분한 FSW 전문인력을 보유하고 있지 않아, 산업별로 적용 부품을 찾고, 개발하고, 적용하는 시점이 대체적으로 느린 편이다. 상기 문제를 지속적으로 관리, 개선 및 해결함으로써, 더욱 더 많은 기술이 개발되어지고, 실제 제품으로 빠르게 응용될 것이다.

Acknowledgements

본 연구는 산업통산자원부 2012년 사업화연계기술개발사업인 “신접합공정기술을 통한 국가주력 비철금속 국산화”에 관한 사업화개발사업 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

1. Don-Hyun Choi., “Friction Stir Welding of Duplex Stainless Steel”, Journal of KWJS, Vol. 28, No. 5, pp. 38-44, 2010.
2. I. SHIGEMATSU., “Joining of 5083 and 6061 aluminum alloys by friction stir welding”, J. of mat. sci. letter Vol. 22, pp. 353-356, 2003.
3. Seung-Boo Jung., “Non-ferrous Metals and Welding Characteristics”, Journal of KWJS, Vol. 20, No. 6, pp. 8-16, 2002.
4. Han-Sur Bang., “Recent Studies on Hybrid Friction Stir Welding”, Journal of KWJS, Vol. 28, No. 5, pp. 35-37, 2010.
5. Young sik Kim., “Future of the Friction Stir Welding Technology for Non-Ferrous Metal”, Journal of KWJS, Vol. 30, No. 3, pp. 4-14, 2012.
6. Ki-Sang Bang, Kwang-Jin Lee, Han-Sur Bang, Hee-Sun Bang., “Interfacial Microstructure and

- Mechanical Properties of Dissimilar Friction Stir Welds between 6061-T6 Aluminum and Ti-6%Al-4%V Alloys”, *Materials Transactions*, Vol. 52, No. 5, pp. 974-978, 2011.
7. A.K.Lakshminarayanan and V.Balasubramanian, “Assessment of fatigue life and crack growth resistance of friction stir welded AISI 409M ferritic stainless steel joints”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 539, No. 30, pp. 143-153, 2012.
8. Yasuyuki Miyano, Hidetoshi Fujii, Yufeng Sun, Yasuyuki Katada, Shuji Kuroda, Osamu Kamiya, “Mechanical properties of friction stir butt welds of high nitrogen-containing austenitic stainless steel”, *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 528, No. 6, pp. 2017-2921, 2011.
9. Mustafa Kemal Kulekci., “Effects of tool rotation and pin diameter on fatigue properties of friction stir welded lap joints”, *J of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 36 No. 9-10, pp. 877-882, 2008.
10. Mohiedin Bagheri Hariri, Sajad Gholami Shiri, Yadollah Yaghoubinezhad, Masoud Mohammadi Rahvard, “The optimum combination of tool rotation rate and traveling speed for obtaining the preferable corrosion behavior and mechanical properties of friction stir welded AA5052 aluminum alloy”, *Materials & Design*, Vol. 50, pp. 620-634, 2013.
11. Chun. C. K., “Friction Stir Welding Technology for Aluminum Rolling Stocks”, *J. of KSMPE*, Vol. 11 No. 1, pp. 68-75, 2012.
12. L. Fratini, F. Micari, G. Buffa, V.F. Ruisi, “A new fixture for FSW processes of titanium alloys”, *CIRP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 59, No. 1, pp. 271-274, 2010.
13. Rong-Tsong Lee, Chien-Te Liu, Yuang-Cherng Chiou, Huey-Lin Chen, “Effect of nickel coating on the shear strength of FSW lap joint between Ni-Cu alloy and steel”, *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 213, No. 1, pp. 69-74, 2013.
14. M.K. Sued, D. Pons, J. Lavroff, E.H. Wong, “Design features for bobbin friction stir welding tools: Development of a conceptual model linking the underlying physics to the production process”, *Materials & Design*, Vol. 54, pp. 632-643, 2014.
15. Thomas, W.M., “Friction Stir Welding for the Transportation Industries”, *Materials and Design*, Vol. 18 No. 4, pp. 269-273, 1997.
16. Tracie Prater, “Friction Stir Welding of Metal Matrix Composites for use in aerospace structures”, *Acta Astronautica*, Vol. 93, pp. 366-373, 2014.
17. Y.C. Chen, A. Gholinia, P.B. Prangnell, “Interface structure and bonding in abrasion circle friction stir spot welding: A novel approach for rapid welding aluminium alloy to steel automotive sheet ”, *Materials Chemistry and Physics*, Vol. 134, No. 1, pp. 459-463, 2012.
18. Honda develops new technology to weld together steel and aluminum and achieves world’s first application to the frame of a mass-production vehicle. Honda Motor Co., Ltd.; 2012.
19. R. Nandan, T. DebRoy, H.K.D.H. Bhadeshia, “Recent advances in friction-stir welding- Process, weldment structure and properties”, *Progress in Materials Science*, Vol. 53, No. 6, pp. 980-1023, 2008.
20. http://www.attheamp.com/case_studies/apple-use-friction-stir-welding-technology-in-new-gen-imac