

## 마찰교반접합장비의 기술개발 동향

김영표<sup>\*,†</sup> · 김철희<sup>\*\*</sup> · 김영곤<sup>\*\*\*</sup> · 주성민<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>화천기공(주) 기술개발연구소

<sup>\*\*</sup>한국생산기술연구원 용접·접합연구그룹

<sup>\*\*\*</sup>한국생산기술연구원 그린가공공정그룹

<sup>\*\*\*\*</sup>조선대학교 용접접합과공학과

### Trends of Technology Development of Friction Stir Welding Machine

Young-Pyo Kim<sup>\*,†</sup>, Cheol-Hee Kim<sup>\*\*</sup>, Young-Gon Kim<sup>\*\*\*</sup> and Sung-Min Joo<sup>\*\*\*\*</sup>

<sup>\*</sup>Institute of R&D, Hwacheon Machine Tools Ltd., Gwangju 62227, Korea

<sup>\*\*</sup>Advanced Welding and Joining R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Incheon 21999, Korea

<sup>\*\*\*</sup>Green Manufacturing Process R&D Group, Korea Institute of Industrial Technology, Gwangju 61012, Korea

<sup>\*\*\*\*</sup>Dept. of Welding/Joining Science & Engineering, Chosun University, Gwangju 61452, Korea

<sup>†</sup>Corresponding author : kyp@hwacheon.com

(Received May 9, 2016 ; Revised May 19, 2016 ; Accepted May 25, 2016)

#### Abstract

At present, FSW(friction stir welding) process is being considered as an actual way for production of various industrial products. However FSW process involves high temperature and load on the tool during welding. These are make a difference between FSW machine and general machine tools. From this reason, development of FSW machine needs very careful consideration on stiffness of machine structure, spindle and moving axis including machine control system. In this study authors investigate on the trends of technology development of FSW machine in order to share the information for more extension of FSW technology with related researchers and engineers.

Key Words : Friction stir welding, Friction spot joining, Machine tools, Robot, Parallel kinematic mechanism

#### 1. 서 론

최근 산업계에서 실제품 생산을 위해 적극 고려되고 있는 마찰교반접합의 경우 Fig. 1에 보인 바와 같이 일반 밀링가공(공정 중 발생한 충격 및 열 에너지가 칩 배출 등으로 인해 외부로 소산 됨)에 비해 공정 중 발생하는 높은 하중과 열이 그대로 접합장비에 전달되는 공정 특성상 이를 고려한 장비의 설계 및 제작이 필수적이다.

이를 위해서는 Fig. 2에 보인 바와 같이 마찰교반접합장비를 구성하는 요소 중 핵심 요소인 기계구조, 주축, 이송계, 제어장치에 대한 공정특성 고려가 있어야 한다. 그러나 장비 개발 초기의 경우 정보의 부족으로 인해

Fig. 3에 보인 바와 같이 연구용 장비의 경우 기존 공작기계를 그대로 사용하거나 개조하여 사용하였다. 이와 같은 많은 연구자들의 공정이해를 위한 기본 연구에 힘입어 마찰교반접합장비의 개발은 선진국을 중심으로 생산 제품에 맞는 전용장비 형태로 개발 및 발전되어 왔다.

하지만 기존 TWI 원천특허로 인해 장비 개발 및 시

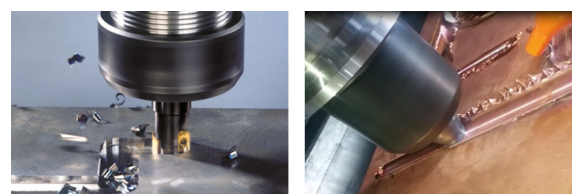


Fig. 1 Comparison between milling and FSW process

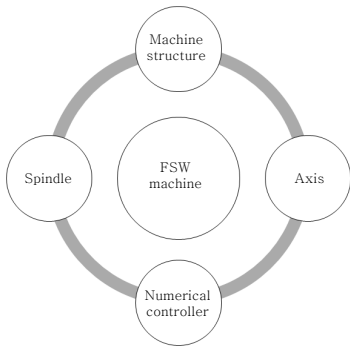


Fig. 2 Key components of FSW machine

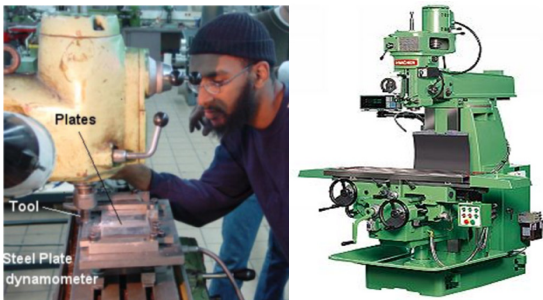


Fig. 3 Initial FSW machine (use of conventional milling machine)

장 활성화가 늦었으나 최근 이 원천특허의 만료로 인해 산업계 전반에 걸쳐 마찰교반접합에 대한 관심의 증대와 더불어 다양한 마찰교반접합장비의 제작이 이루어지고 있다. 본 논문에서는 이러한 국내·외의 마찰교반접합기술의 활성화에 따라 공정 구현시 필수적으로 요구되는 마찰교반접합장비의 국내·외 기술개발 동향을 살펴보고 이를 통해 국내 관련업계의 생산 및 제조기술 향상에 도움이 되고자 한다.

## 2. 국내외 산업별 마찰교반접합기술 적용 분야

### 2.1 국외 산업별 적용 현황

해외의 경우 Fig. 4에 보인 바와 같이 수송기계 분야

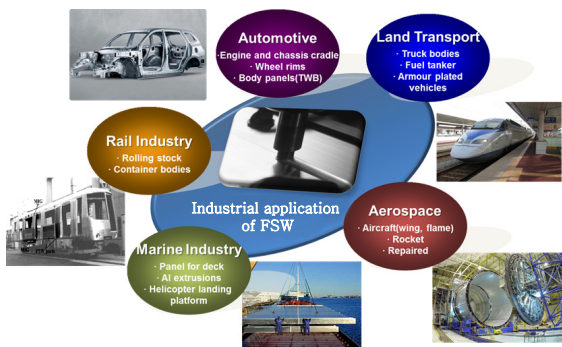


Fig. 4 Application fields of FSW at overseas

를 중심으로 제품 경량화에 맞춰 마찰교반접합이 적용되고 있다<sup>1)</sup>.

대표적으로 미국의 경우 우주항공 분야에 큰 기술 발전을 이루고 있다. 일본의 경우는 자동차 및 철도차량 분야, 독일의 경우는 자동차 분야에 강점을 가지고 기술적용을 선도하고 있다. 더불어 이들 국가의 특징을 보면 기계산업 분야 중 특히 공작기계 관련 기술이 우수한 나라들로 기존 기반기술의 강점을 충분히 활용하고 있다.

### 2.2 국내 산업별 적용 현황

국내의 경우 마찰교반접합이 가장 활성화된 분야는 전자 관련 반도체 및 평판디스플레이 제조 설비에 들어가는 열교환 플레이트의 제작분야(Fig. 5)이다. 최근에는 자동차 분야에서 차체 경량화를 위한 경량금속의 활용 및 이중금속간 접합기술에 주목하고 있다. 앞에서 언급한 전자분야 외에도 자동차 냉각기용 중공실린더의 제작 등에도 기 양산화 된 기술로 활용되고 있으며, 철도차량 및 우주발사체 제작 분야에서도 관련 기술의 적용을 위한 검토가 이루어지고 있다.

## 3. 국내외 마찰교반접합장비 개발 동향

### 3.1 국외 개발 동향

해외의 경우 앞에서 언급한 바와 같이 수송기계(자동차, 철도차량, 우주항공, 조선)의 생산 및 제조를 위한 각 제품의 특성에 맞는 전용기 형태로 마찰교반접합 장비의 개발이 이루어져 왔다. 특히 다양한 공정연구와 틀형상에 대한 기반 연구를 통해 국내에 비해 성능이 우수하고 안정적인 마찰교반접합 장비의 개발이 우리보다 선행되어 왔다. 2000년대 초반 까지는 Fig. 6에 보인 바와 같이 기존의 공작기계 형태(갠트리 구조의 3축 장비)를 유지한 채 성능이 개선된 평면 용접이 가능한 장비가 주로 개발되었다. 최근에는 3차원적인 형상을 갖는 제품의 생산을 위해 다관절 로봇을 이용한 3차원 곡면에 대한 마찰교반접합장비 개발이 수행되고 있다<sup>2)</sup>. 특히 로봇을 접합장비로 사용하기 위해서는 기존 2차원

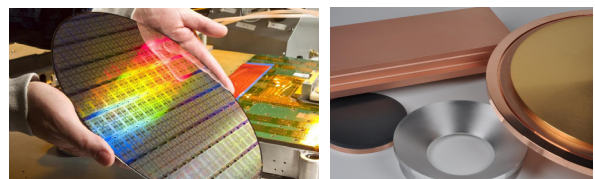


Fig. 5 Application example on electronic industry for production of sputtering and backing plate



Fig. 6 Example of 2-dimensional FSW machine at oversea



Fig. 7 Example of 3-dimensional FSW machine at oversea

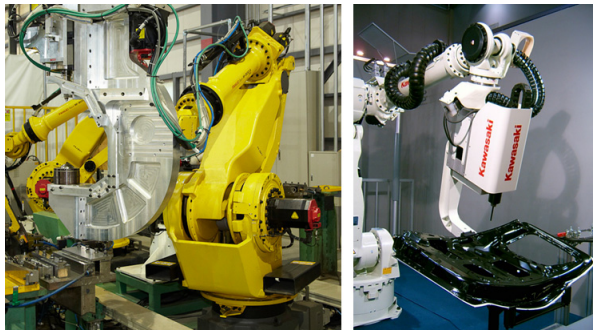


Fig. 8 Example of FSW application on auto-mobile industry at Japan

장비에 비해 로봇의 가반중량을 고려하여 주축을 경량/소형화 하면서도 마찰교반접합에 사용될 수 있는 저속 고평구 주축의 개발이 필요하다(Fig. 7). Fig. 8에 보인 바와 같이 자동차 산업이 강점인 일본(Honda 및 Kawasaki)의 경우 로봇을 활용하여 차체부품을 생산하기위한 마찰교반접합(FSW) 및 마찰교반 점접합(FSJ) 기술을 조기에 상용화하였다.

### 3.2 국내 개발 동향

국내의 경우 Fig. 9에 보인 바와 같이 (주)원젠에서

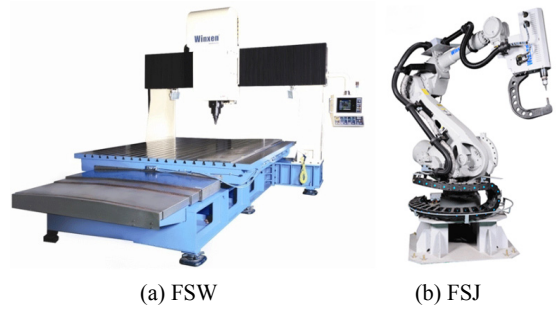


Fig. 9 Example of 2-dimensional FSW machine at domestic (WINXEN)

마찰교반접합 및 로봇을 이용한 점접합 장비를 개발하여 연구소 및 학교를 중심으로 판매를 하였다. 일부 회사에서는 중고 대형 수직형 머시닝센터를 개조하여 자가 설비로 사용하였으나 초기 마찰교반접합 공정에 대한 기초 연구정보 부족으로 인해 해외 장비 대비 성능 및 안정성 측면에서 취약하였다.

또한, 국내 산업 특성상 박판보다는 후판에 대한 마찰교반접합 수요가 있었으며 후판을 이용하여 제작하는 제품의 경우 마찰교반접합 전/후에 기계 가공공정이 필요한 사례가 많았으나 이를 위한 국내·외 장비의 대응이 부족하였다. 더불어 후판 가공(알루미늄 두께 30mm 이상) 특성상 기존 국내 접합장비의 경우 장시간 사용시 기계강성 부족으로 인한 장비변형 발생 등 어려움이 있었다.

이러한 산업계의 장비개선 요구에 따라, 기존 마찰교반접합가공기와는 차별화 되도록 마찰교반접합이 가능하며 기존 머시닝 센터의 가공 기능 및 성능을 그대로 갖는 복합가공기의 개발이 이루어졌다(Fig. 10). 마찰교반접합 복합가공기의 경우 기존 기계구조를 기반으로 기계구조(특히 교반접합시의 수직하중에 대응할 수 있도록), 이송계, 주축에 대한 설계 및 제작이 새로 이루어졌다. 형태를 보면 수직 및 수평형 복합가공기 형태로



Fig. 10 Example of 2-dimensional hybrid FSW machine at domestic (HWACHEON)

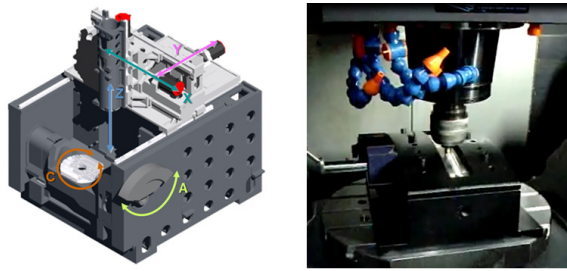


Fig. 11 3-dimensional FSW test using 5-axis machining center (HWACHEON)

다양한 산업계의 제품제작 요구에 부합하도록 제작되었으며 마찰교반접합 및 가공용 공구를 교환할 수 있는 장치도 탑재되었다.

더불어 산업계에서는 실제품 제작시 연구 및 특정목적의 직선용접 수요에 비해 용접선 방향이 자주 바뀌는 형태의 복잡한 공정이 주로 수행하고 있다, 따라서, 틀의 전진각을 사용하는 공정을 사용하지 않으며 장비 구조상 경사축이 있어도 기계구조상 강성저하로 인해 현실적이지 못해 자생적으로 수직용접자세에 쇼울더 면이 블록한 Convex 틀을 사용하는 공정이 업계에 정착되었다. 이를 기반으로 해외와 달리 기존 머시닝센터와 동일한 기계구조형상을 갖는 현재 형태의 장비 개발이 이루어졌다. 연구 목적이나 직선용접의 경우는 쇼울더 면이 오목한 틀의 전진각을 이용(기존 TWI 원천 특허)한 접합공정이 안정적인 것은 이미 잘 알려져 있지만, 국내에서는 자체 환경에 맞게 대체 공정 및 장비개발이 이루어졌다.

최근 국내에서도 전자산업 분야 외에 다른 산업분야(수송기계 분야·자동차, 항공, 조선)에서도 마찰교반접합 공정에 관심<sup>5)</sup>을 갖게 되면서 자연스럽게 평면에 대한 2차원 마찰교반접합이 아닌 곡면에 대한 3차원 마찰교반접합 및 점접합의 관심이 높아지고 있다.

Fig. 11에 보인 바와 같이 3차원 곡면에 대한 마찰교반접합을 위한 기본 연구를 5축 머시닝센터를 이용하여 수행하였으며 이를 통해 곡면에 대한 마찰교반접합 수행시 필요한 기본 자료를 축적하였다. 이를 토대로 로봇의 가공 유연성과 기존 머시닝 센터 형태 장비의 강성과 정밀도 특성을 갖도록 한 병렬형구조의 마찰교반접합 가공기가 개발 되었다(Fig. 12). 일반 다관절 로봇의 경우 움직임에 대한 유연성은 뛰어난데 반해 관절(구동)부의 직렬연결 구조상 작용점과 지지점의 거리가 멀어지면 취약해지는 구조 특성을 갖는다. 반면 병렬구조형 마찰교반접합가공기는 주요 운동부인 3개의 직선축 암이 트러스 구조를 가져 작용점에 대한 저항력이 지지점에서 분산되며 2축 가공 주축과 연동되어 3차원

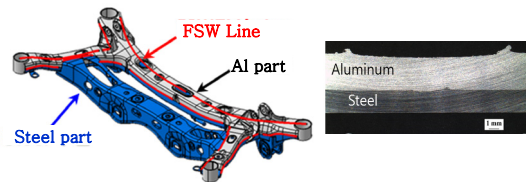
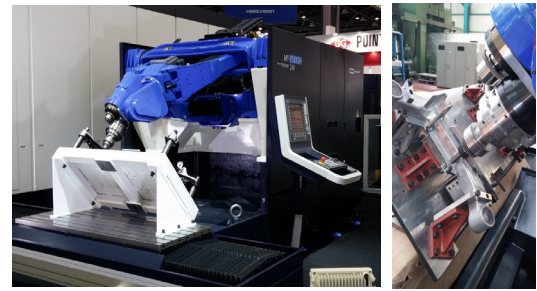


Fig. 12 Example of 3-dimensional hybrid FSW machine with parallel kinematic structure (HWACHEON)

곡면에 대한 마찰교반접합이 가능하다. 또한 지그 설계에 따라 마찰교반 점접합도 가능하도록 개발되었다.

### 3.3 하중 모니터링 및 틀 삽입깊이 제어 기술의 국내외 개발 동향<sup>2,6)</sup>

실제 마찰교반접합을 이용한 제품 제작시 가장 중요한 공정변수인 하중변화를 모니터링 하여 실시간으로 틀 삽입 깊이를 제어할 필요성은 매우 중요하나 아직까지 신뢰성이 충분한 방법이 부족한 현실이다. 현재 이를 해결하기 위해 제안되는 방법은 다음의 3가지가 있다. ①위치제어(위치센서를 이용 실시간 틀 삽입깊이 제어, 직접방식), ② 하중제어(하중센서를 이용 직접 틀에 가해지는 하중을 측정하여 틀 삽입 깊이 제어, 간접방식), ③주축부하제어(주축 모터 부하 변화에 따른 전류 변화를 감지하여 틀 삽입 깊이 제어, 간접방식). 이 중 별다른 측정센서 없이도 하중에 비례해 변하는 주축 모터의 전류변화를 이용한 방법 ③ (Fig. 13 참조. 측정을 위한 보드, 운영 S/W 및 PLC 로직 구성이 필요하며 틀 삽입 깊이에 비례하여 틀 하중과 주축 모터 부하가 증가하는 원리를 응용한 것으로서, 이 값이 일정하게 되도록 제어하는 방식임. 이러한 제어 방식은

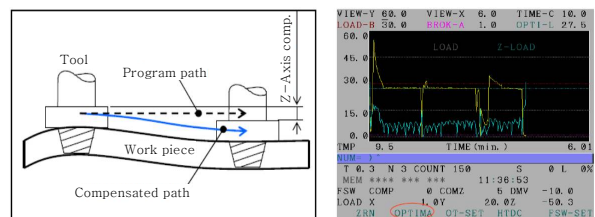
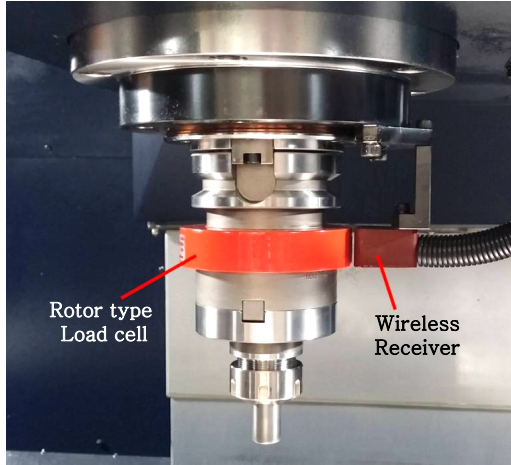


Fig. 13 Example of z-axis compensation control system coupled with spindle load/variation of spindle current (HWACHEON)



**Fig. 14** Example of Tool insertion depth control system coupled with wireless load cell

툴 삽입 깊이를 툴 하중과 주축모터 부하에 의해 간접적으로 측정되기 때문에, 제어 파라미터와 툴 삽입 깊이를 연관 시키는 것이 매우 중요함)이 현재 장비 제작 업체 입장에서 가장 실질적인 방법으로 검토되고 있다. 방법 ①의 경우는 위치 센서의 종류, 측정 표면 및 측정 위치(툴 근방)에 따른 오차를 가질 수 있다. 더불어 곡률이 큰 제품에 적용하기는 어려운 특징을 가지고 있다. 마지막으로 방법 ② (Fig. 14 참조)의 경우는 하중센서의 위치에 따른 오차가 발생할 수 있으며 툴의 축 방향과 하중계측 방향이 틀릴 경우에도 오차가 발생할 수 있어 이를 계산에 의해 보정할 필요가 있다. 이외에도 위의 3가지 방법에 더하여 제품의 온도변화를 동시에 모니터링하여 툴 삽입깊이를 보정하는 방법도 검토되고 있다.

#### 4. 고 찰

그동안 많은 국내·외 연구자들의 노력<sup>4)</sup>에 의해 최근 실제 제품생산에 마찰교반접합공정을 적용하고자 하는 문의가 증가하고 있다. 기존의 전자산업 분야 관련 반도체 및 평판 디스플레이의 제조설비에 들어가는 열 교환

플레이트 분야를 넘어서 자동차, 철도 및 우주항공 분야까지 그 적용 분야가 확대되고 있는 일은 굉장히 고무적인 일이라고 생각된다. 우리나라의 경우 생산제조업을 기반으로 하는 산업구조 특성상 해외 대비 실제 마찰교반접합공정을 응용할 수 있는 다양한 산업제품군을 보유하고 있다. 따라서 관련 연구자와 산업계에서 실제 기술을 사용하는 엔지니어간의 협업 및 기술정보 교류의 활성화가 매우 중요한 시점이라고 생각한다. 그리고 이 정보들을 잘 활용하면 세계적인 경쟁력을 갖는 마찰교반접합장비를 개발하는 것이 가능하다고 생각된다. 특히 우리나라의 경우 세계 공작기계산업분야에서 5위권의 기술력을 갖고 있으며, 이 기반을 잘 활용하면 마찰교반접합 분야(학문적 연구, 응용제품 개발 및 장비개발 등)에서 확실한 기술 경쟁력을 가질 수 있을 것으로 생각된다.

#### 후 기

본 연구는 산업통상자원부 산업기술혁신사업 (과제번호: 10049005)의 지원으로 수행되었습니다.

#### References

1. R.S. Mishra, P.S.D.N. Kumar, Friction Stir Welding and Processing, Springer(ISBN 978-3-319-07042-1), 2014, 1-11
2. M.K.B. Givi and P. Asadi, Advances in Friction-Stir Welding and Processing, Woodhead Publishing(ISBN 978-0-85709-454-4), 2014, 706-721
3. J.S. Noh, J.H. Kim, G.H. Go, M.C. Kang, New technology trends on friction stir welding based on milling process in terms of tools, machine and applied parts, Journal of KSMPE, 12-6 (2013), 37-44 (in Korean)
4. K.J. Lee, Recent Research & Development Trend on Friction Stir Welding and Friction Stir Processing, Journal of KWJS, 31-2 (2013), 26-29
5. H.S. Bang, Recent Studies on Hybrid Friction Stir Welding, Journal of KWJS, 28-5 (2010), 35-37
6. Japan Welding Society, Friction Stir Welding, Sanpo Publications(ISBN 4-88318-031-X C3057), 2005, 32-46