

## 마찰교반접합기술을 이용한 이종재료 접합에 관한 최근 연구동향

방한서·방희선·전근홍

### Recent Studies on Friction Stir Welding Techniques for Dissimilar Materials

Han-Sur Bang, Hee-Seon Bang and Geun-Hong Jeon

#### 1. 서론

마찰교반접합(friction stir welding, FSW)은 마찰열과 소성유동현상을 이용하여 접합하는 고상접합 공정으로 재료의 용융점 이하에서 접합이 이루어지므로 용융용접 시 발생하는 여러 결함들의 발생을 방지할 수 있다. 접합대상이 기존의 알루미늄과 알루미늄 동종계의 경량합금에서 이종재의 경량합금의 영역 뿐 아니라 경량합금과 철강재료의 접합 영역까지 확대되고 있다. 알루미늄 이종접합에 대한 연구는 많이 보고되었으며, 결과 또한 매우 우수하다. 그러나 마찰교반접합기술을 이용하여 물리적인 성질과 기계적인 성질이 상이한 이종재료를 접합할 경우 기존 동종재료의 마찰교반접합 방식으로는 건전한 접합부를 쉽게 얻을 수 없다고 알려져 있다. 이 경우 두 재료 중 연질인 재료에 툴을 삽입하여 접합이 이루어지는데<sup>1)</sup>, 접합강도가 부족하고 툴에 마모가 상대적으로 다소 많이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제점들을 더욱 보완하고 우수한 접합부를 얻기 위하여 최근에는 다양한 연구방법들이 소개되고 있으며, 특히 하이브리드 마찰교반접합기술에 대한 연구가 주목을 받고 있다.

따라서 본 보고에서는 현재까지 발표된 이종재료 마찰교반접합기술에 대한 기술개발 사례와 접합방법 및 일부 연구수행 결과를 소개하고자 한다.

#### 2. 알루미늄합금-티타늄합금

항공우주산업에 사용되는 티타늄합금은 강도와 내식성이 뛰어나 사용이 권장되고 있으나 재료의 가격이 매우 높아 제조원가를 낮추기 위하여 고강도 알루미늄합금과의 접합을 시도하고 있다. 그러나 알루미늄합금과 티타늄합금은 이종금속 접합 시 용융점 차이로 인한 접합계면의 불균일한 반응으로 새로운 산화피막의 형성과 금속간화합물의 생성은 용융용접의 주요 강도저하의 원

인이 되고 있다. 따라서 최근에는 용점이하의 고상에서 접합하는 마찰교반접합 기술을 이용한 이종재료 접합에 대한 연구가 활발히 진행 중이다. 현재까지 마찰교반접합기술을 이용한 알루미늄합금과 티타늄합금의 이종재료 접합에 관한 연구는 C.Y Kang et al.<sup>2)</sup>, Ulrike Dressler et al.<sup>3)</sup> 등에 의해 보고되어 있다. Ulrike Dressler 등은 A2024알루미늄합금과 Ti-6Al-4V 티타늄합금과의 이종 마찰교반접합 결과 알루미늄합금 모재강도 대비 약 73%의 인장강도를 얻을 수 있었다고 보고하였다<sup>3)</sup>. H.S Bang 등은 Al6061 알루미늄합금과 Ti-6Al-4V 티타늄합금의 하이브리드 마찰교반접합 기술을 이용하여 접합한 결과 우수한 인장강도 값을 얻었다고 보고하고 있다. 결과의 대부분 알루미늄합금 모재강도 대비 약 80% 이상의 값을 나타내었으며, 특정 접합 조건에서 알루미늄 합금의 모재 강도에 근접한 접합결과를 얻을 수 있었다<sup>4)</sup>. Fig. 1은 본 보고에서의 알루미늄합금과 티타늄합금의 이종접합 실험 모식도를 나타낸 것이며, Fig. 2는 하이브리드 마찰교반접합 조건별 인장강도 값을 나타낸 것이다.

#### 3. 알루미늄합금-일반구조용압연강재

수송기기 산업에서 환경문제와 함께 국제유가 상승으로 인한 경량화에 대한 요구가 부각 되면서 경량합금 사용이 증가하고 있다. 따라서 이종재료인 경량합금과

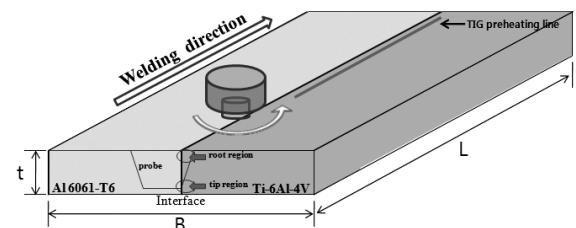


Fig. 1 Schematics of GTAW assisted FSW hybrid welding

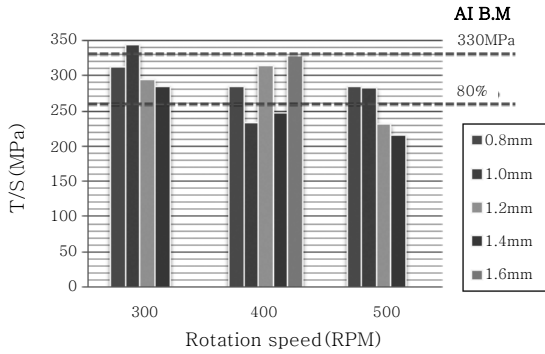


Fig. 2 Relation between the rotation speed and tensile strength

철강재료의 구조재료가 동시에 적용되는 사례가 늘고 있다. 이와 같이 특성이 크게 다른 이종금속의 용접접합 기술에 대한 수요의 증가와 더불어 마찰교반용접을 이용한 이종접합에 대한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 물리적 특성이 매우 상이한 이종재료(Al6061, SS400)간에 기존의 접합방법으로 리벳팅 및 바이메탈을 이용한 용융 용접법들이 적용되고 있으나 이에 소요 공정 시간의 증가 및 용접열에 의한 용접결함(변형, 잔류응력, 응고균열, 기공, 산화 등) 뿐만 아니라 금속간 화합물생성( $AlFe_3$ )으로, 접합부의 강도저하로 건전한 접합부를 얻기가 어렵다. 최근 경량합금인 알루미늄 합금과 구조용 재료인 스틸과의 이종재료 접합 시 레이저 또는 아크와 마찰교반접합기술을 결합한 하이브리드 접합법을 적용한 연구결과가 보고되고 있다. 이공정은 틀을 연결재료 쪽으로 삽입하고 레이저 또는 아크를 이용해 스틸 판재를 예열함으로써 스틸 접합부의 소성유동성을 높여 접합부의 강도를향상시킬 수 있다. 또한 기존의 마찰교반접합을 이용한 이종재료 접합 시 경질재료의 마찰에 의해 발생하는 틀의 마모를 하이브리드 마찰교반접합기술을 이용하여 경질재료에 예열을 함으로써 틀의 마모를 줄일 수 있는 장점이 있다.

H.B Bang 등은 Al6061-T6과 SS400을 사용한 레이저와 GTAW를 이용한 하이브리드 마찰교반접합 연구결과에서 하이브리드 FSW의 경우 단독 FSW 접합과 비교하여 동일한 Rotation speed에서 더 높은 Welding speed에 우수한 인장강도를 나타냄을 보였다<sup>5-6</sup>. Fig. 3은 본 보고에서의 실험 장치를 나타낸 것이며, Fig. 4 (a)와 (b)는 각각 FSW 및 하이브리드 FSW 접합시험편에서 각 접합변수에 따른 인장강도 값의 결과를 나타낸 것이다.

M. Merklein 등은 Al6061-T6과 DC04을 다이오드 레이저와 마찰교반접합기술을 결합하여 하이브리드 용접을 실시하였다<sup>7</sup>. Diode laser는 맞대기에서 약

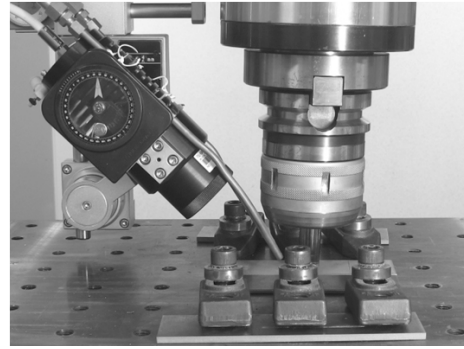


Fig. 3 Setup for laser assisted FSW hybrid welding process

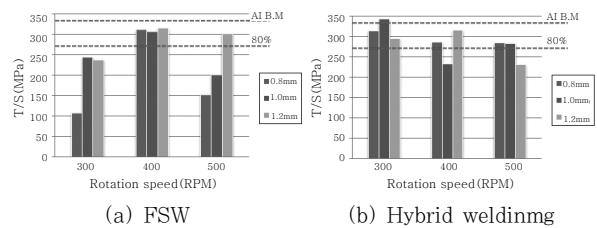


Fig. 4 Relation between the rotation speed and tensile strength

3mm와 틀 방향으로 10mm로 위치하여 틀의 용접 방향 바로 앞에 위치시키고 니켈을 사용한 합금 틀을 사용하여 접합하였다. 연구결과 알루미늄합금 모재 인장강도의 약 80 %인 200MPa의 우수한 접합강도를 보임을 보고하고 있다.

### 4. 알루미늄합금-스테인리스강

최근 마찰교반접합기술을 이용하여 철강재료와 같은 고 용점 재료 접합에 대한 연구도 활발히 진행되고 있는 상황이다. W.B Lee, S.B Jung et al.<sup>1)</sup>, H.J Kim et al<sup>8)</sup> 등은 스테인리스강에 마찰교반접합을 실시하여 철강재료의 접합가능성을 시사하였다. 접합체의 인장시험편은 대부분 모재부에서 파단 하여 항복응력 및 최대인장응력이 모재와 거의 같음을 보고하였다. 이와 같이 마찰교반접합 이용한 철강재료의 접합에 대한 연구 결과가 우수하지만, 현재까지는 문제점들이 존재하고 있다. 그 중 하나가 철강재료 접합용 전용 공구가 없다는 것이다. 초기 연구에 사용된 공구 재료로는 W 합금, 초경합금, Mo합금 등이 사용되어 왔으나, 이들 공구재료에 대해서도 마모 및 파손이 발생하여 현재는 세라믹재료 및 우수한 내마모성을 가진 PCBN (Polycrystalline Cubic Boron Nitride) 공구에 의한 철강재료 마찰교반접합 연구가 성과를 얻고 있다. 그러나 이러한 공구는 고가이며 가공방법이 어렵기 때

문에 활발한 연구 진행에 걸림돌이 되고 있는 실정이다. 따라서 기존 공구재료를 사용하면서 마모 와 파손을 줄이기 위하여 새로운 접합 공정인 하이브리드 마찰교반접합기술이 시도 되고 있으면 양호한 연구결과가 보고되었다.

H.S Bang et al. 등의 연구 보고에 의하면 알루미늄합금(Al6061)과 강도와 내식성이 우수한 스테인리스강(STS304)의 이종재료의 접합을 하이브리드 마찰교반접합기술을 이용하여 우수한 접합강도를 얻었다고 보고하였다. 공구 재료는 W-Co (12%)를 사용하였으며, 접합공정은 기존 마찰교반접합공정과 동일하게 적용하였으며, 이종재료 중 경질인 스테인리스강 접합부 근방에 Laser 및 Arc 보조열원을 이용하여 예열함과 동시에 마찰교반접합을 실시하였다. 물리적 성질이 상이한 이종재료에 발생하는 열적 특성과 소성유동현상을 향상 시킴으로써 마찰교반접합법 보다 우수한 접합강도를 얻었으며, 틀의 마모 현상도 확연히 줄어들음을 보고하였다<sup>9)</sup>. 이종재료의 접합부 파단은 알루미늄 합금 모재에서 파단 되었으며 인장응력은 알루미늄 모재강도의 약 80~90%에 이르는 값을 얻을 수 있다고 보고하였다.

### 5. 마그네슘합금-일반구조용압연강재

마그네슘합금은 구조용 재료 중 가장 가벼운 금속으로 경량화가 요구되는 수송분야에 많이 적용될 재료 중 하나이다. 마그네슘합금의 접합방법으로 현재까지는 대부분 용융용접이 적용되어왔다. 그러나 용융용접으로 인한 금속간 화합물 생성과 결정립 조대화 및 각종 결함의 발생으로 적용 분야가 한정되어 있는 실정이다. 현재는 마찰교반접합 기술을 이용하여 동종 및 이종마그네슘 접합에 대한 연구가 진행되고 있으며 기존 용접법에 대하여 우수한 결과를 보이고 있다. 그러나 마그네슘과 철강재료에 대한 연구는 거의 없는 실정이다. 따라서 향후 경량화에 따른 이종 구조재료의 사용이 필연시 되고 있으므로 이와 같은 철강재료와의 이종접합기술도 확보하여야 할 것이다. H.S Bang 등은 AZ31B 마그네슘합금과 SS400 일반구조용압연강재의 이종재료를 GTAW 하이브리드 마찰교반접합 연구결과에서 틀 회전속도 400rpm, 이송속도 1.2mm/s, GTAW 전류 50A 일 때 최대인장강도 약 235MPa로 마그네슘합금모재의 약 90%에 이르는 우수한 강도가 나타남을 보고하였다<sup>10)</sup>. 틀의 삽입위치는 이종재료 중 연질인 마그네슘 합금측에 삽입되었으며 틀의 probe 측면 일부만이 스틸 접합계면의 교반에 관여하였다. 마찰교반접합 기술에 비해 보다 향상된 강도를 나타내었으며 파단 특성에서도 대부분의 취성 파단양상을 보였으나 하

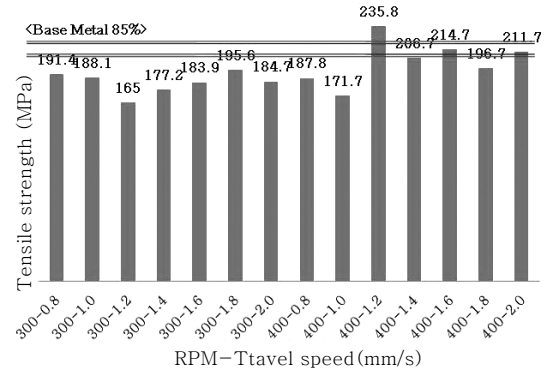


Fig. 5 Relation between the rotation speed and tensile strength

이브리드 마찰교반접합기술을 이용하여 접합함으로써 연성파단특성이 향상됨을 보고하였다. Fig. 5는 하이브리드 마찰교반접합 조건별 인장강도 값을 나타낸 것이다.

### 6. 맺 음 말

용융용접으로는 접합이 곤란했던 이종재료들은 마찰교반접합에 의해 접합이 가능해지고 용접결함이 줄었으나 동종재에 비해 상대적 소성유동의 부족으로 다소 만족스러운강도를 얻지 못하고 있다. 이러한 마찰교반접합 기술의 한계로 하이브리드 마찰교반접합기술 개발이 진행되고 있으며 일부 우수한 강도를 얻는 결과들이 보고되고 있다. 그러나 하이브리드 마찰교반접합기술의 실용화를 위해서는 더 많은 강종과 판재 두께별 접합조건을 최적화 하는 등 해결해야 할 문제점들이 아직 많이 남아 있으며, 특히 실 제품 적용을 위하여 내구성 있는 틀개발이 수반되어야 할 것이다.

### 참 고 문 헌

1. W.B Lee, S.B Jung: Joint properties and Interface Analysis of Friction Stir Welded Dissimilar Materials between Austenite Stainless Steel and 6013 Al Alloy, Journal of KWJS, **23-5** (2005), 469-476 (in Korean)
2. J.H. Kim, C.Y Kang: Joint Characteristics of Dissimilar Friction stir welded between Ti64 and Al5052, Abstracts of KWJS, **51** (2009), 127 (in Korean)
3. U. Dressler, G.Biallas and U.A. Mercado: Friction stir welding of titanium alloy TiAl6V4 to aluminium alloy AA2024-T3, Materials Science and Engineering A 526, (2009), 112-117
4. H.J. Song, Hee-Sun Bang, Han-Sur Bang: A study on the weldability of dissimilar(Al/Ti) butt joint by TIG assisted friction stir welding, Abstracts of KWJS, **54** (2010), 90 (in Korean)

5. K.S. Jeon, Hee-Sun Bang, Han-Sur Bang: weldability and mechanical characteristics of dissimilar(Al/SS400) butt joint by TIG assisted friction stir welding, Abstracts of KWJS, **54** (2010), 102 (in Korean)
6. Han-Sur Bang, Hee-Seon Bang, H.S Kim: A Study on the Weldability and Mechanical Characteristics of Dissimilar Materials Butt Joints by Laser Assisted Friction Stir Welding, Journal of KWJS, **28-6** (2010), 678-683 (in Korean)
7. M. Merklein, A. Gieral: Laser assisted Friction Stir Welding of drawable steel-aluminium tailored hybrids, International, Journal of Material Forming (2008)
8. H.J Kim, W.S Chang: Fundamental study on friction stir welding of steel, Abstracts of KWJS, **46** (2006), 286-288 (in Korean)
9. G.H Jeon, Hee-Sun Bang, Han-Sur Bang, S.Min Joo: A Study on Weldability of TIG Assisted Friction Stir Dissimilar Welding of Al6061 and STS304 Sheet, Abstracts of KWJS, **52** (2009), 161 (in Korean)
10. J.Y Jeon, Hee-Sun Bang, Han-Sur Bang: Evaluation of The Weldability of Dissimilar Materials (AZ31B/SS400) butt joint by TIG Assisted Friction Stir Welding, Abstracts of KWJS, **54** (2010), 158 (in Korean)



- 방한서
- 1951년생
- 조선대학교 선박해양공학과
- 용접공정 및 설계
- e-mail : hsbang@chosun.ac.kr



- 전근홍
- 1980년생
- 조선대학교 선박해양공학과
- 용접공정 및 설계
- e-mail : ghjun@chosun.kr



- 방희선
- 1971년생
- 조선대학교 선박해양공학과
- 용접공정 및 설계
- e-mail : banghs@chosun.ac.kr