



하이브리드 M/C의 마찰교반용접을 위한 힘-온도 연동 제어

박인규^{a,*}, 김병재^b, 이종득^a, 문성준^b

Force-Temperature Coupled Controller for Friction Stir Welding of Hybrid M/C

In-Gyu Park^{a,*}, Byeongjae Kim^b, Jogdeuk Lee^a, Seongjun Moon^b^a Smart Mobility Systems Research Center, Korea Institute of Robotics & Technology Convergence (KIRO)^b Machining Technology Center, Institute of R&D, Hwacheon Machine Tool Co., Ltd.

ARTICLE INFO

Article history:

Received	18	August	2025
Revised	27	August	2025
Accepted	28	August	2025

Keywords:

Force-temperature coupled controller
Friction stir welding (FSW)
Intelligent tool holder
Temperature-acceleration sensor system
Segmented tool tip
Thermocouple

ABSTRACT

In this paper, a force-temperature coupled controller is proposed to overcome welding quality deterioration owing to heat accumulation in the workpiece during friction stir welding (FSW) with force control alone. The temperature of the weld joint must be controlled to compensate for the force-control problem. To this end, we developed and tested an intelligent tool holder that can receive temperature feedback. Additionally, system modeling for temperature control was experimentally obtained using a system identification method. The feedback controller uses a proportional-integral (PI) controller, and the root-locus method is employed for its design. An experiment was conducted to test the force-temperature coupled control system. The results confirmed that force control is stable in the axial movement range of the tool within ± 0.15 mm. This is because the temperature controller appropriately reduced the tool's rotational speed to maintain the weld joint temperature in the 400°C range.

1. 서론

하이브리드 머신은 절삭과 마찰 교반용접(FSW) 작업을 고속으로 동시에 수행할 수 있는 최신 공작기계이다. 이러한 특성을 충분히 활용하기 위해서 가공품의 다양한 소재 및 형상에 안정적으로 대응할 수 있도록 FSW 공정 변수들을 제어할 수 있어야 한다. 일반적으로 알려진 공정 변수로는 수직력, 공구 회전 속도, 그리고 이송 속도가 있다. 수직력 제어는 FSW 작업 중 소재의 열 변형이나 두께 차이로 인한 가해지는 힘의 균일성을 보장한다. 스피들 회전 속도 제어는 내부에 축적된 열에너지를 효과적으로 제어하여 폭이 넓고 긴 소재의 용접을 가능하게 한다. 또한, 이송 속도 제어가 품질 측면에서 가장 우수한 방법임을 연구를 통해 확인했다^[1].

그리고, 현장 적용 시 고려해야 할 사항들을 정리하였는데 그 내용은 다음과 같다. 수직력 제어의 경우, 기존 공정 속도를 유지할 수 있고 제어기 구성 비용 측면에서 이점이 있지만, 축적된 내부 열에너지를 방출할 수 없어 작업 중 일정한 힘을 발생시키기 위해 공구를 과도하게 용접 조인트에 압력을 가하게 된다. 결과적으로 용접 품질의 저하를 불러온다. 공구 회전 속도 제어 시에는 용접부의 정확한 온도 측정이 필수적이다. 이를 위해서는 FSW 공정 중 실시간으로 온도를 측정할 수 있는 툴 홀더를 적용해야 하며, 이송 속도 제어는 고속 작업이 요구되는 분야에서 생산성 측면에서 불리하다.

FSW 공정은 1991년 영국 케임브리지 TWI에서 처음 개발한 이후 지속적인 연구개발이 진행되어 왔으며, 최근에는 친환경적이

* Corresponding author. Tel.: +82-54-279-0436

E-mail address: igpark@kiro.re.kr (In-Gyu Park).

고 경제적인 작업 특성으로 인해 운송기계 및 전기자동차 산업으로 확장되고 있다²⁻⁴⁾. 또한, 공정 변수를 정밀하게 제어하기 위해 지난 10년 동안 용접부의 힘 제어뿐만 아니라 온도 제어를 통한 품질 향상을 위한 많은 시도가 있어 왔다.

용접 조인트의 온도를 정확하게 측정하기 위해 공구와 소재 사이에 열전대를 직접 연결하는 다양한 방법이 제안되었으며, 최근에는 무선 통신 기술을 이용하여 공구 본체에 홈을 가공한 후 열전대를 삽입하여 온도를 직접 측정하는 방법이 활발히 적용되고 있다. 또한, 이러한 정보를 활용한 다양한 피드백 제어 방법들이 연구개발되고 있다⁵⁻¹¹⁾. Backer⁹⁾는 열전효과(thermocouple effector)를 기반으로 공구와 공작물의 온도를 측정하는 새로운 방법인 Tool-workpiece thermocouple(TWT) 방법을 개발했다. 이 방법은 측정된 온도 데이터가 페루프 온도 제어기의 입력으로 사용되고, 출력은 공구의 회전 속도와 축력을 보상하는 다중 출력 온도 제어기로 전달된다. 이 시스템을 다양한 유형의 AI 소재에 적용하여 그 유용성을 확인했다. Ana¹⁰⁾는 TWT 방법의 상용화를 고려하여 현장 적용성을 향상시키기 위해 Thermocouple embedded in the tool(TTC) 방법을 제안했다. 최적의 TTC 방법을 구현하기 위해 공구 모서리, 프로브, 솔더에 열전대 위치의 구멍을 가공하고 설치하여 용접부의 온도 특성을 분석하였다. 이 온도 데이터를 입력으로 사용하는 독립적인 온도 PI 제어기를 제안하였고, 이 TTC 방법과 제어기를 복잡한 형상의 용접 작업에 적용하여 그 효과를 확인하였다. Arnold¹¹⁾는 지난 10년간 다양한 온도 제어 연구 결과를 분석한 결과, 온도 제어 방식이 좋을수록 산업계에 적용하기가 까다롭고 어렵다는 것을 확인하였다. 또한, 작업속도는 산업계에서 요구하는 1000~2000 mm/min 이상으로 적용하기 어렵다고 판단하였다. 그래서, 산업계에서 쉽게 적용하기 위해 기존 공구에 홈을 가공하여 열전대를 설치하고, 스피들 속도에 대해 비교적 간단하고 비용 효율적인 자동 튜닝 PID 제어기를 적용했다. 이를 통해 간단한 PID 기반 온도 제어기 구현으로 높은 용접 속도에서도 고 품질을 생산할 수 있음을 확인했다.

본 논문에서는 기존 힘 제어 연구 결과의 문제점을 온도 제어기 추가를 통해 극복하고자 한다. 기존의 공구 높이 변화를 통한 힘 제어 연구 결과를 요약하면, 일정 영역까지는 목표 힘을 잘 추종하였으나, 시간이 지난 후에는 힘이 점진적으로 작아지는 특성을 나타내었다. 그럼에도 불구하고 공구의 높이는 지속적으로 낮아지는 현상이 있었다¹²⁾. 이러한 현상은 FSW 작업 중 소재에 가해지는 열이 지속적으로 증가하여 소재의 조직이 무른 상태가 되었으나 힘 제어기에서는 일정한 힘을 유지하기 위해 지속적으로 압력을 가하는 현상으로 파악된다. 이러한 특징적 현상으로 온도 제어기 추가하여 극복하고자 한다. 본 연구논문을 통해 현장에서 요구되는 폭이 넓고 긴 소재에 대한 고속 FSW 가공이 가능하

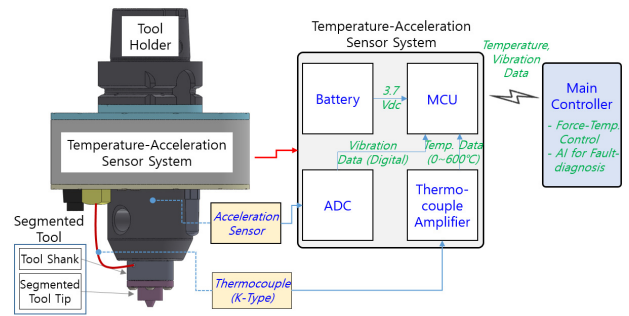


Fig. 1 Control system configuration block diagram of the intelligent tool holder

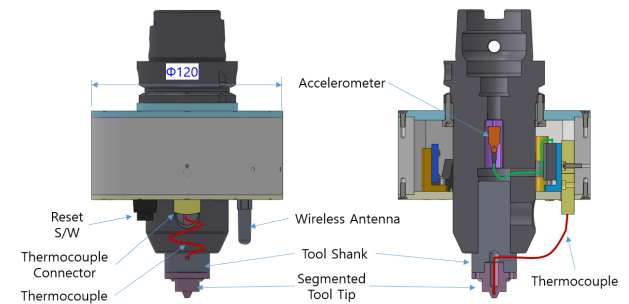


Fig. 2 Placement and outer diameter geometry of force and temperature sensors

도록 한다. 이를 위해 실시간 온도 측정이 가능한 지능형 툴 홀더를 개발하고, 힘-온도 제어 알고리즘을 개발 및 적용을 통해 그 유용성을 검증한다.

2. 지능형 툴 홀더

2.1 지능형 툴 홀더의 설계 및 제작

본 논문에서 제안하는 지능형 툴 홀더의 구성은 Fig. 1과 같다. 이 툴 홀더는 손쉽게 현장에 적용할 수 있도록 기존 툴 홀더를 최대한 활용하여 최소한의 수정만 거치는 구성방식이다. 이 구성방식은 별도로 개발된 온도-가속도 센서 시스템과 생크와 팁으로 분할되는 분할 공구를 기존의 상용제품인 툴 홀더(SCHUNK, WEL HSK-A63)에 삽입하여 바로 사용할 수 있도록 하였다. 적용된 상용 툴 홀더는 현장에서 일반적으로 사용되는 제품이며, 가속도 센서 설치를 위한 나사 가공 후 바로 적용할 수 있다.

온도-가속도 센서 시스템은 FSW 가공 중 발생하는 공구 혹은 공작물의 온도 데이터와 절삭 중 발생하는 가속도 데이터를 무선 인터넷을 통해 메인 제어기로 전송한다. 이 데이터는 메인 컨트롤러로부터 10 m 이내에서 100 Hz(115,200 bps) 주파수로 전송된다. 이 데이터를 수신한 메인 컨트롤러는 힘-온도 결합 제어 알고리즘과 공구 상태 예측 알고리즘에 사용된다.

온도 및 가속도 센서는 Fig. 2와 같이 각각 공구 홀더 내부에

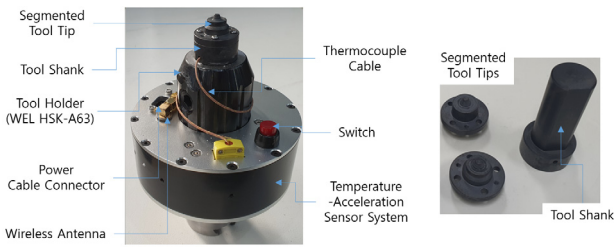


Fig. 3 Manufactured intelligent tool holder and tool

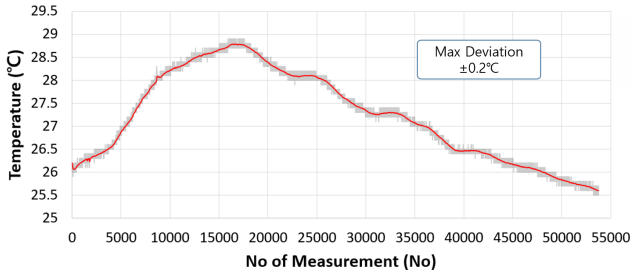


Fig. 4 Temperature data measured via wireless communication at a distance of 10 m

위치한다. 가속도 센서는 공구 홀더의 회전 중심축에 위치하여 수직 방향의 진동을 측정한다. 열전대인 온도센서는 분할된 공구 팁의 홈에 고정하여 사용하며, 커넥터를 통해 쉽게 교체할 수 있도록 하였다.

분할 공구는 고탄소강 소재(SKD 61)를 가공 및 열처리하여 제작하였다. 열전대를 삽입하기 위한 미세 홈 가공 등의 제작 난이도와 비용을 줄이기 위해 분할형으로 제작하였다. 샵크와 팁으로 분리되어 공구 마모 시 팁만 교체할 수 있도록 설계하였다. 공구 팁은 회전 중심에 $\varnothing 1.0$ mm의 구멍이 가공되어 있으며, 열전대를 삽입 후 세라믹 본드로 고정하였다. 온도-가속도 센서 시스템의 외경은 $\varnothing 120$ mm 이하(허용 범위: 최대 $\varnothing 150$ mm)로 설계 반영하여 공구 매거진에 장착 가능하도록 하였다. Fig. 3은 제작된 지능형 공구 홀더와 분리형 공구 형상이다.

2.2 지능형 툴 홀더의 기능시험 및 검증

본 절에서는 지능형 툴 홀더의 온도 데이터 측정 및 원격 전송 기능 시험을 수행한다. 고장 진단을 위한 가속도 센서 데이터 시험은 본 논문에서 수행하지 않는다. 시험을 위하여 툴 홀더는 메인 컨트롤러인 산업용 PC로부터 10 m 떨어진 무선 통신(Bluetooth)을 통해 데이터를 수신한다. 이때 통신 속도는 115,200 bps이고 샘플링 시간은 10 ms이다. 시험조건은 평균온도 27.22°C인 실내 환경이며, 배터리를 완충 후 방전되어 작동하지 않을 때까지 실험을 수행한다.

Fig. 4에서 Fig. 6은 지능형 툴 홀더의 온도 데이터 측정 및 원격 전송 기능시험 결과를 나타내었다. Fig. 4는 온도 데이터의 무선

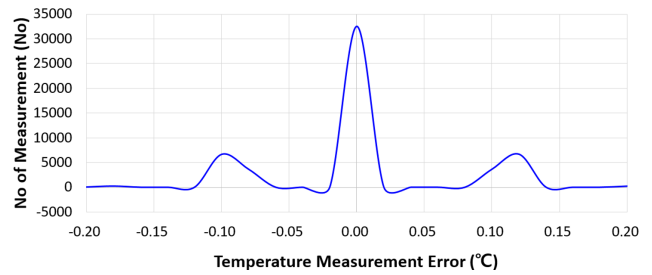


Fig. 5 Normal distribution of measurement data deviation

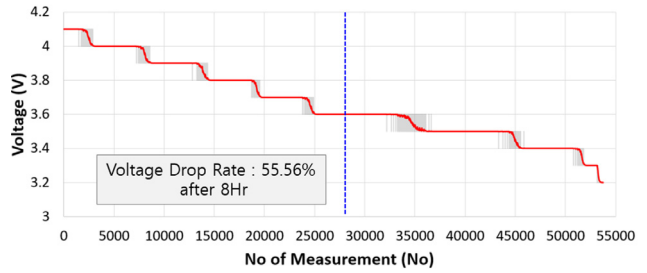


Fig. 6 Graph of battery performance test results

전송 가능한 시간이 약 15시간(53,000 count 이상) 동안 온도 데이터 송신을 할 수 있었다. 이때 발생한 데이터 간 최대 편차는 $\pm 0.2^\circ\text{C}$ 이다. Fig. 5에서는 온도 데이터 간 최대 편차를 $\pm 0.1^\circ\text{C}$ 범위로 하였을 경우 데이터의 99% 이상이 이 범위에 해당되어 안정적으로 데이터 전송이 됨을 확인했다. Fig. 6은 배터리의 용량 시험 결과 그래프로써, 15시간 동안 작동함을 확인하였다. 8시간 후의 전압강하가 55%로써 안정적으로 작동하였다.

3. 힘-온도 연동 제어

3.1 시험장비 구성

개발된 지능형 툴 홀더를 하이브리드 가공기인 주식회사 화천의 F1300^[12]에 장착하여 힘-온도 연동 제어를 수행한다. 본 시험을 통해 힘 제어 시 소재내 온도 보상이 되지 않아 공구의 과도한 높이 변화로 인한 품질 저하 문제를 극복하고자 한다.

시험장비는 기존의 힘 제어가 가능한 하이브리드 가공기에 온도 제어가 가능하도록 보완한 형태로써, Fig. 7과 같은 구성을 갖는다. 힘-온도 제어기(force-temperature coupled controller)는 지능형 툴 홀더에서 측정된 공작물의 온도 데이터를 무선 온도센서 모듈(wireless temperature sensor module)을 통해 원격으로 전달받고, FSW 중 공작물에서 발생하는 3축의 힘 F_x , F_y , F_z 는 로드셀계측기(load cell indicator)를 통해 전달받고, 그리고 하이브리드 제어기인 화낙 제어기(0iF Plus)로부터 시스템의 제어상태 정보들인 스펀들의 위치 및 가속도, 피드레이트(feed rate) 등을 전달받는다. 이렇게 입력받은 정보들을 활용하여, 힘-온도 제어를

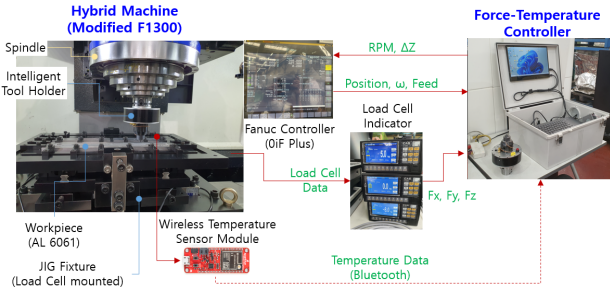


Fig. 7 System configuration for force-temperature coupled control

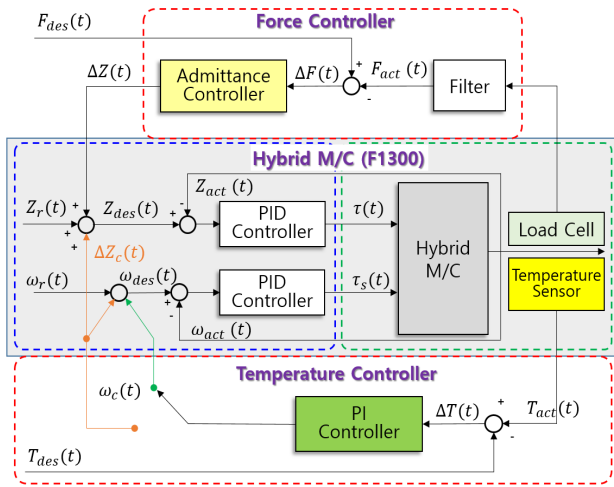


Fig. 8 Block diagram for force-temperature coupled control

수행하기 위한 스피ndl의 높이 ΔZ 와 계산된 스피ndl 회전수(rpm)을 출력으로 하는 구조이다.

3.2 힘-온도 연동제어

Fig. 8은 하이브리드 가공기에 적용된 힘-온도 연동제어기의 구조도이다. 하이브리드 가공기의 주제어기인 화낙제어기 내부에서는 작업자에 의해 입력된 스피ndl 높이 $z_r(t)$ 와 스피ndl 회전속도 $\omega_r(t)$ 를 피드백 PID 제어할 수 있는 구조를 갖는다. 여기에 힘-온도 연동 제어기를 부가적으로 설치하여 시험한다.

온도 제어기는 작업 중 소재의 발열량을 제어하기 위해 적용한다. 지능형 툴 홀더의 온도 센서를 통해 읽은 소재의 온도 $T_{act}(t)$ 를 PI 제어를 통해 계산된 보상 회전속도 $\omega_c(t)$ 를 스피ndl 회전속도 $\omega_r(t)$ 와 합하여 원하는 스피ndl 회전속도 $\omega_{des}(t)$ 를 얻는다. 이때, $\omega_{des}(t)$ 가 급격한 스피ndl 회전속도의 변화로 장비에 무리를 가하거나 공구가 손상을 입지 않도록 하기 위하여 $\omega_{min} < \omega_c(t) + \omega_r(t) < \omega_{max}$ 가 되도록 한계를 설정한다. 그리고, 공작물의 온도가 너무 높거나 낮아 $\omega_c(t)$ 가 ω_{min} 또는 ω_{max} 의 범위를 넘어서는 경우의 스피ndl 회전수는 $\omega_c(t) = \omega_{max} \cap \omega_{min}$

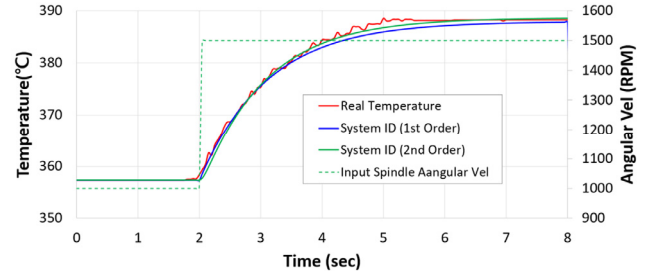


Fig. 9 Temperature response characteristics of workpiece according to step input of spindle rotational speed

로 나타내고, 스피ndl의 높이는 $z_{des}(t) = \Delta z(t) \pm \Delta z_c(t)$ 가 되도록 한다.

3.3 온도 제어 시스템 모델링

시스템 동조(system identification) 방법을 이용하여 온도 제어부의 제어 시스템을 실험적으로 모델링한다. 온도의 계단입력(step input)에 대한 스피ndl 회전속도 출력을 갖는 Single Input Single Output(SISO) 시스템이 되도록 한다.

시스템의 특성방정식을 얻기 위해, Fig. 9와 같이 스피ndl의 회전속도를 1000 rpm으로 입력하여 공작물의 온도가 257.3°C로 안정화시킨 후 1500 rpm으로 계단 명령을 인가한다. 그러면 4초 후에 388.05°C로 안정됨을 알 수 있다. 시험 결과 실제온도(actual Temperature)의 경우, 계단 응답의 시작 부분에서 변곡이 있어 2차 시스템의 특성을 지닌다. 그러나 과도응답(overshoot response)이 없이 안정되어 1차 시스템으로 근사화가 가능한 것으로 판단된다. 각 차수 별 시스템의 전달함수를 설정 과정을 정리하면 다음과 같다.

(1) Case 1 : 1차 시스템 전달함수

1차 시스템의 개루프 전달함수는 $G(s) = K/(\tau s + 1)$ 로 나타낸다. 여기서 시정수 τ 는 정상상태 응답의 63.21%까지 도달 시간으로서 $\tau = 1.1$ 이다. 그리고 계인 $K = 30.6$ 이다. 이를 적용하여 1차 시스템의 전달함수 $G(s)$ 는 식 (1)과 같다.

$$G(s) = \frac{30.6}{1.1s + 1} \quad (1)$$

(2) Case 2 : 2차 시스템 전달함수

실제 온도 그래프 특성을 살펴보면, 그래프 특성이 과도감쇠된 2차 시스템(over damped 2nd order system)과 동일한 특성을 나타냄을 알 수 있다. 즉, 복소평면에서 실수축에 2개의 극점을 갖는 구조이다. 2차 시스템의 개루프 전달함수는 식 (2)와 같이 나타낸다.

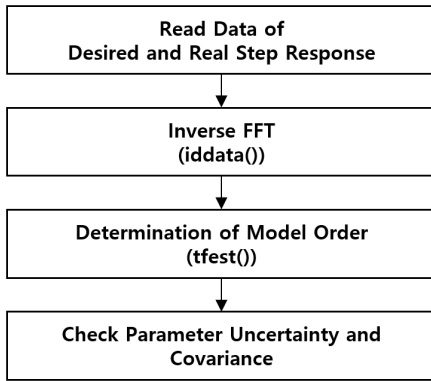


Fig. 10 Flowchart of system identification for step response using Matlab functions

$$G(s) = \frac{K\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (2)$$

Matlab의 함수들을 활용하여 시스템 동조를 수행하였다^[13]. 시험을 통해 구한 실제 온도 데이터를 입력으로 Fig. 10과 같은 절차를 통해 개루프 전달함수를 추정한다. 우선, 계단 응답의 목표 값(desired value)과 실제 값(actual value)을 읽어들이고, inverse FFT를 통해 시스템 동조 계수를 계산한다. 그리고, 식 (2)의 전달 함수 계수들을 구하기 위해 극점(pole)은 2, 영점(zero)은 0으로 차수를 선정한다. 마지막으로 추정된 시스템의 추정 데이터의 적합성(fitness of estimation data)을 확인한다.

시스템 추정 결과는 식 (3)과 같이 나타낸다.

$$G(s) = \frac{14.25}{s^2 + 15.83s + 14.25} \quad (3)$$

여기서, 추정 데이터의 적합성은 96.21%이다. 그리고 시스템 데이터 간 평균제곱오차(MES)는 0.2347이다.

3.4 온도 제어기 설계

실험적 시스템 동조기법을 통해 추론한 개루프 전달함수 식 (3)에 적합한 PI제어기를 근궤적법(root-locus method)을 적용하여 설계한다. 전형적인 PI 제어기는 식 (4)와 같이 구성된다.

$$C(s) = \frac{K_p(s+z)}{s} \quad (4)$$

여기서, $z = K_i/K_p$ 이다. 제어기 설계의 성능 규격은 계단 응답의 특성을 고려하여 과감쇠 시스템(overdamped system)에 가깝도록 $T_s \leq 3.6s$, $P.O. < 0.1\%$ 로 선정한다. 이 선정 값으로부터 시스템 댐핑계수 ζ 를 식 (5)로부터 계산한다.

Table 1 Case settings for each experimental condition

	RPM	1000	2000	2500
Feed Rate[mm/min]				
500		Case 1	Case 2	-
1500		-	Case 3	Case 4

$$\zeta = \sqrt{\frac{\left(\ln \frac{P.O.}{100}\right)^2}{\pi^2 + \left(\ln \frac{P.O.}{100}\right)^2}} = 0.91 \quad (5)$$

이 값을 식 (2)의 특성방정식에 대입하여 풀이하면, $\omega_n = 1.22$ 가 된다. 그러면, 우세근은 $q, \hat{q} = -1.1 \pm j1.055$ 가 된다. 근궤적으로부터, 영점과 이루는 각도 $\theta_z = 58.2383^\circ$ 가 된다. 그러므로 영점의 위치는 $z = -2.8041$ 이 된다. 비례계인 K_p 는 극점과 영점으로부터의 거리의 비로 계산되어, $K_p = 6.9221$ 이 된다. 이때, 적분 계인 K_i 는 19.4103이 된다. 이 결과로부터 제어기 식 (4)를 다시 정리하면 다음 식 (6)과 같다.

$$C(s) = \frac{6.9221\left(s + \frac{19.4103}{6.9221}\right)}{s} \quad (6)$$

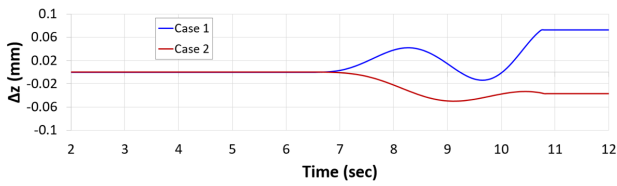
4. 시험 결과 및 검토

4.1 제어기의 기능시험

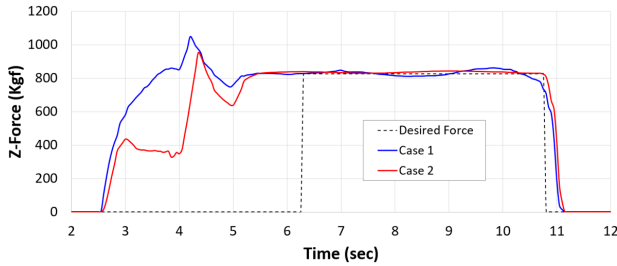
Fig. 7의 힘-온도 연동제어기는 식 (3)과 식 (6)을 결합하여 PI온도 제어기를 구성하고, 그 제어기의 성능을 검증하기 위한 시험을 수행한다. 시험조건 별, 경우의 수를 장비 상태를 고려하여 Table 1에 나타낸 것처럼, Case 1에서 Case 4로 나누어 수행한다. 시편은 열처리되지 않은 AL6061, 길이 200 mm, 폭 80 mm, 두께 6 mm 소재를 사용한다. FSW 작업 길이는 150 mm이다. 공구의 솔더는 $\varnothing 12$ mm, 프로브 길이 3 mm, 프로브 직경 $\varnothing 3$ mm 형상을 갖는 분할형 공구이다. 그래프는 이송속도(feed rate)를 중심으로 표현한다.

(1) Feed rate 500 : Case 1, Case 2

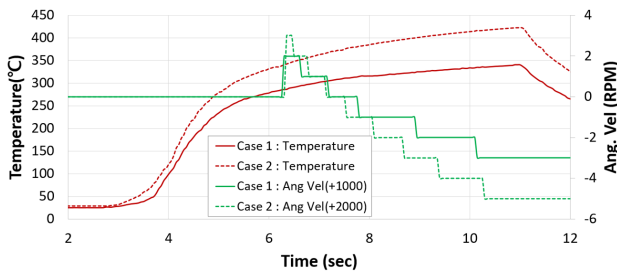
시험 결과는 Fig. 11과 같다. Fig. 11(a)에서, 축방향의 공구 절입 높이가 보상값이 최대 0.075 mm로 제품의 품질을 보장하는 높이 한도인 ± 0.15 mm 조건을 만족한다. Fig. 11(b)에서, 힘 제어는 6.3s에서 시작되어 안정적으로 제어됨을 확인한다. Fig. 11(c)에서는 온도 제어시, 회전수의 최대 변동이 5 rpm 이 발생됨을 확인한다. 그 결과로 공작물의 온도 변화는 크게 상승하지 않음을 알 수 있다.



(a) Tool cutting height compensation values in axial direction

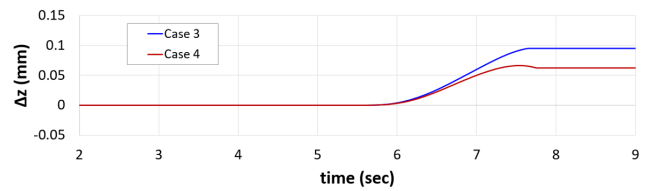


(b) Results of axial force control

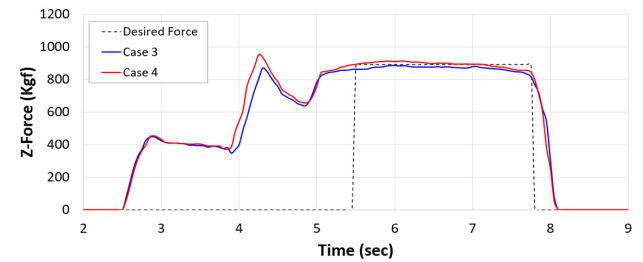


(c) Temperature control results according to tool rotation speed changes

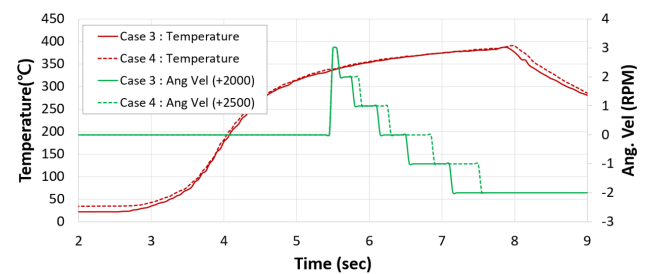
Fig. 11 Force temperature control experiment results for case 1 and case 2



(a) Tool cutting height compensation values in axial direction



(b) Results of axial force control



(c) Temperature control results according to tool rotation speed changes

Fig. 12 Force temperature control experiment results for case 3 and case 4

(2) Feed rate 1500 : Case 3, Case 4

시험 결과는 Fig. 12과 같다. Fig. 12(a)에서, 축 방향의 공구절입 높이가 보상값이 최대 0.0903 mm로써 시스템의 요구 조건을 만족한다. Fig. 12(b)에서, 힘 제어는 5.5s에서 시작되어 안정적으로 제어됨을 보인다. Fig. 12(c)의 온도제어시, 회전수의 최대 변동이 5 rpm 발생됨을 확인한다. 이 조건의 결과도 온도 변화를 최소화하기 위한 제어기의 작동성을 확인할 수 있다.

힘-온도 연동 제어의 경우, 온도를 보상하기 위해 제어기는 충실히 작동하였으나 약 4초간의 짧은 시간에서 보상이 충분하지 못하였다. Fig. 13은 FSW 작업 후 제품의 표면을 보여주는데, 안정적으로 가공되었음을 확인할 수 있다.

4.2 긴 공작물에 대한 성능 평가

상대적으로 긴 공작물의 힘-온도 연동 제어 특성을 살펴보기 위해, Fig. 14와 같이 소재를 장착하고 곡면 가공 궤적을 포함하는 FSW 작업을 수행한다. 공작물의 재질은 AL 6061이며, 길이 430 mm, 너비 190 mm, 두께 6 mm의 공작물이다. FSW는 Fig. 14(b)와 같은 폐쇄 궤적으로 수행하였다. FSW 작업의 총 길이는

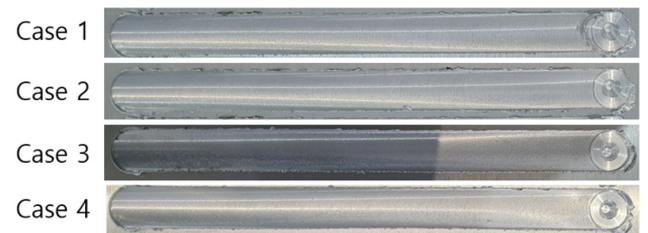
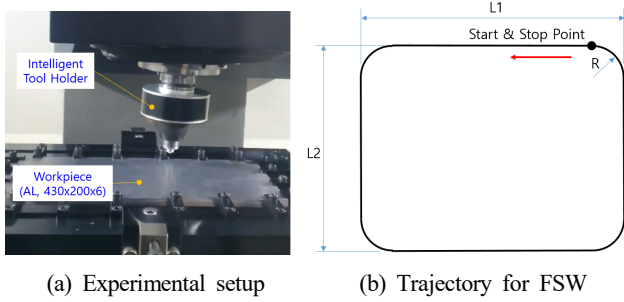


Fig. 13 Results of controller function test (working length is 150 mm)

765.7 mm이다.

Fig. 15는 힘-온도 연동 제어의 실험 결과이다. Fig. 15(a)에서, 축 방향 공구 절삭 높이가 보정 제어 결과 최대 0.12 mm의 오차가 발생하였다. 또한 Fig. 15(b)에서, 절삭 높이가 변화가 발생하더라도 힘 제어는 안정적으로 유지됨을 확인하였다. Fig. 15(c)의 온도 제어시, 장비의 갑작스러운 작동을 방지하기 위해 $\omega_{\min} = \omega_r - 1000$ ($\omega_{\max} = \omega_r + 1000$) 범위로 제한하여 안전을 고려하였다. 공구 회전 속도는 1372 rpm으로 조정되었으며, 총 628 rpm이 변화(감소)되었다. 그 결과, 용접부의 온도가 400°C 부근에서 안정적으로 제어됨을 확인할 수 있다.



(a) Experimental setup (b) Trajectory for FSW
Fig. 14 Experimental equipment for curved surface experiments (L1=185, L2=135, R=20[mm])

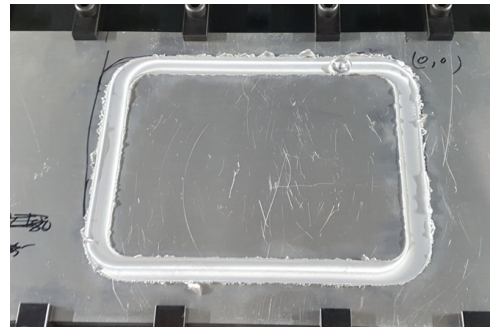
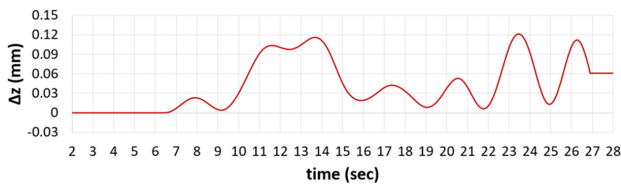
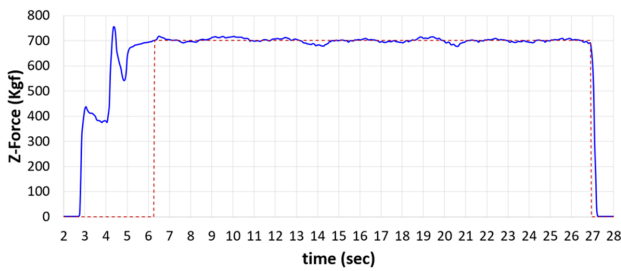


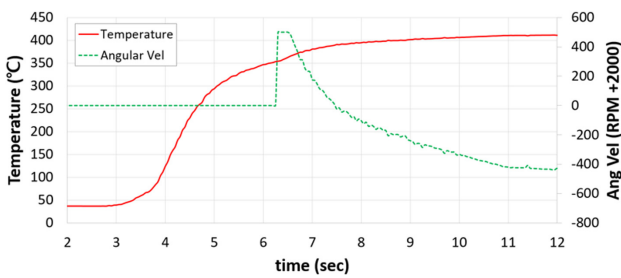
Fig. 16 Results of curved surface processing experiments



(a) Tool cutting height compensation values in axial direction



(b) Results of axial force control



(c) Temperature control results according to tool rotation speed changes

Fig. 15 Force temperature control experiment results for long curved surface machining

Fig. 16은 긴 공작물에 대한 힘-온도 연동 제어 실험 결과 형상을 보여준다. FSW 작업 중, 축 방향 공구 절삭 높이 변화가 최대 0.12mm의 변동이 있었고, 공구의 회전 속도가 628rpm 변동이 있었음에도 가공된 공작물의 표면에 비드 불균일, 과도한 플래시(flash), 미세한 균열, 웜홀(wormhole) 등의 불량 없이 매우 안정적인 형상을 유지하고 있음을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문을 통해 힘-온도 연동 제어를 제안하고, 이를 실제장비인 F1300에 적용하여 검증하였다. 이를 위해 용접부의 온도를 측정하고 제어할 수 있는 지능형 툴 홀더를 제안하였다. 이 지능형 툴 홀더는 제어기와 10 m 거리에서 약 15시간 동안 데이터를 전송할 수 있었으며, 데이터 간 최대 편차가 $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ 미만으로 매우 안정적인 성능을 확인하였다.

제안된 힘-온도 연동 제어 알고리즘을 제안하고 실험을 통해 그 유용성을 확인하였다. 힘 제어 알고리즘은 참고문헌^[12]의 사전 연구 결과를 활용하였다. 온도 제어를 위한 시스템 모델링은 시스템의 계단 응답에 대한 시스템 식별법을 사용하여 실험적 방법을 통해 결정하였다. 온도 제어를 위한 PI 제어기 설계는 근궤적법을 사용하여 설계하였다.

다양한 작동 조건에서 실험을 수행하였다. 그 결과를 살펴보면 4.1절의 기능 검증 실험에서 힘-온도 연동 제어기는 주어진 조건에서 잘 작동함을 확인하였다. 수직력 제어 결과와는 달리, 상대적으로 짧은 시간(2.2 sec~4.5 sec)과 짧은 작업 거리(150 mm)의 작업에서는 열에너지의 축적이 적어 충분한 온도 제어 성능을 발휘하지 못하고 계속 온도가 축적되는 특성을 확인하였다. 상대적으로 길이가 긴 공작물(5.8 sec, 765.7 mm)의 경우인 4.2절에서는 힘-온도 결합 제어가 양호하게 작동되어, 400°C 의 범위 내에서 안정화되면서도 축 방향의 공구 절입 높이 보상 범위가 최대 0.12 mm로써, 시스템 요구 조건인 ± 0.15 mm 이하로 안정적인 성능을 확인하였다. 그리고 FSW 작업 중, 축 방향 공구 절삭 높이 변화가 최대 0.12mm의 변동이 있었고, 공구의 회전 속도가 628rpm 변동이 있었음에도 가공된 공작물의 표면에 비드 불균일, 과도한 플래시(flash), 미세한 균열, 웜홀(wormhole) 등의 불량 없이 매우 안정적인 형상을 유지하고 있음을 확인하였다.

후 기

이 연구는 2022년도 산업통상자원부가 지원한 ‘기계장비산업기술개발사업’으로 지원을 받아 수행한 연구결과입니다. [과제명: 마찰교바용접/머시닝 하이브리드 가공시스템 개발/과제고유번호: 20018458]

References

- [1] Longhurst, W. R., 2009, Force Control of Friction Stir Welding, Doctoral Thesis, Vanderbilt University, USA.
- [2] Kim, Y. P., Kim, C. H., Kim, Y. G., Joo, S. M., 1992, Trends of Technology Development of Friction Stir Welding Machine, *J. Weld. Join.*, 34:3 1-5, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.1>.
- [3] Kim, Y., Park, Y. D., 2022, Joining Technologies and Solutions for Aluminum-based Battery Case Manufacturing, *J. Weld. Join.*, 40:1 54-73, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2022.40.1.7>.
- [4] Kim, H., 2021, Friction Stir Welding Experiment and FEM Analysis for Fillet Joint of Electric Vehicle Battery Frame, Master Thesis, Gyeongsang National University, Republic of Korea.
- [5] Kenneth, R., Carl, S., 2013, Friction Stir Welding and Processing VII - Advances in Temperature Control for FSP, 301-310, Springer, Switzerland, https://doi.org/10.1007/978-3-319-48108-1_31.
- [6] Fehrenbacher, A., Duffie, N. A., Ferrier, N. J., Pfefferkorn, F. E., Zinn, M. R., 2014, Effects of Tool-Workpiece Interface Temperature on Weld Quality and Quality Improvements Through Temperature Control in Friction Stir Welding, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 71 165-179, <https://doi.org/10.1007/s00170-013-5364-4>.
- [7] Sigl, M. E., Bachmann, A., Mair, T., Zach, M. F., 2020, Torque-Based Temperature Control in Friction Stir Welding by Using a Digital Twin, *Metals.*, 10:7 914, <https://doi.org/10.3390/met10070914>.
- [8] Merritt, G. R., Williams, M. B., Allison, P. G., Jordon, J. B., Rushing, T. W., Cousin, C. A., 2022, Closed-Loop Temperature and Force Control of Additive Friction Stir Deposition, *J. Manuf. Mater. Process.*, 6:5 92, <https://doi.org/10.3390/jmmp6050092>.
- [9] De Baker, J., 2014, Feedback Control of Robotic Friction Stir Welding, Doctoral Thesis, University West, Sweden.
- [10] Silva-Magalhães, A., 2020, Thermoelectric Measurements for Temperature Control of Robotic Friction Stir Welding, Doctorate Thesis, University West, Sweden, <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.34010.70083>.
- [11] Wright, A., Munro, T. R., Hovanski, Y., 2021, Evaluating Temperature Control in Friction Stir Welding for Industrial Applications, *J. Manuf. Mater. Process.*, 5:4 124, <https://doi.org/10.3390/jmmp5040124>.
- [12] Park, I. G., Kim, B., Lee, J., Lee, J., Moon, S., 2023, A Study of Admittance Force Control for FSW of Hybrid Machine, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 32:2 109-117, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2023.32.2.109>.
- [13] Aleksandarhaber.com, 2022, viewed 17 September 2025, Introduction to MATLAB system Identification Toolbox- Transfer function Identification, <<https://aleksandarhaber.com/introduction-to-matlab-system-identification-toolbox-transfer-function-identification/>>.

	<p>In-Gyu Park Chief Researcher in Smart Mobility Systems Research Center of KIRO. His research interest is Robotics. E-mail: igpark@kiro.re.kr</p>
	<p>Byeongjae Kim Research Engineer in Machining Technology Center Institute of R&D of Hwacheon Machine Tool Co., Ltd.. His research interest is Machine. E-mail: kbj@hwacheon.com</p>
	<p>Jongdeuk Lee Senior Researcher in Smart Mobility Systems Research Center of KIRO. His research interest is Robotics. E-mail: artofgene@kiro.re.kr</p>
	<p>Seongjun Moon Director in Machining Technology Center Institute of R&D of Hwacheon Machine Tool Co., Ltd.. His research interest is Machine. E-mail: msj@hwacheon.com</p>