



하이브리드 가공기의 FSW를 위한 어드미턴스 힘 제어에 관한 연구

박인규^{a*}, 김병재^b, 이정우^a, 이종득^a, 문성준^b

A Study of Admittance Force Control for FSW of Hybrid Machine

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

ARTICLE INFO

Article history:

Received	1	February	2023
Revised	20	February	2023
Accepted	21	February	2023

Keywords:

FSW(friction stir welding)

Admittance control

z-axis direction force control

Coefficients optimization

Hybrid machine(FSW and milling)

ABSTRACT

This paper presents force control along the z-axis during friction stir welding (FSW) using a hybrid machine (F1300, Hwacheon Machinery). An admittance force controller is applied to control the position compensation of the tool for force change. During FSW with P-control, the values of the coefficients m , c , and k satisfying the position output of the tool for unit force input are selected as the coefficients for the controller. In the frequency domain analysis of the open loop transfer function, the coefficients are optimized to suppress, low pass, or cut-off of noise of the vibration data. Verification experiments revealed that the sensitivity of the axial force was up to 32.5 kgf, the tool position compensation value in the axial direction was stably controlled within 0.1 mm, and the internal voids of the material could be further reduced.

1. 서론

마찰교반용접(FSW)은 1991년 영국 케임브리지의 TWI에서 Wayne Thomas에 의해 처음 발명된 이후에 친환경적이며 경제적인 작업특성으로 수송기계(자동차, 철도차량, 우주항공, 조선)의 생산 및 제조분야에 많이 보급 및 확산 되고 있다^[1]. 특히, 최근에는 전기 자동차의 배터리 팩 등 기밀과 경량화를 요하는 제품의 제조분야에 빠르게 확대되고 있다^[2,3].

전통적으로 FSW를 제어하는데 사용된 주요 공정변수는 공구의 플런지 깊이, 회전속도, 이송속도였으나, 기술의 발전으로 공구에 의해 공작물에 가해지는 축방향(z-축) 힘이 매우 중요한 고정 매개 변수로 떠올랐다. 강성이 강한 이상적인 공작 기계의 경우에 있어 위치 제어만으로 적절한 축 방향 힘을 유지할 수 있으나, 플런지 깊이와 축력의 관계는 공작물의 고유하고 가변적인 강성으로 인해

비선형 방식으로 밀접하게 결합된다. 즉, 도구가 공작물에 플런지하는 양과 축방향 힘의 관계는 비선형관계를 갖는다^[4].

이러한 비선형 힘 제어를 위하여 다양한 연구가 진행 중이다^[4,8]. William 등^[4,5]은 밀링머신을 제어가 가능하도록 자동화하여 PID 방법을 이용한 축방향 힘 제어, 이송속도를 통한 힘 제어, 회전속도를 통한 힘 제어 등에 대한 제어를 수행하여 각각의 특징을 연구하였다. 이송속도 변화를 통한 힘 제어가 가장 정확하고 부산물로 용접 이음매에 따라 열분포가 잘 되고, 회전속도변화를 통한 힘 제어는 소재강도가 우수한 특징을 나타내었다. 축방향 힘 제어는 공구표면적을 일정하게 힘 제어하는 방식으로 소재의 열변형이나 공작기계의 처짐(deflection) 보상에 우수한 특징을 가진다. 또한, 실험을 통해 도출된 공구와 공작물 사이의 특성 즉, 페루프 시스템 응답의 특성인 2차 시스템의 피드포워드 전달함수를 도출하고, 이를 시뮬레이션하여 응답특성을 분석하여 제어 파라미터를 도출하는

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

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

방법을 제안했다.

Jerone^[6]은 FSW 중 소재에 작용하는 온도조절하기 위해 공구의 회전속도와 축력의 제어를 통해 열을 분산 및 제어하는 새로운 방법인 TWT(tool-workpiece thermocouple)을 제안했다. 이는 온도 제어는 회전속도를 제어하고 힘 제어는 축방향 위치를 제어하도록 하였다. 이를 통해 FSW 동안 재료의 과열을 방지하는 공구 홀더를 적용하여 공정 견고성과 용접의 품질향상을 수행하였다. 또한 제어기는 PI제어를 적용하였으며, 최적 계인을 찾기 위하여 스텝응답(step response)실험을 통해 시스템 거동을 파악하고 이를 바탕으로 1차 근사 프로세스 전달함수를 도출 후, Bode-diagram을 통해 위상여유(phase margin) 45°와 위상각 -180°에 해당하는 주파수를 활용하여 PI 제어 계인을 선정하였다.

Xin 등^[7]은 FSW 힘 제어를 위한 비선형 피드백 제어기를 제안하고, 계인의 설계는 극배치(pole placement) 기술을 사용하여 설계하였다. 이 제어기는 힘과 플런지 깊이관계 동특성과 플런지 명령과 플런지 동 특성에 대해 각각의 관계에 대한 실험적 방법에 의한 개루프 전달함수를 추론하고 이 두 관계를 합하여 비선형 피드백 제어기를 완성하는 방법을 사용한다. 이 시스템의 안전성은 Bode plot을 활용하여 계인 마진과 페이스 마진을 확인한다.

Yoon 등^[8]은 중하중을 받는 스틸과 알루미늄 합금의 FSW 작업에서 기존의 실험 기반의 시스템 전달함수 도출 및 페루프 제어기 개발 연구와 달리, FSW 축방향의 힘과 위치 상관관계를 수식화하여 축력의 변화에 따른 축방향 값의 보정을 통한 수직력 제어를 수행하는 연구를 하였다.

FSW의 힘 제어특징들은 FSW 작업 중 발생하는 축방향 힘을 입력으로 하고, 이에 비선형 전달함수를 통해 축방향 위치 값을 출력으로 하는 제어시스템을 구성하는 것을 볼 수 있다. 이때 비선형 전달함수는 실험을 통하여 상호 관계를 1차 혹은 2차 특성방정식으로 표현하는 특징을 가진다. 이러한 특징은 서로간의 동적 특성을 정확히 파악하기 어려운 로봇과 인간, 로봇과 로봇 등의 상호 접촉에 의한 협업관계를 갖는 시스템 간의 힘 제어인 어드미턴스 제어(admittance control)의 특징과 동일한 특징을 가짐을 알 수 있다^[9-11].

본 논문에서는 FSW 작업 공정의 힘 제어에 축력 입력에 대한 축방향의 위치 변화량을 출력으로 하는 어드미턴스 제어방법을 적용한다. 전달함수의 유도과정은 Jung 등^[9,10]의 유도과정을 참조한다. 공구와 공작물 사이의 원하는 임피던스(impedance)인 m, c, k 의 변수들을 결정함에 있어서는 P-제어를 통해 파악한 단위 힘 입력에 대한 위치 출력 값을 기반으로 Bode diagram의 정보를 기반으로 한다. 이렇게 구성한 어드미턴스 힘 제어기를 이용하여 FSW의 성능평가 실험을 수행하고 이를 통해 힘제어의 유용성과 가공품의 품질을 확인한다.

2. 실험 장비 및 힘제어 방법

2.1 실험장비 구성

실험장비는 3축 직교 FSW 및 절삭가공이 동시에 가능한 하이브리드 가공기인 화천기공의 F1300 모델에서 수행한다. 이 장비는 높은 강성과 0도 틸팅 각도를 가진 상용화된 FSW 장비이다. 장비 내부에 다양한 센서들을 내장하고 있지만, 보다 개선된 성능을 얻기 위하여 FSW 중 소재와 공구 사이의 힘, 온도, 혹은 가속도의 영향을 고려할 센서의 고려가 요구되고 있는 실정이다.

본 절에서는 하이브리드 가공기가 FSW작업 중 소재와 공구사이의 직접적인 영향을 고려하고, 사양을 파악하기 위한 실험을 위하여 Fig. 1과 같이 실험 지그를 구성한다. 구성은 3개 부분으로 나누어진다. 우선은 소재를 고정하고 FSW 중 발생하는 x, y, z 축에 대한 각 방향의 반력을 측정할 수 있는 힘 센서를 갖춘 지그 프레임부로서, 힘 센서(CAS, BSA-2)는 x, y축은 정격 1,000 kgf, z축은 정격 2,000 kgf가 되도록 구성한다. 다음은 FSW 작업 중 발생하는 진동 및 소재의 온도를 측정할 수 있는 센서들과 이들을 취합하는 센서모듈부로서, 온도 센서(Misumi, MFEP)는 -50~ 150°C까지 측정가능하며, 진동센서(Silicon Design, Model 2470)은 3축으로 ±10 g 측정 가능하다. DAQ(LabJack T7)는 USB Ethernet 형태로 14 analog inputs, 16-bit ADC이고, Force Sensor Regulator는 CAS사의 GTDL-350을 사용한다. 그리고 마

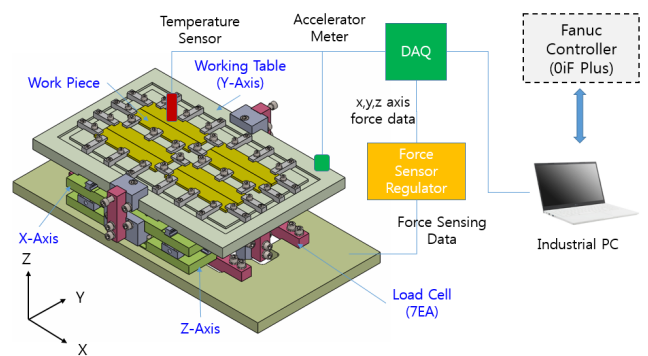


Fig. 1 Configuration of sensor system

Table 1 Specification of sensor system

		x-axis	1,000 kgf
JIG frame	Load cell	y-axis	1,000 kgf
		z-axis	2,000 kgf
		Temperature sensor	
Sensor module		Accelerometer sensor	±10 g
Force controller	Operating system		Linux
	Communication with F1300		Ethernet (20 Hz)
	Communication with JIG		RS-232C (20 Hz)

지막으로 힘 제어기 부는 산업용 PC(i5-6300U 2.4GHz)는 Ubuntu (20.04.5)를 운영체제로 한다. 이 힘 제어기는 센서 정보를 취합하고 분석하고 페루프 제어 알고리즘을 구현하고 그 결과를 실시간으로 하이브리드 가공기의 제어기인 FANUC 제어기 (Ver. 0iF plus)와 Ethernet 통신으로 20 Hz로 데이터를 교환하고, 이에 따라 각종 센서들도 20 Hz 내로 데이터를 읽도록 구성한다. 각 구성요소의 하드웨어 사양은 Table 1에 나타낸다.

FSW 가공 실험에 사용된 소재는 열처리가 없는 AL6061을 사용한다. 소재의 크기는 20×100×6 [mm] 이고, 두 개의 소재를 맞대어 용접 실험을 수행한다. AL6061은 전기차용 배터리 케이스 및 덮개 등에서 50% 이상 널리 사용되며, 반도체 웨이퍼 검사장비의 소재로도 사용되고 있다. 그 사용 두께는 3.5~6.0 mm이다.

축 방향의 힘은 플런지 깊이, 이송속도 및 공구 회전속도의 함수이다^[13]. 축 방향 힘은 마찰을 유발하고 이로 인한 열로 FSW를 수행하게 된다. 큰 공구 즉, 큰 숄더(shoulder) 및 긴 프루브(probe)는 큰 축력을 낼 수 있으나, 큰 토크와 이송 시 큰 저항력을 받는다. 반면 작은 공구 즉, 작은 숄더 및 짧은 프루브는 작은 축력을 낼 수 있으나, 작은 토크와 이송 시 작은 저항력을 가지는 서로 대조를 이루는 공구로써 Fig. 2와 같이 A형 및 B형 공구를 선택한다. A형 공구는 TiNiFe 합금 소재이고, B형 공구는 다이스 강 (Skd 61) 소재이다.

Fig. 3은 개발된 지그프레임이 하이브리드 가공기의 베드위에 설치된 형상이다. 본 논문에서는 힘 제어를 위하여 공구와 공작물 사이에 작용하는 축력만을 활용한다.

2.2 힘 제어

FSW 작업 중 공구와 소재와의 접촉 표면적을 일정하게 하여 소재 혹은 장비의 열변형에 의한 가공 오차를 줄이기 위하여 공구의 수직력의 힘을 제어하여 플런지 깊이(depth of plunging)를 최적화 하는 힘 제어 방법이 일반적으로 사용되고 있다.

현재 하이브리드 가공기는 Fig. 4와 같은 위치제어기로 운용되

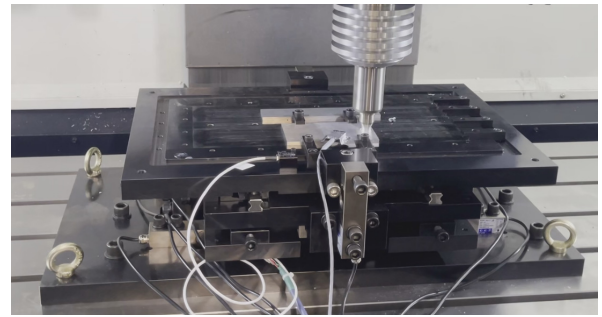


Fig. 3 Developed JIG frame and sensors

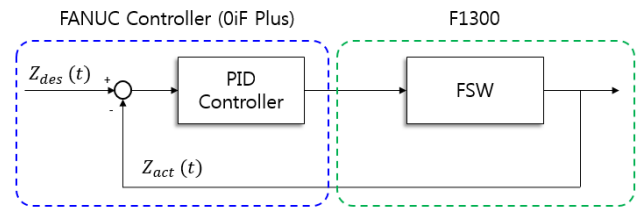


Fig. 4 Diagram of position controller of hybrid machine

고 있다. Fanuc 제어기를 적용하고 있으며, 내부적으로 8 msec의 주기로 작동되고 있다. 외부적으로 데이터를 주고 받기 위해서는 Fanuc사에서 제공하는 Focas Library를 사용하여 이더넷으로 50 msec (20 Hz)로 통신이 되도록 되어 있고, 내부적으로 고급언어를 사용한 사용자 프로그램의 개발이 매우 제한적이다. 본 절에서는 기존의 위치제어기를 유지하면서, FSW 작업 시 발생하는 힘을 측정할 수 있는 지그 프레임에 추가하는 힘 제어 알고리즘을 Fig. 5와 같이 개발한다. 본 절에 적용된 어드미턴스 제어 알고리즘의 유도과정은 Jung 등^[9,10]의 방법을 참고하여 유도한다.

힘과 위치의 관계를 mass-spring-damper의 모델, 즉 임피던스로 표현하였을 때 식 (1)과 같다.

$$F(t) = m\ddot{z}(t) + c\dot{z}(t) + kz(t) \quad (1)$$

여기서 m, c, k 는 임피던스 변수들이다. 힘 제어를 위해서는 힘

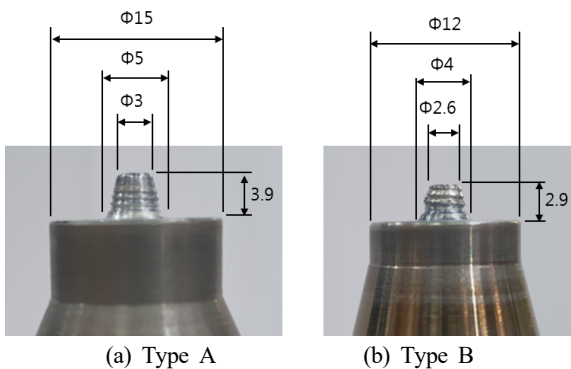


Fig. 2 Shape of the tool used (unit: mm)

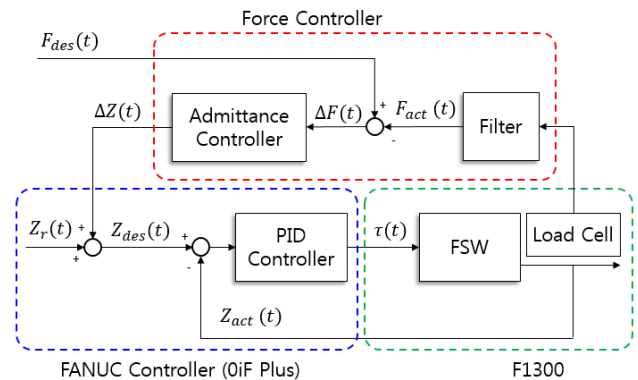


Fig. 5 Diagram of force controller of hybrid machine

(F)에 대한 축 방향 위치(z)의 전달함수가 필요하므로 식 (1)의 Laplace 변환은 다음과 같다. 식 (2)는 힘을 필터링하는 2차 필터의 기능을 갖는다.

$$z(s) = \frac{1}{ms^2 + cs + k} F(s) \quad (2)$$

식 (2)를 실제 제어기에서 구현하기 위해서 이산 식으로 근사화하여 정리하면 식 (3)을 얻게 된다.

$$F(n) = m \left(\frac{z[n] - 2z[n-1] + z[n-2]}{T_s^2} \right) + c \left(\frac{z[n] - z[n-1]}{T_s} \right) + kz[n] \quad (3)$$

여기서 T_s 는 샘플링시간이다. 식 (3)을 정리하면 다음과 같다.

$$x[n] = \frac{1}{k + \frac{c}{T_s} + \frac{m}{T_s^2}} F[n] + \frac{\frac{c}{T_s} + \frac{2m}{T_s^2}}{k + \frac{c}{T_s} + \frac{m}{T_s^2}} z[n-1] - \frac{\frac{m}{T_s^2}}{k + \frac{c}{T_s} + \frac{m}{T_s^2}} z[n-2] \quad (4)$$

여기서 $F[n]$ 은 $f - f_d$ 로 기준힘과 힘 센서에서 측정된 힘의 차이로 정의하고 $z[n]$ 은 기준 입력으로 넣어주는 z_r 과 더해져 새로운 경로 z_d 를 생성한다.

계수 m, c, k 는 공구와 공작물 사이에 작용하여 동적 특성이 원하는 형태가 되도록 선정한다. 계수의 범위는 $F[n]$ 이 일(unit) 때 특정 $z[n]$ 이 나오도록 실험을 통해 결정하고, 동적 특성의 안전도는 FSW 작업 중 발생된 진동과 공진을 피하거나 감소시키고 저주파 노이즈를 제거할 수 있는 범위에서 선택한다.

3. 결과 및 검토

힘 제어 성능을 분석하기 Fig. 5의 어드미턴스 힘 제어를 기반으로 실험을 수행한다. 힘 제어의 적용 구간을 파악하기 위하여 FSW 작업 시 발생하는 수직력의 형태를 파악하기 위한 실험을 수행한다. 실험 조건은 A형 공구를 사용하여 1400 rpm, 500 mm/min의 피드 조건에서 수행하였다. FSW는 큰 힘으로 압력을 생성하여 소재를 소성변형한 다음 단조를 수행하는 비선형 가공법^[4]으로 인해 매번 동일한 힘의 형태는 얻을 수 없으나, 전형적인 힘 형태는 Fig. 6과 같다. 녹색의 점선은 원하는 힘 궤적으로, 두 플런지(probe and shoulder plunge)가 끝난 후에 공구가 이동하고 일정한 시간이 지난 후부터 시작하여 공구가 목표위치까지 운동한 후 까지 제어를 수행한다.

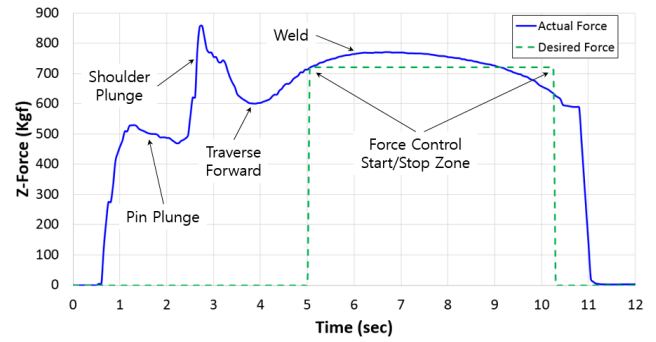


Fig. 6 Weld sample with no force control

FSW 작업 중 과도한 힘이 작용하거나 낮은 힘이 작용하면 온도 변화 등으로 인해, 조직 내부에 보이드(void), 터널(tunnel) 등이 과도하게 발생하고, 외관상으로도 플래쉬(flash), 공구에 의한 짓눌림(collapse) 현상이 과도하게 발생하여 품질을 떨어뜨리는 원인이 된다^[4]. 이러한 조직 내부의 문제는 힘 제어를 통해 극복하고, 외부의 문제는 후가공을 통해 제거한다. 이때 후가공 방법은 하이브리드 가공기 등을 활용하여 바로 절삭가공을 수행한다. 현장에서는 약 0.5 mm 이내의 깊이로 절삭하여 제거한다. 절삭가공 깊이는 제품마다, FSW 가공 상태 값에 따라 그 값을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 공구의 수직방향 변위량(ΔZ)이 0.2 mm 이내에서 제어한다.

어드미턴스 힘 제어를 위한 m, c, k 는 임피던스 변수의 선정은 $F[n]$ 이 단위 입력일 때, $z[n]$ 의 값이 특정한 변위 값이 나오도록 한다. 특정한 $z[n]$ 의 범위를 파악하기 위해, 힘의 오차 값 $F[n]$ 의 단위 입력인 1 kgf에 대한 위치 보정 값 Δz 인 $z[n]$ 의 값의 범위를 분석한다. 이를 위해 입력과 출력사이의 관계를 안정된 상태에서 관측하기 위해 어드미턴스 제어기 대신 P-제어를 수행한 결과를 토대로 분석한다. 실험 방법은 공구의 회전속도 1400 rpm, x-축 절삭을 위한 이송속도 500 mm/min, 사용된 공구는 Type A형이다. 이때 P-게인 값은 0.0001이다. P-제어 결과는 Fig. 7과 같으며, 1 kgf의 힘에 대해 약 0.0001 mm의 변화가 일어남을 확인한다. 이 결과 값에 대응되도록 결정한 임피던스 변수는 $m = 30$,

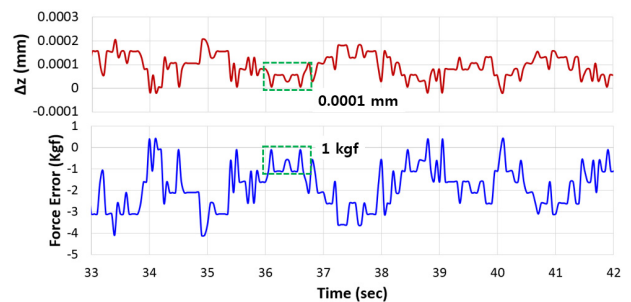


Fig. 7 Tool position compensation measurement for unit force input

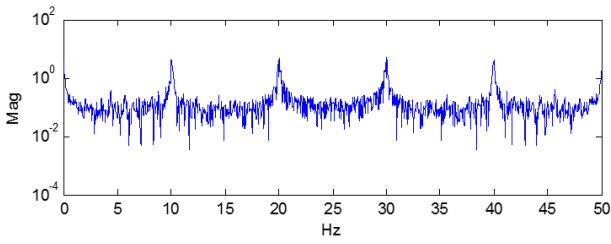


Fig. 8 Frequency analysis of the control region

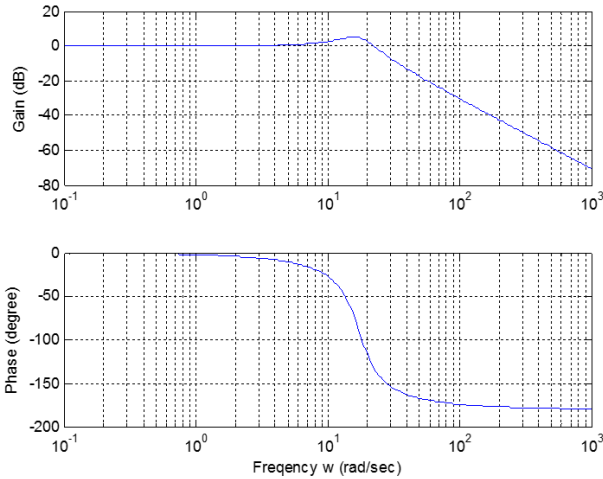


Fig. 9 Response characteristics of impedance controller

$c = 5$, $k = 10000$ 으로 결정한다.

결정된 변수가 FSW 작업 중 발생하는 진동에 안전한 특성을 보이는지 파악하기 위하여 제어부분의 진동 주파수 분석을 Fig. 8과 같이 수행하였다. 그 결과 11.05 Hz, 21.05 Hz, 30.95 Hz, 40.95 Hz에서 공진이 발생함을 확인하였다.

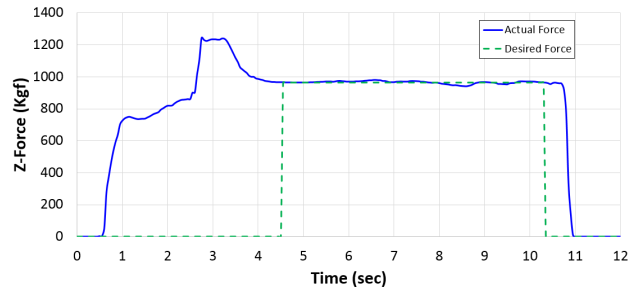
Fig. 9에서 phase margin은 22.36 Hz에서 48.195 dB이다. 특성상 phase 가 -180도가 되고, bandwidth를 지나게 되어 값이 대부분 잘려져 나가고 주로 영향을 주는 것은 11.05 Hz가 메인을 이룸을 알 수 있다. 이 개루프 형상의 전달함수 특성상 5 Hz 이하는 저역필터(low pass filter)의 기능을 하고, -3 dB이 시작되는 대역폭 이상인 15 Hz 이후의 주파수는 제어기의 기능이 감쇠되어 영향을 주지 않는 특징을 가진다^[12].

제안된 어드미턴스 제어 방법이 FSW 작업에 적용이 가능함을 파악하기 위하여 공구, 이송속도, 스핀들 회전속도 변화에 대한 제어 특성을 비교한다.

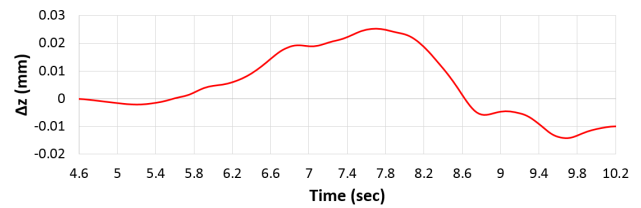
1) Case 1 : Type A, 500 mm/min, 1400 rpm

축력의 제어결과는 평균 힘의 오차량은 0.895 kgf 이며, 최대 오차는 8.45 sec 일 때 22.5 kgf 이다.

이때, 축 방향의 공구 위치 보상 값은 7.7 sec에서 최대 0.0253 mm 이다. 전체 축방향의 보상 값은 0.0383 mm이다. 이는 제어 목표인 0.2 mm의 19.15% 범위내로 후 가공이 충분히 가능한 안

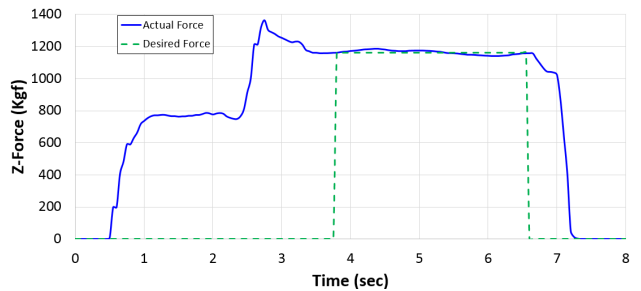


(a) Force control result of axial force

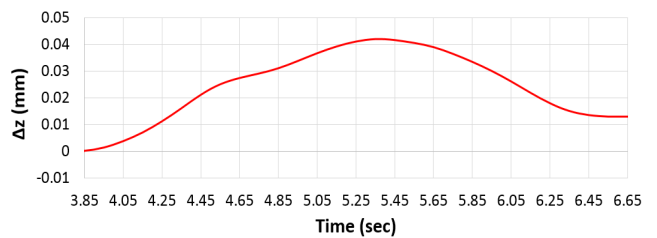


(b) Tool position compensation value in axial direction

Fig. 10 Results of force control experiment in Case 1



(a) Force control result of axial force



(b) Tool position compensation value in axial direction

Fig. 11 Results of force control experiment in Case 2

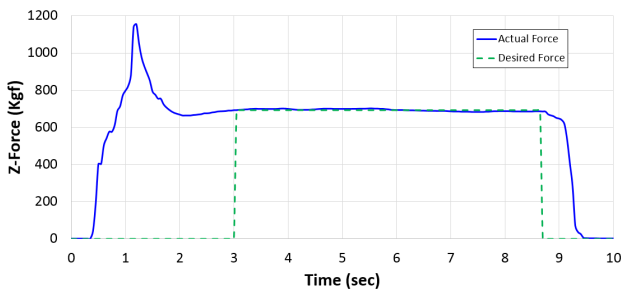
정된 제어상태이다.

2) Case 2 : Type A, 1000 mm/min, 1400 rpm

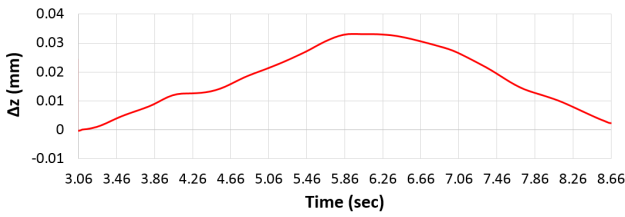
이 경우 축력의 제어결과는 평균 힘의 오차량은 2.39 kgf 이며, 최대 오차는 4.25 sec 일 때 21.5 kgf이다.

이때, 축 방향의 공구 위치 보상 값의 최대 값은 5.35 sec에서 0.042 mm 이다. 이는 제어 목표치의 20.0% 범위내로 후 가공이 가능한 안정된 제어상태이다.

3) Case 3 : Type B, 500 mm/min, 1400 rpm

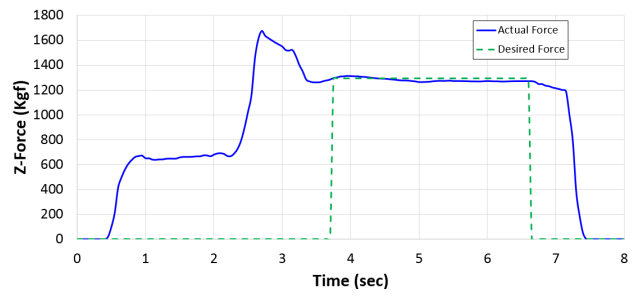


(a) Force control result of axial force

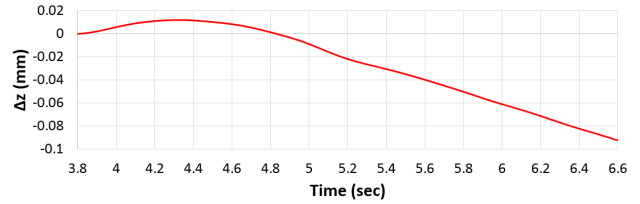


(b) Tool position compensation value in axial direction

Fig. 12 Results of force control experiment in Case 3

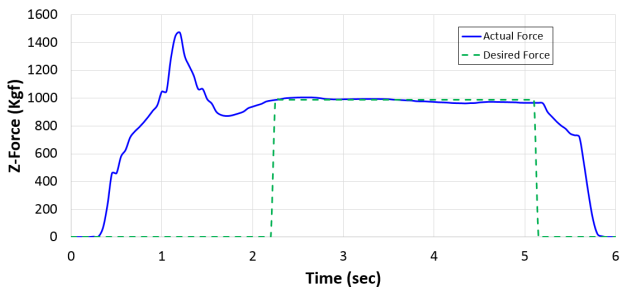


(a) Force control result of axial force

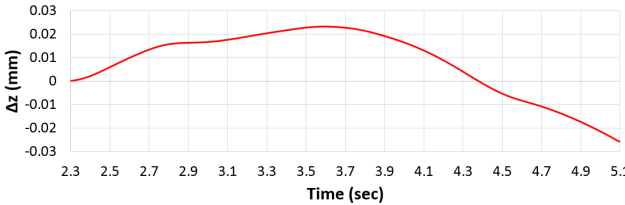


(b) Tool position compensation value in axial direction

Fig. 14 Results of force control experiment in Case 4

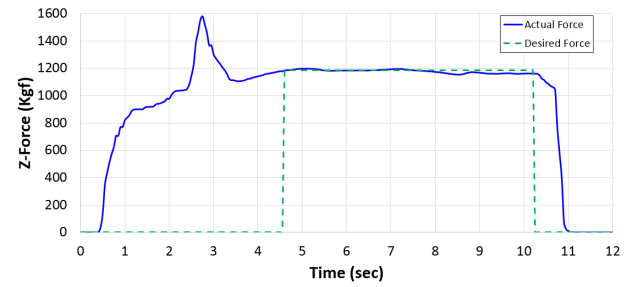


(a) Force control result of axial force

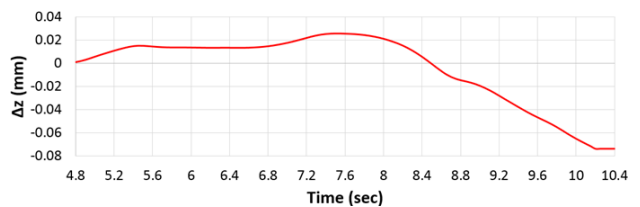


(b) Tool position compensation value in axial direction

Fig. 13 Results of force control experiment in Case 5



(a) Force control result of axial force



(b) Tool position compensation value in axial direction

Fig. 15 Results of force control experiment in Case 6

이 경우 축력의 제어결과는 평균 힘의 오차량은 0.208 kgf이며, 최대 오차는 7.4 sec 일 때 10.0 kgf이다.

이때, 축 방향의 공구 위치 보상 값의 최대 값은 5.9 sec에서 0.033 mm이다. 이는 제어목표치의 16.5% 이내의 수준에서 안정적인 제어가 이루어졌다.

4) Case 4 : Type B, 1000 mm/min, 1400 rpm

이 경우 축력의 제어결과는 평균 힘의 오차량은 4.43 kgf이며, 최대 오차는 4.35 sec 일 때 25.0 kgf 이다.

이때, 축 방향의 공구 위치 보상 값의 최대 값은 3.6 sec에서 0.023 mm이고, 시간이 지나면서 지속적으로 감소함을 알 수 있

다. 제어 중 전체 보상 값은 0.048 mm이다. 이는 제어목표치의 24.0% 이내의 수준에서 안정적인 제어가 이루어졌다.

5) Case 5 : Type A, 1000 mm/min, 1600 rpm

이 경우 축력의 제어결과는 평균 힘의 오차량은 16.15 kgf이며, 최대 오차는 5 sec일 때 32.5 kgf이다.

이때, 축 방향의 공구 위치 보상 값의 최대값은 6.6 sec에서 -0.09198 mm이고, 시간이 지남에 따라 점진적으로 하향 운동을 한다. 제어 중 전체 보상 값은 0.104 mm이다. 이는 제어목표치의 52.0% 이내의 수준에서 안정적인 제어가 이루어졌다.

6) Case 6 : Type A, 500 mm/min, 1000 rpm

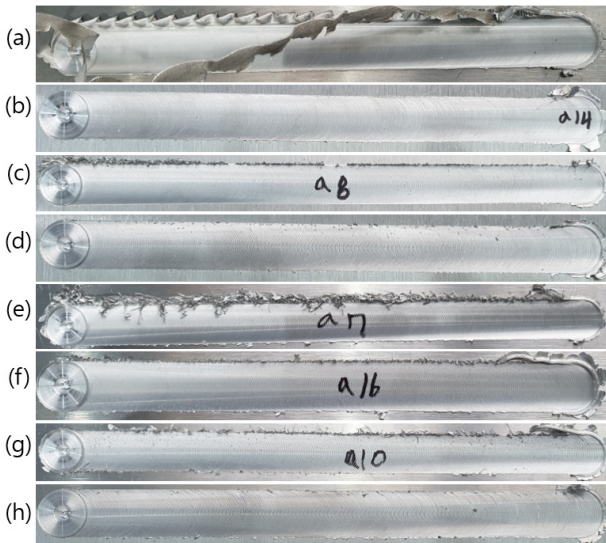


Fig. 16 FSW test result shapes in each case ((a): 1400 rpm, 500 mm/min, tool type A, w/o control, (b): Case 1, (c): Case 2, (d): Case 3, (e): 1600 rpm, 1000 mm/min, tool type B, w/o control, (f): Case 4, (g): Case 5, (h): Case 6)

이 경우 축력의 제어결과는 평균 힘의 오차량은 30.5 kgf이며, 최대 오차는 8.5 sec 일 때 6.59 kgf이다.

이때, 축 방향의 공구 위치 보상값의 최대 값은 10.1 sec에서 -0.0694 mm 이고, 시간이 지남에 따라 점진적으로 하향 운동을 한다. 제어 중 전체 보상 값은 0.095 mm 로 안정적인 범위 내에서 보상이 이루어진다. 이는 제어목표치의 47.5% 이내의 수준에서 안정적인 제어가 이루어졌다.

FSW 실험 결과 외형 형상은 Fig. 16과 같다. 제어를 하지 않는 경우인 (a)와 (e)의 경우에는 상대적으로 플래시가 많이 발생함을 알 수 있다. 이는 처음 플런지하는 깊이 조절이 작업자의 숙련도에 따라 다르기 때문인 것으로 판단된다. 상대적으로 나머지 공작물의 형상은 처음에는 플런지가 어느 정도 있으나 힘 제어를 수행하는 동안 플래시가 줄어들거나 사라지는 현상을 보였다. 이 외부에서 발생된 플래시는 후가공인 절삭가공을 통하여 모두 제거할 예정이다. 이때 절삭가공의 깊이는 0.2 mm이다.

FSW를 수행한 소재의 내부 상태를 파악하기 위하여, Fig. 16의 소재 중 제어를 하지 않은 결과인 소재 (a)와 (e) 그리고 제어를 수행한 결과인 소재 (b)와 (f)에 대하여 산업용 디지털 카메라 (industrial digital camera, Nikon DS600)을 사용하여 검사를 수행하였다. 그 결과는 Fig. 17과 같다.

Fig. 17(a)의 경우, 0.35×0.135 mm 크기 규모의 보이드가 다수 생성되었으며, Fig. 17(b)의 경우, 0.178×0.354 mm 크기 규모의 보이드가 다수 생성되었음을 확인하였다. Fig. 17(c)의 경우, 보이드의 크기가 상대적으로 작을 뿐만 아니라 발생빈도가 낮음을 알

수 있다. 그리고 Fig. 17(d)의 경우에는 Fig. 17(c)보다 더 안정적인 내부 구조임을 알 수 있다. 사진에서 나오는 전체적인 세로 선들은 연삭을 위한 절삭 시 발생한 선들로 파악된다. 내부 보이드 크기는 힘 제어를 통해 그 크기가 약 0.1배 ~ 약 0.03배의 크기로 줄어들음을 알 수 있다. 또한, 발생빈도 역시 적어 전체적으로 깨끗한 면이 생성되었음을 알 수 있다. 이는 일관된 축 방향의 힘 제어를 통해 우수한 품질의 내부 미세 구조를 생성하였기 때문으로 판단된다^[14].

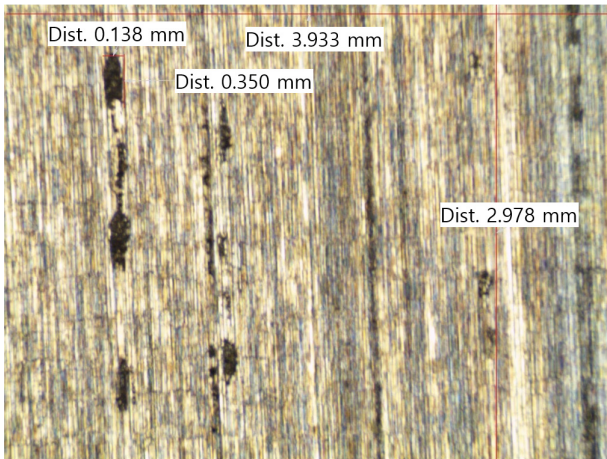
4. 결론

본 논문에서 FSW시 공구와 공작물 사이의 안정적인 축력을 유지하기 위한 어드미턴스 힘 제어를 수행하였다. 힘의 측정, 힘 제어 알고리즘 구현 및 F1300 제어기와의 통신을 위한 하드웨어 시스템을 구성하였다. 제안된 힘 제어 알고리즘 및 시스템의 유용성을 검증하기 상용 하이브리드 가공기 F1300를 이용하여 다양한 조건에서 실험 검증을 수행하였다.

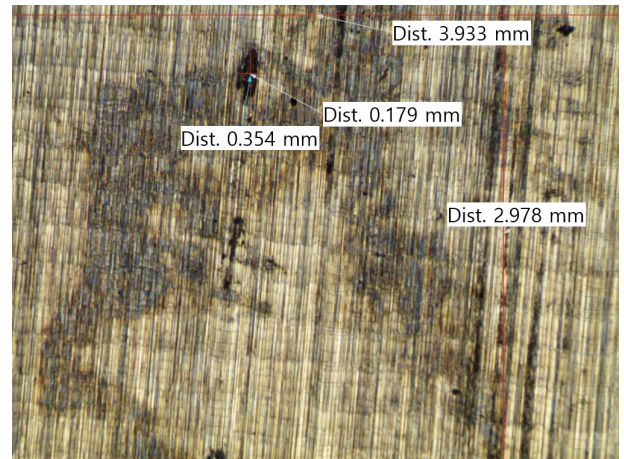
힘 제어알고리즘은 어드미턴스 제어기를 적용하였으며, 공구와 공작물 사이의 동특성이 안정된 특성을 나타내는 범위에서 임피던스 계수인 m, c, k 를 선정하기 위해, FSW 작업 중 발생하는 공진 주파수를 파악하고 이를 감쇠, 둔화, 혹은 필터링 할 수 있는 범위를 Bode diagram을 통해 파악하였다. 선정된 임피던스 계수는 $m = 30, c = 5, k = 10000$ 이다.

힘 제어기의 FSW 작업에 적용 가능성을 파악하기 위하여 공구 형태, 이송속도, 스핀들 회전속도 변화에 대한 6가지 변수에 대해 FSW 실험을 수행하였다. 그 결과, 축력의 민감도가 최대 32.5 kgf (Case 5)를 가지고 있지만, 축 방향의 공구 위치 보상 값이 상대적으로 이송속도가 낮은 Case 1에서 Case 3의 경우는 0.042 mm이며, 제어 목표치인 0.2 mm의 20.0% 범위 내로 후가공이 충분한 범위이다. 상대적으로 이송속도가 큰 Case 4에서 Case 6에서는 최대 0.104 mm의 보상 값을 가지며, 제어목표치의 52.0%까지 올라가지만 후가공이 충분한 범위이다.

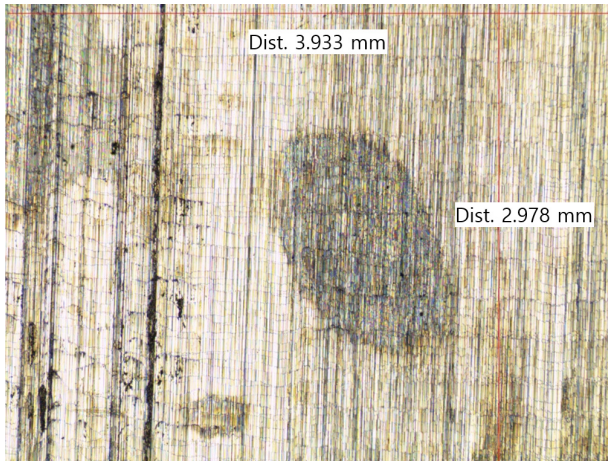
실험 결과 외형을 살펴보면, 힘 제어를 하지 않은 경우에는 작업자의 숙련도에 따라 플래시가 많이 발생하나, 힘 제어를 수행한 경우에는 플래시가 비교적 적게 나옴을 알 수 있었다. 이는 FSW 작업 중 발생하는 최대 힘을 받기 전에 목표 힘(desired force) 값으로 선정하여 작업하였기 때문으로 판단된다. 또한 소재의 내부 상태를 점검 한 결과, 힘 제어를 수행 한 경우에 보이드 크기가 약 0.1배 ~ 약 0.03배 크기로 줄어들 뿐만 아니라, 발생빈도도 현저히 떨어져 전체적으로 깨끗한 영상을 확인할 수 있다. 이는 일관된 축 방향의 힘 제어를 통해 우수한 품질의 내부 미세 구조를 생성하였기 때문으로 판단된다.



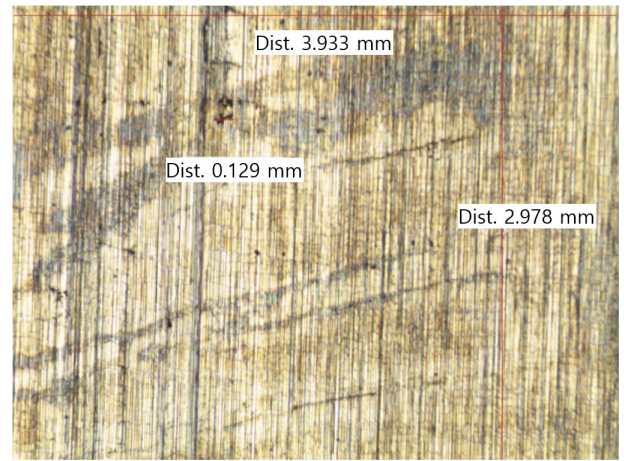
(a) 1400 rpm, 500 mm/min, tool type A, w/o control
(size of void : about 0.0483 mm²)



(b) 1600 rpm, 1000 mm/min, tool type B, w/o control
(size of void : about 0.0634 mm²)



(c) Case 1 (size of void : about 0.0042 mm²)



(d) Case 4 (size of void : about 0.0013 mm²)

Fig. 17 Shape of the cutting surface of material

후 기

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

References

- [1] Kim, Y.-P., Kim, C.-H., Kim, Y.-G., Joo, S.-M., 1992, Trends of Technology Development of Friction Stir Welding Machine, *Journal of Welding and Joining*, 34:3 1-5, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2016.34.3.1>.
- [2] Kim, Y., Park, Y.-D., 2022, Joining Technologies and Solutions for Aluminum-based Battery Case Manufacturing, *Journal of Welding and Joining*, 40:1 54-73, <https://doi.org/10.5781/JWJ.2022.40.1.7>.
- [3] 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, <<http://dcollection.gnu.ac.kr/common/orgView/000000029700>>.
- [4] Longhurst, W. R., 2009, Force Control of Friction Stir Welding, Doctorate Thesis, Vanderbilt University, U.S.A..
- [5] Longhurst, W. R., Strauss, A. M., Cook, G. E., 2011, The Identification of the Key Enablers for Force Control of Robotic Friction Stir Welding, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 133:3 31008-31019, <https://doi.org/10.1115/1.4004132>.
- [6] Backer, J. D., 2021, Feedback Control of Robotic Friction Stir Welding, Doctorate Thesis, University West, Sweden.
- [7] Zhao, X., Kalya, P., Landers, R. G., Krishnamurthy, K., 2008, Design and Implementation of Nonlinear Force Controllers for Friction Stir Welding Processes, *J. Manuf. Sci. Eng.*, 130:6

061011, <https://doi.org/10.1115/1.3006326>.

- [8] Yoon, J., Kim, C., Rhee, S., 2018, Compensation of Vertical Position Error Using a Force-Deflection Model in Friction Stir Spot Welding, *Metals*, 8:12 1049, <https://doi.org/10.3390/met8121049>.
- [9] Oh, M. S., Seo, J. H., Jung, S., 2016, Implementation of Position and Force Control by Modelling of a Miniatured Excavator, *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, 22:12 1034-1039, <https://doi.org/10.5302/J.ICROS.2016.16.0081>.
- [10] Jung, S., Jeong, D.-J., 2021, Admittance Force Tracking Control Schemes for Robot Manipulators under Environment and Dynamics, *Int. J. Control Autom. Syst.*, 19:11 3753-3763, <https://doi.org/10.1007/s12555-020-0959-7>.
- [11] Kim, H., Park, H., Yang, W., 2021, Variable Admittance Control Strategy for the Control Stability of Power Assist Robot according to Load Weight, *J. Korea Soc. Precis. Eng.*, 38:3 177-185, <https://doi.org/10.7736/JKSPE.020.090>.
- [12] Dorf, R. C., Bishop, R. H., 2008, *Modern Control Systems*, 11th edition, Prentice Hall, U.S.A..
- [13] Longhurst, W. R., Strauss, A. M., Cook, G. E., Cox, C. D., Hendricks, C. E., Gibson, B. T., Dawant, Y. S., 2010, Investigation of Force-controlled Friction Stir Welding for Manufacturing and Automation, *Proc. IMechE, Part B: J. Engineering Manufacture*, 224:6 937-949, <https://doi.org/10.1243/09544054JEM1709>.
- [14] Busu, N., Jaffarullah, M. S., Low, C. Y., Shaari, M. S. B., Armansyah, Jaffar, A., 2015, A Review of Force Control Techniques in Friction Stir Process, *Procedia Computer Science*, 76 528-533, <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.12.331>.



In-Gyu Park

Chief Researcher in Smart Mobility R&D Division of KIRO.

His research interest is Robotics.

E-mail: igpark@kiro.re.kr



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



Jungwoo Lee

Chief Researcher in Smart Mobility R&D Division of KIRO.

His main research topics include Deep Machine Learning and Software Engineering.

E-mail: ricow@kiro.re.kr



Jongdeuk Lee

Senior Researcher in Smart Mobility R&D Division of KIRO.

His research interest is Robotics.

E-mail: artofgene@kiro.re.kr



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