Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers 27:3 (2018) 175~181

https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.175

J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.
ISSN 2508-5107(Online)

6축 로봇을 활용한 탄소 섬유 강화 플라스틱(CFRP) 소재의 드릴링 가공 분석 및 실시간 경로 제어

조재훈[a], 이진호[a], 신강우[a], 김태곤[a], 김효영[a], 이석우[a*]

6-Axis Robotic Carbon Fiber Reinforced Plastic Drilling Process Using Real-Time Path Control

Jae-Hoon Jo[a], Jin-Ho Lee[a], Kang-Woo Shin[a], Tae-Gon Kim[a], Hyo-Young Kim[a], Seok-Woo Lee[a*]

[a] *Korea Institute of Industrial Technology,*
89, Yangdaegiro-gil, Ipjang-myeon, Seobuk-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31056, Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	11	April	2018
Revised	18	May	2018
Accepted	30	May	2018

Keywords:
Carbon fiber reinforced plastic (CFRP)
6-Axis robot
Drilling
Manipulator
Force control

ABSTRACT

Carbon fiber reinforced plastic (CFRP) has high strength and light weight. Thus, it has the advantage of improving fuel efficiency. Because of its strength compared to weight, this material is used to manufacture large parts such as aircraft parts. In this paper, we study CFRP drilling and how to improve the machining accuracy of robotic drilling without an additional driving system in the robot's end-effector. Robotic drilling hole defects cause drilling force and error displacement at the end-effector. To address this problem, the authors apply real-time calibration on the drilling path based on drilling force signals from the dynamometer. As a result, it has been confirmed that real-time path control is effective for improving robotic drilling hole quality in CFRP specimens compared to drilling without real-time path control.

1. 서 론

최근 항공기 등의 부품 제작 시 강성을 유지하며 경량화를 통해 연비 향상에 대한 방안이 제안되고 있다. 그 방안으로 CFRP(탄소 섬유 강화 플라스틱 : Carbon Fiber Reinforced Plastic)과 같은 소재를 활용한 부품 제작이 각광받고 있는 추세이다[1-3].

이러한 항공 부품들은 일반적으로 크기가 크다. 따라서 가공물과 비슷하거나 더 작은 부품을 가공하는데 사용하는 CNC 등의 일반 가공기계를 활용하는 데 제약이 있다.

반면 다축 로봇을 활용한 가공 공정은 가공 부품 크기에 대한 제약이 적어 크기가 큰 항공 부품 등의 가공에 유리하다. 또한 공정 변경 시 가공 도구의 교체도 용이하기에 공정의 유연성도 높다.

그러나 다축 로봇 구조 상 다수의 구동기가 직렬로 연결되어 로봇 끝단부(End-Effector)의 움직임을 구현하기에 구동 중 강성이 낮아 가공 정밀도가 낮은 단점이 있다. 따라서 밀링 및 드릴링 등의 가공 부하가 큰 공정들을 진행할 때 다축 로봇을 활용할 경우, 가공 정밀도가 떨어져 가공 대상물의 품질이 저하된다. 때문에 로봇을 활용한 공정은 부하가 거의 없는 용접 및 pick&place 등의 공정에 많이 활용되며, 정밀도가 필요한 공정에 로봇을 활용할 시 Fig.1과 같은 방식으로 로봇 끝단부 추가 구동 시스템을 장착하여 가공 공정을 수행한다[4,5]. 이는 로봇이 정지 상태 시 강성이 비교적 높다은 특성을 활용한 공정이며, 로봇 끝단부의 구동 시스템을 특정 위

* Corresponding author. Tel.: +82-51-309-7401
Fax: +82-51-309-7510
E-mail address: swlee@kitech.re.kr (Seok Woo Lee).

치의 가공물 근처로 이동한 뒤 구동 시스템을 활용하여 드릴링, 밀링 등의 공정을 진행한다.

그러나 이는 특정 공정에 특화된 추가 구동 시스템을 로봇 끝단부에 부착하는 방식이다. 따라서 다양한 공정을 위한 기구 교체에 제약을 받기 마련이라 공정 유연성이 크다는 로봇 공정의 장점이 감소되는 것을 감수해야 한다.

본 논문에서는 이러한 로봇 가공의 단점을 보완하기 위해, 로봇 끝단부에 추가 구동 시스템 없이 로봇 가공 정밀도 향상 방안에 대한 연구를 진행하였으며 CFRP 가공 시 품질 향상 정도를 확인하였다. 이를 통해 추가 구동기 없이 로봇에 부하가 높은 가공을 적용할 수 있어 다양한 공정에 대한 유연성 확보를 기대할 수 있다. 더불어 로봇 정밀도 향상을 위한 추가 구동 시스템의 구성을 생략할 수 있다. 이는 시스템 구성이 단순해지기에 비용 절감 효과도 기대할 수 있을 것이다.

2. 로봇 CNC 드릴링 가공 비교

2.1 실험 목적

로봇의 드릴링은 가공 대상물의 크기에 제약을 적게 받으며 공정 유연성이 뛰어나다는 장점이 있다. 하지만 현재 널리 사용되는 CNC를 활용한 가공에 비해 가공 정밀도와 품질이 떨어지기에 활용이 어렵다. 따라서 이번 실험을 통해 로봇과 CNC의 드릴링 가공 결과를 비교하여 가공된 시편의 품질 차이를 확인하였다.

추가로 가공 결함의 원인 탐색을 위해 가공 중 부하의 추세를 확인하였으며, 로봇 가공 시 끝단부의 거동을 확인하기 위해 레이저 트래커를 활용한 로봇 끝단부 위치 변위를 확인하였다.

2.2 실험 환경

로봇의 드릴링 공정을 위해 Fig. 2의 사진과 같은 Staubli사의 TX200 모델의 로봇을 활용하였다. 로봇 끝단부에는 Fig. 3에 보이는 HSD사의 Spindle인 ES327를 부착하여 드릴링을 실시하였다.

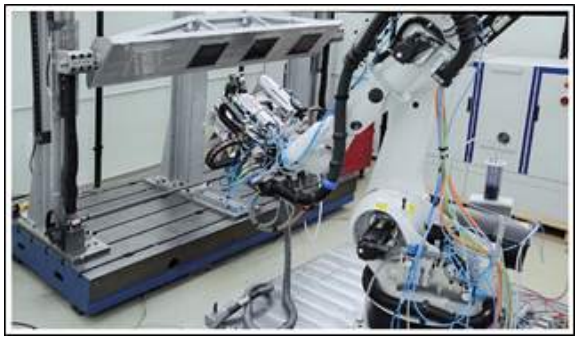


Fig. 1 Applying normal adjustment cell for improving robot drilling accuracy[4]

또한 가공 품질 비교를 위한 CNC 드릴링은 Fig. 4의 사진처럼 CSCAM 사의 M6430T14-A3을 활용하였다.

Fig. 2 6-Axis robot : TX200 (Staubli)

Fig. 3 Drilling spindle of robot : ES327 (HSD)

Fig. 4 Machining center : M6430T14-A3 (CSCAM)

Fig. 5 Dynamometer & amp : Type9272, 5070A (Kistler)

두 가공 환경에서의 가공부하 모니터링을 위해 Fig. 5의 사진에 보이는 Kistler 사 Type9272의 공구동력계(Dynamometer)를 시편 고정 지그 하단에 배치하였다. 공구동력계 신호는 Kistler 사의 Type5070의 앰프로 신호를 받아 확인하였다.

가공 조건은 6000 rpm, 0.05 mm/rev, 공구는 Kennametal 사의 K531A인 CFRP 전용 가공 공구로 드릴링 가공을 실시하였다. 이후 드릴링 후 가공 부하와 홀 가공된 시편의 품질을 비교하였다. 가공 시편 소재는 항공용 CFRP 소재로, 최상단은 woven 층으로 되어 있으며 최상단층 아래 [135° - 90° - 135° - 0° - 45° - 90° - 45° - 0° - 0° - 45° - 135° - 90° – 135°] 구조로 적층되어있다. 추가 상세 사양은 Table 1과 같다.

2.3 드릴링 시편 결과 분석

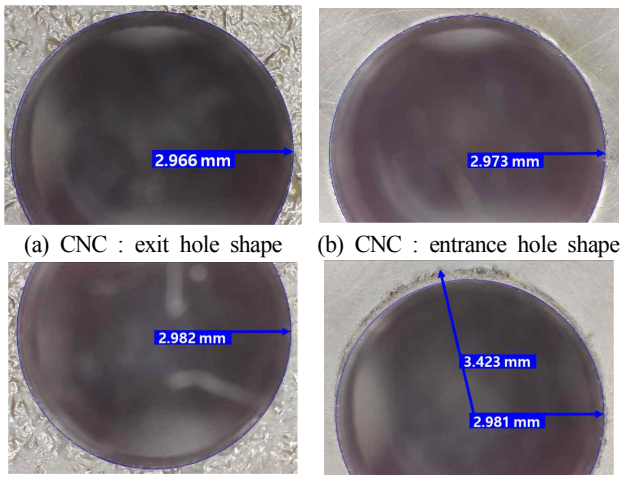
CNC와 로봇을 활용한 CFRP 시편의 가공 결과를 홀 입구, 출구 형상의 박리 지수로 비교하였다. 가공 홀 형상은 Fig. 6과 같이 나타났으며 두 공정 모두 출구 박리 및 형상은 큰 차이가 없었다. 하지만 입구 가공부에서 CNC에 비해 로봇 가공에서 결함이 일정 방향으로 0.5 mm 가량 더 크게 생성된 것을 확인하였다.

2.4 CNC와 로봇 드릴링 가공 부하 비교

CNC 가공보다 크게 발생하는 로봇 가공의 홀 결함 원인 분석을 위해 공구동력계의 신호를 확인하였다. 공구동력계의 힘 측정 방향 좌표계는 Fig. 7과 같다. 또한 공구동력계는 로봇, CNC 모두 시편 고정 지그 하단부에 배치하여 가공 부하를 측정하였다.

Table 1 Work-piece specification

Polymer Matrix	Carbon Fiber	Thickness	Manufacturing
Epoxy	T1000	5.7 mm	Auto-clave



(a) CNC : exit hole shape (b) CNC : entrance hole shape

(c) Robot : exit hole shape (d) Robot : entrance hole shape

Fig. 6 Comparing of CNC & robot drilling hole about CFRP

CNC와 로봇을 활용한 드릴링 가공 부하는 각각 Fig. 8, 9와 같이 도출되었다. 드릴링 가공 중 각 축별 부하 수치 범위는 Table 2와 같이 나타낼 수 있다.

CNC와 로봇 드릴링 모두 Z축 방향 부하는 비슷한 수치를 보여준다. 하지만 X,Y 방향의 가공 부하 비교 시, CNC의 가공 부하는 영점 기준으로 좌우 대칭의 양상을 보이는 반면 로봇 드릴링 가공 부하는 특정 방향으로 편향되는 경향을 보이는 것을 확인하였다.

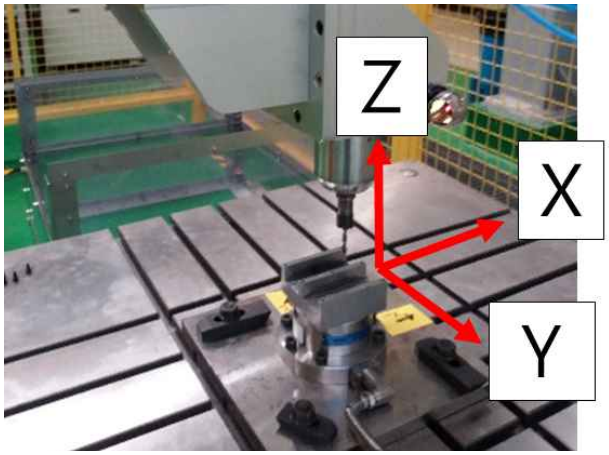


Fig. 7 Dynamometer setup for measuring drilling force

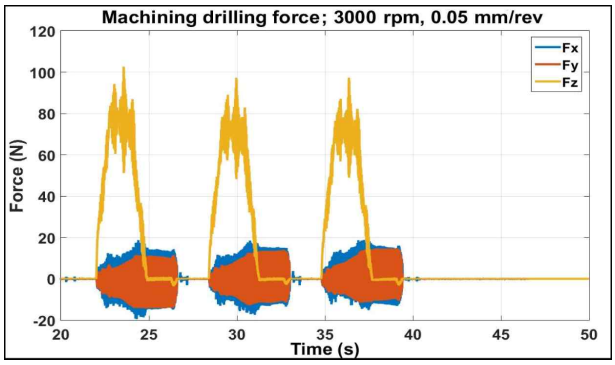


Fig. 8 Measuring drilling force graph of CNC

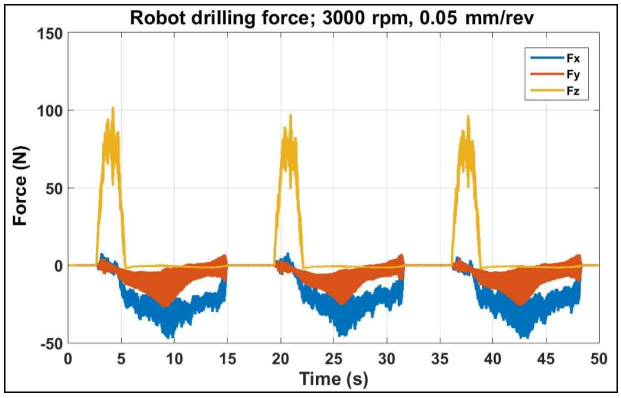


Fig. 9 Measuring drilling force graph of 6-axis robot

Table 2 Drilling force of CNC & robot

Force Direction	Maximum Force (N)	Minimum Force (N)
X Axis CNC	19.6	-19.4
Y Axis CNC	13.2	-14.6
Z Axis CNC	102.3	49.8
X Axis Robot	8.4	-43.6
Y Axis Robot	8.7	-27.5
Z Axis Robot	101.9	48.7

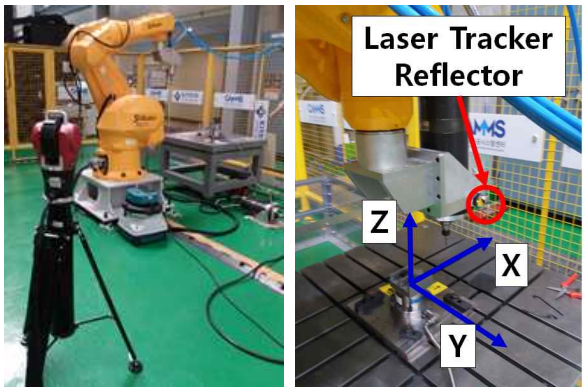


Fig. 10 Robot & laser tracker experimental setup

Table 3 Specification of laser tracker (Radian)

Measurement Range (Linear)	100 m
System Resolution	0.1 um
System Angular Accuracy	3.5 um/m

3. 로봇 가공 오차 원인 분석

3.1 로봇 드릴링 모션 측정

로봇 드릴링 시 발생하는 가공 부하의 편향 현상의 원인은 가공 시편 입구 가공부 결함 원인과 동일한 것으로 예상된다. 세부 원인 분석을 위해 드릴링 중 가공 부하 편향 현상이 발생하였을 때 로봇 끝단부의 변위를 레이저 트래커로 측정하였다.

실험을 위한 레이저 트래커의 배치 및 레이저 트래커 측정 위치는 Fig. 10과 같이 배치하였다. 레이저 트래커는 Radian 사의 API Laser Tracker를 사용하였으며, 상세 사양은 표 3과 같다. 드릴링 가공 부하가 있을 경우의 레이저 트래커 측정 가공 조건은 rpm을 3000, 6000, 9000 rpm으로, feed는 0.01, 0.05, 0.1 mm/rev 으로 가공 조건을 변경하며 각각에 대한 모션을 측정 하였다. 이후 가공 부하가 없는 모션을 측정하였으며, 각 부하 조건별 로봇 끝단부 모션이 무 부하 모션에 비해 변위가 얼마나 발생하는지 경로 비교하여 그래프를 Fig. 11, Fig. 12와 같이 나타내었다.

CFRP 시편의 3회 드릴링 동안의 레이저 트래커 변위 데이터는 Fig. 11과 같은 거동을 보인다. 이 중, 첫 번째 홀 가공이 진행되는

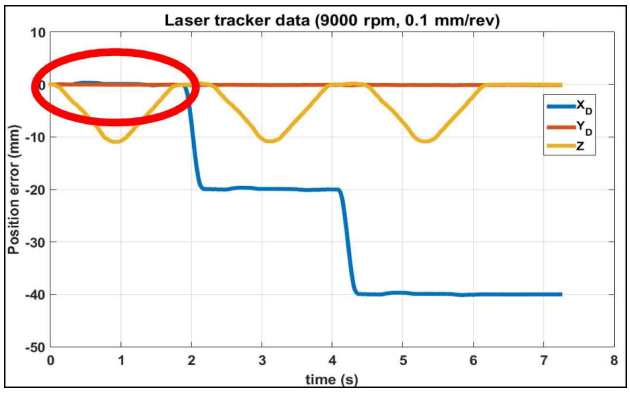


Fig. 11 Displacement of robot end effector during CFRP drilling

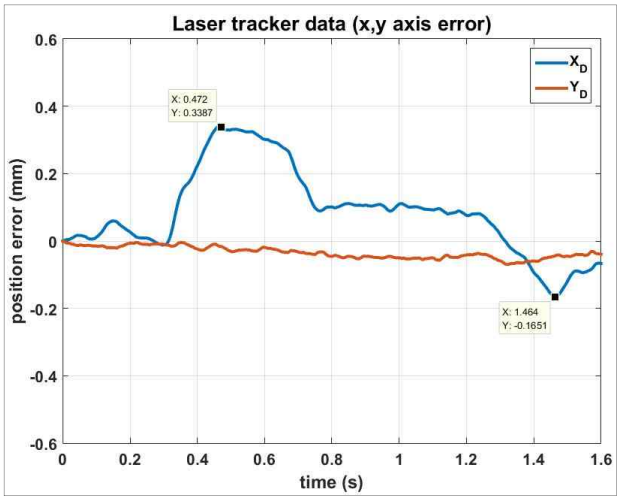


Fig. 12 Displacement of robot end effector during CFRP drilling about 1st hole processing

중의 로봇 끝단부 변위 발생 현황(붉은색 원 내부)을 확대했을 때 Fig. 12와 같은 그래프의 경향을 볼 수 있다.

드릴링 중의 로봇 끝단부 X, Y축 방향 변위를 확인해보면 영점 기준으로 X축 방향 변위가 0.339 mm에서 -0.165 mm 까지 최대 0.6 mm 차이의 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. Y축의 변위도 발생하지만 X축의 발생 변위에 비해 미미한 수준의 변위가 발생한다. 실험의 가공 조건별 X축 방향으로 발생하는 최대 변위를 정리해보면 Table 4와 같이 정리할 수 있다.

이 실험을 통해 드릴링 가공 시작과 동시에 발생하는 가공 부하로 인해 X축 방향 변위가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 각 가공 조건별로 생성되는 X방향 가공 부하 최대값을 정리하면 Table 5와 같이 정리할 수 있다. 그리고 이러한 결과를 Table 4에서 도출한 최대 위치 오차와 연계하여 가공 부하-위치 오차 간 비를 도출하면 Table 6과 같은 결과를 얻을 수 있다.

각 조건별 X축 방향 로봇 끝단부 강성 값이 25~30 um/N 의 범위 내에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 가공 조건에 따라 편차가 존재하는 이유는 최대 변위와 최대 부하를 기준으로 진행하였기에

Table 4 Maximum X-axis error displacement of end effector by drilling condition

RPM \ Feed	0.01 mm/rev	0.05 mm/rev	0.1 mm/rev
3000	0.078 mm	0.094 mm	0.102 mm
6000	0.101 mm	0.234 mm	0.283 mm
9000	0.114 mm	0.188 mm	0.339 mm

Table 5 Maximum X-axis drilling force by drilling condition

RPM \ Feed	0.01 mm/rev	0.05 mm/rev	0.1 mm/rev
3000	-31.81 N	-38.09 N	-42.02 N
6000	-34.32 N	-81.90 N	-91.88 N
9000	-39.08 N	-85.30 N	-113.46 N

Table 6. X-axis stiffness of end effector by drilling condition

RPM \ Feed	0.01 mm/rev	0.05 mm/rev	0.1 mm/rev
3000	24.52 um/N	24.68 um/N	24.27 um/N
6000	29.43 um/N	28.57 um/N	30.80 um/N
9000	29.17 um/N	22.04 um/N	29.88 um/N

편차가 존재하는 것으로 예상된다. 로봇 끝단부의 위치에 따라 강성 수치가 달라지지만[6] 본 실험에서의 가공 영역은 100 mm × 100 mm × 100 mm 의 공간으로 로봇 전체의 워크 스페이스 영역에 비해 매우 작은 영역 내에서 가공이 진행된다. 따라서 위치 변화에 따른 강성 변화는 고려하지 않는다.

해당 실험 데이터를 바탕으로 알고리즘에 적용할 이득(Gain)값을 25~30 um/N 범위 내에서 반복 실험을 통해 도출하였다. 그 결과 최적 강성 수치인 25 um/N 을 도출하여 이를 경로 알고리즘에 적용하였다.

4. 가공 품질 향상을 위한 알고리즘 적용

앞서 진행한 실험을 통해 가공 결함은 드릴링 시 생성되는 가공 부하가 원인이 되어 로봇 끝단부의 위치 변위가 발생시키는 것을 확인할 수 있었다. 그리고 발생한 변위로 인해 CFRP 시편의 홀 가공 결함으로 도출되는 것을 확인하였다. 이에 대한 해결 방안으로 '가공 부하 기반의 실시간 로봇 경로 보정 알고리즘(이하 경로 보정 알고리즘)'을 적용한다. 이를 적용하기 위한 실험 세트는 Fig. 13과 같이 구성하였다.

경로 보정 알고리즘의 기반인, 가공 경로의 실시간 제어를 위해 Staubli 사에서 제공하는 Alter 프로그램을 활용하였다. Alter 프로그램은 로봇 외부의 신호를 로봇 내 신호로 수신하여 이를 로봇

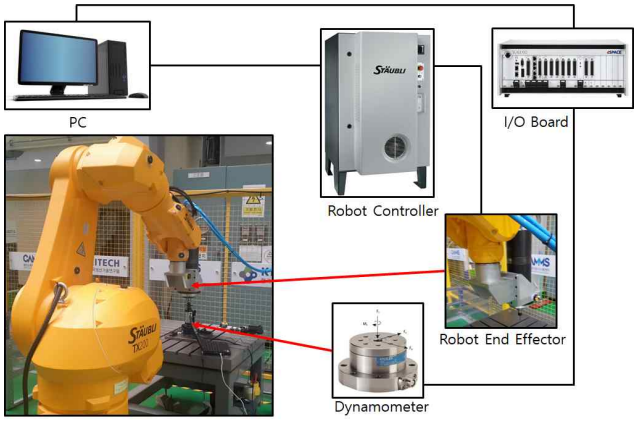


Fig. 13 System setup of robot drilling real-time path control

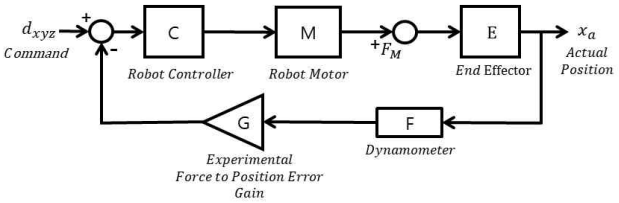


Fig. 14 Block diagram of robot drilling real-time path control

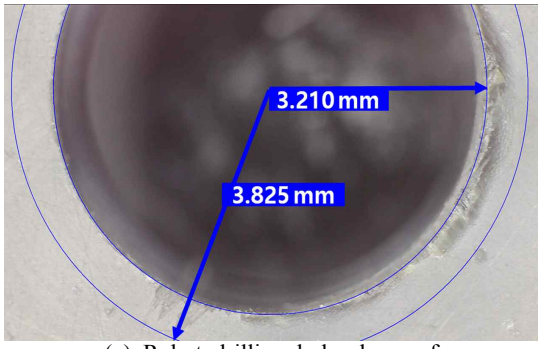
경로에 실시간으로 반영하는 프로그램이다. 이를 활용해 공구동력계의 가공 부하 신호를 로봇 내 프로그램의 I/O로 받아 로봇 가공 경로를 실시간 수정 및 반영한다.

가공 부하를 로봇 경로에 적용하기 위해 실험에서 도출된 최적 강성 값인 25 um/N을 이득값으로 적용한다. 지정된 이득값은 공구동력계에서 출력하는 부하 신호를 변위로 변환하여 로봇 경로 보정에 실시간 반영하는 데 사용한다. 공구동력계의 부하 신호를 입력 신호로 변환하여 사용하기 위해 I/O Board로 dSPACE 사의 Scalexio를 활용하였다. 경로 보정 알고리즘이 적용된 로봇의 제어 블록 다이어그램은 Fig. 14와 같이 나타낼 수 있다.

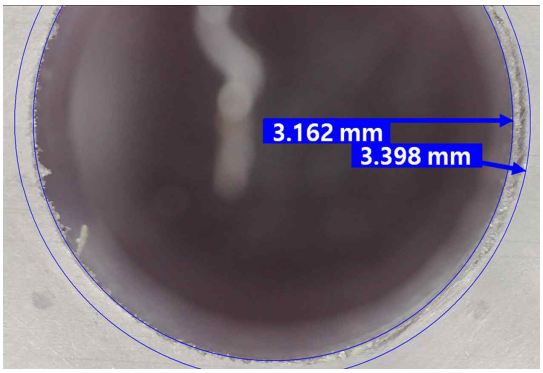
경로 보정 알고리즘의 효과 확인을 위해 로봇 드릴링 시 알고리즘 적용, 미적용 드릴링 실험을 실시하여 CFRP 시편의 홀 가공 품질 변화 양상을 확인하였다.

5. 알고리즘 적용 실험 결과 확인 및 분석

본 실험에서는 CFRP 최적 가공 조건인 6000 rpm, 0.05 mm/rev 의 조건에서 드릴링 가공을 진행하였고 공구는 Kennametal사의 K531A 공구를 사용하였다. 경로 보정 알고리즘 유무에 따른 드릴링 홀 가공 품질의 편차를 확인하기 위해 알고리즘 적용/미적용 상태의 홀 가공을 각각 30회 진행하였다. 그 결과 가공 홀 형상은 Fig. 15와 같이 나왔으며, 30개 홀의 가공 결함 크기를 박리 지수(Delamination Factor) 로 도출하여 그린 그래프는 Fig. 16과 같다.



(a) Robot drilling hole shape of not applied real-time force control algorithm



(b) Robot drilling hole shape of applied real-time force control algorithm

Fig. 15 Comparing of applied/not applied real-time force control algorithm

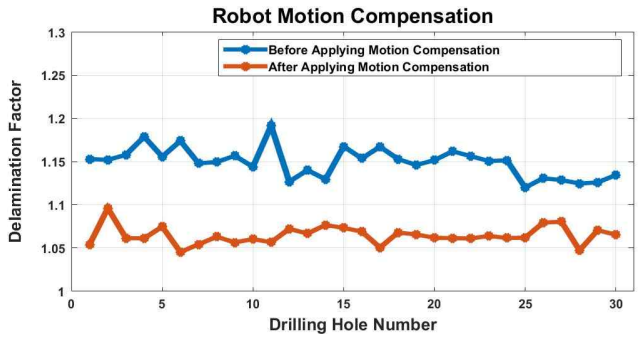


Fig. 16 Comparing delamination factor of applied/not applied real-time force control algorithm about 30 holes

실험 결과의 그래프를 확인해보면, 경로 제어 알고리즘을 적용한 경우 홀 박리 지수가 알고리즘 미적용 수치에 비해 확연히 줄어든 것을 확인할 수 있다. 더 나아가 경로 제어 알고리즘을 적용한 로봇의 가공 결과와 CNC를 활용한 가공 결과의 박리 지수를 비교하였으며 그 수치는 Table 7과 같다.

경로 제어 알고리즘을 적용하지 않은 로봇과 CNC의 시편 가공 박리 지수를 비교해보면, 로봇 가공의 품질이 확연히 저하되는 것을 보여준다. 하지만 알고리즘을 적용한 로봇은 CNC와 비교하여 큰 차이를 보이지 않고 비슷한 수치의 박리 지수를 보여준다.

Table 7 Comparing of delamination factor: CNC, robots without algorithm, robots with algorithm

Drilling machine	Delamination factor (average)	Delamination factor (maximum)
CNC	1.095	1.169
Robots without algorithm	1.149	1.192
Robots with algorithm	1.065	1.096

6. 결론 및 향후 연구 방향

CNC 드릴링 가공에 비해 로봇 가공은 가공 공정의 유연성이 높고 가공 부품 크기의 제약을 덜 받는 등의 다양한 장점을 지니고 있다. 하지만 가공 부하로 인한 로봇 모션의 오차가 발생하며 이로 인해 로봇 끝단부의 가공 기구가 틀어져 가공 품질의 저하를 발생시킨다.

본 논문에서는 로봇 가공 시 발생하는 결함의 원인 확인을 위해 CNC와 로봇의 가공 부하를 측정 및 비교 분석하였다. 측정된 가공 부하 추세와 로봇 끝단부 레이저 트래커의 위치 변위를 비교하여 로봇 가공 시 발생하는 가공 부하와 로봇 끝단부의 거동을 확인하였다. 그리고 이를 개선하기 위한 방안으로 로봇의 경로를 가공 부하 신호 기반으로 실시간 보정하는 알고리즘을 제시하였다.

가공 경로의 실시간 보정 방안으로, 공구동력계의 가공 부하 신호를 입력 신호로 받아 로봇의 실시간 경로 수정에 반영하였다. 해당 알고리즘을 적용한 로봇 가공 결과를 알고리즘 미적용 상태의 로봇 가공 결과 뿐 아니라 CNC 드릴링 가공 결과와도 비교하였다.

본 연구를 통해 로봇 가공 시 공구동력계를 활용한 실시간 경로 보정이 CNC가공과 비슷한 수준의 가공 결과물을 보여주는 것을 확인하였다. 이를 바탕으로 높은 공정 유연성과 가공 대상물의 제약에 자유로운 로봇 가공의 장점을 유지하는 한편, 가공 정밀도도 확보할 수 있는 방안을 제시하였다.

하지만 로봇 가공 시 가공물의 위치에 따라 로봇 끝단부의 위치가 달라지고, 끝단부 위치에 따른 기구적 강성이 다르다. 때문에 같은 소재 및 가공 조건이라도 끝단부 위치에 따라 가공 결과물이 다르게 나올 수 있다.

로봇의 위치별 강성 측정에 대한 연구는 정적 상태에서의 로봇 강성 연구가 다양하게 진행되고 있다.[7-9] 하지만 동적 상태에서의 로봇 강성은 정적 상태의 강성과 매우 다른 거동을 보이기에 동적 강성에 대한 연구는 많이 진행되지 않고 있다.

따라서 향후 연구 방향으로는 위치별 로봇의 정적/동적 강성을 실험 및 이론적 계산을 통해 도출하고 이를 로봇 가공 경로 실시간 보정에 적용할 필요가 있다. 이를 통해 특정 위치가 아닌 로봇 가동부의 모든 위치에서 가공 오차를 줄여 가공 유연성을 향상시킬 수

있는 연구가 필요할 것으로 예측된다.

덧붙여 드릴링 뿐 아니라 밀링 등의 다른 가공 방식에서의 가공 부하를 분석하여 이에 대한 로봇 가공 경로의 실시간 보정을 진행, 가공 정밀도를 향상시킬 수 있다면 가공 공정의 용이함을 추가 확보할 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부의 기계산업핵심기술개발사업의 일환으로 수행하였습니다[10053248, 과제명: 탄소섬유복합재(CFRP) 가공시스템 개발].

References

[1] Lee, B. E., Hyun, D. K., Shin, D. H., 2018, A Review of Forming Performance Thermoplastic Composites in Aerospace Applications, Transactions of Materials Processing, 27:1 60-65.

[2] Wang, X., Kwon, P. Y., Sturtevant, C., Lantrip, J., 2014, Comparative Tool Wear Study Based on Drilling Experiments on CFRP/Ti Stack and Its Individual Layers, Wear, 317:1 265-276.

[3] Zitoune, R., Krishnaraj, V., Collombet, F., 2010, Study of Drilling of Composite Material and Aluminium Stack, Composite Structures, 92:5 1246-1255.

[4] Frommknecht, A., Kuehnle, J., Effenberger, I., Pidan, S., 2017, Multi-Sensor Measurement System for Robotic Drilling, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 47 4-10.

[5] Olsson, T., Robertsson, A., Johansson, R., 2007, Flexible Force Control for Accurate Low-Cost Robot Drilling, IEEE International Conference on Robotics and Automation, 4770-4775.

[6] Slavkovic, N. R., Milutinovic, D. S., Kokotovic, B. M., Glavonjic, M. M., Zivanovic, S. T., Ehmann, K. F., 2013, Cartesian Compliance Identification and Analysis of an Articulated Machining Robot, US FME Transactions, 41:2 84-95.

[7] Dumas, C., Caro, S., Garnier, S., Furet, B., 2011, Joint Stiffness Identification of Six-Revolute Industrial Serial Robots, Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 27 881–888.

[8] Chen, S. F., Kao, I., 2000, Conservative Congruence Transformation for Joint and Cartesian Stiffness Matrices of Robotic Hands and Fingers, The International Journal of Robotics Research, 19:9 835-847.

[9] Alici, G., Shirinzadeh, B., 2005, Enhanced Stiffness Modeling, Identification and Characterization for Robot Manipulators, IEEE, TRANSACTIONS ON ROBOTICS, 21:4 554-564.