



탄소섬유 프리폼 고정밀 절단을 위한 로봇 자세 제어

김형구^a, 홍태화^a, 김성현^{a,*}

Robot Posture Control for Precise Trimming of Carbon Fiber Preforms

Hyeong Gu Kim^a, Taehwa Hong^a, Seong Hyeon Kim^{a,*}^a Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH)

ARTICLE INFO

Article history:

Received	28	October	2025
Revised	4	November	2025
Accepted	6	November	2025

Keywords:

Robotic machining
Pose control
Stiffness
Knife cutting
Carbon fiber reinforced plastic

ABSTRACT

Precise robotic trimming of carbon fiber preforms is essential in resin transfer molding to ensure mold conformity and final product accuracy. However, the low stiffness of industrial robots causes tool center point (TCP) displacement under cutting forces, resulting in dimensional errors. Conventional posture optimization using redundant degrees of freedom (DOF) is ineffective for knife-based trimming in which all six DOFs are constrained. This study proposes a stiffness-based posture control method applicable to nonredundant cutting tasks. Despite the absence of redundancy, the robot can assume eight distinct postures on the same TCP. A virtual joint modeling approach was employed to predict posture-dependent deformation and identify the configuration with maximal stiffness. Experimental validation showed that the selected high-stiffness posture reduced the dimensional error by 64.3% compared with the lowest-stiffness case, demonstrating the potential of the method to enhance the accuracy in fully constrained robotic trimming processes.

1. 서론

탄소섬유복합재(carbon fiber reinforced plastic, CFRP)는 높은 강도 대비 낮은 무게와 우수한 내구성을 바탕으로 자동차, 항공 우주, 방위산업 등 다양한 산업분야에서 폭넓게 활용되고 있다. 특히 항공우주 산업에서는 극한의 온도와 기압 변화 등 열악한 환경에 지속적으로 노출되기 때문에, 높은 신뢰성과 성능을 보장하는 고품질 CFRP에 대한 수요가 증가하고 있다. CFRP 성형을 위한 대표적인 공정 중 하나인 Autoclave 성형법은 고온·고압 환경에서 성형을 수행하여 공극률이 낮고 품질이 균일한 제품을 생산할 수 있다는 장점이 있다. 그러나 높은 생산 비용과 긴 공정 시간으로 인해 대량 생산에는 한계가 존재한다. 이에 대한 대안으로 Resin

Transfer Molding (RTM) 공정이 주목받고 있다. RTM 공정은 밀폐된 성형틀을 활용하여 외부 환경과의 접촉을 최소화하고, 온도와 압력을 소재에 직접 가함으로써 우수한 품질의 CFRP를 생산할 수 있다^[1-3]. 또한 상대적으로 저온·저압의 조건에서 성형이 가능하다는 장점이 있다. RTM 공정은 Fig. 1에 도시된 바와 같이, 탄소섬유 직물(carbon fabric)을 절단하는 단계로 시작된다. 절단된 직물은 최종 제품의 섬유 배열 및 형상에 맞춰 적층되고 (lay-up), 이후 예비성형(preforming) 과정을 거쳐 프리폼 (preform) 형태로 제작된다. 이 탄소섬유 프리폼은 CFRP 제품 형상을 갖는 비경화 상태의 중간재료, 프리폼의 품질은 최종 CFRP 제품의 품질에 결정적인 영향을 미친다. 제작된 프리폼은 최종 형상에 근접하도록 절단(trimming)된 후 성형틀(mold)에 배치된다. 이후 성형틀 내

* Corresponding author. Tel.: +82-41-589-8562

E-mail address: shkim@kitech.re.kr (Seong Hyeon Kim).

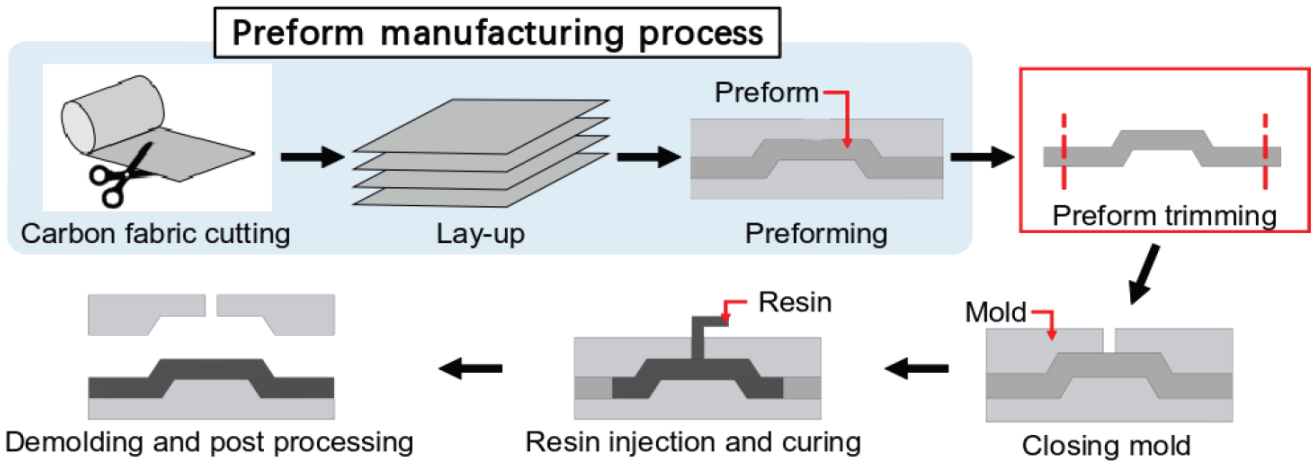


Fig. 1 CFRP manufacturing process using RTM

부로 수지를 주입하면, 프리폼은 수지에 완전히 함침되며, 고온·고압 환경에서 경화(curing) 과정을 거친다. 경화가 완료된 후에는 성형된 CFRP 제품을 탈형(demolding)하고, 필요 시 표면 정리 및 후가공(post-processing) 단계를 거쳐 최종 CFRP 제품이 완성된다. RTM 공정 중 프리폼 절단 단계는 프리폼을 성형틀에 배치하기 전, 최종 형상에 근접한 형태로 절단·가공하는 과정으로 프리폼 절단 단계에서 치수 오차가 발생하면 성형틀과 프리폼 사이에 틈새가 생기거나 과도한 간섭이 발생하여, 수지 주입 시 공극 형성 및 수지 흐름 불균일로 인해 제품의 결함이 유발될 수 있다.

최근, 기존에 수작업으로 수행되던 프리폼 절단 공정의 품질 및 생산성 향상을 위해 해당 공정에 산업용 로봇을 적용하는 연구가 수행되고 있다^[4,5]. 로봇을 활용한 가공 공정은 공작기계에 비해 높은 자유도와 유연성, 공간 활용 효율 등의 장점이 있지만, 로봇 매니퓰레이터의 낮은 강성으로 인해 발생하는 외력에 의한 위치 오차가 한계점으로 지적되어 왔다. 로봇 엔드이펙터에 외력이 작용하게 되면 로봇의 축 변형이 발생하게 되고 이는 로봇 Tool Center Point (TCP)의 위치 오차를 발생시켜 가공 정밀도를 저하시킨다^[6-10]. 따라서 산업용 로봇을 활용하여 고정밀 프리폼 절단을 하기 위해서는 로봇의 낮은 강성에 의해 발생하는 가공 오차를 저감할 필요가 있다.

로봇 매니퓰레이터의 낮은 강성으로 인해 발생하는 위치 오차를 해결하기 위해, 기존 연구에서는 로봇의 강성을 수학적으로 모델링하고 강성이 가장 높은 로봇 자세를 결정하는 방법을 제안하였다. Ye et al.은 밀링 가공 중 정밀도를 평가하기 위한 지표를 제안하였고, Particle Swarm Optimization (PSO)를 통해 로봇의 강성을 극대화하기 위한 최적의 작업물 배치 방안을 도출하였다^[11]. Xiong et al.은 로봇의 강성 평가를 위한 지표를 개발하고, 로봇 여유 자유도(redundant DOF)를 활용하여 밀링 공정에서의 최적 자세를 도출하였다^[12]. Chen et al.은 스핀들 중량 및 절삭력에 의한

변형을 동시에 고려하는 변형 지표를 활용하여 로봇의 functional redundancy를 제어하는 자세 최적화 방법을 제안하였다^[13]. Lee et al.은 로봇 자세와 공작물 위치를 동시에 최적화할 수 있는 변형 에너지 기반 모델을 제안하고, 이를 실험 및 시뮬레이션을 통해 검증하였다^[14].

그러나 위 연구들은 공구의 회전축 기준 여유 자유도를 활용하여 강성이 높은 자세를 찾는 방법들로써 회전형 공구에만 적용 가능하다는 한계가 있다. 반면, 탄소섬유 프리폼 절단 공정의 경우 칼날 형태의 공구를 사용하기 때문에 여유 자유도가 존재하지 않아 기존 연구에서 제안한 방법들을 적용하기 어렵다. 이에 본 논문에서는 칼날 형태의 공구를 사용하는 로봇 가공시스템에서, 여유 자유도가 없는 상황에서도 가공 정밀도를 향상시킬 수 있는 자세 제어 방법을 제안하였다. 로봇은 자세에 따라 강성이 달라지는 특징이 있고, 동일한 TCP 위치에서 최대 8가지의 자세를 취할 수 있다. 따라서, 각 자세에 대한 강성을 정량적으로 분석하였고, 이를 통해 가장 높은 강성을 갖는 자세를 선정하여 적용함으로써 로봇의 가공 정밀도를 향상시켰다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 로봇 프리폼 절단 공정에서 발생하는 형상 오차의 원인을 규명하기 위해 기초 실험을 수행하였다. 3장에서는 형상 오차를 저감하기 위한 로봇 자세 제어 방법을 제안하고, 제안한 방법의 유효성을 실험을 통해 검증하였다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결과를 요약하고 결론을 정리하였다.

2. 본 론

2.1 로봇 프리폼 절단 시 형상 오차 발생 원인

로봇 기반 프리폼 절단 공정에서 발생하는 형상 오차의 원인을 분석하기 위해 Fig. 2와 같이 로봇과 공작기계를 활용한 절단 실험

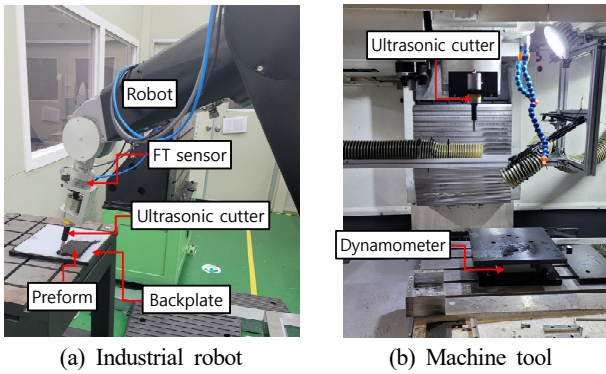


Fig. 2 Experimental setups for trimming CFRP preforms

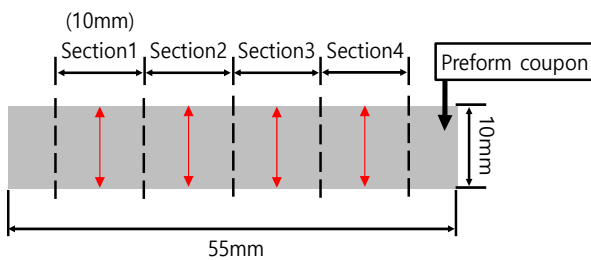


Fig. 3 Width measurement method for preform coupons

을 수행하였다. 프리폼 절단을 위한 초음파 진동자(HP-8701, Sonotec)는 각각 로봇의 엔드이펙터와 동작기계의 스피들 고정부에 장착하였고, 두 장비에서 동일 가공 조건으로 실험하고 결과를 비교하였다. 실험 간 절단력 측정을 위해 각 장비에 Force Torque 센서(Delta SI-330-30, ATI)와 공구동력계(9257B, Kistler)를 사용하였다. 절단 공구(FB-0231-6L, Sonotec)는 초경합금 소재로 양단에 칼날이 있는 공구를 사용하였고, 절단 공구 파손을 방지하기 위해 실리콘 백플레이트를 활용하였다. 절단된 프리폼 시편의 형상 오차는 광학현미경(VHX S770E, Keyence)을 이용하여 측정하였다. 측정은 Fig. 3에 나타낸 바와 같이 시편 중심을 기준으로 10 mm 간격의 4개 구간을 설정하고, 각 구간에서의 최소 폭을 측정하는 방식으로 수행하였다. 이후 각 구간의 최소 폭에 대한 평균값을 해당 시편의 대표 폭으로 정의하고, 이 값과 사전에 설정된 목표 폭과의 차를 형상 오차로 산정하였다.

실험에서 사용된 시편은 준등방성 특성을 갖는 직조형 탄소섬유 프리폼으로 4개의 $\pm 45^\circ$ 직조 직물과 12개의 $0^\circ/90^\circ$ 직조 직물로 구성되었다. Hexcel 사의 탄소섬유를 활용해 5-harness satin 구조로 제작되었고, 프리폼의 평균 두께는 7.23 mm이다. 프리폼 절단 공정 조건은 절단 각도 45° , 이송 속도 1 m/min로 설정하였다. 여기서, 절단 각도는 Fig. 4에서 프리폼의 표면과 절단 공구의 중심선이 이루는 각도를 의미하며, 이송 속도는 공구가 절단 방향으로 이동하는 속도를 의미한다. 초음파에 대한 공정 조건은 진폭 60 μm , 진동수 24 kHz로 설정하였고, 시편 크기는 길이 55 mm,

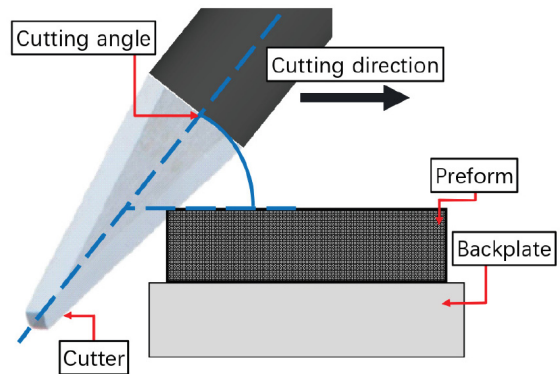


Fig. 4 Cutting angle and feed rate used for the experiment

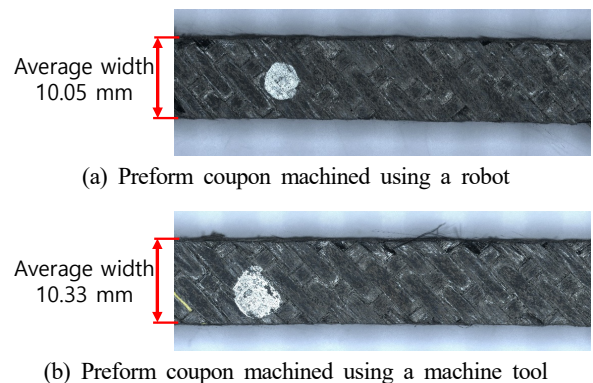


Fig. 5 Preform coupon samples of each experimental setup

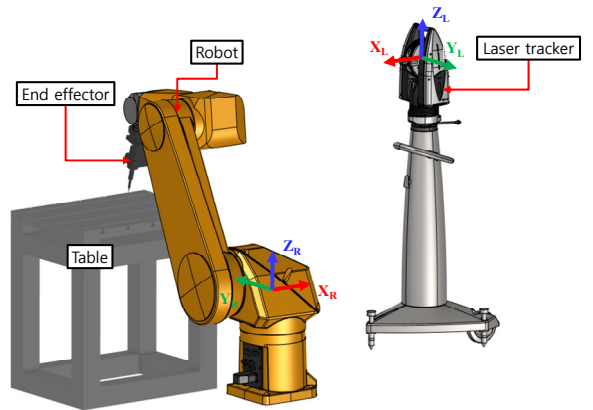


Fig. 6 Experimental setup for measuring position errors caused by robot stiffness

폭 10 mm로 4회 반복 실험하였다.

프리폼 절단 실험 결과, 동작기계를 활용한 경우 평균 형상 오차는 47 μm 로 측정된 반면, 로봇을 활용한 경우 평균 형상 오차는 320 μm 로 측정되었다. Fig. 5는 각 장비를 이용하여 절단한 4개의 시편 중 하나의 시편이다. 기초 실험 결과를 통해 로봇 기반 프리폼 절단 시 동작기계 대비 형상 오차가 크게 증가함을 확인하였다. 이는 로봇의 낮은 강성 때문에 프리폼 절단 시 발생하는 절단력에 의해 로봇 구조에 변형이 발생하고, 그 결과 TCP의 위치 오차가

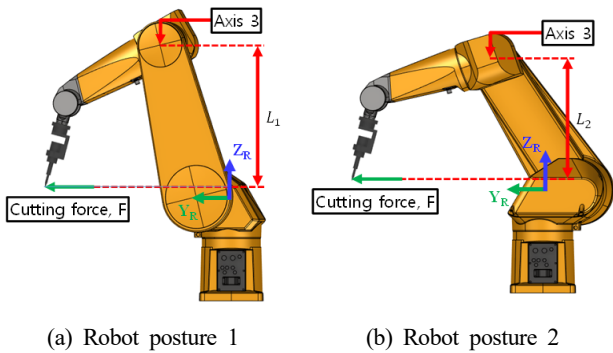


Fig. 7 Torque variations depending on postures at the same TCP position

발생하여 형상 오차로 이어진 것으로 판단된다.

로봇의 낮은 강성이 프리폼 절단 시 TCP 위치 오차에 미치는 영향을 분석하기 위해, 절단력 작용 유무에 따른 TCP 위치 오차를 측정하였다. TCP 위치 오차는 TCP의 목표 위치와 실제 위치 간의 차이로 정의하였다. 목표 위치는 로봇 제어기의 목표 위치 데이터로 정하였고, 실제 위치는 레이저 트래커(AT960MR, Hexagon Metrology)를 활용하여 측정하였다. 실험을 위해 Fig. 6과 같이 실험 환경을 구성하였으며, 엔드이펙터에는 반사구를 부착하여 TCP 위치를 계측할 수 있도록 하였다. TCP 오차 측정은 절단 경로를 따라 다수의 위치에서 수행되었으며, 각 위치에서의 목표 위치와 측정 위치 간 차이의 절대값을 계산하고, 전체 평균값을 산출하여 로봇 절단 중 발생하는 위치 오차를 정량적으로 평가하였다.

본 실험에서 프리폼 절단은 로봇 좌표계의 $-Y_R$ 방향으로 진행되었다. 따라서 시편의 형상 오차에 영향을 미치는 TCP 오차는 진행 방향의 측면 X_R 방향의 오차이다. 측면 방향 TCP 오차 측정 결과, 절단력이 작용하지 않은 조건에서는 평균 오차가 $149 \mu\text{m}$ 로 나타났으며, 절단력이 작용한 경우에는 $295 \mu\text{m}$ 로 증가하였다. 이는 절단 공정 시 로봇의 낮은 강성으로 인해 발생한 TCP 오차가 시편의 형상 오차에 영향을 미침을 의미한다.

2.2 로봇 프리폼 절단 정밀도 향상을 위한 자세 선정

본 연구에서는 로봇의 낮은 강성에 의해 발생하는 형상 오차를 줄이기 위한 로봇 자세 제어 방법을 제안하고자 한다. 로봇은 Fig. 7과 같이 동일한 TCP 위치에서도 다양한 자세를 취할 수 있으며, 각 자세에 따라 절단력에 의해 로봇의 개별 축에 전달되는 토크의 분포가 달라진다. 이로 인해 자세에 따라 축별 변형 양상이 달라지고, 그 결과 동일한 절단력 조건에서도 자세에 따라 형상 오차가 달라진다.

로봇 기반 프리폼 절단 공정에서는 칼날 형태의 공구가 가공 경로를 따라 정렬되어야 하므로, 로봇의 6개 자유도는 모두 고정된다. 이러한 조건에서 로봇은 동일한 TCP 위치를 유지하면서 Fig.

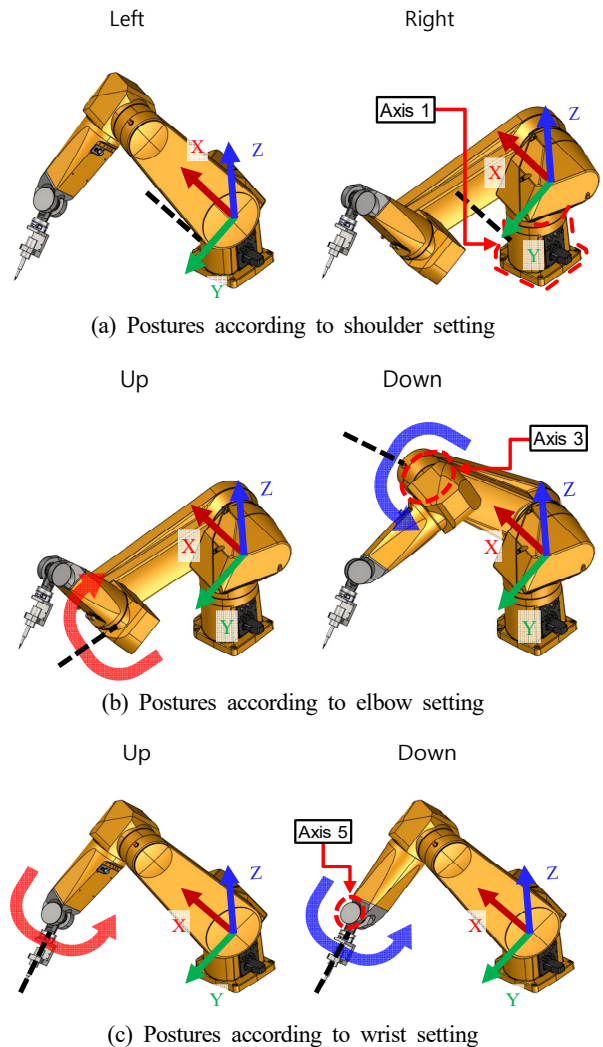


Fig. 8 Robot postures depending on configuration settings

8과 같이 8개 자세를 가질 수 있다. 로봇 자세는 Shoulder, Elbow, Wrist의 조합에 따라 결정된다. Shoulder의 경우, 로봇 1번 축(검은 점선)의 기준점에 대해 2번 링크가 좌측에 위치하는 경우 'Left', 우측에 위치하는 경우 'Right'로 정의된다. Elbow 및 Wrist는 각각 3번 축과 5번 축의 값이 양수인 경우 'Up', 음수인 경우 'Down'으로 구분된다.

로봇이 취할 수 있는 8가지 자세 중, 프리폼 절단 시 발생할 수 있는 특이점(singularity), 축 가동 범위의 제한, 그리고 주변 장비와의 충돌 가능성 등을 고려한 결과, 현재 실험 환경에서 활용 가능한 후보 자세는 Fig. 9와 같이 3가지로 확인되었다. 후보 자세 중 TCP 오차가 가장 작은 자세를 도출하기 위해, 본 연구에서는 Virtual Joint Modeling (VJM) 방법을 활용하였다^[15,16]. VJM은 로봇의 각 관절을 가상의 스프링 요소로 모델링하여 외력에 의한 로봇의 변형을 예측하고, 이를 통해 로봇 시스템의 구조적 강성 특성을 정량적으로 평가할 수 있다. VJM을 이용하여 각 자세 별

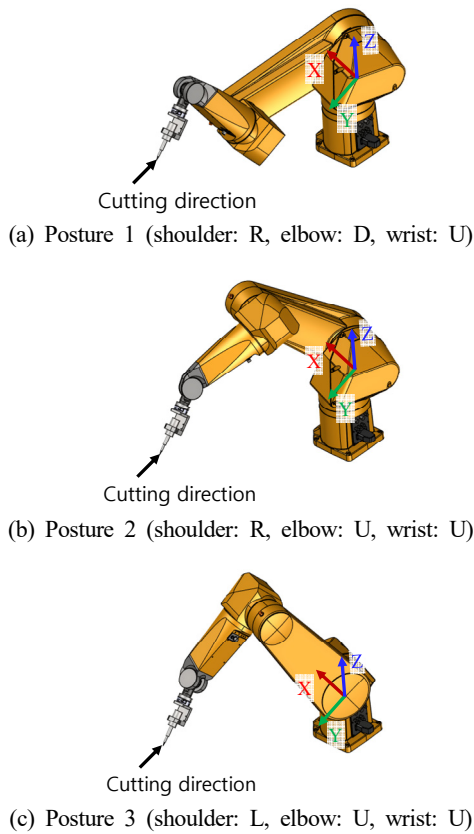


Fig. 9 Available robot postures in the experimental setup

위치오차를 예측하기 위해, Eq. (1)을 이용하여 TCP의 위치 오차를 계산하였다. 여기서 δ_d 는 TCP의 변형, J 는 로봇의 자코비안 행렬, W 는 로봇 TCP에 가해진 힘-토크, K_θ 는 축 강성을 나타낸다. VJM을 활용하여 가공 경로 상의 각 위치에서 측면 변형의 절대값을 계산하고, 이를 평균하여 자세 별 예측 형상 오차를 계산하였다. 그 결과, 세 가지 후보 자세(posture 1, 2, 3)에 대한 예측 형상 오차는 각각 276 μm , 297 μm , 342 μm 로 나타났으며, 가장 낮은 오차를 갖는 Posture 1이 후보 자세 중 상대적으로 강성이 높은 자세임을 확인하였다.

$$\delta_d = JK_\theta^{-1} J^T W \quad (1)$$

제안한 방법의 유효성을 검증하기 위해 각 자세 별 프리폼 절단 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 절단 공정 조건은 절단 각도 45°, 이송 속도 1 m/min이며, 초음파 조건은 진폭 60 μm , 진동수 24 kHz로 설정하였다. 각 자세(posture 1, 2, 3)에 대해 4회씩 반복 실험을 진행하였으며, 절단된 시편은 길이 90 mm, 폭 10 mm의 직사각형 형상으로, 모든 실험에서 동일한 형상과 크기로 절단하였다.

절단된 시편의 형상 오차를 평가하기 위해, 시편 중심을 기준으

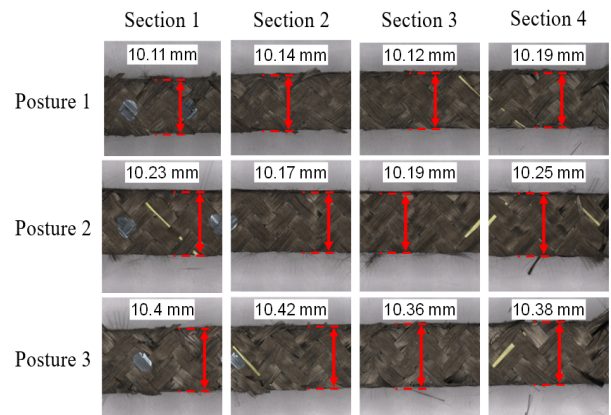


Fig. 10 Experimental coupon widths for each robot posture

Table 1 Average dimensional errors for each robot posture (n=4)

Robot posture	Average dimensional errors (μm)
Posture 1	135
Posture 2	184
Posture 3	379

로 10 mm 간격으로 총 7개 구간을 설정하였다. 각 구간에서 절단 폭이 가장 좁은 지점을 측정하였으며, 이 최소 폭들의 평균값을 해당 시편의 대표 절단 폭으로 정의하였다. 이후, 측정된 대표 절단 폭과 사전에 설정된 목표 폭의 차이를 형상 오차로 계산하였다. Fig. 10은 시편 중 하나에 대한 절단 폭 측정 결과를 나타낸 것이다. 로봇 기반 프리폼 절단 시 자세별 평균 형상 오차는 Table 1에 정리하였으며, Posture 1, 2, 3에서 각각 135 μm , 184 μm , 379 μm 로 측정되었다. 실험 결과, 로봇 자세의 강성이 높을수록 형상 오차가 감소하는 경향을 보였으며, 강성이 가장 높은 Posture 1은 강성이 가장 낮은 Posture 3에 비해 형상 오차가 약 64.3% 감소함을 확인하였다.

3. 결론

본 연구에서는 탄소섬유 프리폼의 고정밀 절단을 위해 로봇 강성을 고려한 새로운 자세 제어 방법을 제안하였다. 기존 연구에서는 로봇의 낮은 강성 문제를 해결하기 위해 여유 자유도를 활용한 자세 최적화 기법이 주로 사용되었으나, 칼날 형태의 공구를 사용하는 프리폼 절단 공정과 같이 여유 자유도가 존재하지 않는 경우에는 적용이 어렵다는 한계가 있었다. 이에 본 연구에서는 로봇 자세 제어를 통한 강성 향상 방법을 제안하였다. 동일한 TCP 조건에서 8가지 로봇 자세를 구성하고, 각 자세에 대해 VJM 기반 강성 오차 예측 모델을 구축하여 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 강성이 가장 높은 자세를 선정하였으며, 해당 자세를 적용한 프리폼

절단 실험에서 평균 형상 오차가 135 μm 로, 가장 낮은 강성 자세 대비 약 64.3% 감소하였다. 이러한 결과는 제안한 자세 제어 방법이 여유 자유도가 없는 칼날 형태의 공구를 사용하는 절단 공정에서도 로봇 강성에 기인한 가공 오차를 효과적으로 저감할 수 있음을 입증한다. 향후 연구에서는 탄소섬유 프리폼 절단 공정의 종합적인 품질 향상을 목표로, 본 연구에서 다룬 형상 오차 외에 미절삭 섬유 및バリ 등의 결함에 대한 발생 메커니즘 분석과 저감 방안을 연구할 계획이다.

후 기

이 연구는 한국생산기술연구원 기관주요사업 “고위험, 고난이도 파이프 제작 공정 대응 원격 제조 시스템 개발 (EH250004)”의 지원으로 수행하였습니다.

References

- [1] Hong, S., Song, M.-H., Song, K., Baik, S.-M., Shin, S.-J., 2016, Fabrication and Evaluation of Integrated Composite Part for Aircraft Using OOA (Out-of-Autoclave) Prepreg, *Compos. Res.*, 29:5 315-320, <https://doi.org/10.7234/composres.2016.29.5.315>.
- [2] Poodts, E., Minak, G., Mazzocchetti, L., Giorgini, L., 2014, Fabrication, Process Simulation and Testing of a Thick CFRP Component Using the RTM Process, *Compos. B Eng.*, 56 673-680, <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2013.08.088>.
- [3] Uozumi, T., Kito, A., Yamamoto, T., 2005, CFRP Using Braided Preforms/RTM Process for Aircraft Applications, *Compos. Res.*, 14:4 365-383, <https://doi.org/10.1163/156855105774470366>.
- [4] Björnsson, A., Johansen, K., Alexandersson, D., 2013, Three-Dimensional Ultrasonic Cutting of RTM-Preforms – A Part of a High-Volume Production System, *Proc. 19th Int. Conf. Compos. Mater.*, 8960-8969.
- [5] Olivero, K. A., Barraza, H. J., O’Rear, E. A., Altan, M. C., 2002, Effect of Injection Rate and Post-Fill Cure Pressure on Properties of Resin Transfer Molded Disks, *J. Compos. Mater.*, 36:16 2011-2028, <https://doi.org/10.1177/0021998302036016244>.
- [6] Wu, K., Kuhlkoetter, B., 2020, Experimental Analysis of the Dynamic Stiffness in Industrial Robots, *Appl. Sci.*, 10:23 8332, <https://doi.org/10.3390/app10238332>.
- [7] Chen, Y., Dong, F., 2013, Robot Machining: Recent Development and Future Research Issues, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 66 1489-1497, <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4433-4>.
- [8] Pan, Z., Zhang, H., Zhu, Z., Wang, J., 2006, Chatter Analysis of Robotic Machining Process, *J. Mater. Process. Technol.*, 173:3 301-309, <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033>.
- [9] Jo, J.-H., Lee, J.-H., Shin, K.-W., Kim, T.-G., Kim, H.-Y., Lee, S.-W., 2018, 6-Axis Robotic Carbon Fiber Reinforced Plastic Drilling Process Using Real-Time Path Control, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 27:3 175-181, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2018.27.3.175>.
- [10] Cho, S., Ahn, D., Jeong, A., Lee, H.-J., 2022, Optimal Design of 2-DOF Position Compensation Stage for Machining, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 31:6 381-387, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2022.31.6.381>.
- [11] Ye, C., Yang, J., Zhao, H., Ding, H., 2021, Task-Dependent Workpiece Placement Optimization for Minimizing Contour Errors Induced by the Low Posture-Dependent Stiffness of Robotic Milling, *Int. J. Mech. Sci.*, 205 106601, <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106601>.
- [12] Xiong, G., Ding, Y., Zhu, L., 2019, Stiffness-Based Pose Optimization of an Industrial Robot for Five-Axis Milling, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, 55:Part A 19-28, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.001>.
- [13] Chen, C., Peng, F., Yan, R., Li, Y., Wei, D., Fan, Z., Tang, X., Zhu, Z., 2019, Stiffness Performance Index Based Posture and Feed Orientation Optimization in Robotic Milling Process, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, 55:Part A 29-40, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2018.07.003>.
- [14] Lee, J. H., Kim, S. H., Min, B.-K., 2022, Posture Optimization in Robotic Drilling Using a Deformation Energy Model, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, 78 102395, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102395>.
- [15] Yoshikawa, T., Hosoda, K., 1996, Modeling of Flexible Manipulators Using Virtual Rigid Links and Passive Joints, *Int. J. Rob. Res.*, 15:3 290-299, <https://doi.org/10.1177/027836499601500305>.
- [16] Abele, E., Weigold, M., Rothenbücher, S., 2007, Modeling and Identification of an Industrial Robot for Machining Applications, *CIRP Annals*, 56:1 387-390, <https://doi.org/10.1016/j.cirp.2007.05.090>.



Hyeong Gu Kim

M.S. Candidate in the Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include Precision Robotic Machining.
E-mail: hgu97@kitech.re.kr



Taehwa Hong

Ph.D. Candidate in the Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include Robotics Manufacturing and AI.
E-mail: barnet@kitech.re.kr



Seong Hyeon Kim

Senior Researcher in the Industrial Transformation Technology Department, Korea Institute of Industrial Technology (KITECH). His research interests include Robotics, Robotic Machining, Precision Control, and AI.
E-mail: shkim@kitech.re.kr