

Auxetic 구조 기반 로봇 가공용 스피들 홀더의 진동 감쇠 성능 연구

박주협^a, 김성현^b, 심재홍^c, 김기현^c, 김효영^{c,*}

Robotic Machining Vibration Attenuation using an Auxetic Spindle Holder

Juhyeop Park^a, Seong Hyeon Kim^b, Jaehong Shim^c, Kihyun Kim^c, Hyo-Young Kim^{c,*}^a Department of IT Semiconductor Convergence Engineering, Tech University of Korea^b Industrial Transformation Technology Department, KITECH^c Department of Mechanical Engineering, Tech University of Korea

ARTICLE INFO

Article history:

Received	5	May	2026
Revised	13	May	2026
Accepted	19	May	2026

Keywords:

Robot machining
Auxetic structure
Vibration attenuation
Damping

ABSTRACT

Machining precision and surface quality in robotic systems can be improved by reducing tool-side vibrations. Spindle-induced vibrations are critical because they propagate through the spindle holder to the robotic arm and cause machining errors. Because industrial robots have limited payload capacity, the spindle holder must be lightweight while providing effective vibration suppression. This paper proposes an auxetic spindle holder with a negative Poisson's ratio. Auxetic structures become denser under tensile deformation, enabling them to absorb external shocks and vibrations. Finite element analysis was used to design and optimize the holder, verify its auxetic deformation behavior, and evaluate its structural and vibrational performance. Compared with a conventional fully filled holder, the auxetic design achieved greater vibration attenuation in machining-relevant frequency ranges while reducing mass. The proposed holder can enhance machining stability and surface quality without exceeding robot payload limits.

1. 서론

최근 산업 현장에서는 작업자의 개입 없이 자율적으로 운영되는 제조공장 구현을 목표로, 로봇 도입이 활발하게 이루어지고 있다^[1-3]. 가공 시스템 분야에서도 기존의 전통적인 공작기계를 대체하고자, 자동화가 용이한 다축 산업용 로봇 팔에 절삭 및 연삭 공구를 장착하여 기계 가공을 수행하는 로봇 가공기술에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다^[4]. 로봇 가공 시스템은 6자유도 이상의 유연성을 바탕으로 다양한 각도에서의 가공이 가능하다. 또한, 좁은 설치 공간에서도 넓은 작업 영역을 확보할 수 있고, 초기 설치 비용이 비교적 저렴하여 기존 공작기계 대비 여러 장점을 지닌다. 그러나

산업용 로봇은 본질적으로 외팔보(cantilever) 구조를 가지고 있어, 구조적 강성이 낮고 진동에 취약하다는 한계를 갖는다^[5,6]. 특히 로봇 가공 시 발생하는 진동은 다양한 원인에 의해 유발되며, 가공 정밀도 저하, 표면 품질 열화, 공구 수명 단축 등 여러 문제로 이어진다^[7,8]. 이러한 진동은 크게 외란에 의한 강제 진동(forced vibration)과 로봇 시스템 자체 조건에 의해 발생하는 자력 진동(self-excited vibration)으로 구분된다. 이 중에서도 절삭 공정 중 공구와 공작물 간의 상호작용으로 발생하는 chatter 진동(chatter vibration)은 로봇 가공 정밀도에 가장 큰 영향을 미치는 현상이다. chatter는 절삭 경로에서 발생하는 미세한 반복 진동이 누적되어 진폭이 점차 커지는 불안정한 진동 현상이다^[9,10]. 이는 절삭력의 불

* Corresponding author. Tel.: +82-31-8041-0464

E-mail address: kimhy@tukorea.ac.kr (Hyo-Young Kim).

규칙성을 초래하고, 공구 마모를 가속화하며, 결과적으로 가공면에 공구 흔적을 남겨 표면 조도를 악화시킨다. 특히 이러한 진동은 직렬로 연결된 로봇의 유연한 관절 구조를 통해 쉽게 전달된다. 그 중에서도 스펀들과 로봇을 연결하는 부위인 스펀들 홀더를 통해 진동이 로봇 본체로 직접 전달된다. 따라서 로봇 가공에서 진동을 효과적으로 억제하기 위해서는, 공구에서 발생하는 진동이 로봇 본체로 전달되기 전에 차단하거나 감소시킬 수 있는 기술적 접근이 필요하다. 지금까지는 로봇 제어 알고리즘의 정밀도를 향상시키거나, 별도의 구동기를 활용한 능동 진동 제어 시스템을 설계하거나, 감쇠 소재를 이용한 스펀들 홀더 구조를 적용하는 등의 방법이 연구되어 왔다^[11-14]. 그러나 이러한 방법들은 로봇 끝단(end-effector)의 크기 및 무게를 증가시켜 가공 유연성을 저하시킬 수 있으며, 동적 특성의 저하로 이어질 우려가 있다. 또한 별도의 구동기와 센서의 도입은 비용 상승의 원인이 되기도 한다. 기존 선행 연구들은 로봇 모션 제어 및 별도의 구동기를 통한 진동 제어를 통해 로봇 가공시 발생하는 진동을 효과적으로 저감하였지만, 그 현장에 적용하기에는 비용적, 구조적 한계성을 가지고 있었다. 스펀들 홀더를 통한 진동 저감 방법은 별도의 제어알고리즘 및 구동기 없이 부품 자체에서 수동적 형태로 진동을 저감할 수 있는 방법이다. 댐핑을 가지고 진동 에너지를 흡수하는 물질 또는 구조는 일반적으로 진동 저감에는 매우 효과적이지만, 강성이 약해 정밀 가공을 할 수 없다는 단점이 있다. 본 연구에서는 이러한 문제를 해결하기 위한 새로운 접근으로, Fig. 1과 같은 Auxetic 구조를 적용한 스펀들 홀더 설계를 제안한다.

Auxetic 구조는 일반 재료와는 달리 음의 포아송 비(negative Poisson's ratio)를 갖는 메타물질 구조로, 단일 축에 대한 외부 압력이나 충격을 받을 경우 수직 방향으로 확장하는 대신 수축하는 독특한 변형 특성을 지닌다^[15-18]. 이러한 구조는 외부 진동이나 충격에 대해 국부적인 밀도를 증가시키며, 진동 흡수 및 충격 저감에 효과적이다. 또한 음의 포아송 비를 가지는 구조적 특성상 경량화된 형상으로 강성 유지를 할 수 있어 정밀 가공이 가능하다. 이러한 특징으로 현재 Auxetic 구조를 적용한 경량화 충격 흡수 안전 헬멧이나 신발 등은 이미 상용화되어 제품으로 판매되고 있다. 본 논문에서는 유한요소해석을 통해 Auxetic 구조가 적용된 스펀들 홀더의 변형 특성, 고유 진동수 분석, 임펄스 응답 해석을 수행하고, 이를 기존 스펀들 홀더와 비교하여 진동 저감 성능을 검증하였다. 또한 이러한 Auxetic 구조가 적용된 스펀들 홀더를 제작하여 진동저감 효과를 실험적으로 검증하고자 한다. 실험 결과, 동일한 질량 조건에서도 제작된 Auxetic 스펀들 홀더는 더 우수한 진동 감쇠 성능을 나타냈으며, 로봇 가공 표면 품질이 향상되었음을 실험적으로 확인한 내용을 다루고 있다.

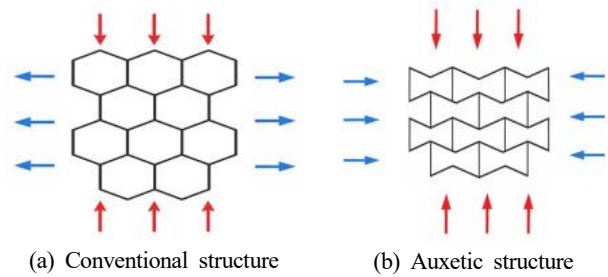


Fig. 1 Auxetic structure

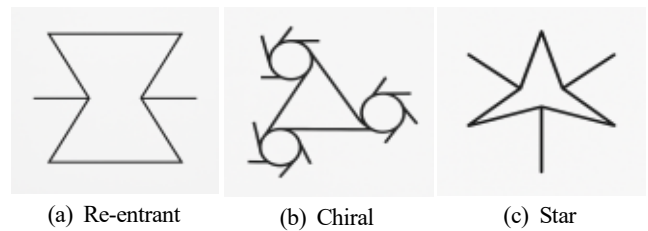


Fig. 2 Auxetic unit cell

2. Auxetic 스펀들 홀더 설계

2.1 Auxetic 구조 선정

본 연구에서는 로봇 가공 시 발생하는 진동 문제를 해결하기 위한 방안으로, Fig. 1과 같은 음의 포아송 비 특성을 가지는 Auxetic 구조를 스펀들 홀더에 적용하고자 하였다. Auxetic 구조 특징상 외부로부터 진동이나 충격이 가해질 때 국부적인 밀도 증가를 유도하여 에너지를 분산시킬 수 있기 때문에, 로봇 가공 시 발생하는 진동 감쇠와 충격 흡수에 매우 효과적일 수 있을 것이라고 판단하였다. 외팔보 구조 끝단에 무거운 가공 스펀들의 부착되어 있는 로봇 가공 시스템은 공구날이 가공물을 절삭 할 때마다 주기적인 충격이 가해지게 되는데, Auxetic 구조의 충격 흡수 특성은 진동에 민감한 로봇 가공 환경에서 매우 유리하게 작용할 수 있다. Auxetic 구조는 다양한 형태의 유닛 셀(unit cell)을 통해 구현할 수 있으며, 대표적으로 Fig. 2와 같은 Re-entrant, Chiral, Star 등의 구조가 있다.

각각의 구조는 고유의 기계적 특성을 가지며, 사용 목적에 따라 선택이 달라지지만, 모두 음의 포아송 비를 가지고 있다. 본 연구에서는 여러 구조 중에서도 Re-entrant 형태의 구조를 선택하여 스펀들 홀더에 적용하였다. Re-entrant 구조는 동적 하중에 대해 상대적으로 높은 안정성을 가지며, 설계 변수 조절이 용이하다는 장점이 있다. 또한 Re-entrant 구조는 이미 다양한 진동 저감 응용 분야에서 그 효과가 입증된 바가 있어 가장 기본적이고 대표적인 auxetic 구조로 알려져 있다^[19-21].

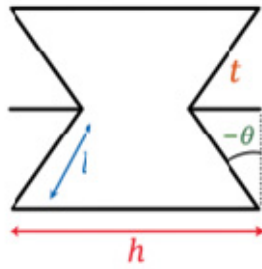


Fig. 3 Re-entrant unit cell design parameters

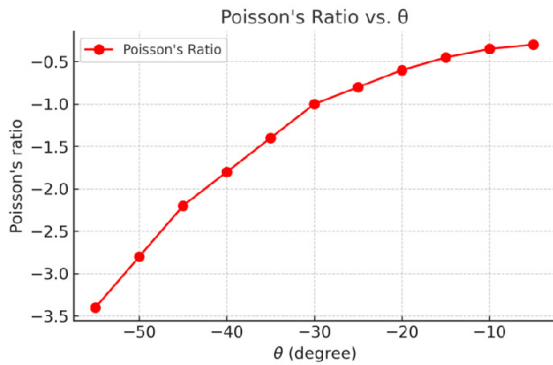


Fig. 4 Effect of re-entrant angle on poisson's ratio in auxetic unit cell

2.2 Auxetic 구조를 적용한 스펀들 홀더 설계

스펀들 홀더의 진동 감쇠 성능을 향상시키기 위한 방안으로, 본 연구에서는 Auxetic 구조, 그중에서도 Re-entrant unit cell을 적용한 설계를 수행하였다. Re-entrant 구조는 음의 포아송 비를 가지는 대표적인 Auxetic 구조로, 외부 하중에 대해 독특한 기하학적 거동을 보이며 진동 및 충격에 대한 흡수 효과가 우수한 것으로 알려져 있다. Auxetic 스펀들 홀더는 복수의 Re-entrant unit cell을 결합하여 구성되며, Fig. 3은 단일 Re-entrant unit cell의 형상을 나타낸다. Fig. 3의 Unit cell은 다음과 같은 주요 설계 변수에 의해 정의된다. h는 Unit cell의 수직 방향 폭, l은 대각 리브(diagonal rib)의 길이, t는 리브 및 외곽을 구성하는 재료 두께, θ는 대각 리브가 이루는 기하학적 각도를 나타낸다. 해당 구조가 굽힘 응력(bending stress)을 받는 조건에서 거동한다고 가정할 때, 포아송 비는 아래의 수식 (1)과 같이 정의될 수 있다.

$$\nu = \frac{\cos^2(\theta)}{(h/l + \sin\theta)\sin\theta} \tag{1}$$

식 (1)은 포아송 비가 재료의 물성치(탄성계수 등)보다는 주로 기하학적 설계 변수, 즉 h, l, θ에 의해 결정된다는 것을 의미한다. 따라서 동일한 재료를 사용하더라도, 형상 설계를 통해 포아송 비의 값을 효과적으로 제어할 수 있다.

Re-entrant unit cell의 주요 설계 변수 중 각도 θ는 포아송 비에

Table 1 Design parameter and value

Parameter	Value
l	10 [mm]
h	20 [mm]
t	1 [mm]
θ	30 [degree]

매우 민감하게 작용하며, Fig. 4에 도시된 바와 같이 비선형적 특성을 가진다. 일반적으로 θ 값이 작아질수록 포아송 비는 더욱 음의 방향으로 증가하며, 구조의 Auxetic 효과가 강하게 나타난다. 본 연구에서는 로봇 가공 시 진동 억제 효과를 극대화하기 위한 조건으로, 포아송 비가 약 -1의 값을 갖는 θ = 30°를 선정하였다. 기타 설계 변수인 h, l, t에 대해서는 본 연구의 주요 목적이 설계 변수의 최적화보다는 음의 포아송 비가 진동 감쇠에 미치는 효과를 검증하는 데 있는 점을 고려하여, 기존 선행 연구에서 자주 활용되는 일반적인 값과 비율을 참조하여 설정하였다. Table 1은 설계 및 제작에 사용한 값들이다. 만약 본 연구를 통해 음의 포아송 비를 갖는 Auxetic 스펀들 홀더가 로봇 가공 진동 억제에 효과적임이 확인된다면, 이후 단계에서는 위 설계 변수들을 주요 설계 인자로 하여 보다 정밀한 최적 설계 수행이 가능할 것이다. 이는 향후 고속·고정밀 가공을 위한 로봇 가공 시스템의 스펀들 홀더 설계에 실질적인 기여를 할 수 있을 것으로 기대된다.

2.3 Auxetic 구조 FEA 시뮬레이션

Auxetic 스펀들 홀더의 구조적 거동 및 진동 특성을 평가하기 위해 본 연구에서는 유한요소해석(finite element analysis, FEA) 시뮬레이션을 수행하였다. Re-entrant cell이 정상적으로 음의 포아송 비 변형이 가능하기 위한 기하학적 조건인 내부 각도 θ < 0 와 구조적 안정성 범위인 t/l ≤ 0.2를 만족하는 조건에서 re-entrant unit cell의 3D CAD 모델을 생성하였다^[22-23]. 상부 평면에 대해 수직 방향으로 4 μm까지 1 μm씩 증가하는 압축 변위를 부여한 후, 이에 따른 수평 방향 변위를 측정하여 포아송 비를 계산하고, 수식 (1)과 비교하여 정확성을 검증하였다. 또한, 단일 Unit cell 간 변형 상호작용이 Auxetic 구조 전체에 미치는 영향을 분석하기 위해, 동일하게 설계된 Re-entrant unit cell을 적용한 8 × 8 배열의 Auxetic 구조를 구성하여 압축 시뮬레이션을 수행하였다. 이 경우에도 수직 변위 입력에 따른 수평 변위를 측정하여 포아송 비를 계산하고, 이론값과의 차이를 분석하였다. 이후, Auxetic 구조를 적용한 스펀들 홀더 모델을 생성하여 로봇 가공 환경에서의 진동 특성을 평가하였다. Auxetic 구조는 공구 축에 수직한 평면 방향에 배치하여, 가공 시 예상되는 진동 흡수 효과를 최대화하도록 설계되었다. 최종적으로 Auxetic 스펀들 홀더의 사양은 시뮬레이션 분석을 통해 음의 포아송 비 특성이 안정적으로 발휘되는

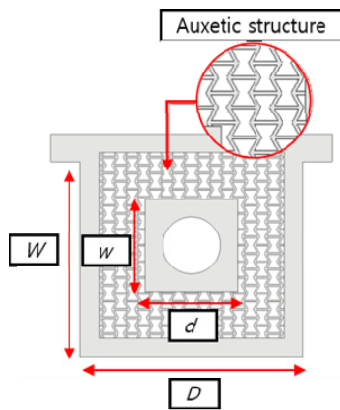


Fig. 5 Auxetic spindle holder demension

Table 2 Auxetic spindle holder Design parameter

Parameter	Value
Dimension (W*D*H)	120 × 120 × 70 [mm ³]
Dimension (w*d*H)	50 × 50 × 70 [mm ³]
Mass	1.681 [kg]

unit cell의 8 × 8 배열 이상의 격자 배치 조건을 충족하도록 설계 되었다. 또한, 사용된 로봇의 가반하중(payload) 내에서 가공 장비 및 측정 센서류의 무게를 제외하고 스피들 홀더 자체의 질량을 3 kg 이내로 제한하였으며, 적층 제조(additive manufacturing) 기기의 작업 공간(250 × 250 × 320 mm)을 고려한 체적 제약을 모두 반영하여 Fig. 5 및 Table 2와 같은 최종 사양을 도출하였다. 진동 특성 분석을 위해 Modal 해석을 수행하여 스피들 홀더의 고유 진동 모드 및 공진 주파수를 도출하였다. 분석에서는 Auxetic 스피들 홀더의 로봇 장착부에 고정 경계 조건을 적용하였으며, 1차부터 6차 모드까지의 모드 형상 및 고유 주파수를 확인하였다. 또한, 임펄스 충격 조건으로 공구 축에 수직 방향으로 600 N의 충격 하중을

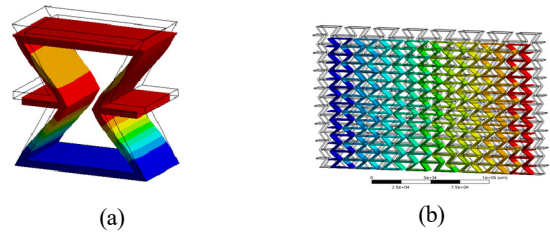


Fig. 6 Total deformation distribution result for (a) re-entrant unitcell and (b) auxetic structure

입력하여 시간 영역에서의 진동 응답 및 감쇠 거동, 공진 주파수를 분석하고 두 시뮬레이션의 진동 특성 일치 방향성을 검토하였다.

2.4 시뮬레이션 결과 분석

Re-entrant unit cell에 대한 압축 변형 시뮬레이션 결과, Fig. 6(a)와 같이 설계 의도에 부합하는 Auxetic 변형 특성이 발생함을 확인하였다. Table 3은 압축 변형에 따른 수직 및 수평 변위, 계산된 포아송 비, 이론값과의 오차를 정리한 것이다. 분석 결과, Re-entrant unit cell은 주어진 압축 변위 범위 내에서 약 -0.84의 일정한 포아송 비를 유지하였으며, 이론값 대비 약 15%의 오차를 보였다. 8 × 8 배열로 확장된 Auxetic 구조에 대한 시뮬레이션 결과에서도, Fig. 6(b)에 나타난 바와 같이 Unit cell 간 상호작용에 따른 수평 방향 변형의 구배가 나타나지 않고 균일한 수축 거동을 보였다. Table 4에 정리된 데이터에 따르면, Auxetic 구조 또한 단일 Unit cell과 유사하게 약 -0.84의 포아송 비를 나타냈으며, 이론값 대비 약 16%의 오차가 발생하였다. 이러한 오차는 이론 모델과 FEA 경계 조건 사이의 차이에서 기인한 것으로 판단된다. 본 논문에서 제시된 수식(1)은 구조 중심을 기준으로 위아래 양방향에서 대칭적으로 압축이 가해지는 조건을 전제로 유도된 반면,

Table 3 Results of Poisson's ratio and deformation in re-entrant unit cell simulation

Displacement (verticla) [μm]	Average deformation (horizontal) [μm]	Poisson's ratio (simulated)	Poisson's ratio (theoretical)	Error [%]
1	0.84	-0.84	-1	16
2	1.69	-0.85		15
3	2.53	-0.84		16
4	3.38	-0.85		15

Table 4 Results of Poisson's ratio and deformation in auxetic structure simulation

Displacement (verticla) [μm]	Average deformation (horizontal) [μm]	Poisson's ratio (simulated)	Poisson's ratio (theoretical)	Error [%]
1	0.84	-0.84	-1	16
5	4.2	-0.84		16
10	8.4	-0.84		16
50	4.2	-0.84		16

Table 5 Nature frequency for auxetic spindle holder

Mode	Natural frequency [Hz]
1	1304.7
2	2406.9
3	3049.9
4	3941.5
5	5919.1
6	6996.8

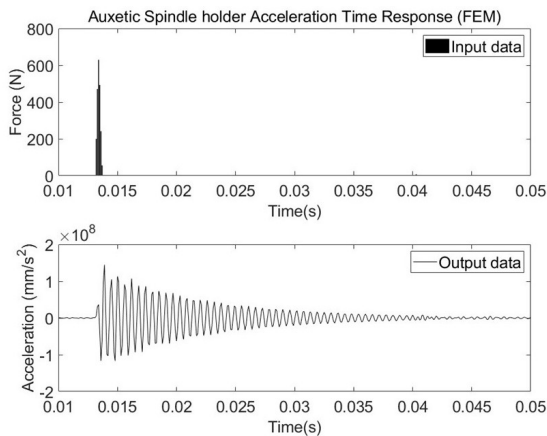


Fig. 7 Input/Output data of TCP in time domain

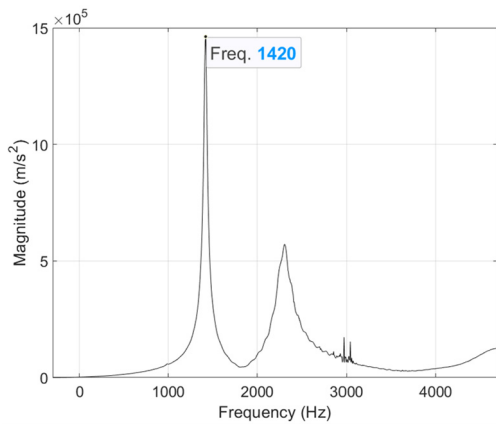


Fig. 8 Peak point and peak frequency

본 FEA에서는 모델 하단면에 고정 경계 조건을 적용하고 상단면에만 강제 변위를 부여하였다. 이러한 비대칭 경계 조건으로 인해 수평 방향 변위가 이론값보다 작게 산출되어 포아송 비의 절댓값이 과소 평가된 것으로 판단된다. 한편, 8×8 배열 구조 해석에서도 단일 Unit cell과 동일한 수준의 오차율이 관측되었는데, 이는 8×8 배열에 인가된 강제 변위가 단일 cell 대비 10배 이상으로 설정되어 전체 구조에 대한 변형률 수준이 단일 cell의 경우와 동일하였기 때문이다. 즉, 변형률 수준이 동일함에 따라 하단 고정 경계 조건의 상대적 영향이 배열 구조 전체에 걸쳐 동일하게 유지되어, 배열 규모에 무관하게 일정한 오차율이 체계적으로 발생한다.

것으로 해석된다. 이를 통해, 설계된 Re-entrant unit cell이 목표한 음의 포아송 비 특성을 안정적으로 구현하였으며, Auxetic 구조로 확장되었을 때에도 일관된 변형 특성을 유지함을 확인할 수 있었다. Auxetic 스펴들 홀더에 대한 Modal 해석 결과인 각 모드별 고유 진동수는 Table 5에 제시되어 있으며, 7,000 Hz 이내에서 총 6개 모드에 대응하는 고유주파수가 관측되었다. Auxetic 스펴들 홀더의 1차 모드 주파수는 약 1304.7 Hz로 도출되었다. 1차 모드는 구조물의 가장 낮은 에너지 상태에서의 진동 특성을 반영한다. 1차 모드에 대한 정보는 초기 실험 설계단계 가공 조건을 설정하는 기준점이 될 뿐만 아니라, 이후 임펄스 응답 해석과의 비교 분석을 위한 핵심 기준값으로 활용된다.

Fig. 7은 TCP 위치에 임펄스 하중을 가했을 때의 가속도 응답을 시간 영역에서 나타낸 결과로, 충격 이후 시간 경과에 따라 Auxetic 구조에 따른 진동감쇠가 정상적으로 시뮬레이션 완료되었음을 나타낸다. 이후 이를 주파수 응답함수로 변환하였고, Fig. 8에서 주요 피크 주파수는 1420 Hz에서 나타나는 것을 확인하였다. 이는 Modal 해석을 통해 도출된 1차 고유 주파수와 근접한 값을 가지며 이 차이는 임펄스 하중 시뮬레이션 모델에 추가된 스펴들 및 공구의 가상 질량과 강성에 기인한 것으로 해석된다. 시뮬레이션 상에서 도출된 공진 주파수가 Modal 해석 결과와 근접하다는 것은 모델의 신뢰성과 동적 해석의 신뢰성을 뒷받침한다. 본 연구의 동적 특성 시뮬레이션 결과는 실험 설계 및 실제 가공 조건 설정에 있어 매우 중요한 시사점을 제공한다. 시뮬레이션 결과에서 도출된 공진 주파수와 주파수 응답 함수 상의 피크는 실험이나 실제 가공 조건에서 진동이 가장 크게 증폭될 수 있는 주파수 대역을 의미하므로, 이를 피하기 위한 안정한 가공 주파수 설정이 필요하다. 예를 들어 가공 스펴들의 특정 RPM 조건에서 공진 주파수와 배수 관계를 갖는 경우 진동이 강화되는 불안정 영역에 진입할 가능성을 사전 예측할 수 있고, 주파수 대역을 회피하는 스펴들 RPM을 설정하여 회피할 수 있다. 결과적으로, 본 시뮬레이션 분석은 Auxetic 스펴들 홀더의 동적 거동을 정량적으로 평가하고, 안정적인 로봇 가공 조건 설정을 위한 유효한 설계 지침을 제공한다. 이는 점에서 실질적인 의미를 가진다.

3. 로봇 가공 스펴들 홀더 진동 감쇠 평가

3.1 로봇 가공 시스템 구축

Auxetic 스펴들 홀더의 진동 감쇠 효과를 실험적으로 검증하기 위해 로봇 가공 시스템을 구축하였다. Auxetic 스펴들 홀더는 복잡한 격자 구조의 제작에 적합한 금속 적층 제조 공정을 이용하여 제작되었다. Auxetic 스펴들 홀더의 진동 저감 능력 향상의 기준을 마련하기 위해 일반(general) 스펴들 홀더를 제작하였다. 일반

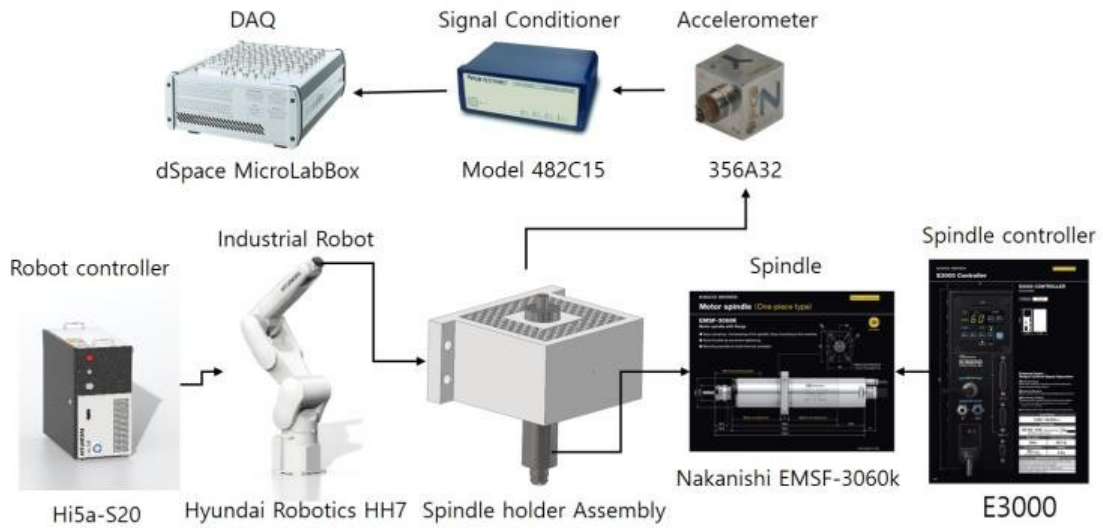


Fig. 9 Configuration of robot machining system

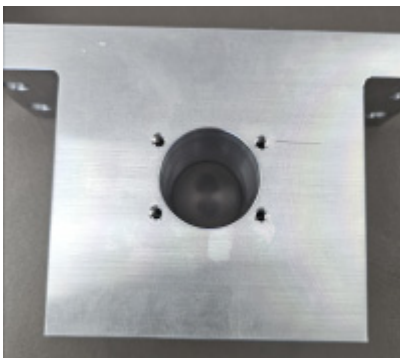
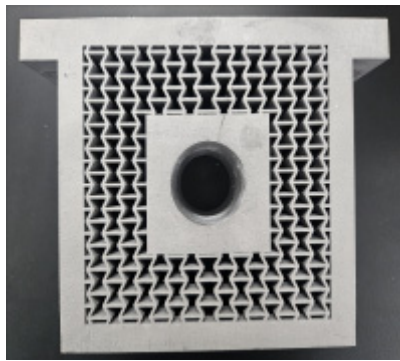


Fig. 10 External appearances of (a) the auxetic spindle holder and (b) the general (non-auxetic) spindle holder fabricated for comparative analysis

스핀들 홀더는 Auxetic 구조 적용에 따른 순수한 진동 감쇠 효과를 비교 판단하기 위한 대조군으로, 내부에 격자 구조가 없는 블록 (solid) 형태로 제작하였다. 특히 로봇의 제한된 가반하중을 고려하여 두 스핀들 홀더가 동일한 질량을 가지도록 실험 변인을 통제하였다. 내부가 딱 찬 일반 스핀들 홀더가 Auxetic 스핀들 홀더와

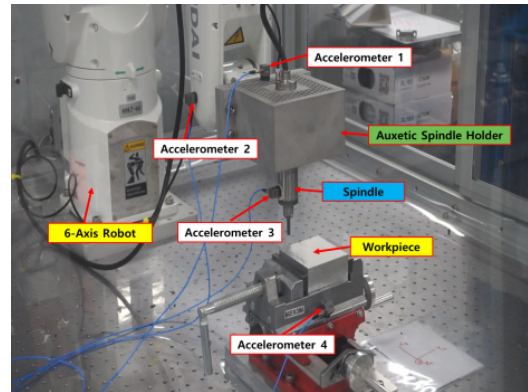


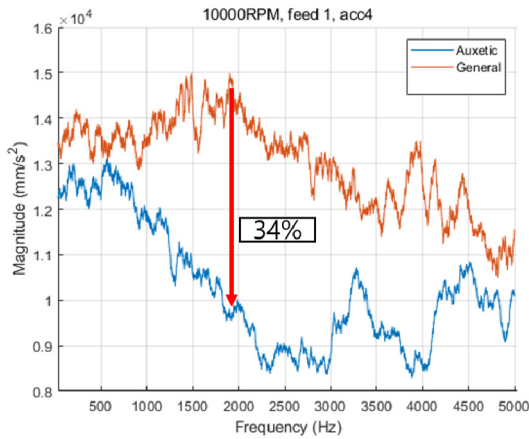
Fig. 11 Experimental setup for robotic machining vibration test

Table 6 General Spindle holder design parameter

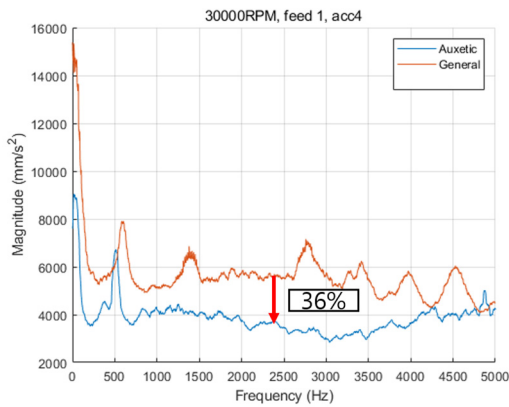
Parameter	Value
Dimension(W*D*H)	96 × 96 × 70 [mm ³]
Mass	1.731 [kg]
Difference*	+ 2.9%

*difference compared to the Auxetic spindle holder

동일한 질량을 갖기 위해, 기존 Auxetic 스핀들 홀더와 동일한 정방형 비율의 단면을 유지한 상태로 부피를 축소하여 설계하였다. 이를 통해 동일 질량 조건에서 Auxetic 구조가 진동 저감에 미치는 긍정적 효과를 보다 명확하게 검증하고자 하였다. Fig. 10에서 제작된 두 스핀들 홀더의 외관을, Table 6에서 일반 스핀들 홀더의 사양을 확인 할 수 있다. 로봇 가공 시스템의 전체 구성은 Fig. 9에 제시되어 있으며, 주요 구성 요소는 다음과 같다. 가공 장비로는 가반하중 7kg급 6자유도 산업용 로봇(Hyundai Robotics, HH7)을 사용하였고, 로봇 제어는 HI5a-S20 제어기를 이용하여 수행하였다. 스핀들은 Nakanishi 사의 EMSF-3060k 모델을 적용



(a) Frequency response comparison at 10,000 RPM and 1 mm/s feed rate (Sensor ACC4)



(b) Frequency response comparison at 30,000 RPM and 1 mm/s feed rate (Sensor ACC4)

Fig. 12 Acceleration response spectrum comparison

하였으며, 스피들 제어기는 E3000 컨트롤러를 사용하였다. 가공 중 발생하는 진동을 측정하기 위해 PCB Piezotronics 사의 3축 가속도 센서(356A32)를 각 구성 요소(스핀들 홀더, 로봇 관절, 스피들 본체, 워크피스)에 부착하였다. 측정된 가속도 데이터는 dSPACE MicroLabBox를 이용하여 수집하고 분석하였다. 구축

된 시스템은 이하 서술할 다양한 가공 조건에서 Auxetic 스피들 홀더의 진동 저감 성능 및 가공 품질 향상 효과를 실험적으로 검증하는 데 활용되었다.

3.2 로봇 가공 스피들 홀더 진동 측정 실험

구축된 로봇 가공 시스템에 Auxetic 스피들 홀더를 장착하여, 가공 중 스피들 홀더를 포함한 시스템 주요 구성 요소들의 진동 저감 효과와 가공물 품질 향상 효과를 검증하기 위한 실험을 수행하였다. Fig. 11은 실험 장비 구성을 나타낸 것으로, 스피들 홀더, 로봇 관절, 스피들 본체, 워크피스의 네 지점에 3축 가속도 센서를 부착하여 각 부위별 진동 응답을 측정하였다. 로봇 가공 방식은 Auxetic 스피들 홀더의 설계 목적에 부합하도록, 수평 방향 직선 엔드밀 절삭을 적용하였다. 가공 시편은 낮은 절삭력으로 가공이 용이한 Al6061 알루미늄 합금 소재의 70 × 70 × 30 mm³ 직육면체 블록을 사용하였다. 사용된 공구는 초경합금(cemented carbide) 재질의 직경 6 mm, 2날 플랫폼 엔드밀이다. 로봇 가공 스피들 홀더 진동 측정 실험은 공구 회전 속도(RPM)와 이송 속도(feed rate)를 변수로 설정하여 진행하였다. 공구 회전 속도는 10,000-50,000 RPM 범위로 설정하였으며, 30,000 RPM을 기준으로 저속(10,000-30,000 RPM) 및 고속(30,000-50,000 RPM) 영역으로 구분하였다. 각 영역 내에서 이송 속도는 저속 영역에서는 1 mm/s 및 5 mm/s, 고속 영역에서는 5 mm/s 및 10 mm/s로 설정하여 다양한 가공 조건을 구현하였다. 모든 실험 조건에서 절삭 깊이(depth of cut)는 1 mm로 통일하였다. 각 조건에 대해 Auxetic 스피들 홀더와 일반 스피들 홀더를 번갈아 장착하여 동일 조건 하에 비교 실험을 수행하였으며, 총 24회의 직선 엔드밀 로봇 가공 실험을 완료하였다.

3.3 Auxetic 스피들 홀더의 진동 저감 효과

로봇 가공 실험 결과, 대부분의 조건에서 Auxetic 스피들 홀더를 적용한 경우 일반 스피들 홀더 대비 가속도 응답 크기가 감소하

Table 7 Surface roughness(Ra) measurement table by experimental conditions

1. Low RPM						
RPM	10,000		20,000		30,000	
Feed [mm/s]	1	3	1	3	1	3
Auxetic	1.160 μm	1.356 μm	0.791 μm	0.542 μm	0.628 μm	0.442 μm
General	1.587 μm	broken	0.703 μm	1.835 μm	0.671 μm	1.053 μm
2. High RPM						
RPM	30,000		40,000		50,000	
Feed [mm/s]	5	15	5	15	5	15
Auxetic	0.629 μm	0.662 μm	0.534 μm	0.786 μm	0.390 μm	0.738 μm
General	1.076 μm	broken	0.546 μm	0.731 μm	0.725 μm	1.054 μm

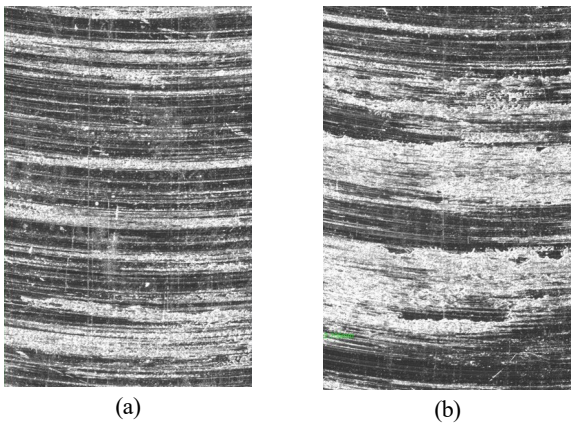


Fig. 13 Comparison of machined surface conditions (a) auxetic and (b) non-auxetic spindle holders

는 경향을 보였다. Fig. 12는 주파수 영역에서 측정된 가속도 응답의 일부 실험조건 결과를 나타내며, Auxetic 스펀들 홀더(blue line)를 적용했을 때 일반 스펀들 홀더(red line)에 비해 진동 응답 크기가 현저히 낮게 나타난 것을 확인할 수 있다. 가속도 응답의 크기를 비교하였을 때, Auxetic 스펀들 홀더는 일반 스펀들 홀더를 사용하였을 때보다 평균 40% 이하의 진동 저감이 확인되었다. 이에 대한 유의미한 결과로 Auxetic 스펀들 홀더의 진동 저감 효과는 가공물 표면 품질 향상으로도 이어졌다. 가공 후시편의 표면 조도(Ra)를 측정하여 정량적으로 비교하였으며, 실험 조건별 결과는 Table 7에 정리하였다. 대부분의 가공 조건에서 Auxetic 스펀들 홀더를 적용한 경우 일반 홀더 대비 낮은 표면 조도 값을 나타냈다. Fig. 13은 동일 가공 조건에서 Auxetic 스펀들 홀더(a)와 일반 스펀들 홀더(b)를 적용하여 가공한 시편 표면을 비교한 사진으로, Auxetic 스펀들 홀더를 사용한 경우 표면이 보다 균일하고 매끄럽게 가공되었음을 육안으로도 확인할 수 있다. 표면 조도 분석 결과, Auxetic 스펀들 홀더 적용 시 일반 스펀들 홀더 대비 최대 49.6%, 평균 21.8%의 표면 품질 개선 효과를 나타냈다. 또한, 상대적으로 낮은 RPM 대비 높은 이송 속도를 설정한 실험 조건에서는 일반 스펀들 홀더 사용 시 가공물과의 충격으로 인해 공구가 파손되어 실험이 중단된 사례가 발생한 반면, Auxetic 스펀들 홀더를 사용한 경우 공구 손상 없이 모든 실험이 정상적으로 완료되었다. 이는 Auxetic 스펀들 홀더의 진동 저감 특성이 가공 중 충격을 효과적으로 완화하여 공구 보호에 기여했음을 시사한다. 이러한 결과는 Auxetic 스펀들 홀더가 로봇 가공의 가공 조건 범위를 확장시키고, 보다 높은 Feed rate 조건에서도 안정적인 가공을 가능하게 하며, 결과적으로 생산성 향상 및 공구 수명 연장에도 긍정적인 영향을 미칠 수 있음을 보여준다. 요약하면, 로봇 가공 진동 측정 실험과 표면 조도 비교를 통해, Auxetic 스펀들 홀더가 기존 대비 우수한 진동 감쇠 성능을 제공하며, 이는 로봇 가공 품질 향상 및 생산성

증대에 실질적으로 기여할 수 있음을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 로봇 가공 시 발생하는 진동 문제를 해결하고자 음의 포아송 비(negative Poisson's ratio)를 가지는 Auxetic 구조를 스펀들 홀더 설계에 적용하였다. Re-entrant 형태의 Auxetic unit cell을 기반으로 설계된 스펀들 홀더는 유한요소해석(FEA)을 통해 변형 특성, 고유 진동수, 임펄스 응답을 시뮬레이션하여 구조적 특성과 진동 특성을 분석하였다. 시뮬레이션 결과, 설계된 Auxetic 스펀들 홀더는 음의 포아송 비와 그에 따른 변형을 안정적으로 구현하였으며, 감쇠 성능 및 고유진동수에 대한 정보를 교차 검증하여 얻을 수 있었다. 로봇 가공 스펀들 홀더 진동 측정 실험에서는 Auxetic 스펀들 홀더와 일반 스펀들 홀더를 비교하여 진동 응답의 크기와 가공 품질을 평가하였다. Auxetic 스펀들 홀더를 적용했을 때, 전반적으로 가속도 응답 진폭이 감소하였고, Auxetic 구조의 설계 방향에서 진동 감쇠 효과가 두드러지게 나타났다. 또한, 낮은 RPM 대비 높은 Feed rate 조건에서는 일반 스펀들 홀더가 공구 파손으로 인해 가공을 완료하지 못한 반면, Auxetic 스펀들 홀더는 공구 파손 없이 모든 실험 조건에서 가공을 정상적으로 완료하였다. 이는 Auxetic 스펀들 홀더가 진동 에너지를 효과적으로 흡수하여, 로봇 가공의 안정성과 작업 범위를 확장시킬 수 있음을 시사한다. 가공 후 표면 조도(Ra) 분석 결과, Auxetic 스펀들 홀더는 일반 스펀들 홀더 대비 평균 21.8%, 최대 49.6%까지 표면 품질이 향상되는 효과를 보였다. 이러한 결과는 Auxetic 구조를 적용함으로써 진동 저감과 동시에 경량화 및 강성 유지를 달성할 수 있음을 실험적으로 입증한 것이다. 결론적으로, 본 연구에서 제안한 Auxetic 스펀들 홀더는 로봇 가공 공정에서 발생하는 진동을 효과적으로 감쇠하고, 공구 수명 및 가공 품질을 향상시킬 수 있는 유효한 방안을 확인하였다. 향후 Auxetic 구조 최적화를 통한 추가적인 경량화 및 주파수 대역별 진동 감쇠 성능 향상 연구를 통해, 다양한 로봇 가공 응용 분야로의 확장이 기대된다.

후 기

이 연구는 경기도의 경기도지역협력연구센터(GRRC) 사업의 일환으로 수행하였으며 [(GRRC한국공대2024-B02), 3D 프린팅 후처리 자동화를 위한 도킹시스템 및 공정기술 개발] 연구비 지원에 의한 연구임.

References

- [1] Wang, W., Guo, Q., Yang, Z., Jiang Y., Xu, J., 2023, A State-of-the-Art Review on Robotic Milling of Complex Parts with High Efficiency and Precision, *Robot. Comput.-Integr. Manuf.*, 79 102436, <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2022.102436>.
- [2] Kim, H., Hong, T., Kim, S., 2025, Robot Posture Control for Precise Trimming of Carbon Fiber Preforms, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 34:6 445-451, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2025.34.6.445>.
- [3] Jeong, S., Kang, H., Je, H., Lee, S., Shim, J., Kim, K., Kim, H., 2024, Research on Delta Robots for Miniature Object Sorting Using Image Processing Technology, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 33:6 365-375, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.6.365>.
- [4] Ji, W., Wang, L., 2019, Industrial Robotic Machining: A Review, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 103 1239-1255, <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>.
- [5] Wan, M., Shen, C.-J., Qu, X., Yang, Y., Zhang, W.-H., 2025, Chatter Stability of the Robotic Milling Process Involving the Influences of Low Frequency Vibrations in Three Directions, *Mech. Syst. Signal Process.*, 224 112014, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2024.112014>.
- [6] Ji, Y., Wang, L., Song, Y., Wang, H., Liu, Z., 2022, Investigation of Robotic Milling Chatter Stability Prediction under Different Cutter Orientations by an Updated Full-Discretization Method, *J. Sound Vib.*, 536 117105, <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2022.117150>.
- [7] Li, M., Huang, D., Yang, X., 2021, Chatter Stability Prediction and Detection During High-Speed Robotic Milling Process Based on Acoustic Emission Technique, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, 117 1589-1599, <https://doi.org/10.1007/s00170-021-07844-3>.
- [8] Xin, S., Tang, X., Wu, J., Peng, F., Yan, R., Yang, W., 2023, Investigation of the Low-Frequency Chatter in Robotic Milling, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, 190 104048, <https://doi.org/10.1016/j.ijmachtools.2023.104048>.
- [9] Kim, D., Lee, J., Seo, J., 2024, Toolpath Dependent Chatter Stability analysis During Milling Process, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 33:2 107-112, <https://doi.org/10.7735/ksmte.2024.33.2.107>.
- [10] Jo, M. H., Kim, H., Koo, J. Y., Lee, J. H., Kim, J. S., 2024, Signal Acquisition for Effective Prediction of Chatter Vibration in Milling Processes, *J. Korean Soc. Manuf. Technol. Eng.*, 23:4 325-329, <https://doi.org/10.7735/KSMTE.2014.23.4.325>.
- [11] Celikag, H., Sims, N.D, Ozturk, E., 2019, Chatter Suppression in Robotic Milling by Control of Configuration Dependent Dynamics, *Procedia CIRP*, 82 521-526, <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.04.053>.
- [12] Lee, J., Hong, T., Seo, C. -H, Jeon, Y. H., Lee, M. G., Kim, H. -Y., 2021, Implicit Force and Position Control to Improve Drilling Quality in CFRP Flexible Robotic Machining, *J. Manuf. Process.*, 68:Part A 1123-1133, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.06.038>.
- [13] 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>.
- [14] Yuan, L., Sun S., Pan, Z., Ding, D., Gienke, O., Li, W., 2019, Mode Coupling Chatter Suppression for Robotic Machining Using Semi-Active Magnetorheological Elastomers Absorber, *Mech. Syst. Signal Process.*, 117 221-237, <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.07.051>.
- [15] Chen, Y. -L, Wang, X. -T, Ma, L., 2020, Damping Mechanisms of CFRP Three-Dimensional Double-Arrow-Head Auxetic Metamaterials, *Polym. Test.*, 81 106189, <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2019.106189>.
- [16] Chen, Y. -L, Wang, D. -W, Ma, L., 2021, Vibration and Damping Performance of Carbon Fiber-Reinforced Polymer 3D Double-Arrow-Head Auxetic Metamaterials, *J. Mater. Sci.*, 56 1443-1460, <https://doi.org/10.1007/s10853-020-05366-z>.
- [17] Ma, L., Chen, Y. -L., Yang, J. -S., Wang, X. -T., Ma, G. -L., Schmidt, R., Schroder, K. -U., 2018, Modal Characteristics and Damping Enhancement of Carbon Fiber Composite Auxetic Double-Arrow Corrugated Sandwich Panels, *Compos. Struct.*, 203 539-550, <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2018.07.006>.
- [18] Kim, J., Hegde, H., Kim, H. -Y., Lee, C. B., 2022, Spindle Vibration Mitigation Utilizing Additively Manufactured Auxetic Materials, *J. Manuf. Process.*, 73 633-641, <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2021.11.051>.
- [19] Wallbanks, M., Khan, M. F., Bodaghi, M., Triantaphyllou, A., Serjouei, A., 2022, On the Design Workflow of Auxetic Metamaterials for Structural Applications, *Smart Mater. Struct.*, 31 023002, <https://doi.org/10.1088/1361-665X/ac3f78>.

- [20] Zhang, X. -W., Yang, D. -Q., 2016, Numerical and Experimental Studies of a Light-Weight Auxetic Cellular Vibration Isolation Base, *Shock Vib.*, 2016:1 4017534, <https://doi.org/10.1155/2016/4017534>.
- [21] Liu, W., Wang, N., Luo, T., Qiong, Z., 2016, In-Plane Dynamic Crushing of Re-Entrant Auxetic Cellular Structure, *Mater. Des.*, 100 84-91, <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.03.086>.
- [22] Gibson, L., Ashby, M., 1997, *Cellular Solids: Structure and Properties* (2nd ed.), Cambridge University Press, Cambridge, UK.
- [23] Masters, I. G., Evans, K. E., 1996, Models for the Elastic Deformation of Honeycombs, *Compos. Struct.*, 35:4 403-422, [https://doi.org/10.1016/S0263-8223\(96\)00054-2](https://doi.org/10.1016/S0263-8223(96)00054-2).

	<p>Juhyeop Park Researcher in the Department of IT Semiconductor Convergence Engineering. His research focuses on robot machining and manufacturing system. E-mail: 2017122012@tukorea.ac.kr</p>
	<p>Seong Hyeon Kim Principle Researcher in the Industrial Transformation Technology Department, KITECH. His research focuses on robot machining and manufacturing system. E-mail: shkim@kitech.re.kr</p>
	<p>Jaehong Shim Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea. His research interests include autonomous mobile robot navigation with visual SLAM and image processing system like as robot hand-eye. E-mail: jhshim@tukorea.ac.kr</p>
	<p>Kihyun Kim Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea. His research interests include design and control for high performance mechatronics and new patterning process and systems. E-mail: khkim12@tukorea.ac.kr</p>
	<p>Hyo-Young Kim Professor in the Department of Mechatronics Engineering, Tech University of Korea. His research interests include robotic manufacturing system with AI technology and precision control system. E-mail: kimhy@tukorea.ac.kr</p>