

PBF 적층 기반 엔드밀 공구 바디의 내부 격자구조 설계에 따른 정적 해석 및 시제품 제작

Static Analysis and Fabrication of Sample according to the Internal Lattice Structure Design of Endmill Tool Body based on Powder Bed Fusion Technology

손호민¹, 김동규², 사민우^{1, #}
Ho Min Son¹, Dong Gyu Kim², and Min-Woo Sa^{1, #}

¹ 에스제이엔텍 기업부설연구소 (R&D Center, SJNTEC)

² (재)대구기계부품연구원 정밀가공융합기술지원센터 (Center for Advanced Cutting Tool and Machining, Daegu Mechatronics & Materials Institute)

Corresponding Author / E-mail: 79smw42@gmail.com, TEL: +82-53-586-6210

ORCID: 0000-0003-0979-8736

KEYWORDS: Metal 3D printing (금속 3D 프린팅), Powder bed fusion (분말 적층 용융), Cutting tool (절삭공구), Lattice structure (격자구조), End mill (엔드밀)

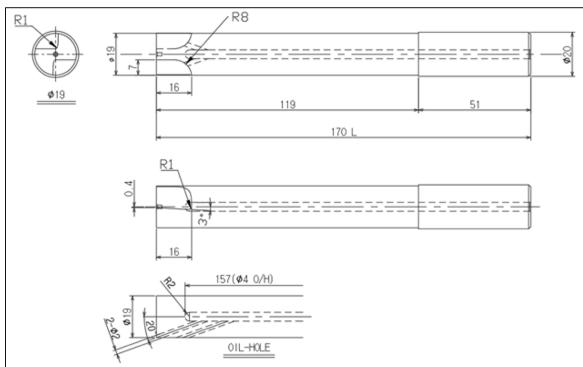
Product development based on metal 3D printing has been expanding steadily in the manufacturing industry. Powder bed fusion (PBF) is currently the most widely used metal 3D printing method, as it produces parts of complex shape with high precision. Applying PBF to the cutting tool industry could shorten process time relative to conventional sintering routes and reduce the material waste generated during machining. It also allows internal lattice structures and fluid channels to be designed within the tool, facilitating light-weighting and improved cutting performance. In this study, nTop software was first used to design the internal lattice structure of an end mill tool for additive manufacturing and to perform the corresponding simulation analysis. Three configurations were compared, in which the tool lattice was defined either by thickness dimension or by thickness range, and the reinforced results confirmed that none of the designs posed problems for actual additive manufacturing within the software. On this basis, tool bodies were fabricated on PBF metal 3D printing equipment, and their feasibility for tool applications was evaluated.

Manuscript received: March 4, 2026 / Revised: June 18, 2026 / Accepted: August 4, 2026
This paper was presented at KSPE Autumn Conference in 2025

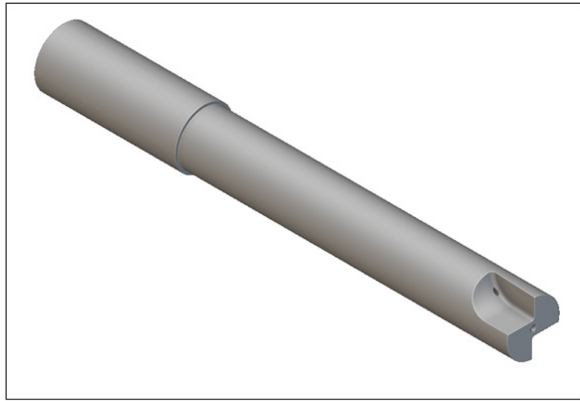
1. 서론

여러 산업 분야에서 금속 3D 프린팅 기술의 활용성이 점차 증가되고 있어 이를 활용한 혁신적인 제품 개발이 활발히 진행되고 있다[1-4]. 금속 3D 프린팅 방식 중 분말 적층 용융 (Powder Bed Fusion) 방식은 금속 분말 소재를 얇은 층으로 도포한 후 레이저나 전자빔을 선택적으로 조사하여 용융시켜 적층하는 기술을 말한다[3-6]. 이 방식은 복잡한 형상을 가진 모델이나 가공이 어려운 난삭재 가공에 유리한 특징이 있다. 절삭공구

제작에서 PBF 방식을 이용한다면 기존 제작 방식인 연삭 가공 공정과 비교해 여러 이점들이 나타난다. 대표적으로 기존 연삭 가공의 공정수를 단축시킬 수 있으며, 설계 데이터를 3D 프린팅 장비에 입력만 하면 원하는 형상으로 제작되는 방식으로 인해 복잡하고 정밀한 형상의 공구 제작이 쉽게 가능하다. 이를 통해 공구 내부의 다양한 내부 격자구조 및 절삭 유로에 대한 제작이 가능하여 공구의 경량화 및 절삭 성능을 향상시킬 수 있다[5-7]. 또한, 공구 제작에 3D 프린팅 기술을 활용한다면 기존 연삭 가공의 고숙련 작업자들이 없어도 제작이 가능하여 인건비를



(a) 2D CAD



(b) 3D modeling

Fig. 1 2D and 3D design of endmill tool body

줄일 수 있음과 동시에 제작 공정에서 가공 칩 배출이 없어 환경 친화적인 제조를 실현시킬 수 있다[8,9].

따라서, 절삭공구 제작에서도 PBF 적층 방식을 이용할 필요가 있다. 적층 기술을 이용해 공구 내부 구조를 다양한 형태로 설계하여 경량화와 진동 감쇠성을 향상시킬 수 있을 것으로 판단되어 공구의 특성을 비교하기 위해 다음과 같이 연구를 실시하였다[10].

본 연구에서는 설계한 엔드밀 공구 바디 형상을 nTop (nTop Software, nTopology, USA) 프로그램을 이용해 공구 내부에 격자구조를 삽입하였고, 격자 선 두께에 대해 치수별로 공구 바디를 각각 설계하였다. 이후, 공구 바디의 경량률 및 정적 시뮬레이션 해석을 분석하여 최적의 결과를 토대로 PBF 적층 방식의 금속 3D 프린팅 장비를 통해 엔드밀 공구 바디를 적층 제조하여 실제 강성 실험을 실시하여 비교 분석하였다. 또한, 공구 바디에 절삭날을 체결하여 엔드밀 공구로 제작한 후 비교 가공 실험을 통해 가공성도 분석하였다.

2. 공구 바디 설계

2.1 엔드밀 공구 바디 형상 설계

엔드밀 공구 바디 제작에 앞서, 공구 바디의 형상 설계를 다음과 같이 실시하였다. Fig. 1은 직경 19 mm의 엔드밀 공구

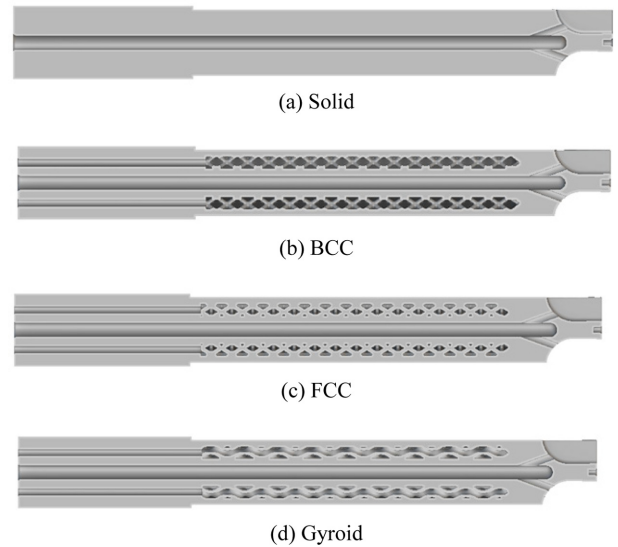


Fig. 2 Designing lattice structures within tools using nTop software

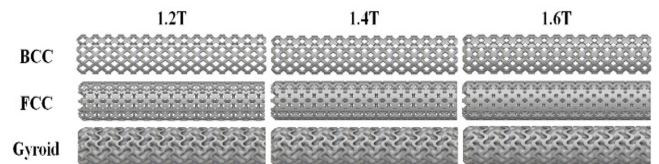


Fig. 3 Shape according to lattice structure thickness dimensions

바디를 2D 및 3D로 설계한 사진이다. 엔드밀 공구 바디의 플루트 수는 2개로 하였으며, 가공 시 각 플루트 면에 절삭유가 나올 수 있도록 2개의 가지형으로 오일 홀을 형성하였다. 플루트 측면의 길이는 16 mm, 폭 길이는 7 mm, 각도는 3°를 주었다. 또한, 공구 바디의 전장 길이는 170 mm, 생크 측면 길이는 51 mm, 생크 직경은 20 mm로 설정하였다.

2.2 공구 바디의 내부 구조 설계

엔드밀 공구 바디 형상 설계 후 nTop 프로그램을 통해 공구 내부에 여러 형태의 격자구조들을 삽입시켰다. 삽입한 격자구조는 BCC (Body Centered Cubic), FCC (Face Centered Cubic), Gyroid로 3가지 형태의 구조이다. 또한, 격자구조의 Unit Cell은 모두 $3.5 \times 3.5 \times 6$ mm로 동일하게 설계하였다.

Fig. 2는 nTop프로그램에서 공구 내부에 각 격자구조별로 삽입한 단면 모습을 보여준다. Fig. 2(a)는 격자구조를 형성하지 않은 일반Solid 형태, Fig. 2(b)는 BCC 격자구조, Fig. 2(c)는 FCC 격자구조 그리고 Fig. 2(d)는 Gyroid 격자구조를 삽입한 공구 바디의 단면을 보여준다. 각 격자구조별로 삽입된 공구 바디의 심층적인 비교 분석을 위해 격자 선 두께 치수별로 다음과 같이 설계하였다. Fig. 3은 3가지 격자 선 두께에 따른 각 격자구조 형상을 보여준다. 설계한 해당 격자 선 두께의 치수는 1.2, 1.4, 1.6 mm이다. 격자 선 두께가 증가할수록 격자 사이의 빈 공간이 점차 줄어드는 것을 볼 수 있다.

Table 1 Mass of Solid structure tool

Type	Tool body mass [g]
Solid	383.31

Table 2 Weight of tools by 3 Lattice structures and lightweight ratio compared to solid tool

Type	Tool body mass [g]			Solid to lightweight ratio [%]		
	1.2T	1.4T	1.6T	1.2T	1.4T	1.6T
BCC	319.08	327.87	337.09	16.76	14.47	12.06
FCC	326.58	335.72	344.75	14.80	12.42	10.06
Gyroid	325.90	332.29	338.57	14.98	13.31	11.67

3. 시뮬레이션 해석

3.1 공구 바디의 경량률 분석

격자구조별로 설계한 엔드밀 공구 바디의 기본 형상인 Solid 구조 대비 경량률을 파악하기 위해 다음과 같이 분석하였다. Table 1은 기본 형상 Solid 구조의 공구 바디의 중량을 nTop 소프트웨어를 통해 측정하여 나타낸 것이며, 383.31 g으로 나타났다. Table 2는 3가지 격자 선 두께에 따른 각 격자구조별 삽입된 엔드밀 공구 바디의 중량 및 Solid 구조 대비 경량률을 나타낸 값이다. 격자구조 모두 격자 선 두께가 증가할수록 경량률이 작게 나타나며, 격자 선 두께가 1.2 mm일 때 BCC 격자구조의 공구 홀터의 경량률이 가장 크게 나타난 것을 볼 수 있다.

3.2 공구 바디의 격자 선 두께에 따른 응력 변형 해석

격자 선 두께에 따른 각 격자구조별로 삽입된 엔드밀 공구 바디의 휘어지는 량과 응력 값을 파악하기 위해 nTop 프로그램을 통해 시뮬레이션 해석을 실시하였다. 시뮬레이션 해석에 앞서, 구속 조건은 Fig. 4와 같이 설정하였다. Fig. 4(a)는 힘의 방향을 지정한 모습으로 절삭날 면으로 힘이 들어가게 설정하였으며, 1,000 N의 힘을 주었다. Fig. 4(b)는 공구에 힘이 들어가는 것을 지지하기 위해 고정면을 생크면으로 설정한 모습이다. Fig. 5는 nTop 프로그램을 통해 정적 시뮬레이션 해석을 실시한 모습이며, 각 격자구조 및 격자 선 두께별에 따른 공구의 최대 변위 및 최대 응력에 대해 나타내었다. Table 3은 기본 형상인 Solid 구조 공구의 최대 변위 및 최대 응력 값을 나타낸 것이다. Solid 구조 공구 바디의 최대 변위 값은 0.45 mm, 최대 응력 값은 244.32 MPa로 측정되었다. Table 4는 3가지 격자 선 두께에 따른 격자구조별로 삽입된 공구 바디의 최대 변위 값에 대한 표이며, Table 5는 각 공구별 최대 응력 값을 나타낸 표이다. 최대 변위 값에서 3가지 격자구조의 공구 바디 모두 격자 선 두께가 증가할수록 변위 값이 낮아지는 것으로 나타난다. 최대 응력 값에서는 BCC 및 FCC 구조의 공구 바디는 격자 선 두께가 증가할수록 응력 값이 높아지지만 Gyroid 구조의 공구 바디는 격자 선 두께 1.4 mm에서는 높아졌지만 1.6 mm에서는 낮아지는

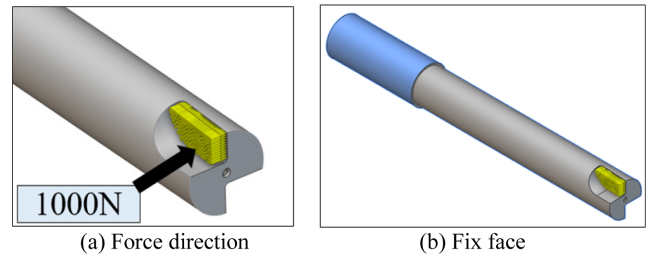


Fig. 4 Setting conditions for simulation analysis

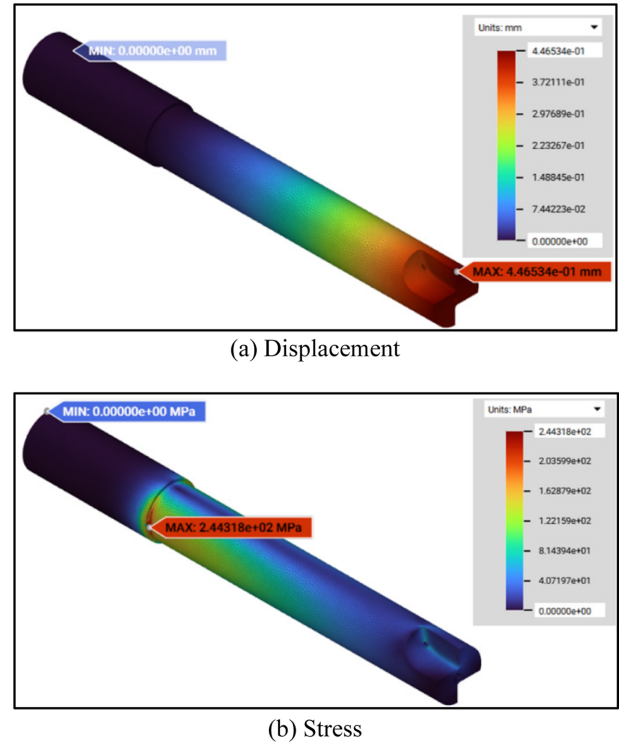


Fig. 5 Simulation analysis of the nTop program

Table 3 Static characteristics of Solid structure tool

Type	Maximum displacement [mm]	Maximum stress [MPa]
Solid	0.45	244.32

Table 4 Maximum displacement of tools by 3 lattice structures

Type	Maximum displacement [mm]		
	1.2T	1.4T	1.6T
BCC	0.62	0.60	0.57
FCC	0.58	0.56	0.53
Gyroid	0.57	0.55	0.53

Table 5 Maximum stress of tools by 3 lattice structures

Type	Maximum stress [MPa]		
	1.2T	1.4T	1.6T
BCC	369.82	369.68	380.27
FCC	386.52	390.97	440.01
Gyroid	301.64	330.05	325.78

Table 6 Static stiffness analysis results for tool bodies of each Lattice structure with a 1.2 mm grid line thickness

Type	Displacement [mm]	Static stiffness [N/mm]
Solid	0.45	2,240
BCC	0.62	1,613
FCC	0.58	1,719
Gyroid	0.57	1,768

것을 볼 수 있다. 이를 통해 격자 선 두께 1.6 mm의 공구 바디가 다른 두께 치수에 비해 높은 변위 값을 가지지만 0.05 mm 미만으로 차이가 거의 나타나지 않았다. 하지만 최대 응력 값에서는 1.2 mm 격자 선 두께의 공구 바디가 다른 두께 치수에 비해 10.45 MPa 이상으로 차이가 나타나 기계적 부하가 적어 가공 시 chatter 진동이 줄어들 것으로 보여진다. 따라서, 1.2 mm 격자 선 두께의 공구 바디가 다른 격자 선 두께에 비해 경량률이 높으면서도 적은 최대 응력 값으로 인해 외부 힘의 분산이 균일하게 잘 발생되어 가공에 대한 효율성이 높을 것으로 판단된다[11].

3.3 공구 바디의 강성 해석

공구 바디 제작에 앞서, 엔드밀 공구의 가공 정밀도 향상에 대한 요인인 강성 특성을 비교하고자 다음과 같이 분석하였다[12]. 바디의 선정된 격자 선 두께 1.2 mm에 대해 각 구조별 공구 바디의 정강성 특성을 비교하기 위해 식(1)을 통해 나타내었다.

$$k_{Static} = \frac{F}{\delta} \quad (1)$$

여기서 정적 등가 강성 값인 k_{static} 는 공구 바디의 절삭날 면으로 들어가는 힘인 F 를 공구 바디의 변위 값인 δ 를 나눈 값으로 구해진다. 힘은 1,000 N이며, 변위 값은 nTop 프로그램을 통해 얻어진 최대 변위 값으로 위 수식에 대입한 결과를 Table 6에 나타내었다. 정강성 결과에서 격자구조가 생성되지 않은 기본 형상인 Solid 공구 바디가 2,240 N/mm로 가장 높게 나타났으며, 격자구조가 생성된 공구 바디에서는 Gyroid 구조가 1,768 N/mm로 가장 높게 나타났다.

또한, 각 격자구조별 공구 바디의 고유 진동수를 통한 모달 강성을 나타내었다. Fig. 6은 nTop 프로그램을 통해 각 격자구조별 공구 바디에 대한 고유진동수를 나타낸 것이다. 모달 강성은 nTop 프로그램을 통해 나타난 1차 고유 진동수를 다음 수식을 통해 대입하여 나타내었다. 모달 강성 값인 k_{Modal} 은 각 격자구조별 공구 바디에 발생하는 1차 고유진동수 f 를 2π 와 곱한 값에 제곱하여 공구 바디의 질량 m 을 곱한 값으로 나타낼 수 있다. 각 격자구조별 공구 바디의 1차 고유 진동수 및 수식을 통해 구해진 모달 강성 값들을 Table 7에 나타내었다. 모달 강성도 정강성과 동일하게 Solid 구조의 공구 바디가 가장 높게 나타났으며, 격자구조가 생성된 바디에서는 Gyroid 구조가 높게 나타났다. 모달 강성이 높을수록 로봇 밀링 시스템의 안정성이 증가된다는

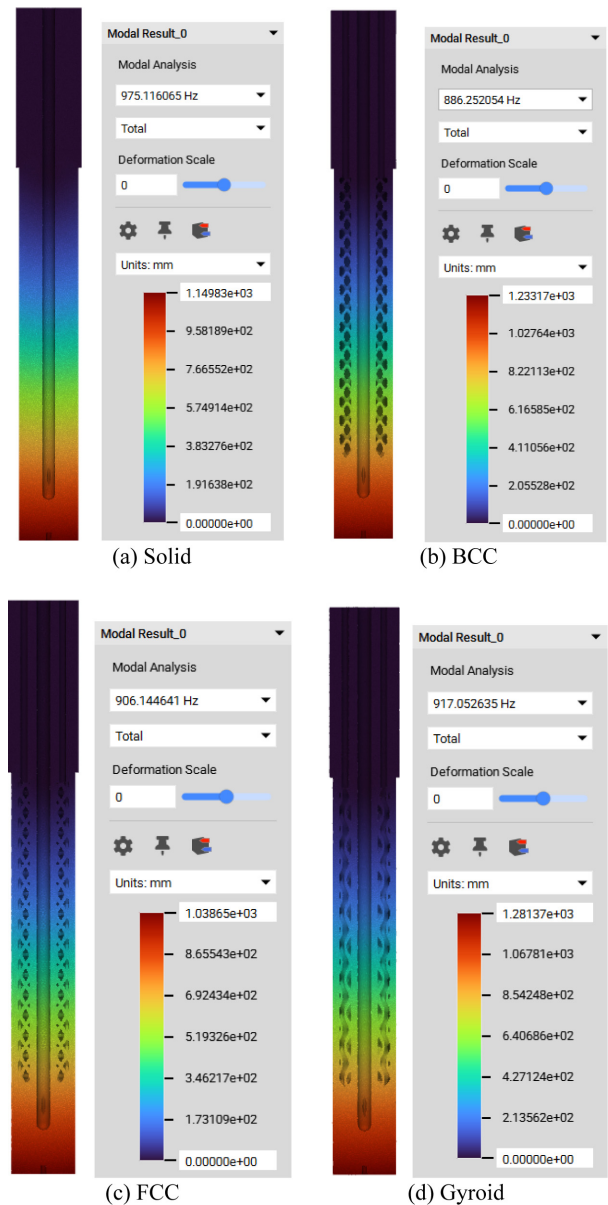


Fig. 6 Natural frequencies of tool bodies by lattice structure

Table 7 Results of modal stiffness analysis for tool bodies of each Lattice structure with a 1.2 mm grid line thickness

Type	Natural frequency [Hz]	Modal stiffness [N/m]
Solid	975.12	1.44E+07
BCC	886.25	0.99E+07
FCC	906.14	1.06E+07
Gyroid	917.05	1.08E+07

문헌을 통해 공구 바디로 제작된 엔드밀의 절삭 가공 중 발생하는 진동에 저항하는 힘이 커질 것으로 사료된다[13].

$$k_{Modal} = (2\pi f)^2 \times m \quad (2)$$



Fig. 7 3D printing equipment

Table 8 Specification of 3D printing equipment

Build volume	250 × 250 × 325 mm
Laser type	Yb fiber laser: 1 × 400 W
Precision optics	F theta lens: High speed scanner
Scan speed	Up to 7.0 m/s
Focus diameter	100 μm
Power supply	1 × 32 A
Power consumption	Max 8.5 kW / Typical 2.4 kW
Compressed air supply	7 Bar: 20 m³/h

Table 9 Properties of Maraging steel powder material

Part density	8.0–8.1 g/cm³
Part Accuracy (Small)	Approx. ±50 μm
Part Accuracy (Large)	Approx. ±0.1%
Layer thickness	40 μm
Hardness rockwell C	50–57 HRC

4. 공구 바디 제작 및 분석

4.1 공구 바디 제작

설계를 토대로 각 공구 내부 구조별에 따른 1.2 mm의 격자 선 두께로 엔드밀 공구 바디를 적층 제조하였다. Fig. 7은 본 엔드밀 공구 바디 제작에 사용된 PBF 방식의 3D 프린팅 장비(M290, EOS GmbH, Germany)이며, 제작에 사용된 적층 분말 소재는 Maraging steel이다. Table 8은 제작에 사용된 3D 프린팅 장비의 제원을 나타내고 있고, Table 9은 사용된 적층 분말 소재인 Maraging Steel의 특성을 보여준다. Fig. 7은 1.2 mm의 격자 선 두께에 대한 격자구조별로 적층 제작된 엔드밀 공구 바디이고, Fig. 9는 최종 생크 직경으로 생크를 연마 가공하여 완성시킨 공구 바디의 모습을 나타내었다. Fig. 10은 적층 제작된 각 구조별 엔드밀 공구 바디를 전자저울(WK-4C,

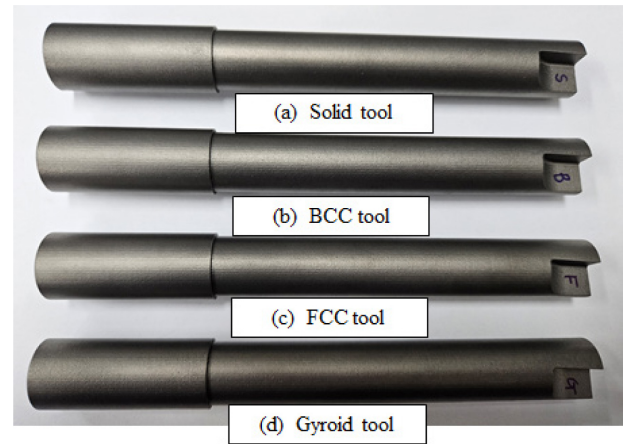


Fig. 8 Endmill tool body manufactured using PBF additive manufacturing

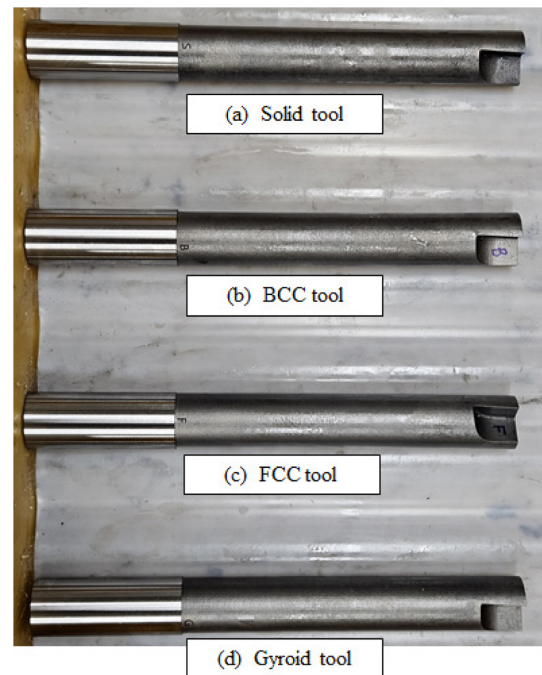


Fig. 9 Endmill tool body with polished shank

CAS, Korea)을 통해 무게를 측정한 모습이다. 측정 결과, FCC 및 Gyroid 격자구조의 공구 바디가 서로 동일하게 나타났고, BCC 격자구조의 공구 바디가 가장 작게 나타난 것을 볼 수 있다.

Fig. 11은 공구 측정 장비(Genius3, Zoller, Germany)를 통해 제작된 엔드밀 공구 바디의 런아웃 및 절삭 날부의 플루트 직경을 측정한 모습이며, 측정 값은 Table 10에 나타내었다. 측정 결과, 4가지 엔드밀 공구 바디에 대한 런아웃은 0.07 mm 이내로 들어오게 되었으며, 플루트 직경 값은 설계 값에 대해 차이가 거의 나타나지 않아 추후 엔드밀 공구 제작에 문제가 없음을 확인할 수 있었다.

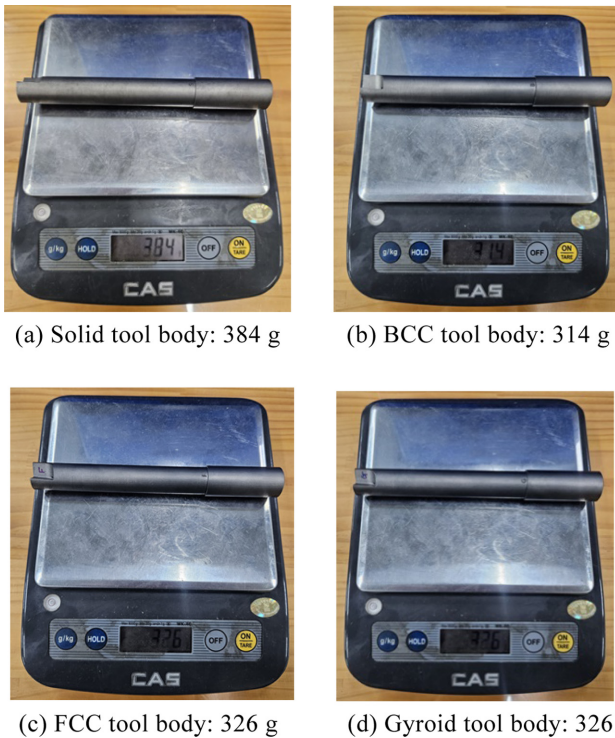


Fig. 10 Weight measurement of the manufactured Endmill tool bodies

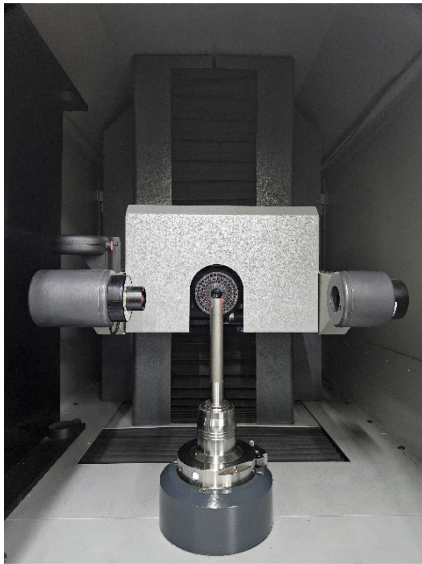


Fig. 11 Dimension measurement set up

Table 10 Dimension information for endmill tool bodies

Type	Run-out [mm]	Diameter [mm]
Solid	0.067	19.042
BCC	0.042	19.049
FCC	0.038	19.012
Gyroid	0.009	19.038

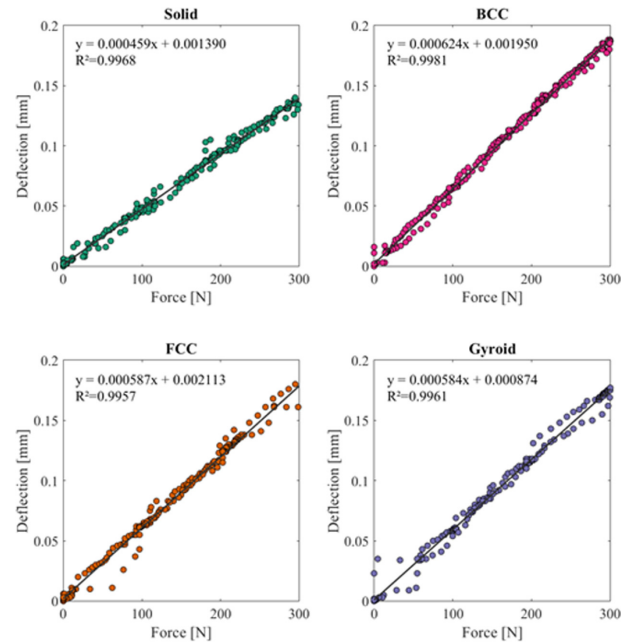


Fig. 12 Static stiffness graph for each tool bodies

4.2 제작된 공구 바디의 강성 특성 분석

공구 바디를 공작기계에 장착 후 인서트와 장착되는 부분인 공구 바디 끝 부분을 로드셀로 힘을 가하여 밀었다. 이때 공구 바디 상단과 하단에 각각 변위센서를 부착하여 변위를 측정하였다. 힘에 따른 상단과 하단 변위 차이를 처짐이라 정의하였으며, 처짐 시험 결과는 Fig. 12에 제시하였다. 기존 Solid 구조는 100 N 힘에서 약 50 μm , 300 N 힘에서 140 μm 의 처짐을 보였다. BCC 구조는 100 N 힘에서 약 66 μm , 300 N 힘에서 188 μm , FCC 구조는 100 N 힘에서 약 60 μm , 300 N 힘에서 180 μm , Gyroid 구조는 100 N 힘에서 약 60 μm , 300 N 힘에서 177 μm 의 처짐을 보였다.

격자구조를 적용하지 않은 Solid와 대비해 격자구조를 적용한 바디는 300 N 하중 조건에서 약 29~48% 큰 처짐을 보였다.

조금 더 직관적으로 비교하기 위해 로드셀로 미는 힘에 대한 바디 처짐 기울기를 강성으로 가정하고 그 값을 Fig. 13과 같이 비교하였다. 기존 Solid 구조는 2,177.84 N/mm, BCC 구조는 1,603.2, FCC 구조는 1,702.57 N/mm, Gyroid 구조는 1,711.99 N/mm 강성을 보였다.

격자구조를 적용하지 않은 Solid와 대비해 격자구조를 적용한 바디는 최대 약 78% 이상 강성을 유지하였다. 격자 구조 별 강성 비교는 해석 비교결과와 동일한 경향을 보였다.

4.3 엔드밀 공구 제작 및 가공 실험

격자별 공구 바디를 엔드밀 공구로 제작하기 위해 절삭날인 인서트 팁을 바디에 체결하였다. Fig. 14는 인서트 팁이 체결되어 완성된 엔드밀 공구의 모습이다. 이후, 제작된 엔드밀 공구의 가공성을 분석하기 위해 머시닝 센터(DST-36D, Daesung HITEC, Korea)

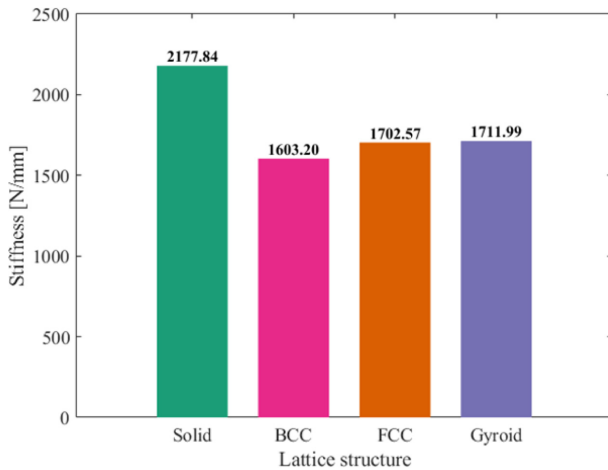


Fig. 13 Comparison of static stiffness data



Fig. 14 Photos of the fabricated endmill tool

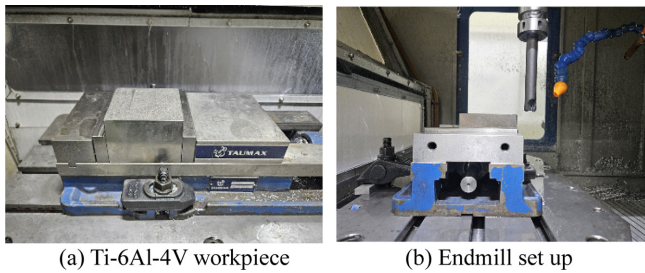


Fig. 15 Machining experiment set up

Table 11 Machining conditions

Parameter	Value
Cutting velocity [m/min]	50
Feed rate [mm/tooth]	0.05
Axis depth [mm]	2
Radius depth [mm]	4

장비를 통해 절삭 가공 실험을 실시하였다. Fig. 15는 가공 실험에 사용된 피삭재 및 가공 세팅 사진이다. 피삭재는 티타늄 합금 (Ti-6Al-4V)을 사용하였으며, 공구 내부의 오일 홀을 통해 내부 급유 가공을 실시하였다. Table 11은 가공 조건을 나타낸 표로 1가지 가공 조건을 통해 가공된 표면 거칠기 값을 Table 12에 나타내었다. 그 결과, Solid 공구의 가공 표면 거칠기 값이 가장 낮게 나타났으며, 격자구조가 삽입된 공구 중에서는 Gyroid 공구의 가공 표면 거칠기 값이 가장 낮게 나타났다. 이에 대한 결과는 앞서 측정된 공구 바디의 정강성 값이 영향을 끼친 것으로 판단되었다.

Table 12 Surface roughness of endmill

Type	Surface roughness [μm , Ra]
Solid	0.337
BCC	0.651
FCC	0.483
Gyroid	0.482

5. 결론

본 연구에서는 엔드밀 공구 바디 내부에 3가지 격자구조 (BCC, FCC, Gyroid)를 삽입하여 격자 선 두께별로 설계한 후 시뮬레이션 해석을 실시하였다. 이후, 특성을 비교 분석하여 최적의 결과를 바탕으로 PBF 방식의 금속 3D 프린팅을 통해 엔드밀 공구 바디를 제작하여 공구의 주요 가공 치수 및 강성을 측정하여 분석하였다.

3가지 격자구조인 BCC, FCC, Gyroid 구조에 대해 격자 선 두께별(1.2, 1.4, 1.6mm)로 공구 바디 내부에 삽입하여 nTop 프로그램 상에서 무게를 측정하였다. 그 결과, 두께가 커질수록 공구의 중량이 크게 나타나 Solid 구조 공구 대비 경량률이 점점 작아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 3가지 격자구조 중 BCC 구조의 공구 바디가 Solid 구조 대비 경량률이 가장 크게 나타났으며, 그 다음 Gyroid 구조의 공구 바디가 경량률이 크게 나타났다.

또한, nTop 프로그램을 통해 각 격자 선 두께별 공구 바디에 대한 정적 시뮬레이션을 실시한 결과, 격자 선 두께 1.2 mm가 다른 두께에 비해 경량률이 높으면서도 최대 응력값이 작게 나타나 외부 힘의 분산이 잘 발생되어 실제 공구 가공에서 효율성이 가장 좋을 것으로 판단되었다.

격자구조별 공구 바디에 절삭날을 체결하여 제작된 엔드밀 공구 비교 가공 실험을 실시하여 가공된 표면 거칠기를 측정하고, 설계된 바디의 시뮬레이션 해석 및 제작된 바디의 해석 결과가 기인됨을 확인할 수 있었다.

정적 시뮬레이션 결과를 바탕으로 격자 선 두께 1.2 mm를 선정하여 격자구조별로 공구 바디를 제작하였으며, 제작된 공구 바디에 대해 정강성 실험을 실시하였다. 그 결과, nTop 프로그램에서 실시한 정강성 실험 결과와 거의 동일하게 나타난 것을 볼 수 있다.

본 연구에서 적층 기술을 이용해 공구 바디 내부에 다양한 격자구조 및 격자 선 두께를 형성시킬 수 있어 가공 성능 향상에 영향을 끼칠 것으로 보여진다. 추후, 엔드밀 공구의 반경방향 절삭력과 더 최적화된 격자구조 탐색에 대한 연구도 수행할 계획이다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 중소벤처기업부와 중소기업기술정보진흥원의 “지역혁신선도기업육성(R&D), (S3451625)”사업의 지원을 받아 수행된 연구결과임.

REFERENCES

1. Son, Y., (2020), Design for additive manufacturing processes for metal 3D printing using the PBF method, Journal of the KSME, 60(2), 34-37.
2. Choi, B. J., Yang, J. Y., Lee, M. G., Jeon, Y. H., (2021), Defect analysis of metal 3d printing process, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 30(1), 92-98.
3. Oh, D. J., Kang, Y. J., Kim, G. D., Park, S. Y., Song, S. W., (2020), Effect of HIP process on fatigue performance for SS 316L manufactured by PBF, Journal of Welding and Joining, 38(1), 41-46.
4. Lee, B., Kim, D. K., Kim, Y. I., Kim, D. H., Son, Y., Park, K. T., Kim, T. S., (2020), Review on characterization method and recent research trend about metal powder for powder bed fusion (PBF) process, Journal of Powder Materials, 27(6), 508-519.
5. Yoon, J. C., Lee, M. G., Choi, C. Y., Kim, D. H., Jeong, M. S., Choi, Y. J., Kim, D. H., (2018), Evaluation of microstructure and mechanical properties in 17-4PH stainless steels fabricated by PBF and DED processes, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 17(2), 83-88.
6. Yeo, U. S., (2021), A study on the manufacture of bite holder using 3D additive manufacturing technology, M.Sc. Thesis, Ulsan University.
7. Jeong, M. H., Kong, J. R., Kim, D. H., Kim, H. J., Kim, H. J., (2023), Metal additive manufacturing of canoe paddle grip using lattice structure, Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, 22(6), 47-54.
8. Song, J. K., Park, K. S., Kim, M. S., Kwon, T. Y., Hong, M. H., (2018), Accuracy comparison between subtractive and additive methods in fabricating working model, Korean Journal of Dental Materials, 45(1), 89-96.
9. Chang, Y., (2007), Evaluation of the productivity and environmental effects of laser aided direct metal deposition process for remanufacturing, Clean Technology, 13(3), 228-234.
10. Lee, H. B., Lee, H. J., Kim, K. H., Kim, K. M., Ryu, S. S., Han, Y. S., (2019), A Study on the mechanical properties of Al_2O_3 cutting tools by DLP-based 3D printing, Journal of Powder Materials, 26(6), 508-514.
11. Lee, J., Yoo, G. D., Oh, S. Y., Kwon, T. K., (2026), A Comparative analysis of structural performance and life cycle cost by stadium seat installation method: focusing on domestic sports stadiums, Journal of Korea Academia-Industrial Cooperation Society, 27(2), 125-135.
12. Choi, J. G., Kim, H. S., Kim, S. C., (2004), A study on the optimum finish allowance for machining accuracy improvement in the end milling processes, Journal of the Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 13(3), 8-15.
13. Tian, H., Pang, B., Liu, J., Meng, D., Dang, X., (2024), Influence of different position modal parameters on milling chatter stability of orthopedic surgery robots, Scientific Reports, 14, 10581.

**Ho Min Son**

Received his bachelor's degree in 2021 from the Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu, Korea. He is currently an assistant researcher in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His research interest is cutting tool.
E-mail: shm0091@naver.com

**Dong Gyu Kim**

Principal Researcher, Daegu Mechatronics & Materials Institute (DMI), Daegu, Korea. His research interest is advanced manufacturing technology.
E-mail: kdg0830@dmir.re.kr

**Min-Woo Sa**

Received his Ph.D. degree in 2018 from the Department of Mechanical Engineering, Andong National University, Andong, Korea. He is currently a director in R&D Center, SJNTEC company, Daegu, Korea. His current research interests are special cutting tools and additive manufacturing technology.
E-mail: 79smw42@gmail.com