



• 특집 • 공작기계 디지털 트윈 및 지능화

복셀 기반 NC 밀링가공 절삭력 고속 시뮬레이션

Voxel Based Fast Cutting Force Simulation in NC Milling Process

허세곤^{1, #}, 김창주¹, 오정석¹
Segon Heo^{1, #}, Chang-Ju Kim¹, and Jeong Seok Oh¹

¹ 한국기계연구원 첨단생산장비연구부 (Advanced Manufacturing Systems Research Division, Korea Institute of Machinery & Materials)
Corresponding Author / E-mail: heo@kimm.re.kr, TEL: +82-42-868-7447
ORCID: 0000-0001-6084-8001

KEYWORDS: NC milling (NC 밀링), Cutting force (절삭력), Virtual machining (가상 가공), Digital twin (디지털 트윈), Voxel (복셀)

With the advent of the 4th industrial revolution, advanced digital manufacturing technologies are actively developed to strengthen manufacturing competitiveness. Smart factories require a real-time digital twin including a Cyber-Physical System (CPS) of machines and processes and intelligent technologies based on the CPS. To predict machining quality and optimize machines and processes, it is necessary to analyze the cutting force during machining. Therefore, for real-time digital twin, a fast cutting force simulation model that receives information such as the positions of the feed axes in short time intervals from the CNC and calculates the cutting force until the next information is input is required. This paper proposes a voxel-based fast cutting force simulation in NC milling for real-time digital twin. The proposed simulation model quickly calculates the cutting force by using only information of voxel elements removed by each tool edge without complicated Cutter-Workpiece Engagement (CWE) and chip thickness calculations in previous studies. To verify the performance of the developed simulation, experimental machining was performed and the measured cutting force and simulated cutting force were compared. It was demonstrated that the proposed model can successfully predict the cutting force 3.5 times faster than the actual process.

Manuscript received: September 30, 2022 / Accepted: October 23, 2022

NOMENCLATURE

$dF_t(i, j)$ = Differential Tangential Cutting Force Generated by Flute j at Axial Disk Element i

$dF_r(i, j)$ = Differential Radial Cutting Force Generated by Flute j at Axial Disk Element i

$dF_a(i, j)$ = Differential Axial Cutting Force Generated by Flute j at Axial Disk Element i

K_{tc} = Tangential Shearing Force Coefficient

K_{rc} = Radial Shearing Force Coefficient

K_{ac} = Axial Shearing Force Coefficient

K_{te} = Tangential Edge Force Coefficient

K_{re} = Radial Edge Force Coefficient

K_{ae} = Axial Edge Force Coefficient

$h(i, j)$ = Uncut Chip Thickness for Flute j at Axial Disk Element i

dz = Chip Width

n = Number of Removed Workpiece Voxels by Each Tool Edge Element

m = Mesh Size of the Voxels

d = Moving Distance of Each Tool Edge Element during Simulation Step Time

$dF_x(i, j)$ = Differential Cutting Force in X-Direction Generated by Flute j at Axial Disk Element i

$dF_y(i, j)$ = Differential Cutting Force in Y-Direction Generated by Flute j at Axial Disk Element i

$dF_z(i, j)$ = Differential Cutting Force in Z-Direction Generated by Flute j at Axial Disk Element i

$O(i, j)$ = Angular Position of Flute j at Axial Disk Element i

1. 서론

최근 급변하는 사회와 시장에 유연하게 대응하기 위해서 제조업은 제품공급 중심에서 다양한 수요와 서비스 중심으로 빠르게 변화하고 있다. 이에 따라, 제조업 경쟁력을 강화하기 위한 제조산업 디지털 전환이 적극적으로 추진되고 있으며 스마트공장을 그 핵심적인 예로 들 수 있다. 스마트공장을 구현하기 위해서는 가공시스템과 가공공정의 정밀한 물리 모델을 포함한 실제 공정과 동기화된 디지털트윈의 개발이 필수적으로 요구된다. 이를 기반으로 장비와 공정의 상태 진단 및 가공물 품질 예측이 가능하며 나아가 장비와 공정의 최적화 및 제품의 생산 관리가 가능해지기 때문이다. 절삭가공 중 발생하는 절삭력은 장비 구조물의 힘이나 진동을 발생시켜 가공물의 형상정밀도와 표면거칠기를 떨어뜨리며 제어 특성에도 영향을 미치기 때문에 절삭가공 공정의 예측과 최적화, 장비구조 및 제어시스템의 고강성 설계를 위해서 가장 우선 고려하는 요소이다. 따라서, 가공시 절삭력을 실시간으로 정확하게 예측하는 모델은 동작기계 디지털트윈의 핵심요소라고 할 수 있다.

밀링가공에서의 절삭력을 예측하기 위해 많은 연구가 진행되었다. 역학적 절삭 모델(Mechanistic Cutting Force Model) 연구에서부터 단일 경로 또는 코너[1] 등 국소영역에서의 절삭 해석에 대한 연구들이 수행되었다. 반면, 최근 활발히 연구 및 개발되고 있는 가상공작기계(Virtual Machine Tool)나 디지털트윈 기술은 가공품질 예측과 장비 및 공정 최적화를 위해 활용되는데[2,3], 이를 위해서는 NC 밀링가공 시뮬레이션이 요구된다. NC 밀링가공 시뮬레이션은 G코드로 입력되는 복잡한 공구경로에 의해 가공이 진행됨에 따라 변화하는 가공물의 형상과 각 방향으로의 절삭력 등을 예측하는 것을 의미한다. 이러한 시뮬레이션은 다양하게 변하는 공구와 가공물 사이의 맞물림(Cutter-Workpiece Engagement, CWE)을 효율적으로 연산할 수 있어야 하며, 전체 공구경로에 대한 시뮬레이션이 가능해야 하므로 연산 속도가 빨라야 한다. Devore는 NC 밀링가공 시뮬레이션을 위해 공구 날의 작은 미세 요소에 의해 발생하는 힘들을 합하여 밀링가공의 절삭력을 계산하는 방법을 제시하였다[4,5]. 이후 이러한 방법을 기반으로 보다 정확하고 효율적으로 절삭력을 예측하는 수많은 연구가 진행되었다. 하지만, 현재까지 NC

가공에서의 절삭력 시뮬레이션에 있어 빠른 연산속도를 기반으로 한 실시간 시뮬레이션을 강조하는 연구는 찾아보기 힘들다. 실가공 동기화된 실시간 디지털트윈에서의 절삭력 시뮬레이션은 CNC에서 짧은 시간 간격으로 이송축 위치 등의 정보를 입력 받아 다음 정보 입력 시까지 시뮬레이션을 수행하는 것을 의미하며, 이는 실제 공정보다 빠른 절삭 시뮬레이션이 필수적이므로, 향후 고속 절삭력 시뮬레이션에 대한 연구 및 기대가 증가할 것으로 생각된다.

이 연구에서는 NC 밀링가공에서의 공구경로에 따른 재료 제거 및 절삭력 고속 시뮬레이션 방법을 제시한다. 3차원 기하 형상을 표현하는 가장 간단한 방법 중 하나이며 전산화에 적합한 복셀(Voxel)을 기반으로 가공물의 재료 제거를 시뮬레이션하고, 공구의 미소 요소에 의해 제거되는 복셀 요소 정보를 이용하여 기존의 복잡한 CWE 및 칩 두께 계산 없이 절삭력을 빠르게 연산한다. 제안한 시뮬레이션을 검증하기 위하여 가공 정밀도 평가용 시편(KS B ISO 10791-7 A160)의 가공을 수행하여 측정된 절삭력 및 실제 가공 시간과 시뮬레이션된 절삭력 및 연산 시간을 비교하였다.

2. 시뮬레이션 모델

2.1 가공물 및 공구 기하 모델

2.1.1 가공물 기하 모델

NC 코드에 의한 가공에서 절삭력을 계산하기 위해서는 공구 경로에 따라 계속적으로 변화되는 가공물 형상을 정의할 수 있는 3차원 기하 모델이 필요하다. 3차원 형상을 기하학적으로 표현하는 방법은 크게 B-REP (Boundary Representation), CSG (Constructive Solid Geometry)를 사용하는 솔리드 모델과 지맵(Z-Map), 복셀(Voxel), 텍셀(Doxel)과 같은 이산 모델로 구분된다[6]. B-REP은 넵스(Non-Uniform Rational B-Spline, NURBS)나 베지어 곡선(Bezier Curve) 등의 수학적 방법으로 형상을 표현하며, CSG는 구, 육면체 등 기본 모양 요소의 불리언(Boolean), 합 등 집합 연산을 통해 물체를 표현한다. 이러한 솔리드 모델은 표현 정밀도가 높아 CAD/CAM 소프트웨어에 주로 사용되는 반면 기하 연산에 있어 많은 시간이 요구된다. 이산 모델은 표현정밀도가 떨어지는 반면, 특정 기하 시뮬레이션에 있어 매우 효율적이다[7]. 지맵을 이용한 NC 가공 절삭력 시뮬레이션이 제시되었으나[8], 언더컷(Undercut)이 있는 형상에 적용할 수 없어 5축 가공으로의 확장이 어렵다는 한계를 지닌다.

이 연구에서는 가공물을 표현하기 위해 복셀을 사용하였다. 복셀은 X, Y, Z 세 방향의 격자로 분해된 정육면체 모양의 작은 체적 요소로 입체를 나타내는 방법으로, 복잡한 3차원 기하 형상의 표현 및 연산에 있어 가장 간단하고 효율적인 방법 중 하나이다. 앞서 설명한 지맵 기반 시뮬레이션의 한계를 극복할 수 있으며, 공구와 가공물의 기하 관계를 계산하고 재료를 제거하는데 있어 간단한 형태를 가지고 있어 고속 연산에 유리하다.

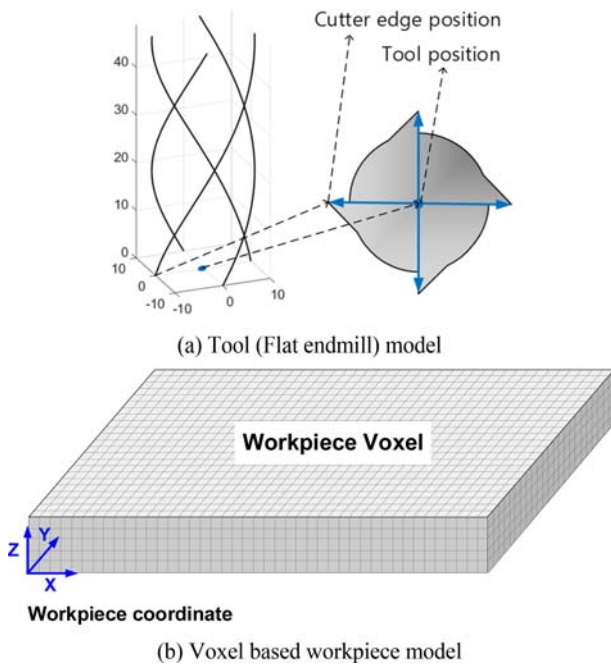


Fig. 1 Schematic representation of the geometric simulation model

Fig. 1(b)는 직육면체 모양의 초기 가공물 형상의 복셀 기반 3차원 기하 모델의 개략도를 보여준다.

2.1.2 공구 기하 모델

NC 가공 절삭력 시뮬레이션을 위해 복잡한 절삭공구 형상을 기하학적으로 정밀하게 모델링하는 것은 효율적이지 않다. 공구 모델은 시뮬레이션을 위해 꼭 필요한 공구 형상 정보를 이용하여 연산에 용이한 형태로 표현되어야 한다. 이 연구는 평엔드밀 공구를 대상으로 한다. 공구는 주어진 경로를 따라 이동하며, 공구 아랫면의 중심인 공구중심점(Tool Center Point, TCP)으로 공구의 위치를 정의한다. 공구의 형상은 공구의 위치를 정의하는 공구중심점과 공구 길이 방향으로 나뉜 미소 디스크 요소에서의 공구중심점을 기준으로 한 각 날의 상대 위치로 정의된다. 각 날의 끝 위치는 헬릭스각(Helix Angle)에 의해 공구 길이 방향을 따라 달라진다. 공구 형상을 정의하기 위해 필요한 인자는 공구 직경, 날 수, 헬릭스각, 유효 날 길이(Effective Length of Cut) 및 미소 디스크 요소 두께이다. Fig. 1(a)는 4날 평엔드밀 공구를 정의하는 공구 모델의 개략도를 보여준다.

2.2 모션 모델

NC 밀링가공에서 공구는 회전하면서 주어진 경로를 따라 움직인다. 시뮬레이션에서의 재료 제거 및 절삭력 계산을 위해서는 공구와 가공물과의 상대 위치를 매 시뮬레이션 스텝마다 계산해야 한다. 이 연구에서 공구가 이동하는 경로는 시간 및 TCP 정보 입력을 기반으로 정의된다. TCP 정보가 입력되는 시간 간격과 공구의 위치 변화를 이용하여 X, Y, Z 각 방향으로의 이송속도를 계산하고, 두 TCP 위치 사이를 공구 1회전 시간의

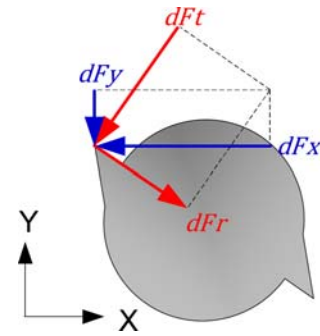


Fig. 2 Differential cutting force generated by each flute element

1/24의 일정한 시간 간격을 기준으로 선형 보간하여 매 시뮬레이션 순간의 공구 위치를 생성한다. 대부분의 상용 CNC는 약 20-50 Hz 정도의 빈도로 외부와 정보 입출력이 가능하다. 즉, 실공정 동기화된 시뮬레이션에서는 약 수십 밀리초 시간 간격으로 CNC로부터 TCP, 주축회전수, 공구 정보 등을 입력 받으며, 공구 회전속도와 무관하게 공구 1회전당 24회 재료 제거와 절삭력 계산을 수행한다. 오프라인 시뮬레이션에서는 G코드 해석 및 보간 알고리즘을 이용하여 시간에 대한 공구 위치를 계산하여 생성한다.

2.3 재료 제거 및 절삭력 계산 모델

매 시뮬레이션 순간 발생하는 절삭력은 공구 디스크 요소의 각 날에서 재료 제거에 의해 발생하는 힘들의 합으로 계산된다 [4,5,9,10]. Fig. 2는 공구 각 날의 미소 요소에서 발생하는 미소 절삭력을 보여주는 개략도이다. 공구의 *i*번째 디스크 요소의 *j*번째 날에서의 공구의 접선 방향, 중심 방향 및 축방향으로 발생하는 미소 절삭력 $dF_t(i, j)$, $dF_r(i, j)$, $dF_a(i, j)$ 는 식(1)과 같다.

$$\left. \begin{aligned} dF_t(i, j) &= K_{tc}h(i, j)dz + K_{te}dz \\ dF_r(i, j) &= K_{rc}h(i, j)dz + K_{re}dz \\ dF_a(i, j) &= K_{ac}h(i, j)dz + K_{ae}dz \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

여기서, K_{tc} , K_{rc} , K_{ac} 는 각각 공구의 접선 방향, 중심 방향, 축방향의 전단 비절삭 계수(Specific Cutting Force Coefficient)이며, K_{te} , K_{re} , K_{ae} 는 각각 날 끝단부 마찰에 대한 공구 접선 방향, 중심 방향, 축방향의 비절삭 계수이다[11]. $h(i, j)$ 는 공구의 *i*번째 디스크 요소의 *j*번째 날에 의한 미변형 칩 두께(Uncut Chip Thickness)이며, dz 는 칩 폭(Chip Width)을 의미한다. 식에서 알 수 있듯이 절삭력을 계산을 위해서는 미변형 칩 두께와 칩 폭을 계산해야 한다. 특히, NC 밀링가공에서 공구 각 미소 요소에서의 칩 두께는 공구 회전에 의해 계속적으로 변하며, 이를 계산하는 것이 절삭력 시뮬레이션의 핵심적인 요소라고 할 수 있다. 대부분의 기존 연구들에서는 미변형 칩 두께를 구하기 위해 CWE 영역을 계산하고 이를 기반으로 공구의 각 미소 요소에서 가공물과의 입출구 물림각(Immersion Angle)을 계산한다. 하지만 CWE를 계산하는

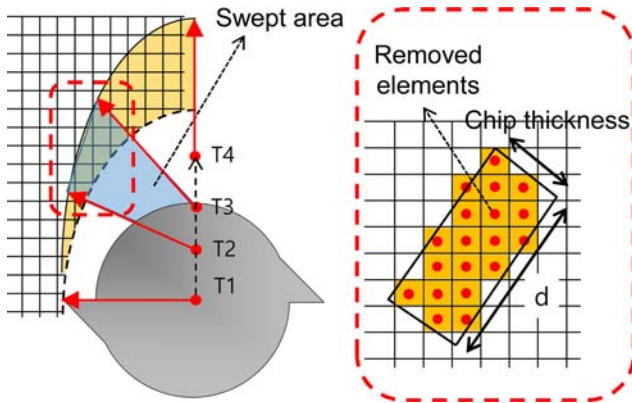


Fig. 3 Material removal and chip thickness calculation algorithm

것은 매우 복잡하고 많은 연산능력을 요구한다. 따라서, 짧은 시간 간격마다 CWE를 계산할 수 없게 되며, 이는 또한 미세하게 변하는 CWE에 대한 세밀한 절삭력 계산을 힘들게 한다. 이와 같은 이유로 기존 연구는 오프라인 절삭 시뮬레이션이 대부분이며, 온라인 실시간 절삭력 시뮬레이션은 찾아보기 힘들다.

이 연구에서는 복잡한 CWE 계산 없이 공구의 미소 요소에 의해 제거된 복셀 요소의 수만을 이용하여 간단하게 재료 제거와 절삭력을 계산하는 알고리즘을 개발하여 시뮬레이션 고속화를 꾀하였다. Fig. 3은 재료 제거 및 칩 두께 계산 알고리즘을 보여준다. NC 가공 시뮬레이션에서 재료의 제거는 공구 1/24 회전 시간 간격의 매 시뮬레이션 순간마다 공구 디스크 요소의 각 날이 지나간 영역(Swept Area) 내에 위치하는 가공물의 복셀 요소점들을 제거함으로써 이루어진다. 이때 제거된 가공물 영역을 직사각형으로 가정하여 식(2)와 같이 칩 두께를 계산한다.

$$h(i, j) = (n \times m^2)/d(i, j) \tag{2}$$

여기서, n, m, d 는 각각 날이 지나간 영역 내의 제거된 복셀 요소 개수, 복셀의 메시(Mesh) 크기, 공구 i 번째 디스크 요소의 j 번째 날의 이동 거리를 나타낸다.

제안된 방법은 각 날에 의해 제거되는 실제 재료 제거 현상을 모사하며 제거되는 모든 복셀 요소들은 연속적인 절삭력 계산에 영향을 미치므로 아주 복잡한 공구경로와 가공물 형상에서의 시뮬레이션이 가능하고, 공구 1회전당 24회의 시뮬레이션을 수행하므로 공구 회전에 의한 절삭력 변동의 세밀한 시뮬레이션이 가능하다.

Fig. 2에서 보이는 것과 같이, 식(1)의 미소 절삭력 $dF_t(i, j)$, $dF_x(i, j)$, $dF_y(i, j)$ 는 공구날 각 요소의 각위치(Angular Position) $\theta(i, j)$ 에 의해 식(3)과 같이 X, Y, Z방향의 미소 절삭력 $dF_x(i, j)$, $dF_y(i, j)$, $dF_z(i, j)$ 로 변환되며, 이를 모든 공구 요소에 대해 적산하여 매 순간 절삭력을 계산한다.

$$\left. \begin{aligned} dF_x(i, j) &= -dF_t(i, j)\cos\theta(i, j) - dF_r(i, j)\sin\theta(i, j) \\ dF_y(i, j) &= +dF_t(i, j)\sin\theta(i, j) - dF_r(i, j)\cos\theta(i, j) \\ dF_z(i, j) &= +dF_a(i, j) \end{aligned} \right\} \tag{3}$$

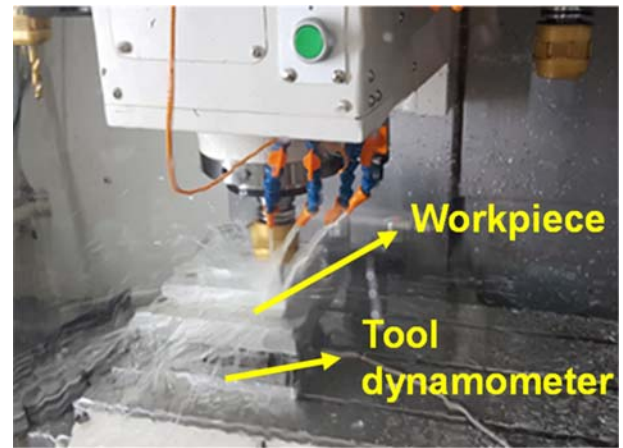


Fig. 4 Experimental setup

Table 1 Simulation parameters

Parameter	Value
Workpiece material	Aluminum 6061
Tool	Φ10mm, 3 flute, Helix angle 30°
	Φ12mm, 3 flute, Helix angle 30°
	Φ14mm, 2 flute, Helix angle 30°
Cutting force coefficient	K_{tc} : 680.06 N/mm ²
	K_{rc} : 179.76 N/mm ²
	K_{ac} : 103.87 N/mm ²
	K_{te} : 14.62 N/mm
	K_{ae} : 11.41 N/mm
K_{ae} : -1.6 N/mm	
Voxel mesh size [mm]	0.09
Tool mesh size [mm]	0.6
Simulation step time	1/24 tool rotation time

3. 시뮬레이션 검증

개발된 시뮬레이션 모델의 예측정확도 및 연산성능을 검증하기 위하여, 밀링가공 정밀도 평가용 시편(KS B ISO 10791-7 A160)의 가공을 수행하여 측정 절삭력과 시뮬레이션 결과를 비교하였다. Fig. 4는 가공 실험 모습을 보여준다. 가공 실험은 수직형 3축 장비(SM400DH, SMEC)를 사용하여 수행하였으며, 알루미늄 6061 소재의 시편과 직경 및 날 수가 각각 10 mm 3날, 12 mm 3날, 14 mm 2날인 세 개의 공구를 사용하였다. 다축 공구동력계(9257B, Kistler)를 사용하여 가공 중 X, Y, Z 방향의 절삭력을 측정하였다. 약 25 Hz 빈도로 CNC 제어기(M800, Mitsubishi)로부터 시간, 이송축 위치, 이송속도, 주축 회전속도, 공구번호를 입력받아 그 시간 간격 동안 측정된 평균 절삭력을 동기화하여 함께 기록하였다.

위와 같이 저장된 시간, 이송축 위치, 주축 회전속도, 공구 정보를 입력으로 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 프로그램은 C언어로 작성되었으며, 병렬 연산은 수행하지 않았다. 시뮬레이션에 사용된 연산 프로세서는 i7-6700K (Intel)이다. Table 1은

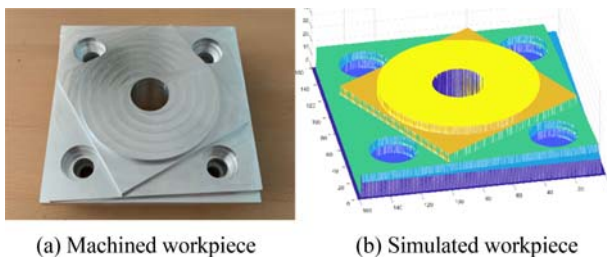


Fig. 5 Comparison between machined and simulated workpiece

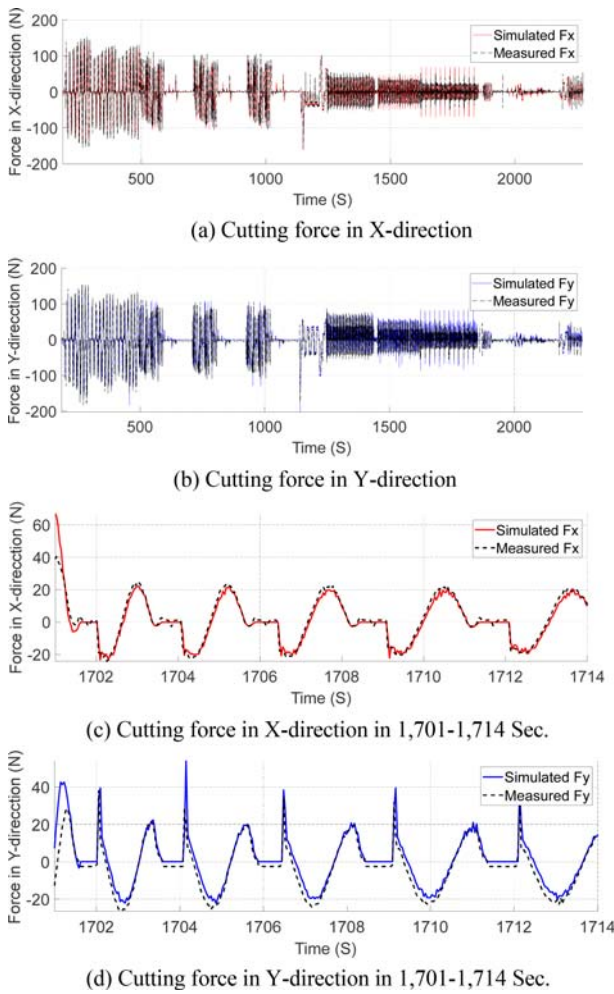


Fig. 6 Comparison between measured and simulated cutting force

시뮬레이션 조건을 나타낸다.

Fig. 5는 실제 가공된 가공물과 복셀 정보를 이용하여 가시화한 시뮬레이션된 가공물 형상을 나타낸다. Fig. 6은 CNC 정보 입력마다 계산된 평균 절삭력과 측정된 평균 절삭력을 비교한 결과를 보여준다. Figs. 6(a)와 6(b)는 각각 X방향과 Y방향의 측정 및 시뮬레이션 절삭력을 보여주며, Figs. 6(c)와 6(d)는 가공 시간 1,701초부터 1,714초 사이의 절삭력을 별도로 나타낸다. 평엔드밀 절삭 모델이 정확하게 적용되지 않는 드릴링과 유사한 구멍 가공 구간과 이송계 급속이송으로 인해 측정된 힘을

제외하면 약 25 N 이내의 오차 범위에서 실제 절삭력과 유사하게 예측이 가능함을 확인하였다. 또한, 0.09 mm의 비교적 작은 메시 크기를 적용하고 최신 연산 프로세서를 사용하지 않았음에도 불구하고, 시뮬레이션 시간은 638초로 실제 가공 시간 2,273초보다 약 3.5배 빠른 속도로 시뮬레이션이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

이 연구에서는 NC 밀링가공에서의 공구경로에 따른 재료 제거 및 절삭력 고속 시뮬레이션 모델을 제시하였다. NC 밀링가공에서는 공구경로에 의해 공구와 가공물과의 기하 관계가 복잡하고 다양하게 변하게 되는데, 고속 시뮬레이션을 위해서는 이에 연산 복잡도 및 속도가 영향을 받지 않는 단순하고 효과적인 시뮬레이션 모델이 필요하다. 이를 위해 전산화가 용이한 복셀 기반의 가공물 모델과 공구중심점과 날의 미소 요소 위치로 정의된 공구 모델을 개발하였다. 제시된 모델은 공구 각 미소 요소가 지나간 영역 내의 가공물 복셀 요소들을 제거하여 재료 제거를 시뮬레이션하고, 제거된 복셀 개수만을 이용하여 간단하게 미변형 칩 두께 및 절삭력을 계산한다. 기존의 복잡한 CWE 및 칩 두께 계산 없이 절삭력을 빠르게 연산할 수 있으며, 이산화된 순간과 공간에 대한 절삭력 계산이 아닌 아주 복잡한 형상 가공에 대응할 수 있는 세밀하고 연속적인 시뮬레이션이 가능하다.

개발된 시뮬레이션 모델을 검증하기 위하여 가공 정밀도 평가용 시편(KS B ISO 10791-7 A160)의 가공을 수행하여 측정된 절삭력 및 실제 가공 시간과 시뮬레이션된 절삭력 및 연산 시간을 비교하였다. 전체 가공을 대상으로 25 N 이내의 오차로 실제 절삭력을 유사하게 예측하였고, 시뮬레이션 시간은 실제 가공 시간의 28%에 불과해 실시간 시뮬레이션이 가능함을 검증하였다. 제안된 시뮬레이션은 가공품질 예측, 공정·장비 진단 및 최적화를 위한 공작기계 실시간 디지털트윈의 핵심기술로 활용될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGEMENT

본 연구는 산업통상자원부의 기계장비산업핵심기술 개발사업(20000285, 장비/제어/공정 통합 가상공작기계 기술 및 이에 기반한 공작기계 지능화 원천기술 개발)의 지원으로 수행되었음.

REFERENCES

1. Zhang, L., Zheng, L., (2004), Prediction of cutting forces in milling of circular corner profiles, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 44(2-3), 225-235.

2. Altintas, Y., Brecher, C., Weck, M., Witt, S., (2005), Virtual machine tool, CIRP Annals, 54(2), 115-138.
3. Altintas, Y., Aslan, D., (2017), Integration of virtual and on-line machining process control and monitoring, CIRP Annals, 66(1), 349-352.
4. Kline, W., DeVor, R., Lindberg, J., (1982), The prediction of cutting forces in end milling with application to cornering cuts, International Journal of Machine Tool Design and Research, 22(1), 7-22.
5. Kline, W., DeVor, R., (1983), The effect of runout on cutting geometry and forces in end milling, International Journal of Machine Tool Design and Research, 23(2-3), 123-140.
6. Altintas, Y., Kersting, P., Biermann, D., Budak, E., Denkena, B., Lazoglu, I., (2014), Virtual process systems for part machining operations, CIRP Annals, 63(2), 585-605.
7. Park, J.-W., Chung, Y.-C., Choi, B.-K., (2002), Precision shape modeling by z-map model, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 3(1), 49-56.
8. Yun, W.-S., Cho, D.-W., (2001), Accurate 3-D cutting force prediction using cutting condition independent coefficients in end milling, International Journal of Machine Tools and Manufacture, 41(4), 463-478.
9. Schmitz, L., Smith, K., (2009) Machining dynamics: Frequency response to improved productivity, Springer.
10. Altintas, Y., (2012), Manufacturing automation: Metal cutting mechanics, machine tool vibrations, and CNC design 2nd edition, Cambridge University Press.
11. Kang, G., Kim, J., Choi, Y., Lee, D. Y., (2022), In-process identification of the cutting force coefficients in milling based on a virtual machining model, International Journal of Precision Engineering and Manufacturing, 23(8), 839-851.



Segon Heo

Principal researcher in the Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interest is process simulation and additive manufacturing.

E-mail: heo@kimm.re.kr



Chang-Ju Kim

Principal researcher in the Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interest is machine tool dynamics and precision engineering.

E-mail: changjukim@kimm.re.kr



Jeong Seok Oh

Principal researcher in the Korea Institute of Machinery & Materials (KIMM). His research interest is precision machines and Metrology.

E-mail: ojs6114@kimm.re.kr