

NC 밀링에서 짧은 공구설치 방법으로 생산성 향상

김수진*

NC Milling Productivity Incensement by Short Milling Tool Setting Method

Su Jin Kim *

ABSTRACT

The tool overhang length affects tool deflection and chatter that should be reduced for machined surface quality, productivity and long tool life. The shortest tool setting algorithm that uses a safe space is proposed and applied with simulation software in NC machining. The safe space in the coordinate fixed in the tool is computed by the virtual machining system that simulates NC machining by stock model, tool model and NC code. The optimal tool assembly that has largest diameter and shortest length is possible using the safe space. This algorithm has been applied over fifty companies for safe and rigid tool setting. The collision accident between holder and stock was reduced from 3 to 0 a year and the productivity was incensed about 15% by using faster feed rate acceptable for shorten tool length.

Key Words : Tool Length (공구길이), Tool Setting (공구설치), Safe Space (안전영역), Tool Interference (공구간섭), Machining Simulation (가공시뮬레이션), NC Milling (NC 밀링)

1. 서론

1.1 홀더 조립

일반적인 중대형 금형의 형상부를 NC 가공하는데 30 개 이상 공구를 교환해야 하므로 작업자가 공구에 적합한 홀더를 찾아 조립하는 일을 자주 반복하게 된다. 공구와 분리해서 보관되는 홀더 (Holder)는 가공하기 직전에 선정되고 조립되는 것이 일반적이다. 금형은 제품마다 모양이 다르기 때문에 공구 세팅 길이와 홀더 종류가 항상 변화하게 된다.

일반적으로 안전을 위해서 Fig. 1 (a)와 같이 공구 길이를 절삭 영역의 깊이 보다 조금 길게 하고 있다. 이것은 안전하지만 공구 길이를 가장 길게

하는 방법이므로 공구가 절삭력에 휘거나 진동하기 쉽다.

1.2 공구의 휨과 진동

공구 길이가 휨과 진동에 많은 영향을 준다는 연구들이 있다. 절삭력의 수평방향 성분이 원기둥 모양의 외팔보로 볼 수 있는 공구를 휘게한다.^{1,3} 공구의 휨은 절삭력의 수평성분, 탄성계수, 공구길이 그리고 공구직경의 영향을 받는다.

$$\delta = \frac{FL^3}{3EI} = \frac{64 F L^3}{3\pi E D^4} \quad (1)$$

δ : Deflection

접수일: 2007년 10월 18일; 게재승인일: 2008년 2월 25일

* 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원

E-mail: sujinkim@gnu.ac.kr Tel. (055) 751-6075

- F : Cutting force perpendicular to the tool axis.
- E : Modulus of elasticity
- I : Second moment of area
- L : Tool length
- D : Tool diameter

탄성계수 E 는 공구 재질에 그리고 절삭력 F 는 소재 재질, 날당 이송 그리고 절삭 깊이에 영향을 받는다. 공구 길이 L 과 직경 D 의 비율 L^3/D^4 이 공구의 휨에 가장 큰 영향을 주기 때문에 공구길이는 줄이고 직경은 늘리면 가공 오차를 줄일 수 있다.

체터(Chatter)는 공구와 소재간의 진동으로 주로 자러진동(Self excited vibration)에 의해 발생한다. 체터는 회전 수, 가공 깊이 그리고 공구 기계 시스템의 동적 강성의 영향을 받는다.^{4,5} 공구 기계 시스템의 동적 강성은 공구의 길이와 직경에 가장 크게 영향을 받는다. 공구의 길이를 줄이고 직경을 늘려 강성을 증가시키면 체터가 줄게 된다.⁵

1.3 충돌 체크

가공 속도를 높이기 위해서는 공구길이를 최소로 줄이고 직경이 큰 부가 축을 공구와 홀더 사이에 끼워 강성을 높이는 것이 좋다. 강성이 높아지면 공구의 휨과 진동 또한 감소한다. 하지만 안전한 충돌 검증 방법 없이 임의로 공구의 길이를 줄이면 Fig. 1 (b)와 같이 홀더가 소재에 충돌할 수 있다.

일반적인 CAM 과 가상가공 시스템에서는 조립된 공구 홀더 모델을 가지고 소재 모델에 충돌하지 않는지 시뮬레이션 한다.⁶⁻¹² 충돌이 없는 3-축 NC 가공경로 생성을 위해서 C-space 가 제안되었고,⁶ 5-축 가공에서는 충돌이 없는 공구 자세를 결정하기 위해서 C-space 와 Visibility 가 제안되었다.^{7,8} CAM 에서는 공구경로를 생성하는 단계에서 조립된 공구와 홀더가 소재모델이나 디자인 모델에 충돌하는지 검사한다. 시작 소재와 간섭을 검사하면 공구 길이가 최적값 보다 길어진다. 홀더와 upset 모델사이의 간섭을 검사하는 방식은 실제 소재의 특정 부분이 upset 모델보다 높이 있을 수 있으므로 위험하다. 가상가공 시스템은 공구와 홀더를 디자인하고 NC 가공 시뮬레이션을 통해서 홀더가 소재에 충돌하는지 검사한다.⁹⁻¹² 만약 충돌이 발생하면 공구 길이를 늘리고 홀더 직경을 줄인

후 다시 가공 시뮬레이션을 해야 한다. 이렇게 반복되는 공구 홀더 디자인과 충돌 검사 시뮬레이션은 시간을 많이 소모하고 최적의 홀더와 최적의 공구길이를 얻기 어렵다.

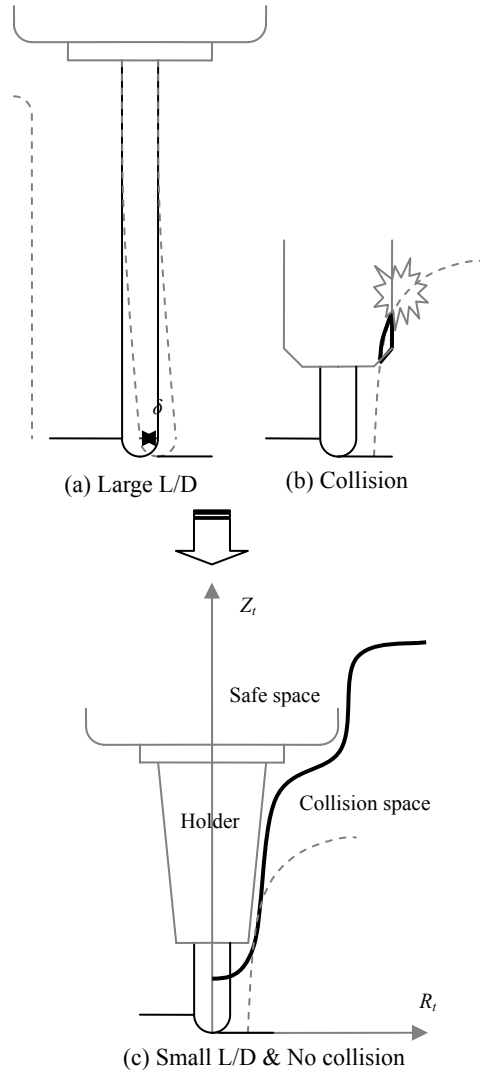


Fig. 1 Short and safe tool setting by safe space

1.4 안전영역을 이용한 공구조립

본 논문에서는 가공시뮬레이션을 통해서 공구 좌표계에 안전영역을 만들고, Fig. 1 (c)와 같이 최적의 홀더와 공구 길이를 한번에 계산하고자 한다. 다음에는 안전영역이 무엇인지, 어떻게 계산하는

지, 이것을 이용해서 홀더와 공구 길이를 어떻게 얻는지, 기존 방법과 무엇이 다른지 설명된다. 제안된 방법은 많은 중대형 금형 가공 업체에 이용돼 공구와 홀더를 안전하고 짧게 설치해 생산성을 향상시키는데 도움을 주고 있다.

2. 안전영역

2.1 안전영역이란

본 논문에서는 NC 가공에서의 안전영역과 이를 이용한 안전하고 짧은 공구 설정 방법을 제안한다. 안전영역은 공구가 가공경로를 따라 움직일 때 소재와 만나지 않는 영역을 공구 좌표계에 나타낸 것이다. 이것은 Fig. 1 (c)와 같이 충돌이 없는 홀더 직경과 공구 길이를 계산하는데 이용된다.

공구 좌표계 위의 영역을 공구가 가공경로를 따라 움직일 때 소재와 만나는 충돌영역과 만나지 않는 안전영역으로 나눈다. 식 (2)와 같이 집합 이론에 의하면 안전영역과 소재가 서로 만나지 않고 홀더가 안전영역 안에 있으면 홀더와 소재가 서로 만나지 않는다.

$$\text{if } S \cap W = \Phi \ \& \ H \subset S \text{ then } H \cap W = \Phi \quad (2)$$

S: Safe space

W: Workpiece

H: Tool holder

Φ : An empty set

따라서 정확하게 계산된 안전영역 안에서 조립된 모든 부가축, 홀더 그리고 아머는 소재와 충돌하지 않는다.

2.2 가공 시뮬레이션을 통한 안전영역 계산

안전영역은 가공될 소재나 CAD 모델에서 계산할 수 있다. 가공될 소재에서 안전영역을 계산하는 것은 아주 안전하지만 최적의 값은 아니다. CAD 모델을 읍셋한 것을 소재로 보고 안전영역을 계산하는 것은 실제로는 남아있는 소재가 읍셋 모델 바깥에 있을 수 있으므로 위험한 방법이다. 정확한 안전영역과 충돌영역을 계산하기 위해서는 현재 공구의 위치에서 이미 가공된 소재 형상과 다음 위치에서 가공될 소재 형상을 고려해야 한다.

본 논문에서는 가상가공 시스템의 소재제거 시뮬레이션 과정 중에 안전영역을 계산함으로써 현

재 위치에서 제거된 형상과 남은 형상을 정확히 고려하도록 하였다. 가상가공 시스템은 시작 소재 모델, NC 가공경로 그리고 공구 형상을 입력 받고 가공된 소재 모델과 안전영역을 출력한다. 소재 모델과 안전영역은 3 축 가공 시뮬레이션에 많이 적용되고 있는 Z-map 으로 표현된다. 식(3)과 Fig. 2 (a)와 같이 소재는 공구경로를 따라 이동하는 공구에 의해서 제거된다. 식 (4)와 Fig. 2 (b)와 같이 공구 좌표계에 있는 안전영역은 공구경로의 역방향으로 이동하는 소재에 의해서 제거된다.

$$W = W - (T + p) \quad (3)$$

$$S = S - (W - p) \quad (4)$$

W: Workpiece model

T: Tool model

S: Safe space

p: Points on tool path

Fig. 2 (a)와 같이 소재는 공구 경로의 시점 p_s 와 끝 점 p_e 에서 공구와 두 점 사이를 이동하는 공구의 궤적에 의해서 제거된다 [10]. Fig. 2 (b)와 같이 안전영역은 시점 $-p_s$ 와 끝 점 $-p_e$ 에서 소재와 두 점 사이를 이동하는 소재의 궤적에 의해서 제거된다. 소재가 만드는 실루엣(silhouette) 곡선은 식(5)와 같이 소재 모델의 법선벡터의 내적이 공구 경로의 방향 벡터에 수직인 점들의 집합이다.

$$n_{sp} \cdot (p_s - p_e) = 0 \quad (5)$$

n_{sp} : Normal vector of workpiece model on the silhouette point

p_s : Start point of a tool path block

p_e : End point of a tool path block

2.3 소재, 모델, 시뮬레이션으로 계산된 안전영역의 비교

시작 소재, CAD 모델 그리고 가공 시뮬레이션으로 각각 계산된 안전영역을 Fig. 3 에서 비교하였다. 안전영역과 충돌영역의 경계를 공구에 고정된 원통 좌표계에 곡선으로 표시하였다. 그래프에서 직경을 사용한 것은 공구와 홀더의 사양이 일반적으로 직경과 길이로 표기되기 때문이다. Fig. 3

(a)는 황삭 가공 시뮬레이션 결과와 안전영역을 각각 보여준다. 시작 소재는 사각형 상자 모양이고 공구는 직경 50 mm 이고 원형 인서트를 가지고 있다. Fig. 3 (b)는 중삭 가공 시뮬레이션 결과와 안전영역 그래프를 보여준다. 시작 소재는 Fig. 3 (a)에 보이는 황삭 가공 시뮬레이션이 결과 소재이고 공구는 직경 25 mm 볼엔드밀 이다.

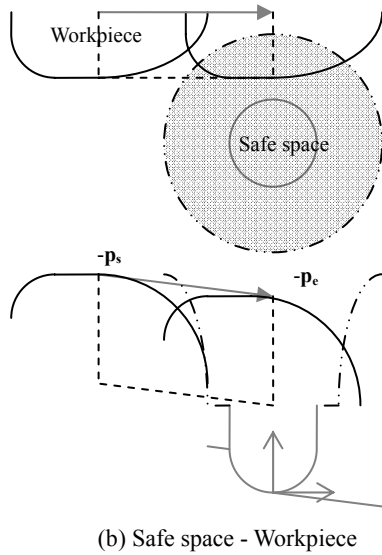
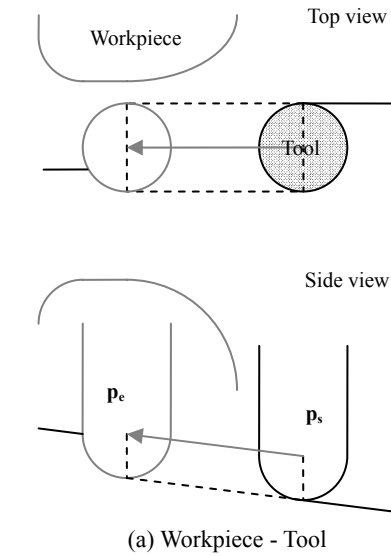


Fig. 2 Boolean operation between workpiece, tool and safe space

점선으로 표시된 안전영역은 시작 소재에서 계산된 것으로 공구가 이동하면서 가공한 형상이 고려되지 않았기 때문에 다른 것들 보다 좁고 높다. 회색 실선으로 표시된 안전영역은 CAD 모델에서 계산된 것으로 남아 있는 소재가 읍셋 모델 보다 높을 수 있기 때문에 충돌영역이 포함될 수 있어 위험하다.

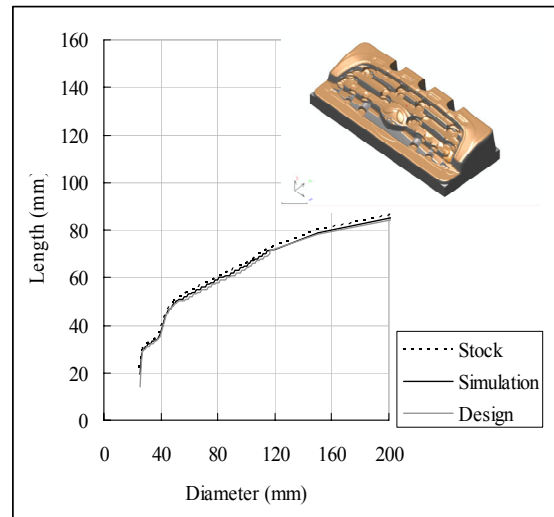
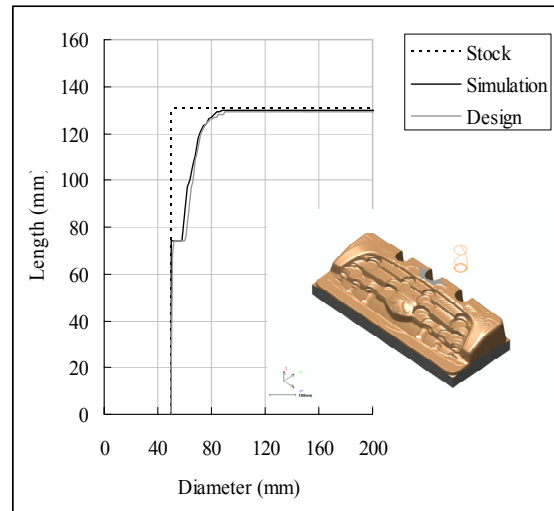


Fig. 3 The safe space computed by stock model, design model and cutting simulation

검은 실선으로 표시된 안전영역은 가공 시물레이션 과정에서 소재와 겹치는 충돌영역을 제거하면서 계산된 것이다. 시물레이션을 이용한 방법은 공구가 공구경로를 따라 이동하면서 이미 제거된 소재 형상과 아직 제거되지 않은 소재 형상이 고려되기 때문에 다른 방법에 비해 안전영역과 충돌영역이 더 정확하게 계산된다. 따라서 본 연구에서는 안전영역을 가공 시물레이션을 통해 계산하였다.

4. 안전영역을 이용한 공구 설치

4.1 홀더와 공구길이 선정

금형의 NC 가공에는 많은 종류의 홀더들이 이용되는데 중대형 금형의 경우에는 홀더와 공구가 각각 보관되고 사용하기 직전에 적당한 것을 선택해 조립하고 있다. 홀더와 공구 세팅 길이는 가공 오차와 체터 발생에 주된 영향을 주기 때문에 충돌이 없는 가장 큰 직경의 홀더와 가장 짧은 공구길이를 계산하기 위한 효과적인 방법이 필요하다. 본 연구에서는 충돌이 없는 홀더 직경과 공구 길이의 기준이 되는 안전영역과 그 계산 방법을 제시하였다.

시물레이션을 통해서 계산된 안전영역에서 홀더와 공구길이를 자동으로 추천하기 위해서 홀더 데이터가 만들어진다. 홀더 모델은 조립부인 외경, 내경 그리고 직경과 높이로 표현되는 외형으로 구성된다. 내경이 공구 직경이나 콜렛(Collet) 직경 같고 외경이 아머 내경과 같은 홀더가 공구를 고정하는데 선택될 수 있다. 안전영역을 이용해서 모든 선택 가능한 홀더들의 공구 세팅 길이를 얻고, 직경이 크면서 공구 길이를 가장 짧게 할 수 있는 홀더가 선택된다.

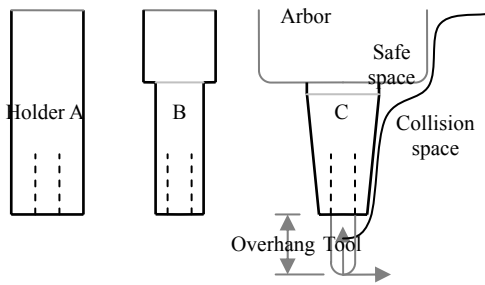
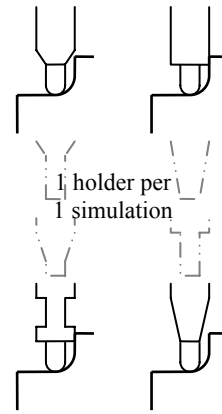


Fig. 4 Holder and overhang selection by safe space

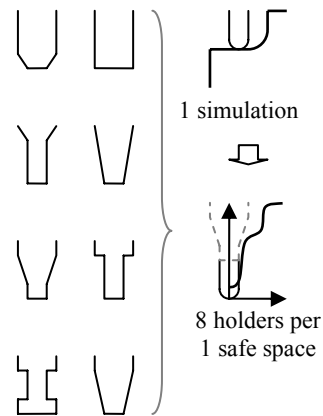
예를 들어 Fig. 4 에 공구와 아머의 직경에 조립 가능한 세 개의 홀더가 있다. 각 홀더를 공구와 아머 사이에 두고 안전영역 안에서 조립 가능한 높이를 보면 홀더 B 나 C 를 선택할 때 가장 짧은 공구 조립이 가능함을 알 수 있다. 이 중 홀더 C 의 직경이 B 보다 크므로 최적의 홀더는 C 가 된다.

4.2 안전영역과 시물레이션 비교

일반적인 가상가공 시스템은 한번의 가공 시물레이션을 통해서 오직 한 홀더의 충돌 여부만을 검사할 수 있지만, 제안된 방법은 한번의 가공 시물레이션으로 계산된 안전영역으로 모든 홀더들의 충돌 여부를 검사할 수 있다.



(a) Collision check by simulation



(b) Collision check by safe space

Fig. 5 Collision check by simulation vs. safe space

일반적인 가상가공 시스템에서는 Fig. 5 (a)와 같이 한 시뮬레이션을 통해서 정해진 길이로 조립된 하나의 홀더가 소재와 충돌하는지 검사한다. 만약 8 개의 홀더가 공구와 아머에 조립될 수 있다면, 충돌이 없는 최적의 홀더를 선택하는데 8 회의 시뮬레이션이 필요하고, 가장 짧은 공구 세팅 길이를 얻기 위해서는 시뮬레이션을 수회 반복해야 한다.

제안된 방법에서는 Fig. 5 (b)와 같이 한번의 시뮬레이션으로 계산된 안전영역을 이용해서 모든 이용 가능한 홀더의 안전한 조립 높이를 빠르게 얻는다. 예를 들어 8 개의 이용 가능한 홀더가 있다면 한번의 시뮬레이션으로 얻은 안전영역으로 8 개 홀더의 안전한 세팅 길이를 계산하고 최적의 홀더와 공구길이를 얻게 된다.

기존의 충돌 시뮬레이션 방법과 제안된 안전영역을 이용한 홀더와 공구 길이 선택 방법의 연산 시간을 비교하였다. 기존의 충돌 시뮬레이션 방법의 연산 시간은 식 (6)과 같이 한 공구에 조립 가능한 홀더의 숫자에 비례해서 증가한다. 한 공구에 대해서 한 홀더와 정해진 세팅 길이만 사용된다면 연산 시간이 짧지만, 한 공구에 많은 홀더가 다양한 공구 길이로 조립 가능하다면 연산 시간이 오래 걸린다.

$$n_h \cdot (t_s + t_c) \quad (6)$$

n_h : Count of fixable holders per a tool

t_s : Simulation time

t_c : Collision check time

제안된 안전영역을 이용한 홀더와 공구 길이 선정 방법은 홀더의 안전한 세팅 높이를 계산하는 시간이 시뮬레이션과 안전영역 계산 시간이 비해서 아주 짧기 때문에 식 (7)과 같이 홀더의 개수에 관계 없이 거의 일정하다.

$$t_s + t_{sp} + n_h \cdot t_{oh} \quad (7)$$

t_{sp} : Safe space computation time

t_{oh} : Overhang length computation time ($t_{oh} \ll t_s + t_s$)

Fig. 6 (a)에 보이는 대형 금형의 시뮬레이션 시간과 안전영역 계산 시간을 PC (Pentium 2.13 GHz CPU, 2.0 GB memory)에서 측정하였다. 이 대형 금

형을 가공하는 데 32 개의 공구가 사용되며 실제 가공시간은 약 62 시간이 소요되었다. 제안된 방법의 총 연산 시간은 14.5 분이고 홀더의 개수에 거의 영향을 받지 않는다. 그 중 순수한 가공 시뮬레이션 시간은 9.5 분으로 만약 한 공구에 하나의 홀더와 정해진 공구 길이만 가능하다면 기존의 충돌 검사 시뮬레이션이 더 빠르다. 하지만 만약 한 공구에 평균 5 개의 홀더를 조립할 수 있다면 기존의 방법은 반복된 가공시뮬레이션 시간만으로도 47.5 분으로 제안된 방법보다 길다.

따라서 안전영역을 이용한 홀더 직경 및 공구 길이 선정 방법은 많은 공구와 홀더를 따로 보관하고 가공 직전에 적합한 홀더를 선택해 조립하는 중대형 금형의 가공에 적합하다. 공구 길이와 홀더 직경을 안전영역 안에서 빠르게 바꿀 수 있으므로 가장 짧고 높은 강성의 공구 세팅이 가능하다.

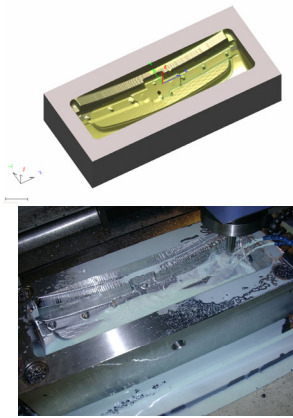
4.3 공구-홀더 세팅 실험

소재, 공구 그리고 공구경로를 입력 받아 가공 시뮬레이션 후의 소재 형상과 안전영역을 출력하는 가상가공 시스템을 C++ 언어와 OpenGL 로 구현하였다. 제안된 알고리즘을 실험하기 위해서 시스템에서 계산된 안전영역을 대형 금형 가공의 홀더 선택과 공구길이 선정에 적용하였다.

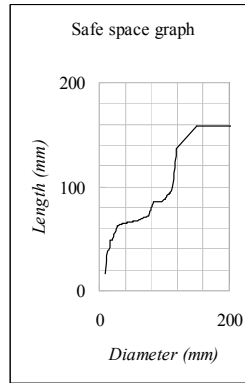
대형 금형의 깊고 복잡한 형상을 가공하기 위해서는 직경이 작으면서 길이가 긴 공구를 이용해야 하므로 어려움이 많다. 이때 발생하는 공구의 휨이나 체터 진동은 공구의 길이를 줄여주는 다양한 홀더를 이용해 줄일 수 있다.

제안된 안전영역을 이용한 공구 세팅 방법이 자동차 전면 그릴 금형 가공에 적용되었다. Fig. 6 (a)는 가공 시뮬레이션 후 소재 형상과 실제로 가공된 금형 소재의 형상을 함께 보여준다. Fig. 6 (b)-(e)는 시뮬레이션을 통해서 계산된 안전영역과 이를 이용해 설치한 공구와 홀더를 보여준다. 오른쪽 그림의 눈금 사이 거리는 20 mm 이다. Fig. 6 (c), (d)에서 공구 길이는 안전영역을 이용해서 가장 짧게 세팅 되었다.

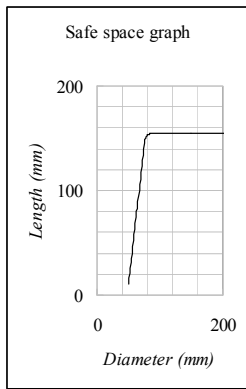
공구 직경이 2 mm 인 소경 공구는 직경이 6 mm 인 샹크에 연결되어 있어 정밀한 안전영역의 계산이 필요하다. Fig. 6 (e)와 같이 정밀한 안전영역이 소경 공구의 형상을 선택하는데 도움을 준다.



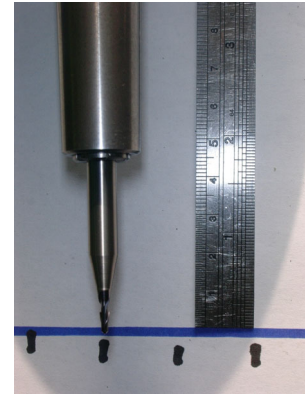
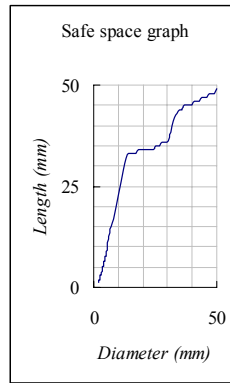
(a) Simulation result and real NC machining of large mold



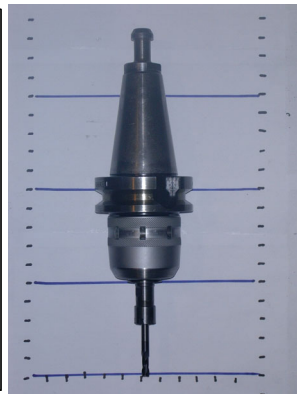
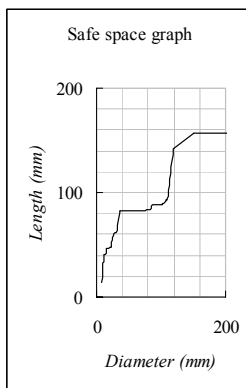
(d) Tool-holder assembly for finishing (Dia. 10mm ball, L/D 16 → 9)



(b) Tool-holder assembly for roughing (Dia. 50 mm cutter, L/D 3.2)



(e) Taper of small tool and holder assembly for grill cutting (Dia. 2 mm ball L/D 20 → 5)



(c) Tool-holder assembly for pencil (Dia. 8mm flat, L/D 20 → 7.8)

Fig. 6 Experiment of tool-holder setting method using safe space; left is safe space graph and right is tool, holder and arbor assembly used at real NC machining

Table 1 Tool setting length / diameter before and after using safe space

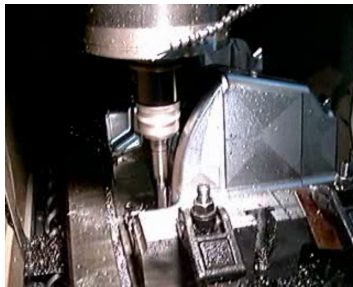
	(b) Rough	(c) Pencil	(d) Finish	(e) Grill
L/D Manual	3.2	20	16	20
L/D Safe space	3.2	7.8	9	5

Table 1 은 안전영역을 사용하기 전의 길이 직경 비율과 이용한 후에 직경 길이 비율을 비교해

보여준다. 제안된 방법을 사용한 이후 길이 직경 비율이 절반으로 줄어 생산성과 품질 역시 향상될 것으로 기대된다. 실제 가공에서 공구 길이가 절반으로 줄었지만 홀더와 아버가 안전영역 안에 있도록 조립했기 때문에 홀더와 소재 사이에 충돌 사고가 발생하지 않았다.

4.4 금형 회사들에 적용

개발된 가상가공 시스템 및 안전영역을 이용한 공구 세팅 방법은 가공시뮬레이션 및 이송속도 조정 소프트웨어의 모듈로 50 개 이상의 중 대형 금형 가공 업체에 적용 되었다. 이 기업들에서는 금형의 NC 밀링 가공에서 홀더와 소재가 충돌하는 사고가 년 3 회에서 0 회로 줄었고 생산성이 약 15% 향상되었다.



(a) The slide core of mold



(b) The mold of the automobile

Fig. 7 Application to large mold machining

Fig. 7 (a)는 소재를 다섯번 돌려 물려서 가공해야 하는 슬라이딩 코어 금형의 가공 과정이다. CAM 시스템에서 남아있는 소재 형상을 인식하지 못하기 때문에 안전영역을 이용하기 전에는 짧고 안전한 공구 설치가 어려웠다. 하지만 적용 후에는 가상가공 시스템에서 안전영역이 정확하게 계산되

고 이를 이용해 공구가 안전하고 짧게 설치되었다. Fig. 7 (a)에서 짧게 설치된 홀더가 소재에 가깝게 근접해 지나지만 소재에 충돌하지는 않음을 볼 수 있다. 또한 짧아진 공구 길이에 맞는 빠른 이송속도를 부여해 약 20%의 가공시간이 단축되었다.

Fig. 7 (b)는 자동차 내장 플라스틱의 대량 생산을 위해 가공 중인 대형 사출금형이다. 대형 금형에서 가공 깊이가 공구 직경에 비해 깊기 때문에 간섭이 없는 공구 홀더 조립은 매우 중요하다. 공구 길이를 안정적으로 길게 하면 휨과 체터가 발생하고, 공구 길이를 임의로 짧게 하면 홀더, 아버 또는 주축 몸체가 소재와 충돌하는 사고가 발생해 대형 금형 가공에 어려움이 많았다. 안전영역을 이용한 공구 세팅이 적용된 이후 연 4 회 정도 발생하던 공구 주축 시스템과 소재 사이에 충돌이 0 회로 줄었다. 또한 짧아진 공구 길이와 가공 부하에 적합한 이송속도 부여로 가공시간이 약 12% 감소하였다. 제안된 공구 세팅 방법을 이용하는 업체가 꾸준히 증가하고 있으며 좋은 결과를 얻고 있다.

5. 결론

본 논문에서는 안전영역을 이용한 가장 짧고 안전한 공구 세팅 알고리즘을 제안하고 NC 밀링 가공에 적용하였다. 안전영역은 공구 좌표에서 소재와 간섭이 없는 공간으로, 홀더가 안전영역 안에 있으면 소재와 절대로 충돌하지 않는다는 것이 증명되었다. 따라서 안전영역을 이용해서 길이는 줄이고 직경을 늘리면서 소재와 간섭이 없는 공구와 홀더의 설치가 가능했다. 실험에서 제안된 공구 설치 알고리즘으로 공구 길이와 직경비율 L/D 가 펜슬에서 60% 정삭에서 44% 감소하였다.

이 알고리즘은 C++ 언어로 가상 가공 시스템과 함께 구현되었다. 가상가공 시스템에서 공구경로를 따라 이동하는 공구가 소재를 제거하고, 현재 소재모델이 공구 좌표계의 안전영역을 제거함으로써 최종 소재형상과 안전영역이 계산된다. 안전영역을 이용해서 최적의 홀더와 공구 길이를 빠르게 얻는다. 또한 짧아진 공구 길이와 가공 부하에 적합한 빠른 이송속도를 추가해 생산성을 향상시킨다. 이 시스템은 50 개 이상의 금형 가공 업체에서 짧고 안정적인 공구 세팅과 생산성향상을 위해 이용하고 있으며, 적용된 이후로 홀더와 소재

간의 충돌 사고가 연 3 회에서 0 회로 줄었고 짧아진 공구에 적합한 이송속도 적용으로 약 15%의 생산성이 향상효과가 발생하였다.

새로 제안된 방법은 일반적인 가상가공 시스템의 한 홀더와 한 소재의 공구간섭 시뮬레이션과는 다르다. 제안된 방법에서는 한번의 가공 시뮬레이션으로 만들어진 안전영역을 이용해 모든 홀더와 모든 공구 길이에 대해서 간섭 유무를 빠르게 검사할 수 있다. 따라서 제안된 방법은 많은 종류의 홀더를 구비하고 매번 적합한 홀더를 선택하고 조립해 사용하는 중형 및 대형 금형의 가공에 유용하게 적용될 수 있다.

참고문헌

1. Shirase, K. and Altintas, Y., "Cutting force and dimensional surface error generation in peripheral milling with variable pitch helical end mills," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 36, No. 5, pp. 567-584, 1996.
2. Kim, G. M., Kim, B. H. and Chu, C. N., "Estimation of cutter deflection and form error in ball-end milling," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 43, No. 9, pp. 917-924, 2003.
3. Lopez, L. N., Lamikiz, A., Sanchez, J. A. and Salgado, M. A., "Effects of tool length in the high-speed milling inclined surface," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 24, No. 1, pp. 621-631, 2004.
4. Tlustý, J., Smith, S. and Winfough, W. R., "Techniques for the use of long slender end mills in high-speed milling," *Annals of the CIRP*, Vol. 45, No. 1, pp. 393-396, 1996.
5. Schmitz, T. L., Burns, T. J., Ziegert, J. C., Dutterer, B. and Winfough, W. R., "Tool length-dependent stability surfaces," *Machining Science and Technology*, Vol. 8, No. 3, pp. 377-397, 2004.
6. Choi, B. K., Kim, D. H. and Jerard, R. B., "C-space approach to tool-path generation for die and mould machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 29, No. 9, pp. 657-669, 1997.
7. Morishige, K., Kase, K. and Takeuchi, Y., "Collision-free tool path generation using 2-dimensional C-space for 5-axis control machining," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol. 13, No. 6, pp. 393-400, 1997.
8. Balasubramanian, M., Sarma, S. E. and Marciniak, K., "Collision-free finishing tool paths from visibility data," *Computer-Aided Design*, Vol. 35, No. 4, pp. 359-374, 2003.
9. Anderson, R. O., "Detecting and eliminating collisions in NC machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 10, No. 4, pp. 231-237, 1978.
10. Chung, Y. C., Park, J. W., Shin, H. Y. and Choi, B. K., "Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC verification," *Computer-Aided Design*, Vol. 30, No. 8, pp. 587-594, 1998.
11. Su, C. J., Lin, F. and Ye, L., "A new collision detection method for CSG-represented objects in virtual manufacturing," *Computers in Industry*, Vol. 40, No. 1, pp. 1-13, 1999.
12. Roy, U. and Xu, Y., "Computation of a geometric model of a machined part from its NC machining programs," *Computer-Aided Design*, Vol. 31, No. 6, pp. 401-411, 1999.