

3축 밀링 가공의 공구 충돌 검증

정연찬* · 박정환**

Verification of Tool Collision for 3-Axis Milling

Yun C. Chung and Jung W. Park

Key Words: 3-Axis Milling(3축 밀링 가공), Tool Collision(공구 충돌), Z-Map, Verification(검증), Cutting Simulation(모의 가공)

Abstract

Verification of tool collision is an important issue in die and mold machining. In this paper three functions of verification are schematically explained based on Z-Map model. The first function is getting a collision-free region when a tool assembly and a part surface model are given. The second function estimates the shortest length of cutter shank with that the tool cuts all of a region without collision. The last one is cutting simulation considering all parts of tool assembly as well as cutter blade. Those functions can be easily implemented by using several basic operators of Z-Map model which are explained also. Proposed approaches have enough accuracy to verify collision in reasonable computing time.

1. 서론

자동차의 내판 혹은 외판을 성형하는 프레스 금형은 물론이고, 가전제품의 외장을 성형하는 사출 금형은 최종 적인 제품의 외관과 제품 개발 주기에 결정적인 영향을 미친다. 이들 사출 금형과 프레스 금형의 형상과 구조는 점점 복잡해지고 있는데, 그 원인은 크게 두 가지로 요약된다. 첫 번째는 제품 외관에 관한 최종 사용자의 심미적 요구가 날로 높아지기 때문이다. 이러한 결과로 최근의 금형 형상면은 CAD/CAM 시스템을 이용한 자유곡면으로 모델링 되고 있다. 두 번째 원인은 제품의 개발 주기를 단축하고 생산성을 높이기 위해 사출 혹은 프레스 공정의 수를 줄이려는 노력이 금형의 구조를 복잡하게 하고 있다.

금형이 복잡해지면서 부분적으로는 5축 가공이 필요한 구조와 형상을 가지게 되었지만, 국내 사출 금형 및 프레스 금형 업계에서는 3축 밀링 가공으로 금형을 생산하고 있다. 업계에서 5축 가공기를 보유하고 있지 않는 측면도 있지만, 신뢰성 있는 5축 가공 경로 데이터를 생성할 수 있는 CAD/CAM 시스템이 아직 없으며, 업계에서 5축 가공에 관한 경험 기술이 부족하기 때문이다. 또, 작업물의 셋업을 바꾸면 대부분의 경우 3축으로 가공 가능하다. 몇몇 특수한 경우에는 어태치(attachment)를 부착해서 한 축을 고정된 고정 4축으로 가공하기도 한다.

일반적인 CAD/CAM 시스템은 가공 경로 데이터를 계산할 때 가공 공구와 피삭재와의 충돌 여부를 고려하지 않는다. 충돌을 고려하는 기능이 있는 경우에도 아주 제한적인 용도이거나, 비현실적으로 많은 계산 시간을 필요로 하는 경우가 대부분이다. 일반적으로 CAD/CAM 시스템에서 가공 경로를 계산할 때, 공구의 날(blade) 부분 형상만을 고려하고 홀더(holder) 혹은 칩(chuck)의

* (주)큐빅테크 큐빅기술연구소

** 영남대학교 기계공학부

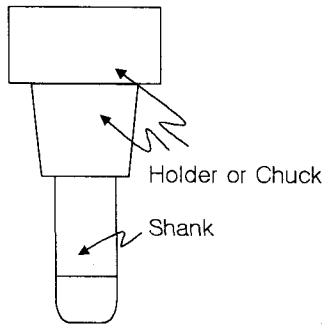


Fig. 1 Tool Assembly

형상은 고려하지 않기 때문이다(Fig. 1의 공구 부속 명칭 참조). 또, 가공 여유 살이 붙어 있는 피삭재를 고려하지 않고 최종 형상면으로만 가공 경로 테이터를 계산하기 때문이다.

사출 혹은 프레스 금형 가공에서 공구 충돌은 치명적인 재해의 가능성과 생산성 및 제품의 품질에도 영향을 미친다. 최근, 금형의 생산성을 높이기 위해 고속 가공기를 사용하는 경우가 많은데, 고속가공기에서는 5,000~20,000 mm/min의 이송속도로 움직인다. 따라서 공구와 피삭재가 충돌하는 경우 기계의 손상은 물론이고 안전사고로 이어질 가능성이 매우 크다. 그리고 충돌로 인해 금형 가공 표면에 손상이 발생해서 용접을 하는 경우는 금형의 품질 뿐 아니라 최종 제품의 품질에도 영향을 미치게 된다. 피삭재를 새로 준비해서 가공하는 경우에는 소재와 추가적인 가공 비용이 발생하며 납기에 영향을 미치게 된다.

3축 밀링 가공에서 공구 충돌 검증은 사용자 관점에서 1)충돌 없는 영역 산출, 2)최소 샹크(shank) 길이 산출, 3)모의 가공의 세 가지로 나눌 수 있다. ‘충돌 없는 영역 계산’은 주어진 공구(홀더와 척 포함)로 충돌 없이 가공할 수 있는 가공 영역을 계산하는 것이다. 공구의 종류가 제한적이거나 가공성 등의 이유로 공구가 미리 지정되는 경우에 필요한 검증이다.

‘최소 샹크(shank) 길이 산출’은 홀더와 척이 주어져 있을 때, 충돌 없이 모든 영역을 가공할 수 있는 최소 샹크 길이를 산출하는 검증이다. 일반적으로 샹크의 길이가 짧을 수록 공구의 떨림이 적기 때문에 작업자는 최대한 짧은 공구를 사용하려고 하며, 일반적으로 홀더와 척은 공구의 크기(지름)에 따라 정해지기 때문에 이러한 검증이 필요하다.

모의 가공은 실제 피삭재를 가공하기 전에 안전하고 값싸며, 가공성이 좋은 소재를 미리 가공해 보는 것이다. 가장 확실하게 공구 충돌 여부를 확인하는 방법이며, 과거에는 스티로폼을 가공 소재로 많이 사용하였다. 그러나 최근에는 더욱 저렴하면서 수치적인 검증이 용이한 컴퓨터 모의가공이 일반적인 검증 방법으로 인식되고 있다.

본 연구에서는 특별한 구분이 없는 한 공구를 잡고서 공구와 함께 움직이는 기계의 헤드와 공구 홀더, 어댑터 등의 공구 장치 전체를 “홀더”라는 용어로 사용하겠다. 또, 공구의 “충돌”이란 절삭이 가능한 공구의 날을 제외한 생크 혹은 홀더가 피삭재와 부딪히는 것을 의미한다. 2절에서부터 앞에서 언급한 세 가지 공구 충돌 검증의 실제 구현 방안과 그 결과를 소개하고자 한다. 실제적인 구현은 Z-Map 모델을 기초로 이루어졌는데, 솔리드 등의 다른 모델보다 월등히 빠른 시간에 요구되는 정확성을 만족하는 계산을 할 수 있었다.

2. Z-Map 모델의 이해

본 절에서는 곡면 형상을 표현하는 모델인 Z-Map 모델에 대해 설명하고, 실제 검증 계산에 사용될 Z-Map 모델의 기본적인 연산자를 소개하고자 한다.

2.1 Z-Map 모델의 정의

Z-Map 모델은 비매개변수형 곡면의 특수한 형태로서, 식(1)에서 보듯이 XY-평면(domain)에 정의된 격자점(grid-point)에서의 높이 값을 2차원 배열 $Z[i, j]$ 형식으로 저장하고 있다.⁽¹⁾

$$z = Z[i, j] \quad (1)$$

$$x = X0 + Dx * i$$

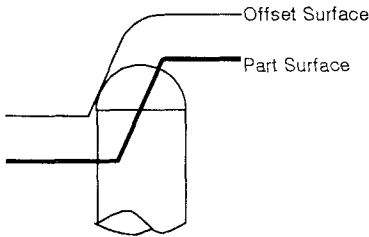
$$y = Y0 + Dy * j$$

여기서, Dx , Dy 는 X- 및 Y-방향의 격자간격
 $X0$, $Y0$ 는 Z-Map 모델 영역의 원점

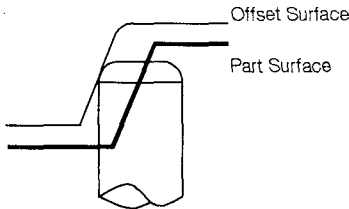
2.2 Z-Map 모델의 오프셋(Offset)

어떤 곡면을 R만큼 오프셋 하는 것을 고려할 때, 그 곡면과의 최단거리가 R인 점들의 집합을 오프셋 곡면이라고 한다. 이때, ‘최단거리’의

개념을 확장하면, 공구가 그 곡면을 침범하지 않는 최단 거리의 공구 중심점들의 집합을 오프셋 곡면이라고 할 수 있다. 이것은 Fig. 2와 같이 거꾸로 세운 공구의 중심점을 원래 곡면(part surface) 위의 모든 점에 위치시킬 때 형성되는 공구의 포락면(envelope surface)으로 해석할 수도 있기 때문에 역공구오프셋(inverse tool offset)이라고 한다. Fig. 2는 볼엔드밀과 라운드엔드밀의 역공구오프셋을 2차원적으로 보여주고 있다.^{(2),(3),(4)}



(a) Offset Surface for Ball-endmill



(b) Offset Surface for Round-endmill

Fig. 2 Inverse Tool Offset

2.3 Z-Map 모델의 연산자

이어지는 절의 설명을 쉽게 하기 위해 몇 가지 Z-Map 모델의 연산자를 정의하고자 한다. Z-Map 모델이 간단한 자료 구조이기 때문에 여기서 정의된 연산자는 쉽게 구현할 수 있다.^{(2),(3),(5)}

1) 역공구오프셋

$$ZM_{out} = ToolOffset(ZM_{in}, type, r)$$

ZM_{out} : 출력 Z-Map 모델

ZM_{in} : 입력 Z-Map 모델

type : 공구의 종류

= {Ball, Flat, Round, Taper}

r : 공구의 반경

2) 빼기연산 : Z-Map 모델 a의 z-값에서 b의 z-값을 뺀다.

$$ZM_{out} = ZM_a - ZM_b$$

3) 더하기연산 : Z-Map 모델 a의 z-값과 b의 z-값을 더한다.

$$ZM_{out} = ZM_a + ZM_b$$

4) 영역산출 : XY-평면과 Z-Map 모델을 교선을 구한다.

$$Region = Intersection(ZM_{in}, z)$$

Region : 교선이 형성하는 영역

z : XY-평면의 z-값

5) 최대 Z-값

$$z = MaxZ(ZM_{in})$$

z : ZM_{in} 의 최대 z-값

6) Z-이동변환

$$ZM_{out} = Trans(ZM_{in}, z)$$

z : 이동량

3. 충돌 없는 영역 산출

충돌 없는 영역은 가공에 사용할 공구가 이미 정해져 있을 때, 그 공구로 충돌 없이 가공 가능한 영역을 산출하는 문제이다. 본 절에서는 앞 절에서 정의된 Z-Map 모델의 연산자들을 이용해서 홀더의 충돌이 없는 영역을 산출하는 방법을 설명하고자 한다. 설명의 편의를 위해 Fig. 3과 같은 공구를 가정하자.

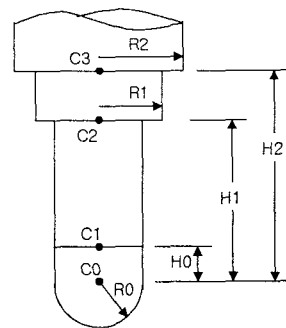


Fig. 3 Tool Assembly

3.1 피삭재 생성 : ZM_{stock}

가공 이전 단계의 피삭재 형상 정보를 입력 받을 수 있고, 그 형상을 피삭재 모델로 한다면 좀

더 정확한 충돌 검증이 가능하다. 그러나 최종 가공 형상은 CAD/CAM 시스템에서 모델링 되기 때문에 쉽게 얻을 수 있지만 가공할 피삭재는 수가공으로 만들어지거나 이전 가공 단계에서 다른 가공을 통해 만들어 지기 때문에 일반적으로 최종 가공형상을 이용해서 피삭재를 생성해야 한다. 최종 가공 형상 ZM_{part} 와 가공 여유 t 가 주어질 때, 피삭재는 다음과 같이 생성할 수 있다.

$$ZM_{stock} = ToolOffset(ZM_{part}, Ball, t) \quad (2)$$

where, ZM_{part} : 최종 가공 형상면
 t : 가공 여유 살의 두께

또, 가공 여유가 아주 적은 최종 정삭 가공일 때는 최종 가공형상을 피삭재 형상으로 가정하기도 하는데, 이 방법은 실제 있을 충돌을 놓칠 위험이 있다.

3.2 공구 충돌면 생성 : $ZM_{collision}$

Fig. 3에서 공구의 날 부위를 제외한 생크와 홀더가 충돌을 일으키는데, 이러한 충돌 가능성이 있는 부위를 역공구오프셋 해서 충돌면을 생성한다. 충돌면 위쪽은 충돌이 없는 충돌자유영역(collision free space)이 되며, 충돌면 아래쪽은 충돌영역이 되는데, 이러한 영역의 구분은 Fig. 3의 C0에 해당되는 공구의 중심점을 기준으로 한다. Choi⁽⁵⁾는 그러한 영역을 C-space(configuration space)라는 개념으로 설명하였다. Fig 3.과 같은 공구의 경우 충돌면은 다음과 같은 방법으로 얻어진다.

$$ZM_{collision} = ZM_{shank} + ZM_{h1} + ZM_{h2} \quad (3)$$

where, $ZM_{r0} = ToolOffset(ZM_{stock}, Flat, R0)$
 $ZM_{shank} = Trans(ZM_{r0}, -H0)$
 $ZM_{t1} = ToolOffset(ZM_{stock}, Flat, R1)$
 $ZM_{h1} = Trans(ZM_{t1}, -H1)$
 $ZM_{t2} = ToolOffset(ZM_{stock}, Flat, R2)$
 $ZM_{h2} = Trans(ZM_{t2}, -H2)$

위 식(3)에서 사용되는 이동변환은 역공구오프셋에 사용되는 생크와 홀더의 공구중심이 Fig. 3에서 각각 C1과 C2, C3에 해당하기 때문에 전체 공구의 중심점인 C0점에 맞추기 위한 것이다.

생크와 홀더의 모양이 평엔드밀 형상이 아닌

경우에도 그에 맞는 역공구오프셋을 취하면 충돌면을 얻을 수 있으며, 홀더의 형상이 복잡한 경우에도 기본 공구형상으로 분리하고 각각의 오프셋을 취해서 모두 더하면 최종 공구 충돌면을 얻을 수 있다.

3.3 공구 위치(Cutter Location)면 생성 : ZM_{cl}

공구 위치면은 실제 공구가 가공 경로 데이터를 따라 움직일 때, 공구의 중심점이 형성하는 곡면이다. 따라서 다음과 같은 식으로 공구위치면을 얻을 수 있다.

$$ZM_{cl} = ToolOffset(ZM_{part}, Ball, R0) \quad (4)$$

where, ZM_{part} : 최종 가공 형상면

이때도 절삭을 일으키는 공구의 날 형상이 기본 형상(볼엔드밀, 평엔드밀, 라운드엔드밀, 테이퍼엔드밀)이 아닌 경우에는 기본 형상으로 분해해서 역공구오프셋을 취한 후 모두 더하면 된다.

3.4 충돌 없는 영역 산출

최종적으로 충돌 없는 영역을 찾기 위해서는 다음과 같은 연산이 필요하다.

$$Region = Intersection(ZM_{sub}, 0 + \epsilon) \quad (5)$$

where, $ZM_{sub} = ZM_{cl} - ZM_{collision}$
 ϵ : 허용 공차 ($\epsilon > 0$)

이때, 허용 공차 ϵ 을 조절함으로써 충돌 없는 영역의 안전성을 높일 수 있다.

4. 최소 생크 길이 산출

본 절에서는 사용할 공구의 홀더와 날에 해당하는 공구의 크기가 정해져 있을 때, 충돌 없이 가공할 수 있는 생크의 최소 길이를 산출하는 방법을 설명하고자 한다. 이것은 가능한 짧은 공구로 가공하려는 작업자의 필요성을 만족할 수 있다.

Fig. 3의 예제 공구에서 생크의 길이는 (H1-H0)에 해당한다. 따라서 생크를 제외한 공구 충돌면을 구한 후, 공구 위치면과 차이를 구하면 충돌이 없는 최소 생크의 길이를 구할 수

있는데 Fig. 3의 예제 공구를 가정하고 설명하면 다음과 같다.

4.1 공구 충돌면 생성 : $ZM_{collision}$

생크의 길이가 주어지지 않았기 때문에 생크 위 부분을 이루는 홀더의 충돌면은 다음과 같다.

$$ZM_{collision} = ZM_{h1} + ZM_{h2} \quad (6)$$

$$\text{where, } ZM_{h1} = ToolOffset(ZM_{stock}, Flat, R1)$$

$$ZM_{t2} = ToolOffset(ZM_{stock}, Flat, R2)$$

$$ZM_{h2} = Trans(ZM_{t2}, -(H2-H1))$$

식(6)의 역공구오프셋면은 공구의 중심이 Fig. 3의 C2에 해당하기 때문에 오프셋 연산 이후의 이동 변환이 앞 절의 식(3)과 다르다.

4.2 공구 위치면 생성 : ZM_{cl}

공구 위치면은 앞 절의 식(4)와 동일한 방법으로 얻을 수 있다.

4.3 최소 생크 길이 산출 : L_s

공구 충돌면과 공구 위치면이 주어지면 다음과 같은 방법으로 최소 생크 길이를 구할 수 있다.

$$L_s = \text{Max}Z(ZM_{collision} - ZM_{cl}) \quad (7)$$

5. 모의 가공

개념적으로는 공구가 움직일 때, 생크 혹은 홀더가 피삭재에 닿는지 여부를 확인하는 것이며⁽⁹⁾, 바로 직전까지 가공된 피삭재의 형상과 비교하는 것이 가장 정확하다. 따라서 공구 움직임 하나하나의 모의가공을 수행하면서 충돌을 확인하는 것이 일반적이다.⁽¹⁰⁾ 모의가공은 계산량이 많기 때문에 금형 가공과 같이 가공 데이터의 양이 많은 경우에는 Z-Map에 기초한 계산 방법이 타당한 것으로 평가되고 있다.^{(3),(6),(7),(11)}

공구가 움직일 때 생성되는 공구 이동 궤적면과 피삭재와의 비교 방법은 다음 세 가지로 나뉘어 진다.

- 1) 기본 공구 형상(원통, 원뿔)으로 분해한 궤적면을 모델링해서 순차적으로 계산
- 2) 하나의 궤적면으로 모델링해서 계산

- 3) 짧은 간격으로 공구를 이동 하면서 샘플링

첫 번째 방법은 공구의 어느 부위와 충돌이 발생했는지 확인 할 수 있지만 같은 좌표점을 모든 기본 궤적면에 대해 계산해야 하기 때문에 계산량이 많은 단점이 있다. 그러나 두 번째 방법은 하나의 좌표점에 대해서 한번의 계산만 필요하지만 충돌 부위 확인이 곤란하다. 그리고 이 방법은 구현이 가장 복잡하다는 단점이 있다. 세 번째 방법은 아주 쉽게 구현할 수 있는 장점이 있지만 가장 많은 계산 시간을 필요로 한다.⁽³⁾

본 연구에서는 복잡한 형상의 공구를 기본 공구 형상(구, 원통, 원뿔)로 분해해서 참고 문헌(6)과 (8)에 기술된 방법으로 궤적면을 모델링한 후에 피삭재와 비교하는 방법을 사용하였다.

6. 결론

본 연구에서는 3축 밀링 가공에서 필요한 공구의 충돌 검증의 구체적인 구현 방안을 제시하였다. Z-Map 모델을 기초로 세 가지 검증 방안을 실제 구현해 본 결과, 일반적으로 만족할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 비록 솔리드 모델 등의 다른 방법에 비해서는 비교할 수 없을 정도로 빠른 계산 시간을 보이지만, 그 크기가 2,000 x 2,000 mm² 이상 되는 대형 금형의 경우에는 Z-Map 모델의 메모리 부담이 커지고 계산해야 할 데이터가 많아지기 때문에 계산 시간이 급증하게 된다. 향후 Z-Map 연산자의 알고리즘 효율을 더욱 높이고 병렬 컴퓨팅 등의 방법을 써서 계산 시간을 단축하는 것이 필요하겠다.

일반적으로는 충돌 검증의 허용 오차가 크기 때문에 Z-Map 모델로도 계산의 정확성 측면에서는 어려운 점이 없었다. 그러나 Z-Map 모델의 특성 때문에 수직에 가까운 측면에서의 오류가 커지며, 대부분의 충돌이 수직 측면에서 일어나기 때문에 정밀한 충돌 검증에는 한계가 있다.

최소 생크 길이 산출의 경우에 본 연구에서 제시한 방법은 생크가 곧은(straight) 형상인 경우에만 가능한 방법이다. 테이퍼가 있거나 다단인 경우를 고려한 추가 연구가 필요하다.

제시된 방안의 구현 결과를 다른 방법과 엄밀히 비교 분석하는 추후 연구가 필요하겠다.

참고문헌

- (1) B. K. Choi, 1991, *Surface Modeling for CAD/CAM*, Elsevier
- (2) 정연찬, 1991, "Z-Map 곡면의 오프셋과 블렌드 곡면 형성에 관한 연구", 석사학위논문, 한국과학기술원
- (3) 정연찬, 1996, "금형가공용 통합 CAM 시스템을 위한 가공데이터의 모의가공과 검증에 관한 연구", 박사학위논문, 한국과학기술원
- (4) 박정환, 정연찬, 최병규, 1998, "Z-map 모델을 이용한 정밀형상 모델링", 한국정밀공학회지, Vol.15, No.11, pp.180-188
- (5) B. K. Choi and R. B. Jerard, 1999, *Sculptured Surface Machining*, Kluwer Academic Publishers.
- (6) 정연찬, 최병규, 1996, "모의가공을 위한 공구 이동 궤적면의 비매개변수형 모델링", 한국 CAD/CAM 학회 논문집, 제1권 제1호, pp.45-55
- (7) 최병규, 정연찬, 1995, "Z-map을 사용한 모의가공과 NC-code의 검증", 산업공학, 8권, 3호, pp.155-169
- (8) Yun C. Chung, Jung W. Park, Hayong Shin and Byoung K. Choi, 1998, "Modeling the surface swept by a generalized cutter for NC verification," *Computer-Aided Design*, Vol.30, No.8, pp.587-594
- (9) T. V. Hook, 1986, "Real time shaded NC milling display," *Computer Graphics*, Vol. 20 No. 4, pp. 15-20
- (10) R. O. Andersen, 1978, "Detecting and eliminating collisions in NC machining," *Computer-Aided Design*, Vol. 10 No. 4, pp. 231-237
- (11) S. Takata, M. D. Tsai and M. Inui, 1989, "A cutting simulation system for machinability evaluation using a workpiece model," *Annals of the CIRP*, Vol. 38, pp. 417-420