

## 공구간섭으로 인한 미절삭 윤곽의 잔삭가공을 위한 효율적인 공구경로

주상윤\*, 이상현\*\*

### An Efficient CleanUp Tool Path for Undercuts Come from Cutter Interferences in Profile Machining

Ju, S. Y.\* and Lee, S. H.\*\*

#### ABSTRACT

In 2D-Profile machining using cutter radius compensation cutter interferences are very common. To prevent the cutter interferences undercuts are inevitable in some regions of the profile. The undercut regions require cleanup machining using smaller radius tools. This paper considers a procedure of the tool path generation for the cleanup profile machining. And two methods are introduced for an efficient tool path generation. One is how to reduce the machining time by uniting adjacent tool paths of undercut regions, and the other is how to find the tool path with the minimal distance by applying TSP algorithm.

**Key words** : profile machining, cleanup, tool path, machining time, TSP algorithm

#### 1. 서 론

NC가공은 드릴가공과 같은 PTP가공, 2차원 평면상의 곡선을 따라 작업이 이루어지는 윤곽가공, 그리고 3차원 공간 상에 모델링된 곡면 상에서 작업이 이루어지는 곡면가공으로 분류된다<sup>[1]</sup>. 자동차 산업에서 자동차 외관을 제작하려면 많은 금형을 필요로 하게 되는데 이들 금형들 가운데 윤곽가공이 요구되는 대표적인 것으로는 자동차 외관의 가장자리를 자르기 위한 트리밍 금형(trimming die)과 가장자리를 구부리기 위한 플랜지 금형(flange die)이 있다. 이 금형들은 주물공정에 의하여 상형과 하형의 짝(pair)으로 생성되며, 상형은 바깥쪽으로 하형은 안쪽으로 가공윤곽면을 밀링가공하여 제작된다. 윤곽가공은 2차원 XY평면상에서 수행되는 것이 일반적이지만 가공될 금형의 윤곽곡선이 Z축 방향으로 값이 크게 변화하는 경우 헬리컬가공을 이용한 3차원 윤곽가공을 수행하기도 한다<sup>[2]</sup>.

윤곽가공에 관한 연구는 모델링된 윤곽곡선을 부드

럽게 연결된 다수의 원호들로 근사한 후 가공데이터를 얻는 방법에 관한 것들이 대부분이다. Schonherr<sup>[3]</sup>는 2차원 자유곡선을 biarc로 근사하는 방법을 제시하였고, Meek<sup>[4]</sup>는 점 데이터를 그리고 Young<sup>[5]</sup>은 2차원 상의 자유곡선을 각각 arc spline으로 근사시키는 방법에 관하여 연구하였다. 신하용<sup>[6]</sup>은 모델링된 2차원 윤곽곡선을 다수의 biarc곡선들로 근사하여 가공데이터를 생성하였을 때 얻게 되는 여러 장점들에 대하여 소개하였다. 또한 주상윤<sup>[2]</sup>은 3차원 윤곽곡선을 직선과 bihelical곡선으로 근사하여 가공데이터를 생성하는 방법을 제시하였다. 그러나 지금까지 윤곽가공에 관한 연구들은 모델링된 곡선을 원호나 헬리컬곡선으로 근사시키는 방법을 집중적으로 다루고 있을 뿐 공구간섭이 존재할 때 간섭영역에 추가로 요구되는 잔삭가공에 관하여는 다루고 있지 않다.

본 연구에서는 공구간섭이 존재하는 윤곽곡선으로부터 잔삭가공을 수행하기 위한 공구경로를 생성하는 절차와 공구이동시간과 공구 이동거리를 단축시키는 효율적인 가공데이터의 생성 방법을 소개하고자 한다.

본 논문에서 공구경로라 함은 공구경 보정을 사용하는 NC 프로그램 상의 경로를 의미하며, 공구경 보정 시작과 종료를 포함한다.

\*종신회원, 울산대학교 공과대학 산업정보경영공학부  
\*\*정회원, (주)큐빅테크 DDM 센터  
- 논문투고일: 2002. 3. 15  
- 심사완료일: 2002. 4. 22

## 2. 전주가공과 잔삭가공

CAD시스템으로부터 모델링된 윤곽곡선은 다항식 형태의 함수식으로 표현되는 것이 일반적이다. 그러나 대부분의 NC기계는 직선선분이나 원호와 같은 단순한 단위곡선만을 가공할 수 있으므로 모델링된 다항식 윤곽곡선으로부터 가공데이터를 얻으려면 우선 윤곽곡선을 다수의 직선선분이나 원호로 근사시켜야 한다. 다항식 윤곽곡선을 근사시키는 절차는 다음의 2단계를 따라 이루어진다.

- 다항식으로부터 점데이터의 샘플링
  - 샘플링된 점들을 직선선분 혹은 원호로 근사
- 윤곽곡선을 직선선분이나 원호로 근사시키는 절차에 관한 자세한 내용은 주상윤<sup>12)</sup>을 참조한다.

윤곽곡선을 다수의 직선선분이나 원호로 근사시킨 다음에는 지정된 공구에 대한 윤곽곡선 상의 간섭영역을 조사한다. 공구간섭은 윤곽곡선에서 오목한 원호의 반지름이 공구의 반지름보다 작은 경우에 발생하며, Fig. 1과 같이 근사된 윤곽곡선들을 공구의 반지름만큼 오프셋시킨 오프셋곡선의 교점을 조사하면 찾을 수 있다. 오프셋곡선은 공구의 중심점 궤적에 해당하며 간섭영역은 오프셋곡선 상의 꼬여 있는 구간에 해당하는 윤곽곡선의 일부 구간으로 Fig. 1에서는 두 점 P, Q를 양끝점으로 가지는 굵은 곡선으로 표시되어 있다.

공구간섭이 존재하는 윤곽가공은 1차적으로 전체 윤곽곡선을 따라가며 전주가공을 수행한 다음 공구간섭으로 인하여 미절삭된 부분에 대한 잔삭가공(cleanup machining)이 추가로 이루어진다. 이러한 잔삭가공은 보다 작은 공구를 사용하여 여러 차례 반복될 수 있다. 본 논문에서는 편의상 하나의 간섭영역에 대하여 이루어지는 단위 잔삭가공을 부분가공(local machining)이라고 부르기로 한다. Fig. 2에서는 3개의 부분가공으로 이루어진 잔삭가공에 대하여 XY-평면 상에서 공구가

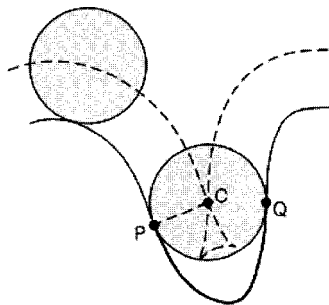


Fig. 1. Offset curve and undercut region.

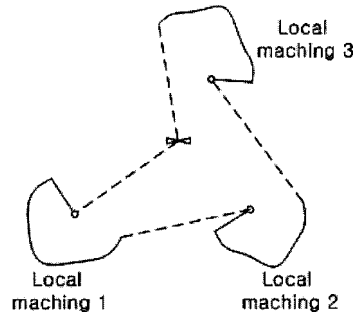


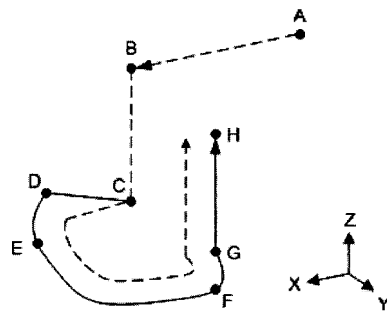
Fig. 2. Local machining for undercut region.

이동하는 경로를 보여주고 있다. 여기서 점선으로 표시된 경로는 다음에 작업할 부분가공을 향한 공구의 급송경로이며 실선으로 표시된 경로는 부분가공을 위한 공구의 이송경로를 나타낸다.

## 3. 부분가공과 공구경로

부분가공은 공구간섭으로 인한 개개의 미절삭구간을 가공하기 위한 단위가공으로 Fig. 3과 같은 경로를 따라 공구가 이동한다. Fig. 3에서 점선은 실제 공구 중심의 궤적이다. 윤곽면에 대한 가공은 구간 E-F에서 이루어지며 공구가 가공할 윤곽면에 부드럽게 진입하거나 혹은 퇴거하도록 진입원호(approach arc)와 퇴거원호(retract arc)를 설정하였다. 구간 D-E는 진입원호이고 구간 F-G는 퇴거원호이다.

또한 안정적인 공구경 보정을 위하여 진입원호에 직선구간(approach line) C-D를 추가함으로써 항상 2D상의



- A-B : rapid move for local machining
- B-C : downward tool move
- C-D : approach line
- D-E : approach arc
- E-F : machining path
- F-G : retract arc
- G-H : upward tool move

Fig. 3. Tool path of local machining.

직선구간에서 공구경 보정을 시작하도록 하였다.

위치점 C는 진입원호 D-E의 중심점으로 부분가공을 위한 기준점으로 종종 이용된다.

**3.1 부분가공을 위한 공구 급송**

부분가공을 위하여 공구를 급송하는 것으로 Fig. 3에서 구간 A-B에 해당한다. 여기서 공구의 Z값은 지정된 최대 높이를 유지한다. 급송이송의 목표점 B의 (x, y)좌표값은 진입원호의 중심점 C의 (x, y)좌표값과 동일하다. 즉, 부분가공을 위한 공구급송의 목표점 B는 진입원호의 중심점 C으로부터 얻어진다.

**3.2 하향 및 상향 공구 이송**

하향 공구이송은 공구의 (x, y)좌표값을 진입원호의 중심점 C에 고정시킨 상태에서 Z축의 값을 가공윤곽면의 높이까지 낮추는 것으로 Fig. 3에서 구간 B-C에 해당한다. 하향이송 중에는 공구가 작업물과 충돌할 위험이 있으므로 NC데이터를 작성할 때 급송 코드인 G00 대신 G01이 대부분 사용된다.

상향 공구이송은 공구의 (x, y)좌표점을 퇴거원호의 끝점 G에 고정시킨 채 Z축의 값을 지정된 최대 높이까지 올리는 것으로 Fig. 3에서 구간 G-H에 해당한다. 이때 공구경 보정을 종료한다. 상향이송에서는 작업물과 충돌할 위험이 없으므로 G00이 사용된다.

**3.3 진입원호의 접근 및 이송**

부분가공에서는 보다 작은 반경의 공구를 이용하여 직전가공에서 미가공된 윤곽구간에 대한 가공이 추가로 이루어진다. 일반적으로 공구간섭영역에서는 과부하로 인하여 공구가 휘게 되므로 정밀한 가공이 이루어지지 않는다. 따라서 부분가공을 수행할 때 이전에 이미 이루어진 가공윤곽의 일부를 중복가공하여 가공의 정밀도를 유지하는 것이 바람직하다. 부분가공에서 중복가공할 윤곽의 구간을 정하려면 Fig. 4와 같이 직전에 사용되었던 공구보다 약간 큰 직경의 원(circle for overlap machining)을 설정하여 윤곽곡선과의 접점 R, S를 구한다. 직전에 사용된 공구(previous tool)와 윤곽곡선과의 접점을 P, Q라 할 때 중복가공구간은 접점 P, Q와 또 다른 두 접점 R, S로부터 얻을 수 있다. 즉, 구간 R-P는 공구가 진입할 때의 중복가공구간이고 구간 Q-S는 공구가 퇴거할 때의 중복가공구간이다. 또한 중복가공영역의 끝점 R, S로부터 설정된 원으로부터 일부 원호를 취하여 공구의 진입원호와 퇴거원호를 정한다. Fig. 4에서 부분가공을 위한 진입원호와 퇴거원호는 각각 R'-R과 S-S'에 해당한다.

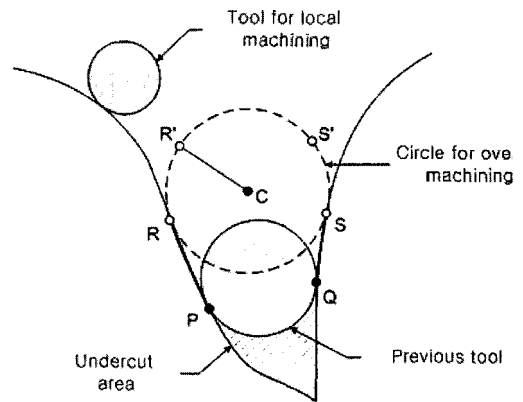


Fig. 4. Determination of overlap machining area.

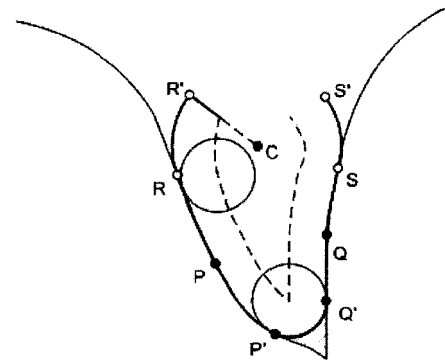


Fig. 5. Local machining path considering overlap.

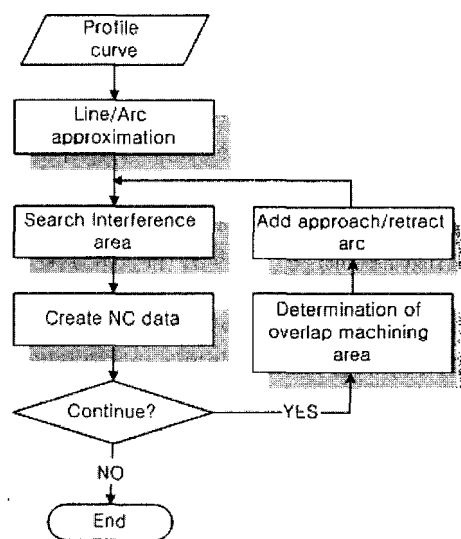


Fig. 6. Flowchart for profile machining.

Fig. 5는 중복가공을 고려한 부분가공의 공구경로를 보여주고 있으며 공구는 C-(공구경 보정 시작)-R'-R-P-P-Q-Q-S-S'-(공구경 보정 종료)를 따라 이동한다. 이때 C점에서 공구경 보정을 시작하므로 실제 공구의 중심점 궤적은 그림의 점선과 같이 된다.

Fig. 6에서는 공구간섭이 존재하는 윤곽곡선으로부터 전주가공과 잔삭가공을 수행하기 위한 가공데이터를 생성하는 절차를 보여주고 있다.

#### 4. 부분가공의 통합

앞에서 기술한 바와 같이 하나의 부분가공에서는 공구의 급승, 공구의 하강, 진입원호의 접근, 진입원호 이송, 진입 중복가공, 간섭영역 가공, 퇴거 중복가공, 퇴거원호 이송, 공구의 상승의 순서로 공구가 이동하게 된다. 만약 두개의 부분가공이 가까이 인접해 있는 경우 Fig. 7(a)와 같이 부분가공의 공구이동순서에 따라 이들을 각각 별도로 가공하는 것보다 Fig. 7(b)처럼 두 부분가공을 통합하여 하나의 부분가공으로 가공하는 것이 효율적이다.

Fig. 7(a)에서 공구의 경로는 A-(공구경 보정 시작)-B-C-D-E-F-G-(공구경 보정 종료)-H-(공구경 보정 시

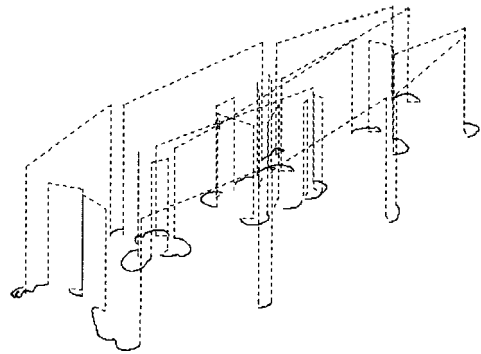


Fig. 8. Example of unifying adjacent tool paths.

작)-I-J-K-L-M-N-(공구경 보정 종료)를 따라 이루어지는데 반하여 Fig. 7(b)에서 공구의 경로는 A-(공구경 보정 시작)-B-C-D-E-F-J-K-L-M-N-(공구경 보정 종료)를 따라 이루어진다. 두 그림 상의 공구의 경로에 있어서 Fig. 7(a)의 공구경로 F-G-H-I-J와 Fig. 7(b)의 공구경로 F-J만이 다를 뿐 나머지 경로는 동일하다. 따라서 상이한 공구경로에서 소요되는 가공시간을 구하여 비교해보면 두 부분가공의 통합여부를 결정할 수 있다.

Fig. 7(a)에서 구간 F-G의 퇴거원호의 길이를  $L_0$ , 위치점 G에서 공구의 상향 이동거리를  $L_1$ , 이웃한 부분가공으로의 급승거리, 즉 구간 G-H를  $L_2$ , 위치점 H에서 공구의 하향 이동거리를  $L_3$ , 구간 H-I의 진입원호에 대한 접근이동거리를  $L_4$ , 구간 I-J의 진입원호의 길이를  $L_5$ 라고 하자. 또한 Fig. 7(b)에서 윤곽곡선의 구간 F-J의 길이를  $L_6$ 라고 하자. Fig. 7(a)의 공구경로 F-G-H-I-J를 따라 가공했을 때 소요되는 시간  $T_0$ 와 Fig. 7(b)의 공구경로 F-J를 따라 가공했을 때 소요되는 시간  $T_1$ 은 다음 식과 같이 결정된다.

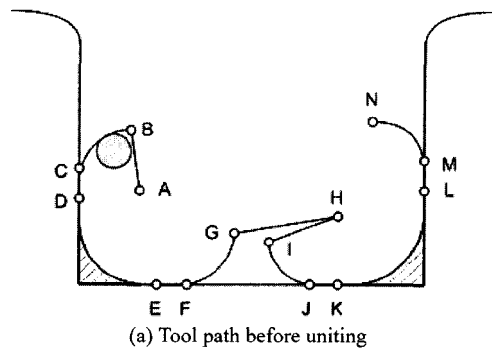
$$T_0 = (L_0 + L_2)/f_0 + (L_1 + L_3 + L_4 + L_5)/f_1$$

$$T_1 = L_6/f_1$$

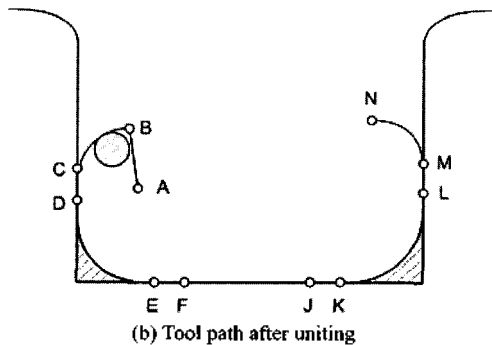
여기서  $f_0$  : 공구의 급승속도

$f_1$  : 공구이송속도

만약 소요시간  $T_1$ 이  $T_0$ 보다 작을 때 두 부분가공은 통합하여 Fig. 7(b)와 같이 가공하는 것이 효율적이다. Fig. 8은 인접한 부분가공을 통합하여 가공한 공구경로를 보여주고 있다.



(a) Tool path before unifying



(b) Tool path after unifying

Fig. 7. Uniting adjacent tool paths.

#### 5. 부분가공들의 순서 결정

간섭영역은 윤곽곡선을 따라 탐지되고 저장되므로

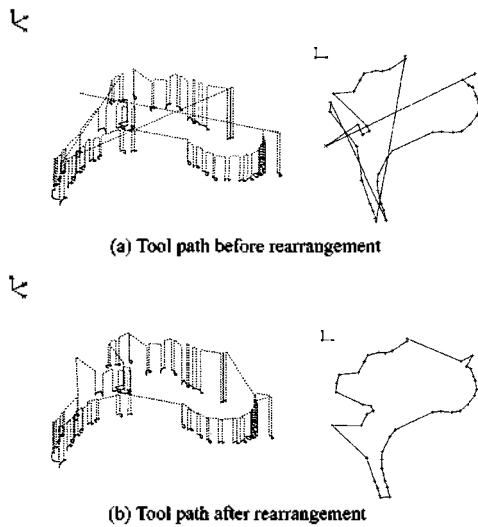


Fig. 9. Rearrangement of machining order for local machining.

부분가공은 윤곽곡선을 따라 이루어진다. 하지만 부분가공이 존재하는 위치는 윤곽곡선과 거의 상관이 없으므로 윤곽곡선을 따라 부분가공의 순서를 정하는 것은 바람직하지 않다. 따라서 공구의 이동거리를 최소화 하는 부분가공의 순서를 결정할 필요가 있다. 잔삭가공은 간섭영역을 한번씩 방문하여 부분가공을 수행하는 것이므로 TSP(Traveling Salesman Problem)알고리즘을 적용하면 방문거리를 최소화 하는 부분가공의 순서를 정할 수 있다. TSP알고리즘을 적용하기 위해 부분가공의 공구경로 가운데 진입원호의 중심점을 방문지점으로 정한다. 이상의 내용을 정리하면 다음과 같다.

- 가공데이터로부터 부분가공에 대한 방문지점을 찾는다.
- TSP알고리즘을 적용하여 방문거리를 최소화 하는 부분가공의 순서를 정한다.
- 부분가공의 방문순서에 따라 가공데이터를 재구성한다.

본 연구에서는 Kirkpatrick<sup>[7]</sup>에 의하여 제안된 시뮬레이티드 어닐링(Simulated Annealing)기법을 사용하여 부분가공의 순서를 정하였다. Fig. 9(a)는 윤곽곡선을

따라 부분가공을 수행하였을 때 공구의 이동경로이며 또한 Fig. 9(b)는 TSP알고리즘을 적용하여 부분가공의 순서를 재구성한 공구의 이동경로이다. 44개의 부분가공이 존재하는 잔삭가공에 대하여 TSP알고리즘을 적용한 결과 공구의 이동거리는 7331 mm에서 4402 mm로 줄었다.

## 6. 결 론

본 연구에서는 공구간섭이 존재하는 윤곽가공에서 추가로 요구되는 잔삭가공의 효율적인 공구경로를 생성하기 위한 방법들을 제안하였다. 본 연구에서 얻을 수 있는 기대효과는 다음과 같다.

- 1) 공구간섭이 존재하는 윤곽가공에서 잔삭가공을 위한 공구경로를 얻는 방법을 소개하였다.
- 2) 인접한 부분가공들을 통합함으로써 잔삭가공에 소요되는 시간을 단축하였다.
- 3) TSP알고리즘을 적용함으로써 부분가공간에 공구의 이동거리를 최소화 하는 공구경로를 얻을 수 있다.

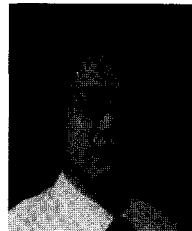
## 참고문헌

1. 최병규 외, CAD/CAM시스템과 CNC절삭가공, 최중당, 1996.
2. 주상윤, 남장현, "자동차 산업의 금형제작을 위한 3차원 윤곽가공," *IE Interfaces*, 제9권, 제2호, pp. 119-128, 1996.
3. Schoherr, J., "Smooth biarc curves," *Computer-Aided Design*, Vol. 25, No. 6, pp. 365-370, 1993.
4. Meek, D. S. and Walton, D. J., "Approximation of discrete data by G1 arc spline," *Computer-Aided Design*, Vol. 24, No. 6, pp. 301-306, 1992.
5. Yeung, M. K. and Walton, D. J., "Curve fitting with arc spline for NC tool path generation," *Computer-Aided Design*, Vol. 26, No. 11, pp. 845-849, 1994.
6. 신하용, 정희민, 박영수, "공구경보정을 이용한 2차원 자유곡선의 가공," *IE Interfaces*, 제8권, 제3호, pp. 133-139, 1995.
7. Kirkpatrick, S., Gelatti, C. D. and Vecchi, M. P., "Optimization by Simulated Annealing," *Science*, Vol. 220, pp. 671-680, 1983.



**주 상 운**

1977년 서울대학교 산업공학과 학사  
1979년 한국과학기술원 산업공학과 석사  
1989년 한국과학기술원 산업공학과 박사  
1979년-현재 울산대학교 산업공학과 교수  
관심분야: 곡면모델링, CAD/CAM, NC가공, 제조시스템자동화



**이 상 현**

1997년 울산대학교 산업공학과 학사  
1999년 울산대학교 산업공학과 석사  
1999년-현재 큐빅기술연구소 선임연구원  
관심분야: NC가공, CAD/CAM, RP