

절삭가공 시 출구 버어의 최소화를 위한 최적 가공계획 알고리즘의 개발

김영진*, 김지환⁺, 정희철⁺⁺

(논문접수일 2006. 7. 21, 심사완료일 2006. 11. 9)

Development of Optimal Process Planning for Exit Burr Minimization in Milling Operation

Young-Jin Kim*, Ji-Hwan Kim⁺, Hee-Chul Jung⁺⁺

Abstract

One of the most important processes is the face milling in processing task. It makes the smooth surface of processed goods. In processing stage, the formation of burr is inevitable. The formed burr decreases a detailed drawing and effects the safety of workers. So, it causes a deburring process for removing and a bottle-neck condition. Therefore, the study which can minimize the generation of burr is needed. In this paper, complex feature, such as line, arc, circle, spline is studied more reality than any other papers. And also, the algorithm which can predict the path of generated burr is established. Moreover, the finality goal is that the system which can produce tool-path minimized has to be developed.

Key Words : Exit Burr(출구 버어), Optimal Process Planning(최적가공계획), Minimization(최소화), Expert System(전문가 시스템)

1. 서론

버어는 공작물(이하 피삭재)의 모서리 부분에서 발생하기 때문에 피삭재의 형상과 밀접한 관련이 있다. 따라서, 피삭재의 단면도의 형상을 분석하여 버어의 생성 원리를 파악할 수 있다. 이를 위하여 피삭재의 형상을 이루는 기본 요소들

을 정의하고, 이 요소들에 따라 기본적으로 버어가 어떻게 발생하는지를 이해 해야할 필요가 있다. 지금까지는 이러한 기본적인 요소들만 고려한 버어의 해석 및 예측에 대한 연구를 해왔으나, 본 연구에서는 이를 바탕으로 실제 가공 현상을 고려하여 CAD 도면으로부터 피삭재의 형상을 읽어들이고, NC 데이터로부터 가공 정보를 추출하여 복잡한 피삭재

* 경희대학교 테크노공학대학 산업공학과
주소: 449-701 경기도 용인시 기흥읍 서천리 경희대학교
+ (주)코미코
++ 경희대학교 테크노공학대학 산업공학과

의 형상과 다중절삭경로에 대하여 버어의 발생을 해석하고 예측하는 알고리즘을 제시하고자 한다. 또한, 더 나아가 정면밀링에서의 버어 발생을 최소화 할 수 있는 가공 경로의 생성까지도 지원할 수 있는 전문가 시스템을 개발하고자 한다.

2. 특정형상에 대한 출구 버어 형성의 기하학적인 해석

버어는 절삭가공 시 피삭재의 모서리 부분에 발생하는 것으로, 절삭공구가 공작물의 모서리 부분을 지나가면서 피삭재가 소성 변형되며 밀려나오는 결과로 발생하는 돌출현상을 말한다. 따라서, 버어는 피삭재의 모서리의 형상과 밀접한 관련이 있다고 볼 수 있다⁽¹⁾.

Fig. 1은 이러한 각각의 형상에 대한 출구 버어의 형성원리를 보여 주고 있다.

Fig. 1과 같이 모든 형상에 대해서 버어는 공구와 피삭재의 접점으로부터 공구의 절삭 영역까지 발생하는 것을 알 수 있다. 단, 원의 경우 피삭재에서 구멍을 이루는 형상이므로 도형의 방향성이 반대로 설정된다.

3. 출구 각의 계산

출구 각은 출구 버어가 생성되어 있는 임의의 점에서 공구가 절삭하는 방향과 피삭재의 방향벡터와의 사이각으로 정의할 수 있다. 여기서, 공구는 회전하며 절삭하기 때문에 임의의 점에서 공구의 절삭 방향은 그 점에서 공구의 접선벡터를 의미한다⁽²⁾.

피삭재의 형상이 어떻게 생겼느냐에 따라 출구 각의 기하학적 계산의 방법이 달라지게 된다. 따라서, 본 연구에서도 선, 호 또는 원, 자유곡선에 따라서 출구 각의 계산을 각기

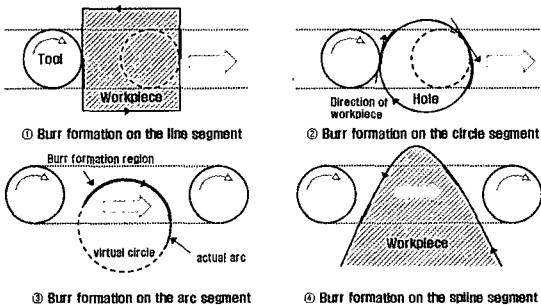


Fig. 1 Burr formation of each feature

달리 수행하게 된다.

Fig. 2는 각 형상에 따른 출구 각을 보여주고 있다.

4. 복합형상의 인식과 다중경로의 적용

4.1 피삭재 형상의 CAD도면 인식

본 연구에서는 피삭재의 형상이 CAD 데이터의 기본형식인 DXF 포맷으로 주어지는 경우의 형상인식을 수행한다. 일반적으로 DXF 파일의 내부는 4개의 섹션으로 구분되어 있으며, 각 섹션은 많은 그룹으로 되어있고 도면상의 그래픽 객체들은 개체(entity)로 되어 있다⁽²⁾.

4.2 복합형상의 인식

출구 버어 형상의 예측은 피삭재의 모서리를 이루는 도형, 즉 단면도의 도형에 따라 판별하게 된다. 따라서, 피삭재의 형상을 인식하는 부분이 매우 중요하다고 할 수 있겠다.

피삭재가 원기둥 같이 단일형상으로 되어있다면, 4.1절에서 제시한 방법으로 간단히 판별 할 수 있다. 하지만, 만약 피삭재의 형상이 여러개의 직선, 원, 호 등으로 연결되어 있거나, 한 개 이상의 형상으로 이루어져 있다면, 방향성 설정이 매우 중요하게 된다⁽³⁾.

4.3 그룹화와 방향성 설정

DXF에서 개체들을 인식하고 나면, 여러개의 선, 호, 원, 자유곡선으로 이루어져 있을 것이다. 이 중 어떤 것들은 서로 연결되어 있고, 어떤 것들은 또 다른 개체들과 연결되어 있을 것이다. 이 요소들을 서로 연결되어있는 것끼리 모아서

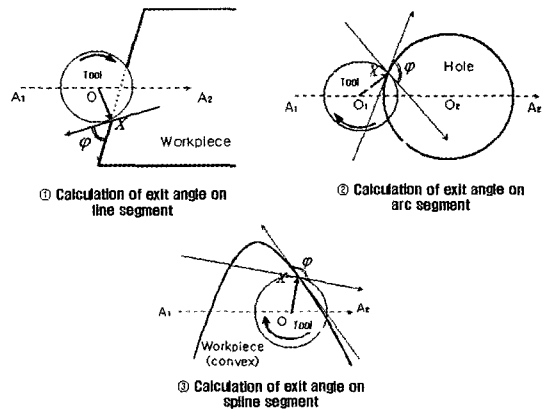


Fig. 2 The calculation of exit angle

몇 개의 완전한 형상으로 취급해야 한다⁽³⁾.

4.4 공구정보와 다중경로의 인식

머시닝 센터를 이용하여 정면 밀링작업을 할 경우 공구의 정보, 가공정보 그리고 가공경로등의 작업정보를 CAM 데이터를 통하여 인식을 하게 된다. 따라서, 본 연구에서는 실제 가공현실을 반영하기 위하여 이 CAM데이터를 인식하여 공구의 정보를 인식하도록 했다⁽³⁾.

Fig. 3에서 볼 때, 2차 절삭 중 1차 절삭과 중복되는 부분은 무시하고 굵은 선으로 표시되는 부분만 2차 절삭으로 인정한다.

따라서, 다중 절삭 시 공작물에 중복절삭이 전단계의 절삭 영역에 포함된다 하더라도 출구 버어 영역을 판단할 때는 중복되지 않는 부분만 고려한다.

4.5 복합형상에서 다중 경로를 적용한 출구 버어 형상 예측

복합형상에서 다중 경로를 적용하려면, 단일형상에 대한 출구 버어 판별을 여러 번 수행해야 한다. 즉, Fig. 4처럼 첫 번째 경로에 대한 출구 버어 판별 알고리즘을 수행하는데

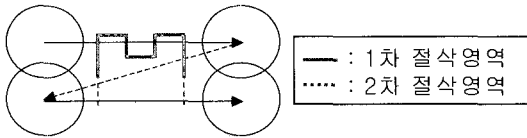


Fig. 3 Cutting region in multi-path

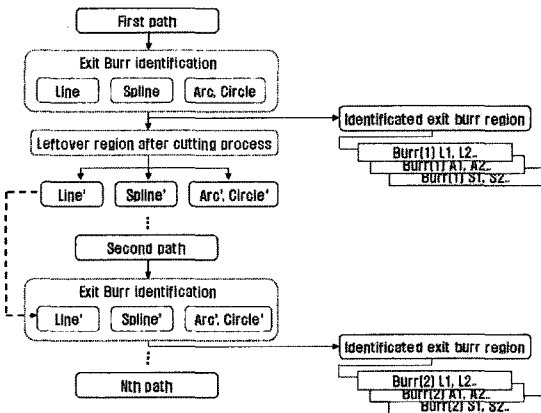


Fig. 4 Exit burr identification algorithm in multi-path and complex features

각 개체에 대한 판별 모듈을 여러 번 수행하고, 변경된 개체 정보를 가지고 두 번째 경로에 대한 출구 버어 판별 알고리즘을 수행하는 방식으로 다중 경로의 모든 경로에 대해 판별 알고리즘을 수행하면 된다.

Fig. 5는 복합형상에 다중 경로를 적용한 모습이다. 이는 복합형상을 인식하고, Multi-Path에 대하여 출구 버어 판별 알고리즘을 적용한 예가 된다.

Fig. 5에서도 보듯이 이러한 알고리즘을 적용하면, 첫 번째 경로에 대한 출구 버어가 생성되지 않았던 부분이라도 이미 절삭이 수행되었다면, 다음 경로에서는 적용이 되지 않아야 함을 알 수 있다.

5. 출구 버어 최소화를 위한 최적 가공계획 알고리즘

5.1 출구 버어의 측정

버어 최소화 알고리즘을 수립하기 위해서는, 우선 버어의 무엇을 최소화해야 할 것인지를 가능할 최소화의 측정 기준이 있어야 할 것이다. 버어의 정도를 표현할 수 있는 특징적인 요소들로는 버어의 총 길이, 버어의 크기, 버어의 모양 (Type) 등이 있다.

버어의 크기와 모양은 피삭재와 절삭 조건에 따라 달라질 수 있는데, 이는 기 실험결과 database를 참조하여 알아 낼 수 있고, 버어의 길이는 버어 판별 알고리즘 수행 후 메모리에 저장되어있는 버어의 정보를 더하여 총 길이를 계산 할 수 있다.

그 밖의 고려요소로 가공시간 또한 중요한 요소로 생각할

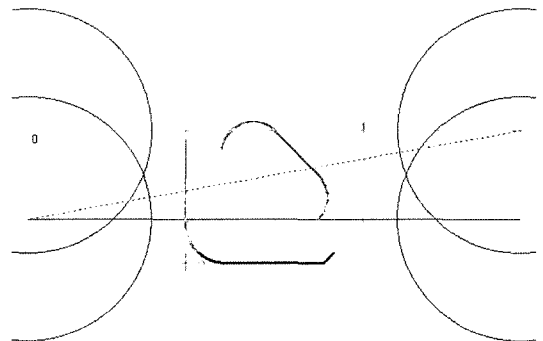


Fig. 5 The example of exit burr identification in multi-path and complex features(Burr is on the bold line segment)

수 있는데, 본 연구에서 수행하고자 하는 정면 밀링의 특성상 C형과 Z형의 가공경로의 경우 가공 시간의 차이가 그리 크지 않으므로, 본 연구에서는 고려하지 않는다.

5.2 출구 각과 최소화와의 관계

버어의 크기, 모양 그리고 후처리 등의 특징들은 서로 연관성을 갖고 있다. 가장 큰 연관성은 이들이 출구 각에 따라 달라지는 특징이다. 출구 각이 크면 클수록 버어의 크기가 커지고, 모양이 일그러지며, 후처리 비용이 많이 들어가게 된다.

또한, 그 정도가 공구와 피삭재의 특성에 따라 달라지게 되는데, 예를 들어 Fig. 6과 같이 SM45C 재료를 공구 1로 가공하였을 경우 출구 각이 120°가 넘어가면서부터 버어의 크기와 모양이 급격히 커지게 된다⁽⁴⁾.

따라서, 피삭재의 특성에 따른 버어의 크기 변화에 대한 데이터가 주어진다면, 이들 대신에 출구 각의값을 가중치나

제한조건으로 추가할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 출구 각을 제한 조건으로 사용하기 위하여 임계각 개념을 도입하고자 한다. 임계각이란 특정 피삭재에 대하여 버어의 크기가 무시하지 못할 수준으로 커지기 시작하는 시점의 출구 각으로서 후처리 비용이 상대적으로 커지기 시작하는 부분이라 할 수 있다.

그렇다면, 임계각보다 큰 출구 각을 갖는 버어들의 총 길이를 생각해 볼 때, 이를 임계 버어 길이(critical burr length)라 하면, 본 알고리즘의 목적인 후처리비용의 최소화는 임계 버어 길이를 최소화하는데 있다.

임계각은 피삭재의 특성과 가공 조건에 따라 달라질 수 있고, 실험결과 또는 사용자들의 의견에 따라 달라질 수 있으므로, 이는 사전에 충분한 검증을 통하여 database로의 구축이 필요하다.

5.3 출구 버어 최소화를 위한 공구경로의 조정

본 연구에서는 ‘C’ 형 또는 ‘Z’ 형 다중 가공형태를 유지하는 상황 하에서 버어를 최소화 할 수 있는 공구 이동경로를 찾아보고자 한다.

공구 이동경로의 좌표를 설정함에 있어서 가공의 실현성을 감안하여 볼 때, 가공 영역의 설계가 중요하다. 즉, Fig. 7처럼 공구의 절삭 영역내에 공작물이 놓일 수 있도록 T_0 , T_1 , T_2 , T_3 의 좌표 설정과 간격 δ 를 조정해야 한다. 그리고, 공구경로를 형성할 수 있는 가능한 모든 경우를 고려하기 위하여 피삭재에 대한 모든 절삭 방향도 고려해야만 한다.

지금까지 설명하였던 알고리즘으로 사용자가 지정하는 피삭재(DXF)와 공구경로를 포함한 가공조건(NC)을 인식하여 버어의 형상을 예측할 뿐만 아니라 버어의 길이 등의 버어형성 정보를 예측할 수 있다. 이를 이용하여 NC data

Table 1 Tool Geometry

	Lead angle (L)	Radial Rake angle (ar)	Axial Rake angle (aa)	Diameter (D)	Insert shape
Tool 1	45°	-6°	20°	125(mm)	square
Tool 2	0°	6°	15°	125(mm)	triangle

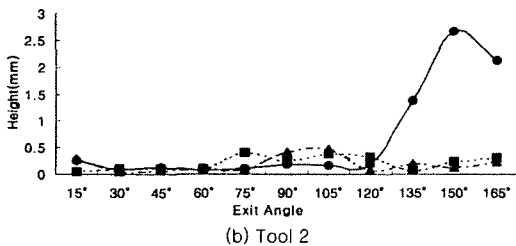
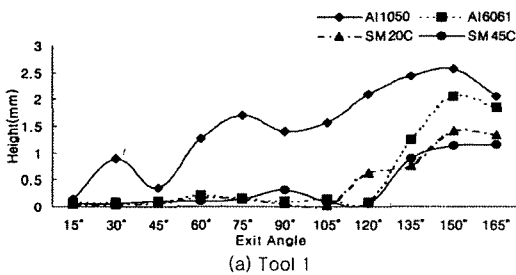


Fig. 6 Variation of burr height according to the change of exit angle

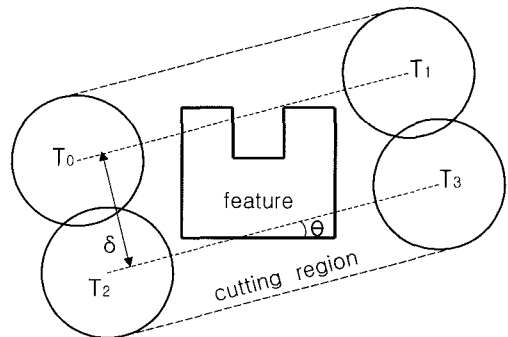


Fig. 7 The design tool-path considering cutting region

중에서 공구경로만 임의로 수정하여 재해석을 수행하면 변경된 공구경로에 대한 버어 형성정보를 얻어낼 수 있게 된다.

공구경로를 결정하는 인자로는 위의 Fig. 7에서 알 수 있듯이 절삭 각도(θ), 시작점(T_0) 그리고 패스 간 간격(δ)을 생각해 볼 수 있다.

결국, 위에서 언급한 제한조건 내에서 각각의 인자들을 일정 수치만큼 변경시켜가며 다양한 절삭경로를 추출하는 알고리즘을 수립하였고, 이 공구 경로들을 앞장에서 설명한 버어 판별 알고리즘으로 재해석하여 버어가 최소로 형성되는 공구 경로를 찾아내게 되었다.

6. Burr expert system

6.1 Burr Expert System의 개요

Burr Expert System은 밀링 가공에서 버어가 발생하는 원리를 이해하고, 기하학적으로 해석하여 버어의 발생 구역과 형상 등을 예측하고 이의 정보를 화면에 제공하여 주며, 이때의 버어 형태를 기 실험결과를 저장하고 있는 database와 연동하여 형상 예측을 가능하게 해주며, 이러한 출구 각을 최소화 할 수 있는 최적의 공구 가공경로를 설계하여 제공하는 윈도우 기반 응용 프로그램 형태의 전문가 시스템이다.

이 프로그램의 궁극적인 목표는 DXF file에서 복합형상의 피삭재 정보를 인식하고 NC파일에서 공구정보 및 다중경로를 인식하여 버어의 생성정보를 제공하고, 이러한 버어가 최소로 발생하는 가공경로를 설계하여 제공하는데 있다.

6.2 Burr Expert System의 알고리즘

Burr Expert System은 공구의 정보, 가공정보 그리고 가공경로 등의 작업정보를 인식하기 위해서 NC 코드가 저장

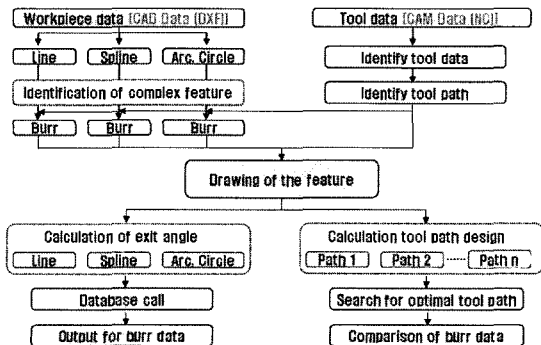


Fig. 8 The algorithm of burr expert system

되어있는 CAM 데이터를 읽어들이고, 피삭재의 형상을 인식하기 위해서 DXF 파일로부터 선, 원, 호 그리고 자유곡선 정보를 읽어들이어 형상의 기하학적 정보를 추출한다.

이렇게 추출한 정보로 복합형상을 인식하고, 공구의 이동 경로를 인식하여, 이 두 가지 정보로 기하학적인 해석을 통하여 버어의 생성 영역을 판단하게 된다. Fig. 8은 Burr Expert System의 전체적인 알고리즘을 보여준다.

6.3 Burr Expert System의 실행

피삭재 정보와 가공 정보를 입력하면, 입력된 정보를 바탕으로 앞에서 언급한 알고리즘을 적용하여 예상되는 버어의 형성정보를 계산하여 화면에 나타내준다.

①번은 출구 버어가 생성되는 구간을 시각적으로 표현해주는 화면이다. 양쪽 4개의 원과 피삭재를 가로지르는 직선은 공구와 공구의 경로를 의미하며, 피삭재의 형상에서 굵은 부분이 출구 버어가 발생하는 부분이다.

버어임을 나타내는 굵은 부분에 마우스 포인터를 가까이 가져가면 마우스 포인터가 '+' 모양으로 바뀐다. 이때, 마우스를 더블클릭하면 기존의 실험database를 바탕으로 그 부분의 버어 형성정보를 보여준다.

6.4 burr 형상 정보

Fig. 10은 출구 버어 생성영역을 마우스로 클릭했을 때 나타나는 버어 형상정보 윈도우이다. 사용자가 선택했던 피삭재의 종류 및 공구의 정보와 절삭조건이 ①번의 공구 형상과 절삭 조건에 제공된다. 또한, 3절에서 언급했던 방법으로 출구 각의 값이 계산되어, 프로그램 내에 구축되어 있는 과거 실험결과 database를 통해 예측된 버어 형상과 버어 형상 사진이 ②, ③에 제공된다. 사용자는 이 결과를 참고하여 밀링 가공 중 출구 버어를 최소화 할 수 있는 절삭환경을 설정

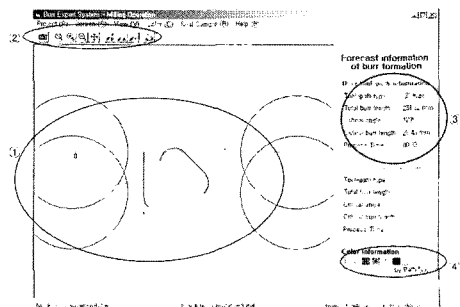


Fig. 9 The main screen of milling burr

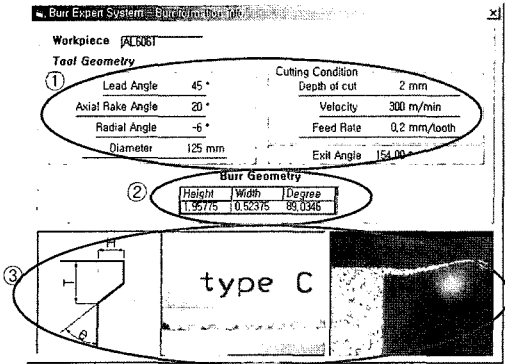


Fig. 10 The information of burr features

할 수 있다.

6.5 출구 버어를 최소화하는 최적의 공구경로 설계

자동 공구경로 생성기를 실행하면, 현재 가공 상황에서 버어를 가장 적게 발생시킬 수 있는 가공경로를 탐색하여, 최적 가공경로를 설계할 수 있도록 정보를 제공해준다. 최적 가공경로를 찾아내면 ① 최적화된 공구 경로 정보 윈도우가 나타나며, 사용자는 이를 참고하여 자신의 NC 코드에 적용시킬 수 있다.

메인 화면의 우측 ②에는 그 동안 비 활성화 되어있던 자동 공구 경로 정보 부분에 그 결과 정보들이 제공되며, 이전의 작업에서 형성된 버어의 정보와 최적 가공경로에서의 버어의 정보를 비교해 볼 수 있게 하였다.

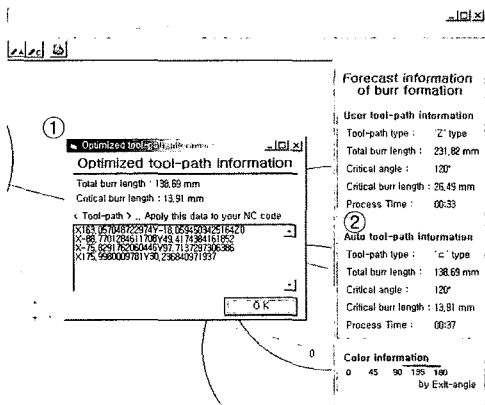


Fig. 11 The function of optimized tool-path

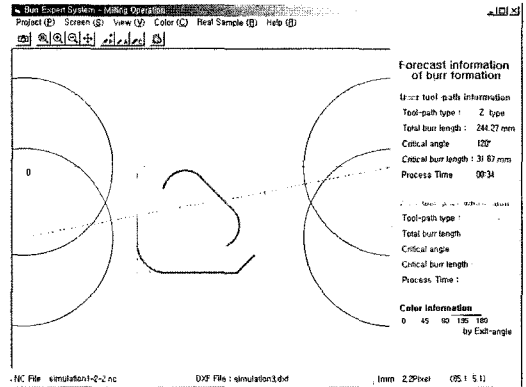
6.6 최적 가공경로 설계의 효과

위의 Fig. 12는 똑같은 조건으로 실험을 수행한 결과 임계 버어 길이가 31.87mm가 발생하던 기존 실험에 비해 최적 가공경로 설계 이후 임계 버어 길이가 13.91mm로 줄일 수 있는 공구 경로를 추출해내는데 성공하였음을 보여준다.

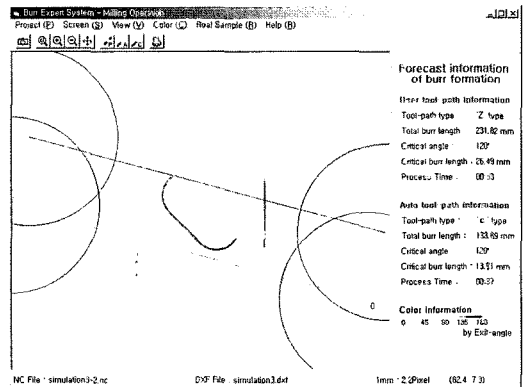
피삭재의 형상과 가공조건에 따라 버어를 절감하는 정도가 다르지만, 몇몇의 다른 피삭재와 가공 상황 하에서도 아주 양호한 결과를 얻어낼 수 있었다.

다음으로, 위와 똑같은 피삭재의 형상으로 실제 정면 밀링 가공 실험을 수행하여 보았다⁽⁴⁾.

Fig. 13은 위의 최적화 알고리즘의 결과로 얻어진 최적 가공경로를 실제 NC file에 적용하여 가공하여 얻어진 실험 결과이다. Fig. 13에서도 볼 수 있듯이 ①,④를 포함한 대부분의 모서리부분에서는 아주 미미한 버어가 발생했고, 프로그램



(a) Customized tool-path by user



(b) Optimized tool-path by calculating

Fig. 12 The effect of optimized tool-path

Table 2 Comparison arbitrary cutting result with optimized algorithm result

Experiment condition	User input	After optimization process
Experiment result		
Tool-path type	“Z” type	“ㄷ” type
Total burr length	244.27mm	138.69mm
Critical angle	120°	120°
Critical burr length	31.87mm	13.91mm
Process time	34 sec.	55 sec.

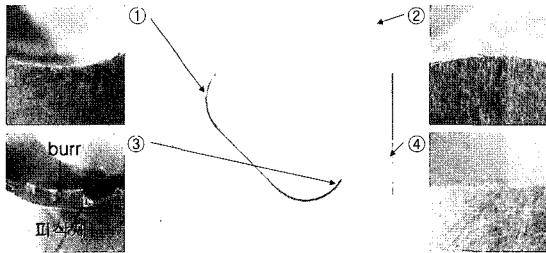


Fig. 13 The actual cutting experiment

에서 critical burr에 해당하는 ③에서만 큰 버어(critical burr)가 발생함을 알 수 있었다.

②에서는 이론적으로 버어가 발생하지 않는 곳이지만 실제 가공에서는 미미하게 entrance burr가 발생하였다. 이는 추후 entrance burr의 추가적인 연구로 보완해야 할 부분이다.

7. 결론 및 향후 연구과제

본 연구에서는 버어 전문가 시스템(Burr Expert System)의 버어 형성 예측 알고리즘을 개발하였고, 이를 이용하여 버어를 최소화 할 수 있는 알고리즘을 수립하여 최적의 가공 가공경로를 제시할 수 있는 기반을 구축하였다.

그리고, 버어의 길이를 최소화하는 알고리즘으로 피삭재를 고정된 상태에서 일정각도만큼 공구 경로를 회전시키며 각각의 버어의 길이를 비교하여 이 중 최소가 되는 값을 최적값으로 산출하였다.

앞으로의 연구에서는 이산적 데이터를 이용한 최적 알고리즘 보다는 해석적 방법에 의한 최적화 방안을 수립하고자 한다.

아울러 stand-alone으로 구현된 Burr Expert System을 C-S모델기반의 웹 기반의 Burr Expert System으로의 개발도 진행하고자 한다.

후 기

이 연구는 2004년도 경희대학교 연구비지원에 의한 결과임(KHU-20040220).

참 고 문 헌

- (1) Dornfeld, D., 2000, “Geometric Approaches for Reducing Burr Formation in Planar Milling by Avoiding Tool Exits,” *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 40.
- (2) Kim, Y. J., Lee, J. Y. and An, Y. J., 2001, “Geometrical Analysis on the Formation Mechanism of Milling Burr on Arbitrary Feature,” *Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 6, No. 4, pp. 222~228.
- (3) Kim, J. H., Lee, J. B. and Kim, Y. J., 2002, “Development exit burr identification algorithm on multiple feature and multiple-path cutting,” *KIIE autumn scientific convention*, pp. 1~15.
- (4) Han, S. W. and Ko, S. L., 2002, “A Study on exit Burr Formation in Face Milling,” *KSPE*, Vol. 19, No. 8, pp. 55~62.
- (5) Lee, K. W., 2000, *Principles of CAD / CAM / CAE Systems*, Pearson Education Korea.