한국경영과학회/대한산업공학회 2003 춘계공동학술대회
2003년 5월 16일-17일 한동대학교(포항)

# Burr Expert System을 이용하여 Exit Burr의 최소화를 고려한 최적 가공 계획 알고리즘의 개발

김지환, 김영진 (경희대학교)
Ji-Hwan Kim, Young-Jin Kim (KyungHee University)
경기도 용인시 기흥읍 서천리 1번지 경희대학교 테크노공학대학 산업공학전공

**Abstract**

금형가공에 있어서 밀링머신의 가공에서는 절삭가공의 잔유물인 버(Burr)가 생성되고, 이러한 버는 가공의 정밀도를 감소시킬 뿐만 아니라 후처리 과정(Deburring)을 야기시킴으로 인해서 작업효율의 감소 및 생산비의 비효율적 낭비를 가져오게 된다. 따라서, 정밀도와 작업효율을 극대화하기 위해서는 버의 생성원리를 파악하고, Exit Burr의 생성부분을 미리 예측하여 버의 생성을 최소화 할 수 있는 작업 가공계획을 설계하여야 한다.[1]

기존의 Burr Expert System에서는 피삭재의 단면형상이 Line과 Arc처럼 단순한 형상뿐만 아니라, Line과 Arc가 연결되어있는 복잡한 형상에 대해서도 버를 판별한다. 그리고, 가공 후 버가 생성되는 부분을 예측하고, 이때의 Exit Angle을 계산하여 이에 해당하는 기 실험결과 DataBase와 연동하여 생성될 버의 형상과 크기 등의 결과를 제공하여 준다. 더불어, 피삭재의 단면형상이 여러 가지 복합적인 형상으로 이루어져 있는 경우와 다양한 공구경로까지 고려하여 실제가공과 거의 유사한 상황을 적용할 수 있는 알고리즘으로 개발하였다.

본 논문에서는 이제까지 개발된 다양한 형상에 대한 Exit Burr 판별 알고리즘을 이용하여 임의형상을 가진 피삭재의 다중가공경로 상에서 발생 가능한 버를 예측하고, 버의 길이나 가공 시간 등을 정량화 하여 최적화하는데 필요한 요소를 추출해 보고자 한다.

또한, 이를 이용하여 Face Milling에서의 버 발생을 최소화 할 수 있는 최적 절삭가공 공구경로를 제시하여, 작업 효율성을 극대화하는 알고리즘을 Windows 응용 프로그램으로 구현하고자 한다.

## 1. 서론

Burr는 절삭가공시 공작물의 모서리부분에 발생하는 것으로, 절삭공구가 공작물의 끝부분을 빠져나가면서 공작물이 소성 변형되며 밀려나오는 결과로 발생하는 돌출현상을 말한다. 이렇게 절삭 작업 과정에서 발생하는 버는 공구와 피삭재가 만나는 상태에 따라 그 형상이 결정되어진다. 공구와 피삭재 사이의 각, 공구의 회전속도, 이송속도, 피삭재의 종류 등은 이러한 버의 형상을 결정하는데 결정적인 역할을 하므로, 실험에 의해서 생성된 단계별 자료를 CAD 및 CAM 데이터와 연관시켜 저장하고 효율적인 알고리즘을 통하여 검토하는 것은 실제 작업에서 큰 도움을 줄 수 있다.

그래서, 이 전까지의 연구에서는 피삭재 형상에 대한 정보를 포함하고 있는 CAD 데이터를 인식하고 이를 통해 복합적인 형상의 피삭재에 대한 - 다양한 기하학적 특성인 구멍과 원호를 포함한 복합형상 - 버 형성 메커니즘 연구를 수행하였다.

또한, 실제의 CAM 데이터를 이용하여 보다 체계적으로 공구의 이동경로를 인식하도록 하였고 단일경로 및 다중절삭경로를 인식하여 이를 실제 가공상황에 적용할 수 있게 하였다.

이러한 알고리즘을 바탕으로 Burr Expert System을 개발하였다. 이 Windows 응용프로그램은 단순한 버의 해석뿐만 아니라 버의 발생구역을 화면에 도시하고 버의 형태를 표현해준다. 그리고, 가공상태를 의미하는 Exit Angle을 계산한 값과 기존의 실험 데이터를 분류하여 구축한 DataBase를 프로그램 결과와 연동하여 Exit Angle별로 어떠한 타입의 버가 생성되는지를 시각적으로 확인할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 지금까지 개발된 Burr Expert System의 알고리즘을 응용하여, Face Milling 가공 공정에 있어서 Burr를 최소화 할 수 있는 최적 가공 경로를 제시할 수 있도록 필요한 요소를 정의하고, 공구가공 경로를 결정할 수 있는 알고리즘을 제시하고자 한다.

## 2. Burr Expert System

### 2.1 Burr Expert System의 개요

Burr Expert System은 밀링가공에서 Burr가 발생하는 원리를 기하학적으로 해석하여 Burr의 발생 구역과 형상 등을 Computer 화면에 도시해주고, 이때의 Burr 형태를 기 실험결과를 저장하고 있는 DataBase와 연동하여 결과 예측을 가능하게 해주는 Windows Application Program 형태의 전문가 시스템이다. 즉, 밀링가공에 있어서 작업물의 CAD정보와 가공작업의 CAM정보를 인식하여 피삭재의 형상을 인식하고, 공구의 정보를 인식한 후 해당 작업에서의 Burr 발생을 예측하고 이의 자료를 제시해주는 Program 이다.[2]

Burr Expert System은 공구의 정보, 가공정보 그리고 가공경로 등의 작업정보를 인식하기 위해서 NC 코드가 저장되어있는 CAM 데이터를 읽어들이고, 피삭재의 형상을 인식하기 위해서 DXF 파일로부터 Line, Circle, Arc 그리고 Spline을 정보를 읽어들여 형상의 기하학적 정보를 추출한다.

이렇게 추출한 정보로 복합형상을 인식하고, 공구의 이동 경로를 인식하여, 이 두 가지 정보로 기하학적인 해석을 통하여 버의 생성 영역을 판단하게

된다. Fig. 1.은 Burr Expert System의 전체적인 알고리즘을 보여준다.

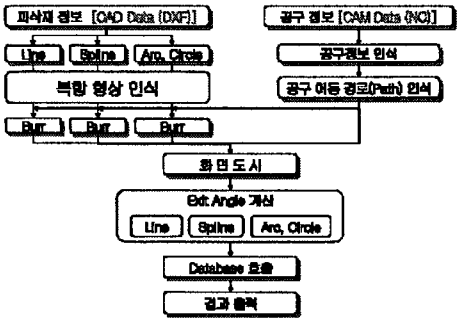


Fig. 1. Burr Expert System의 전체 알고리즘

### 2.2 복합형상의 인식

Exit Burr 형상의 예측은 피삭재의 형상을 인식하는 부분이 매우 중요하다고 할 수 있겠다. 처음 DXF파일에서 도형의 형상정보를 인식하게 되면 Line, Arc, Circle, Spline 각각 별도로 인식되게 된다. 또한, 각 개체형상의 방향성도 무작위로 설정되어 있을 것이므로 이대로는 Burr영역을 판단하기가 쉽지 않다. 따라서, 몇 개의 형상을 이루는 - 서로 연결되어 있는 - Group 별로 구분해야할 필요가 있고, 이들 Group의 포함 관계에 따라 일괄적인 방향성 설정이 필요하게 된다.[2]

이때, Circle은 어떤 것과도 연결되지 않는 특성이 있기 때문에 하나의 Group과 같이 취급해야 한다. 따라서, Group화 과정에서 제외시키고, 추후 다른 Group들과의 포함관계만 판단해주면 된다.

그러나, 연속한 개체들을 찾지 못하게 되면 Group화를 시키지 못하게 되는데, 이것은 닫혀있지 않은 형상이 존재하거나, CAD도면 작업 중에 발생한 보이지 않은 찌꺼기 - 예를 들어 중복하여 보이지 않은 Line 등 - 일 가능성이 있다. 따라서, 이를 사용자에게 경고하여 형상정보를 수정하게 한다.

이렇게 Group화와 방향성 설정이 완료되면 Exit Burr 판별을 수행하게 되는데, Exit Burr판별은 각 개체에 대하여 개별적으로 수행하므로 이후로는 Group의 개념이 그리 중요하지 않게 된다.

### 2.3 Multi - Path에서의 Exit Burr 형상 예측

실제 Face Milling에서는 NC파일에 기록되어있는 공구의 절삭경로가 단방향 절삭경로뿐만 아니라 2회 이상의 절삭을 수행하는 다중 절삭경로가 포함될 수도 있다.

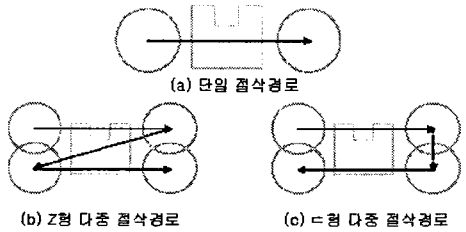


Fig. 2. Multi-Path(다중경로)의 대표적인 유형

Fig. 2.은 단일절삭경로와 비교하여, 다중경로의 가장 보편적인 두 가지 방식을 보여준다. 공구의 중심을 잇는 실선은 절삭경로를, 점선은 절삭은 수행하지 않고 공구가 이동하는 경로를 나타낸다. 이는 공구경로를 나타낸 좌표값의 Z축 값으로 결정된다.[1]

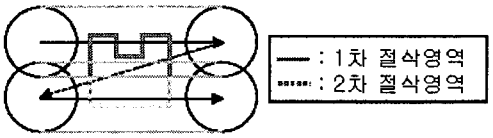


Fig. 3. Multi-Path(다중경로)에서의 절삭영역 구분

Fig. 3.에서 볼 때, 총 두 번의 절삭에서 2차 절삭의 일부분은 - 1차 절삭 경로와 2차 절삭 경로가 겹치는 부분 - 이미 1차 절삭에서 절삭된 부분이므로 굵은 선으로 표시되는 부분만 2차 절삭으로 인정한다.

따라서, 다중 절삭의 경우 n차 절삭 후 변경된 형상 정보를 그때에 수정해주고, 만약 추후 중복절삭이 수행될 때 이전의 절삭영역에 포함된다 하더라도 이 부분을 무시하고 중복되지 않는 부분만 Exit Burr 영역의 판단에 고려하도록 한다.

그리고, 각각의 절삭경로에 대하여 발생한 버 영역을 메모리에 저장해 놓고, 추후 Burr 형상 정보를 검색하는데 편리하게 한다.

### 2.4 복합형상에서 Multi-Path를 적용한 Exit Burr 형상 예측

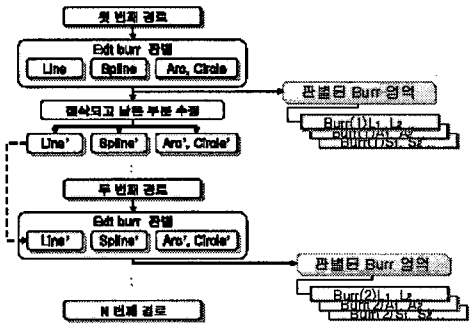


Fig. 4. 복합 형상에서 Multi-Path의 Exit Burr 판별 알고리즘

복합형상에서 Multi-Path를 적용하려면, 단일형상에 대한 Exit Burr 판별을 여러번 수행해야 한다. 즉, 아래의 Fig. 4.처럼 첫 번째 경로에 대한 Exit Burr 판별 알고리즘을 수행하는데 각 개체에 대한 판별 모듈을 각각 수행하고, 이에 변경된 개체정보로 두 번째 경로에 대한 Exit Burr 판별 알고리즘을 수행하는 방식으로 Multi-Path의 모든 경로에 대해 판별 알고리즘을 수행하면 된다.

Fig. 5.는 위의 3절에서 예로 들었던 형상에 Multi-Path를 적용한 모습이다. 이는 복합형상을 인식하고, Multi-Path에 대하여 Exit Burr 판별 알고리즘을 적용한 예가 된다.

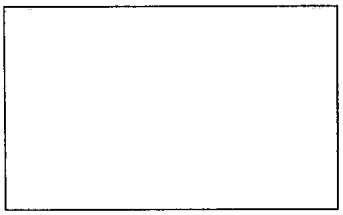

Fig. 5. 복합 형상에서 Multi-Path의 Exit Burr 판별의 예

그림에서도 볼 수 있듯이 이러한 알고리즘을 적용하면, 첫 번째 경로에 대해 절삭이 수행되었다면 Exit Burr가 생성되지 않았던 부분이라 하더라도 다음 경로에서는 적용이 되지 않음을 알 수 있다.

## 3. Exit Burr 최소화를 위한 알고리즘

### 3.1 Exit Burr 최소화의 목적

버는 가공의 정밀도를 감소시킬 뿐만 아니라 후처리과정(Deburring)을 야기 시킴으로 인해서 작업효율의 감소 및 생산비의 비효율적 낭비를 가져오게 된다. 따라서, 본 연구에서는 Burr Expert System의 알고리즘에 이어서 CAD 정보와 CAM 정보가 주어진 작업 하에서 공구의 가공경로의 수정을 통하여 Burr가 가장 적게 발생할 수 있는 경로를 제시하고자 한다.

D. Dornfeld는 Milling 가공시 버를 최소화 할 수 있는 공구가공 경로에 대한 연구에서, 결과적으로 공구가 피삭재의 외곽형상을 따라 시계방향(CW)으로 가공하면 Exit Burr가 거의 발생하지 않는다는 이론을 제시했다.[5]

그러나, 실제 Face Milling 가공에서는 복잡한 가공 경로보다 앞에서 언급하였듯이 ㄷ형 또는 Z형 다중 가공형태를 주로 사용한다. 가공물에 비하여 공구의 크기가 비교적 클 뿐만 아니라, 가공물의 정교한 형상을 고려하여 가공하기엔 비용과 시간이 너무 많이 투자될 수도 있기 때문이다.

따라서, 공구 가공경로의 형태가 ㄷ형이나 Z형을 유지하면서, 가공경로의 좌표 수정을 통한 최소화 알고리즘을 수립 해보고자 한다.

### 3.2 Exit Burr 최소화 측정기준

버 최소화 알고리즘을 수립하기 위해서는, 우선 버의 무엇을 최소화해야 할 것인지를 가늠할 최소화의 측정 기준이 있어야 하겠다. Table. 1.과 같이 버의 정도를 표현할 수 있는 특징적인 요소들로는 버의 총 길이, 버의 크기, 버의 모양(Type) 등이 있다.

| 요 소 | | 내 용 |
|---|---|---|
| 길이 (mm) | | 생성된 버의 총 길이 |
| 크기 | Width (mm) | |
| | Height (mm) | |
| | Degree (°) | |
| 모양 (Type A, Type B, Type C) | | |

Table. 1. Burr를 표현할 수 있는 특징적인 요소

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

가장 중요한 요소로는, 버를 제거(Deburring)하는데 소요되는 비용 또는 시간 등을 들 수 있다. 버 최소화의 궁극적인 목적은 후처리(Deburring) 비용의 최소화이므로 가장 중요한 요소가 될 수 있다. 그러나, 후처리 비용은 경험치 이므로 정량화 또는 수치화 하기가 어렵고, 버의 위치와 형상에 따라 비용이 달라질 수 있기 때문에 본 연구에서는 버의 총 길이를 최소화하면서 후처리 비용이 상대적으로 큰 부분에 대하여 가중치를 부여하고자 한다.

그 밖의 고려요소로 가공시간 또한 중요한 요소로 생각할 수 있는데, 본 연구에서 수행하고자 하는 Face Milling의 특성상 ㄷ형과 Z형의 가공경로의 경우 가공 시간의 차이가 그리 크지 않으므로, 본 연구에서는 고려하지 않는다. 그러나, 추후 가공시간이 차지하는 중요정도에 따라 제한조건으로 추가시킬 수도 있을 것이다.

### 3.3 Exit Angle과 최소화의 관계

버의 크기, 모양 그리고 후처리 등의 특징들은 서로 연관성을 갖고 있다. 가장 큰 연관성은 이들이 Exit Angle에 따라 달라지는 특징이다. Exit Angle이 크면 클수록 버의 크기가 커지고, 모양이 일그러지며, 후처리 비용이 많이 들어가게 된다. 또한, 그 정도가 공구와 피삭재의 특성에 따라 달라지게 되는데, 예를 들어 아래 Fig. 6.과 같이 SM45C 재료를 Tool 1으로 가공하였을 경우 Exit Angle이 120° 가 넘어가면서부터 버의 크기와 모양이 커지게 된다.[3]

| | Lead angle (L) | Radial Rake angle ($\alpha_r$) | Axial Rake angle ($\alpha_a$) | Diameter (D) | Insert shape |
|---|---|---|---|---|---|
| Tool 1 | 45° | -6° | 20° | 125(mm) | square |
| Tool 2 | 0° | 6° | 15° | 125(mm) | triangle |

Table. 2. Tool geometry

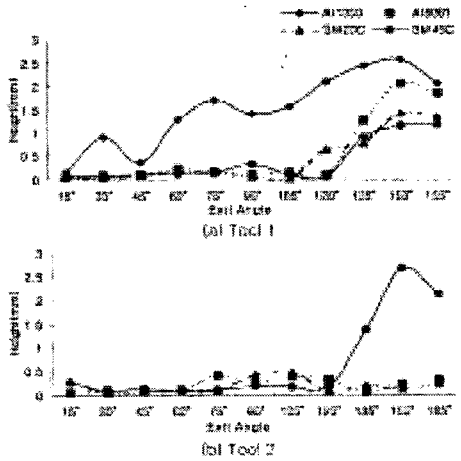

Fig. 8. Exit Angle에 따른 버의 크기(Height)[3]

따라서, 피삭재의 특성에 따른 버의 크기 변화

에 대한 데이터가 주어진다면, 이들 대신에 Exit Angle 값을 가중치나 제한조건으로 추가할 수 있을 것이다.

본 연구에서는 Exit Angle을 제한 조건으로 사용하기 위하여 Critical Angle 개념을 도입하고자 한다. Critical Angle이란 특정 피삭재에 대하여 버의 크기가 무시하지 못할 수준으로 커지기 시작하는 시점의 Exit Angle로서 후처리 비용이 상대적으로 커지기 시작하는 부분이라 할 수 있다.

그렇다면, Critical Angle보다 큰 Exit Angle을 갖는 버들의 총 길이를 생각해 볼 때, 이를 Critical Burr length라 하면, 본 알고리즘의 목적인 후처리비용의 최소화는 Critical Burr length를 최소화하는데 있다.

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

### 3.4 Critical Angle을 고려한 최소화 알고리즘

수행하고자 하는 가공 조건에서 Critical Angle이 정해지면, Critical Burr length가 최소가 되는 공구의 이동경로를 찾아야 한다.

본 연구에서는 ㄷ형 또는 Z형 다중 가공형태를 유지하는 상황 하에서 버를 최소화 할 수 있는 공구 이동경로를 찾아보고자 한다. 따라서, 가공형태를 유지하면서 피삭재를 모두 가공할 수 있는 공구이동 경로의 좌표 설정이 필요하다.

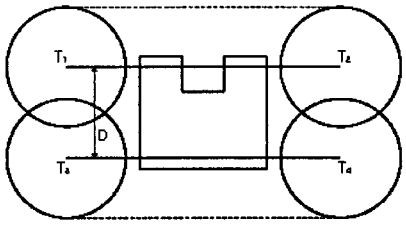


Fig. 9. Tool-path의 범위

공구 이동경로의 좌표를 설정함에 있어서 가공의 실현성을 감안하여 볼 때, 가공 영역의 설계가 중요하다. 가공의 폭과 각 가공사이의 간격에 제한을 두어 공작물의 전 영역이 가공될 수 있게 해야한다. 즉, Fig. 7.처럼 공구의 cutting region내에 공작물이 놓일 수 있게 $T_1$, $T_2$, $T_3$, $T_4$의 좌표 설정과 간격(D) 조정을 해야 한다.

위의 조건 내에서 다양한 Tool-path를 생성하여 보고, 각각 Burr 생성 알고리즘을 적용시켜 생성되는 Burr에 대한 정보를 추출해 낼 수 있을 것이다. 그리고 나서, 이들의 Critical Burr length가 최소가 되는 Tool-path를 찾아야한다. Burr Expert System은 주어진 공구경로에 대한 Critical Burr length를 구할 수 있으므로, 궁극적으로 우리가 구하고자 하는 버의 최소화를 이룰 수가 있다.

## 4. 개발 기술의 적용

2절에서 소개한 이론적인 알고리즘을 기초로 하여 Milling 가공 시 Exit Burr의 발생을 예측하고, 기실험에 의한 정보를 보여주는 과정을 Burr Expert System이라는 이름으로 Windows 환경에서 응용프로그램을 개발하였다.

### 4.1 페이스 밀링에 대한 Burr Expert System 프로그램 실행

Fig. 8.은 Burr Expert System 프로그램의 초기화면을 보여준다. 사용자는 Select Material에서 AL6061, AL1050, SM20C, SM45C 등 4개의 피삭재 종류 중 하나를 선택할 수 있고, Tool Geometry에서 공구의 형상(Lead Angle, Axial Angle, Radial Angle)에 관한 정보를 선정할 수 있다. 또한, 절삭조건을 포함하고 있는 CAM 데이터를 선정하여 절삭조건에 관한 정보를 입력받을 수 있다. 이렇게 입력받은 정보는 Cutting Condition 영역에 표시된 Diameter, Feed Rate 및 Spindle RPM 을 통해 사용자에게 전달될 수 있고, CAD 데이터를 선택하여 피삭재에 대한 형상정보를 얻을 수 있다.

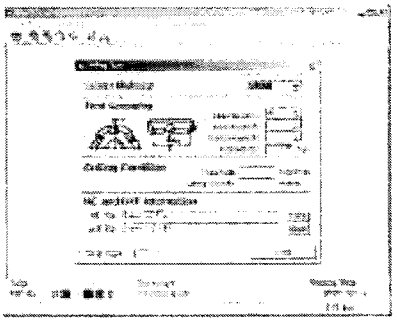

Fig. 10. Burr Expert System 프로그램의 첫 화면

### 4.2 절삭과정 표현과 Exit Burr 영역

DXF 파일에서 형상 데이터를 입력받고, NC 파일에서 절삭데이터를 포함한 CAM 데이터를 입력받게되면, 형상정보와 공구정보의 인식모듈이 동작하고, 곧바로 공구의 가공경로에 따른 Exit Burr 판별 모듈을 실행하게된다. Exit Burr 판별이 완료되면 인식한 형상의 모습과 생성된 Exit Burr의 영역을 화면에 도시하게 되는데, 굵고 Color로 표현된 부분이 Exit Burr가 생성되는 영역이 된다.

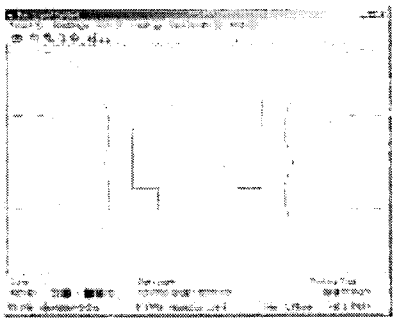

Fig. 9. 다중경로에 대한 Exit Burr 판별모습

가공경로가 단일경로가 아닌 다중경로일 경우, 몇가지 다른 색상으로 Exit Burr가 표현되어 각각의 경로에 대한 색상과 일치시킴으로써, 어떤 경로에 대하여 생성된 Exit Burr 인지를 판단하는 중요한 역할을 하게 된다.

이때, 생성된 Exit Burr 부분에 마우스 커서를 가져가면 마우스 커서 모습이 + 형태로 바뀌게 되며,

그 부분을 클릭 하게 되면 그 부분의 Exit Burr에 대한 상세 정보를 결과화면에서 얻을 수 있다.

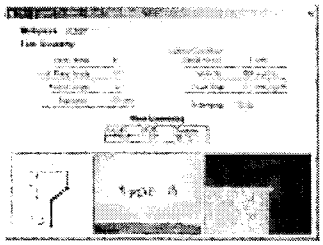

Fig. 10. 특정부분에서 발생한 Exit Burr의 형상정보 (기 실험결과 DataBase와 연동)

Fig. 10.과 같이 Exit Angle 계산 모듈을 실행하여 사용자가 클릭한 부분의 Exit Angle값을 계산하고, 그 수치를 DataBase와 연동하여 저장된 Exit Burr 형상의 모습을 결과로 보여준다. 이 DataBase는 실험을 통하여 공구의 상태, 피삭재의 재료, Exit Angle의 값 등의 조건에 따라 생성되는 Burr의 모습과 정보가 담겨있다.

### 4.3 최소화를 위한 Exit Angle 분포

Burr Expert System에서는 Burr가 발생한 특정부분의 Exit Angle을 계산할 수 있다. 이를 이용하여 발생한 Burr의 Exit Angle의 분포를 도시하는 기능을 추가하였다.

Fig. 11.은 Exit Angle의 분포를 Color로써 표현하였다. Color가 Yellow에 가까울수록 Exit Angle의 값이 작고 따라서 Burr의 크기가 작을 것이며, Color가 Red에 가까울수록 Exit Angle의 값이 크고 따라서 Burr의 크기가 클 것이라고 예상할 수 있다.

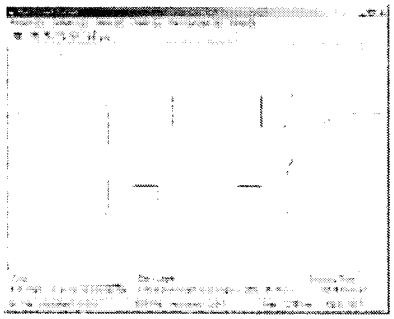

Fig. 11. Exit Angle의 분포를 Color로써 도시

또한, Critical Angle보다 큰 Exit Angle의 총 길이를 계산하여 상태바에 나타내었다. 이를 이용하여 Critical Burr Length의 길이가 최소가 되는 공구의 가공경로를 제시할 수 있다.

## 5. 결론 및 향후과제

본 연구에서는 Burr Expert System의 버 형성 예측 알고리즘을 개발하였고, 이를 이용하여 버를 최소화 할 수 있는 알고리즘을 수립하여 최적의 공구 가공경로를 제시할 수 있는 기반을 구축하였다. 또한, 이를 응용하여 Exit Angle의 분포를 예측할 수 있는 Burr Expert System의 기능을 추가하였다. 이러한 과정은 궁극적으로 Milling 가공시 생성되는 Exit Burr를 최소화하여 작업효율 증대 및 생산비의 효율적 사용을 목적으로 한다.

향후 연구 과제로는 현재 제안한 버 최소화 알고리즘을 정립하여 Windows 응용프로그램으로 개발하고, ㄷ형과 , Z형의 Tool-path에 대하여 다양한 절삭경로를 탐색하여 그 중에서 Exit Burr를 최소화 할 수 있는 최적의 공구 가공 경로를 추출하는 Burr Expert System의 최적화 시스템을 계획중이다.

## 6. 참고문헌

1. 김영진, 이계열, 안용진, "임의의 특정형상에 대한 버 발생 메카니즘의 기하학적 해석", 한국 CAD/CAM학회 논문집
2. 김지환, 이장범, 김영진, "임의 형상 및 다중경로의 해석 Exit Burr 판별 알고리즘 개발", 대한 산업공학회 추계학술대회 논문집, 2002
3. 한상우, 고성림, "페이스 밀링 가공시 출구버 형성에 관한 연구", 한국정밀공학회지, 제19권, 제8호, pp.55-62, 2002.8.
4. D. Dornfeld, "Burr Minimization in Face Milling : A Geometric Approach", ASME, Vol. 119, May 1997.
5. D. Dornfeld, "Geometric Approaches for Reducing Burr Formation in Planar Milling by Avoiding Tool Exits", International Journal of Machine Tools and Manufacture, 2000
6. 이건우, "CAD / CAM / CAE 시스템", Pearson Education Korea, 2000.
7. AutoCAD 2002 Reference Manual, Autodesk Inc., 2001.
8. Vera B. Anand, "Computer Graphics & Geometric Modeling for Engineers", WILEY, 1993.
9. 이이표, 김병세, "Microsoft Visual Basic Bible 6.0", 삼양출판사, 1999.