

금형연마작업을 위한 5축 CAM 시스템

서석환*, 이민석*, 김두형**

*포항공대 산업공학과 CAM Lab.

**한국기계연구원 로봇공학실

A Five-Axis CAM System for Free-Surface Grinding

Suk-Hwan Suh*, Min-Suk Lee* and Doo-Hyeong Kim**

*Computer Automated Manufacturing Lab. Industrial Engineering Dept., POSTECH

**Robotics lab., Automation Dept. KIMM

Abstract

In manufacturing press die with free surface, grinding operation is an important post process for surface finish and dimensional accuracy. With the advancement of NC technology, surface grinding operation is increasingly replaced by the gantry type manipulator. As the mechanics for grinding operation is different from machining operation, conventional CAM system for machining operation is hard to apply. In this paper, we develop a five-axis CAM system by which an efficient gantry trajectory can be planned and verified. The developed system consists of four conceptual modules: namely CAD, PROCESS, CAM, and ANALYSIS. In the CAD module, the machined surface is represented by CL-data or surface modeler, and process parameters are specified by the PROCESS module. Then, the CAM module generates a series of grinding paths based on the grinding mechanics together with process databases for tool specs and grinding conditions. The generated paths are verified via ANALYSIS module. Validation via real experiments is left for further study.

1. 서론

자동차, 선박, 항공기의 외관과 같은 3차원 자유 곡면에 대하여 불 렌드 밀을 사용하여 금형 가공을 할 경우, 공구의 경로를 따라 cutter mark와 함께 NC 공작기계의 직선 보간시에 야기되는 가공 오차가 발생한다. 따라서 cutter mark의 제거, 가공 오차의 최소화 및 표면의 평활화를 위하여 연마 작업이 필연적으로 요구된다.

금형 생산의 자동화는 설계에서부터 NC가공에 이르기까지 진전 되었으나 후처리 과정인 연마 공정은 현재까지 대부분 수작업으로 수행되어 왔다. 금형 제품의 수명이 점차 단축되고, 고급화되는 추세에 따라 금형 생산 공정의 소요 시간 중 30-40%를 차지하는 연마 공정의 자동화는 시급한 과제이다 [1]. 이에 따라 산업용 로봇을 활용하여 연마 공정에 적용하려는 시도가 활발히 이루어지고 있으나, 기존의 교시 (teach by doing) 방법으로 로봇들을 운용하는 것은 교시에 많은 시간이 소요되며, 작업의 형태가 매우 복잡하므로 정확한 작업 data의 형성이 어렵고, 작업 환경이 열악한 이유로 인하여 많은 문제점을 안고있다.

반면에 오프 라인(off line)으로 로봇 프로그램을 생성하는 방식은 금형 CAD data를 사용하여 자유 곡면에 대한 정확한 구동 조건을 결정할 수 있으므로 교시에 소비되는 시간 단축과 함께 표면의 정밀도를 높이는 데에 있어서 많은 장점을 가진다.

본 연구에서는 3차원 자유 곡면 형상의 금형을 5축 컨트롤러의 로봇으로 연마 작업을 수행함에 있어서, CAD 형상을 입력받은 후 연마 공구에 의한 간섭을 방지하는 로봇의 궤적을 산출하고 검증할 수 있는 과정을 지원하는 오프 라인 5축 CAM 시스템의 개발에 관한다.

2. 금형 연마 5축 CAM 시스템의 구조

금형 연마 5축 CAM 시스템은 그림 1과 같이 4개의 모듈로 구성되며 금형 형상의 입력(CAD), 연마 공정 조건 설정(PLAN), 공구 경로의 산출(CAM), 생성된 궤적을 따라 로봇의 연마 시뮬레이션을 수행하고 이때의 금형 표면에 대하여 분석 작업(ANALYSIS)을 수행할 수 있도록 설계되었다.

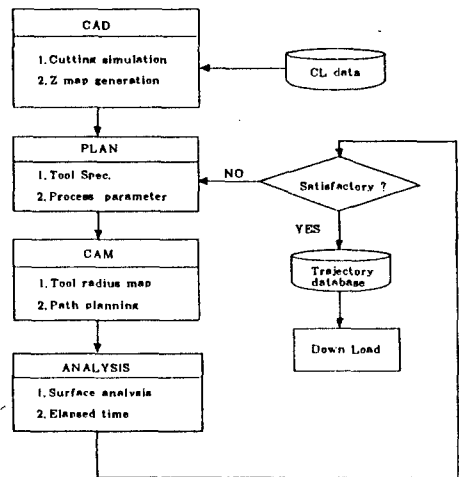


그림 1. 금형 연마 CAM 시스템의 구조

(1) 금형 형상 입력 모듈(CAD)

금형 형상은 NC 가공에서 사용된 공구 경로 데이터(cutter location data: CL data)를 입력으로 cutting simulation을 통하여 Z-map의 형태로 저장된다. Z-map은 금형 곡면을 XY 평면 상에 투영시키고 평면상의 각 그리드에 해당하는 금형의 높이를 저장해 놓은 2차원 행렬을 뜻한다. cutting simulation을 행한후의 Z-map은 NC 가공에서의 scallop을 포함하고 있다. 현재는 scallop이 포함된 Z-map을 사용하여 구현되어 있으나, 차후에는 scallop이 제거된 형상으로 변환하는 프리프로세싱의 과정을 거쳐 최종 CAD 데이터를 구축하고자 한다.

(2) 연마 조건 설정 모듈

정의된 금형의 연마에 사용될 공구 및 공구 회전수, 이송 속도, 연마량, 허용 공차 등을 입력 받으며 초기 연마 진행 방향을 지정하는 모듈이다. 정압이 유지되는 상태에서 연마 패턴을 따라 공구가 이동하는 경우 공구 회전 속도와 이송 속도 그리고 지석과 공작물의 재질에 의해 일회 연마량이 결정되며, 따라서 사용자가 지정한 연마량을 만족할 수 있는 연마 회수가 계산된다.

(3) 경로 계획 모듈

연마 조건 설정이 끝나면 로봇의 End effector에 부착된 공구의 위치 벡터와 자세 벡터를 계산하고 연마 경로를 결정한다. 본 연구에서는 연마 공구에 의해 야기될 수 있는 간섭 현상을 방지하기 위하여 first contact algorithm을 개발하였으며 이에 따라 공구 경로간 간격(path interval)을 결정하는 방식을 제시하였다.

(4) 연마 작업 수행 시뮬레이션 및 분석 모듈

입력한 연마 조건에 의해 생성된 공구 경로를 따라 로봇의 연마 작업을 시뮬레이션 하고, 이 때의 표면 변화를 각 곡면 셀 단위로 산출하고 도시한다. 매 회 연마 작업의 진행에 따라 연마되는 양의 변화가 각 그리드에서의 색깔로 확인된다. 이와 함께 제시되는 소요 시간과 연마 후 연마량의 분포에 대한 분석 결과를 참조하여 사용자는 공구, 공구 이송 속도 및 회전 속도 등의 연마 공정 파라미터를 변경하여 최적의 경로 계획을 산출할 수 있다.

3. 연마 역학

연마 작업은 그림 2에 나타난 바와 같이, 1) 기계 가공후의 cutter mark의 제거, 2) 금형 표면의 smoothing의 두 공정으로 구

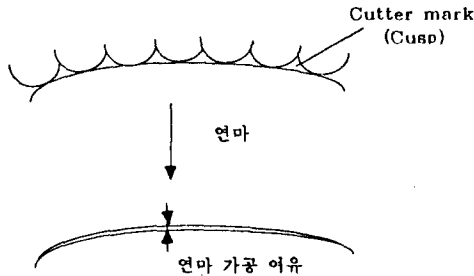


그림 2. 연마 작업

성되며, 그 표면 허용 오차는 $\pm 0.01 \text{ mm}$ 이하이다. 본 연구에서 추구하는 로봇에 의한 금형 연마 작업의 자동화 시스템은 기본적으로 CAD/CAM 시스템의 형태를 취하기 때문에, NC가공과 연마 가공의 차이를 비교 분석함으로써 NC 가공에 적용된 이론을 활용할 수 있다.

공구 경로 산출과 관련하여 그 차이점을 보면, 1) 연마 공구는 절삭날이 바닥에만 존재하며, 2) 공구의 자세는 곡면과 법선을 이루도록 해야하며, 3) 공구와 엔드 이펙트(End effector)의 연결은 유니버설 조인트(universal joint)에 의하고, 4) 정압 정치가 있으므로 공작물과 공구의 법선 방향 거리는 유효 구간(유효 구간) 내에서는 연마 깊이에 영향을 주지 않으며, 연마 깊이에 영향을 주는 요소는 연마 공구의 회전 속도(rpm), 이송 속도(Feed rate), 공작물과 지석의 재질 등을 들 수 있고, 5) 균질한 표면 처리를 위해서는 연마 패턴도 매우 중요한 고려 사항이다.

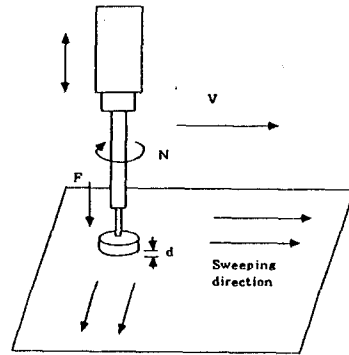


그림 3. 연마 방향 및 연마 변수

그림 3과 같은 평면에서 로봇으로 연마를 수행한다고 가정할 때, 이 때의 연마 변수는 공구 반경, 가압력, 회전 속도, 이송 속도 및 연마 깊이로 각각 $R(\text{mm})$, $F(\text{kg/cm}^2)$, $N(\text{rev/min})$, $V(\text{mm/min})$, $d(\text{mm})$ 로 표시될 수 있다. 연마 깊이는 식 (1)과 같이 회전 속도와 가압력에 비례하고 이송 속도에 반비례하는 관계를 가진다 [2].

$$d = (FN / V) k_1(E_1, E_2)k_2(P_1, P_2), \quad (1)$$

여기서 E_1 과 P_1 은 공구 지석의 young 율과 poisson 비, E_2 과 P_2 은 금형의 Young 율과 Poisson 비이다.

이와 동시에 연마 깊이는 지석과 금형의 Young 율(E) 및 Poisson 비(P) 등의 재질과도 밀접한 관계를 가지나 그 관계는 비선형적이어서 이의 수식화는 매우 어려운 것으로 알려져 있다. 따라서, 본 연구에서는 연마 조건에 따른 절삭 깊이의 실험 데이터가 있다고 가정하고, 공구 경로의 산출에 중점을 둔다. 사용자가 요구하는 연마량 δ 와 일회 연마 깊이 d 에 의해 횡삭 회수는 다음 식에 의해 결정된다.

$$n = \delta / d \quad (2)$$

정삭 연마는 연마 깊이에 거의 영향을 주지 않기 때문에 횡삭의 제한은 없다고 볼 수 있다.

연마 공정은 NC절삭 가공에 의한 생성된 형상면의 표면 조도를 목표치 만큼 낮추는 작업이나, 연마 가공 자체에 의해 금형면에 파상도(waviness)가 발생하는데 이는 연마 패턴에 무방향성을 줌으로써 감소시킬 수 있다. 이를 위해 다양한 연마 패턴이 제시되고 있으며 [4], 그림 4는 대표적으로 사용되는 몇가지 예를 보이고 있다. 연마 패턴이 복잡해 질 수록 파상도는 감소되는 반면 경로 산출 및 제어가 어려운 문제가 있다 [5]. 경로 산출의 용이성과 표면 처리를 감안하여 본 연구에서의 경로 산출 알고리즘은 그림 4의 (d)와 같은 지그재그 형태의 연마 패턴을 적용한다.

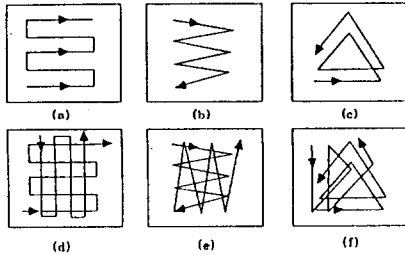


그림 4. 다양한 연마 패턴

4. 자유 곡면에 대한 연마 경로 생성 알고리즘

양호한 형상 정밀도와 표면 조도를 갖도록 연마하기 위해서는 연마면에 따라 공구의 자세를 제어하는 것이 중요하다. 이를 위해 공구의 자세는 연마면의 법선 방향으로 지정한다. 연마 공구가 금형 표면을 가공할 때에도 NC가공에서의 유사하게 그림 5에서와 같이 공구에 의한 간섭 현상이나 미절삭 부위가 발생할 여지가 있다. 이러한 문제점을 검색하고 해결하기 위한 연마 공구 경로 계획은 1) 연마 진행 방향 결정, 2) first contact algorithm을 적용한 tool radius map의 형성, 3) 이를 이용하여 각 공구의 접근 가능영역내에서 공구 경로의 계획, 4) 경로간 간격 산출의 4단계로 구성된다.

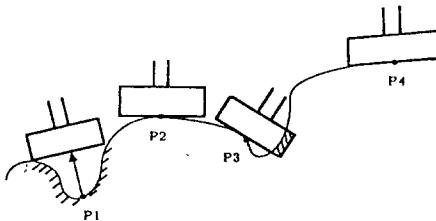


그림 5. 연마 공구에 의한 간섭

4.1 연마 방향 결정

연마 초기의 진행 방향은 그림 4의 (d)에 나타난 지그재그 패턴의 횡 방향과 종방향 가운데에서 금형 표면의 cutter mark와 수직에 가까운 방향을 택하도록 한다. 연마 궤적이 cutter mark와 평행하게 되면 유니버설 조인트를 가진 지석 공구로서는 연마 후 심한 waviness가 발생하는 것이 실험으로 나타났다. 초기 연마를 수행한 후에는 횡 방향과 종 방향을 연마 회수를 만족할 때까지 번갈아 택하여 지그재그 패턴을 만족하도록 한다.

4.2 First contact 방식을 이용한 tool radius map의 형성

First contact 방식은 곡면의 법선 방향을 공구의 자세로 취하여 곡면에 접근할 때, 간섭 현상을 방지하기 위하여 공구가 이동하는 위치를 공구의 최초 접촉점으로 설정하는 방식이다.

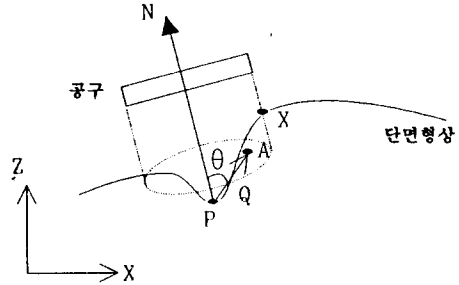


그림 6. 최초 접촉점(first contact point)

곡면상의 한 점 P로 공구가 이동할 때 만나게 되는 최초 접촉점이 그림 6에 나타나 있다. 최초 접촉점 X는 공구를 곡면상의 점 P의 법선 방향으로 투영시켰을 경우, 투영된 영역내에서 가장 먼저 공구와 접촉하는 곡면상의 점으로서 아래의 식에 의해 구한다.

$$X = \max(Q \cdot N) \quad (3)$$

여기서 X 최초 접촉점이고, $Q = A - P$, N은 점 P에서의 법선 벡터이며, A는 N의 방향으로 공구가 투영된 영역내에 있는 금형면의 점을 나타낸다.

곡면상으로 공구의 투영영역을 구하는 문제는 계산 기하학적으로 어려운 문제이므로, 여기에서는 투영 영역을 포함하는 사각형의 enclosing area를 z map 상에서 구하고, 그 area내에서 $|Q| \sin \theta$ 가 공구 반경보다 작은 그리드(A)는 투영 영역내에 존재하게 됨을 이용하여 이들 그리드에 대해 최초 접촉점 여부를 판정하도록 한다.

최초 접촉점에서 연마가 일어나면 그림 7과 같이 공구 밀면을 포함하는 3차원 평면과 곡면과의 교점을 구함으로써 연마 깊이 d를 고려한 공구 하단 곡면의 z 값 변화를 추정할 수 있다. 이에 따라 Z map 상의 모든 그리드에 대하여 공구를 진입시키고, 최초 접촉점에서의 연마를 시뮬레이션하여 연마 후의 z 값(높이)을 계산한다.

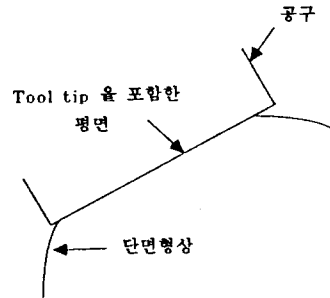


그림 7. 연마 후 곡면의 단면도

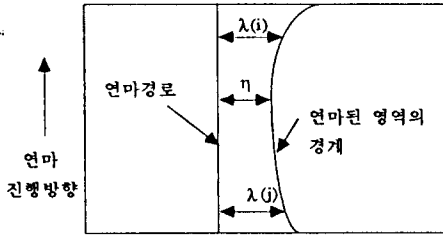


그림 9. (a) 경로간 간격의 결정

경로 사이, 즉 경로간 영역내의 모든 그리드가 연마 되는지를 확인한다. 만약 이 조건을 만족시키면 그리드 하나를 더 증가 시켜 새로운 경로로 설정하고 동일한 테스트를 반복하나, 경로간 영역 내에 미연마 부분이 발생하면 현재의 경로간 간격보다 그리드의 크기로 하나가 적은 값을 최종적인 경로간 간격으로 설정하여 모든 영역을 연마하는 최대 경로간 간격을 얻는다. 이 방식은 그리드 단위로 미분 시뮬레이션하여야하므로 계산량이 방대하여지는데, 이를 해결하기 위하여 위의 식과 같이 이전 경로에 의해 연마된 영역의 우측 경계값 가운데에서 최소의 값을 다음 경로로 설정하는 것이다.

위와 같이 연마 경로간 간격을 정하는 방법을 곡면의 단면도로 나타내면 그림 9 (b)와 같다.



그림 9. (b) 경로간 간격

황삭 회수에 의해 결정되는 일회 연마량의 영향은 최초 접촉점에서 고려되는 값이기 때문에 그림 9의 (b)에서 보는 바와 같이 경로와 경로 사이의 영역에서는 연마가 중복이 되지만 연마 회수의 증가로 인한 과절삭은 일어나지 않는다.

5. 연마량 분석

설정된 연마 조건에 의해 결정된 경로를 따라 연마된 양은 경로상의 각 점에 대해 최초 접촉점을 먼저 계산하고 이 점에서의 연마를 시뮬레이션 함으로서 추정된다. 3차원 표면 조도에 대한 evaluation의 표준 방법은 없으므로 식 (7)과 같이 연마량 δ를 계산하고, 전체 금형 표면에서의 이 값에 대한 통계적 분포를 사용하여 연마 후 표면의 상태를 평가한다.

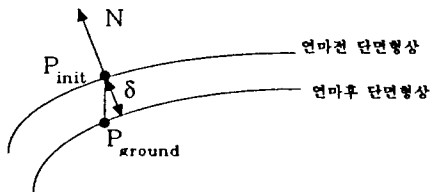


그림 10. 연마량

$$\delta = (P_{init} - P_{ground}) \cdot N_p \quad (7)$$

여기서 P_{ground} 는 연마후의 위치벡터, P_{init} 는 연마 전의 위치 벡터, N_p 는 P 에서의 법선 벡터를 각각 나타낸다.

공구 이동 속도를 빠르게 하면 일회 절삭 깊이가 작아지므로 황삭 회수는 상대적으로 늘어나며, 회전 속도는 그 반대의 관계를 가지므로 공구 반경과 이 들을 조정하여 작업 시간을 단축시키고, 균질한 연마량의 분포를 얻도록 한다.

6. 시스템의 구현 및 자동차 fender 금형 연마에의 적용

연마 5축 CAM 시스템은 IBM PC 486 상에서 C 언어로 구현되었다. 풀 다운메뉴(PULL DOWN MENU)를 사용하여 그림 1에 나타난 시스템의 각 기능을 수행할 수 있으며, 사용자는 최적의 연마 경로를 얻기 위해 시스템의 지시에 따라 연마 공정 변수를 입력할 수 있다.

그림 11는 자동차 Fender 금형의 CL data를 입력으로 Cutting simulation을 통해 생성된 z map을 도시한 것이다. 사용된 금형은

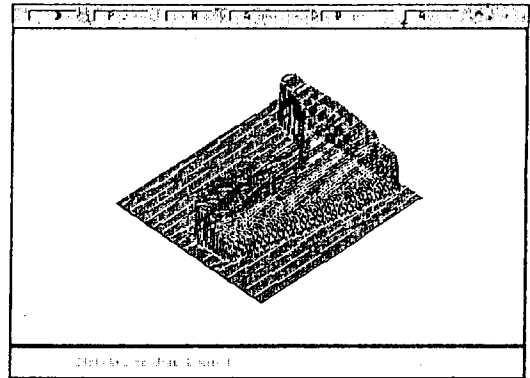


그림 11. 자동차 Fender 금형의 z map

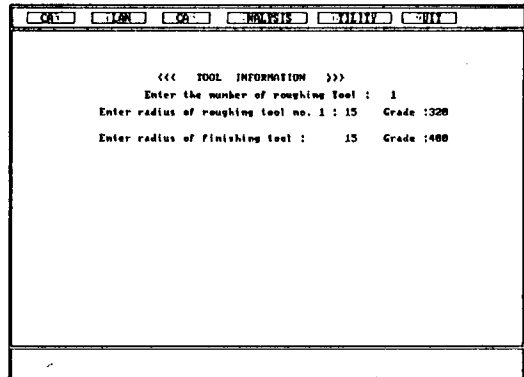


그림 12. (a) 연마 변수 입력

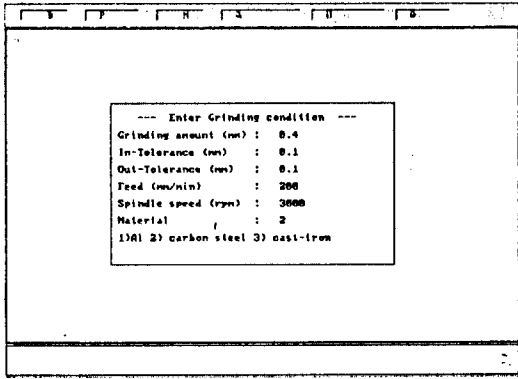


그림 12. (b) 연마 공구 사양 입력

자동차 fender를 1/2로 축소한 모델로서 크기는 약 400*300 mm²이다. 초기 설정한 연마 변수와 공구 사양을 입력하는 화면은 그림 12의 (a)와 (b)에 나타나 있다. 연마 변수로서 공구의 Feed rate는 200 mm/min, 공구 회전 속도는 3000 rpm, 그리고 연마량은 0.4 mm, 연마량의 허용 공차는 in-tolerance, out-tolerance 각각 0.1 mm, 금형의 재질은 탄소강으로 입력하였다. 공구는 한 개의 직경 30mm의 광삭 공구(#320 grade) 및 동일한 크기의 #400 grade의 정삭 공구이다. 실제로는 이상의 연마 변수 입력을 바탕으로 일회 연마량이 산출 되어야 하나, 3절에서 언급한 바와 같이 이에 대한 실험 데이터를 가정하여 일회 연마량을 0.983 mm로 설정하고 그 결과 생성된 tool radius map이 그림 13에 나타나 있다.

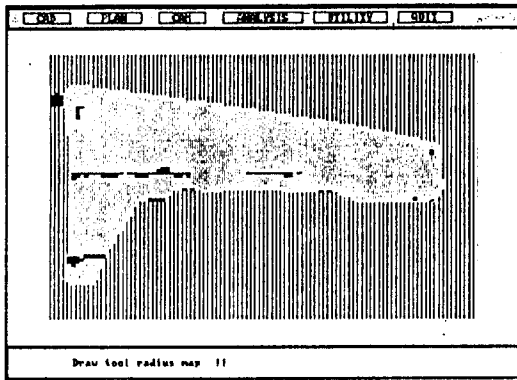


그림 13. tool radius map의 생성

그림 13의 tool radius map에서는 Fender 표면에 반경 15mm 공구로서 진입할 수 없는 영역이 검은색으로 도시되어 있고, 나머지 영역은 공구 접근 가능 영역임을 보여 주고 있다. 금형 중앙부에 나타나 있는 접근 불가능 지역은 fender상에 있는 폭이 좁은 groove에 의해 야기된 것이며, 상단 및 하단의 접근 불가능 지역은 fender상의 두개의 홈에 의한 것이다. 그 외에 흠어져 존재하는 몇개의 접근 불가능 지역을 나타내는 그리드는 평면과 fender의 경계면에서 급격히 솟아오른 fender의 형상에 기인한 것이다. 이와 같은 지역의 연마를 위해서는 크기가 아주 작은 공구를 사용하거나 수작업 연마로서 처리할 수 있다.

그림 14는 생성된 광삭 공구 경로가운데에서 초기 경로(CL-data에 수직인 방향)를 보여준다. NC 가공에서 CL-data의 진행 방향이 X 축(정방향)에 가까웠으므로 초기 연마 진행 방향을 Y축과 평행한 중방향으로 설정하였다. Fender 형상에서 비교적 평평한 윗부분에서는 경로간 간격이 크게 나타난 반면, 곡률이 점차 커지는 아래 부분에서는 경로간 간격이 좁게 나타남을 볼 수 있다. 최초 접촉점 방식을 사용할 경우, 일회 연마량의 깊이가 만큼 진입하더라도 곡률이 클수록 연마되는 공구 하단의 연마 영역은 좁아지게 되기 때문에 나타난 결과이다. 일회 연마량이 0.983 mm 이므로 지그재그 패턴을 따라 이전 연마에 수직인 방향으로 3회의 광삭 가공이 뒤따른다. 정삭 가공은 cutter mark이 제거된 표면의 평활화가 목적이므로 소요 시간을 고려하여 정삭 가공의 회수는 사용자가 지정하도록 한다.

그림 15는 연마 시뮬레이션을 수행한 후 표면의 연마량을 분석하고 있다. 목표한 연마량은 0.4 mm 였으나, 연마량의 평균은 0.368 mm, 분산은 0.006 mm, 표준 편차는 0.075 mm, 그리고 445.1분의 시간이 소요 되었음을 알 수 있다. 직경 20mm의 연마 공구를 더 사용할 수 있다면 새로이 공구 사양을 입력하여 그림 16과 같은 새로운 tool radius map을 생성할 수 있다. 반경 15mm 공구로 접근할 수 없었던 부분이 두 가지 grey level로 구분되어진 부분은 접근 불가능 지역, 옅은 부분은 10mm 공구로 접근 가능한 지역임을 알 수 있다. 두 공구에 의해 연마 시뮬레이션된 결과

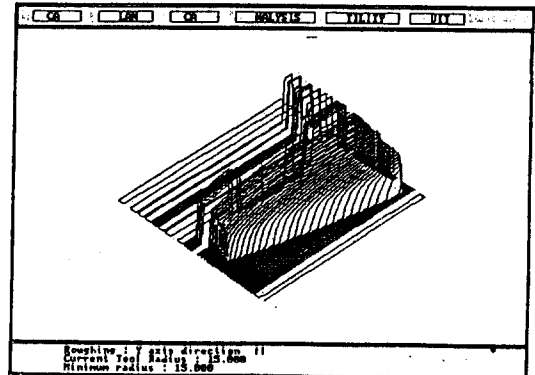


그림 14. 연마 공구 경로

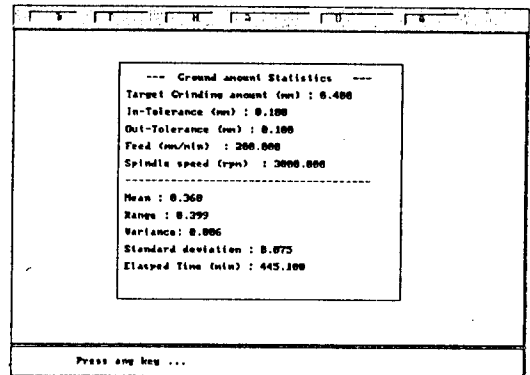


그림 15. 연마량의 분석

는 그림 17에 나타난 것처럼 연마량의 평균 0.372, 분산 0.005, 표준 편차 0.073, 그리고 소요 시간 643.9분이다. 공구 두께를 사용한 경우 소요 시간은 늘어 났으나, 표면 연마 상태는 더 우수하므로 이를 선택하도록 한다. 이 때, 소요 시간을 줄이기 위해서 연마 변수 가운데 feed를 300 mm/min로 늘리고 동시에 연마량을 증가시키기 위해 spindle speed를 4000 rpm으로 조정해서 얻은 결과는 그림 18과 같다. 연마량과 분산에 있어서는 앞의 경우와 거의 차이가 없으나 소요 시간에 있어서는 429.3분으로 현저한 향상이 있었음을 볼 때, 이 때 적용한 연마 조건이 가장 양호함을 알 수 있다. 이와같이, 소요 시간과 표면 처리간의 trade off를 고려하여 새로이 수차례 연마 조건을 변경하여 적절한 조건을 찾도록 한다. 물론 일회 연마량은 가정한 값이므로 실제 데이터를 사용하면 표면 처리와 소요 시간에 관한 위의 결과와는 다를 수 있으나, 그 결과를 위와 같이 가정했을 때 분석하는 방법은 상기한 바와 같이 사용자에게 가장 적절한 연마 조건을 찾아 갈 수 있음을 보여 주었다.

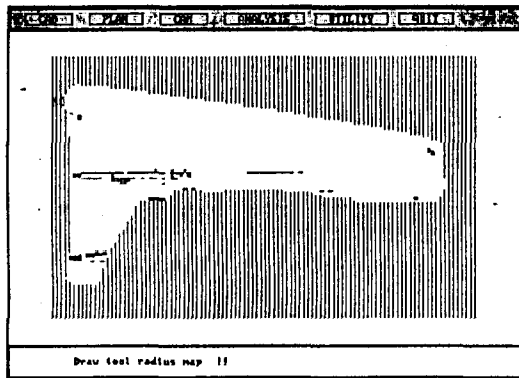


그림 16. Tool radius map

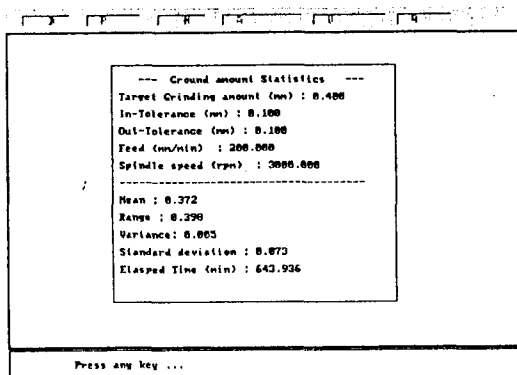


그림 17. 연마량의 분석

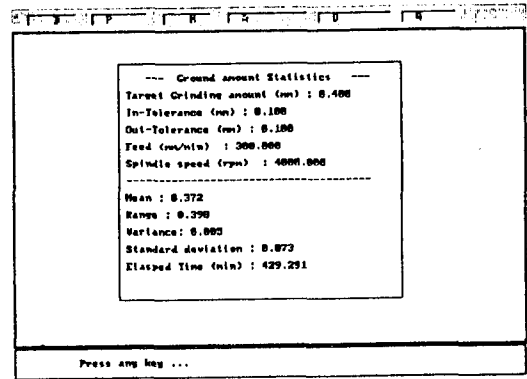


그림 18. 연마량의 분석

7. 결론

본 연구에서는 5축 센터 타일의 로봇트를 사용하여 자유 곡면의 연마를 수행함에 있어, CL-data를 입력으로 공구 간섭이 없는 공구 경로를 생성하는 이론적 배경으로서 First contact algorithm을 이용하여 tool radius map을 생성하고 이에 따라 해당 공구의 경로를 생성하는 방법을 사용하였다. 제시된 알고리즘은 수차례 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 검증되었으나, 연마 변수의 변화에 따른 연마 깊이에 대한 실제 data의 수집 및 실제 실험을 통한 캘리브레이션 과정을 거쳐 그 유효성을 입증함으로써 오프 라인 시스템과 실제 시스템과의 차이를 해소하여야 할 것이다.

추후 과제로는 1) CL-data가 주어지지 않은 다양한 곡면에 대하여 그 형상을 기하학적 모델로 변환하고, 이를 이용하여 공구 간섭을 방지하는 로봇트 연마 경로 생성에 관한 연구, 2) 연마에 의해 야기되는 파상도를 최소화하는 경로 패턴 생성 및 제어에 관한 연구를 들 수 있다. 연마 5축 CAM 시스템은 오프 라인 로봇틱 프로그래밍 시스템으로서 연마 가공과 유사한 deburring 작업에 응용할 수 있으리라고 본다.

참고문헌

- [1] Saito, "Finishing and Polishing of Free-form surface", JSPE, vol. 18, no 2, 1984.
- [2] Motoshi Suzuki, Shumpei Ichiyasu, etc, "Development of Die-finishing System controlled by CAD/CAM System", JSPE-58-08, 1992, pp 43-48.
- [3] Yasuharu Matsunami, Motohisa Haga, "金型磨きの 自動化に向けて - 大形金型自動磨機の開発ね, 機械工具, 1989, pp 70-75.
- [4] Yoshio Mizugaki, Masafumi Sakamoto, "Fractal Path Generation for a Metal-Mold Polishing Robot System and Its Evaluation by the Operability", Annals of CIRP, 41/1/1992.