

마이크로 마스크를 가진 미세입자분사가공을 위한 가공경로의 생성

김호찬*, 이인환**, 고태조#

Tool Path Generation for Micro-Abrasive Jet Machining Process with Micro-Mask

Ho-Chan Kim*, In-Hwan Lee**, Tae-Jo Ko#

(Received 19 August 2011; received in revised form 5 December 2011; accepted 6 December 2011)

ABSTRACT

Micro-abrasive jet machining(μ AJM) using mask is a fine machining technology which can carve a figure on a material. The mask should have holes exactly same as the required figure. Abrasive particles are jetted into the holes of the mask and it collide with the material. The collision break off small portion of the material. And the μ AJM nozzle should move all over the machining area. However, in general the carving shape is modeled as in a bitmap figure, because it often contains characters. And the mask model is also often modeled from the bitmap image. Therefore, the machining path of the μ AJM also efficient if it can be generated from the bitmap image. This paper suggest an algorithm which can generate μ AJM tool path directly from the bitmap image of the carving figure. And shows some test results and applications.

Key Words : Micro-Abrasive Jet Machining(미세입자분사가공), Mask(마스크), Image(이미지), Tool Path(공구 경로), CAM(컴퓨터이용제조)

1. 서 론

입자분사가공(abrasive jet machining)은 미세한 연마 입자를 재료에 분사하여 가공하는 기술이다. 전통적으로 이 기술은 표면거칠기의 저감이나 버(burr)의 제거에 이용되고 있다^[1,2]. 최근 이 기술에 마스크를 적용

하여 특정 부위만 가공되도록 입자분사의 영역을 제한할 수 있도록 함으로서 미세한 문양을 식각할 수 있는 미세입자분사가공(micro-abrasive jet machining: μ AJM)이 연구되고 있다. 이 기술은 특히 얇은 재료, 열에 민감한 재료, 경도 및 취성이 높은 재료에 미세 문양을 식각하는데 적합한 기술이다^[3-7].

최근 정밀한 마스크를 적은 비용으로 빠르게 제작할 수 있는 기술이 개발되어 미세입자분사가공의 적용이 더욱 효율적으로 이루어 질 수 있게 되었다^[8]. 또한 가공 문양에 해당하는 비트맵 이미지로부터 마스크의 3차원 형상을 직접 모델링할 수 있는 기술 역

* 안동대학교 기계자동차공학과

교신저자 : 영남대학교 기계공학부

E-mail : tjko@yu.ac.kr

** 충북대학교 기계공학부

시 개발되어 식각 문양 및 마스크의 모델링 작업의 효율도 크게 향상되었다^{9,10)}. 그러나, 현재까지 비트맵 이미지로 주어진 가공 문양에서 직접 미세입자분사기를 위한 노즐의 가공경로를 생성하는 기술은 연구된 바가 없으며, 이는 일반 절삭가공과는 달리 가공부에 인접한 마스크의 일부에까지 가공 경로가 이어져야 하는 차이가 있다. 따라서, 본 논문은 주어진 식각 문양의 이미지 파일 정보에 따라 미세입자가공기의 노즐의 가공 경로를 자동으로 생성하는 알고리즘을 개발하여 제시한다.

2. 미세입자분사가공

2.1 입자분사가공

마스크를 이용하는 미세입자분사가공은 Fig. 1에 나타난 바와 같이 고압의 공기 제트에 미소연마입자를 실어 가공물에 분사하는 기술이다. 노즐의 위치제어가 용이하고 마스크가 필요한 특징이 있다.

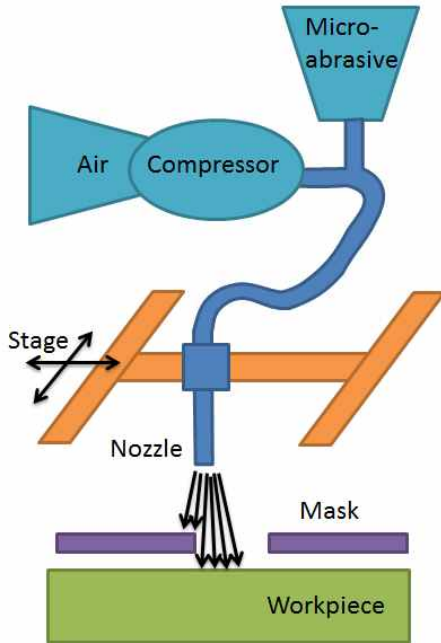


Fig. 1 Micro-abrasive machining

마스크의 제작은 광학적식각(photolithography)과 광조형(stereolithography)에 의한 방법이 있다. 먼저 광학적 식각은 투명필름 위에 마스크의 형상을 불투명하게 그린 후 포토레지스트(photo resist) 필름 위에 설치하고 빛을 조사하여 포토레지스트의 특정 부분만 성질이 변하도록 하여 이를 인화(develop)함으로써 마스크를 제작하는 방법이다. 이 방법은 거쳐야 할 공정이 많고 자동화가 어렵지만 하나의 마스크로 다수의 패턴 제작이 가능해 대량생산의 경우 경제성이 있다. 한편 최근 제안된 광조형에 의한 마스크 제작은 실제 가공할 소재 위에 직접 광경화성 수지를 도포하고 UV 광을 이용하여 선택적으로 경화시킨 후 잉여 수지를 세척하여 제작하는 방법이다⁸⁾. 이 방법은 마스크의 3차원 CAD 모델이 필요하며, 이를 2차원 마스크 이미지로부터 생성할 수 있는 기술이 개발되어 있다^{9,10)}.

2.2 공정계획

미세입자분사가공의 공정계획은 Fig. 2에 보인바와 같이 식각을 원하는 패턴형상의 이미지 파일이 입력으로 필요하다. 해당되는 출력은 μ AJM 노즐을 이동시키는 경로의 G-code 파일과 마스크의 3차원 형상정보이다.

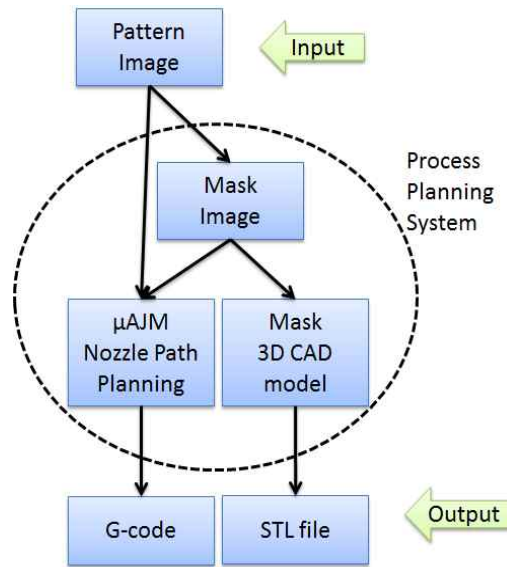


Fig. 2 μ AJM process planning

마스크 제작에 광학적 식각을 이용한다면 마스크의 3차원 모델링과 STL파일 생성 부분은 필요치 않게 된다.

3. 분사경로생성

3.1 알고리즘

μ AJM을 위한 분사경로 생성에서 일반적인 절삭가공과의 가장 큰 차이는 입력 정보가 가공영역의 이미지라는 점이다. 따라서 가공영역의 이미지로부터 가공영역의 CAD 정보를 생성해야 한다. 또한 미세입자 분사에 의한 가공 깊이를 내부와 마스크의 경계부에서 균일하도록 유지하기 위해서는 항상 마스크 위에서 가공을 시작하고 마스크 위에서 종료할 필요가 있다. 또한 공구의 경로가 변경되는 코너 부에서의 속도 변화에 따른 가공 깊이 편차를 최소화하기 위해서 마스크영역을 최대한으로 활용할 수 있도록 지그재그(zig-zag) 경로를 선택하였다. Fig. 3은 이상의 사항을 고려하여 마스크를 생성하기 위한 알고리즘을 전체적으로 보였다.

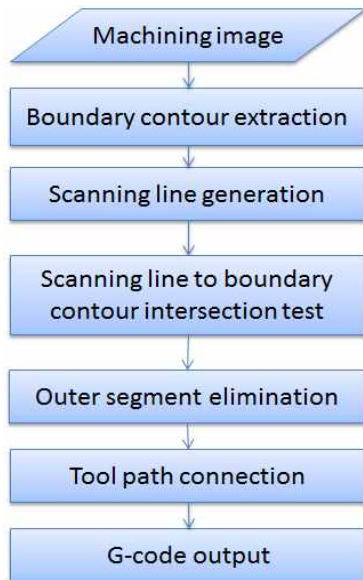


Fig. 3 Tool path generation

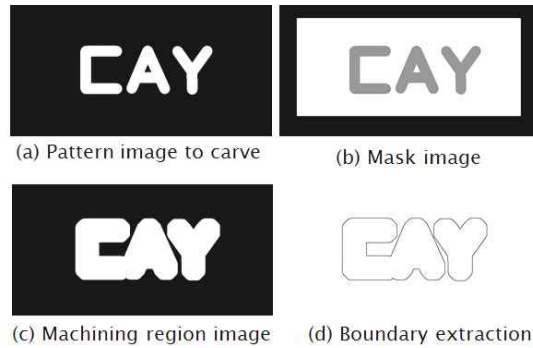


Fig. 4 Input images and extracted boundary

3.2 경계외곽선 추출

마스크를 이용하는 μ AJM을 위한 입력으로 이미지를 사용하는 것은 식각하는 형상이 문자이거나 무늬인 경우가 많으므로 일반적인 CAD 형상 보다는 편리할 경우가 많기 때문이다. Fig. 4(a)에 보인바와 같이 CAY라는 문자를 식각하고자 한다면, 검정색 배경의 이미지에 픽셀별 크기를 결정하여 해당 크기에 맞게 형상을 백색으로 그려 넣은 이미지 파일이 입력이 된다. 이 이미지를 이용하여 이미지 편집 도구를 이용하여 Fig. 4(b)와 같이 마스크 형상을 모델링할 수 있으며, Fig. 4(c)와 같이 백색영역을 확장하여 미세입자가 분사될 영역을 간단히 설정할 수 있다. 입자분사 영역의 경우 식각하고자 하는 패턴 이미지를 모두 포함하면서 마스크의 영역을 벗어나지 않게 설정하여야 한다.

Fig. 4(d)는 Fig. 4(c)로부터 경계선 추출을 통하여 가공영역의 CAD 데이터를 생성한 것이다. 일반적인 이미지 프로세싱에서는 경계선 추출을 위하여, 문턱값(thresholding), 형태학(morphology), 경계선추출(boundary detection), 세선화(thinning), 점 및 모서리추출(point and edge detection)의 프로세스를 거쳐야 하나 본 논문의 입력 데이터는 사용자에게 정형화되어 제작된 것이므로, 색상별로 흑과 백색의 영역을 나누는 문턱값 공정과 형상의 구분이 불확실한 픽셀들을 인접한 영역에 병합하여 노이즈를 제거하는 형태학공정 및 이미지상의 선의 굵기를 1픽셀로 줄이는 세선화는 필요치 않다.

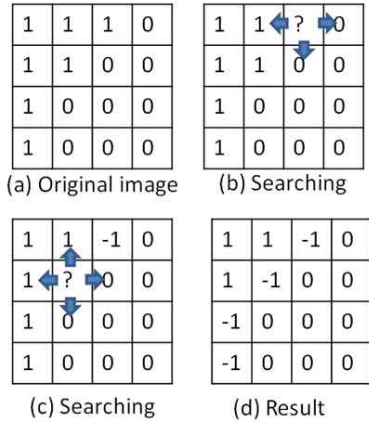


Fig. 5 Boundary detection

경계선추출은 백색인 픽셀과 흑색인 픽셀이 서로 만나는 영역을 찾아 마킹을 하는 작업이다. 즉 Fig. 5(a)에 보인 비트맵 이미지에서 백색에 해당하는 1의 값을 갖는 모든 픽셀에 대하여 그에 인접한 상하좌우의 4 픽셀에 대하여 흑색에 해당하는 0인 값을 갖는 픽셀이

픽셀에 대하여 흑색에 해당하는 0인 값을 갖는 픽셀이 하나라도 존재하면 해당 픽셀은 경계에 해당하며 -1로 표시한다.

Fig. 6에는 경계로부터 점짓모서리추출을 이용하여 경계의외곽선을 추출하는 방법을 보였다. 우선 탐색의 시작점을 정해야 하며, -1로 표시된 경계 픽셀 전체에서 가장 위의 행에 있는 픽셀에서 시작하며, 가장 윗 행에 -1인 픽셀이 여럿일 경우에는 그들 중 좌측의 픽셀에서 탐색을 시작한다. 탐색점에서 다음 점을 탐색할 때에는 항상 현 픽셀에 인접한 8개의 픽셀만을 대상으로 탐색을 한다. 탐색은 이전 픽셀에서 현재 픽셀까지 이은 선분으로부터 현재 픽셀을 중심으로 반시계방향으로 탐색하게 되며, 최초로 -1로 표시된 픽셀이 다음 픽셀이 된다. 단, 최초의 시작점에서는 해당 픽셀의 바로 좌측의 픽셀을 가상의 이전 픽셀로 하고 탐색을 수행한다. 현재 점에서 발견된 다음 점까지 외곽선의 선분을 생성한다. 이러한 작업을 시작점에 되돌아오기까지 반복하면 하나의 경계의외곽선을 구할 수 있다.

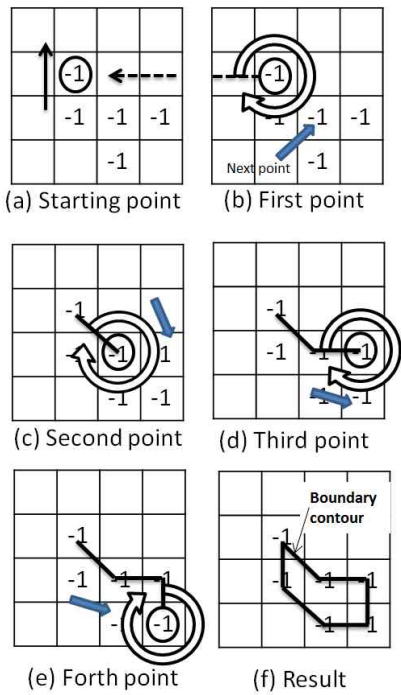


Fig. 6 Boundary contour

하나의 경계의외곽선이 추출되면 해당하는 시작 점과 직접 맞닿은 4개의 픽셀 중 -1로 표시된 픽셀들을 모두 -2로 표시한다. 또한 -2로 표시한 픽셀과 맞닿은 모든 -1인 픽셀들을 -2로 변경하여 더 이상 맞닿은 -1인 픽셀이 없을 때까지 반복한다. 이렇게 하면 한 경계의외곽선에 해당하는 -1의 표식을 모두 지울 수 있게 된다. 이후에 전체 픽셀을 검사하여 -1로 표시된 픽셀이 존재하게 되면 시작점을 선정하는 것부터 경계의외곽선 추출법을 더 이상 적용할 픽셀이 없을 때까지 반복한다. 이상과 같은 방법으로 이미지로 제공된 가공영역이 CAD 정보로 재생성 되었다.

3.3 분사경로 선분의 계산

이상의 과정에서 얻어진 경계의외곽선을 채우는 분사경로는 무수히 많은 방법이 존재하지만, 비교적 단순하면서도 균일한 가공을 보장할 수 있는 지그제그 방식으로 분사경로를 생성한다. 이때 사용자에게서 분사 가공이 이루어질 공구경로의 간격을 입력 받는다. 먼저 Fig. 7(a)에 보인바와 같이 Fig. 7(b)와 같은 경계의외곽선이 존재할 경우 이를 완전히 포함할 수 있는 최소의 경계상자(bounding box)를 구하여 이것 보다 10% 더 큰 영역에 헤칭선분을 생성한다.

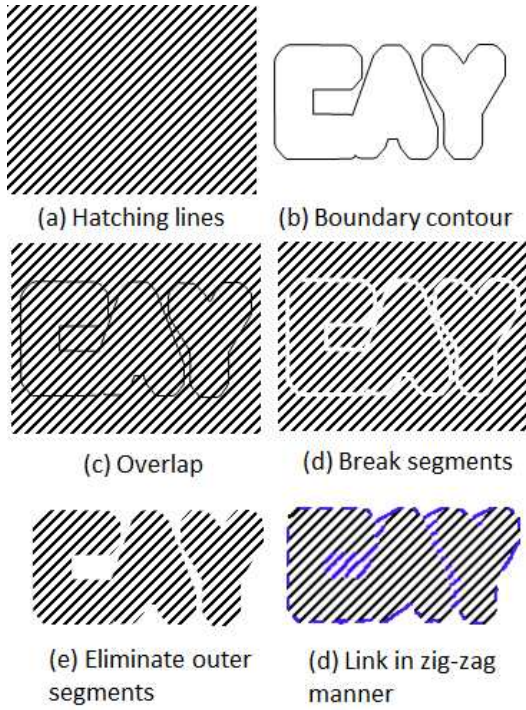


Fig. 288 Tool path generation

각 해칭 선분은 좌하단이 시작점이며, 우상단이 종료점인 유한 선분이다. 생성된 선분들과 경계의외곽선은 공간적으로 Fig. 7(c)와 같이 배치되게 된다. 이때 해칭 선분과 경계의외곽선의 교차여부를 계산하여 교차가 발생하는 모든 점에서 해칭 선분을 둘로 분할하면 Fig. 7(d)와 같이 가공영역 내에 속하는 선분과 그렇지 않은 선분으로 분리가 가능하다. 교차 검사를 수행하는 두 선분의 끝점을 각각 p_1, p_2, q_1, q_2 라고 하면 아래의 식(1)과 (2)를 이용하여 두 선분의 무한 연장선들의 교점 i 를 계산할 수 있다. 이때, 구해진 교점이 두 연장선의 교점이므로 실제로는 해당

$$i_x = \frac{t_q q_{1x} - t_p p_{1x} - q_{1y} + p_{1y}}{t_q - t_p} \quad (1)$$

$$i_y = t_q (i_x - p_{1x}) + q_{1y} \quad (2)$$

$$\text{단, } t_p = \frac{p_{2y} - p_{1y}}{p_{2x} - p_{1x}}, t_q = \frac{q_{2y} - q_{1y}}{q_{2x} - q_{1x}}$$

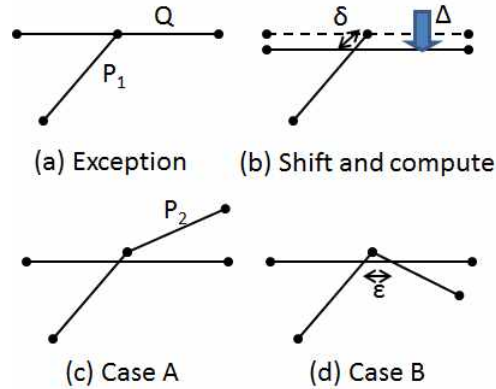


Fig. 8 Exceptional case in intersection

점이 두 선분 내에 모두 포함되어 있을 경우에만 실제로 교차가 있는 것이다. 교점의 계산에서 흔히 발생하는 예외사항은 Fig. 8(a)와 같이 교점이 한 선분의 끝점이며, 또 다른 선분 위에 있는 경우이다. 이 경우 본 논문으로 제안하는 해법은 Fig. 8(b)와 같이 하나의 검사선분을 선분의 방향과 수직하게 미소한 량 Δ 만큼 특정 방향으로 쉬프트 하여 교점을 계산하는 미세변동계산(Shift and compute)방법이다. 이후 Fig. 8(c)와 8(d)에 보인 바와 같이 P선분의 외곽선 루프에 어떤 방향으로 진행하더라도 문제가 없는 결과를 주게 된다. 또한 Δ 가 미소량이면 δ 와 ϵ 도 미소하므로 그 오차가 미소 하다고 할 수 있다. 실제로 본 논문의 계산에 사용된 값은 $1 \times 10^{-6} \text{mm}$ 이다. 한 선분의 끝점 q 와 선분 p_1, p_2 의 수직거리를 식(3)을 이용하여 계산하고 그 값이 0이면 q 가 선분 p_1, p_2 위에 있다고 판단한다.

$$h = l \sin \theta \quad (3)$$

$$l = \sqrt{(p_{2x} - q_x)^2 + (p_{2y} - q_y)^2}$$

$$\theta = \tan^{-1} \left(\frac{p_{2y} - q_y}{p_{2x} - q_x} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{p_{2y} - p_{1y}}{p_{2x} - p_{1x}} \right)$$

이상의 방법으로 Fig. 7(d)와 같이 해칭선분들이 교점에서 분할되면 전체의 외곽에 해당하는 선분들을 지워서 Fig. 7(e)와 같이 분사가공이 이루어질 선분들을 구할 수 있다. 가공부위의 외부에 해당하는 선분들은 해칭선이 좌하측에서 시작하여 우상측 방향을 향하는 방향성분으로 볼 때, Fig. 9(a)와 같이 그 순번을

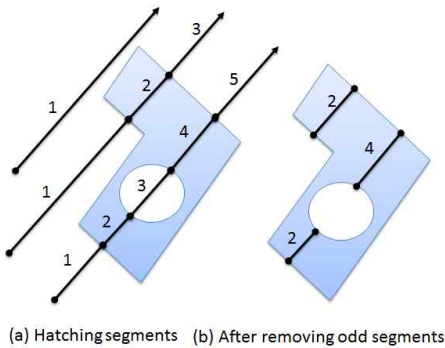


Fig. 9 Outer segments elimination

분할되기 전의 해칭선분 별로 매길 수 있으며, 이 순번 상에서 홀수에 해당하는 선분들은 모두 외부이거나 구멍에 해당하므로 이들을 지우면 순수하게 경계외곽선 내부에 존재하는 가공경로를 얻을 수 있다.

이후 가공되지 않고 공구가 이동 되는 급속이송 부분을 지그재그 방식으로 Fig. 7(d)와 같이 추가하면 최종적인 가공 경로를 얻을 수 있다. 이때 급속이송 구간에서 미세입자 분사가공의 경우 공구가 직접 공작물과 마주 닿은 절삭 가공과는 달리 공구를 특정 안전 평면까지 후퇴하지 않고 바로 다음 위치로 이동할 수 있는 특징이 있다.

이상의 경로에 대하여 가공 선분의 시작점에 분사를 시작하는 M코드를, 급속이송의 시작점에서 분사를 중지하는 M코드를 넣어 G-code로 출력하면 미세입자 분사가공을 위한 가공경로정보의 생성이 완료된다.

3.4 적용결과

본 논문의 알고리즘은 Visual C++™ 9.0 이용하여 구현 되었다. 개발된 시스템은 가공이 필요한 영역에 대한 흑백 이미지와 함께, 공구경로의 간격과 좌표계의 절대, 상대값 여부를 입력으로 받아 해당하는 G-code를 자동으로 생성하여 출력한다. Fig. 4(c)에 보인 이미지를 입력으로 하여 해칭 간격을 100 μ m로 설정하여 절대좌표계로 공구 경로를 생성한 예를 Fig. 10에 보였다. Fig. 10(a)는 마스크와 공작물의 위치를 보여주고 있으며, Fig. 10(b) 추출된 경계외곽선을 보여준다. Fig. 10(c)는 교차 계산과 외부 선분의 제거를 마친 가공 경로를 개발된 응용프로그램과 함께 확대하여 보여주고 있다.

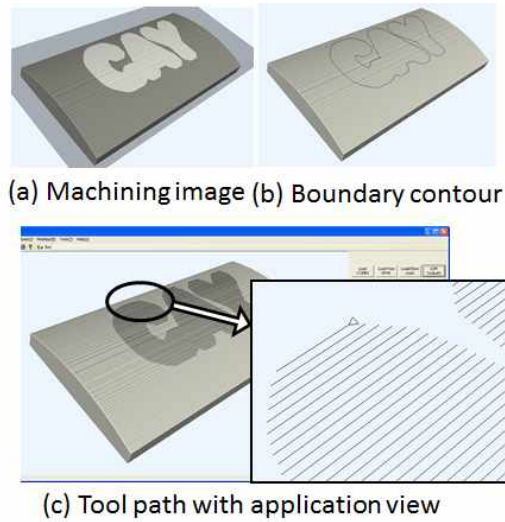


Fig. 10 Application result

5. 결 론

본 논문은 미세입자분사 가공을 위한 분사경로를 가공영역의 이미지로부터 자동으로 생성하는 기술의 개발에 대하여 다루었다. 기존의 CAM 소프트웨어는 CAD 파일로부터 가공경로를 생성하지만, 본 연구의 대상인 입자분사 가공은 문자나 문양의 식각에 많이 이용 되므로 해당되는 이미지로부터 분사 경로를 생성하는 것이 효과적이다. 따라서 이에 필요한 정보를 추출하는 이미지 처리 기술과 가공 경로의 생성에 필요한 전산기하적 알고리즘과 예외적인 사항의 처리기술을 개발하여 소개 하였다. 또한 개발된 기술은 기존에 이미지를 이용하여 CAM 정보를 생성하는 소프트웨어가 다루지 못하는 입자분사가공에 대해서 최초로 적용된 성과이다. 향후 생성된 CAM 정보를 이용해 가공할 때에 가공 정밀도를 향상할 수 있는 기술의 개발이 연구될 것이다.

후 기

본 연구는 과학기술부의 기초과학연구사업 (No. R01-2008-000-20568-0)의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Boothroyd, Geoffrey, and Knight, Winston A., "Fundamentals of machining and machine tools," Marcel Dekker, pp. 478-479, 1989.
2. Todd, Robert H., Allen, Dell K., and Alting, Leo, "Manufacturing Processes Reference Guide", Industrial Press Inc., pp. 2-5, 1994.
3. Chastagner, Matthew, and Shih, Albert J., "Abrasive Jet Machining for Edge Generation", Transaction of NAMRI/SME 35, pp. 359-366.
4. Ghobeity, A., Getu, H., Krajac, T., Spelt, J. K. and Papini, M., "Process Repeatability in Abrasive Jet Micro-machining", Journal of Materials Processing Technology, Vol. 190, No. 1-3, pp. 51-60, 2007.
5. Belloy, E., Thurre, S., Walckiers, E., Sayah, A. and Gijs, M. A. M., "The introduction of Powder Blasting for Sensor and Microsystem Applications", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 84, No. 3, pp. 330-337, 2000.
6. Slikkerveer, P. J., Bouten, P. C. P. and de Haas, F. C. M., "High Quality Mechanical Etching of Brittle Materials by Powder Blasting", Sensors and Actuators A: Physical, Vol. 85, No. 1-3, pp. 296-303, 2000.
7. Fan, J. M., Wang, C. Y. and Wang, J., "Development of Micro Abrasive Jet Machining Technology", Diamond and Abrasives Engineering, Vol. 145, No. 1, pp. 25-30, 2005.
8. Lee, S., Lee, I., Ko, T., Kang, H. and Cho, D., "Development of Rapid Mask Fabrication Technology for Micro-abrasive Jet Machining", Journal of the KSPE, Vol. 25, No. 1, pp. 138-144, 2008.
9. Kim, Ho Chan, Lee, In Hwan, and Ko, Tae Jo, "Mask Modeling of a 3D Non-planar Parent Material for Micro-abrasive Jet Machining", Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 27, No. 8, pp. 91-97, 2010.
10. Kim, Hochan, Lee, In Hwan, and Ko, Tae Jo, "Direct 3D mask modeling for nonplanar workpieces in microabrasive jet machining", International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Online first, 2011, DOI 10.1007/s00170-011-3370-y.