

미세입자 분사가공을 위한 3차원 임의형상 모재용 마스크 모델링

Mask Modeling of a 3D Non-planar Parent Material for Micro-abrasive Jet Machining

김호찬^{1,✉}, 이인환², 고태조³
Ho Chan Kim^{1,✉}, In Hwan Lee² and Tae Jo Ko³

1 안동대학교 기계자동차공학과 (Department of Mechanical and Automotive Engineering, Andong Natl. Univ.)

2 충북대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Chungbuk Natl. Univ.)

3 영남대학교 기계공학부 (School of Mechanical Engineering, Youngnam Univ.)

✉ Corresponding author: hckim@andong.ac.kr, Tel: 054-820-5269

Manuscript received: 2010.4.26 / Accepted: 2010.6.1

Micro-abrasive Jet Machining is one of the new technology which enables micro-scale machining on the surface of high brittle materials. In this technology it is very important to fabricate a mask that prevents excessive abrasives not to machine un-intend surface. Our previous work introduced the micro-stereolithography technology for the mask fabrication. And is good to not only planar material but also for non-planar materials. But the technology requires a 3 dimensional mask CAD model which is perfectly matched with the surface topology of parent material as an input. Therefore there is strong need to develop an automated modeling technology which produce adequate 3D mask CAD model in fast and simple way. This paper introduces a fast and simple mask modeling algorithm which represents geometry of models in voxel. Input of the modeling system is 2D pattern image, 3D CAD model of parent material and machining parameters for Micro-abrasive Jet Machining. And the output is CAD model of 3D mask which reflects machining parameters and geometry of the parent material. Finally the suggested algorithm is implemented as software and verified by some test cases.

Key Words: Micro-Abrasive Jet Machining (미세입자 분사가공), Stereolithography (광조형), Mask Modeling (마스크 모델링), Voxel (복셀), Marching Cube Algorithm (마칭큐브알고리즘)

1. 서론

입자분사가공(abrasive jet machining)은 연마입자를 고압의 공기와 함께 모재에 분사하여 연마 가공을 수행하는 것으로 주로 표면 거칠기의 저감이나 버(burr)의 제거에 이용되고 있다. 최근에는 마이크로 형상을 갖는 마스크와 미세입자를 이용하는 미세입자 분사가공(micro-abrasive jet machining) 기술이 연구되고 있다. 미세입자 분사가공은 취성이 높은 재료에 미세한 패턴을 식각할 수 있다는 점에서 높은 활용성이 있을 것으로 기대된다.^{1,4} 또

한 본 논문의 선행연구에서 마이크로광조형(micro-stereolithography)기술을 이용하면 매우 미세하고 정밀한 마스크를 저비용 고효율로 제작할 수 있음을 보였다.⁵ 그런데 기존의 연구들은 평면상의 패턴식각을 다루고 있어서 휘어진 부분이나 곡면이 있는 재료의 형태에서 적용하기가 어렵다. 이것은 연마제트 가공이 노즐의 크기, 분출압력, 입자의 종류, 가공소재의 특성 등과 함께 노즐과 가공물 사이의 거리에도 매우 민감하기 때문이다. 또한 곡면인 경우에는 마스크를 모델링하고 제작하는 것 자체가 기존의 일반적인 패턴 식각방식을 사용

할 수 없는 문제가 있다. 따라서, 곡면형상의 모재에 대하여 미세입자 분사가공을 수행할 수 있도록 하는 마스크의 모델링 및 제작기술을 개발할 필요가 있으며, 이에 마이크로 광조형기술을 이용하면 곡면의 모재에 대하여서도 마스크의 제작이 가능함이 구체적인 실험을 통하여 밝혀졌다.^{6,9} 한편 비평면 모재에 대한 마스크의 형상 모델링도 평면과는 달리 간단하지 않아 해당 기술의 개발이 필요하다. 따라서 본 논문은 적합한 3 차원 곡면 모재용 마스크를 효과적으로 모델링하는 기술의 개발에 관해 다루었다.

2. 미세입자 분사가공

미세입자 분사 가공은 마스크제작공정, 입자분사공정, 마스크제거공정의 3 단계로 구분할 수 있다. 먼저 Fig. 1(b)에 보인 바와 같이 모재 위에 가공이 이루어지지 않도록 하고자 하는 부위를 마스크로 덮는다. 이때 모재의 가공이 완료될 때까지 마스크가 다 제거되지 않을 정도로 충분한 두께를 줄 필요가 있다. 또한 입자분사 가공시 마스크 전체가 어느 정도 수준의 힘을 받게 되므로 박리되지 않도록 충분한 접착강도를 유지할 필요가 있다. 이송속도와 분사거리 및 소재의 가공특성을 반영한 소재제거율에 따라 가공 부위가 원하는 가공깊이를 갖도록 분사가공이 Fig. 1(c)와 같이 수행된다. 마지막으로 마스크를 녹이거나 태우는 등과 같이 적절한 방법을 통해 제거하게 되면 Fig. 1(d)와 같이 최종적인 가공물을 얻게 된다.

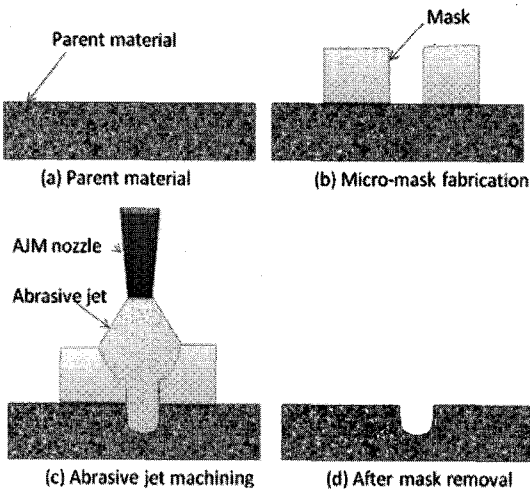


Fig. 1 Micro-abrasive jet machining

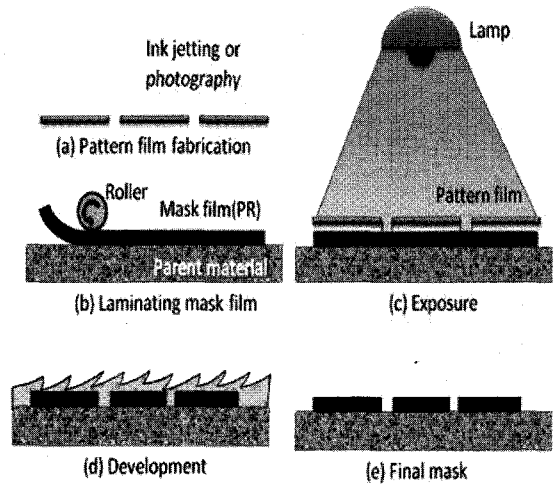


Fig. 2 General mask fabrication process

마스크 제작에는 일반적으로 광학적 식각 (photolithography) 방법이 사용되고 있다. 이 방법은 Fig. 2 에 나타낸 바와 같이 먼저 포토레지스트 (PR, Photo Resist)의 성질에 따라 마스크를 만들고자 하는 형상과 동일하거나 반대의 이미지를 갖는 패턴필름(pattern film)을 인쇄 또는 인화 등의 방법으로 제작한다. 다음에 모재 위에 마스크로 사용될 PR 을 붙이거나 도포한다. PR 위에 패턴필름을 올리고 램프등으로 광을 조사한다. 이제 PR 의 불필요한 부분을 화학적 처리를 통해 제거하면 최종적으로 원하는 마스크의 형상을 얻게 된다. 이 방법은 거쳐야할 공정이 많고 자동화하기 어렵지만 하나의 마스크로 다수의 패턴 제작이 가능해 마이크로 광조형을 이용한 방법에 비해 경제성이 있다.

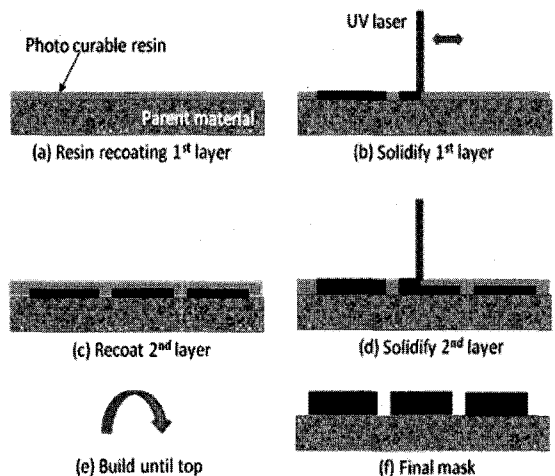


Fig. 3 Mask fabrication with micro-stereolithography

마스크를 제작할 수 있는 다른 방법으로 본 논문의 저자 등이 제안한 방식은 Fig. 3에 보인 바와 같이 마이크로 광조형 기술을 사용하는 것이다.⁵ 이 방법은 가공할 소재의 위에 특정 두께로 마스크의 재료가 되는 액상의 광경화성 수지가 덮일 수 있도록 광경화성 수지에 담근 후 UV 레이저를 마스크를 생성하고자 하는 부분에 조사하여 경화시킴으로써 마스크를 생성하는 기술이다. 요구되는 마스크의 두께가 제작 가능한 한 층의 두께보다 두꺼운 경우에는 한 층씩 모재를 광경화성 수지에 담가 액상의 수지가 추가로 도포될 수 있도록 하여 경화시키는 작업을 최종 마스크 높이에 도달할 때까지 반복하면 된다. 이 방법은 폐속조형 기술을 이용하므로 광학적식각을 이용하는 방법에 비하여 완전 자동화가 가능하고 공정이 단순한 특징이 있어 소량의 마스크를 생산할 경우 합리적이다. 또한 마이크로 광조형 기술을 이용한 마스크 제작의 가장 큰 장점은 곡면모재 위에도 마스크를 제작할 수 있다는 점이다.

즉, 광학적 식각을 이용한 방법은 평면이 아닌 곡면 모재를 이용할 경우 PR 필름을 붙이거나, PR을 균일하게 도포하기 매우 어렵다. 또한 경사면과 평면에서의 PR의 램프 조사 방향으로서의 길이가 달라짐에도 불구하고 한가지 수준의 노출(exposure)만이 가능한 문제가 있다. 그러나 마이크로 광조형을 이용한 마스크 제작 방법은 Fig. 4에

보인 바와 같이 곡면소재에도 동일한 방법을 적용할 수 있다. 즉, 액상의 광경화성 수지를 마스크 생성을 원하는 가장 아래 면에서 한 층 두께 만큼 높은 수준까지 채운 후 마스크가 되어야 할 부분만 레이저로 경화시켜주면 된다. 마스크의 높이가 층의 두께보다 높아야 된다면 역시 수지도포와 경화작업을 계속 반복해서 수행하면 된다. 전술한 방법으로 곡면 모재위에 마스크를 제작한 결과물의 사진을 Fig. 5에 보인다. 곡면 모재위에 마스크를 제작하는 연구에 대해서는 저자의 선행연구를 참조하기 바란다.^{6,9}

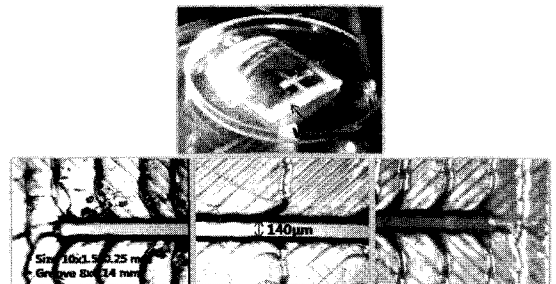


Fig. 5 Mask fabricated on curved surface by micro-stereolithography

3. 곡면 모재용 3 차원 마스크 모델링

마스크를 모델링하는 전체적인 알고리즘은 Fig. 6에 개략적으로 표시된 바와 같이 가공하고자 하는 2 차원 패턴 이미지를 확장하여 마스크 이미지를 생성하여 이를 모재에 투영하여 기초곡면을 생성한 후 이를 특정한 두께로 만들어서 마스크를 생성하는 것이다. 마이크로 광조형은 대표적인 폐속조형(Rapid prototyping)기술의 하나이다. 따라서, 다른 폐속조형 기술들과 같이 제작하고자 하는 물체의 3 차원 CAD 정보를 입력으로 요구한다. 폐속조형 분야에서 사실상의 표준 입력 파일은 3 차원 형상 모델의 표면에 대한 정보를 삼각형들로서 표현하는 STL 파일이다. 따라서 본 논문이 다루고자 하는 마스크 모델링 시스템의 출력은 STL 파일 포맷으로 표현된 마스크의 3 차원 형상이다. 이러한 출력을 얻을 수 있는 모델링 기술은 여러 가지가 존재하지만, 미세입자 분사가공이 이용되는 식각이나 패터닝은 2 차원 가공 이미지를 입력으로 하는 경우가 많으므로 본 논문도 이를 입력으로 받도록 하였다. 마스크 모델링 시스템의 입력으로

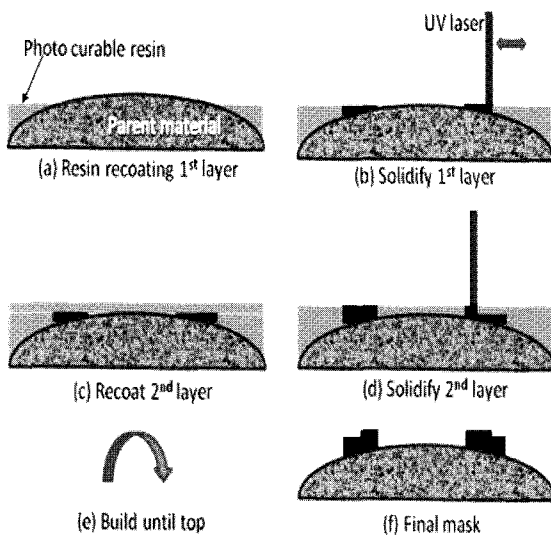


Fig. 4 Mask fabrication on curved surface with micro-stereolithography

는 Fig. 7 에 나타낸 바와 같이 패턴이미지 외 에도 모재의 형상정보와 미세입자 분사가공의 공정변수도 포함된다.

마스크의 모델링 알고리즘은 Fig. 8 에 보인 바와 같다. 즉, 시스템의 입력 중 모재의 형상정보는 복셀(voxel)의 형태로 변환되어 저장된다. 복셀은 3 차원적 공간을 조그마한 블럭의 조합으로 나타내고 물체가 해당 공간을 차지하고 있는지 그렇지 않은 지의 여부를 기록함으로써 형상을 나타내는 방식이다. 복셀의 공간은 픽셀(pixel)화된 이미지에 두께를 부여하고 이들을 높이방향으로 여러장 겹쳐 쌓은 것과 같다.

가공할 패턴의 이미지를 역으로 뒤집으면 마스크의 이미지가 된다. 이 이미지의 각 픽셀을 모재의 정보가 저장된 복셀에 투영하여 모재가 차지하

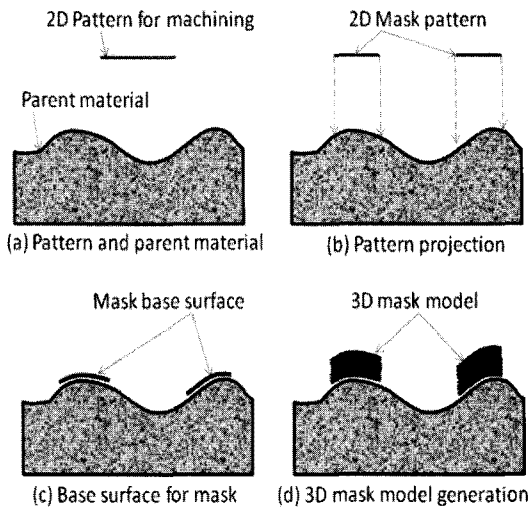


Fig. 6 μ AJM mask modeling for non-planar surface

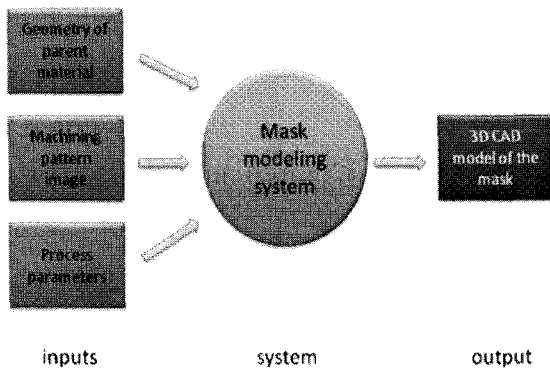


Fig. 7 Diagram of system input and output

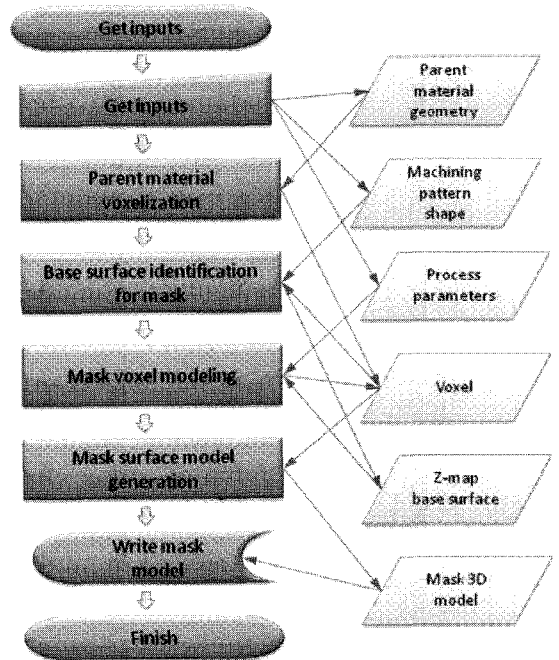


Fig. 8 Overall procedure for mask modeling

고 있는 공간의 좌표의 높이를 기록하고 해당 픽셀의 좌표에 높이를 부여함으로써 곡면을 형성하면 마스크 모델링을 위한 기초곡면이 된다. 이 정보는 해당 픽셀에 따른 z 축 방향의 정보를 기록하여 물체의 상측 표면을 나타내는 z-map 을 이용하여 저장한다.

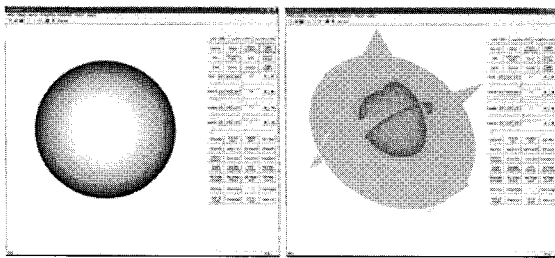
이제 소재의 제거율에 따라 마스크의 두께를 결정하여 z-map 에 표현 된 기초곡면의 높이로 부터 마스크의 두께에 해당하는 만큼의 복셀을 마스크가 공간을 차지하고 있다고 기록한다. 이 작업을 기초곡면 z-map 상의 모든 픽셀에 대해 수행하면 복셀에 3 차원 마스크 모델이 차지해야할 모든 공간을 마킹할 수 있다. 이제 마스크 마킹을 가진 복셀을 마칭큐브(marching cube) 알고리즘¹⁰⁻¹³을 이용하여 3 차원 서피스 모델로 만들어 STL 포맷으로 저장하면 곡면 모재를 위한 3 차원 마스크를 얻을 수 있다.

4. 적용예

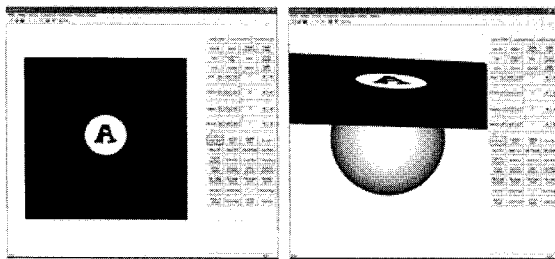
본 연구에서 제안하는 마스크 모델링 알고리즘을 적용한 소프트웨어를 Visual C++TM 9.0 을 이용하여 개발하였다. 이때 가시화를 위해서 Visualization Tool Kit 5.4 의 라이브러리를 이용하였다.¹⁴

제안된 알고리즘을 잘 설명할 수 있는 간단한 예제를 선택하였다. 시스템의 입력이 되는 모재의 3 차원 형상으로는 Fig. 9(a)에 보인 구를 이용하였다. 입력된 모재의 형상정보는 Fig. 9(b)와 같이 복셀화되어 저장되며 그림은 xy, yz, 및 zx 평면상의 복셀을 이미지화 하여 나타낸 것이다. 시각하고자 하는 패턴에 따른 마스크의 이미지는 Fig. 10(a)에 보인 바와 같다. 또한 마스크 이미지와 모재의 형상정보의 공간적 배치는 Fig. 10(b)에 나타낸 바와 같다. 마지막 입력항목으로 가공파라미터는 모재 가공 깊이의 최고값을 160 μm 로 하고 마스크가 모재에 비해 3 배 더 많이 가공되는 것으로 설정하였다. 따라서 마스크의 두께는 480 μm 가 된다. 한편 미세입자 분사가공에서 모재 및 마스크의 제거

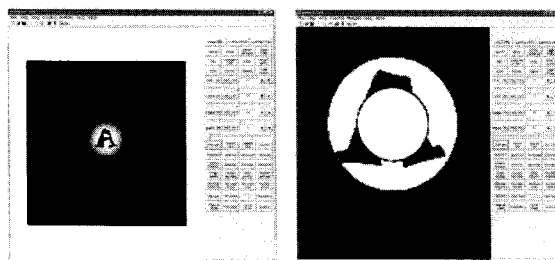
율은 가공환경 및 재료에 따라서 달라지게 된다. 사용한 복셀의 단위 크기는 x, y 방향으로 85 μm 에 z 방향으로 40 μm 이다. 이때 z 방향으로 복셀의 크기에 차이가 있는 것은 본 연구자들이 기존 연구에서 개발한 미세입자 분사가공 장치의 현재 설정이 미세입자의 1 회 분사에 모재 80 μm 씩 가공할 수 있는 점을 감안하여 적은 수의 복셀로 전체 형상을 충분히 나타낼 수 있도록 하기 위해서 이다. 복셀의 해상도는 높을 수록 정밀도가 높아 지지만 많은 메모리와 긴 계산 시간을 요구하게 되므로, 충분한 해상도의 마스크를 만들 수 있는 최대 크기의 복셀을 이용하는 것이 적합하다. 본 예의 경우 인텔의 Xeon CPU 2.67GHz 를 사용하는 개인용 컴퓨터에서 사용자 입력 등의 모든 작업시간을 포함하여 32 초의 작업 시간이 소요되었으며, 형상모델의 생성을 위한 계산시간은 11 초가 소요되었다. 마스크의 이미지는 모재의 정보를 담고있는 복셀에 투영되며 이때의 높이를 기초곡면을 나타내는 z-map 에 저장하였다. 이 z-map 정보는 높이가 높은 픽셀은 백색을 낮은 픽셀은 검정색을 높이에



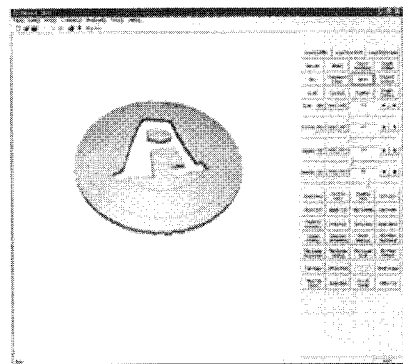
(a) Parent material (b) Voxel view
Fig. 9 Voxel of a parent material sphere



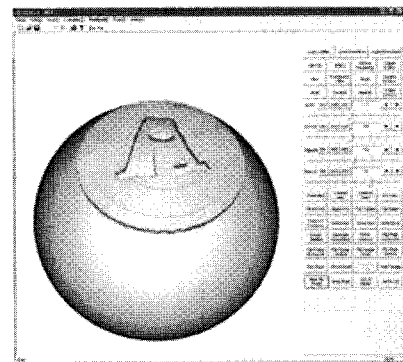
(a) Mask image (b) Mask layout
Fig. 10 Input mask image



(a) Base surface for mask (b) Mask voxel xy section view
Fig. 11 Mask voxel generation



(a) Mask 3D model



(b) Mask with parent material

Fig. 12 3D model of the mask

비례하여 사상함으로써 Fig. 11(a)에 보인 바와 같이 가시화 될 수 있다. 기초곡면 정보와 필요한 마스크의 두께 정보를 이용하여 마스크의 복셀정보를 생성한 후의 복셀을 Fig. 11(b)에 보였으며, 이 그림에서 가운데의 회색원은 모재의 복셀이며 외부의 흰색 이미지는 마스크의 복셀을 나타낸다. 최종적으로 마스크의 복셀을 이용하여 마칭큐브 알고리즘을 이용하여 면을 생성하여 Fig. 12에 보인 바와 같이 3 차원 마스크 CAD 모델을 생성하였다.

두번째 적용예는 보다 실제적인 형상을 적용하여 보았다. 사용된 모재형상은 Fig. 13(a)에 보인 바와 같이 미소기어이다. 기어를 복셀화하고 이를 xy , yz , 및 zx 평면의 이미지로 가시화한 이미지를 Fig. 13(b)에 보였다. 사용된 마스크는 또한 보다 복잡한 문양을 가지도록 하였으며 Fig. 13(c)와 같다. 해

당 마스크를 복셀에 투영하고 높이를 측정하여 z -map 데이터를 생성하고 이를 가시화한 기초곡면을 Fig. 13(d)에 표시하였다. 이 결과를 이용 일정한 두께를 갖도록 마스크를 생성한 최종 형상을 Fig. 13(e)에 모재와 함께 보였다.

이상의 적용예들을 통하여 본 연구에서 제안한 모델링 알고리즘이 실제적으로 곡면모재를 위한 3 차원 마스크의 모델링에 잘 적용됨을 보였다.

5. 결론

본 논문은 미세입자 분사가공에서의 임의의 곡면형상을 갖는 모재에 마이크로 스케일의 가공을 수행하기 위해 필요한 3 차원 마스크의 모델링 알고리즘을 개발하였다. 또한 이를 적용한 소프트웨어를 개발하여 그 실효성을 검증하였다. 개발된 시스템은 모재와 식각이미지 및 가공파라미터를 입력으로 하고 이에 적합한 3 차원 마스크의 CAD 모델을 출력으로 한다. 또한 개발된 시스템에 간단한 예와 실제적인 예를 적용하여 그 결과를 보였으며, 결과적으로 곡면모재에 대한 마스크의 모델링 생산성을 높이고 미소입자 분사가공의 적용 범위를 한층 높일 수 있을 것으로 기대한다.

후 기

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

참고문헌

1. 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.
2. 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.
3. 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.

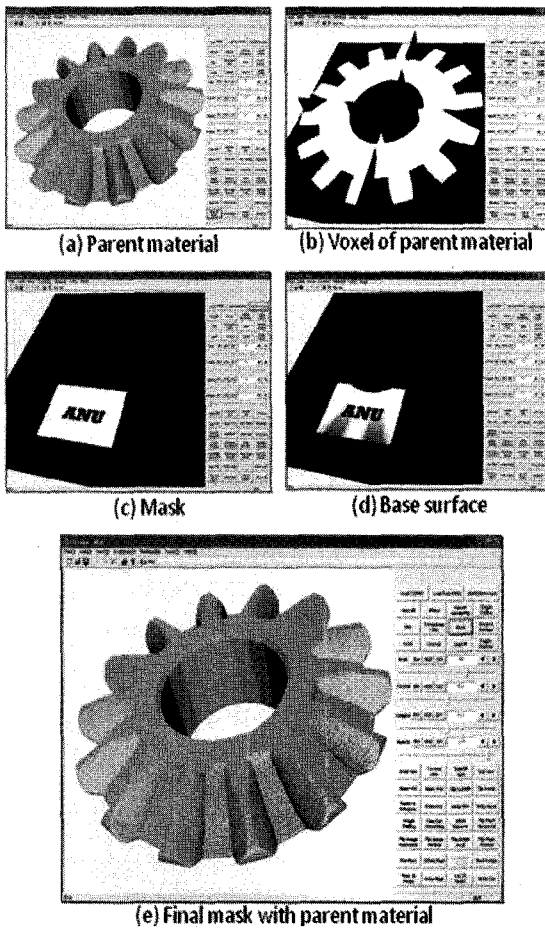


Fig. 13 Mask generation for a gear

4. 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.
5. 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.
6. Lee, I., Lee, S., Ko, T., Kang, H. and Cho, D., "Development of Rapid Mask Fabrication Technology for Micro-Abrasive Machining," *International Conference on Smart Manufacturing Application*, pp. 363-366, 2008.
7. Yu, G., Lee, I. and Ko, T., "A Study on the Non-planar Mask Fabrication for Micro-abrasive Jet Machining," *Proc. of KSPE Autumn Conference*, pp. 215-216, 2009.
8. Yu, G., Lee, I. and Ko, T., "The influence of laser beam scanning patterns on the mask fabrication for micro-abrasive jet machining," *22nd International Microprocesses and Nanotechnology Conference*, 2009.
9. Kim, Y., Lim, J., Lee, I. and Kim, H., "Photopolymer Solidification for Inclined Laser Exposure Conditions," *Solid Freeform Fabrication Symposium*, 2009.
10. Lorenzen, W. E. and Clin, H. E., "Marching Cubes: A High Resolution 3D Surface Construction Algorithm," *Computer Graphics*, Vol. 21, No. 4, pp. 163-169, 1987.
11. McNamara, B. P., Cristofolini, L., Toni, A. and Taylor, D., "Relationship between bone prosthesis bonding and load transfer in total hip reconstruction," *Journal of biomechanics*, Vol. 30, No. 6, pp. 621-630, 1997.
12. Montani, C., Scateni, R. and Scopigno, R., "Discretized marching cubes," *IEEE Proceedings Visualization 94 Congress*, pp. 281-287, 1994.
13. Kim, H., Bae, Y., Keon, K., Seo, T. and Lee, S., "Development of 3D Modeling Technology of Human Vacancy for Bio-CAD," *Journal of the KSPE*, Vol. 26, No. 12, pp. 138-145, 2009.
14. Kitware Inc., <http://www.vtk.org>