

마이크로 전기·화학 복합형상 제거시스템

이희원*, 국경훈, 김기원, 김태곤, 유병한, 정재원, 한민섭, 정영훈, 민병권, 이상조
(연세대학교 기계공학부)

Microfactory for Electro-Chemical Machining

H.W.Lee*, K.H.Kook, K.W.Kim, T.G.Kim, B.H.Ryu, J.W.Jung, M.S.Han, Y.H.Jung
B.-K.Min, S.J.Lee (School of Mechanical Engineering, Yonsei University)

Abstract

Microfactory is effective method for machining micro size component. Electro-chemical machining can be more suitable to a microfactory than other machining methods in terms of maintaining high accuracy. Surface profile of EDM Machined component is predicted by micro EDM simulation using superpositioning spark crater. Planar motor and micro pump are developed to construct microfactory system.

Key Words : 마이크로 팩토리, 방전가공 시뮬레이션

1. 서론

현재 미세부품이 일반적으로 대형의 생산시스템을 미세한 단위로 제어하여 생산되기 때문에 그 정밀도와 효율성에서 문제점을 나타낸다. 일례로, 시계 생산에 필요한 작은 부품들은 대부분 1mm 정도의 크기에 수 mg의 무게밖에 되지 않으나 이들을 가공하고 조립하는 시스템은 수십 m의 길이에 수백 kg의 가공장비와 로봇으로 구성된다. 대형 생산시스템은 고속, 고효율을 필요로하는 대량 생산에는 유리할 수 있으나, 다품종 소량화의 추세로 가속되어가는 산업 트렌드에는 적합하지 않다. 따라서 생산시스템을 소형화하는 것이 시장과 제품 생산의 공간적 시간적 차이를 없애므로써 시장의 요구에 부합하는 방법이 될 수 있다.

마이크로 팩토리는 생산 시스템의 새로운 개념이며 이를 통해 생산활동에 소요되는 공간, 에너지 및 자원을 획기적으로 절감할 수 있으리라 기대되는 산업분야이다. 마이크로 팩토리를 이용하여 생산할 수 있는 미세부품의 용도는 자동차, 항공, 정보통신, 바이오, 전자 등에서 소비재 부품에까지 그 응용분야가 다양하다. 현재 미세부품이 일반적으로 대형의 생산시스템을 미세한 단위로 제어하여 생산되는 반면에, 개발하고자 하는 마이크로팩토리는 기존의 생산시스템보다 훨씬 작은 치수의 생산유닛을 이용하여 부품을 가공하는데 차이가 있다. 또한, 생산장비의 소형화는 생산기계의 크기에 비례해서 발생하는 오차 (예: 열변형)를 최소화시키며, 초미세 부품의 생산에 필요한 환경제어 (예: 청정실)에 드는 비용을 최소화 시키는 장점이 있다.

* 주저자, 연세대학교 기계공학부 (donkyho@yonsei.ac.kr)
주소: 120-749 서울시 서대문구 신촌동 134

본 연구에서는 마이크로 팩토리와 관련하여 전기화학가공을 위한 모듈을 설계하고 그에 관한 연구를 진행하고 있다.

2. 전기화학가공 마이크로 팩토리

마이크로 팩토리를 통하여 이러한 목적을 달성하려면 초소형화, 저동력화, 자동화의 세 가지 요소가 필요하다. 동시에 일정한 수준의 정밀도를 유지하는 등, 프로세스 성능의 저하가 없어야 한다. 작은 제품을 만들기 위해서는 공구와 지그 등이 작아야 하는데 통상의 가공 프로세스를 경우 공구의 소형화가 진전 될수록 강성은 저하된다. 따라서 공구와 피가공물 간에 직접적인 접촉이 없는 방전가공(Electro-discharge machining, EDM)이나 전해가공(Electro-chemical machining, ECM)이 소형 제품을 제작하는데 유리하다. 뿐만 아니라 일반적인 기계 가공 프로세스가 주재료를 선택적으로 제거(material removal) 해 나가면서 제품을 성형해 가는 특징을 갖는 반면에 방전 및 전해 가공은 전기화학적 반응원리를 응용하여 제거뿐 아니라 적층(material deposition)도 가능하다는 또 다른 이점이 있다. 기계적 가공법에 비해 소모 동력도 적어 선삭, 밀링 등을 이용하여 가공할 수 없는 부품 가공에 마이크로 팩토리 모듈로서 적용될 수 있다.

전기화학적 원리에 의한 가공시스템 기술은 이미 초정밀 금형산업에 있어서 중요한 위치를 구축해왔다. 방전가공은 금형가공으로서, 전해가공은 난삭재의 초정밀 고품위 금형연마로서 주로 활용되어왔다. 이러한 기존의 가공기술을 축소함으로써 초미세 기계금형은 물론 각종 마이크로 시스템 디바이스 제작 기술에 적용할 수 있다. 미세방전 및 미세전해 프로세스를 통해서 잉크젯헤드, 정보저장장치의 자기헤드, 인체용 의용기구, 가속도계, 압력센서 등의 완성도 높은 시장에 진입할 수 있는 부품을 생산할 수 있을 뿐 아니라 약물전달시스템, 유량센서, 마이크로 모터/기어 등과 같이 성장 가능성이 큰 제품 생산에도 응용될 수 있다.

따라서, 본 연구에서 제안하는 마이크로 팩토리를 위한 초소형 전기·화학 복합형상 제거 시스템 기술은 자원, 에너지, 공간을 크게 절감하고 전기화학적 재료 제거 및 증착 기술을 통하여 첨단제품의 수급에 민첩하게 대응할 수 있는 실용적인 가공장치를 개발하고자 하는 것이다.

미세전기화학 복합형상가공시스템, 즉 방전 및 전해 시스템을 미세화 복합화한 기술은 다양한 수요가 있는 구멍가공에서 뛰어난 능력을 보이고 있다. 또한, 본 연구에서 개발될

미세방전을 응용하여 재료뿐 아니라 재료를 쌓아서 구조물을 만드는 재료제거와 증착의 복합공정은 재료 제거공정으로는 이루어질 수 없으며 기존의 공정보다도 강력한 미세제작기술(micro fabrication technique)이 될 수 있다. 마이크로 팩토리에 있어서 가공기의 크기가 축소됨에 따라 기기의 강성이 저하될 수 있는 문제점이 있으나 전기화학에 의한 방법은 그러한 문제를 유발하지 않으며 소요동력이나 환경적인 면에서도 우수한 것으로 알려져 있다. 그러므로 마이크로 팩토리 개발에 있어서 미세전해 및 미세방전기술은 효과적인 방법으로 제시될 수 있다.

3. 방전가공 시뮬레이션

방전가공은 기본적으로 3 단계의 과정으로 모델링 될 수 있다. 첫 번째 단계는 공작물과 전극의 간격과 기하학적 형상, 전압에 의해서 전계가 집중되어 절연체의 절연강도를 초과하면 절연체가 이온화 되어 방전이 시작되는 단계이다. 그 다음 전극과 공작물이 통전이 되어 플라스마 채널이 형성되면서 열에너지에 의하여 공작물이 용융 증발이 발생한다. 마지막 단계로 플라스마 압력에 의하여 공작물의 용융된 부분이 가장자리로 소성 변형하면서 크레이터를 형성하게 되며, 이 크레이터는 그 다음 방전의 시작점이 된다.

본 연구에서는 범용 유한요소 해석 패키지인 ANSYS를 이용하여 단발 방전 과정을 시뮬레이션 하였다. 먼저 시간에 따른 플라스마 채널의 반경을 모델링 하였고, 가우스 분포를 가지는 열원을 모델링 하여 공작물의 온도를 계산하였다. 여기서 온도에 따라 용융 및 증발 부분을 찾게 되고, 증발온도 이상이 되면 재료 증발에 의해 재료가 제거된다. 구조해석을 통하여 공작물의 온도에 따른 점성 등을 고려하고 가우시안 분포의 압력을 공작물에 적용하여 크레이터 형상을 시뮬레이션 하였다. 단발 방전 때 발생 하는 전압과 전류 파형을 검출하여 플라스마가 발생할 때의 에너지를 측정하였고, 공작물의 형상을 3차원 광간섭기로 측정하여 시뮬레이션 결과와 비교하였다.

방전시에 발생하는 플라스마는 시간에 따라 지름이 변하는 원통형으로 모델링하였다. 플라스마의 지름의 변화는 플라스마가 발생하는 동안의 전류의 변화를 측정하여 모델링 하였다. 이때의 열원은 가우스 분포의 형태로 모델링하였다. Fig.1 과 같이 공작물의 중심부에 피크 열유속을 가지면서 가장자리로 갈수록 감소하는 열원의 형태를 가지고 있다. 열원의 유효직경은 플라스마 직경으로 모델로 하였다. 플라스

마의 압력은 열원과 같은 분포를 가지고 있으며 직경 역시 열원과 같은 크기를 가지며 플라즈마 모델을 따라 시간에 따라 직경이 달라진다.

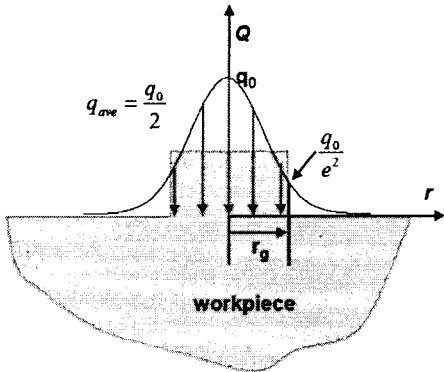


Fig.1 Heat source model with Gaussian distribution

시뮬레이션에 사용한 재료는 구리와 NAK80이다. 구리는 방전 가공에서 전극으로 많이 사용되는 재료이고, NAK80은 방전 가공이 많이 쓰이는 금형에 사용되는 재료이다. 각각의 재료 물성치와 위의 열원 모델과 압력 모델을 이용하여 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션은 3단계로 진행하였다. 먼저 열원 모델을 이용하여 온도 분포를 구하는 과정과 그 다음 온도분포에 따라 용융된 부분에 압력을 가하여 변형시키는 단계, 마지막으로 전기장 해석을 이용하여 다음 방전이 일어나는 곳을 찾는 단계로 진행하였다.

유한요소법에 의한 온도 해석 결과를 Fig.2 에 나타내었다. 열원에 의해 증발, 용융층 등을 나타내었다. 순수한 철의 증발온도는 약 3000K 이고 녹는점의 온도는 1800K 이다. 그 림에서 용융층의 두께는 3 μ m 정도 이다. 크레이터 형상을 시뮬레이션 하기 위하여 증발 온도 이상이 되는 공작물은 기화 되어 제거된다고 가정하고, 최고점의 온도는 방전시작시간부터 종료까지 약 5000K~6000K를 유지하므로 최대 증발 압력을 500bar로 가정하였다. 500bar의 기압이 열원과 같은 가우시안 형태로 공작물에 주어졌다고 했을 때 용융부분이 위로 밀려난 것을 예측할 수 있다. Fig.3 은 방전종료시 용융된 부분이 크레이터를 형성한다. 중심부에서는 최대 압력이 가해져서 용융부분이 옆으로 밀려나가고, 가장자리에서는 압력이 급격히 감소하므로 용융부분이 위로 밀리게 된다.

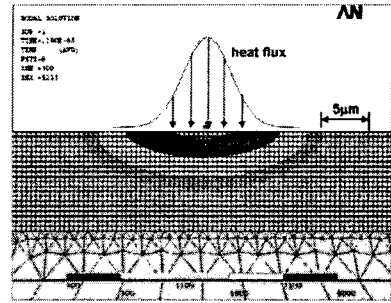


Fig.2 Temperature distribution simulated using field analysis

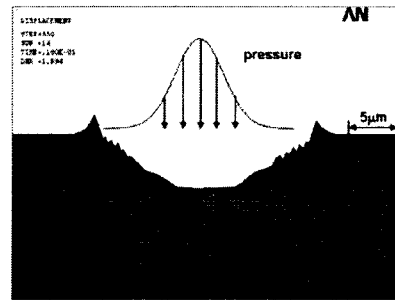


Fig. 3 Simulation of crater shape

시뮬레이션 결과와 실제 결과를 비교하기 위해 단발 방전을 시뮬레이션과 동일한 시편에 일으켰다. 단발방전 결과 생긴 크레이터는 Fig. 4와 같다. 그리고 Fig. 5는 실험에 의해 생성된 방전 가공표면과 시뮬레이션에 의해 얻어진 가공 표면을 비교한 것이다. 이를 통해 시뮬레이션에 의해 얻어진 크레이터의 형상은 실제보다 더 작고 깊게 만들어진 것을 알 수 있다. 이는 열원과 압력의 분포가 중심부에 집중하는 가우시안 형태를 취했기 때문이다. 시뮬레이션 된 방전 크레이터가 실제 형상과 거의 비슷하므로 방전 과정이 적절히 모델링되었음을 알 수 있다.

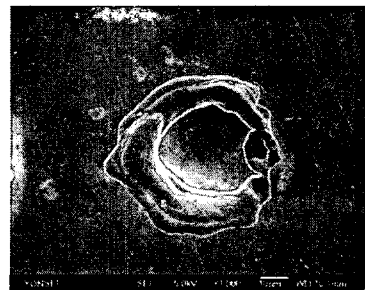


Fig. 4 SEM image of single crater

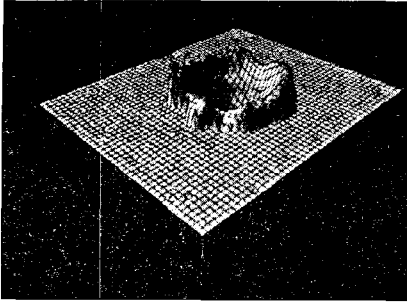


Fig. 5 3D image of single discharge crater

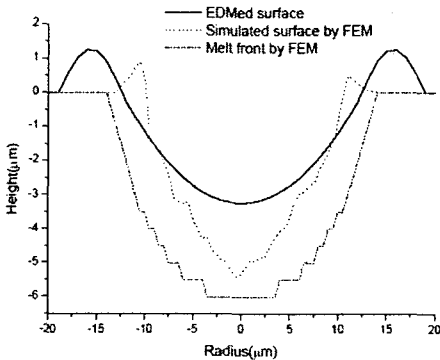


Fig. 6 Comparison between experiment and simulation

4. 마이크로 팩토리 시스템의 개발

4.1 마이크로 팩토리의 이송시스템 개발

마이크로 팩토리에서는 가공을 위한 여러 이송 행정들이 수행된다. 축소된 공간상에서 효율적인 공정간의 이송을 위하여 평면 이동이 가능한 평면 리니어 모터(surface linear motor)를 사용하여 마이크로 팩토리의 공정 이송의 관한 연구를 진행하고 있다. Fig. 7은 구성하고자 하는 마이크로 팩토리의 기본 개념을 표현한 그림으로 평면리니어 모터를 사용하여 팩토리의 이송계를 구현하는 것을 제시한다.

사용하는 평면 리니어 모터는 하나의 XY스테이지에서 두 개의 리니어 스텝 모터를 이용하여 XY의 평면 이동을 한다. 바닥면과는 공압에 의한 에어베어링을 형성하여 바닥과의 마찰력을 제거하고 모서리 두 곳에 원점 센서가 부착하여 위치 초기화를 할 수 있도록 하였다.

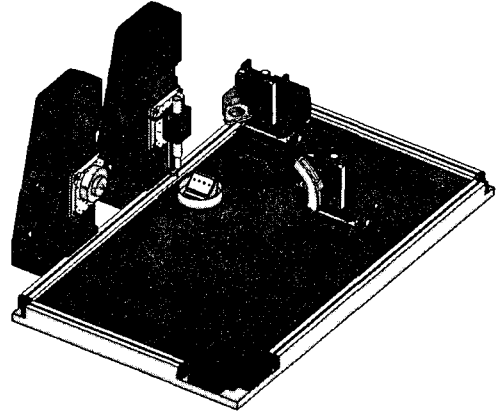


Fig. 7 Conceptual design of microfactory for electro chemical machining

아래의 Fig. 8, 9는 실험중인 평면 리니어 모터로서 전체 시스템의 구성을 위한 테스트베드로 활용하고 있다. 두 개의 리니어 모터를 운용하고 제어하는 기술을 확보하여 추후에 구성 될 마이크로 팩토리 시스템에 응용할 수 있을 것이다.

마이크로 팩토리에서 평면 리니어 모터는 정밀한 이송보다는 각 공정간의 원활한 이동을 위해서 사용된다. 하지만 사용하는 평면 리니어 모터는 반복정밀도가 떨어지기 때문에 추가적을 외부에서 이송 정밀도를 보장할 수 있는 시스템이 필요하다.

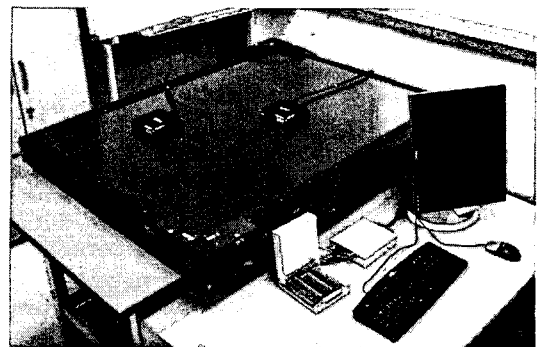


Fig. 8 Testbed for surface linear motor

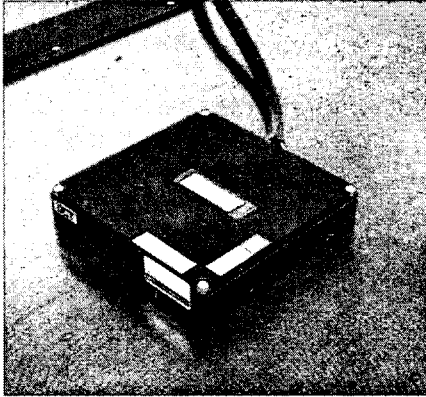


Fig. 9 Surface linear motor

복수대의 컴퓨터 비전 시스템을 이용하여 공정의 진행상황을 모니터링하고 오픈 루프로 제어하는 평면 모터의 정밀도를 높이기 위해 비전기반의 피드백 시스템을 개발하고 있으며 PSD를 이용하여 평면 모터에서 보장하지 못하는 위치 오차를 줄이려는 연구가 진행 중이다. 실제 구현하려는 시스템에서는 평면 리니어 모터와 더 정밀한 스테이지의 조합으로 가공을 위한 운동을 구현하려고 한다.

4.2 마이크로 방전 가공을 위한 펌프제작

마이크로 방전가공에서는 전해액이 방전현상을 유도하는 주요한 변수 중의 하나이다. 따라서 전해액을 일정하게 공급하고 제어할 수 있는 시스템이 필요하며 마이크로팩토리에 적용하기 위하여 소량의 용액을 제어하는 소형 펌프 및 순환 장치의 개발이 필요하다. 또 증착 공정 기술 구축의 일환으로 메탈파우더의 공급 시스템 제작이 필수적이고 이에 소형 펌프 및 유체/분말 공급장치의 개발에 관한 연구가 본 연구에서도 진행되었다.

방전가공 중에 증착을 목적으로 공급되어지는 파우더의 특성은 비중이 큰 메탈 파우더로 용액과 혼합 시 침전되며, 전도성이 있어서 자석에 반응하게 된다. 이 때문에 일반적으로 사용되는 펌프로는 이 혼합용액을 일정한 농도로 유지하기 어려운 점이 있어서 높은 rpm의 모터를 사용하여, 용액과 파우더를 골고루 섞어줌으로써 일정한 농도의 혼합용액을 만들어주었다. 기존의 펌프 시스템에서 팬 부분에 파우더가 달라붙는 문제점을 스크루를 이용한 펌프 방식을 채택함으로써 해결할 수 있다.

전체적인 파우더 공급 장치의 구성은 두 개의 소형 모터와

회전 막대, 파우더를 이송시키는 스크루 부분으로 구성되어 있다.

실제 구성되는 시스템에 적용하기 위해서는 유량을 제어하고 계측할 수 있는 기능이 첨가되어야 하고 또 복합적인 가공시스템의 구축을 위해서 여러 가지 유체/분말 등을 선택적으로 공급할 수 있는 시스템이 구현되어야 하며 이에 연구가 계속 진행되고 있다.

아래의 Fig. 10은 구현하고자 하는 유체/분말 공급시스템의 개념도이다. 각각의 필요한 여러 가지 유체/분말에 따라 독립적으로 공급 시스템이 구성되어야 하며 Fig. 11은 이 프로토타입으로 개발 중인 펌프의 형태이다. 800 RPM 으로 회전하며 5~10 ml/min 의 케로신-메탈 파우더 용액을 공급하도록 설계되어 있다.

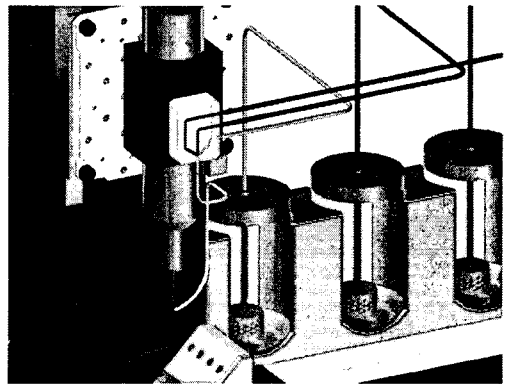


Fig. 10 Conceptual Design for fluid supply system

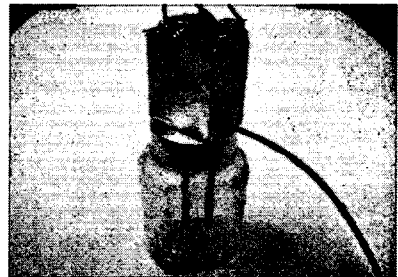


Fig. 11 prototype of fluid supply pump

5. 결론

전기화학을 이용한 마이크로 팩토리는 기존의 절삭가공에 비해서 강성의 문제가 적고 더 정밀한 가공을 가능하게 하므로 그 필요성이 대두되고 있다. 이를 위해서 기본적으로 방

전가공의 특성을 이해하고 가공성능을 예측하기 위한 시뮬레이션의 연구가 진행되었다.

단발 방전 프로세스를 유한요소법으로 모델링하여 공작물의 온도분포를 예측하였고 플라즈마 압력을 가하여 크레이터 형상을 시뮬레이션 하였다. 이렇게 시뮬레이션 된 크레이터를 실제 단발방전을 일으킨 크레이터와 비교함으로써 시뮬레이션을 검증하였다.

시스템의 구성을 위하여 이송장치로 고려하고 있는 평면 리니어 모터를 제어하고 운용하는 연구를 진행하고 있으며 방전/증착 가공을 위한 유체/분말 공급시스템의 개발에 관한 연구도 진행되고 있다.

후 기

본 연구는 산업자원부 산업기술개발사업인 “마이크로 전기 화학 복합형상 제거 시스템 개발” 연구비 지원으로 이루어 졌습니다.

참 고 문 헌

- (1) T. Masuzawa , "State the Art of Micromachining," CIRP, Vol. 49/2, pp. 473-488, 2000
- (2) Z.Y. Yu, T. Masuzawa, "Micro-EDM for Three -Dimensional Cavities-Development of Uniform Wear Method," CIRP, Vol. 47/1, pp. 169-172, 1998
- (3) R. Snoeys, F. Van Dyck / J. Peters, "Investigations of EDM operations by means of thermo-mathematical models," Annals of CIRP, Vol. 20/1, p. 35-36, 1971
- (4) Daryl D. Dibitono, Philip T. Eubank, "Theoretical model of the electrical discharge machining process I. A Simple Cathode erosion model," Journal of Applied Physics, Vol. 66, pp. 4095-4103, 1989
- (5) A. Erden, F. Arinc and M. Kogmen, "Comparison of Mathematical Models for Electric Discharge Machining," J. of Materials Processing & Manufacturing Science, Vol. 4, pp163-175, 1995
- (6) S. T. Jilani and P. C. Pandey, " Analysis and modeling of EDM parameters," Precision Engineering, Vol. 4/4, pp215-221, 1982
- (7) V. Yadav, V. K. Jain and P. M. Dixit , "Thermal stresses due to electrical discharge machining," Int. J. of Mach.

- Tools and Manufacture, Vol. 42/8, pp. 877-888, 2002
- (8) S. Das, M. Klotz and F. Klocke "EDM simulation: Finite element-based calculation of deformation, microstructure and residual stress," J. of Material Processing Technology Vol. 142/2. pp. 434-451, 2003
- (9) DongKil, Kim, "Electrical Discharge Machining Mechanism Analysis and Simulation using Finite Element Method " Ph. D. thesis, Yonsei University, 2004.8