

상용유한요소 코드를 이용한 연마재 워터젯 절단 공정 해석 Finite Element Analysis of Abrasive Waterjet Cutting Process by Using Commercial Code

*박강수¹, 정해영², 배원병³, #신보성³

*K. S. Park¹, H. Y. Jeong¹, Y. B. Bae², #B. S. Shin³(bosung@pusan.ac.kr)

¹부산대학교 기계공학부 대학원, ²부산대학교 기계공학부, ³부산대학교 ERC/NSDM

Key words : Abrasive waterjet, Cutting process, Finite element, PCB

1. 서론

연마재 워터젯(Abrasive waterjet 이하 AWJ)의 가공원리는 고압의 물이 포커싱 노즐을 통과하는 과정에서 생기는 압력차를 이용해 연마재를 유입한 뒤, 노즐의 중심부로 집중시켜 소재에 고압으로 분사 가공하는 것이다. 이러한 AWJ는 유해가스 없이 가공이 가능하며, 제품의 실재 및 재료 변경이 유연하고, 동일한 공구로 천공 및 절단이 가능하여 가공 시간과 절단 비용을 줄여주는 등 여러가지 장점이 있다. 그 중에서 다른 가공법과 특히 비교되는 점은 발열을 수반하지 않아 열로 인한 변형, 변성, 가스화가 일어나지 않아 열에 약한 물질의 가공에 매우 유리하다는 점이다. 그리고 최근에는 0.1 ~ 1.0mm의 노즐과 수십 um의 연마재 개발로 마이크로 단위의 미세가공 실현을 위해서 많은 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁾⁽²⁾

최근 첨단 IT 분야의 기술발전으로 고성능화와 함께 제품의 소형화가 가능해지고 있다. 이러한 고성능화 및 소형화는 현재 급속히 발달하는 PCB(Printed circuit board) 핵심 가공 기술로서 대두 되고 있다. 이러한 PCB의 기존 절단 기술로는 프레스 금형과 레이저를 주로 사용하고 있다.⁽³⁾ 하지만 이러한 가공법은 열변형 및 가공 정밀성의 한계 등으로 PCB 발달에 미치지 못하고 있는 실정이다. 이러한 기존 가공의 결점을 보완하기 위한 기술로서 AWJ를 본 논문에서 연구하게 되었다.

즉, 국내외에서 연구가 이루어 지고 있으나 양산 체제에는 많은 문제점이 대두되고 있다.⁽⁴⁾ 이러한 기술한계를 벗어나 마이크로 워터젯(Micro waterjet) 개발을 위한 기초연구 단계로 본 논문에서는 AWJ를 통해 미세 정밀 가공 기술을 확보하고 이를 검증하기 위하여 상용유한코드인 ABAQUS 6.6을 이용하여 절단공정을 시뮬레이션하고, 실험 결과와 비교 분석하였다.

2. 이론적 배경

충돌해석에서는 에너지 보존의 법칙으로부터, 무게가 W인 물체가 h만큼의 높이에서 자유낙하 될 때, 무게 W인 물체의 위치에너지 손실과 구조물의 변형에너지는 같다는 가정하에 해석하며, 식 (1)과 같이 나타낸다.⁽⁵⁾

$$W(h + \delta_{im}) = \frac{\delta_{im}^2}{2\delta_{st}} W \quad (1)$$

여기서, δ_{im} 은 최대 변형량이고, δ_{st} 은 정하중에 의한 변형량을 나타낸다.

일반 적으로 두 물체 간의 상호작용을 적용하기 위해서 “Small-sliding”과 “Finite-sliding” 등 두가지 방법이 있으며, 보다 정확한 해석을 위해서 본 논문에서는 “Finite-sliding” 방법을 사용하였다. 이러한 해석을 하기 위한 입력조건에는 물체의 물성치와 응력-변형률 외에도 시간과 속도, 가속도를 알아야 되며, 식 (2), (3), (4)와 같이 나타낸다.

$$\dot{h} = -n \cdot (x_A - x_C - r) \quad (2)$$

$$\dot{h} = -n \cdot (x_A - x_C - \phi_C \times r) \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \ddot{h} = & -n \cdot (\ddot{x}_A - \ddot{x}_C - \ddot{\phi}_C \times r) + n \cdot \dot{\theta}_C \cdot r \cdot \dot{\theta}_C \\ & - n \cdot \dot{\phi}_C \cdot r \cdot \dot{\phi}_C - (x_A - x_C - \phi_C \times r) \cdot \\ & (\dot{\phi}_C \times n + \frac{\partial n}{\partial S\alpha} t_\alpha \cdot (x_A - x_C - \phi_C \times r)) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 h는 두 물체 사이의 거리이며, \dot{h} 와 \ddot{h} 는 각각 속도와 가속도이다. A와 A'는 두 물체가 만나는 각각의 점이며, n은 “Overclosure”을 나타낸다. 그리고 x_A, x_C 는 점 A와 점 C의 현재 좌표를 나타내며, r은 점 C에서 A'까지의 벡터를 가리키며 여기서 점 C는 Rigid body reference node를 말한다.⁽⁶⁾

그리고, 두 물체간의 충돌 후 유한 요소의 파단조건은 Drucker-Prager/Cap model에서와 같이 식(5)(6)과 같다.⁽⁷⁾

$$F_s = t - p \tan \beta - d \quad (5)$$

$$F_t = \sqrt{(P - P_\alpha)^2 + [t - (1 - \frac{\alpha}{\cos \beta})(d + P_\alpha \tan \beta)]^2} - \alpha(d + P_\alpha \tan \beta) \quad (6)$$

여기서 F_s 는 파괴곡면(Shear failure)이고, F_t 는 변이표면(Transition surface)을 나타낸 식이다. P는 압력, P_α 는 소성변형률(Volumetric plastic strain), α 는 전단파괴되는 표면과 Cap 사이의 변화율을 나타낸다. 그리고 t는 축차응력(Deviatoric stress measure), β 는 두 물체간의 마찰(Friction)과 결합력(Cohesion)간의 각도, d는 결합력을 나타낸다.

3. 실험방법 및 결과

본 논문에서 사용된 워터젯 장비는 작업테이블(CNC table), 펌프부(Pump unit), CNC 컨트롤러등 3부분으로 나뉘어 있으며, 장비사양은 최대 압력 410Mpa, 최대토출유량 3.8 l/mm, 최대 가공속도 15,000mm/min의 연마재 워터젯을 사용하였다. 실험은 가장 정밀한 가공에서 확인하기 위하여 약 60um 크기의 가넷(Gamet)을 연마재로 사용하였으며, 500um 직경의 노즐을 사용하였다. 실험 시편으로는 PCB의 주요 소재로 사용되고 있는 PPG(Glass F/Epoxy)와 구리(Copper)로 이루어진 450um 두께의 복합층을 사용하였으며 물성치는 Table 1과 같다. 실험은 이격거리 1.0mm, 압력 200MPa로 복합소재를 가공하였다.

Fig. 1은 AWJ를 이용하여 복합층에 가공한 부분을 SEM을 이용하여 촬영한 것이다. 그 결과 평균 직경 약 20um, 깊이 약 5um의 가공 홈을 확인하였다

Table 1 Mechanical properties used for FE analysis

| Material | Young's modulus(GPa) | Poisson's ratio | Density (kg/m ³) |
|---------------|----------------------|-----------------|------------------------------|
| Glass F/Epoxy | 3.5 | 0.28 | 1940 |
| Copper | 117 | 0.35 | 8500 |

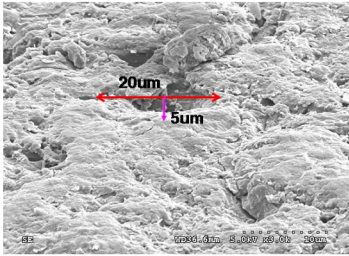


Fig. 1 SEM photo of PPG surface processed by AWJ

4. 유한요소해석 방법 및 결과

유한요소 해석으로 실제 실험결과와 비교 분석하기 위하여 ABAQUS 6.6 을 이용하였다. 연마재는 직경 60um 의 강체(Rigid body)로 모델링 하였고, 가공시편(Plate)은 두께 450um 의 변형체(Deformable body)로 하였다. 동역학 해석을 위해 변형체의 기계적 물성치는 PPG 와 구리를 사용하였다. 그리고 경계 조건은 Fig. 2 와 같이 연마재가 1000 ms/s 의 속도로 가공시편 방향으로 충돌하도록 해석 모델을 구축하였다. 여기서 속도는 CFD 해석 결과를 참고하였다.⁽⁸⁾ 그리고 Table 2 와 같은 구리의 응력-변형선도를 사용하고, 연마재와 가공시편의 충돌해석은 "Finite-sliding" 방법을 사용하였으며, 파손(Failure)이 일어나는 조건으로 2D 형식으로 해석하였다

Fig. 3 은 경계조건에 따라 마이크로사이즈의 고속 강체를 복합층에 충돌시킨 후 변형(Strain)에 대한 해석결과를 나타낸 것으로 직경 약 25um, 깊이 약 5um 의 홀이 생겼다. 실제가공 시편과 비교하면, Table3 과 같이 직경(x 방향)은 약 5um 의 오차가 발생하였고, 깊이(y 방향)는 1um 의 오차가 발생하였다. 상대오차는 각각 25%와 20%가 발생하였고 여기서, 상대오차는 시뮬레이션 해석과 실험결과의 차이를 백분율로 구한것이다.

이러한 상대오차가 발생하는 이유는 크게 3 가지로 분류할 수 있다. 첫째, 연마재 형상의 차이로 실제 가공상에는 연마재의 크기와 형태가 일정하지가 않지만 해석조건에서는 직경 60um 의 일정한 구를 사용하였다. 둘째, 고압의 물에 의한 영향력이나, 연마재의 분산을 무시하였다. 셋째, 실제 가공상에서 연마재는 가공 각이 발생하지만 해석에서는 모두 수직으로 가공한 점 등이다.

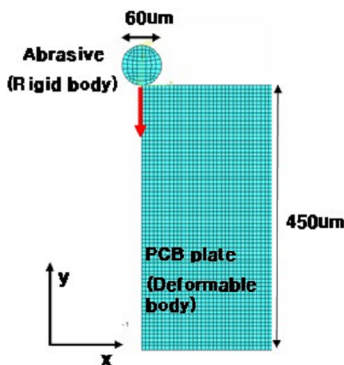


Fig. 2 Impact finite element model of abrasive micro-sphere and workpiece

Table 2 Stress-Strain diagram of copper

| Stress | Strain |
|--------|---------|
| 241.5 | 0 |
| 268.2 | 0.00075 |
| 282.0 | 0.00164 |
| 287.5 | 0.00260 |
| 290.3 | 0.01700 |

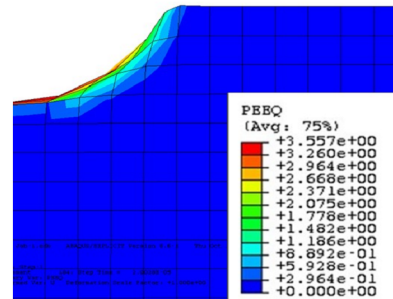


Fig.3 Simulation results of material process by single abrasive

Table 3 Comparison with experimental and analysis results

| Hole | Experimental | FEM | Error(%) |
|--------------|--------------|-----|----------|
| Diameter(um) | 20 | 25 | 25 |
| Depth(um) | 5 | 6 | 20 |

4. 결론 및 고찰

본 논문에서는 연마재 워터젯을 이용하여 가공시 고압의 연마재에 의한 가공성을 ABAQUS 6.6 을 이용하여 미세 연마재(Micro single abrasive)의 고속 충돌가공에 대한 해석을 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

첫째, 마이크로 단위의 미세한 소재에 대한 유한요소 해석 모델을 제시하였다.

둘째, 유한요소 해석결과 실제 가공값과는 약 20~25% 정도의 오차가 발생하였다.

본 연구에서 발생한 문제점을 보완하여 차후 개발 예정인 마이크로 워터젯(Micro waterjet)의 가공해석에 응용할 것이다.

참고문헌

1. 박강수, 박연경, 고정상, 신보성, "연마재 워터젯을 이용한 복합재 미세가공의 백화현상에 대한 연구", 한국공작기계학회, 2007. 9(Accept)
2. Brattberg, T., and Chanson, H., "Air entrapment and air bubble dispersion at two dimensional plunging water jets", Chemical Engineering Science, Vol. 53, No. 24, pp. 4133~4127, 1998
3. Miller, D. S., "Micromachining with abrasive waterjets" Journal of Materials Processing Technology, Vol. 149, pp. 37~42, 2004
4. Ryan, A., Lewis, H., "Manufacturing an environmentally friendly PCB using existing industrial processes and equipment", Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, Vol. 23, pp. 720~726, 2007
5. Werner, S., Robert, S. and Peter, E., "Elastoplastic phenomena in multibody impact dynamics", Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering, Vol. 195, pp. 6874~6890, 2006
6. "Finite-sliding interaction between a deformable and a rigid body", Section 5.1.3 of the ABAQUS Analysis User's Manual
7. "Drucker-Prager/Cap model for geological materials", Section 4.4.4 of the ABAQUS Analysis User's Manual
8. Liu, H., Wang, J., Kelson, N., and Brown, R. J., "A study of abrasive waterjet characteristics by CFD Simulation", Journal of Materials Processing Technology, Vol 153, pp 488-493, 2004