

FDTD방법을 이용한 엑시머 레이저 어블레이션 해석

최경현*(제주대 기계공학과), 배창현(부산대 대학원 기계공학과), 김동수(한국기계연구원),
이석희(부산대 기계공학과)

Analysis of Excimer laser ablation via FDTD method

C. H. Bae(Mech. Eng. Dept., PNU), K. H. Choi(Mech. Eng. Dept., CNU), D. S. Kim(IT MRC, KIMM)
S. H. Lee(Mech. Eng. Dept., PNU)

ABSTRACT

In this paper, an analytical laser ablation model with Maxwell equation will be addressed by considering relationship between laser ablation and material. The Maxwell equation consists of four equations: two Gauss laws for electric and magnetic fields, Faraday's law, and Ampere's law. This analytical model will be calculated by employing Finite Difference Time Domain (FDTD). This method also makes it possible to simulate the laser beam propagation in a wide range of materials, such as metals, semiconductors, and dielectrics. Therefore, in this study, a numerical model for short pulse laser interaction with materials is developed, focusing on the accurate description of laser beam propagation and ablation process into the material with each pulse.

Key Words : Laser ablation(레이저 어블레이션), Excimer laser(엑시머 레이저), FDTD(유한차분시간영역법),

1. 서론

레이저에서 발진되는 전자기 에너지는 가공부 표면에 도달하게 되면 전기적, 열적, 화학적, 기계적인 에너지로 변환되어 작용하게 된다. 특히 레이저 어블레이션은 전자적 여기, 결합파괴, 가열에 의한 화학적 분해, 제거, 증발 등의 여러 복잡한 프로세스가 복합적으로 작용하여 일어나게 된다. 이러한 어블레이션 기술에 사용되는 엑시머 레이저는 Ar, Kr, Xe 등의 희귀가스와 F, Cl과 같은 할로겐족 가스를 혼합하여 방전여기에 의해 발진되는 157-350nm 파장대의 자외선계열 레이저이다.

레이저 에너지는 대부분의 경우 물체에 흡수되면 열에너지로 변환된다. 그런데 Fig.1처럼 폴리머와 같은 재료는 물체 자체가 화학적 결합으로 구성되어 있으므로 이 경우 원자간의 결합에너지에 해당하는 만큼의 에너지가 공급되면 결합이 끊어지게 된다. 이와 같이 광자에 의해 화학적 결합의 파괴를 유도하여 재료를 제거하는 공정을 포토어블레이션이라고 하며 플라스틱이나 세라믹, 또는 피부 조직 등과 같은 재료를 대상으로 적용되고 있다.

C.Paterson은 마스크 투사에 의한 엑시머 레이저 마이크로가공의 수치적 모델을 제시하였다.[1] H.Gai는 레이저 어블레이션을 이용한 폴리머 표면의 가공을 시뮬레이션 하기 위한 컴퓨터 알고리즘을 디자인하였다.[2] 방세윤은 엑시머 레이저로 폴리머 소재를

어블레이션 가공해 준삼차원 형상의 미소구조물을 가공하는 과정을 예측하기 위한 모델링을 수행하였다.[3] 그러나 아직 레이저 어블레이션의 기본적인 물리 메카니즘은 명확히 밝혀져 있지는 않고, 여러 논문들에서 일치되지 않는 여러 견해들이 나오고 있다. 왜냐하면 실제 실험과 병행한 이론적이고 수치적인 작업이 거의 없기 때문이다. 대부분의 현재 알려진 사실들은 실험에서 얻어진 것들이다. 그러므로 물질과 레이저간의 상호 작용을 규명할 수 있는 수치적인 모델이 있다면 여러 현상을 이해하는데 큰 도움을 줄 것이다. 또한, 정확한 가공 형상을 예측할 수 있으므로 여러 가지 가공 조건들을 실제 가공 전에 결정 할 수 있을 것이다.

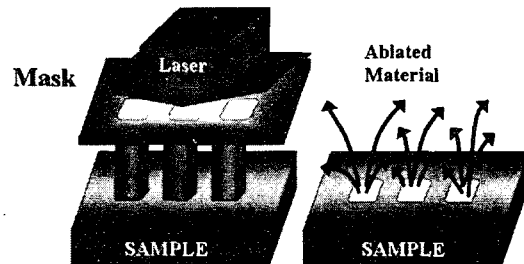


Fig1. Laser ablation process

본 연구에서는 물질과 레이저빔과의 상호작용을 위한 수치적 모델을 전개하려 한다. 유한차분시간영역

역법(FDTD)을 이용하여 맥스웰 방정식의 해를 구하려고 한다. FDTD는 전자기파의 지배 방정식인 Maxwell 방정식을 중심 차분 근사 하는 것을 제외하고는 어떠한 가정도 없이 직접적으로 그 해를 구하는 수치 해석적 방법으로 시간에 따른 전 공간의 모든 전자기장 성분을 알 수 있으므로 직관적인 해를 제시한다.

2. FDTD Method(유한차분시간영역법)

FDTD 방법은 미분형태의 Maxwell 방정식을 시간영역에서 차분법(finite difference method, FDM)을 적용하여 계산하는 수치해석 방법이다.[4] FDTD 방법은 1966년 Kane Yee에 의해 처음 소개되었는데, 전계와 자계의 벡터값을 시간 영역과 공간 영역에서 서로 반 격자만큼 어긋나도록 샘플링을 하여 Maxwell 방정식의 미분과 적분 형태를 표현했다. 미분형태와 적분형태의 시간 영역 Maxwell 방정식을 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$\nabla \times E = -\frac{\partial B}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times H = J_f + \frac{\partial D}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot D = \rho_f \quad (3)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (4)$$

여기서 E 는 전계(electric field), D 는 전속 밀도(electric flux density), H 는 자계(magnetic field), B 는 자속 밀도(magnetic flux density), J_f 는 전기 전류 밀도(electric current density), ρ_f 는 자유 전하 밀도(free charge density)를 나타낸다. 위 맥스웰방정식들을 FDTD방법으로 수치적으로 계산한다.

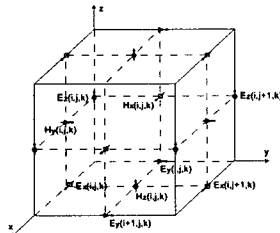


Fig 2. Yee Cell

FDTD를 위한 Yee 알고리즘은 Fig 2처럼 공간에 대한 Yee 격자를 만든다. 3차원 에서 각각의 모든 전기장 성분들은 4개의 자기장 성분들에 둘러 쌓여 있으며, 또한 각각의 모든 자기장 성분들은 4개의 전기장 성분들에 둘러 쌓여 있다. 이와 같이 Yee 격자를 구성함으로써 Faraday 법칙, Ampere 법칙, 두 개의 source-free Gauss 법칙, 그리고 격자와 격자의 경계면에서 전자기장 접선 성분이 연속이라는 경계 조건을 특별한 고려 없이 자연스럽게 만족시킬 수 있다. 이때 공간 미분항을 중심 차분식으로 표현하면 맥스웰 회전 방정식은 2차의 정확도를 가지는 유한 차분식

으로 바뀐다.

3. Simulation 및 결과

본 연구에서는 KrF 엑시머 레이저($\lambda=248\text{nm}$)를_HIT 소스로 가정하여 시뮬레이션하였다. 포커싱 된 레이저빔은 직경이 $50\mu\text{m}$ 이고 에너지는 $5\text{J}/\text{cm}^2$ 이다. 사용된 재료는 전기전도율이 $1\text{mho}/\text{m}$ 인 실리콘이 사용되었다. 위 조건으로 완전 정합층(PML) 흡수 경계 조건(ABC)을 이용한 FDTD법을 이용하여 시뮬레이션 하였다. Fig 3과 같은 각 위치별 가공 깊이를 구할 수 있다.

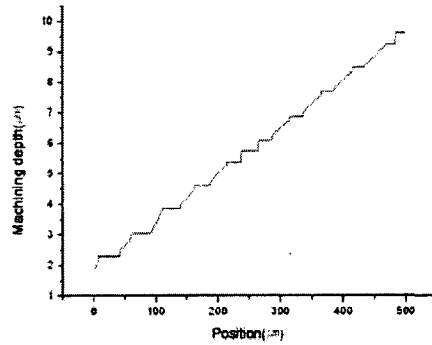


Fig 3. Section curve of the cavity

4. 결론

본 연구에서는 엑시머 레이저로 미소구조물을 가공하기 전에 실제 가공을 예측할 수 있는 시뮬레이션 프로그램을 FDTD 방법을 이용하여 개발하였다. 시뮬레이션 조건을 좀더 정확히 한다면 레이저 어블레이션을 이해하는데 더 큰 도움이 될 것이다.

후기

본 연구는 산업자원부의 중기거점사업 중 "디지털 3차원 실물복제기 개발" 과제의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

1. C.Paterson, A.S.Holmes, R.W.Smith, "Eximer laser ablation of Microstructures-A numerical model" Journal of Applied Physics Vol.86 NO11, 1999.
2. Huadong Gai and Gregory A. Voth, ", A computer simulation method for studying the ablation of polymer surface by ultraviolet laser radiation", Journal of Applied Physics 71(3), 1415-1420, 1992.
3. 방세운, 신귀성, 윤경구, 황경현, "레이저 어블레이션을 이용한 준삼차원 미소형상 가공 모델링", 2000 Proceedings of the 2nd Korean MEMS Conference pp.15-23.
4. K. S. Yee, "Numerical Solution on Initial Boundary Value Problems Involving Maxwell's equations in Isotropic Media," IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 14, pp. 302-307, 1966