

FEM 을 이용한 질화규소의 고온절삭특성 연구

A Study of High-Temperature Machining Characteristics of Silicon Nitride by FEM

*임세환¹, #이제훈¹, 신동식¹, 김주현²

* S. H. Lim¹, # J. H. Lee(jaholee@kimm.re.kr)¹, D. S. Shin¹, J. H. Kim²

¹ 한국기계연구원 지능형생산시스템본부, ² 국민대학교 기계자동차공학부

Key words : Laser-assisted machining, Silicon nitride, Cutting force, FEM

1. 서론

엔지니어링 세라믹(engineering ceramic)은 높은 고온강도, 내부식성, 내마모성 등 기계적 성질이 우수할 뿐만 아니라 비중이 낮아 제품의 경량화에 매우 유리하여 열기관, 베어링, 절삭공구, 금형, 바이오 등 다양한 분야에 적용되고 있다. 이러한 세라믹 재료는 경도가 높아 연삭(grinding)이나 다이아몬드 가공(diamond machining) 공정을 통해 생산되어 왔다. 이러한 공정은 높은 강성을 갖는 공작기계가 요구될 뿐만 아니라 공구마모율이 높고 재료제거율이(Material Removal Rate, MRR) 낮아 생산단가가 높아지는 단점이 있다. 이를 대체하기 위한 공정으로 Laser-Assisted Machining (LAM)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.¹⁻⁵

LAM 은 Fig. 1 과 같이 시편의 상단에서 레이저빔에 의해 가열되고 하단에서 CBN 인서트에 의해 절삭가공이 이루어진다. 이때 레이저빔 출력이 증가함에 따라 절삭부(material removal area)의 온도상승으로 재료의 연성이 증가하게 되므로 절삭력과 공구마모가 감소하는 효과를 얻을 수 있다. 선삭가공의 파라미터가 변화할 경우에는 레이저빔의 조건 역시 복합적으로 변화한다.³ 예를 들어 절삭속도를 증가시킬 경우 시편의 회전속도가 증가하게 되어 레이저빔이 조사된 후 절삭부에 도달하는 시간이 감소하며, 이송속도가 증가할 경우 시편에 축적된 에너지가 감소함에 따라 절삭부의 온도가 감소한다. 절삭깊이가 증가할 경우에는 시편의 반경방향 온도차로 인해 절삭부의 온도가 감소하게 된다. 이러한 복합 파라미터의 영향으로 인해 실험 위주의 연구만으로는 가공조건의 선정에 어려움이 따른다.

본 연구에서는 질화규소의 칩형성 과정에 대한 유한요소해석을 통해 복합 파라미터의 영향 분석을 수월하게 하고 다양한 조건에 신속히 대응할 수 있는 기반을 마련하고자 한다. 유한요소해석은 온도에 따른 물성변화를 고려하기 위해 점소성 구성방정식을 사용하였으며, 칩형성 과정 모델에는 adaptive remeshing 기법을 사용하였다.

2. 유한요소모델

Fig. 2 와 같이 유한요소모델을 생성하였다. 시편을 구성하는 요소의 크기는 가로, 세로 모두 0.025mm 이며 전체 크기는 가로 0.35mm, 세로 0.1mm 이다. 절삭 길이는 총 0.25mm 이며 800 개의 스텝으로 나누어 매 스텝마다 updated Lagrangian formulation 을 기반으로 하는 adaptive remesh 를 실시하였고 이때 시편요소의 최소 크기는 0.002mm 로 설정하였다. 공구와 시편의 접촉에는 마찰력이 시편재료의 전단강도 이내로 제한되는 전단 마찰 (shear friction) 모델을 사용하였고 마찰계수는 0.3 으로 가정하였다. CBN 인서트는 열적 특성을 고려하지 않고 탄성계수 710GPa, 포와송비 0.15 만을 고려한 선형탄성모델로 가정하였다. 실험에 사용된 절삭공구는 대구텍(주)의 CNMA 120408 LN TB650 모델로 외경가공에 널리 사용되는 선삭용 인서트로서 음의 경사각을 가지며 노즈반경(nose radius)은 0.8mm, 절삭날 반경은 0.016mm 이다. 노즈반경의 영향으로 절삭 시 발생하는 칩의 폭(width)는 절삭깊이(depth of cut)보다 크고 미변형칩두께(undeformed chip thickness)는 이송속도(feed rate) 보다 작은 값을 갖는다. 따라서 칩의 폭을 절삭

부의 실제 접촉면 길이로 고려하고 이에 상응하는 미변형 칩두께를 계산하여 유한요소모델을 생성하였다. Fig. 2 우측 상단의 절삭날 형상과 같이 CBN 등의 세라믹 공구는 절삭날 끝단에 응력집중을 예방하기 위해서 챔퍼(chamfer)가 형성된다.⁶

LAM 에 대한 유한요소해석을 위해서 질화규소의 열-기계적 특성(thermo-mechanical characteristic)을 표현하는 점소성 구성방정식(viscoplastic constitutive equation)을 사용하였고, Lei, S. 등에 의해 다음과 같이 제안되었다.^{4,5}

$$\sigma = \sigma_0 \left(1 + \frac{\epsilon}{\epsilon_0}\right)^n \left[\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}_0}\right]^m \exp\left(\frac{mQ}{RT}\right) \quad (1)$$

여기서 변형경화지수 n 은 0.3 이며 점성지수 m 은 0.061 이다. 질화규소의 활성화 에너지(activation energy) Q 는 800kJ/mol 이며, 보편기계상수(universal gas constant) R 은 8.31447J/mol · K 이다. 기준이 되는 응력, 변형률, 변형률 속도는 실험 측정치와의 비교를 통해 각각 $\sigma_0=50MPa$, $\epsilon_0=1$, $\dot{\epsilon}_0=10^4s^{-1}$ 로 각각 가정하였다.

실험 및 해석 조건은 절삭깊이 0.3mm, 이송속도 0.013mm/rev, 회전속도 620rpm 으로 동일한 상태에서 레이저 출력을 증가시켰다. 절삭부의 온도는 고온계(pyrometer) 측정결과를 통해 결정되었으며 레이저 출력이 400, 600, 800W 로 증가함에 따라 절삭부 온도는 각각 1426, 1605, 1736°C 이다.

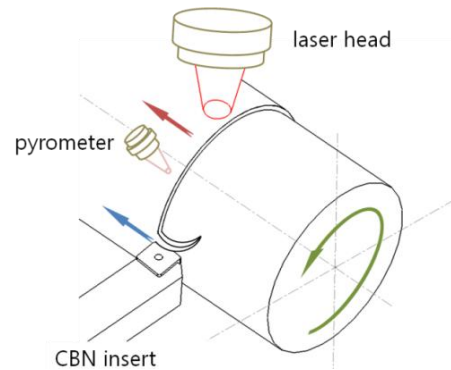


Fig. 1 Schematic diagram for laser-assisted machining experiment

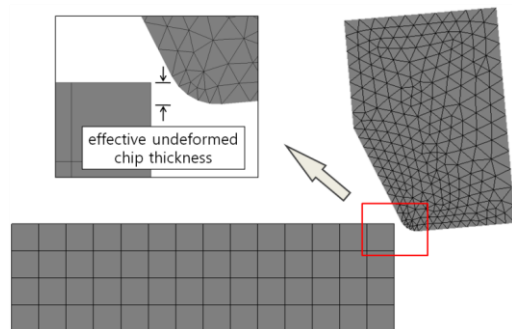


Fig. 2 Plane strain finite element model for chip formation

3. 유한요소해석 결과

Fig. 3은 레이저 출력이 600W인 조건에서 CBN 인서트와 칩에 작용하는 응력을 나타낸 것이다.

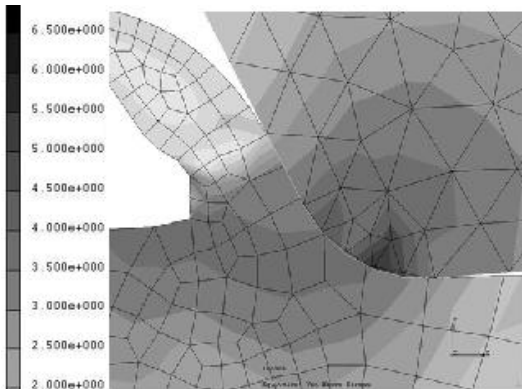
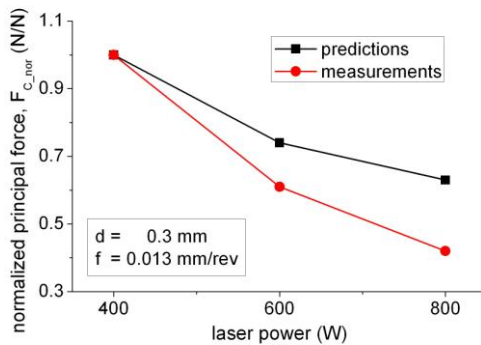
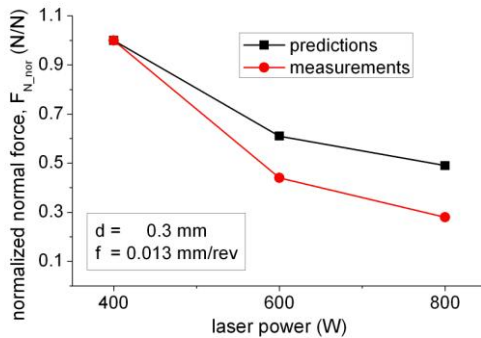


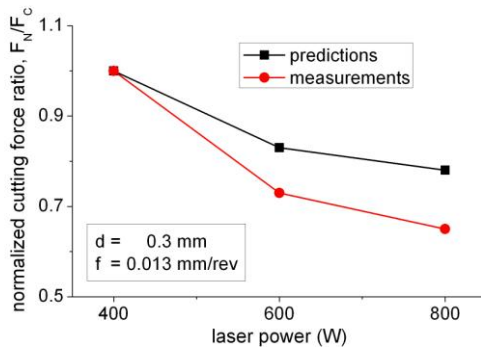
Fig. 3 Chip formation and von Mises stress distribution (600W)



(a) Principal force, F_C



(b) Normal force, F_N



(c) Cutting force ratio, F_N/F_C

Fig. 4 Comparison of cutting force between predictions and measurements for various laser powers

시편의 응력은 전단면(shear plane)에 인서트의 응력은 여유면과 가공표면의 접촉부에 각각 집중되었다. 400W부터 800W까지 증가하는 동안 인서트와 시편에 작용하는 응력이 점차 감소하였고 칩의 두께는 증가하는 경향을 보였다.

Fig. 4는 레이저 출력에 따른 상대적인 변화를 나타내기 위해 예측된 출력별 절삭력을 400W 조건의 값으로 나눈 값이다. 실험과 유한요소해석의 결과에서 동일하게 레이저 출력이 증가함에 따라 재료의 연성이 증가하게 되어 주분력 F_C 과 수직분력(배분력과 이송분력의 합력) F_N 이 점차 감소하였고, 주분력에 대한 수직분력의 비율 (cutting force ratio) 역시 감소하였다. 유한요소해석에서 예측된 절삭력의 변화율은 실험에서의 측정치보다 적었으나 동일한 경향을 보였다. 온도증가에 따른 절삭력 감소폭이 적은 것은 (1)의 점소성 구성방정식 중 온도의 영향을 나타내는 3 번째 항에서 질화규소의 점성지수 m 과 활성화 에너지 Q 의 값에서 발생하는 오차로 사료된다. 향후 다양한 조건의 실험데이터를 바탕으로 이러한 오차를 감소시켜나갈 예정이다.

4. 결론

LAM 가공특성 분석을 위한 유한요소해석을 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있다. 질화규소의 칩형성 모델링에는 remeshing 기법을 사용하였으며, 칩의 폭을 절삭부의 실제 접촉면 길이로 고려하고 이에 상응하는 미변형칩두께를 계산하여 유한요소모델을 생성하였다. 질화규소에 대한 점소성 구성방정식을 사용하였고 그 외의 물성치는 온도에 따른 변화를 고려하였다. 실험과 유한요소 해석의 결과에서 레이저 출력에 따른 절삭력 변화는 같은 경향을 보였다. 온도가 증가함에 따라 재료가 연화되어 절삭부에 작용하는 응력이 감소하였고, 이로 인해 절삭력과 절삭분력 비율이 감소하였다.

후기

본 연구는 지식경제부의 지역산업기술 개발 사업인 “레이저 복합가공기 개발” 과제의 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Lee, J.H., Shin, D.S., Suh, J., Cho, H.Y. and Kim, K.W., “Trends of Laser Integrated Machine,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 25, No. 9, pp. 20-26, 2008.
2. Shin, D.S., Lee, J.H., Lim, S.H., Kim, J.D. and Lee, S.J., “Cutting Characteristics on Rake Angle in Laser-Assisted Machining of Silicon Nitride,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 4, pp. 47-54.
3. Lim, S.H., Lee, J.H., Shin, D.S., Kim, J.D. and Kim, J.H., “A Study on Laser-Assisted Machining Process of Silicon Nitride,” Journal of the Korean Society for Precision Engineering, Vol. 26, No. 5, 48-56
4. Lei, S., Shin, Y. C. and Incropera, F. P., “Deformation Mechanisms and Constitutive Modeling for Silicon Nitride Undergoing Laser-Assisted Machining,” International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 40, pp. 2213-2233, 2000
5. Tian, Y. and Shin, Y. C., “Multiscale Finite Element Modeling of Silicon Nitride Ceramics Undergoing Laser-Assisted Machining,” Journal of Manufacturing Science and Engineering,” Vol. 129, pp. 287-295, 2007
6. Trent, E.M. and Wright, P. K., “Metal Cutting 4th Edition,” Butterworth-Heinemann, pp.227-245