비접촉식 열 공구를 이용한 미세 형상 가공에서의 열 영향부에 대한 수치적 모사에 관한 연구

김효찬*(KAIST 대학원), 안동규(조선대), 이상호(KAIST 대학원), 양동열(KAIST)

A study on numerical analysis of heat affected zone in detailed shape processing using Non-contact hot tool

H. Y. Kim(Graduate School, KAIST), D. G. Ahn(Mech. Eng. Dept. Chosun Univ.), S. H. Lee (Mech. Eng. Dept., KAIST), D. Y. Yang(Mech. Eng. Dept., KAIST)

ABSTRACT

In VLM-ST process, the fine detailed shape processing process is needed due to the use of thick sheets for layers. The developed process perform the fine detailed shape processing in VLM-ST parts using non-contact hot tool. To predict the heat-affected zone and temperature distribution of VLM-ST parts in detailed shaping, the heat flux from the tool to the surface was calculated for the finite element analysis by modeling the tool as a heat source of radiation. The dominant process parameters such as the radiated heat input, the tool speed, and the gap between the tool tip and the foam sheet (tool height) were considered in the analysis. The results showed a good agreement with the experiments.

Key Words : Detailed Shaping (세부 형상 가공), Non-contact cutting (비접촉식 열가공), Radiation Heat Source model (복사 열원 모델), Transient thermal analysis(비정상 열전달 해석)

1. 서론

최근 국내에서 개발된 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 단속형 가변 적층 패쇽 조형 공정(VLM-ST)[1-2]은 측면에 부여된 경사각에 의해 측면 단차가 거의 존재하지 않아 표면 후가공은 거의 요구되지 않으나 4 mm 이내의 후판을 적층하여 3 차원 제품을 제작하기 때문에 적층되는 판의 두께보다 작은 세부 형상이나 표면의 형상 구현에 한계가 존재한다. 따라서, 본 연구에서는 VLM-ST 공정 시제품에 세부 형상 가공을 통해 시제품의 형상 정밀도를 향상시키는 공정을 제안하였다[3]. 본 공정에서는 새로운 개념의 비접촉식 열 공구를 이용하여 가공을 수행한다. 비접촉식 열 공구를 이용한 가공시 접촉에 의한 가공 저항이 거의 발생하지 않아 가공 저항력에 따른 공구 변형이나 기타의 문제가 발생하지 않고 재료를 열분해시켜 가공하는 메커니즘을 가지기 때문에 가공 후 잔여 재료가 거의 발생하지 않는다.

가공원리는 복사 열 전달에 의한 열 작용으로 재료가 가공되기 때문에 이에 따른 복잡한 현상에 대한 해석적 접근이 필요하다.

본 공정과 유사하게 열원이 이동하면서 모재를 절단 혹은 가공하는 공정에서 열 분포를 예측하기 위한 시도는 1940 년대 Rosental 등에 의해 간략화된 해가 제공되기 시작하였다[4]. 1975 년에는 Paley 와 Habbert 등에 의하여 실제 용접 설계에서 수치적 해석 방법에 의한 온도 분포 계산이 수행되었다[5]. 1987 년 Na 와 Lee 는 열원과 함께 움직이는 해의 영역(domain)의 제안으로 요소(element)의 수를 최소화하였고 계산 시간을 줄였다[6]. 2002 년에 Ahn 과 Yang 등은 VLM-ST 공정에서 선형 열선 절단기의 열원 모델링을 제안하였으며 제안된 열원 모델을 이용하여 유한 요소 해석을 수행하였다[7].

본 연구에서는 세부형상가공 공정의 가공 원리인 Fig. 1 과 같이 비접촉식 열원과 모재 표면의 복사 열전달 현상을 수학적으로 모사하여 복사 열원 모델링을 제안하였으며 이 결과를 유한 요소 해석을 통해 열 영향부 분석을 수행하였다. 또한, 유한 요소 해석 결과와 실험 결과를 비교함으로써 제안된 해석 모델의 타당성을 검증하였다. 유한 요소

해석은 비정상 열전달 해석용 상용 소프트웨어인 SYSWELD+[8]를 이용하였다.

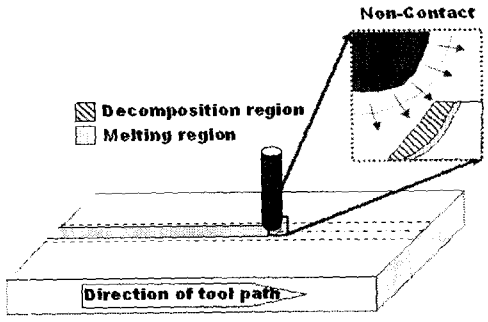

Fig. 1 Principle of Non-contact cutting

2. 복사 열원 해석

2.1 가 정

본 연구에서 복사 열원의 수식으로 모델링하기 위해서는 다음과 같은 가정이 필요하다.

- 열원과 모재(EPS foam)의 표면은 불투명(Opaque), 확산(Diffuse), 회색면(Gray Surface)
- 방사율(Emissivity)은 모든 파장대에서 일정함
- 준정상 상태 조건(Quasi Steady-States)
- 모재와 열원 사이에 매체 효과 무시함
- 모재에 도달하는 열 에너지는 공구의 반구 형상에서 나오는 열 에너지 (공구 측면에 발산하는 에너지 무시)

2.2 복사 열원 형상 함수

열원에서 모재에 도달하는 복사에너지의 분포를 구하기 위해서는 형상 함수[10]를 계산해야 하며 이를 위해 Fig. 3 와 같이 제작된 공구의 형상을 관찰하여 형상의 간략화를 수행하며 공구의 크기를 측정하는 작업이 필요하다.

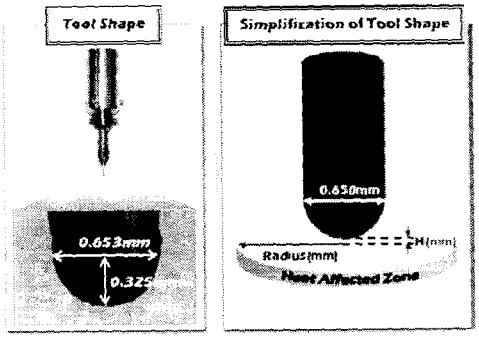

Fig. 2 Simplified geometry of Non-contact hot tool

공구의 간략화 형상은 모재와 가까운 부분의 반구 형상과 모재와 먼 부분의 원통 형상으로 구분되어 진다. 모재와 비교적 멀리 떨어진 원통 형상에 의한 복사 열전달크기는 반구 형상에 비해 매우 작다. 원인은 기하학적으로 두 면이 모재에 대한 형상 함수값의 차이가 크며 옆면과 모재와의 거리가 정면부(반구 형상부)에 비해 멀어 가정에서 무시하였던 매체(공기)의 효과가 크게 작용하여 전달되는 열 에너지 양이 급격히 감소되기 때문이다.

간략화 된 공구 형상과 모재와의 형상 함수는 참고 문헌(10)을 통하여 얻을 수 있다.

$$F_{12}(r) = 0.5 \times (1 - \frac{1}{\sqrt{1+R_2^2}}),\ R_2 = \frac{r}{h} \qquad (1)$$

여기서 h 는 공구 중심에서 모재까지 거리이며 r은 모재의 열 영향부의 반경이다.

2.3 열 평형 방정식

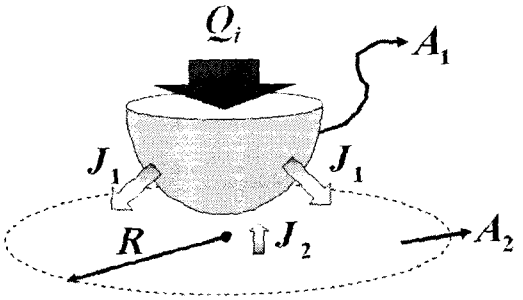

Fig. 3 Heat transfer model

공구의 표면과 모재 표면의 거리에 따른 형상 함수와 공구 표면에서 발산하는 열 에너지양을 계산하여 공구 표면과 모재 표면 그리고 공기에 대한 열 평형 방정식을 세워 실제 공구에서 모재로 유입되는 열 에너지를 계산하도록 한다.

$$Q_i A_1 = \frac{J_1 - J_2}{\frac{1}{A_1 F_{12}}} + \frac{J_1 - J_3}{\frac{1}{A_1 F_{13}}} \qquad (2)$$

$$\frac{E_{b2} - J_2}{\frac{1-\varepsilon_2}{\varepsilon_2 A_2}} = \frac{J_2 - J_1}{\frac{1}{A_2 F_{21}}} + \frac{J_2 - J_3}{\frac{1}{A_2 F_{23}}} \qquad (3)$$

여기서, Q_i 는 공구로 들어오는 열 입력량

(W/mm^2)이며 J_1는 공구 표면에서 발산하는 에너지 양 (W/mm^2), J_2는 모재 표면에서 발산하는 에너지 양 (W/mm^2), J_3는 주변에 발산하는 에너지 양 ($0.000417W/mm^2$), F_{12}는 공구에서 모재에 도달하는 형상 함수, F_{21}는 모재에서 공구에 도달하는 형상 함수, F_{13}는 공구에서 주변에 도달하는 형상 함수, F_{23}는 모재에서 주변에 도달하는 형상 함수, ε_2는 모재의 방사율(Emissivity), A_1는 가공부의 표면적 (mm^2), A_2는 모재의 표면적 (mm^2)으로 모재의 열 영향부 반경(R)에 대한 함수, E_{b2}는 모재가 흑체(Black-Body)일 때 발산하는 에너지 양 ($0.000417W/mm^2$)을 나타낸다.

식 (2)와 식 (3)을 이용하여 J_2를 계산하여 식 (4)에 대입하여 공구에서 모재에 도달하는 복사 열 에너지를 계산할 수 있다.

$$Q_{input}(r) = \frac{\varepsilon_2}{1-\varepsilon_2}(E_{b2} - J_2(r)) \quad (4)$$

2.4 유한 요소 모델링

본 해석에서는 준정적 열 유동 상태라 가정하였으며 고정 좌표계에서의 비정상 열 전달 지배 방정식은 식 (5)와 같다.

$$\vec{\nabla}\cdot(k\vec{\nabla}T) + \dot{q} = \rho c_p \dot{T} \quad (5)$$

본 공정에서는 움직이는 열원에 의해 가공이 수행되므로 지배 방정식을 움직이는 좌표에 대해 정리하면 식 (6)과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_M}(k\frac{\partial T}{\partial x_M}) + \frac{\partial}{\partial y}(k\frac{\partial T}{\partial y}) + \frac{\partial}{\partial z}(k\frac{\partial T}{\partial z}) + \dot{q} = \rho c\left\{\frac{\partial T}{\partial t_M} - V_{ir}\times\frac{\partial T}{\partial x_M}\right\} \quad (6)$$

2.5 해석 결과 및 고찰

실험을 통하여 열 영향부에 지배적인 영향을 미치는 공정 변수는 열 입력량(Q_i), 가공 속도(V_c), 가공 높이(H) 임을 알 수 있었다.

Fig. 4 은 동일 가공 속도와 가공 높이에서 열 입력량을 변화시켜 가며 열 영향부를 관찰한 결과이다. 나머지 경우에도 동일 조건에서 가공 속도와 가공 높이를 변화시켜가며 해석을 수행하였다. 해석을 통하여 다음의 사실을 알 수 있었다.

첫째, 해석을 통하여 최대 크기의 240° C 등온선를 이용하여 실제 가공시 가공 너비 및 깊이를 예측할 수 있었다. 이는 EPS 폼의 용융 온도가 240° C 임에 기초하여 나온 결론이다. 해석 결과에서 240° C 이상의 온도 분포 영역을 가공 영역으로 설정하였다. 이러한 예측된 가공 너비와 깊이를 실험을 통하여 해석의 타당성을 입증할 수 있다.

둘째, 물리적으로 예측한 공정 변수가 해석에서 가공 너비 및 깊이에 주요한 영향을 미침을 확인할 수 있었다. 따라서, 후가공 공정 수행에서도 세가지 공정 변수를 조절함에 따라 가공 너비 및 깊이를 제어할 수 있음을 예측할 수 있다.

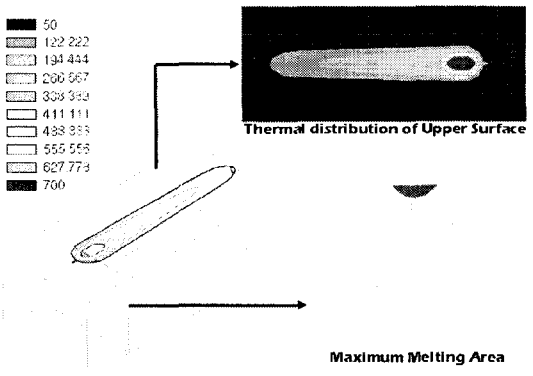

Fig. 4 Results of numerical analysis for $Q_i = 1.862\,W/mm^2$, $H = 0.15\,mm$, $V_c = 40\,mm/s$

3. 공정 변수에 따른 실험 및 고찰

3.1 가공 실험

공정 변수를 변화 시켜가며 가공을 수행하였으며 가공 영역의 측정은 정상 상태의 가공이 이루어졌다고 볼 수 있는 처음과 끝단에 약 20 mm 떨어진 영역의 단면의 가공 너비(Ω : Kerfwidth)와 깊이 (β : Depth of Cut)를 측정하여 평균값을 얻어 데이터로 사용하였다.

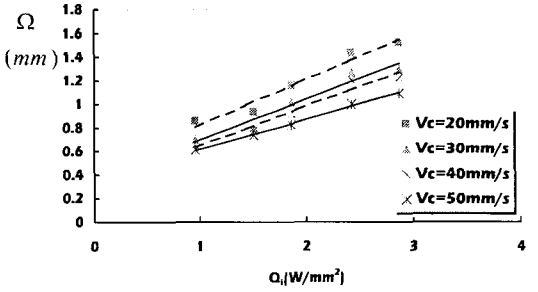

Fig. 5 Relationship between the kerfwidth and the heat input

Fig. 5 은 동일한 조건상에서 열 입력량을 변화시켜가며 가공한 결과를 정리한 결과이다.

3.2 해석 결과와 비교를 통한 고찰

동일한 조건상에서 수행한 해석 결과와 실험 결과의 비교를 통해 본 해석모델에서 제안한 복사 열원 모델과 유한 요소 모델의 타당성을 검증할 수 있었다. Fig. 6 은 동일 조건상에서 열 입력량이 변할 때 해석 결과와 실험 결과를 비교한 결과이다.

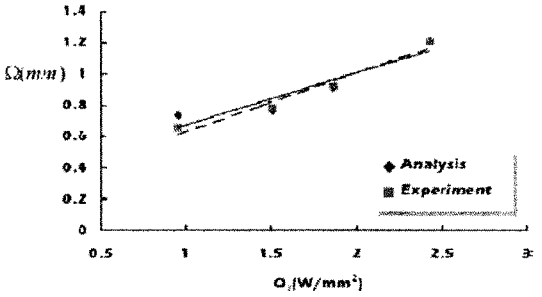

Fig. 6 Comparison of kerfwidth between the analysis and the experiment

4. 결론

본 연구에서는 세부 형상 가공 공정에서 비접촉식 열 공구에 의해 가공이 이루어지는 현상을 수치적으로 모사하였다. 이를 위해 공구에 대한 복사 열원 모델링을 수행하여 모재로 유입되는 열 입력량 분포를 계산하였으며 모재에서의 3 차원 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 이러한 연구를 통해 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 공정 변수와 가공 너비 및 깊이 관계에서 물리적으로 예측한 결과와 동일하게 열 입력량의 크기에 비례하고 가공 속도 및 가공 높이와 반비례함을 해석 및 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

둘째, 제안된 복사 열원 모델을 이용한 유한 요소 해석 결과는 일정한 공정 변수 범위내에서 선형적인 관계를 유지함을 알 수 있다. 이것은 실험 결과에서도 나타나는데 이러한 공정 변수와 가공 너비 및 깊이와의 선형적인 관계를 이용하면 공정 변수들을 통합하여 하나의 변수로 표현이 가능하며 실제 가공에서 통합된 변수를 이용하여 가공 영역의 제어가 가능해 진다.

셋째, 제안된 해석 모델을 이용하여 해석한 결과와 동일 조건하에서의 실험 결과가 매우 근접하게 일치함을 알 수 있다. 이것은 열원 모델이 실제 가공에서의 열 에너지 분포를 매우 근접하게 표현하고 있음을 나타낸다.

후 기

본 연구는 과학기술부 국가중점사업인 주문적응형 쾌속제품개발시스템 사업단의 "가변 용착/적층에 의한 직접식 쾌속 조형 공정 및 응용 기술 개발" 연구 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

참고문헌

1. 안동규, 이상호, 최홍석, 양동열, 박승교, "단속형 재료 공급식 가변적층 쾌속 조형 공정 및 장치 개발에 관한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 2 호, pp. 95-105, 2002.
2. 양동열, 안동규, 이상호, 최홍석, 박승교, "선형열 절단 시스템을 이용한 단속적 재료 공급식 가변 적층 쾌속조형 공정 및 장치," 특허 출원 번호, 제 2001-0040212 호, 2001.
3. 김효찬, 안동규, 이상호, 양동열, "VLM-ST 제품의 국부형상 정밀도 향상을 위한 후가공 공정 개발에 관한 연구," 한국정밀공학회 추계학술대회, pp. 274–278, 2002.
4. D. Rosental, Mathematical Theory of Heat Distribution During Welding and Cutting, Welding Journals, Vol.30, No.5, Research Supplement, pp.220-225, 1941.
5. Z. Paley and P. D. Hibbert, "Computation of Temperatures in Actual Weld Designs," Supplement to the welding journal, pp.385-392, November 1975.
6. S.J. Na, S.Y. Lee, "A study on the three-dimensional analysis of the transient temperature distribution in gas tungsten arc welding," Proc Instn Mech Engrs, Vol.201, pp.52-59, No.B3, 1987.
7. D. G. Ahn, S. H. Lee, and D. Y. Yang, "Investigation into thermal characteristics of linear hotwire cutting system for variable lamination manufacturing (VLM) process by using expandable polystyrene foam," International Journal of Machine Tools and Manufacture, Vol.42, pp.427–439, 2002.
8. ESI Group, "SYSWELD+ 2.0 Reference Manual," SYSTUS International, New York, 1972.
9. R. Siegel, J. R. Howell, "Thermal radiation Heat Transfer," McGraw-Hill Book Company, 2nd Edition, 1972.