

EPS foam 의 선형 열선 절단시 절단 경사각의 영향에 관한 연구

안동규*(KAIST 대학원), 이상호(KAIST 대학원), 양동열(KAIST), 윤석환(KAIST 대학원)

Investigation into effect of cutting angle on the thermal characteristics in the linear heat cutting of EPS foam

D. G. Ahn(Graduate School. KAIST), S. H. Lee(Graduate School. KAIST), D. Y. Yang(KAIST),
S. H. Yoon(Graduate School. KAIST),

ABSTRACT

During the hotwire cutting of EPS foam sheet, the dimensional accuracy and part quality of the cut part are highly dependent upon the thermal field in the EPS. The thermal field is determined by operating parameters such as heat input, cutting speed and cutting angle. The objective of this study is to investigate into the influence of cutting angle on the kerfwidth and part quality of the cut part in hotwire cutting of EPS foam using the experiments and the numerical analysis in the case of a single sloped cutting. In order to estimate an accurate temperature field, the transient thermal analysis using a moving coordinate system and the sloped heat flux model is carried out. From the results of the experiments and the analysis, it has been found that the effect of cutting angle on the kerfwidth and the melted area at the edge are 0.1 mm and 0.11 mm² respectively. The results of the experiments show that the surface roughness is not appreciably influenced by the cutting angle.

Key Words : Hotwire cutting (열선 절단), EPS foam (발포 폴리스티렌 폼), Cutting angle (절단경사각), Transient thermal analysis (비정상 열전달 해석), Dimensional accuracy (치수정밀도), Part quality (제품정밀도)

1. 서론

선형 열선 절단기에 의한 발포 폴리스티렌 폼 (Expandable Polystyrene Foam : EPS foam) 의 절단은 일반적으로 EPS 폼 블록에서부터 임의 형상의 제품을 제작하는데 널리 사용되는 공정이다. 현재, 국내에서는 4 축이 동시 제어되는 선형 열선 절단기를 이용하여 두꺼운 층의 EPS 폼 판재를 단위 형상 조각 및 단위 형상층을 생성한 후 적층/접착하는 신개념 쾌속조형공정인 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 쾌속조형공정 (Variable Lamination Manufacturing using EPS : VLM-S) 이 개발되고 있다⁽¹⁻³⁾. VLM-S 로 제작된 시작품은 선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼의 절단시 발생하는 EPS 폼 내부의 열전달 특성에 의하여 제품의 정밀도와 표면 상태가 결정된다. EPS 폼 내부의 열전달 특성을 결정하는 주요 공정 변수는 열선 절단기에 투입되는 입열량, 열선 절단기 절단 속도, EPS 폼 두께 및 절단 경사각 등이 있다.

열선 절단기에 의한 EPS 폼 절단에 공정에서의 공정 변수의 제품 정밀도 및 표면 상태에 미치는 영향에 대한 연구는 넓게 연구되지 못하고 있다. 열선 절단과 같은 열 절단 공정의 절단부의 온도 분포 및 공정 변수의 영향성 분석에 대한 연구는 일반적인 레이저 절단과 용접 공정등에서 찾아 볼 수 있다.

1940 년대 초반 Rosental 은 이동 열원을 가지는 열절단 및 용접 공정을 점 또는 선형 열원을 가지는 준 정상상태 열전도 (Conduction) 문제로 가정하여 온도해석을 수행한 바 있다⁽⁴⁾. Jhaveri 등은 용접과 열 절단공정에서의 판재 두께와 복사열의 효과를 연구하기 위한 차트를 개발하였다⁽⁵⁾. Park 과 Na 는 레이저 절단에서 절단 메커니즘과 절단 압력과 절단 폭 (Kerfwidth) 관계에 대하여 연구하였다⁽⁶⁾. Aloke 등은 레이저 절단에서 열입력과 절단 속력이 절단 폭에 미치는 영향에 대하여 연구하였다⁽⁷⁾. 한편, Ahn 과 Yang 은 선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼 수직 절단시 열 특성과 공정 변수 영향에 대한

연구를 수행한 바 있다^(8,9)

본 연구에서는 VLM-S 로 제작된 쾌속 조형 제품의 제품 정밀도를 향상시키기 위하여 선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼 판재 경사 절단시 절단 경사각이 절단된 제품의 절단 폭, 모서리 용융량, 표면 조도 및 내부 온도 분포에 미치는 영향을 연구하였다. 본 연구는 실험적인 방법과 해석적인 방법을 이용하여 수행되었다. 실험 결과로부터 절단 경사각이 절단 폭, 모서리 용융량 및 표면 조도에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 해석은 이동좌표계와 경사 열원 모델링을 이용한 비정상 열전달 해석을 상용 소프트웨어인 SYSWELD+⁽¹⁰⁾ 를 이용하여 수행하였다. 본 해석을 통하여 절단 경사각이 EPS 폼 내부의 온도 분포에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 경사 절단 실험 및 고찰

3.1 경사 절단 실험

Fig. 1(a) 와 같은 단순 경사각을 가지는 형상에 대하여 경사 절단 시험을 수행하였다. 실험 장치는 Fig. 1(b)와 같은 단속형 판재 공급식 가변 적층 쾌속조형 장치 (VLM-Sr) 를 사용하였다.

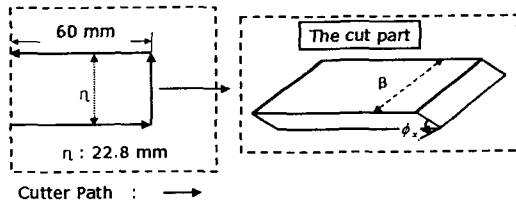


Fig. 1(a) Details of specimen and the dimensions for measuring the kerfwidth

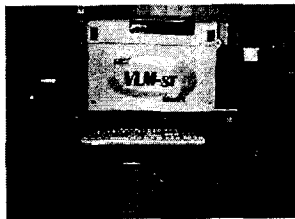


Fig. 1(b) Experimental set_up

본 실험에서는 투입 열량과 절단 속도 및 절단 경사각을 조절하면서 실험을 수행하였다. 실험에 적용된 절단 경사각은 0°, 10°, 20°, 30°, 및 40° 이다. 절단 폭 (n) 및 모서리 용융 면적은 식(1) 및 식(2) 와 같이 정의 되었다. 절단폭은 CAD 상의 절단 요구 치수 (a) 와 실제 절단된 제품의 측정된 치수 (β) 의 차이이며, 모서리 용융 면적은 모서리 부분

의 가상 윤곽선으로 형성된 면적과 실제 제품의 면적의 차이로 측정하였다. 모서리 용융 면적은 식(2) 와 같이 용융 면적을 형상에 적응하는 삼각형으로 나누어 합하였다. 표면 조도는 최대 조도 (Rmax) 및 평균 절대 조도 (Ra) 를 측정하였다. 본 실험에서는 열선 절단 속력과 열 입력량을 동시에 고려하기 위하여 식(3)과 같은 유효 열입력량 (Effective Heat Input) 을 도입하였다.

$$\eta = \alpha - \beta \quad (1)$$

여기서, a 는 CAD 상의 절단 치수 요구 치수이며 β 는 실제 절단된 시편에서 측정된 치수이다.

$$\Omega = \sum_{i=1}^n A_i \quad (2)$$

여기서, Ω 는 모서리 용융 면적이며 Ai 는 전체 용융 면적을 형성하는 각 단위 면적이다.

$$Q_{eff} = Q / (V_c L_e) \quad (3)$$

여기서, Q_{eff} 는 유효 열입력량이고 Q 는 열입력량이며 V_c 는 열선 절단 속력이고 L_e 유효 열선 길이이다.

3.2 결과 및 고찰

단순 경사 절단 실험 결과 절단 경사각이 절단 폭에 미치는 영향은 Fig. 2 와 같다.

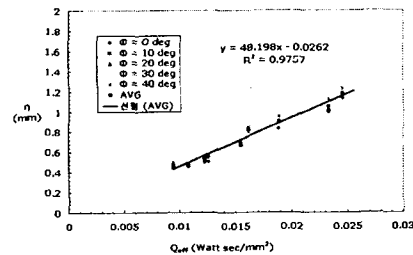


Fig. 2 Relationship between the kerfwidth and the effective heat input

본 실험 결과로부터 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

첫째, 절단 경사각의 절단 폭에 대한 영향은 열 입력과 절단 속력의 영향 보다 적다. 본 실험에서 최대 유효 열입력인 0.0245 Watt sec/mm² 경우 40° 절단 경사각에서 수직 절단에서 측정된 절단폭과 약 0.1 mm 의 절단 폭 차이를 보인다.

둘째, 절단 경사각의 절단폭에 대한 영향은 유효 열입력이 증가될수록 영향이 커진다.

위 두가지 결과로부터 실제적인 VLM-S의 운영 조건인 유효 열입력량 $0.01 \text{ Watt} \cdot \text{sec}/\text{mm}^2$ 에서 $0.017 \text{ Watt} \cdot \text{sec}/\text{mm}^2$ 및 최대 절단 경사각 65° 내에서는 절단 경사각의 절단폭에 대한 영향이 0.1 mm 이하임을 알 수 있었다.

선형 열선 절단기의 절단 경사각이 제품 모서리 부의 용융 면적에 미치는 영향은 Fig. 3 과 같다.

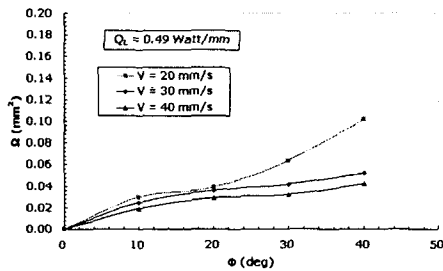


Fig. 3 Effect of cutting angle on the melted area in edge

Fig. 3 에서 절단 경사각이 증가할 때 모서리 부의 용융 면적이 급격히 증가함을 볼 수 있다. 이 결과로부터 절단 경사각이 모서리 용융 면적을 결정하는 주요 공정 변수임을 알 수 있다. 실제적인 VLM-S 운영 범위내에서는 모서리 용융 면적이 0.11 mm^2 이하임을 알 수 있었다.

선형 열선 절단기의 절단 경사각이 제품 표면 조도에 미치는 영향은 Fig. 4 와 같다.

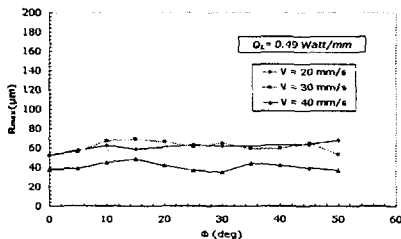


Fig. 4 Effect of cutting angle on the surface roughness

표면 조도 측정 결과 절단 경사각은 표면 조도에 영향을 미치지 못함을 알 수 있었다. Fig. 4 에 나타난 것과 같이 표면 조도의 경우 절단 경사각 보다 유효 열입력량에 의한 결정됨을 알 수 있었다. 특히, 유효 열입력량이 적을 경우 열에 의하여 EPS 폼이 완전 열분해 되지 못하고 제품의 표면을 도포하여 EPS 폼의 셀 (Cell) 을 채움으로 해서 제품의 최대 표면 조도 및 평균 절대 조도가 각각 $40 \mu\text{m}$ 와 $5\sim 8 \mu\text{m}$ 정도로 감소됨을 알 수 있었다.

3. 경사 절단 해석 및 고찰

3.1 EPS 폼의 열선 절단 특징

열선 절단기에 의한 EPS 폼 판재 절단 공정을 고찰하면 다음과 같은 2 가지 특징이 있음을 알 수 있다.

가. 열선 절단기 내부 열선의 열 분포는 양 끝단을 제외하고는 열선 길이 방향으로 열 구배가 없는 선형 열원 특성을 나타낸다.

나. EPS 폼이 매우 낮은 열전도도를 가지기 때문에 내부의 열 영향 영역은 매우 적다. 또한, 열선 절단기의 절단 속력이 커질수록 열 영향부는 적어진다.

3.2 지배 방정식 및 유한 수식화

열 절단 공정은 비정상 열전달 현상으로 가정할 수 있다. 열원과 동일한 속력으로 이동하는 이동좌표계 (Moving coordinate system) 를 이용한 3 차원 비정상 열전달 현상에 대한 지배 방정식은 식(4)와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x_M} \left(k \frac{\partial T}{\partial x_M} \right) + \frac{\partial}{\partial y_M} \left(k \frac{\partial T}{\partial y_M} \right) + \frac{\partial}{\partial z_M} \left(k \frac{\partial T}{\partial z_M} \right) + q = \rho c \left[\frac{\partial T}{\partial t_M} - V_x \frac{\partial T}{\partial x_M} \right] \quad (4)$$

여기서, (x_M, y_M, z_M) 은 이동좌표, (x_G, y_G, z_G) 는 고정좌표, k 는 열전도 계수, ρ 는 밀도, C_p 는 비열, V_x 은 열선 이동 속력이다.

식(4)을 등방성 요소에 적용하여 유한 요소 수식화하면 식(5)를 얻게 된다.

$$[C(T)] \dot{T} + [K(T)] T + \{V\} = \{Q(t)\} \quad (5)$$

여기서, $[C(T)]$, $[K(T)]$, $\{V\}$ 및 $\{Q(t)\}$ 는 각각 커패시턴스 행렬, 강성 행렬, 속도 벡터 및 열 유동 벡터이다.

열원의 모델은 3.1. 절의 가항의 특징을 이용하여 타원 단면적을 가지는 선형 열원으로 가정하였다. 이때, 열원의 단면적과 열입력 위치 계산식은 다음과 같다.

$$\frac{(x + z \tan \phi)^2}{(r / \cos \phi)^2} + \frac{y^2}{r^2} = 1.0 \quad (5)$$

여기서, r 과 ϕ 는 열원의 반경과 절단 경사각이다.

선형 열선 절단기에 의한 경사 절단 해석은 상용 유한요소해석 프로그램인 SYSWELD + 를 이용하였다. $0.49 \text{ Watt}/\text{mm}$ 열원을 이용하여 경사각 0° 부터 40° 까지 10° 간격으로 해석을 수행하였다.

3.3 해석 결과 및 고찰

유한 요소해석 결과 Fig. 5와 같은 EPS 폼 내부의 온도 분포를 얻을 수 있었다. 해석 결과 절단 경사각이 커질수록 경사 절단에서의 온도 분포는 재료의 중앙을 중심으로 비대칭적인 분포로 변해감을 알 수 있었다. 열선의 진행 방향의 수직한 단면의 온도 분포의 경우 실제적으로 절단폭에 영향을 미치는 용융 온도까지의 온도 분포는 모서리 부분을 제외하고는 열원의 기하학적 형상에 적응하는 온도 분포를 나타냄을 알 수 있었다. 또한, 절단 경사각이 증가할수록 모서리의 용융 면적이 증가하는 것을 알 수 있었다.

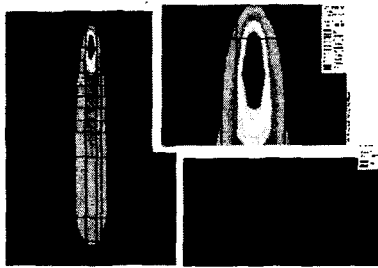


Fig. 5(a) The results of finite element analysis ($V_c = 30 \text{ mm/s}$, $Q_L = 0.49 \text{ Watt/mm}$, $\phi = 0^\circ$)

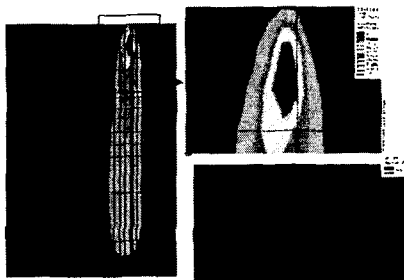


Fig. 5(b) The results of finite element analysis ($V_c = 30 \text{ mm/s}$, $Q_L = 0.49 \text{ Watt/mm}$, $\phi = 40^\circ$)

Fig. 6은 재료의 두께 방향의 중앙에서의 온도 분포이다. 이 결과로부터 절단 경사각이 증가할수록 절단 면적이 많아져 열전도가 많이 발생하므로 최대 온도가 감소하며, 재료로 전달되는 열전달량 증가하여 절단 폭이 확장되는 것을 알 수 있었다.

Fig. 7은 절단 속도별 절단 폭과 절단 경사각의 관계를 실험 결과와 비교한 것이다. 이 결과 실험과 해석 결과가 잘 일치하고 있음을 확인 할 수 있다. 이것은 본 해석에서 가정된 EPS 폼의 연속체가정과 타원 단면을 가진 선형 열원의 가정이 타당하기 때문으로 사료된다. 그러나, Fig. 8과 같은 모서리부의 최대 수평 방향 용융 길이의 경우 해석과 실험이 차이를 보이는 것은 모서리부의 용융길이가 경사각이 커질수록 EPS 폼의 단위 셀 크기와 견줄 만한 크기가 됨으로 연속체로 가정한 해석이 실제

적인 열전달 현상을 정확히 구현하기 어렵기 때문으로 사료된다.

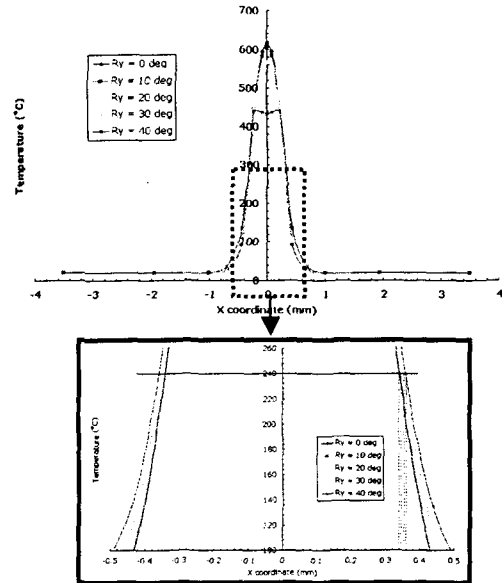


Fig.6 Temperature distribution in the mid-line of thickness ($V_c = 30 \text{ mm/s}$, $Q_L = 0.49 \text{ Watt/mm}$)

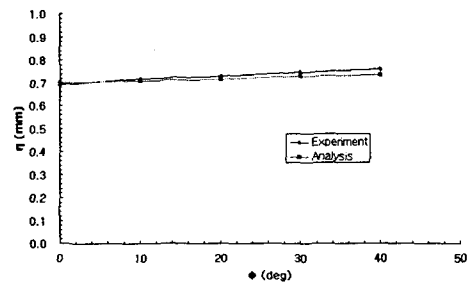


Fig. 7 Comparison of kerfwidth between the results of analysis and those of experiments ($V_c = 30 \text{ mm/s}$, $Q_L = 0.49 \text{ Watt/mm}$)

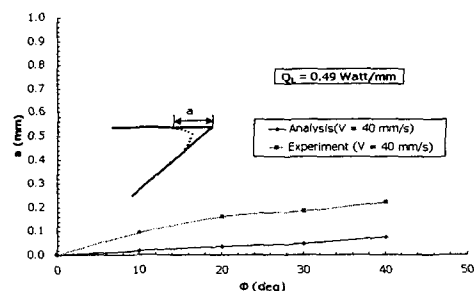


Fig. 8 Comparison of the maximum melted length between the results of analysis and those of experiments ($V_c = 30 \text{ mm/s}$, $Q_L = 0.49 \text{ Watt/mm}$)

본 유한요소해석결과 열선의 경사 절단시 발생하는 EPS 폼 내부의 열 특성과 온도장 변화를 예측하고 분석할 수 있었다. 또한, 실제적인 제품의 치수 정밀도를 결정하는 절단 폭의 경우 절단 경사각에 영향을 크게 받지 않음을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 VLM-S 공정으로 제작된 시작품의 제품 정밀도를 결정하는 주요 공정 변수인 열선 절단기의 절단 경사각의 영향에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 경사 절단 실험을 통하여 절단 경사각의 절단 폭과 모서리 용융 면적에 대한 영향이 각각 0.1 mm 및 0.11 mm² 이하임을 알 수 있었다. 이 결과로부터 절단 경사각의 절단 폭과 모서리 용융 면적에 대한 영향은 열 입력과 절단 속력에 보다는 적은 것을 알 수 있었다. 또한, 절단 경사각의 변화에 의한 표면 조도의 변화는 거의 없음을 알 수 있었다.

둘째, 경사 절단에 대한 유한 요소 해석 모델링을 수행하여 경사 절단 공정중의 EPS 폼 내부의 온도 분포를 예측하였다. 해석 결과 절단 경사각이 증가할수록 EPS 폼 내부의 최대 온도 분포가 커지는 특성을 알 수 있었다. 또한, 제안된 해석 모델이 전체적인 온도 분포 및 절단 폭을 정확히 예측할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나, 제안된 해석 모델이 연속체를 가정한 열전달 해석임으로 경사각이 클때의 모서리부분과 같이 특정 영역이 EPS 폼의 셀 크기와 같은 경우 정확한 온도 분포를 얻기 어려움을 알 수 있었다.

본 해석과 실험 결과로부터 EPS 폼의 열선 절단시 절단 경사각의 영향은 열 입력량과 절단 속력에 비해 그 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

후 기

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

참고문헌

1. 안동규, 이상호, 양동열, 신보성, 박승교, 이용일, "발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변적층 패속 조형 공정 및 장치 개발," 한국 정밀공학회지, 제 18 권, 제 8 호, pp. 54-63, 2001.

2. 안동규, 이상호, 양동열, "연속형 가변적층 패속 조형 공정과 응용기술을 이용한 3 차원 제품의 정형 가공에 관한 연구," 한국 소성가공학회지, 제 10 권, 제 6 호, pp. 500-508, 2001.
3. 안동규, 이상호, 최홍석, 양동열, 박승교, "단속형 재료 공급식 가변적층 패속 조형 공정 및 장치 개발에 관한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 2 호, pp. 95-105, 2002.
4. Rosental, D., "Mathematical theory of heat distribution during welding and cutting," *Welding Journal*, Vol. 20, pp. 220s - 234s, 1941.
5. Jhaveri, P., Moffatt, W. G., and Adams, C. M., "The effect of plate thickness and radiation on heat flow in welding and cutting," *Welding Journal*, Vol. 41, pp. 12s - 16s, 1962.
6. 박준홍, 한국찬, 나석주, "FDM 을 이용한 레이저 절단 공정에서의 메커니즘 및 절단 폭의 해석," 대한기계학회논문집, 제 17 권, 제 10 호, pp. 2418-2425, 19993.
7. Alope, R., Grish, V., Scrutton, R. F., and Molian, P. A., "A model for prediction of dimensional tolerances of laser cut holes in mild steel thin plates," *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, Vol. 37, No. 8, pp. 1069 - 1078, 1997.
8. 안동규, 이상호, 양동열, 신보성, 이용일, "가변적층 패속 조형 공정 개발을 위한 발포 폴리스티렌 폼의 선형 열선 절단시스템 절단 특성 및 접착 강도 특성에 대한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호, pp. 185-194, 2000.
9. Ahn, D. G., Lee, S. H. and Yang, D. Y., "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.
10. ESI Group, "SYSWELD+ 2.0 Reference Manual," SYSTUS International, New York, 1972.