

발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변적층 쾌속조형공정의 형상 정밀도 개선을 위한 열전달 특성 및 잔여 재료폭 영향에 관한 연구

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

Investigation of Thermal Characteristics and Skeleton Size Effects to improve Dimensional Accuracy of Variable Lamination Manufacturing by using EPS Foam

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

ABSTRACT

Rapid Prototyping (RP) techniques have unique characteristics according to their working principle: the stair-stepped surface of a part due to layer-by-layer stacking, low building speed, and additional post-processing to improve surface roughness. A new RP process, Variable Lamination Manufacturing by using expandable polystyrene foam (VLM-S) has been developed to overcome the unfavorable characteristics. The objective of this study is to investigate the thermal characteristics and skeleton size effects as the hotwire cuts EPS foam sheet in order to improve dimensional accuracy of the parts, which is produced by VLM-S. Empirical and analytical approaches are performed to find the relationship between cutting speed and heat input, and the relationship between maximum available cutting speed and heat input. In addition, empirical approaches are carried out to find the relationship between cutting error and skeleton size, and cutting deviation and skeleton size. Based on these results, the optimal hotwire cutting condition and available minimum skeleton size are derived. The outcomes of this study are reflecting in the enhancement of VLM-S input data generation S/W.

Key Words : Rapid Prototyping (쾌속조형), Variable Lamination Manufacturing (가변적층 쾌속조형공정), Expandable Polystyrene Foam (발포 폴리스티렌 폼), Cutting Offset(절단 오프셋), Maximum Cutting Speed(최대절단 속도), Heat Transfer Analysis(열전달해석), Cutting Error(절단오차), Cutting Deviation(절삭편차)

1. 서론

쾌속 조형 공정의 바람직하지 못한 특징인 적층 방향의 계단 현상, 장시간의 조형 시간, 고가의 장비 도입/유지비 및 추가적인 후처리 공정의 소요와 추가적 장비 도입등을 극복하기 위하여 조형 시간을 획기적으로 단축시키며, 장비 도입/유지비가 현저히 저렴하며, 정밀도가 향상 및 후처리 공정이 거의 요구되지 않는 새로운 개념의 가변 적층 쾌속 조형 공정이 개발중에 있다. 특히, 현재 개발되고 있는 가변 적층 쾌속조형 공정중 발포 폴리스티렌 폼(Expandable Polystyrene Foam: EPS Foam)를 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정(VLM-S)은 장비 가격과 유지비가 저렴하며 산업적으로 활용도가 높을 것으로 판단된다. [1,2]

VLM-S 공정에서 단위 형상 조각의 형상 정밀

도는 열선 절단기에 의한 발포 폴리스티렌 폼 절단시 발생하는 열반경과 열선 절단중 공급 재료에 응력의 불균형에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 열선 절단기에 의한 발포 폴리스티렌 폼 절단시 나타나는 열전달 특성을 실험 및 해석적 방법으로 접근하여 절단시 발생하는 열 반경, 절단 가능 속도 영역 및 열 선단부 크기를 정량화 하였다. 또한, 실험적 방법으로 절단후 잔여 재료폭의 정밀도에 미치는 영향에 대하여 고찰하였다.

2. 열선 절단 공정의 열전달 특성에 대한 실험적 분석

2.1 실험 장치 구성

본 실험에 사용된 실험 장치 구성은 Fig.1 과 같

다. 실험에 사용된 열선 직경은 0.36mm 이다.

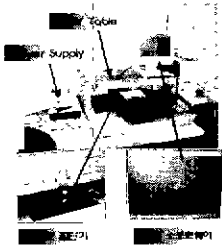


Fig.1 Organization of Test Apparatus

2.2 열선 최대 절단 가능 속도 측정 실험

본 실험에서는 열선에서 모재로 투입되는 열 입력별 최대 절단 가능 속도와 이때의 표면 상태를 측정하여 제품의 형상에 영향을 미치지 않고 표면 요철이 거의 발생하지 않는 열 입력별 최대 절단 가능 속도에 대한 관계식을 유도하였다. 또한, 시편을 롤링 방향과 롤링 방향에 수직한 방향에 대하여 모두 제작하여 재료 이방성 특성이 최대 절단 가능 속도에 미치는 영향에 대하여 조사하였다. 절단 시편 Fig.2 와 같다.

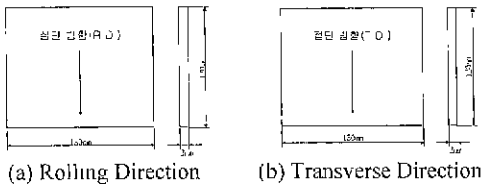


Fig.2 Detail of the Cutting Specimen

본 실험은 Fig 2 과 같은 발포 폴리스티렌 폼 시편을 롤링 방향 및 롤링 방향에 수직한 방향으로 절단하여 롤링 방향 및 롤링 방향에 수직한 방향의 열 입력량(Q_L)별 최대 절단 가능 속도(V_{HMAX})를 측정하였다. 본 실험 결과를 이용하여 식(1)와 같은 롤링 방향에 대한 열 입력량별 최대 절단 가능 속도 관계를 유도하였다.

$$V_{HMAX RD} = 115.5 \times Q_L + 8.15 \quad (1)$$

여기서, Q_L (watt) 은 열 입력량이고 $V_{HMAX RD}$ 는 해당 열량에 대한 롤링 방향이다.

한편, Fig.3 직선의 아래 영역인 "A" 영역에서는 열선에 의한 직선 형상의 절단시 표면 요철이 거의 발생하지 않고 절단 직진도도 정확히 구현되며, 절단력이 거의 발생하지 않았다. 한편, Fig.3 직선의 아래 영역인 "A" 영역에서는 열선에 의한 직선 형상의 절단시 표면 요철이 거의 발생하지 않고 절단 직진도도 정확히 구현되며, 절단력이 거의 발생하지 않았다.

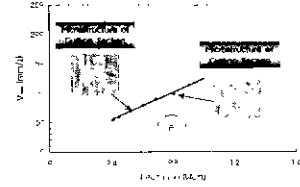


Fig.3 Relationship between Heat Input and Maximum Cutting Speed in Rolling Direction

열 입력과 롤링 방향에 수직한 방향의 최대 절단 가능 속도는 롤링 방향의 최대 절단 가능 속도의 약 64% 정도밖에 되지 않았다. 이 결과는 재료의 롤링 방향에 대한 롤링 방향에 수직한 방향의 인장 강도 비율과 동일하다. 이것은 재료의 이방성 특성때문으로 사료된다.

2.3 절단 오프셋 측정 실험

열선의 열량이 발포 폴리스티렌 폼 절단면으로 전달되는 량에 따라 절단 후의 치수 오차가 달라진다. 본 실험에서는 열선에 의하여 발포 폴리스티렌 폼 재료에 투입되는 열량을 제어하여 각 속도 영역에서의 형상 오차량을 계산하였다. Fig.4 와 같이 시편을 절단하여, 열선의 발열량변화에 대한 절단 폭(W)과 절단 후 폭(W_c) 변화량을 측정하였다. 실험에 사용된 실험 장치는 Fig.1 과 같다.

본 실험 결과 속도별 절단 후 치수 변화를 정량적으로 나타낼 수 있는 절단 무차원 변수 절단 오프셋(Cutting Offset : C.O.)를 정의 할 수 있었다.

$$C.O = (W - W_c) / D - 1.0 \quad (2)$$

여기서, D 는 열선의 직경이다

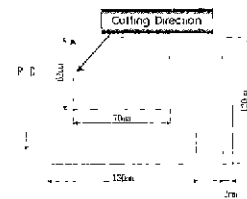


Fig 4 Cutting Specimen for the Cutting Offset Test

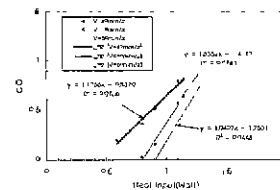


Fig. 5 Relationship between Cutting Offset and Heat Input

또한, 절단 오프셋은 열 입력량(Q_L)과 함께 데이터

를 나타낸 후 선형 함수로 보간 하였다.

3. 열선 절단 공정의 열전달 특성에 대한 해석적 분석

3.1 지배 방정식

열에 의한 절단 공정은 비정상 (Non-Stationary) 열 유동이 발생하는 시직절 영역과 끝점 영역 및 준정상 (Quasi-Stationary) 열 유동 영역으로 구분할 수 있다. 열원과 동일한 속력으로 이동하는 이동좌표계 (Moving Coordinate) 3 차원 비정상 열전달 현상에 대한 지배방정식은 식(3)과 같다.[3]

$$\frac{\partial}{\partial x_M} \left(k \frac{\partial T'}{\partial x_M} \right) + \frac{\partial}{\partial y_M} \left(k \frac{\partial T'}{\partial y_M} \right) + \frac{\partial}{\partial z_M} \left(k \frac{\partial T'}{\partial z_M} \right) + q = \rho c_p \left\{ \frac{\partial T'}{\partial t_M} - V_n \frac{\partial T'}{\partial x_M} \right\} \quad (3)$$

여기서, (x_M, y_M, z_M) 은 이동좌표, (x_f, y_f, z_f) 는 고정좌표, k 는 열전도 계수, ρ 는 밀도, c_p 는 비열, V_n 은 열선 이동 속력이다.



Fig.6 Schematics of Hotwire Cutting, Moving Coordinate, and Heat Source Model

3.2. 유한요소해석

유한요소해석은 용접 공정 해석에 널리 쓰이고 있는 Sysweld + 를 사용하였다. 지배방정식의 유한요소해석을 위한 유한 요소 수식은 식(4)와 같으며, 시간적분은 사각형 적분법 (Trapezoid Rule)을 사용하였다

$$[C(T)]\{T\} + [K(T)]\{T\} + \{F\} = \{Q(T)\} \quad (4)$$

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

열원 모델링은 선형 열원을 모델링 할 수 있는 Fig.6 와 같은 체적 열원 모델을 이용하였다

3.2.1. 전체 영역 해석

열반경의 크기와 온도 분포 및 절단 속도와 요소 크기의 영향을 대략적으로 예측하기 위하여 전체 영역에 대한 비정상 상태 열전달을 수행하였다.

해석에 적용한 열선 속도는 10mm/s, 30mm/s, 40mm/s 및 50mm/s 이다. 본 해석에서는 육각형 요소 600 개와 표면 요소 1360 개를 사용하였다. 해석

결과 열선 절단시 최대 열반경 크기는 10mm/s 일 때 5mm 정도였으며, 열 반경 밖에서는 거의 주위 온도와 동일한 온도 분포를 나타내었다. 또한, 대류에 의한 온도 변화는 거의 없었으며, 전도에 의하여 모재로 열이 모두 전달됨을 알 수 있었다. 속도가 증가함에 따라 열 반경이 현저히 감소하는 현상을 나타내었다.

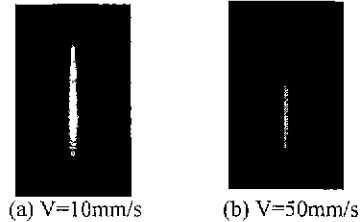


Fig.8 Global Analysis Results

3.2.2. 국부 영역 해석

열반경의 크기와 온도 분포 및 열 선단부 길이를 예측하기 위하여 국부 영역에 대한 비정상 상태 열전달을 수행하였다. 전체 영역 해석 결과를 이용하여 폭 방향 길이는 5mm 로 하였으며, 길이 방향으로 25mm 로 하였다. 특히, 해석 시작점을 길이 방향으로 5mm 들은 점에 둠으로써 시작점 효과를 최소화 하였다. 해의 진동을 최소화하기 위하여 각변의 길이가 0.5mm 인 육각형 요소를 사용하였으며, 적분 시간 간격은 열선의 진행 방향으로 각 절점에서 수행될 수 속도별로 시간 간격을 조절하였다.

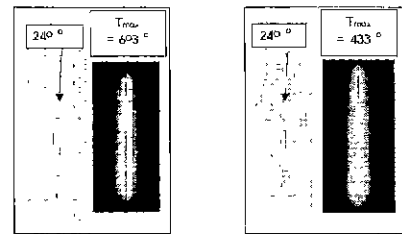


Fig.9 Local Analysis Results

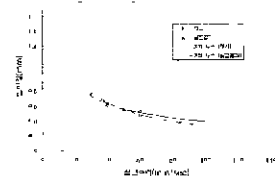


Fig.10 Comparison of Melting Width between Analysis and Experiments

해석에 적용한 열선 속도는 실제 열선 절단 속도인 30mm/s, 40mm/s, 50mm/s 및 60mm/s 를 적용하

였다. 본 해석에서는 육각형 요소 1500 개와 표면 요소 1360 개를 사용하였다. 해석 결과는 Fig.9 와 같으며, 온도 분포는 진동이 없이 일정하였다. 최종 해석 결과와 실험 결과를 비교하면 Fig.10 와 같이 95% 이상 일치하는 결과를 얻게 되었다.

본 해석 결과를 토대로 열선에서 공급된 열 입력에 의하여 용융 시킬 수 있는 속도별 열 선단부 길이를 계산하였다. 그리고, 이 값을 지수 함수로 보간하여 열선이 휘어지는 온도에서의 열 선단부 길이를 계산하였다. 그 결과 실험에서 예측된 값과 잘 일치하였다.

5. 절단후 잔여 재료폭의 형상 정밀도 영향

열선에 의한 단위 형상 조각 생성시 절단후 잔여 재료폭의 크기에 따라 기준치와 실제 절단 치수의 오차가 다르게 발생한다. 이것은 실제 열선 절단중 응력의 불균형 상태가 발생하는데, 이때 절단후 잔여 재료폭이 작으면 폭방향의 끝부분으로부터의 응력변화가 커져서 정확한 절단 경로를 따라 절단이 되지 않기 때문이다. 그러므로, 본 공정의 절단 오차를 최소화하기 위하여 Fig 11 과 같은 절단 시험을 수행하여 식(7)와 (8)에서 정의한 절단 오차(C.E. Cutting Error)와 절단 편차(C.D : Cutting Deviation)로써 절단 후 잔여 재료폭의 형상 정밀도 영향을 판단하였다.

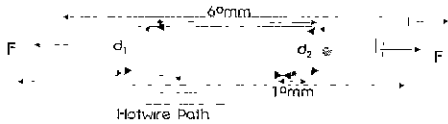


Fig 11 Schematic of the cutting path of a hotwire

$$d_{exp} = (d_2 + d_1)/2.0 \quad (5)$$

$$d_{dev} = (d_2 - d_1)/2.0 \quad (6)$$

$$C.E.(%) = (d_{exp} - d_c)/d_c \times 100 \quad (7)$$

$$C.D.(%) = d_{exp}/d_c \times 100 \quad (8)$$

실험 결과는 Fig.12, Fig 13 과 같으며 절단 후 잔여 폭이 커지면 응력 불균형이 완화되어 절단 오차와 절단 편차 상당히 줄어드는 것을 알 수 있다

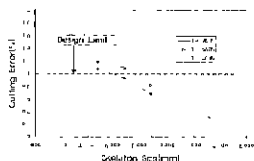


Fig.12 Relationship between C. E. and Skeleton Size

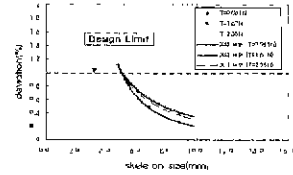


Fig 13 Relationship between C.D. and Skeleton Size

그러므로, 본 공정에서는 기준 하중인 2N 을 기준으로 하여 절단오차와 절단 편차가 1% 이하인 8mm 이상의 절단 후 잔여 재료폭이 소요된다

6. 결론

본 논문에서 VLM-S 에 의해 제작된 제품의 형상 정밀도를 개선을 위해 정밀도에 영향을 미치는 주요 인자인 열선 절단 공정에서의 열전달 특성과 절단 후 잔여 재료폭의 치수 효과에 대하여 연구하였다. 그 결과, 열전달시 실제적인 정밀도에 영향을 미치는 절단 오프셋을 열선에 의한 열 입력과 관계식을 수립할 수 있었다. 또한, 실제 열선 절단 공정에서 최대 절단 가능 속도와 열 입력 관계 및 열선이 휘어지지 않고 제품을 절단 할 수 있는 열 선단부의 크기와 열입력 관계를 정량적으로 유도할 수 있었다. 이 결과는 현재 개발중에 VLM-S 입력데이터 생성 프로그램에 반영되어 VLM-S 를 이용한 제품 제작시 형상 정밀도 향상에 기여할 것이다. 그리고, 공급 재료의 절단후 잔여 재료폭과 절단 오차 및 절단 편차의 관계를 실험적으로 정량화 함으로써 형상 정밀도에 영향을 미치지 않는 최소 절단 후 잔여 재료폭을 정의할 수 있었다.

참고 문헌

1. 안동규, 이상호, 양동열 외 3 인. 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 패속 조형 공정 설계 및 개발. 한국정밀공학회 추계학술대회 논문집, pp.759~762, 2000.
2. 안동규, 이상호, 양동열 외 2 인 “가변 적층 패속 조형 공정 개발을 위한 발포 폴리스티렌 폼의 선형 열선 절단시스템 절단 특성 및 접착강도 특성에 대한 연구” 한국정밀공학회지, 제 17 권, 제 12 호 pp185~194, 2000
3. Y. S. Yang and S. J. Na. “A study on residual stresses in laser surface hardening of a medium carbon steel”. Surface and Coatings Technology, Vol 38, pp.311~324, 1989