韓國精密工學會 2002年度 秋季學術大會論文集 pp.176~180 KSPE 02F039

EPS foam 의 선형 열선절단시 일반 절단경사각의 제품 정밀도에 미치는 영향에 관한 연구

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

A study on influence of cutting angle on the thermal characteristics in the linear heat cutting of EPS foam in case of generally sloped cutting

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

ABSTRACT

All types of VLM-S process include the linear heat cutting of EPS foam to generate a layer with 3D shape. The dimensional accuracy and part quality of the cut part are dependent on the thermal characteristics in the EPS foam. The thermal characteristics are determined by operating parameters such as an effective heat input and cutting angle. The objective of this study is to investigate into the influence of cutting angle on the kerfwidth and the melted length of the cut part using the numerical analysis and the experiments in generally sloped cutting with two cutting angles. In order to estimate an accurate temperature field, the transient thermal analysis using moving coordinate system, the fully conformed mesh and the heat flux model with two cutting angles is carried out. From the results of the analysis and the experiments, it has been found that the influence of the rotational angle about x-axis in which the rotational axis is normal with hotwire cutting direction is appreciably negligible in comparison with that of the rotational angle about y-axis.

Key Words : Hotwire cutting (열선 절단), EPS foam (발포 폴리스티렌 폼), Generally sloped cutting angle (일반절단경사각), Transient thermal analysis (비정상 열전달 해석)

1. 서론

발포 폴리스티렌 폼 (Expandable Polystyrene Foam : EPS Foam) 을 절단하여 3 차원 형상을 제작하는 가장 일반적인 방법중 하나가 선형 열선 절단 시스템을 이용하는 방법이다. 이 방법과 쾌속조형의 특징인 한층씩 절단하여 적층하는 방식을 결합한 신개념 쾌속 조형 공정인 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정 (Variable Lamination Manufacturing Process using EPS foam : VLM-S) 가 국내 독자 기술로 개발되고 있다[1-3].

VLM-S 공정의 경우 평형사변형 메커니즘을 가진 4 축 동시제어되는 선형 열선 절단기 시스템을 이용하여 두개의 절단 경사각을 가지는 3 차원 형상의 한층인 단위형상층 (Unit Shape Layer : USL)을 생성한 후, USL 을 적층하여 3 차원 제품을 제작한다. VLM-S 공정에서 제품의 치수 정밀도와 표면 상태는 선형 열선 절단기의 절단 공정 변수인 유효 열입력, 절단 경사각, 재료 두께등에 영향을 받는다. 선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼 절단 공정에 대한 연구로써 Jouaneh 등은 유연 자동화된 폼 절단 시스템 개발에 대한 연구를 수행하였으며[4], Ahn 과 Yang 은 VLM-S 공정 개발을 위한 선형 열선 절단기 시스템의 EPS 폼 수직 절단시 EPS 폼 내부 열 특성에 대하여 연구하였다[5]. 또한, Ahn 과 Yang 등은 선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼 단순 경사 절단시 EPS 폼 내부 열 특성 및 제품 특성의 변화에 대한 연구를 수행하였다[6]. Swift-Hook 등은 선형 열선 절단기의 열원 특성과 동일한 선형 열원을 가진 침투 용접 (Penetration Welding) 공정에 대하여 절단 속도 한계와 용융폭에 대한 연구를 해석적으로 수행하였다[7]. Park 과 Na 는 레이저 절단에서 절단 메

커니즘과 절단 폭 (Kerfwidth) 관계에 대하여 연구하였다[8]. Aloke 등은 레이저 절단에서 열입력과 절단 속력이 절단폭에 미치는 영향에 대하여 연구하였다[9].

본 연구에서는 VLM-s 공정의 핵심 공정인 Fig. 1 과 같은 4 축 열선 절단기에 의한 EPS 폼 절단시 두개의 절단 경사각(φ_x , φ_y)을 가지는 일반 경사 절단에서 절단 경사각의 진행 방향이 절단 진행 방향에 수직한 x 방향 절단 경사각의 절단폭 (kerfwidth : η)과 모서리 용융 길이 (melted length : μ)에 대한 영향을 실험 및 해석적 방법으로 분석하였다. 또한, 두가지 절단 경사각을 가지는 일반적 4 축 열절단 공정을 유한요소해석하기 위하여 두개의 절단 경사각이 고려된 열원 모델링과 전 해석 영역이 절단 경사각과 일치하는 유한요소격자 생성법을 도입하였다. 유한요소해석은 비정상 열전달 해석용 상용 소프트웨어인 SYSWELD+[10] 를 이용하였다.

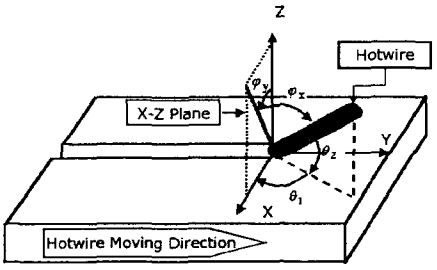


Fig. 1 Schematic of generally sloped cutting

2. 일반 경사 절단 해석 및 고찰

2.1 선형열선절단기에 의한 EPS 폼 절단 특성

선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼 절단 공정을 고찰하면 다음과 같은 특징을 발견할 수 있다..

가. 열선의 열분포는 양끝단을 제외하고는 열선 길이 방향으로 열구배가 없는 선형 열원 특성을 나타낸다[5].

나. 경사 절단시 열 영향부의 분포가 EPS 폼의 양끝단을 제외하고는 열원의 경사각과 일치하는 단면 분포를 나타낸다[6].

2.2 유한요소 지배방정식 및 열원 모델링

선형 열선 절단기에 의한 EPS 폼 절단과 같이 열원을 이용한 절단 공정은 이동 좌표계를 이용한 비정상 열전달 현상으로 해석할 수 있다. 이동좌표계를 이용한 3 차원 열전달 현상의 경우 식(1)과 같이 표현될 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x_M}(k\frac{\partial T}{\partial x_M})+\frac{\partial}{\partial y_M}(k\frac{\partial T}{\partial y_M})+\frac{\partial}{\partial z_M}(k\frac{\partial T}{\partial z_M})+\dot{q}=\rho c\left\{\frac{\partial T}{\partial t_M}-V_{tr}\frac{\partial T}{\partial x_M}\right\} \quad (1)$$

여기서, (x_M, y_M, z_M)은 이동좌표, k 는 열전도 계수, ρ 는 밀도, C_p는 비열, V_{tr}은 열선 이동 속력이다.

식(1)을 등방성 요소에 적용하여 유한 요소 수식화 하면 식(2)를 얻게 된다.

$$[C(T)]\{\dot{T}\}+[K(T)]\{T\}+\{V\}=\{Q(t)\} \quad (2)$$

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

두개의 절단 경사각을 가진 열선 절단 공정에서 열원은 역학적으로 Fig. 2 와 같이 두개의 절단 경사각에 의하여 EPS 폼과 접촉하는 열원의 면적이 증가된 타원형 선형 열원으로 가정할 수 있다. 이 타원형 선형 열원은 원통 방정식을 식(3)과 같이 회전 변환하여 얻을 수 있다. 이때, 열원의 단면적과 열입력 위치 계산식은 식(4)와 같다.

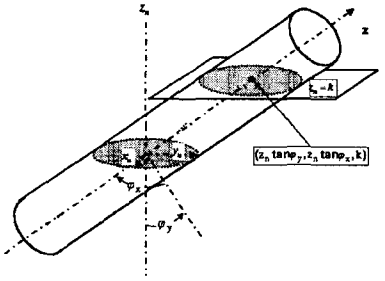


Fig. 2 Center and the applied area of the heat flux in the finite element model

$$\begin{Bmatrix}x\\y\\z\end{Bmatrix}=\begin{bmatrix}\cos\varphi_y & 0 & -\sin\varphi_y\\ 0 & 1 & 0\\ \sin\varphi_y & 0 & \cos\varphi_y\end{bmatrix}\begin{bmatrix}1 & 0 & 0\\ 0 & \cos\varphi_x & -\sin\varphi_x\\ 0 & \sin\varphi_x & \cos\varphi_x\end{bmatrix}\begin{Bmatrix}x_n\\y_n\\z_n\end{Bmatrix} \quad (3)$$

여기서, r, φ_x , φ_y 는 각각 열원 반경과 x 축 및 y 축 절단 경사각이다.

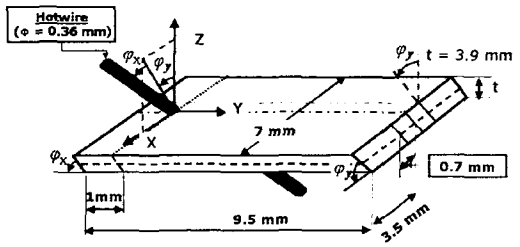
$$\frac{(x_n-z_n\tan\varphi_y)^2}{(r/\cos\varphi_y)^2}+\frac{(y_n-z_n\tan\varphi_x)^2}{(r/\cos\varphi_x)^2}=1.0 \quad (4)$$

여기서, (x_n,y_n,z_n)은 회전된 좌표계이며 (x,y,z)는 최초 좌표계이다.

2.3 유한요소해석

두개의 절단 경사각을 가진 일반 경사 조건에 대한 열선 절단 공정을 해석하기 위하여 열선의 EPS 폼 단순 경사 절단시 나타난 주요 특징인 2.1.

절의 나 특징을 이용하여 전체 유한요소격자가 열원의 두가지 경사각과 일치하는 경사를 가진 FCM (Fully conformed mesh) 격자 구조를 이용하여 3 차원 비정상 열절단 해석을 수행하였다. 해석에 사용된 형상과 유한 요소 격자는 Fig. 3 과 같다. 해석에 사용된 사용된 유한요소격자는 육면체 요소 1560 개, 표면 요소 1496 개이다. 일반 경사각에서 x 축 경사각의 영향을 분석하기 위하여 φ_y 를 30° 로 고정한 뒤 φ_x 를 40° 까지 10° 씩 변화시키면 해석을 수행



하였다. 열원의 강도는 4.81 W/mm^2 이다.

Fig. 3(a) Analysis geometry conformed to cutting angle

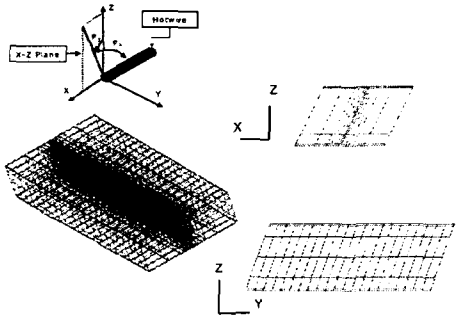


Fig. 3(b) Finite element modeling using a fully conformed geometry

2.4 해석 결과 및 고찰

두개의 절단 경사각을 가진 일반 경사 절단조건에 대한 3 차원 비정상 열전달 해석 결과는 Fig. 4, Fig. 5 와 같다.

해석 결과 EPS 폼 내부의 온도는 x 축 절단 경사각(φ_x)에 관계없이 거의 일정한 온도분포를 나타냄을 알 수 있었다. 절단 폭과 두께 방향 중간 단면에서의 온도 분포는 y 축 절단 경사각(φ_y)만으로 해석한 결과와 거의 동일한 결과를 나타내었다. x 축 절단 경사각(φ_x)의 절단폭에 미치는 영향은 0.02 mm 이다. 이 결과는 y 축 절단 경사각(φ_y)이 절단폭에 미치는 영향이 0.11mm 정도[6]임을 고려할 때 x 축 절단 경사각(φ_x)의 절단폭에 미치는 영향 상당히 작음을 알 수 있다.

x 축 절단 경사각(φ_x)의 모서리 용융 길이에 미치는 영향은 Fig. 6 과 같다. 모서리 용융 길이에 미치는 x 축 절단 경사각(φ_x)의 영향은 거의 없음을 알 수 있다. 이와 같이 x 축 절단 경사각이 y 축 절단 경사각보다 절단 폭과 모서리 용융 길이에 영향을 미치지 못하는 이유는 y 축 절단 경사각은 열원의 반경을 절단폭 방향으로 증가시킴으로 절단폭 방향으로 투입열량을 증가시키는 효과가 있는 반면 x 축 절단경사각은 열선의 진행 방향으로 열원의 반경을 증가 시키고 절단폭 방향으로는 거의 열전달을 이르키지 못하므로써 실제적으로 절단폭과 용융 길이를 증가시키지 못하기 때문이다

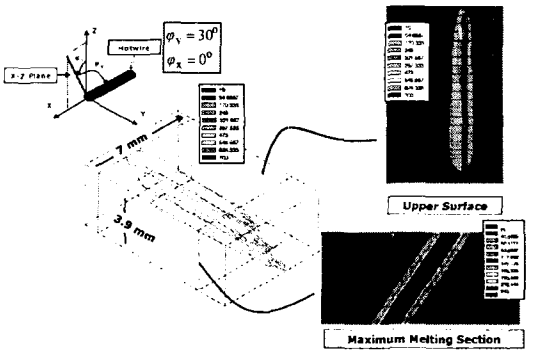


Fig. 4(a) Results of analysis for generally sloped cutting(Q_{eff}=0.016W·s/mm^2, φ_x = 0°, φ_y = 30°)

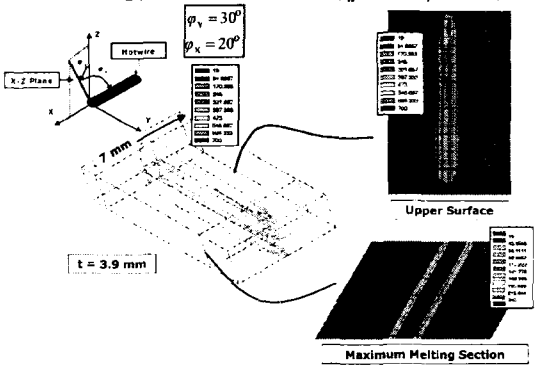


Fig. 4(b) Results of analysis for generally sloped cutting(Q_{eff}=0.016W·s/mm^2, φ_x = 20°, φ_y = 30°)

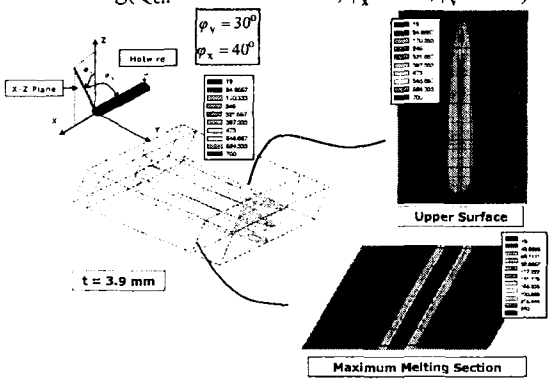


Fig. 4(c) Results of analysis for generally sloped cutting(Q_{eff}=0.016W·s/mm^2, φ_x = 40°, φ_y = 30°)

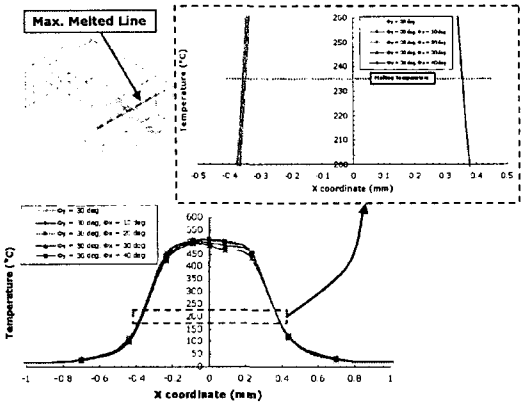


Fig. 5 Influence of cutting angle (φ_X) on temperature distribution in the maximum melted line

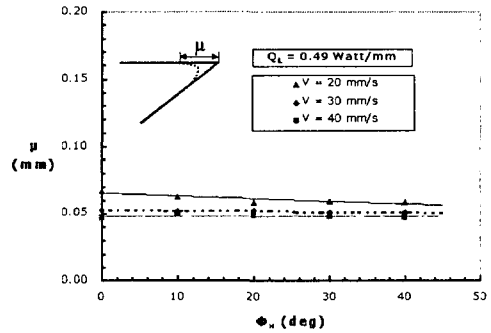


Fig. 6 Results of analysis (the size of melted length)

3. 경사 절단 실험 및 고찰

3.1 경사 절단 실험

일반 경사 절단 조건에 유한요소해석 결과를 검토하기 위하여 일반 경사 절단 실험을 수행하였다. 실험에 사용된 시편은 Fig. 7 과 같으며 실험은 VLM-ST 장치를 사용하였다.

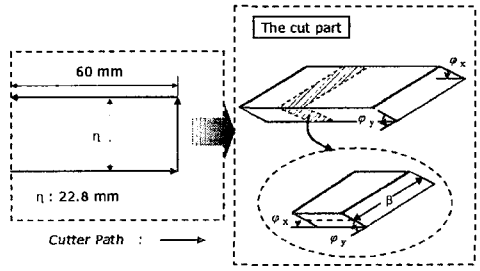


Fig. 7 Details of specimen and measured dimension

본 실험에서는 해석조건과 동일하게 φ_y 를 30° 로 고정한 뒤 φ_x 를 40° 까지 10° 씩 변화시키면 실험을 수행하였다. 열원의 강도는 4.81 W/mm^2 이다. 절단속도는 20 mm/s, 30 mm/s 및 40 mm/s 로 하였다.

절단폭은 CAD 상의 절단 요구 치수(α)와 실제 절단된 제품의 치수(β)의 차이를 측정하였다. 또한, 절단 시편의 모서리의 형상을 비교함으로써 모서리 용융길이에 대한 x 축 절단 경사각의 영향을 분석하였다.

3.2 실험 결과 및 고찰

일반 경사 실험 결과 x 축 절단 경사각의 절단폭에 미치는 영향은 Fig. 8 과 같다. 또한, x 축 절단 경사각의 모서리 용융 길이에 미치는 Fig. 9 와 같다

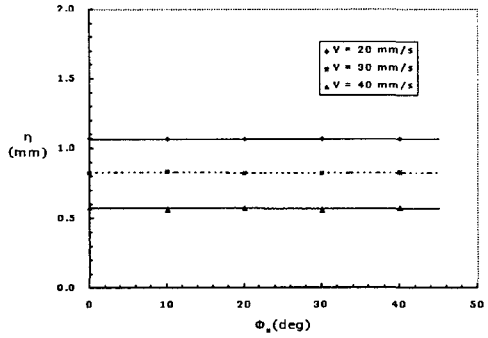


Fig. 8 Influence of φ_x on the kerfwidth

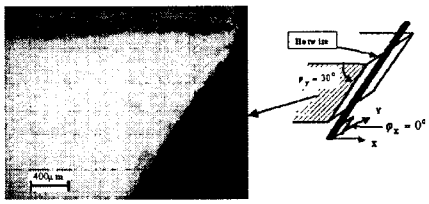


Fig. 9(a) Influence of φ_x on the edge shape (Q_{eff}=0.016W·s/mm^2, φ_x = **0°**, φ_y = **30°**)

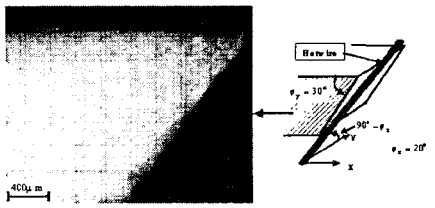


Fig. 9(b) Influence of φ_x on the edge shape (Q_{eff}=0.016W·s/mm^2, φ_x = **20°**, φ_y = **30°**)

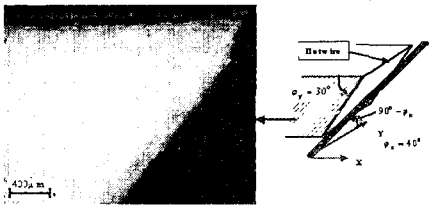


Fig. 9(c) Influence of φ_x on the edge shape (Q_{eff}=0.016W·s/mm^2, φ_x = **40°**, φ_y = **30°**)

Fig. 8 은 x 축 절단 경사각이 절단폭에 영향을 미치지 못함을 보여준다. 또한, Fig. 9 에서 x 축 절단 경사각이 변하여도 모서리 형상이 거의 변하지 않음을 알 수 있다. 이 결과는 해석 결과와 매우 일치된 결과이다. 본 실험 결과를 통하여 일반 경사각이 고려된 3 차원 열전달 해석 모델을 타당성을 입증할 수 있었으며, 제안된 해석 모델이 신뢰할 수 있는 해석 결과를 제공함을 할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 VLM-s 공정에서 열선 절단기에 의해 두개의 경사각을 가지는 일반 4 축 열선 절단시 열선 절단각의 영향에 대하여 연구하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 두개의 절단각 경사각을 가진 일반 4 축 열선 절단 공정을 해석하기 위해서는 열선의 경사에 의해 EPS 폼에 추가적으로 투입되는 열량을 고려하기 위하여 타원형 선형 열원 모델링이 필요하며, 정확한 열전달 현상을 묘사하기 위하여 FCM 유한요소 격자가 필요함을 알 수 있었다. 또한, 제안된 해석 모델로 해석한 결과와 실험 결과는 잘 일치하였다. 이결과로부터 제안된 해석 모델의 타당성과 신뢰성을 입증할 수 있었다.

둘째, 해석 및 실험 결과를 통하여 절단 경사각 중 x 축 절단 경사각(φ_x)이 절단폭에 미치는 영향은 0.02 mm 이하임을 알 수 있었다. 또한, x 축 절단 경사각(φ_x)이 모서리 용융 길이에 미치는 영향은 거의 없음을 알 수 있었다. 이 결과로부터 일반 4 축 열선 절단시 두개의 열선 경사각 중 y 축 절단 경사각(φ_y)이 절단폭 및 모서리 용융 길이에 미치는 영향에 비해 x 축 절단 경사각(φ_x) 이 절단폭 및 모서리 용융 길이에 미치는 영향이 매우 작음을 알 수 있었다.

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, 양동열, 신보성, 박승교, 이용일, "발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변적층 쾌속 조형 공정 및 장치 개발," 한국 정밀공학회지, 제 18 권, 제 8 호, pp. 54 - 63, 2001.
2. 안동규, 이상호, 양동열, "연속형 가변적층 쾌속 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 쾌속 조형 공정 및 장치 개발에 관한 연구," 한국 정밀공학회지, 제 19 권, 제 2 호, pp. 95 - 105, 2002.
4. Jouaneh, M., Hammad, A., and Datseris, P., "A Flexible Automated Foam Cutting System," International Journal of Machine Tools & Manufacture Vol. 37, pp. 437 - 449, 1997.
5. 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 & Manufacture, Vol. 42, pp. 427 - 439, 2002.
6. 안동규, 이상호, 양동열, 윤석환, "EPS foam 의 선형 열선 절단시 절단 경사각의 영향에 관한 연구," 한국정밀공학회 춘계학술대회, pp. 947-951, 2002.
7. Swift-Hook, D. T. and Gick, A. E. F., "Penetration welding with lasers," Welding Journal, pp. 492s – 499s, 1973.
8. 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.
9. Aloke, 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.
10. ESI Group, "SYSWELD+ 2.0 Reference Manual," SYSTUS International, New York, 1972.