

## 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 다기능 열선절단장치 개발

이상호\*(KAIST 기계기술연구소), 김효찬(KAIST 대학원), 양동열(KAIST),  
박승교(주 메닉스), 김찬국(주 메닉스)

### Development of Multi-functional Hotwire Cutting System using EPS-foam

Sang-Ho Lee\*(Research Institute of Mechanical Technology, KAIST),  
Hyo-Chan Kim(Graduate School, KAIST), Dong-Yol Yang(KAIST),  
Seung-Kyo Park(Menix Engineering, Ltd.), Chan-Kuk Kim(Menix Engineering, Ltd.)

#### ABSTRACT

A thick-layered RP process, transfer-type variable lamination manufacturing using expandable polystyrene foam (VLM-ST) has been developed to have the advantageous characteristics such as high building speed, low cost for introduction and maintenance of VLM-ST apparatus, and little staircase surface irregularities of parts. However, VLM-ST has difficulty fabricating an axisymmetric shape and a large-sized freeform shape because of the limited sloping angles and small build size. The objective of this paper is to develop a multi-functional hotwire cutting system using EPS-foam (MHC). MHC employs a four-axis synchronized hotwire cutter with the structure of two XY movable heads and a turntable. In order to examine the applicability of the developed MHC apparatus, an axisymmetric shape, a polyhedral shape and a large-sized freeform shape were fabricated on the apparatus.

**Key Words** : VLM-ST (단속형 가변적층쾌속조형공정), MHC (다기능 열선가공장치), axisymmetric shape (축대칭형상), large-sized freeform shape (대형 자유표면 형상), turntable (회전 테이블)

#### 1. 서론

2001년 Yang 과 Ahn 등이 제안한 단속형 가변적층쾌속조형공정(VLM-ST)은 1 mm 이하의 얇은 층을 이용하는 종래의 쾌속조형시스템<sup>1,2</sup> 과 1 mm 이상의 후판적층조형공정의 단점을 극복할 수 있도록 개발되었다. VLM-ST 장치<sup>3</sup>는 3 차원 CAD 모델로부터 생성된 USL 데이터에 따라서 (X, Y)로 병진운동과 ( $\theta_x$ ,  $\theta_y$ )로 회전운동을 수행하는 외팔보 구조의 4 축 동시제어되는 선형열선절단기를 이용하여 발포폴리스티렌 폼을 절단/적층하여 3 차원 형상을 빠르게 제작 가능하다. 하지만, VLM-ST 장치도 최대 65°로 제한된 경사각과 작은 조형크기(VLM300: 297×210 mm, VLM400: 420×297 mm)로 인하여 축대칭형상이나 대형조형물 제작에 다소 어려움이 있다. 또한, 기둥과 같은 축대칭 형상을 제작하는데도 모든 층을 각각 쌓아올려 제작해

야하기 때문에 작업의 효율성이 떨어진다.

본 연구에서는 VLM-ST 장치의 단점을 보완할 수 있도록 CAD 데이터로부터 축대칭 형상이나 다면체 형상, 그리고 대형 3 차원 조형물을 쉽게 제작할 수 있는 발포폴리스티렌 폼을 이용한 다기능 열선가공장치(MHC: Multi-functional Hotwire Cutting system using EPS-foam)를 개발하고자 한다. 그리고, 다기능 열선가공장치를 이용하여 3 차원 형상을 제작함으로써 제안된 장치의 적용성과 효율성을 검증하고자 한다.

#### 2. 다기능 열선 가공 장치

다기능 열선가공장치의 개념도는 Fig. 1 에 보여진 바와 같다. 다기능 열선가공장치는 3 차원 CAD 모델 데이터로부터 생성된 절단경로 데이터에 따라 두 개의 XY 헤드 사이에 연결된 열선을

이용하여 다양한 두께를 가진 최대 1200×900 mm 크기의 EPS 폼 판재를 순서대로 절단/적층하여 대형 3 차원 조형물을 빠르게 제작하거나 회전 테이블과 열띠(hot-strip)를 이용하여 EPS 폼 블록(block)을 가공하여 구나 원뿔, 원기둥 등과 같은 축대칭 형상을 쉽고 간편하게 제작할 수 있는 장치이다.

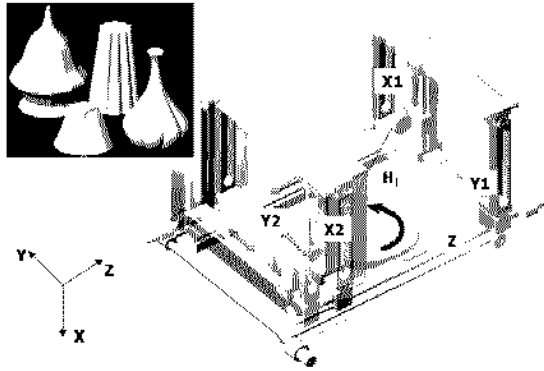


Fig. 1 Schematic of multi-functional hotwire cutting system

다기능 열선가공장치는 Fig. 2 에 보여진 바와 같이 두 개의 XY 헤드 사이에 열선이 연결된 열선절단기와 회전테이블, 그리고 시스템 제어부로 구성된다.

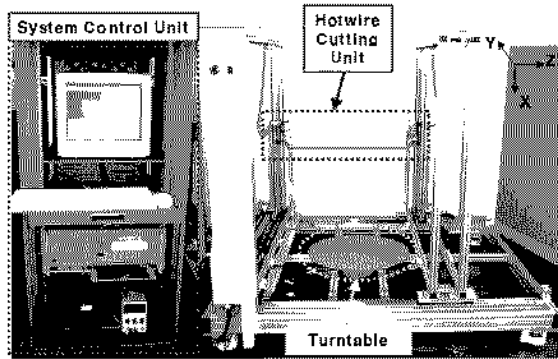


Fig. 2 Multi-functional hotwire cutting apparatus

### 3. 열선절단기의 절단 경로 데이터 생성

다기능열선가공장치에서 다면체 형상과 축대칭 형상을 제작하고자 하는 경우, 별도의 절단경로데이터의 생성 없이 회전테이블과 열선절단기 또는 열띠를 이용하여 수동으로 제작 가능하다. 반면에

다기능열선가공장치로 적층방식을 이용한 일반적인 3 차원 형상을 제작하기 위해서는 각 층에 대한 열선절단기의 절단경로데이터 ( $X_1, Y_1, X_2, Y_2, H_1$ )을 생성하여야 한다.

### 3.1 열선절단기의 자세 묘사

Fig. 3 에 보여진 바와 같이 다기능열선가공장치의 열선절단기의 자세를 정의한다. Fig. 6 에 나타낸 변수 중에서 W, R, C는 각각의 열선지지원판의 위치를 계산하는데 필요한 설계 변수값으로서 W는 YZ 평면상에서 열선 지지대가 고정되어 있는 축간의 Z 방향으로의 수직거리이고, R은 열선지지원판의 반지름이며, C는 XZ 평면상에서 열선지지대의 중심축과 열선지지원판의 중심 사이의 Z 방향으로의 수직거리를 나타낸다. 현재 설계된 열선절단기에서는 R 값과 C 값이 동일하도록 제작되었다.

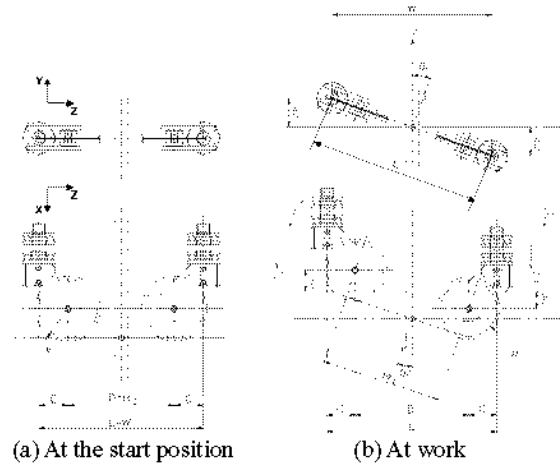


Fig. 3 Posture of hotwire cutter

### 3.2 절단경로데이터 계산

VLM-ST 공정용 절단경로데이터를 이용하여 다기능열선가공장치용 절단경로데이터의 계산하기 위해서 3 차원 CAD 모델의 STL 데이터로부터 USL 데이터 ( $x, y, \theta_x, \theta_y$ )<sup>4</sup>을 생성한다.

그리고 나서, 주어진 설계변수 W, C 값과 USL 데이터의 회전각 ( $\theta_x, \theta_y$ )로부터 L, D,  $\theta_y$  값은 각각 다음과 같이 구한다.

$$L = \frac{W}{\cos \theta_x} \quad (1)$$

$$D = L - 2 \cdot C \quad (2)$$

$$\theta_y' = \tan^{-1}(\tan \theta_y \cdot \cos \theta_x) \quad (3)$$

여기서,  $L$  은 양쪽 열선지지대의 중심축 사이의 수직거리이고,  $D$  는 열선지지원판의 중심 사이의 수직 거리이며,  $\theta_y'$ 은  $Z$  축 방향벡터와 열선사이의 각도를 나타낸다.

최종적으로 주어진 설계변수  $W, R$  값과 식(2), (3)으로 구해지는  $D, \theta_y'$ 값, 그리고 USL 데이터 ( $x, y, \theta_x, \theta_y$ )으로부터 다기능열선가공장치의 절단경로 데이터 ( $X_1, Y_1, X_2, Y_2, H_1$ )을 다음과 같이 계산할 수 있다.

$$X_1 = x - [D/2 \cdot \tan \theta_y' + R(1/\cos \theta_y' - 1)] \quad (4)$$

$$Y_1 = y + W/2 \cdot \tan \theta_x \quad (5)$$

$$X_2 = x + [D/2 \cdot \tan \theta_y' - R(1/\cos \theta_y' - 1)] \quad (6)$$

$$Y_2 = y - W/2 \cdot \tan \theta_x \quad (7)$$

$$H_1 = D/\cos \theta_y' \quad (8)$$

여기서,  $X_1, Y_1$  은 왼쪽에 있는 열선지지원판의 중심의 위치이고,  $X_2, Y_2$ 는 오른쪽에 있는 열선지지원판의 중심의 위치이며,  $H_1$ 은 열선의 길이를 나타낸다.

#### 4. 삼차원 형상 제작

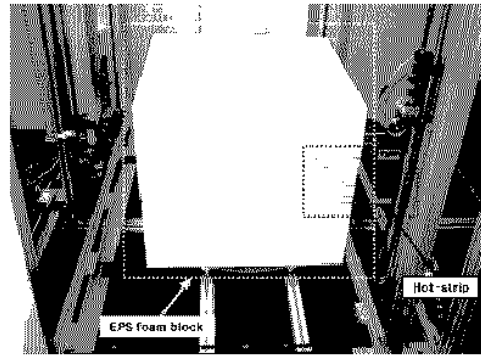
본 논문에서 개발한 다기능열선가공장치의 적용성을 검증하기 위하여 축대칭형상, 다면체형상, 자유표면형상을 제작하는 방법을 설명하고 실제 3차원 형상을 제작하였다.

##### 4.1 축대칭형상 제작

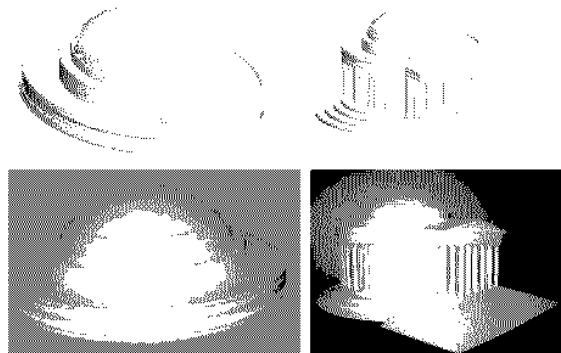
Fig. 4 은 다기능열선가공장치를 이용하여 제퍼슨기념관의 지붕형상을 위의 과정으로 제작한 예를 보여준다.

VLM-ST 장치를 이용하여 제퍼슨기념관의 지붕형상과 같은 반구형상을 제작하는 경우, 제한된 경사각 때문에 반구의 맨 윗부분으로 갈수록 정밀도가 떨어질 뿐만 아니라, 한층씩 적층하여 제작하기

때문에 작업 효율이 떨어진다.



(a) Fixed foam block on turntable



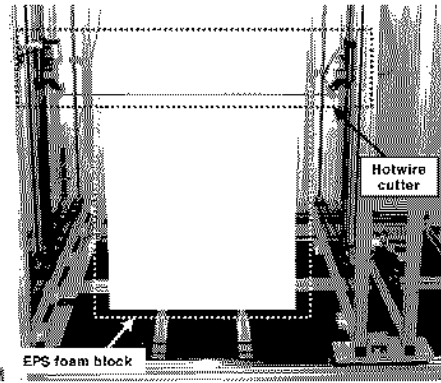
(b) Shape fabricated by turntable

Fig. 4 Axi-symmetric shape fabricated by MHC apparatus : roof of Jefferson memorial

Fig. 8 에 보여진 바와 같이 다기능열선가공장치는 열띠(hot-strip)와 회전테이블을 이용함으로써 제퍼슨기념관의 지붕형상을 한 번의 작업으로 손쉽게 제작할 수 있다.

##### 4.2 다면체형상 제작

Fig. 5 는 다기능열선가공장치를 이용하여 측면이 다면체로 구성된 탑형상을 제작한 예를 보여준다. VLM-ST 장치를 이용하여 이와 같은 탑형상을 제작할 경우, 제한된 경사각 때문에 수평에 가까운 측면경사는 구현이 불가능하고 한층씩 적층하여 제작하기 때문에 작업 효율이 떨어진다. 하지만, Fig. 9 에 보여진 바와 같이 다기능열선가공장치는 열선절단기와 회전테이블을 이용함으로써 탑형상을 손쉽게 제작할 수 있다.



(a) Hotwire cutter and foam block at the starting position



(b) Fabricated shape

Fig. 5 Polyhedral shape fabricated by MHC apparatus : Pagoda shape

#### 4.3 자유표면형상 제작

Fig. 6 은 다기능열선가공장치를 이용하여 조형 크기가 630 x 440 x 1,315 mm 인 이순신장군상을 제작한 예를 보여준다. 기존의 VLM-ST 장치를 이용하여 대형 조형물을 제작할 경우, 최대조형크기 (297×420 mm)에 맞도록 STL 데이터를 여러 조각으로 분할한 다음, 각각을 절단/적층하고 나서 다시 또 각각의 분할된 조각들을 조립해야 하기 때문에 상당한 시간이 소요된다. 하지만, 다기능열선가공장치를 이용할 경우, 최대조형크기가 820×1060 mm 이므로 조형크기가 630 x 440 x 1,315 mm 인 이순신장군상을 분할/조립의 과정 없이 하나의 일체화된 형상으로 제작할 수 있기 때문에 전체 조형시간을 크게 단축시킬 수 있다.

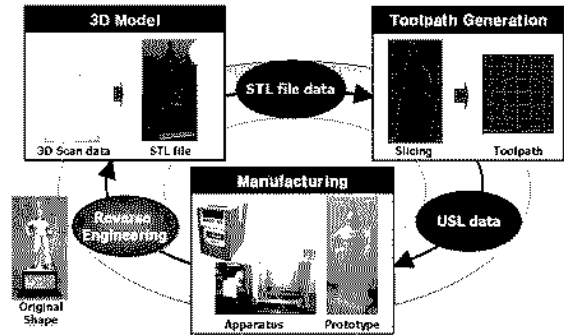


Fig. 6 Freeform shape fabricated by MHC apparatus : statue of general Yi Sun-Sin

## 5. 결론

본 논문에서는 VLM-ST 장치의 단점을 보완하고 장점은 그대로 가지고 있는 다기능열선가공장치(MHC: Multi-functional Hotwire Cutting system using EPS-foam)를 개발하였다. 이렇게 개발된 다기능열선가공장치를 이용하여 실제로 제머슨 기념관의 지붕형상과 탑형상, 그리고 이순신장군상을 제작함으로써 축대칭형상과 다면체형상은 물론이고 일반적인 대형 3 차원 형상 제작에도 효과적으로 적용할 수 있음을 보였다.

## 참고문헌

1. Jacobs, P. F., Stereolithography and other RP&M Technologies, ASME Press, 1996.
2. Kulkarni, P., Marson, A., and Dutta, D., "A Review of Process Planning Technique in Layered Manufacturing," Rapid Prototyping Journal, Vol. 6, No. 1, pp. 18-35, 2000.
3. Ahn, D. G., Lee, S. H., and Yang, D. Y., "Development of Transfer Type Variable Lamination Manufacturing (VLM-ST) Process," International Journal of Machine Tools & Manufacture, Vol. 42, No. 14, pp. 1577-1587, 2002.
4. Lee, S. H., Ahn, D. G., Choi, H. S., Yang, D. Y., Moon, Y. B., Chae, H. C., "Generation of Unit Shape Layer on CAD/CAM System for VLM-ST," Transactions of the Society of CAD/CAM Engineers, Vol. 7, No. 3, pp. 148-156, 2002.