

# VLM-s 공정을 위한 EPS 폼의 단순 경사 열선 절단시 절단 경사각이 절단폭과 모서리 형상에 미치는 영향

안 동 규\* · 양 동 열\*\*

\*조선대학교 공과대학 기계공학과

\*\*한국과학기술원 기계공학과

## Effects of Cutting Angle on Kerf width and Edge Shape in the Hotwire Cutting of EPS Foam for the Case of Single-Sloped Cutting for VLM-s Process

Dong-Gyu Ahn\* and Dong-Yol Yang\*\*

\*Dept. of Mechanical Engineering, College of Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

\*\*Dept. of Mechanical Engineering, KAIST, Daejeon 305-701, Korea

### Abstract

The dimensional accuracy and global roughness between successive layers of VLM-s, which is a new rapid prototyping process using hotwire cutter and EPS foam, depend significantly on the operating parameters of hotwire cutter. In the present study, the effect of cutting angle on the kerf width and edge shape in hotwire cutting of EPS foam for the case of single-sloped cutting with one cutting angle was investigated. Through single-sloped cutting tests, the modified relationship between kerf width and effective heat input, considering the effect of the cutting angle, and the relationship between the melted area and the cutting angle were obtained. In order to investigate the effect of cutting angles on the thermal field in EPS foam, transient heat transfer analyses using single-sloped volumetric heat flux model and locally-conformed mesh were performed. Through the comparison between experimental and numerical results, it was shown that the proposed analysis model is needed to estimate the three-dimensional temperature distribution of the EPS foam for the case of single-sloped hotwire cutting.

\* Corresponding author : smart@mail.chosun.ac.kr

(Received April 9, 2003)

Key Words : Hotwire cutting, Eps foam, Single-sloped cutting, Kerf width, Edge shape, Transient heat transfer analysis, Finite element method

## 1. 서 론

쾌속조형공정은 장시간의 조형시간, 추가적인 후처리 및 고가의 제작비등의 몇가지 단점을 가지고 있다<sup>1)</sup>. 이 같은 단점을 극복할 수 있는 방법들 중의 하나로서 발포 폴리스티렌 (EPS) 폼을 이용한 가변적층 쾌속조형 공정 (VLM-s) 이 개발되었다<sup>2-3)</sup>. VLM-s 공정의 핵심 기술은 4축 동시 제어되는 열선절단기에 의한 EPS 폼의 경사 절단이다. 열선절단기에 의한 EPS 폼의 절

단에서 EPS 폼 내부의 열전달 특성은 VLM-s 공정으로 제작된 시작품의 정밀도와 표면특성을 결정한다. 이 열전달 특성은 유효 열입력 (Effective Heat Input), 절단 경사각 및 재료 두께 등에 매우 의존한다.

열선절단기에 의한 EPS 폼 절단 제품의 치수 정밀도와 모서리 형상 개선을 위해 절단 현상의 물리적 연구와 절단공정변수의 영향에 대한 연구는 Ahn과 Yang 등<sup>4)</sup>에 의한 연구외에는 거의 이루어지지 않았다. 그러나, 본 연구에 관련된 유사 연구로써 이동 열원을 이용한 3차원 열전달 해석 및 열절단시 주요 공정 변수의

영향성에 대한 연구는 레이저 절단과 용접 공정 관련하여 많이 연구되고 있다. Swift-Hook 은 해석적 기법으로 선열원을 이용한 심용입 용접시 용융폭과 절단속도 한계를 예측하였다<sup>5)</sup>. Yang 과 Na 는 중단소강의 레이저 표면 경화 공정의 잔류 응력 해석시 이동좌표계를 이용한 FEM 열전달 해석을 수행하였다<sup>6)</sup>. Wang 등은 LOM 공정에서 레이저에 의한 종이 절단시 제품의 평면내 정밀도 향상을 위한 실험적 연구를 수행하였다<sup>7)</sup>. Labudovic 은 레이저 표면 개질 처리시 피절단체 내부의 3차원 열전달 현상을 ABAQUS를 이용하여 해석하였다<sup>8)</sup>. 이상의 연구들은 모두 열원이 재료 표면에 수직인 조건의 경우에 대한 연구이다.

본 연구에서는 Fig. 1 에 나타난 열선절단기에 의한 EPS 폼의 단순 경사 절단 (Single-sloped cutting) 시 절단 경사각이 절단폭과 절단리 모서리 용융량에 미치는 영향을 분석/고찰하였다. 단순 경사 절단 실험을 통하여 경사각이 고려된 절단폭과 유효 열입력량과의 관계식 및 각 유효 열입력별 절단 경사각이 모서리 용융량에 미치는 영향에 대하여 연구하였다. 경사진 체적 열원 (Single-sloped volumetric heat flux) 모델 및 열선 경사각 국부 적응 유한 요소 격자 (Locally-conformed mesh structure)를 이용하여 EPS 폼 절단시 EPS 폼 내부 열전달 현상 및 온도 분포를 계산하였다. 비정상 열전달 해석은 SYSWELD+를 사용하여 수행하였다.

## 2. EPS 폼의 열선 절단 특징 및 열원 모델링

### 2.1 EPS 폼의 열선 절단 특징

EPS 폼 판재의 열선 절단에서는 다음과 같은 2가지의 특징이 나타난다.

가. Photo 1 과 같이 열선의 양끝 영역이외의 열선부

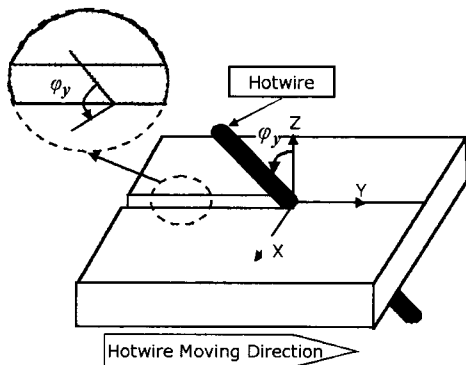


Fig. 1 Schematic of single-sloped hotwire cutting

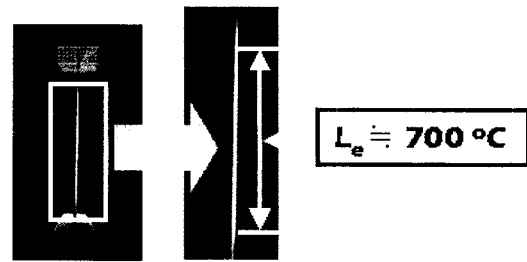


Photo 1 Temperature distribution in hotwire

에서는 열선의 길이 방향으로 온도의 구배가 없다. 즉, 선 열원의 특징을 나타낸다.

나. EPS 폼 판재의 수직 열선 절단에서 용융 면적은 절단속도와 입열량에 공히 영향을 받는다<sup>4)</sup>.

### 2.2 EPS 폼의 열선 절단시의 열원 모델링

열선절단의 특징을 고려하여 다음과 같이 열원 모델링을 위한 물리적 가정을 하였다.

가. 열선의 균일 발열 특징으로부터 식(1)과 같이 열선을 선형 체적열원(Linear volumetric heat flux)으로 가정하였다.

$$Q_L = \frac{Q}{L_e} \tag{1}$$

여기서,  $Q_L$ ,  $Q$ ,  $L_e$  은 각각 열선 단위 길이당 입열량, 총입열량 및 유효 열선 길이이다.

선형 체적 열원의 강도는 식(2)와 같이 계산되었으며, 열효율은 실제적으로 측정할 수 없어 100%로 가정하였다.

$$q(r) = \frac{4Q_L}{\pi d^2} \tag{2}$$

여기서,  $q(r)$ 과  $d$ 은 각각 선형 체적 열원의 강도 및 열선의 직경이다.

나. 2.1절 나항의 특징으로부터 열선 단위 길이당 입열량과 절단 속도를 동시에 고려하기 위하여 식(3)과 같은 유효 입열량 (Effective heat input)을 도입하였다.

$$Q_{eff} = \frac{Q_L}{V_c} \tag{3}$$

여기서,  $Q_{eff}$  와  $V_c$  는 각각 유효 입열량 및 열선 절단속도이다.

### 3. 단순 경사 절단 실험 및 결과 분석

#### 3.1 실험 장치 및 조건

단순 경사 절단 실험은 Photo 2 와 같은 VLM-s 패속조형장치에서 수행되었다. 시편의 형상과 절단 경로는 Fig. 2 와 같다. 실험에 사용된 절단 경사각은 0°, 10°, 20°, 30° 및 40° 이다. 열선의 사양은 Table 1 과 같다. 실험 조건은 Table 2 와 같다.

#### 3.2 절단 폭 (Kerf width : $\eta$ )

절단 시편의 절단폭은 Fig. 3(b) 와 같이 절단된 시편의 두께방향 중앙에서 측정하였다. 절단 폭은 식(4) 와 같이 정의된다.

$$\eta = \alpha - \beta \tag{4}$$

여기서,  $\eta$ ,  $\alpha$  와  $\beta$ 는 각각 절단폭, CAD 상의 절단 시편 폭 및 절단된 시편으로부터 측정된 폭이다.

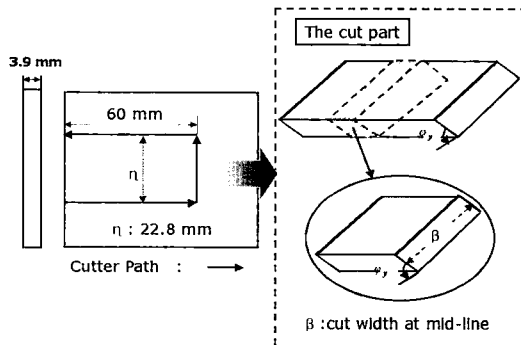


Fig. 2 Details of specimen and the measured dimension

Table 1 Specification of the hotwire

Material				Diameter (mm)
Ni (%)	Cr (%)	Mn (%)	Fe (%)	
77	20	2	1	0.36

Table 2 Experimental conditions of single-sloped cutting test

V (V)	I (A)	Q (Watt)	L <sub>c</sub> (mm)	Q <sub>L</sub> (Watt/mm)	Q <sub>eff</sub> (J/mm <sup>2</sup> )		
					V (mm/sec)		
					20	30	40
2.7	3.6	9.72	30	0.324	0.0162	0.0108	0.0081
2.9	3.9	11.31	30	0.377	0.0189	0.0126	0.0094
3.4	4.1	13.94	30	0.465	0.0232	0.0155	0.0116
3.5	4.2	14.70	30	0.490	0.0245	0.0163	0.0123

본 실험에서는 실험 데이터의 회귀 분석을 통하여 절단 경사각을 고려한 절단폭과 유효 입열량과의 관계식을 도출하였다. 절단 폭과 유효 입열량과의 관계는 식 (5) 와 같이 표현될 수 있다.

$$\eta = A_1 \times Q_{eff} + A_2 \tag{5}$$

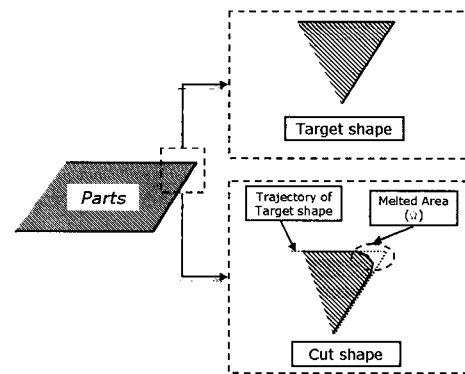
여기서, A<sub>1</sub> 과 A<sub>2</sub> 는 회귀 분석에 의해 결정되는 상수이다.

#### 3.3 모서리 용융 면적 (Melting area : $\Omega$ )

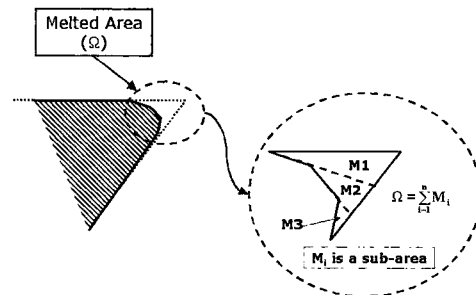
절단 경사각 절단 제품 모서리 형상에 미치는 영향을 분석하기 위하여, 각 실험 조건에 대한 모서리 용융 면적을 측정하였다. 모서리 용융 면적은 Fig. 3(a)와 같이 절단후 절단 단면의 목적 모서리 윤곽 (trajectory of the target shape) 과 절단후 절단 단면의 실제 모서리 윤곽 (trajectory of the cut shape)의 차이로 계산하였다. 모서리 용융 면적을 계산하기 위한 방법은 Fig. 3(b) 및 식(6)와 같다.

$$\Omega = \sum_{i=1}^n M_i \tag{6}$$

여기서,  $\Omega$ 와  $M_i$  는 각각 모서리 용융 면적 및 Fig.



(a) Definition of the melting area



(b) Measuring methodology

Fig. 3 Definition of the melting area and measuring methodology

4(b) 의 각 세부 삼각형 면적이다.

### 3.4 실험 결과 및 고찰

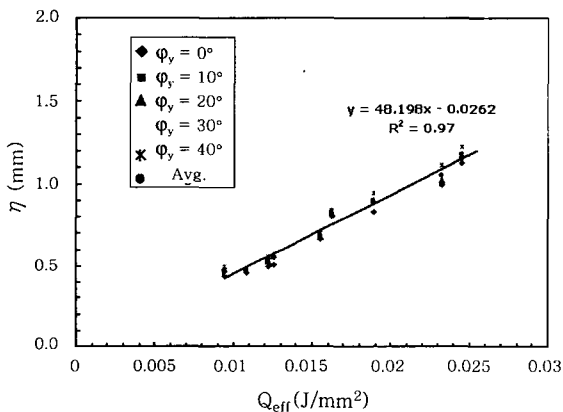
#### 3.4.1 절단폭에 대한 절단 경사각의 영향

단순 경사 절단 실험에서 절단 경사각이 절단폭에 미치는 영향은 Fig. 4 와 같다.

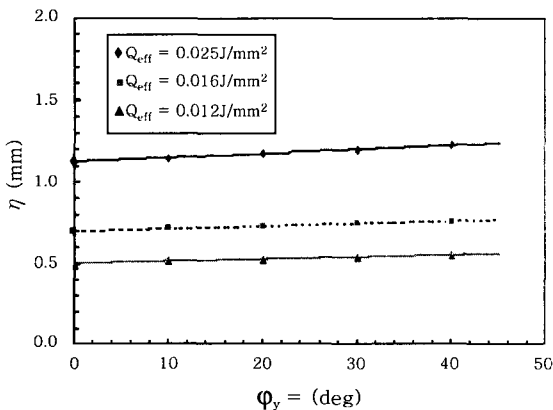
절단 경사각이 절단폭에 미치는 영향은 열선 절단기의 유효 입열량의 영향에 비해 매우 작았다. Fig. 4(a) 에서 상관 계수 ( $R^2$ )는 0.97 이었다. 이것은 절단 폭과 유효 입열량의 관계가 강한 선형성을 나타냄을 의미한다. 단순 경사 절단에서 절단 경사각이 고려된 절단폭과 유효 입열량 관계는 식(7)과 같다.

$$\eta = 48.2 \times Q_{eff} - 0.02 \quad (7)$$

한편, Fig. 4(b)로부터 유효 입열량이 매우 큰 영역에서 절단 경사각이 절단폭에 미치는 영향이 조금씩 나타남을 알 수 있다. 실험의 최대 유효 입열량인  $0.0245 \text{ J/mm}^2$  이고 절단 경사각이  $40^\circ$  인 경우의 절단폭을 동일 유효 입열량 조건이고 절단경사각이  $0^\circ$  인 경우의



(a) Relationship between kerf width and effective heat input



(b) Relationship between kerf width and cutting angle

Fig. 4 Results of single-sloped cutting test (kerf width)

절단폭과 비교하면, 절단 경사각이  $0^\circ \sim 40^\circ$  로 변할 때 절단폭은 약  $0.12 \text{ mm}$  정도 커짐을 알 수 있었다.

VLM-s 쾌속조형장치의 열선 절단기 운영 영역은 유효 입력량의 경우  $0.012 \text{ J/mm}^2$  에서  $0.017 \text{ J/mm}^2$  까지이며, 최대 절단 경사각은  $65^\circ$  이다. VLM-s 공정의 실제적인 운영 영역을 고려하면 절단 경사각이 절단폭의 크기에 미치는 영향은  $0.1 \text{ mm}$  이하임을 알 수 있었다.

#### 3.4.2 절단 경사각이 모서리 형상에 미치는 영향

단순 경사 절단 실험에서 절단 경사각이 모서리 용융 면적에 미치는 영향은 Fig. 5 및 Photo 3과 같다. Fig. 5 에서 절단 경사각이 클수록 모서리 용융 면적이

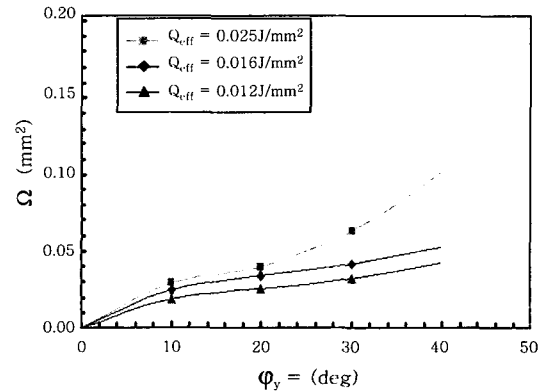
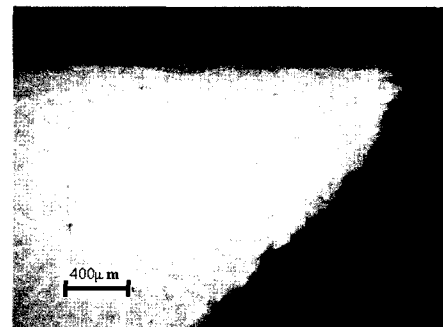
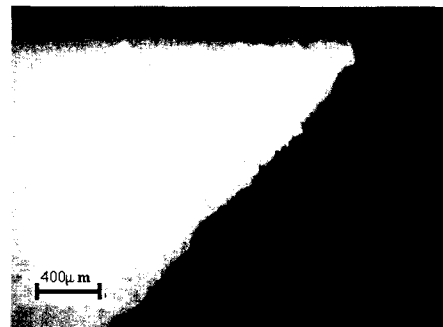


Fig. 5 Influence of cutting angle on the melting area in the edge



(a)  $Q_{eff} = 0.025 \text{ J/mm}^2, \phi_y = 40^\circ$



(b)  $Q_{eff} = 0.012 \text{ J/mm}^2, \phi_y = 40^\circ$

Photo 3 Influence of cutting angle on edge shape

증가함을 알 수 있다. Photo 3 과 같이 유효 입열량이 큰 경우 절단 제품의 모서리 형상이 목적형상과 차이가 남을 알 수 있다. 또한, 고 유효 입열량 및 절단경사각이 모두 큰 경우 모서리 용융 면적이 급격히 증가함을 알 수 있었다.

본 실험 결과, VLM-s 쾌속조형장치의 열선 절단기 운영 영역에서는 모서리 용융량이 0.11 mm<sup>2</sup> 이하임을 알 수 있었다.

#### 4. 유한 요소 해석

##### 4.1 유한 요소 해석

절단 경사각이 EPS 폼 판재의 내부 온도 분포에 미치는 영향을 분석하기 위하여 상용 소프트웨어인 SYSWELD+<sup>9)</sup>를 이용하여 비정상 열전달 해석을 수행하였다. 열선은 절단 경사각에 따라 단면의 주축(Major axis) 길이가 변하는 타원형 단면을 가진 선형 체적 열원으로 가정하였다. 열원의 단위 체적당 강도는 식(2) 와 같다. 열선 절단기의 절단 경사각에 적응하는 유한요소격자를 생성하기 위하여 열선 절단 경사각에 따라 열원 통과부분과 열원 인접부분의 유한요소격자가 기울어진 절단 경사각 만큼 기울어진 국부 적응 유한요소 격자를 도입하였다. 제안된 열원 모델링과 유한요소격자의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석 결과를 실험 결과와 비교/분석하였다.

본 3차원 비정상 유한요소해석에 사용된 유한요소 지배방정식은 식(8)과 같다<sup>8)</sup>.

$$[C(T)] \left\{ \frac{dT}{dt} \right\} + K[(T)] + \{V\} = Q(t) \quad (8)$$

여기서, [C(T)] 와 [K(T)] 는 각각 커패시턴스(Capacitance) 행렬과 강성 행렬이다.

##### 4.2 열원 모델링

경사 절단시, Fig. 6 과 같이 열원과 EPS 폼 판재의 xy 평면이 접하는 열원의 단면은 절단 경사에 의하여 원형 단면에서 타원형 단면으로 변하게 된다. 열원의 이동 방향과 열선의 회전축이 일치할 경우, 타원형 단면의 주축은 열선 이동 방향과 수직이 된다. 절단폭은 열선 이동 방향에 수직한 방향으로 측정되기 때문에 타원형 단면이 됨으로써 발생한 열원의 추가적인 면적이 절단면의 면적을 미세하게 확장시킨다. 그러므로, 경사 절단시 정확한 열전달 특성을 고려하기 위하여서는 열원의 단면 변화가 고려되어야 된다.

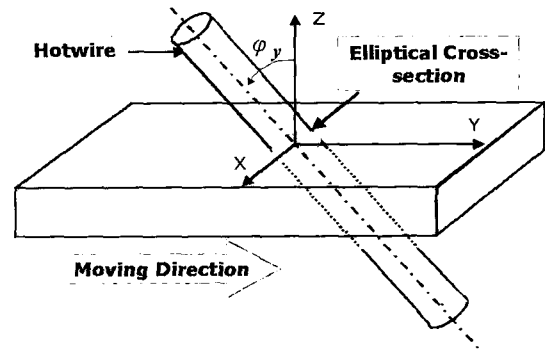


Fig. 6 Schematics of cross-section change according to the cutting angle

본 연구에서는 열선 절단기를 타원형 단면을 가진 선형 체적 열원으로 가정하였다. 열원의 중심점과 열원 면적은 식(9)의 원통형상 기하학 방정식을 식(10)과 식(11)과 같은 좌표계 회전을 이용하여 유도된 식(12)으로부터 계산한다. 유한 요소 해석시 선형 체적 열원의 직경내에 존재하는 유한 요소 격자에는 균일 열원(Uniform heat flux) 이 부여되도록 하였다. Fig. 7 은 열선이 y축으로 회전하였을 때 최외좌표계{P}와 회전좌표계{P<sub>n</sub>}의 관계이다.

$$x^2 + y^2 = r^2, z = h \quad (9)$$

여기서 h는 원통의 높이이다.

$$\{P\} = [T_{Ry}]\{P_n\} \quad (10)$$

$$\begin{Bmatrix} x \\ y \\ z \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi_y & 0 & -\sin \phi_y \\ 0 & 1 & 0 \\ \sin \phi_y & 0 & \cos \phi_y \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} x_n \\ y_n \\ z_n \end{Bmatrix} \quad (11)$$

여기서,  $\phi_y$ ,  $(x_n, y_n, z_n)$  및  $[T_{Ry}]$ 은 각각 절단경사각과 회전된 좌표계 성분들 및 회전행렬이다.

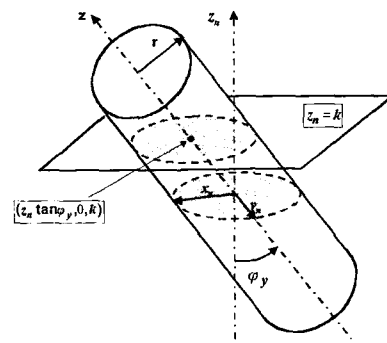


Fig. 7 Center and the applied area of the heat flux in the finite element model

$$\frac{(x_n - z_n \tan \phi_y)^2}{\left(\frac{r}{\cos \phi_y}\right)^2} + \frac{y_n^2}{r^2} = 1, \quad z_n = k \quad (12)$$

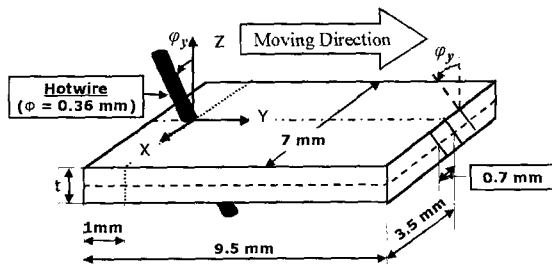
열원에서 EPS 폼으로 투입된 입열량 ( $Q_T$ )은 식(13)과 같이 계산될 수 있다.

$$Q_T = \frac{\pi q(r) d^2 t}{4 \cos^2 \phi_y} \quad (13)$$

여기서,  $t$ 는 EPS 폼의 두께이다.

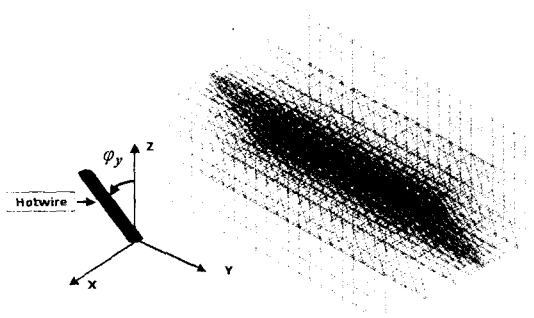
### 4.3 유한 요소 해석 조건

유한 요소 해석 영역은 Fig. 8(a)와 같이 열원 중심으로부터  $y$ 축으로  $\pm 3.5$  mm 떨어진 위치까지 선택

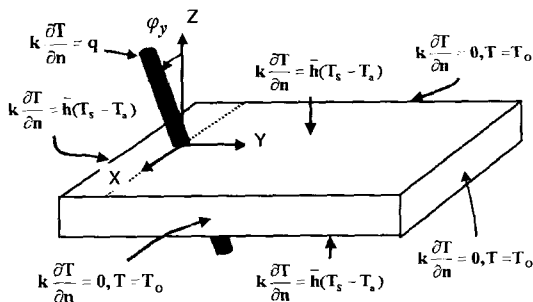


$t = 3.9$  mm

(a) Geometry of the analysis model



(b) Finite element mesh model



(c) Boundary conditions

Fig. 8 Finite element modeling and boundary conditions for analysis

하였다. Fig. 8는 해석 형상, 유한요소격자 및 경계조건이다. 경계조건은 모재가 정지해 있고 열선절단기가 이동함으로 자연 대류조건을 사용하였다. 자연 대류에서는 부력과 자중효과가 대류계수를 결정하는 지배적인 요소이다. 그러므로, 상·하면의 대류계수는 식(14), 식(15) 및 식(16)에 의하여 결정하였다<sup>10)</sup>.

$$\bar{h} = \frac{k}{L_c} \overline{Nu}_L \quad (14)$$

여기서,  $\bar{h}$ ,  $L_c$ ,  $\overline{Nu}_L$ 는 평균 대류계수, 특성 길이 및 평균 Nusselt 수이다.

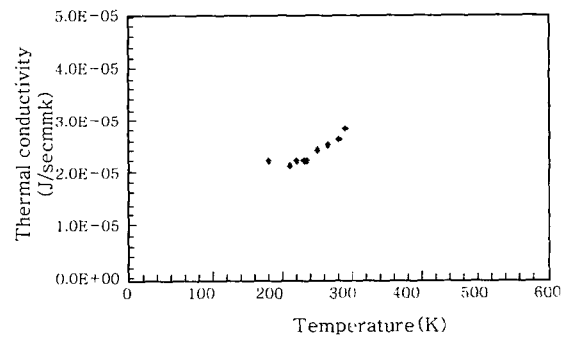
$$\overline{Nu}_L = 0.15 \times Ra_L^{1/3} \quad : \text{상면} \quad (15)$$

$$\overline{Nu}_L = 0.27 \times Ra_L^{1/4} \quad : \text{하면} \quad (16)$$

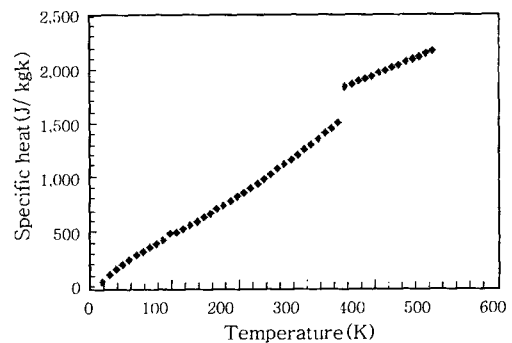
여기서,  $Ra_L$ 는 Rayleigh 수이다.

Fig. 8(b)와 같이 열원 중심으로부터  $y$ 축으로  $\pm 0.7$  mm 떨어진 위치까지의 유한요소격자들이 열원에 적용하도록 열원의 경사각과 동일하게 유한요소격자를 기울였다. 이것을 국부형상 적용 격자라 정의하였다.

유한요소해석에 사용된 유한요소격자수는 육면체 요소 1560개와 쉘 (Shell) 요소 1496개이다. EPS 폼



(a) Thermal conductivity<sup>11)</sup>



(b) Specific heat<sup>12)</sup>

Fig. 9 Thermal conductivity and specific heat of EPS foam

의 열전달계수와 비열은 Fig. 9 와 같이 온도에 따른 물성변화가 고려되었으며, 평균 대류계수와 밀도는 상수로 하였다. Table 3은 EPS 폼의 물성치이다.

유한요소해석에서 열선의 절단 속도는 20 mm/sec, 30 mm/sec 및 40 mm/sec, 절단 경사각은 0°, 10°, 20°, 30° 및 40° 로 하였다. 열원의 강도는 4.81 W/mm<sup>3</sup> 를 적용하였다.

4.4 해석 결과 및 고찰

Fig. 10 과 Fig. 11은 해석조건별 EPS 폼 내부의 온도 분포를 나타낸다. 이 결과로부터 다음과 같은 두 가지 결과를 도출할 수 있었다.

첫째로서 EPS 폼 내부의 온도 분포는 유효 입열량에

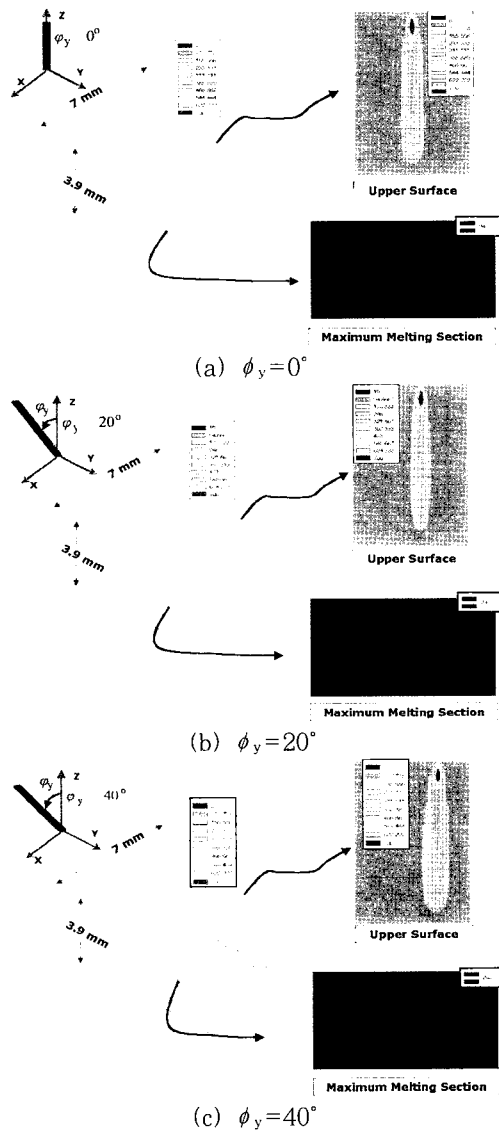


Fig. 10 Influence of cutting angle ( $\phi_y$ ) on the temperature distribution ( $Q_{eff} = 0.016 \text{ J/mm}^2$ )

의해 결정되며 EPS 폼 내부의 온도 분포는 모서리 영역을 제외하고는 열선 경사각에 거의 일치한다는 것이다. 즉, Fig. 10 과 Fig. 11 의 최대 용융 단면에서와 같이 두께 방향의 온도 구배보다 열선 이동방향에 수직 방향에서의 온도 구배가 현저히 크게 나타난다. 그러므로, 정확한 온도분포를 계산하기 위해서는 열원 부근의 유한요소격자가 열원의 절단 경사각에 적응하여야 한다.

둘째로서 열원의 절단경사각은 모서리부분의 비대칭 온도분포를 발생시킨다는 것이다. 그러나, 두께 방향 중간 단면의 온도분포는 절단 경사각에 관계없이 대칭형 온도분포를 유지하였다. 절단경사각이 증가할 경우

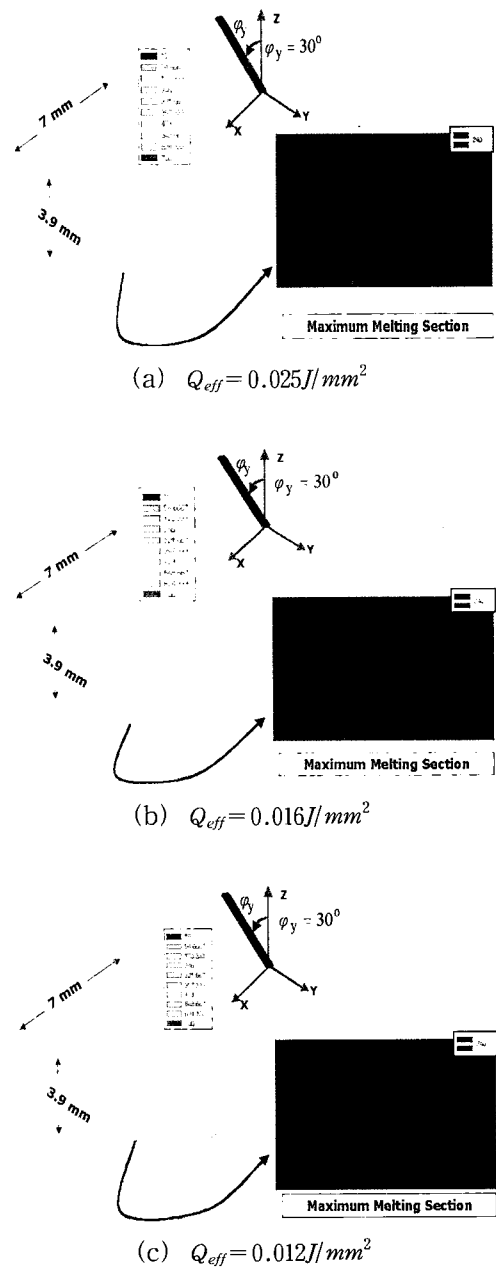


Fig. 11 Influence of effective heat input on the temperature distribution ( $\phi_y = 30^\circ$ )

비대칭 온도분포는 EPS 폼 내부로 급격히 확대된다. 또한, 절단 경사각이 증가하면 열이 점점 더 예리한 모서리로 집중되어 모서리가 과용융 된다.

단순 경사절단에서 절단 경사각이 절단폭에 미치는 영향은 Fig. 12와 같다. Fig. 13은 실험과 해석결과 결과가 절단폭 측면에서 잘 일치함을 보여준다. 이 결과로부터 경사절단에 대한 EPS 폼 내부의 열전달 특성을 고려하기 위하여서는 절단 경사에 의하여 단면의 변화가 고려되는 열원 모델링이 필요함을 알 수 있었다. 해석 결과와 실험 결과를 모서리 형상 측면에서 비교하기 위하여 Fig. 14(a) 와 같은 용융길이를 각 해석 조건에서 계산하였다. Fig. 14(b) 는 해석 결과이다. 최대 용융 길이는 0.0245 J/mm<sup>2</sup>에서 0.12 mm 로 예측되었다. 이 결과는 Fig. 15 와 같이 경사각에 따른 모서리 용융길이 변화 경향은 실험결과와 유사하나 모서리 용융량의 크기는 실험 결과와 차이를 나타내었다. 이것은 모서리 부근과 같은 매우 국부적인 영역에서는 유한요소 격자수가 너무 적게 생성되어 EPS 폼의 입자 크기가 해석모델의 유한요소격자 크기와 같게 되어 정확한 온도분포 계산이 어렵기 때문으로 사료된다. 또한, 해석시 EPS 폼의 온도에 따른 물성치의 비선형성에 대한

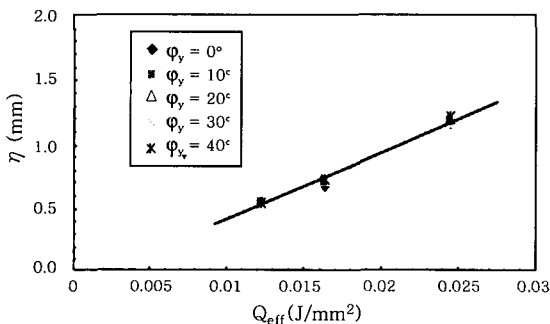


Fig. 12 Influence of cutting angle on the kerf width (Results of analysis)

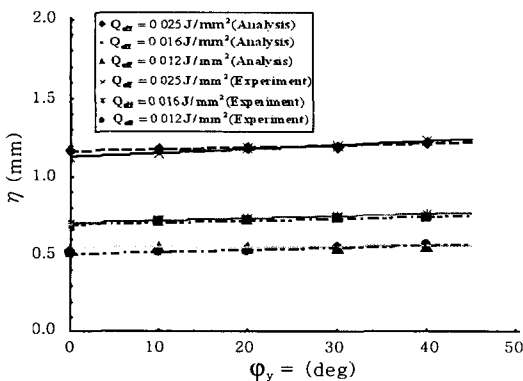
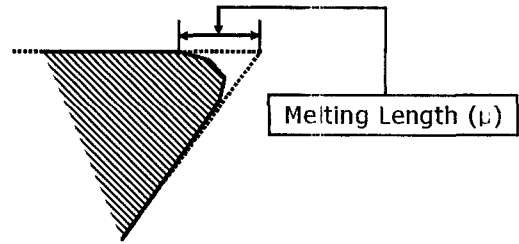
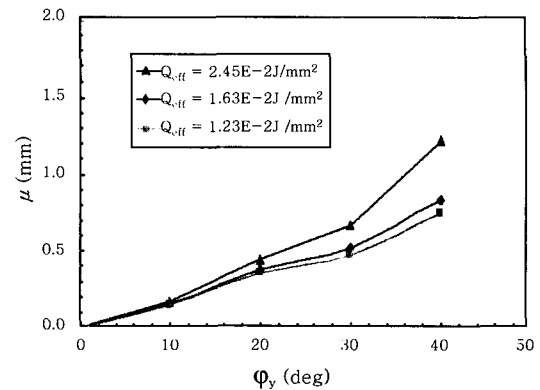


Fig. 13 Comparison of numerical results with experimental results with respect to kerf width



(a) Definition of the melting length



(b) Results of numerical analysis

Fig. 14 Definition of the melting length and the results of numerical analysis

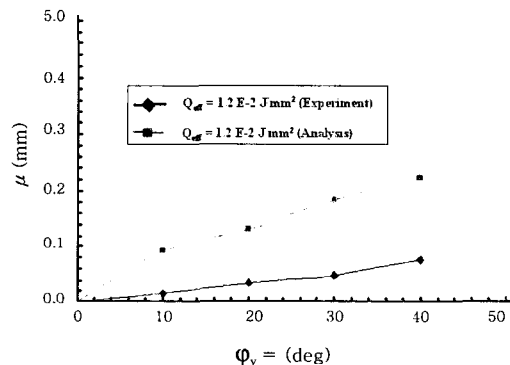


Fig. 15 Comparison between numerical results and experimental results

정확한 고려가 되지 못했기 때문으로 사료된다.

### 5. 결 론

VLM-s 패속조형 제품의 정밀도와 표면특성은 유효 입열량 및 절단 경사각과 같은 열선 절단 공정변수에 의하여 결정된다.

본 연구에서는 EPS 폼의 열선 단순 경사절단시 절단 공정변수가 제품 정밀도와 모서리 형상에 미치는 영향을 정량적으로 분석하기 위하여 단순 경사 절단 실험과 유한요소해석을 수행하였다. 그 결과 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.



1) 단순 경사 절단 실험 결과 절단폭은 절단 경사각 보다 주로 유효 입열량에 의하여 결정됨을 알 수 있었다. 또한, 절단 경사각이 고려된 절단폭과 유효 입열량 관계식을 도출하였다. 모서리 용융량은 절단 경사각에 의하여 지배적으로 결정됨을 알 수 있었다. VLM-s 공정의 운영 조건에서 절단 경사각의 절단 폭 및 모서리 용융량에 미치는 영향은 각각 0.1 mm 및 0.11 mm<sup>2</sup> 이하임을 알 수 있었다.

2) 절단 경사각이 고려된 타원형 단면을 가진 체적 열원과 국부 적응 유한 요소 격자를 이용하여 EPS 폼의 열선 단순 경사절단 공정에 대한 유한요소해석을 SYSWELD+를 이용하여 수행하였다. 해석결과 절단 경사각이 증가할수록 비대칭 온도 분포가 EPS 폼 내부로 급격히 확대됨을 알 수 있었다. 절단폭 측면에서 해석 결과는 실험과 잘 일치하였다. 이 결과로부터 제안된 유한요소해석기법이 열선절단기의 EPS 폼 단순 경사 절단시 공정 변수의 영향을 예측하기 위한 효과적인 방법임을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

1. A. Nova, S. Kaza, Z. Wang, and C. Thomas : Techniques for Improved Speed Accuracy in Layered Manufacturing, Proceedings of Solid Free Form Fabrication Symposium, 1996, 609-617
2. Dong-Gyu Ahn, Sang-Ho Lee and Dong-Yol Yang : Investigation into Development of Progressive-Type Variable Lamination Manufacturing using Expandable Polystyrene Foam and Its Apparatus, Journal of Engineering Manufacture, 216-9 (2002), 1239-1252
3. Dong-Gyu Ahn, Sang-Ho Lee and Dong-Yol Yang : Development of Transfer-Type Variable Lamination Manufacturing (VLM-s) Process, International Journal of Machine Tools & Manufacture, 42-11 (2002), 1577-1587
4. Dong-Gyu Ahn, Sang-Ho Lee and Dong-Yol 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 & Manufacture, 42-5 (2002), 427-439
5. D. T. Swift-Hook and A. E. F. Gick : Penetration Welding with Lasers, Welding Journal, (1973), 492s-499s
6. Y. -S. Yang and S. -J. Na : A Study on Residual Stresses in Laser Surface Hardening of a Medium Carbon Steel : Surface and Coating Technology, 38 (1989), 311-324
7. W. Wang, W. Feng, Y. Yan, and J. Y. H. Fuh : Experimental Design and Analysis of In-Plane Processing Accuracy for SSM Process, Materials & Design, 17-3 (1996), 159-166
8. M. Labudovic, D. Hu and R. Kovacevica : Three-Dimensional Finite Element Modeling of Laser Surface Modification, Journal of Engineering Manufacture, 214-5 (2000), 683-692
9. ESI Group : SYSWELD+ 2.0 Reference Manual, SYSTUS International, 1992
10. F. P. Incropera and D. P. Dewitt : Introduction to Heat Transfer (2nd Edition), Wiley, 1990, 504-508
11. Y. S. Touloukian and C. Y. Ho : Thermophysical Properties of Material, Plenum Press, 1972
12. F. P. Incropera and D. P. Dewitt : Introduction to Heat Transfer (2nd Edition), Wiley, 1990, A1-A30