

# 가변 적층 쾌속 조형 공정 개발을 위한 발포 폴리스티렌 폼의 선형 열선 절단시스템 절단 특성 및 접착강도 특성에 대한 연구

안동규\*, 이상호\*, 양동열\*, 신보성\*\*, 이용일\*\*\*

## Investigation of Cutting Characteristics of Linear Hotwire Cutting System and Bonding Characteristics of Expandable Polystyrene Foam for Variable Lamination Manufacturing (VLM) Process

Dong Gyu Ahn\*, Sang Ho Lee\*, Dong Yol Yang\*, Bo Sung Shin\*\*, Yong Il Lee\*\*\*

### ABSTRACT

Rapid Prototyping (RP) techniques have their unique characteristics according to the working principles: stair-stepped surface of parts due to layer-by-layer stacking, low build speed caused by line-by-line solidification to build one layer, and additional post processing to improve surface roughness, so it is required very high cost to introduce and to maintain of RP apparatus. The objective of this study is to develop a new RP process, Variable Lamination Manufacturing using linear hotwire cutting technique and expandable polystyrene foam sheet as part material (VLM-S), and to investigate characteristics of part material, cutting characteristics by using linear hotwire cutting system and bonding. Experiments were carried out to investigate mechanical properties of part material such as anisotropy and directional tensile strength. In order to obtain optimal dimensional accuracy, surface roughness, and reduced cutting time, addition experiments were performed to find the relationship between cutting speed and cutting offset of hotwire, and heat generation of hotwire per unit length. So, adhesion strength tests according to ASTM test procedure showed that delamination did not occur at bonded area. Based on the data, a clover-shape was fabricated using unit shape part (USP) it is generated hotwire cutting. The results of present study have been reflected on the enhancement of the VLM-S process and apparatus.

**Key Words** : Rapid Prototyping(쾌속조형), Variable Lamination Manufacturing(가변 적층 쾌속조형), Expandable Polystyrene Foam(EPS Foam : 발포 폴리스티렌 폼), 재료 이방성(Anisotropy), 열선 절단 속도(Cutting Velocity), 절단 오프셋(Cutting Offset), 접착 강도(Bonding Strength)

### 1. 서론

쾌속 조형 공정이 등장한지 10 여년이 경과하는 동안 3 차원 시작품 제작을 위하여 여러 가지

새로운 쾌속 조형 기술이 개발되었다<sup>(1)</sup>. 현재 상용화되었거나 개발중인 대표적인 쾌속 조형 공정에는 StereoLithography Apparatus(SLA), Fused Deposition Modeling(FDM), Shape Deposition

\* 한국과학기술원 기계공학과  
\*\* 한국기계연구원  
\*\*\* ㈜해라시스템

Manufacturing (SDM), Selective Laser Sintering(SLS), 3D printing, Laminated Object Manufacturing(LOM) 등이 있다.

이러한 기존의 쾌속 조형 공정은 다음과 같은 문제점이 있다.

- 3 차원 CAD 데이터를 z 방향으로 슬라이싱하여 2 차원 슬라이스 데이터를 얻는 과정에서 z 방향으로 계단형상의 단차가 생긴다. 이러한 계단 형상 때문에 시작품의 정밀도가 떨어진다. 그러므로 시작품의 정밀도를 향상시키기 위해서 추가적으로 시작품의 계단 형상 제거를 위한 후처리 공정이 요구된다<sup>(4)</sup>.

- 고정된 두께의 얇은 층(LOM 의 경우 한 층의 두께는 0.1067 mm 임)과 선 형태로 적층하기 때문에 많은 조형 시간이 소요된다.

이와 같은 기존의 쾌속 조형 공정의 문제점을 극복하기 위하여 정밀도 향상과 조형 시간을 획기적으로 단축시키며 후처리 공정이 거의 요구되지 않는 새로운 개념의 가변 적층 쾌속 조형 공정(Variable Lamination Manufacturing : VLM)이 개발중에 있다. 특히, 현재 개발되고 있는 가변 적층 쾌속조형 공정중 발포 폴리스티렌 폼<sup>(5)</sup> (Expandable Polystyrene Foam: EPS Foam)를 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정<sup>(6)</sup>(VLM-S)은 장비 가격과 유지비가 저렴하며 산업적으로 활용도가 높을 것으로 판단된다.

본 연구에서는 VLM-S 의 공급 재료인 발포 폴리스티렌 폼의 재료 특성에 대한 분석을 수행하였으며, VLM-S 주요 세부 공정인 선형 열선 절단 시스템에 의한 발포 폴리스티렌 폼 절단 시 발생하는 절단 특성 분석, 열선 발열량에 따른 최대 절단 가능 속도 관계식 수립 및 열선 발열량에 따른 절단 오프셋량 예측식 수립 등을 수행하였다. 또한, 본 공정의 세부 공정 중 적층/접착 공정에 사용되는 접착제와 재료의 접착 특성을 평가하기 위한 접착 강도 시험을 수행하였다. 이 결과들을 이용하여 열선 절단 시스템을 이용한 3 차원 크로바(Clover) 형상을 제작하였다.

## 2. 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정(VLM-S)

VLM-S 공정은 여러가지 두께로 연속적으로 공급되는 판재띠를 4 자유도를 가진 선형 열선

절단 시스템으로 폭, 길이 및 측면 경사를 실시간 제어하여 3 차원 형상을 절단하여 접착/적층함으로써 일체화된 3 차원 형상의 제품을 빠른 시간에 제작할 수 있는 쾌속 조형 공정이다. Fig. 1 은 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정(VLM-S) 구성도이며, Fig. 2 는 선형 열선 절단 시스템을 이용한 절단 공정에 대한 개념도이다.

VLM-S 공정은 Fig.1 과 같이 재료 저장/공급부, 형상 생성부, 재료 적층 및 접착부, 잔여 재료 절단/저장부 및 시스템 제어부로 구성된다.

재료 저장 및 공급부는 형상 생성부에 소요되는 발포 폴리스티렌 폼을 연속 및 단속적으로 공급한다. 재료는 롤에 감겨져서 저장 되고, 재료 이송 장치에 의하여 연속 및 단속적으로 공급된다.

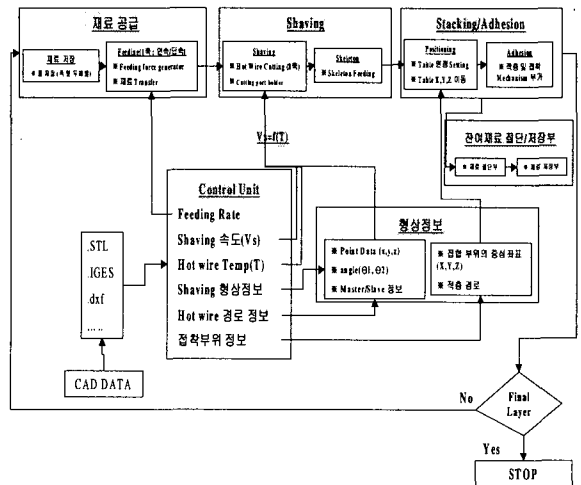


Fig. 1 Process Flow of VLM-S

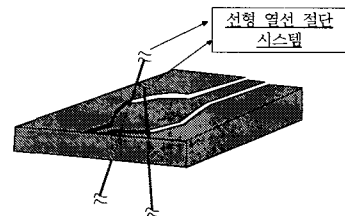


Fig. 2 Schematic Diagram of the Cutting Process by using Linear Hotwire System

형상 생성부는 공급된 발포 폴리스티렌 폼을 시스템 제어부에서 제공되는 형상 정보, 열선 온도, 열선 이동 경로 및 열선 이송 속도를 이용하여 3 차원 목적물의 각층에 해당되는 부분을 생성한다. 열선은 자동 제어가 용이하고, 장/탈착이 손쉬운 기구학적 시스템으로 구성되어야 한다.

재료 적층 및 접착부는 형상 생성부에서 제작된 3 차원 목적물의 각층에 해당되는 부분을 정확히 해당 위치에 적층하고 인접부위의 각 부분들의 면과 완벽하게 접착 시키는 부분이다. 적층은 형상 생성부에 제작된 3 차원 목적물의 각층에 해당되는 부분을 지지하고 있는 절단 제품 위치 고정기가 수직으로 이동하여 적층 위치에 안착 시킨다. 이때, 절단 제품에 형성된 전면과 후면의 경사가 적층시 안내자 역할을 하게 한다. 접착은 재료 공급시 바닥면에 접착제를 묻혀서 공급하여 적층과 동시에 접착이 될 수 있도록 한다.

잔여 재료 절단 및 저장부는 형상 생성부에서 공급된 발포 폴리스티렌 폼 중 형상 생성부에서 3 차원 목적물의 각층에 해당되는 부분으로 제작된 절단 형상을 제외한 잔여 재료 부위를 주기적으로 절단하고 절단된 조각들을 저장한다.

시스템 제어부는 3 차원 목적물의 형상을 STL 파일 형식으로 제공 받은 후, 이 데이터를 이용하여 열선 이동 경로, 절단 제품 적층 위치/경로, 열선 이송 속도, 재료 공급 속도 및 잔여 재료 절단 속도 등을 결정하여 VLM-S 장비가 3 차원 목적물을 신속/정확히 조형할 수 있도록 구성된 하드웨어, 소프트웨어, 인터페이스 및 제어 장치 조합이다. 시스템 제어부는 입력 데이터를 컴퓨터에 받아들여 일괄적으로 처리하는 배치 프로세싱 (batch processing)을 수행한다.

### 3. 발포 폴리스티렌 폼

#### 3.1 발포 폴리스티렌 폼 특성

발포 폴리스티렌 폼은 폴리스티렌 수지에 프로판(Propane), 부탄(Buthane), 석유 에테르(Ether) 등의 입상 수지를 발포제로 사용하여 20 배 이상의 배율로 발포 시킨 후, 200 ~ 260 °C 에서 사출 또는 압출하여 제작한다. 특히, 판재 형태의 발포 폴리스티렌 폼은 압출된 재료의 두께

를 조절하기 위해 다단 물을 통과 시킨 후 물에 감아서 보관하게 된다. 그러므로, Fig 3 과 같이 발포 폴리스티렌 폼은 롤링 방향(Rolling Direction : R.D.) 와 롤링 방향에 수직인 방향 (Transverse Direction : T.D)의 입자 길이가 다르게 되어 이방성(Anisotropy) 특성이 나타나게 된다.

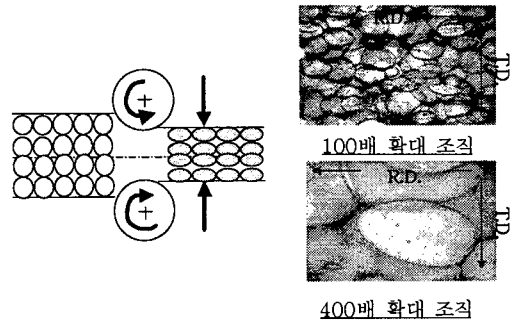


Fig. 3 Microstructure of Expandable Polystyrene Foam Sheet

본 공정에 사용된 발포 폴리스티렌 폼은 쾌속 조형공정 특성에 적합한 밀도가 높고 발포 비율이 낮아 치수 변화가 거의 없으며, 강성이 높아 서포터(Supporter)를 최소화 할 수 있는 재료를 선정하였다. 그리고, 폼 재료의 경우 본 공정에서 사용하고 있는 열선(Hotwire)을 이용하여 절단할 경우 절단력이 거의 영에 가깝다.

#### 3.2 발포 폴리스티렌 폼의 기계적 성질

발포 폴리스티렌 폼의 경우 발포 시 사용된 발포제 종류, 발포 배율, 사출/압출 온도 및 롤링 방법에 따라 기계적 성질이 달라진다. 그러므로, 본 공정에 사용되는 재료에 대한 밀도, 인장 강도, 경도등 기계적 성질은 시험을 통하여 측정하였다.

밀도 측정 시험은 본 공정에 사용된 재료를 부피  $5.43 \times 10^5 \text{ mm}^3$  로 반복 시험한 후, 측정치의 평균을 사용하였다.

인장 강도 측정 시험의 경우 ASTM D638-96(Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics)에 의거하여 시편 제작과 시험 수행 및 결과 정리를 수행하였다.

인장 강도 측정용 시편의 형상은 ASTM D638-96 의 Type I 을 선택하였다. 시편의 형상은 Fig.4

과 같다. 또한, 판재 재료의 특성을 고려하여 Fig.5 와 같이 롤링 방향과 롤링 방향에 수직인 방향 모두에 대하여 시편을 절취하였다.

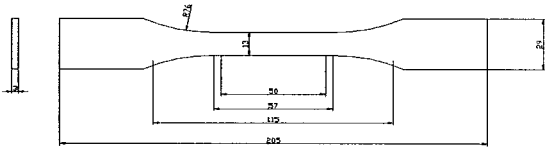


Fig. 4 Details of the Tensile Test Specimen

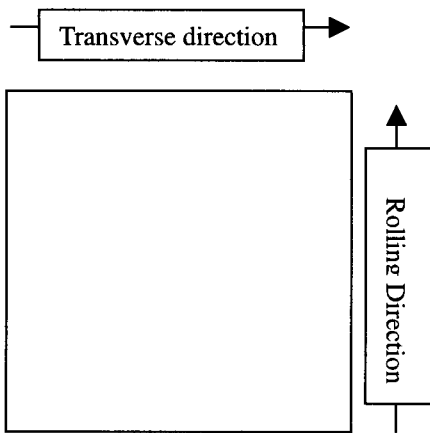


Fig. 5 Gathering of Test Specimens from the Expandable Polystyrene Foam Sheet

Table 1 Mechanical Properties of the Expandable Polystyrene Foam Sheet

밀도 (g/mm <sup>3</sup> )	인장 강도 (MPa)		열변형 온도 (°C)	연화 온도 (°C)
	R.D.	T.D.		
6.26 × 10 <sup>-5</sup>	1.727	1.163	90 ~ 95	79

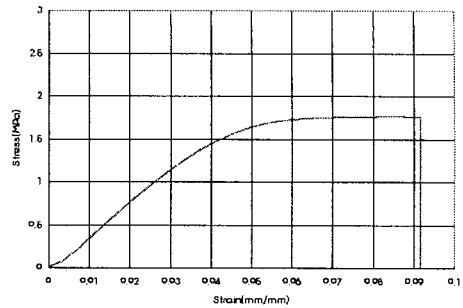


Fig. 6 Stress-Strain Relation of the Expandable Polystyrene Foam along the Rolling Direction

#### 4. 선형 열선 절단 시스템을 이용한 발포 폴리스티렌 폼 절단 실험

##### 4.1 실험 장치 구성

본 실험에 사용된 실험 장치 구성은 Fig.7 과 같다. 본 장치는 입력 데이터의 위치와 속도를 받아들이며 XY 테이블을 제어하는 XY 테이블 제어부와 선형 열선 절단기의 공급 전력을 제어하는 전력 공급부, 시편을 위치 시킨 후 입력된 데이터로 이동하는 XY 테이블 및 XY 테이블 이동 시 소재를 절단하는 선형 열선 절단기로 구성된다.

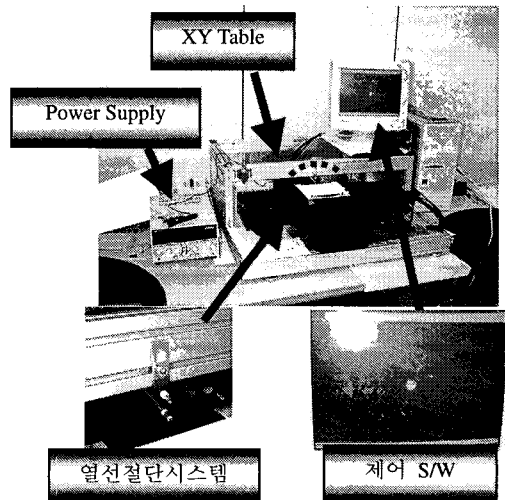


Fig. 7 Organization of Test Apparatus

선형 열선 절단기에 부착된 열선의 사양은 Table.2 와 같다.

Table 2 Specification of the Hotwire

재질	길이(mm)	직경(mm)	저항(Ω)
니크롬선	20.0	0.16	0.51

**4.2 열선 발열량에 대한 열선 최대 절단 가능 속도(V<sub>HMAX</sub>) 측정 실험**

현재 개발 중인 VLM-S 공정을 이용하여 쾌속 제품 조형을 수행 할 경우 공정의 많은 시간을 열선 절단 시스템에 의한 제품 절단에 소요하게 된다. 그러므로, 전체 공정에 소요되는 시간을 최소화하기 위해서는 제품 절단 시간을 최소화하여야 한다. 그러나, 열선을 이용한 발포 폴리스티렌 폼 수지 절단 시 각 발열량에 대하여 최대 절단 가능 속도(V<sub>HMAX</sub>)가 제한 되어 있다.

본 실험에서는 열선에 발생하는 각 발열량별 최대 절단 가능 속도와 이때의 표면 상태를 측정하여 제품의 형상에 영향을 미치지 않고 표면 요철이 거의 발생하지 않는 발열량별 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.

**4.2.1. 열선 발열량에 대한 최대 절단 가능 속도 측정 실험 I (롤링 방향)**

본 실험은 Fig.8 과 같은 발포 폴리스티렌 폼 시편을 롤링 방향으로 절단하여 이때의 표면 요철, 직진도, 조도등을 측정하여 롤링방향의 각 발열량별 최대 절단 가능 속도를 측정하였다.

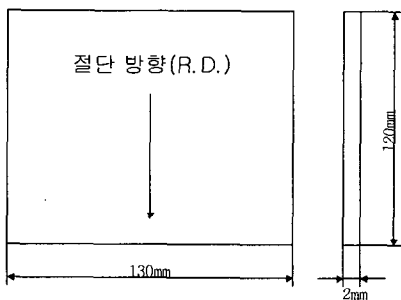


Fig. 8 Cutting Specimen along the Rolling Direction

본 실험에 사용된 실험 장치는 Fig.7 과 같으며, Fig.8 의 시편을 XY 테이블에 장착한 후 열선의 발열량을 조절하며 절단하였다.

본 실험 결과를 이용하여 식(1), (2) 와 같은 각 발열량별 최대 절단 가능 속도 관계를 유도하였다.

$$V_{HMAX} = C_1 \times Q_L + C_2 \tag{1}$$

$$C_1, C_2 = f(\text{절단 재료}) \tag{2}$$

여기서, Q<sub>L</sub>(watt/mm) 은 단위 길이당 열선 발열량 이고 해당 발열량에 대한 최대 절단 가능 속도이며 C<sub>1</sub>, C<sub>2</sub>는 상관 계수이다.

본 실험에 적용된 발포 폴리스티렌 폼 재료의 경우 식(1)의 상수들은 식(3)과 같으며, 식(3)을 적용할 수 있는 최소 단위 길이당 열선 발열량은 0.2 watt/mm 이다.

$$V_{HMAX} = 196.35 \times Q_L + 8.15 \tag{3}$$

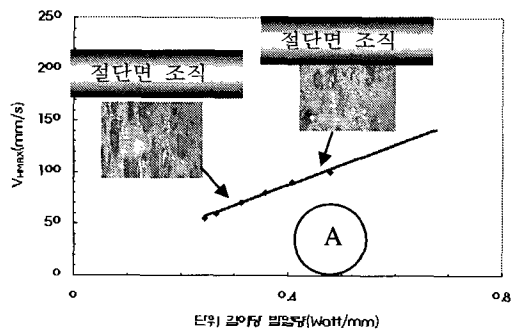


Fig. 9 Relationship between Maximum Allowable Cutting Speed and Heat Generation of Hotwire per unit length

또한, Fig.9 의 식(3)을 나타내는 직선상의 열선 절단면 조직은 Fig.9 와 같이 거의 동일한 조직 상태를 나타내었으며, 표면 조도 또한 거의 동일하였다. 한편, Fig.9 의 식(3)을 나타내는 직선의 아래 영역인 “A” 영역에서는 열선에 의한 직선 형상의 절단시 표면 요철 발생하지 않고 절단 직진도도 정확히 구현되며, 절단력이 거의 발생하지 않았다.

### 4.2.2. 열선 발열량에 대한 최대 절단 가능 속도 측정 실험 II (롤링 수직 방향)

본 실험은 Fig.10 과 같은 발포 폴리스티렌 폼 시편을 롤링 방향에 수직인 방향으로 절단하여 이때의 표면 요철, 직진도, 조도등을 측정하여 롤링방향의 각 발열량별 최대 절단 가능 속도를 측정하였다. 본 실험에 사용된 실험 장치는 Fig.7 과 같으며 Fig.10 의 시편을 XY 테이블에 장착한 후 열선의 발열량을 조절하며 절단하였다.

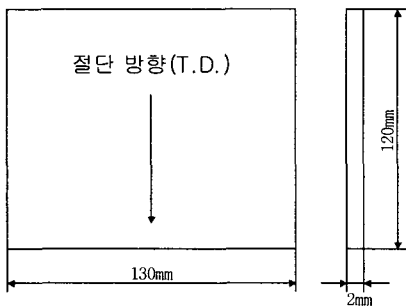


Fig. 10 Cutting Specimen along the Transverse Direction

본 실험 결과 열선 발열량과 롤링 방향에 수직인 방향의 절단 속도는 식(1), (2)와 같은 관계가 있었으나, 최대 절단 가능 속도( $V_{HMAXR.D.}$ )는 식(4)와 같이 롤링 방향의 최대 절단 가능 속도( $V_{HMAXT.D.}$ )의 약 64% 정도밖에 되지 않았다.

$$V_{HMAXT.D.} = a V_{HMAXR.D.} \quad (a \approx 0.64) \quad (4)$$

여기서,  $a$  는 절단 방향 속도 보정 계수 이다. 이 결과는 재료의 롤링 방향에 대한 롤링 방향에 수직인 방향의 인장 강도 비율과 동일하다. 이것은 재료의 이방성 특성때문으로 사료된다. 그 이유는 재료의 결정 입계(Grain Boundary)가 롤링 방향과 평행하게 되어 있어 롤링 방향으로 재료를 절단할 경우 재료의 결정 입계를 절단하게 되나, 롤링 방향의 수직인 방향으로 재료를 절단하게 될 경우 결정 격자를 관통하여 절단하게 되므로 추가적인 에너지가 더 소요되기 때문으로 사료된다.

### 4.3 열선 발열량별 절단 오프셋(Cutting Offset) 측정 실험

현재 개발 중인 VLM-S 공정을 이용하여 쾌속 제품 조형을 수행 할 경우 열선 절단 시스템에 의하여 제품을 절단하게 된다. 이때, 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. 이 결과를 이용하여 실제 공정에서 제품 절단시 초기 오프셋으로 입력하여 제품의 치수를 제어하고자 한다.

본 실험은 4.2.1.절 및 4.2.2.절의 결과를 이용하여 Fig.11 와 같이 시편을 절단하여, 열선의 발열량변화에 대한 절단 폭( $W$ )과 절단 후 폭( $W_c$ ) 변화량을 측정하였다. 실험에 사용된 실험 장치는 Fig.7 과 같으며, Fig.11 의 시편을 XY 테이블에 장착한 후 각 속도별로 열선의 발열량을 조절하며 절단하였다.

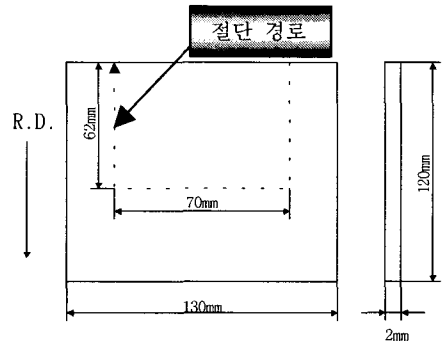


Fig. 11 Cutting Specimen for the Cutting Offset Test

본 실험 결과 시편 및 열선의 치수에 영향을 받지 않으며, 속도별 절단 후 치수 변화를 정량적으로 나타낼 수 있는 절단 무차원 변수 절단 오프셋(Cutting Offset : C.O.)를 정의 할 수 있었다.

$$C.O. = (W - W_c) / D - 1.0 \quad (5)$$

여기서,  $W$  는 열선 절단 전 시편 폭의 기준 치수이고  $W_c$  는 열선 절단 후 시편의 폭이며  $D$  는 열선의 직경이다.

또한, 절단 오프셋은 열선 단위 길이당 발열량( $Q_L$ )과 함께 데이터를 나타낸 후 선형 함수로 보간 할 경우 데이터 퍼짐이 거의 발생하지 않았다.

$$C.O. = A_1 \times Q_L + A_2 \quad (6)$$

$$A_1, A_2 = F(\text{절단재료, 절단속도}) \quad (7)$$

여기서,  $Q_L$  은 열선 단위 길이당 발열량이고  $A_1/A_2$  는 상관 계수(Coefficient)이다.

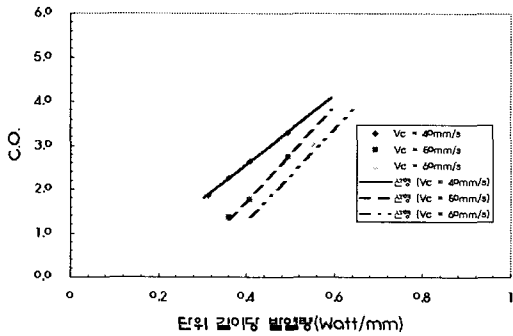


Fig. 12 Relationship between Cutting Offset and Heat Generation of Hotwire per unit length

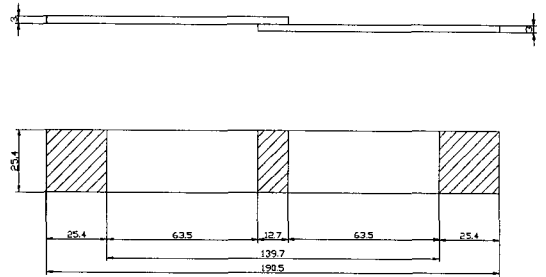
### 5. 발포 폴리스티렌 폼 접착 강도 실험

본 실험은 현재 개발중인 VLM-S 공정의 세부 공정인 적층/접착 공정에 사용되는 접착제의 접착 강도를 평가하기 위한 실험이다. 본 공정과 같이 접착제를 사용하여 접착/적층을 수행하는 패속 조형 공정에서는 접착면의 강도가 충분하지 못하여 접착면의 층간 분리가 자주 발생한다. 그러므로, 층간 접착 강도를 정량적으로 평가하기 위하여 층간 분리를 일으킬 수 있는 하중 모드별 접착 강도 실험을 수행하여야 한다. 본 실험에서는 인장하중에 의한 전단 강도 시험과 적층 조립체에 대한 인장 하중에 의한 전단 강도 시험을 수행하였다. T 필 저항 시험(T Peel Resistance Test)은 본 공정에서 사용되는 발포 폴리스티렌 폼 재료의 강성이 커서 T 필 저항 시험의 시편 형상과 같이 90°로 꺾여진 형상을 제작할 수 없어 시험을 수행하지 않았다.

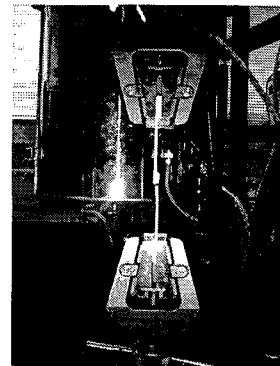
#### 5.1 인장 하중에 의한 전단 강도 시험

본 실험은 ASTM D1002-72 에 제안된 인장 하중에 의한 전단 강도 시험 절차에 맞도록 수행하였다. 시편 형상은 Fig.13 와 같다. 본 시험에 사용된 실험 장비는 Instron 5583 과 이 장비에 부

착된 데이터 저장 시스템을 사용하였다.



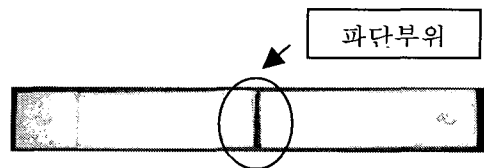
(a) Details of Test Specimen



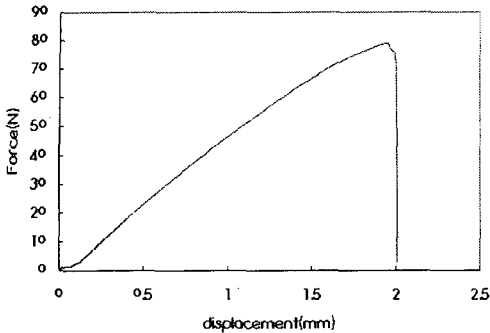
(b) Test Set\_Up

Fig. 13 Specimen and Test Set\_Up for the Shear by Tension Loading Test

본 실험 결과 Fig.14 와 같이 모재인 발포 폴리스티렌 폼에서 파단이 발생하였다. 이것은 접착제의 접착 강도가 모재의 인장 강도보다 크기 때문이다.

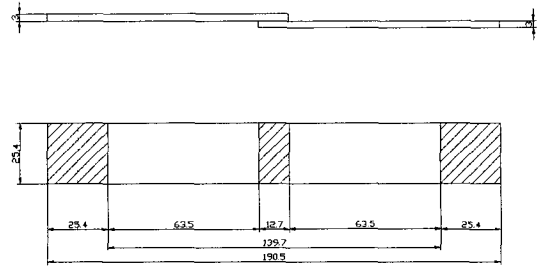


(a) Fracture Location of the Specimen



(b) Load-Displacement Curve of the Test

Fig. 14 Results of the Shear by Tension Loading Test



(a) Details of Test Specimen



(b) Test Set\_Up

Fig. 15 Specimen and Test Set\_Up for the Shear by Tension of Laminated Assemblies Test

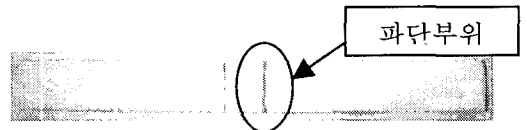
### 5.2 적층 조립체에 대한 인장 하중에 의한 전단 강도 시험

본 실험은 ASTM D3162-73 에 제안된 적층 조립체에 대한 인장 하중에 의한 전단 강도 시험 절차에 맞도록 수행하였다.

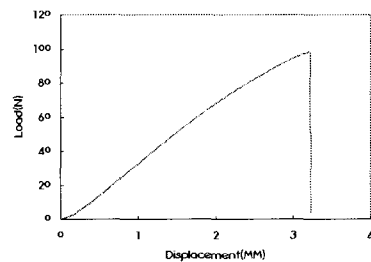
시편 형상은 Fig.15 와 같다. 본 시험에 사용된 실험 장비는 Instron 5583 과 이 장비에 부착된 데이터 저장 시스템을 사용하였다 .

본 실험 결과 Fig.16 와 같이 모재인 발포 폴리스티렌 폼에서 파단이 발생하였다. 이것은 접착제의 접착 강도가 모재의 인장 강도보다 크기 때문이다. 또한, 하중-변위 선도에서 최대 하중이 인장 하중에 의한 전단 강도 시험 보다 조금 높게 나타났다. 이것은 인장 하중에 의한 전단 강도 시험에 사용된 시편은 접착 부위만 두께가 기준 두께의 2 배이나, 본 시험에 사용된 시편은 접착부위 직전의 좌우 ± 3mm 부위를 제외하고는 모두 기준 두께의 2 배가 되어, 인장 하중에 의한 전단 강도 시험 보다 본 시험이 최종 파단 발생 영역에서의 굽힘 응력이 작게 작용하기 때문으로 사료된다

5.1.절과 5.2 절의 접착 강도 시험을 통하여 본 공정에서 도입한 접착제와 모재간의 접착 강도를 정량적으로 평가할 수 있었다. 그 결과, 모재와 모재 사이의 접착력 부재에 의한 층간 분리는 발생하지 않을 것으로 사료된다.



(a) Fracture Location of the Specimen



(b) Load-Displacement Curve of the Test

Fig. 16 Results of the Shear by Tension of Laminated Assemblies Test



## 6. 크로바 형상 제작

위 실험 결과 취득 된 결과들을 이용하여 선형 열선 절단기 시스템에 의한 절단과 본 공정에 적용된 접착제를 이용하여 크로바 형상의 3 차원 시작품을 제작하였다. 크로바 형상 제작과정은 Fig.17 와 같이 3 차원 형상을 슬라이드 모델링하여 .STL 파일을 생성한 후, 각 층(Layer)의 3 차원 대상물에 해당되는 각 부분(단위 형상 조각 : Unit Shape Part)으로 나눈다. 그후, 선형 열선 절단기로 각 단위 형상 조각을 절단 한 후, 접착제로 접착하여 크로바 형상을 제작하였다. 본 시작품 제작시, 위 실험에서 얻어진 단위 길이당 열선 발열량과 최대 속도 관계 및 단위 길이당 열선 발열량과 절단 오프셋의 관계를 이용하여 열선 발열량과 절단 속도를 형상에 따라 제어하였다. 그리고, 접착 접착제외에 접착 강도를 향상시키기 위해 Fig.18 과 같은 적층 방법을 사용하였다.

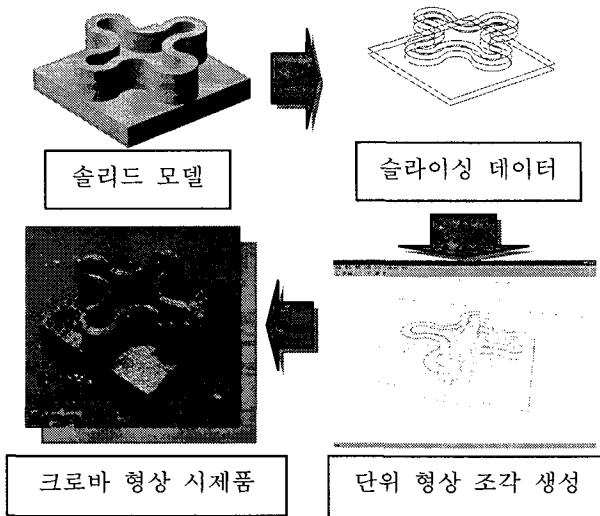


Fig. 17 Process Flow of VLM-S to generate a Clover Shape

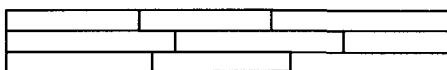


Fig. 18 Lamination Technique to increase Strength of Part

## 7. 결론

기존의 쾌속 조형 공정 및 장치의 각 문제점인 계단 형상 발생, 장시간의 조형 시간 소요, 및 고가의 장비가격과 유지비를 해결 할 수 있는 가변 적층 쾌속 조형 공정 및 장치가 개발되고 있다. 본 연구에서는 VLM-S 공정의 주요 세부 공정인 선형 열선 절단기 시스템을 이용한 절단 특성 및 접착제를 이용한 적층/접착 시 접착 강도 특성 및 발포 폴리스티렌 폼 재료에 대한 특성에 대한 연구를 수행하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

첫째, 본 공정에 사용되는 발포 폴리스티렌 폼은 발포 압출 재료를 롤링하였기 때문에 재료 입자가 타원형으로 되어 롤링 방향과 롤링 방향의 수직인 방향의 인장 강도가 차이가 발생하는 이방성 특성을 나타내었다.

둘째, 선형 열선 절단기에 의해 발포 폴리스티렌 폼 절단시 롤링 방향과 롤링 방향에 수직 방향에 대한 열선 단위 길이당 발열량과 절단 최대 가능 속도에 대한 관계식을 수립하고, 열선 단위 길이당 발열량 별 절단 가능 영역을 취득하였다. 또한, 본 공정에 사용되는 재료의 이방성 특성을 고려하기 위하여 각 재료 방향별 최대 속도 관계식을 수립하였다.

셋째, 본 공정에 사용되는 접착제의 접착 강도를 인장 하중에 의한 전단 강도 시험과 적층 조립체에 대한 인장 하중에 의한 전단 강도 시험을 수행하여, 모재와 접착제간의 접착 특성과 접착제의 전단 강도 부재에 의한 모재간의 층간 분리가 발생하지 않음을 실험적으로 평가하였다.

넷째, 위 3 가지 결과를 이용하여 크로바 형상을 제작하였다.

다섯째, 본 연구 결과를 현재 개발중인 가변 적층 쾌속 조형 장치에 피이드 백 하였다. 재료의 이방성을 고려하여 재료 공급 방향과 주 절단 방향이 롤링 방향이 되도록 하였다. 또한, 절단 형상에 따라 열선의 발열량과 절단 속도를 설정 하였으며, 열선 발열과 절단 속도에 맞추어 절단 오프셋을 설정하도록 하였다.

## 참고문헌

1. S. A. McMains, "Rapid Prototyping of Solid

Three-Dimensional Parts,” Master’s Project under the direction of Carlo Sequin, 1995.

2. A. F. Lennings, J. J. Broek, I. Horvath, A. de Smit, J. S. M. Vergeest, “Prototyping large-sized objects using freeform thick layers of plastic form,” Solid Free Fabrication Symposium Proceedings, pp. 97-104, 1998.
3. I. Hovath, J. S. M. Vergeest, J.J.Broek, B. Smit “Tool Profile and Tool Path Calculation for Freeform Thick-Layed Fabrication,” Delft University in house report
4. A. Novc, S. Kaza, Z. Wang, C. Thomas, “Techniques for Improved Speed Accuracy in Layered Manufacturing” Solid Free Fabrication Symposium Proceedings, pp. 609-617, 1996.
5. 정동천, “플라스틱 재료 해설과 성형조건, pp. 42-44, 1996.
6. “선형 열절단 시스템을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정 및 장치” 특허 2000-18175, 2000.