

# 단속형 재료 공급식 가변 적층 쾌속조형공정 및 장치 개발에 관한 연구

양동열\* · 안동규\*\* · 이상호\*\* · 최흥석\*\* · 박승교\*\*\* · 채희창\*\*\*\*

## Investigation into Development of Transfer Type for Variable Lamination Manufacturing Process and Apparatus

Dong-Yol Yang\*, Dong-Gyu Ahn\*\*, Sang Ho Lee\*\*, Hong Seok Choi\*\*,  
Seung Kyo Park\*\*\*, Hee Chang Chae\*\*\*\*

**Key Words :** Rapid Prototyping (쾌속조형), Variable Lamination Manufacturing (가변적층 쾌속조형), Transfer Type (단속적 재료 공급 방식), Process Design (공정 설계), 3D Prototypes (3 차원 시작품)

### Abstract

A new rapid prototyping process, as a transfer type of Variable Lamination Manufacturing by using expandable polystyrene foam (VLM-ST), has been developed to reduce building time, apparatus cost including the introduction and the maintenance and additional post-processing. The objective of this study is to propose a VLM-ST process and to develop an apparatus for implementation of the process. Design criteria of the apparatus were defined and the techniques were proposed to satisfy the design criterion. In order to examine the efficiency and applicability of the developed process, various three-dimensional shapes, such as a world-cup logo, a knob shape and a character, Son-o-kong, were fabricated on the apparatus in which unit shape layer (USL) was generated to build up each layer.

### 기호설명

$\theta_x, \theta_y$  : 측면경사각  
 $N_x, N_y, N_z$  : 패킷 (facet) 의 단위 법선벡터  
 $U_x, U_y, U_z$  : 패킷의 단위 접선 벡터

### 1. 서론

오늘날 수요자의 다양한 기호에 따라 제품 모델이 다양화되고, 국내의 시장에서 경쟁이 치열해지면서 제품 개발기간과 시작기간 및 비용의 단축이 절실히 요구되고 있어 모든 산업분야에서 제품

의 시장 도입시기, 즉 제품의 납기를 앞당기려는 여러 가지 시도를 경주하고 있다.

이러한 시장의 요구에 효과적으로 대처하고, 제품의 경쟁력을 제고하기 위해서는 제품의 설계에서부터 시작품 생산에 이르는 제품 개발에 소요되는 비용과 시간을 절감하여 신속하고 저렴하게 제품을 시장에 출하하는 것이 필수적이라 할 수 있다. 그러므로, 이러한 시장의 요구를 만족시키고 기존 제품 개발에서 나타나는 장시간의 개발 기간을 단축할 수 있는 한가지 대안으로 동시공학적 개념의 새로운 시작품 제작 공정인 쾌속조형 (Rapid Prototyping : RP)이 도입되었다<sup>(1)</sup>.

미국을 중심으로 하여 1986 년에 레이저 stereolithography 를 이용한 SLA 공정이 개발되기 시작하여 3 차원 프린터 및 시작품 제작 역할을 수행하는 20 여가지 이상의 쾌속조형 공정들이 개발되었다<sup>(2)</sup>. 그러나, 현재까지 개발된 공정의 경우 장시간의 조형 시간, 고가의 장치 도입/유지

\* 한국과학기술원 기계공학과  
 \*\* 한국과학기술원 대학원  
 \*\*\* ㈜ 메닉스엔지니어링  
 \*\*\*\* 전북대학교 기계공학과

비 및 추가적인 후처리 공정의 소요등의 문제점을 가지고 있다. 최근에는 Genisys, Thermojet, Z402, Objet 및 JP5 등 3 차원 가시화 (Visualization) 용 소형 장치의 개발이 두드러지고 있다<sup>(3)</sup>. 또한, 최근 송용억등에 의하여 수행된 교육기관, 정부출연 연구소 및 산업체의 설문조사 결과에 따르면, 폐속 조형 장치에서 개선 요구되는 사항의 경우 제작 시간, 정밀도, 장치 도입 가격, 시작품 크기, 저렴한 재료비, 후처리 작업 간소화 등이었다<sup>(4)</sup>.

제작 시간 최소화 측면에서 두꺼운 층을 쌓아 올려서 3 차원 제품을 제작하는 공정에 대한 연구가 A. Novc, A. F. Lennings 및 R. L. Hope 등에 의하여 수행된 바 있다<sup>(5, 6, 7)</sup>. 또한, 국내에서는 D. Y. Yang, D. G. Ahn 등에 의하여 조형 시간을 획기적으로 단축시키고, 장비 가격 및 유지비가 현저히 저렴하며, 측면 경사에 의한 단차 현상을 최소화하고 후처리 공정이 거의 요구되지 않는 새로운 개념의 발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 폐속 조형 공정 (Variable Lamination Manufacturing using Expandable Polystyrene Foam: VLM-S) 이 제안된 바 있다<sup>(8,9)</sup>.

VLM-S 의 경우 재료를 틀에 감아 연속적으로 공급시키며 절단/적층하는 연속형 (Progressive Type : VLM-SP) 과 정해진 규격의 재료를 단속적으로 공급하며 자동 절단과 오프 라인 (Off-Line) 에서 반자동으로 적층하는 단속형 (Transfer Type : VLM-ST) 두가지로 개발되고 있다. VLM-ST 의 경우 VLM-SP 와 달리 평탄화 공정과 잔여 재료 제거 공정이 요구되지 않으며, 적층 및 접착을 파일럿 핀 (Pilot Pin) 과 적층 보조 장치 (Building Board) 를 이용하여 반자동화함으로써 VLM-SP 에 비해 조형 속도가 현저히 증가되고 장치 가격이 획기적으로 저렴해진다. 그러므로, VLM-ST 는 교육 현장 및 산업 현장에 개념 및 프리젠테이션 모델러로 폭넓게 사용 가능하며, 2 차 공정을 이용하여 기능성 제품을 제작할 수 있어 실용적인 활용도가 높을 것으로 사료된다.

본 연구에서는 VLM-ST 공정을 제안하였으며, 제안된 공정에 대한 공정 설계 및 공정 설계를 구현하기 위한 VLM-ST 장치 설계/제작을 수행하였다. 그리고, 제안된 공정 및 장치를 이용하여 다양한 3 차원 시작품을 제작하여 본 공정의 적용성과 효율성을 입증하였다.

## 2. VLM-ST 공정 설계

VLM-ST 공정은 여러 가지 두께를 가진 일정

규격의 재료를 단속적으로 공급하여 4 자유도 동시 제어되는 선형 열선 절단기를 이용하여 재료를 폭, 길이 및 측면 경사를 실시간 제어하여 3 차원 CAD 데이터와 일치되는 3 차원 형상을 절단한 후, 오프라인에서 파일럿 핀과 적층 보조 장치를 이용하여 접착/적층함으로써 일체화된 3 차원 형상의 제품을 빠른 시간에 제작할 수 있는 폐속 조형 공정이다. Fig.1 은 VLM-ST 공정 구성도이다.

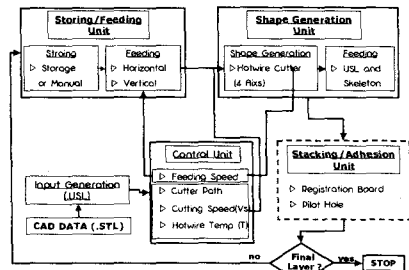


Fig. 1 Process flow of VLM-ST

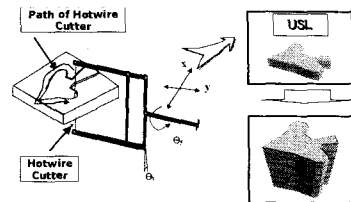


Fig. 2 Concept of the Unit Shape Layer and VLM-ST

VLM-ST 는 Fig.2 와 같이 한층에 하나의 3 차원 형상을 생성하는 단위 형상층 (Unit Shape Layer : USL) 개념을 이용한다. VLM-ST 공정은 솔리드 모델로부터 조형 공정에 입력하기 위한 입력데이터 (USL File) 생성과정과 이 데이터를 이용하여 3 차원 형상 제작을 수행하는 가변 적층 폐속 조형 공정으로 구분된다<sup>(10)</sup>.

### 2.1 입력데이터 생성 과정

입력데이터 생성 과정은 솔리드 모델링된 3 차원 형상을 VLM-ST 공정에 의해 제품으로 제작되기 하기 위한 단위 형상층별 열선 절단 이동 위치 및 각 위치에서의 측면 경사각, 열선 열량, 열선 속도 및 파일럿 핀과 기준 형상 (Reference Shape) 등의 정보를 생성하는 단계이다. VLM-ST 입력데이터 생성 단계는 Fig.3 의 흐름도와 같이 크게 6 단계로 구성된다.

측면 경사각 계산은 식 (1) 과 같다.

$$\begin{bmatrix} \sin \theta_y \\ -\sin \theta_x \cos \theta_y \\ \cos \theta_x \cos \theta_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} N_x U_z - N_z U_x \\ -(N_x U_y - N_y U_x) \\ N_x U_y - N_y U_x \end{bmatrix} \quad (1)$$

Fig.4 는 입력데이터 생성과정을 정립사지 5 층 석탑을 이용하여 나타내었다.

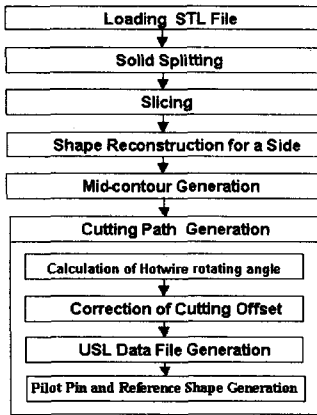


Fig. 3 Flow chart for generation of input data

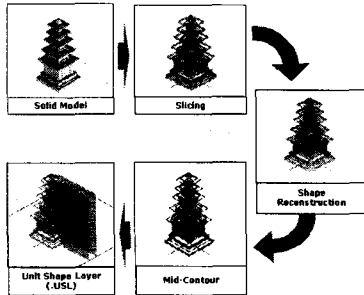


Fig. 4 Process flow for generation of input data

## 2.2 VLM-ST 공정

### 2.2.1 재료 저장 및 공급부

재료 저장 및 공급부는 형상 생성부에 소요되는 판재 (Plate) 형태의 발포 폴리스티렌 폼을 단속적으로 공급한다. 재료는 전체 재료를 저장 장치에 저장하여 전체 공정 순서에 맞추어 자동으로 공급될 수 있다. 초기 공급 재료에는 Fig.5 와 같이 형상 생성 후 적층을 정확하고 신속하게 수행하기 위한 적층 안내 구멍과 형상 생성부까지 이송을 위한 지지 구멍이 뚫어져 있다.

### 2.2.2 형상 생성부

형상 생성부는 공급된 판재 형태의 재료를 시스템 제어부에서 제공되는 형상 정보, 열선 온도, 열선 이동 경로 및 열선 이송 속도를 이용하여 3 차원 목적물의 각층인 단위 형상층을 생성한다. Fig.6 은 단위 형상층 생성 절차이다.

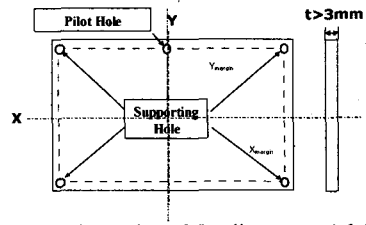


Fig. 5 Schematics of Feeding Material (A4 Size)

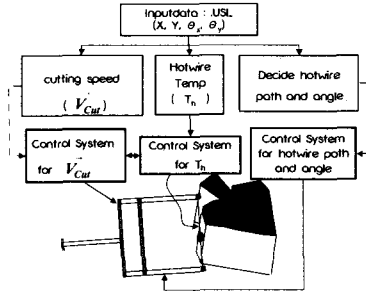


Fig. 6 Flow chart to generate Unit Shape Layer

### 2.2.3 재료 적층 및 접착부

재료 적층 및 접착부는 Fig.7 과 같이 형상 생성부에서 제작된 단위 형상층을 적층 보조 장치와 파일럿 핀을 이용하여 반자동으로 적층 한 후, 접착제로 접착시키는 공정이다. 이 세부공정은 자동 형상 생성후 오프라인에서 반자동으로 수행된다. 또한, 다중 연결 영역 (Multiple Connected Domain) 의 경우 형상 생성시 발생할 수 있는 절단 공간 (Cutting Gap) 을 보충하기 위한 후처리도 공정도 포함한다.

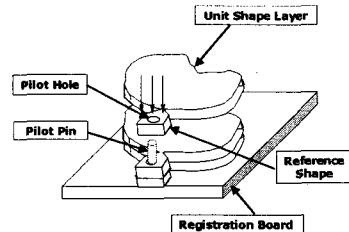


Fig. 7 Schematics of stacking using registration board

### 2.2.4 시스템 제어부

시스템 제어부는 입력된 .USL 파일의 데이터를 이용하여 형상 생성 정보, 열선 절단기 경로 정보, 열선 절단기 절단 속도, 열선 온도 및 재료 이송 속도/간격등을 결정하여 VLM-ST 가 3 차원 제품을 신속/정확히 조형할 수 있도록 구성된 PC-NC 시스템이다. 전체 시스템은 개방형 제어시스템이며, 4 축 열선 절단기 회로는 4 축 동시 제어를 수행할 수 있는 시스템으로 구성된다.

### 3. VLM-ST 장치 설계 및 제작

Fig.8 은 재료 저장 및 공급부와 형상 생성부에 대한 개념도이고, Fig.9 는 VLM-ST 장치를 나타낸다. 본 장치의 제작 가능 크기는 평면내에서는 250 mm × 180 mm 이며, 최대 적층 높이는 제한이 없다. 한 층의 적층 두께는 최소 3 mm 이상이다.

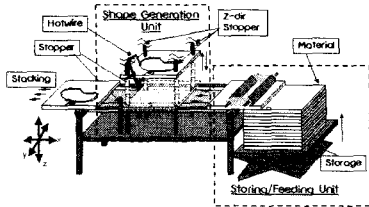


Fig. 8 Schematics of VLM-ST process

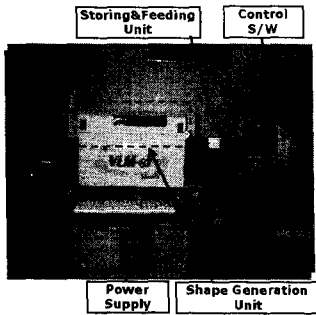


Fig. 9 Prototype of VLM-ST Apparatus

#### 3.1 재료 저장 및 공급부

VLM-ST 의 재료 저장 및 공급부는 재료 저장 단위로 저장된 재료를 단속적으로 이송 시키는 이송 단위로 구성된다. 재료 저장 단위는 A4 크기의 판재 발포 폴리스티렌 폼을 단속적으로 공급할 수 있도록 재료 저장고와 위치 조절 장치로 구성하였다. 재료 이송 단위는 판재 형태의 발포 폴리스티렌 폼을 단속적으로 공급할 수 있도록 이송 컨베이어 시스템 및 판재 발포 폴리스티렌 폼을 형상 생성부로 이송 시키는 수직 재료 이송부로 구성된다.

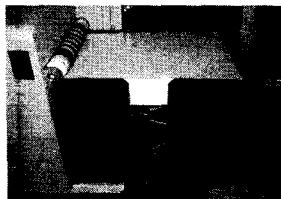


Fig. 10 Material storing unit

#### 3.2 형상 생성부

VLM-ST 공정의 특징인 단위 형상층의 측면 경사를 구현하기 위하여 4 축 열선 절단기 시스템을 설계/제작 하였다. 4 축 열선 절단기는 4 개의 스텝 평 모터에 의하여 제어되는 평행사변형 링크 메커니즘을 이용하였다. VLM-ST 공정에서는 단위 형상층을 생성하기 위하여 열선 절단기를 Fig.11 과 같이 하였다.

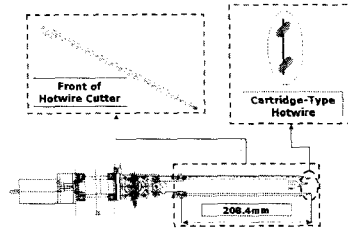


Fig. 11 Hotwire cutter

열선 장착 선단부가 길어짐에 따라 발생할 수 있는 선단부 굽힘 현상에 의한 열선 초기 인장력 감소를 제어하기 위하여 I-DEAS 를 이용하여 선단부 변형해석을 수행하였다. 해석 결과 설계 제한 하중인 0.1N 열선 작용 하중하에서 선단부 변위가 0.54 mm 이하가 되도록 열선 선단부를 설계하였다.

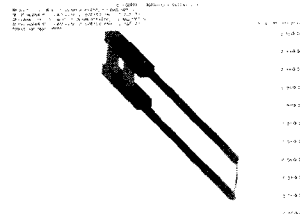


Fig. 12 Finite element analysis results

열선의 과도 열변형과 저주기 피로에 대처하기 위하여 고온에서 기계적 물성이 뛰어난 Ni-Cr 선을 사용하였다. 또한, 열선 발열 온도를 적외선 온도 측정기로 측정된 결과 700 °C 이었다. 그러므로, Fig.13 의 결과에 의하여 초기 인장력을 7.76N 이하로 제한하였다.

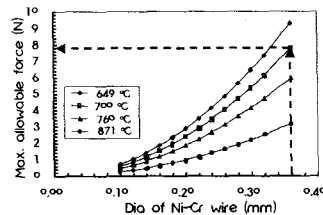


Fig. 13 Relationship between maximum available force and diameter of Ni-Cr wire for each temperature

열선 직경은 0.36 mm 이며, 단위 길이당 열선 입열량은 0.28 Watt/mm 이상이 되도록 하였고 최대 절단 속도는 50 mm/sec 로 제한 하였다.

### 3.3 재료 적층 및 접착부

본 세부 공정은 Fig.14 (a) 와 같이 설계되었다. 다양한 제품 높이에 적응하기 위하여 조립식 다단 파일럿 핀으로 제작하였다. Fig.14 (b) 는 See-KAIST 로고에 대한 적층예를 나타낸다.

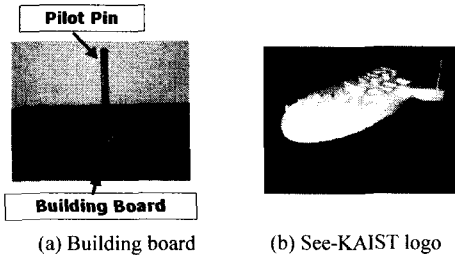


Fig. 14 Building board and example of stacking

### 3.4 시스템 제어부

본 시스템 제어부는 재료 공급/저장 공정, 형상 생성 공정 및 형상/잔여재료 자동 이송/저장의 3 공정을 Window 환경에서 전 자동 및 부분 자동으로 제어할 수 있도록 PC-NC 시스템으로 구축하였다. Fig.15 는 시스템 제어부의 소프트웨어를 나타낸다.

본 제어부는 하드웨어와 소프트웨어로 구성된다. 하드웨어는 500 MHz 급 이상의 PC 에 제어될 수 있는 6 축 다중 모션 제어보드를 사용하였다. 이 제어보드의 6 축 중 4 축은 열선 절단기의 4 축 절단을 위하여 동시 연동되어 작동될 수 있도록 되어 있다. 또한, 본 제어시스템에서는 4 축 스텝핑 모터 제어, 2 축 DC 모터 제어, 12 개의 디지털 입력과 2 개의 디지털 출력으로 구성되어 있다. 그리고, 소프트웨어는 C 와 C++ 언어를 이용하여 Window 상에서 구현될 수 있도록 하였으며 제어 대상은 절단 속도, 절단기 위치 및 경사, 이송 속도 및 디지털 입출력이다.

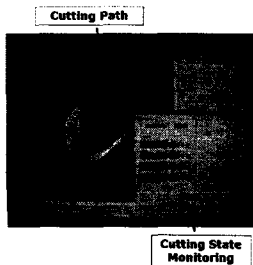


Fig. 15 VLM-ST control software

## 4. 시작품 제작 및 고찰

VLM-ST 의 공정 및 장치 설계에 의하여 제작된 프로토타입 VLM-ST 장치를 이용하여 여러가지 형태의 시작품을 제작하였다. 공정의 효율성과 경제성을 입증하기 위하여 VLM-ST 시작품의 적용 범위 중 하나인 엔터테인먼트와 프리젠테이션 모델로 적당한 World-Cup 2002 로고를 선택하였다. World-Cup 2002 로고의 경우 적층 개념이 유사하고 현재 상용화 되어 있는 LOM 제작품과 VLM-ST 시작품을 제작 형상, 제작 시간 및 제작 비용에 대하여 비교하였다. World-Cup 2002 로고의 경우 기준 치수가 210 mm (W) × 60 mm (L) × 12 mm (H) 이다.

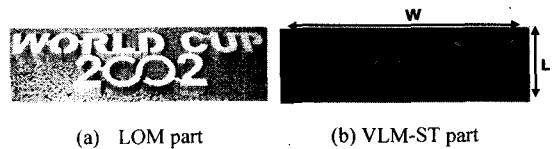


Fig. 16 Comparison of World-Cup 2002 logo shape between LOM and VLM-ST

Fig.16 과 같은 World-Cup 2002 로고 형상의 경우 LOM 과 VLM-ST 모두가 유사한 형상을 나타내었다.

Table 1. Comparison of building time and material cost between LOM parts and VLM-ST parts

Parts	Process	Building Time (min)	Material Cost (Won)
WorldCup	LOM	434	15,000
2002 Logo	VLM-ST	5	750

그러나, 본 시작품 형상에 대하여서는 Table.1 과 같이 전체 조형시간과 재료 원가면에서 VLM-ST 공정이 LOM 공정 보다 경제적이고 효율적임을 알 수 있었다.

VLM-ST 공정의 타당성과 적용성을 입증하기 위하여 일반적인 3 차원 형상을 가지는 Knob 및 손오공 형상을 VLM-ST 공정으로 제작하였다. Table. 2 는 Knob, 손오공 형상 대한 조형 조건, 조형 높이 및 총 조형 시간을 나타낸다. Fig.17 은 손오공 형상을 조형하기 위한 VLM-ST 공정 순서를 나타낸다. Fig.18 는 VLM-ST 로 제작된 노브의 형상과 입력 CAD 형상이다. Fig. 17 및 Fig. 18 의 결과로부터 입력된 솔리드 모델 데이터와 동일한 형상이 본 공정을 통하여 제작될 수 있음을 알 수 있으며,

Table.2 의 결과와 같이 기존 상용화 공정에서 기본적인 최대 제작 모델 크기인 300 mm × 250 mm × 250 mm 의 형상의 경우 약 60 분 정도의 시간에 제작할 수 있음을 알 수 있었다.

Table 2. Building condition, building height and building time of the test parts

Parts	Q (W/mm)	V (mm/s)	Height (mm)	Building Time (min)
Son-o-Kong	0.34	40	183	40
Knob	0.34	40	109	20

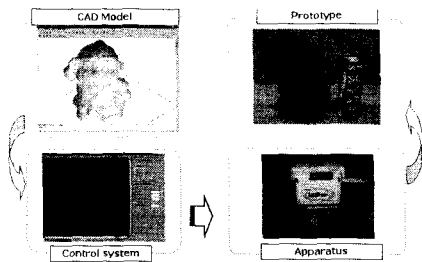


Fig. 17 Process flow of VLM-ST to generate a Son-o-Kong

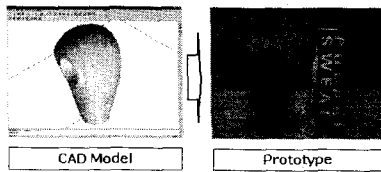


Fig. 18 Comparison of shape between solid models and fabricated parts

## 5. 결론

본 논문을 통하여 기존 쾌속 조형 공정의 문제점으로 대두되고 있는 장시간의 제품 제작 시간, 고가의 장비 가격과 유지비 및 추가적인 후처리 공정 소요 등을 해결 할 수 있는 단속형 재료 공급식 가변 적층 쾌속 조형을 제안하였다.

본 연구 결과 VLM-ST 공정에 요구되는 세부 공정과 주요 요소 기술들을 정의하여 분류하여 공정을 확립 할 수 있었다. 또한, 공정 설계를 구현하기 위한 장치 설계/제작을 수행하였으며 각 세부 공정 설계시 요구되는 설계 변수와 기준을 정의하여 설계 기준을 만족시키는 장치 설계 및 제작을 할 수 있었다. 제작된 장치를 이용하여 World-Cup

2002 로고 시작품을 제작하여 상용 공정인 LOM 과 비교하여 VLM-ST 공정이 경제적이고 효율적인 공정임을 알 수 있었다. 또한, 손오공 및 Knob 등의 여러가지 3 차원 시작품을 제작하여 제안된 공정의 적용성과 타당성을 확인하였다.

## 후 기

본 연구는 과학기술부 국가중점사업인 주문적 응형 쾌속 제품 개발 시스템 사업단의 “가변 용착/적층에 의한 직접식 쾌속 조형 공정 및 응용기술 개발”연구 결과의 일부이며, 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

- (1) S. A. McMains, “Rapid Prototyping of Solid Three-Dimensional Parts,” Master’s Project under the direction of Carlo Sequin, 1995.
- (2) P. Kulkarni, A. Marsan, D. Dutta, “A review of process planning techniques in layered manufacturing”, Rapid Prototyping Journal, Vol 6, #1, pp.18-35, 2000
- (3) T. Wohler, “Wohlers Report 2000, Rapid Prototyping & Tooling State of the industry”, Wohler’s Associates Inc., 2001.
- (4) 송용익, “컨조인트 분석 기법을 이용한 신제품 개발에 관한 연구”, 고려대학교 석사학위 논문, pp.30-38, 2001.
- (5) 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.
- (6) 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.
- (7) R. L. Hope, P. A. Jacobs, R. N. Roth, “ Rapid prototyping with sloping surface”, Rapid Prototyping Journal, Vol 3, #1, pp.12~19, 1997
- (8) “선형 열절단 시스템을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정 및 장치”특허 2000-18175, 2000
- (9) 안동규, 이상호, 양동열 외 2 인 “발포 폴리스티렌 폼을 이용한 가변 적층 쾌속 조형 공정 설계 및 개발” 한국정밀공학회 제 18 권 제 8 호 pp54-62, 2001
- (10) “선형 열절단 시스템을 이용한 단속적 재료 공급식 가변 적층 쾌속 조형 공정 및 장치”특허 2001-0040212, 2001