

삼차원 스캐너와 가변 적층 쾌속조형공정을 이용한 대형 입체 형상의 쾌속 제작 : 러쉬모어산 기념물 제작 사례

이상호* · 김효찬* · 송민섭* · 양동열† · 박승교**

(2004년 7월 6일 접수, 2004년 10월 21일 심사완료)

Rapid Fabrication of Large-Sized Solid Shape using 3D Scanner and Variable Lamination Manufacturing : Case Study of Mount Rushmore Memorial

Sang-Ho Lee, Hyo-Chan Kim, Min-Sup Song, Dong-Yol Yang and Seung-Kyo Park

Key Words : Rapid Prototyping(쾌속조형), Reverse Engineering(역공학), Variable Lamination Manufacturing(가변적층쾌속조형), Large-Sized Solid Shape(대형 입체 형상)

Abstract

This paper describes the method to rapidly fabricate the large-sized physical model with the envelope model size of more than 600 mm x 600 mm x 600 mm using two type semi-automatic VLM-ST processes in connection with the reverse engineering technology. The fabrication procedure of the large-sized solid shape is as follows: (1) Generation of STL data from 3D scan data using 3D scanner, (2) generation of shell-type STL data by Boolean operation, (3) division of shell-type STL data into several pieces by solid splitting, (4) generation of USL data for each piece with VLM-Slicer, (5) fabrication of each piece by cutting and stacking according to USL data using VLM-ST apparatus, (6) completion of a shell-type prototype by zigzag stacking and assembly for each piece, (7) completion of a 3D solid shape by foam backing, (8) surface finish of a completed 3D solid shape by coating and sanding. In order to examine the applicability of the proposed method, the miniature of the Mount Rushmore Memorial has been fabricated. The envelope model size of the miniature of the Mount Rushmore Memorial is 1,453 mm x 760 mm x 853 mm in size. From the result of the fabricated miniature of the Mount Rushmore Memorial, it has been shown that the method to fabricate the large object using two type semi-automatic VLM-ST processes in connection with the reverse engineering technology are very fast and efficient.

1. 서론

현대 산업 사회는 급격한 산업 발전과 소비자의 다양한 기호에 따라 제품의 모델이 다양화되고 형상이 복잡해 지고 있다. 또한 국내의 시장에서 제품의 개발기간과 시작품 제작 기간의 단축이 요구되고 있으며, 이에 따른 시장 도입시기 및 제품

개발의 납기 단축이 중요한 문제로 대두 되었다. 따라서 제품의 다양성과 시작기간의 단축에 부응할 수 있는 시작품 제작 방법의 기술 혁신이 필요하게 되었으며 제품 설계 및 개발의 동시 공학적 추구가 필수적이다. 이러한 시장의 요구를 만족시키고, 고품질의 신제품을 빠른 시간에 개발하기 위해 역공학기술(Reverse Engineering Technology)과 쾌속조형기술(Rapid Prototyping Technology)이 도입되었다.⁽¹⁾

일반적으로 역공학기술⁽²⁾은 기존의 제품으로부터 3 차원 측정을 통해서 측정 데이터(point cloud data)를 얻은 후 이로부터 CAD/CAM에 이용 가능한 3 차원 CAD 모델 데이터를 생성하는 것이다. 이러한 역공학 기술은 CAD 데이터가 없는 부품

† 책임저자, 회원, 한국과학기술원 기계공학과
E-mail : dyyang@kaist.ac.kr
TEL : (042)869-3214 FAX : (042)869-3210

* 한국과학기술원 대학원 기계공학과

** ㈜ 메닉스

과 동일한 물건이 필요한 경우와 기존에 3 차원 CAD 데이터가 없이 제작된 제품을 개조하여 새로운 제품을 개발하고자 할 경우에 필요로 한다. 역공학기술의 주요 적용 분야는 신제품 개발, 금형 및 제품의 검사 또는 복제, 의료 분야에서 인공관절 및 치아제작, 수술 준비에 필요한 모형 제작, 애니메이션 캐릭터 또는 3 차원 입체 아바타 생성 등이다.

폐속조형 기술은 시작품을 신속하게 제작하기 위해서 3 차원 CAD 데이터를 일정한 두께 간격으로 슬라이싱한 각 층을 다양한 방법으로 만들고, 이러한 층을 한층씩 적층하여 원하는 3 차원 형상을 제작하는 기술이다. 폐속 조형법은 초기에는 광(beam)에 의해 형상이 만들어진다고 하여 광조형법이라고 불렸다. 그 후 시작품(Prototype)을 신속(Rapid)하게 제작할 수 있다는 사실로부터 'Rapid Prototyping' 또는 '폐속 조형법' 이라고 불리게 되었다.

현재 상용화된 폐속조형기술에는 광조형법(SLA), 용착조형공정(FDM), 선택적레이저소결공정(SLS), 박판조형공정(LOM), 3 차원 프린팅(3DP) 등이 있다. 이러한 종래의 폐속조형기술은 층 두께가 1 mm 이하로 아주 얇기 때문에 조형 크기가 600 mm x 600 mm x 600 mm 이하⁽³⁾인 소형이나 중형크기를 가진 물체의 폐속 제작에 적합하다. 따라서, 가전 산업, 자동차 산업 등에서 초기 시작품 개발과정에서 설계 검증용 개념 모델 제작에 주로 이용 되어 왔고, 최근에는 의료, 건축, 산업디자인, 광고, 연예 산업, 조형 예술 등의 분야에도 적용되고 있다.

국내외의 여러 연구자들에 의해서 층 두께가 1 mm 이상으로 두꺼운 층을 사용하여 조형 크기가 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상인 대형 물체의 폐속 제작에 관한 연구가 수행되었다. 국외에서는 Thomas, Hope, Horvath 등⁽⁴⁻⁶⁾에 의해서 조형 크기가 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상인 대형 크기를 가진 물체를 폐속제작하기 위한 연구가 수행되었지만, 아직 실용화 단계에는 이르지 못하고 있다. 국내에서는 허정훈 등⁽⁷⁾에 의해서 두꺼운 판재와 6축 병렬기구를 이용하여 적층과 절삭을 복합적으로 수행하는 판재적층식 폐속시작시스템인 RP-ECLIPSE 가 개발 되었지만, 장치 크기에 비해서 조형 크기가 작아서 대형 물체 제작에는 어려움이 있다.

2001년 Ahn 과 Yang 은 기존의 폐속 조형 공정의 문제점인 긴 조형시간, 2 차원의 얇은 층의 적층에 의한 측면 계단 형상, 추가적인 후처리 공정, 제한된 조형 크기 등을 극복할 수 있는 새로운 개

념의 반자동 적층방식의 단속형 가변적층폐속조형 공정 및 장치(Transfer type Variable Lamination Manufacturing using expandable polyStyrene foam: VLM-ST)을 개발하였다.⁽⁸⁾

본 논문에서는 백색광 방식의 3 차원 스캐너와 반자동형 VLM-ST 장치를 이용하여 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상의 조형 크기를 가진 대형 입체 형상을 효과적으로 제작하는 방법론을 제안하고자 한다.

2. 역공학과 폐속조형 연계 시스템

Fig. 1 은 3 차원 스캐너와 가변 적층 폐속조형공정을 이용한 3 차원 형상의 복제 과정을 보여준다.

2.1 삼차원 스캐너

본 연구에서는 3 차원 측정 데이터를 얻기 위해서 Fig. 2 에 보여진 것과 같은 할로겐 램프를 광원으로 사용하고, 공간부호화(space coding)와 위상천이법(phase shifting)을 함께 사용하여 측정 해상도를 높은 백색광 방식의 3 차원 스캐너를 이용하였다.⁽⁹⁾ Table 1 은 백색광 방식의 3 차원 측정기의 장치 사양을 보여 준다.

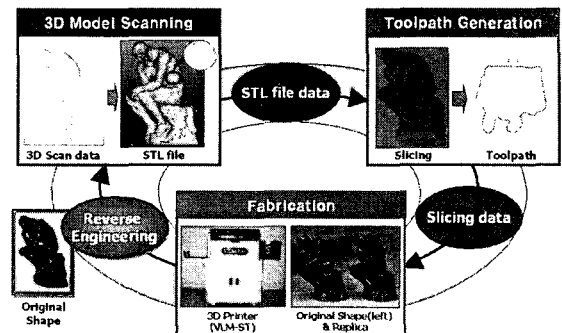


Fig. 1 Replication procedure of Rodin's thinking man

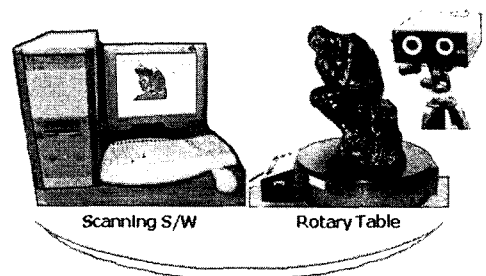


Fig. 2 3D scanner using halogen lamp

Table 1 Specifications of 3D scanner

Item	3D Scanner (SNX)
Scanning Area	150 x110 mm
Camera Resolution	640 x 480 (pixels)
Accuracy	±20 μm
Max. number of data points (per scan)	300,000 points
Scanning method	Structured Light Method
Scanning time	0.7 second
Light source	Halogen Lamp (150 W)
Power	DC 24 V

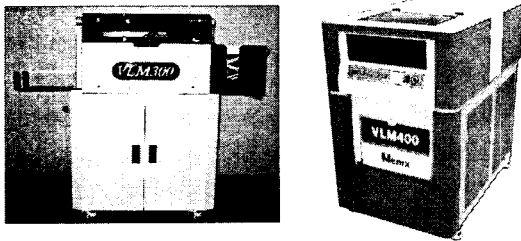


Fig. 3 VLM300(left) and VLM400(right)

Table 2 Specifications of VLM300 and VLM400

	VLM300 (A4 size)	VLM400 (A3 size)
Max. Build Size	200x160 mm (Height: not limited)	300x240 mm (Height: not limited)
RP Technology	Variable Lamination Manufacturing (Thick layers with sloping edges)	
Cutting System	4-axis synchronized hotwire cutter (Parallelogram mechanism)	
Stacking	Manual stacking	Manual stacking
Part material	EPS-foam sheets (A4 size)	EPS-foam sheets (A3 size)
Layer thickness	1-4 mm	1-10 mm
CAD/CAM SW	VLM-Slicer USL V. for A4	VLM-Slicer USL V. for A3
Input Data	STL file	
Control	PC-NC (Stepping Motor)	
Max. Cutting Speed	50 mm/sec	30 mm/sec
Price Available	\$ 14 k (List Price)	\$ 20 k (List Price)

2.2 가변 적층 쾌속조형공정 및 장치

반자동형 VLM-ST 공정은 3D CAD 모델로부터 변환된 STL 파일에서부터 생성된 3 차원 공구 경로 데이터에 따라 두꺼운 두께를 가진 판재를 4 축 선형 열선 절단기를 사용하여 측면 경사를 가진 층으로 절단한 후, 오프라인에서 수동으로 각 층을 순서대로 접착/적층함으로써 3 차원 형상의 제품을 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 쾌속 조형 공정이다.⁽⁹⁾ 반자동형 VLM-ST 장치는 공급재료 크기가 A4 크기(297x210 mm) 인 VLM300 과 공급재료 크기가 A3 크기(420x297 mm) 인 VLM400 의 2 가지 형태로 개발 되었다. Fig. 3 는 VLM300 장치와 VLM400 장치를 보여 준다. Table 2 은 VLM300 과 VLM400 의 장치 사양을 보여 준다.

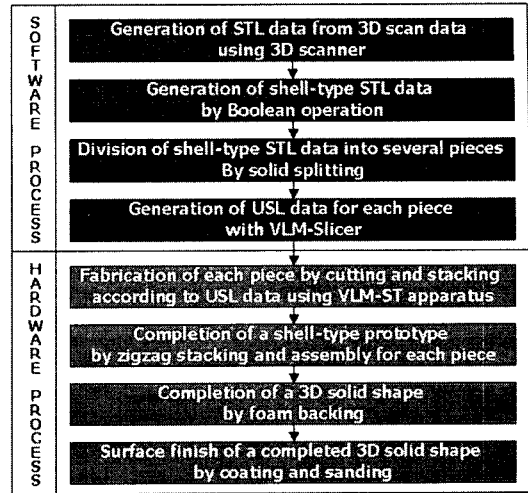


Fig. 4 Flowchart of fabrication of large object

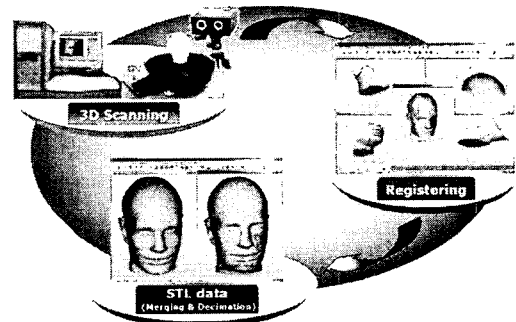


Fig. 5 Procedure of 3D scanning

3. 대형 입체 형상의 쾌속 제작 방법

Fig. 4 는 백색광 방식의 3 차원 스캐너와 반자동형 VLM-ST 장치를 이용하여 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상의 조형 크기를 가진 대형 3 차원 입체 조형물 제작 절차를 보여 준다.

3.1 삼차원 스캐닝

3 차원 스캐너를 이용하여 제작하고자 하는 대형 3 차원 입체 조형물의 기념품 모형으로부터 표면의 스캐닝 데이터를 획득한 다음, 표면을 삼각형망으로 둘러싸서 STL 파일을 생성한다.

Fig. 5 에 보여진 바와 같이 3 차원 스캐너를 이용하여 기존의 3 차원 형상으로부터 표면을 삼각형망으로 근사한 STL 데이터를 생성하는 과정은 다음과 같다.

(1) 3 차원 스캐너를 이용하여 3 차원 형상에 대해서 여러 각도에서 측정된 데이터를 얻는다.

(2) 여러 각도에서 측정된 데이터는 영상의 잡영(Noise)을 제거한 후, 각각의 조각들을 일치시켜서 원래의 3 차원 모델을 완성한다. 이와 같이 나누어서 측정된 모델을 서로 일치시키는 작업을 “레지스터레이션(Registration)” 이라고 한다.

(3) 완전한 3 차원 CAD 모델을 얻기 위해서 끊어지거나 겹친 부분을 하나로 이어주는 작업(merging)과 측정이 안되어 구멍이 있는 부분을 보간법으로 메우는 작업(hole filling)을 수행한다. 이러한 일련의 작업이 완료되고 나면 3 차원 CAD 모델의 기하학적 형상을 삼각형 격자로 근사화한 STL 파일포맷(ASCII 형식과 Binary 형식)으로 측정 데이터를 변환한다. STL 파일로 변환할 때, 모델 점 데이터의 수를 줄이는 작업(decimation)을 수행하여 측정된 형상이 잘 표현되는 범위 내에서 STL 파일의 삼각형의 수를 감소시킬 수 있다.

3.2 셸 형태의 STL 데이터 생성

부울 연산을 이용하여 속이 빈 셸(shell)형태의 STL 파일을 생성한다. 즉, 3 차원 스캐닝을 통해서 생성된 STL 파일과 이 STL 파일에서 일정한 거리만큼 후방 오프셋(offset)한 STL 파일 사이에 차(Difference) 연산을 수행하여 속이 빈 셸(shell)형태의 STL 파일을 생성한다.

B-REP(Boundary Representation)은 입체를 꼭지점, 모서리, 면 등의 위상적인 경계를 이용하여 다면체 모델로 근사하여 간접적으로 표현하는 방법이다. 입체를 삼각형망으로 표면을 근사하여 표현된 STL 파일은 삼각형 기준 모델로 표현된 B-REP 방식으로 볼 수 있다. 이러한 입체에 부울 연산을 적용하기 위해서는 3 차원 모서리 근방 해석⁽¹⁰⁾을 통해서 A, B 두 입체에 대한 삼각형의 위치를 Fig. 6 에 나타낸 바와 같이 8 가지로 분류할 수 있다.

입체 A 와 B 의 경계 분류의 결과로부터 3 개의 부울 연산인 합집합(Union), 교집합(Intersection), 차집합(Difference) 은 다음과 같이 계산 될 수 있다.⁽¹¹⁾

$$A \cup B = A \text{ out } B \oplus B \text{ out } A \oplus A \text{ on } B^+ \quad (1a)$$

$$A \cap B = A \text{ in } B \oplus B \text{ in } A \oplus A \text{ on } B^+ \quad (1b)$$

$$A - B = A \text{ out } B \oplus (B \text{ in } A)^{-1} \oplus A \text{ on } B^- \quad (1c)$$

여기서, \oplus 는 재구성(gluing) 연산자, $^{-1}$ 의 의미는 법선벡터의 방향이 반대가 되고, 꼭지점의 순서를 역전시킨 삼각형을 말하며, $\cup, \cap, -$ 은 각각 정규화된 합집합, 교집합, 차집합 연산자 이다.

Fig. 7 은 입체 A 와 B 에 대한 부울 연산 결과를 보여 준다.

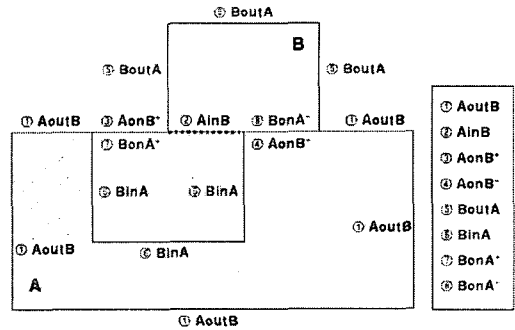
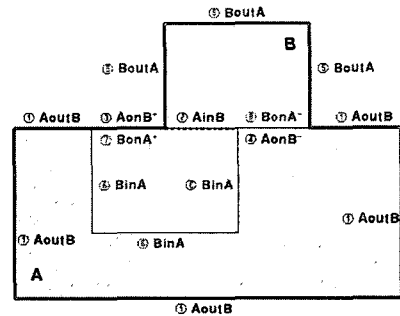
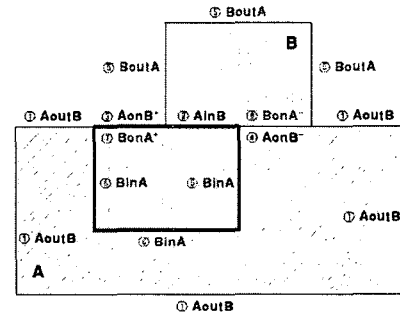


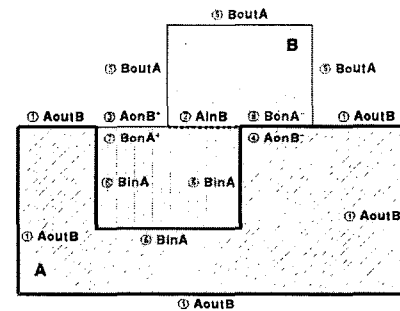
Fig. 6 Boundary classifications of two solids A and B



(a) Union ($A \cup B$)



(b) Intersection ($A \cap B$)



(c) Difference ($A - B$)

Fig. 7 Boolean operations of two solids A and B

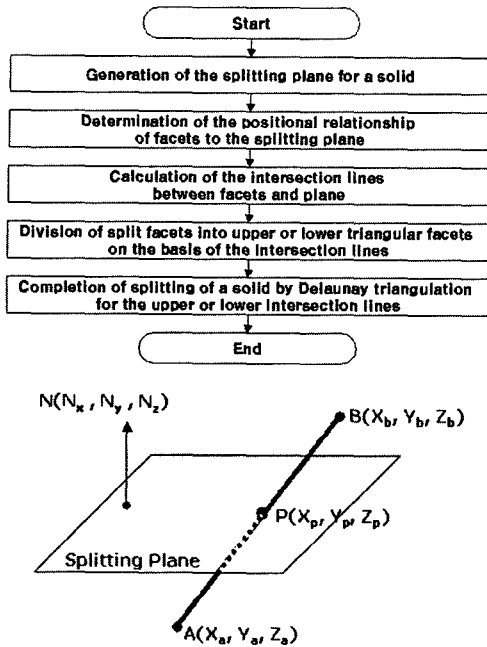


Fig. 9 Intersection point between a line segment and a splitting plane

3.3 셀 형태의 STL 데이터의 분할

셀 형태의 STL 파일을 VLM300(조형크기: 200×160 mm)과 VLM400(조형크기: 300×240 mm)장치의 조형 크기에 맞게 여러 조각으로 분할한다.

Fig. 8 에 보여진 바와 같이 삼각형 기준 모델로 표현된 입체를 분할하는 과정은 다음과 같다.

(1) 입체 분할을 위한 평면을 생성한다.

평면에 수직인 단위법선벡터가 $N(N_x, N_y, N_z)$ 이고, 평면상의 점 $Q(X_q, Y_q, Z_q)$ 이 주어질 때, 분할 평면의 방정식은 다음과 같다.

$$N_x X + N_y Y + N_z Z + D = 0 \tag{2}$$

여기서 $D = -(N_x X_q + N_y Y_q + N_z Z_q)$ 이다.

(2) 분할 평면에 대한 삼각형의 위치 관계를 결정한다.

Kripac⁽¹²⁾은 임의점의 평면에 대한 위치를 판별하기 위해서 임의점 $R(X_r, Y_r, Z_r)$ 의 좌표를 평면의 방정식에 대입하여 얻은 반공간 파라미터 K 를 다음과 같이 정의하였다.

$$K = N_x X_r + N_y Y_r + N_z Z_r + D \tag{3}$$

(3) 삼각형과 분할 평면 사이의 교차선을 계산한다.

Fig. 9 에 보여진 바와 같이 선분 AB 와 절단 평면과의 교차점 $P(X_p, Y_p, Z_p)$ 는 선분 AB 의 두 끝점의 좌표와 점 A 와 점 B 의 반공간 파라미터 값 K_a, K_b 에 의해서 다음과 같이 주어진다.

$$X_p = (K_a X_b - K_b X_a) / (K_a - K_b) \tag{4a}$$

$$Y_p = (K_a Y_b - K_b Y_a) / (K_a - K_b) \tag{4b}$$

$$Z_p = (K_a Z_b - K_b Z_a) / (K_a - K_b) \tag{4c}$$

(4) 절단된 삼각형들을 교차선을 기준으로 위와 아래 삼각형으로 분할 한다.

(5) 상하부의 교차선으로 구성된 단면에서 Delaunay 삼각형 분할 과정을 거쳐서 채워지지 않은 면을 생성하여 입체 절단을 완성한다.

조형 크기가 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상인 대형 3 차원 입체 조형물을 제작하는 경우에는 지그재그로 입체를 분할함으로써 각각의 분할된 조각들을 조립하기 용이하도록 한다.

3.4 절단 경로 데이터 생성

VLM-ST 장치의 조형 크기에 맞게 분할 된 STL 데이터를 VLM-Slicer 를 이용하여 선형열선절단기의 절단경로 데이터인 USL 데이터를 생성한다.⁽¹³⁾

USL 데이터는 STL 파일을 슬라이싱하여 얻은 중간 단면 데이터로부터 주어지는 가공 윤곽 데이터(X, Y, Z)와 각 모서리를 포함하는 삼각형의 법선 벡터로부터 계산된 선형 열선 절단기의 회전각 데이터 (θ_x, θ_y) , 그리고 중간 단면에 부가한 적층 기준 형상의 좌표값으로 구성된다.

선형열선절단기의 회전각 (θ_x, θ_y) 은 해당 모서리를 포함하는 삼각형의 단위 법선벡터 (N_x, N_y, N_z) 와 열선진행방향의 단위 방향벡터 (U_x, U_y, U_z) 로부터 다음과 같이 계산된다.

$$\theta_y = \sin^{-1}(N_y U_z - N_z U_y) \tag{5a}$$

$$\theta_x = \sin^{-1}\{(N_x U_z - N_z U_x) / \cos \theta_y\} \tag{5b}$$

3.5 분할된 조각 제작

조형크기에 따라서 VLM300(조형크기 : 200x160 mm) 과 VLM400(조형크기 : 300x240 mm)의 2 가지 형태로 개발된 반자동형 VLM-ST 장치를 이용하여 주어진 USL 데이터에 따라서 순서대로 절단/적층하여 각각의 조각들을 제작한다.⁽⁸⁾

반자동형 VLM-ST 장치는 재료 저장 및 공급부, 자동 형상 생성부, 오프라인에서의 반자동 재료 적층 및 접착부, 그리고 시스템 제어부의 4 가지 세부 공정으로 구성된다. Fig. 10 은 반자동형 VLM-ST 장치의 작동 원리를 보여 준다.

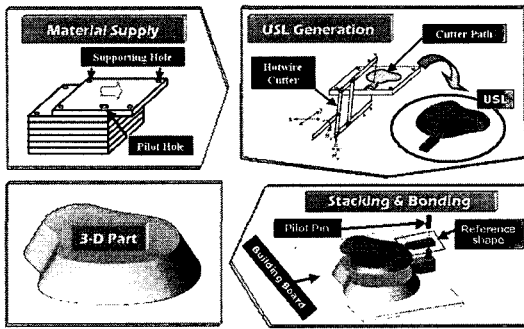
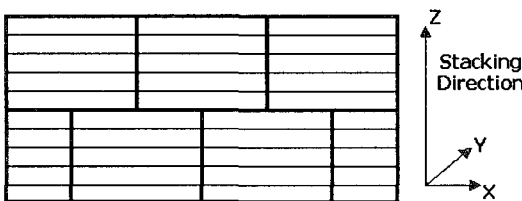


Fig. 10 Working principle of Semi-automatic VLM-ST



ZigZag Stacking of each fabricated piece

Fig. 11 Zigzag stacking of each fabricated piece

Table 3 Technical data of spray-type urethane foam

Property	Value	Application Conditions
Density	25 ~ 30 kg/m ³	
Compressive Strength	10 ~ 20 N/cm ²	
Water Absorption	0.3% vol.	
Tack-free Time	10 ~ 15 min	Temp. : 20℃, Humidity : 60%
Cutting Time	40 ~ 60 min	Temp. : 20℃, Humidity : 60%
Curing Time	24 hour	

[Application Temperature : above + 5℃ (20 ± 5℃)]

Table 4 Procedure of surface finishing

Step	Process
1	Surface Drying & Cleaning of VLM-ST Part
2	Coating VLM-ST Part with Acryl Painter
3	1 st Sanding(#150~#220) and Grinding
4	2 nd Sanding(#360~#1200) and Grinding
5	Coating VLM-ST Part with Cresol Putty
6	1 st Sanding(#150~#220) and Grinding
7	2 nd Sanding(#360~#1200) and Grinding
8	Coloring & Glossing with Spray or Lacquer

3.6 셀 형태의 3 차원 형상 조립

Fig. 11 에 나타난 바와 같이 각각의 조각들을 지그재그로 적층/조립하여 셀 형태의 3 차원 형상의 원형을 완성한다. 즉, 3.3 절에서 셀 형태의 대형 3 차원 물체를 조형 크기에 맞도록 하면서 지그재그로 분할한 각각의 조각들을 역순으로 조립하는 것이다.

각각의 조각을 지그재그로 적층/조립함으로써 조립을 용이하게 할 수 있을 뿐만 아니라, 각 조

각들 사이의 접착 강도를 높일 수 있다.

3.7 폼 충전

셀 형태로 제작된 3 차원 형상의 내부를 폼으로 충전시켜 속이 꽉 찬 3 차원 입체 형상을 완성한다.

스프레이 건 형태의 일액형 폴리우레탄 폼은 분사 후, 공기 중 습도에 의해 경화되며, 발포력 및 접착력이 우수하여 각종 틈새, 빈 공간, 크랙 등을 메워주는 용도로 주로 사용된다. 본 연구에서 사용된 일액형 폴리우레탄 폼의 주요 특징은 다음과 같다.⁽¹⁴⁾

(1) 95%의 미세한 독립기포로 형성되어 있으므로 조직이 안정되고, 변형이 없다.

(2) 강력한 자기 접착력을 가지고 있어 먼지, 수분, 유분 등을 제거하면, 콘크리트나 패널금속 등 재질에 관계없이 접착성이 뛰어나다.

(3) 경화 후 물, 석유, 유지류, 산, 용매, 미생물 부식에 대한 저항성이 좋다.

(4) 폴리우레탄을 스프레이 한 후 각종 도료나 보호 코팅제로 표면처리가 가능하다.

Table 3 은 스프레이 형태의 우레탄 폼에 대한 주요 물성치를 나타낸다.

3.8 표면 처리

완성된 3 차원 입체 형상의 표면 품질을 개선하기 위해서 코팅제와 사상공구를 이용하여 표면 처리를 수행한다.

Table 4 는 발포 폴리스티렌 폼의 특성을 고려하여 표면 코팅과 사상작업을 두 차례 수행하여 표면 조도, 치수정밀도, 표면 경도, 도장성, 내열성, 내구성 등의 표면 특성을 개선시킬 수 있도록 제안된 VLM-ST 시작품의 표면처리 절차를 보여 준다.⁽¹⁵⁾ 대리석 분말이 섞여 있는 아크릴 페인터를 이용한 1 차 코팅은 코레졸 퍼티가 모재에 침투하는 것을 방지해 주고, 코레졸 퍼티를 이용한 2 차 코팅은 방수 효과를 부여한다. 이와 같은 2 단계의 코팅작업과 사상작업을 수행하여 VLM-ST 로 제작된 3 차원 형상의 표면을 녹이지 않으면서 표면에 나타나는 적층 무늬를 효과적으로 제거하고, 표면 특성을 개선할 수 있다.

4. 적용 예 : 러쉬모어산 기념물 제작

3 절에서 제안한 백색광 방식의 3 차원 스캐너와 반자동형 VLM-ST 장치를 이용하여 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상의 조형 크기를 가진 대형 3 차원 입체 조형물 제작 방법을 검증하기 위한 적용 예로서 일반적인 자유표면형상을 가진 러쉬모어산 기념물을 선택하였다.

Fig. 12 는 러쉬모어산 기념물의 실물 사진을 보여 준다.

본 논문에서는 미니어처(miniature) 테마파크 등의 실의 전시물로 사용할 수 있도록 크기가 182 mm x 95 mm x 107 mm 인 러쉬모어산 기념물의 기념품으로부터 획득한 3 차원 스캐닝 데이터를 8 배 확대하여 실물 크기보다 약 48 배 축소된 크기를 가진 러쉬모어산 기념물의 축소모형(조형크기 : 1,453 mm x 760 mm x 853 mm)을 제작한다.

4.1 삼차원 스캐닝

본 연구에서는 러쉬모어산 기념물의 3 차원 측정 데이터를 얻기 위해서 Fig. 13 에 보여진 것과 같이 미 역대 대통령상의 기념품으로부터 3 차원 측정 데이터를 얻고, 이 측정 모델의 크기를 8 배 확대하여 표면이 삼각형망을 근사된 STL 데이터를 생성하였다.

4.2 셀 형태의 STL 데이터 생성

Fig. 14 에 보여진 것과 같이 3 차원 스캐닝을 통해서 얻어진 원래 STL 파일과 본래 크기보다 50 mm 후방으로 오프셋(offset)된 STL 파일 사이의



Fig. 12 Real photograph of Mount Rushmore Memorial

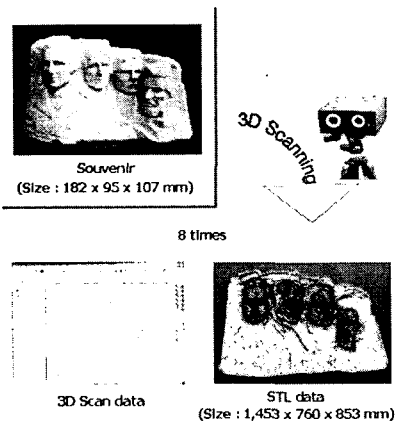


Fig. 13 Generation of STL data from 3D scan data

차집합 연산을 수행하여 속이 빈 셀 형태의 STL 파일을 생성하였다. 조형 크기가 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상인 속이 짙은 입체 형상 데이터를 제작에 직접 이용하는 것 대신에 속이 빈 셀 형태의 데이터를 제작에 이용함으로써 재료비 절감은 물론 제작 시간을 대폭 단축 시킬 수 있다.

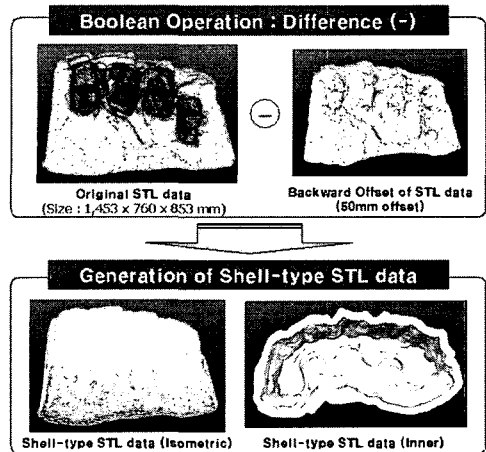
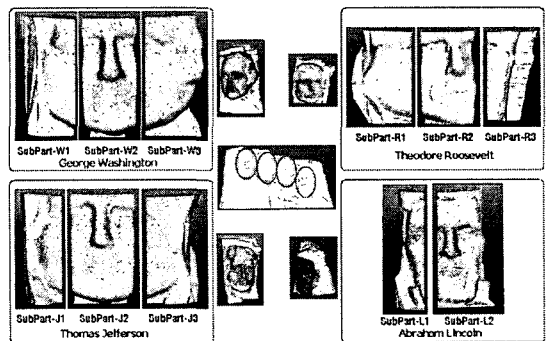
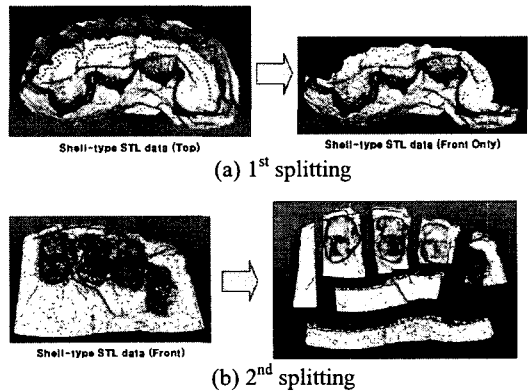


Fig. 14 Generation of shell-type STL data



(c) 3rd splitting
Fig. 15 Division of shell-type STL data

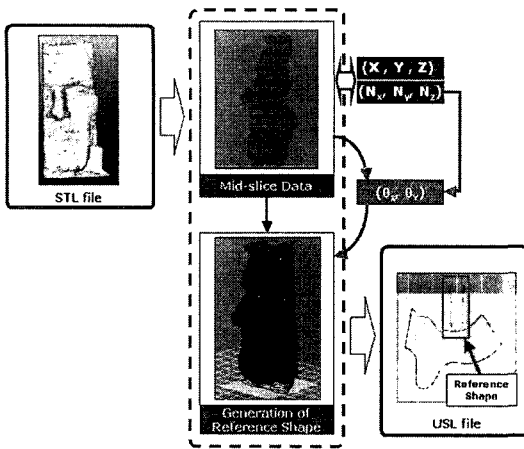


Fig. 16 Generation of USL data using VLM-Slicer

세밀하게 제작할 필요가 있는 형상은 VLM300 장치를 이용하여 제작가능하도록 셀 형태의 STL 파일과 같이 분할 하였다. 그리고, 그외의 부분은 제작 시간을 단축시키기 위해서 VLM400 장치로 제작가능하도록 분할 하였다.

4.4 절단 경로 데이터 생성

앞서 분할된 각각의 STL 데이터에 대해서 VLM-Slicer 를 이용해서 공급 재료의 두께 간격으로 슬라이싱하고 적층기준형상을 부가하여 VLM-ST 장치의 절단경로 데이터인 USL 데이터를 생성하였다. VLM300 으로 제작하는 대통령상 얼굴 주위의 세밀한 형상은 3.5 mm 두께로 슬라이싱하였고, VLM400 으로 제작하는 그외의 부분은 8.62 mm 두께로 슬라이싱하였다.

Fig. 16 은 링컨의 안면 얼굴의 일부에 대해서 USL 데이터를 생성하는 과정을 보여 준다.

4.5 분할된 조각 제작

VLM300 과 VLM400 을 이용하여 각각의 조각의 USL 데이터에 따라서 선형열선절단기로 순서대로 절단/적층하여 각각의 조각들을 제작한다. 앞서 생성한 USL 데이터에 따라서 대통령상 얼굴 주위의 세밀한 형상은 3.5 mm 두께의 재료를 사용하여 VLM300 으로 제작하였고, 그외의 부분은 8.62 mm 두께의 두꺼운 재료를 사용하여 VLM400 으로 제작함으로써 전체 조형시간을 대폭 단축 시킬 수 있었다.

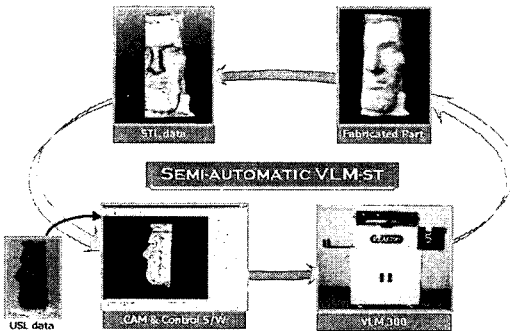


Fig. 17 Fabrication of 3D part using VLM300

Fig. 17 은 VLM300 장치를 이용하여 링컨의 안면 얼굴의 일부를 제작하는 과정을 보여준다.

4.6 셀 형태의 3차원 형상 조립

Fig. 18 에 보여진 바와 같이 각각의 조각들을 접착성이 있는 스프레이 폼과 접착제를 이용하여 안면 얼굴 형상부터 서로 조립한 다음, 그 외의 부분을 원래 STL 데이터와 일치하도록 차례로 조립하여 셀 형태의 미 역대 대통령상을 완성한다. 이때, Fig. 11 에 나타난 바와 같이 각각의 조각들을 지그재그로 적층/조립함으로써, 쉽게 조립할 수 있었을 뿐만 아니라, 각 조각들 사이의 접착 강도도 높일 수 있었다.

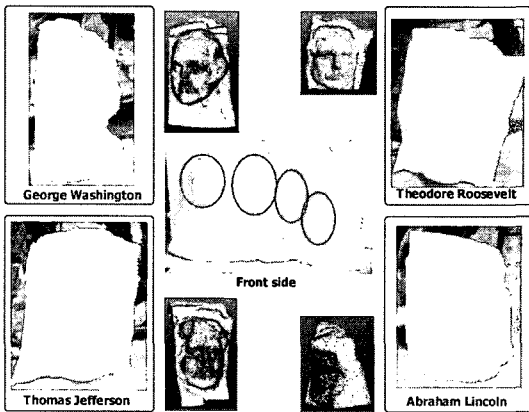


Fig. 18 Assembly of shell-type prototype

4.3 셀 형태의 STL 데이터의 분할

셀 형태의 STL 파일을 VLM300(조형크기: 200×160 mm)과 VLM400(조형크기: 300×240 mm)의 조형 크기에 맞도록 Fig. 15 에 보여진 것처럼 여러 조각으로 분할하였다.

러쉬모어산 기념물에서 워싱턴과 제퍼슨, 루즈벨트, 그리고 링컨의 안면 얼굴 형상과 같이 좁다

4.7 폼 충전

Fig. 19 에 보여진 바와 같이 셀 형태의 미 역대 대통령상의 내부와 뒤쪽을 폼으로 채워서 속이 확장 3 차원 입체 형상을 완성하였다. 이 때, 충전 작업 시간을 단축 시키기 위해서 두꺼운 발포폴리스티렌 폼 판재를 사용하여 뒷 쪽(①)과 옆쪽(②)을 먼저 막은 다음, 스프레이 형태의 폴리우레탄

폼과 발포폴리스티렌 폼 조각을 이용해서 그 사이 공간(㉓)을 꽉 채우는 방식을 사용하였다.

4.8 표면 처리

폼 충진이 완료된 러쉬모어산 기념물에 대해서 2 단계의 코팅작업과 사상작업을 거치는 표면 처리 작업을 마치고 나면 최종적으로 표면에 적층 무늬가 제거되고, 표면 조도, 표면 경도, 도장성, 내열성, 내수성 등의 표면 특성이 향상된 속이 꽉 찬 3 차원 입체형상의 러쉬모어산 기념물을 얻을 수 있다. 이러한 표면처리과정은 다소 어느 정도의 숙련도를 요구하는 작업이다.

Fig. 20 은 실제 러쉬모어산 기념물을 48 배로 축소 제작한 최종 축소 모형을 보여 준다.

Table 5 는 러쉬모어산 기념물의 축소 모형 제작을 위한 제작 조건과 재료비 및 절단 시간, 적층시간, 조립시간, 표면처리시간 등을 보여준다.

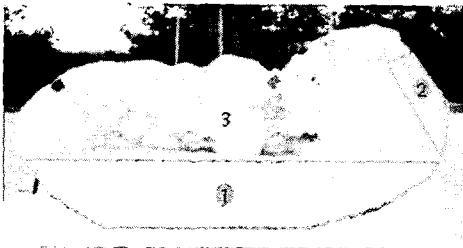


Fig. 19 Foam backing



Fig. 20 Final miniature of mount rushmore memorial

Table 5 Fabrication specifications for mount rushmore memorial

	VLM300 (A4 size)	VLM400 (A3 size)
Material Thickness	3.5 mm	8.52 mm
No. of SubParts	18 pieces	19 pieces
No. of Layers (USLs)	1,146 layers	329 layers
Real Costs	₩400,750	₩329,000
	₩ 729,750	
Cutting Speed	50 mm/sec	17 mm/sec
Net Cutting Time	859 min (14.3 hr)	494 min (8.3 hr)
	1,353 min (22.6 hr)	
Stacking Time	280 min (4.7 hr)	160 min (2.7 hr)
	440 min (7.4 hr)	
Assembly Time	60 min (1 hr)	
Surface Finish Time	480 min (8 hr)	

5. 결론

본 논문에서는 3 차원 스캐너와 반자동형 VLM-ST 장치를 이용하여 600 mm x 600 mm x 600 mm 이상의 조형 크기를 가진 대형 3 차원 입체 형상을 효과적으로 제작하는 방법론을 제안하고, 이러한 방법을 러쉬모어산 기념물의 축소 모형 제작에 적용한 결과, 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

(1) 제안된 방법을 통해서 조형 크기인 1,453 mm x 760 mm x 853 mm 인 러쉬모어산 기념물의 축소 모형을 제작함으로써 기존의 쾌속조형공정의 조형 크기의 제한을 극복하고, 더 나아가서는 제작 비용을 절감하고, 제작 기간을 대폭 향상시킬 수 있었다.

(2) 기념품 모형으로부터 3 차원 측정 데이터를 획득한 후, 제작하고자 하는 크기로 확대하는 방법을 이용함으로써 실물 크기의 대형 조각물이나 예술 작품 등을 실제로 측정하지 않고 손쉽게 STL 데이터를 생성할 수 있음을 보였다.

(3) 부울 연산을 이용하여 생성된 속이 빈 셀 형태의 STL 파일로부터 셀 형상의 원형을 제작한 다음, 폼으로 충진하여 속이 꽉 찬 3 차원 입체 형상을 제작함으로써 재료비 절감은 물론 제작 시간 단축을 크게 단축시킬 수 있었다.

(4) 러쉬모어산 기념물에서 각각의 대통령 얼굴 주위의 세밀한 형상은 3.5 mm 두께의 재료를 사용하여 VLM300 으로 제작하고, 그외의 부분은 8.62 mm 두께의 두꺼운 재료를 사용하여 VLM400 으로 제작함으로써 전체 조형시간을 대폭 단축시켰다.

(5) VLM-ST 의 조형 크기에 맞도록 STL 데이터를 지그재그로 분할한 뒤에 VLM-ST 로 제작된 각각의 분할된 조각들을 다시 지그재그로 적층/조립함으로써 조립을 용이하게 할 수 있었을 뿐만 아니라, 각각의 조각들 사이의 접촉 강도도 높일 수 있었다.

참고문헌

- (1) Jacobs, P. F., 1996, Stereolithography and other RP&M Technologies from Rapid Prototyping to Rapid Tooling, ASME Press.
- (2) Kim, H. C., Hur, S. M., Lee, S. H., 2002, "STL Generation in Reverse Engineering by Delaunay Triangulation," *Transactions of the KSME, A*, Vol. 26, No. 5, pp. 803~812.
- (3) CAM/CAM Publishing, Inc., 2003, "Rapid

- Prototyping Large Objects,” Rapid Prototyping Report, February 6.
- (4) Novc, A., Kaza, S., Wang, Z. and Thomas, C., 1996, “Techniques for Improved Speed Accuracy in Layered Manufacturing,” *Solid Free Fabrication Symposium Proceedings*, pp. 609~617.
- (5) Hope, R. L., Riek, A. T. and Roth, R. N., 1996, “Layer Building with Sloping Edges for Rapid Prototyping of Large Objects,” *Proceedings of the 5th European conference on Rapid Prototyping and Manufacturing*, pp. 47~57.
- (6) Broek, J. J., Horvath, I., de Smit, B., Lennings, A. F., Rusak, Z. and Vergeest, J. S. M., 2002, “Free-foam thick layer object manufacturing technology for large-sized physical models,” *Automation in Construction*, Vol. 11, pp. 335~347.
- (7) Hur, J. H., Lee, K. W., Zhu-hu and Kim, J.W., 2002, “Hybrid rapid prototyping system using machining and deposition,” *Computer-Aided Design*, Vol. 34, pp. 741~754.
- (8) Ahn, D. G., Lee, S. H., Choi, H. S., Yang, D. Y., Park, S. K., 2002, “Investigation into Development of Transfer Type for Variable Lamination Manufacturing Process and Apparatus,” *J. of KSPE*, Vol. 19, No. 2, pp. 95~105.
- (9) <http://www.solutionix.com>
- (10) Chae, H. C., Chung, I. S., 1993, “A study on the split triangle-based solid modeling,” *J. of KSPE*, Vol. 10, No. 1, pp. 89~99.
- (11) Mäntylä, M., 1988, *An Introduction to Solid Modeling*, Computer Science Press, pp. 263~300.
- (12) Kripac, J., 1987, “Algorithm for Splitting Planar Faces,” *CAD*, Vol. 19, No. 6, pp. 293~298.
- (13) Lee, S. H., Ahn, D. G., Choi, H. S., Yang, D. Y., Moon, Y. B., Chae, H. C., 2002, “Generation of Unit Shape layer on CAD/CAM System for VLM-ST,” *Trans. of the Society of CAD/CAM Engineers*, Vol. 7, No. 3, pp. 148~156.
- (14) <http://www.worldfoam.com>
- (15) Lee, S. H., Kim, H. C., Yang, D. Y., Ahn, D. G., Song, M. S., Park, S. K., 2003, “Development of Surface Finishing Methodology for the Laminated Pattern Removal of VLM-ST Parts,” *Proceedings of KSPE*, October, pp. 92~95.