

◆특집◆ 쾌속조형공정 및 쾌속생산

직접 쾌속조형을 위한 점 데이터의 조형 자세 결정

변홍석\*, 강의철\*\*, 이관행\*\*\*

Determination of the Orientation of the Scanned Point Data for Direct Rapid Prototyping

Hong-Seok Byun\*, Eui-Chul Kang\*\* and Kwan H. Lee\*\*\*

Key Words : Direct rapid prototyping(직접 쾌속조형), Scanned Point Data (측정 점데이터), 3D Grid(3차원 그리드), Genetic algorithm (유전자 알고리즘)

1. 서론

쾌속조형기술은 한 층씩 조형하여 평행하게 적층해 나가는 재료 적층 기법을 사용한다. 일반적으로 쾌속조형 장비는 표준 입력파일로 작은 삼각형 패치들로 이루어진 STL 파일을 사용하고, 삼각형 패치들을 작은 두께로 단면화하여 파트를 제작하게 된다.

STL 모델은 솔리드 모델러나 서피스 모델러에서 CAD 모델을 생성하여 삼각화 되어 생성되거나 전산 역설계 공정을 거쳐 삼각형 패치를 생성하여 만들어진다. 그러나, 이들의 STL 모델은 퇴화된 패치(degenerated facet), 삼각패치 사이의 불필요한 간격(undesirable gap), 법선 방향 에러 및 정점 에러와 같은 위상 문제를 포함한다<sup>1</sup>.

최근 STL파일이 가지는 이러한 에러와 해결을 위한 시간 비용 때문에 슬라이싱 데이터 생성을 위해서 STL 대신에 점 데이터를 직접 사용하여 슬라이싱을 하는 연구가 진행되고 있다<sup>1,2</sup>. 점 데이터의 사용은 CAD 모델에 생성된 STL 에러와

위상 문제를 해결하기 위한 시간 비용을 피할 수 있는 장점이 있다.

최근에 효율적인 쾌속 제품 개발을 위해서 역설계와 쾌속조형 기술을 통합화하는 연구가 진행되고 있으며<sup>1,2</sup>, 그 일반적인 절차는 Fig. 1과 같다. 이처럼 파트를 제작할 때 CAD모델이나 STL모델을 구성하지 않고 직접적으로 점 데이터로부터 파트를 제작하는 것을 직접(Direct) 쾌속조형이라고 한다<sup>1</sup>. 그런데, 직접 쾌속조형에서도 스캔 점 데이터를 슬라이싱할 때 이전에 사용하던 STL 모델처럼 스캔 점 데이터의 조형자세를 결정하는 것이 매우 중요하다. 그 이유는 파트의 조형자세는 제작시간, 시작품의 품질 등에 크게 영향을 미치기 때문이다.

한편, 기존의 연구들<sup>3-9</sup>은 CAD 모델을 사용할 때 이에 대한 최적 조형 자세를 결정하는 방법에 대해서만 연구가 진행되었고 아직까지 국내외적으로 점 데이터에 대한 최적 조형 자세를 결정하는 연구가 없었다. 따라서 본 연구에서는 Direct 쾌속조형에서 파트를 제작할 때 파트의 품질을 향상시키고 제작시간도 감소시킬 수 있는 점 데이터의 최적 조형 자세의 결정에 관하여 연구를 수행되었다. 이를 위해 스캔 점 데이터의 전처리를 위한 점 데이터 감소방법인 3D 그리드 방법과 유전자 알고리즘을 사용하였다.

\* 국방과학연구소 2 체계개발본부 해양기술부

Tel. 062-970-2386, Fax. 062-970-2384

Email lee@kyebek.kjist.ac.kr

CAD/CAM 과 컴퓨터 그래픽스 특히, Immersive modeling 에 관심을 두고 연구를 하고 있다.

\*\* 광주과학기술원 기전공학과 대학원

\*\*\* 광주과학기술원 기전공학과

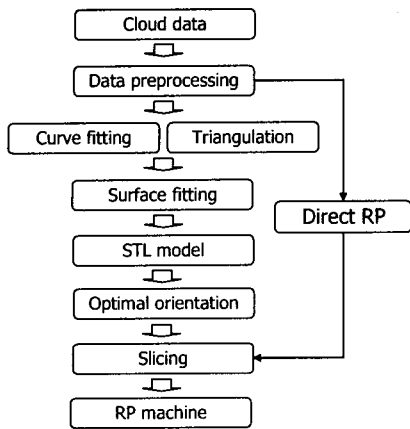


Fig.1 Integration of RE and RP for direct RP

## 2. 관련연구

파트의 조형 자세와 관련하여 많은 연구가 수행되었고 간략하게 그 내용을 살펴보면 다음과 같다.

Hur 와 Lee<sup>3</sup> 은 staircase 면적을 계산하는 알고리즘을 개발하였고 파트에서 제거되거나 더해지는 재료의 체적에 의해 계산되는 공정 에러를 양적화하여 조형 자세가 결정되었다. 이 알고리즘은 가변 층 두께 또한 계산할 수 있으며 추가적으로 제작시간 및 지지대 체적도 계산할 수 있다. 이 최적 조형 자세 알고리즘은 사용자의 주요 인자의 선정에 기초로 하여 결정되었다.

Pham 등<sup>4</sup> 은 SLA 공정의 최적 조형 자세를 결정하기 위해 사용자에게 의사결정을 지원하는 틀을 개발하였다. 이 방법은 파트 가격, 제작시간, problematic feature, 최적으로 조형될 feature, overhang area 와 지지대 체적과 같은 많은 인자를 고려한다. 특히, 각 후보 자세에 대한 위치 점수(position score)에 각 인자에 직관적으로 할당된 가중치를 곱하여 가장 높은 점수를 얻은 후보자세를 최적의 조형 자세로 결정하였다.

Lin 등<sup>5</sup> 은 최소 공정 에러에 기반하는 조형 자세를 정의하기 위해 최적화 알고리즘을 개발하였고 공정 에러를 예측하기 위한 수학적 모델을 제안하였다. 더 좋은 조형 자세를 결정하는 알고리즘의 검증에 위해 구, 사각 그리고 자유형상 파트에 대한 사례를 통해 예를 보였다.

Masood 등<sup>6</sup> 은 CAD 모델을 슬라이싱할 때 야

기되는 체적 에러의 양을 계산하는 알고리즘을 개발하여 조형 자세를 결정하였다. 체적 에러는 사용자가 정의한 축에대해서 파트를 회전시켜서 다양한 후보자세에서 가장 적은 에러를 갖는 조형자세를 최적으로 선정하였다.

Alexander 등<sup>7</sup> 은 파트 가격 모델을 위한 방법론과 정밀도 계산 모델을 개발하였다. cusp 높이가 파트의 정밀도 계산을 위해 사용되었고 파트의 정밀도, 파트가격 그리고 지지대 양을 최소화하는 후보자세가 최적의 조형자세로 결정된다. 정밀도는 cusp 높이에 각 삼각형 패킷의 면적을 곱한 가중치된 cusp 높이를 사용하여 계산되었다. 이 알고리즘은 SLA 와 FDM 공정에 적용되었다.

Xu 등<sup>8</sup> 은 여러 폐속조형 공정에 대한 제작시간, 제작 정밀도, 가격 세가지 인자를 고려하여 적당한 조형 자세를 결정하는 방법을 제안하였다. 제작 비용이 주요 최적화 목적함수로서 선정되었고 제작시간과 정밀도가 두번째 목적함수로 고려되었다. 제작 정밀도는 staircase 체적, overhang 면적아래의 oversize 체적과 trapped 체적의 합에 의해 계산되고, 제작 비용은 사용된 재료와 지지대 재료 비용으로부터 계산되었다. 만약 후보자세가 제작 비용이 동일하다면, 두번째 목적함수가 사용된다. 그러면, 가장 작은 제작시간을 갖는 조형자세가 최적의 조형 자세로 선정된다.

최근에, Reddy 등<sup>9</sup> 이 FDM 공정에 대한 제작시간과 표면 거칠기를 고려하여 유전자 알고리즘을 사용하여 최적 조형 자세를 결정하는 연구를 수행하였다. 하지만, 이 알고리즘은 FDM 공정에 제한되고 제작 가능한 파트의 모든 자세를 고려할 수 없다. 그래서 보완된 자동 최적 조형 자세 결정 알고리즘을 Byun 와 Lee<sup>10</sup> 에 의해서 개발되었고 주요공정에 대해서도 적용될 수 있다.

그러나, 위의 연구들은 입력모델이 STL 모델이나 CAD 모델에 제한된다. 그리고 이들의 알고리즘은 직접 폐속조형에 적용하기는 매우 힘들다. 따라서 본 연구에서는 직접 폐속조형을 위한 점 데이터의 조형 자세를 자동으로 결정해 주는 알고리즘을 개발하고자 한다.

## 3. 3D 그리드 방법

최근에 파트의 표면 데이터를 얻기 위해서 고정밀도와 빠른 측정 스피드를 제공하는 비접촉 방

식이 많이 사용되고 있다. 이것은 빠른 시간 내에 파트의 표면 점 데이터를 획득할 수 있고 복잡한 자유형상 파트를 쉽게 측정할 수 있는 장점이 있다. 그러나, 획득된 데이터의 정보량이 너무 많기 때문에 다루기가 힘들고 계산시간이 많이 걸리고 많은 저장공간을 필요로 하는 문제가 발생한다.

따라서 대용량 데이터의 처리를 손쉽게 하기 위해서 3 차원 그리드 방법을 사용하여 데이터를 감소한다. 기존의 2 차원 그리드 방법은 한 방향으로 스캔된 데이터에 한정하여 적용가능하며 완성된 3 차원 점 데이터가 필요하다면 데이터 감소후 점 데이터의 멀징(merging)이 요구된다. 이러한 한계성을 극복하기 위해서 3 차원 그리드 방법이 사용되었다. 사용된 3 차원 그리드 방법은 양방향 비균일 그리드 방법으로서 파트의 기하학 정보로서 점 데이터의 법선값을 사용한다. 이 방법은 미디언 필터링(median filtering)에 기초로 하여 각 셀(cell)에 있는 대표적인 점이 선정된다.

3 차원 그리드 방법에 대해서 간략하게 설명하면 다음과 같다<sup>11</sup>.

- Step 1: x, y, z 축사이에서 바운딩 박스의 가장 짧은 축이 선정된다. 이것은 초기 셀의 수를 결정하기 위해서 사용된다.
- Step 2: 바운드 박스의 가장 짧은 축은 사용자의 입력된 값으로 나누어진다.
- Step 3: 초기 셀에서 점 데이터를 포함하고 있지 않은 셀들을 제거한다.
- Step 4: 각 셀은 옥트리(octree) 분해를 사용하여 서브디비전되고, 비어 있는 셀들은 다시 제거된다

서브디비전을 위해서, 각 셀 안에 있는 점들의 법선의 표준편차를 사용하고, 사용자가 정의한 공차보다 클 경우 해당하는 셀은 다시 8 개의 셀로 분할된다.

점 데이터의 추출은 각 셀 내에 있는 점 데이터의 평균에 가장 가까운 법선값을 가지는 점이 선택된다. 3 차원 그리드 방법을 사용하여 점 데이터 감소가 이루어지는데 데이터 감소 수준은 초기 셀의 수와 사용자가 정의한 공차에 의해 결정된다. Fig. 2 은 본 연구에 사용된 옥트리 구조를 보여주고 있다.

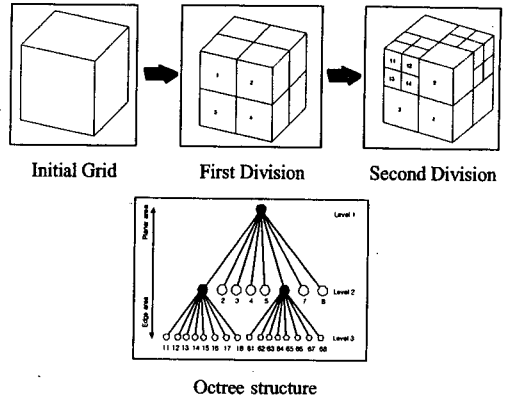


Fig. 2 Octree structure

#### 4. 결정인자

스캔 점 데이터의 조형자세를 결정하기 위해서 파트의 조형에 가장 많은 영향을 미치는 2 가지 인자, 표면 거칠기와 제작시간을 사용한다. 각 인자의 수학적 모델링은 다음과 같다.

##### 4.1 표면 거칠기

파트의 품질은 제작되는 조형 자세에 따라서 크게 달라진다. 특히, 시작품이 몰딩의 패턴이나 조립 및 기능성 검사 등에 사용될 때 가장 크게 영향을 미치는 중요한 인자로서 작용한다.

표면 거칠기 표현식을 유도하기 위해서 기존 연구에서 많이 사용되었던 예리한 예지형태<sup>3,5-9,12</sup>보다 실제적으로 제작되는 표면의 특성을 고려하여 Fig. 3 와 같이 둥근 예지를 가지고 적층된다고 가정한다.

Fig.3 의 제안된 모델로부터 표면 거칠기식을 구하면 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$R_a = \frac{l_i}{4} \cos\theta - \frac{(R_1^2 + R_2^2)(1-\pi/4)\sin\theta}{l_i} + \frac{\{(R_1^2 - R_2^2)(1-\pi/4)\}^2}{l_i^2} \tan\theta \sin\theta \quad (1)$$

표면의 거칠기는 층 두께 뿐만 아니라 적층방향과 셀안에 점의 법선의 사이각, 필렛과 코너 반경에 영향을 받는다는 것을 알 수 있다. 그러면, 표면의 품질 평가를 위해서 제작되는 파트 전체의 평균 가중치 표면 거칠기를 구하면 다음과 같다.

$$R_{a_w} = \sum_{i=1}^N R_{a_i} A_i / \sum_{i=1}^N A_i \quad (2)$$

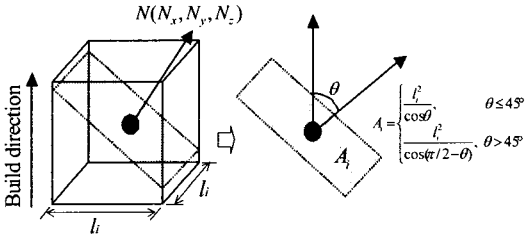


Fig. 3 Point normal of one cell and inclined area

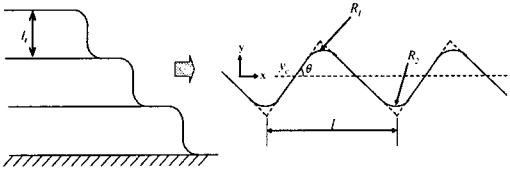


Fig. 4 Manufactured surface with round edges

표면의 품질은 면적에 의해 영향을 받으므로 각 셀안에 있는 점들의 법선에 수직인 면의 면적이 제작되는 파트의 표면으로 고려할 수 있으므로 이 면적( $A_i$ )은 정육면체 셀의 면의 면적( $A_i^k$ )으로부터 계산하여 거칠기 식(1)에 곱하여 가중치로서 사용한다. 그래서 모든 점들의 법선에 수직인 면들의 면적은 파트 전체의 표면적을 대표한다.

본 연구에서는 파트에 영향을 미치는 지지대 또한 고려한다. 지지대의 접촉이 일정 거칠기,  $R_c$  만큼 증가시킨다고 가정하면, 지지대에 의해 미치는 거칠기 식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$R_{sup} = \sum_{i=1}^n R_c A_i / \sum_{i=1}^N A_i \quad (3)$$

$A_i$ 은 추출된 각 셀 안에 있는 점의 법선에 수직인 면의 면적을 의미한다.

그러면, 제작되는 파트 표면의 총 평균 가중치 거칠기는 식(4)와 같이 유도될 수 있고, 평균 가중치 거칠기 값이 작을수록 더 좋은 파트 품질을 가진다.

$$R_{a_{MSR}} = \left( \sum_{i=1}^N R_{a_i} A_i + \sum_{j=1}^n R_c A_j \right) / \sum_{k=1}^N A_k \quad (4)$$

## 4.2 제작시간

제작시간은 표면 거칠기와 더불어 파트의 조형자세를 결정하는 중요한 인자라 할 수 있다. 조형되는 파트의 자세에 따라서 제작시간이 크게 달라질 수 있으며, 제작시간이 짧을수록 좋다. 그러나 때때로 이것은 거칠기 또는 정밀도와 trade-off를 가진다.

제작시간은 층 사이의 공정시간, 파트를 제작하는 시간에 비례한다. 즉, 제작시간은 다음과 변수들의 함수로서 쓰여 질 수 있다.

$$T_b = f(N_l, T_l, d_1, d_2, \bar{A}_p, A_{pbr}, A_{psr}, A_s) \quad (5)$$

그런데, 동일한 공정에 대해서는 스캔 밀도, 면적당 스캔률, 평균 적층 면적, 파트 체적은 동일하다. 즉, 파트를 제작하는 시간에는 이러한 요소를 고려할 필요가 없다. 따라서 제작시간은 식(4)와 같이 정의 될 수 있다.

$$T_b = N_l T_l + d_2 \frac{A_s}{A_{sr}} \quad (6)$$

$N_l$ 은 층의 수,  $T_l$ 은 적층되는 층 사이 시간,  $d_2$ 은 지지대 밀도,  $A_s$ 는 지지대를 생성하는 셀 안의 사각형 면적, 그리고  $A_{sr}$ 은 스캔되는 면적을 나타낸다. 그래서, 공정이 선정되면 제작시간은 적층되는 수와 지지대에 크게 의존한다는 것을 알 수 있다.

## 4.3 퍼지 가중치

일반적으로, 요소의 가중치는 수치(crisp) 값으로 주어진다. 그러나, 많은 상황아래에서 인간의 판단은 종종 애매모호하므로 정확한 수치값으로 선호도를 평가할 수 없다. 그러므로 수치 데이터가 실제 환경을 모델링할 때 사용되는 것은 부적절하다. 따라서 언어적 평가의 사용이 더 현실적이고 직관적이라고 할 수 있다<sup>13</sup>. 본 연구에서는 주어진 요소의 가중치는 삼각퍼지수로서 표현 가능한 언어적 변수를 사용하여 평가된다. Table 1은 각 요소의 중요도의 가중치를 위한 언어적 변수와 그에 상응하는 퍼지수를 보여준다.

Table 1 Linguistic variables for the weight of importance of each criterion and their corresponding fuzzy numbers

Definitely unimportant	(0, 0, 1/8)
Very unimportant	(0, 1/8, 2/8)
Unimportant	(1/8, 2/8, 3/8)
Slightly unimportant	(2/8, 3/8, 4/8)
Middle	(3/8, 4/8, 5/8)
Slightly important	(4/8, 5/8, 6/8)
Important	(5/8, 6/8, 7/8)
Very important	(6/8, 7/8, 1)
Definitely important	(7/8, 1, 1)

#### 4.4 목적함수

표면 거칠기와 제작시간을 고려하여 파트의 최적 조형 자세를 결정하는 문제는 두 요소에 대해서 가중치를 할당하고 단일 목적(single objective) 최적화 문제의 형태로 쓰여질 수 있다. 즉, 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$J = W_1 \cdot \left( \frac{\sum_{i=1}^N R_{a,i} A_i + \sum_{j=1}^n R_{c,j} A_j}{\sum_{i=1}^N A_i} \right) / \text{Min}(R_{a,HSR}) \quad (7)$$

$$+ W_2 \cdot (N_1 T_1 + d_2 \frac{A_s}{A_r}) / \text{Min}(T_b)$$

여기서,  $W_1$  와  $W_2$  는 표면 거칠기와 제작시간의 목적함수에 대한 우선 순위 즉, 가중치로서 고려될 수 있다. 위의 식(7)을 최소화하는 문제는 파트의 조형 자세를 최적화하는 것이므로 본 연구에서는 식(7)의 최적화 문제를 풀기 위해서 유전자 알고리즘을 사용하였다. 기존의 연구처럼 후보자세에서 각각의 최적값을 구하고 가장 작은 또는 가장 큰 값에 해당하는 조형 자세를 최적 파트 조형 자세로 고려하는 것보다 유전자 알고리즘을 사용하면 자동으로 최적의 파트 조형 자세를 찾을 수 있을 뿐만 아니라 불필요한 시간을 감소시킬 수 있는 장점이 있다.

### 5. 유전자 알고리즘

스캔 점 데이터의 최적 조형 자세를 결정하기 위해서 유전자 알고리즘을 사용한다. 유전자 알고리즘

리즘<sup>14</sup> 은 자연 진화 현상을 모델링한 확률적 탐색 방법으로 주어진 문제에 세대 진화를 통하여 효율적인 글로벌 탐색 엔진을 제공한다.

제안된 모델의 목적함수는 시작품의 표면 거칠기와 제작시간을 최소화하는 것으로 적합도는 단순회 목적함수의 값과 동일하다고 가정한다. 염색체를 선정할 때는 적합도 값에 비례하는 룰렛 휠(roulette wheel) 접근 방법을 채택하였다. 본 연구에서는 두 기초적인 유전 연산자인 교배와 돌연변이를 사용하였다. 교배는 일점(one-point) 교배방식을 사용하고 돌연변이는 랜덤(random)하게 선택된 유전자에서 일어난다. 교배가 일어난 후에는 각 자손은 낮은 확률을 가지는 돌연변이가 발생한다. 유전자 알고리즘을 이용하여 함수  $J$  를 최적화하기 위해, pop\_size=50 개의 염색체로 구성된 개체 집단을 형성하였고, 200 세대까지 프로그램이 실행된다. 교배확률은 0.75, 돌연변이는 0.02 로 두어 교배와 돌연변이가 일어난다고 가정하여 연산을 수행하였다. Fig. 5 은 연산의 수행절차를 보여주고 있다.

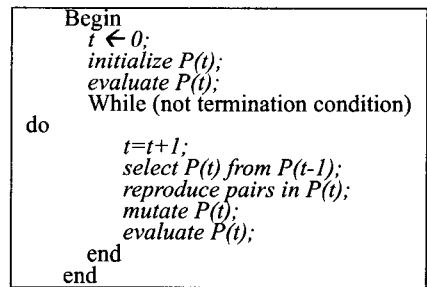


Fig. 5 A genetic algorithm

## 6. 사례연구

### 6.1 응용예

제안된 스캔 점 데이터의 최적 조형 자세 결정 알고리즘을 검증하기 위해서 자동차의 기어 손잡이 knob 모델과 사람 척추뼈 spine 모델에 대해서 실험을 수행하였다. 데이터는 3 차원 레이저 스캐너를 사용하여 획득하였다. Fig. 6 은 측정된 knob 의 점 데이터를 3 차원 그리드 방법을 통해서 데이터를 감소시키는 것을 보여 주고 있다.

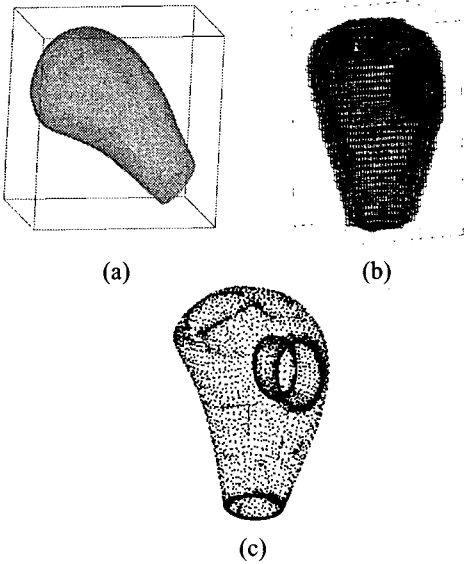


Fig. 6 Data reduction;(a) Scanned point data, (b) 3D grids and (c) Reduced point data

Fig. 7 은 SLA 공정에 대해서 3 차원 그리드 방법으로 감소된 점 데이터를 유전자 알고리즘을 사용하여 최적의 조형 자세를 보여주고 있다. 주어진 가중치는 표면 거칠기에는 ‘Slightly unimportant’을 주었고 제작시간에는 ‘Slightly important’을 주었다. 사용된 층두께는 0.1mm 로 하였고, 지지대에 대한 거칠기는 정확하게 모델링을 통해 얻을 수 없으므로 사용자에게 주관에 따라서 조금씩 달라질 수 있으므로  $R_{sup}$  은 0.1 로 두었다. 지지대의 중요도에 따라서 0.01~0.25 까지 주어진다. Z 방향이 조형 방향이다.

SLS 공정에 대해서 spine 모델에 제안된 알고리즘을 적용해 보았다. 가중치를 표면 거칠기에는 ‘Very important’로 주었고, 제작시간에는 ‘Unimportant’로 주어서 거칠기가 제작시간보다 더 중요한 요소로서 작용하도록 하여 수행하였다. Fig. 8 에서 수행된 최적의 조형 자세 결과를 보여주고 있다.

제안된 알고리즘은 기존 CAD 모델로부터 조형 자세를 결정하는 알고리즘과는 달리, 스캔 점 데이터에서 직접적으로 슬라이싱하여 획득된 데이터를 폐속조형장비의 입력 데이터로서 사용될 때 파트가 표면품질 및 시간측면에서 더 효율성이 있는 조형 자세를 결정할 수 있다.

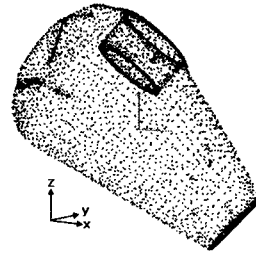


Fig. 7 Point data orientation of the knob optimized for SLA using the proposed algorithm



Fig. 8 Point data orientation of the spine optimized for SLS using the proposed algorithm

무엇보다 이전의 알고리즘에서는 사용자에게 의해서 정의된 후보자세를 결정하고 그 중에서 가장 좋은 조형 자세를 결정하는 알고리즘과 달리 후보자세 없이 자동적으로 파트의 조형 자세를 결정할 수 있어서 시간, 비용면에서 큰 장점이 있다.

## 6.2 STL 모델과 비교

제안된 알고리즘의 검증을 위해서 스캔 점 데이터의 최적의 조형 자세 결과와 STL 모델을 사용하여 최적화된 조형 자세 결과를 서로 비교하였다. STL 모델에 대한 최적 조형 자세는 Byun<sup>10</sup>이 제시한 방법을 사용하여 구하였다. Fig. 9 는 SLS 공정으로 knob 을 제작할 때 제작시간을 최소화시키는 최적의 조형 자세 결과를 보여준다. 결과에서 보듯이 STL 모델과 스캔 점 데이터의 조형자세가 동일한 결과를 준다는 것을 알 수 있었다.

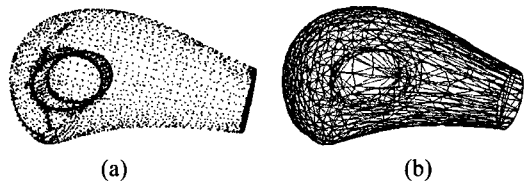


Fig. 9 Optimal orientation minimizing the build time for SLS; (a) Point data and (b) STL model

아래의 Fig. 10 은 SLA 공정에서 spine 모델을 제작할 때 표면 거칠기를 최소화하는 조형 자세를 보여준다. 스캔 점 데이터를 사용하거나 STL 모델을 사용할 때 표면 거칠기를 최소화는 최적 조형 자세가 동일하다는 것을 알 수 있다. 따라서, 제안된 알고리즘은 직접 패속조형을 위한 조형 자세를 결정할 때 매우 효율적인 방법을 제공할 수 있다.

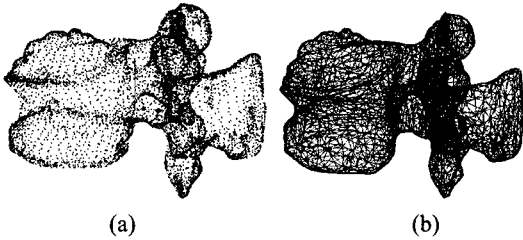


Fig. 10 Optimal orientation minimizing the surface roughness for SLA; (a) Point data and (b) STL model

## 7. 결론 및 향후 과제

본 연구에서는 기존의 STL 모델이 아니라 스캔 점 데이터로부터 직접적으로 슬라이싱하고 파트를 제작하는 직접 패속조형을 위해 점 데이터의 최적 조형 자세 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 파트의 조형 자세가 가장 큰 영향을 미치는 표면 거칠기와 제작시간을 고려하여 목적 함수를 계산하고 퍼지 가중치를 사용하여 단일 목적 최적화 문제로 바꾸어 계산하였다. 표면 거칠기는 기존의 사용하던 예리한 에지형태가 아니라 실제 파트의 표면을 묘사하는 둥근 에지 형태의 표면 프로파일을 제안하고 그로부터 표면 거칠기 식을 모델링 하였다.

제안된 방법은 자동적으로 조형 자세를 결정하여 시간 비용을 감소할 뿐만 아니라 이전 연구에서 시도하지 않았던 점 데이터의 조형 자세를 결정할 수 있다는데 큰 의의가 있겠다. 앞으로 스캔 점 데이터로부터 패속조형을 이용하여 파트를 제작할 수 있도록 기 결정된 최적 조형 모델, 즉 점 데이터에서 직접적으로 슬라이싱 데이터를 추출할 수 있는 알고리즘 개발이 필요하다고 본다.

## 참고문헌

1. Liu, G.H., Wong, Y.S., Zhang, Y.F. and Loh, H.T., "Error-based segmentation of cloud data for direct rapid prototyping," *Computer Aided Design*, Vol.35, pp.633-645, 2002.
2. Wu, Y.F., Wong, Y.S., Loh, H.T. and Zhang, Y.F., "Modelling cloud data using an adaptive slicing approach," *Computer Aided Design*, Vol.36, pp. 231-240, 2004.
3. Hur, J. and Lee, K., "The Development of a CAD Environment to Determine the Preferred Build-up Direction for Layered Manufacturing," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.14, pp. 247-254, 1998.
4. Pham, D.T., Dimov, D.T. and Gault, R.S., "Part Orientation in Stereolithography," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.15, pp. 674-682, 1999.
5. Lin, F., Sun, W., Yan, Y., "Optimization with minimum process error for layered manufacturing fabrication," *Rapid Prototyping Journal*, Vol.7, No.2, pp. 73-8, 2001.
6. Masood, S.H., Rattanawong, W. and Iovenitti, P., "Part Build Orientations Based on Volumetric Error in Fused Deposition Modeling," *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, Vol.19, pp. 162-168, 2000.
7. Alexander, P., Allen, S. and Dutta, D., "Part orientation and build cost determination in layered manufacturing," *Computer Aided Design*, Vol.30, pp. 343-356, 1998.
8. Xu, F., Loh, H.T. and Wong, Y.S., "Considerations and selection of optimal orientation for different rapid prototyping systems," *Rapid Prototyping Journal*, Vol.5, pp. 54-60, 1999.
9. Thrimurthulu, K., Pandey, P.M. and Reddy, N.V., "Optimum part deposition orientation in fused deposition modeling," *International Journal of Machine Tools & Manufacture*, Vol.4, pp. 585-594, 2004.
10. Byun, H.S. and Lee, K.H., "Optimal part orientation of rapid prototyping using a genetic algorithm," *Proc. the 34<sup>th</sup> International Conference on Computers and*

Industrial Engineering, San Francisco, CA,  
November 14-16, 2004.

11. Lee, K.H., Woo, H. and Suk, T., "Point data reduction using 3D grids," International Journal of Advanced Manufacturing Technology, Vol.18, pp. 201-210, 2001.
12. Reeves, P.E. and Cobb, R.C., "Surface deviation modeling of LMT processes – A comparative analysis," Proceedings of the Fifth European Conference on Rapid Prototyping and Manufacturing, University of Nottingham, UK, pp. 59-77, 1995.
13. Chen, C.T., "Extension of the TOPSIS for group decision-making under fuzzy environment," Fuzzy Sets and Systems, Vol.114, pp. 1-9, 2000.
14. Mitsuo, Gen and Runwei, cheng, "Genetic Algorithms and Mechanical Design," JOHN WILEY & SONS, INC., 1997.