

# SLS의 공정 파라미터 최적화에 관한 연구

허성민\*, 오도근\*, 최경현\*\*, 이석희\*\*\*  
 (1999년 5월 13일 접수)

## Optimization of Build Parameters in SLS Process

Sung-Min Hur, Do-Keun Oh, Kyung-Hyun Choi and Seok-Hee Lee

**Key Words:** RP(쾌속조형), SLS(선택적 소결법), Build Parameter(공정 파라미터), STL File(STL 파일), Slicing(슬라이싱), Neural Network(신경회로망)

### Abstract

RP(Rapid Prototyping) technology is gaining its popularity in building a prototype in all industries. SLS(Selective Laser Sintering) is one of RP technologies, which is focused on tooling processes as well as three dimension solid model. There are several factors, the length and the cross-sectional area of a part, that have an effect on build setup in SLS process. In this paper, the computation on geometrical relationship is used to slice STL file and to estimate these factors. Based on these values, the build setup parameters such as the heating temperature, the laser power, and the powder cartridge feed rate are determined by neural network approaches. The test results show that the computation time is saved and the neural network approach is able to apply to get the optimal parameters of build process within an acceptable error rate.

### 1. 서 론

쾌속조형은 제품의 수명주기가 짧아지고 자유곡면이 많은 시작품을 만들어내는데 유용한 기술로서, 현재 많은 산업부문 중에서도 특히 자동차부문에 큰 각광을 받고 있다.

쾌속조형을 통하여 시작품 제작 단계에 소요되는 시간을 줄일 수 있을뿐만 아니라, 경제적인 측면에서 기존의 시작품을 만드는데 드는 비용을 크게 절감할 수 있다.

현재 가동되고 있는 SLA, SLS, LOM, FDM 등의 장비들은 각각 독특한 공정 파라미터(build parameter)를 가지고 있다. 이 파라미터들은 시작

품의 형상과 기능에 영향을 미치게 되므로 이들을 최적화하면 시작품의 정밀도 및 품질 향상뿐만 아니라 장비의 무리한 부하를 줄일 수 있다.

관련 연구로는 I. Y. Turner 등이 레이저 출력, 슬라이스 두께, 조형 자세를 파라미터로 하여 성형 단면의 특징을 통한 결합 패턴을 인식하였으며,<sup>(1)</sup> E. Sabourin은 쾌속조형 장비의 속도와 정밀도를 높이는 연구에서 STL 파일의 슬라이싱 방법들을 이론적으로 제시하였지만, 슬라이싱 때 발생하는 예외적인 사항이나 실제 구현시에 발생할 수 있는 이론과 실제와의 격차를 밝히지 않았다.<sup>(2)</sup> Dolenc 등은 슬라이싱할 때 평평한 점과 침점을 처리하는 방법을 제시하였으며, 삼각형 부분의 cusp 높이를 사용하여 가변 층 두께를 계산하는 방법론을 소개하였으며,<sup>(3)</sup> Suh 등은 이전 층의 슬라이스 윤곽을 따라 샘플링 점 집합을 만들고, 최대 허용 층 두께는 샘플링 점에서 면을 고려하여 계산하였다.<sup>(4)</sup> 그러나, 이들 연구에서는 실제 현장에서 공정에 영향을 주는 단면정보를 생성하거나 이용하지 못했다.

\* 부산대학교 대학원

\*\* 제주대학교 기계공학부

\*\*\* 회원, 부산대학교 기계공학부 및 기계기술연구소

E-mail : sehles@hyowon.pusan.ac.kr

TEL : (051)510-2327 FAX : (051)514-0685

특히, SLS(selective laser sintering) 시스템에서는 레이저 출력(laser power), 히터 온도(heating temperature), 파우더 카트리지 피드량(powder cartridge feed rate)은 새로운 작업을 할 때마다 작업자가 설정을 해야하는 주요 공정 파라미터들이다.

이들 파라미터들은 조형 작업과 파트에 큰 영향을 미치는 요소들이지만 현재는 작업자의 경험에 의해서 설정된다. 따라서 작업자나 작업환경이 바뀌는 경우 종전처럼 일관되고 신뢰성 있는 생산을 할 수가 없는 실정이다.

본 논문에서는 SLS 공법을 이용하는 DTM사의 Sinterstation 2000에 대해서 일관되고 신뢰성 있는 작업으로 공정의 효율을 향상시키기 위해 단면 정보를 추출하는 방법론을 개발하고, 신경회로망을 이용하여 공정 파라미터를 최적화하는 전문가 시스템을 구축하고자 한다.

## 2. SLS장비의 구조와 공정 파라미터

SLS는 레이저빔으로 열 가소성 분말 재료를 녹여 융합시킨 후 냉각하는 방법으로, 분말 재료 위를 레이저로 조사하면 분말입자는 연화되고, 인접한 다른 입자와 연결되어 제품을 형성하게 된다.

Fig. 1은 일반적인 SLS 공정을 보여주는데, 한 층의 가공이 완료되면 롤러는 분말 공급 장치(powder cartridge)에서 새로운 분말을 도포하고, 이 과정을 반복하여 임의의 형상을 갖는 완제품을 생산할 수 있다.

Table 1은 파라미터들이 완성된 파트나 공정 중에 있는 파트에 영향을 주어 생길 수 있는 문제들로서, 실제 시작품 제작시에 발생하는 대부분의 문제들이므로 파라미터의 설정은 매우 중요하다.

부적절한 파라미터의 설정으로 인해 파트의 품질은 많이 떨어지게 된다. 치수가 틀려지거나, 정밀도와 파트의 강도가 떨어지며, 파트에 흠이 생기는 등 시작품으로 사용할 수 없는 결과를 초래 한다.

파라미터들은 슬라이스된 단면 형상의 면적과 길이에 따라 설정을 달리해주어야 하는데, 히터 온도와 레이저 출력은 면적, 카트리지 피드량은 X축 방향의 길이에 따라 설정값들을 변화시켜야 한다.

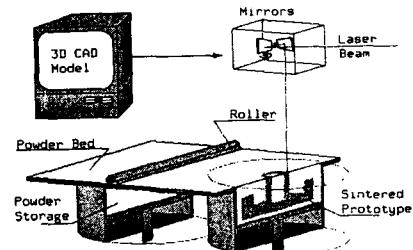


Fig. 1 SLS process

Table 1 Problems by build factors

Parameter	Problems
Laser Power	Bonus Z, Growth, Weak part/Porosity
Heating temperature	Clumping, Melting, Cracking, Curling, Glazing, Growth, Streaking, Wash out
Powder feed rate	Shot Feed, Powder Fluff

## 3. STL 파일의 처리

### 3.1 슬라이싱

히터 온도, 레이저 출력, 카트리지 피드량의 최적값을 구하기 위해서는 STL 파일 처리가 선행되어져야 하는데, STL 파일을 슬라이싱하여 X축 값의 최대, 최소값을 찾고, 형상의 단면을 나타내는 폐루프들의 면적을 구해야 한다.

RP 장비에서 사용되는 STL 파일의 슬라이싱이란 3차원 형상을 가진 STL 파일을 Z축과 평행한 평면들로 잘라내어 임의의 높이에 대한 단면 형상을 얻는 것을 말한다.

본 논문에서의 슬라이싱은 SLS 장비의 조형 과정에서처럼 미세하게 할 필요는 없다. 이는 SLS 공정에서 히터, 레이저, 피드량은 실제로 가공 레이어마다 설정할 수 없기 때문에 구간별로 슬라이싱하여 이 값을 사용하게 된다. 수행된 연구에서는 슬라이싱 구간의 기본 값을 10~50mm로 설정하였다.

슬라이싱은 STL의 facet을 구성하는 세 개의 모서리와 슬라이싱 평면과의 교차점을 구하는 것으로 단순화할 수 있다. 만약 평면과 삼각 facet이 교차하면 교차 선분이 생성되는데, 이 교차 선분은 중복 검사를 거쳐 Fig. 2과 같은 구조체로

저장된다.

삼각 facet과 슬라이스 평면과의 관계는 기하학적으로 Fig. 3과 같이 다섯 가지로 분류할 수 있으며, 각 경우에 대한 처리가 따로 이루어지게 된다.

첫째, 평면에 facet가 포함될 경우, 세 개의 모서리 자체를 교차선분으로 처리하며, 3개의 교차선분이 생성된다.

둘째, 평면에 facet의 한 모서리를 포함될 경우, 공유되는 모서리를 우선하여 교차선분을 구한다. 따라서 교차선분이 한 개 생성된다.

셋째, 평면에 facet의 한 점만 포함될 경우, 점은 평면에서 물리적인 정보가 될 수 없으므로 무시한다. 결과적으로 교차선분은 생성되지 않는다.

넷째, 평면이 facet과 교차하는 경우와 다섯째로 평면과 facet이 비교차하는 경우에는 모서리가 평면과 교차하는지의 여부를 판단하여 교차하는 경우 교차점을 구하고, 교차하지 않는 경우 무시한다.

교차 여부를 판단하는 가장 일반적인 방법은 모서리를 이루는 두 정점의 Z축 좌표사이에 평면이 존재할 경우 교차점을 구하는 방법이다.

두 점  $p = (x_p, y_p, z_p)$ 과  $q = (x_q, y_q, z_q)$ 로 이루어진 모서리를 식 (1)로 정의한다면, 평면과

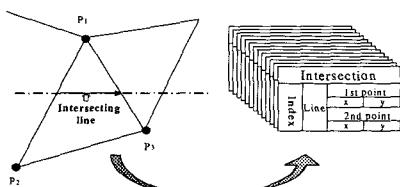


Fig. 2 Intersecting line structure list

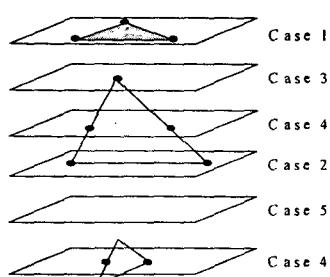


Fig. 3 Relation between facet and plane

모서리의 교차점은 식 (2)에서 얻어진 매개변수  $t$ 를 식 (1)에 대입하여 구할 수 있다.

$$P(t) = p + t(q - p) \quad (1)$$

$$t = \frac{h - z_p}{z_q - z_p} \quad (2)$$

그러나 이 방법을 쓰기 위해서는 두 정점 중에 어떤 정점의 Z축 좌표가 더 큰지를 비교해야 하는데 이 과정이 들어가면 교차점을 구하는데 소요되는 시간이 매우 길어진다.

또한 위 식은 비록 교차하지 않더라도 모서리의 연장선상의 평면과의 교차점을 구하기 때문에 또 다른 연산 처리가 필요하다. 결국 연산 처리수가 많아지므로 연산 시간도 많이 소비하게 된다.

본 연구에서는 연산 처리 시간의 지연을 줄이기 위해서 논리연산의 하나인 Exclusive NOR 연산을 이용하였다.

Exclusive NOR 연산은 두 개의 조건문을 인자로 가지며 두 조건문이 반환하는 값이 서로 같을 경우에는 True, 반환되는 값이 서로 다를 경우에는 False를 반환한다.

한 모서리를 이루는 두 점의 Z축 좌표와 슬라이스 높이가  $h$ 인 평면에 식 (3)을 적용하면 두 정점의 Z축 좌표의 크기 비교 없이 Fig. 4와 같이 교차의 여부를 판단하여 식 (1)과 식 (2)에 의해 교차점을 구하고 새로운 교차 선분을 생성한다.

$$[Z \text{ coordinate of first vertex} \geq h]$$

$$\text{Exclusive NOR} \quad (3)$$

$$[Z \text{ coordinate of second vertex} \leq h]$$

### 3.2 페루프의 검출

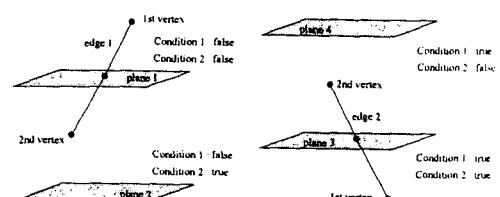


Fig. 4 Exclusive NOR equation

슬라이싱이 완료되어 모든 교차 선분을 집합시키면 다중의 폐루프가 나타나게 된다. 여기서 각각의 폐루프들을 검출해야 하는데 단면정보인 X축 방향의 길이와 면적을 구하는데 필요하다.

Fig. 5와 같이 생성된 교차선분들 중에서 임의의 선분의 첫 점을 시작위치로 정하고 그 선분의 두 번째 점의 좌표와 같은 점이 있는 교차선분을 찾는다. 찾아진 선분의 반대편 점을 가지고 다시 같은 좌표를 가진 점을 찾는다. 이런 반복과정 중에 찾아진 점이 초기 시작점일 경우 하나의 루프가 검색 완료되며, 다중 루프의 경우 검색된 점들을 제외하고 다시 검색을 하게 된다.

루프의 검색이 완료되면 Fig. 6에서 보이는 형식의 슬라이스 파일을 생성하고 슬라이싱 과정은 완료된다.

#### 4. 단면정보 추출

##### 4.1 루프의 부호 판별

단면정보중에 슬라이스 형상의 X축 방향의 길이는 슬라이스 파일의  $X_m$ 들을 정렬하여 구할 수 있지만, 단면적을 얻기 위해서 다음과 같은 과정이 필요하다. 단면적을 구하기 위해서는 각 루프들이 (+), (-)의 어떤 부호를 가지는지를 알아

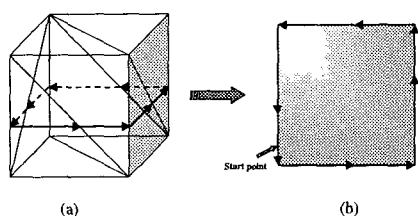


Fig. 5 Closed loop detection in slicing

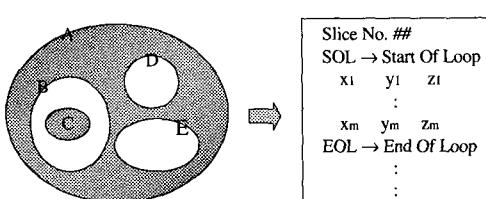


Fig. 6 Slicing file list

야 하며, 실제 루프들의 면적과 부호를 조합하여 최종 면적을 구해야 한다. 루프는 시계·반시계의 방향을 가지게 되며, 각 루프의 방향으로 인해 부모·자식 관계를 형성시킨다. 일단 부모·자식 관계가 형성되면 반시계 방향의 루프는 (+)의 면적을, 시계 방향의 루프는 (-)의 면적을 가지게 된다.

기하학적으로 루프의 방향을 알 수 있는 것으로 알려진 방법은 Fig. 7과 같이 임의의 한 점  $P$ 에서  $+X$  방향으로 반직선을 그은 후에 이 반직선이  $n$ 각형의 변과 몇 번 만나는지를 검사하여 포함 회수를 가지고 판별하였다. 그러나 반직선의 시작점을 설정하는 것뿐만 아니라 반직선과 루프의 한 부분이 겹치는 경우, 그리고 반직선이 루프의 꼭지점에서 만나는 경우 등 예외적인 부분을 처리하기 위해 처리 과정이 복잡해지는 단점이 있다.

본 연구에서는 루프의 방향을 구별하지 않고 면적을 (+)와 (-)로 판별하기 위해 외적의 성질을 이용하였다. 슬라이싱 단면에 여러 루프가 존재할 경우 임의의 루프가 어떤 루프들에 의해 포함이 되는지를 판단하여 포함되는 회수를 조사하는 것이다. 즉, 임의의 루프가 다른 루프들에 의해 짹수번 포함될 경우 (+)의 면적을 가지게 되고, 홀수번 포함이 될 경우 (-)면적을 가지게 된다.

$n$ 개로 이루어진 다각형의 꼭지점들의 좌표를  $P_1(X_1, Y_1)$ ,  $P_2(X_2, Y_2)$ , ...,  $P_n(X_n, Y_n)$ 라 할 때, 점  $P(X_p, Y_p)$ 가 다각형의 내부에 있는지를 판단하기 위하여 식 (4)를 적용한다.

식 (4)의 각각의 식의 값이 모두 같은 부호를 가지면 점  $P(X_p, Y_p)$ 는 다각형의 내부에 존재하는 점이고, 그렇지 않으면 외부의 점이 된다.

슬라이스 단면에 존재하는 루프가  $m$ 개일 경우 한 루프에서 임의의 점을 가지고 자기 자신을

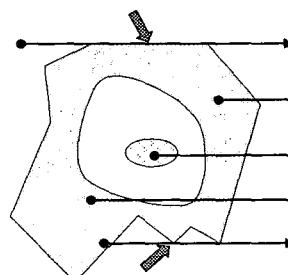


Fig. 7 Decision of loop direction

제외한 나머지 루프들에 대하여 식을 적용하면 점이 포함되는 회수가 곧 점을 구성원으로 하는 루프가 다른 루프들에 포함되는 회수가 되기 때문에 루프의 판별이 가능해진다.

$$\begin{aligned} & (X_1 - X_p) \times (Y_2 - Y_p) - (X_2 - X_p) \times (Y_1 - Y_p) \\ & \vdots \\ & (X_i - X_p) \times (Y_{i+1} - Y_p) - (X_{i+1} - X_p) \times (Y_i - Y_p) \\ & \vdots \\ & (X_n - X_p) \times (Y_1 - Y_p) - (X_1 - X_p) \times (Y_n - Y_p) \end{aligned} \quad (4)$$

#### 4.2 루프의 면적

$n$ 개의 점으로 구성된  $n$ 각형인 루프들의 면적을 구하는 방법 중에 가장 일반적인 방법은 교차 점들을 기준으로 삼각분할(triangulation)을 하는 방법이다.

그러나 삼각분할을 한 후 각 꼭지점의 좌표로서 각 변의 길이를 계산해야 하고, 분할된 삼각형의 수가 많을수록 처리시간은 길어지게 된다.

따라서 본 논문에서는 외적의 성질을 이용한 그린의 정리(Green's theorem)를 이용하였다.

그린의 정리란 어떤 영역의 경계에 관한 방정식을 알 때, 그 내부의 면적을 정적분으로 계산하는 방법에 관한 정리이다. Fig. 8과 같이  $C$ 를  $xy$ 평면의 영역  $S$ 의 경계를 이루는 부분적으로 원활한 단일폐곡선이라고 할 때, 만일  $M(x, y)$ 와  $N(x, y)$ 가  $S$ 와  $S$ 의 경계  $C$ 위에서 연속함수이고, 또 연속인 편도함수를 가진다고 하면 식 (5)와 같이 정의할 수 있다.

평면 내의 영역  $S$ 가 부분적으로 원활한 단일 폐곡선으로 된 경계  $C$ 를 가질 때,  $M(x, y) = -y/2$ ,  $N(x, y) = x/2$ 라 두고 그린의 정리를 적용하면 면적은 식 (6)의 증명 과정을 거쳐 식 (7)

이 된다. 식 (7)을  $n$ 각형의 넓이 계산에 적용하면 루프의 넓이를 구할 수 있다.

$n$ 각형의 요소들이  $P_1(X_1, Y_1), P_2(X_2, Y_2), P_3(X_3, Y_3), \dots, P_n(X_n, Y_n)$ 일 경우 식 (7)은 식 (8)과 같이 되어 다각형의 면적을 구할 수 있다.

식 (8)에서의 절대값으로 구한 것은 방향성을 고려하지 않기 위함이다. 그런의 정리를 적용하여 다각형의 면적을 구할 때는 다각형을 이루는 점의 배열이 시계방향인지 시계반대방향인지에 따라 부호가 다르게 나온다. 그러나 루프의 방향에 대한 부호의 처리는 앞 절에서 판별이 되었기 때문에 면적의 절대치만 구하면 된다.<sup>(5)</sup>

$$\int_S \int \left( \frac{\partial N}{\partial x} - \frac{\partial M}{\partial y} \right) dA = \oint_C M dx + N dy \quad (5)$$

$$\oint_C \left( -\frac{y}{2} dx + \frac{x}{2} dy \right) = \oint_S \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \right) dA \quad (6)$$

$$A(S) = \frac{1}{2} \oint_C x dy - y dx \quad (7)$$

$$\begin{aligned} S = & |(X_1 \times Y_2 - X_2 \times Y_1) + \\ & (X_2 \times Y_3 - X_3 \times Y_2) + \dots + \\ & (X_{n-1} \times Y_n - X_n \times Y_{n-1}) + \\ & (X_n \times Y_1 - X_1 \times Y_n)| \times 1/2 \end{aligned} \quad (8)$$

그린의 정리에서 도출된 식은 기존의 다각형을 삼각분할하여 각 변의 길이를 구한 다음 개개의 삼각형의 면적을 구하여 합하는 방법보다 처리과정이 간단하므로 처리시간도 빠르게 된다.

루프들의 면적이 구해지면 앞 절에서의 루프들의 부호와 조합하여 모두 더하면 슬라이스 단면의 면적이 구해진다.

#### 5. 공정 파라미터의 최적화

Table 2는 SLS 장비에서 나일론 재질을 사용한 경우의 공정 파라미터에 대한 정보이다. 히터는 성형을 우선하고, 레이저는 출력을 우선하는 방향으로 설정을 하는데, 이는 분말을 제거할 때 break out 문제를 고려한 것이다. 피드량의 단위는 베드 실린더의 지름에 대한 비율이다.

대개의 모든 RP 장비들은 개발사, 또는 공급업체에서 기본적인 정보들을 제공하지만, 장비의 가동 환경이나 재료의 종류 등 여러 변수들을 최

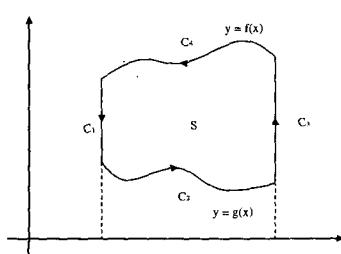


Fig. 8 Green's theorem

적으로 하기에는 이 값만으로는 부족하다.

최적값을 구하는 문제를 풀기 위해 신경망이 효과적으로 사용되는데, 가공 파라미터를 결정하기 위해 신경망을 이용하여 핸드북과의 오차를 15% 이내로 줄였고,<sup>(6)</sup> L. Burke는 퍼지 적응 공명 이론적 신경망(fuzzy adaptive resonance theory neural network)을 셀 단위 생산방식의 부품군/기계 그룹 형성 문제에 적용하였다.<sup>(7)</sup> 본 논문에서도 최적 공정 변수들을 추출하기 위하여 신경망 이론인 백프로페이션 알고리듬을 사용하여 계산하였다. 이러한 신경망 모듈들은 공정 변수와 관련된 새로운 데이터의 적용시에도 이용할 수 있는 이점을 가지며, 본 연구에서는 작업자의 경험과 시스템 설계자의 제안에 의한 데이터에 의해서 학습되었다.

개발된 신경망은 Fig. 9와 같이 입력층, 은닉층, 출력층의 다층 구조로 구성되어 있다. 입력층은 파트의 x축 방향 길이와 슬라이스된 단면적에 의한 2개의 노드로 구성되어 있으며, 출력층에는 히터온도, 레이저 출력, 카트리지 피드량에 의한 3개의 노드로 구성되어 있다. 사용된 학습 데이터는 40개 형상의 단면 정보가 사용되었고, 모멘텀비 0.7, 학습률 0.9로 설정하였다.

학습을 위한 입력 데이터는 실제 조형 작업 중에서 발생할 수 있는 각 값들의 분포를 고려하여 한계를 정하였으며 그 중 일부는 Table 3과 같다.

입력값들의 차원이 틀리기 때문에 입력과정에서 모든 값을 normalize하여 사용하였고, 학습 종료를 위한 기준으로서 최대 산출오차  $\epsilon = 0.01$ 로 설정하였다.

Table 2 Build parameters in SLS

Heater	Laser	Feed
• 187.7°C ~ 188.7°C • 0.1°C unit	• 3.1 ~ 3.5 Watt • 0.1 unit	• 0.18 ~ 0.25 • 0.01 unit

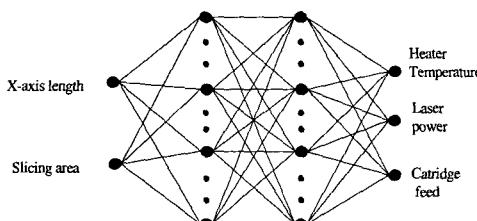


Fig. 9 Designed neural Network structure

## 6. 소프트웨어의 개발과 신경망 적용

### 6.1 소프트웨어의 개발

전술한 이론들을 실현할 수 있는 소프트웨어를 개발하였다.

프로그램 개발 환경으로는 Intel 사의 Pentium 150 MHz의 CPU와 64Mbyte의 램을 장착한 컴퓨터를 사용하였으며, Microsoft 사의 Windows NT 4.0 버전의 오피레이팅 시스템 환경에서 Visual Basic 5.0 버전을 이용하였다. 또한 작업자가 현재 조형되는 파트가 어떤 형상인지를, 그리고 슬라이스 단면은 어떤 형상인지를 알 수 있도록 OpenGL을 사용하여 시각적으로 표현하였다.

소프트웨어의 전체적인 구성도는 Fig. 10에 나타내었으며, Fig. 11은 실제 자동차 부품을 슬라이싱하여 나타난 단면의 모습이다.

Table 3 Training input data

Input variable		Referenced output variable		
Length (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Feed	Temp. (°C)	Laser (Watt)
28.90	41.30	0.19	188.70	3.40
39.80	288.90	0.20	188.60	3.30
59.20	1842.70	0.20	188.50	3.20
72.90	2995.60	0.20	188.40	3.20
118.40	8634.50	0.20	188.40	3.20
169.20	10886.50	0.21	188.30	3.20
185.10	12618.90	0.22	188.30	3.20
218.20	15789.30	0.23	188.20	3.10
249.20	19401.40	0.24	188.00	3.10
263.00	19458.10	0.25	188.00	3.10

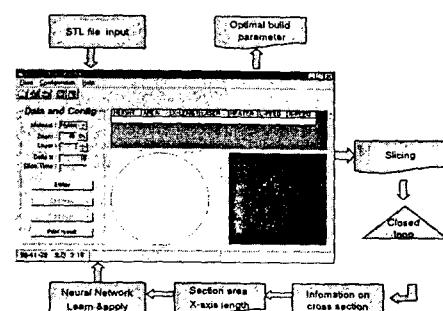


Fig. 10 Schematic diagram of S/W

Table 4 Network responses on the desired data set

Input variables		Desired output variables( $V_{des}$ )			Network output variables( $V_{nn}$ )			Ratio ( $V_{nn}/V_{des}$ )		
Length (mm)	Area (mm <sup>2</sup> )	Feed	Temp. (°C)	Laser (Watt)	Feed	Temp. (°C)	Laser (Watt)	Feed	Temp. (°C)	Laser (Watt)
17.2	84.6	0.18	188.7	3.4	0.191	188.69	3.34	1.06	1.00	0.98
43.3	334.6	0.20	188.6	3.3	0.199	188.57	3.20	1.00	1.00	0.97
67.7	868.1	0.20	188.5	3.2	0.201	188.53	3.19	1.01	1.00	1.00
97.3	1931.7	0.20	188.5	3.2	0.203	188.48	3.19	1.02	1.00	1.00
133.8	4541.8	0.20	188.4	3.2	0.209	188.40	3.20	1.00	1.00	1.00
157.9	7416.6	0.21	188.4	3.2	0.219	188.36	3.20	1.04	1.00	1.00
176.8	9557.1	0.21	188.4	3.2	0.227	188.32	3.21	1.08	1.00	1.00
202.4	13448.9	0.23	188.2	3.2	0.230	188.23	3.18	1.00	1.00	0.99
242.0	17511.5	0.24	188.1	3.1	0.242	188.07	3.10	1.01	1.00	1.00
258.6	20989.3	0.24	187.8	3.1	0.240	187.92	3.10	1.00	1.00	1.00

Table 5 Weight matrix and biases

## Weight matrix

Layer	Node	$W_{ij}$ ( i : Preceding)			
		1	2	3	4
From input to hidden	1	2.002	-35.536	0.406	4.516
	2	0.604	-3.788	-9.548	-36.248
From hidden to hidden	1	-7.366	-2.003	-3.825	-4.436
	2	1.811	-4.412	7.634	-1.819
From hidden to output	3	3.587	-5.965	-0.371	-0.193
	4	-1.956	-10.043	4.036	-9.981
From output	1	-7.550	3.958	5.147	1.759
	2	-2.866	-9.379	-1.610	1.659
	3	-4.085	5.585	1.320	0.440

## Biases

Layer	1	2	3	4
Node				
Hidden 1	-0.293	0.523	-11.057	7.747
Hidden 2	1.428	-11.978	2.053	8.266
Output	-22.882	-3.352	2.534	

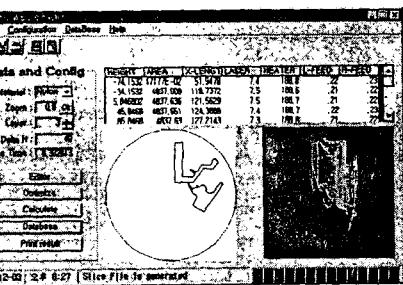


Fig. 11 Configuration of sliced part

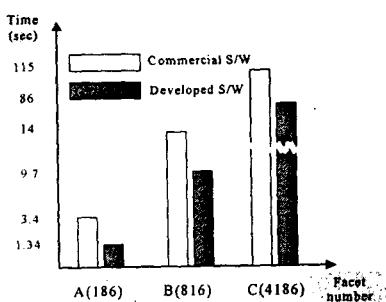


Fig. 12 Comparison of time to slicing

Fig. 12는 전술한 슬라이싱 알고리듬으로 개발한 프로그램의 슬라이싱 속도와 상용프로그램인 STL View 7.0의 슬라이싱 속도를 비교한 것이다. 슬라이싱 속도의 비교는 읽어들인 형상을 슬라

이싱하고, 루프를 검색하여 슬라이스 파일을 출력하는 데까지 걸리는 시간을 측정하였다.

STL View 7.0보다 약 1.5배에서 2배까지 빠른 슬라이싱 속도를 얻었다. 슬라이싱 시간은 기본

적으로 형상의 높이에 비례하지만, facet의 수에는 지수함수적으로 늘어났다.

## 6.2 신경망 적용

학습된 신경망의 수행 결과는 공정 변수들의 예측 정도를 검사하여 평가하였다. Table 4에서는 새로운 입력값에 근거한 기대값  $V_{des}$ 와 신경망 출력값인  $V_{nn}$ 을 비교하였고, Table 5에서는 결과적으로 생성된 weight 값과 biases의 값을 나타내었다.

학습에 사용되지 않은 실제 테스트 데이터와 백프로퍼게이션 알고리듬의 결과 비교는 이 신경망의 실제 현장 적용을 위하여 필수적이다.

SLS 장비에서 나일론 재질을 사용한 경우의 신경망의 결과는 상당히 정확하다. 이는 히터 온도, 레이저 출력, 카트리지 피드량의 설정 범위가 적기 때문이다. 결과적으로 본 신경망은 공정 변수의 10% 내외의 오차 범위 내에서 예측할 수 있는 것으로 기대된다.

## 7. 결 론

SLS 장비는 슬라이스 단면의 정보에 따라서 일정한 구간마다 공정 파라미터를 설정해주어야 하는데, 공정 파라미터 값들인 레이저 출력, 히터, 온도 카트리지 피드량을 자동으로 설정하기 위하여 본 논문에서는 슬라이스 단면 정보의 추출을 위한 소프트웨어를 개발하였고 백프로퍼게이션 신경망을 적용하였으며, 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 개발된 소프트웨어는 슬라이스 단면의 X축 길이와 단면적을 얻기 위해서 의적의 성질과 그린의 정리를 이용하였다. 특히, 삼각 facet과 슬라이스 평면과의 기하학적 관계 분류에 의한 교차선분 검사과정을 통해 교차점의 판단에 필요한 연산 처리 과정을 줄여서 기존의 상용 프로그램 보다 1.5~2배 정도 빠른 슬라이싱 속도를 얻었다.

(2) 다층 구조의 백프로퍼게이션 신경망은 슬라이스 단면의 X축 방향 길이, 면적에 의한 입력층과 레이저 출력, 히터, 온도 카트리지 피드량에 의한 출력층으로 구성되었다. 이 신경망은 작업자의 경험에 의한 데이터를 학습하였으며, 수행

결과 10% 이내의 오차 범위 내에서 출력을 예측 할 수 있었다.

(3) 공정 전체적인 관점에서 파라미터의 최적화를 통하여 조형 실패로 인한 재조형 회수를 줄일 수 있기 때문에 시간과 재료비, 인건비등 경제적인 이득을 얻을 수 있으며, 신차 개발의 관점에서는 좋은 품질의 시작품을 가지고 검토할 수 있어서 개발 기간의 단축과 정확한 테스트를 얻을 수 있다.

## 참고문헌

- (1) Turner I. Y., Thompson D. C., Wood K. L. and Crawford R. H., 1998, "Characterization of Surface Fault Patterns with Application to a Layered Manufacturing Process," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 17, No. 1, pp. 23~36.
- (2) Sabourin E., 1996, "Adaptive High-Precision Exterior, High-Speed Interior, Layered Manufacturing," *M.S. Thesis*, Virginia Polytechnic Institute and State Univ., pp. 3~27.
- (3) Dolenc A. and Makeya I., 1994, "Slicing Procedures for Layered Manufacturing Techniques," *Computer Aided Design*, Vol. 26, NO. 2, pp. 119~126.
- (4) Suh Y. and Wozny M. J., 1994, "Adaptive Slicing of Solid Freeform Fabrication Processes," *Solid Freeform Fabrication Symposium Proceedings*, University of Texas at Austin, pp. 404~411
- (5) 강신민, 1996, 미분적분학, 경문사, 서울, pp. 1024~1028.
- (6) Choi K. H., 1996, "Neural Networks Approach to the Determination of the Machining Parameters," *KSME Journal*, Vol. 10, No. 4, pp. 389 ~ 395.
- (7) Burke L. and Kamal S., 1995, "Neural Networks and the Part Family/Machine Group Formation Problem in Cellular Manufacturing : A Framework Using Fuzzy ART," *Journal of Manufacturing Systems*, Vol. 14, No. 3, pp. 148~159.