

# 쾌속 조형시스템의 제작 및 성능평가에 관한 연구

강원주\*, 김준안\*\*, 이석희\*\*\*, 백인환\*\*\*\*

## A Study on the Manufacture and the Performance Evaluation of Stereolithography System

Won-Joo Kang\*, Jun-An Kim\*\*, Seok-Hee Lee\*\*\*, and In-Hwan Paik\*\*\*\*

### ABSTRACT

This paper addresses a development work of a SLA apparatus on laboratory basis. The SLA test machine is composed of optical, movement, curing and control subsystems. Optical part is performed by a He-Cd laser with mirror combination and mechanical movement is achieved by X-Y table.

The developed system is evaluated by several test runs, and shows a good precision capability in forming a basic part. The technique used in this work can be extended to replace the high technology transfer cost of commercial RP machine.

**Key Words :** RP(rapid prototyping), SLA(stereolithography), epoxy resin(에폭시 수지), curing(조형)  
He-Cd laser(헬륨-카드뮴 레이저), focus lens(초점렌즈), surface roughness(표면거칠기),

### 1. 서론

RP(Rapid Prototyping)기술은 설계자의 의도를 실제 성형물로 제품 개발 초기 단계에서 빠르게 제작, 검증함으로써 형상확인, 외관평가 및 기능 검증 등 설계검토용으로 활용되고 있으며, 개발제품의 신뢰성을 높이고, 개발 기간을 대폭적으로 단축하고 있다<sup>(1)</sup>.

널리 사용되고 있는 RP기법으로는 빛을 광경화성 수지에 조사하여 형상을 제작하는 쾌속조형법(Stereolithography), 광경화현상과 표면절삭과정을 되풀이하여 하나의 단면을 한번에 생성시키는

SGC(Solid Ground Curing), 고체 분말 수지에 CO<sub>2</sub> 레이저를 조사하여 소결시켜 단면을 생성하는 SLS(Selective Laser Sintering), 고분자나 왁스를 필라멘트선을 통과시켜 압출하여 필름형태로 고화시키는 FDM(Fused Deposition Modeling), 종이나 수지 등의 시트 재료를 슬라이스 데이터로 절단하여 가열, 압착시켜 형상을 완성하는 LOM(Laminated Object Manufacturing), 용융된 왁스나 고분자 입자를 구형으로 투사하여 형상을 적층하는 BPM(Ballistic Particle Manufacturing), 액상의 왁스나 고분자를 직접 뿌려 입체 형상을 제작하는 3DP(Three Dimensional Printing) 등이 있다<sup>(2)</sup>.

\* 고려대학교 대학원 기계공학과  
\*\* 경남정보대학 기계설계과  
\*\*\* 부산대학교 기계공학부  
\*\*\*\* 부산대학교 기계공학부 기계기술연구소

이 중 쾌속조형법은 층의 두께를 얇게 제작하므로 곡면부의 표면단차를 줄일 수 있고, 수축이 적은 에폭시계의 수지를 사용하여 높은 치수정밀도를 실현할 수 있으므로 초정밀 미세 형상 모델의 제작 시 최적의 방법으로 제안되고 있다.

상용화된 쾌속조형시스템으로는 미국의 3D Systems 사의 SLA(StereoLithography Apparatus) 시리즈, 일본의 C-MET사의 SOUP(Solid Ultra-violet Laser Plotter)시스템과 D-Ment사의 SCS(Solid Creator System)가 있다<sup>(3-5)</sup>.

이러한 쾌속조형시스템들은 고가이고, 각 제조사의 제작 노하우에 대한 보안으로 인하여, 사용자가 독자적으로 개발한 독자적인 소프트웨어를 접목하는 것이 불가능하다. 따라서 쾌속조형기계 제작 기술 및 운용기술의 해외의존도를 피할 수 없다.

따라서 본 연구에서는 쾌속조형기술의 국내정착을 통하여 외국 제작업체에 대한 기술 의존도를 탈피하고, CAD에 의한 입체모델로 형상을 제작하는 일련의 과정을 독자적으로 구현할 수 있도록 시스템을 제작한다.

또한, 제작된 시스템을 이용하여 쾌속조형 제품의 형상정밀도에 영향을 미치는 여러 변수들에 의한 경화특성을 고찰하고, 이를 통한 최적의 가공조건을 선정한다.

제작된 시스템은 형상정밀도가 우수하고, 형상을 용이하게 제작할 수 있는 X-Y 테이블 방식을 채택하여 실험실 연구용으로 적합하도록 하였다.

## 2. 이론적 배경

### 2.1 SLA 시스템의 개요

SLA(Stereolithography Apparatus)는 일종의 3차원 인쇄장치로 액체상태의 광경화성수지에 자외선광 또는 레이저를 조사하고 한 층씩 적층하여 원하는 입체형상을 제작하는 방식이다.

쾌속조형법을 이용한 3차원형상 제작 장치인 SLA의 구동원리는 Fig. 1에서 보는 바와 같이 3차원 CAD 시스템에서 모델링된 원시도형 데이터로부터 X, Y, Z축 구동데이터를 생성하고, 엘리베이터를 단면 두께만큼 아래로 이동한다. 이어서 자외선레이저를 조사하여 형상의 제일 아래단면을 성형한다. 그리고 엘리베이터를 단면두께만큼 아래로 이동시키고 레이저로 다음 층을 조사한다. 이러한 작업을 반복함으로써 복잡한 3차원 형상을 신속하

게 조형할 수 있다.

한편 쾌속조형 기술은 복잡한 형상도 간단히 조형할 수 있는 이점도 있지만 레이저를 사용함에 따라 장비가 비싸며 조형에 사용되는 것이 수지 종류이므로 조형된 제품이 열에 약하고, 경화시 수지의 수축 및 변형, 표면의 계단형상 등에 의한 정밀도의 저하 등이 아직 문제점으로 남아있다<sup>(6)</sup>.

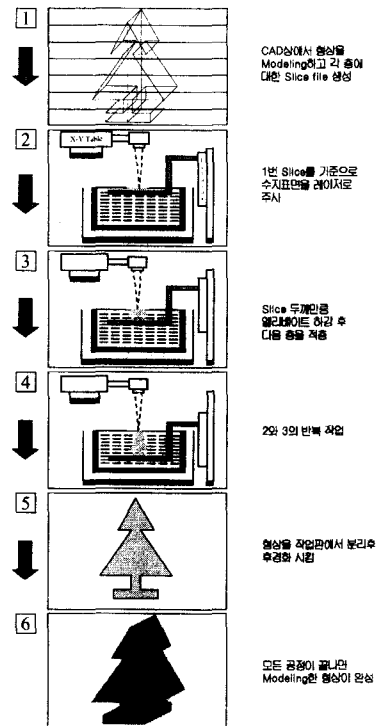


Fig. 1 StereoLithography Process

### 2.2 경화형상 관계식<sup>(1)</sup>

#### 2.2.1 집광렌즈

집광렌즈는 조형시 레이저의 빛을 줄여 보다 작은 초점이 조형판에 맺히도록 한다. 이상적인 가우스 분포의 레이저 빛을 볼록렌즈로 집광시켜도, Fig. 2에서 보는바와 같이, 초점이 한곳에 모이는 것이 아니고 쌍곡선 형태를 가진다. 따라서, 이 쌍곡선의 점근선이 교차하는 점이 초점에 해당한다.

레이저를 집광시켰을 때의 spot 반경은 다음 식과 같다.

$$W_0 = \frac{\lambda}{\pi} \frac{L}{D_L} \quad (1)$$

여기서, 집광렌즈의 초점거리는  $L$ , 파장  $\lambda$ , 레이저의 직경은  $D_L$ 이다.

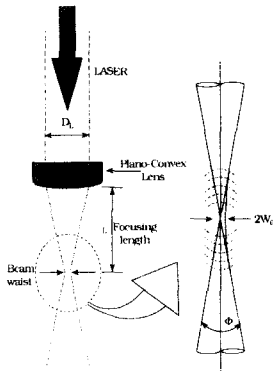


Fig. 2 Focus of Laser beam

### 2.2.2 층두께와 표면 거칠기

단위 경화형상의 윤곽은 실제로 Gaussian 곡선 형태를 이루므로 이 형상을 일정간격을 적층하였을 때 경사면을 직선으로 근사화 하면 Fig. 3과 같다. 여기에서 경화형상의 표면을 경사면의 최대거칠기의 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$H = \frac{L}{\sin \theta \cdot \tan(\theta - \phi) + \cos \theta} \quad (2)$$

여기서  $\phi$ 는 단위 경화형상의 윤곽의 기울기이고  $\theta$ 는 수평면에 대한 모형의 면 경사각,  $L$ 은 한층 두께이며  $H$ 는 최대 거칠기이다.

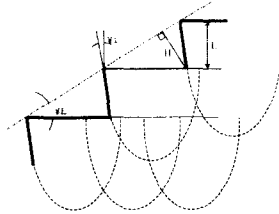


Fig. 3 Theoretical intersection profile of a part

### 2.2.3 주사속도와 경화깊이의와의 관계

Jacobs가 제안한 경화깊이( $C_d$ )는 다음과 같다.

$$C_d = a \log_e \left( \frac{\pi^2 I_0}{VE_T} \right) \quad (3)$$

여기서, 중심부 빛의 강도  $I_0$ , 주사속도  $V$ , 수지의 흡수 계수  $a$ , 경화에 필요한 레이저 빛의 강도는  $E_T$ 이다. 경화깊이가 주사속도에 반비례하는 이유는 주사속도가 작을 경우에는 경화에너지가 국부적으로 밀집되고, 이 에너지에 의해 경화깊이가 깊어져 불룩하게 경화되기 때문이다

## 3. 쾌속 조형시스템의 설계

### 3.1 하드웨어 설계

쾌속조형시스템은 기계자체의 정밀도가 조형되는 조형물의 정밀도에 큰 영향을 미치기 때문에 진동발생을 억제하고, 레이저광의 이동이 원활하며 안정된 시스템이 요구된다.

본 연구에 필요한 하드웨어 제작으로는 먼저 전체 장치를 지지하는 프레임 제작하고, 레이저의 빛을 ON/OFF시키는 셔터와, 레이저광이 정확하게 조형판까지 도달할 수 있도록 직각으로 반사시키는 Mirror, 레이저광의 이동을 담당하고 있는 X-Y 테이블로 구성하여 제작하였다.

다음으로 수지면을 평활화시키는 밀대를 제작하였으며, 한 층의 조형이 끝나면 다음 층을 조형할 수 있도록 수지면을 수직으로 상하 이동시키는 Z축 엘리베이터를 제작하였다.

마지막으로 수지조와 수지가 경화되는 조형판 등을 제작하였다.

#### 3.1.1 광학부

광학부는 레이저발진기에서 나오는 특정파장의 빛을 집광하는 역할을 한다. 보통 레이저에서 나오는 빛은 직경이 1mm정도이므로 그대로 수지면상에 도달할 경우 경화층의 두께와 경화폭이 커지므로 정확한 형상을 조형할 수 없다. 따라서, 초점렌즈를 사용하여 레이저의 직경을 줄여야 한다.

광학계의 구성은 레이저발진기, 레이저 빛을 직각으로 반사하는 미러, 수지면에 정확한 초점을 잡는 초점렌즈 및 주사경로에 따라 레이저를 ON/OFF시키는 셔터로 구성된다.

### 3.1.2 이송구동부

정확한 3차원 형상의 조형을 위해서는 기계자체의 진동을 방지하고 레이저에서 여기된 빛을 수지면까지 정확히 전송해야 한다. 빛을 전송하는 방식의 대표적인 것이 X-Y 테이블 방식과 갈바노미러 방식인데, 갈바노미러 방식은 X-Y 테이블 방식에 비하여 주사 정밀도에 문제가 있고, 제작 가능한 크기도 제약이 있다.

반면에 X-Y 테이블 방식은 주사범위가 크고, 조형 정밀도가 우수하므로 본 연구에서 개발한 쾌속조형 시스템에서는 X-Y 테이블 방식을 채택하였다.

본 시스템에서 이송을 담당하는 부분은 X-Y 테이블 외에 경화된 수지를 지지하고 계속적으로 적층시키는 Z축 엘리베이터, 적층 후에 불균일한 수지면을 고르게 해주기 위한 수지평활용 밀대로 구성된다.

### 3.1.3 조형부

경화폭과 경화두께를 일정하게 하기 위해서는 레이저의 초점렌즈와 수지의 액면을 일정하게 유지시켜야 한다. 이를 위한 방법으로는 서보기구를 이용하여 수지를 담고있는 수지탱크를 경화두께 만큼 상하 이동시키는 방법과 수지탱크는 그대로 유지하고 수지가 조형되는 조형판을 상하 이동시키는 방법이 있다<sup>6)</sup>.

전자의 방법은 상하이동시 수지자체의 떨림이 생길 수 있으며 또한 서보기구에 상당한 부하가 걸리게 되므로 본 연구에서는 수지가 조형되는 조형판을 상하 이동시키는 구조를 채택하였다.

### 3.2 소프트웨어 설계

CAD로 설계된 형상은 수치적으로 표현되어 컴퓨터 메모리 속에 저장된다. 쾌속 조형시스템의 구동에 사용되는 소프트웨어는, CAD데이터를 수평면을 따라 절단하여 NC 코드로 변환하고, 이를 통하여 레이저의 궤적을 결정한 다음 레이저의 조사기구에 지령을 내리게 된다.

슬라이스 형상을 설계할 때에는 CAD데이터에 다음의 정보를 추가해야한다.

- ① 층의 두께를 설정한다.
- ② 제작 대상물에 support를 추가하여, 조형이 완성된 후 제거가 쉽도록 해야 한다.
- ③ 수지의 수축을 고려하여 형상 두께를 보정하

기 위한 읍셋량을 결정한다.

제작된 쾌속조형장치의 제어대상은 크게 두 부분으로 나누면 80c196과 PC이다. 80c196에서는 X-Y 테이블의 위치제어를 수행하며, PC에서는 레이저의 셔터, 밀대, Z축 스테핑모터의 제어를 담당한다. 제어 프로그램은 C언어로 작성하였고 Fig. 4는 제어의 흐름도를 나타내었다.

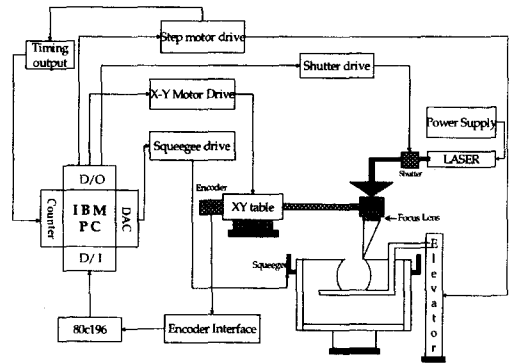


Fig. 4 Schematic diagram of PC Control

### 3.3 쾌속조형시스템의 제작

쾌속조형시스템을 구성하는데 있어서 가장 중요한 점은 운동시 발생하는 진동의 억제와 수평유지이다.

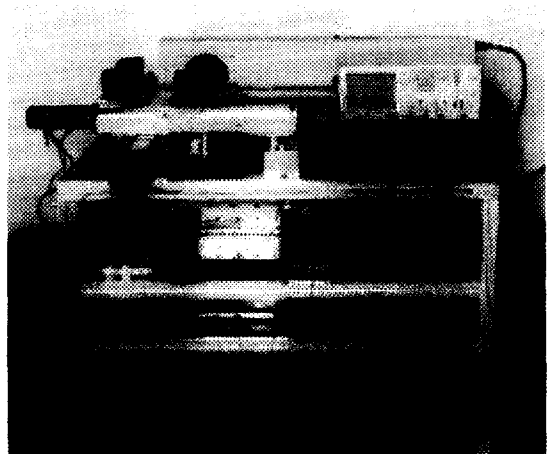


Fig. 5 Developed rapid prototyping system

Table 1 Construction elements of Stereolithography Machine

	Parts Name	Features
Frame Part	Frame	Profile 40×40(AL frame) 1000×800×800
	Bracket	AL,Plate,Steel Bracket
X-Y Table Part	X-Y Table	stroke 300×200 10mm/rev
	DC servo Motor	DC 30V, 4A Rated Torque : 2.5 kgcm Resolution 432 P/R
Z-axis Elevator Part	Step Motor	2 Phase 6V, 2A
	Reduction Gear	12.5 : 1
Optics Part	He-Cd Laser	325nm, UV wavelength
	Shutter	DC 24V, 3.8W
	Focus Lens	Convex Radius: 154.8mm focal length : 300mm
	Reflect Mirrors	Wavelength : 325nm Reflectance : 99.5%
Build Part	resin	Epoxyacrylate resin
	Resin vat.	acrylic
Squeegee	DC Motor	KGC :3448D

시스템에 진동이 있게되면 조형물의 형상이 변형되며, 적층이 잘되지 않는다. 그리고 정확한 수평이 유지되지 않으면 일정한 깊이의 경화깊이가 얻어지지 않아 조형물의 치수 정밀도에 문제가 생긴다. 따라서 X-Y 테이블의 구동부, 밀대부, Z축 엘리베이터의 이동시 발생하는 관성력이 수지저장조에 전달되어 수지면이 고르지 않게 되는 것을 방지해야 하며, 여기된 레이저광이 정확히 수지면에 도달할 수 있도록 각 반사거울의 수평유지와 고른 수지면을 얻기 위한 밀대의 부드러운 이송이 필수적이다.

이상의 사항을 고려하여 본 연구에서 개발한 쾌속 조형시스템의 사진과 주요 제원을 Fig. 5와 Table 1.에 제시하였다.

#### 4. 쾌속 조형시스템의 성능평가

쾌속조형법의 조형 메카니즘은 단면인 X-Y방향

과 깊이 Z방향이 다르고, 조형정밀도는 그 메카니즘에 의존한다. X-Y 단면상의 형상정밀도는 주로 레이저의 spot직경에 따라 다르다. 한편 Z방향 즉 깊이방향 형상정밀도는 레이저에 의한 수지의 경화깊이에 의존한다. 그러므로 형상정밀도 및 조형정밀도는 수지의 조형특성에 앞서 그 제작기구의 기구적 정밀도가 우선되어야 한다.

쾌속 조형시스템의 성능평가로는 우선 조형정밀도의 측정으로 (1) X-Y 방향의 주사선의 직각여부를 조사하고 (2) 단일 주사선을 연속 주사하였을 때 경화선사이의 중첩효과를 알아보고 (3) Fig. 7과 같은 성능평가용 모델을 선정하고, 형상을 제작하여 평가에 활용하였다.

첫 번째 실험은 X-Y방향으로 단위경화형상을 주사하여 그때 성형되는 주사선의 직각여부를 조사하였다. 조형조건은 주사속도를 100mm/sec로 하였고, 주사간격을 0.5mm로 하였다. 여기에 사용된 수지는 예폭시 계열의 점성이 높은 수지를 사용하였고 조형된 성형물을 현미경 사진 촬영하였다.

실험결과는 Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 수평방향의 주사선과 수직방향의 주사선이 서로 직각을 이루며 경화에너지의 중첩에 의하여 교차점 부분이 하나의 일체형으로 조형되었다.

두 번째 실험은 단일주사선을 수평방향으로 지그재그 연속 주사하여 각 주사선사이의 중첩효과를 확인하였다. 조형조건은 주사속도를 100mm/sec로 일정하게 하고 주사간격을 경화폭과 같은 0.4mm로 하였다.

Fig. 6(b)에서는 주사간격을 경화폭과 같게 하였을때 고른 수평면을 이루고 경화에너지에 의하여 주사선 사이가 서로 단단하게 결합되는 것을 볼 수 있다.

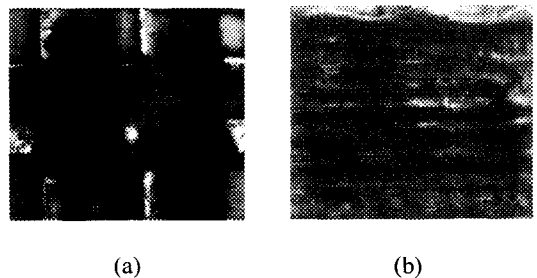


Fig. 6 (a) Cross-profile of single line cured(X-Y, ×100)  
(b) Plane-profile of multi line cured(X-Y, ×50)

일반적으로 경화되는 평면은 주사간격이 좁을수록 유리하지만, 주사간격이 경화폭보다 너무 좁게 조형할 경우 주사선끼리의 조사되는 경화에너지가 중첩되어 그 에너지가 조형면의 옆과 아래에 영향을 주어 경화깊이가 깊어지고, 전체적으로 경화두께가 두꺼워진다. 반면에 주사간격을 너무 크게 하면 경화선 사이의 경화구속력이 약화되어 경화층 표면이 수평하게 제형태를 이루지 못하므로 일반적으로 경화폭과 같게 조형한다.

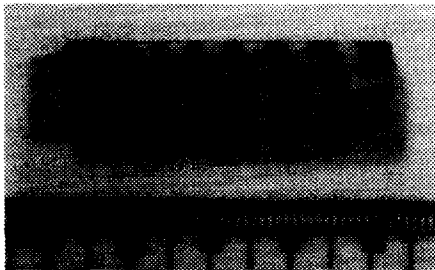


Fig. 7 Sample for system performance test

Table 2. Result of system performance test(Units:mm)

	a	b	c	d	e	f	g
CAD data	1.00	1.50	2.00	2.50	3.00	3.50	4.00
Mold size	1.12	1.62	2.12	2.61	3.14	3.64	4.15
Error size	-0.12	-0.12	-0.12	-0.11	-0.14	-0.14	-0.15

세 번째 실험은 Fig. 7과 같은 성능평가용 모델을 선정하고, 형상을 제작하여 평가에 활용하였다. 이 때의 형상치수는 Table 2와 같은 실제 치수보다 조금 큰 값이 나오는 것이 일반적이다. 이것은 형상제작시 수치 수축율을 고려하면 실제 치수보다 작은 형상이 만들어져야 하지만, 수치는 주사방향에 대하여 선형 경화와 동시에 경화에너지가 수치 내부에 남아 경화가 계속 진행되기 때문이다. 따라서 조형된 성능평가 모델의 형상치수를 기준으로, CAD 데이터와 비교하여 그 차이값에 대한 부분을 옵션값으로 조정하면 된다.

### 5. 실험에 의한 경화특성 고찰

2장에서도 언급된 바와 같이 수지의 경화특성은 빛의 세기, 노광량 등에 의하여 결정된다. 조형

에 관계된 광원의 물리량은 경화층의 두께와 주사 속도 등을 조정하여 제어할 수 있는데, 이러한 가공조건이 가공물의 형상정밀도에 미치는 영향을 파악하여, 최적의 가공조건을 결정하는 것은 매우 의미있는 일이다.

### 5.1 층두께와 표면거칠기

폐속 조형법은 제품을 일정한 두께로 연속적인 적층으로 가공하므로 형성되는 각 층들의 두께에 의하여 앞의 Fig. 3과 같은 단차가 생긴다. 이러한 단차에 의한 표면거칠기는 식 (2)에 의하여 구해질 수 있다. 이 표면거칠기를 줄이기 위해서는 경화형상의 윤곽의 기울기  $\phi$ 를 줄이거나 적층시 경사면의 조형방향을 수직에 가깝도록  $\theta$ 를 조정하거나 적층 두께 L을 작게하는 방법이 있다.

위의 방법중  $\phi$ 와  $\theta$ 를 조정하는 것은 실제 가공의 간섭이나 물체의 조형자세의 영향으로 작업자가 쉽게 선택할 수 없는 값인 반면에, 적층 두께를 결정하는 것은 비교적 손쉽게 바꿀 수 있지만 거칠기를 줄이기 위하여 경화두께를 너무 얇게 하면 조형시간이 증가되고 광원의 중첩에 의한 치수오차가 발생하므로 적절한 값을 선택하는 것이 중요하다.

### 5.2 주사속도와 경화깊이

주사속도가 경화깊이에 미치는 영향을 파악하기 위하여 Table 3과 같이 주사속도를 50mm/sec에서 200mm/sec까지 변화시키면서 경화된 단일주사선의 깊이를 측정하였다.

Table 3. Cure depth according to scan velocity

Length(mm)	200	200	200	200	200	200
Voltage(V)	5	7	10	13	15	20
Time(sec)	4.9	2.5	2	1.7	1.4	1
Velocity(mm/sec)	50.5	80.0	100.0	117.0	142.0	200.0
Cure depth(mm)	0.79	0.55	0.52	0.44	0.40	0.39

Fig. 8은 속도에 따른 실제 경화된 주사선을 나타낸다. 그리고 Fig. 9는 경화깊이를 측정한 그래프로 가장 저속인 50.5mm/sec에서 경화깊이가 0.79로 가장 깊게 나타났고, 속도가 증가할수록 Gaussian 곡선형태를 이루고 있다.

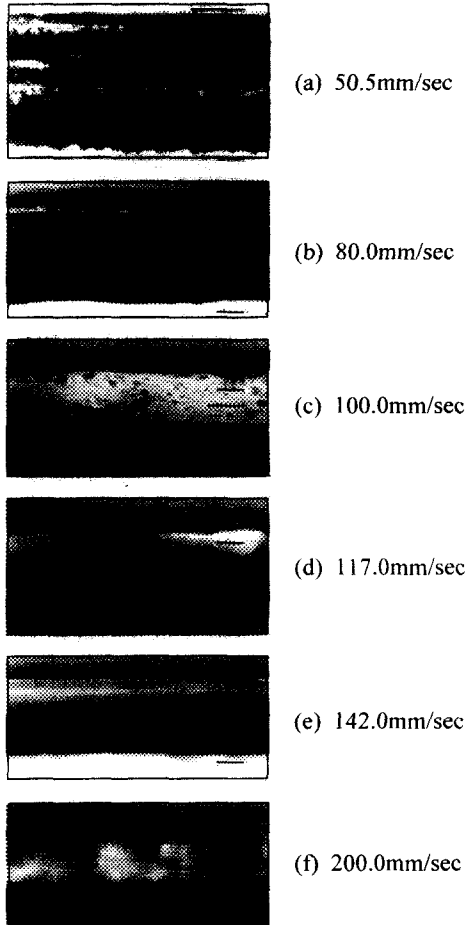


Fig. 8 Profile of single line cured with various projection speed

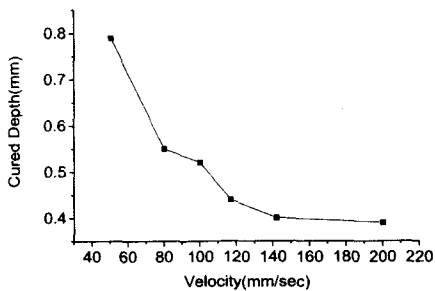


Fig. 9 The diagram of cure depth with various projection speed

여기에서 조사되는 레이저 빛의 강도와 수지의 흡수 계수가 일정할 때, 경화깊이는 주사속도에 반비례적인 관계로 식 (3)과 부합되는 것을 알 수 있다.

## 6. 결론

본 연구에서는 쾌속 조형기술의 한 방식인 쾌속 조형법을 이용하여 3차원 CAD 모델로부터 형상을 제작하는 시스템을 제작하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

[1] 개발된 시스템은 기존의 제품에 비하여 형상 정밀도에 대한 보정이 필요하지만 실험실 베이스의 시작품을 직접 제작함으로써 쾌속 조형기술의 국외 의존도를 줄여 수입 경비 절감 효과를 가져왔다.

[2] 시물레이션으로만 평가되던 쾌속 조형 기술에 관한 기존의 제어 알고리즘을 제작된 기계를 이용, 실험하여 직접 평가할 수 있었다.

[3] 직접 제작한 성능평가용 모델과 모델링한 CAD 데이터를 서로 비교함으로써 0.2mm이내의 정밀도를 얻을 수 있었다.

## 후기

본 연구는 한국과학재단의 연구지원에 의해 수행된 연구의 일부분입니다. 이에 관계자 여러분께 감사 드립니다.

## 참고문헌

1. Paul. F. Jacobs, Rapid Prototyping & Manufacturing, 1st edition, SME, 1992.
2. J.P. Kruth, "Material Increase Manufacturing by Rapid Prototyping Techniques," Annals of the CIRP Vol. 40, pp. 603-614, 1991.
3. M.J.Wozny, "DATA DRIVEN SOLID FREEFORM FABRICATION," IFIP Transactions B-3 : Human Aspects in Computer Integrated Manufacturing, pp. 71-82, 1992.
4. Lamont Wood, Rapid Automated Prototyping, 1st edition, Industrial Press Inc., pp. 11, 1993.
5. C-MET사의 SOUP 시스템 소개서.
6. 丸谷洋二 外, 光造型法, 日刊工業新聞社, pp. 15, 1990.