

# 소실 모형 주조법(EPC)의 스티로폼 패턴 성형을 위한 레이저 가공 기술

## Laser Processing for Styrofoam Pattern Manufacturing in EPC(Eliminative Pattern Casting)

인하대학교 대학원 기계공학과 최명수, 강경호  
인하대학교 기계공학과 김재도

### I. 서론

소실모형주조법은 스티로폼으로 원하는 형상의 모형(pattern)을 제작한 다음 이 모형을 점결제를 첨가하지 않은 건조한 모래 중에 묻고 모형에 용탕을 직접 주탕하여 주물을 제작하는 방법이다. 이 방법은 폐주사물의 문제를 해결할 수 있을 뿐만 아니라 코어의 제작이 필요 없고 후처리가 지극히 간단해지는 특징이 있다.<sup>(1)</sup> 자동차용 프레스 금형과 같은 중·대형의 프레스 금형에서도 이러한 소실주조법을 이용하여 프레스 금형의 주물을 제작하고 있다.

현재 소실모형주조의 패턴 제작은 거의 대부분 숙련자의 수작업에 이루어지고 있는 실정이다. 이러한 수작업에 의한 방법은 오랜 제작 시간과 높은 인건비로 인한 전체 금형 제작비용의 상승을 초래할 수밖에 없다.

기존의 수작업을 대체하기 위한 방법으로서 일반적인 수치제어 공작기계를 이용하여 스티로폼을 가공하는 방법이 있다. 그러나 스티로폼의 재료 특성상 가공면이 매우 거칠어지는 문제점을 가지고 있다.<sup>(2)</sup>

본 연구에서는 레이저 가공 시스템을 이용하여 레이저빔으로 스티로폼을 가공하는 새로운 방식을 도입하였다. 스티로폼 표면에 조사된 레이저빔은 순간적으로 스티로폼을 용융, 기화시켜 매우 짧은 시간에 제거시킨다.

쾌속조형(Rapid Prototyping)에 사용되는 공정을 역이용하여 원하는 형상의 3차원 CAD 데이터로부터 각 단면 형상 데이터를 얻어내고 각 단면의 형상에서 불필요한 부분을 레이저빔을 이용하여 제거시켜 나가는 방식을 이용하였다.<sup>(3-6)</sup>

### II. 실험방법

레이저에서 생성된 빔을 소프트웨어 부분에서 설정한 가공 경로를 따라 2차원 평면에 주사시키기 위하여 레이저 가공 시스템을 설계 제작하였다.<sup>(7-8)</sup> 설계 시 가장 우선적으로 고려한 사항은 빠른 시간 내에 정확한 형상을 가공할 수 있는 시스템을 만드는 것이다. 소프트웨어 부분에서 설정한 경로를 따라 피가공물을 최소한의 오차로 신속하게 가공하기 위해서는 높은 정밀도와 민첩한 특성을 가진 레이저 가공 시스템이 요구된다. 따라서 스텝 모터 컨트롤러를 소프트웨어적으로 설정된

가공 경로를 충분히 따라 갈 수 있도록 직선 보간 및 원호 보간이 가능한 것으로 선택하였고, LM 가이드도 정밀도와 강성이 우수한 것을 사용했다. 발생한 빔을 원하는 위치까지 보내는데 가장 중요한 요소 중의 하나인 반사 미러도 반사율이 매우 높은 미러를 사용하였으며, 전체 틀(body)과 함께 설계하여 정밀한 세팅 과정을 거쳐 장착하였다. 또한 쾌적한 작업 환경을 위하여 가공시 발생하는 유해한 가스를 제거할 수 있는 집진 장치를 부착하였다. Fig. 1은 제작한 실험 장치의 개념도이다.

#### 1. 레이저 빔 기초 가공 실험

CO<sub>2</sub> 레이저를 사용하여 실제 패턴 가공에 필요한 가공 데이터들을 얻기 위하여 기초적인 실험들을 하였다. 이를 위하여 출력, scanning 속도, 절단가스에 따른 선 가공 실험, Hole 가공 실험을 실시하였다.

이 실험은 각 변수들에 따른 기초 가공 데이터를 획득하여 실제 가공시 적절한 가공 폭과 가공 깊이 등을 조절할 수 있도록 하는 기초 가공 데이터 베이스가 되는 중요한 실험이다. 또한 각 조건에 따른 실험을 통해 가장 가공 품질이 우수한 변수의 범위를 선정하는 기초 실험이다.

#### 2. 윤곽면 절단 가공 실험

실제 가공을 위한 첫 번째 단계로서 윤곽면의 절단 공정이 있다. 가공되는 윤곽면은 지면과 수직을 이루어야 하며 정확한 치수 정밀도를 유지하여야 한다. 그러나 레이저 빔의 특성상 절단 과정에서 기울기가 발생하며, 레이저 빔의 열에 의한 열영향부의 발생으로 실제 빔의 직경보다 더 크게 제거되는 치수의 오차가 발생한다.

이 실험은 스티로폼의 절단 실험을 통해 가공 형상을 관찰하여 그 형상 특징과 최적의 윤곽면 가공을 위한 데이터를 얻어내기 위한 실험이다.

#### 3. 평면 가공 실험

일정한 레이저 출력과 scanning 속도로 왕복 이송시키면 일정한 깊이의 평면을 가공할 수 있다. 가공 평면의 수평도를 관찰하여 실제 가공시 빔의 출력이나 scanning 속도를 적절히 조절할 수 있도록 하기 위한 실험이다.

가공 효율을 위하여 레이저 빔은 집속하지 않은 빔을 사용하였으며 각 속도와 출력에 따른 실험을 진행하였다. 가공할 평면의 크기는 100×100 (mm)이며 실험에 사용할 스티로폼은 150×150×200 (mm)의 것을 사용하였다.

#### 4. 경사면 가공 실험

레이저를 이용한 스티로폼 패턴 제작에 있어서 경사면의 가공성을 파악하기 위하여 간단한 경사면 형상을 조형하는 실험을 실시하였다. 레이저 빔의 조사 범위를 점차 줄여나감으로써 계단 형상의 경사진 형상을 얻을 수 있다. 레이저 빔은 평면 가공 실험에서처럼 집속하지 않은 빔을 사용하였다.

### III. 결과 및 고찰

#### 1. 가공 변수에 따른 가공 깊이와 폭

200×200×50 크기의 평면 시편에서 레이저빔의 출력과 scanning 속도별 가공 깊이와 가공 폭 실험 결과 값을 Fig. 2과 Fig. 3에 나타내었다.

Fig. 2에서 볼 수 있듯이 가공 깊이는 출력 5W 에서는 scanning 속도에 따른 변화가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 일정한 가공 깊이가 요구되는 평면 가공에서는 출력 5W에 scanning 속도 50mm/s를 설정하는 것이 가공 품질과 가공 시간 면에서 가장 유리함이 판명되었다.

레이저빔의 출력이 20W 이상에서는 scanning 속도에 매우 민감하게 가공이 되어지는 결과를 얻었는데 이는 평면 가공에서보다는 패턴의 가장자리를 형성하는 윤곽 가공이나 구멍 가공에 유리하게 이용할 수 있다.

가공 폭의 경우는 깊이와 달리 각 출력과 scanning 속도에 따라 선형적으로 변하는 것을 Fig. 3를 통해 볼 수 있는데, 이는 가공 깊이 방향으로는 채 기화되지 못한 용융상태의 스티로폼이 응고, 경화되어 가공을 방해하는데 비해 폭 방향으로는 이와 같은 현상이 거의 없기 때문이다. 또한 가공 방향이 깊이 방향으로 되어지는 2축 가공시스템의 특성상 가공 폭은 깊이 방향보다 선형적이 되고 scanning 속도에 덜 민감한 것으로 보인다.

실제 면 가공이나 경사면 가공에 있어서 한번의 가공 경로 당 일정한 가공 깊이와 폭을 유지해야만 일정한 평면이나 기울기를 가진 경사면을 형성할 수 있으므로 레이저빔의 출력과 scanning 속도 설정이 매우 중요함을 알 수 있다.

#### 2. 표면 거칠기

Fig. 4에 20mm/s의 scanning 속도에서와 절단 가스 Ar의 사용 여부에 따른 가공된 표면의 거칠기 형상을 나타내었다. 같은 면적을 가진 평면을 같은 경로로 3회 연속 가공하여 실험하였는데 이는 형상 가공 시 수반되는 Z 축 방향의 경화 여부를 알아보기 위함이다.

가공후의 표면 거칠기는 5W 레이저 출력에서 가장 우수한 표면 거칠기를 나타내었다. 20W 이상의 출력에서는 Fig. 4 (d)와 같이 가공 부위가 급속한 온도 상승과 하강으로 인해 경화현상이 발생하여 표면 거칠기가 좋지 않게 되는 현상이 발생하였다. 이는 레이저빔의 열을 받은 부위는 국부적으로 용융, 기화 현상을 일으키는데 레이저의 출력이 20W 이상이 되면 용융량이 커지면서 용융된 액상 상태의 내부가 미처 모두 기화되지 못하고 다시 냉각되어 경화된 부위가 생기게 때문이다. 이러한 현상은 Fig. 4 (b)와 Fig. 4 (c)에서 보는 것과 같이 절단 가스 사용으로 어느 정도 방지할 수 있지만 이후 형상 가공에서도 계속 영향을 미치므로 경화되는 현상을 최소화하기 위해서는 10W 이상의 낮은 출력을 이용한 가공이 필요로 함이 판명되었다.

### 3. 가공 단면 형상

Fig. 5는 레이저 출력 5W로 빔을 직선 이송시켜 얻어진 빔의 scanning 속도별 가공 단면의 모습이다. 다른 여러 출력에서도 가공 단면의 형상은 Fig. 5와 비슷한 경향을 나타내고 있으며, 출력의 영향보다는 이송 속도의 영향을 크게 받는 것으로 판단된다. scanning 속도가 느릴수록 단위 시간당 단위 면적에 에너지가 많이 흡수되므로 가공 깊이 방향으로 깊어지는 현상을 보인다.

또한 가공 단면의 형상은 scanning 속도가 크면 단면 형상이 'U' 형을 보이며 계속 속도가 느려지면서 점점 단면형상이 'V' 형을 가지게 됨을 알 수 있다. 실험 결과 적절한 표면 거칠기와 Z방향 형상을 위한 단면의 형상은 'U' 형이 우수한 특성을 나타내었다.

표면 거칠기와 빔의 단면 형상을 종합하여 보면 적절한 빔의 출력은 5W에서 경화 현상이 비교적 적게 나타나며 표면의 거칠기와 다면 형상이 적절한 상태를 보이고 있는 것을 알 수 있었다.

### 4. Hole 가공 실험

Fig. 6에 레이저빔의 출력과 절단가스 압력에 따라 가공된 Hole의 직경을 나타내었고 Fig. 7은 실험에서 실제 가공된 Hole의 단면을 나타낸 그림이다. Fig. 6에서 볼 수 있듯이 절단 가스 사용 유무에 따라 그 가공되는 Hole 직경에 많은 차이가 있음을 알 수 있다. 이는 절단 가스의 분사가 냉각 작용을 하여 레이저빔과 닿지 않는 측면의 용융을 억제하여 주기 때문이다.

절단 가스를 사용하였을 시 빔의 출력 증가에 따라 가공 직경이 조금씩 커지는 경향이 있기는 하나 그 차이는 작은 것을 볼 수 있다. 본 실험에 사용된 레이저 빔 직경 3.5mm보다 외곽에서 가공된 영역은 피가공재인 스티로폼이 용융 온도가 120℃에 불과하기 때문에 흡수된 열 에너지에 의하여 용융이 일어나게 되며, 열전도율이 매우 낮은 재료이기 때문에 각 출력별 가공 직경의 차이가 크지 않게 되는 것으로 사료된다.

Fig. 7에서 절단 가스를 사용하지 않은 Hole은 가공면이 균일하지 않음을 볼 수 있다. 이를 통해 실제 패턴 가공 시 가공 정밀도와 표면 품질 측면에서 절단 가스의 사용은 필수적인 요소임을 알 수 있다.

### 5. 윤곽 가공 실험

Fig. 8은 30W 빔 출력, 10mm/s 빔 scanning 속도, 1kgf/cm<sup>2</sup>의 cutting gas 압력으로 분사하여 윤곽 가공을 한 그림이다. 평면 시편에서 직선 이송하여 시험한 Fig. 2과 Fig. 3의 결과를 보면 이때 가공 깊이와 폭은 각각 21mm와 8mm로 가공되는 것을 알 수 있다. 깊이 방향으로 21mm를 초과하여 가공할 필요가 있을 때는 scanning 속도를 10mm보다 낮게 설정하면 가공이 가능하나 저속으로 가공 시 불

균일한 가공깊이, 절단 가스의 영향 부족으로 인한 경화 현상, 가공 시간의 증대 등의 부정적인 요소가 발생하므로 같은 경로로 반복 가공하는 것이 유리한 것으로 사료된다.

윤곽 가공은 가공하려는 패턴의 외곽 형상의 기초를 만드는 단계인데 레이저빔의 가공 특성상 가공 폭이 매우 넓게 되므로 오차 보정이 필요함을 알 수 있다.

## 6. 경사면 가공 실험

경사면 가공을 하는 방법은 세 가지로 분류할 수 있는데 피가공물의 경사에 따라 빔 출력을 증가시키면서 가공하는 방법, scanning 속도를 느리게 하여 가공 깊이를 증가시켜가며 가공하는 방법, 일정한 빔 출력과 scanning 속도로 경사에 따라 가공 경로의 반복 횟수를 달리하여 가공하는 방법이다. 본 실험에서는 Fig. 9과 같은 경사면을 가공 경로 반복 횟수를 달리하는 방법으로 생성하였다. 가공의 특성상 가공 면이 계단식으로 형성이 되므로 평면 가공이나 윤곽 가공 보다 그 가공성이나 효율성이 떨어지는 것으로 나타났다.

## 7. 형상 가공 실험

Fig. 10의 (a) (b)는 위에서 실시한 실험들의 결과 값을 기초로 하여 가공한 금형용 패턴이다.

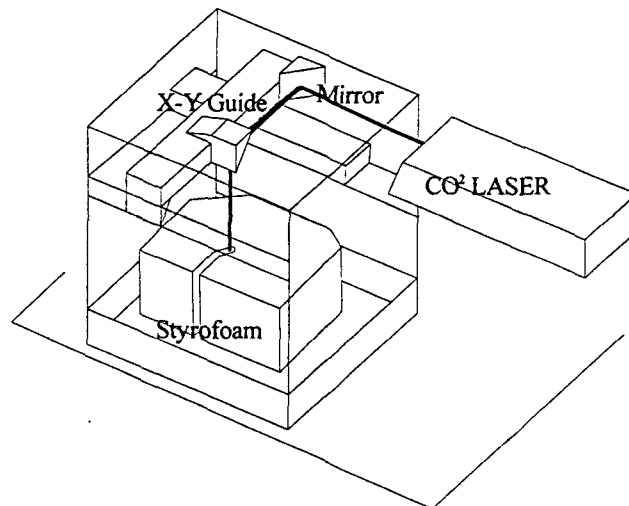


Fig. 1 Diagram of laser system

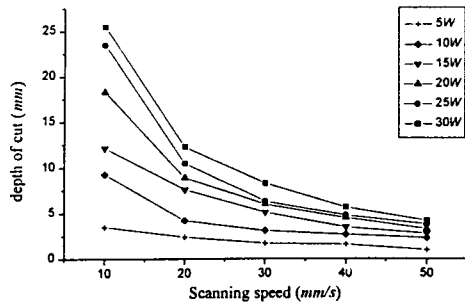


Fig. 2 Depth of cut at various scanning speed and laser power

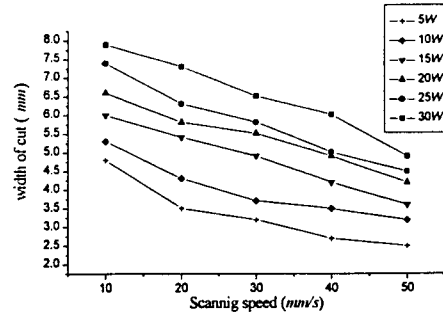


Fig. 3 Width of cut at various scanning speed and laser power

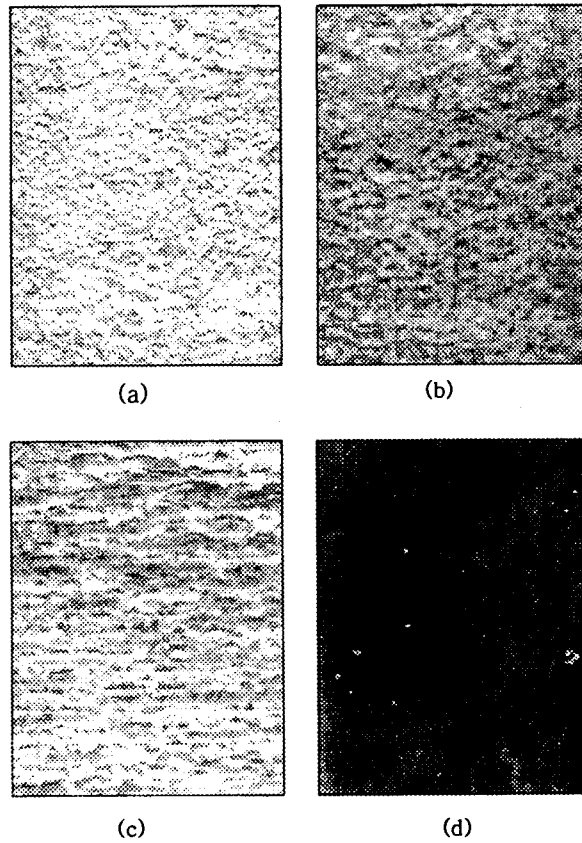


Fig. 4 Surface roughness of 20mm/scanning speed  
 (a) 5W, 1.0kgf/cm<sup>2</sup> cutting gas (b) 10W, 1.0kgf/cm<sup>2</sup> cutting gas  
 (c) 10W, No cutting gas (d) 20W, No cutting gas

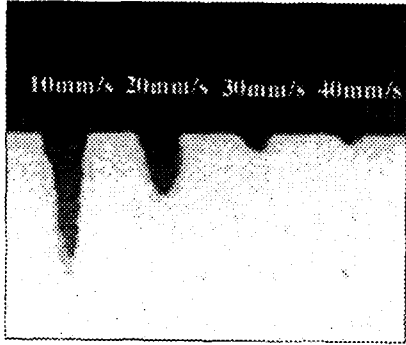


Fig. 5 Cross-sectional shape of various scanning speed

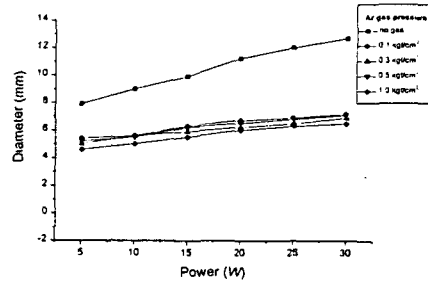


Fig. 6 Hole diameter at various laser power

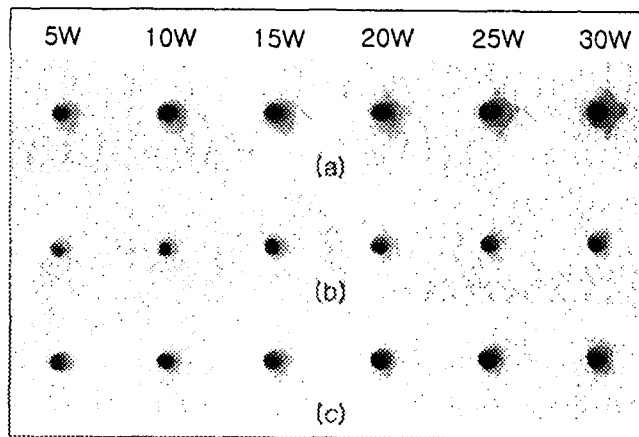


Fig. 7 Picture of Hole process

- (a) No cutting gas
- (b) 1.0kgf/cm<sup>2</sup> cutting gas
- (c) 0.5kgf/cm<sup>2</sup> cutting gas

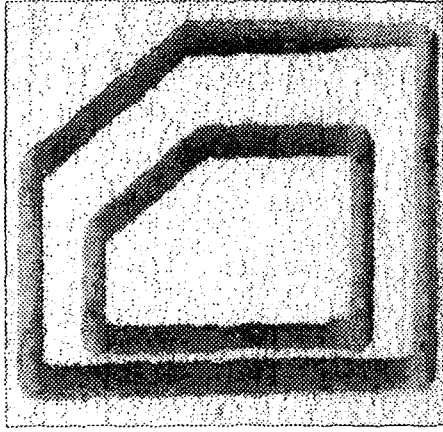


Fig. 8 Trimming outer contour

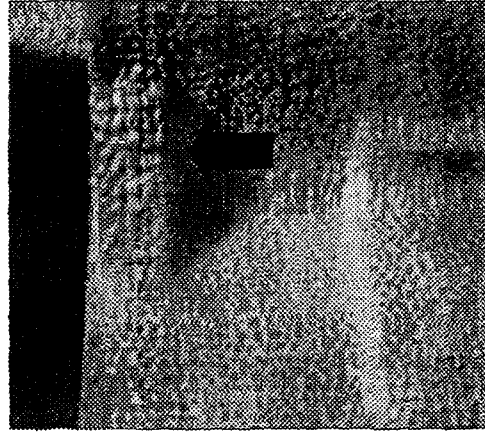
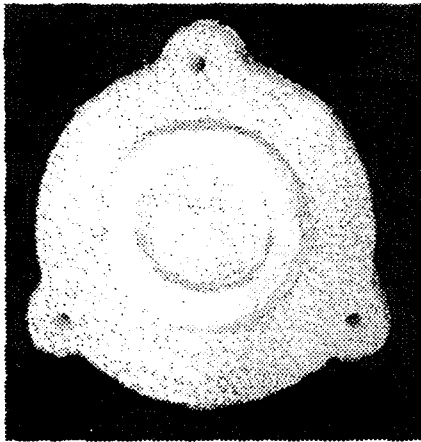
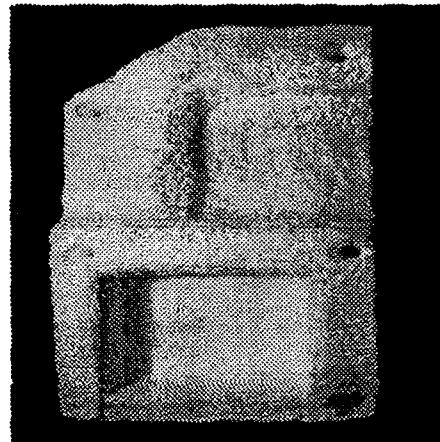


Fig. 9 Process of Inclined plane



(a)



(b)

Fig. 10 Completed die pattern



#### IV. 결론

레이저 가공 시스템을 이용한 프레스 금형용 패턴 제작에 관한 연구를 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 레이저 가공 시스템을 이용한 금형용 스티로폼 패턴 가공에 있어서 레이저빔의 출력, scanning 속도, 절단 가스가 가장 중요한 가공 변수임을 알 수 있었다.
2. 일정한 가공 깊이가 요구되는 평면 가공에서는 출력 5W에 scanning 속도 50mm/s를 설정하는 것이 가공 품질과 가공 시간 면에서 가장 유리함이 판명되었다.
3. 가공 시 발생하는 경화 현상을 최소화하기 위해서는 절단 가스의 사용이 필수적이며, 그 분사 압력이 1kgf/cm<sup>2</sup> 일 때 가장 최적의 조건으로 가공 할 수 있었다. 경화되는 현상을 최소화하기 위해서는 10W 이상의 낮은 출력을 이용한 가공이 필요함을 확인하였다.
4. 레이저빔의 출력이 20W 이상에서는 scanning 속도에 매우 민감하게 가공이 되어지는 결과를 얻었는데 이는 패턴의 가장자리를 형성하는 윤곽 가공이나 구멍 가공에 유리하게 이용할 수 있다.
5. 가공시간과 효율을 높일 수 있는 가공 경로의 생성, Laser 빔의 On/Off, 가공 폭의 보정을 통해 수작업보다 정밀도가 높은 패턴을 제작할 수 있었다.

#### V. 참고문헌

1. 최성갑, 송광호, "주조공학", 보문당, 1996
2. 박정환, "자동차 프레스 금형의 스티로폼 패턴 가공을 위한 전용 CAM시스템 개발 및 활용", 98학술발표회 논문집, 한국CAD/CAM학회, pp. 249- 253, 1998
3. 박근, 윤정환, 양동열, 조종래, "쾌속 3차원 조형법과 유한요소해석을 연계한 소성가공 금형설계의 동시공학적 접근방법", 한국정밀공학회지, 제13권, 제8호, pp. 146-153, 1996
4. 최홍태, 김준안, 이석희, 백인환, "Stereolithography를 위한 STL 파일로부터 단면 정보 변환 시스템의 개발", 한국정밀공학회지, 제12권, 제11호, pp. 140-147, 1995
5. 이우중, 이용한, 홍유석, "Rapid prototyping system을 위한 형상 정보 변환 절차", 대한산업공학회지, 제 18권, 제1호, pp. 63-80
6. 안대건, 김준안, "Stereolithography로 3차원 형상 가공을 위한 레이저 조사 경로 생성에 관한 연구", 한국정밀공학회지 추계학술대회논문집, pp. 687-692, 1994
7. Fumie ABE, Kozo Osakada, "Fundamental Study of Laser Rapid Prototyping of Metallic Parts", int. J. Japan Soc. Prec. Eng., Vol. 30, No. 3, pp. 278-279, 1996
8. David miller, Carl Deckard, John Williams, "Variable Beam Size SLS Workstation and Enhanced SLS Model", Rapid Prototyping Journal, Vol. 3, No. 1, pp. 4-11, 1997