기술논문 한국정밀공학회지 제15권 제3호 (1998년3월)
Journal of the Korean Society of Precision Engineering Vol. 15. No. 3. March. 1998.

본 연구는 1996년도 교육부 학술연구조성비(ME96-E-09)에 의하여 연구되었으며 이에 감사드립니다.

RP를 이용한 고차압밸브 디스크의 시제품 제작 시스템 확립

최 민 식*, 박 문 선**, 강 범 수***

Establishment of Prototyping System for Drag-Valve Disk Using RP

Min-Shik Choi*, Moon-Sun Park** and Beom-Soo Kang***

ABSTRACT

Rapid prototyping becomes widely used in design and manufacturing of mechanical and aerospace engineering. Here a drag valve disk consisted of complicate configuration has designed by CAD, and prototyped by a stereolithography apparatus (SLA) to confirm the design configuration. Also the prototyped valve disk was used for checking if it could be applied for casting from the view point of accuracy, cost, and time. The rapid-prototyped disk by SLA was compared with a high-speed machined disk by MAKINO V55, and it is found that the prototyping of the disk by SLA appears more economical, more accurate and faster than by machining with MAKINO V55.

Key Words : RP(Rapid Prototyping, 쾌속조형), SLA(StereoLithography Apparatus, 광조형 장치), NC Manufacturing(NC가공), Drag Valve(차압밸브), Valve Core(밸브코어).

1. 서 론

여러 공업의 분야에서 생산되는 제품의 형상과 구조는 기능 및 성능의 향상과 사용자의 욕구를 만족시키기 위해서 갈수록 복잡한 형태로 바뀌고 있다. 이와 동시에 치열한 기업간의 경쟁을 감안할 때 제품의 개발에서 시장에의 접근까지 소요되는 시간을 줄이는 것은 기업의 경쟁력으로 직결되고 있다. 이로 인해 제품의 개발시 선행되는 프로토타입(prototype)의 제작이 신속하고 정확하게 이루어질 수 있다면 제품의 양산시 문제가 될 수 있는 부분을 빠르게 확인하고 검증할 수 있으므로 개발에서 양산까지의 주기를 줄여 경쟁력을 높일 수 있을 것이다. 하지만 제품의 형상과 구조가 복잡해짐으로 인해 곡면으로 이루어진 부분이 대부분이며 공구가 들어갈 수 없는 형상을 가진 것도 적지 않다. 또한 검증되어야 할 항목이 부품간의 피팅이나 간섭여부등의 일정 이상의 정밀도를 요구하게 될 경우 숙련된 기술자라 하더라도 프로토타입의 제작이 힘들거나 불가능하기까지 하며, 가능하다 하더라도 많은

* 부산대학교 항공우주공학과 대학원
** 대우정밀공업주식회사
*** 부산대학교 항공우주공학과

시간과 경비를 요하게 된다.

이러한 문제점의 해결책으로 현재 국내 · 외의 학계와 산업계에서는 활발히 그 연구가 진행 중인 RP(Rapid Prototyping)의 중요성이 부각되고 있는데, 미국은 항공 관련 분야의 경우 25% 정도가 사용하고 있으며 해마다 50%에 가까운 성장률을 보여 왔다[1]. 학계 및 산업계에서의 주된 사용 분야는 설계의 확인 및 검토를 비롯하여 각종 실험에의 활용, 주조용 패턴, 주형제작 등이다[2][3][4]. 일본의 경우 1995년 현재 전기, 전자, 자동차, 항공, 의료등의 분야에서 250대 이상의 RP 장비를 도입해서 설계의 확인, 주조의 마스터등의 용도로 사용하고 있다.[5][6] 또한 유럽의 경우 영국, 벨기에등 여러 국가에서 항공, 인베스트먼트 주조용, 의료용 등의 용도로 RP 시스템을 활용해오고 있다[7][8][9].

국내에서는 지난 1991년 대우자동차를 시작으로 쌍용자동차, LG전자 등이 RP 시스템을 수입 또는 개발해서 디자인 검토, 부품피팅, 기능테스트등의 용도로 사용하고 있으며[10], 학계에서도 플라스티신을 이용한 모사실험에 사용할 다이제작, 단면정보변환에 관한 연구, 최적 성형방향의 결정에 관한 연구 등 RP에 관한 관심과 연구가 계속되고 있다[11][12][13].

현재까지 개발되어 있는 RP 시스템으로는 광조형장치(SLA, Stereolithography Apparatus), 선택적 레이저 소결법(SLS, Selected Laser Sintering), 용융침전 모델링법(FDM, Fused Deposition modeling), 박막적층법(LOM, Laminated Object Manufacturing), SGC(Solid Ground Curing), BPM(Ballistic Particle Manufacturing)등이 있다. 그 중에서도 해상도가 높고 표면 처리 상태와 정밀도가 좋은 SLA가 전세계적으로 가장 많이 쓰인다.

본 연구에서는 CAD 시스템 및 SLA를 활용하여 고차압 밸브에 사용되는 미로형 디스크의 시제품을 제작하는 시스템을 확립하였다. 이 시스템의 완성으로 설계과정에서 도출되는 미로의 형상을 CAD로 구성하여 직접 제작 검토할 수 있게 된다. 이와 더불어 실용 부품적용 방안에 대한 검토도 동시에 수행하여 이의 적용 가능성을 보여주고 있으며, 고속 머시닝센터로 제작된 시제품과 SLA로 제작된 모델의 정밀도, 소요시간, 비용 등을 비교 · 평가하였다.

2. SLA를 통한 시제품 제작과정

2.1 SLA의 시제품 제작원리

SLA는 미국의 3D Systems社에 의해 개발된 시스템이다. 3D Systems社는 1987년 SLA-1을 시작으로 SLA-250, SLA-500등의 장비를 시판하고 있다. SLA의 기본적인 제작원리는 Fig.1에 보여지고 있는 바와 같이 컴퓨터에 의해 제어되는 레이저를 일정두께의 액상광경화성 수지에 주사해서 얇은 층을 만들고 다시 그 위에 같은 두께의 액상 광경화성 수지를 두고 그 위층을 경화시키는 과정을 반복해서 시제품을 만든다는 것이다.

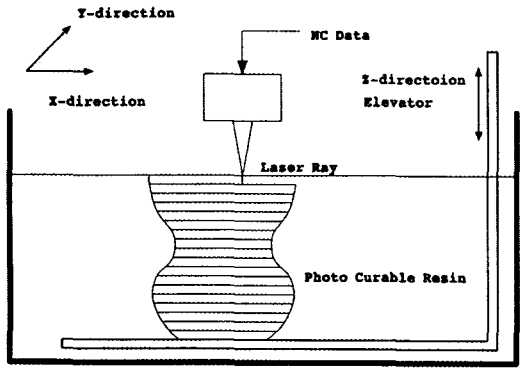

Fig. 1 Manufacturing Principle of SLA

주사되는 레이저는 레이저의 ON/OFF 시기와 주사경로를 포함하고 있는 일종의 NC 데이터에 의해 제어되어진다. 현재 사용되고 있는 여러 가지의 RP 시스템에 따라서 다소간의 차이는 있지만 NC 데이터를 만드는 기본적인 과정을 다음과 같다.

먼저 3차원 모델링이 가능한 CAD 시스템을 이용하여 제작하고자 하는 시제품의 3차원 모델을 만든다. 이렇게 만들어진 모델은 STL 포맷이라는 형태로 변환되어져야 한다. STL 포맷은 3차원의 형상을 삼각형의 패치만으로 표현한 것으로 대부분의 CAD 시스템은 고유의 포맷을 STL 포맷으로 변환하는 변환자를 가지고 있다. STL 포맷에 대해서는 2.2절에서 좀더 자세히 설명하겠다. STL 데이터는 다음으로 슬라이싱(Slicing)을 통한 단면정보 추출 작업을 거친다. 슬라이싱은 z=h인 평면과 STL 파일의 모델을 구성하고 있는 삼각형들과의 교점을 추출하는 작업을 말한다. 이렇게 슬라이싱된 데이터로부터 중복된 점을 찾아 폐루프를 만드는 과정을 통해 단면정보가 완성된다. 슬라이싱 과정을 통해 단면정보를 추출하는 과정은 다른 논문을 통해 잘 알려져 있으므로 생략하도록

한다[12]. 이제 3차원 모델은 유한개의 단면정보로 바뀌었다. 이 각 단면에 대해서 레이저의 주사경로를 결정하고 ON/OFF 시기를 넣은 후 각 단면의 NC 데이터사이에 z-방향의 이동거리를 넣으면 SLA를 위한 NC 데이터가 완성된다.

본 연구에서 사용된 SLA는 분말을 사용하는 SLS등과는 달리 제작 특성상 지지대(support)를 필요로 하는 시스템이다. 물을 제외한 모든 물질은 액상에서 고상으로의 상변화시 밀도증가로 인해 수축하게 된다. 제작하려는 제품의 형상과 구조에 따라서는 이러한 수축으로 인해 발생되는 뒤틀림이 정확도에 심각한 영향을 줄 수도 있으므로[14] 모델링시 함께 지지대를 설계하거나 STL 포맷으로의 전환후 STL 포맷의 지지대를 만들어 결합시키기도 한다. 또한 SLA로 제작되는 모든 모델은 작업후 작업대와의 분리가 용이하도록 첫 번째 단면을 경화시키기 전에 기본지지대(base support)를 조형해야 한다. 고차압 밸브의 디스크는 별도의 지지대를 필요로 하지 않는 형상이어서 기본지지대만을 사용하여 제작하였다.

2.2 STL 포맷

여러 가지 CAD 시스템들은 각기 나름대로의 형상 표현을 위한 데이터의 포맷을 가지고 있다. SLA로 프로토타입을 만들기 위해서는 각기 다른 이러한 포맷들을 STL(STereoLithography) 포맷으로 만들어 주어야 한다. STL 포맷이란 3차원의 폐곡면을 삼각형 패치(patch)로 표현한 것으로 세꼭지점의 좌표와 그에 의해서 만들어지는 면에 Fig. 2와 같이 오른손 법칙을 만족하는 수직한 벡터로 구성되어 있으며 Fig. 3과 같이 이웃한 삼각형 정점끼리 연결되는 VV (Vertex-to-Vertex) Rule을 만족해야한다.

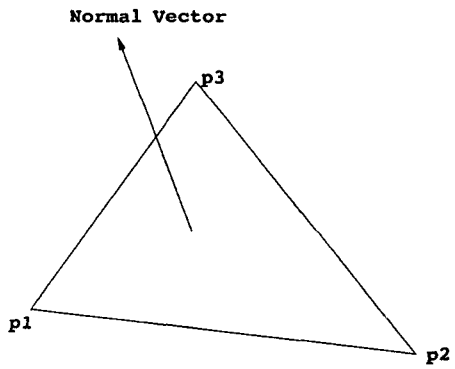

Fig. 2 Right hand rule

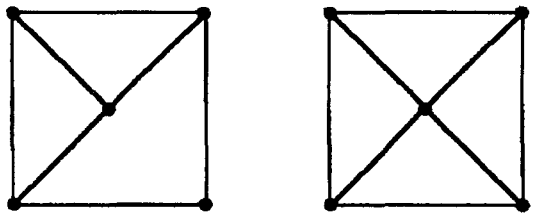

Fig. 3 Vertex-to-Vertex rule

Fig. 4에 STL화일의 기본 형식이 나타나 있는데, 대부분의 CAD 시스템에서 솔리드(Solid)로 모델링하였거나, 면으로 모델링한 경우 모든 인접한 면끼리 정확하게 맞아떨어지면(match) STL 포맷으로의 전환이 가능하다. 이 방식의 개발자인 Dave Albert는 모든 CAD 시스템에서 가능한 이러한 범용성때문에 이러한 포맷을 선택했다고 한다[15].

```
solid valve
  facet normal 0.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00
    outer loop
      vertex  1.65930e+02  5.29400e+01  1.78400e+01
      vertex  1.85930e+02  5.29400e+01  1.78400e+01
      vertex  1.65930e+02  5.29400e+01  9.44827e+00
    endloop
  endfacet
  facet normal 0.000000e+00 0.000000e+00 0.000000e+00
    outer loop
      vertex  1.65930e+02  5.29400e+01  9.44827e+00
      vertex  1.85930e+02  5.29400e+01  9.44827e+00
      vertex  1.85930e+02  5.29400e+01  1.78400e+01
    endloop
  endfacet
  .
  .
  .
endsolid valve
```

Fig. 4 Sample of STL format

하지만 STL 포맷에는 몇 가지의 단점들이 있다. 첫째는 CAD 시스템에 의해서 만들어진 모델의 근사에 그칠 수밖에 없다는 점이다. 평면의 경우에는 삼각형 패치로 표현하는 것이 큰 문제를 일으키지 않지만 곡면의 경우 그 정도가 심해지므로 많은 수의 삼각형 패치가 필요하게 된다. 두 번째로, 위와 같은 이유와 삼각형 패치만으로 형상을 표현해야 한다는 특징 때문에 CAD 파일에 비해서 데이터의 크기가 커진다는 점이다. 그렇기 때문에 패치의 개수는 STL 포맷으로의 전환시 요구되는 정밀도와 알고리즘에 의해서 결정되어져야 한다. CAD 데이터의 STL

포맷으로의 전환시 정확도는 주로 코드 높이(chord height)에 의해서 제어된다.

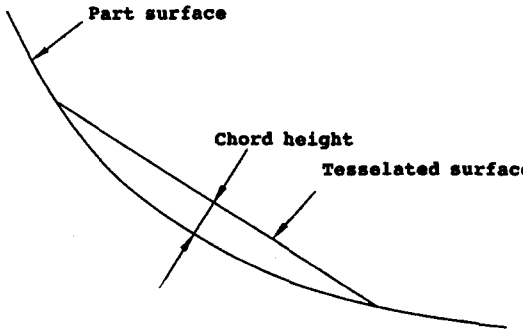

Fig. 5 Chord height

Fig. 5에 표시된 바와 같이 코드 높이는 모델링된 형상의 표면과 삼각형의 한 변간의 최대거리로 정의된다.[14] 이 값에 따라서 삼각형 패치의 개수가 달라지게 되므로 원하는 정확도에 해당하는 적정한 값을 선택하는 것이 중요하다. 지나친 정확도로 인해서 너무 거대한 크기의 파일을 만들게 되면 슬라이싱시 많은 시간을 요구하게 되며 정확도가 낮으면 슬라이싱시에 요구되는 시간은 적겠지만 곡면부의 형상이 다각형과 같이 나타내어지게 되므로 정확도 선택시 주의해야 할 것이다.

3. 고차압 밸브의 디스크 제작

3.1 고차압 밸브

고차압밸브는 원자력발전소, 화력발전소, 석유화학, LNG, 정유공장등에서 고압의 액체, 증기, 물, 석유화합물, 화학약품과 같은 고압의 액체, 기체를 다룰 수 있도록 설계된 밸브이다. 이 밸브의 핵심적인 부품인 디스크는 Fig. 6과 같이 직각으로 꺾인 유로를 가지고 있는데 유체가 이러한 유로를 지나가게 함으로써 압력을 다단계로 저하시켜 유속의 제어를 가능하게 한다.

이렇게 꺾인 유로의 형상에 의한 저항으로 압력의 저하와 함께 출구의 유속을 안정한 수준까지 낮출 수 있으며 디스크 개수의 조절로 압력과 유속 변화의 폭을 조절할 수 있다. 고차압 밸브의 위와 같은 역할을 통해 과도한 유속으로 인한 침식, 소음, 진동, 동작 제어성의 저하 등을 제거할 수 있다. 본 연구에서는 앞서 설명한 과정을 통해 밸브 디스크의 형상을 모델링하고 광조형 장치를 이용하

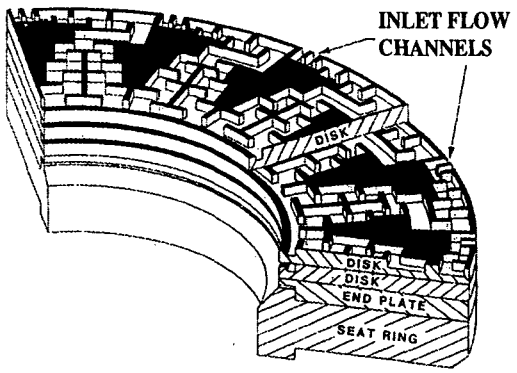

Fig. 6 Shape of path of disk

여 고차압 밸브의 디스크를 제작하는 시스템을 확립하였다.

3.2 SLA를 이용한 디스크 시제작

모델링은 광조형 장치로 시제품을 만드는 첫 단계이다. 본 연구에서는 모델링 시스템으로 Parametric Technology社의 Pro/Engineer를 사용하였다. Pro/Engineer는 여러 가지 CAD 시스템과의 호환성이 우수하며 STL 포맷으로의 전환을 지원하는 3차원 모델러이다.

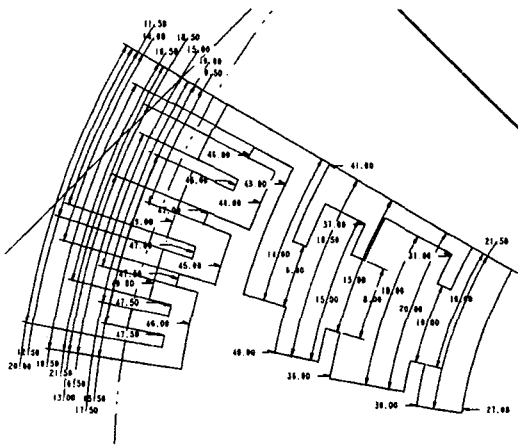

Fig. 7 Configuration and dimensions of a path of disk

Fig. 7은 모델링된 디스크 유로의 형상과 치수를 나타낸 것으로 전체지름이 200mm이고 두께는 10mm, 유로의 깊이는 5mm이다. Fig. 8은 모델링된 디스크를 코드 높이를 0.02mm로 설정하여 STL 포맷으로 변환한 것으로 6792개의 삼각형 패치로 구성하였다. 앞서 설명된 과

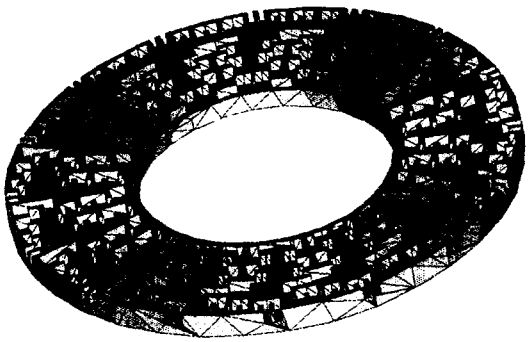

Fig. 8 Part model of disk in STL format

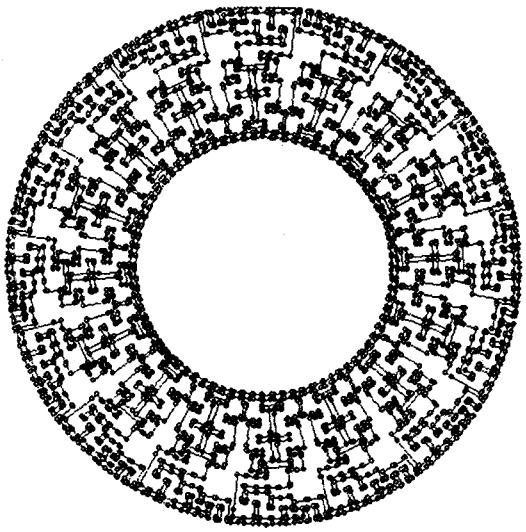

Fig. 9 Closed-loops of cross-section of disk

정을 통해서 단면정보를 추출하였는데 이렇게 만들어진 디스크의 단면 정보가 Fig. 9에 나타나 있다.

각 페루프에 대해서 NC 데이터를 만들어 시제품을 제작하였는데, 제작에 사용된 장비는 SLA-250이다. 각 층의 두께는 0.1mm이며 치수오차는 ±0.01mm이다. He-Cd 레이저와 Urethane Acrylate계 수지를 사용하였다. 제작에 소요된 시간은 7시간 20분이었으며, 후가공은 샌드페이퍼를 사용하였다. Fig.10은 제작된 디스크의 형상이다.

3.3 머시닝센터를 이용한 디스크 제작

NC 가공은 복잡한 형상을 기계 가공할 때 사용되는 대표적인 가공방법이다. 본 연구에서는 시제품 제작시 RP

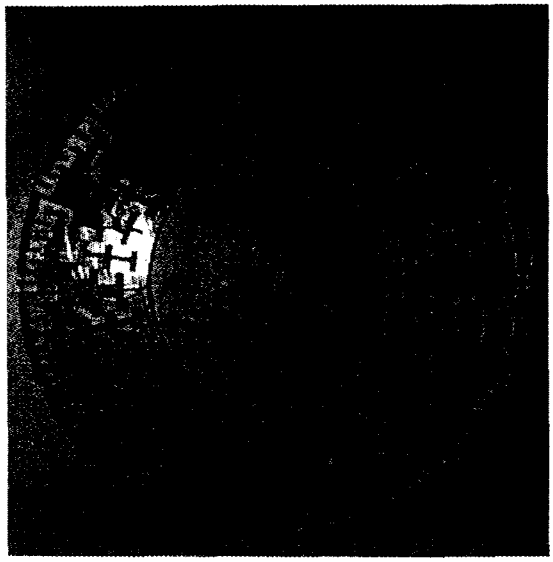

Fig. 10 Prototype of disk made by SLA-250

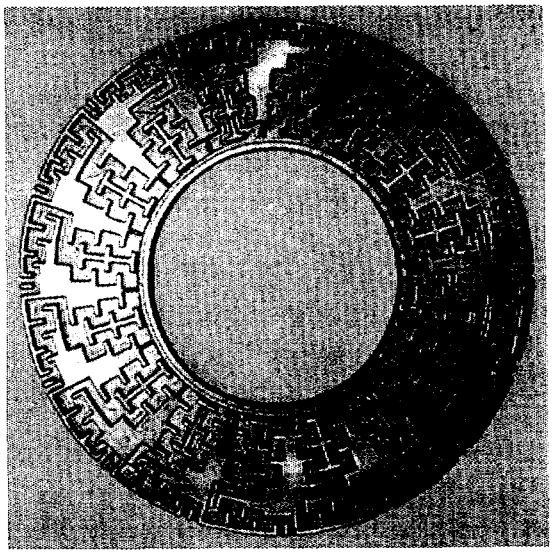

Fig. 11 Prototype of disk made by machining center (MAKINO V55)

와 NC 가공과의 장단점을 비교하기 위해서 NC가공을 통한 시제품을 제작했다. 사용된 장비는 부산대학교에 도입되어 있는 'MAKINO V55' 이라는 고속가공용 장비로 개략적인 성능은 다음과 같다. x, y, z방향으로의 이송량은 각각 900mm, 500mm, 450mm이며 최대 이송속도는 50,000mm/min, 최대 적재중량은 700kg이다. 주축은 축심 냉각 시스템을 채용하여 발열량을 최소화시키며

최대회전수는 20,000rpm이다. 위치결정정도는 ±2㎛이다. NC 데이터는 한 스텝에 0.3mm의 두께를 가공하도록 했으며, 황삭과 정삭의 두단계로 나누어 프로그램했다. 공구는 일본 COBE社의 2 ball end mill, 2 flat end mill을 각각 황삭과 정삭에 사용하였다. 사용된 공구의 개수는 황삭용이 4개, 정삭용이 3개였다. 황삭시 주축의 회전수는 15,000rpm, 이송속도는 1,000mm/min, 정삭시는 주축의 회전수를 18,000rpm에 이송속도는 1,000mm/min으로 설정하였다. 가공에 사용된 재료는 200mm×200mm×16mm의 연강이며, 사각형의 재료에서 바깥쪽 모서리와 안쪽의 구멍은 NC가공 후 선반가공을 통한 것이다. Fig.11이 NC가공으로 제작된 디스크이다.

3.4 RP를 이용한 시제품과 NC가공의 비교

이상과 같이 RP와 NC가공을 통해서 시제품을 제작해 보았다. 각 제작방식에 소요된 시간, 비용 등을 Table 1에 정리하였다. 소요된 시간, 비용은 모델링이나 데이터의 전송에 소요된 것은 제외한 것으로 오직 제작 및 가공에 소요된 시간, 비용만을 고려한 것이다. 또한 제작 후 Fig. 12에 나타나있는 바와 같은 여러 부분에서 측정된 치수오차가 백분율로 Table 2에 정리되었다. 각 부분의 오차는 SLA를 통해 제작된 시제품은 Moire 좌표 측정장치를 이용하여 측정하였으며 NC가공을 통해 제작된 시제품은 독취현미경을 통해 측정되었다.

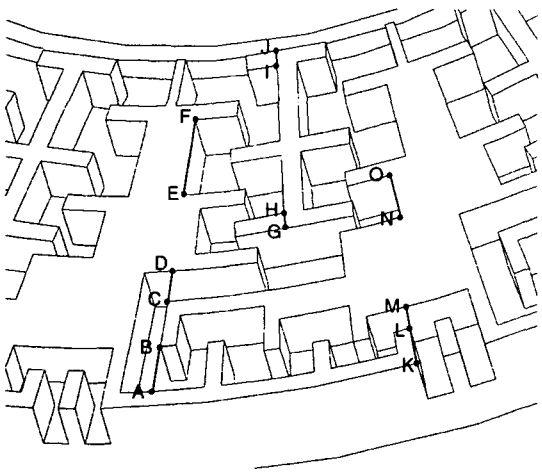

Fig. 12 The locations where the mismatching percents in length between CAD model and prototypes manufactured had been measured

Table 1 Comparision of SLA and NC

항목 / 방법	소요시간	재료비	장비사용료
SLA제작	7.3시간	수지값: 150,000원	35,000원/시간*7.3시간=255,500원
NC가공	20시간	코팅공구(2Ø ball end mill 4EA+2Ø flat end mill 3EA) = 340,000원	200,000원(기본사용료) +20,000원/시간*20시간=600,000원

Table 2 The errors in length between CAD model and prototypes manufactured at variable positions

위치 / 방법	$\overline{AB}$	$\overline{CD}$	$\overline{EF}$	$\overline{GH}$	$\overline{IJ}$	$\overline{KL}$	$\overline{LM}$	$\overline{NO}$
SLA제작	-1.94%	-6.65%	-1.85%	+7.54%	+8.14%	3.18%	-5.11%	-1.98%
NC가공	-2.00%	-8.25%	-4.37%	+16.50%	-1.5%	3.60%	-7.66%	-5.00%

Table 1과 2를 통해서 알 수 있듯이 본 연구에서 제작된 디스크와 같은 형상이 복잡한 제품의 시제품을 만들시에는 RP를 통한 제작이 NC가공을 통한 제작보다 시간, 비용, 정밀도면에서 뛰어남을 알 수 있다. NC가공을 통해서 만들어진 시제품은 예상했던 것보다 표면이 깨끗하지 못했다. 머시닝 센터의 위치결정 정밀도는 ±2㎛이지만 가공되는 유로가 복잡하여 공구의 가공량이 많아짐으로서 가공중 공구의 마모가 심해져 표면정밀도가 떨어진 것으로 생각된다. NC가공의 경우 효율적인 NC데이터의 작성과 더불어 가공조건과 장비사용자의 숙련도에 따라서 가공품의 정밀도와 제작에 소요되는 시간이 달라질 수 있다. 하지만 RP를 통해서 제품을 제작할 경우는 NC가공에 비해서 작업자의 숙련정도를 크게 요구하지 않는다. 물론 RP를 통해서 제작된 시제품의 기계적 성질이 금속재료를 기계가공을 통해서 제작한 시제품에 비해서 열등한 것은 사실이다. 하지만 복잡한 제품의 설계의 확인, 부품간의 간섭 등의 목적으로 활용될 시제품이나 실험들의 용도로 강도를 크게 요구하지 않는 부분에 사용되는 부품, 주조용 마스터 및 패턴 등으로 활용한다면 제품의 개발 및 양산까지의 시간, 비용을 크게 줄일 수 있을 것으로 판단된다.

4. 결 론

본 연구에서는 침식, 소음, 진동을 일으키는 고속, 고압 유체의 압력과 속도의 제어를 위해 산업현장에서 많이 사용되고 있는 고차압 밸브의 핵심 부품인 디스크를 모델링

하여 SLA로 시제품을 제작하였다.

1) RP기술의 특성과 시제품 제작원리를 이해하고 전반적인 공정에 관한 지식과 문제해결 방법을 설명하였다.

2) 고차압 밸브의 제작시 기초가 되는 시제품을 제작하고 시뮬레이션이나 실험 등을 통해서 보다 나은 동작성능을 보이는 형상이 제시되었을 경우 수정, 보완하여 최종 시제품을 단기간 내에 만들어 낼 수 있는 기반을 마련하였다.

3) RP를 통한 제작과 NC가공과의 장단점을 비교하였다. 여기에서 RP를 통한 제작이 NC가공을 통한 모델의 제작시간보다 시간, 비용 및 정밀도면에서 효과적이었다.

참 고 문 헌

1. "Rapid prototyping gives productivity a boost", AEROSPACE AMERICA, October 1995.
2. Dornfeld, W., "Direct Dynamic Testing of Stereolithographic Models", ASME International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, The Hague, Netherlands, June 13-16, 1994.
3. Nagarsheth, V., Jacobs, P., Santin, D., Wise, S. and Yoder, J., "CBC Injection Mold Tooling for Thermoset Plastic Parts using StereoLithography Patterns", Proceedings of the SME Rapid Prototyping and Manufacturing '94 Conference, Dearborn, MI, April 1994.
4. Mueller, T., "Recent Developments in the Use of Rapid Prototyping Techniques to Prototype Die Cast Parts", Proceedings of the SME Rapid Prototyping and Manufacturing '94 Conference, Dearborn, MI, April 1994.
5. Shinjiro Yamada, "Status of Rapid Prototyping and Tooling Fabrication in Japan", Proceedings of the SME Rapid Prototyping and Manufacturing '96 Conference, Dearborn, MI, April 1996.
6. J. Adachi, T. Hara, N. Kusu and H. Chiyokura, "Surgical Simulation using Rapid Prototyping", The Forth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, Ohio, June 1993.
7. P.D. Thomas, D.J. Roore and R. Moffatt, "Rapid Prototyping of manufacture of scale model aircraft components", First National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research, Buckinghamshire College, UK, November 1995.
8. H. Tsang and G. Bennett, "Rapid Tooling - direct use of SLA moulds for Investment Casting", First National Conference on Rapid Prototyping and Tooling Research, Buckinghamshire College, UK, November 1995.
9. Bart Swaelens, J.P. Kruth, "Medical Applications of Rapid Prototyping Techniques", The Forth International Conference on Rapid Prototyping, Dayton, Ohio, June 1993.
10. 이용한, 정인래, 정준희, 장재대, "시작프로세스의 혁명, 래피드 프로토타이핑", CAD & 그래픽스, 1994년 11월.
11. 박근, 신민철, 양동렬, 조종래, 김종수, "모델재료와 SLA 시금형을 이용한 터빈블레이드 열간 단조공정의 모사실험", 한국소성가공학회지, 제4권 제4호, pp. 335-344, 1995.
12. 최홍태, 김준안, 이석희, 백인환, "Stereolithography를 위한 STL파일로부터 단면정보 변환에 관한 연구", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 445-450, 1995.
13. 허정훈, 이건우, "SLA를 이용한 신속시작작업에서 최적 성형방향의 결정", 한국정밀공학회 춘계학술대회논문집, pp. 552-558, 1995.
14. Paul F. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing", First Edition, Published by Society of Manufacturing Engineers, 1992.
15. "Interfacing CAD and Rapid Prototyping", Rapid Prototyping Report, pp. 4~6, January 1992.
16. PRO/Engineer User's Guide Release 17.0, PARAMETRIC THCHNOLOGY Co.