

원자력 기기·부품의 평가용 모형 제작을 위한 쾌속조형공정의 적용

Application of Rapid Prototyping Technology in the Prototype Manufacturing for Evaluation of NPP Components & Equipments

박치용, 김진원
한국전력공사 전력연구원
대전시 유성구 문지동 103-16

손현기*, 최홍석*, 양동열*
* 한국과학기술원
대전시 유성구 구성동 373-1

요 약

원자력발전소의 기기, 구조물 및 부품의 시작품 또는 모형은 설계를 수행한 후 기기 및 부품의 성능, 조립방식 및 설계 개선 또는 확인을 위하여 필요하며, 가동원전 부품의 손상원인 분석을 위해서도 필요하다. 본 논문에서는 기계적 적층제작방식(layer-by-layer)을 통하여 복잡한 3차원의 형상을 쉽게 제작할 수 있는 쾌속조형(Rapid Prototyping)공정의 특성을 먼저 설명하고 3차원 입체 CAD 모델링과 상용 쾌속조형공정의 일종인 박판재료적층(Laminated Object Manufacturing)공정을 이용하여 복잡한 형상을 지닌 팬(fan)을 시제품으로 하여 쾌속조형모형을 제작하였다. 이를 이용하여 제품개발 초기에 필요한 설계 확인 및 변경을 신속하게 수행할 수 있으며, 또한 제작된 쾌속조형모형을 원형(pattern)으로 하여 진공주조, 로스트 종이(lost-paper) 주조 등 다양한 2차공정(secondary process)을 이용하여 시작품(prototype)을 제작할 수 있다. 이를 통해 기존의 CNC 등 절삭가공을 이용한 시작공정에 비해 시간과 비용을 크게 절감할 수 있으며, 팬, 터빈 블레이드(turbine blade) 등과 같이 복잡한 자유곡면(free surface)을 가진 기타 발전 및 전력계통 부품의 제작에도 효율적으로 응용될 수 있다는 점을 확인하였다. 또한, 원전 운영 시 발생할 수 있는 여러 가지 물리, 화학적 결함(FAC 등)을 가시화(visualization)함으로써 결함에 대한 이해도를 높일 수 있어서 결함의 효과적 해결에 크게 기여할 수 있다.

Abstract

A brief overview of rapid prototyping technology in which a part with complex shape can be produced easily and rapidly in a layer-by-layer additive manner is given in this article. In addition, a prototype model of a complex fan is manufactured using three-dimensional solid CAD modeling and Laminated Object Manufacturing (LOM), a rapid prototyping technology. This enables designers to verify and modify design rapidly at an early stage of product development; and the prototype model of a fan can be used as a pattern for various secondary casting process such as vacuum casting, lost-paper casting to make prototypes of a fan. It has been shown that the combination of three-dimensional solid CAD modeling and rapid prototyping technology can reduce greatly the cost and time for prototyping of fans and turbine blades in comparison with conventional CNC machining. It should also be noted that rapid prototyping technology enables the visualization of various physical and chemical defects at a nuclear power plant so that it can help engineers understand those defects in an effective way.

1. 서론

국내외 시장이 점차적으로 다품종소량생산 체제로 전환됨에 따라, 산업분야 전반에서 제품모델의 다양화와 빈번한 제품설계변경이 절실하게 요구되고 있다. 이러한 현실에 효과적으로 대처하고, 제품의 경쟁력을 제고하기 위해서는 제품의 설계에서부터 시작품(prototype) 생산에 이르는 제품개발(Product Development) 과정에 소요되는 비용과 시간을 절감하는 것이 필수적이라고 할 수 있다.

기존의 CNC 가공 등 절삭 가공을 위주로 한 전통적인 시작품 및 시작금형(die)/몰드(mold) 제작방법으로는 시장의 빠른 변화, 소비자의 다양한 요구 변화, 소량생산 등에 효과적으로 대처하기 어렵다. 또한, 제품개발에서 빈번히 발생하는 설계 변경 및 시행착오로 인한 시작품, 시작금형/몰드 수정 또는 제작으로 인한 비용 상승이 불가피하다. 따라서, 전통적 제품개발방식을 탈피하고 제품 다양성과 소량생산 및 시작기간과 비용의 절감에 유연하게 부응할 수 있는 새로운 시작품 및 시작금형/몰드 제작방법의 개발 또는 도입이 절실히 요구되고 있다.

1990년대 미국에서 개발된 “쾌속조형기술”(Rapid Prototyping Technology)은 제품의 3차원 입체 CAD 데이터로부터 광경화성수지(photopolymer), 플라스틱, 종이, 금속 등의 재료를 이용하여 설계된 제품의 시작품(prototype)을 금형/몰드 없이 제작하거나 시작금형/몰드를 저가의 비용으로 신속하게 제작할 수 있는 새로운 개념의 공정으로 ‘광조형법’(Stereolithography)이라는 이름으로 개발된 공정을 필두로 하여 다양한 공정들이 개발되어 현재는 약 20여 가지 이상의 공정들이 상용화되어 미국, 유럽, 일본 등 전세계적으로 시작품 및 시작금형/몰드 제작을 비롯한 여러 분야에서 활발하게 이용되어 제품개발에 소요되는 비용과 시간을 혁신적으로 절감하고 있다. 쾌속조형기술(RP)은 개발 초기에는 주로 자동차와 항공산업 등에서 응용되었으나, 현재는 전자 및 가전 산업, 중공업 등을 비롯하여 거의 모든 제조관련분야에서 1)시작품 제작을 통한 설계된 제품의 디자인 검증(design verification)과 2)2차공정(secondary processes)을 위한 원형(pattern)제작에 응용되어 제품개발에 소요되는 시간과 비용을 절감하는 필수적인 공정으로 사용되고 있다. 또한, 소량생산의 경우에는 쾌속조형기술을 이용하여 직접 제품을 제작하거나, 또는 2차공정과 결합하여 금형/몰드를 제작하여 제품을 생산할 수 있다. 현재 쾌속조형기술을 응용하여 제품개발 비용과 시간을 크게 절감한 많은 사례들이 세계적으로 보고되고 있으며, 그 응용분야도 지속적으로 확산되고 있다.

본 논문에서는 복잡한 3차원의 입체 형상을 쉽게 제작할 수 있는 쾌속조형공정의 원리와 대표적인 상용 쾌속조형공정(Rapid Prototyping processes)들의 특징을 설명하고, 3D CAD 모델링과 상용 쾌속조형공정 중의 하나인 박판재료적층(Laminated Object Manufacturing)공정을 이용하여 CNC 가공 등 기계가공으로 제작이 거의 불가능하거나 비경제적인 팬(fan)의 시작품 제작에 응용함으로써, 원전관련 제품 중 복잡한 형상의 부품 제작 시 요구되는 설계 검증에 소요되는 시간과 비용의 절감 가능성을 알아보고자 한다.

2. 쾌속조형공정(Rapid Prototyping Processes)

1987년 최초의 쾌속조형기계가 등장한 이후로 다양한 쾌속조형공정과 기계가 개발되어 현재는 전세계적으로 23개 사(미국 9개, 일본 8개, 독일 3개, 싱가포르, 중국, 이스라엘 각 1개 사)에서 쾌속조형기계를 제작 판매하고 있으며, 새로운 쾌속조형공정의 개발을 위한 많은 연구들이 국내외 여러 대학, 연구소 및 기업 등지에서 활발히 진행되고 있다. 각 공정에 따라 서로 다른 재료, 열원, 공정방식이 사용되고 있지만, 3차원의 입체를 적층하여 제작하는 기본 원리는 동일하다. 쾌속조형기술의 제작원리는 다음과 같다. 제작하고자 하는 제품을 3차원 CAD 모델링하고, 이 CAD 파일로부터 STL파일을 얻는다. STL파일은 쾌속조형기계의 입력파일(input file)으로써 제품의 표면만을 삼각형 격자(triangular patch)를 이용하여 나타내었을 때 각 삼각형의 꼭지점 좌표와 단위방향벡터를 저장한 파일이다. 기존 CNC 절삭가공의 CAM 데이터나, CAE 해석결과로부터도 입력파일을 생성할 수도 있다. 이 파일을 쾌속조형기계에 입력하면 삼각형 격자로 표현된 제품의 CAD 모델이 컴퓨터 상에서 한 방향으로 일정한 두께로 나누어진다(slicing). 이 나누어진 2.5차원의 얇은 층(layer)들을 쾌속조형기계에서 여러 가지 방법을 이용하여 순서대로 한번에 한 층씩(layer-by-layer) 만들면서 동시에 이전 층(previous layer)에 붙여나가면서 제품

을 제작하게 된다. 즉, 3차원의 형상을 2.5차원의 얇은 층의 집합으로 변환하여 순차적으로 한 층씩 적층해 나가는 것이 쾌속조형기술이다. 이와 같이 쾌속조형기술은 그 공정 특성상 복잡한 3차원 형상을 금형/몰드 없이 쉽게 제작할 수 있다. 본 장에서는 현재까지 개발된 상용 쾌속조형공정들 중에서 대표적인 공정들의 원리 및 특징을 설명하고자 한다.

2.1 광조형법(Stereolithography)

3D Systems사(미국)의 광조형법(SLA)은 액체상태의 광경화성 수지에 레이저광(laser beam)을 선택적으로 조사(scanning)하여 한 층씩 적층해 나가는 방법이다. 광조형법의 제작원리는 다음과 같다. <그림 1>에서 먼저 평판 형태의 받침대가 들어 있는 용기 안에 광경화성 수지를 채운다. 이때 수지의 표면과 받침대의 표면은 서로 일치하게 된다. 공정이 시작되면, 받침대가 수지 표면에서 일정한 간격(layer thickness)만큼 수지 안으로 잠긴다. 그러면 실제적으로 받침대 위에 얇은 한 층(최소 0.025 mm)의 광경화성 수지가 형성된다. 다음에 그 층 위로 레이저광을 제작하고자하는 제품의 단면 형상대로 조사하면 레이저광이 조사된 부분은 수지의 특성상 경화되면서 받침대에 붙게된다.

레이저광이 조사되지 않은 나머지 부분은 액체상태를 그대로 유지하고 있다. 한 층에 대한 레이저광의 조사가 끝나면, 다시 받침대가 일정한 간격만큼 내려가서 앞서 경화된 층위로 같은 두께의 액체 수지가 깔리게 된다. 다음에 이전과 같이 레이저광을 다음 층의 단면 형상대로 조사하면 레이저광이 조사된 부분 만 경화되면서 아래층과 붙게 된다. 이때 사용되는 단면 정보는 제품의 STL파일로부터 얻어진다. 이 과정을 계속적으로 제품의 단면들을 모두 제작할 때까지 반복하면 원하는 제품을 제작할 수 있다. 돌출된 형상(overhangs)이 있는 제품을 제작하는 경우는 지지대(support)를 처음 층부터 동시에 제작하게 되며, 제작이 끝난 후 지지대를 제거한다. 적층이 끝난 제품은 아직 완전히 경화(curing)가 끝난 상태가 아니기 때문에 경화로(furnace)에 넣어 일정시간 동안 경화를 시키게 되며 이 과정 중에 광경화 수지의 특성상 휨이나 비틀림이 발생하여 제품의 치수 정밀도가 떨어질 수 있다. 1999년 말까지 세계적으로 쾌속조형기계 중 가장 많은 1,597대의 SLA 장비가 운용되고 있다. 광조형법으로 제작된 제품은 정밀도가 우수하고, 얇고 미세한 형상도 잘 표현할 수 있는 특징이 있다.

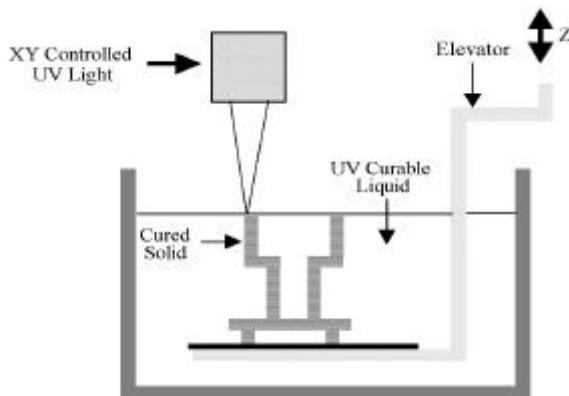


그림 1 광조형법(SLA) 공정 원리도

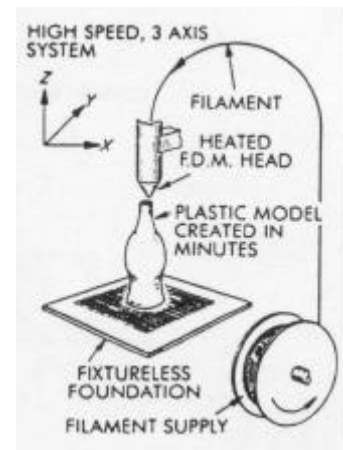


그림 2 용착조형공정 (FDM) 공정 원리도

2.2 용착조형공정(Fused Deposition Modeling)

Stratasys사(미국)의 용착조형공정(FDM)의 공정 원리는 다음과 같다. <그림 2>에서와 같이 선(filament) 형태의 폴리에스터(polyester), ABS 등의 플라스틱 재료가 가열된 압출금형과 유사한 형태의 노즐 내부로 이송(feeding)된다. 가열된 노즐을 통과하는 동안 재료는 용융되며, 이때 노즐이 단면 형상대로 이동하면서 용융재료를 붙이는 방식으로 입체 형상을 제작하는 공정이다. 한 층의 제작이 끝나면, 받침대가 층 두께만큼 하강하여 다음 층을 제작하게 된다. 돌출부에 대해서는 지지대를 만들게 되는데, 용착조형공정의 경우는 지지대용 노즐이 별도로 있으며, 지지대는 부서지기 쉬운 구조로 적층이 되며, 제작 완료 후에 손으로 쉽게 제거 할 수 있다. 1999

년 말 기준으로 1,285대의 FDM 장비가 판매되었으며, 이것은 SLA 장비 다음으로 많이 설치된 것이다

용착조형공정에서는 레이저를 이용하지 않기 때문에 기계장치가 간단하고, 사무실 환경에서도 사용할 수 있는 이점이 있다. 최근에는 치수가 큰 제품의 제작을 위해 대형 장비가 개발되어 시판되고 있으며, 공정 속도를 개선하기 위해 자력(magnetic force)을 이용하여 노즐을 이송함으로써 노즐의 이송 속도를 크게 증가시켰다. 또한, 수용성 지지대 재료가 개발되어 더욱 간편하게 지지대를 제거할 수 있다. 'WaterWorks'로 명명된 이 지지대(support)를 이용하면 FDM 장비에서 제작된 ABS 부품을 water-based solution에 담그기만 하면 지지대가 화학적으로 분해되며, 지지대가 닿았던 부분도 깨끗하고 매끈하게 유지되는 장점이 있다. 제품 정밀도의 개선으로 디자인 검증 및 후가공을 통해 시작금형/몰드 제작을 위한 원형(pattern) 제작에도 사용되고 있다.

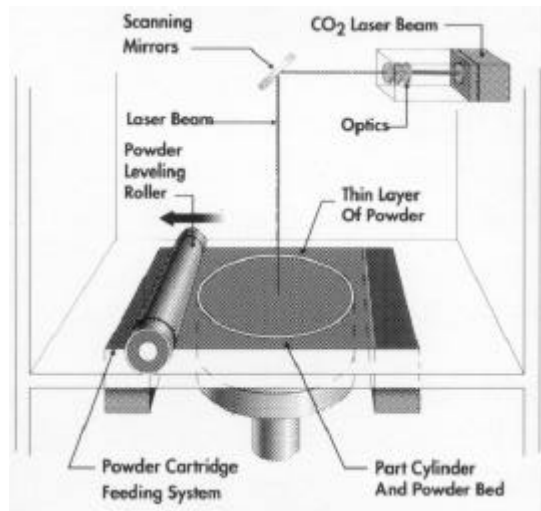


그림 3 선택적 레이저 소결공정(SLS) 공정 원리도

2.3 선택적 레이저 소결공정(Selective Laser Sintering)

DTM사(미국)의 선택적 레이저 소결공정(SLS)은 미세 고체 플라스틱 분말을 균일하게 한 층도포한 후 제품 단면의 형상대로 레이저광을 조사하여 고체분말을 용융 결합시켜 3차원 형상을 제작하는 공정이다. 레이저광은 광학기구를 이용하여 이송/조사된다. 광조형법의 경우와 같이 레이저광이 조사되지 않은 부분의 분말은 재사용이 가능하다. 사용하는 분말의 크기가 표면의 조도를 결정하게 되며, 고분자 재료 분말을 사용하기 때문에 기능성 부품(functional part)을 직접 제작 할 수 있다는 장점이 있다. 폴리아미드(polyamide), 폴리탄산에스테르(polycarbonate), 구리 폴리아미드(copper polyamide) 등 다양한 종류의 재료가 개발되어 있다. 또한, RapidTool이라는 공정에서는 고분자가 표면에 코팅된 강(steel)분말을 사용하여 레이저 소결하고 황동(bronze)을 용침(infiltration)하여 시작금형을 직접 제작할 수도 있다. 이 경우에는 소결과 용침의 다소 번거로운 후처리 공정을 거치게 된다. 그밖에도 정밀주조 원형 제작용으로 'CastForm PS'를 출시하였으며, CastForm으로 제작된 제품을 정밀주조(investment casting)용 원형으로 사용하면 약 0.02% 정도의 재(ash)가 몰드에 남는 것으로 알려져 있다.

2.4 박판재료 적층공정(Laminated Object Manufacturing)

Helisys사(미국)의 박판재료적층공정(LOM)은 종이를 재료로 사용하여 입체 형상을 제작하는 공정이다. <그림 4>에서 먼저 아래 쪽 면에 접착제가 코팅되어 있는 종이를 이전 층위로 이송한다. 한 층의 두께는 종이 두께와 동일하게 되며, 그 두께는 약 0.1 mm 정도이다. 다음에 가열된 롤러(roller)를 이용하여 이전 층위에 압착시킨다. 레이저광을 이용하여 접착된 종이 위에 제품의 해당 단면의 외곽선 만을 조사하고 나머지 외곽선 바깥 부분은 쉽게 제거될 수 있도록 바

독판 형태로 조사한다.

이와 같은 공정을 반복하여 공정이 끝나면 바둑판 형태로 절단된 부분은 4각 기둥의 형태로 제품의 주변에 붙어 있게된다. 이 4각 기둥을 모두 제거(decubing)하면 제작된 형상을 얻을 수 있다. 이 작업은 다소 시간이 소요되는데 이는 박판재료적층공정의 단점으로도 작용하고 있다. 제작된 형상은 거의 나무와 같은 성질을 가지고 있기 때문에 후가공이 비교적 용이한 이점이 있으며, 비교적 치수가 큰 형상의 제품 제작이 유리하다. 종이를외에도 플라스틱, 세라믹 재료를 이용하여 부품을 제작하는 연구가 진행 중이며, 종이를 이용하여 몰드를 제작하고 그 몰드에 왁스를 주조하여 정밀주조용 왁스 원형을 제작할 수도 있다.

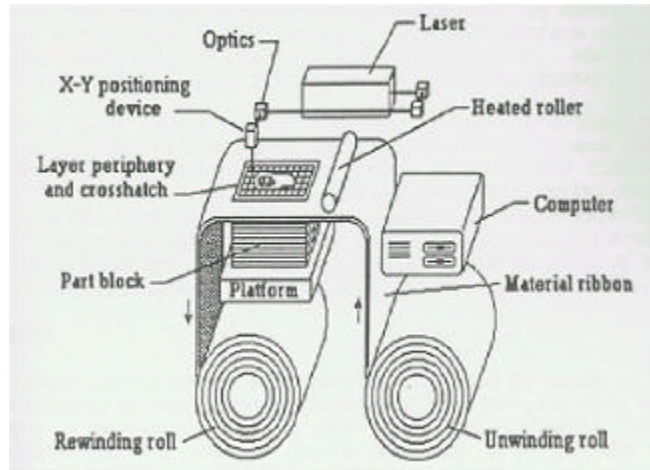


그림 4 박판재료적층공정(LOM) 공정 원리도

2.5 3차원 프린팅(Three-dimensional Printing)

미국 MIT 공대에서 개발된 이 공정은 <그림 5>에서 보는 바와 같이 플라스틱, 세라믹, 금속 등의 분말을 한 층 도포한 후 그 위에 점도가 낮은 액상의 접착제(binder)를 잉크젯 방식으로 제품의 단면형상을 따라 분사(spray)하여 분말을 접착하는 방식으로 제작하고자 하는 형상의 한 층을 제작하고, 다음에 받침대가 하강하여 다시 분말 재료를 도포하고 접착제를 분사하여 다음 층을 제작하는 방식을 반복하여 입체 형상을 만든다. 접착제가 분사되어 결합된 형상은 나머지 분말을 제거한 후에 후공정에서 소결하여 부품을 완성하게 된다.

현재 5개 회사가 이 3차원 프린팅(3DP)에 대한 license를 가지고 있으며, 그 중에서 ExtrudeHone사(미국)와 Z Corp.사(미국)가 쾌속조형기계를 판매하고 있으며, Soligen Technologies(미국)사가 금속주조를 위한 세라믹 몰드를 제작하는 공정(Direct Shell Production Casting)에 대한 용역을 제공하고 있다. ExtrudeHone사의 ProMetal 공정에서는 도포된 스테인레스강 또는 공구강 분말 위에 중합(polymeric) 접착제를 분사하여 green part를 만든 다음, 소결하고 구리합금을 용침하여 부품을 제작한다. Z Corp.사에서는 1999년에 plaster-based 재료인 ZP100를 개발하여 매우 작고, 박벽(thin-walled)의 부품 제작이 가능하게 되었다. ZP100은 2차 공정에 사용될 수 있는 원형제작을 위해 개발된 재료이다.

2.6 Solid Ground Curing (SGC)

Cubital사(이스라엘)의 SGC공정에서는 Xerox 복사 과정에서와 같이 photomask를 만들어 광경화성 수지 위로 이송시킨다. 이때 이 photomask에는 제작하고자 하는 단면의 형상이 인쇄되어 있다. 다음에 UV 광을 photomask 위로 조사하면 UV 광이 mask를 통과하여 그 아래에 광경화성 수지를 일시에 단면의 형상대로 경화시키게 된다. UV 광이 조사되지 않은 수지는 흡입하여 제거하고 그 부분은 왁스를 채워 경화시킨다. 이 왁스는 일종의 지지대 역할을 하게 된다. 경화가 되면 밀링가공을 이용하여 원하는 두께를 가지도록 윗면을 가공한다. 밀링가공이 끝나면 다시 광경화성 수지를 깔고, 다음 단면의 형상대로 photomask를 만든 다음 같은 공정을 반복함으로써 3차원의 형상을 만들어 낸다. SGC공정에서는 한번에 여러 가지 다양한 형상을 만

들 수 있으며, 적층방향으로 비교적 양호한 정밀도를 가지는 이점이 있다. 반면 한번에 많은 형상을 제작해야 하며 공정이 복잡하다는 단점이 있다.

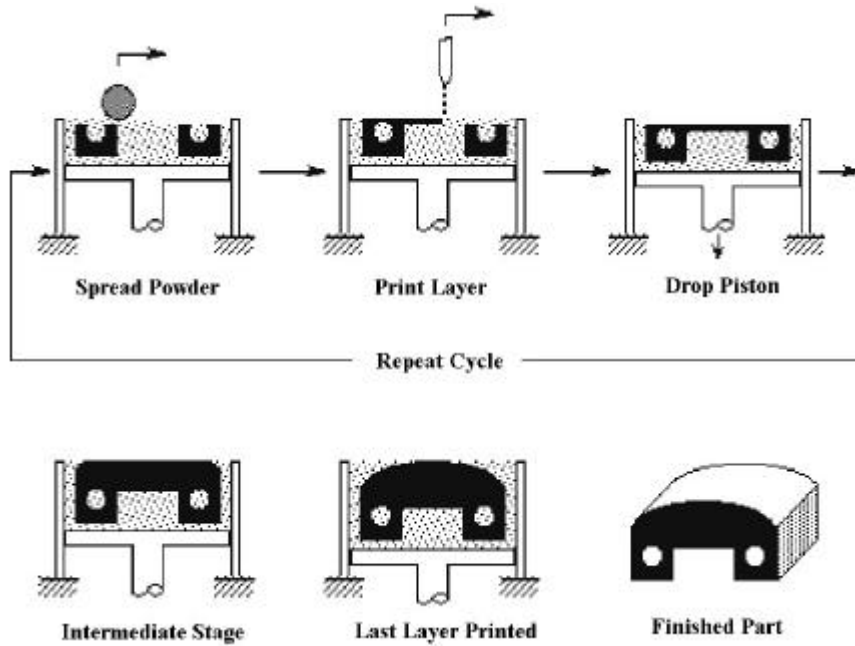


그림 5. 3차원 프린팅(3DP) 공정도

이 외에 여러 가지 다양한 캐속조형공정들이 상용화되어 있다. 최근들어 제품의 설계 검증을 위한 '3차원 프린터'들이 판매되고 있다. 3차원 프린터는 소형, 저가 장비이며, 재료도 무해하여 사무실 환경에서 일종의 제품 설계자를 위한 사무기기로서 활용되고 있다. 경우에 따라서는 후처리를 통해 정밀주조용 원형으로 사용한 사례도 보고되고 있다.

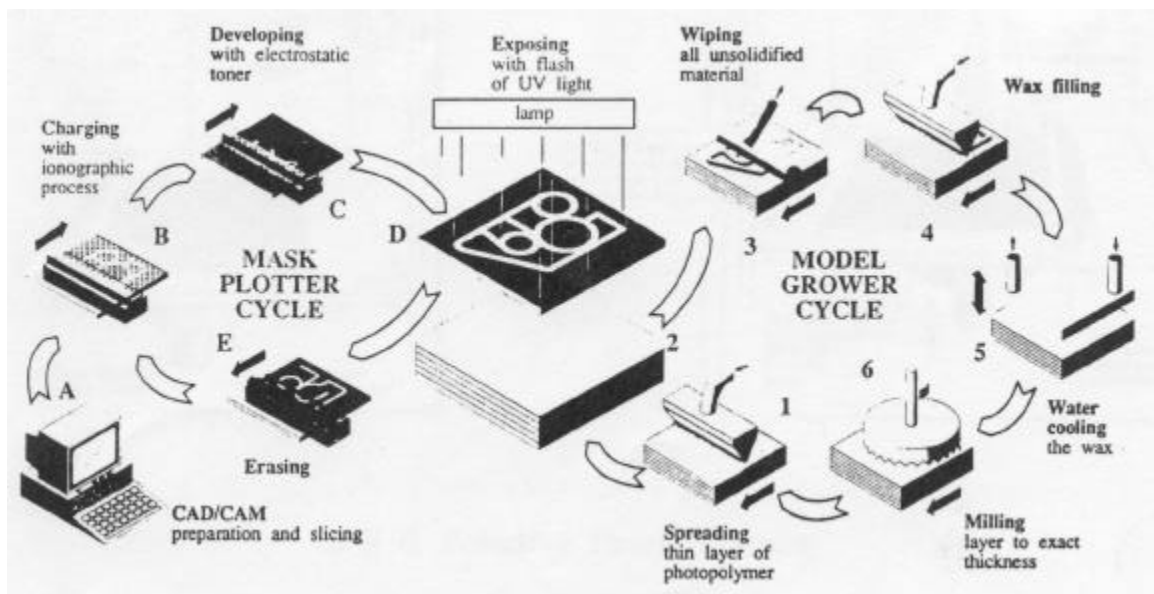


그림 6. Solid Ground Curing (SGC) 공정 원리도

3. 쾌속조형공정을 이용한 팬의 시작품 쾌속제작

팬 제작에 있어서 그 형상이 비교적 간단한 경우에는 CNC 등 기계가공을 이용하여 제작할 수 있으나, 형상이 복잡한 경우에는 공구경로 설정 등 가공시간이 지나치게 많이 걸리거나, 공구의 접근이 불가능하여 가공 자체가 불가능한 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우에는 팬의 목업(mockup)을 제작하여 이를 원형으로 하여 주조를 하여 팬을 제작하게 된다. 목업을 이용하여 팬을 제작하는 경우는 목업이 수작업으로 제작되므로 설계 도면대로 제작하기가 어렵기 때문에 실제 제작된 팬의 형상이 설계 도면과 다를 수 있다. 이러한 기계가공이나 주조 등 전통적인 방법으로 팬을 시작하는 경우에는 설계 변경이 필요한 경우 그 절차가 복잡하고 시간과 비용이 많이 드는 단점이 있다.

이에 반해, 3차원 입체 CAD 모델링과 쾌속조형공정을 이용하여 시작품을 제작하는 경우에는 설계 변경이 필요한 경우에 CAD 모델을 수정하거나, 간단한 경우에는 STL파일 편집 소프트웨어에서 수정이 가능하므로 빠른 시간 내에 모델 수정이 가능하고, 또한 금형/몰드를 제작하지 않고 원형을 제작할 수 있기 때문에 기계가공에 비해 시작품 제작시간과 비용을 크게 절감할 수 있다.

3.1 팬의 3차원 입체 CAD 모델링 및 STL파일 생성

쾌속조형공정을 이용하여 제품의 시작품을 제작하기 위해서는 제품의 STL파일이 필요하며, 이 파일을 얻는 방법은 대표적으로 두 가지가 있다. 첫 번째는 제품을 3차원 입체 CAD 모델링한 후 모델링 소프트웨어로부터 STL파일을 구하는 방법이다. 대부분의 CAD 소프트웨어는 STL파일을 생성해 주는 기능이 있으므로 모델링만 완료되면 STL파일을 쉽게 얻을 수 있다. 두 번째 방법은 3차원 스캐닝을 이용하는 방법이다. 이 경우는 실제 제품이 있고, 이것으로부터 약간의 변경을 하여 제품을 제작하는 경우와 CAD 모델링이 어려운 경우에 사용할 수 있다. 본 논문에서는 팬의 CAD 모델링으로부터 STL파일을 구하여 시작품을 제작하였다.

<그림 8>에서 팬의 CAD 모델로부터 얻은 STL파일을 보여주고 있다. STL 파일은 팬의 외형만을 삼각형 격자로 표현한 파일로써, 그 형식이 간단하여 대부분의 상용 쾌속조형장치의 입력 파일로 이용된다. 삼각형 격자의 밀도에 따라 CAD 형상의 정밀도가 결정되므로 조밀하게 STL파일을 만들수록 정확한 모델을 만들 수 있으나, 조밀하게 만들수록 파일 크기가 커지므로 경우에 따라서는 파일을 다루는데 많은 시간이 소요된다. 본 논문에서 사용한 STL파일의 격자수는 72,754개이다.

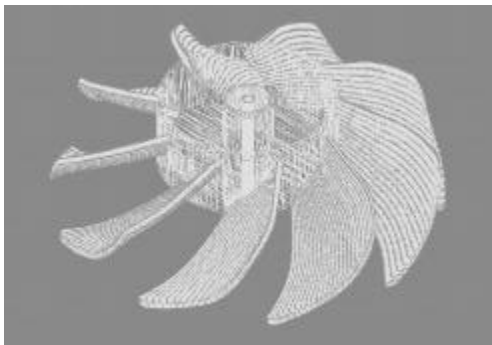


그림 7-1. 팬의 STL파일

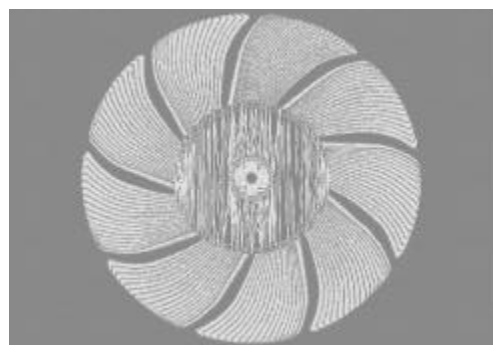
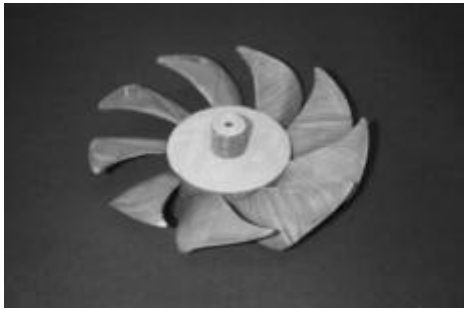


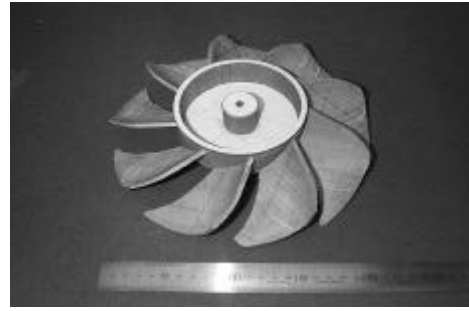
그림 7-2. 팬의 STL파일(평면각)

3.2 박판재료적층공정(LOM)을 이용한 FAN 시작품 제작

CAD 모델링으로부터 구한 STL파일을 박판재료적층 조형기(LOM1015)에 입력한다. 다음에 박판재료적층 조형기의 소프트웨어를 이용하여 필요한 공정변수를 조정하여 팬의 모델을 제작하게 된다. 조형공정은 무인 상태(unattended)에서 진행되며, 한 층이 두께 즉, 종이 두께는 0.1067 mm이다. <그림 8>에서 제작된 팬의 쾌속조형모델을 보여주고 있다. 팬의 치수는 최대 외경이 216 mm, 높이가 66 mm이며, 팬의 날개 수는 9개이다.



(a) 평면도



(b) 배면도



(c) 측면도

그림 8. 박판재료적층공정을 이용한 팬의 캐속 시작품: (a) 평면도, (b)배면도, (c)측면도

<그림 8>에 나타난 팬의 캐속조형모델은 후처리가 되지 않은 상태이며, decubing 시간을 포함하여, 약 25시간이 소요되었다. 캐속조형공정으로 제작된 부품은 한 층씩 적층하여 제작하는 공정 특성상 표면에 계단형상(stair-step)이 생기게 되므로 이를 제거하고 매끄러운 표면을 얻기 위해 후처리가 필수적이다. 각 캐속조형공정에서 사용되는 재료에 따라 후처리 방법이 달라지게 되며, 박판적층조형공정의 경우에는 재료가 종이이기 때문에 후처리가 비교적 용이하다. 팬과 같이 자유곡면이 많은 경우에 정확한 치수정밀도를 얻기 위해서는 숙련된 후처리 기술이 필요하다. 본 연구에서는 후처리를 위해 사포(sand paper)를 사용하였으며, 후처리에 소요된 시간은 약 2시간 정도이다. <그림 9>에서 사포를 이용하여 표면이 후처리된 팬의 형상(a)과, 표면 거칠기를 더욱 향상시키기 위해 표면을 도장(painting)한 팬(b)을 보여주고 있다.



(a) 후처리된 팬



(b) 도장한 팬

그림 9. 박판재료적층공정을 이용한 팬의 캐속 시작품: (a) 후처리된 팬, (b) 도장한 팬

도장한 쾌속조형 펜을 이용하여 디자인 검증용 모델로 사용하여, 설계자가 직접 모델을 살펴 보면서 설계를 검토할 수 있으며, 또한 진공주조, 로스트 종이 주조 등 다양한 2차공정의 원형으로 사용하여 금속 시작품을 제작할 수도 있다. 이러한 방법은 CNC공정으로 가공하거나, 목업을 제작하여 주조공정을 이용하여 제작하는 경우에 비해 훨씬 경제적이다.

4. 결 론

원자력발전소 기기 및 부품의 설계 평가 및 설치 부품의 분석을 위한 모형 제작공정 소개하였고, 비교적 복잡한 형상 제품인 펜에 대한 시제품을 제작하였다. 본 논문에서 2.5차원의 단면 형상을 한 층씩 적층(layer-by-layer)하는 방식으로 복잡한 3차원의 입체 형상을 신속하게 제작할 수 있는 쾌속조형공정(Rapid Prototyping processes)들의 특징을 설명하였고, 3D CAD 모델링과 상용 쾌속조형공정 중의 하나인 박판재료적층(Laminated Object Manufacturing)공정을 이용하여 펜의 쾌속시작모형을 제작하였다.

이 쾌속시작모형을 이용하여 제품개발 초기에 필요한 설계변경을 신속하게 수행할 수 있으며, 또한 쾌속조형모형을 원형으로 하여 진공주조, 로스트 종이(lost-paper) 주조 등 다양한 2차공정을 이용하여 시작품을 제작할 수도 있다. 이를 통해 기존의 CNC 등 절삭가공을 이용한 시작공정에 비해 시간과 비용을 크게 절감할 수 있으며, 팬, 터빈 블레이드와 같이 복잡한 자유곡면을 가진 발전 및 전력계통 부품의 개발에도 효율적으로 응용될 수 있다는 점을 확인하였다.

복잡한 3차원 형상을 쉽게 빠른 시간 내에 제작할 수 있는 쾌속조형기술의 특징을 이용하여 원전 운영시 발생할 수 있는 여러 가지 물리, 화학적 결함(FAC 등)을 가시화(visualization)함으로써 결함에 대한 이해도를 높일 수 있으며 이를 통해 결함 원인 분석의 효과적 해결에 기여할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

- [1] P. Jacobs, "Stereolithography and other RP&M Technologies—from Rapid Prototyping to Rapid Tooling", SME/RPA, 1996.
- [2] "Rapid Prototyping System—Fast Track to Production Realization", SME/RPA, 1993.
- [3] P. Jacobs, "Rapid Prototyping & Manufacturing—Fundamentals of Stereolithography", SME/CASA, 1992.
- [4] T. Wohlers, "Rapid Prototyping Worldwide Report - State of the Industry", SME, 2000.
- [5] 한국기계연구원 정책연구실, "선진국의 주요기계기술개발동향-미국, 일본, 유럽을 중심으로-", 1996.
- [6] 이용환, 정인래, 정준희, 장재대, "시작프로세스의 혁명, 래피드 프로토타이핑", CAD & 그래픽스, 1994년 11월.
- [7] D. Atkinson, "Rapid Prototyping and Tooling - A Practical Guide", Strategy publications, 1997.
- [8] P.D. Hilton, P. Jacobs, "Rapid Tooling—Technologies and Industrial Applications", Marcel Dekker, 2000.
- [9] 特集号, ラピッドプロトタイプINGK° (Rapid Prototyping), (日本)型技術, Vol. 2, 1996.
- [10] 양동열, 손현기, "쾌속제품개발(RPD)에서 쾌속조형(RP)과 2차공정의 역할", 한국정밀공학회 춘계학술대회 논문집, pp.927-931, 1998.
- [11] G.C. Calsby, "Rapid Prototyping of Centrifugal Pump Impeller", Proc of 5th Int Conf on Rapid Prototyping, Dayton, USA, June 12-15, pp.259-267, 1994.
- [12] H. Imanishi, "Rapid Tooling Using LOM Models", Proc of 8th Int Conf of Rapid Prototyping, Tokyo, Japan, June 12-13, pp.371-376, 2000.
- [13] Y. Song, S. Park, and S. Ha, "apid Tooling vs. Five-Axis Milling for Ship Propeller Prototypes", Rapid Prototyping, Vol.4, No.3, pp.1-4, 1998.
- [14] D. Klosterman, R. Chartoff, M. Agarwala, I. Fiscus, J. Murphy, S. Cullen, M. Yeazell, "Direct Fabrication of Ploymer Composite Structures with Curved LOM", Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium, Austin, Texas, August 9-11, pp.401-410, 1999.
- [15] J. Park, M.J. Tari and H.T. Hahn, "Characterization of the laminated object

- manufacturing (LOM) process", *Rapid Prototyping Journal*, Vol.6 No.1, pp.36-49, 2000.
- [16] D. Klosterman, R. Chartoff, N. Osborne, G. Graves, A. Lightman, A. Bezeredi, "Net Shape Fabrication of SiC and SiC/SiC Components Using Laminated Object Manufacturing (LOM)", *Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, August 10-12, pp.745-746, 1998.
- [17] C. Chi, L. Dodin, and S. Pak, "Development and Fabrication of Metallic LOM Objects", *Proc of 7th Int Conf on Rapid Prototyping*, San Francisco, California, March 31-April 3, pp.293-299, 1997.
- [18] S.S. Pak, D.A. Klosterman, B. Priore, and R.P. Chartoff, "Prototype Tooling and Low Volume Manufacturing Through Laminated Object Manufacturing (LOM)", *Proc of 7th Int Conf on Rapid Prototyping*, San Francisco, California, March 31-April 3, pp.325-331, 1997.
- [19] 최민식, 박문선, 강범수, "RP를 이용한 고차압밸브 디스크 시제품 제작 시스템 확립", *한국정밀공학회지*, 제15권 제3호, pp.61-67, 1998.
- [20] 박근, 신민철, 양동열, 조중래, 김종수, "모델재료와 SLA 시금형을 이용한 터빈블레이드 열간 단조 공정의 모의실험", *한국소성가공학회지*, 제4권 제4호, pp.335-344, 1995.
- [21] P. Jacobs, "Recent Advances in Rapid Tooling from Stereolithography", *Proc of 7th Int Conf on Rapid Prototyping*, San Francisco, California, March 31-April 3, pp.338-354, 1997.
- [22] M. Bertoldi, M.A. Yardimci, C.M. Pistor, S.I. Gucer, G. Sala, "Mechanical Characterization of Parts Processed via Fused Deposition", *Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, August 10-12, pp.557-566, 1998.
- [23] A. Kara, "Investigation of Fused Deposition Modelling Process Parameters", *Proc of 7th Int Conf on Rapid Prototyping*, San Francisco, California, March 31-April 3, pp.130-137, 1997.
- [24] C. Nelson, J. Kepler, R. Booth, P. Conner, "Direct Injection Molding Tooling Inserts from the SLS Process with Copper Polyamide", *Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, August 10-12, pp.451-460, 1998.
- [25] T.D. Stewart, K.W. Dalgarno, T.H.C. Childs, J. Perkins, "Strength of the DTM RapidSteel 1.0 Material", *Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, August 10-12, pp.443-450, 1998.
- [26] F. Klocke, H. Wirtz, "Selective Laser Sintering of Zirconium Silicate", *Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, August 10-12, pp.605-612, 1998.
- [27] S. Uhland, R. Holman, B. DeBear, P. Saxton, M. Cima, E. Sachs, Y. Enokido, H. Tsuchiya, "Three-Dimensional Printing, 3DPTM, of Electronic Ceramic Components", *Proc of Solid Freeform Fabrication Symposium*, Austin, Texas, August 9-11, pp. 865-872, 1999.