

선택적 레이저 소결법을 이용한 기어박스의 정밀주조기술 개발

최상련*, 김천기*, 박 근*, 오철호*

Development of Precision Casting Technology for Inlet Gear Box using Selective Laser Sintering

Sang-Ryon Choi*, Chun-Ki Kim*, Keun Park* and Chul-Ho Oh*

Abstract

In this paper, rapid prototyping and precision casting technology have been developed for the manufacturing of inlet gear box of an airplane. Rapid prototyping is a new prototyping technology that produces complicated parts directly from three-dimensional CAD data with a high efficiency, and has been extensively applied to various manufacturing processes. In the present work, Selective Laser Sintering(SLS) system is utilized in order to manufacture prototype of the inlet gear box. Prototyping technology using SLS is also investigated from the viewpoint of accuracy. Using the SLS master, the casting products are manufactured through several processes such as: vacuum casting, lost wax shell casting and investment casting. The shrinkage characteristics of wax and cast iron in the casting procedures are considered, and then reflected to the design procedure so that the accuracy of the product is improved consequently.

Key Words : Rapid Prototyping(쾌속조형), Selective Laser Sintering(선택적 레이저 소결법), Vacuum Casting(진공주형), Investment Casting(인베스트먼트 주조)

1. 서 론

최근 다양한 시장의 요구에 따라 제품의 모델이 다양화 되고 제품의 형상이 복잡해지고 있다. 또한 제품의 주기가 짧아짐에 따라 신속한 시작 기술이 요구되고 있다. 현재 주로 사용되고 있는 시작 방법은 전문 기술자의 축적된 경험에 의존해서 수작업으로 제작하고 있기 때문에 많은 시

간이 소요되는 것이 사실이다. 이러한 문제점을 해결하고 동시공학적인 시스템을 구축하는 것이 바람직하며, 이러한 시스템의 하나로써 쾌속조형법이 대두되고 있다.

쾌속조형법(Rapid Prototyping)은 최근 몇년간 자동차, 가전, 전자, 항공 및 중공업 등 거의 모든 제조 관련분야에 걸쳐서 제품의 설계에서 생산에 이르는 기간과 노력을 절감하는 동시공학의 필수적인 도구로써 사용되고 있다.⁽¹⁾

* 삼성전기(주) 금형개발실

폐속조형법은 3차원 형상의 제품을 높이에 따른 2차원 단면 데이터로 분할하여 각각의 단면을 레이저 등을 이용하여 제작하고 적층, 접합하여 원하는 형상의 제품을 생산하는 생산방식이다. 초기의 폐속조형법은 형상 검증이나 조립성 평가를 위하여 사용되었으나, 근래에는 폐속조형법을 사용하여 제작되어진 제품을 직접 기능용 시제품으로 사용하는 등 적용 범위가 확장되고 있으며, 2차 공정을 위한 마스터 모델로도 사용되어, 그 활용도가 점차 커지고 있다.⁽²⁻⁴⁾ 현재 폐속조형기법을 2차 공정으로 활용한 예로는 방전용 전극 제작,⁽⁵⁾ 박판성형용 금형 제작,⁽⁶⁾ 3차원 냉각회로를 내포한 사출금형⁽⁷⁾ 등 제반 생산공정에의 적용이 점차적으로 확대되어지고 있다.

그러나 폐속조형기술을 실제 제품의 제작에 활용하기 위해서는 시작품의 정밀도 문제를 우선적으로 해결해야 한다. 이러한 정밀도 문제는 특히 제작된 시작품을 2차공정에 적용한 폐속 금형제작(Rapid Tooling)으로의 연계시에 최종 제품의 정밀도에 큰 영향을 미치게 된다. 본 연구에서는 이러한 관점에서 폐속조형법을 이용한 시작기술 및 이와 연계된 2차 공정의 정밀도 향상을 위한 연구를 진행하고자 한다. 또한 이러한 연구결과를 바탕으로 항공기용 기어박스의 정밀주조 기술을 개발하고자 한다.

2. 제품의 개요

본 연구에서 개발하고자 하는 제품은 기어박스(Gear box)의 시작품으로, 주된 기능으로는 항공기 주축의 동력 전달용 베벨기어의 케이스 역할을 함과 동시에 윤활유 공급라인을 포함하고 있다. Fig. 1에 기어박스를 3차원 CAD로 모델링한 형상을 도시하였다. 제품 개발상의 특징을 살펴보면, 제품의 설계 완료시점에서부터 시작품의 제작까지 요구되는 기간이 약 1개월 정도이며, 6개의 수량이 요구되었다. 이러한 요구조건을 충족시키기 위해서는 기존의 기계가공에 의한 주조방법으로는 납기를 만족시키기 어려운 실정이다. 또한 요구수량이 상대적으로 적어 금형 제작에 소요되는 비용이 제품의 개발비에 차지하는 비중이 높아 개발 원가에 큰 부담으로 작용하게 된다.

반면에 기계가공으로 6개의 시작품을 직접 제작하는 방법도 제품 형상의 난이도를 고려해볼 때 많은 비용 및 시간이 소요될 것으로 예상된다. 본 연구에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 폐속조형기법을 활용한 정밀주조기술을 개발하였다. 폐속조형 장비로는 삼성전기(주) 금형개발실에서 보유하고 있는 선택적 레이저 소결(Selective

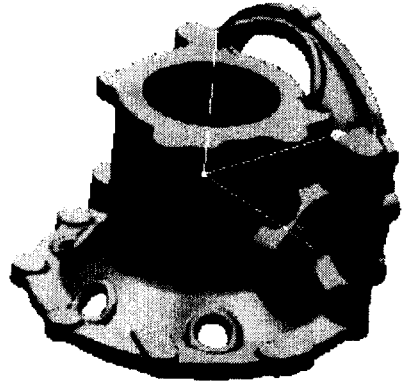


Fig. 1 Three-dimensional CAD model for inlet gear box

Laser Sintering: SLS) 시스템을 사용하였고, SLS 시작품을 사용하여 왁스 패턴(wax pattern)을 제작함으로써 정밀주조 기술에 활용하였다.

3. 선택적 레이저 소결 시스템

본 연구에서는 DTM社에서 개발된 Sinterstation[®] 2500시스템을 사용하였다. Sinterstation[®] 2500시스템은 선택적 레이저 소결법을 기본 원리로 하고 있으며 구성 요소는 분말을 소결시키는 레이저장치, 소결이 원활하게 이루어질 수 있도록 분유기를 유지해주는 가열장치 및 배기장치, 분말의 이송 및 소결되어진 부품을 적층할 수 있는 이송 및 엘리베이팅 장치로 구분할 수 있다.⁽⁸⁾

레이저는 공업용으로 가장 많이 사용되는 CO₂ 레이저를 사용하고 있으며, CO₂ 레이저의 주사는 갈바노 방식(Galvano Mirror Method)을 채택하고 있다. 분말이 소결이 이루어지는 환경은 분말의 녹는점보다 약 10~15℃ 낮은 온도이며, 분말을 녹이는 추가적인 에너지는 레이저에 의해서 얻어진다. 한편 분말의 이송은 롤러(Roller)가 좌우 왕복 운동을 하면서 이루어지며, 엘리베이팅 장치는 일정한 두께로 상하운동을 수행하며 도포된 분말을 일정한 두께로 레벨링할 수 있도록 되어있다. 양쪽 카트리지의 피스톤은 작업이 진행됨에 따라 Part Bed에 적정량의 분말을 공급할 수 있도록 구성되어있다. Fig. 2에 본 연구에서 사용한 Sinterstation[®] 2500시스템의 구조를 도시하였으며, 기본 작동원리는 다음과 같다.

(1) 장비 내의 롤러에 의해 양쪽 카트리지에 있는 분말이 중앙의 베드(Bed)부에 일정한 두께로 도포되어진다.

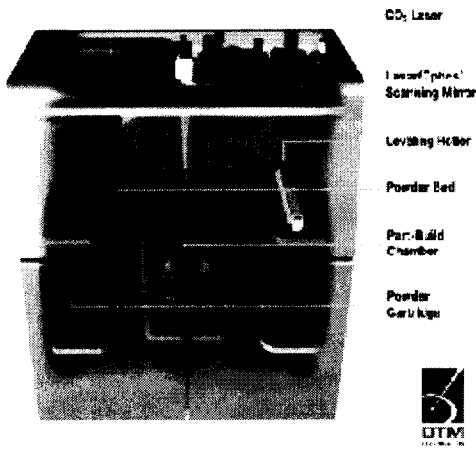


Fig. 2 SLS system (Sinterstation 2500)[®]

- (2) 장비의 상부에 구성되어 있는 레이저에 의해 한 층(Layer)에 해당되는 단면형상을 소결한다.
- (3) 소결되어진 부분은 베드부에 장착되어진 엘리베이터 장치에 의해 일정 두께만큼 아래로 이동한다.
- (4) 전체 형상의 제작이 완료될 때까지 (1) ~ (3)의 작업을 반복적으로 수행한다.

4. 쾌속조형을 이용한 주조공정의 개발

쾌속조형기법을 이용한 항공기용 기어박스의 정밀주조공정은 단계별로 얻어지는 제품을 기준으로 하여 구분하면 다음과 같은 순서로 구성된다. Fig. 3에 이러한 일련의 공정을 순서도로 도시하였다.

- (1) 원하는 제품의 3차원 CAD 모델링
- (2) 쾌속조형을 위한 형상정보 처리(STL 파일 생성 및 슬라이싱)
- (3) SLS를 사용한 기어박스의 마스터 제작
- (4) 진공주형기법에 의한 실리콘수지 몰드 제작
- (5) 실리콘수지 몰드를 사용한 왁스패턴 제작
- (6) 로스트왁스법을 이용한 셸(Shell) 몰드 제작
- (7) 셸 몰드를 사용한 인베스트먼트 주조
- (8) 주조품의 후가공 및 측정

여기서 CAD 모델링은 I-DEAS Master Series를 사용하여 수행하였으며, 이를 STL 파일로 변환하고 SolidView를 사용하여 위치 및 스케일을 조정한 후에 최종 STL 파일을 SLS 장비로 전송하였다. 전송된 STL 파일 정보는

SLS 장비 내에서 자동으로 슬라이싱되어 단면 데이터를 형성한다. Fig. 4에 각 단계별 제작된 제품을 도시하였다. Fig. 4의 (a)는 SLS를 사용하여 제작된 기어박스의 마스터, (b)는 실리콘러버 몰드를 사용하여 제작된 왁스패턴, (c)는 최종 주조품이다. 전술한 단계별 제작공정 중 주요 공정을 살펴보면 다음과 같다.

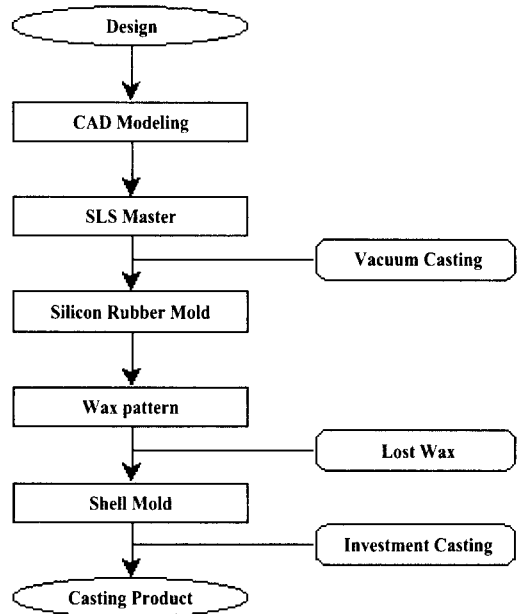


Fig. 3 Precision casting procedure

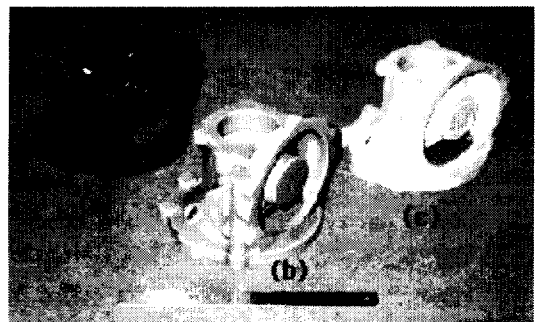


Fig. 4 Products at each process

- (a) SLS master
- (b) wax pattern
- (c) casting product

4.1 진공주형(Vacuum casting)

진공주형은 모델을 액상의 실리콘 수지 혹은 금속 분말 등의 필러를 섞은 액상 수지형 재료로 충전하고, 혼입한 공기와 미충전 부분의 잔류공기를 진공상태에서 탈포한 후 고화시켜 원하는 형상을 얻는 방법이다.⁽⁴⁾ 이때 진공상태의 탈포 과정에서 잔류공기를 모두 제거함으로써 형틀 내의 구석까지 수지를 충전시켜 결과적으로 충전성을 향상시켜준다. 본 연구에서는 SLS를 사용하여 제작된 마스터 모델에 실리콘 수지를 주입하여 실리콘 몰드를 제작하는 과정에서 이러한 진공주형기법을 응용하였다. Fig. 5에 이러한 일련의 과정을 도시하였다. 제작된 실리콘 몰드를 사용하여 왁스패턴을 제작하는 과정에서도 마찬가지로 방법으로 진공주형기법을 사용하여 정밀도를 향상시켰다. 이때의 작업 온도를 Table 1에 요약하였다.

Table 1 Working temperature for vacuum casting

Procedure		Temperature(°C)
Casting	Silicon mold	70
	Wax	90~100
Ejection		40

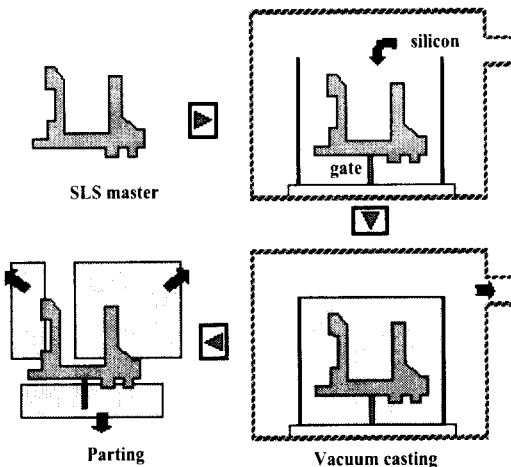


Fig. 5 Vacuum casting procedure

4.2 로스트왁스법에 의한 셸 몰드 제작

본 연구에서는 로스트왁스(Lost wax)기법을 이용하여 인베스트먼트 주조를 위한 세라믹 셸 몰드를 제작하였다. 기본 원리는 제작된 왁스패턴을 세라믹 분말에 바인더를

혼합한 슬러리(slurry)에 담가 왁스 표면을 코팅시키며, 대기중에서 건조시킨 후 이러한 과정을 수차례 반복하여 왁스패턴의 음각 형상을 지닌 셸 몰드를 제작하게 된다. 이때 제작된 셸 몰드의 두께는 5~15mm 정도의 값을 갖는다. 건조가 완료된 후에 셸 몰드를 가열로에 넣고 900~1100℃로 가열하여 왁스를 제거해준다. Fig. 6에 이러한 일련의 과정을 도시하였으며, Fig. 7은 제작된 기어박스의 셸 몰드이다.

4.3 인베스트먼트 주조(Investment casting)

인베스트먼트 주조는 한 개의 왁스패턴에서 하나의 주조품만이 만들어지므로 대량생산에는 문제가 있으나 다 품종 소량생산에 장점을 갖는 주조법이다. 인베스트먼트 주조법은 기계가공으로 성형하기 어려운 매우 복잡한 형상을 신속하게 제작할 수 있고, 치수정밀도와 표면상태가 우수하다는 장점이 있다. 인베스트먼트 주조품의 치수공차는 0.1mm이며, 표면조도는 1.6~3.2a 정도이다. 주조공정을 살펴보면 제작된 셸 몰드에 용탕을 주입하여 응고시킨 후 셸을 제거하여 제품을 제작하게 된다. Fig. 8에 이러한 일련의 과정을 도시하였다.

5. 정밀도 향상을 위한 제작기술 개발

기어박스의 정밀주조품은 여러 단계의 공정을 거쳐 제작된다. 이때 각 단계별로 얻어지는 제품의 치수정밀도에 오차가 발생하게 되고, 이러한 오차가 단계별로 누적되어 최종 제품의 치수정밀도에 악영향을 미치게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 본 연구에서는 다음과 같은 관점에서 제품의 치수정밀도를 향상시키기 위한 제작기술을 개발하였다.

5.1 SLS 시작품의 정밀도 향상기법

SLS를 사용하여 시작품을 제작하는 과정에서 치수의 오차를 유발하는 원인은 여러 가지가 있으나, 그 중에서 가장 큰 영향을 주는 것은 고온(약 180~190℃)에서 제품을 제작하므로 제작이 완료된 후에 상온으로 냉각되는 과정에서 발생하는 수축과 레이저의 반경에 의한 오차로 구분할 수 있다.

이러한 오차를 보정하기 위하여 Fig. 9와 같은 형상의 모델을 제작하여 측정하였다.⁽⁸⁾ Table 2에 이때의 작업 조건을 요약하였다. 그림과 같이 X축과 Y축 방향으로 2개의 모델을 90°의 각도로 배열하고 동시에 제작한 후 각각

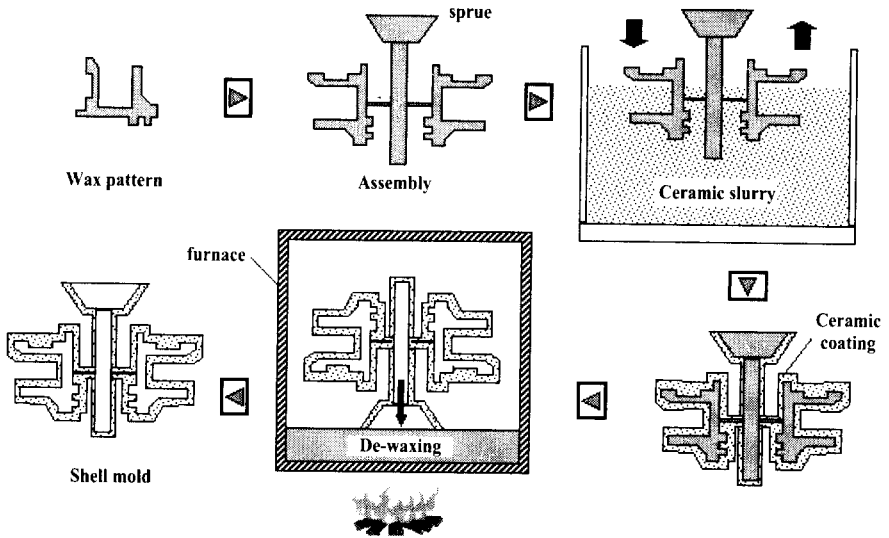


Fig. 6 Lost wax shell casting procedure

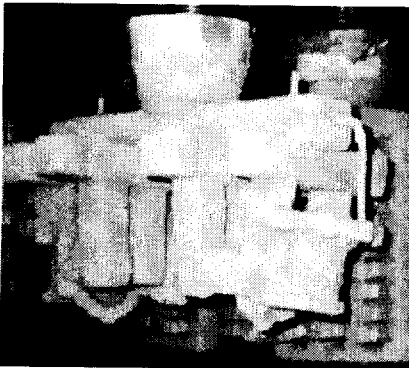


Fig. 7 Shell mold for inlet gear box

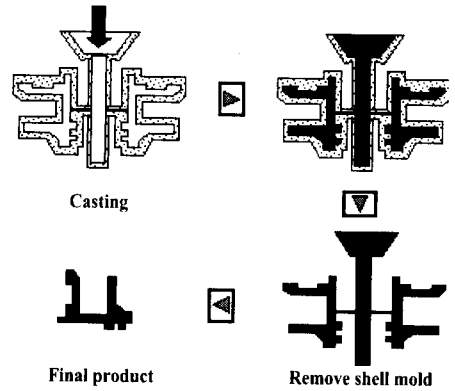


Fig. 8 Investment casting procedure

의 치수를 측정하여 각 공칭 치수(nominal dimension)에 대한 편향오차를 계산하여 Fig. 10과 같이 도시하였다. 측정된 데이터를 바탕으로 회귀 직선의 방정식을 다음과 같이 표현할 수 있다. 이때 그래프상에서 나타내는 기울기는 각각 X, Y방향으로의 수축률을 의미하며, 이를 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$y_1 = a_1 x_1 + b_1 \quad (1)$$

$$y_2 = a_2 x_2 + b_2 \quad (2)$$

여기서 a_1 , a_2 는 각각 X, Y 방향으로의 수축률을 의미

하며, 이를 역으로 보정하여 다음과 같이 초기 제품설계에 반영할 수 있다.

$$\lambda_1 = \frac{1}{1 - a_1} \times 100(\%) \quad (3)$$

$$\lambda_2 = \frac{1}{1 - a_2} \times 100(\%) \quad (4)$$

여기서 λ_1 , λ_2 는 각각 X, Y 방향으로의 부피팽창율(scale factor)을 의미한다. 실제 Table 2와 같은 작업 조건에서 2.07%만큼 수축이 발생한 것으로 측정되었으며, 이

Table 2 Process parameters for SLS prototyping

Machine	DTM 194
Material	DuraForm GF (used)
Bed Temperature	180℃
Laser Power	6.5W

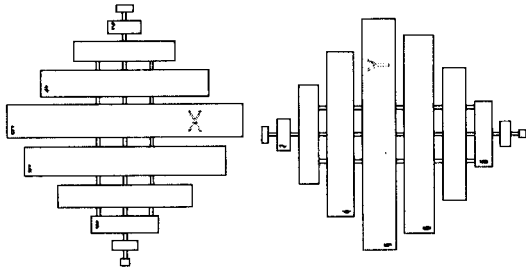


Fig. 9 Test models for accuracy compensation

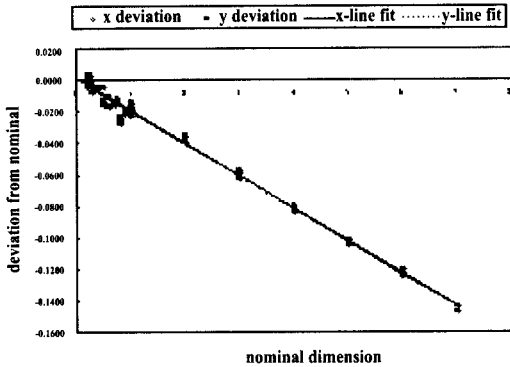


Fig. 10 Determination of shrinkage ratio and the amount of offset

를 보정하여 1.021배만큼 크게 부피팽창율을 부과하여 모델링을 수행하였다.

SLS 시스템에서는 레이저의 경로 설정시 레이저 빔의 중심을 기준으로 제어한다. 따라서 레이저 빔의 반경에 해당하는 양만큼의 오차가 발생하게 되는데, 이를 위해 빔의 반경에 해당하는 양만큼 내측으로 오프셋(Offset)시켜 보정하였다. 이때 오프셋 양 역시 Fig. 10에 도시된 그래프 상에서 Y절편의 값을 사용하여 구할 수 있다(Y절편의 1/2). 주어진 조건에서 계산된 오프셋 양은 0.013 mm이다.

5.2 단계별 수축율을 고려한 제품설계

전술한 일련의 공정중에 실리코너버 몰드를 사용한 왁스패턴 제작 및 쉘 몰드를 사용한 인베스트먼트 주조과정에서 제품의 응고시에 수축이 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 이러한 수축율에 의한 치수정밀도 저하를 보상하기 위해 다음과 같은 방법을 사용하였다.

왁스패턴 제작시의 수축율은 다음과 같이 정의된다.

$$\eta_1 = \frac{d_0 - d_1}{d_0} \times 100(\%) \quad (5)$$

여기서 d_0 는 실리코너버 몰드상의 치수이며, d_1 은 왁스패턴이 응고된 후의 치수이다. 마찬가지로 방법으로 인베스트먼트 주조시의 수축율도 다음과 같이 정의될 수 있다.

$$\eta_2 = \frac{d_2 - d_3}{d_2} \times 100(\%) \quad (6)$$

여기서 d_2 는 왁스패턴을 사용하여 제작된 쉘 몰드상의 치수이며, d_3 는 주조품이 응고된 후의 치수이다. 이때 쉘 몰드의 치수가 왁스패턴의 치수와 동일하다고 가정하면 ($d_1 = d_2$), d_0 와 d_3 의 관계식은 다음과 같다.

$$d_3 = (1 - \eta_1)(1 - \eta_2)d_0 \quad (7)$$

이러한 관계식을 사용하여 수축에 의한 치수정밀도 저하를 보상하기 위한 초기 설계시의 여유팽창율(λ)을 다음과 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \lambda &= \left(\frac{d_0}{d_3} - 1 \right) \times 100(\%) \\ &= \left(\frac{1}{(1 - \eta_1)(1 - \eta_2)} - 1 \right) \times 100(\%) \end{aligned} \quad (8)$$

본 연구에서 사용한 왁스와 주조품의 수축율은 각각 1.5%, 1.1%이다. 이 값을 식 (8)에 대입하면 2.6%의 여유팽창율이 얻어지며, 이에 따라 초기 설계형상의 체적을 2.6% 팽창시켜 CAD 모델링을 수행하였다.

5.3 형상정밀도의 고찰

최종 주조품의 형상정밀도를 고찰하기 위해 기어박스의 주요 치수를 측정, 비교하였다. Fig. 11에 총 9개의 주요 비교부위를 도시하였다. Table 3에 각각 SLS 마스터, 왁스패턴, 최종 주조품의 9개의 치수부위에 대한 측정치를 CAD 모델과 비교하였고, Fig. 12에 그래프로 도시하였다.

9개의 치수중 3, 4, 6번 치수에서 상대적으로 오차가 크게 발생한 반면 나머지 부분은 양호함을 알 수 있었다. 해당 부위에서 오차가 크게 발생하는 원인을 분석하기 위해 다음과 같이 단계별 치수의 변화율을 정의하였다.

$$\alpha_1 = \frac{d_s}{d_c} \tag{9}$$

$$\alpha_2 = \frac{d_w}{d_s} \tag{10}$$

$$\alpha_3 = \frac{d_p}{d_w} \tag{11}$$

$$\alpha_{total} = \frac{d_p}{d_c} = \alpha_1 \times \alpha_2 \times \alpha_3 \tag{12}$$

여기서 d_c , d_s , d_w , d_p 는 각각 CAD 모델, SLS 마스터, 왁스패턴, 주조품의 치수를 의미한다. Table 4에 각각의 비를 측정점별로 비교함으로써 단계별 치수의 변화를 확인하였고, 최종적으로 식 (12)와 같이 정의된 주조품과

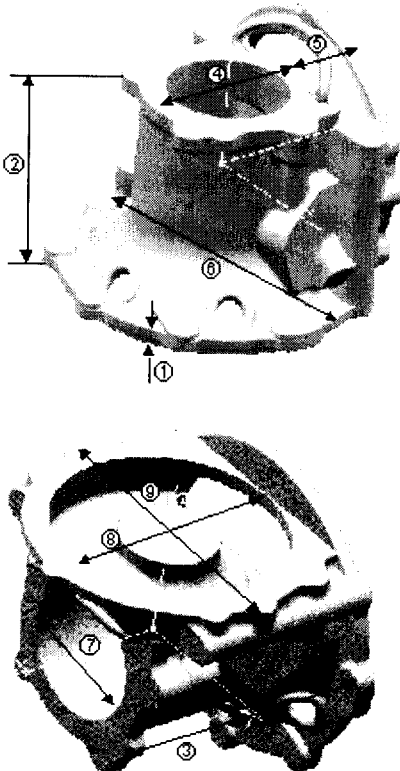


Fig. 11 Major dimensions for comparison

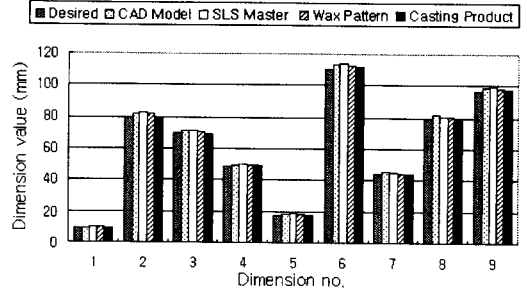


Fig. 12 Comparison of dimensions

Table 3 Comparison of dimension for each product (unit : mm)

Dim. no.	Desired	CAD Model	SLS Master	Wax Pattern	Casting Product
1	9.50	9.75	10.50	10.05	9.43
2	79.50	81.57	82.15	81.20	79.95
3	70.00	71.82	71.57	71.15	68.68
4	48.81	50.08	50.75	50.01	49.89
5	17.78	18.24	19.05	18.55	17.86
6	110.00	112.86	113.57	112.27	111.15
7	44.00	45.14	44.63	44.17	44.14
8	79.34	81.40	80.78	80.15	79.87
9	96.50	99.01	99.58	98.38	97.17

Table 4 Comparison of dimension ratio

Point no.	SLS Master	Wax Pattern	Casting Product	Casting Product
	CAD Model	SLS Master	Wax Pattern	CAD Model
1	1.077	0.957	0.938	0.992
2	1.007	0.988	0.985	1.006
3	0.997	0.994	0.951	0.967
4	1.013	0.985	0.998	1.022
5	1.044	0.974	0.963	1.004
6	1.006	0.989	0.990	1.010
7	0.989	0.991	0.998	1.003
8	0.992	0.992	0.996	1.007
9	1.006	0.988	0.988	1.007

CAD 모델간의 치수의 비를 계산하였다. 오차가 크게 발생한 부분, 즉 3, 4, 6번 치수를 보면 α_{total} 의 값이 상대적으로 크게 측정되었음을 알 수 있다. 이러한 오차는 어느 한 공정에 국한되어 두드러지게 발생하였다기보다는 각 공정

에서 발생하는 오차의 조합에 기인한다고 볼 수 있다. 예를 들어 SLS 마스터 제작시에 레이저의 주사 경로, 적층 방향 등에 의해 부위별 정밀도에 차이가 발생하고, 주조시에도 제품의 두께, 탕구의 위치 등 여러 가지 변수에 따라 수축률의 차이가 발생하는 등 다양한 원인이 존재한다.

따라서 본 연구에서 제안한 바와 같이 식 (8)과 같은 여유팽창률을 전체적으로 균일하게 부과하는 방법으로 전체적인 형상정밀도를 어느 정도의 수준으로 유지할 수는 있었으나, 모든 부위에서의 정밀도를 추구하기에는 다소 한계가 있다고 보여진다. 향후에는 제품 형상의 특성이나 두께 등을 고려하여 부위별로 차별화된 여유팽창률을 부과함으로써 보다 정밀한 제품을 얻을 수 있을 것으로 기대된다. 본 연구에서는 해당 부위에 대해 간단한 후가공을 거쳐 원하는 정밀도를 얻을 수 있었다.

6. 결 론

복잡한 형상을 가진 항공기용 기어박스 시작품의 신속한 제작을 위해 패속조형기법을 활용한 시작품 제작기술을 적용하였다. 이러한 결과를 종합하여 정리해보면 다음과 같다.

- (1) 선택적 레이저 소결법(SLS)을 사용한 시작품 제작 기술을 확립하고, 항공기용 기어박스 시작품 제작에 성공적으로 적용하였다.
- (2) SLS 시작품을 활용하여 진공주형기법에 의한 실리콘 몰드 및 왁스패턴의 제작, 로스트왁스법에 의한 셀 몰드 제작 및 이를 사용한 인베스트먼트 주조 공정 등을 거쳐 최종 제품을 단시간 내에 생산할 수 있었다.
- (3) 제품의 정밀도 향상을 위해 초기 제품설계시 각 공정에서 발생하는 치수오차를 미리 예측하여 이를 고려한 여유팽창율을 부여함으로써 결과적으로 원하는 치수정밀도를 얻을 수 있었다.

이러한 연구결과는 기존에 형상의 복잡성 및 치수정밀도의 한계 등의 제약조건으로 인해 제한적으로 적용되어 왔던 패속조형기법의 단점을 극복하여 패속 금형제작에의 활용 가능성을 제시하였다고 사료된다. 향후에는 본 연구에서 개발된 SLS 시작품의 정밀도 향상기술을 바탕으로 금속분말을 사용하여 금형을 직접 제작하는 패속 금형제작으로의 활용도 가능하리라 전망된다.

참 고 문 헌

- (1) 양동열, "패속 3차원 조형법의 소개와 패속 금형제작에의 응용", 제 1회 패속 3차원 조형 및 금형기술혁신 심포지움, pp. 1~14, 1995.
- (2) 박근, 이상찬, 정준호, 양동열, 윤재륜, "패속 3차원 조형법을 이용한 시작기술 및 시작금형 제작기술 개발", 대한기계학회논문집(A), 제 20권 제 5호, pp. 1582~1589, 1996.
- (3) 명경학, 전병철, 김재도, "TrueForm과 폴리프로필렌 분말을 이용한 선택적 레이저 소결", 패속시작기술연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 8~15, 1998.
- (4) 정해도, "진공주형을 이용한 패속금형제작", 패속시작기술연구회 춘계학술대회 논문집, pp. 65~73, 1998.
- (5) A. Arthur, P. Dicken, and C. Cobb, "Using Rapid Prototyping to Produce Electrical Discharge Machining Electrodes", Rapid Prototyping Journal, Vol. 2, No. 1, pp. 4~12, 1996.
- (6) Prasad K. D. V. Yarlagadda, I. P. Ilyas, and P. Christodoulou, "Evaluation of Rapid Tooling Produced by Nickel Electroforming and Stereolithography for Sheet Metal Forming", Proc. of AFDM'99, pp. 601~608, 1999.
- (7) [Http://www.expresstool.com/e_concol.html](http://www.expresstool.com/e_concol.html)
- (8) DTM Corporation, The Sinterstation System 2500 User's Guide, 1997.
- (9) [Http://www.dtm-corp.com/Technology/sinterdata25.htm](http://www.dtm-corp.com/Technology/sinterdata25.htm)
- (10) DeGarmo, Black, Kohser, Materials and Processes in Manufacturing, Macmillan Publishing Company, 1990.
- (11) DTM Corporation, The Sinterstation System 2500 SLS Geometry Tools Guide, 1996.