

사출성형품의 역공학에서 Geometry 정보를 이용한 정밀도 향상에 관한 연구

김연술*, 이희관**, 黃錦鐘*, 공영식***, 양균의****

A Study on Improvement of Accuracy using Geometry Information in Reverse Engineering of Injection Molding Parts

Yeun-Sul Kim*, Hi-Koan Lee**, Jing-Chung Huang*, Young-Sik Kong*** and Gyun-Eui Yang****

ABSTRACT

This paper proposes an error compensation method that improves accuracy with geometry information of injection molding parts. Geometric information can give an improved accuracy in reverse engineering. Measuring data can not lead to get accurate geometric model, including errors of physical parts and measuring machines. Measuring data include errors which can be classified into two types. One is molding error in product, the other is measuring error. Measuring error includes optical error of laser scanner, deformation by probe forces of CMM and machine error. It is important to compensate these in reverse engineering.

Least square method (LSM) provides the cloud data with a geometry compensation, improving accuracy of geometry. Also, the functional shape of a part and design concept can be reconstructed by error compensation using geometry information.

Key Words : Molding error (성형 오차), Measuring error (측정 오차), Probe forces (프로브 접촉력), CMM (Coordinate Measuring Machine), Least square method (최소자승법)

1. 서론

역공학(Reverse Engineering)은 이미 존재하는 제품형상을 측정하여 공학적 개념이나 형상 모델을 추출하는 기술이며, 물리적인 모델로부터 수학적 모델을 얻는 공학이라 말할 수 있다.⁽¹⁾ 이것은 설계와 생산과정에서 새로운 모델을 개발하거나 수정하는 과정에서 RP(Rapid Prototyping)나 NC가공 등에 적용되어 개발기간을 단축하였으며, 기존의 금형이

나 제품의 복제 또는 검사(inspection), 더 나아가서 의료분야에도 적용되어왔다.⁽²⁾ 역공학의 공정은 주로 4단계로 이루어지는데, 그 첫 번째가 대상물의 측정 데이터를 얻는 것이다. 그 다음 단계로, 얻어진 측정 데이터를 전처리(preprocessing)하고, 이를 바탕으로 영역을 분할하여 곡면생성 단계를 거쳐 최종적으로 하나의 모델을 생성하게 된다. 각 단계마다 여러 연구가 수행되어지고 있으며, 그 목표를 시간 단축이나 정밀도 향상에 두고있다. 본 논문은

⁽¹⁾ 2002년 2월 27일 접수
* 전북대학교 대학원 기계공학과
** 전북대학교 자동차 부품·금형 TIC
*** 전북 지방 중소기업청
**** 전북대학교 기계항공시스템공학부

정밀도 향상을 목표로 하고 있으며, 이를 위해 수행된 연구 동향을 살펴보면 다음과 같다.

C. Menq⁽³⁾ 등은 CMM(Coordinate Measuring Machine)으로 측정된 점들을 정확히 지나는 곡률 연속인 단면곡선을 곡면 생성에 사용하기 위하여, 측정 오차를 줄이기 위한 방법으로 반복적인 CMM 측정으로 프로브(probe) 반경보정의 오차를 감소시키는 방법을 사용하였으며, 반복 과정에서 프로브의 측정 방향은 곡면의 법선 방향을 갖도록 하였다. 이관행^(4,5) 등은 전처리 단계에서 레이저 스캐너로 측정된 점 데이터의 오차를 줄이기 위해서 uniform grid를 이용한 데이터 감소 방법과 곡률을 고려한 non-uniform grid방법을 통한 데이터 감소방법을 제안하였다. 또 각 점들의 접선벡터를 추출하는 방법을 제시하여 3차원 grid를 이용한 데이터 감소 방법을 소개하였다. Park⁽⁶⁾ 등은 근사 오차에 따라서 곡면의 조정점 개수를 효율적으로 줄이는 알고리즘을 통하여 부드럽고 정확한 곡면모델 생성에 대하여 연구하였다. 이들의 연구는 측정 데이터가 정확하다고 인정한 후에, 점 데이터를 정확하게 지나는 곡선이나 곡면을 생성하는데 중점을 두었다.

그러나, 측정오차를 최소화한 후 얻어진 점 데이터라 하더라도, 이들 점 데이터를 정확하게 지나는 곡선과 곡면으로 완성된 모델은 대상물 측정 시에 발생하는 측정오차와 대상물이 원래 갖고 있는 성형오차로 인하여 제품이 갖는 기능적인 형상이 무시된 모델이 되기 때문에, 제품이 가져야 할 본래의 기능을 발휘하지 못하게 된다. 이러한 오차를 줄이기 위해서, 역공학 적용 시에, 제품의 기하학적 정보인 형상요소와 형상변환을 이용한 기하학적 보정이 요구되어진다.

본 연구에서는 측정된 점 데이터를 가지고 제품에서 추출된 기하학적 정보를 이용하여 측정 데이터가 가지는 여러 가지 요인의 오차를 보정 함으로서 역공학을 통한 제품의 정밀도를 높이는 방안을 제시하였다.

2. 측정 데이터의 오차

역공학을 적용하기 위해서 얻어진 측정 데이터는 여러 가지 오차를 포함하게 되며, 크게 두 가지로 나누어 생각할 수 있다. 첫째, 대상물이 가지고 있는 성형오차가 있고, 두 번째로는 대상물을 측정할 때 발생하는 측정오차가 있다.

2.1 성형오차

대상물이 본래 갖게 되는 성형오차는 제품이 생산될 때 발생하는 오차로 여러 가지 요인에서 기인한다. 이러한 오차는 제품의 치수나 기하학적 형상요소를 변형시키는 원인이 되어 제품의 치수정밀도나 기하공차에 악영향을 끼치게 된다.

사출성형품의 경우, 성형오차를 야기시키는 주된 원인은 재료가 갖는 수축이다. 이것은 싱크마크(sink mark) 또는 휨, 굽힘, 비틀림 등으로 제품의 치수와 기하학적 형상에 변형을 주게 된다고 보고되어있다.⁽⁷⁻⁸⁾ 싱크마크는 제품의 표면에 오목한 형상으로 남게 되는 성형불량으로 보스(boss), 리브(rib), 비드(bead) 부위에 주로 나타난다. 싱크마크는 제품 두께의 차이에서 오는 냉각속도와 수축율의 차이가 원인이 된다. 휨 또는 굽힘, 비틀림 또한 수축이 주된 원인이며, 냉각시간의 차이에 의해서 발생하는 결함이다. 이외에도 사출성형품의 형상에 결함을 주는 인자에는 잔류응력, 금형온도 등 여러 가지 성형조건이 있다.

이러한 결함을 해결하기 위해서 사출성형품의 박막화가 이루어지고 있으나, 이들 형상 결함이 완전히 제거되지는 않고 있다. 결국, 역공학 시에 성형오차로 남게 되어 정밀도에 영향을 끼치게 된다.

2.2 측정오차

2.2.1 CMM(Coordinate Measuring Machine)

CMM(Carl Zeiss co., Prismo Vast)장비는 정밀도가 높고 잡음으로부터 영향을 거의 받지 않는 대표적인 접촉식 측정기이다. CMM장비의 경우, 측정되어지는 좌표 값은 프로브 볼 중심이 얻어지기 때문에 프로브 반경보정이 측정 데이터의 정밀도에 중요하게 작용한다. 일반적인 프로브 반경보정은 Fig. 1에서와 같이 프로브의 측정 방향으로 반경 만큼 보정되어 식 (1)과 같이 표현된다.

$$P_i = P_c - r \vec{T} \quad (1)$$

여기서, P_i 는 프로브 측정방향으로의 프로브 선단 좌표 값, P_c 는 프로브 볼의 중심 값, r 은 프로브 볼의 반경 값, \vec{T} 는 프로브의 측정 방향이다.

하지만, 실제 자유곡면 측정 시 측정되는 곡면의 법선방향을 알지 못 하기 때문에, 정확한 측정 방향으로 측정이 이루어지지 않는다. 이 때문에 실

제 접촉점과 보정점이 일치하지 않으므로 오차가 발생하게 된다. 여기서 발생하는 오차를 줄이기 위해서, offset surface 개념⁽⁹⁾을 Fig. 1과 같이 사용한다. 프로브가 어떤 방향에서든지 접근하여 곡면 위의 모든 점에 접촉하더라도, 프로브의 중심은 offset surface 위에 위치하게 된다. 결과적으로 offset surface의 법선 방향(\vec{n})을 계산하여, 이 방향으로 프로브 반경(r)만큼 offset 시킴으로써 실제 곡면의 좌표 값을 얻게 되며, 식 (2)와 같이 표현된다.

$$P_s = P_c - r \vec{n} \quad (2)$$

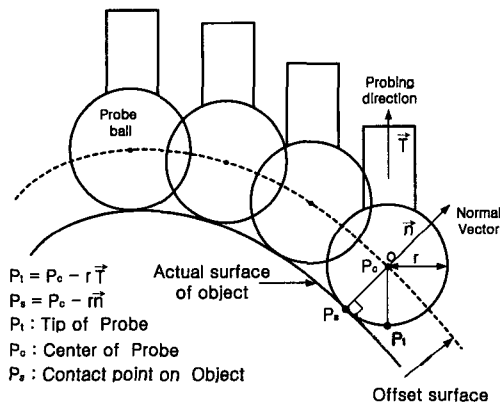
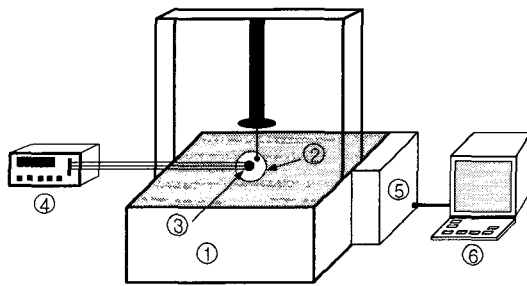


Fig. 1 Offset surface concept



- ① CMM ② Object ③ Strain gage
- ④ Strain indicator ⑤ Controller ⑥ PC

Fig. 2 Apparatus of measurement

그러나, 대상물의 형상과 재질에 따라서 프로브 접촉력에 의한 변형이 발생하게 된다. 두 개의 성형제품을 대상으로 프로브 접촉력을 0.1N, 0.2N, 0.4N 으로 변화시켜 각각 세 곳을 측정하여 변형량

을 알아보았다. Fig. 2는 실험장치 개략도를 보여준다.

측정 결과는 Fig. 3에서 보여지는 것과 같이 측정 대상물의 형상과 재질에 따라 다소 차이가 있음을 알 수 있다. (a)와 (b)경우는 사출성형품으로 최대 변형량을 비교하여 보면, (a)의 경우에 $4.473\mu\text{m}$ 로 (b)의 경우 $0.136\mu\text{m}$ 에 비하여 변형량이 많음을 알 수 있다. 고정 방법에 따라 대상물의 형상을 분류한다면, (a)의 경우는 외팔보 조건으로 고정된 상태이고, (b)는 (a)의 경우보다는 구속이 많은 경우로 고정된 상태이다. 결과적으로 정밀도를 보장하는 접촉식 측정에서도 대상물의 재질이나 형상에 따라서 프로브 접촉력에 의한 측정오차를 갖게 됨을 알 수 있다.

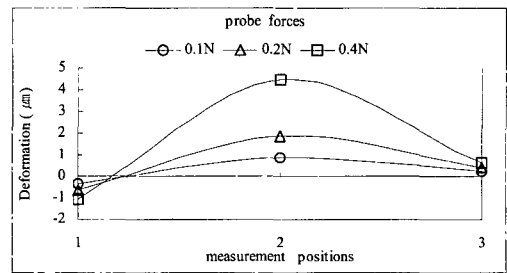


Fig. 3(a) Error by probe force in Fan

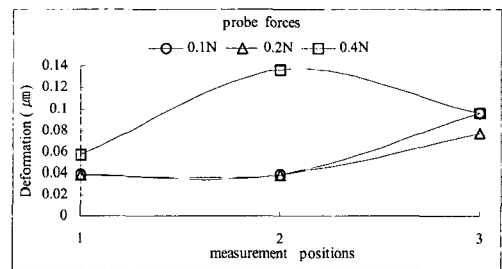


Fig. 3(b) Error by probe force in DY (Deflection Yoke) separator

2.2.2 레이저 스캐너(Laser scanner)

레이저 스캐너(Surveyor DS-4060)는 비접촉식 측정기 중에서 많이 사용되고 있는 측정기이며, CMM장비에 비하여 측정속도는 빠르지만 정밀도는 다소 떨어진다. 측정원리는 Fig. 4와 같이 좌표 값을 추출하기 위한 CCD장치와 광원 사이의 각도와 대상물과의 거리를 이용하는 삼각법(triangulation)

method)을 이용한다. 측정 시에 noise에 의한 spike를 갖게 되며, 측정 표면과 레이저 빔이 이루는 각이 적정 각도 보다 커지게 되면 shadow효과로 인하여 정확도가 떨어지는 데이터를 얻게 된다. 측정된 x, y값은 프로브가 위치한 장비축의 좌표 값을 갖지만, z값은 장비축과 CCD카메라에서 얻어진 값으로부터 프로브와 물체간의 거리가 계산되므로 x, y값에 비해 정밀도가 상대적으로 떨어지게 되며, 대략 $\pm 10\mu\text{m}$ 의 오차를 갖는다고 보고 되어있다.⁽¹⁰⁾

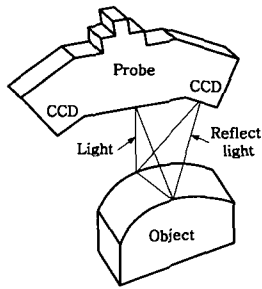


Fig. 4 Principle of the laser scanner

3. 기하학적 보정

3차원 형상을 이해하기 위해서는 기하학적 형상요소와 형상요소의 변환이라고 하는 기하학적 특성이 필요하다. 기하학적 형상요소에는 점(point), 선(line), 곡선(curve), 다각형(polygon), 곡면(surface) 등이 있으며, 형상요소의 변환에는 이동(translation), 축적(scale), 회전(rotate), 대칭(reflection), 전단(shearing) 등이 있다.

제품의 기능적인 형상들은 기하학적 형상요소와 이들의 변환들로 구성되어 있다. 유체기계의 부품 중의 하나인 임펠러(impeller)는 유체의 효율적인 흐름을 위해서 접선 연속인 자유형상의 ruled 곡면을 가지며, LED(Light Emission Diode) 광학 기구는 발광과 수광을 위한 구면과 비구면을 갖게 된다.

이들 제품을 측정하여 얻어진 데이터는 여러 가지 요인에 의한 오차로 인하여 기하학적 특성에 대한 불충분한 정보를 갖게 된다. 또한 각각 측정된 데이터가 병합(registration) 될 때, 이들 기하학적 특성을 상실하게 된다. 그래서 측정 데이터에 제품이 갖는 기하학적 특성을 부가해서 본래 제품의 기하학적 형상을 복원 할 필요가 있다.

사출성형품의 경우, 성형 시에 생성되는 제품오차와 측정 시에 발생하는 측정오차를 갖게 된다. 이들 오차를 포함한 데이터로부터 기하학적 형상을 추출하기 위해서 최소자승법(least square method)이 사용된다.⁽¹¹⁾ 기하학적 형상 복원을 위해서, 먼저 제품에서 요구되어지는 기하학적 형상을 결정하고, 측정 데이터로부터 기하학적 형상요소를 찾기 위해서 최소자승법이 적용된다. 기하학적 형상이 결정되어지고 형상요소의 치수가 계산되어진다.

3.1 곡선 생성

곡선은 식 (3)과 같은 B-spline곡선을 사용한다.⁽¹²⁾ B-spline곡선은 연속성이 보장되는 상태에서 조정점(control point)을 이동하여 형상변화가 가능하고, 곡선의 국부적인 수정이 용이한 특성을 가진다.

$$P(t) = \sum_{i=1}^{n+1} B_i N_{i,k}(t) \quad (3)$$

t 는 변수로 0과 1 사이의 값을 갖는다. B_i 는 조정점이며, $N_{i,k}$ 는 B-spline곡선의 블렌딩 함수(blending function)이며, 다음과 같이 정의된다.

$$N_{i,k}(t) = \frac{(t-x_i) N_{i,k-1}(t)}{x_{i+k-1} - x_i} + \frac{(x_{i+k} - t) N_{i+1,k-1}(t)}{x_{i+k} - x_{i+1}} \quad (4)$$

$$N_{i,1}(t) = \begin{cases} 1, & \text{if } x_i \leq t < x_{i+1} \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases}$$

여기서, x_i 는 knot이고 k 는 차수이다.

변수 t 는 chord length방법으로 산출한다. 만일 n 개의 데이터가 주어졌다면, l 번째 변수 t_l 은 다음과 같이 표현된다.

$$t_l = \frac{\sum_{s=2}^l |D_s - D_{s-1}|}{\sum_{s=2}^n |D_s - D_{s-1}|} \quad (5)$$

여기서, $|D_s - D_{s-1}|$ 는 주어진 점들에서 이웃하는 두 점 사이의 chord length이고, $l \geq 2$ 이며, $t_1 = 0$ $t_n = 1$ 이다.

최소자승법에 의해서 주어진 점들을 근사화 하기 위해서 적절한 조정점을 찾게 되며, 오차 (E)는 다음과 같이 표현된다.

$$E = \sum_{i=1}^n |Q_i - P(t_i)|^2 \quad (6)$$

여기서, Q_i 는 i 번째 주어진 데이터이며, $P(t_i)$ 는 B-spline 근사 함수의 i 번째 값이다.

$$B_1 = P(0), \quad B_{n+1} = P(1)$$

식 (6)의 오차를 최소로 하는 최적의 조정점을 찾기 위한 식이 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{\partial E}{\partial B_i} = 2 \sum_{i=1}^n \left[\{Q_i - P(t_i)\} \cdot \left\{ \frac{Q_i - P(t_i)}{\partial B_i} \right\} \right] \quad (7)$$

조정점이 식 (7)에 의해서 결정되면, B-spline 곡선은 식 (3)에 의해서 계산되어진다.

3.2 곡면 생성

3차원 곡면은 기하학적 형상요소의 변환에 의해서 생성된다. 예를 들면, 선, 다각형, 곡선 등이 공간상의 경로를 따라 변환하는 것이다. 이러한 곡면을 sweep 곡면이라 부르며, sweep 곡면의 식은 다음과 같이 표현된다.⁽¹³⁾

$$S(u, v) = \alpha(v) S_0(u, v) + \beta(v) S_1(u, v) \quad (8)$$

여기서, S_0 와 S_1 는 안내곡선과 단면곡선의 블렌딩 곡면이며, u 와 v 는 변수이다. S_0 와 S_1 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} S_0(u, v) &= \alpha(v) [G_0(u) + D_0(v)] \\ &\quad + \beta(v) [G_0(u) + D_1(v)] \\ S_1(u, v) &= \alpha(v) [G_1(u) + D_0(v)] \\ &\quad + \beta(v) [G_1(u) + D_1(v)] \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, $G_i(u)$, [$i=0, 1$]는 단면곡선이며, $D_i(v)$, [$i=0, 1$]는 안내곡선이다. α 와 β 는 접선연속인 블렌딩 함수(blending function)이다.

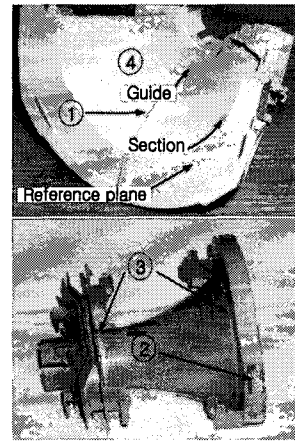


Fig. 5 Separator

4. 적용사례

기하학적 보정이 DY(Deflection Yoke) 편향코일 기구 중의 한 부품인 세퍼레이터(separator)에 적용되었다. Fig. 5는 세퍼레이터를 보여준다. ①은 세퍼레이터에 강성을 주기 위한 리브(rib) 형상이고, ②는 조립 시에 체결되는 부분이다. ③은 세퍼레이터의 주요 곡면과 다른 면이 만나는 경계부위이며, ④는 세퍼레이터의 주요 곡면이다. 대상곡면은 원호(arc)인 단면곡선과 자유곡선인 안내곡선으로 이루어졌으며, 특히 전자 방출을 고려하여 형성된 곡면이다. 곡면이 갖는 기하학적 특성은 접선연속이며, 단면 곡선이 리브(rib) 형상의 중립면을 기준으로 하여 대칭이다. Fig. 6은 레이저 스캐너와 CMM 장비로 측정된 각각의 측정 데이터를 보여준다.

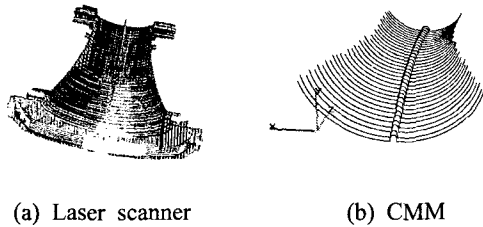


Fig. 6 Scanned data

Fig. 7은 기하학적 보정을 이용한 적용사례의 절차를 보여준다. 우선, Fig. 5의 영역 ①과 ③은 기하학적 보정에 오류를 줄 수 있는 영역이기 때문에 측정 데이터로부터 삭제된다. 그 다음 단계로, 기준 평면(reference plane)의 법선 방향(Z-direction)으로 기준 평면에 평행한 단면을 1mm 간격으로 생성 한 후에 이들 단면의 점 데이터를 측정 데이터로부터 추출한다. 기준 평면은 성형 시에 가장 적은 오차를 갖고 성형된 영역이다. 추출된 각각의 단면 데이터를 근사법에 의해서 원호로 근사화 한다.

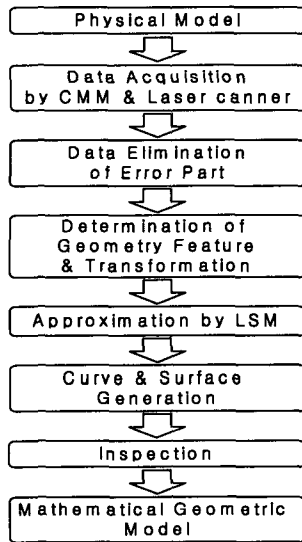
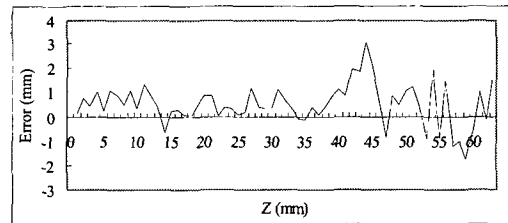


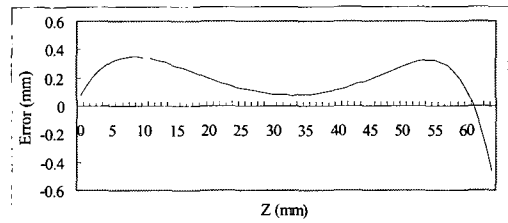
Fig. 7 Procedure of reverse engineering using geometry information

근사화 된 단면 원호는 제품이 갖는 기하학적 특성을 이용한 기하학적 보정을 위하여 대칭성이 비교된다. Fig. 8(a)와 Fig. 9(a)는 근사화 된 양쪽 단

면의 원호가 서로 비교되어진 오차를 보여준다. 레이저 스캐너의 경우, Fig. 8(a)에서와 같이 가장 작은 오차는 0.033mm(Z=18mm인 단면)로 나타났고, 가장 큰 오차는 3.065mm(Z=44mm인 단면)이며, 평균 오차가 0.78mm로 나타났다. 대칭성을 만족시키기 위해서 0.5mm이내의 오차를 갖는 단면 원호를 선택하였다. 이것은 최소자승법에 의해서 단면원호의 경계점을 따라 생성되는 안내곡선이 가져야하는 연속성을 양쪽 곡면에 동일하게 부여할 수 있다. 이로 인하여 안내방향으로 기하학적 보정이 이루어지게 된다. 보정 후 생성된 곡면으로서 동일 단면 위에 있는 양쪽 원호의 비교된 반경의 오차가 Fig. 8(b)와 Fig. 9(b)에서 보여진다. Fig. 8(b)에서 보여지는 것과 같이 평균 오차가 0.202mm로 Fig. 8(a)에 비하여 약 0.578mm 감소했음을 알 수 있다. CMM장비의 경우, Fig. 9(a)에서 보여주는 것처럼 근사화 된 양쪽 원호 반경의 오차의 평균 오차가 0.208mm로 나타났고, 0.3mm 이내의 오차를 갖는 원호를 선택했다. 선택된 단면 원호에 단면 방향과 안내 방향으로 기하학적 보정이 이루어진 곡면의 양쪽 원호의 비교값은 0.172mm로 감소했다.

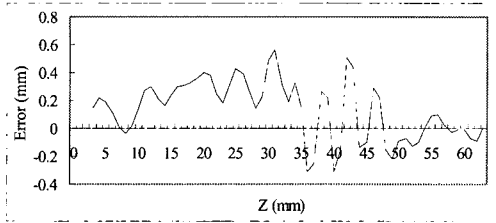


(a) Error between left and right radius [mean error : 0.78mm]

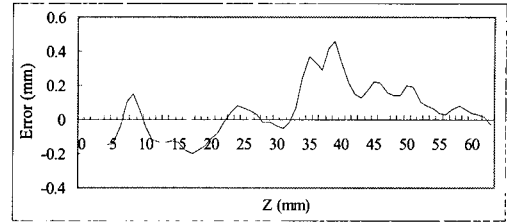


(b) Error between left and right radius by geometry compensation in section and guide curve [mean error : 0.202mm]

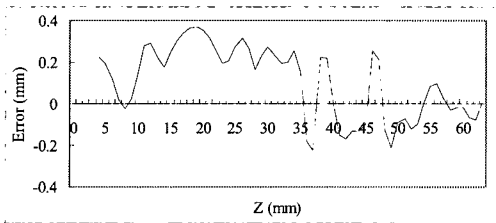
Fig. 8 Difference of radius in laser scanner data



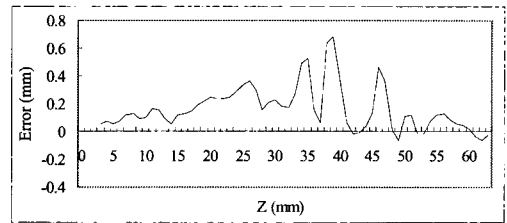
(a) Error between left and right radius [mean error : 0.208mm]



(c) Error in left side of separator by CMM [mean error : 0.128mm]



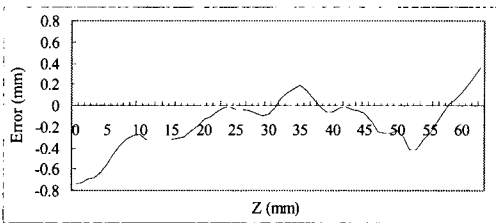
(b) Error between left and right radius by geometry compensation in section and guide curve [mean error : 0.172mm]



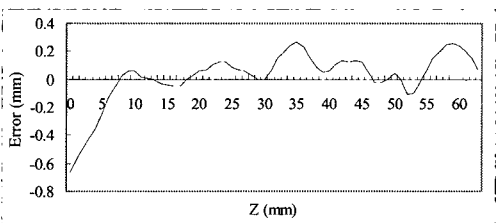
(d) Error in right side of separator by CMM [mean error : 0.170mm]

Fig. 9 Difference of radius in CMM data

Fig. 10 Error between radius in design data and compensated data



(a) Error in left side of separator by laser scanner [mean error : 0.224mm]



(b) Error in right side of separator by laser scanner [mean error : 0.125mm]

Fig. 10은 도면 데이터와 기하학적 보정이 이루어진 곡면 데이터사이에서 반경이 비교된 오차를 보여준다. Fig. 10(a)와 (b)의 레이저 스캐너의 경우와 Fig. 10(c)와 (d)의 CMM장비에서 나타난 평균오차를 고찰하여 보면, 동일 곡면인 (a)와 (c)에서 CMM장비의 평균오차가 레이저 스캐너의 평균오차보다 작게 나타났고, 동일 곡면인 (b)와 (d)에서는 레이저 스캐너의 평균오차가 작게 나타났다. 결과적으로, 역공학으로 생성된 모델의 정밀도는 측정장비의 정밀도 보다는 기하학적 보정의 영향이 더 많은 영향력을 가지고 있음을 알 수 있다.

Table 1은 기하학적 보정이 정밀도 향상에 기여하는 정도를 수치로 보여준다. Table 1에서 A는 Z축 방향으로 1mm 간격을 두고 추출된 단면 데이터가 원호로 근사화 된 원호의 반경과 도면의 반경이 비교된 오차의 평균값이며, B는 기하학적 보정이 행해진 후에 생성된 곡면의 반경과 도면의 반경이 비교된 오차의 평균값이다. Table 1에 나타난 것과 같이 기하학적 보정으로 정밀도가 향상되는 것을 알 수 있다. 그리고 오른쪽 곡면의 보정 결과를 보면, 측정 정밀도가 비교적 낮은 레이저 스캐너에서

도면과의 오차가 작게 나타났다. 결과적으로 CAD 모델의 정밀도는 측정장비의 정밀도 보다 기하학적 보정의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있다.

Table 1 Dimension comparison of design and approximated and geometric compensated data (unit : mm)

Machine	Laser scanner		CMM	
	Left side	Right side	Left side	Right side
A	0.488	0.425	0.138	0.198
B	0.224	0.125	0.128	0.170

note) A : Mean error of radius between design data and approximated data

B : Mean error of radius between design data and geometric compensated data

5. 결론

기존의 역공학의 연구는 측정 데이터를 정확히 지나는 곡선과 곡면을 생성하는 것에 집중되어 왔으나, 측정 데이터에는 제품의 성형 시에 발생하는 성형오차와 측정 시에 발생하는 여러 요인의 측정 오차가 포함되어 있기 때문에 역공학 곡면의 정밀도가 떨어지게 됨으로써 설계 개념을 완벽하게 복원할 수 없었다.

따라서 본 논문에서는 사출성형품의 역공학에서 기하학적 보정을 통한 정밀도 향상이 연구되었으며, 기하학적 형상과 치수를 복원하기 위해서, 제품의 기하학적 특성을 파악하고, 기하학적 정보에 근사법인 최소자승법(least square method)을 적용시켜, 기하학적 보정을 통해 모델의 정밀도를 향상시킬 수 있었으며, 제품의 설계 개념이 포함된 기하학적 모델을 추출할 수 있었다. 역공학을 통한 CAD모델의 정밀도에 미치는 영향은 측정장비가 갖는 정밀도의 영향보다 제품의 기하학적 특성을 이용한 보정의 영향이 더 크다는 것을 알 수 있었다.

참고문헌

1. Tamas Varady, Ralph R Matrin and Jordan Cox, "Reverse engineering of geometric models - an introduction," Computer-Aided Design, Vol. 29,

No. 4, pp. 255-268, 1997.
 2. Bidanda, B and Hosni, Y A, "Reverse engineering and its relevance to industrial engineering: a critical review," Computers Ind Engng, Vol. 26, No. 2, pp. 343-348, 1994.
 3. C. MENQ and F. L. CHEN, "Curve and Surface Approximation from CMM Measurement Data," Computer ind. Engng, Vol. 30, No. 2, pp. 211-225, 1996.
 4. 우혁재, 석태훈, 류재현, 이관행, "역엔지니어링을 위한 측정 점데이터 처리에 관한 연구," 한국 CAD/CAM학회 학술 발표회 논문집, pp. 24-29, 1999.
 5. 우혁재, 석태훈, 이관행, "전산 역설계를 위한 점 데이터 감소 방법 연구," 한국 정밀공학회 추계 학술대회 논문집, pp. 428-431, 1999.
 6. Park, H., "Smooth surface approximation to serial cross-sections," Computer-Aided Design, Vol. 28, No. 12, pp. 995-1005, 1996.
 7. 이성출, 플라스틱 사출 성형 조건 control법, 기전연구소, pp. 118-145, 2001.
 8. 홍명용, 사출 성형 기술 I, II, 기전연구소, pp. 189-200, 247-286, 1999.
 9. Myeong-Woo Cho, Tae-II Seo, Jae-Doc Kim and Oh-Yang Kwon, "Reverse Engineering of Compound Surfaces Using Boundary Detection Method," KSME International Journal, Vol. 14, No. 10, pp. 1104-1113, 2000.
 10. 최병규, 배석형, 유석규, 정원형, "쾌속제품개발을 위한 형상 역공학," 한국정밀공학회, 제17권, 제10호, pp. 17-25, 2000.
 11. Ingle, K A, "Reverse Engineering," McGraw-Hill, NJ, 1994.
 12. David F. Rogers and J. Alan Adams, Mathematical Elements for Computer Graphics, McGraw-Hill, Inc, pp. 306, 1990.
 13. Wen-Der Ueng, Jiing-Yih Lai, and Ji-Liang Doong, "Sweep-surface reconstruction from three-dimensional measured data," Computer-Aided Design, Vol. 30, No. 10, pp. 791-805, 1998.