

역설계 방법에 의한 시편 치수 형상의 오차율 분석

정현석^{a*}, 박수정^a, 유중학^b**Analysis of Master Dimensional Shape Error Rate According to Reverse Engineering Technique**Hyun-Suk Jung^{a*}, Su-Jung Park^a, Joong-Hak Yoo^b^a School of Mechatronic Engineering, Korea University of Technology and Education, 1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31253, Korea^b Department of Mechatronic Engineering, Korea University of Technology and Education, 1600, Chungjeol-ro, Byeongcheon-myeon, Dongnam-gu, Cheonan, Chungnam-do, 31253, Korea**ARTICLE INFO***Article history:*

Received	18	July	2016
Revised	1	September	2016
Accepted	8	September	2016

Keywords:

3D Printer
Aliasing
CT measuring machine
Measuring master
Reverse engineering

ABSTRACT

In this study, an experiment was conducted using a 3D scanner, commonly used in reverse engineering techniques, and the newly introduced CT measuring machine. The hole, width, and angle of specimens having various shapes were designated, the error rates in dimensional modelling generated during scanning with each device were compared, and the models were printed using a 3D printer. A secondary comparative analysis of the two printed specimens was conducted; the causes of dimension errors that occur during the printing process after scanning with each device and the differences associated with variation in shape were also analyzed. Based on the analysis results, the featured shape for each scanning application method and issues to consider in reverse engineering were presented, and the use of the CT measuring machine was recommended as a method to minimize error rates in dimensions and ensure efficient reverse engineering.

1. 서론

역설계^{1,2)}는 기존에 있는 제품의 모델링(modeling)을 활용하여 개발 및 제품 변경할 수 있는 다른 차원의 설계 방법을 말한다. 효과적인 역설계를 위하여 3차원 스캐닝(3D scanning) 기술을 접목시켜 다양한 분야에 적용되고 있다. 기업에서는 이를 일반화 기술 검증 후 적용하고 있으며, 다양한 신제품 설계 및 제조 단계에서 효율적으로 적용되고 있다. 3차원 스캐닝 기술을 응용한 역설계 방법은 설계 및 제조 시장에서 신제품 개발을 위한 시작 단계로 많이

사용된다. 이 단계에서 3D 프린터의 도입은 기존 역설계 방법을 시간과 비용 측면에서 보다 효율적인 시스템으로 변화하는 계기가 되었다. 과거 3차원 측정기와 3D 스캐너로 제품의 모델링 분석 등과 같이 한정적인 활용에 그치던 역설계 방법은 작업 프로세스 간의 연계 활동으로 일반적인 개발 시스템보다 다양하고 획기적인 방법으로 변화했다. 추후에는 다양한 제조업계에서 가공성 및 고정밀도를 요구할 것이며 이에 따라 역설계 방법 또한 더욱 발전할 것이다. 그러나 이러한 역설계 과정에서 3D 프린터의 정밀도는 제품의 품질과 생산성 향상에 저하 요인이 될 수 있다. 3D 프린터

* Corresponding author. Tel.: +82-31-610-0272

Fax: +82-31-610-0298

E-mail address: junghs@engel.co.kr (Hyunsuk Jung).

장비의 부족한 부분은 스캐닝 단계에서 보완되어야 하며 3D 프린터의 정밀도를 고려한 3D 스캐닝 기술력은 더욱 발달되고 있다. 스캐닝 기술의 발달은 3차원 스캔 방식을 넘어서 정밀측정뿐만 아니라 제품의 내부까지 스캔 가능한 X선 투과 방식의 CT 측정기^[3]로 이어졌다. 이와 같이 3D 프린터의 낮은 정밀도를 고려한 스캐닝 기술개발은 점차 확대되고 있으며 이런 여건들을 뒷받침해줄 역설계 방법이 중요시 될 것이다. 역설계의 대한 연구사례를 살펴보면 Choi^[4]는 재구성된 순공학 프로세스의 성능 및 제약 요구사항을 참고하여 이를 역공학 프로세스를 개선하는데 반영하였다. 또한, 개선된 역공학 프로세스를 지능형 종합 감시 시스템에 적용하여 활용 방법을 검증했다. Lee^[5]는 역공학에서 면기반 방법을 이용한 측정데이터의 영역화를 위하여 형상을 복원하는 프로세스를 구현하였고, 이에 대한 효율성을 검증했다. Jang^[6]은 CAD 모델이 없는 실물을 비-접촉식 측정방법을 이용하여 형상 특징에 적합한 측정경로를 알아내었고 정밀하고 효율적인 곡면 모델링이 가능하도록 하였다. 3D 스캐너의 대한 연구들을 보면 Han과 Lee^[7] 등은 마이크로 스테퍼(micro stepper)를 활용한 역설계 시스템의 성능을 평가를 위해 여러 물체를 측정하여 특성을 파악하였다. 본 연구에서는 3D 스캐너와 CT 측정기를 사용하여 역설계 시 발생하는 치수 오차율을 비교분석하고, 형상에 따라 미치는 영향을 확인하였다. 이를 통해 역설계 시 스캔 적용방법에 따른 특정 형상의 특징과 고려해야 할 사항을 제시하고자 한다.

2. 관련 이론

2.1 3D 스캐너

본 실험에서는 다양한 산업 분야에 널리 사용되고 있는 광학식 3D 스캐너를 선정하였고, 광학식 3D 스캐너의 원리는 Fig. 1과 같이 MTP (miniaturized projection technique) 방식을 선정하였다. MTP는 프로젝터를 기준하여 비대칭으로 위치한 2개의 고해상도 카메라를 사용한다. 카메라는 제품의 크기에 따라 프로젝터와 적당한 거리에 위치하며 2가지 패턴을 인식한다.

1차원 패턴 방식은 LCD 프로젝터나 움직이는 레이저(sweeping

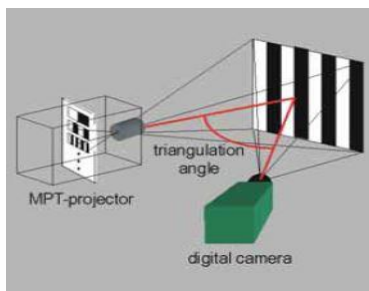


Fig. 1 Mechanism of MTP

laser)를 이용해 라인형태의 패턴을 물체에 훑어내는 방식이고, 2차원 패턴 방식은 격자무늬 또는 줄무늬이다. 이러한 패턴을 이용하여 물체를 투영하고 그 패턴의 특정한 형태를 파악해 3차원 정보를 얻어낸다. 라인을 구성하는 모든 화소의 깊이 값은 광삼각법 방식을 이용해 구해내며, 여러 방향에서 얻어진 원근 이미지를 합하여 최종 3D 데이터를 완성한다. 이러한 방식은 스캔영역 전반에 포함되어 있는 모든 피사체의 3차원 좌표를 한 번에 얻어내기 때문에 스캔 속도가 빠르다.

2.2 CT 측정기

CT(computed tomography)^[8]기술은 X선을 이용하여 의료영상, 재료분석 및 비파괴검사 등에 사용되고 있으며, 최근에는 이 기술이 적용된 CT 측정기가 개발되어 산업현장에서 형상길이 계측용으로 사용되고 있다. CT 측정기는 측정과 단층촬영이 결합된 측정기이다. 3D 스캐너와 달리 X-ray가 제품을 투과하면서 내·외부에 대한 3차원 측정이 가능한 특징이 있고, 측정과 검사뿐만 아니라 복잡한 제품의 내·외부에 결함도 확인할 수 있다. 이런 CT 측정기의 특징은 복잡한 형상 및 내부구조를 가진 제품 역설계 시 적용을 가능하게 할 수 있다. CT 측정기와 CT 기술의 발달은 정밀 기계 산업에서도 유용하게 적용될 수 있으며 경쟁력 확보를 위한 발달과 연구개발이 지속될 것으로 예상된다.

본 실험에서 사용한 CT 측정기의 측정원리는 Fig. 2와 같으며, 의학에서 사용되는 X-ray 기술과 유사한 원리이다. X-ray는 전자기장 빔을 통해 대상을 투과하는데, 이 빔은 디텍터(detector) 표면과 만나 대상의 두께와 흡수력 특징에 따라 다양한 강도를 기록한다. 제품을 360° 회전시켜 내·외부를 스캔하며 2차원의 흑백 명암 이미지와 3차원 이미지로 표현이 가능하다.

3. 실험장치 및 실험방법

Fig. 3은 본 실험에 사용한 실험장비 및 평가대상 항목에 대해 설명하였다. (a)는 스캔방식의 광학식 3D 스캐너(Model: Smart

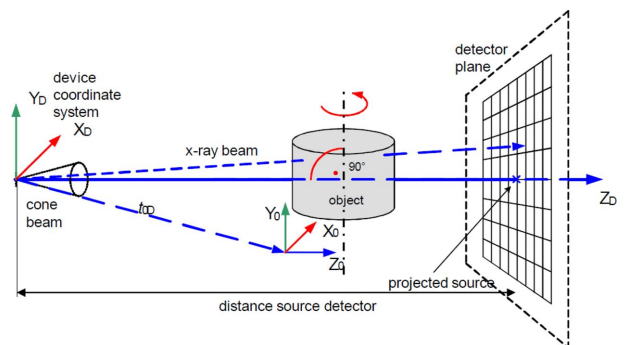


Fig. 2 Mechanism of CT measuring machine

scan 3D, Breuckmann Co.)이며, 광원은 100 W이고 카메라 해상도 500만 화소, 스캔범위는 대각선으로 90~600 mm, 정밀도는 5~12 μm 이다. (b)는 CT 측정기(Model: Metrotom 1500, Zeiss Co.)이며, 촬영한 영상을 3D 모델링으로 변환시켜 측정하는 방식이다. X-ray의 튜브 전력은 255 W이고 스캔범위는 \varnothing 300×350, 기계정밀도는 8 μm 이다. (c)는 3D 프린터(Model: Formiga P110, Eos Co.)이며 레이저 소결 공정으로 제작되는 방식이다. 정밀도는 50~60 μm 이며 인쇄 레이어 적층 두께는 0.1 mm이고 재

료는 폴리아미드(polyamide)를 사용하였다. (d)는 3차원 측정기(Model: MHB-101508C, Dukin Co.)이며 헤드는 PH10M, 센서는 TP2를 사용하였고, 최대 허용오차는 0.2 μm 이다. (e)는 3D 프린터로 제작한 출력물과 모델링의 형상 중 Table 1과 같이 시편 형상의 내경, 외경, 외곽 치수, 각도 등을 선정하여 치수 오차율을 확인하였다.

4. 결과 및 고찰

4.1 3D 스캐너 치수 오차율

기존의 역설계 기법을 고려하여 제품 모델링을 얻기 위한 방법으로 3D 스캐너와 CT 측정기를 사용하였다. 이 때 3D 스캐너를 통한 역설계 시 발생할 수 있는 치수 오차율을 확인하고, 특정 형상에 따른 특징과 이에 미치는 영향을 알아보았다. 각 장비의 모델링으로 제작된 시편 측정 시 측정오차를 줄이기 위하여 CNC 자동측정법을 선택하였으며, 총 10회 반복측정 후 평균값을 실험데이터로 적용하였다. 측정결과 외경, 내경 및 외곽 등에서는 0.002~0.003 mm의 측정 편차가 발생되었으며, 각도는 0.01~0.02°의 편차가 발생되었다.

Fig. 4는 Table 1에 표기된 내경 기준으로 3D 스캐너로 스캔한 모델링과 3D 프린팅한 시편의 치수 오차율을 비교한 그래프이다. 모델링은 내경 10 mm에서 1.95%, 내경 15 mm에서 0.73%, 내경 30 mm에서 0.47%의 치수 오차율이 발생하였다. 3D 프린터로 제작된 시편은 내경 10 mm에서 5.74%, 내경 15 mm에서 3.02%, 내경 30 mm에서 1.98%의 치수 오차율을 나타내었다.

Fig. 5는 외경을 3D 스캔한 모델링과 이를 3D 프린팅한 시편의 치수 오차율 비교한 그래프이다. 모델링의 치수 오차율은 외경 13 mm에서 0.06%, 외경 14 mm에서 0.15%, 외경 24 mm에서 0.09%이었다. 3D 프린터로 제작된 시편의 치수 오차율은 외경 13 mm에서 0.09%, 외경 14 mm에서 0.36%, 외경 24 mm에서는

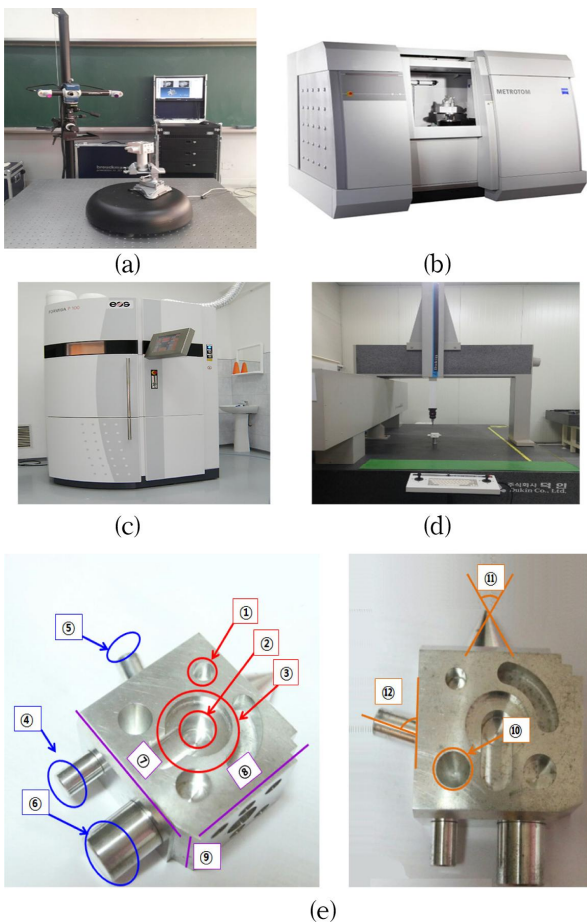


Fig. 3 Experiment equipment and measurement position

Table 1 Injection molding experiment conditions

No.	Dimension	No.	Dimension
1	\varnothing 10/15 (depth)	7	78 (X edge width)
2	\varnothing 15/10 (depth)	8	78 (Y edge width)
3	\varnothing 30/5 (depth)	9	50 (Z edge width)
4	\varnothing 13/out dia	10	45°
5	\varnothing 14/out dia	11	59°
6	\varnothing 23/out dia	12	75°

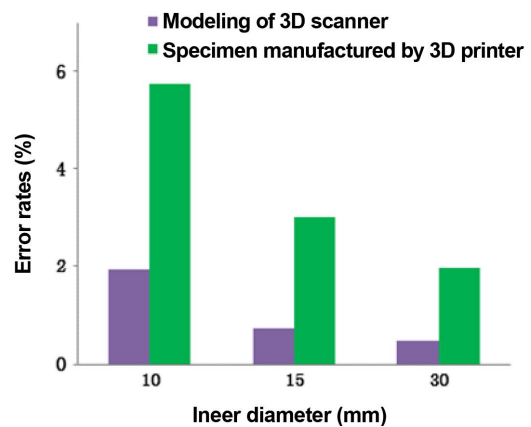


Fig. 4 Inner diameter error rates of 3D scanner

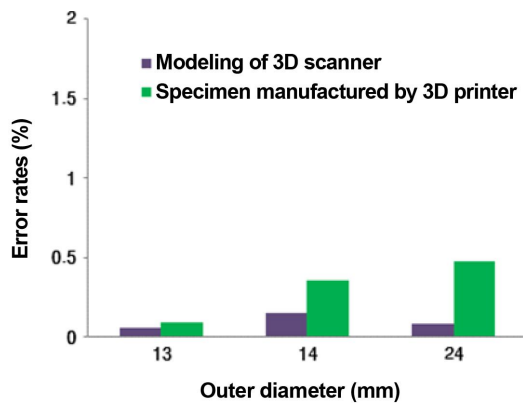


Fig. 5 Outer diameter error rates of 3D scanner

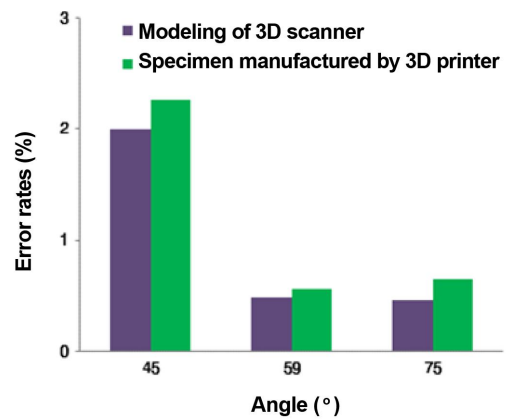


Fig. 7 Angle error rates of 3D scanner

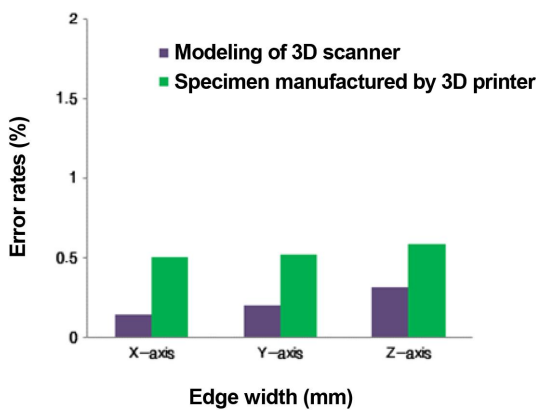


Fig. 6 Edge width error rates of 3D scanner

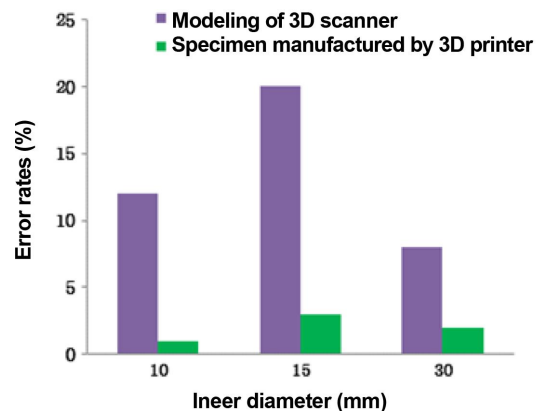


Fig. 8 Inner diameter error rates

0.47%이었다. 이 결과 3D 스캐너로 역설계를 할 경우 외경에 비해 내경 치수 오차율이 더 높았으며, 가장 오차율이 크게 발생한 지점은 내경 중 가장 작고 깊은 10 mm이었다. 이는 외부의 광 간섭으로 인해 형상이 왜곡되거나, 레이저 광이 등근 표면에 닿아 반사될 때 일어나는 난반사의 영향으로 추측된다.

Fig. 6은 3D 스캐너로 외곽 치수를 스캔한 모델링과 그를 3D 프린팅한 시편의 외곽 치수 오차율을 비교한 그래프이다. 모델링 데이터는 X축 78 mm에서 0.14%, Y축 78 mm에서 0.21%, Z축 50 mm에서 0.32%의 치수 오차율이 발생하였다. 3D 프린터로 제작된 시편은 X축 78 mm에서 0.50%, Y축 78 mm에서 0.52%, Z축 50 mm에서 0.59%의 치수 오차율을 나타냈다. 확인 결과 외곽 치수의 경우 레이저 광이 시편 겉 표면에 골고루 분포되지만 모서리 끝 부분에 광자가 닿아 반사되면서 산란이 발생된 것으로 확인되며, 이 부분은 3D 스캔 시 영향을 미치는 것으로 보인다.

Fig. 7은 3D 스캐너로 외곽 치수를 스캔한 모델링과 그를 3D 프린팅한 시편의 각도 치수 오차율을 나타낸 그래프이다. 모델링 각도 치수 오차율은 45°에서 2.0%, 59°에서 0.49%, 75°에서 0.46%이었다. 3D 프린팅한 시편의 각도 치수 오차율은 45°에서 2.26%, 59°에서 0.56%, 75°에서 0.64%이었다. 분석한 결과 각도

중 내측 테이퍼 각도에서 비교적 높은 오차율이 발생함을 알 수 있었다. 이는 내측 테이퍼 형상의 등근 표면에서 발생한 난반사가 치수에 영향을 준 것으로 판단된다.

이를 통해 내부에 존재하는 등근 형상, 즉 내경과 테이퍼 각도가 작고 깊을 때 오차율 발생이 높아짐을 확인하였다. 또한, 전반적으로 3D 프린팅된 시편의 치수 오차율이 높은 것으로 보아 모델링을 STL로 변환 후 이를 프린팅 하는 과정에서 추가적인 오차율이 발생한 것으로 확인되었다.

4.2 CT 측정기 치수 오차율

CT 측정기의 영상 품질은 시편의 밀도에 따라 달라지는 특징이 있다. 밀도가 현저하게 높은 물체는 상대적으로 매우 큰 값의 감쇄 계수를 갖게 되고, CT 영상에 빔 경화(beam hardening), 산란(scatter), 줄무늬 아티팩트(artifact) 등을 발생시킨다. 본 실험에서는 이러한 아티팩트가 역설계 과정 중에 미치는 영향을 확인하기 위해 알루미늄 합금 시편을 선정하여 보정 전·후를 비교하였다. 실험에 사용된 알루미늄 합금은 밀도가 2.8 g/cm³로 보통의 1.34~1.42 g/cm³인 열가소성 수지와 1.34~2.3 g/cm³인 열경화성

수지에 비하여 밀도가 높다.

Fig. 8은 아티팩트 보정 전·후 시편형상 중 내경의 치수 오차율을 비교한 그래프이다. 보정 전 치수 오차율은 내경 10 mm에서 12.43%, 내경 15 mm에서 19.49%, 내경 30 mm에서 6.27%이었다. 아티팩트 보정 후 치수 오차율은 내경 10 mm에서 1.17%, 내경 15 mm에서 2.53%, 내경 30 mm에서 1.85%이었다. 실험결과 보정 전·후 치수 오차율이 크게 발생하였으며, 이는 그래프를 통하여 확인할 수 있다. 금속 시편인 경우 발생될 수 있는 아티팩트는 필요한 영상의 품질에 악영향을 크게 미치게 된다. STL 파일을 변환하는 과정에서 발생하는 오차율은 각 장비에서 모델링한 치수와 프린팅 시편의 치수의 차로 정의할 수 있다. 이는 단순히 STL을 변환하는 과정에서 발생하는 오차율을 정확하게 구할 수 없으며, 모델링 데이터를 3D 프린팅 하는 과정에서 오차율에 영향을 미칠 수 있는 요인이 STL 변환 및 3D 프린팅 시 발생하는 수축률을 의미한다. 그러므로 3D 프린팅 시 치수 오차율이 더 높게 발생하기 때문에 정확한 데이터를 위하여 아티팩트 보정이 필요하다. 이와 같이 본 실험에서는 아티팩트 보정의 필요성을 확인하였고, 이에 따라 보정된 값으로 실험을 진행하였다.

Fig. 9는 CT 측정기로 내경을 스캔한 모델링과 3D 프린팅한 시편의 치수 오차율을 비교한 그래프이다. 측정방법은 3D 스캐너와 동일하게 10회 측정하여 평균값으로 설정하였다. 내경, 외경 및 외곽 치수는 0.001~0.003 mm의 편차가 발생하였으며, 각도 측정 시에는 0.01~0.02°의 편차가 발생되었다. 모델링 데이터는 내경 10 mm에서 0.05%, 내경 15 mm에서 0.55%, 내경 30 mm에서 0.06%의 치수 오차율이 발생하였다. 3D 프린터로 제작된 시편은 내경 10 mm에서 1.17%, 내경 15 mm에서 2.53%, 내경 30 mm에서 1.85%의 치수 오차율을 나타내었다. 실험결과 모델링보다 3D 프린터로 제작한 시편의 치수 오차율이 더 높게 발생함을 알 수 있었다. 이는 앞서 언급한 바와 같이 금속재질의 특성상 밀도가 높고 두꺼운 금속 시편에 의해 발생한 아티팩트가 원인이며, 보정

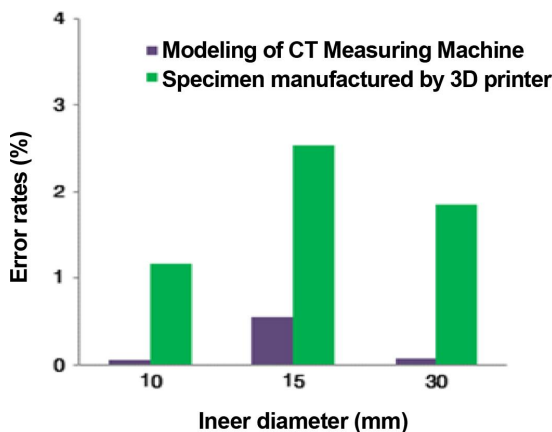


Fig. 9 Inner diameter error rates of CT measuring machine

작업을 하였음에도 완벽히 제거되지 않아 STL 변환 후에도 3D 출력 시 영향을 미치는 것으로 판단된다. 또한, 내경 15 mm에서 모델링 치수 오차율이 다른 형상에 비해 높게 발생함을 알 수 있었다. 이는 X-ray가 시편을 투과할 때 내부까지 도달하지 못하고 영상 손실이 발생한 것으로 추정할 수 있다. 이는 CT 측정기로 스캔 시 회전판이 돌아가면서 스캔을 하는 방법으로 시편이 회전하면서 외곽에 있는 형상까지는 X-ray가 도달되지만 가운데 있는 15 mm 형상에는 X-ray가 투과하기에는 외곽에 비해 밀도가 높이지므로 X-ray가 투과되는 과정에서 손실이 발생되어지는 것으로 추정할 수 있다.

Fig. 10은 CT 측정기로 외경을 스캔한 모델링과 3D 프린팅한 시편의 치수 오차율을 비교한 그래프이다. 모델링 데이터는 외경 13 mm에서 0.09%, 외경 14 mm에서 0.09%, 외경 24 mm에서 0.06%의 치수 오차율이 발생하였다. 3D 프린터로 제작된 시편은 외경 13 mm에서 0.10%, 외경 14 mm에서는 0.26%, 외경 24 mm에서는 0.43%의 치수 오차율을 나타내었다. 외경의 경우 모델링 치수와 3D 프린팅된 시편의 치수 오차율은 큰 차이를 보이지 않았다. 이는 CT 측정기를 사용하여 스캔할 때 내경보다 외경의 치수 오차율이 낮음을 의미한다. 또한, 내경의 치수 오차율이 높은 것으로 보아 시편의 밀도와 두께에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

Fig. 11은 CT 측정기로 스캔한 모델링과 3D 프린터로 제작된 시편의 외곽 치수 오차율을 비교한 그래프이다. CT 측정기 모델링 데이터는 X축 78 mm에서 0.02%, Y축 78 mm에서 0.02%, Z축 50 mm에서 0.02%의 치수 오차율이 발생하였다. 3D 프린팅된 시편은 X축 78 mm에서 0.34%, Y축 78 mm에서 0.36%, Z축 50 mm에서 0.42%의 치수 오차율을 나타냈다. 분석 결과 모델링에 비해 3D 프린팅 된 치수 오차율이 비교적 높았다. 이는 시편의 날카로운 모서리에서부터 선상으로 뺏어나가는 아티팩트가 3D 프린팅 시 영향을 미친 것으로 보인다.

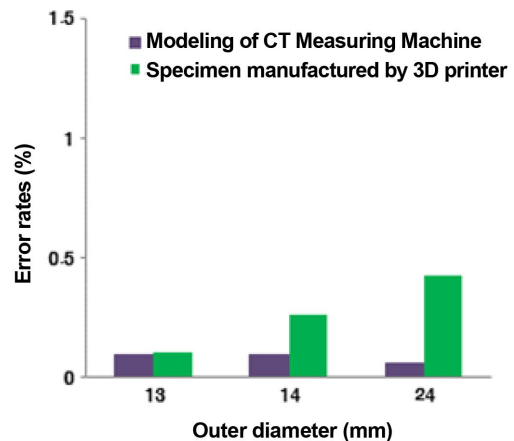


Fig. 10 Outer diameter error rates of CT measuring machine

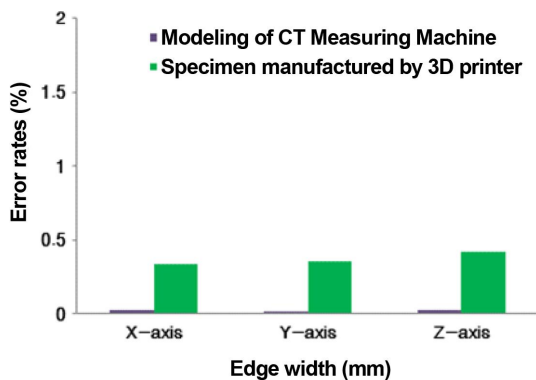


Fig. 11 Edge width error rates of CT measuring machine

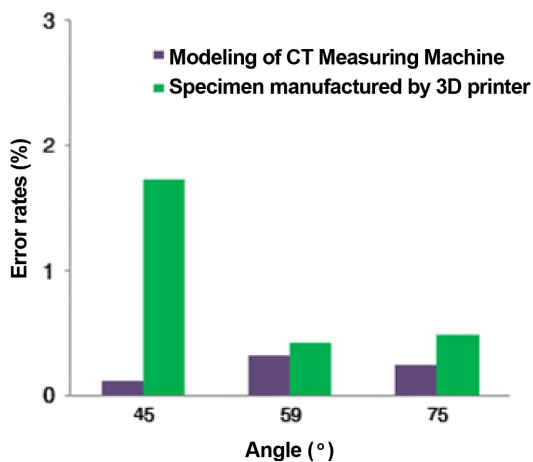


Fig. 12 Angle error rates of CT measuring machine

Fig. 12는 CT 측정기로 스캔한 모델링과 3D 프린터로 제작한 시편의 각도 치수 오차율을 비교한 그래프이다. 모델링 치수 오차율은 45°에서 0.12%, 59°에서 0.32%, 75°에서 0.25%이었다. 3D 프린팅한 시편의 치수 오차율은 45°에서 1.73%, 59°에서 0.42%, 75°에서 0.49%이었다. 분석 결과 모델링과 3D 프린팅한 시편의 각도 치수 오차율은 형상 위치에 따라 차이를 보였다. 원뿔 각도 59°와 기울어진 원통 각도 75°의 치수 오차율은 크게 차이가 없었다. 하지만 내측 테이퍼 각도 45°의 치수 오차율은 높게 발생하였다. 이는 X-ray가 금속 내측 테이퍼를 투과할 때 끝이 뾰족한 꼭짓점에 의해 발생한 에일리어싱의 영향으로 치수 오차율이 높게 나타남을 확인하였다. 이를 통해 내측 테이퍼가 원뿔보다 에일리어싱에 영향을 많이 받는 것을 알 수 있었다.

5. 결론

본 연구는 역설계 시 효율적인 방법을 모색하기 위한 실험을 실시하였다. 역설계 시 3D 스캐너와 CT 측정기를 사용하여 모델링 데이터 수집 중 발생할 수 있는 치수 오차율을 비교 분석하였으며,

또한 역설계 장비에 따른 치수 오차율 및 편차에 영향을 미치는 요소를 확인하여 다음과 같은 결과를 얻었다.

(1) 3D 스캐너를 이용한 역설계 실험결과 모델링과 3D 프린팅 시편의 치수 오차율이 발생하였다. 그 중 내경 10 mm에서 모델링은 1.95%, 프린팅 시편은 5.74%의 오차율이 발생하였고, 작고 깊은 내경에 의한 광 간섭과 난반사의 원인으로 보인다.

(2) CT 측정기는 역설계 시 시편의 형상 중 가장 내부에 존재하는 내경 15 mm에서 큰 치수 오차율이 발생하였다. 모델링은 0.55%, 프린팅 시편은 2.53%의 오차율이 발생하였으며, 밀도와 두께에 영향을 받아 내부에 위치한 형상일수록 오차율이 크게 발생하는 것을 확인하였다.

(3) 역설계 실험을 통하여 금속 시편일 경우 3D 스캐너는 스캔 및 모델링 공정에 1시간이 소요되었으며, CT 측정기 활용 시에는 모델링 공정을 생략할 수 있지만 스캔 시간이 1시간이 소요되어 비슷한 시간이 소요되었다. 비교적 밀도가 낮은 시편일 경우에도 CT 측정기를 사용하게 되면 스캔 시간이 30분으로 단축되고 모델링 공정의 생략으로 인하여 보다 빠르게 역설계를 할 수 있을 것으로 사료된다.

References

- [1] Oh, H. K., 2013, A Study on the Utilization of Reverse Engineering for the Modeling Process of Product Design, Journal of Korea Design Knowledge Society Conference, 14-20.
- [2] Lee, B. G., 2010, A Study on the Improvement of the Reverse Engineering Process with its Application to Systems Design, A Thesis for a Master, Ajou University Graduate School, Republic of Korea, 92-101.
- [3] Park, S. J., Jung, H. S., Hong, C. M., Yoo, J. H., 2014, Accuracy Analysis of 3D Printer Manufacturing using Reverse Engineering Techniques, Proceedings of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 179.
- [4] Choi, S. U., 2011, On the Improved Reverse Engineering Process to Generate System Requirements, A Thesis for a Master, Ajou University Graduate School, Republic of Korea, 67-102.
- [5] Lee, Y. Y., 2003, Segmentation of Scanned Point Data Using a Face-based Method in Reverse Engineering, A Thesis for a Master, Korea University Graduate School, Republic of Korea, 41-71.
- [6] Jang, G. Y., 2003, A Study on the Multi-step Digitizing Method and Reverse Model Generation for Improvement of Reverse Engineering Accuracy, A Thesis for a Master, Incheon University Graduate School,

- Republic of Korea, 45-52.
- [7] Han, M. S., Lee, J. Y., Kim, S. Y., Kim, T. H., Jeon, E. C., 2004, The Performance Evaluation of Reverse Engineering System using Micro Stepper, Proceedings of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, 340-344.
- [8] Chung, H. M., Won, D. Y., Kwon, D. G., and Chung, J. E., 2013, Measurement of Space Dose Distribution during Exposure Micro Computed Tomography (μ -CT) for Scattering Rays, Journal of Korean Society for Radiology, 7:1 45-50.