

# LOM 공정에서의 제품 치수 오차 분석에 관한 연구

하성도\*, 김경환\*, 송용억\*, 박태권\*\*, 김창희\*\*

## Dimensional Error Analysis of Products from LOM Process

Sungdo Ha\*, Kyunghwan Kim\*, Yong-Ak Song\*, Taekwon Park\*\*, Changhee Kim\*\*

### ABSTRACT

LOM (Laminated Object Manufacturing) process is one of rapid prototyping processes, where shapes are formed by accumulating cross sections of laser-cut paper. The process expects wide popularity since it is simple and the material is familiar to conventional mockup makers. However the dimensional accuracy of LOM parts is not so good as that of traditional wooden mockups, since the stack of adhesive-spread papers causes significant dimensional error. Also it is unclear how the other unknown environmental effects cause the errors as well.

In this work the dimensional errors of LOM parts are measured and analysed. Experiments with test parts were performed in order to see the effects of part shape, moist, and sealer on dimensional variations. The characteristic of the paper is also analysed. Re-heating LOM parts, which is shown to have the effect of recovering dimensional changes, is applied to an example part.

**Key Words** : Rapid Prototyping(쾌속조형), LOM (Laminated Object Manufacturing) Process, Manufacturing Error(제조오차)

### 1. 서론

오늘날의 제조업체에서는 소비자의 다양한 기호와 신속히 변하는 취향에 적응하기 위하여 제품의 다양성과 시작기간의 단축에 대응할 수 있는 시제품의 제작 기술 혁신이 필요하게 되었다. 이러한 필요에 대하여 기존의 금형 제작 방법으로는 다양하며 급격히 변화하는 환경 변화 요구를 수용하기 어렵게 되었다. 또한 점차 동시공학적인 제품 개발이 일반화되어 감에 따라서 신속한 시제품의 제작에 대한 필요성은 더욱 증대되고 있다.<sup>(1)(2)</sup> 1986년 3차

원 인쇄술 (Stereolithography) 이라는 이름으로 개발된 공정을 시작으로하여 CAD 데이터를 직접 이용하여 3차원 형상을 제작하는 쾌속조형(Rapid Prototyping) 기술은 지난 수년간 많은 발전을 거듭해 오면서 여러 가지 다양한 방법들이 개발되었다. 쾌속조형기술은 최근 몇 년간 자동차, 가전, 전자, 항공, 중공업 등 거의 모든 제조 관련 분야에 걸쳐 제품의 설계에서 생산에 이르는 기간과 노력을 절감하는 동시공학의 필수적인 도구로서 사용되어 왔다.<sup>(3)</sup>

최근 전세계적으로 다양한 쾌속조형 공정들이 개발되고

\* 한국과학기술연구원 CAD/CAM연구센터  
\*\* RP Korea 사

있으며, 현재까지 상용화되어 있는 공정으로는 Stereolithography (SLA), Fused Deposition Modeling (FDM), Selective Laser Sintering (SLS), Solid Ground Curing (SGC), Three Dimensional Printing (TDP), Ballistic Particle Manufacturing (BPM), Laminated Object Manufacturing (LOM) 등이 있으며, 이들 공정들은 액상 혹은 고체의 분말상태의 재료를 적층하여 성형하는 방식을 사용하고 있다. 이들 공정들의 재료로는 광경화성 수지(SLA), 접착제가 도포되어 있는 종이(LOM), 분말 상태의 세라믹 혹은 금속(SLS, TDP), 열가소성 합성 수지(FDM), 고분자 재료(BPM) 등이 사용되며, 레이저광의 조사(SLA), 고열 접착(LOM), 자외선 램프 조사(SGC), 재료의 분사(FDM, BPM) 등의 방법으로 제품을 성형한다.<sup>(4)</sup>

이러한 공정들은 각기 적용 기법이 다르기 때문에 각각 장단점을 가지고 있어서 실제 적용 시에 이러한 특성을 고려하여 적합한 공정을 선택할 필요가 있다. 각 공정의 상대적인 장단점은 Table 1과 같다.<sup>(5)(6)</sup>

앞에서 설명한 여러 가지의 쾌속조형 기법 중에서 본 과제 연구 대상인 LOM 공정은 종이 재료 뒷면에 도포되어 있는 열 감응성의 접착제를 이용하여 아래층과 압착하여 적층 시킨 후, 원하는 제품의 단면 형상을 레이저 광

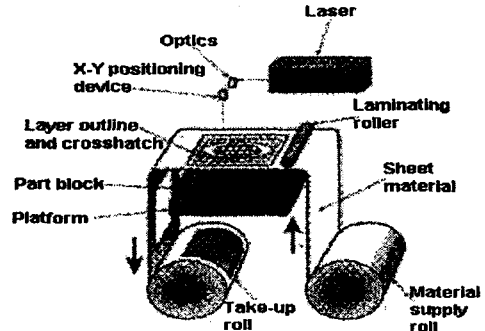


Fig. 1 Overview of LOM Equipment Structure<sup>(7)</sup>

선을 사용하여 절단하여 만들고, 제품의 단면 이외의 부분은 작은 4각형의 단위로 절단하여 적층이 완료된 후에 이러한 작은 4각형 단위의 부분을 제거해 냄으로써 원하는 형상의 입체를 만드는 방법을 이용한다.<sup>(7)</sup>

Fig.1은 종이재료의 급송 장치, 레이저 광선의 위치 결정 장치 및 제작품의 수직방향의 위치를 조절하는 수직 이동 장치로 구성되는 LOM 장비의 기본 구조를 나타내며, Fig.2는 새로운 종이 층의 적층, 롤러를 이용한 가열 압착, 그리고 레이저 광선을 이용한 절단으로 구성되는 LOM 공정의 기본 개념을 보여준다.

Table 1 Comparison of Rapid Prototyping Processes

공정	장점	단점
SLA	복잡한 형상에 대해서 비교적 양호한 정밀도를 가진다.	후처리 과정이 필요하며, Curing과정 중 재료 특성에 의해 뒤틀림과 비틀림이 발생함.
FDM BPM	장비 구조가 간단하여 사무실 환경 등에서 사용이 가능함.	제작품의 형상과 치수 정밀도에 제한이 있음.
SLS	제작 후 성형되지 않은 재료의 추출이 용이하며, 기능실험이 가능한 재료의 이용이 가능함.	공정 변수의 제어가 어려우며, 장시간의 후처리가 필요함.
SGC	적층 방향의 치수 정확도가 우수하고 제작시간이 상대적으로 짧음.	공정이 복잡하여 장비가 매우 크고 관리가 요구됨.
TDP	세라믹 셀 제조에 의한 정밀주조에 사용이 가능함.	후공정에서 발생하는 제품변형의 예측이 어려움.
LOM	공정이 간단하며 재료가 사용자에게 익숙함. 대형의 제품 제작이 가능함.	상대적으로 복잡한 형상의 제작이 어렵고 습기 등 주위의 영향에 민감함.

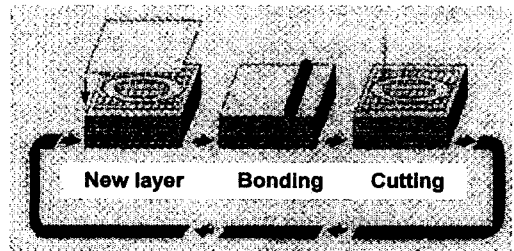


Fig. 2 Steps of LOM Process<sup>(7)</sup>

LOM 공정에서는 적층, 압착과 레이저를 이용한 절단 과정이 완료된 후에 성형된 직육면체로부터 제품을 분리해 내는 Decubing 작업의 후처리 공정이 필요하다. Fig.3의 사진에서 보이듯이 후처리의 각 과정은 (a), (b), (c), (d)의 순서로 이루어진다. 그림 (a)와 같이 장비의 Platform에서 분리한 직육면체의 외벽을 분리한 후에 제품을 둘러싸고 있는 Cube 형태의 부분 및 제품의 내부에 위치하는 기타 불필요한 부분을 제거한다. (그림 (b) 및 (c) 참조) 성형된 제품이 얻어지면 제품의 표면을

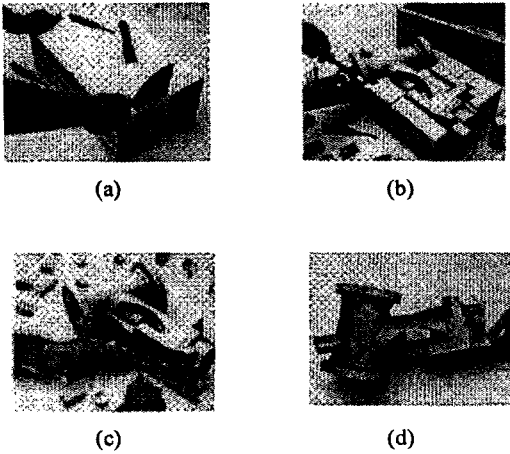


Fig. 3 Decubing in LOM Process<sup>7)</sup>

구름은 Polishing 및 Painting 공정을 거쳐 그림 (d)와 같은 최종 제품이 만들어진다.

LOM 공정은 제작 과정이 비교적 간단하며 종이 재료를 사용하므로 적층 후에 제품이 가지는 특성이 목재의 특성과 유사하여 기존의 목형을 이용하여 시제품을 제작하는 경우와 마찬가지로 제품의 절단 및 결합 등이 용이하고 다른 금속조형 공정과 비교하여 상대적으로 대형의 시제품을 제작할 수 있다는 장점이 있다.

한편 후공정에서의 Decubing 때문에 복잡한 내부 구조 혹은 섬세한 형상의 제품을 제작하기가 곤란하다는 단점이 있다. 또한 목재의 특성이 그러하듯이 제작 후에 주위의 습도 변화에 따른 변형이 유발되며 이로 인한 치수 정밀도 변화가 크다는 단점이 매우 심각하게 고려되고 있다. 더구나 적층된 종이들 사이에는 접착제가 층을 이루고 있어 접착제로 인한 치수 변화도 큰 영향을 주는 것으로 인식되고 있다.

LOM 공정은 현재 시제품의 특성 중에서 매우 중요한 치수 정밀도에 미치는 여러 가지 인자들의 영향에 대한 이해와 실험을 통한 정량적인 데이터가 부족하여 제품의 변형에 적절한 대응이 이루어지지 못하고 있는 실정이다.<sup>(8)</sup>

본 논문에서는 LOM 공정에서 제품의 제작 시에 발생하는 제조 치수오차와 제조 후의 사용기간에 따른 치수 오차의 크기를 측정, 비교하고 치수 오차에 영향을 미치는 주위 환경의 영향을 분석하여 LOM 제품의 정밀도를 향상시키기 위한 정성적인 방안을 강구하고자 한다.

## 2. 실험 개요

### 2.1 실험 장비와 시료

본 연구에서는 실험 장비로서 LOM 장비인 Helisys사의 LOM-2030E를 사용하였다. 이 장비는 Control Console, Cabinet, Laser Cutting System, Paper Feed System, Lamination System, Z-Table System으로 구성되며 시스템 주요 사양은 Table 2와 같다.<sup>(9)</sup>

Table 2 Specification of LOM-2030E

항 목	사 양
Control Computer	Pentium, Window NT, LOM Slice software
Laser System	50 Watt CO <sub>2</sub>
Lamination Process	Hot roll compression
System Dimension	206cm L×142cm W×140cm H (Cabinet) 56cm L×61cm W×140cm H (Console)
Cooling System	Laser Chiller Unit (inside control console)
Power	220volts±10%, 30amps 50-60Hz

본 연구에서 LOM 제품의 변형량을 측정하기 위한 실험에 사용한 시료는 Fig.4와 같이 가로 세로 높이가 각각 100mm인 정육면체의 Solid Cube와 두께 5mm의 Shell Cube이며 이들 시료에 대해 각 방향별로 8개의 측정점을 선정하여 변형 전후의 치수를 측정하였다.

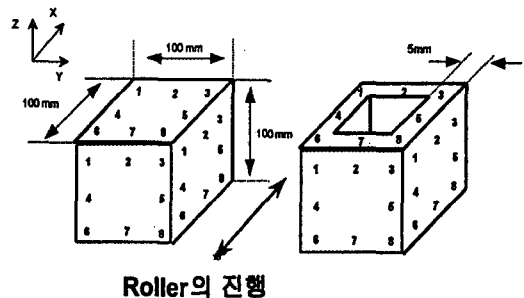


Fig. 4 Experiment Samples(1~8 : Measurement Points)

종이 재료 특성 실험에서는 Fig.5에 나타난 바와 같이 4개의 100mm×100mm의 정사각형 시료를 절단하여 사용하였다.

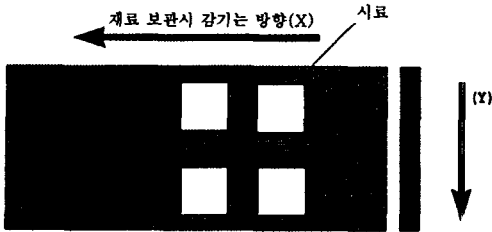


Fig. 5 Samples of Paper Characteristic Experiments

## 2.2 실험 목적 및 방법

본 연구에서는 LOM 공정으로 제작된 제품의 제조 오차의 정량적 특성과 그 원인을 파악하기 위해서 LOM 공정으로 제작된 시료의 방향에 따른 변형 특성 및 재료의 특성 분석을 위한 기본 실험을 수행하였다. 기본 실험 결과를 바탕으로 제품의 치수 정밀도를 향상시키기 위한 방안을 고려하여 실제 제품에 적용해 보았다.

### 2.2.1 변형량 측정 실험

본 실험에서는 제작 후의 보관 기간에 발생하는 제품의 각 방향으로의 변형률과 제품의 형태에 따른 변형률을 측정하며, 제품의 제작 후에 변형을 방지하기 위하여 도포되는 Sealer의 효과를 비교 분석하였다. Sealer를 도포한 시료와 도포하지 않은 시료에 대하여 시료 제작 후에 후처리 공정이 끝난 직후와 48시간 보관 후에 각각 방향별 8개 측정점에서의 치수를 측정하여 비교하였다. 이 시간동안 측정실 내부의 온도와 습도는 각각 23.4°C~24.4°C와 17.3%~19.8%로 유지되었다.

### 2.2.2 습기 영향 분석 실험

LOM 제품의 제작 후 발생하는 변형의 원인으로서 공기 중에 포함되어 있는 습기의 영향이 클 것으로 사료되어 본 연구에서는 제품의 제작 후 발생하는 치수 변화에 대한 습기의 영향을 파악하기 위한 실험을 수행하였다. 이 실험에서는 습기를 차단하기 위하여 사용되는 Sealer를 도포하지 않은 6개의 Shell 형태의 Cube를 사용하여 3개의 제품은 온도 22.8°C~23.7°C, 습도 25.1%~25.3%의 일반 환경에서 보관하고 나머지 3개의 제품은 습기의 영향을 차단하기 위하여 외부 공기와 차단된 밀폐된 공간

에 보관하였다. 이들 시료에 대하여 각각 제작 직후의 초기 치수와 40시간 보관 후의 변형 치수를 측정하였다.

### 2.2.3 종이 재료 특성 실험

LOM 공정에서 사용되는 재료는 뒷면에 열감응성 접착제가 도포된 종이로서 열감응성 접착제가 LOM 제품에서 발생하는 휘어짐, 뒤틀림 등의 변형에 영향을 줄 것으로 추정되었다. 따라서 공정 중에 가열되어 변형되는 종이 재료의 변형량을 측정함으로써 이러한 변형이 제품에 미치는 영향을 파악하고자 하였다. 본 실험에서는 종이 재료의 열에 대한 특성을 파악하기 위하여 종이 재료 시료를 70°C에서 60분 가열하여 각 방향에 따른 시료의 치수 변화를 측정하였다.

### 2.2.4 제품 재가열 실험

제작 후에 일반 환경에서 일정 시간 보관한 제품에서 발생한 변형의 큰 원인으로 추정되는 습기를 제거함으로써 가공 직후의 치수를 복원할 수 있는지의 여부를 알아보기 위한 방법으로 제품을 재가열하는 실험을 하였다.

본 실험에서는 제작 후에 Sealer를 도포하지 않은 채 1주일 동안 일반 환경에서 보관하여 치수가 변화한 Solid Cube와 Shell Cube의 시료를 3시간에 걸쳐 60°C~90°C의 온도 범위에서 가열하며 시간에 따른 치수 변화를 측정하였다. 3시간 가열한 후에는 시료들을 다시 일반 환경에서 냉각시키며 20분 동안 보관한 후에 최종 치수를 측정하였다.

### 2.2.5 실제 제품을 이용한 실험

지금까지의 실험에서는 Cube 형태의 시료를 사용하였으나, 본 실험에서는 실제 LOM 제품에 대하여 제품 제작 후의 변형과 재가열 과정 중의 치수 변화를 살펴보기 위하여 Fig.6과 같은 Shell 형태의 마우스 제품을 이용하

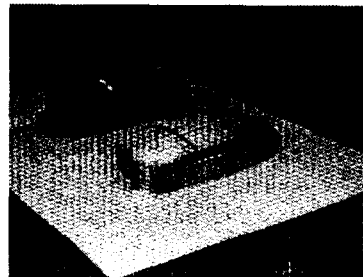


Fig. 6 Mouse Manufactured by LOM (compared with the actual product)

여 실험하였다. 이 마우스는 실제 제품의 외관을 측정하여 얻은 데이터를 이용하여 CAD 모델을 만든 후에 LOM 공정으로 제작한 것이다.

제작 후의 변형과 재가열 과정의 변화, 그리고 재가열 후 일반 환경에서 치수 변화를 제품의 수직 방향 높이에 대해서 측정하였으며, 모든 측정은 19.7°C~21.4°C의 온도와 21.6%~23.5%의 습도 환경에서 이루어졌다

### 3. 실험 결과

Fig.7과 Fig.8은 각각 Sealer를 도포한 시료와 도포하지 않은 시료에서의 각 방향에 따른 치수 변화율을 도시한 것으로서 변화율은 변형량의 초기 치수에 대한 상대값으로 계산하였다. 또한 Fig.9는 제품의 Sealer의 도포

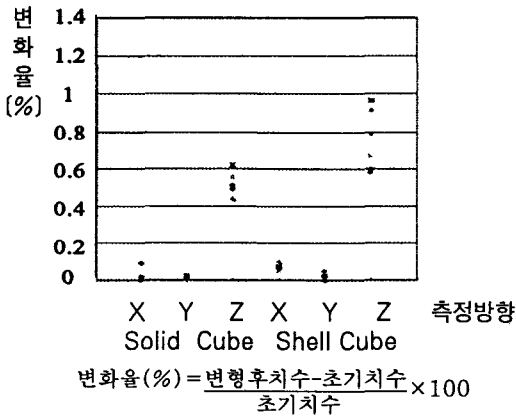


Fig. 7 Expansion Rates of Samples with Sealer

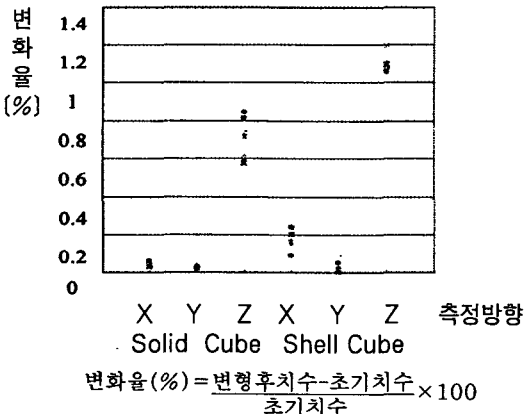


Fig. 8 Expansion Rates of Samples without Sealer

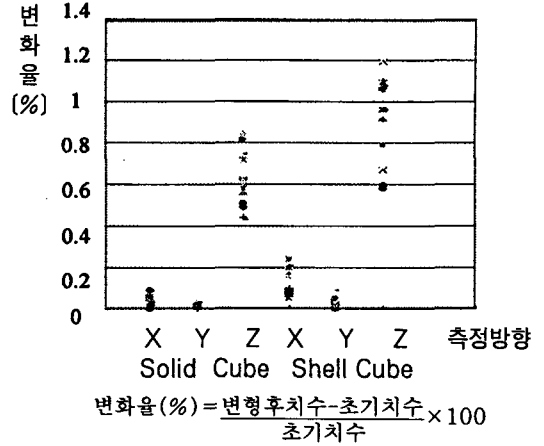


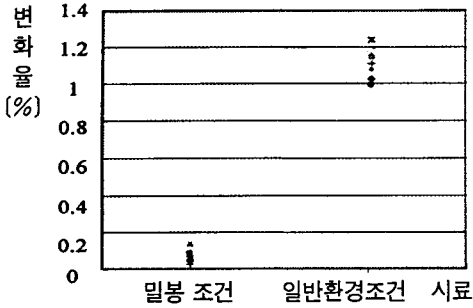
Fig. 9 Expansion Rates of Solid and Shell Cubes

유무와 관계없이 앞의 두 실험의 결과를 Solid Cube와 Shell Cube로 분류하여 변화율을 도시한 것이다.

결과에 의하면 모든 방향에서 Sealer를 도포하지 않은 경우가 Sealer를 도포한 경우에 비해서 변화율이 크므로 팽창을 억제하는데 Sealer의 효과가 있다는 사실을 알 수 있었다. 그리고 Solid Cube와 Shell Cube를 비교하면 Shell Cube의 변화율이 크며 이것은 Shell Cube의 경우 공기와의 접촉 면적이 넓어서 공기 중에 포함되어 있는 습기의 흡수가 용이하기 때문인 것으로 추정된다. 또한 Sealer의 도포 여부와 Solid 및 Shell의 형상에 관계없이 모두 Z 방향의 팽창이 X방향 및 Y방향의 팽창보다 크고, X 방향이 Y방향에 비해서 변화의 정도가 더욱 크다는 것을 알 수 있었다.

습기 영향 분석 실험의 결과는 Fig.10과 같다. 밀폐된 공간에서 보관하여 습기의 침투를 차단한 제품의 Z방향의 평균 팽창률은 0.06%이며 일반 환경 조건에서 보관한 제품의 팽창률은 1.13%이다. 외부 공기와 차단시킨 제품의 팽창률이 일반 환경 조건에 보관한 제품의 팽창률의 1/19에 불과하여 외부 공기와의 접촉에 의한 습기의 흡수가 팽창에 커다란 영향을 미침을 알 수 있다. 또한 이러한 팽창률의 차이는 Sealer의 도포 여부에 따른 팽창률의 차이보다 커서 Sealer가 외부 공기와의 완전한 차단역할을 하지 못함을 알 수 있다. 도포된 Sealer의 경우 육안으로 확인이 어려운 작은 Crack이 형성되어 이를 통한 습기의 침투가 발생하는 것으로 사료된다.

종이 재료 가열 시험의 결과로 종이 재료는 가열하면

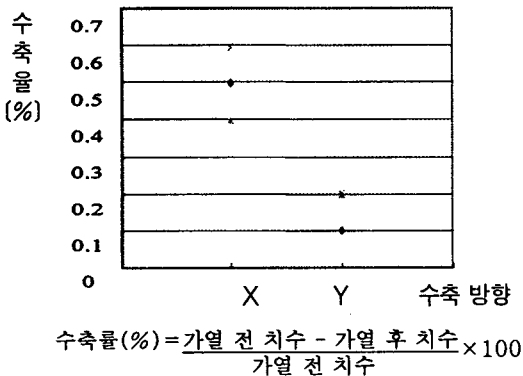


$$\text{변화율}(\%) = \frac{\text{변형후치수} - \text{초기치수}}{\text{초기치수}} \times 100$$

Fig. 10 Effect of Environmental Moisture

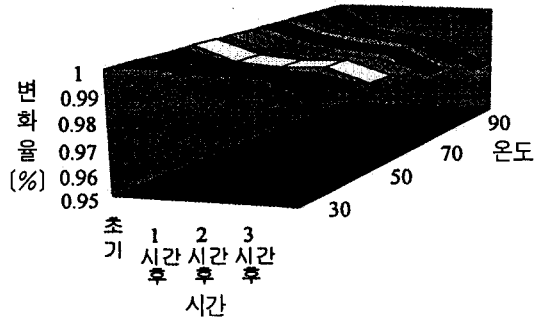
수축 변형이 발생하였으며 그 방향별 수축률은 Fig.11에 나타난 바와 같이 Y방향의 수축보다 X방향의 수축이 큰 것을 알 수 있었다. 이러한 방향별 수축률의 차이는 종이 재료가 가지는 방향성보다는 종이 재료에 도포되어 있는 열감응성 접착제의 도포 방향에 기인한 것으로 사료된다.

앞의 실험에서 나타난 바와 같이 LOM 제품에 있어서 제작 직후에 얻어지는 치수를 오랜 기간 유지하는 것이 어렵다는 것을 알 수 있다. 주위 환경의 영향 및 재료가 가지는 이방성 등의 영향을 상쇄시키기 위한 방안으로 실험된 제품의 재가열 결과가 Fig.12에 나타나 있다. 이 실험의 결과에 의하면 재가열을 통하여 제품의 팽창된 치수를 회복시킬 수 있으며 치수의 회복은 가열 온도가 높을수록 유리함을 알 수 있다. 실험에서는 시료의 변형을 일으키지 않는 온도 한계인 90°C까지의 범위에서 재가열을



$$\text{수축률}(\%) = \frac{\text{가열 전 치수} - \text{가열 후 치수}}{\text{가열 전 치수}} \times 100$$

Fig. 11 Contraction Rates of Paper Material



$$\text{변화율}(\%) = \frac{\text{초기 치수} - \text{각 시간당 측정 치수}}{\text{초기치수}} \times 100$$

Fig. 12 Dimension Recovery by Reheating

하였다. 특히 가열 후에 상온에서 20분 동안 냉각하는 동안에 발생하는 수축이 커서 이는 수분에 의한 팽창 및 수축 이외에 종이 재료 층 사이에 존재하는 접착제의 팽창 및 수축의 영향도 크다는 것을 추측할 수 있었다.

실제 제품을 이용한 실험 결과는 Fig.13과 같다. 그림에서 치수는 제작된 마우스 제품의 수직 방향의 높이를 나타낸다. 제작 후 일반 환경에서 보관한 기간에 해당하는 63시간 동안 지속적인 팽창 변형을 보였으며, 이 변형 이후에는 상대적으로 안정된 치수를 나타내었다. 이후 실시된 2시간 20분 동안의 재가열 과정 중에서는 시료의 재가열 실험에서와 같은 결과로서 제품이 수축하여 치수가 복원되는 현상과 재가열 후의 냉각기간 동안에 발생하는 급격한 수축 현상을 볼 수 있었다. 재가열에 의한 치수 복원 이후에 다시 일반 환경에서 보관한 결과로는 초기 제작 후에 관찰되었던 팽창과 유사한 패턴의 팽창을 다시 확인할 수 있었다.

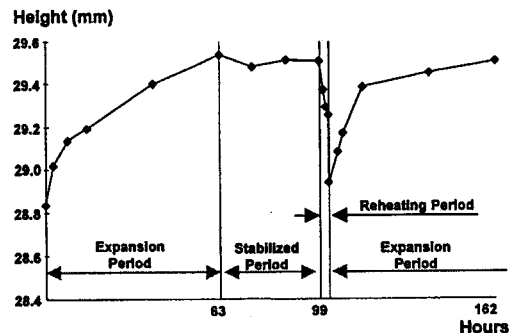


Fig. 13 Historical Data of Example Part Height during Expansion, Reheating, Expansion Processes

#### 4. 결 론

본 연구에서는 LOM공정을 통하여 제작된 제품의 제조 오차의 원인을 분석하기 위하여 Cube 형태의 시료 및 종이 재료, 그리고 실제 제품에 대하여 그 변화를 및 변화 형태에 관하여 실험을 수행하였다. 치수변화에 영향을 미치는 원인을 다음의 3가지로 분석하였다.

##### 1. 습기에 의한 변형

제품 제작 후에 일반 환경에 보관한 제품에서 나타나는 치수 팽창의 주원인으로 습기의 영향이 검토되었다. 실험에서 Sealer를 도포하거나 밀폐 공간에서 보관함으로써 외부 공기로부터의 습기 흡수를 차단하면 치수 팽창이 작아지는 결과를 얻었다. 특히 Sealer의 도포보다는 밀폐공간에 보관한 경우 팽창률의 차이가 현격하여 Sealer의 효과가 크지 않음을 알 수 있었다.

##### 2. 종이 재료의 방향에 따른 변화의 차이

종이 재료를 가열하면 수축하며, 그 수축률은 이방성을 가지고 있음을 확인하였다. LOM 제품은 종이 재료의 이러한 방향에 따른 변형률의 차이로 인하여 제작 후 제품의 기하학적인 형태에 따라서 제품 내부에 불균일한 응력이 발생하며 이로 인한 뒤틀림 등의 변형이 발생하는 것으로 사료된다. 또한 제품의 제작 방향을 설정함에 있어서 상대적으로 변형이 적은 방향으로 정밀한 치수가 요구되는 제품의 방향을 설정하면 보다 정확한 치수의 제품을 제작할 수 있을 것이다.

##### 3. 재가열 효과

제작 후에 일반 환경에서 보관하여 팽창된 제품을 재가열하면 제작 직후의 치수로 복원이 가능함을 실험을 통하여 확인하였다. 이때 실험결과에서 알 수 있듯이 재가열 온도에 따라서 수축률이 다르며 이러한 수축률의 차이를 이용하여 필요한 양만큼의 수축을 구현하기 위하여 재가열 온도 및 시간을 결정할 수 있을 것이다. 실제 제품에 이러한 재가열 공정을 적용할 때는 되도록 짧은 시간에 수행하는 것이 좋지만 그러기 위해서는 높은 온도가 필요하며, 높은 온도에서 급격하게 재가열할 경우 휘어짐 등의 변형 현상이 발생할 가능성이 많다. 본 실험에서는 변형이 발생하지 않는 가열온도 범위는  $60^{\circ}\text{C} \sim 90^{\circ}\text{C}$ 였다.

본 연구의 재가열 특성 파악 실험에서는 상대적으로 변화량이 큰 Z방향에 대해서 정량적인 실험을 수행하였다.

그러나 향후 실제 공정에 이 기법이 적용되기 위해서는 X와 Y방향의 변화량에 대한 특성 또한 고려되어야 하며, 제품의 기하학적인 특성에 따라 각 방향 변화의 상대적인 연관성에 대한 정량적인 변화를 예측할 수 있는 기법이 연구되어야 할 것이다.

본 연구에서는 LOM 제품의 제작 후에 발생하는 변형 오차에 관하여 방향에 따른 변형량의 차이, 변형을 유발시키는 원인 분석과 변형을 감소시키기 위한 방안, 그리고 발생된 변형을 회복시키기 위한 방안 등에 관하여 실험을 통하여 연구가 수행되었다. LOM 공정은 전술한 바와 같이 가열된 Roller를 사용하여 열감응성 접착제가 도포되어 있는 종이 재료를 압착한 후 레이저로 절단하는 공정으로 이루어진다. 따라서 LOM 제품의 제조오차를 줄여서 치수 정밀도를 확보하기 위하여 Roller의 압착력과 온도, 레이저의 Power와 Cutting 속도 등 공정 중에 제어하여야 하는 공정 파라미터가 제품의 제조 오차에 미치는 영향에 대한 연구를 통해서 LOM 공정을 최적화할 필요가 있다.

#### 후 기

이 기술개발내용은 산업자원부에서 시행한 공업기반기술개발사업의 기술개발 결과임을 밝히며, 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

#### 참 고 문 헌

1. T. Pfeifer, W. Eversheim, W. Koenig and M. Weck, Manufacturing Excellence, CHAPMAN & HALL, 1984.
2. N. Ikawa, T. Kishinami and F. Kimura, Rapid Product Development, CHAPMAN & HALL, 1997.
3. P.F. Jacobs, Stereolithography and other RP&M Technologies, ASME Press, 1996.
4. 양동열, "제1회 쾌속 3차원 조형 및 금형기술혁신 심포지움," 한국과학기술원 금형기술혁신연구센터, pp 1-8, 1995.
5. J. Sikes Jr., "Rapid Prototyping: The Wave of the Future," Rapid Prototyping Reference Guide, Newsletter of the Laser Institute,

- vol.4, issue 3, October/November 1994.
6. P. Weissman, B Bolan, and R. Chartoff, "Measurement of Linear and the Residual Stresses Developed during Laser Photopolymerization," Proceedings of Third International Conference on Rapid Prototyping, University of Dayton, pp. 103-112, June 1992.
  7. Helisys Inc. Home page: <http://www.helisys.com>
  8. Sung S. Pak and Gregory Nisnevich, "Inter-laminate Strength and Processing Efficiency Implements in Laminated Object Manufacturing," The Fifth International Conference on Rapid Prototyping, pp. 171-180, June 1994.
  9. LOM-2030 System User's Manual, Helisys Inc., 1996.