

3 차원 곡면에 정밀 인쇄를 위한 공정 변수에 따른 이미지 보정에 관한 연구

송민섭*, 김효찬**, 이상호***, 양동열#

A study of correction dependent on process parameters for printing on a three-dimensional surface

Min Sup Song*, Hyo Chan Kim**, Sang Ho Lee*** and Dong Yol Yang#

ABSTRACT

In the industry, three-dimensional coloring has been needed for a realistic prototype. The Z-corporation developed a 3D printer which provides a three-dimensional colored prototype. However, the process cannot be adopted to models fabricated by other rapid prototyping processes. In addition, time and cost for manufacturing colored prototypes still remain to be improved. In this study, a new coloring process using an ink-jet head is proposed for color printing on a three-dimensional surface. Process parameters such as the angle and the distance between the ink-jet nozzle and the three-dimensional surface should be investigated through experiments. In order to minimize the distortion of a 2D image, the correction matrix according to the sloped angle is proposed and obtained by analysis of printing errors. An image on the doubly curved surface is printed so as to verify the proposed method. As a practical example, a helmet is chosen for printing images on the curved surface. The practical applicability of the correction matrix is then demonstrated by printing the character images on the surface of the helmet.

Key Words : three-dimensional printing(3 차원 인쇄), coloring(채색), process parameter(공정변수), image correction(이미지 보정)

기호설명

D = Distance between the nozzle and the surface

θ_i = Surface angle

ζ = Axis ratio

L_x, L_y = Length of circle in x,y direction

η = Error normalization

L_r = Circumference length

L_a = Approximated length

Φ_d = Curvature angle

Δ_r = Discrete length

접수일: 2005년 5월 9일; 게재승인일: 2006년 1월 13일

* 한국전력기술주식회사

** 한국과학기술원 기계공학과

*** ㈜ LG 전자생산기술원

교신저자: 한국과학기술원 기계공학과

E-mail dyyang@kaist.ac.kr. Tel. (042) 869-3214

1. 서론

오늘날 쾌속조형기술이 도입되어 3 차원 형상조형 작업을 빠르게 할 수 있지만, 실감 재현을 하는데 있어서 한계를 가진다. 3 차원 형상에 채색을 하는 기술이 개발되어 있지 않기 때문에 쾌속 조형 제작품의 색은 재료 자체의 색을 가지게 되며, 후처리 과정 속에서 조도를 위한 재료의 도포나 사상작업을 통해 색의 변질이 있을 수도 있다. 따라서 쾌속 조형 공정에서 실감 재현을 하기 위한 채색 공정의 개발이 필수적이다.

Z-corp. 사에서는 채색 기술의 한계가 있는 기존 쾌속 조형기술의 단점을 보완해주는 3D 프린터를 개발하였다. 하지만, 3D 프린터는 자체 제작된 시작품에만 채색을 적용 할 수 있는 공정이며 타 쾌속 조형 공정의 시작품에는 적용 할 수 없으며 고가의 재료와 장시간 채색으로 인해 3 차원 채색 기술로서의 한계를 지니고 있다⁴.

3 차원 인쇄에 있어서 기존 산업 기술들이 존재한다. 실크 스크린 기술은 실크 망사를 사용하여 플라스틱, 종이, 프린트 배선, 기관 등 병이나 컵과 같은 곡면에도 인쇄가 가능하다. 하지만, 여러 장의 스텐실을 제작해야 하고 장시간의 인쇄를 요하기 때문에 인쇄 기술로서의 한계를 가진다. 패드 프린트 기술은 홈이 파여있는 형판에 잉크를 스퀴즈를 사용하여 밀어 넣은 후, 패드가 내려와 잉크를 점착시키고 점착된 잉크는 패드의 탄력을 이용하여 곡물을 가진 물체에 전사된다. 패드는 탄력을 가지고 있어 제품과 정확히 접촉을 하게 된다. 하지만, 패드는 다색 인쇄를 하기가 힘들고 큰 곡률면에는 인쇄가 불가능한 단점이 존재한다. 마킹 기술은 비 접촉 식으로 레이저를 사용하여 소결 성질을 갖는 분말을 인쇄하고자 하는 표면에 도포한 후, 인쇄할 영역에 대해 레이저를 조사하면 조사된 부분의 분말이 소결되면서 인쇄를 하게 된다. 소결부가 아닌 다른 부분은 분말을 제거함으로 인쇄 과정을 끝낸다. 마킹 기술은 다색 인쇄가 불가능하며 점별 인쇄이기 때문에 정밀 인쇄가 힘든 한계가 있으며 고가의 장치가 필요하다.

기존 기술들이 가진 단점을 보완하는 잉크젯 프린팅 기술은 매우 값이 싸면서도 인쇄 하는 영역에 원하는 색을 분사함으로 해서 트루 컬러를 재현 할 수 있는 특징과 장점이 있으며 표면에 대한 접근성도 뛰어나다². Daplyn 은 종이 가 아닌 직

물 위에 잉크젯 인쇄를 통해서 인쇄 품질에 관한 연구를 하였고⁶, Tchan 은 CCD 카메라를 이용하여 인쇄 농도에 따른 인쇄물 측정에 관한 연구를 하였고³, Fribert 는 인쇄 측정시 문턱값을 제안하여 색추출에 관한 연구를 하였다⁷.

잉크젯 프린팅 기술에 관한 연구는 매우 활발하지만, 2 차원 면 인쇄에 국한되어 있으며 3 차원 면에 인쇄하는 연구는 이루어진 사례가 거의 없다 따라서, 본 연구에서는 잉크젯 프린팅 기술을 이용하여 공정변수 분석과 입력 이미지의 보정식을 통하여 3 차원 곡면에 정밀 인쇄를 하기 위한 곡률 반지름별 단속거리를 제안하고 이중 곡률면에 대한 실험을 수행하였다. 이에 대한 개념도는 Fig. 1 과 같다. 개념도에는 곡률이 작고 넓은 영역을 프린팅 하는 매크로 노즐과 곡률이 크고 좁은 영역을 프린팅 하는 마이크로 노즐로 이루어져 있으며 하단의 인택싱 테이블은 다면을 한번에 채색할 수 있게 되어 있다. 본 연구는 개념도와 같은 3 차원 채색 공정을 위한 공정 변수 기초 연구이다.

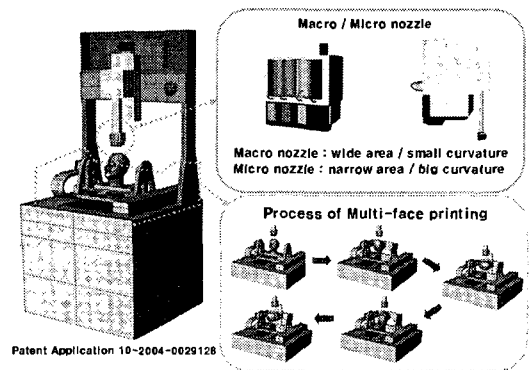


Fig. 1 Concept of a three-dimensional printing

2. 공정변수 선정과 기초실험

2.1 공정 변수 선정

본 공정에서는 잉크젯 헤드를 이용하여 3 차원 표면에 인쇄를 한다. 이를 위해서는 일반적인 2 차원 인쇄와는 다른 잉크젯 헤드의 Z 축 이동이나 물체 받침대의 Z 축 이동이 필요하다. 기존과는 달리 Z 축의 이동이 추가됨으로 Fig. 2 와 같이 잉크젯 노즐과 표면 사이에는 거리(D)가 존재하고 표면의 곡률에 따른 3 차원 표면의 각도(θ)가 존재하게 된다.

두 공정 변수에 대하여 인쇄 이미지의 크기와 밀도가 변하게 된다. 인쇄 이미지에 대하여 영향력을 가지는 거리와 각도에 대하여 공정 변수로 택하였다.

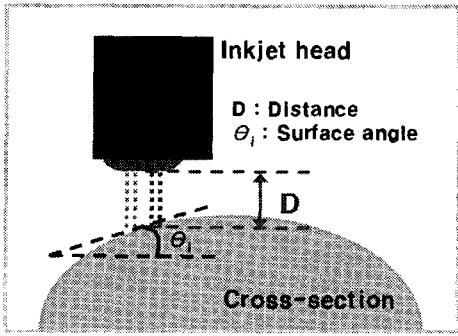


Fig. 2 Two variables of a three-dimensional printing

2.2 실험을 위한 2 차원 이미지 선정

실험을 위한 인쇄 이미지 샘플은 이미지 엑스퍼트(ImageXpert)사의 잉크젯 600 dpi 용 테스트 샘플에서 선택하였고 이미지는 Fig. 3 과 같다⁹.

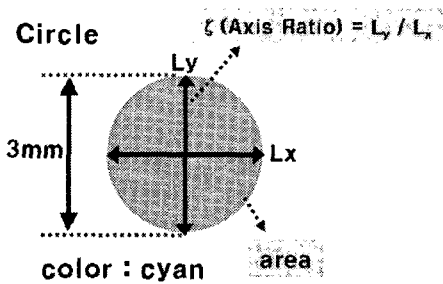


Fig. 3 Standard images for a three-dimensional printing

샘플 이미지는 거리 변수에 대하여 가로, 세로 지름과 넓이를 측정하였으며 각도 변수에 대하여 가로-세로 지름비(Axis ratio)를 측정하였다.

2.3 거리 및 각도에 따른 실험 결과

노즐과 인쇄 표면간의 인쇄 적정 거리에 대해 실험을 수행하였다. 첫번째 실험은 3 mm 지름을 가진 원(circle)을 인쇄하였다. 시편의 상단부와 노즐 사이의 거리는 6 mm 로 설정하였다. 거리변수는 6 mm 에서 25 mm 까지이며 20 개의 이미지를 얻어서 분석을 실시하였다. 원형태의 인쇄 결과는 Fig. 4 와 같다. 거리(D)가 증가함에 따라 10 mm 이

상이 되면 반지름(L_x, L_y)이 인쇄 밀도 감소에 따라 불규칙한 인쇄 폭을 갖게 되었다. 사람은 25 cm(근점)에서 가장 명확한 상을 볼 수 있으며 이때의 육안 분해능은 $58 \mu\text{m}$ 가 된다. 따라서 본 연구에서 인쇄의 허용 오차를 $60 \mu\text{m}$ 로 설정 하였다¹⁰.

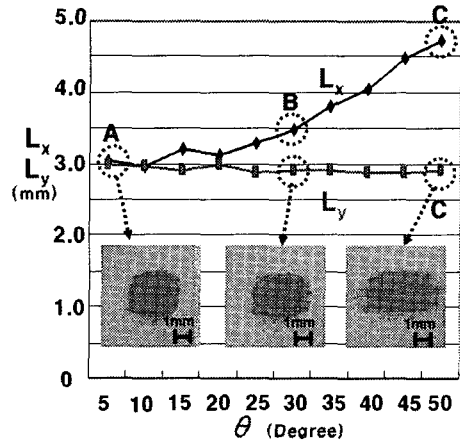


Fig. 4 Results of printing for various distances

거리에 따라 왜곡되는 인쇄 이미지를 인쇄 허용 오차에 따라 분석하면 10 mm 거리에서 반지름 3.06 mm 가지므로 정밀 인쇄가 되었다고 결론을 내릴 수 있다. 따라서 정밀 인쇄를 위해서는 잉크젯 노즐과 표면 사이의 거리가 10 mm 이내가 되어야 함을 알 수 있었다.

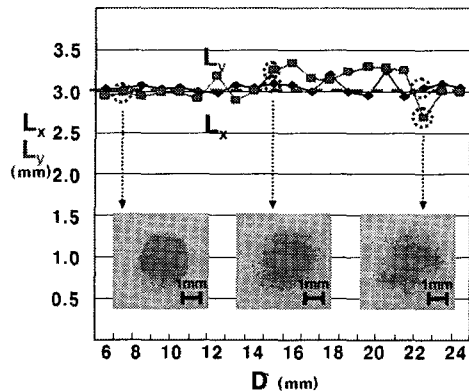


Fig. 5 Results of printing for various angles

공정 변수로 선택한 거리 이외의 각도에 대한 실험을 실시하였다. 실험은 원 형태의 데이터로

거리 실험에서와 동일한 값을 갖는 것으로 하였다. 실험 조건은 잉크 분사가 시작되는 점의 거리가 노즐과 7 mm 로 설정하였고, X 축 표면각도 5°- 50° 의 시편으로 실험을 실시한 결과는 Fig. 5 와 같다. 실험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 정원 형태의 이미지가 점차 타원형태로 변하는 결과를 얻을 수 있었다. 각도의 변화가 있는 X 축에서의 지름 변화는 각도가 증가함에 따라 선형적으로 증가하지만, 각도 변화가 없는 Y 축에서의 지름 변화는 거의 없었다. X 축으로의 지름 변화에 따라 가로-세로 지름비가 정원일 경우 1 값을 가지지만 각도 변화가 있는 방향으로의 지름이 증가하여 각도가 증가함에 따라 가로-세로 지름비값도 선형적으로 감소함을 볼 수가 있었다. 50° 경사면에서는 가로-세로 지름비 값이 0.6 까지 감소함을 확인 할 수가 있다.

2.4 왜곡된 이미지에 대한 보정식 제안

경사면에 대한 왜곡된 이미지의 결과는 인쇄 노즐로부터 분사되는 잉크 입자가 각도를 가진 표면에 투영되는 결과라고 예상할 수 있다. 실험 결과 수치(L_x), 입력 데이터 수치(L_x')와 기하학적인 관계에 의해 예상된 수치(G_x)를 비교해 보았다. Fig. 6 에서 보는 것과 같이 기하학적 관계에 의해 예상되는 왜곡 이미지의 길이는 삼각함수의 관계를 이용하여 도출하였다.

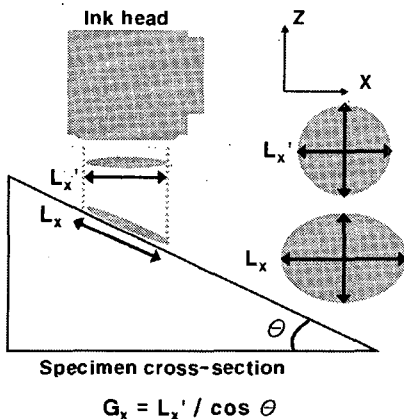


Fig. 6 Relationship of L_x and L_x'

잉크 입자가 표면에 투영됨으로써 기하학적 관계에 의해 얻어진 기하학적 길이 G_x 값과 실험에 의해 얻어진 L_x 의 데이터를 비교해 보았다. 비교에 의해 얻어진 30° 이하에서는 0.1 mm 의 오차를

가지며 그 이상의 경사에 대해서도 45° 이외에는 0.15 mm 이상을 넘지 않는 것을 확인 할 수 있었다. 따라서 기하학적 예상 길이와 실험결과의 길이 비교에서 상당 부분 일치하는 결과를 얻을 수 있었기 때문에 기하학적인 보정을 통하여 인쇄 오차를 최소화 할 수 있는 방법을 제안할 수 있었다. 제안된 보정행렬을 구하는 과정은 Fig. 7 과 같으며, 구해진 보정행렬은 식 (1)과 같다.

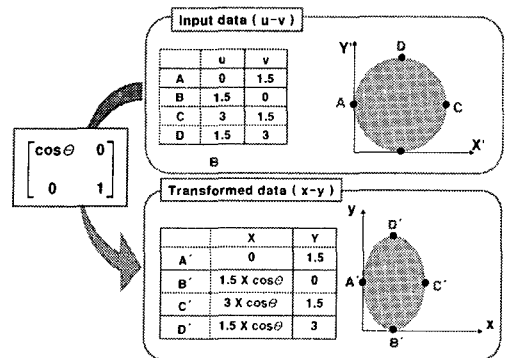


Fig. 7 Correction matrix for printing on a sloped surface

$$[X1 \ Y1] = [U1 \ V1] \begin{bmatrix} \cos \theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

경사면의 좌표계를 u-v 라고 하고 입력 데이터 평면을 x-y 라고 가정할 때, u-v 평면상의 정원인쇄를 위해서는 입력 데이터 평면 x-y 에서는 정원 이미지가 아닌 보정된 이미지가 필요하다. 보정식은 인쇄를 위한 CAD 데이터를 일차원 변환을 할 수 있는 행렬이다.

2.5 보정식을 적용한 프린팅 실험

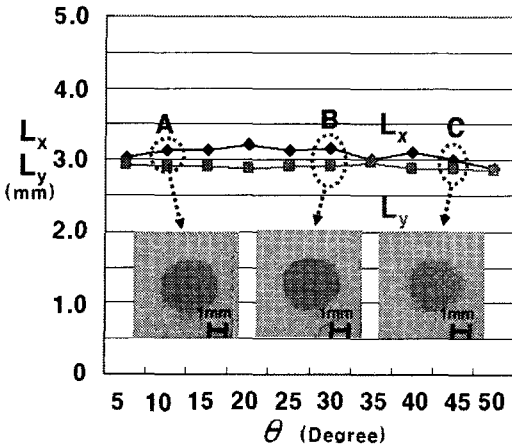
본 연구에서 제안한 보정식을 통한 입력 데이터 이미지는 정원을 인쇄하기 위해 입력 데이터의 형태가 보정을 거쳐 타원 형태로 변환된다.

보정식을 거친 입력 데이터로부터 각도 실험을 실시해보았으며 결과는 Fig. 8 과 같다.

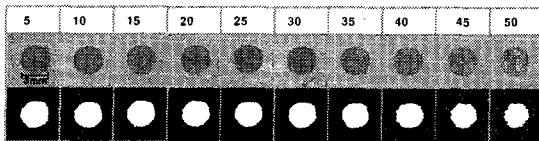
실험 결과에서 볼 수 있는 것처럼 보정식을 거친 인쇄 이미지는 보정되지 않은 이미지에 비해 월등하게 오차가 수정된 것을 육안으로도 확인 할 수 있다. 가로-세로 지름비(axis ratio)도 0.9-1.0 사이의 값을 가지며 X 축 지름과 Y 축 지름 모두

2.85-3.15 mm 사이의 값을 갖게 되었다. 따라서 기하학적으로 예상된 길이에 따른 보정식의 제안이 타당하다는 것을 보였다.

일반적으로 쓰이는 인쇄의 기본 단위인 3 mm 원 이미지를 인쇄 하여 보았고, 예제로서 경사면에 텍스트 이미지를 인쇄하는 실험을 수행하였다.



(a) Plot of diameter and axis ratio for the corrected images



(b) Corrected images
Fig. 8 Results of the corrected images

인쇄 실험을 실시한 예제로 ‘KAIST’ 로고를 선택하여 보정식에 따라 각도별 데이터를 생성하였다. 텍스트 데이터에서 ‘K’의 높이는 30 mm이며 보정식에 따른 데이터는 각도 시편의 10 단계 각도 변화에 따라 제작하였다. 인쇄 결과 Fig. 9에서 볼 수 있는 것처럼 경사면 각도가 커짐에도 불구하고 인쇄 결과는 매우 양호함을 확인할 수 있다.



Fig. 9 Results of the corrected images and binary images

3. 곡면 인쇄를 위한 단속거리 제안 및 적용

3.1 단속거리 개념

앞장에서 일방향 경사면에 대한 실험과 거리에 관한 실험만을 실시하였다. 하지만, 일반적인 물체의 경우 곡률을 가진 면이 존재하기 때문에 이에 대한 실험이 요구되므로 이 절에서는 곡률을 가진 시편을 제작하여 기초 실험을 실시하였다. 시편 제작은 선직면(Ruled surface) 형태로 하였으며 단면에서 기하학적인 결과 값을 도출하기 위하여 일반적인 수학적식을 제안하였다. 시편은 곡률 반지름 15 mm 인것과 15 mm 에서 20 mm 사이의 곡률 반지름의 타원 곡면을 갖도록 쾌속 조형 장비인 서머젯(Thermojet)장치를 이용하여 형상을 제작하였다. 곡면에 인쇄될 경우 곡면의 곡률반지름에 따라 오차가 발생함을 예상하여 기하학적인 분석을 실시하고 곡면 단면을 다각형으로 각도 근사화를 실시하였다. 각도 근사화를 통하여 이미지보정의 기준이 되는 노드점을 생성하고 곡률 반지름에 따른 단속거리를 제안하였다.

곡면에서의 인쇄는 각도의 변화로 인하여 오차를 갖게 된다. 오차 측정을 위하여 원단면 시편을 사용하여 실험을 실시하였다. 실험에서 노즐과 표면 사이의 거리는 6 mm 로 하였고, 실험 데이터는 3 mm 지름의 사이언(cyan)색의 원을 X 축 1 mm 간격으로 인쇄를 실시하였다. 각의 변화가 적은 상단부에서는 오차가 크지 않지만, 각도변화가 커지는 하단부로 갈수록 각변화가 있는 X 방향으로의 오차가 크게 발생한다. 컬러 이미지의 실험 결과를 보게 되면 일방향 경사면에서의 결과와 매우 비슷한 경향을 가짐을 알 수 있다. Fig. 10 에서 알 수 있는 것처럼 근사화가 가능함을 알 수 있었다.

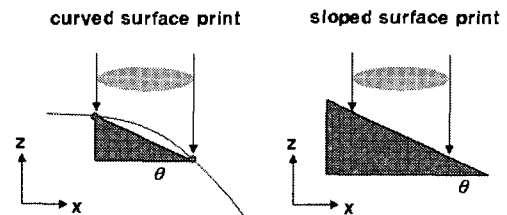


Fig. 10 The comparison of printing image on the curved surface and the sloped surface

곡면을 노드점에 따라서 각도 근사화를 실행하

면 오차에 대하여 보정을 시켜줄 수 있음을 예상하였다. 기하학적으로 곡률 반지름이 일정한 원에 대하여 일정크기의 n 등분으로 분할할 때 원주와 근사화된 직선길이가 차이가 급격히 감소함을 고찰하여 보았으며 결과는 Fig. 11 과 같다. Fig. 11 에서 L_r 은 시편 위의 원주상 거리를 뜻하며 L_a 는 시편 표면 거리의 양단을 이은 곡면 근사화된 직선거리를 뜻한다.

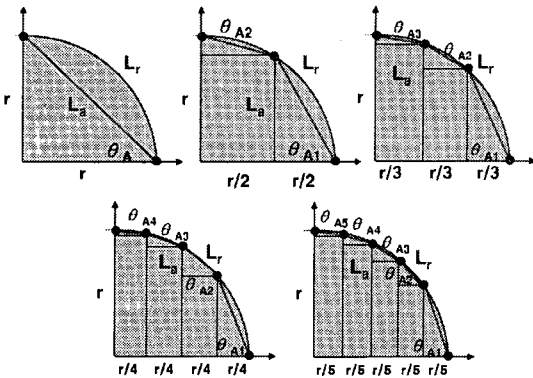


Fig. 11 The comparison of the circumference and the approximated length

3.2 단속거리 방법에 대한 수학적 검증

앞장에서 볼 수 있는 것처럼 X 축으로 등분하여 근사화한 거리의 오차 정규화 값은 3 등분에 0.01 을 갖게 된다. 이것으로 미루어 등분을 이용하여 곡면에 인쇄 오차 보정이 가능함을 알게 되었다. 실제 원주 길이와 근사화한 길이의 차이는 정밀 인쇄를 위한 기준인 0.06 mm 를 만족해야 한다. 그 이유는 실제 원주에 인쇄된 길이를 근사화한 길이로 가정하고 오차를 보정해야 하기 때문이다. Fig. 12 에서와 같이 근사된 길이(L_a)와 원주길이(L_r)의 차이(L_s)를 계산할 수 있다. L_s 가 0.06 mm 이내인 조건을 결정하기 위해 곡률 중심에서의 각도(Φ_d)와 곡률 반지름(r)의 관계를 설정 할 수 있다. 원주길이가 투영된 단속거리(Δ_r)란 인쇄 이미지를 곡면을 근사화한 표면에 인쇄하기 위하여 인쇄 이미지를 X 나 Y 방향으로 노드를 몇 개나 만드는 지에 관한 기준이 되는 거리이다. 예를 들어 곡률 반지름이 50 mm 인 곡면에 30 mm 크기의 인쇄 이미지를 채색할 때에 정밀 인쇄 영역 내에서 11 mm 로 인쇄 이미지 내부에 노드를 생성하여 곡면의 근사화 표면에 보정하여 주는 기준이 되는 거리를 뜻한다.

단속거리를 위해 원주길이와 근사길이의 차이(L_s)의 값을 0.06 mm 이내로 하는 Φ_d 를 곡률 반지름에 따라 구하는 식은 식(2), (3), (4)과 같다.

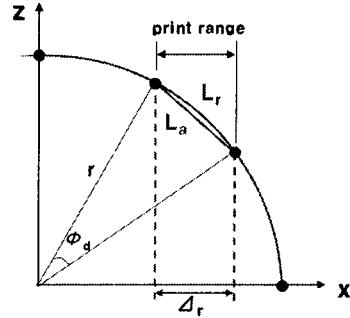


Fig. 12 Calculation of the circumference and the approximated length

$$L_r = r \cdot \phi_d \tag{2}$$

$$L_a = \sqrt{2r^2 - 2r^2 \cos \phi_d} \tag{3}$$

$$L_s = L_r - L_a \tag{4}$$

위의 식을 통해 반지름 r 과 Φ_d 의 관계를 L_s 가 0.06 mm 이하인 영역에서 찾아보면 Fig. 13 과 같다.

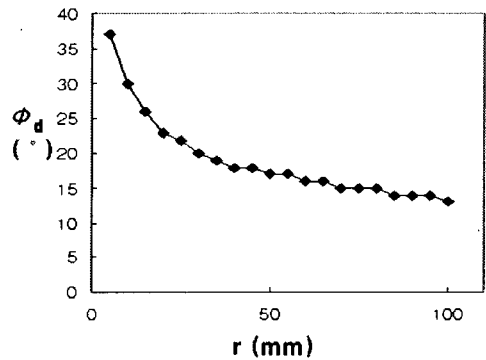


Fig. 13 Radius curvature according to Φ_d

Fig. 13 에서서는 시편의 곡률 반지름에 따른 단속 거리를 계산하기 전에 실제 인쇄가 되는 피 인쇄 물의 곡률 길이를 계산하기 위하여 시편의 곡률

반지름에 따른 정밀 인쇄를 위한 곡률 중심각 Φ_d 의 범위를 나타내고 있다. 계산되어진 곡률 중심각은 각각의 반지름에 대하여 다시 한번 X 축으로 투영된 길이로 계산되어야 실제적인 단속거리를 계산할 수 있기 때문이다. Φ_d 에 따라서 달라진 단속 거리는 Δ_r 로써 표시된다. 이때 Δ_r 은 L_a 를 X 축(또는 Y 축)으로 투영 시킨 길이이다. Δ_r 은 +X 방향으로 갈수록 작아지는데, 표면각도가 점점 커지기 때문이다. 따라서 최소한의 단속거리를 정하기 위해 Φ_d 가 X 축에 투영된 길이 Δ_r 을 r 에 따라 결정해야 한다. 인쇄한계각 45° 를 적용하여 단속거리를 계산하여 본다. 계산되어진 인쇄 한계각 내에서의 단속거리는 Fig. 14 과 같다.

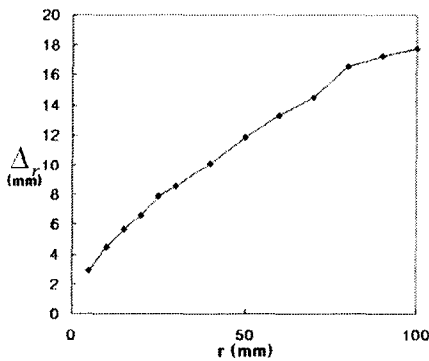


Fig. 14 Discrete lengths according to radius of curvature

3.3 단속거리 방법에 대한 실험적 검증

근사화된 표면에 인쇄될 보정된 인쇄 이미지와 원본 이미지의 오차가 각도 근사화를 이용한 단속거리 방법에서 얼마만큼 차이를 갖는 지에 관하여 확인하였다. 시편 위에 단속 거리의 효과를 알아 볼 수 있도록 텍스트의 크기를 곡률 반지름으로 하여 단속 거리법을 적용하여 보정한 데이터의 인쇄 결과와 단속 거리 이상의 값을 적용하여 보정한 데이터의 인쇄 결과를 비교, 분석해 보았다. 실험 조건은 Fig. 15 와 같다.

실험 조건에서 인쇄되는 시편 윗부분과 인쇄노즐 사이의 거리(D)는 6 mm 로 하였다. 글자'K'의 높이를 곡률 반지름과 같은 15 mm 로 하였으며 색은 사이언(cyan)으로 하였다. 시편 윗면에는 원주면을 따라 잉크젯 전용지를 부착하여 인쇄 결과 측정이 용이하도록 하였다. 측정은 전용지를 이미지 촬영하여 컴퓨터 계산을 실시하였다.

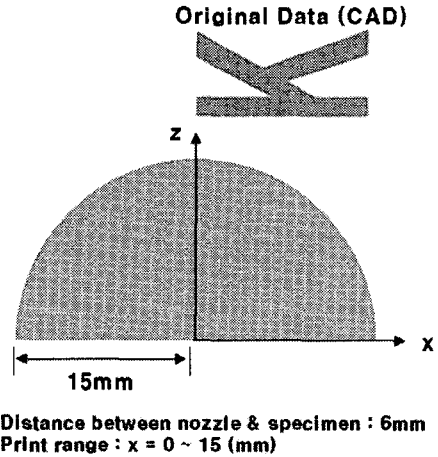


Fig. 15 Printing of character 'K' on a specimen

원본 데이터로 인쇄를 할 경우 곡면에 따라 인쇄 왜곡이 발생한다. 따라서 왜곡을 보정해 주기 위해 데이터를 곡률 반지름에 따른 단속 거리로 보정해서 인쇄한 데이터와 단속 거리 이상의 값으로 보정한 데이터를 생성했으며, 결과는 Fig. 16 과 같다.

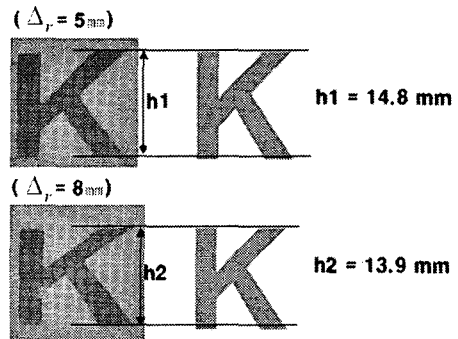


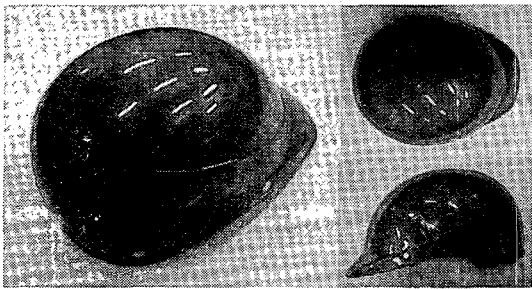
Fig. 16 Comparison of height of the printed images according to Δ_r

첫번째 보정 데이터는 곡률 반지름에 따라 계산된 단속 거리를 5 mm 로 하였다. 결과처럼 CAD 데이터와 오차가 작게 인쇄가 되었다. 하지만, 두 번째 보정 데이터는 곡률 반지름에 따른 단속거리 이상의 8 mm 를 기준하여 CAD 데이터와 오차가 크게 인쇄가 된 것을 확인할 수 있었다.

따라서 Fig. 16 에서 볼 수 있는 결과처럼 제안한 단속적 거리 방법을 적용한 결과가 3 차원 곡면에 서 CAD 데이터와 오차가 적은 것을 확인함으로 정밀 인쇄를 위한 보정 방법으로 단속거리 방법이 적합함을 검증 할 수 있었다.

4. 이중 곡률 면을 가진 형상에 보정 이미지 인쇄

앞장의 실험에서 일방향 곡률을 가진 시편에 인쇄를 실시하였으나, 본 장에서는 이중 곡률을 가진 실제품을 사용하여 일반 컬러 인쇄 이미지를 단속거리 법을 적용하여 인쇄를 실시하여 보았으며 실험에 사용된 이중곡률을 가진 헬멧 형상은 Fig. 17 과 같다.

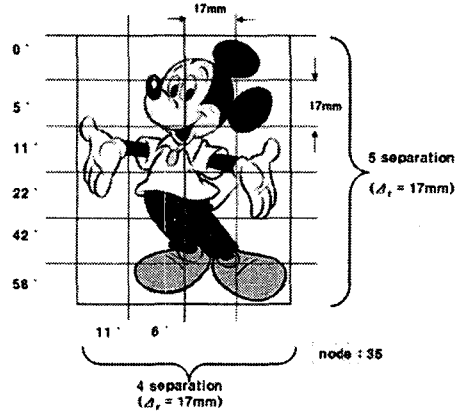


(180 X 245 X 210 mm)

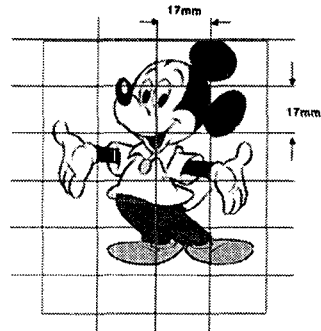
Fig. 17 Size of a helmet

헬멧의 크기는 245 x 210 x 180 mm 이며 3 차원 측정을 수행하여 시편의 곡률 반지름을 측정한 결과 곡률 반지름 분포는 100 - 120 mm 임을 알 수 있었다. 이에 적합한 3 차원 인쇄를 위한 단속거리 는 Fig. 14 에 따라 17 mm 가 되며 원본 이미지와 단속거리에 따라 보정된 이미지는 Fig. 18 과 같다. 원본 이미지의 크기는 80 x 100 mm 이며 보정된 이미지의 크기는 78 x 82 mm 이다.

Fig. 18 (b)에서 나타나는 것과 같이 17 mm 단속거리와 30 개의 이미지 노드를 사용하여 보정 데이터를 생성하였다. 중앙선을 단속거리의 기준으로 하고 보정 해준 결과 상단부가 넓고 하단부가 좁은 보정 데이터가 생성되었다. 이와 같은 현상은 하단부의 양 끝단은 이중곡률의 영향으로 많은 인쇄 왜곡이 일어나는 부분인 반면에 다른 부위는 곡률이 작아 왜곡이 거의 발생하지 않기 때문이다.



(a) The original image



(b) The corrected data

Fig. 18 The original image and corrected image of example "Mickey Mouse"

인쇄 결과를 정량적으로 비교하기 위해 인쇄 결과와 이미지 데이터 간의 오차값을 식 (5)와 같이 정규화 하였다.

$$\eta_{(1-2)} = \frac{L_{cad} - L_{exp}}{L_{cad}} \quad (5)$$

인쇄된 각 데이터에서 각 위치에 따른 오차정규화 데이터를 나타낸 결과는 Fig. 19 과 같다. Fig. 19 의 오차 정규화 그래프에서 관찰할 수 있듯이 이미지 보정을 수행하였을 때 인쇄 오차가 크게 감소함을 알 수 있다. 또한, Fig. 19 에서 각 위치에 따른 오차 보정의 효과가 차이가 있음을 알 수 있는데 이는 인쇄된 면의 형상에 의해 나타난 결과

임을 알 수 있다. A, B 부분의 인쇄영역의 형상은 거의 평면에 가까워 이미지 보정을 수행하지 않은 이미지와 오차의 차이가 거의 없으나 H, C, D 부분은 인쇄 형상의 표면의 거리와 각도가 매우 크기 때문에 이미지 보정에 의한 오차 감소 효과가 매우 큼을 알 수 있다.

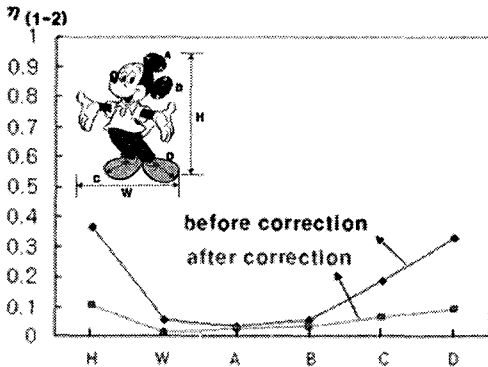


Fig. 19 Comparison of the normalized errors of the original image and the corrected image

이러한 결과를 통해 본 연구에서 3 차원 곡면에 정밀 인쇄를 위해 본 연구에서 제안한 이미지 보정식이 오차 감소의 효과가 있으며 인쇄면의 거리와 각도가 커짐에 따라 그 효과가 극대화됨을 할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 3 차원 곡면에 정밀 인쇄를 하기 위하여 공정 변수 거리와 각도에 따른 실험을 통해 이미지 보정을 위한 실험식을 제안하였다. 이러한 보정식을 곡면에 적용하기 위해 곡률에 따른 단속거리를 제안하였으며 제안된 개념을 수학적 방법과 실험적인 방법을 통해 검증하였다. 최종적으로 이중곡률을 가진 실제 제품인 헬멧의 표면에 보정된 이미지를 인쇄하고 오차를 분석함으로써 제안된 개념에 대한 검증을 수행하였다. 본 연구를 통해 다음과 같은 사실을 알 수 있었다.

첫째, 2 차원 기본 테스트 이미지로 사용되는 원 형상을 잉크젯 노즐과 표면 사이의 거리와 각도에 따라 인쇄 품질의 변화를 관찰하였다. 관찰 결과를 통해 공정 변수에 따라 발생하는 이미지 왜곡을 보상할 수 있는 실험식을 제안하였다.

둘째, 3 차원 곡면에 선행 실험을 통해 제안된 보정식을 적용하기 위해 곡면을 최소단위의 직선 구간으로 나누는 단속거리 개념을 제안하였으며 이를 다양한 방법으로 검증을 수행하였다.

셋째, 본 연구에서 제안된 개념을 이중 곡률을 가진 실제 제품에 적용함으로써 타당성을 검증할 수 있었다.

향후에는 잉크 헤드가 여러 면에서 접근하여 인쇄할 수 있는 방법 및 장치를 설계하여 거리에 의한 오차를 최소화할 것이다.

참고문헌

- Haneishi, H., Shimoyama, N. and Miyake, Y., "Color digital halftoning for colorimetric color reproduction," IS&T's 10th International Congress on Advances in Non-Impact Printing Technologies, pp.380-385, 1994.
- Chen, P. H., Chen, W. C., Ding, P. P. and Chang, S. H., "Droplet formation of a thermal sideshooter inkjet printhead," Journal of Heat and Fluid, Vol. 19, pp. 382-390, 1998.
- Tchan, J., Thompson, R. C. and Manning, A., "A computational model of print-quality perception," Expert Systems with Applications, Vol. 17, pp. 243-256, 1999.
- Gibson, I. and Ming, L. W., "Colour RP," Rapid Prototyping Journal, Vol. 7, No. 4, pp. 212-216, 2001.
- Elsayad, S., Morsy, F., Sherbiny, S. and Abdou, E., "Some factors affecting ink transfer in gravure printing," Journal of Pigment and Resin Technology, Vol. 31, pp. 234-240, 2002.
- Daplyn, S. and Lin, L., "Evaluation of pigmented ink formulations for jet printing onto textile fabrics," Pigment & Resin Technology, Vol. 32, No. 5, pp. 307-318, 2003.
- Fribert, M., "Separation model of colour regions in a halftone print," Computers & Graphics, Vol. 27, pp. 801-806, 2003.
- Luo, J. and Zhang, Z., "Automatic colour printing inspection by image processing," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 139, pp. 373-378, 2003.
- Heule, M., Schonholzer, U. P. and Gauckler, L. J.,

- “Patterning colloidal suspensions by selective wetting of microcontact-printed surfaces,” *Journal of the European Ceramic Society*, Vol. 24, pp. 2733-2739, 2004.
10. Jang, Y. H., “Optics, Sang-hak-dang,” 1993.
 11. Yang, D. Y. and Sohn, H. K., “Recent state of rapid prototyping technique for rapid product development,” *Journal of Society Precision Engineering*, Vol. 17, No. 10, pp. 5-10, 2000.
 12. Lee, S. H., Kim, H. C., Song, M. S. And Yang, D. Y., “Development of surface finishing methodology for the laminated pattern removal of VLM-ST parts,” *Journal of Society Precision Engineering*, Vol. 22, No. 2, pp. 202-209, 2005.
 13. Ahn, D. G. and Yang, D. Y., “Principle of rapid prototyping and its trends,” *Journal of Society Precision Engineering*, Vol. 22, No. 10, pp. 7-16, 2005.