

종이컵 성형기용 배럴 캠 설계 프로그램 개발

김 옥 현* · 박 태 원*†

* 아주대학교 기계공학부

Development of Program for Designing Barrel Cam of Machine Making Paper Cups

Wook Hyeon Kim* and Tae Won Park*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Ajou Univ.

(Received October 19, 2010 ; Revised January 25, 2011 ; Accepted February 1, 2011)

Key Words : Paper Cup Forming Machine(종이컵 성형기), Barrel Cam(배럴 캠), Dynamic Analysis(동역학 해석), 3D Laser Scanner(3 차원 레이저 스캔), High-Speed Camera(고속카메라)

초록: 종이컵 성형기는 배럴캠, 인덱스, 터렛, 모터 등의 많은 부품으로 이루어진다. 그 중에서 배럴캠은 기계의 주 구동부이다. 배럴캠이 회전하면서 인덱스에 고정되어 있는 롤러를 밀어준다. 그리고 인덱스와 연결된 터렛이 회전하면서 종이컵이 만들어진다. 따라서 종이컵 성형기의 성능은 배럴캠에 큰 영향을 받는다. 이번 연구에서는 배럴캠을 설계하는 프로그램이 MATLAB 을 이용하여 개발 되었다. 프로그램은 배럴캠의 프로파일을 만들어준다. 이 프로파일은 3 차원 CAD 프로그램을 이용 하여 3 차원 CAD 모델로 변환된다. 이 3 차원 CAD 모델과 배럴 캠의 3 차원 레이저 측정을 통해 생성된 모델을 포함하는 동역학 모델을 생성하였다. 그리고 동역학 모델을 검증하기 위해 기계의 인덱스의 회전각이 고속카메라를 이용하여 측정된다. 동역학 모델의 회전각을 비교하여 프로그램을 검증한다.

Abstract: A machine that makes paper cups has many parts, including a barrel cam, an index, and a turret. When the barrel cam, which is the main operating part of the machine, rotates, it pushes the roller fixed on the index, and paper cups are formed as the turret connected to the index rotates. Therefore, the performance of the machine is affected by the barrel cam. In this study, the program for designing barrel cam, which creates the profile of the cam is developed using MATLAB. This profile is used to develop a 3D CAD model by using a 3D CAD program. Dynamic models containing the barrel cam are created on the basis of the profile and 3D laser scan of the barrel cam. Further, the rotation angle of the index in the machine is measured using a high-speed camera. The rotation angles of the dynamics models are compared to verify the effectiveness of the program.

1. 서 론

종이컵 성형기는 배럴 캠, 인덱스, 터렛 등의 여러 부품들로 이루어져 있다. 이 중에서 종이컵 성형기의 성능에 가장 큰 영향을 미치는 부분은 배럴 캠과 인덱스라고 할 수 있다. Fig. 1 과 같이 배럴캠은 인덱스에 회전 운동을 주는 목적으로 인덱스 프로파일(Profile)이 파여져 있고, 인덱스는 원형의 판에 롤러가 부착되어 있는 구조이다. 배럴캠이 회전하면서 인덱스를 밀어주면서 인덱스는 배럴 캠에 수직한 방향으로 회전을 하게 된다. 인

덱스에 연결된 터렛은 가공된 용지를 단계별 공정으로 이어준다. 따라서 배럴 캠의 프로파일을 어떻게 설계하는지에 따라 인덱스의 움직임이 결정되며, 종이컵 성형기의 성능 또한 결정된다. 따라서 배럴 캠의 형상을 설계하기 위해 많은 연구가 진행되어 왔다. Chakraborty 등은 스크류 이론을 이용하여 캠과 종동철의 접촉 조건을 결정하였다.⁽¹⁾ Gonzalez-palacios 등은 순간 스크류 운동 이론을 적용하여 입체 캠의 형상을 생성하였다.⁽²⁾ Tsai 등의 연구는 복소 평면 이론을 이용하여 입체 캠을 설계하여, 이를 가공 및 검사과정까지의 과정을 연구하였다.⁽³⁾ Hsieh 등의 연구는 복소 평면 이론을 이용한 입체 캠을 설계하여 가공 및 검사하는 과정까지의 연구를 진행하였다.⁽⁴⁾ Shin 등의

† Corresponding Author, park@ajou.ac.kr
© 2011 The Korean Society of Mechanical Engineers



Fig. 1 The barrel cam and the index

연구에서는 캠과 종동절의 상대 속도를 이용하여 배럴캠을 설계하는 연구를 하였다.⁽⁵⁾ Cho 등은 복소 평면 이론을 이용한 모델의 가공에 대한 연구를 진행하였다.⁽⁶⁾ 이렇게 입체 캠의 설계, 프로그램, 가공까지의 많은 연구가 이루어졌지만, 프로그램을 이용하여 생성된 입체 캠의 검증에 대한 연구는 활발하게 이루어지지 않았다.

본 논문에서는 MATLAB 을 이용하여 배럴 캠 설계 프로그램을 개발하였다. 앞서의 연구에서 정립된 수식을 이용하여 배럴 캠의 프로파일 형상을 생성하였다. 개발된 프로그램을 통해 출력된 데이터를 3 차원 CAD 프로그램에 입력하여 3 차원의 배럴 캠 모델을 생성하였다. 그리고 다물체 동역학 프로그램을 이용한 동역학 모델을 생성하여 설계 프로그램의 결과를 검증하였다.

2. 캠 설계 프로그램 개발

2.1 변위 선도

변위 선도는 주동절의 회전각에 따른 종동절의 변위를 의미한다. 캠의 안내 홈 형상은 종동절의 움직임에 따라 결정되기 때문에 종동절의 거동을 나타내는 변위선도는 중요한 입력 변수이다. 배럴 캠 설계 프로그램에 이용된 변위 선도는 변형 사인 곡선이다. 변형사인곡선은 곡선의 연속성과 최대 가속도 값을 낮게 한다는 조건을 만족시키는 장점이 있다.⁽⁷⁾ 식 (1)-(7)은 변위선도로 사용된 변형사인곡선의 식을 보여준다.

$$A_m = \frac{1}{\frac{2T_a}{\pi} + \frac{2-8T_a}{\pi^2}} \quad (1)$$

$$V_a = \frac{2T_a A_m}{\pi} \quad (2)$$

Table 1 Variables of the modified sine curve

부호	내용
A_m	변형 사인 곡선의 최대 가속도
V_a	변형 사인 곡선의 평균 속도
S_a	변형 사인 곡선의 초기 변위
S_b	변형 사인 곡선의 최종 변위
T_a	무차원 수
S	무차원 거리

$$S_a = \frac{2T_a^2 A_m}{\pi} - \frac{4T_a^2 A_m}{\pi^2} \quad (3)$$

$$S_b = 1 - S_a \quad (4)$$

구간 1 ($0 \leq T \leq T_a$)

$$S_a = \frac{2T_a^2 A_m}{\pi} T - \frac{4T_a^2 A_m}{\pi^2} \sin\left(\frac{\pi T}{2T_a}\right) \quad (5)$$

구간 2 ($T_a \leq T \leq 1 - T_a$)

$$S_a = \frac{(1 - 2T_a)^2 A_m}{\pi^2} \left(1 - \cos \frac{\pi(T - T_a)}{1 - 2T_a}\right) + V_a(T - 1 - T_a) + S_a \quad (6)$$

구간 3 ($1 - T_a \leq T \leq 1$)

$$S_a = \frac{4T_a^2 A_m}{\pi^2} \left(\cos \frac{\pi(T - 1 + T_a)}{2T_a} - 1\right) + V_a(T - T_a) + S_a \quad (7)$$

T 와 S 는 무차원 수와 무차원 거리이다. T 가 0 또는 1/4 일 경우 변의 선도는 각각 단원곡선과 사이클로이드 곡선의 특징을 보이기 때문에 T 의 범위는 $0 < T < 1/4$ 로 한다. 사용된 T 값은 1/8 로서 표준 변형사인 곡선의 대표적인 값이다.⁽⁸⁾ Fig. 1 은 현재 종이컵 성형기에 맞춰 식 (5) - (7) 을 스케일링한 변위선도 그림이다. 변위 선도 그림에서 배럴 캠이 200° 회전하는 동안 인덱스는 정지 운동을 하며 200° ~ 360° 회전하는 1 구간부터 3 구간 동안 인덱스는 51.43° 상승 운동을 한다.

2.2 캠의 프로파일

배럴 캠의 회전할 때, 캠의 프로파일은 인덱스

Table 2 Design variables of the cam design

부호	내용
$(xyz)_0$	배럴 캠 좌표계
$(xyz)_1$	0 좌표계의 평행이동, 회전 후 좌표계
$(xyz)_2$	인덱스 좌표계
$(xyz)_r$	롤러 좌표계
l_1	0 좌표계에서 1 좌표계까지의 x 축 이동
l_2	0 좌표계에서 1 좌표계까지의 z 축 이동
l_3	0 좌표계에서 1 좌표계까지의 y 축 이동
r_i	인덱스 반지름
r_r	롤러 반지름
h_r	롤러 높이
h_{ri}	단계별 롤러 높이
θ_i	롤러의 위치
θ_r	롤러 접촉각
θ_1	배럴 캠의 회전각
θ_2	인덱스의 회전각

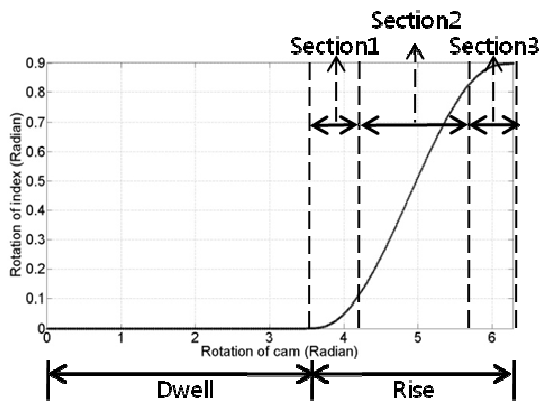


Fig. 2 Displacement diagram of index

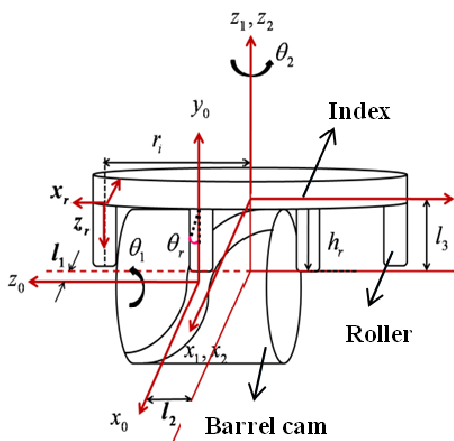


Fig. 3 Geometry of the index and the barrel cam

에 부착되어 있는 롤러가 움직이게 하는 역할을 한다. 따라서 배럴 캠이 1 회전 하는 동안 롤러의 궤적을 구한다면 배럴 캠의 프로파일의 형태를 알 수 있다. 안내 홈의 프로파일을 구하기 위해서는 변환행렬과 복소 평면 이론이 사용된다. Table 2는 각각의 설계 변수를 보여주며 Fig. 3은 인덱스 배럴 캠의 좌표계를 보여준다. x, y, z 축으로 l_1, l_2, l_3 만큼 평행 이동한 변환행렬 식 (8)과 x, y, z 축으로 $0^\circ, -90^\circ, 0^\circ$ 회전 이동한 변환행렬 식 (9)를 이용하여 롤러의 좌표계 $(xyz)_r$ 를 배럴 캠 좌표계 $(xyz)_0$ 로 나타내면 식 (10)과 같이 인덱스 배럴 캠의 구조를 수식으로 나타낼 수 있다.

$$T = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & l_1 \\ 0 & 1 & 0 & l_2 \\ 0 & 0 & 1 & l_3 \end{bmatrix} \quad (8)$$

$$R = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(-90^\circ) & -\sin(-90^\circ) & l_2 \\ 0 & \sin(-90^\circ) & \cos(-90^\circ) & l_3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

$${}^0M_r = [{}^0M_x \quad {}^0M_y \quad {}^0M_z]^T = \begin{bmatrix} r_r \cos\theta_1 \cos(\theta_2 - \theta_3 - \theta_r) + r_i \cos\theta_1 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ -h_r \sin\theta_1 - l_1 \cos\theta_1 + l_3 \sin\theta_1 \\ -r_r \sin\theta_1 \cos(\theta_2 - \theta_3 - \theta_r) - r_i \sin\theta_1 \cos(\theta_2 - \theta_3) \\ -h_r \cos\theta_1 + l_1 \sin\theta_1 + l_3 \cos\theta_1 \\ -r_r \sin(\theta_2 - \theta_3 - \theta_r) - r_i \sin(\theta_2 - \theta_3) - l_2 \end{bmatrix} \quad (10)$$

롤러의 형상을 정의하면 식 (11)과 같다.

$$S_r = [r_r \cos\theta_r \quad r_r \sin\theta_r \quad h_r]^T \quad (11)$$

식 (11)에서 Unit normal vector 를 구하면 식 (12)와 같다.

$$N_r = \frac{\frac{\partial s_r}{\partial h_r} \times \frac{\partial s_r}{\partial \theta_r}}{\left| \frac{\partial s_r}{\partial h_r} \times \frac{\partial s_r}{\partial \theta_r} \right|} \quad (12)$$

복소 평면 이론을 적용하면 식 (11)과 (12)를 이용하여 식 (13)과 같은 관계식을 세울 수 있다. 0N_r 은 Unit normal vector 를 0 좌표계로 나타낸 것이며, 0S_r 은 S_r 를 0 좌표계로 나타낸 것이다.

$${}^0N_r^T \cdot \frac{d^0S_r}{dt} = 0 \quad (13)$$

식 (13)를 만족시키는 θ_r 은 식 (14)와 같다. θ_r 을 식 (1)에 대입하면 롤러의 궤적을 구할 수 있게 되며 이는 배럴 캠의 프로파일이 된다.

$$\theta_r = \tan^{-1} \left(\frac{G / \sqrt{A+B+C+D+E+F}}{(H+I) / \sqrt{A+B+C+D+E+F}} \right) \quad (14)$$

$$A = 2 \sin(-\theta_2 + \theta_i) h_{ri} \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \right) r_r \quad (15)$$

$$B = 2 \sin(-\theta_2 + \theta_i) h_r \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \right) r_r \quad (16)$$

$$C = 4 \sin(\theta_2^2) h_{ri} r_r \quad (17)$$

$$D = h_{ri}^2 + h_r^2 + \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \right)^2 r_r^2 + 2 h_r h_{ri} \quad (18)$$

$$E = -4 \sin(\theta_2^2) h_{ri}^2 + 4 \sin(\theta_1^4) h_{ri}^2 \quad (19)$$

$$F = -4 \sin(-\theta_2 + \nu) u_{ri} \sin(\theta_1^2) \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \right) a_3 \quad (20)$$

$$G = \cos(-\theta_2 + \theta_i) 2 \sin(\theta_1^2) h_{ri} - l_3 - h_{ri} \quad (21)$$

$$H = -\sin(-\theta_2 + \theta_i) + 2 \sin(\theta_2 + \theta_i) u_{ri} \sin(\theta_1^2) \quad (22)$$

$$I = -\sin(\theta_2 + \theta_i) h_r - \left(\frac{\partial \theta_2}{\partial \theta_1} \right) r_r \quad (23)$$

2.3 설계 프로그램

캠의 변위선도와 복소 평면 이론을 이용하여 배럴 캠의 프로파일을 생성하는 프로그램을 MATLAB을 이용하여 개발하였다. 개발된 프로그램을 이용하여 배럴 캠의 입체 캠 모델을 생성하는 과정은 Fig. 5와 같다. 먼저 배럴 캠의 설계변수를 입력한다. 설계 프로그램에 입력되는 설계 변수는 롤러의 반지름과 높이, 인덱스의 반지름이다. 개발된 프로그램은 입력된 변수를 이용하여 변위선도를 생성한다. 그리고 생성된 변위선도와 배럴 캠과

롤러 사이의 관계식을 이용하여 3차원의 배럴 캠의 프로파일을 생성하게 된다. 배럴 캠의 프로파일은 롤러 옆면이 지나가면서 만들어내는 궤적이다. Fig. 6은 설계 프로그램의 결과로 출력된 배럴 캠의 프로파일을 보여준다. 배럴 캠 형상을 생성하기 위해 사용된 변수의 값들은 Table 3과 같다. 설계 프로그램에서 배럴 캠의 프로파일은 점 데이터의 형태로 출력된다. 설계 프로그램에서 출력되는 점 데이터는 약 3200개이다. 이 데이터를 3D

Table 3 Input value of the program

변수	입력값 (mm)
롤러 반지름	31.75
롤러 높이	38.1
인덱스 반지름	164

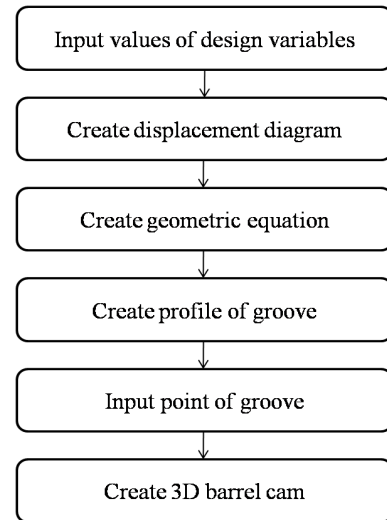


Fig. 5 Procedure of the cam design

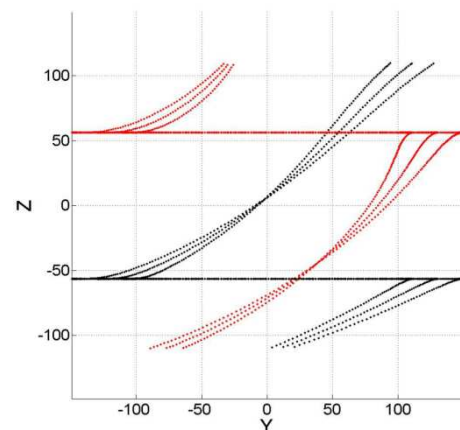


Fig. 6 Profile of the cam

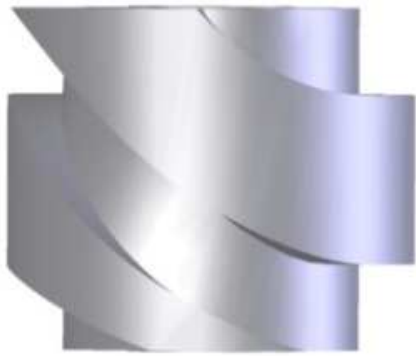


Fig. 7 Converted model of the cam

CAD 프로그램에 입력하고 각 점들을 선으로 연결하고 이 선들을 이용하여 Fig. 7 과 같은 배럴 캠 형상을 생성하게 된다.

3. 설계 프로그램 검증

3.1 동역학 모델

배럴 캠 설계 프로그램으로 생성한 모델을 검증하기 위해 배럴 캠의 종동절인 인덱스의 움직임을 측정하는 과정이 필요하다. Fig. 8 은 상용 다물체 동역학 해석프로그램인 ADAMS 를 이용하여 생성된 동역학 모델을 보여준다. 배럴 캠 모델은 Fig. 9 의 3 차원 레이저 스캔을 통해 역 설계된 모델을 이용하였다. 동역학 모델은 총 24 개의 바디로 구성되어 있고 바디 사이에는 조인트, 드라이버, 스프링, 접촉이 정의되어 있다. 동역학 모델의 총 자유도는 22 자유도이다. 동역학 모델의 정보는 Table 4 와 같다. 해석 시에 배럴 캠은 실제 시스템의 운행 속도인 140rpm 으로 회전하게 된다.

동역학 모델을 실제 기계의 인덱스의 움직임과 비교하였다. 배럴 캠의 프로파일 형상에 따라 출력되는 값이 인덱스 드라이브의 회전 거동이기에 때문에 고속 카메라를 이용하여 종이컵 성형기의 인덱스의 회전각을 측정하였다. 고속 카메라의 측정 방법은 다음과 같다. 고속 카메라가 인덱스의 회전축과 일직선상에 위치하도록 지면에 수직하게 설치하고 Fig. 10 과 같이 인덱스 드라이브의 회전부에 부착한 마커의 위치를 추적한다. 그리고 기계가 140rpm 의 속도로 움직일 때 인덱스를 초당 2000 프레임의 속도로 수집하였으며 이미지 해석 소프트웨어(NI Vision Builder)를 이용하여 측정된 사진들로부터 인덱스 드라이브의 회전각을 계산하였다. Fig. 11 은 인덱스 드라이브 회전각의 해석 결과와 측정 결과를 비교한 그래프이다. 인덱스의 회전각을 측정하는 마커의 위치의 오차와 측정 결

Table 4 Information of dynamic model

Parts	Rigid body	24
Joints	Revolute	16
	Translational	7
	Fixed	1
	Driver	1
Forces	Spring	14
	Contact	21
D.O.F		22

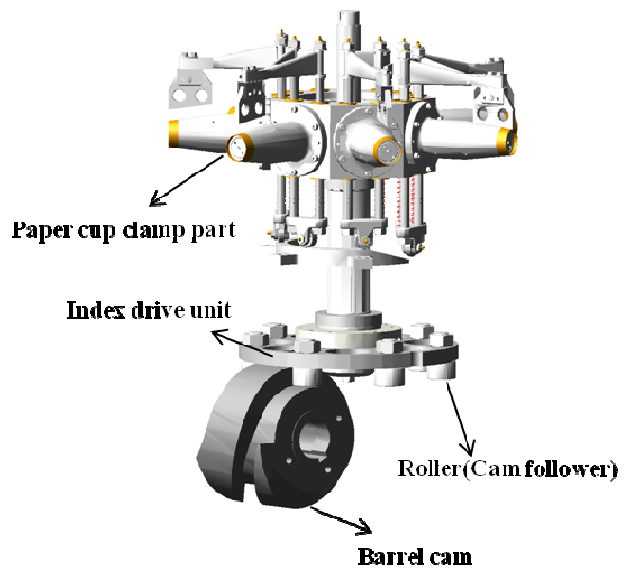


Fig. 8 Dynamic model of the paper cup forming machine

과의 후처리 시에 발생한 오차로 인해 두 결과가 정확히 일치하지 않는다. 그러나 두 결과 모두 배럴 캠이 1 회전(360°)할 때 인덱스가 1/7 회전(51.43°)을 하는 것을 보여준다. 이를 통해 동역학 모델의 신뢰성을 확보하였다.

3.2 프로그램 검증

설계 프로그램을 이용하여 생성된 배럴 캠을 이용한 동역학 모델이 1 회전 하는 동안 인덱스가 1/7 회전을 한다면 프로그램을 검증할 수 있다. 동역학 모델의 배럴 캠은 설계 프로그램을 이용하여 생성하였다. Fig. 12 는 설계 프로그램에서 배럴 캠의 프로파일을 생성하는 과정에서 입력한 배럴 캠에 의한 인덱스의 회전각과 이 배럴 캠을 이용한 동역학 모델에서 인덱스의 회전각을 비교하여 보여준다. 입력된 선도에 따라 배럴 캠의 프로파일이 생성되어 배럴 캠이 1 회전을 할 때 인덱스는 1/7 회전을 하는 것을 보여준다. 따라서

개발된 프로그램을 이용하여 만든 배럴 캠 모델의 신뢰성을 확보할 수 있었다.

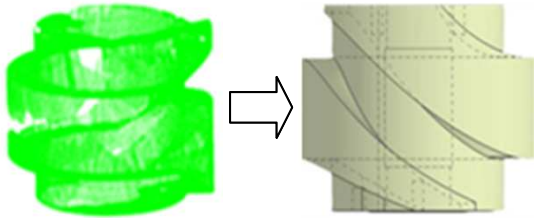


Fig. 9 Barrel cam model scanned using 3D laser scanner

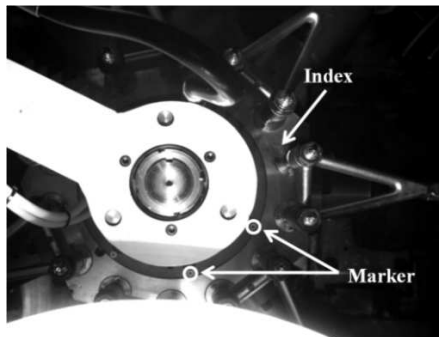


Fig. 10 Image analysis

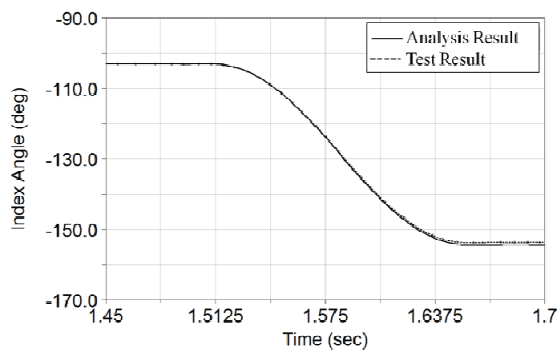


Fig. 11 Comparison of analysis result and test result

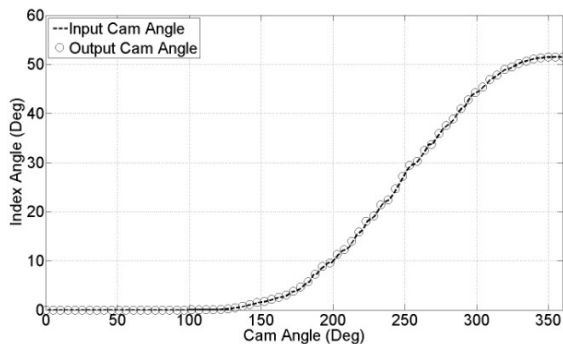


Fig. 12 Rotation angle of the two dynamic models

4. 결 론

본 논문에서는 종이컵 성형기에 사용되는 배럴 캠 설계 프로그램을 개발하였다. 변형사인곡선이 변위선도로 사용하고 변환행렬과 복소 평면 이론을 이용하여 배럴 캠과 인덱스에 부착된 풀러 사이의 관계식을 구하였으며 이를 프로그램에 삽입하여 배럴 캠의 프로파일을 생성하였다. 생성된 프로파일은 3D CAD 프로그램을 이용하여 3 차원 배럴 캠 형상을 생성할 수 있다. 생성된 배럴 캠 형상을 검증하기 위해 다물체 동역학 모델을 생성하였다. 다음, 실제 배럴 캠을 레이저 측정기를 이용하여 3 차원 형상으로 생성 하였고 두 모델의 비교 기준을 인덱스의 회전각으로 정하였다. 배럴 캠이 1 회전 할 때, 두 모델의 회전각이 일치하는 것을 확인하여 프로그램을 검증하였다. 본 프로그램을 이용할 경우 향후 배럴 캠 설계 분야에 크게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- (1) Chakraborty, J. and Dhande, S. G., 1977, *Kinematics and Geometry of Planar and Spatial Cam Mechanisms*, John Wiley & Don, New York.
- (2) Gonzalez-Palacios, M. A., Angles, J. and Cai, C., 1994, "Generation of Contact Surfaces of Indexing Cam Mechanisms - A Unified Approach," *ASME*, Vol. 2, pp. 369~374.
- (3) Tsai, W. J. and Lee, J. J., 1994, "An Automated System for Cam Design and Manufacture," *The 23rd Biennial Mechanisms Conf., ASME*, Vol. 71, pp. 121~128.
- (4) Hsieh, J., 2007, "Design and Machining of Barrel Cam with Meshing Indexing Disc," *Journal of Mechanical Engineering Science*, Vol. 221, No. 3, pp. 341~351.
- (5) Shin, J. H., Kim, S. W., Kang, D. W. and Yoon, H. E., 2002, "A Study on Design of Barrel Cam Using Relative Velocity," *Journal of the Korean Society of Precision Engineering*, Vol. 19, No. 8, pp. 47~54.
- (6) Cho, S. R., Lee, C. M. and Chung, W. J., 2001, "A Study on The Modeling of Roller Gear Cam," *Transaction of the Korean Society of Machine Tool Engineers*, Vol. 10, No. 3, pp. 31~37.
- (7) Neklutin, C. N., 1969, *Mechanism and Cams for Automatic Machines*, Elsevier.
- (8) Yang, Y. M., 1982, *Kinematics of Automatic Machine*, Gijunungoosa.