

필름 이송을 위한 진공 롤 외통의 정밀가공 공정개발

김의중¹ · 이호상^{2,†}

(주)제이피이¹

한국교통대학교 항공기계설계학과^{2,†}

Development of a precision machining process for the outer cylinder of vacuum roll for film transfer

Eui-Jung Kim¹ · Ho-Sang Lee^{2,†}

J-Precision Engineering, Inc.¹

Dep. of Aeronautical & Mechanical Design Eng., Korea Nat'l Univ. of Transportation^{2,†}

(Received May 21, 2024 / Revised May 24, 2024 / Accepted June 30, 2024)

Abstract: Unlike the roll-to-roll process that uses a steel roll and a nip roll, a vacuum roll can hold and transfer a thin film using a single roll. To precisely manufacture a vacuum roll, a thin outer cylinder must be machined, which is assembled on the outside of the roll and contacts the film via vacuum pressure. In this study, the effects of jaw width and chucking force on the deformation of the outer cylinder during the turning process were investigated using analysis, and a precision machining and burr removal process was developed. The deformation of the outer cylinder decreased almost linearly with increasing jaw width and increased with higher chucking force and larger cylinder diameter. Additionally, the deflection due to the weight of the outer cylinder was approximately three times greater than that caused by film tension. For the machined outer cylinder, a burr removal experiment was conducted, and concentricity and cylindricity were measured. Using a device that removes burrs by rotating a wheel connected to the main shaft at high speed, it was found that burrs generated on the inner diameter could be removed very efficiently. On the vacuum side, the concentricity errors of the inner and outer diameters were 0.015 mm and 0.014 mm, respectively, and on the opposite side, they were 0.006 mm and 0.010 mm, respectively. Additionally, the measurement of Total Indicator Runout (TIR) according to the angle showed that the maximum cylindricity of the outer and inner diameters was 0.02 mm and 0.025 mm, respectively. Finally, through burr-height measurement at the hole boundary, it was found that the heights were within 0.05 mm.

Key Words: Vacuum Roll, Outer Cylinder, Burr, Concentricity, Cylindricity

1. 서론

필름을 대량생산하는 전통적인 분야부터 플렉시블 마이크로 일렉트로닉스, 얇은 플렉시블 배터리, 태양전지, 디스플레이 등 다양한 분야까지 롤투롤(Roll-to-Roll) 생산방식이 적용되고 있다¹⁾. 최근에는 2차전지 전극 제조를 위한 코팅, 프레싱, 슬리팅, 노칭 등 각 공정에서 필름을 공급, 이송하기 위해 롤투롤 장비가 사용되며, 수요가 급증하고 있는 추세

이다.

롤투롤 장비에서는 스틸 롤과 함께 닙 롤(nip roll)을 사용하여 필름에 압력을 가해 장력을 조절하고, 필름을 이송한다. 그러나 스틸 롤과 닙 롤 사이의 선 접촉으로 인해 필름 표면에 응력이 집중되며, 접촉 압력이 불균일하기 때문에 필름의 두께가 균일하지 않게 된다²⁾. 또한 닙 롤의 고무가 오염되어 필름 표면에 이물질이 묻거나, 주름이 발생하는 문제가 빈번하게 발생한다. 뿐만 아니라 두께가 매우 얇은 필름 또는 한쪽 표면이 접촉 불가능한 필름의 경우에는 적용할 수 없는 한계를 안고 있다.

두개의 롤을 사용할 때 발생하는 한계를 극복하기 위하여 최근에는 하나의 롤을 사용하여 두께가

† 교신저자: lhs@ut.ac.kr

* 본 논문에 대한 저작권은 저자들에게 있으며 CC BY-NC-SA를 만족하는 조건으로 이용할 수 있습니다.

매우 얇은 필름의 장력을 정밀하게 제어하고, 이송할 수 있는 진공 롤(Vacuum Roll)에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. 진공 롤은 미세한 구멍을 통해 진공으로 필름을 흡착하는 방식으로 진공 각도 조절이 용이하며, 진공 폭 조절 기능을 사용하여 다양한 종류의 필름 이송에 사용할 수 있다. 미국의 Maxcess에서는 진공 영역 조절이 가능하며, 내통을 고정하고 외통을 회전시켜 필름을 흡착, 이송시킬 수 있는 진공 롤을 개발해 상용화하였으며, 롤의 최대 직경은 406.4 mm이며, 동심도 및 진직도 공차는 0.127 mm 수준이다³⁾.

진공 롤을 정밀하게 제작하기 위해서는 롤 외부에 조립되고 필름과 직접 접촉하여 진공압력으로 필름을 잡아주는 얇은 원통형태의 외통(Outer cylinder)을 가공하여야 한다. 외통의 외경부는 직접 필름과 접촉하여 회전하는 부분으로 외경의 정밀도가 필름의 흔들림에 직접적인 영향을 주기 때문에 높은 정밀도가 요구되며, 원통도와 동심도를 갖도록 가공하는 기술이 매우 중요하다.

또한 진공 압력을 필름에 전달하기 위하여 외통에 다수의 미세한 진공 홀을 가공하여야 한다. 일반적인 진공 홀 크기는 외통 내경부에 있는 버(Burr) 제거가 용이하도록 직경 4~5 mm 정도의 구멍으로 가공하고, 미세한 홀이 형성된 니켈 망을 씌워서 박막의 필름이 지날 때 흡입 구멍의 흔적이 남지 않도록 하고 있다. 그러나 필름 소재가 구리 또는 알루미늄인 경우에는 수십 Kg의 장력이 요구되기 때문에 니켈망 사용이 어렵고, 따라서 상대적으로 작은 직경 2~3 mm 구멍을 직접 외통에 가공하여야 한다. 이때 미세한 구멍에서 발생하는 버를 제거하는 것이 필수적이다⁴⁾. 버 제거를 위해 공구를 사용할 경우 수십 개 구멍의 버만 제거해도 공구의 마모가 심하게 발생하고⁵⁾, 공구 자체가 파손되는 문제가 발생하게 된다. 이를 해결하기 위하여 많은 연구가 수행되었으나, 아직까지 미세한 구멍 가공에서 발생하는 버를 제거하기에는 한계를 안고 있다⁶⁻¹¹⁾.

본 논문에서는 진공 롤 외통을 선삭가공하는 공정에서 조(Jaw)의 폭, 척킹력(Chucking force) 등이 외통 변형에 미치는 영향을 해석을 통해 고찰하였다. 또한 외통을 제작하기 위한 정밀가공 및 버 제거 공정을 개발하였으며, 최종 가공된 외통에 대한 동심도, 원통도 등을 측정하였다.

2. 외통 변형해석

진공 롤의 외통을 선삭가공하는 공정에서 조(Jaw)의 폭, 척킹력(Chucking force) 등이 외통 변형에 미치는 영향을 고찰하였다. 외경 204 mm, 내경 172 mm인 외통을 적용대상으로 하고, 구조해석을 적용하여 외통의 변형량을 해석하였다. Fig. 1과 같이 3개 또는 4개의 조가 외경을 지지하는 경우와 내경을 지지하는 경우 각각에 대해 해석을 수행하였다.



Fig. 1 Support conditions for outer-cylinder machining

구조해석을 위해 ANSYS를 사용하였으며, 외통의 길이가 매우 길기 때문에 2차원 평면변형률(Plane strain) 해석을 수행하였다. 조가 4개인 경우에는 Fig. 2와 같이 외통의 1/4부분을 모델링하고, 조가 3개인 경우에는 1/3 부분을 모델링하였다. 또한 단면에서 대칭 경계조건을 부여하고, 조(Jaw)에 의한 척킹력을 하중경계조건으로 부여하기 위해 조의 위치에 리모우트 포인트(Remote point)를 설정하였다.

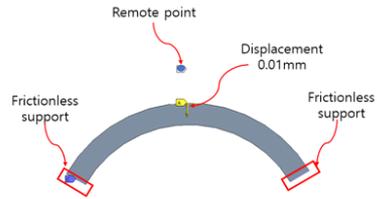


Fig. 2 Boundary conditions for outer-cylinder analysis

2.1. 조의 폭이 변형에 미치는 영향

Fig. 3은 척킹력이 4,500N으로 일정할 때 조의 폭에 따른 외통의 최대변형량을 나타낸 것이다. 모든 척킹 조건에서 조의 폭이 증가함에 따라 외통의 변형량이 거의 선형적으로 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한 조가 외경을 지지하는 경우와 내경을 지지하는 경우는 변형에 큰 영향이 없으며, 지지하는 조의 개수가 변형에 크게 영향을 미치는 인자임을 알 수 있다. 특히 조가 3개인 경우는 4개인 경우에 비해 조와 조사이의 간격이 넓기 때문에 변형량이 크

게 발생하며, 또한 척킹력이 작용하는 부분에서의 변형량과 조와 조사이 중간부분에서의 변형량이 거의 차이가 없기 때문에 외경지지와 내경지지인 경우의 변형량이 거의 동일한 것으로 판단된다. 4개의 조를 사용하여 외경을 지지하고, 조의 폭이 35 mm 인 경우 외통의 변형량을 0.0033 mm로 가장 감소시킬 수 있는 것으로 나타났다.

일반적으로 선삭가공 공정에서 발생하는 외통의 최대 변형량은 0.01 mm 이내로 제한하고 있다. 따라서 최대변형량 0.01 mm 발생할 때 조의 폭 변화에 따른 척킹력을 해석하였다. Fig. 4는 외통의 최대 변형량 0.01 mm일 때 척킹 조건별 조의 폭 변화에 따른 척킹력을 계산한 결과를 나타낸 것이다. 폭이 35 mm일 때 4개의 조가 외경을 지지하는 경우 척킹력은 13,840N으로 다른 척킹 조건에 비해 가장 높은 것으로 나타났다. 반면에 4개의 조가 내경을 지지할 때 척킹력은 11,968N으로 외경을 지지하는 경우에 비해 척킹력이 감소하는 것으로 나타났다.

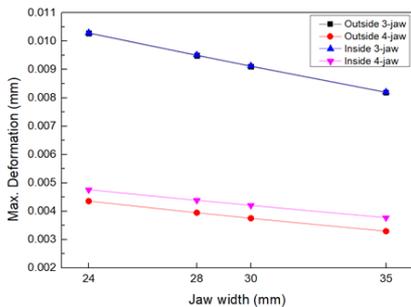


Fig. 3 Maximum deformation as a function of jaw width (chucking force: 4,500N)

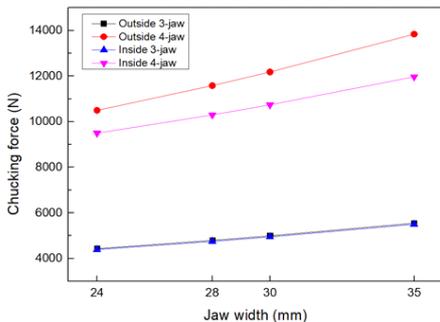


Fig. 4 Chucking force as a function of jaw width (maximum deformation: 0.01 mm)

2.2. 척킹력이 변형에 미치는 영향

Fig. 5는 조의 폭이 24 mm일 때 척킹력에 따른

외통의 최대변형량을 나타낸 것이다. 모든 척킹 조건에서 척킹력이 증가함에 따라 외통 변형량이 증가하였다. 4개의 조가 외경을 지지하는 경우 변형을 최소화시킬 수 있으며, 척킹력이 5,500N 일 때 최대 변형량은 0.0053 mm로 나타났다.

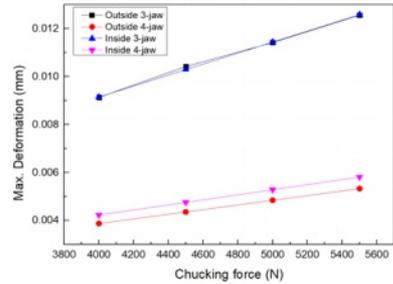


Fig. 5 Maximum deformation as a function of chucking force (jaw width: 24 mm)

2.3. 외통의 크기가 변형에 미치는 영향

외통의 크기가 변형에 미치는 영향을 고찰하였다. 외통의 외경과 내경이 각각 204 mm와 172 mm 인 경우, 241 mm와 210 mm인 경우, 261 mm와 230 mm인 경우, 그리고 291 mm와 260 mm인 경우에 대해 변형해석을 수행하였다. 이때 4개의 조가 내경을 지지하는 경우로 가정하였다.

Fig. 6은 조의 폭이 24 mm일 때 다양한 외통 크기에 대해 척킹력에 따른 변형량을 나타낸 것이다. 외통의 외경 및 내경이 증가수록 변형이 크게 발생하고 있으며, 특히 외경 291 mm, 내경 260 mm인 경우 척킹력의 증가가 변형에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 외통의 두께가 31 mm로 동일한 상태에서 내경과 외경이 증가할 경우 강성이 감소하기 때문에 척킹력에 의한 변형이 증가하는 것으로 판단된다.

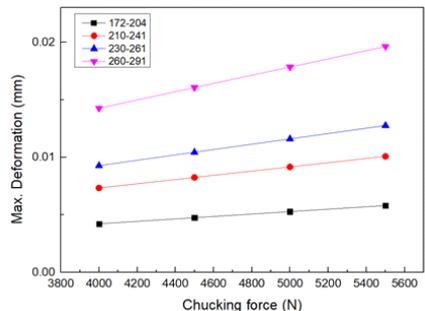


Fig. 6 Maximum deformation as a function of chucking force at various cylinder size (jaw width: 24 mm)

2.4. 외통의 자중과 필름 텐션에 의한 처짐

외통의 자중과 필름 텐션에 의하여 발생하는 외통의 처짐량을 비교하였다. 해석을 위해 Fig. 7과 같이 외경 260 mm, 내경 230 mm, 길이 2,610 mm인 외통에 대해 길이 1,400 mm 영역에 걸쳐 70°구간에서 필름이 접촉하고 있는 상태를 모델링하였다. 또한 외통의 자중과 필름의 텐션은 실측에 의해 각각 2,370N, 588N를 적용하였으며, 롤러 베어링으로 지지되어 있는 외통의 양 끝단에 단순지지 경계조건을 설정하였다.

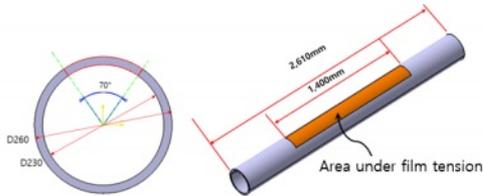
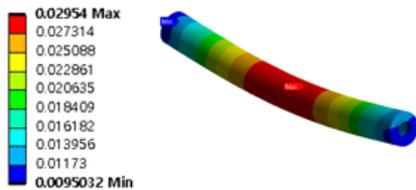
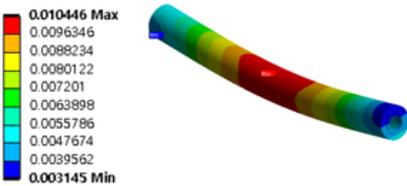


Fig. 7 Deflection analysis model of outer cylinder by film tension

Fig. 8에서 알 수 있는 바와 같이 외통의 자중에 의한 처짐과 필름 텐션에 의한 처짐이 각각 0.03 mm, 0.01 mm 으로 자중에 의한 처짐이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다.



(a) self weight



(b) film tension

Fig. 8 Deflection of outer cylinder

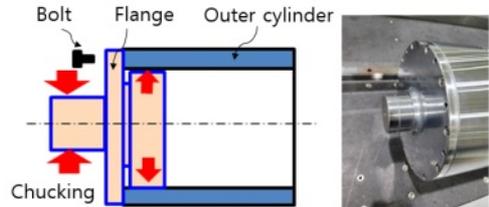
3. 외통 가공 및 버 제거

3.1. 외통 가공

제작하고자 하는 외통의 크기는 내경 190 mm,

외경 210 mm, 길이 1,450 mm이며, 재질은 STKM13A이다.

외통의 한쪽을 주축의 척에 척킹하고, 한쪽 끝을 심압대에 지그(파이프센터)를 사용하여 장착하여 외경을 황삭가공 하였다. 방진구를 설치하는 부위의 외경을 정삭 가공하였으며, 해당 부분에 방진구를 설치하고, 외통의 한쪽 끝에 척킹 지그를 장착할 수 있도록 외통의 내, 외경을 가공하였다. Fig. 9(a)는 외통의 한쪽 끝에 장착되는 척킹 지그를 도시한 것으로 외통의 내경에 내접하게 지그 플랜지면을 가공하고 8개의 볼트를 사용하여 플랜지와 외통을 등간격으로 조립한 이후에 지그 축을 척킹하도록 하였다. Fig. 9(b)는 외통의 외경을 황삭, 정삭 가공하기 전 단계에서 주축의 척에 척킹하기 위해 제작한 지그와 외통의 조립상태를 나타낸 것이다.



(a) Schematics

(b) Assembly

Fig. 9 Chucking jig and outer cylinder

가공된 외통의 외경을 기준으로 Fig. 10과 같이 보링용 지그를 장착하여 방진구에 지그를 물리고, 외경과 동심도를 점검하면서 내경을 황삭, 정삭하여 완성하였다. 이때 가공조건은 공작물 회전수 200rpm, 황삭 절입깊이 0.5 mm, 이송속도 20 mm/min, 정삭 절입깊이 0.1 mm, 이송속도 10 mm/min를 적용하였다.



Fig. 10 Attachment of boring jig

외통의 외경은 원통연삭기에서 연삭하여 완성하였으며, 연삭시 내경과 동심도를 확보하기 위해서

Fig. 11과 같이 양쪽 센터 조정지그를 설치하여 외경을 기준으로 연삭이 되도록 하였다. 또한 최종 외통의 다듬질 조건은 외경 다듬질 연삭 0.8S, 내경 다듬질 6.3S를 적용하였다.

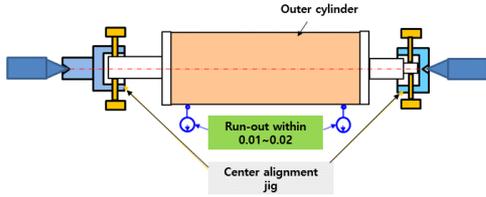


Fig. 11 Attachment of center-alignment jig

3.2. 버 제거

진공압력을 전달하기 위하여 외통에 직경 3 mm 인 12,915개의 구멍을 드릴 가공하였다. 이때 구멍 주위에서 버(Burr)가 발생하게 되며, 버가 잔존할 경우 진공압력에 의해 내외통 사이를 유동하면서 진공홀을 막거나 접촉면의 손상을 일으키기 때문에 버를 제거하기 위한 디버링 공정이 매우 중요하다.

외통 내경부 진공 홀에서 발생한 버를 제거하기 위해 고속으로 회전하는 버 제거장치를 Fig. 12와 같이 설계하였다. 메인 샤프트를 베어링으로 지지하고, 모터를 이용하여 메인 샤프트에 연결된 휠(브러시)을 고속으로 회전시키며 버를 제거할 수 있도록 하였다.

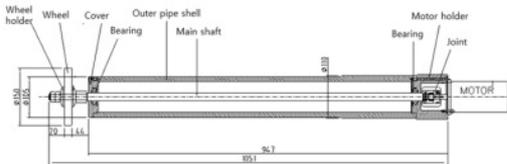


Fig. 12 Burr removal device by using rotating tool

Fig. 13은 제작한 버 제거장치를 선반의 공구대에 지그를 이용하여 조립한 상태를 나타낸 것이다. 버 제거작업을 위한 절입과 이송은 선반의 각축(X축, Z축)을 사용하도록 하였다. 버 제거장치의 휠 부분에 직경 4inch, 폭 20mm인 스틸 브러시를 장착하였으며, 디버링 조건으로서 공구회전수 200rpm, 이송 속도 20 mm/min를 사용하고, 3회 반복 왕복하면서 버를 제거하도록 하였다.

Fig. 14는 버 제거장치를 사용하여 진공 홀에서 발생한 버를 제거하기 전과 제거한 이후의 상태를

나타낸 것이다. 초음파를 이용하여 내경에서 제거된 버를 세척하였으며, 최종적으로 내경에 발생한 버를 매우 효율적으로 제거할 수 있음을 확인하였다.



Fig. 13 Assembly of burr removal device

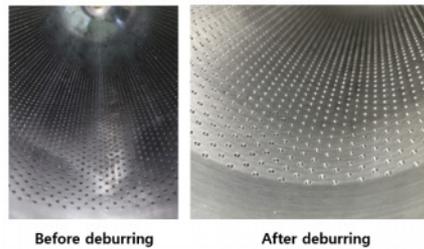


Fig. 14 Photos before and after deburring using burr removal device

4. 측정 및 평가

선삭가공과 미세구멍 가공 및 버 제거가 수행된 외통에 대하여 동심도와 원통도를 측정하였다. Fig. 15는 외통을 베어링 블록에 위치시키고 내외경 동심도를 측정하는 상태를 나타낸 것이다. 외통의 양쪽 끝단(진공측과 반대쪽)의 내경과 외경에 각각 인디게이터를 2개씩 설치하고, 외통을 회전시키며 흔들림 량을 측정하였다.

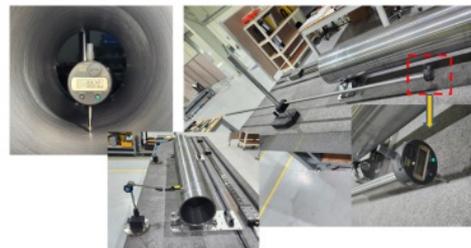
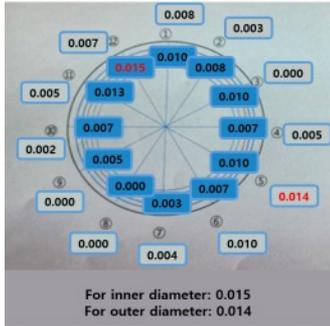
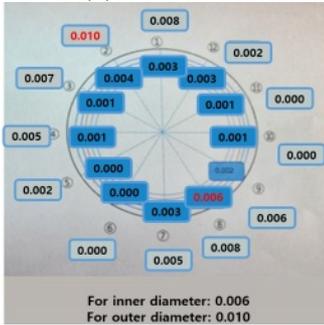


Fig. 15 Measurement of inner and outer diameter concentricity

Fig. 16은 외통의 내외경 동심도(흔들림)를 측정 한 결과를 나타낸 것이다. 진공측에서 내경 및 외경 동심도 오차는 각각 0.015 mm, 0.014 mm로 나타났 으며, 반대측에서의 내경 및 외경 동심도 오차는 각 각 0.006 mm, 0.010 mm로 나타났다.



(a) Suction side



(b) Opposite side

Fig. 16 Inner and outer diameter concentricity

Fig. 17은 외통이 선반에 설치된 상태에서 내외경 원통도를 기상측정하는 상태를 나타낸 것이다. 외통의 내경에 2개의 인디게이터를 설치하고, 외경에 3 개의 인디게이터를 각각 설치하였으며, 외통을 회전 시키며 TIR(Total Indicator Runout)값을 측정하였다.



Fig. 17 Measurement of inner and outer diameter cylindricity

Table 1은 외통의 내외경 각 지점에서 측정한 각 도에 따른 TIR값을 나타낸 것으로 외경의 최대 원 통도는 0.02 mm, 내경의 최대 원통도는 0.025 mm 로 나타났다.

Table 1 TIR according to angle at each position of inner and outer diameters

Angle (°)	TIR (mm)				
	Outer			Inner	
	Left	Center	Right	Center	Right
0	0.010	0.010	0.010	0.010	0.000
90	0.000	0.000	0.000	0.010	-0.010
180	0.000	0.000	0.015	0.015	0.015
270	-0.010	0.005	0.000	0.010	-0.010
Total	0.020	0.010	0.015	0.015	0.025

정량적인 버 높이를 측정하기 위해서 Fig. 18과 같이 표면거칠기 측정기(Mitutoyo SJ-310)를 사용하여 구멍경계에서의 버 높이를 측정하였다. 측정결과 구멍 경계부위의 버 높이는 0.05 mm 이내로 확인되 었다.



Fig. 18 Burr height measurement

5. 결론

진공 롤 외통을 선삭가공하는 공정에서 조의 폭, 척킹력 등이 외통 변형에 미치는 영향을 해석하였 으며, 외통을 제작하기 위한 정밀가공 및 버 제거 공정을 개발하였다. 이를 통해 얻은 결론은 다음과 같다.

- 1) 조의 폭이 증가함에 따라 외통의 변형량이 거 의 선형적으로 감소하였으며, 척킹력이 증가함에 따 라 외통 변형량이 증가하였다.
- 2) 외통의 외경 및 내경이 증가수록 변형이 크게

발생하였으며, 4개의 조를 사용하여 외경을 지지하는 경우가 변형량을 가장 감소시킬 수 있는 척킹 조건으로 나타났다.

3) 외통의 자중에 의한 처짐이 필름 텐션에 의한 처짐에 비해 약 3배 크게 발생함을 알 수 있었다.

4) 메인 샤프트에 연결된 휠을 고속으로 회전시키며 버를 제거할 수 있는 장치를 개발하여 실험한 결과 내경에 발생한 버를 매우 효율적으로 제거할 수 있었다.

5) 외통의 동심도를 측정하였으며, 진공측에서 내경 및 외경의 동심도 오차는 각각 0.015 mm, 0.014 mm이고, 반대측에서 내경 및 외경의 동심도 오차는 각각 0.006 mm, 0.010 mm로 나타났다.

6) 외통의 내외경에서 각도에 따른 TIR값을 측정하였으며, 외경 및 내경의 최대 원통도는 각각 0.02 mm, 0.025 mm로 나타났다.

7) 표면거칠기 측정기를 사용하여 구멍경계에서의 버 높이를 측정한 결과 0.05 mm 이내로 확인되었다.

후기

본 연구는 2023년 한국교통대학교 산학협력단 지원을 받아 수행하였음

참고문헌

- 1) Ha, Y.-W., A., Kim, G.-H. and Lim, D.-C., "Understanding and trends of roll-to-roll operation," J. Korean Inst. Electr. Electron. Mater. Eng., Vol.37, No.1, pp. 36-42, 2024.
- 2) Choi, J. W., Shin, K. H. and Lee, C. W., "Matching Technology Between Nip Roll Characteristics and Quality of Print Pattern in Roll-to-Roll Printed Electronics Systems," Trans. Korean Soc. Mech. Eng. A, Vol.36, No.2, pp. 173-178, 2012.
- 3) Maxcess, Fixed and Adjustable Zone, Vacuum Rolls, http://www.maxcessintl.com/wp-content/uploads/2021/02/Webex_VacuumRolls.pdf, 2021.
- 4) Ko, S. L. and Kim, J. H., "Minimization of burr formation in drilling with step drill," J. Korean Soc. Prec. Eng., Vol.17, No.10, pp. 132-140, 2020.
- 5) Park, S.-O., Kim, M.-H., Lee, S.-K. and Jung, S.-T., "Development of tool-life prediction program to determine the optimal machining conditions in mold machining," Design & Manufacturing, Vol.17, No.1, pp. 7-12, 2023.
- 6) Bae, J.-K., Park, H.-Y., Kwon, B.-C. and Ko, S.-L., "Determination of cutting conditions for an efficient deburring process using a new deburring tool," J. of Korean Soc. Manuf. Proc. Eng., Vol.15, No.4, pp. 109-117, 2016.
- 7) Jeong, Y. H., HanYoo, B., Lee, H. U., Min, B. K., Cho, D. W. and Lee, S. J., "Deburring microfeatures using micro-EDM," J. of Mat. Proce. Tech., Vol. 209, No. 14, pp. 5399-5406, 2009.
- 8) Lee, S. H., and Dornfeld, D. A., "Precision laser deburring," J. Manu. Sci. and Eng., Vol. 123, No. 4, pp. 601-608, 2001.
- 9) Lee, K. U. and Ko, S. L., "Development of deburring tool for burrs at intersecting holes," J. Mat. Proce. Tech., Vol. 20, No. 1, pp. 454-459, 2008.
- 10) Ton, T. P., Park, H. Y. and Ko, S. L., "Experiment alanalysis of deburring process on inclined exit surfa.ce by new deburring tool," CIRP Annals-Manuf. Tech., Vol. 60, No. 1, pp. 129-132, 2011.
- 11) Ko, S. L., "Measurement and effective deburring for the micro burrs in piercing operation," Int. J. Korean Soc. Prec. Eng. and Manuf., Vol. 1, No. 1, pp. 152-159, 2000.

저자 소개

김 의 중(Eui-Jung Kim)

[비회원]



- 2002년 2월 : 아주대학교 시스템공학과 (공학박사)
- 1994년 11월~2004년 7월: 고등기술연구원, 책임연구원
- 2001년 6월~2007년 8월: 하이젤(주), 부사장
- 2007년 9월~ 현재: ㈜제이피이, 대표이사

< 관심분야 >
정밀가공

이 호 상(Ho-Sang Lee)

[정회원]



- 1989년 2월 : 서울대학교 기계설계학과 (공학박사)
- 1989년 1월~1995년 2월 : LG전자 생산기술원, 책임연구원
- 1995년 3월~1996년 7월 : 고등기술연구원, 책임연구원
- 1996년 8월~현재: 한국교통대학교 항공기계설계학과, 교수

< 관심분야 >
사출성형 및 금형, CAE해석