

사출성형 조건에 따른 정밀 플라스틱 나사의 형상정밀도 향상에 관한 연구[§]

백순보^{**} · 박근^{*†} · 염충호^{**} · 나승우^{***}

*서울산업대학교 기계설계자동화공학부, **서울산업대학교 원, ***㈜서울금속 기술연구소

Study on Improvement of Dimensional Accuracy of a Precision Plastic Screw Under Various Injection-Molding Conditions

Soon Bo Baek^{**}, Keun Park^{*†}, Chung Ho Youm^{**} and Seung Woo Ra^{***}

* School of Mechanical Design and Automation Engineering, Seoul Nat'l Univ. Tech,

** Graduate School, Seoul Nat'l Univ. Tech., *** Research Center, Seoul Metal Co. Ltd.

(Received May 13, 2010 ; Revised July 20, 2010 ; Accepted August 2, 2010)

Key Words : Injection Molding(사출성형), Plastic Screw(플라스틱 나사), Numerical Analysis(수치해석), Design of Experiment(실험계획법)

초록: 플라스틱 나사는 경량성, 내식성, 열 및 전기절연성이 우수하여 최근 금속나사 대체용으로 사용되고 있다. 플라스틱 나사는 사출성형에 의해 제작되며 성형과정에서 수축이 발생하여 형상정밀도가 저하된다. 특히 소형 정밀나사의 경우 마이크로미터 단위의 정밀도를 요구하는 관계로 소성가공에 의해 제작되는 금속나사를 대체하기 위해서는 많은 어려움이 따른다. 본 연구에서는 사출성형 공정의 수치해석을 통해 금형설계 인자를 결정하였고, 실험계획법을 적용하여 변형량을 최소화하기 위한 성형조건을 도출함으로써 플라스틱 나사의 형상정밀도 향상을 위한 연구를 수행하였다.

Abstract: Recently, plastic screws have replaced metal screws because of the former's light weight, thermal and electrical insulating properties, and anticorrosion characteristics. Plastic screws are usually produced by injection molding, which involves material shrinkage during the solidification of the polymer. This shrinkage results in the degeneration of the dimensional accuracy. In the present study, the effect of injection-molding conditions on the dimensional accuracy of plastic screws was investigated through a numerical simulation of injection molding; on the basis of this simulation, we could determine the mold-design parameters. The design of experiment was applied in accordance with the numerical analysis in order to optimize the injection-molding conditions with a view to improving the dimensional accuracy of the precision plastic screw.

1. 서론

나사(Screw)는 각종 부품의 체결기능을 수행하는 기계요소로서 다양한 산업분야에서 널리 사용되고 있다. 나사는 일반적으로 금속 재료를 사용하여 제조되고 있으며, 최근 전자 및 통신제품의 소형화 및 집적화로 인해 점차적으로 소형화되어 가는 동시에 높은 형상정밀도를 요구하고 있다. 금속 나사는 절삭가공이나 소성가공에 의해 제작

되고 있다. 소성가공의 경우 나사의 머리부분은 단조공정, 나사산 부분은 전조공정에 의해 제작되고 있는데, 정밀 소형 나사의 전조공정시 형상정밀도 향상을 위한 관한 연구가 진행되고 있다.^(1,2) 한편 제품수요의 다양화에 따라 최근 플라스틱 나사의 필요성이 대두되고 있다. 플라스틱 나사는 경량성, 내식성, 전기절연성 등이 우수하여 디스플레이 장치, 이동통신기기, 차세대 정보저장장치 등에 수요가 점차적으로 증가되고 있다. 본 연구에서는 사출성형(Injection molding)을 이용한 정밀 플라스틱 나사 개발에 관한 연구를 진행하고자 한다. 사출성형은 고분자재료를 용융시켜 액상에서 고압, 고속으로 금형 캐비티를 충전시켜 성형하는 기술로서 고분자재료의 응고과정에서 수축에 의한 부

§ 이 논문은 2010년도 대한기계학회 생산 및 설계공학부분 춘계학술대회(2010. 4. 22-23., 제주 라마다프라자) 발표논문임.

† Corresponding Author, kpark@snut.ac.kr

© 2010 The Korean Society of Mechanical Engineers

피변화가 발생한다. 따라서 소성가공에 의해 제작되는 금속 나사에 비해 형상정밀도가 저하되어 정밀 소형 나사의 경우 형상정밀도 향상을 위한 금형설계 및 공정조건의 최적화가 요구된다.

또한 플라스틱 나사를 체결부품으로 사용하기 위해서는 일정수준 이상의 강도(Strength)가 보장되어야 한다. 고분자 재료중 상대적으로 강도가 높은 반결정성(Semi-crystalline) 재료의 경우 사출성형 공정조건에 따라 기계적 물성의 변화가 발생하는데,⁽³⁾ 기계적 특성을 향상시키기 위한 사출성형 조건의 최적화에 관한 연구가 수행되었다.⁽⁴⁻⁶⁾

본 연구에서는 사출성형 조건이 성형품의 형상정밀도에 미치는 영향을 분석하여 최적의 조건을 찾기 위해 사출성형의 유동해석과 후변형해석을 연계하여 적용하였다. 이때 소형 정밀 나사의 입체적인 형상특성을 효과적으로 고려하기 위해 3차원 입체요소(Solid element)에 기반한 해석⁽⁷⁾을 진행하였다. 또한 해석 및 실험계획의 체계적인 수립 및 결과의 통계적인 분석을 위해 실험계획법을 적용하였다.⁽⁸⁾

2. 플라스틱 나사 성형용 금형개발

2.1 플라스틱 나사 설계

본 연구에서 개발하고자 하는 플라스틱 나사는 정밀 전자부품에 많이 사용되는 M3(외경 3.0mm, 길이 6.0mm, 피치 0.5mm) 나사로 선정하였다. Fig. 1에 M3 나사의 형상 및 주요 치수를 도시하였다. M3 나사의 경우 2급 조건(2.874~2.980mm)을 만족하기 위해서는 외경이 $\pm 53\mu\text{m}$ 이내의 정밀도로, 피치는 $\pm 10\mu\text{m}$ 이내의 정밀도로 제작되어야 한다.

정밀나사 제작용 플라스틱 재료는 엔지니어링 플라스틱인 Solutia社의 Vudyne 21SPA (PA66) 수지를 사용하였다. Table 1에 해당 수지의 주요 물성을 요약하였다. 해당 수지는 반결정성 수지로서 인장강도가 82.7MPa 이고 성형수축율은 2.0%에 해당한다.

Table 1 Mechanical properties of Solutia Vudyne 21SPA

Material Properties	Value
Elastic modulus (GPa)	2.96
Tensile strength (MPa)	82.7
Density (g/cm ³)	1.14
Hardness (Shore D)	60
Mold shrinkage (%)	2.0

2.2 플라스틱 나사 성형을 위한 사출금형 설계

Fig. 2에 M3 나사 사출성형을 위한 금형의 주요 형상을 도시하였다. 금형은 3단 금형 구조를 채택하였고, 가로 200mm, 세로 180mm, 높이 175mm인 몰드 베이스를 선정하였다. 또한 나사부 치형에 대해 슬라이드 코어 형태로 금형을 제작하여 언더컷 처리를 용이하게 할 수 있도록 금형을 설계하였다.

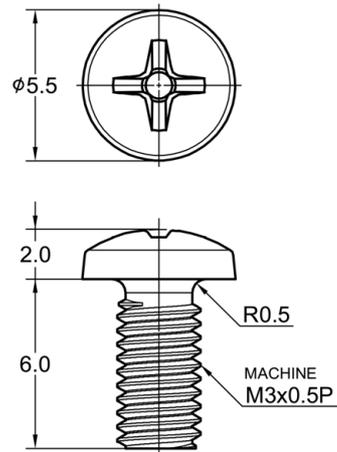


Fig. 1 Dimensional specifications of an M3 screw

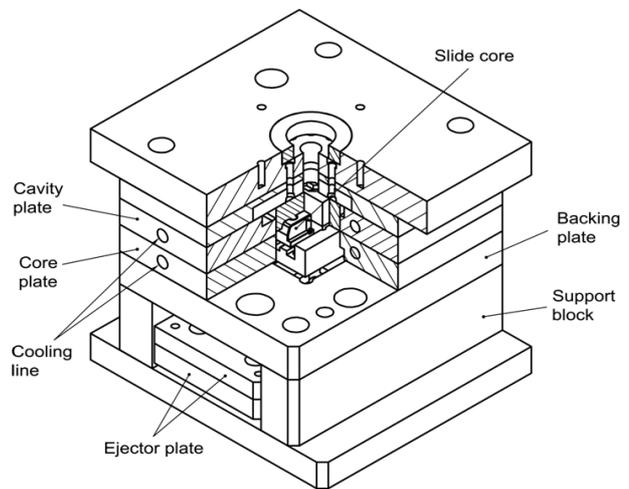


Fig. 2 Configuration of an injection mold for a screw

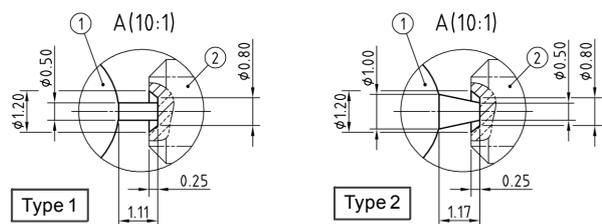


Fig. 3 Configuration of two types of gate designs

플라스틱 나사는 측면부에 나사산이 가공되어 있고, 머리부에 십자 홈이 형성되어 있는 관계로 사출성형시 게이트가 바닥면에 위치하도록 금형을 설계해주어야 한다. 따라서 바닥면에 핀포인트 게이트가 삽입되고 머리부에 이젝터핀이 위치하는 구조로 설계하였다. 이때 바닥면에 게이트 제거후 흔적이 남으면 제품으로 사용시 문제가 발생할 여지가 있기 때문에 바닥면에 도피부를 추가하여 제품 설계를 수정하였고, 도피부 중앙에 핀포인트 게이트가 위치하도록 하였다(Fig. 3 참조).

도피부는 직경이 0.8mm, 단차 0.25mm 로 설계하였다. 게이트는 도피부 내측에 설치하였으며, 직경을 0.5mm 로 설계하였다. 그러나 게이트 크기가 너무 작은 경우 게이트 부위에서 압력강하가 증가하여 유동특성이 저하되고 사출압이 증가할 것으로 예상된다. 따라서 본 연구에서는 Fig. 3 에 도시된 바와 같이 원형 게이트(Type 1)과 췌기형 게이트(Type 2)의 2 가지 형태의 게이트를 적용하였다. 췌기형 게이트는 게이트 끝단 직경을 0.5mm 로 유지한 채 역구배를 부여하여 게이트 부위에서의 압력강하를 감소시킬 수 있도록 설계하였다.

3. 플라스틱 나사 사출성형 해석

3.1 게이트 설계에 따른 사출성형 해석

상기 2가지 형태의 게이트를 사용하여 사출성형을 실시한 경우의 유동특성 비교를 위해 사출성형의 CAE 해석을 실시하였다. 해석은 Moldflow Plastic Insights[®] 5.0을 사용하였으며, 3차원 사면체 요소(tetrahedral element)를 사용하여 요소망을 구성하였다. Table 2에 해석시 사용한 사출성형 조건을 요약하였다.

Fig. 4에 원통형 게이트를 사용한 경우 충전시간에 따른 유동패턴의 변화를 도시하였다. 사출시간은 0.5초로 설정하였고, 보압 전환을 99%시점으로 설정하였기 때문에 최종 충전시간이 0.512초로 예측되었다. 보압은 2단계로 부여하였으며, 1차 0.5초간 50MP, 2차 0.5초간 45MPa 의 압력을 부여하였다. 최종적으로 성형되는 부분은 나사 머리부의 외측면으로 확인되었으며, 전체적으로 미성형은 발생되지 않고 나사의 미세 치형이 모두 성형되는 것으로 확인되었다.

Fig. 5에 제품 단면에서의 온도분포를 시간에 따라 도시하였다. 충전이 완료된 직후(0.51초)의 경우 금형과 인접한 표면부의 온도가 80℃인 반면 중앙부의 온도가 300℃이상의 분포를 보임을 알

수 있다. 또한 보압이 종료된 1.5초가 경과한 경우 내부의 온도가 급격히 저하됨을 알 수 있으며, 나사부에 비해 머리부의 온도가 상대적으로 빨리 저하됨을 알 수 있다. 특히 2.77초 경과시 나사부의 온도가 150℃ 이하로 떨어져 고화가 발생됨을 예측할 수 있는데, 이러한 결과로부터 현재 5초로 설정한 냉각시간이 성형부의 고화 측면에서는 충분함을 알 수 있다.

게이트 형태에 따른 사출성형시 유동특성을 고

Table 2 Injection molding conditions for a micro screw

Molding conditions	Value
Melt temperature (°C)	290
Mold temperature (°C)	80
Injection time (s)	0.5
Packing time (s)	1.0
Cooling time (s)	5.0

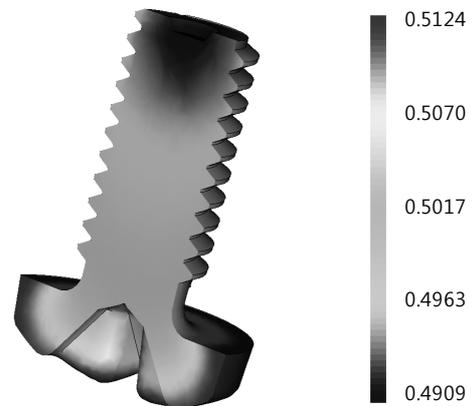


Fig. 4 Distribution of filling time (unit: s)

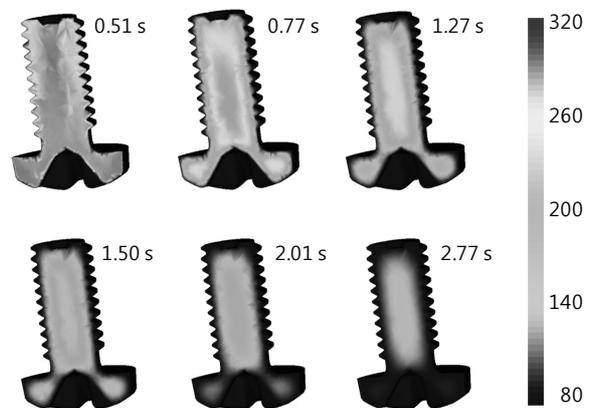


Fig. 5 Sectional temperature distributions (unit: °C)

찰하기 위해 Fig. 6에 원형 게이트(Type 1)와 썬기형 게이트(Type 2)의 경우에 대해 시간에 따른 노즐 끝단에서의 최대사출압 변화 그래프를 비교하였다. 원형 게이트의 경우 최대사출압이 15.13MPa인 반면 썬기형 게이트의 경우 최대사출압이 12.21MPa에 해당하여 게이트에서의 압력강하가 20% 정도 감소됨을 알 수 있다.

Fig. 7에 2가지 형태의 게이트에 대해 냉각시간에 따른 게이트 끝단에서의 온도변화 그래프를 비교하였다. 원형 게이트의 경우 보압이 종료되는 시점에서 급격하게 온도가 감소한 반면 썬기형 게이트의 경우 온도감속 속도가 다소 완화되어 게이트 응고가 지연되고 결과적으로 성형품 내부로의 보압전달이 용이할 것으로 판단된다. 상기 결과를 종합해볼 때 원통형 게이트보다는 썬기형 게이트가 최대사출압은 저감시키면서도 압력전달 특성이 우수함을 확인할 수 있었다.

3.2 사출성형 조건에 따른 후변형해석

본 절에서는 사출성형 조건에 따른 나사의 변형량 예측을 위해 사출성형 해석과 연계한 후변형 해석을 실시하였다. 앞절의 해석결과를 토대로 게

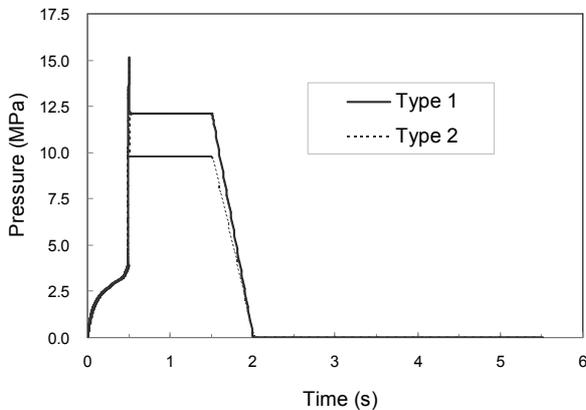


Fig. 6 Comparison of the injection pressure profiles

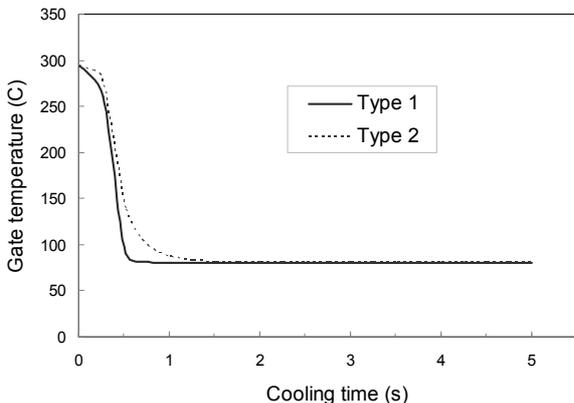


Fig. 7 Comparison of the gate temperature profiles

이트는 썬기형 게이트로 최종 선정하였다. Fig. 8에 해석 결과로부터 얻어진 제품의 반경방향 변형량을 도시하였다. 전체적으로 수축이 발생하여 외경 기준 수축량은 위치에 따라 0.1105~0.1110mm의 분포를 보임을 확인할 수 있었다.

본 연구에서는 사출성형 조건이 제품의 후변형 특성에 미치는 영향을 보다 체계적으로 분석하기 위해 실험계획법과 CAE 해석을 연계하여 진행하였다. 실험계획법 적용을 위해 사출온도, 금형온도, 보압시간 및 냉각시간의 4가지 성형조건을 인자(A~D)로 선정하였다. 1차 실험계획은 4가지 인자에 대해 2수준으로 실험계획을 수립하였으며 (Table 3 참조), 부분요인 실험계획을 적용하여 8회의 실험(분석도 IV)을 수행하였다.

Fig. 9(a)에 해석 결과로부터 얻어진 외경 변형량에 대한 주효과 그래프(Main effect plot)를 도시하였다. 4가지의 인자중 사출온도가 가장 큰 영향을 보인 반면 금형온도에 따른 영향이 가장 작은 것으로 분석되었다. 인자별 영향을 살펴보면 사출온도가 낮을수록, 보압시간이 길수록, 냉각시간이 짧을수록 외경의 수축량이 감소함을 알 수 있다.

상기 조건을 토대로 후변형량 감소를 목적으로 사출성형 조건 최적화를 위한 2차 실험계획을 진행하였다. 우선적으로 1차 실험계획법 적용 결과에서 영향이 미미한 것으로 나타난 금형온도(B)를 상대적으로 변형량이 적게 나타난 80°C로 고정시

Table 3 Injection molding conditions for the 1st DOE

Factor	Molding conditions	Level 1	Level 2
A	Melt temperature (°C)	260	300
B	Mold temperature (°C)	40	80
C	Packing time (s)	0.5	1.5
D	Cooling time (s)	5.0	9.0

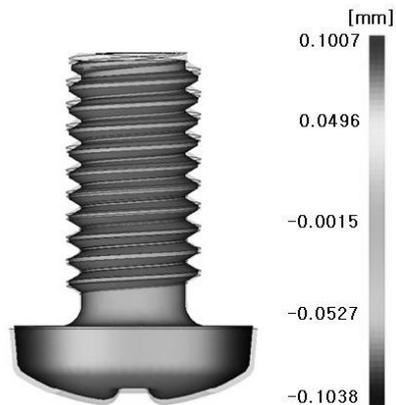
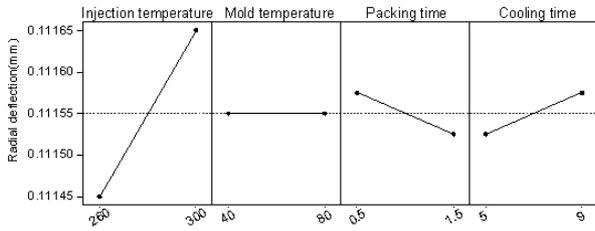
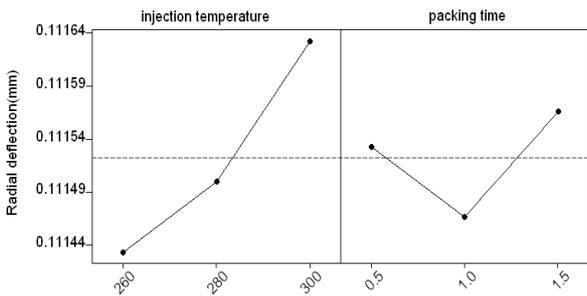


Fig. 8 Distribution of the radial deflection (unit: mm)



(a) Main effect plots of the 1st DOE



(b) Main effect plots of the 2nd DOE

Fig. 9 Main effect plots for the radial deflection

켰다. 냉각시간(D)의 경우 냉각시간이 짧을수록 변형량이 감소하는 경향을 보이며, 동시에 생산성 측면에서도 유리한 점을 감안하여 최소조건인 5 초로 설정하였다. 2 차 실험계획에서는 상기 2 개의 인자를 제거하고 사출온도(A)와 보압시간(C)만을 설계인자로 선정하였다. 2 가지 인자에 대해 중간값(사출온도 280°C, 보압시간 1.0 초)을 추가하여 3 수준 완전요인 실험계획을 적용하여 9 회의 실험(분석도 V)을 수행하였다.

Fig. 9(b)에 2 차 실험계획에 의한 외경 변형량의 주효과 그래프를 도시하였다. 보압시간의 경우 중간값인 1.0 초에서 변형량이 최소가 됨을 확인할 수 있었으며, 상기 결과로부터 1.0 초를 최적의 값으로 설정하였다. 반면 사출온도의 경우 온도가 감소함에 따라 변형량이 감소하는 경향을 보이며, 중간값인 280°C 를 기점으로 기울기가 완화된 것을 알 수 있다. 선행 연구^(5,6)에 의하면 온도가 너무 낮을 경우 결정화도가 낮아져 강도가 저하될 가능성이 있어 변곡점에 해당하는 280°C 를 최적의 조건으로 선정하였다.

4. 나사 사출성형품의 형상정밀도 분석

4.1 나사부 외경의 형상정밀도 분석

나사 사출성형 실험을 위해 3.1절에서 언급한 사출성형 해석결과를 토대로 금형을 설계하여 제작하였다. 사출성형기는 25ton 사출기를 사용하였으

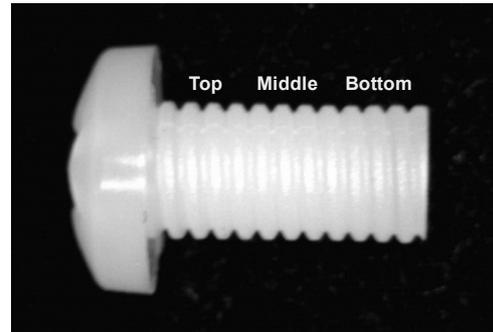


Fig. 10 An injection-molded screw with 3 measurement positions

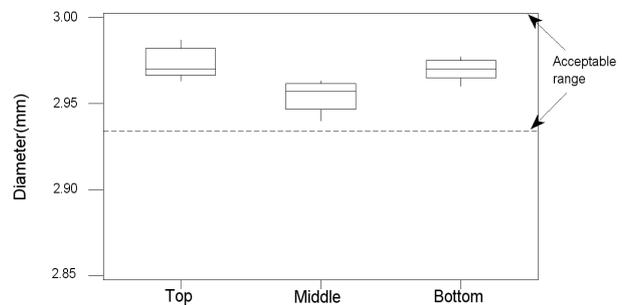


Fig. 11 Box plots for the measured diameter values

며, 온도조절기를 사용하여 금형온도를 조절해주었다. 성형조건은 3.2절에서 선정한 최적 조건을 사용하였고, 성형품의 형상정밀도 분석을 위해 나사부의 외경을 측정하였다. 사출성형으로 제작되는 플라스틱 나사의 경우 나사부 위치에 따른 외경의 차이가 발생하여 Fig. 10과 같이 상부(Top)/중부(Middle)/하부(Bottom)로 구분하여 외경을 측정하였다. 외경은 버니어캘리퍼스를 사용하여 5개의 샘플에 대해 3회씩 반복측정하여 평균값을 산출하였으며, Fig. 11에 부위별 측정결과를 Box plot 형태로 비교하였다. 그래프에 점선형태로 1급 나사의 허용치수(2.933~3.000mm) 범위를 표시하였다.

측정결과를 보면 5개 샘플의 평균치가 상부 2.973mm, 중부 2.955mm, 하부 2.970mm 로 측정되어 중부의 외경 치수가 상대적으로 낮게 나타났다. 제품간의 산포를 고려하여 분석해보면 측정된 5개의 시편중 상부 외경이 가장 크게 측정된 경우가 2.987mm 로 기준치수(2.967mm)에 비해 +20µm의 오차를, 중부 외경이 가장 작은 경우가 2.940mm 로 기준치수에 비해 -27µm의 오차를 보여 1급 나사의 오차범위인 2.967±0.033mm 를 만족시켜 제작된 플라스틱 나사가 1급 나사의 기준을 충족시킴을 확인할 수 있다.

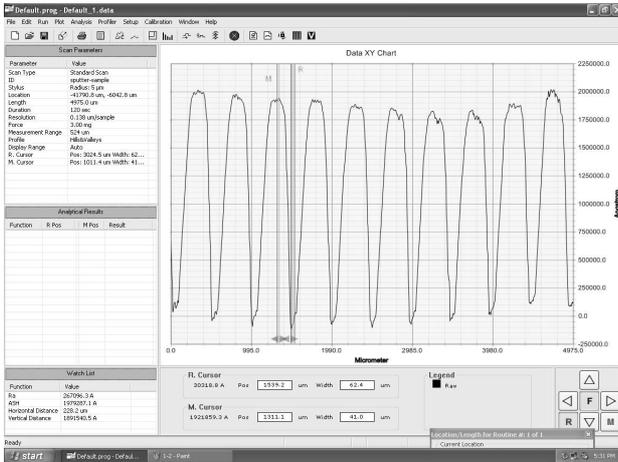


Fig. 12 Measured data of a plastic screw profiles

4.2 나사산간의 피치정밀도 분석

제작된 나사부의 나사산간 피치정밀도를 고찰하기 위해 3 차원 표면측정기를 사용하여 나사산 프로파일을 측정하였다. 측정장비는 (재)서울테크노파크 MSP 기술지원센터에서 보유하고 있는 미국 Dektek 社의 3D-Profiler 를 사용하였다. Fig. 12 에 3 차원 표면측정기를 사용하여 측정된 나사산 프로파일의 형태를 도시하였다. 이때 그래프의 x 축은 나사 바닥면 기준 측방향 거리를 의미하며, y 축은 나사산의 높이를 의미한다(측정단위: μm). 나사 프로파일을 측정한 결과 10 개의 나사산간 피치는 $484.6\sim 495.2\mu\text{m}$ 사이의 결과를 보이며, 공차범위를 고려한 설계치수(0.490mm) 대비 $+5.2\mu\text{m}$, $-5.4\mu\text{m}$ 이내의 분포를 보여 1 급나사 기준 목표치인 $0.490\pm 0.010\text{mm}$ 를 달성함을 확인할 수 있었다.

5. 결론

이상으로 본 연구에서는 정밀 플라스틱 나사의 개발과정에서 형상정밀도를 향상시키기 위한 연구를 수행하였다. 세부적인 연구내용을 요약하면 다음과 같다.

(1) 사출성형 공정의 수치해석을 통해 성형과정에서의 유동특성 및 온도변화 특성을 고려하여 성형조건 범위를 설정하였다.

(2) 사출성형품의 후변형해석을 통해 제품의 변형량을 예측하였고, 실험계획법과 연계하여 변형량을 최소화시키기 위한 최적의 조건(사출온도 280°C , 금형온도 80°C , 보압시간 1 초, 냉각시간 5

초)을 도출하였다.

(3) 상기 조건을 적용하여 제작된 성형품의 형상을 측정하여 1 급 나사의 기준(제품 외경 기준 $2.967\pm 0.033\text{mm}$, 피치 기준 $0.490\pm 0.010\text{mm}$)을 만족함을 확인하였다.

후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업 및 이공계전문기술지원서포터즈사업의 지원으로 수행되었음.

참고문헌

- (1) Kao, Y. C., Cheng, H. Y. and She, C. H., 2007, "Development of an Integrated CAD/CAE/CAM System on Taper-Tipped Thread-Rolling Die-Plates," *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 177, pp. 98~103.
- (2) Shin, M. S., Cha, S. H., Kim, J. B., Kim, J. H. and Rha, S. W., 2009, "Thread Rolling Analysis for Lead Screw Process Design," *Elast. Composites*, Vol. 44, pp. 384~390.
- (3) Katti, S. S. and Schultz, J. M., 1982, "The Microstructure of Injection-Molded Semicrystalline Polymers: a Review," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 22, pp. 1001~1017.
- (4) Fitchmun, D. and Newman, S., 2000, "On the Effect of Crystallinity on the Elastic Properties of Semi-Crystalline Polyethylene," *Polym. Eng. Sci.*, Vol. 22, pp. 330~335.
- (5) Chu, J., Kamal, M. R., Dourdour, S. and Hrymak A., 2008, "Effects of Processing Conditions on Mechanical Properties and Crystallinity of Micro Injection Molded Thermoplastics," *Proc. SPE ANTEC*, pp. 2468~2472.
- (6) Park, K. and Kim, Y. S., 2009, "Effect of Mold Temperature on Mechanical Properties of an Injection-Molded Part with Microfeatures," *J. Polym. Engng.*, Vol. 29, pp. 135~154.
- (7) Park, K., Ahn, J. H. and Yim, C. H., 2003, "Residual Stress Estimation and Deformation Analysis for Injection Molded Plastic Parts Using Three-Dimensional Solid Elements," *Trans. of the KSME (A)*, Vol. 23, No. 4, pp. 507~514.
- (8) Park, K. and Ahn, J. H., 2004, "Design of Experiment Considering Two-Way Interactions and Its Application to Injection Molding Processes with Numerical Analysis," *J. Mater. Proc. Tech.*, Vol. 146, pp. 221~227.