

Crack 발생 예측을 통한 Lead Screw 전조공정설계

신명수¹ · 차성훈¹ · 김종봉[#]

Prediction of Crack Initiation and Its Application to the Design of Lead Screw Thread Rolling Process

M.-S. Shin, S.-H. Cha, J.-B. Kim

(Received January 25, 2010 / Revised March 29, 2010 / Accepted April 22, 2010)

Abstract

In this paper, the process parameters of thread rolling were designed based on the numerical analysis results. Firstly, the effective analysis conditions that guarantee the reliability of the analysis results were found. To find the effective analysis conditions, the analyses were carried out for various numbers of teeth. And then, the effects of the process parameters such as tool shape and temperature on the thread rolling performance were investigated. The formability in thread rolling process was evaluated in terms of Cockcroft-Latham damage value. In order to evaluate formability, Cockcroft-Latham damage value was normalized by the critical damage value which was obtained from the analysis of uniaxial tensile test. The analyses were carried out using DEFORM-3D. The results showed that the flank angle and crest round had an effect on the thread rolling load. It was also shown that temperature had significant effects on the effective strain distribution, rolling load, and damage. With the reduced formability of stainless steel at higher temperature, it was shown that the normalized damage values increased as the process temperature.

Key Words : Thread Rolling Process, Thread Shape, Temperature, Damage

1. 서 론

전조공정이란 상부다이스와 하부다이스 사이에 소재를 놓고 소성변형을 하여 원하는 모양으로 만드는 가공 기법으로 나사나 기어를 만드는데 이용되고 있다. 이 방법은 정도가 우수하고 균일한 나사산의 생산이 가능하기 때문에 대부분의 나사성형에 이용된다. 전조의 방식으로는 두 개의 원형 다이스 사이에 소재를 끼우고 다이스를 회전시켜 나사를 만드는 회전식과, 평판형 다이스를 이용하여 다이스의 왕복운동에 의하여 나사를 만드는 왕복식이 있다. Fig. 1은 회전식과 왕복식 전조공정에 대한 개략도이다. 평판형 다이스를 이용하는 방식은 소형나사의 대량생산에 이용되고, 원

형 다이스를 이용하는 방식은 정밀한 나사를 만드는 공정에 많이 이용된다. 원형 다이스를 이용한 방식과 평판형 다이스를 이용한 방식 모두 절삭가공에 비해 가공시간이 매우 단축되고[1], 인장 및 전단과 피로 강도측면에서 향상된 성능을 가지며, 가격측면에서도 유리하다. 또한 다양한 형태의 형상도 성형이 가능하다. 단점은 소량을 생산할 경우 생산성이 떨어지며, 회전식 공정의 경우 소재를 잡아주는 홀드가 필요하다는 것이다[2]. 현재 전조에 대한 연구는 미비한 실정이며, 현장에서는 전문가의 경험에 의존하여 제품을 생산하고 있다. 전조에 대한 선행 연구로는 spindle screw 공정에서의 최적 소재경 선정에 관한 연구[3], 프랭크 각도, 초기 소재경, 다이스 치형 끝단

1. 서울산업대학교 NID융합대학원
교신저자: 서울산업대학교 자동차공학과, jbkim@snut.ac.kr

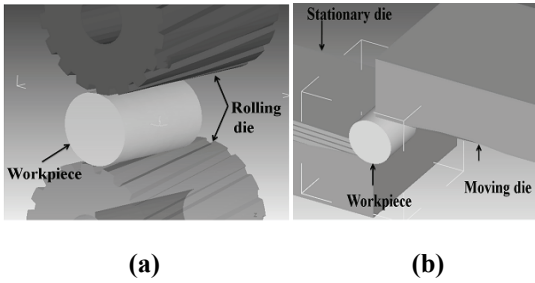


Fig. 1 Thread rolling process using (a) roll die and (b) flat die

부위 라운드, 마찰계수, 소재의 가공경화지수에 따른 전조 부품의 정밀도 향상에 관한 연구[4], counter flow 방식의 고정밀도 렉다이의 설계에 관한 연구[5], 소재의 유동, 치형의 형상, 직경의 길이 등을 고려한 전조해석에 관한 연구[6], 금형 형상과 마찰계수에 따른 크랙 발생 연구[7], 그리고 마찰계수와 상하부 다이의 정렬에 관한 연구[8] 등이 있다. 전조 공정에 관한 연구는 대부분 냉간 공정에 관한 연구이며, 열간 공정을 고려한 연구는 거의 없다고 볼 수 있다. 또한 전조 공정에 대한 해석의 경우 해석시간이 많이 소요되므로, 이전의 연구들은 대부분 2차원 해석을 수행하였다.

본 연구에서는 평관형 다이스를 이용한 전조공정을 DEFORM-3D를 이용하여 수행하였다. 해석시간을 줄이고 정확한 결과를 얻기 위해, 치형의 수를 변화시키면서 해석을 수행하여 해석의 정확도를 보장하기 위해 해석에 필요한 최소 치형의 개수를 파악하였다. 그리고, 요소 수에 따른 해석을 수행하여 해석의 정도를 보장하는 최적의 요소의 수를 결정하였다. 마지막으로 금형 형상과 성형온도에 따른 해석을 수행하여 금형의 형상과 온도가 전조력, 유효 변형율, 그리고 크랙 발생에 미치는 영향을 분석하였다.

2. Lead Screw 소재의 특성

Lead Screw는 핸드폰, 디지털카메라, PMP, 그리고 MP3등에서 Stepping Motor의 정밀제어에 사용되는 부품으로 탄소강 합금강, 스테인리스 등이 주로 이용된다. 본 연구에서는 실제 공정에 사용되고 있는 AISI SUS 304 소재를 이용하는 전조공정에 대해 해석을 진행하였다. 소재의 화학적 조성 과 온도에 따른 응력-변형율 특성[9]은 Table 1 과 Fig. 2에 각각 나타내었다. Fig. 2에 보인 응력-변형

Table 1 Chemical composition of AISI SUS 304

C	Cr	Mn	Ni	P	Si	S
0.03%	18~20%	2%	8~12%	0.045%	1%	0.03%

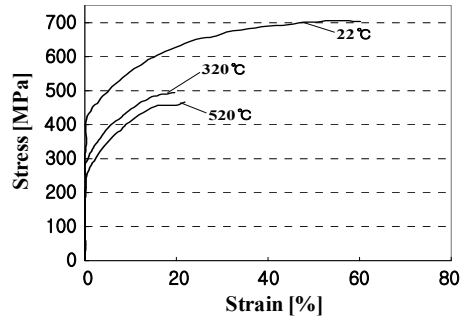


Fig. 2 Stress-strain curve of AISI SUS 304 at various temperature

율 곡선과 연신율은 소성 구성방정식 모델링과 온도에 따른 Crack 발생을 예측하는데 각각 이용하였다.

3. 해석모델 검증

전조공정에서는 성형이 상부 다이의 이동에 따라 점진적으로 미세하게 진행되기 때문에 해석시간이 많이 소요된다. 치형의 수가 증가하면 해석에 필요한 요소의 수도 증가 하기 때문에 해석시간이 길어져 해석이 어렵다. 3차원(3D) 해석을 진행할 경우 2차원(2D) 해석보다 정확한 결과를 얻을 수 있지만 해석시간을 줄이기 위해 대부분 2차원으로 해석을 진행한다[10]. 본 연구에서는 3차원해석을 수행하였고, 해석시간을 줄이며 해석의 신뢰성 확보를 위해 치형의 개수를 4개와 6개에 대해 해석을 진행하여 해석결과를 분석하였다. 치형의 개수를 줄이기에 앞서 lead screw 전체 형상에 대한 해석을 수행하였다.

Fig. 3은 lead screw 전체 형상에 대해 해석한 결과를 보여준다. 그림에서 확인 할 수 있듯이 전체 형상을 해석하였을 경우 요소가 충분히 작게 나누어 지지 않아 형상이 불분명하게 성형되었다. 해석 시간과 컴퓨터 메모리 문제로 인해 해석에 사용된 요소의 수를 더 이상 증가시킬 수 없기 때문이다. 실제로 Fig. 3에 보인 문제를 해석하는데도 single core CPU로 15일 이상이 소요되었다. 결과적으로, 이와 같은 스크류 전체에 대한 해석

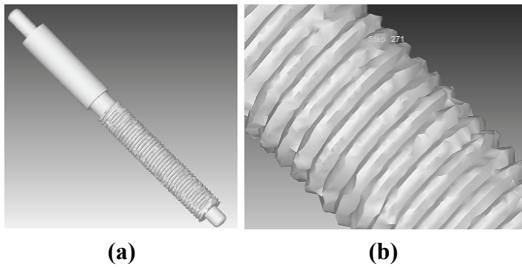


Fig. 3 (a) Full model analysis result and (b) detailed view of Fig. 3(a)

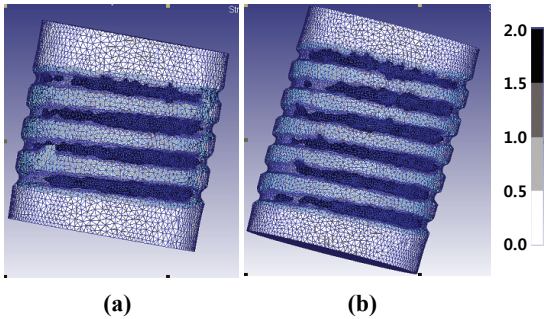


Fig. 4 Effective strain distribution on lead screw for the analysis of (a) 4 and (b) 6 threads

에서는 해석결과가 신뢰 할 수 없을 뿐만 아니라 해석시간 또한 많이 소요된다는 것을 확인하였다. 그러므로, 결과의 신뢰성을 확보하고 해석시간을 줄이기 위해, 해석 결과의 신뢰성을 확보할 수 있는 범위에서 모델의 크기를 줄여서, 즉 치형의 수를 줄여 해석을 진행할 필요가 있어 치형의 수 4개와 6개에 대해서 해석을 수행하고 그 결과를 분석하였다.

Fig. 4는 치형의 수를 4개와 6개로 하여 해석한 결과를 보여준다. 치형의 수가 4개와 6개인 경우 모두 유효 변형율이 이뿌리 부근에서 가장 크게 나타나는 것을 확인 할 수 있고 분포가 비슷함을 알 수 있었다. 요소의 크기를 작게 하기 위해 4개의 나사산에 대해서만 해석을 수행하였는데도 응력 분포가 부드럽지 않음을 알 수 있다. 요소의 크기를 더 작게 해야 하지만, 메모리 한계로 인해 더 줄이지는 못했다. 결과를 보다 정량적으로 비교하기 위해 치형의 개수에 따른 유효변형율 분포와 유효응력 분포를 Fig. 5와 Fig. 6에 각각 나타내었다. 유효 변형율의 경우 첫번째 치형과 마지막 치형에서 약간의 차이가 발생하지만 전체적으로 비슷한 분포가 나타난다고 볼 수 있고, 유효

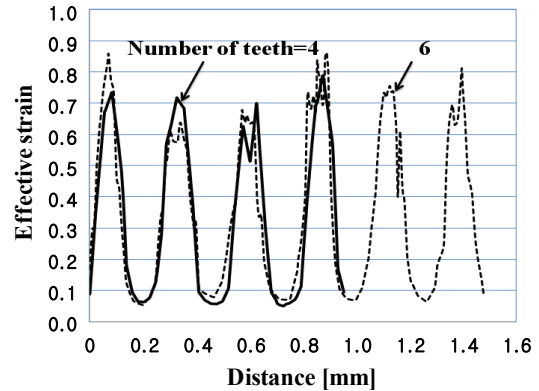


Fig. 5 Effective strain distribution along teeth section for the various numbers of teeth

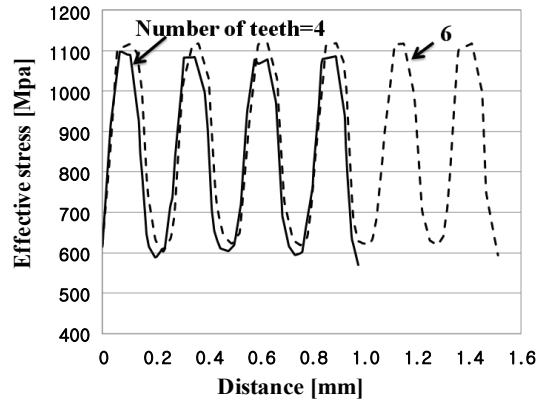


Fig. 6 Effective stress distribution along teeth section for the analysis of 4 and 6 threads

응력의 경우에도 두 가지 해석 결과가 전체적으로 비슷한 결과를 보임을 알 수 있다. 이와 같은 유효 변형율과 유효 응력의 결과로 볼 때 치형의 수를 4개로 해석하여도 무리가 없다고 판단된다.

또한, 치형의 개수가 4개일 때 적합한 요소의 수를 파악하기 위해 피치를 요소의 최소 길이로 나눈 값을 12, 25, 그리고 33으로 해석을 진행 하였다. Fig. 7은 그 값에 따른 유효 변형율 중 이 뿌리에서 최대값을 평균한 그래프이다. 그래프에서 볼 수 있듯이 피치/요소최소길이 값이 25로 해석을 진행하여도 33인 경우와 거의 같은 결과를 얻을 수 있다고 판단된다. 즉 치형의 개수를 4개, 요소의 수를 피치/요소최소길이 값이 25로 해석을 하였을 경우 해석 결과의 신뢰성과 해석 시간 측면에서 적합하다고 판단된다.

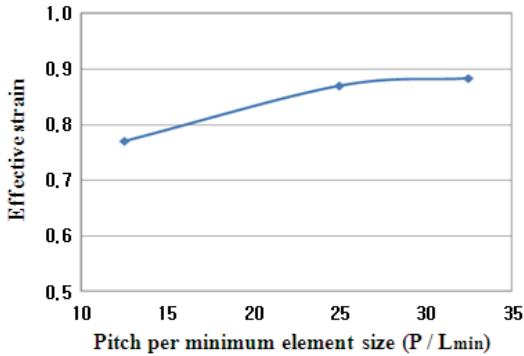


Fig. 7 Averaged peak values of effective strain for number of element per a tooth

4. 결함(Damage) 예측

모든 성형 제품은 성형 중에 크랙 등의 불량 발생이 문제가 되고 있다. 본 연구에서도 전조 공정에서 발생하는 크랙 발생을 알아보기 위해 DEFORM-3D에서 제공하는 결함 값을 확인해 보았다. 결함은 다음과 같이 기술되는 Cockcroft-Latham[11] 이론을 적용하였다.

$$\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \frac{\sigma_1}{\bar{\sigma}} d\bar{\epsilon} = C \quad (1)$$

여기서 σ_1 은 최대 주응력, $\bar{\sigma}$ 은 유효응력, 그리고 $\bar{\epsilon}_f$ 는 파단까지의 유효 변형율이다. 식 (1)은 최대 주응력을 유효응력으로 나눈 값을 적분한 값으로 결함 값(C)을 정의한 것이다. 이 값이 클 경우 결함이 발생할 가능성이 큰 것으로 본다. 하지만, 식 (1)에서 정의된 결함 값은 동일한 소재를 이용하고, 동일한 온도에서 성형한 경우에 대한 상대적인 의미만 있을 뿐이다. 그렇기 때문에 성형 온도나 재료가 바뀔 경우 결함 가능성에 대한 비교가 무의미하다.

그래서, 본 연구에서는 전조 공정에서 발생하는 소재의 결함 값을 절대적으로 예측하기 위해, Fig. 2에 보인 온도에 따른 연신율을 이용하여 인장시험에 대한 해석을 수행 하여, 식 (1)의 결함 값을 다음과 같이 표준화 하였다.

$$\frac{\int_0^{\bar{\epsilon}_f} \sigma_1 / \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}}{C_T} = C_N \quad (2)$$

Table 2 Damage values for various test temperature

Temperature	Damage value
20 °C	0.521
100 °C	0.23
200 °C	0.133

여기서 C_T 는 인장시험의 해석에서 구한 결함 값이다. 식 (2)에서 C_N 이 1보다 크면 결함이 발생한 것이고, 1보다 작으면 결함이 발생하지 않은 것으로 판단할 수 있다. 해석은 인장 시험편에서 일정한 단면을 가지는 게이지 구간에 대해서만 수행하였다. Fig. 2에 나타난 파단 변형율까지 해석을 수행하고, 그 때의 결함 값을 추출하였다. Table 2는 온도에 따른 파단 순간의 결함 값을 보여준다. 이 값으로 전조 해석에서 예측된 결함 값을 나누어 정규화 하면 온도에 따른 결함 가능성을 비교할 수 있다. Table 2에서 20°C일 경우 연신율이 가장 크기 때문에 가장 큰 결함 값을 보인다. 하지만, 이 값으로 전조 공정에서 예측된 결함 값을 나누기 때문에 결함 가능성이 낮게 예측될 수 있다.

5. 성형인자에 따른 결과 분석

전조 시 성형에 영향을 주는 성형인자로 프랭크 각도, 다이스 끝단 부 라운드, 마찰계수, 그리고 소재의 가공경화 지수 등이 있다. 마찰계수는 0.9 이상일 경우에 다이와 소재 사이에 미끄럼이 발생하지 않기 때문에[8] 본 연구에서는 마찰계수를 1로 적용하였다. 소재의 가공경화 지수는 성형성과 관련이 있는데[12,13], 가공경화 지수가 클수록 치형의 산 부분이 볼록하게 나타난다. 본 연구에서는 치형의 개수가 4개일 경우에 프랭크 각도에 따른 성형성을 파악해 보았다.

Fig. 8은 프랭크 각도에 따른 상부 다이의 스트로크에 따른 전조력을 나타낸 그림이다. 프랭크 각도가 커질수록 전조력이 크게 요구되는 것을 확인할 수 있었다. 프랭크 각도가 커짐에 따라 접촉 면적이 커지기 때문으로 사료된다. Fig. 9는 프랭크 각도에 따른 변형율 분포를 비교한 그림이다. 70°인 경우가 50°와 60°인 경우보다 전체적으

로 큰 변형율이 발생되는 것을 확인할 수 있다. 성형 깊이가 작은데도 불구하고, 전체적으로 lead screw의 산 부분의 변형율이 크게 예측이 된다. Fig. 10은 동일 스트로크에서 프랭크 각도에 따른 충전된 형상을 나타낸 것이다. 자세히 관찰해본 결과 70°의 경우 완전한 충전이 되었고, 60°는 왼쪽의 마지막 치형이 충전 되지 않았으며, 50°는 치형 높이의 1/4 정도가 충전 되지 않은 것을 확인하였다. 따라서 프랭크 각도가 커질수록 충전 시간이 빠르다고 볼 수 있다. 그 이유는 프랭크 각도가 클수록 산의 높이가 낮기 때문으로 사료된다. 프랭크 각도 60°일 때 완전 충전은 상부 다이가 반경방향으로 0.1796mm 진행 되었을 때 이루어졌음을 알 수 있었다. 이와 같은 결과는 전조 공정의 설계에 유용하게 이용이 될 수 있을 것으로 사료된다

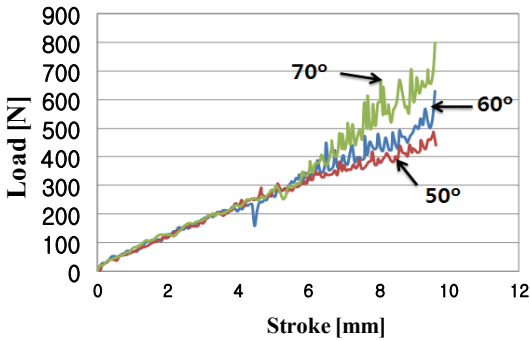


Fig. 8 Thread load for Frank angle

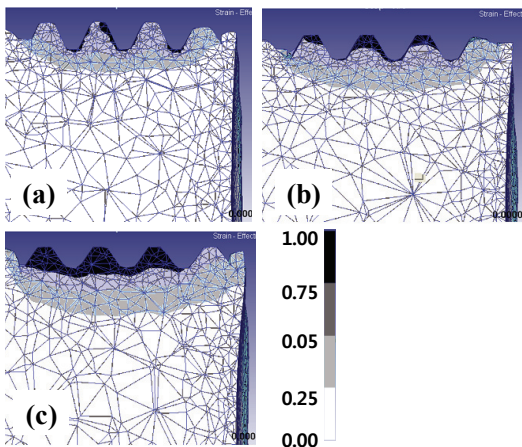


Fig. 9 Comparison of effective strain distribution for Frank angle of (a) 50°, (b) 60°, and (c) 70°

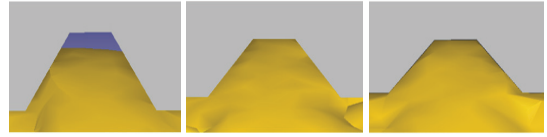


Fig.10 Comparison of filling shape for Frank angle of (a) 50°, (b)60°, and (c)70°

Table 3 Normalized damage values for various Frank angle

Frank angle	Normalized damage value
50°	0.06
60°	0.01
70°	0.12

Table 3은 프랭크 각도 별로 예측된 표준화된 결함 값을 보여준다. 표에서 확인할 수 있듯이 프랭크 각도가 70°일 경우가 가장 큰 결함 값을 가지는 것을 알 수 있었다. 프랭크 각도가 커질수록 결함 값이 커지기 때문에 크랙 발생 가능성이 크다고 판단 된다. 결과적으로 완전 충전이 되었다고 가정할 경우, 50°일 경우 변형율과 결함 측면에서 모두 유리하다고 볼 수 있다.

6. 온도에 따른 결과 분석

AISI SUS 304는 Fig. 2에서 볼 수 있듯이 온도가 상승 할수록 스테인리스의 특징인 상변태에 의해서 파단이 빨리 발생된다. 이와 같은 온도에 따른 특성이 전조 공정에서 결함 발생에 미치는 영향을 파악하기 위해 상온, 100℃, 200℃에서 해석을 각각 수행하였다. 4장에서 얻은 온도에 따른 인장시험 해석에서 얻은 결함 값과 전조 공정의 해석에서 구한 결함 값을 이용하여 식 (2)로 정의되는 표준화된 결함 값을 구해 Table 4에 나타내었다

Table 4 Normalized Damage values for various forming temperature

Temperature	Normalized damage value
20℃	0.1
100℃	0.32
200℃	0.61

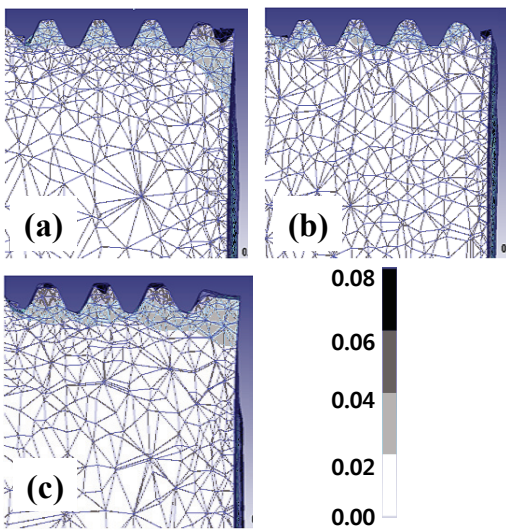


Fig.11 Comparison of damage value distribution at processing temperature of (a) 20°C, (b) 100°C, and (c) 200°

Table 4의 표준화된 결함 값을 보면 온도가 상승할수록 결함 값이 커지기 때문에 온도 상승시 크랙 등의 불량 발생 가능성이 크다고 볼 수 있다. Fig. 11은 전조 공정시의 성형온도에 따른 결함 값의 분포를 나타낸 것이다. 그림에서 확인할 수 있듯이 치형 끝단의 상단부 모서리 부분이 가장 큰 결함 값을 가지고 온도가 높을수록 최대 결함 값이 커짐을 확인할 수 있었다. 이 뿌리 부분 보다 나사산 부분에서, 그리고 온도가 높아질수록 크랙이 발생할 가능성이 크다고 판단 된다.

7. 결론

AISI SUS 304소재를 이용한 lead screw의 전조공정에 대한 해석을 수행하였다. 전체 형상을 해석할 경우 해석시간이 오래 걸릴 뿐만 아니라, 변형 형상을 잘 묘사할 만큼 요소의 수가 충분치 않기 때문에 해석 결과 또한 신뢰할 수 없었다. 해석 시간을 줄이며, 해석의 신뢰성을 확보하고자 치형의 개수를 줄여 4개와 6개에 대해서 해석을 진행하였다. 해석 결과 나사산 뿌리 부분에서 가장 큰 변형율이 발생하는 것을 확인할 수 있었고, 치형 4개일 경우 유효 변형율과 유효 응력 측면에서 치형 6개의 결과와 큰 차이가 없다고 판단되기 때문에 치형의 개수 4개로 해석을 진행 하였다.

요소의 크기에 따른 해석 결과 요소의 크기는 최소한 피치의 1/25 이하로 해야 함을 알 수 있었다.

금형 형상에 따른 해석 결과 프랭크 각도가 50°일 때 변형율과 결함 측면에서 유리한 것을 확인하였다. 마지막으로, 성형 온도가 높을수록 전조력 측면에서는 유리하지만, 표준화된 결함 값을 비교해 본 결과 높은 온도에서 결함 값이 크기 때문에 크랙 등의 불량 발생이 더 잘 발생할 것으로 예상된다. 이것은 스테인리스 소재가 온도가 높아짐에 따른 연성이 줄어들기 때문이다. 또한 이 뿌리 부분보다 나사 산 부분에서 크랙의 발생 가능성이 커짐을 알 수 있었다.

후 기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력 양성사업으로 수행된 연구결과임. 또한 중소기업청의 기술혁신사업으로 수행된 연구결과임.

참 고 문 헌

- [1] J. Schey, 1997, Introduction to Manufacturing Process, McGraw-Hill, p. 254.
- [2] P. F. Ostwald, J. Munoz, 1997, Manufacturing Processes and System, 9th Edi., Wiley, p. 518.
- [3] K. H. Kim, D. H. Kim, B. K. Kim, 2002, Determination of optimum blank diameter for the high precision of Spindle Screw, Trans. Mater. Process., Vol. 11, No. 8, pp. 710~715.
- [4] K. H. Kim, D. H. Kim, D. C. Ko, B. K. Kim, 2002, Characteristics Evaluation of Process Parameters for Improvement the Precision of Thread Rolling in Lead Screw, Proc. Kor. Soc. of Precision Eng., Fall, pp. 321~315.
- [5] D. C. Ko, J. M. Lee, B. M. Kim, 2004, Development of Form Rolling Technology for High Precision Worm using the Rack Dies of Counter Flow Type, J. Kor. Soc. of Precision Eng., Vol. 21, pp. 57~64.
- [6] J. P. Domblesky, F. Feng, 2002, A Parametric Study of Process Parameters in External Thread Rolling, J. Mater. Process. Tech., Vol. 121, pp. 341~349.
- [7] H. W. Lee, G. A. Lee, S. Choi, D. J. Yoon, S. J. Lim, Y.-S. Lee, 2006, Analysis and Optimization of

- Design Parameters in a Cold Cross Rolling Process using a Response Surface Method, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 8, pp. 550~555.
- [8] H. W. Lee, J. H. Song, G. A. Lee, H. J. Lee, K. D. Park, S. M. Bae, 2009, Thread Forming Of a Micro Screw For Storage Devices Using Finite Element Analysis, Proc. Kor. Soc. Tech. Plasticity, Spring, p. 55.
- [9] J. Chen, B. Young, 2006, Stress-strain Curves for Stainless Steel at Elevated Temperatures, Engineering Structures, Vol. 28 , pp. 229~239.
- [10] J. Walters, 1997, Memorial Seminar on Metal Forming, A State of the Art: Overview for Industry, p. 5.
- [11] M. J. Cockcroft, D. J. Latham, 1968, Ductility and Workability of Metals, J. Inst. Metals., Vol. 96, p. 3.
- [12] J. R. Davis, 1989, Metals Handbook, ASM International, 9th Edi., Vol. 16, pp. 280~282.
- [13] J. T. Drozda, C. Wick, 1983, Tool and Manufacturing Engineering Handbook, Society of Manufacturing Engineers, pp. 12~126.