

돌기 튜브 성형을 위한 회전 금형 인발공정에 관한 연구

박준홍*, 변상민*[#]

*동아대학교 기계공학과

Drawing Process with Rotational Die for Forming Grooves in a Tube

Joon-Hong Park*, Sang-Min Byon*[#]

*Department of Mechanical Engineering, DONG-A UNIV.

(Received 30 April 2018; received in revised form 21 May 2018; accepted 29 May 2018)

ABSTRACT

A rotational drawing die which can form a long tube with spiral grooves on the surface is presented. The main feature of the proposed die is a rotation insert that is embedded into the die container for the die to freely rotate with respect to the drawing centerline as the materials are drawn. We employed a three-dimensional finite element model to investigate the effects of the rotational die on the material filling of spiral grooves. The material used in the finite element analysis was stainless 304. We also performed a pilot drawing test to verify the usefulness of the proposed rotational drawing die. Results reveal that the material filling of spiral grooves by the proposed rotational drawing die was in good agreement for both the finite element analysis and the drawing test. We found that the underfill in a conventional drawing die was reduced in the proposed rotational drawing die.

Key Words : Rotational Die(회전금형), Spiral Groove(나선형 돌기), Pilot Drawing Test(파일럿 인발시험), Finite Element Analysis(유한요소해석), Material Filling(소재 충전)

1. 서 론

열교환기(Heat exchanger)에 사용되는 튜브(Tubes)는 표면 열전달 효율이 뛰어나야 하므로 미려한 가공표면과 정밀한 가공치수에 장점이 있는 인발공정(Drawing processes)에 의해 생산된다. 이와 같이 생산된 튜브는 일반 보일러에서부터 화력 발전소, 원자력 발전소에 이르기까지 다양한 열교환기의 냉각장치 부에 설치되어 사용된다. 특히, 발전소의 경우

에는 처리되는 에너지 양이 막대하므로 튜브를 어떤 종류를 사용하느냐에 따라 전력 생산과 효율에 막대한 영향을 미치게 된다. 즉, 튜브는 발전소의 열교환 성능을 좌우하는 주요 부품으로 관리되고 있다.

최근 들어, 에너지 부족 문제 및 환경 문제가 심각해지면서 발전소의 생산효율을 높이기 위한 노력들이 진행되고 있다. 튜브의 경우에도 표면적을 최대한 늘려서 열전달 효율을 높이는 방식이 채택되고 있다^[1]. 특히, 튜브의 외면에 나선형상의 돌기(Spiral groove)를 성형하여 냉각장치 부에 설치하면 열교환 성능을 현저히 높일 수 있는 것으로 알

Corresponding Author : smbyon@dau.ac.kr

Tel: +82-51-200-7639, Fax: +82-51-200-7656

려져 있다. 그러나, 인발공정에서 나선형상의 돌기를 튜브 외면에 성형하기 위해서는 과도한 성형하중 및 돌기 코너(Coner)부 성형 불량등의 문제점이 있어서 기술적인 극복이 절실히 요구되고 있다.

인발공정은 튜브의 외경을 줄이는 금형(Die)과 내경을 줄이는 플러그(Plug) 혹은 인발 각도가 없는 고정 플러그인 맨드릴(Mandrel)로 구성이 되어 있다. 기존의 인발에 관한 연구는 크게 고정 플러그에 대한 연구^[2-7]와 부유 플러그(Floating plug)에 대한 연구^[8-9]로 나누어진다. 특히, Yoshida 등^[9]은 각종 플러그의 종류에 따른 유한요소 모델과 실험을 통해서 장단점을 고찰하였다. 그리고, 최근들어 인발공정에 관련되는 공정변수 즉, 인발각도, 인발하중, 인발 단수, 윤활제 등의 최적화를 통해서 파손없이 정밀한 제품을 생산하기 위한 방법에 대한 연구^[10-13]가 있었다. 그러나, 위의 연구들은 외경 및 내경이 원형 형태의 일반적인 축 대칭 튜브에 대한 연구에 국한되어 있다.

본 연구에서는 나선형상의 돌기를 튜브 외면에 성형하기 위해서 가장 큰 문제점인 과도한 성형하중 및 돌기 코너(Coner)부 성형 불량등의 문제점을 획기적으로 줄일 수 있는 회전 인서트(Rotation insert)가 장착된 금형을 제시하였다. 이것의 삼차원 구조를 주변 금형과 함께 CAD 모델로 정립하고, 효과적이고 정확하게 모사할 수 있는 삼차원 유한요소해석 모델을 또한 제시하였다. 실제 시험용 금형을 제작하고 인발 테스트를 실시하여 제품이 원하는 형태로 성형이 되는지 확인하였다. 나선형상의 돌기에 관해서 해석 결과와 인발 테스트 결과를 비교 분석하였다.

2. 회전 인서트 장착 인발금형

Fig. 1(a)는 회전 인서트가 장착된 금형 어셈블리의 삼차원 형상을 보여주고 있다. 튜브의 외경 형상을 성형하는 역할을 하는 금형(Die)과 금형의 하면(Bottom plane)과 연결되어 금형이 구름 회전을 할 수 있도록 구조가 설계된 회전 인서트, 금형 및 회전 인서트를 장착할 수 있도록 하는 금형 컨테이너

로 이루어져 있다.

Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 각 구성요소가 장착된 상태에서 단면을 상세하게 나타내었다. Fig. 1(a)의 구성요소에 튜브의 내경을 성형하는 역할을 하는 플러그(Plug)가 더 추가 되어 있다. 회전 인서트의 구조는 상판과 하판이 볼 베어링으로 연결되어 있어서 튜브를 인발할 때 인발 방향을 축으로 금형이 회전 인서트 상에서 자유롭게 구름 회전을 할 수 있도록 되어 있다. 금형과 금형 컨테이너 사이에는 금형이 잘 회전할 수 있도록 윤활이 충분히 되도록 되어야 한다.

Fig. 1(c)는 회전 인서트가 장착되어 인발에 의해 금형이 자동적으로 회전하여 가공되는 나선형상의 돌기가 있는 튜브의 형상을 삼차원 모델링한 것이다. 그림에서 보는 바와 같이, 돌기의 단면 형상이

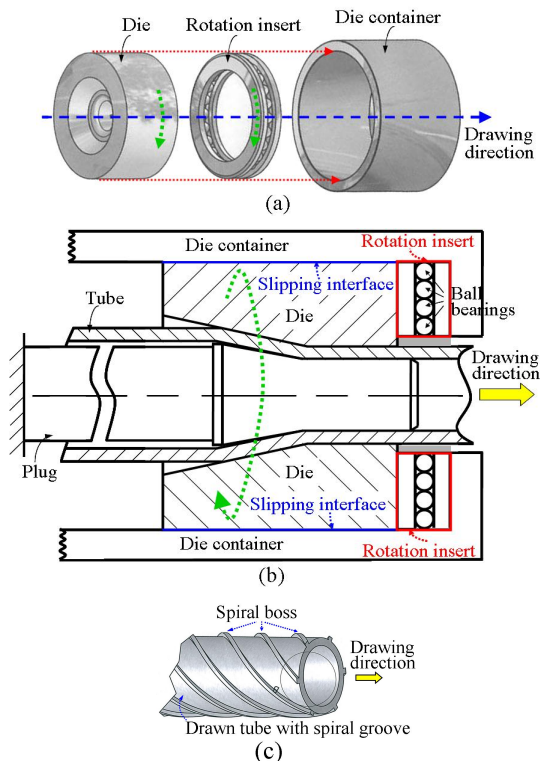


Fig. 1 Schematic of drawing die with rotation insert: (a) complete view of drawing dies, (b) plane-view of the die assembly, and (c) shape of drawn tube with spiral grooves.

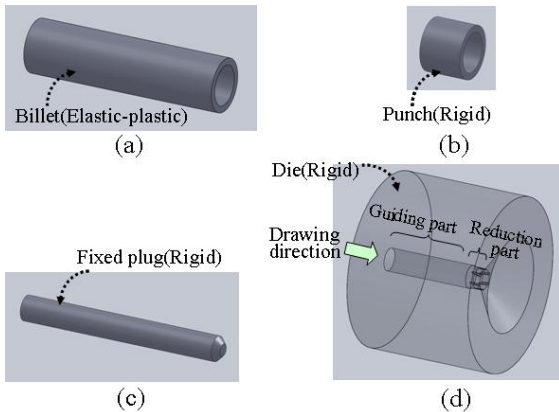


Fig. 2 Components used for FE analysis of tube drawing process: (a) billet, (b) punch, (c) plug, and (d) die

사각형이므로 코너 부위를 성형으로 채우기 위해서는 막대한 성형하중과 응력집중이 유발된다. 본 연구에서 개발한 회전 인서트는 금형이 회전하도록 함으로써 응력집중 완화와 현저한 성형하중의 감소를 유발한다.

3. 나선형 돌기 튜브의 인발 유한요소(FE) 해석

튜브의 외면에 나선형상의 돌기를 성형하도록 고안된 회전 인서트가 장착된 인발 금형 가공 문제를 유한요소법(Finite element method)으로 해석하기 위해서 Fig. 2와 같은 해석모델을 고안하였다. 성형 해석대상인 가공 소재는 두꺼운 튜브형태의 빌렛(Billet)(Fig. 2(a))으로 탄-소성모델이 채용되었다. 빌렛을 뒤쪽에서 밀어 넣어 빌렛을 금형 출측까지 유출시키기 위한 펀치(Punch)(Fig. 2(b)), 빌렛의 내경을 성형하기 위한 플러그(Fig. 2(c)), 빌렛의 외경 및 외면의 나선형상의 돌기를 성형하기 위한 금형(Fig. 2(d))은 강체로 모델링하였다. 금형은 빌렛이 실제로 압축되어 소성 변형되는 압하부(Reduction part)와 압하되는 동안 빌렛이 휘어지는 것을 방지하기 위한 가이드부(Guiding part)로 나누어 모델링하였다. 가이드부에는 마찰이 없는 것으로 가정하였다. 압하부에는

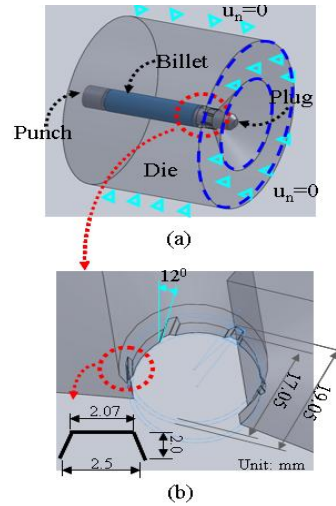


Fig. 3 (a) Constraint conditions on the outer surface of die, and (b) detailed profile of spiral groove engraved on the inner surface of die

쿨롱마찰모델을 도입하였고, 건식 인발 시 통상적인 마찰계수인 0.1을 채용하였다.

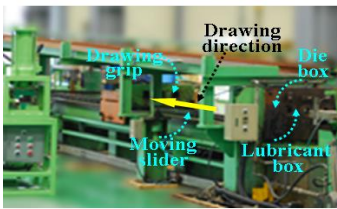
Fig. 3(a)는 빌렛, 펀치, 플러그, 금형이 함께 조합된 해석모델을 보여주고 있다. 회전 인서트와 접하는 면이 금형 출측 단면(그림에서 점선표시)인데, 금형의 회전 자유도를 주기 위해서 이 면에서는 면의 수직방향의 변위만 구속을 주고($u_n=0$) 다른 구속조건을 주지 않았다. 또한, 금형의 외경부도 자유로운 회전이 되어야 하므로 면에 수직방향 구속만 주었다. Fig. 3(b)는 금형 내경부에 음각되어 있는 나선 홈의 형상을 금형 단면을 일부 절단하여 자세하게 나타내었다. 나선각도는 인발진행 방향에 대해 12°로 설계되어 있다.

4. 회전 인서트 금형의 인발 테스트

유한요소해석 모델을 통해서 얻은 결과를 검증하기 위해서 회전 인서트가 장착된 금형을 제작하고 이것을 실제 인발기에 장착하여 테스트를 수행하였다. Fig. 4(a)는 테스트를 위해서 제작한 플러그, 금형, 회전 인서트 및 금형 컨테이너를 차례로 보여주고 있다. 튜브 인발 시 빌렛이 Fig. 3(b)에서 설명한 금형 내부의 나선홈을 따라서 회전변형이 발생



(a)



(b)

Fig. 4 Drawing die and machine to produce tube with spiral grooves: (a) actual shape of die assembly with rotation insert, and (b) structure of drawing machine

할 때, 금형도 같이 회전할 수 있도록 제작되었다. 테스트에 사용한 소재는 스테인레스 304 (STS 304) 튜브 빌렛이었다.

Fig. 4(b)는 인발 테스트를 위한 실제 인발기의 외형을 보여주고 있다. 인발기는 크게 윤활제 박스, 금형 박스, 인발 그립(Drawing grip) 및 동력장치로 이루어져 있다. 인발하기 전에 빌렛의 끝을 뾰족하게 테이퍼로 만들기 위한 포인팅기(Pointing machine)가 별도로 필요하다. 포인팅된 빌렛을 윤활제 박스 및 금형 박스를 통과시켜서 인발 그립에 물린 다음 동력장치를 이용하여 빌렛을 앞으로 당겨서 금형에 음각된 형상과 같은 형상이 빌렛의 외면에 성형되도록 하였다. 본 연구에서는 금형을 금형 컨테이너에 고정시키지 않고 회전 인서트를 통해서 자유롭게 회전하도록 하였다.

인발 공정에서 가장 중요한 인자 중의 하나는 윤활제이다. 본 테스트에서는 인발 시에 나선 홈을 따라서 발생하는 극심한 소성변형과 이로 인해 유

발되는 발열에도 일정한 윤활 특성을 유지할 수 있도록 특수한 윤활제를 개발하였다. 본 윤활제는 고온에서 강력한 피막층을 형성하는 특성을 가지고 있는 말레익 악시드 수지(Maleic acid resin)와 극심한 압력에도 화학적으로 안정한 클로리네이트드 파라핀 왁스(Chlorinated paraffin wax)가 혼합되어 개발된 것이 특징이다.

5. 결과 및 고찰

5.1 기존 금형에서의 돌기 충전 FE 해석

전통적인 튜브 인발공정에서는 금형이 회전하지 않고 고정되어 있는 상태에서 소재가 인발된다. 본 절에서는 나선형상의 돌기를 튜브 외면에 성형시키기 위한 튜브 인발공정을 전통적인 튜브 인발공정과 같은 방식으로 성형할 때 발생하는 문제점을 유한요소해석을 통해서 고찰하였다.

Fig. 5는 전통적인 튜브 인발공정으로 유한요소 해석을 수행했을 때 튜브 표면의 나선형 돌기가 인발 진행에 따라 돌기 부분에 소재의 충진이 어떻게 이루어지는지 보여주고 있다. Fig. 5(a)는 인발되기 전의 빌렛의 1/4형상을 보여주고 있다. Fig. 5(b), 5(c), 5(d)는 각각 단면적의 압하율이 각각 30%, 60%, 100% 진행했을 때 빌렛과 인발된 소재의 1/4 단면을 보여주고 있다. 압하율이 100% 진행된다는 것은 초기 빌렛의 단면적이 최종 인발 후 제품의 축소된 단면적에 도달되었다는 것을 의미한다.

전통적 튜브 인발공정은 금형이 회전하지 않고 고정되어 있어야 하므로, 회전 인서트를 고려하여 금형이 회전할 수 있도록 고려된 Fig. 3(a)의 금형 구속조건에 금형 외면의 접선방향 변위도 없는 구속조건($u_t=0$)을 추가적으로 설정하여 해석하였다. 해석결과를 고찰해 보면, 압하가 진행됨에 따라 인발 제품에서 나선형 돌기에 해당되는 금형 내에서의 홈(Groove)이 점차적으로 충전되는 것을 관찰할 수 있으나 압하가 100% 진행되어도 완전히 홈이 충전되지 않는 것을 알 수 있다. Fig. 5(c)와 5(d)를 비교해보면, 60% 압하가 진행된 이후에는 압하량이 커지더라도 더 이상 충전되지 않는 것을 관찰할 수 있다. 이것은 홈이 나선 형상이므로 소재가 홈을

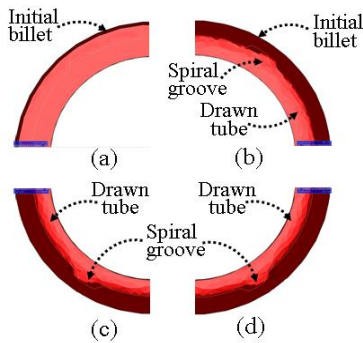


Fig. 5 Prediction of groove filling by FEM in case that conventional die is employed: (a) 0%, (b) 30%, (c) 60%, and (d) 100% reduction ratio

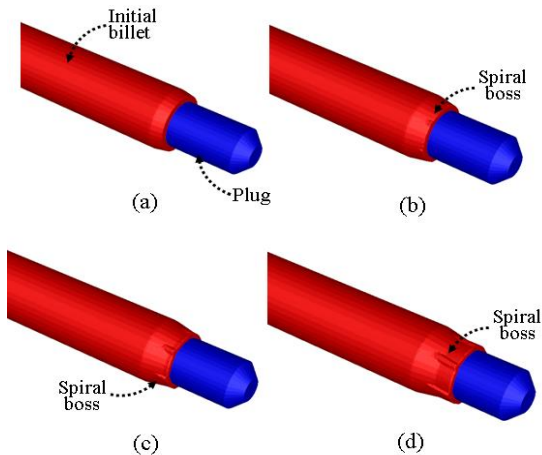


Fig. 6 Prediction of groove filling by FEM in case that rotational die with rotation insert is employed: (a) 0%, (b) 30%, (c) 60%, and (d) 100% reduction ratio

따라서 소성유동이 발생할 때 금형이 고정되어 있으면 꼬여있는 홈에 소재의 공급이 단절되어 더 이상 홈을 채우지 못하는 것으로 판단된다. 금형이 고정되어 있는 전통적인 인발공정에 의해서는 나선형 돌기가 있는 인발제품을 성형하기가 어려운 것을 알 수 있다.

5.2 회전 인서트 금형에서의 돌기 충전 FE 해석

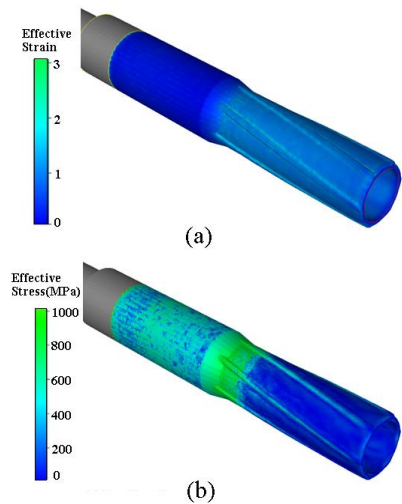


Fig. 7 (a) Effective strain, and (b) effective stress distributions of material at die and drawn tube

유한요소해석 모델 Fig. 2 및 Fig. 3을 통해서 얻어진 유한요소해석 결과를 Fig. 6에 나타내었다. Fig. 6(a)는 인발되기 전 플러그에 장착된 빌렛의 삼차원 형상을 보여주고 있다. Fig. 6(b), 6(c), 6(d)는 단면적의 압하율이 각각 30%, 60%, 100% 진행했을 때, 인발된 튜브의 외면 삼차원 형상을 보여주고 있다. 압하가 진행됨에 따라 튜브의 나선형 돌기가 정확한 형상으로 성형되는 것을 관찰할 수 있다. 금형이 고정되어 있는 전통적인 인발방식에서는 압하율이 60% 이상에서 나선홈의 충전이 더 이상 이루어지지 않는데 반해, 인발이 진행됨에 따라 자유롭게 회전하는 회전 금형에서는 압하율 증가에 따라 비례적으로 나선홈의 충전이 이루어지는 것으로 나타난다. 이것은 튜브 외면의 나선형 돌기의 형상이 인발방향을 따라서 꼬여 있기 때문에 고정형 인발 금형에서는 소성변형 중 홈 부위에 원활한 소재가 공급되지 않는데 반해, 본 연구에서 개발된 회전 금형에서는 소재의 공급이 원활하게 이루어지는 것으로 고찰된다.

Fig. 7(a) 및 7(b)는 유한요소해석을 통해서 얻어진 소재의 유효변형률 및 유효응력 분포를 각각 보여주고 있다. 변형률은 인발되어 유출된 튜브의 나선홈을 따라서 가장 크게 남는 것을 알 수 있다.



Fig. 8 Actual scene of spiral-boss tube drawn from rotational die with rotation insert

또한, 응력은 성형압력이 작용하고 있는 인발금형 부위에 소재가 위치할 때 가장 크게 작용하는 것을 알 수 있다. 성형이 완료되고 난 후에도 튜브 나선홈을 따라서 소재에 응력이 잔류하는 것으로 나타났다.

5.3 인발 테스트와 FE 해석 결과의 비교

Fig. 4(a)에서 설명한 회전 인서트장착된 회전 금형을 인발 테스트기에 장착하여 스테인레스 304 소재에 대하여 실제 튜브 시편을 인발 성형하였다. Fig. 8은 나선형 돌기가 성형된 튜브 인발 테스트 시편들이다. 유한요소해석에서와 마찬가지로 나선형 돌기가 원래 설계했던 형상 대로 성형되었다.

Fig. 9은 전통적인 고정 금형과 본 연구에서 개발한 회전 인서트장착된 회전 금형을 사용하여 얻은 나선홈 부분의 충전에 관한 유한요소해석 결과를 인발 테스트로부터 얻은 시편의 형상과 비교하여 놓았다. 나선홈의 폭방향을 중심으로 하여 좌우 소재의 충전 평균 및 단면에 존재하는 여섯개의 나선홈의 총 충전 평균을 그림에 나타내었다. 사각형 기호는 인발 테스트로부터 얻은 시편의 나선 돌기를 측정하여 얻은 데이터이고, 세모 및 원형 기호는 회전금형과 고정금형을 통해 유한요소 성형 해석한 결과이다.

전통적인 고정 금형을 사용할 경우는 나선 홈을 채우는 것이 사실상 불가능하다는 것을 알 수 있다. 이에 반해, 본 연구에서 개발한 회전 인서트장착된 회전 금형을 사용하여 인발하는 경우는 나선 홈을 완전히 채우는 것을 알 수 있다. 유한요소해석 결과에서 홈 모서리 부분을 완전히 채우지 못한 것은 유한요소해석 시 계산시간을 고려하여 격

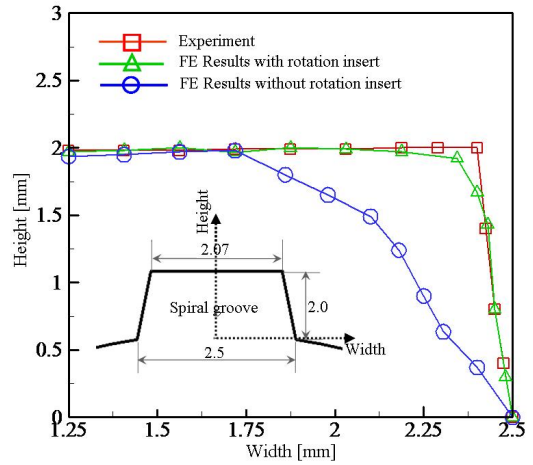


Fig. 9 Comparison of groove filling of material between FE predictions and measurement

자의 개수를 제한함으로써 해서 모서리 형상을 구현하는 자유도가 부족해서 나타나는 현상인 것으로 파악된다. Fig. 9으로부터 유한요소해석에서 예측한 대로 실제 인발 테스트에서 나선 돌기가 정확히 성형된 것을 확인할 수 있다.

6. 결론

본 연구에서 나선형 돌기가 있는 튜브를 인발공정을 통해 성공적으로 성형하는 방법을 제시하였다. 전통적인 튜브 인발에서 고정 금형을 사용하는 것과 다르게 본 연구에서는 회전 인서트장착된 회전 금형을 도입하였다. 먼저, 유한요소해석을 통해 고정 금형 방식으로는 나선형 홈을 완전히 충전시키지 못하고 회전 금형을 이용해서 나선형 홈을 완전히 충전시킬 수 있다는 것을 확인 하였다. 해석에 사용한 회전 인서트 및 회전 금형을 실제 제작하고 또한 인발기에 장착하여 인발 성형 테스트를 수행하였다. 이를 통해서 나선형 돌기가 있는 튜브가 회전 금형을 사용할 때 성공적으로 가공된다는 것을 입증하였다.

본 연구는 다양한 형태의 열교환기 및 플랜트 관련 튜브 제품 개발에 적용할 수 있다. 즉, 본 성형 가공 기술을 통해서 이론적으로 입증된 다양한 열전달 효율 극대화 튜브 구조물을 실제 성형하여 열

전달 테스트를 수행해 볼 수 있다. 본 연구는 향후 에너지 효율을 극대화 시키기 위한 가공 기반 기술 및 제품 상용화 기술에 큰 기여가 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 동아대학교 교내연구비 지원에 의하여 연구되었음.

REFERENCES

1. Yoo, J. H. and Yoon, J. K., "Numerical Analysis for Heat Transfer Characteristics of Elliptic Fin-Tube Heat Exchanger with Various Shape," Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers B, Vol. 37, No. 4, pp. 367-375, 2013.
2. Karnezis, P. and Farrugia, D. C. J., "Study of Cold Tube Drawing by Finite-Element Modelling," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 80-81, pp. 690-694, 1998.
3. Kwan, C. T., "A Generalized Velocity Field for Axisymmetric Tube Drawing Through an Arbitrarily Curved Die with an Arbitrarily Curved Plug," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 122, pp. 213-219, 2002.
4. Rubio, E. M., Gonzalez, C., Marcos, M. and Sebastian, M. A., "Energetic Analysis of Tube Drawing Processes with Fixed Plug by Upper Bound Method," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 177, pp. 175-178, 2006.
5. Kim, S. W., Kwon, Y. N., Lee, Y. S. and Lee, J. H., "Design of Mandrel in Tube Drawing Process for Automotive Steering Input Shaft," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 187-188, pp. 182-186, 2007.
6. Lee, S. K., Ko, D. C., Kim, B. M., Lee, J. H., Kim, S. W. and Lee, Y. S., "A Study on Monobloc Tube Drawing for Steering Input Shaft," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 191, pp. 55-58, 2007.
7. Palengat, M., Chagnon, G., Favier, D., Louche, H., Linardon, C. and Plaideau, C., "Cold Drawing of 316L Stainless Steel Thin-Walled Tubes: Experiments and Finite Element Analysis," International Journal of Mechanical Sciences, Vol. 70, pp. 69-78, 2013.
8. Swiatkowski, K. and Hatalak, R., "Study of the New Floating Plug Drawing Process of Thin Walled Tubes," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 151, pp.105-114, 2004.
9. Yoshida, K. and Furuya, H., "Mandrel Drawing and Plug Drawing of Shape-Memory-Alloy Fine Tubes Used in Catheters and Stents," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 153-154, pp. 145-150, 2004.
10. Beland, J. F., Fafard, M., Rahem, A., D'Amours, G. and Cote, T., "Optimization on the Cold Drawing Process of 6063 Aluminium Tubes," Applied Mathematical Modelling, Vol. 35, pp. 5302-5313, 2011.
11. Bihamta, R., Bui, Q. H., Guillot, M., D'Amours, G., Rahem, A. and Fafard, M., "Application of a New Procedure for the Optimization of Variable Thickness Drawing of Aluminum Tubes," CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology. Vol. 5, pp. 142-150, 2012.
12. Lee, S. J., Yoo, U. K., Lee, Y. S. and Byon, S. M., "An Investigation on the Mechanical Behaviors of Lubricant and Coating to Improve the Drawability of Non-heat Treated Steels," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 7, No. 4, pp. 62-67, 2008.
13. Kim, S. H., Jang, G. C. and Lee, C. W., "Development and Evaluation of Dry Lubricant Recycle Technologies for Wire Drawing Process," Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 13, No. 2, pp. 35-40, 2014.