[논문] 한국소성가공학회지, 제 24 권 제 5 호, 2015
Transactions of Materials Processing, Vol.24, No.5, 2015
http://dx.doi.org/10.5228/KSTP.24.5.340

중공형 LM-Guide Rail의 치수정밀도 향상을 위한 형상인발 금형 설계

박정현[1] · 이경훈[2] · 김성민[3] · 김희중[3] · 김성진[3] · 김병민[#]

Die Design for Shape Drawing to Improve the Dimensional Accuracy of a Hollow LM-Guide Rail

J. H. Park, K. H. Lee, S. M. Kim, H. J. Kim, S. J. Kim, B. M. Kim
(Received May 11, 2015 / Revised June 9, 2015 / Accepted June 15, 2015)

Abstract

Multi-pass shape drawing is used to manufacture long products of arbitrary cross-sectional shapes. This process allows smooth surface finishes and closely controlled dimensions of the cross-sectional shape. Tube shape drawing for hollow type products provides material savings and weight reduction. The intermediate die shapes are very important in multi-pass tube shape drawing. In the current paper, the design method for the intermediate dies in a tube shape drawing process is developed using a die offset for corner filling (DOCF) method. Underfill defects are related to the radial velocity distribution of each divided section in the deformation zone. The developed intermediate die shape design was applied to the two-pass tube shape drawing with fixed mandrel for manufacturing a hollow linear motion (LM) guide rail. The proposed design method led to uniform and steady metal flow at each divided section. FE-simulations and experiments were conducted to validate the effectiveness of the proposed method in multi-pass tube shape drawing process.

Key Words : Intermediate Die Shape Design, Die Offset, Tube Shape Drawing, Fixed Mandrel

1. 서 론

리니어 모션 가이드 레일(LM-Guide Rail)은 CNC선반, 정밀측정기기, 반도체 생산장비 및 자동차 제조 관련 장비 등의 부품소재로 사용되는 높은 치수 정밀도가 요구되는 제품이다.

이 제품은 주로 냉간 인발 공정을 통하여 생산되고 있다. 냉간 인발 공정은 저렴한 가공비로 부드럽고 매끄러운 표면, 높은 재료 회수율, 우수한 기계적 성질 및 치수 정도를 얻을 수 있는 소성가공 공정이다[1,2].

중공형 리니어 모션 가이드 레일은 기존의 중실형 제품에 비해 저감되는 중량만큼 자원을 절감하고 경량화 할 수 있다. 중공형 제품은 일반적으로 튜브 인발 공정으로 제조된다. 튜브 인발 공정은 내부 지지대가 없는 튜브 싱킹 공정과 다양한 유형의 맨드렐을 사용하여 튜브 외경과 두께를 동시에 제어 하는 맨드렐 인발 공정 등이 있다[3]. 맨드렐의 유형에는 고정 타입, 플로팅 타입 및 무빙 타입 등이 있다[4]. 고정 타입의 맨드렐을 적용 시, 플로팅 타입에 비해 정밀한 두께제어가 가능하고 무빙 타입과 달리 인발 후 소재 내부에 삽입된 맨드렐을

1. 부산대학교 기계공학부 정밀가공시스템 전공
2. 해양대학교 기관공학부
3. 광진실업주식회사 금속소재기술연구소
Corresponding Author : School of Mechanical Engineering, Pusan National University, E-mail: bmkim@pusan.ac.kr

제거하는 공정이 생략된다. 따라서 본 연구에서는 고정 타입의 맨드렐을 이용하여 중공형 리니어 모션 가이드 레일을 제조하였다.

복잡한 단면형상의 제품을 인발 공정으로 생산할 경우 제품 형상의 코너부에 미충진 현상이 발생할 수 있다. 특히, 내벽이 지지되지 않는 중공형 제품에 대한 형상인발 공정의 경우, 코너부에 미충진 결함이 발생하기 쉽다[11].

코너부 미충진 결함의 문제점을 해결하기 위하여 다음의 연구들이 수행되었다. Kim 등은 동일한 마찰조건에서 다이반각과 단면적 감소율이 코너부의 치수 정도에 미치는 영향에 대한 연구를 수행하였다[5]. Lee 등은 등전위선을 이용한 중간 다이의 단면형상 설계에 대하여 연구를 수행하였다[6]. 또한, Lee 등은 가상금형설계법을 이용한 중간 다이의 단면형상 설계에 관한 연구를 수행하였다[7]. Rubio 와 Yoshida 등은 중공형 제품을 제조하기 위하여 튜브 내부에 고정 타입의 맨드렐 또는 플로팅 타입의 맨드렐을 삽입하여 외부 치수뿐만 아니라 벽 두께의 치수까지 정밀하게 제어하는 중공형 형상인발 공정에 관한 연구를 수행하였다[8,9].

본 연구는 중공형 리니어 모션 가이드 레일을 제조하기 위한 2패스 맨드렐 인발 공정의 다이 및 맨드렐을 설계하기 위해 수행되었다. 또한, 이형 제품 단면형상의 코너부 미충진 결함을 최소화하기 위하여 Die Offset for Corner Filling(DOCF) 금형 설계법을 제시 하였다. 제시된 설계법으로 설계된 금형 형상을 적용하여 중공형 형상인발 해석 및 실험을 수행하였다. 인발 후 제품 형상의 치수측정을 통해 제안된 설계법의 유효성이 검증되었다.

2. 중공형 형상인발 공정설계

2.1 초기 소재의 치수 결정

본 연구에서는 초기 소재의 형상을 원형 튜브로 제한한다. 초기 튜브의 외경 및 두께를 결정하기 위해서는 제품 단면형상의 정보가 필요하다.

Fig. 1(a)는 중공형 리니어 모션 가이드 레일의 단면형상을 나타낸다. 초기 튜브의 외경은 제품 형상의 최소 외접원보다 커야 한다. 총 2패스 공정에서 각 패스의 충진율을 고려하여 제품 형상의 최소외접원은 Fig. 1(b)와 같이 4mm 만큼 Overall offset 되어 초기 튜브의 외경으로 가정된다[10].

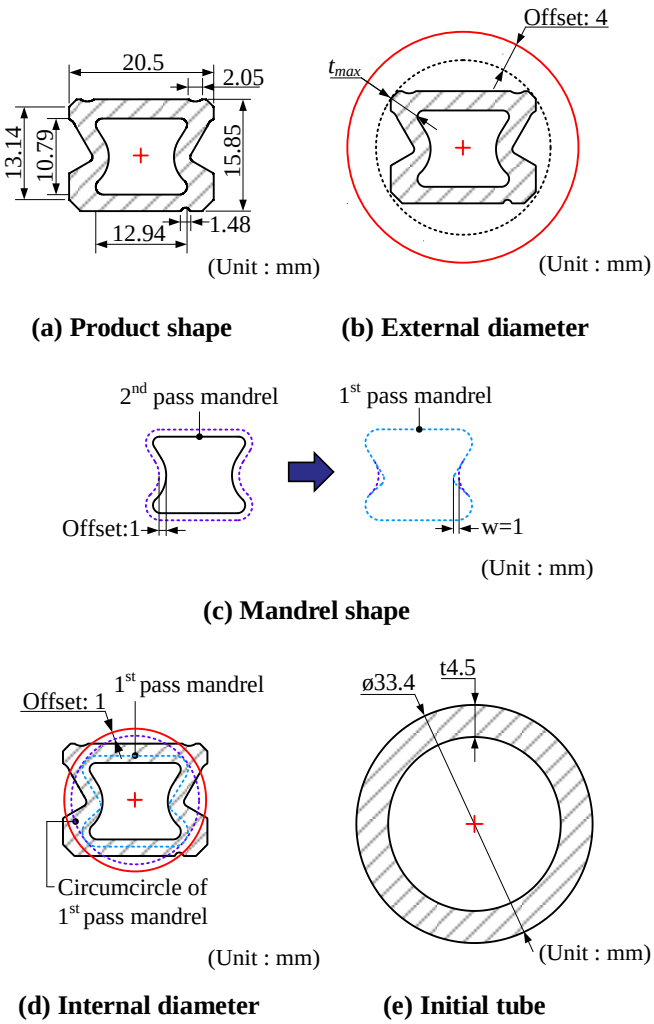


Fig. 1 Design for geometry of initial tube

초기 튜브의 내경을 결정하기 위해 제품의 내부 형상을 이용하여 각 패스의 맨드렐 형상을 결정하였다. Fig. 1(c)와 같이 2패스 맨드렐 형상은 제품의 내부 형상과 동일하다. 1패스 맨드렐 형상은 제품의 내부 형상을 1mm 만큼 Overall offset 한 후 소재와 맨드렐 사이의 마찰면적을 줄이기 위해 좌우 폭(w)을 1mm 감소된 형상으로 결정하였다.

Fig. 1(d)에서 1패스 맨드렐이 초기 튜브 내부에 삽입이 되기 위한 초기 튜브의 내경은 1패스 맨드렐 형상의 최소외접원보다 1mm 이상 커야 한다.

Fig. 1(b)에서 제품 형상의 최대두께 t_{max}는 4.5mm 이다. 따라서 소재의 두께 충진율을 고려하여 Fig. 1(e)에서 가정된 초기 튜브의 외경과 유사하고, 내경의 범위를 만족하는 소재의 치수를 ASTM 규격에서 선정하여 직경 33.4mm 두께 4.5mm 로 결정하였다.

2.2 중간패스 다이 단면형상 설계

Fig. 2(a)에서 R_0 은 초기튜브의 외경을 이루는 모든점이며 초기 튜브와 제품의 도심을 일치시킨 후 도심에서부터 외부 형상까지의 거리를 나타내는 반경 방향 변형거리가 최소가 되는 점 A 와 최대가 되는 점 B 를 표시하고 각 점에 대한 소재의 예상 유동경로를 나타내었다. Fig. 2(b)는 Fig. 2(a)를 3 차원으로 나타내었다. 중심선(C.L.)은 초기 튜브의 형상과 제품 형상의 도심을 지나는 선이다. 반경 방향 변형거리가 최소인 R_0-A 경로의 중심선에 대한 기울기는 최소 다이반각을 나타내며 반경 방향 변형거리가 최대인 R_0-B 경로의 중심선에 대한 기울기는 최대 다이반각을 나타낸다.

제품 형상에 따른 다이 반각의 차이를 비교함에 있어 3차원보다 Fig. 3(a)와 같이 2차원으로 나타내는것이 유리하다. 중심선을 Z 축으로 하고 반경 방향 변형거리를 R 축으로 하였다.

미충진 결함은 제품단면에서 도심을 향하는 반경 방향의 소재유동속도와 관계가 있다. 변형구간 내에서 소재가 다이와 접촉되는 순서가 다이반각에 따라 다르거나 성형 중 다이와 접촉이 떨어지는 구간이 생기더라도 소재가 다이 에 접촉할 때 Fig. 2(a)와 같이 다이반각의 기울기에 따라 속도의 방향이 정해지게 된다. 변형구간 내 Z 축 방향의 동일한 미소 변형거리 dz 에 대하여 Z 축 방향 유동속도 $v_{z,A}$와 $v_{z,B}$가 동일할 때 소재의 R 축 방향 유동속도는 $v_{r,B}$가 $v_{r,A}$보다 크다. 소재는 연속체로 각 구간은 서로 분리되어 있지 않다. 따라서 소재의 R 축 방향 유동속도 $v_{r,A}$는 속도 $v_{r,B}$에 의해 속도 $v_{r,A'}$로 증가 되어 A-A′ 구간의 미충진 결함 발생의 원인이 된다. 따라서 다이반각이 가장 작은 영역에 미충진 결함이 발생할 가능성이 높음을 알 수 있다.

따라서 본 연구에서는 총 2패스 공정에서 제품의 코너부 미충진 결함을 개선하기 위해 1패스 단면형상을 설계하는 방법으로 Die Offset for Corner Filling(DOCF) 금형 설계법을 제안하였다. DOCF 금형 설계법은 제품형상의 둘레를 따라 동일한 간격만큼 형상을 확장하는 Overall offset method 와 부분적으로 형상을 확장하는 Local offset method 로 이루어진다. 제품 형상과 제품 형상의 최소외접원의 교점으로 최소 다이반각을 갖는 코너부를 찾고 1패스에서 코너부에 충진되는 재료가 많아지도록 다이형상을 Local offset 으로 수정한다. 따라서 2패스에서 소재의 R 축 방향 유동 속도차이를 최소화하여 제품의 코너부 미충진 결함을 개선할 수 있다.

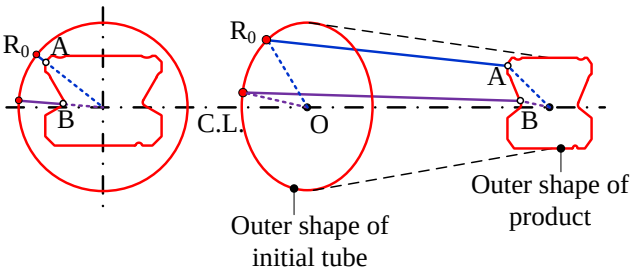
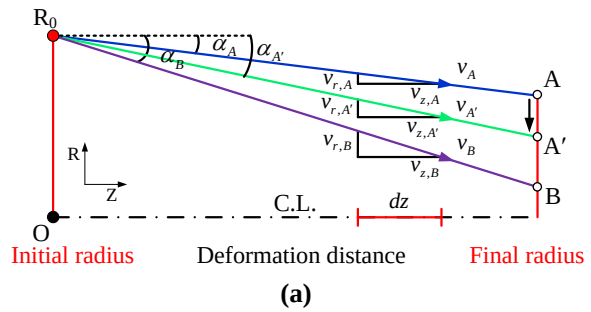


Fig. 2 Schematic illustration of expected metal flow



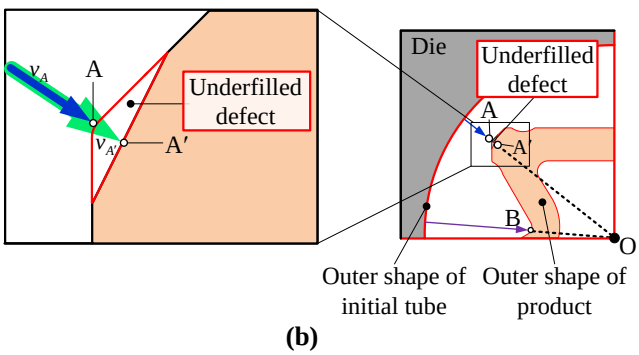
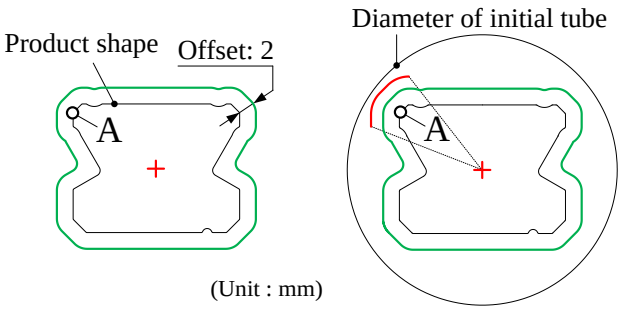


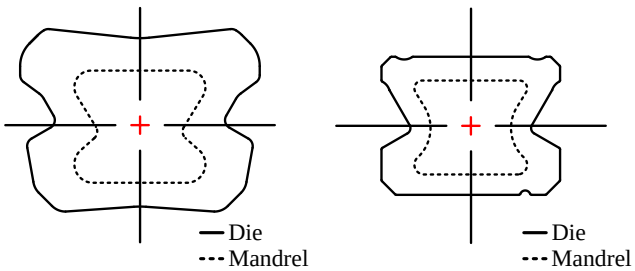
Fig. 3 Expected unfilled area caused by difference of die angle in case of product has complicated shape

DOCF 금형 설계법을 중공형 리니어 모션 가이드 레일형상에 적용하여 1패스 다이의 단면형상을 설계하였다. 1패스 형상은 제품 형상에 가까운 형상이어야 한다. 따라서 패스 수에 따른 충진율을 고려하여 초기 형상을 결정하는 방법과 동일하게 Fig. 4(a)와 같이 제품 형상을 2mm Overall offset 하여 1패스 예비 형상을 결정하였다. 1패스 예비 형상의 최소외접원의 외경은 초기 튜브의 외경과 제품 형상 최소외접원의 외경 사이의 치수일때 인발이 가능하다. 제품의 두께 충진율을 위해서 1패스 형상의 두께는 2패스 형상의 두께보다 두꺼워야 한다.



(a) Overall offset method **(b) Local offset method**

Fig. 4 Cross-sectional shape based on Overall offset and Local offset method



(a) 1st pass **(b) 2nd pass**

Fig. 5 Section shape of multi-pass tube shape drawing dies

1패스 후 소재의 내부형상은 제품의 내부형상을 1mm offset 한 1패스 맨드렐 형상에 의해 결정된다. 따라서 1패스 후 소재의 두께를 고려하여 1패스 외부형상을 1mm 를 초과한 양만큼 Overall offset 이 요구된다. 따라서 인발이 가능한 1패스 외부형상의 치수범위 안에서 1패스 형상의 두께 및 외부형상의 충진율을 고려하여 2mm 로 Overall offset을 하였다.

Fig. 4(b)와 같이 제품 형상의 최소외접원과 제품 형상의 교점인 A 에서 초기형상까지의 거리가 최단거리 이다. 따라서 최소 다이반각을 이루며 미충진 결함 발생 가능성이 가장 높다. 또한 실제품의 베어링이 가이드 되어야 하는 부분이기 때문에 높은 치수정밀도가 요구된다. 따라서 Fig. 4(b)와 같이 베어링을 가이드 하는 형상을 포함시키는 범위만큼 Local offset 을 적용한다. Local offset 의 양은 1패스 예비형상의 최소외접원의 직경과 초기 튜브의 직경 사이의 범위를 넘지 말아야 한다. FE-simulation을 이용하여 Local offset 의 양을 0~100%의 범위안에서 증감을 조절하여 찾는다. 25%, 50%, 75%, 100% 4가지경우에서 초기형상과 겹치지 않는 가장 높은 75% 의경우를 적용했을 때 Local offset 의 양은 약 1.5 mm 이다. Fig. 5 (a)는 Local offset 이 적용된 코너부 형상의 양 끝점을 1패스 예비형상과 작도법으로 연결하여 결정된 1패스 형상이다. 2패스 형상은 Fig. 5(b)와 같이 제품 형상과 동일하다.

3. 유한요소해석 및 중공형 형상인발 실험

3.1 유한요소해석

중공형 리니어 모션 가이드 레일을 제조하기 위한 형상인발 공정에서 설계된 중간패스 다이 단면형상을 적용하여 설계법의 타당성을 검증하기 위한 유한요소해석을 수행하였다.

중공형 리니어 모션 가이드 레일의 소재는 구상화 열처리된 MN55Cr소재이며, 인장시험을 통하여 기계적 물성치를 확보하였다. 소재의 유동응력식은 다음과 같다.

$$\bar{\sigma} = 944.3 \cdot \bar{\varepsilon}^{\,0.184} \ \text{[MPa]} \qquad (1)$$

Fig. 6 은 1, 2 패스 유한요소해석모델을 나타낸 것이다. 중간패스 다이 단면형상의 좌우 대칭성을 고려하여 3D-half 모델을 적용하였고 상용 유한요소해석 소프트웨어 DEFORM-3D 를 이용하여 수행하였다. 유한요소해석 조건은 현장에서 쓰이는 장비사양 및 윤활을 고려하여 인발속도는 66.7mm/s 이며, 소재와 다이의 마찰상수는 0.1 로 하였다[2]. 1 패스 인발 후 소재의 가공경화 및 응력완화를 위하여 풀림열처리를 수행한 후 2 패스 인발을 수행한다. 따라서 풀림열처리 효과를 고려하기 위하여 1 패스 인발 후 소재에 축적된 유효변형률 값을 0 으로 재설정한 후 2 패스 성형해석을 수행하였다.

Fig. 7은 유한요소해석의 결과를 각 패스에서의 유효변형률 분포로 나타낸 것이다. 1패스를 통과한 소재는Fig. 7(a)에서 볼 수 있듯이 상대적으로 변형량이 많은 상하좌우 외부표면에서 변형률이 높음을 알 수 있다. 코너부 ①과 ②는 Local offset method 를 적용하였기 때문에 성형이 진행되면서 다이와 접촉하지 않게 되어 변형률이 0에 가깝다. 1패스 성형 후 중간재의 내부표면 ③의 변형률이 낮은 이유는 1패스 맨드렐이 Fig. 1(c)와 같이 설계되어 소재내부와 접촉하지 않기 때문이다.

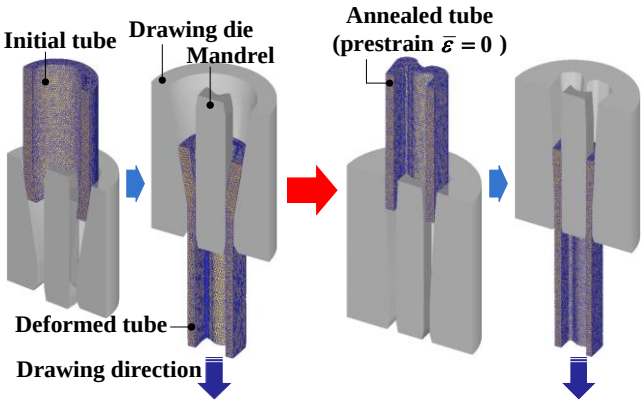


Fig. 6 FE-simulation model of multi-stage tube shape drawing process

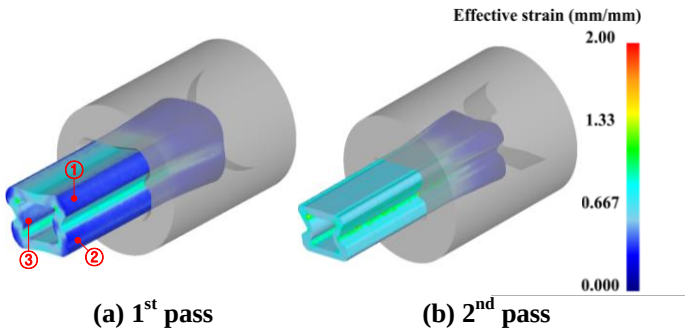


Fig. 7 Distribution of effective strain

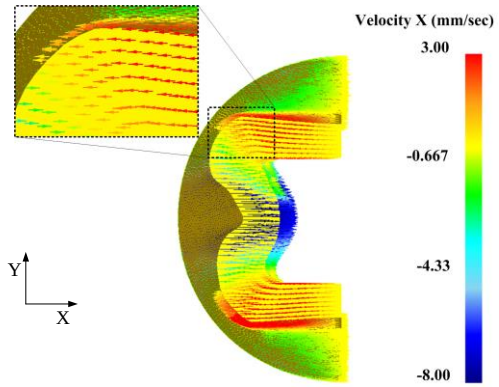
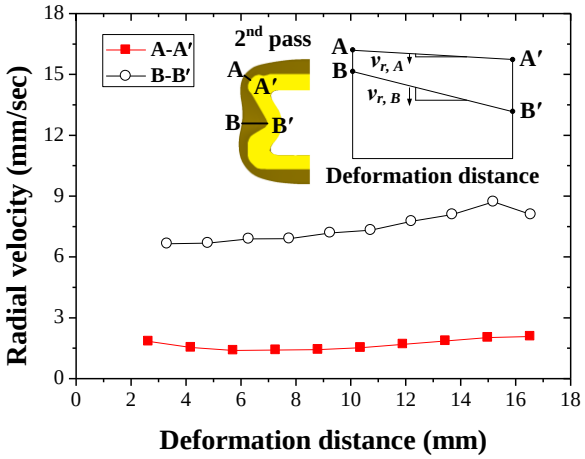
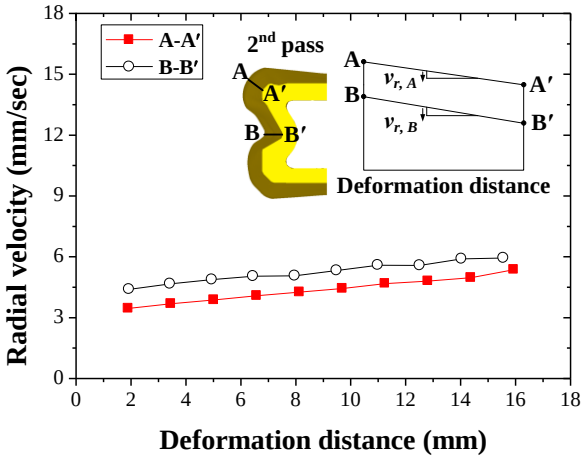


Fig. 8 X-axial velocities on section shape of 1st pass process

소재 내부의 상부 좌우측 및 하부 좌우측의 코너부에서의 유효변형률은 맨드렐에 의한 내부반발력으로 높게 나타났다. 1패스에서 Local offset method로 코너부의 두께가 증가 했기 때문에 2패스에서는 Fig. 7 (b)와 같이 외부표면의 유효변형률이 균일함을



(a) Equal-potential line method



(b) DOCF method

Fig. 9 Comparison of radial velocities in 2nd pass drawing process

알 수 있다.

Fig. 8 은 1 패스 유한요소해석 결과, 소재의 변형이 끝나는 위치의 단면에서 X 방향 성분의 속도분포를 나타내었다. 코너부의 소재는 다이와 접촉하지 않으며 평탄부에서 맨드렐의 반발력에 의해 코너부로 향하는 소재의 X 방향 성분의 속도분포를 확인할 수 있다.

Fig. 9(a)는 동일한 조건에 대해 기존의 설계방법중 하나로 등전위선을 이용하여 설계된 경우 2패스에서 소재의 반경 방향 유동속도를 변형거리에 따라 측정하여 그래프로 나타내었다. Fig. 9(b)는 DOCF 설계방법을 이용하여 설계된 경우 2패스에서 소재의 반경 방향 유동속도를 변형거리에 따라 측정하여

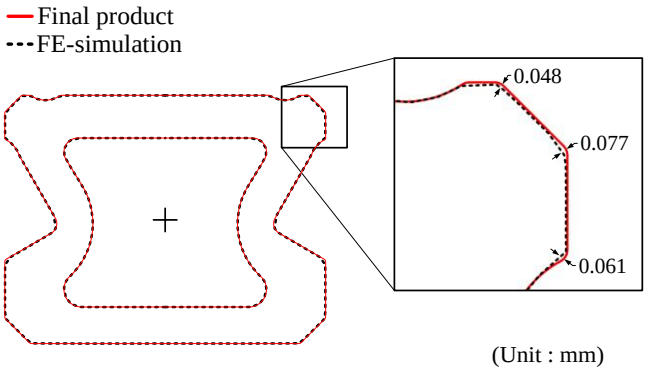


Fig.10 Comparison between cross-sectional shape of deformed tube and product in 2nd pass drawing process

그래프로 나타내었다. Fig. 9(a)의 경우 변형거리에 대한 A-A′ 경로와 B-B′ 경로의 다이반각 차이는 크지만 Fig. 9(b)의 경우에 다이반각의 차이는 적다. 측정된 반경 방향 속도분포는 다이반각이 큰 경로에서 크게 측정되었고 다이반각이 작은 경로에서 작게 측정되었다. 따라서 다이반각의 차이가 크게 설계되는 등전위선을 이용한 설계법의 경우 소재의 반경 방향 유동속도의 차이가 크게 발생하고 다이반각이 비슷하게 설계되는 DOCF 설계법의 경우 소재의 반경 방향 유동속도의 차이는 적기 때문에 DOCF 설계법이 미충진 결함 개선에 유리하다.

Fig. 10에 2패스 성형해석 후 소재의 단면형상과 제품의 단면형상의 도심을 일치시킨 후 외부형상의 치수오차를 표시하였다. Fig. 10의 제품 형상의 단면적과 2패스를 통과한 소재의 단면적을 이용하여 계산되는 미충진율(unfilling rate: UR)로 제품의 단면치수정도를 평가하였다.

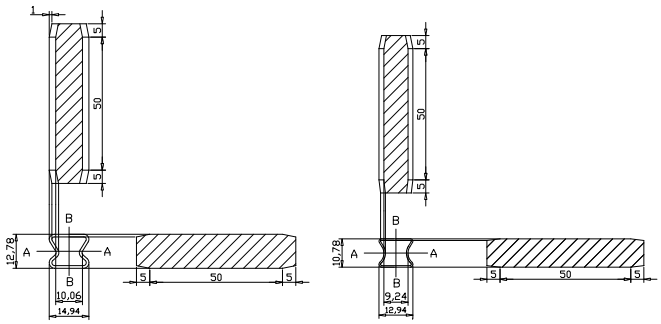
미충진율은 계산된 값이 적을수록 단면치수정도가 우수하며 계산식은 다음과 같다.

$$UR = \left(1 - \frac{A_{simulation}}{A_{product}}\right) \times 100\ [\%] \qquad (2)$$

DOCF 설계법을 적용한 경우의 소재단면에서 모서리부분의 미충진 결함은 거의 없으며, 예측된 제품의 미충진율은 0.4%이다. 이 단면치수정도는 등전위선을 이용한 설계법[11]을 적용한 경우의 미충진율 1.4% 보다 우수함을 알 수 있다. 또한, 등전위선

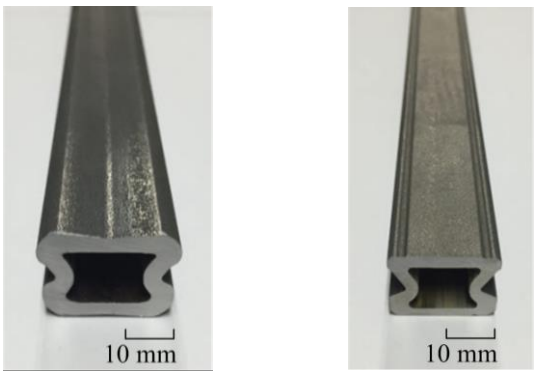
(a) 1st pass **(b) 2nd pass**

Fig.11 Die shape of hollow type shape drawing



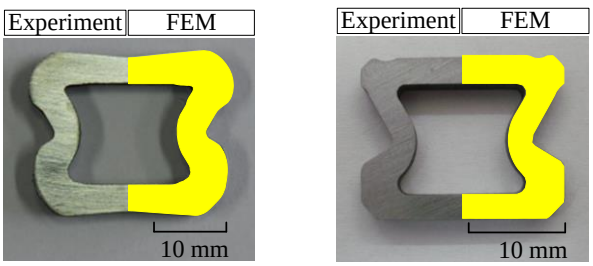
(a) 1st pass **(b) 2nd pass**

Fig.12 Mandrel shape of hollow type shape drawing



(a) 1st pass **(b) 2nd pass**

Fig.13 Products of hollow type shape drawing



(a) 1st pass **(b) 2nd pass**

Fig.14 Cross-sectional shape of hollow type shape drawing

을 이용한 설계법은 전기장 해석이 선행적으로 수행되어야 한다. 반면, DOCF 설계법은 선행 해석 없이 제품의 형상적 정보만으로 중간다이의 단면형상 설계가 가능하여 설계효율측면에서 유리하다.

3.2 중공형 형상인발 실험

본 연구에서 제시한 DOCF 금형 설계법과 유한요소해석 결과의 타당성을 검증하기 위하여 중공형 형상인발 실험을 수행하였다. Fig. 11에 유한요소해석과 동일한 형상으로 제작된 인발다이를 나타내었다. 1패스 및 2패스 맨드렐 형상을 유한요소해석에 이용한 맨드렐 형상과 동일한 형상으로 Fig. 12와 같이 제작하였다. Fig. 13에 중공형 형상인발 실험을 통하여 제조된 제품을 나타내었고, Fig. 14는 각 패스 통과 후 제품의 단면형상을 나타낸 것이다. 최종 제품에 대하여 3차원 투영기를 이용하여 미충만율을 계산하였다. 계산된 미충만율은 0.8%이다. 이는 유한요소해석을 통하여 얻은 미충만율과 유사한 1% 미만의 값이며 기존의 설계법으로 제조된 제품[11] 보다 최종제품의 단면치수정도를 개선할 수 있을 것으로 사료된다. 이러한 결과는 본 연구에서 제시한 설계 방법의 타당성을 나타내고 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 중공형 리니어 모션 가이드 레일 제조를 위한 고정 맨드렐을 가진 2패스 형상인발 공정에서 중간패스 다이의 단면형상 설계 방법을 제시하였으며, 그 결과로 다음과 같은 결론을 도출하였다.

(1) 이형 형상의 위치에 따른 상이한 다이반각으로 인해 유발되는 소재의 불균일한 반경 방향 유동속도는 미충진 결함의 발생원인이 된다.

(2) 소재의 불균일한 반경 방향 유동속도의 차이를 최소화 하기 위한 1패스 중간 다이의 단면형상을 설계 하는 방법으로 DOCF 금형 설계법을 제시하였다. 제품의 외부 형상과 초기 튜브의 외부 형상으로 최소 다이반각을 가지는 영역을찾는다. Die off set 으로 1패스 다이의 형상을 수정하여 다이반각의 차이를 감소시킴으로써 2패스에서 불균일 했던 소재의 반경 방향 유동속도를 최소화하였다. 그리고 각 패스 소재의 내부에 삽입이 가능한 맨드렐을 설계하였다.

(3) 본 연구에서 제시한 중간패스 다이의 단면형상을 설계하는 방법의 타당성을 검증하기 위해 유한요소해석 및 중공형 형상인발 실험을 수행하였다. 그 결과, 제품 단면형상으로부터 계산된 미충만율은 1% 미만이었다.

후 기

본 연구는 산업통상자원부 및 한국산업기술평가관리원의 부품소재기술개발사업[10042740, 중량 40% 저감 중공형 LM-Light Rail 개발]과 PNU IFAM 국제공동연구소의 지원으로 수행하였음.

REFERENCES

[1] K. Sawamiphakdi, G. D. Lahoti, J. S. Gunasekera, R. Kartik, 1998, Development of Utility Programs for a Cold Drawing Process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80~81, pp. 392~397.

[2] S. K. Lee, J. E. Lee, B. M. Kim, S. M. Kim, 2007, Die Design in the Complex shape Drawing of Cross Roller Guide to Improve the Dimensional Accuracy, J. Mech. Sci. Technol., Vol. 21, No. 10, pp. 1573~1579.

[3] J. Rasty, D. Chapman, 1992, Isothermal and Thermo Mechanical Finite-element Analysis of the Tube Drawing Process using a Fixed Tapered Plug, J. Mater. Eng. Perform., Vol. 1, No. 4, pp. 547~554.

[4] C. T. Kwan, 2002, A Generalized Velocity Field for Axisymmetric Tube Drawing Through an Arbitrarily Curved Die with an Arbitrarily Curved Plug, J. Mater. Process. Technol., Vol. 122, No. 2, pp. 213~219.

[5] Y. C. Kim, Y. Choi, B. M. Kim, J. C. Choi, 1999, A Study on the Drawing of Rectangular Rod from Round Bar by using Rigid Plastic FEM and Neural Network, Trans. Mater. Process., Vol. 8, No. 4, pp. 331~339.

[6] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2009, A Study on the Pass Schedule of Multi-Pas Shape Drawing Process for Cross Roller Guide, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 7, pp. 550~555.

[7] S. K. Lee, J. E. Lee, T. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2009, Process Design of Multi-Stage Shape Drawing Process for Cross Roller Guide, J. Kor Soc. Precis.

Eng., Vol. 26, No. 11, pp. 124~130.

[8] E. M. Rubio, C. Gonzalez, M. Marcos, M. A. Sebastian, 2006, Energetic Analysis of Tube Drawing Processes with Fixed Plug by upper Bound Method, J. Mater. Process. Technol., Vol. 177, pp. 175~178.

[9] K. Yoshida, H. Furuya, 2004, Mandrel Drawing and Plug Drawing of Shape-memory-alloy Fine Tubes used in Catheters and Stents, J. Mater. Process. Technol., Vol. 153, pp. 145~150.

[10] J. E. Lee, T. K. Lee, S. K. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim, 2009, A Study on Cross Sectional Shape Design of Intermediate Pass in the Multi-Stage Shape Drawing, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 283~289.

[11] S. H. Kim, 2014, Process Design of Shape Drawing for Manufacturing Hollow Linear Motion Guide Rail, M. Eng. Thesis, Pusan National University, Pusan, pp. 8~23.