

## 형상인발공정 기술동향

이상곤<sup>1</sup> · 이인규<sup>1,2</sup> · 김병민<sup>2</sup>

1. 한국생산기술연구원 극한제조기술그룹
2. 부산대학교 기계공학부

## Review on Profile Drawing Process

S. K. Lee, I. K. Lee, B. M. Kim

1. Ultimate Manufacturing Technology Group, Korea Institute of Industrial Technology, Daegu, Korea
2. School of Mechanical Engineering, Pusan National University, Busan, Korea

### 1. 개요

형상인발공정은 단면형상이 일정한 길이가 긴 기계부품인 프로파일(profile)을 제조하기 위한 대표적인 소성가공 공정이다. Fig. 1과 같이 프로파일은 수송기계부품, 산업용기계부품 등 산업전분야에 폭넓게 사용되고 있다. 형상인발공정은 기존 기계가공에 의한 제조방법에 비해 다양한 장점을 가지고 있다. Table 1에서 알 수 있듯이 정형가공(net shaping)이 가능하며, 상대적으로 소재 손실량이 적다. 또한 대량생산이 가능하며, 복잡한 형상의 프로파일 제조도 가능할 뿐만 아니라, 표면품질 및 기계적 성질이 우수한 장점이 있다.

형상인발공정은 전통적인 소성가공 공정으로 1950년대부터 독일을 중심으로 주로 연구가 진행되었으며, 이후 일본에서 정밀기계부품 제조를 위한 연구가 진행되었다. 최근에는 국내의 몇몇 전문가들이 꾸준한 연구를 수행하고 있다[1~9].

국내에서도 형상인발공정을 이용하여 리니어 모션 가이드 레일(linear motion guide rail), 동력전달용 스플라인(spline), 스프링용 각재 와이어 등 다양한 종류의 프로파일들이 생산되고 있다.

형상인발공정의 경우 소재의 성형성, 단면감소율, 생산성 등을 고려하여 일반적으로 2~3패스 이내로

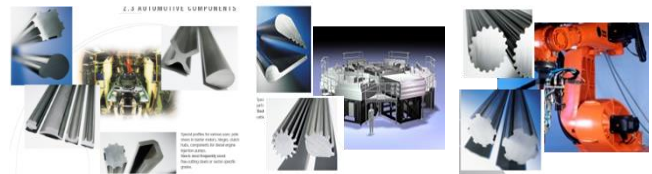


Fig. 1 Application of profiles

Table 1 Classification of drawing process

Method	Feature
Machining	Low productivity Poor mechanical properties Excessive material loss
Shape drawing	Net shaping Excellent material saving Volume production Production of complex shape profile

이루어진다. 요구되는 품질을 가진 프로파일 제조를 위해서는 적합한 형상인발 공정설계가 매우 중요하다. 해외의 경우 1990년대까지 형상인발 공정설계를 위한 몇몇 연구들이 진행되었으며[10~12], 최근에는 형상인발공정 시 발생하는 응력 계산을 위한 연구들이 진행되었다[13,14].

요구품질을 가진 프로파일 제조를 위해서는 적합한 다단 형상인발 공정설계가 매우 중요하다. 현재까지 다양한 연구들이 진행되었으나, 대부분 실제 산업현장에 적용 가능한 공정설계관련 연구들은 거의 이루어지지 않았다. 이로 인해 다단 형상인발 공정설계는 대부분 현장 숙련자의 경험에 의존하고 있기 때문에 신제품 개발 시 반복적인 시행착오에 의해 많은 시간과 비용이 소모되고 있는 실정이다. 최근 다단 형상인발 공정설계에 관한 연구가 일부 수행되고 있으며, 특히 국내 몇몇 연구자들이 활발한 연구를 수행하고 있다[15~30].

본 논문에서는 최근 국내에서 수행된 연구를 중심으로 다단 형상인발 공정설계기술에 관하여 간략하게 소개하고자 한다.

## 2. 다단 형상인발공정 기초이론

### 2.1 인발공정 분류

형상인발공정은 최종제품의 형상난이도에 따라 두 가지로 구분할 수 있다. 첫 번째는 초기소재로부터 바로 형상인발공정을 적용하여 최종제품을 제조하는 방법 최종제품의 형상이 비교적 단순한 경우에 적용된다. 두 번째는 최종제품의 형상이 상대적으로 복잡한 경우로, 이 경우 일반적으로 형상압연을 통해 최종제품과 유사한 형태의 제품을 성형한 후 형상인발공정을 적용하여 최종제품을 제조하게 된다. 두 공정의 분류기준은 Lee 등이 제안하였다[16]. Lee 등은 형상계수(shape factor, SF), 최종제품의 단면도심을 중심으로 제품형상에 외접/내접하는 최대/최소 원의 반경비(Radius ratio, RR), 그리고 최종제품의 대칭면 개수를 이용하여 공정분류를 하였다. 식(1)로 계산되는 형상계수는 최종제품 단면의 복잡성(shape complexity)를 나타낸다.

$$SF = P^2 / A \tag{1}$$

여기서, P는 최종제품의 둘레길이, 그리고 A는 최종제품의 단면적이다. 형상계수가 증가하면 단면적에 비해 제품의 둘레길이 상대적으로 긴 경우로 단면형상이 보다 복잡하거나 세장비가 큰을 의미한다[15].

식(2)로 계산되는 반경비 또한 Fig. 2에서 보듯이 최종제품 단면의 복잡성을 나타낸다.

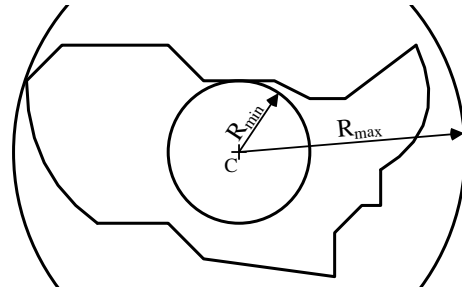


Fig. 2 Radius ratio [16]

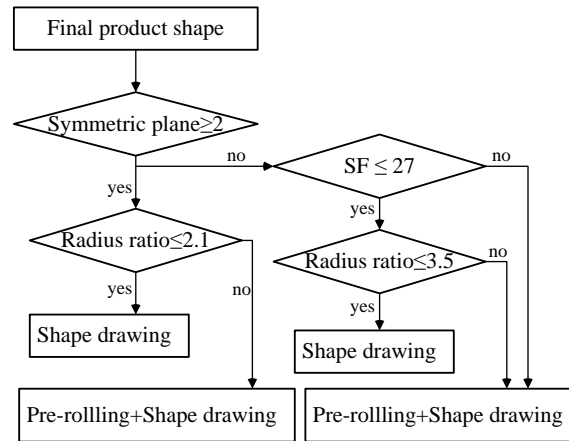


Fig. 3 Flowchart for classification of shape drawing[16]

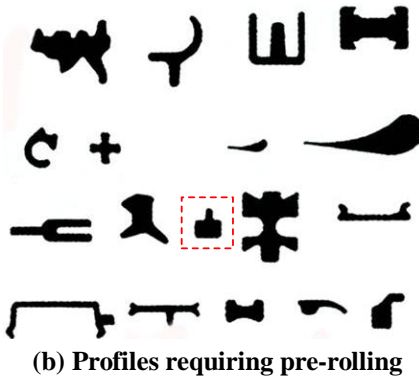
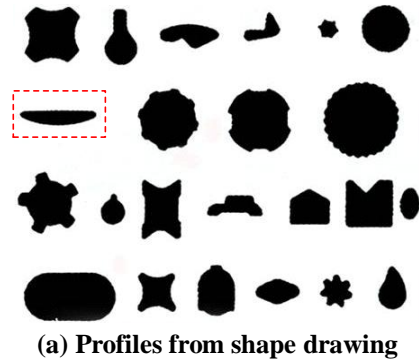


Fig. 4 Samples of profiles [1]

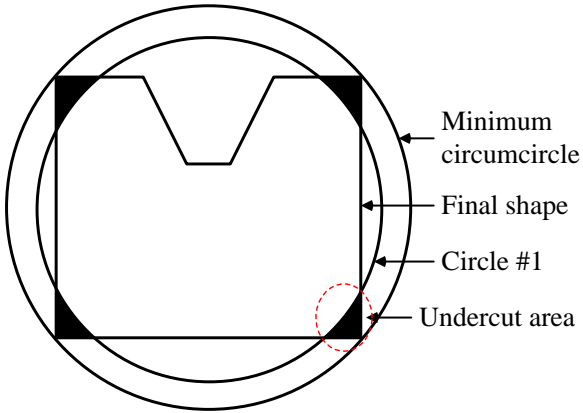


Fig. 5 Initial material size [17]

$$RR = R_{max} / R_{min} \quad (2)$$

여기서,  $R_{max}$ 는 최대 외접원의 반경, 그리고  $R_{min}$ 은 최소 외접원의 반경이다. 반경비가 증가하면 최종제품의 세장비(aspect ratio) 증가 혹은 오목부(concave)의 깊이가 깊음을 의미하여 이러한 제품의 경우 형상인발만으로 제조하는 것은 불가능하다.

최종제품의 대칭면 개수 또한 매우 중요한 인자로, 대칭면의 개수가 증가할수록 원형에 가깝기 때문에 최종제품의 형상이 단순해짐을 의미한다.

이상의 분류기준을 적용한 공정분류 절차는 Fig. 3과 같으며, 분류절차를 적용하면 Fig. 4와 같이 실제 산업현장에서 작업자의 경험으로 분류된 제품형상들의 공정분류가 가능하다[1,16].

### 2.2 패스 수 설정

다단 형상인발공정 시 패스 수 설정은 매우 중요하다. 형상인발 시 패스당 단면감소율은 최대 40%까지도 가능하나, 제품의 단면형상이 비교적 복잡한 경우 최대 30%를 초과하기 어렵다. 따라서 일반적으로 30% 이내로 단면감소율을 설정하고 있다.

다단 형상인발공정의 패스 수는 식(3)으로 표현되는 평균단면감소율 계산식으로 설정이 가능하다.

$$r_{avg} = \left[ 1 - (1 - r_{total} / 100)^{1/n} \right] \times 100 \quad (3)$$

여기서,  $r_{avg}$ 는 평균단면감소율,  $r_{total}$ 은 총단면감소율, 그리고  $n$ 은 패스 수이다. 식(3)을 이용하여 평균단면감소율이 30% 이하가 되도록 패스 수를 설정할 수 있다.

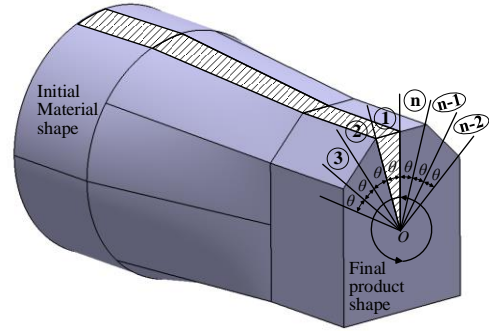


Fig. 6 Samples of profiles [27]

### 2.3 초기 소재 직경 설정

형상인발 시 초기소재는 최종제품의 최소 외접원보다 커야 한다[17]. Fig. 5에서 보듯이 초기소재가 최소 외접원보다 작을 경우(circle #1) 언더컷 영역이 발생한다. 인발공정의 경우 다이 내 소재에 주로 인발방향으로 인장응력이 발생하기 때문에 이러한 언더컷 영역을 채우는 것은 매우 어렵다.

일반적으로 초기 소재 직경은 최소 외접원의 크기와 총단면감소율, 그리고 평균단면감소율을 고려하여 설정하게 된다.

### 2.4 형상인발하중 및 응력 계산

인발공정설계를 위해서는 인발응력 계산이 반드시 이루어져야만 한다. 인발 시 다이 출구를 빠져나온 소재에 항복응력 이상의 응력이 발생하게 되면 소성변형으로 인하여 제품의 치수정도가 저하된다. 축대칭 인발공정에 대한 하중 및 응력예측에 관한 연구들은 다수 수행되었다. 그러나 형상인발공정은 비축대칭 형상으로 최종제품의 형상이 복잡하기 때문에 수학적 모델 확립이 매우 어렵다. 최근에 몇몇 연구자들이 형상인발공정 하중 및 응력예측에 관한 연구를 수행하였다. Trofimov 등이 사각형 프로파일 형상인발공정에 대한 인발응력 계산 모델을 제시하였으나, 실공정에 적용하기에는 한계가 있다[13]. Lee 등은 기존 축대칭 인발하중 예측모델을 활용하는 단면요소분할법을 제안하였다[18, 27].

Fig. 6에서 보듯이 형상인발공정을 도심을 중심으로 미소한 중심각( $\theta$ )을 갖는 유한개의 요소로 분할한 후 분할된 각 요소의 인발하중을 구한 후 모두 합하면 형상인발공정의 하중 및 응력을 예측할 수 있다.

Fig. 7은 분할된 요소를 나타낸 것이다. Fig. 7에서  $l$ 은  $O'd$ 와  $O'c$ 의 평균길이이고, 초기소재 반경이  $Oa$ , 그리고 최종제품 반경이  $l$ 인 축대칭 인발로 가정하면,

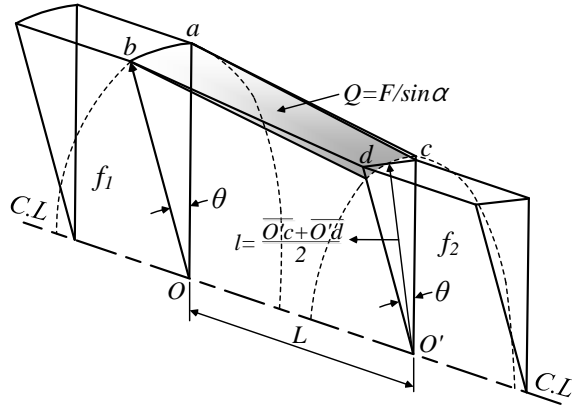


Fig. 7 Divided section [27]

분할요소의 인발하중( $SL$ )은 다음의 식(4)로 표현된다.

$$SL_i = L_i / \theta \quad (4)$$

여기서,  $L_i$ 는 축대칭 인발하중예측 모델로 계산되는 인발하중, 그리고  $\theta$ 는 분할요소의 중심각이다.

따라서, 형상인발 하중은 다음의 식으로 계산 가능하다.

$$DL = \sum_{i=n} SL_i \quad (5)$$

여기서,  $i$ 는 분할된 요소의 개수이다.

제안된 방법에서는 형상인발하중 예측을 위해 축대칭 인발하중예측 모델이 필요하다. Lee 등은 Geleji가 제안한 아래의 식(6)을 적용하여 인발하중을 계산하였다.

$$L_i = k_{m,i} \cdot (F_i + Q_i \cdot \mu_i) + 0.77 \cdot k_{fm,i} \cdot f_{2,i} \cdot \alpha_i \quad (6)$$

여기서,  $k_{m,i}$ 는 평균변형저항(average deformation resistance),  $F_i$ 는 다이 출구부와 입구부 단면적 차이,  $Q_i$ 는 소재와 다이의 접촉면적,  $\mu_i$ 는 마찰계수,  $k_{fm,i}$ 는 평균항복강도(mean yield strength),  $f_{2,i}$ 는 다이 출구부 단면적, 그리고  $\alpha_i$ 는 다이 반각이다.

따라서, 형상인발공정 능력은 계산된 인발하중과 다이 출구부 단면적을 이용하여 다음과 같이 계산된다.

$$DS = DL / f_2 \quad (7)$$

## 2.5 중간패스 다이형상 설계

다단 형상인발 공정설계 시 가장 중요한 것 중의 하나는 중간패스 다이 형상설계이다. 단면 감소율과

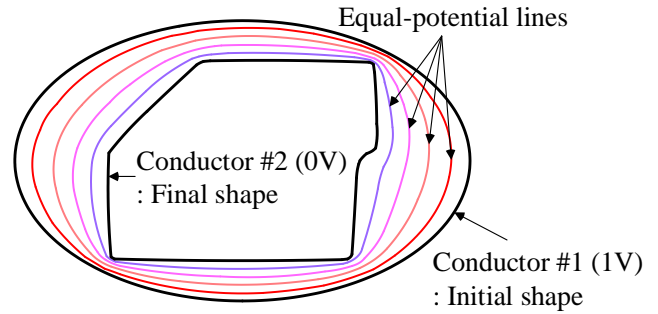


Fig. 8 Divided section [26]

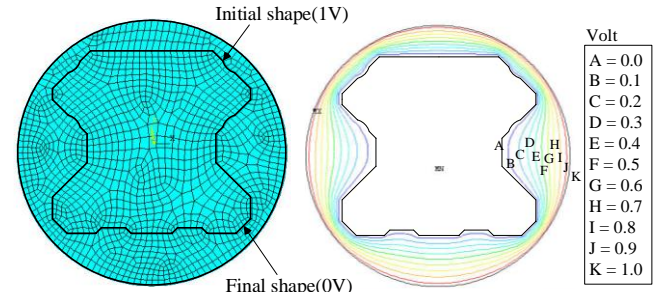


Fig. 9 Electric field analysis [26]

최종제품의 형상 등을 고려하여 적절한 중간패스 다이 형상설계가 이루어지지 않을 경우 요구품질을 가진 최종제품 제조가 불가능하다. 대부분은 현장 작업자의 경험에 의존하여 설계가 되었으나, 최근 몇몇 방법들이 제안되었다.

Lee 등은 중간패스 다이형상 설계를 위한 두 가지 방법을 제안하였다[26]. 첫 번째는 Yang 등[31]이 열간단조 예비성형체 설계를 위해 적용한 전기장이론을 이용하여 다단 형상인발공정의 중간패스 다이형상을 설계하는 방법이다[26]. Fig. 8에서 보듯이 서로 교차하지 않는 두 도체 사이에 서로 다른 전위를 인가하면 두 도체 사이에는 교차하지 않는 등전위선(equal-potential line)이 생성된다. Lee 등은 생성된 등전위선과 단면감소율을 활용하여 다단 형상인발공정의 중간패스 다이형상을 설계하였다. Fig. 9는 실제 리니어 모션 가이드 형상인발 공정설계를 위해 수행된 전기장 해석 모델 및 결과를 나타낸 것이다. 생성된 등전위선 중 중간패스의 단면감소율과 동일한 등전위선을 중간패스 다이형상으로 선정한다.

두 번째 방법은 초기소재 형상과 최종제품 형상으로 생성되는 가상금형(virtual die)를 이용하는 방법이다. Fig. 10과 같이 초기소재 형상과 최종제품 형상을 연결하면 가상의 금형을 생성할 수 있다. 생성된 가

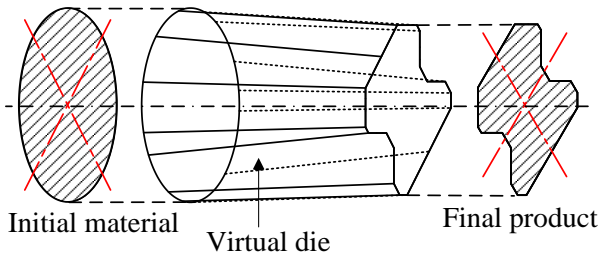


Fig.10 Electric field analysis [26]

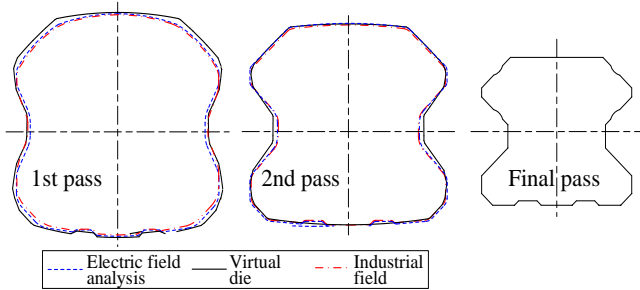


Fig.11 Comparison of the intermediate die shape [26]

상금형을 패스 수로 등간격 분할 후 분할된 단면과 최종제품의 형상으로 계산되는 스케일 계수(scale factor)를 이용하여 중간패스 다이형상을 설계한다[26].

Fig. 11은 리니어 모션 가이드 레일 제조를 위한 3 패스 형상인발공정 설계에 적용한 예를 나타낸 것이다. Fig. 11에서 알 수 있듯이 두 설계방법의 결과가 유사함을 알 수 있다.

최근에는 Lin 등이 가상금형 설계법과 유사한 방법을 이용해 사다리꼴 와이어 제조를 위한 형상인발 공정설계를 수행하였다[16].

### 3. 다단 형상인발 공정설계 시스템

효과적인 다단 형상인발 공정설계를 위해 최근까지 최적화기법 혹은 유한요소해석 등이 활발히 적용되었다. 그러나 이러한 방법들은 활용방법이 매우 복잡하거나 과도한 시간이 요소 되는 등 실제 산업 현장에 적용하기에는 많은 제약들이 있다. 이러한 단점을 보완하기 위하여 최근 GUI 환경으로 만들어진 다단 형상인발 공정설계 시스템 개발에 관한 연구들 수행되었다[24,32]. 개발된 공정설계 시스템은 범용 설계 소프트웨어인 AutoCAD V14 에 설치되어 설계자가 편리하게 활용할 수 있다. Fig. 12에서 보듯이 개발된 프로그램은 최종제품 정보 창(information of final product), 초기소재 정보 창(information of initial

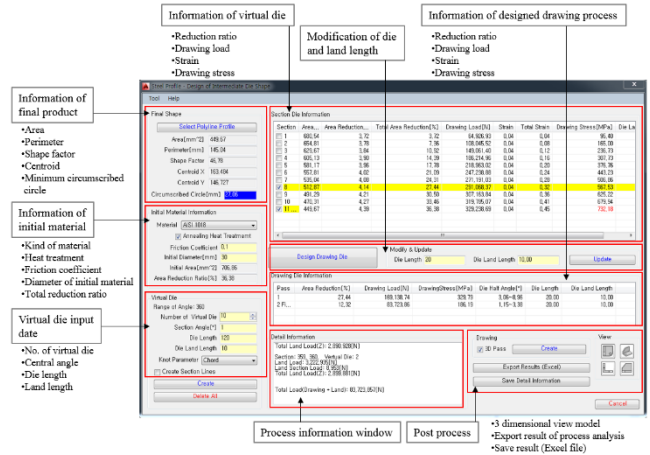


Fig.12 Process design system [24]

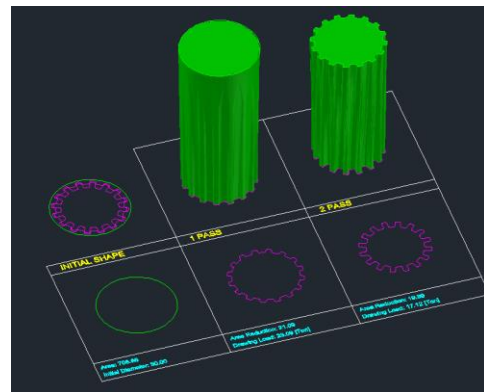


Fig.13 Post process of design system [24]

Table 2 Result of process analysis [24]

Pass No.	Reduction in area(%)	Drawing Load(kN)	Drawing Stress(MPa)	Half die angle(°)
1	27.4	169.1	330.0	3.06~8.96
2	12.3	83.7	186.1	1.15~3.38

material), 가상금형 조건 입력 창(virtual input date), 생성된 가상금형 정보 창(information of virtual die), 다이 및 랜드 길이 수정 창(modification of die and land length), 설계된 공정 정보창(information of designed drawing process), 공정 정보 창(process information window), 그리고 후처리 창(post process)로 구성되어 있다.

Fig. 13은 치형 스플라인부품의 공정설계결과를 나타낸 것이며, Table 2와 같이 다양한 정보들이 출력된다. 개발된 공정설계 시스템은 사용이 매우 간단하고 단시간 내 공정설계가 가능하기 때문에 실제 산업현장에 효과적으로 적용 가능할 것으로 사료된다.

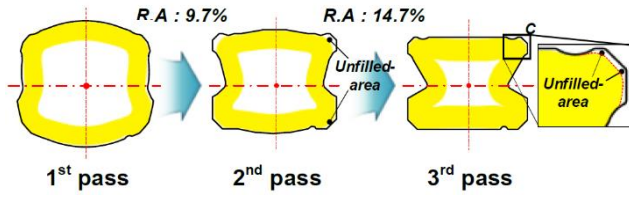
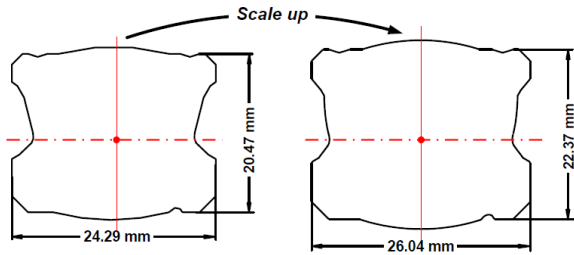
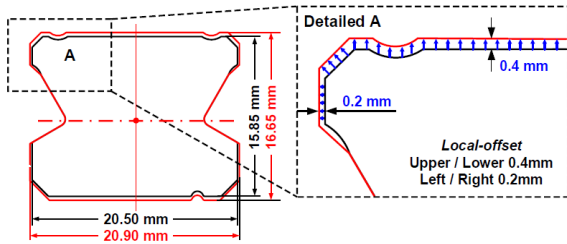


Fig.14 Cross-sectional shape at each pass [29]



(a) 2<sup>nd</sup> drawing pass



(a) 3<sup>rd</sup> drawing pass

Fig.15 Application of overall-offset method [29]

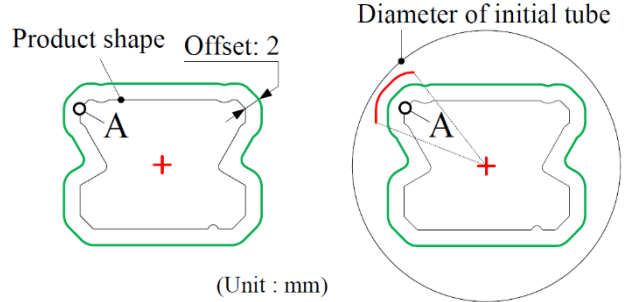
#### 4. 중공 프로파일 형상인발

최근에는 경량화 및 원가절감을 위해 중공소재를 이용한 형상인발제품 개발이 요구되고 있으며, 몇몇 연구들이 수행되고 있다.

Lee 등은 기존 가상금형 설계법 적용 시 중공소재를 적용한 리니어 모션 가이드 레일의 치수정도 저하를 해결하기 위하여 중간패스 다이 단면형상을 수정하는 Overall-offset 설계법을 제안하였다[29]. 이 방법은 중간 패스 다이 단면형상을 확대시켜 최종 제품의 치수오차를 감소시키는 방법이다.

Fig. 14 에서 보듯이 기존 가상금형 설계법 적용 시 최종제품의 코너부에 미충만영역(unfilled area)이 발생한다. 이를 방지하기 위한 Overall-offset 설계법이 적용된 수정 2 번째, 3 번째 패스 다이 단면형상은 Fig. 15 와 같다.

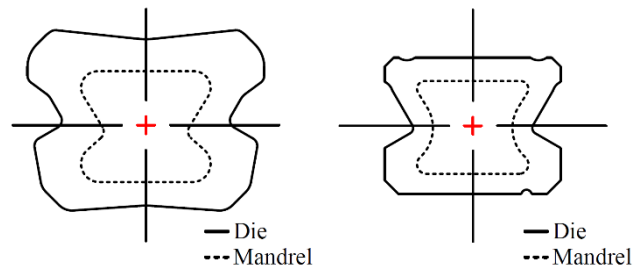
Park 등은 중공형 리니어 모션 가이드 레일의 치수정도 향상을 위해 고정 타입의 맨드렐을 적용한 형상인발 금형설계에 관한 연구를 수행하였다[30].



(a) Overall-offset

(b) Local offset at corner

Fig.16 Cross section based on overall-offset and local offset method [30]



(a) Overall-offset

(b) Local offset at corner

Fig.17 Section of multi-pass tube drawing die [30]

중공소재를 이용한 형상인발의 경우 내부의 지지력이 없기 때문에 중실소재 대비 코너부 미충만에 의한 결함발생 가능성이 매우 높다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 Park 등은 Die Offset for Corner Filling(DOCF) 설계법을 제안하였다. 이 방법은 Lee 등[29]이 제안한 Overall-offset 설계법과 제품형상의 둘레를 부분적으로 확장하는 Local offset 설계법을 동시에 적용한다. 이 방법을 적용하면 제품의 볼록부(convex)와 오목부(concave)로의 소재 유동속도차를 최소화시켜 제품 코너부 미충진을 줄일 수 있다. Fig. 16 에 DOCF 설계법 적용 예를 나타내었다. Fig. 16(a)와 같이 Overall-offset 설계법을 적용하여 전체 형상에 대하여 균일한 offset 을 적용한 후 소재 미충만이 발생하는 코너부는 Local offset 을 다시 적용하게 된다.

Fig. 17 은 DOCF 설계법이 적용되어 설계된 형상인발 금형과 맨드렐 단면 형상을 나타낸 것이다.

#### 5. 맺음말

다만 형상인발공정은 일반적인 축대칭 인발공정에 비해 부가가치가 높으며, 다양한 정밀 기계요소

부품 제조에 활용되는 공정이다. 국내의 경우 중소·중견기업 중심으로 다양한 프로파일 제품들이 형상인발공정을 통해 생산되고 있다. 그러나 여전히 체계적이고 효율적인 공정설계는 이루어지고 있지 않고 있으며, 대부분 현장 작업자의 경험에 기초한 시행착오법으로 공정설계가 이루어지고 있다.

다만 형상인발공정의 경우 학문적 기반의 연구도 중요하지만 실제 산업현장에 적용 가능한 공정설계 연구가 더욱 필요한 실정이다. 일반적인 축대칭 인발공정에 비해 다이 형상설계 등 보다 높은 난이도의 기술이 요구되는 공정으로 향후 산업현장에 적용 가능한 다양한 연구들이 수행되면 그 기대효과가 매우 클 것으로 판단된다.

## REFERENCES

- [1] K. Greulich, 1961, Drawing of Special Profiles in Steel (in German), Draftwelt, Vol. 47, pp. 579~583.
- [2] F. J. Hahne, H. H. Domalski, 1967, Drawn Profiles of Stainless Steel-Their Manufacture, Application, and Economy (in German), Rohre und Profile, Vol. 14, pp. RP 4/2~4/12.
- [3] H. Preußler, 1949, Multi-Pass Design of Cold Drawn Profiles (in German), Stahl u. Eisen, Vol. 69, pp. 819~824.
- [4] B. B. Basily, D. H. Sansome, 1976, Some Theoretical Considerations for the Direct Drawing of Section from Round Bar, Int. J. Mech. Sci., Vol. 18, pp. 201~208.
- [5] W. Steuff, R. Kopp, 1995, Estimation of Designing Methods for the Drawing of Section Rods and Wire, Wire J. Int., Vol. 28, pp. 104~109.
- [6] J. P. Renz, R. Kopp, 1998, A New Calibration Method for Complex Shape Sections with Reflex Angles, Wire. J. Int., Vol. 31, pp. 96~100.
- [7] K. Kobayashi, 1998, The Present Situation of Cold Drawn Special Section (in Japan), J. Jpn. Soc. Technol. Plast., Vol. 39, No. 447, pp. 335~337.
- [8] K. Yoshida, S. Tuihiji, 2002, Multiple Drawing of Rails for Linear Motion, Adv. Technol. Plast., Vol. 1, pp. 367~372.
- [9] K. Yoshida, 1999, Production Technology of Shaped Wire and Bar for Linear Motion Guide, The Iron and Steel Inst. Jpn., Bar and Wire Forum.
- [10] 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.
- [11] S. K. Sahoo, P. K. Kar, 2000, Round-to-hexagon Drawing through Straightly Converging Dies: an Application of the SERR Technique, Int. J. Mech. Sci., Vol. 42, No. 3, pp. 445~449.
- [12] K. L. Wang, V. Argyropoulos, 2005, Design and Analysis of Direct Cold Drawing of Section Rods through a Single Die, J. Mater. Process. Technol., Vol. 166, No. 3, pp. 345~358.
- [13] V. N. Trofimov, T. V. Kuznetsova, 2013, Stress of Drawing Solid Rectangular Profiles, Russ. J. Non-ferrous Met., Vol. 54, No. 5, pp. 364~368.
- [14] V. N. Trofimov, T. V. Kuznetsova, D. S. Anyshchuk, A. V. Eseneev, M. G. Shtutsa, 2013, Drawing of Continuous Sections with a Regular Polygon Profile, Russ. J. Non-ferrous Met., Vol. 54, No. 6, pp. 470~474.
- [15] C. R. Boër, H. Riegger, 1986, Pattern Recognition in Steel Profile Production, Int. J. Mach. Tool. Des. Res., Vol. 26, No. 1, pp. 21~34.
- [16] Z. Lin, B. Shen, F. Sun, Z. Zhang, S. Guo, 2015, Numerical and Experimental Investigation of Trapezoidal Wire Cold Drawing through a Series of Shaped Dies, Int. J. Adv. Manuf. Technol., Vol. 76, pp. 1383~1391.
- [17] 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. Korean Soc. Precis. Eng., Vol. 26, No. 11, pp. 124~130.
- [18] T. K. Lee, C. J. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2009, Prediction of Drawing Load in the Shape Drawing Process, Trans. Mater. Process., Vol. 18, No. 4, pp. 323~328.
- [19] S. K. Lee, S. M. Kim, S. B. Lee, B. M. Kim, 2010, Optimization of Process Variables of Shape Drawing for Steering Spline Shaft, Trans. Mater. Process., Vol. 19, No. 2, pp. 132~137.
- [20] S. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2010, Development of Intermediate Die Shape Design Program for Multi-

- pass Shape Drawing by Using VisualLISP, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 4, pp. 242~247.
- [21] S. M. Kim, S. K. Lee, T. K. Lee, S. B. Lee, B. M. Kim, 2011, Process Design Program for Multistage Profile Drawing from Round Material, *J. Korean Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 3, pp. 377~382.
- [22] S. M. Kim, S. K. Lee, C. J. Lee, B. M. Kim, M. S. Jeong, S. B. Lee, 2012, Process Design of Multi-pass Shape Drawing considering the Drawing Stress, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 4, pp. 266~270.
- [23] S. K. Lee, B. M. Kim, 2014, Trend and Technology of Drawing Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 23, No. 4, pp. 250~258.
- [24] I. K. Lee, C. Y. Choi, S. K. Lee, M. S. Jeong, J. W. Lee, D. H. Kim, Y. J. Cho, B. M. Kim, 2015, Process Design for Multi-pass Profile Drawing using Round Materials, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 4, pp. 234~240.
- [25] S. H. Lee, S. K. Lee, B. M. Kim, 2010, Study on the Manufacturing Process of Precision Linear Guide Rail through Shape Rolling and Shape Drawing, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 8, pp. 1647~1653.
- [26] S. K. Lee, J. E. Lee, S. M. Kim, B. M. Kim, 2010, Design of Intermediate Die Shape of Multistage Profile Drawing for Linear Motion Guide, *J. Mech. Sci. Technol.*, Vol. 24, No. 12, pp. 2539~2544.
- [27] S. M. Kim, S. K. Lee, C. J. Lee, B. M. Kim, S. B. Lee, M. S. Jeong, 2012, Innovative Process Design of Multistage Shape Drawing for Precision Guide Rail, *Steel Res. Int., Special Ed.: Metal Forming 2012*, pp. 483~486.
- [28] S. I. Ji, K. H. Lee, L. S. Hong, J. Y. Jung, J. S. Kim, B. M. Kim, 2015, Process Design of Multi-pass Shape Drawing Wire with Asymmetric Trapezoid Profiles, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 3, pp. 187~193.
- [29] K. H. Lee, S. H. Kim, S. B. Lee, D. H. Kim, S. M. Kim, B. M. Kim, 2015, Design Method for the Intermediate Dies in Multi-stage Shape Drawing: The Case for a Hollow Linear Motion Guide Rail, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 3, pp. 155~160.
- [30] J. H. Park, K. H. Lee, S. M. Kim, H. J. Kim, S. J. Kim, B. M. Kim, 2015, Die Design for Shape Drawing to Improve the Dimensional Accuracy of a Hollow LM-Guide Rail, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 24, No. 5, pp. 340~347.
- [31] S. R. Lee, Y. K. Lee, C. H. Park, D. Y. Yang, 2002, A New Method of Preform Design in Hot Forging by Using Electric Field Theory, *Int. J. Mech. Sci.*, Vol. 44, pp. 773~792.
- [32] I. K. Lee, S. K. Lee, S. Y. Lee, D. H. Kim, Y. J. Choi, J. W. Lee, M. S. Jeong, S. K. Whang, B. M. Kim, 2015, Process Design of Multi-pass Shape Drawing Process, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Autum Conf, Kor. Soc. Tech. Plast.*, Jaeju, Korea, p. 143.