

연속드로잉에서 아이어닝과 리드로잉의 복합공정

정준기[†] · 조웅식^{*} · 이택성^{*}

Combined Process of Ironing and Redrawing in Progressive Drawing

Joon-Ki Chung, Woong-Shick Cho and Taek-Sung Lee

Key Words : Deep Drawing(디프 드로잉), Forming(성형가공), Ironing(아이어닝), Redrawing(리드로잉), Die(금형)

Abstract

In deep drawing of sheet metal, there are many cases in which the uniform and thin wall thickness of the drawn products is more important than the bottom thickness. In this case, we can not easily get the deep drawn products with the uniform and precise wall thickness by only drawing process. Therefore in general the manufacturing processes which both the drawing and the ironing process are proceeded sequentially are used. But this method has the disadvantages of a cost-up, decrease of productivity and degradation of quality, because the ironing process is added after the drawing process. In this study, in order to improve those problems and to enhance the effect of deep drawing, the combined process of redrawing and ironing for multistep drawing of cylindrical cups is used. In this experiment, we considered the characteristics of the combined process such as the relation between the drawing and ironing rates, the drawing limits and the forces needed for operations. The suggested force prediction shows that it can successfully represent experimental results.

1. 서 론

드로잉(Drawing)과 아이어닝(Ironing)은 프레스 가공 방법의 하나로 용기형상의 제품을 생산하는데 주로 응용되고 있다. 드로잉은 금속재료인 2차원 형상의 블랭크(Blank)를 금형이라는 특수공구를 사용하여 원통 및 사각통과 같은 3차원 형상의 제품을 금속의 흐름성을 이용하여 성형가공하는 방식으로 단일 드로잉 공정과 리드로잉을 위한 다단계 드로잉 공정으로 구분된다.

아이어닝은 성형된 용기의 벽 두께를 금형을

통해 감소시키고 균일하며 평활한 벽면을 얻는 동시에 제품의 높이를 증가시키는 효과를 얻기 위하여 사용된다.

드로잉금형은 편치, 다이, 블랭크홀더(Blank Holder)로 구성되며 드로잉공정에서 재료는 플랜지부위에서 원주방향으로 압축응력을 받고 다이입구 반경 부위에서는 굽힘과 퍼짐이 이루어지며 용기 벽면은 인장응력을 받으며 성형된다. 이와 같이 드로잉 재료의 흐름이 복잡하고 순간적으로 드로잉이 이루어지므로 재료에 주름이나 파단이 발생하게 되며 그 원인은 재료의 물성, 금형설계, 제품형상, 마찰 등과 관계가 있다.

드로잉 제품을 성형하는데 있어 제품의 바닥두께보다 얇고 균일한 벽두께를 필요로 할 때가 있으나 이 경우 드로잉 공정만으로는 불가능하므로 드로잉 공정과 아이어닝 공정을 별도로 수행하는 성형방법을 일반적으로 이용한다. 그러나 이 방법은 공정의 분리로 인한 금형제작비용 상승과 생산성 저하 및 품질 저하 등의 문제점이 발생한다.

[†] 책임저자, 회원, 홍익대학교 기계/시스템디자인공학과
E-mail : jkchung@wow.hongik.ac.kr
TEL : (02)320-1680 FAX : (02)333-5719

^{*} 한국산업기술대학교 기계설계공학과

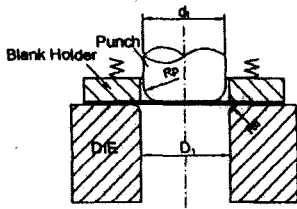


Fig. 1 Structure of drawing die

본 논문에서는 이와 같은 문제점을 개선하고 다단계 드로잉의 공정 감축과 디프드로잉 효과를 높이기 위하여 리드로잉과 아이어닝 공정을 복합시켜 하나의 금형으로 복합공정을 수행하는 실험을 통해 시편으로 사용한 황동판의 드로잉 한계, 드로잉률과 아이어닝률 관계, 복합공정에 필요한 힘의 이론값을 제시하고 실험값과 비교하는 등 복합공정에 관한 특성을 고찰하였고 실제 금형을 제작하고 제품 생산을 통하여 그 결과를 고찰하였다.

2. 드로잉과 아이어닝

2.1 드로잉 공정

원통드로잉 금형은 펀치와 다이 및 블랭크홀더로 Fig. 1⁽¹⁾과 같이 구성되며 다이 위에 놓인 재료를 블랭크홀더가 누르고 펀치가 하강하면 드로잉이 이루어진다.

드로잉 공정 중에 다이와 블랭크 홀더 사이에 있는 블랭크 재료가 다이 내로 이동할 때 원주방향으로 인장응력 뿐만 아니라 압축응력과 굽힘응력을 받게 된다. Fig. 2는 드로잉에서 블랭크 재료의 변형상태를 나타낸다.⁽²⁾

드로잉에서 드로잉의 가능성을 나타내는 드로잉비와 드로잉에 필요한 힘을 파악하는 것이 필요하다.

드로잉에서 블랭크 직경 D와 원동컵 내경 d와의 관계에서 드로잉의 가능한도를 나타내는 기준으로 한계 드로잉비(Drawing Ratio, D/d) 또는 드로잉률(Drawing Rate, d/D)을 사용하며 드로잉률이 작을 수록 드로잉 가공이 어렵게 된다.⁽³⁾

1·2차 드로잉된 높이와 드로잉 직경을 각각 H_1, d_1, H_2, d_2 라 하고 재료 두께를 t라고 하면

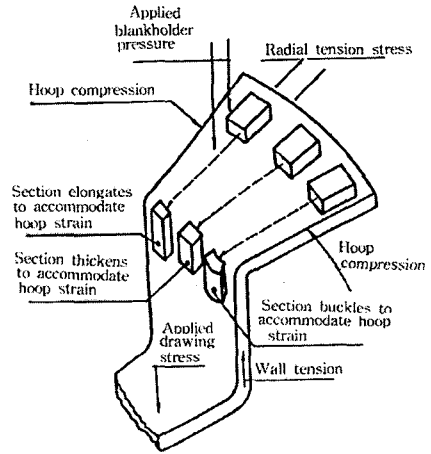


Fig. 2 Material deformation in drawing

Table 1 Drawing rate for various blank materials

Materials	First Drawing Rate	Redrawing Rate
Steel	0.55 ~ 0.60	0.75 ~ 0.80
Stainless Steel	0.50 ~ 0.55	0.80 ~ 0.85
Brass	0.50 ~ 0.55	0.75 ~ 0.80
Copper	0.55 ~ 0.60	0.70 ~ 0.80
Aluminum	0.53 ~ 0.60	0.75 ~ 0.85

높이 $H_1 = (D^2 - d_1^2)/4(d_1 + t)$, $H_2 =$

$(d^2 - d_2^2)/4(d_2 + t)$ 로 나타낼 수 있다.⁽⁴⁾

Table 1은 일반적으로 많이 사용되는 재료의 드로잉률을 나타낸다.

드로잉에 필요한 힘은 블랭크 홀더의 힘과 드로잉 힘으로 구분된다. 블랭크 홀더의 힘은 다이 위에 있는 블랭크를 눌러 주는 힘으로 드로잉할 때 재료에 발생하는 주름을 방지하기 위해 필요하다.

이 힘이 너무 작으면 주름발생 방지 효과가 없게 되며 너무 크면 재료와 다이 면 사이에 마찰이 대단히 크게 되고 블랭크의 반지름방향의 인장력이 증가하여 심하면 재료가 파단하게 된다. 따라서 이 힘을 적당히 조절할 필요가 있으며 블랭크의 단위면적당 작용하는 압력(q)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽²⁾

$$q = 0.0025 (\beta_0 - 1)^2 + \left(\frac{0.5d}{100t}\right) \sigma_B \quad (1)$$

여기서 σ_B 는 재료의 인장응력(psi), β_0 는 드로잉비, d 는 드로잉 제품 직경(inch), t 는 재료 두께(inch)이다.

원통컵 형상의 드로잉에 필요한 힘 P_d 는 재료의 인장강도와 두께, 드로잉비 등에 관계된다. 드로잉 가공 중에 용기의 측벽 부분이 인장을 받아 파단되기 직전의 힘을 최대 드로잉 힘 P_{max} 이라고 한다. 그러나 실용상으로 보면 드로잉률, 마찰 등의 조건에 따라 다르므로 보정계수를 고려한 드로잉 힘은 다음과 같이 나타낼 수 있다.⁽⁶⁾

$$P_d = \pi \cdot d_n \cdot t \cdot \sigma_B \cdot N \quad (2)$$

여기서 σ_B 는 재료 인장 강도(kgf/mm²), t 는 재료 두께(mm), d_n 는 드로잉 제품 외경(mm), N 은 보정계수이다.

2.2 아이어닝 공정

아이어닝 공정에서 필요한 힘과 아이어닝률의 관계를 파악하는 것은 아이어닝제품을 생산하는데 중요한 일이다. 아이어닝은 원통컵 형상의 용기를 편치에 의해 다이 안으로 밀어 통과시켜서 용기의 벽 두께를 줄이거나 일정하게 하는 방법으로 아이어닝 전후의 재료 두께를 t_0 , t_1 이라고 하면 아이어닝률은 $(t_0 - t_1)/t_0 \times 100$ 로 계산되며, 원통용기 벽두께의 축소율을 의미한다.⁽⁶⁾

또한 원통용기의 직경을 d_0 , d_1 블랭크 직경을 D 라고 할 때, 원통용기의 높이(h_0)는 아이어닝 가공에 의해 증가하며 그 높이(h_i)는 $h_i = H_0(D - d_1)t_0 / (D - d_0)t_1$ 로 계산된다.⁽⁷⁾ Fig. 3은 박판으로 된 용기의 경우 아이어닝 가공을 보여준다.

원통컵을 아이어닝 가공하는데 필요한 힘은 다이의 입구각 크기, 재료의 인장강도, 다이와 재료의 접촉길이와 마찰, 원통컵의 직경, 아이어닝률과 관계가 있다. 아이어닝 전·후의 원통컵 두께를 각각 t_{n-1} , t_n 이라 하고 재료 인장강도를 σ_B , 외경을 d_n , 보정계수를 K_y 라고 하면 아이어닝에 필요한 힘 P_i 는 다음과 같이 얻는다.⁽⁸⁾

$$P_i = \pi d_n (t_{n-1} - t_n) \sigma_B K_y \quad (3)$$

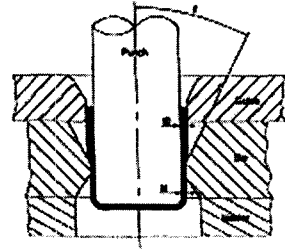


Fig. 3 Ironing process

여기서 보정계수 K_y 는 강의 경우 1.8~2.25이며 황동은 1.6~1.8이다.

2.3 리드로잉과 아이어닝 복합공정

용기의 벽두께가 일정하며 정밀한 디프드로잉 제품을 성형하고자 할 때 드로잉 공정만으로는 한계가 있으며 제품의 바닥보다 얇은 벽 두께를 요구하는 경우 드로잉 공정 후 아이어닝 공정이 추가되어야 한다. 따라서 공정 추가로 인한 생산성 및 품질저하의 문제점이 발생한다.

이와 같은 문제점에 대한 대책으로 Fig. 4와 같이 1차 드로잉된 제품을 2차 가공부터 리드로잉과 아이어닝을 복합시켜 하나의 금형으로 동시에 수행함으로써 공정의 회수를 줄이고 디프드로잉 효과를 높일 수 있는 장점이 있다. 그리고 리드로잉과 아이어닝을 동시에 수행하는데 필요한 힘(P_{id})은 드로잉 공정과 아이어닝 공정 각각에서 필요한 힘의 합과 관계된다고 생각할 수 있다. 그러나 이 경우 리드로잉과 아이어닝이 동시에 이루어진다는 것을 고려하여 복합공정의 특성을 고찰할 필요가 있다.

복합공정이 동시에 수행되는 특성을 감안하여 보정계수(α)를 고려한다면 복합공정에 필요한 힘은 $P_{id} = (P_d + P_i)\alpha$ 로 추정할 수 있으므로 식 (2)와 (3)을 사용하여 리드로잉과 아이어닝을 동시 복합가공하는데 필요한 힘을 다음과 같이 제시할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{id} &= [\pi d_n t_{n-1} \sigma_B + \pi d_n (t_{n-1} - t_n) \sigma_B] \alpha \\ &= \pi d_n t_{n-1} \sigma_B \left(2 - \frac{t_n}{t_{n-1}}\right) \alpha \end{aligned} \quad (4)$$

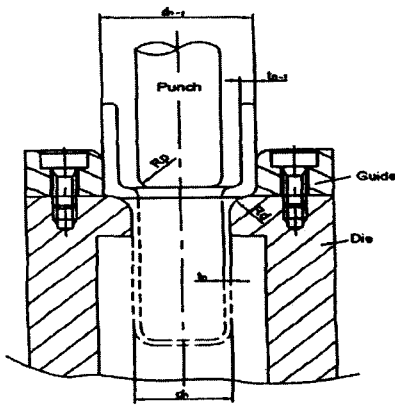


Fig. 4 Process parameters of redrawing combined with ironing

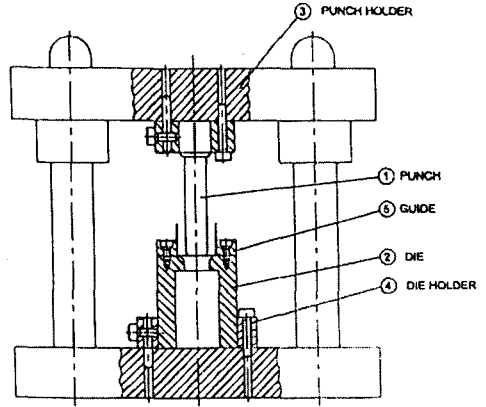


Fig. 6 Die for the combined process

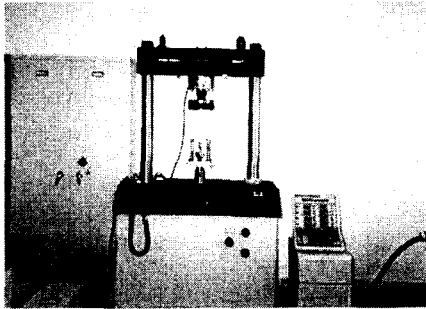
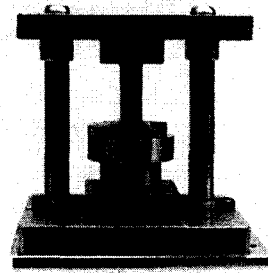
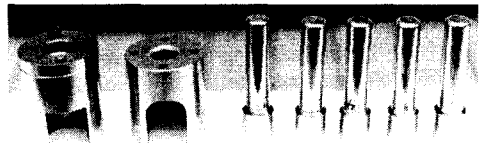


Fig. 5 Experimental equipment for redrawing with ironing



(a) First drawing die



(b) Dies and punches

Fig. 7 Drawing dies and punches

3. 실험

3.1 실험장치 및 방법

본 실험은 만능재료시험기(모델 : INSTRON 8801)에 실험용 금형을 장착하여 실시하였으며 Fig. 5는 실험장치의 구성을 나타낸다. Fig. 6은 실험 금형으로 펀치, 다이, 펀치홀더, 가이드로 구성되어 있으며 Fig. 7은 실험에서 교환하며 사용된 다이와 펀치를 보인다.

다이와 펀치 재료는 STD11을 사용하였고 열처리 경도(HRC)는 60이다.

3.2 실험방법

실험용 블랭크 재료는 두께 0.4mm 황동판을 사용하였고 재료의 특성은 Table 2와 같다.

1차 드로잉 실험에서 블랭크 지름은 23~31mm, 드로잉 펀치 지름은 15mm로 하고 드로잉비를 변화시키며 드로잉을 실시하였다. 이 때 블랭크 홀더력 때문에 드로잉힘이 영향을 받지 않도록 하기 위하여, 블랭크 홀더에 힘을 가하지 않는

Table 2 Material properties of brass

Material	Thickness (mm)	Hardness (HV)	Erichsen Value	Tensile Strength (kgf/mm ²)	Elongation (%)	Coefficient of Work Hardening
C2680R-O	0.4	81.9	12. 3	33.6	54	0.55

Table 3 Drawing ratio and drawing forces

Blank Diameter (mm)	Die Inner Diameter (mm)	Punch Diameter (mm)	Drawing Ratio	Drawing Forces (kgf)	Calibration Coefficient (N)
23	15.80	15.0	1.53	273.7	0.54
25	15.80	15.0	1.66	371.2	0.73
27	15.80	15.0	1.80	522.7	1.03
30	15.80	15.0	2.0	633.4	1.25
31	15.80	15.0	2.10	700	failure

방법으로 고정형 블랭크 홀더를 부착한 드로잉 금형을 사용하였다.

1차 드로잉된 제품을 사용하여 리드로잉과 아이어닝을 동시에 수행한 복합공정에서 드로잉률 0.8, 아이어닝률 0~40% 범위에서 펀치지름 d를 12.0~12.4mm로 변화시키며 실험하였다.

실험용 금형은 다이입구의 모서리 반경 Rd는 3 mm, 펀치 선단 모서리 반경 RP는 2 mm로 하고, 다이 내면과 펀치 외면에 그리스 윤활을 하고 드로잉 속도는 4 mm/sec로 실시하였다.

3.2.1 드로잉비와 드로잉힘

Table 3은 드로잉비와 드로잉힘의 실험값을 보인 것이다. 최대 드로잉비는 황동판의 인장강도 33.6 kgf/mm²이 작용할 때이므로 식(4)에서 보정

계수를 고려하지 않은 이론상의 최대드로잉힘은 506kg 임을 계산할 수 있다. 그리고 실험을 통하여 구한 드로잉비에 따른 드로잉힘의 실험값과 이론상의 최대드로잉힘과 비교하면 드로잉 보정 계수 N을 알 수 있다.

Fig. 8은 블랭크지름 31mm인 황동판에 대해서 펀치 하강량과 드로잉힘 관계를 드로잉율에 따라 보인 것이다. Fig. 9는 드로잉률과 드로잉 힘, 보정계수 관계를 나타낸다. 실험결과에서 재료가 파단되지 않고 드로잉 할 수 있는 한계 드로잉비는 2.0 정도임을 보여준다.

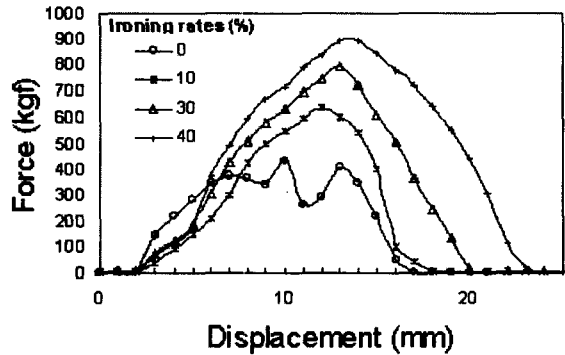


Fig. 8 Force versus displacement with respect to blank diameters

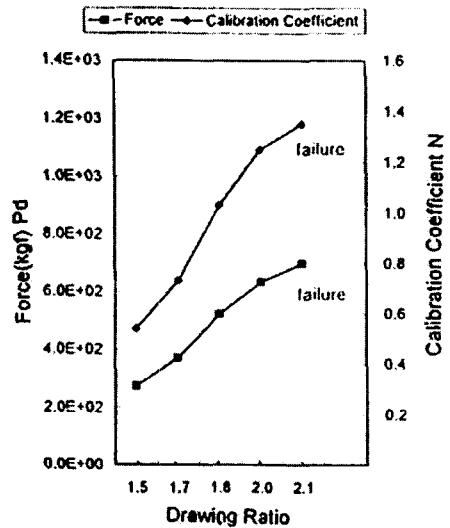


Fig. 9 Force and calibration coefficient versus drawing ratio

3.2.2 리드로잉과 아이어닝의 복합공정

리드로잉과 아이어닝을 동시에 복합 가공하는 데 필요한 힘을 실험을 통해 고찰하였다. Table 4는 Fig. 6 금형을 사용하여 리드로잉률 0.8, 아이어닝률 0~40%범위에서 아이어닝과 리드로잉을 동시에 가공한 힘의 4회 평균 실험값과 식 (4)에 의한 계산값($\alpha=1$)을 나타낸다. 여기서 아이어닝률 10%이상에서 실험값이 계산값보다 1.1~1.26배 만큼 높은 것을 알 수 있다. 이것은 리드로잉힘과 아이어닝힘 각각을 단순히 합한 것에 비해 리드로잉과 아이어닝이 동시에 이루어진 실험값이 높은 것은 재료의 변형저항이 그만큼 증대하기 때문으로 보이며 보정계수(α)는 1.1~1.3임을 알 수 있다.

따라서 보정계수를 재료별로 실험을 통해 알게 되면 드로잉과 아이어닝의 동시복합가공에 관한 힘을 예측할 수 있다. 또한 복합공정을 통해 디프로잉의 하는 경우 일반 드로잉에 비해 드로잉공정을 단축시킬 수 있다.

Fig.10은 리드로잉과 아이어닝을 복합공정을 통하여 수행한 실험에서 아이어닝률의 증가에 따라 복합공정에 필요한 힘이 증가하는 경향을 보인 것이며 Fig.11은 리드로잉과 아이어닝의 복합공정의 실험값과 두 공정을 각각 수행할 때의 힘의 합력인 계산값을 나타낸 것이다. 여기서 아이어닝률이 높으면 실험값과 계산값의 차이가 증가함을 보여준다.

Fig. 12는 좌측에서부터 블랭크, 1차드로잉에서 파단, 리드로잉, 복합공정에 의한 실험품을 배열한 것이다.

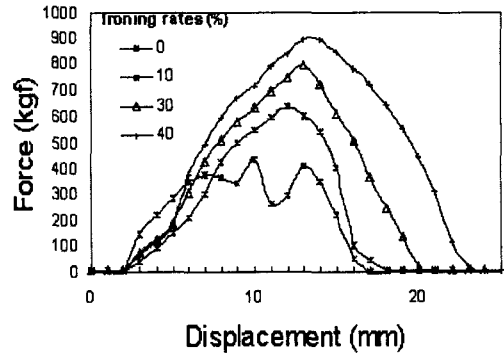


Fig. 10 Force versus displacement with respect to ironing rates

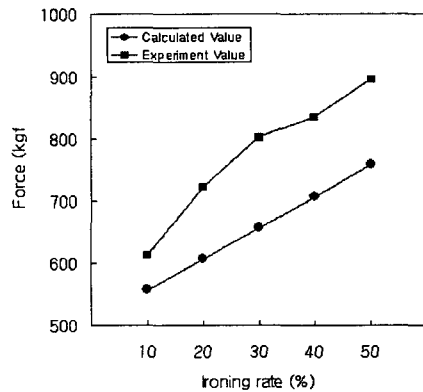


Fig. 11 Comparison of drawing force between theory and experiment

Table 4 Forces and calibration coefficients on the combined process of redrawing and ironing

Ironing Rates (%)	Die inner Diameter (mm)	Punch Diameter (mm)	Ironing-Redrawing Forces		Calibration Coefficient (α)	Drawing Depth (mm)
			Experiment	Calculation		
0	12.80	12.00	433.7	506	0.85	9.3
10	12.80	12.08	613.9	557	1.10	10.2
20	12.80	12.16	723.6	607.6	1.18	11.6
30	12.80	12.24	802.3	658.6	1.21	13.4
40	12.80	12.32	897.7	708.9	1.26	16.1



Fig. 12 Experimental products of drawing

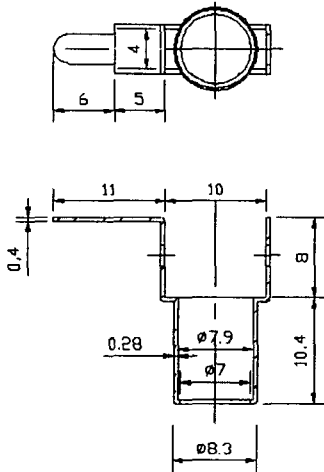


Fig. 13 Can terminal

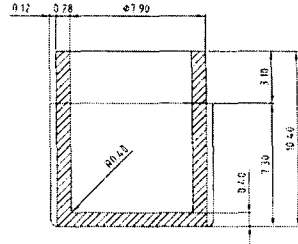
4. 아이어닝과 리드로잉 복합금형

상기와 같은 실험을 통해 아이어닝과 리드로잉의 복합공정의 특성을 이용하여 아래와 같은 제품을 생산하기 위한 금형을 개발하였다.

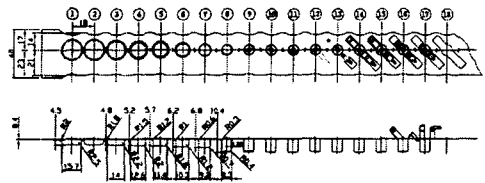
Fig. 13은 캔 터미널 제품을 나타낸 것으로 재료는 연질 황동판이며 제품의 특징은 피어싱, 드로잉, 아이어닝, 벤딩 공정이 요구되는 프로그레시브금형을 개발하였다.

스트립 레이아웃은 제품의 전개길이를 고려하여 재료 폭 40 mm 두께 0.4 mm 피치 18 mm로 설정하고 다음과 같이 설계하였다.

우선 ①스태이지(stage)에서 15.7 mm의 직경으로 높이 4.5 mm 낮은 드로잉하고 ⑦스태이지까지 리드로잉률 0.9로 드로잉 직경을 9.2 mm로 점차적으로 감소시키며 높이를 6.8 mm로 증가시키는 단단계 리드로잉을 한다. 그리고 ⑧스태이지는 아이어닝과 리드로잉의 복합공정을 적용하였으며



(a) Ironing with redrawing in ⑧ stage



(b) Strip layout

Fig. 14 Strip layout of can terminal for deep drawing

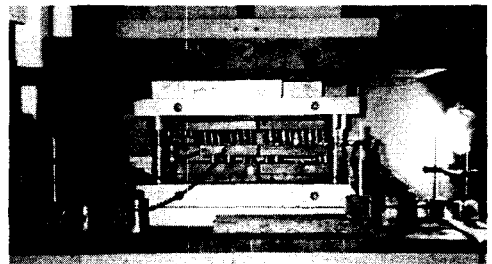


Fig. 15 Progressive die for deep drawing

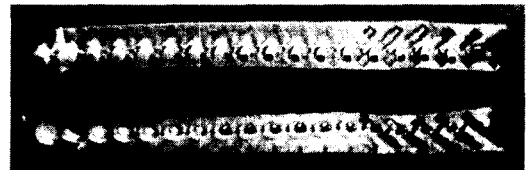


Fig. 16 Product of can terminal

제품의 핵심적인 부위를 아이어닝률 30%와 리드로잉률 0.9로 아이어닝과 리드로잉의 동시복합공을 활용하여 제품의 벽 두께 0.4 mm에서 0.28

mm로 균일한 벽 두께를 얻음과 동시에 제품높이는 6.8 mm에서 10.4 mm로 디프 드로잉하고 공정회수를 2회 감축할 수 있는 효과를 얻도록 하였다.

각 드로잉 스테이지에서 펀치선단부 모서리 반경과 다이입구 모서리 반경 R을 최소 2.5 mm, 2.0 mm로 시작하여 최종 0.4 mm와 0.3 mm까지 점차적으로 감소시키는 방법으로 드로잉 공정 중에 파손이 일어나지 않도록 하였다.

⑨스테이지에서 밀면 7 mm직경의 피어싱 가공, ⑩⑪스테이지는 피어싱, ⑫스테이지 아이들, ⑬스테이지 1차 벤딩, ⑭스테이지 2차 벤딩, ⑮스테이지에서 제품 절단 순서로 가공공정을 설정하였다.

⑧스테이지의 리드로잉과 아이어닝에 의한 다이나믹 대척으로 초경합금의 인서트 다이를 사용하고 재료 이송위치 결정은 드로잉 공정 중 재료의 변형으로 파일럿 사용 방식이 곤란하므로 이송 장치에 의한 이송 위치결정을 하도록 하였다.

Fig. 14는 캔 터미널 디프 드로잉 공정을 위한 스트립레이아웃 설계도를 나타낸다. 그리고 ⑧공정에서 아이어닝과 리드로잉의 복합공정에 의한 디프드로잉 상태를 나타낸다.

Fig. 15는 터미널을 시험생산하기 위한 아이어닝과 리드로잉을 복합시킨 금형이다.

Fig. 16은 터미널 제품생산을 위해 ①공정부터 ⑮공정까지 가공과정을 나타낸 스트립 레이아웃이다.

5. 결론

황동판재를 사용한 원통 드로잉실험에서 리드로잉과 아이어닝의 복합공정을 동시에 수행한 실험으로부터 성형특성을 고찰한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 리드로잉과 아이어닝 복합공정을 동시에 수행하는데 필요한 힘을 구하는 방법을 제시하였다.

(2) 복합공정에서 아이어닝률을 증가시키면 가공에 필요한 힘도 커지며, 아이어닝률 40%에서 단순 드로잉보다 약 1.7배의 높은 드로잉 깊이를 얻었다.

(3) 1차 드로잉에서 드로잉비에 따른 드로잉힘과 드로잉 보정계수 관계를 확인하였으며, 한계 드로잉비는 2.0이다.

(4) 복합공정의 특성을 적용하여 연속 리드로잉에서 공정회수를 2회 감축한 터미널 금형을 개발하였다.

참고문헌

- (1) Research Society for Precision Press Auto-Die, 1990, Press Die Lecture, Kijeon Yeonkusa, pp. 63-69.
- (2) Cor, L., 1981, "Two-piece Can Manufacturing : Blanking and Cup Drawing." SME's Modern Can Manufacturing Clinic, Society of Manufacturing Engineers, pp. 148-159.
- (3) Yoshida, K. and Yamakuchi, M., 1986, Die Design Standard Manual, New Technology Development Center, pp. 92-95.
- (4) Matsya, S., 1979, Press Die Design Method, IPC, p. 22.
- (5) ASM International Handbook Committee, 1974, Metal Handbook Volume 14 - Forming and Forging, ASM International, p. 507.
- (6) Hutoida, T., 1993, Press Processing Technology Manual, Kijeon Yeonkusa, p. 91.
- (7) Yoo, S., 1979, ASTM Die Design Handbook (Translation), Seong An Dang, pp. 412-416.
- (8) Press Processing Data Book Editing Committee, 1982, Press Processing Data Book, Nikan Engineering Newspaper Co., p. 274.