

원통형 용기의 다단계 디프드로잉에 대한 다이 곡률반경 및 틈새의 영향

김 두 환*

(1998년 12월 16일 접수)

Influence of Die Shoulder Radius and Punch to Die Clearance for Multistage Deep Drawing of Complex Cylindrical Shell

Doo Hwan Kim

Abstract

This paper reviews the rules for optimizing die design and the process variables such as die shoulder radius and punch to die clearance, which are important factors in drawing the sheet metal without failures during deep drawing. To find the optimum conditions for improving deep drawability, a series of the experiments are performed, and the wall thinning and thickening variations are investigated in each process of deep drawing for a complex cylindrical shell. From the results of this proposed experiment, the optimum values of process variables are examined and discussed, and the usefulness of the present suggestion is shown.

Key Words : Limiting Drawing Rate, Die Shoulder Radius, Punch to Die Clearance

1. 서 론

디프드로잉 가공은 판재성형 중에서 가장 고 난이도의 가공으로 이 분야에 대한 기술발전과 많은 실험적 연구도 꾸준히 이루어져 왔다. 그러나 대부분 기초이론을 중심으로 한 유한요소해석이 주류를 이루고 있으며, 아직도 이론과 실제사이에 다소 거리가 있는 것으로 판단된다. 또한 많은 부분이 베일 속에 가려져 있는 분야로 좀 더 발전적인 연구가 필요하다. 이러한 디프드로잉 가공은 소성역학 특성상 복잡한 변형경로를 나타내는 가공공법이다. 특히, 다이 곡률반경부(die shoulder radius)에서 인장, 압축과

아울러 굽힘(bending) 및 펴짐(straightening) 등의 복잡한 성형기구⁽¹⁾로 말미암아 예측할 수 없는 결합들이 발생된다. 따라서 디프드로잉 가공에 큰 영향을 미치는 공정 변수(process variables) 가운데서 특히, 다이 곡률반경과 펀치-다이 틈새에 대해 연구가 필요하다.

다이 곡률반경에 관한 연구는 지금까지 활발히 진행되고 있다. Kaczmarek,⁽²⁾ Oehler와 Kaiser⁽³⁾가 간단한 실험식을 수립하였고, Koelzer⁽⁴⁾는 Oehler와 Kaiser의 실험식에 변수의 영향을 다르게 정의하였다. 또한 Romanowki⁽⁵⁾는 상대두께비(relative sheet thickness, t/D)를 고려해서 실용적인 값을 구하였으며, Sellin⁽⁶⁾은 판 두께에 대

* 만도기계(주) 생산기술원

한 비율로 다이 곡률반경을 결정하였다.

펀치-다이 틈새(clearance)에 관한 연구는 Heinrich L. Hilert가 재료별로 구분하여 펀치-다이 틈새를 나타내었고, Oehler와 Kaiser⁽³⁾는 Guth 등의 실험을 기초로 하여 간단한 실험식을 수립하였다. 반면에 Siebel은 Oehler의 실험식에 기계적 특성을 가미하여 틈새를 결정하였다.⁽⁷⁾

본 연구에서는 다단계 디프드로잉으로 성형 되는 하나의 제품을 선정하여 디프드로잉 실험을 실시하였다. 실험을 통하여 최적의 성형결과를 얻을 수 있는 다이 곡률반경과 펀치-다이 틈새를 결정하고 이들을 기존의 연구 결과들과 비교하였다. 이러한 비교를 통하여 기존 연구 결과들의 타당성과 유용성을 검증하는 것을 본 연구의 목표로 하였다.

2. 디프드로잉 실험

Fig.1(a)는 본 실험적 연구대상의 디프드로잉에 대한 기하적 형상을 나타낸 것이다. 이 제품은 측벽두께의 감소를 최소화하여 내경 정밀도를 높게 유지해야 한다. 본 연

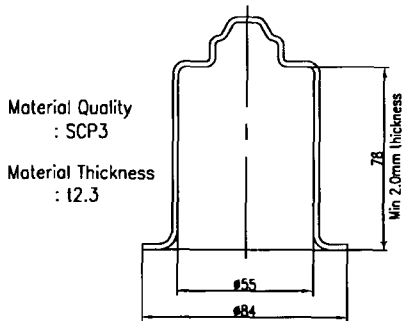


Fig. 1 (a) Geometry of housing as a final shape

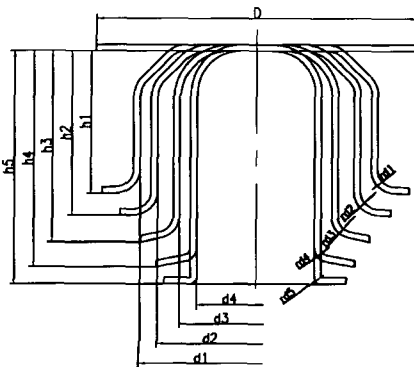


Fig. 1 (b) Geometry of multi-stage deep drawing process for the present method

구에서는 제품의 몸통에 대한 성형공정을 4단계의 디프드로잉 공법으로 Fig.1(b)와 같이 실험을 실시하고자 한다.

2.1 실험

본 연구에서 다이 곡률반경 및 펀치-다이틈새에 최적 값을 실험을 통해 검증하고 성형성을 고찰하였다. 실험재료는 두께 2.3 mm, 블랭크 직경 167 mm의 SCP3 재료를 디프드로잉 소재로 사용하였다. 실험용 장비는 500톤 프레스이며 콧손과 취출장치(knockout)가 갖추어져 있는 기계식 프레스이다. 디프드로잉의 성형속도는 20s.p.m에서 실험하였다.

실험용 형 구조⁽¹⁰⁾는 슬리브 링(sleeve-type)이 달린 전형적인 원통형 디프드로잉 다이구조이다. 주요 부분의 형 소재는 합금 공구강(STD11)이며, 경도는 HRC 60으로 열처리하여 실험하였다.

실험을 용이하게 하기 위해 각 공정의 다이 곡률반경과 펀치-다이 틈새를 실제의 실험값보다 적게 만들어 실험조건에 따라 약간씩 증가 시켜 가면서 최적조건을 결정하도록 하였다.

드로잉 오일은 강제 윤활방식으로 형과 형 사이의 접촉면에 고점도의 염소계 윤활제를 도포하여 실험하였다.

판 두께변형분포 조사는 소재 판의 표면에 5 mm 간격으로 눈금을 표시, 디프드로잉 후 각 공정별 측벽두께에 대한 변형분포를 포인트 마이크로미터 측정기로 조사하였다.

2.2 다단계 디프드로잉에 대한 공정변수의 영향

Fig.1의 제품에 대한 디프드로잉에 있어서 성형의 중요한 공정변수로서는 한계 드로잉율, 펀치 및 다이 곡률반경, 블랭크 홀딩력, 윤활, 성형속도 그리고 틈새 등을 들 수 있다. 본 실험연구에서는 그 중에서 최적 드로잉율(optimum drawing rate), 다이 곡률반경 그리고 펀치-다이 틈새의 공정변수에 관해 실험적 연구를 통해 알아보았다.

2.2.1 다단계 디프드로잉율

Romanowki 등^(2,5,8)이 발표한 한계 드로잉율(Limiting Drawing Rate)을 비롯하여 지금까지 많은 실용적 드로잉율이 제안되어왔다. 본 연구에서는 Kim⁽⁹⁾이 정립한 원통형 디프드로잉 공정설계법을 도입하여 적용하였으며, 이와 관련 이론과 실험식에 대해서 본 연구에서는 생략하였다.

본 실험적 연구의 제품에 대해 제안된 최적 공정 수, 다단계 디프드로잉율 그리고 총합적인 드로잉비를 Fig.2와

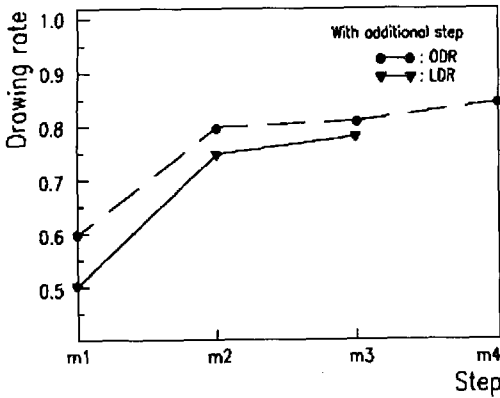


Fig. 2 Comparison of variations of optimum drawing rate and limiting drawing rate in each step of deep drawing

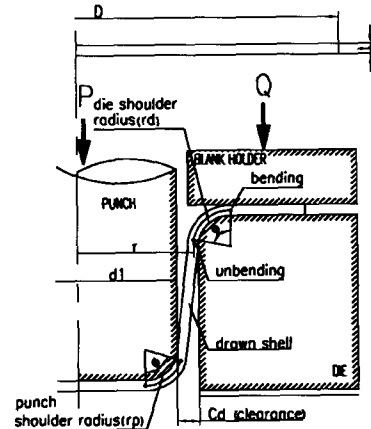


Fig. 4 First stage deep drawing of a cylindrical shell

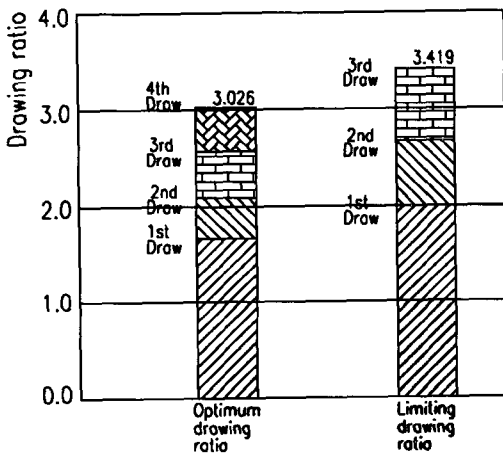


Fig. 3 Comparison of cumulative drawing ratio of optimum drawing ratio and limiting drawing ratio in each step of deep drawing

Fig.3에 각각 나타내었다.⁽⁹⁾ Fig.2에서 보는 바와 같이 한 계 드로잉 보다 최적 드로잉에서는 1공정을 추가하여 안전하고 균형 있는 가공이 되도록 드로잉을 재분배를 제한하였다.

2.2.2 다이 곡률반경(die shoulder radius)

다이 곡률반경부에서의 변형거동을 살펴보면 Fig.4에서 보는 바와 같이 소재가 유입될 때, 블랭크 홀더와 다이 면 사이에서 주름이 발생되지 않도록 소재를 적절한 압력으로 눌러준다. 상형의 편치가 점차 하강하면서 다이 속으

로 들어가는 순간 소재는 굽힘과 같이 편치와 다이 곡률반경부 주위를 감싸면서 굽힘과 퍼짐이 이루어지면서 측벽이 성형 된다. 이 때 복잡한 소성변형경로로 인해 유입되는 소재가 장애를 받으면서 판 두께변형, 편치 곡률반경부의 파단 그리고 제품 치수정도 등에 다이 곡률반경부가 큰 영향을 미친다. 그러므로 본 실험에서는 다음과 같이 다이 곡률반경을 결정하여 실험을 실시하였다.

박판 디프드로잉의 초기 드로잉 곡률반경(r_{d1})에 관한 일반적인 설계원칙은 소재두께에 대한 비율로 표현되고 있다. 본 실험에서의 초기 다이 곡률 반경의 형상은 소재 유입이 유리한 R 형상(radial type)으로 제안하였다. 이와 관련 형상과 값의 범위는 편치하중(punch force)과 한계 드로잉율이 서로 밀접한 관계가 있기 때문에 관련 변수를 감안하여 결정하였다. 대체로 1회에 성형 되는 제품은 한계 드로잉 조건으로 해도 가능하다. 그러나 Kim⁽¹⁰⁻¹¹⁾이 발표한 다단계 디프드로잉 가공에서 제안한 바와 같이 가공횟수마다 가공경화 등의 영향을 받아 드로잉성이 떨어진다. 그렇기 때문에 드로잉율을 충분히 고려하지 않으면 양산시 생산성과 제품정도 등에 상당한 영향을 미친다. 본 연구의 공정설계는 Fig.2에서 보여주는 바와 같이 무리한 성형이 되지 않도록 1공정을 추가 시키는 공정 설정 방법을 제안하였다. 또한 다이 곡률반경이 편치에 걸리는 하중에도 큰 영향을 준다. 다이 곡률반경이 커짐에 따라 편치 하중이 점점 줄어들어 약35%정도 까지 감소시킬 수 있다. 그러나 다이 곡률반경이 소재두께의 10배 이상이 될 경우, 더 이상 하중감소에 영향을 미치지 못하는 반면에 오히려 주름이 발생되어 파단을 일으키는 경향을 초래한

다.⁽¹²⁾ 이와 반대로 다이 곡률반경을 너무 작게 하면 펀치 곡률반경부에서 드로잉 하중이 국부적으로 많이 걸려 소재가 얇아지거나 파단 또는 천공되는 현상도 발생할 가능성이 높다. 그러므로 소재가 드로잉 될 때, 플랜지 부에서 원주방향으로 발생하려는 주름의 저항력 보다 다이 곡률 반경부에서 일어나는 응력이 더 크게 작용되도록 해야 한다. 즉, 드로잉 하중이 적게 걸리도록 설계하는 것이 최적 드로잉 곡률반경이라고 할 수 있다. 실험된 초기 드로잉에 대한 다이 곡률반경의 적정 값은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{d1} = f[50 + (D - d_1)]\sqrt{t} \quad (1)$$

여기서 r_{d1} 은 초기 드로잉 반경, D 는 블랭크 직경, d_1 은 1차 드로잉 직경이며, t 는 소재 두께이다. 위 식에서 계수

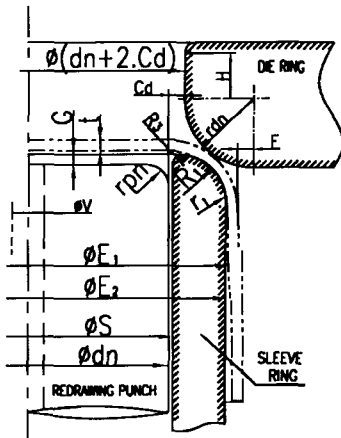


Fig. 5 (a) Geometry of R-type redraw die

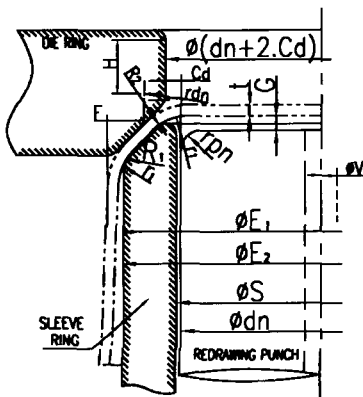


Fig. 5 (b) Geometry of angular type redraw die

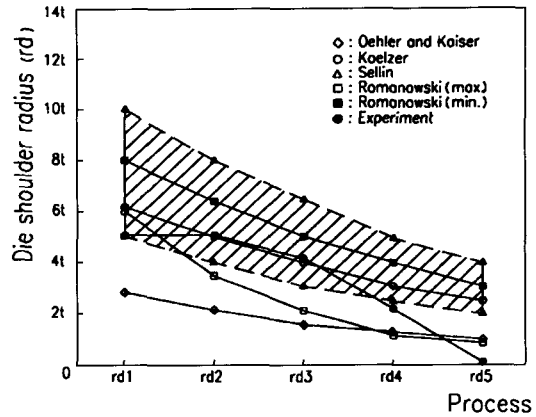


Fig. 6 Relation of material thickness (t) and die shoulder radius (r_d) in each process of deep drawing for complex cylindrical shell

f 를 0.06~0.07 범위 내에서 정하였다. 이식은 Oehler와 Kaiser⁽³⁾가 정립한 실험식에서 f 값을 2배로 적용하여 본 연구의 실험식으로 제안하여 비교, 검증하였다.

다단계를 거치는 디프드로잉의 재드로잉 다이 곡률반경 $r_{d2} \sim r_{dn}$ 의 형상과 값에 대해 많은 연구결과와 실험식이 있다. 본 연구에서는 기본형상⁽⁷⁾에 대해 Fig.5와 같이 나타내었으며, 각 형상(angular type) 보다는 형 제작을 고려하여 R 형상(radial type)을 제안하여 실험하였다. 재드로잉에 관한 각 공정별 다이 곡률반경은 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$r_{d2} \sim r_{dn} = 0.8(r_{d1} \sim r_{dn-1}) \quad (2)$$

여기서 $r_{d2} \sim r_{dn}$ 은 2공정부터 n 공정까지의 다이 반경이다. 위 식에서 계수 0.8은 일률적으로 적용하기는 다소 무리가 있으며, 제품 내경, 플랜지 면의 상태 그리고 공정수에 따라 0.4 ~ 0.6 범위까지 적용하는 것이 오히려 바람직한 것으로 보인다.

본 연구에서는 실험을 통하여 앞에서 언급한 기존 실험식과 제안된 최적 다이 곡률반경에 관련된 실험값을 비교하여 Fig.6과 같이 나타내었다.

2.2.3 펀치-다이 틈새(punch to die clearance)

펀치-다이 틈새는 큰 저항을 받지 않고 다이 내로 원활히 소재가 유입(drawing)되도록 적절한 틈새를 주는 것이 주된 목적이다.

드로잉 가공에서 소재의 플랜지면에 꺾임적으로 발생하는 원주방향의 압축응력과 마찰, 굽힘과 퍼짐의 연속적인 변형이 일어난다. 이 때 펀치 곡률 반경부와 측벽 연결부에서는 얇아짐(thinning)이, 플랜지부와 측벽 연결부에서는 두꺼워짐(thickening) 현상이 반드시 발생한다. 또한 최초의 소재 물성치와 판 두께도 반드시 산포가 생기기 때문에 디프드로잉 가공에 심각한 영향을 미칠 수 있다. 이러한 요인들로 말미암아 용기바닥과 측벽 연결부인 펀치 곡률반경부위에서 파단 또는 천공도 종종 발생된다. 이 밖에 다른 문제점은 두꺼워진 플랜지 측벽부에서 심하게 아이어닝(ironing) 되어 소착(cold welding) 현상이 발생된다. 그래서 소재두께 보다 크게 여유를 주어 가공해야 함을 알 수 있다.

이미 발표된 연구결과와 실험적 틈새는 소재두께에 대해 15~20% 정도 여유(allowance: δ)를 주어 가공한다면, 드로잉 하중이 최소가 되며 아이어닝 현상도 없앨 수 있다고 보고되어있지만,⁽¹³⁾ 최종 제품정도에 따라 단단계 디프드로잉의 최적 펀치-다이 틈새를 결정해야 한다. 또한 경우에 따라 소재두께 이하 또는 30% 이상 여유를 주어야 할 때도 빈번히 요구된다. 그러나 너무 큰 틈새를 주면 주름(pucker)이 발생할 가능성이 높다. 또 다른 고찰은 플랜지 유무와 한계 드로잉을 그리고 소재의 인장강도에 따라 틈새 적용조건이 크게 달라질 수 있음을 고려해야 한다. 다음 식(3)~(5)는 초기 드로잉의 틈새 적용에 간단히 이용할 수 있는 실험식들이다.^(3,14,16)

$$t_{\max} = t_0 \cdot 4\sqrt{D/d} \quad (3)$$

$$t_{\max} = t_0 \cdot \sqrt{D/d} \quad (4)$$

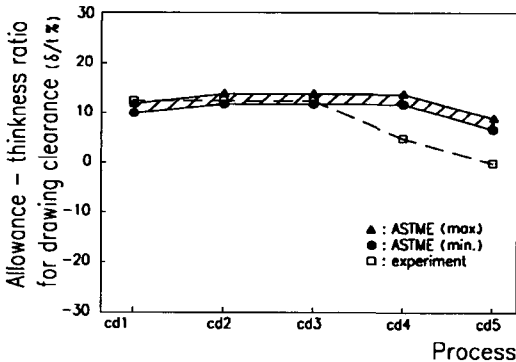


Fig. 7 Variations of allowance for punch to die clearance in each process of deep drawing for complex cylindrical shell

$$t_{\max} = t_0 + 0.07 \cdot \sqrt{10 \cdot t_0} \quad (5)$$

여기서 t_0 는 소재 두께이고, D 는 블랭크 치수, d 는 초기 드로잉 펀치 치수, t_{\max} 는 드로잉 후 두께 변형 치수이다. 위 식에서 보는 바와 같이 한계 드로잉비가 클수록 틈새를 크게 주는 것이 타당하며, 식(4)를 고찰해볼 때, 한계 드로잉비가 크고 플랜지가 없는 가공에 적합한 실험식이라고 할 수 있다.

Fig.7은 기존 실험값과 본 연구에서 제안된 틈새를 비교하여 나타낸 것이다.

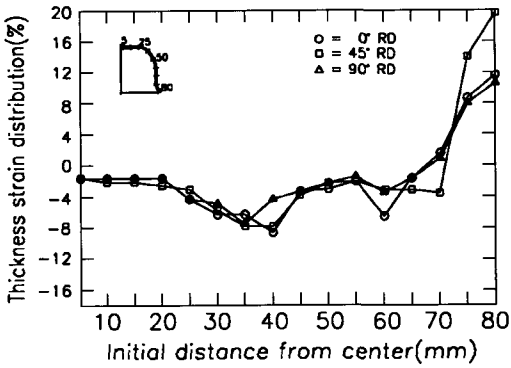
3. 실험 결과 및 고찰

실험 결과를 고찰해 본 결과, 다이 곡률반경과 펀치-다이 틈새가 디프드로잉의 성공여부에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있었다.

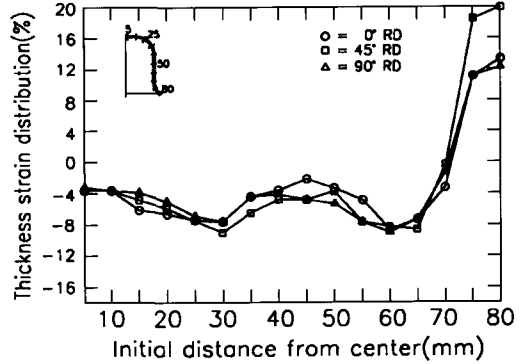
디프드로잉 공정에서 소재가 원주방향으로 압축응력과 다이 곡률반경에서 굽힘과 퍼짐의 극심한 재료변형 때문에 다이 곡률반경이 작을수록 측벽으로 유입되는 소재의 두께가 크게 감소하였고 플랜지만 상당히 두꺼워지는 현상을 Fig.8에서 보는 바와 같이 알 수 있었다. 그러나 대체로 측벽두께는 우수한 두께변형분포를 보여주고 있다.

2차 드로잉 이후 단단계 재 드로잉에 대한 다이 곡률반경은 R형상보다 Tractrix 형상⁽¹⁵⁾이 한계 드로잉성을 크게 향상시킬 수 있는 좋은 형상이라고 볼 수 있으나, 형제작의 난이도와 최적 형상 추구에 실험 횟수가 늘어나 오히려 원가상승을 초래하기 때문에 총원가 측면을 고려하여 신중히 선택해야 함을 알 수 있었다. 또한 다이 곡률반경을 크게 할수록 한계 드로잉성이 크게 향상되지만, 많은 공정을 거쳐 R을 교정해야 하므로 프레스 내 최적 공정 수와의 관계를 고려해서 적정 곡률반경을 결정해야 한다. Fig.6에서 보는 바와 같이 r_{d5} 공정의 다이 곡률반경은 앞에서 언급한 식(2)를 일률적으로 적용할 수가 없으며 플랜지 부의 조건에 따라 결정해야 함을 알 수 있었다.

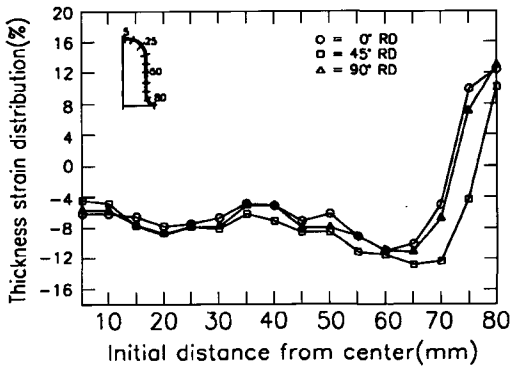
연속 드로잉 공정의 틈새의 여유는 Fig.7에서 보여주는 바와 같이 식(3), 식(5), ASTME⁽⁷⁾이 발표한 실험 값이 본 연구에서 제안한 것과 가장 잘 일치하며 유용한 것으로 판단된다. Fig.7를 공정별로 분석해보면, 1~3공정에서는 소재두께보다 10% 이상 여유를 주는 것이 타당하였다. 그러나 4공정에서는 오히려 상당히 적게 주어야 하고 5공정에서는 틈새를 거의 소재두께와 동일하게 한 것이 성형조건



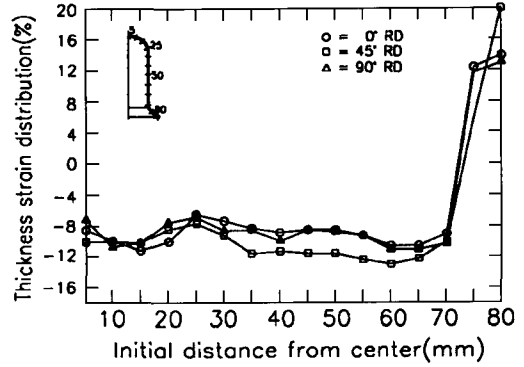
(a) First process



(b) Second process



(c) Third process



(d) 4th process

Fig. 8 Variations of thickness strain distribution in each process

이 우수하였다. 실험 결과를 고찰해 볼 때, Fig.8의 두께 변형분포에서 보여주는 바와 같이 플랜지가 넓고 다단계 성형을 하는 경우, 각 공정마다 연속적인 두께변형이 일어나 측벽두께는 최초의 소재두께보다 상당히 얇아지는 현상이 나타났다. 반면에 플랜지 바닥부만 현저하게 두꺼워져 펀치-다이 틈새를 크게 적용할 필요가 없음을 고찰하였다.

4. 결 론

본 연구에서는 연속 다단계 디프드로잉 가공에 있어서, 다이 곡률반경과 펀치-다이 틈새가 어떤 영향을 미치는가를 조사하기 위하여 실험용 형 제작 과 일련의 실험들을 실시하였다. 실험을 통하여 관련된 최적 공정변수들을 고찰하였고 실험된 각 공정별 두께변형률분포를 비교 조사

한 결과, 다음과 같은 결론을 이끌어 낼 수가 있었다.

(1) 다이 곡률반경부에서 굽힘과 퍼짐의 변형은 장력이 큰 만큼, 곡률반경이 작을수록 소재유입의 저항을 받아 두께변형에 큰 영향을 미치며, 이 때 변형된 소재는 플랜지에 남아 두께가 지나치게 두꺼워진다. 경우에 따라서는 펀치 곡률반경 부위에서 파단 또는 천공되는 현상도 나타났다.

(2) 한계 드로잉성과 펀치하중은 다이 곡률반경의 크기와 밀접한 상관관계가 있음을 알 수 있었다. 따라서 다이 곡률반경을 증가 시키면 따라 성형성이 향상되고 성형하중은 감소되었다. 그러나 어느 일정범위(소재 두께의 10 배)를 초과하면 하중감소에 거의 영향을 끼치지 못하는 것으로 조사되었다.

(3) 다이 곡률반경이 커질수록 드로잉의 통과 저항이 작아지지만, 지나치게 증가 시키면 오히려 플랜지에 주름이 생겨 소재유입의 장애를 일으키는 결함이 일어난다.

(4) 다이 곡률반경이 작을 때는 제품이 편치에, 클 때는 다이 속에 제품이 끼이며, 지나치게 작은 다이 곡률반경과 틈새는 다이 내측과 편치의측에 심한 소착현상을 일으킨다.

(5) 편치-다이 틈새는 소재두께에 대해 10~15% 여유를 주는 것이 바람직하며, 최종 제품의 정도 수준에 따라 소재두께 이하로 아이어닝 하는 것도 바람직하다.

(6) 한계 드로잉율이 낮을 때에는 소재유입이 원활치 않기 때문에 최적 드로잉을 때보다 플랜지와 측벽 연결부에서 두께가 두꺼워진다. 그러므로 틈새와 다이 곡률반경을 크게 하는 것이 성형에 유리하다.

(7) 가공소재의 특성 및 두께 산포가 크기 때문에 산포를 고려하여 틈새를 결정해야 한다.

(8) 성형 된 제품의 두께변형률분포는 각 공정 마다 약간씩 감소현상을 나타내며, 편치 곡률반경에서 감소된 부분은 연속 성형공정에서 두께변형이 크게 나타남을 알 수 있었다. 그러나 대체로 우수한 변형분포를 나타내고 있다.

참고 문헌

- (1) Donald F. Eary and Edward A. Reed, 1974, "Techniques of Pressworking Sheet Metal", prentice-Hall Inc., pp.100 ~ 110.
- (2) 太田 哲, '1990, "프레스 가공 및 型技術, 日刊工業新聞社", pp. 69~72, pp. 79~83.
- (3) Oehler, G., and Kaiser, F.,1973, "Blanking, and Punching, and Drawing Tools", 6th ed., Berlin Heiderlberg / New York, Springer.
- (4) Koelzer, H., 1949, "The Behavior of Deep Drawing Sheets as a Function of the Testing Method", Dr-thesis, technische Hochschule, Braunschweig.
- (5) Romanowski, E., 1959, "Handbook of Blanking Technology (in Germany)", Berlin, VER Verlag Technik.
- (6) Sellin, W., 1931, "Handbook of drawing Technology", Belin, Springer.
- (7) 井本, 1988, "實用プレス型技術.加工技術データ集", 井本技術士事務所, pp. 264~266, pp. 277~278.
- (8) 日刊工業新聞社 編集委員會 編, 1990, "新プレス加工データブック", pp. 233.
- (9) 김두환, 1998, "원통형 용기의 다단계 디프 드로잉 공정설계에 관한 사례 연구", 한국소성가공학회 '98춘계학술대회 논문집, pp. 160~167.
- (10) 김두환, 1998, "원통형 디프 드로잉 용기의 벽 두께 감소 최소화에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제7권, 제4호, pp. 393~399.
- (11) 김두환, 1998, "스테인리스 강 STS305의 디프 드로잉 가공에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제7권, 제5호, pp. 439~444.
- (12) EDWARD M. MIELNIK, 1991, "Metalworking Science and Engineering", McGraw-Hill Book Company, pp 792~793.
- (13) ASM INTERNATIONAL, 1988, "Metals Handbook", Ninth Edition, Volume 14, Forming and Forging, pp. 581.
- (14) T. KUWABARA, 1997, "深絞り加工", 塑性と加工, 第38巻, 第436號, pp. 52~53.
- (15) May, O., 1961, "The Tractrix Curve, a Die with Helical Shoulder and the Ironing in Several Dies", Werkstattstechnik, 51, pp. 476~479.
- (16) Aida Engineering, Ltd, 1992, "AIDA Press Hand-book", pp. 77~78.