

원형컵 드로잉 공정에 미치는 영향인자에 관한 실험적 연구

정동원* · 양경부** · 김광희***

(1999년 1월13 일 접수)

Experimental Study on the Parameters Affect Cylindrical Cup Drawing Process

D.W. Jung, K.B. Yang and K.H. Kim

Abstract

Sheet metal forming process is a non-linearity problem which is affected by various process variables, such as geometric shape of punch and die, frictional characteristic, etc.. Therefore, the knowledge of the influence of the process variables is needed in the design of sheet metal working processes. In this paper, cylindrical cup drawing tests for blank holding force, punch speed and lubrication between sheet material and tool were carried out to investigate the influence upon sheet formability. Experimental results were discussed about the defects on the deformation behaviors during the forming process.

Key Words : Cylindrical cup, Deep drawing, Blank holding force, Punch speed, Lubrication

1. 서 론

박판금속을 소재로 하여 이어 붙임 없이 소성변형에 의하여 필요한 형상으로 성형하는 과정을 박판성형 혹은 프레스(press) 가공이라 부른다. 이 가공법은 단조, 압출, 압연등과 같은 체적성형법과 함께 금속 소성가공법의 하나의 큰 줄기를 이루고 있다. 이러한 박판 금속성형법(sheet metal forming)은 성형품의 강도에 비해 경량이며 낮은 제조 원가와 양호한 표면 가공 및 높은 정밀도등 생산성이 높으며 부품으로서의 교환성이 뛰어나고 직접 완제품으로 쓸 수 있는 등의 장점이 있어서 자동차의 차체, 비행기 기체부품, 가전제품의 케이스류, 주방용구, 맥주캔등에 널리 적용되고 있다.⁽¹⁾

단순한 판재를 이용하여 원하는 형상의 제품을 얻기 위해서는 프레스와 같은 소성 기계를 비롯하여 다이(die), 펀치(punch) 그리고 블랭크 홀더(blank holder)장치등이 필요하다. 박판성형 공정은 굽힘(bending), 인장성형(stretching), 딥 드로잉(deep drawing), 전단(shearing) 또는 이들의 조합으로 이루어져 있다. 박판 성형 가공은 재료의 물질적 특성, 다이의 기하학적 형상, 다이와 재료간의 마찰 특성등 여러가지 공정 변수들에 의하여 복합적인 영향을 받는 비선형 문제이기 때문에 이러한 공정 변수들을 파악하는 것은 효율적인 공정설계를 하는 데 필수적이다. 따라서 실제 제품에 많이 적용되고 있는 복잡한 형상을 가진 제품의 드로잉 공정을 이해하는데 있어서 기본이 되는 컵 드로잉시 공정인자에 대해서 파악하는 것이 필

* 제주대학교 기계공학과
** 제주대학교 대학원
*** 부경대학교 정밀기계공학과

요하며 컵 드로잉 공정에 대해서 많은 실험적 및 이론적 연구가 행하여져 왔다.⁽²⁻⁶⁾

딥 드로잉이란 다이 공(die cavity)위에 블랭크(blank)를 올려놓고 펀치를 내림으로써 성형하는 공정으로 이때 플랜지(flange)에서 발생하는 주름(wrinkling)을 방지하기 위하여 블랭크 홀더를 쓴다. 딥 드로잉 제품은 그 형상에 따라 축대칭형 컵, 4각통, 비축대칭품등으로 나누어지는데 가장 간단한 공정형태가 축대칭형 컵 드로잉이다. 컵 드로잉은 원판을 링(ring)형상의 다이 위에 올려놓고 링형상의 블랭크 홀더로 원주를 누르고 있는 상태에서 펀치를 내림으로써 컵을 만드는 공정이다.^(1,7)

본 연구에서는 축대칭형 원형컵 드로잉실험을 수행하여 시편의 한계드로잉비를 증가시키고 보다 나은 성형품을 얻기 위해서 변수가 되는 블랭크 홀딩력(blank holding force:이하 BHF라 약함)과 펀치 속도에 따른 성형에 미치는 영향을 관찰하였으며 공구와 피가공재 사이의 마찰에 영향을 주는 윤활조건에 관한 실험을 통해 성형시 발생할 수 있는 여러 결함에 대하여 고찰하였다.

2. 실험방법

박판성형시 공정에 영향을 미치는 인자중 BHF와 펀치 속도 그리고 윤활조건의 영향을 관찰하기 위해 50ton만능시험기를 이용하여 원형컵 드로잉실험을 수행하였다. 재료는 자동차 차체 성형용 압연강판으로 JIS규격인 SPEN을 사용하였고 강판의 두께는 0.8 mm이다.

컵 드로잉실험을 위한 시편은 프레스용 원형절단기를 이용하여 지름 120 mm의 원형시편을 제작하였으며 재료 표면에 지름 5 mm의 원형격자모양을 전기화학 에칭(electro-chemical etching)하였다. Fig. 1은 실험에 사

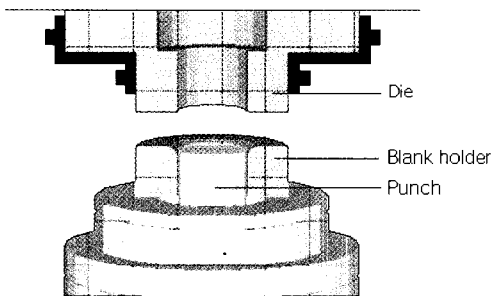


Fig. 1 Cross-sectional view of geometric description of the tooling for deep drawing

용된 만능시험기의 펀치와 다이형상의 단면을 나타내고 있는 것으로 펀치의 직경은 59.88 mm이며 곡률반경은 5 mm이고 다이의 내부직경은 61.78 mm이며 곡률반경은 5 mm이다. 드로잉비(drawing rate)는 다음과 같다.

$$DR = \frac{120}{59.88} \approx 0.2$$

2.1 BHF에 의한 영향 실험

드로잉 시에 플랜지에서 발생하는 주름을 예방하기 위해서 판면에 수직한 방향으로 가하는 힘을 블랭크 홀딩력이라 한다. 이 블랭크 홀딩력의 변화에 의한 박판성형시 영향을 관찰하기 위해 블랭크 홀더와 연결된 유압을 조절하면서 블랭크 홀딩력을 각각 10ton, 12ton, 14ton, 15ton으로 맞추어 펀치진행거리 10 mm간격마다 펀치하중과 변위 관계 그리고 두께변화를 측정하여 서로 비교하였다. 블랭크 홀딩력의 설정기준은 펀치가 최대 행정거리를 진행했을 때 파단이 전혀 일어나지 않은 영역에서부터 짧은 거리에서 파단이 일어나는 영역까지를 실험에 기초하여 설정하였으며, 드로잉시 과다 블랭크 홀딩력에 의한 파단후 펀치가 계속 진행하는 것을 막기 위해 시험기는 재료가 파단시 자동정지하도록 하였다. 펀치하중과 변위관계는 시험기에 연결된 컴퓨터에 자동 저장되도록 되어있으며 두께변화의 측정은 재료 성형후 단면을 절단하여 마이크로 미터(micrometer)를 이용하여 에칭된 원형격자를 따라 5 mm간격으로 측정하였다. 재료는 윤활되지 않은 상태이며 펀치속도는 1.65 mm/sec로 일정하게 유지하였다.

2.2 펀치속도에 의한 영향 실험

펀치가 재료에 접촉하는 순간의 속도, 즉 충격속도는 박판성형에서 중요한 역할을 한다.

펀치속도에 관한 실험은 펀치와 연결된 유압장치를 조절하면서 펀치 진행속도를 바꾸며 수행하였다. 속도 설정기준은 시험기에서 가장 낮은 속도와 가장 빠른 속도 그리고 BHF실험에 사용된 속도로 결정하였다. 수행된 펀치속도는 각각 0.04 mm/sec, 1.65 mm/sec 그리고 10.23 mm/sec이며 BHF는 12ton으로 유지하면서 속도에 의한 영향만을 관찰하였다. 재료는 무윤활 상태이다.

2.3 윤활에 의한 영향 실험

공구와 피가공물간의 마찰은 박판성형에서 고려해 주어야 할 중요한 인자로서 윤활에 대한 충분한 고찰이 필요하

다. 따라서 본 실험에서는 다이와 재료가 접촉하는 부위에 윤활을 하여 그 영향을 관찰하였다. 실험에서는 다이와 접촉이 이루어지는 재료상부에 베어링용 오일을 바르고 윤활을 하지 않은 재료와 같은 BHF와 펀치속도로 성형중 펀치하중과 변위가 변해가는 모습을 비교하였고 성형후 두께변화를 측정하여 그 차이를 비교하였다. 윤활에 의한 마찰력의 변화는 마찰계수의 측정이 난해하여 고려하지 못하였으며 윤활상태와 무윤활상태의 영향에 관해서만 실험을 수행하여 고찰하였다.

3. 실험결과및 고찰

3.1 블랭크 홀딩력(BHF)의 영향

Fig. 2는 BHF가 10, 12, 14, 15ton일때의 펀치진행거리가 30 mm진행했을 때의 펀치하중과 변위와의 관계를 보여주고 있다. Fig. 2에서 BHF가 15ton인경우 펀치진행거리 20 mm에 도달하기 전에 파단이 일어나고 있으며 10, 12, 14ton인경우는 30 mm에서도 파단이 일어나지 않고 계속 성형이 진행해 나갈 수 있다. 또한 BHF가 증가함에 따라 펀치하중이 조금씩 증가하는 경향이 있으나 전체적으로 비슷한 경향을 보이고 있어 본 연구에서 설정한 BHF10~14ton 범위에서는 BHF의 증가가 펀치력에는 거의 영향을 주지 않는 것으로 보인다.

Fig. 3와 Fig. 4는 BHF 10ton과 12ton일 때 펀치가 각각 30 mm와 40 mm 진행했을 때의 두께변형을 분포를 보여주고 있다. 전체적으로 펀치 곡률 부위에서 많은 변형이 발생하여 두께가 얇아짐을 알 수 있으며 다이 곡률 부위에서는 오히려 두께가 증가하고 있는데 이는 펀치가 진행함에 따라 재료가 유입되면서 다이곡률부위 쪽으로 재료가 모이고 있기 때문인 것으로 생각된다. Fig. 3와

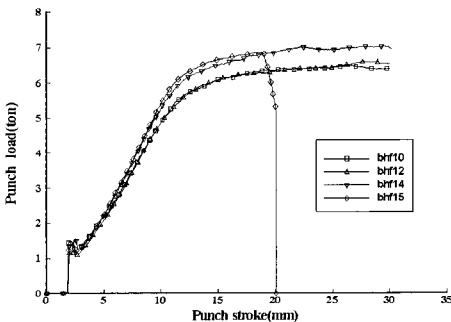


Fig. 2 Comparison of various BHF for punch load vs. punch stroke relation at the punch stroke 30 mm

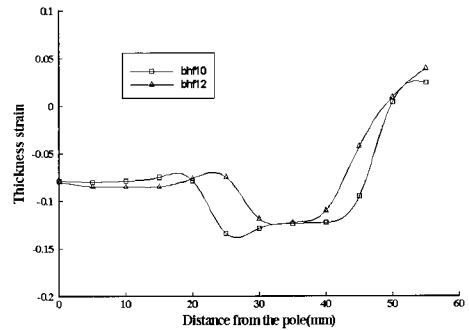


Fig. 3 Comparison of the thickness strain between the BHF 10ton and BHF 12ton at the punch stroke 30 mm

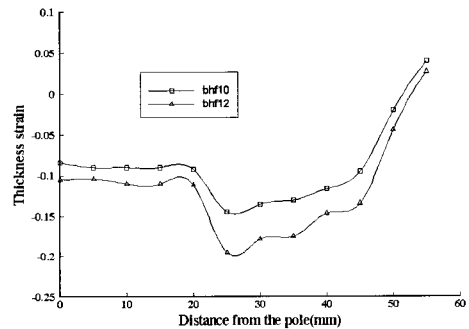


Fig. 4 Comparison of the thickness strain between the BHF 10ton and BHF 12ton at the punch stroke 40 mm

Fig. 4를 비교해 보면 펀치 진행거리가 길어지는 Fig. 4에서 BHF의 차이에 의한 두께변형의 정도가 많은 차이를 보여주고 있다. 또한 Fig. 4에서 BHF가 큰 12ton인 경우 국부적인 변형집중이 크게 발생하고 있음을 알 수 있다. 따라서 BHF는 성형중 파단과 재료의 두께 변화에 많은 영향을 미치고 있음을 알 수 있다. 또한 파단이 발생하지 않는 BHF영역에서도 높은 BHF의 설정은 보다 많은 두께 감소를 초래하여 제품 사용중 파단이 쉽게 발생할 수 있는 가능성이 있기 때문에 주름발생을 억제할 수 있는 최소 BHF의 설정이 필요함을 확인할 수 있다.

3.2 펀치 속도의 영향

Fig. 5는 BHF가 12ton인 경우 펀치속도가 각각 0.04, 1.65 그리고 10.23 mm/sec일때의 펀치하중과 변위관계를 나타낸다. Fig. 5에서 펀치속도가 증가할수록 펀치하중도 증가하고 있으며 펀치속도가 낮을수록 파단이 조기에 일어나고 있다. 또한 펀치 속도가 증가할수록 성형한계도

증가하고 있음을 알 수 있다. Fig. 5에서 각 속도마다 하중 입력 시작 변위가 다른 이유는 시험기로부터 하중값이 입력될 때 초기에 발생하는 불필요한 신호를 제거하기 위해 입력 지연시간(delay time)을 0.5초로 설정하였기 때문이다. 따라서 속도가 빠른 10.23 mm/sec 인 경우 약 6 mm 변위까지는 하중값이 나타나지 않고 있다. 속도영향에 관한 실험에서는 BHF 영향실험에서 펀치하중이 클수록 파단이 일찍 일어나는 경우와는 다른 현상을 보여주고 있는데 이는 변형률속도(strain rate: $\dot{\epsilon}$)가 펀치속도의 증가에 의해 아래의 식(1)에 의하여 커지게 되고 식(2)와 식(3)에 의하여 유효응력(effective stress: $\bar{\sigma}$)이 커지면서 펀치하중의 증가를 초래하지만 유효변형률(effective strain)도 증가함으로써 펀치속도가 큰 10.23 mm/sec인 경우 펀치하중이 증가하지만 성형한계도 같이 증가하는 것으로 생각된다.

$$\dot{\epsilon}_{ij} = \frac{1}{2} \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) \quad (1)$$

$$\dot{\bar{\epsilon}} = \frac{2}{3} \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij} \quad (2)$$

$$\bar{\sigma} = C(\dot{\bar{\epsilon}})^m \quad (3)$$

여기서, v_i 는 속도성분이며 $\dot{\bar{\epsilon}}$ 는 유효변형률속도(effective strain rate), C 는 변형률과 온도에 따라 변하는 재료상수이고 m 은 변형률속도 민감도 상수(coefficient of strain rate sensitivity)이다.^(1,8,9)

Fig. 6은 펀치속도 변화에 따른 변형률 모습을 비교한 것으로 전체적으로 비슷한 분포를 보여주고 있으나 펀치속도가 낮은 경우는 펀치 곡률부위에 국부적으로 변형이 집중되어 있어 조기파단을유발하는 원인이 된다고 생각된다.

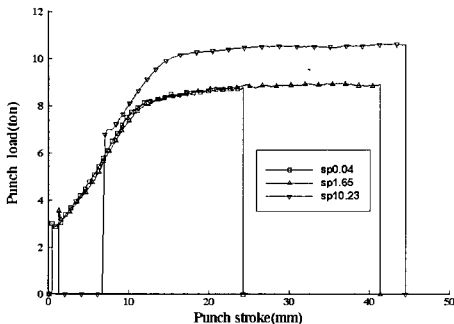


Fig. 5 Comparison of punch load-stroke curves for various punch speeds

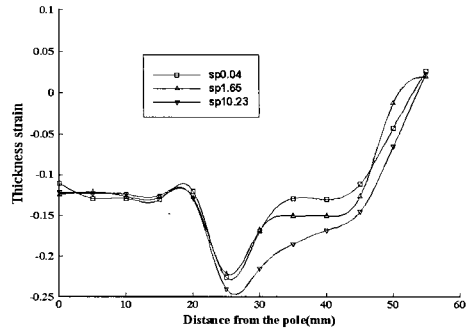


Fig. 6 Comparison of the thickness strain for various punch speeds at the punch stroke 20 mm

다. 본 연구에서는 시험기의 최고속도인 10 mm/sec 정도의 범위내에서 실험을 수행하였다. 이 범위에서는 펀치속도가 높아질수록 성형한계를 증가시키나 최적의 펀치속도 한계가 있으리라 판단된다.

3.3 윤활의 영향

Fig. 7은 BHF 12ton인 경우 윤활을 한 시편과 윤활을 하지 않은 시편의 펀치가 40 mm진행했을 때의 펀치하중과 변위관계를 보여주고 있다. 윤활을 하지 않은 재료가 윤활을 한 재료보다 펀치하중이 증가하고 있으며 이러한 펀치하중의 증가는 시편의 한계드로잉비를 감소시키고 피가공물의 파단을 쉽게 일으킬 수 있다. Fig. 8은 BHF가 14ton인 경우를 비교한 것으로 같은 BHF상에서도 윤활을 하지 않은 재료는 30 mm근처에서 파단이 일어났는데 비해 윤활을 한 재료는 한계 드로잉 수치까지 펀치를 진행하여도 파단이 일어나지 않고 있다.

Fig. 9는 윤활된 재료와 무윤활 재료의 두께 변형률을 비교한 것으로 BHF는 12ton인 경우이다. Fig. 9에서 무

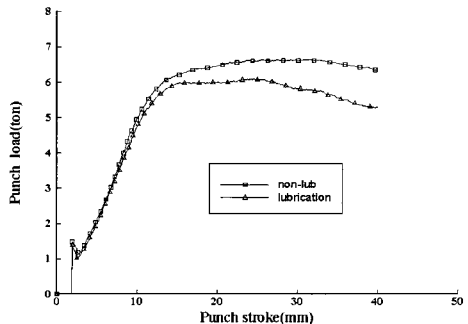


Fig. 7 Comparison of punch load between lubrication and non-lubrication at the BHF 12ton

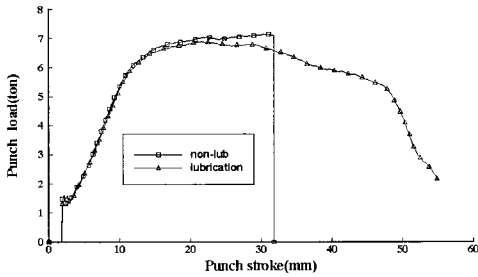


Fig. 8 Comparison of punch load between lubrication and non-lubrication at the BHF 14ton

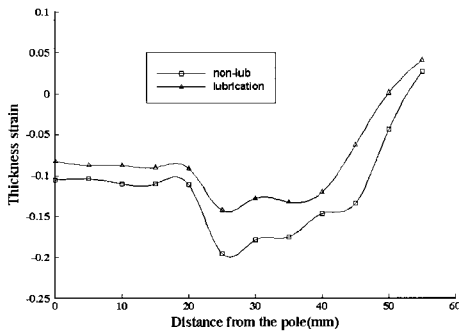


Fig. 9 Comparison of thickness strain between lubrication and non-lubrication at BHF 12ton

윤활 시편인 경우 굽힘 변형이 많이 발생하는 펀치 곡률부위에서 국부적인 변형이 집중되는 반면 윤활을 한 시편은 전체적으로 고른 두께 분포를 보여주고 있다.

또한 윤활을 한 재료는 전체적으로 무윤활 시편보다 낮은 두께변형을 보여주고 있어 윤활에 의한 마찰을 고려하는 것은 박판성형에 있어서 아주 중요하게 작용됨을 알 수 있다. 따라서 윤활에 의한 정확한 마찰력을 산정하는 것은 보다 나은 성형을 위한 변수를 확보하는 것이 될 것이다.

4. 결론

박판금속 성형시 공정에 영향을 미치는 여러 인자중 블랭크 홀딩력과 펀치속도 그리고 윤활의 영향에 대하여 원형컵 드로잉 실험을 통하여 각각의 경우에 대한 펀치하중과 변위관계 그리고 성형후 두께변형을 측정하였다. 이상의 실험과 고찰로부터 얻은 결론은 다음과 같다.

(1) 높은 블랭크 홀딩력은 한계 드로잉비를 낮추기 때문에 블랭크 홀딩력의 결정은 주름이 발생하지 않은 최소한의 블랭크 홀딩력으로 유지하면 된다.

(2) 펀치속도가 10 mm/sec내의 범위에서의 높은 펀치속도는 펀치 하중을 증가시키지만 한계 드로잉비가 높아지며 변형에 그다지 많은 영향을 미치지 않으며 낮은 펀치속도는 유효 변형률의 감소와 국부적인 변형집중으로 조기 파단이 발생한다.

(3) 성형재료에 윤활을 하여 마찰을 감소시킨 경우 윤활을 하지 않은 경우보다 펀치 하중이 감소하여 한계드로잉비를 월등히 증가시키면서 전체적인 두께변형도 고르게 분포시켜 박판성형시 중요한 역할을 담당한다. 따라서, 정확한 마찰계수의 측정으로 재료에 맞는 마찰력의 산정이 필요하다.

참고문헌

- (1) 전기찬, 1993, 박판금속의 성형, 반도출판사.
- (2) 김영석, 최원집, 1990, "자동차용 표면 처리 강판의 마찰 특성에 관한 연구", 대한기계학회 논문집, 제 14권, 제6호, pp. 1474~1486.
- (3) 배원병, 허병우, 김호윤, 한정영, 1998, "스테인리스 판재의 성형성 향상에 관한 연구", 한국소성가공학회지, 제7권, 제5호, pp. 445~449.
- (4) S. Thiruvarudchelvan and W.G. Lewis, 1990, "Deep drawing with blank holder force approximately proportional to the punch force", Trans, ASME, J. of Engineering for Industry, Vol.112, pp. 278~285.
- (5) M. Muraki and T. Nakamura, 1996, "Frictional behaviour of lubricants during deep drawing and ironing processes for zinc-coated steel sheets", Proc. Instn. Mech. Eng. Vol.210, pp. 189~197.
- (6) Y.M. Huang and J.W. Cheng, 1997, "Influence of lubricant on limitation of formability of cylindrical cup drawing", J.Mat. Pro. Tech. Vol.63, pp. 77~82.
- (7) K. Lange, 1985, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Inc.
- (8) 김동원, 1998, 소성학, 청문각.
- (9) Y.J. Kim and D.Y. Yang, 1985, "A formulation for rigid-plastic finite element method considering work-hardening effect", Int. J. Mech. Sci, Vol.27, No.7/8, pp. 487~495.