

반구형 극소 드로잉 제품의 두께분포 비교

이기성¹ · 정효기² · 김종봉³ · 김종호[#]

Thickness Distribution of Hemispherical Cup in Meso-Scale Deep Drawing Process

K. S. Lee, H. K. Jung, J. B. Kim, J. H. Kim

(Received December 27, 2010 / Revised January 20, 2011 / Accepted January 24, 2011)

Abstract

Meso-scale or micro-scale forming of sheet metal parts has been recently considered as one of the important forming technologies with growing demand on meso/micro products for electric or medical devices. Experimental investigation on the cylindrical meso-cup drawing with hemispherical punch is carried out to examine the limit drawing ratio and thickness distribution of drawn cups. The working parameters chosen in this study are blank diameter, die-corner radius and blankholding force. It is found from the experiments that the limit drawing ratio of 2.4 can be achieved in the case of hemispherical cup drawing and uniform thickness distribution in wider region can be obtained compared with the results of conventional cup drawing.

Key Words : Meso Scale Forming, Hemispherical Punch, Blankholding Force, Limit Drawing Ratio

1. 서 론

21세기는 첨단 산업 기술의 발전으로 반도체, 모바일 제품, 의료제품, 광전자 제품, 기계금속 등 산업 전반에서 제품의 소형화 및 정밀화, 고기능성을 요구한다. 특히 핵심 요소부품 중에 초미세 가공기술을 필요로 하는 부품개발 기술력은 상품의 경쟁력을 강화시킬 수 있다. 그러나 금속판재의 소성가공 분야는 제품의 크기 제약에 따른 기술적 어려움이 있어 많은 연구가 진행되지 않았지만 점차 고부가가치를 창출할 수 있는 초소형 모터, 초소형 센서, 초소형 채널, 초소형 기계부품 등에 대한 연구가 점차 관심을 갖게 되었다. 이런 추세에 맞춰 소성가공방법 중에 하나인 프레스금형(Press die)을 이용한 프레스 가공방법도 점차 발

전해왔다.

금속 박판의 디프드로잉(Deep-drawing)가공을 통해 생산되는 과거의 제품들은 수십 내지 수백 밀리미터(mm) 단위의 제품이 대부분이었지만 현재는 메조(Meso) 크기 또는 마이크로미터(μm) 크기를 가진 초소형제품을 생산하는 비중이 커지고 있으며 이런 제품을 효율적으로 생산하기 위한 가공시스템 개발에 관한 연구[1]가 이뤄지고 있다.

박판 소재를 이용한 매크로(Macro) 크기의 반구형드로잉 성형에 관한 연구로 Jung과 Hwang[2]은 Dyna Form을 사용하여 바인더-랩과 S-레일, 반구형 디프드로잉을 해석하여 산업현장에 적용가능성과 타당성을 검토하였으며 Lee와 Kang[3,4]은 직경30mm의 원통컵 드로잉에서 다이코너반경과 블랭크홀딩력이 드로잉력에 미치는 영향에 대해 이론

1. 서울과학기술대학교 산업대학원 정밀기계공학과
2. 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과
3. 서울과학기술대학교 자동차공학과
교신저자: 서울과학기술대학교 제품설계금형공학과,
E-mail: jhkim365@seoultech.ac.kr

과 실험을 수행하여 비교 분석하였다. Lee[5] 등은 금속 박판과 펀치 사이의 마찰이 존재하는 인장 성형(Stretch-forming) 공정을 Hill의 이방성 이론을 적용하여 해석과 실험결과를 비교 분석하였다.

Chino[6] 등은 크로스를 압연에 의해 제작된 마그네슘합금판재(AZ31)를 이용하여 소재의 인장성 형성을 연구하였으며, Yang[7] 등은 Hsu와 Chu에 의해 개발된 탄소성 요소 코드와 Storen과 Rice에 의해 개발된 포밍 한계 학설을 이용하여 한계 돔(Dome) 높이와 인장분포에 관한 마찰 조건을 분석하였고, Thiruvarudchelvan과 Sritharan [8]은 원형 펀치 바닥에 반구형 우레탄펀치를 설치하여 반구형 컵 형상으로 드로잉된 제품의 품질에 관해 조사하였다.

본 연구에서는 메조크기의 반구형 원통펀치를 사용하여 50 μ m 두께의 극박판을 드로잉하여 한계 드로잉비를 구하고, 실험조건에 따른 성형품의 두께와 경도 분포를 비교 분석하였다. 또한 평면형 원통펀치를 사용한 드로잉제품[9, 10]과의 드로잉 성과 품질 비교도 함께 수행하였다.

2. 실험준비

2.1 실험재료

본 실험에서는 두께가 50 μ m인 베릴륨동(C1720) 소재를 사용하였다. 인장시험용 시편은 압연 방향을 기준으로 Wire-EDM 가공하여 제작하였다. 인장시험은 200kgf 용량의 만능시험기(Instron 5948)를 사용하여 기계적 성질을 측정하였으며 그 결과가 Table 1에 주어졌다.

Table 1 Mechanical properties of specimen

Material	Beryllium Copper (C1720)
Thickness (μ m)	50
Yield Strength (Kgf/mm ²)	21.7
Tensile Strength (Kgf/mm ²)	45.8
Elongation (%)	58.7
Hardness (Hv)	113.4

2.2 실험방법

실험에서 드로잉속도(Draw speed)는 100mm/min으로 고정하고, 블랭크홀딩력(Blank holding force, BHF)은 펀치 바닥면이 소재에 접촉했을 때의 압축된 스프링하중을 기준으로 설정하였다. 윤활제

Table 2 Experimental conditions for cup-drawing

Draw speed (mm/min)	100			
Drawing ratio (β) (Blank diameter, D, mm)	1.6(4.8), 1.9(5.7), 2.2(6.6), 2.4(7.2),	1.7(5.1), 2.0(6.0), 2.3(6.9),	1.8(5.4), 2.1(6.3)	
Blankholding force (BHF, Kgf)	0.6, 9.9, 19.2,	3.0, 12.3, 21.5,	5.3, 14.6, 23.9,	7.6, 16.9, 26.2
Die-corner radius (Rd, mm)	0.3, 0.5, 1.0			
Punch-corner radius (Rp, mm)	1.5			
Diameter of punch (Dp, mm)	3.0			
Diameter of die (Dd, mm)	3.14			
Clearance(C, mm)	0.07			

로는 다이와 소재 사이엔 테프론 필름을, 그리고 블랭크홀더와 소재 사이엔 무윤활 처리하였다.

실험에 사용한 제품은 내경 3mm의 반구형 원통컵이고 제품 높이는 블랭크 직경에 따라 달라진다. 실험 변수로는 10가지의 블랭크 직경, 12가지의 블랭크홀딩력과 3가지의 다이코너 반경(Die-corner radius, Rd)으로 변화시키면서 한계드로잉비(Limit drawing ratio, LDR)를 조사하였으며 실험 조건은 Table 2에 나타내었다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 드로잉 실험

실험은 금형의 펀치코너반경을 고정시킨 상태에서 주어진 블랭크홀딩력에 대해 블랭크 직경을 변화시키면서 한계드로잉비를 구하고, 블랭크홀딩력을 다음단계로 증가시키면서 블랭크 직경의 변화에 따른 한계드로잉비를 구하는 방법으로 진행되었다. 이러한 순서에 의해 다이코너반경, 블랭크홀딩력, 블랭크 직경을 변화시키면서 구한 한계드로잉비가 Fig. 1에 나타나있으며, Fig. 2는 본 연구에서 실험한 성형품의 사례를 보여주고 있다.

다이코너반경이 1.0mm(소재두께의 20 배)로 큰 경우에는 블랭크 소재를 제대로 구속하지 못한 상태에서 소재가 유입될 때 다이코너반경 부위에서 주름불량이 항상 발생되어 본 실험에서 제외하였다.

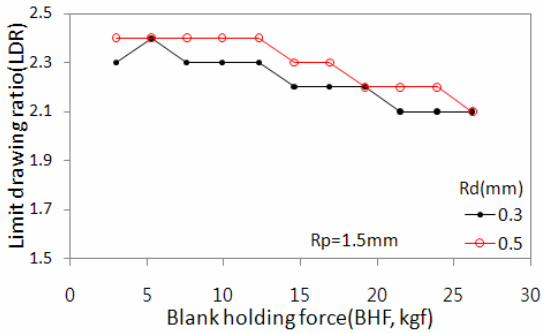


Fig. 1 Limit drawing ratio for various blankholding forces and die-corner radii

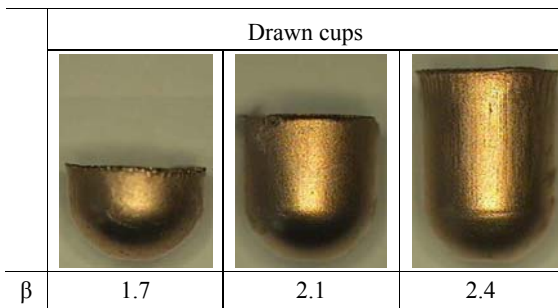


Fig. 2 Photograph of drawn cups (Rd=0.3mm, BHF=5.3kgf)

다이코너반경 0.3mm 와 0.5mm 조건에서 블랭크홀딩력을 변화시키면서 구한 최대 한계드로잉비는 2.4 이며 최소 한계드로잉비는 2.1 이다. Fig. 1 에서 블랭크홀딩력이 증가함에 따라 한계드로잉비가 감소하고, 다이코너반경이 작을수록 한계드로잉비가 감소하는 것을 알 수 있다. 일반 평면형 원통펀치를 사용한 경우의 연구결과[10]와 비교해 보면 다이코너반경이 0.3, 0.5mm 에서 최대 한계드로잉비가 2.1, 2.2 임을 고려할 때, 반구형 원통펀치를 사용하여 드로잉하면 성형성이 더 향상되는 것으로 나타났다.

3.2 성형품의 두께 및 경도측정

3.2.1 블랭크홀딩력의 영향

성형된 제품 중에서 다이코너반경이 0.3mm 일 때 동일한 직경의 소재를 사용하여 블랭크홀딩력을 증가한 경우와 동일한 블랭크홀딩력에서 블랭크 직경을 증가할 경우의 두께 및 경도를 측정

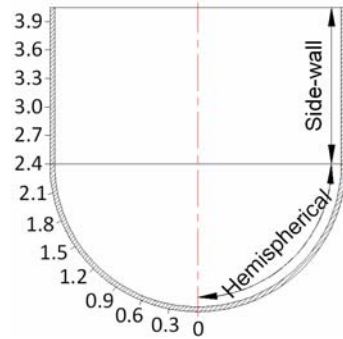


Fig. 3 Measuring position for thickness and hardness

비교하였다.

시편을 에폭시수지로 마운팅하고 압연방향을 기준으로 0°가 되도록 중심면을 절단하고 절단면을 연마작업(Polishing)을 하여 측정하였다. 절단된 제품의 반구부(Hemispherical)와 측벽부(Side wall)를 Fig. 3과 같이 0.3mm간격으로 금속현미경과 마이크로비커스 경도계를 이용하여 두께 및 경도를 측정하였으며 드로잉비 1.7(블랭크직경 5.1mm)을 기준으로 드로잉된 제품의 측정결과가 Fig. 4와 Fig. 5에 각각 나타나있다.

드로잉비 1.7(블랭크직경 5.1mm)을 기준으로 블랭크홀딩력 5.3kgf에서는 초기소재 두께 50 μ m을 기준으로 반구부에서 두께가 평균적으로 약 4.9% 얇아졌으며 블랭크홀딩력이 21.5kgf로 증가하면 약 12.5%로 얇아진다. 본 연구에서는 펀치에 윤활을 하지 않아 최소 두께 위치는 반구부의 정점이 아니고, 블랭크홀딩력의 증가에 따라 제품마다 중심으로부터 측정위치 2.1mm(87.5%) 와 측정위치 1.8mm (75.0%)인 위치(반구부에서 측벽부로 이동되는 부분)에서 발생되었다. 시편두께 50 μ m이상이 되는 지점은 블랭크홀딩력이 5.3kgf일 때는 측정위치 2.7mm의 측벽부분이며, 21.5kgf의 경우에는 시편초기 두께보다 두꺼워지는 위치가 존재하지 않았다. 따라서 동일드로잉비 조건에서는 블랭크홀딩력이 클수록 제품 두께가 얇아지므로 블랭크홀딩력을 임의로 크게 할 필요가 없음을 알 수 있었다.

Fig. 5는 마이크로 비커스경도를 측정한 결과로 두께가 얇아지면서 가공경화되어 제품의 경도가 높게 측정되었다. 소재경도 Hv113.4를 기준으로 블랭크홀딩력이 5.3kgf에서는 최소 47.2%에서 최대 139.7%까지 증가하였으며, 블랭크홀딩력 21.5kgf의 경우에는 최소 67.2%에서 최대 146.2%까지 경도가 증가되었다.

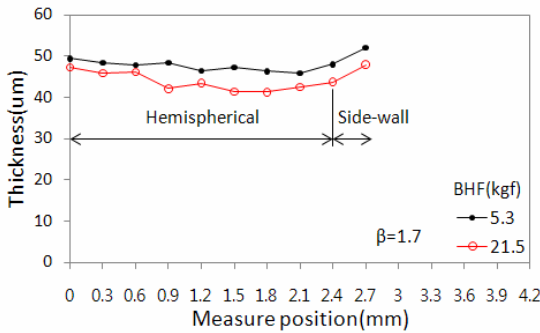


Fig. 4 Comparison of thickness distribution for different blankholding forces (Rd=0.3mm)

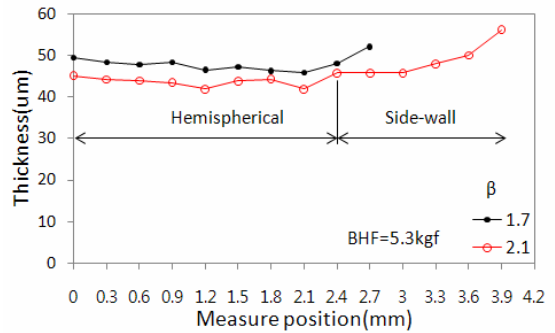


Fig. 6 Comparison of thickness distribution for different drawing ratio (Rd=0.3mm)

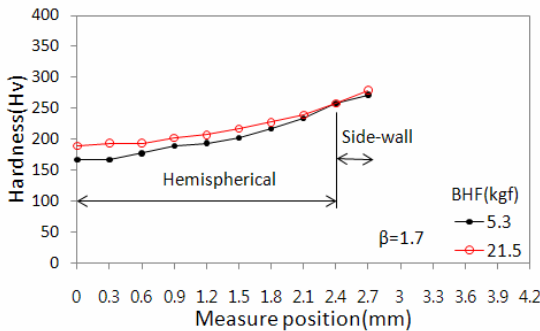


Fig. 5 Comparison of hardness distribution for different blankholding forces (Rd=0.3mm)

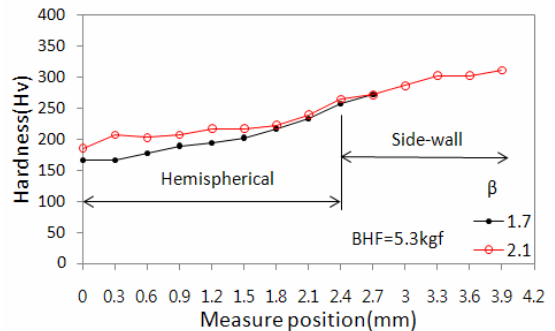


Fig. 7 Comparison of hardness distribution for different drawing ratio (Rd=0.3mm)

3.2.2 블랭크 직경의 영향

블랭크홀딩력을 5.3kgf로 일정하게 가하면서 드로잉비가 1.7과 2.1인 경우의 성형품 두께와 경도 측정결과가 Fig. 6과 Fig. 7에 각각 주어져있다. 드로잉비가 2.1로 증가되어 블랭크 직경이 증가되었을 때 블랭크홀딩력이 일정하더라도 반구부의 두께는 평균적으로 약 12.4% 얇아지는 것을 알 수 있다. 이것은 소재가 클수록 드로잉 저항력이 크기 때문에 사료된다. Fig. 7에 보인 경도 분포도 Fig. 5에 나타난 경도 분포와 유사하게 소재 두께가 얇아지면서 가공경화로 인해 블랭크 직경이 클수록 반구부의 경도가 더 큰 것으로 나타났다. 그러나 이러한 경도 차이는 반구형 중심부에서 측벽부로 갈수록 차이가 줄어들고 있다.

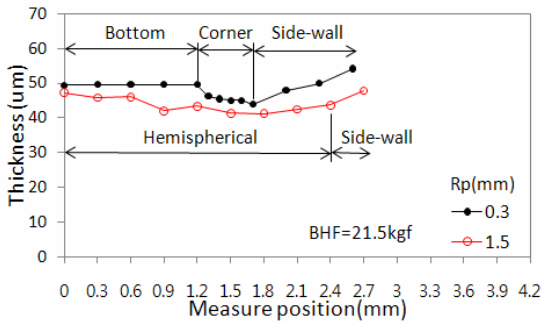
3.3 펀치형상에 따른 품질비교

펀치밀면의 형상이 제품 두께에 미치는 영향을 살펴보기 위해 본 연구와 동일한 실험조건에서 수행한 지난 연구[10]의 결과를 펀치코너반경 변

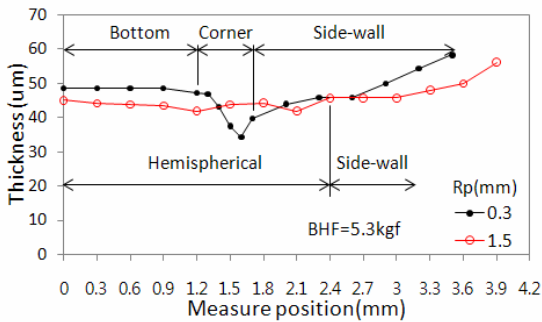
화에 따라 Fig. 8 에 함께 비교하였다. Fig. 8(a)는 드로잉비 1.7 인 경우를 비교한 것으로 펀치코너반경이 0.3mm 인 평면형 원통펀치로 성형한 경우에는 펀치코너반경 부위에서 집중적으로 두께가 얇아지는 것을 알 수 있는 것에 반해, 반구형 원통컵 제품에서는 두께 분포가 균일하게 변형된 것을 알 수 있다.

펀치코너반경이 0.3mm인 평면형 원통컵 제품에서는 제품의 바닥부분은 소재두께 기준으로 1% 미만의 두께변화로 거의 변화가 없지만, 펀치코너부에서는 국부적인 변형이 집중되어 두께가 얇아지는 현상이 최대 12.0%인 것으로 나타났다. 펀치코너반경이 1.5mm인 반구형 원통컵 제품에서는 전체적으로 소재두께 이하의 분포이지만 국부적인 변형은 발생하지 않았다. 이때의 두께변화는 최대 17.4%까지 나타났다.

드로잉비를 2.1로 증가시켜 실험한 Fig. 8(b)의 결과에서도 펀치코너반경이 0.3mm인 평면형 원통컵 제품에서는 국부적인 변형이 크게 발생하여



(a) $\beta=1.7$



(b) $\beta=2.1$

Fig. 8 Comparison of thickness distribution for different punch-corner radii (Rd=0.3mm)

제품의 두께가 최대 31.2%까지 얇아지는 현상이 나타났다. 또한 제품 두께의 최대, 최소 편차는 40.9%로 나타났다. 펀치코너반경이 1.5mm인 반구형 원통컵 제품에서는 두께변화가 최대16.2%까지 밖에 얇아지지 않으면서 광범위하게 균일변형을 나타내고 있다. 따라서 펀치형상에 따른 제품의 두께비교를 통해 반구형 원통펀치의 두께변화가 평면형 원통펀치에 비해 국부적인 변형이 발생하지 않고 균일하게 변형됨에 따라 더 높은 드로잉 성형성이 가능함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 두께 50 μ m의 베릴륨동 극박판을 사용하여 메조 크기의 드로잉 실험을 통해 반구형펀치가 드로잉 성형성에 미치는 영향을 분석하였다. 직경 3mm의 반구형 원통펀치가 장착된 금형에서 다이코너반경과 블랭크홀딩력을 변화시키면서 한계드로잉비를 구하고 반구형 원통컵과 평면형 원통컵의 두께 분포를 비교 분석한 결과를

정리하면 다음과 같다.

(1) 50 μ m 두께의 베릴륨동 극박판의 반구형 드로잉에서 성형할 수 있는 한계드로잉비는 2.4까지 가능하다.

(2) 블랭크홀딩력이 5.3kgf 에서 21.5kgf 로 증가됨에 따라 두께 감소율은 약4.9%에서 약12.5%로 더 확대된다.

(3) 블랭크 지름이 5.1mm에서 6.3mm로 증가되면 두께 감소율은 약4.9%에서 약12.4%로 블랭크홀딩력을 증가시킬 때와 유사하게 나타난다.

(4) 평면형 원통컵 드로잉에서는 펀치 코너부에서 국부적인 변형(최대 두께감소율 31.2%)이 발생하는 반면, 반구형 원통컵 드로잉에서는 심한 국부 변형없이 제품 전체의 두께가 균일하게 변형되면서 드로잉 성형성을 향상시킨다.

후기

본 연구는 지식경제부와 한국산업기술재단의 전략기술인력양성사업으로 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고 문헌

- [1] N. K. Lee, H. J. Lee, S. O. Choi, 2005, Development of micro metal forming system technology in micro factory, Proc. of the Kor. Soc. of Mech. Tool Eng. Conf., pp. 420~425.
- [2] D. W. Jung, J. S. Hwang, 2004, A study of forming analysis by using dynamic-explicit finite element method in auto-body stamping, J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng., Vol. 3, No. 4, pp. 63~72.
- [3] J. K. Lee, M. S. Kang, 1989, A study on the effect of die profile radius on formability in deep-drawing process with spring-type blankholder system, Trans. of The Kor. Soc. of Automot. Eng., Vol. 11, No. 4, pp. 35~42.
- [4] J. K. Lee, M. S. Kang, 1989, A study on the blankholding force in deep drawing process, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng., Vol. 13, No. 5, pp. 886~900.
- [5] C. H. Lee, H. B. Shim, D. Y. Yang, 1983, Analysis of stretch-forming by hemispherical punch with friction, Proc. of the KSME Conf., No. 1, pp. 329~333.

- [6] Yasumasa Chino, Kensuke Sassa, Mamoru Mabuchi, 2009, Enhanced stretch formability of Mn-free AZ31 Mg alloy rolled by cross-roll rolling, *J. Mater. Sci.* Vol. 44, No. 7, pp. 1821~1827.
- [7] Tung-Sheng Yang, Tze-Chi Hsu, 2001, Forming limit analysis of hemispherical-punch stretch forming, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 117, Issues 1~2, pp. 32~36.
- [8] Sinnathamby Thiruvarudchelvan, Thirumany Sritharan, 2003, Properties of hemispherical cups drawn using a flexible tool, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 134, Issue 3, pp. 310~317.
- [9] S. S. Park, K. B. Hwang, J. B. Kim, J. H. Kim, 2010, Investigation of deep drawability and product qualities of ultra thin beryllium copper sheet metal, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 19, No. 3, pp. 179~184.
- [10] K. S. Lee, J. H. Kim, J. B. Kim, W. J. Jung, 2010, Influence of blankholding force on deep drawability of thin sheet metal, *Proc. of KSPE Autumn Conf.*, pp. 165~167.