

극소형 원통컵의 드로잉성과 품질에 미치는 블랭크 홀딩력과 블랭크 직경의 영향

이기성¹ · 김종봉² · 정완진³ · 김종호[#]

Influence of Blankholding Force and Blank Diameter on the Drawability and Quality of Very Small Cylindrical Cups

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

(Received July 3, 2014 / Revised November 3, 2014 / Accepted November 12, 2014)

Abstract

Micro forming is an appropriate process to manufacture very small metal parts which can be employed in the field of electronic devices or electrically controlled mechanical systems. The purpose of the current study was to investigate the influences of both blankholding force and blank diameter for the deep drawing of very small cups. It is essential to control the blankholding force because improper force can result in defects such as wrinkles in the flange or cracks in the corner of the drawn cups. In the current study blankholding force was controlled by springs connected to the blankholder of a press die. Exchangeable bushing dies with various die-corner radii were also used. To obtain the limit drawing ratio for each working condition several sizes of circular specimens were prepared using blanking tools. Beryllium copper(C1720) alloy sheet of 50 μ m thickness was chosen for the experiments. The maximum limit drawing ratio of 2.1 was achieved experimentally for the conditions of the blankholder force(BHF)=5.3kgf and Rd=0.3mm. Both thickness and hardness along the central section of drawn cups were measured and compared for different drawing conditions. It was found that the deviation of measured data in the thickness and hardness distribution increases with increasing blankholder force and blank diameter.

Key Words : Micro Forming, Drawing, Blankholding Force, Blank Diameter, Limit Drawing Ratio

1. 서론

최근 스마트 폰, 디지털 카메라, 반도체, 하드디스크 등의 정보통신 또는 정보저장 기기에 사용되는 차세대 IT산업의 부품들은 점점 소형화, 경량화, 고기능화되면서 제품의 크기도 마이크로 단위의 미세 부품으로 변화되고 있으며, 이에 대한 산업계의 수요도 계속 증가될 것으로 예상된다. 이들 부품은 주

로 프레스 또는 사출성형으로 제조될 수 있지만 이에 관한 연구는 아직 미미한 수준이다. 국내에서는 금속의 미세 부품 성형을 위한 미세소성가공기술[1]에 대한 연구가 처음으로 시도되면서 학계와 연구기관이 주도적으로 연구를 진행하고 있다.

소성가공 분야에서도 극박판 소재의 드로잉 공정에 관한 연구로는 Vollertsen 등[2, 3]이 최근의 마이크로 성형기술의 연구 현황과 개발 사례 연구에서

1. 에이테크솔루션(주) 프레스개발팀

2. 서울과학기술대학교 기계자동차공학과

3. 서울과학기술대학교 기계시스템디자인공학과

Corresponding Author : Dept. of Mechanical System Design Engineering, Seoul National University of Science and Technology, E-mail: jhkim365@seoultech.ac.kr

부품의 크기가 마이크로(micro)단위로 작아지면 금속입자 크기, 윤활, 접착력, 표면장력 등이 성형에 영향을 미쳐 매크로(macro) 크기의 제품과는 성형성이 다르다는 크기효과(size effect)를 제시하였다. Joo 등[4]은 1~3 μm 의 금속박판에 다양한 형상의 마이크로 채널 성형을 연구하였으며, Shim[5]은 폭 3mm인 정사각캡 성형 공정을 대상으로 미세 스탬핑(stamping)에 미치는 블랭크 형상의 영향을 조사하였다. Saotome 등[6]은 0.2mm 이하의 SPCE소재를 사용하여 펀치의 직경이 드로잉 성형성에 미치는 영향을 실험하였고, Park 등[7]은 50 μm 두께의 극박판을 이용하여 드로잉성 조사와 제품 품질 특성을 비교 분석하였다. Zhao 등[8]은 프로그레시브 금형(progressive die) 설치가 가능한 마이크로 성형장치를 개발하고 이를 통해 마이크로 스프링과 마이크로 캡(micro cap)의 성형 가능성을 확인하였다.

범용의 드로잉 공정에 있어서 블랭크 홀딩력의 영향에 관한 연구로 Lee와 Kang[9]은 스프링 타입의 블랭크 홀더를 사용하여 다이 코너 반경이 드로잉력과 드로잉성에 미치는 영향을 조사하였으며, Shim과 Keum[10]은 블랭크 홀딩력이 인출 속도에 따라 성형 중 마찰에 어떤 영향을 미치는지에 대해 조사하였다. Yoshihara 등[11]은 고온에서 마그네슘 합금 판재의 성형성을 파악하기 위하여 다양한 블랭크 홀딩력을 제어하여 한계 드로잉비의 변화와 FEM 시뮬레이션과의 비교를 하였다.

본 연구에서는 극박판 소재를 사용하여 극소형 원통캡을 드로잉할 때 펀치 코너 반경(punch corner radius)과 틈새(clearance)를 고정시킨 상태에서 블랭크 홀딩력과 블랭크 직경 그리고 다이 코너 반경을 변화시키면서 각 조건 별 한계 드로잉비를 조사하고 성형품의 두께와 마이크로 비커스 경도 분포를 비교 분석하여 제품 품질에 미치는 영향을 실험적으로 연구하였다.

2. 실험

2.1 실험재료

본 실험에서는 두께가 50 μm 인 베릴륨 동(C1720)소재를 사용하였다. 인장시험용 시편은 이전 연구[7]를 참고하여 치수를 설계하였으며, 압연 방향에 따른 이방성(anisotropy) 시험을 위해 압연 방향 기준으로 각도에 따라 Wire-EDM 가공하여 Fig. 1과 같은 시편을

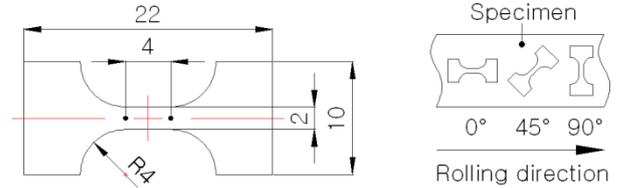


Fig. 1 Specimen for tensile test

Table 1 Mechanical properties of specimens

Material	Beryllium Copper (C1720-O)		
Thickness	50 μm		
Angle to the rolling direction	Degree		
	0°	45°	90°
Yield strength (kgf/mm ²)	21.7	23.1	23.6
Tensile strength (kgf/mm ²)	45.8	46.3	46.1
Elongation (%)	57.0	54.3	54.5
R- value	1.06	0.98	1.06
Hardness (Hv)	113.4		

제작하였다. 기계적 성질 시험은 200kgf 용량의 만능시험기(Instron 5948)를 사용하였으며 그 결과가 Table 1에 주어져 있다.

2.2 블랭크 홀딩력의 선정

실험 장치는 이전 연구[7]에서 사용한 금형으로 블랭크 홀딩력은 4개의 스프링에 의해 부가되는 방식인데, 이 하중은 스프링의 압축된 길이에 비례하기 때문에 블랭크 홀딩력의 선정 기준이 필요하다. 본 연구에서는 펀치 밀면과 소재의 윗면이 접촉하면서 드로잉이 시작될 때 소재에 가압되는 스프링 압축력을 블랭크 홀딩력으로 설정하였다.

Fig. 2의 L은 스프링의 초기 자유길이, A는 금형 조립상태에서의 초기 스프링 압축량, 그리고 B는 드로잉 성형 직전의 펀치 밀면과 소재 윗면이 접촉한 상태에서의 압축된 스프링 길이를 나타낸다. 블랭크 홀더에 장착된 n개의 스프링($k=0.58\text{kgf/mm}$)과 블랭크 홀더의 자체 무게(w, 0.6kg)를 이용하여 블랭크 홀딩력(BHF)은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\text{BHF}=[(L - B) \times k] \times n + w \quad (1)$$

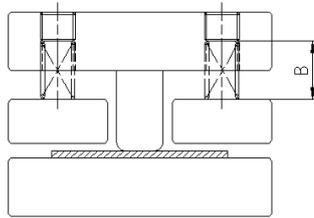
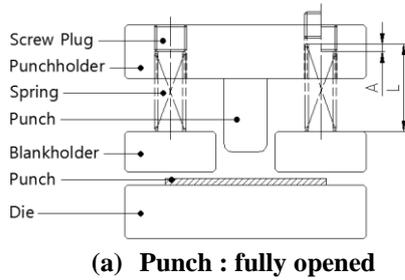


Fig. 2 Determination of blankholding force

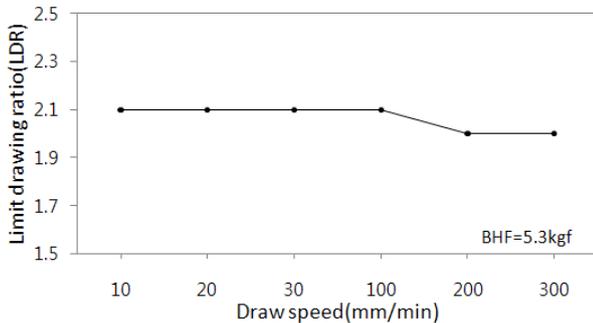


Fig. 3 Limit drawing ratio for various punch speeds

2.3 최적의 드로잉 속도

드로잉 속도에 의한 영향을 조사하였으며 실험에 사용된 만능시험기(대형TSM-100)의 최대 속도(300mm/min)를 고려하여 6가지 속도 변화에 대한 한계 드로잉비(Limit drawing ratio)를 조사하였다.

미윤화된 상태에서는 성형중에 모두 파단이 발생하여 다이와 블랭크 사이에만 테프론(Teflon) 필름 윤활제를 사용하였으며, 펀치 직경은 3mm, 다이 직경은 3.14mm, 블랭크 홀딩력은 5.3kgf, 펀치와 다이의 코너 반경은 각각 0.3mm 로 고정하였다. 주어진 드로잉 속도에서의 한계 드로잉비는 블랭크 직경을 0.3mm 씩 증가시키면서 드로잉할 때 파단 직전의 최대 블랭크 직경을 이용하여 계산한 것으로 이에 대한 결과가 Fig. 3 에 나타나 있다.

드로잉속도 10~100mm/min사이에서는 한계 드로잉비가 2.1로 일정하고, 200mm/min이상에서는 2.0으로 감소하는 것을 확인하였다. 이 결과를 기초로 본 연

Table 3 Experimental conditions for cup drawing

Blank diameter (D, mm)	4.8(1.6), 5.1(1.7), 5.4(1.8), 5.7(1.9), 6.0(2.0), 6.3(2.1), 6.6(2.2), 6.9(2.3), 7.2(2.4)
Blankholding force (BHF, kgf)	0.6, 2.3, 5.3, 7.6, 9.9, 12.3, 14.6, 16.9, 19.2, 21.5, 23.9, 26.2
Die-corner radius (Rd, mm)	0.3, 0.5, 1.0

구에서는 성형속도를 100mm/min으로 고정하여 실험하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 드로잉성 비교

실험은 블랭크 직경, 블랭크 홀딩력, 다이 코너 반경의 3가지 변수를 Table 3에서와 같은 조건 별로 실험을 수행하였으며, 기타 작업조건은 전항의 실험 조건과 동일하게 적용하였다.

Fig. 4는 블랭크 홀딩력과 다이 코너 반경을 변화시키면서 얻은 한계 드로잉비를 나타낸다. 다이 코너 반경이 0.3, 0.5mm에서는 드로잉 성형이 가능했지만, 1.0mm(소재두께의 20배)에서는 모든 조건에서 주름이 발생하여 실험에서 제외하였다. 다이 코너 반경이 너무 큰 경우에는 블랭크 홀더에 의해 소재에 가압되는 부위가 0.6mm 전후로 아주 작고, 또한 다이 코너 반경 부위에 위치한 소재는 제대로 가압되지 않은 상태에서 다이 내부로 유입되면서 측벽에 주름이 심하게 발생되었다.

본 연구에서의 소재는 극박판이기 때문에 블랭크 홀더(0.6kgf) 자체 무게에 의해 가압된 상태에서 성형이 가능한 조건은 다이 코너 반경 0.3mm 일때 한계 드로잉비 1.6 으로 나타났다.

블랭크 홀딩력 변화에 따라 다이 코너 반경이 0.3mm 인 경우에는 1.6~2.1 의 한계 드로잉비가 얻어졌고, 다이 코너 반경이 0.5mm 에서는 1.9~2.2 의 한계 드로잉비를 얻을 수 있어, 다이 코너 반경이 소재 두께의 10 배까지 증가하면 드로잉성이 향상됨을 확인할 수 있었다.

또한 최대 드로잉비를 나타내는 블랭크 홀딩력의 설정은 Fig. 4 에서 보는 바와 같이 다이 코너 반경의 크기와 상관없이 블랭크 홀딩력이 5.3kgf 까지 한계 드로잉비가 증가하다가 그 이상이 되면 낮아지는 경향을 보이기 때문에 본 연구에서는 블랭크 홀

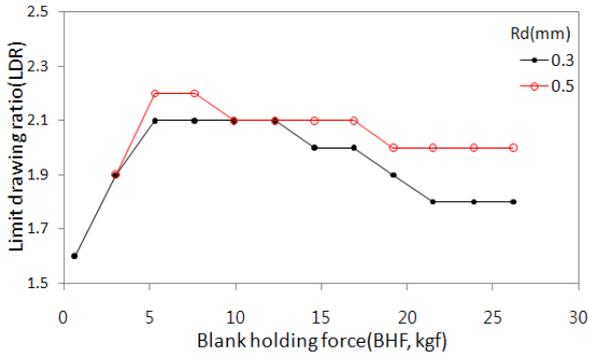


Fig. 4 Limit drawing ratio for various blankholding forces

딩력이 5.3kgf일때 적합한 것으로 판단되었으며, 이 하중은 드로잉 하중의 간편식에 의한 이론하중 (21.6kgf)의 25%에 해당된다.

3.2 성형품의 두께 및 경도 비교

제품의 두께분포는 제품의 치수 정밀도와 파단발생 부위를 예측할 수 있고, 경도 분포는 제품의 가공경화와 내부 응력 상태를 파악하여 제품 형상의 변형과 제품 강도의 취약 부위를 예측할 수 있어, 본 연구에서는 제품의 품질을 판단하는 인자로 성형품의 두께와 경도 분포를 평가대상으로 선정하였다. 블랭크 홀딩력과 블랭크 직경 변화에 따른 영향을 파악하기 위해 두 경우로 구분해 조사하였다. 하나는 동일한 블랭크 직경의 소재를 사용하여 블랭크 홀딩력을 변화시킨 경우이고, 또 하나는 블랭크 홀딩력을 일정하게 한 상태에서 블랭크 직경을 변화시킨 경우에 대해 각각 두께와 경도를 측정하여 제품의 품질을 분석하였다. Fig. 5는 비교 조사를 위한 실험 조건에서 성형된 제품을 나타낸 것이다.

측정을 위한 시편은 에폭시 수지로 마운팅하고 압연방향을 기준으로 0°가 되도록 원통컵의 중심면을 절단하고 깨끗하게 폴리싱하였다.

절단된 제품의 바닥부, 코너부, 측벽부를 Fig. 6과 같이 준비하고 금속현미경과 마이크로 비커스 경도계를 사용하여 두께와 경도를 측정하였다.

블랭크 직경이 5.1mm(드로잉비 1.7)이고 블랭크 홀딩력이 각각 5.3, 21.5kgf일 때의 두께와 경도 비교가 Fig. 7과 Fig. 8에 주어져 있다.

Fig.7 에서 바닥부 두께는 49.4 μm으로 1.2%의 두께 감소가 발생하였고, 코너부에서는 블랭크 홀딩력이 5.3kgf 에서 46 μm(8% 감소), 21.5kgf 에서 44 μm(12%

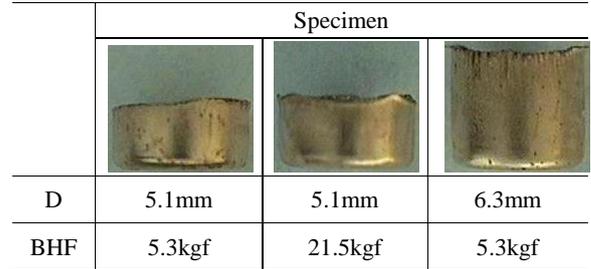


Fig. 5 Photograph of drawn cups (Rd=0.3mm)

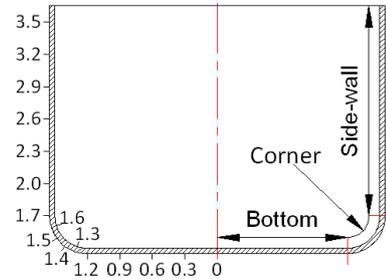


Fig. 6 Measuring position for thickness and hardness

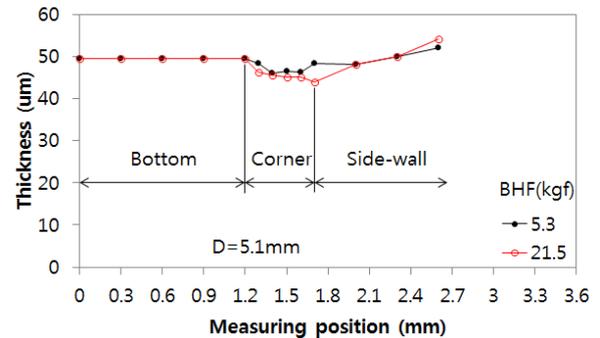


Fig. 7 Thickness distribution for different blankholding forces (Rd=0.3mm, D=5.1mm)

감소)으로 나타났다. 이와 같은 현상은 측벽 2.3mm 위치까지 지속되다가 그 이후에는 두꺼워지고 있다. 동일 크기의 소재를 가지고 드로잉할 때 블랭크 홀딩력이 클수록 코너부에서의 두께가 급격히 감소되면서 파단 될 위험이 있으므로 불필요하게 블랭크 홀딩력을 증가시킬 필요가 없으며, 최소 두께의 위치도 블랭크 홀딩력이 증가할수록 측벽 방향으로 이동함을 알 수 있었다. 성형된 원통컵 끝단의 미세 주름을 제외한 제품의 깨끗한 유효높이는 제품 내径의 약 40%까지 성형되었다.

Fig. 8은 Fig. 7의 동일 제품에 대해 경도를 측정한 것으로 바닥 중심(Hv167)에서 측벽부로 갈수록 경도가 증가하고 있다. 특히 블랭크 홀딩력이 큰 경우의 코너부에서는 경도가 크게 증가되면서 두 조건의

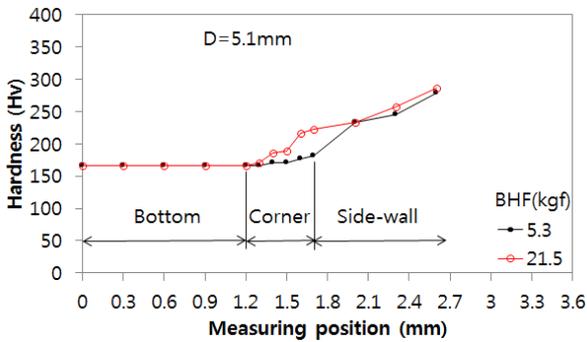


Fig. 8 Hardness distribution for different blankholding forces (Rd=0.3mm, D=5.1mm)

경도 차이가 Hv41(측정위치 1.7mm)까지 발생되었다. 소재 경도 Hv113.4를 고려할때 블랭크 홀딩력이 5.3kgf에서는 47%(바닥부 Hv167)에서 146%(측벽부 Hv279)까지 증가하고, 블랭크 홀딩력이 21.5kgf에서는 50%(바닥부 Hv170)에서 152%(측벽부 Hv287)까지 증가되었다. 즉, Fig. 7의 두께 변화율에 비해 경도 변화율이 더 큰 것으로 나타났다.

본 연구에 사용된 금형은 제품 취출을 위해 다이 내부에 스프링 타입의 녹아웃판(knock-out plate)이 설치되어 있어, 성형 중에는 펀치와 녹아웃판 사이에서 소재가 압축되면서 바닥부의 경도가 더 증가한 것으로 판단되었다. 이의 확인을 위해 펀치 직경보다 작은 2mm 직경의 원형 소재를 녹아웃판 위에 위치시킨 후 드로잉 실험과 동일한 스트로크까지 압축한 후의 경도는 Hv142가 얻어졌다. 즉 성형품 바닥부의 경도가 Hv167임을 고려할 때, 본 연구에 사용한 소재와 같이 연성이 좋은 소재의 경우에는 펀치 바닥부에서 압축과 연신이 동시에 일어나 경도가 크게 상승하는 것을 알 수 있다.

Fig. 9는 블랭크 홀딩력을 5.3kgf로 일정하게 한 상태에서 블랭크 직경만을 5.1mm에서 6.3mm로 증가시키면서 실험한 결과이다. 성형 가능한 드로잉 조건에서 블랭크 직경이 증가할수록 제품 높이가 더 크게 성형되었지만, 바닥부 두께는 48.6 μ m으로 2.8%, 코너부 두께는 34.4 μ m으로 31.2%까지 얇아지면서 제품이 전체적으로 두께 변화가 심하게 발생된 것을 알 수 있다. 또한 코너부의 최소 두께 위치도 측벽 방향으로 이동하고 있고, 초기 소재와 동일한 두께를 나타내는 부위도 측정 위치 2.9mm까지 높아지고 있다. 블랭크 직경이 증가함에 따라 성형품의 유효높이도 제품 내경의 40%에서 71% 까지 높게 성형되었다.

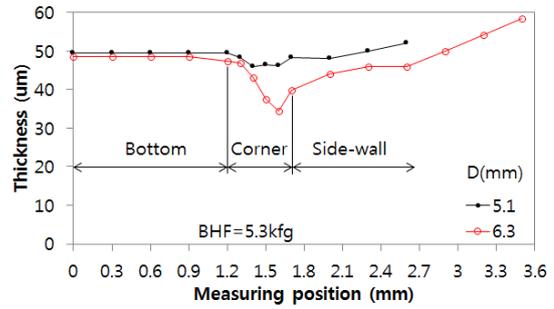


Fig. 9 Thickness distribution for different blank diameters (Rd=0.3mm, BHF=5.3kgf)

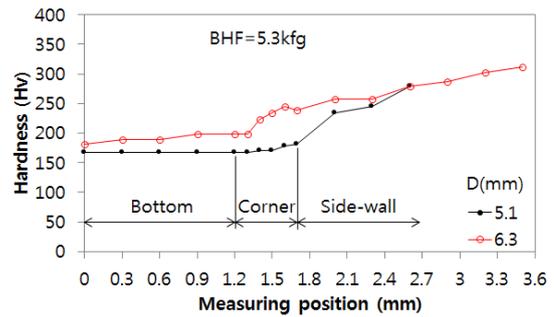


Fig.10 Hardness distribution for different blank diameters (Rd=0.3mm, BHF=5.3kgf)

Fig. 10은 Fig. 9와 같은 조건의 제품들에 대한 경도 분포를 나타낸 것이다. 두께 변화 결과로부터 예측할 수 있듯이 두께가 심하게 변형할수록 가공경화로 인해 경도가 높게 나타났으며 측벽 상단으로 갈수록 경도가 계속 증가하였다. 블랭크 직경이 증가함에 따라 바닥부 경도는 Hv167에서 Hv182로 증가되었고, 코너부에서는 Hv178에서 Hv245로 더 크게 증가되었다.

성형품의 동일 측정 위치(1.6mm)에서 두께 차이를 비교해 보면 Fig. 7에서는 1.2 μ m, Fig. 9에서는 12 μ m으로 나타났고, 경도 차이를 비교해 보면 Fig. 8에서는 Hv 39, Fig. 10에서는 Hv 67로 나타났다. 즉 드로잉이 가능한 본 연구의 실험 범위 내에서 작업변수의 영향은 블랭크 홀딩력보다 블랭크 직경이 더 크게 미치는 것으로 판단된다.

4. 결론

본 연구에서는 두께 50 μ m인 베릴륨 동(C1720)소재 를 사용하여 직경 3mm의 원통컵을 드로잉할 때 주요 설계 변수가 제품 품질과 성형성에 어떤 영향을

미치는지에 대한 실험 연구를 수행하였다.

편치와 틈새 및 윤활 조건은 일정한 상태에서 다이 코너 반경, 블랭크 홀딩력, 블랭크 직경을 변화시키면서 한계 드로잉비를 구하고, 성형된 제품의 두께와 경도를 측정하여 분석한 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 실험을 통한 연구범위 내에서 베릴륨 동 소재의 한계 드로잉비는 2.2로 나타났다.

(2) 블랭크 홀딩력이 증가함에 따라 한계 드로잉비는 증가하다가 감소하는 경향이 있으며 블랭크 홀딩력이 5.3kgf에서 최대치를 나타냈다.

(3) 블랭크 직경이 5.1mm일 때 블랭크 홀딩력이 5.3kgf에서 21.5kgf로 증가되면 최대 두께 감소율이 8%에서 12%로 증가하였다.

(4) 블랭크 홀딩력이 5.3kgf일 때 블랭크 직경을 5.1mm에서 6.3mm로 증가하면, 최대 두께 감소율은 8%에서 31.2%로 증가되면서 경도도 더 크게 증가된 것을 고려할 때, 블랭크 홀딩력보다 블랭크 직경 변수가 성형에 더 큰 영향을 미치는 것으로 나타났다.

후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다(2014-1150).

REFERENCES

- [1] K. H. Na, H. J. Park, N. S. Cho, 2000, Processing of Micro-parts by Metal Forming, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 17, No. 7, pp. 14~19.
- [2] F. Vollertsen, Z. Hu, H. Schulze Niehoff, C. Theiler, 2004, State of the Art in Micro Forming and Investigations into Micro Deep Drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 151, No. 1-3, pp. 70~79.
- [3] F. Vollertsen, H. Schulze Niehoff, Z. Hu, 2006, State of the Art in Micro Forming, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 46, No. 11, pp. 1172~1179.
- [4] B. Y. Joo, S. W. Baek, S. I. Oh, 2006, Micro Channel Forming with Ultra Thin Metal Foil, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng.-A, Vol. 30, No. 2, pp. 157~163.
- [5] H. B. Shim, 2006, A Study on the Effect of Blank Shape on the Miniature Stamping, Trans. Mater. Process., Vol. 15, No. 4, pp. 304~310.
- [6] Y. Saotome, K. Yasuda, H. Kaga, 2001, Microdeep Drawability of very Thin Sheet Steels, J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, No. 1-3, pp. 641~647.
- [7] 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.
- [8] J. Zhao, A. Brockett, A. Razali, Y. Qin, C. Harrison, Y. Ma, 2010, Micro-Sheet-Forming and Case Studies, Steel Research Int., Vol. 81, No. 9, pp. 1185~1188.
- [9] 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. Kor. Soc. Autom. Eng., Vol. 11, No. 4, pp. 35~42.
- [10] J. W. Shim, Y. T. Keum, 2007, Effects of Blank Holding Force on the Friction Behavior in Sheet Metal Forming, Trans. Mater. Process., Vol. 16, No. 5, pp. 381~385.
- [11] S. Yoshihara, K. Manabe, H. Nishimura, 2005, Effect of Blank Holder Force Control in Deep-drawing Process of Magnesium Alloy Sheet, J. Mater. Process. Technol., Vol. 70, No. 3, pp. 579~585.