

## 알루미늄 판재의 다단계 드로잉에 있어서 원통컵의 치수 정밀도 비교

최종민<sup>1</sup> · 김종호<sup>#</sup>

### Dimensional Accuracy of Cylindrical Cups in Multi-Stage Drawing of Aluminum Sheet Metal

J. M. Choi, J. H. Kim

(Received December 12, 2014 / Revised December 26, 2014 / Accepted January 16, 2015)

#### Abstract

Deep drawing of cylindrical cups is one of the most fundamental and important processes in sheet metal forming. Circular cups are widely used in industrial fields such as automobile and electronic appliances. Some of these cups are formed by a one-stage process, others such as battery cases and beverage cans are made by a multi-stage process. In the current study the multi-stage deep drawing of aluminum sheet metal is examined. The process consists of two deep drawing operations followed by two ironing operations. The press die, which can be used for the four-stage forming process, was manufactured allowing punch and die components to be easily changed for various experiments. The rolling direction of both the sheet and the drawn cups was always positioned toward the horizontal x-direction on the die face to minimize experimental errors during the progressive forming. The dimensional accuracy of the cylindrical cups formed at each stage and the earing defect due to the anisotropy of sheet were investigated. The influence of anisotropy on the thickness distribution was also examined. Both the thickness and the outer diameter of the cups were measured and compared for each set of experimental conditions. It was found that the dimensional accuracy of cups rapidly improves by employing the ironing process and also by increasing the amount of ironing.

**Key Words** : Deep Drawing, Ironing, Cylindrical cup, Multi-Stage Drawing, Anisotropy, Dimensional Accuracy

### 1. 서론

원형컵 디프 드로잉 공정은 금속 박판재의 프레스 가공방법 중 가장 기초적이면서도 중요한 공정 중의 하나이다. 이에 의한 제품은 자동차, 가전제품, 스마트 기기 등 산업 전 분야의 부품으로 사용되고 있기 때문에 이에 대한 연구는 이론적, 실험적으로 많이 진행되어왔다. 드로잉 공정에 관한 연구로 성형해석 이외에 금형설계 조건[1]이나 작업 조건[2]이

성형성에 미치는 영향, 다단계 공정의 제품에 대한 공정설계 기법[3,4], 극박판[5] 또는 난소성재의 성형 [6], 성형성 향상을 위한 신 공법[7] 등의 많은 연구가 원통컵을 중심으로 이루어져 왔다. 지금까지의 연구는 이와 같이 새로운 해석기법의 제안이나 공정 개선 또는 성형성 향상 등에 관해 집중되었고 제품의 품질에 관한 연구는 거의 미미한 수준이었다.

제품 정밀도에 관한 연구로서 Kim[8]은 드로잉 컵의 두께 정밀도를 향상시키기 위해 3회의 드로잉

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

공정 제품을 2회의 드로잉과 아이어닝 공정으로 두께 품질의 개선 효과를 제시한 바 있고, Lee[9]는 똑같은 원통컵일지라도 공정설계변화에 따라서 두께 정밀도가 다르다는 것을 발표한 적이 있다.

그러나 이들 연구에서는 소재의 이방성이나, 아이어닝률에 따른 품질 변화는 고려되지 않았다. 또한 건전지 케이스, 음료 캔, 가스 압력용기 등과 같이 드로잉과 아이어닝이 복합된 다공정 제품의 성형에 관해서는 단순 식으로 하중을 예측할 수 있는 모델 제시와 실험을 통한 유용성을 비교한 바 있고[10], 최근에는 DDI(deep drawing and ironing) 공정의 하중 예측을 위한 유한요소 해석의 시도[11]와 연성 파괴 모델을 적용한 시뮬레이션으로 금형 설계를 개선하여 압력용기를 개발한 사례[12]도 있지만 제품의 정밀도 향상에 대한 연구는 아직 미흡한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 알루미늄 소재를 사용하여 드로잉, 재드로잉, 2 회의 아이어닝 공정을 거쳐 최종 제품을 성형할 때 각 공정 별로 성형된 원통컵의 외경, 두께, 경도 등을 측정하여 품질 특성의 변화를 조사한다. 또한 소재의 이방성에 따른 제품의 불균일한 변형과 이어링(earing) 발생을 분석하고 이들 결과로부터 정밀도 높은 균일 품질의 원통컵을 성형하기 위한 조건을 실험적으로 제시해 보고자 한다.

## 2. 실험

### 2.1 실험재료

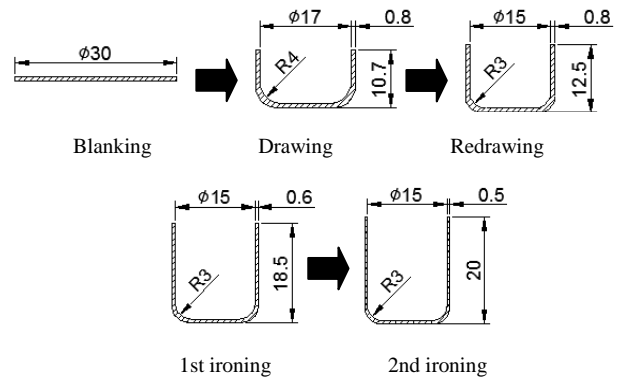
본 실험에서는 두께가 0.8mm인 알루미늄(A1050-O) 판재를 사용하여 소재의 압연 방향을 기준으로 0°, 45°, 90° 방향으로 각각 시편을 준비하여 기계적 성질을 시험하였으며 그 결과가 Table 1 에 주어졌다.

### 2.2 실험방법

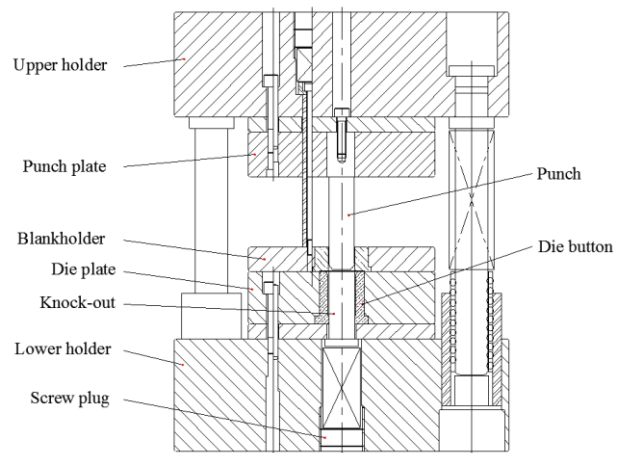
실험을 위한 공정 설계도가 Fig. 1에 주어져 있다. 알루미늄 소재(두께 0.8mm)의 압연방향을 기준으로 하여 직경 30mm의 블랭킹을 하고, 이 블랭크를 이용하여 직경 17mm로 드로잉한 후, 직경 15mm로 재드로잉한다. 재드로잉된 컵을 이용하여 컵 내경은 일정하게 한 상태에서 측벽 두께를 0.6mm로, 그 다음엔 0.5mm로 각각 아이어닝 작업을 수행하여 최종 원통컵을 성형하는 것으로, 이를 위한 실험용 금형 조립도가 Fig. 2에 주어져 있다.

**Table 1 Mechanical properties of specimen**

| Material                                | A1050-O |      |      |
|---|---------|------|------|
|   | 0°      | 45°  | 90°  |
| Angle to the rolling direction          | 0°      | 45°  | 90°  |
| Tensile strength (kgf/mm <sup>2</sup> ) | 7.6     | 7.9  | 7.8  |
| Elongation at break (%)                 | 42.0    | 40.7 | 40.3 |
| Anisotropy(R-value)                     | 0.85    | 0.56 | 1.20 |



**Fig. 1 Process design for drawing and ironing**



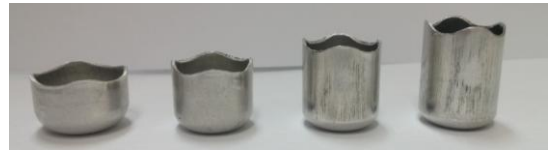
**Fig. 2 Cross-sectional view of drawing die**

드로잉시의 주름 발생을 예방하기 위해 스프링력 (30kgf)을 부가하기 위한 블랭크홀더를 상부 금형에 설치하였고, 재드로잉과 아이어닝 공정에서는 주름발생이 없어 블랭크홀더를 사용하지 않았다. 또한 개별공정 실험을 위한 펀치와 다이버튼(die button)은 교환이 용이하도록 금형 구조를 설계하였으며 이들 부품에 대한 상세 치수는 Table 2에 주어져 있다.

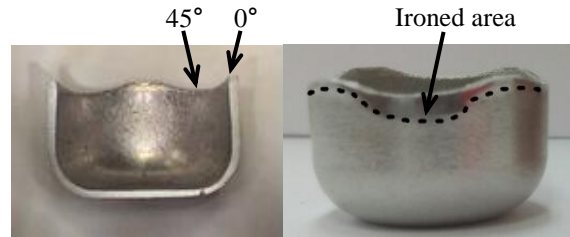
실험은 10톤 용량의 재료시험기에서 200mm/min의 속도로 수행하였다.

**Table 2** Sizes of die components for experiments

| Process     | Punch |                | Die   |                | Clearance |
|-------------|-------|----------------|-------|----------------|-----------|
|             | D     | R <sub>p</sub> | d     | R <sub>d</sub> | C/t       |
| Drawing     | 17    | 4              | 18.92 | 4              | 1.2       |
| Redrawing   | 15    | 3              | 16.76 | 3              | 1.1       |
| 1st ironing |       |                | 16.2  |                | 0.75      |
| 2nd ironing |       |                | 16.0  |                | 0.625     |
| Remark      |       |                |       |                |           |

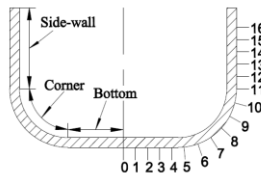


**Fig. 4** Cups formed through experiments

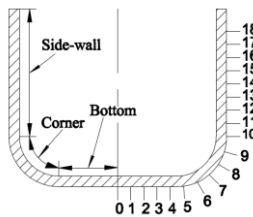


(a) Cross-section (b) Side view

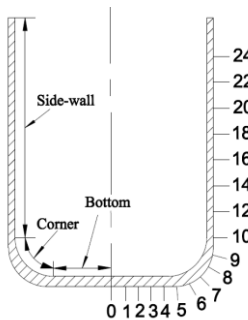
**Fig. 5** Cups drawn at first stage



(a) Drawn cup



(b) Redrawn cup



(c) Ironed cup

**Fig. 3** Measuring position for dimensional accuracy

시편의 양면에 드로잉유(RENOFORM 7319)를 도포하여 다이의 중심에 위치시키고 펀치를 하강시키면서 성형하였다. 4개의 공정을 거치면서 소재의 방향성을 일정하게 하고 실험의 일관성을 위해 시편 표면에 압연방향을 표시하고, 이 방향이 항상 금형의

똑같은 위치에서 성형되도록 하여 실험 오차를 줄이고자 하였다.

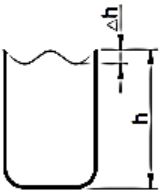
각 공정에서 성형된 원통컵에 대하여 외경과 두께, 경도를 측정하였다. 외경의 측정위치는 Fig. 3에 표시하였다. 두께에 대해서는 압연방향에 맞추어 원통컵의 중심 단면을 절단하고 폴리싱한 후 포인트 마이크로미터로 측정하였다. 그리고 경도에 대해서는 분할된 시편을 에폭시 수지에 마운팅하여 경화시킨 후에 마이크로비커스 경도계를 이용하여 측정하였다.

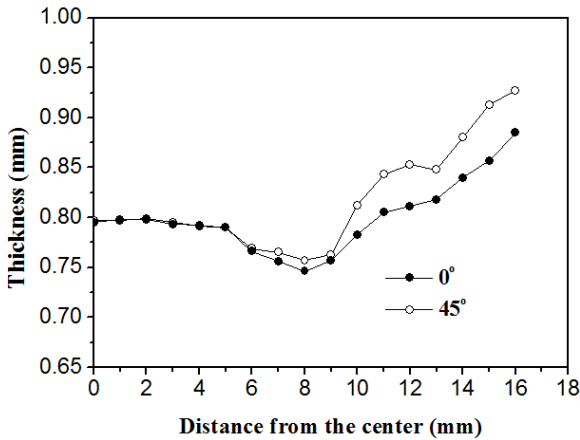
### 3. 실험결과 및 고찰

#### 3.1 이방성의 영향

Fig. 1의 공정순서에 따라 성형된 원통컵 사진이 Fig. 4에 주어져 있다. 그림에서 보는 바와 같이 본 연구에 사용한 소재는 Table 1의 이방성 계수(R-value)에서 알 수 있는 것처럼 압연방향에 따른 이방성으로 인해 성형된 제품의 끝 단부에서 이어링 불량이 나타나고 있다. 이어링 현상은 이방성 계수가 큰 0°, 90° 방향으로 산(ear)이 형성되고, 이방성 계수가 작은 45° 방향으로 골(valley)이 형성되는데 이러한 것이 Fig. 5(a)에 나타나 있다. 이방성 계수가 작은 골 부분의 측벽 두께가 산 부분의 측벽 두께보다 더 두꺼워지기 때문에 드로잉 작업후의 외측벽이 제한된 금형 틈새(소재 두께의 1.2배)에 의해 일부 아이어닝된 흔적이 Fig. 5(b)의 점선 표시와 같이

**Table 3 Height measurement of cup and ear**

| Process    | Maximum Height(h) | Ear height( $\Delta h$ ) | Remark  |
|------------|-------------------|--------------------------|---|
| Drawn      | 11.4              | 1.24                     |  |
| Redrawn    | 13.48             | 1.09                     |   |
| 1st ironed | 17.27             | 1.38                     |   |
| 2nd ironed | 20.67             | 2.03                     |   |



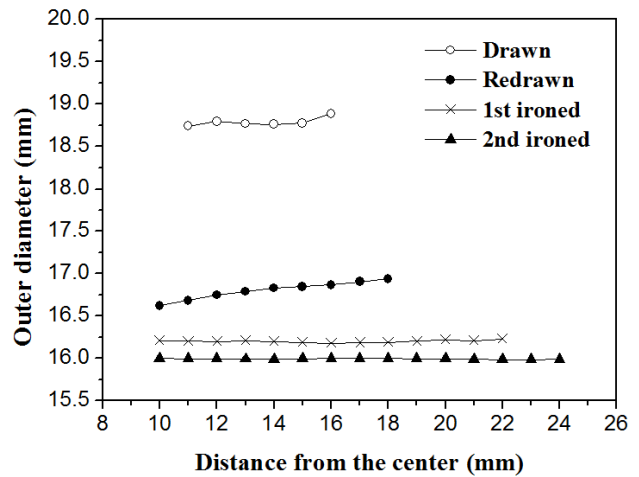
**Fig. 6 Thickness distribution of a drawn cup with respect to angle to the rolling direction**

원주 방향에 따라 다르게 나타나 있다.

공정순서에 따라 성형된 Fig. 4의 제품들에 대해 원통컵의 최대높이와 이어링 불량의 귀 높이(ear height)를 측정된 결과가 Table 3에 주어져 있다.

이 귀 높이는 재드로잉의 경우엔 끝 부분의 상대적인 두께 증가와 급형 틈새(소재 두께의 1.1배)에 의한 아이어닝 현상으로 드로잉 제품의 귀 높이 보다 작아지고, 그 이후의 공정에서는 아이어닝이 진행될수록 귀 높이가 증가되는 것을 알수 있다. 대체로 컵 최대높이에 대한 귀 높이 비율은 (8~11)% 범위인 것으로 나타났다.

이러한 이방성으로 인한 측벽의 두께 변화를 조사하기 위해 드로잉된 원통컵을 압연방향과 압연방향에 45° 방향으로 절단하여 Fig. 3(a)의 측정 위치별로 측정된 두께 분포가 Fig. 6에 나타나 있다. 절단면의 두께는 드로잉되기 시작하는 코너로부터 측벽 끝 단까지 증가하고 있을 뿐만 아니라, 똑같은 높이 위치에서도 이방성에 의해 두께가 변하고 있



**Fig. 7 Comparison of outer diameter of cups**

음을 알 수 있다. 즉 이방성 소재의 드로잉된 원통컵 측벽은 높이 방향과 원주 방향으로 모두 두께가 변화하고 있기 때문에 제품의 치수 정밀도를 높이는 데 한계가 있음을 예측할 수 있다.

### 3.2 성형품의 정밀도 및 경도 비교

각 공정에서의 원통컵 외경을 압연방향 기준으로 측정 위치에 따라 측정된 결과가 Fig. 7에 주어져 있다.

공정이 진행됨에 따라 컵 높이가 커지고 직경이 감소하고 있는데, 치수 정밀도는 아이어닝되면서 균일해지는 것을 알 수 있다. 높이 방향으로 드로잉 제품의 외경 편차는 0.15mm이고, 재드로잉에서는 0.25mm로 증가하지만, 1차 아이어닝(아이어닝률 25%)에서는 0.05mm, 2차 아이어닝(아이어닝률 37.5%)에서는 0.01mm로 크게 향상되고 있다.

또한 다이 내경 치수와 제품 외경 치수를 비교할 때 드로잉 컵은 다이 치수 기준으로 (-0.18)~(-0.03)mm, 즉 다이 내경보다 작은 측벽이 성형되었고, 재드로잉 컵은 (-0.07)~0.18mm, 1차 아이어닝 컵은 (-0.02)~0.03mm, 2차 아이어닝 컵은 (-0.01)~0mm로 치수 차이가 거의 발생하지 않았다. 특히 2차 아이어닝 컵의 경우엔 다이 치수 기준으로 10 $\mu$ m 이내의 정밀도를 나타냈다.

Fig. 8은 각 공정 별 원통컵의 두께를 압연방향 기준으로 측정된 것이다. 드로잉 컵은 코너부 중앙에서 소재 두께의 0.93배(0.74mm)로 얇아진 후, 측벽 끝 단으로 갈수록 1.12배(0.90mm)까지 두꺼워지고 있으며, 이런 현상은 재드로잉 컵에서도 유사하게

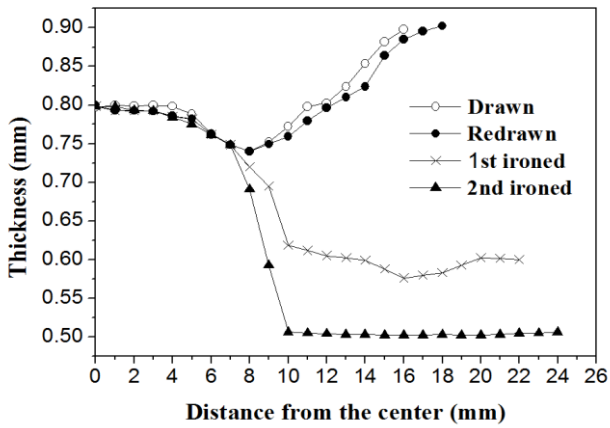


Fig. 8 Thickness distribution after each process

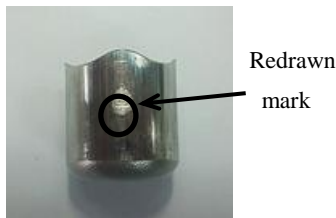


Fig. 9 Redrawn surface remained after 1st ironing

나타나고 있다. 아이어닝 공정에서는 측벽 두께가 아이어닝되면서 두께가 균일하게 변형되어 가지만 1차 아이어닝보다 2차 아이어닝의 경우가 보다 더 균일한 두께의 측벽이 성형되고 있음을 알 수 있으며, 이런 현상으로 인해 앞에서 기술한 바와 같이 외경 치수 정밀도도 더 우수하게 나타난 것이다.

1차 아이어닝 컵의 측벽부 두께 분포를 보면 측정 위치 16mm 부근에서 두께가 얇아지고 있는데, 이것은 Fig. 9의 사진에서 보는 바와 같이 1차 아이어닝된 후에도 재드로잉 표면이 아이어닝되지 않고 그대로 남아있기 때문에 두께가 얇게 측정된 것이다. 이런 흔적은 컵의 같은 높이 위치에서 일정 간격의 원주방향으로 4곳에 나타났다.

Fig. 10은 2차 아이어닝된 컵을 압연방향 기준으로 0도, 45도 방향으로 절단한 단면의 두께를 측정된 것이다.

드로잉된 컵에서는 Fig. 6 에서와 같이 압연방향에 따라 두께 분포가 다르게 나타났지만, 2차 아이어닝 컵에 있어서는 압연방향에 관계없이 일정하고 균일한 두께 분포를 나타내고 있다. 즉, 소재의 이방성 영향을 받지 않으면서 정밀도를 높이기 위해서는 적정량의 아이어닝 공정이 필요할 것으로 판단된다.

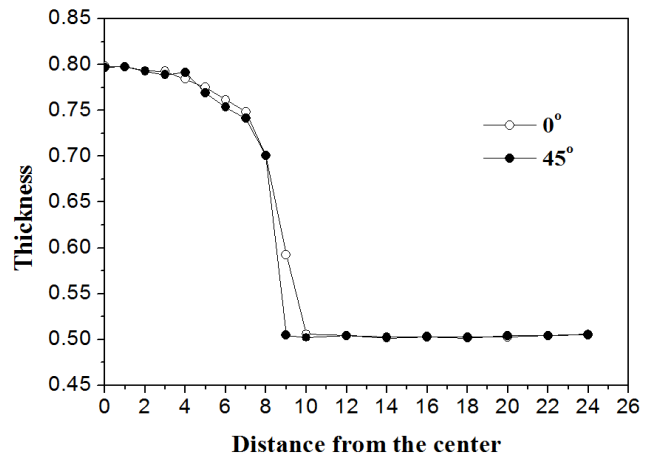


Fig.10 Thickness distribution of 2nd ironed cup with respect to angle to the rolling direction

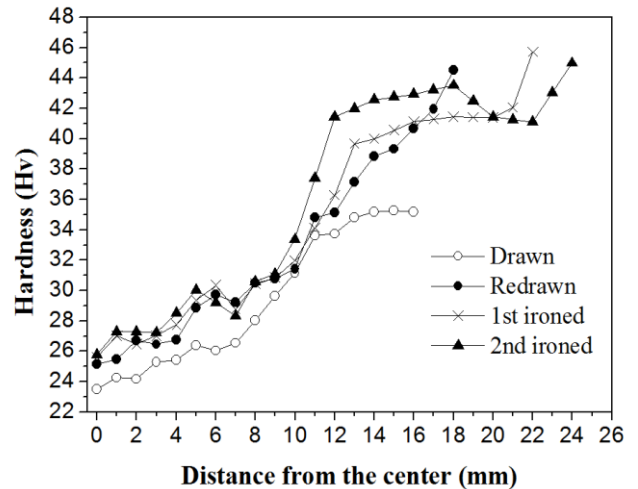


Fig. 11 Hardness distribution after each process

Fig. 11은 Fig. 9의 동일 제품에 대해 경도 분포를 비교한 것이다. 경도는 두께 분포 경향과는 달리 밑바닥으로부터 측벽 끝 단으로 갈수록 계속 증가하고 있으며, 또한 드로잉,재드로잉,아이어닝의 공정이 순차적으로 진행됨에 따라 제품도 공정 별로 계속 가공경화되면서 경도가 증가되고 있다. 그러나 2차 아이어닝 컵의 측벽 끝 단부에서 경도가 일부 감소하다가 증가한 경향을 보인 것은 Fig. 9와 Fig. 10에서 기술한 바와 같이 재드로잉 측벽 표면이 그대로 잔존되면서 경화되지 않았음을 나타내는 것이다. 측벽부의 경도 증가 경향을 보면 재드로잉 컵의 경도는 급격히 증가되는 반면, 드로잉과 아이어닝 제품의 경우엔 경도가 서서히 증가되고 있다.

## 4. 결론

본 연구에서는 두께 0.8mm 알루미늄 소재를 사용하여 4 공정(드로잉, 재드로잉, 1,2 차 아이어닝)을 거쳐 원통컵을 성형할 때 발생하는 이어링 불량과 각 공정에서 성형된 원통컵의 치수 정밀도를 비교 분석하였으며 이의 실험 결과를 정리하면 다음과 같다.

(1) 소재의 이방성에 의한 이어링 불량과 이로 인한 컵의 두께 변화가 드로잉 제품의 경우 높이 방향뿐만 아니라 원주 방향으로도 불균일하게 발생하였다.

(2) 이방성에 의한 컵 측벽부의 얇아진 두께로 인해 1 차 아이어닝 후에도 재드로잉된 표면의 흔적이 남아있어 이를 제거하기 위해서는 적정 아이어닝률(37.5%)의 추가 공정이 필요하다.

(3) 드로잉 공정이 진행될수록 두께와 외경 치수 정밀도가 나빠지고 있지만 아이어닝 공정이 진행되면서 정밀도 향상이 나타났는데, 1 차 아이어닝에서는 0.05mm, 2 차 아이어닝에서는 0.01mm 이내의 두께와 외경 치수 정밀도를 나타냈다.

(4) 원통컵 드로잉 공정에 있어서 제품의 치수 정밀도를 수십 마이크로 단위로 향상시키기 위해서는 아이어닝 공정이 필요한 것으로 나타났다.

## 후 기

본 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

## REFERENCES

- [1] 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.
- [2] 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. Auto. Eng.*, Vol. 11, No. 4, pp. 35~42.
- [3] S. B. Park, Y. Choi, B. M. Kim, J. C. Choi, J. Lee, 2000, A Study on the Computer-Aided Design System of Axisymmetric Deep Drawing Process(II), *Trans. Mater. Process.*, Vol. 5, No. 1, pp. 61~71.
- [4] K. H. Na, S. W. Choi, T. H. Choi, W. J. Chung, J. H. Kim, H. S. Bae, 2000, A Development of Design Support System for Multistep Deep Drawing Process, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 9, No. 6, pp. 638~643.
- [5] F. Vollertsen, H. S. Niehoff, Z. Hu, 2006, State of the Art in Micro Forming, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 46, No. 11, pp. 1172~1179.
- [6] H. K. Kim, J. D. Kim, Y. M. Heo, W. J. Kim, 2012, A Comparative Study of Failure Criteria for Magnesium Alloy Sheet under Warm Press Forming Condition, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 21, No. 2, pp.113~118.
- [7] H. Y. Ryu, Y. E. Kim, J. H. Kim, 2001, Improvement of Square Cup Drawability of Clad Sheet Metal by Warm Forming Technique, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 10, No. 3, pp. 253~260.
- [8] D. H. Kim, 1998, Experimental Study on Minimizing Wall Thickness Thinning for Deep Drawing of Circular Shells, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 7, No. 4, pp. 393~399.
- [9] J. M. Lee, J. H. Kim, S. T. Won, 2002, Influence of Process Design Scheme on Product Qualities in Cylindrical Cup Drawing, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 11, No. 8, pp. 716~723.
- [10] J. K. Chung, W. S. Cho, T. S. Lee, 2004, Combined Process of Ironing and Redrawing in Progressive Drawing, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 28, No. 5, pp. 664~661.
- [11] H. W. Lee, J. H. Bae, C. Kim, 2013, A Study on D.D.I. Load for Forming of the CNG Storage Vessel, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 30, No. 6, pp. 629~637.
- [12] Y. W. Yun, S. H. Kang, C. K. Yun, J. H. Lee, 2009, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., Autumn(editor: Y. T. Keum), *Kor. Soc. Tech. Plast.*, Seoul, Korea, pp. 403~407.