

원형컵 디프 드로잉의 성형해석에 의한 공정설계

정완진* · 김종호* · 류제구*
(2003년 7월 25일 접수)

New Design of Cylindrical Cup Deep Drawing by Forming Analysis

W. J. Chung, J. H. Kim and J. G. Ryu

Abstract

A systematic approach for the process design in deep drawing is necessary to improve the quality of drawn cups. This study concentrates mainly on the influence of process design strategy on the product quality. Different types of process design were chosen from initial blank of 100mm in diameter to make final cup of 50mm in diameter. In order to make this cup, we used 2-stage deep drawing. Forming analyses are carried out to find out better design in terms of drawing force. It is proposed that the process design, in which maximum drawing forces during successive operations are equal, is a more desirable one. Through experiment, it is found that the proposed case shows equivalent values in terms of maximum drawing force during successive operations in real process and can achieve the best product quality in terms of dimensional accuracy. Thus, it is shown that proposed design is very effective in the improvement of quality in drawn cups and may be extended to deep drawing with more stages.

Key Words : Deep Drawing, Forming Analysis, Minimum Drawing Force, Product Quality

1. 서론

현재 금속성형분야에서 디프 드로잉 공정은 성형품의 강도에 비해 경량이면서, 제조원가가 낮고 양호한 표면가공 및 높은 정밀도를 얻을 수 있는 장점이 있어 자동차산업의 발달과 함께 그 중요성이 날로 증가하고 있으며, 이에 대한 이론적, 실험적 연구가 활발히 진행되고 있다. 원형컵 제품의 경우에는 몇 단계 공정을 거쳐 제작되는 것이 일반적이며 중간공정 설계방법에 따라 제품의 품질이 좌우되어 중간공정 설계방법에 대한 체계적인 접근 방법이 필요하다. 따라서 지금까지 이에 대

한 연구가 활발하게 수행되어 왔다.⁽¹⁻⁸⁾

Karzhavin⁽¹⁾은 다단의 축대칭 컵 연구에서 풀림 처리하지 않은 디프 드로잉의 경우에 5 가지의 파단 현상이 공정별로 다른 형태로 생성됨을 발표하였다.

또한 Park⁽²⁻³⁾은 드로잉률 데이터를 이용한 드로잉공정의 자동설계를 통해 원형컵 드로잉 공정에 적용될 수 있는 프로그램이 제시되었으며, 그 후 Na⁽⁴⁾는 공정설계를 체계적으로 수행하기 위해 다공정을 필요로 할 때 중요형상단계(Key stage)와 레이아웃(Lay out)의 개념을 도입하여 유한요소 해석과 함께 자동 공정설계를 할 수 있는 통합시

* 서울산업대학교 금형설계학과

스텝을 발표한 바 있다. 그리고 Yang⁽⁵⁾은 원형컵 드로잉 공정에서 재드로잉과 역 재드로잉에 대한 두 공정의 성형특성 차이를 비교하였으며, Kim⁽⁶⁻⁷⁾은 스테인리스강판(STS305)의 성형조건을 실험적으로 연구한 결과, 중간 풀림 열처리없이 성형할 수 있는 최적 조건들을 조사하여 기존의 디프 드로잉공법에 아이어닝(ironing)작업을 복합시킨 아이어닝 디프 드로잉 공법의 유용성을 입증하였다. 또한 Kim⁽⁸⁾은 원형컵 제품을 2 회의 공정으로 나누어 성형하는 경우에 대하여 실험을 수행하고 중간 공정 설계에 따른 제품의 품질에 대한 영향에 대하여 연구하고 최적공정 설계방법을 제시하였다. 그러나 실험적 방법에 의하여 최적공정을 도출하기에는 시간적, 재정적 장애가 큰 단점을 내포하고 있다.

따라서 본 연구에서는 여러 단계의 디프 드로잉공정을 사용하여 원형 컵을 성형하는 경우에 해석적인 방법을 이용하여 보다 적합한 공정설계를 탐색하는 방법을 제시하고자 한다. 본 연구에서는 원형컵 제품을 2 회의 디프 드로잉 공정으로 나누어 성형하는 경우에 대하여 연구를 수행하였다. 2 회의 공정 중에 1 차 드로잉과 재드로잉의 최대 드로잉하중이 가장 균일한 공정을 해석적인 방법으로 탐색하여 이 경우를 바람직한 경우로 제안하였다. 실제 이에 따른 실험을 수행하고 드로잉 하중 및 성형품질을 관찰함으로써 해석을 이용한 설계방법의 유효성을 검증하고자 한다

2. 유한요소해석을 이용한 공정설계

2.1 실험에 의한 원형컵 드로잉에 대한 최적설계연구

Kim⁽⁸⁾은 최근 실험에 의한 연구에서 두께 0.5mm의 스테인레스 강판(STS 304)을 디프 드로잉 공정을 이용하여 Fig. 1과 같은 최종성형품을 만들기 위하여 공정설계를 수행하였다.

Fig. 2는 Kim⁽⁸⁾이 수행한 연구에서 적용한 1차 드로잉공정으로 성형한 제품(case 1)과 서로 다른 드로잉비를 적용시킨 두 개의 재드로잉 공정(case 2,3)을 보여 준다.

Fig. 3은 각 공정조건에 따른 드로잉하중과 스트로크 선도를 보여 주고 있다. 여기로부터 구한 공정별 최대 드로잉하중을 Table 1에 정리하였다. 1회 공정으로 성형하는 Case 1 보다는 2회로 공정을 분할하면 하중감소를 기대할 수 있고 하중 감소 비율이 약 15%이었다. 공정별로는 Case 2 보

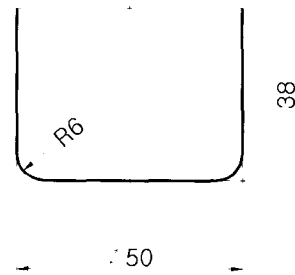


Fig. 1 A finished cup after drawing

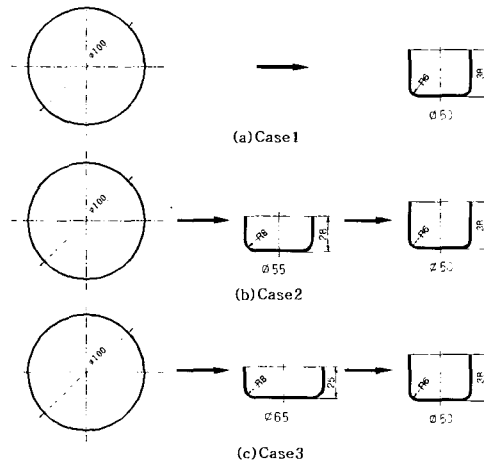


Fig. 2 Process design scheme for deep drawing

다 Case 3에서 다소 감소효과가 큰 것으로 나타났다. 일반적으로 다공정설계에 있어서 공정간의 하중은 균일하게 분포되는 것이 제품품질에 좋은 영향을 미치게 되는데 case2나 case3 둘 다 1차 드로잉과 재드로잉 시 성형력이 불균일함을 확인할 수 있었다. 또한 성형결과를 검토한 결과에서도 Case 2와 Case 3의 공정 중 어느 것이 더 좋은 공정이라고 단정하기가 힘들었고 두께분포와 경도 비교에 있어서도 뚜렷한 차이를 발견하기 힘들었다.

Table 1 Maximum drawing forces for each process Design⁽⁸⁾

Case1	Case2		Case3		Max Reduction(%)
	1st	2nd	2st	2nd	
61.5	52.3	41.0	34.9	52.2	15

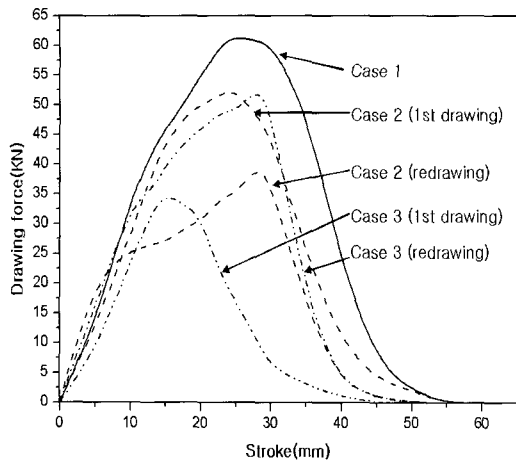


Fig. 3 Drawing force-stroke curves for STS304 Material⁽⁸⁾

2.2 성형해석에 의한 최적공정의 탐색

Kim⁽⁸⁾의 연구결과에서 Case 2 는 1 차 드로잉력이 크고 Case 3 는 재 드로잉력이 크므로 Case 2 와 3 사이에 균일한 하중 분포를 나타내는 공정이 존재하는 것을 예상할 수 있기 때문에 Case 2 와 Case 3 사이에서 1 차 드로잉의 직경을 55mm 에서 65mm 의 범위에서 1mm 간격으로 변화시키며 1 차 드로잉과 재드로잉에서 드로잉력이 균일하게 나오는 공정을 탐색하기로 하였다.

균일 드로잉력을 가지는 공정설계를 탐색하기 위해 유한요소 해석 S/W 인 Z-STAMP⁽⁹⁾를 이용하여 1 차 드로잉과 재드로잉 공정에 대하여 해석하였다. Z-STAMP 는 외연적유한요소법을 사용하여 3 차원 판재성형을 해석할 수 있는 해석 S/W 로 이론적인 내용은 참고문헌⁽¹⁰⁾에 자세히 나와 있다. 소재 및 금형은 3 차원 솔리드모델러인 Pro/Engine-er 를 사용하여 금형설계에 맞게 모델링하였으며 Pro/Mesh 를 사용하여 유한요소를 생성하였다. 1 차 드로잉해석에 사용한 메쉬형상을 Fig. 4 에 그리고 재드로잉해석에 사용한 메쉬형상을 Fig. 5 에 각각 나타내었다. 금형의 경우는 삼절점 유한요소를 사용하여 생성하고, 다이 각 반지름과 펀치 각 반지름 부분의 경우는 보다 정밀한 해석을 위해 유한요소를 세밀하게 생성하였다. 소재는 4 절점 요소를 사용하여 표현하고 각반지름 부위에 변형을 표현하기에 충분한 요소가 배치되도록 모델링하였다.

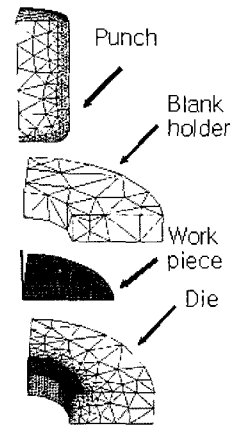


Fig. 4 Mesh for first drawing analysis

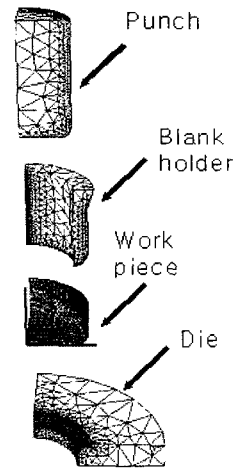


Fig. 5 Mesh for redrawing analysis

해석에 사용된 물성치를 구하기 위하여 소재의 압연방향에 따라 0°, 45°, 90°방향으로 각각 3 개의 KS B0801 의 13 호 시편으로 제작하여 인장시험을 하고 그 평균값을 얻었으며 그 값을 Table 2 에 표시하였다. 해석에 사용된 블랭크 홀딩력은 예비 실험을 통하여 구하였으며 3 절에 설명하였다. 다이반경과 펀치반경은 초 드로잉에서는 8mm, 재드로잉에서는 6mm 로 하였다. 그리고 클리어런스는 초드로잉에서는 0.7mm, 재드로잉에서는 1.0mm 로 하였다. 해석과정에서 마찰계수는 0.1 을 사용하였으며 펀치의 최대속도는 10m/s 를 사용하였다.

Table 2 material data for cup drawing analysis

Young's modulus(N/m ²)	19.60X10 ⁹
Poisson's ratio	0.28
Density(kg/mm ³)	7.8X10 ⁻⁶
Lankford's value	1.12
workhardening constant, K (N/m ²)	139.3X10 ⁶
workhardening exponent, n	0.52
Thickness(mm)	0.50

Fig. 4는 해석결과 얻어진 드로잉력을 보여 주며 이 결과에서 Ø59 일 때 드로잉력이 가장 균일하게 나타났다. 이 공정을 case 4로 명명하고 직경 59mm로 초드로잉한 다음 직경 50mm로 재드로잉하도록 한다.

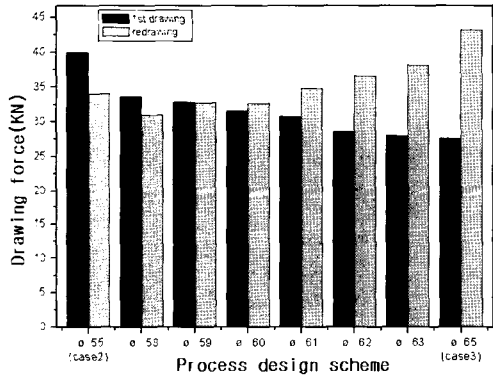


Fig. 6 Comparison of drawing force for optimal design

3. 실험방법 및 측정방법

실험은 Fig. 7의 만능 박판성형 시험기에서 블랭크홀딩력과, 윤활, 금형틈새, 펀치와 다이 각 반지름, 드로잉속도(약 125mm/min) 등을 일정하게 유지시킨 후, 실험을 수행하였다. 본 실험에 앞서 재드로잉까지 성공적으로 될 수 있는 윤활조건과 작업조건을 조사한 결과, 직경 50mm의 1차 드로잉과 2차 드로잉에서 모두 파단이 발생하여, 각 소재에 드로잉유 처리를 하는 것으로 결정하였다. 블랭크홀딩력은 드로잉작업에서의 주름발생을 억제할 수 있는 최소하중을 적용하였다. 각 조건 별로 예비실험을 한 결과 직경 65mm 제품 성형 시

에 8KN, 직경 59, 55, 50mm 제품 성형 시에는 1차 드로잉에서는 13KN, 재드로잉시에는 11KN을 적용하였을 때 깨끗한 원형컵을 얻을 수 있어 이와 같은 조건에서 본 실험을 수행하였다. 실험은 5회에 걸쳐 수행한 후 측정값은 이를 평균하였다.

성형된 제품의 두께분포를 측정하기 위해 시편을 압연방향에 대해 0°, 45°, 90°방향으로 제품단면을 절단하고 샌드페이퍼(#100~#1500)로 연마하여 시편을 준비하였다.

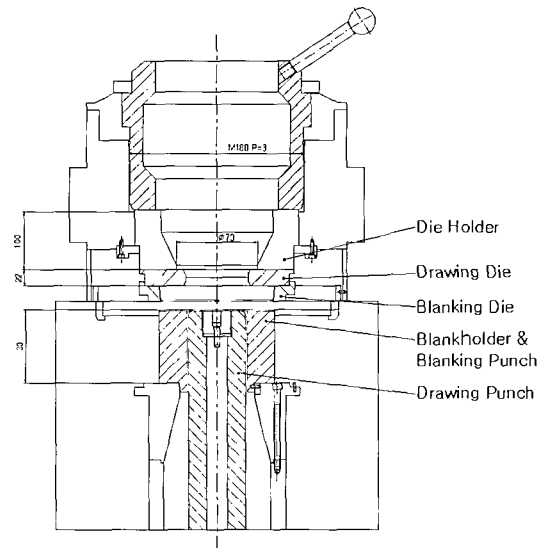


Fig. 7 Sectional view of assembled die parts in universal sheet metal testing machine

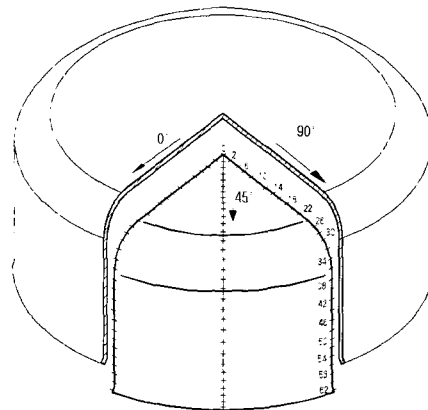


Fig. 8 Schematic view of measuring position for a drawn cup

각 공정별 성형된 제품을 Fig. 8 과 같이 절단하여 시편중심으로부터 2mm 간격으로 포인트 마이크로 미터를 이용하여 두께분포를 측정하였다. 제품의 높이는 귀현상이 일어난 부위(이하: 산높이)와 발생하지 않은 부위(이하: 골높이)를 디지털 하이트 게이지를 이용하여 측정하였다. 제품의 외경 치수는 디지털 버니어 캘리퍼스를 이용하여 압연 방향에 따라 제품 밑면에서 플랜지부위쪽으로 10mm 씩 증가시키면서 측정하였다.

4. 결과 및 고찰

Fig. 9 는 실험에 의한 각 공정조건에 따른 드로잉하중과 스트로크(stroke)선도를 나타내는 것으로 각각의 경우에 대한 1 차 드로잉 하중과 재드로잉하중을 동시에 나타내었다. 최적공정으로 예측된 Case 4 는 실제 드로잉 실험 결과에서도 1 차 드로잉 시 45.1KN, R 재드로잉 시 45.7KN 으로써 드로잉하중이 거의 비슷하게 나왔고, Case 1 에 비해 최대드로잉하중 감소 비율이 1 차 드로잉시는 26.7%, 2 차 드로잉시는 25.7%로 나타났다. 또한 case 2 와 case 3 에 대해서도 현저하게 균일한 하중 결과를 나타내어 해석에서 예측한 경향과 부합함을 알 수 있다.

Fig. 10 에 실험에 의하여 측정된 두께분포를 나타내었는데, 중심에서 25~30mm 거리에 있는 지점은 펀치 각 반지를 원호가 끝나 측벽과 연결되는 부분으로 이곳에서 재료 두께가 가장 얇게 되어 있다. STS304 소재는 가공경화지수가 매우 큰 소재이므로 측벽과 플랜지에서 가공경화현상이 크게 발생하여 그 영향으로 펀치 밑면에서의 두께 감소가 현저히 나타났다.

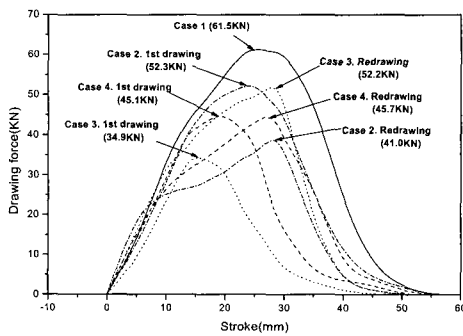


Fig. 9 Drawing force-stroke curve for STS 304 for different process designs

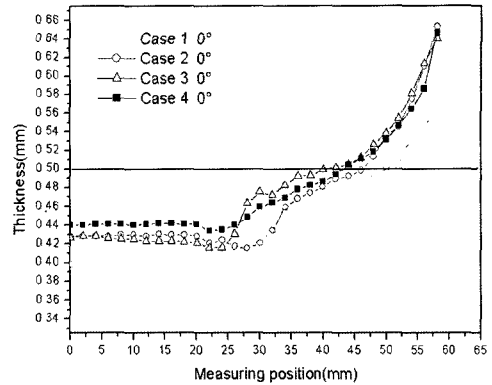


Fig. 10 Thickness distribution of STS 304 drawn cup along the rolling direction

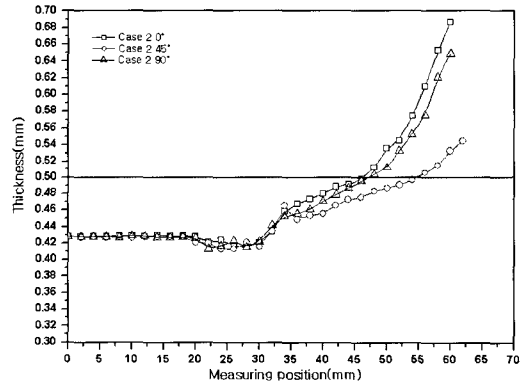


Fig. 11 Thickness distributions of SPCC drawn cup with respect to the rolling direction

재드로잉 공정으로 성형된 제품은 Case 1 의 경우보다 고른 두께 분포를 나타내며, Case 2, Case 3, Case 4 의 제품 밑면에서의 두께가 균일함을 알 수 있다. Case 4 의 경우 제품의 밑면부가 두께감소 현상이 가장 적게 일어났고 최소 두께가 가장 크다. 또한 전체적으로 Case 4 의 경우가 가장 균일한 두께 분포를 보여 준다. Fig. 11 은 압연방향에 따른 두께분포를 보여 주는 데, 45° 방향이 플랜지 부위에서 두께가 0° 와 90° 에 비해 두께가 작음을 알 수 있다. Fig. 12 는 설계방법에 따른 산 높이와 골 높이를 표시하고 있다. Table 3 에는 구체적인 수치를 표시하였다. 최대성형하중이 저하함에 따라 산 높이와 골 높이가 감소하고 있음을 알 수 있고 Case 4 가 평균 높이가 가장 낮아 두께 분포가 가장 좋을 것을 예측할 수 있다. 귀 발생 높이

는 Case 3 가 가장 작은 것을 알 수 있어 귀 발생을 줄이기 위해서는 1 차 드로잉 하중보다 재드로잉 하중이 큰 것이 유리함을 알 수 있다.

Table 3 Comparison of height for drawn cups
(unit:mm)

Process	Height		Variation (Δh)
	Upper (h_{max})	Lower (h_{min})	
Case 1	43.73	40.73	3.00
Case 2	42.06	39.19	2.87
Case 3	40.28	38.19	2.09
Case 4	40.38	37.31	3.07

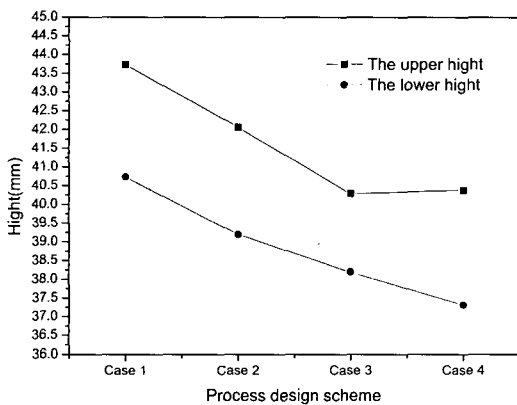


Fig. 12 Height variations according to process design scheme

성형품 외경의 평균 치수 측정 결과가 압연방향 각도에 따라 Table 4 에 주어지 있다. 압연방향에 따라 귀현상이 일어날 뿐만 아니라, 45 도 방향에서 외경치수가 수십 마이크론 작은 것으로 나타났다. 또한 컵 바닥에서부터의 높이 방향으로 10 mm, 20mm, 30mm 위치에서의 치수비교에서는 밑부분 직경이 제일 작고, 높이가 증가에 따라 증가하다가 상부에서는 감소하는 경향을 보이고 있으며, 높이방향의 외경편차는 Case 1 는 1.04mm 를 보이고, Case 2 는 0.23mm, Case 3 는 0.37mm, Case 4 는 0.34mm 로 단일 공정인 Case 1 이 2 단계 공정인 Case 2, Case 3, Case 4 보다 치수 산폭이 큰 것으로 나타났다. 압연방향에 따른 진원도(평면방향의 외경편차)도 측정위치가 높을수록 편차가 증가하는데 Case 1 의 경우는 그 편차가 0.06~0.77mm 로 Case 2 0.27~0.60mm, Case 3 0.38~0.70mm, Case 4 0.19~0.39mm 에 비해 크게 측정되었다. 따라서 Case

4 가 치수정확도에 있어서 다른 경우에 비해 우수함을 확인할 수 있었다.

Table 4 Comparison of diameter for drawn cups
(unit:mm)

Process	Dia. variation In cross-section			Mean diameter			Diameter variation to height direction
	H=10	h=20	h=30	h=10	h=20	h=30	
	Case 1	0.06	0.29	0.77	51.06	52.00	
Case 2	0.27	0.27	0.60	52.00	52.23	52.10	0.23
Case 3	0.38	0.60	0.70	51.70	52.07	52.06	0.37
Case 4	0.39	0.19	0.39	52.14	51.80	52.13	0.34

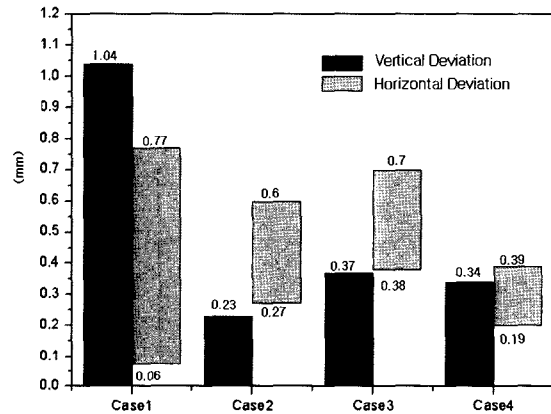


Fig. 13 Diameter deviations along horizontal and vertical direction

5. 결 론

원형컵의 다단계 드로잉 공정설계에 있어 연속되는 공정이 균일한 하중으로 성형될 경우 개선된 결과를 얻을 수 있다는 가정 하에 본 연구를 수행하였다. 유한요소해석에 의해 구해진 하중을 토대로 1 차 드로잉 하중과 재드로잉 하중이 균일한 공정을 적합한 공정으로 선정하였다. 하중이 불균일한 공정과 제안된 공정들에 대하여 실험을 수행하여 결과를 비교 검토한 결과 제안된 공정이 성형력에 있어서 균일하여 금형의 수명을 향상시킬 수 있고 저하중으로 성형할 수 있으며 제품품질에 있어서도 매우 우수한 결과를 나타내는 것을 입증하였다. 따라서 본 연구에서 제안된 균일하중을 갖는 공정설계가 유용하다는 가정과 유한요소해석을 이용한 하중예측 방법론이 유효함을 입증하였다. 본 연구는 2 단계 공정에 국한되

었으나 본 과제에서 제시한 최적설계방법은 일반적인 다단계 공정설계에도 적용이 가능할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- (1) V. V. Karzhavin, 1987, "Problem of Fracture of Axisymmetric Articles During Multiple - Step Deep Drawing", Allerton Press, Inc, pp. 96~101.
- (2) 박상봉, 최영, 김병민, 최재찬, 김보환, 1996, "축대칭 디프드로잉 제품의 공정설계 시스템에 관한 연구(I)", 한국소성가공학회지, 제 5 권 제 1 호, pp. 27~36.
- (3) 박상봉, 최영, 김병민, 최재찬, 이종, 1996, "축대칭 디프드로잉 제품의 공정설계 시스템에 관한 연구(II)", 한국소성가공학회지, 제 5 권 제 1 호, pp. 61~71.
- (4) 나경환, 최석우, 최태훈, 정완진, 김종호, 배형수, 2000, "다단 디프드로잉 공정의 설계지원 시스템 개발", 한국소성가공학회지, 제 9 권 제 6 호, pp. 638~643.
- (5) 양선규, 1996, "박판 원형컵의 제드로잉 가공 특성에 관한 연구", 서울산업대학교 석사논문.
- (6) 김두환, 1988, "원통형 디프 드로잉 용기의 벽 두께의 감소 최소화에 관한 실험적 연구", 한국소성가공학회지, 제 7 권, 제 4 호, pp. 393~399.
- (7) 김두환, 1998, "스테인리스강 305 의 디프 드로잉 가공에 관한 실험적 연구." 한국소성가공학회지, 제 7 권, 제 3 호, pp. 439~444.
- (8) 이재명, 김종호, 원시대, " 원형컵 드로잉의 공정설계변화가 제품품질에 미치는 영향", 한국소성가공학회지, 제 11 권, 제 8 호, pp. 716~723.
- (9) Z-stamp User manual, Cubic Tech Co., 2003.
- (10) 정완진, 조진우, 김충식, 이동우, "박판금속성형 해석시스템의 개발과 응용", '98 금형가공 심포지엄 논문집, 한국소성가공학회, pp. 19-27.