

프로그레시브 공정을 이용한 8 단 자동변속기용 솔레노이드 밸브케이스 치수정밀도 향상

김태현¹ · 배원병² · 배준호² · 김 철[#]

Improvement of Dimensional Accuracy for a Solenoid Valve Case for an 8-Speed Automatic Transmission by Using Multistage Drawing

T. H. Kim, W. B. Bae, J. H. Bae, C. Kim

(Received June 27, 2013 / Revised October 31, 2013 / Accepted November 4, 2013)

Abstract

The solenoid valve case of an 8-speed automatic transmission plays a role in maintaining the valve seal, which prevents an inflow of foreign substances into the transmission. The seal increases the reliability of the automatic transmission's performance. As a solution to pollution-related problems and to reduce fuel consumption, transmissions are being made with more gears to work more economically and have reduced fuel consumption. These newer transmission require greater dimensional tolerances and need to be manufactured with more precision. In the current study, the design of a multistage drawing considering both the product's height and limit draw ratio (LDR) of the material was performed using both a theoretical analysis and the expertise of industrial experts. The finite element modeling (FEM) simulation was performed using the commercial software, PAM-stamp, and tests of the dimensional measurements for a prototype were performed to verify the optimal progressive process.

Key Words : Progressive Process, Multi-Stage Drawing, Dimensional Accuracy, FEM Simulation

1. 서 론

환경 오염과 에너지 고갈 문제가 심화됨에 따라, 미래 환경 보호 차원에서 내연기관의 가스 저감 기술 및 고연비가 요구되고 있으며, 이를 실현하기 위하여 자동변속기는 점점 다단으로 나뉘어지고 있다. 또한 차량주행 중 변속 메카니즘은 운전자의 안전과도 직접적으로 연계되므로 각 부품의 신뢰성이 매우 중요하며, 그에 따라 치수적 정밀도 또한 점점 더 높게 요구되고 있는 실정이다. 8단 자동변속기는 Aluminum Career, Shift-by-Wire System, E-Module, 직접제어 솔레노이드 밸브로 구성되어 있으며, 직접제어방식의 솔

레노이드 밸브는 TCU(Transmission Control Unit)의 제어에 따라 각 유압 컨트롤계통에서 선택적으로 공급/배출되는 유압을 적절히 분배하여 변속 제어 응답성을 향상시키는 역할을 담당한다. 이러한 솔레노이드 밸브의 밸브케이스는 변속 작동 신뢰성을 확보하기 위하여 솔레노이드 밸브 제어계통의 자력 발생을 외부와 차단시켜주는 역할과 밸브내부에 외부 이물질 유입을 방지하여 기밀성을 유지하는 역할을 담당한다. 이러한 치수정밀도가 높은 밸브케이스를 제작하기 위해서 드로잉공정 특성에 대한 정확한 이해가 필요함에도 불구하고 현장 작업자들의 경험과 실험에 의한 시행착오에 의존하고 있는 실정이다.

1. 부산대학교 창의공학시스템학과

2. 부산대학교 기계기술연구원

Corresponding Author : Research Institute of Mechanical Technology,
Pusan Nat'l Univ., E-mail: chulki@pusan.ac.kr

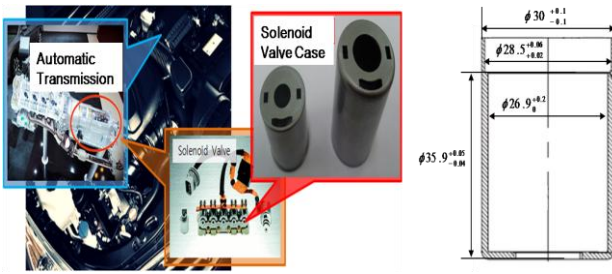


Fig. 1 Solenoid Valve and Protect Case

기존의 딥드로잉 공정 및 밸브케이스 생산방식은 여러 개의 단발 드로잉 금형을 이용한 프레스 공정으로 컵 형태의 케이스 형상을 성형한 후, 절삭가공으로 내경부의 단 부분을 가공하는 것이다[1~4]. 이 생산방식에서는 다수의 단발 공정에서 이송 시에 발생하는 오차, 축에 의한 편심 오차, 이송시간 등에 의해 치수불량이 발생하며 생산성이 떨어지는 문제점을 가지고 있다. 이에 본 논문에서는 Fig. 1과 같이 8단 자동변속기용 솔레노이드 밸브케이스의 치수정밀도 향상을 위하여 기존에 시도되었던 생산방식인 단발 및 절삭 공정이 아닌 프로그레시브 공정설계와 이에 대한 금형설계를 수행하였다. 또한 유한요소해석 및 시제품 제작을 통하여 설계된 공정을 검증하였다

2. 공정 설계

2.1 드로잉 공정 이론설계

드로잉 공정설계에서 주어진 블랭크(Blank)의 크기로부터 몇 번의 드로잉을 거쳐서 제품성형이 가능한가를 검토하여 최소가공횟수를 결정한다. 가공횟수는 생산성과 직결되기 때문에 드로잉 공정설계에서 매우 중요하며, 가공횟수를 결정하는데 중요한 자로는 한계드로잉비(LDR)가 있다[5]. 한계 드로잉 비는 결함이 발생하지 않으면서 가공이 이루어질 수 있는 최대 드로잉 비를 말하며 드로잉 펀치 직경에 대한 블랭크 직경의 비로서 표현된다. 한 번의 공정으로 제품을 가공할 때, 공정의 드로잉 비가 한계 드로잉 비를 넘어서게 되면 주름, 찢어짐 등의 결함이 발생할 수 있으므로, 한계 드로잉 비를 초과하지 않도록 다단 드로잉 공정을 설계하여야 한다. 하지만 이는 블랭크의 직경과 최종제품의 직경이 관련되어있는 소재의 LDR값만을 고려한 공정설계가 될 수 있으므로, 최종 제품의 높이 또한 고려하

여 공정설계를 할 필요성이 있다. LDR뿐 만 아니라, 최종 제품의 높이도 고려하기 위해서 최종 드로잉 제품의 직경에 대한 높이 비(HDR)를 이용하여 드로잉 공정수와 각 공정에서의 직경감소률(RD)을 계산할 수 있다. 초드로잉을 포함하여 i 번째 드로잉 공정에 대한 설계규칙은 다음과 같고, 각 공정에서의 변수는 Table 1에 나타내었다.

- 1) 재료물성 LDR, 최종 드로잉제품 형상치수 h_i, d_i 값을 식(1)과 (2)에 적용하여 HDR_i, RD_i, HDR_i 값을 계산한다.
- 2) i 공정에서의 RD_i 값은 i 공정에서의 HDR_i 값으로부터 계산되며, $(i-1)$ 공정에서의 HDR_{i-1} 값은 i 공정에서의 HDR_i 값과 RD_i 값으로부터 계산한다.
- 3) 동일한 방식으로 HDR_{i-1} 값으로부터 RD_{i-1} 값을 구한 뒤, 이 두 값으로부터 HDR_{i-2} 값을 계산한다.
- 4) 재드로잉의 HDR값이 최대허용 HDR값 이하가 되도록 계산을 반복하여 수행한다.
- 5) $HDR_i \leq HDR_{i-n+1} (n=1,2,\dots)$ 의 조건을 만족할 때의 n 값이 드로잉 공정 수가 되고 $i-n$ 번째 드로잉이 초드로잉이 된다.

블랭크와 첫 번째 드로우 컵의 표면적이 같음을 이용하여 아래의 식(1)과 같이, LDR 값으로부터 초드로잉의 최대 HDR값인 HDR_1 값을 구할 수 있다.

$$HDR_1 = \frac{h_1}{d_1} = \frac{1}{4} [(LDR)^2 - 1] \quad (1)$$

소성변형에서 체적불변조건으로부터 아래의 식(2)와 같이 HDR값과 RD값의 관계를 나타낼 수 있으며, $i=1$ 인 경우에 식(3)과 같이 HDR_1 값으로부터 초드로잉의 최대 직경감소률 값인 RD_1 값을 구할 수 있다.

$$(HDR_{i-1} + 0.25) = (1 - RD_i)^2 (HDR_i + 0.25) \quad (2)$$

$$RD_1 = 1 - 0.5 \sqrt{\frac{1}{HDR_1 + 0.25}} \quad (3)$$

재드로잉에서의 드로잉 한계를 구하기 위하여 최대 펀치력이 최대 허용 펀치력과 같음을 이용하여 유도된 식(4)를 통하여 RD_i 값을 구할 수 있다[5].

$$RD_i = 1 - \exp \left[\frac{\left(\frac{1+R}{2} \right)^{\frac{1+n}{2}} \left(\frac{n}{e} \right)^n}{4 \times 0.5^n e^{\frac{\mu\pi}{2}} [\ln(1+4HDR_i)]^2} \right]^{-1} \quad (4)$$

여기서, HDR_i 는 최종 드로잉제품에 대한 직경대
높이 비, n 은 가공경화지수, R 은 수직 이방성계수, μ
는 마찰계수이다[6~7]. 본 논문에서 제시된 모든 드
로잉 공정설계에서 식(1)~(4)를 이용하여 HDR 과 RD
를 구하였으며, 이를 유한요소 해석 및 시제품 제작
에 적용하였다.

본 논문에서 사용된 SPCD소재의 성형관련 물성
값들은 Table 2에 나타내었고, 최종 드로잉제품의 높
이와 직경은 각각 46mm, 30.3mm 이므로 HDR_i 값은
1.518이다. 식(1)~(4)와 상기의 설계규칙으로부터 수
행된 결과를 Table 3에 나타내었다.

Table 1 Design variables for drawing process

Process	First drawing	(i-2)th drawing	(i-1)th drawing	(i)th drawing
Variables	HDR_1	HDR_{i-2}	HDR_{i-1}	HDR_i
	RD_1	RD_{i-2}	RD_{i-1}	RD_i

Table 2 Material properties of SPCD

Variables	Value
Limit draw ratio	2.19
Normal anisotropy(R)	1.6525
Work hardening exponent(n)	0.234
Friction coefficient(μ)	0.12
Thickness	1.6mm

Table 3 The drawing process by drawing theories and rules

	1 st drawing	2 nd drawing	3 rd drawing
HDR	0.751462	1.08752	1.518152
RD	0.507389	0.256506	0.221184
Draw Ratio	2.03	1.345	1.284
Diameter(mm)	50	38	30.3
Height(mm)	37.5731	41.32575	46

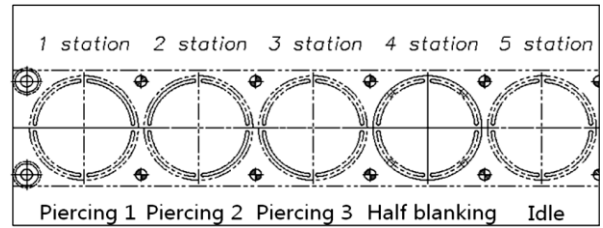


Fig. 2 The strip layout of pre processes

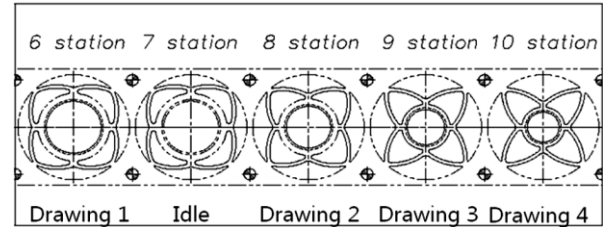


Fig. 3 The strip layout for drawing processes

2.2 프로그레시브 공정 및 금형 설계

이론을 바탕으로 다음과 같이 프로그레시브 공정
설계를 수행하였다.

2.2.1 전처리 공정

전처리 공정은 1~5스테이션으로써 파일럿 핀 용
구멍을 뚫고 스트립으로부터 원형의 블랭크를 생성
하기 위한 피어싱, 하프블랭킹 등의 공정으로 구성
되며 이를 Fig. 2에 나타내었다. 각 스테이션에 대한
스트립의 크기는 가로, 세로와 두께가 각각 100mm,
105mm, 1.6mm이고, 원형 블랭크의 직경은 95mm이
다. 파일럿 핀은 스트립의 위치 및 이동파치를 정확
하게 유지시키는 역할을 한다.

2.2.2 드로잉 공정

현장에서 이론적으로 설계된 공정에 의해 순차적
으로 높이를 증가시켜가며 성형하면 마지막 드로잉
제품의 벽 두께가 얇아지는 현상이 발생하였다. 이
러한 현상을 방지하기 위하여, 이론적으로 설계된
드로잉 공정에 한 공정을 더 추가하여 Fig. 3에서와
같이 총 4회의 드로잉으로 이루어진 공정으로 재설
계하였다. 3번째 드로잉 공정에서 최종 드로잉 제
품의 높이보다 더 높은 케이스를 성형한 뒤, 4번째 드
로잉에서 다시 최종 드로잉 제품의 높이로 성형함
으로써, 벽 두께가 얇아지는 현상이 발생한 부분을
보정하고 균일한 벽 두께 분포를 나타낼 수 있도록
하였다. 재설계 결과는 다음의 Table 4와 같다.

Table 4 The drawing process by field experience

	1st drawing	2nd drawing	3rd drawing	4th drawing
HDR	0.83	1.110	1.386	1.518
RD	0.507	0.192	0.159	0.150
Draw ratio	2.03	1.238	1.189	1.173
Diameter (mm)	50	41	35	30.3
Height(mm)	41.5	45.5	48.5	46

2.2.3 리스트라이킹 공정

리스트라이킹 공정은 드로잉 공정만으로 제품의 정확한 치수를 만족시킬 수 없는 경우, 드로잉 공정시에 제품의 벽두께를 도면상의 치수보다 조금 크게 성형한 후, 다듬질 성형을 수행하는 것으로, 성형공정에서 성형을 한 후에 매칭면 등의 관리가 필요한 부분이나 전단계의 성형공정에서 성형이 완전히 이루어지지 않은 부분을 다시 성형시켜주는 역할을 한다. 본 논문에서는 드로잉 공정만으로는 케이스의 정밀한 치수공차를 만족시키기 위해 한계가 있기 때문에, Fig. 4에서와 같이 드로잉 공정 후에 11~15스테이션을 리스트라이킹 공정으로 구성하여 내경단 성형 및 치수보정 가공을 수행하도록 하였다. 내경단 성형에 있어서 한 번에 모든 두께를 가공하게 되면 정밀치수공차를 만족시키기 어렵고 제품의 불량률 또한 높아지기 때문에 45.2% (0.33mm), 13.7%(0.1mm), 41.1%(0.3mm)의 비율로 나누어 가공을 수행하였다. 각각의 비율은 현장경험 및 작업조건에 따라 설정된 값들이며, 가공 비율에 따라서 달라지는 치수의 경향을 유한요소해석을 통하여 검증하였다. 정확한 두께 변화를 측정하기 위하여 팜스탬프 해석프로그램의 치수측정 모듈을 사용하였다.

2.2.4 후처리 공정

후처리 공정은 16~19스테이션으로써 Fig. 5에서와 같이 컵바닥부에 구멍을 뚫고 제품을 스트립으로부터 분리시키기 위한 피어싱, 블랭킹, 스크랩 컷팅 등의 공정으로 구성하였다.

2.3 드로잉 하중

드로잉 하중은 일반적으로 작업프레스 용량의 60~70% 수준이다. 드로잉 시, 가장 많은 하중이 작

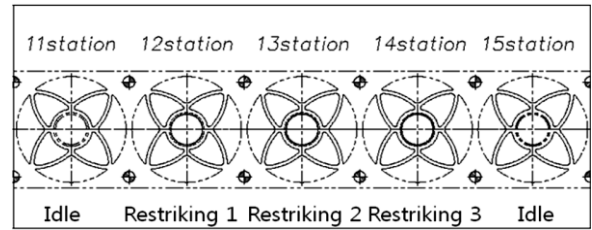


Fig. 4 The strip layout of restriking processes

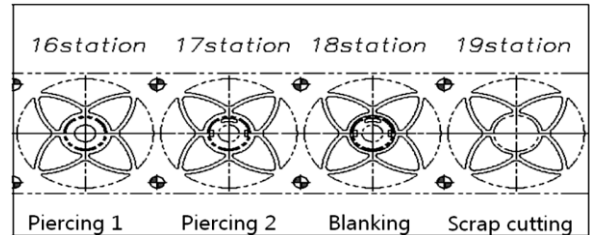


Fig. 5 The strip layout of post processes

Table 5 The drawing force

	First drawing	Second drawing	Third drawing	Fourth drawing
Diameter(mm)	46.8	37.8	31.8	27.1
Force(kN)	21.03	16.99	14.29	12.18

용하는 부분은 컵바닥 부근의 벽면부이며, 블랭크의 두께가 가장 얇아지고 결함이 발생하기 쉬운 부분이기도 하다. 이론 계산식을 통하여 각 공정들에 대한 드로잉하중을 계산하여 요구되는 실제 프레스 용량을 대략적으로 파악하고 하중적인 측면에서 설계공정을 검토하였다. 컵 바닥 부근의 응력은 Moore와 Wallace의 평면변형에서의 확산 넥킹(necking)이 발생하는 조건으로부터 Table 2의 SPCD재료의 물성과 식(5)를 이용하여 계산하였고, 그 결과를 Table 5에 나타내었다.

$$F = 2\pi dtK \left(\frac{1+R}{\sqrt{1+2R}} \right)^{1+n} \left(\frac{n}{e} \right)^n \quad (5)$$

3. 유한요소해석

설계검증에 필요한 성형해석을 수행하기 위하여, 헥사메쉬(Hexa mesh) 타입만을 제공하는 상용소프트웨어 팜스탬프(PAM-stamp)를 사용하여 박판성형해석

전용 프로그램에 재료(SPCD)의 수직이방성계수(1.6525)를 적용한 공정해석을 수행하였다. 프로그래시브 공정에 대한 해석을 수행하기 위하여 한 공정에 대한 해석을 수행한 뒤, 해석완료된 모델형상 및 성형이력으로 다음 공정에 대한 해석을 수행하였다.

3.1 모델링 및 경계조건

블랭크를 모델링 하기 위해서 아래의 Fig. 6과 같이 0.2mm의 매우 좁은 간격을 가지는 폐곡선 형태로 트리밍하여 노칭 라인을 구현하였으며, 스트립의 크기는 100mm×105mm×1.6mm, 원형 블랭크의 직경은 95mm이다.

드로잉 공정의 금형들은 펀치면과 다이면이 일치하기 때문에, 다이의 특정부분을 오프셋하여 펀치 및 홀더를 생성시키는 팜스탬프의 금형생성도구를 사용하여 Fig. 7과 같이 모델링 하였다.

리스트라이킹 공정의 금형들은 펀치에 내경부 단을 성형하는 부분이 존재하므로 펀치 면과 다이 면이 일치하지 않아 드로잉 공정의 금형을 생성하였던 팜스탬프의 금형생성도구의 오프셋 방법으로 다이와 펀치를 생성시킬 수 없다. 따라서 각각의 공정에 대한 다이와 펀치를 모두 모델링 하였다[8~9].

펀치, 다이 그리고 블랭크 홀더는 성형 중 변형이

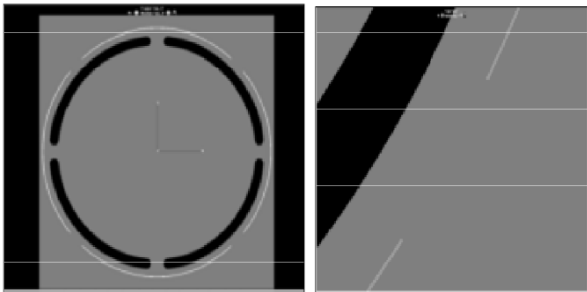


Fig. 6 Blank modeling

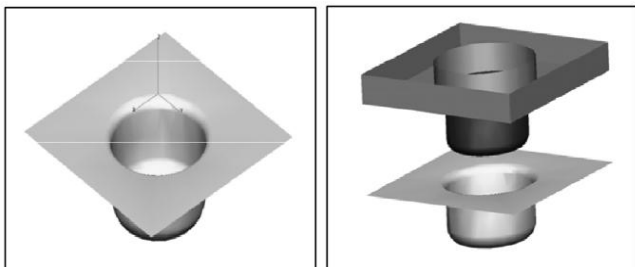


Fig. 7 Die models for the drawing process

없다고 가정하여 강체로 설정하였고, 블랭크는 SPCD물성, x축 방향의 압연 방향 및 8절점 육면체 요소인 헥사메쉬(Hexa mesh)를 사용하였다.

3.2 드로잉 공정

4회의 다단 드로잉 공정에 대한 해석을 수행하였으며, 주름발생 여부는 다이와 블랭크 사이의 간격을 체크하여 간격이 일정하면 주름이 발생하지 않는 것으로 판단하였고, Fig. 8과 같이 간격이 일정하지 않으면 주름이 발생하는 것으로 판단하였다.

아래의 Fig. 9는 기존의 3개의 다단 드로잉 공정과 각각 드로잉비 2.03, 1.24, 1.19, 1.17을 가지는 4개의 다단 드로잉 공정에 대한 각 공정별 바닥두께 변화에 대한 해석결과를 나타내었다. 3번째 드로잉 해석 결과에서 케이스바닥 부근의 벽 두께가 얇아지는 경향(1.6→1.17mm)이 나타나지만 4번째 드로잉에서 다시 원래의 두께와 근접하게(1.5~1.6mm) 복원되는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 모든 공정에서 다이와 블랭크사이의 간격이 일정하게 나타났으므로 주름이 발생하지 않았다고 판단된다.

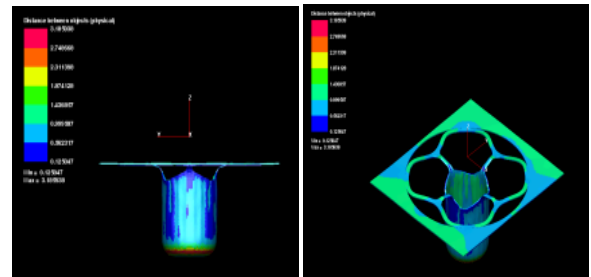


Fig. 8 A check of wrinkling by the distance between die and case

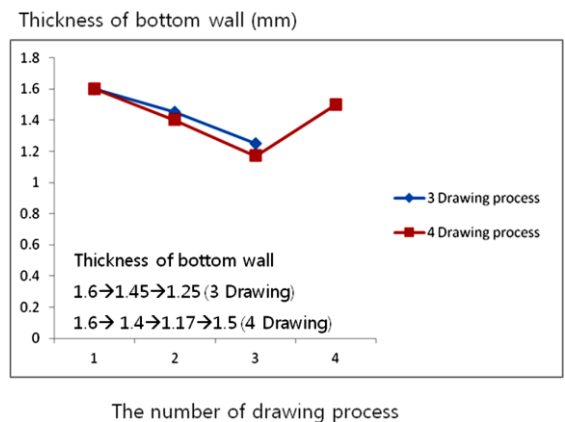


Fig. 9 The simulation results of thickness of bottom wall by 3 and 4 drawing process

3.3 리스트라이킹 공정

내경단 성형 및 치수보정이 이루어지는 3개의 리스트라이킹 공정에 대한 해석을 수행하였으며 내경단 가공비율에 따른 치수경향을 알아보기 위하여 다음의 Table 6과 같은 3가지 경우를 고려하였다.

Table 6 Three cases of the simulation for the restriking process

Forming ratio(%)		
Case 1	45.2→13.7→41.1	
Case 2	45.2→41.1→13.7	
Case 3	100(only 1 process)	

정밀한 공차가 요구되는 케이스의 주요치수들 (Critical dimensions)은 아래의 Fig. 10과 같으며 팜스탬프의 치수측정 모듈을 사용하여 각 치수들을 측정하였다.

그 중에서도 가장 정밀한 공차를 요구하는 내경의 치수(②: 28.52~28.56mm)에 대해 공정해석 프로그램(PAM-stamp)의 치수측정모듈을 사용하여 깊이 방향으로 옆면의 윗부분부터 바닥면까지 등간격(10구간)으로 측정된 유한요소 해석결과를 Table 7에 나타내었으며, 괄호 안의 값은 마지막 공정의 가공 비율을 나타낸다.

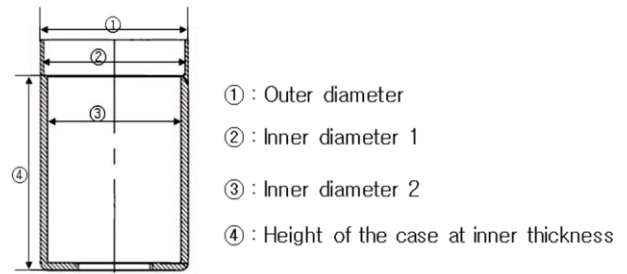


Fig.10 Critical dimensions of the case

Table 7 The results of simulation for restriking processes

No.	② : Inner Diameter 1(mm)		
	Case 1(41.1%)	Case 2(13.7%)	Case 3(100%)
1	28.574202	28.518387	28.563104
2	28.557766	28.552533	28.567476
3	28.547865	28.533068	28.578265
4	28.571131	28.519681	28.566131
5	28.558657	28.524550	28.568244
6	28.532277	28.539631	28.550037
7	28.558057	28.518316	28.568501
8	28.563492	28.536372	28.563472
9	28.553772	28.513742	28.573086
10	28.559145	28.521583	28.554113
Average	28.557636	28.527786	28.574245
Tolerance	28.52 ~ 28.56		

Case 2의 경우에는 하한공차 부근, Case 3의 경우에는 상한공차 부근에 치수가 분포되어 있는 경향을 보이며, Case 1의 경우일 때 제품에 요구되는 치수공차에 가장 근접한 치수 정밀도를 나타내었다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 금형 및 시제품 제작

4회의 드로잉 공정과 Case 1의 가공비율을 가지는 리스트라이킹 공정으로 구성된 프로그램을 금형 및 시제품을 아래의 Fig. 11 및 Fig. 12와 같이 제작하였다.

4.2 치수측정 테스트

제작된 시제품의 치수공차 만족여부를 검증하기 위하여 치수측정 테스트를 수행하였다. 단차 게이지 및 3차원 측정기를 이용하여 5회의 테스트를 수행하였으며, 아래의 Table 8과 같이 모두 치수공차를 만족하는 것을 확인하였다.



Fig.11 The progressive die



Fig.12 Progressive strips and final product of the case

잉 공정을 설계하였으며, 균일한 벽두께 성형을 위하여 현장경험으로 1회의 드로잉 공정을 추가하여 4회의 드로잉 공정으로 재설계하였다. 유한요소해석 결과, 4회의 드로잉 공정의 경우 주름이 발생하지 않았으며 균일한 벽두께를 나타내었다.

(2) 두께 0.73mm 내경부 단 성형을 위한 리스트라이킹 공정의 가공 비율을 세가지 경우로 나누어 유한요소해석을 수행한 결과, Case 1(내경단 가공비율: 45.2%→13.7%→41.1%)의 경우에 치수공차에 가장 근접한 치수 정밀도를 나타내었으며, 이를 리스트라이킹의 가공비율로 결정하여 케이스를 성형하였다.

(3) 4회의 드로잉과 Case 1의 가공비율을 가지는 리스트라이킹 공정으로 구성된 프로그래시브 금형 및 시제품을 제작하였으며, 정밀공차가 요구되는 주요 치수들에 대한 테스트를 수행한 결과, 모두 치수 공차를 만족한 것을 확인하였다.

후 기

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음.

Table 8 The results of dimension measurement tests

Dimensions (mm)		Values of the test(mm)				
		1	2	3	4	5
①	30 ^{+0.1} _{-0.1}	30.03	30.02	30.03	30.04	30.02
②	28.5 ^{+0.06} _{-0.02}	28.532	28.534	28.537	28.537	28.538
③	26.9 ^{+0.2} ₀	27.02	27.04	27.03	27.04	27.02
④	35.9 ^{+0.05} _{-0.04}	35.89	35.89	35.91	35.92	35.91

5. 결론

본 논문에서는 8단 자동변속기용 솔레노이드 밸브케이스의 치수정밀도 향상을 위하여 드로잉 설계 이론 및 현장경험을 적용하여 총 19스테이션으로 구성된 프로그래시브 공정을 설계하였으며, 유한요소해석 및 시제품 테스트를 통하여 설계된 공정을 검증하였다. 그 결론을 요약하면 다음과 같다.

(1) 소재의 한계드로잉비(LDR) 및 케이스의 높이를 고려한 드로잉 공정설계를 수행하여 3회의 드로

REFERENCES

[1] E. G. Yoh, S. H. Jo, Y. S. Lee, 2002, A Study on the Formability Factors of Axisymmetric Multi-Stage Deep Drawing Processes, Journal of KSMTE, Vol. 11, No. 4, pp. 6~11.

[2] C. S. Park, T. W. Ku, B. S. Kang, S. M. Hwang, 2004, Process Design and Blank Modification in the Multistage Rectangular Deep Drawing of an Extreme Aspect Ratio, J. Mater. Process. Tech., Vol. 153~154, pp. 778~784.

[3] B. C. Hwang, C. Kim, W. B. Bae, 2008, Development of an Automated Progressive Design System for Manufacturing Product with Multi Processes, Piercing, Bending, and Deep Drawing, J. Kor. Soc. Precis. Eng., Vol. 25, No. 12, pp. 55~64.

[4] 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. 654~661.

- [5] T. H. Kim, 2013, Improvement of Dimensional Accuracy for the Solenoid Valve Case of 8-shift Automatic Transmission by using Progressive Process, M.D. thesis, School of Mechanical Engineering, Pusan National University.
- [6] D. L. Ko, D. W. Jung, 2009, A Study on the Behavior of Wrinkling in the Square Cup Deep Drawing of Al Alloy, Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A, Vol. 33, No. 3, pp. 276~281.
- [7] K. C. Jun, 1993, Sheet Metal Forming, Bando, Korea, pp. 155~177.
- [8] H. Y. Kim, K. Y. Choi, I. H. Lee, C. K. Song, 2008, Die Design and Sheet Metal Forming Simulation using PAM-STAMP, KyoBo, Korea.
- [9] PAM-STAMP 2G 2011 User's Guide, Hankook ESI Co., Ltd.