

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터의 지원에 의해 연구되었으며 이에 관계자 여러분께 감사드립니다.

후방압출공정에서 치수정밀도 향상을 위한 초기소재형상 결정

김호창*, 김태형*, 김병민**, 최재찬**

Determination of Initial Billet Shape to Improve Dimensional Accuracy in Backward Extruded Cups

H. C. Kim*, T. H. Kim*, B. M. Kim**, J. C. Choi**

ABSTRACT

Experimental studies have been carried out to obtain uniform cups by one operation of backward extrusion. A lot of factors on dimensional accuracy of backward extruded cups are billet material, billet shape, punch shape, punch velocity, geometry of tool, tool material, and lubrication etc. In manufacturing cup-shaped parts by backward extrusion, it is very important to design the initial billet shape or the preform. The objective of this paper is to find that the shape of the initial billet is related to dimensional accuracy and also to manufacture the more accurate product simultaneously reducing the loss of material as forming the shape of the initial billet by means of upsetting.

Key Words: Backward Extrusion(후방압출), Initial Billet Shape(초기소재형상), Dimensional Accuracy(치수정밀도), Upsetting(단순압축)

1. 서론

종래의 금속성형공정은 전문가의 Know-how를 바탕으로 경험적으로 발달되어 왔다. 그러나 최근 금속성형공정은 소재비의 상승, 작업환경의 악화로 인한 숙련기술자의 부족 및 다품종 소량 생산 등의 문제점을 극복하기 위하여 생산성 향상, 소재 손실의 최소화, 예비성형을 통한 후속공정의 최소화 등 비용절감에 주력하고 있다.

일반적으로 냉간단조의 금형은 고가이기 때문에 많은 실험을 통한 시행착오를 거듭할 수 없는 여건이다. 따라서 다양하고 정밀한 제품을 개발함에 있어서 시행착오와 가공시간, 제작비 등을 최소화하여 효과적으로 제작하기 위하여 이론 해석을 바탕으로 금속성형공정설계를 CAD/CAM도입과 컴퓨터 시뮬레이션을 이용하는 방법이 많이 연구되고 있다.

후방압출공정은 다른 가공방법에 비해 가공속도가 빠르

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터

기 때문에 컵형상 제품의 대량생산에 주력해 왔으나, 오늘날에 와서는 종래의 대량생산 방식에서 탈피하여 중·소량의 정밀 제품을 생산하는 추세이다. 따라서 후방압출공정에 의해 균일한 벽두께를 얻기 위한 비교적 많은 연구가 수행되어 왔다⁽¹⁻⁵⁾.

후방압출가공품의 치수정밀도에 미치는 요인으로서 재료, 소재형상, 펀치형상과 가공속도, 금형의 형상과 재질, 윤활조건에 따른 온도의 영향 등의 많은 조건이 있다.

Kato 등은 후방압출공정 중의 소재와 금형의 열변형을 해석하였다⁽¹⁾. Bay 등은 단면감소를, 가공경화의 정도, 윤활조건에 따른 제품의 치수정밀도 향상을 위한 펀치형상을 실험으로 조사하였다⁽²⁾. Imai 등은 균일한 벽두께를 얻기 위해 가공속도에 따른 변형열의 영향을 제시하였고, 제품의 상·하부분의 비정상 변형과 치수정밀도와 의 관계를 밝혔다^(3,4). 그러나, 치수정밀도에 영향을 미치는 초기소재형상에 대한 연구는 비교적 적었다. 天野富男 등은 원통형 소재의 상·하부 가장자리를 절삭가공한 소재를 사용하여 가공한 제품이 완전 원통형 소재로 가공한 제품과 비교하여 치수정밀도가 양호함을 실험적으로 나타내었다⁽⁵⁾.

본 연구의 목적은 냉간후방압출가공 시 제품의 치수정밀도에 영향을 미치는 초기소재형상에 주 관점을 두었으며, 초기소재의 형상 결정에 있어서 원재료로부터 절단된 소재를 업셋팅으로 예비성형체를 가공하여 재료의 손실을 줄임과 동시에 최종 제품의 치수정밀도를 향상시키는 것이다. 원재료로부터 절단된 소재를 업셋팅하여 후방압출공정에서 사용하면 단면평행도를 향상시킬 수 있으며 절단된 소재의 버(Burr)등과 같은 결함도 제거할 수 있다. 업셋팅 시 마찰상수에 의한 배불림 현상과 펀치형상을 변화시키므로써 예비성형된 소재형상이 치수정밀도에 미치는 영향을 유한요소 시뮬레이션을 통해 검증해 보고자 한다.

2. 초기소재형상선정 및 유한요소 정식화

2.1 초기소재형상

완전 원통형 소재를 이용하던 과거의 공정과는 달리 天野富男 등은 Fig. 1과 같이 원통형 소재의 상·하부 가장자리를 절단한 주판 구슬 모양의 초기소재형상과 소재의 상·하부의 모퉁한 초기소재형상을 후방압출공정에 이용하면 최종 제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있음을 실험으로 입증하였다⁽⁵⁾.

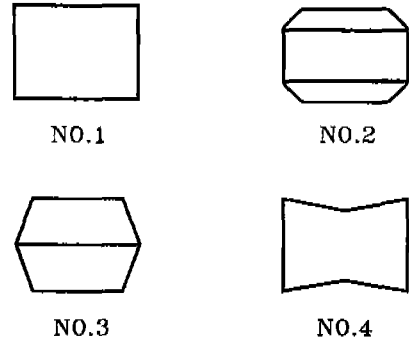


Fig. 1 Geometry for cut billets

또한 초기소재의 측면 원통부가 적을수록 후방압출된 최종 제품의 치수정밀도가 양호하다고 제시하였다. 그러나 초기소재의 절삭가공으로 인한 재료의 손실 및 초기소재의 가공에 소요되는 비용 등은 제품의 단가 상승 및 자동화를 추구하고 있는 금속성형산업의 추세로 볼 때 바람직한 현상으로 받아들이기 힘들다. 따라서 본 연구에서는 소재를 절삭 가공하지 않고 Fig. 2와 같이 업셋팅공정에서 마찰조건을 변화시키므로써 배불림 정도의 차이로 초기소재의 형상을 선정하였으며, 또한 실제 후방압출공정에서 사용하는 초기소재의 단면평행도를 개선하고 재료의 손실을 최소화하는 부가적인 효과도 기대할 수 있을 것으로 본다.

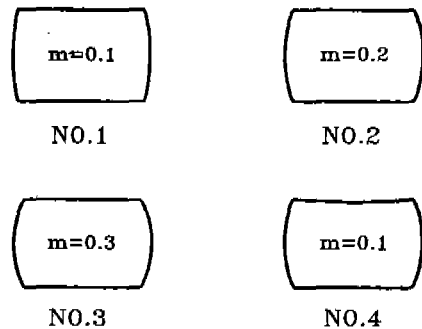


Fig. 2 Geometry for upset billets

2.2 유한요소 정식화

본 연구에서는 감소성 유한요소법을 사용하였으며, 이의 수식화 과정은 여러문헌^(6,7)에 자세히 소개되어 있으므로 여기서는 간략히 언급한다.

변형 중인 소재의 관성력을 무시하면 강소성재료의 범함수는 다음과 같다.

$$\Pi = \int_V \bar{\sigma} \bar{\epsilon} dV - \int_{S_f} \bar{t}_i v_i dS \quad (1)$$

여기서, $\bar{\sigma} = \sqrt{3/2 \sigma'_{ij} \sigma'_{ij}}$ 로 정의되는 유효응력이며, 여기서 σ'_v 는 편차응력이다.

$\bar{\epsilon} = \sqrt{2/3 \dot{\epsilon}_{ij} \dot{\epsilon}_{ij}}$ 로 정의되는 유효변형률속도,

$\bar{t}_i =$ 표면력, $v_i =$ 절점속도, $\dot{\epsilon}_{ij} =$ 변형률속도이다.

비압축성 조건을 고려하기 위하여 벌칙함수(penalty function), K 를 도입하면, 식(1)에 대한 일차 변분 범함수는 다음과 같이 표현된다.

$$\delta \Pi = \int_V \bar{\sigma} \delta \bar{\epsilon} dV + K \int_V \dot{\epsilon}_v \delta \dot{\epsilon}_v dV - \int_{S_f} \bar{t}_i \delta v_i dS = 0 \quad (2)$$

식(2)에서 $\dot{\epsilon}_v$ 는 체적변형률속도이다.

위 식은 일반적인 유한요소 분할화과정을 거치면 절점속도가 미지수인 비선형 방정식이 되므로 뉴턴-랩슨법(Newton-Raphson method)을 이용하여 해를 구하며, 초기 속도장은 직접 반복법(direct iteration method)을 이용하여 구한다.

3. 유한요소 시뮬레이션

본 연구에서 수행한 시뮬레이션 조건은 Table 1에 나타냈으며 해석 시 가정은 다음과 같다.

- (1) 소재의 단면은 완전 평행이다.
- (2) 펀치면과 다이의 마찰조건은 동일하다.
- (3) 모든 공정에 대해 클리어런스량은 동일하다.
- (4) 후방압출 시 초기소재의 체적, 펀치속도, 최종 편치위치 등은 모든 공정에 대해 동일하다.

본 연구에서는 초기소재의 형상 변화에 대해서만 치수 정밀도를 해석, 비교하였다.

실제 후방압출공정에서는 초기소재의 직경과 컨테이너 내경 (D_c) 사이에는 클리어런스가 존재하며 본 연구에서는 모든 공정에 대하여 클리어런스량이 동일하도록 업셋

Table 1 Process conditions for the simulation

PROCESS	UPSETTING		EXTRUSION	
	punch	friction(m)	punch	friction(m)
A	NONE		flat and conical	0.1,0.2
B	flat	0.1,0.2,0.3	flat and conical	0.1,0.2
C	conical	0.1,0.2,0.3	flat and conical	0.1,0.2

팅공정의 해석 시 편치행정을 제어하였다.

후방압출공정의 개략도는 Fig. 3과 같으며 단면감소율 (γ)은 다음과 같이 표현된다.

$$\gamma = \frac{D_p^2}{D_c^2} \quad (3)$$

여기서, D_p 는 펀치 직경이고, D_c 는 컨테이너 내경이며 본 연구에서는 단면감소율을 0.75로 동일하게 두었다.

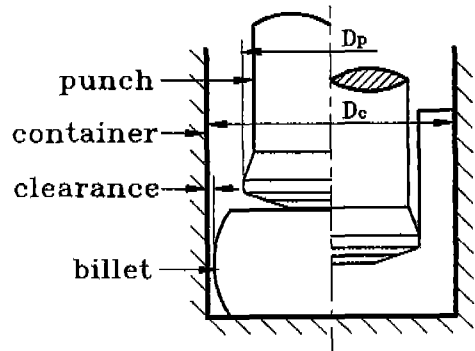


Fig. 3 Backward can extrusion : process geometry and clearance
 D_p :punch nose diameter, D_c :container diameter

본 연구에 사용한 편치형상은 참고문헌^(8,9)을 통해 결정하였으며 $D_p = 13\text{mm}$, $D_c = 15\text{mm}$ 이다.

시뮬레이션에 사용한 소재는 초기 항복강도가 223.50MPa인 AISI 1010이며, 응력-변형률 관계식은 $\bar{\sigma} = 715.95 \bar{\epsilon}^{0.22} [N/mm^2]$ 이다. Fig. 4는 시뮬레이션 공정 A와 B를 나타내며, 공정 A의 소재치수는 $\phi 15 \times 4.44$ 이고 공정 B의 업셋팅 이전의 초기소재의 치수는 $\phi 10 \times 10$ 이다.

본 연구에서는 Fig. 2의 NO.1~3과 같이 동일한 체적의 원통형 소재를 각각 마찰상수(m) 0.1, 0.2, 0.3으로

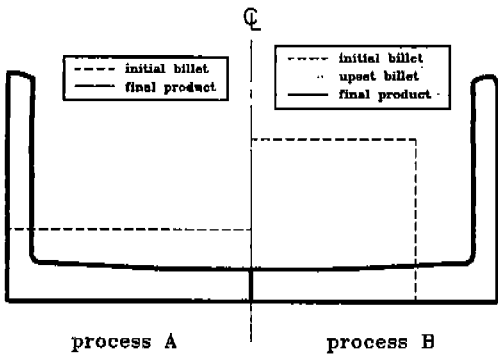


Fig. 4 Description of process A & B

업셋팅하면 배블림의 정도가 다르게 나타난다. 배블림이 많이 생긴 소재가 원통형 측면 부분이 적은 Fig. 1의 NO.3과 유사하다고 볼 수 있다.

이들 초기소재를 Table 1과 같은 조건에서 유한요소 해석하여 치수정밀도를 비교해 보고, 초기소재형상이 치수정밀도에 어떤 영향을 미치는지 그 경향을 알아보고자 한다. Fig. 1의 NO.4에서처럼 원통형 소재를 평탄하게 하는 대신 실제 공정에 쓰이는 원추형의 오목 자국을 만들어 펀치와 소재와의 동심도를 좋게 하기 위하여 원추형 펀치로 업셋팅한 소재를 동일한 조건에서 후방압출하는 것이 최종 제품의 치수정밀도에 어떠한 영향을 미치는지를 조사하였다.

4. 결과 및 고찰

형상오차량을 정량적으로 나타내기 위하여 Fig. 5와 같이 후방압출된 컵의 벽면에서 원하는 제품 형상과 성형된 형상과의 오차량을 오차편차(E.D. : error deviation)로 나타내었으며 오차편차를 다음과 같이 정의하였다.

$$E.D. = \frac{1}{N} \sqrt{\sum D_i^2} \quad (4)$$

여기서, N은 벽면 경계요소에서 불 균일한 절점의 개수이고, D_i 는 원하는 형상에서 실제 성형된 형상사이의 거리이다.

형상오차량은 최종 제품의 벽면의 불 균일한 정도를 나타내므로 그 값이 적을수록 원하는 제품 치수와 가깝다고 볼 수 있다.

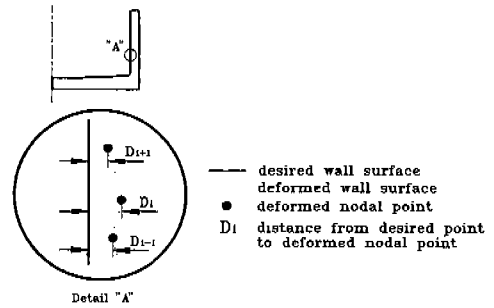


Fig. 5 Definition of shape deviation(E.D. : Error Deviation)

Table 2는 각각의 공정에서 펀치를 이젝팅(ejecting)하지 않은 컵 내경의 형상오차량의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다.

Table 2 Error deviations for various forging conditions

PROCESS	FRICTION FACTOR		ANNEAL	E.D. ($\times 10^{-3}$)	
	UPSET	EXTRU			
A	×	0.1	×	196.279	
		0.2		203.325	
B	0.1	0.1	○	113.578	
			×	114.439	
		0.2	○	118.231	
			×	110.271	
		0.2	0.1	○	105.138
				×	101.281
0.2	0.2	○	112.487		
		×	108.830		
C	0.3	0.1	○	97.545	
			×	99.047	
		0.2	○	105.229	
			×	107.694	
C	0.1	0.1	○	105.554	
				0.2	122.957
	0.3	0.1	○	97.612	
				0.2	115.397

원통형 소재를 사용하여 직접 후방압출한 경우인 공정 A는 마찰상수가 낮을수록 형상오차량이 더 작음을 볼 수 있었으며 초기의 원통형 소재를 평편치를 이용하여 업셋팅한 후 다시 후방압출한 경우인 공정 B의 형상오차량은 공정 A보다 더 낮음을 볼 수 있다. 공정 B에서는 업셋팅

시 마찰상수가 높을수록 후방압출공정 후 비교적 형상오차량이 낮게 나타났으며, 업셋팅 시 마찰상수가 0.3이며 후방압출공정에서 마찰상수가 0.1이고 풀림처리를 한 경우의 형상오차량이 가장 낮음을 볼 수 있었다. 업셋팅공정에서 마찰상수가 0.1, 0.3인 조건에서 후방압출한 경우에는 풀림처리를 함으로써 형상오차량이 더 낮게 나타남을 볼 수 있었다. 공정 C는 원통형 소재를 원추형 펀치를 이용하여 업셋팅한 후 풀림처리를 거친 소재를 후방압출한 공정들로서 이 경우 역시 공정 A에서의 형상오차량보다 더 낮은 값을 보였으며 공정 B에서와 같이 업셋팅 시 마찰상수가 0.3이며 후방압출공정에서 마찰상수가 0.1인 경우의 형상오차량이 가장 낮음을 볼 수 있었다. 이 경우 역시 풀림처리를 한 경우가 형상오차량이 더 낮음을 볼 수 있다.

Fig. 6은 Table 3의 4가지 공정으로 후방압출된 제품의 내·외경의 치수정밀도를 비교한 것이다. 여기서, S[mm]는 압출된 컵의 끝단부에서 바닥까지의 거리이며,

W_i 와 W_e 는 임의의 S위치에서 성형된 컵의 내·외경이고, Fig. 3의 D_p 와 D_c 는 각각 펀치랜드부의 직경과 컨테

Table 3 Four simulation processes for comparison

process	upset. punch	friction		anneal
		upset	extrusion	
①	flat	none	0.1	none
②	flat	0.3	0.1	×
③	flat	0.3	0.1	○
④	conical	0.3	0.1	○

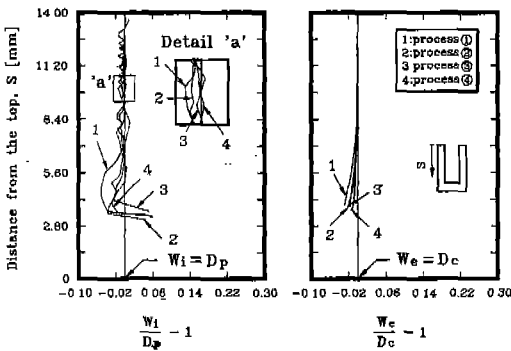


Fig. 6 Deviation degree on the inside and outside of the cup wall determined with FEM

이너의 내경이며 성형된 컵 내·외경의 형상오차량의 기준이 된다. Table 3에서의 4가지 공정은 보다 치수정밀도가 향상된 경우인 높은 마찰조건에서 업셋팅을 거친 소재를 낮은 마찰조건에서 후방압출한 경우들을 나타내고 있다.

Fig. 6의 해석 결과는 외경 치수 오차의 정도가 내경에 비해 현저히 낮음을 알 수 있고, 제품의 끝단부가 중심축으로 굽힘이 발생되었음을 볼 수 있다. 이러한 현상은 성형 후 펀치를 제품으로부터 분리할 때 제품의 끝단부와의 간섭이 발생됨을 예측할 수 있다. 따라서 균일한 벽두께를 얻기 위해서는 제품의 내경의 치수정밀도가 중요함을 알 수 있다.

Fig. 6(a)에서 공정①보다는 업셋팅한 소재를 풀림처리를 한 후 후방압출한 공정③과 오목한 소재를 후방압출한 공정④의 경우가 Table 2와 같이 치수정밀도가 향상되었음을 알 수 있으며 끝단부에서의 굽힘량도 적음을 볼 수 있다.

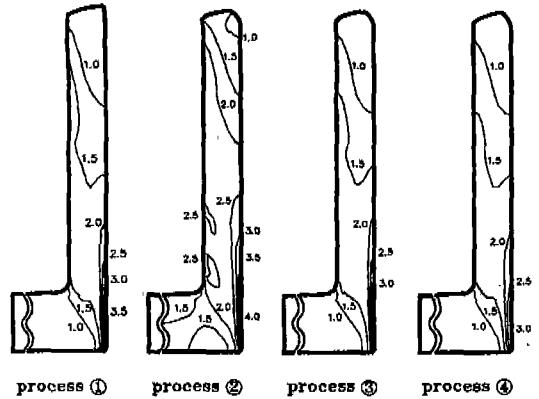


Fig. 7 Comparison of effective strain distribution

Fig. 7은 Table 2의 공정들에 대한 후방압출된 제품의 벽면 내부의 변형률분포를 나타낸 것이다.

Fig. 7의 경우 역시 후방압출된 제품의 끝단부에서 굽힘이 발생됨을 볼 수 있고, 제품 내부에서 최대 변형률은 외벽 하단부에서 발생하였으며 제품의 상단부에서는 큰 변형이 발생하지 않았음을 볼 수 있다. 또한 공정①의 경우보다는 공정③과 ④에서 전체적으로 변형률이 낮고 균일함을 볼 수 있다. 공정②에서는 업셋팅 후 풀림처리를

하지 않았기 때문에 제품 내부에 변형률이 높음을 알 수 있다.

Table 1의 본 연구에서 해석한 모든 공정에 대한 편치 행정-하중의 관계를 Fig. 8에 나타내었다.

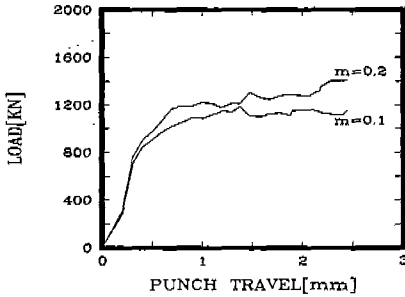


Fig. 8(a) Punch load on convectional backward extrusion

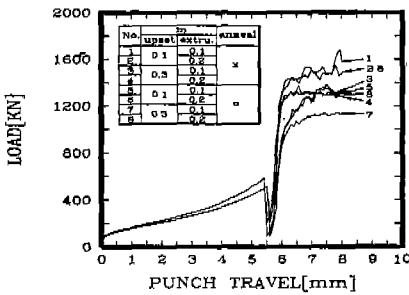


Fig. 8(b) Punch load using upset billets by flat punch

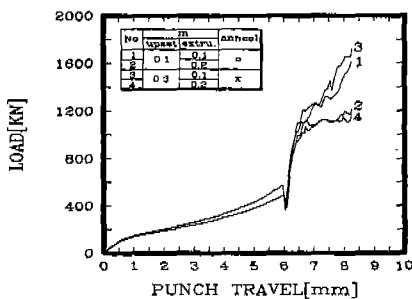


Fig. 8(c) Punch load using upset billets by conical punch

Fig. 8(a)는 원통형 소재를 직접 후방압출한 경우에 대한 하중변화를 나타낸 것으로서 윤활이 좋은 경우가 편치에 작용하는 하중이 더 낮음을 볼 수 있다.

Fig. 8(b)는 원통형 소재를 평편치로 업셋팅한 후 후방압출한 공정들에 대한 하중변화를 도시한 것으로서 전체적으로 업셋팅 후 풀림처리한 경우가 후방압출공정에서 작용하중이 더 낮게 작용함을 볼 수 있었다. 특히 업셋팅 공정에서 마찰상수가 크고 업셋팅 후 풀림처리한 소재를 윤활조건이 좋은 상태 하에서 후방압출한 공정에서 가장 낮은 하중을 보이고 있으며 이것은 원통형 소재를 직접 후방압출한 경우보다도 작용하중이 더 낮음을 알 수 있었다.

Fig. 8(c)는 원통형 소재를 원추형 편치를 이용하여 업셋팅한 후 풀림처리를 거친 소재를 후방압출한 공정들에 대한 편치행정-하중의 변화를 도시한 것으로서 전체적으로 평편치를 사용하여 업셋팅한 경우와 하중의 크기가 유사함을 알 수 있었다.

이상의 시뮬레이션 결과로부터 정성적으로 다음과 같은 경향을 알 수 있었다.

원통형 소재를 직접 후방압출하는 경우에 비하여 적절한 중간공정의 추가는 단조하중, 제품의 정밀도, 균일한 변형 등을 얻을 수 있었다. 따라서 본 연구에서는 중간공정을 평편치와 원추형 편치를 이용하여 초기소재를 업셋팅한 후 풀림처리를 거치거나 혹은 풀림처리 없이 후방압출하는 공정에서 마찰의 효과도 동시에 관찰하였으며, 평편치를 사용하여 업셋팅을 한 경우에는 업셋팅 시 마찰상수가 클수록, 후방압출 시 마찰상수가 작을수록 또한 업셋팅공정 후 풀림처리를 거칠수록 치수정밀도가 더 우수한 제품을 얻을 수 있었다. 그러나 업셋팅공정에서 원추형 편치를 이용한 경우 Table 1의 치수정밀도 측면, 금형의 제작 비용 측면에서 평편치를 사용하는 것이 더 효과적임을 볼 수 있었다. 이러한 결과들을 토대로 후방압출공정의 설계, 정밀도 향상 등을 위해서는 초기의 봉재를 일정한 체적으로 절단한 후 높은 마찰조건하에서 업셋팅을 수행한 후 풀림처리, 윤활처리를 거친 후 후방압출공정에 이용하면 최종 제품의 치수정밀도를 향상시킬 수 있음을 알 수 있었다.

5. 결론 및 향후 과제

후방압출공정에서 정밀도를 향상시키기 위해 초기소재의 형상 및 가공 조건을 살펴보았다. 이상의 해석 결과로

부터 다음과 같은 결론을 제시하고자 한다.

① 평편치를 사용하여 초기소재를 업셋팅한 후 후방압출하는 공정은 원통형 소재를 업셋팅을 하지 않은 후방압출공정보다 더 균일한 변형 및 정밀도를 얻을 수 있었다.

② 초기소재를 높은 마찰조건에서 업셋팅한 후 풀림처리를 거쳐서 후방압출하면 제품의 정밀도를 향상시킬 수 있었다.

③ 편치하중이 낮은 상태에서 가공된 제품의 벽두께가 보다 균일함을 알 수 있었다.

④ 원추형 편치를 사용하여 초기소재를 업셋팅하여 후방압출하면 하중의 변화가 보다 완만하고, 제품 내부의 변형률분포도 균일하였으나, 제품의 정밀도 향상 측면에서는 평편치를 사용하는 것이 유리함을 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. T. Kato, Y. Tozawa, K. Nakanishi and T. Kawabe, "Prediction of Dimensional Accuracy of Cold Extruded Can During Repeating Operation", Annals of the CIRP, Vol. 35, no. 1, pp. 177~180, 1986.
2. N. Bay, S. Lassen and K. B. Pedersen, "Lubrication Limits in Backward Can Extrusion at Low Reductions", Annals of the

- CIRP, Vol. 40, no. 1, pp. 239~242, 1991.
3. K. Imai, "Effects of Punch Velocity on the Preciseness of Backward-Extruded Cups", J. JSTP, Vol. 22, no. 241, pp. 185~190, 1981.
4. K. Imai, "Effects of Unsteady Deformation on Inner and Outer Diameters of Backward Extruded Cups", J. JSTP, Vol. 16, no. 178, pp. 1065~1072, 1975.
5. 天野富男, 田村公男 "後方押しにおける最適素材條件", 第 37回 塑性加工連合講演會, pp.20~22, 1986.
6. O. C. Zienkiewicz, The finite element method, 3rd Ed. McGraw-Hill, New York, 1977.
7. S. Kobayashi, S. I. Oh and T. Altan, Metal forming and the finite element method, Oxford University Press, 1989.
8. K. Lange, Handbook of Metal Forming, McGraw-Hill Book Company, 1985.
9. General Recommendations for Design, Manufacture and Operational Aspects of Cold Extrusion Tools for Steel Components, ICFG Doc. no. 6/82, International Cold Forging Group, Portcullis Press, 1983.