

PAS부품의 성형공정해석

박 성 호, 이 호 용*, 황 병 복**

인하대학교 공과대학 자동화공학과

* 동국대학교 공과대학 기계공학과

** 인하대학교 공과대학 자동화공학과

An Analysis on the Forming Process of a Power Assisted Steering Part

Sung-Ho Park, Ho-Yong Lee*, and Beong-Bok Hwang**

Department of Industrial Automation, Inha University

* Department of Mechanical Engineering, Dongguk University

** Department of Industrial Automation, Inha University

ABSTRACT

A manufacturing process of the power steering worm blank is analyzed by FEM simulation. The process includes mainly three operations such as indentation, extrusion, and upsetting, which was designed by a forming equipment expert. The results of simulation are summarized in terms of load-stroke relationships, die pressure distributions, effective strain distribution, and deforming patterns for each forming operation. Also, Efforts are focused to get the reason that the tool expert designed the forming process in three operations. The results of the simulation are to be useful for the next advanced process planning in terms of good dimensional accuracy, savings in material and machining, no deforming defects and improvements in mechanical properties.

Key words : indentation, extrusion, upsetting, die pressure, process planning

1. 서 론

고도의 성형성과 고강도가 요구되는 제품을 저렴한 비용으로 대량생산할 수 있는 경제적으로 우수성을 가지고 있는 냉간단조는 재료의 기계적 성질을 향상시킬 수 있고, 치수의 정밀도를 높일 수 있으며, 재료 및 기계 후가공을 절감할 수 있고, 표면상태를 향상시킬 수 있는 장점이 있기 때문에 자동차부품을 비롯하여 선박, 항공기 및 각종 기계부품의 생산에 이용되고 있다.^[1] 냉간단조기술은 제품설계, 공정설계, 금형설계, 금형 제작, 피가공재, 윤활, 프레스기계, 자동화장치, 후처리 등의 요소기술이 조합된 것으로

이러한 기술들이 고도로 균형있게 조화가 이루어질 때 고정도 제품의 안정적인 생산이 가능해진다.^[2] 과거에는 위의 각 요소들이 서로 독립적으로 이루어 졌기 때문에 요소별 중복되는 작업이 많았으며 이로 인한 불필요한 낭비가 많았고, 대부분의 작업들이 전문가의 노하우나 반복된 시행착오에 의하여 이루어 졌다. 그러나, 시행착오에 의한 공정 설계는 시간과 비용이 많이 들고, 유사한 제품의 공정설계시 같은 시행착오를 반복하게 되는 등 제조 노하우의 체계적인 정리 및 이용이 힘들다.

컴퓨터를 이용한 공정해석 및 설계방법은 크게 유한요소해석에 의한 방법과 전문가 시스템을 이용한 방법이 있다. 전문가 시스템을 이용한 공정설계 방법은 현장 경험이 거의 없는 초보자라도 숙련된 기술자와 동등한 결과의 공정설계가 가능하다는 이점을 가지고 있으나, 재료유동이나 응력, 소성변형률, 내부결합, 불완전한 다이 충만성 및 연성파괴 등을 예측할 수 없다는 단점을 가지고 있다. 반면에, 유한요소법을 이용한 공정 해석은 소프트웨어 및 하드웨어에 큰 영향을 받으며 모델링에 시간이 많이 소요되는 단점이 있어 이용하는데 어려움이 있다.^[3] 이러한 문제점을 보완하기 위하여 Osakada등은 유한요소해석으로 얻은 결과들을 전문가시스템의 지식베이스로 사용하였고, 최근의 연구에서는 신경회로망 기술을 이용하여 보다 빠르게 결과를 산출하고 자기학습을 통하여 기존에 가지고 있는 지식베이스로부터 유용한 부가적인 정보를 얻을 수 있도록 하였다.^{[4][5][6]} 또한, Alberti등은 지식베이스에 의해 실행된 몇가지 가능한 성형절차를 예비선택하여 각각의 공정을 유한요소해석을 통하여 최적의 성형절차를 결정하는 통합적 방법을 제안하였다.^[7] 그러나, 대부분 간단한 형상에 국한되어 시도되고 있다.

본 논문은 프레스 장비 전문가에 의하여 설계된 비교적 복잡한 형상의 제품을 생산하는 기존의 공정을 유한요소법에 의한 시뮬레이션을 통하여 해석하여 각각의 공정단계에서의 제품 내부의 변형률분포 및 금속유동에 의한 형상변화, 부분 충만도, 제품 내부 및 자유경계면에서의 결함발생 여부, 펀치하중, 그리고 다이 및 펀치에 가해지는 압력분포 등을 계산하여 보다 새로운 공정설계시 설계기준이 되는 자료로 활용될 것이다.

2. 부품의 특성 및 기존의 생산방법

파워스티어링웜(Power Steering Worm)은 1926년 미국에서 Davis에 의하여 조향휠(Steering Wheel)조작에 드는 힘을 덜기 위해 처음으로 시도된 조향보조시스템(Power-Assisted steering, PAS) 장치에 사용되는 부품이다. 주로 트럭이나 버스와 같은 대형차에 많이 이용되며 최근 소형차에서도 응용되어 그 용도를 넓혀가고 있다. 조향보조시스템은 운전자가 자동차의 조향시 드는 힘을 경감시켜 주어 차의 방향을 쉽게 바꿀 수 있도록 하며, 지면으로부터 조향휠로 오는 충격을 완화하는 기능을 한다. 주로 유압을 동력원으로 이용한 조향보조시스템이 사용되는데 자기윤활(self-lubricate) 특성을 가지고 있고, 적은 공간에서 큰 힘을 낼 수 있으며, 동작을 간단하게 제어할 수 있고, 밀폐시스템이므로 내부를 청결하게 유지할 수 있으며 설치가 간편한 장점이 있다.^[8]

그림 1은 본 논문의 해석대상인 파워스티어링웜 블랭크의 세부형상이고 그림 2는 조향보조시스템의 예로서 그림 중앙부에 보이는 부품이 파워스티어링웜이다. 조향휠의 회전시 회전저항이 증가하면 토션바의 회전에 의해 제어밸브의 상대적인 각도가 변화하고 유압펌프로부터 유체가 유입되어 조향휠의 조향운동을 돕게 된다.

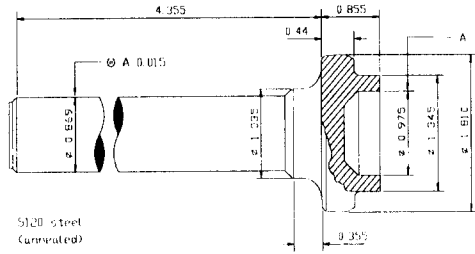


Fig. 1 Blank for a power-steering worm

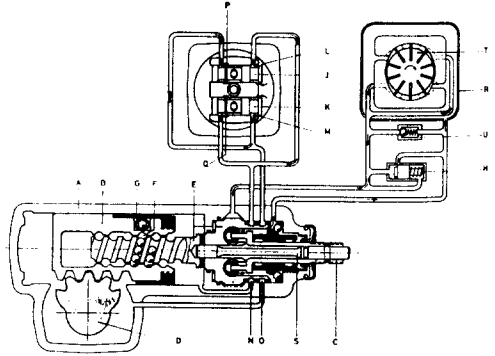


Fig. 2 Example of the use of power-steering worm in PAS system

그림 3과 그림 4는 프레스장비 전문가에 의해 설계된 파워스티어링웜 블랭크 공정으로, 그림 3은 초기빌렛의 형상이고 그림 4는 각 공정에서의 금형 및 예비성형체의 형상이다.

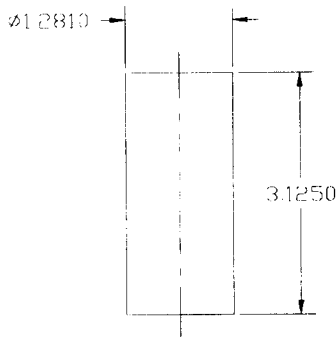


Fig. 3. Initial billet of power-steering worm blank

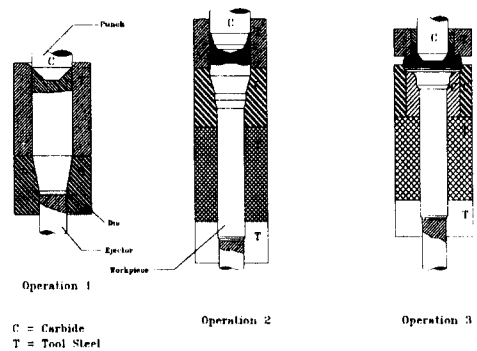


Fig. 4. Original method for producing a power-steering worm blank

파워스티어링웜 블랭크의 성형공정은 압입(indentation), 압출(extrusion), 헤딩(heading)의 세공정으로 이루어져 있으며, 파워스티어링웜 블랭크의 제작조건은 표 1과 같고, 각 공정에서의 성형조건은 표 2와 같이 요약할 수 있다.

초기빌렛은 어니일링된 직경 1.281 in, 높이 3.125 in의 AISI 5120 강재를 사용하며, 800ton 호칭능력의 2-point 크랭크프레스가 이용되고, 윤활제로는 건조비누가 사용된다. 공정해석에서 마찰은 일정전단마찰(constant shear friction)을 사용하였으며 펀치와 다이 모두 0.05인 것으로 가정하였다.^[9] 재료의 유동응력과 변형률의 관계식은 다음 식 (1)과 같다.^[10]

$$\bar{\sigma} = (98.1) \bar{\epsilon}^{-0.16} \quad [\text{ksi}], \quad \bar{\epsilon} < 0.7 \quad (1)$$

Press	Crank-type mechanical two-point, 800-ton	
Die	Three station transfer on 10-in. centers	
Tool material	Carbide inserts	
Slug	Sheared, annealed and phosphated	
Lubricant	Soap	
Extrusion Pressure	525 tons (total)	
Press speed	20 strokes per min	
Setup time	8 hr	
Production rate	1200 pieces per hour	
Tool life (punch and die inserts)	First station	100,000 pieces
	Second station	50,000 pieces
	Third station	75,000 pieces

Table 1. Manufacturing conditions for power steering worm blank

	Operation	Forging Ratio	
1st Step	Indentation	$r = 3.57$ (R = 72 %)	
2nd Step	Forward Extrusion	1st pass	$r = 1.42$ (R = 29.5%)
		2nd pass	$r = 1.53$ (R = 34.7%)
3rd Step	Heading	$s = 0.88$ (t = 1.86)	

r = Extrusion Ratio (R = Reduction of Area)

s = Upset Ratio (t = Diameter Ratio)

Table 2. Forming conditions for each step

첫 번째 공정은 압입(Indentation)작업으로 제품의 동심도(concentricity)를 향상시키기 위하여 필요한 공정이다. 두 번째 공정은 압출(extrusion)작업으로 주로 제품하부에 대한 성형이 이루어진다. 압출은 전방압출이 주변형으로 발생하고 일부분 후방압출이 일어나는 복합된 형태이다. 마지막으로 세 번째 공정은 주로 제품 상부의 성형이 주로 일어나는 헤딩(Heading)작업으로 제품의 최종형상이 완성된다.

3. 해석 및 결과

앞서 서술한 조건하에서 파워스티어링웜 블랭크 성형공정의 각 공정에 대하여 유한 요소해석을 하였다. 파워스티어링웜 블랭크의 성형과정에서는 탄성변형이 소성변형에

비해 무시할 수 있을 정도로 작기 때문에 시뮬레이션의 효율을 높이기 위하여 강소성 유한요소법을 사용한다.^[11] 유한요소해석을 통하여 소재의 유동 및 편치의 행정거리와 하중간의 관계, 다이압분포 등에 관한 자료를 얻었으며, 관련자료를 통하여 해석기준에 관한 다른 여러 가지 정보를 얻었다.

그림 6 ~ 그림 8은 각 공정에서의 재료의 변형과 변형률분포, 그리고 다이의 압력 분포를 보여주고 있다. 그림의 좌측에는 각 공정의 초기의 소재와 금형 및 공구의 모양이고 우측은 공정이 끝났을 때의 소재의 변형된 형상과 유한요소 격자의 상태, 변형률 분포 및 다이압 분포를 나타낸다.

첫 번째 공정에서는 그림 6에 나타난 바와 같이 빌렛의 윗부분에서 압입 작업이 일어나고 동시에 아랫부분에서는 다음 공정에서 전방압출이 일어나기 직전까지의 상태로 성형된다. 단면감소율은 72%(압출비는 3.57)이다. 전방압출의 경우 결함없이 압출이 가능한 한계단면감소율은 자유단조일 때 각각 저탄소강인 경우 35%, 알루미늄인 경우 25%, AISI 강철인 경우 40%이고, 빌렛이 모두 다이의 안쪽에 위치한 압출의 경우 70 ~ 75%이다.^[1] 그러나, 본 공정은 다음 공정에서 전방압출시 편치 및 하부 금형에 작용하는 압력을 줄이기 위하여 변형소재의 하부를 압출이 일어나기 직전의 상태로 만들어 주기 위한 것이고, 실제로 압출이 발생하지 않으므로 위의 한계단면감소율을 적용하는 것이 부적절하다. 변형률의 분포는 윗편치의 각진 부분과 하부 금형의 경사진 부분을 중심으로 큰 값을 보이고 있으며 최대 유효 변형률은 1.67이다. 전체적으로 재료의 변형에 의한 변형률 분포의 차이가 그리 심하지 않음을 알 수 있다.

편치와 금형에 작용하는 압력은 편치와 금형의 상부가 만나는 부분과 금형의 하부 경사진 부분에 크게 작용하며, 편치와 금형 상부가 만나는 부분에서 금형쪽으로 최대압력 22.1 ksi가 작용한다. 편치에 작용하는 압력은 편치의 윗부분으로 갈수록 커지며 최대 11.42 ksi가 작용한다. 금형의 측면에서는 상단부를 제외하고는 거의 일정한 압력분포를 보인다. 금형하부에서는 금형의 경사진 부분에 압력이 크게 작용하며 그 크기는 최대 18.30 ksi이며 금형하부에는 최대 2.93 ksi로 크기가 다른 부분에 비하여 상당히 작다.

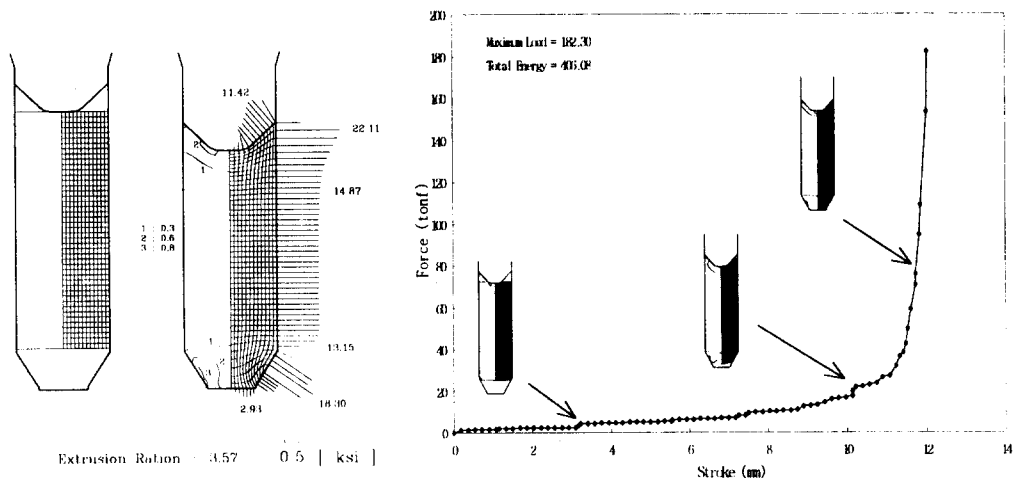


Fig. 6. Deformation patterns, Die pressure and Load-stroke relationships for the first step operation

그림 7은 두 번째 공정인 압출에 의한 재료의 변형과 변형률 분포, 다이압 분포이다. 전체적인 변형형태는 전방압출이며 소재의 윗부분에서 후방압출이 일부분 일어나는 다단압출이다. 두 번의 전방압출이 단계적으로 동시에 일어나는 경우 최대단면감소율은 연강의 경우 30%를 초과할 수 없으며 두 압출의 거리는 최소한 빌렛의 직경보다 커야 하고 복합된 압출은 같은 축으로 최대 3개까지 가능하다.^[1] 두 번째 공정에서는 첫 번째 압출의 압출비가 1.53(단면감소율 34.7%)이고, 두 번째 압출은 압출비가 1.42(단면감소율 29.5)이다. 따라서, 최대 면적감소율이 첫 번째 압출에서 30%를 초과하고 두 번째 압출에서도 30%에 근접하므로 전문가에 의하여 제시된 설계규칙에 의하면 두 번째 공정에서 재료에 결함이 발생할 가능성이 있다고 볼 수 있다. 같은 축상에 전방압출이 동시에 3단까지 가능하므로 결함이 없는 제품을 성형하기 위한 공정설계시 압출비를 작게 하고 또 한번의 압출이 일어나도록 해야 할 것이다. 재료의 변형은 주로 펀치의 경사진 부분과 금형의 측면을 중심으로 일어나며, 최대 유효 변형률은 3.60이다.

펀치에 작용하는 압력은 펀치의 밑부분에서 윗부분으로 갈수록 커지며 펀치의 경사진 부분에서 압력이 급격히 증가하여 최대 28.94 ksi에 이른다. 금형의 측면에는 압력분포가 비교적 고르게 작용하나 압출이 일어나는 금형의 단부분에서 최대 31.30 ksi가 작용하며 펀치와 금형이 접촉하는 금형의 상부로 갈수록 압력이 증가하여 최대 46.75 ksi가 작용한다. 금형하부에는 다른 부분보다 압력이 상당히 작게 작용하는데 최대 6.13 ksi이다.

두 번째 공정은 다이압분포와 변형률분포는 첫 번째 공정과 비슷한 양상을 보이고 있다. 따라서, 첫 번째 공정과 두 번째 공정을 적절히 혼합하여 공정단계수를 감소하거나 압출비를 조절하여 공정단계수는 감소하지 않고 금형 및 공구에 작용하는 압력을 줄

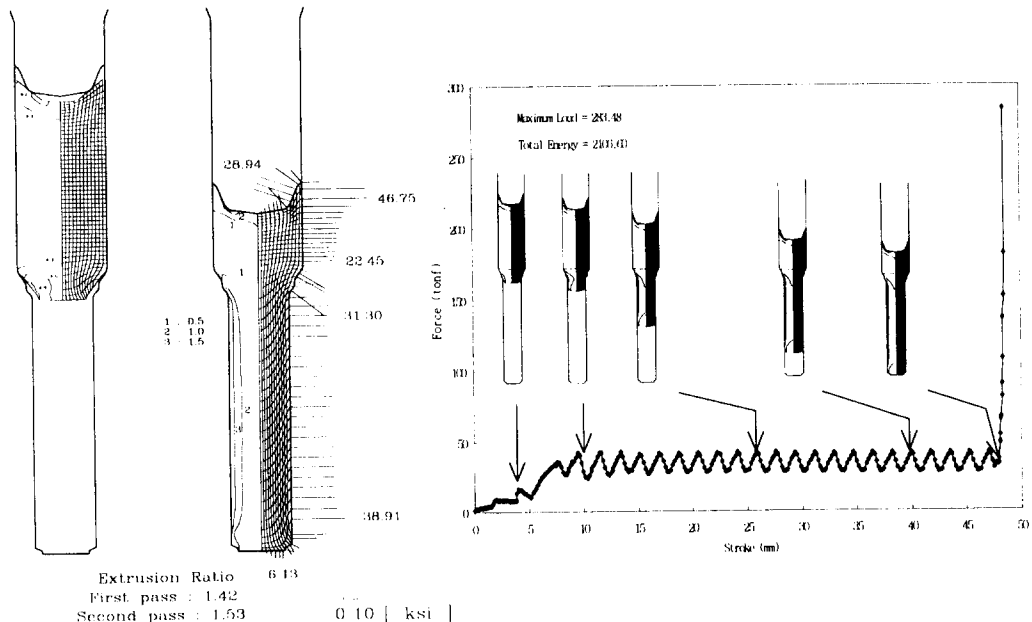


Fig. 7. Deformation patterns, Die pressure distribution and Load-stroke relationships for the second step operation

여 보다 개선된 결과를 얻을 수 있을 것이다. 왜냐하면 기존의 첫 번째 공정은 두 번째 공정에서 압축이 보다 잘 일어나고 공구에 작용하는 압력을 적게하기 위한 공정이기 때문이고 동심도를 고려한 설계를 위하여 전체 성형공정에서 필요한 공정이기 때문이다.

파워스티어링웜 블랭크 제작의 마지막 공정은 헤딩공정으로 제품의 윗부분이 주로 성형된다. 유한요소해석의 결과로 얻어진 격자의 모양과 변형률분포, 다이압의 분포가 그림 8에 나타나 있다.

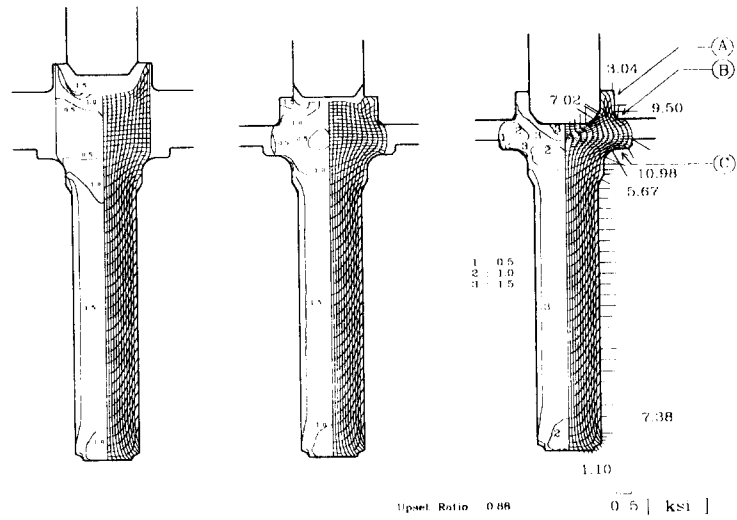
먼저 상부금형과 펀치가 함께 하강하여 그림 8의 ㉠와 ㉡사이인 제품 상부의 높이가 최종 제품의 치수인 0.855 inch가 되도록 성형한다. 상부금형과 펀치의 하강이 끝나면 그림 8의 (b)와 같은 형상이 되며, 최종적으로 펀치로 소재를 가압하면 그림 8의 (c)와 같은 형상의 최종제품이 완성된다. 변형률분포를 보면 그림 8의 ㉢와 ㉣부분, 그리고 펀치의 각진 부분에서 변형이 심하게 이루어지고, 펀치의 각진 부분에서 최대 유효변형률이 5.32이다.

다이압분포를 살펴보면 앞공정에 비하여 대체적으로 작은 압력이 금형 및 펀치에 작용하며, 변형이 심하게 일어나는 그림 8의 ㉢와 ㉣부분, 그리고 펀치의 각진 부분에서 압력이 크게 작용한다. 전체적으로 볼 때 하부금형의 벽면을 따라 약 7.38 ksi의 고른 압력이 작용하며, 하부금형의 곡면진 부분에 최대 10.98 ksi의 압력이 작용한다. 펀치에 작용하는 압력은 다른 두공정보다 작으며, 두 번째 공정에서와는 다르게 제품 귀부분의 펀치와 상부금형에는 압력이 거의 작용하지 않음을 알 수 있다. 펀치에서는 펀치의 각진 부분에서 최대 7.02 ksi의 압력이 작용하고, 상부금형에서는 제품의 귀부분이 시작하는 곳에서 최대 9.30 ksi의 압력이 작용한다.

각 성형공정에서의 펀치의 행정거리와 펀치가 재료에 가하는 힘과의 관계가 그림 6 ~ 그림 8에 각각 나타나 있다. 최대하중과 총 가공에너지는 각 단계별로 첫 번째 공정에서 182.3 tonf, 406.0 tonf-mm이고 두 번째 공정에서 283.4 tonf, 2106.6 tonf-mm이며 세 번째 공정에서 73.4 tonf, 641.9 tonf-mm이다. 그림 6과 그림 7의 마지막부분에서 행정거리-작용력의 값이 갑자기 커지는 것은 공정의 첫번째와 두번째는 폐쇄단조이기 때문이고, 최대하중값은 모의실험에서 재료의 모든 경계절점들이 펀치와 다이가 접하는 순간에서의 값을 취한 것이다.

4. 결 론

본 논문에서는 유한요소법을 이용하여 조향보조시스템 장치에 사용되는 파워스티어링웜 블랭크의 성형공정을 해석하였다. 전체적으로 볼 때 프레스의 성형능력 내에서 각 공정이 이루어지고 있으며, 두 번째 공정에서 최대하중 및 총 가공에너지가 가장 많이 필요하고 펀치에 작용하는 압력도 가장 크다. 각 공정에서의 다이압분석을 통하여 다이압이 큰 부분은 공구강(tool steel)보다 강도가 큰 카바이드(carbide) 재료를 사용하여 금형의 안전도를 높이고 있으며, 금형수명을 고려하여 다이인서트(die insert)를 사용하고 있음을 수치적으로 알아보았다. 공정해석으로 얻은 결과는 개선된 공정설계시 중요한 설계변수로 사용될 수 있으며, 보다 정밀한 제품으로 성형하기 위해서는 금형의 탄성해석과 함께 결함발생 여부에 대한 해석도 함께 이루어져야 할 것이다.



(a)

(b)

(c)

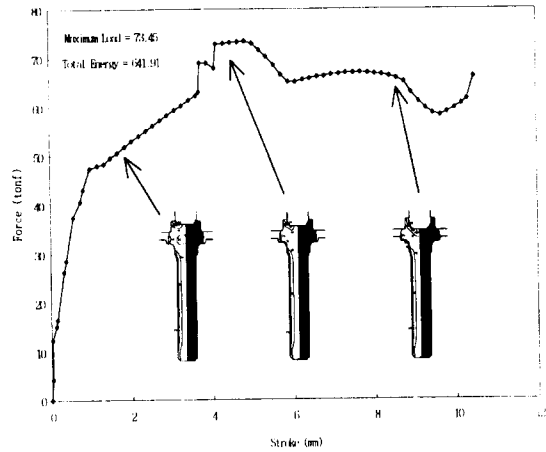
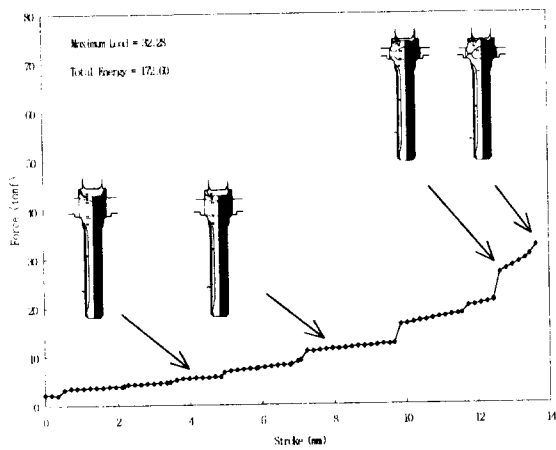


Fig. 8. Deformation patterns, Die pressure distribution and Load-stroke relationships for the third step operation

후 기 : 본 논문은 인하대학교 및 (주)쌍용정공의 연구비지원에 의하여 수행되었습니다.

참고자료

- [1] K. Sevenler, P. S. Raghupathi, T. Altan, "Forming-Sequence Design for Multistage Cold Forging", Elsevier Science Publishers B.V., pp. 121 ~ 135, 1987

- [2] 박 창국, “단조금형 신기술 전망”, 월간 금형저널, pp. 176 ~ 180, 1992
- [3] 최 재찬, 김 병민, “냉간단조의 공정설계 전문가 시스템”, 한국소성가공학회지, 제2권, 제2호, pp. 1 ~ 7, 1993
- [4] K. Osakada, T. Kato, G. B. Yang, “Application of AI-Technique to Process Planning of Cold Forging”, Annals of the CIRP, Vol. 37/1, pp. 239 ~ 242, 1988
- [5] K. Osakada, G. B. Yang, T. Nakamura, K. Mori, “Expert System for Cold-Forging Process Based on FEM Simulation”, Annals of the CIRP, Vol. 39/1, pp.249 ~ 252, 1990
- [6] K. Osakada, G. B. Yang, “Neural Networks for Process Planning of Cold Forging”, Annals of the CIRP, Vol. 40/1, pp. 243 ~ 246, 1991
- [7] N. Alberti, L. Cannizzaro, F. Micari, “Knowledge-Based Systems and F. E. Simulations in Metal-Forming Processes Design An Integrated Approach”, Annals of the CIRP, Vol. 40/1, pp. 295 ~ 298, 1991
- [8] M. J. NUNNEY, “Light & Heavy Vehicle Technology”, 2nd Ed., pp. 489 ~ 505
- [9] 이 동녕, “소성가공학”, 문우당, p.128, 1994
- [10] Air Force Materials Laboratory, “Forging Equipment, Materials, and Practices”, Metals and Ceramics Information Center, p.164, 1973
- [11] C. H. Lee and S. Kobayashi, “New solutions to rigid-plastic deformation problems using a matrix method”, J. Eng. Ind., Trans. ASME, Vol. 95, p.865, 1973