

수평식 냉간 다단포머에서 예비성형체와 편심하중을 고려한 Shaft의 성형공정설계

박상수¹ · 이정민¹ · 김병민[#]

Process Design of Shaft Considering Effect of Preform and Eccentric Load on Cold Forging Product in Multistage Former of Horizontal Type

S. S. Park, J. M. Lee, B. M. Kim

(Received October 22, 2004)

Abstract

This study deals with the cold forging process design for shaft in the main part of automobile motors with rectangular deep groove. In forging process, the accuracy and die life is very important because it have influence on reduction of the production cost and the increase of the production rate. Therefore, it is necessary to develop the manufacturing process of shaft by cold forging., process variables are the cropped face angle of billet and the eccentric load of punch. The former is derived from cropping test, the latter is occurred by clearance between container and preform. Also, grooved preform select the process variable for decrease in punch deflection. We investigate that a deflection of punch and a deformation of preform to every process variables. Through this investigation, we suggest the optimal preform and process design, expect to be improved the tool life in forging process.

Key Words : Rectangular Groove, Hobbing, Preform Design, Punch Deflection, Multi-stage Former

1. 서 론

최근, 국내외 단조산업은 소재비의 상승과 작업 환경의 악화로 인한 숙련기술자의 부족 및 단품 종 대량 생산 등의 문제를 극복하기 위하여, 공정 수의 감소와 후처리 공정의 최소화를 통한 비용 절감에 주력하고 있다. 단조산업이 발달한 주요 선진국의 향후 단조산업에 대한 개발방향은 예비 성형 공정의 감소, 제품 정밀도 향상과 공구 수명의 연장 등을 통한 단조 공정 설계 기법에 역점을 두고 있다[1~2]. 특히, 단조제품에서 정밀도에 관심이 집중되어 냉간 상태에서 완제품을 성형하

여 재료의 절약, 공정수 단축으로 인한 생산성 증대 등의 고부가가치 가공 수단으로 이용되는 추세이다. 이러한 경우 예비성형체의 형상은 최종제품의 정밀도 및 공구 수명에 많은 영향을 미친다[3~7].

본 연구에 사용된 제품은 Fig. 1에 나타내었듯이, 3×3×16mm의 사각형의 깊은 홈을 가진 자동차 모터부의 핵심 부품인 샤프트이다. 이 제품은 절삭가공과 단조 프레스 공정으로 생산되고 있다.

그러나 이러한 생산 방식은 트리밍 공정에 의한 재료 손실이 크고, 단조 프레스공정으로 인한 생산시간이 길다는 단점이 있다.

1. 부산대학교 정밀기계공학과 대학원

교신저자 : 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구소
E-mail : bmkim@pusan.ac.kr

특히, 사각형의 깊은 흠을 냉간단조 성형할 때 불균일한 소재유동과 편심하중에 의한 편치 휨으로 편치의 사각부분과 원형부분의 연결부에 응력의 집중 또는 편치 끝단의 모서리 부분이 파손되어 금형수명이 매우 짧은 단점이 있다.

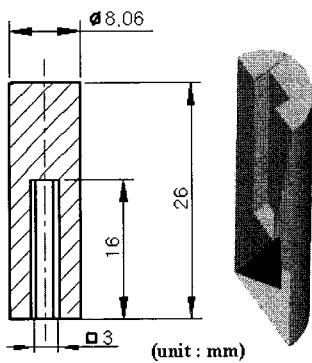


Fig. 1 Dimension and 3D-model of shaft

따라서 본 논문에서는 대량생산에 적합한 수평식 다단포머(multi-stage former)에서 예비성형체의 형상과 컨테이너와 예비성형체 사이의 클리어런스에 의한 편심량이 소재 변형양상과 편치 휨(deflection)에 미치는 영향을 조사하였다. 이러한 결과를 통해 균일한 소재유동과 편치 휨을 최소로 할 수 있는 예비성형체의 형상을 제시 함으로써 수평식 다단포머에서 정밀도가 높은 샤프트의 생산과 편치 수명향상을 향상시킬 수 있는 냉간단조 공정설계를 하였다.

먼저 예비성형체의 형상 및 절단면의 경사각을 알아보기 위해 봉재의 절단실험을 선행하였다. 봉재 절단실험 결과를 통해 절단면의 경사각을 획득하고, 경사각의 변화에 따른 변형양상 및 편치의 휨에 관한 연구를 수행하였다.

2. 소재의 절단실험

2.1 소재의 절단실험 조건

실험에 사용된 소재는 냉간 단조용 소재 AISI 1025이고, 전단기는 봉재에 홀더(holder)와 지지장치(supporter)가 있는 구조로서 Fig. 2에 절단기의 개략도를 나타내었다.

봉재 절단 공정에서 소재형상에 영향을 미치는 공정 변수로는 커터사이의 클리어런스와 전단속도, 세장비(H/D), 윤활조건[8~10] 등을 들 수 있지만 본

실험에서는 공정변수로 커터사이의 클리어런스와 세장비를 고려하였다. 실험의 신뢰성을 위해 커터와 봉재 사이의 클리어런스를 각각 0.15mm(D_m-D), 0.1 mm(D_f-D)로, 전단속도로 128mm/s로 일정하게 유지하였다. 실험에 적용된 공정변수 값은 Table 1에 나타내었고 실험의 재현성 검증을 위해 각 경우에 대해 10회 수행하였다. Fig. 3은 절단실험 후, 절단면의 경사각 평가를 위한 측정위치를 나타낸 것이다.

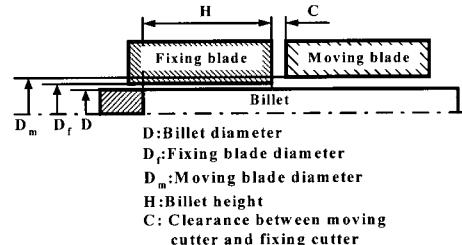


Fig. 2 Schematic draw of cropping machine and process variable

Table 1 Process variables of cropping experiment

Case	H/D	Clearance (mm)	Case	H/D	Clearance (mm)
1	0.84	0.1	5	0.83	0.1
2	0.84	0.15	6	0.85	0.1
3	0.84	0.3	7	0.86	0.1
4	0.84	0.5			

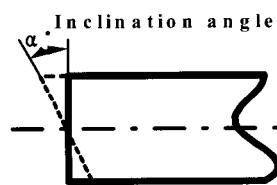


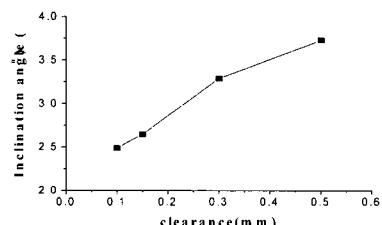
Fig. 3 Position of measurement

2.2 소재의 절단실험 결과

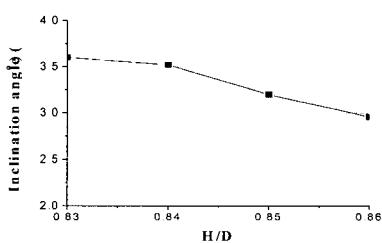
Fig. 4의 (a)는 봉재 절단 시 각 클리어런스에 따른 절단면의 경사각 변화를 나타낸다. 실험 결과, 경사각은 2~4°의 변화를 보였고, 커터 사이의 클리어런스가 증가할 수록 절단면의 경사각은 증가했다. Fig. 4의 (b)는 봉재 전단 시 각 세장비에 따른 전단 소재의 경사각의 변화를 나타내었다. 실험

결과, 세장비가 감소할 수록 경사도가 나빠짐을 알 수 있다.

실험 결과로 부터 알 수 있듯이 양호한 전단봉재를 획득하기 위해서는 세장비(H/D)는 크고, 커터간의 클리어런스는 작게 하는 것이 좋은 것으로 나타났고, 절단면의 경사각은 대략 2~4°의 구간임을 알 수 있었다.



(a) Clearance VS inclination angle



(b) H/D VS inclination angle

Fig. 4 Effects of process variable on the inclination angle of cropping surface

3. 공정변수 선정 및 성형해석 결과

3.1 공정변수 선정

공정변수의 선정은 앞서 수행한 봉재의 절단실험을 통해 얻은 단면의 경사각(α °) 2°, 3°, 4°를 첫 번째 공정변수로 선정하였고, 성형해석시 단면 경사각에 대한 영향만을 조사하기 위해 클리어런스는 0.06mm로 일정하게 두었고, 클리어런스에 의한 편심은 없는 것으로 가정하기 위해 소재와 컨테이너의 중심 축을 일치시켰다.

두번째 공정변수는 빌렛과 컨테이너사이의 클리어런스에 의한 편심량(C)으로, 수평식 다단포머에서 성형시 클리어런스 만큼의 편심이 발생하게 된다. 이러한 편심은 소재변형의 불균일과 편치에 편심하중을 유발하기 쉽다. 따라서 컨테이너와 빌렛의 클리어런스에 대한 영향을 평가하기 위해

일반적인 후방압출 공정에 사용되는 클리어런스인 0.02mm, 0.04mm, 0.06mm로 선정하였다. 절단면의 경사각은 업세팅 공정에 의해 평탄해진 것으로 간주하여 끝단면 경사각은 0°로 설정하였다.

세번째 공정변수는 앞서 선정한 공정변수의 해석결과인 불균일한 소재유동과 편심하중에 의한 편치 휨을 줄이기 위해 소재 선단부에 홈이 성형된 예비성형체를 선정하였다. 홈의 깊이는 2.75mm, 홈의 끝단 지름은 3mm로 일정하게 유지하고 홈 각도(β)를 20°, 30°, 40°로 달리 적용하였고, 클리어런스는 0.06mm로 일정하게 유지하여 소재변형 양상과 편치 휨을 조사하였다.

본 연구를 위해 사용된 성형해석 프로그램은 강소성 유한 요소해석 코드인 DEFORM 3D를 사용하였고[11], 성형시 편치의 휨을 조사하기 위해 구조 및 강도 해석 프로그램인 Ansys로 해석하였다.

해석을 위한 소재와 금형의 특성은 Table 2에 보였고, Fig. 5에 선정한 공정변수를 나타내었다.

Table 2 Material properties for FE analysis

Item	Value
Material of billet	AISI 1025
Stress-strain relation	$\sigma = 751(\epsilon)^{0.22}$ MPa
Friction factor(m)	0.1
Material of tool	SKD 11
Yield strength(SKD 11)	2.2 GPa

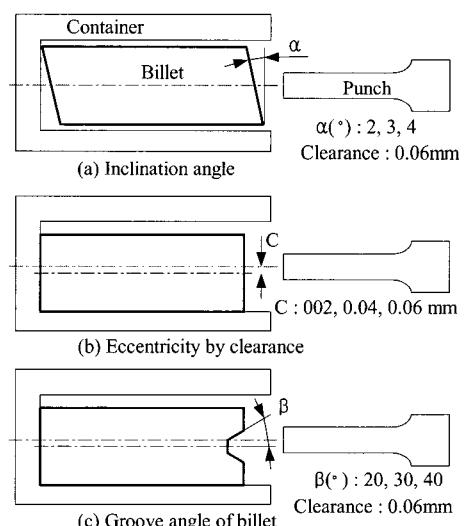


Fig. 5 Process variables for simulation

3.2 해석 결과

3.2.1 소재의 유동해석 결과

편치의 압입공정에서 빌렛의 형상이 편치에 미치는 영향은 초기에 가장 크게 미친다. 따라서 압입깊이 2mm까지의 성형해석 결과를 보였다. Fig. 6은 끝 단면 경사각이 4°일 경우 해석결과로, 성형 초기 “S”자 형상의 유동을 보였다. 이는 편치 끝 단면에 편심하중을 유발하여 편치의 탄성변형에 영향을 미친다. 스트로크 2mm이후는 후방압출에 의한 변형양상을 보였다. 경사각 2°, 3°의 해석결과는 4°일 경우와 비슷한 경향을 보였으나 4°일 때의 불균일한 유동보다 양호한 현상을 보였다. 결과적으로 절단면의 경사각이 클수록 불균일한 유동현상이 크게 나타남을 알 수 있다.

Fig. 7은 컨테이너와 예비성형체의 클리어런스가 0.06mm일 경우의 변형을 나타내었다. 소재의 변형은 성형 초기(stroke 0.2mm) 편치도입부에서 클리어런스 만큼 상부로 이동하는 경향을 보였고, 편치가 압입됨에 따라 중심부에서 클리어런스 만큼의 좌굴을 일으키는 불안정한 유동현상을 보였다. 클리어런스가 0.02mm, 0.04mm일 경우는 0.06mm일 경우보다 좌굴량이 적으므로 좀더 양호한 변형을 보였다. 스트로크 2mm이후는 컨테이너 내부를 채우고 후방압출에 의한 변형이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

Fig. 8은 예비성형체에 홈이 있는 경우의 해석 결과로 홈 각도가 20°일 때 변형양상을 나타내었다. 성형 초기 0.2mm에서 유동현상은 예비성형체가 전체적으로 중심으로 이동하는 현상을 보여 편치가 홈의 바닥부와 밀착되어 편심하중에 의한 영향이 적고, 스트로크 1mm 부터 후방압출에 의한 성형이 이루어져 예비성형체의 소재유동이 양호함을 알 수 있다. 전체적인 유동현상은 홈 각도 30°와 40°의 경우도 유사한 경향을 보였다. 하지만 Fig. 9와 같이 편치 스트로크 0.6mm에서 30°와 40°의 경우는 예비성형체의 경사면에서 겹침(folding)현상이 나타남을 확인할 수 있었다. 이러한 겹침현상은 성형시 칩을 형성하여 제품정밀도 및 편치수명에 큰 영향을 미칠 우려가 있다. 홈 각도가 20°일 경우는 겹침현상이 없는 매끄러운 경사면을 보였다.

3.2.2 편치의 휨(deflection) 해석결과

예비성형체의 형상이 편치변형에 미치는 영향 평가는 상용구조해석 프로그램인 Ansys에서

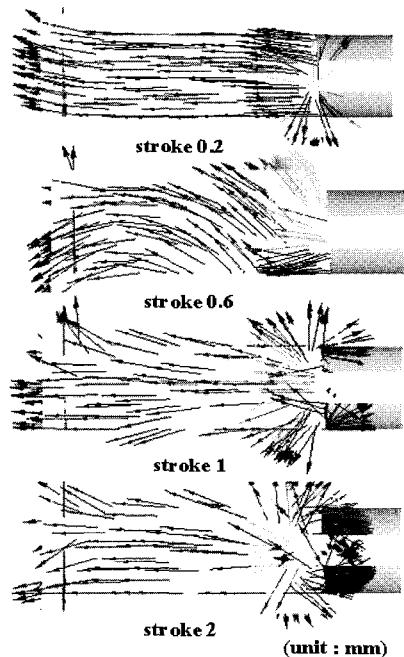


Fig. 6 Deformation of billet at initial stroke (inclination angle : 4°)

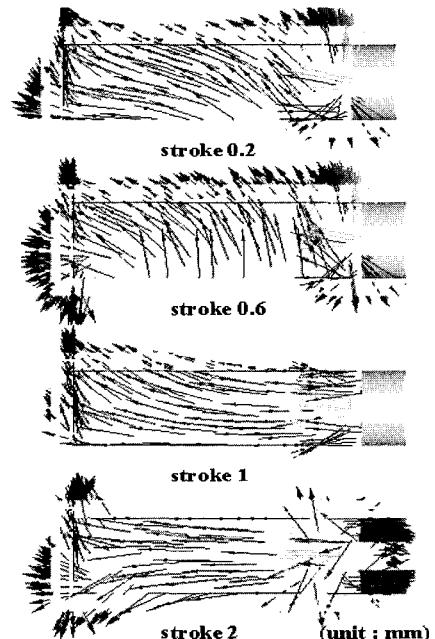


Fig. 7 Deformation of billet at initial stroke (clearance : 0.06mm)

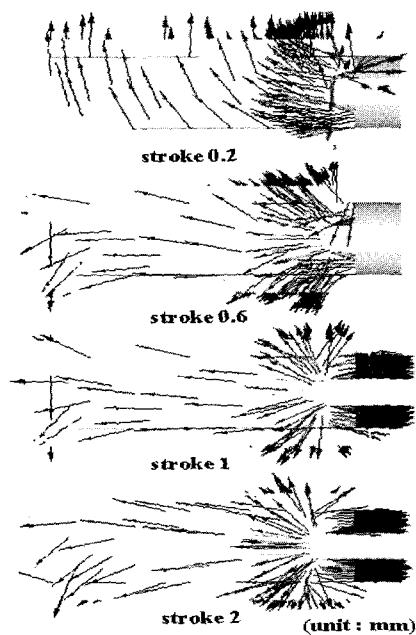


Fig. 8 Deformation of billet at initial stroke (groove angle of billet : 20°)

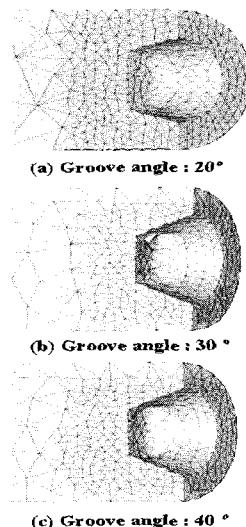


Fig. 9 Deformation of billet at stroke 0.6mm

수행하였다. Fig.10은 편심하중에 의한 편치 흡 경향을 파악하기 위해 스트로크 1mm일 때 각 공정변수에 대한 해석결과를 나타내었다. 예비성형체의 끝 단 경사각(a)이 있는 Fig. 10의 (a) 경우와 클리어런스

스가 0.06mm인 Fig.10의 (b) 경우와 같이 편치의 흡은 중심부에서는 아랫방향으로, 편치 끝단에서는 윗방향으로 흡이 발생함을 알 수 있고, 예비성형체에 흡이 있는 (c)의 경우는 편치 끝단의 흡이 거의 없고 중심부의 흡 역시 0.004mm 정도로 아주 작게 나타났음을 알 수 있다.

Fig.11~13은 편치의 흡을 그래프로 나타낸 것으로 편치 스트로크 4mm이후는 컨테이너 내부를 다채우고 후방압출에 의한 변형만 나타나므로 스트로크 4mm까지의 결과를 보였다. 예비성형체의 끝단면 경사각이 있을 경우(Fig.11) 성형초기에 편치 중심부에서 아래방향(“-”방향)의 흡보다 (+)방향인 윗방향으로 크게 나타났고, 스트로크 0.6mm에서 경사각 4° 일 때 편치 끝단의 흡이 0.017mm로 가장 큼을 알 수 있다. 스트로크가 진행됨에 따라, 경사각이 적을수록 편치의 흡은 ±0.005mm 이내로 줄어들었다.

클리어런스에 의한 편치의 흡(Fig.12)은 편치 끝단(“+”방향)보다 중심부(“-”방향)에서 크게 나타났다. 스트로크 1mm에서 클리어런스 0.06mm일 때 중심부에서 0.032mm로 가장 크게 나타났고, 클리어런스가 작을수록 편치 흡은 작게 나타났다.

Fig.13은 편치의 흡을 줄이기 위해 예비성형체에 흡이 있을 경우의 해석결과로 흡은 ±0.005mm 이내로 나타났다.

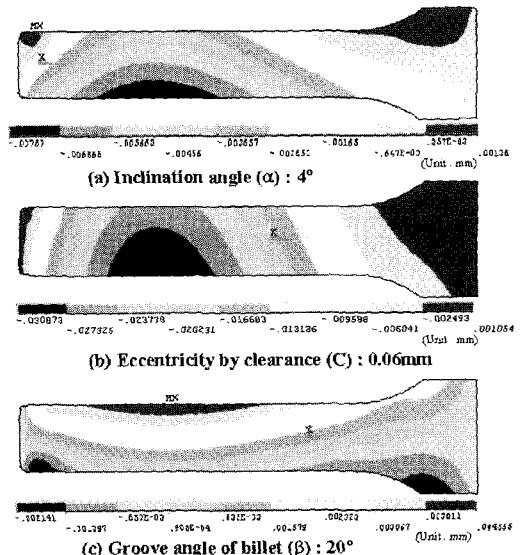


Fig.10 Result of punch deflection at stroke 1mm

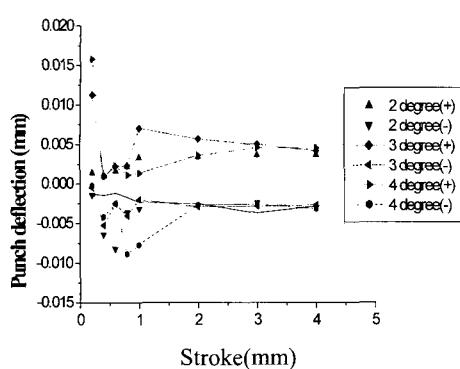


Fig.11 Punch deflection-stroke curve for angle of inclination

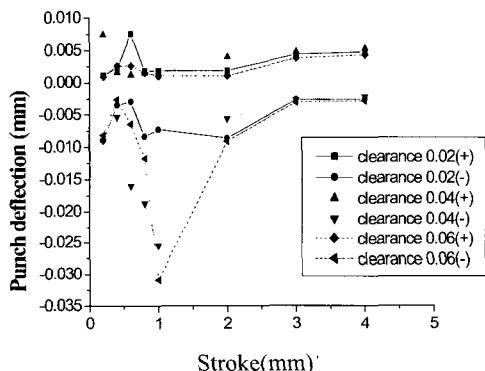


Fig.12 Punch deflection-stroke curve for clearance

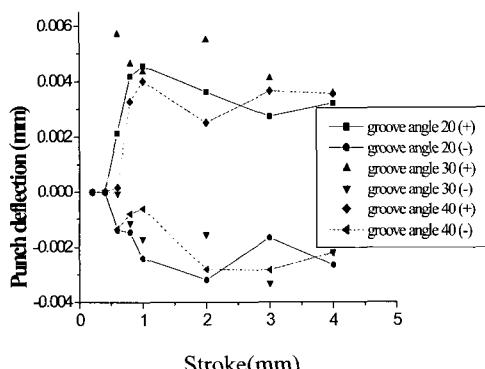


Fig.13 Punch deflection-stroke curve for groove angle

4. Shaft의 냉간단조공정설계

앞서 수행한 연구 결과를 통해 Fig.14와 같이 공정설계를 하였다. 먼저 절단에 의한 빌렛 경사각을 없애기 위한 업세팅공정, 다음으로 클리어런스로 인해 편치의 휨에 영향을 미치는 편심을 줄이기 위해 업세팅된 소재에 흠을 성형하는 호빙(hobbing)공정, 최종적으로 사각편치를 압입하는 후방압출(backward extrusion)공정으로 설계하였다.

설계된 공정의 성형해석 결과는 Fig.15와 같이 양호한 형상으로 나타났다.

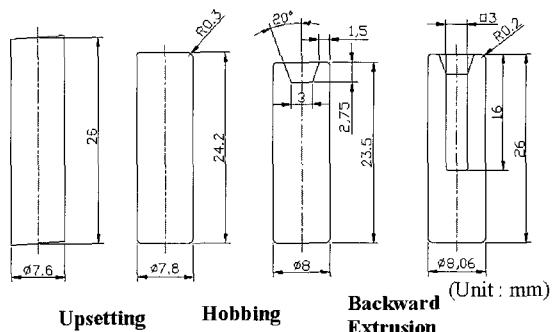


Fig.14 Process design of shaft

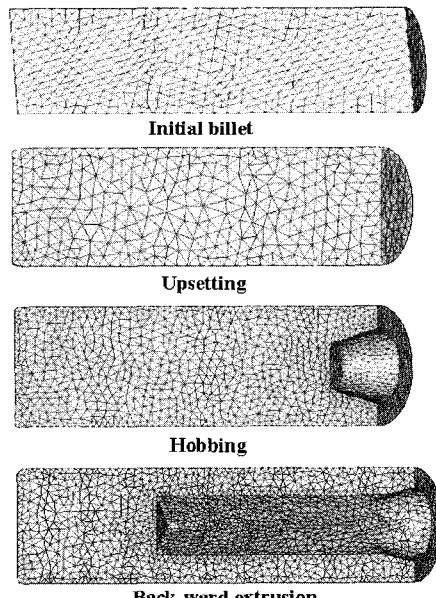


Fig.15 Result of process analysis

Fig.16은 제시된 공정의 하중 그래프를 나타내었다. 3가지 공정 모두 최대 35~40kN으로 비슷하게 나타났다. 이는 냉간다단 포머로 성형시 각 단에 균등한 하중분배로, 포머의 진동을 줄이고 재료의 유동을 양호하게 하는 이점이 있다[12].

Fig.17은 최종단계에서의 편치와 다이의 강도해석결과로서 샤프트 성형시 발생되는 성형압력이 금형에 미치는 유효응력 분포를 나타내었다.

편치와 다이에 작용하는 최대응력은 1.7GPa로 SKD 11의 항복강도 2.2GPa 보다 낮게 나타났다. 편치의 탄성변형량의 경우 앞서 수행한 연구와 같이 0.005mm이내로 양호한 탄성변형을 보였다.

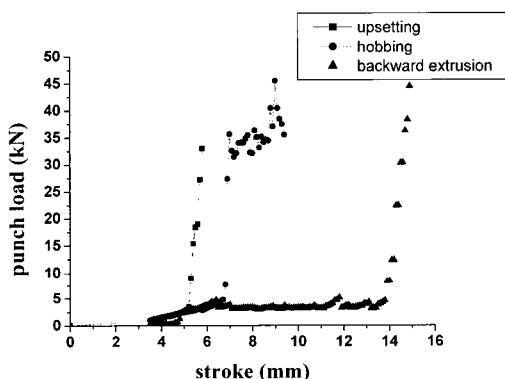


Fig.16 load-stroke curves to each process of shaft

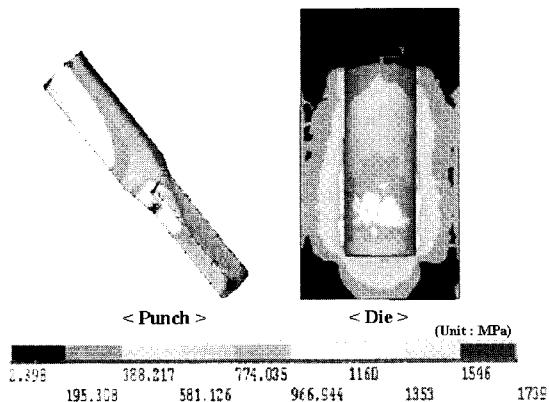


Fig.17 Result of stress analysis

5. 결론

본 연구는 냉간 다단포머를 이용한 샤프트 성형 공정개발을 위해 초기 빌렛의 전단에 대한 평가와 각 공정변수별 성형특성과 편치 휨을 조사하여 다음과 같은 결론을 얻었고 샤프트 성형공정을 설계하였다.

(1) 소재 절단면 경사각이 클 수록 재료 유동이 "S"형상으로 불균일하게 나타났고, 전단 후 빌렛 끝단의 경사각이 클수록 성형 초기 편치의 휨이 크게 나타남을 알 수 있었다.

(2) 클리어런스 크기에 대한 재료 유동은 편치가 압입됨에 따라 소재 중심부에서 클리어런스 만큼의 좌굴이 발생하여 불안정한 유동을 보였고, 클리어런스가 클수록 스트로크 1mm정도에서 편치의 휨이 크게 나타났다.

(3) 예비성형체에 흠이 있을 경우에 있어서 편치의 휨은 전반적으로 0.005mm이내로 크게 감소하였고, 재료유동 역시 아주 양호하게 나타났다. 흠 각도 30°와 40°의 경우는 성형초기 흠 경사면에서 겹침 현상이 발생하였으나, 20°의 경우는 편치가 경사면을 따라 미끄러져 양호한 성형 양상을 보였다.

(4) 샤프트의 성형공정은 업세팅공정, 호빙공정, 후방압출공정으로 설계하였고, 성형하중 역시 다단포머에 적합한 균일한 하중 분포를 보였다. 금형의 강도응력 분포는 SKD 11의 항복강도인 2.2 GPa 보다 작은 1.7Gpa으로 나타나 안정적임을 알 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] G. C. Wang, G. Q. Zhao, X. H. Huang, Y. X. Jia, 2002, Analysis and design of a new manufacturing process for a support shaft using the finite element method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 121, pp. 259~264.
- [2] N. S. Kim, S. Kobayashi, 1990, Preform Design in H-Shaped Cross Sectional Axisymmetric Forging by the Finite Element Method, *Int. J. Mech. Manuf.*, Vol. 30, No. 2, pp. 243~265,
- [3] J. H. Lee, T. H. Kim, B. M. Kim, 1998, Design Methodology of Preform for Reducing Tool Wear in cold Forging, *J. of the Korean Society of*

- Precision Engineering, Vol. 15, No. 4, pp. 118~125
- [4] M. Shiome, J. H. Xu, K. Mori, K. Osakada, 1996, Three-Dimensional Finite Element Simulation of Buckling Behavior of Slab in Width-sizing Process, Advanced Technology of Plasticity, pp. 355~358.
- [5] T. Kato, Y. Tozawa, K. Nakanishi, T. Kawabe, 1986, Prediction of dimensional Accuracy of Cold Extruded Can During Repeating Operation, Annals of the CIRP, Vol. 35, No. 1, pp. 177~180.
- [6] K. Imai, 1981, Effects of Punch Velocity on the Preciseness of Backward-Extruded Cups, J. JSTP, Vol. 22, No. 241, pp. 185~190.
- [7] K. Imai, 1975, Effects of Unsteady Deformation on Inner and Outer Diameters of Backward Extruded Cups, J. JSTP, Vol. 16, No. 178, pp. 1065~1072.
- [8] Meisenbach GmbH and Bamberg, 1992, Cropping of steel bar-its mechanism and practice, International Cold Forging Group.
- [9] I. Pillinger, P. Hartley, C.E.N. Sturgess, G. W. Rowe, 1985, An elastic-plastic three-dimensional finite element analysis of the upsetting of rectangular blocks and experimental comparison, Int. U. Mach. Tool. Des. Res., Vol. 25, p. 229.
- [10] Massao Murakawa, 1992, Building a Prototype Cropping Tester of Circular Bars and Several Test Results Obtained, J. JSTP, Vol. 33, No.374.
- [11] Scientific Technologies Corporation, 1995, DEFORM User's Manual V4.1.
- [12] 김동진, 김병민, 1999, 이중 리브를 가진 냉간 압출품의 내·외부 결합 방지를 위한 공정설계, 한국소성가공학회, 제 8 권 제 6 호, pp. 612 ~619.