

준축대칭 제품 냉간단조용 전문가시스템 개발 - 다단포머 금형의 수평분할 및 최적설계 -

박철우*, 조천수**, 김 철#, 김영호***, 최재찬***

Development of Expert System for Cold Forging of Axisymmetric Product - Horizontal Split and Optimal Design of Multi-former Die Set -

Chul-Woo Park*, Cheon-Soo Cho**, Chul Kim#, Young-Ho Kim*** and Jae-Chan Choi***

ABSTRACT

This paper deals with an automated computer-aided process planning and die design system by which designer can determine operation sequences even if they have a little experience in process planning and die design for axisymmetric products. An attempt is made to link programs incorporating a number of expert design rules with the process variables obtained by commercial FEM softwares, DEFORM and ANSYS, to form a useful package. The system is composed of four main modules. The process planning and the die design modules consider several factors, such as the complexities of preform geometry, punch and die profiles, specifications of available multi former, and the availability of standard parts. They can provide a flexible process based on either the reduction in the number of forming sequences by combining the possible two processes in sequence, or the reduction of deviation of the distribution on the level of the required forming loads by controlling the forming ratios. Especially in die design module an optimal design technique and horizontal split die were investigated for determining appropriate dimensions of components of multi-former die set. It is constructed that the proposed method can be beneficial for improving the tool life of die set at practice.

Key Words : Process Planning(공정설계), Die Design(금형설계), Split Die(금형분할), Extrusion(압출)

1. 서론

냉간단조공정은 비교적 가벼운 축대칭형 제품의

생산에 적합한 공정으로 좋은 가공표면과 높은 치수정도를 갖는 제품을 대량으로 생산 할 수 있으나, 공정설계와 금형제작에 드는 비용 및 시간이 다른 공정에 비해 크다는 단점을 가지고 있다.

접수일: 2003년 12월 05일; 게재승인일: 2004년 5월 7일

* 부산대학교 정밀기계대학원

** 부산대학교 지능기계대학원

교신저자: 부산대학교 기계기술연구소

E-mail chulki@pusan.ac.kr Tel. (051) 510-2489

*** 부산대학교 기계공학부, ERC/NSDM

그래서 최근에는 공정설계시 수반되는 반복적인 작업을 컴퓨터를 사용하여 수행함으로써 보다 효율적인 설계를 하고자 하는 노력이 계속되고 있다.

이에 본 연구에서는 통합적 시스템의 주요 모듈인 가공가능성검사, 공정 및 금형설계를 통하여 다양한 공정 및 금형을 설계하는 냉간단조용 전문가시스템을 개발하고자 한다.¹ 개발된 시스템의 가공가능성검사모듈에서는 설계규칙에 따라 가공 가능한 모든 공정을 창출한다. 공정설계모듈에서는 초기소재 치수와 종류의 변화 및 업세팅과 전방압출순서의 변화를 통하여 재설계하는 기능과 가공가능성검사모듈에서 창출된 공정을 성형단계수 감소와 성형하중의 균일화의 관점에서 재설계하는 기능을 통하여 제품에 가장 적합한 공정을 선택한다.¹ 금형설계모듈에서는 탄성유한요소해석을 수행한 후 후벽원통이론의 탄성해와의 연계를 통하여 응력을 계산하였다. 금형의 최대허용내압을 위하여 보강링의 설계, 다이의 수직 및 수평분할 등을 수행하여 최적의 설계변수값을 구하고 이를 토대로 금형설계도면을 자동적으로 창출시킨다. 창출된 공정 및 금형도면의 타당성을 DEFORM과 ANSYS로 검증했다.

2. 시스템의 구성 및 작동원리

시스템은 입력 및 형상처리 모듈, 가공가능성검사모듈, 공정설계모듈 및 금형설계모듈로 구성되었으며, 이에 대한 알고리즘을 Fig. 1에 나타내었다.¹

2.1 입력 및 형상처리 모듈

입력 및 형상처리모듈은 냉간 가공될 제품의 재질과 치수 및 공차를 사용자로 하여금 입력시키면, 제품의 형상데이터를 설계에 용이한 수치데이터로 변환시킨다.

2.2 가공가능성검사모듈

가공가능성 검사모듈에서는 입력 및 형상처리모듈에서 인식된 단조품 형상을 성형할 수 있는 소재의 직경을 정하고 각 소재 직경에 따라 가공 가능한 공정도면들이 설계규칙에 의하여 창출된다.¹

2.3 공정설계모듈¹

공정설계모듈은 가공가능성검사모듈에서 선택된 공정설계도면에 대하여 공정순서, 공정수, 성형하중, 중간단계의 기하학적 형상, 성형성, 변형률등을 고려하여 창출된 도면들 가운데 제품에 적합한 공정설계 도면을 선택한다.

이를 위하여 2단 동시압출(double operation), 다단 업세팅, 복합압출과 같은 복합공정을 이용하거나 다이의 최적분할(수직분할 및 수평분할)을 통하여 금형의 최대허용내압을 증가시켜 공정수를 감소시키고자 하였다.

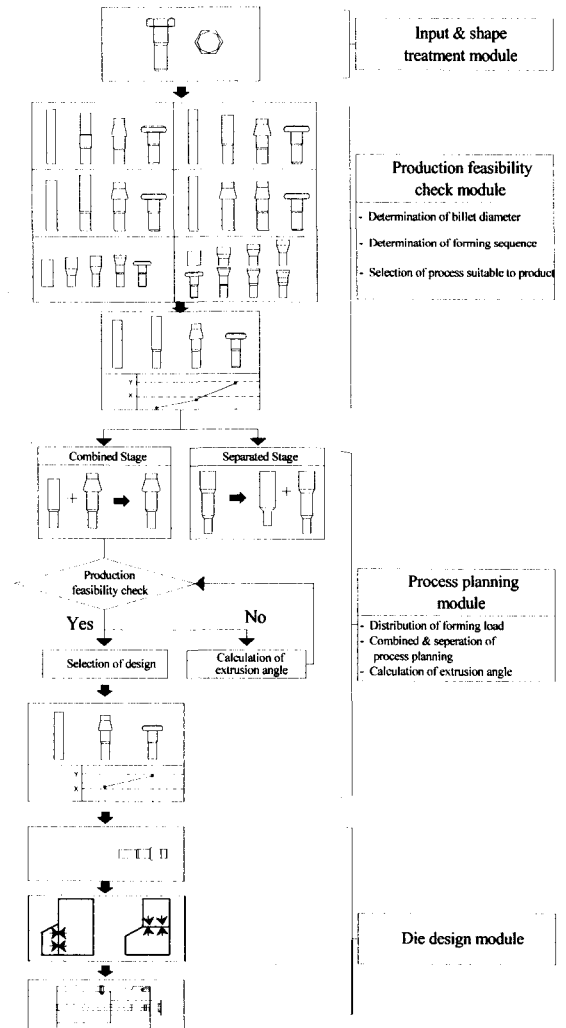


Fig. 1 Configuration of the system

규칙5) 다이 인서트와 보강링의 설계는 최대의 허용내압이 작용할 수 있도록 직경을 분할하고, 최대 허용내압이 작용할때는 보강링의 내면이 항복조건을 만족하도록 끼워맞춤 공차를 준다.

규칙6) 보강링의 조립은 최외각 링부터 순차적으로 한다

규칙7) 보강링의 열박음시 가열온도는 소려온도 (400°C)이하라야 한다.

규칙8) 50%이상의 구속압출에서는 다이의 분할이 필요하다.³

3. 시스템의 적용 및 고찰

육각머리볼트(hexagon head bolt), 플랜지볼트(flange bolt), 또는 각종 렌치볼트(wrench bolt) 형상의 헤드부와 필요에 따라 헤드부 아래단에 세레이션 가공을 하는 각종 준축대칭 제품들 가운데 본 연구에서는 현재 산업현장에서 생산중인 재질이 S45C인 Fig. 4와 같은 육각머리볼트 제품을 개발된 시스템에 적용시켜 각 모듈에서 수행된 결과를 고찰하고자 한다.

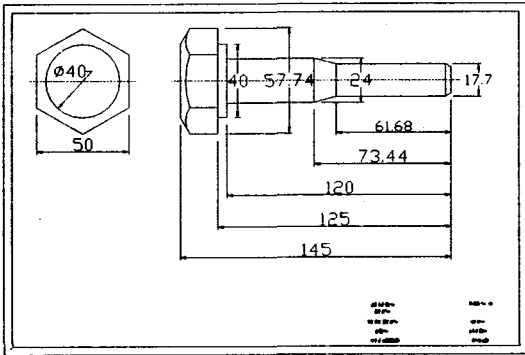
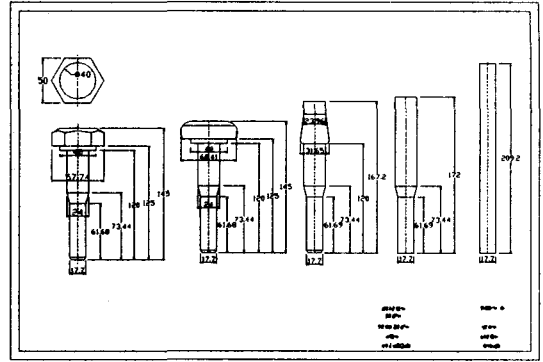


Fig. 4 A sample drawing of hex bolt, M24

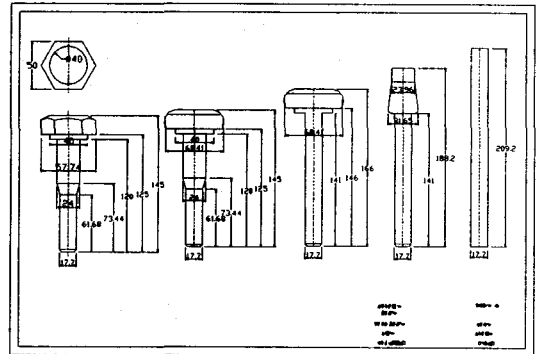
3.1 가공가능성검사모듈에의 적용

설계규칙에 의하여 결정된 소재의 지름(17.7mm, 23.93mm, 26.5mm)으로 본 모듈에서 수행된 공정을 Fig. 5(a) ~ (e)에 나타내었다. Fig. 5(a)는 볼트의 아랫단(나사산 가공부분)을 소재의 지름(17.7mm)으로 하여 창출된 공정으로 모든 공정이 업세팅으로 이루어졌다. 이 공정에서는 볼트의 가

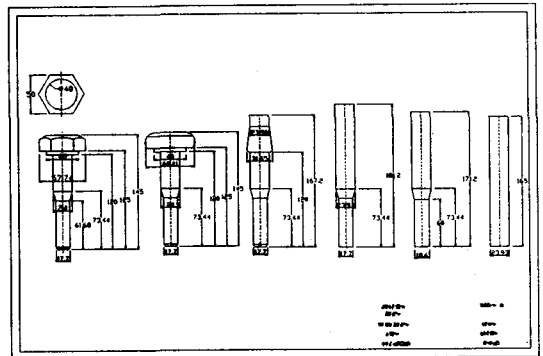
장 중요한 나사부분이 한번도 가공경화를 받지 않기 때문에 매우 약하다.



(a) In case of the billet diameter, 17.7mm



(b) In case of the billet diameter, 17.7mm
(all upsetting)



(c) In case of the billet diameter, 23.93mm

또한 압출비나 업셋비의 조절, 공정의 병합 등을 통하여 성형하중을 균일화 시키도록 하였다.²

2.4 금형설계모들

금형설계모들에서는 공정설계모들에서 창출된 최종적인 공정의 형상 정보를 가지고 금형에 최대 허용내압을 증가시키기 위해 보강링 설계, 다이의 분할 등을 수행하여 Fig. 2 나타난 설계변수에 대하여 최적 변수값을 구하여 이를 토대로 금형 설계 도면을 자동적으로 창출시킨다.

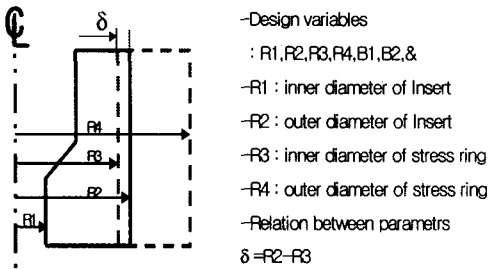


Fig. 2 Geometrical variables for the optimization model

2.4.1 금형 설계에 관한 규칙

규칙1) 금형 인서트와 보강링의 재질이 다른 경우의 설계계산식은 다음과 같다.

(Q, Q_1, Q_2 는 Fig. 3 참조)

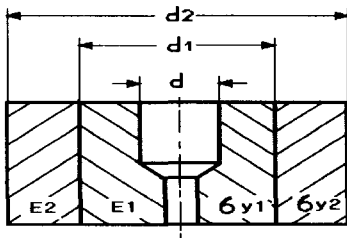


Fig. 3 Die with stress ring

· 최적분할직경비 $Q_{lopt} = \sqrt{Q^2 + Q\sqrt{1+Q^2}}$

· 최대 허용내압 $P_{iopt} = \frac{\sigma_{y2}}{(1+2Q_{lopt}^2)}$

· 접촉 면압

$$P_1 = \frac{1}{2} \frac{(1+Q^2)(1-Q_1^2)}{(1-Q^2)(1+Q_1^2)} \{ \sigma_{y2}(1-Q_2^2) \}$$

· 억지끼워맞춤량

$$Z_1 = \left[\frac{(1-\nu_2)Q_2^2 + (1+\nu_2)}{E_2(1-Q_2^2)} + \frac{(1-\nu_1) + (1+\nu_1)Q_1^2}{E_1(1-Q_1^2)} \right] P_1 d_1$$

$$Q = \frac{d}{d_2}, \quad Q_1 = \frac{d}{d_1}, \quad Q_2 = \frac{d_1}{d_2}$$

σ_{y1} : yield stress of insert

σ_{y2} : yield stress of stress ring

규칙2) 축대칭 원통 부재에서 반경방향과 원주방향의 응력 계산식은 다음과 같다.

$$\sigma_r = \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_0}{r_2^2 - r_1^2} - \frac{(p_i - p_0) r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2) r^2}$$

$$\sigma_\theta = \frac{r_1^2 p_i - r_2^2 p_0}{r_2^2 - r_1^2} + \frac{(p_i - p_0) r_1^2 r_2^2}{(r_2^2 - r_1^2) r^2}$$

여기서, r_1 : 금형의 내경

r_2 : 금형의 외경

σ_r : 반경방향 응력

σ_θ : 원주방향 응력

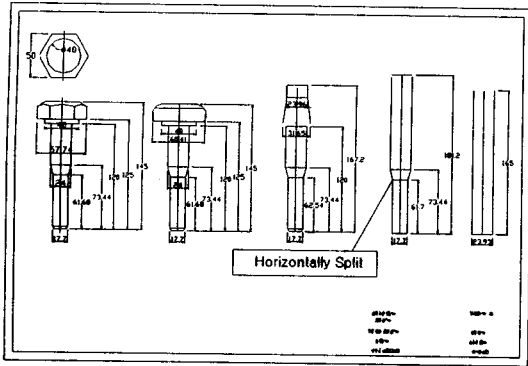
규칙3) 보강링의 개수를 결정하는 기준은 다음과 같다.

- 보강링 0개 : $P_{iopt} < 100 \text{ kgf/mm}^2$

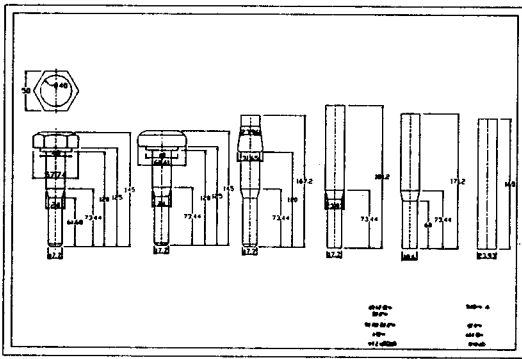
- 보강링 1개 : $100 \text{ kgf/mm}^2 \leq P_{iopt} < 160 \text{ kgf/mm}^2$

- 보강링 2개 : $160 \text{ kgf/mm}^2 \leq P_{iopt} < 200 \text{ kgf/mm}^2$

규칙4) 금형인서트와 보강링의 재질이 다른 경우 즉, 금형인서트의 재질이 초경합금(W.C.)이면, 다이 인서트가 인장응력에 취약하므로 작업중에 금형인서트에 인장응력을 허용하지 않는다.



(d) Combined process of the billet diameter, 23.93mm



(e) In case of the billet diameter, 26.5mm

Fig. 5 Automated process planning drawings generated according to the design rules

Fig. 5(b)는 (a)공정과 같이 모든 공정이 업세팅으로 이루어졌으며, 볼트의 머리부분을 먼저 성형하고 난후 중간부분을 성형한다. Fig. 5(c)는 볼트의 중간단을 소재의 지름(23.93mm)으로 하여 창출된 공정으로 50% 구속압출과 10%비구속압출로써 볼트의 나사부를 성형하고 난후 머리부분은 업세팅으로 성형된다. Fig. 5(d)는 중간단을 소재의 지름으로 하여 창출된 공정으로 다이의 수평분할을 통하여 급형의 최대허용내압을 증가시켜 공정수를 감소시켰다. Fig. 5(e)는 가장 균형잡힌 공정을 수행할 수 있는 소재의 직경을 계산한후 그것을 소재의 지름(26.5mm)으로 하여 창출된 공정으로 압출비의 조절

로 성형하중의 균일화를 시켰지만, 공정수가 늘어나는 단점이 있다.

3.2 공정설계모듈에의 적용

가공가능성검사모듈에서 창출된 Fig. 5(a)~(e)의 공정들 가운데 중간부분의 기하학적 형상 및 나사산의 강도를 고려하여 제품에 적합한 공정은 Fig. 5(c)와 (d)이다. 현재 생산현장에서 다단포머의 형태가 4단이상이면 Fig. 5(c)의 공정을 사용할 수 있으나 공정수의 감소와 각 공정간의 성형하중의 균일화가 이루어진 Fig. 5(d)로 선택한다.

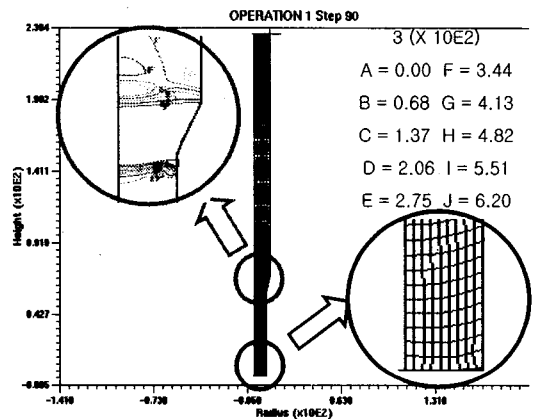


Fig. 6 Effective stresses for the trap extrusion with the ratio, 60%

선택된 (d)공정에 대한 가공가능성을 검증하기 위하여 DEFORM으로 시뮬레이션을 수행한 결과를 Fig. 6에 나타내었다. 해석결과에 의하면 최대 유효응력은 62kgf/mm^2 로써 소재의 인장응력보다 작으므로 성형시 결함이 발생하지 않음을 알 수 있다. 해석중 소재가 다이에 완전히 밀착하는 마지막 단계에서 하중이 비정상적으로 급격히 증가하는 현상이 발생하므로 공정의 98.7%단계에 이를 때의 하중을 공정하중으로 하였다.⁴

또한 Fig. 7에 의하면 (d)공정의 하중영역은 $8 \sim 24\text{kgf/mm}^2$ 로 (c)공정의 하중영역 $6 \sim 24\text{kgf/mm}^2$ 비하여 성형하중분포가 균일함을 알 수 있다.

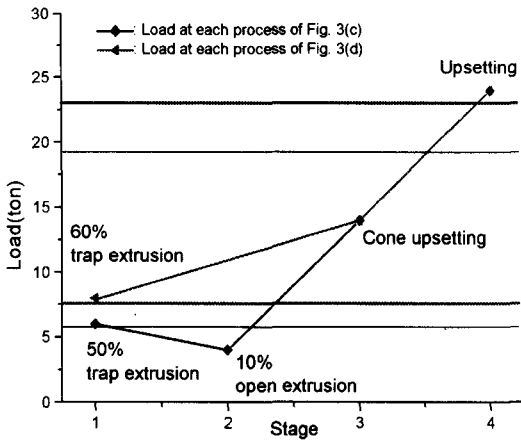


Fig. 7 Comparison of deviation of the forming load distributions from the area of forming load

3.3 금형설계모듈에의 적용

공정설계도면으로부터 금형의 최적분할 직경비, 최대허용내압, 간섭량, 접촉면압, 반경 및 접선방향의 응력을 계산한 후 다이인서트, 보강링 도면이 자동적으로 창출되어진다.

Table 1 Mechanical properties of the workpiece, die and stress ring

	AISI 1045 (Workpiece)	W.C. (Insert)	SKD 61 (Ring)
Modulus of Elasticity (Kgf/mm ²)	20,000	465,000	212,000
Poisson Ratio	0.3	0.24	0.3
Hardness (HRA)	-	92.0	77.0
Yield Stress (Kgf/mm ²)	54.08	273.7	117.2

금형과 공작물의 기계적인 특성은 Table. 1과 같으며, 인서트와 보강링사이의 마찰조건은 전단마찰상수를 0.1로 하였다. 금형의 수명을 향상시키는 인자로는 탄성변형, 마모, 반복응력, 열응력, 탄성계수의 변화, 소성변형, 최대응력 등 여러 가지가 있지

만, 본 연구에서는 피로파괴의 균열이 시작되는 금형 내곽면에서의 원주방향응력을 주요인자로 했다.⁵

Fig. 8은 단일보강링의 응력 최적화를 위한 세가지 경우를 보여준다.⁶

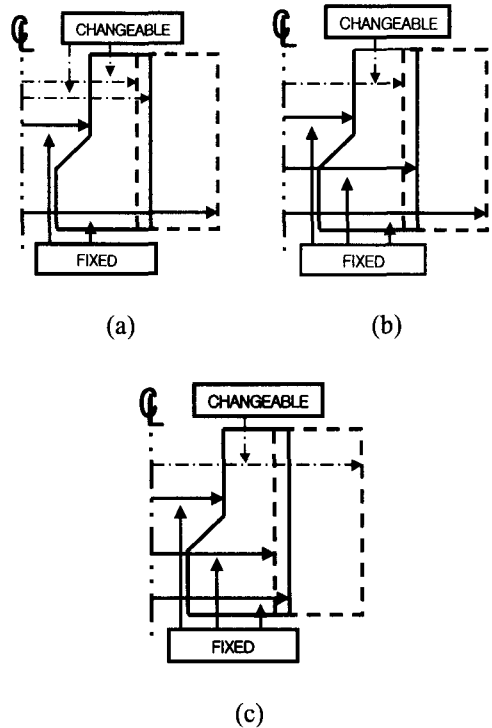


Fig.8 Three cases for optimizing stresses of the die set with a single stress ring

Fig. 8(a)는 금형세트의 외경이 한정되어지고 금형의 형상은 제품의 생산치수에 의해 결정되므로 변경이 가능한 것은 인서트의 외곽반경과 보강링의 내곽반경의 변화이며, Fig. 8(b)는 인서트와 보강링간의 억지끼워맞춤양이 변화하는 경우이며 Fig. 8(c)는 보강링의 외경이 어느 정도 확장이 가능한 경우이다.

Fig. 9와 Fig. 10은 Table. 2의 조건에 따라서 인서트와 보강링의 응력변화를 나타낸 것이다.

Table 2 Dimensions of outer diameters of insert and stress ring

	outer diameter of insert(mm)	outer diameter of stress ring(mm)	clearance(mm)
case1	56	110	0.14
case2	58	110	0.14
case3	60	110	0.14
case4	62	110	0.14
case5	64	110	0.14
case6	66	110	0.14
case7	68	110	0.14
case8	70	110	0.14

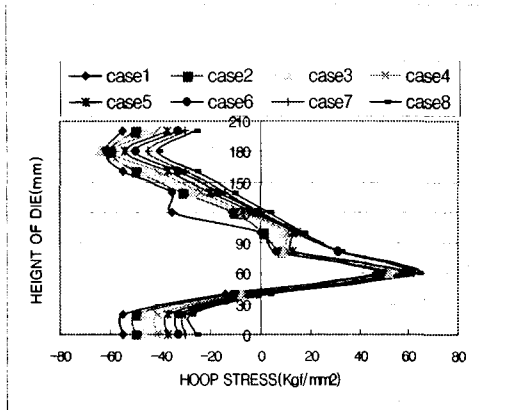


Fig. 9 Hoop stress in the inner diameter of insert according to the diameter ratios

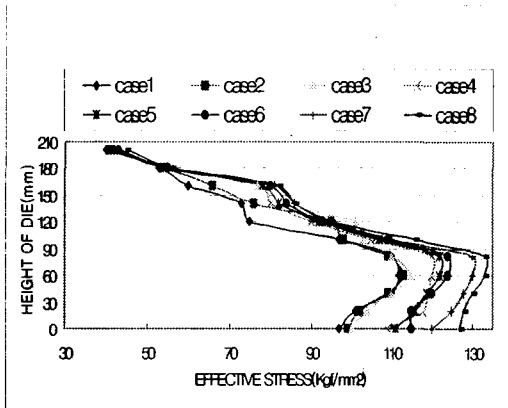


Fig. 10 Effective stress in the inner diameter of stress ring according to the diameter ratios

Fig. 11과 Fig. 12는 일정한 금형의 분할비에 대하여 공차량변화에 따른 인서트와 보강링의 응력변화를 나타내었다.

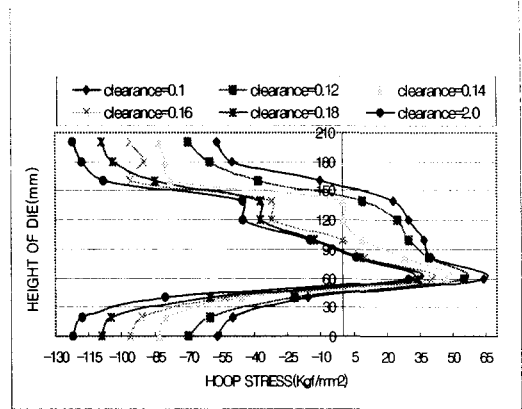


Fig. 11 Hoop stress in the inner diameter of insert according to interferences

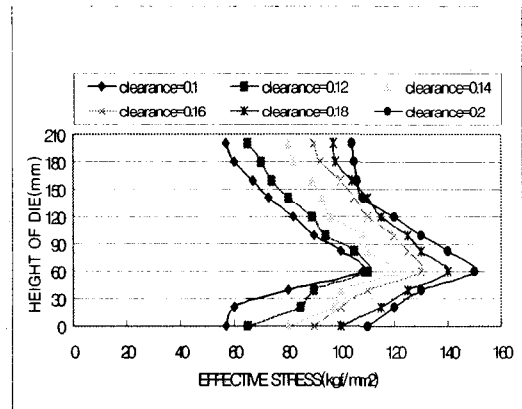


Fig. 12 Effective stress in the inner diameter of stress ring according to interferences

각각의 경우 인서트의 외경은 $\phi 60\text{mm}$, 공차량은 0.14mm 까지 사용 할 수 있었다. 인서트에 최대의 압축잔류응력을, 보강링에는 최소의 인장응력을 발생시키는 case3에 대한 해석결과를 Fig. 13 나타내었다.

금형설계도면의 타당성을 검증하기 위하여 ANSYS를 이용하여 금형의 강도평가를 수행했다. 우선 성형성 평가에 사용된 DEFORM 테이터를 가지고 보간력(interpolate forces) 기능을 이용하여 소

재료부터 금형에 전달되는 하중값들을 추출하여 ANSYS의 좌표값과 하중값으로 변환하고 보강링과 다이인서트 사이의 접촉을 접촉요소(contract172 element, target169 element)로 모델링하여 강도해석을 수행한 결과를 Fig. 14에 나타내었다.

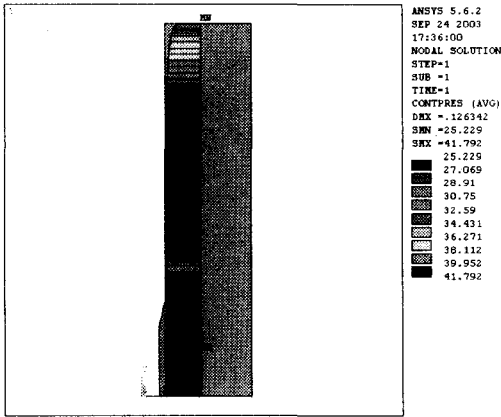


Fig. 13 Contact pressure between the insert and the stress ring

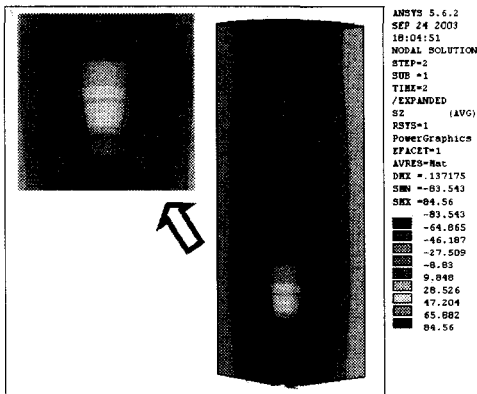


Fig. 14 Tangential stresses of the die insert for the trap extrusion with the extrusion ratio, 60%

Fig. 14는 인서트내경에서 $\sigma_r = -98.51\text{Kgf/mm}^2$, $\sigma_\theta = 47.2\text{Kgf/mm}^2$ 이고, 인서트외경에서 $\sigma_r = -37\text{Kgf/mm}^2$, $\sigma_\theta = -9\text{Kgf/mm}^2$ 로서 이는 작업중에 다이인서트에 인장응력을 허용하지 않는다는 설계규칙에 위배된다.

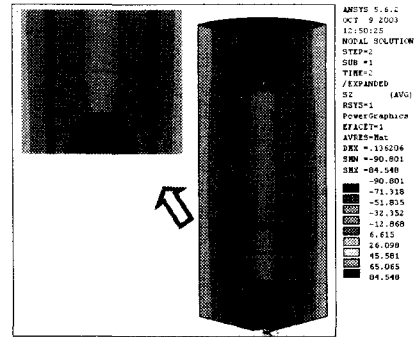


Fig. 15 Tangential stresses of the die insert for the 60% trap extrusion with the horizontal split die

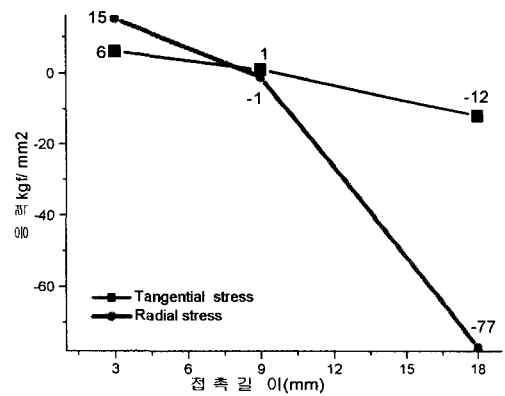


Fig. 16 Stress distribution of according to the contact length between upper and lower parts of split die

그리하여 본 모듈에서는 Fig. 15와 같이 다이의 수평 분할에 의한 강도 해석을 수행했다. 금형의 수평 분할면의 접촉길이가 9mm이상일때는 접선방향으로 압축응력이 작용함을 Fig. 16에서 알 수 있다. 이에 수평분할면의 접촉길이를 18mm로 했을 때, 해석 결과에 의하면 인서트 반경방향응력 $\sigma_r = -77\text{Kgf/mm}^2$, 접선방향응력 $\sigma_\theta = -12\text{Kgf/mm}^2$ 이 인서트에 압축응력인 상태로 작용하고 있으므로 금형이 안전함을 알 수 있다. 따라서 60% 구속압출공정도 다이의 수평분할을 통하여 한 공정으로 수행하는 것이 가능함을 알 수 있다.

4. 결 론

본 연구에서는 소성가공이론, 산업체 설계전문가들의 경험 지식과 유한요소해석을 통한 최적의 공정변수를 토대로 냉간단조 성형을 위한 공정 및 금형설계자동화 시스템을 개발했다. 개발된 시스템의 공정설계모듈에서는 공정수의 감소와 각 공정간의 성형하중 균일화를 통하여 제품에 가장 적합한 공정을 선택하며 금형설계모듈에서는 보강링과 인서트의 억지끼워맞춤으로 발생하는 접촉면압, 변위 및 응력분포를 계산할수 있으며, 60% 구속압출 공정에 대하여 다이의 수평분할을 통하여 공정이 가능하도록 했다. 각 모듈에서 수행된 결과는 제품의 공정 및 금형세트의 최적설계에 활용할수있으리라 판단되며, AUTO CAD 시스템을 이용한 도면의 출력은 본 전문가 시스템의 유용성을 더욱 늘려 줄 것이다.

참고 문헌

1. Park, Chul Woo, Kang, Jung Hun, Lee, Joon Ho Kim, Chul, Kim, Moon Saeng and Choi, Jae Chan "A Study of Automated Process Planning and Die Design for Multi Former-Bolt Products," Journal of the Korean Society of Precision Engineering, Vol. 20, No. 4, pp. 29-38, 2003.
2. Kim, Hong Seok and Im, Young Taek "Expert System for Process Design of Cold Forging with Redesigning Scheme," The Korean society of Mechanical Engineers, Vol. 18, No. 8, pp. 2039-2052, 1994.
3. KURT LANGE "HANDBOOK OF METAL FORMING," McGraw-Hill Book Company, N.Y., 1967.
4. Vazquez, Victor, Hannan, Daniel and Taylan, Altan, "Tool life in cold forging - an example of design improvement to increase service life," Journal of Materials Processing Technology 98, pp. 90-96, 2000.
5. Kuhn, Howard H., "Optimum Die Design for Powder Compaction," The International Journal of Powder Technology, Vol. 14, No. 8, pp. 259-275, 1978.
6. An, S. C. and Im, Y. T., "Optimal Design of Dimension of Extrusion Die with Single Stress Ring," Transactions of Materials Processing, Vol. 11, No. 4, pp. 363-370, 2002.
7. Lengyel, B. and Venkatasubramanian, T. V., "Optimization in the Cold Forging of Steel," Proc. 18th MTDR Conf., pp. 153-157, 1977.
8. Badawy, A. A., Kuhlmann, D. J., Raghupathi, P. S. and Altan, T., "Computer-Aided Design of Multi-stage Forging Operations for Round Parts," J. Mech. Work. Technology, 11, pp. 259-274, 1985.