한국기계가공학회지, 제19권, 제5호, pp.91～97(2020.05) ISSN 1598-6721(Print)
Journal of the Korean Society of Manufacturing Process Engineers, Vol. 19, No. 5, pp.91~97(2020.05) ISSN 2288-0771(Online)

https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.05.91

육각볼트 헤드 단조를 위한 분할금형설계

추연근*, 조해용**,#

*충북대학교 대학원 기계공학과, **충북대학교 기계공학부

A Split Die Design for Forging of Hexagonal Bolt Head

Qiu Yuangen*, Hae Young Cho**,#

*Dept. of Mechanical Engineering, Graduate School, Chungbuk Nat'l Univ.,
**Dept. of Mechanical Engineering, Chungbuk Nat'l Univ.

(Received 2 April 2020; received in revised form 28 April 2020; accepted 6 May 2020)

ABSTRACT

A split-die design for the cold forging of symmetric parts such as those having a hexagonal cross-section is presented in this paper. Parts with a hexagonal cross-section, such as bolt heads and nuts, should be forged with a die that has a hexagonal-shaped hole. A split type die is required to mitigate the buildup of stress concentrations located at the corners of the hexagonal hole. Generally, the insert of a hexagonal die is made by cutting each corner of a cylinder using a hexagonal hole and then combined with the die and shrink-fitted. However, split dies face problems when extruding material at the corners of the hexagonal split die. To address this problem, two types of split dies were evaluated: rounded hexagonal dies and angular hexagonal dies. The effects of the pre-stress ring on the dies were compared and analyzed and results show that using the angular split hexagonal die can extend the lifetime of forging dies.

Key Words : Cold Forging(냉간단조), Die Design(금형설계), Non-Axisymmetric(비축대칭), Finite Element Analysis(유한요소해석), Shrinkage Ring(보강링)

1. 서 론

단조공정은 대표적인 소성가공공정중의 하나로서 품질과 생산성이 우수하고 경제적인 가공법으로 알려져 있다[1]. 특히 자동차를 비롯한 다양한 기계공업분야에서 대량생산의 요구에 따라 단조공법을 주로 사용하고 있으며 대표적인 예로 볼트, 너트와 같은 다양한 체결요소들이 있다. 그 중에서 6각볼의 경우 냉간단조성형을 통하여 6각단면형상의 헤드부와 생크부를 성형한 후 절삭 또는 전조공정을 거쳐 성형한다. 이와 같은 정6각단면구조를 가진 부품을 단조성형 할 경우 동일한 형상을 가진 단조금형으로 성형하는 것이 일반적이다. 단조금형의 설계에 있어서 우선 고려되어야 할 사항은 금형이 접촉압력을 충분히 견딜 수 있도록 설계되어야 한다. 이를 위해서는 단조과정에서 소재가 금형에 작용하는 힘으로 인해 발생되는 금형응력 및 변형을 예측하여 금형파손을 방지할 수 있는 적절한 금형분할설계가 필요하다. 또한 금형수명을 향상시키기 위하여 보강링의 사용이 필수적이며 단조과정에서 금형 열박음으로 인한 금형간의 접촉압력에 대한

Corresponding Author : hycho@cbnu.ac.kr
Tel: +82-43-261-2464, Fax: +82-43-263-2441

Copyright © The Korean Society of Manufacturing Process Engineers. This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution-Noncommercial 3.0 License (CC BY-NC 3.0 http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

예측이 필요하다[2]. 특히 정6각단면과 같은 비축대칭금형인 경우 금형의 분할방법이 금형수명에 직접적인 영향을 줄 수 있다.

본 논문에서는 정6각단면을 가진 단조금형의 분할방법에 대하여 수식화 및 유한요소해석을 통하여 최적의 금형분할방법에 대하여 연구하고자 하였다. 또한 다양한 금형분할법을 통하여 금형수명을 향상시킬 수 있음을 확인하고자 하였다.

2. 단조공정 시뮬레이션

Fig. 1에서와 같이 정6각단면형상의 헤드를 가진 TERMINAL NUT부품의 단조공정을 예로 들 경우 일체형금형으로도 단조금형을 설계할 수 있다. 또한 단조실험에서 금형에는 파손이 발생하지 않았다. 그러나 일정한 시간 사용 후 Fig. 2에 나타낸 바와 같이 금형내벽의 모서리 부분에서부터 크랙이 발생한다. 이는 금형내벽에 작용되는 성형압력으로 인하여 금형에 인장응력이 발생하며, 인장에 약한 초경금형재료의 특성으로 인해 파손되었을 것으로 판단된다.

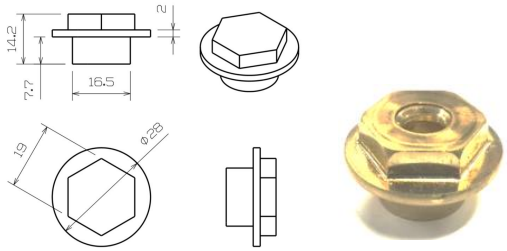


Fig. 1 Shape of termimal nut

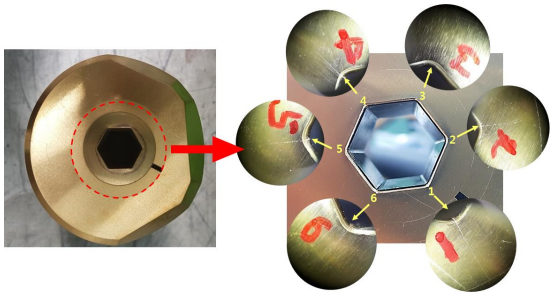
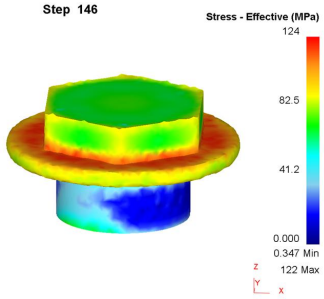


Fig. 2 Generation points of die cracking

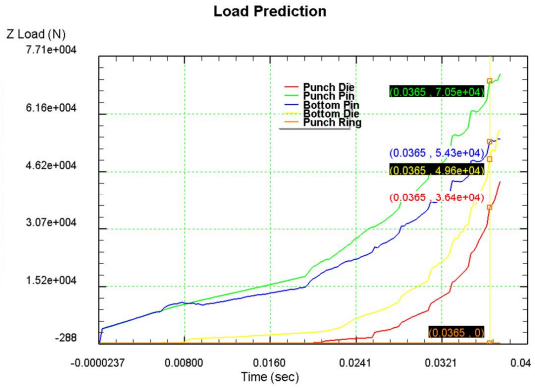
2.1 단조 및 금형응력 해석

파손원인을 분석하기 위해 3차원 설계 프로그램인 CATIA로 금형을 모델링을 하였고 상용 유한요소해석 프로그램인 DEFORM-3D를 이용하여 단조성형 및 금형응력해석을 하였다. 해석 경계조건에서 냉간 공정이므로 금형과 빌렛의 온도는 상온인 20°C를 적용하였고 소성변형 과정에서의 발열과 금형과의 열전달은 무시하였다. 빌렛의 요소 개수는 50,000개로 설정하였다. 금형과 소재의 마찰상수는 일반적으로 냉간가공에서 사용되는 0.08을 적용하였으며 단조금형에서 펀치의 속도는 200 mm/s로 설정하였다. 소재의 기계적 물성은 DEFORM에서 제공한 동합금인 C2600을 적용하였다.

Fig. 3(a)에 나타낸 단조해석결과에서 TERMINAL NUT의 형상은 단조실험결과와 일치하게 나왔으며 Fig. 3(b)에 표시된 바와 같이 단조금형펀치와 핀에



(a) Shape of forged terminal nut



(b) Graph of forging load

Fig. 3 Simulated result of forging process for termimal nut

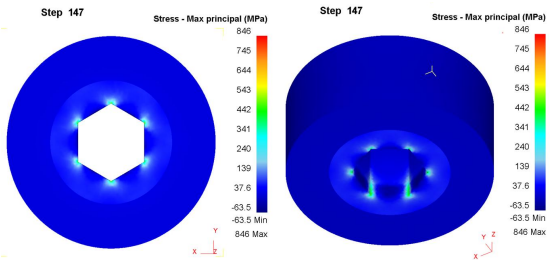


Fig. 4 Simulated results of die stress for one-piece type

Table 1 Mechanical and thermal properties of C2600, WC, SKD-61

Specimen	Yield strength [MPa]	Tensile strength [MPa]	Elongation [%]
C2600	115	340	57

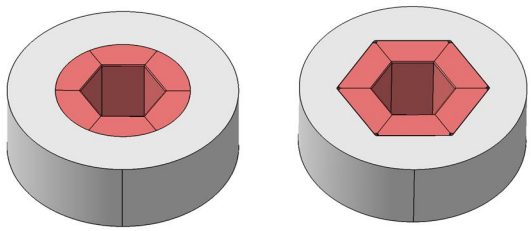
Materials	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio
WC	650	0.3
SKD-61	210.3	0.25

는 각각 36,400N과 70,500N의 수직하중이 작용되었음으로 성형하중은 약 106,900N 으로 예측된다. 또한 금형응력을 예측하기 위하여 금형응력해석을 하였다. 금형재료에서 보강링은 STD61, 내부의 초경은 WC소재를 적용하였으며 탄성체로 설정하여 해석하였으며 기계적 물성은 Table 1에 표시한 바와 같다.

금형응력해석결과는 Fig. 4에서 나타내었다. 금형내벽의 6각형 모서리부근에서의 주응력은 약 800MPa 이상인 인장응력이 나타난 것을 확인할 수 있다. 이러한 인장응력의 분포는 단조실험에서 금형의 파손방향과 일치하였다. 따라서 해석결과를 바탕으로 정6각형모양의 금형에 대한 분할설계가 필요하다.

3. 금형 설계

정6각형모양의 금형의 분할에서 가장 일반적인 방법으로는 파손방향에 따라 Fig. 5(a)와 같이 대각선 방향으로 균일하게 분할하여 설계하는 방법이 있다. 그 외에도 다양한 설계방법들 중에서 Fig. 5(b)에서와 같이 내부 초경금형형상을 6개의 균일한 사다리꼴단면으로 분할하는 독특한 분할방법이 일부 금형설계업체에서 제안된 바가 있다.



(a) (b)

Fig. 5 Die Split method of circular type and hexagonal type design

3.1 분할금형 형상설계

단조성형과정에서 분할금형에 작용하는 힘에 대하여 Fig. 6 에 나타내었다. 금형의 단면에서 직접 소재와 닫는 금형의 내면을 AB로 하고 보강링으로부터 외압을 받는 면을 CD로 정한다. 또한 열박음하여 발생되는 외압(p_o)은 평면상태에서 외부원형-내부6각인 경우와 외부6각-내부6각인 경우를 비교하기 위하여 각 분할금형의 단면을 그림으로 나타내었다. 사다리꼴 형상인 경우 외압으로부터 중심부로 향하는 합성력은 동일하다고 가정한다. 또한 중심부에서의 각도는 60°, 중심축에서부터 금형내벽의 6각형의 대각거리를 r_1 금형끝단까지의 거리 r_2가 같다고 설정하고, 외압 □p□$_o$□에 의해 걸리는 힘

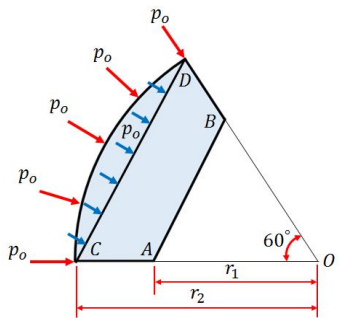
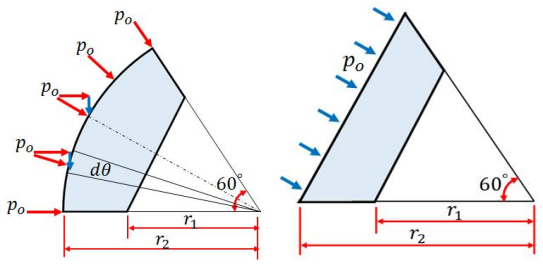


Fig. 6 Force distribution acting on the split die



(a) circular type **(b) hexagonal type**

Fig. 7 Force distribution acting on the split die

은 Fig. 7에 나타낸 바와 같다. 분할금형의 외벽을 원통형으로 설계할 경우 외압으로부터 금형에 작용하는 힘 F_C는 다음과 같다. 단면형상의 대칭축으로부터 AC와 BD로 멀어짐에 따라 발생되는 각도를 Θ라고 한다. 이 각도에 따라 금형에는 내벽과 수직되는 작용력과 일정한 각도를 가진 분력으로 나눌 수 있다. 따라서 Fig. 7(a)에서 발생되는 분할면의 접촉압력은 Fig. 7(b)인 경우 보다 크게 발생한다.

원통형 분할금형인 경우와 6각형 분할금형인 경우 식 (1)에서와 같이 외압으로 인하여 중심부로 향하는 합성력은 동일하다.

$$F_c = 2\int_0^{\frac{\pi}{6}} p_o r_2 d\theta \times 1 \times \cos\theta = 2p_o r_2 [sin]_0^{\frac{\pi}{6}} = p_o r_2$$

$$F_s = r_2 p_o \times 1 = p_o r_2 \quad (1)$$

$$\therefore F_c = F_s$$

그러나 동일한 크기의 외압 □p_o□로인하여 각 분할면에서 발생되는 접촉력은 서로 다르게 발생한다. θ 각의 변화에 따라 :

$$0 \le \theta \le \frac{\pi}{6}$$

$$F_c = 2\int_0^{\frac{\pi}{6}} p_o r_2 d\theta \times 1 \times sin\,\theta = 2p_o r_2 [-cos]_0^{\frac{\pi}{6}}$$

$$= 2p_o r_2 \left(1 - \frac{\sqrt{3}}{2}\right) = 0.2679 p_o r_2 \quad (2)$$

$$(r_2 - r_1) \times 1$$

각도 θ에 따라 접촉압력 σ_c 는

$$\sigma_c = \frac{0.2679 p_o r_2}{r_2 - r_1} \quad (3)$$

이다.

사다리꼴 형상으로 분할한 경우 외압 p_o에 의해 걸리는 힘 F_s는

$$F_s = p_o r_2 \times 1 \times \sin\frac{\pi}{6} = \frac{p_o r_2}{2} \quad (4)$$

이고 따라서 접촉압력 σ_s는 식(5)와 같다.

$$\sigma_s = \frac{p_o r_2}{r_2 - r_1} \quad (5)$$

두 형상으로부터 발생되는 접촉압력을 비교하여 볼 때

$$\therefore \frac{\sigma_s}{\sigma_c} = \frac{1}{0.2679 \times 2} = 1.86 \quad (6)$$

즉 형상의 차이에 따라 식(6)에 나타낸 바와 같이 이론적으로 최대 약 1.86배의 차이가 발생하는 것을 알 수 있다. 따라서 분할금형을 사다리꼴로 분할한 경우 분할된 금형과 보강링간의 접촉합력은 원통형인 경우보다 크게 작용한다. 또한 Fig. 8 에서와 같이 금형간의 압축력 F_N을 비교하여 볼 경우 다음과 같다.

$$EC = CA\cos\frac{\pi}{6}$$

$$F_{Nx} = F_N \cdot \cos\theta = F_N \cdot \cos\frac{\pi}{6} \quad (7)$$

$$\sigma_x = \frac{F_{Nx}}{EA} = \frac{F_N}{CA} \quad (8)$$

$$\therefore F_{Nc} < F_{Ns}$$

식 (7)과 (8)의 결과에 따라 압축력 σ_s□가 σ_c□보다 크다는 것을 알 수 있다. 즉 내압(동일한 크기의

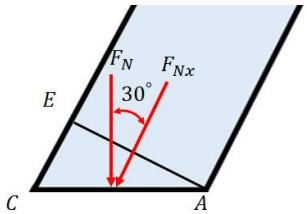


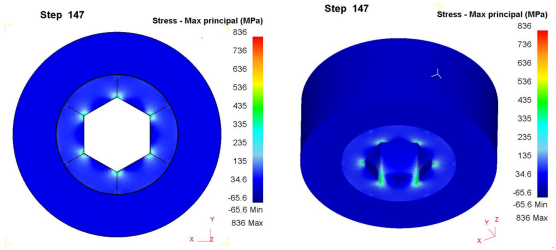
Fig. 8 Compressive force of split die

$p_{i\square}$)이 걸리는 경우 금형간의 압축력이 더 큼으로 성형과정에서 발생하는 인장응력을 상쇄시킬 수 있으며 이에 따라 금형의 수명도 증가될 것으로 생각된다.

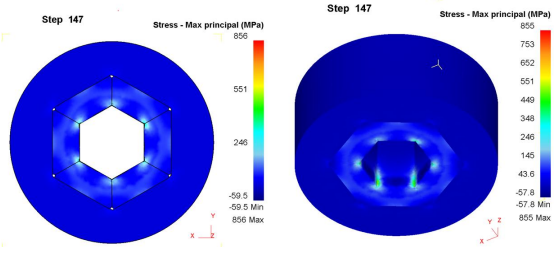
3.2 금형응력해석

분할방법에 따라 금형을 비교분석하기 위하여 동일한 조건으로 분할된 금형에 대한 금형응력해석을 하였다. 금형분할방법에 따른 해석결과는 Fig. 9에 나타낸 바와 같다.

두 가지의 분할설계 금형의 응력해석 결과에서 소재로부터 발생되는 금형응력의 최대치는 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 따라서 성형과정에서 금형에 작용하는 내압은 동일한 것으로 판단된다. 그러

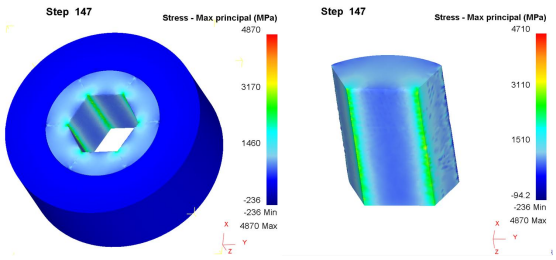


(a) circular type

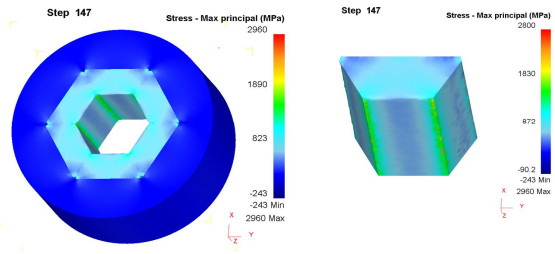


(b) hexagonal type

Fig. 9 Simulated results of die stress for split die



(a) circular type



(b) hexagonal type

Fig. 10 Simulated results of shrinkage ring preload

나 응력의 분포를 비교하여 볼 경우 사다리꼴로 분할한 금형에서 응력집중이 완화된 것을 확인할 수 있다. Fig. 9(a)에서 원통형상으로 인하여 금형내벽의 모서리에 응력이 집중되어 있는 것을 볼 수 있다. 즉 내압에 의한 굽힘으로 인하여 응력이 집중되어 있는 것으로 알 수 있다. 반면에 Fig. 9(b)에서 분할금형은 사다리꼴 형상으로 설계되어 있어 응력분포가 상대적으로 균일한 것을 확인할 수 있다. 즉 내압으로부터 발생되는 힘을 보강링으로 균일하게 전달함을 알 수 있다.

이를 역으로 증명하기 위하여 동일한 형상으로 분할금형에 동일한 열박음예압을 주어 금형응력해석을 하였다. 열박음량은 동일하게 0.05 mm를 적용하였으며 그 해석결과는 Fig. 10에 나타낸 바와 같다.

Fig. 10(a)와 Fig. 10(b)를 비교하여 볼 경우 최대주응력은 각각 4700 MPa과 2960MPa로 나타났으며 약 1.59배의 차이가 발생하였다. 또한 Fig. 9(a)에서와 마찬가지로 모서리 부분에 금형응력이 집중된 것을 확인할 수 있다. 반면에 Fig. 10(b)에서 나타낸 해석결과에서는 분할금형전체에 금형응력이 비교적 균일하게 분포되어 있으며 이에 따라 내압에 의한

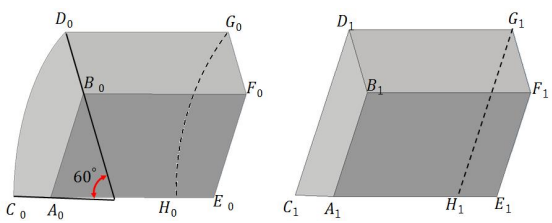
금형변형도 작을 것으로 판단된다.

이러한 결과를 종합하여 비교하여 볼 때 분할금형간의 벌어짐 또는 자체의 변형을 최소화하기 위하여 금형의 외벽도 6각형으로 설계하고 분할하는 것이 바람직하다. 또한 금형내벽에서 분할금형간의 과도한 접촉압력으로 인한 금형파손방지에도 유리할 것으로 판단된다. 따라서 정6각형상의 단면형상을 가진 제품의 단조금형설계에서는 분할금형으로 설계하는 것이 유리하며 그 형상은 내벽과 외벽 모두 정6각형인 분할금형으로 설계하는 것이 바람직하다고 생각된다.

4. 금형 가공

단조금형의 가공에 있어 분할방법에 따라 금형의 정밀도에 일정한 영향을 줄 수 있다. 예를 들어 Fig. 11(a)에서와 같이 $C_0D_0A_0B_0$를 절단 후 $A_0B_0F_0E_0$ 면, $C_0A_0E_0H_0$면 ,$D_0B_0G_0F_0$을 각각 절단하여 가공할 경우 원주면의 정확한 길이를 맞추기가 어렵다. 특히 열박음을 할 경우 원주면의 직경이 변화함에 따라 열박음효과가 균일하지 않을 수 있다. 반면에Fig. 11(b)에서와 같은 형상인 경우 $A_1B_1C_1D_1$면에서 부터 A_1B_1 F_1E_1면, $D_1B_1F_1G_1$ 면, $A_1C_1H_1E_1$면 모두 연마하여도 각 길이는 정확히 맞출 수 있다. 따라서 조립 후 내외면이 모두 정6각형임으로 상대적으로 금형의 정밀도가 향상될 것으로 판단된다.

이러한 방법으로 설계 제작한 금형은 Fig. 12에 나타낸 바와 같으며 단조성형결과에 대한 조사에서 금형수명은 기존 약 5,000회의 평균수명에서 20,000회 이상으로 향상되었다.



(a) circular type **(b) hexagonal type**

Fig. 11 Shape of split die block

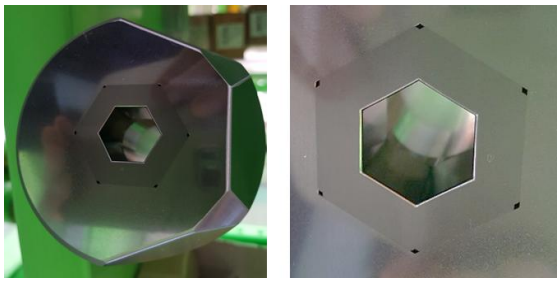


Fig. 12 Hexagonal type split die

5. 결 론

본 연구에서는 정6각형구조를 가진 부품의 단조금형수명향상을 위하여 금형분할방법을 설계하고 비교분석을 하였다. 일반적인 원형분할법과 정6각형분할법에 대한 유한요소해석 및 수식적 접근을 통하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 정6각형구조를 가진 부품의 단조금형에서는 금형내벽의 6각형모서리 부분에서 응력집중이 발생하여 쉽게 파손이 됨으로 분할금형설계로 완화시켜 주는 것이 바람직하다.
2. 정6각형구조를 가진 분할금형에서 정6각형분할법은 원형분할법 보다 높은 금형간의 접촉압력을 생성하여 분할금형간의 벌어짐 현상을 완화할 수 있다.
3. 보강링을 이용하여 열박음을 할 경우 원형분할법보다 정6각형분할법으로 분할한 금형에서 응력분포가 균일하며 모서리부분의 응력집중현상이 작게 나타났다. 따라서 금형수명향상을 위하여 정6각형분할법을 사용하는 것이 유리하다.
4. 분할금형의 가공에 있어 정6각형분할법은 원형분할법보다 가공정밀도에 대한 요구가 낮음으로 원가절감의 측면에서 유리하다. 그러므로 정6각형분할법을 이용한 분할금형설계는 기타 정6각형 홀 구조를 가진 단조 및 압출금형에도 적용하는 것이 좋다.

후 기

“이 논문은 2019년도 자동차부품기업활력제고사업

연구비 지원에 의하여 연구되었음.” (No. 20007322)

REFERENCES

1. An, S. C., Lee, G., Kim, S. Y., Im, Y. T., “Elastic Analysis of Cold Extrusion Die Set with Stress Ring”, Journal of The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 11, No. 4, pp 355-362, 2002.
2. Suh, D. Y., Lee, M. C., Joun, M. S., “Elastic Finite Element Analysis of the Cold Forging Dies Prestressed by Shrinkage Rings”, Journal of The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 7, pp 347-353, 1998.
3. Park, J. H., Cho, J. M., Baek, J. H., Joun, M. S., “Improved die life in crankshaft hot forging by finite element method", Journal of The Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 10, pp 107-708, 2019.
4. Kwon, H. H., Moon, K. J., Song, S. E., “Forging Process Analysis of the Multi-forging Die for the Unified Universal Pipe Joint of the Intermediate Shaft”, Journal of The Korean Society of Manufacturing Technology Engineers, Vol. 19, No. 1, pp 33-41, 2010.
5. Jung, T. W., Kim, S. W., Lee, Y. S., Hoon, M. Y., Nam, J. H., “A Study on the Split Die to Prevent Stress Concentration under Cold Former Forging Process”, Korean Society for Precision Engineering, Vol. 5, pp, 249-250, 2010.
6. Lee, Y. S., Lee, D. K., Lee, J. H., “A Study on the Experimental and Theoretical Analysis About the Elastic of Die for Cold Forging”, Journal of the Korean Society For Technology of Plasticity, Vol. 11, No. 2, pp. 171-178, 2002.
7. Ku, T. W., Kang, B. S., "Tool design for inner race cold forging with skew-type cross ball grooves," Journal of Materials Processing Technology, Vol. 214, No. 8, pp. 1482-1502, 2014.