

기계식 프레스 압입 방식의 냉간단조용 금형 예압 부과 공정의 유한요소해석

변종복¹ · 전유종² · 강성묵³ · 이광희⁴ · 전만수^{5,#}

Finite Element Analysis of Mechanical Pre-stressing Processes of Cold Forging Dies

J. B. Byun, Y. J. Jyun, S. M. Kang, K. H. Lee, M. S. Joun

(Received September 15, 2020 / Revised November 2, 2020 / Accepted November 25, 2020)

Abstract

In this study, elastoplastic finite element analysis with multi-body treatment was used to elucidate the mechanical phenomena occurring from pre-stressing of die-system. A finite element analysis model with detailed conditions is proposed. The effects of die pre-stressing slope on the circumferential components of the pre-stressed die inserts were evaluated. The role of tight fitting between the supporter and die case was also emphasized because it has a significant effect on the undesirable change in the target slope of machined inner surface of the die case around the die insert. The two mechanical problems include the one between die-insert and die case and the other between supporter and die case, and their correlation is minimized to establish the optimum design in the die structural design stage because it cannot be quantitatively controlled owing to various factors affecting the die structural behavior during die pre-stressing.

Key Words: Approximate Finite Element Model, Cross-Sectional Area Rule

1. 서 론

금형의 예압 또는 예응력 부과는 금형의 수명에 큰 영향을 미친다. 이런 이유로 대부분의 냉간단조 금형은 예압된 상태로 사용되고 있다. 예압은 응력 사이클에서 평균 응력을 낮추는 효과가 있다. 특히 단조에서 취약한 금형의 원주방향 응력 성분이 하중 미부과 시에 압축상태에 머무르게 하며, 하중이 부과되었을 때, 최대 인장응력을 낮추며, 이것은 피로파괴의 수명에 절대적으로 영향을 미치는 평균응력을 낮추는 효과가 있다 [1-5].

금형에 예압을 부과하는 방식으로 열박음 방식과

프레스 압입 방식이 있다. 열박음 방식은 가열온도의 한계, 가령, 금형강의 경우 약 500°C 이하(변형률 기준으로 약 0.005 내외)의 한계가 있다. 대다수의 공정에서 이 정도의 예압은 유용하고, 열박음 공정이 비교적 쉽기 때문에 열박음 방식이 널리 사용된다. 물론 열박음량을 크게 하기 위해서 다중 열박음을 실시할 수도 있다.

프레스 압입 방식[6]은 열박음 방식에서 존재하는 한계는 없다. 금형 인서트와 예압링 (shrink ring) 사이의 접촉면과 단조 방향이 이루는 각도(이하 예압 각도)를 증가시킴으로써 하나의 예압링으로도 큰 예압을 가할 수 있다. 그러나 과도한 예압 각도에 따른 예압하중은 프레스 박음 직후 또는 단조 중에 예압링과 다이인서트 간의 미끄러짐을 발생시킬 수 있는 구조적 문제를 동반할 수 있다. 프레스 압입

1. 경상대학교 공학연구원, 연수연구원

2. 우주산업 대표

3. (주)풍강, 차장

4. (주)풍강, 상무이사

5. 경상대학교 기계항공공학부, 공학연구원, 교수

Corresponding Author: School of Mechanical Engineering /Engineering Research Institute, Gyeongsang National University,

Email:msjoun@gnu.ac.kr. ORCID: 0000-0003-1678-5415

방식으로 예압된 금형 조립체는 이러한 문제를 미연에 방지하는 설계가 필수적이다.

예압된 금형 조립체의 역학적 규명을 위한 수치 해석적 방법이 다양하게 발전되었다. Frater 와 Zinolabedini [7]는 1980 년대 말에 그 당시에 유한요소법을 활용한 구조해석 기술의 발전에 크게 기여한 SAP 을 사용하여, 금형 조립체의 해석 기술을 확립하였다. 그들은 예압량을 가상의 열하중, 즉 열팽창계수와 온도 차이로 부과하였다. 이 방식은 수치적 안정성이 뛰어나며, 사용의 편리성도 보장된다. 열하중의 부과 방식이 실제 열박음의 과정과 흡사하기 때문이다.

Frater 와 Zinolabedini 의 방식은 2000 년대 초에 Joun 등[8]에 의하여 보다 일반화된 수치화로 발전하여 범용 축대칭 단조공정의 해석용으로 발전하였다. Joun 등[8]의 연구결과에서 단조중에 성형하중과 예압에 의하여 결정되는 마찰응력을 정확하게 반영되는 것을 확인하였으며, 접촉면에서의 금형 응력 분포의 타당성[9,10]과 범용성이 다수의 적용을 통하여 입증되었다[11-15].

2000 년대에 들어와서 활성화된 금형 조립체의 구조해석은 유한요소법에 바탕을 둔 상용소프트웨어를 활용한 응용 연구가 주를 이루고 있다[1-5, 16-27]. 따라서 구체적인 접촉면 처리 방식 및 마찰응력의 타당성 등을 알 수는 없으나, 대부분의 금형 조립체의 유한요소법에 의한 구조해석은 접촉면에서 입력된 침투량을 취급하는 것으로 판단된다. 이 방식은 마찰응력을 취급하는데 수치적으로 복잡하며, 사용상에서도 복잡성이 동반된다.

경계요소법[28]은 금형의 구조적 특성상 금형 조립체의 구조해석 목적으로 연구자들로부터 많은 시선을 끌었다. 그러나 이 경계요소법은 소성가공 공정해석에 적용함에 한계가 있어 그 강점을 살리지 못하였다.

이 연구에서는 기계식 프레스 압입 방식의 예압의 특성 파악을 위하여 관련 공정을 해석하고, 체결을 고려한 압입 방식의 예압에 의존한 금형의 구조설계에 관하여 논한다.

2. 프레스 압입 방식의 금형 예압 공정의 해석

Fig. 1 은 축대칭 기계식 프레스 압입 방식에 의한 금형 예압 부과 공정을 나타내고 있다. 압입 과정을 설명하자면, 압입공정 시 금형에 조립되는 ①과 ②의 다이인서트, ③번의 서포터, ④번의 케이스로 구성되며, 압입은 고정된 하부의 지지대와 상부의 편치의 상대 운동에 의해서 이루어지며, 압입의 근원은 다이 인서트의 외경과 케이스의 내경의 기울어진 각도, 즉 압입각도 β 에 연유한다.

③번의 서포터의 상단에 프레스를 이용하여 수직하중을 부과하여 이것이 케이스 중간 지점에 위치한 내부의 단차를 억지 키움 상태로 통과하게 한 후, 서포터의 하단이 두 개의 다이 인서트를 밀어서 금형 케이스에 압입시키는 것이다. 프레스 압입 방식의 예압에 따라 다이 인서트에는 원주방향의 압축응력이 부과되며, 금형 조립체의 케이스에는 양의 원주방향 응력 성분이 작용하게 된다. 이 응력의 크기는 압입각도에 크게 영향을 받는다.

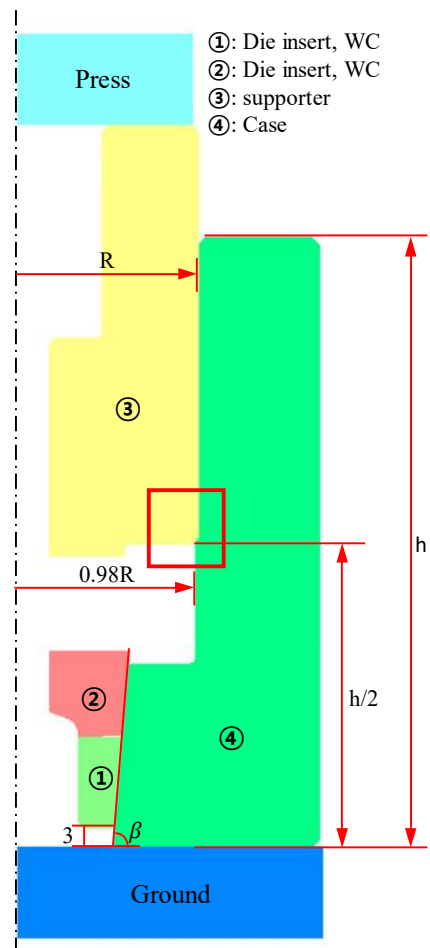


Fig. 1 Conceptual diagram of die prestressing process by press

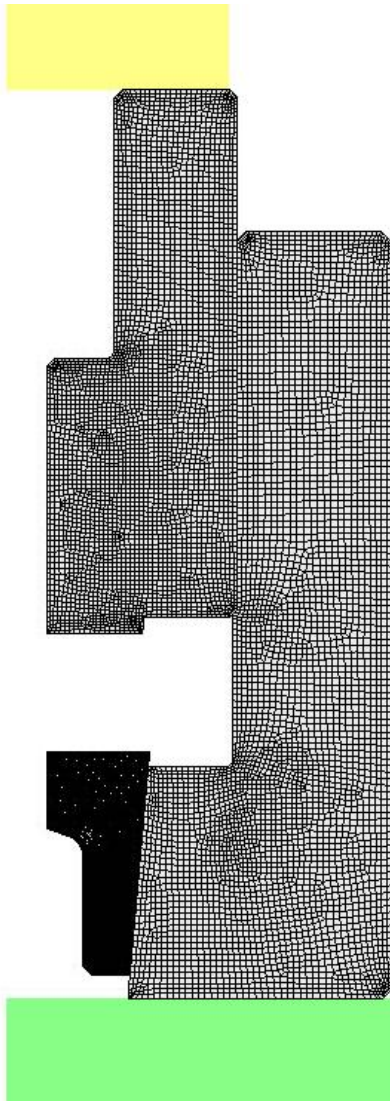


Fig. 2 Finite element mesh system of the problem at the initial position

Table 1 Material properties of die parts [31]

Die number	Material	Young's modulus (GPa)	Poisson's ratio	Flow stress (MPa)
①, ②	G8	550	0.23	—
③	SCM4	210	0.30	$Y_0 = 1400$ $b = 0.003$ $n = 0.16$
④	SCM4	210	0.30	$Y_0 = 1300$ $b = 0.002$ $n = 0.05$

한편, 프레스가 하사점에 도달한 후 상승할 때, 케이스가 다이 인서트를 통하여 서포터를 밀어 올리는 힘이 작용하게 되는데, 이를 막기 위하여 서포터와 금형 케이스 간에는 충분한 끼워맞춤에 의한 압축응력을 유지해야 한다.

프레스에 의한 금형 예압 부과 방식은 열하중에 의한 방식에 비하여 역학적으로 복잡하다. 이것은 앞에서 설명한 바와 같이, 다이 인서트와 금형 케이스 간의 역학뿐만 아니라 서포터와 금형 케이스 간의 역학관계도 고려해야 하기 때문이다.

이 연구에서는 전술한 두 부분의 역학적 상호 관계를 밝히고, 이것이 예압에 미치는 영향을 다물체 탄성 또는 탄소성 유한요소법[12,29]을 이용하여 정량적으로 분석하고자 한다.

물체 간의 침투 방지를 위하여 벌칙기법을 사용하였으며, 10^{10} 을 벌칙상수로 사용하였다. 소재들 간의 공동접면에는 Coulomb 마찰법칙과 0.1의 마찰계수를 사용하였다[30]. 재료는 속도비의존적이라고 가정한다. 따라서 프레스의 하강속도를 단위속도로 가정하였다.

이 연구에서 유한요소해석 목적으로 사용한 재료의 정보는 Table 1 에서 보는 바와 같다. 유동응력은 Swift 모델로 수식화되었다. 그리고 Fig. 2 는 공정해석에 사용된 초기요소망을 나타내며, 다이 인서트 ①과 ②, 서포터 ③, 케이스 ④의 절점 수는 각각 4000 개 내외이다.

이 절에서는 이론 전개를 용이하게 하기 위하여 케이스와 서포터를 탄성체라고 가정한다. 실제 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 소성변형이 역지 끼움의 초기 단계에서 발생하지만, 이 절에서 다루고자 하는 문제의 본질과 무관하므로 이를 무시한다.

Fig. 3 은 $\beta = 85.0^\circ$ 일 때의 해석결과 중에서 압입공정 중 원주 방향의 응력의 변화 과정을 나타낸 것이다. 밝은 부분은 인장상태를 나타내고 어두운 부분은 압축상태를 의미한다. 원주방향의 최대인장응력은 약 2900MPa 에 이르고, 최대압축응력은 약 5800MPa 에 이른다. 이것은 프레스 압입에 의한 예압의 특징을 잘 보여주고 있다.

한편, Fig. 4 는, $\beta = 85.0^\circ$ 일 때, 압입 과정에서 다이 인서트와 예압링의 상호관계를 확대하여 보여주고 있다. 이 그림으로부터 본래 동시 접촉을 목적으로 동일 경사각을 갖도록 설계한 접촉면이 강제로 끼워맞추어지는 과정에서 서포터와 예압링의 상호작

용으로 인하여 하부에서 초기 접촉이 발생하고 이것이 상부로 발전됨을 보여주고 있다. 이것은 전술한 바와 같이 다이 인서트에 예상치 않은 국부적 과예압 또는 저예압과 불균일 예압을 초래한다.

3. 프레스 압입 방식의 금형 예압 설계 시 고려사항에 관한 고찰

프레스 압입 방식에서 가장 중요한 설계요소는 압입각도이다. 이것은 다 알려진 사실이다. 그러나 전술한 바와 같이 이 공정의 역학적 복잡성으로 인하여 그것에 관한 정량적 연구가 이루어지지 않았다.

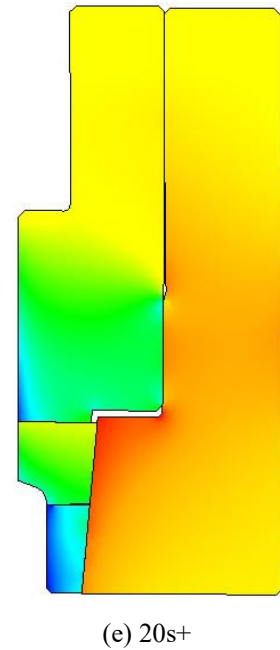
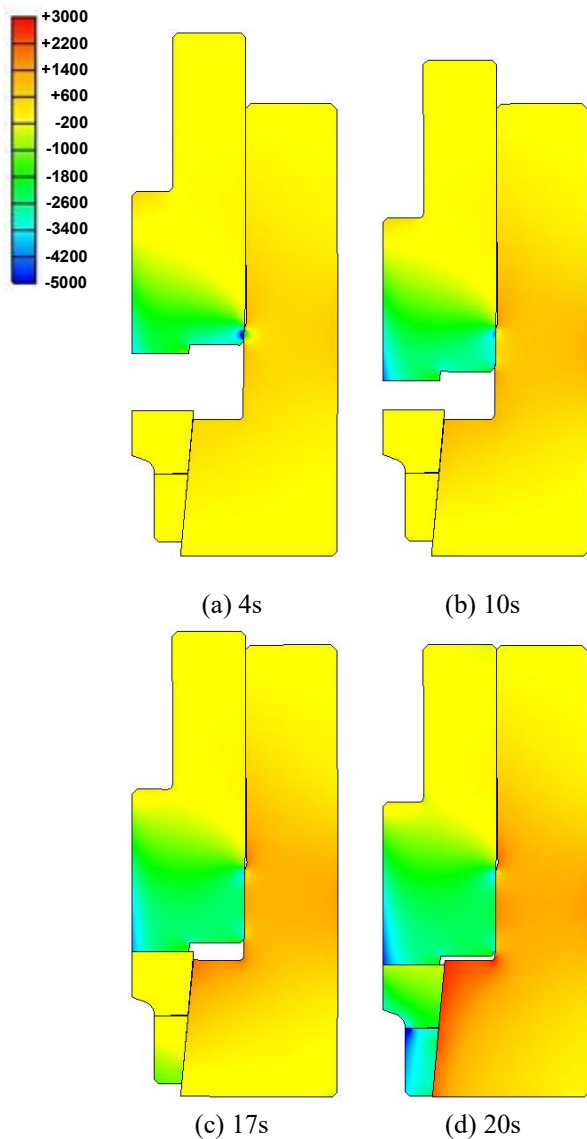


Fig. 3 Circumferential stress in pre-stressing process by press

여기서는 세 가지의 압입각도, 즉 $\beta = 85.0^\circ, 85.5^\circ$ 와 86.0° 에 대하여 해석을 실시하여 그 결과를 분석함으로써, 압입각도 및 개념설계에 관한 평가를 실시하다. 세 가지 모두 다이 인서트는 동일하며, 무부하시(단차를 무시한 경우)의 다이 인서트와 압축링 간의 초기 접촉점의 위치도 동일하다. 즉, Fig. 1에서 보는 바와 같이 하부로부터 3.0mm 떨어진 지점에서 초기 접촉이 발생하도록 설계되었다.

Fig. 5는 세 경우의 다이 인서트와 예압링의 설계에 대해서 예압의 최종상태에서 구한 원주방향의 응력성분을 비교하고 있다. 압입각도가 커짐에 따라 최대의 원주방향 압축응력 성분의 크기가 감소하며, 그 크기는 각각 5800MPa, 4900MPa, 4700MPa이다. 이것은 무부하시의 초기 접촉점이 동일하다는 조건 때문에 당연한 결과이지만 예압각도가 응력에 매우 민감하다는 사실을 정량적으로 보여주고 있다. 예압링에 작용하는 최대 원주방향 인장응력 성분은 각각 2910MPa, 2930MPa, 2940MPa의 순서로 증가하지만, 그 차이는 크지 않다. 작은 크기의 증가가 발생하는 이유는 하부에서 압축량이 약간 증가하기 때문이다.

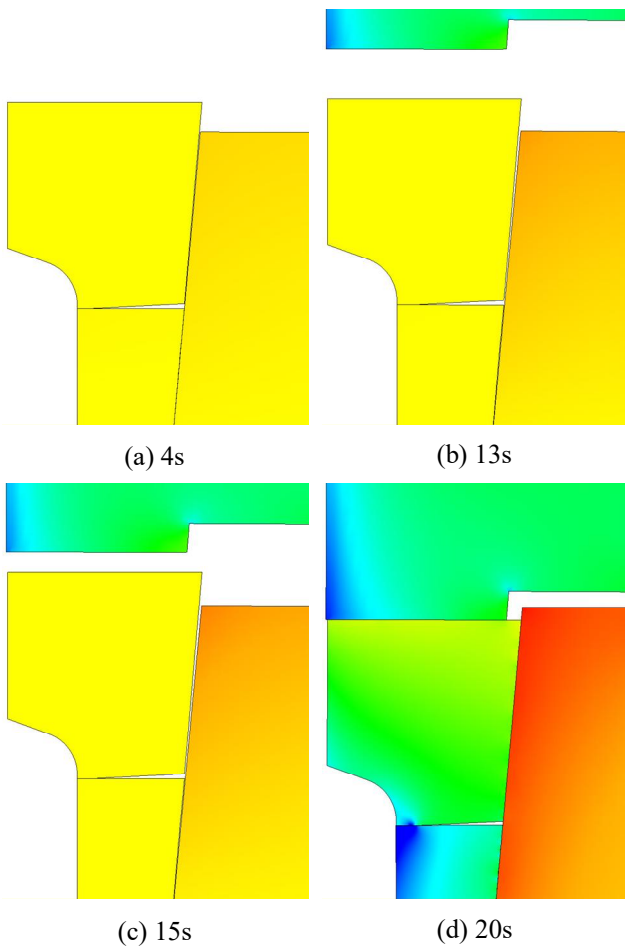


Fig. 4 Detailed development of contact along the die insert and shrink ring interface

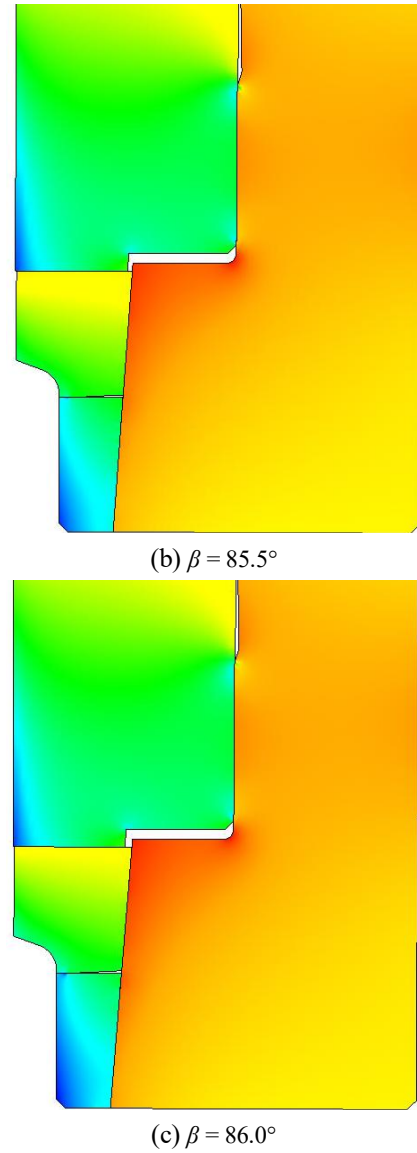
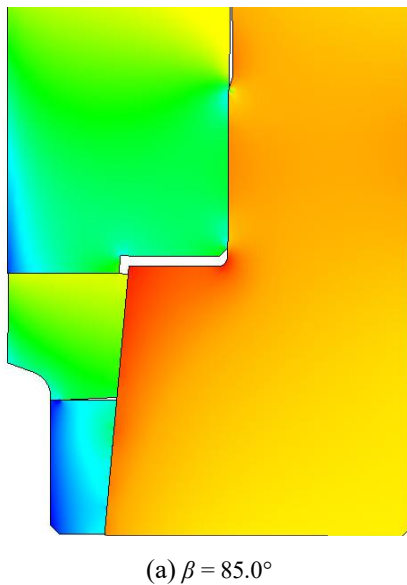


Fig. 5 Change of circumferential pre-stress components with pre-stressing slope angle



한편, 실제로는 Fig. 6 에서 보는 바와 같이 탄소성 유한요소해석을 실시할 경우에는 서포터와 다이 케이스 간의 억지 끼워맞춤 초기 단계에 단차로 인하여 국부적인 소성변형이 발생하게 된다. 이 소성변형은 금형재료의 상태 및 단차 선단의 설계에 따라, 다양한 해석의 경험으로 판단할 때, 크게 달라진다. 이 소성변형에 따라 다이 인서트에 예압이 부과되는 시점에서 금형 케이스 내경의 기울어짐의 차이가 달라진다.

따라서 다이 인서트와 금형 케이스 간의 조립 직전에 다이 인서트의 각도는 원래의 값을 유지하지

만, 금형 케이스 내경의 기울기는 서포터와 금형 케이스의 조립 과정에서 다소 변한다. 이 변화를 비교적 고정확도로 예측하는 것은 용이하지 않다. 가공 치수의 정밀도는 물론이고, 금형강의 특성상 그리고 국부적으로 발생하는 소성변형 특성을 공학적으로 정확하게 반영하기란 쉬운 일이 아니다. 접촉면에서 소성변형에 영향을 크게 미칠 마찰에 따른 마찰조건의 변화도 무시할 수 없지만[31], 그것을 밝혀내기가 쉽지 않다. 물론 이 영향을 무시할 수 없다. 왜냐하면, 서포터와 금형 케이스 간의 접촉 조건을 크게 바꾸기 때문이다.

결론적으로 기계식 프레스 압입의 금형 예압 부과 방식에서 체결 목적의 억지 끼워맞춤과 예압 목적의 압입 간의 역학적 상호작용을 최소화하기 위한 구조 설계가 중요하다.

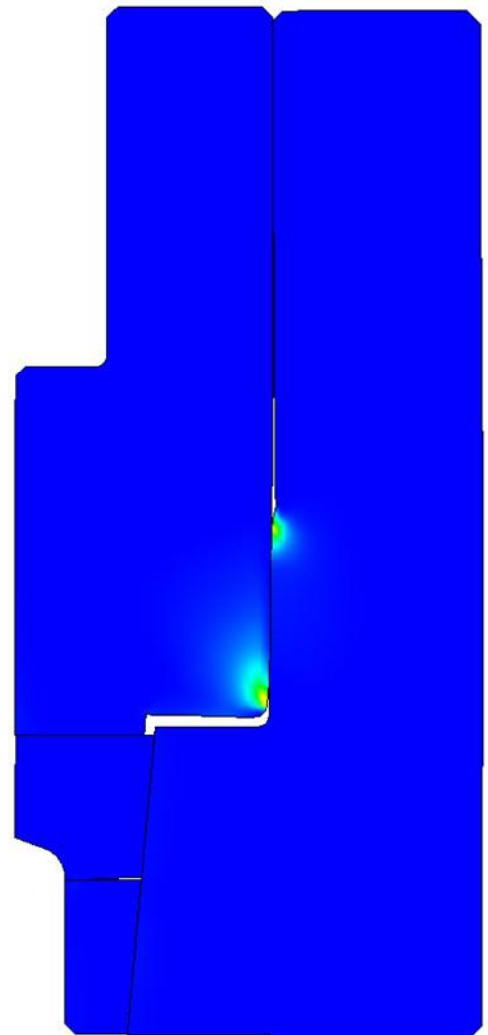
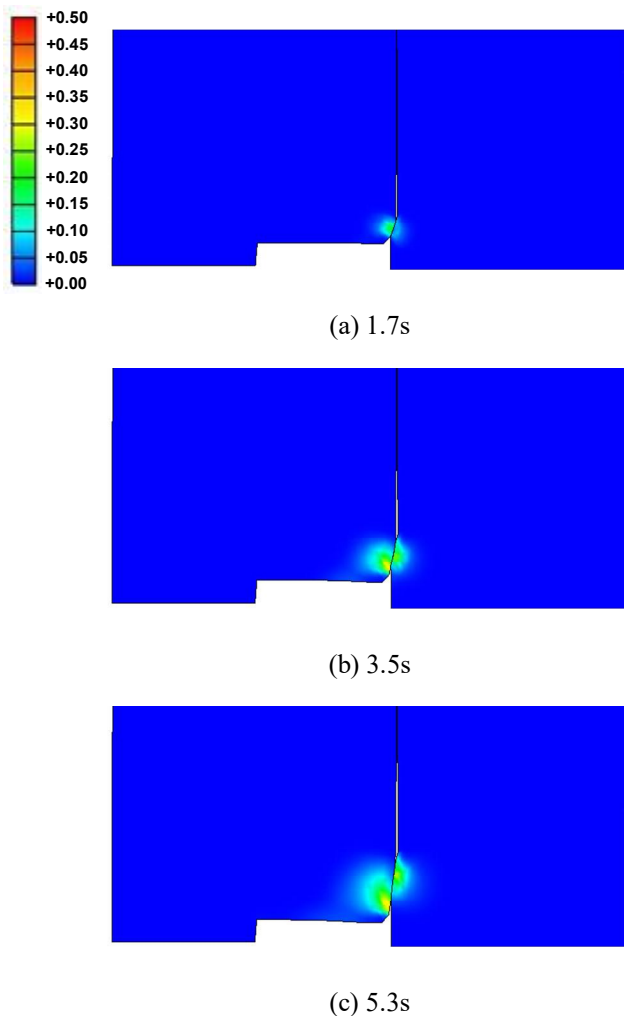


Fig. 6 Predicted plastic strain of the die pre-stressing process by press

4. 결론

이 연구에서는 기계식 프레스 압입 방식의 금형 예압의 해석 기술을 확립하였으며, 이를 이용하여 특정한 기계식 프레스 압입 방식의 금형 예압 설계를 평가하였다.

이러한 과정을 통하여 예압량, 즉 다이 인서트에 작용하는 원주방향의 압축응력과 금형 설계 간의 상호 민감성을 확인하였다. 예압량의 정량적 통제를 위해서는 예압각도를 정밀하게 해야 하며, 예압의 풀립 방지용 억지 끼워맞춤의 영향을 충분히 고려한 금형 구조설계의 중요성이 강조되었다.

후 기

이 연구는 산업통상자원부의 산업소재핵심기술개발-첨단뿌리기술(과제 번호: 20003950) 사업의 지원으로 이루어졌음.

REFERENCES

- [1] T. Ø. Pedersen, 2000, Numerical studies of low cycle fatigue in forward extrusion dies, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 105, No. 3 pp. 359-370.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(00\)00518-5](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(00)00518-5)
- [2] R. Voelkl, B. Falk, 2001, Prediction of stochastic failure characteristics of cold forging tool systems, *Simul. Mater. Process.: Theory, Methods and Appl.*, pp. 415-420.
- [3] H. C. Lee, M. A. Saroosh, J. H. Song, Y. T. Im, 2009, The effect of shrink fitting ratios on tool life in bolt forming processes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 8 pp. 3766-3775.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.08.032>
- [4] M. W. Fu, J. Lu, W. L. Chan, 2009, Die fatigue life improvement through the rational design of metal-forming system, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 2, pp. 1074-1084.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.016>
- [5] K. K. Tong, M. S. Yong, M. W. Fu, T. Muramatsu, C. S. Goh, S. X. Zhang, 2005, CAE enabled methodology for die fatigue life analysis and improvement, *Int. J. Prod. Res.*, Vol. 43, No. 1, pp. 131-146.
<https://doi.org/10.1080/002075404123331281962>
- [6] K. S. Lee, G. Y. Kim, Y. S. Ahn, 2018, Study on the optimum design of the insert ring and shank ring of the cold forging die for an automotive wheel nut, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 27, No. 3, pp. 165-170.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2018.27.3.165>
- [7] J. L. Frater, R. Zinolabedini, 1989, Stress analysis of dies having multiple shrink rings, *J. Mater. Shaping Technol.*, Vol. 7, No. 2, pp. 67-80.
- [8] M. S. Joun, M. C. Lee, J. M. Park, 2002, Finite element analysis of prestressed die set in cold forging, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 42, No. 11, pp. 1213-1222.
[https://doi.org/10.1016/S0890-6955\(02\)00079-2](https://doi.org/10.1016/S0890-6955(02)00079-2)
- [9] Q. S. Li, M. C. Kim, D. C. Jung, Y. H. Son, M. S. Joun, 2011, Quantitative analysis of effect of shrink fit in cold forging, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 28, No. 3, pp. 301-307.
- [10] Q. S. Li, J. G. Eom, Y. S. Kim, E. Z. Kim, M. S. Joun, 2010, Causes of die fracture in automatic multistage cold-forging of high-strength ball-studs, *Steel Res. Int.*, Vol. 81, No. 9, pp. 266-269.
- [11] B. Y. Jun, S. M. Kang, M. C. Lee, R. H. Park, M. S. Joun, 2007, Prediction of geometric dimensions for cold forgings using the finite element method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 189, No. 1-3, pp. 459-465.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.02.030>
- [12] K. M. Kim, M. C. Kim, T. M. Hwang, S. H. Chung, W. J. Chung, M. S. Joun, 2019, Numerical and Experimental Study on Spring Back in Automatic Multi-Stage Precision Cold Forging Process of a Steering Yoke, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 28, No. 3, pp. 115-122.
<https://doi.org/10.5228/KSTP.2019.28.3.115>
- [13] J. B. Byun, J. B. Park, I. D. Suh, M. S. Joun, 2019, Non-isothermal analysis of a SUS 304 ball-stud forging process, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Autum Conf.*, Kor. Soc. Tech. Plast., Jeju, Korea, pp. 118-119.
- [14] J. D. Yoo, T. M. Hwang, M. S. Joun, 2020, Finite element prediction of temperature variation of material and dies in aluminum forging, *Key Eng. Mater.*, Vol. 830, pp. 93-100.
<https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/KEM.830.93>
- [15] H. N. Song, Y. S. Kim, M. S. Joun, 2020, The effects of theoretical models of materials and die on finite element predictions in a forging process of aluminum scroll, *Proc. IMechE Part E: J. Proc. Mech. Eng.*, 958106.
- [16] K. Lange, A. Hettig, M. Knoerr, 1992, Increasing tool life in cold forging through advanced design and tool manufacturing, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 35, No. 1-3, pp. 495-513.
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90337-R](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90337-R)
- [17] M. Meidert, M. Knoerr, K. Westphal, T. Altan, 1992, Numerical and physical modelling of cold forging of bevel gears, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 33, No. 1-2, pp. 75-93.
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(92\)90312-G](https://doi.org/10.1016/0924-0136(92)90312-G)

- [18] M. Knoerr, K. Lange, T. Altan, 1994, Fatigue failure of cold forging tooling: causes and possible solutions through fatigue analyses, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 46, No. 1-2, pp. 57-71.
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)90102-3](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)90102-3)
- [19] T. H. Kim, B. M. Kim, J. C. Park, 1995, Methodology of tool analysis to improve the accuracy of cold forged parts, *J. Kor. Soc. Precis. Eng.*, Vol. 12, No. 1, pp. 29-37.
- [20] C. McCormack, J. Monaghan, 2001, A finite element analysis of cold-forging dies using two- and three-dimensional models, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 118, No. 1-3, pp. 286-292.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(01\)00960-8](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(01)00960-8)
- [21] Y. S. Lee, J. H. Lee, T. Ishikawa, 2002, Analysis of the elastic characteristics at forging die for the cold forged dimensional accuracy, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 130-131, pp. 532-539.
[https://doi.org/10.1016/S0924-0136\(02\)00800-2](https://doi.org/10.1016/S0924-0136(02)00800-2)
- [22] S. C. An, Y. T. Im, 2002, Optimal design of dimension of extrusion die with multi stress rings, *Trans. Kor. Soc. Mech. Eng. A*, Vol. 26, No. 10, pp. 2211-2218.
<https://doi.org/10.3795/KSME-A.2002.26.10.2211>
- [23] J. J. Sheu, C. H. Yu, 2008, The die failure prediction and prevention of the orbital forging process, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 201, No. 1-3, pp. 9-13.
<https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.178>
- [24] F. D. Silveira, L. Schaeffer, 2018, Evaluation of different levels of prestressing for cold forging tools by numerical simulation analysis, *Int. J. Adv. Manuf. Technol.*, Vol. 98, pp. 2487-2495.
<https://doi.org/10.1007/s00170-018-2351-9>
- [25] Z. Li, F. Zeng, Z. Zhao, C. Hu, 2020, Optimized design for a combined die with two stress rings in cold forging considering thermal-mechanical effects, *J. Shanghai Jiaotong University (Sci.)* Vol. 25, pp. 304-314.
<https://doi.org/10.1007/s12204-019-2150-y>
- [26] G. Y. Tzou, S. H. Lin, D. C. Chen, U. C. Chai, 2020, Die stress analysis and improvement of the welding valve fastener in multi-stage forging, *Trans. Can. Soc. Mech. Eng.*, Vol. 44, No. 2, pp. 263-271.
<https://doi.org/10.1139/tcsme-2019-0087>
- [27] Y. G. Qiu, H. Y. Cho, 2020, A split die design for forging of hexagonal bolt head, *J. Kor. Soc. Manuf. Process. Eng.*, Vol. 19, No. 5 pp. 91-97.
<https://doi.org/10.14775/ksmpe.2020.19.05.91>
- [28] M. Fu, B. Shang, 1995, Stress analysis of the precision forging die for a bevel gear and its optimal design using the boundary-element method, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 53, No. 3-4, pp. 511-520.
[https://doi.org/10.1016/0924-0136\(94\)01754-O](https://doi.org/10.1016/0924-0136(94)01754-O)
- [29] M. S. Joun, 2020, Recent advances in metal forming simulation technology for automobile parts by AFDEX, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* Vol. 834, pp. 012016
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/834/1/012016>
- [30] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, B. Y. Jun, 2009, Effects of friction laws on metal forming processes, *Tri. Int.*, Vol. 42, No. 2, pp. 311-319.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2008.06.012>
- [31] S. W. Lee, J. M. Lee, M. S. Joun, 2020, On critical surface strain during hot forging of lubricated aluminum alloy, *Tri. Int.*, Vol. 141, pp. 105855.
<https://doi.org/10.1016/j.triboint.2019.105855>