

유한요소법을 이용한 냉간단조품의 치수 예측

전병윤* · 강상명** · 박재민*** · 이민철**** · 박래훈**** · 전만수#

Finite Element Approach to Prediction of Dimensions of Cold Forgings

B. Y. Jun, S. M. Kang, J. M. Park, M. C. Lee, R. H. Park and M. S. Joun

Abstract

In this paper, a systematic attempt for estimating geometric dimensions of cold forgings is made by finite element method and a practical approach is presented. In the approach, the forging process is simulated by a rigid-plastic finite element method under the assumption that the die is rigid. With the information obtained from the forging simulation, die structural analysis and springback analysis of the material are carried out. In the springback analysis, both mechanical load and thermal load are considered. The mechanical load is applied by unloading the forming load elastically and the thermal load is by cooling the increased temperature due to the plastic work to the room temperature. All the results are added to predict the final dimensions of the cold forged product. The predicted dimensions are compared with the experiments. The comparison has revealed that predicted results are acceptable in the application sense.

Key Words : Sprinback, Die deformation, Finite element analysis, Precision forging

1. 서 론

대부분의 기계부품이 제 기능을 갖추는데는 절삭이 불가피하다. 절삭은 많은 가공공수를 필요로 하므로 절삭공수의 최소화는 소재비, 인건비, 기계장치비의 절감 효과로 연결되고 기계부품의 가격 경쟁력으로 직결된다. 따라서 불가피한 절삭을 줄이려는 다양한 시도들이 지속되고 있다. 단조는 이러한 목적에 매우 적합하며, 특히 다수의 냉간 단조품은 무절삭으로도 사용이 가능하며, 10 μ m 내외의 치수정도에 도전하고 있다. 우리나라의 경우 정밀단조 기술이 크게 낙후되어 일본 등의 해외 의존도가 비교적 높은 실정이다.

한편, 그 중요성에도 불구하고 산업현장에서 활용 가능한 단조품의 치수정도를 맞추기 위한 체계

적 접근방법이 확립되어 있지 않으며, 설계자의 경험과 시행착오적 접근방법에 의하여 치수정도를 맞추고 있다.

냉간단조품의 치수정도는 금형의 탄성변형, 소재의 탄성회복, 성형 후 열수축 등에 의해 영향을 받는다. 그리고 열처리시에도 다소의 치수변화가 발생한다. 따라서 단조품의 최종 치수 예측 문제는 매우 복잡하며, 상호연계성을 갖기 때문에 정확하게 해석한다는 것은 매우 어려운 문제이다.

금형의 탄성구조해석에 관한 연구는 비교적 많은 연구자[1-8]에 의하여 이루어졌지만, 활용이 미흡한 실정이다. 그러나 향후 정밀냉간단조의 발전과 더불어 단조품의 최종치수 예측에 대한 필요성이 점점 증할 것으로 예상되고 있다.

본 연구에서는 유한요소법[9-18]에 의하여 예측

교신저자: 경상대학교 기계항공공학부
* 경상대학교 수송기계부품기술혁신센터
** ㈜삼광공업
*** 큐빅테크
**** 경상대학교 기계공학과 대학원

된 단조공정 시뮬레이션 결과를 이용하여 금형의 탄성변형, 소재의 탄성회복, 소재의 열수축 등을 고려함으로써 단조품의 치수 예측 기술을 제안하고자 한다. 기초이론을 소개하고, 산업 현장에서 발굴한 예제에 대한 예측 치수와 실제 공정 치수를 비교함으로써 접근방법의 타당성을 검증하고자 한다.

2. 접근방법

모든 인자간의 상호관계를 반영하여 단조품의 치수변화를 예측한다는 것은 사실상 불가능하다. 단조품의 치수 결정에 미치는 인자들이 매우 많고 복잡하게 얽혀 있으므로 일부 인자들의 상호연계성을 무시할 수밖에 없으며, 그 결과가 금형구조 설계를 위한 지침을 줄 수 있다면 공학적으로 충분한 가치를 가질 수 있다.

본 연구에서는 먼저 단조 시뮬레이션 시에 금형을 강체로 가정하였다. 이 결과로부터 얻은 하중정보를 금형의 해석목적으로 사용하였으며, 최종 단계에서 금형의 탄성변형량만큼 금형변형에 의한 소재의 형상변화가 발생한다고 가정한다. 물론 실제로는 금형의 탄성변형으로 인한 형상변화가 하중변화를 야기하므로 상호 연계되어 있으나 그 연계성이 하중의 크기와 분포를 실제 크게 변화시키지 않는다고 가정하여도 공학적으로 큰 무리가 아니다. 이 가정은 많은 연구자들에 의하여 이용되어 왔다.

단조 후 소재의 탄성회복시 하중이 일시에 제거된다고 가정하고, 이 때 소재는 등방성 탄성변형을 받는다고 가정한다. 그리고 소재의 냉각과정에서도 탄성변형을 받는다고 가정한다.

최종적으로 소재의 형상은 독립적으로 구한 금형의 변형량, 소재의 탄성회복량, 열수축 변형량을 더하여 구한다. 이 과정을 Fig. 1에 나타내었다. Fig. 1(a)는 단조 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 이 결과는 금형이 강체라는 가정에 연계해석을 실시하여 얻은 것이다. Fig. 1(b)는 Fig. 1(a)의 해석 결과 하에서 실시한 금형의 탄성변형 해석 결과를 나타내고 있고, Fig. 1(c)는 소재의 탄성회복과 열수축을 해석한 결과를 나타내고 있다. Fig. 1(d)에서 보는 바와 같이 소재의 점 P의 최종 위치는 Fig. 1(b)와 Fig. 1(c)에서 구한 변형량을 더함으로써 근사적으로 구해진다.

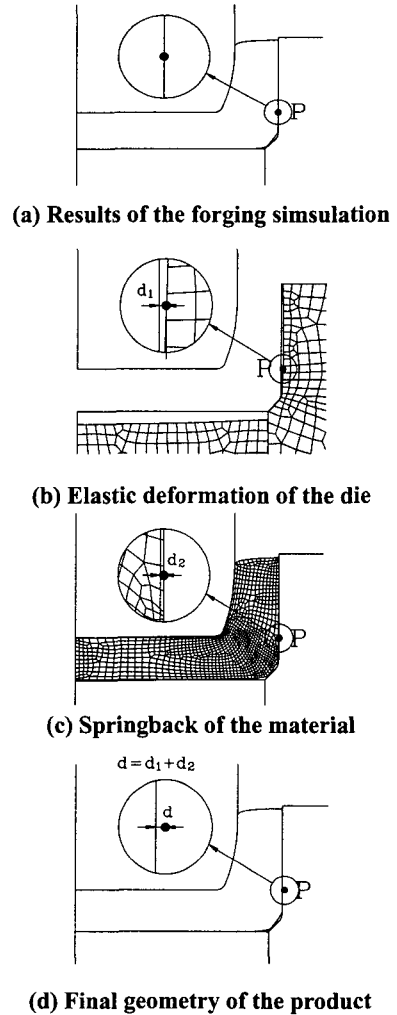


Fig. 1 Basic approach to estimating geometric dimensions of cold forgings

냉간단조 금형은 구조적으로는 단순하지만, 금형의 구조해석 문제는 열박음과 접촉문제를 내포하므로 매우 어려운 문제에 속한다. 문제를 손쉽게 활용 가능한 형태로 만들기 위하여 소재와 금형은 등방성이며 탄성변형을 받는다고 가정한다. 상세한 이론적 배경은 참고문헌[8]로 대신한다.

소재의 탄성회복 및 열수축 문제는 소성변형과정에서 발생한 소재의 이방성과 추출과정에서 하중이 제거되는 과정에도 다소 영향을 받는다. 사실, 이 두 과정을 정확하게 구한다는 것은 불가능하다. 연계된 인자들이 매우 복잡할 뿐만 아니라 관련 소재의 물성치를 구하기가 쉽지 않기 때문에 산업적으로 활용할 수 있는 정도의 해를 얻는

데 만족할 수밖에 없다. 따라서 본 연구에서는 소재의 탄성회복 및 열수축 문제의 해석시 소재는 등방성 탄성변형을 받는다고 가정한다. 이 경우, 관련 이론적 배경은 금형의 구조해석과 동일하므로 앞 절의 내용으로 대신한다.

소재의 탄성회복과 열수축 해석시의 기계적 하중과 열적 하중은 단조 시뮬레이션 결과로부터 추출하여 사용한다. 이 때 단조 완료 시점에서 소재의 응력을 소재의 탄성회복 해석시의 초기 응력으로 간주하고 금형이 소재에 작용하는 응력벡터를 탄성회복 해석을 위한 하중으로 사용한다. 그리고 상온과 단조 종료 시점에서의 소재의 온도 차이를 열적하중으로 간주하여 열수축을 해석한다.

3. 공정 적용

3.1 공정의 선택 및 강소성 유한요소해석

Fig. 2 은 공정적용 목적으로 선택된 냉간단조 공정의 공정도이다. 소재는 SCM420H 이며, 두 공정 모두 풀림열처리가 선행된다. 이 공정은 비교적 단순하므로 실험이 용이하다는 장점을 지니고 있다. 실험결과와 해석결과와의 비교검토를 위하여 실공정 투입직전에 삼차원 측정기를 사용하여 실측한 금형 치수를 해석목적으로 사용하였다. Fig. 5 에 사용된 금형세트의 설계를 나타내었다. 금형은 열박음되어 있으며, 열박음량은 0.4%(열박음시 온도차는 약 400℃)이다. 금형 소재는 모두 SKD11 이다.

먼저 소재 치수 해석을 위한 기본 정보를 얻기 위하여 단조공정 시뮬레이션을 실시하였다. 실제 측정된 값과 비교하기 위하여 Fig. 2 에서 정의된 두께(t)가 5.0 mm일 때와 4.6 mm일 때의 두 경우에 대해서 해석하였다. 공정해석에 사용된 공정조건 및 소재정보는 다음과 같다.

- 유동응력: $\bar{\sigma} = 745.3\bar{\epsilon}^{0.2}$ MPa
- 마찰계수: $\mu = 0.1$
- 금형속도: 등속(상형: -100 mm/sec, 하형: 0.0 mm/sec)
- 열팽창계수: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$
- 소재 초기온도: 20℃
- 금형 초기온도: 20℃

두 경우의 해석결과의 경향이 비슷하므로 4.6 mm인 경우에 대해서는 주요 단조 시뮬레이션 결과를 Fig. 2~4 에 도시하였고, 5.0 mm인 경우는 비교 목적으로만 사용하였다.

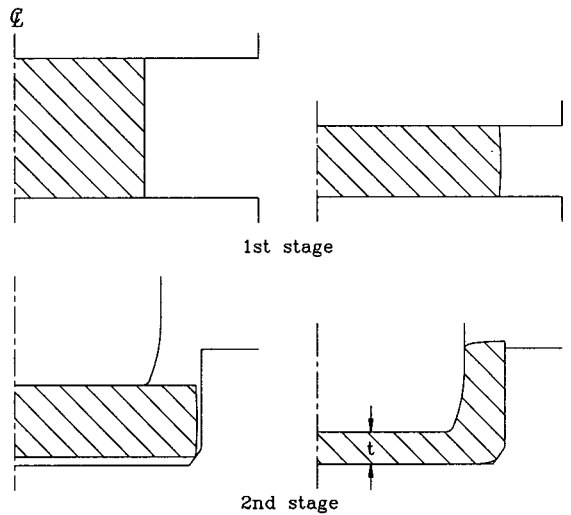


Fig. 2 Forging sequence of the selected test example

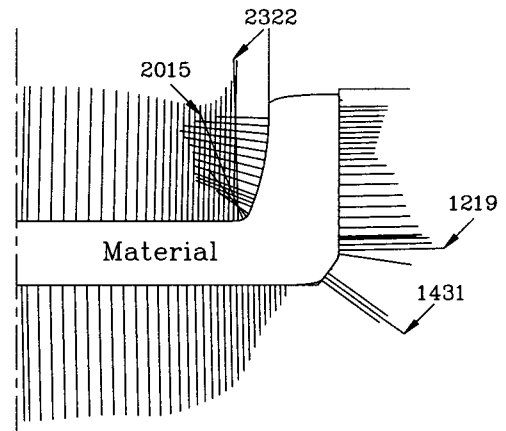


Fig. 3 Stress vectors(MPa)

Fig. 3 는 표면력을 나타내고 있으며, 최대내압이 약 2,322MPa 이다. Fig. 4 은 열점소성 유한요소해석에 의한 온도분포 예측결과를 나타내고 있다. Fig. 4(a)는 단조 종료 시점의 온도분포를 나타내고 있고, 온도는 최고 110℃이다. Fig. 4(b)는 단조 종료 시험으로부터 10 초 동안 공냉시킨 후의 온도분포를 나타내고 있다. 소재의 초기온도가 20℃이므로 Fig. 4(b)의 결과는 단조 과정에서 소재의 온도가

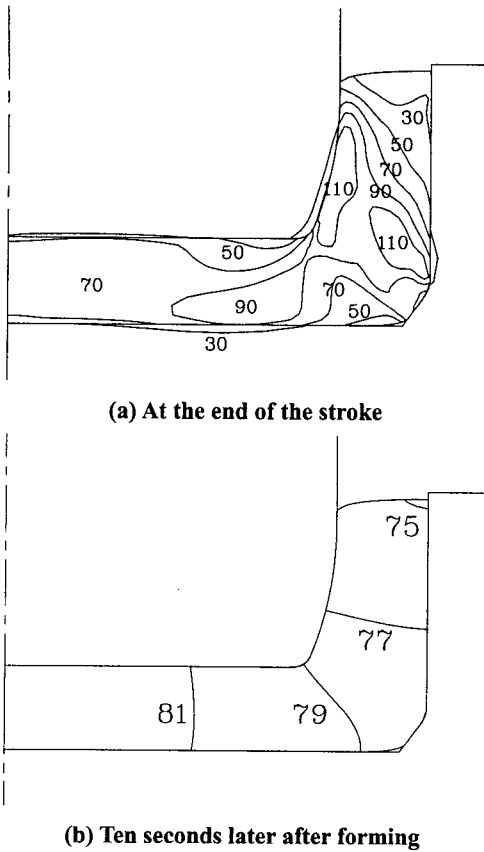


Fig. 4 Temperature distribution(°C)

평균적으로 60°C 상승했음을 의미한다. 응력벡터 예측결과는 소재의 탄성회복과 금형의 탄성변형 해석 목적으로 사용되며, 온도분포 결과는 소재의 열수축량 예측 목적으로 사용된다. 본 적용예제에서는 금형에 작용하는 열하중을 고려하지 않는다.

3.2 금형의 탄성해석

Fig. 5 은 금형의 구조를 나타내고 있다. 수축링 (shrink ring)은 400°C의 온도차이로 열압축된다. 모든 금형 부품들의 소재는 SKD11 이다. 금형구조 해석에 필요한 SKD11 의 기계적 성질은 다음과 같다.

- 탄성계수: $E = 200 \text{ GPa}$
- 포아송비: $\nu = 0.3$
- 마찰계수: $\mu = 0.1$
- 열팽창계수: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

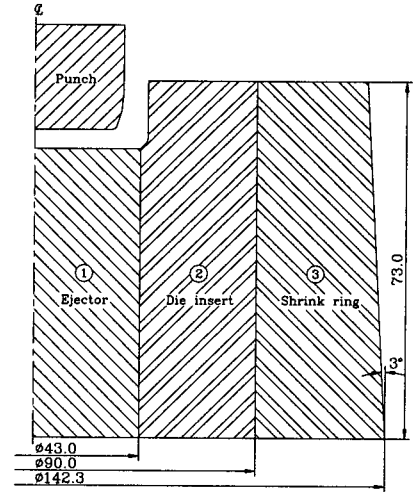


Fig. 5 Design of the die set

Fig. 6 은 금형의 구조해석을 위한 유한요소해석 모델이다. 열박음과 성형하중을 동시에 고려한 주요 해석결과를 Fig. 7 와 8 에 나타내었다.

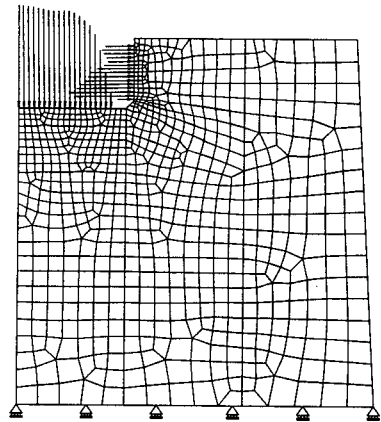


Fig. 6 Finite element model for die structural analysis

Fig. 7 는 실제 변형된 금형을 10 배 확대하여 나타낸 것이다.

3.3 소재의 탄성회복 및 열수축 해석
소재의 탄성회복 및 열수축 해석을 위한 정보는 다음과 같다.

- 탄성계수: $E = 210 \text{ GPa}$
- 포아송비: $\nu = 0.3$
- 열팽창계수: $\alpha = 1.2 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$

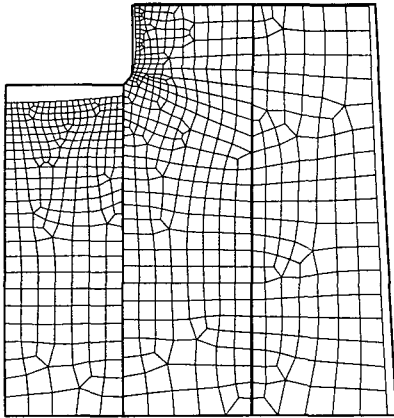


Fig. 7 Deformation of die set due to forming load and shrink fit(Displacement was multiplied by 10)

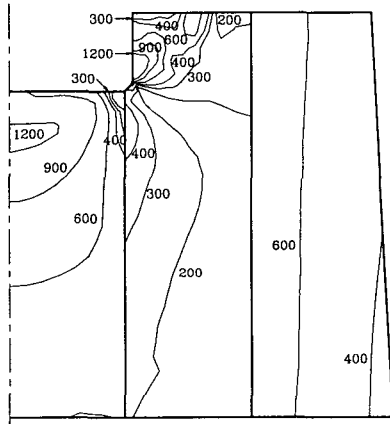


Fig. 8 Effective stress distribution(MPa)

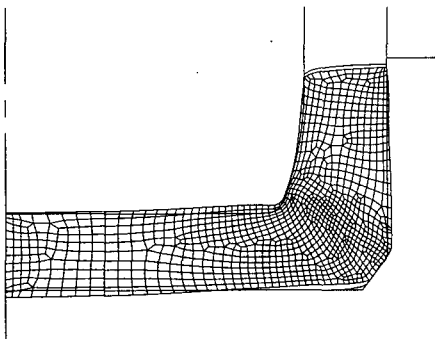


Fig. 9 Springback of the material(Displacement was multiplied by 10)

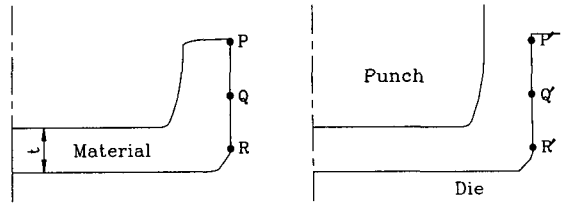


Fig. 10 Test points for comparison in radial direction

Table 1. Comparison of the predicted radial displacement with the measured one in the case of $t = 4.6 \text{ mm}$

Point	Springback of material(a)	Deformation of die(b)	Prediction (A=a+b)	Measurement (B)	$\frac{A}{B} \times 100$
P	0.015 mm	0.061 mm	0.076 mm	0.047 mm	62%
Q	0.011 mm	0.072 mm	0.083 mm	0.058 mm	70%
R	0.003 mm	0.067 mm	0.070 mm	0.076 mm	108%

Table 2. Comparison of the predicted radial displacement with the measured one in the case of $t = 5.0 \text{ mm}$

Point	Springback of material(a)	Displacement of die(b)	Prediction (A=a+b)	Measurement (B)	$\frac{A}{B} \times 100$
P	0.016 mm	0.059 mm	0.075 mm	0.050 mm	67%
Q	0.015 mm	0.076 mm	0.091 mm	0.061 mm	67%
R	0.004 mm	0.060 mm	0.064 mm	0.065 mm	101%

성형하중과 열하중의 제거 과정에서 발생하는 탄성회복과 열수축을 해석한 결과를 Fig. 9 에 나타내었다. 이 결과에서 변위는 10 배 확대된 것이다.

3.4 변형의 예측치와 실측치의 비교

Fig. 10 에서 보는 바와 같이 점 P, Q, R 에서 반경방향의 변위 예측치와 실측치를 비교하였다. 변형이 없는 상태에서 점 P, Q, R 의 실제 금형의 반경값은 22.976 mm, 22.976 mm, 22.975 mm이다. 이는 하중이 가해지지 않았을 때의 치수이다.

금형의 탄성변형과 소재의 탄성회복 및 열수축에 의하여 발생하는 변위를 Table 1 과 2 에서 요약하였다.

두께가 4.6 mm인 경우, 점 Q 의 탄성회복 및 열수축에 의한 반경방향의 변위는 0.011 mm이다. 그리고 실제 성형하중에 의하여 발생한 금형의 변위 값은 0.072 mm이다. 따라서 Q 가 단조 공정중에서 실제 변화하는 총변위량은 0.083 mm이다. 이는 완제품의 치수가 금형의 치수보다. 0.083 mm이 더 크다는 것을 의미한다.

단조품을 실측한 결과, 두께가 4.6 mm인 경우, Q 의 반경방향의 총변위량은 0.058 mm이다. 이 값은 하중이 가해지지 않을 때의 금형 치수와 실제 생산된 제품 치수의 차이로부터 구해졌다. 실측치와 예측치의 비교결과로부터 실측치는 약 30% 정도의 오차 범위에 속함을 알 수 있다. 점 P 는 38%의 오차 범위에 있고 점 R 은 8%의 오차범위에 속하고 있다.

두께가 5.0 mm인 경우도 Table 2 에서 보는 바와 같이 두께가 4.6 mm인 경우와 비슷한 경향을 보이고 있다.

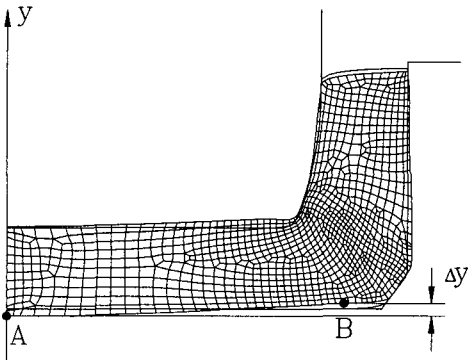


Fig. 11 Definition of Δy

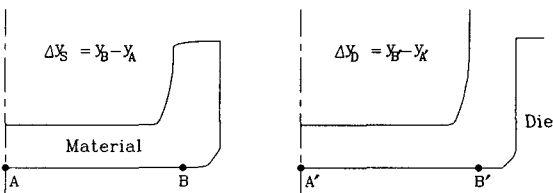


Fig. 12 Test points for comparison in axial direction

그리고 축방향의 변위에 관한 동일한 시도가 실시되었다.

Fig. 11 에서 보는 바와 같이 점 A 와 점 B 사이의 y 축 좌표 차이를 예측하여 실측치와 비교하였다. 금형에서의 예측치도 같은 방법으로 점 A 와 점 B 사이의 y 축 좌표 차이를 예측하여 실측치와 비교하였다. Fig. 12 은 소재와 금형의 축방향의 변위 측정점을 보여주고 있다.

금형의 탄성변형과 소재의 탄성회복에 의하여 발생한 Δy_s 와 Δy_D 의 비교값을 Table 3 에 나타내었다.

Table 3. Comparison of the predicted axial displacement with the measured one

t	Springback of material (Δy_s)	Deformation of die (Δy_D)	Prediction ($A = \Delta y_s + \Delta y_D$)	Measurement (B)	$\frac{A}{B} \times 100$
4.6	0.058mm	0.115mm	0.173mm	0.17mm	98%
5.0	0.058mm	0.11mm	0.156mm	0.17mm	109%

두께가 4.6 mm인 경우, 탄성회복 및 열수축에 의한 Δy_s 는 0.058 mm이고 금형해석에 따른 Δy_D 는 0.115 mm이다. 따라서 공정중 변하는 총 변위량은 소재의 변형량과 금형의 변형량을 합한 0.173 mm 이다. 실측한 변위량은 0.17 mm로 오차는 0.004 mm 이다.

실측치와 예측치의 비교결과로부터 실측치는 약 2% 정도의 오차 범위에 속함을 알 수 있다. 5.0 mm인 경우는 9%의 오차 범위에 속한다.

4. 결론

본 논문에서는 냉간단조품의 치수정밀도 예측을 위한 해석적 접근이 시도되었으며, 체계적인 접근방법이 제안되었다. 이 접근방법에서는 금형이 강체라는 가정하에서 강소성 유한요소법에 의하여 단조공정이 해석된다. 단조공정 해석결과에서 획득된 정보를 바탕으로 금형의 구조해석과 소재의 탄성회복이 해석된다. 탄성회복해석시에 성형하중에 의한 기계적 하중과 소성열에 의한 열적 하중이 고려되었으며, 소재는 탄성적으로 변형한다고 가정하였다.

예측결과와 실험결과를 비교한 결과, 예측결과는 정성적으로 실험결과를 비교적 잘 반영하고 있음을 확인하였으며, 설계경험과 접목된다면 정밀 냉간단조 공정 설계 목적으로 활용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

이 논문은 2005년도 지방대학혁신역량강화사업에 의하여 지원되었음.

참 고 문 헌

- [1] U. Engel, M. Hansel, 1990, "FEM-Simulation of Fatigue Crack Growth in Cold Forging Dies", Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp. 355-360.
- [2] Z. Xing-hua, 1990, "Finite Element Analysis of Container and Accuracy Control of Extrusion Products", Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp.343-348.
- [3] K. Lange, A. Hettig and M. Knoerr, 1992, "Increasing Tool Life in Cold Forging through Advanced Design and Tool Manufacturing Techniques", J. Mat. Proc. Tech., Vol.35, pp.495-513.
- [4] K. F. Hoffmann and K. Lange, 1989, "Computation of the Elastic Expansion and Stresses in Cold Extrusion Dies with Non- Axisymmetric Inner Shape", Trans. NAMRI of SME, Vol., pp.71-78.
- [5] S. Takahashi and C. A. Brebbia, 1990, "Forging Die Stress Analysis Using Boundary Element Method", Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp.203-210.
- [6] Y. Ochiai and R. Wadabayashi, 1987, "Application of Boundary Element Method to Cold Forging Die Design", Adv. Tech. Plast., Vol. 1, pp.37-42.
- [7] M. Fu and B. Shang, 1995, "Stress Analysis of the Precision Forging Die for a Bevel Gear and its Optimal Design Using the Boundary-Element Method", J. Mat. Proc. Tech., Vol. 53, pp.511-520.
- [8] M. S. Joun, M. C. Lee and J. M. Park, 2002, "Finite element analysis of prestressed die set in cold forging", Int. J. Math. Tools Manuf., vol. 42, pp.1214-1222.
- [9] S. I. Oh, J. P. Tang and A. Badawy, 1984, "Finite Element Mesh Rezoning and its Applications to Metal Forming Analysis", Advd. Tech. Plasticity, Vol. 2, pp. 1051-1058.
- [10] C. H. Lee and S. Kobayashi, 1973, "New Solution to Rigid Plastic Deformation Using a Matrix Method", Trans. ASME, J. of Eng. for Ind., Vol. 95, pp. 865-873.
- [11] O. C. Zienkiewicz and P. N. Godbole, 1975, "A Penalty Function Approach to Problems of Plastic Flow of Metals with Large Surface Deformation", J. of Strain Analysis, Vol. 10, No. 3.
- [12] K. Osakada, J. Nakano and K. Mori, 1982, "Finite Element Method for Rigid-Plastic Analysis of Metal Forming-Formulation for Finite-Deformation", Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, pp. 459-469.
- [13] S. I. Oh, N. Rebelo and S. Kobayashi, 1978, "Finite Element Formulation for the Analysis of Plastic Deformation of Rate-Sensitive Materials in Metal Forming", IUTAM Symposium, Tutzing/Germany, pp. 273-291.
- [14] C. C. Chen and S. Kobayashi, 1978, "Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Ring Compression", Application of numerical methods to forming processes, ASME, AMD, Vol. 28, pp. 163-174.
- [15] S. I. Oh, 1982, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrary Shaped Dies, Int. J. Mech. Sci., Vol. 24, pp. 479-493.
- [16] 전만수, 김형일, 2000, 고체역학에서 유한요소법까지, 피어슨에듀케이션코리아.
- [17] S. M. Hwang, M. S. Joun and J. S. Park, 1990, "A Penalty Rigid-Plastic Finite Element Method for the Determination of Stress Distributions at the Tool-Workpiece Interface in Metal Forming", Trans. of NAMRI of SME, Vol. X VIII, pp. 13-19.
- [18] S. M. Hwang, M. S. Joun and Y. H. Kang, 1993, "Finite Element Analysis of Temperatures, Metal Flow and Roll Pressure in Hot Strip Rolling", ASME Trans. J. Eng. for Industry, Vol. 115, pp. 290-298.