

강소성 유한요소법을 이용한 냉간단조 공정의 최종단계 해석

최영* · 정성윤* · 김병민** · 최재찬**

(1998년 10월 21일 접수)

An Analysis of Cold Forging at Final State Using Rigid-Plastic FEM

Y. Choi, S. Y. Jung, B. M. Kim and J. C. Choi

Abstract

In this paper, the analysis of cold forging in final state has been performed by using rigid-plastic FEM. For the analysis, the geometry and flow stress of the workpiece are required. One method to obtain the geometry is measurement of that made from experimet. To evaluate the flow stress, average effective strain is calculated from the load-stroke diagram by using energy method. The numerical test performed to show the validity of propose method. The analysis of PFIR, the precision forging of spur gear with inside relif, is performed.

Key Words : Rigid Plastic FEM, Cold Foring, Final State, Contacted Nodal Force

1. 서 론

최근, 소성가공 문제를 강소성 유한요소법으로 해석하는 것이 일반화 되고 있다.¹⁾ 그러나 공정이 많고 형상이 복잡한 경우와 3차원 문제는 많은 계산시간이 요구되며 격자 재구성(remeshing)이 필요하다. 이를 해결하기 위해, 빠른 계산속도를 가진 컴퓨터의 도입과 병렬처리 기법²⁾이 도입되고 있으며 자동 격자재구성 기법^{3~4)}이 개발되고 있다. 이러한 연구들에도 불구하고 여전히 3차원 및 공정이 많고 형상이 복잡한 경우의 유한요소 해석은 많은 시간과 노력이 요구된다.

단조 공정을 해석하는 방법으로, 초기소재로부터 최종 단조품까지의 성형을 시뮬레이션하는 방법이 일반적이다. 또 다른 방법으로는 단조 최종단계의 해석을 수행하는 것

으로, 슬래브법(slab method), 상계법(upper-bound method)이 적용되었다. 리브-웨브형의 열간단조에 대해 슬래브법이 단조 최종단계에 대해 성공적으로 적용되었다.^{5~7)}

또한 강소성 유한요소법을 이용하여 단조 최종단계를 해석하는 방법도 개발되었다. Altan⁸⁾ 등은 스퍼기어의 단조에 대해 2차원으로 가정하고 코너채움에 대해 단조 최종단계의 유한요소해석을 수행하였다. 유한요소해석시 필요한 형상을 경험적으로 결정하였다. Lee⁹⁾ 등은 최종단계의 유한요소 해석을 위해 실험으로 얻어진 형상 및 소재의 물성치를 이용하여 해석하였다. 즉, 측정된 경도값을 변형률값으로 환산하여 소재의 유동응력을 결정하고 이를 이용하였다. 단조 최종단계만을 유한요소 해석하게되면, 계산시간의 절감효과가 있다. 또한 금형해석시 얻어진 절

* 부산대학교 대학원

** 부산대학교 기계공학부, 정밀정형 및 금형가공 연구센터

점력을 금형해석에 적용하기 용이하다.

본 연구에서는 단조 최종단계 형상을 실험을 통해 알고 있는 것으로 생각하고, 재료의 유동응력을 변위-하중 선도로부터 평가하여 단조 최종단계를 강소성 유한요소 해석하는 방법을 제안한다. 제안한 방법의 타당성을 평가하기 위해, spike단조⁽¹⁰⁾에 대해 해석하여 비교하고자 한다. 비교 결과, 제안한 방법의 타당성을 보였으며, 제안한 방법으로 내부 유동여유를 갖는 스퍼기어의 정밀단조법 (Precision Forging of spur gear with Inside Relief, PFIR, Ref⁽¹¹⁾)의 최종단계를 해석하였다.

2. 단조공정의 최종단계 해석

단조 최종단계의 해석을 위해서는 소재의 형상과, 유동응력 분포를 알아야 한다. 본 연구에서는 단조 최종단계의 소재의 형상을 알고 있는 것으로 한다. 이는 실험으로 통하여 얻을 수 있다. 재료의 유동응력을 평가하기 위해, 하중-변위 선도로부터 평균 변형률을 계산하고 이를 이용하였다. 평균 변형률을 계산하는 방법은 Altan⁽¹²⁾등에 의해 제안되었으며 저자의 상해해석에도 이용되었다⁽¹³⁻¹⁴⁾. 그러나 반드시 실험을 통하여 소재의 형상과 하중-변위 선도를 구할 필요는 없다. 소재 형상은 단조시 얻는 제품의 형상으로 생각할 수 있다. 하중-변위 선도의 적분은 최종단계의 하중과 편치행정을 알 때, 근사적으로 계산할 수 있다.⁽¹⁵⁾ 제안한 방법은 금형에 작용하는 근사하중을 쉽고 빠르게 평가할 수 있으므로 금형설계시 유용한 기술이라 생각된다.

본 연구에서, 제안한 단조공정의 최종단계 해석을 Fig.1에 나타낸다.

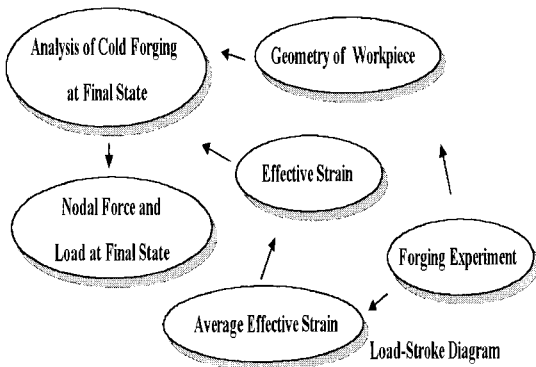


Fig. 1 Procedure of the analysis of the cold forging at final state

아래에 하중-변위 선도로부터 평균 유효변형률을 계산하는 방법을 기술한다. 표면마찰을 무시하면, 외력이 한 일은 모두 소성변형에 소비됨으로

$$Lds = \int_V \bar{\sigma} \, d\bar{\epsilon} dV \quad (1)$$

이고, 유효변형율은 전체 변형영역에서 평균 변형률로 가정하면,

$$Lds = V\bar{\sigma} \, d\bar{\epsilon}_m \quad (2)$$

이다. 여기서, L 은 단조하중, s 는 편치행정, V 는 가공물의 체적이다. 그러므로 하중-변위 선도를 적분하면, 단조시 소재에 가해진 총 일량(W_{total})을 구할 수 있다.

$$W_{total} = \int Lds = V \int_0^{\bar{\epsilon}_m} \bar{\sigma} d\bar{\epsilon}_m \quad (3)$$

그러므로, 재료의 응력-변형률 관계를 이용하여 식(3)의 마지막 항을 적분하여 평균 유효변형률, $\bar{\epsilon}_m$, 을 계산할 수 있다. 유동응력이 식(4)와 같다면, 평균 유효변형률은 식(5)와 같다.

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \quad (4)$$

$$\bar{\epsilon}_m = \sqrt[n+1]{\frac{W_{total} \cdot (n+1)}{V \cdot K}} \quad (5)$$

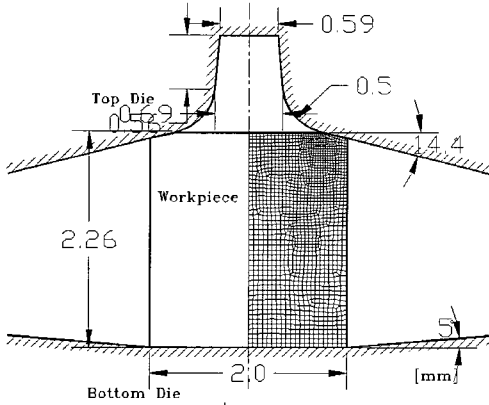
실험으로부터 하중-변위 선도가 얻어지면 식(3)과 식(5)로 평균 유효변형률을 계산할 수 있다. 그러나 실험을 수행하지 못한 경우, 하중-변위 선도의 적분은 최종 단계의 하중과 편치행정으로 근사적으로 계산할 수 있다.⁽¹⁵⁾

3. 수치적 검증

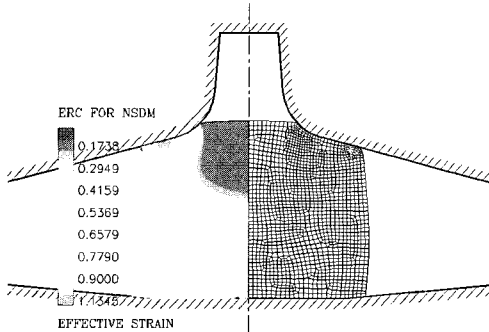
제안한 방법의 타당성을 보이기 위해, 수치적으로 검증하려고 한다. 먼저 초기 소재로부터 최종제품까지 단조 시물레이션을 수행한다. 시물레이션 결과 중, 형상과 하중변위 선도를 이용하여 제안한 방법으로 단조 최종단계를 해석하여 비교한다. 수치적 검증을 위해 DEFORM을 이용하여 해석하였다. 해석은 Table 1과 같은 조건으로 수행하였다. 본 연구에서 단지 수치적 검증을 목적으로 해석하였으므로 제품 및 금형 치수는 단위 값으로 축차 되었다. 단조공정 및 Case 1에 대한 결과 해석결과를 Fig.2에 나타내었다. 소재로부터 최종 단조품까지의 해석결과로 유

Table 1 FE-Simulation condition of spike forging.

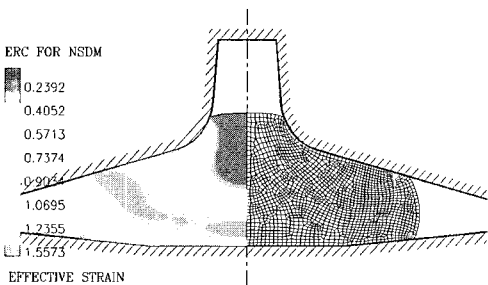
	Material	Friction Factor	Stroke
Case 1	SCM415($\bar{\sigma} = 768.06\epsilon^{-0.139}$ [MPa])	0.13	1.4[mm]
Case 2		0.35	1.4[mm]
Case 3	Al alloy($\bar{\sigma} = 287.74\epsilon^{0.12}$ [MPa])	0.13	1.4[mm]
Case 4		0.35	1.4[mm]



(a) Schematic drawing of the spike forging



(b) Distribution of effective strain at stroke 0.7mm



(c) Distribution of effective strain at stroke 1.4mm

Fig. 2 Schematic drawing of the spike forging & FE-simulation results of case 1.

효변형률 분포와 격자변형을 Fig.2에 나타낸다.

Fig.3에 시뮬레이션 결과, 얻어진 하중 변위 선도를 나타낸다. 하중 변위선도를 수치적분하여 소재에 가해진 총 일량(W_{total})을 식(3)으로 계산하고 식(5)로 평균 유효변형률을 계산하였다. 계산된 평균 유효변형률은 1.0956이다. 계산된 평균 유효변형률과 Fig.2 (c)에 얻어진 소재 형상을 이용하여 단조 최종단계를 해석하였다. 금형에 작용하는 절점력과 유효변형률속도 분포를 Fig.4에 나타낸다.

Fig.4에 나타낸 유효변형률속도 분포는 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 것(Fig.4 왼쪽)과 원 소재부터 최종 단조까지 유한요소 시뮬레이션한 것(Fig.4 오른쪽)과는 차이가 있다. 먼저 변형이 심한 부분은 유사하나, 내부와 상단 출구부의 변형은 차이가 난다. 그러나 비교적 유사한 분포임에 틀림없다. 절점력은 상당히 일치하고 있다. 자세히 살펴보면 상단 출구부에 조금의 차이가 관찰될 뿐이다.

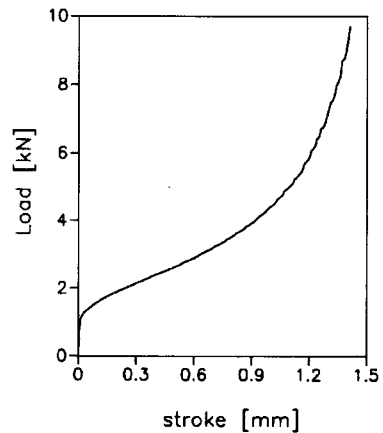


Fig. 3 Load stroke diagram of the spike forging of case 1

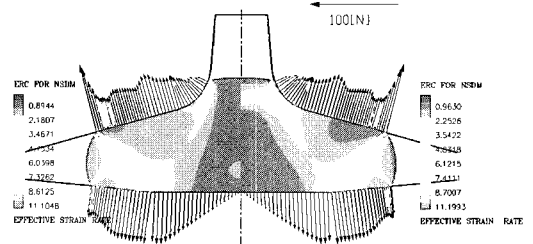


Fig. 4 Comparisons of effective strain rate and nodal forces between the present analysis and the simulation of case 1. (left: present analysis, right: simulation from billet to final forging)

이는 상단 출구부는 변형이 거의 없는 강체영역(Fig.2 (c))이나 평균 유효변형률 값으로 가정하였기 때문으로 생각된다. 어느 정도 변형이 있는 부분은 평균값으로 대체 하여도 금형에 작용하는 절점력에는 큰 영향이 없음을 알 수 있다. 계산된 단조하중을 비교하면, 9.78[KN] 및 9.72[KN]으로 제안한 방법이 0.62% 높은 값을 보인다.

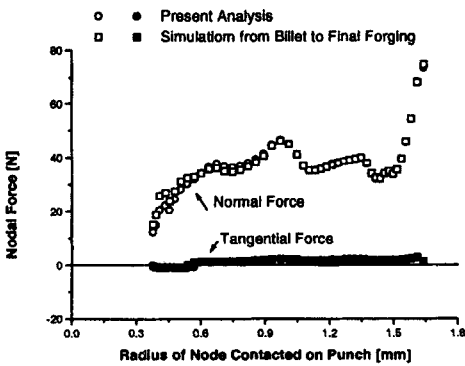
이는 냉간단조 최종단계를 해석하여 금형에 작용하는 절점력을 계산하는 방법의 타당성을 보이는 것이다. 그러나 유효변형률속도와 그와 관계된 값, 응력등을 계산하는 것은 비교적 덜 정확할 것으로 생각된다. 금형에 작용하는 절점력을 비교하기 위해 절점의 반경값에 대해 금형에 수직, 수평의 절점력 값을 Fig.5에 도시한다. Fig.5 (a)에 Table 1의 공정조건에 따른 결과를 나타낸다.

Fig.5에 나타낸 절점력의 비교는 아주 잘 일치함을 알 수 있다. 냉간단조 공정에서 비교적 높은 마찰인 경우

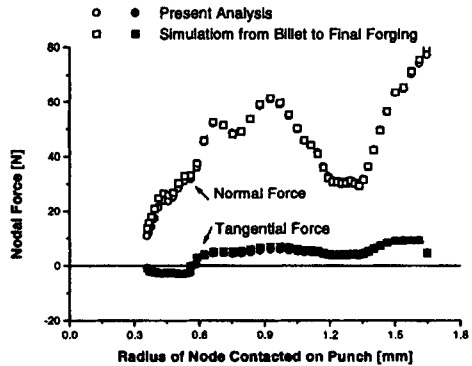
($m = 0.35$), (b), (c),에도 본 연구에서 제안한 방법으로 계산한 결과가 초기소재부터 최종단조까지 해석한 경우와 잘 일치한다. 그러므로 금형의 해석 및 설계에 유용한 절점력을 손쉽게 결정할 수 있음을 보이는 것이다.

그러나 반경이 작은 곳 즉, 상단 출구부의 경우는 Fig.2 (c)와 같은 변형률 분포를 가진 영역을 평균값으로 하여 해석함으로써 다른 곳보다 비교적 큰 오차를 가진다. 전체 영역이 균일한 변형을 하여, 변형률 분포가 균일하다면, 정확한 해석결과를 얻을 수 있을 것으로 생각된다.

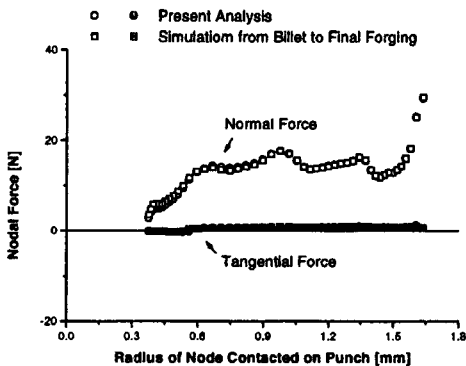
Table 2에 정략적인 분석을 나타낸다. 단조하중의 비교에서 최대오차는 재료가 알루미늄이고 마찰상수가 0.35인 case 4인 경우로 1.17%의 오차를 보였다. 모든 경우에서, 제안한 방법으로 계산된 단조하중이 높다. 이는 식 (3)을 적용할 때 마찰을 무시하여 실제보다 큰 평균유효 변형률을 계산하였기 때문이다. 단조하중에 대한 오차는



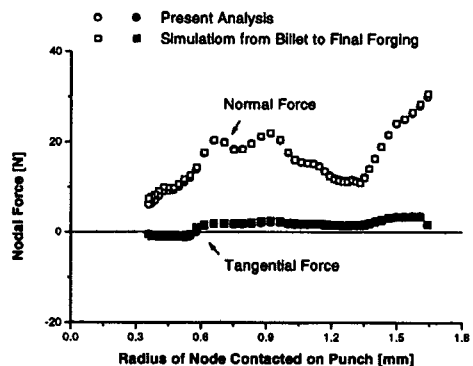
(a) results of case 1



(b) results of case 2



(c) results of case 3



(d) results of case 4

Fig. 5 Comparison of nodal force for the each case between present analysis and simulation from billet to final forging

Table 2 Comparison at final state between present analysis and full simulation.

	Forging Load [KN]		
	Present	Full Simulation	Error [%]
Case 1	9.784	9.720	0.66
Case 2	10.564	10.452	1.07
Case 3	3.619	3.581	1.06
Case 4	3.991	3.953	1.17

마찰상수가 커짐에 따라 증가한다.

4. 내부 유동여유를 갖는 스퍼기어의 정밀단조 공정의 단조 최종단계 해석

본 연구에서 제안한 해석법을 저자가 제안한 내부 유동여유를 갖는 스퍼기어의 정밀단조 공정(PFIR, ref[11])에 적용하여 실제 3차원 단조문제에 대한 적용성을 살피고자한다. 정밀단조공정을 Fig.6에 나타낸다. 정밀단조법은 2단계 단조공정으로 안내형단조공정을 변형한 형태이다. 두 번째 단조단계에서 이젝터부의 충만을 위해, 이젝터부 내측의 유동여유(inside relief)가 첫 단계에서 생성시키는 방법이다. 두 번째 단조단계에서 완전 밀폐성형이 되지 않도록 이젝터의 내경을 맨드릴 외경보다 크게 하였고 첫 번째 단조단계와 두 번째 단조단계에서 이젝터만 바꾸어 성형하는 방법이다.

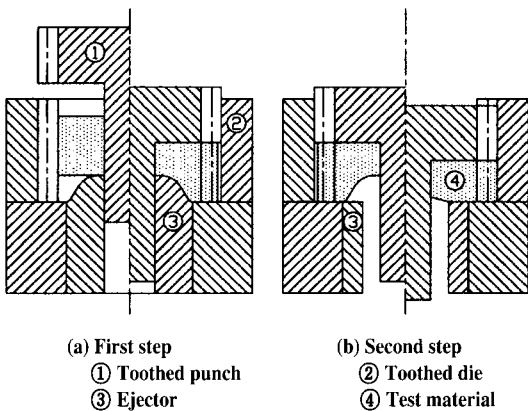


Fig. 6 Precision forging of spur gear with inside relief, PFIR

본 연구에서 제안한 방법으로 3차원 단조공정을 해석하기 이전에, 정밀단조 공정을 축대칭 제품에 적용한 경우를 해석하여 타당성을 비교하고자 한다.

4.1 축대칭 제품의 정밀단조 공정의 해석

DEFORM을 이용하여 소재로부터 최종단조 공정을 먼저 시뮬레이션하고 형상과 하중-변위 선도로부터 평균유효변형률을 계산하고 이를 이용하여 단조 최종단계만 해석하여 비교한다. 소재는 SCM415이며, 마찰계수는 0.129로 하였다. Fig.7에 유한요소 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

Fig.7 (a)에 금형과 초기 소재형상, (b)에 첫 번째 단조단계의 최종상태(왼쪽)과 두 번째 단조단계의 시작을 나타낸다. Fig.7 (c)에 최종단조 상태와 유효변형률 분포, (d)에 하중-변위 선도를 나타낸다. 단조 최종단계의 변형률분포를 살펴보면, 내부 유동여유가 형성되고 없어지는 내부영역의 변형률 값이 아주 높다. 금형과 접촉하는 부분은 변형률 분포가 균일하며 대략 0.7222값을 가진다. 내부 유동여유를 갖는 정밀단조법이 제품의 외면에 균일한 변형률 분포를 갖게 하는 단조법임을 알 수 있다. Fig.7 (d)에 보인 하중-변위 선도를 적분하고 식(5)를 이용하여 평균 유효변형률을 계산하면, 0.786를 얻는다. 이와 시뮬레이션시 얻어진 소재 형상(Fig.7 (c))로 단조 최종단계를 해석하였다. 해석결과와 소재로부터 최종 단조품까지의 시뮬레이션 결과를 Fig.8에 보인다.

Fig.8에 나타낸 유효변형률속도 분포는 본 연구에서 제안한 방법으로 구한 것(왼쪽)과 원 소재부터 최종단조까지 유한요소 시뮬레이션한 것(오른쪽)은 잘 일치한다. 그리고 절점력도 아주 잘 일치한다. 이는 spike단조와 다르게 소재 전체에 변형이 있기 때문이라고 생각된다.

또한 펀치와 금형에 접촉하는 부분의 변형률 값과 평균 유효변형률 값이 각각 0.722와 0.786으로 큰 차이가 없기 때문에 좋은 결과를 얻은 것 같다. 계산된 단조하중을 비교하면, 12.723[KN] 및 12.546[KN]으로 제안한 방법이 1.39% 낮은 값을 보인다. 실험결과보다 낮은 값을 예측한 이유는 국부적으로 높은 유효변형률 부분을 평균값으로 평가하기 때문이라 생각된다. 해석결과는 내부 유동여유를 갖는 정밀단조 최종단계를 해석하여 금형에 작용하는 절점력을 계산하는 방법의 타당성을 보이는 것이다.

4.2 스퍼기어의 정밀단조 공정의 최종단계 해석

스퍼기어의 정밀단조공정을 최종단계 해석하기 위한 유한요소 모델을 Fig.9에 나타낸다. Fig.9의 유한요소 모델

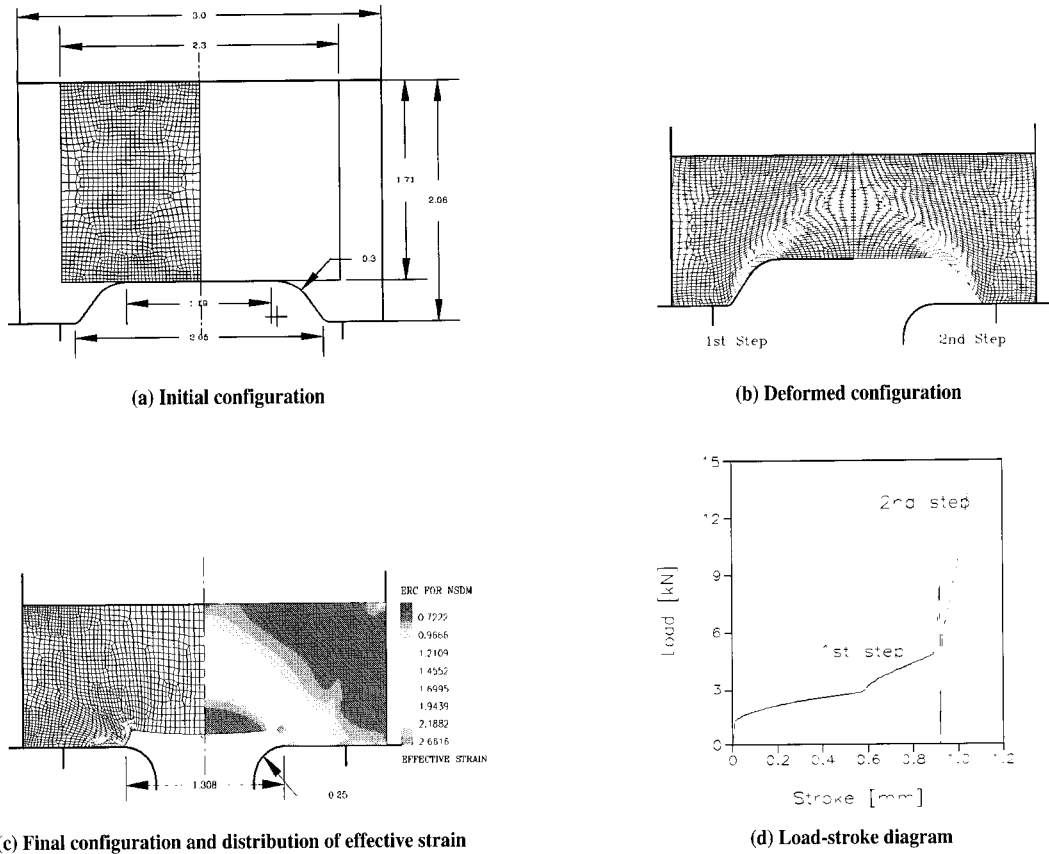


Fig. 7 Results of FE-simulation of precision forging of inside relief with axisymmetric model

은 빌딩 블록(building block) 방식을 이용하였다. 즉, 치형부는 2차원 유한요소 격자를 적용하여 구성하였고 내부는 2차원 유한요소 모델을 회전하여 구성한 후, 이를 결합하였다. 스퍼기어의 정밀단조 실험결과⁽¹¹⁾로부터 내부의 유동여유 형상을 대략적으로 측정하여 모델링한 것이다. 절점 1142개, 육면체 요소 1578개로 모델링 하였다. 소재는 SCM415이고 마찰상수는 0.129이다.

실험으로 얻은 하중-변위 선도를 적분하고 식(5)를 이용하여 평균 유효변형률 값, 1.347,을 결정하였다. 이를 입력으로 하여, 개발된 강소성 유한요소 해석 프로그램을 이용하여 최종단계만 해석하였다. 개발된 강소성 유한요소 해석 프로그램은 이형재 인발공정에 적용 되어졌다⁽¹⁶⁻¹⁷⁾. 해석시 다이, 이젝터 및 금형 형상은 함수값을 이용하였고 형상 및 자세한 수식적 표현은 생략한다.

해석결과, 계산된 단조하중은 87.0(tonf)로 실험에서 얻는 하중값, 85.5(tonf), 보다 1.76% 높은 값을 보인다.

단조하중을 아주 정확하게 예측한 것이다. 해석 결과 얻어진 유효변형률속도 분포를 Fig.10에 나타낸다.

기어의 윗 부분은 강체영역으로 변형이 거의 없다. 또한

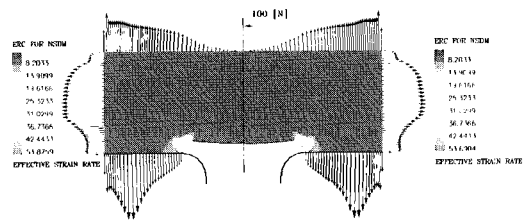


Fig. 8 Comparisons of effective stain rate and nodal forces between the present analysis and the simulation of PFIR with axisymmetric model. (left: present analysis, right: simulation from billet to final forging)

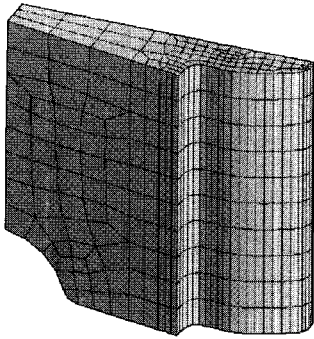
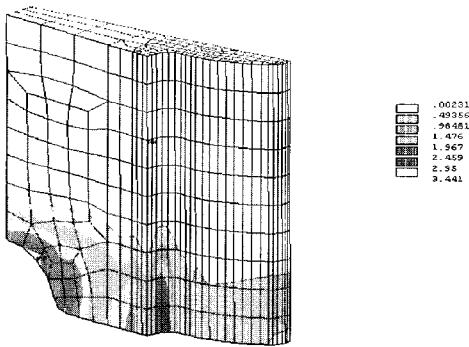
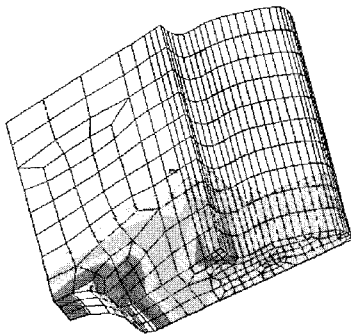


Fig. 9 FE-model for the analysis of precision forging at final state.



(a) 1st view



(b) 2nd view

Fig. 10 Distribution of effective strain rate of forged spur gear at final state.

내부의 유동여유에서 최대 변형이 일어남을 알 수 있다. 그리고 치형부 보다 유동이 변화하는 기어의 필렛부에 변형이 집중됨을 알 수 있다. 또한 계산결과 금형에 작용하

는 절점력이 계산된다. 절점의 위치가 정형화되어 있으므로 금형의 유한요소 모델에 대한 사상(mapping)이 필요하지 않다. 해석결과 얻어진 절점력으로 부터 금형을 해석 및 설계하는 방법에 대한 연구결과는 다음논문에서 논의하기로 한다. 이와 같이 복잡한 3차원 단조문제를 최종단계만 빠르게 해석할 수 있었다. 본 연구에서는 펜티엄 PC로 약 1시간 정도 계산시간이 필요하였다.

5. 결 론

본 연구에서는 냉간단조 공정의 최종단계를 해석하는 방법에 대해 논의했다. 먼저 spike 단조에 대해, 비교 검토하였다. 빌렛으로 부터 최종단계까지 해석한 경우와 단조 최종단계만 해석한 결과를 비교한 결과 좋은 근사를 보였다. 단조 최종단계를 해석하기 위해, 제품의 형상 각 위치에 대한 유동응력을 알고 있어야 한다. 실험을 통해 형상 및 하중-변위 선도는 이미 알고 있는 것으로 하였다. 하중-변위 선도로부터 평균 유효변형률 선도를 구하고 이를 이용하여 단조 최종단계를 해석하는 방법을 제안한다. 축대칭 부품의 정밀단조법에 대해서도 비교하였고 내부 유동여유를 갖는 스퍼기어의 정밀 냉간단조 실험결과를 이용하여, 이를 3차원 유한요소 해석하여 제안한 방법의 적용성을 보였다.

후 기

본 연구는 부산대학교 정밀정형 및 금형가공 연구센터를 통한 한국과학재단 우수 연구센터 지원금에 의한 것입니다.

참고문헌

- (1) P. Hartley et al. (editor), Proceedings of the 7th International Metal Forming 98, The University of Birmingham, UK. September 1-3, 1998.
- (2) 박근, 양동열, "부구조법에 의한 영역 분할 및 강소성 유한요소해석의 병렬 계산", 한국소성가공학회지, 제7권 제5호, pp.474~480, 1998.
- (3) Y. K. Lee and D. Y. Yang, "A New Automatic Mesh Generation Technique and its Applications to the Finite Element Analysis of Practical Forging Process, Proceedings of the 5th I.C.T.P.,

- Columbus, Ohio, USA, pp.409~413, 1996.
- (4) Scientific Forming Technologies Corporation, DEFORMTM-3D User's Manual, 1995.
 - (5) T. Altan et al., Forging Equipment, Materials, and Practices, pp.127~162, 1973.
 - (6) Claudio R. Bo r, "Process Modelling of Forging of Structural Parts with Thin Ribs", Int. J. Mech. Sci, Vol. 26, No. 5, pp. 337~249, 1984.
 - (7) 김성원, 열간단조 공정설계 및 금형설계의 자동화시스템에 관한 연구, 부산대학교 대학원 박사학위 논문, pp. 19~20, 113, 1994.
 - (8) T. Altan et al., Establishment of a Computer Aided Design (CAD)/ Computer Aided Manufacturing (CAM) Process for the Production of Cold Forged Gears, Contact Number DAAE07-82-C-4063, Battelle Columbus Laboratories, 1985.
 - (9) 이충호, "성형실험을 통한 냉간단조 공정의 단축 유한요소 시뮬레이션", 한국소성가공학회지, 제6권 제5호, pp. 395~399, 1997.
 - (10) S. I. Oh, "Finite Element Analysis of Metal Forming Processes with Arbitrarily Shaped Dies", Int. J. Mech. Sci, Vol. 24, No. 8, pp. 479~493, 1982.
 - (11) 최재찬, 최영, "합금강을 이용한 스퍼기어의 정밀 냉간 단조", 한국소성가공학회지, 제6권 제6호, pp. 500~507, 1997.
 - (12) T. Altan, H. J. Henning and A. M. Sabroff, "The Use of Model Materials in Predicting Forming Loads in Metalworking", ASME J. of Eng. for Industry, 444~452, MAY, 1970.
 - (13) J. C. Choi, Y. Choi and S. J. Tak, "The Forging of Helical Gears (I): Experiments and Upper-Bound Analysis", Int. J. Mech. Sci, Vol. 40, No. 4, pp. 325~337, 1998.
 - (14) 최재찬, 허관도, 김창호, 최영, "원호필렛-인벌류트 스퍼어 기어의 밀폐단조에 관한 상계해석", 한국소성가공학회지, 제3권 제1호, pp.97~ 109, 1994.
 - (15) T. Altan et al., Metal Forming, Fundamentals and Applicationns, pp.103, 1983.
 - (16) 김호창, 최영, 김병민, "비정상상태 이형재 인발공정의 3차원 강소성 유한요소해석", 한국정밀공학회지, 제15권 제7호, pp.119~128, 1998.
 - (17) B. M. Kim, Y. Choi and H. C. Kim, "Three Dimensional Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Non-Steady State Shaped Drawing Process", accepted in Int. J. of Machine Tools & Manufacture, 1998.