

스파이더 단조공정의 시뮬레이션 및 결과의 검증

김홍태¹· 이민철²· 엄재근³· 전병윤⁴· 전만수[#]

Simulation of Spider Forging Processes and Verification of the Results

H. T. Kim, M. C. Lee, J. G. Eom, B. Y. Jun, M. S. Joun

Abstract

We simulated a hot forging process for the spider with four legs and an enclosed die forging process for the spider with three legs using an intelligent forging simulator AFDEX 3D and compared the predictions with the experiments in terms of the deformed shape. The formation of characteristic lines was emphasized in the simulation to simulate the extruded legs with higher accuracy.

Key Words : Spider(스파이더), Enclosed die Forging Process(폐쇄단조공정), Forging Simulator(단조시뮬레이터)

1. 서론

국내의 자동차 및 기계 부품산업의 대외경쟁력 향상을 위해 경량화 기술, 고품질화 기술, 생산성 향상 및 제조원가 절감 기술등의 연구에 힘쓰고 있다. 최근 냉간정밀단조 기술의 발전과 더불어 대량생산 체계의 소성가공법으로 변환되고 있는 추세이며, 기계부품의 소형화, 경량화, 고기능화 및 생산성의 향상이 절실히 요구되고 있다. 생산 기술 측면에서 절삭량을 최소화하여 소재의 낭비를 줄이고 고품질을 유지하는 생산 방법으로 정밀정형성형 기술이 각광을 받고 있다. 정밀정형성형 기술의 대표적인 것으로 폐쇄단조 기술[1-5]이 발전하였으며, 이 공법으로 생산할 수 있는 단조 제품으로는 베벨기어, 헬리컬기어, 스파이더, 인너 레이스, 크로스저널 등이 있다. 이러한 제품들을 정밀정형단조로 생산할 경우, 단조품 내·외부 결합방지 등의 장점이 있다.

신 부품이나 성형공정의 개발에서 소요되는 시간과 비용 절감을 위해 실제의 금형과 공구의 제작 이전에 해석기술의 접목을 통하여 소재의 유동 및 금형내부 채움 정도와 성형하중 등의 상세한 정보를 얻는 것은 중요하다. 최근 컴퓨터 발전과 더불어 소성유동에 관한 유한요소해석 기술이 급격하게 발전하여 각종 소성가공문제를 유한요소해석하여 비교적 좋은 해를 획득하게 되었다.

단조 공정 시뮬레이션 기술은 유한요소법과 유한체적법에 의하여 발전되어 왔다. 유한요소법은 유한체적법에 비하여 결과의 정확도와 신뢰성이 높다는 장점이 있다. 반면, 유한체적법은 복잡한 문제와 계산시간 측면에서 유리한 것이 현재로서는 장점이 되고 있다.

유한요소법을 이용한 단조 시뮬레이션 기술의 적용은 2 차원 축대칭 문제 중심으로 실시되어 왔으며, 2000 년대 초까지만 하더라도 3 차원 문제는 주로 2 차원 문제로 근사화하여 해결되어 왔다.

1. 경상대 대학원 기계공학과
2. 경상대 2단계 BK21 첨단기계항공급급인력양성사업단
3. (사)경상대 수송기계부품기술혁신센터
4. 진엔지니어링
교신저자: 경상대 기계항공공학부
E-mail: msjoun@gsnu.ac.kr

복잡한 단조 공정에 대한 유한요소해석 가능 여부는 요소망 자동생성 기술에 좌우될 수밖에 없다. 유한요소법의 장점인 결과의 정확성도 요소망의 품질에 좌우된다. 따라서 유한요소법에 바탕을 둔 단조 시뮬레이션 기술은 요소망의 자동생성 기술에 종속되어 있다고 해도 과언은 아니다.

이러한 까닭으로 많은 연구자들이 적응적 요소망 자동생성 기술에 관한 연구를 실시하였다[6~9]. 최근, Lee 등에 의해 특성경계를 살리는 표면요소망 생성 기법[10,11]과 금형과 소재 사이의 간섭을 고려한 적응적 요소망 재구성 기술[12]이 개발되었다. 그리고 접촉 경계와 유사한 패턴을 갖는 요소망 생성 기술을 개발하여 요소망생성의 지능화를 이루었다[13].

본 연구에서는 전술한 지능적 요소망 자동생성 기법을 근간으로 개발된 단조 공정 해석용 시뮬레이터인 AFDEX 3D 를 일반 열간단조 및 폐쇄냉간단조공정으로 생산되는 스파이더에 적용하고, 그 결과를 실제공정에서 생산되는 제품과 비교함으로써 지능적 요소망 자동생성 기법을 활용한 단조 시뮬레이션 기술의 중요성을 강조하고자 한다.

2. 단조공정 시뮬레이터 AFDEX3D

AFDEX3D 는 강소성 유한요소법에 바탕을 둔 범용 소성가공 공정 해석용 소프트웨어이다. 유한요소로는 육면체요소와 사면체요소를 사용하고 있으며, 육면체요소망은 사용자 개입에 의한 요소망재구성이 가능하며[14], 사면체요소망은 자동

소망재구성이 가능하다[12,15]. 육면체요소는 주로 변형 중 요소망재구성이 불필요한 압연 공정의 해석에 사용되고 있으며[16-18], 사면체요소는 단조 등과 같이 해석 중 요소망재구성이 필요한 소성가공 공정의 해석 목적으로 사용된다.

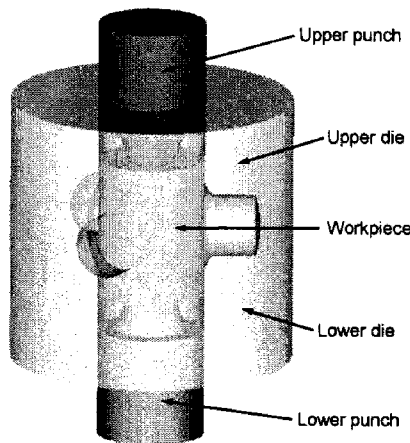
본 논문에서는 AFDEX3D 의 사면체요소 기능을 이용하여 성형 중 요소망재구성의 빈도가 비교적 높은 스파이더 단조공정을 해석하는데 목적을 두고 있으므로 사면체요소 기능을 중점적으로 설명하고자 한다.

성형 중 재료의 탄성변형은 무시되었다. 재료는 비압축성의 성질을 가지며, 등방성경화의 특성을 지니고 있는 것으로 가정하였다. 그리고 금형-소재 접촉면은 일정전단마찰법칙을 따르는 것으로 가정하였다.

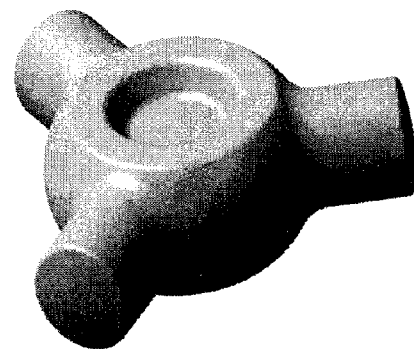
사면체요소의 사용으로 발생하는 비압축성 조건의 과구속 문제를 해소하기 위하여 MINI-요소[19,20]를 사용하고 있으며, 자동 요소망재구성은 최근 Lee 등[10-12]이 개발한 지능적 사면체요소망 재구성 기법을 이용하였다.

3. 스파이더 단조공정의 해석

스파이더 단조 공정 그 자체는 일반화되어 있다[21-25]. 그러나 스파이더 단조공정의 시뮬레이션은 결과의 정확도 검증이나 요소망의 품질평가 측면에서 매우 유용하다. 따라서 본 연구에서는 3축 스파이더 냉간폐쇄단조공정과 4축 스파이더 열간단조공정을 산업현장과 문헌에서 발굴하여 해석을 실시하였으며, 그 결과를 AFDEX3D 의 정량적 및 정성적 평가 목적으로 사용하였다.



(a) Workpiece and dies



(b) Product

Fig. 1 Geometries of workpiece, dies and product

3.1 3족 스파이더의 냉간폐쇄단조공정 해석

Fig. 1 에 해석 대상인 3족 스파이더 냉간폐쇄단조공정을 나타내었다. 이 제품은 복동링크유압식 폐쇄단조에 의하여 생산되며, Fig. 1 에서 보는 바와 같이 상형과 하형이 닫혀 움직이지 않는 상태에서, 즉 폐쇄가 이루어진 상태에서 상편치와 하편치가 소재를 가압하여 성형이 이루어진다. 폐쇄는 유압 시스템에 의하여 지탱되고, 상편치는 프레스의 하중으로, 하편치는 링크에 의하여 전달된 프레스의 하중으로 소재를 성형하게 된다.

해석에 사용된 주요 공정조건은 Table 1 과 같다.

Table 1 Process conditions of the three-leg spider forging process

Workpiece (mm)	∅ 30.0 × h 58.0
Friction factor	0.1
Upper punch (mm/sec)	-1.0
Lower punch (mm/sec)	1.0
Upper/ Lower dies (mm/sec)	0.0
Flow stress (MPa)	$\bar{\sigma} = 757.0\bar{\epsilon}^{0.20}$

본 연구에서는 대칭 조건을 이용하여 스파이더 전체의 1/6 에 대하여 해석을 수행하였다. 상하의 대칭 조건은 고려하지 않았다.

해석 중 요소망재구성 시에 사면체요소의 수가

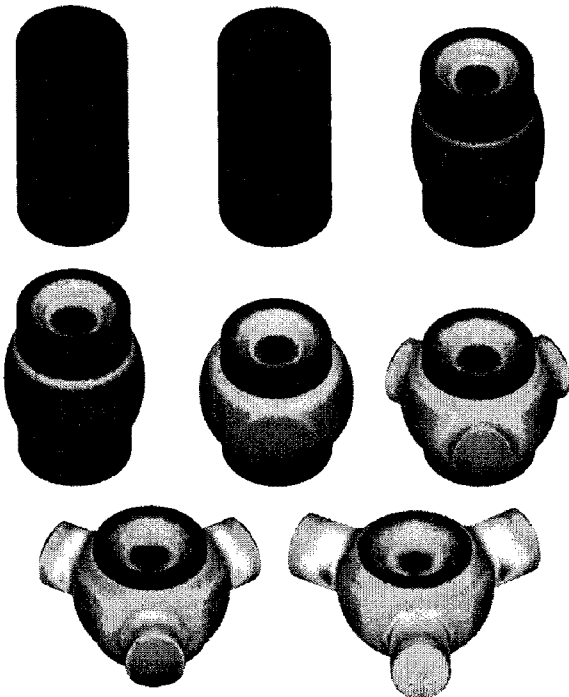


Fig. 2 Predictions of the three-leg spider forging Process

100000 개 내외가 되도록 하였다. Fig. 2 에 해석결과를 나타내었다. Fig.3 에서 보는 바와 같이 요소 밀도가 금형-소재 경계를 매우 잘 반영하고 있음을 알 수 있다. 이는 AFDEX3D 가 사용하고 있는 자동요소망생성의 기능이 특성경계와 경계조건을 매우 잘 표현하는 점의 효과로 볼 수 있다.

Fig. 4 은 시험생산 과정에서 추출한 공정의 흐름을 나타내고 있다. Fig. 2 와 Fig. 4 의 샘플링은 동일한 행정이 되도록 하였으므로, 각 단계에서 해석과 실험 결과를 비교해 보면, 전반적으로 유사함을 알 수 있다.

3.1 4족 스파이더의 열간단조공정 해석

Fig. 5 는 참고문헌[21]에서 발췌한 것으로 4족 스파이더를 생산하기 위한 열간단조 공정의 정보를 나타내고 있다. 이 공정은 플래쉬가 허용되는 일반 열간단조 공정에 속하므로 특히 플래쉬의 발생시 요소망재구성이 빈번히 발생하므로 자동요소망재구성 기능이 필수적이며, 요소망의 품질이 매우 중요한 문제에 속한다.

등은 공정으로 가정하였고, 상하의 대칭성은 고려하지 않았으며, 총 대칭면이 4 개이므로 전체의 1/8 을 해석 영역으로 간주하였다. 해석 중 사면체 요소의 수가 100000 개 내외가 되도록 하였다. 소재 및 공정 조건은 Table 2 와 같다.

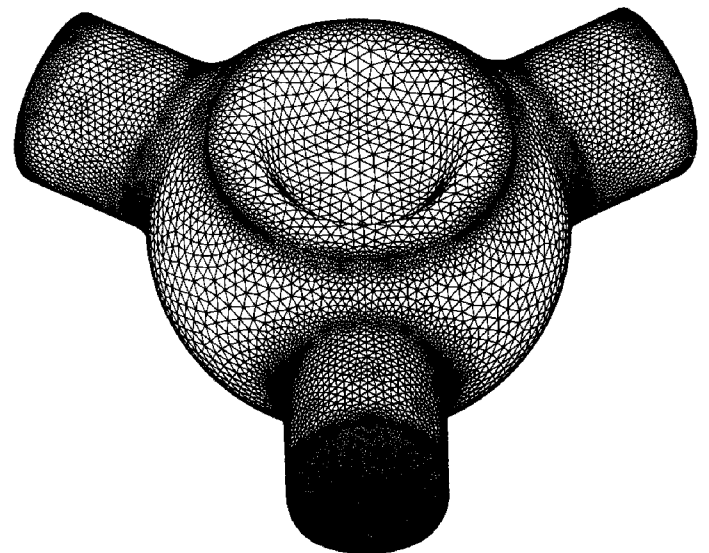
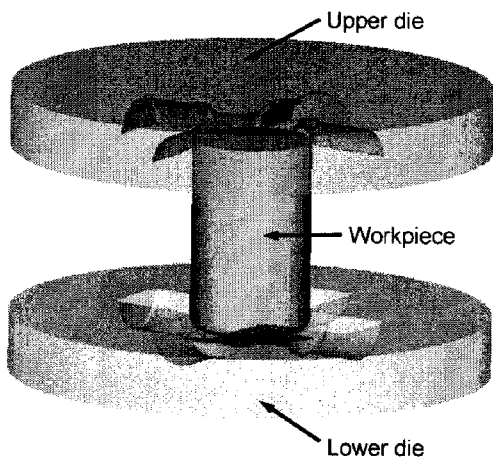


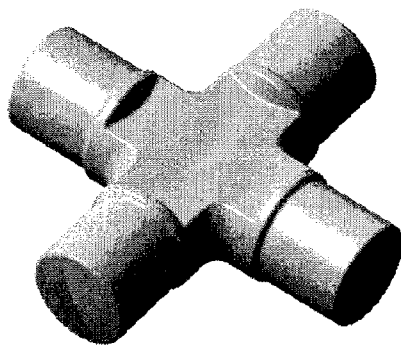
Fig. 3 Finite element mesh system at the final stroke



Fig. 4 Experiments of the three-reg spider forging process



(a) Workpiece and dies



(b) Product

Fig. 5 Geometries of workpiece, dies and product

Table 2 Process conditions of the four-legs spider forging process

Workpiece (mm)	∅ 38.0 × h 60.8
Friction factor	0.4
Upper die (mm/sec)	-100.0
Lower die (mm/sec)	0.0
Flow stress (MPa)	$\bar{\sigma} = 75.6\dot{\epsilon}^{0.188}$

Fig. 6 에 해석 결과를 나타내었다. 그림에서 보는 바와 같이 요소망이 변형 중 소재의 형상과 매우 유사한 패턴으로 나타내고 있다. 이는 AFDEX3D 의 요소망재구성 기능의 지능화의 결과이며, 해의 정확도에 매우 긍정적인 영향을 미치는 중요한 요소이다.

최종 변형형상을 참고문헌[21]의 실험결과와 비교한 결과, 잘 일치함을 확인하였다.

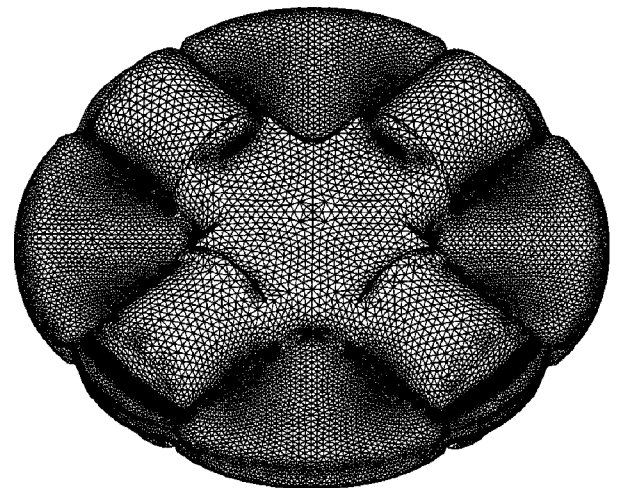


Fig. 6 Finite element mesh system at the final stroke

4. 결론

본 연구에서는 지능적 단조 시뮬레이션 기법에 근거한 단조 시뮬레이터 AFDEX 3D 를 스파이더 열간단조공정과 폐쇄단조공정에 적용하였으며, 해석 결과를 문헌과 직접실험을 통하여 획득한 실공정 결과와 비교하였다.

지능적인 요소망재구성의 기능으로 변형 중인 재료의 형상과 사면체요소망의 모양새가 매우 잘 어울리게 나타났다. 이는 요소망재구성 중에 특성경계와 경계조건을 고려한 결과이며, 해석결과의 신뢰도를 높이는데 매우 중요한 요소가 된다. 해

석결과와 실험결과와의 비교 결과, 변형 형상 측면에서 매우 잘 일치하는 것을 확인하였다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구결과로 수행되었으며, (사)경상대 수송기계 부품기술혁신센터의 장비를 활용하여 실시되었다.

참 고 문 헌

- [1] H. Yoshimura, K. Tanaka, 2000, Precision forging of aluminum and steel, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 98, pp.196~204.
- [2] K. Shi, D.B. Shan, W. C. Xu, Y. Lu, 2007, Near net shape forming process of a titanium alloy impeller, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 187~188, pp. 582~585.
- [3] P. Petrov, V. Perfilov, S. Stebunov, 2006, Prevention of lap formation in near net shape isothermal forging technology of part of irregular shape made of aluminium alloy A92618, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 177, No. 1~3, pp. 218~223.
- [4] K. Osakada, X. Wang, S. Hanami, 1997, Precision forging process with axially driven container, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 71, No. 1, pp. 105~112.
- [5] T. Nakano, 1996, Multi-action forming in cold forging - application of forging with fully enclosed dies, *JSAE*, Vol. 17, No. 4, pp. 449~449.
- [6] M. S. Shephard, 2003, Automated Simulation in Engineering Design, Proceedings of the 4th Symposium on Trends in Unstructured Mesh Generation, Albuquerque; New Mexico, U.S.A.
- [7] S. J. Owen, 2005, An introduction to mesh generation algorithms, Proceedings of the 14th International Meshing Roundtable, San Diego; California, U.S.A..
- [8] H. Borouchaki, P. Laug, A. Cherouat, K. Saanouni, 2005, Adaptive remeshing in large plastic strain with damage, *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, Vol. 63, No. 1, pp. 1~36.
- [9] G. Li, J. T. Jinn, W. T. Wu and S. I. Oh, 2001, Recent development and applications of three-dimensional finite element modeling in bulk forming processes, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 113, No. 1~3, pp. 40~45.
- [10] M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 1-On the plane, *Adv. Eng. Softw.*, doi:10.1016/j.advengsoft.2006.11.004
- [11] M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 1-On the surface, *Adv. Eng. Softw.*, doi:10.1016/j.advengsoft.2006.11.005
- [12] M.C. Lee, M.S. Joun, J. K. Lee, 2007, Adaptive tetrahedral element generation and refinement to improve the quality of bulk metal forming simulation, *Finite Elem. Anal. Des.*, Vol. 42, No. 10, pp. 788~802.
- [13] 이민철, 전만수, 2007, 삼차원 단조공정의 지능적 시뮬레이션, 한국소성가공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 155~159.
- [14] 고병호, 이민철, 제진수, 전만수, 2002, 로터폴 단조 공정의 정밀 삼차원 시뮬레이션 및 결과의 검증, 한국정밀공학회지, 제19권, 제12호, pp. 158~162.
- [15] M. C. Lee, M. S. Joun, 2006, Tetrahedral mesh generation by using the advancing-front method, the optimal surface triangular mesh generation technique, *Society of CAD/CAM Engineer*, Vol. 11, No. 2, pp. 138~147.
- [16] H. K. Moon, M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, Predicting the formation of polygonal defects with ring rolling using a rigid-viscoplastic finite element method, *Int. J. Mech. Sci.*, doi:10.1016/j.ijmecsci.2007.06.004
- [17] H. K. Moon, M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, An approximate, efficient finite element approach to simulation of a rotary forming process, its application to wheel-bearing assembly, *Finite Elem. Anal. Des.*, Accepted.
- [18] M. S. Joun, J. H. Cho, H. T. Kim, M. C. Lee, G. C. An, H. W. Kim, Three-dimensional rigid-plastic finite element analysis of an unsteady roll forming sequence, will be submitted to *Finite Elem. Anal. Des.*
- [19] D. N. Arnold, F. Brezzi, M. Fortin, 1984, A stable finite element for stokes equations, *Calcolo*, Vol. 21, No. 4, pp. 337~344.
- [20] 전만수, 이민철, 정석환, 권영삼, 2004, Mini-요

소를 이용한 소성가공 공정시뮬레이션 결과에 관한 고찰, 대한기계학회논문집 A권, 제28권, 제10호, pp. 1475~1482.

- [21] J. R. Cho, D. Y. Yang, 2000, Three-dimensional finite element simulation of a spider hot forging process using a new remeshing scheme, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 99, No. 1~3, pp.219~225.
- [22] R. Boussetta, T. Coupez, L. Fourment, 2006, Adaptive remeshing based on a posteriori error estimation for forging simulation, *Comput. Methods Appl. Mech. Engrg.*, Vol. 195, No. 48~49, pp. 6626~6645.
- [23] A. Cherouat, K. Saanouni, Y. Hammi, 2003,

Improvement of forging process of a 3D complex part with respect to damage occurrence, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 142, No. 2, pp. 307~317.

- [24] S. Jirathearanat, V. Vazquez, C. A. Rodríguez, T. Altan, 2000, Virtual processing – application of rapid prototyping for visualization of metal forming processes, *J. Mat. Proc. Technol.*, Vol. 98, No. 1, pp. 116~124.
- [25] I. H. Son, Y. T. Im, 2006, Localized remeshing techniques for three-dimensional metal forming simulations with linear tetrahedral elements, *Int. J. Numer. Methods Engrg.*, Vol. 67, No. 5, pp. 672~696.