

2차원 및 3차원 연계해석을 통한 다단 자동냉간단조 공정의 강소성 유한요소해석

이민철¹·전만수[#]

Rigid-Plastic Finite Element Analysis of Multi-Stage Automatic Cold Forging Processes by Combined Analyses of Two-Dimensional and Three-Dimensional Approaches

M. C. Lee, M. S. Joun

(Received September 14, 2007)

Abstract

We analyzed a sequence of multi-stage automatic cold forging processes composed of four axisymmetric processes followed by a non-axisymmetric process using rigid-plastic finite element based forging simulators. The forging sequence selected for an example involves a piercing process and a heading process accompanying folding or overlapping, which all make it difficult to simulate the processes. To reduce computational time and to enhance the solution reliability, only the non-symmetric process was analyzed by the three-dimensional approach after the axisymmetric processes were analyzed by the two-dimensional approach. It has been emphasized that this capability is very helpful in simulating the multi-stage automatic forging processes which are next to axisymmetric or involve several axisymmetric processes.

Key Words : Multi-stage Automatic Cold Forging Processes, Forging Simulators, Folding, Overlapping, Two-dimension, Three-dimension

1. 서론

1990년대에 우리나라를 비롯한 중진국의 단조 산업이 급성장하였다. 특히 우리나라는 자동차와 전자산업 등 단조품 수요 산업의 눈부신 발전으로 양적으로 큰 발전이 이루어졌다. 단조는 품질과 가격을 동시에 만족시킬 수 있는 공법이고, 단조가 가능한 일반 부품생산 분야에서 단조보다 경쟁력이 있는 생산기술이 사실상 없다. 그 원인은 소재기술, 포머단조 기술, 정밀폐쇄단조 기술 등이 발전하여 고부가가치 제품 생산과 대량 생산에 의한 가격 경쟁력의 확보가 가능해졌기 때문이다.

최근 우리나라의 단조산업에서는 정밀단조 및 초소형 단조, 대량고속자동단조 또는 포머단조, 대형 단조품의 생산을 위한 자유단조 등의 발전이 괄목할만하다. 전술한 단조산업 특히 포머단조, 즉 다단 자동단조(multi-stage automatic forging)의 부흥을 위해서 필수적으로 확보해야 하는 기술은 대량생산을 고려한 공정개발 기술이다. 이 기술은 시행착오에 의한 방법으로는 사실상 확보가 불가능하다. 이러한 이유로 전통적인 자동차 및 생산장비 선진국들만이 이 분야에서 경쟁력을 갖추고 있는 실정이다. 왜냐하면 공정개발을 위해서는 각 공정 간의 높은 연계성, 생산량, 품질, 소재 등 여러 변수들을 종합적으로 고려해야 하는 어려운

1. 경상대학교 기계항공공학부 박사후 과정
교신저자: 경상대학교 기계항공공학부,
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

점이 있기 때문이다. 그리고 공정개발시 불가피하게 발생하는 설계 실패는 큰 비용을 수반하기 때문이다. 이러한 문제의 해결에 도움을 주기 위하여 학계에서는 전문가 시스템과 CAD/CAM 기술을 활용한 공정설계 시스템의 개발에 많은 노력을 기울였으나[1~5], 그 결과는 산업현장에서의 활용 측면에서 볼 때 기대 수준에 미치지 못하고 있다.

단조 시뮬레이션 기술[6~9]은 최근에 크게 발전하여 국내의 많은 기업체에서 활용하는 단계에 이르렀다. 단조 시뮬레이션 기술은 1990년대 후반부터 2차원 및 축대칭 공정의 해석 목적으로 사용되다가 최근에는 3차원 공정의 해석 목적으로 활용이 확산되고 있다. 문제는 3차원 해석 기술이 2차원 해석 기술에 비하여 정교함, 즉 결과의 정확도가 떨어지고, 입력 데이터의 작성과 해석결과 의 획득 및 평가에 많은 비용과 시간이 소요된다는 점이다.

한편, 다단 자동단조 공정은 단조 시뮬레이션 기술이 절실한 분야이면서 공정간의 높은 연계성으로 인하여 시뮬레이션에 소요되는 노력이 훨씬 많다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 저자들은 1990년대 중반에 자동 단조 시뮬레이션 기능이 강조된 단조 시뮬레이터 AFDEX 2D[7]를 개발하여 관련 업체로부터 많은 호응을 받은 바 있다. 특히 다단 자동냉간단조 공정은 매우 정교하게 작업되고 자동화가 기본이기 때문에 공정설계가 상대적으로 정교하다. 자동단조 품은 대개 축류가 많으며 5단 이상의 자동단조기에서 고속으로 생산되기 때문에 정교한 해석이 필요하다. 그리고 축대칭 제품이 주류를 이루고 있으며, 볼트와 같이 전반부의 공정은 축대칭이며 최종 1-2 단에서 3차원 형상을 성형하는 경우가 대부분이다. 따라서 축대칭 공정을 수반하는 비축대칭류의 다단 자동단조에서 2차원 해석과 3차원 해석의 연계에 의한 정교한 단조 시뮬레이션 기술이 실용적 관점에서 매우 중요하다.

본 연구에서는 피어싱 공정(piercing process)과 소재의 접힘(folding)이 발생하는 3차원 공정이 포함된, 단조 시뮬레이션 관점에서 비교적 난공정에 속하는, 5단 자동냉간단조 공정을 2차원과 3차원 연계해석 기법으로 해석해 봄으로써 포머단조 공정해석상의 특징과 확보된 기능의 유용성을 확인하고자 한다.

2. 2차원 및 3차원 연계방법

본 장에서는 2차원 삼각형/사각형요소 및 3차원 사면체/육면체요소의 특성에 관하여 다룬다. 특별한 언급이 없이 사용한 요소 또는 요소망은 선형 삼각형/사각형요소와 사면체/육면체요소를 의미한다.

2.1 2차원 및 3차원 요소의 특성비교

역학적 관점에서 소성가공 문제는 지배방정식인 평형방정식, 응력과 변형률속도의 관계를 규정하는 구성방정식, 속도장과 변형률속도의 관계를 규정하는 기하학적인 관계식, 비압축성 조건, 경계조건 등으로 구성된다[10]. 2차원 해석과 3차원 해석의 근본적인 차이는 비압축성 조건을 처리하는데 있어 발생하는 수치적 문제로 인하여 발생한다.

소성가공 해석을 위하여 주로 사용하는 유한요소법에서는 비압축성 조건 처리를 위하여 라그랑지(Lagrange) 변수법과 벌칙기법(penalty method)이 사용되고 있다. 2차원 해석과 3차원 해석 시 비압축성 처리로 인하여 발생하는 문제점을 요소망의 종류에 따라 비교하면 다음과 같다.

2차원에서 사각형요소를 사용할 경우 비압축성 조건과 관련된 항에 한 차수 낮은 수치적분(reduced integration)을 실시하면 수치적 문제를 발생시키지 않으며, 각 요소에서 평균적으로 비압축성 조건을 만족하는 결과를 얻게 된다. 왜냐하면 2차원에서 사각형요소는 각각의 요소가 독립적으로 부피변화가 발생하지 않아야 한다는 조건으로부터 유한요소해석 시에 자유도를 하나 감소시키지만, 총 요소 수가 각 절점당 두 개의 자유도를 발생시키는 총 절점 수보다 작기 때문이다. 반면에 2차원에서 삼각형요소를 사용할 경우에는 총 요소 수가 총 절점 수보다 많으며, 총 요소 수가 총 절점 수보다 2배 가까이 많아질 수도 있다. 이 경우 경계에서 자유도가 구속되는 절점들과 비압축성 조건을 만족시키기 위하여 각 요소마다 하나의 구속조건이 만들어진다는 점을 고려하면, 사실상 결정해야 할 미지수, 즉 자유도가 없게 된다. 따라서 과구속 문제로 인하여 신뢰성이 있는 해를 얻을 수 없게 되는 것이다.

3차원의 경우, 육면체요소는 2차원에서 사각형요소와 동일한 성질을 갖는다. 즉 비압축성 조건으로 인한 수치적 문제가 발생하지 않는다. 반면에 사면체요소는 2차원에서 삼각형요소와 동일한 성질을 갖는다. 즉 비압축성 조건으로 인한 수치

적 문제가 불가피하게 발생하게 된다.

2.2 요소망 생성방법 비교

2차원의 경우 사각형요소망의 자동생성 문제가 해결되어 있으므로 특별한 경우를 제외하고는, 굳이 삼각형요소를 사용할 이유가 없다. 그러나 3차원의 경우, 비록 육면체요소가 비압축성 조건으로 인한 수치적 문제를 발생시키지 않지만 요소망 자동생성은 아직까지 숙제로 남겨져 있는 실정이다. 특히 단조와 같이 예리한 모서리가 존재하는 임의 형상에 대한 육면체요소망의 자동생성은 쉬운 일이 아니다. 반면 사면체요소망의 자동생성은 해결되어 있는 실정이며, 특히 임의 형상으로 성형되는 복잡한 단조품의 관점에서 볼 때 육면체요소망에 비하여 유리한 위치에 있다. 이러한 이유로 3차원 단조 시뮬레이터에서는 사면체요소망을 선호하고 있는 것이다.

2.3 접근방법

최근에 삼각형 및 사면체요소의 비압축성 처리로 인하여 발생하는 수치적 문제를 해결하기 위하여 MINI-요소[11]가 개발되었으며, 상용 S/W[12, 13]에서 이 요소를 활용하고 있는 실정이다. 그러나 MINI-요소로 수치적 문제는 해결되었지만, 상세한 수치적 특성이 밝혀진 바가 없다. 최근에 저자들은 선행연구[13]에 통하여 MINI-요소를 이용한 결과를 사각형요소나 육면체요소를 이용한 결과와 비교하였으며, MINI-요소 결과의 신뢰성이 사각형요소나 육면체요소에 비하여 다소 떨어짐을 확인한 바 있다.

3차원 해석은 아직 계산 시간 측면에서도 문제가 있다. 컴퓨터의 발전으로 인하여 2차원 해석은 계산시간의 부담을 느끼지 않고 손쉽게 활용할 수 있는 단계에 이르렀으나, 아직까지 3차원 해석은 일반 개인용 컴퓨터로는 계산시간의 부담이 클 수밖에 없다.

3차원 해석을 통하여 2차원 해석과 같은 정확도를 얻기 위해서 요소의 크기를 2차원 해석시 사용한 요소의 크기와 동일하게 할 경우, 계산해야 할 미지수가 수십 배로 증가하게 되어, 계산 시간 역시 수십 배 또는 수백 배 많이 소요되게 된다.

따라서 가능한 문제에 대하여 2차원과 3차원 해석 기능을 연계한 해석 기술[14,15]이 실용적 측면에서 매우 유용하며, 특히 포머단조에서 이 기능은 강력하게 그 효력이 발휘될 것이다.

3. 3차원 해석

3.1 입력데이터 생성

본 논문에서는 전술한 연계해석을 위하여 2차원 해석에서는 사각형요소를 사용하였고, 3차원 해석에서는 사면체요소를 사용하였다. 3차원 해석을 수행하기 위하여 2차원 해석결과를 읽어 요소망을 회전시켜주거나 압출시켜서 육면체요소망으로 이루어진 3차원 해석결과로 만들어 3차원 해석결과 파일의 형식으로 기록(Fig. 3 참조)한 후, 추가적인 3차원 해석에 필요한 금형 등의 해석 정보를 입력하여 실행함으로써 2차원 및 3차원 연계해석을 수행하였다. 3차원 해석의 시작과 함께 입력으로 취한 육면체요소망은 사면체요소망으로 자동 재구성(automatic remeshing)하였다.

3.2 요소망재구성

복잡한 단조 공정에 대한 유한요소해석 가능 여부는 요소망 자동생성 기술에 좌우된다. 뿐만 아니라 유한요소법의 장점인 결과의 정확성과 유한요소해석의 생산성 또한 고품질의 요소망 자동생성 기술과 직결되어 있다.

최근에 본 연구의 저자들은 특성경계를 고려한 표면 요소망 자동생성 기법[16,17]과 금형과 소재 사이의 간섭을 고려한 적응적 요소망 재생성 또는 자동생성 기술[18,19]을 개발하였다. 또한 요소망 재생성시에 단조공정 시뮬레이션 중 금형의 이동으로 인하여 변형된 소재의 경계조건을 고려한 지능적 요소망 자동생성 기법[20]을 개발한 바 있다.

요소망 자동생성에 관한 상세한 사항은 참고문헌으로 대신한다.

3.3 접힘처리

본 연구에서 다루는 해딩공정(heading process)은 절삭공정과 유사한 공정으로써 성형해석 시 요소망의 접힘이 빈번하게 발생한다. 따라서 본 연구에서는 이웃한 삼각형요소간의 외각이 입력된 각도보다 작은 경우에는 접힘이 발생하는 것으로 판단하였다. 이때 접힘이 발생하는 삼각형은 접합이 발생하는 것으로 간주하여 요소망 재구성 과정에서 제거하였다[14]. 그리고 요소망 재구성시 삼각형의 품질, 면적 및 모서리 길이가 입력된 값보다 작은 경우에는 삼각형의 모서리를 반복적으로 제거함으로써 고품질의 요소망을 생성하였다.

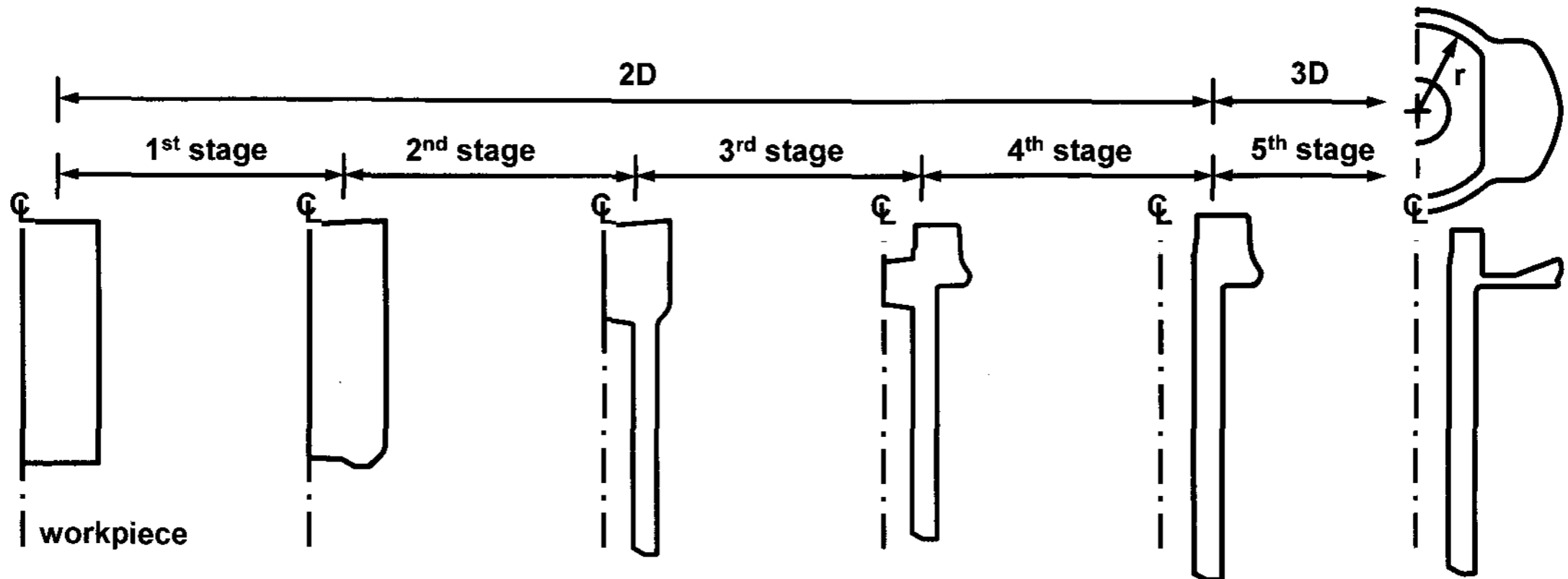


Fig. 1 Schematic descriptions of the multi-stage automatic cold forging process

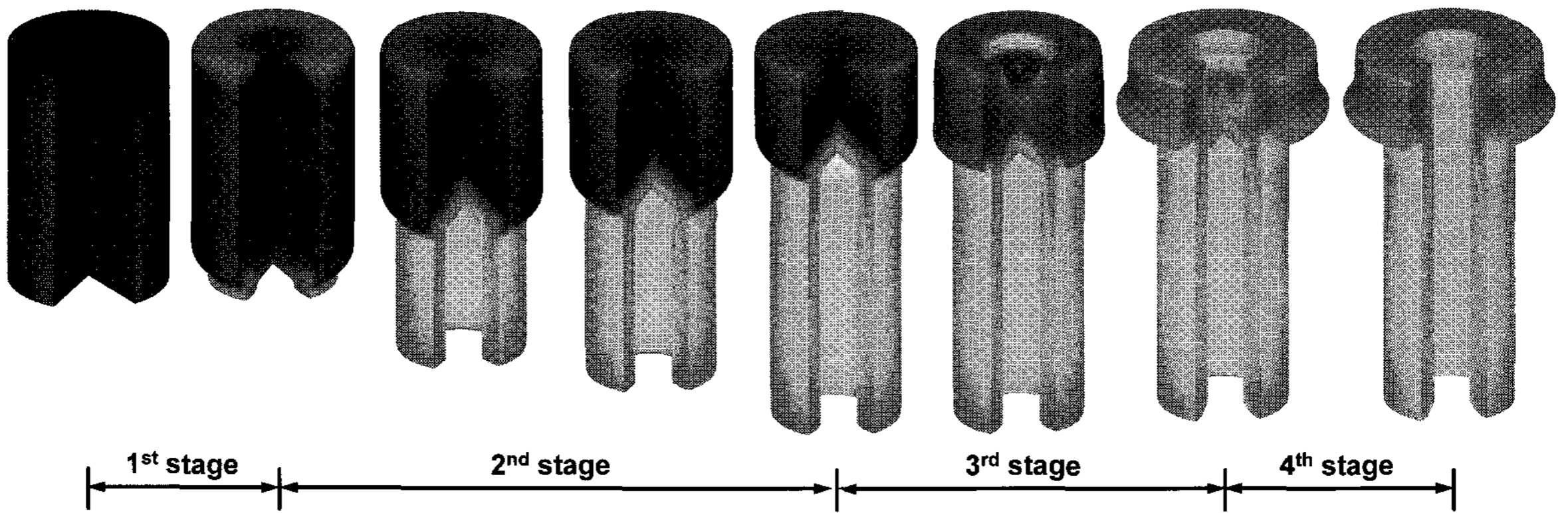


Fig. 2 Two-dimensional results of the process

4. 적용예제

본 논문에서 사용한 연계해석 기법의 적용 대상 공정을 Fig. 1에 나타내었다. 이 공정은 총 5단 공정이며, 4단 공정까지 축대칭 공정이다. 제4단 공정은 피어싱 공정이며, 제5단은 해딩 공정으로써 공정 중에 최종적으로 트리밍(trimming)될 곳에 접힘이 발생하여 해석이 용이하지 않은 공정이다.

제1단에서 제4단까지는 AFDEX 2D를 이용한 축대칭 해석을 실시하였으며, 제5단은 AFDEX 3D를 사용하여 3차원 해석을 실시하였다. 대칭성을 고려하는 전체의 해석 영역의 1/4만을 해석영역으로 간주하였다. 2차원의 해석 시에 사각형요소의 수가 1500개 내외가 되도록 하였고, 3차원 해석 시에 사면체요소의 수를 80000개 내외가 되도록 하였다. 해석에 사용된 공정조건은 다음과 같다.

- Flow stress: $\bar{\sigma} = 617.0 \bar{\epsilon}^{0.25}$ MPa
- Friction factor: 0.1

2차원 축대칭 해석결과를 3차원으로 가시화하여 Fig. 2에 나타내었다. Fig. 3은 5단 해딩 공정해석을 위하여 2차원 축대칭 해석결과를 3차원 입력 데이터로 변환하는 과정을 개념적으로 나타내고 있다. Fig. 4는 3차원 해석결과이다. 그림에서 보는 바와 같이 고품질의 적응적 요소망이 생성되었음을 알 수 있다.

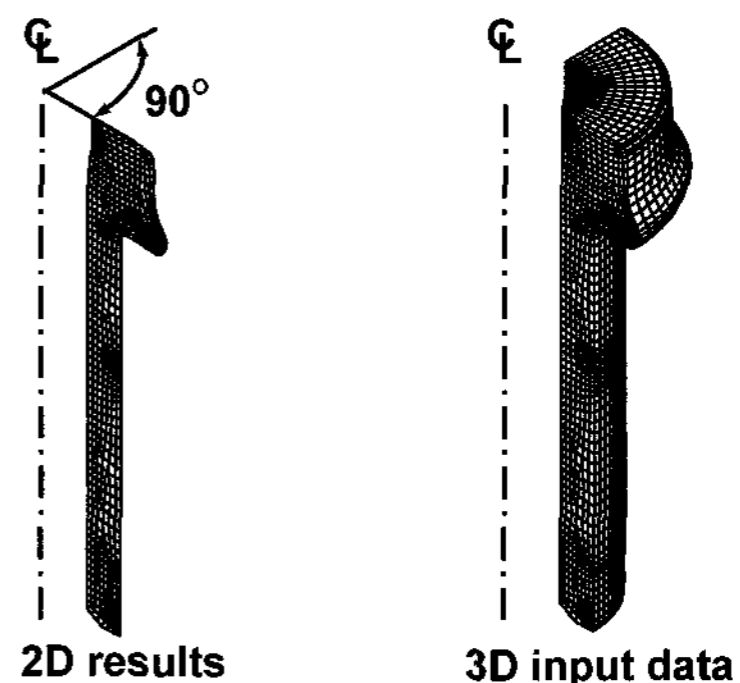


Fig. 3 Transfer the results from 2D to 3D

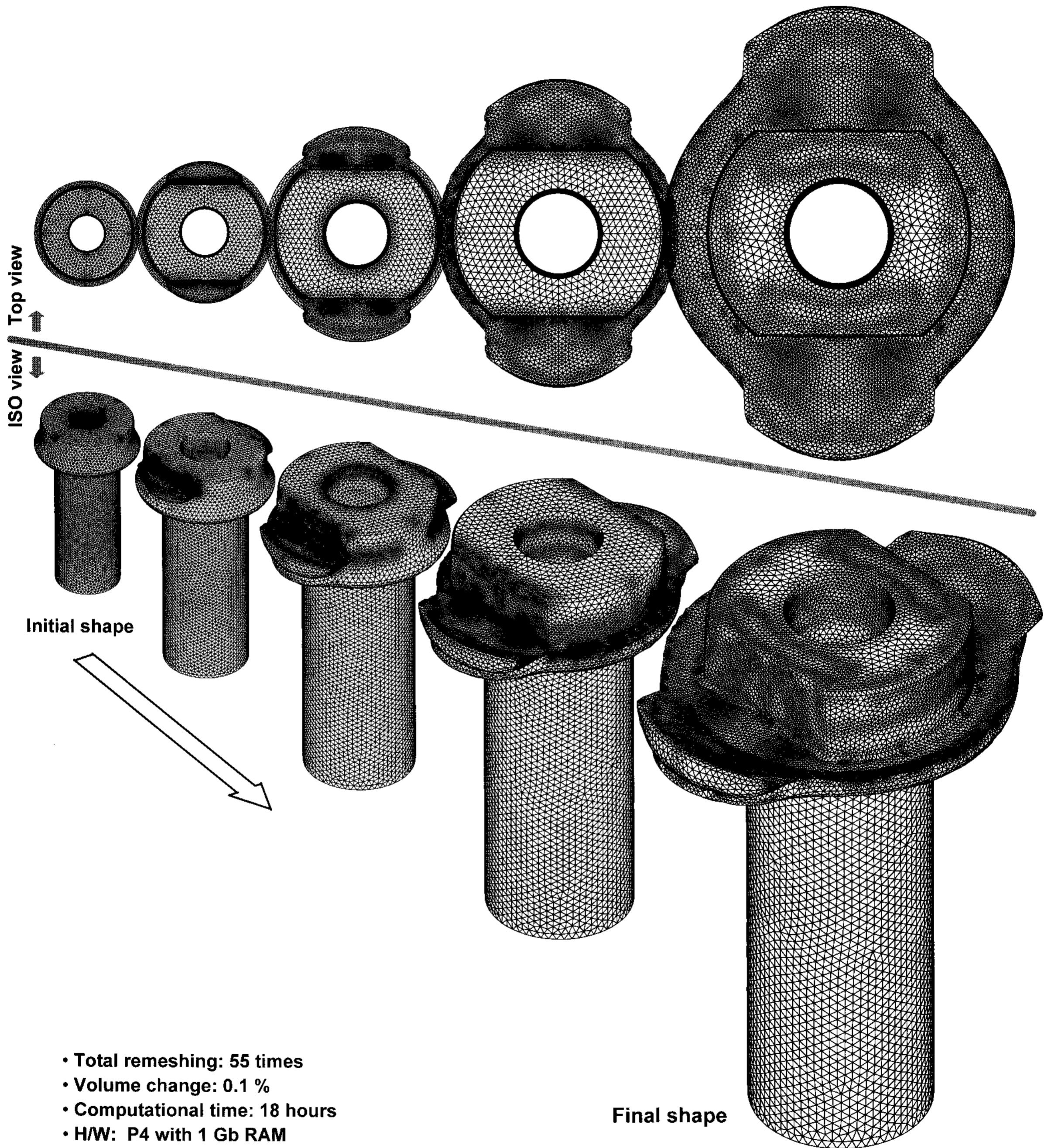


Fig. 4 Three-dimensional results of the process

5. 결 론

본 논문에서는 2 차원 해석과 3 차원 해석의 연계해석의 중요성이 다단 자동단조 공정의 단조 시뮬레이션의 관점에서 강조되었으며, 접근 방법이 제시되었다.

적용 예제로 피어싱 공정과 접히는 부분이 있기 때문에 해석의 관점에서 볼 때 냉간 포머단조 공정으로써 매우 어려운 공정을 선택하였으며, 비교적 신뢰성이 높은 결과를 안정적으로 얻게 해 줌을 공정 개발 적용을 통하여 확인하였다.

고품질의 적응적 요소망을 사용함으로써, 특성 경계 및 국부적인 영역의 형상변화를 더욱 정확하게 예측할 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 지원으로 수행되었음.

참 고 문 헌

- [1] P. Barimi, W. A. Knight, 1988, Computer aided cold forging process design: a knowledge-based system approach to forming sequence generation, Ann. CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 243~246.
- [2] W. Makosch, K. Lange, 1988, Application-oriented cad system for multi-stage tooling design for cold forging, Proc. of the 16th NAMRC, pp. 63~70.
- [3] K. Osakada, T. Kado, G. B. Yang, 1998, Application of AI-technique to process planning of cold-forging, Ann. CIRP, Vol. 37, No. 1, pp. 239~242.
- [4] Q. C. Hsu, R. S. Lee, 1997, Cold forging process design based on the induction of analytical knowledge, J. Mater. Process. Technol., Vol. 69, No. 1-3, pp. 264~272.
- [5] C.S. Im, S.R. Suh, M.C. Lee, J.H. Kim, M.S. Joun, 1999, Computer aided process design in cold-former forging using a forging simulator and a commercial CAD software, J. Mater. Process. Technol., Vol. 95, No. 1-3, pp. 155~163.
- [6] <http://www.deform.com>
- [7] <http://engine.gsnu.ac.kr/~msjoun/afdex.htm>
- [8] http://www.mscsoftware.co.kr/product_02/product7_6a.asp
- [9] <http://www.cpmgmbh.de/>
- [10] M. S. Joun, H. I. Lee, 200, From continuum mechanics to finite element method, Prentice Hall
- [11] D.N. Arnold, F. Brezzi, M. Fortin, 1984, A stable finite element for stokes equations, Calcolo, Vol. 21, No. 4, pp. 337~344.
- [12] G. Li, J.T. Jinn, W.T. Wu, S.I. Oh, 2001, Recent development and applications of three-dimensional finite element modeling in bulk forming processes, J. Mater. Process. Technol., Vol. 113, No. 1-3, pp. 40~45.
- [13] M. S. Joun, M. C. Lee, S. H. Chung, Y. S. Kwon, 2004, Consideration on the results of metal forming simulation based on MINI-elements, KSME (A), Vol. 29, pp. 1475~1482.
- [14] C. MacCormack, J. Monaghan, 2002, 2D and 3D finite element analysis of a three stage forging sequence, J. Mater. Process. Technol., Vol. 127, No. 1, pp. 48~56.
- [15] A. Behrens, H. Schafstall, 1998, 2D and 3D simulation of complex multistage forging processes by use of adaptive friction coefficient, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80-81, No. 1, pp. 298~303.
- [16] M. C. Lee, M. S. Joun, 2008, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 1- On the plane, Adv. Eng. Softw., Vol. 39, No. 1, pp. 25~34.
- [17] M. C. Lee, M. S. Joun, 2008, Adaptive triangular element generation and optimization-based smoothing, Part 2- On the surface, Adv. Eng. Softw., Vol. 39, No. 1, pp. 35~46.
- [18] M. C. Lee, M. S. Joun, June 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.
- [19] M. S. Joun, M. C. Lee, 1997, Quadrilateral finite-element generation and mesh quality control for metal forming simulation, Int. J. Numer. Methods Eng., Vol. 40, No. 21, pp. 4059~4075.
- [20] M. C. Lee, M. S. Joun, 2007, Intelligent simulation of three-dimensional forging process, Proc. of KSTP 2007 Spring Annual Meeting, KAIST, Daejeon, May 10-11, pp. 155~159.