

인위적 체적력 기법에 의한 후방 가압 및 인장을 고려한 인발공정의 정밀 시뮬레이션 기술

엄재근¹ · 심상현² · 조재민² · 김홍석³ · 전만수[#]

Precision Simulation of Drawing Processes Considering Back Pressing or Tension with Artificial Body Force Scheme

J. G. Eom, S. H. Shim, J. M. Cho, H. S. Kim, M. S. Joun

(Received August 25, 2011 / Revised September 5, 2011 / Accepted September 19, 2011)

Abstract

An artificial body force method is presented to accurately simulate drawing processes in which back pressing is exerted. A rigid-plastic finite element method is applied together with a numerical scheme to eliminate the numerically incurred plastic deformation in rigid or elastic region, which significantly influences simulation results because it eventually changes reduction of area in drawing. Back tension or compression is applied by body force at the rear part of material to obtain numerically stable solution. Two typical examples are shown, a drawing process with back tension applied and a tube drawing with a fixed plug and back pressing applied.

Key Words : Precision Simulation, Drawing, Tube Drawing, Back Pressing, Back Tension

1. 서 론

인발공정은 전통적인 체적소성가공 공정의 한 종류이며, 단면이 일정한 선재, 봉재, 튜브뿐만 아니라, 단면 형상이 다른 장축의 부품 제조 목적으로도 널리 행하여지고 있다. 그리고 단조공정, 특히 자동다단단조공정에서 필요로 하는 초기소재 반경을 얻는 목적으로도 행하여지고 있다. 선재 인발공정은 일반적으로 다단으로 이루어져 있고, 각 단과 단 사이에 인장력이 작용하도록 한다. 튜브 공정도 마찬가지이다. 내경의 정밀도를 얻기 위하여 맨드릴(mandrel)이나 플러그(plug)를 사용하며, 플러그는 고정될 수도 있고, 그렇지 않고 가해진 힘에 의하여 평형상태를 유지하도록 하는 경

우도 있다.

축대칭 인발공정은 기하학적으로 상대적으로 단순하기 때문에 이러한 주요 인자의 영향의 분석을 위한 해석적 접근이 가능하며 최근에는 유한요소법의 응용이 대세를 이루고 있다[1].

인발공정의 특징은 출구에서 탄성상태의 소재에 가해진 인장력과 입구에서 탄성상태의 소재에 가해진 인장력 또는 압축력에 의하여 금형과 소재의 접촉면에 압축력을 발생시키며 이 압축력과 탄성상태의 소재에 가해진 인장력에 의하여 소성변형이 발생한다는 점이다. 비구속 압출 문제를 제외한 대부분의 소성가공 방식은 직접 금형으로 재료에 소성변형을 야기시킨다는 점에서 인발가공 방식과 근본적으로 다르다.

1. (사)경상대수송기계부품기술혁신센터
2. 경상대학교 기계공학과 대학원
3. 대구대학교 자동차산업기계공학부
교신저자: 경상대학교 기계항공학부/공학연구원,
E-mail: msjoun@gnu.ac.kr

이러한 문제는 공정 시뮬레이션 상에 매우 큰 차이를 발생시킨다. 인발공정과 비구속 압출공정 문제를 제외한 대부분의 문제에서 공정 시뮬레이션에서 발생하는 수치적 소성변형은 공학적인 관점에서 문제가 되지 않을 정도로 작고, 중요한 것은 그 변형이 공정의 주요 거동특성에 영향을 주지 않는다는 점이다. 그러나 인발공정과 같이 탄성영역의 변형이 재료의 거동특성, 즉 인발공정에서 인발비를 좌우하는 경우에는 상황이 달라진다.

대부분의 경쟁력을 갖춘 인발공정에서 탄성영역에는 소성영역 직전의 한계응력이 작용한다. 이것은 공정 수, 즉 제조원가와 직결되기 때문이다. 따라서 인발공정에서 상대적으로 수치적 변형량이 클 수밖에 없다. 이 문제는 개방압출에서도 마찬가지로 발생한다[2].

이러한 이유로 최근들어 많은 연구자[3~8]들이 탄소성 유한요소법을 사용하였다. 그러나 다수의 연구자들이 공학적 관점에서 이러한 문제를 무시하고 강소성 유한요소법으로 인발공정의 유한요소해석을 실시하였다[1,9~13]. 물론 두 방법이 모두 장단점을 지니고 있으므로 상호 보완적으로 발전해야 한다고 사료된다.

본 논문에서는 강소성 유한요소법을 사용하되, 강소성 유한요소법이 가지고 있는 탄성영역에서 발생하는 수치적 소성변형 문제를 인위적으로 고려하는 수치적 방법을 사용하고, 후방의 압축력 또는 인장력을 부과하는 방식, 즉 인위적 체적력 부과 기법(artificial body force method)을 제안하여 사용함으로써 공정에 관한 시뮬레이션의 신뢰도를 제고시키려고 한다.

2. 해석적 관점에서 인발공정의 특징

인발공정의 주요 변수는 소재의 유동특성, 단면 감소율, 마찰조건 및 금형의 각도, 후방 압축력 또는 인장력 등이다.

인발공정의 해석 관점에서 볼 때, 이러한 요소들은 해석 결과에 직접적으로 영향을 미친다. 타 공정에 비하여 이러한 변수에 가장 민감하게 변하는 것이 인발과 개방압출공정이다. 따라서 이러한 인자에 대한 상세한 고찰이 선행되어야 할 필요가 있다. 특히 강소성 유한요소법을 사용할 경우, 문제에 따라서는 이론의 한계 범위 밖에 존재할 수 있기 때문에 철저한 분석이 선행되어야 한다.

2.1 재료의 물성치

인발공정은 기본적으로 재료에 작용하는 인장력에 의존하는 공정이므로 재료의 물성치를 인장시험에 의하여 획득하는 것이 바람직하다. 그러나 대부분의 연구자들은 압축시험에 의하여 획득된 강성계수-변형경화지수모델(또는 Ludwik-Hollomon 모델)을 사용하고 있다. 이 모델은 실제의 유동응력을 표현하는데 한계가 있을 수밖에 없으며, 특히 인발공정과 같이 성형하중이 재료를 통하여 소성변형 영역에 전달되는 공정의 정밀해석에는 부적합하다[14]. 따라서 본 연구에서는 인장시험[15]을 통하여 획득한 SCM435 소재의 유동응력 함수를 사용하였다.

2.2 강소성의 가정과 수치적 문제

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계 S 로 나누어지며, 경계 S 는 표면력(traction) 이 $t_i^{(n)} = \bar{t}_i^{(n)}$ 로 주어진 S_t , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 S_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 압축력이 작용하는 금형과 소재의 접촉면에서의 법선속도는 동일하다. 즉, S_c 에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises 항복이론과 관련 유동법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다.

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 와 정수압 p 를 구하자는 것이며, 평형방정식, 응력-변형률속도 관계식, 속도-변형률 관계식, 비압축성 조건식, 경계조건식 등으로 구성된 경계치 문제[1]로 수식화된다. 강소성 이론에서는 다음과 같은 변형률 관계식을 사용한다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\epsilon}} \bar{\epsilon}'_{ij} \quad (1)$$

여기서 $\bar{\epsilon}'_{ij}$ 는 소성변형에 의한 변형률속도를 의미한다. 즉, 탄성변형은 발생하지 않는다고 가정한다. 그런데 이 가정하에서 탄성변형 영역의 유효 변형률속도 $\bar{\epsilon}'$ 는 영이 된다. 이로 인하여 수치적 문제가 발생하게 된다.

강소성 유한요소법에서 전술한 수치적 문제를 해결하기 위하여 허용최소유효변형률속도를 일반적으로 사용한다. 이 수치는 사용자에게 의하여 입력될 수도 있고 프로그램이 자체적으로 생성하는

경우도 있을 수 있다. 이 수치가 작으면 작을수록 이론에 가깝게 되지만, 즉 탄성영역과 소성영역의 구분이 명확하게 되지만, 전술한 바와 같이 수치적 문제를 일으킬 수 있다. 만약 어떤 질점에서 탄성영역에 속하거나 유효변형률속도가 허용최소 유효변형률속도보다 작을 경우에 식 (1)에서 σ 값을 허용최소유효변형률속도로 간주하고 있다[16]. 다시 말하면, 탄성영역에서 식 (1)의 분모는 상수가 되며, 식 (1)의 조건은, 재료의 유동응력이 변형률에만 의존적일 경우, 비압축성 재료의 후크법칙과 동일하게 된다. 물론 이 후크법칙은 실제의 재료의 성질을 반영하는 것이 아니라 대다수의 문제에서 공정 적용상 문제를 발생시키지 않을 정도로 미미한 영향력을 가진 인위적인 후크법칙이다. 문제는 강소성 유한요소법에서 구해진 절점속도를 바탕으로 절점의 새로운 위치의 계산 시에 인위적 탄성변형의 배제가 불가능하며, 이전 해석 스텝의 응력정보를 사용하지 않는다는 점에 있다.

따라서 강소성 유한요소법에서는 전술한 허용최소 유효변형률속도의 도입으로 인하여 탄성변형 영역에서의 인위적 소성변형은 불가피하다. 대부분의 경우, 이러한 소성변형량은 매우 작은 값으로 공차범위 이내에 존재하기 때문에 문제가 되지 않지만, 장축 개방압출공정과 인발공정과 같이 인위적인 소성변형량이 공정의 주요 변수인 단면감소율의 변화를 초래하게 된다. 이러한 경우는 실제 공정과 해석 결과는 다를 수밖에 없다[2]. 이러한 문제를 인위적으로 피하기 위하여 무마찰 금형을 사용하는 경우도 있으나, 이는 전혀 다른 문제의 결과로 연결될 수 있다. 물론 허용최소유효변형률속도를 작게 하면, 그 인위적인 소성변형량을 줄일 수 있으나, 이 값을 충분히 작게 하면 해의 수렴성이 크게 나빠지고, 유한요소해를 얻지 못하게 된다.

본 연구에서는 해의 효율적 및 안정적 확보가 가능한 강소성 유한요소법을 사용하되, 선행연구 [2]에서 제시된 탄성영역에서 발생하는 수치적 소성변형 문제를 인위적으로 고려하는 수치적 방법을 사용하였다.

2.3 마찰

마찰은 개방압출과 인발공정에서 매우 중요하다. 한계 단면 감소율의 인발공정에서 마찰조건에 따라 실험 및 해석 결과는 크게 달라질 수 있다. 마찰 현상은 불확실성이 다소 있지만, 대체적으로 저면압에서는 Coulomb 마찰법칙이 효과적이라고

알려져 있다. Coulomb 마찰법칙이 고면압에서 문제가 있다고 해서 고면압에서 일정전단마찰법칙이 바람직하다는 주장도 있으나, 유한요소법에서 마찰법칙과 함께 사용하는 순화함수[16]가 고면압에서 Coulomb 마찰법칙이 안고 있는 문제를 자연적으로 해결해 주기 때문에 사실상 문제가 되지 않는다[17]. 따라서 본 연구에서는 Coulomb 마찰법칙을 사용하였다.

3. 가상체적력기법과 적용 예제

흔히 인발공정에서 후방에 인장력을 가하거나 압축력을 가한다. 세선인발공정(fine wire drawing process)에서 후방 인장력은 공정의 안정성을 향상시키면서 금형의 마모를 줄여 준다[18]. 그리고 경우에 따라서는 인발공정에서 후방 압축은 단면감소율 또는 튜브의 외경 감소율의 증가로 연결된다. 따라서 후방 압축 및 인장은 인발공정에서 매우 중요하다. 그러나 문헌상에서 후방 압축 및 인장을 고려한 해석 결과를 찾기가 쉽지 않다. 그 이유는 대부분의 연구자들이 응용을 목적으로 상용 소프트웨어를 사용하였고, 상용 소프트웨어 관점에서 인발공정은 매우 특이한 것이므로 비록 그 기능이 있다고 하더라도 접근이 용이하지 않거나 활용성이 떨어지기 때문이라고 판단된다.

만약 후방에 가해진 하중을 고려하기 위하여 후방에서 금형을 일정한 속도로 밀거나 당길 경우, 인발 금형 입구에 들어가지 않은 소재가 소성변형을 받게 될 것이다. 그 양이 미미할지라도 후미의 소성변형은 인발공정에서 주요 변수인 단면감소율의 변화를 야기시킨다. 물론 후미에 압력 경계를 부과할 수 있지만, 소성가공 공정 시뮬레이터의 관점에서는 범용성과 활용성을 떨어뜨리게 된다. 특히 요소망재구성이 필요한 경우에는 사용자의 개입이 요구될 수도 있다.

본 연구에서는 가상의 체적력을 인발 소재의 후미에 가함으로써 범용성과 정확성을 동시에 만족하도록 하는 가상체적력 기법을 제안한다.

이 기법에서는 소재의 초기조건을 설정할 때 소재 후미의 일부에 가상으로 온도 등을 설정하고, 온도에 따라 체적력을 다르게 입력하는 방식이다. 따라서 기존 프로그램의 변화를 최소화하여 후방 인장력 또는 압축력이 가해진 인발공정의 해석이 가능하게 함으로써 사용의 편리성과 프로그램의 범용성을 도모하였다.

3.1 선재인발공정의 해석

Fig. 1은 시험목적으로 선정된 가상의 선재인발공정의 공정도이다. 소재의 길이 40mm중에서 후미 5mm는 후방 인장력을 가하기 위한 목적으로 체적력 9.8912N/mm³을 인발가공의 방향과 반대로 가하였다. 이 체적력은 금형 입구에 진입하는 소재에 평균적으로 50MPa의 인장응력을 가한다. 마찰계수는 0.05로 하였다[8]. Fig. 2에는 인발가공에 따른 소성유동선도의 변화를 나타내었고, Fig. 3에는 인발과정 중 소재에 가해진 유효응력과 유효변형률의 분포를 나타내었다. 유효응력의 분포에서 보다시피 소재가 금형 입구에 진입하기까지 소재는 50MPa의 인장상태를 유지하고 있으며, 이에 따라 Fig. 4에서 보는 바와 같이 인발금형과 잡아당기는 도구 사이에는 1422N의 성형하중 차이를 발생시키고 있다. Fig. 4에서 보는 바와 같이 이 성형하중 차이는 전 공정해석 기간 동안에 걸쳐 동일하다. 그리고 Fig. 2에서 소재의 전후방에 인장력이 가해지고 있지만 탄성영역에 속하므로 수치적 치수 변화는 나타나지 않고 있다. 이러한 결과들은 제안한 방법의 수치적 안정성과 결과의 신뢰성을 구체적으로 보여 주는 결과이다.

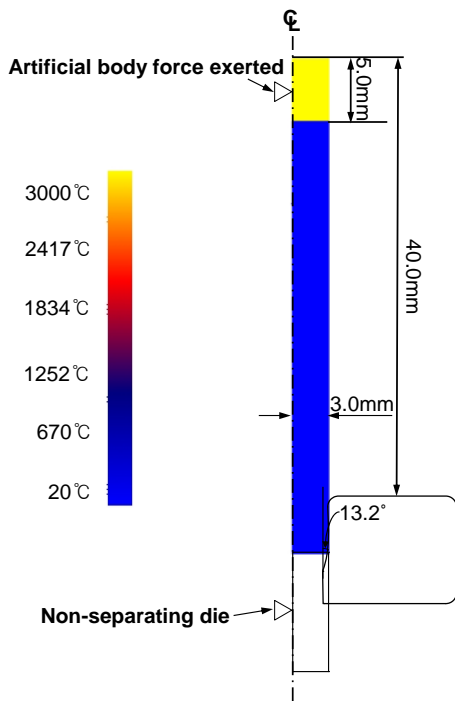


Fig. 1 Description of a test process

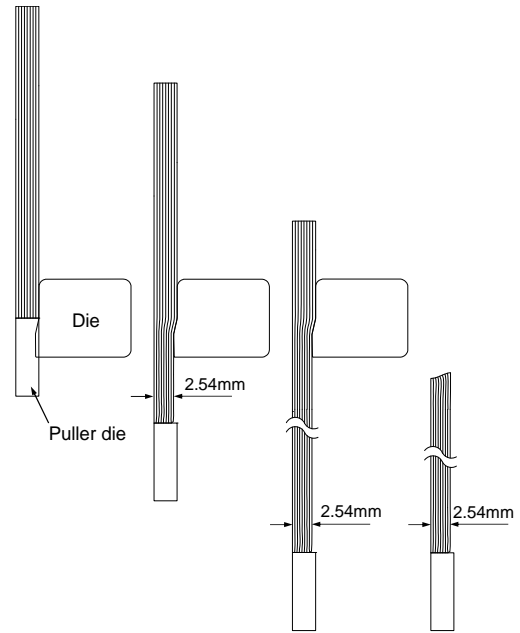
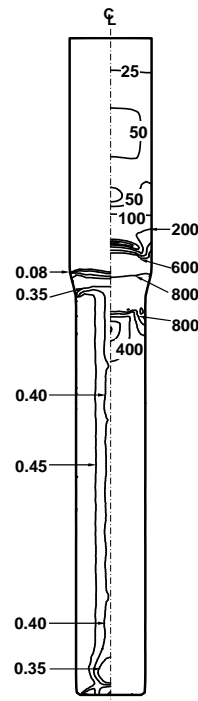


Fig. 2 Metal flows and dimensions(mm)



(a) Effective strain (b) Effective stress

Fig. 3 Effective strain and effective stress(MPa)

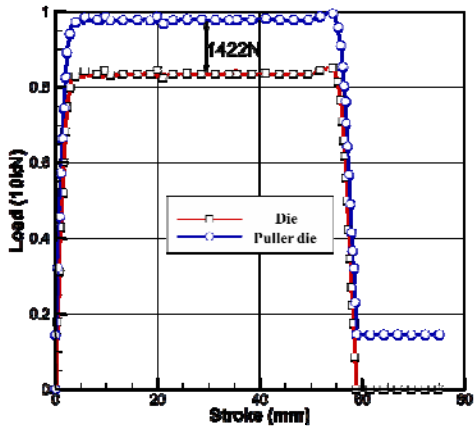


Fig. 4 Forming load-stroke curve

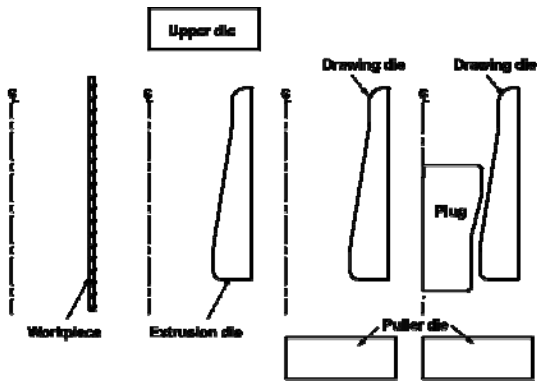
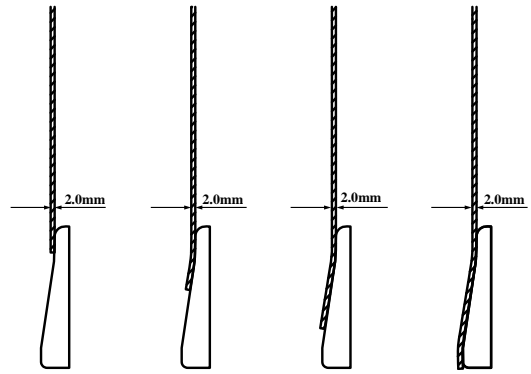


Fig. 5 Description of the test pipe drawing process

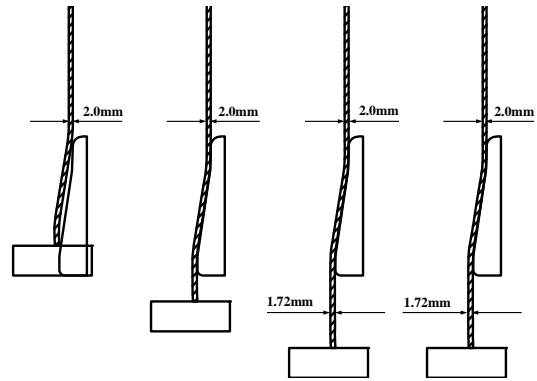
3.2 튜브인발공정의 해석

적용 예제로 3단의 예비성형체 제조를 위한 개방압출 및 인발가공 공정을 해석하였다. Fig. 5는 공정도를 나타내고 있다. 총 3단으로 구성되어 있고, 제 1단은 개방압출공정이며, 제 2단과 제 3단은 인발공정이다. 인발공정에서는 모두 후방압축력 18000N이 작용하고 있고, 제 3단에서는 고정식 플러그가 사용된다. 소재 길이는 총 200mm이며, 이 중에서 후미의 10mm를 후방압축력을 부여하는 목적으로 사용되었다. 따라서 체적력의 방향은 인발가공의 방향과 일치하며, 그 크기는 $5N/mm^3$ 이다. 최적의 윤회상태에서 인발가공이 이루어진다는 가정하에 마찰계수는 0.02로 하였다.

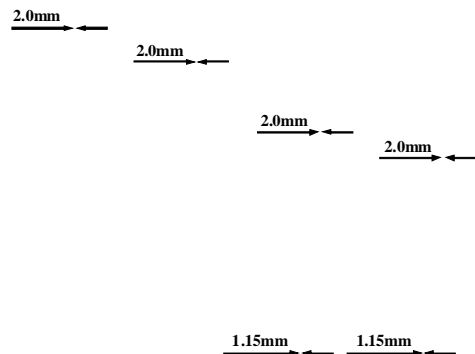
Fig. 6은 공정 중 소재의 변형 이력을 나타낸 것이다. 여기서 강조하고자 하는 것은 탄성영역에서 발생하는 수치적 소성변형 문제를 인위적으로 제거하는 기법을 사용하였기 때문에 입구의 소재에



(a) First stage (Extrusion)



(b) Second stage (Drawing)



(c) Third stage (Drawing)

Fig. 6 Deformation history

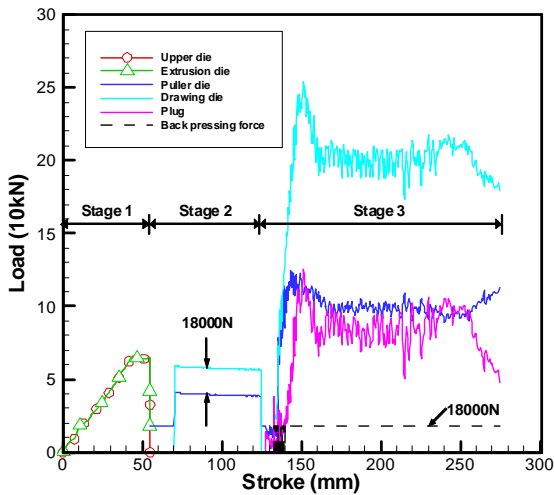


Fig. 7 Forming load variation with stroke

압축력이 작용하고 있음에도 불구하고 소재의 외경변화가 전혀 발생하지 않았다는 점이다. 그리고 출구쪽에서도 소성변형이 발생하지 않았을 경우에는 두께의 변화가 발생하지 않았다. 약간의 두께 변화는 소성변형에 의한 것이다. Fig. 7에 성형하중의 분포를 나타내고 있다. 제 1단과 제 2단에서는 성형하중이 매우 안정적으로 나오며, 제 3단에서는 다소의 진동이 발생하고 있다. 이는 플러그와 인발금형 사이에 소재가 진입할 때 절점의 접촉 상태에 따라 수치적으로 단면감소율이 수시로 변하기 때문으로 비정상상태 해석기법으로는 불가피한 것이다. 여기서 강조하고자 하는 점은 후방에 가한 압축력은 정확하게 반영되었다는 점이다. 즉, 임의의 순간에서 플러그에 작용하는 반발력과 인발 성형하중의 합과 인발금형에 작용하는 하중의 차이(Fig. 7에서 점선으로 표시됨)는 후방가압력 18000N과 일치하고 있다.

4. 결론

본 논문에서는 강소성 유한요소법을 이용한 개방압출 및 인발공정의 정밀해석 기술을 제시하였다. 후방 압축력 및 인장력의 부가 방법으로 인위적 체적력 기법을 제안하였다. 이 기법과 탄성영역의 수치적 변형을 제거하는 기법을 통하여 개방압출공정 및 인발공정의 강소성 유한요소해석에서 수치적 안정성과 결과의 수치적 신뢰성을 확보하였다. 따라서 강소성 유한요소법의 이론적

한계로 인하여 존재하던 개방압출공정 및 인발공정의 해석상의 문제점을 해소함으로써 강소성 유한요소법의 적용의 범위를 확대하였다.

제안된 기법은 후방 인장력이 가해진 선제인발공정과 개방압출과 인발이 복합적으로 적용된 튜브 가공 공정에 성공적으로 적용되었다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업 및 2010년도 정부(교육과학기술부)의 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2010-0017012).

참 고 문 헌

- [1] C. J. Luis, J. León, R. Luri, 2005, Comparison between finite element method and analytical methods for studying wire drawing processes, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 164~165, pp. 1218~1225.
- [2] S. S. Han, J. G. Eom, S. M. Jang, M. C. Lee, M. S. Joun, S. J. Kang, Y. H. Son, 2009, Special simulation technique of multi-faced long bolt forging process, *Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Conf., KSTP, Incheon, Kor.*, pp. 44~47.
- [3] P. Karnezis, D. C. J. Farrugia, 1998, Study of cold tube drawing by finite-element modelling, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 80~81, pp. 690~694.
- [4] M. Hayashi, M. Jin, S. Thipprakmas, M. Murakawa, J. C. Hung, Y. C. Tsai, C. H. Hung, 2003, Simulation of ultrasonic-vibration drawing using the finite element method(FEM), *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 140, pp. 30~35.
- [5] K. Yoshida, H. Furuya, 2004, Mandrel drawing and plug drawing of shape-memory-alloy fine tubes used in catheters and stents, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 153~154, pp. 145~150.
- [6] S. Norasethasopen, K. Yoshida, 2006, Finite-element simulation of inclusion size effects on copper shaped-wire drawing, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 422, pp. 252~258.
- [7] S. Norasethasopen, 2008, Influence of process parameters on shape quality and area fraction in round-to-hexagonal composite wire drawing, *J.*

- Mater. Process. Technol., Vol. 203, pp. 137~146.
- [8] T. Kuboki, K. Nishida, T. Sakaki, M. Murata, 2008, Effect of plug on levelling of residual stress in tube drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 204, pp. 162~168.
- [9] C. C. Chen, S. Kobayashi, 1978, Deformation analysis of multi-pass bar drawing and extrusion, CIRP Ann., Vol. 27, p. 151.
- [10] M. S. Joun, S. M. Hwang, 1993, Pass schedule optimal design in multi-pass extrusion and drawing by finite element method, Int. J. Mach. Tools Manuf., Vol. 33. No. 5, pp. 713~724.
- [11] G. H. Majzoubi, F. Fereshteh Saniee, A. Aghili, 2008, An investigation into the effect of redundant shear deformation in bar drawing, J. Mater. Process. Technol., Vol. 201, pp. 133~137.
- [12] S. K. Lee, D. C. Ko, B. M. Kim, J. H. Lee, S. W. Kim, Y. S. Lee, 2007, A study on monobloc tube drawing for steering input shaft, J. Mater. Process. Technol., Vol. 191, pp. 55~58.
- [13] Y. Tang, L.-S. Lu, D. Yuan, Q.-H., Wang, X.-I. Zhao, 2009, Experimental and FEM study on sinking of miniature inner grooved copper tube, J. Mater. Process. Technol., Vol. 209, pp. 5333~5340.
- [14] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, 2008, A new method for acquiring true stress-strain curves over a large range of strains using a tensile test and finite element method, Mech. Mater., Vol. 40, pp. 586~593.
- [15] M. S. Joun, J. G. Eom, M. C. Lee, J. H. Park, D. J. Yoon, 2008, Tensile test based material identification program AFDEX/MAT and its application to two new pre-heat treated steels and a conventional Cr-Mo steel, Int. J. Mod. Phys. B, Vol. 22, pp. 5768~5773.
- [16] M. S. Joun, 2009, Advanced Solid Mechanics and Finite Element Method, Jinsaem Media.
- [17] M. S. Joun, H. G. Moon, I. S. Choi, M. C. Lee, B. Y. Jun, 2009, Effects of friction laws on metal forming processes, Tribol. Int., Vol. 42, pp. 311~319.
- [18] A. Skolyszewski, M. Paćko, 1998, Back tension value in the fine wire drawing process, J. Mater. Process. Technol., Vol. 80~81, pp. 380~387.