

선재 인발공정에서 인발제품의 선경변화에 대한 연구

문 창 선* · 김 낙 수*†

* 서강대학교 기계공학과

Study on Dimensional Change in Wire Product During Wire-Drawing Process

Changsun Moon* and Naksoo Kim*†

* Dept. of Mechanical Engineering, Sogang Univ.

(Received December 1, 2011 ; Revised April 13, 2012 ; Accepted April 19, 2012)

Key Words: Dimensional Change(선경변화), Elastic Deformation(탄성변형), Thermal Expansion(열팽창), Elastic Recovery(탄성회복), Wire-Drawing Process(선재인발공정)

초록: 상온의 인발공정에서 소재는 인발다이를 통과하면서 직경이 줄어들고 길이가 늘어난다. 인발다이와 소재가 접촉한 면에서의 압력과 미끄럼 운동에 의해 소재에는 탄성회복, 인발 다이에는 마찰과 마모가 생긴다. 또한, 소재의 변형 및 마찰열로 인해 소재와 다이의 온도가 상승하며 이로 인해 지정된 다이 내경으로 제품이 가공되기 어려우며 소재의 선경은 지정된 직경 또는 다이 내경과 다르게 된다. 본 논문에서는 다이의 온도분포를 고려하여 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 다이와 소재의 열변형이 인발제품의 선경변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하였다. 네 가지 요인 중에서 소재의 탄성회복의 영향이 선경변화량의 대부분을 차지함을 확인하였다. 선경변화에 영향을 주는 인자들을 고려하여 지정된 치수와 차이를 주지 않는 초기 다이를 설계하였고, 설계된 초기 다이를 이용하여 지정된 치수의 인발제품을 얻을 수 있었다.

Abstract: During the cold wire-drawing process, the diameter of a wire is reduced and the length of the wire is increased as the wire passes through the die. The pressure and sliding motion at the interface between the wire and die cause elastic recovery of the workpiece and friction and wear on the die. In addition, wire deformation and frictional heating raise the temperature of the wire and die, resulting in difficulty in manufacturing the drawn products according to a designated inner diameter of the die, deviating from the designated dimension or the inner diameter of the die. In this study, considering the die temperature distribution, the effects of dimensional changes of the drawn products were analyzed quantitatively; these changes are caused by the elastic deformation of the die, the elastic recovery of the workpiece, and the thermal deformation of both the die and the workpiece. It was confirmed that the elastic recovery of the workpiece influenced these changes the most. The initial dies considering these factors could avoid deviation from the designated dimension, and the desired drawn products were obtained by using the designed initial drawing dies.

- 기호설명 -

D_0 : 인발전 선재직경
 D_f : 인발후 선재직경
 δ : 백 릴리프 각도
 γ : 다이반각
 ω : 직입각도
 L : 베어링부 길이
 β : 감면부 길이

h_1 : 대류 열전달계수
 h_{lub} : 선재와 다이간 접촉면 열전달계수
 h_{lub1} : 다이와 케이스간 접촉면 열전달계수

1. 서론

상온에서의 인발공정은 우수한 마감 표면과 정확한 직경의 원형단면이나, 일정한 단면적을 가지는 긴 제품들을 제조하는 방법이다. 소재는 인발다이를 통과하면서 직경이 줄어들고 인발다이와 소재가 접촉한 면에서의 압력과 미끄럼 운동에 의해 소재에는 탄성회복, 인발다이에는 마찰과 마모

† Corresponding Author, nskim@sogang.ac.kr
© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

가 생긴다. 또한, 소재의 변형 및 마찰열로 인해 소재와 다이의 온도가 상승하며 이로 인해 지정된 다이 내경으로 인발제품이 가공되지 않는다. 지정된 다이내경과 인발후 제품의 직경간의 차이를 선경변화라고 정의한다. 인발제품의 품질에 대한 관리수준이 높은 경우, 선경변화는 10 μ ms내외의 치수정도로 가공되고 있다. 인발제품의 품질은 선경변화량으로 평가하므로, 선경변화를 정량적으로 파악하지 못하면 인발제품의 품질관리가 어렵다.

Kampus⁽¹⁾은 인발된 소재의 치수에 영향을 주는 인자를 분석하기 위해서 두 가지 모델을 이용하였다. 첫 번째 모델은 탄소성방정식으로 구성되었으며, 그 모델을 계산하여 인발된 소재의 치수를 계산하였다. 두 번째 모델은 첫 번째 모델의 결과와 비교 및 입증하기 위해 유한요소해석(FEM, finite element method) 상용프로그램을 이용한 모델이다. Akiyama 등⁽²⁾은 일련의 다이에 의해 인발된 고탄소강 소재의 선경변화를 관찰하였다. 그들은 가공된 AISI 1070 고탄소강 소재를 자른 후 그 시편을 특정온도로 가열했을 때와 상온에서 식혔을 때의 소재의 직경과 길이를 측정하였다. 온도의 영향은 소재 직경에 따라 달라졌으며, 직경이 작을수록 온도의 영향이 큼을 확인하였다. Lee 등⁽³⁾은 상온 단조에서 가중, 제하, 그리고 취출의 단계별로 다이와 소재의 치수를 관찰하였다. 그들은 실험과 유한요소해석에서 얻은 각 단계별 변형률들을 비교하였으며 다이와 소재의 치수에 영향을 미치는 인자들을 분석하였다. Ishikawa 등⁽⁴⁾은 단조공정에서 발생된 열과 응력이 펀치, 다이, 그리고 소재의 치수변화에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 실험과 유한요소해석으로부터 얻은 제품의 내경과 외경의 치수가 비슷함을 확인하였고, 그 결과를 이용하여 초기 장비를 설계하여, 정확한 치수의 제품을 얻을 수 있었다. Luksza 등⁽⁵⁾은 다이에 소재를 통과시킨 횟수에 따라 소재에 대한 실험적인 조사와 이론적인 소재의 변형거동에 대해 연구하였다. 그들은 유효변형률 분포 결과들을 비교하였으며, 최종제품에 대한 기계적인 성질의 변화를 관찰하였다.

상온의 인발공정에서 많은 공정변수들은 인발제품의 품질에 영향을 준다. Camacho 등⁽⁶⁾은 다이의 응력 또는 동력과 같은 변수에 대한 후방장력의 영향을 분석하기 위하여, 실험값, 수치계산으로 얻어진 값, 그리고 슬래브법에 의해 계산된 값을 비교하였다. 수치계산으로 얻어진 결과는 실험값과 비슷하였으나 슬래브법의 결과와는 차이가 있음을

확인하였다. Dixit 등⁽⁷⁾은 감면율, 다이각도, 그리고 마찰계수와 같은 다양한 공정변수가 다이의 압력분포에 미치는 영향에 대해 연구를 하였다. 그들은 감면율이 클수록 다이의 압력분포가 커지고, 다이각도가 클수록 다이의 압력분포는 작아짐을 확인하였다. 그리고 다이의 온도분포에 대한 마찰계수의 영향은 미미함을 확인하였다. Castro 등⁽⁸⁾은 다이각도가 소재의 기계적인 성질에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 다이각도가 증가함에 따라 항복강도와 인장강도의 값들은 증가하는 반면에 연신율은 감소함을 확인하였다.

Norasethasopon 등⁽⁹⁾은 개재물의 영향을 파악하고자 구리로 된 소재의 인발공정 중 개재물의 크기와 종횡비등의 개재물의 변수가 인발응력과 다이압력에 미치는 영향을 연구하였다. 그들은 개재물의 크기와 종횡비가 증가할수록 인발응력은 증가하는 반면에 다이압력에 대한 개재물의 크기의 영향은 미미함을 확인하였다. Chen 등⁽¹⁰⁾은 인발공정에서 에너지소비를 최소화 하기 위해 유한요소법과 다구찌법을 이용하여 공정변수를 최적화하였고, 제품의 질을 향상시킬 수 있었다. Vega 등^(11,12)은 실험과 수치적인 접근을 통해 구리로 된 소재의 인발공정에 대하여 연구하였다. 그들은 실험을 통해서 인발력과 온도는 소재의 강종과 계면의 상태에 의존함을 확인하였다.

다이의 마모, 온도분포, 그리고 인발제품의 품질에 영향을 주는 소재와 다이 사이의 마찰조건에 관한 여러 연구들도 수행되었다. Rigaut 등⁽¹³⁾은 새로운 마찰시험과 분석을 통해 마찰조건을 정확하게 얻는 것이 어려움을 확인하였다. 그들은 정확한 마찰조건을 얻기 위해서는 소재와 다이 사이의 마찰계수와 접촉의 효율적인 조절에 관련이 있음을 확인하였으며, 압입자를 사용하여 소재 접촉표면의 누적된 변형 과정을 파악하는 실험을 수행함으로써 마찰계수를 계산하였다. Obi 등⁽¹⁴⁾은 선재 인발에서 지방으로 된 윤활유를 이용하여 인발제품의 표면에 대해 연구하였으며, 인발에서 사용된 윤활유의 마찰계수를 평가하기 위해 Evans 등⁽¹⁵⁾의 실험 절차를 기반으로 소재를 개방형 다이에 통과시켜 실험을 하였다. Kim 등⁽¹⁶⁾은 상온에서 인발공정의 실패는 다이 표면에서 발생하는 높은 압력과 다이의 마모가 주된 원인이며 이 문제를 해결하기 위해 다이의 마모를 예측하고 공정을 최적화하였다. Gillström 등⁽¹⁷⁾은 소재 표면 처리방법 즉, 산세법에 따른 다이 마모의 차이를 평가하였다. 그들은 소재 표면 처리방법을 사용함으로써 응착

마모를 제거할 수 있었으며, 깨끗한 인발제품을 얻을 수 있었다. Hollinger 등⁽¹⁸⁾은 절반으로 자른 다이에 대해 주사전자현미경과 X-선 분광기를 이용하여 인발실험을 수행하였고, 그 결과 관찰된 마모손상은 취성과괴와 결정립조직의 제거에 부합함을 확인하였다. Moon 등⁽¹⁹⁾은 다이의 온도변화 및 인발동력의 계산결과와 간단한 측정치들을 비교하여 마찰과 열적조건을 결정하기 위해 역공학적인 절차를 제안하였다. 그들은 역공학적으로 결정한 조건들을 바탕으로 다이의 온도변화와 소재의 변형거동을 수치적으로 해석하였으며 인발제품의 선경변화를 예측하였다.

지금까지의 논문들은 인발후 인발제품의 기계적 인 성질과 소재의 변형거동에 대한 내용이 대부분이며 감면율, 다이반각(즉, 감면각도) 그리고 인발 속도 등의 공정변수에 따른 인발제품의 질에 대한 내용을 주로 다뤘다. 반면에, 소재와 다이 사이의 마찰조건, 그리고 공기와 같은 주변환경 사이의 열전달 영향을 고려한 다이 온도분포의 실질적인 유한요소해석 절차에 대한 내용은 다루어지지 않았다. 인발제품의 선경변화를 정확하게 예측하기 위해서는 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 열에 의한 소재와 다이의 변형을 고려 해야 한다. 본 연구에서는 Moon 등⁽¹⁹⁾이 역공학적으로 결정한 마찰과 열적조건을 바탕으로 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 열에 의한 소재와 다이의 변형을 고려함으로써 인발제품의 선경변화에 대한 정량적인 예측기술을 제안하고자 한다. 유한요소해석을 통한 예측치수와 실제 공정치수를 비교함으로써 접근방법의 타당성을 검증한다. 그리고 선경변화에 영향을 주는 네 가지 인자들을 고려하여 지정된 치수와 차이를 주지 않는 초기 다이를 설계한다.

2. 실험

소재는 인발 다이를 통과하기 전에 예비교정기 공정에서 1차적으로 곧게 펴주는 작업을 거친 후 스케일제거공정에서 곧게 펴진 소재 표면의 스케일이 제거된다. 스케일제거공정 후 소재는 인발다이를 통과하면서 직경이 줄어들고 길이는 늘어나며 절단공정을 통해 일정한 길이, 예를 들면 3m씩 잘라진다. 인발제품의 선경을 측정하기 위해, 인발후 소재를 동일한 길이로 자른 50개의 소재에 대하여 마이크로미터를 이용하여 직경을 측정하였다. 각각의 소재에 일정한 간격으로 3점의 선경을 측정하고 측정된 치수들의 평균값을 계산하여 평균

선경으로 정의하였다. 선경변화는 소재의 평균선경에서 다이의 내경을 뺀 값으로 정의하였다. 측정된 선경 값의 표준편차는 0.05% 수준이었다. Fig. 1(a)는 인발공정에서 사용된 모델의 개략도이며 Fig. 1(b)는 다이의 형상을 나타낸 것이다. 다이의 형상을 정의하는 변수로는 백 릴리프각도(δ), 다이반각(γ), 진입각도(ω), 그리고 베어링 길이(L) 등이 있다. 다이반각 즉, 감면각도는 실제 단면수축이 일어나는 부분이다. 베어링 부는 단면수축을 유발하지 않고 마찰저항을 일으킨다. 베어링 부를 두는 주된 이유는 원추형의 다이반각 부분이 마모될 경우 재가공하여 사용하기 위한 것이다. 백 릴리프각도는 인발된 소재가 탄성회복으로 약간 팽창하는 것을 수용하기 위한 것이다. 또한, 인발공정이 멈췄을 때 마모의 가능성을 최소화시키는 역할을 한다. 인발공정에서 사용된 소재, 다이 및 케이스의 강종은 각각 S45CS, WC, 그리고 AISI-H-13이다. Fig. 2는 실험에서 소재가 다이를 통과한 후의 형상이다.

3. 선경변화 분석

유한요소해석에서는 소재와 다이의 접촉 및 분리조건에 따라서, 각 표면절점에서 계산되는 선경값에 미세한 차이가 있다. 그러므로 인발된 소재의 수치적인 평균선경을 정의할 필요가 있다. 계

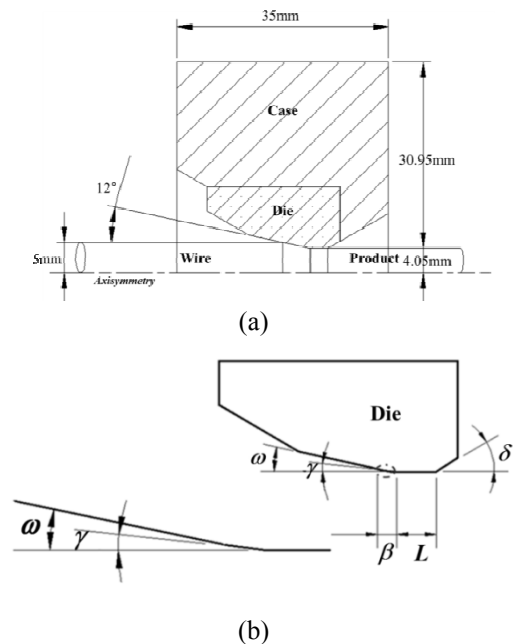


Fig. 1 (a) Schematic outline of the model used in experiment and FEA and (b) parameters defining the die geometry

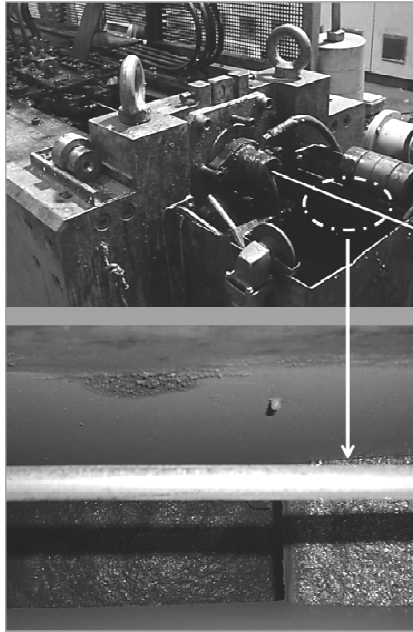


Fig. 2 Wire shape passed through the die

산된 평균직경은 소재표면에서 50 개의 절점에 대한 부피평균으로 정의하였다. 계산된 직경은 그 편차가 0.1%미만의 수준이기 때문에 실험과 의미 있게 비교할 수 있다.

인발공정에서 소재의 변형양상은 상당한 길이만큼 소재가 인발된 이후에 정상상태에 도달한다고 가정할 수 있다. 본 연구에서는 정상상태가 상당한 길이만큼 인발되어 인발력이 일정하게 된 후 얻어진 것으로 간주한다. 인발 공정해석을 위해 DEFORM 2D 를 사용하였고 인발해석시 다이와 케이스는 탄성모델 그리고 소재는 탄소성모델로 설정하였다.

인발분석은 2 차원축대칭모델로 수행하였다. Fig. 3 은 20 °C 와 200 °C 에서 소재의 강종인 S45CS 의 유동응력을 나타낸 것이다. Table 1 은 인발공정에서 사용된 강종별 물성치를 정리한 것이다. 인발장비의 초기온도는 30 °C 그리고 외기온도는 20 °C 로 설정하였다.

Fig. 4 는 Moon 등⁽¹⁹⁾이 인발공정에서 열전달에 대한 해석을 위해 인발장비의 각 경계에 열전달계수를 적용한 그림이다. 그들은 소재와 다이의 계면(a-b)과 다이와 인발케이스의 계면(c-f-g)은 동일한 계면 열전달계수(h_{lub})를 갖는다고 가정하고 $h_{lub} = 10 kW/m^2K$ 으로 계산하였다. 인발케이스 경계(d-e)에서 열전달계수는 $h_{lub1} = 0.1011 kW/m^2K$ 으로 계산하였고, case 의 b-c-d 와 e-f-a 는 공기와 접촉하고 있으며 $h_1 = 0.0246 kW/m^2K$ 으로 계산하였

Table 1 Material properties used in the simulation

Material	S45CS	WC	AISI-H-13
Young's modulus (GPa)	192	650	210
Poisson's ratio	0.3	0.25	0.3
Heat conductivity (W/mK)	51.9	59	24
Heat capacity (J/mmK)	0.486	15	2.7
Thermal expansion coefficient (1/K)	1.397e-05	5e-05	1.17e-05

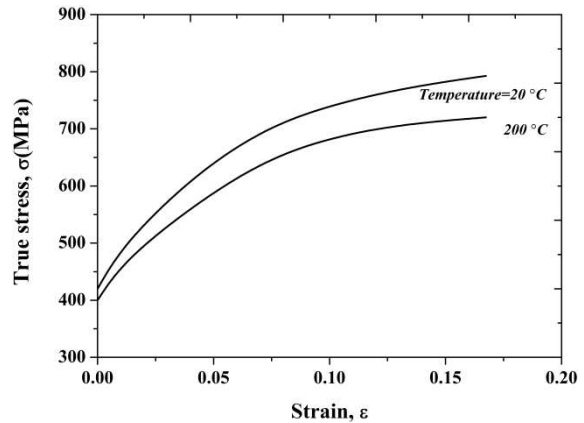


Fig. 3 True stress-strain curve of S45CS

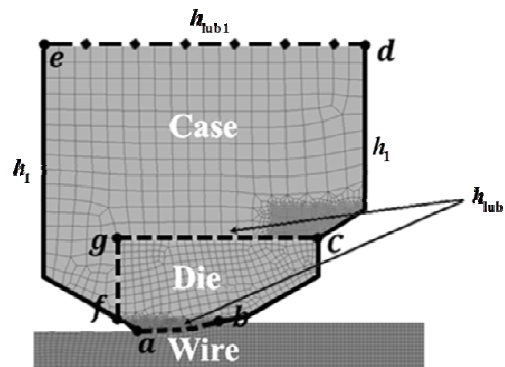


Fig. 4 Model of heat transfer on surface in FE simulation of the wire-drawing process

다. 본 연구에서는 이들 값을 사용하여 열전달과 온도상승을 고려한 선경변화를 계산하였다.

3.1 선경변화의 정량적인 분석

측정과 계산에 의한 선경변화를 비교하기 위해 다이의 형상을 다이반각, 진입각도, 그리고 베어링 길이의 변화에 따라 총 3가지 경우로 구성하였다. 3가지의 경우들은 기하학적인 다이 치수만 달리고 동일한 강종과 윤활조건을 사용한 것이다.

Table 2에는 각 경우에 대한 선경변화의 측정치, 계산치 등을 비교하여 나타내었다. 그 결과 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3의 측정치와 계산치는 각각 11%, 15%, 그리고 10%의 차이를 보였다.

3.1.1 다이의 탄성변형

다이마모를 무시한다면, 선경변화에 영향을 주는 인자들은 다이와 소재의 열팽창과 소재의 탄성회복 그리고 다이의 탄성변형이다. 탄성변형이 선경변화에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위해서 소재는 탄소성 그리고 다이는 탄성체와 강체로된 모델로 구분하고 각 모델의 다이에 소재를 통과시켜 선경변화를 계산하였다.

다이를 탄성체로 설정한 모델에서는 다이에 탄성변형이 생기며, Fig. 5는 변형된 다이형상을 2차원축대칭모델로 나타낸 그림이다. 이로 인해 선경변화는 다이를 강체로 설정한 모델보다 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3은 각각 0.001mm, 0.002mm, 그리고 0.001mm 늘어나는 것으로 계산되었다. 다이의 탄성변형으로 인해 다이의 내경이 늘어나고 그로 인해 소재의 직경 또한 늘어남을 관찰되었다. 상온의 인발공정에서 다이의 탄성변형은 소재의 직경을 증가시키는 원인이 됨을 알 수 있다.

3.1.2 소재와 다이의 열변형

인발공정에서 소재와 다이는 열변형으로 인해 열수축 또는 열팽창을 일으킨다. 소재와 다이에 열변형이 인발제품의 선경변화에 미치는 영향을 정량적으로 확인하기 위해 소재와 다이의 열팽창계수를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델을 각각 다이에 소재를 통과시켜 선경변화를 계산하였다. 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3의 형상에서 다이의

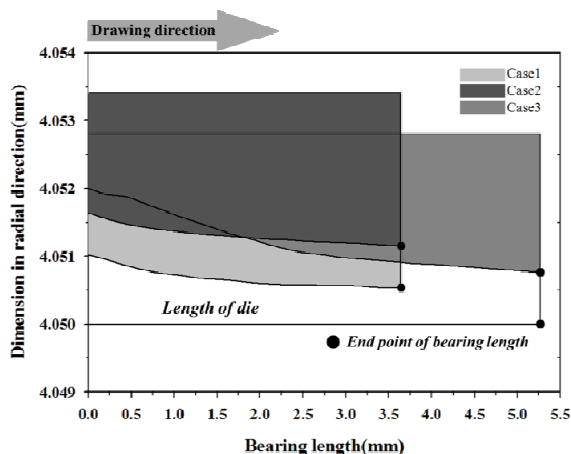


Fig. 5 Elastically deformed die geometries for case 1, case 2, and case 3

열팽창계수를 고려한 모델의 선경변화는 열팽창계수를 고려하지 않은 모델보다 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3은 각각 0.002mm, 0.003mm, 그리고 0.002mm 줄어들었다. 열변형으로 인해 다이의 내경이 줄어들었고, 그로 인해 소재의 직경 또한 작아짐이 관찰되었다. 다이의 내경이 줄어드는 이유는 다이의 측면과 윗면이 인발케이스에 고정되어 있기 때문이라고 생각된다. 더구나 다이와 소재의 접촉영역에서 멀리 떨어진 곳에서는 온도상승이 없으므로 열팽창이 생기지 않고, 대신에 다이내경을 줄이도록 구속하는 역할을 한다. 반면에, 소재의 열팽창계수를 고려한 모델과 고려하지 않은 모델의 선경의 차이는 없다. 소재는 빠른 속도로 다이를 통과 하기 때문에 열에 의한 영향이 크지 않음을 알 수 있었다.

3.1.3 소재의 탄성회복

소재의 탄성회복량은 다이의 탄성변형과 소재와 다이의 열변형으로 인해 발생된 선경변화량을 빼 나머지 선경변화량이다. 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3의 총 선경변화량은 각각 0.008mm, 0.011mm, 그리고 0.009mm이다. 그러므로 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3의 탄성회복량은 각각 0.009mm, 0.012mm, 그리고 0.01mm이다. 다이의 탄성변형, 소재의 열변형, 다이의 열변형, 그리고 소재의 탄성회복은 선경변화에 각각 11~18%, 0%, -27~-22%, 그리고 109~112.5%의 영향을 미친다.

3.2 변형경화지수(n)에 따른 선경변화의 정량적인 분석

변형경화지수(n)는 소재의 가공경화능력 혹은 균일변형능력을 나타내는 지표로서 변형경화지수(n)가 크다는 것은 소재가 국부변형 없이, 균일변형을 하는 균일연신능력 즉, 가공성 향상능력이 좋다는 것을 의미한다.

식 (1)은 Fig. 3에서 상온의 진응력-변형률곡선을 유동응력식으로 변환한 것이다.

$$\sigma = 1266.6\epsilon^{0.2389} \text{ MPa} \quad (1)$$

변형경화지수(n)가 선경변화에 미치는 영향을 알아보기 위해서, 변형경화지수(n)만 달리하고 동일한 다이치수(경우 1)와 윤활조건으로 선경변화를 계산하였다. 그 결과 변형경화지수(n)가 0.20, 0.25, 그리고 0.30일 때 각각의 선경변화는 0.006mm, 0.008mm, 그리고 0.012mm 이다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 식 (1)의 변형경화지수(n)를 기준으로 선경변화는 감소 및 증가의 경향을 보이며, 변형

경화지수(n)가 증가할수록 선경변화는 증가한다. 선경변화가 변형경화지수에 따라 비선형적으로 영향을 받음을 알 수 있다. 앞에서 언급한 방법으로 변형경화지수(n)을 달리한 3가지 경우에 대해 선경변화에 미치는 네 가지 인자들을 정량적으로 분석하였다. 선경변화는 다이의 탄성변형으로 인해 각각 0.0007mm, 0.0012mm, 0.002mm 늘어나고, 다이의 열변형으로 인해 -0.001mm, -0.002mm, 그리고 -0.003mm 줄어들며, 소재의 탄성회복으로 인해 0.0066mm, 0.0088mm, 그리고 0.013mm 늘어난다. 그러나 소재의 열변형은 선경변화에 영향을 미치지 않는다. 다이의 탄성변형, 소재의 열변형, 다이의 열변형, 그리고 소재의 탄성회복은 선경변화에 각각 13~17%, 0%, -26~-23%, 그리고 107~111%의 영향을 주는 것으로 파악된다.

3.3 다이 형상에 따른 선경변화

다이 형상을 정의하는 변수들 즉, 다이반각(γ), 그에 대한 길이(β), 그리고 베어링 길이(L)를 변화시켜가면서 그에 따른 선경변화량을 예측하였다. 각 다이 형상을 정의하는 변수에 대해서는 각 변수 별 범위를 설정하였다. 변수 γ , β , 그리고 L 의 범위는 0~6°의 구간에서 1.5°의 크기로 등간격, 0~4.8mm 구간에서 1.2mm의 크기로 등간격, 그리고 3.645~6.885mm의 크기로 구간에서 0.405mm의 크기로 등간격으로 나누어 설정하였고 각 변수 별 설정된 범위에서 계산하였다. Fig. 6(b)-(d)에서는 γ , β , 그리고 L 이 증가할수록 선경변화는 증가, 증가, 그리고 일정해지는 경향을 보임을 알 수 있었다.

4. 다이설계

상운의 인발공정에서 선경변화의 크기에 따라 인발제품의 질을 평가하게 된다. 인발다이에는 마찰과 마모가 생기며, 소재변형 및 마찰열로 인해 소재와 다이의 온도가 상승하며 이로 인해 지정된 다이 내경으로 인발제품이 가공되지 않는다. 즉, 인발공정 후 발생한 선경변화는 인발제품의 관리를 어렵게 한다. 냉간단조의 경우에도 동일한 문제가 발생하므로, Kang 등⁽²⁰⁾은 지정된 치수대로 가공되는 냉간단조금형을 설계하는 방법을 제시하였다. 본 연구에서도 유사한 방법을 적용하여, 지정된 치수와 차이를 주지 않는 초기 다이를 설계하였다. 이때 선경변화에 영향을 주는 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 열에 의한 소재와 다이의 변형을 고려하였다. 선경변화를 구성하

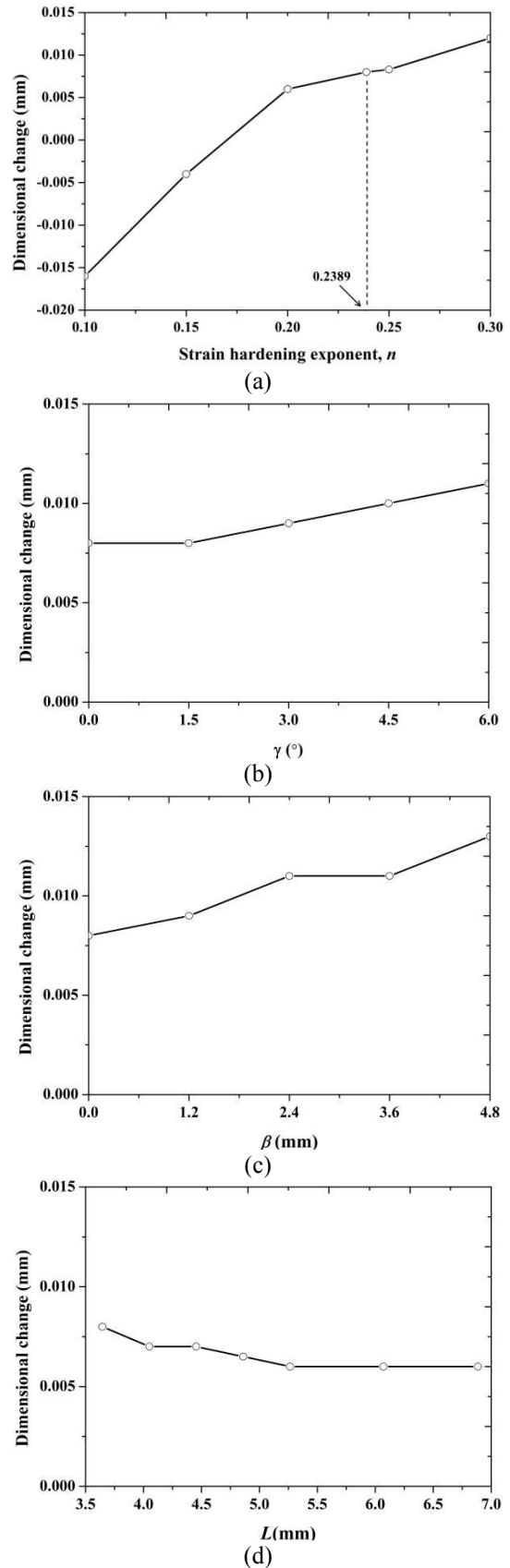


Fig. 6 Dimensional changes considering (a) strain hardening exponent and parameters defining the die geometry: (b) die angle; (c) length for die angle; (d) bearing length

Table 2 Analysis of effect factors influencing dimensional change and comparison with dimensional changes

CASE	D_0 (mm)	D_f (mm)	β (mm)	L (mm)	ω (°)	γ (°)	Effect factors (%)			Dimensional changes (mm) (Deviation from measurement, %)			
							Elastic deformation	Thermal expansion die wire	Elastic recovery	Experiment	FEA	FEA applying modified die	
CASE 1			0	3.645		0	12.5	-25	0	112.5	0.009	0.008(11%)	0.000
CASE 2	10	8.1	2.4	3.645	12	6	18	-27	0	109	0.013	0.011(15%)	0.000
CASE 3			2.4	5.265		6	11	-22	0	111	0.010	0.009(10%)	0.000

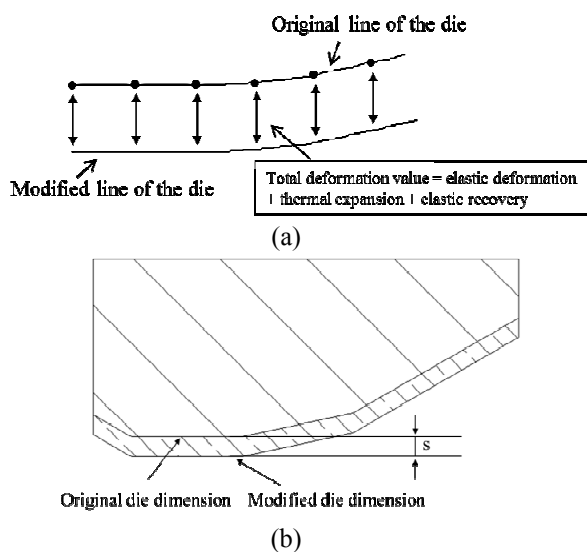


Fig. 7 Die design modification from the analysis result: (a) die interface line modification; (b) side view of the modified die (s of case 1: 0.008, s of case 2: 0.011, and s of case 3: 0.009 mm)

는 각각의 영향인자로 인해 변화된 선경만큼 기존 다이내경을 변화시키면 소재는 지정된 직경으로 인발 될 것이다. Fig. 7 에서 보는 바와 같이 경우 1, 경우 2, 그리고 경우 3 은 다이의 탄성변형, 소재와 다이의 열팽창, 그리고 소재의 탄성회복으로 인해 각각 0.008mm, 0.011mm, 그리고 0.009mm 만큼 소재의 선경이 늘어났으므로 변화된 선경만큼 기존 다이내경을 작게 하여 초기 다이를 설계하였다. 또한, 변형경화지수(n)를 달리한 3 가지 경우에도 동일한 방법으로 초기 다이를 설계하고 설계된 초기 다이를 이용하여 선경변화를 계산한 결과, 선경변화는 없었다. 설계된 초기 다이를 이용하여 지정된 직경의 인발제품을 얻을 수 있었다(Table 2).

5. 결론

본 연구에서는 소재의 탄성회복, 다이의 탄성변형, 그리고 온도상승에 의한 소재와 다이의 열변

형이 인발제품의 선경변화에 미치는 영향을 정량적으로 분석하고 인발제품의 유한요소해석을 통한 예측치수와 실제 공정치수를 비교하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 역공학으로 구한 열적상수를 바탕으로 인발제품의 선경변화를 예측해 실험값과 비교 및 검증한 결과 타당한 계산결과를 얻을 수 있었다.

(2) 선경변화에 영향을 미치는 네 가지 인자들에 대한 각각의 조건들을 다르게 하고 그 결과값들을 비교함으로써 정량적으로 분석하였다. 그 결과, 소재의 탄성회복이 선경변화량의 대부분을 차지함을 확인하였다.

(3) 본 연구에서 설정한 변형경화지수(n)의 크기에 따라 선경변화에 영향을 미치는 네 가지 인자들에 대해 분석한 결과, 변형경화지수(n)의 크기에 상관없이 선경변화에 영향을 미치는 각 인자들의 비율은 비슷하였다.

(4) 선경변화에 영향을 주는 인자들을 고려하여 지정된 치수와 차이를 주지 않는 초기 다이를 설계하였고, 설계된 초기 다이를 이용하여 지정된 치수의 인발제품을 얻을 수 있었다.

이러한 연구과정을 통해 향후, 인발제품의 선경변화를 고려한 인발공정설계에 활용될 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 2010 년도 동부제철의 계측제어팀의 지원을 받아 수행되었으며 이에 감사 드립니다.

참고문헌

(1) Kampus, Z., 1999, "Analysis of Factors Influencing Accuracy in the Drawing of Round Rods," *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 87, pp. 90~96.
 (2) Akiyama, M., Taniyama, A., Neishi, Y. and Hamada, T., 2004, "Dimensional Change in High Carbon Steel Wire Owing to Heavy Reduction by Tandem Cold

- Drawing,” *Material Science and Technology*, Vol. 20, pp. 903~908
- (3) Lee, Y. S., Lee, J. H., Kwon, Y. N. and Ishikawa, T., 2004, “Analysis of the Elastic Characteristics at Die and Workpiece to Improve the Dimensional Accuracy for Cold Forged Part,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 153~154, pp. 1081~1088.
- (4) Ishikawa, T., Yukawa, N., Yoshida, Y., Kim, H. and Tozawa, Y., 2000, “Prediction of Dimensional Difference of Product from Tool in Cold Backward Extrusion,” *CRIP Annals-Manufacturing Technology*, Vol. 49, pp. 169~172.
- (5) Luksza, J., Majta, J., Burdek, M. and Ruminski, M., 1998, “Modelling and Measurements of Mechanical Behavior in Multi-Pass Drawing Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 80~81, pp. 398~405.
- (6) Camacho, A. M., Domingo, R., Rubio, E. and González, C., 2005, “Analysis of the Influence of Back-Full in Drawing Process by the Finite Element Method,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 164~165, pp. 1167~1174.
- (7) Dixit, U. S. and Dixit, P. M., 1995, “An Analysis of the Steady-State Wire Drawing of Strain-Hardening Materials,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 47, pp. 201~229.
- (8) Castro, A. L. R., Campos, H. B. and Cetlin, P. R., 1996, “Influence of Die Semi-Angle on Mechanical Properties of Single and Multiple Pass Drawn Copper,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 60, pp. 179~182.
- (9) Norasethasophon, S. and Yoshida, K., 2006, “Influences of Inclusion Shape and Size in Drawing of Copper Shaped-Wire,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 172, pp. 400~406.
- (10) Chen, D. C. and Huang, J. Y., 2007, “Design of Brass Alloy Drawing Process Using Taguchi Method,” *Materials Science and Engineering: A*, Vol. 464, pp. 135~140.
- (11) Vega, G., Haddi, A. and Imad, A., 2007, “Modélisation Numérique de Mise en Forme par Tréfilage,” *18e` Congrès Français de Mécanique, Grenoble*, pp. 27~31.
- (12) Vega, G., Haddi, A. and Imad, A., 2009, “Temperature Effects on Wire-Drawing Process: Experimental Investigation,” *International Journal of Material Forming*, Vol. 2, Suppl 1: pp. 229~232.
- (13) Rigaut, J. M., Oudin, J., Bricout, J. P., Cabezon, J. and Ravalard, Y., 1998, “A New Friction Test Procedure for the Improvement of Drawing and Similar Processes,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 21, pp. 3~28.
- (14) Obi, A. I. and Oyinlola, A. K., 1996, “Frictional Characteristics of Fatty-Based Oils in Wire Drawing,” *Wear*, Vol. 194, pp. 30~37.
- (15) Evans, W. and Avitzur, B., 1968, “Measurement of Friction in Drawing, Extrusion and Rolling,” *Journal of Lubrication Technology*, pp.72~89.
- (16) Kim, B. M., Kim, T. H. and Choi, J. C., 1997, “Prediction of Die Wear in the Wire-Drawing Process,” *Journal of Materials Processing Technology*, Vol. 65, pp. 11~17.
- (17) Gillström, P. and Jarl, M., 2007, “Wear of Die After Drawing of Pickled or Reverse Bent Wire Rod,” *Wear*, Vol. 262, pp. 858~867.
- (18) Hollinger, S., Depraetere, E. and Giroux, O., 2003, “Wear Mechanism of Tungsten Carbide Dies During Wet Drawing of Steel Tyre Cords,” *Wear*, Vol. 255, pp. 1291~1299.
- (19) Moon, C. and Kim, N., “Analysis of the Wire Drawing Process with Friction and Thermal Conditions Obtained by Inverse Engineering,” *Journal of Mechanical Science and Technology*, (submitted).
- (20) Kang, G. J., Kim, J. and Kang, B. S., 2008, “Numerical and Experimental Evaluation for Elastic Deformation of a Cold Forging Tool and Workpiece for a Sleeve Cam of an Automobile Start Motor,” *Journal of Engineering Manufacture*, Vol. 222, pp. 217~224.