

ABS 용 부품의 마이크로 포머단조공정 시뮬레이션

최인수¹, 류성욱², 박상균², 윤덕재³, 전만수[#]

Forging Simulation of a Micro-Former Forging Process of an ABS Part

I. S. Choi, S. W. Yoo, S. G. Park, D. J. Yoon, and M. S. Joun

Abstract

In this study, the factors that have strong relationship with size effects on forging simulation are investigated and then a dimensionless concept is implemented into the forging simulator. The approach is applied to simulating a micro former forging process of which sequence involves a piercing process to make a hole of 0.7mm diameter of the product whose maximum diameter is 3mm. The simulated results are discussed to reveal the size effect in forging simulation.

Key Words : Cold Former, Micro Forming, Simulation, Dimensionless

1. 서 론

단조는 기준에 따라 다양하게 분류되고 있다. 소재의 온도가 분류 기준이 될 때는 냉간단조, 온간단조, 열간단조 등으로 분류되고, 금형의 형태에 따라 자유단조와 형단조로 분류된다. 물론 형단조에서도 플래쉬의 허용 여부와 소재에 성형하중을 가하는 방법에 따라 개방단조, 밀폐단조, 폐쇄단조, 분류단조 등등으로 구분되고 있다. 그리고 사용하는 장비에 따라 해머단조, 프레스단조, 포머단조, 업셋터단조 등등으로 분류된다. 물론 특수단조로 소재와 금형의 온도를 동일하게 유지한 상태에서 성형하는 항온단조 등이 있다.

해머단조와 프레스단조는 널리 알려져 있는데 반하여 포머단조와 업셋터단조는 상황이 다르다. 업셋터단조는 흔하게 접할 수 없고 특수한 제품의 성형에 활용되기 때문에 널리 알려져 있지 않으며, 국내 학계로부터 관련 응용연구가 발표된

바가 없다. 반면, 포머단조품이 없으면 우리의 일상생활이 사실상 불가능하다. 안경의 부품인 볼트가 한 예이다. 포머단조는 우리가 흔히 접하는 것으로 포머장비, 즉 다단자동단조기(Automatic multi-stage forging machine)를 근간으로 하는 것으로 광의의 프레스단조에 속한다고 볼 수 있다. 그러나 포머단조는 일반 프레스단조와 명확한 차이가 있다. 우선 장비가 자동화되어 있고, 고속생산이 기본이다. 냉간포머단조의 경우 단조 단계 사이에서 풀림 등의 열처리가 불가능하며, 절단 부위에서 피막처리가 되지 않는다. 일반 프레스단조가 대체적으로 직경이 30mm 이상의 제품을 대상으로 하는 반면, 포머단조는 초소형 제품의 단조에서 비교적 소재의 직경이 큰 제품까지 가능하다. 현재 국내에서도 포머장비로 직경 60mm 내외의 냉간단조품과 직경 150mm 내외의 열간단조품이 생산되고 있다. 물론 그 이상의 것은 현재로서는 불가능하지만, 그 영역이 점진적으로 상향조정

1. 경상대학교 대학원

2. 성진포머(주)

3. 생산기술연구원

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

될 것으로 판단된다. 그러나 제품의 크기에는 제한을 받을 수밖에 없다고 사료된다.

냉간포머단조는 특히 대량생산되는 초소형 축대칭 형상의 제품의 제조에 적합하다. 그러한 까닭으로 마이크로 포머단조[1-12] 분야가 크게 발전하고 있다. 마이크로 포머단조는 일반적으로 제품에서 두 개 이상의 치수가 1mm 이하인 경우를 일컫는다. 물론 제품의 최소 직경이 1mm 이하인 제품을 포함하는 의미로 사용됨이 옳다고 사료된다. 이러한 초소형 제품의 단조공정 개발 목적으로 단조 시뮬레이션 기술이 활용된 사례는 많지 않다. 상용 단조 시뮬레이터들이 대개 일반 프레스단조에 초점을 맞추어 개발되었고, 대기업 중심으로 단조 시뮬레이션 기술이 응용이 시작되었기 때문이라고 판단된다.

단조 시뮬레이터의 사용자가 단조품의 크기와 공정변수를 근거로 크기를 조절해야 하는 입력변수가 있다. 가령, 절점의 금형 침투 허용치, 최소 허용유효변형률속도, 재료의 금형 침투 허용치, 속도 비의존 문제의 금형 속도 등이 이에 속한다. 이러한 수치는 단조 시뮬레이터의 사용자가 제품의 크기, 금형속도 등의 공정변수, 해석 결과의 정확도 등을 고려하여 경험적으로 결정해야 하는 것이다. 그런데 이러한 수치들에 대한 기준치가 없으므로 인하여 경험을 체계화하는데 어려움을 겪고 있다고 판단된다. 따라서 본 연구에서는 기준이 되는 공정의 크기를 제안하고, 이를 바탕으로 공정해석을 실시함으로써 시뮬레이션 결과에 대한 신뢰성을 향상시키고 경험 기술을 체계화하는 방법을 제시하고자 한다.

2. 유한요소수식화 및 인자 분석

2.1 유한요소수식화

소성가공 공정에서 금형과 소재는 해석영역 V 와 경계영역 S 로 나누어지며, 경계영역 S 는 표면력이 $t_i = \bar{t}_i$ 로 주어진 경계 S_t , 속도가 $v_i = \bar{v}_i$ 로 주어진 경계 S_v , 금형과 소재의 접촉면을 표현하는 경계 S_c 등으로 세분화될 수 있다. 금형-소재 접촉면에서 압축력이 작용하면, 금형과 소재의 법선속도는 동일하다. 즉 S_c 에서 $v_n = \bar{v}_n$ 이다. 본 논문에서 하첨자 n 과 t 는 각각 법선성분과 접선성분을 의미한다.

소재는 비압축성, 강소성, 등방성 경화(Isotropic hardening) 등의 성질을 가지고 있으며 von Mises

항복이론과 관련 유동법칙을 따르며, 접촉면에서 일정전단마찰법칙을 따른다고 가정한다. 그리고 자중 및 가속도의 영향은 무시할 정도로 작다고 가정한다

소성가공 공정의 유동해석 문제는 소재의 속도장 v_i 를 구하자는 것이며, 벌칙기법을 이용하여 비압축성 조건을 처리하면, 다음의 약형으로 수식화된다.

$$\int_V \sigma'_{ij} \omega'_{ij} dV + \int_V K \dot{\epsilon}_{ij} \omega_{ij} dV - \sum \int_{S_t} \bar{t}_i \omega_i dS + \int_{S_c} \mu \sigma_n g(v_i) \omega_i dS = 0 \quad (1)$$

여기서 가중함수 ω_i 는 경계 S_v 에서 영의 값을 갖는 임의의 함수이고,

$$\omega_{ij} = \frac{(\omega_{i,j} + \omega_{j,i})}{2} \quad (2)$$

이다. 벌칙상수 K 는 매우 큰 값의 양수이며, 다음의 물리적 의미를 갖는다.

$$K \dot{\epsilon}_{ii} = \frac{\sigma_{ij}}{3} = -p \quad (3)$$

따라서 벌칙기법을 사용할 경우, 압력분포 p 는 속도장 해석결과로부터 자동적으로 구해진다.

식 (1)에서 K 는 전단항복응력이며, μ 은 마찰계수이다. 함수 $g(v_i)$ 는 접촉면에서 소재와 금형의 상대속도의 영향을 반영하는 함수이며, 접촉면에서 미끄럼이 발생하면 그 절대값이 1이 되고, 미끄럼이 발생하지 않으면 그 절대값이 1보다 작게 된다. 즉, 함수 $g(v_i)$ 는 상대속도가 마찰에 미치는 영향을 고려하는 역할, 수치적 문제점을 완화시키는 역할, 고착상태($v_i = \bar{v}_i$)를 만들어 줌으로써 전단응력이 이론적 한계를 못 넘게 하는 역할 등을 수행하는 함수이며, Chen과 Kobayashi [13]가 제안한 다음의 함수가 가장 널리 사용되고 있다.

$$g(v_i) = -\frac{2}{\pi} \tan^{-1} \left(\frac{v_i - \bar{v}_i}{a} \right) \quad (4)$$

여기서 v_i 와 \bar{v}_i 는 각각 소재와 금형의 접선속도성분을 나타내며, a 는 금형의 속도에 비하여 충분히 작은 양의 상수이다.

식 (1)에서 편차응력텐서 σ'_{ij} 는 소성유동법칙에 의하여 다음과 같이 변형률속도 $\dot{\epsilon}_{ij}$ 의 함수로 표현된다.

$$\sigma'_{ij} = \frac{2\bar{\sigma}}{3\bar{\varepsilon}} \varepsilon'_{ij} \quad (5)$$

여기서 $\bar{\sigma}$ 와 $\bar{\varepsilon}$ 는 각각 유효응력과 유효변형률 속도를 의미한다. 식 (1)을 유한요소법에 의하여 이산화시키면, 비선형방정식이 유도된다. 이와 관련된 상세한 내용은 참고문헌[14]으로 대신한다.

2.2 제품의 크기에 따라 영향을 받는 인자

단조 시뮬레이션 결과는 동일한 문제라도 사용자가 선택하는 변수들에 의하여 다소의 영향을 받는다. 대개의 경우, 단조 시뮬레이터 개발자가 추천하는 수치를 사용하거나 이론을 이해하는 상황에서 경험적으로 선택하였을 경우는 만족할만한 결과를 얻을 수 있다. 그런데 크기가 50mm인 제품의 단조공정 해석 문제를 주로 해결하던 사용자가 1mm급의 소형 단조제품의 단조공정 해석 문제를 접할 경우, 이론 전문가가 아닌 이상 당황하게 되고, 경우에 따라서 부적절한 결과를 얻게 되는 것이다. 다음에 제품의 크기에 따라 문제가 될 수 있는 요소들을 축대칭 또는 2차원 평면변형 문제를 대상으로 상술한다.

절점의 금형 침투 허용 깊이: 일반적으로 단조 시뮬레이션 중 절점의 금형 침범을 허용하고 있다. 절점이 금형을 침범하지 못하게 하면, 해석의 전진이 늦어지는 문제가 있다. 물론 침투한 절점의 위치는 인위적으로 가까운 금형 상의 점으로 수정된다. 금형의 침범 허용 수치는 해석 결과의 정확도와 해석 시간 등에 비교적 큰 영향을 주고 있다. 경험에 따르면, 원하는 해석 결과의 정확도의 50% 이하로 절점의 금형 침투 허용 깊이를 잡는 것이 바람직한 것으로 판단된다. 가령 0.02mm의 정확도로 해석하고자 할 경우 0.01 이하를 허용하는 것이 바람직하다. 대개의 프로그램들은 사용자의 큰 실수를 방지하기 위하여 기본값(default value)을 정해 두고 있다. 단조 시뮬레이터로 0.001mm의 정확도를 원하는 경우는 일반적으로 흔하지 않기 때문에 세심한 주의를 기울이지 않으면, 마이크로 포머단조 공정과 같이 치수 자체가 매우 작은 공정의 해석 시에 문제가 될 수가 있다. 프로그램의 기능이 많이 되어 있을수록 이런 문제는 더욱 심하게 된다.

소재의 금형 침투 허용 깊이: 가장 보편적으로 사용되고 있는 선형요소를 사용할 경우, 단조 시뮬레이션 시에 소재가 금형을 침투하는 것은 불가피하다. 곡선 상에서 인접한 두 절점을 연결하

면 소재의 경계는 금형을 벗어나거나 금형과 소재 사이에 빈 공간이 발생하는 것은 불가피하다. 일반적으로 단조 시뮬레이터가 일정 수준 이상 지능화되어 있을 경우 후자는 단조 시뮬레이션 중에서 잘 나타나지 않는다. 반면, 전자는 매우 흔하게 나타난다. 비록 요소망이 일그러지지 않았지만, 요소망 재구성을 실시해야 하는 상황이 발생하는 것이다. 이 때 필요한 것이 소재가 금형을 침투할 수 있는 깊이를 규제해 두어야 한다. 이 소재의 금형 침투 허용 깊이는 단조제품의 크기에 비교적 큰 영향을 받으며, 어느 정도의 경험적 요소가 결정하는데 작용할 수 있다.

최소허용유효변형률속도: 식 (5)의 분모에는 유효변형률속도 $\bar{\varepsilon}$ 가 존재한다. 이 값은 이론적으로는 탄성영역에서 0이며, 이 때 수치적으로 계산이 불가능한 문제에 빠지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 유효변형률속도가 최소허용유효변형률속도 이하가 되면 그 값 대신 이 최소허용유효변형률속도를 사용한다. 이 수치는 해석결과의 정확도와 수렴특성에 매우 큰 영향을 미친다. 만약 이 값을 크게 잡으면, 해는 비교적 쉽게 구해지겠지만, 특성영역의 과도한 수치적 변형을 야기시키므로 대부분 해의 정확도를 떨어뜨리는 역할을 한다. 반대로 이 값을 매우 작게 잡으면, 해는 보다 정답에 가깝게 될 가능성은 높지만 해의 수렴특성이 나빠지게 된다. 따라서 이 값을 결정하는데도 비교적 세심한 주의가 필요하다. 이 수치도 단조제품의 크기의 영향을 다소 받을 수밖에 없다.

3. ABS 슬레노이드 밸브용 부품의 포머 단조 공정의 해석

2장에서 상술한 문제들은 실제 일반적인 단조 공정, 즉 냉간단조에서 제품의 지름이 50mm 내의 이거나 열간단조에서 제품의 지름이 150mm 내의 일 경우는 별 문제가 되지 않는다. 그러나 그 크기가 매우 작은 마이크로 포머단조나 발전설비에 들어가는 대형단조제품의 경우에는 상황이 달라진다. 이 경우, 길이의 단위에 적당한 스케일을 곱하여 길이의 수치를 적절히 변환하여 수치상으로 일반적인 크기의 제품으로 만들어서 문제를 해결하는 것이 바람직할 수 있다. 본 연구에서는 단조 시뮬레이터에 이러한 기능을 부여하여, 마이크로 포머단조 공정에 적용 하였다.

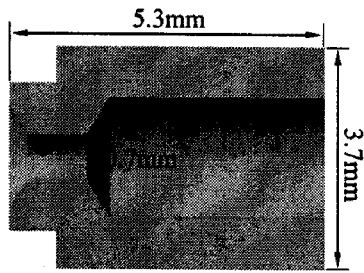


Fig. 1 Shape and dimension of objective product

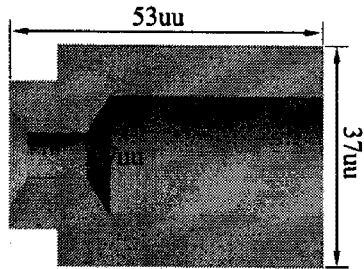


Fig. 2 Changed dimension

Fig. 1에 적용 대상의 단조품 도면을 나타내었다. 이 도면에서 보는 바와 같이 대상 제품의 크기는 매우 작다. 바깥 지름은 3.7mm이고 안쪽의 피어싱 부분의 직경은 0.7mm이다. 이 수치대로 단조 공정 해석을 실시하면, 단조 시뮬레이션의 지능화의 기능으로 인하여 프로그램 자체적으로 부여된 일부의 수치, 즉 기본값이 이 문제에 적합하지 않을 수 있다. 따라서 mm 대신 사용자가 정한 단위계를 사용하는 것이 바람직하다. 가령, uu의 단위를 다음과 같이 정의하자.

$$s \text{ uu} = 1 \text{ mm} \quad (6)$$

그러면 $s=10$ 일 경우 Fig. 1의 도면은 Fig. 2로 변경될 것이다. 그리고 재료의 변형저항식이 다음과 같을 때,

$$\bar{\sigma} = K\bar{\epsilon}^n \text{ kg/mm}^2 \quad (7)$$

이를 uu 단위로 나타내면 다음과 같이 된다.

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{100} K\bar{\epsilon}^n \text{ kg/uu}^2 \quad (8)$$

따라서 앞에서 서술한 다른 입력변수들을 개발자가 추천하는 수치로 두고 해석을 실시하면 전술한 단조품의 크기의 영향으로부터 자유로울 수가 있다. 단조 시뮬레이터를 개발한 저자도 사실

은 반경이 5000mm가 되는 대형 단조 공정을 해석할 경우 전술한 크기에 민감한 입력변수를 어떻게 해야 할지 망설여지는 경우가 허다하다. 이때는 전술한 방법으로 각자가 기준을 잡은 치수로 바꾸어 문제를 해결하는 것이 바람직하다. 이때 재료가 속도 의존적일 경우에는 반드시 속도도 같이 단위변환을 실시해야 한다는 사실이다.

Fig. 3에 실제 공정의 결과와 Fig. 4에 예측결과를 나타내었다.



Fig. 3 Experiment

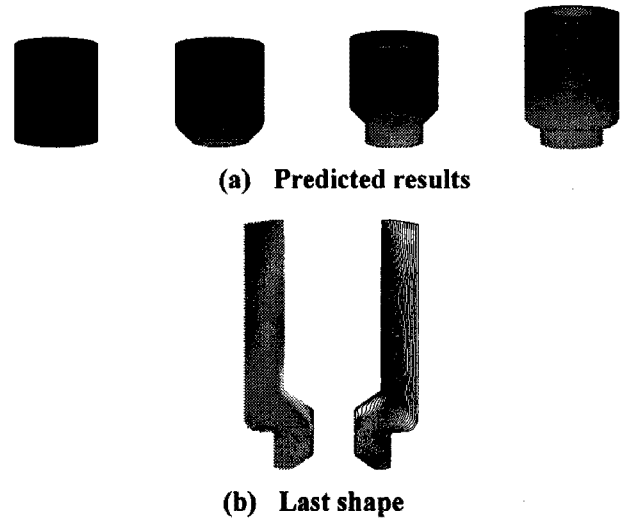


Fig. 4 Prediction

4. 결 론

본 연구에서는 단조 시뮬레이션에서 제품의 크기와 해석 결과의 연관성에 관하여 조사하였다. 절점의 최대 금형 침투 허용 깊이, 소재의 최대 금형 침투 허용 깊이, 최소허용유효변형률속도 등이 비교적 제품의 크기에 민감한 입력변수로 조사되었다. 마이크로 포머단조나 대형 열간단조의 문제를 해결하기 위하여 사용자 지정 단위를 사용함으로써 극소 또는 극대의 문제에서 대한 경험 부족 문제를 해소할 수 있으며, 단조 시뮬레이션 결과의 신뢰성을 보장받을 수 있다.

제시된 기법은 0.7 mm 피어싱 공정이 포함된 마이크로 포머단조 공정의 해석에 적용되었다. 이 수치를 10배 확대함으로써 치수상으로는, 즉 컴퓨터상에서는 마이크로 포머단조가 아닌 일반적인 냉간단조의 문제와 동일하게 간주하여 해석하였다. 그 결과, 실험결과를 비교적 정확하게 예측하였다.

후기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행 되었습니다.

참고문헌

- [1] N. N., Market Analysis for Microsystems 1996-2002, 1998, NEXUS Task Force.
- [2] N. Tiesler, U. Engel, M. Geiger, 1999, Forming of microparts – effects of miniaturization on friction, Proceedings of the 6th ICTP, Vol. 2, pp. 889 ~ 894.
- [3] J. Keepler, 1999, What's a good number, Fastener Technology International, www.Coldheadermachinecorp.com.
- [4] N. Tiesler, U. Engel, 2000, Microforming – Effects of miniaturisation, Metal Forming 2000, Proceedings of the 8th int. conf. on metal forming, Pietrzyk et al. (eds), Balkema, Potterdam, pp. 355 ~ 360.
- [5] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, 2001, Microforming, 51th General Assembly of CIRP, Nancy, pp. 445-462.
- [6] M. Geiger, M. Kleiner, R. Eckstein, N. Tiesler, U. Engel, 2001, Microforming, Ann. CIRP 50, pp. 445 ~ 462.
- [7] U. Engel, R. Eckstein, 2002, Micro forming- from basic research to its realization, J. Mater Process. Technol., Vol. 125 ~ 126, pp. 35 ~ 44.
- [8] N. Tiesler, 2002, Microforming – size effects in friction and their influence on extrusion processes, Wire, Vol. 1, pp.34~38.
- [9] F. Vollerston, Z. Hu. Schulze Niehoff, C. Theiler, 2004, State of the art in microforming and investigations in micro deep Drawing, Int. J. Mech. Sci., Vol. 151, pp. 70~79.
- [10] Y. Qin, 2006, Micro-forming and miniature manufacturing systems-development need and perspectives , Int. J. Mat. Pro. Tech. Vol. 177, pp. 8~18.
- [11] EU Masmicro Consortium, 2005, Project Technical Reports, NMP2-CT-2004-5000095.
- [12] Y. Xie, H. Yu, X. Ruan, 2005, Development and future of metal microforming technology, China Mech. Eng., 16, pp. 935 ~ 939.
- [13] C. C. Chen, S. Kobayashi, 1978, Rigid-Plastic FEA of Ring Compression, ASME AMD, Vol. 28, pp. 163~174.
- [14] 전만수, 이형일, 연속체역학에서 유한요소법 까지, (주)피어슨 에듀케이션 코리아.