

모델링진흙을 이용한 단조 성형 모사 실험

임용택

Physical Modeling Technique With Modeling Clay Of Metal Forming Processes

Y.T. Im

1. 서 론

소성가공은 소재의 손실을 최소로 줄이면서 원하는 형상의 제품을 가공하는 방식이다. 소성가공의 일종인 단조 공정은 간단한 형상의 소재를 금형을 통하여 복잡한 형상의 부품으로 만들어 주는 생산공정으로 대량생산을 가능케하고 또한 비교적 높은 강도를 가진 부품을 만들어 주기 때문에 자동차, 트럭, 항공기, 철도차량 등의 부품 생산에 적합하다. 그러나 복잡한 형상의 제품을 결함이 없이 만들거나 부수적인 기계가공 공정을 없애기 위한 공정설계를 위해서는 생산공정에 대한 보다 많은 이해가 필요하다.

따라서 단조 공정에서 보통 사용되는 경험법칙에 의한 단조 공정 설계가 제품의 결함을 유발한다든지 프레스에 손상을 입히거나, 또는 부품의 최종형상 및 치수가 원하는 값들과 맞지 않을 경우에 소모되는 재설계 및 이에 따른 새로운 공구들의 조합등은 막대한 손실을 초래하게 된다. 더구나 대부분의 단조공장들이 중소기업형이므로 체계적인 방법을 강구하기보다는 금형의 설계를 외국에 의존하는 것이 대부분이다. 그러나 최근 국제 시장에서 경쟁력을 확보

하기 위해서는 싼값에 고품질의 제품을 생산해야만 한다. 결국 이러한 요구사항들을 충족시키기 위해서는 사용하기 쉽고 체계적인 방법을 통한 단조 공정 설계방안의 강구가 필요하다.

단조 공정 중에 일어나는 재료들의 유동을 알아보기 위한 모델링 재료를 이용한 실험은 1950년 초기에 Green^[1]과 Cook^[2]에 의해 시도된 이후로 많은 주목을 받아 왔다. 모델링 재료를 이용한 실험은 공작물과 기하학적으로 상사성을 가진 재료를 사용하여 단조 공정을 모사하는 방법으로 재료비가 싸고 아크릴 등을 이용한 실험장치를 이용할 수 있기 때문에 비교적 유용한 자료들을 저렴하게 얻을 수 있는 장점이 있다. 지금까지 주로 사용된 모델링 재료들은 왁스, 탄소강, 모델링 진흙(플라스티신), 또는 납 등으로 이들에 대한 많은 연구가 진행되어왔다.^[3-7] 따라서 본 논문에서는 모델링 재료를 이용하여 단조 공정모사 실험을 수행하는 과정에 관해 간단히 알아보려고 한다.

2. 필요장비

모델링재료를 이용한 단조 공정 모사 실험에 필요한 기본 장비는 다음과 같다.

장비목록	근사단가
공기 오븐(air oven)	\$90000
로드 셀(load cell)	\$1,000000
직선변위측정기(LVDT)	\$50000
차트 기록기(Chart Recorder)	\$60000
자기블록(magnetic blocks)	\$48000
평판(parallels)	\$7000
프레스 받침대(press stand)	\$37500
공구용 현미경 (toolmaker's microscope)	\$1,70000
진공 압출기(vacuum extruder)	\$3,50000
프레스(변속 가능한)	\$4,00000
작업대	\$9500
컷터(wire slicer)	\$1,35000

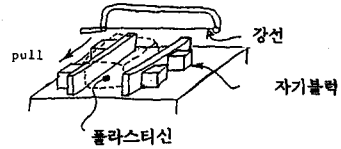


그림 1(b). 강선을 이용한 컷터로 플라스틱시를 슬랩으로 자르는 방법.

이들 장비들을 모두 구입하기 위해서는 대략 \$14,570(11,656,000원) 정도 필요하나 원하는 정도에 따라 장비를 줄일 수도 있고 압연기나 압출기를 용도에 따라 덧붙일 수도 있다. 그림 1(a), (b)에는 피아노선을 이용한 컷터(wire slicer)와 컷터를 이용하는 방법이 소개되어 있고 그림 2에는 필요한 모델 실험실의 유통도가 주어져 있다. 앞에 소개된 변속이 가능한 프레스는 핸드 프레스, 드릴링 머신등으로 대체가 가능하다.

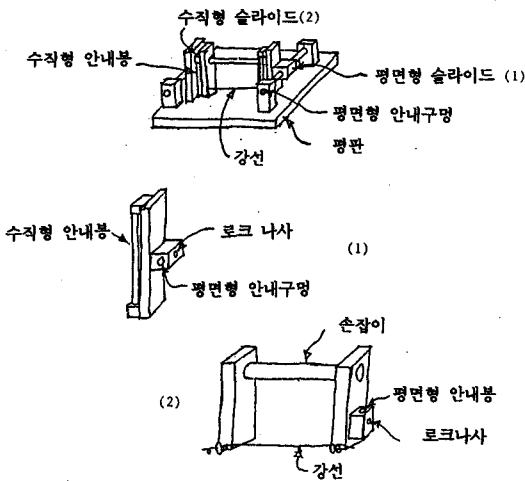


그림 1(a). 강선을 이용한 평면형/수직형 컷터의 설계도 및 세부도.

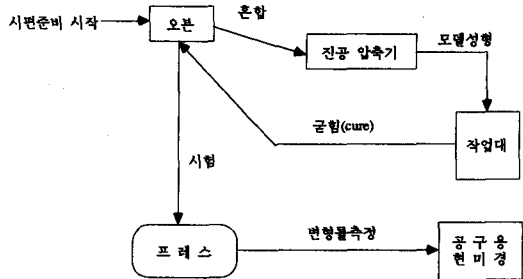


그림 2. 모델링진흙을 이용한 모사 단조실험 유통도.

3. 모델링 진흙을 이용한 단조모사 실험

모델링 진흙을 이용한 단조모사 실험은 세단계로 나뉘어진다: (1) 플라스틱과 같은 모델링 진흙과 다른 첨가물의 혼합, (2) 혼합된 모델링재료와 실제 재료와의 상사성 검토 및 가공 조건의 상사성 검토, (3) 혼합된 모델링재료를 이용한 초기 시편 가공.

제 1 단계

우리가 모사하고자하는 재료의 유동 특성을 나타내기 위해서는 모델링 진흙을 일정량의 바셀린(vaseline), 라노린(lanoline), 카올린(kao-line), 레진(resin)등과 혼합한다. 바셀린과 라노린은 모델링재료에 초소성(superplasticity)적인 특성을 첨가해 주는 것으로 알려져 있으며 레진은 혼합물 유동응력의 변형률도(strain-rate)에 대한 민감도를 낮춰준다고 알려져 있

다. 표 1에는 모델링재료의 무게비에 따른 혼합물 유동응력의 변형률도에 대한 민감도가 주어져 있다. 또한 그림 3과 4에는 모델링진흙의 일종인 플라스틱신의 유동응력을 변형률, 변형률도에 따라 나타내었는데 이는 열간가공 시에 강의 유동 특성이 변형률도에 민감하므로 혼합물의 무게비를 조절함으로 고온에서의 재료의 유동응력을 모사할 수 있다는 것을 보여주고 있다.

표 1. 혼합 무게비에 따른 모델링재료의 유동응력과 변형률도와의 관계

	모델링진흙 (Plasticine)	바셀린 (Vaseline)	카오린 (Kaoline)	라노린 (Lanoline)	레진:라노린 (Resin: Lanoline) 10:4	레진:라노린 (Resin: Lanoline) 10:5	변형률 도지수* \bar{m}
1	100						0.05
2	100	2					0.07
3	100		3				0.03
4	100			2			0.07
5	100	5			6		0.15
6	100	5			6		0.09
7	100	2			2		0.09
8	100			5		5	0.31
9	100			10		10	0.43
10	100	13				10	0.14
11	100	2		10		10	0.40

* 유동 응력의 변형률도에 대한 민감도 지수($\sigma=C\epsilon^{\bar{m}}$)

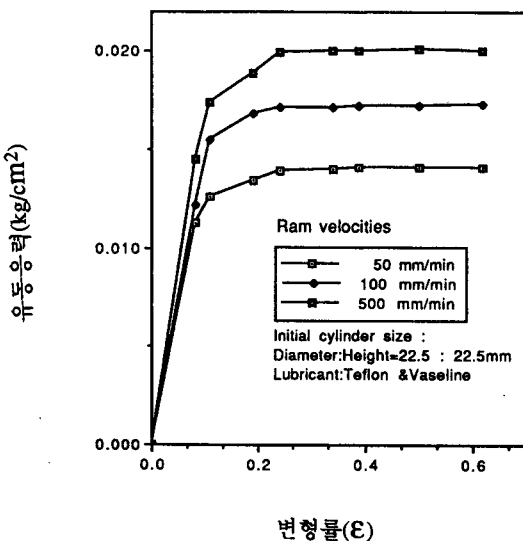


그림 3. 플라스틱신의 유동응력^[7].

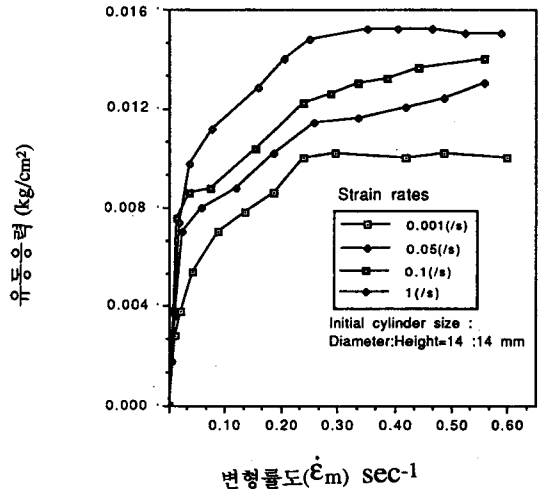


그림 4. 플라스틱신의 변형률도에 대한 민감도^[7].

일단 모델링재료의 혼합물 무게비가 정해지면 모델링진흙과 첨가제들을 완전하게 혼합하여 균일한 재료로 만든다. 혼합을 하기 위해서는 50도로 유지된 오븐 속에서 모델링재료를 가열한 후 진공 압출기를 이용하여 효율적인 혼합을 이룰 수 있으나 손으로 첨가제들을 배합하여 혼합을 할 수도 있다. 진공 압출기를 이용할 때 얻을 수 있는 장점들은 아래와 같다.

- (1) 완전히 균일한 재료의 배합이 가능하다.
- (2) 재료내에 포함되어 있는 기포를 제거하는데 유리하다.
- (3) 기사용된 모델링진흙을 재사용할 수 있다.
- (4) 대량의 진흙들을 신속히 다룰 수 있다.
- (5) 다양한 단면들을 압출할 수 있다.

물론 진공 압출기를 사용하게 되는 경우 압출기를 구입하기 위한 경비, 압출기의 워밍업시간(warm-up time), 그리고 여러가지 색깔을 이용할 경우에 필요한 기계 세척등 단점도 있다. 압출기를 이용하거나 또는 손으로 혼합을 하거나 균질한 모델링 재료를 만들도록 주의하여야 한다. 이는 만일 재료내의 불균일한 부분(hard spots)이 포함되어 있는 경우 단조시 유동이 불균일 해 질 수 있기 때문이다.

제2단계

일반적으로 상사성을 검토하기 위해서는 재료의 항복 특성과 모델링재료의 항복 특성을 재료시험(일반적으로 압축시험)을 통해 비교해보고 또한 가공조건의 상사성을 알아보기 위해서는 금형과 가공물 사이의 마찰조건을 비교 검토해야 한다. 이를 위해 흔히 링을 이용한 압축 실험이 많이 이용되고 있으며 필요한 자료들이 다른 문헌에 나와 있으므로 여기에서는 자세한 설명은 생략하기로 한다^[5].

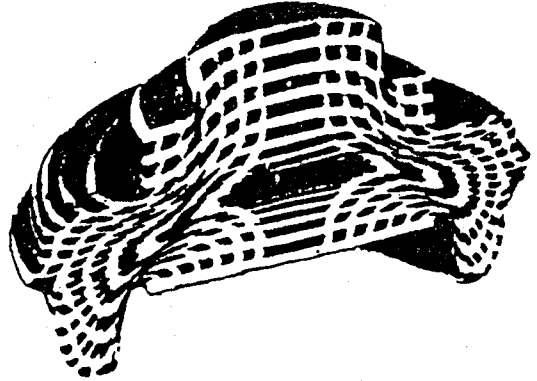


그림 5. 백색과 흑색 플라스틱신을 이용한 변형된 체커보드형 격자 형상.

제3단계

상사성이 검토되어 적합한 모델링 재료가 이루어지면 마지막 단계인 이 단계에서는 필요한 실험에 사용될 시편을 만드는 다음과 같은 4단계 작업을 한다: (a) 모델링재료를 원하는 기하학적 조건을 갖춘 빌렛으로 압출 또는 성형시킨다. (b) 압출 또는 성형된 빌렛을 슬랩으로 자른다. (c) 변형률을 측정하기 위해 각각의 슬랩에 격자를 그린다. (d) 각각의 슬랩들을 합쳐 필요한 형상의 초기 시편으로 조립한다.

이중 첫번째 단계를 위해서는 진공 압출기를 원하는 단면형상의 노즐을 부착하여 압출하거나 또는 유압프레스에 나무로된 모울드를 부착하여 성형하는 방법을 이용할 수 있다. 모델링재료는 50도 정도로 가열하면 쉽게 성형할 수 있으나 나무로된 모울드에 진흙이 들어붙는 것을 방지하기 위해 탈칼분말(talcum powder)을 뿌려야 한다. 압출 또는 성형된 시편들을 자르는 작업은 쉽지 않다. 이를 위해 그림 1에 주어진 바와 같은 평면형 또는 수직형의 강선(피아노선)을 이용한 컷터가 특별히 고안돼 이용되고 있다.

격자를 그리는 방법으로는 슬랩의 표면 위에 인디아 잉크를 이용해 직접 그리는 방법과 또한 여러 색깔의 체커보드를 만들어 격자를 만드는 경우도 있다(그림 5 참조). 이 방법을 이용하면 변형률을 측정하기에는 유리하나 체커보드를 만들기가 복잡하므로 많은 시간이 드는 단점이 있다.

앞에서 준비된 슬랩들을 재조합하기 위해서는 석유로 만들어진 투오너를 슬랩표면에 뿌려 슬랩들이 서로 붙는 것을 돕도록한다. 슬랩끼리 완전한 결합이 이루어지게하기 위해 약간의 힘을 가해 탄성변형을 주고 50℃의 오븐에서 24시간 가량 가열한다. 가열이 끝난 후에는 시편을 대기온도까지 냉각하여 실험을 수행한다.

4. 단조실험

단조실험에 필요한 장비는 실험자의 필요에 달려 있으나 일반적으로는 모델링재료의 유동응력이 낮기 때문에 투명한 아크릴을 이용한 금형을 이용할 수 있는 장점이 있다. 물론 실험에서 주의하여야 할 점으로 다음과 같은 것들이 있다.

마찰력

단조실험에 있어서 가장 중요한 공정변수는 금형과 가공물 사이의 마찰력이므로 모사실험의 정확성을 기하기 위해서는 마찰력의 상사성도 이루어져야 한다. 그림 6에는 모델링진흙을 이용한 링실험 결과가 주어져 있다. 이 그림을 보면 각 윤활제들의 윤활상태를 알 수 있으며 이 값들은 열간단조 공정시 전단마찰계수 값이 대략 0.1에서 0.5정도이므로 실제 공정에서 일

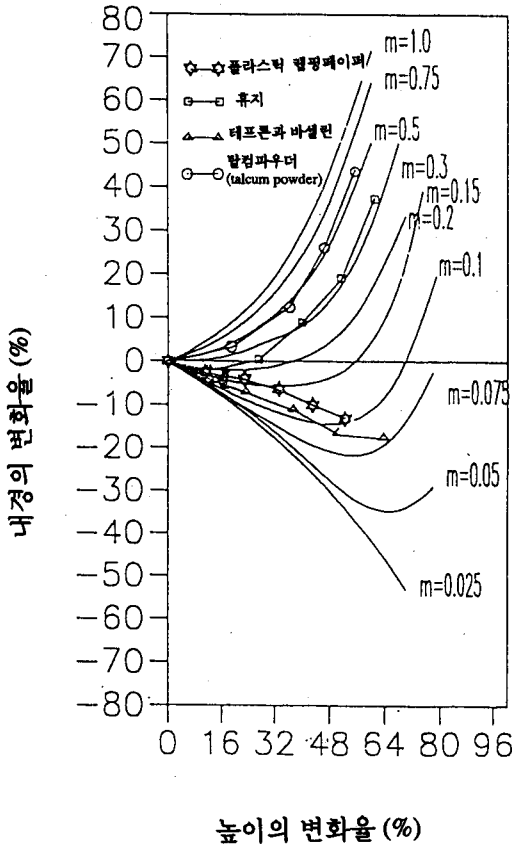


그림 6. 모델링진흙(외경:내경:높이=6:3:2)의 링 시험을 이용한 각종 윤활제의 마찰상수값^[7].

변형

모사실험에서 고려되어야 될 또다른 인자가 탄성변형양인데 일반적으로 필요한 금형 변위에 약 2%정도를 더함으로써 탄성변형양을 고려해 줄 수 있다. 보다 복잡한 형상의 단조 실험에서는 실험에 의해 필요한 탄성변형양을 알아내야 한다.

측정

단조하중, 금형변위, 램속도, 변형률 등이 측정될 수 있는 대표적인 값들이다. 물론 압력 트랜스듀서(pressure transducer)를 시편에 묻어 두어 응력 값들을 측정할 수도 있다. 단조하중은 대략 20-2000파운드의 로드셀을 이용하여 측

정하고 이 값은 측정온도와 속도에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 시편 내부의 변형을 알기 위해서는 시편을 강선을 이용한 컷터로 격자들이 나타나게 잘라내어 공구용 현미경으로 격자들의 길이를 재면된다. 만일 얇은 층을 적층한 시편(lamella specimens)을 이용할 경우 실험을 하는 동안 층이 떨어지지 않도록 하고 또한 금형에서 모델링진흙을 떼어내는데 주의를 기해야 한다. 이는 모델링진흙이 약해서 작은 힘에도 변형을 일으키기 쉽기 때문이다. 또한 시편을 이용할 경우 단조하중은 슬랩의 폭에 수직인 방향으로 작용시켜야 한다. 만일 시편이 단조하중에 수직인 슬랩들과 일치하지 않는 경우에는 슬랩들의 얇은 층이 떨어지게 되는데 이는 단조시 슬랩들 사이의 인장과 전단응력이 커지기 때문이다. 복잡한 형상의 단조실험시에는 약간 높은 온도에서 좀더 오랜 시간동안 오븐에서 가열하는 것이 이와같은 얇은층 떨어짐을 방지해 줄 수 있다.

실험예

그림 7에는 도움형상의 단조공정을 플라스틱신을 이용하여 실험한 예를 보여주고 있는 데

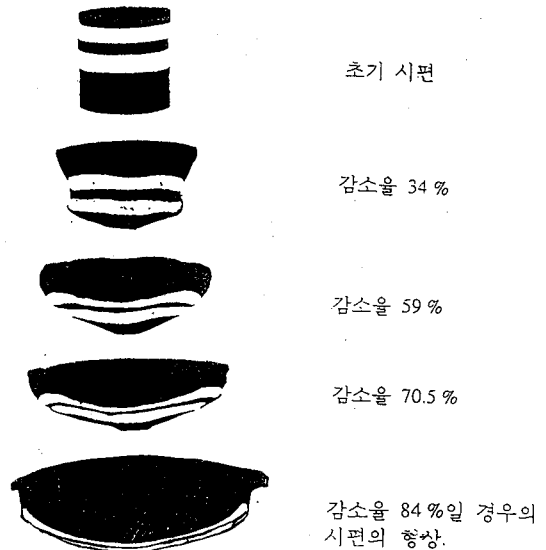


그림 7. 모델링진흙을 이용한 폐쇄단조 모사실험 예^[7].

이 그림을 보면 단조 공정시 재료의 유동을 쉽게 알아 낼 수 있다는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

앞에서 살펴본 바와 같이 모델링재료를 이용한 단조모사 실험은 이론적으로 해석하거나 실제 규모로 실험을 하기 어려운 새로운 공정을 이해하고 설계하는 데 많은 도움을 경제적으로 얻을 수 있는 장점이 있다. 따라서 중소기업에서도 쉽게 도입하여 사용할 수 있으며 새로운 제품을 생산하기 위한 금형개발에 많은 도움을 얻을 것이다.

감사의 글

이 논문을 정리하고 그림을 만드는 데 도움을 준 주은덕군에게 감사를 표한다.

참고문헌

1. Green, A. P., "The Use of Plasticine Models to Simulate the Plastic Flow of Metals," *Phil. Mag.*, April, 1951, p.365.
2. Cook, P. M., "Forging Research: Use of Plasticine Models," *Metal Treatment and Drop Forging*, November, 1953, p.541.
3. Wanheim, T., Maegaard, V. and Danc-kert, J., "The Physical Modeling of Plastic Working Processes," *Advanced Technology Plasticity*, Vol.1, 1984, p.984.
4. Shah, d. C., "Use of Metallic Materials to Model the Plastic Flow and Fracture of Steel in Cold Upsetting," *Proceedings of 16th Mechanical Working and Steel Processing Conference*, January 23-24, 1974, Dolton, Illinois.
5. Erman, E. and Semiatin, S. L., "Physical Modeling of Metalworking Processes," A Publication of the Metallurgical Society, Inc. 1987.
6. Azushima, A, and Kudo, H., "Physical Simulation for Metal Forming with Strain Rate Sensitivity Model Material," *Yokohama Univ., Japan*, 1987, to be published.
7. 이근안, 임용택, 이종수, 홍성석, 1992, "모델링재료를 이용한 축대칭형 돔형상의 폐쇄단조 성형 연구(I)," *기계학회 제출중*.