

소성유동선도를 강조한 소성가공 시뮬레이션과 그 적용 사례

엄재근¹ · 정승원² · 전만수[#]

Metal Forming Simulation with Emphasis on Metal Flow Lines and its Applications

J. G. Eom, S. W. Jeong, M. S. Joun

(Received June 19, 2013 / Revised July 22, 2013 / Accepted July 26, 2013)

Abstract

In this paper, the flow lines as a function of product design as well as the forging process design are explored using typical application examples. The prediction of flow lines using metal forming simulation technology is introduced along with their characterization. Experimental studies have shown that the metal flow lines have a strong influence on the structural rigidity of the final product. In this study we present several typical applications. One example is the case of severely cut metal flow lines during machining, especially in the region where periodic contacting forces are applied. Another example is the case of abnormal distortion of flow lines which can cause too much elongation or hot shortness due to viscous heating in the region of distortion. A third example is the case of a macrosegregation region which needs to be controlled so it is not adjacent to the region where the force is applied in the use of the final component. An example of weight reduction for an automobile component with improved flow lines is also introduced. These typical applications can provide process engineers with the insight in designing automobile or mechanical components as well as in designing the manufacturing methods to produce various parts.

Key Words : Failure in Metal Forming, Metal Flow Lines, Strength of Product, Metal Forming Simulation

1. 서론

소성가공공정의 개발 과정에서 많은 비용과 소요 시간을 투자함에도 실패하는 경우가 많다. 소성가공 시뮬레이션 기술은 결함 제거에 매우 효과적이며 많은 비용과 시간이 소요되는 시행 착오를 대체하고 있다[1~3].

미충진 결함이나 겹침 결함의 경우 소성가공시뮬레이션 기술을 사용하여 손쉽게 수정할 수 있으며, 많은 실제 상황에서 이러한 결함은 경험을 바탕으로도 제거할 수 있다. 그러나 소성유동선 결함은

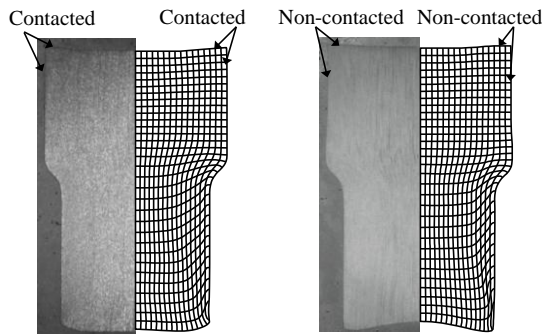
경험적으로 제거하기는 매우 어려우며, 대부분의 동력전달 부품은 고유의 최적의 소성유동선을 갖고 있다.

소성유동선은 주조된 소재를 사용하여 압출, 압연, 인발 등의 공정을 거쳐 단조용 소재로 제조하는 과정에서 형성된다. 즉, 주조 공정에서 형성된 결정은 길이 방향으로 변형되거나 배열된다. 그 소재를 길이 방향으로 자른 후 그 단면을 연마하여 화학적으로 부식시키면, 결정경계가 먼저 부식되면서 길이 방향으로 형성된 결이 가시화된다. 이러한 결정들의 길이방향의 배열을 소성유동선(metal flow lines)

1. 경상대 수송기계부품기술혁신센터

2. 경상대학교 기계공학부 대학원

Corresponding Author : School of Mechanical and Aerospace Engineering, Gyeongsang National University, E-mail: msjoun@gnu.ac.kr



(a) SCM435

(b) ESW105

Fig. 1 Comparison of metal flow lines between experiments(left) and predictions(right) of a forward extrusion process

이라고 한다. 소성유동선은 소재의 거시적 특성에 직접적인 영향을 미치며, 단조품의 소성유동선의 건전성을 평가하는 측면에서도 매우 중요하다.

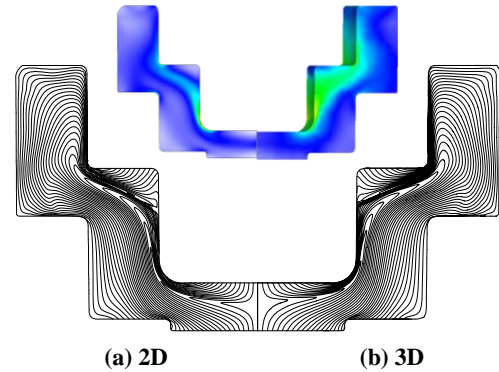
Fig. 1(a)는 압출공정의 소성유동선을 나타내었다. 압출이 실시되지 않는 부분에서도 소성유동선이 형성됨을 볼 수 있으며 압출, 단조 과정에서 소성유동선이 새로이 형성되는 것이 아니라 그 무늬만 바뀌는 것을 의미한다.

소성유동선은 구조강도와 깊은 연관이 있으며, 최적화된 소성유동선을 찾는 연구는 매우 중요함에도 불구하고 활발하지 않다[5~8]. 대부분의 경우 최적화된 소성유동선은 과학적 증거가 아닌, 전문가들의 통찰력에 의해 결정되고 있다. 대부분의 전문가들은 일그러진 소성유동선보다 부드러운 소성유동선을 선호하며 불연속한 소성유동선은 바람직하지 않다고 경험적으로 생각한다. 사실 많은 공정설계 기술자와 기계 부품 설계 기술자들에게 최적화된 소성유동선에 대한 근거자료가 부족하다. 따라서 실험과 해석을 바탕으로 소성유동선을 최적화할 수 있는 보다 체계적인 접근이 필요하다.

본 논문에서는 소성유동선을 고려한 공정 설계의 중요성을 적용 사례를 이용하여 강조하였으며, 구조강도에 미치는 소성유동선의 효과를 적용 경험을 바탕으로 소개한다.

2. 소성유동선 해석

Fig. 1에서 SCM435와 ESW105 두 재료에 대하여 축대칭 압출공정의 실험과 해석결과를 비교하였다[4].



(a) 2D

(b) 3D

Fig. 2 Comparison of metal flow lines obtained by 2D and 3D simulations

ESW105는 압출공정 전 열처리를 실시한 선조질강이며 압출공정 과정에서 소성유동선이 지워지거나 변형되지 않는다. 두 재료를 압출한 실험과 해석 결과, 끝 모양이 매우 비슷하며 펀치의 가장자리 또한 매우 유사함을 확인할 수 있다.

소성가공 시뮬레이션 기술은 소성유동선을 세부적으로 예측하는데 매우 효과적이다.

소성유동선도의 예측 기법은 그 결과에 상당히 큰 영향을 미친다. Zhang[7]의 연구에서 소성유동선의 결과가 상당한 오차를 보이고 있다. Joun[8]등은 2차원 소성유동선의 정교한 예측 기법을 개발하였으며, 최근에는 3차원 소성유동선의 예측 기법을 개발하였다[9]. Fig. 2는 대표적인 적용예제를 나타내고 있다.

Fig. 2에서 2차원과 3차원의 소성유동선을 비교하였다. 선행연구[10]에서 2차원 해석결과를 실험결과와 비교하였으며 서로 잘 일치하는 결과를 얻었다. Fig. 2의 2차원과 3차원의 해석결과의 비교에서 보는 바와 같이, 두 결과의 이론적 배경의 차이와 기법의 수치적 차이로 인하여 미미한 차이는 불가피하지만, 그 차이는 공학적 관점에서 무시할 수 있다. 전반적으로 볼 때, 사각형요소의 축소적분과 사면체요소의 MINI-기법의 사용으로 인한 2차원과 3차원 결과의 차이는 불가피하며, 하부에서의 소성유동 차이는 3차원 해석에서 적은 요소로 인하여 다소 불가피한 요소밀도의 영향과 마찰을 반영하는 기법의 영향에 따른 것이다.

3. 소성유동선을 고려한 공정설계

3.1 소성유동선에 의한 강도 저하

Fig. 3과 같이 등속조인트[11]에 대한 서로 다른 두 개의 3단축대칭열간단조 공정은 매우 다른 소성유동

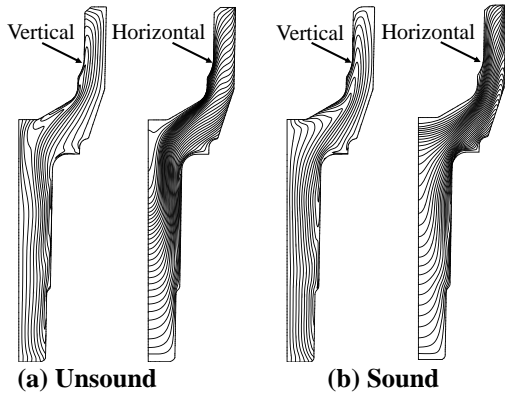


Fig. 3 Two metal flow lines for two different process designs

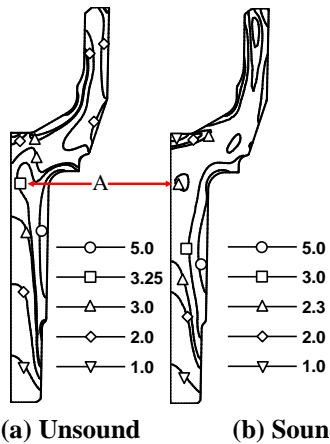


Fig. 4 Effective strain distribution



Fig. 5 Experiment of tensile load

선을 형성했다. 소성유동선의 차이는 Fig. 4와 같이 다소 다른 유효응력분포를 발생시켰으며, 이는 두 번째 단계의 금형 형상의 차이로 인해 나타났다.

Fig. 5는 인장하중의 실험결과를 나타내었으며, 실험결과 Fig. 3의 왼쪽 소성유동선을 가진 단조품이 오른쪽 소성유동선을 가진 단조품보다 약 20% 정도

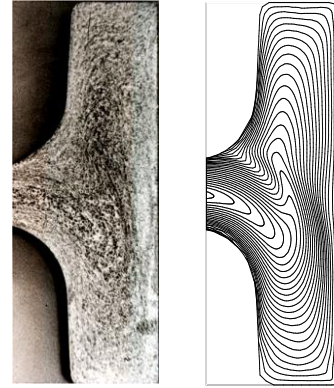


Fig. 6 Comparison of metal flow lines

적게 인장하중을 지탱하였다. 그 이유는 복잡하다. 물론 소성유동선 자체는 구조강도에 직접적인 영향을 미칠 수 있다. 깨진 영역에서의 잘못된 공정설계로 인한 뒤틀린 소성유동선은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 그 부위에 심한 변형을 야기시키며 이로 인한 소성열은 결과적으로 고온취성으로 인한 구조강도의 저하를 초래한다.

3.2 비대칭 소성유동선

어떤 부품은 기하학과 역학적 대칭면을 모두 갖고 있으며 이 경우, 그 최적설계는 기계적 특성에 관한 대칭 요구사항을 충족해야 한다. 특히 대칭부분이 마멸에 노출되어 있을 때 소성유동선은 대칭이어야 하며 비대칭일 경우 강한 쪽이 정상상태를 유지할 하더라도 약한 쪽에서 조기 파열이나 마모가 발생할 수 있다. 전형적인 예는 허브 베어링 제조업체에서 발견되었다.

Fig. 6은 베어링 부품에 대한 3D 열간 단조 공정 해석결과와 실험결과의 소성유동선을 비교하였다. 공정에 대한 자세한 정보는 참고문헌[12]으로 대신한다. 이 예제는 단조품의 표면 결함이 없음에도 불구하고 비대칭 및 부적합한 소성유동선으로 인해 실패한 공정설계를 보여주는 전형적인 예이며 특히 소성가공 시뮬레이션의 중요성을 강조하고 있다.

3.3 최적의 소성유동

Fig. 7(a)에서는 과거에 경험에 의해 개발된 자동차 부품 단조공정의 실험결과와 해석결과를 비교하였고, Fig. 7(b)에서는 최적화된 단조공정에 의하여 제조된 제품을 나타내었다[13].

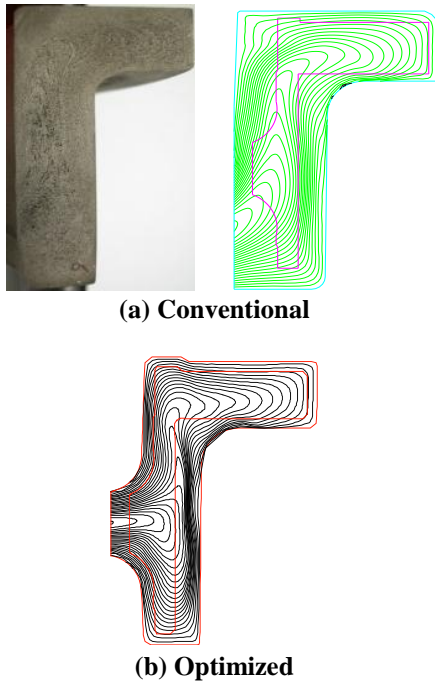


Fig. 7 Metal flow line optimization and weight reduction of an automobile part

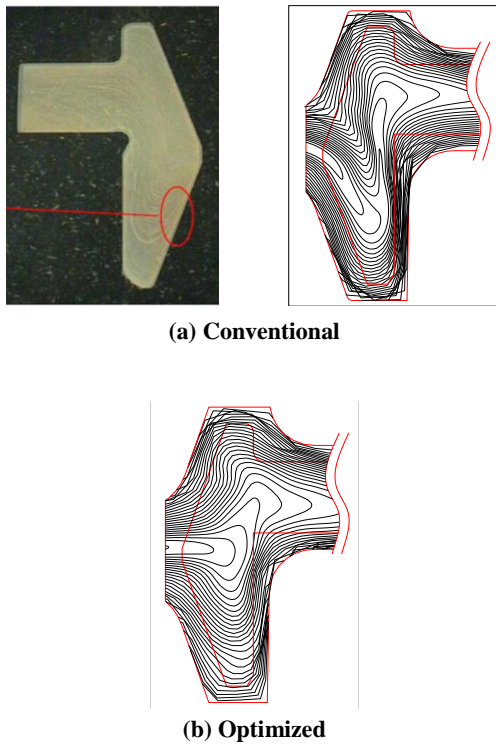


Fig. 8 Optimized placement of macrosegregation region

과거의 제품에 비해 새 제품은 최적화된 소성유동선에 의한 구조강도의 증가로 무게를 약 10% 감소시키는데 기여하였다. 이 예제는 소성유동선을 고

려하여 최적의 단조공정설계의 중요성을 강조하고 있다. 실제로 소성유동선의 최적화는 강도 증가의 효과가 있으므로 경량화 및 환경보호에 공헌할 수 있다.

3.4 편석영역 수정

주조과정에서 재료의 좋지 않는 특성을 가진 편석부분이 형성되며, 이는 강도를 저하시키는 요인이다. 따라서 대부분의 동력 전달 부품에 대해 편석부분은 신중하게 통제해야 한다. Fig. 8과 같이 플랜지를 가진 자동차 부품에 대한 실제 응용 사례에서 찾아 볼 수 있다. Fig. 8(a)의 불량 소성유동선은 Fig. 8(b)의 소성유동선을 최적화하기 위해 시뮬레이션 기술을 적용하기 이전에 자동차 부품에 사용되었다.

Fig. 8(a)는 편석영역이 하부에 위치해 있으며 반대쪽의 소성유동선 역시 절단되는 전형적인 불량 소성유동선을 가진 생산품을 보여준다. Fig. 8(b)는 최적화의 결과로 획득된 최적 소성유동선을 나타낸다.

4. 결론

소성가공 시뮬레이션은 소성가공공정의 개발에 필수가 되었다. 컴퓨터 하드웨어 기술의 발전에 의해 주요 문제는 학문적 연구대상에서 적용의 영역으로 옮겨왔다. 소성가공품의 소비자들은 이 기술을 사용하도록 제조업체에 요청하는 빈도가 증가할 것이다. 특히 소성가공 시뮬레이터의 응용프로그램은 자동차 산업에 필수적이 되었다.

소성가공 시뮬레이션 기술의 가장 중요한 역할 중 하나는 이 기술 없이는 달성될 수 없는 최적화된 소성유동선을 획득할 수 있도록 하는 것이다.

본 논문에서는 소성유동선은 제품의 구조강도에 큰 영향을 미친다는 것을 전형적인 적용 사례를 통해 강조하였다. 예를 들어 기계가공 시에 소성유동선의 절단은 특정영역에서 최소화되어야 한다. 과도한 국부 소성열에 의한 고온취성이나 큰 연신율이 손상된 소성유동선을 발생시킬 수 있기 때문이다. 또한 편석영역이 힘 지지 영역과 인접하지 않도록 통제되어야 한다.

후 기

본 연구는 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역

혁신인력양성사업과 중소기업청의 업종공통기술 개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임.

REFERENCES

- [1] M. S. Joun, M. C. Kim, D. J. Yoon, H. J. Choi, Y. H. Son, 2011, Proc. ASME 2011 Int. Manu. Sci. Eng. Conf., ASME, Oregon, USA, p. 117.
- [2] M. S. Joun, M. C. Lee, J. G. Eom, 2011, Proc. ASME 2011 Int. Manu. Sci. Eng. Conf., ASME, Oregon, USA, p. 113.
- [3] H. K. Moon, J. S. Lee, S. J. Yoo, M. S. Joun, J. K. Lee, 2007, Hot Deformation Behavior of Bearing Steels, *J. Eng. Mater. Technol.*, Vol. 129, No. 3, pp. 349~355.
- [4] 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. Modern Physics B*, Vol. 22, No. 31~32, pp. 5774~5779.
- [5] M. Arentoft, P. Henningsen, N. Bay, 1994, Simulation of Defects in Metal Forming-an Example, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 45, No. 1~4, pp. 527~532.
- [6] P. Petrov, V. Perfilov, S. Stebunov, 2006, Prevention of Lap Formation in Near Net Shape Isothermal Forging Technology of Part of Irregular Shape Made of Aluminum Alloy A92618, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 177, No. 1~3, pp. 218~223.
- [7] Y. Zhang, D. Shan, F. Xu, 2009, Flow Lines Control of Disk Structure with Complex Shape in Isothermal Precision Forging, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 209, No. 2, pp. 745~753.
- [8] M. S. Joun, S. W. Lee, J. H. Jung, 1998, Finite Element Analysis of a Multi-stage Axisymmetric Forging Process Having a Spring-attached Die for Controlling Metal Flow Lines, *Int. J. Mach. Tools Manuf.*, Vol. 38, No. 7, pp. 843~854.
- [9] M. S. Joun, M. C. Lee, J. G. Eom, 2013, Proc. Kor. Soc. Tech. Plast. Spring Conf., Kor. Soc. Tech. Plast., Seoul, Korea, pp. 106~109.
- [10] M. S. Joun, AFDEX 2D, Metal Forming CAE 2008, pp. 187~188.
- [11] Y. B. Yu, 2008, Yu Young Bong's Wheel Alignment, Goldenbell, Seoul, Korea, p. 426.
- [12] M. S. Joun, H. K. Moon, R. Shivpuri, 1998, Automatic Simulation of a Sequence of Hot-former Forging Processes by a Rigid-thermoviscoplastic Finite Element Method, *J. Eng. Mat. Tech.*, ASME, Vol. 120, No. 4, pp. 291~296.
- [13] H. K. Moon, S. C. Moon, J. G. Eom, M. S. Joun, 2005, Optimization of a Hot Forging Process using Six Sigma Scheme and Computer Simulation Technology Considering Required Metal Flow Lines, *Trans. Mater. Process.*, Vol. 14, No. 9, pp. 798~803.