

비조질강의 바우싱거 효과에 미치는 변형을 영향

권용남¹, 이영선¹, 김상우¹, 이정환¹

Effect of Pre-strain on the Bauschinger Phenomenon of Micro-Alloying Forging Steel

Y.-N. Kwon, Y. S. Lee, S. W. Kim and J. H. Lee

Abstract

In the present study, Bauschinger effect was investigated for the micro-alloying forging steel which has been developed for about 30 years ago to save energy consumption by eliminating the heat treatment processes in the forging industry. The micro-alloying steels used for cold forging industry mainly aim to replace the usual carbon steel. With the conventional carbon steels, all the deformation history can be eliminated after the final heat treatment(quenching and tempering). In the case of micro-alloying forging steels, however, the prior deformation history should be taken into consideration to meet the mechanical property requirement since the microstructure of micro-alloying steels might exhibit the Bauschinger effect, which was not needed to consider in the case of conventional carbon steel having quenching and tempering treatment. In the present study, the reverse loading tests were carried out to determine the Bauschinger effect of micro-alloying steel which composed of ferrite and cementite phases.

Key Words : Bauschinger effect, Micro-alloying forging steel, Pre-strain, Reversal Loading

1. 서론

비조질강은 자동차 구동시스템 및 회전 부품으로 사용되고 있는 조질강을 효과적으로 대체할 수 있는 소재로 기존의 단조 후 담금질(quenching) 및 뜨임(tempering) 처리를 생략함으로써 단조품 생산에 필요한 에너지를 혁신적으로 절감할 수 있다. 독일에서 시작된 비조질강의 개발에 일본의 철강사들이 참여하여 다양한 비조질강들이 개발되고 있으며 최근에는 새로운 압연/냉각 설비를 이용한 제어압연/제어냉각 기술 및

새로운 합금설계를 이용하여 기존 소재에 비해 고강도, 고인성화를 달성하고자 하는 시도가 계속되고 있다.

자동차 산업을 비롯한 대부분의 냉간 단조품 제조에 사용되어 온 기존 중·저 탄소강과는 달리 비조질강의 강화기구는 V, Ti, Nb 등과 같은 합금원소를 첨가하여 페라이트상내에 미세한 입자를 석출하는 개념을 이용하고 있다. 추가적인 강화 방법으로 압연, 신선, 냉간 단조를 거치는 과정 중의 축적되는 가공경화를 이용하는 것이다.

일반적으로 강한 이상 입자를 포함한 재료에서

1. 한국기계연구원 소재성형연구센터
권용남, E-mail: kyn1740@kmail.kimm.re.kr

바우싱거 현상은 쉽게 관찰되고 있다. 즉, 초기 응력 방향에 대해 반대 방향으로 변형을 할 경우 변형 저항이 감소한다. 그림 1 은 초기 변형 후 반대 방향으로 변형을 가한 경우에 발생하는 바우싱거 효과를 도식적으로 나타낸 것으로 바우싱거 효과를 정의하는 인자들을 나타내고 있다.

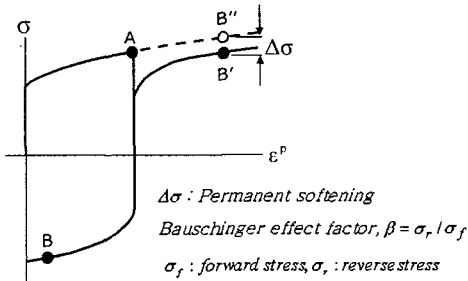


Fig. 1 Schematic diagram of Bauschinger effect from the reversal loading[1].

비록 일반적인 저탄소강의 냉간 단조시에도 구상화처리된 탄화물 입자를 가진 이상조직으로 인해 바우싱거 효과가 발생할 수 있으나 이에 대한 고려가 중요하지 않은 이유는 제품의 최종적인 물성이 담금질과 뜨임을 통해 결정되기 때문이었다. 이에 비해 비조질강의 경우 단조제품의 부위별 가공량 및 바우싱거 효과의 차이에 따라 성형품의 부위별 강도 분포의 변화의 가능성이 높다. 결국 세멘타이트와 페라이트로 구성된 대부분의 비조질강의 단조제품의 신뢰도에 바우싱거 효과는 매우 중요한 영향을 미칠 수 있는 요소이다. 냉간 비조질강은 열간 제어압연 후 단조제품의 치수에 적합하도록 냉간 신선을 실시한다. 냉간 단조시 변형의 방향이 냉간 신선시와 반대로 형성될 경우 바우싱거 효과가 발생한다. 본 연구에서는 냉간 비조질강에서 발생하는 바우싱거 효과를 조사함으로써 냉간 신선의 최적 단면 감소를 및 냉간 단조제품의 재질 편차를 예측할 수 있는 기초 데이터를 확보하고자 하였다.

2. 냉간 비조질강의 특성

2.1 제조방법

본 연구에 사용한 냉간 비조질강의 조성은 표 1 에 나타내었다. 진공유도용해로울 이용하여 잉곳을 제조한 후 제어압연/냉각 공정을 거쳐 최종

16 mm 의 지름을 가지는 봉재로 제조되었다. 이후 각각 14.7mm 의 지름으로 냉간 신선하여 냉간 단조 시험을 실시하였다.

그림 2 는 압연재의 미세조직을 보여주는 사진으로 본 연구에 사용된 냉간 비조질강은 페라이트와 세멘타이트 상으로 이루어진 소재임을 알 수 있다. 페라이트 내에는 V 탄화물 혹은 질화물이 분포하여 석출강화를 일으킬 것으로 판단된다.

Table 1 Chemical composition of micro-alloying cold forging steel used in this study (wt.%)

C	Si	Mn	Cu	Cr	Al	V	Fe
0.14	0.13	1.55	0.15	0.35	0.02	0.15	Bal.

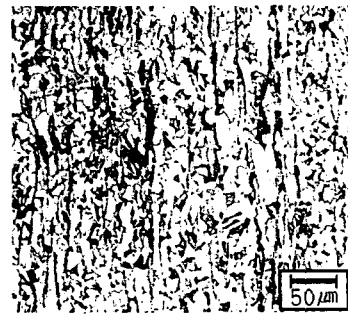


Fig. 2 Optical microstructure of micro-alloying cold forging steel after controlled rolling consisting of ferrite and cementite phases

2.2 냉간 단조 시험

본 연구에서는 조질강을 이용해 양산되고 있는 냉간 단조제품에 대해 비조질강을 이용해 냉간 단조 시험을 실시하였다. 열간 압연후 16mm 의 지름을 가지는 소재를 약 16% 냉간 신선하여 14.7 mm 의 지름을 가지는 봉재로 제조한 소재를 사용하였다. 그림 3 은 비조질강을 이용해 선일다이파스(주)에서 냉간단조를 실시한 제품의 외관 및 metal flow 를 보여주는 사진이다. 기존 조질강과 마찬가지로 단조는 성공적으로 이루어짐을 확인할 수 있었다.

그림 4 는 냉간 단조 후 제품의 단면을 절단한 후 측정된 경도 분포를 정리한 결과이다. 그림 5 는 3 단계로 구성되어 있는 냉간 단조제품의 성형시 각 단계별 변형율의 분포를 유한요소법을 이용하여 계산한 결과를 나타낸 것으로 1 단계 성형시

압출에 의해 높은 변형을 받는 부분은 최종 성형 후 높은 경도를 가지게 됨을 확인할 수 있다. 이에 반해 전체 단조 과정을 통해 변형이 제한적으로 발생하는 4~6 구역은 원소재 경도값인 240Hv 에 근접한 경도를 나타내는 것으로 확인되었다.

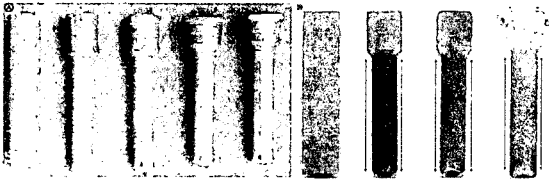


Fig. 3 Cold forging samples using micro-alloying cold forging steel

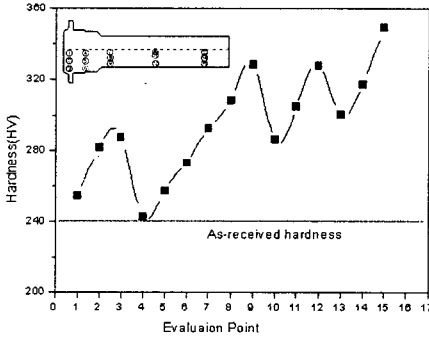


Fig. 4 Micro hardness of cold forged sample showing non-uniform strain hardening of forging

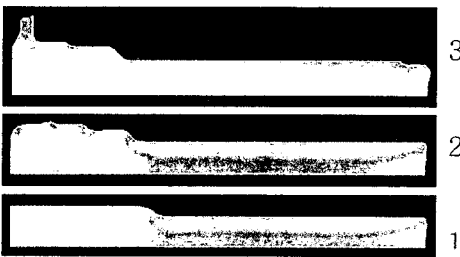


Fig. 5 Finite element analysis of cold forging consisting of three steps

3. 비조질강의 바우싱거 효과

비조질강의 냉간 단조시에 금형에 부가되는 응력은 구상화처리를 한 조질강에 비해 훨씬 높은 수준으로 금형의 마모 및 파손을 낮출 수 있는 기술이 요구된다.

그림 6 은 지름 16mm 의 압연재와 냉간신선을

실시한 지름 14.7mm 의 소재에 대해 압축시험을 실시한 결과이다. 냉간 신선재는 약 16%의 가량의 변형을 받았기 때문에 압연재에 비해 높은 변형 저항을 나타낼 것으로 예상되었으나 실제로는 압연재에 비해 낮은 유동응력을 가짐을 확인할 수 있었다. 또한, 압연재에서 관찰된 항복점 현상도 냉간 신선재에서는 관찰되지 않는다. 이에 반해 인장시험을 실시한 경우 표 2 에 나타난 것과 같이 냉간 신선한 경우 항복 및 인장 강도가 모두 압연재에 비해 높은 값을 가짐을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 냉간 신선시 소재의 길이 방향과 동일한 변형 경로를 가지는 인장시험에서는 가공경화가 발생한 반면 압축변형시에는 바우싱거 효과가 나타난 것을 확인할 수 있었다.

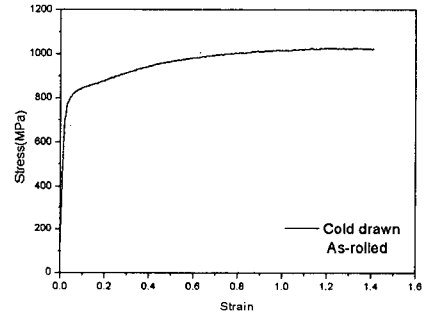


Fig. 6 Compression tests with as-rolled and cold drawn micro-alloying forging steels

Table 2 Tensile results for as-rolled and cold drawn micro-alloying forging steels

	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
As-rolled	621.3	737.0	27.0
Cold drawn	750.7	822.2	15.5

이상의 결과로부터 냉간 신선시 변형량을 최적으로 조절할 경우 일반적으로 봉재의 길이방향으로 압축 변형을 받는 단조공정에서 소재의 유동응력이 낮아져 금형에 미치는 부하를 최소화할 수 있을 것으로 기대된다.

그림 7 은 지름 16mm 을 가지는 압연재를 이용하여 변형역전시험(strain reversal test)을 실시한 결과이다. 먼저 냉간 신선시와 같이 인장 방향의 변형을 가한 후 압축 변형을 실시할 경우 발생하는 바우싱거 효과를 관찰하였다. 본 연구에 사용한 비조질강의 인장시험시 항복 연신율이 약 5%로

매우 높았으며 이로 인해 항복점 이상으로 변형량을 증가시키는 것이 불가능하였다.

변형량(pre-strain)이 바우싱거 효과에 미치는 영향을 조사하기 위하여 그림 8 에 나타낸 것과 같이 인장방향의 소성변형량을 약 0.3 과 0.7 로 변화시켜 압축변형을 실시하였다. 그림 8 의 변형역전시험에서 알 수 있듯이 바우싱거효과지수 ($\beta = \sigma_r / \sigma_f$, σ_f : forward stress, σ_r : reverse stress) 가 초기 변형량이 증가에 따라 낮아지는 결과를 얻을 수 있었다.

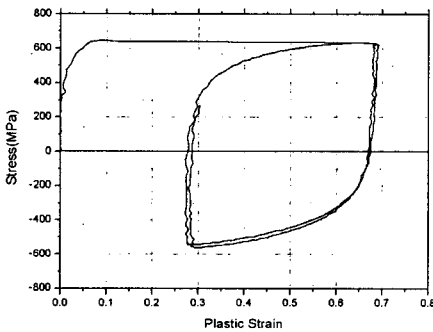


Fig. 7 Strain reversal test shows that the Bauschinger effect in micro-alloying forging steel

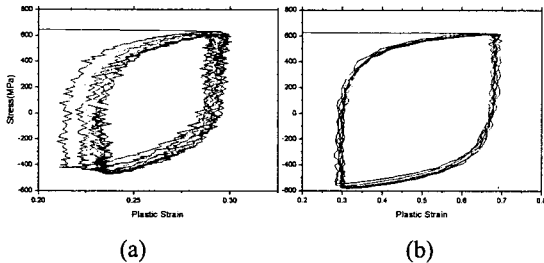


Fig. 8 Effect of pre-strain on the Bauschinger effect in micro-alloying forging steel

하지만, 앞에서 언급한 바와 같이 인장-압축시험시 발생하는 시편의 좌굴로 인해 항복점 연신율을 넘어서는 변형을 범위에서 바우싱거 효과를 고찰할 수 없어 냉간 신선량을 27%까지 증가시킨 시편을 제조하여 16% 경우와 상대적인 비교를 실시하였다. 약 50%의 냉간 압축을 기준으로 16% 냉간 신선재의 경우 9.8%, 27% 신선재의 경우는 5.7%의 유동응력 감소를 얻을 수 있었다.

현재 결과를 바탕으로 냉간 비조질강의 최적 냉간 신선율을 결정하는 정량적인 결과를 얻기

위하여 비틀림 변형을 이용한 시험을 현재 진행 중이다.

4. 결론

본 연구에서는 냉간단조용 비조질강의 특성과 바우싱거 효과에 대한 기초적인 시험을 실시하였다. 비조질강 단조품의 재질 편차는 냉간 단조공정설계 뿐만 아니라 압연 후 냉간 신선량에 결정을 받는다. 따라서, 보다 균일한 물성을 가지는 단조품 생산 및 단조 공정의 금형수명 향상을 위해서는 바우싱거 효과를 비롯한 소성변형특성이 합금설계에 효과적으로 반영되어야 한다.

후 기

본 연구는 산업자원부 청정생산기술개발사업 “차세대 환경친화형 고강도 냉간 비조질강 제품 개발” 사업의 지원에 의해 가능하였으며 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- [1] R. Sowerby et al., 1979, A review of certain aspect of the Bauschinger effect in metals, Mater. Sci. & Eng., Vol. 41, pp. 43~58.
- [2] A. Abel and H. Muir, 1972, The Bauschinger effect and discontinuous yielding, Phil. Mag., Vol. 26, pp. 489~504.
- [3] K. Terada et al., 2004, Numerical re-examination of the micro-scale mechanism of the Bauschinger effect in carbon steels, Comp. Mater. Sci., Vol. 31, pp. 67~83.
- [4] G. Vincze et al., A comparison of the mechanical behavior of an AA1050 and a low carbon steel deformed upon strain reversal, Acta Mater., Vol. 53, pp.1005~1013.
- [5] D. Uko et al., 1980, Bauschinger in structural steels and role in fabrication of line pipe, Metal Tech., pp. 359~367.
- [6] S. P. Gupta and S. P. Kodali, 1976, The effect of pre-strain on the Bauschinger effect, Scripta Metal., Vol. 10, pp. 111~114.