

고강도 API 강의 바우싱거 효과에 미치는 V, Cu 의 영향

박재신¹, 김대우¹, 장영원¹

The influence of V, Cu on the Bauschinger effect in API steel

J. S. Park, D. W. Kim, Y. W. Chang

Abstract

API steel is used for line-pipe to transport the oil and natural gas. As the recent trends in the development of API steel are towards the use of larger diameter and thicker plate, many researches have been studied to achieve higher strength, higher toughness and lower yield ratio in API steel. However, the strength of API steel after pipe forming is changed depend on the competition of the Bauschinger effect and work hardening. So, the purpose of this study is to investigate the influence on the Bauschinger effect for API steel by addition of V and Cu which are formed the precipitations for higher strength in API steel. The results are that the addition of V considered as a ferrite stabilizer and Cu considered as a austenite stabilizer decreases and increases the Bauschinger effect for API steel respectively.

Key Words : Bauschinger effect, API steel, Vanadium, Copper, Low temperature transformed phases, Yield behavior

1. 서 론

바우싱거 효과(Bauschinger effect)는 순방향으로의 예비변형 후, 역방향으로 변형시킬 때에 나타나는 역전 항복응력 또는 변형 응력의 감소 현상으로 정의된다. 이 현상이 발견된 것은 1886년 J. Bauschinger[1]에 의한 것이었으나 현상학적으로만 해석되다가 1930년대에 Taylor, Orowan 등에 의해서 전위의 개념이 발표되고, 이후 그 개념이 확립되면서 바우싱거 효과는 전위론에 의해 해석되게 되었다.

즉, Orowan[2]은 전위집적(pile-up)에 의한 역응력의 영향과 전위숲 경화(dislocation forest hardening)에 의한 슬립 장애물의 이방성에 의한 영향으로 바우싱거 효과를 설명하였다. 이와 같은 전위론에 의한 연구는 Wilson[3]의 X선 측정에 의해 증명되면서 여러 가지 방향으로 진행되었다.

그러나 바우싱거 효과에 대한 상당한 연구에도 불구하고 아직까지도 기초적이고 계통적인 연구

가 충분히 되었다고 말할 수 없으며, 바우싱거 효과를 정량적으로 평가할 수 있는 단일 변수도 아직까지 명확하게 밝혀진 바 없다.

한편, 석유 및 천연가스의 수송용 관으로 사용되는 API 강은 요구되는 강도 수준에 따라 최적화된 미세조직도 달라진다. API X60급 이하에서는 polygonal ferrite와 pearlite가 주된 조직이며, API X70 및 X80급의 강종에서는 polygonal ferrite와 pearlite 뿐만 아니라 acicular ferrite, bainite, martensite 등의 여러 가지 조직이 복합적으로 혼재되어 있다. 또한, 강관 제조 시 압축, 굴곡, 인장 등 다양한 형태의 변형 이력을 거치게 되어 바우싱거 효과 및 가공 경화의 정도에 따라 원소재와는 상이한 기계적 특성을 나타나게 된다. 따라서 고강도, 고인성 및 저 항복비를 얻기 위한 최적의 미세조직을 설계하기 위해서는 각각의 미세조직학적 인자의 변화거동에 대한 바우싱거 효과 및 가공경화 거동에 대하여 체계적인 연구가 진행되어야 한다.

1. 포항공과대학교 신소재공학과

본 연구에서는 X80급 API 강에 V과 Cu를 첨가함으로써 각 미세조직을 변화시키고, 미세조직과 바우싱거 효과와의 상관 관계를 조사하기 위해 압축-인장 시험을 실시하고 항복강도 저하량을 통하여 바우싱거 효과에 미치는 V, Cu의 효과를 분석하였다.

2. 실험방법

본 연구에 사용된 X80급 API 강은 (주)posco에서 제조된 것으로 그 합금조성을 표 (1)에 나타내었다. 페라이트 안정화 원소인 V과 오스테나이트 안정화 원소인 Cu는 석출강화에 의해 API 강의 고강도화를 얻기 위해 첨가되었다. SB1으로 명명된 강종이 기본조성이며, 여기에 V이 첨가된 합금을 SB2, V과 Cu가 첨가된 합금을 SB3라 명명하였다.

Table 1. Composition of X80 API steel (wt. %)

	C	Mn	Si	Nb	Ti	Mo
SB1	0.05	1.8	0.25	0.04	0.01	0.25
SB2	0.05	1.8	0.25	0.04	0.01	0.25
SB3	0.05	1.8	0.25	0.04	0.01	0.25
	Ni	Al	V	Cu	Fe	
SB1	0.25	0.03			Bal.	
SB2	0.25	0.03	0.04		Bal.	
SB3	0.25	0.03	0.04	0.2	Bal.	

이렇게 제조된 합금을 고강도, 고인성의 X80 급 API 강을 얻기 위해 1200°C에서 용체화 처리 후 열간 압연을 실시하였다. 먼저, γ 결정립을 미세화하기 위해 γ 재결정 영역에서 조압연을 실시하였으며, γ 미세결정 영역에서의 사상압연을 통해 미세한 α 결정립과 압연 방향으로 연신된 γ 결정립을 가진 복합상을 제조할 수 있었다. 마무리 압연이 끝난 후, 1.5°C/s의 속도로 서냉하여 polygonal ferrite가 대략 50% 정도 생성 되도록 한 다음 SCT에서 30°C/s의 속도로 급냉하고, FCT에서 1°C/s의 속도로 다시 서냉하여 최종적으로 X80급 API 강을 제조하였다. 이때, SCT와 FCT를 각각 다르게 하여, 각 강종마다 각 상들의 분율을 달리한 2 종류의 강종을 더 만들었다.

한편, 바우싱거 효과를 측정하기 위하여 압연방향에 수직인 방향으로 시편을 절취하고 지름 6.2mm, 표점거리 15mm의 봉상시편을 제작하였다. 이를

10⁻³/s의 변형을 속도로 상온에서 인장 및 압축-인장 시험을 실시하여 전변형량(pre-strain)에 따른 항복강도 변화를 분석하였다.

3. 실험결과 및 고찰

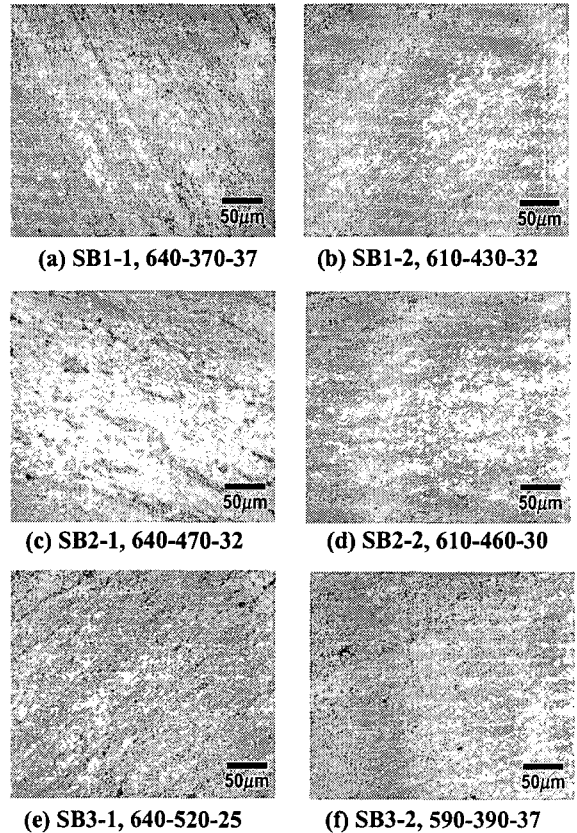


Fig.1. Microstructures of X80 API steels before deformation (SCT-FCT-Cooling Rate)

그림 (1)은 최종적으로 제조된 X80급 API강의 변형 전 광학으로 본 미세조직이다. SB1 강종에 비해 V이 첨가된 SB2 강종이 밝은 색으로 보이는 polygonal ferrite가 비교적 많은 것을 알 수 있다. Cu가 첨가된 SB3 강종의 경우 SB3-2 강종은 어두운 색으로 보이는 acicular ferrite, bainite, martensite와 같은 저온 변태상 (low-temperature transformed phase)이 비교적 많이 존재하지만, SB3-1 강종은 SB3-2에 비해 polygonal ferrite가 많이 존재하는데 이는 상대적으로 높은 FCT와 느린 냉각속도에 기인한 것으로 판단된다. 표 (2)에 각 강종에서의 polygonal ferrite의 상분율을 나타내었다.

Table.2, Volume fraction of polygonal ferrite

	SB1-1	SB1-2	SB2-1	SB2-2	SB3-1	SB3-2
$V_f(\%)$	41.3	44.0	51.0	49.6	39.8	28.6

한편, 표 (3)의 인장 시험 결과를 보면 polygonal ferrite의 분율이 제일 많은 SB2-1 강종은 준불연속 항복거동을 보이며 이로 인해 높은 항복비 및 상대적으로 낮은 항복강도와 인장강도를 보임을 알 수 있다. 저온 변태상이 가장 많은 SB3-2 강종은 반대로 연속 항복거동을 보이며 이로 인해 비교적 낮은 항복비 및 높은 항복강도와 인장강도를 보이고 있다. 이것은 저온 변태상인 acicular ferrite 강이 pearlite-reduced 강보다 기지조직에 가동 전위 밀도가 높아 연속 항복거동을 보인다는 G.Tither 등의 결과와 유사하다.[4]

Table.3, Tensile test results (C : Continuous yielding, QD : Quasi-discontinuous yielding)

	YS(MPa)	UTS(MPa)	YR(%)	Yielding
SB1-1	562	837	75.7	C
SB1-2	606	834	78.1	C
SB2-1	552	772	83.7	QD
SB2-2	608	820	84.6	QD
SB3-1	609	795	86.0	QD
SB3-2	703	941	79.3	C

그림 (2)는 압축 변형을 가한 후 인장 시험을 실시하였을 때 항복 강도의 감소를 나타낸 것이다. 전 변형량(pre-strain)이 증가할수록 항복강도 감소량($\Delta\sigma_y$)이 증가하다가 포화되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 항복강도 감소 현상을 바우싱거 효과라 하는데 전변형시 발생한 전위의 집적에 의한 역응력(back stress)에 그 원인이 있으며[5], 전 변형량이 증가할수록 $\Delta\sigma_y$ 가 포화되는 것은 결정립계나 석출물과 같은 전위 이동의 방해물에 집적되는 전위의 양에 한계가 있기 때문에 이러한 현상이 나타난다고 일반적으로 알려져 있다.

그림 (3)은 항복거동이 바우싱거 효과에 미치는 영향을 나타낸 것으로, acicular ferrite, bainitic ferrite, granular bainite, martensite와 같은 저온 변태상이 많은 강종들이 연속 항복거동을 보이고, 가동 전위밀도가 높은 이러한 저온 변태상이 많

을수록 전위집적이 용이해 역응력이 크게 작용함으로써 바우싱거 효과가 크게 나타난 것으로 판단된다. 이것은 dual-phase steel에서 martensite 분율이 증가할수록 바우싱거 효과가 크다는 A. Goel 등의 실험결과와 유사하다.[6]

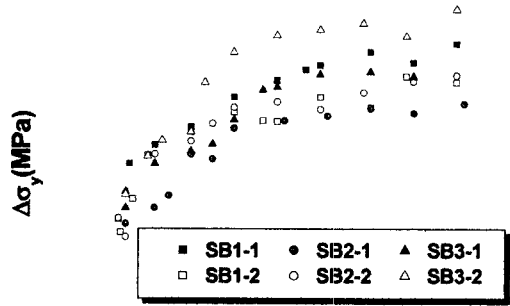


Fig.2, Yield strength change after compressive prestrain

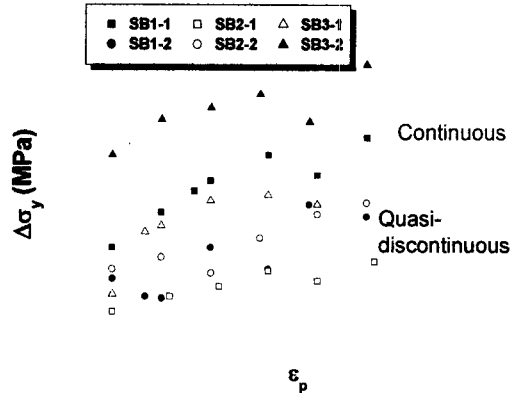


Fig.3, $\Delta\sigma_y$ depending on the yield behavior

한편, V와 Cu 첨가가 고강도 API 강의 바우싱거 효과에 미치는 영향을 그림 (4),(5)에 나타내었다. 즉, V를 첨가한 강종이 대체적으로 더 낮은 바우싱거 효과를 나타내었고 Cu를 첨가한 강종이 더 높은 바우싱거 효과를 나타낸 것을 알 수 있다. 이는 V를 첨가함으로써 페라이트 안정화 원소인 V이 미세조직 내 페라이트 형성을 촉진하여 상대적으로 저온 변태상 형성을 둔화시키기 때문인 것으로 생각되며, 반대로 오스테나이트 안정화 원소인 Cu는 오스테나이트 경화능을 향상시켜 저온 변태상 형성을 촉진하여 이로 인한 예비 변형시 기지 조직 내 전위밀도 증가와 역응력의 증가로 바우싱거 효과가 크게 나타난 것으로 생각된다.

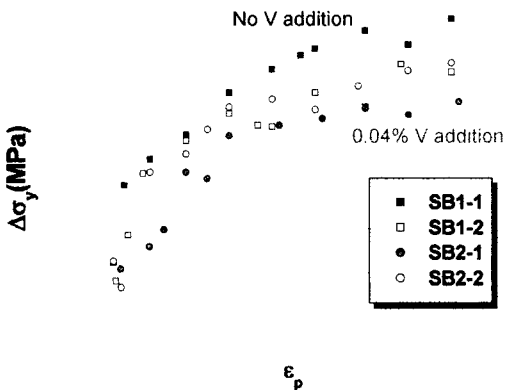


Fig.4, $\Delta\sigma_y$ depending on the V addition

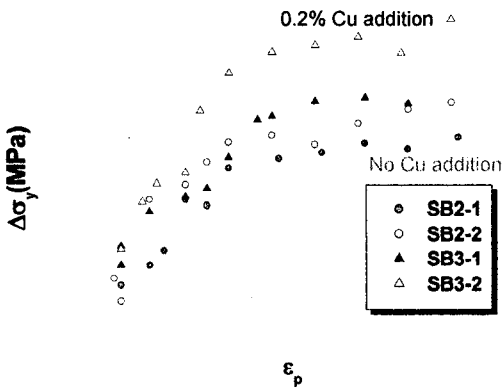


Fig.5, $\Delta\sigma_y$ depending on the Cu addition

그러나, 아직까지 바우싱거 효과에 미치는 합금원소의 영향은 많은 연구가 이루어지지 않았으며, 특히 V과 Cu의 영향은 전무하여 이 부분에 대한 많은 고찰이 필요할 것으로 생각된다.

따라서, API 강을 파이프 형태로 제조 시 U-O forming, 확관 등 파이프 두께를 중심으로 내, 외부에 복잡한 변형 이력(deformation history)을 거치게 됨에 따라 최종적으로 제조된 라인 파이프(line-pipe)의 강도는 바우싱거 효과에 의한 항복강도 감소와 가공경화 효과에 의한 유동 응력의 증가를 동시에 고려하여 석유 수송용 관으로써 필요한 요구 수준을 만족하도록 설계하여야 한다. 이때, Cu와 같은 오스테나이트 안정화 원소를 첨가하게 되면 저온 변태상 증가로 바우싱거

효과는 커지지만 변형량이 증가하면 그림 (2)의 결과처럼 항복강도 감소 폭은 점차 줄어들고 저온 변태상 증가로 인해 연속 항복거동을 보임으로써 항복비가 감소하여 큰 가공 경화 효과를 나타내므로 원판에 비해 최종적인 파이프의 강도는 크게 향상될 것으로 판단된다.

4. 결론

고강도 API 강의 인장 및 인장-압축 시험을 통하여 다음과 같은 결론을 얻을 수 있었다.

- (1) 저온 변태상이 많을수록 연속 항복거동을 보이며 항복강도 감소량은 커졌다.
- (2) V을 첨가함으로써 저온 변태상의 분율이 감소하고, Cu를 첨가함으로써 저온 변태상의 분율이 증가하였다.
- (3) 저온 변태상 증가가 기조조직 내 가동 전위 밀도를 높이고 따라서 예비 변형시 전위 집적을 높여 역응력을 증가시킴으로써 항복강도 감소를 증가시킨 것으로 생각된다.

후 기

본 연구는 (주)posco의 연구비 후원으로 이루어졌으며, 이에 감사드립니다.

참 고 문 헌

1. [1] J. Bauschinger, 1886, Mit. Mech.-Tech., Lab. Munchen, Heft 13, 1
- [2] E. Orowan, 1959, Causes and Effects of Internal Stresses, Internal stresses and Fatigue in Metals, Symposium, Detroit
- [3] D. V. Wilson, 1965, Reversible work hardening in Alloys of Cubic metals, Acta. Met., Vol.13, p.807
- [4] G. Tither and M. Lavite, 1975, Beneficial stress-strain behavior of moly-columbium steel line pipe, JOM, p.15
- [5] R. E. Stoltz and R. M. Pelloux, 1976, Metall. Trans. A, Vol.7, p.1295
- [6] A. Goel, R. K. Ray and G. S. Murty, 1982, Bauschinger effect in a Dual-phase steel, Scripta Metal., Vol.17, p.375