

신선 가공된 열처리 생략강의 냉간 성형성에 대한 연구

박경수* · 박용규** · 이덕락*** · 이종수*

(2003 년 5 월 15 일 접수)

Study on the Cold Formability of Drawn Non-heat Treated Steels

K. S. Park, Y. K. Park, D. L. Lee and C. S. Lee

Abstract

Non-heat treated steels are attractive in the steel-wire industry since the spheroidization and quenching-tempering treatment are not involved during the processing. However, non-heat treated steels should satisfy high strength and good formability without performing heat treatment. Therefore, it is important to investigate optimum materials showing a good combination of strength and formability after the drawing process. In this study, three different steels such as dual phase steel, low-Si steel, and ultra low carbon bainitic steel were used to study their mechanical properties and the cold formability. The cold formability of three steels was investigated by estimating the deformation resistance and the forming limit. The deformation resistance was estimated by calculating the deformation energy, and the forming limit was evaluated by measuring the critical strain revealing crack initiation at the notch tip of the specimens. The results showed that deformation resistance was the lowest in the low-Si steel, and the forming limit strains of ultra low carbon bainitic steel and low-Si steel were higher than that of commercial SWRCH45F steel.

Key Words : Non-Heat Treated Steel, Dual Phase (DP) Steel, Low-Si Steel, Ultra Low Carbon Bainite (ULCB) Steel, Drawing, Bauschinger Effect, Cold Formability

1. 서론

철강 산업에서 최종 제품을 생산하는데 있어, 열처리 공정을 생략하여 비용을 절감하려는 노력이 증가되고 있다. 이는 특히 봉강 및 선재 제품을 가공하고 성형하는 업체에서 큰 관심을 보이고 있는데, 성형 전의 구상화 열처리와 성형 후의 소입소려 열처리를 생략할 수 있는 열처리 생략강이 1970 년대 초반 유럽에서 최초로 개발되었고, 그 후 경제적 측면 및 실용적 측면에서의 효과가 커 현재까지 많은 연구가 진행되고 있다.⁽¹⁻²⁾ 성형

전후의 열처리를 생략하기 위해서는 후 열처리 없이도 원하는 수준의 강도가 확보되어야 하고, 전 열처리 없이도 성형성이 우수해 다이스의 수명을 떨어뜨리지 않으면서 성형이 잘 되어야 한다.

이러한 열처리 생략강의 성형성을 평가하는 방법으로는 냉간 성형성 평가를 통한 방법이 있는데, 이는 다이스의 수명을 고려한 변형 저항성과 각각의 재료에 대한 한계 성형율의 두 가지 관점에서 평가할 수 있다. 현재까지 다이스의 수명을 평가하기 위하여 기계·역학적인 방법, 냉간 성형

* 포항공과대학교 신소재공학과

** 포스코 기술개발실

*** 포스코 기술연구소

의 computer simulation, 그리고 다이스의 재질에 관한 연구가 진행되어 왔다.⁽³⁻⁴⁾ 그러나 재료적인 측면, 즉 냉간 성형용 소재가 다이스에 미치는 영향은 거의 고려되고 있지 않은 실정이다. 따라서 소재가 다이스에 미치는 영향을 변형 저항성의 평가를 통해 살펴볼 필요가 있다. 일반적으로 변형 저항성이 큰 재료의 냉간 성형 시, 변형 저항성이 작은 재료에 비해 다이스는 높은 압력을 받게 되어 다이스의 수명을 저하시킨다. 한편 한계 성형율은 압하율에 따른 재료 표면의 균열 발생 여부를 조사하여 평가하는데, 특히 성형성이 우수한 재료의 한계 성형율을 평가하는 경우에는 압축 시편 표면에 노치를 만들어 평가하고 있다.⁽⁵⁾

열처리 생략강은 신선 후 구상화 열처리 없이 바로 성형을 하기 때문에 신선 공정이 제품의 기계적 성질에 미치는 영향을 고려하는 것이 중요하다. 이는 약 20% 정도의 신선을 하게 되면, 냉간 가공으로 가공 경화 현상이 일어나며 이에 따른 성형성 및 기계적 성질에 변화가 생기게 되어 냉간 성형성에 영향을 미치기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 인장 강도에 비해 상대적으로 낮은 항복 강도를 갖는 DP 강, Si의 함량을 극소량으로 억제한 Low-Si 강, 그리고 가공성이 우수한 ULCB 강을 대상으로 열처리 생략강의 기계적 성질을 평가하고 동일한 인장 강도를 갖는 시편들을 이용하여 어느 조직이 우수한 냉간 성형성을 나타내는지 평가하고자 하였다. 이와 함께, 각 조직 시편에서 최종 성형전의 신선 공정이 제품의 기계적 성질에 미치는 영향을 조사하였다.

2. 실험 방법

Table 1 과 같은 성분의 강종을 진공 유도 용해로에서 제조하여 1250℃에서 120 분 동안 용체화 처리한 후, Fig. 1 과 같이 열간 압연하였다. 이 때, DP 강은 페라이트와 마르텐사이트의 이상 조직을 얻기 위해 780℃에서 최종 압연한 후 50℃/s 의 속도로 수냉하였고, Low-Si 강과 ULCB 강은 각각 300℃와 830℃에서 최종 압연한 후 공냉하였다. 열간 압연은 냉간 성형성 평가를 위해 20% 신선 후 세 강종의 인장 강도가 비슷해지는 조건으로 제어하였고, 각 강종으로 draw bench 를 이용하여 신선 가공을 수행하였다. 이 때, 윤활재로는 MoS₂ 가 주성분인 Molycolite D-321R 을 사용하였고, 다이스는 Φ 11.32 mm 크기의 초경 다이스를 사용하

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Alloys	C	Si	Mn	Ni	Cu	Ti	Nb	B
DP (0.1C)	0.1	0.845	1.50	-	-	-	-	-
DP (0.078C)	0.078	0.875	1.52	-	-	-	-	-
DP (0.042C)	0.042	0.85	1.48	-	-	-	-	-
Low-Si	0.292	0.073	1.50	-	-	-	-	-
ULCB	0.018	0.046	1.61	0.495	0.82	0.014	0.030	0.002

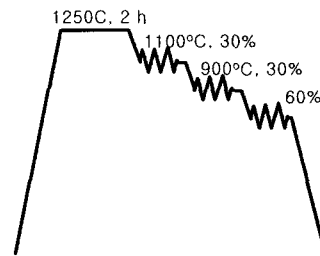


Fig. 1 The diagram for hot rolling conditions

였으며, 가공 시 발열에 기인한 aging 을 억제하기 위하여 50 mm/s 의 속도로 신선하였다.

이와 같이 가공된 각 합금으로 기계적 성질 및 냉간 성형성 평가를 위해 인장 및 압축 시험을 수행하였다. 냉간 성형성 평가는 다이스의 수명에 영향을 미치는 변형 저항성과 소재의 균열 발생 여부를 조사한 한계 성형율을 통해 평가하였다. 변형 저항성은 압축 곡선을 통해 평가하였고, 한계 성형율은 노치 시편의 압축량에 따른 표면 균열 발생 여부를 조사하여 평가하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 기계적 성질

열간 압연으로 제어한 DP 강, Low-Si 강 및 ULCB 강의 미세조직은 Fig. 2 와 같다. DP 강은 이상 영역에서 최종 압연 후, 수냉에 의해 페라이트와 마르텐사이트의 이상 조직으로 형성되었다. 또한 Low-Si 강은 페라이트와 퍼얼라이트가 거의 같은 비율로 형성되었고, ULCB 강은 베이나이트 기지 조직에 오스테나이트 입계와 입내에 granular bainitic 페라이트가 존재하는 조직이 형성되었다.⁽⁶⁾

이러한 세 강종의 인장 시험 결과는 Fig. 3(a)와

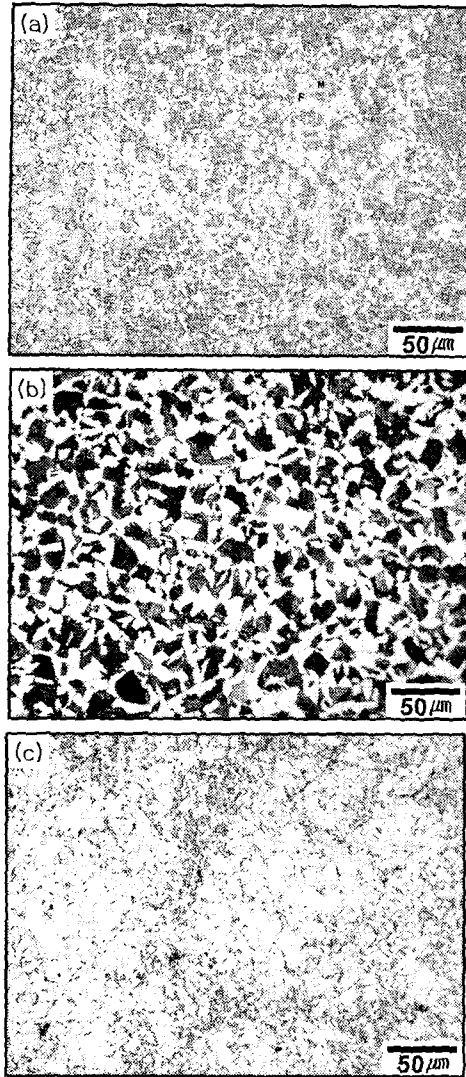


Fig. 2 Optical Micrographs for steels (Nital etching) (a) DP steel (b) Low-Si steel (c) ULCB steel

같이 나타난다. DP 강은 상변태 시 마르텐사이트 주위의 페라이트 내부에 잔류 응력으로 인한 가동 전위가 많이 형성되기 때문에 연속 항복 거동을 보인다.⁽⁷⁾ Low-Si 강은 초기 변형 시 가동 전위 형성에 필요한 변형량 만큼 항복점 연신이 필요하며, 이후 다시 유동 응력이 증가하는 특징을 보인다. 한편 ULCB 강은 베이나이트 기지 조직을 가지고 있어 항복점 현상 없이 연속 항복 거동을 보이는 것을 알 수 있다. 이러한 인장 특성을 나타내는 각 강종들은 신선에 의해 가공 경화되어 항복 강도와 인장 강도가 증가하고 연신

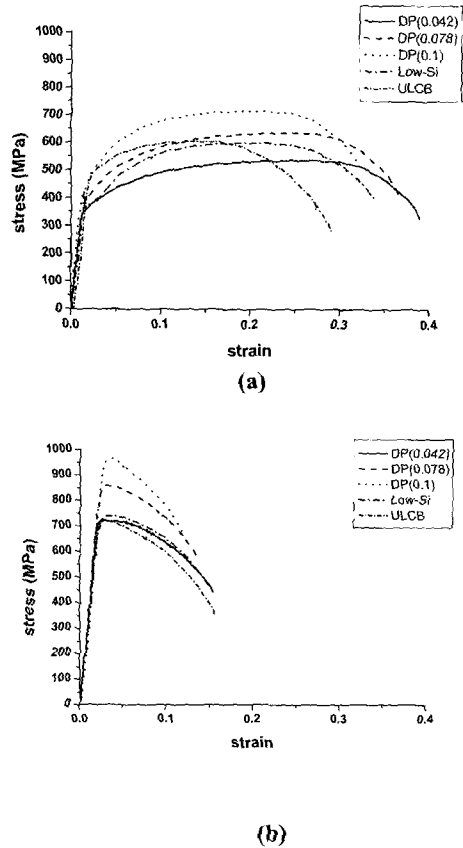
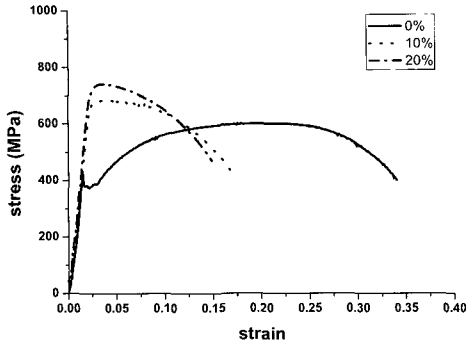


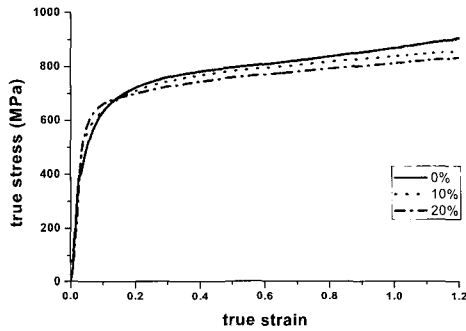
Fig. 3 Tensile stress-strain curves of three different steels (a) without drawing, (b) with drawing ($\epsilon = 0.2$)

율이 감소하게 된다.⁽⁸⁾ 즉 Fig. 3(b)와 같이 20% 이상의 신선 후, 가공 경화 현상이 사라져 각 합금은 항복 강도와 인장 강도의 차이가 거의 없는 경향을 나타낸다. 이 때, DP 강의 경우 가공 경화로 인한 강도의 증가량이 다른 강에 비해 큰 것을 확인할 수 있는데, 이는 DP 강이 다른 강에 비해 초기 가공 경화율이 크기 때문이다. 또한 Low-Si 강은 신선전에 나타났던 항복점 현상이 신선 후에 사라지는 것을 확인할 수 있다.

한편, 신선량에 따른 압축 곡선을 살펴보면 Fig. 4(b)와 Fig. 5 에서와 같이 세 강종 모두 신선량이 증가함에 따라 항복 강도는 증가하나, 일정 변형률 이상에서의 압축 강도는 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 4(a)의 인장 곡선과 비교했을 때, 초기 변형률 구간에서는 비슷한 경향성을 보이나 일정 변형률 이상의 유동 응력에서는 서로 상반된 결과를 나타내고 있는 것이다. 이와



(a)



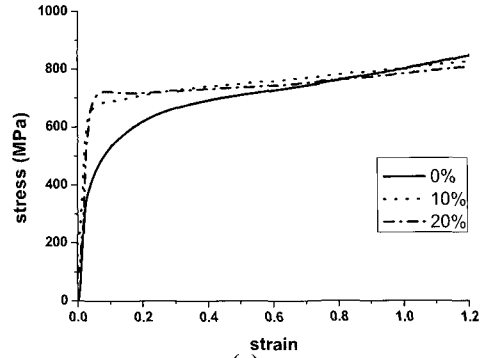
(b)

Fig. 4 Stress-strain curves of Low-Si steel with the variation of the strain amount of drawing in (a) tensile test, (b) compression test

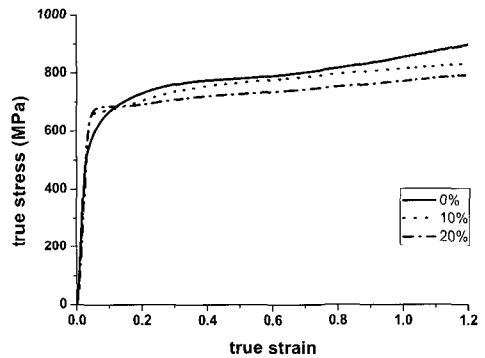
같은 압축 강도의 역전 현상은 세 강종에서 모두 발견되었고, 이는 신선 후 압축을 하면서 나타나는 Bauschinger 효과에 의한 영향으로 판단된다.⁽⁹⁾ 즉 신선에 따른 가공 경화로 인해 신선 후 압축 곡선이 이전보다 낮게 형성되어 초기 가공 경화로 인한 강도의 증가 효과가 일정 변형율 이상에서는 사라지게 되고, 압축 강도가 오히려 감소하는 경향을 나타내는 것이다.

3.2 냉간 성형성 평가

냉간 성형에 따른 다이스의 수명을 변형 저항성 측면에서 살펴볼 수 있다. 비교 대상 합금의 인장 강도를 비슷하게 제어하였고, 압축 곡선도 일정량 이상의 압축 후 나타나는 압축 강도가 비슷하게 제어되었다. 따라서 초기 압축 곡선이 나타내는 면적으로부터 다이스 수명을 예측하고 변형 저항성을 평가할 수 있다.⁽¹⁰⁾ 이는 항복 강도 이후에 나타나는 가공 현상과 밀접한 관계를 가



(a)



(b)

Fig. 5 Compressive stress-strain curves of with the variation of the strain amount of drawing in (a) DP steel, (b) ULCB steel

지고 있다. 즉 항복 강도가 낮고 가공 경화 현상이 두드러진 합금의 면적이 상대적으로 적으며, 따라서 다이스는 적은 에너지를 받게 되는 것이다. Fig. 6 에서 각 강종의 압축 곡선을 살펴보면, Low-Si 강과 ULCB 강은 신선 전 인장 강도가 비슷하기 때문에 초기 영역을 제외하고는 비슷한 압축 강도를 나타내고 있다. 하지만 항복 강도와 가공 경화율이 다르기 때문에 초기의 압축 곡선에서 항복 강도가 낮고 가공 경화 현상이 두드러진 Low-Si 강의 변형 저항성이 더 작을 것으로 생각된다. 반면에 DP 강은 다른 두 강에 비해 0.042C-DP 강의 경우는 인장 강도가 다소 낮고, 0.078C-DP 강의 경우는 인장 강도가 다소 높기 때문에 압축 곡선에서도 같은 양상의 결과를 나타내고 있다. 그러나 열처리 생략강은 신선 후 열처리를 거치지 않은 강으로 변형 저항성 평가 시 신선을 거친 강의 압축 곡선을 비교할 필요가 있

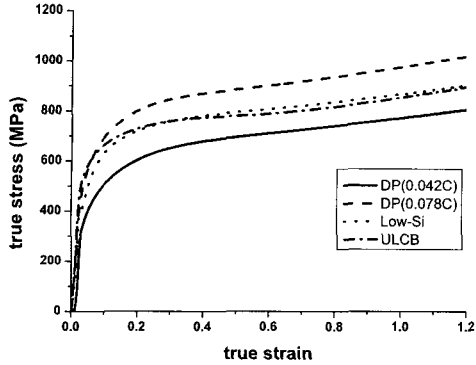


Fig. 6 Compressive stress-strain curves of four different steels

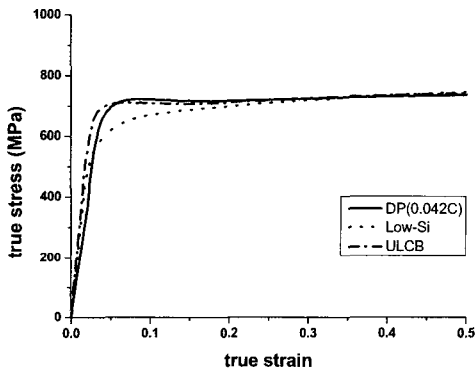


Fig. 7 Compressive stress-strain curves of three different steels after 20% drawing

다. 따라서 Fig. 7 과 같이 20% 신선한 각 강종의 압축 곡선에서 $\epsilon = 0.3$ 까지의 면적을 구하면 Table 2 와 같이 Low-Si 가 가장 낮은 값, 즉 다이스의 수명에 가장 적은 영향을 미치는 것으로 판단된다.

한편, 소재가 균열을 생성시키지 않고 견딜 수 있는 최대 변형량을 나타내는 한계 성형율을 통해 냉간 성형성을 평가할 수 있다. 이는 부품 성형 시 최종 제품의 내부에 생성되어 있을 수도 있는 결함의 발생 빈도를 줄이는 데 매우 중요한 영향을 끼치는 변수로써, 복잡한 부품으로의 성형은 소재의 부위별 변형 정도가 다르고 내부에 유도되는 응력 상태와 변형 이력이 다양하게 나타나므로 충분한 한계 성형율이 보장되어야만 최종 제품에 대한 신뢰도를 확보할 수 있다. 세 강종의

Table 2 The comparison of the area for the deformation resistance after 20% drawing

DP steel (0.042C)	Low-Si steel	ULCB steel
204.1	194.8	206.0

Table 3 The fracture limit for the drawn steels in upset test

X : crack initiated

Materials	Drawing Reduction	Upsetting Ratio					
		40%	50%	60%	70%	80%	90%
DP steel	10%	→ X (65%)					
	20%	→ X (55%)					
Low-Si steel	10%	→ X (75%)					
	20%	→ X (62.5%)					
ULCB steel	10%	→ X (82.5%)					
	20%	→ X (72.5%)					

Table 4 The results of the hardness test for each phases

DP steel (0.042C)		Low-Si steel	
Ferrite	Martensite	Ferrite	Pearlite
195 (Hv)	430 (Hv)	203 (Hv)	263 (Hv)

압축량에 따른 표면 균열의 발생 여부를 평가한 한계 성형율은 Table 3 에서와 같이, 단상 조직인 ULCB 강이 이상 조직인 Low-Si 강이나 DP 강보다 우수함을 알 수 있었다. 이는 소성 불균일 측면에서 살펴보았을 때, 단상 조직의 Bainitic 페라이트 구조를 가진 ULCB 강이 이상 조직의 페라이트-퍼얼라이트의 Low-Si 강이나 페라이트-마르텐사이트의 DP 강보다 우수함을 알 수 있다. 또한 같은 이상 조직에서도 Table 4 와 같이 두 상 간의 강도 차이가 적은 Low-Si 강의 한계 성형율이 더 우수함을 알 수 있다. 이와 같은 한계 성형율을 냉간 성형용으로 생산되는 열처리 강인 SWRCH45 5F 강과 비교했을 때, 20% 신선 후 ULCB 강과

Low-Si 강은 각각 72.5%와 62.5%의 한계 성형율을 보이기 때문에 우수한 한계 성형율을 나타낸다고 판단된다.

냉간 성형성에 미치는 신선의 영향을 살펴보면 변형 저항성 측면에서는, 신선량에 따라 압축 곡선의 초기 변형 단계에서는 높은 유동 응력을 보이지만 Bauschinger 효과로 인해 일정 변형량이 지난 후에는 오히려 낮은 유동 응력을 나타낸다.(Fig. 4(b), Fig. 5) 이러한 변형 거동은 변형 에너지에 영향을 미치게 되므로 다이스의 수명과도 관련이 있다. 따라서 신선량이 증가함에 따라 인장 강도는 증가하지만, 변형 저항성이 감소하므로 냉간 성형성은 오히려 향상될 수 있음을 알 수 있다. 한편 한계 성형율 측면에서는 신선량이 증가함에 따라 한계 성형율이 낮아져 적은 변형에서도 표면 균열이 발생함을 알 수 있다.

4. 결론

성형성이 우수한 DP 강, Low-Si 강, 그리고 ULCB 강을 열간 압연을 통해 제어하였고, 신선을 거친 후 인장 및 압축 실험으로부터 기계적 성질 및 냉간 성형성을 평가하였다.

(1) 신선 후 인장 강도는 가공 경화 현상으로 인해 증가하나, 압축 강도는 Bauschinger 효과로 인해 일정 변형을 이상에서 감소하였다.

(2) 냉간 성형에 따른 다이스의 수명을 변형 저항성 측면에서 살펴보면 Low-Si 강이 가장 우수하였고, 한계 성형율은 ULCB 강과 Low-Si 강이 우수하였다.

(3) 신선량이 증가함에 따라, 변형 저항성 측면에서의 냉간 성형성은 증가하나 한계 성형율 측

면에서의 냉간 성형성은 감소하였다.

후 기

본 연구는 과학기술부 2003 년 국가지정연구실 사업과 포스코의 지원에 의하여 수행되었으며, 이에 감사를 드립니다.

참 고 문 헌

- (1) G. Krauss and S.K. Banerji, Fundamentals of Micro alloying Forging Steels, AIME, Warrendale (1987).
- (2) D.J. Naylor, Ironmaking & Steelmaking, 16 (1989) p. 246.
- (3) D.J. Jeong, D.J. Kim, J.H. Kim, B.M. Kim and T.A. Dean, J. Mater. Pro. Tech., 113 (2001) p. 544.
- (4) J.X. Dong, P.A. Karnezis, G. Durrant and B. Cantor, Metall. Trans., 30A (1999) p. 1341.
- (5) B.P.P.A. Gouveia, J.M.C. Rodrigues and P.A.F. Martins, J. Mater. Pro. Tech., 101 (2000) p. 52.
- (6) George Krauss and Steven W. Thompson, ISIJ Inter., 35 (1995) p. 937.
- (7) C.L. Magee and R.G. Davies, Acta Metall., 20 (1979) p. 1031.
- (8) C. Biselli and D.G. Morris, Acta Metall., 44 (1996) p. 493.
- (9) F.A. McClintock and A.S. Argon, Mechanical Behavior of Materials, Addison-Wesley, (1966) p. 185.
- (10) Toshiyuki Hoshino et al., 川崎製鐵技, 23 (1991) p. 105.