

## 신선 가공된 이상 조직강의 냉간 성형성에 대한 연구

박경수\* · 최상우\*\* · 이덕락\*\* · 이종수\*

### Study on the Cold Formability of Drawn Dual-Phase Steels

K. S. Prak, S. W. Choi, D. L. Lee and C. S. Lee

#### Abstract

There is a growing interest to replace the commercial steels with non-heat treated steels, which does not involve the spheroidization and quenching-tempering treatment. 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, Dual-Phase Steels were studied as candidate materials for non-heat treated steels, which have different martensite morphologies and volume fractions obtained through heat-treatment of intercritical quenching (IcQ), intermediate quenching (ImQ) and step quenching (SQ). The mechanical properties of DP steels were measured by tension and compression tests. Also, the cold formability of three DP steels which have similar tensile strength value was investigated by estimating the deformation resistance and the forming limit. The deformation resistance which is important factor in determining die life was estimated by calculating the deformation energy. And the forming limit was estimated by measuring the critical strain revealing crack initiation at the notch tip of the specimens.

**Key Words :** Non-heat Treated Steel, Dual-Phase Steel, Drawing, Intercritical Quenching, Intermediate Quenching, Step Quenching, Cold Formability, Deformation Resistance, Forming Limit

#### 1. 서론

철강 산업에서는 생산성 향상을 위한 노력이 다방면으로 진행되고 있는데, 특히 가공 공정 단축을 통한 열처리 생략강에 대한 관심이 집중되고 있다. 이에 따라 성형 전의 구상화 열처리와 성형 후의 소입 소려 열처리를 생략할 수 있는 열처리 생략강이 1970 년대에 개발되어 최근 에너지 절감을 통한 생산성 향상 및 환경 친화형 철강으로 각광 받고 있다.<sup>(1)</sup> 이러한 열처리 생략강은 전 열처리 없이도 성형성이

우수해 다이스의 수명을 떨어뜨리지 않으면서 성형이 잘 되어야 하고, 후 열처리 없이도 요구되는 기계적 특성을 만족시켜야 한다.

열처리 생략강의 냉간 성형성은 소재가 다이스에 미치는 영향을 고려한 변형 저항성의 평가와 성형에 따른 재료 표면의 균열 발생 여부를 조사한 한계 성형율로 평가할 수 있다. 이러한 열처리 생략강은 신선 후 열처리 공정을 거치지 않고 바로 성형을 하기 때문에 신선 공정이 기계적 성질에 미치는 영향을 고려하는 것이 중요하다. 신선으로 인한 냉간 가공이 가공 경화 현상을 일으켜

\* 포항공과대학교 신소재공학과

\*\* 포스코 기술연구소

냉간 성형성에 영향을 미치기 때문이다.

따라서 본 연구에서는 높은 가공 경화율로 우수한 성형성을 보이는 DP 강을 열처리 조건에 따라 마르텐사이트의 형태와 분율을 변화시켜 기계적 성질 및 냉간 성형성을 평가하였다. 또한 최종 성형 전 신선 공정이 기계적 성질 및 냉간 성형성에 미치는 영향을 살펴보았다.

## 2. 실험 방법

Table 1 과 같은 성분의 강종을 진공 유도 용해로에서 제조하여 1250℃에서 120 분 동안 용체화 처리한 후, 주조 조직의 파괴를 위하여 사이징 압연을 통해 두께 100 mm의 슬라브로 제조하였다. 이를 가지고 서로 다른 형태를 가지는 마르텐사이트와 페라이트의 이상 조직을 형성시키기 위하여 Fig. 1 에 나타난 바와 같이 intercritical quenching 과 intermediate quenching, 그리고 step quenching 의 열처리를 수행하였다. 이 때, 마르텐사이트의 분율을 변화시키기 위해 2 상 ( $\alpha + \gamma$ ) 영역에서의 열처리를 통해 마르텐사이트의 형태와 분율을 달리하는 이상 조직강을 얻었다. 이렇게 얻어진 각각의 이상 조직강으로 draw bench 를 이용하여 신선 가공을 수행하였다. 신선 가공 시 윤활재로는 MoS<sub>2</sub>가 주 성분인 Molycote D-321 R 을 사용하였고, 다이스는  $\phi 11.32$  mm 크기의 초경 다이스를 사용하였으며, 가공 시 발열에 기인한 aging 을 억제하기 위하여 50 mm/s 의 속도로 신선하였다.

## 3. 실험 결과 및 고찰

### 3.1 열처리 조건에 따른 미세 조직

열간 압연 후 용체화 처리를 거친 as-received 조직은 페라이트와 퍼얼라이트로 구성된다. 이를 Fig. 1 에서의 열처리 경로에 따라 가공하면 서로 다른 형태와 분율의 이상 조직강을 형성한다. IcQ 열처리를 통한 이상 조직강은 Fig. 2 (a)와 같이 페라이트의 결정립을 따라 미량의 마르텐사이트가 형성된다. 이는 페라이트와 퍼얼라이트로부터 오스테나이트의 핵 생성이 계면 또는 입계에서 일어나고 이상 영역에서의 평형 오스테나이트의 부피 분율 및 조성에 도달할 때까지 오스테나이트가 페라이트 쪽으로 성장하기 때문이다.<sup>(2)</sup> 이렇게 성장한 오스테나이트를 퀴칭하게 되면 마르텐사이트를 형성하게 된다. Fig. 2 (b)는 ImQ 열처리를 통한 이상 조직강으로, 미세한 침상의 마르텐사이트가 페라이트 기지 내에 균일하게 분포되어 있는 것을 관찰

Table 1 Chemical composition (wt. %)

Alloys	C	Si	Mn
DP steels	0.07	0.83	1.51

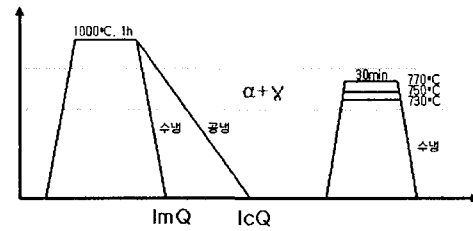


Fig. 1 (a) The diagram for heat treatment of ImQ-DP steel and IcQ-DP steel

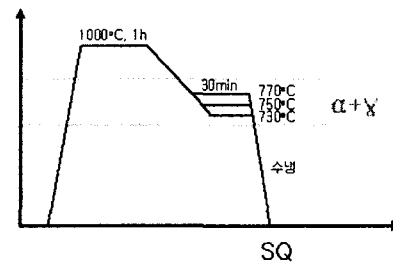


Fig. 1 (b) The diagram for heat treatment of SQ-DP steel

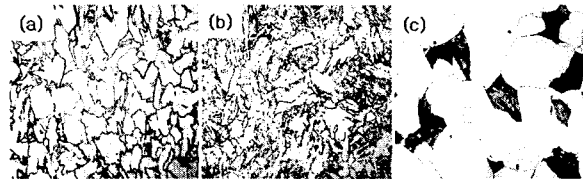


Fig. 2 Optical Micrographs for DP steels (Nital etching) (a)IcQ (b) ImQ (c) SQ

할 수 있다. 이는 이상 영역 전의 조직이 마르텐사이트로 이를 다시 이상 영역으로 재가열하면 오스테나이트가 구 마르텐사이트의 래스 경계에서 핵생성되어 래스 경계를 따라 성장함으로써 오스테나이트를 형성하게 되고 이를 퀴칭하게 되면 미세한 침상의 마르텐사이트가 형성되는 것이다. 한편 SQ 열처리를 통한 미세 조직은 Fig. 2 (c)에서와 같이 페라이트 결정립과 거의 비슷한 크기를 가진 조대한 피상의 마르텐사이트를 형성하게 된다. 이는 이상 영역 어닐링 이전의 조직이 오스테나이트이며, 이상 영역으로 온도가 낮아짐

에 따라 오스테나이트 결정립계를 따라 페라이트가 형성되고 이것이 오스테나이트 결정립내로 성장하기 때문이다. 따라서 페라이트로 변태하지 않은 오스테나이트가 퀴칭시 마르텐사이트를 형성하게 된다.

### 3.2 기계적 성질

열처리를 통해 제어된 이상 조직강의 인장 시험 결과는 Fig 3 과 같이 나타난다. 이상 조직강의 인장 특성은 연속 항복 거동을 보이는데, 이는 마르텐사이트 입자 주변에 축적되어 있는 가동 전위의 밀도가 높고, 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되는 동안 3~5%의 체적 팽창을 일으키기 때문에 페라이트 내부에 압축 잔류 응력이 존재하게 되고 이에 의한 Bauschinger 효과로 항복점이 소실되기 때문으로 알려져 있다.<sup>(3)</sup> 한편 각 이상 조직강의 인장 성질을 비교하여 살펴보면 SQ 의 경우 강도는 매우 높으나 낮은 연신율을 나타내고 있어 상당히 취약함으로 알 수 있다.<sup>(4)</sup> 이는 조대한 마르텐사이트의 형성 시 생긴 미세 균열 등으로 인해 인장 취약한 연성을 나타내고 있는 것이다. 이에 반해 마르텐사이트의 분율이 작고 미세한 IcQ 의 경우는 마르텐사이트의 분율이 매우 낮아 강도가 낮고 연성이 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

또한 이상 조직강을 신선으로 냉간 가공할 경우 강도가 증가하고 연신율이 감소하는 것을 알 수 있다.<sup>(5)</sup> 이러한 강도 증가는 가공 경화율이 큰 이상 조직강에서는 상당히 큰 비율로 증가하게 된다. 하지만 이러한 강도의 증가는 이상 조직강의 특징인 가공 경화 현상과 상쇄되어 항복 강도가 인장 강도와 거의 비슷할 정도가 된다. 그러나 Fig. 3 에서의 압축 성질을 살펴 보면, 초기 강도의 증가와는 달리 변형량이 증가함에 따라 강도의 증가 효과가 줄어드는 것을 살펴볼 수 있다. 이는 초기 강도의 증가는 냉간 가공에 따른 가공 경화 현상에 의한 것인데 반해, 일정 변형량 이상에서는 가공 경화 현상의 영향이 사라지고 Bauschinger 효과나 균열에 의해 강도가 비슷해 지거나 오히려 감소하는 경향을 나타내게 되는 것이다.<sup>(6)</sup>

### 3.3 냉간 성형성 평가

다이스의 수명에 영향을 미치는 변형 저항성은 압축 곡선이 나타내는 면적을 통해 비교할 수 있다. 약 600 MPa 정도의 비슷한 인장 강도를 갖도록 제어된 각각의 강으로 압축 곡선 면적을 계산하여 변형 저항성을 비교하였다. Fig. 3 을 보면 초기 강도는 SQ 강이 가장 높고 다른 두 강은 낮은 것을 볼 수 있다. 그러나 일정 변형량 이상에서는 오히려 SQ 강이 가장 낮고 ImQ 강이 가장 높은 강도를 나타냄을 확인할 수

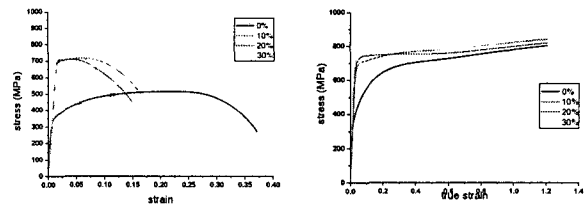


Fig. 3 (a) Stress-strain curve of IcQ-DP steel  
(i) tensile test (ii) compression test

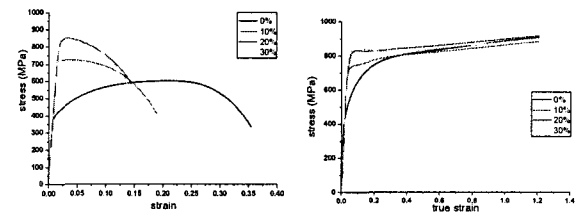


Fig. 3 (b) Stress-strain curve of ImQ-DP steel  
(i) tensile test (ii) compression test

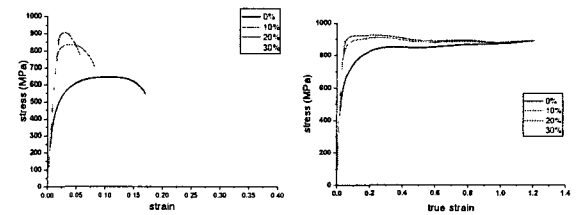


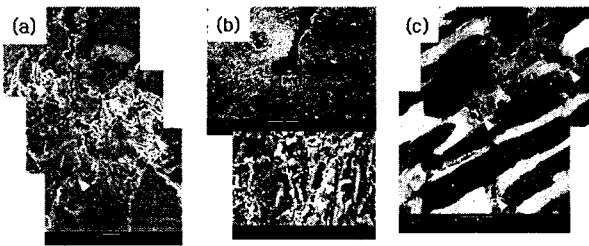
Fig. 3 (c) Stress-strain curve of SQ-DP steel  
(i) tensile test (ii) compression test

있다. 따라서 곡선이 나타내는 면적의 비교를 통해 변형 저항성을 살펴보면 IcQ 강이 가장 작은 변형 저항성을 나타냄으로 다이스의 수명에 가장 적게 영향을 미칠 것으로 예측할 수 있다.

한계 성형율은 압축에 따른 표면 균열 발생 여부로 평가하였는데, Table 2 과 같이 SQ 강 의 경우 50%의 성형율에서 균열이 발생하기 시작하여 한계 성형율이 가장 나쁜 것으로 나타났고, IcQ 강 의 경우 85%의 성형율에서부터 균열이 발생하기 시작하여 한계 성형율이 우수한 것으로 나타났다. 이는 인장 시험에서의 연신율 결과와도 잘 일치하고 있다. 또한 신선량에 따른 한계 성형율은 감소함을 살펴볼 수 있는데, 특히 IcQ 강에서 두드러지게 감소하는 경향을 보이고 있다. 하지만 신선량이 증가함에 따라 한계 성형율의 감소는 그리 크지 않았다.

**Table 2** The fracture limit for the drawn steels in upset test

Materials	Drawing Reduction	Upsetting Ratio					
		40%	50%	60%	70%	80%	90%
IcQ	0%	→ X (95%)					
	10%	→ X (95%)					
	20%	→ X (82.5%)					
	30%	→ X (62.5%)					
ImQ	0%	→ X (95%)					
	10%	→ X (80%)					
	20%	→ X (60%)					
	30%	→ X (50%)					
SQ	0%	→ X (80%)					
	10%	→ X (77%)					
	20%	→ X (42%)					
	30%	→ X (37.5%)					



**Fig. 4** SEM micrographs at crack tip of DP steels  
(a) IcQ (b) ImQ (c) SQ

이러한 이상 조직강의 한계 성형율은 Fig. 4 과 같이 마르텐사이트와 페라이트의 계면에서 공동 또는 미세 균열이 생성됨을 관찰할 수 있다. IcQ 강은 마르텐사이트와 페라이트의 계면에서 많은 미세 균열을 발견할 수 있다. 즉, 이러한 계면에서 시작된 미세 균열들이 서로 연결되면서 균열로 진행되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 이러한 미세 균열이 연결되기에는 마르텐사이트의 분율이 적어 페라이트 내부로도 균열이 전파하기 때문에 균열의 발생이 느리게 진행된다. ImQ 강에서의 균열도 마르텐사이트와 페라이트 사이의 계면에서 미세 균열이 발생하나, 침상의 마르텐사이트가 시편 전체에 걸쳐 고르게 분포되어 있기 때문에 형성된 미세 균열들이 다소 쉽게 연결될 수 있다. 따라서 ImQ 강이 IcQ 강보다 더 빠른 미세 균열의 연결로 인한 균열 발생으로 한계 성형율이 좋지 않다. 한편 SQ 강은 마르텐사이트와 페라이트 사이의 계면에서 미세 균열이 발생하기도 하고, 조대한 마르텐사이트가 깨지면서 균열이 발생하기도 한다. 이러한 조대한 마르텐사이트는 오스테나이트로부터의 변태 과정에서 계면의 소성 변형 차이로 인한 큰 변형

을 차이를 보이게 된다. 따라서 침상의 마르텐사이트와는 달리 페라이트 조직과의 계면부가 취약해 미세 균열이 쉽게 형성되고 다소 큰 미세 균열들이 연결되면서 균열을 성장시키게 된다. 따라서 SQ 강은 경우가 가장 낮은 한계 성형율을 갖게 되는 것이다.

#### 4. 결 론

열처리 조건을 달리한 DP 강을 마르텐사이트의 형태와 분율이 다른 IcQ 강, ImQ 강, 그리고 SQ 강으로 제어하였고, 신선 공정을 거친 후 인장 및 압축 실험으로부터 기계적 성질 및 냉간 성형성을 평가하였다.

(1) 10% 신선 후 인장 강도는 가공 경화 현상으로 인해 크게 증가하나, 20% 이상에서는 증가량이 줄어들었다. 한편 압축 강도는 가공 경화와 Bauschinger effect 로 인해 일정 변형율 이상에서는 비슷하거나 약간 감소하였다.

(2) 변형 저항성 측면에서의 냉간 성형성은 IcQ 강이 가장 우수하였고, 신선량이 증가함에 따라 변형 저항성이 감소하였다.

(3) 한계 성형율 측면에서의 냉간 성형성은 IcQ 강이 가장 우수하였고, 신선량이 증가함에 따라 한계 성형율이 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, 1987, "Fundamentals of Micro alloying Forging Steels", AIME, Warrendale.
- (2) G.R. Speich, V.A. Demarest and R.L. Miller, 1981, Metall. Trans. 12A, pp. 1419.
- (3) R.G. Davies, 1978, Metall. Trans., 9A, pp. 41.
- (4) N.J. Kim and G. Thomas, 1981, Metall. Trans., 12A, pp. 483.
- (5) C. Biselli and D.G. Morris, 1996, Acta Metall., 44, pp. 493.
- (6) J.X. Dong, P.A. Karnezis, G. Durrant and B. Cantor, 1999, Metall. Trans., 30A, pp. 1341.