

P 첨가 0.15C-1.5Mn-1.5Al TRIP 형 냉연강판의 미세조직과 기계적 성질

안만욱[#], 조경목¹, 서동우², 오창석², 김성준²

Microstructure and Mechanical Properties of P Added 0.15C-1.5Mn-1.5Al TRIP Aided Cold Rolled Steel

M. W. Ahn, K. M. Cho, D. W. Suh, C. S. Oh, S. J. Kim

(Received October 21, 2005)

Abstract

Microstructure and mechanical properties are investigated for 0.15C-1.5Mn-1.5Al TRIP aided cold rolled steels containing 0.05wt%P and 0.1wt%P. Despite of the complete replacement of Si by Al, the TRIP steel shows tensile strength of 700MPa and total elongation of 35% by addition of 0.1wt% P. Tensile strength of P added TRIP steels is not only affected by the solid solution hardening but also the volume fraction of retained austenite. As P content increases from 0.05wt% to 0.1wt%, tensile strength and volume fraction of retained austenite are increased, but elongation is decreased. The lower stability of austenite in 0.1wt% P added steel is responsible for the decrease of the elongation.

Key Words : TRIP Aided Steel, P Addition, Strength, Retained Austenite, Microstructure

1. 서 론

최근 자동차의 연비향상을 위한 경량화 추세와 더불어 충돌 안정성 확보가 중요한 문제로 대두됨에 따라 고강도와 고성형성을 겸비한 새로운 강판에 대한 요구가 증가하고 있다. 자동차 차체용 새로운 고강도 강판(AHSS: Advanced High Strength Steel)으로서 이상조직강(Dual Phase Steel), TRIP (Transformation Induced Plasticity)강, 복합조직강(Complex Phase Steel)등이 개발되고 있다[1]. 이 중에서 특히 TRIP 형 저합금 강판은 잔류 오스테나이트에 의한 변태유기소성현상을 이용한 강판으로서 비교적 단순한 합금조성으로부터 고강도와 고연신율을 확보할 수 있어 자동차 경량화를 통한 연비향상 및 스크랩의 재활용 측면에서 환경

친화적 소재로 주목 받고 있다[2]. TRIP 형 강판은 0.1~0.2wt% 정도의 C 에 1.5wt% 정도의 Si 와 Mn 을 첨가하여 제조되는데 Si 의 함량이 일반탄소강 보다 높은 이유는 Si 이 오스테퍼링시 탄화물의 생성을 억제하여 잔류 오스테나이트의 C 함량을 높임으로써 오스테나이트의 안정성을 높여주기 때문이다[3]. 또한 Si 은 고용강화원소로서 기지인 페라이트의 강도향상에도 기여한다.

자동차 차체용 강판은 많은 경우에 내식성의 향상을 위하여 표면에 용융아연도금을 하게 되는데 Si 이 다량 첨가된 TRIP 형 강판에서는 어닐링시 강판표면에 Si 산화물이 형성되어 용융아연도금성이 크게 저하되는 문제점이 보고되고 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여 종래의 TRIP 형 강판의 조성에서 Si 의 함량을 저감하고 Si 과 유

1. 부산대학교 재료공학과
2. 한국기계연구원 환경재료연구센터
교신저자 : 부산대학교 재료공학과.
E-mail : an10006@naver.com

사하게 탄화물의 생성을 억제하는 원소인 Al 등을 첨가하여 도금성을 개선하려는 시도가 이루어지고 있다[4]. 그러나 Al 은 페라이트 내에서의 고용강화효과가 거의 없어 Si 을 Al 으로 대체하였을 경우 강도가 현저히 낮아지게 된다. Si 저감형 TRIP 강판에서 발생하는 이러한 강도저하를 보상하기 위하여 페라이트 내에서 매우 강한 고용강화효과를 나타내는 것으로 알려진 P 를 첨가하는 방안이 검토되고 있다[5]. P 는 강 중에서 입계편석에 의한 취성을 나타내는 원소로 알려져 있지만 소량의 첨가에 의해서 페라이트의 강도를 향상시킬 수 있으며 또한 페라이트 내의 탄소의 활동도를 증가시켜 잔류 오스테나이트로의 확산을 촉진시킴으로써 오스테나이트의 안정성 확보에도 기여한다고 알려져 있다[6]. 그러나 TRIP 형 강판에서 P 첨가에 따른 잔류 오스테나이트의 안정성 및 변태거동의 변화가 기계적 특성에 미치는 영향에 대한 연구는 많지 않다.

이 연구에서는 용융아연도금성을 개선하기 위하여 Si을 Al로 대체한 0.15C-1.5Mn-1.5Al TRIP형 냉연강판에 페라이트 고용강화원소인 P를 첨가하여 미세조직 및 기계적 특성을 평가하고 P 첨가량에 따른 잔류오스테나이트 분율의 변화와 안정성이 기계적 성질에 미치는 영향을 고찰하였다.

2. 실험 방법

Table 1에 실험에 사용된 강판의 화학조성을 나타내었다. 0.15C-1.5Mn-1.5Al을 기본조성으로 하여 P를 0.05wt% 와 0.1wt% 첨가한 주편(100×170×250mm)을 제조한 후 950~1100°C에서 4mm로 열간 압연 하고 600°C에서 30분간 권취모사 한 후 공냉하였다. 열간압연된 시편을 냉간압연하여 최종적으로 두께 1mm의 압연판재를 제조하였다.

제조된 냉연강판의 이상영역열처리와 항온변태 열처리 온도를 결정하기 위하여 dilatometer를 이용하여 상변태 온도를 측정하였다. 이상영역열처리는 오스테나이트와 페라이트의 부피분율이 약

30:70 정도로 평가되는 온도인 820°C에서 염욕을 이용하여 2분간 실시하였다. 시편을 이상영역 열처리 후 연속적으로 항온변태열처리 하여 Ms온도보다 약 30°C 높은 450°C에서 유지시간을 5~300초로 변화시켜가며 열처리하였다. 냉연강판의 열처리 경로를 Fig. 1에 나타내었다.

열처리된 냉연강판의 광학현미경 조직은 nital 부식액과 10% sodium metabisulfite 부식액을 이용하여 관찰하였다. 또한 열처리된 냉연강판을 ASTM E8M 서브사이즈규격의 인장시편으로 가공한 후 인장시험기를 이용하여 강판의 기계적 특성을 측정하였다. 인장시험시의 크로스헤드 속도는 2mm/min.으로 하였다. 각 열처리 조건에서의 잔류오스테나이트 부피분율은 XRD 분석을 통하여 측정하였다. XRD 분석용 시편은 초기 1/3두께까지 기계적으로 연마한 후 최종 1/2두께까지 (5%HF+95%H₂O₂) 용액으로 화학연마하여 연마시 발생할 수 있는 잔류오스테나이트의 변형유기변태를 최소화하고자 하였다. 잔류오스테나이트의 부피분율은 XRD 회절에 의해 얻어진 페라이트와 오스테나이트 피크(peak)의 적분강도를 이용하여 다음 식으로부터 구하였다[7].

$$V_{\gamma} = \frac{1.4I_{\gamma}}{I_{\alpha} + 1.4I_{\gamma}} \quad (1)$$

여기서 I_γ 는 오스테나이트의 {220}, {311} 피크에서 얻어진 평균 적분강도값이며 I_α는 페라이트의 {211} 피크로부터 구한 적분강도값이다.

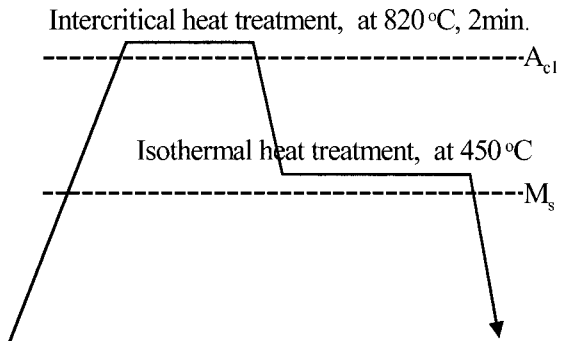


Fig. 1 Heat treatment path for cold rolled TRIP steel (Isothermally heat-treated for 5, 30, 60, 120, 180 and 300 sec.)

Table 1 Chemical composition of TRIP steels (wt%)

	C	Mn	Al	Cu	P
0.05P	0.15	1.5	1.5	0.5	0.05
0.1P	0.15	1.5	1.5	0.5	0.1

3. 실험 결과

3.1 P 첨가 TRIP 형 냉연강판의 미세조직

Fig. 2(a), (b), (c)에 0.1wt% P 가 첨가된 TRIP 형 냉연강판의 열처리에 따른 미세조직을 나타내었다. Sodium metabisulfite 부식액을 이용하여 광학현미경으로 관찰하면 페라이트는 밝은 회색, 베이나이트와 마르텐사이트는 짙은 회색 그리고 잔류오스테나이트는 흰색으로 나타나게 된다. Fig. 2에서 알 수 있듯이 냉연강판의 기지는 결정립크기가 약 10 μm 정도인 페라이트로 이루어져 있고 페라이트의 결정립계를 따라서 베이나이트 또는 마르텐사이트가 잔류오스테나이트와 함께 관찰되고 있다. 또한 항온변태 열처리 시간이 증가함에 따라서 잔류오스테나이트의 분율이 증가하고 있음을 알 수 있다. 항온변태 열처리 초기에는 이상영역 열처리에 의해서 형성된 대부분의 오스테나이트가 베이나이트로 변태되지 못하기 때문에 오스테나이트 내부의 탄소농축이 충분히 이루어지지 않고 따라서 오스테나이트의 열적 안정성이 낮아 항온변태열처리 후 상온으로 냉각 중에 오스테나이트가 마르텐사이트로 변태되어 잔류오스테나이트의 분율이 비교적 낮게 된다. 그러나 항온변태 열처리 시간이 증가함에 따라 베이나이트 변태가 진행되면서 잔류 오스테나이트 내부에 탄소가 충분히 농축되고 이로 인하여 오스테나이트의 열적 안정성이 향상되기 때문에 상온에서의 잔류 오스테나이트의 분율이 증가하게 된다. 광학현미경으로 관찰되는 잔류 오스테나이트의 형상은 주로 1~2 μm 크기를 가진 등축상이었지만 주사전자현미경으로 관찰하면 베이나이트 래스 경계에 필름상으로 존재하는 잔류오스테나이트도 다수 존재함을 확인하였다. Fig. 2(b)와 (d)를 비교하여 보면 P 첨가량에 변화에 따라 페라이트 결정립 크기나 잔류오스테나이트의 분포 및 형상은 크게 변화하지 않음을 알 수 있다. 그러나 P 첨가량의 증가에 따라서 잔류오스테나이트로 판단되는 상의 분율이 다소 증가하는 것으로 나타났다.

3.2 P 첨가 TRIP 형 냉연강판의 잔류 오스테나이트 분율

TRIP 형 강판에서 잔류오스테나이트는 변형 중 마르텐사이트로 변태하여 가공경화를 촉진하고 균일한 변형에 기여함으로써 강도상승과 연신율의 증가에 핵심적인 역할을 한다.

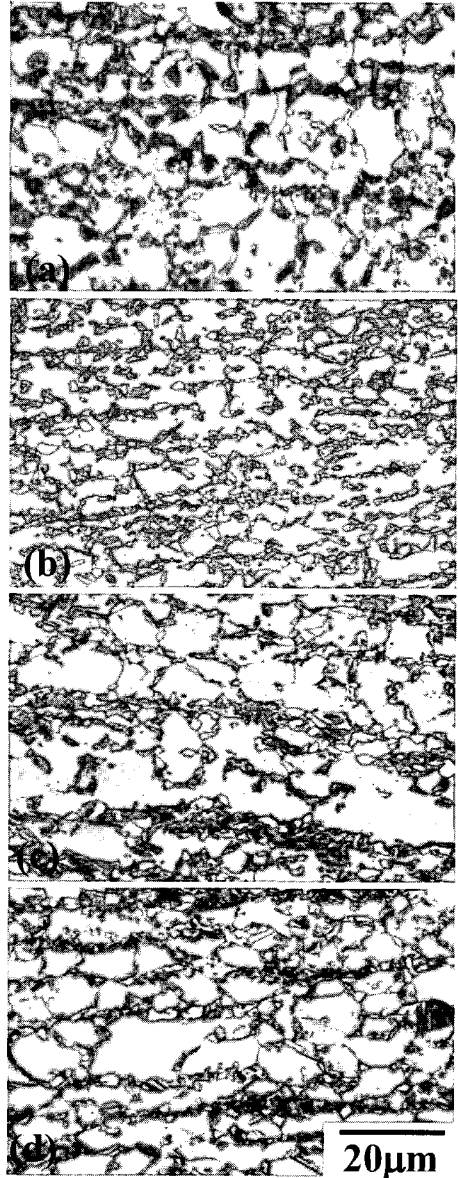


Fig. 2 Microstructures of P added TRIP steel

- (a) 0.1P, isothermally heat-treated for 5sec.
- (b) 0.1P, isothermally heat-treated for 60sec.
- (c) 0.1P, isothermally heat-treated for 180sec.
- (d) 0.05P, isothermally heat-treated for 60sec.

Fig. 3 에 이상영역열처리 후 항온변태열처리 시간에 따른 오스테나이트 분율을 나타내었다. 0.1P TRIP 강판의 경우 항온변태열처리 시간이 증가하면서 잔류오스테나이트 분율이 점차 증가하여

120 초 정도의 항온변태열처리를 통하여 약 15% 이상의 잔류오스테나이트 분율을 확보할 수 있었다. 이러한 결과는 앞 절의 광학현미경 관찰결과와 거의 일치한다. 0.05P TRIP 강판의 경우에는 0.1P TRIP 강판과 비교하여 동일한 열처리 조건에서 잔류오스테나이트 분율이 2~3% 정도 감소하는 것으로 나타났다. 이것은 P 함량이 0.05~0.2wt% 구간에서 P 함량의 증가에 따라 잔류오스테나이트 분율이 증가한다는 기존의 연구 결과와 부합되는 결과이다. P 함량의 증가에 따라서 잔류오스테나이트 분율이 증가하는 것은 P 가 페라이트 형성을 촉진하는 원소이면서 동시에 탄화물의 석출을 억제하여 Si 과 비슷한 작용을 하기 때문으로 보고 되고 있다[8].

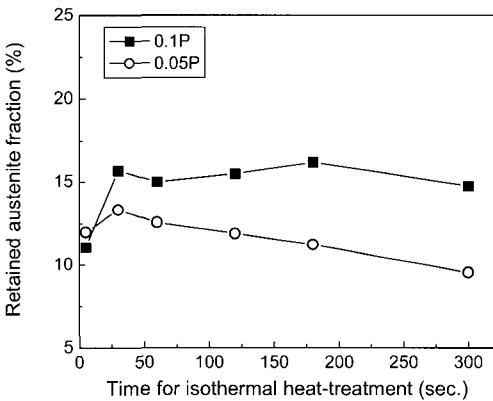


Fig. 3 Retained austenite fraction with isothermally heat-treated time

3.3 P 첨가 TRIP 형 냉연강판의 기계적 특성

Fig. 4 에 P 첨가 TRIP 형 냉연강판의 항온변태열처리 유지시간에 따른 기계적 특성을 나타내었다. 항온변태온도에서의 유지시간의 증가에 따라 인장강도는 점차 감소하고 항복강도와 총연신율은 증가하는 경향을 나타내지만 120 초 이상의 유지시간에서는 거의 일정한 기계적 특성을 나타내고 있음을 알 수 있다. 이러한 기계적 특성의 변화는 강판내의 잔류오스테나이트 분율과 밀접한 관련이 있다. 항온변태 유지시간이 짧으면 잔류오스테나이트가 열처리 후 냉각 중에 마르텐사이트로 쉽게 변태된다. 따라서 강판의 기계적 특성이 이상조직강(DP steel)의 그것과 비슷하게 되어 연속항복거동과 더불어 초기에 매우 높은 가공경화를 나타내므로 높은 인장강도와 낮은 항복강도를 가

지게 된다. 항온변태 유지시간이 증가하면서 잔류오스테나이트의 분율이 상승하게 되면 인장강도는 약간 낮아지게 되지만 잔류오스테나이트의 변형유기 마르텐사이트변태에 기인한 시편전체의 균일한 변형에 의해서 연신율은 상승하게 된다.

P 함량의 증가에 의하여 강판의 강도는 상승하였다. 항온변태 유지시간이 120 초 이상인 경우에 0.05P TRIP 강판의 인장강도가 약 625MPa 인 것에 비하여 0.1P TRIP 강판의 인장강도는 약 700MPa 수준으로 나타났다. P 첨가에 의한 페라이트의 고용강화효과는 0.1wt% 당 약 67MPa 수준으로 알려져 있다[5]. 따라서 이 연구에서 0.05wt%의 P 함량 차이에 의해서 약 75MPa 정도의 인장강도 상승이 발생한 것은 P 함량의 증가에 의한 인장강도의 상승이 고용강화효과 뿐만 아니라 잔류오스테나이트 분율의 변화에 의해서도 영향을 받는다는 것을 의미한다. 즉 잔류오스테나이트의 분율이 상대적으로 높은 0.1P TRIP 강판의 경우 변형유기 변태에 의해 생성되는 마르텐사이트의 분율도 높아 0.05P TRIP 강판에 비하여 가공경화가 빠르게 일어나며 이것이 최종적인 인장강도의 증가에 기여하게 된다고 판단된다.

0.05P 와 0.1P TRIP 강판은 120 초의 항온변태 유지시간에서 각각 40%와 35% 이상의 우수한 연신율을 보였다. P 함량의 증가에 의해서 강판의 연신율은 감소하는 것으로 나타났는데 TRIP 형 냉연강판의 연신율에 큰 영향을 미치는 인자가 잔류오스테나이트의 분율과 기계적 안정성임을 고려할 때 P 함량의 증가함에 따라 잔류오스테나이트 분율이 상승하였음에도 불구하고 연신율이 감소한 것은 0.05P 와 0.1P TRIP 강판내에 존재하는 잔류오스테나이트의 기계적 안정성의 차이에 기인한다고 생각된다.

4. 고 찰

TRIP 형 강판의 기계적 특성, 특히 연신율은 잔류오스테나이트의 분율과 안정성에 크게 영향을 받는다. 일반적으로 TRIP 형 강판에서는 잔류오스테나이트의 분율이 높을수록 그리고 오스테나이트의 기계적 안정성이 적정수준으로 유지되어야 연신율이 증가한다고 알려져 있다. 이 절에서는 TRIP 형 냉연강판에서 P 함량에 따른 잔류오스테나이트의 분율과 기계적 안정성이 연신율에 미치

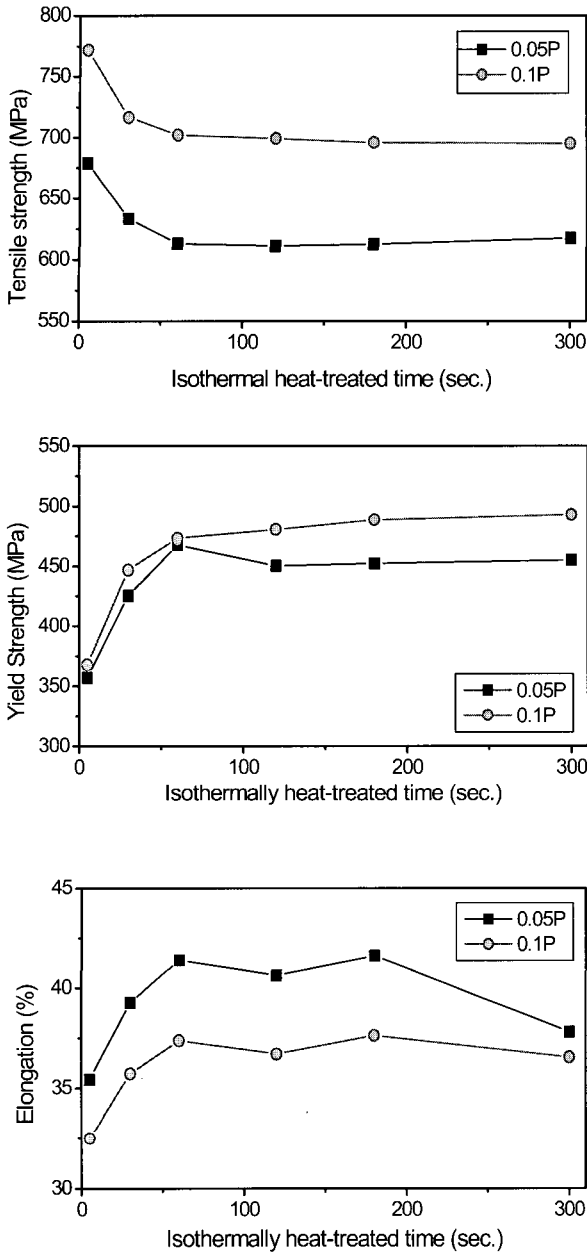


Fig. 4 Mechanical properties of 0.05P and 0.1P TRIP steel with isothermally heat-treated times

는 영향에 대해서 보다 자세히 고찰하여 보고자 한다.

앞 절에서 언급한 바와 같이 P 첨가 TRIP 강판은 P의 함량이 증가함에 따라 잔류오스테나이트의 분율이 증가하지만 연신율은 오히려 감소하

는 경향을 보인다. 이러한 결과는 잔류오스테나이트의 안정성과 밀접한 관련이 있다. Fig. 5에 120 초동안 항온변태 열처리한 0.05P와 0.1P TRIP 강판의 진변형율에 따른 가공경화지수증분을 나타내었다. DP 강이나 TRIP 강에서 나타나는 가공경화특성은 전통적인 Hollomon 방정식 대신 Sachdev가 제안한 가공경화지수증분 ($n_{inc} = d\ln(\sigma) / d\ln(\epsilon)$)을 이용하는 것이 효과적이라고 알려져 있다.[9] 그림에서 점선은 가공경화지수증분이 진변형률과 같은 조건으로 이 점선과 n_{inc} 곡선의 만나는 점이 시편의 균일변형율을 나타내게 된다. Fig. 5에서 알 수 있듯이 균일변형율은 0.05P TRIP 강판이 0.1P TRIP 강판보다 크다. 0.05P TRIP 강판이 잔류오스테나이트의 함량이 상대적으로 낮음에도 불구하고 높은 균일연신율을 나타내는 이유는 변형이 진행되는 동안 균일한 가공경화를 나타내기 때문이며 이러한 결과는 0.05P TRIP 강판의 잔류오스테나이트의 안정성이 0.1P TRIP 강판보다 상대적으로 높다는 것을 의미한다.

Fig. 5에서 0.1P TRIP 강판의 가공경화지수증분의 변화를 살펴보면 변형초기에 높은 가공경화 정도를 나타내는 것으로 보아 잔류오스테나이트의 변태가 변형초기에 집중적으로 이루어지는 것으로 판단된다. 즉 0.1P TRIP 강판의 경우 잔류오스테나이트의 분율은 0.05P TRIP 강판보다 높지만 비교적 변형초기에 변태가 집중됨으로서 잔류오스테나이트에 의한 가공경화상승효과가 변형이 진행됨에 따라 급속히 감소하여 균일연신율의 증가에 크게 기여하지 못하고 있는 것으로 생각된다. P 첨가량의 변화에 따른 잔류오스테나이트의 기계적 안정성이 차이를 나타내고 있는 것은 잔류오스테나이트의 부피분율 차이에 의한 오스테나이트 내부에 농축된 탄소함량의 증감에 기인하는 것으로 생각되지만 P 함량의 증가가 잔류오스테나이트의 형상 및 크기를 변화시켜 기계적 안정성에 영향을 미친다는 보고도 있으므로[5] 이에 대해서는 앞으로 보다 정량적인 연구가 필요하다고 생각된다.

이상의 결과를 종합하여 보면 TRIP형 냉연강판에서의 P 첨가는 고용강화효과 및 잔류오스테나이트의 분율을 증가시킴으로써 강판의 기계적 특성 향상에 기여할 수 있지만 P 함량의 증가는 잔류오스테나이트의 기계적 안정성을 저하시켜 연신율의 감소를 가져올 수 있으므로 이를 고려한 합금 설계가 필요하다고 판단된다.

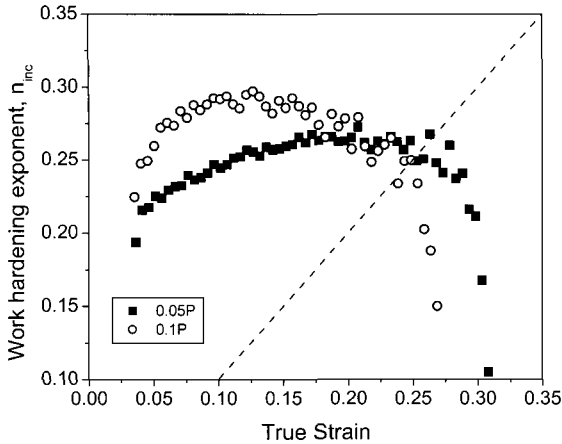


Fig. 5 Incremental work hardening exponent of 0.05P and 0.1P TRIP steel isothermally heat-treated at 450°C for 120sec.

5. 결론

용융아연도금성의 개선을 위하여 Si 을 완전히 Al 로 대체한 0.15C-1.5Mn-1.5Al TRIP 강판에 페라이트 고용강화원소인 P 를 첨가하여 미세조직과 기계적 특성을 평가하고 P 첨가에 따른 잔류오스테나이트의 분율과 기계적 안정성에 대하여 고찰하였다.

(1) 0.15C-1.5Mn-1.5Al 의 TRIP 형 냉연강판에 P 를 0.05wt% 이상 첨가하면 인장강도 600MPa 이상, 연신율 35% 이상인 고강도 고성형성의 냉연강판을 제조할 수 있음을 확인하였다. 특히 P 함량을 0.1wt% 첨가하였을 경우 Si 이 주합금원소인 0.15C-1.5Mn-1.5Si TRIP 강판의 기계적 성질과 동등한 인장강도 700MPa 이상, 연신율 35% 이상의 기계적 특성을 확보할 수 있었다.

(2) P 함량의 증가에 따라서 잔류오스테나이트의 분율은 증가하였다. 450°C 에서 120 초의 항온변태 열처리에 의해 0.05wt% P 첨가강은 약 12%, 0.1wt% P 첨가강은 약 15%정도의 잔류오스테나이트 분율을 나타내었다.

(3) P 함량의 증가에 따라서 잔류오스테나이트 분율은 증가하였지만 연신율은 감소하였다. 이것은 0.1wt% P 첨가강의 경우 잔류오스테나이트가 변형초기에 대부분 변태되어 변형이 진행됨에 따라 가공경화속도가 급속히 감소하기 때문이다.

후 기

이 연구는 산업자원부 핵심연구기술개발사업의 지원으로 이루어졌습니다.

참 고 문 헌

- [1] B. Ehrhardt, T. Gerber, H. Hofmann, T. W. Schaumann, 2004, Property related design of advanced cold rolled steels with induced plasticity, Steel Grips, Vol.2, pp. 247~255.
- [2] S. J. Kim, C. G. Lee, I. Choi, S. Lee, 2001, Effect of heat treatment and alloying elements on the microstructure and mechanical properties of 0.15 wt pct C transformation-induced plasticity-aided cold rolled steel sheet, Metallurgical and Materials Transactions, Vol.32A, pp. 505~514.
- [3] P. J. Jacques, 2004, Transformation-induced plasticity for high strength formable steels, Curr. Opi. Sol. Sta. Mat. Sci, Vol.8, pp. 259~265.
- [4] B. C. De Cooman, 2004, Structure-property relationship in TRIP steels containing carbide-free bainite, Curr. Opi. Sol. Sta. Mat. Sci, Vol.8, pp. 285~303.
- [5] H. C. Chen, H. Era, M. Shimuzu, 1989, Effect of phosphorus on the formation of retained austenite and mechanical properties in Si-containing low-carbon steel sheet, Metallurgical Transaction, Vol.20A, pp. 437~445.
- [6] J. Mahieu, D. V. Dooren, L. Barbé, B. C. De Cooman, 2002, Influence of Al, Si and P on the kinetics of intercritical annealing of TRIP-aided steels: thermodynamical prediction and experimental verification, Proc. Int. Conf. on TRIP aided High Strength Ferrous Alloys, pp. 159~164
- [7] R. L. Miller, 1964, Trans. ASM, vol.57, p. 892.
- [8] S. K. Ray, S. Mishra, O. N. Mohanty, 1982, TEM study of carbide precipitation in a phosphorus-bearing low-carbon steel, Scripta Metallurgica, Vol.16, pp. 43~47.
- [9] A. K. Sachdev, 1983, Effect of retained austenite on the yielding and deformation behavior of a dual phase steel, Acta Metallurgica, Vol.31, pp. 2037~2042.