

Fe-Si-Mn-P강판의 초기조직변화가 잔류오스테나이트 형성 및 인장성질에 미치는 영향

文元振, 姜昌龍, 金漢軍, 金基敦*, 成章鉉**

釜慶大學校 工科大學 金屬工學科

浦項製鐵(株) 技術研究所*

東亞大學校 工科大學 金屬工學科**

Effect of Initial Structure on the Retained Austenite and Tensile Properties of
Fe-Si-Mn-P Steel Sheet

Won-Jin Moon, Chang-Yong Kang, Han-Goon Kim, Ki-Don Kim* and Jang-Hyun Sung**

Department of Metallurgical Engineering, Pukyong National University

*Technical research laboratories, Posco

**Department of Metallurgical Engineering, Dong-A University

ABSTRACT

This study has been conducted to investigate the effects of initial structure on the microstructure and tensile properties of high strength trip steel sheet. The initial structure before austempering remarkably influenced the second phase. The specimen with normalized initial structure showed mainly bainitic ferrite and retained austenite, while the as rolled specimen and spheroidized specimen showed martensite plus retained austenite and martensite plus bainitic ferrite with small retained austenite, respectively. Two type of retained austenite, film type and granular type were observed in all specimens. The as rolled specimen appeared the highest contents of retained austenite owing to the compressive stress by cold rolling. The contents of retained austenite increased with increasing intercritical annealing temperature and austempering time. Tensile strength showed the highest in the as rolled specimen, while the highest elongation were obtained in the normalized specimen. The maximum T.S.×El. Value showed in normalized initial structure and increased with increasing intercritical annealing and austempering time. The highest Value of T.S.×El. obtained at austempering temperature of 400°C and retained austenite of 12%.

1. 서론

자동차 부품중 고강도 소재를 개발하여 적용하므로써 경량화를 도모할 수 있는 부품은 많이 있지만, 자

동차 범퍼 및 도어 보강재 등도 이에 해당하는 부품들이다. 고강도 강판을 사용함으로써 경량화를 도모할 수 있는 강판으로서는 석출경화형 강판, 2상강(dual phase steel)판 및 Trip형 고장력강판 등이

있고, 최근에는 이러한 강판중 일부가 연속어닐링 공정(continuous annealing line)으로 제조가 가능하게 되어 이에 따른 자동차의 경량화 추세도 가속화되고 있다.

지금까지 알려져 있는 자동차용 고장력강판중 Trip형 고장력강판은 Trip현상¹⁾으로 인한 재료의 강도-연성 발란스가 대단히 우수하여 최근 많은 연구 대상이 되고 있을 뿐만 아니라, roll켄칭 공정으로 제조가 가능하여 이를 자동차의 범퍼, 도어의 보강재 및 차체 등에 적용시킴으로써 경량화를 도모할 수 있는 강으로 크게 기대되고 있다.

현재까지 진행되고 있는 Trip형 고장력강판에 대한 연구는 Hayami와 Furukawa가 2상강(dual phase)에서 잔류오스테나이트를 발견한 이래²⁾, 상온에서 잔류오스테나이트를 다량 얻기 위한 열처리 조건^{3,4)} 변화 및 치환형 합금원소를 변화시켜 이들의 변화가 잔류오스테나이트 형상 및 함량 변화에 미치는 영향^{5~8)}, 잔류오스테나이트의 Trip거동^{9,10)}, Trip에 미치는 변형온도의 영향^{11,12)}, 잔류오스테나이트의 안정도에 미치는 합금원소의 영향^{5,13)}, 실용화 연구로서 압연 조건에 관한 연구 및 연속어닐링공정 변수에 관한 연구^{5,14)}와 같이 많은 연구가 수행되어 보고되고 있다. 그러나 2상영역 열처리 이전의 초기조직변화가 2상영역 열처리후 오스텨퍼링할 때 생성되는 잔류 오스테나이트의 량 및 형상변화와 인장성질 등에 미치는 영향을 연구한 논문은 대단히 부족하다.

특히, Trip강은 제강-슬라브-roll켄칭-박판-coiling의 공정을 통하여 제조되고 있기 때문에 조업도중 재료가 가공을 받게되고 이러한 재료의 이력은 미세조직 및 기계적성질에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상되고 있음에도 불구하고 이를 체계적으로 규명한 논문은 없는 것 같다.

따라서 본 연구에서는 2상영역 열처리 이전에 실시된 가공에 의한 재료의 이력이 2상영역 열처리후 오스텨퍼링 생성되는 제2상의 형성에도 큰 영향을 미치게 되고 이에 따라 인장성질도 달라질 것으로 예상되기 때문에 냉간가공, 노르말라이징 및 탄화물 구상

화처리에 의해 초기조직을 달리 한 시료를 roll켄칭과 유사한 열사이클인 2상영역 후 오스텨퍼링하여 초기조직 및 열처리 경로 변화에 따른 조직변화를 조사하고 이에 따른 인장성질의 변화를 조사하였다.

2. 실험방법

2-1. 시료

본 실험에 사용된 시료는 고주파 진공 용해로에 의해 표1과 같은 조성을 갖는 시료를 만든 후 1200℃에서 균질화처리한 다음 열간 압연하여 약 3mm 두께의 판재를 만들었다. 이를 산세 및 냉간 압연의 과정을 거쳐 최종 1.2mm두께로 만든 후 시편으로 사용하였다.

Table 1. Chemical composition of the specimen.
(wt%)

C	Mn	Si	P	Fe
0.237	1.98	1.45	0.098	bal.

2-2. 열처리

열처리는 Fig. 1에서와 같이 920℃에서 10분간 노르말라이징 처리한 A시료와 냉간 압연한 B시료, 노르말라이징 후 670℃에서 10시간 탄화물 구상화 처리한 C시료를 초기조직으로 하여, 열팽창 시험에 의해 측정된 가열 및 냉각시의 A₁ 및 A₃변태점을 참고로 하여 2상영역 열처리 온도 범위를 760~840℃로 설정하여 20분까지 유지시간을 달리하여 열처리를 한 후, 350~450℃로 유지된 염욕에서 60분까지 시간을 변화시켜 오스텨퍼링 처리를 하였다.

2-3. 미세조직 관찰

시료의 미세조직 관찰은 열처리가 끝난 시료의 조직이 페라이트 기지에 마르텐사이트, 베이나이트-페라이트(bainitic ferrite) 및 잔류오스테나이트로 된 다상 혼합조직(multiphase structure)을 갖기

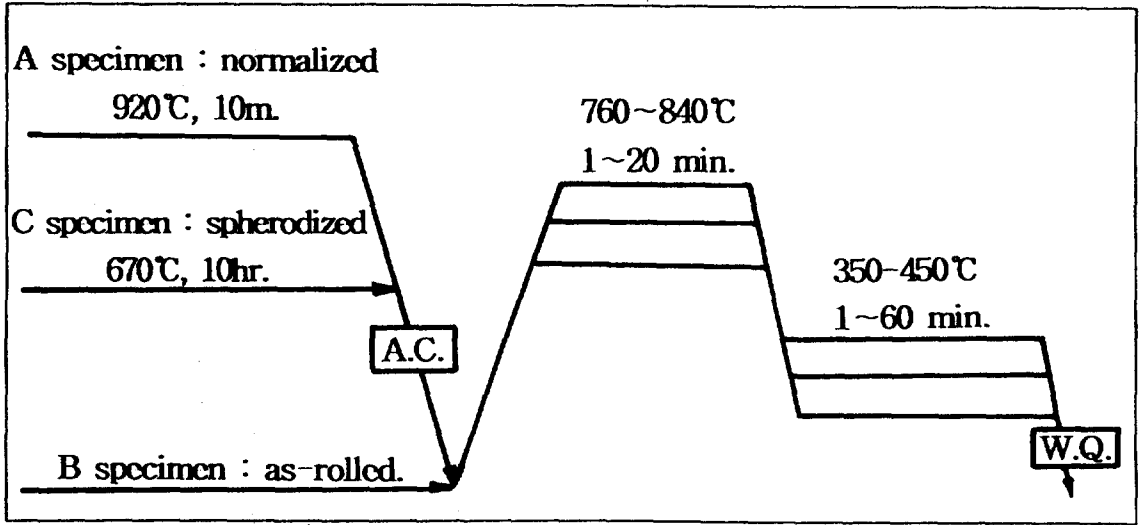


Fig. 1 Schematic diagram of heat treatment cycles.

때문에 각각의 상을 구분하기 위하여 Kalling etchant와 $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_8$ 을 기본으로 하는 착색 부식액을 본 연구진에 의해 개발하여 부식한 다음, 광학현미경 및 주사전자현미경에 의해 조사하였다. 한편 잔류오스테나이트의 존재형태 관찰은 투과전자현미경 (Hitachi E13-800)을 사용하여 관찰하였다.

2-4. X선 회절시험

2상영역 열처리 후 오스테퍼링한 시료의 잔류오스테나이트량 측정은 X선 회절시험기에서 $\text{Co K}\alpha$ 선을 이용하여 35kv, 17.5mA의 조건으로 회절실험하였을 때 얻은 회절선도로부터 잔류오스테나이트량 및 격자상수값을 구하였다. 이때 잔류오스테나이트량은 Miller법을 따라서 구하였고¹⁵⁾, 격자상수값은 (111) γ 회절면의 면간거리를 이용하여 다음식으로 구하였다.

$$a = 3.555 + 0.044X$$

(X = wt. % C)

2-5. 인장시험

인장시험은 냉간가공이 끝난 시료를 ASTM E-8의 규격으로 제작한 다음 Fig. 1과 같이 열처리를 한 후 Shimadzu인장시험기에서 cross head speed를

1mm/min.로 정한 다음 초기조직 변화 및 열처리경로 변화에 따른 인장성질을 조사하였다.

3. 실험결과 및 고찰

3.1 미세조직의 변화

Photo. 1은 2상영역 열처리 이전의 초기조직을 나타낸 광학현미경 사진이다. 920°C에서 10분 유지 후 공랭한 A시료의 사진 a)에서는 페라이트 기지에 베이나이트, 마르텐사이트 및 잔류오스테나이트가 분산된 다상혼합조직(multiphase structure)으로 이루어져 있고, 냉간압연한 시료인 b)에서는 냉간압연에 의해 페라이트조직이 심하게 소성변형되어 있으며, 사진a)에서 흰색으로 나타난 잔류오스테나이트가 가공에 의해 대부분 마르텐사이트로 변태되어 관찰되지 않고 있다. 사진 c)는 920°C에서 10분간 노말라이징 처리후 670°C에서 10시간 유지시켜 탄화물을 구상화시킨 초기조직을 나타낸 것으로서, 초기에 마르텐사이트 및 베이나이트 등이 존재하였던 자리에서 탄화물이 밀집된 형태로 구상화되어 있으며, 확산이 용이한 입계를 따라 필름상의 탄화물도 존재하고 있다.



Photo. 1 Optical micrographs showing the initial structure.

Initial structure : a) normalized.
 b) as-rolled.
 c) spheroidized.
 ex) RA : Retained Austemite
 F : Ferrite B : Bainite

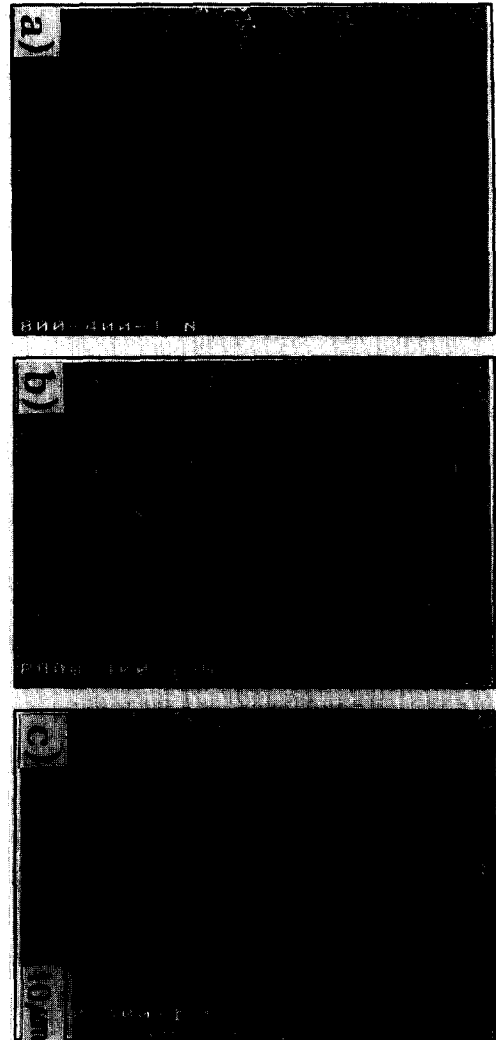


Photo. 2 SEM micrographs showing the effect of initial structure on the austempering in A, B and C specimens. The specimens were austempered at 400°C after intercritical annealing at 800°C.

Initial structure: a) normalized.
 b) as-rolled
 c) spheroidized.

Photo. 2는 초기조직이 다른 A, B 및 C시료를 800°C에서 2상영역 열처리후 400°C에서 10분간 오스테이핑하였을 때 생성된 제2상을 나타낸 주사전자

현미경 사진으로서, 초기 노르말라이징 처리한 A시료의 사진 a)에서는 제2상이 주로 베이나이트로 이루어져 있지만 적은량의 잔류 오스테나이트가 함유되

어 있고, 냉간가공한 초기조직을 갖는 B시료의 사진 b)에서는 대부분 마르텐사이트 조직에 소량의 잔류오스테나이트가 존재하고 있다. 이에 반하여 탄화물 구상화시킨 C시료의 사진 c)에서는 마르텐사이트와 베이나이트조직에 잔류 오스테나이트가 미량 존재하고 있음을 알 수 있다.

Trip형 고장력강판에서 오스템퍼링후 얻어지는 잔류오스테나이트의 형태는 페라이트입내에 존재하는 고립(1 μ m크기)형상과 페라이트 입계, 특히 3중점 등에 존재하는 블록(block=2 μ m정도의 크기)형상의 입상형태, 베이나이트-페라이트 및 마르텐사이트 라스사이에서 존재하는 필름(film)형태 및 페라이트 입내에 존재하는 봉상 형태의 4가지가 있다고¹⁶⁾ 알려져 있다. 또한, Matsumura 등¹⁷⁾은 0.14C-1.46Si-1.2Mn강에서 오스템퍼링할 때 생성되는 잔류오스테나이트의 형태는 오스테나이트 단상영역에서 열처리 후 오스템퍼링하면 베이나이트-페라이트 라스 사이에 필름(film) 형태의 잔류오스테나이트가 존재하지만, 2상영역 열처리 후 오스템퍼링하면 2 μ m이하의 입상 잔류오스테나이트가 존재한다고 보고하고 있다. 본 연구에서도 2상영역 열처리후 오스템퍼링할 때 생성되는 잔류오스테나이트의 형태를 알아보기 위하여 시료를 760 $^{\circ}$ C에서 2상영역 열처리를 행한 후 400 $^{\circ}$ C에서 오스템퍼링하였을 때 생성된 잔류오스테나이트를 투과전자현미경에 의해 조사하여 Photo. 3에 나타내었다. 이 사진에서 알 수 있는 바와 같이 a)에서는 잔류오스테나이트가 베이나이트-페라이트 라스 사이에서 필름형태로 존재하고 있으며 b)에서는 페라이트 입내와 입계 및 삼중점에서 입상형태로 존재하고 있음을 알 수 있다. 이 결과로부터 2상영역 열처리 후 오스템퍼링한 본 실험에서는 고립형태와 블록형태로 존재하는 입상과 필름 형태의 잔류오스테나이트가 공존하고 있음을 알 수 있다.

이상의 미세조직관찰 결과로부터 2상영역 열처리 후 오스템퍼링할 때 생성되는 2상은 초기조직에 크게 영향을 받고 있음을 알 수 있다. 즉, 노르말라이징한 초기조직을 갖는 시료에서는 주로 베이나이트와 잔류



Photo. 3 TEM micrographs showing the morphology of the retained austenite obtained by the austempering at 400 $^{\circ}$ C after intercritical annealing at 760 $^{\circ}$ C.

B-F : Bainitic Ferrite
a) film type. b) granular type.

오스테나이트가 생성되고, 냉간가공한 시료에서는 주로 마르텐사이트와 잔류오스테나이트가 생성되고 있으며, 탄화물 구상화한 시료에서는 베이나이트와 마르텐사이트 및 잔류오스테나이트가 생성되었다.

3.2 초기조직 및 열처리 경로 변화가 잔류오스테나이트 함량에 미치는 영향

Fig. 2는 초기조직이 다른 3시료를 760 $^{\circ}$ C에서 2상영역 열처리 시간을 변화시켜 열처리 한 후 400 $^{\circ}$ C에서 10분 유지하였을 때 생성된 잔류오스테나이트량의 변화를 2상영역 열처리 시간에 따라 나타낸 것이다. 냉간가공한 상태의 초기조직을 갖는 B시료가 잔류오스테나이트량이 가장 높고 탄화물 구상화 처리한 C시료의 경우가 가장 낮게 나타났다. 그러나 2상영역 열처리 시간이 20분이 되면, 냉간가공한 시료

의 경우는 잔류오스테나이트량이 급속히 감소되고 있음을 알 수 있다. 이와같이 냉간가공한 시료가 잔류오스테나이트량이 가장 높은 이유는 가공응력이 2상영역 열처리시 충분히 제거되지 않았기 때문이라고 생각된다. 즉, 2상영역 열처리 후 재료내 존재하는 가공응력(압축응력)은 오스템퍼링 처리시 체적팽창이 일어나는 베이나이트-페라이트 라스의 성장을 억제할 뿐만 아니라, 이 압축응력이 존재하는 시료는 오스템퍼링후 수냉시 단위원자당 부피가 큰 마르텐사이트로 변화하는 것보다, 상대적으로 단위원자당 부피가 적은 오스테나이트 상태로 잔류하는 것이 안정하므로²²⁾ 잔류오스테나이트가 많이 생성되는 것으로 생각된다. 따라서 Trip강에서 가공응력이 존재할 때 Ms는 탄소 및 Mn의 농도를 고려한 수식에¹⁹⁾ 가공도를 고려하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$M_s = 550 - 360 \times C_r - 4 \times Mn_r - \text{가공도} \dots\dots(1)$$

여기서, C_r 와 Mn_r 은 각각 오스테나이트내의 탄소 및 Mn의 농도이다. 위의 (1)식을 잔류오스테나이트내의 탄소농도식으로 나타내면, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$C_r = \frac{(550 - 40 \times Mn_r - M_s - \text{가공도})}{360} \dots\dots(2)$$

(2)식에서 시료내 잔류오스테나이트가 형성될 때 Mn_r 와 M_s 가 일정하다고 가정하면 잔류오스테나이트내의 임계탄소농도는 가공도에 의해 결정되어짐을 알 수 있다. 따라서 가공도가 클수록 임계탄소농도는 저하되어 잔류오스테나이트의 형성이 용이해진다. 이와같은 이유에서 냉간가공한 B시료는 압축응력 때문에 잔류오스테나이트의 형성이 용이해지는 것으로 생각된다. 그러나 2상영역열처리 시간이 10분 이상으로 길어지게 되면 잔류오스테나이트량이 감소하는데, 그 이유는 2상영역 열처리 시간이 길어짐에 따라서 잔류응력이 제거되어 가공에 의한 영향이 제거되기 때문에 (2)식에서 알 수 있는 바와 같이 임계탄소농도가 높아져서 잔류오스테나이트의 양이 낮아지게 된

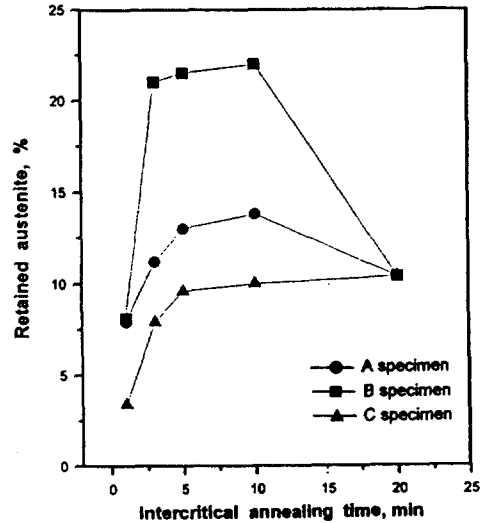


Fig. 2 Changes in retained austenite content with intercritical annealing time in A, B and C specimen. The specimens were austempered at 400°C after intercritical annealing at 760°C.

다. 또한 초기 구상화시킨 C시료의 경우 10분 이후에서도 잔류오스테나이트의 양이 감소하지 않는 이유는 구상화처리에 의하여 형성된 C시료의 탄화물이 A 및 B시료의 탄화물보다 비교적 안정하기 때문에 2상영역 열처리시 고용되는 탄소량이 적기 때문에 오스테나이트의 탄소농도가 낮아 오스테나이트의 안정도가 높아지기 때문이라고 생각된다.

Fig. 3는 초기조직이 다른 3시료를 760°C에서 2상영역 열처리 시간을 변화시켜 열처리한 후, 400°C에서 오스템퍼링하였을 때 얻어진 잔류오스테나이트량을 오스템퍼링 시간 변화에 따라 나타낸 것이다. 3시료 모두 오스템퍼링 시간이 길어짐에 따라 잔류오스테나이트량이 급격히 증가하고 있다. 이와같이 오스템퍼링시간이 길어짐에 따라 잔류오스테나이트량이 증가하는 이유는 첨가된 Si가 오스템퍼링시 탄화물의 생성을 억제하므로써 오스테나이트내 베이나이트-페라이트의 생성과 성장을 조장^{5, 20)}하게되고, 이러한 베이나이트-페라이트 라스의 성장과 더불어 탄소원자가 오스테나이트로 확산되어감에 따라서 오스테나

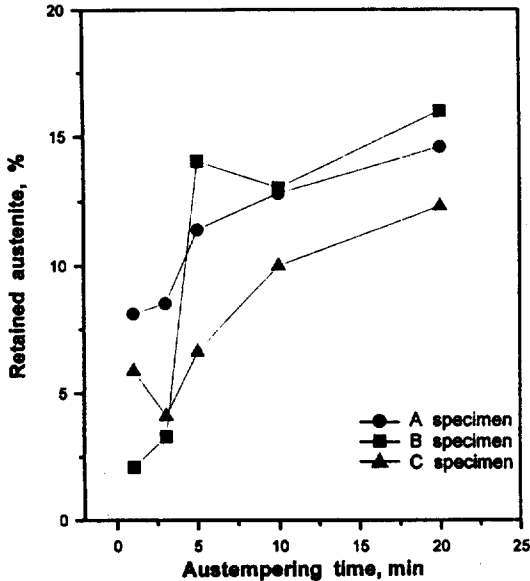


Fig. 3 Changes in retained austenite content with austempering time in A, B and C Specimens. The specimens were austempered at 400°C after intercritical annealing at 760°C.

이트의 탄소농도가 증가되어 오스테나이트의 안정도가 낮아지기 때문이라고 생각된다. 또한, 냉간가공한 초기조직을 갖는 B시료의 경우가 앞에서 설명한 바와 같이 압축 잔류응력으로 인하여 잔류오스테나이트의 양이 가장 높게 나타나는 것으로 생각된다.

이상에서 알 수 있는 바와 같이 잔류오스테나이트의 양은 냉간가공한 초기조직을 갖는 시료가 가장 높게 나타났고, 구상화처리한 초기조직을 갖는 시료가 가장 낮게 나타나고 있음을 알 수 있다.

3.3 초기조직 및 열처리경로 변화가 인장성질에 미치는 영향

앞의 미세조직관찰 및 잔류오스테나이트 변화에 관한 실험에서 초기조직과 열처리경로 변화가 잔류오스테나이트의 양 및 형상변화에 크게 영향을 미치고 있음을 알 수 있었고, 이러한 변화는 인장성질에도 큰 영향을 미칠 것으로 예상되어 초기조직 및 열처리 경로 변화에 따른 인장성질을 조사하였다.

Fig. 4는 초기조직변화가 인장성질에 미치는 영향을 알아보기 위하여 초기조직이 각기 다른 A, B 및

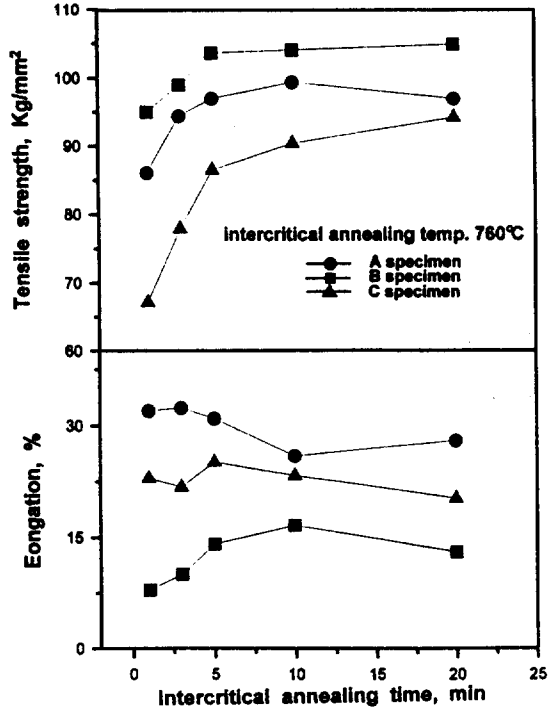


Fig. 4 Changes in tensile properties with intercritical annealing time at 760°C followed by austempering for 10 min at 400°C in A, B and C Specimens.

C시료를 760°C에서 시간을 달리한 2상영역 열처리를 한 후, 400°C에서 10분간 오스템퍼링한 시료를 인장시험 하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 2상영역 열처리 시간에 대해 나타낸 것이다. 인장강도는 2상영역 열처리 시간이 길어질수록 약 10분까지는 증가하다가 그 이후의 시간에서는 큰 변화가 없는데 반하여 연신율은 약간 감소하는 경향을 나타내고 있다. 이와같이 2상영역 열처리 시간이 길어짐에 따라서 인장강도가 증가하고 연신율이 감소하는 이유는 2상영역 열처리 시간이 길어짐에 따라서 탄화물 고용량의 증가와 더불어 계면에 존재하는 필름상의 탄화물이 소멸되어 마르텐사이트와 베이나이트 등을 형성하기 때문이라고 판단된다. 또한 동일 열처리 조건에서 인장강도는 냉간가공한 B시료의 경우가 Fig. 2에서 알 수 있는 바와 같이 잔류오스테나이트량이 가장 많은 데도 불구하고 가장 높은 값을 나타내는 이유는 가공시에 받은 응력이 2상영역 열처리시 충분히 제거되지

않았을 뿐만 아니라, Photo. 2에서 알 수 있는 바와 같이 오스템퍼링 후 수냉할 때 마르텐사이트가 가장 많이 생성되기 때문이라고 생각한다. 한편, 연신율은 노르말라이징 처리한 A시료가 가장 높고 냉간가공한 B시료의 경우가 가장 낮은 값을 나타내고 있다. 이와 같이 연신율이 C시료가 A시료보다 낮은 이유는 Photo. 1의 초기조직사진에서와 같이 필름상으로 존재하는 탄화물이 오스템퍼링 후 수냉에 의해 마르텐사이트 및 베이나이트로 변화되어 이들이 입계를 둘러싸고 있기 때문에 인장시험시 소성구속하였기 때문이라고 생각된다. 또한 냉간가공한 B시료가 연신율이 가장 낮은 이유는 오스템퍼링후 수냉시 마르텐사이트가 가장 많이 생성되기 때문이라고 생각된다.

Fig. 5는 초기조직이 다른 3시료를 760℃에서 2상영역 열처리 한 다음, 350℃에서 시간을 달리 한 오스템퍼링 처리를 한 후 인장시험하였을 때 얻은 인장강도와 연신율을 오스템퍼링 시간에 대해 나타낸 것이다. 오스템퍼링 시간이 길어짐에 따라서 인장강

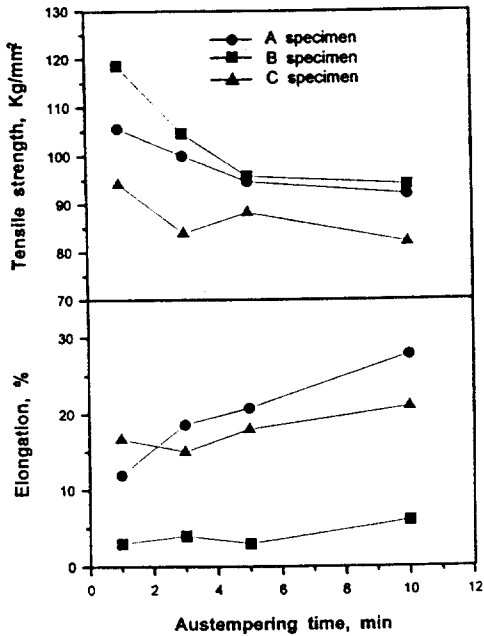


Fig. 5 Changes in tensile properties with austempering time at 350°C after intercritical annealing at 760°C.

도는 감소하고 연신율은 증가하였다. 이와같은 이유는 Fig. 3에서 알 수 있는 바와 같이 오스템퍼링 시간이 길어짐에 따라 오스테나이트내 베이나이트-페라이트가 성장되는데 기인되어 오스테나이트내 탄소 농도가 증가하여 오스테나이트의 안정도가 높아지므로 잔류오스테나이트량이 증가하기 때문이라고 생각된다.

Fig. 6은 고장력강판의 일반적으로 강도와 성형성을 평가하는 기준이 되는 강도-연성발란스값에 미치는 초기조직의 영향을 알아보기 위하여 초기조직이 다른 3시료를 이상영역 열처리 및 오스템퍼링 조건을 변화시켜 열처리한 다음, 인장시험하였을 때 얻은 인장강도를 연신율에 대해 나타낸 것이다. 이 그림에서 알 수 있는 바와 같이 노르말라이징한 A시료의 경우는 강도-연성 발란스 값이 열처리에 따라서는 2000~3100사이의 높은 값을 나타내고 있으며 이 값은 이상조직강(2000~1000)보다도 훨씬 높은 강도-연성 발란스값을 갖는 것으로 나타났고, 냉간압연한 B시료는 경우에 따라서는 1000이하의 가장 낮은 강도-연성 발란스값을 갖는 것으로 나타났다. 이와같이 노르말라이징한 A시료의 경우가 가장 높은

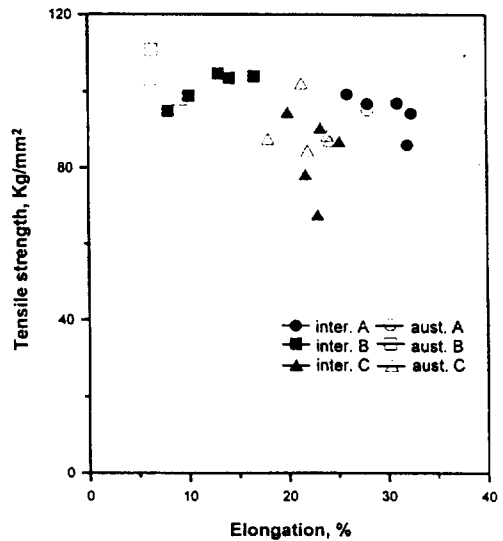


Fig. 6 Effect of initial structure on T.S. x El obtained after heat treatment by Various condition in A, B and C specimens.

강도-연성발란스값을 나타내는 이유는, Fig. 2와 3에서 알 수 있는 바와 같이 얻어지는 잔류오스테나이트량이 약 12%로서 비교적 많아 Trip현상이 가장 효과적으로 나타났기 때문²²⁾이라고 생각된다.

지금까지 알려진 바에 의하면, Trip형 고장력강판에서 잔류오스테나이트의 양이 약 10~15% 범위 사이일 때 강도-연성 발란스값이 가장 높은 값을 나타낸다고 보고²²⁾하고 있다. 본 실험에서도 노르말라이징한 시료의 경우는 대개 이 범위의 잔류오스테나이트량을 갖기 때문에 가장 높은 강도-연성 발란스값을 나타내는 것으로 판단되고 이 결과와 잘 일치하고 있다.

4. 결 론

강도-연성 발란스가 우수한 Fe-Mn-Si-P조성을 갖는 Trip형 고장력강판에서 초기조직을 달리 한 다음 2상영역열처리 및 오스테퍼링 온도와 시간을 변화시켜 열처리를 한 후 초기조직 변화에 따른 잔류오스테나이트량과 형상 및 인장성질 변화를 조사한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

- 1) 오스테퍼링후 생성되는 제2상은 초기조직에 의해 큰 영향을 받아, 노르말라이징한 초기조직을 갖는 시료에서는 주로 베이나이트와 잔류오스테나이트가 생성되고, 냉간가공한 시료에서는 마르텐사이트와 잔류오스테나이트가 생성되는데 비하여, 탄화물 구상화한 시료에서는 베이나이트와 마르텐사이트 및 잔류오스테나이트가 생성되었다.
- 2) 오스테퍼링후 생성되는 잔류오스테나이트는 초기조직에 관계없이 필름 및 입상형태로 존재하였다. 또한 잔류오스테나이트량은 냉간가공한 초기조직을 갖는 시료가 냉간가공에 의한 응력 때문에 가장 높고, 2상영역열처리 온도가 낮을수록, 오스테퍼링 시간이 길어질수록 증가하였다.
- 3) 냉간가공한 초기조직을 갖는 시료가 인장강도는 가장 높고, 탄화물 구상화 한 시료가 가장 낮은값을 나타내고 있다. 이에 반하여 연신율은 노르말

라이징한 시료가 가장 높고 냉간가공한 시료가 가장 낮게 나타났다.

- 4) 강도-연성의 발란스값은 노르말라이징한 초기조직을 갖는 시료가 가장 높은값을 나타내고 있고, 2상영역열처리 시간이 길어질수록, 오스테퍼링시간이 길어질수록 약간 증가하였다. 한편 강도-연성발란스의 최대값은 3000이상으로 오스테퍼링온도가 400℃, 잔류오스테나이트량이 약 12%에서 얻었다.

참고문헌

- 1) V. F. Zackey, E. R. Parker D.Fahr, R. Bush ; Trans ASM, Vol. 60, 1967, 252
- 2) S. Hayami, T. Fukawa ; Microalloying 75, Union Carbide Corp, New York, 1975, 87
- 3) O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi ; Trans. ISIJ, Vol. 27, 1987, 571
- 4) 小松原望, 今井規雄, 國重和俊 ; CAMP-ISIJ, Vol. 6, 1993, 1702
- 5) Y. Sakuma, O. Matsumura, H. Takechi ; Metallurgical Trans. A, Vol. 22A, 1991, 489-498
- 6) I. Tsukatani, T. Kamei, T. Sakai, S. Hashimoto, K. Hosomi ; Microalloyed HSLA Steels, 1988, 541-550
- 7) 水井直光 ; CAMP-ISIJ, vol. 6, 1993, 1700
- 8) O. Matsumura, Y. Sakuma, Y. Ishii, J. Zhao ; ISIJ International, Vol. 32, 1992, No.10, 1110-1116
- 9) 松村理外 4人 ; CAMP-ISIJ, Vol. 2, 1989, 828
- 10) 정우창, 최진환 ; CAMP-ISIJ, Vol. 6, 1993, 756
- 11) 今井規雄, 小松原望, 國重和俊 ; CAMP-ISIJ, Vol. 6, 1993, 754
- 12) 杉本公一, 小林光征, 橋本俊一 ; 日本金屬學會

- 誌, 第54卷, 第6號, 1990, 657-663
- 13) 今井規雄, 小松原望, 國重和俊; CAMP-ISIJ, Vol. 5, 1992, 1896
- 14) 塚谷一郎, 龜井忠, 酒井忠迪; CAMP-ISIJ, Vol. 1, 1988, 945
- 15) R.L. Miller, : Trans. ASM, 57, 1964, 892-899
- 16) 杉本公一, 小林光征, 松島英浩; CAMP-ISIJ, 6(1993), 758
- 17) O. Matsumura, Y. Sakuma, H. Takechi; ISIJ International, Vol. 32, 1992, No. 9, 1014-1020
- 18) D. A. Porter, K. E. Easterling; Phase Transformations in Metals and alloy, pp. 415-416
- 19) H. Sugimoto, N. Usui, M. Kobayashi, H. Hashimoto; ISIJ International, Vol. 32, 1992, No. 12, 1311-1318
- 20) W. S. Owen; Trans. ASM, 46, 1994, 812
- 21) 河野治, 脇田淳一, 江板一彬, 河部博; CAMP-ISIJ, 8(1995), 568
- 22) 國重和俊; Meteria Japan, 35, 1(1996), pp. 32-40