

내진용 600 및 700 MPa 급 고강도 철근의 미세조직과 인장 특성 비교

홍태운¹ · 이상인¹ · 이준호² · 심재혁³ · 이명규⁴ · 황병철^{1,*}

Comparative Study of Microstructure and Tensile Properties of 600 and 700 MPa-Grade High-Strength Seismic Resistant Reinforced Steel Bars

T. W. Hong, S. I. Lee, J. H. Lee, J. H. Shim, M. G. Lee, B. Hwang

(Received July 4, 2018 / Revised August 2, 2018 / Accepted August 6, 2018)

Abstract

This study deals with the microstructure and tensile properties of 600 and 700 MPa-grade high-strength seismic reinforced steel bars. High-strength seismic resistant reinforced steel bars (SD 600S and SD 700S) were fabricated by TempCore process, especially the SD 700S specimen was more rapid cooled than the SD 600S specimen during the TempCore process. Although two specimens had microstructure of tempered martensite in the surface region, the SD 600S specimen had ferrite-degenerated pearlite in the center region, whereas the SD 700S specimen had bainite-ferrite-degenerated pearlite in the center region. Therefore, their hardness was highest in the surface region and revealed a tendency to decrease from the surface region to the center region because tempered martensite has higher hardness than ferrite-degenerated pearlite or bainite. The SD 700S specimen revealed higher hardness in the center region than SD 600S specimen because it contained a larger amount of bainite as well as ferrite-degenerated pearlite. On the other hand, tensile test results indicated the SD 600S and SD 700S specimens revealed continuous yielding behavior because of formation of degenerated pearlite or bainite in the center region. The SD 600S specimen had a little higher tensile-to-yield ratio because the presence of ferrite and degenerated pearlite in the center region and the lower fraction of tempered martensite enhance work hardening.

Key Words : High strength, Seismic resistant, Reinforced steel bar, Microstructure, Tensile properties

1. 서론

최근 몇 년간 세계 곳곳에서 지진이 빈번하게 발생하면서 많은 인명과 물질적 피해가 잇따르고 있다. 국내의 경우도 지진 발생이 지속적으로 증가하고 있어 그 어느 때보다 건축물의 안정성에 대한 중요성이 커지고 있다. 이에 따라 지진 발생 시 건축물의 피해를 최소화하기 위한 건축법이 개정되면

서 내진설계 의무화에 대한 법규가 도입되고, 건축물의 구조재에 대한 규격이 새롭게 개정되고 있다 [1~2]. 특히 건축물의 구조재로 많이 사용되고 있는 철근의 경우 일반 철근과 내진 철근의 구분이 명확해지고, 내진 철근의 강도 및 내진 성능과 관련된 항복 강도, 항복 강도 대비 인장 강도(tensile-to-yield ratio, TS/YS, 이하 항복비) 및 균일 연신율(uniform elongation)에 대한 규격이 점점 더 강화되고 있는 추세이다. 이는 지진 발생 시 철근의 소성 변형이 시작되는 시점부터 최종 파단에 이르기까지 보다

1. 서울과학기술대학교 신소재공학과 학생, 교수
2. 고려대학교 신소재공학과 교수
3. 한국과학기술연구원 고온에너지연구센터 책임연구원
4. 서울대학교 재료공학부 교수
* Corresponding Author : Department of Materials and Engineering,
Seoul National University of Science and Technology, Associate
Professor, E-mail: bhwang@seoultech.ac.kr

많은 에너지를 흡수하면서 건축물의 붕괴로 인한 피해를 최소화하기 때문이다[1~4].

한편 최근 개정된 대한민국 철근 표준규격(KS D 3504)을 비롯한 각 국가별 철근 표준규격집을 참고하여 항복 강도 500 MPa 급 이상의 철근에 대한 표준규격을 표 1 에 정리하였다[5~10]. 국가별 철근 표준규격을 자세히 살펴보면(표 1), 일반적으로 항복 강도를 기준으로 철근의 등급을 구분하고, 세부적으로 인장 강도, 항복비, 균일 연신율 및 총 연신율에 따라 분류된다. 특히 대한민국 철근 표준규격은 일반 철근과 내진 철근을 항복비를 기준으로 구분하고 있는 반면, 독일 표준규격(DIN 488 Teil 1)의 경우 총 연신율을 기준으로 일반 철근과 내진 철근을 구분하고 있다. 국제 표준규격(ISO 6935-2), 영국 표준규격(BS 4499) 및 중국 표준규격(GB 1499.2)의 경우 항복비와 균일 연신율을 기준으로 등급을 구분하고 있다. 또한 현재 세계적으로 항복 강도 700 MPa 급 이상의 고강도 철근에 대한 표준규격은 대한민국에만 존재하는 것을 확인할 수 있다.

일반적으로 철근의 내진 성능은 재료의 변형능

(deformability)과 관계되며, 그 변형능은 주로 항복비, 균일 연신율 및 가공경화 지수(work hardening exponent) 등으로 평가된다. 특히 철근은 합금원소 및 제조 방법에 따라 강도 및 내진 성능이 크게 달라지는데, 이는 제조 방법에 따라 철근의 미세조직이 전혀 다른 양상을 보이기 때문이다. 템프코어 공정(TempCore process)을 통해 제조된 철근의 경우 공냉 공정(air cooling process)을 통해 제조된 철근보다 강도는 높지만, 내진 성능은 낮은 경향을 나타낸다[3,4]. 본 연구에서는 최근 개발된 내진용 600 및 700 MPa 급 고강도 철근의 미세조직, 경도 및 인장 특성을 비교함으로써 철근의 미세조직과 기계적 특성의 상관관계를 이해하고, 이를 통해 향후 항복 강도 700 MPa 급 이상의 초고강도 내진 철근의 개발에 도움이 되고자 하였다.

2. 실험 방법

본 연구에서 사용된 철근 시편은 내진용 600 및 700 MPa 급 고강도 철근으로 D 사로부터 공급받았

Table 1 Tensile property requirements of the high-strength reinforced steels according to standard specification by countries[5~10].

| Reference | Grade | Yield strength (YS), MPa | Tensile strength (TS), MPa | TS/YS | Uniform elongation, % | Total elongation, % |
|-----------------|-----------|--------------------------|----------------------------|-------------|-----------------------|---------------------|
| KS D 3504 | SD 600 | 600 ~ 780 | - | ≥ 1.08 | - | ≥ 10 |
| | SD 600S | 600 ~ 720 | - | ≥ 1.25 | - | ≥ 10 |
| | SD 700 | 700 ~ 910 | - | ≥ 1.08 | - | ≥ 10 |
| ASTM A615/A615M | Grade 80 | ≥ 550 | ≥ 725 | - | - | ≥ 7 |
| | Grade 100 | ≥ 690 | ≥ 790 | - | - | |
| DIN 488 Teil 1 | BSt 500S | ≥ 500 | ≥ 550 | - | ≥ 4 | ≥ 10 |
| | BSt 500M | | | - | | ≥ 8 |
| GB 1499.2 | HRB 500 | ≥ 500 | ≥ 630 | - | ≥ 7.5 | ≥ 15 |
| BS 4499 | B 500A | 485 ~ 650 | - | ≥ 1.03 | ≥ 2.0 | - |
| | B 500B | | - | ≥ 1.06 | ≥ 4.0 | - |
| | B 500C | | - | 1.13 ~ 1.38 | ≥ 6.0 | - |
| ISO 6935-2 | B 500 AWR | ≥ 500 | - | ≥ 1.02 | ≥ 2 | ≥ 14 |
| | B 500 BWR | | - | ≥ 1.08 | ≥ 5 | ≥ 14 |
| | B 500 CWR | | - | ≥ 1.15 | ≥ 7 | ≥ 14 |
| | B 500 DWR | | - | ≥ 1.25 | ≥ 8 | ≥ 13 |

으며, 철근 시편의 항복 강도에 따라 편의상 ‘SD 600S’ 및 ‘SD 700S’ 로 표기하였다. 두 철근 시편의 자세한 화학 조성을 표 2 에 나타내었다. SD 600S 시편의 탄소 당량은 항복 강도 600 MPa 급 내진 철근에 관한 대한민국 철근 표준규격을 만족하였다. 위 철근 시편들은 모두 900 °C 이상에서 열간 압연한 후 템프코어(TempCore) 공정을 통해 제조되었고, 냉각 과정에서 SD 700S 시편은 SD 600S 시편보다 빠른 속도로 냉각되었다. 일반적으로 템프코어 공정은 열간 압연 후 수냉하는 공정으로 표면부가 급랭되어 마르텐사이트 조직이 형성되고, 이후 공냉 과정에서 표면부의 마르텐사이트 조직이 중심부의 잠열(latent heat)로 인해 템퍼링되어 템퍼드 마르텐사이트 조직이 형성되며, 중심부의 미세조직은 냉각 과정 중 냉각 속도와 시편의 경화능에 따라 달라진다. [11]

제조된 철근 시편들의 미세조직은 시편의 단면을 기계적으로 연마하고 3 % 나이탈 용액으로 에칭한 후 광학현미경(OM, optical microscope, BA310Met, Motic, China) 및 주사전자현미경(SEM, scanning electron microscope, AIS1800C, SERON, Korea)을 사용하여 관찰하였고, 철근 시편의 에칭된 단면의 명암이 교차되는 지점을 통하여 경화능 깊이(hardenability depth, d_h)를 구하였고, 이를 통해 템퍼드 마르텐사이트 분율(tempered martensite fraction, V_{TM})을 계산하였다[12]. 경도 시험은 비커스 경도 시험기(FM-800, Future-Tech Corp., Japan)를 이용하였으며, 표면부로부터 1 mm 간격마다 하중 500 gf 하에서 유지시간 15 초로 실시하였다.

한편 철근 시편들의 인장 특성을 평가하기 위해 본 연구에서는 KS B 0801 표준 인장 시편 규격에 따라 기계적 가공없이 표점 거리를 각 철근 시편 지름의 8배, 물림 간격을 표점 거리에 지름의 2배를

더한 길이를 철근 시편에 표시한 후 100 톤 용량의 만능재료시험기를 이용하여 KS B 0802 표준 인장 시험 규격에 따라 항복점까지의 응력증가율 11.5 N/mm²·s, 항복점 이후의 변형증가율 50 %/min으로 상온에서 인장 시험을 실시하였다. 인장 시험에 따른 응력-변형률 곡선으로부터 얻은 항복 강도는 연속 항복 거동을 보인 경우 0.2 % 상쇄한 유동응력을 항복 강도로 하고, 불연속 항복 거동을 보인 경우 상부 항복점을 항복 강도로 규정하였다[5]. 또한 인장 강도, 균일 연신율 및 총 연신율(total elongation)을 측정하여 미세조직과 인장 특성의 상관관계를 고찰하였다.

3. 실험 결과 및 고찰

3.1 미세조직

본 연구에서 사용된 철근 시편의 중심부(center region), 표면에서 2 mm 이내 경계부(boundary region) 및 표면에서 1 mm 이내 표면부(surface region)의 미세조직을 광학현미경 및 주사전자현미경으로 관찰한 결과를 각각 그림 1 및 2 에 나타냈다. SD 600S 및 SD 700S 시편 모두 표면부에서 템퍼드 마르텐사이트 조직이 형성되었고, 경계부에서는 템퍼드 마르텐사이트 및 베이나이트(bainite) 등의 저온 변태 조직과 페라이트 조직이 형성되었는데, 이는 앞에서 설명한 바와 같이 표면부는 템프코어 공정 중 빠른 속도로 냉각되어 마르텐사이트 및 베이나이트 조직이 형성되고, 중심부의 잠열로 인해 표면부에 형성된 마르텐사이트 조직이 템퍼링되었기 때문이다. 반면 SD 600S 및 SD 700S 시편의 각 중심부에서는 서로 다른 조직인 불완전 펄라이트(degenerated pearlite) 및 베이나이트 조직이 형성됨을 확인할 수 있었는데, 이는 템프코어 공정 과정 중 냉각 속도의

Table 2 Chemical composition (wt. %) of the SD 600S and SD 700S specimens investigated in this study. The chemical composition and carbon equivalent ($C_{eq} = C + 1/6Mn + 1/15Cu + 1/5V$) of the SD 600S specimen satisfy the requirement of KS D 3504 specification[5].

| Specimen | | C | Si | Mn | P | S | V | Cu | C_{eq} [5] |
|----------|----------|--------|-------|-------|--------|--------|------|-------|--------------|
| SD 600S | Range[5] | ≤ 0.37 | ≤ 0.3 | ≤ 1.8 | ≤ 0.04 | ≤ 0.04 | - | ≤ 0.2 | ≤ 0.67 |
| | Measured | 0.32 | 0.15 | 1.08 | 0.017 | 0.024 | 0.04 | 0.25 | 0.52 |
| SD 700S | Measured | 0.33 | 0.15 | 1.12 | 0.018 | 0.026 | 0.04 | 0.25 | 0.54 |

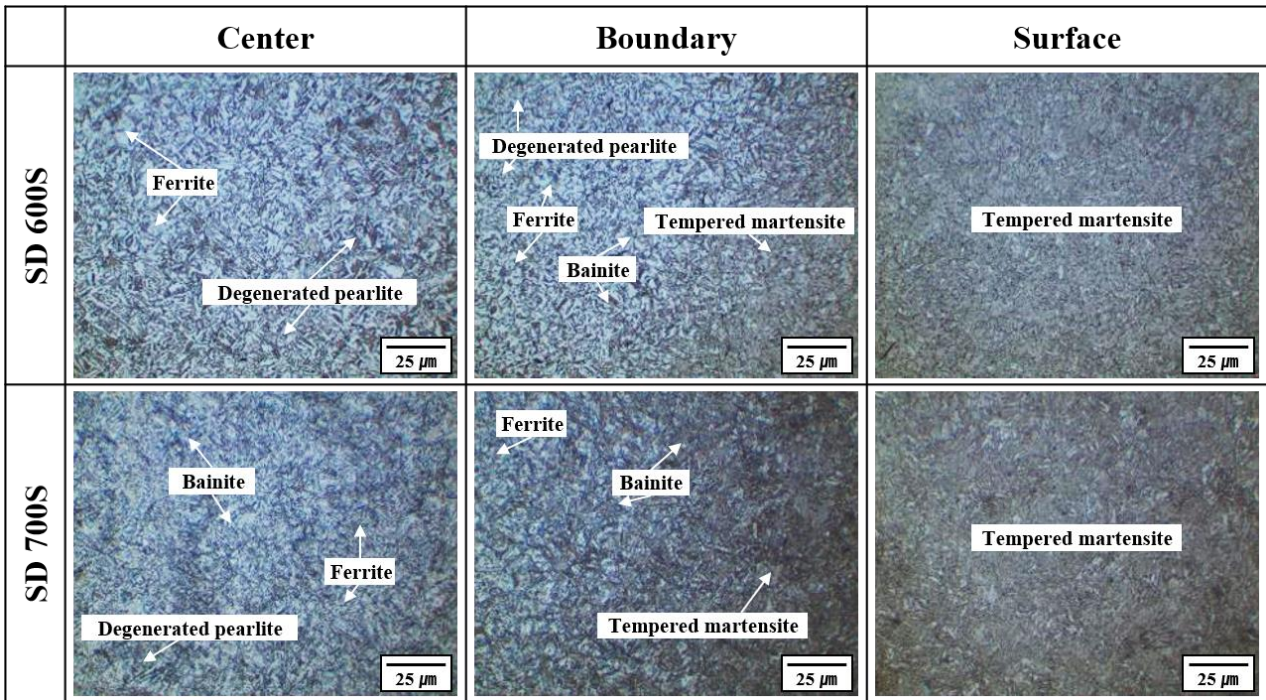


Fig. 1 Optical micrographs of the SD 600S and SD 700S specimens fabricated by TempCore process. Microstructure in center, boundary and surface regions of the reinforced steel bar specimens was observed.

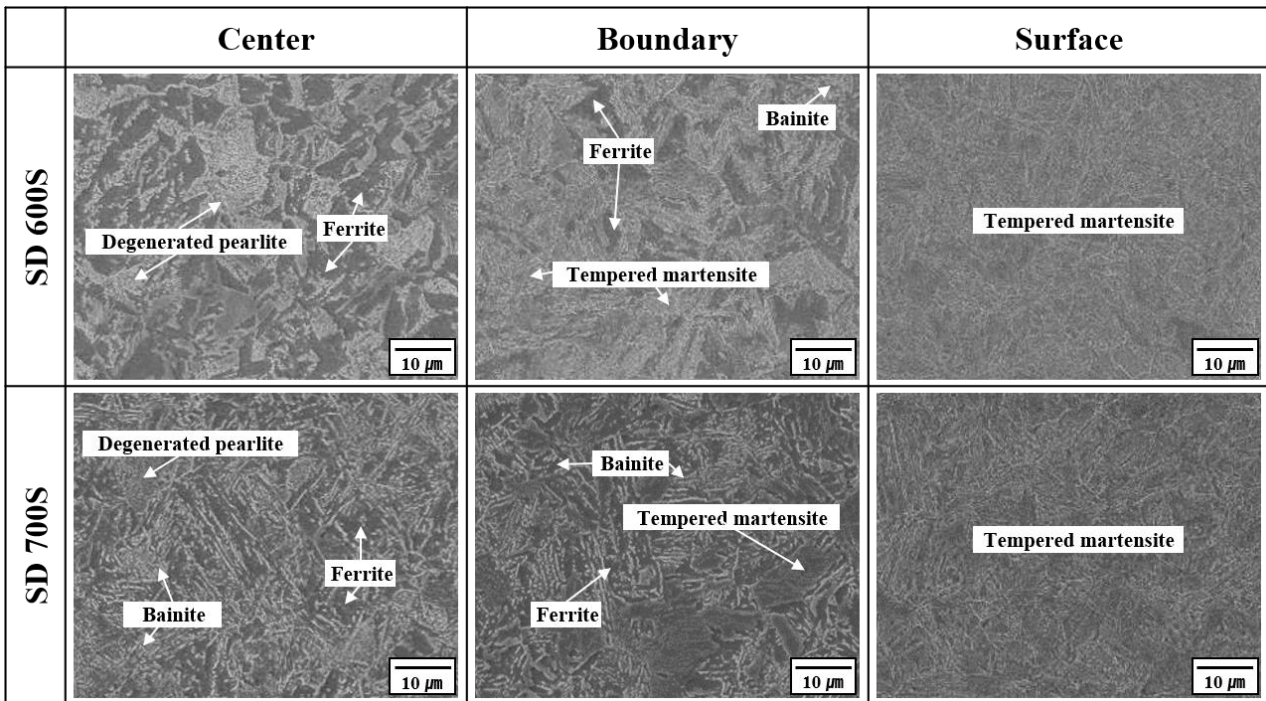


Fig. 2 SEM micrographs of SD the 600S and SD 700S specimens fabricated by TempCore process. Microstructure in center, boundary and surface regions of the reinforced steel bar specimens was observed.

차이 때문이다.

두 철근 시편의 중심부에 형성된 미세조직을 자세히 살펴보기 위해 주사전자현미경을 이용하여 고배율로 관찰한 결과를 그림 3에 나타냈다. 그림 3(a)를 통해 SD 600S 시편의 중심부에서는 일반적인 펄라이트 내에 존재하는 층상 구조를 이루는 시멘타이트(cementite) 뿐만 아니라 불규칙적인 배열과 형상을 가진 시멘타이트를 포함하는 불완전 펄라이트 조직을 확인할 수 있었다. 일반적으로 이러한 불완전 펄라이트 조직은 펄라이트 생성 종료 온도와 베이나이트 생성 시작 온도의 경계에서 형성된다고 알려져 있다[13,14]. 반면 SD 700S 시편의 중심부에서는 베이나이트 조직이 주로 형성된 것을 확인할 수 있었는데(그림 3(b)), 이는 템프코어 공정 과정에서 SD 600S 시편보다 빠르게 냉각되었기 때문이다.

한편 철근 시편의 3% 나이탈 에칭된 단면을 그림 4에 나타내고, 에칭된 단면의 명암이 교차되는 지점으로부터 구한 경화능 깊이 및 템퍼드 마르텐사

이트 분율을 표시하였다. 두 철근 시편에서 표면부의 어두운 영역과 그 내부의 밝은 영역이 공통적으로 관찰되었는데, 각 영역은 템퍼드 마르텐사이트 조직이 형성된 영역과 페라이트 및 불완전 펄라이트 또는 베이나이트 조직이 형성된 영역이다. SD 600S 시편의 경화능 깊이 및 템퍼드 마르텐사이트 분율은 1.0 mm 및 18.2%로 SD 700S 시편에 비해 작은 값을 나타냈다. 이는 일반적으로 경화능은 오스테나이트 결정립 크기, 탄소를 포함한 합금원소 함량 및 냉각 속도에 영향을 받는 것으로 알려져 있

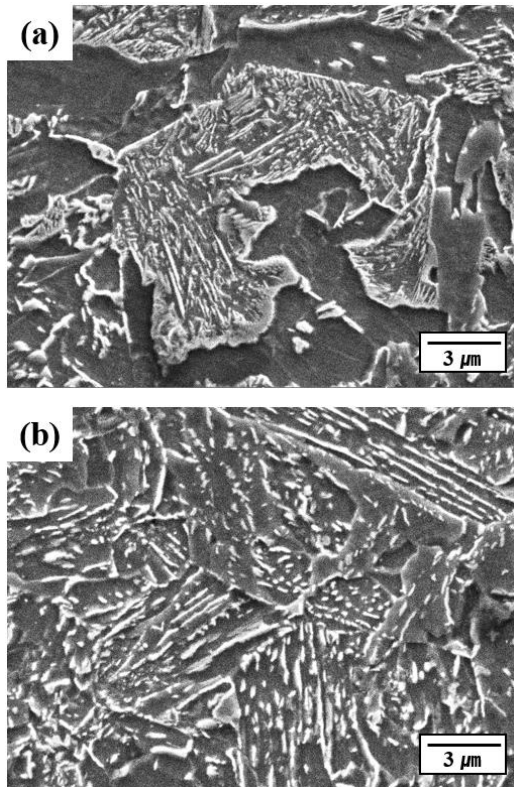


Fig. 3 SEM micrographs showing degenerated pearlite and bainite structure in center region of the (a) SD 600S and (b) SD 700S specimens, respectively.

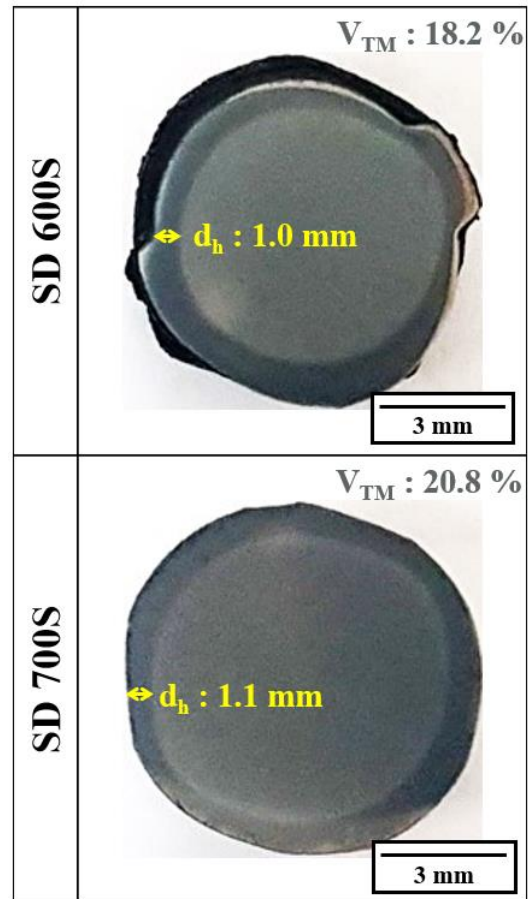


Fig. 4 Photographs of the cross-section of the SD 600S and SD 700S specimens. The d_h indicates a hardenability depth determined from a location corresponding to the average value of half-fraction of tempered martensite in each specimen and V_{TM} means the fraction of tempered martensite calculated from d_h of each specimen. In the photographs, relatively dark regions are hardened regions showing the formation of tempered martensite.

는데, 본 연구에서 사용된 두 철근 시편은 화학 조성과 압연 조건이 유사하기 때문에 냉각 속도의 차이가 영향을 준 것으로 생각된다.

3.2 경도 특성

본 연구에서 사용된 두 철근 시편들에 대하여 표면부에서 중심부 방향으로 1 mm 간격마다 측정한 경도 결과를 그림 5에 나타냈다. SD 600S 및 SD 700S 시편들 모두 표면부에서 343 Hv 및 361 Hv로 가장 높은 경도를 나타내지만, 중심부로 갈수록 낮아지는 경향을 나타냈는데, 이는 표면부에 형성된 템퍼드 마르텐사이트 조직이 중심부에 형성된 페라이트 및 불완전 펄라이트 또는 베이나이트 조직보다 높은 경도를 갖기 때문이다.

두 철근 시편들의 경도 변화를 자세히 살펴보면(그림 5), 표면부에서 SD 700S 시편의 경도가 SD 600S

시편보다 다소 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 SD 700S 시편의 경우 SD 600S 보다 빠르게 냉각되어 중심부의 잠열 온도가 낮아지게 되고, 이로 인해 SD 600S 시편보다 낮은 온도에서 템퍼링되었기 때문에 SD 600S 시편에 비해 상대적으로 높은 경도가 나타나는 것으로 생각된다. 일반적으로 템퍼드 마르텐사이트의 경도는 탄소, 망간 및 바나듐 등의 합금 원소 함량이 많을수록 증가하고, 템퍼링 온도 및 시간이 증가할수록 경도가 낮아진다고 보고되고 있다 [15,16]. 또한 중심부에서도 SD 700S 시편의 경도가 SD 600S 시편보다 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 중심부의 미세조직이 SD 700S 시편의 경우 베이나이트 조직이 형성된 반면, SD 600S 시편의 경우 비교적 느린 냉각 속도로 인해 베이나이트보다 낮은 경도를 나타내는 불완전 펄라이트 조직이 형성되었기 때문이다.

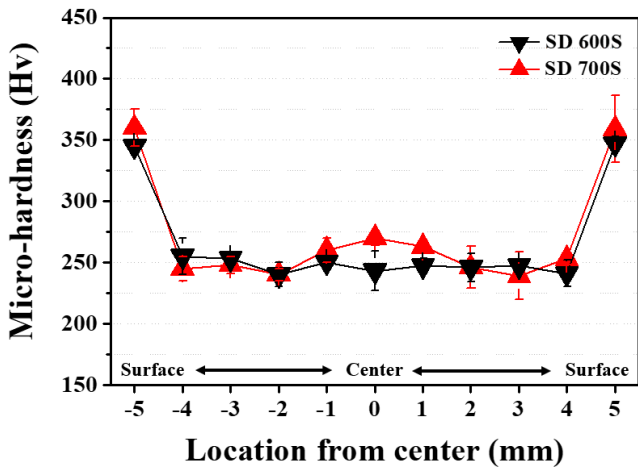


Fig. 5 Hardness as a function of location of the SD 600S and SD 700S specimens. The SD 600S and SD 700S specimens fabricated by TempCore process exhibit a U-shaped hardness result.

3.3 인장 특성

본 연구에서는 철근 시편의 상온 인장 곡선을 그림 6에 나타냈고, 이를 통해 얻은 철근 시편의 인장 특성을 표 3에 정리하였다. 본 연구에서 사용된 SD 600S 시편의 인장 특성은 대한민국 철근 표준규격의 항복 강도 600 MPa 급 내진 철근에 관한 대한민국 표준규격을 만족하였다. 먼저 두 철근 시편의 항복 거동을 살펴보면(그림 6), SD 600S 및 SD 700S 시편 모두 연속 항복 거동을 나타냈다. 일반적으로 불연속 항복 거동에 의한 항복점 현상은 인장 변형시 재료 내부에 존재하는 용질 원자와 전위 사이의 상호작용에 의한 것으로 보고되며, 바나듐(V) 및 니오븀(Nb) 등의 미량합금원소 첨가 시 페라이트 내의 탄소 및 질소 등의 용질 원자들과 결합해 탄화물 및 질화물을 형성함으로써 용질 원자와 전위 사이의 상호작용을 감소시킨다고 보고되고 있다[17,18].

Table 3 Tensile properties of the SD 600S and SD 700S specimens investigated in this study. The tensile properties of the SD 600S specimen satisfy the requirement of KS D 3504 specification[5].

| Specimen | | Yield strength (YS), MPa | Tensile strength (TS), MPa | TS/YS | Uniform elongation, % | Total elongation, % |
|----------|----------|--------------------------|----------------------------|--------|-----------------------|---------------------|
| SD 600S | Range[5] | 600 ~ 720 | - | ≥ 1.25 | - | ≥ 10 |
| | Measured | 611 | 816 | 1.34 | 8.3 | 11.0 |
| SD 700S | Measured | 711 | 908 | 1.28 | 6.7 | 8.8 |

두 철근 시편의 경우 바나듐 첨가에 의한 탄화물 및 질화물의 형성과 함께 불완전 펄라이트 또는 베이나이트 조직 내의 시멘타이트가 형성됨에 따라 매우 많은 페라이트 내의 탄소 용질 원자들이 석출되면서 용질 원자와 전위 사이의 상호작용을 감소시켜 연속 항복 거동을 나타내는 것으로 생각된다.

또한 두 철근 시편의 인장 특성을 비교해 보면(표 3), SD 700S 시편이 항복 및 인장 강도가 더 높은 것을 확인할 수 있다. 이는 템프코어 공정 시 빠른 냉각에 의해 중심부에 형성된 베이나이트 조직과 높은 템퍼드 마르텐사이트 분율의 영향으로 생각된다. 일반적으로 템프코어 공정은 철근의 강도를 높이기 위해 주로 사용되며, 냉각 속도에 따라 표면 경화능 깊이가 클수록 강도는 증가하지만, 항복비, 균일 연신율 및 총 연신율은 감소하는 문제점이 있다[19]. 본 연구에서 사용된 두 철근 시편은 모두 1.25 이상의 높은 항복비(KS D 3504의 내진 철근 표준규격에 해당)를 나타냈는데, 바나듐 첨가에 의해 형성된 미세한 석출물이 가공경화를 증가시키기 때문이다. 특히 SD 600S 시편은 SD 700S 시편에 비해 높은 항복비를 나타냈는데, 이는 SD 700S 시편에 비해 비교적 느린 냉각 속도에서 형성된 페라이트 및 불완전 펄라이트 조직이 가공경화에 더 큰 영향을 미치기 때문이다. 또한 균일 연신율 및 총 연신율의 경우 SD 600S 시편이 높은 것을 확인할 수 있는데, 이는 SD 700S 시편에 비해 낮은 템퍼드 마르텐사이트 분율을 가지기 때문이다.

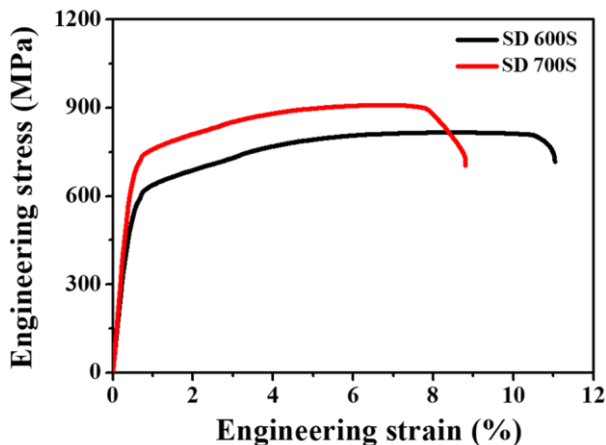


Fig. 6 Engineering stress-strain curves of the SD 600S and SD 700S specimens. Room-temperature tensile test was performed according to KS D 0802 specification.

4. 결론

본 연구에서는 제조 공정 조건이 다른 2 종류의 내진용 600 및 700 MPa 급 고강도 철근 시편의 미세조직을 정량적으로 분석하고, 상온 경도 및 인장 시험을 통해 미세조직과 기계적 특성의 상관관계를 고찰하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

(1) 템프코어 공정을 통해 제조된 SD 600S 및 SD 700S 시편은 표면부에는 공통적으로 템퍼드 마르텐사이트 조직이 형성된 반면, SD 600S 시편의 중심부에는 페라이트 및 불완전 펄라이트 조직이 형성되고, SD 700S 시편의 중심부에는 페라이트 및 베이나이트 조직이 형성되었다.

(2) 철근 시편의 위치에 따른 경도 분석 결과 두 시편 모두 표면부에서 경도가 가장 높고, 중심부로 갈수록 감소하는 경향을 나타내었다. 이는 템퍼드 마르텐사이트 조직의 경도가 페라이트 및 불완전 펄라이트 또는 베이나이트 조직의 경도보다 높기 때문이다. 또한 두 시편의 중심부에서 SD 700S 시편이 더 높은 경도를 나타냈는데, 이는 비교적 빠른 냉각 속도로 냉각된 SD 700S 시편의 중심부에 불완전 펄라이트 조직의 경도보다 높은 경도를 갖는 베이나이트 조직이 형성되었기 때문이다.

(3) 항복비의 경우 SD 600S 시편이 상대적으로 높았는데, 이는 불완전 펄라이트가 가공경화에 큰 영향을 미치기 때문이다. 한편 균일 및 총 연신율의 경우 SD 700S 시편이 낮은 값을 나타냈는데, 이는 SD 600S 시편보다 빠르게 냉각되면서 템퍼드 마르텐사이트가 비교적 많이 형성되었기 때문이다.

후기

이 연구는 서울과학기술대학교 교내연구비의 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] S. Y. Lee, H. C. Lee, C. S. Park, K. M. Woo, Y. T. Suh, 2010, Development of High-Strength in 600, 700, 800 MPa Class of Yield Strength and Seismic Resistant Steel Deformed Bar, J. Kor. Concrete Inst., Vol. 22, No. 5, pp. 28~36.
- [2] J. Nikolaou and G. D. Papadimitriou, 2004,

- Microstructures and Mechanical Properties after Heating of Reinforcing 500 MPa Class Weldable Steels Produced by Various Processes (Tempcore, Microalloyed with Vanadium and Work-Hardened), *Const. Build. Mater.*, Vol. 18, No. 4, pp. 243~254.
- [3] B. Hwang, J. H. Shim, M. G. Lee, J. Lee, J. H. Jung, B. S. Kim, S. B. Won, 2016, Technical Developments and Trends of Earthquake Resisting High-Strength Reinforcing Steel Bars, *Kor. J. Met. Mater.*, Vol. 54, No. 12, pp. 862~874.
- [4] J. H. Shim, B. Hwang, M. Lee, J. Lee, 2018, "Invited Paper" Computer-Aided Alloy Designs of Grade 600 MPa Reinforced Steel Bars for Seismic Safety Based on Thermodynamic and Kinetic Calculations: Overview, *Calphad*, Vol. 62, No. 1, pp. 67~74.
- [5] Korean Agency for Technology and Standards, 2016, KS D 3504, Steel Bars for Concrete Reinforcement
- [6] American Society for Testing and Materials, 2015, Standard Specification for Deformed and Plain Carbon-Steel Bars for Concrete Reinforcement, ASTM A615/A615M-15a
- [7] German Institute for Standardization, 1984, Rebar(Reinforcing Bars) of Mass and Weight, DIN 488 Teil 1
- [8] China State Bureau of Technical Supervision, 2007, Steel for the Reinforcement of Concrete-Part 2: Hot Rolled Ribbed Bars, GB 1499.2
- [9] British Standards Institution, 2005, Steel for The Reinforcement of Concrete Weldable Reinforcing Steel Bar, Coil and Decoiled Product Specification, BS 4499
- [10] International Organization for Standardization, 2007, Steel for The Reinforcement of Concrete Part 2: Ribbed Bars, ISO 6935-2
- [11] P. Simon, M. Economopoulos, P. Nilles, 1984, Tempcore: A new Process for The Production of High-Quality Reinforcing Bars, *Iron Steel Eng.*, Vol. 61, No. 3, pp. 53~57.
- [12] G. C. Jeong, 1989, Hardenability Calculation, *J. Kor. Soc. Heat Treatment*, Vol. 2, No. 2, pp. 46~54.
- [13] T. Furuhashi, T. Moritani, K. Sakamoto, T. Maki, 2007, Substructure and Crystallography of Degenerate Pearlite in an Fe-C Binary Alloy, *Mater. Sci. Forum*, THERMEC 2006, Vol. 539, pp. 4832~4837.
- [14] K. S. An, S. W. Jeong, H. J. Bea, W. J. Nam, 2016, Formation of Abnormal Structures and Their Effects on the Ductility of Eutectoid Steel, *Met. Mater. Int.*, Vol. 22, No. 6, pp. 995~1002.
- [15] R. A. Grange, C. R. Hribal, L. F. Porter, 1977, Hardness of Tempered Martensite in Carbon and Low-Alloy Steels, *Metall. Trans. A*, Vol. 8, No. 11, pp. 1775~1785.
- [16] V. Ollilainen, W. Kasprzak, L. Holappa, 2003, The Effect of Silicon, Vanadium and Nitrogen on The Microstructure and Hardness of Air Cooled Medium Carbon Low Alloy Steels, *J. Mater. Process. Technol.*, Vol. 134, No. 3, pp. 405~412.
- [17] A. Kumar, S. B. Singh, K. K. Ray, 2008, Influence of Bainite/Martensite-Content on The Tensile Properties of Low Carbon Dual-Phase Steels, *Mater. Sci. Eng. A*, Vol. 474, No. 1, pp. 270~282.
- [18] T. Waterschoot, A. K. De, S. Vandeputte, B. C. De Cooman, 2003, Static Strain Aging Phenomena in Cold-Rolled Dual-Phase Steels, *Metall. Mater. Trans. A*, Vol. 34, No. 3, pp. 781~791.
- [19] P. Simon, M. Economopoulos, P. Nilles, 1984, Tempcore, an Economical Process for The Production of High Quality Rebars, *Metall. Plant Technol.* Vol. 3, No. 1, pp. 80~93.