

## 항복강도 600, 700, 800MPa급을 갖는 고강도 철근 및 내진철근의 개발

Development of High-Strength in 600, 700, 800 MPa Class of Yield Strength and Seismic Resistant Steel Deformed Bar



이상윤\*  
Sang-Youn Lee



이형철\*  
Hyoung-Chul Lee



박춘수\*\*  
Chun-Su Park



우기만\*\*  
Ki-Man Woo



서영태\*\*  
Yeong-Tae Suh

### 1. 머리말

초대형 토목·건축 구조물에 적용될 수 있는 고품질의 철근에 대해 강력하고도 확고한 수요자의 요구가 철근시장에 있어 왔다. 수요자의 주된 관심사는 철근의 경제성과 안전성이다. 최근 토목·건축 구조물이 초대형화 되면서 일반 강도(항복강도 300~400 MPa급)의 철근 제품을 적용할 때 수직 부재의 단면이 증가한 만큼 철근의 소요량이 많아지면서 자재비용의 상승으로 인한 경제적 부담이 커지고 있다. 그리고 최근 세계 곳곳에서 잇달아 일어나고 있는 지진으로부터 자유로울 수 있는 토목·건축 구조물은 없을 것이다. 구조물에 대한 내진설계 기준이 강화되고 설계 및 시공 기술이 발전하더라도 이에 맞는 철강 제품이 없다면 구조물의 안전성에 대한 효과가 작을 것이다. 이러한 수요자의 요구를 충족시키고 철강 제품의 기술 수준 향상 및 국민의 재산과 생명 보호를 위해 현대제철(주)과 동국제강(주)은 지식경제부의 지원 아래 산업원천기술개발사업인 ‘초고강력 H형강 및 철근 개발’ 사업을 2004년 9월 1일부터 2010년 2월 28일까지 5년 6개월간 수행하였다. 이 연구 개발은 철강 재료를 초대형 구조물에 적극적으로 활용할 수 있도록 고강도, 고기능 H형강 및 철근을 개발하여 실용화하는데 역점을 두었다. 연구기관으로 (사)한국콘크리트학회가 참여하여 고강력 철근 제품에 대한 적용성 연구를 수행하였다. 이 연구 사업을 통해 개발된 항복강도 600, 700, 800

MPa급 철근의 제조공정과 개발 내용 그리고 내진철근의 개발에 대해서 설명토록 하겠다.

### 2. 철근 제조공정

국내에서 제조되는 철근은 전기로 제강공정을 통해 생산되고 있다. 전기로 제강공정은 수명이 다한 건축부자재, 자동차, 산업기계, 가전제품 등의 폐자원인 철스크랩을 용해하여 철강 제품을 생산하는 자원 재순환이 완성되는 곳이다. 또한 제강공정 중 생성된 제강슬래그와 같은 산업부산물에 대해서도 아스팔트 콘크리트 및 콘크리트 도로 포장용 골재로서 활용이 활발히 추진되고 있어 전기로는 녹색·친환경 공정이라고 말할 수 있다.

철근 제조공정은 크게 전기로 → LF 정련 → 연속주조 → 가열로 → 열간압연 → 수냉설비 → 절단 → 결속 및 출하의 공정으로 <그림 1>에 나타난 바와 같이 구성되어 있으며 각각의 공정에 대해 설명하겠다.

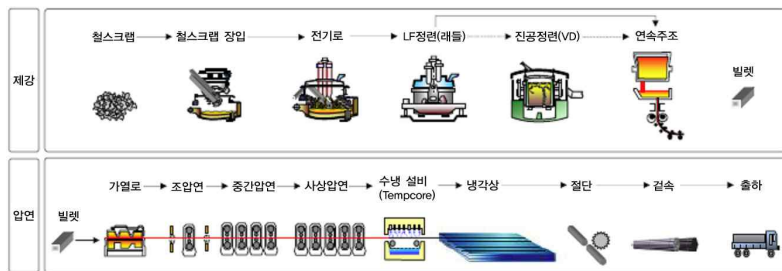


그림 1. 철근의 제조공정도

\* 현대제철(주) 생산기술팀 대리  
steelsmith@hyundai-steel.com

\*\* 현대제철(주) 생산기술실 이사

\*\*\* 동국제강(주) 중앙기술연구소 선임연구원

\*\*\*\* 동국제강(주) 중앙기술연구소 책임연구원

\*\*\*\*\* 동국제강(주) 포항제강소 이사

### 2.1 제강공정

전기로는 전기를 이용하여 강을 제조하는 노(Furnace)로써 전기 양도체인 전극에 전류를 통하여 주원료인 철스크랩 사이에 발생하는 아크(arc)열에 의하여 철스크랩을 용해하는 일차 정련을 한다<sup>1)</sup>. 이러한 아크로는 고온에서 쉽게 얻어지고 온도의 조절이 자유롭고 정확하며, 노내 분위기를 산화성 및 환원성으로도 할 수 있다. 또한 열원이 전력이므로 증유나 가스처럼 유황 등의 불순물이 용강 내로 들어가는 일이 없다. 제조된 용강은 2차 정련을 위해 래들(ladle furnace, LF)로 옮겨지게 된다. LF 정련 공정에서는 목표 강종을 생산하기 위해 합금성분을 첨가 및 조절하며 탈탄, 탈황, 탈인, 탈산 등을 통하여 합금성분을 균질화 시키고 압연 시 균열을 유발하는 비금속 개재물을 부상 분리하여 제거하는 작업을 수행한다. 또한 특수한 용도로 사용되어지는 강종에 따라 용강 내에 잔존하는 산소, 수소, 질소 등의 탈가스를 위해 래들 자체를 진공(vacuum degassing, VD)처리하여 용강의 청정성(steel cleanliness)을 높이기도 한다<sup>2)</sup>. LF 정련 공정을 마친 용강은 턴디쉬(tundish)로 주입되며, 용강류를 안정화 시킨 후 연속주조(continuous casting) 공정에 의해 용강이 응고되면서 빌렛 등의 반제품이 생산된다. 반제품인 빌렛(billet)은 철근 압연에 적용되어 생산된다.

### 2.2 압연공정

반제품 빌렛은 표면 및 내부 조직검사를 거쳐 압연공장의 가열로에 장입된다. 빌렛의 원활한 압연공정을 위해 고온으로 가열하는데 이때 강종 및 용도에 따른 재질 확보를 위해 가열온도 및 시간을 제어한 후 추출하게 된다<sup>1,3)</sup>. 압연공정은 일정한 형상을 갖고 있는 2개의 롤(roll)사이 에 빌렛을 진입시켜 단계별로 단면을 축소시키는 공정이다. 소비자가 원하는 치수의 제품을 제조하는 동시에 압연속도, 온도 등을 제어하여 건전한 미세조직을 확보하는 방법으로 후속의 냉각공정과 함께 상호 보완적인 작업조건에 의하여 용도에 맞는 강종 특성을 확보하게 된다. 압연공정을 세밀하게 나누면 조압연(roughing mill), 중간압연(intermediate mill), 사상압연(finishing mill)으로 구성되며, 각 압연 단계의 역할은 다음과 같다. 조압연은 가열로에서 추출된 빌렛의 두께를 감소시키고, 기존 연속주조 공정을 통해 형성된 빌렛 내부의 주조 미세조직(casting micro-structure)을 변화시킨다. 이후 빌렛은 중간압연, 사상압연을 통해 내부의 미세조직이 변화하게 된다. 일반 철강재의 압연공정과 다르게 특이할 만한 사항은 압연기에 설치된 슬릿 slit이라 불리는 압연 설비에 의해 빌렛이 2~4개로 갈라지게 된다. 이것은 한 개의 빌렛에서 동일 규격의 제품이 생산될 시 압연에 의해 철근

표 1. 한국기술표준에서 새롭게 개정한(KS D3504 개정) 철근 롤마크 표기법<sup>4)</sup>

구분		표기 방법					
기존 롤마크							
변경 롤마크							
항 목	내 용	비 고	강종 구분	표시 방법		비고	
				숫자	Dot		
①	원산지	한국(K, KS), 일본(J) 등	일반용	SD300	각인 없음	숫자 또는 Dot 선택	
②	제조자명	XX		SD350	3		●
③	호칭지름	10, 13, 16, 19, 22....		SD400	4		●●
④	강종표시	숫자/Dot 표기		SD500	5		●●●
⑤	용접용(Dot)	용접용만 해당		SD600	6	●●●●	원산지 앞 ● 표시
			SD700	7	●●●●●		
			용접용	SD400W	●+4	●●●●	
				SD500W	●+5	●●●●●	
제조자명 표기							

제품의 길이가 너무 길어져 한정된 냉각상 공간에 철근을 수용할 수 없기 때문이다. 또한 하나의 빌렛에서 최대 네 개의 철근을 동시에 압연할 수 있어 생산 효율성 향상에 큰 도움을 준다. 사상압연 공정 중 마지막 압연기를 통과할 때 철근은 원산지, 제조자, 호칭지름, 강종을 1.5m 이하의 간격마다 반복적으로 표시하게끔 이를 롤에 각인하여 <표 1>에 나타낸 바와 같이 철근에 마킹을 한다<sup>4)</sup>. 이후 철근은 템프코어(tempcore)라 불리는 특별한 수냉 설비 공간을 통과한다. <그림 2>와 같이 이 설비의 냉각 효율은 철근의 표면 및 경계층이 경질상인 마르텐사이트 조직(martensite)으로 변화되며, 중심층은 상대적으로 연질상인 페라이트(ferrite) 및 펄라이트(pearlite) 조직으로 남게 된다. 철근이 격렬한 냉각 구간을 빠져 나올 때 단면에 형성된 온도 구배는 철근의 중심으로부터 표면으로 열의 흐름을 일으킨다. 이러한 표면층의 온도 구배 증가는 자신을 뜨임(tempering)하여 템퍼링된 마르텐사이트 조직(tempered martensite)을 형성한다. 템프코어란 이름은 마르텐사이트 조직층이 열에 의해 뜨임(tempering)되고 중심(core)에 페라이트와 펄라이트 조직만 남게 된다는 사실을 설명함으로써 선택되어 졌다<sup>5)</sup>. 이 공정을 적용함에 있어 크게 세 가지의 장점이 있다<sup>5~7)</sup>. 첫째, 냉각수량 및 냉각속도를 적절히 적용하여 항복강도 및 인장강도의 증가를 이룰 수 있으며, 두 번째로는 고강도를 유지하면서 탄소당량(Ceq)이 낮아 좋은 용접성능을 얻을 수 있다. 마지막으로 추가적인 합금성분 첨가 없이도 고기능의 철근을 제조할 수 있어 원가절감 측면에서 경제적인 공정이다. 템프코어 공정을 마친 철근은 냉각상에서 공랭을 실시한다. 이후 냉각상에서 이송된 철근 제품은 주문 치수로 길이 설정 작업에 들어가며 제품의 온도, 길이, 절단 정도를 고려하여 필요한 절단값을 설정한 후 소정의 치수로 절단하게 된다. 그 후 육안검사에 의해 표면의 흠

을 검사하고, 기계적 특성 등의 품질검사를 마친 제품은 강종, 길이별로 결속기에 의해 제품이 결속되어지며 이후 재고장으로 이동하게 되어 최종적으로 소비자에게 출하된다.

### 3. 항복강도 600, 700 MPa급 철근의 개발

#### 3.1 항복강도 600, 700 MPa급 철근 개발의 필요성

철근 토목·건축 구조물이 초고층화, 대형 및 장대화 되면서 건설재료의 성능 향상에 대한 필요성이 증대되고 있으며, 이는 토목·건축 주자재의 대부분을 차지하는 철근과 콘크리트의 성능 향상에 대한 요구로 이어지고 있다. 근래에 들어 콘크리트의 압축강도 상승은 고강도 철근의 개발 필요성을 더욱 절실하게 하였는데 이유는 다음과 같다. 콘크리트의 고강도화는 구조물의 자중 감소, 고내구성 및 고성능 AE 감수제 사용에 따른 유동성 증진 등 많은 장점<sup>8)</sup>이 있으나 단순히 콘크리트의 강도만 높인 것은 철근비가 상승되어 취성적인 재료가 되고, 이 취성적인 특성에 대한 보완 조치가 없으면 부재의 연성이 확보되지 않아 안전성의 문제가 야기될 수 있다는 단점이 있다<sup>8,9)</sup>. 이러한 단점이 발생하는 이유는 여러 가지 있겠으나 그 중 한 예는 고강도 콘크리트에 일반 강도의 철근을 적용한 결과로 여겨지며, 철근비의 상승으로 인한 취성파괴는 조밀한 배근 간격으로 인한 과다 배근이 주원인일 것이다. 그러나 일반 철근보다 높은 항복강도를 지닌 고강도 철근을 사용한다면 구조물에 조밀한 배근을 방지하여 철근의 물량을 감소시킬 수 있으며, 배근 간격이 넓어짐에 따라 콘크리트의 타설이 원활해져 구조물 품질에 긍정적인 영향을 줄 것이다. 또한 철근 물량 감소로 인한 공사비 절감 및 공기 단축 등을 통해 구조물의 경제성을 향상시킬 수 있는 장점이 있어 고강도 철근의 개발은 필요하다<sup>10)</sup>.

#### 3.2 항복강도 600, 700 MPa급 철근 제조의 이론적 배경

철기 문명시대가 도래한 이후로 대학, 연구소 및 산업현장에서는 철강 재료를 여러 가지 목적으로 사용하기 위하여 많은 연구가 이루어져 왔으며, 특히 철강재의 고강도화 분야에 연구가 집중되어 있다. 고강도 철강 재료를 제조하기 위해 많은 이론이 정립되어 있는데 그 중에서도 세 가지 강화방법들이 대표적이다. 이 강화기구를 자세히 검토해 보면 이들은 각각 독립적인 강화기구로 작용한다기보다는 서로 연관되어 작용하는 것을 알 수 있다<sup>11)</sup>. 철강 재료를 강화시키는 이들 강화기구 및 방법들에 대하여 고강도 철근 제조와 연관 지어 간단히 살펴보겠다.

첫 번째로 소개할 방법인 고용강화는 가장 보편적인 방법으로 순철 합금원소 첨가를 통해 재료의 강도를 향상시키는 방법이다. 순철

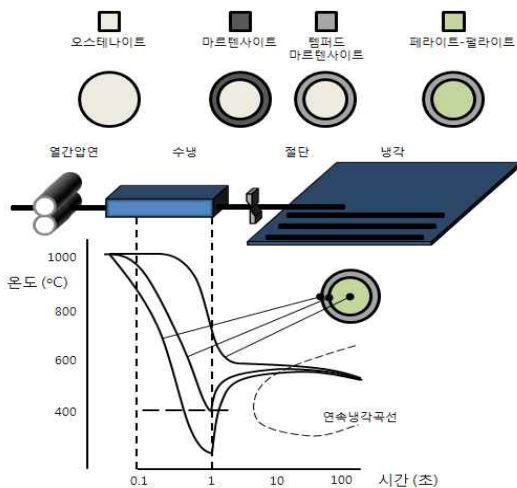


그림 2. 템프코어 공정 중 철근 조직의 상태 및 온도 구배 변화

(Fe)에 첨가되는 대표적인 합금원소로는 탄소(C)와 망간(Mn)을 들 수 있다. 탄소(C)는 순철(Fe) 원자의 격자구조에 침입형 원자로 고용되며, 망간(Mn)은 치환형 원자로 고용되어 철강 재료의 강도를 향상시킨다. 반면 철강 재료에 있어서는 용접성능 및 탄소당량 규제를 고려하여 이러한 합금원소의 양을 제한하고 있다. 따라서 탄소(C)와 망간(Mn) 이외의 미소량 합금원소의 첨가로 강도 향상을 피하고자 하였는데 이것이 금속의 강화기구 중 두 번째 방법인 미세입자 석출에 의한 석출경화법이다<sup>13, 14</sup>. 바나듐(V)과 나이오븀(Nb) 등의 합금원소는 고온에서 순철(Fe)의 기지조직에 고용되어 열간압연 및 냉각 과정을 거치면서 미세한 석출물이 형성되어 기지조직을 강화시킨다. 세 번째 방법으로는 결정립 미세화로 금속 재료의 강도 향상에 많이 사용하는 방법이다. 과거에 많은 금속공학자들은 금속재료의 결정립 크기와 강도 사이에는 서로 반비례 한다는 사실을 알고 이들 관계를 학문적으로 연구하여 증명하였으며 다양한 방법들이 정립되었다<sup>12 ~ 15</sup>. 근래에 철강 산업현장에서는 고강도 철강 재료를 제조하기 위해 압연과정 중에 온도 조절을 수행함으로써 결정립 크기 조절과 금속 조직의 상변태를 동시에 수반하는 방법을 적용하였다. 이러한 공정을 열가공 처리(TMCP, thermo-mechanical control process)라 하며, 금속재료의 기계적 성질이 크게 개선되므로 고강도의 철강 재료를 제조하는데 주로 사용하고 있다<sup>15</sup>. 이러한 방법을 고강도 철근의 제조에 적용한 것이 바로 템프코어(tempcore) 공정이다. 위에서 살펴본 바와 같이 철강 재료의 강도를 향상시키는 강화기구들은 대부분의 금속재료에 공통적으로 적용시킬 수 있으며, 각각의 강화기구들은 서로 독립적이라기보다는 상호연관 되어 작용되고 있다.

### 3.3 항복강도 600, 700 MPa급 철근의 개발

3.3.1 항복강도 600, 700 MPa급 철근의 합금설계 및 시생산  
현재 시장에 공급되고 있는 철근 중 최고 강도인 항복강도 500 MPa급 강종의 합금성분계를, 열간압연 및 냉각 조건을 조절하여 기술개발의 목표치를 달성하는 것에는 한계가 있는 것으로 판단하였다. 그래서 항복강도 600, 700 MPa급의 철근을 개발하기 위해 결정립 미세화와 석출경화 효과가 있는 바나듐(V), 나이오븀(Nb)의 합금원소를 첨가하여 시생산하였다. 바나듐(V) 및 나이오븀(Nb) 첨가량에 따른 경도 및 강도의 변화를 시험한 결과, 바나듐(V)을 단독 첨가시킨 철근의 경도 및 강도는 바나듐(V), 나이오븀(Nb)을 복합 첨가시킨 철근의 강도보다 더 크게 나타났다. <그림 3>에 나타난 바와 같이 연구개발 1차년도에 0.066 wt.%의 바나듐(V)을 첨가시킨 철근의 항복강도는 583 MPa를 나타내었으며, 3차년도에는 0.081 wt.%의 바나듐(V)을 첨가시켜 항복강도 711 MPa를 달성하였다. 바나듐(V)

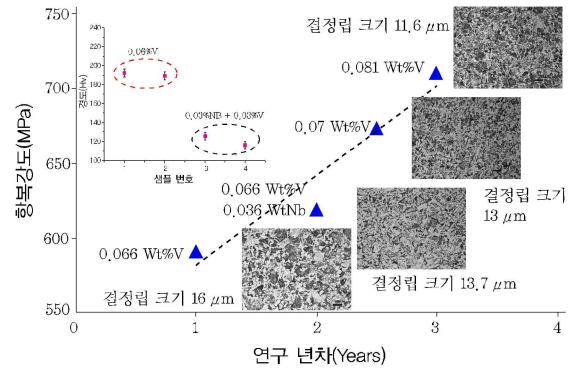


그림 3. 바나듐(V) 및 나이오븀(Nb) 첨가량에 따른 경도, 항복강도 및 미세조직의 변화

을 단독 첨가한 철근의 경우, 페라이트 결정립 크기는 첨가량이 증가할수록 미세해져 최종에는 페라이트 결정립 크기가 11.6 μm를 나타냈으며 그에 따라 높은 경도값을 나타내었다. 고강도 철근을 개발하기 위해 바나듐(V) 및 나이오븀(Nb)의 합금원소 첨가를 고려한 것은 이 두 원소가 열간압연 시 금속의 상변태 온도를 지연시켜 미세한 페라이트 결정립을 생성시키는 역할을 기대하였기 때문이다. 그 첨가 목적에 맞게 두 원소를 단독 또는 복합 첨가한 결과, 두 원소의 복합 첨가보다는 바나듐(V)을 단독 첨가한 경우가 결정립 미세화 및 석출경화 효과가 더 크게 나타났으며, 따라서 철근의 강도 향상에는 바나듐(V) 단독 첨가가 긍정적인 것을 알 수 있었다.

3.3.2 항복강도 600, 700 MPa급 철근의 미세조직 및 경도  
상기에서 서술한 합금설계안을 토대로 항복강도 600, 700 MPa급을 갖는 철근을 시생산하였다. 한국기술표준규정(KS)에서 표기되어 있는 항복강도별 강종 표기로 위의 강도를 갖는 철근은 SD600 및 SD700으로 명명하였다. 두 강종의 규격 D22의 미세조직 및 경도 측정된 결과를 <그림 4>에 나타내었다. 철근의 단면을 관찰한 결과, 두 강종은 열간압연 후 수냉에 의해 철근의 표면층이 먼저 급랭되어 마르텐사이트로 상변태되었으며, 중심은 페라이트-펄라이트 조직으로 형성된 것이 관찰되었다. 또한 표면의 마르텐사이트 조직은 중심층에서 표면층으로 빠져나가는 복열로 인해 템퍼링되는(Core 1 영역) 전형적인 템프코어 철근의 조직을 갖는 것으로 확인되었다. 이렇게 형성된 표면의 경한 마르텐사이트는 일정 두께의 띠로 형성되어 있음을 볼 수 있다. 이는 철근 강도에 직접적인 영향을 미치며, 경화층 깊이 또는 면적비 제어를 통해 항복강도를 적절히 제어할 수 있다. SD600 강종의 경우, 표면 경화층의 경도는 340 Hv 정도이며, 중심층 페라이트-펄라이트 조직 영역은 240 Hv 정도로 나타났다. SD700 강종은 표면 경화층이 360 Hv, 중심층이 260

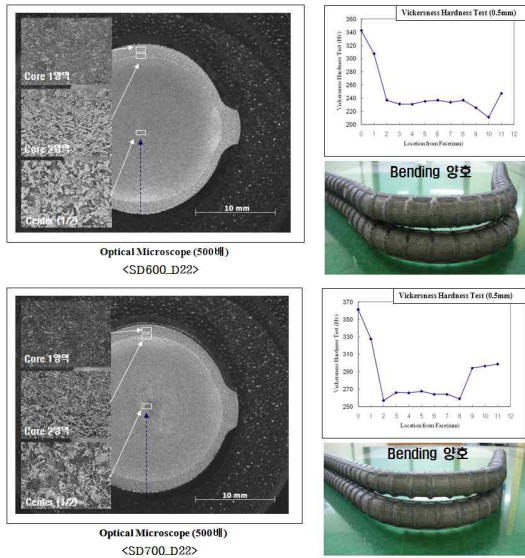


그림 4. SD600, SD700강종의 미세조직, 단면, 경도 및 굽힘시험 후 철근 사진

Hv로 나타났다. SD700 강종에서 경도값이 20 Hv 더 높게 나타난 것은 탄소(C) 함유량이 SD600 강종에 비해 높기 때문이다. 아울러 중심부의 경도값이 더 높은 것은 합금원소의 첨가량, 열간압연 및 냉각조건 조절에 따른 미세조직의 변화가 결정립 크기 감소와 석출경화로 이어졌기 때문이다.

### 3.3.3 항복강도 600, 700 MPa급 철근의 기계적 특성

본 연구에서는 항복강도 600 MPa급의 D10, 13, 22 규격과 항복강도 700 MPa급의 D10, 13, 16, 22, 25 규격의 고강도 철근을 생산하였으며, <표 2>에 기계적 특성을 나타내었다. 개발

표 2. SD600, SD700강종 철근의 기계적 특성

구분	규격	항복강도	인장강도	연신율	굽힘성능
		MPa	MPa	%	Degree
KS D3504		600↑	710↑	10↑	90° 균열유무
	D10	630 ~ 681	764 ~ 796	16 ~ 20	90°, 180° 균열 없음
	D13	618 ~ 638	763 ~ 786	11 ~ 13	
D22	678 ~ 682	805 ~ 805	11 ~ 13		
KS D3504		700↑	800↑	10↑	90° 균열유무
	D10	712 ~ 780	804 ~ 884	12 ~ 16	90°, 180° 균열 없음
	D13	707 ~ 718	832 ~ 856	10 ~ 11	
	D16	704 ~ 706	837 ~ 841	11	
	D22	703 ~ 719	834 ~ 870	13	
	D25	706 ~ 709	848 ~ 853	16 ~ 18	

강종의 연성을 엄격하게 평가하기 위해 한국기술표준규정(KS)에서 제시한 90°보다 더 가혹한 조건인 180°에서 굽힘 시험을 실시한 결과, <그림 4>에서 나타낸 바와 같이 시험 중 파단이 되거나 표면에 결함이 발생하는 등의 품질 불량 발생하지 않았다. 개발된 강종은 2007년 9월에 한국기술표준(KS D3504)에 새 강종으로 등재하였다.

## 4. 항복강도 800 MPa급 철근 개발

### 4.1 항복강도 800 MPa급 철근의 개발 배경

토목·건축분야 구조물에 고강도 철근을 사용하고 있는 일본은 산·학·연의 긴밀한 협조아래 고강도 재료를 구조물에 사용하는 연구를 꾸준히 진행해왔다. 각각하게 살펴보면, 고강도 철근을 이용한 RC(Reinforced Concrete)조 건물 구조설계의 새로운 기술을 개발하기 위해 일본 국토교통성(구 건설성) 주관 하 종합기술 개발 프로젝트인 ‘철근콘크리트 건축물의 초고층 초고충화 기술 개발’을 진행하였으며, 이 결과로 1999년 일본 건축학회에서 발간된 ‘철근콘크리트 건물 인성 보증 형식 내진 설계 지침서’의 해설을 통해 항복강도 685, 785 MPa급의 고강도 철근(USD 685, 785, 일본 국토교통성 인증)을 건축 구조물에 반영되어 사용할 수 있게 되었다<sup>16)</sup>. 이러한 고강도 철근은 주로 고강도콘크리트와 결합하여 주근 및 전단 보강근으로 설계에 반영하여 건축 구조물에 사용되고 있다. 또한, 기둥 주근에 초고강도 콘크리트( $f_{ck}$ , 설계기준압축강도 120 MPa급)와 고강도 철근(USD685)을 사용한 초고층 RC조 건물의 건축설계 지침을 마련하기 위해 건설 업체 15개사에 의한 ‘초고강도 재료를 이용한 초고층 RC건물의 구조설계법에 관한 공동 연구회’를 설치하고, 메이지 대학과 야마구치 대학이 공동 연구를 실행하고 있는 중이다<sup>17)</sup>. 이러한 추세에 맞추어 본 연구팀은 한국 철강 기술의 선진성을 알리고, 토목·건축 기술의 미래화와 수요에 발맞추고자 항복강도 800 MPa급 초고강도 철근을 개발하기로 하였다.

### 4.2 항복강도 800 MPa급 철근의 합금설계 및 시생산

항복강도 800 MPa급 강도를 얻기 위해 세 가지 종류의 강종을 합금설계 하였으며, 실제 산업현장인 제강 및 압연공장에서 시생산을 거쳐 기계적 특성을 측정하였다. 합금설계된 강종들의 명칭은 YS800A, YS800B, YS800C로 명명하였으며, 세 강종의 합금설계된 목적은 다음과 같다. 첫 번째 강종인 YS800A의 화학성분은 0.19 wt.%C-0.75 wt.%Mn-1.2 wt.%Cr-0.3 wt.%Mo를 기본으로 설계하였다. 크롬(Cr)과 몰리브덴(Mo)의 첨가는 철근의 기지조직 강화 및 표면층에 경화층을 강화시

켜 강도 향상을 기대하였으며 냉각 중 템퍼링되는 철근 표면층의 취성(tempering embrittlement)에 대한 저항성 및 부식 저항성이 향상될 것으로 기대되어 설계하였다. 두 번째 강종인 YS800B의 화학성분은 0.45 wt.%C-1.23 wt.%Mn-0.12 wt.%V를 기본으로 설계하였다. 탄소(C)와 망간(Mn)은 철강재료의 강도를 높이는데 가장 효과적인 합금원소로 그 첨가량을 상향시켰으며, 바나듐(V)의 첨가는 탄소(C)와 기존 제강공정 중 첨가된 질소(N)의 화학적 결합을 통해 바나듐 탄질화물(VC, VN) 입자를 석출시키는 석출경화 효과를 기대하였다. 마지막으로 YS800C 강종의 화학성분은 0.29 wt.%C-1.7 wt.%Mn-0.075 wt.%V를 기본으로 하였다. YS800C강종은 YS800B강종보다 탄소(C)와 바나듐(V)의 첨가량을 줄이고 망간(Mn)의 첨가량을 늘려 최적의 강도와 연성이 확보될 수 있는 개념으로 설계하였다. 이 세 강종은 압연공정 중 취성을 유발하는 비금속 개재물의 저하를 위해 제강공정에서 수소(H), 산소(O), 질소(N)의 성분량을 조절하였으며, 고순도의 청정강을 제조하기 위해 위 화학성분의 원소를 탈가스 처리하는 진공정련(VD, vacuum degassing) 공정을 추가적으로 거쳤다. 연주공정에서 생산된 200 mm 빌렛은 조압연에서 133 mm 빌렛으로 압연하였으며, 이후 133 mm 빌렛을 열간압연 및 냉각조건을 조절하여 규격 D10, D13, D16의 철근으로 시생산하였다.

#### 4.3 항복강도 800 MPa급 철근의 미세조직 특성

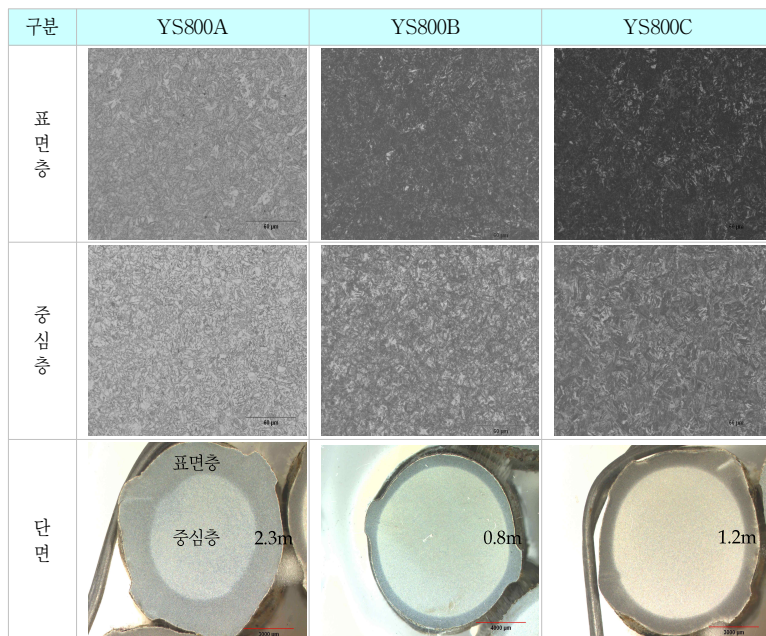


그림 5. 항복강도 800 MPa급 철근(D10)의 미세조직(표면층, 중심층, 단면)

YS800A, YS800B, YS800C강종은 공통적으로 표면층에 마르텐사이트 조직이 형성되었으며 직경이 작아질수록 철근 중심층에 미세한 페라이트 결정립 크기를 지닌 조직이 관찰되었다. <그림 5>를 보면, 철근압연공정 후 D10 규격의 미세조직을 각각 표면층, 중심층, 단면으로 나누어 나타내었다. YS800A강종의 표면층 미세조직을 보면 치밀하게 구성된 마르텐사이트 조직이 관찰되었다. 또한, 중심층의 미세조직은 페라이트 결정립 크기가 작아져 평균  $7\mu\text{m}$ 크기의 결정립 크기를 갖는 것으로 확인되었으며, 단면을 절단하여 관찰한 결과, 합금설계된 의도대로 표면층에 두께 2.3 mm를 갖는 경화층이 형성되었다. YS800B 강종의 표면층 또한 마르텐사이트 조직이 관찰되었으며, 중심층은 등축정 형태를 갖는 페라이트 입자와 펄라이트 조직이 관찰되었고, 중심층 페라이트 결정립 크기는 평균  $5\mu\text{m}$ 크기이며, 표면층은 두께 0.8 mm를 갖는 경화층이 형성되었다. 중심층에 페라이트 결정립 크기가 미세하게 형성된 것은 바나듐 탄질화물(VC, VN)의 미세입자 석출로 인해 결정립 크기가 작아진 것으로 판단된다. YS800C강종의 미세조직 분포는 YS800A강종과 비슷한 형상을 갖는 조직을 구성했다. 표면층은 마르텐사이트 조직이 관찰되었으나 중심층은 미세하고 길쭉한 형태를 갖는 팬케익(pancake) 형태의 페라이트 결정립이 관찰되었다. 페라이트 결정립 크기는 평균  $6\mu\text{m}$ 로 관찰되었으며 표면의 경화층은 1.2 mm의 두께를 형성한 것으로 확인되었다.

#### 4.4 항복강도 800 MPa급 철근의 기계적 특성

D10 규격으로 압연된 세 강종에서 모두 항복강도 800 MPa 이상을 나타내어 개발 목표를 달성하였다. 규격별로 세 강종의 항복강도, 인장강도, 연신율, 굽힘시험 결과에 대하여 <표 3>에 나타내었으며, <그림 6>에 세 강종의 굽힘시험 후 철근 시편의 사진을 나타내었다. <표 3>을 보면 YS800B강종은 D10, D13, D16 규격에서 항복강도 800 MPa 이상을 달성하였으며, <그림 6>에서 보여 주듯이 굽힘시험에서도 균열이 나타나지 않았다. YS800A, YS800C 강종에서는 D10 규격에서 항복강도 800 MPa 이상의 값을 나타내었고, 이보다 직경이 큰 규격에서는 항복강도 657 ~ 745 MPa 사이의 값을 보였다. 두 강종의 D13, D16 규격에서 기술 개발 목표인 800 MPa급의 항복강도가 실현되진 않았지만 600, 700 MPa급의 고강도를 보였으며, 굽힘시험 시 균열이 발생하지 않아

표 3. 항복강도 800MPa급 철근의 기계적 특성

구분	규격	항복강도	인장강도	연신율	굽힘성능
		MPa	MPa	%	Degree
개발 목표		800 ↑	900 ↑	10 ↑	90° 균열유무
YS800A	D10	975	1,112	14	180° 균열 없음
	D13	745	968	12	
	D16	737	927	11	
YS800B	D10	933	1,050	13	
	D13	825	958	14	
	D16	807	952	13	
YS800C	D10	1,147	1,295	11	
	D13	657	928	12	
	D16	691	914	13	

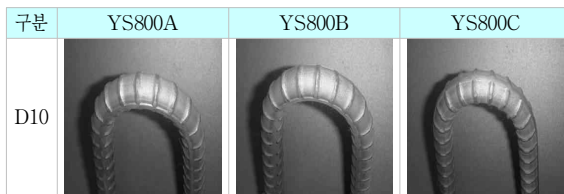


그림 6. 항복강도 800 MPa급 철근의 강종별 굽힘시험 사진

충분한 연성도 가지고 있는 것을 확인하였다. 세 강종의 시험 결과, 공통적으로 압연공정과 수냉 처리 조건이 가혹할수록 항복강도의 상승이 이루어졌으며 세 강종 중 경화층 두께가 클수록 그리고 결정립 크기가 작고 형상이 등축정에 가까울수록 강도향상과 연성측면에서 개발 목표치 달성에 유리한 것을 확인할 수 있었다. 또한, 항복강도 800 MPa급 철근의 합금설계 시 마나뎀(V) 합금원소의 첨가가 이롭다는 것이 시험결과를 통해 확인되었다. 장기간에 걸친 한결같은 연구진의 노력은 항복강도 800 MPa급 초고강도 철근을 개발하였다는 성과로 이어졌다.

### 5. 내진철근 개발

#### 5.1 내진철근 개발의 필요성

최근 지진이 세계 곳곳에 일어나 많은 인명과 물질적 피해가 잇따르고 있다. 국내의 경우도 지진 발생이 지속적으로 증가하고 있어 우리가 살고 있는 한반도도 더 이상 지진으로부터 안전지대가 아님을 곳곳에서 경고하고 있어 그 어느 때보다 내진성능을 지닌 철근의 개발이 절실히 필요한 때이다. 근래에 들어와 국내의 강구조 설계기준 변화와 내진 설계기준의 강화는 내진성능 강개 개발의 필요성에 당위성을 더하고 있다. 미국의 경우, 1994년 노스리지 지진의 경험을 통해 건축물에 내진성능을 강화한 ASTM A992/A706M을 개정 및 적용

하여 사용토록 하였으며, 일본의 경우, 1995년 고베 지진을 겪으면서 JIS G3136 개정 및 일본 국토교통성 인증(USD) 등을 통해 내진성능을 강화한 철근을 개발하여 사용토록 하였다<sup>18, 19)</sup>. 참고로 <표 4>에 미국과 일본의 내진철근 성능 규정을 요약하여 나타내었다<sup>18 ~ 20)</sup>. <표 4>를 보면 ASTM A706M 및 USD 규정<sup>20)</sup>의 경우, 항복비(yield ratio, YR = 항복강도/인장강도)를 0.80 이하 또는 0.85 이하로 규제하고 있다. 지진이 발생할 때 철강 재료의 항복비가 낮은 경우, 재료가 항복한 이후 소성변형을 일으키며 지진의 에너지를 흡수할 수 있는 양이 커지므로 건물 전체의 급작스런 붕괴를 막는 것이 가능하다. 또한, 항복점의 하한뿐만 아니라 상한도 함께 규정하여 항복점 변위를 축소하였으며, 용접 결함의 발생 없이 작업이 가능하도록 탄소당량 수치를 일정 수준 이하로 할 것을 요구하고 있다.

국내의 내진 강재 개발 현황을 살펴보면 철근의 경우는 개발된 제품이 없으며, 한국기술표준규정(KS)이나 철근콘크리트구조물에서 내진 재료에 대해 적용되는 설계기준 또한 미흡하다. 따라서 초대형 토목·건축물의 구조적인 안전성 확보를 위해 내진성능을 강화한 철근 개발이 필요한 시점이다.

#### 5.2 내진철근의 합금설계 및 시생산

항복강도 400, 500 600 MPa급을 지닌 내진철근 개발을 위해 항복비 상한, 항복강도 상/하한 규정 및 탄소 당량 상한치를 고려하여 합금설계를 하였으며, 열간압연 후 수냉 처리를 통해 원가절감형으로 개발하는 것을 기본으로 하였다. 400, 500 MPa급 내진철근의 경우, 0.31 wt.%C-0.80 wt.%Mn의 합금성분계를 사용하여 열간압연 및 수냉 조건 조절을 통해 목표로 한 기계적 물성치를 만족하는 내진철근을 개발하고자 하였다. 600 MPa급 내진철근의 경우, 목표로 하는 항복강도 및 항복비를 달성하기 위해서는 템프코어 생산방식 보다는 열간압연 후 철근 표면층에 약한 수냉 처리를 하여 강도를 보강하는 방법을 적용하였다. 석출경화로 강도향상이 가능한 합금원소인 마나뎀(V)을 0.08 wt.% 첨가하여 시압연을 실시하였다.

표 4. 미국(ASTM), 일본(USD)의 내진철근 성능 규정

구분	규격/규정	항복강도	인장강도	항복비	연신율	굽힘성능	탄소당량 (Ceq)
		MPa	MPa		%	Degree	
ASTM A706M (미국)	D10 ~ D19	420 ~ 540	550 ↑	0.80 ↓	14	180° 균열 유무	0.55
	D22 ~ D36				12		
	D43, D57				10		
USD (일본)	590A	590 ~ 675	-	0.85 ↓	12	90° 균열 유무	0.70
	590B	590 ~ 650	-	0.80 ↓	12		
	685A	685 ~ 785	-	0.85 ↓	10		
	685B	685 ~ 755	-	0.80 ↓	10		

### 5.3 내진철근의 미세조직 및 경도특성

항복강도 400, 500 MPa급 규격 D19 내진철근의 미세조직 및 경도 측정 결과를 <그림 7>에 나타내었다. 고강도 철근인 SD600 및 SD700강종의 결과와 마찬가지로 열간압연 후 수냉에 의해 표면층이 급냉되어 마르텐사이트로 변태되고 중심층은 페라이트로 상변태를 일으켰으며, 이때 철근의 중심에서 표면으로 빠져나가는 열로 인해 외부의 마르텐사이트는 템퍼링되어 표면 경화층(Core 1 영역)이 형성된 것을 확인할 수 있었다. 중심층은 페라이트-펄라이트 조직으로 형성되었다. 철근 단면을 보면 표면층에 일정 두께의 피가 형성되어 있음을 볼 수 있으며, 항복강도 400 MPa급 철근의 경우, 경화층의 두께는 1 mm, 항복강도 500 MPa급의 경우 1.3mm로 나타났다. 이는 수냉조건 조절을 통한 냉각효과 차이에 기인한 것이다. 이렇게 형성된 경화층은 철근 강도에 직접적인 영향을 미치며, 경화층 두께 또는 면적비 제어를 통해 항복강도 및 항복비를 제어할 수 있다. 두 강종의 철근 단면에서 지름방향의 경도분포 측정 결과, 표면의 경도가 높으며 중심부는 상대적으로 경도가 낮은 L자형 곡선으로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. 자세히 살펴보면 항복강도 400 MPa급의 경우, 표면 경화층의 경도는 약 300 Hv 정도이며, 중심층의 페라이트-펄라이트 영역은 약 200 Hv 정도로 나타났다. 항복강도 500 MPa급의 경우, 중심층에서 위 강종과 비

슷한 경도수준을 나타내었다. 표면의 경우 더 깊은 영역까지 경도를 유지하는 것을 확인할 수 있는데, 이는 표면 냉각에 의해 더 깊은 영역까지 마르텐사이트가 형성된 결과에 기인한다.

항복강도 600 MPa급 철근의 미세조직 및 경도 분포를 <그림 8>에 나타내었다. 위의 두 강종과는 다른 열간압연 조건으로 시생산하였으며, 수냉을 하지 않거나 조건을 매우 완화시켜 항복비 상한을 맞추는 조업 조건으로 시생산 하였다. D19의 경우, 표면층과 중심층은 모두 동일하게 페라이트-펄라이트 조직으로 구성되어 있으며, 중심층의 페라이트 결정립 크기는 평균 12.1  $\mu\text{m}$  정도로 나타났다. 경도분포 또한 표면층과 중심층이 동일하게 280 Hv 정도로 나타났다.

### 5.4 내진철근의 기계적 특성

본 연구를 통해 개발된 항복강도 400, 500, 600 MPa급 내진철근 D10, D19, D32 규격의 기계적 특성을 <표 5>에 나타내었다. 세 강종 모두 기계적 특성 목표치를 모두 만족하였으며, <그림 7>과 <그림 8>에 나타낸 바와 같이 180o 굽힘시험 시 철근 표면부에 균열이 관찰되지 않고 양호한 외관을 보여주었다. 내진철근 강종의 기술개발 목표를 달성하기 위해 열간압연 및 수냉 조건을 달리하여 생산하였는데 600 MPa급 내진철근의 경우, 목표로 하는 항복강도 및 항복비를 달성하기 위해서 템프코어 생산방식 보다는 열간압연 후 철근 표면층에 약한 수냉 처리를 하여 강도를 보상하는 방법이 더 합리적이라 판단된다.

### 6. 맺음말

항복강도 600, 700, 800 MPa급 고강도 철근과 내진철근 개발을 통해 국내·외 철강제품별 기술적 격차를 줄이고 전체적인 철강 제조 기술수준을 끌어 올리게 됨으로써 토목·건축 구조물

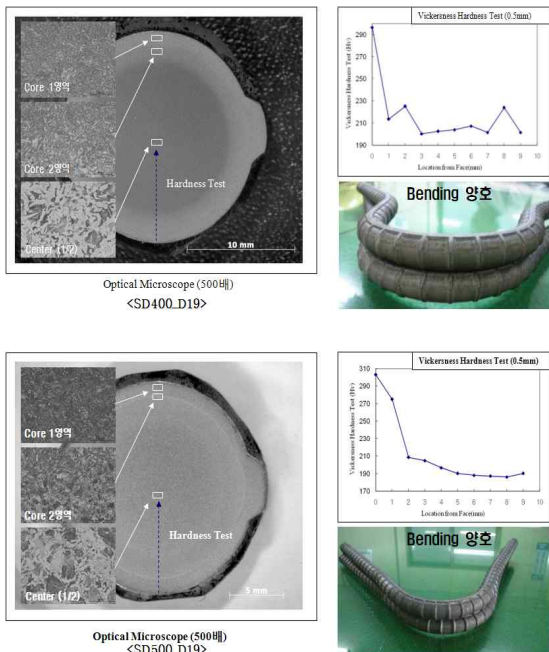


그림 7. 항복강도 400, 500 MPa급 내진철근의 단면, 미세조직, 경도분포 및 굽힘시험 후 철근 사진

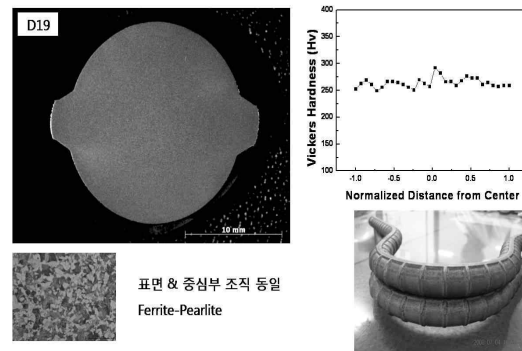


그림 8. 항복강도 600 MPa급 내진철근의 단면, 미세조직, 경도분포 및 굽힘시험 후 철근 사진



표 5. 항복강도 400 MPa, 500 MPa, 600 MPa급 내진철근의 기계적 특성

구분	규격	항복강도	인장강도	항복비	연신율	굽힘성능
		MPa	MPa		%	Degree
개발 목표		400 ↑	-	0.80 ↓	10 ↑	90° 균열 유무
400 MPa급	D10	437 ~ 479	587 ~ 634	0.75	20 ~ 23	180° 균열 없음
	D19	462 ~ 479	609 ~ 621	0.77	18 ~ 22	
	D32	474 ~ 482	634 ~ 641	0.75	20 ~ 21	
개발 목표		500 ↑	-	0.80 ↓	10 ↑	90° 균열 유무
500 MPa급	D10	506 ~ 549	655 ~ 686	0.79	18 ~ 21	180° 균열 없음
	D19	524 ~ 534	669 ~ 678	0.79	17 ~ 19	
	D32	516 ~ 527	670 ~ 681	0.77	17 ~ 18	
개발 목표		600 ↑	-	0.80 ↓	10 ↑	90° 균열 유무
600 MPa급	D10	615 ~ 650	817 ~ 829	0.74 ~ 0.79	12.5 ~ 15.0	180° 균열 없음
	D19	623 ~ 624	795 ~ 798	0.78	15.0 ~ 15.4	
	D32	623	802	0.78	14.5	

에 적용을 크게 확대할 수 있을 것으로 예상된다. 특히, 콘크리트 구조물에 사용되는 철근의 고강도화로 이와 관련된 구조설계 기준의 변화에도 상당한 영향을 미칠 것으로 예상되는 바, 개발된 고강도 철근 제품이 실제 토목·건축 구조물에 적용 가능하도록 각 부재단위의 안전성과 사용성을 충족하는 성능기준에 대한 방안 마련이 필요하다. 이에 대한 첫 걸음으로써 현대제철(주), 동국제강(주)의 연구팀과 (사)한국콘크리트학회 연구팀이 공동 수행한 ‘고장력 철근의 적용성’에 대한 연구는 공급자와 사용자 사이에서 제품 개발과 적용, 검증이라는 공동연구로 시급석이 될 것이다. 아울러 미려한 필체로 작성된 이 글을 끝까지 읽어주신데 대해 독자들에게 고마움을 표하며, 이 지면을 통해 고강도 철근의 개발을 알리는데 기회를 주신 (사)한국콘크리트학회에 감사의 말씀을 드립니다. ☐

참고문헌

1. 한국철강신문 편찬위원회, ‘기초 철강지식, 한국철강신문’, 2006.
2. Dipak Mazumdar, James W. Evans, “Modeling of Steelmaking Processes“, CRC Press, 2009.
3. 이용도, 박재현, 이형철, 장상진, 박순길, 박찬필, ‘열간압연’, 현대제철(주), 2005.
4. 한국기술표준원, ‘KS D3504 개정, 고시 2009-0247’, 2009.
5. Pierre Simon, “Tempcore : A new Process for the Production of High-Quality Reinforcing Bars”, Iron and Steel Engineer, 1984.
6. A. N. Ivoditov et al. “Low temperature tempering of weldable, high strength reinforcing steel of classes A-IV and A-V”, Steel In The User, 1985.

7. W. J. Ammerling, “Tempcore : Economical method for High Quality Reinforcing Bars”, Metallurgical Plant and Technology, 1984.
8. 최판길, 이봉환, ‘고강도 철근과 콘크리트 강도수준에 따른 최적조합에 관한 연구’, 강원대학교 산업기술연구소 논문집, 2006.
9. 오병환, 조근호, 박대균, 최승원, ‘고강도 콘크리트와 고강도 철근을 사용한 중공단면 교각의 구조거동 실험연구’, 대한토목학회 논문집, 2005.
10. 윤동용, 은성운, 인광진, ‘고강도 철근(SD500)의 적용성에 관한 연구’, 대한토목학회 논문집, 2004.
11. 김도훈, ‘상식의 지평을 넓혀주는 금속이야기(5)’, 재료마당, 대한금속재료학회, 2007.
12. D. A. Porter, K. E. Easterling, “Phase Transformation in Metal and Alloys”, Chapman & Hall, 1992.
13. Yuqing Weng, “Ultra Fine Grained Steels”, Metallurgical Industry Perss, 2009.
14. H. K. D. H. Bhadeshia, R. W. K. Honeycombe, “Steels ; Microstructure and Properties 3rd”, Elsevier, 2006.
15. R. W. Cahn, “Thermo-Mechanical Processing of Metallic Materials”, Elsevier, 2007.
16. Murakami Hideo, “Engineering topics”, Konoike, 2005.
17. 한국과학기술정보원, ‘글로벌 동향 브리핑, 초고강도 콘크리트의 구조설계기준 작성’, 한국과학기술정보원(KISTI), 2005.
18. 일본규격협회, ‘일본공업규격(JIS) 2’, 일본규격협회, 2008.
19. ASTM committees, “ASTM Standards”, ASTM International, 2007, Vol 01.04,
20. 일본건축학회, 「고강도 콘크리트 시공지침(안) 및 해설」, 2005.
21. 윤용선, ‘철근 마킹 변경’, 스틸데일리, 2010.

담당 편집위원 : 권기주(한국전력공사) kyeunkjoo@kepco.co.kr