

## 중장비용 열연 고강도강 개발 동향 및 용접성

임영록 · 이창훈 · 이정철 · 정홍철

### Recent Development and Welding Properties of High Strength Hot Rolled Steels for Lifting, Handling and Transport Equipments

Young-Roc Im, Chang-Hoon Lee, Jung-Chul Lee and Hong-Chul Jeong

#### 1. 서 론

중장비는 굴삭기, 크레인 등 건설기계 부문과 트럭, 트레일러 등 운송장비 부문으로 대별할 수 있다. 세계 건설기계 산업의 규모는 '07년 기준으로 조선 산업의 1.7배에 달하며, 지속적인 성장세가 유지되어 왔다. 국내 중장비 산업은 수출 지향형으로서 세계 시장으로의 점유율 확대 여지가 크며, 현재로서는 연간 약 50만톤의 강재가 국내 중장비 산업 부문에 사용되는 것으로 파악되고 있다.

중장비용으로는 주로 후판 및 열연 소재가 사용되며, 소재의 두께는 얇게는 2mm에서부터 50mm 이상 두께의 후물까지 다양하게 사용되고 있다. 본 기고문에서는 주로 중장비용 열연 소재에 집중하여 전형적으로 3mm에서 18mm의 두께를 갖고 권취 공정을 통해 생산되는 중장비용 고강도 열연소재에 대해 살펴보고자 하겠다. 열연 소재 중 후물은 두께 측면에서 후판재와 경합하게 되는데, 후판 소재의 장점은 광폭이며 재질 이방성이 적고 열처리 프로세스가 정립되어 있어 초고강도재의 제조에도 용이하다는 점이다. 반면 열연 소재는 생산성과 경제성 측면에서 장점이 있으며, 고속 연속압연 공정을 통해 생산되어 결정립 미세화에 유리하고 가격 대 성능비가 뛰어난 특징이 있다. 국내의 중장비용 고강도 열연재는 주로 Ti, Nb 등 미량합금 원소가 첨가된 micro-alloyed 강을 TMCP 방식으로 제조하고 있는데, 열연 제조시의 압연 및 권취 능력, 또한 레벨링 등 열연 후공정의 능력에 의해 일차적으로 제조 가능한 두께와 강도 범위가 제한되고 있다. 야금학적으로는 석출 경화형 합금으로 달성 가능한 강도의 상한과 충격특성과의 균형 측면에서 두께 및 강도 수준이 제한된다고 할 수 있겠는데, 현재 생산되는 국내 중장비용 고강도 열연재의 대표적인 최고 수준은 두께 3~10mm인 TMCP형 항복강도 700MPa급 소재이다. 현재 보다

고강도 열연 소재를 생산하기 위한 DQ(direct quenching) 공정이나 열연 후열처리(RQ, reheating and quenching) 공정은 국내에서는 아직 활발하게 적용되고 있지 않다. 유럽의 고강도 열연소재 특수 압연 밀의 경우 권취 이전 런아웃 테이블에서의 급냉을 통해 강도를 얻는 열연 DQ 공정을 통해 YS 1100MPa 급 혹은 HB500급 소재까지 상업적인 생산을 하고 있다. 또한 유럽의 대표적인 고강도강 제조업체인 SSAB 사의 경우 열연 소재를 전단 후 후판 열처리 공정에 투입함으로써 YS 1200MPa급의 초고강도 소재까지 생산하고 있으며, 후판 소재로서는 YS 1300MPa급까지 양산하고 있다. 한편 이처럼 후열처리 공정을 추가로 실시하는 경우 추가 공정에 따른 원가 상승을 부담해야 하나 최종 열처리에서 요구되는 특성을 얻는 만큼 앞서의 압연 공정에서는 열연의 최대 두께-폭 수준까지도 비교적 용이하게 제조가 가능하다. 현재 국내 열연 소재의 최대 두께 수준은 대략 25mm 안팎이며, 열처리 공정을 적용할 경우 이론적으로는 이러한 후물 영역까지 열연 공정을 이용한 고강도강의 생산이 가능하다. 최근 유가 상승과 배기가스 제한 등 환경 규제에 따라 중장비 경량화는 매우 중요한 설계 요소가 되고 있으며, 뛰어난 품질의 고강도 열연 소재 개발은 중장비 산업 경쟁력의 원천이 될 수 있을 것으로 판단된다.

이후의 내용에서는 먼저 중장비용 철강재 시장상황을 살펴보고, 중장비용 고강도재의 구분 및 개발 현황, 야금학적 원리, 그리고 용접성에 대해 차례대로 살펴보기로 하겠다.

#### 2. 중장비 산업 및 중장비용 강재 시장 동향

중장비 산업의 특징은 자본집약적이고 규모의 경제가 요구되는 산업이며 부가가치가 높고 관련 산업에 대한 파급 효과가 매우 큰 국가 기간산업이다. 또한 소재 및

부품으로부터 완성 제품까지 기계 산업의 전반적인 기술이 요구되며, 시장의 신뢰성 확보 및 보증을 위한 장기적인 신뢰성 구축에도 상당한 기간을 요구하는 산업이기도 하다.

중장비 산업의 시대별 발전을 살펴보면 그 태동은 1970년대에서부터 시작되었으며, 1980년대에는 생산성 및 가동 효율을 중심으로 연비 향상을 위한 노력이 이루어졌다. 1990년대에는 안락성과 쾌적성을 목표로 한 발전이 이루어졌으며 승용 자동차의 눈부신 발전이 이루어진 2000년대 이후에 본격적인 고도기술의 개발과 접목이 이루어지기 시작하였다.

2000년대에는 1990년대부터 추진되어 온 안락성과 쾌적성과 더불어 환경 규제에 대응하기 위한 다각적인 노력이 이루어지기 시작하였다. 2010년에는 화석연료를 사용하는 중형급 장비의 동력원을 하이브리드 형식으로 개발하고 현재의 엔진 효율을 향상시키는 목표를 갖고 있으며, 전동식 장비에 사용하는 배터리의 효율과 용량을 향상시켜 소형 제품을 중형 제품으로 확대하는 개발을 하고 있으며, 초경량 제품의 개발을 가능하게 하는 소재의 개발 또한 꾸준히 진행되고 있다.

중장비 산업은 연간 1천만톤 이상의 강재 다소비 산업으로서, 중국과 인도 등 소위 BRICs를 중심으로 한 사회 간접기반시설 건설 수요 증가 및 자원개발 확대로 인해 그 수요가 지속적으로 증가하여 2015년에는 15백만톤 이상이 사용될 것으로 전망된다.

한편, 최근 배기가스 규제 강화, 장비 대형화 및 에너지 효율 향상 증대로 인해 중장비 부문에의 고강도강 적용 요구가 증가하고 있는 상황이다. 예를 들어, 콘크리트 펌프트럭, 크레인 같은 중장비는 작업 반경의 차이가 장비의 최고 경쟁력으로 꼽고 있다. 이러한 요구 사항을 받아들여 SSAB(스웨덴) 사는 항복강도 1,300(Weldox1300)의 Boom Steel을 개발하여 콘크리트 펌프카 및 크레인의 붐 등에 적용하고 있다.

자동차보다 기술개발 속도가 늦어 왔던 트레일러 부문 또한 최근 일반강으로 제조되어 오던 프레임용 YS 700MPa급 고강도강으로 대체함으로써 35% 이상의 경량화를 이루었고, 유류비 절감뿐 아니라 적재량 증가

에 따른 물류비 감소와 CO<sub>2</sub> 배출량까지 줄일 수 있어 1석 3조의 기대효과를 거두었다.

주로 굴삭기 버켓과 트럭 적재함에 사용되는 내마모강 역시 내구성 향상 및 경량화 요구로 인해 고내마모강 요구가 증가되어, 브리넬 경도 600수준의 강재까지 개발되어 상용화되고 있으며, 적재함에 사용되는 내마모강은 차체 경량화 및 내구성 향상을 동시에 만족시키기 위하여 브리넬 경도 450의 4mm 두께 박물 내마모강을 사용하고 있다.

친환경 정책에 따른 규제 강화 및 제품 경쟁력 향상을 위하여 일반강 수요는 점차 줄어들고 고강도강 및 내마모강의 수요는 지속적으로 증가할 것으로 전망되며, 향후 중장비 시장의 선점을 위해서는 시장에서 요구하는 강재 개발을 누가 먼저 이루어내느냐가 가장 중요한 관건이 될 것으로 보여진다.

### 3. 중장비용 열연 고강도강의 구분 및 개발 현황

#### 3.1 TMCP형 열연 고강도 소재 개발 현황

중장비용 소재는 용도에 따라 다음 표 1과 같이 대별할 수 있다. 그 중 열연 소재가 가장 널리 사용되는 부문은 냉간성형 고강도강 부문으로서, TMCP 공정을 통해 생산한 페라이트 기지의 강재가 사용되고 있다.

이러한 냉간성형 고강도강은 주로 상용차 프레임이나 박물 붐압류에 사용되는데, 강도, 용접성, 성형성 등 여러가지 특성의 균형이 잘 잡혀 있는 소재라 할 수 있다. 냉간성형 고강도강의 강도는 결정립 미세화와 microalloying 원소 첨가에 따른 석출경화를 통해 얻고 있는데, 그 강도의 상한은 현재 대략 YS 700MPa 수준이며 두께는 3~10mm의 범위로 주로 생산되고 있다. 냉간성형 고강도강으로는 SSAB사의 DomexMC, RUUKKI의 OptimMC, 그리고 국내의 경우 POSCO의 ATOS 시리즈가 대표적이며, TMCP 공정으로는 모두 YS 700MPa급까지가 그 개발 상한이다. SSAB사의 경우 TMCP 압연 후 DQ 냉각공정을 더하여 YS 900, 960MPa급 열연 소재를 개발하였으나, 냉간성형

Table 1 중장비용 소재의 주요 용도와 특징

구분	주요물성					미세 조직	제저 공장	강화 기구
	고강도	성형성	내마모성	용접성	내식성			
냉간성형 고강도강	●	●		●		Ferritic	HR	석출, 미세립
내마모강	●	△	●	○		Martensitic	DQ / RQ	저온조직
용접특화 초고강도강	●●	△		●		Martensitic	DQ / RQ+1	저온조직
내후성 / 내해수강	●	○		○	●	Ferritic	HR	석출, 미세립

성 면에서 YS 700MPa급과 차이가 뚜렷하여 이들 소재는 DQ형 열연 고강도 소재로 구분해야 할 것으로 생각된다. 중장비용 열연소재 제조사로서 특화되어 인지도와 기술적인 면에서 가장 차별화된 SSAB사의 경우 항복강도 50MPa 간격으로 냉간성형 고강도강을 Line-up하고 있으며, 고객지원 기술의 수준 또한 높다. 국내 철강사 중 POSCO의 경우 YS 700MPa를 초과하는 등급의 TMCP형 열연 소재의 개발과 함께 기존 강도수준 소재의 후물화를 함께 추진하고 있다. YS 700MPa급 ATOS80의 경우 최대 14t까지 후물화가 이루어졌으며, YS 600MPa급 소재의 경우 최대 두께 18t, 최대 폭 1800mm를 목표로 한 개발이 진행되고 있다.

한편 열연 고강도강은 내후성, 내해수성 등 내식 부문에도 사용되고 있는데, 국내 열연 내후성강의 경우 YS 700MPa급까지 개발되어 있으며 내해수강의 경우에도 고강도강의 개발과 사용이 추진되고 있다. 이러한 고강도 내해수강은 항만/해양 구조물의 경량화, 장수명화에 기여함으로써 그 경제적 가치를 갖게 된다.

### 3.2 DQ 혹은 RQ형 열연 고강도 소재 개발 현황

YS 700MPa급 이상의 강도가 요구될 경우 베이나이트 혹은 마르텐사이트의 저온 변태조직 분율을 높여서 강도를 얻는 것이 보통이며, 열연 권취 이전의 런아웃 테이블 냉각중에 급냉하여 강도를 부여하는 DQ (direct quenching) 방식과 열연코일 혹은 전단재를 대상으로 추가 열처리를 실시하는 RQ(reheating and quenching) 방식이 널리 채택되고 있다. DQ 방식을 채택할 경우 TMCP 압연을 통해 한층 높은 강도를 얻을 수 있으며, 결정립 미세화를 통해 충격 특성의 개선도 기대할 수 있다. RQ 혹은 RQ+템퍼링 방식은 후판 압연재의 후열처리에 많이 사용되고 있으며, 표 1의 내마모강과 용접특화 초고강도강은 전형적으로는 이와 같은 후판 후열처리 공정을 통해 제조되는 소재로 볼 수 있다. 하지만 근래 유럽의 열연 밀들을 중심으로 DQ 방식으로 내마모강과 초고강도강을 제조하는 기술이 활발히 개발되어 왔으며, 그 중 RUUKKI사의 경우 HB400~HB500급의 내마모강 (RAEX)과, 최대 YS 1100MPa 급의 초고강도강(OptimQC)을 열연 DQ 공정으로 제조하고 있다. 또한 Salzgitter 및 VAI 사의 경우에도 DQ 공정을 적극 활용하고 있으며, VAI사의 경우 YS 1100MPa 급의 고강도강 ALFORM 1100M을 제조하고 있는 것으로 파악되고 있다. 다만 이러한 열연 DQ 공정의 경우 권취와 형상 교정의 어려

움으로 인해 두께와 폭에 제한이 있게 되며, 이에 반하여 RQ 공정을 적용할 경우 열연 소재의 최대 폭-두께 수준 내에서 좀 더 넓은 영역까지 활용이 가능할 것으로 판단된다. 무엇보다 최고의 강도 수준은 RQ 등 후열처리 공정을 통해 얻을 수 있으며, SSAB 후판 열처리 소재의 경우 최대 YS 1300MPa 급의 초고강도강 (Weldox)과 HB600급의 내마모강(Hardox)이 RQ 혹은 RQT 공정을 통해 제조되고 있다. 국내 POSCO사의 경우 RQ 혹은 RQT 공정이 후판 압연재에 대해 활용되어 내마모강의 경우 HB400급 (경도 하한에 대한 기준이 지역별로 달라 POS-AR360이 EU의 경우 HB400급에 해당됨), 초고강도강의 경우 YS 900MPa 급까지가 개발되어 있다.

## 4. 중장비용 열연 고강도강의 야금학

앞장에서 언급되었듯이, 현재 중장비용 고강도 열연재는 주로 TMCP 방법으로 생산되는 Ti, Nb, V 등의 합금원소가 첨가된 microalloyed 석출강화강과 열간압연 후 권취 전 ROT 구간에서의 급냉을 통해 생산되는 DQ강으로 나눌 수 있다. 본 장에서는 상기 두 고강도강의 기본적인 야금학적 특성에 대해 간단히 살펴보고록 하겠다.

### 4.1 석출강화강

#### 4.1.1 재가열 온도의 영향

통상 열연재의 제조공정은 제강-연주를 통해 만들어진 슬라브의 재가열로부터 시작된다. 슬라브를 1100℃ 이상의 고온에서 재가열하여 조압연(roughing mill)과 마무리압연(finishing mill)을 거쳐 고객의 주문사이즈 (폭\*너비)로 압연된 후, 냉각 및 코일링 단계를 거쳐 열연재로 제조된다. 슬라브의 재가열시, 슬라브 내부의 연주 중 생성된 Ti, Nb, V의 탄질화물의 재용해는 재가열 온도, microalloy 합금원소량, 탄소량, 질소량에 영향을 받는다. 이러한 탄질화물의 재용해와 재가열 온도, Ti, Nb, V첨가량, C, N 함량과의 관계는 많은 연구자들에 의해 연구가 있었는데, 가장 대표적으로 사용되고 있는 것이 K.J. Irvine 등<sup>1)</sup>의 용해도 곱의 식이며, 그 식은 다음과 같다.

$$\log [Ti] [C] = -7000/T + 2.75$$

$$\log [Nb] [C + 12/14N] = -6770/T + 2.26$$

위의 관계식으로부터 Ti, Nb 등 석출물 형성 원소의 함량이 증가하면 이들 원소의 충분한 고용을 위해 재가

열 온도를 높여야 함을 알 수 있다. 또한 Ti, Nb 등 microalloying 합금원소뿐만 아니라, C 및 N의 함량에 따라라도 재용해를 위한 재가열 온도가 달라지는 것을 확인할 수 있다. 따라서 microalloying 합금원소가 첨가된 강은 가급적 높은 온도에서 재가열을 하여 연주 중 생성되어 슬라브 내에 존재하는 조대한 Ti, Nb, V 등의 탄질화물을 재용해시킴으로써 조압연 및 마무리압연시 탄질화물의 석출을 통한 오스테나이트 결정립 미세화와 오스테나이트 → 페라이트 변태시 석출되는 미세 탄질화물 또는 페라이트에서 석출되는 미세 탄질화물에 의한 석출강화를 극대화할 수 있다.

4.1.2 결정립 미세화

Ti, Nb, V 첨가강에서의 오스테나이트 결정립 미세화와 관련된 연구는 오랫동안 진행되어 왔다. 특히 Nb 첨가강의 결정립 미세화 및 재결정 관련한 연구는 지금까지 계속 진행되고 있다.

대부분의 microalloying 합금원소는 슬라브 재가열을 통해 용해상태로 존재한다. 슬라브 온도가 낮아지면서 열간압연 중 탄질화물의 석출이 일어난다. 이러한 미세 석출물은 오스테나이트 결정립 성장을 방해한다. 그리고, 이 석출물은 온도가 더욱더 낮아질수록 열간압연된 오스테나이트의 재결정을 지연시키는 역할에 한다. 결국 미세한 오스테나이트 결정립이 미세결정압연에 의해 팬케이크 형태로 유지되고, 결정립계의 분율이 증가되면서 오스테나이트에서 페라이트로 상변태할 때 핵생성 자리가 증가하게 됨으로써 최종 변태조직이 미세하게 된다. Microalloying 강에서 결정립 미세화는 강도를 증가시키는 가장 중요한 방법이 되며, 동시에 인성도 향상시킨다.

4.1.3 석출강화

Microalloyed 합금첨가강에서 결정립 미세화와 더불어 고강도를 획득하는 방법이 미세 탄질화물 석출을 통한 석출강화이다. 상대적으로 고온의 오스테나이트에서 석출한 탄질화물은 비록 오스테나이트 결정립 성장을 방해하는 역할로는 효과적이나 석출강화를 기대하기에는 석출물의 크기가 너무 커서 다소 무리가 있다. 석출강화 효과가 있는 석출물은 저온의 오스테나이트에서 생성된 탄질화물 또는 오스테나이트에서 페라이트 변태시 상변태 계면에서 생성되는 탄질화물, 그리고 페라이트 내에서 생성된 탄질화물 등 상대적으로 크기가 작은 미세 탄질화물들이다. 이들의 크기는 수nm~수십 nm로 생성되는 온도에 따라 좌우된다. R.D.K. Misra<sup>2)</sup> 등은 Ti, Nb, V등이 첨가된 고강도 열연재의 석출물 분석에서 (a) 상대적으로 온도가 높은 오스테나이트 영

역에서 생성된 조대 석출물의 약 100nm 이상의 크기를 가지며, (b) 상대적으로 온도가 낮은 미재결정 영역에서 압하에 의해 생성된 석출물의 크기는 약 20~50nm정도이고, (c) 고온의 페라이트 영역에서 생성된 석출물은 약 10~20nm 정도이고, (d) 마지막으로 코일링 이후 생성된 석출물의 크기는 3~10nm 정도라고 보고하였으며, 또한 석출물의 크기를 고려하였을 때, (b)와 (c) 석출물이 오스테나이트-페라이트 상변태 계면에서 생성된 것으로 판단된다고 보고하였다.

4.2 DQ강

현재 생산되고 있는 고강도 중 YS 700MPa 기준으로 그 이하 강도 grade는 TMCP를 활용한 석출강화형 고강도강으로 생산하며, 그 이상의 강도 grade는 권취 전 급냉으로 마르텐사이트 또는 베이나이트+마르텐사이트 복합조직강으로 생산하고 있다. Ti, Nb, V 등의 석출강화형 합금원소를 미량 첨가하는 석출강화형 고강도강과는 달리, DQ강에서는 급냉으로 마르텐사이트 조직을 충분히 확보할 수 있도록 경화능(hardenability)를 향상시킬 수 있는 합금원소들을 첨가하게 된다. 그러한 합금원소로는 Mn, Ni, Mo, B 등이 있다.

그림 1은 경화능 합금원소 첨가시 CCT 상태도의 변

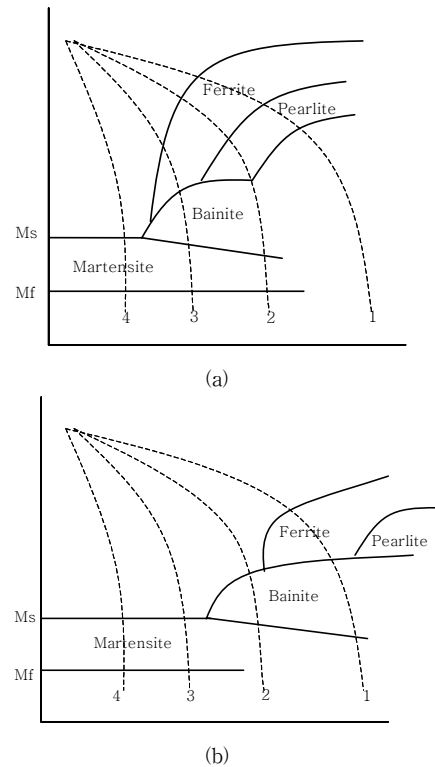


Fig. 1 CCT diagram (a) without any alloying elements (b) with alloying elements to increase hardenability

화를 나타내고 있다. 경화능 향상 합금원소를 첨가할수록 페라이트와 베이나이트의 상변태가 상대적으로 지연되면서 비교적 낮은 냉각속도에서도 안정적으로 마르텐사이트 조직을 확보할 수 있게 된다.

B이 경화능에 미치는 영향에 대해서는 지난 수십년 동안 많은 연구가 있어 왔고, 경화능 향상을 위한 최적의 B 함량은 강 중 용해상태로 약 15~25ppm 수준임이 보고되고 있다<sup>3)</sup>. B은 수 ppm~수십 ppm 정도의 첨가로도 경화능 향상에 있어 탁월한 효과를 발휘하는 것으로 알려지면서 많은 철강회사에서 저원가형 강재개발에 적극적으로 B을 활용하고 있으며, SSAB, RUUKKI 등 유럽의 고강도 특화 제철소에서도 B첨가형 DQ 강을 생산하고 있다.

### 5. 중장비용 고강도 강재의 용접성

최근 건설기계 시장의 약 40%를 차지하는 굴삭기 붐 및 암 소재로 기존 강재보다 고강도 소재를 적용함으로써 굴삭기의 경량화를 통한 연비절감 친환경 기술 개발이 추진되고 있다<sup>4)</sup>. 일반적으로 중장비 등에 고강도 강재를 적용하기 위해서는 무엇보다도 제조사의 용접부 저온균열 방지 및 용접부 충격인성 확보가 중요하다. 이러한 고강도 강재의 문제점을 해결하기 위하여 철강사는 각종 고성능 강재와 집합 기술을 지속적으로 개발하고 있다. 본 장에서는 국내외에 시판중인 고강도 강재의 모재 물성 및 용접성에 대하여 간략히 조사한 결과를 소개하였다.

#### 5.1 API X80열연강재

API X80강재는 라인파이프용으로 개발된 열연강재로 고강도 및 고인성을 확보할 수 있는 강재이다. API X80강재의 탄소당량은 약 0.47수준이다. 표 2에 18mm소재의 기계적 특성을 나타내었으며, 항복강도는 약 740MPa, 인장강도는 약 830MPa수준이다. 한편 0°C에서의 충격인성은 230J수준으로 매우 우수한 충격인성을 나타내고 있다. 그림 2에 API X80강재의 용접부 최고경도를 나타내었는데, 용접부 최고 경도는 약

Table 2 Mechanical properties of API X80 steel

Steel	Thickness (mm)	Tensile Property			Toughness vE <sub>0c</sub> (J)
		YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	
API-X80	18	741	833	12.5	230.4

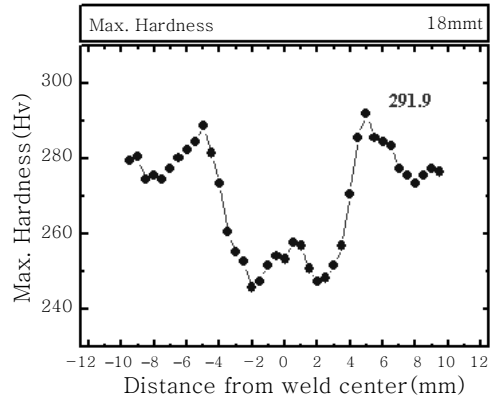


Fig. 2 Hardness distribution of API X80 steel weld

Table 3 Mechanical properties of welded joint in API X80 steel

Steel	Welding process (Heat input)	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Fractured location
API-X80	GMAW (2.0kJ/mm)	639	750.1	19.5	WM
		625	747.5	19.2	WM

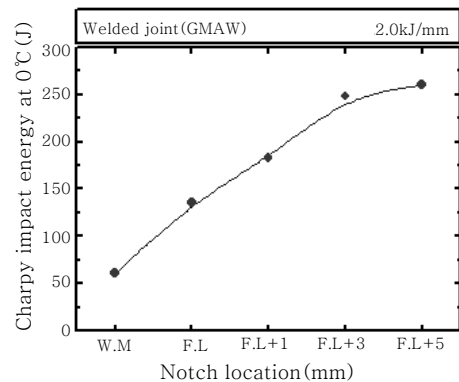


Fig. 3 Toughness of GMA welded joint in API X80 steel

291Hv수준을 보여 모재 강도수준을 고려하면 용접부 경화능은 매우 낮다고 할 수 있다. 표 3은 약 20kJ/cm의 입열량을 적용한 GMAW 용접부 물성을 나타낸 것이다. 용접부 인장강도는 약 750MPa를 보이고 있는데, 이것은 Undermatch 용접재료를 사용하였기 때문으로 판단되며, 고강도 용접재료를 사용하면 용접부 인장강도는 더욱 증가할 수 있을 것으로 판단된다. 그림 3은 동일 용접입열량으로 GMA 용접한 용접부의 충격인성을 나타낸 것이다. 0°C에서의 용접부 충격인성은 용접금속부가 가장 낮은 충격인성을 보이고 있으며 용접열영향부에서는 100J이상의 우수한 충격인성을 보이고 있다. 따라서 API X80강재는 모재강도가 800MPa

급 이상을 확보할 수 있으며, 용접경화성도 낮으면서도 우수한 용접부 충격인성을 확보할 수 있다.

### 5.2 ATOS80강재

ATOS80강재는 주로 자동차 및 중장비 등에 적용되는 고강도 강재이다. ATOS80강재의 탄소당량은 약 0.39수준이다. 표 4는 ATOS80강재의 모재 기계적 성질을 나타내고 있다. 모재 항복강도는 약 660MPa급 이상을 보이고 있으며, 인장강도는 약 785MPa급 이상을 보이고 있다. 7.5mm 두께의 충격시험편을 사용한 0°C에서의 충격인성은 약 60J수준을 보이고 있다. 표 5에는 GMA용접한 실용접부의 기계적 성질을 나타내었다. GMAW용접은 용접입열량을 약 25kJ/cm로 하여 AWS A5.28ER120S-G에 해당되는 용접재료를 사용하여 용접하였다. 용접부 인장특성으로는 용접부 항복강도는 약 590MPa이상을 확보하였고 인장강도는 약 700MPa급 이상을 보였다. 그림 4는 subsize충격 시험편을 사용한 GMA 용접부의 실용접부 충격인성을 나타낸 것이다. 0°C에서의 용접부 충격인성은 F.L (Fusion Line)에서 가장 낮은 충격인성을 보였고 F.L+3mm에서의 용접열영향부에서는 약 100J정도의 양호한 충격인성을 보였다. 그림 5는 ATOS80강의 GMA용접부 경도분포를 나타낸 것이다. 용접부 경도는 모재가 약 260Hv수준을 보였으며, 용접 열영향부는 용접열에 의하여 연화되어 약 220~240Hv 수준을 보였다.

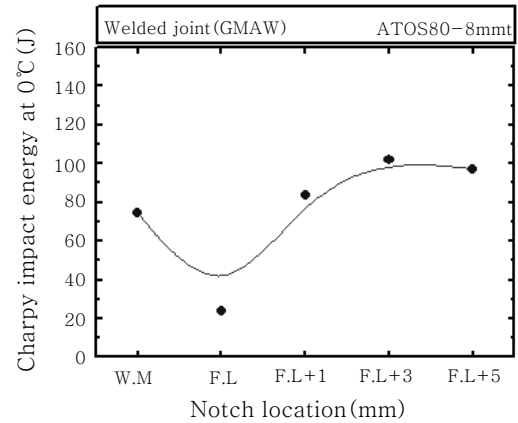


Fig. 4 Toughness of GMA welded joint in ATOS 80 steel

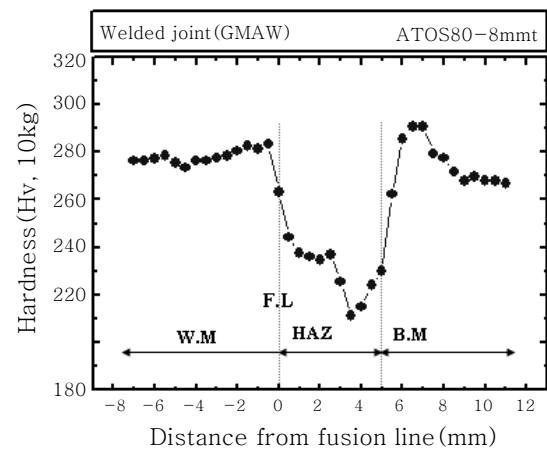


Fig. 5 Hardness distribution of GMA welded joint in ATOS80 steel

Table 4 Mechanical properties of ATOS 80 steel

Steel	Thickness (mm)	Tensile Property			vE <sub>-20°C</sub> (J) (Subsize : 7.5mm)
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
ATOS 80	8	662	785	16.4	61
		702	813	18.1	

Table 5 Mechanical properties of GMA welded joint in ATOS 80 steel

Steel	Thickness (mm)	Tensile Property			Fractured location
		YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)	
ATOS 80	8	607.4	724	21.0	BM
		592.8	725	20.2	
		599.2	703	18.3	

### 5.3 DOMEX600/700 강재

DOMEX600/700강재는 스웨덴의 SSAB사에서 개발한 고강도 열연강재로 DOMEX 강재는 저 C함량에 Ti 및 Nb가 첨가된 것이 특징이다. 탄소당량은 각각 DOMEX600의 경우 약 0.31wt.%, DOMEX700의 경우 약 0.39wt.% 수준이었다. DOMEX소재의 모재 인장특성을 표 6에 나타내었다. DOMEX600강의 경우 항복강도가 700MPa급이었고 인장강도는 약 790MPa급 수준을 보이고 있다. DM700강은 항복강도가 761MPa 및 인장강도 830MPa수준을 보이고 있다. 그림 6에 DOMEX600/700강재의 모재 충격인성을 나타내었다. 충격인성은 subsize로 0°C에서의 충격인성은 대략 60~70J수준을 보이고 있고 두 강재 모두 연성-취성 천이온도는 약 -10°C로 판단된다. 표 7에 GMA실용접부 이음부 인장특성을 나타내었다. DOMEX600강의 경우 인장강도는 676MPa급 DOMEX700강의 경우 약 707MPa수준의 강도를 나타내었다. 그림 7에 DOMEX600/700강의 실용접부 충격인성을 나타내었다. DOMEX600및 700강의 용접부 충격인성은 용접 열에 의하여 결정립 조대화가 일어나는 F.L.근처에서 가장 낮은 충격인성을 보였으며, 차차 F.L.에서 모재쪽으로 갈수록 충격인성은 증가하는 경향을 보이고 있다. F.L.+1mm위치에서의 충격인성은 DOMEX600강은

Table 6 Mechanical properties of DOMEX600/700 steel

Steel	Thickness (mm)	YS(MPa)	TS(MPa)	EL(%)
DOMEX600	10	703	794	18.2
DOMEX700	10	761	838	23.3

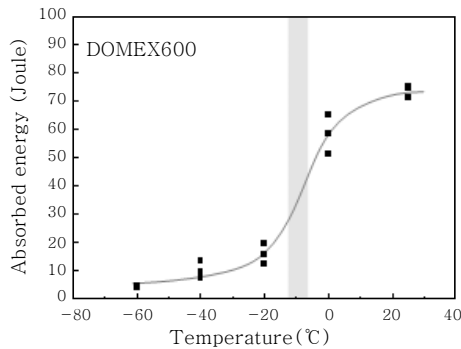


Fig. 6 Toughness of base metals in DOMEX600/700 steels

약 120J을 보였으며, DOMEX700강은 약 70J수준을 보이고 있다. 그림 8에 DOMEX600/ 700강의 용접부 경도분포를 나타내었다. DOMEX600강의 용접열영향부 경도는 약 200Hv수준으로 모재경도에 비하여 약 40Hv이 감소되어 현저한 용접열영향부 연화가 관찰되는 반면에 DOMEX700강의 용접열영향부경도는 약 230Hv수준으로 용접열영향부 HAZ연화는 크게 관찰되지 않았다.

Table 7 Mechanical properties of GMA welded joint in DOMEX600/700 steel

Steel (Thickness)	Welding process (Heat input)	YS (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	Fractured location
DOMEX600 (10mmt)	GMAW (25kJ/mm)	619	676	7.1	BM
DOMEX700 (10mmt)		665	707	6.3	BM

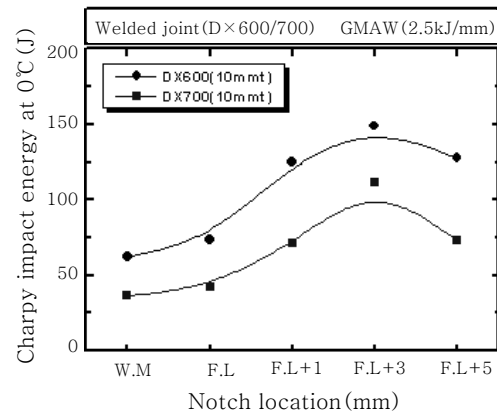
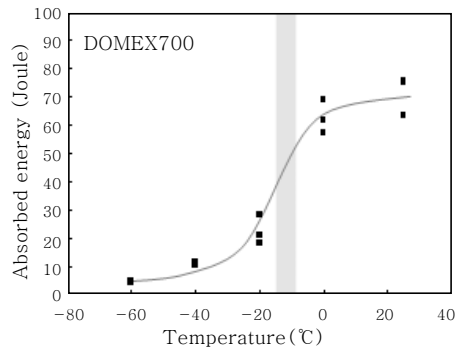


Fig. 7 Toughness of GMA welded joints in DOMEX 600/700 steels



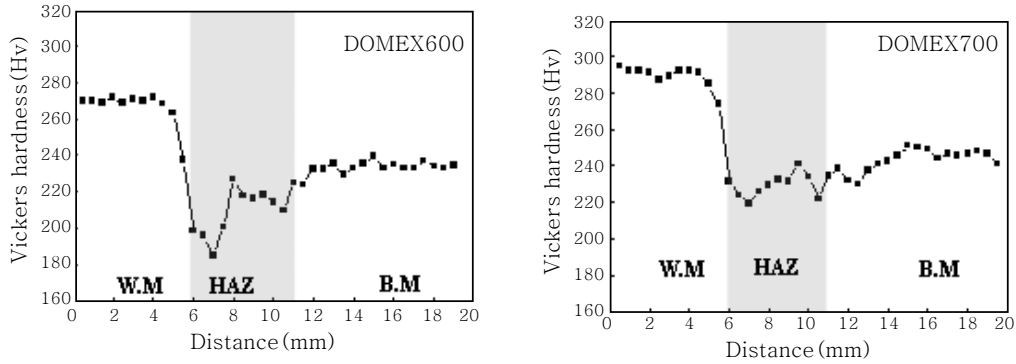


Fig. 8 Hardness distribution of GMA welded joints in DOMEX 600/700 steels

### 6. 결 론

중장비용 열연 고강도 소재는 굴삭기, 크레인 등 건설기계 부문과 트럭, 트레일러 등 운송장비 부문에 사용되며, 용도 면에서는 냉간성형 고강도강, 내마모강, 용접특화형 초고강도강, 내후성/내해수강으로 대별할 수 있다. TMCP 공정으로 제조되는 열연 냉간성형 고강도강의 최대 강도 현수준은 YS 700MPa이며, 보다 높은 강도를 얻기 위해 유럽을 중심으로 DQ, RQ 초고강도 열연 소재들이 개발되어 왔다. 국내에서는 냉간성형 고강도강의 후물화와 강도 향상 개발이 진행되고 있으며, 보다 높은 강도 소재의 제조를 위해 DQ 공정의 적용 및 열연 RQ 공정의 도입이 추진되고 있다.

이러한 중장비용 열연 소재의 여러가지 사용기술 중에서 용접성이 가장 중요하며, 고강도강 적용의 궁극적

인 효과를 얻기 위해서는 용접부 미세조직 및 기계적 특성의 제어가 핵심이라고 할 수 있다. 용접부 건전성과 용접부 피로 수명의 향상을 위해서는 모재 제조기술의 향상, 적절한 용접용 소재와 용접 기술의 개발이 필수적이며 국내 고강도강과 중장비의 세계시장 경쟁력 확보를 위해 강제 제조기술-접합기술-설계기술의 조화로운 발전을 도모해야 할 것으로 생각된다.

### 참 고 문 헌

1. K.J. Irvine, F.B. Pickering, and T. Gladmann: J. Iron Steel. Inst., 205(1967), 161
2. R.D.K. Misra, H. Nathani, J.E. Hartmann, and F. Sciliano: Mat. Sci. and Eng. A, 394(2005), 339
3. G.F. Melloy et al. : Met. Trans., Vol.4, (1973), 2279
4. “차세대 친환경 경량 굴삭기 구조설계 및 제조공정개발에 관한 연구기획 보고서” 산업자원부(2007)



- 임영록(林永祿)
- 1970년생
- POSCO 기술연구원 박판연구그룹 책임연구원
- 합금설계
- e-mail : yrim@posco.com



- 이창훈(李昌勳)
- 1975년생
- POSCO 기술연구원 박판연구그룹 책임연구원
- 합금설계
- e-mail : lee1626@posco.com



- 이정철(李正哲)
- 1976년생
- POSCO 공정품질서비스실 수요개발그룹
- 건설기계
- e-mail : jcllee@posco.com



- 정홍철
- 1964년생
- POSCO 기술연구원 강제솔루션연구그룹 전문연구원
- 용접
- e-mail : jeonghc@posco.com