고강도-고인성 라인파이프강 개발 동향

유장용† · 강기봉*

Developing Trend of High Strength and Good Toughness Linepipe Steel

Jang-Yong Yoo† and Ki-Bong Kang*

Key Words : Linepipe steel (**라인파이프강**), Acicular ferrite(**침상페라이트**), X70 **강**, X80 **강**,

Abstract

Linepipe steels with a low carbon acicular ferrite microstructure have been recently developed to accommodate the current transportation condition of the gas and oil industry, and they are finally applied to West- East pipeline project in China. By adopting acicular microstructure, both better formability and better toughness could be obtained due to low yield ratio and fine grained microstructure. Mechanical properties of pipe are not greatly different from those of base plates or hot coils with a microstructure of acicular ferrite. Merits of introducing higher strength steels are well known, i.e., reducing the gauge of pipe and the material cost, increasing the welding speed and decreasing construction cost because of reducing the construction period. Threfore, gas and oil industry has required higher strength steel than API-X70 grade steel. Under this background, API-X80 steel has been developed and shall be applied to the several projects. In this paper, developing stage of API-X80 steel is also presented and discussed.

1. 서 론

최근 유가 상승에 따라 가스전 개발이 활발하게 진행중으로 사용 환경이 가혹한 지역에서의 라인파이프 건설에 따라, 고강도이며 저온인성을 가진 라인파이프용 강재가 다량 요구되고 있다.

전세계에 걸쳐서 파이프라인 건설 프로젝트는 광범위하게 걸쳐 있어서 각국의 제철소 및 강관사는 이러한 수요에 적극 대처하고 있다. 극동 지역에서는 중국 및 러시아를 중심으로 대규모 프로젝트가 진행 중으로, 고강도 라인파이프 강재의 수요는 급속히 증가할 전망이다. 중국에서는 서쪽의 타림 분지로부터 상하이로 연결되는 길이 4,200㎞의 서기동수 파이프라인 프로젝트가 진행되고 있으며, 러시아 이루크추크-중국–한국을 잇는 이루크추크 파이프라인 프로젝트도 활발히 논의가 되고 있어 2-3 년 내로 파이프라인 건설이 개시될 전망이다. 이들 프로젝트는 한냉지역을 통과하는 관계로 –15 또는 –20℃에서 DWTT 특성(취성 파괴 전파 정지 특성)을 보증할 수 있는 저온인성이 우수한 API-X70 급 강재를 다량 요구되고 있다.

최근에는 북미를 중심으로 파이프라인 프로젝트에 API-X80 강을 적용하는 것을 검토하고 있다. 이는 장거리 배관 건설시 고강도인 API-X80 강을 사용함으로써, 일정 공급 압력 하에서 가스 배관 두께를 감소시킬 수 있으며, 용접에 소요되는 시간이 단축되어 API-X65 강 대비 공사비가 7.5% 이상 절감이 가능하기 때문이다. 이에 따라 각 제철소에서는 고강도-고인성이며 우수한 용접성을 가진 API-X80 강을 개발 적용하고 있다.

본 논문에서는 침상 페라이트 조직을 갖는 고강도-고인성의 API-X70 및 X80 강의 특징 및 개발 현황에 대해 소개한다.

2. 침상 페라이트계 API-X70 강

2.1 침상페라이트계 X70 강의 합금설계 개념

입도가 매우 불규칙하며 내부에 많은 전위를 함유하는 침상페라이트(Acicular Ferrite) 조직은 면심입방격자를 가진 오스테나이트로부터 베이나이트 변태 또는 매시브(massive) 변태에 의해 형성된다. 이와 같은 침상페라이트

† ㈜포스코 기술연구소 후판연구그룹
E-mail : yoojang@posco.co.kr
TEL : (054)220-6082 FAX : (054)220-6911
* ㈜포스코 기술연구소 후판연구그룹
TEL : (054)220-6349 FAX : (054)220-6911

를 형성하기 위한 변태는 합금원소 첨가 및 오스테나이트로부터의 급냉에 의해 결정립이 등축 형상을 하는 등축페라이트(Polygonal Ferrite)의 형성을 억제함에 의해 일어날 수 있다.

Mn이 등축페라이트의 형성을 억제하여 침상페라이트를 형성시키는데 가장 유효한 원소로 알려져 있으며, Mo도 침상페라이트 형성을 조장하는 것으로 알려져 있다. 이와 병행하여 우수한 인성을 확보하기 위하여, Nb를 첨가함으로써 오스테나이트 입도를 미세화한다.

Table 1 은 전형적인 등축페라이트계 X70 강과 침상페라이트계 X70 강의 화학성분을 보여주고 있다. Table 1 에서 보듯이, 강의 소입성을 증가시켜 침상페라이트 조직을 얻기 위해 등축페라이트계 강 대비 Mn, Mo 및 Nb 함량을 크게 증가시키며, 저온인성을 향상시키기 위해 탄소(C)는 적게 첨가한다.

Table 1 Comparison of chemical composition between API-X70 steels with acicular ferrite and polygonal ferrite microstructures.

Steel	C	Mn	Mo	Nb	Others
X70 (A.F)	0.07	1.55	0.25	0.055	Cu,Ni, Ti,V
X70 (P.F.)	0.09	1.50	-	0.045	

2-2. 침상페라이트 강의 제조 방법

Fig.1에는 침상페라이트계 X70강과 등축페라이트계 X70강의 제조 방법을 비교하여 나타내었다. 등축페라이트계 X70강은 강을 저온역,오스테나이트 + 페라이트가 공존하는 2상영역까지 열간압연한후 비교적 약냉으로 냉각하여 제조하는데 반하여, 침상페라이트계 X70강은 오스테나이트 단상역에서 열간압연을 종료하고 빠른 냉각속도로 압연판을 냉각하여 제조한다

등축페라이트계 강은 비교적 약냉에 의해 제조하므로 제철소에서 용이하게 제조 가능하나, 침상페라이트계 강은 강냉에 의해 제조하므로 냉각시 열수축에 의한 판변형 문제 등 여러가지 제조 공정상 난점이 많으므로 고도의 기술을 보유한 제철소 만이 제조가 가능하다.

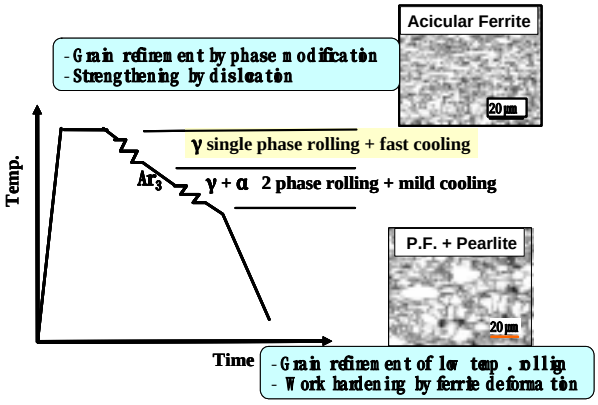

Fig.1 Comparision of manufacturing process between acicular ferrite and polygonal ferrite steels.

Table 2에는 전형적인 등축페라이트계 X70 강과 침상페라이트계 X70강의 강도와 인성을 이론적으로 계산하여 비교하였다.

Table 2. Strength-toughness of acicular ferritic X70 steels.

Strength or toughness	Conventional X70 (P.F.)	Acicular ferritic X70
①Strength by refinement ($15.1d^{-1/2}$)	150MPa (grain dia.: 0.01mm)	210Mpa (grain dia.: 0.005mm)
②Strength by dislocation (σ_d)	170MPa (dislocation density: $2 \times 10^{14}/m^2$)	240Mpa (dislocation density: $4 \times 10^{14}/m^2$)
③Strength by precipitate(σ_p)	50~70MPa (V : 0.05wt%)	0
Total strength (① + ② + ③)	370~390MPa	453Mpa
CVN transition temperature $= -19 + 0.26(\sigma_d + \sigma_p) - 11.5d^{-1/2}$	-77°C	-120°C

Table 2으로부터 침상페라이트계 X70강의 강도는 인성도 함께 향상시키는 입도 미세화에 의해 증가되므로, 등축페라이트계 X70강 보다 강도 및 인성이 월등히 우수할 것임을 잘 알 수 있다.

2-3 침상페라이트계 X70강 Spiral 강관의 물성

일반적으로 판재를 강관으로 제조시에는 반복응력에 의한 바우싱거 효과 및 변형에 의한 가공경화 효과에 따라 판재와 비교시 강관의 항복강도는 크게 변화하는 것으로 알려져 있다. 특히, 등축페라이트계 강에서는 대체로 반복응력에 의한 바우싱거 효과가 커서 항복강도가 감소하는 것으로 알려져 있다.

Fig.2는 항복강도 446Mpa 이상의 API-X65강에 있어서의 열연 코일과 spiral 강관에서의 항복강도 변화를 보여 주고 있다. 이때에는 미세조직이 전형적인 등축페라이트-퍼얼라이트로 구성되는데, 그림에서 보는 바와 같이 Spiral 조관후에 항복강도가 40Mpa 정도 감소하였다.

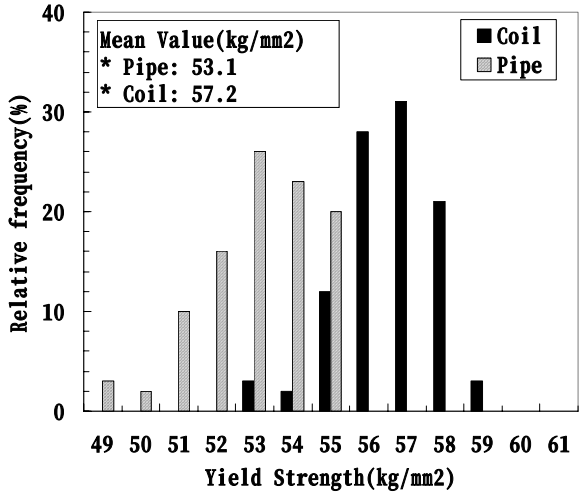

Fig. 2 Yield strength histogram of hot coils and spiral pipes for API-X65 grade steel

Fig.3에는 침상페라이트계 X70강 spiral 강관에서의 조관 전후의 강도 변화를 보여주고 있다. 이때에는 항복강도가 약 10Mpa 정도 저하하나 인장강도는 30Mpa 정도 증가하였다. 이는 침상페라이트계 X70강의 경우 spiral 조관후에 강도 하락이 거의 없음을 잘 보여주는 것이다.

2-4. 침상페라이트계 X70강 UOE 강관의 물성

Table 3에 0.07C-1.53Mn-0.25Mo-Nb-V-Ti계강을 고온역 제어 압연-강냉 가속냉각에 의해 제조한 침상페라이트계 X70강과 저온역 제어압연-약냉에 의해 제조한 등축 페라이트계 X70강의 기계적 성질을 나타내었다.

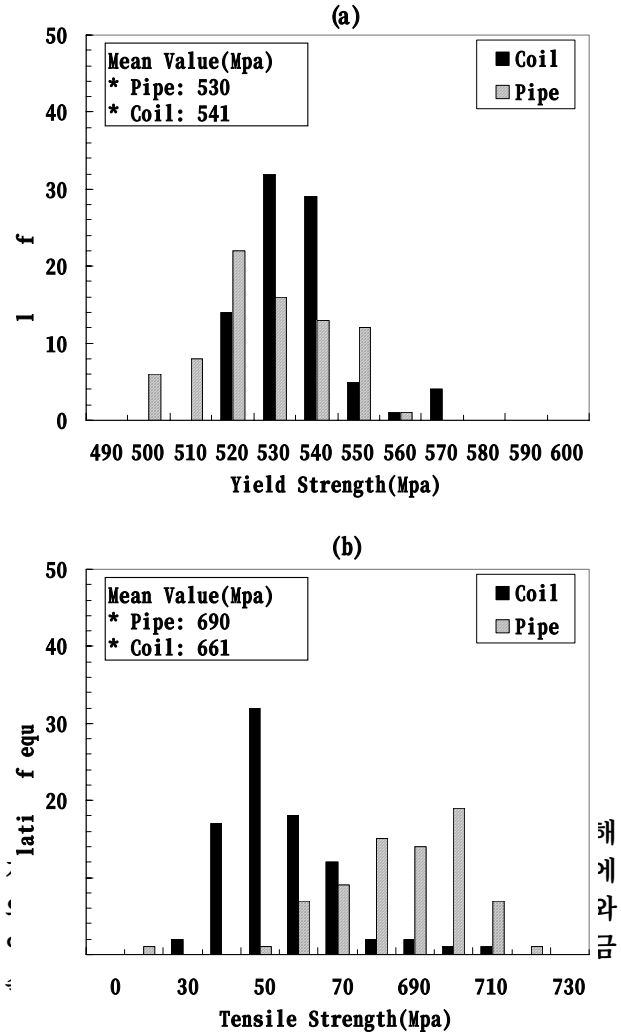

Fig. 3 Strength histogram of coils and spiral pipes in acicular ferrite API-X70 Steel.
(a) Yield strength (b) Tensile strength

Table 3에서 보듯이 침상페라이트계 X70강이 등축페라이트계 X70강 대비 동일한 항복강도 수준에서 비교할 때 충격인성이 월등히 우수함을 잘 알 수 있다. 또한 침상페라이트계 X70강의 항복비(YR)는 등축페라이트계 X70강 보다 월등하였다. 일반적으로 항복비가 낮을수록 소성변형능이 우수하여 라인파이프의 성형성이 좋음을 감안할 때 침상페라이트계 강이 등축페라이트계 강 보다 성형성 및 인성 면에서 크게 우수함을 잘 예측할 수 있다.

Table 3. Mechanical properties of acicular ferrite X70 steel.

Plate No.	Tensile properties (Transverse, flat specimen, API full size)				CVN Energy at -20℃ (J)	DWTT SA% at -15℃
	YS (MPa)	TS (MPa)	El. (%)	YR (%)		
A.F. steel	512	640	38	80	492	93
P.F. steel	537	643	31	83.5	307	99

Fig 4는 침상페라이트강과 등축페라이트강의 UOE 조관시의 조관전과 조관후의 물성을 비교하여 도시한 것이다. 그림에서 침상페라이트강에서는 UOE 성형 및 확관에 의해 가공경화되어 항복강도가 80Mpa 정도 크게 향상되는데 반하여, 등축페라이트강에서는 조관시의 바우싱거 효과와 확관에 의한 가공경화가 상쇄되어 조관전이나 후의 강도 차이는 매우 미미함을 잘 알 수 있다.

위와같이 침상페라이트 조직으로 했을 때에는 조관후 강도가 상승하며, 인성 및 성형성이 우수한 관계로 최근의 주요 라인파이프 프로젝트에서는 침상페라이트계 강을 대량으로 채용하고 있다.

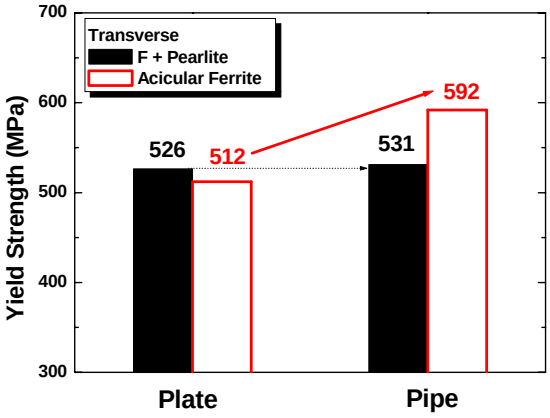

Fig.4 Changes of yield strength by UOE forming and expansion in acicular ferrite steel.

2-5. 고인성 침상페라이트계 강의 비정상 DWTT 파면 해석

DWTT 시험은 라인파이프강의 취성파괴 정지 특성을 평가하는 시험으로, 정상적인 DWTT 시험에서는 취성 크랙(crack)이 노치(notch) 에서 형성되어 일정 거리를 전진한후 연성파괴 mode로 변화하여 취성파괴가 정지되며 최종적으로 햄머(hammer) 충돌 부위에서 새로이 취성파괴로 변화하는 양상을 보인다.

햄머 타격 부분에서 발생하는 취성파괴는 햄머 타격에 기인한 가공경화에 의한 것으로 시험재의 취성 파괴 정지 특성 평가와는 관계가 없는 것으로 알려져 있다. 종래의 라인파이프강에서는 가공경화에 의해서 형성된 역취성 파면의 면적이 API 5L3 규격에서 요하는 연성면적(shear area) 계산 대상에 포함이 되지 않았다. 그러나, 저온인성이 월등히 우수한 침상페라이트계 X70강에서는 가공경화에 기인한 역취성 파면의 면적이 비정상적으로 커서 API 5L3 규격의 연성 면적 평가 대상에 속하는 문제가 발생하였다.

위와 같은 비정상적인 파단 현상이 시편 준비 또는 다른 인자에 의해서 영향을 받는 것인지를 명확히 하기 위하여 21mm 두께의 0.07C-1.53Mn-0.25Mo-Nb-V-Ti강에 대하여 notch type의 함수로써 DWTT 시험을 행하여 파면을 조사하였다. Notch는 표준 press notch와 Fig.5에 보이는 back gouge 시편을 사용하였다. Back gouge 시편은 고인성 라인파이프강의 동적연성파괴(dynamic ductile fracture) 저항성을 조사하는데 쓰이는 것이나, back gouge하여 쐐기를 넣은 부분이 불연속면이 되므로 가공경화 취성의 크기를 줄일 가능성이 있으므로 역취성 파면을 저하시킬 수 있는 지를 조사하기 위하여 사용하였다.

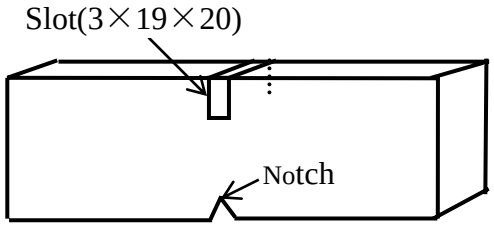

Fig.5 Schematic diagram showing the back slotted and shimmed DWTT specimen.

Table 4 와 Fig.6 에 21mm 두께의 0.07C-1.53Mn-0.25Mo-Nb-V-Ti 계 강판을 -15℃ 에서 DWTT 시험하여 얻어진 파면율과 파면 형상을 수록하였다. Table4 와 Fig.6 에서 보듯이 햄머 충격부분에서 형성된 역취성 파면에 기인한 취성 파면율은 9.5% 정도로 나타났다. 한편 back gouge 시편을 사용한 경우에는 햄머 타격 부분에서의 역취

성 파면이 3.3% 이하로 현저히 감소하였다. 이로부터 DWTT 시험 목적에 무관하게 나타나는 가공경화에 의한 역취성 파면은 back gouge 시험편을 사용함에 어느 정도 개선할 수 있음을 잘 알 수 있었다.

Table 4 Brittle fracture fraction in the notch side and hammer impact side for 0.07C-1.53Mn-0.25Mo-Nb-V-Ti steel which was tested at -15°C with various types of DWTT specimens.

Notch type	Standard		Back slotted and shimmed	
	Press V	Chevron	Press V	Chevron
Brittlefracture at the notch side (%)	0	1.6	0	2.9
Brittle fracture at the hammer impact side(%)	9.5	9.4	3.3	0

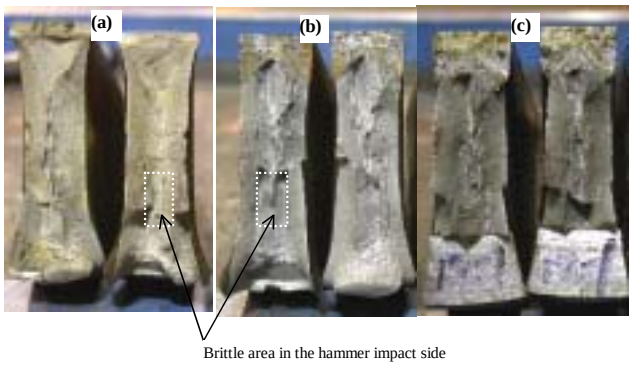

Fig.6 DWTT fracographs for 0.07C-1.53Mn-0.25Mo-Nb-V-Ti steels which were tested at –15°C with standard press notched (a) and Chevron notched (b) and back slotted and shimmed (c) specimens.

2-6. 침상페라이트계 X70강의 Seam 용접부 물성

침상페라이트계 강의 용접열영향부 인성은 등축페라이트계 강 대비 월등히 우수한 것으로 알려져 있다. Fig.7에 중국 서기동수 프로젝트에 공급한 침상페라이트계 X70강의 용접입열량 4.5kJ/cm에서의 용접열영향부 인성을 평가한 결과를 나타내었다. 용접부의 인성은 모재부에 비해 현저히 저하했으나, -20°C에서 130J 이상으로 매우 높게 나타났다. 일반적으로 등축페라이트계 강의 경우에는 같은 온도에서 100J 이하임을 고려할 때, 침상페라이트계 강의 인성은 매우 우수함을 잘 알 수 있다. 이는 Fig. 8에서 보듯이 용접열영향부의 미세조직도 인성이 우수한 침상페라이트로 구성됨에 기인한 것으로 사려된다.

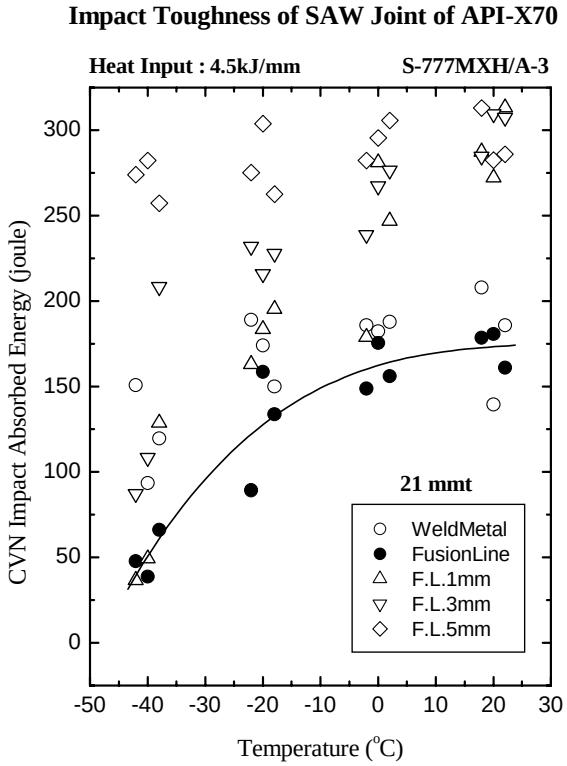

Fig. 7 Charpy v-notch impact test results of SAW joint for acicular ferrite API-X70 grade steel.

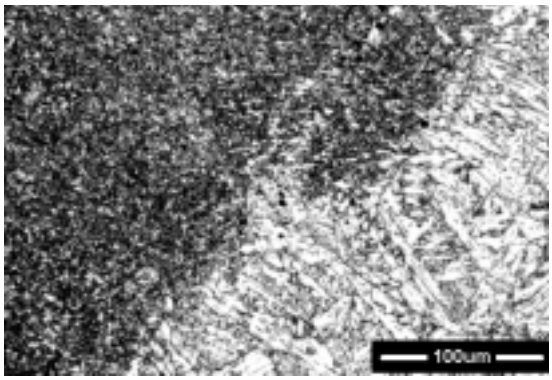

Fig.8 Microstructure at fusion line in SAW HAZ of acicular ferrite API-X70 steel.

3. 침상 페라이트계 API-X80 강

최근 북미를 중심으로 경제적인 파이프라인 건설을 위한 API-X80 강 적용 프로젝트에 대응하여, POSCO에서는 침상페라이트 조직을 갖는 15㎜ 두께의 API-X80강을 개발하였다.

Table 5와 6에 POSCO에서 개발한 API-X80강의 개략적인 화학성분과 제조조건을 나타내었다.

Table 5. Chemical compositions of API-X80 steel for spiral pipe.(wt%)

C	Mn	Si	Nb+Ti	Mo + Ni
0.067	1.89	0.23	≤ 0.090	≤ 0.75

Table 6. Typical process conditions of API-X80 steel for spiral pipe.

Reheatig Temp.	Finish Delivery Temp.	Coilng Temp.
≥ 1150℃	≤ 820℃	≤ 620℃

Table 5에서 알 수 있듯이, acicular ferrite의 강도 상승을 위해 API-X70 강 대비 Mn 함량을 상향하였으며, 인성 향상을 위해 Ni 을 첨가하였다. 기지조직이 전부 침상페라이트가 되도록 저온 슬라브 가열 및 오스테나이트 단상역 압연에 의해 제조하였다.

Table 7. Mechanical properties of API-X80 steel for spiral pipe.

YP (MPa)	TS (MPa)	EL (%)	YR (%)	Charpy Energy (J,-60℃)	DW TT (℃, 85%)
572	755	30	76	249	< -20

제조된 강재의 기계적 성질을 Table 7 에 나타내었다. 개발 강재의 항복강도은 572Mpa 수준으로 규격에서 요구하는 552Mpa 를 크게 상회하고 있으며, 취성파괴 정지 특성을 나타내는 DWTT 연성파면율 보증온도도 -20°C 이하로 저온인성이 매우 우수하였다.

4. 결론

1) 고온역 제어압연 및 강냉 냉각에 의해 제조하는 침상페라이트계 강의 강도는 저온변태 조직에 의한 입도 미세화에 의해 얻어지므로, 전통적인 등축페라이트계 강 보다 인성 및 성형성이 우수하다.

2) 침상페라이트계 X70강에서는 조관시 가공경화에 의해 판재 대비 강도가 상승하였다.

3) 침상페라이트계 API-X70강의 용접부 인성은 -20°C에서 130J 이상으로 매우 우수하였는데, 그것은 용접열영향부 조직이 인성이 우수한 침상페라이트로 구성됨에 기인함을 알 수 있었다.

4) 고인성의 acicular ferrite 계 X70 강에서는 통상의 강재 대비 햄머 타격 부위에서의 가공경화에 의한 역취성 파면이 크게 나타났다. 이는 강재의 취성파괴 정지 특성 평가와 관련이 없는 것으로 취성파면으로 계산하지 않는 것이 옳으며, back gouge 시험편을 사용하면 역취성 파면이 크게 저하 가능함을 알 수 있었다.

5) Mn 함량 증대 및 Ni, Mo 첨가에 의해 저온인성이 우수한 API-X80 강을 개발하였다.

5. 참고 문헌

1) H. Zhiqian: Proc. of the 2000 International Pipeline Conference, Vol.1, ASME, (2000), 627.

2) K. Asakura, Oil and Gas Journal, May 15, (2000), 74.

3) H. Gondoh etal: Nippon Steel Technical Report, No.14, December (1979), 55.

4) T. Osuka et al: Nippon Kokan Technical Report Overseas, No.9, (1980), 21.

5) I. Tamura, H. Sekine, T. Tanaka and C. Ouchi: Thermomechanical Processing of High-strength Low-alloy Steels, Butterworth & Co., (1988), 186.

6) S. Endo etal: Proc. of 9th International Conference of Offshore Mechanics and Arctic Engineering, ASME, (1990), 1.

7) N. Iwasaki, T. Yamaguchi and T. Taira: MWSP XIII Conf. Proc., Iron and Steel Society/AIME, (1975), 294.

8) N. Pussegoda, L. Malik, A. Dinovitzer, B.A. Graville and A.B. Rothwell: Proc. of the 2000 International Pipeline Conference, Vol.1, ASME, (2000), 239.