

배관 강재 API 5L X65의 중심편석

†최병학·이상우*·김우식**·김철만**

강릉원주대학교 신소재금속공학과 교수, *강릉원주대학교 석사과정, **한국가스공사
(2020년 6월 23일 접수, 2020년 10월 7일 수정, 2020년 10월 8일 채택)

Centerline Segregation of Pipe Plate made of API 5L X65 Steel

†Byung Hak Choe · Sang Woo Lee · Woo Sik Kim* · Cheol Man Kim*

Dept. of Metal and Materials Engineering, Gangneung-wonju National University,
Gangneung, 25457, Korea

*KOGAS, Ansan 15328, Korea

(Received June 23, 2020; Revised October 7, 2020; Accepted October 8, 2020)

요약

본 논문에서는 파이프라인에서 사용되는 API 5L 철강의 중심선 편석에 대해 다루고자 한다. Mn/S와 Nb 그리고 C는 파이프 두께 방향으로의 중심선에서 편석되는 요소로 알려져 있다. Mn은 일반적으로 긴 점성상을 이루는 S를 동반한다. 중심선의 미세조직은 MnS와 산소를 포함한 Nb/Ti로 구성되어 있는데 이 중심선 지역의 편석효과를 OM, SEM/EDS 및 마이크로비커스 경도기로 분석하였다. Mn, Nb 및 C는 오스테나이트가 페라이트 또는 마르텐사이트로 변태하는 것을 억제시키는 원소이다. 이러한 원소들은 마르텐사이트의 한 종류인 베이나이트 미세조직을 만들 수 있는데 이는 용융 및 열처리에서 얻어지는 중심선과 매트릭스 간의 원소 편석과는 다르다.

Abstract - This paper is considered about centerline segregation of API 5L steel used in pipeline. Mn/S, Nb and C were known as segregated elements in the centerline of pipe thickness. The Mn usually was accompanied by S consisting of long viscous shape. Microstructure of the centerline was composed of MnS and Nb/Ti inclusions including oxide. The segregation effect in centerline region was analyzed by OM, SEM/EDS and micro Vickers hardness. The Mn, Nb and C are retarded elements in transformation from austenite to ferrite or martensite. These elements could derive a bainitic microstructure as a kind of martensite, which is different from difference and element segregation between in matrix and centerline derived from steel melting and heat treatment.

Key words : centerline segregation, pipe plate, Nb-Mn-C element, bainitic structure

I. 서론

석유 및 화학 플랜트에 사용되는 배관으로 API 5L에 근거한 ASTM A516 규격 재질이 많이 사용된다. ASTM A516 재질에는 X45, X65 및 X70과 같이 등급이 다양한데, 이것은 45ksi(310MPa), 65ksi(448MPa) 및 70ksi(483MPa) 등의 항복강도에 따라 구분되는 것이다. 각 등급에 해당하는 항복강도는 재질의 미세조

직 구성에 의존하며, X65(448MPa) 등급 이하의 재질인 경우 일반 펄라이트(페라이트 + 펄라이트) 미세조직 구성인데 반하여 X70(483MPa) 이상의 등급 재질은 베이나이트(파인 펄라이트 포함) 미세조직으로 구성되는 특징이 있다 [1,2].

중심편석은 배관 원소재 제강과 압연부터 개입되는 지시(Indication) 형태이다. 제강 또는 잉고트 주조 과정 중에 불순물은 최종 응고지역인 중심선에 집적하며 편석을 유발한다. 주된 편석은 S 집적에 의한 (Mn, Fe)S 상이며, 이외에 Al, Si 등 성분의 산화 개재물 형성 가능성이 크다 [3]. 또한 배관 원소재의 연속

†Corresponding author:cbh@gwnu.ac.kr
Copyright © 2020 by The Korean Institute of Gas

주조 또는 잉고트 제조 과정 중에서 응고에 따른 Nb/Ti 정출상이 형성된다 [4-6]. 이것들은 주로 편석이 일어나는 덴드라이트 계면인 인터덴드라이트에 만들어지는데, 응고 1차 석출상이므로 이후의 용체화 처리 과정 중에 고용되는 효과가 제한적이다. 만약 이것이 (Nb, Ti)C 와 같은 탄화물이라면 1200°C 이상의 고온에서 고용화가 가능하지만, (Nb, Ti) 성분의 덩어리 1차 석출상이라면 고용화가 어렵다 [4]. 또한 Mn 및 Nb는 C와 더불어 “오스테나이트→페라이트” 상변태 억제 원소로 분류된다 [7-12]. 즉 이 원소들은 일종의 마르텐사이트 형성원소로써 이것이 집적한 중심부는 마르텐사이트 유사 배이나이트 조직을 이룰 수 있음을 의미한다.

본 연구에서는 ASTM A516 Gr.65 (X65) 배관 재질에 대하여 이와 같은 중심편석을 분석하였다. 광학현미경을 통하여 배관 재질의 중심선에 형성된 편석상의 형상 및 분포를 관찰하였으며, 주사전자현미경으로 편석된 성분을 분석하였다. 이러한 분석결과로부터 배관에 구성된 중심편석을 확인할 수 있고, 이것이

배관의 기계적 특성에 영향을 미치게 되는 경우를 대비하여 편석상 제어 공정에 활용될 수 있을 것이다.

II. 실험방법

석유 및 화학 플랜트에 사용된 배관을 이용하여 중심편석을 분석하였다. 배관 재질은 ASTM A516 Gr.65 (X65) 이며, 이것의 대표적인 화학성분은 표 1 과 같다.

Table 1. Chemical composition of ASTM A516 Gr.65 (X65)

	C max	Mn max	P max	S max
Seamless Pipe	0.28	1.40	0.030	0.030
Welded Pipe	0.26	1.45	0.030	0.030
Nb + V + Ti ≤ 0.15%				

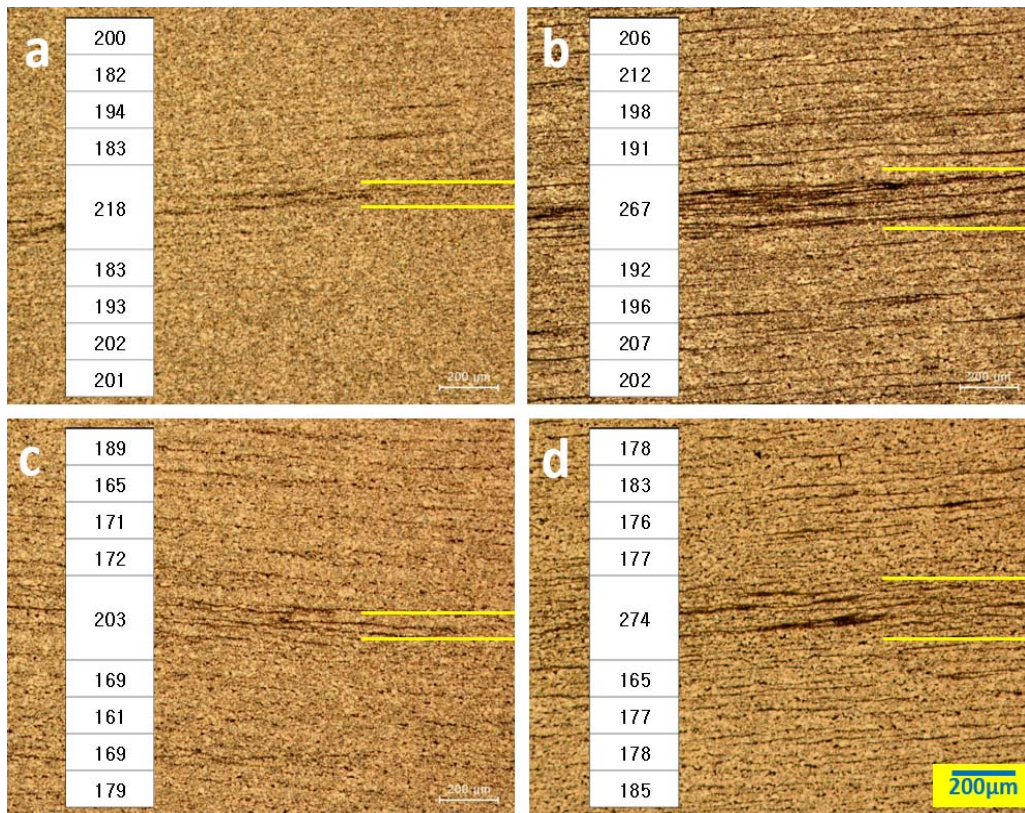


Fig. 1. Microstructures and hardness values for pipes of (a)A, (b)B, (c)C, (d)D

배관 재질 X65의 중심편석을 포함한 미세조직을 배관 제조 년도가 다른 4 종류의 샘플(A, B, C, D)을 가지고 분석하였다. 각 배관의 두께는 15~17.5mm 이며 시편 단면에 대하여 광학현미경으로 중심편석 양상과 미세조직을 관찰하였다. 편석상의 미세조직은 광학 (OLYMPUS BX51M) 및 주사전자현미경 (JEOL JP/JSM-7500F)을 이용하여 관찰하였고 성분은 EDS (AMETEK EDAX ELITE)로 분석하였다. 또한 배관 단면부 외부로부터 중심부 및 내부에 대한 비커스 경도를 (Future Tech JP-FM-7) 으로 측정하여 중심편석의 미세조직 관련성을 검토하였다.

III. 실험결과

3.1. 광학현미경 미세조직

중심편석 정도가 다른 4 종류 (A, B, C, D) 샘플의 배관에 대한 중심편석 양상은 그림 1과 같다. 배관 미세조직은 그림과 같이 내부/외부 및 중심부가 서로 다르게 관찰되는데, 중심부를 제외한 배관 모재는 일반 탄소강의 펄라이트 (페라이트 + 펄라이트) 조직으로

구성된다. 이에 비해 배관 중심부에는 100 μm ~ 200 μm 간격의 중심편석이 띠 형태로 구성되어 있다. 그리고 배관의 “내부→중심부→외부”에 대한 경도값은 그림1에 명시된 바와 같이 중심편석 부위가 큰 것을 알 수 있다. 즉 배관 모재 경도값은 평균적으로 170~180HV 범위인 것에 비하여, 중심편석 부위의 경도값은 편석부 간격에 따라 간격이 100 μm 정도로 작은 경우 203~218HV이고 간격이 200 μm 정도로 비교적 큰 경우 267~274HV 정도로 증가한 것으로 측정된다.

이와 같은 제조 년도가 다른 4 종류 (A, B, C, D) 배관의 미세조직의 구성을 확인하기 위하여 확대 관찰하였다 (그림 2). 그림에서 모든 시편들의 기본 모재 조직은 일반 탄소강에 구성된 펄라이트 (페라이트 + 펄라이트) 조직인 것으로 확인된다. 그런데 배관 중심부에는 띠 형태의 편석 부위가 관찰되는데, 여기에는 모재보다 빠른 냉각 조직으로써 미세 펄라이트 또는 베이나이트로 추정되는 조직이 관찰된다.

그림 3에서 초정 페라이트는 평균 10 μm 크기의 흰색 결정립으로 관찰되며 펄라이트는 흑색의 덩어리로 관찰된다. 이에 비하여 베이나이트는 갈색의 띠

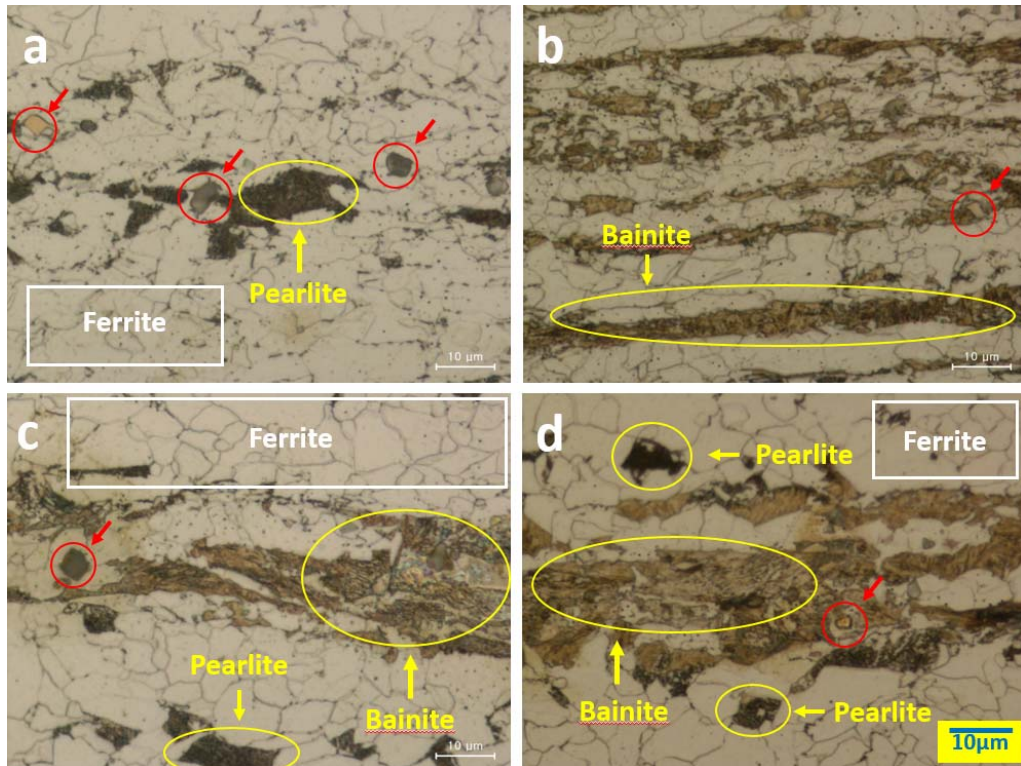


Fig. 2. Phases of Microstructures for pipes of (a)A, (b)B, (c)C and (d)D

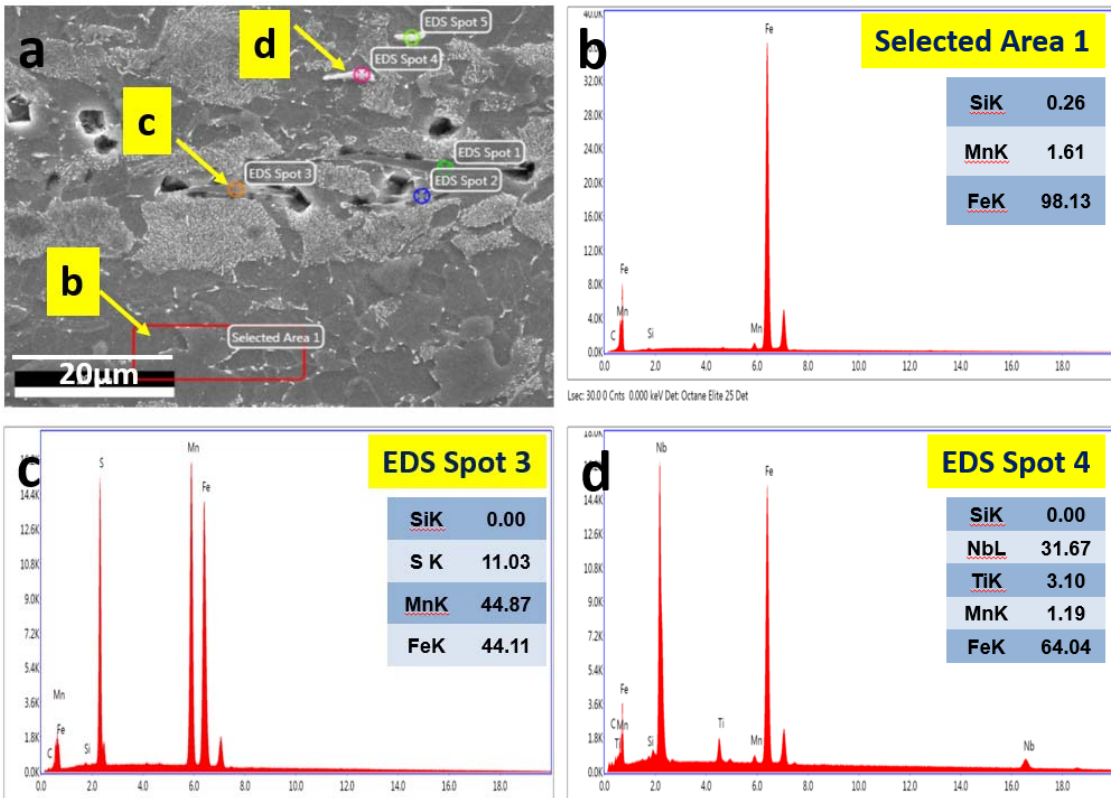


Fig. 3. SEM/EDS analysis on segregation phases of pipe A: (a) morphology, (b) selected area 1 of matrix, (c) spot 3 of MnS, (d) spot of Nb/Ti

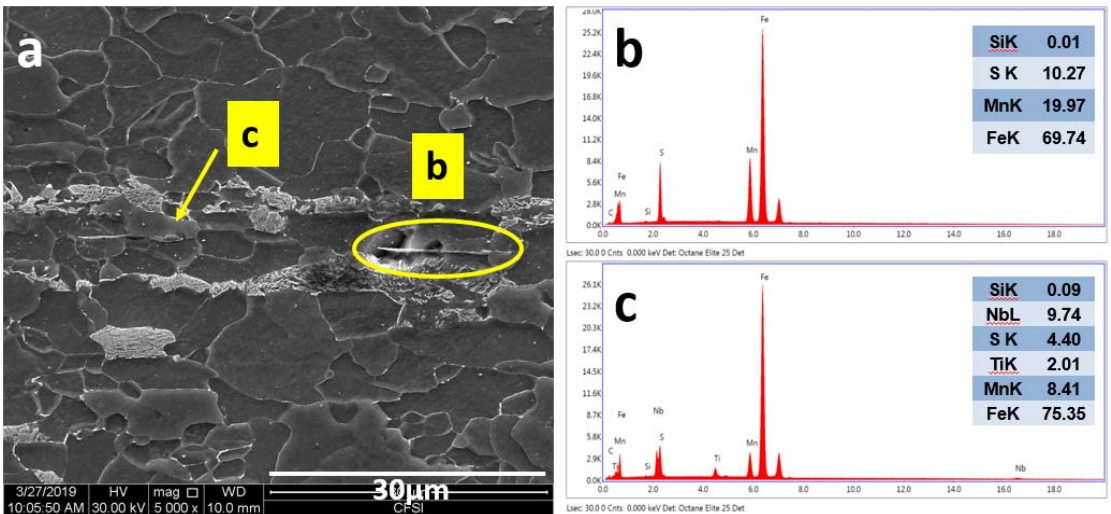


Fig. 4. SEM/EDS analysis on segregation phases of pipe B: (a) MnS, (b) Nb/Ti

형태로 구성된다. 또한 중심편석 일부 지역인 그림 2의 빨간색 원과 화살표 부분에 각형의 편석상 형상이 관찰된다.

앞의 그림 1에서 중심부 편석지역의 경도값이 큰 것은 이와 같이 중심부에 형성된 냉각 조직에 기인한다. 즉 모재의 서냉 조직인 펄라이트에 비하여 베이나이트와 같은 급냉조직 형성에 기인한 경화 효과인 것으로 판단된다.

3.2. SEM 및 EDS 분석

제조 년도가 다른 4 종류 (A, B, C, D)의 중심부 편석지역에서 관찰되는 편석상에 대해서 SEM/EDS로 성분 분석을 수행하였다. 그림 3, 4, 5에서와 같이 각 배관 단면 중심에 형성된 편석상은 MnS와 Nb/Ti 성분 개재물의 두 종류인 것으로 분석된다. 여기에서 Nb/Ti 성분 개재물은 (Nb,Ti) 탄질화물로 추정되는데, SEM/EDS 분석에서 C/N 피크가 검출되지 않은 것은 light element C/N의 K α 피크의 검출이 용이

하지 않은 것에 기인한다 [13].

그림 3의 배관 A에서 관찰되는 편석상은 MnS와 Nb/Ti 성분 개재물인 것으로 확인된다. 이 중에서 MnS는 그림과 같이 길게 늘어진 점성 형태로 관찰된다. 이것은 비금속개재물 A 타입으로 분류되는 점성상의 황화물계에 해당한다. 특히 MnS 형성 부위는 그림과 같이 기공을 동반하는 특징을 갖는다. 이에 비해 Nb/Ti는 각형 또는 다원형으로써 탄소를 고용하지 않은 순수 Nb 또는 Ti 성분으로만 구성된다.

그림 4의 배관 B에서 관찰되는 편석상도 MnS와 Nb/Ti 성분 개재물인 것으로 확인된다. 배관 A와 마찬가지로 MnS는 기공을 동반하는 점성 형태이며 Nb 외에 S가 함유된 것으로 분석되는 것은 편석상 지역에 MnS가 중첩된 것에 기인한 것으로 보여진다. 이것은 S가 Mn을 동반하여 MnS 상으로 구성되기 때문이다.

그림 5는 배관 C와 D 중심부에 형성된 편석상을 보여주는 것이다. 그림 5 (a), (b)에서 S의 편석상 MnS는 점성 형태이며 그림과 같이 길게 연신된 기공을 동반

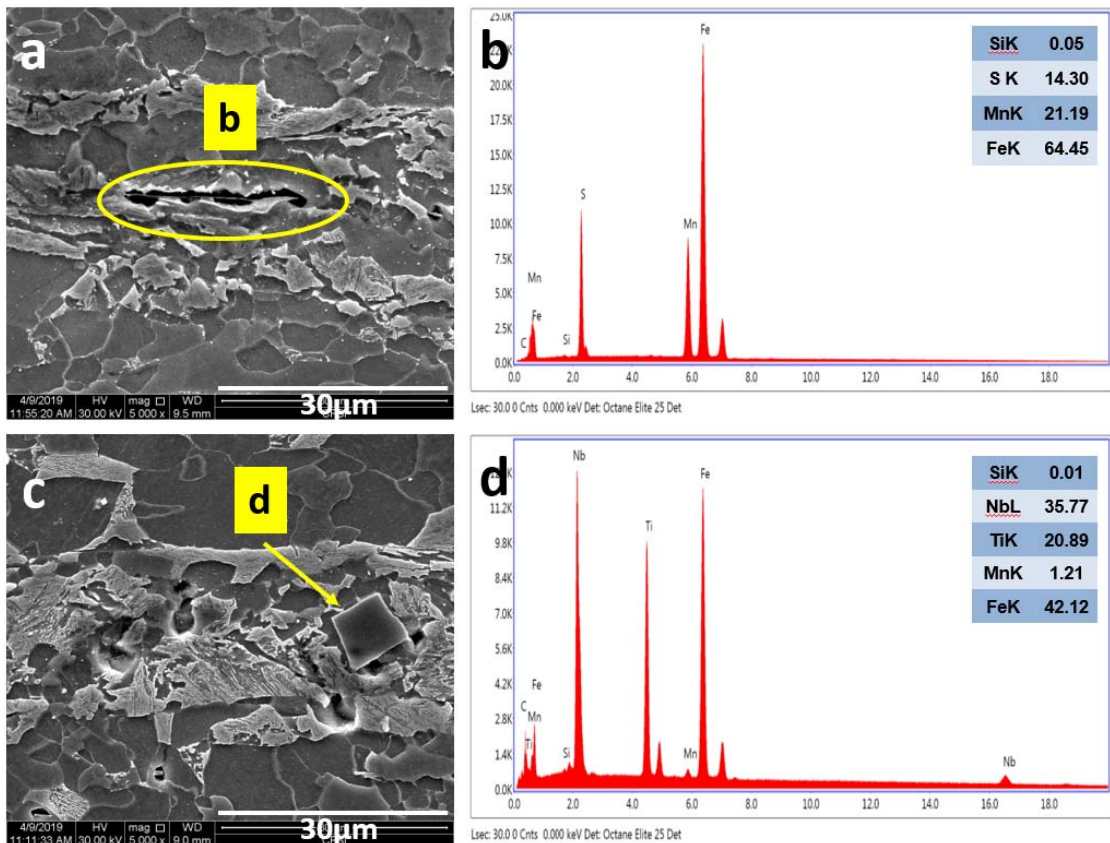


Fig. 5. SEM/EDS analysis on segregation phases of (a), (b) pipe C and (c), (d) pipe D

한다. 그리고 그림 5 (c), (d)에서 입방 각형의 편석상은 Nb와 Ti 성분인 것으로 분석된다.

IV. 고찰

앞의 그림 1에서 중심편석이 형성된 배관 중심 부위의 경도가 중심부 이외의 지역보다 높은 것은 중심부에 형성된 급냉의 베이나이트 조직 구성에 기인한다. 그런데 이와 같이 배관 중심에 경화 조직이 구성되는 것은 마르텐사이트 형성 원소인 Mn 또는 Nb 편석으로 인하여 질량 효과가 감소하고 이 지역에 빠른 냉각 조건으로 기인되는 베이나이트 (또는 미세 펄라이트) 구성과 이로 인한 경도 증가가 유발되는 것이다. 그런데 마르텐사이트 형성 원소 중 Nb는 0.15% 미만의 소량 첨가되고, 대부분이 (Nb,Ti)(C,N)의 탄질화물 형성에 소모되므로 이것이 마르텐사이트 형성에 기여하

는 효과가 작을 것으로 보여 진다 [14].

그림 6은 SEM Mapping을 통해 배관 중심부의 Mn 및 Nb/Ti 성분들의 편석 분포를 나타내는 것이다. 그림에서 Mn은 다른 문헌에서 보고된 바와 같이 주로 S와 결합하여 MnS로 존재한다 [3]. 그리고 Nb는 Ti와 동일한 지역에 편석 되는 것을 알 수 있다.

그림 6(a)에서 점성으로 길게 연신된 편석상은 그림 6(c)의 mapping으로부터 여기에 Mn/S (76%Mn-24%S)가 편석 되어 있는 것을 확인하여 준다. 또한 그림 6(a)에서 Nb/Ti 성분의 각형 또는 구형 형태 편석상은 그림 6(d)의 mapping으로부터 여기에는 Nb/Ti (28%Nb/72%Ti)가 편석된 것을 알 수 있다. 그리고 그림 6(a)의 사진과 Mn/S 성분을 겹친 상태에서 mapping 한 결과로부터 보다 상세한 성분 분포를 확인할 수 있었는데, 그림 6(b)와 같이 Mn/S 편석 지역은 점성의 긴 편석상 외에 각형/구

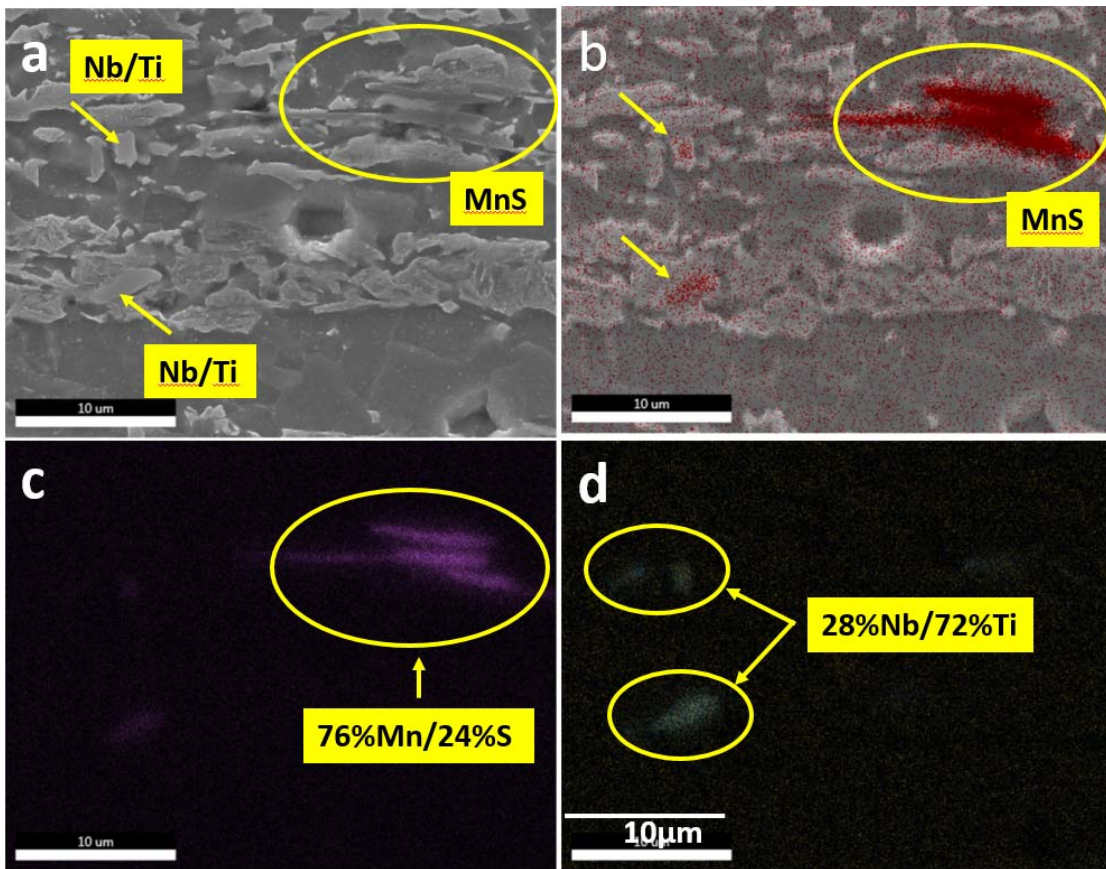


Fig. 6. SEM Mapping about Mn/S and Nb/Ti of pipe B: (a) Morphology, (b) mapping of MnS on the morphology, (c) mapping of Mn/S and (d) mapping of Nb/Ti

형의 편석상에도 집적되어 있는 것이 확인된다. 즉 각형 또는 구형의 편석상은 주로 Nb/Ti 성분이 주를 이루지만 이곳에는 일부 Mn/S 성분도 포함되어 있는 것을 알 수 있다. 이에 대해서는 더 자세한 구체적인 분석이 필요하다.

강재에서 Nb의 미세 첨가 (micro-alloying)는 입자 미세화 효과가 있는 것으로 알려져 있다 [4-6]. 이는 미량 첨가된 Nb이 “오스테나이트 → 페라이트” 상변태를 억제시켜 베이나이트를 형성하는 효과를 발휘하는 것에 기인한다. 이것은 앞에서 언급된 빠른 냉각속도 유발과 동일한 효과로써 질량 효과를 감소시켜 중심부에 마르텐사이트 유사의 베이나이트를 형성시키는 것이다. 그리고 이러한 베이나이트 미세조직 형태를 입자 미세화로 규정하고 있다 [7,8,9]. 그러나 본 연구의 SEM/EDS 분석에서 light element로써 C/N 성분 측정이 어렵지만, Nb는 탄질화물 형태의 5 μm 정도 크기의 덩어리 형태로 존재하는 것으로 추정된다 [13]. 이렇게 분포하는 Nb 편석상이 입자 미세화라는 본연의 임무를 수행할지에 대해서는 확인이 어렵다. 제강 공정에서 Nb 성분 제어에 대한 고찰이 필요하며 이를 통하여 배관에 적합한 제강 및 열처리 공정이 필요하다.

이외에 탄소도 Mn 및 Nb와 마찬가지로 질량 효과 감소 원소로 알려져 있다 [10-12]. 이것은 탄소가 마르텐사이트 형성 원소로 작용하여 “오스테나이트 → 페라이트” 상변태를 억제시켜 베이나이트를 형성하는 효과를 발휘하는 것에 기인한다. 이것은 빠른 냉각 속도 유발과 동일한 효과로써 중심부에 마르텐사이트 유사의 베이나이트를 촉진시킨다는 논리로 해석된다.

그림 6을 포함한 앞의 모든 그림에서 중심 부분에 급냉 조직이 확인된다. 이것은 중심 부위에 편석 되는 마르텐사이트 형성 원소인 Mn, Nb 및 C의 영향으로 판단된다. 균일한 미세조직 확보를 위해서는 제강 및 열처리 공정을 제어하여야 한다. 배관 사용 건전성 확보를 위하여 편석 제어 재질에 대한 기계적 성질 측정 및 정량화 연구가 필요하다 [15].

V. 결론

(1) 배관에 사용되는 ASTM A516 Gr.65 (X65) 강의 모재는 일반 서냉 조직인 펄라이트로 구성되어 있는 반면에 중심 부위에는 100~200 μm 정도 폭의 편석이 형성되어 있으며 이 부분에 급냉 조직인 베이나이트가 구성된 것을 알 수 있다.

(2) 배관 모재의 펄라이트 조직 경도는 170HV~180HV 범위인 것에 비하여, 중심편석 부위의 경도

값은 편석부 간격에 따라 간격이 100 μm 정도로 작은 경우 203HV~218HV이고 간격이 200 μm 정도로 비교적 큰 경우 267HV~274HV 정도로 측정된다.

(3) 배관 중심부에 형성된 편석 지역에는 긴 점성 형태 및 각형/구형 형태의 두 종류 편석상이 관찰된다.

(4) 여기에서 긴 점성형태의 편석상에는 다량의 Mn/S 성분이 측정되고, 각형/구형 형태의 편석상에는 다량의 Nb/Ti 성분이 측정된다.

(5) 배관 중심 부분이 고경도의 급냉 조직으로써 베이나이트 조직으로 구성된 것은 배관 제강 시 중심 부위에 마르텐사이트 형성 원소인 Mn과 더불어 Nb, C 성분이 편석 되었기 때문인 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 한국가스공사 2018년 대학협력연구과제 (과제번호: RD2018-0271) 지원으로 수행되었습니다.

REFERENCES

- [1] Godefroid, L.B., Sena, B.M., Da Trindade Filho, V.B., “Evaluation of Microstructure and Mechanical Properties of Seamless Steel Pipes API 5L Type Obtained by Different Processes of Heat Treatment”, *Mat. Res.*, 20(2), (2017)
- [2] Godefroid, L.B., Candido, L.C., Toffolo, R.V.B., Barbosa, L.H.S., “Microstructure and mechanical properties of two Api steels for iron ore pipelines”, *Mat. Res.*, 17, 114-120, (2014)
- [3] Liu, Y., Zhang, L., Duan, H., Zhang, Y., Luo, Y., Conejo, A.N., “Thermodynamic Analysis, and Precipitation Mechanism of MnS-TiN Complex Inclusions in Low-Sulfur Steels”, *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47, 3015-3025, (2016)
- [4] Müschenborn, W., Meyer, L., *Thyssen Technische Berichte*, 1, 22, (1974)
- [5] Pichler, A., Hebesberger, Th., Traint, S., Tragl, E., Kurz, T., Kremaszky, C., Tsipouridis, P., Werner, E., “The role of Niobium in Advanced Sheet Steels for Automotive Application”, *Proc. Of the Int. Symp. On Nb Microalloyed Sheet Steel for Automotive Appl.* TMS, 245, (2006)
- [6] Hulka, K., Klinkenberg, C., Mohrbacher, H., *Recent advances of Niobium Containing Materials in Europe: Proceedings of the Symposium Helt*

- at the Occasion of the 30 Years Anniversary of Niobium Products Company GmbH in Düsseldorf*, ed. Hulka, K., Stahlesen, (2005)
- [7] Collins, L.E., Barager, D.L. *Interstitial Free Steel Sheet: Processing, Fabrication and Properties*, Iron & Steel Society, (1991)
- [8] Zackay, V.F., Parker, E.R., Fahr, D., Busch, R., *ASM Transactions Quarterly*, American Society for metals, (1969)
- [9] Hashimoto, S., *Materials Science Forum Vols. 539-543*, 4411-4416, (2007)
- [10] Ghosh, A., "Segregation in cast products", *Sadhana*, 26, 5-24, (2001)
- [11] El-Bealy, M.O., "Macro-segregation Quality Criteria and Mechanical Soft Reduction for Central Quality Problems in Continuous Casting of Steel", *Materials Sciences and Applications*, 5, 724-744, (2014)
- [12] El-Bealy, M.O., "Spray cooling pattern and microthermomechanical rigidity criterion for improving inner quality in continuously cast steel slabs", *Ironmaking & Steel making*, 40, 167-188, (2013)
- [13] Constantino Capurro, Carlos Cicutti, "Analysis of titanium nitrides precipitated during medium carbon steels solidification", *Journal of Materials Research and Technology*, 7, 342-349 (2018)
- [14] Hardy Mohrbacher, "The Effects of Niobium Microalloying in Second Generation Advanced High Strength Steel", Taiwan 2008 International Steel Technologies Symposium (2008)
- [15] Woo Sik Kim, Jae Il Jang, "The Effect of Hydrogen on Mechanical Properties of Gas Pipeline Material: I Tensile property", *KIGAS*, 15(3), 67-73, (2011)