

大韓熔接學會誌
 第11卷第1號 1993年3月
 Journal of the Korean
 Welding Society
 Vol. 11. No. 1, Mar., 1993

오스테나이트계 스테인레스 강관에서의 손상해석에 관한 연구#

이상율** · 이종오* · 이주석* · 조경식* · 조종춘* · 이보영*

Failure Analysis of Austenitic Stainless Steel Pipe

S. Y. Lee**, J. O. Lee*, J. S. Lee*, K. S. Cho*, C. C. Cho*, B. Y. Lee*

Key Words : AISI 304 Stainless Steel (304 내식강), Elbow Tube (엘보우관), Welding Defect (용접결함),
 Low Temperature Embrittlement (저온취성)

Abstract

A cracking failure of a austenitic stainless steel elbow in a naphtha cracking line in a petrochemical plant occurred, resulting in leakage of organic compound flowing inside the elbow. Due to the failure, emergency shutdown of the plant was enforced to repair the troubled part of the line. The repair cost as well as production loss during the unscheduled plant shutdown had cost the company a great amount of financial loss. In this studies, a failure analysis of the cracked elbow was performed using NDT, chemical analysis, microstructural analysis including optical microscopy as well as scanning electron microscopy with EPMA, mechanical testings such as tensile testing, hardness testing and Charpy impact test fractography. The results indicated that several problems such as a welding defect and presence of a detrimental phase which was found to be related to improper postforming heat treatment process was identified and the failure was concluded to be due to a low temperature embrittlement of the defect-containing elbows.

* 정회원, 한국기계연구원

** 정회원, 한국항공대학교 항공재료공학과

1992. 10. 30 추계학술발표 대회

1. 서 론

석유화학플랜트의 구성은 대단히 복잡하고 여러가지의 많은 장치들이 상호연관되어 있으며 이러한 장치들의 운전조건중에 작업온도의 분포를 보면 그 변화가 대단히 큰 경우들이 많다. 이들의 장치중에는 약 1300°C 정도의 높은 온도에서 사용되며 Heater, Boiler 등과 같은 설비들이 있는가 하면, -100°C 정도의 저온의 운전조건을 갖는 여러 종류의 설비가 있다. 따라서 이러한 여러 운전조건에서도 안전하게 사용할 수 있는 적절한 재료의 선정은 설계상의 중요한 한 부분이라 할 수 있다.

현재 저온에서 사용되는 장치의 설비재료는 여러 종류가 있으나 그 중에서도 오스테나이트계의 내식강(austenitic stainless steel)은 강도, 연신율 및 내부식성과 용접성이 우수하고, 저온에서도 우수한 인성(toughness)을 가지고 있기 때문에 특히 많이 사용되고 있다. 그 중에서도 18Cr-8Ni 계열 AISI 304종의 내식강은 다른 내식강에 비해서 비교적 우수한 경제성을 갖고 있기 때문에 일반적으로 가장 많이 사용되고 있다.

본 논문에서는 국내의 한 석유화학공장에서 설치 가동 20여일 만에 AISI 304 내식강으로 된 강관에서 균열이 발생하여, 그 균열 발생원인을 분석하고 동일 결함의 재발에 의한 피해를 극소화시킴으로서 안전하고 효율적인 공장운전관리에 기여하고자 한다.

2. 손상배경 및 운전조건

국내의 한 석유화학공장에서 공장가동 약 20여일 만에 나프타 분해공정중의 6인치 엘보우관에서 균열이 발생하여 내부의 유기화합물이 유출되는 사고가 발생하였고, 그로부터 약 20일 사이에 유사한 균열이 동종의 부품의 두 곳에서 더 발생하였다. 균열이 발생한 부위에서의 운전 조건은 운전온도가 약 -85°C에서 -87°C 사이이고 내압은 약 38kg/cm², 그리고 아세틸렌, 에칠렌 등의 유기화합물이 39ton/hr 속도로 내부에서 흐르고 있다.

3. 실험방법과 결과

3.1 시편

균열이 발생한 문제의 엘보우관은 6"SCH40S의 ASTM A403-WP304로서 플라즈마 용접강관을 냉간 가공하여 엘보우로 제조한 오스테나이트계 스테인레스강관이다. 용접조건은 용가재를 사용하지 않고, 예열처리 없이 0.3m/min.의 속도로 26 Volts(D. C), 250 Amp.에서 단층 단일방식으로 용접후, 1010-1100°C 사이에서 10±5분간 유지한 후 급냉하는 후열처리를 하였다. 손상원인 분석에 사용된 시편은 90도 엘보우(외경 168.3mm, 두께 7.1mm)에서 채취하여 다음과 같이 분류하였다. 열처리를 수행한 시편은 시편명 뒤에 HT를 덧붙였다. 즉 E6B(L)HT는 E6B(L)을 열처리 한 시편을 의미한다.

시 편	내 용
E6B(L)	균열이 발생하여 내용물의 유출이 있었던 엘보우
E6B(U)	E6B(L)과 같은 조건에서 사용하였으나 유출이 발생하지 않은 엘보우
E6B(N)	전혀 사용되지 않은 엘보우

3.2 비파괴시험

엘보우관의 안쪽 용접부에 대해 액체침투탐상시험 및 방사선투과시험(160KV, 4mA, 15min)을 수행하였다. 액체침투탐상시험을 시행한 결과 그림 1에서 보는 바와 같이 E6B(L) 시편의 경우 내부용접선을 따라 전 용접부에서 선형지시가 발견되었으며, 화살표로 나타낸 바와 같이 용접부를 가로 지른 균열이 발견되었다. E6B(U)와 E6B(N) 시편에서도 내부 용접선을 따라 전용접부에서 선형지시가 발견되었으며 용접비드의 횡방향으로 깊이가 깊지 않은 미세균열이 발견되었는데, 이러한 균열은 E6B(N)에서 보다 E6B(L)이나 E6B(U)에서 많이 발견되었다. 따라서 이러한 횡균열은 저온에서 사용함에 따라 증가하는 것을 알 수 있다. 방사선투과시험결과 용접비드 내부에서 기공이나 비금속개재물등과 같은 불연속은 발견되지 않았다.

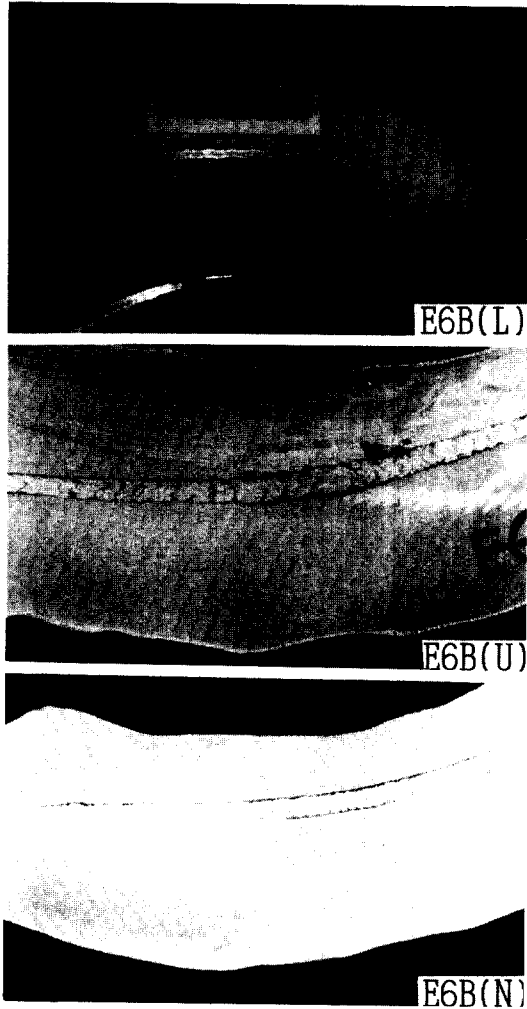


Fig. 1 Results of Liquid Dye-Penetration Testing on E6B(L), E6B(U), and E6B(N)

3.3. 성분 분석

용접부와 모재의 화학성분 분석 결과는 표 1과 같고 용접부와 모재의 성분이 탄소함량에서 약간의 차이만 보일뿐 거의 비슷하며, ASTM/A403-WP304 규격에 일치한다. 특히 기계적성질에 해로운 영향을 미치는 것으로 알려진 인이나 황 성분도 ASTM 규격을 만족하는 것으로 분석 되었다.

질소의 양은 오스테나이트 계열 내식강의 기계적 성질에 비교적 큰 영향을 미치는 것으로 보고된 바 있다. 질소의 양이 증가함에 따라 항복강도가 크게

Table 1. Chemical composition analysis of E6B(L) specimen

(in Wt.%)

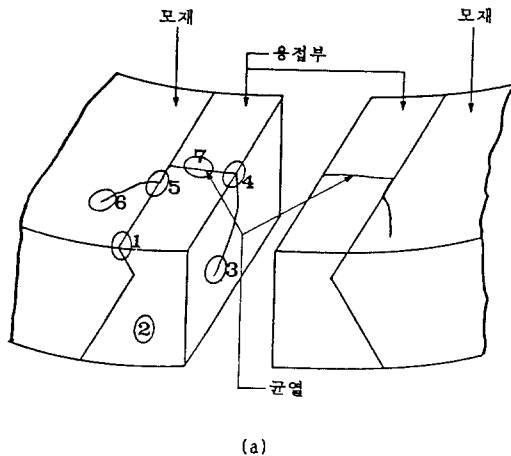
시 편	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
E6B(L)모재	0.051	0.48	0.85	0.012	0.025	18.3	8.07
E6B(L)용접	0.085	0.39	0.86	0.018	0.025	18.2	8.13
ASTM규격	0.08	1.0	2.0	0.045	0.03	18-20	8-11

증가하기 때문에¹⁾ 일부 합금의 경우 고의적으로 질소를 첨가하기도 하지만 질소를 첨가할 경우 저온에서 사용함에 따라 인성의 감소를 수반한다.²⁾ 이 에 본 연구에서도 E6B(L) 시편에 함유된 질소량을 분석하였으며, 그 결과 용접부와 모재에서 질소함량은 각각 63ppm 그리고 82ppm으로 나타났다. 이 정도의 함유량은 재료의 기계적 성질에 큰 영향을 미치지 않을 것으로 판단되었다.

3.4 미세조직 관찰

용접부 및 모재부위를 채취하여 연마 한 후 희석된 옥살산을 이용하여 전해부식 시킨 다음 광학현미경을 사용하여 미세조직을 관찰하였다.

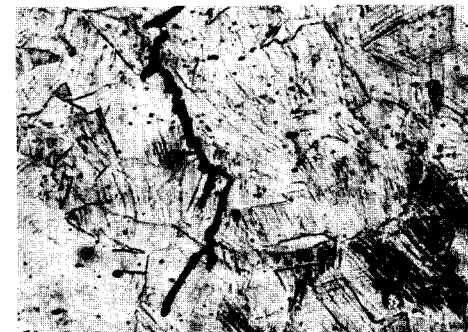
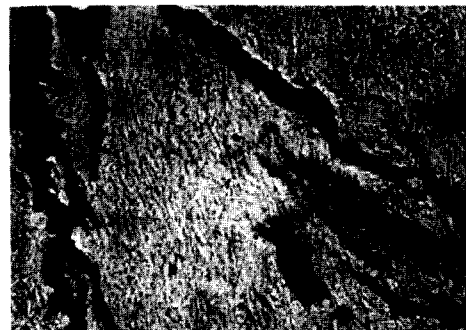
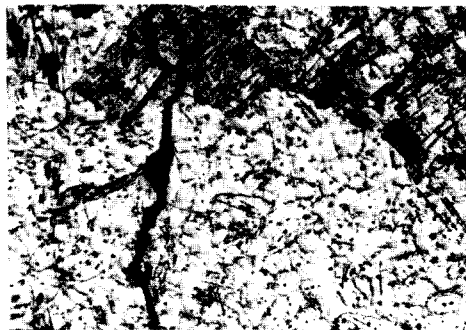
그림 2(a)는 E6B(L) 시편의 개략도이고 그림 2(b)는 그림 2(c)의 설명도 이다. 그림 2(c)1에서는 엘보우의 내부 용접부의 단면을 나타내고 있는데 액체침투탐상시험 결과로 나타났던 용접부와 모재사이의 선형지시 부근의 조직사진이며 이러한 결함은 모재와 용접부 사이의 용합불량(Lack of Fusion) 현상을 나타내는 것으로 판단되고, 그 깊이는 약 0.5mm로 측



1) X100 Cross Sectional View of Lack of Fusion	2) X100 Weld Metal
3) X200 Crack Tip Area in the Weld Metal	4) X50 Cross Sectional View of Weld Metal
5) X50 Top View of L/F and Crack in the Base Metal	6) X200 Crack Tip Area in the Base Metal
7) X500 Crack in the Weld Metal	



(b)



c)

Fig. 2 Microstructures of E6B(L) : a) schematic view of cut-out section, b) description of figures, c) optical microstructures

정되었다. 이러한 용합불량은 엘보우의 내부 용접부의 전 선상에서 발견되었다. 그림 2(c)5는 앞에서 언급한 용합불량 결함을 위에서 내려다 보았을 때의 조직사진이고 그림 2(c)7은 용접부에서의 균열을 보여주고 있으며 그림 2(c)4는 용접선방향에 평행한 단면에서 찍은 사진을 보여주고 있다. 특히 그림 2(c)3은 용접부 균열의 끝부분을 나타내고 있는데 용접부조직이 침상의조직으로 변태되어 있는 것을 보여주고 있으며, 이러한 오스테나이트조직의 변태현상은 그림 2(c)6에서 보여주고 있는 바와 같이 용접열영향부(HAZ)에서도 분명하게 나타나있다.

이러한 침상의 조직을 분석하기 위하여 X-ray 회절 및 투과전자현미경 시험을 수행하였다. X-ray분석시 Cu target을 이용하였으며, 그림 3에서 보는 것과 같이 오스테나이트와 마르텐사이트 격자면을 나타내는 고유의 peak들을 확인함에 따라 이러한 침상조직은 마르텐사이트(Lath Martensite)로 판단되었다. 또한 JEM 2000 FX2 투과전자현미경을 사용하여 시편의 미세 조직을 분석하여 본 결과 X-RD 시험결과와 마찬가지로 오스테나이트(γ)와 마르텐사이트(α') 미세조직이 관찰되었다. 그림 4는 오스테나이트(γ)와 마르텐사이트(α') 미세조직을 보여주고 있으며 이러한 상(phase)들에 대한 diffraction pattern 분석을 통해 마르텐사이트 상(phase)의 존재를 다시 확인하였다. 그림 2(c) 3, 6, 7을 자세히 관찰하면 균열이 성장할 때 연성이나 인성이 우수한 오스테나이트상 보다는 저온인성이 좋지 않은 변태된 마르텐사이트상을 따라서 이루어진 것을 알 수 있고, 이것은 저온에서 발생한 마르텐사이트변태가 E6B(L) 엘보우의 파손에 직접적인 관련이 있는 것으로 연관 지을 수 있다.

그림 5와 6에서는 각각 E6B(U)와 E6B(N) 시편들의 각 부분에 대한 조직을 나타내고 있는데 두 시편 모

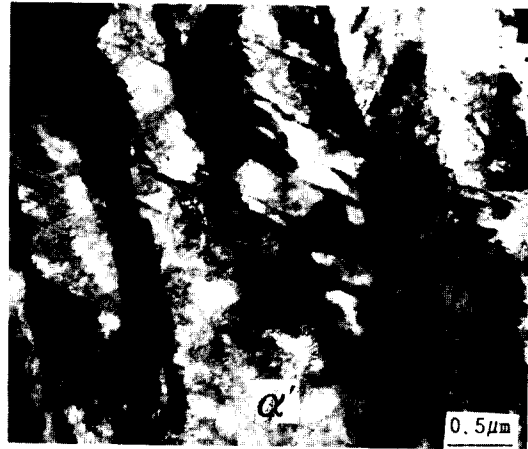


Fig. 4 TEM Bright field images of austenite and martensite phase observed in E6B(L)

두에서 용합불량이 발견되었으며, 미세조직은 앞서 설명한 E6B(L) 시편의 조직과 거의 유사하게 나타났다. 마르텐사이트로 변태한 조직의 양은 E6B(U)보다 E6B(N) 시편에 조금 더 적은 것으로 관찰되었다. 그림 5(c)는 그림 1에서 미리 언급한 바 있는 용접부를 가로 지르는 횡균열(Cross crack)을 엘보우 내부에서 내려다 보듯이 찍은 사진이다. 그리고 그림 5(d)는 이 횡균열의 용접비드 방향의 단면사진으로 횡균열의 깊이는 약 0.2mm 정도로 측정되었다. 이러한 횡균열은 E6B(U)의 시편에서 E6B(N) 시편의 경우보다 훨씬 많이 발견되었으며 그 생성원인은 두가지로 분석할 수 있다. 그중 하나는 엘보우를 제작하기 위해 사용한 파이프 제조시 내부 용접덧살을 제거하는 과정인 절삭이나 rolling 과정에서 lap defect의 일종으로 생성될 수 있다는 분석이고, 사용하지 않은 E6B(B) 시편에서 횡균열이 발견되었다는 사실이 이를 증명하고 있다. 다른 한가지는 그림 5(c)5나 그림 6(c)7에서 화살표로 표시되어 있는 것처럼 용접중에 발생한 용접부의 결함(Notch)들이 엘보우들이 저온에서 응력을 받을때 응력집중현상을 유도하여 용접부의 횡방향으로 발전하고 결국 이러한 균열이 용접부를 관통하는 균열로 발전한다는 분석이다. E6B(U)에서 E6B(N) 보다 많은 횡균열이 발견되었다는 사실이 이러한 분석을 뒷받침하고 있다.

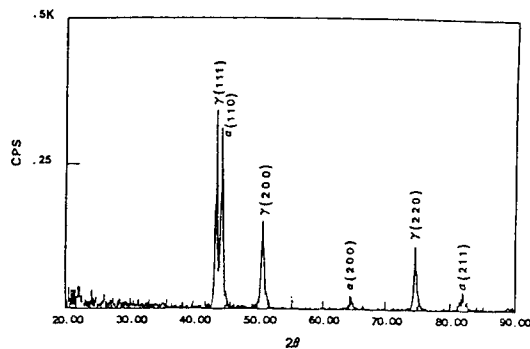


Fig. 3 Results of X-ray diffraction analysis

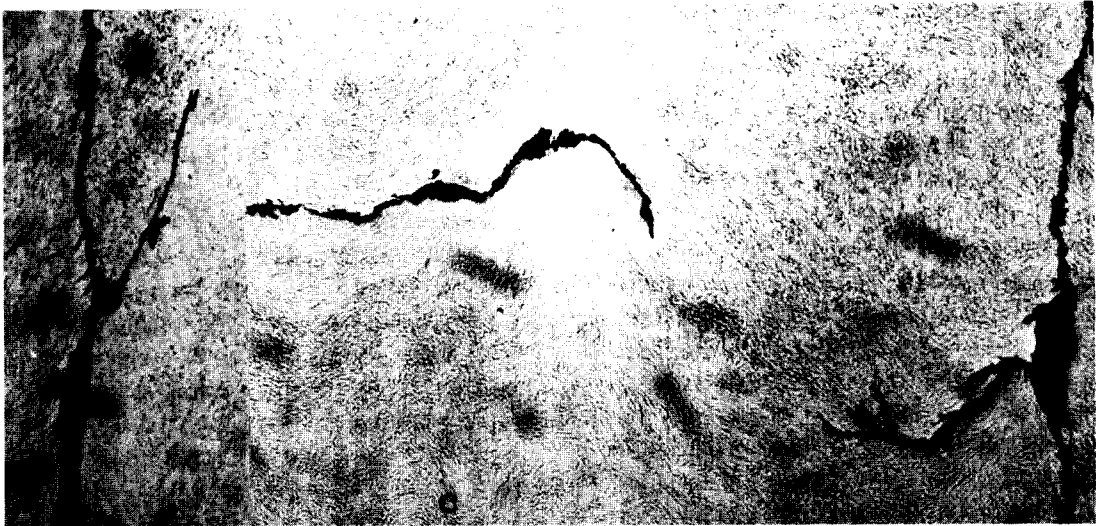
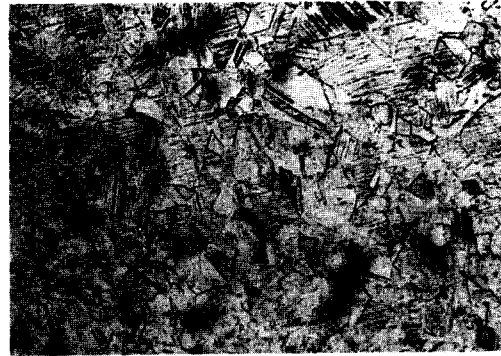
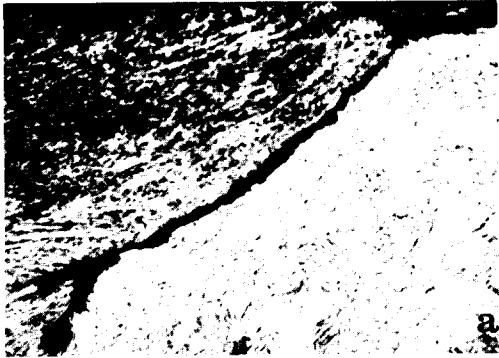


Fig. 5 Microstructures of E6B(U) ; a) weld root area showing lack of fusion, X100, b) from parent metal, X100, c) cross crack observed in the weld bead, X50, d) cross sectional view of the cross crack parallel to weld bead, X200

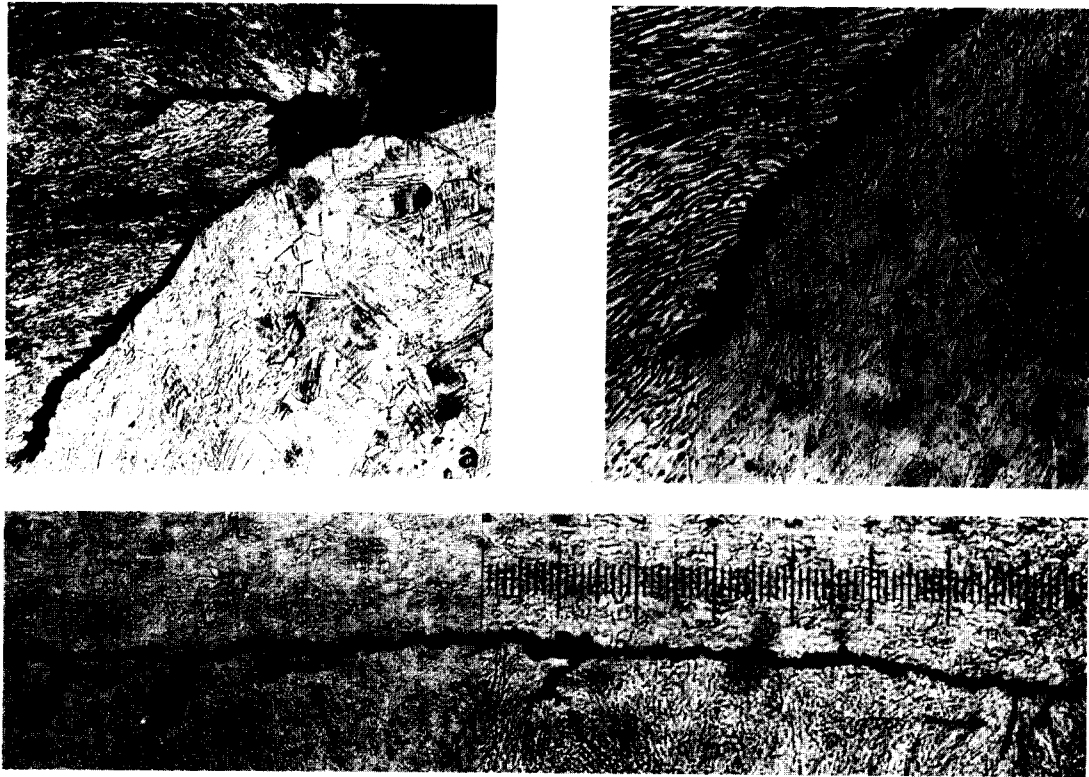


Fig. 6 Microstures of E6B(N) : a) weld root area showing lack of fusion, X100, b) higher magnification from the same area, X200, c) top view of the lack of fusion and notch at the weld root, X50

3.5 주사전자현미경 분석 및 파면검사

파이프로 부터 엘보우를 만드는 과정중 소형변형 과정에서 유도된 조직의 변화 즉 오스테나이트 조직에서 마르텐사이트 조직으로의 변태를 원상태를 되돌려 주기 위해 일반적으로 용체화처리를 수행한다. 이러한 과정에서 열처리로내의 온도조절이 잘못되었거나 열처리후 냉각속도가 잘못 조절되었을 경우에 조직의 예민화 현상(Sensitization)이 나타난다. E6B(L) 시편에서 이러한 예민화현상의 존재유무를 알아보기 위해 주사전자현미경(Scanning Electron Microscope)을 이용해 조직을 관찰하였고 입계에 형성된 석출물에 대해서 미소성분분석(Electron Probe Microanalysis)을 수행하였다.

그림 7(a)와 (b)는 E6B(L) 시편의 SEM 조직을 나타내고 있다. 마르텐사이트변태 시 FCC 조직에서 BCC/HCP 조직으로의 변태시에 수반되는 Shear 형

태의 Strain에 기인하여 그림 7에서 보여주는 것과 같은 surface relief 현상을 나타내고 있다.

그림 7(b)의 화살표로 표시된 입계석출물과 0표로 표시된 모재의 미소성분 비교 분석을 수행한 결과를 그림 8에서 보여주고 있는 바와 같이 석출물에서의 Cr양이 모재에서 보다 많이 나타났으며 이러한 석출물은 Cr이 많은 $M_{23}C_6$ 계 복합탄화물로 판단된다. 그러나 이러한 탄화물이 많이 석출되지 않은 점으로 보아 조직의 예민화 정도가 크게 우려되지는 않은 것으로 판단되었다. 또한 그림 7에서 나타나는 둥근 모양의 것들은 Sulphide나 Phosporus계의 불순물이 있던 자리로 평가되며, 이러한 불순물들은 근본적인 재질의 Melting practice 상태에 생성된 것으로 분석된다.

균열이 발생한 E6B(L) 시편의 파면을 주사전자현미경을 이용해서 관찰하였다. 결과는 그림 9에 나타내었고, 그림 9(a)의 사진에서 화살표가 가리키고 있는 A부분은 E6B(U) 시편이나 E6B(N) 시편의 종단면

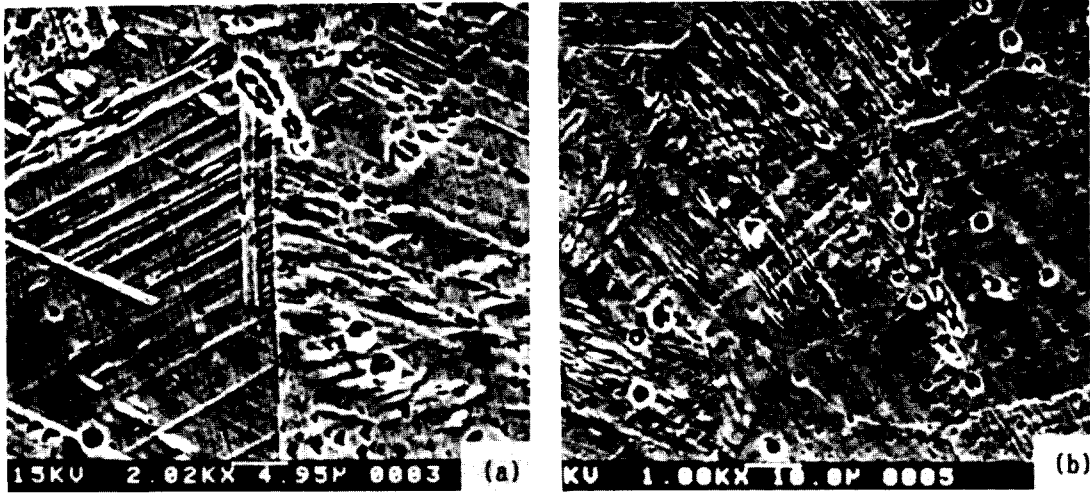


Fig. 7 SEM microstructure of E6B(L) ; a) showing a surface relief phenomena due to phase transformation, b) showing grain boundary precipitate indicated by arrow

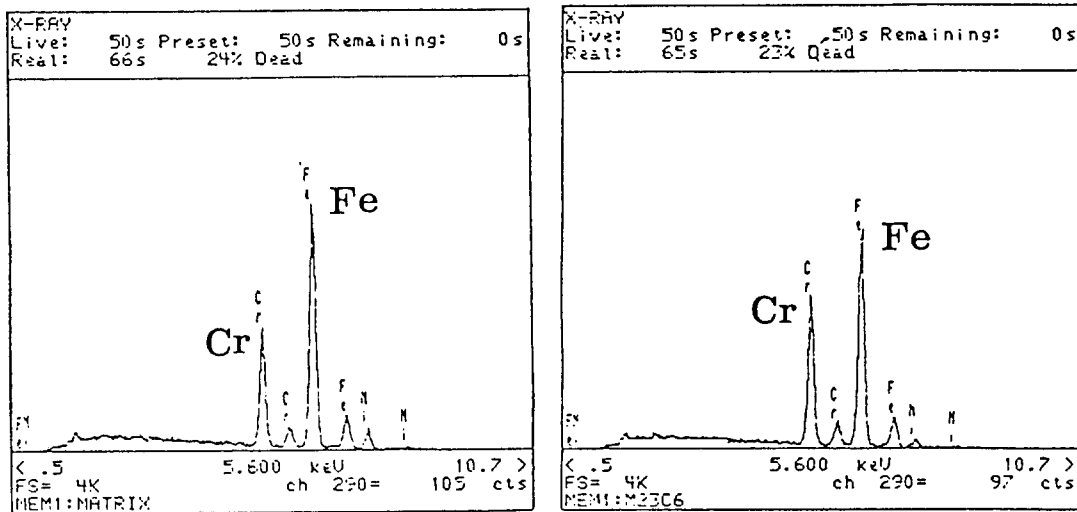


Fig. 8 EPMA results of E6B(L) from ; a) parent metal, b) Chromium-rich M23C6 type precipitate

조직 (그림 5와 6)에서 보여준 바와 같이 용접부의 용접비드에 평행하게 절단한 단면사진에 볼 수 있었던 횡방향균열(Cross crack)의 일부분에 해당된다. 그림 9(b)는 E6B(L) 시편의 파단면을 보여주고 있는데 벽개파괴양상(Cleavage fracture mode) (사진에서 B 지역으로 표시)과 입계를 따라서 파괴되는 입계분리 파괴양상(Intergranular decohesion fracture mode (A 지역))이 복합적으로 구성되어 있다. 이러한 파단면은

마르텐사이트계 내식강의 전형적인 저온파단면으로 입계준벽개파괴 모양(Intergranular Quasi-Cleavage Fracture appearance)을 갖는 것으로 판단되고, 이러한 파단면은 미세조직과 관련된 저온취성(Low temperature embrittlement)에 기인되는 것으로 판단된다.^{3,4)}

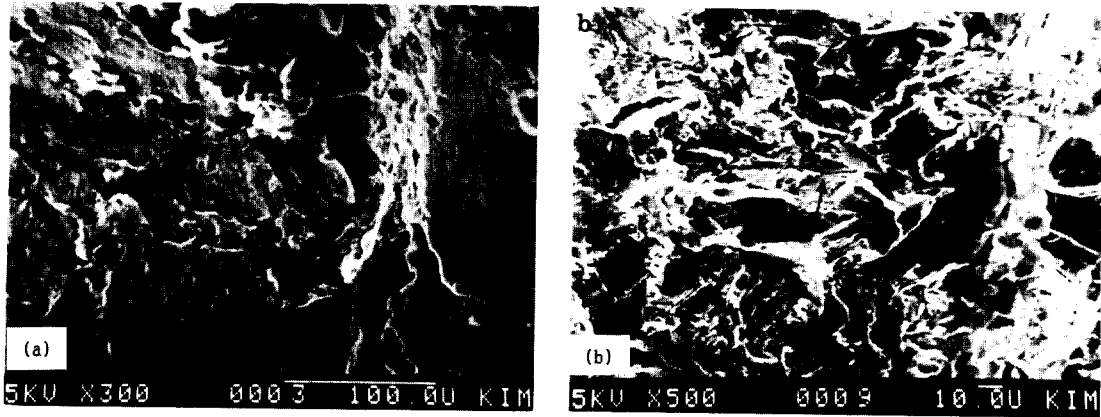


Fig. 9 SEM fractography showing cracked surface from E6B(L)

3.6 인장시험 및 경도시험

인장시험은 E6B(U)와 E6B(N)에 대하여 ASTM 규정에 의거하여 수행하였으며, 인장시험의 결과를 표 2에 나타내었다. 항복강도와 인장강도의 경우 E6B(L), E6B(U)와 E6B(N) 세 시편 모두 ASTM에서 규정하는 값을 훨씬 상회하고 있으며, 특히 E6B(L)과 E6B(U)의 항복강도 ASTM 규정치의 2배 이상의 높은 값을 나타내고 있다. 엘보우 시편들의 인장강도와 항복강도의 높은 증가는 앞에서 언급된 미세조직의 변화에 기인하는 것으로 설명할 수 있다. 이러한 강도의 큰 증가에도 불구하고 시편들의 연신율을 여전히 규정값을 상회하는 결과를 나타내고 있다. 그러나 E6B(L) 시편의 경우 E6B(N)보다 비교적 낮은 연신율을 나타내고 있는 것으로 보아 규격은 만족하지만 사용 중에 대단히 취화된 상태로 발전되었음을 알 수 있다. 이러한 취성의 원인을 미세조직분석시에 관찰된 마르텐사이트 조직과 깊은 관련이 있는 것으로 판단된다.

경도시험은 DHM-1 Matsuzawa 경도기를 사용하였으며 200gr의 하중을 15초간 부하하여 경도를 측정

Table 2. Tensile properties of 6'SCH40 Elbow

시편	항복강도 (MPa)		인장강도 (Mpa)		연신율 (%)	
	평균	$\Delta\sigma$	평균	$\Delta\sigma$	평균	$\Delta\sigma$
E6B(U)	548.4	343.4	838.2	323.2	47.8	12.8
E6B(L)	610.0	405.0	828.0	313.0	43.0	8.0
E6B(N)	429.5	224.5	694.9	179.9	51.0	16.0
A403 WP304	205		515		35	

Table 3. Microhardness of 6'SCH40 Elbow

시편	Vicker's Microhardness (Hv(0.2))	
	용접부	용접부 근처의 모재
E6B(L)	431 ± 25	307 ± 20
EB6(L)HT	171 ± 5	182 ± 12
E6B(B)	442 ± 29	321 ± 40
E6B(N)	386 ± 23	220 ± 20
E6B(N)HT	175 ± 5	180 ± 10

하였다. 12번의 측정을 수행한 최대값과 최소값을 무시한 10개의 값에 대한 평균과 표준편차를 계산하였다. 각 편도 측정결과를 표 2에 요약하였다.

용접부에서 E6B(L)과 E6B(U)의 경도 값은 거의 비슷하나 E6B(N)의 경도값 보다는 약간 높은 것을 알 수 있다. 이는 Elbow를 제조하여 저온에서 사용함으로써 추가적으로 형성된 마르텐사이트상의 양이

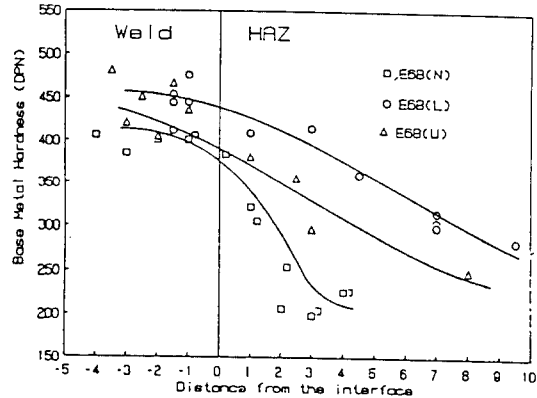


Fig. 10 Microhardness as a function of distance from interface between the weld and the parent metal

증가 함에 기인하는 것이며, 이는 앞서 기술한 인장 강도 시험과 조직사진과도 잘 일치한다. 그리고 이러한 현상은 모재에서 비슷하게 나타났다.

그림 10에서는 용접부와 모재의 경계면으로 부터의 거리에 따른 경도값을 나타내 주고 있다.

3.7 충격시험

AISI 304 내식강은 저온에서 우수한 인성을 가지고 있기 때문에,⁵⁻⁷⁾ 설계 및 사용규격에서 시험대상조건으로 포함되지는 않지만 본 논문에서는 재질의 인성 약 영향을 미치는 마르텐사이트 상이 검출되었으며 이런 상에 의한 인성의 변화 여부를 알아보기 위하여 상온충격시험을 수행하였다. 충격시험의 형상은 ASTM Charpy subsize specimen을 사용하여 상온에서 충격시험을 수행하였다. 엘보우의 벽두께가 얇아서 100mm×10mm×55mm의 표준충격시험편을 제작할 수 없었으므로 subsize 시험편인 5mm×10mm×55mm의 충격시험편을 제작하여 상대적인 비교 시험을 수행하였다.

E6B(U) 시험편은 79.5Joule의 충격값을 나타내며 91.2 Joule을 나타내는 E6B(N) 시험편 보다 다소 낮은 충격값을 보이는데, 이는 인장시험 결과분석의 경우와 마찬가지로 엘보우 사용중 마르텐사이트 변태량이 증가된데 기인하는 것으로 판단된다. 본 논문에서 사용한 시험편의 크기가 표준시험편 보다 1/2정도의 크기를 가지므로 충격시험값이 시험크기에 정비례한다고 가정할 때 E6B(L)과 E6B(B)의 충격시험 값은 159 Joule과 182.4Joule이 되며 이 값들은 Sanderson and Llewlyn¹⁾ 과 McConnell and Bradly⁸⁾이 AISI 304 내식강에 대해 상온에서 실시한 충격 시험값인 217.6 Joule과 208.8Joule에 조금 못 미치는 하나, 거시적인 측면에서 E6B(L)과 E6B(N) 시험편의 충격시험값은 문제가 되지 않는다고 판단된다. 그러나 냉간가공이나 예민화현상들이 AISI 304 내식강의 충격시험을 저하시킨다는 결과를 고려하면⁹⁾ 마르텐사이트상으로의 변태로 인한 국부적인 인성 저하를 유발하여 결국 이러한 취화된 상(phase)을 따라 균열이 성장한 것으로 판단된다.

4. 손상원인 고찰

파손된 설비의 손상원인을 분석하는 연구의 대부

분의 경우 그 파손의 원인을 분석하여 보면 한가지 원인에 기인하는 경우보다 대개 여러가지 원인이 복잡하게 얽혀 있는 경우가 많다. 본 연구의 경우에도 6인치 엘보우의 균열발생 원인은 여러가지 이유가 복합적으로 작용한 것으로 분석된다.

액체침투탐상시험이나 방사선투과시험의 결과가 보여주는 것처럼 엘보우의 내부 용접선을 따라 선형 지시가 나타났고 이 선형지시는 결국 용접상의 조업 미숙에 기인한 융합불량으로 판단되바 있고, 이러한 융합불량을 갖고 있는 엘보우 부품이 응력을 받게되면 응력집중현상을 유도하여 균열을 발생시킨 것으로 판단된다. 이때 외부응력의 근원은 여러가지가 될 수 있는데 시간당 약 39ton의 내용물이 엘보우 내부에서 이동시에 생기는 응력이거나 또는 자체의 무게에 의한 응력도 가능하며 엘보우를 만들기 위한 변형(Bending) 과정에서 생긴 변형응력 또는 잔류응력이 될 수 있다. 균열발생에 대한 이러한 논리는 그림 2, 5, 6에 있는 미세조직들에 의해 잘 설명 될 수 있다. 사용하지 않은 엘보우에서 채취한 E6B(N) 시험편의 용접비드에 있는 불연속결함(그림 6(c)에서 화살표로 표시)들이 Notch 역할을 하여 균열을 발생시키게 된다. 이러한 균열은 초기에는 용접비드를 가로지르는 횡균열(cross crack)로 발전하게 되는데 엘보우를 사용함에 따라 그 수가 증가한 것을 보면 (그림 1참조) 엘보우가 운전중에 받은 응력이 크게 작용하는 것으로 생각된다.

이렇게 발생한 notch나 횡균열도 인성이 우수한 오스테나이트 조직에서는 크게 성장하기가 어렵다. 그렇기 때문에 Bending 과정에서 생기는 마르텐사이트 조직을 소멸시키는 것이 변형후 소둔 열처리를 수행하는 목적이 된다. 그러나 균열이 발생한 엘보우의 시험편에서 뿐 아니라 사용하지 않은 엘보우에서도 미세조직을 관찰한 결과 용접부와 열영향부에서는 물론 모재에서 인성이 낮은 마르텐사이트 조직이 발견된 것으로 보아 용체화처리과정에서 문제가 있었던 것으로 판단된다.

잔류 마르텐사이트를 가지고 있는 엘보우를 사용한 경우 특히 본 시험편의 경우처럼 -85℃의 저온에서 응력을 받을 경우 기존에 있는 마르텐사이트상이나 그 자취를 생성점 (nucleation cite)으로하여 보다 많은 변태가 쉽게 이루어지게 된다. 이러한 마르텐사이트 조직으로의 변태는 여러가지 기계적 성질의 변화를 수반하게 되는데 경도, 항복강도나 인장강도는 크게 증가하게 되나 연실율이나 인성은 감소하게 된다.

예를들면 사용전 AISI 304 계열 합금의 연신율은 50%를 넘지만, 마르텐사이트 계열의 내식강은 소둔(tempering) 열처리 한 뒤에도 연신율은 20% 미만에 머무른다.¹⁰⁾ 즉 마르텐사이트 조직은 재질의 연신율을 저하시키는 취화된 상으로 해석할 수 있다. 본 연구에서도 경도나 인장시험의 결과가 이를 증명하고 있다. 이러한 조직의 변태에 의한 경도나 강도의 증가는 용납할 수 있지만 이에 수반되는 연신율의 감소는 문제점으로 지적할 수 있다. 그러므로 용합불량과 같은 용접결함에 기인된 균열이 오스테나이트 조직이 저온취성의 문제를 가지고 있는 마르텐사이트 조직으로 변태됨에 따라 입계간 균열(intergranular cracking)로 발전하여, 결국 용접부를 관통하게 된 것으로 판단된다.

끝으로 균열발생원인으로 분석되는 용체화처리에서의 문제점을 확인하기 위하여 E6B(L) 엘보우에서 용접부와 모재부분을 절취하여 시편을 열처리로에서 대기중에 열처리하였다. 그림 11에서는 E6B(L) 시편을 용체화처리 한 뒤의 조직을 나타내고 있으며 모재(그림 11(a))와 용접부(그림 11(c))에서 마르텐사이트 조직이 거의 소멸되어 오스테나이트 조직을 나타내고 있다. 열처리를 한 시편은 표 3에 나타난 것처럼 경도의 급격한 감소를 나타내었다. 엘보우에 대한 용체화처리를 정상적으로 실시하였다면 표 3에서 보여주는 것과 같이 약 170에서 180H_{V(0.2)} 정도의 경도값이 기대된다. 그림 11(b)에서는 마르텐사이트조직이 열처리에 의해 100% 소멸되지 못하고 어느정도의

자취(trace)를 남긴 것으로 판단된다. 이러한 조직을 갖는 부위에서 경도를 측정한 결과 열처리전의 값보다는 많이 감소된 185H_{V(0.2)} 정도의 경도값을 나타낸 점으로 보아서 이러한 조직을 경한 마르텐사이트 조직으로 볼 수 없다는 판단이다. 이러한 조직은 높은 온도에서 급냉하였을때 발생하는 열응력에 의해 시편의 표면에 국부적으로 발생하는 일종의 표면 마르텐사이트이라 판단되며, 이것을 증명하기 위해서 E6B(N) 시편을 1050°C에서 1시간 가열한 뒤 2.5°C/min.으로 냉각한 뒤 조직을 관찰해 보고, 또한 열처리된 시편에 외부로부터 열응력을 재현하기 위해 약한 충격을 가해본 뒤 조직을 검사하였다. 열처리로내에서 서냉시킨 시편은 거의 완전하게 소둔된 오스테나이트조직을 보이고 있으며 미소한 부분에서 국부적인 마르텐사이트의 자취를 보여주었다. 그러나 외부에서 충격을 가 한 뒤의 조직은 그림 11(b)와 유사한 조직을 보여주었다. 즉 열처리를 수행한 뒤의 조직은 soft한 오스테나이트조직이나 외부에서의 약한 충격이나 온도에 의한 열응력이 존재할 경우에 쉽게 마르텐사이트 조직으로 변하는 것을 관찰하였다.

한편 연구자석을 이용하여 각 시편의 자성특성을 평가해 본 결과 E6B(L), E6B(U), E6B(N) 3 시편 모두 용접부에서 강자성을 나타냈으며 모재에서도 자성을 나타냈다. 그러나 열처리를 한 뒤 E6B(L)HT 시편의 각 부분에서의 자성을 거의 없어졌다. 이는 열처리 후의 강자성의 마르텐사이트조직이 상자성이 오스테나이트조직으로 변태된 현상과 잘 일치한다.

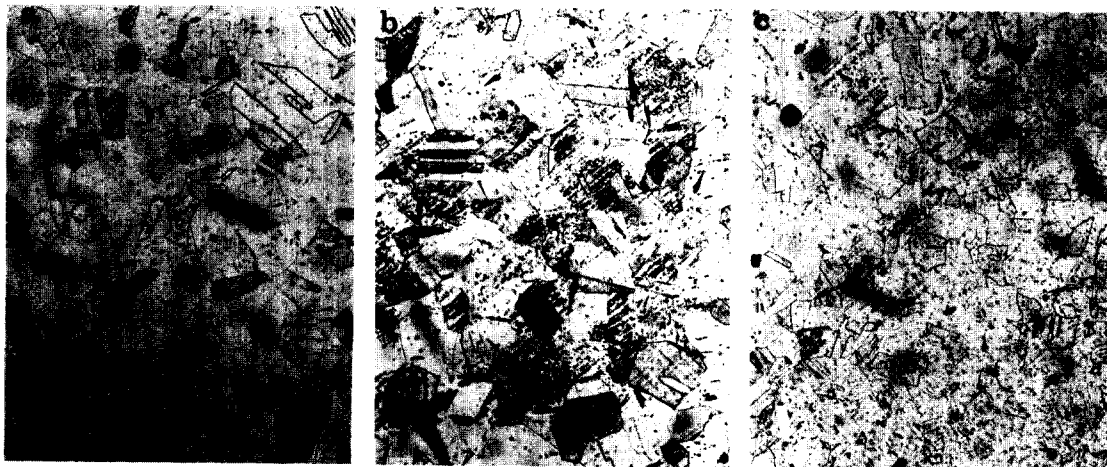


Fig. 11 Optical microstructure of E6B(L)HT, X200 ; a) from the parent metal, b) from the parent metal but showing trace of surface martensite, c) from the weld

5. 결 론

6인치 AISI 304 엘보우의 결함 발생 원인은 용접강관 제작시 발생한 용합불량과 root 부위의 용접덧살 등이 성형가공시 강관모재와는 특이한 metal flow 조직을 형성하게 되었고 성형가공후 생긴 마르텐사이트 조직이 열처리 후에도 잔존하여 이들 부위에서의 저온취성약화에 의한 것으로 분석된다. 이런 종류의 결함을 방지하기 위해서는 성형가공 전에 강관의 결함 유무를 확인하는 것이 필요하며 후열처리를 정확하게 실시해야 할 것이다.

6. 감사의 글

본 연구를 수행하는데 협조하여 주신 여러분께 감사하며, 특히 비파괴검사를 도와 주신 황원규, 조상제씨와 EPMA 작업을 도와 주신 유위도 그리고 김영욱씨에게 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. G. P. Sanderson and D. T. Llewellyn, Mechanical properties of standard austenitic stainless steels in the temperature range of -196 to 800 C, J. Iron Steel Inst. London, vol. 20, (1969), pp.1129~1146.
2. D. T. Read and R. P. Reed, Toughness, fatigue crack growth and tensile properties of three nitrogen-strengthened stainless steels at cryogenic tempera-

이상울 · 이종오 · 이주석 · 조정식 · 조종춘 · 이보영

- tures, The Materials Science of Stainless Steel, ASM, Metal Park (1979), pp.92~121
3. ASM : Failure Analysis and Prevention, Metals Handbook 9th Edition, Vol. 11, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, U. S. A., 1983, pp. 82~101, 203~224, 307~313, 695~706
 4. ASM : Fractography, Metals Handbook 9th Edition, Vol. 12, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, U. S. A., 1983, pp.351~365
 5. Williams, I., Williams, R. G., and Capellaro, R. C. : In Proceeding of the Sixth International Cryogenic Engineering Conference. IPC Science and Technology Press, Gillingford, Surrey, England, pp.337~341
 6. peckner, D. and Bernstein, I. M. : Handbook of stainless Steels, McGraw-Hill Book Company, New York, U. S. A., 1987, Chapters 1, 4, 14, 15, 17, 20, 30, 48
 7. Reed, R. P. and Clark, A., edited by : Materials At Low Temperatures, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, U. S. A., 1983, pp.295~312, 371~387
 8. J. H. McConnell and R. D. Bradley, Austenitic Stainless Steels-thousands of tons -300 to 425 F range, Chem. Eng. (1960) pp.125~128
 9. E. H. Schmidt, Low temperature impact properties of annealed and sensitized 18-8, Met. Prog., Vol.54 (1948) pp.698~704
 10. ASM : Properties and Selection Stainless Steels, Tool Materials and Special Purpose Metals, Metals Handbook 9th Edition, Vol.3, American Society for Metals, Metals Park, Ohio, U. S. A., 1983, pp.1~186