

저온조건하 스테인레스 강의 파괴 특성
Fracture Characteristics of Stainless Steel
Under Low Temperature Conditions

김 두 환* · 한 석 규** · 안 세 희**
D.H. Kim · S.K. Han · S.H. Ahn
(1998년 1월 21일 접수, 1999년 3월 10일 채택)

ABSTRACT

It has been recognized that the mechanical properties of structural steels can be accepted very greatly in a state of normal temperature. While, under low temperature conditions the properties of the structural steels may not be appropriately achieved. When the various and particular structures will be constructed in an intense cold region afterward, the mechanical properties of a stainless steel under low temperature condition must be investigated.

The purpose of this paper is to account for the fracture mechanics of structures in the state of low temperatures. The fracture toughness was examined through an experimental test from which the tensile strength and impact values of STS 304 were obtained. In order to demonstrate the present studies, the fracture toughness was compared with the test results for SWS 50 published previously by an author.

1. 서 론

저온공학은 에너지 산업, 전기전자산업, 수동 산업 등에 광범위하게 쓰이고 그 기술이 획기적이기 때문에 많은 각광을 받으며 발전되어 왔

다. 특히 인류가 앞으로 해결해야 할 가장 큰 문제인 에너지 산업분야와 매우 밀접한 관계가 있기 때문에 중요하다.

액화천연가스(LNG, liquefied natural gas)의 대형저장탱크 및 수동설비의 건설이 필요하게

* 서울산업대학교 구조공학과

** 서울산업대학교 구조공학과 석사과정

됨에 따라 소형저장용기의 재료로 사용되고 있는 오스테나이트계 스테인레스강이나 9% Ni 강의 파괴거동에 대한 연구가 필수적이다.

국내에서는 저온용이라는 구체적인 목적으로 저온용 강재가 생산되고 있지 않으나 현재 국내에서 생산되고 있는 강재중에서 저온에서도 사용할 수 있는 것으로는 STS 304, STS 316 등의 스테인레스강이 있으며 지금까지 상온이상의 온도에서 내식성이 우수한 점만 인식되어 왔으나 이들 제품에 대한 저온에서의 기계적 성질에 대한 자료가 거의 없어 저온에서는 별로 사용되고 있지 않는 실정이다. 그러나 앞으로 있을 대대적인 LNG 운반선의 제작, LNG 인수기지 추가 건설 등을 감안할 때 국산 스테인레스강에 대한 저온에서의 기계적 성질에 대한 연구가 필요하며 저온내지는 극저온 구조물 및 설비의 안정성과 수명을 보증해야 하기 때문에 파괴역학적 측면에서의 구조물에 대한 정량적 안정성 평가는 반드시 고려되어야만 한 실정이다.

따라서 본 연구에서는 STS 304에 관한 파괴인성을 실험식으로 유도하고 시험을 통하여 얻어진 결과를 구조용강(SWS50)의 시험 결과¹⁾와 비교, 검토함으로써 저온내지는 극저온하에서의 구조물에 대한 파괴역학적 평가를 가능하게 하는데 목적이 있다.

2. 이론적배경

모든 구조물은 여러가지 종류의 흠이나 균열을 가지고 있으며 이는 설계중에 발생한 것도 있고(뿔죽한 모서리나 단면), 제작과정에서 발생한 것도 있으며(용접결함), 운용중에 생긴 것도 있다. 이러한 결함들은 응력집중을 발생시키는 역할을 해서 정상적인 항복강도 이하의 응력만 가해져도 취성재료는 파괴되나 연성 재료에서는 하중지지 면적을 감소시키는 것 이외에는 별로 영향을 주지 못하며 하중지지 용량도 크게 감소되지 않는다.

파괴역학을 이용하여 균열을 포함하고 있는 부재의 강도를 구하기 위해서는 균열을 포함하고 있는 재료의 파괴인성(fracture toughness)을 알아야 한다. 여기서 파괴인성이란 균열이 존재

하는 재료의 파괴에 대한 저항력을 나타내는 단일변수로서 온도, 부하속도, 미세조직 등에 의존한다. 탄성 파괴역학의 경우에, 평면 변형 파괴인성 K_{IC} 는 식(1)로 표시되는 소성영역의 크기 r_p 가 매우 작을 때에만 유효한 값을 갖는다.

$$r_p = \frac{1}{2\pi} \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \dots\dots\dots (1)$$

여기서, σ_{ys} 는 항복강도, K_{IC} 는 Mode I에서의 평면변형 파괴인성이다.

따라서 ASTM E399에서는 시편의 두께 B와 균열길이 a가 식(2)와 같은 조건을 만족하여야만 K_{IC} 값이 유효하다고 규정하고 있다²⁾.

$$B, a \geq 2.5 \left(\frac{K_{IC}}{\sigma_{ys}} \right)^2 \dots\dots\dots (2)$$

한편 소성영역의 크기가 커지면 더 이상 유효한 K_{IC} 값을 얻을 수 없다. 이 때는 K_{IC} 값 대신에 탄소성 파괴인성 J_{IC} 값을 구해야 한다. J_{IC} 의 경우에도 식(3)을 만족해야만 유효한 값을 얻을 수 있다³⁾.

$$B, b \geq 2.5 \frac{J_{IC}}{\sigma_{ys}} \dots\dots\dots (3)$$

그러나 극저온에서 파괴인성시험을 실시하였을 때 대부분의 재료의 경우 K_{IC} 값을 얻으려면 시편의 크기가 대단히 두꺼워야 한다. 물론 두꺼운 시편을 사용하여 K_{IC} 값을 구할 수는 있겠지만 시편이 두꺼워질수록 비경제적이고 또한 시험기의 용량에도 문제가 있다. 따라서 극저온에서의 파괴인성 시험의 경우, 시편 크기의 제한이 적은 J_{IC} 시험이 많이 사용되고 있다⁴⁾. 그리고 J_{IC} 시험을 통하여 식(4)를 이용하면 K_{IC} 를 추정할 수 있다.

$$K_{IC} = \left[\frac{J_{IC} E}{(1-\nu^2)} \right]^{1/2} \dots\dots\dots (4)$$

여기서 E는 탄성계수이며 ν 는 포아송비이다.

한편 인성을 측정하는 두번째 방법인 Charpy 충격시험에서는 충격날로 Notch가 있는 시편을 파괴시키는데 필요한 에너지를 측정하므로써 인성치를 얻는다. 충격에너지 값이 작으면 파괴인성이 작고 Notch에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다. 또한 Charpy-V-Notch(CVN) 시편과 파괴역학적 측면을 고려한 시편으로부터 측정하

파괴인성에는 서로 연관성이 있다는 여러 연구가 발표되었는데 Corten 과 Sailors⁵⁾의 실험식에 의하면 다음과 같다.

$$K_{IC} = 15.5(CVN)^{1/2}$$

$$(ksi\sqrt{in}, 1ksi\sqrt{in} = 1.095MPa\sqrt{m} \dots (5a)$$

그리고 Roberts와 Newton⁶⁾의 실험식에 의하면 다음과 같다.

$$K_{IC} = 9.35(CVN)^{0.63}$$

$$(ksi\sqrt{in}, 1ksi\sqrt{in} = 1.095MPa\sqrt{m} \dots (5b)$$

따라서 식(5a)와 (5b)를 사용함으로써 간단한 CVN 시편을 통하여 K_{IC} 값을 얻을 수 있으므로 재료가 사용되는 온도에서의 파괴안전설계를 용이하게 할 수 있다.

3. 실험방법

본 실험에 사용한 재료는 판 두께 12mm의 STS 304 스테인레스강으로 화학적 성분은 Table 1과 같고 미세구조를 촬영한 것은 Photo. 1과 같다. 또한, 인장시험시 대부분의 조건은 ASTM A370에 따랐으나 저온에서 시험하여야 하므로 시편의 크기를 ASTM 규격에서 규정보다 작게 가공하였다. 시편이 크면 grip 또한 비례적으로 커지고 냉매의 손실도 많아질 뿐만 아니라 저온용 chamber의 크기도 고려하여 ASTM에서 규정한 시편의 치수를 비례 축소하여 결정하였다.

Table 1 Chemical composition of STS 304 Wt. (%)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Fe
0.06	0.58	0.86	0.03	0.01	18.33	9.18	Bal.

저온에서 실험하기 위하여 Instron사의 Model 320의 저온용 chamber를 사용하였다. 먼저 시편을 정착시키고 액체질소를 사용하여 실험온도를 5분 정도 유지시켜 온도 변화를 최소화시킨 후 Instron사의 model 1235 만능시험기를 사용하여 인장시험을 하였다. 온도 구간은 22℃, -3℃, -40℃, -70℃로 구분하여 시험을 하였다.

또한 STS 304 스테인레스강의 파괴인성을 구하기 위하여 주어진 실험온도하에서 CVN 충

격실험을 진행하여 파괴시의 흡수에너지를 구하였다.

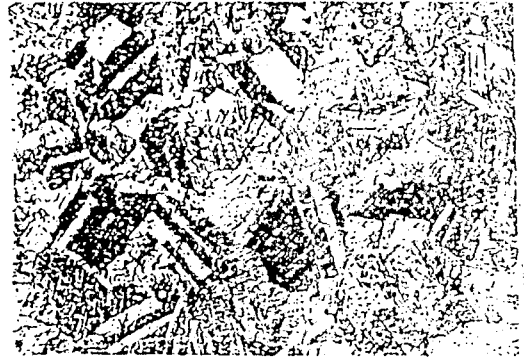


Photo. 1 Microstructure of STS 304 stainless steel (×1000)

한편 충격시편의 온도조절은 드라이아이스와 아세톤을 사용하였으며 이 때 시편의 온도에 정확을 기하기 위하여 해당온도에서 10분이상 유지시켜 온도 변화를 최소화 시킨 후 5초이내에 충격실험을 실시하였다. 재료의 파단면에는 파괴의 진행상황을 나타내는 특징적인 모양이 존재하므로 이를 분석하면 파괴기구에 관한 귀중한 정보를 얻을 수 있으므로 본 연구에서는 인장과 충격시험 후 파단면을 관찰하기 위하여 주사형 전자현미경을 사용하여 미세적 파면해석을 하였다.

4. 실험결과 및 고찰

4.1 인장시험

인장시험은 초기변형속도 1×10^{-4} mm/s로 2℃, -3℃, -40℃, -70℃에서 각각 실험하였으며, Fig. 1과 Fig. 2는 22℃와 -70℃에서의 stress-elongation(%) 곡선이다. 곡선의 형태는 거의 동일하게 항복점이 뚜렷이 나타나지 않았으며 또한, 상온에서의 σ_T/σ_{ys} (740/340=2.18)와 -70℃에서의 σ_T/σ_{ys} (1025/450=2.28)를 비교해 보면 -70℃에서 σ_T/σ_{ys} 가 큼을 알 수 있었으며 여기서 사용된 σ_{ys} 는 0.2% offset의 항복강도이다. 이는 온도가 내려가면서 강도는 증

가하며 인장강도의 증가가 항복강도의 증가보다 크다는 것을 의미한다. 즉, 항복강도보다 인장강도가 온도의 감소에 더 큰 영향을 받고 있음을 보여주고 있다.

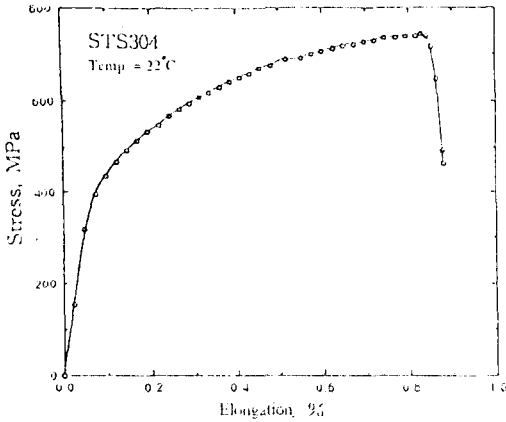


Fig. 1 Stress-elongation(%) curve of STS 304 at 22°C

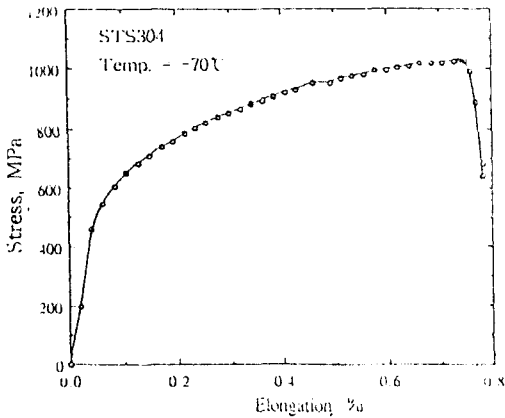


Fig. 2 Stress-elongation(%) curve of STS 304 at -70°C

Fig. 3, 4에서와 같이 항복강도와 인장강도의 값은 온도가 저하됨에 따라 증가함과 동시에 σ_T/σ_{ys} 의 비도 증가함을 알 수 있었다. 단면수축율은 Fig. 5에서 보듯이 -40°C에서 최저치를, 실온(22°C)에서 최고치를 나타내고 있으며 연신율은 Fig. 6에서와 같이 온도가 감소하면서 -40°C까지 감소하다가 그 이하의 온도에서는 파면 해석에서 보인 것 같이 재질의 변화가 나타남에

따라 다시 증가함을 나타내었다.

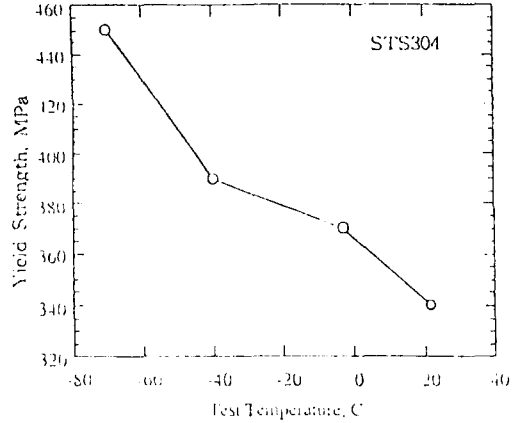


Fig. 3 Yield strength of STS 304 at different temperatures

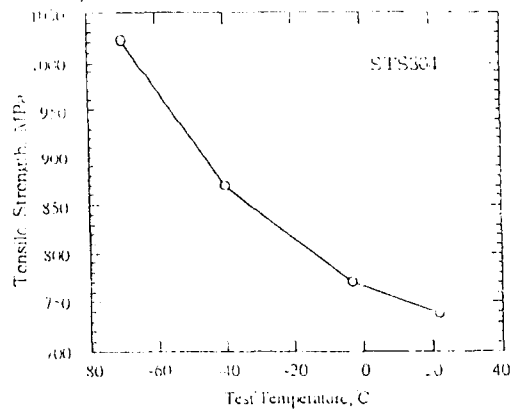


Fig. 4 Tensile strength of STS 304 at different temperatures

한편 STS 304와 구조용강(SWS 50)의 인장강도¹⁾를 비교해 보면 Fig. 7에서와 같이 STS 304는 22°C의 경우 $\sigma_{T, STS 304}/\sigma_{T, SWS 50}=780/540=1.44$ 인데 비해 -70°C의 경우 $\sigma_{T, STS 304}/\sigma_{T, SWS 50}=1020/650=1.57$ 이므로 저온에서 SWS 50에 비해 인장강도비가 높음을 알 수 있으며 온도가 감소하면서 STS 304의 인장강도 증가비(UTS at -70°C/UTS at 22°C)가 약 1.31로 SWS 50(=1.20) 보다 크다는 것을 알 수 있다.

4.2 충격시험

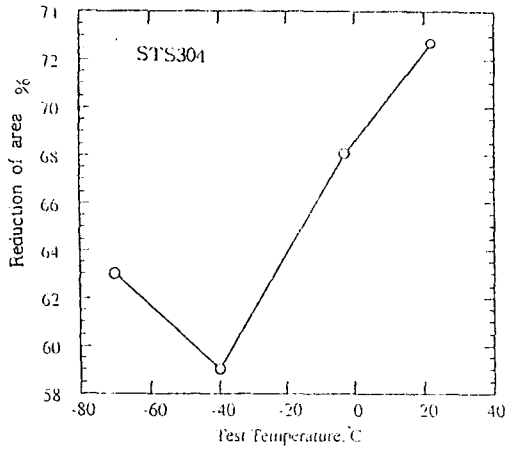


Fig. 5 Reduction of area(%) of STS 304 at different temperatures

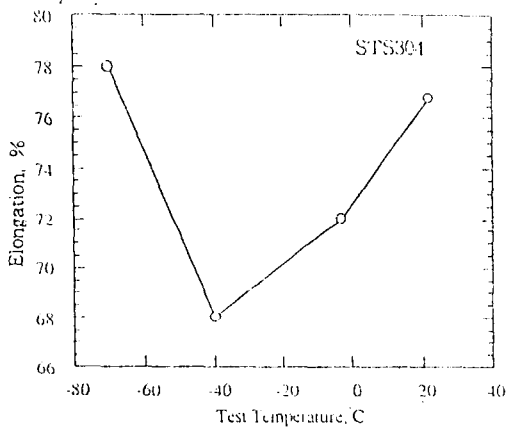


Fig. 6 Elongation of STS 304 at different temperatures

STS 304의 충격치는 Fig. 8에서와 같이 실험 온도가 저하하면서 감소함을 보여주고 있다. 본 STS 304는 오스테나이트계 스테인레스강이므로 연성-취성 전이현상은 없는 것으로 가정되며³⁾ BCC 구조의 구조용강(SWS 50)과 비교하면 충격치는 STS 304가 전 실험온도구간(실온~ -70°C)에서 크다는 것을 나타낸다. 그리고 온도감소에 따라 충격치 감소비(충격치 at -70°C /충격치 at 22°C)는 STS 304는 1.4, SWS 50은 1.2로서 FCC 구조의 STS 304가 온도에 따른 충격치의 영향이 훨씬 적다는 것을 알 수 있다. 그러므로 충격치와 파괴인성이 서로 상관된 관계를 갖고

있다고 가정할 때 파괴역학을 고려한 설계시 저온에서는 STS 304를 사용하는 것이 안전하다는 것은 명백한 사실이다.

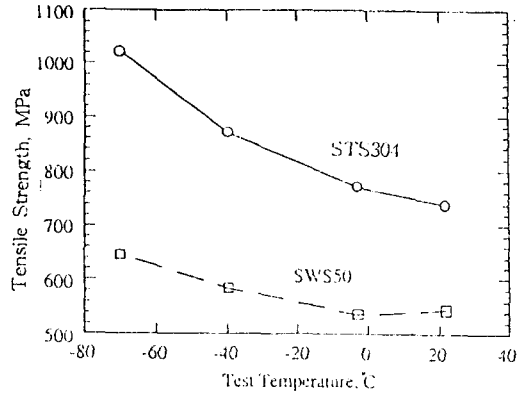


Fig. 7 U.T.S. comparison between STS 304 and SWS 50 at different temperatures

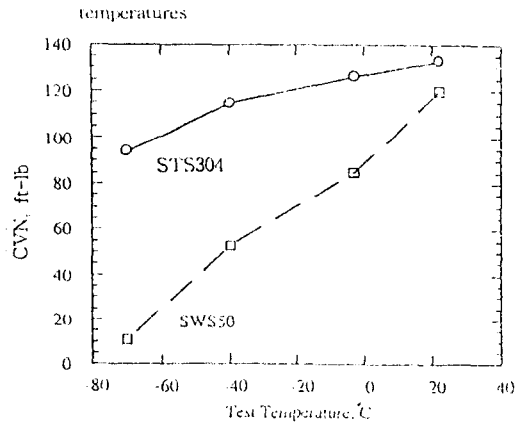


Fig. 8 Charpy impact values of STS 304 and SWS 50 at different temperatures

Fig. 9에서 보듯이 Robert와 Newton⁶⁾식에 의하여 구한 K_{IC} 가 Corten과 Sailors⁵⁾의 K_{IC} 보다 크다는 것을 알 수 있다. 실제 STS 304의 K_{IC} 는 양 관계식에 의한 값을 최소, 최대치로 가정하여 저온에서 설계가 가능하다⁷⁾.

4.3 파면해석

인장시험 후, 전 온도구간에서의 시편들의 파

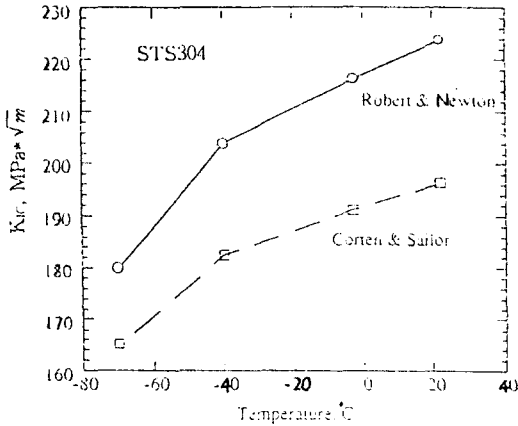


Fig. 9 Use of CVN test results to predict K_{Ic} for STS 304 at different temperatures



Photo. 2 Fracture surface of STS 304 tensile specimen at 22°C

면은 ductile fracture 형태의 모습을 나타내었다. Photos. 2, 3, 4는 22°C, -3°C, -70°C에서의 파단면의 형상을 나타낸다. 모든 파면들은 작은 dimple들로 구성된 전형적인 연성파괴의 양상을 띄고 있다. 그러나 온도가 낮아지면서 dimple들의 크기가 커지고 숫자가 상대적으로 적어짐을 알 수 있는데 이는 한정된 파단 단면내에서 dimple의 숫자가 감소한다는 것은 즉, dimple의

크기가 상대적으로 증가되는 것으로 온도가 저하함으로써 파단시의 에너지 흡수가 저하되며 연성파단의 양상이 상대적으로 감소함을 의미한다.

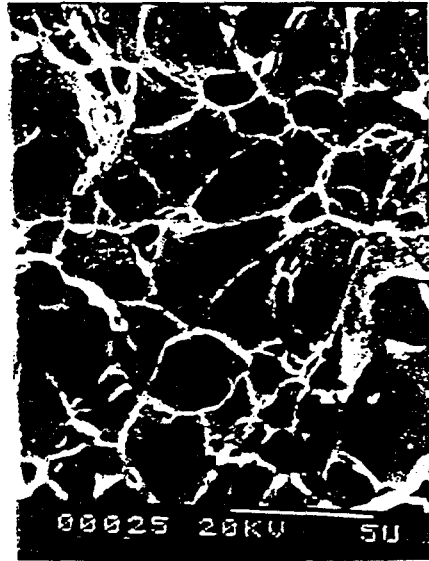


Photo. 3 Fracture surface of STS 304 tensile specimen at -3°C

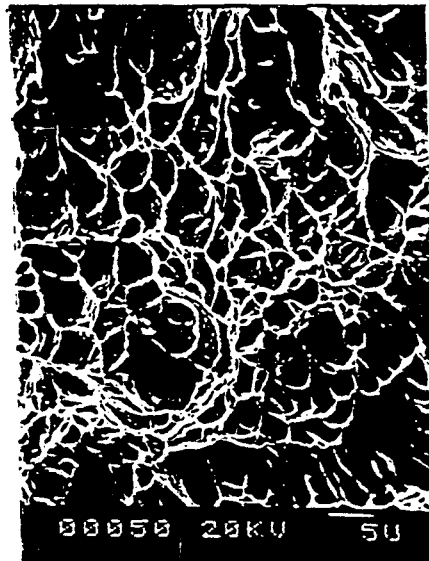


Photo. 4 Fracture surface of STS 304 tensile specimen at -70°C

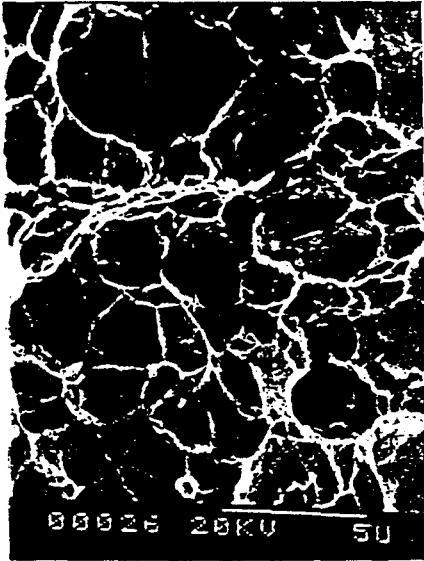


Photo. 5 Fracture surface of STS 304 impact specimen at 22°C

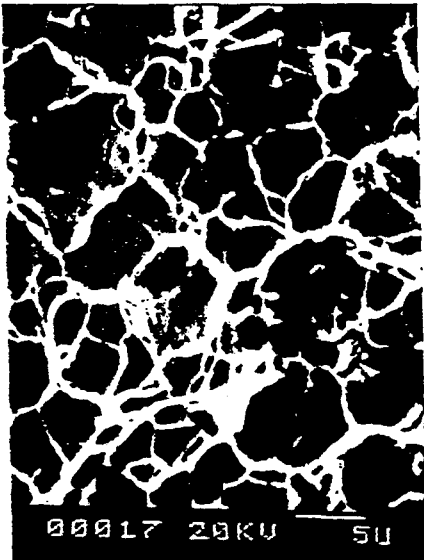


Photo. 6 Fracture surface of STS 304 impact specimen at -3°C

충격시험 후도 마찬가지로 전 온도구간에서 시편들의 파면이 작은 dimple들로 이루어져 있으며 역시 온도가 낮아지면서 dimple들의 숫자가 감소하고 크기가 증가함을 보이고 있다. 다

시 말해 온도저하에 따른 인성치의 감소는 연성 파괴를 대표하는 dimple들의 숫자의 감소와 일치함을 알 수 있으며 전 실험온도구간에서 STS 304는 dimple rupture가 일어났음을 말해준다.

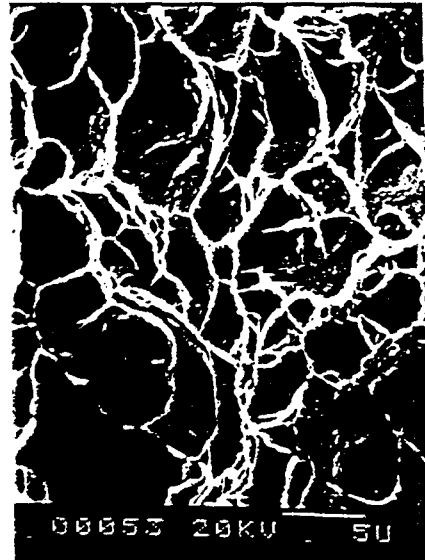


Photo. 7 Fracture surface of STS 304 impact specimen at -70°C

5. 결 론

본 연구에서는 STS 304 스테인레스강의 저온에서의 파괴거동을 연구한 후 구조용강(SWS 50)과 비교, 검토한 결과는 다음과 같다.

- 1) 항복강도와 인장강도는 온도가 감소하면서 증가함을 보였다. 그러나 항복강도보다 인장강도가 온도의 감소에 더 큰 영향을 받고 있음을 보였다.
- 2) 구조용강(SWS 50)에 비해 STS 304가 저온에서 강도가 월등히 높음을 보였고 온도감소에 따른 충격치 감소비는 STS 304에 비해 구조용강이 훨씬 크다는 것을 알 수 있었다.
- 3) 전 실험온도구간인 실온에서부터 -70°C까지 이루어진 STS 304의 인장 및 충격시편의 파면은 작은 dimple들로 이루어진 전형적인 연성파괴양상을 띄었으며 온도가 저하하면서 dimple들의 숫자는 감소하고 크기는 증가함

을 보였다.

참 고 문 헌

- 1) 김두환, 한석규, 안세희 “극한조건하 강구조 부재 이음부의 파괴 거동해석”, 한국산업안전학회지, Vol. 13, No. 4, December, 1998.
- 2) J.M. Barsom, and S.T. Rolfe, “ K_{IC} Transition Temperature Behavior of A517-F Steel”, J. of Engineering Fracture Mechanics, p. 341, 1971.
- 3) J.D. Landes, and J.A. Begley, “The Effect of Specimen Geometry on J_{IC} Stress Analysis and Growth of Cracks, ASTM STP 514, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, pp. 24~39, 1972.
- 4) Annual Book of ASTM Standards, “Standards Test Method for J_{IC} A Measure of Fracture Toughness”. Designation : E 813-81, Vol. 3, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, Pennsylvania, pp. 762-780, 1983.
- 5) J.T. Corten, and R.H. Sailors, “Relationship Between Material Fracture Toughness using Fracture Mechanics and Transition Temperature Tests”, T. & A.M. Report No. 346, University Illinois, Urbana, August, 1971.
- 6) R. Roberts, and C. Newton, “Report on Small-Scale Test Correlations with K_{IC} Data”, WRC Bulletin 299, November. 1984.
- 7) H.I. McHenry, “The Properties of Austenitic Stainless Steel at Cryogenic Temperatures”, in Austenitic Steels at Low Temperatures, R.P. Reed, and T. Horiuchi, Plenum Press, New York, 1983.