



## 연강(Mild Steel)의 극저온 파괴 거동에 대한 실험적 연구

†최성웅·이우일\*

한국기계연구원 극한기계연구본부, \*서울대학교 기계항공공학부  
(2015년 8월 21일 접수, 2015년 12월 8일 수정, 2015년 12월 9일 채택)

## Study on Fracture Behavior of Mild Steel Under Cryogenic Condition

†Sung Woong Choi · Woo IL Lee\*

*Department of Extreme Energy Systems, Korea Institute of Machinery and Materials,  
Daejeon, Korea*

*\*School of Mechanical and Aerospace Engineering, Seoul National University, Seoul  
151-744, Korea*

*(Received August 21, 2015; Revised December 8, 2015; Accepted December 9, 2015)*

### 요약

LNG선이나 해양플랜트 같은 설비나 구조물은 작동 조건을 고려할 때, 특히 부재마다 가지는 고유한 연성 취성 천이온도(Ductile to Brittle Transition Temperature, DBTT)를 고려하여 설계되어야 한다. 본 연구에서는 해양플랜트 및 LNG선에 hull plate로 쓰이는 A-grade 연강(mild steel)에 대해 DBTT를 샤르피 V-노치(CVN) 실험을 통해 알아보고 파괴형상을 통한 파괴거동을 살펴보았다. 그 결과 온도가 감소함에 따라 충격 흡수에너지는 감소함을 보였다. Upper shelf energy region과 lower shelf energy region이 나타나고 그 사이 구간의 천이점을 통해 DBTT가 결정되었다. 파괴형상에서는 upper shelf energy region에서 수많은 딩플이 연성파괴 형상으로 관찰되고 lower shelf energy region에서는 전형적인 취성파단형상이 관찰되었다. 이를 통해 BCC 구조를 가지는 A-grade 연강은 upper shelf energy 구역과 lower shelf energy 구역을 보이고 그 사이 구간의 천이점에서 급격하게 온도가 떨어지는 DBTT 구간을 뚜렷하게 보이는 특성을 알 수 있었다.

**Abstract** - Considering for plants and structure under extreme conditions is required for the successful design, especially temperature and pressure. The ductile-brittle transition temperature (DBTT) for the materials under extreme condition needs to be considered. In this study, A-grade mild steel for the LNG carrier and off-shore plant was examined by performing low-temperature Charpy V-notch (CVN) impact tests to investigate DBTT and the fracture toughness. The absorbed energy decreased gradually with the experimental temperature, which showed an upper-shelf energy region, lower shelf energy region, and transition temperature indicating DBTT. In addition, the fracture surface morphologies of the mild steels indicated ductile fractures at the upper-shelf energy level, with wide and large-sized dimples, whereas a brittle fracture surface, where was observed at the lower-shelf energy level, with both large and small cleavage facets. Based on the experimental results, ductile brittle transition temperature was estimated in about  $-60^{\circ}\text{C}$ .

**Key words** : A-grade mild steel, CVN, DBTT, Ductile fracture, Brittle fracture

†Corresponding author: younhulje@kimm.re.kr  
Copyright © 2015 by The Korean Institute of Gas

## I. 서론

천연가스와 관련된 탄화수소 계열 석유화학 제품들은 운송 및 운반의 용이성을 위하여 저온 및 극저온 온도로 액화하여 취급된다. 또한 액화천연가스(liquefied natural gas, LNG) 및 액화석유가스(liquefied petroleum gas, LPG)를 제조하는 과정에서 나오는 액화물(Natural gas liquid, NGL)은 생산 및 가공 프로세스 라인의 공정별 온도를 고려한 특성에 맞추어 처리 및 생산된다. 일반적으로 극저온에서 취급되는 재료는 안전밸브 및 이송 파이프 등의 극한 상태에서 충분한 안전성을 고려하여 취급된다.

한편 LNG선에서 선체(hull)를 지탱하는 구조체(structure)의 경우 LNG를 운반하는 화물창 탱크(cargo tank)를 받치고 동시에 바깥부분(outer hull)인 해수 및 평형수(water ballast)와 접촉하는 구조로 되어 있다. 따라서 LNG는 구조상 화물창 시스템(containment system)의 온도는 바깥 해수의 온도의 영향이 불가피한 구조이고 열적 부분에 대한 고려가 필수적이다. 부유식 액화천연가스 생산 저장 하역설비(Floating LNG, FLNG)선 같은 해양플랜트의 경우, 부유체 선체 부분(hull side)이 구조체로서의 역할을 담당하고 있는데 상부구조물과 선체(topside & hull Side)와 같은 주요 설비가 온도가 낮아짐에 따른 취성 대한 고려가 필수적이다[1].

이러한 부재는 극저온 환경이나 저온 환경에서 노출될 수 있는 개연성이 있고, 각 부재마다 가지는 고유한 연성 취성 천이온도(Ductile to Brittle Transition Temperature, DBTT)를 고려하여 설계되어야 한다. DBTT 이하의 온도에서는 갑작스럽게 부재가 연성을 잃어버리고 취성의 성질을 띠게 되어 약간의 충격에도 쉽게 파괴되는 취성파괴 특성을 보이게 된다. 특히 온도가 상시 저온을 유지하는 도로교의 건축 설계 시[2]와 대형 액화공정 플랜트 및 원자로 용기 시공 등에서는 취성파괴에 대한 안정성을 확보해야 하며 이에 대한 많은 연구들이 수행되어 왔다[3]. 각각의 물질에 대한 취성 파괴의 위험성은 취성천이지점의 논의에서 시작되고 각 부재마다의 취성천이온도의 시작점이 어디인가에 대한 연구는 아직도 많은 부분에서 진행 중이다.

탄소강(carbon steel)중 하나인 연강(Mild steel)은 대표적인 체심입방격자(body-centered cubic lattice, BCC) 구조를 가지는 물질이다. 대부분의 금속은 넓은 범위에 걸쳐 DBTT를 보이고 이러한 변이구간을 밝히고자 많은 연구들이 진행되었다[4]. 하지만 BCC 구조체의 경우, 특정 온도에서 급격하게 떨어지는 DBTT 구간의 특성을 보이며 이는 특정 온도에서 뚜렷한

연성-취성 천이 영역을 가진다.

본 연구에서는 해양플랜트 및 LNG선에 hull plate로 쓰이는 A-grade 연강에 대해 DBTT를 알아보고 파괴형상을 통한 파괴거동을 알아보고자 한다.

## II. 실험

### 2.1. 재료의 인성 측정

금속의 인성(Toughness)이란 인장응력을 받을 경우 소성변형 없이 취성파괴에 저항하는 재료의 고유한 성질이다. 재료에 대한 인성의 값을 알아내는 방법에는 평면변형을 파괴 인성법(Plane strain fracture toughness), CTOD(Crack tip opening displacement, CTOD), J적분(J-integral) 등의 방법 등이 있다. 그 중에 시험 평가의 간편성과 소요 시간 등을 고려한 가장 일반적으로 수행하는 방법이 샤르피 충격시험(Charpy impact test)법이다[5-7]. 특히 용접부와 같이 모재 부위와 열영향부 등의 부위별 인성을 평가하는데 주로 샤르피 충격시험이 주로 사용되었고 본 저자의 경우, 용접 인성을 표현하는 데에 샤르피 충격시험을 사용하여 각 부재별 인성 특성을 평가하여 발표한 바 있다[8]. 각 부재가 사용되는 환경특성을 고려하여 온도별 인성 특성을 알아보는 것은 플랜트 및 구조물의 설계 시 반드시 고려하여야 할 사항이다[2-3].

샤르피 V-노치(CVN) 테스트로 알려진 샤르피 충격법은 파괴되는 동안 재료에 흡수된 에너지의 양을 측정하는데 그림 1과 식(1)에 의해 충격 흡수에너지가 표현된다.

$$E_{CVN} = MR(\cos\beta - \cos\alpha)g \quad (1)$$

여기서  $E_{CVN}$ 는 CVN테스트 동안 흡수된 에너지, M은 진자의 질량, R은 시편의 길이,  $\alpha$  낙하각도,  $\beta$ 는 시편이 절단된 후 진자해머가 회전한 각도, g는

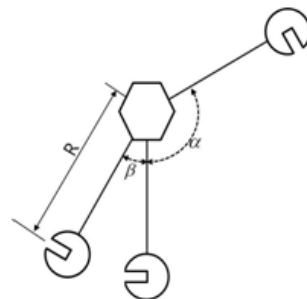


Fig. 1. Diagram of CVN impact test

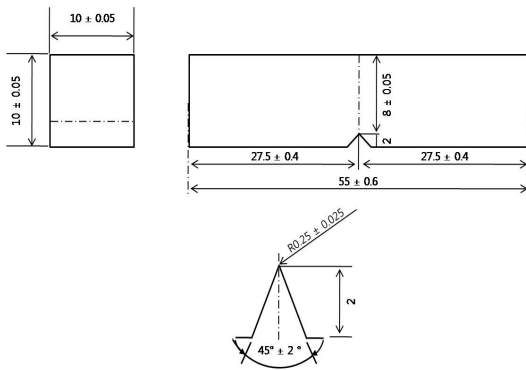
충격가속도를 나타낸다. 본 시험에서는 대상 강재에 대해 CVN 실험을 실시하여 환경온도별 충격 흡수 에너지 값에 따른 DBTT의 양상을 알아보았다. 또한 온도에 따른 재료의 파단형상을 미시적 관점에서 온도에 따른 재료의 파단 거동을 관찰하여 분석 결과를 뒷받침하였다.

**2.2. 시험 재료**

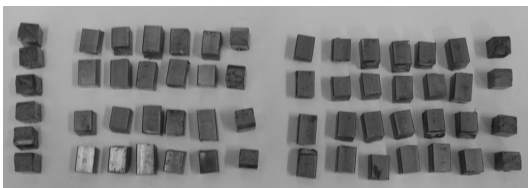
연강이라고 하면 보통 0.25% 이하의 탄소함유율을 가진 합금을 의미한다. 본 연구에서 사용된 재료의 시편은 주로 선박 및 해양구조물에서 높은 활용도를 가지는 A-grade 연강을 대상으로 하였다. 사용

**Table 1.** The chemical composition of specimens, its mechanical properties

	C	Cr	Ni	Mn	S	P	Si
Case 1	0.15	0.05	0.06	0.45	0.025	0.015	0.15
Case 2	0.14	0.04	0.03	0.345	0.020	0.013	0.12
Yield strength (MPa)					240		
Tensile strength (MPa)					460		
Elongation (%)					25		



**Fig. 2.** Specification of test specimen.



**Fig. 3.** The fractured specimens.

된 시편의 화학 구성비와 물성치는 한국화학시험연구원에서의 측정치를 토대로 하였으며 이는 표 1에서 보는 바와 같다.

시험 시편은 그림 2에서 보는바와 같이 ASTM E32에 따라 10 x 10mm<sup>2</sup>의 면적에 55 mm 길이 규격으로 제작되었다. 2mm 깊이를 가지는 45° V-노치는 0.25mm 노치 반지름으로 제작되었다.

**2.3. 시험 방법**

샤르피 충격시험은 KSB 0810(2003) 「금속재료 충격시험방법」에 따라 시험을 실시하였다[9]. 시험온도는 금속의 저온거동 및 DBTT를 찾기 위해 +20°C에서 -196°C까지 열 구간의 인터벌로 나누어서 실시하였으며 그림 3에서 보는 바와 같이 각각의 온도에서 3개의 시험편을 실험하여 결과값을 얻을 수 있었다. 시험온도는 솔레노이드 밸브에 의해 액체질소의 양이 조절되는 냉동챔버에 관한 시편을 넣고 시험온도를 맞추었다. 시험시편이 각각의 시험온도에 도달하도록 열 침투시간을 반영한 열적 평형상태를 고려하여 대략 40-50분 정도의 시험온도에 유지시킨 다음 시험편을 챔버에서 꺼내어 5초 이내에 충격시험을 실시하였다.

**III. 시험 결과**

**3.1. 충격시험 결과**

그림 4에서는 상온에서부터 액체질소온도인 -196°C까지의 환경온도에 따른 연강의 충격 흡수에너지 결과 값을 보여준다. 흡수에너지는 시험편이 파단하는데 필요한 에너지를 말하며 실험 결과에 따르면 충격에 의한 물질의 흡수에너지는 테스트 온도에 따라 점차 감소하는 경향이 나타나는데 그 결과는 온도에 따라 각기 특징적인 양상을 나타낸다. 온도가 상온에서 -25°C까지는 upper shelf energy region이 나타나고, -100°C에서 -196°C까지는 lower shelf energy region이 각각 나타난다. 그 사이는 급격하게 흡수에너지가 감소하는 천이점을 관찰할 수 있다. Upper shelf energy region에서는 흡수에너지가 30 J 근방으로, 온도에 따른 흡수에너지의 감소폭이 크지 않은 구간의 특성을 관찰할 수 있다. 이는 연강이 -25°C까지는 연성의 특징을 가지고 있는 것을 암시한다. 하지만 온도가 감소함에 따라 흡수에너지는 30 J 근방에서 10 J 근방으로 급격한 감소가 나타나는 것을 알 수 있다. 그리고 또다시 -100°C 이후로 변화폭이 크지 않은 lower shelf energy 구간이 나타난다. 각각의 흡수에너지의 변화가 거의 없는 구간에서는 물성의 흡수에너지 변화가 없는 구간을 의미한다.

다. 즉 상온에서는 연성의 성질이 우수하고 저온에서는 취성의 성질이 우수하며 이러한 성질의 변화가 없음을 암시한다. 그리고 -100°C 이후로 나타나는 흡수에너지의 변화가 거의 없는 구간에서는 연강이 취성의 형태를 가지고 있음을 알 수 있다. 온도가 상온에서 -25°C까지의 upper shelf energy region과 -100°C 이하에서의 lower shelf energy region 사이 급격하게 흡수에너지가 감소하는 전이점인 DBTT는 -60°C 근처에 존재함을 알 수 있다.

### 3.2. 미세조직 분석

연강의 온도에 따른 충격 흡수에너지의 거동에 따르면 상온에서 -25°C까지의 연성의 모습을 보인 upper shelf energy region과 -100°C 이하에서 취성의 모습을 보인 lower shelf energy region이 존재함을 알 수 있었다. 이러한 현상은 미시적 관점의 파단면 분석(fractographic analysis)을 통해 파악될 수 있다. 본 연구에서는 주사전자현미경(SEM) (S-4800, Hitachi, Inc., Japan)을 이용하여 연강의 온도에 따른 파단면 형상을 분석하고 DBTT와 전후 온도에서의 거동을 파악하였다.

그림 4은 각 시험온도(25°C에서 -150°C)에 따른 대표적인 파단면을 보여준다. 각각의 파단면을 통한 결과에서 볼 수 있듯이, 시험온도가 25°C에서 -150°C로 감소할수록 파단면에서의 파단형상이 연성파단형상에서 취성파단형상의 모습을 보이는 것을 알 수 있다. 그림 5 a), b)에서 알 수 있듯이, 충격시험결과에서와 마찬가지로 상온에서 -25 °C까지는 연성파

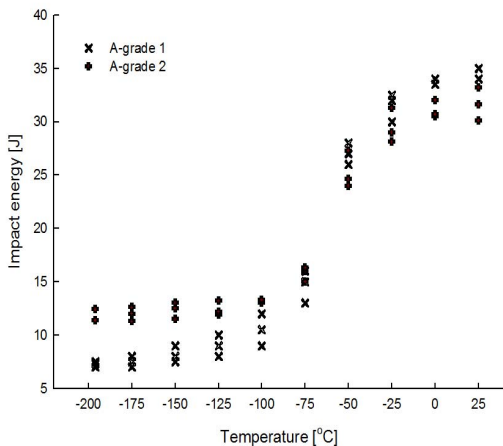


Fig. 4. The impact energy under different temperatures.

괴 형상인 딴플이 주요 결정입자의 모습으로 관찰되었고 수많은 크고 작은 여러 모양들로 보인다. 반면 그림 5 e), f)에서 볼 수 있듯이, lower-shelf energy region 부근의 -100°C 이하에서는 전형적인 취성파단형상이 관찰되는데 결정입자의 모습이 flat and fragile 특징을 가짐을 볼 수 있다. 이러한 모습은 시험온도가 내려갈수록 더욱 뚜렷하게 나타난다. Sharp-edge and coarse의 결정입자 모습이 뚜렷하게 나타나고 취성 파단형상인 깨짐과 부서짐의 형상이 주요 파단 모습으로 관찰되었다.

미시적 관점으로 볼 때 결정입자가 깨지지 않고 딴플 형상을 가진다는 것은 단위면적당 더 많은 에너지를 가지고 있다는 것을 의미하고 재료가 파단되기 전까지 에너지를 흡수할 수 있는 능력인 흡수에너지가 크면 클수록, 파단 되지 않고 에너지를 흡수할 수 있는 재료의 능력은 커지기[10, 11] 때문에 충격 흡수에너지가 높은 연성의 특징을 가진다고 볼 수 있다. 이는 Benedetti 등(2005)의 연구에의 결과와 동일한 파괴형상의 결과를 나타내는데[10] 시험 온도에 따라 달라지는 흡수에너지가 높은 파단형상은 연성구간에서는 딴플 형상으로 대표될 수 있고 시험온도가 취성 영역인 -100°C 이하에서는 sharp-edge and coarse 입자들로 깨짐과 부서짐의 형상들로 구성되는 것도 동일하게 확인된다[12]. 이들의 결과를 토대로 충격

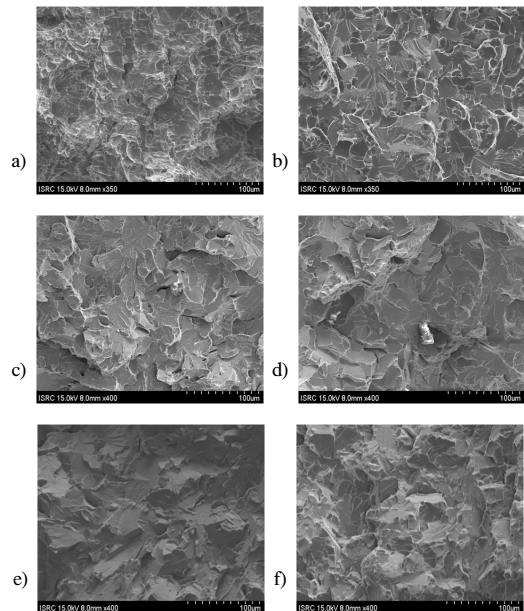


Fig. 5. The fractured surface of specimens (a: 상온, b: -25 °C, c: -50 °C, d: -75 °C, e: -100 °C, f: -150 °C)

시험과 미세조직 분석을 통해 사용된 A-grade 연강의 DBTT는 약 -60°C 근방의 값을 추정할 수 있다.

#### IV. 결론

본 연구에서는 해양플랜트 및 LNG선에 쓰이는 A-grade 연강에 대해 DBTT를 알아보고 파괴형상을 통한 파괴거동을 알아보았다. 온도에 따른 충격 흡수 에너지를 알아보고자 CVN실험을 수행하여 재료의 거동을 알아보았고 재료의 파단면 형상을 미시적 관점에서 분석하였다. 본 연구의 결과는 다음과 같다.

(1) 온도가 감소함에 따라 충격 흡수에너지가 감소하였고, 충격흡수에너지는 온도구간에 따른 특징을 다음과 같이 보여준다,

- ① 상온 ~ -25°C: upper shelf energy region
- ② -25°C ~ -100°C: 천이구간
- ③ -100°C ~ -196°C: lower shelf energy region.

Upper shelf energy region 에서의 연성의 특성, lower shelf energy 구간에서는 취성의 특성이 각각 나타나는 것을 알 수 있었고 천이점에서는 DBTT가 결정되었다.

(2) 파단면을 통한 미세조직 분석결과 시험온도가 25°C에서 -196°C로 감소할수록 결정입자모습으로 연성 및 취성의 성질을 추정할 수 있었다. 연성 파단형상의 대표적인 특징으로 나타나는 수많은 덩플 결정모습이 연성구간에서 보였고 취성파단형상의 대표적인 특징인 flat and fragile의 모습이 취성 구간에서 나타남을 미세조직 분석을 통해 확인할 수 있었다.

(3) 충격시험과 미세조직 분석을 통해 사용된 A-grade 연강의 DBTT는 약 -60 °C 근방을 값을 나타냄을 알 수 있다.

#### REFERENCES

[1] Kumar, S., Kwon, H.T., Choi, K.H., Cho, J.H., Lim, W.S. and Moon, I, "Current status and future projections of LNG demand and supplies: A global prospective", *Energy Policy*, 39-7, 4097-4104, (2011)

[2] Kim, I. P., Heo, Y., Park, Y. S., Yoon, T. Y., "Introduction of Bridge Design Specification,

2008 Interim ", *Harmony of the Nature and Civilization / v.56 no.10*, pp.59-66, (2008)

[3] Manahan, M., "Determination of Charpy transition temperature of ferritic steels using miniaturized specimens." *Journal of Materials Science*, 25(8): 3429-3438, (1990)

[4] Tanguy, B., Bensson, J., Piques, R., Pineau, A., "Ductile to Brittle Transition of an A508 Steel Characteristics by Charpy Impact Test Part: I Experimental Result", *Engineering Fracture Mechanics*, 72(1): 49-72, (2005)

[5] Kumar, A.S., Louden, B.S., Garner, F.A., and Hamilton, M.L., "Small specimen test techniques." *ASTM STP 1204*, 47, p47, (1993)

[6] Mitra, G., and Boyer, S.E., "Energy balance and deformation mechanisms of duplexes." *Journal of Structural Geology* 8(3): 291-304. (1986)

[7] Lee, C.H., Shin, S.H., Park, K.T., and Yang, S.H., "Evaluation of the applicability of structural steels to cold regions by the Charpy impact test", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, 23(4): 483-491, (2011)

[8] Kim, J.H., Choi, S.W., Park, D.H., Lee, J.M., "Cryogenic Charpy Impact Test based on GTAW Method of AISI 304 Stainless Steel for LNG Pipeline", *Journal of Welding and Joining*, Vol.32, No.3, pp37-42, (2014)

[9] KS B 0810, Method of impact test for metallic materials, *Korean Standards*, (2003)

[10] Benedetti, M., Heidemann, J., et al., "Influence of sharp microstructural gradients on the fatigue crack growth resistance of  $\alpha + \beta$  and near  $\alpha$  titanium alloys." *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 28(10): 909-922, (2005)

[11] Gere, J.M., Goodno, B.J., "Mechanics of Materials." 7th Edition, *Cengage Learning*, Toronto, (2009)

[12] Commentary and worked examples to EN 1993-1-10 "Material toughness and through thickness properties" and other toughness oriented rules in EN 1993