

## 극저온 액화가스 누출에 의한 선체 구조용 강재의 샤르피 충격성능에 관한 연구

### A Study on the Charpy Impact Performance of Structural Steel Considering the Leakage of Cryogenic Liquefied Gas

강동혁<sup>1</sup>, 김정현<sup>2</sup>, 김슬기<sup>2</sup>, 김태욱<sup>2</sup>, 박두환<sup>2</sup>, 박기범<sup>1</sup>, 이제명<sup>1,2\*</sup>

Dong Hyuk Kang<sup>1</sup>, Jeong-Hyeon Kim<sup>2</sup>, Seul-Kee Kim<sup>2</sup>, Tae-Wook Kim<sup>2</sup>,  
Doo-Hwan Park<sup>2</sup>, Ki-Beom Park<sup>1</sup>, Jae-Myung Lee<sup>1,2\*</sup>

#### 〈Abstract〉

Environmental regulations are being strengthened worldwide to solve global warming. For this reason, interest in eco-friendly gas fuels such as LNG and hydrogen is continuously increasing. However, when adopting eco-friendly gas fuel, liquefying at a cryogenic temperature is essential to ensure economic feasibility in storage and transportation. Although austenitic stainless steel is typically applied to store cryogenic liquefied gas, structural steel can experience sudden heat shrinkage in the case of leakage in the loading and unloading process of LNG. In severe cases, the phase of the steel may change, so care is required. This study conducted Charpy impact tests on steel material in nine different temperature ranges, from room to cryogenic temperatures, to analyze the effects of cryogenic liquefied gas leaks. As a result of the study, it was not easy to find variations in ductile to brittle transition temperature (DBTT) due to the leakage of cryogenic liquefied gas. Still, the overall impact toughness tended to decrease, and these results were verified through fracture surface analysis. In summary, brittle fracture of the steel plate may occur when a secondary load is applied to steel for hull structural use exposed to a cryogenic environment of  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$  or lower. Therefore, it needs to be considered in the ship design and operating conditions.

*Keywords : Charpy Impact Test, AH36 Steel, Cryogenic Leakage, Brittle Fracture*

1\* 부산대학교 조선해양공학과  
E-mail: jaemlee@pusan.ac.kr

2 부산대학교 수소선박기술센터

1\* Department of Naval Architecture and Ocean Engineering,  
Pusan National University

2 Hydrogen Ship Technology Center, Pusan National University

## 1. 서론

유엔 산하의 국제해사기구(International Maritime Organization, IMO)는 해양에서 발생하는 오염 문제에 유연하게 대처하기 위해 환경규제를 지속해서 강화하고 있다. 이를 준수하기 위해 기존 병커C유, 디젤 기반의 연료 대비 상대적으로 환경오염을 보다 적게 발생시키는 액화가스에 관한 관심이 증대되고 있다[1-3]. 친환경 연료에 대한 수요 증가는 선박을 포함한 해양구조물의 변화를 가져왔다. 액화천연가스(Liquefied Natural Gas, LNG)는 천연가스를 -163도의 극저온 환경에서 액화시킨 것으로 상온·상압 대비 부피를 600배 줄일 수 있어 저장 및 운송 효율 측면에서 경제성을 확보할 수 있다. 다만, -163도라는 극저온 온도를 유지할 수 있는 단열소재를 이용해 열 유입을 차단할 수 있는 형태로 운용된다. 저장탱크의 형태에 따라 상이하겠지만 주로 폴리우레탄 폼이나 그라스울 등 다양한 단열소재가 적용되어 LNG가 기화되는 것을 최소화하는 한편, 기화되는 천연가스는 재액화하거나 선박 추진 연료로 활용하는 등의 조치를 취한다[4-6].

LNG와 직접 맞닿게 되는 강재는 오스테나이트계 스테인리스강, 알루미늄 합금, 니켈강, 고망간강 등 -163도의 극저온 환경에서도 충분히 안전성을 확보할 수 있도록 하고 있다. 특히 오스테나이트계 스테인리스강은 변태유기소성(Transformation Induced Plasticity, TRIP) 강으로 마르텐사이트 상 변태로 인해 저온 환경에서도 우수한 기계적 성능을 가지고 있으며, 이러한 이유로 LNG뿐만 아니라 액체 수소 등 저온 및 초저온 영역에서 가동되는 구조물에 적용되고 있다. 이들 강재의 극저온 특성에 관한 연구는 다수 보고된 바 있다. 다만, LNG를 선적 및 하역 시 극저온 액화가스의 누출로 인해 극저온 강재가 아닌 선체 구조용 강재에 극저온

액화가스가 직접적으로 닿게 되면 열변형이 발생하여 수축이 발생할 수 있고, 급격한 온도변화에 기인한 국부적 응력집중이 발생할 수 있으며, 그에 따라서는 재질의 변화를 동반한 취성파괴가 발생할 수 있다. 과거 연구를 통해 선체에 적용되는 강재에 관한 극저온 액화가스 영향성에 대해 다수 보고된 바 있다. Kim et al.(2015)는 LNG 운송선 1차 방벽으로 적용되는 304 스테인리스강을 대상으로 상온에서 -196도에 이르는 샤르피 충격시험을 수행했다. FCC 구조인 304 스테인리스강은 극저온 액화가스로 인해 Ductile to Brittle Transition Temperature (DBTT)가 발생하지 않았고, 충격 인성이 다소 감소하는 결과를 보였다. 기계적 거동 분석 결과를 미세구조 분석과 연계해서 결과를 입증했다[7]. Chen et al.(2018)은 고망간강을 대상으로 샤르피 충격 시험을 수행하였다[8]. Park et al.(2022)는 열처리를 진행한 고망간강을 대상으로 극저온 온도 영역에서 Charpy 충격 시험을 수행하였다. 시험 결과, 대상 강재는 극저온 온도에서도 취성파괴로 대표되는 마르텐사이트 상이 발생하지 않은 것을 확인하였다[9]. 이 외에도 선박에 적용되는 극저온 강재를 대상으로 극저온 충격인성 분석에 관한 연구가 다수 보고되었다[10,11]. 다만, 대부분의 연구는 극저온 강재의 극저온 환경에서의 안전성 검증에 초점이 맞추어져 있으며, 실제 액화가스 누출 때문에 주변의 선체 강재에 의한 문제 혹은 피해에 관한 정량적인 연구는 거의 수행되지 않은 실정이다. 본 연구에서는 선체 구조용 강재인 AH36을 대상으로 극저온 액화가스에 의한 충격 인성에 대해 정량적으로 평가하였다. 극저온 액화가스에 노출된 강재와 노출되지 않은 강재를 대상으로 상온에서 -163도에 이르는 9개의 온도 영역에서 충격 시험을 수행했다. 또한, 온도에 의존한 미세구조 분석을 통해 파단면에 대한 분석을 수행하였다.

## 2. 시험 개요

### 2.1 극저온 누출 시험편 제작

극저온 액화가스에 의한 충격인성에 대한 정량적인 평가를 수행하기에 앞서 극저온 액화가스에 노출된 강재 시험편을 제작하기 위해 Fig. 1과 같은 판재를 준비하였다. 실제 구조물 상황과 같은 경계조건을 부여하기 위해 지지구조는 고정단으로 설정하였고, 폴리우레탄 폼으로 둘러싸인 곳에 액체질소를 분사하여 극저온 액화가스 누출 시나리오를 설정하였다. 극저온 액화가스에 노출된 판재가 30분 이상 지속된 이후에 충분한 시간을 통해 강재가 회복할 수 있도록 하였다. 이후 액체질소에 직접적으로 노출된 지점을 중심으로 샤르피 충격 시험편을 제작하였다.

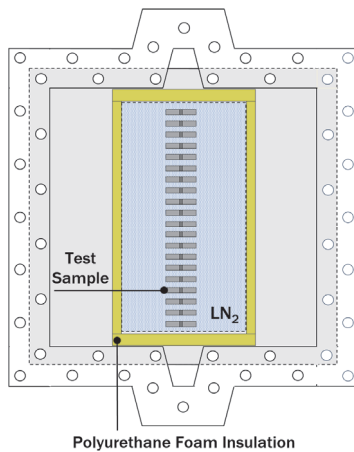


Fig. 1 Preparation of the cryogenic leakage test to obtain the testing samples

### 2.2 대상 강재

본 연구에서 진행한 대상 강재는 고강도 구조용 강재인 AH36으로, 각종 컨테이너선, 벌크선, 페리 등 다양한 선박에 적용되는 강재이다. Table 1에 본 연구 대상 강재에 대한 화학적 조성비를 나타내었다.

### 2.3 시험 시나리오

본연구에서는 극저온 액화가스 누출에 의한 선체 구조용 강재의 영향을 분석하기 위해 극저온 액화가스에 노출된 시험편과 노출되지 않은 시험편을 대상 강재로 선정하였고, 상온에서 LNG 저장에 사용되는 -163도에 이르는 총 9개의 온도 (20, 0, -20, -30, -40, -50, -60, -100, -163℃) 환경을 조성하여, 샤르피 충격시험을 수행했다. Table 2는 본 연구를 통해 수행한 시험 시나리오를 정리한 표이다.

저온 시험의 경우 극저온용 챔버를 설치한 후 액체질소를 분사하여 시험편을 예냉하였으며, 시험편 내부의 열 평형상태를 고려해 1시간 정도의 예비냉각 시간을 가졌다. ASTM A370 규격에 의존하여 설정된 온도 범위를  $\pm 1^{\circ}\text{C}$  이내로 조정후 시험편을 극저온 챔버에서 꺼낸 후 5초 이내에 시험을 진행하여 시험 오차를 줄이려고 하였다. 테스트 결과의 정확성과 재현성을 검증하기 위해 각 케이스에 대해 5회 반복 테스트를 진행하였다. 시험 결과는 5회 반복한 시험편 중 최댓값과 최솟값을 제외한 3개의 데이터의 평균값을 이용해 정리하였다.

Table 1. Chemical composition of AH36 steel

Material	Chemical composition (wt. %)						
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni
AH36	0.18	0.33	1.22	0.035	0.035	0.2	0.040

Table 2. Scenario for charpy V-notch impact test

No.	Cryogenic Leakage	Temperature (°C)
1		20
2		0
3		-20
4		-30
5	Non-affected	-40
6		-50
7		-60
8		-100
9		-163
10		20
11		0
12		-20
13		-30
14	Affected	-40
15		-50
16		-60
17		-100
18		-163

Table 3. Performance degradation caused by experiencing the cryogenic leakage

No.	Leakage	Temperature (°C)	Absorbed Energy (J)
1		20	47.0
2		0	46.5
3		-20	45.2
4		-30	34.8
5	As-received	-40	23.9
6		-50	15.2
7		-60	12.2
8		-100	3.0
9		-163	2.1
10		20	44.7
11		0	43.8
12		-20	42.3
13		-30	32.1
14	Cryogenic Leakage	-40	22.5
15		-50	11.1
16		-60	8.0
17		-100	2.5
18		-163	2.0

### 3. 실험 결과 및 고찰

#### 3.1 극저온 액체 누출에 의한 영향

Fig. 2에 온도에 따른 샤르피 흡수 에너지를 나타내었다. 실험을 수행했던 온도 영역을 x축으로 설정하였고, 시험 진행 후 충격 흡수 에너지를 y축으로 나타내었다. 그림에서 나타난 것과 같이 시험을 시행한 AH36 강재는 충격 흡수 에너지가 급격히 감소하는 DBTT가 발생하는 것을 확인할 수 있었다. 극저온 액화가스에 노출된다고 하더라도 DBTT에 변화가 생겼다고는 확인이 어려우며, 두 경우 모두 DBTT는 -20도에서 -50도 사이에서 발생한 것을 확인할 수 있었다. 우선, 극저온 액화가

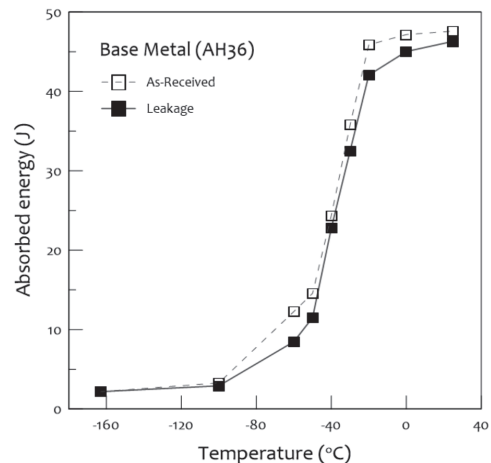


Fig. 2 Temperature-dependent absorbed energy for AH36 considering the cryogenic leakage

스를 경험하지 않은 시험 결과의 경우 DBTT가 발생하기 전 최대 흡수 에너지는 약 47J로 조사되었으며, DBTT 후 약 10J에서 -163도의 온도 영역에서는 5J 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 극저온 액화가스 누출에 의한 경우는 충격 흡수 에너지 감소율이 온도별로 나타나는 것을 확인할 수 있었다. DBTT가 발생하기 전 최대 흡수 에너지는 약 45J로 조사되었으며, DBTT 후 약 11J에서 -163도의 온도 영역에서는 5J 이하로 떨어지는 것을 확인할 수 있었다. 대체로 액체수소 누출을 경험하여 판재가 급격한 수축을 경험하고 난 이후에 상대적으로 충격 흡수 에너지가 감소하는 것을 확인할 수 있었다. 극저온 누출을 경험한 시험편은 DBTT 구간에서의 충격 흡수 에너지 감소율이 약 74%로써, 누출을 경험하지 않은 시험편의 에너지 감소율인 67% 대비 약 7%가량의 차이가 더 나타난 것으로 확인되었다. Table 3에 온도별 충격 흡수 에너지에 대해 정리하였다.

### 3.2 파단면 분석

Fig. 3은 20도의 상온에서와 -60도 일 때의 파단면을 나타낸 사진이다. Fig. 3(a)은 하중이 가해졌을 때 충분한 변형이 발생한 이후에 파손이 발생하여 비교적 불규칙한 파손 형상을 보인다. 반면, DBTT 이후의 영역에 있는 Fig. 3(b)의 -60도

파단면의 경우 상대적으로 매끈한 면을 보이고 있어 취성파괴에 의한 거동을 육안으로 확인할 수 있었다.

### 3.3 미세구조 분석

Fig. 4에 온도에 따른 파단면 형상을 나타내었다. DBTT가 발생하기 전의 파단면과 DBTT가 발생하는 온도 영역에서의 파단면, 그리고 이후의 파단면을 각각 분석하고자 하였으며, 상온, -40도, -60도, -163도 이렇게 네 가지 시나리오 시험 결과를 나타내었다. 먼저 Fig. 4(a)에는 덩플에 의한 파단면을 확인할 수 있다. 덩플 발생으로 인해 해당 환경에서는 충분한 변형 이후에 파손이 발생했을 것으로 짐작할 수 있으며, Fig. 2의 높은 수준의 충격 흡수 에너지에 대한 근거가 될 수 있을 것이라 사료된다. Fig. 4(b)는 DBTT가 발생한 온도 범위에서의 파손 형상을 보인다. 해당 면에서 연성파괴와 취성파괴의 흔적을 동시에 확인할 수 있으며, 연성파괴 면의 경우 상온 대비 훨씬 넓은 영역의 덩플이 확인되었고, 하단부에서는 취성파괴의 대표 표면인 Cleavage Facets를 확인할 수 있다. Fig. 4(c)는 DBTT 이후의 -60도에서의 파단면인데, 가장자리가 날카롭고 거친 덩플이 아닌 상대적으로 찢어진 듯한 거친 면을 확인할 수 있다. Fig. 4(d)는 LNG 운반선 저장 온도인 -163도



Fig. 3 Temperature-dependent fracture surface for AH36 on the tested temperatures: (a) 20 and (b) -60°C.

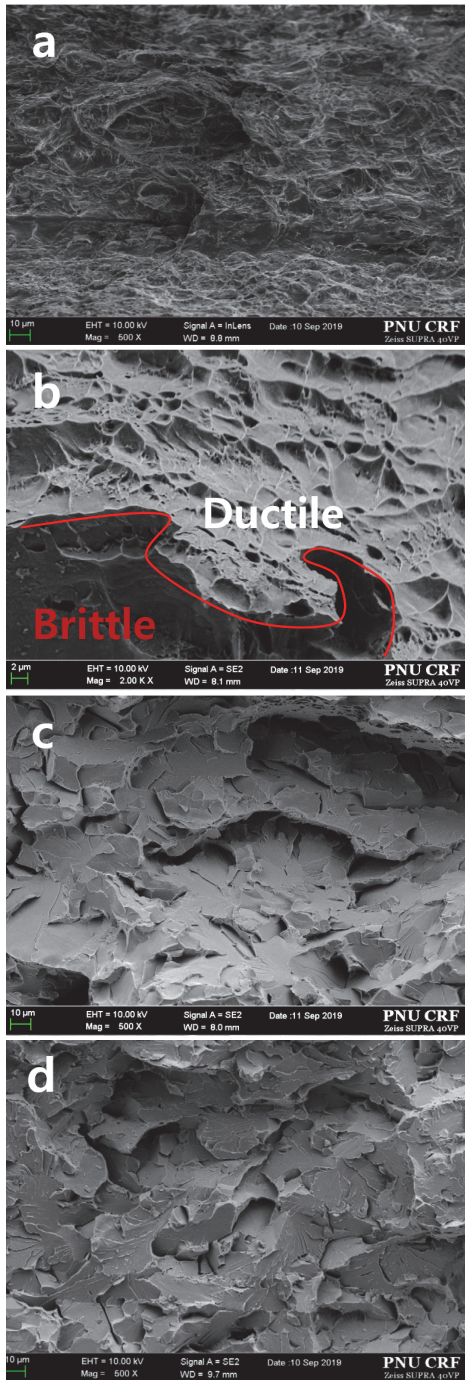


Fig. 4. Fractured surface of AH36 steel depending on the tested temperatures: (a) 20, (b) -40, (c) -60, and (d) -163°C.

에서의 거동을 보이며, 불연속적으로 표시되는 취성파괴 거동을 보였다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 극저온 액화가스 누출에 의한 선체 주변 강재의 영향을 분석하기 위한 연구로 AH36에 대한 샤르피 충격시험을 수행하였다. 극저온 액화가스에 노출된 시험편을 제작하기 위해 판을 고정한 상태에서 액화가스에 노출시켰으며, 충분한 시간이 지난 후에 시험편을 제작하여 상온과 극저온에 이르는 총 9개의 온도 영역에서 테스트를 수행했다. 본 연구를 통해 확보한 내용을 아래에 간단히 정리하였다.

- AH36은 -20도에서 -50도 사이의 온도 영역에서 DBTT가 발생하였으며, 이로 인해 설계 시 DBTT 발생 이전 온도에서 사용될 수 있도록 고려되어야 한다.
- 극저온 누출을 경험한 시험편은 DBTT 구간에서의 충격 흡수 에너지 감소율이 약 74%로써, 누출을 경험하지 않은 시험편의 에너지 감소율인 67% 대비 약 7%가량의 차이가 더 나타난 것으로 확인되었다.
- 상온에서는 덤플이 다수 분포된 연성파괴를, 그리고 DBTT 이후의 온도 영역에서는 가장 자리가 날카롭고 불연속적인 취성파괴 거동을 보였다.
- DBTT 범위에 있는 -40도 온도 조건에서 미세구조 분석을 한 파단면에서 연성과 취성에 의한 파단면을 확인할 수 있었다.

사고에 의해 극저온 환경에 노출될 수 있으며, 다행히 누출에 의해서는 충격 흡수 에너지가 큰 폭으로 감소하지 않는 경향을 보였다. 다만, -40도 이하의 극저온 환경에 노출된 조건에서 2차적

인 하중이 가해지면 판재의 취성파괴로 이어질 수 있으므로 이에 대한 주의가 필요하다고 생각된다. 극저온 누출이 발생하였을 때 2차적인 피해가 발생하지 않도록 LNG 선적 및 하역시에는 주변부와 이격시키거나 단열에 대한 추가적인 설계 방안에 대해서도 고려할 필요가 있을 것으로 생각된다. 추후 연구로 용접부에 대한 영향에 대해서도 분석하여 안전성 여부를 판단해 볼 계획이다.

## 사 사

이 연구는 2022년도 산업통상자원부 및 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원에 의한 연구임(20017530). 이 논문은 2022년도 정부(해양수산부)의 재원으로 해양수산과학기술진흥원-해양 부유쓰레기 수거처리용 친환경 선박기술 개발 사업 지원을 받아 수행된 연구임(KIMST-20220494).

## 참고문헌

- [1] D. H. Lee, S. Park, H. T. Kim, J. D. Kim, J. H. Kim, S. K. Kim, J. K. Seo, P. K. Song, J. E. Oh, B. H. Youn, G. M. Choi, D. H. Lim, and J. M. Lee, "Proposing a new solution for marine debris by utilizing on-board low-temperature eco-friendly pulverization system", *Scientific Reports*, vol 11, pp. 24364, (2021).
- [2] S. K. Kim, J. D. Kim, D. H. Lee, J. H. Kim, J. M. Lee, "Characteristics of pre-strained polyisocyanurate foam: Deformation recovery and compressive mechanical behavior at cryogenic temperature", *Journal of Cellular Plastics*, vol 58, pp. 357-376, (2022).
- [3] T. W. Kim, S. G. Cho, S. S. Kim, J. I. Jhun, H. W. Kim, "A Study on the Evaluation of Structural Safety of Saddle for Bunkering of LNG Fueled Ship", *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol 24, pp. 745-751, (2021).
- [4] T. W. Kim, J. W. Oh, Y. K. Seo, S. J. Han, J. M. Lee, "A Study of Mechanical Characteristics at Room/Cryogenic Temperature of Powder Insulation Materials Applied to Type C Fuel Tank", *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol 24, pp. 787-793, (2021).
- [5] T. W. Kim, S. K. Kim, S. B. Park, J. M. Lee, "Design of Independent Type-B LNG Fuel Tank: Comparative Study between Finite Element Analysis and International Guidance", *Advances in Materials Science and Engineering*, vol 2, pp. 1-14, (2018).
- [6] T. W. Kim, S. G. Cho, S. H. Park, J. W. Oh, J. H. Lee, S. E. Bae, H. W. Kim, "A Study of Wind/Earthquake Load Analysis for LNG Vent Mast", *Journal of the Korean Society of Industry Convergence*, vol 23, pp. 343-349, (2020).
- [7] J. H. Kim, S. W. Choi, D. H. Park, J. M. Lee, "Charpy impact properties of stainless steel weldment in liquefied natural gas pipelines: Effect of low temperatures", *Materials and Design*, vol 65, pp. 914-922, (2015).
- [8] J. Chen, J. K. Ren, Z. Y. Liu, G. D. Wang, "Interpretation of significant decrease in cryogenic-temperature Charpy impact toughness in a high manganese steel", *Materials Science and Engineering: A*, vol 737, pp. 158-165, (2018).
- [9] M. H. Park, G. W. Park, S. H. Kim, Y. W. Choi, H. C. Kim, S. H. Kwon, S. H. Noh, J. B. Jeon, B. J. Kim, "Tensile and Charpy impact properties of heat-treated high manganese steel at cryogenic temperatures", *Journal of Nuclear Materials*, vol 570, (2022).
- [10] L. T. H. Nguyen, J. S. Hwang, M. S. Kim, J. H. Kim, S. K. Kim, J. M. Lee, "Charpy Impact Properties of Hydrogen-Exposed 316L Stainless Steel at Ambient and Cryogenic Temperatures", *Metals*, vol 9, pp. 1-14, (2019).

- [11] S. S. Sohn, S. M. Hong, J. H. Lee, B. C. Suh, S. K. Kim, B. J. Lee, N. J. Kim, S. H. Lee, “Effects of Mn and Al contents on cryogenic-temperature tensile and Charpy impact properties in four austenitic high-Mn steels”, *Acta Materialia*, vol 100, pp. 39-52, (2015).

---

(접수: 2023.03.09. 수정: 2023.03.30. 게재확정: 2023.04.03.)