

## 극저온용 스테인레스 강의 저온거동 특성

홍진한\*, 금동민\*, 한대석\*, 박인범\*, 전민성\*\*, 고경완\*\*\*, 이재명†\*

부산대학교 조선해양공학과\*, (주) 삼성중공업\*\*, (주) 조광ILI\*\*\*

### Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment

Jin-Han Hong\*, Dong-Min Keum\*, Dae-Suk Han\*, In-Bum Park\*  
Min-Sung Chun\*\*, Kyung-Wan Ko\*\*\* and Jae-Myung Lee†\*

Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Pusan National University\*  
Samsung Heavy Industries co.,ltd.\*\*, Jokwang ILI\*\*\*

#### Abstract

Austenitic stainless steels(SUS 304, SUS 316), which are used for safety control valve of LNG carrier, are occasionally exposed in the cryogenic environment. In this regards, it is required to evaluate the mechanical characteristics under the low temperature environment. In this study, a series of uniaxial tensile test was carried out varying temperature for austenitic stainless steel. The phenomena of the strain-induced plasticity have been observed on the all temperature ranges. The critical value for threshold of 2nd hardening due to the phase transformation induced plasticity as well as the increase of hardening have been reported. The summarized experimental results would be used for the validation of numerical techniques applicable for the nonlinear hardening behavior of austenitic stainless steel under the cryogenic temperature environment.

※Keywords: Austenitic stainless steel(오스테나이트계 스테인레스강), Cryogenic environment (극저온 환경), Tensile test(인장실험), Mechanical behavior(기계적 거동), Phase transformation induced plasticity(변태소성), 임계변형률(Threshold strain)

#### 1. 서론

최근 전 세계 LNG 운반선 발주 물량의 60%

이상을 수주할 정도로 한국의 조선산업은 충분한 경쟁력을 가지고 있다. 그러나 LNG 운반선 건조 분야의 후발주자로서 핵심 특허 보유자에 대한 기술 의존도는 상당하다. 이것은 로열티로 연결이 되며, 지금도 국내 조선소는 상당액의 로열티를 지급하면서 LNG 운반선을 건조하고 있다. 이러한

접수일: 2008년 6월 11일, 승인일: 2008년 10월 7일

†교신저자: jaemlee@pusan.ac.kr, 051-510-2342

기술중속을 벗어나 원천기술을 독자적으로 보유하기 위해서는 이를 대체할 수 있는 방열시스템의 개발이 필요하며, 국내에서도 다수의 연구자들에 의해 LNG 방열시스템에 대한 연구(Nam et al. 1993, Noh, 2005, Lee et al. 2007)들이 원활히 수행되면서 꾸준히 관련 기술을 개발하고 있다. 하지만 기존의 방열시스템에 관한 다수의 연구 중에서, LNG 운반선의 가장 중요한 특징인 저온환경 하에서의 각종 재료 특성에 관한 연구결과는 쉽게 찾아 볼 수 없다. 특히 방열시스템의 1차 방벽만이 아니라 각종 밸브류에 필수적으로 채용되는 저온용 스테인레스강의 거동 예측용 해석기법의 제안은 거의 찾아볼 수 없으며 따라서 관련 연구개발의 약점으로 볼 수 있다.

기존의 연구결과에 따르면 300계열 오스테나이트계 스테인레스강은 극저온에서도 저온취성 현상이 발생하지 않고, 저온에서도 우수한 재료물성치를 가진다고 알려져 있다(Kim et al. 2000). 이들 재료는 저온에서의 마르텐사이트 변태에 의하여 내부 균열성장이 저지되는 특성이 있어 피로관점에서 문제가 없음이 알려져 있다(Lee et al. 1999). 이러한 재료특성에 기인하여 오스테나이트계 스테인레스 강은 저온용 용기의 구조재료로 이미 널리 활용되고 있다.

그러나 지금까지 극저온 하에서 스테인레스강의 구조거동을 정밀하게 구현할 수 있는 해석용 모델은 개발된 바 없으며, 특히 재료 항복점을 넘어 탄소성변형을 유발하는 범위에서 스테인레스강의 거동을 수치적으로 규명하기 위한 기초 실험 자료가 많이 부족한 상태이다.

본 연구에서는 극저온 영역에서 스테인레스 304, 316 강의 인장특성을 면밀히 분석함으로써 이들 재료의 유한요소해석용 재료 모델을 개발하기 위한 실험적 근거를 확보하고자 하였다. 본 연구의 실험방법은 이전에 이루어졌던 극저온용 구조재료로서의 적합성 판정에 주목한 스테인레스강의 극저온 실험(Kim et al. 2000)과는 달리 온도 의존적인 스테인레스강의 현상학적 특성을 정량적으로 수식화 할 수 있도록 더 세분화된 온도에서 실험을 수행하였다. 이를 위하여  $-50^{\circ}\text{C}(223\text{K})$ ,  $-100^{\circ}\text{C}(173\text{K})$ ,  $-130^{\circ}\text{C}(143\text{K})$ ,  $-160^{\circ}\text{C}(113\text{K})$ 에서

재료인장 시험을 수행하였으며, 이들 결과를 이용하여 유한요소해석에 필요한 탄소성 구성방정식 모델 개발에 필요한 실험적 근거를 확보 하였다.

## 2. 오스테나이트계 스테인레스강의 일반적 특성 고찰

국내외의 많은 문헌들에 의하면, 스테인레스강의 저온영역에서 상변태에 따르는 비선형 경화현상 발생이 공통적으로 보고되어 있으며, 일부 문헌들에서는 오스테나이트계 스테인레스강의 재질 분석을 통하여 상변태 후의 마르텐사이트(martensite) 함유량과 소성변형률의 관계(Cedric et al. 2006)로 보고한 바 있다.

Fig. 1은 오스테나이트계 스테인레스강의 저온인장 특성을 나타내고 있다. 이것은 저온영역에서 발생하는 비선형 경화, 즉, 1차 항복이 나타난 이후 임계변형률(Threshold strain;  $\epsilon_{cr}$ )을 거치면서 2차 경화와 함께 강도가 현저하게 증가하는 특성을 보여주고 있다.

이러한 2차 경화 현상은 저온환경 하에서 재료 내부에 항복을 넘는 과대 응력이 발생하면서 재료가 오스테나이트로부터 마르텐사이트로의 부분적

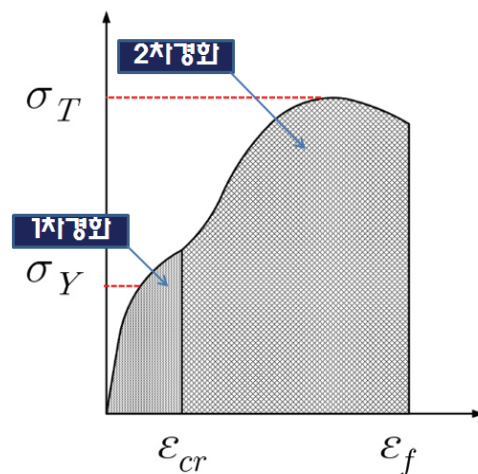


Fig. 1 A schematic of the typical behavior of austenitic stainless steel under low temperature ranges

변태를 일으키는데서 유발된다. 즉, 저온영역에서의 2차 경화현상은, 내부적인 상변태에 의한 것이며 구체적으로는 오스테나이트로부터 마르텐사이트(martensite)로의 부분 변태가 미치는 내부적인 조밀도의 영향이 크게 작용하는 것으로 알려져 있다(Tobler et al. 1997). 내부적으로 이러한 야금학적 변화가 발생하게 되면, 보통 결정립이 미세해지고 결정립 내에 쌍정이 잘 발달 되어 저온취성이 발생하지 않고 저온영역에서 높은 연신율을 나타내기도 한다(Kim et al. 2000, Lee et al. 1999). 이러한 비선형 소성문제는 변태소성(Transformation induced plasticity) 문제로 정의되며, 저온용 스테인레스 강만이 아니라, 개재물을 함유하고 있는 복합재료 등에서도 일부 보고되고 있는 현상으로 알려져 있다(Cedric et al. 2006).

3. 극저온 기계적 특성 분석 실험

본 연구에서는, 만능시험기(UTM, Universal Test Machine, SHIMADZU, UH-1000KNI)와 극저온 챔버(+100~ -200℃ 온도범위 디지털 제어 방식)를 이용하여 극저온 하의 재료 인장시험 환경을 구축하였다. 극저온 챔버는 액체질소를 이용하여 챔버내부에 실험시나리오에 따르는 저온환경을 조성하였으며, 정밀한 데이터 취득을 위하여 극저온용 신율계(Extensometer, Epsilon tech., 3542-050M-100-LT)를 사용하였다.

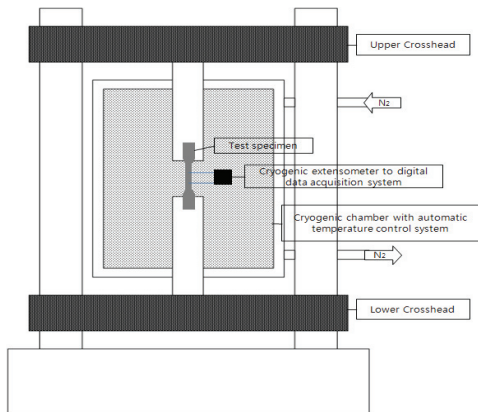


Fig. 2 Schematic of experimental apparatus

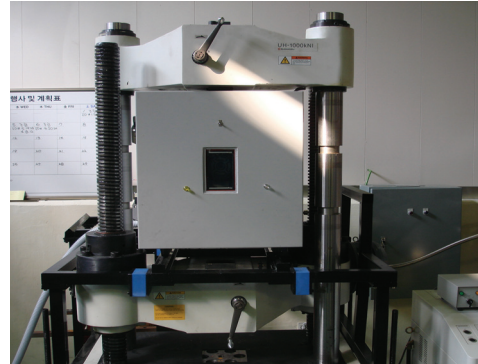


Fig. 3 A photograph of UTM(Universal Testing Machine; SHIMADZU, UH-1000KNI) with cryogenic chamber

Table 1 Test specimen details (unit: mm)

| 표점거리 L | 평행부의 길이 P   | 반지름 R |
|--------|-------------|-------|
| 5 D    | 5.5 D - 7 D | 15 이상 |

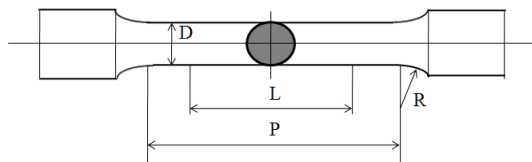


Fig. 4 Specimen standard (KS B0801 14A)



Fig. 5 A photograph of Extension meter installation in a cryogenic chamber

**Table 2** Chemical compositions (wt.%)

| Material | C     | Si   | Mn   | P     | S     | Ni    | Cr    | Mo   |
|----------|-------|------|------|-------|-------|-------|-------|------|
| SUS 304  | 0.06  | 0.67 | 1.01 | 9     | 0.009 | 8.50  | 18.10 | -    |
| SUS 316  | 0.052 | 0.67 | 1.49 | 0.033 | 0.005 | 10.71 | 16.43 | 2.12 |

**Table 3** Experimental results of SUS 316 and SUS 304

| Material | Temperature   | E(GPa) | $\sigma_Y$ (MPa) | $\sigma_T$ (MPa) | Strain at $\sigma_T$ | Threshold strain $\epsilon_{cr}$ | Fracture strain |
|----------|---------------|--------|------------------|------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------|
| SUS 304  | -50°C (223K)  | 212.4  | 384.5            | -                | -                    | 0.13                             | -               |
|          |               | 207.9  | 405.5            | 1363.6           | 0.29                 | 0.14                             | 0.35            |
|          |               | 200.3  | 392.2            | -                | -                    | 0.14                             | -               |
|          | -100°C (173K) | 214.4  | 400.7            | -                | -                    | 0.16                             | -               |
|          |               | 223.5  | 423.6            | 1362.8           | 0.32                 | 0.15                             | 0.41            |
|          |               | 206.6  | 413.8            | 1266.3           | 0.36                 | 0.10                             | -               |
|          | -130°C (143K) | 212.7  | 417.5            | 1492.1           | 0.32                 | 0.13                             | -               |
|          |               | 204.0  | 412.2            | -                | -                    | 0.14                             | -               |
|          |               | 203.4  | 434.7            | 1398.2           | 0.34                 | 0.2                              | 0.43            |
|          | -160°C (113K) | 200.2  | 408.0            | -                | -                    | 0.1                              | -               |
|          |               | 208.8  | 424.6            | 1498.4           | 0.29                 | 0.11                             | 0.37            |
|          |               | 214.5  | 432.6            | 1527.1           | 0.32                 | 0.12                             | 0.41            |
| SUS 316  | -50°C (223K)  | 213.5  | 399.6            | 851.2            | 0.57                 | 0.12                             | 0.74            |
|          |               | 215.1  | 392.5            | -                | -                    | -                                | -               |
|          | -100°C (173K) | 200.5  | 434.8            | 1041.1           | 0.49                 | 0.11                             | 0.65            |
|          |               | 211.3  | 436.3            | 1044.6           | 0.48                 | 0.10                             | 0.63            |
|          |               | 198.5  | 405.8            | 1040.4           | 0.48                 | 0.13                             | 0.64            |
|          | -130°C (143K) | 199.5  | 470.0            | 1160.5           | 0.38                 | 0.10                             | 0.51            |
|          |               | 204.7  | 526.6            | 1164.9           | 0.43                 | 0.11                             | -               |
|          |               | 208.5  | 468              | 1169.4           | -                    | 0.12                             | -               |
|          | -160°C (113K) | 206.6  | 486.6            | -                | -                    | 0.10                             | -               |
| 202.5    |               | 590.0  | 1196.3           | 0.33             | 0.09                 | -                                |                 |
| 203.6    |               | 494.7  | 1328.7           | 0.38             | 0.10                 | -                                |                 |

**Table 4** Experimental results of references (A: Lee et al. 1990, B: Kim et al. 2000, C: Cho 1982)

| Material | Temperature   | $\sigma_Y(MPa)$ |     |     | $\sigma_T(MPa)$ |      |      |
|----------|---------------|-----------------|-----|-----|-----------------|------|------|
|          |               | A               | B   | C   | A               | B    | C    |
| SUS 304  | 25°C (298K)   | 300             |     | 256 | 675             |      | 618  |
|          | 20°C (293K)   |                 | 361 |     |                 | 721  |      |
|          | -30°C (243K)  |                 |     | 240 |                 |      | 1025 |
|          | -80°C (193K)  |                 | 497 | 227 |                 | 1163 | 1212 |
|          | -100°C (173K) |                 |     |     |                 |      |      |
|          | -120°C (153K) |                 | 508 |     |                 | 1245 |      |
|          | -130°C (143K) |                 |     | 240 |                 |      | 1347 |
|          | -160°C (113K) |                 | 551 |     |                 | 1495 |      |
|          | -196°C (77K)  | 390             |     | 232 | 1580            |      | 1609 |
|          | -269°C (4K)   | 520             |     |     | 1825            |      |      |
| SUS 316  | 25°C (298K)   | 282             |     |     | 623             |      |      |
|          | -196°C (77K)  | 350             |     |     | 1450            |      |      |
|          | -269°C (4K)   | 420             |     |     | 1680            |      |      |

Fig. 2에서는 실험장비의 개요를, Fig. 3에서는 UTM과 결합된 저온 챔버의 모습을 각각 보이고 있다. 시험편의 치수는 KS B0801 14A에 따라 Fig. 4와 같이 설정하였다. Fig. 5에는 극저온용 신윤계를 장착한 챔버내 시험편 설치 모습을 보인다. 각 실험시나리오 별로 설정된 온도는 실험수행 동안 변동되지 않도록 전자제어 컨트롤러를 통해 유지되도록 하였다.

#### 4. 실험결과 및 고찰

##### 4.1 성분 분석

Table 2 에서 본 실험에 사용된 두 강재의 화학조성비를 나타내었다. 여기서 SUS 304 와 316 의 화학조성비는 인(P)과 몰리브덴(Mo) 원소의 비율차이에서 구분됨을 알 수 있고, 이는 염소이온에 대한 내식성을 증가시키기 위한 수단으로 알려져 있다. 그러므로 일반적인 수준에서 두 강재는 동일한 계열의 강재로 분류되어 사용되고 있다.

##### 4.2 기계적 특징

SUS 304와 SUS 316에 대하여 온도별로 획득한 실험결과를 Table 3에서 나타낸다. Table 4는 기존의 실험결과 값들을 정리해 놓은 것으로 본 연구의 결과와 비교할 수 있도록 나타내었다.

먼저, 온도별 항복응력의 경우 Fig. 6, Fig. 7에 선 나타나는 바와 같이 두 강재가 비슷한 항복응력을 나타내지만, 최대 인장응력은 SUS 304가 SUS 316 보다 높은 값을 가진다, 이 결과로 저온에서 SUS 304는 SUS 316보다 더 강한 온도의존 경향을 나타낸다는 것을 알 수 있다. 즉, 동일한 수준의 저온 영역에 대한 결과로부터 볼 때, SUS 304의 인장응력 증가량이 더 큰 것을 확인하였다.

또한 경화거동 특성의 경우, 두 재료 모두 항복점 이후 응력이 완만히 증가하다가 약 10%~20% 이내의 변형을 범위에서 인장응력까지 응력이 다시 크게 증가하는 2차 경화를 보이고 있다.

2차 경화의 발생을 의미하는 임계변형을  $\epsilon_{cr}$ 의 크기는 온도에 따라 큰 차이를 보이지는 않지만,

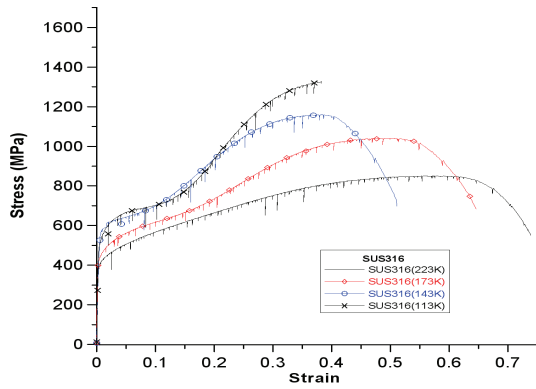


Fig. 6 Comparison of stress-strain relationship at each temperature for SUS 316

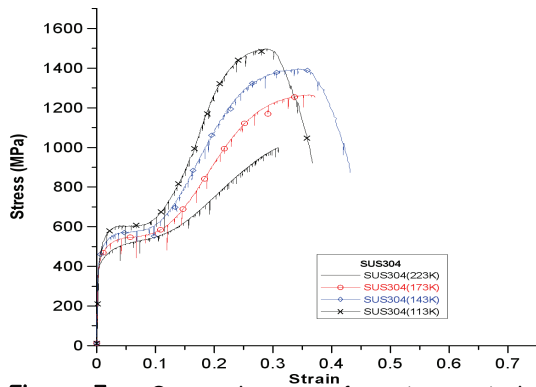


Fig. 7 Comparison of stress-strain relationship at each temperature for SUS 304

온도가 저하될수록 작아지는 경향을 보이고 있다. 또, 파단변형률 및 인장응력에서의 변형율을 비교 하면, SUS 316이 더 높은 연신율을 나타내고 있음을 알 수 있다.

온도와 파단변형률 간의 관계는, 실험 중 나사 산 파손으로 인해 일부 시험편의 경우 파단변형률의 측정이 어려웠던 이유로 정량적인 비교가 곤란하였다. 다만, 인장응력에서의 변형률과 전체적인 실험결과와의 비교 등을 통해 추정한다면, 대체적으로 저온이 될수록 연신율이 감소하는 경향을 확인하였다.

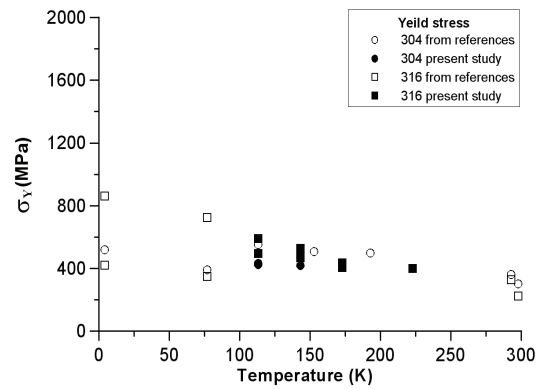


Fig. 8 Comparison of initial yield strength at each temperature for SUS 304, SUS 316

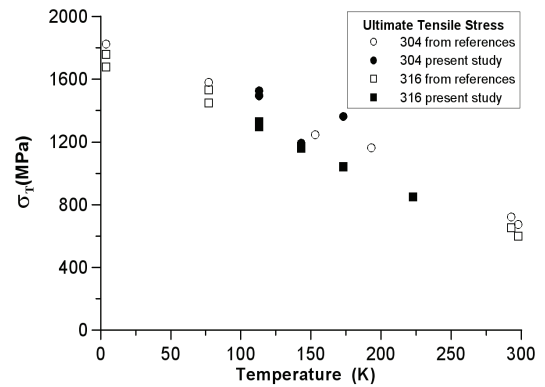


Fig. 9 Comparison of ultimate tensile strength at each temperature for SUS 304, SUS 316

Fig. 8 및 9에 본 연구의 실험결과와 기존의 실험 결과들을 비교하여 나타낸다. 본 실험 결과들은 기존 실험결과에서 사용하였던 온도범위를 포함한 광범위한 온도범위에서 볼 때 실험결과와의 타당성을 확인할 수 있는 경향을 보여주고 있다. 또한, 기존에 보고된 바 있는 인장응력 및 항복응력이 저온으로 갈수록 증가하는 경향성을 확인할 수 있었다. 따라서 두 강재 모두 저온영역에서의 강도향상을 확보한 재료임을 확인할 수 있다.

본 연구의 가장 중요한 목표인, 저온용 스테인레스강의 거동 특징, 즉, 1차 항복이후의 2차 소

성경화량 분석을 위하여 각 실험시나리오별 초기 항복응력과 2차 경화가 발생한 후의 최대 인장응력의 비( $R_H = \sigma_T / \sigma_Y$ )를 분석한 결과를 그림 10에 나타내었다.

이 결과로부터, 저온에서의 SUS 304, SUS 316의 강도적 우수성은 초기항복응력 대비 수준으로 볼 때 온도에 따라 상당한 차이를 가지고 있는 것으로 분석된다.

응력-변형을 거동의 보다 정밀한 분석을 위해 2차 소성경화가 발생하는 시점인  $\epsilon_{cr}$  (threshold

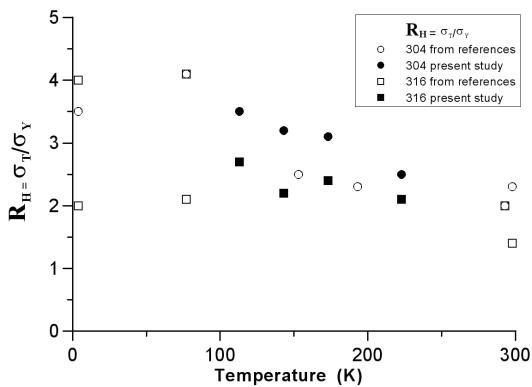


Fig. 10 Comparison of hardening ratio ( $R_{CR} = \sigma_T / \sigma_Y$ ) at each temperature for SUS 304, SUS 316

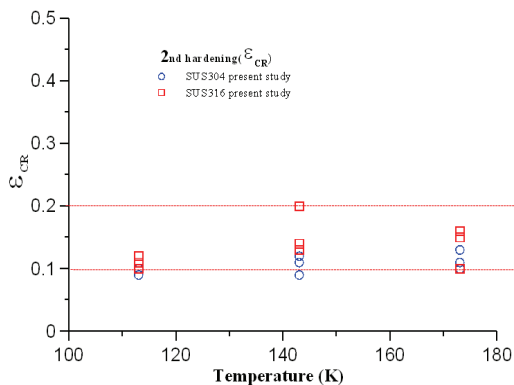


Fig. 11 Comparison of threshold strain( $\epsilon_{cr}$ ) at each temperature for SUS 304, SUS 316

strain)의 크기가 Fig. 11과 같이 분석되었으며, Fig. 10의 응력비와 비교해 볼 때 온도변화에는 크게 영향을 받지 않는 것으로 판단된다.

### 5. 결론

본 연구에서는, 오스테나이트 강의 저온 영역 거동특성을 분석하기 위하여 온도별 재료 인장실험을 수행하였다. 실험온도는 해당 재료의 사용조건에 맞추어 설정되었으며, 기존에 보고된 바 있는 저온강도 특성의 확인과 더불어 비선형 소성거동의 가장 큰 특징인 임계변형을 및 강도증가량의 정량적인 크기가 분석되었다. 본 연구를 통해 얻어진 저온 거동 특성을 아래에 정리한다.

- SUS 304보다 SUS 316이 보다 더 강한 온도 의존 경향을 보인다. 즉, 온도가 낮을수록 SUS 316 인장응력의 증가량이 크다.
- 온도별 항복응력의 경우, SUS 304는 SUS 316과 비슷한 범위를 보이지만, 최대 인장응력은 SUS 304가 SUS 316 보다 높은 값을 가진다.
- 두 재료 모두 전반적으로 저온이 될수록 연신율이 감소하는 경향이 확인되었다.
- 2차 경화거동 특성 발생 측면에서, 두 재료 모두 항복점 이후 응력이 완만하게 증가하다가 약 10%~20% 이내의 변형을 범위에서 인장응력까지 응력이 현저하게 증가하는 저온 인장 특성을 확인할 수 있다.
- 두 재료 모두 2차 경화가 시작되는 뚜렷한 임계변형을(threshold strain,  $\epsilon_{cr}$ )을 지니고 있으며, 그 크기는 저온으로 갈수록 작아지는 경향이 있다
- 2차 경화거동 완료 측면에서, 두 재료 모두 온도가 낮아질수록 초기 항복응력 대비 최대 인장응력의 크기는 증가한다.

본 논문에서는, 저온환경 하에서 온도 변화에 따른 오스테나이트강의 거동특성을 시리즈 실험을 통하여 분석하고 정리하였다. 기존의 저온강도 우수성에 대하여 기본적인 내용들이 확인되었으며, 비선형 소성거동 즉, 2차 경화 발생과 완료를 정

의하는 필수적인 값들이 정량적으로 정리되었다. 본 연구의 결과들은 광범위한 활용도를 지닌 저온 용 재료에 대해서, 해석모델 개발에 필수적으로 요구되는 구성방정식 개발 및 온도별 재료모델 개발 분야에서 실험적 근거로서 유용하게 활용될 수 있으리라 기대된다.

후 기

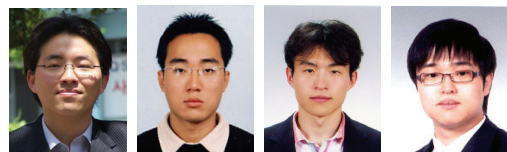
본 연구는 한국과학재단 우수 연구 센터 (ASERC)의 지원으로 수행되었습니다. 재료 및 시험편 제공에 협력한 (주)조광 I에 감사드립니다.

참 고 문 헌

- Cedric Garion, Blazej Skoczzen, Stefano Sgobba, 2006, "Constitutive Modelling and Identification of Parameters of the Plastic Strain-induced Martensitic Transformation in 316 Lstainless Steel at Cryogenic Temperatures," International Journal of Plasticity, Vol. 22, pp. 1234-1264.
- Cho, C.C., Kang, S.B. and Jun, E.J., 1982 "The Effect of Nitrogen on the Low Temperature Mechanical Properties of Ni-free Austenitic Stainless Steel," Journal of the Korean Institute of Metals, Vol. 20, No. 10, pp. 927-935.
- Kim, J.K., Kim, C.S., Cho D.H., Kim, D.S. and Yoon, I.S., 2000, "Low Temperature Effects on the Strength and Fracture Toughness of Membrane Material for LNG Storage Tank," Journal of Mechanical Science and Technology, A Vol. 24, No. 3, pp. 710-717.
- Nam, Y.Y., Nho, I.S., and Lee H.S., 1993, "Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG Tank (3rd report)," Transactions of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 30, No. 4, pp. 83-92.
- Lee, J.H., Choi, W.C, Kim, M.H., Kim, W.S., Noh, B.J., Choe, I.H., and Lee, J.M., 2007, "Experimental Assessment of Dynamic Strenth of Membrane Type LNG Carrier Insulation

System," Journal of the Society of Naval Architects of Korea, Vol. 44, No. 3, pp. 296-304.

- Lee, H.W., Shin, Y.T., Park, J.U., Lee, J.W. and Kang, C.Y., 1999, "A Study on Low Temperature Strength and Fatigue Strength of Austenitic Stainless Steel for Membrane Type LNG Tank," Journal of KWS., Vol. 17, No. 3, pp. 198-202.
- Lee, H.M., Nahm, S.H., Huh, Y.H., Lee J.J. and Bahng, G.W., 1990, "Construction of Cryogenic Testing System and Tensile Deformation Behavior of AISI 300 Series S tainless Steels at Cryogenic Temperatures," Journal of the Korean Inst. of Metals Vol. 28, No. 11, pp. 970-976.
- Noh, B.J., 2005, "Sloshing Load Analysis in Spherical Tank of LNG Carrier," Special Issue of the Society of Naval Architect of Korea, pp. 22-30.
- Tobler, R.L., Nishimura A. and Yamamoto, J. 1997, "Design-relevant Mechanical Properties of 316-type Steels for Superconducting Magnets," Cryogenics, Vol. 37, pp. 533-550.



< 홍진한 > < 금동민 > < 한대석 > < 박인범 >



< 전민성 > < 고경완 > < 이제명 >