

<학술논문>

DOI <http://dx.doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.5.429>

ISSN 1226-4873(Print)
2288-5226(Online)

Cold Stretching 압력용기용 ASS304 소재의 극저온 인장 및 피로거동[§]

최훈석* · 김재훈**† · 나성현** · 이윤형*** · 김성훈**** · 김영균***** · 김기동*****

* 국방과학연구소, ** 충남대학교 기계공학부, *** 한국가스안전공사 연구개발부,
**** 대창솔루션 연구개발팀, ***** 한국가스공사 연구개발원

Tensile and Fatigue Behavior of ASS304 for Cold Stretching Pressure Vessels at Cryogenic Temperature

Hoon Seok Choi*, Jae Hoon Kim**†, Seong Hyun Na**, Youn Hyung Lee***, Sung Hun Kim****, Young Kyun Kim***** and Ki Dong Kim*****

* The 5th R&D Institute, Agency for Defense Development

** School of Mechanical Engineering, Chungnam National Univ., Daejeon, Korea

*** Korean Gas Safety Corporation, R&D Division, Chungcheongbuk-do, Korea

**** Technical Research Center, Daechang Solution Co. Ltd, Busan, Korea

***** Korean Gas Corporation, R&D Division, Ansan, Gyeonggi-do, Korea

(Received April 2, 2015; Revised March 24, 2016; Accepted March 28, 2016)

Key Words: Cold Stretching(콜드스트레칭), Pressure Vessels(압력용기), Austenitic Stainless Steel(오스트나이트계 스테인리스 강), Fatigue Strength(피로강도), S-N Curve(S-N 선도), P-S-N Curve(P-S-N 선도)

초록: ASS304 소재로 제작된 cold stretching 압력용기는 극저온 액화천연가스의 운반 및 저장에 이용된다. Cold stretching 압력용기는 특정 수압을 이용하여 허용응력까지 기존의 압력용기를 신장시킴으로써 재료에 상당량의 소성변형이 나타난다. 이 경우, ASS304 소재의 특성에 따라 소성변형 후 항복강도가 증가하며, 신장량에 따라 두께가 감소한다. 따라서 강도 및 무게측면에서 기존의 압력용기 대비 높은 효율을 나타낸다. 본 연구에서는 ASME 코드에 의거하여 제작된 소형 cold stretching 압력용기에서 직접 채취한 시편을 이용하여 극저온 인장 및 피로특성을 평가하였다. 또한 저온피로시험으로부터 획득한 S-N 선도를 통계적으로 접근하여 P-S-N 선도를 작성하였으며, SEM 을 이용하여 파단면을 분석하였다.

Abstract: Cold stretching(CS) pressure vessels from ASS304 (austenitic stainless steel 304) are used for the transportation and storage of liquefied natural gas(LNG). CS pressure vessels are manufactured by pressurizing the finished vessels to a specific pressure to produce the required stress σ_k . After CS, there is some degree of plastic deformation. Therefore, CS vessels have a higher strength and lighter weight compared to conventional vessels. In this study, we investigate the tensile and fatigue behavior of ASS304 sampled by CS pressure vessels in accordance with the ASME code at cryogenic temperature. From the fatigue test results, we show S-N curves using a statistical method recommended by JSEM-S002. We carried out the fractography of fractured specimens using scanning electron microscopy (SEM).

1. 서론

전세계적으로 천연가스의 사용은 높은 효율을 가진 청정에너지로서의 장점 때문에 꾸준히 증가

하는 추세이며, 특히 국내에서도 경제규모의 증대에 힘입어 그 사용량이 증가하고 있다. 이러한 천연가스는 운반성 및 저장문제로 -162 °C에서 액화시킨 후 액화천연가스(LNG-liquefied natural gas) 형태로 국내에 운반되어 저장탱크에 저장된 후 소비자들에게 공급되고 있는데, 오스트나이트계 스테인리스강(ASS)은 우수한 극저온 기계적/피로특성을 지니고 있으므로 LNG 저장탱크의 내조(inner wall)로서 세계적으로 많이 이용된다.⁽¹⁾

§ 이 논문은 2015년도 대한기계학회 재료 및 파괴부문 춘계학술대회(2015. 4. 2-3., 서귀포KAL호텔) 발표논문임.

† Corresponding Author, kimjhoon@cnu.ac.kr

© 2016 The Korean Society of Mechanical Engineers

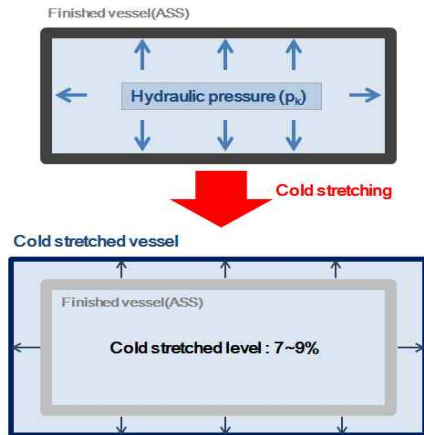


Fig. 1 Schematic of cold stretching pressure vessels

오스트나이트계 스테인리스강은 저온 기계적 특성이 우수한 반면, 알루미늄 등과 같은 재료 대비 중량이 크므로, LNG 저장탱크의 내조로 이용될 경우 타 재료보다 에너지 효율측면에서 부정적 일 수 있다. 이러한 중량 문제를 보완하기 위하여 ASS304 재료특성을 이용한 cold stretching(CS) 공법이 미국 및 중국에서 개발/활용되었다. 이를 이용하여 ASS304 소재로 제작된 cold stretching 압력용기는 극저온 액체가스의 운송 및 저장에 이용되고 있으며, 이에 대한 관련 규정 및 표준은 AS 1210 Supplement 2:1999,⁽²⁾ ASME Section VIII Div. 1 Appendix. 44⁽³⁾ 및 Q/320582SDY7 등⁽⁴⁾에서 제시하고 있다.

Cold stretching 압력용기란 Fig. 1에 나타낸 것처럼 ASME에서 제시하고 있는 요구응력(σ_k)에 대응하는 특정 수압(p_k)을 기존의 완성된 압력용기에 가함으로써 소성변형된 압력용기를 의미한다. Cold stretching 이후에는 압력용기 내조 재료인 ASS소재가 스트레칭방향으로 7~9% 신장됨에 따라 상당량의 소성변형을 겪기 때문에 가공경화(work hardening)에 의해 강도가 증가하며, 중량이 기존 압력용기 대비 최대 30~50% 감소한다. 따라서 cold stretching 압력용기는 기존의 압력용기 대비 경제적 및 에너지소비 관점에서 매우 우수하다.⁽⁵⁾

Cold stretching에 관한 연구는 미국 및 중국에서 활발히 진행되고 있다. 중국의 일부 문헌에서는 cold stretching 공법을 모사한 9% 변형률 제어(strain control)를 이용하여 ASS304소재 시편의 신장에 의해 발생하는 가공경화에 따른 인장 및 피로특성을 평가하고 이에 영향을 주는 인자에 대하여 연구하였다.⁽⁶⁾ 하지만 선행연구들은 실제 운용조건이 아닌 상온에서 시험을 수행하였으며, 또한 실제 압력용기가 아닌 변형률 제어를 통한 인위적

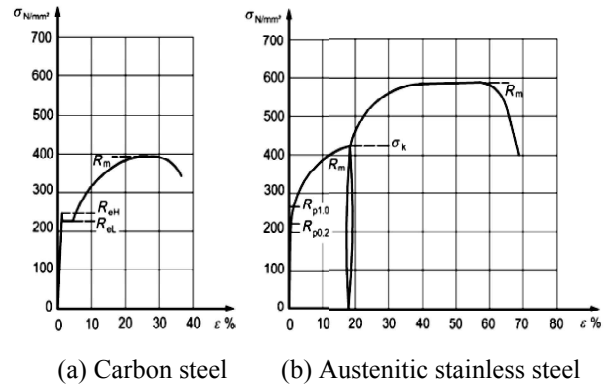


Fig. 2 Stress/strain curves for (a) carbon steel and (b) austenitic stainless steel⁽⁷⁾

으로 신장된 시편을 이용하였기 때문에, 실제 cold stretching 압력용기에 대한 극저온 기계적 및 피로 특성의 시험자료가 부족한 실정이며, 이에 따라 적용 구조물에 대하여 너무 보수적이고 구조건전성(structural integrity)이 결여된 설계로 이어질 수 있다.⁽⁷⁾

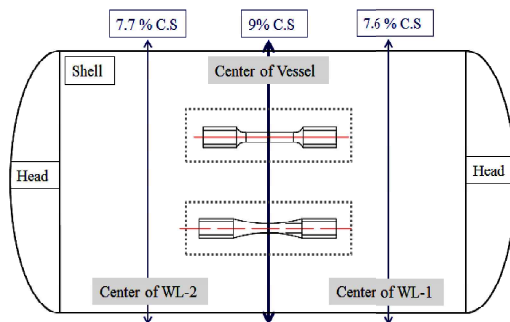
따라서 본 논문에서는 ASME규정⁽³⁾에 의거하여 제작된 소형 cold stretching 압력용기에서 직접 채취한 시편을 이용하여 상온 및 극저온에서의 인장 특성 및 고주기 피로특성에 대한 연구를 수행하였으며, cold stretching 효과를 알아보기 위하여 ASS304소재와 비교/평가하였다.

2. ASS304의 강화이론

일반적으로 오스트나이트계 스테인리스강은 일반 금속과 다른 응력-변형률 거동을 보인다. Fig. 2는 ASS소재 및 탄소강에 대한 응력-변형률 선도를 나타낸 것이며, 그림에서 나타나듯이 ASS소재의 경우 탄소강과는 다르게 변형 시 재료의 성질을 유지하면서 상당량의 소성변형이 발생한다.⁽⁸⁾ 이는 재료 내부적인 상변태에 의한 것이며, 재료 관점에서는 오스테나이트로부터 마르텐사이트(martensite)의 부분적인 변태가 미치는 내부적인 조밀도 영향이 크게 작용하는 것으로 보고되고 있다.⁽⁹⁾ 이에 대한 개략도는 Fig. 2(b)에 나타나 있으며, 일반 ASS소재의 인장 시험편에 강화응력(strengthening stress, σ_k)까지 하중을 가한 후 다시 하중을 제거하면 영구적인 소성변형이 나타난다. 이후 같은 인장시험편에 하중을 다시 가하면, 이전의 응력보다 더 높은 탄성구간이 보이며 이에 따라 항복강도(yield strength)가 변형 전 대비 높은 수준으로 증가한다.⁽⁸⁾ 이러한 강화이론을 이용하여 ASS304로 제작된 압력용기에 강화응력에 대응하

Table 1 Chemical composition of ASS304 (wt%)

C	Si	Mn	Ni
0.05	0.34	1.46	8.0
N	S	P	
0.057	0.001	0.031	

**Fig. 3** Sampling of test specimen from cold stretched pressure vessels

는 특정 수압을 이용하여 cold stretching 압력용기를 제작한다.

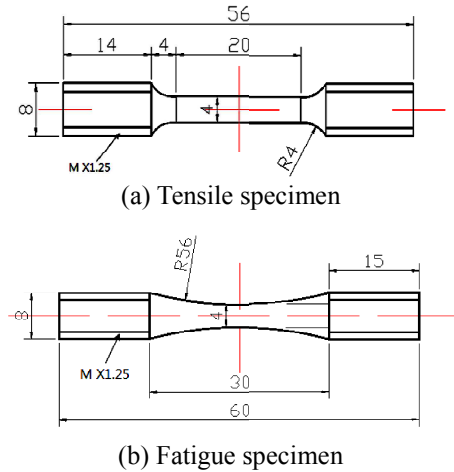
3. 재료 및 실험방법

3.1 재료 및 시편

본 연구의 cold stretching 압력용기에 이용된 재료는 저온 특성 및 가공경화 효과가 우수한 ASS304(EN 1.4301)이며, 이 재료에 대한 화학적 조성비는 Table 1과 같다. Cold stretching 압력용기는 ASME Code⁽³⁾에 의해 제작된 소형압력용기(직경: 2 m, 셸 두께: 9~10 mm)이다. Fig. 3은 본 연구에 이용된 압력용기 형상을 나타낸 것이며, stretching 수준은 7~9%이다. 국제표준규격⁽⁸⁾에서 제시한 것과 같이 보수적인 강도 및 피로특성을 파악하기 위하여 셸(shell) 부분의 스트레칭 방향인 원주(circumference) 방향의 직각인 축(axial) 방향으로 시편을 채취하여 가공하였다. Cold stretching 후의 압력용기 셸의 두께가 9~10 mm 이하이므로, ASTM에서 제시하고 있는 Fig. 4의 sub size 환봉시편형태의 인장 및 피로시편을 가공하였다.

3.2 실험방법

인장 및 피로시험은 온도에 따른 특성의 변화를 검토하기 위하여 상온, -70℃, -120℃, -170℃에서 수행되었다. 기계적 특성 시험은 유압식 10톤 용량의 MTS810을 이용하였으며, 저온환경을 모사하기 위하여 LN₂가스를 이용한 저온챔버를 이용하였다. 저온챔버는 P.I.D 제어 방식의 온도 조절장치에 의하여 솔레노이드 밸브를 개폐함으로써 액체질소의

**Fig. 4** Dimension of test specimens

양을 조절하여 목적온도에 도달하였으며, 챔버 내의 온도를 확인하기 위하여 챔버 상부에 온도센서를 설치하였다. 그리고 시편 내부의 열평형 상태를 고려하여 20분간 예열을 실시하였다. 극저온 인장시험은 ASTM-E8⁽¹⁰⁾에 준하여 수행하였으며, 시험속도는 2 mm/min로 변위제어 방식을 이용하였다. 고주기 피로시험은 ASTM-E466⁽¹¹⁾에 준수하여 수행하였으며, 인장시험에서 얻은 데이터를 기반으로 실제운용조건을 고려하여 최대 인장강도의 60~95% 수준으로 시험하중을 설정하였다. 피로시험 하중은 응력비(R) 0.1의 일정 진폭의 정현파를 20 Hz의 속도로 적용하였다. 또한 JSME S-002⁽¹²⁾에서 제시한 통계적 기법에 따라 파괴확률 50%의 S-N선도 및 좀더 보수적인 파괴확률 10%의 S-N 선도를 작성하였다.

3.3 P-S-N 선도 결정

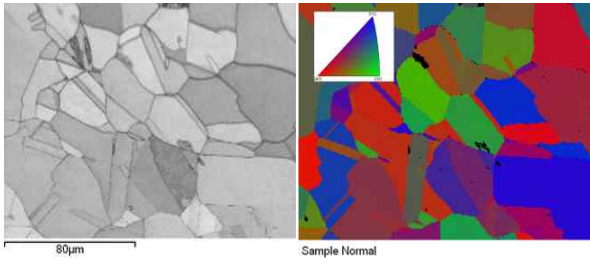
Cold stretching 압력용기는 운용 시 정적 하중 및 반복하중을 받기 때문에 구조물의 신뢰도를 보증하기 위한 확률론적 저온피로수명선도가 요구된다. 이를 위하여 JSME S-002⁽¹²⁾에서 규정하는 S-N 선도 작성법을 이용하였다. 경사부의 강도에 대한 피로수명을 회귀직선으로 양대수(log)좌표로 정리하면 식 (1)과 같다.

$$\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S \quad (1)$$

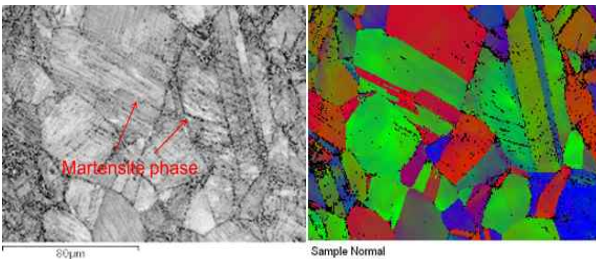
파손확률 P=10%, 90%에 대응하는 P-S-N 선도는 식 (2)와 같다.

$$\log N = \hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 \log S \pm 1.28\hat{\sigma}(\log N) \quad (2)$$

여기서 $\hat{\sigma}(\log N)$ 는 다음과 같이 표현된다



(a) Base metal of ASS304



(b) Cold stretched (9%) ASS304

Fig. 5 EBSD analysis of microstructure for ASS304(dark area presents martensite phase)

$$\hat{\sigma}(\log N) = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \{bg N_i - (\hat{\alpha}_2 + \hat{\beta}_2 bg S_i)\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (3)$$

위 식의 $\hat{\alpha}_2$ 및 $\hat{\beta}_2$ 은 각각 양대수 좌표에서 S-N 선도의 절편 및 기울기를 나타내는 계수이며, $\hat{\sigma}(\log N)$ 는 피로한도 이상의 응력범위 영역에서 10개 피로시험에 대한 계단식 시험으로 구한 과단수명의 대수표준편차이다.

4. 결과 및 요약

4.1 미세조직 분석

본 연구에서는 ASS304 재료의 cold stretching에 의해 소성변형된 재료 상 변태를 알아보기 위하여 Kikuchi 회절도형으로 결정방위를 측정하는 EBSD(Electron back scattered diffraction)법을 이용하여 분석하였다. Fig. 5는 EBSD를 이용한 ASS304 모재 및 cold stretching 소재에 대한 미세조직을 나타낸 것이다. 그림에서 보이는 것처럼 모재의 미세조직은 오스테나이트 상을 나타내며 결정립이 뚜렷하게 구분 되지만, cold stretching 소재의 경우 소성변형으로 인하여 오스트나이트 상의 결정립 경계에서 부분적으로 바늘형태(needle shaped)의 마르텐사이트 상으로 변태하였음을 알 수 있다.

4.2 극저온 기계적 특성

Fig. 6은 ASS304 모재 및 cold stretching 압력용기에서 채취한 시험편(cold stretched ASS304)에 대한

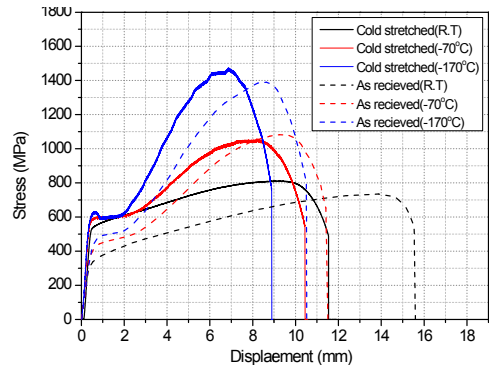


Fig. 6 Stress-displacement curves for base and cold stretched ASS304 at various temperature

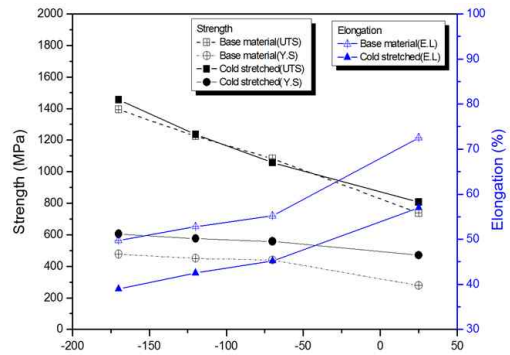


Fig. 7 Comparison of strengths for base metal and cold stretched ASS304 at various temperature

응력-변위선도를 나타낸 것이다. Fig. 6의 점선에서 나타나듯이 ASS304모재의 경우 극 저온으로 갈수록 인장강도 및 항복강도가 높아지는 것을 알 수 있다. 저온시험의 경우 ASS304소재의 특징인 재료의 1차항복 후 임계변위(threshold displacement)을 지난 후 2차 경화와 함께 강도가 현저히 증가하는 특성인 비선형경화 현상이 나타난다. 이러한 현상은 저온환경에서 항복강도를 넘는 과대응력이 발생하면서 재료가 오스트나이트로부터 마르텐사이트의 부분적 변태를 일으키는 것이 원인이며, 이는 재료 내부의 상변태에 의한 것이다.⁽¹³⁾ Fig. 6의 실선에서 나타나듯이 cold stretched ASS304의 경우 모재와 동일한 응력-변위 형태를 나타내며, 2차 경화현상이 보인다. 반면, cold stretching 과정에서 재료에 소성변형이 발생되었으며, 재료가 가공경화되어 상온에서 항복강도는 모재 대비 약 68% 증가하였다. Fig. 7은 상온 및 저온에서 모재 및 cold stretched ASS304에 대한 강도 비교를 나타낸 것이다. 앞서 언급한 것처럼 상온에서 cold stretching으로 인한 가공경화가 발생하여 모재 대비 높은 항복강도 증가율을 보이나 인장강도의 경우 재료의 특성이므로 상온 및 저온에서 비슷한 수준의 값을

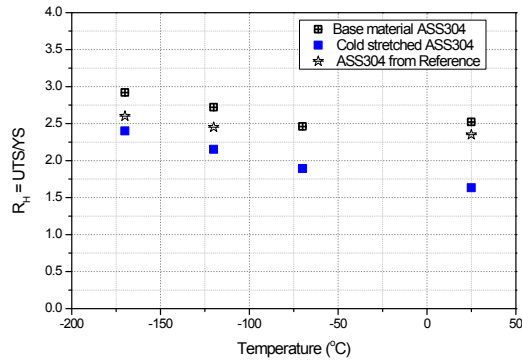


Fig. 8 Comparison of hardening ratio (R_H) for base metal and cold stretched ASS304 at various temperature

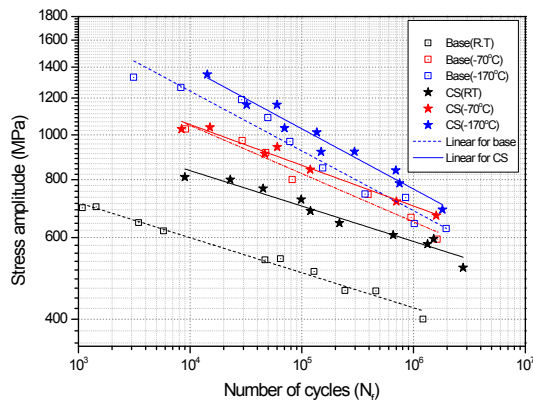


Fig. 9 Comparison of S-N curves for base metal and cold stretched ASS304 at various temp

나타내고 있다. 본 연구에서 제작된 cold stretching 압력용기에서 채취한 cold stretched ASS304의 경우 ASME code case 2596:2008에서 제시한 설계요구 항복강도(>250MPa) 및 인장강도(520~720 MPa)에 만족하므로 설계강도에 만족한다.

Fig. 8은 ASS304 모재 및 cold stretching 소재의 특징인 1차 항복 이후의 2차 소성경화량을 분석하기 위하여 1차 항복 응력 및 인장응력의 비(R_H)를 나타낸 것이다. 이로부터 저온에서 모재 및 cold stretching 소재의 강도적 우수성은 초기항복응력 대비 수준으로 볼 때 온도에 따라 상당히 차이를 보이며, 온도가 낮을수록 R_H 이 증가한다. Cold stretched ASS304의 경우 1차적으로 소성변형에 의한 가공경화를 겪었기 때문에 모재 대비 R_H 값이 작은 것을 알 수 있다.⁽¹³⁾

4.3 극저온 피로특성

Fig. 9는 ASS304 모재 및 Cold stretching 소재에 대한 상온, -70 °C 및 -170 °C에서의 피로시험 결과를 응력범위 및 파단수명의 관계로 나타낸 것이다. S-N선도에서 나타나듯이 상온에서는 항복강도

Table 2 P-S-N curves of fracture probability of cold stretched ASS304 at R.T. and -170 °C

Temp.	Fracture probability	P-S-N curve	Endurance limit(MPa)
R.T	50%	$\log N = (50.0) - (15.83)\log S$	520
	10%	$\log N = (43.0) - (15.83)\log S$	494
-170 °C	50%	$\log N = (27.0) - (7.29)\log S$	549
	10%	$\log N = (25.5) - (7.29)\log S$	525

증가로 인하여 모재 대비 cold stretched ASS304의 피로강도 및 피로한도가 높은 수준으로 증가한 것을 알 수 있다. 또한 일반적으로 운용조건이 극저온인 LNG선의 경우 피로강도가 증가하는 것으로 알려져 있으며, 본 연구에서도 저온으로 갈수록 피로 강도가 증가하는 것을 확인하였다. 이는 마르텐사이트 상이 상온 대비 저온에서 다량으로 생성되며, 균열성장이 억제되어 피로수명이 향상된 것이 원인이다.⁽¹⁴⁾ 반면, 고주기(high cycle fatigue)로 갈수록 피로강도 증가 폭이 감소하며, 이는 특정한 온도 및 재료에서 마르텐사이트 상의 생성이 한계가 있음을 의미한다.

4.4 P-S-N 선도

본 연구의 cold stretching 압력용기는 극저온에서 운용되는 구조물로서 운용조건을 고려한 변형구속 조건이나 응력분포에 있어서 좀더 보수적인 피로 강도 및 수명이 필요하다. 따라서 JSME S-002에서 제시한 P-S-N 선도 작성법을 이용하여 파괴확률 50% 및 10%에 대한 계수를 산출하였으며, 이로부터 확률 식을 나타내었다. Table 2는 cold stretched ASS304 대한 상온 및 -170 °C에서의 피로시험결과에 대한 P-S-N선도 계수를 나타낸 것이며, 이 식을 이용하여 Fig. 10의 P-S-N선도를 작성 하였다. Fig. 10의 실선은 파괴확률 50%의 선이며, 점선은 파괴확률 10% 선이다. 실 구조물 운용조건을 고려하여 10^7 사이클을 무한수명으로 가정하였을 때, Table 2에서 나타나듯이 상온에서 cold stretched ASS304의 파괴확률 50% 및 10%에서 각각 520 MPa, 494 MPa의 피로한도(endurance limit)을 보이며, -170 °C에서 파괴확률 50% 및 10%에서 각각 549 MPa, 525 MPa에서 피로한도를 나타낸다. 본 연구를 통해 도출해낸 10% 파괴확률의 P-S-N선도는 cold stretching 압력용기 피로수명 예측 및 보수적인 설계 기준으로 유용하게 사용될 수 있을 것

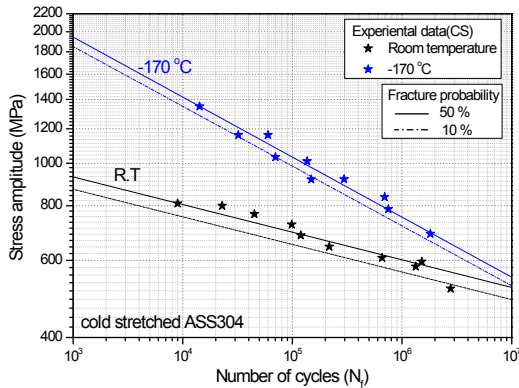


Fig. 10 P-S-N curves for cold stretched ASS304 at room temperature and -170 °C

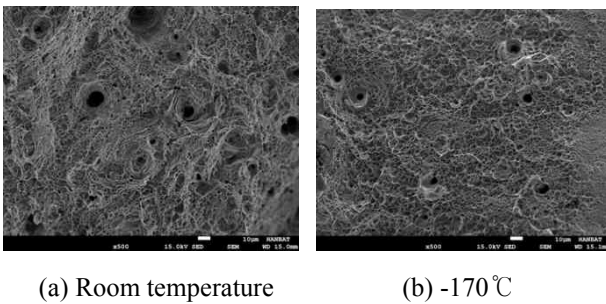


Fig. 11 SEM images for fracture surface of tensile test for cold stretched ASS304

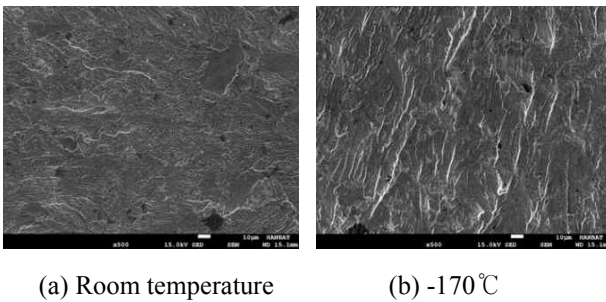


Fig. 12 SEM images for fracture surface of fatigue test for cold stretched ASS304

로 판단된다.⁽¹⁴⁾

4.5 파단 면 분석

인장 및 피로시험의 하중 작용형태 및 온도에 따른 파단 면 형상, 특성 및 파단 기구를 평가하기 위하여 SEM을 이용한 파단 면 분석을 수행하였다. Fig. 11은 인장시험 후 파단 면을 1,000배 확대하여 관찰한 것이다. 각 온도에 대한 파단 면을 분석한 결과 연성재료에서 나타나는 딴플(dimple)이 뚜렷하게 나타났으며, 상온 대비 저온에서 딴플 크기가 작으며, 이는 미소공동의 성장 및 합체에 의하여 파괴가 쉽게 일어났음을 의미한다. Fig.

12는 피로 시험 후 균열진전부위를 SEM 촬영한 것이며, 인장 시험과는 다르게 파단 면에서 반복적인 사이클에 의한 피로 줄 무늬(striation)가 발생되지만, 일반적인 금속재료와 달리 피로 줄무늬가 명백히 나타나지 않는다. 파단 면은 비교적 평탄한 것을 알 수 있으며, 이는 cold stretching 과정에서 소성변형에 의한 연성 특성 저하를 의미한다. 상온 대비 저온으로 갈수록 파단 면이 거칠어지고 조직이 입내 형태의 파괴양상을 보이며, 이것은 저온으로 갈수록 피로 파단 면은 조직상의 크기에서 뚜렷한 차이를 나타내어 저온일수록 취성 성질을 갖는 파괴가 발생한 것으로 판단된다.⁽¹⁴⁾

5. 결론

본 연구에서는 ASME 코드에 준수하여 기존의 ASS304 소재 압력용기를 이용하여 소형 cold stretching 압력용기를 제작하였으며, 이 용기에서 직접 채취한 시편을 이용하여 운용조건을 고려한 극저온 인장 및 피로특성을 평가하였으며, 얻은 결론은 다음과 같다.

- (1) 재료특성 관점에서 EBSD 분석결과 Cold stretched ASS304은 소성변형으로 인하여 일부 오스테나이트상이 결정립 경계에서 마르텐사이트 상으로 상변태 하였다.
- (2) 기계적 특성 시험결과 상온에서 Cold stretched ASS304의 경우 모재 대비 68% 수준의 항복증가를 보이며, 저온(-170°C)으로 갈수록 상온 대비 20% 수준 증가된 항복강도를 나타낸다. 반면, 인장강도는 모재 대비 비슷한 값을 보인다.
- (3) 피로특성 시험 결과 Cold stretched ASS304는 상온 및 저온에서 모재 대비 높은 수준의 피로강도를 보이며, 이는 마르텐사이트 생성에 의한 균열성장 방해가 원인이다
- (4) P-S-N 선도를 이용하여 파괴확률 10%의 cold stretched ASS304의 극저온 피로강도 예측 결과 상온 및 -170°C에서 각각 494 MPa 및 525 MPa 일 때 무한수명을 나타내며, 이는 cold stretching 압력용기의 피로수명 및 설계기준으로 유용하게 이용될 것으로 판단된다.

후 기

본 연구는 2013년도 전력산업 융합원천기술개발사업의 연구비 지원으로 수행되었으며, 이에 진심으로 감사드립니다.

참고문헌

(References)

- (1) Kim, J. H., Choi, S. W., Park, D. H. and Lee, J. M., 2014, "Cryogenic Charpy Impact Test Based on GTAW Method of AISI 304 Stainless Steel for LNG Pipe Line," *Journal of Welding and Joining*, Vol. 32, No. 3, pp.89~94.
- (2) AS 1210-Supple2, 1999, "Pressure Vessels-Cold Stretched Austenitic Stainless steel Vessels."
- (3) ASME Section VIII Div. 1, 2013, "Cold Stretching of Austenitic Stainless Steel Pressure Vessels," Appendix. 44.
- (4) Q/320582SDY7, 2008, "Pressure Strengthening of Cryogenic Vessels from Austenitic Stainless Steels-Static Vessels".
- (5) Miao, C., Zheng, J., Gao, X., Huang, X., Guo, A., YE, D. and Ma, Li., 2012, "Investigation of Low-cycle Fatigue Behavior of Austenitic Stainless Steel for Cold Stretched Pressure Vessels," *Appl Phys & Eng*, Vol. 14, No. 1, pp. 31~37.
- (6) Zheng, J., Miao, C., Xu, P., Ma, Li. and Guo, A., 2012, "Investigation on Influence Factors of Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steel for Cold Stretched Pressure Vessels," *Transaction of ASME Journal of Pressure Vessel Technology*, Vol. 134, pp. 061407-1~061407-2.
- (7) Park, W. S., Kim, J. H., Chun, M. S. and Lee, J. M., 2008, "Development of Temperature and Strain-Rate Dependent Unified Constitutive Equation for Ships and Offshore Structures," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 48, No. 3, pp. 200~206.
- (8) ISO21009-1, 2008, "Cryogenic Vessels-Static Vacuum-insulated Vessels".
- (9) Tobler, R. L., Nishimura A. and Yamaoto, J., 1997, "Design-relevant Mechanical Properties of 316-type Steels for Superconducting Magnets," *Cryogenics*, Vol. 37, pp. 533~550.
- (10) ASTM E8M, 2004, "Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Material".
- (11) ASTM E466, 2007, "Standard Practice for Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials".
- (12) JSME S 002, 1994, "Standard Method of Statistical Fatigue Testing," *Journal of the Japan Society of Mechanical Engineers*, pp.10~42.
- (13) Hong, J. H., Kuem, D. M., Han, D. S., Park, I. B., Chun, M. S., Ko, K. W. and Lee, J. M., 2008, "Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment," *Journal of Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 45, No. 5, pp. 530~537.
- (14) Kim, K. S., Boo, S. H., Park, C. Y., Cho, Y. G. and Lee, J. S., 2008, "An Experimental Study on the Tensile and Fatigue Strengths of SUS304L Lap Joint Weld at the Cryogenic Temperature," *Journal of Ocean Engineering and Technology*, Vol. 22, No. 3, pp. 96~102.