

저온 기계 재료용 TP 304, TP 316 소재의 저온거동 특성 평가

조승현
한국기계전기전자시험연구원

Mechanical Characteristics of Stainless Steel TP 304, TP 316 under Low Temperature Environment

Seung-Hyun Cho

Division of Machinery Testing Center, Korea Testing Certification

요약 자동차용 금속재료와 플랜트 모듈을 구성하는 소재가 동유럽, 러시아 북부, 캐나다 등과 같은 극한 지역(겨울 평균 기온 -20°C 이하)에서 운용되는 장비에서는 관련 부품의 결빙 등에 대한 대비가 필요하다. 또한 극한지 자원·에너지 개발, 각종 파이프라인 지하시공 증가 등으로 고온 및 저온의 내환경성이 우수한 기계 재료의 사용이 요구되고 있다. 하지만, 현재까지 초저온용 재료에 대한 고속 인장 시험의 경우에는 상온에서의 영향에 대한 연구만 일부 수행 되었을 뿐, 저온에서의 영향은 고속·저속에서의 차이가 있다는 정도만 확인이 되고 있다. 본 논문에서는 보편적 재료인 TP304, TP316소재의 상온 및 저온에서의 기계적 특성에 대한 비교 시험을 실시하여 두 재료의 저온 특성에 대하여 알아보았다. 인장시험은 KS B 0801의 표준 시험편을 사용하였으며, 실험장치는 특수 제작된 저온 인장 시험기를 사용하였다. 그 결과 TP304는 저온 영역에서 2차 경화 현상이 발생하였다. TP316은 저온 영역에서 연신율이 감소하였으며, 최대인장강도가 상온보다 증가하는 것을 확인하였다. 온도 의존성은 최대인장강도와 연신율은 TP304가 높았고, 항복강도는 TP316재료가 높게 나타난 것을 확인할 수 있었다.

Abstract Automotive materials and plant modules need to be prepared for freezing parts to operate in extreme areas such as Eastern Europe, Russia, and Canada. However, the only thing that has been done for ultra-qualifying materials for extremely low operating materials is that only the effects at low temperatures are conducted at room temperature, and the effects at low temperatures are only identified at low speeds. Therefore, this study examined the low-temperature characteristics of materials by conducting comparative tests on the mechanical properties of the room at the temperature and temperature of TP304 and TP316 materials, which are the most common materials.

Keywords : Austenitic steel, Extreme locations, Freezing, Low tensile test, Mechanical material

1. 서론

최근 자동차 산업은 배기 가스 규제와 고유가에 의한 연비 향상을 위해 많은 관심을 가지고 있다. 배기 매니폴드와 같은 부품은 엔진에서 나오는 배기가스에 가장 먼저 영향을 받고 이로 인해 배기 매니폴드가 냉각과 가

열이 반복되는 현상이 나타난다[1]. 따라서 주행환경이 동유럽과 러시아 북부, 캐나다 등과 같이 극한 지역(겨울 평균 -20 도 이하)에서는 관련 부품의 결빙 등에 대한 대비가 필요하다. 또한 극한지 자원·에너지 개발, 각종 파이프라인 지하시공 증가 등으로 고온 및 저온의 내환경성이 우수한 재료의 사용이 요구 되어 진다[2-3].

본 논문은 국토교통부 플랜트연구개발사업의 연구비 지원(161FIP-B089065-03) 및 2017년도 산업통상자원부 산업기술평가관리원(KEIT) 연구비 지원(10069228)에 의해 수행되었음.

*Corresponding Author : Seung-Hyun Cho(KTC)

Tel: +82-31-470-1603 email: shcho@ktc.re.kr

Received September 7, 2017

Revised (1st September 21, 2017, 2nd September 27, 2017)

Accepted October 13, 2017

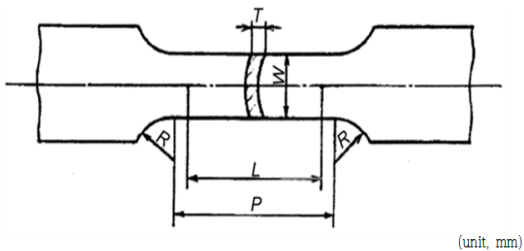
Published October 31, 2017

LNG 저장용기의 재료 특성 실험의 연구가 있지만[4], 현재까지 자동차 및 플랜트 금속재료에 대해서는 저온 및 고온에서의 변형률 속도를 고려한 고속 인장 실험이 일부 수행되어 왔으나, 극저온용 재료에 대한 고속 인장 실험의 경우에는 상온에서의 영향에 대한 연구만 일부 수행 되었을 뿐, 저온에서의 영향은 고속·저속에서의 차이가 있다는 정도만 확인이 되고 있다[5]. 따라서 본 논문에서는 가장 보편적으로 사용되고 있는 오스테나이트계의 스테인레스 강인 TP 304, TP 316 소재의 저온에서의 기계적 특성에 대한 실험적 고찰을 수행하였다.

2. 인장 시험

2.1 인장 시험편

본 연구에서 사용되어진 인장시험편은 KS B 0801 표준의 12B호 시험편의 규격에 따라 제작하여 사용하였다. 시험 재료는 TP 304, TP 316 로써 ASTM A312 규격에서 배관용 재료로 사용되어지는 오스테나이트 스테인레스 강 이라는 금속 소재이다. 시험편의 형상과 치수는 Fig. 1과 같고, Table 1에서 각각의 소재에 대한 화학적 성분을 표시하였다.



TYPE	W	L	P	R	T
TP 304	25	50	60	15	4.4
TP 316	25	50	60	15	4.0

Fig. 1. Tensile test specimen shape and dimensions

2.2 실험장치

본 연구에서는 실험 재료의 저온 특성을 파악하기 위하여 Fig. 2, 3과 같이 특수 제작된 저온 인장 시험기를 사용하였다. 만능재료시험기(300 kN, DTU-900 MHA, 380 V 3 ph 50/60 Hz)를 사용하였고, 저온 환경을 만들기 위하여 저온 챔버(-40℃ to 100℃, SP790)를 제작하였다. 저온챔버 내부에 설치되어 있는 온도 센서와 유동제어를 통해 일정 온도를 제어하는 자동 온도 제어 시스템을 사용하였으며, 정확한 변형률을 측정하기 위하여, 극저온용 신율계(3542-050M-100-ST, Epsilon Tech, -40℃ to 100℃)를 사용하였다.

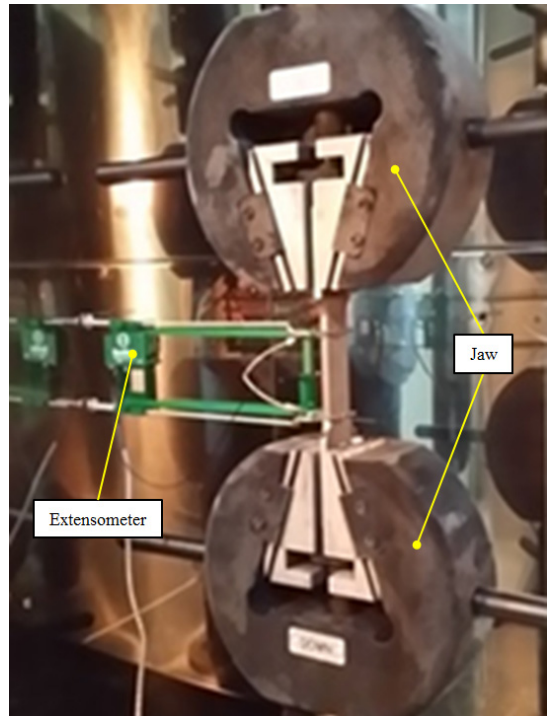


Fig. 2. Tensile test under low temperature environment

Table 1. Chemical analysis of substrate material

Grade	Chemical composition, %										
	C	Mn	P	S	Si	Cr	Ni	Mo	N	Co	Cu
TP 304	0.046	0.97	0.031	0.002	0.45	18.11	8.08	0.20	0.040	0.18	0.30
TP 316	0.021	0.96	0.035	0.002	0.51	16.67	10.06	2.07	0.037	0.21	0.32

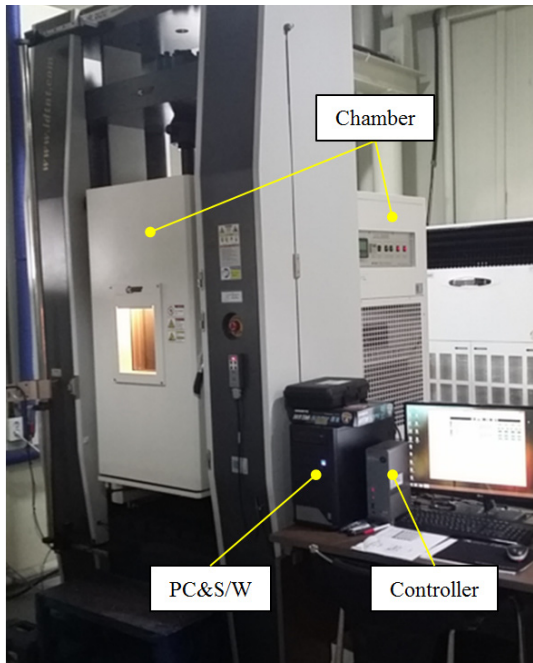


Fig. 3. Low Temperature chamber and universal material testing

2.3 실험방법

시험편에 대해서, Fig. 2에서와 같이 길이 방향의 연신율을 측정하기 위하여 표점거리가 50 mm인 종방향 연신율계를 사용하였다. 실험 온도는 극한지역에서의 사용 온도를 고려하여 상온을 포함한 2개의 실험 온도를 설정하였다. 실험의 인장속도는 KS B 0802 의 표준을 참조하여 선정하였다. 각 온도에서 2가지 실험속도로 진행하였다.

시험편은 ISO 6892-3 표준에 따라 열팽형을 고려하고 고자 목표 온도에서 도달한 뒤 10분이 지난 후에 실험을 실시하였다.

Table 2. Condition of the tensile test

Grade	Temperature (°C)	Strain rate (mm/min)
TP 304	20	10
		2
	-40	10
		2
TP 316	20	10
		2
	-40	10
		2

3. 실험결과 및 고찰

3.1 상온 · 저온 인장 실험 결과

본 연구에서는 TP 304와 TP 316에 대해 상온과 저온에 대해 재료 인장 실험을 실시하였다. 온도별로 측정된 실험결과는 Table 3에 나타내었다. 수행된 재료 인장 실험의 결과를 보면 TP 304의 경우 상온에서의 연신율이 저온 대비 최대 64.0% 이상 크게 나타났다. TP 316의 경우에도 상온에서의 연신율이 저온 대비 최대 9.0% 이상 차이가 나타났다.

저온 영역에서의 실험에서는 Fig. 4~7에서 나타나는 바와 같이 두 재료가 유사한 항복응력 값을 나타내고 있지만, 각 재료별 상온과 저온영역의 항복응력값을 비교해보면 TP 304는 최대 9.0%이상 차이가 나타났고, TP 316은 저온영역에서 최대 24.0% 이상 증가하였다. 이는 TP 316이 저온에서 내부적인 조밀도에 영향이 크게 작용하는 것으로 판단되어 진다. 최대인장강도의 온도영역 차이점을 보면 TP 304의 경우 저온영역에서 최대 38.0% 증가하였다. TP 316은 저온영역에서 최대 28.0% 증가하였다. 이에 따라 상온 실험 결과와 비교해 보았을 때 저온영역에서 최대인장강도와 연신율은 TP 304가 TP 316 보다 재료의 온도의존성이 더 높음을 알 수 있었고 항복

Table 3. Tensile test result of TP 304, TP 316

Material	Temperature	Speed(mm/min)	$\sigma_T(MPa)$	$\sigma_Y(MPa)$	$\epsilon(\%)$
TP 304	20°C(293K)	10	787.14	343.19	56.07
		2	780.14	303.60	80.19
	-40°C(233K)	10	988.17	338.17	49.22
		2	1077.14	331.62	48.88
TP 316	20°C(293K)	10	587.66	274.91	75.13
		2	608.81	276.55	76.24
	-40°C(233K)	10	730.47	341.65	69.67
		2	779.96	340.88	69.68

응력의 경우는 저온영역에서 TP 316이 TP 304보다 온도의존성이 높음을 알 수 있었다. 또한 TP 304는 항복점 이후에 응력이 완만하게 증가하다가 인장응력까지 응력이 다시 크게 증가하는 2차 경화와 함께 강도가 현저히 증가하는 특이인 비선형경화 현상이 나타났다. 이러한 현상은 저온 영역에서 항복강도를 초과하는 응력이 발생하면서 재료 특성이 오스테나이트계에서 마르텐사이트 계로 부분적 변태를 일으키는 것이 원인이며, 이는 재료 내부의 상변태에 의한 것이다[7].

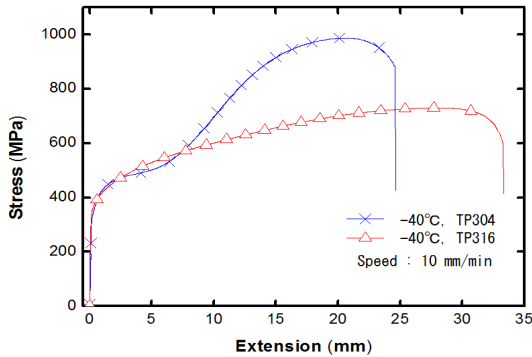


Fig. 4. Comparison of TP 304 and TP 316 in Temp. -40°C

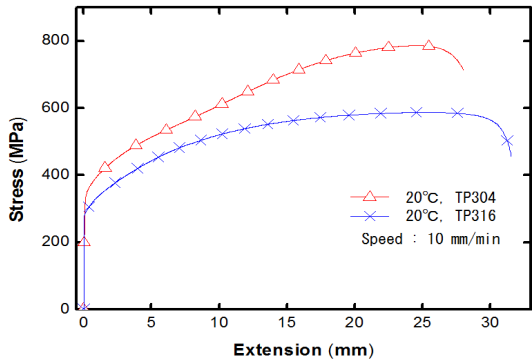


Fig. 5. Comparison of TP 304 and TP 316 in Temp. 20°C

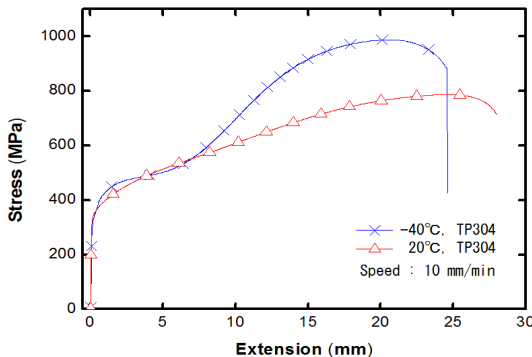


Fig. 6. Comparison of -40°C and 20°C in TP 304

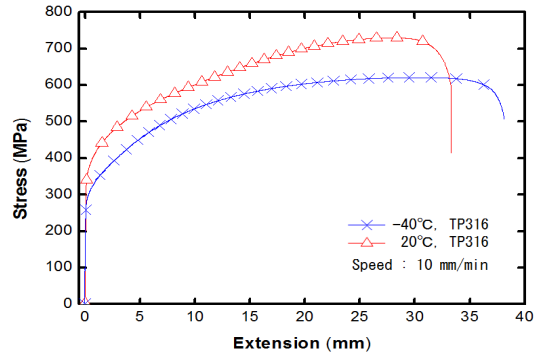


Fig. 7. Comparison of -40°C and 20°C in TP 316

3.2 인장속도 비교 실험 결과

본 연구에서는 TP 304와 TP 316에 대하여 저온인장 시험시 인장속도를 고속(10mm/min) 및 저속(2mm/min)으로 변화를 주는 실험을 실시하였고 그 결과는 Table 3와 Fig. 8~9에 나타내었다. 수행된 인장 시험의 결과 저온영역에서 인장 속도가 빠를수록 항복강도는 커지고, 최대인장강도는 낮아지는 양상을 나타내었다. 재료에 따른

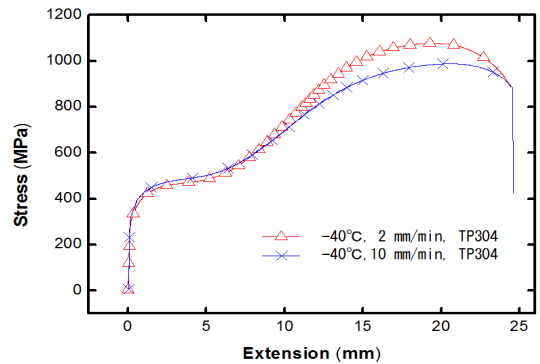


Fig. 8. Comparison of Tension Speed in -40°C, TP 304

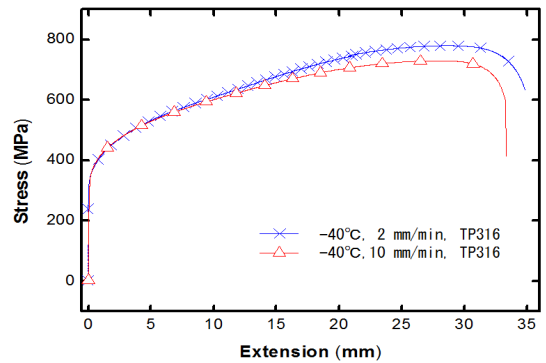


Fig. 9. Comparison of Tension Speed in -40°C, TP 316

특성을 살펴보면, TP 304는 상온에서 최대인장강도는 큰 차이가 없었고, 항복강도는 고속인장에서 13.0% 증가하였다. 연신율은 고속인장에서 30.0% 넘게 감소하는 현상을 보였다. 저온에서는 최대인장강도는 고속인장에서 8.3% 감소하였고, 항복강도는 2.0% 증가하고, 연신율은 큰 차이가 없었다. TP 304는 상온에서의 인장속도는 최대인장강도보다 항복강도와 연신율에 영향이 크다는 것을 확인할 수 있었고, 저온에서는 최대인장강도가 영향을 많이 받는 것을 실험결과 알 수 있었다.

TP 316의 경우 상온에서 최대인장강도는 고속일 때 약 3.0% 정도 감소하였고 연신율과 항복강도의 차이는 거의 없었다. 저온에서 최대인장강도는 고속일 때 약 6.0% 감소하였고 연신율과 항복강도의 차이는 오차범위 내로 차이가 없었다. 이러한 실험 결과에 따라 인장속도는 TP 316소재에서 연신율과 항복강도보다는 최대인장강도에 영향을 준다는 점을 확인할 수 있었다.

4. 결론

본 연구에서는 자동차 및 플랜트 재료로 사용되어지는 TP 304 및 TP 316 재료에 대하여 상온·저온, 인장속도에 따른 재료 인장 실험을 수행하였다.

- 1) 두 재료에 대한 상온·저온 인장 실험 결과, TP 304는 저온 영역에서 2차 경화 현상이 발생하였다. 이로 인해 연신율은 상온에서 보다 작아지지만, 최대인장강도는 증가하는 것을 알 수 있다. TP 316은 저온 영역에서 2차 경화 현상은 발생하지 않았지만, 연신율이 저온에서 작게 나타나며, 최대인장강도가 상온에서보다 증가하는 것을 확인하였다.
- 2) 온도 의존성은 최대인장강도의 경우는 TP 304가 더 크다는 것을 확인하였고, 항복강도와 연신율은 TP 316이 온도 의존성이 더 크다는 것을 확인하였다.
- 3) 두 재료의 인장속도 비교 실험 결과, 인장 속도에 따른 경향이 다르게 나타났다. TP 316은 상대적으로 인장속도가 느릴수록 최대인장강도가 증가하는 경향을 확인하였다. TP 304는 상온에서 인장속도가 빠를 때 인장강도와 항복강도가 증가하고, 연신율은 감소하였다. 저온에서는 최대인장강도는 감소하고 항복응력, 연신율은 증가하였다.

본 연구에서는, 기계 금속 소재로 사용되는 재료에 대한 저온환경에서 온도 변화에 따른 거동 특성을 실험하여 분석하고 정리하였다. 본 연구의 결과들은 활용도가 높은 저온용 재료에 대해서, 각 재료를 사용한 자동차 재료의 안전성을 평가하기 위한 재료물성치 자료로서 유용하게 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] C. H. Baek, C. Y. Park, J. J. Lee, S. H. Yoo, "A study on the estimation process for the fatigue life of the exhaust manifold," KSAE Fall Conference Proceedings, pp. 524-529, Nov. 2010.
- [2] W. S. Park, K. Y. Kang, M. S. Chun, J. M. Lee, "A comparative study on mechanical behavior of low temperature application materials for ships and offshore structures", *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, pp. 189-199, June, 2011.
- [3] S. J. Park, K. S. Lee, Y. S. Kim, J. S. Kim, "A Study on the Tensile Properties of Plastics used in Automotive Instrument Panel at High Strain Rates under High and Low Temperature Environments," KSAE 08-F0302, pp. 1930-1934, Nov. 2006.
- [4] H. S. Choi, J. H. Kim, S. H. Na, Y. H. Lee, S. H. Kim, Y. K. Kim, K. D. Kim, "Tensile and Fatigue Behavior of ASS304 for Cold Stretching Pressure Vessels at Cryogenic Temperature," *Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers - A*, pp. 429-435, May 2016
- [5] T. Y. Park, S. B. Jeon, M. S. Jeon, H. C. Song, K. O. Kim, S. C. Kim, "Study on high-speed tensile test in cryogenic environment considering strain rate effect," *SNAK Conference*, pp. 571-576, May 2012.
- [6] H. J. Choi, J. G. Kim, Y. D. Gwon, "Analysis on the Low-Temperature Characteristics of oil seal for reciprocating driving of automobile part", *KSPE 11S380*, pp. 1229-1230, June 2011.
- [7] J. H. Hong, D. M. Keum, D. S. Han, I. B. Park, M. S. Chun, K. W. Ko, J. M. Lee, "Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45.5 pp. 530-537, Oct. 2008.
- [8] D. G. Ahn, K. J. Moon, J. S. Kim, G. Y. Han, C. G. Jung, D. Y. Yang, "Investigation into low-velocity impact characteristics of SUS304 sheet," *Proceedings of the KSMPE Conference*, pp. 111-116, Nov. 2006.
- [9] K. J. Lee, T. W. Kim, J. S. Yoo, S. W. Yoo, M. S. Chun, J. M. Lee, "Development of Temperature Dependent Damage Model for Evaluating Material Performance under Cryogenic Environment," *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45.5 pp. 538-546, Oct. 2008.
- [10] Y. K. Yoon, J. H. Kim, K. H. Baik, C. H. Park, "Assessment for Static and Fatigue Strength of the Aluminum Alloy for LNG Ship," *KSME Fall*

Conference, pp. 136-141, Nov. 2011.

- [11] S. H. Cho, J. S. Oh, S. J. Won, G. O. Park, "Evaluation of Mechanical Properties of Low Temperature Space for Automotive Material Applications," KSAE Annual Spring Conference, pp. 1053-1053, May 2017.
-

조 승 현(Seung-Hyun Cho)

[정회원]



- 2014년 2월 : 국민대학교 자동차 공학과 (공학석사)
- 2015년 4월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 연구원

<관심분야>

기계재료, 자동차, 에너지, 친환경