

저온영역에서의 A516-60, A283-C, A285-C, SB410 소재 특성 평가

오정수^{1*}, 이희범², 이봉수¹

¹한국기계전기전자시험연구원, 기계금속센터, ²이즈파크, 생산 ICT 사업부

A Study for Mechanical Property for A516-60, A283-C, A285-C and SB410 materials under Low Temperature

Jung-Soo Oh^{1*}, Hee-Bum Lee², Bong-Soo Lee¹

¹Division of Machinery Testing Center, Korea Testing Certification

²Division of manufacturing ICT business, ISPARK

요약 본 연구에서는 구조 및 압력용기용 소재 A516-60, A283-C, A285-C, SB410에 대하여 상온 20℃ 대비 저온 영역, -20℃와 -40℃에서 인장시험을 수행하고 기계적 물성변화를 정리 및 분석하였다. 결과를 분석하면, A516-60의 경우, 상온 20℃에서 저온 -20℃ 및 -40℃로 진입 시 평균 항복응력은 각각 6.4% 및 7.5% 증가하였고 평균 인장응력은 1.3% 및 4.1% 증가하였다. 반면, 평균 연신율은 상온상태 대비 각각 4.7% 및 20.4% 감소하였다. A283-C의 경우, 평균 항복응력은 각각 8.8% 및 9.8% 증가함을 보였고 평균 인장응력 또한 각각 4.1% 및 5.9% 증가하였으나, 평균 연신율은 각각 7.4% 및 9.9% 감소하였다. A285-C 또한 평균 항복응력은 각각 1.8% 및 8.6% 증가하였고 평균 인장응력 또한 각각 2.6% 및 5.3% 증가하였으나 평균 연신율의 경우 거의 변화가 없는 것으로 나타났다. 마지막으로 SB410의 경우, 평균 항복응력은 각각 7.1% 및 11.8% 증가하였고 평균 인장응력은 각각 4.3% 및 5.5% 증가하였으나 평균 연신율은 각각 8.7% 및 13.5% 감소를 보였다. 한편, 저온 -40℃로 진입 시, A516-60과 SB410의 평균 연신율은 상온상태 대비 각각 20.4% 및 13.5%의 급격한 감소를 보였으며 -20℃에서 -40℃로 온도 저하 시, 취성이 급격히 증가하는 것으로 사료된다.

Abstract In this study, tensile tests were carried out on materials (A516-60, A283-C, A285-C, and SB410) for structural and pressure vessels at temperatures of 20°C, -20°C, and -40°C, and the changes in the mechanical properties were analyzed. Compared to the results at 20°C, the average yield stress increased by 6.4% and 7.5% at -20°C and -40°C for A516-60, while the average tensile stress increased by 1.3% and 4.1%, respectively. The average elongation decreased by 4.7% and 20.4% at these temperatures. In the case of A283-C, the average yield stress increased 8.8% and 9.8%, the average tensile stress increased by 4.1% and 5.9%, and the average elongation rate decreased by 7.4% and 9.9% at -20°C and -40°C, respectively. For A285-C, the average yield stress increased by 1.8% and 8.6%, and the average tensile stress increased by 2.6% and 5.3%, respectively, but there was little change in the average elongation. Finally, for SB410, the average yield stress increased by 7.1% and 11.8%, the average tensile stress increased by 4.3% and 5.5%, but the average elongation rate decreased by 8.7% and 13.5%, respectively.

Keywords : A516-60, A283-C, A285-C, SB410, Low Temperature

본 논문은 국토교통부 2019 플랜트연구사업(No. 19IFIP-B089069-06)의 지원으로 수행되었음

*Corresponding Author : Jung-Soo Oh(Korera Testing Certification)

email: ojs82@ktc.re.kr

Received July 3, 2019

Accepted September 6, 2019

Revised August 26, 2019

Published September 30, 2019

1. 서론

최근, 극한지 및 북극권 자원에너지 개발에 따라 저온환경 적합한 소재의 사용이 요구 되어 진다[1].

특히, 동절기 평균 -20 ℃ 이하인 동유럽과 러시아 북부, 캐나다 등과 같이 극한 지역 에서는 구조 및 압력용기 소재 채택에 있어서 저온환경에서의 고강도, 고인성 및 저온 충격인성 특성이 우수한 재료의 사용이 요구되어 지고 있다[2-4].

저온환경에서의 기계적 거동에 관한 유사 연구사례로 극저온 LNG 저장용기의 재료 특성 실험의 연구가 있지만, 극저온용 특수 금속 소재에 대해서는 저온 및 고온영역에서의 변형률 속도를 고려한 고속 인장 실험연구가 일부 수행되어 연구성과를 확인할 수 있다[5].

극저온용 재료에 대한 고속 인장실험의 경우, 상온에서의 연구가 일부 수행되어 저온환경에서의 기계적 물성치의 변화가 인장속도별 차이가 있다는 정도만 확인이 되고 있다[6].

한편, 본 연구와 유사한 연구사례로 오스테나이트계 스테인레스 강종의 일부 소재를 대상으로 저온영역에서의 기계적 특성에 대한 실험적 고찰과 일부 슈퍼 듀플렉스 강의 저온영역에서의 기계적 거동을 수행한 연구사례가 확인되지만, 저온환경에서 보편적으로 많이 적용되는 구조 및 압력용기 소재에 관한 저온특성 연구사례는 확인되지 않고 있다[7,8].

기존 재료의 저온 특성에 관련된 주요 특성은 샤르피 충격 시험 등을 이용한 충격치가 사용되나 이는 각 재료의 내충격성의 정성적인 비교로만 사용될 수 있으나 설계 계산에 직접적으로 사용하기는 어렵다.

이에 본 연구는 상온에서부터 저온영역까지 사용이 가능한 보편적인 소재 4종을 선정하여, 온도 영역별 기계적 특성에 대한 실험적인 고찰을 수행하고자 한다.

이를 통해 선정된 소재들의 취성화 경향 및 특성을 분석하여 저온 환경 하에서 사용하는 압력용기와 같은 장

비 및 구조물의 재료 선정에 근거를 마련하고자 한다.

2. 인장시험

2.1 시험소재 선정

본 연구에서 시험에 사용된 소재는 ASTM A516 Grade 60(이하, A516-60), ASTM A283 Grade C(이하, A283-C), ASTM A285 Grade C(이하, A285-C), 그리고 JIS G3103 SB410(이하, SB410)을 선정하였다.

A516-60은 상온에서부터 저온영역까지 적용이 가능한 압력용기용 탄소강 강판 소재이며 A283-C와 A285-C는 중저항장력 강판으로 각각 일반구조 및 압력용기에 사용되는 소재이다[9-11]. 또한 SB410은 고온고압용 보일러 및 압력용기용 소재이다[12].

한편, 위 4종의 소재 중 저온환경에 있어 관련 표준에 의하여 A516-60만이 최대 영하 45 ℃에서 샤르피 충격 시험을 요구할 뿐, 다른 3종의 소재에 대해서는 사용 온도가 규정되어 있지 않다.

본 연구에 사용된 인장시험편은 KS B 0801 표준의 13B호 시험편 규격을 적용하였으며 시험의 형상과 치수 그리고 각 소재의 화학성분을 Fig. 1 과 Table 1에 나타내었다.

2.2 인장 시험편

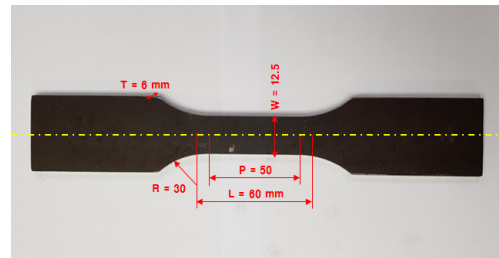


Fig. 1. Test specimen for tensile test

Table 1. Chemical composition of materials

Material/ Grade	Chemical composition (%)											
	C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	Nb	Ti	V
A516 /60	0.15	0.2	0.88	0.018	0.004	0.01	0.01	0.01	0.003	0.002	0.002	0.002
A283 /C	0.14	0.21	0.84	0.16	0.05	0.30	0.30	0.30	0.01	0.01	-	-
A285 /C	0.146	0.207	0.530	0.013	0.003	0.030	0.016	0.011	0.005	0.000	0.0014	0.001
SB410 /-	0.15	0.19	0.87	0.002	0.004	0.02	0.01	0.01	0.005	0.002	0.002	0.001

본 연구에 사용된 인장시험편은 KS B 0801 표준의 13B호 시험편 규격을 적용하였으며 시험편의 형상과 치수 그리고 각 소재의 화학성분을 Fig. 1 과 Table 1에 나타내었다.

2.3 시험 셋업 및 시험방법

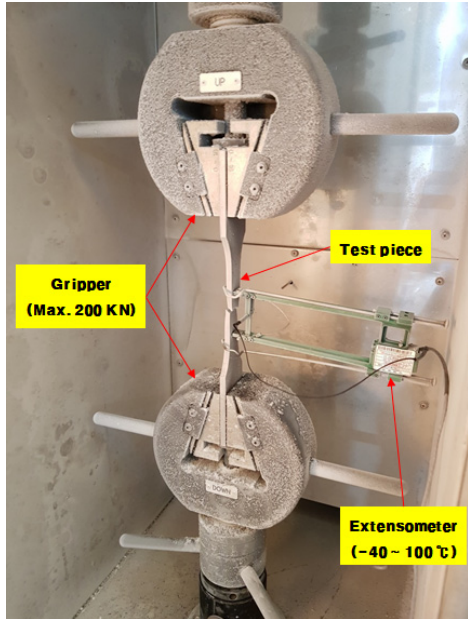


Fig. 2. Tensile test set-up under low temperature environment

본 연구에서는 소재의 저온환경 하에서 저온 특성 분석을 위해 Fig. 2 및 Fig. 3과 같이 저온챔버(-40 ~ 100 °C, SP790)를 만능재료시험기(Max. 300 kN, DTU-900 MHA)에 장착을 하였다.

또한 저온챔버 내부는 ± 0.1 °C 이내로 온도를 제어 하였고 정확한 신장율 측정을 위해 저온용 신율계(3452-050M-100ST, Epsilon)을 채용하였다.

인장 시험 시, 시험편의 길이방향의 연신율 측정을 위하여 표점거리가 50 mm인 종방향 연신율계를 사용하였다.

인장시험은 20 °C의 상온과 -20 °C 및 -40 °C의 저온 상태, 총 3개의 실험온도 상태에서 진행되었으며 각 소재 별, 온도상태 별 시험은 3회 수행하였다. 또한 인장속도는 10 mm/min로 KS B 0820의 표준을 참조하여 선정되었다[14].



Fig. 3. Test equipment for low temperature tensile test

또한 저온인장 시험 시 시험편의 열평형 상태를 고려하여 ISO 6892-3 표준에 따라 목표 온도에 도달을 확인 후 10분이 지난 상태에서 시험을 수행하였다[15].

3. 실험결과 및 고찰

3.1 실험 결과

Table 2 ~ 5에 상온 및 저온영역에서의 각 소재의 인장시험 결과를 나타내었다.

먼저, A516-60의 온도상태별 시험결과를 살펴보면, 상온 20 °C에서 -20 °C 및 -40 °C의 저온영역으로 진입할수록 평균 항복응력(Yield stress)은 각각 334.7 MPa, 356.0 MPa, 359.8 MPa로 상온상태 대비 각각 6.4 % 및 7.5 % 증가하였다.

평균 인장응력(Tensile stress)은 각각 475.6 MPa, 481.7 MPa, 495.1 MPa를 보이며 상온상태 대비 1.3 % 및 4.1 % 증가하였다.

Table 2. Tensile test results of A516-60

Results	Specimen	Temperature (°C)		
		20	-20	-40
Yield Stress (MPa)	#1	334.9	360.0	332.9
	#2	335.8	352.1	380.9
	#3	333.4	355.8	386.7
	Ave.	334.7	356.0	359.8
Tensile Stress (MPa)	#1	475.6	495.5	503.1
	#2	477.9	481.4	495.1
	#3	473.4	468.4	487.2
	Ave.	475.6	481.7	495.1
Total Elongation (%)	#1	36.64	34.64	26.59
	#2	35.58	35.57	29.47
	#3	36.00	33.14	30.31
	Ave.	36.16	34.45	28.79
Tensile Speed (mm/min)	10			

Table 3. Tensile test results of A283-C

Results	Specimen	Temperature (°C)		
		20	-20	-40
Yield Stress (MPa)	#1	330.8	354.1	387.3
	#2	340.4	376.7	379.6
	#3	345.4	375.4	349.1
	Ave.	338.9	368.7	372.0
Tensile Stress (MPa)	#1	472.8	501.4	511.7
	#2	483.5	484.6	503.8
	#3	465.4	493.7	490.0
	Ave.	473.9	493.2	501.8
Total Elongation (%)	#1	35.60	34.58	34.58
	#2	35.13	33.85	30.91
	#3	34.89	29.53	29.64
	Ave.	35.20	32.60	31.71
Tensile Speed (mm/min)	10			

Table 4. Tensile test results of A285-C

Results	Specimen	Temperature (°C)		
		20	-20	-40
Yield Stress (MPa)	#1	341.5	355.8	370.5
	#2	353.3	342.3	380.6
	#3	341.7	357.4	375.2
	Ave.	345.5	351.8	375.4
Tensile Stress (MPa)	#1	455.7	464.5	479.4
	#2	458.1	473.8	482.7
	#3	455.9	466.7	479.8
	Ave.	456.6	468.3	480.6
Total Elongation (%)	#1	37.10	37.95	37.95
	#2	38.59	37.67	37.67
	#3	36.27	36.37	36.36
	Ave.	37.32	37.30	37.33
Tensile Speed (mm/min)	10			

Table 5. Tensile test results of SB410

Results	Specimen	Temperature (°C)		
		20	-20	-40
Yield Stress (MPa)	#1	355.5	371.8	400.5
	#2	355.9	387.5	385.4
	#3	374.9	403.7	428.8
	Ave.	362.1	387.7	404.9
Tensile Stress (MPa)	#1	478.0	494.7	483.3
	#2	477.5	499.1	511.5
	#3	475.9	499.4	515.2
	Ave.	477.1	497.7	503.3
Total Elongation (%)	#1	34.06	34.83	28.86
	#2	38.19	31.49	33.88
	#3	35.82	32.37	30.71
	Ave.	36.02	32.89	31.15
Tensile Speed (mm/min)	10			

반면, 평균 연신율(Elongation)은 각각 36.16, 34.45, 28.79로 상온상태 대비 각각 4.7% 및 20.4 % 감소하는 경향을 보였다.

A283-C의 온도상태별 결과는, 평균 항복응력은 각각 338.9 MPa, 368.7 MPa, 372.0 MPa로 저온상태의 평균항복은 상온상태 대비 각각 8.8 % 및 9.8 % 증가하였으며 평균 인장응력은 각각 473.9 MPa, 493.2 MPa, 501.8 MPa로 각각 4.1 % 및 5.9 % 증가함을 확인할 수 있었다. 그러나, 평균 연신율은 35.2, 32.60, 31.71로 각각 7.4 % 및 9.9 % 감소하였다.

A285-C의 온도상태별 평균 항복응력은 345.5 MPa, 351.8 MPa, 375.4 MPa로 상온상태 대비 평균 각각 1.8 % 및 8.6 % 증가하였으며 평균 인장응력은 456.6 MPa, 468.3 MPa, 480.6 MPa를 보이며 상온상태 대비 각각 2.6 % 및 5.3 % 증가함을 보이나 평균 연신율에 있어서는 거의 변화가 없는 것으로 나타났다.

마지막으로 SB410 시험결과를 살펴보면 온도상태별 평균 항복응력은 362.1 MPa, 387.7 MPa, 404.9 MPa를 보였고 상온상태 대비 평균 항복응력은 각각 7.1 % 및 11.8 % 증가하였다. 또한, 평균 인장응력은 각각 477.1 MPa, 497.7 MPa, 503.3 MPa로 저온상태의 평균 항복응력은 상온상태 대비 4.3 % 및 5.5 % 증가하였으나 평균 연신율은 각각 36.02, 32.89, 31.15 로 각각 8.7 % 및 13.5 % 감소하였다.

3.2 실험결과 분석

본 시험에 사용된 4종의 소재의 경우 상온에서 저온으로 진입할수록 항복응력 및 인장응력은 증가하나 연신율

은 감소하는 경향을 볼 수 있는 데, 이는 탄소강 소재의 저온인성에 관한 연구사례와 동일한 경향을 보이고 있다 [15].

또한 Fig. 4 ~ 8에 나타난 소재별 온도상태에 거동 변화를 살펴보면 상온 20 °C 에서 저온상태로 진입 시, 물성치는 10 % 내외 수준으로 증가하는 경향을 보이나 저온 -40 °C 진입 시, A516-60의 연신율은 상온대비 20.4 %를, SB410의 연신율은 13.5 % 수준으로 급격히 감소하는 경향을 보이고 있다. 이러한 현상을 통해 -40 °C 아래의 저온영역에서 A516-60 및 SB410 소재는 취성화된 것으로 사료된다.

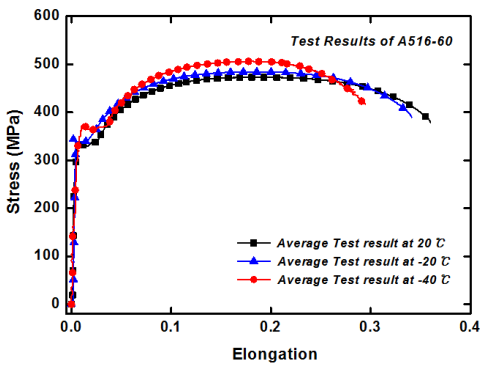


Fig. 4. Mechanical behavior of A516-60 under temperature change

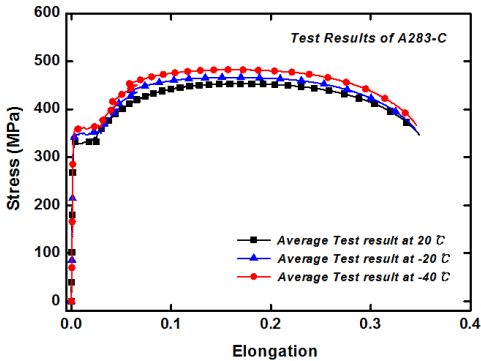


Fig. 5. Mechanical behavior of A283-C under temperature change

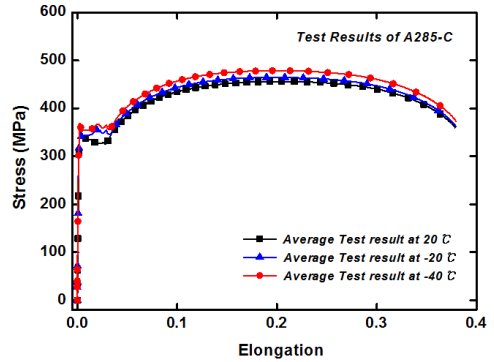


Fig. 6. Mechanical behavior of A285-C under temperature change

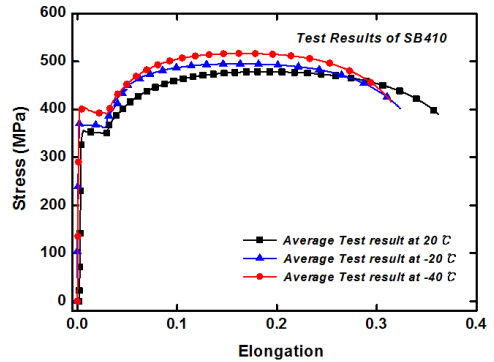


Fig. 7. Mechanical behavior of SB410 under temperature change

4. 결론

본 연구에서는 보편적으로 사용되고 있는 구조 및 압력용기용 소재 A516-60, A283-C, A285-C, SB410 4종에 대하여 상온 대비 저온 영역에서 인장시험을 수행하고 기계적 물성변화를 정리 및 분석하였다.

- 1) 인장시험 시, 상온에서 저온영역으로 진입 시 소재의 물성치 중 항복응력과 인장응력은 증가하는 반면, 연신율은 감소하는 경향을 보였다.
- 2) 상온 20 °C에서 저온 -20 °C까지는 대체적으로 10 % 내외의 물성변화를 보이나 기계적 거동은 대체적으로 유사한 경향을 보였다.

- 3) 하지만, -40 ℃의 저온영역 진입 시, A516-60과 SB410의 평균 연신율은 상온상태 대비 각각 20.4 % 및 13.5 %의 급격한 감소를 보이며 -20 ℃에서 -40 ℃로 온도 저하 시, 소재의 취성화로 사료된다.
- 4) 한편, A285-C는 저온 인장시험 시 온도 상태에 따른 평균 연신율의 감소는 없는 것을 확인 할 수 있었다.

본 연구는 구조물 및 압력용기를 제작 시, 설계단계에서의 소재 선정에 기초 자료로 활용을 기대한다.

References

- [1] Gautier, D. L, Bird, K. J., Charpentier, R. R., Grantz, A., Houseknecht, D. W., Klett, T. R., Moore, T. E., Pitman, J. K., Schenk, C. J., Schuenemeyer, J. H., Sørensen, K., Tennyson, M. E., Valin, Z. C., Wandrey, C. J. "Assessment of Undiscovered Oil and Gas in the Arctic", *Science*, Vol.324, No.5931, pp.1175-1179, June 2009. DOI: <http://dx.doi.org/10.1126/science.1169467>
- [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*, Vol.528, Issue.18, pp.189-199, July 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.msea.2011.04.032>
- [3] J. Y. Lee, H. S. Shin, K. T. Park, "Effects of Welding Processes on the Low Temperature Impact Toughness of Structural Steel Welded Joints", *Journal of Korean Society of Steel Construction*, Vol.24, Issue. 6, pp.693-700, Dec. 2012. DOI: <https://doi.org/10.7781/kioss.2012.24.6.693>
- [4] K. J. Lee, T. W. Kim, J. S. Yoo, S. W. Yoo, M. S. Chun, and 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*, Vol.45, No.5, pp.538-546, Oct. 2008. DOI: <https://doi.org/10.3744/SNAK.2008.45.5.538>
- [5] 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*, Vol.40, No.5, pp. 429-435, May 2016. DOI: [10.3795/KSME-A.2016.40.5.429](https://doi.org/10.3795/KSME-A.2016.40.5.429)
- [6] 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," *The Society of Naval Architects of Korea*, Conference, pp.571-576, May 2012.
- [7] S. H. Cho, "Mechanical Characteristics of Stainless Steel TP304, TP316 under Low Temperature Environment", *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol.18, No.10, pp.125-130, Oct. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5762/KAIS.2017.18.10.125>
- [8] J. H. Hyun, T. W. Shin, S. H. Kim, J. H. Koh., "A Study on Characteristics of Duplex Stainless Steel (ASTM A240 UNS S31803) Weld Metals made with FCAW", *Journal of Welding and Joining*, Vol.35, No.4, pp.74-81, Nov. 2017. DOI: <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.13>
- [9] "ASTM A516/ A516M-17 : Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, for Moderate- and Lower-Temperature Service", American Society for testing and materials International, 2017.
- [10] "ASTM A283 / A283M - 18 : Standard Specification for Low and Intermediate Tensile Strength Carbon Steel Plates", American Society for testing and materials International, 2018.
- [11] "ASTM A285 / A285M - 17 : "Standard Specification for Pressure Vessel Plates, Carbon Steel, Low and Intermediate Tensile Strength", American Society for testing and materials International, 2017.
- [12] "JIS G3103 : Carbon Steel And Molybdenum Alloy Steel Plates For Boilers And Pressure Vessels", Japanese Standards Association, 2012.
- [13] "KS B 0801 : Test piece for tensile test for metallic materials", Korea Standards, 2007.
- [14] "ISO 6892-3 : specifies a method of tensile testing of metallic materials at temperatures between +10°C and -196°C", International Organization for Standardization, 2015.
- [15] S. K. Park, *Study on Structural Strength of Ships in An Arctic Environment : Material Properties of Grade A Carbon Steel and Crashworthiness Characteristics of Steel-plated Structures*, Master's thesis, Korea, Pusan university, pp.13-17, 2010.

오 정 수(Jung-Soo Oh)

[정회원]



- 2012년 8월 : 과학기술연합대학원대학교 나노메카트로닉스학과 (공학석사)
- 2009년 3월 ~ 2012년 5월 한국기계연구원 초정밀시스템연구실 연구원
- 2016년 4월 ~ 현재 : 한국기계연구원 기전자시험연구원 연구원

<관심분야>

초정밀기계시스템, 가속수명시험, 수명예측

이 희 범(Hee-Bum Lee)

[정회원]



- 2011년 2월 : 한국항공대학교 기계공학과 (공학석사)
- 2011년 3월 ~ 2015년 12월 : 마이다스아이티, 선임연구원
- 2016년 1월 ~ 2018년 12월 : 한국 CAE, 책임연구원
- 2018년 1월 ~ 현재 : ISPARK 책임연구원

〈관심분야〉

자동차 및 정밀기계 유한요소해석

이 봉 수(Bong-Soo Lee)

[정회원]



- 2008년 2월 : 한국항공대학교 항공공학과 (공학박사)
- 2000년 2월 ~ 현재 : 한국기계전기전자시험연구원 수석연구원
- 2008년 5월 ~ 현재 : ISO TC 22, 86, 117 전문위원

〈관심분야〉

유체기계 성능평가, 고효율 성능시험