

빙해선박용 강재의 저온특성에 관한 연구

민덕기¹·심천식²·신동완³·조상래^{3,†}

(주) 현대미포조선¹

목포대학교 조선해양공학과²

울산대학교 조선해양공학부³

On the Mechanical Properties at Low Temperatures for Steels of Ice-Class Vessels

Dug-Ki Min¹·Chun-Sik Shim²·Dong-Wan Shin³·Sang-Rai Cho^{3,†}

Hyundai Mipo Dockyard co., Ltd.¹

Dept. of Naval Architecture & Marine Eng., Mokpo National University²

School of Naval Architecture and Ocean Engineering, University of Ulsan³

Abstract

Tensile tests were conducted at low temperatures for the steel materials which are used for outer shell of the vessels making transit through the polar regions. The selected steel materials were GL-DH32, GL-DH36 and GL-EH36. In comparison with the results at room temperature, the yield stress increases approximately by 10 to 13 percent at -30° C and by 13 to 19 percent at -50° C while the tensile strength increases about by 9 percent at -30° C and 11 to 14 percent at -50° C. To obtain true stress-true strain, i.e. correct plastic hardening characteristics, Bridgman's (1952) necking correction formula was introduced taking triaxial state of stresses after onset of diffuse necking into consideration. Photographs of fractured surfaces were taken by using Scanning Electron Microscope immediately after tensile tests completed and one for GL-EH36 has been presented in this paper.

Keywords : Steel for marine use(박용강재), Tensile test(인장실험), Low temperature(저온), True stress-true strain relationship(진응력-진변형률 관계), True fracture strain(진파단변형률)

1. 서론

수에즈 운하나 파나마 운하를 통과할 때 보다 북극항로를 이용할 경우 수송거리 및 시간이 약 40% 단축된다. 구 소련의 몰락과 자유경제의 확대로 북극해 항로를 통과하는 물동량이 증가하고 있으며 러시아의 극지방과 해양을 개발하려고 한다. 이 지역의 석유와 가스는 아직 개발되지 않은 유전 중에서 최대의 매장량이 될 것이라고 추정하고 있다. 선박용 재료로 사용되는 강재(steel)는 타 재료에 비하여 높은 강도를 가지며 가격이 싸고 용접성과 파괴인성면에서 극지와 같은 저온에서도 비교적 우수한 구조재료로 알려져 있다. 그러나 저온에서의 강의 거동과 기계적 물특성치는 상온에 비해 상이한 특성을 나타낸다고 알려져 있다. 극지와 같이 저온환경에서 보다 나은 물특성치를 확보하기 위해서 최근에는 고강력강의 사용이 증가하고 있으나 빙해선박용 고강력강에 대한 데이터는 일반적인 강에 비해서 한정되어 있는 실정이다. 최근 국내에서 스테인레스강의 극저온특성에 대한 연구(Hong et al. 2008)가 수행되었고 ASTM A500-type

carbon steel 강관재에 대한 저온특성에 대한 연구(Kim et al. 2009)등이 수행된 바 있다. 또한 다양한 조선해양구조물용 강재를 대상으로 변형률속도 의존성과 온도 의존성을 고려한 실험적 연구(Choung et al. 2009)를 수행하고 데이터베이스 개발사례를 발표한 바 있지만, 자세한 연구결과를 제시하지는 않았다. 따라서 지금까지 빙해선박용 강재의 구조적 거동에 관한 연구와 소성영역에서의 재료적 거동을 규명하기 위한 기초 연구는 찾아보기 어렵다.

본 논문에서는 빙해선박용 선급강재의 탄소성 물성치를 면밀히 분석하였고, 향후 빙해선박의 구조적 거동특성을 연구하기 위한 기초자료로 활용되리라 예측된다.

2. 소성경화 구성 방정식

강재에 대한 인장실험은 탄성계수, 초기항복강도, 인장강도, 변형률 경화지수, 강도계수 등의 탄소성 재료특성을 얻기 위하여 수행된다. 최종강도 문제와 같이 구조물이 소성변형을 경험하지

만 소성변형률이 크지 않은 경우 즉 대변형 문제이긴 하지만 대 변형률의 문제가 아닌 경우 소성역 재료특성의 부정확성으로 인 한 영향이 비교적 크지 않다. 그러나 선박의 충돌과 같이 부재의 파단과 대변형률을 동반하는 문제에 있어서는 소성 재료특성 정 보는 구조거동의 해석결과에 큰 영향을 미친다. 하지만 대부분의 인장실험에서는 단지 하중(또는 공칭응력)과 표점거리의 신률(또 는 공칭변형률)을 획득하고 있다. 이러한 정보로는 부재의 일부 단면적이 집중적으로 감소하는 확산네킹(Diffuse necking) 이전 까지의 균일 진응력(Uniform true stress)-균일 진변형률(Uniform true strain)을 추정하는 것은 가능하지만 확산네킹 이후의 진응력 -진변형률 관계를 추정하는 것은 쉽지 않다. 즉 하중-신률로부터 추정하는 진응력-진변형률은 확산네킹이 발생하기 이전에 평활 재 시편 평행부의 모든 단면이 균일 변형(Uniform deformation) 할 때 까지만 유효하다. 따라서 확산네킹 이전의 진응력-진변형 률은 균일 진응력-균일 진변형률이라 불린다.

대부분의 상용 강재에 있어서 비균일 변형의 발생은 확산네킹 이 발생하는 최대하중 이후에 시작한다. 지속적인 인장과 함께 하중이 점점 감소하다가 결국 파단에 이르게 된다.

Bridgman(1952)은 봉형 인장시편의 확산네킹 이후 다축응력 상태를 보정하기 위한 해석적 식을 제안하였다. 이는 궁극적으로 인장실험으로 얻은 평균 진응력을 등가 진응력으로 수정하기 위 한 식이다.

2.1 균일 진응력-진변형률

일축 인장실험에 있어서 공칭변형률은 식 (1)과 같이 표현 된다.

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} \tag{1}$$

여기서,

ΔL = 특정순간에서 표점거리의 늘어난 길이

L_0 = 원래의 표점거리

L = 특정순간에서의 표점거리

dL을 표점거리의 소성영역 미소증분이라고 하면 이에 상응하 는 소성변형률 증분은 식 (2)와 같이 표현될 수 있다.

$$d\varepsilon^p = \frac{dL}{L} \tag{2}$$

따라서 특정 순간에서의 표점거리에 상응하는 소성변형률은 식 (3)과 같다.

$$\varepsilon^p = \int_{L_0}^L \frac{dL}{L} = \ln \frac{L}{L_0} \tag{3}$$

식 (3)에 나타난 소성변형률을 로그 진변형률이라 한다. 로그 진변형률은 확산네킹의 발생 전까지 공칭변형률, 식 (1)을 사용 하여 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)에 나타난 소성변형 률은 확산네킹이 발생하기 전까지 적용가능하며 균일 진변형률 이라 한다.

$$\varepsilon^p = \ln \frac{L}{L_0} = \ln \frac{(L - L_0) + L_0}{L_0} = \ln(e + 1) \tag{4}$$

이와 유사하게 균일 진응력은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\sigma = S(1 + e) \tag{5}$$

여기서,

S = 공칭 응력

e = 공칭 변형률

식 (4)와 식 (5)는 균일변형 구간에서만 유효하고 확산네킹이 발생하면 사용할 수 없다.

2.2 평균 진응력-진변형률

Hollomon(1945)은 소성구간에서의 응력-변형률 관계를 변형 률 경화지수(n)와 강도계수(K)를 이용하여 식 (6)과 같이 나타내 었다. 변형률 경화지수는 로그 좌표상에서 응력과 변형률의 기울 기를 의미하며 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$\sigma = K(\varepsilon^p)^n \tag{6}$$

변형률 경화지수 와 강도계수는 ASTM E646-07에 다음과 같 이 정의 되어 있다.

$$n = \frac{N \sum_{i=1}^N x_i y_i - \sum_{i=1}^N x_i \sum_{i=1}^N y_i}{N \sum_{i=1}^N x_i^2 - (\sum_{i=1}^N x_i)^2} \tag{7}$$

$$K = \exp \left\{ \frac{\sum_{i=1}^N y_i - n \sum_{i=1}^N x_i}{N} \right\} \tag{8}$$

여기서,

x = $\log \sigma$

y = $\log e$

N = 데이터의 개수

2.3 등가 진응력-진변형률

Fig. 1에 보인 바와 같이 네킹이 일단 발생하면 최소단면에서의 재료는 최소단면 근처의 상하부 단면보다 빨리 수축하려는 경향을 보인다. 결과적으로 최소단면 상하부 단면이 최소단면의 빠른 수축을 구속하게 되고 정수응력(Hydro-static stress)이 네킹부의 단면에 발달하게 된다. 사실 네킹부에서 전단응력이 존재하지 않기 때문에 정수응력이 소성변형에 기여하지 않는다. 그러나 정수응력이 소성변형에 필요한 평균 진응력을 증가시키게 된다.

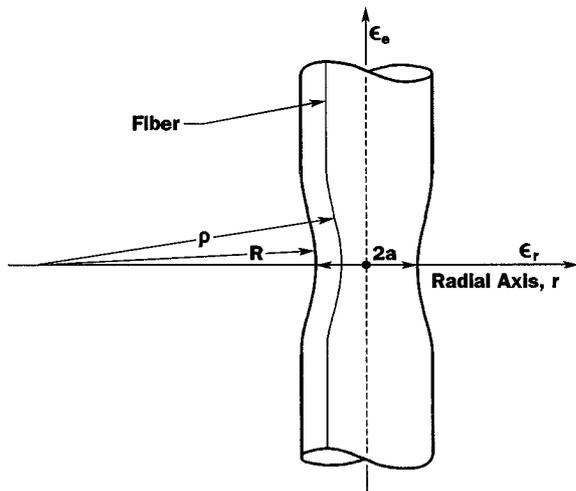


Fig. 1 Illustration of necking of a rod

네킹 이후의 평균 진응력의 수정을 위하여 Bridgman (1952)은 식 (9)와 같이 평균 진응력으로부터 등가 진응력을 계산하는 이론식을 제시하였다.

$$\sigma_{eq} = \frac{\sigma_{a,av}}{\left(1 + \frac{2R}{a}\right) \ln\left(1 + \frac{a}{2R}\right)} = \sigma_{a,av} \cdot \zeta \quad (9)$$

여기서,

- $\sigma_{a,av}$ = 축방향 평균응력
- a = 최소 단면에서의 반지름
- R = 최소 단면에서의 곡률반지름

그러나, 인장시험에서 최소단면의 곡률반지름과 반지름을 매 증분하중마다 정밀하게 계측하는 것은 용이하지 않으며 이러한 문제점을 극복하기 위하여 Le Roy et al.(1981)은 a/R 을 소성변형률의 함수로 나타낸 바 있다. 일반적으로 식 (10)은 비교적 정확한 경험식으로 알려져 있다.

$$\frac{a}{R} = 1.1(\epsilon^p - \epsilon_u^p) \quad (10)$$

여기서,

$$\epsilon^p = \text{소성 변형률}$$

$$\epsilon_u^p = \text{진인장강도에 상응하는 균일진변형률}$$

3. 실험개요

3.1 실험 재료

Table 1은 실험에 사용된 강재의 종류를 나타내었다.

Table 1 Material type and temperature of specimens

Serial No.	Type of Material	Material Thick. (mm)	Temp (°C)	No of Specimen
1	GL- DH32	20	RT.	7
2	GL- DH32	20	-30	3
3	GL- DH32	20	-50	3
4	GL- DH36	20	RT	7
5	GL- DH36	20	-30	3
6	GL- DH36	20	-50	3
7	GL- EH36	30	RT	5
8	GL- EH36	30	-30	3
9	GL- EH36	30	-50	3

3.2 인장시편

ASTM을 기준으로 시편의 치수를 결정하였으며 JIS 및 KS규격도 동시에 만족 하도록 하였다. 시편은 모재의 롤링 방향에 수직이 되도록 제작하였다. Fig. 2는 시편의 치수를 보여주고 있다.

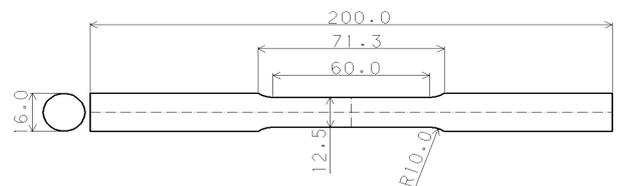


Fig. 2 Scantling of specimen

3.3 인장시험

인장시험은 200kN 만능 인장시험기를 이용하여 1.0mm/s의 속도로 변위제어를 하였다. Fig. 3은 저온챔버에 인장시편을 장착한 상태를 보여주고 있다. 실험온도는 각각의 강재에 대하여 상온, -30°C 및 -50°C에서 실시하였다.

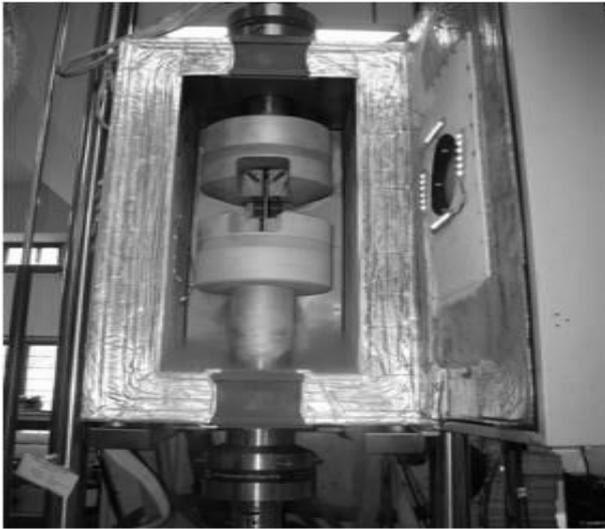


Fig. 3 Specimen setup in cold chamber

3.4 실험결과

강재 종류에 따른 온도 별 항복강도, 인장강도, 변형을 경화 지수(n) 및 강도계수(K) 를 Table 2~Table 10에 나타내었다. 인장 실험기로부터 직접 취득한 공칭응력, 공칭변형을 곡선은 Fig. 4 ~ Fig. 6에 나타내었다. 상온, -30°C 및 -50°C 각각의 온도에서의 평균 진응력-진변형률 및 등가 진응력-진변형률을 비교하여 Fig. 7 ~ Fig. 9에 나타내었다. 초기 단면적과 파단 순간의 단면적을 계측하여 진파단변형률을 구하여 Table 11에 보여 주었다. 본 연구에서 설정된 온도에서 강재의 취성 상태를 알아보기 위하여 인장실험에 사용된 강재의 파단면 전자현미경 촬영을 실시하였고 Fig. 10 ~ Fig. 12에 EH36강재의 파단면 사진을 수록하였다. 이들 사진으로부터 입자(grain)들이 저온에서 상온에 비해 조밀해진 것을 확인할 수 있고, 이는 저온에서 재료가 취성화 되었다는 것을 반증한다고 할 수 있다 (Anderson, 1995).

Table 2 Material properties at RT of GL-DH32

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	(K) [MPa]
S1-1	369.38	523.94	0.22	914.70
S1-2	370.00	520.00	0.19	862.40
S1-3	372.00	521.00	0.19	864.21
S1-4	362.00	517.00	0.22	896.21
S1-5	385.00	521.00	0.22	900.88
S1-6	381.28	532.40	0.20	899.80
S1-7	389.86	533.44	0.20	902.57
Mean	375.65	524.11	0.21	891.54
S.D	9.93	6.36	0.014	20.13
COV	2.64%	1.21%	6.8%	2.26%

Table 3 Material properties at RT of GL-DH36

Label	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S4-1	379.06	552.17	0.21	947.29
S4-2	380.00	545.00	0.19	902.87
S4-3	380.00	547.00	0.21	929.79
S4-4	383.00	553.00	0.20	931.78
S4-5	386.00	548.00	0.21	932.53
S4-6	390.62	558.88	0.19	933.07
S4-7	396.69	560.40	0.19	929.46
Mean	385.05	552.06	0.20	929.54
S.D	6.564	5.900	0.01	13.25
COV	1.7%	1.1%	5%	1.5%

Table 4 Material properties at RT of GL-EH36

Specimen No.	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S7-1	404.87	524.58	0.16	822.39
S7-2	394.00	512.00	0.16	801.74
S7-3	383.00	497.00	0.17	929.79
S7-4	383.03	519.15	0.15	791.87
S7-5	411.29	531.76	0.14	804.74
Mean	395.24	516.90	0.16	830.11
S.D	12.76	13.28	0.011	56.80
COV	3.2%	2.6%	7.3%	6.8%

Table 5 Material properties at -30°C of GL-DH32

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S6-1	451.55	632.16	0.21	1095.22
S6-2	445.70	622.86	0.21	1075.36
S6-3	458.18	620.45	0.22	1082.66
Mean	451.81	625.16	0.213	1084.41
S.D	6.244	6.184	0.006	10.045
COV	1.4%	1.0%	2.7%	0.9%

Table 6 Material properties at -30°C of GL-DH36

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S5-1	429.99	600.33	0.20	1013.40
S5-2	418.19	601.22	0.21	1034.22
S5-3	427.63	595.84	0.21	1016.21
Mean	425.27	599.13	0.21	1021.28
S.D	6.244	2.88	0.006	11.30
COV	1.5%	0.5%	2.8%	1.1%

Table 7 Material properties at -30°C of GL-EH36

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S8-1	442.46	558.28	0.16	881.76
S8-2	444.38	565.39	0.16	887.07
S8-3	440.86	567.93	0.16	884.66
Mean	442.57	563.87	0.16	884.50
S.D	1.76	5.002	0.00	2.66
COV	0.4%	0.9%	0.0%	0.3%

Table 8 Material properties at -50°C of GL-DH32

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S2-1	435.91	572.13	0.22	992.90
S2-2	419.03	571.65	0.21	982.03
S2-3	422.44	571.65	0.22	991.02
Mean	425.79	571.87	0.22	988.65
S.D	8.926	0.375	0.006	5.81
COV	2.1%	0.7%	2.7%	0.6%

Table 9 Material properties at -50°C of GL-DH36

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S3-1	439.66	602.90	0.23	1064.04
S3-2	454.83	594.80	0.23	1048.93
S3-3	449.53	591.08	0.22	1033.37
Mean	448.01	596.26	0.23	1048.78
S.D	7.70	6.04	0.006	15.34
COV	1.7%	1.0%	2.5%	1.5%

Table 10 Material properties at -50°C of GL-EH36

시편	Yield Stren. [MPa]	Tensile Stren. [MPa]	n	K [MPa]
S9-1	446.21	576.61	0.18	939.22
S9-2	446.12	571.72	0.18	928.47
S9-3	435.15	569.41	0.18	922.26
Mean	442.49	572.58	0.18	929.98
S.D	6.36	3.67	0.00	8.58
COV	1.4%	0.6%	0.0%	0.9%

Table 11 True fracture strain

Material	Temp. (°C)	True fracture strain(ϵ_f)
DH32	RT	1.24
	-30	1.17
	-50	1.14
DH36	RT	1.20
	-30	1.18
	-50	1.04
EH36	RT	1.70
	-30	1.65
	-50	1.52

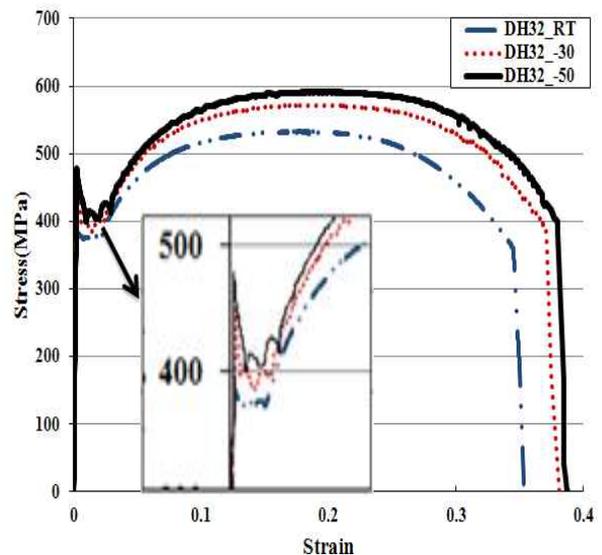


Fig. 4 Nominal Stress-Strain relationships of GL-DH32

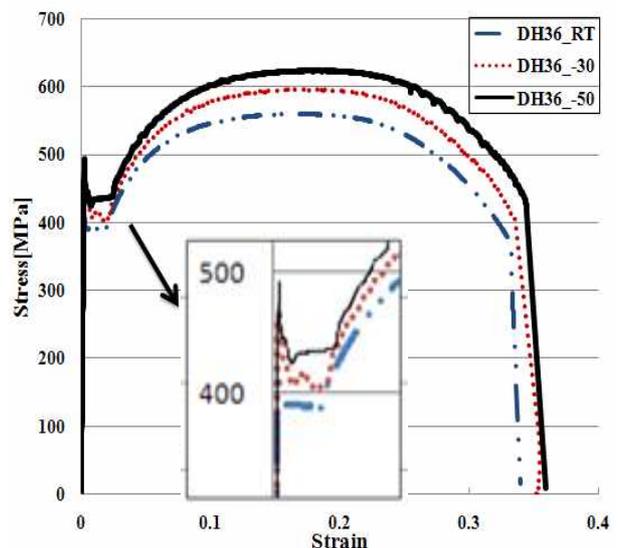


Fig. 5 Nominal Stress-Strain relationships of GL-DH36

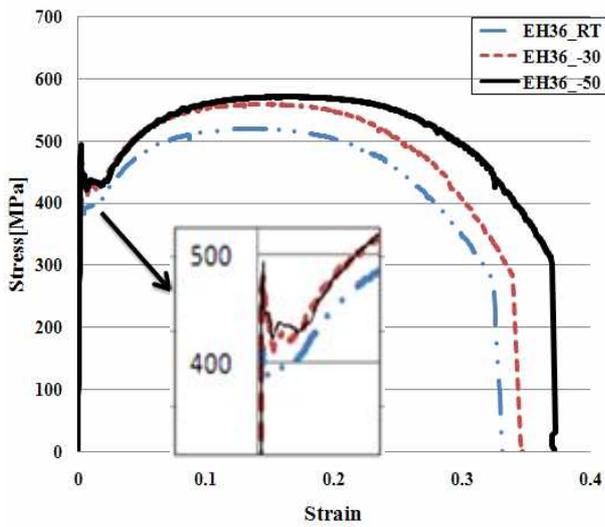


Fig. 6 Nominal Stress-Strain relationships of GL-EH36

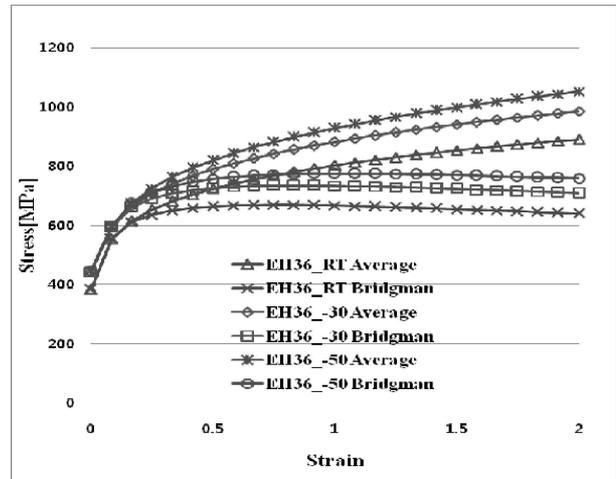


Fig. 9 Average true stress-true strain and equivalent true stress-true strain relationships for GL-EH36 steel at various temperatures

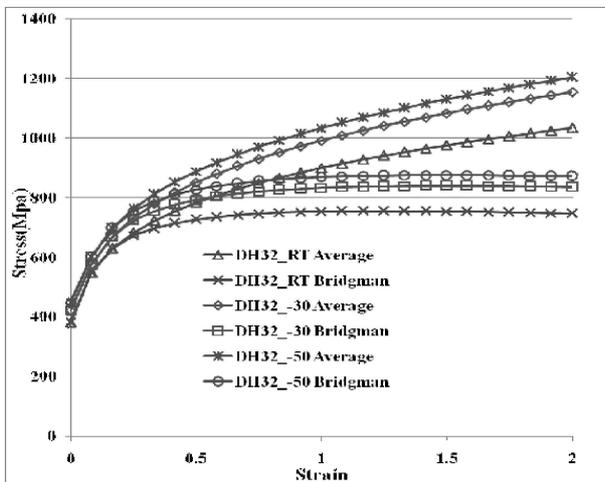


Fig. 7 Average true stress-true strain and equivalent true stress-true strain relationships for GL-DH32 steel at various temperatures

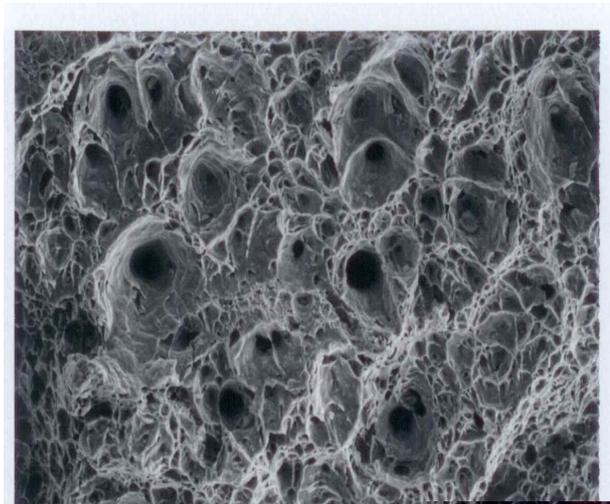


Fig. 10 Scanning Electron microscopic examination of the fractured surface of GL-EH36 steel at room temperature

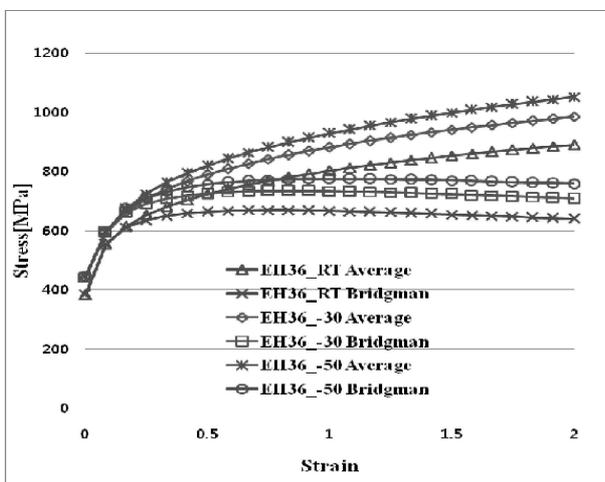


Fig. 8 Average true stress-true strain and equivalent true stress-true strain relationships for GL-DH36 steel at various temperatures

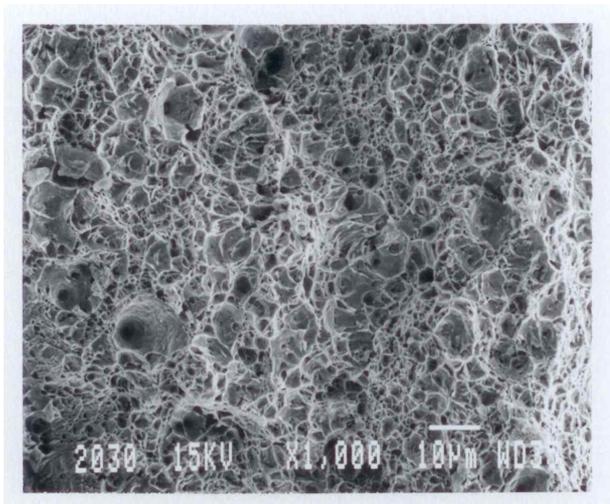


Fig. 11 Scanning Electron microscopic examination of the fractured surface of GL-EH36 steel at -30°C

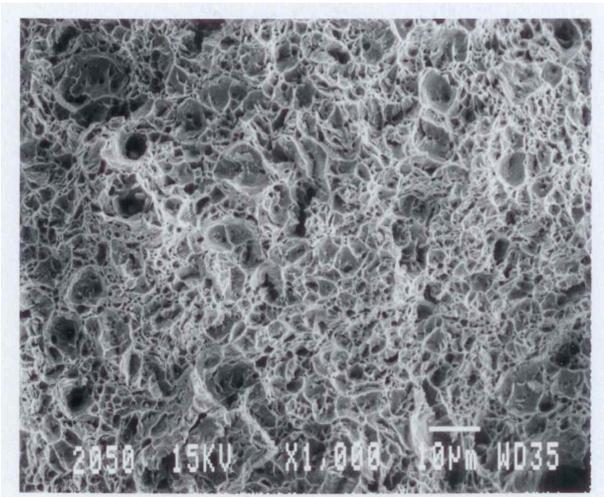


Fig. 12 Scanning Electron microscopic examination of the fractured surface of GL-EH36 steel at -50°C

4. 결론

극지운항 선박의 외판에 주로 사용되는 DH32/36 및 EH36 강재의 저온인장실험을 통하여 선박의 실제 운항조건인 -30°C 및 -50°C 에서 강재의 항복강도와 인장강도 모두 상승하였다. 항복강도는 상온 대비 -30°C 에서 약 10~13% -50°C 에서 약 13~19% 증가하였고 인장강도는 -30°C 에서 대략 9%, -50°C 에서 약 11~14% 증가하였다.

변형률 경화지수 및 강도계수를 구하여 평균 진응력-진변형률을 구하였고, 충돌과 같이 부재의 파단과 대변형률을 동반하는 문제에 대한 구조거동 예측의 정확성을 확보하기 위하여 확산냉각 이후의 등가 진응력-진변형률을 Bridgman의 응력수정식 및 Le Roy et al.의 식을 이용하여 구하였다. 변형률 경화지수 및 강도계수는 온도가 하강 할수록 더욱 더 높은 값을 보여주었고 이에 대한 결과로 상온상태 보다 저온에서 더 높은 진응력이 도시되었다. 그러나 진파단변형률은 저온에서 낮은 값을 보여 주었다. 따라서 빙해지역 운항선박의 ship-ice 충돌 문제를 다룰 때 상온상태에서의 강재 특성치를 사용하는 것은 정확한 구조거동 특성 파악을 담보하지 못한다고 하겠다. 본 연구를 통해 빙해운항선박용 강재의 탄소성 물특성치를 확보 하였고 제시된 자료가 Ship-ice 충돌 및 극지운항선박 구조거동특성 연구를 위한 기초 자료로 활용도가 높을 것으로 기대된다.

일반적으로 강(steel)은 저온 조건에서 취성화 된다고 알려져 있으나 선박용 선급강재에 대한 온도별 취성화 정도에 대한 정확한 정보는 보고된바 없다. 따라서 저온 및 상온실험 시편의 파단면 전자현미경 촬영을 실시하였고 GL-EH36강재의 결과를 제시하였다. 이들 사진으로 부터 쇠빙선 및 쇠빙상선이 운항하는 극지의 온도조건에서 강재의 재료 특성이 취성화 된다는 사실을 확인 하였다. 그러나 제시된 사진만 으로는 현상태가 연성-취성 전이구역(Ductile- Brittle transition)의 어느 구간에 위치하는지는 판단할 수가 없다. 이를 확인하기 위해 GL-DH36 강재의 Charpy

충격실험을 실시하여 이를 확인할 필요가 있다. 또한 모재만이 아니라 용접부의 진응력-진변형률에 대한 특성 연구도 향후과제로 수행 할 필요가 있다.

후 기

이 논문은 울산대학교의 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

Anderson, T. 1995, *Fracture mechanics*. Fundamentals & Applications. C Press: Boca Raton, Florida.

ASTM E646-07. 2008, *Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents(n-Values) of Metallic Steel Materials*.

Bridgman, P.W., 1952. *Studies in Large Plastic Flow*. McGraw Hill: New York.

Choung, J.M. & Cho, S.-R., 2008. Study on true stress correction from tensile tests. *Journal of Mechanical Science and Technology* Vol.22 pp.1039~1051.

Hong, J.-H. Keum, D. M. Han, D. S. Park, I. B. Chun, M. S. Lee, K. W. & Lee, J. M., 2008. Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, Vol. 45, No.5, pp.530~537.

Holloman J. H., Tensile Deformation. *Trans. AIME*, 162, 268(1945)

Choung, J. M. Han, Y. T. Im, S. W. Huh, H. & Kim, K. S., 2009. Development of Elastic-Plastic Material Database Software Considering Temperature and Strain Rate Dependencies of Marine Structural Steels. *KOAST.*, pp.224~229

Choung, J. M., 2007. *On the Fracture Criteria of Steels for Marine Structures Subjected to Impact Loadings*. Ph.D Thesis, University of Ulsan.

Lee, K. J. Kim, T. W. Yoo, J. S. Chun, M. S. & Lee, J. M., 2008. 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.

