선박 및 해양구조물용 극저온 재료의 기계적 거동 특성

박웅섭¹·강기엽¹·전민성²·이제명^{1,†}
부산대학교 조선해양공학과¹
삼성중공업 조선해양연구소²

A Comparative Study on Mechanical Behavior of Low Temperature Application Materials for Ships and Offshore Structures

Woong-Sup Park¹·Ki-Yeob Kang¹·Min-Sung Chun²·Jae-Myung Lee^{1,†}
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan Naval University¹
Marine Research Institute, Samsung Heavy Industries Co., Ltd.²

Abstract

Austenite stainless steel(ASS), aluminum alloy and nickel steel alloy are the most widely used in many cryogenic applications due to superior mechanical properties at low temperature. The Face-Centered Cubic(FCC) and Hexagonal Close-Packed(HCP) materials are used for the primary and secondary insulation barrier of Liquefied Natural Gas(LNG) carrier tank and various kinds of LNG applications currently. In this study, tensile tests of ASS, aluminum alloy and nickel steel alloy were carried out for the acquisition of quantitative mechanical properties under the cryogenic environment. The range of thermal condition was room temperature to -163°C and strain rate range was 0.00016/s to 0.01/s considering the dependencies of temperatures and strain rates. The comprehensive test data were analyzed in terms of the characteristics of mechanical behavior for the development of constitutive equation and its application.

Keywords : Austenitic stainless steel(오스테나이트계 스테인레스 강), Aluminum alloy(알루미늄 합금), Nickel alloy(니켈 합금), Low temperature(저온), Strain rate(변형률 속도), Strain hardening rate(변형 경화율), Strain rate sensitivity(변형률 속도 민감도)

1. 서 론

최근 고유가 인플레이션 현상으로 LNG(액화 천연 가스)의 수요가 증가하고 있으며, 이에 따라 LNG의 채굴, 저장 및 이송에 관련된 극저온 장비의 수요가 크게 증가하고 있다.

일반적으로 LNG는 110K(-163°C)의 극저온에서 저장되기 때문에 LNG Tanker의 1, 2차 방벽, 안전밸브, 이송 파이프 등의 LNG 관련 구조물은 극저온 및 고압 등의 극한 상태에서 충분한 안전성이 확보되어야 한다. 따라서 이러한 극한 조건을 충족시키기 위해, 우수한 저온 재료 특성을 보유한 오스테나이트 스테인레스 강(ASS), 알루미늄 합금(Aluminum alloy), 니켈 강 합금(Nickel steel alloy) 등이 널리 사용되고 있다.

위의 재료는 극저온에서 안전성에 대한 검증은 이미 이루어져 있으나, 대부분 저온 영역에서의 사용 가능 여부에 대한 결론적인 내용만 포함하고 있으며, 실제 극저온 장비가 운용되는 조건에서의 성능 분석 결과 및 재료의 특성을 모사하는 수치해석

기술은 매우 부족한 상황이다(Lee, 2008).

따라서 본 연구에서는, 극저온 재료의 온도 및 변형률 속도의존 통합 구성방정식 개발을 위한 기초 연구단계로, 대표적 극저온 재료에 대한 인장실험을 수행하였다. 실험은 온도 및 변형률 속도의 영향을 고려하여 수행되었으며, 실험 재료로는 300계열의 오스테나이트 스테인레스 강인 304L(17% CW), 316L(17% CW), 321, 347과, 알루미늄 합금 계열 AA5083, 니켈 강 합금 계열 Invar 강을 선정하였다. 인장실험을 통해 각 재료의 온도와 변형률 속도 의존성을 정량적으로 분석하였으며, 통합 구성방정식에 적용하기 위하여 변형률 경화 속도 및 변형률 속도 민감도 측면에서 비선형 거동을 분석하였다.

2. 실험 재료

본 연구에서는 극저온 재료로 가장 널리 상용되고 있는 ASS, 알루미늄 합금 및 니켈 강 합금에 대한 극저온 인장 실험이 수행

Fig. 1 LNG applications (Left : Moss type, Center : Membrane type, Right : Storage tank)

Table 1 LNG carrier tank type and materials

Type		Membrane		Independent	
		GTT MARK III	GTT NO96-2	MOSS	IHI-SPB
Tank	Material	AISI 304L	Invar steel	Al alloy (AA5083)	
	Thickness	1.2mm	0.7mm	50mm	30mm
Insulation system	Material	R-PUF	Plywood + Perlite	PUF	PUF
	Thickness	250mm	530mm	250mm	200mm

되었다. 실험에 사용된 재료의 조선 분야에서의 대표적인 적용 예를 Fig. 1과 Table 1에 나타내었다(Chun, 2009; Harris, 1993).

일반적인 강 또는 극저온 재료의 상온 거동의 경우, Fig. 2에 나타낸 바와 같이 ①과 같은 재료 거동을 나타낸다. 그리고 일반적인 강은 저온으로 온도 감소 또는 변형률 속도의 증가에 따라 ②와 같이 전체적인 강도가 증가 및 연성 감소 경향을 나타낸다. 하지만 실험된 ASS의 경우, 극저온 하에서 ③ 또는 ④와 같이 S자 형태의 2차 경화 거동을 나타내며(Hong, 2008; Seeger, 1955; Obst, 1991), 저온영역에서 변형률 속도의 증가에 따라 ④에 나타난 바와 같이 항복강도는 증가($\sigma_{y3} \rightarrow \sigma_{y4}$)하는 반면인장강도는 감소($\sigma_{t3} \rightarrow \sigma_{t4}$)하는 독특한 비선형 거동을 나타낸다(Park, 2009). 또한, 알루미늄 합금과 인바 강의 경우 저온으로 온도가 감소함에 따라 ⑤와 같이 강도와 연성($\epsilon_1 \rightarrow \epsilon_5$)이 증가하는 독특한 재료 비선형 거동을 나타낸다.

본 연구에서는 이러한 극저온 재료의 복잡한 비선형성을 분석하기 위하여 다양한 온도 및 변형률 속도 의존 인장 실험을 수행하였고, 그 결과를 강도 및 연성, 변형률 경화 속도 및 변형률 속도 민감도 측면에서 분석하였다.

Fig. 2 Schematic of relationship between stress and strain of tested materials

2.1 오스테나이트 스테인레스 강

300계열 ASS는 멤브레인 타입의 LNG선 또는 극저온 밸브 등 극저온 장비에 가장 널리 사용되고 있는 재료이다. 300계열 ASS는 극저온 환경에서 부식과 산화에 대해 우수한 저항성을 가지고 있으며, 뛰어난 연성 및 강도를 갖는다. 본 연구에서는 다양한 종류의 ASS 중 용접 구조물의 HAZ(Heat affected zone)나 해양 환경에서의 구조물 등에서 자주 발생하는 임계부식, 공식부식, 응력부식균열 등에 강한 저항력을 보유한 AISI 304L(17% CW), 316L(17% CW), 321, 347를 실험 재료로 선정하였다. 또한, AISI 304L과 316L의 경우 저온 영역에서 더욱 우수한 성능을 보이는 냉간 가공(Cold-working, CW)된 재료를 실험 재료로 선정하였다. 실험된 ASS의 화학적 성분 구성을 Table 2에 나타내었다.

2.2 알루미늄 합금

AA5083은 5000 계열 (Al-Mg) 알루미늄 합금으로, Table 3과 같이 4.5%의 Mg이 Mn과 함께 추가되어 저온 영역에서 뛰어난 강도와 충격 저항성 등을 갖는 재료이다.

AA5083은 일반 강의 1/3 수준의 밀도로 인하여 구조물 경량화 관점에서 매우 유용하게 사용되고 있으며(ASTM, 2009),

이러한 장점들을 이용하여 LNG 화물창의 1차 방벽 재료로 널리 사용되고 있다. 본 연구에서는 알루미늄 합금 계열 실험 재료로 AA5083계열 재료 중 AA5083(H116, 5% CW)을 선정하였으며, 극저온에서의 온도 및 변형률 속도 의존 거동을 비교 분석하였다.

2.3 니켈 강 합금

다양한 종류의 니켈 강 합금 중에서 극저온 재료로 가장 널리 사용되고 있는 Invar 강(FeNi36)은 주로 0.5~1.5mm의 박판의 형태로 멤브레인 타입 LNG 운반선의 1차 방벽 또는 2차 방벽에 사용된다.

Invar 강의 열팽창률은 연강의 1/10, ASS의 1/15 정도로 매우 작기 때문에 정밀 측정기구, 광학기구 등에 널리 이용되고 있고, 낮은 용융 온도와 비열로 인하여 적은 입열량으로도 우수한 용접성을 갖는다(Harris, 1993). 또한 최근에 산업현장에서 구조물의 변형과 잔류응력제어에 관한 요구가 증대됨에 따라, Invar 강을 LNG관련 산업에 적용하려는 시도가 점차 증가하고 있는 추세이다.

본 연구에서는 니켈 강 합금 중 Invar 강을 실험 재료로 선정하여, 각 실험 조건에 따른 변형률 경화 속도 거동 및 변형률 속도 민감도를 정량적으로 비교 분석하였다. 사용된 Invar 강에 대한 화학적 성분비를 Table 4에 나타낸다.

Table 2 Chemical composition of tested 300 series austenitic stainless steels

Material	Chemical composition (%)									
	C	Cr	Si	Cu	P	Mn	Ni	S	Mo	Others
304L	0.016	18.2	0.376	0.5	0.028	1.451	8.63	0.0251	0.254	—
316L	0.023	16.55	0.37	0.415	0.0311	1.44	10.05	0.0067	2.13	—
321	0.022	17.251	0.325	0.402	0.0315	1.279	9.100	0.0012	0.271	Ti 0.2856
347	0.044	17.474	0.409	0.423	0.0303	1.308	9.116	0.0010	0.262	Nb 0.6610

Table 3 Chemical composition of tested AA5083

Material	Chemical composition (%)									
	Al	Si	Fe	Cu	Mn	Mg	Cr	Zn	Ti	Others
AA5083	Bal.	0.12	0.29	0.03	0.72	4.4	0.06	0.01	0.02	≤ 0.15

Table 4 Chemical composition of Invar steel

Material	Chemical composition (%)						
	Ni	C	Si	Mn	S	P	Fe
Invar	36~36.5	≤ 0.04	≤ 0.25	0.2	≤ 0.0015	≤ 0.008	Bal.

3. 실험

3.1 실험 장비

본 연구에서는 극저온 거동을 파악하기 위하여 Fig. 3, 4와 같이 특수 제작된 형태의 시험시스템을 사용하였다. 만능시험기(UH 1000kN, SHIMADZU, Fig. 4)를 사용하여 실험을 수행하였으며, 극저온 환경 구축을 위하여 저온 챔버를 도입하였다. 저온 챔버 내부에 설치되어 있는 3개의 thermocouple를 통해 질소가스의 유동을 제어하여 일정한 온도를 유지하는 자동 온도 조절 시스템을 이용하였으며, 정확한 변형량의 측정을 위하여, 극저온용 신율계(3542-050M-100-LT, Epsilon tech)를 사용하였다.

실험에 사용된 시편은 한국산업규격((KS B 0801 10; KS B 0801 13B; Fig. 5)에 따라 제작되었으며(KS, 2006), 시편 내부의 열 평형상태를 고려하여 실험 전 30분간의 예냉을 실시하였다.

Fig. 3 Tensile test under cryogenic environment

(A)

(B)

Fig. 4 Photography of universal testing machine with cryogenic chamber (A) and Schematic of experimental apparatus (B)

Fig. 5 Test specimen shapes and dimension for AISI 300 series austenitic stainless steel and aluminum alloy (A, KS B 0801 10) and Invar steel (B. KS B 0801 13B)

3.2 실험 조건

실험 조건은 온도 및 변형률 의존성을 분석을 위해 Table 5와 같이 설정되었다. 실험 온도는 LNG와 LPG의 저장 온도를 고려하여 상온을 포함한 5개의 실험 온도를 선정하였다. 또한 실험 변형률 속도의 경우, 과거 연구(Reed & Simon, 1990; Bang, 1989)에 보고된 바와 같이, ASS의 상변태에 민감하게 작용하는 준정적 변형률 속도 범위에서 실험 변형률 속도를 선정하였다.

실험은 각 온도에서 3가지 변형률 속도로 수행되었으며, 실험 결과의 반복성을 확인하기 위하여 조건별 4회 이상의 실험을 수행하였다. 총 400회 이상의 실험이 수행되었으며, 각 실험 결과는 5% 이내의 오차를 나타냈다.

Table 5 Conditions of the cryogenic tensile test

Test temperature	Test strain rate
293K (20°C)	
223K (-50°C)	1.6E-4 /sec
153K (-120°C)	1.0E-3 /sec
133K (-140°C)	1.0E-2 /sec
110K (-163°C)	

4. 실험 결과 및 고찰

4.1 전반적인 특성

Fig. 6은 각 실험 재료의 최저 변형률 속도에서 대표 온도 의존 응력-변형률 관계를 나타낸다.

ASS는 저온 영역에서 1차 항복과 균일 연신 구간 이후 상당한 양의 2차 경화를 보인다. 이는 상변태로 인한 변태유기소성 (TRIP)에 의한 것으로(Park, 2010; Amar, 2006; Olson & Cohen, 1975), 온도가 감소함에 따라 인장강도는 상당한 증가를 보이는 반면 연신율은 감소하는 경향을 나타낸다.

반면에 AA5083과 Invar 강은 경화에서 ASS와 같은 2차 경화 양상을 나타내지는 않았지만, 온도가 감소함에 따라 항복 및 인장강도가 증가하는 경향을 나타내었다.

본 연구 결과, 실험된 모든 재료는 상온 대비 저온에서 더욱 우수한 강도를 갖는 것을 확인할 수 있었다. 또한 AA5083과 Invar 강의 연신은 온도가 감소함에 따라 일반적인 강과는 반대로 증가하는 독특한 결과를 확인할 수 있었다.

일정한 온도 110K에서 변형률 속도에 따른 각 재료 거동을 비교한 Fig. 7에서 볼 수 있듯이, ASS와 Invar 강은 뚜렷한 변형률 속도 의존 경향을 나타내었다. 저온에서 변형률 속도가 증가함에 따라, ASS는 항복강도가 증가하지만 인장강도는 감소하는 경향을 나타낸다. 이는 단열효과에 의한 현상이며, 온도가 감소함에 따라 변형률 속도에 대한 의존성은 더욱 뚜렷이 나타낸다(Park, 2010; Talonen, 2005).

(A)

(B)

(C)

Fig. 6 Temperature dependent stress-strain curve of AISI 304L (A), AA5083 (B) and Invar steel (C)

Fig. 7 Strain rate dependent stress-strain curve of AISI 304L (A), AA5083 (B) and Invar steel (C)

Invar 강의 경우, 인장강도와 연신율의 뚜렷한 감소를 나타내는 반면, 항복강도에서는 변형률 속도 의존성을 나타내지 않았다. 한편, AA5083은 연성을 제외한 재료의 기계적 특성에서는 변형률 속도 효과가 관찰되지 않았다. 이는 알루미늄 합금 계열 재료는 상온과 저온 영역에서 변형률 속도에 매우 둔감하다는 과거 연구 결과(Voorhees, 1969; Chatfield & Rote, 1981; Pantarkar & Tan, 1998)와 유사한 결과로, 본 연구의 실험 결과 또한 AA5083은 변형률 속도에 매우 불규칙한 경향성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 하지만 Fig. 7에 나타난 바와 같이 변형률 속도의 증가에 따라 연성은 상당량 감소하는, 즉 AA5083은 연성의 관점에서만 변형률 속도에 의존하는 것을 실험 결과 확인할 수 있었다.

4.2 강도 및 연성 분석

실험된 재료의 강도와 연신율의 온도 및 변형률 속도 의존성 분석이 수행되었다. Fig. 8은 실험된 재료의 온도 및 변형률 속도 의존 경향을 나타낸다.

ASS의 경우, 온도가 감소함에 따라 항복강도는 미소(5%)하게 증가하는 반면, 인장강도는 평균적으로 100%의 증가를 나타냈다. 이는 ASS의 FCC결정 구조가 저온에서 TRIP에 의해 소성변형 중 BCC결정구조로 상변태되며, 이 과정에서 2차 경화가 발현됨에 따라 강도가 증가하게 되기 때문이다. 또한 저온 영역에서 변형률 속도의 증가에 따라 항복강도는 증가(10%)하고 인장강도는 감소(17%)하는 경향을 나타낸다. 이러한 특성은 ASS의 항복강도 영역에서는 온도와 변형률 속도에 미소한 영향을 받지만, 인장강도 영역에서는 소성 에너지의 누적에 따라 상대적으로 큰 영향을 받기 때문이며 소성변형 중 생성된 열에너지의 소산, 즉 단열효과(adiabatic effect)에 따른 영향이라고 보고된 바 있다(Dieter, 1976; Park, 2009).

Fig. 8(E)~8(F)는 FCC 결정 구조인 AA5083과 Invar 강의 온도 및 변형률 속도 의존 경향을 나타낸다. 온도가 감소함에 따라 AA5083은 항복 및 인장강도가 각각 30%, 18%, 연신율은 130% 증가하였고, Invar 강은 항복 및 인장강도가 각각 100%, 70%, 연신율은 40% 증가하는 경향을 나타내었다. Invar 강의 경우에 0.01/s 변형률 속도에서는 그 이하 변형률 속도에서의 경향과는 달리, 온도가 감소함에 따라 연성이 감소는 경향을 나타냈다.

일반적으로 알루미늄, 알루미늄 합금, 7% 이상의 Nickel을 함유한 오스테나이트 강 등의 FCC구조인 금속 재료들은 다른 일반적인 재료들에 비해 많은 슬립계(slip system)를 보유하고 있다. 과거의 연구 결과에 따르면 슬립계의 수는 FCC구조의 연성과 관련이 있으며, FCC 결정 구조는 저온영역에서 격자구조가 변하지 않고 전위 이동을 활성화 시켜 연성을 유지 또는 증가시키는 결과를 가져온다(Thomas, 2005). 따라서 이러한 이유로 인하여 본 연구에서 실험된 AA5083과 Invar 강은 일반적인 강들과는 달리 위와 같은 독특한 재료거동을 나타내게 된다. 또한, 본 연구에서 실험된 알루미늄 합금 계열 재료는 불연속 항복의 소성 불안정 요소 때문에 변형률 속도에 둔감한 재료로 알려져 있으며(Obst, 1991), 본 연구의 실험 결과에서 또한 변형률 속도에 있어 매우 불규칙한 의존 경향성을 나타내는 것을 확인할 수 있었다.

Fig. 8 Temperature and strain rate dependent strength and ductility of AISI 304L(A), 316L(B), 321(C), 347(D), AA5083(E) and Invar steel(F)

Invar 강 경우, 앞서 언급한 바와 같이 변형률 속도가 증가할수록 항복강도는 증가하지만, 인장강도와 연성은 감소한다. 이러한 변형률 속도에 대한 의존성은 Nickel 성분 함유량이 주요 원인으로, Invar 강의 기반인 오스테나이트가 Nickel 성분을 첨가함에 의해 안정화되고, grain 결정을 미세화 시켜 낮은 연성-취성 변이 온도를 갖게 하며, 이러한 비선형 거동에 영향을 끼친다. 또한 본 연구의 AA5083 및 Invar 강에서는 불연속적 항복(serrated yielding)의 독특한 현상이 나타났는데, 이러한 불연속 항복은 극저온에서 소성 불안정의 영향으로 나타나며, 재료 거동에 큰 영향을 끼쳐 재료 거동에 어떠한 변수로 인하여 크게 영향을 끼칠 가능성이 있다(Seeger, 1958; Pustovalov, 2008)

4.3 변형률 경화 속도 분석

실험 재료의 온도 및 변형률 속도 의존성을 정량적으로 분석하기 위하여 식(1)로 정의되는 변형률 경화 속도(strain hardening rate, θ)를 도입하였다.

$$\theta = \left(\frac{\partial \sigma}{\partial \epsilon_p} \right)_{\epsilon_p, T}, \quad \theta = f(\dot{\epsilon}_p, \dot{\epsilon}, T) \quad (1)$$

식(1)과 같이 정의되는 θ 는 재료의 변형 경화의 진전을 표현하는 구성방정식에 유용하게 사용되는 변수 중 하나로(Klepaczko, 2009), 온도 및 변형률 속도 의존 경향을 매우 정확하게 표현할 수 있는 변수이며, 일정한 변형률 속도와 온도에서 변형경화에 대한 미분형으로 나타낸다(Babich, 1977).

Fig. 9는 ASS의 경화성을 대표하는 AISI 304L의 θ -진변형률 곡선과 진응력-진변형률 곡선을 비교한 그래프이다. AISI 304L은 상온에서는 소성거동의 진행에 따라 단순한 기울기로 변형률 경화 속도가 감소하는 경향을 보인다. 하지만 저온에서의 경우 변형 시작부에서 높은 변형률 경화 속도를 보이며 이후 균일 연신 구간의 중간부까지 급격히 감소한다. 이후 ASS는 2차 경화 현상을 나타내며, 2차 경화 중간영역까지 변형률 경화 속도는 계속 증가된다. 그 후 변형률 경화 속도는 급격히 감소하게 되며, 인장응력 영역에서 최저값을 나타낸다. 위와 같이 ASS 계열 재료는 상변태에 따라 변형률 경화 속도는 매우 상이한 형태의 거동을 나타내는 것을 본 연구 결과 확인할 수 있었다.

AA5083의 경우, Fig. 10에 나타난 바와 같이 온도 및 변형률 속도에 의존하여 ASS에 비해 단순한 형태의 변형률 경화 속도 거동을 나타냈다. AA5083은 상온에서는 포물선 형태의 거동을 보이는 반면, 온도가 감소함에 따라 θ -진변형률 곡선의 기울기가 감소하며 선형적으로 그 거동 형태가 변화하는 경향을 나타냈다. 또한 알루미늄 합금의 변형률 속도에 대한 불안정 특성을 실험 결과를 통해 확인할 수 있었다.

Fig. 11과 같이, Invar 강 또한 온도가 감소함에 따라 변형률 경화 속도의 기울기가 감소하는 경향성을 나타냈다. 반면 그 거동 형태는 AA5083과 반대로 상온에서는 선형적 거동을 보이나, 온도가 감소함에 따라 S자 형태 거동이 변화하는 경향을 나타냈다.

Fig. 9 θ -true strain curve vs. True stress-strain curve of AISI 304L

Fig. 10 θ -true strain curve vs. True stress-strain curve of AA5083

Fig. 11 θ -true strain curve vs. True stress-strain curve of Invar steel

또한 변형률 속도 의존성 측면에서 실험 최저 변형률 속도와 중간 변형률 속도에서는 유사한 수치의 변형률 경화 속도, 즉 거의 변화가 없는 경향성을 나타내었으나, 실험 최고 변형률 속도에서는 강도 및 연성이 감소하는 경향을 보였다.

4.4 변형률 속도 민감도 분석

$$M = \ln(\dot{\epsilon}_1 / \dot{\epsilon}_{ref}) / (\sigma_1 / \sigma_{ref}) \quad (2)$$

유동응력 기반의 식(2)로 정의되는 변형률 속도 민감도 M 은 금속 성형 가공에 있어 매우 중요한 매개변수로, $\sigma = k\dot{\epsilon}^M$, $\dot{\epsilon}_p = \dot{\epsilon}_0(\sigma/\sigma_0)^M$ 등과 같은 구성방정식의 중요한 매개변수로 사용된다(Schwaiger, 2003). 또한 M 의 온도 의존성은 변형률 구간에 따라 민감하여 변형률 구간별 변형률 속도 의존성을 표현하는 변수로 사용된다(Yao, 2000; Mahmudi, 1995).

본 연구에서는 실험 조건을 바탕으로 가장 상변태에 적은 영향을 끼치는 실험 최저 변형률 속도인 0.00016/s를 기준 변형률 속도 $\dot{\epsilon}_{ref}$ 로 가정하며, 기준 응력 σ_{ref} 은 $\dot{\epsilon}_{ref}$ 조건 실험의 각 변형률에서의 유동응력으로 정의된다. 또한 $\dot{\epsilon}_1$ 과 σ_1 은 가장 높은 실험 변형률 속도 0.01/s와 $\dot{\epsilon}_1$ 조건 실험의 각 변형률에서의 유동응력으로 정의된다. 위와 같이 정의된 식(2)를 통해 재료의 변형률 속도에 대한 각 변형률 구간별 민감도를 산출할 수 있으며, Fig. 12와 같은 M -변형률 곡선이 도출된다.

Fig. 12(A)는 상온과 극저온에서 ASS 중 대표적인 M 경향을 나타내는 AISI 316L의 M -변형률 곡선과 응력-변형률 곡선을 비교한 것이며, Fig. 12(B)는 AA5083의 온도 의존 M -변형률 곡선을 비교한 그래프이다.

ASS는 일반적인 재료와는 반대로 전반적으로 음의 기울기의 M -변형률 곡선을 나타내었다. 상온에서 M -변형률 곡선은 포물선 형태의 거동을 나타내는데 반면, 온도가 감소함에 따라 음의 기울기가 증가하면서 S자 형태로 점차 변화하는 경향을 확인할 수 있었다. 또한 상온에서는 점차 감소하는 단순한 형태의 곡선을 나타내는데 반면, 극저온에서는 2차 경화의 시작과 함께 변형률 속도 민감도가 낮아지며, 인장응력 영역 이후 변형률 속도 민감도가 급속히 낮아지는 경향을 확인할 수 있었다.

반면 Fig. 12(B)와 같이 AA5083의 경우 실험된 다른 재료와는 달리 M -변형률 곡선이 양의 기울기를 나타냈다. 대부분 실험에서 인장응력 전까지 양의 기울기를 나타냈으며, 그 후 감소하는 경향을 나타냈다. 변형률 속도 민감도는 저온으로 갈수록 상온에 비해 점차 둔감하게 변하는 경향을 본 실험 결과 확인할 수 있었다.

Invar 강은 Fig. 12(C)와 같이 전반적으로 M -변형률 관계에서 음의 기울기를 나타냈다. 상온에서는 인장응력 영역까지 거의 변화를 나타내지 않는 반면, 온도가 감소함에 따라 뚜렷하게 음의 측면에서 기울기가 증가하는 현상, 즉 온도가 감소함에 따라 점차 변형률 속도에 대한 영향을 크게 받는 경향성을 실험 결과 확인할 수 있었다.

(A)

(B)

(C)

Fig. 12 M -strain curve vs. stress-strain curve of AISI 316L(A), AA5083(B) and Invar steel(C)

5. 결 론

본 연구에서는 극저온 구조물에 널리 사용되고 있는 재료인 300 계열의 오스테나이트 스테인리스 강(ASS), 알루미늄 합금 그리고 니켈 합금 강에 대한 극저온 인장실험이 수행되었다. 극저온 재료의 강도 및 연성에 대한 온도 및 변형률 속도 의존 경향성이 파악되었으며, 변형률 경화 속도 및 변형률 속도 민감도를 통해 실험 재료의 복잡한 비선형 거동이 분석되었다.

본 연구결과를 아래와 같이 간략히 요약한다.

- 온도가 감소함에 따라, ASS는 변태유기소성(TRIP)에 의한 2차 경화 현상이 관찰되었다. 항복 및 인장강도가 증가하였으며, AA5083 과 Invar 강 또한 항복 및 인장강도가 증가하였으며, 연신을 또한 크게 증가하는 경향을 나타내었다. 저온영역에서 변형률 속도가 증가함에 따라, ASS에서는 항복강도의 증가를 보였으며, 인장강도는 감소하였다. AA5083은 강도 측면에서는 변형률 속도 영향을 거의 받지 않지만, 연신율은 감소하는 경향을 확인할 수 있었다. Invar 강의 경우 중간 변형률 속도까지는 항복응력이 증가하였으며, 인장강도의 경우 거의 증가하지 않는 경향을 나타내는데 반면, 최대 변형률 속도에서 인장강도는 감소하는 경향을 나타냈다.

- 온도가 감소함에 따라, ASS의 변형률 경화 속도는 저온에서 실험된 다른 재료와는 달리 극심한 비선형적인 거동을 나타냈다. AA5083의 변형률 경화 속도는 음의 기울기를 나타냈으며, 점차적으로 기울기는 음의 방향으로 증가하면서 선형 거동 형태를 나타냈다. Invar 강의 변형률 경화 속도는 S형태의 거동을 나타냈고, 그 기울기가 변형률 경화 속도가 증가함에 따라 감소하였다. 저온영역에서 변형률 속도가 증가함에 따라, ASS의 변형률 경화 속도는 감소하는 경향을 보였다. AA5083은 변형률 경화 속도에 변형률 속도의 영향을 거의 나타내지 않았으며, Invar 강의 경우 변형률 경화 속도가 감소하는 경향을 나타내었다.

- ASS는 일반적으로 음의 기울기 변형률 속도 민감도를 나타냈다. 온도가 감소함에 따라, 음의 기울기는 증가하였고, 점차적으로 S자 형태의 곡선으로 바뀌는 거동을 나타내었다. AA5083의 변형률 속도 민감도는 최대 인장강도 영역까지 증가하였고, 그 후 다시 감소하는 경향을 나타냈다. 전체적 기울기는 감소하였으며, 변형률 속도에 둔감한 경향을 나타냈다. Invar 강의 경우, 전반적으로 변형률 속도 민감도는 음의 기울기가 증가하는 경향을 나타냈다.

본 연구에서는 실험된 극저온 재료인 AISI 304L, 316L, 321, 347, AA5083, Invar 강의 온도 및 변형률 속도 의존 재료 거동이 파악되었다. 2차 경화, 강도 및 연성의 증가와 같은 기계적 거동 특성에 대한 경향성을 정량적으로 제시하였다. 또한 저온영역에서 변형률 속도에 의존하는 비선형 거동을 표현하기 위하여 변형률 경화 속도 및 변형률 속도 민감도를 도입하였고, 유동 변형률, 온도, 변형률 속도의 함수로 요약하여 그 경향성을 비교 분석하였다.

본 연구는 선박 및 해양구조물용 극저온 재료의 온도 및 변형률 속도 의존 통합 구성방정식의 개발의 위한 일환으로 수행되었다. 본 연구 결과는 정밀한 구조설계와 안전성 평가를 위한 중요한 실험적 근거로 조선뿐만 아니라 극저온 관련 다방면의 산업분야에 응용하여 사용될 수 있으리라 판단된다.

후 기

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0011489), 첨단 조선 공학 연구센터 (ASERC)의 지원에 감사드립니다.

아울러 본 연구에서 수행된 재료 시험에 관하여 강재 제공에 도움주신 대우조선해양주 산업기술연구소 한명수 박사님께 감사드립니다.

참 고 문 헌

- ASTM B209M. 2009. ASTM International, West Conshohocken, PA, DOI: 10.1520/B0209M-07.
- Babich, V.K. Pirogov, V.A. & Vakulenko, I.A. 1977. Strain-Hardening Parameters Determined from the Stress-Strain Curve. *Strength of Materials*, 9(6), pp.704-707.
- Bang, K.W. 1989. *Korea Research Institute of Standards and Science*, pp.84-123.
- Chatfield, D.A. & Rote, R.R. 1981. *Strain Rate*. Effects on Properties of High Strength Steels. SAE Warrendale, Pennsylvania, Reprint(740), pp.177.
- Chun, M.S. et al., 2009. Experimental Investigation on the Impact Behavior of Membrane Type LNG Carrier Insulation System. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22, pp.901-907.
- De, A.K. et al., 2006. Deformation-Induced Phase Transformation and Strain Hardening in Type 304 Austenitic Stainless Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 37(A), pp.1875-1886.
- Dieter, G.E. 1976. *Mechanical Metallurgy*. McGraw-Hill, New York.
- Harris, F.S. 1993. *Safety features on LNG ships*. *Cryogenics*, 33(8), pp.772-777.
- Hong, J.H. et al., 2008. Mechanical Characteristics of Stainless Steel under Low Temperature Environment. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(5), pp.530-537.
- Klepaczko, J.R. & Łodygowski, T., 2009. Advances in constitutive relations applied in computer codes. *Springer Wien New York*, pp.88-98.
- Korean Standards Information Center, 2006. *Korean industrial standard*, South Korea.

- Lee, K.J. Chun, M.S. Kim, M.H. & Lee, J.M., 2009. A new constitutive model of austenitic stainless steel for cryogenic applications. *Computational Material Science*, 46, pp. 1152–1162.
- Lee, K.J. et al., 2008. 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.
- Mahmudi, R., 1995. Strain rate sensitivity of a wrought Al-1.2%Fe alloy. *Scripta Metall. Mater*, 32, pp.2061–2065.
- Obst, B. & Nylas, A., 1991. Experimental evidence on the dislocation mechanism of serrated yielding in f.c.c. metals and alloys at low temperatures. *Materials Science and Engineering A*, 137, pp.141–150.
- Olson, G.B. & Cohen, M., 1975. Kinetics of strain-induced martensitic nucleation. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 110(3), pp.791–795.
- Park, W.S. Yoo, S.W. Kim, M.H. & Lee, J.M., 2010. Strain-rate Effects on the Mechanical Behavior of the AISI 300 Series of Austenitic Stainless Steel under Cryogenic Environments. *Materials and Design*, 31, pp.3630–3640.
- Patankar, S.N. & Tan, M.J., 1998. Strain rate insensitive plasticity in aluminum alloy 5083. *Scripta Materialia*, 38, pp.1255–1261.
- Pustovalov, V.V., 2008. Serrated Deformation of Metals and Alloys at Low Temperatures. *Low temperature physics*. 34, pp.683–723.
- Reed, R.P. & Simon, N.J., 1990. Discontinuous Yielding in Austenitic Steels at Low Temperatures. *Advances in Cryogenic Engineering*, 36(B), pp.1077–1086.
- Schwaiger, R. et al., 2003. Some Critical Experiments on the Strain-Rate Sensitivity of Nanocrystalline Nickel. *Acta Metall. Mater.* V, 51, pp.5159–5172.
- Seeger, A., 1955. The generation of lattice defects by moving dislocations and its application to the temperature dependence of the flow-stress of F.C.C. crystals. *Philosophical Magazine*, 46, pp.1194–1217.
- Seeger, A., 1958. *Handbuch der Physik*, Vol. VII/2, Springer, pp.109.
- Talonen, J. Nenonen, P. Pape, G. & Hänninen, H., 2005. Effect of Strain Rate on the Strain-Induced $\gamma \rightarrow \alpha$ '–Martensite Transformation and Mechanical Properties of Austenitic Stainless Steels. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 36(A), pp.421–432.
- Thomas, M. F., 2005. Cryogenic engineering, *Marcel Dekker, Inc., New York*, pp.257–291.
- Voorhees, H.R., 1969. A Survey of Effects on Lower-Than-Usual Rates of Strain in the Yield and Tensile Strengths of Metals. *ASTM Data Series DS44*.
- Yao, X.X. & Zajac, S., 2000. The strain-rate Sensitivity of flow stress and work-hardening rate in a hot deformed Al-1.0 Mg alloy. *Journal of materials science letters*, 19(9), pp.743–744.

박웅섭

강기엽

전민성

이제명