취성균열전파정지인성 측정법에 관한 연구

안 규 백* · 배 홍 열** · 박 정 응***,†

*조선대학교 선박해양공학과

**포스코 기술연구원 접합연구그룹

***조선대학교 토목공학과

A Study of Brittle Crack Arrestability Test Method

Gyubaek An*, Hong-Yeol Bae** and Jeong-Ung Park***,†

*Department of Naval Architecture & Ocean Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea

**Steel Solution Marketing Dept. Welding & Joining Research Group, POSCO, Pohang, 51712, Korea

***Department of civil Engineering, Chosun University, Gwangju, 61452, Korea

†Corresponding author : jupark@chosun.ac.kr

(Received November 16, 2020 ; Revised December 9, 2020 ; Accepted December 16, 2020)

Abstract

This study evaluated the brittle crack arrest temperature (CAT) through an isothermal crack arrest test. The concept of evaluating CAT by an isothermal crack arrest test was proposed by C. Wiesner for application to low temperature steels for LPG tanks. The proposed test method consists of arresting a double-tension-type brittle crack with EB melt-run, which acts as a crack initiator and crack runway. There are some disadvantages when evaluating CAT with electron beam welding (EBW), which requires a local brittle zone to initiate a brittle crack. A local temperature gradient (LTG) system is developed to overcome the limitations of the EBW method. LTG systems do not require additional EBW to develop a brittle zone to initiate brittle crack. Recently, brittle crack arrest (BCA) steels are being used in large container ship such as in the upper deck or hatch side coaming of 22,000 twenty-foot equivalent units to prevent fatal brittle fracture accident of those ships. The International Association of Classification Societies (IACS) defined BCA steels using Kca requirement or CAT requirement in their unified rule (UR) S33. Therefore, when a shipyard uses BCA steel in the construction of large container ships, CAT or Kca should be evaluated. In this study, a new CAT test method is introduced to evaluate brittle crack arrest temperature more easily. Furthermore, both test methods were compared for the same specimens to verify the validity of the test method.

Key Words : Brittle fracture, Crack Arrest Temperature (CAT), Electron Beam Welding (EBW), Embrittled zone, Local Temperature Gradient (LTG)

1. 연구배경 및 목적

조선산업에서 컨테이너선 시장은 더욱 거대화 되고 있으며, 그 크기 또한 2020년 기준 24,000TEU(Twenty-foot Equivalent Unit)까지 건조되어 향해 중에 있다. 이러한 초대형 컨테이너선의 건조를 위해서는 고강도 극후물강재의 적용이 불가피 하여, 항복강도 460 MPa 급의 80 ~ 100mm 두께 강재가 선박의 상부구

조에 적용되고 있다¹⁻⁴⁾. 일반적으로, 강재의 두께가 증가하면 파괴인성은 감소하는 경향이 있다. 또한, 파괴인성은 구조물에서 발생하는 파괴의 원인을 조사할 때 사고의 원인을 밝히는 중요한 인자가 되었다⁵⁻¹⁰⁾. 초대형 컨테이너선을 비롯 대형 강구조물에 적용되는 강재의 파괴인성확보를 통하여 신뢰성 높은 구조물을 제작하는 것은 중요한 요소가 된다. 따라서 최근의 대형선박의 건조 시 소재의 파괴인성을 확보하는 것은 필수 요소가 되었다. 종래의 선박건조에 있어서는 사용되는

강재가 주로 50mm 미만의 강재가 적용되어서 두께 증가에 따른 불안전파괴 발생의 위험성에 대한 인식이 낮았으나, 최근 선박의 대형화에 따라 적용강재의 극후물화가 급속하게 진행되어서 불안전파괴의 위험성이 증가됨에 따라 파괴안전성확보를 위한 많은 연구가 수행되었다¹¹⁻²³⁾. 또한, 극후물재에서 나타날수 있는 불안전파괴의 방지를 위하여 최근 취성균열정지 성능이 우수한 강재 (BCA강: Brittle Crack Arrest steel)가 국내외 철강사에 의해서 개발되었다²⁴⁾. BCA라고 하는 새로운 개념의 강종 개발과 함께 국제선급협회(IACS: International Association of Classification Society)를 비롯 각국의 선급 협회에서는 극후물재의 취성파괴 안전성 확보를 위한 지침 및 규칙을 제정하였다²⁵⁻²⁷⁾. 주로 초대형 컨테이너선에 적용될 BCA강의 개발은 국내외적으로 주목 받고 있는 이슈이다. 또한, IACS는 국제적으로 승인된 BCA 설계에 대한 UR (Unified Requirement)을 제정하였으며²⁸⁾, 취성균열전파정지인성, Kca 또는 취성균열전파정지온도, CAT (Crack Arrest Temperature) 측면에서 H/C 및 U/D 용 BCA 강재를 정의하였다. 극후물재의 취성균열전파정지 능력을 나타내는 Kca의 평가는 온도구배형 ESSO 실험을 통하여 평가할 수 있다²⁹⁾. IACS UR에서는 취성균열 전파정지 성능을 갖기 위해서는 최대 80mm의 두께에 대해 Kca 값이 -10°C 에서 $6,000\text{ N/mm}^{1.5}$ 이상을 요구하고 있다. 이처럼 Kca 평가 방법은 규격화²⁹⁾되어서 평가절차가 정립되었으나, 취성균열전파정지온도를 평가하는 CAT 평가 방법은 규격화된 방법이 없으며, 종래에 사용된 방법이 적용되고 있다. 종래의 CAT 연구¹¹⁾에서는 표준화된 CAT 테스트 방법이 아닌 TWI (The Welding Institute, UK)에서 제안되었던 방법이 사용되었다. 일반적으로 CAT 시험을 위해서는 취성균열을 발생시키기 위한 취화 영역(embrittle zone)이 필요하다. 취화 영역을 생성시키기 위하여 전자빔용접 (EBW: Electric Beam Welding)을 적용하여 취성균열이 발생하기 쉬운 취화 영역을 생성시켜서 CAT 실험을 수행해야 한다. 이처럼 종래의 CAT 시험법은 EBW에 의한 추가적인 취화 영역을 생성시키는 과정이 필요 하기 때문에 실험 준비에 많은 노력이 필요하다. 또한, 100mm의 극후물재에 대해서는 EBW를 원패스로 적용하는 것은 매우 어렵다³⁰⁾. 극후물재에 EBW를 적용하더라도, 실험조건에 따라서는 균열발생을 용이하게 하기 위해 만든 취화 영역에서 취성균열을 발생시키지 못하여 별도의 국부냉각을 수행하는 경우도 발생하게 된다. 종래의 CAT 실험법에 적용되었던 EBW에 의한 취화 영역 생성에서 발생한 단점을 개선하여 새로운 CAT 실험법을 제안하고자 한다. CAT실험을 위해

서는 취성균열을 발생시키는 취화 영역이 반드시 필요하다. 취화영역생성에 종래에 사용하였던 EBW방법 적용 대신 국부 온도구배 냉각방식(LTG: Local Temperature Gradient)을 적용하여 취성균열을 발생시키는 실험방법을 개발하였다.

본 연구에서는 극후물재의 취성균열전파정지온도를 검토하기 위한 새로운 CAT실험법을 소개한다. 본 CAT 실험법에서는 취성균열발생을 위해서 인위적으로 만들어주는 취화 영역을 국부 온도구배 냉각방식(LTG)을 적용하였다. 개발된 CAT 시험법은 취화영역을 극저온으로 냉각시켜서 취성균열의 발생의 용이하게 하였으므로 종래의 방법에서 적용되었던 EBW의 추가적인 공정을 줄여서 실험을 보다 쉽게 할 수 있게 했다는데 차별성이 있다. 또한, 종래에 사용되었던 EBW방법을 적용한 실험 결과와 비교 검토를 통하여 본 연구에서 개발한 LTG 방법의 신뢰성을 검증하였다.

2. 취성균열전파정지인성 실험방법

취성균열전파정지인성은 Kca와 CAT의 평가에 의해서 확보 가능하다. 최근에는 취성균열 전파정지인성에 관한 실험이 온도구배 조건하에서 실시되는 대형 ESSO 시험이 폭 넓게 수행되고 있다^{31,32)}. 한편, CAT평가를 위한 실험 방법은 규격화된 방법이 없기 때문에 종래부터 사용되었던 EBW에 의하여 취화영역을 임의로 만들어서 취성균열의 발생을 용의하게 하여 실험을 진행하였으나, 이 실험방법에는 장점과 단점이 있어서 종래의 실험방법의 단점을 보완하여 새로운 CAT실험방법을 제안하였다. 종래의 CAT실험에서는 EBW를 활용하여 취화영역을 만들었으나, 취화영역을 생성하기 위하여 별도의 시험편 제작 과정이 필요하고, EBW 과정에서 결함이 발생하여 균열전파/정지에 영향을 미칠 가능성이 있다. 따라서 본 연구에서는 취성균열전파정지인성 평가를 위하여 전처리가 필요 없는 국부냉각(LTG: Local Temperature Gradient)에 의한 실험법을 개발하여 EBW실험법의 단점을 극복하고자 하였다. LTG 실험 방법은 취화영역을 만들기 위하여 별도의 EBW가 필요하지 않다는 장점을 가지고 있으며, 그 이외는 종래의 EBW에 의한 방법과 유사하다. LTG방법에서 취화 영역은 온도구배에 의해서 발생시키고, EBW 방법에서와 같이 취화영역에서 발생할 수 있는 용접결함 발생에 대한 가능성은 전혀 없다. Fig. 1에 종래의 EBW실험법과 본 연구에서 제안한 LTG실험법의 장단점을 비교하여 정리하였다. CAT실험은 시험편의 모든 영역에 대하여 목표온도로 균일한 온도를 분포시켜서 취성균열이 발생하여 일정 거리만큼 진전 후 정지 유무를 판단하는

Test embrittlement	ESSO	
	Electron Beam Weld	Local Temp. Gradient
Specimens		
Test conditions	- Applied stress : 2/3 of SMYS - Test temperature : Isothermal - Crack initiation : Impact load - Pre Process : EBW	- Applied stress : 2/3 of SMYS - Test temp. + Isothermal - Crack initiation : Impact load - Pre Process : None
Advantage	• The exact brittle crack length	• Not need pre process (like a EBW)
Disadvantage	• Need EB weld	• Need temperature gradient at notch tip

Fig. 1 2 kinds of CAT test methods

Table 1 Compare with Kca and CAT material properties

Method	Kca [N/mm ^{1.5}]	CAT [°C]
Parameter	Stress Intensity Factor	Temperature
Test type	Thermal Gradient specimen	Iso-thermal specimen
Variable	(1) Propagated brittle crack length (2) Temperature at crack arrest (3) Applied stress	Go or stop of the brittle crack on test specimen
Test method	After more than 3~4ea tested, predict the Kca value at -10°C using linear curve fitting	Through experiments at different temperatures, determine the temperature at crack arrest.
International standard	IACS UR S33, WES2815:2014	None

실험이다. Kca와 CAT는 재료의 기계적물성으로서 동일한 의미를 주지만, Kca는 K값을 기반으로 하고 CAT는 온도를 기반하는 차이점이 있다. Table 1 에는 Kca와 CAT의 특징을 정리하였다.

2.1 국부온도구배형(LTG) CAT 시험법

LTG방법에 의해서 평가된 CAT의 신뢰성 검증을 위하여 종래에 CAT 실험에 적용되었던 EBW방법으로도 평가하였다. 본 실험에 사용한 시험편의 화학조성과 기계적 성질을 Table 2, 3에 각각 나타냈다. 조선용 460MPa 급 강재를 사용하였으며, 본 강재는 약 1150 °C의 열

Table 2 Chemical composition of EH47 steel (wt. %)

Steel	C	Si	Mn	P	S	S-Al	Ceq
460MPa (80mm)	0.1≤	0.5≤	2.0≤	0.02≤	0.01≤	0.1≤	0.46

Table 3 Mechanical properties of EH47 steel

Steel	Yield stress (MPa)	Tensile stress (MPa)	Elongation (%)
460MPa (80mm)	497	610	22

간 압연 공정을 통하여 미세구조는 20 μm 크기의 등축 미세 입자를 갖고 있다. 본 실험에 사용된 모든 강재는 조선용 강재로서 선급에서 요구하는 기본 물성을 만족하였다.

Fig. 2는 CAT 실험에 사용한 LTG 및 EBW시험편의 크기와 형상을 나타냈다. 시험편의 크기는 500mm(길이)*500mm(폭)*80mm(두께)로 제작하였으며, 취성균열의 발생을 위하여 0.14mm의 노치를 삽입하였다. 또한, 시험편 표면에 약 5mm 깊이로 양면에 side-groove를 삽입하여 취성균열 전파 정지에 영향을 미칠 것으로 판단되는 shear lip의 영향을 제거하였다. EBW시험

Fig. 2 Standard test specimen shape with mandatory sizes and crack initiation region for an impact type specimen

Fig. 3 Macro section of EBW and notch position

편은 전자빔 용접에 의해서 제작되었으며, 마크로단면을 Fig. 3에 나타냈다. 전자빔의 출력을 조정하면서 전 두께를 관통하여 용가재없이 용접을 수행하였으며, 150mm의 정확한 취화영역을 만드는데 어려움이 있었기 때문에 200mm 정도로 EBW로 취화영역을 만든 후 시험편 규격에 맞게 가공하였다. Table 3에 전자빔용접 조건을 나타냈다. EBW 시험편에서는 시험편의 모든 영역에 균일한 시험온도를 분포시켜서 실험을 진행했고, LTG 시험편의 경우는 노치방향으로 150mm 구간에 온도구배를 발생시켜 취화영역을 강제로 만들어서 실험을 진행했다. 시험편의 온도를 측정하기 위하여 Fig. 4와 같이 50mm 간격으로 열전대를 부착하였으며, 실험 온도는 설정온도의 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 이내로 유지시켰다. 냉각에는 액체질소가 사용되었으며 냉각챔버를 부착하여 액체질소량의 조절을 통하여 온도구배를 만들고 온도를 관

Fig. 4 Temperature profile requirements in the special LTG zone

리하였다. 150mm 이후의 구간은 온도가 목표 온도에 도달하면 두께방향으로 균일한 온도 분포를 확보하기 위해 최소 $10 + 0.1 \times \text{두께} [\text{mm}]$ 분 동안 온도를 유지시킨 후 노치선단에 충격하중을 부가하여 취성균열을 발생시켰다. 온도제어가 중요한 구간은 취성균열을 정지시켜야 하는 150~350mm(0.3 ~ 0.7W) 범위이다. 이 구간은 취성균열의 정지능을 평가하는 구간으로 취성균열전파정지온도가 결정된다. 또한 본 실험에서 유효한 값을 얻기 위해서는 0.3 ~ 0.7W 범위에서 균

열을 정지시켜야 한다²⁸⁾. 한편, 시험편에 가해진 응력과 초기균열 길이는 취성균열 전파정지온도 평가 실험에서 중요한 파라메타이다. CAT 값은 초기균열 길이와 적용하중에 따라서 그 값이 달라지게 된다. 일반적으로 선박 설계에서는 각 강종별 재료의 항복강도와 재료계수를 고려하여 설계응력이 설정된다¹²⁻¹⁴⁾. 그러나, 본 연구에서는 보수적인 접근을 위해 2/3 SMYS (Specific Material Yield Stress)⁸⁾로 설계응력을 결정했다. 본 연구에서 사용한 항복응력 460 MPa 강재의 설계응력은 306 MPa로 적용하였다.

2.2 CAT 평가 결과

LTG 방법에 의한 CAT 평가는 본 연구에서 새롭게 제안된 취성균열 전파정지 온도를 도출하는 실험법으로 기존의 EBW 실험법과 결과를 비교하였다. CAT 실험은 EBW 및 LTG 시험법 모두 사용되었고, 노치로부터 150mm 이후의 구간에서는 양 시험편 모두 동일한 시험온도로 CAT 실험을 실시하였다. Fig. 4는 LTG 및 EBW 시험편의 온도계측을 위한 열전대를 부착한 위치를 모식도로 나타냈다. LTG의 경우는 29~150mm 구간에 취화영역을 구현하기 위하여 국부냉각장치를 설치하였다. 온도구배에 의한 취화영역을 만들기 위해서는 극저온으로 냉각시켜서 완전하게 취성파괴가 발생할 조건을 만드는 것이 매우 중요하다. 그리고, 일반적으로 CAT 실험은 목표 온도에서 수행하며, 최소 2~3회의 실험을 실시한다. 목표온도에서 균열이 정지하는 경우는 목표 온도-5℃의 조건에서 실시하고, 목표온도에서 균열정지에 실패하면 목표온도+5℃의 조건에서 실험을 실시하여 최종적으로 CAT의 범위를 설정한다. Fig. 5는 총 5개의 시험편에 대하여 실시한 CAT실험중의 각 위치에서의 온도를 나타낸 것이다. LTG(Case1, 2) 시험편의 경우는 노치선단에서 약 -110℃ 정도 부터 150mm

구간에 대하여 온도구배를 만들었으며, 150mm 이후는 EBW 시험편과 동일하게 목표온도로 균일한 온도를 갖게 하였다. Fig. 5 에서와 같이 목표 온도는 $\pm 2^\circ\text{C}$ 의 범위에서 제어하였다.

Table 3에는 EBW 및 LTG 시험편에 대한 CAT 실험 결과를 정리하였다. CAT실험의 특성상 정확하게 취성균열이 정지하는 온도를 얻기는 어렵다. 따라서 본 연구에서는 $\pm 5^\circ\text{C}$ 의 간격으로 실험을 실시하였다. LTG 시험편의 경우는 -35°C 에서 취성균열이 정지하였으나 -40°C 에서는 완전파단이 발생하여, CAT는 -35°C 와 -40°C 사이에 존재할 것으로 추정되었다. 따라서 CAT 시험은 최소한 두 번 이상의 실험이 이루어 져야 한다. 경우에 따라서는 EBW의 시험편과 같이 동일한 온도에서 균열이 정지하는 경우와 완전파단에 도달하는 경우가 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 경우는 모두 완전 파괴로 간주하여 보수적인 접근을 하였다. 또한, 취성균열의 전파 길이는 균열이 정지한 시험편에 대하여 모두 165~200mm 정도로 측정되었다. 이상적인 취성균열의 정지길이는 취화 영역이 끝나는 150mm 위치이지만, 취성균열의 전파 속도 등을 고려한다면 정확하게 150mm 지점에서 취성균열을 정지시키는 것은 어렵다. 달리는 취성균열은 관성을 갖고 있으며, 동적 거동을 하기 때문에 실험에서 이론과 같이 정확하게 취성균열을 정지시키기 어렵다. 하지만, 취성균열의 길이가 너무 길게 전파 후 정지하게 되면 그 값에 대한 신뢰성에 문제를 발생시킬 수 있기 때문에, 본 연구에서는 가능한 150mm 지점을 통과한 후 짧은 거리내에서 취성균열이 정지되는 것을 유효한 CAT 값으로 제안하였다. LTG 방법에 의한 CAT 평가가 EBW방법보다 취성균열 정지까지의 길이가 이론에 근접한 값을 나타냈다. 본 연구에서 제안한 새로운 CAT 실험방법이 좀 더 이론적 현상과 유사함을 나타냈다고 판단된다. 또한 두 조건 모두 동일한 CAT 값을 얻었으며, 종래의 시험 방법인 EBW 방법과 비교하여 본 연구에서 제안한 LTG 방법이 유효한 CAT를 얻을 수 있는 실험 방법으로 판단된다. 두 시험방법에서 얻은 CAT 값은 -40°C ($\text{CAT} \leq -35^\circ\text{C}$)로 LTG 방법과 EBW 방법이 동일하게 평가되었다.

3. 고 찰

LTG 조건에서 유효한 CAT 값을 얻으려면 노치팁으로부터 150mm 구간의 온도구배를 적절하게 정의해야 한다. Table 4는 본 연구에서 수행한 실험결과를 바탕으로 국부냉각 영역의 온도분포의 기울기를 나타냈다.

Fig. 5 Temperature gradient profile under LTG and EBW embrittlement

Table 4 CAT test results and test conditions

Thick.	CAT test					
80mm	Case	Notch Temp. (°C)	Test Temp. (°C)	Impact energy (J/mm)	Arrest crack length (mm)	RESULTS
LTG	1	-104.6	-35	41.65	168 mm	$-40^{\circ}\text{C} < \text{CAT} \leq -35^{\circ}\text{C}$
	2	-104.9	-40	42.27	Full penetration	
EBW	3	-34.2	-35	43.36	190mm	$-40^{\circ}\text{C} < \text{CAT} \leq -35^{\circ}\text{C}$
	4	-47.8	-40	42.37	205 mm	
	5	-42.1	-40	41.91	Full penetration	

국부냉각이 이루어지는 150 mm구간을 세개의 구간으로 나뉘서 각각의 구간에 대한 온도분포의 기울기를 검토하였다. 노치팁에서 (길이: 29mm)~50mm, 50mm~100mm 및 100mm~150mm 위치에 대한 온도분포의 기울기를 정리하였다. 이상적인 취화 구간은 150mm 이 내에서 형성시켜서 -100°C 이하의 극저온으로 취화 구간을 만들어서 취성균열의 발생을 용이하게 하며, 150mm 이후 구간은 시험온도로 균일하게 분포시키는 것이다. 취화 구간이 150mm로 짧기 때문에 저온 (-100°C 이하) 으로 부터 목표 온도 (약 -35°C)로 급격하게 변경시키는 것은 사실상 불가능하다. 즉 150mm까지는 -100°C 를 유지하다 151mm부터는 실험온도인 -35°C 로 만드는 것은 불가능하다. 따라서 LTG 방법에서는 취화 영역인 150mm 구간에서 온도구배를 만들어서 실험온도와 자연스럽게 도달시키고자 하였다.

Fig. 6 Temperature gradient profile in Local Temperature Gradient (LTG) zone.

본 연구에서는 다량의 대형 CAT실험 데이터를 바탕으로 취화영역을 세 부분으로 구분하여 온도구배를 제어할 것을 제안하였다. Fig. 6은 LTG 구역의 온도분포 기울기 예를 나타냈다. Zone I에서 Zone III까지 서로 다른 온도분포 기울기를 만들 것을 제안한다. 150mm 구간을 동일한 기울기로 온도를 분포시킬 수도 있지만, 그렇게 되면 노치선단을 극저온으로 만드는데 어려움이 있으며, 너무 높은 온도에서는 취성파괴를 발생시키지 못하여 CAT시험이 불가능하게 될 가능성이 높기 때문에 3개의 구간으로 나뉘서 온도구배를 분포시켰다. 취성균열이 완전하게 정지한후 완전 파단을 통하여 파면을 관찰한 결과 시험편 시작점부터 약170mm까지 취성균열이 전파후 정지됨을 알 수 있었다. 또한, 취성균열진전 후 최대 약 200mm 지점에서 취성균열이 정지되어서 0.3W~ 0.7W 위치에서 정지되어야 하는 조건을 만족시켰기 때문에 유효한 CAT 값으로 판단된다. 본 연구에서 취화영역을 생성시키기 위해서 온도구배를 사용하는 새로운 CAT실험 방법을 제안하였다. LTG 방법은 EBW 방법에 비하여 EBW의 단점을 보완하였기 때문에 보다 쉽게 CAT를 평가할 수 있는 장점이 있는 것으로 판단된다.

Table 5는 여러 온도구배조건의 LTG방법에 의해 수행한 실험 결과로 부터 요약한 국부온도구배 영역의 권장 온도 구배를 나타냈다. 취화영역을 Zone I ~ Zone III

Table 5 Temperature inclination of local temperature gradient area under LTG embrittlement

Location		LTG temp. Grad. [$^{\circ}\text{C}/\text{mm}$]		
		29mm~50mm	50mm~100mm	100mm~150mm
Test Temp. [$^{\circ}\text{C}$]	-30	2.00	0.32	0.15
	-35	2.18	0.46	0.11
	-40	2.2	0.51	0.11
Req. values		2.0~2.3	0.25~0.60	0.10~0.20

Table 6 Recommended temperature inclination by this research work of local temperature gradient area under LTG embrittlement

Zone	Location from edge	Acceptable range of temperature gradient
Zone I	29mm ~ 50mm	2.0°C/mm ~ 2.3°C/mm
Zone II	50mm ~ 100mm	0.25°C/mm ~ 0.6°C/mm
Zone III	100mm ~ 150mm	0.1°C/mm ^{*1} ~ 0.2°C/mm

^{*1} : Mandatory

의 세 부분으로 구분하였으며, 각 구간에 대한 온도구배는 2.0-2.3°C/mm, 0.25-0.60°C/mm 및 0.10-0.20°C/mm로 추천하였다. 취화 영역은 국부온도구배를 통하여 충분히 만들 수 있으며, EBW방법에 의한 CAT 시험결과와 동등한 결과를 나타냈다.

4. 결 론

본 연구에서는 조선용 강재를 대상으로 극후물재의 취성균열 전파정지 온도(CAT)를 실험적으로 구하기 위한 새로운 방법을 제안하였다. 취성균열 전파정지온도는 국부온도 구배 (LTG) 유형과 전자 빔 용접 (EBW) 방법에 의하여 평가가 가능하다. EBW 방법은 종래부터 CAT평가를 위하여 사용되었으나, 용접 결함, 특정 온도에서 취성 균열발생의 어려움, 전자빔 용접을 위한 전처리 등의 단점을 가지고 있다. 본 연구에서 개발한 LTG방법에 의한 취화영역을 구현하는 방법은 EBW방법의 단점을 보완하기 위해 개발되었다. LTG 방법의 적용을 위해서는 온도구배에 의한 취화 구간을 만들어야 하며, 150mm 구간에서의 온도구배가 중요하다. 이 영역의 온도구배에 대하여 3 개의 구간으로 분할하여 각 구간에 대한 온도를 제어할 것을 제안하며, 3 구간에 대한 온도구배는 Zone I: 2.0-2.3°C/mm, Zone II: 0.25-0.60°C/mm 및 Zone III: 0.10-0.20°C/mm를 추천하였다. 본 연구에서 추천하는 온도구배는 목표 온도에 따라서 다소 변화는 가능하지만, Zone III의 온도구배를 목표온도에 관계없이 반드시 본 연구에서 제안한 온도구배로 적용할 것을 추천한다. 따라서 본 연구에서 제안한 새로운 CAT 시험법 (LTG 방법)이 합리적인 취성균열 전파 정지 온도 시험법으로 수립될 것으로 판단한다.

후 기

이 논문은 2020년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NO. NRF-2017R1D1A1B04029150)

ORCID: Gyubaek An: <https://orcid.org/0000-0003-4274-5716>
ORCID: Jeong-Ung Park: <https://orcid.org/0000-0002-0584-7994>

References

1. T. Inoue, T. Ishikawa, S. Imai, S. T. Koseki, K. Hirota and M. Tada., Long crack arrestability of heavy-thick shipbuilding steels. *Proceeding of the 16th International Offshore and Polar Engineering Conference*. San Francisco, California, USA, 4 (2006) 132-136.
2. T. Kawabata, K. Matsumoto, T. Ando, H. Yajima, S. Aihara, and H. Yoshinari. Development of brittle crack arrest toughness Kca test method - brittle crack arrest design for large container carrier ships - 2. *Proceeding of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Beijing, China, 4 (2010) 80-87.
3. T. Handa, T. Matsumoto, H. Yajima, S. Aihara, H. Yoshinari, and K. Hirota. Effect of structural discontinuities of welded joints on brittle crack propagation behavior - brittle crack arrest design for large container carrier ships, *Proceeding of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Beijing, China, (2010) 88-94.
4. T. Inoue, Y. Yamaguchi, H. Yajima, S. Aihara, H. Yoshinari, and K. Hirota. Required brittle crack arrest toughness Kca value with actual scale model tests-brittle crack arrest design for large container carrier ships, *Proceeding of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*. Beijing, China, 4 (2010) 95-101.
5. K. Masubuchi. Analysis of Welded Structures - Fracture toughness, 1st edition, Pergamon, New York USA (1980) 336-399.
6. T. Anderson, Fracture mechanics, 3rd edition. CRC Press, New York USA (2005).
7. E.J. Ripling, and P.B. Crosley. Crack arrest fracture toughness of a structural steel, (A36). *Weld. Res.* (1982) 65-74.
8. C. Andrea, B. Roberto, and V. Sabrina. Notched shells with surface cracks under complex loading, *Int. J. Mech. Sci.* 48 (2006) 638-649.
9. S. Vantadori, A. Carpinteri, and D. Scorza. Simplified analysis of fracture behaviour of a Francis hydraulic turbine runner blade, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 36 (7) (2013) 679-688.
<https://doi.org/10.1111/ffe.12036>
10. A. Carpinteri, C. Ronchei, D. Scorza, and S. Vantadori. Fracture mechanics based approach to fatigue analysis of welded joints, *Eng. Fail. Anal.* 49 (2015) 67-78.
<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2014.12.021>
11. C.S. Wiesner, B. Hayes, S.D. Smith, and A. Willoughby. Investigations into the Mechanics of Crack Arrest in Large Plates of 1.5%Ni TMCP Steel, *Fatigue Fract. Eng. Mater. Struct.* 17 (1994) 221-233.
12. G. B. An, W. Woo and J. U. Park, Brittle crack-arrest fracture toughness in a high heat-input thick steel

- weld, *Int. J. Fract.* 185 (2014) 179-185.
13. Y. C. Jang, Y. Lee, G. B. An, J. S. Park, J. B. Lee and S. I. Kim, Temperature dependent fracture model and its application to ultra heavy thick steel plate used for shipbuilding, *Int. J. Mod. Phys. B.* 22 (2008) 5483-5488.
14. G. B. An, Unstable Fracture Preventive Design in Large Vessels and Offshore Structures, *Int. J. Offshore Polar Eng.* 25 (2015) 221-226.
15. K. Shibamura, F. Yanagimoto, T. Namegawa, K. Suzuki, and S. Aihara. Brittle crack propagation/arrest behavior in steel plate-Part I Model formulation, *Eng. Fract. Mech.* 162 (2016), 324-340.
16. S. Machida, H. Yoshinari, M. Yasuda, S. Aihara, and H. Mabuchi. Fracture mechanical modeling of brittle fracture propagation and arrest of steel (1) - a fundamental model, *J. Japan Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 177 (1995) 243-257.
17. S. Aihara, S. Machida, H. Yoshinari, and H. Mabuchi. Fracture mechanical modeling of brittle fracture propagation and arrest of steel (2) - application to temperature-gradient type test, *J. Japan Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 178 (1996) 545-554.
18. S. Aihara, S. Machida, H. Yoshinari, and Y. Tsuchida. Fracture mechanical modeling of brittle fracture propagation and arrest of steel (3) - application to duplex type test, *J. Japan Soc. Naval Archit. Ocean Eng.* 179 (1996) 389-398.
19. S. Machida, H. Yoshinari, M. Yasuda, S. Aihara, and H. Mabuchi. Fracture mechanical modeling of brittle crack propagation and arrest of steel, *International Proceeding of the joint ASME/JSME pressure vessels and piping conference.* New York USA (1995), 183-195.
20. S. Machida, H. Yoshinari, and S. Aihara. Computer simulation of fast crack propagation and arrest in steel plate with temperature gradient based on local fracture stress criterion, *ASTM Special Technical Publication*, Philadelphia, USA (1997) 617-640.
21. G.P. Smedley. Prediction and specification of crack arrest properties of steel pipe, *Int. J. Press Vessel Pip.* 40 (1989) 279-302.
22. Y. Sumi. Computational crack path prediction for brittle fracture in welding residual stress fields. *Inter. J. Fract.* 44 (1990) 189-207.
23. A.H. Priest. An energy balance in crack propagation an arrest, *Eng. Fract. Mech.* 61 (1998) 231-251.
24. Y. Yamaguchi, H. Yajima, S. Aihara, H. Yoshinari, K. Hirota, M. Toyoda. Development of guidelines on brittle crack arrest design - brittle crack arrest design for large container carrier ships, *Proceeding of the 20th International Offshore and Polar Engineering Conference*, Beijing, China, (2010) 71-9.
25. Nippon Kaiji Kyokai, Guidelines of the application of YP47 steel for hull structures of large container carriers, *Nippon Kaiji Kyoka*, (2008).
26. Gremanischer Lloyd, Supplementary rules for application of steel with yield strength of 460N/mm², *Gremanischer Lloyd*, (2008).
27. American Bureau of shipping, Regulations of the classification and registry of ships, *American Bureau of Shipping*, (2008).
28. Unified Rule S33, Requirements for use of extremely thick steel plates in container ships Unified Rule S33. International Association of Classification Societies, (2013).
29. WES 2815, Test Method for Brittle Crack Arrest Toughness. Kca, *The Japan Welding Eng. Soci*, (2014).
30. K. Sugimoto, H. Yajima, S. Aihara, H. Yoshianri, K. Hirota, and M. Toyoda. Thickness effect on the brittle crack arrest toughness value Kca-brittle crack arrest design for large container ships-6, *Proceeding of the 22nd International Offshore and Polar Engineering Conference*, Rhodes, Greece (2012) 44-51.
31. C. S. Wiesner and B. Hayes, A review of crack arrest tests, *Models and Applications*, TWI report, (1995).
32. G. An, H. Y. Bae, B. D. Noh, Y. H. An, J. K. Choi, W. Woo and J. U. Park, Design for avoid unstable fracture in shipbuilding and offshore plant structure, *J. Weld. Join.* 33(1) (2015) 35-40.
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.1.35>