용접잔류응력의 영향에 의한 조선용 극후물재 취성균열 전파 경로

안규백* · 배홍열** · 박정웅***,† · 우완측****

*조선대학교 공과대학 선박해양공학과

**포스코 철강솔루션마케팅실 접합연구그룹

***조선대학교 공과대학 토목공학과

****한국원자력연구원 중성자본부

Brittle Crack Propagation Path Due to the Effect of Welding Residual Stresses

Gyubaek An*, Hongyeol Bae**, Jeongung Park***,†, and Wan Chuck Woo****

*Dept. of Naval Architecture and Engineering, Chosun University, Gwang-ju, 61452, Korea

**Steel Solution Marketing Dept. Welding & Joining Research Group, POSCO, Pohang, 37859, Korea

***Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwang-ju, 61452, Korea

****Neutron Science Division Korea Atomic Energy Research Institute Daejeon, 34057, Korea

†Corresponding author : jupark@chosun.ac.kr

(Received November 2, 2018 ; Revised November 13, 2018 ; Accepted December 3, 2018)

Abstract

Recently, the size of the ship required to explore and produce oil and natural gas in the arctic offshore region has greatly increased the demand for large vessels. In the shipbuilding industry, the container ship size has gradually increased for mass transportation and cost reduction in the shipping industry. Thus, thick and high-strength steel plates are used for the upper deck structure of container ships because of their large hatch openings. As the increase of plate thickness, the fracture toughness decreases in it. Therefore, it is important to evaluate of the fracture toughness in thick steel plate. In order to evaluate the brittle crack propagation arrest toughness, generally large scale test carried out with full thickness despite the difficult of the experiment. In this study, to clarify the brittle crack propagation arrest mechanism in welds and to establish the basic theory of the technique to avoid brittle fracture, the brittle crack propagation mechanism was investigated using small scale specimens.

Key Words : C-T specimen, Brittle crack arrestability, Welding residual stress, Fracture toughness

1. 서 론

최근 선박을 비롯 구조물의 대형화가 급속하게 진행되고 있으며, 적용되는 강재 또한 고강도 극후물화가 진행되고 있다. 구조물의 초대형화와 함께 건조되는 선박 또한 초대형화가 이루어지고 있다¹⁾. 이러한 건축 구조물 및 선박의 건조에 있어서 고강도강의 적용을 통한 적용강재의 두께를 감소시키는 노력은 끊임없이 지속되어 왔다. 예를들면, 선박용 강재는 460MPa급 강재가 2006년 이미 개발되어서 상용화 되었으며¹⁾, 그

이상의 강도를 갖는 강재의 개발 또한 진행되고 있다. 460MPa급 선급용 강재가 처음 컨테이너선에 적용되었을 때, 고강도강재임에도 불구하고 80mm 이상의 두께가 적용되어서 용접부의 파괴안전성에 관한 특별한 선급 룰이 제정되었다²⁻⁵⁾. 이미 알려진 것처럼 파괴인성은 강재의 두께 상승과 함께 저하되므로⁶⁾ 이러한 초대형 구조물에 적용되는 극후물재의 파괴인성 확보가 무엇보다 중요하였다. 극후물재는 변형이 발생하기 어렵고 외부의 힘이 재료 내부에 그대로 축적되어 한계점에 다다르면 취성적으로 급속하게 파괴(취성파괴)가 발생할 가능성이 있다. 따라서 취성균열 전파 정지인성

의 대표적인 파라메타인 Kca값의 확보를 위한 관련 물이 개발되었다²⁻⁵⁾. 취성파괴의 안전성을 향상시키기 위해서는 균열의 발생을 방지하는 방법과 균열이 발생되어 진전 되더라도 그 진전을 제어 하는 방법으로 연구가 진행되었다⁷⁻⁸⁾. 이처럼 고강도 극후물재의 파괴안전성 확보를 위해서 국제선급협회(IACS: International Association of Classification Societies)를 비롯 각국의 선급협회 및 관련 연구자는 새로운 강재에 대한 각종 규격들을 제정하고 연구를 하였다. 취성균열 발생 저항성 평가를 위하여 종래에는 주로 해양구조물용 강재에서만 요구되었던 CTOD(Crack Tip Opening Displacement)값을 선박용강재에서도 요구하고 있어, 일부 선급에서는 CTOD값 관련 요구 기준을 제정하였다⁹⁾. 또한 극후물재 인성저하에 따른 불안전파괴 안정성을 확보하기 위한 취성파괴인성 파라메타 (Kca) 기준은 두께별로 구분하여, 두께 80mm를 기준으로 80mm 이하의 강재에서는 그 값이 이미 6000N/mm^{1.5}로 설정²⁻⁵⁾ 되었고, 80mm 이상의 강재에 대해서는 더욱 엄격한 기준인 8000N/mm^{1.5}로 국제선급을 제정이 추진되고 있다²⁾. 이러한 취성균열전파정지 인성을 평가하기 위해서는 전 두께를 이용한 대형시험(ESSO시험 등) 실시를 통하여 값을 얻어야 하는 대형실험평가 결과에 의존하고 있었다. 한편, 일본에서는 취성균열전파정지의 관점에서 극후물 강재에 대한 취성균열 정지 특성에 관한 연구가 활발히 진행되었고⁹⁻¹⁴⁾, 노르웨이·독일선급(DNV GL)을 비롯 유럽에서는 취성균열발생 특성에 관한 연구가 진행되고 있다¹⁵⁾. 또한 국내에서도 초대형선박의 불안전파괴 안전성 문제가 국제적으로 제기된 2006년부터 연구가 시작 되어 현재는 많은 연구성과를 보고하고 있다¹³⁻¹⁶⁾. 이러한 연구는 모재의 취성균열 전파 정지인성 평가가 대부분이고, 용접부에서 취성파괴인성 평가에 관한 연구는 거의 이루어 지지 않았다. 용접부는 모재의 파괴인성에 비하여 더욱 낮게 평가 될 것이라는 예측이 가능하고, 균열의 정지도 어렵다고 알려져 있다⁶⁾. 하지만, 국내의 대부분의 조선소의 선박건조공법상 탑재단계에서는 선박의 상부부터 선저까지 일직선으로 용접부가 만들어 지기 때문에 취성파괴에 더욱 취약하다고 할 수 있다. 모재의 취성균열 전파 정지능력이 우수한 강재를 적용하더라도 용접부에서 발생한 취성균열을 모재쪽으로 방향전환을 시키지 못하면 용접부에서 발생한 취성파괴를 정지시키기는 무척 어렵다. 따라서 선급에서는 직선용접부에서 취성균열정지를 위한 arrest hole, arrest weld, arrest insert 등의 기술을 활용한 특별한 설계를 요청하고 있다²⁻⁵⁾. 이러한 기술은 선박건조 시 추가적인 공법이 필요하므로 직선용접부에서 발생한

Fig. 1 Brittle crack propagation path in multi and one pass welding process

균열을 취성균열전파 정지 특성이 우수한 모재쪽으로 전환시키는 것에 의해서 취성파괴 방지가 가능하다. 종래의 연구에 의하면 용접프로세스의 영향에 따라서 취성균열의 전파경로가 변경된다는 보고가 있다¹⁶⁻¹⁸⁾. 용접입열량의 차이에 의한 균열선단에서의 두께방향의 잔류응력의 분포차이가 가장 유력한 인자로 파악되었으나 그 확인이 아직 미흡한 상태이다. Fig. 1 에서와 같이 용접프로세스의 차이에 의한 균열전파경로가 다르게 나타났다. 이러한 연구결과에도 불구하고 용접부에서 취성균열전파 정지 메커니즘에 관한 명확한 규명이 이루어 지지 못하고 있다. 여러가지 요인 중에서 용접부에서 발생하는 잔류응력의 영향이 있을 것 이라는 예측이 있지만 실구조물에서 명확하게 규명이 어려운 상태이다.

본 연구에서는 용접부의 취성균열 전파정지 메커니즘을 규명하고 취성파괴를 회피하는 기술의 기초적인 이론 정립을 위하여, 용접부를 대상으로 잔류응력의 영향에 의한 취성균열전파 정지 메커니즘을 규명하고자 한다. 용접부에서는 필연적으로 잔류응력이 발생하게 되며, 잔류응력의 종류(인장/압축)의 영향을 이용하여 용접부를 따라서 진전하는 균열을 모재로 유도 하는 메커니즘을 규명하고자 한다. 잔류응력에는 인장과 압축의 잔류응력의 생성이 가능하며, 취성균열 진전방향에 압축잔류응력이 존재하게 되면 균열의 진전을 방해하여 균열의 진행방향을 변경 시키는 것이 가능하다. 대형시험을 통하여 잔류응력의 영향을 명확하게 구분하는 것이 어렵기 때문에 본 연구에서는 소형 CT(Compact test) 시험편에 임의로 인장 및 압축 응력을 부가하여

그 영향에 따른 취성균열의 전파 경로를 규명하였다.

2. 적용강재 및 실험방법

2.1 시험편 제작

본 연구에 사용한 강재는 판 두께 80mm의 조선용 460MPa급 TMCP 강재이다. Table 1, Table 2에는 강재의 화학조성 및 기계적 성질을 나타내었다. 잔류응력의 영향에 따른 취성균열의 전파경로를 확인하기 위하여 Fig. 2와 같은 두께 6.35mm의 CT 시험편을 ASTM Standards E647-99¹⁹⁾에 의해서 제작하였다. CT 시험편은 80mm 두께의 강재에서 두께가 6.35mm 되도록 두께방향으로 절단하여 제작 하였다. 소형CT 시험편의 균열선단에 두께방향으로 균일한 임의의 응력을 부가하기 위하여 두께를 최소화 하였다. 종래의 연구결과¹⁹⁾에 의하면, 노치선단에 부가되는 압입자의 위치에 따라서 응력분포가 다르게 되었다. 압입자의 중앙이 노치 선단에 위치하면 노치선단에는 압축응력이 발생하고, 압입자의 선단이 노치선단에 위치하면 노치선단에는 인장응력이 발생하게 된다. 본 연구에서는 이러한 연구결과를 인용하여서 CT 시험편에 압입에 의하여 인

장 및 압축 응력을 갖는 시험편을 제작 하였다.

2.2 CT 시험편을 활용한 취성균열 전파 경로에 미치는 잔류응력의 영향 시험법

인장 및 압축응력의 영향에 의한 취성균열의 전파경로를 평가하기 위하여 Fig. 3과 같이 3종류의 시험편을 준비하였다. CT시험편을 제작후 길이10mm의 피로 균열을 발생시켰다. 피로균열은 $R=0.1$, 10Hz의 조건으로 10ton 피로시험기를 이용하여 수행 하였다. 피로 균열을 생성시킨 후 피로균열이 압입자의 중앙과 선단에 위치하는 조건으로 압입 하였다. 압입자의 크기는 직경30mm의 크기를 사용하였으며, 하중은 약 400kN의 힘으로 0.3mm/s의 속도로 압입 하였다. Fig. 3

Fig. 2 CT specimens with 6.35mm thickness

Table 1 Chemical composition of used

Steels	C	Si	Mn	P	S	S-Al	C _{eq}
YP460 80mm	0.08 ≤	0.2 ≤	2.0 ≤	0.15 ≤	0.002 ≤	0.002 ≤	0.43

Table 2 Mechanical properties of base metal

Steels	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
YP460 80mm	497	610	22

Fig. 3 3 kinds of CT test specimens

(a)는 피로균열만 발생 시킨 그대로의 상태이고, (b)는 압입자의 중앙에 피로균열을 위치시켜 압축응력을 생성 시키고자 한 시험편이며, (c)는 압입자의 선단에 피로균열을 위치시켜 인장응력의 발생을 유도한 시험편이다. 3종류의 시험편에 대하여 중성자를 이용하여 잔류응력이 분포를 확인 하였다. 압입에 의하여 인장 및 압축응력이 분포하는 정도를 피로균열의 선단에서부터 진전방향으로 검토하였다.

3. 시험결과 및 고찰

3.1 강재응력 부가 후 중성자에 의한 잔류응력 측정 결과

CT시험편에 피로균열을 발생시킨 후 인장과 압축응력을 생성시킬 목적으로 압입시험을 실시하였다. 압입 후 정상적으로 인장 및 압축응력의 생성 결과를 확인하기 위하여 중성자를 이용하여 시험편 표면에서의 잔류응력 분포를 확인 하였다. Fig. 4에 그 결과를 나타내었다. Fig. 4(a)에는 피로균열만 발생시킨 시험편의 응력 측정 결과이다. 예상과 같이 아무런 응력을 부가하지 않았으므로 시험편의 표면에는 응력이 거의 0인 상태임을 확인 할 수 있었으며, 그 결과를 통하여 응력 0의 상태가 모든 시험편의 초기 상태임을 확인할 수 있었다. Fig. 4(b)에는 압입자의 중앙에 피로균열의 선단이 위치하게 압입한 시험편의 잔류응력 측정 결과이다. 중성자를 이용하여 잔류변형량을 측정 하여 그 값으로

부터 잔류응력을 계산하여 본 실험에서는 정량적으로 인장 및 압축응력의 값을 확인하였다. 본 실험에서는 3방향의 잔류응력을 측정 하였다. 시험편의 노치를 기준으로 균열의 진행 방향, 균열진행과 직각방향 그리고 두께방향 이렇게 3방향에 대한 각각의 응력성분값을 측정 하였다. 3응력성분 모두 균열의 진전에 영향을 미치는 응력이지만, 하중방향의 응력이 균열의 진전에 가장 큰 영향을 미치게 되므로 본 연구에서는 하중방향의 응력에 집중 하여 고찰을 수행 하였다. 잔류응력의 측정 결과로서 균열선단에서 압축응력이 발생하고 있음을 확인하였고, 균열선단에서 균열의 진전방향으로 압입자의 선단에 가까워지면서 인장응력이 분포하고 있음이 확인되었다. 노치선단에는 약 200MPa의 압축응력이 분포함을 알 수 있었다. 또한 Fig. 4(c)에는 압입자의 선단이 피로균열의 선단에 위치한 시험편 결과를 나타내었다. 피로균열의 선단에서는 인장응력이 분포하고 있었으며, 그 값은 약 200MPa 정도였다. 피로균열의 선단에 압입에 의한 인장 및 압축 응력이 예상과 동일하게 분포하고 있음이 확인 되었다.

단순 압입에 의해서 피로균열선단에 분포하는 인장 및 압축 응력을 확인하였으며, 동일한 시험편을 사용하여 극저온(-196℃)에서 취성균열전파 시험을 실시하였다. 대부분의 균열전파정지 시험은 -10℃에서 설계응력을 부가하여 그 하중에서 균열의 정지 유무를 판단하게 된다. 균열의 정지에 따른 균열정지 위치를 평가하기 보다는 일정 조건에서의 균열정지 가능성을 평가 하게 된다. 하지만 본 연구에서는 균열의 정지가능성 보다는

Fig. 4 Residual stress distribution in each specimens at room temperature

취성균열의 전파 경로에 관한 평가를 실시하였다. 따라서 종래의 취성균열전파경지 시험과는 다소 그 목적에 차이가 있다고 할 수 있다. 통상의 선급용강재의 취성균열전파 시험은 -10°C 에서 전두계를 통하여 균열을 발생시키는 별도의 장치로부터 충격을 주어서 균열을 진전시키는 방법으로 실시되지만, 본 연구에서는 소형의 CT 시험편을 활용하기 때문에 균열의 발생을 위한 충격을 가하는 실험이 어렵기 때문에 비교적 균열의 발생을 쉽게 하기 위하여 극저온에서 실험을 실시 하였다. -196°C 는 액체질소와 동일한 온도이며, 액체질소에 시험편을 충분히 넣어둔 후 균열전파 시험을 실시 하였다. 시험편의 두께가 6.35mm 이지만 실험온도에 도달 후 20분 이상 온도를 유지하였고 그 후 실험을 실시 하였다. 균열전파실험과 동시에 실시간으로 중성자를 이용하여 응력의 변화를 관찰하였다. 냉각 후 파괴 실험은 1분 이내의 짧은 시간에 이루어지지만, 초기 온도에서 어느 정도로 온도가 상승되어서 시험이 완료되는 시점에서는 약 15°C 정도의 온도가 상승 되어서 시험편의 온도는 -180°C 정도가 되었다. 그리고, Fig. 5

Fig. 5 Residual stress measuring positions

에는 실시간으로 측정한 잔류응력 측정위치를 나타내었다. 피로균열의 선단에서부터 균열의 진행 방향으로 응력을 측정하고 균열의 진행 방향과 직각방향으로 2mm, 4mm, 8mm, 16mm 떨어진 위치에서 동일하게 응력을 측정 하였다. 잔류응력계측은 취성균열전파파괴실험과 별도로 진행 되었다. 중성자를 이용하여 잔류응력을 측정하였기 때문에 소용량의 인장 시험기를 이용하여 별도의 챔버를 부착해서 액체질소를 분사 하면서 실시간으로 잔류응력을 측정 하였다. Fig. 6에는 5kN의 힘을 부가 했을 때 응력이 재 분포된 결과를 나타내었다. 피로균열 선단에서부터 균열의 진전방향으로 중성자를 이용하여 측정한 변형량이다. 피로균열만 가지고 있는 시험편에서는 Fig. 6 (a) 와 같이 인장응력이 가해졌으므로 변형량이 균열선단에서 상승하였으며, 균열선단에 압축응력을 가지고 있던 시험편은 인장하중에 의하여 압축응력상태이던 위치(5mm 근방)에서의 응력이 거의 0 또는 인장응력을 나타내고 있음을 알 수 있다. 또한 인장응력이 분포한 시험편에서는 Fig. 6 (c) 와 같이 5mm 근방에서 더욱 큰 인장응력이 분포하게 되었다. 이처럼 하중의 증가와 함께 초기응력상태에서 가해지는 인장응력이 추가 되어서 응력이 재 분포 되었음을 알 수 있었다. 초기 분포하던 응력이 재 분포 되었지만, 압축응력이 분포했던 시험에서는 그 영향이 남아 있어서 인장하중이 부가 되었음에도 인장응력의 상승량은 미미 하였다.

3.2 취성균열 전파경로에 미치는 잔류응력의 영향

취성균열 전파경로는 균열선단에 존재하는 응력의 영향을 받는다는 것은 종래의 연구결과¹⁷⁾에 의해서 제안되었다. 하지만, 종래의 연구결과에서는 취성균열의 정지에 관한 연구 결과가 대부분이고 취성균열이 전파

Fig. 6 Residual stress distribution in each specimens at -196°C

(a) Tensile stress condition

(b) Compressive stress condition

Fig. 7 The brittle crack propagation path due to residual stress

할 때의 잔류응력의 영향에 대한 연구는 미흡하다. 용접부에서 발생 하는 용접잔류응력을 가정하기 위하여 임의로 부가한 인장 및 압축 응력상태에 따라서 하중이 부가 되는 과정에서 응력이 재 분포하게 되며 최종 파단에서 균열의 전파경로에 미치는 영향을 Fig. 7에 나타내었다. 하중의 증가와 함께 노치선단에서 취성균열이 발생하여 진전하게 되었으며, 그 전파 경로는 그림과 같이 노치선단에 인장응력이 분포하는 경우는 직진전파가 이루어 졌고 그 후 압축응력의 영역에서는 균열의 방향이 변경되는 결과를 얻었다. 또한 노치선단에 압축응력이 분포하는 경우는 균열의 진전 초기에 방향이 직진이 아닌 경사를 갖고 진전 후 바로 직진으로 전파되는 결과를 얻었다. 노치선단에는 압축응력이 분포하더라도 균열이 진행하면서 그 방향에 분포되어 있는 인장응력의 영향을 받아서 직진 전파하게 된 것으로 판단된다.

본 연구에서는 종래의 극후물재 용접부에서 취성균열의 전파경로에 잔류응력이 영향을 미칠 가능성이 있다는 연구 결과²⁰⁾를 보다 명확하게 할 수 있는 결과를 얻었다. 극후물재의 용접부에서 분포하는 두께방향의 잔류응력은 용접프로세스에 따라서 인장과 압축 응력의 분포 정도가 다르게 된다. 이러한 응력의 개별적인 영향을 검토하기 위하여 임의로 부가한 인장 및 압축 응력 시험편으로 부터 잔류응력은 취성균열 전파 경로에

영향을 미치는 것으로 검토파악 되었다. 따라서 선박과 같은 대형구조물에서 취성파괴 안전성을 향상시키기 위해서는 일정 구간에 압축잔류응력을 생성시키는 것에 의해서 완전한 취성파괴의 방지가 가능 할 것으로 기대 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 초대형 선박의 건조에 있어서 적용되는 고강도 극후물강재가 갖는 취성파괴 안전성을 향상시키기 위한 기술로 거론되는 잔류응력의 영향에 대한 기초적인 검토를 수행하였다. 용접시 필연적으로 발생하는 용접잔류응력은 용접프로세스에 따라서 그 분포가 다르게 나타나며, 특히 일층용접과 다층용접에서는 두께방향의 잔류응력분포가 다르기 때문에 취성파괴에서 균열전파경로에 미치는 영향을 검토하기 위하여 임의로 균열선단에 인장 및 압축 응력을 부가하여 취성균열 전파경로에 미치는 영향을 검토 하여 다음과 같은 결론을 얻었다.

1) CT 시험편에 원형 압입자를 통한 인장 및 압축응력의 부가 후 시험편 표면에서 중성자를 이용한 응력을 측정한 결과 종래와 동일하게 압입자의 선단이 균열선단에 위치하는 경우는 인장응력, 압입자의 중앙이 균열선단에 위치하는 경우는 압축응력이 각각 약 $\pm 200\text{MPa}$ 정도 분포함을 확인 하였다

2) 극저온에서 하중을 부가하면서 실시간으로 표면에서의 응력 재 분포를 중성자를 이용하여 측정된 결과 초기 응력상태에 따라서 하중의 증가와 함께 인장응력이 증가하게 되었으며, 초기 상태가 압축응력인 상태에서는 인장응력의 증가가 다소 둔감 하게 나타났으며, 초기 상태가 인장 응력의 상태에서는 외부하중과 중첩되어서 응력이 증가되었다.

3) 극저온상태에서 취성균열이 발생되어 전파하는 과정에서 균열선단에 분포하는 응력의 종류에 따라 다른 전파 경로를 나타내었다. 균열선단에 인장응력이 분포하는 경우는 균열의 직진전파가 더욱 가속 되었고, 압축응력이 분포하는 경우는 취성균열의 전파를 다소 방해하는 결과를 얻었다. 하지만 압축영역을 지나서 다시 인장 영역과 균열이 만나면 다시 직진 전파하는 현상을 나타내었다. 이처럼 균열선단에 분포하는 압축응력은 균열의 전파 경로를 변경 시킬 수 있다는 것을 확인 하였으며, 균열선단에 압축응력의 부가에 의해서 완전한 취성파괴를 방지할 수 있을 것으로 기대 한다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재

원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(NO. NRF-2017R1D1A1B04029150)

ORCID: Gyubaek An: <http://orcid.org/0000-0003-4274-5716>

ORCID: Hongyeol Bae: <http://orcid.org/0000-0003-4598-849X>

ORCID: Jeongung Park: <http://orcid.org/0000-0002-0584-7994>

ORCID: Wan Chuck Woo: <http://orcid.org/0000-0003-0350-5357>

References

1. K. Hirota, T. Nakagawa, S. Takeda, Y. Hashi, M. tada, World's first development and application of HTSS(high tensile strength steel) with yield stress of 47 kgf/mm² to actual ship hull structure, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., *Technica Review*, 44-3 (2007), 1-5
2. IACS, Requirement for use of Extremely Thick Steel Plates, (2013)
3. American Bureau of shipping, Higher-strength hull structural thick steel plate in container carrier, (2008)
4. Gremanischer Lloyd, "Supplementary rules for application of steel with yield strength of 460N/mm², (2008)
5. Nippon Kaiji Kyokai, Rules for the survey and construction of steel ship's, (2006)
6. The 147th Research Committee, Evaluation of brittle fracture toughness of welded joints of ship under high welding heat input, Report No. 87, *The Shipbuilding Research Association of Japan*, (1978)
7. An, G.B., Park, J.S., Metals and Materials International, 17(5) (2011), 841-845
8. G. B. An, W. Woo, J. U. Park, Brittle crack-arrest fracture toughness in a high heat input thick steel weld, *Int J Fract*, 185 (2015), 179-185
9. Lloyd's Register, Rules for the Manufacture, *Testing and Certification of Materials*, (2015)
10. T. Handa, S. Suzuki, M. Toyoda, T. Yokura, N. Kiji, Y. Nakanishi, Behavior of long brittle crack arrest in Tee joint structure of thick plate, *Bulletin of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineerings*, 4 (2007), 461-462
11. T. Handa, T. Kubo, F. Kawabata, K. Nishimura, S. Suzuki H. Shiomi, T. Miyata, Effect of Kca value on behavior of brittle crack arrest in Tee joint structure of thick plate, *Bulletin of the Japan Society of Naval Architects and Ocean Engineerings*, 4 (2007), 459-460
12. Takehiro Inoue, Tadashi Ishikawa, Shiro Imai, Tadashi Koseki, Kazuhiro Hirota, Masuo Tada, Yoshiya Yamaguchi Toshiyuki Matsumoto and Hiroshi Yajima, Long crack arrest concept in heavy-thick shipbuilding steels, *Proceedings of International Offshore and Polar Engineering Conference* (2007), 3322
13. Jeong-Ung Park, Gyubaek An, Hae-Woo Lee, *Materials and Design*, 42 (2012), 403-410
14. Joon Sik Park, Bo Young Jung, Gyu Baek An and Jong Bong Lee, Crack Arrest Toughness of Thick Steel Plate Welds for Ship Building, *Journal of KWJS*, 25 (4) (2007), 9-14
15. E. Tanné, T. Li, B. Bourdin, J.-J. Marigo, C. Maurini, Crack nucleation in variational phase-field models of brittle fracture, *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 110 (2018), 80-99
16. Jeong-Ung Park and GyuBaek An, Fracture toughness of thick steel plate for ship building, *Journal of KWJS*, 25 (4) (2007), 15-19
17. G. B. An, W. Woo, J. U. Park, V. Em, Comparison of crack-arrest fracture toughness between low and high heat-input thick weld specimens, *Int J Fract*, 194 (2015), 197-203
18. G. B An, Unstable Fracture Preventive Design in Large Vessels and Offshore Structures, *International Journal of Offshore and Polar Engineering*, 25 (2015)
19. A.H. A.H. Mahmoudi, C.E. Truman, D.J. Smith, Using local out-of-plane compression (LOPC) to study the effects of residual stress on apparent fracture toughness, *Engineering Fracture Mechanics*, 75 (2008) 1516-1534
20. Gyubaek An, Illwook Han, Jeongung Park, and Wan Chuck Woo, A Basic Study on Brittle Crack Propagation Path with Ultra Large Steel Plate Weld Joints, *Journal of Welding & Joining*, 35(6) (2017), 15-20 <https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.3>