

조선 및 해양플랜트 구조물의 불안전 파괴방지 설계기술

안규백^{*,†} · 배홍열^{*} · 노병두^{*} · 안영호^{*} · 최종교^{*} · 우완측^{**} · 박정웅^{***}^{*}포스코 기술연구원 접합연구그룹^{**}한국원자력연구원 중성자과학연구부^{***}조선대학교 토목공학과**Design for avoid unstable fracture in shipbuilding and offshore plant structure**Gyubaek An^{*}, Hong-Yeol Bae^{*}, Byung-Doo Noh^{*}, Young-Ho An^{*}, Jong-Kyo Choi^{*},
Wanchuck Woo^{**} and Jeong-Ung Park^{***}^{*}Technical Research Laboratories, POSCO, Pohang 790-300, Korea^{**}KAERI, Neutron Science Division, Daedeok-daero, Yuseong-gu, Daejeon 305-353, Korea^{***}Dept. of Civil Engineering, Chosun University, Gwangju 501-759, Korea

†Corresponding author : gyubaekan@posco.com

(Received February 10, 2015 ; Accepted February 25, 2015)

Abstract

Recently, there have been the increase of ship size and the development of oil and gas in arctic region. These trends have led to the requirements such as high strength, good toughness at low temperature and good weldability for prevent of brittle fracture at service temperature. There has been the key issue of crack arrestability in large size structure such as container ship. In this report for the first time, crack arrest toughness of thick steel plate welds was evaluated by large scale ESSO test for estimate of brittle crack arrestability in thick steel plate. For large structures using thick steel plates, fracture toughness of welded joint is an important factor to obtain structural integrity. In general, there are two kinds of design concepts based on fracture toughness: crack initiation and crack arrest. So far, when steel structures such as buildings, bridges and ships were manufactured using thick steel plates (max. 80~100mm in thickness), they had to be designed in order to avoid crack initiation, especially in welded joint. However, crack arrest design has been considered as a second line of defense and applied to limited industries like pipelines and nuclear power plants. Although welded joint is the weakest part to brittle fracture, there are few results to investigate crack arrest toughness of welded joint. In this study, brittle crack arrest designs were developed for hatch side coaming of large container ships using arrest weld, hole, and insert technology.

Key Words : Crack arrest toughness, thick steel plate, EGW joint, ESSO test, Brittle crack arrestability

1. 서 론

조선 및 다양한 산업 분야에서 강구조물이 대형화됨에 따라서 후관 강재의 수요량 증가와 함께 적용 강종의 범위 또한 폭넓게 증가 되고 있다. 특히, 조선산업에서는 선박의 수송효율의 극대화를 위하여 컨테이너선의 대형화가 급속하게 진행되고 있으며, 2014년 19,000

TEU 이상의 초대형 컨테이너선이 건조되고 있다. Fig. 1 에서 알 수 있듯이 컨테이너선의 크기는 2000년 상반기부터 급격하게 증가 되어 2014년에는 19,200 TEU의 최대 컨테이너선의 건조가 진행 중에 있다. 이러한 초대형 컨테이너선의 건조를 위해서는 강재의 강도 및 두께의 증가는 자연스럽게 이루어지고 있으며, 초대형 컨테이너선의 경우 Hatch side coaming(H/C)에 선박전체에 적용되는 강재 중에서 가장 두껍고 고강도 강

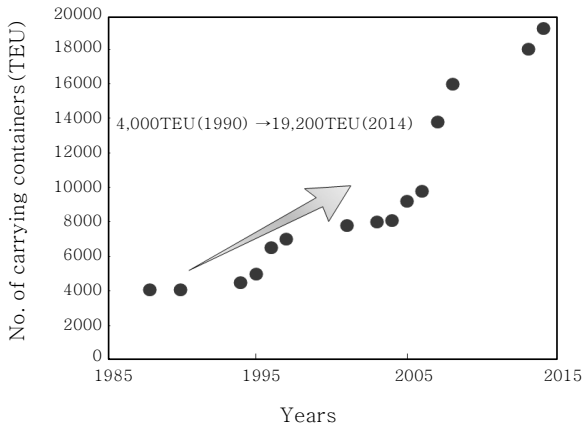


Fig. 1 Container ship increase trend

Element	12,000TEU		19,200TEU	
	Steel	Thick.	Steel	Thick.
Hatch Coaming	EH40	75t	EH47	85t ↑
Deck Plate	EH40	65t	EH40	85t ↑

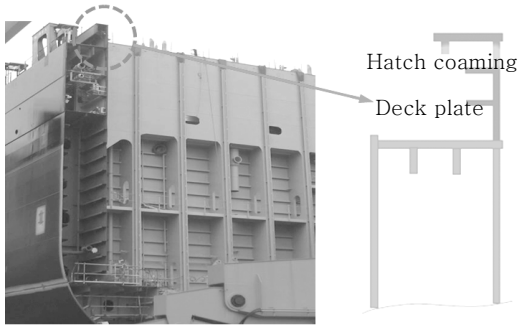


Fig. 2 The upper structure of a large container ship and applied steel plates

재가 적용되며, 19,000TEU급 컨테이너선을 기준으로 460MPa 이상 항복강도의 80mm 이상의 강재가 적용되고 있다¹⁾. 대표적인 컨테이너선의 상부 구조물과 사용되는 강종 및 두께를 Fig. 2에 나타내었다. 이처럼 초대형 선박에 적용되는 강재의 고강도화 및 극후물화에 따라서 선체구조물의 파괴안전성에 대한 관심이 증가되고 있으며, 일본선급협회(NK)²⁾에서는 지난 2006년 7월에 파괴인성 관련 규정을 새롭게 추가하여, 극후물 강재의 파괴안전성 확보에 더욱 높은 관심을 보이고 있다. 파괴안전성은 균열생성의 관점(Crack initiation fracture toughness)과 균열정지의 관점(Crack arrest fracture toughness)으로 구분되어서 연구가 진행되어 왔다. 종래에는 판 두께 30~40mm에 관한 연구들이 주로 수행되었으나³⁾, 최근 몇 년 사이에 일본에서는 균열정지의 관점에서 극후물 강재에 대한 취성균열 정지 특성에 관한 연구가 활발히 진행되

어 왔다⁴⁻⁶⁾. 이러한 연구들은 주로 대형파괴시험을 통하여 극후물 강재 용접부의 취성균열정지 특성을 평가하는 방향으로 진행되었으며, 65mm 이상의 극후물 강재에 대해서 용접부에서 취성균열의 정지가 어렵다는 연구 결과를 발표하고 있다⁴⁻⁶⁾. 극후물 강재 일수록 용접부에서 발생한 취성균열은 용접부를 따라서 직진전파하기 쉽고, 40mm 이하와 같은 두께에서처럼 모재쪽으로 균열의 경로가 바뀌어서 취성균열이 정지되는 것이 아니라, 용접부를 따라서 직진 전파 한다는 것이다. 뿐만 아니라, 이러한 연구결과를 바탕으로 일본선급협회에서는 2009년 3월 파괴안전성을 강화하기 위한 관련 규정을 새롭게 개정하였다⁷⁾. 하지만, 이러한 연구결과는 파괴인성을 평가함에 있어서, 단지 두께의 영향만을 고려 하였으며, 용접프로세스를 고려한 인자의 영향에 대한 평가는 시도되지 않았다. 또한, 국제선급협회 (IACS: International Association of Classification Societies)는 선박의 안전성을 향상시키기 위한 새로운 규정을 제정 하였으며, 이 새로운 규정은 2014년 1월부터 계약된 선박부터 적용을 받게 되었다⁸⁾.

미국선급협회(ABS)⁹⁾, 독일선급협회(GL)¹⁰⁾ 등에서도 고강도 극후물 강재에 관한 파괴안전성을 확보하기 위한 새로운 규정을 마련하였는데, 각각 다른 방향에서 파괴인성 및 취성균열 전파정지 기술에 관한 규정을 포함하고 있다.

이처럼 각 선급협회와 조선사 및 철강사에서는 고강도 극후물 강재에 대한 파괴인성에 관한 관심이 증가하고 있으며, 각각의 관점에서 파괴안전성 확보를 위한 연구가 활발하게 진행되어 왔다¹¹⁻¹²⁾. 일본 조선사의 경우는 선박의 건조 공법상 선박의 상부구조물에서 파괴가 시작 되더라도 하부 구조물의 강재의 성능에 의하여 파괴를 정지시킬 수 있다는 개념으로 컨테이너선의 Hatch side coaming 및 Upper deck 에 적용되는 강재의 성능을 중요시 하고 있다. Fig. 3에 한국 및 일본 조선사의 선박 건조공법에 대하여 정리 하였다. 일본 조선사는 용접이음부를 계단형으로 하여 생산성은 저하하지만, 파괴안전성을 확보하고 있는 반면, 국내 조선사의 경우는 직선형 이음부를 선박의 건조에 적용하고 있기 때문에 생산성은 우수하나, 파괴안전성은 일본 조선사의 선박건조공법에 비하여 다소 저하 되는 것은 사실이다. 이러한 국내의 조선사의 선박 건조공법에서 불안정파괴의 방지를 위해서는 강재의 성능뿐 아니라, 특별한 파괴방지 디자인이 필요하다.

본 연구에서는 초대형 컨테이너선의 상부 구조물에서 발생하는 불안정파괴 방지를 위하여 개발한 설계 기술에 대하여 설명 한다.

2. 적용강재 및 실험방법

2.1 적용강재

본 연구에 사용한 강재는 조선용 460MPa급 TMCP 강재로, 판 두께는 80mm 이다. Table 1, Table 2 에는 강재의 화학조성 및 기계적 성질을 나타내었다. 또한 일본에서 주장한 파괴의 안전성에 미치는 두께의 영향을 파악하기 위하여 360MPa급 50mm 와 80mm 두 종류의 두께를 선정하였다. 용접은 두께에 관계 없이 모두 대입열용접인 EGW(Electro Gas arc Welding) 및 소입열 용접인 FCAW(Flux Cord Arc Welding) 를 적용 하였으며, 50mm는 320kJ/cm, 17kJ/cm, 80mm는 530kJ/cm, 17kJ/cm의 입열로 용접을 수행 하였다. 각 용접프로세스별 상세 조건은 Table 3에 나타내었다.

2.2 취성균열전파정지인성 평가 방법

취성균열전파정지인성의 평가방법은 크게 대형시험과 소형 시험의 방법으로 구분되는데, 대형시험법으로는 Robertson test, ESSO test, Double tension test 등이 있으며, 소형시험법으로는 Charpy 충격 test, Drop

weight(Pellini) test, Drop weigh tear test, Compact crack arrest(CCA) test 등이 있다¹⁵⁾. 소형시험법은 주로 대형시험법을 모사하기 위하여 고안되었으며, 소형시험에서 얻어진 결과값을 통해 대형시험에서의 측정값을 유추하는데 활용되었다. 최근에는 취성균열 전파정지인성에 관한 실험이 온도구배 조건하에서 실시되는 대형 ESSO 시험이 폭 넓게 수행 되고 있다. 본 연구에서도 3,000ton 대형 인장시험기를 사용하여서 판 두께 50mm, 80mm에 대하여 온도구배 조건하에서 ESSO 시험을 실시하여 모재의 취성균열 전파정지 성능을 평가 하다. 온도구배와 하중 조건은, 선급용 극후물 강재의 취성균열 정지 성능에 관한 현 수준을 파악 하고자, 균열이 정지 가능한 조건으로 설정 하였다. Fig. 4에는 온도구배 ESSO시험의 개략도를 나타냈으며, 본 연구에서 사용한 모재 시험편의 크기를 나타내었다. 온도구배는 냉각 챔버를 설치하여 노치부근은 저온으로 냉각하여 균열 생성 및 전파를 용이하게 하였고, 균열 전파 방향을 따라 온도를 상승시켜 균열 정지가 가능하도록 하였다. 온도구배는 통상 2.5°C/cm ~3.5°C/cm 의 범위에서 제어하였으며, 온도구배의 조정을 마친 후 시험편에 인장하중을 가하고, 목표 시험하중에 도달하면 노치에 충격하중을 가하여 균열을 생성, 전파시키고 균열이 정지한 부분의 균열길이를 측정하여 균열이 정지한 위치의 온도에서의 취성균열전파정지인성값, Kca를 계산 하였다. 여기서, 시험하중과 온도조건의 관계가 적절한 조합을 이루지 못하면 균열은 정지 하지 못하고 직진 전파하여서 완전 취성파괴에 도달하게 되므로 시험조건과 온도조건의 설정이 중요하였다. 통상적으로 선박의 최저운항온도(국제선급협회, IACS 기준)인 -10°C에서의 값을 기준으로 하여 소재의 균열정지특성을 비교하는데, 이를 얻기 위해서는 3 ~ 4회 온도구배 ESSO 시험을 실시하여 외삽법을 통해 -10°C에서의 Kca값을 계산하였다. 본 연구에서 수행한 ESSO 시험은 IACS UR S33에서 규정하고 있는 시험방법과 동일한 방법을 적용하였다. ESSO 시험을 통하여 모재가 갖는 취성파괴에 대한 정지 능력을 평가 하였으며, IACS 에서는 모재가 취성파괴에 저항하기 위한 최소 기준을 6000N/mm^{1.5} 로 규정하고 있다. 본 연구에서는 IACS 에서 규정하는 취성균열전파정지능력(Kca)을 충분히 갖는 강재를 사용하여 연구를 수행 하였다.

Table 1 Chemical composition of EH36 steel used

Steels	C	Si	Mn	P	S	S-Al	Ceq
460MPa 80mm	0.08 ≤	0.2 ≤	2.0 ≤	0.15 ≤	0.002 ≤	0.002 ≤	0.43
360MPa	50mm	0.06 ≤	0.2 ≤	2.0 ≤	0.15 ≤	0.002 ≤	0.35
	80mm	0.06 ≤	0.2 ≤	2.0 ≤	0.15 ≤	0.002 ≤	0.35

Table 2 Mechanical properties of base metal

Steels	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
460MPa 80mm	497	610	22
360MPa	50mm	450	26
	80mm	434	24

Table 3 Welding condition for 80mm steel plate

Welding Position	Shielding Gas	Polarity	Current (A)	Voltage (V)	Speed (cm/min)	Heat Input (kJ/cm)
EGW	100% CO ₂	Face : DCEP	360	43	3.7	530
		Root : DCEN	400	43	3.7	
FCAW	100% CO ₂	-	280	30	33	17

3. 시험결과 및 고찰

3.1 모재의 취성균열전파정지인성(Kca) 평가

모재의 취성균열전파정지인성, Kca값을 측정하기 위

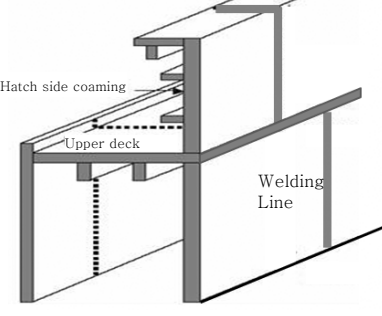
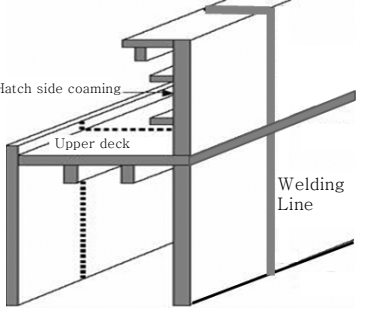
Items	JAPAN	KOREA
Maximum Container Ship	8,100TEU('06년)	19,200TEU('13년)
Maximum Thickness	60mm(EH40),65mm(EH47)	85mm(EH40),85mm(EH47)
Block Joint Method	Block Joint Shift(Productivity ↓) 	Straight Block Joint(Productivity ↑) 
Stability	Stability ↑ (Depend on BM Properties)	Stability ↓ (Depend on Design & BM)

Fig. 3 Comparison of assembly technique between Korea shipyard and Japan shipyard

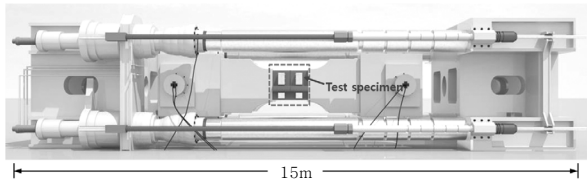


Fig. 4 ESSO test machine and test specimen

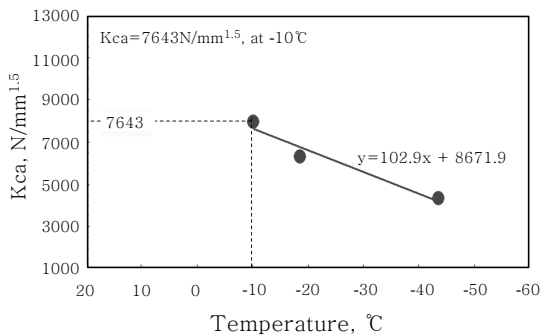


Fig. 5 ESSO test results for evaluate of Kca value at design temperature

하여 실시함 ESSO 시험의 결과로부터 설계온도에서 Kca 값을 도출 가능 하다. Fig. 5에는 460MPa급 강재의 판 두께 80mm에 대한 ESSO 실험 후 균열정지 위치의 온도에서 Kca 값을 계산하여 나타낸 것이다. 또한 실험 결과를 바탕으로 설계온도인 -10°C에서의 Kca 값을 외삽법을 통하여 계산한 결과, 약 7600N/mm^{1.5}의 값을 얻었다. 이 값은 IACS에서 규정하고 있는 취성균열전파정지성능을 충분하게 만족 하고 있음을 알 수 있다.

취성균열전파정지인성의 계산에 있어서 식(1)을 이용

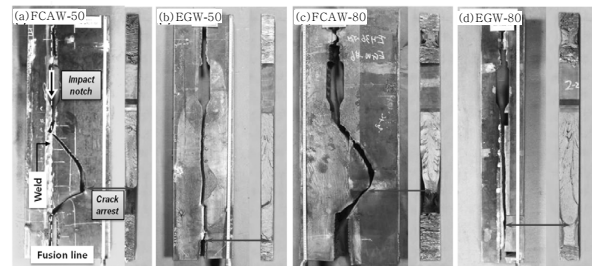


Fig. 6 Comparison of brittle crack propagation path between EGW and FCAW

하여 값을 계산 하였다.

$$K_{ca} = \sigma \sqrt{\pi C_a} \sqrt{\frac{2B}{\pi C_a} \tan \frac{\pi C_a}{2B}} \quad (1)$$

여기서,

K_{ca} : Brittle crack arrest fracture toughness(N/mm^{1.5})

σ_g : Gross stress (N/mm)

C_a : Arrest crack length(mm)

P: Test load(N)

B: Width of specimen(mm)

t: Thickness of specimen(mm)

3.2 취성균열 전파경로에 미치는 두께의 영향

종래의 연구결과에 의하면, 극후물 강재인 경우 용접부에서 발생한 취성균열이 직진 전파하여서 균열정지에 어려움이 있으나, 비교적 두께가 얇은 강재에 대해서는 용접부에서 발생한 취성균열은 모재로 이동하여서 모재의 취성균열정지 성능이 우수하다면 균열을 정지 시킬

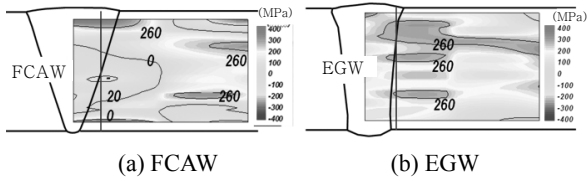


Fig. 7 Welding residual stresses in FCAW and EGW

수 있다고 하는 주장이 있다¹⁶⁾. 본 연구에서는 용접부에서의 취성균열 전파 경로에 대한 검토를 위하여 50mm, 80mm의 두 종류의 두께에 대하여 대입열용접(EGW) 및 소입열(FCAW)부에 대한 취성균열 전파 정지 시험을 실시하였다.

Fig. 7에는 EGW와 FCAW에 대한 50mm, 80mm의 실험결과를 나타냈다. EGW의 경우는 두께에 관계없이 모두 직진 전파하여서 용접부 근처에서 균열이 정지하였고, FCAW의 경우 또한 두께에 관계없이 모두 용접선에서 균열이 발생하여서 일정 거리를 용접선을 따라 진전하다가 모재쪽으로 균열의 전파경로가 변경되어서 최종적으로 모재쪽에서 균열이 정지하는 현상을 나타내었다. 이러한 현상은 일본에서 주장하는 두께의 영향에 따라서 균열의 전파 경로가 다르게 나타난다고 하는 주장과 상반되는 결과를 얻었다^{3,16)}. 본 연구 결과를 통하여 취성균열의 전파 경로는 두께의 영향만이 아닌 용접 프로세스의 영향을 받고 있는 것이라고 판단하였다. 왜냐하면, 본 연구에서는 서로 다른 용접프로세스를 동일한 시험편에 적용하였으며, 서로 다른 결과를 얻었다. 여기서, 용접프로세스의 차이에 의하여 입열량이 다르며, 입열량의 영향에 따라서 용접잔류응력의 분포가 다를 것이라는 판단하에 용접잔류응력의 분포를 측정 하였다. 본 연구에서 사용한 시험편은 두께를 관통하는 균열을 적용하였으며, 취성균열 또한 두께를 관통하여서 진전하기 때문에 표면에서의 잔류응력 보다는 두께방향의 잔류응력이 중요함을 인식하고 두께방향의 잔류응력을 80mm에 대하여 세계최초로 한국원자력연구원과 공동연구를 통하여 측정 하게 되었다. Fig. 7에 두 용접 프로세스에 대한 두께방향의 용접잔류응력 측정결과를 나타냈다. FCAW의 경우는 두께방향으로 용접금속 및 열영향부에 작은 인장 및 압축잔류응력이 분포하는 반면 EGW의 경우는 용접금속과 열영향부에 큰 인장잔류응력이 분포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 잔류응력의 영향으로 EGW의 경우는 외부 인장하중에 인장잔류응력이 더해져서 더욱 균열의 진전이 용의하게 되어서 직진전파 하게 되었고, FCAW의 경우는 균열이 진전하고자 하는 방향에 압축잔류응력이 존

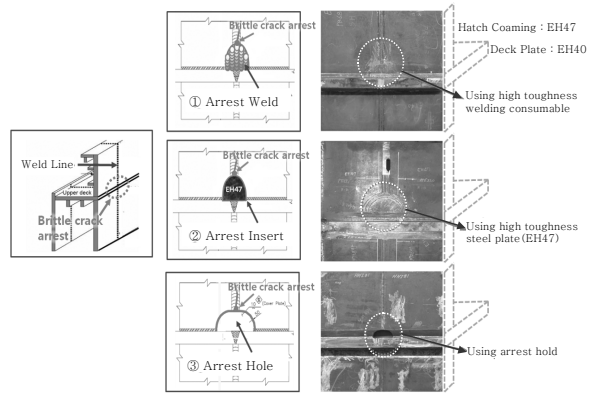


Fig. 8 Brittle fracture prevention solution using arrest weld, arrest hole, and arrest insert

재 하기 때문에 그 응력이 균열의 진전을 방해하게 되어서 모재로 균열이 경로를 변경하게 된 것이라고 판단된다. 본 연구 결과를 통하여 극후물 강재의 취성과파괴의 위험성이 증가하기 때문에 두께를 제한하여 선박 건조를 해야 하기보다는, 적절한 용접프로세스를 적용하여 극후물 강재의 취성과파괴를 방지할 수 있을 것으로 판단되었다.

3.3 취성균열 전파 정지 기술 개발

본 연구에서는 초대형 컨테이너선의 hatch side coaming 에서 취성균열이 발생하여 전파되어 선박의 안전성에 문제가 발생하더라도 완전 파괴를 방지 하기 위한 솔루션을 개발하였다. 상부구조물에서 발생한 균열전파를 deck plate에 도달하기 전에 균열을 정지 시켜서 완전불안전 파괴를 방지 하고자 하였다.

다음과 같이 3종류의 취성균열전파 정지 기술을 개발 하였다. ①Arrest weld, ②Arrest hole, ③Arrest insert. Arrest weld 기술은 H/C 끝단부의 일정구간을 고인성의 용접재료로 용접하여 취성균열이 상부에서 발생하여 전파 하더라도 arrest weld 부에서 완전파괴를 방지 하는 기술이고, arrest hold 기술은 H/C 끝단부와 D/P가 만나는 구간에 hole 을 설치하여서 취성균열이 상부에서부터 발생하여 전파 되더라도 arrest hole 에서 완전파괴를 방지 하는 기술이다. 또한 arrest insert기술은 앞의 arrest weld기술에서 고인성의 용접 재료를 사용하는 대신 취성균열전파정지인성이 우수한 강재를 적용하여서 취성과파괴를 방지 하는 기술이다. Fig. 8에 각각의 취성과파괴 전파방지 솔루션을 나타내었다.

본 연구에서 개발된 기술은 국내의 대형조선사에서 이미 초대형 컨테이너선(18,000TEU급)에 적용 하였

으며, IACS를 비롯 미국선급협회(ABS), 한국선급협회(KR)에서는 이미 선급 룰로 제정 하였다⁸⁻¹⁰⁾.

본 연구 결과를 통하여 국내 조선사는 더욱 안전성이 우수한 초대형 컨테이너선의 건조가 가능할 것으로 판단 되며, 향후 선박수주에 있어서도 경쟁력을 확보 할 것으로 기대 한다. 또한 POSCO 개발 강재의 취성균열전파 정지 능력이 우수함을 규명 하였으며, 본 연구 결과의 적용을 통하여, 더욱 파괴안전성이 우수한 선박이 건조되길 희망한다.

4. 결 론

본 연구에서는 초대형 컨테이너선에 적용되는 고강도 극후물 강재의 취성파괴 안전성을 평가 하였으며, 일본에서 주장하는 불안전파괴안전성에 미치는 영향이 두께만이 아니라 용접프로세스에 의한 잔류응력의 영향임을 규명 하였으며, 초대형 컨테이너선의 파괴안전성을 향상 시키기 위한 취성파괴 방지기술을 다음과 같이 개발 하였다.

1) 본 연구에서 개발되어 생산된 조선용 고강도 극후물재의 취성균열전파 정지 능력은 IACS 에서 규정하는 수준 이상의 성능($K_{Ic} \geq 7500 \text{N/mm}^{1.5}$)를 보유 하고 있다.

2) 취성균열 전파경로는 두께만의 영향이 아닌 용접 프로세스의 차이에 따른 용접잔류응력의 영향이 있음을 규명 하였다.

3) Arrest weld, arrest hole, arrest insert 기술 개발을 통하여, 초대형 컨테이너선의 상부(H/C)에서 발생한 취성균열의 전파에 의한 불안정 완전 파괴를 방지 할 수 있게 되었다.

본 연구에서 개발된 기술은 이미 국내의 대형조선사의 초대형 컨테이너선에 적용을 통하여 본 기술의 적용성을 검증 하였다.

후 기

본 연구의 수행에 많은 도움을 주신 현대중공업, 삼성중공업, DSME, STX, 한진중공업, 미국선급협회, 한국선급협회 관계자께 깊은 감사의 뜻을 전합니다.

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. Nippon Kaiji Kyokai: Rules for the survey and construction of steel ship's, (2006)
3. 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)
4. 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
5. T. Handa, T. Kubo, F. Kawabata, K. Nishimura, S. Suzuki H. Shiomi, T. Miyata: Effect of K_{Ic} 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
6. 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
7. Nippon Kaiji Kyokai: Guidelines of the application of YP47 steel for hull structures of large container carriers, (2008)
8. IACS: Requirement for use of Extremely Thick Steel Plates, (2013)
9. American Bureau of shipping: Higher-strength hull structural thick steel plate in container carrier, (2008)
10. Gremanischer Lloyd, "Supplementary rules for application of steel with yield strength of 460N/mm²". (2008)
11. An, G.B., Park, J.S.: Metals and Materials International, 17(5) (2011), 841-845
12. Jeong-Ung Park, Gyubaek An, Hae-Woo Lee: Materials and Design, 42 (2012), 403-410
13. 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 the Korean Welding & Joining Society*, 25(4) (2007), 9-14
14. Jeong-Ung Park and Gyu-Baek An: Fracture toughness of thick steel plate for ship building, *Journal of the Korean Welding & Joining Society* 25(4) (2007), 15-19
15. C. S. Wiesner and B. Hayes: A review of crack arrest tests, models and applications, TWI report (1995)
16. The 193th Research Committee: Application of 50kgf/mm² class high strength steel plates made of new steel manufacturing process, Report No. 100, *The Shipbuilding Research Association of Japan*, (1985)