

선급용 고강도 극후물재의 취성과파괴 정지 성능에 관한 연구

안규백^{*,†} · 류강목^{*} · 박준식^{*} · 정보영^{*} · 김태수^{*} · 이종섭^{*}

^{*}포스코 기술연구원 강재솔루션연구그룹

Brittle Crack Arrestability of Thick Steel Plates for Shipbuilding

An Gyu Baek^{*,†}, Ryu Kang Mook^{*}, Park Joon Sik^{*}, Jeong Bo Young^{*},
Kim Tae Su^{*} and Lee Jong Sub^{*}

^{*}Technical Research Laboratories Steel Solutions Research Group, Pohang 790-704, Korea

[†]Corresponding author : gyubaekan@posco.com

(Received August 13, 2009 ; Revised September 4, 2009 ; Accepted December 16, 2009)

Abstract

In recent time there is vigorous requirement for the use of thick steel plate in various industrial fields including shipbuilding industry. Especially, with the continual increases in marine transportation volumes on a global scale, the steel of container ships has become thicker and thicker with the increased size of ships. In addition, the brittle crack arrestability of heavy thick plates was big issue, in recently. In this study, crack arrest test were conducted in order to investigate the crack arrestability of thick plates for shipbuilding steels, where test plate thicknesses were 50mm and 80mm. This paper introduces the brittle crack arrestability of heavy thick plates with thickness effect for shipbuilding.

Key Words : Crack initiation fracture toughness, crack arrest toughness, brittle fracture, thick steel plate

1. 서 론

조선 및 다양한 산업 분야의 강구조물이 대형화됨에 따라 후판 강재의 수요량 증가와 함께 적용 강종의 범위 또한 폭넓게 증가 되고 있다. 특히, 조선산업 에서는 선박의 수송효율의 극대화를 위하여 컨테이너선의 대형화가 급속하게 진행되고 있으며, 2009년 13,000 TEU 이상의 초대형 컨테이너선이 건조되고 있다. Fig. 1에서 알 수 있듯이 초대형 컨테이너선의 건조와 함께 강재의 강도 및 두께의 증가는 자연스럽게 이루어지고 있으며, 초대형 컨테이너선의 경우 Hatch side coaming(H/C)에 선박전체 중에서 가장 두꺼운 강재가 적용되는 부분이며, 12,000TEU급 기준으로 400MPa이상 항복강도의 80mm 강재가 적용되고 있다¹⁾.

최근 선박의 고강도화 및 극후물화에 따라서 선체구

조물의 파괴안전성에 대한 관심이 증가 되고 있으며, 일본선급협회(NK)²⁾에서는 지난 2006년 7월에 파괴인성 관련 규정을 새롭게 첨가 하여, 극후판의 파괴안전성 확보에 더욱 높은 관심을 보이고 있다. 파괴안전성은 균열생성의 관점(Crack initiation fracture toughness)과 균열정지의 관점(Crack arrest fracture toughness)

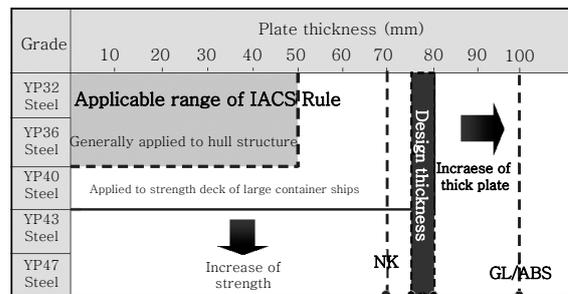


Fig. 1 Thicker and stronger steel plates for large container ships

으로 구분되어서 연구가 진행되어 왔다. 종래에는 판두께 30~40mm에 관한 연구들이 주로 수행되었으나³⁾, 최근 몇 년 사이에 일본에서는 균열정지의 관점에서 극후판에 대한 취성균열 정지 특성에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다⁴⁻⁶⁾. 이러한 연구들은 주로 대형파괴시험을 통하여 극후판 용접부의 취성균열정지 특성을 평가하는 방향으로 진행되었으며, 65mm이상의 극후판에 대해서는 용접부에서 취성균열의 정지가 어렵다는 연구 결과를 발표하고 있다. 극후판일수록 용접부에서 발생한 취성균열은 직진전파하기 쉽게되어서 모재쪽으로 균열의 경로가 바뀌어서 취성균열이 정지되는 것이 아니라, 용접부를 따라서 직진 전파 한다는 것이다. 뿐만 아니라, 이러한 연구결과를 바탕으로 일본선급협회에서는 2009년 9월 파괴안전성을 강화하기 위한 관련 규정을 새롭게 개정하였다⁷⁾. 또한, 미국선급협회(ABS)⁸⁾, 독일선급협회(GL)⁹⁾ 등에서도 고강도강에 관한 파괴안전성을 확보하기 위한 새로운 규정을 마련하였는데, 각각 다른 방향에서 파괴인성 및 취성균열 전파정지에 관한 규정을 포함하고 있다.

이처럼 각 선급협회와 조선사 및 철강사에서는 고강도 극후물 강재에 대한 파괴인성에 관한 관심이 증가하고 있으며, 각자의 관점에서 파괴안전성 확보를 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 이와 관련 최근 조선산업의 초대형컨테이너선의 건조에 있어서 주요관심 대상인 극후판 용접부의 취성균열 정지특성에 관한 기존의 연구동향 및 결과에 대하여 박준식 등¹⁰⁾, 박정웅 등¹¹⁾이 대한용접·접합학회지에 상세하게 소개하고 있다. 본 연구에서는 종래의 연구결과에서 두께의 영향에 의하여 취성균열의 전파경로가 변화 하는 것으로 보고 되고 있으나, 용접구조물에서의 균열의 경로를 결정하는 요인은 여러 가지 인자가 있을 것으로 판단되어서, 종래의 연구에서 사용한 판두께 65mm를 기준으로 좀더 얇은 50mm, 그리고 보다 두껍고 현재 컨테이너선에 적용되는 최대두께인 80mm의 강재를 선정하여, 선급 극후판 강재에 대한 취성균열 전파정지 인성, Kca를 모재 및 용접부에 대하여 평가 하였으며, 균열전파 경로에 대해서도 검토 하였다. 모재에 대한 취성균열전파 정지 인성을 구하기 위하여, 온도구배에 의한 ESSO시험을 실시하여 두께의 변화에 따른 취성균열전파정지인성, K_{ca} 값을 설계온도인 -10°C 에서 구하였으며, 대입열 용접에 의한 용접부에서의 두께의 영향에 따른 취성균열전파인성값 및 균열전파 경로에 대하여 파악하기 위하여 모재와 동일한 ESSO시험을 실시하였다.

Table 1 Chemical composition of EH36 steel used

Steels	C	Si	Mn	P	S	S-Al	Ceq
50mm	0.057	0.14	1.55	0.14	0.0017	0.0186	0.35
80mm	0.057	0.14	1.55	0.14	0.0018	0.0186	0.35

Table 2 Mechanical properties of base metal

Steels	Yield stress (MPa)	Tensile strength (MPa)	Elongation (%)
50mm	450	537	26
80mm	434	544	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)
3G (Vertical Up)	100% CO ₂	Face : DCEP	360	43	3.7	530
		Root : DCEN	400	43	3.7	

2. 적용 강재 및 실험방법

2.1 적용 강재

본 연구에 사용한 강재는 조선용 360MPa급 TMCP-대입열용 강재로, 판두께가 50mm, 80mm의 2 종류이다. Table 1, Table 2에는 강재의 화학조성 및 기계적 성질을 나타내었다. 두께의 영향을 파악하기 위하여 두 종류의 두께를 선정하였다. 용접은 두께에 관계 없이 모두 대입열용접인 EGW(Electro Gas arc Welding)를 적용 하였으며, 50mm의 경우는 약 320kJ/cm, 80mm인 경우는 530kJ/cm의 입열로 용접을 수행하였다. 용접조건은 Table 3에 타내었다.

2.2 ESSO 실험방법

취성균열 전파정지 특성의 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 있다¹²⁾. 소형시험법은 주로 대형시험법을 모사하기 위하여 고안되었으며, 소형시험에서 얻어진 결과값을 통해 대

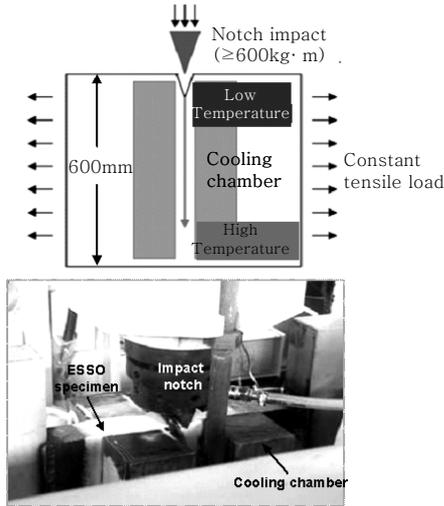


Fig. 2 Shape of large size crack propagation-arrest(ESSO) test specimen

형시험에서의 측정값을 유추하는데 활용되었다. 최근에는 취성균열 전파정지 성능을 파악하기 위한 실험으로는 온도구배 조건하에서 대형 ESSO 시험이 폭 넓게 수행 되고 있다. 본 연구에서도 3,000ton 대형 인장시험기를 사용하여서 판두께 50mm, 80mm에 대하여 온도구배 조건하에서 모재 및 용접부에 대하여 ESSO 시험을 실시하였다. 온도구배와 하중 조건은, 선급용 극후판 강재의 취성균열 정지 성능에 관한 현 수준을 파악 하고자, 균열이 정지 가능한 조건으로 설정 하였다. 하중은 50MPa~300MPa의 범위와 시험온도는 +60℃~-120℃의 범위에서 적절하게 조합하여서 조건을 설정 하였다. Fig. 2에는 온도구배 ESSO시험의 개략도이며, 본 연구에서 사용한 모재 시험편의 크기를 나타내었다. 온도구배는 냉각 챔버를 설치하여 노치부근은 저온으로 냉각하여 균열 생성 및 전파를 용이하게 하고, 균열 전파 방향을 따라 온도를 상승시켜 균열 정지가 가능하도록 하였다. 온도구배는 통상 2.5℃/cm~3.5℃/cm 의 범위에서 제어하였으며, 온도구배의 조정이 마쳐진 후 시험편에 인장하중을 가하고, 목표 시험하중에 도달하면 노치에 충격하중을 가하여 균열을 생성, 전파시키고 균열이 정지한 부분의 균열길이를 측정하여 K_{ca} 값을 계산하였다. 여기서, 시험하중과 온도조건의 관계가 적절한 조합을 이루지 못하면 균열은 정지 하지 못하고 직진전파하여서 완전 취성파괴에 도달하게 되므로 시험조건과 온도조건의 설정이 중요하였다. 통상적으로 선박의 최저운항온도(국제선급협회, IACS 기준)인 -10℃에서의 K_{ca} 값을 기준으로 하여 소재의 균열정지특성을 비교하는데, 이를 얻기 위해서는 3~4회 온도구배 ESSO 시험을 실시하여 외삽법을 통해 -10℃에

서의 K_{ca} 값을 계산하였다. 용접부의 경우도 동일하게 시험을 실시하였으며, 노치위치는 용접부의 가장 취약한 영역으로 판단되는 F/L에 설정하여 균열이 시작되게 하였다.

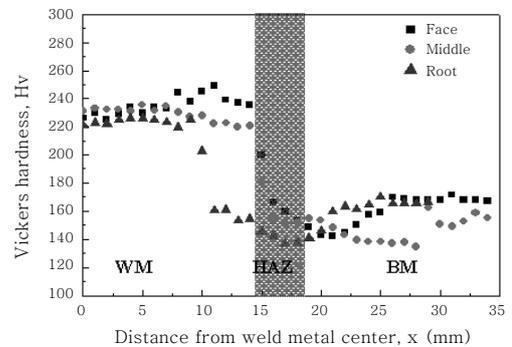
3. 실험결과 및 고찰

3.1 모재 및 용접부 기본물성 평가 결과

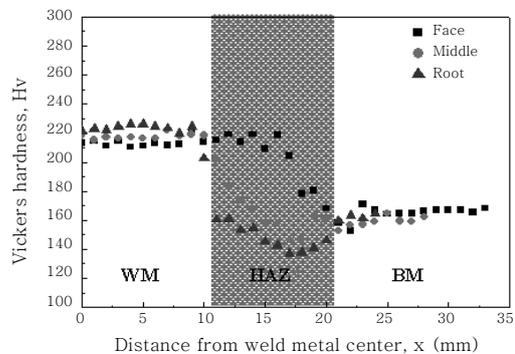
모재 및 용접부에 대하여 경도분포, Charpy충격시험을 실시하였다. Fig. 3에는 용접부근방에 대한 경도분포를 나타내었다. 50mm, 80mm 모두 HAZ연화 영역이 나타났으며, 입열량에 따라서 연화역의 분포는 다소 다르게 나타났다. HZA연화현상은 대입열용접에서 나타나는 일반적인 현상이라고 할 수 있다. Fig. 4에는 Charpy 충격 시험결과를 나타냈으며, 용접금속에 비교적 낮은 충격인성값을 나타내고 있지만, 양 두께 모두 선급규정을 만족하고 있다.

3.2 모재 취성균열 전파 정지 인성 평가 결과

모재가 갖는 취성균열전파 정지 인성값 K_{ca} 값을 측정하기 위하여 ESSO 시험을 실시 하였다. Fig. 5에는



(a) thickness 50mm



(b) thickness 80mm

Fig. 3 Hardness distribution of EH36 grade steel in welded joint

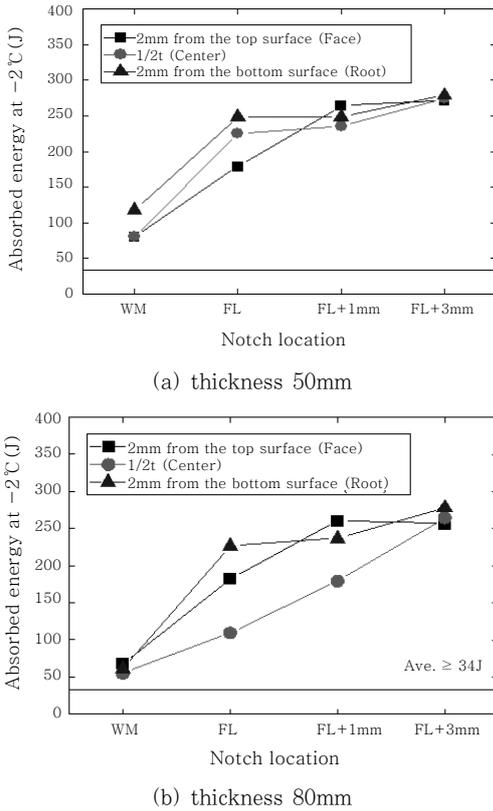


Fig. 4 Charpy impact test of EH36 grade steel in welded joint

	Sp. #1	Sp. #2	Sp. #3
Fracture surface			
Crack length	390mm	340mm	281mm

Fig. 5 Fracture surface of large crack propagation-arrest test (Plate thickness: 80mm)

판두께 80mm에 대한 실험후의 균열 전파경로 및 파면을 나타내었다. 인장하중이 가하여진 상태에서 충격장치에 의하여 균열이 발생되어서 일정 거리 만큼 진전후 온도구배에 의하여 균열이 정지하고 있음을 알 수 있다. 균열정지온도는 7.5°C, -8.0°C, -31°C 였으며, 각각의 균열이 정지된 온도에서의 균열길이는 390mm, 340mm, 281mm였다.

취성균열 전파 정지 인성을 계산하기 위하여 식(1)¹³을 이용하여 K_{ca} 값을 도출 하였다.

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

여기서,

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

σ_g : Gross stress (N/mm^2)

C_a : Arrest crack length(mm)

P : Test load(N)

B : Width of specimen(mm)

t : Thickness of specimen(mm)

두께 50mm에 대해서도 동일한 방법으로 온도구배 ESSO시험을 실시하였으며, 양 두께에 대한 식(1)에 의해서 구해진 K_{ca} 값과 균열정지온도와의 관계를 Fig. 6에 나타내었다. 실험에서 구한 K_{ca} 값은 각각의 두께에 대하여 약 +20°C~-40°C에서 얻을 수 있었다. 두께의 증가에 따라서 K_{ca} 값이 감소함을 알 수 있으며, 거의 동일한 기울기의 경향을 나타내는것을 확인 하였다. 각각 다른 균열정지 온도에서 구해진 K_{ca} 값을 통하여 선박의 설계온도인 -10°C에서의 K_{ca} 값은 외삽법에 의하여 구하여지며, 50mm, 80mm 각각 7381 $N/mm^{1.5}$, 5690 $N/mm^{1.5}$ 이었다.

종래의 연구결과^{3,14}에 의하면 취성균열 전파 정지성능은, 최저 사용온도에 있어서, 통상의 작용응력 조건하에서 취성 균열을 정지 시키기 위해서는, $K_{ca} \geq 3900 N/mm^{1.5}$ 을, 또한 취성균열을 안전하게 완전히 정지 시키기 위해서는, $K_{ca} \geq 5900 N/mm^{1.5}$ 의 값을 가져야 한다고 알려져 있다. 그러나 이러한 결과들은 판두께 30~35mm정도의, 일반 선체용 연강판에 대해서 확인된 실험 결과이고, 실험시 온도구배의 조건등에 따라서 K_{ca} 값이 다

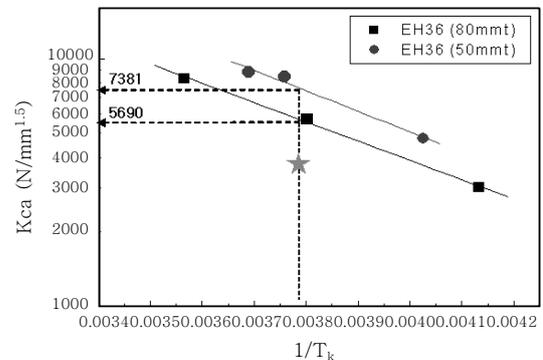


Fig. 6 Relation between brittle crack arrest toughness and temperature

소 차이를 나타낼 수 있다. 따라서 종래의 연구결과를 본 연구에서 사용한 판두께 50mm, 80mm의 극후판에 대한 기준으로 적용 가능한가에 대해서는 불명확하다고 할 수 있다.

한편, 그림에서 ★이 표시하고 있는 K_{ca} 값은 일본선 급협회(NK)가 '06년 7월 제안한 통상운항 조건하에서의 -10°C 에서 값을 나타낸 것이다. 그림에서 알 수 있듯이, 본 연구에 사용된 선급용 극후판 50mm, 80mm, 모두 조건을 만족하고 있음을 알 수 있다.

3.3 취성균열 전파 정지 경로에 미치는 두께의 영향

종래의 연구결과에 의하면, 극후판인 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 수 있다고 하는 주장이 있다¹³⁾. 본 연구에서는 용접부에서의 취성균열 전파 경로에 대한 검토를 위하여 50mm, 80mm의 두 종류의 두께에 대하여 대입열용접(EGW)부에 대한 취성균열 전파 정지 시험을 실시하였다.

Fig. 7에는 50mm에 대한 실험 결과를 나타내었다. 서로다른 하중조건, 온도구배조건에서 3회의 ESSO 시험을 실시하였으며, 취성균열은 직진전파후 모두 용접부에서 균열이 정지한 결과를 얻었다. Fig. 8에는 80mm에 대한 ESSO시험결과를 나타내었다. 50mm와 동일하게 3번의 실험을 실시하였으며, 취성균열은 용접선을 따라서 직진전파후 용접부 부근에서 정지함을 알 수 있었다. 상세한 취성균열 전파 정지 위치를 Fig. 9에 나타내었다. 그림에서 알 수 있듯이, 서로 다른 2종류의

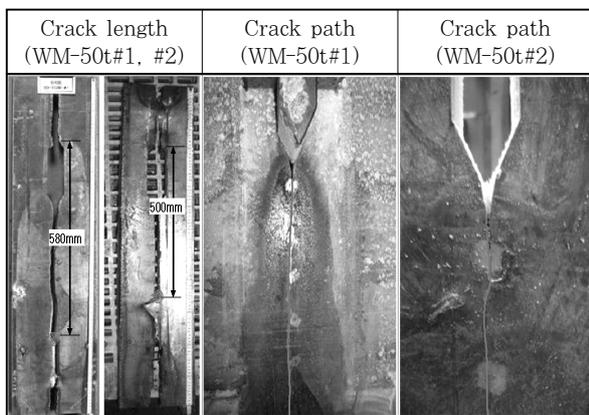
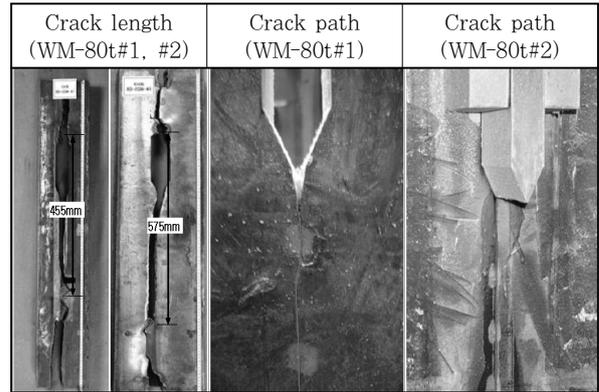


Fig. 7 Results of ESSO test in crack path with welded joint with thickness 50mm



● : Creack arrest posion

Fig. 8 Results of ESSO test in crack path with welded joint with thickness 80mm

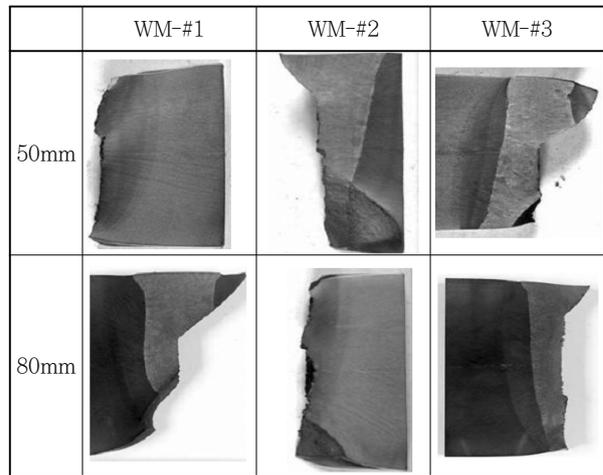


Fig. 9 Results of ESSO test in crack arrest position with welded joint with thickness 50mm, 80mm

두께에 대하여 취성균열의 정지 위치는 모두 용접부 부근임을 알 수 있다. 따라서 취성균열의 전파 경로는 두께만의 영향에 의해서 모재로 방향이 바뀌지는 않는다는 것을 알았다. 물론 본 연구에서는 설계하중이 아닌, 취성균열을 정지 시키기 위한 하중조건과 시험조건으로 실험을 실시하였다. 본 연구결과로부터 취성균열의 전파 경로는 두께만의 영향 보다는 다른 조건들의 영향을 받는 것으로 생각되며, 예를들면 하중조건, 용접시 잔류응력의 분포등이 취성균열 전파 경로에 영향을 주는 인자로 생각 할 수 있다.

Fig. 10에는 두께별 그리고 모재 및 용접부에 대하여 구한 취성균열 전파정지 인성, K_{ca} 값을 정리 하였다. 모재에 비하여 용접부의 K_{ca} 값이 낮게 나타났으며, 50mm 보다는 80mm의 K_{ca} 값이 감소함을 알 수 있다. 두께의 변화에 따라서 K_{ca} 값이 달라지는 것은 강재

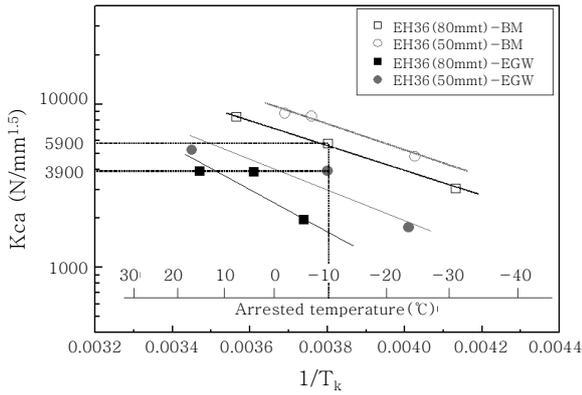


Fig. 10 Relation between brittle crack arrest toughness and temperature with thickness 50mm and 80mm

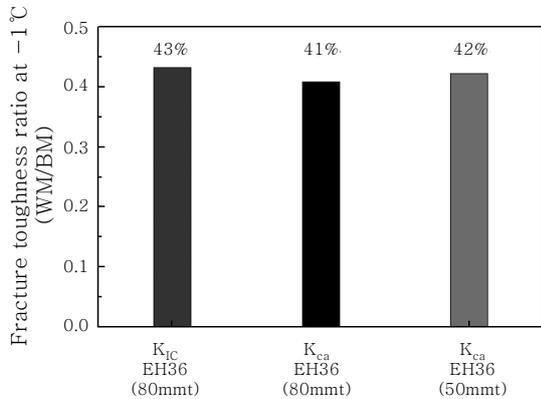


Fig. 11 Fracture toughness ratio (KIC and Kca) between base plate and welded joint

의 제조상 극후판에 대한 인성의 저하등도 영향이 있으며, 극후물재의 경우는 하중상태가 다축응력상태에 놓이게 되는 등 보다 엄격한 조건이 되는 때문인 것으로 생각된다. 본 연구에서 구한 용접부에 대한 K_{ca} 값에 대한 타당성을 평가 하기 위하여 K_{IC} 값과 비교한 것을 Fig. 11에 나타내었다. 그림에서 K_{IC} 값이 모재에 비교하여 용접부는 40% 정도의 수준임을 알 수 있다. 한편, K_{ca} 값 또한 양 두께 모두 약 40% 정도의 수준을 나타내고 있음을 알 수 있다. 따라서 본 연구에서 얻은 용접부의 K_{ca} 값이 어느 정도는 타당한 값을 얻은 것으로 판단 된다.

4. 결 론

본 연구에서는 선급용 극후물재의 취성균열 전파정지 인성 및 용접부에 대한 취성균열 전파 경로에 미치는 두께의 영향에 대하여, 온도구배조건인 ESSO 시험을

통하여 검토하였다. 모재의 경우는 종래의 연구 결과를 바탕으로 제안된 일본 선급협회(NK)의 통상운항 조건 하에서의 K_{ca} 값을 50mm, 80mm 모두 만족하고 있음을 확인 하였으며, 이러한 모재를 사용하여 용접부를 구성하였다. 용접부에 대해서는 종래의 주장과는 달리 두께에 의해서 균열전파 경로가 달라지지 않고, 50mm, 80mm 모두 균열전파 정지 위치는 동일함을 규명 하였다. 균열전파 경로는 두께만의 영향 보다는 다른 조건들의 영향을 받는 것으로 생각되며, 예를들면 하중조건, 용접시 잔류응력의 분포등이 취성균열 전파 경로에 영향을 주는 인자로 생각 할 수 있다. 보다 상세한 취성균열 전파경로에 영향을 미치는 인자에 대한 연구 결과에 대해서 향후에 다시 토론 하고자 한다.

참 고 문 헌

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 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
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. American Bureau of shipping "higher-strength hull structural thick steel plate in container carrier", (2008)
9. Gremanischer Lloyd, "Supplementary rules for application of steel with yield strength of 460N/mm²", (2008)
10. 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 (in Korean)
11. 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 (in Korean)
 12. C. S. Wiesner and B. Hayes: A review of crack arrest tests, models and applications, TWI report (1995)
 13. M. Isida and H. Terada: Analysis of stress intensity factors of plates containing internal crack, Trans. Japan Soc. Mech. Engrs., 43-374 (1977), 3636-3641
 14. 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)