보강재 효과에 따른 취성 균열 발생 방지 및 피로수명 향상 방안에 관한 연구

강 태 우* · 김 명 현*,†

*부산대학교 조선해양공학과

A Study for Brittle Crack Prevention and Fatigue Life Improvement using a Welded Stiffener

Tae-Woo Kang*, and Myung-Hyun Kim*,†

*Dept. of Naval Architecture and Ocean Engineering, Pusan National University, Busan, 46241, Korea

†Corresponding author : kimm@pusan.ac.kr

(Received November 8, 2018 ; Revised December 5, 2018 ; Accepted December 18, 2018)

Abstract

Recently, thickness of steels used in ships is increasing along the increased size of vessels, e.g. container carriers in particular. In container vessels, thick plates are applied to hatch side coaming areas, and safety is also becoming important as steel plate thickness increases. Many studies are conducted on the brittle crack arrest characteristics to prevent catastrophic failure in those areas. A number of experiments have been conducted for investigating propagation characteristics of brittle crack from classification societies. Especially, ESSO test method is commonly employed to analyze the BCA (Brittle Crack Arrest) toughness. In order to prevent brittle crack, arrest holes, weld line shift and insert plates are suggested.

Various researches have been carried out to arrest brittle crack in BCA steel. However, the actual structure thickness has to be applied to the experiment, and it is difficult to carry out experiments due to the large scale specimens. Thus, in this study, crack retardation method is researched considering the thickness, length, and location of a welded stiffener. Finite element analysis was conducted on the hatch side coaming to compare the allowable crack length according to the effect of stiffener and to compare fatigue life based on the characteristics of BCA steel.

Key Words : Brittle crack arrest steel, Brittle crack arrest toughness, ESSO test, Fatigue crack growth rate, Stiffener

1. 서 론

최근 선박 및 다양한 분야에서 구조물의 대형화가 이루어지고 있다. 특히 컨테이너선의 경우 2014년 기준 19,000 TEU(Twenty-foot Equivalent Unit)급 선박이 건조된 것을 넘어, 최근에는 20,000TEU 이상의 초대형 컨테이너선이 요구되고 있다^{1,3)}. 선박의 대형화에 따라 적용되는 강재의 강도와 두께 또한 증가되고 있는데, 컨테이너선의 경우 해치 코밍 부위에 주로 선

박 전체에서 가장 두껍고 고강도의 강재가 적용된다. 현재 19,000TEU급 이상의 컨테이너선을 기준으로 항복강도 460MPa 이상, 두께 80mm 이상의 강재가 요구되고 있다^{1,2)}.

강판의 두께가 증가하면서 취성파괴에 대한 안전성 및 균열의 전파 정지에 대한 연구가 많이 이루어지고 있다^{4,5)}. 국제선급협회(IACS : International Association of Classification Societies)에서는 컨테이너선 해치 코밍의 취성 균열 전파 정지를 위한 설계적인 측면에서의 다양한 방법이 제시되어 있다⁶⁾. 또한 적용되는 강판

Fig. 1 Brittle crack arrest method⁷⁾

의 실험 방법 및 해당 조건에 대해 규정하고 있다.

Fig. 1에 나타난 바와 같이 취성 균열 전파 정지를 위한 설계 방법으로는 1) BCA(Brittle Crack Arrest) 강제적용 2) Crack arrest hole 3) Crack arrest insert 4) Crack arrest weld 5) Weld line shift 적용 등이 있다^{7,10)}. 생산성을 높이기 위해 용접선이 직선으로 형성되어 있는 경우는 2~4번 방법에 해당하는 추가 가공이 필요하다. 용접선을 교차하는 방법에 대해서는 안전성을 높여준다는 장점이 있는 반면, 생산성이 비교적 낮아진다는 단점이 있다.

취성 균열 전파 정지 인성을 평가하는 방법으로는 대형 시험법으로 ESSO test, Double tension test, Duplex crack arrest test 등이 있으며, 소형 시험법으로는 Charpy 충격 test, Compact crack arrest (CCA) test, Drop weigh test 등이 있다⁹⁾. 주로 ESSO test를 통하여 취성 균열 전파특성을 파악하게 되는데 IACS UR S33에서는 -10°C 에서 취성균열 정지인성 값(K_{Ic})이 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ 이상 되도록 요구하고 있다⁶⁾.

ESSO test와 IACS에서 제시하는 기준을 바탕으로 취성 균열 전파 정지 특성 및 BCA 강제에 대한 연구가 많이 이루어졌다. 최근 국내에서는 최대 두께 100mm의 BCA 강재가 적용되고 있다. 또한 파괴인성에 영향을 미치는 것이 두께에 대한 영향 이외에 잔류응력 및 용접 입열량의 영향도 고려된다는 연구가 진행되었으며, 용접부에 압축 잔류응력을 부여하여 균열 진전 방향의 변화에 대한 연구가 진행되었다^{7,8)}.

본 연구에서는 기존에 연구되었던 취성 균열 발생 방지 방법과 달리 보강재를 활용하여 취성 균열의 발생 방지 방법에 대해 고안하였다. 해당 방법의 최적화된 조건을 고려하기 위해 보강재의 위치, 길이, 두께 변화에 따른 효과를 고려하였으며, 해치 코밍부에 대해 유한요소해석을 실시하여 보강재의 효과에 따른 허용 가능 균열 길이를 비교하였다. 또한 BCA 강재의 항복강도, FCGR(Fatigue Crack Growth Rate) 등의 결

과를 바탕으로 허용 길이 증가에 따른 피로 수명의 변화를 비교하였다.

2. 피로균열 진전

피로균열 진전의 거동을 분석하기 위해서는 Paris law로 알려진 응력확대계수범위인 ΔK 와 균열 진전 속도 da/dN 의 관계로 설명된다¹¹⁾.

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (1)$$

여기서 C 는 재료상수, m 은 로그-로그 좌표계의 기울기를 의미한다.

$$K = FS\sqrt{\pi a} \quad (2)$$

F 는 기하학적 형상 및 균열 길이의 비 $a=b$ 에 의해 결정되며, S 는 응력, a 는 균열 길이 그리고 b 는 판의 두께를 의미한다.

본 연구에서는 BCA 강제에 대하여 Fig. 2의 Paris 영역과 같이 균열이 선형적으로 증가하는 범위에서 FCGR 결과를 도출하였다. 또한 취성 균열 정지 인성 값인 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ 을 취성 균열의 시작점인 Paris 영역과 불안정 영역의 경계점으로 하여 불안정 영역에 도달하기까지의 허용 가능 균열 길이 및 피로 수명을 비교하였다.

3. 사전 연구

취성 균열이 발생한 후 균열이 진전되는 방향 두가지 경우에 대해 Fig. 3에 나타내었다. Scenario 1은 해치 코밍부에서 발생한 균열이 상갑판 쪽으로 향하는 경우이며, Scenario 2는 상갑판에서 발생한 균열이 해치

Fig. 2 Schematic of typical FCG data¹¹⁾

Fig. 3 Brittle crack propagation direction¹²⁾

Fig. 4 Variation of stress intensity factor¹³⁾

코밍부로 진전하는 상황이다. Fig. 4는 10379 G.T 벌크선 상갑판의 취성 파괴에 대한 정적 분석 결과이다. 균열 길이에 따른 응력확대계수의 변화를 나타내었는데, 보강재가 존재하는 영역에서 응력확대계수가 감소하는 현상을 확인할 수 있다¹²⁾. 이러한 결과를 바탕으로 균열 진전 방향을 설정하고 보강재의 추가 설치에 의한 응력확대계수의 변화를 구하기 위해 유한요소해석을 실행하였다.

4. 취성 균열 발생 방지 방안

보강재의 효과에 따른 취성 균열의 발생 방지 및 피로수명 향상 효과를 확인하기 위해 사례연구를 진행하였다. Fig. 5에 나타낸 바와 같이 해치 코밍 부분에 대해 모델링을 수행 하였으며, 균열 전파 방향은 Fig. 3의 Scenario 1과 Scenario 2로 구분하였다. 기존에 취성 균열이 발생하는 지점과 보강재를 추가하여 취성 균열이 발생하는 지점의 균열 길이를 비교하였다. 또한 보강재의 길이와 두께, 위치에 따른 효과를 고려하여 최적의 보강재 적용에 대하여 고찰하였다.

4.1 보강재의 치수

먼저 보강재의 길이에 대한 영향만을 확인하기 위해 균열 길이가 240mm이고, 상갑판으로부터 보강재의 위

Fig. 5 FE modeling of hatch side coaming area (a) Dimension, (b) Boundary condition

Table 1 The effect of stiffener length in SIF

Stiffener Length [mm]	2000	1000	500	250	200
SIF [MPa $\sqrt{\text{mm}}$]	6000	6000	5850	5750	5750

치가 200 mm일 때 보강재의 길이 변화에 따른 응력 확대계수(SIF : Stress Intensity Factor) 값을 Table 1에 정리하였다. 보강재의 길이에 따라 응력확대계수가 다르게 나오는 것을 확인할 수 있으며, 보강재의 길이가 200mm인 경우 응력확대계수가 가장 낮은 것을 확인할 수 있다. 이는 보강재의 기하학적 형상으로 인해 형성되는 응력집중의 영향이라 판단된다.

보강재의 최적의 위치를 고려하기 위해 두 가지의 경우에 대해 Fig. 6과 같이 구분하였다. 첫 번째는 응력 확대계수가 $6000 \text{ N/mm}^{3/2}$ 이 되는 지점에 보강재를 설치하여 응력확대계수의 변화를 확인하였고, 두 번째는 첫 번째 보강재의 절반인 지점에 보강재를 추가하였다. 이는 응력확대계수의 크기에 따른 최적의 보강재 위치

Fig. 6 Stiffener position at each scenario

Table 2 Scenario 1 case condition for FE analysis [mm]

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Position	210	210	80	80
Length	200	200	200	200
Thickness	20	30	20	30

Table 3 Scenario 2 case condition for FE analysis [mm]

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Position	200	200	50	50
Length	200	200	200	200
Thickness	20	30	20	30

를 찾기 위함이다. 시나리오 1에서 고려된 위치는 응력 확대계수가 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ 인 해치코밍으로부터 상갑판 방향으로 210mm인 위치와 첫 번째 보강재의 절반 위치에 해당하는 80mm 지점으로 선정하였다. 시나리오 2는 응력 확대계수가 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ 인 상갑판으로부터 해치코밍 방향으로 200mm와 첫 번째 보강재의 절반 위치에 해당하는 50mm 위치로 선정하였다. 두께는 기존 모델링의 보강재와 동일한 두께인 20mm와 30mm 두 가지로 비교하였으며 균열 진전 방향에 따른 해석 조건을 Table 2과 Table 3에 각각 나타내었다.

4.2 해석 조건

유한요소해석을 진행하기 위한 구속 조건, mesh의 개수와 균열선단에서의 mesh 형상 등은 각각 Table 4, Table 5 및 Fig. 7에 나타내었다. 해치 코밍부에 적용하는 응력 조건은 360MPa로 선정하였다. 이는 기존에 적용되었던 두께 65mm의 컨테이너선 평판에 237MPa의 응력이 적용된 것에 비해, 두께의 증가된 점과 해치 코밍부의 모델링 된 점을 감안하여 선정되었다¹⁴⁾.

Table 4 Boundary condition

Fix = 0			
Location	X	Y	Z
Section A	0	0	0
Section B	0	0	-

Table 5 Element types and number of meshes

Mesh number	70000 ~ 95000
Element types	An 8-node linear brick
Applied stress	360 MPa (Z-Tension)

Fig. 7 Mesh shape at crack tip

4.3 허용 가능 균열 길이

4.3.1 해치 코밍에서 상갑판으로 균열 진전

허용 가능 균열 길이에 도달하기까지의 응력확대계수 변화를 Fig. 8에 나타내었다. 긴 점선은 보강재가 없는 경우이며 점선은 보강재의 효과에 따른 응력확대계수의 변화, 실선은 허용 가능 균열 길이가 가장 긴 경우를 나타내었다. Fig. 4의 응력확대계수가 변하는 현상과 동일하게 보강재가 위치한 지점에서 응력확대계수가 감소하는 현상을 확인할 수 있다. 또한 균열이 210mm 지점에서 응력확대계수가 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ 로 취성파괴가 발생하는 지점으로 계산되었다.

Table 6은 추가된 보강재의 조건에 따른 최종 균열 길이를 나타내었다. 응력확대계수의 크기에 따른 보강재의 영향을 보았을 때 응력확대계수가 가장 높은 지점에서 설치된 보강재의 효과가 큰 것을 확인할 수 있다.

(a)

(b)

Fig. 8 Variation of stress intensity factor of scenario 1 (a) Entire results, (b) Zoom of crack length 150-300mm

Table 6 Results of Scenario 1 [mm]

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Position	210	210	80	80
Length	200	200	200	200
Thickness	20	30	20	30
Final Crack length	280	290	240	250

또한 보강재의 치수에 대해서는 Case 2에 나타난 바와 같이 위치 210mm, 길이 200mm, 두께 30mm일 때의 허용 가능 균열 길이가 290mm로 최적의 위치로 나타났다. 따라서 추가적인 보강재에 의해 허용 가능 균열 길이가 210 mm에서 290mm로 약 80mm 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

4.3.2 상갑판에서 해치 코밍으로 균열 진전

보강재가 설치되지 않은 경우 균열이 200mm일 때 응력확대계수가 $6000\text{N/mm}^{3/2}$ 이 된다. Scenario1과 비교하였을 때 차이가 있는데, 이는 첫 번째 보강재의 영향인 것으로 확인할 수 있다.

균열 길이의 변화에 따른 응력확대계수를 Fig. 9에 나타내었다. 마찬가지로 보강재가 없는 경우 긴 점선, 보강재의 효과에 따른 응력확대계수의 변화는 점선, 허용 가능 균열 길이가 가장 긴 경우는 실선으로 나타내었다. Table 7의 Case 2에 해당하는 길이 200mm, 두께 30mm의 보강재를 균열이 발생하는 지점에 추가하

Table 7 Results of Scenario 2 [mm]

	Case 1	Case 2	Case 3	Case 4
Position	200	200	50	50
Length	200	200	200	200
Thickness	20	30	20	30
Final Crack length	260	280	200	210

였을 때 허용 가능 균열 길이가 200mm에서 280mm로 약 80mm 증가하는 현상을 확인할 수 있다.

4.4 피로 수명 예측

BCA 강재의 용접부에 대한 FCGR 특성 평가와 유한요소해석 결과를 바탕으로 해당 구조물의 피로수명을 계산하였다. 적용된 반복응력은 180MPa이며, 피로수명은 보강재가 없는 경우와 각 시나리오에서 허용 가능 균열 길이가 가장 많이 증가하는 위치에 보강재가 설치된 경우에 대해 비교하였다.

Fig. 10에 보인 바 같이 Scenario 1의 경우 6.99×10^4 cycle의 수명이 보강재의 영향으로 9.83×10^4 cycle로 약 29% 피로수명이 향상된 것을 확인할 수 있다. Scenario 2의 경우 보강재의 영향으로 6.39×10^4 cycle에서 8.86×10^4 cycle로 약 28% 피로수명이 향상되었다.

5. 결 론

본 연구에서는 보강재를 활용한 BCA 강재의 균열 지연 방법에 대해 고안하였으며 해치 코밍부의 유한요소해석을 통해 허용 가능 균열 길이를 비교하였다. 또한 BCA 강재 용접부의 FCGR 결과를 바탕으로 피로수명 향상 효과를 비교하였다.

연구결과를 요약하면 다음과 같다.

Fig. 9 Variation of stress intensity factor of scenario 2 (a) Entire results, (b) Zoom of crack length 150-300mm

Fig. 10 Comparison of fatigue life with no stiffener

1) 보강재의 길이와 위치, 두께를 고려하였을 때, 응력확대계수가 가장 높은 지점에서 길이 200mm, 두께 30mm의 보강재를 설치한 경우 허용 가능 균열 길이가 가장 많이 증가하였다.

2) 해치 코밍에서 상갑판으로 균열이 진전하는 경우 보강재의 영향으로 인해 허용 가능 균열이 210mm에서 290mm로 약 80mm 증가하였다. 상갑판에서 해치 코밍으로 균열이 진전하는 경우는 200mm에서 280mm로 약 80mm 증가하였다.

3) 보강재의 효과로 인해 Scenario 1의 경우 약 29%, Scenario 2의 경우 약 28% 피로수명이 향상되었다.

4) 해당 결과를 바탕으로 보강재 효과로 인해 취성 균열의 발생을 방지 및 피로수명을 향상시킬 수 있다고 판단된다. 또한 실제 구조물의 치수, 피로이력 및 응력에 따른 보강재의 영향에 대한 추가 연구가 필요하다고 판단된다.

후 기

이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2011-0030013).

이 논문(저서)은 2018년 교육부와 한국연구재단의 이공학 개인기초연구사업의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2017R1D1A1B03035811).

ORCID: Tae-Woo Kang: <http://orcid.org/0000-0002-1072-020X>

References

1. Gyubaek An, Hong-Yeal Bae, Byung-Doo Noh, Young-Ho An, Jong-Kyo Choi, Wanchuk Woo and Jeong-Ung park, Design for avoid unstable fracture in shipbulding and offshore plant structure, *Journal of Welding and Joining*, 33 (1) (2015), 35-40
<http://dx.doi.org/10.5781/JWJ.2015.33.1.35>
2. 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 47kgf/mm^2 to actual ship hull structure, Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., *Technical Review* 44-3 (2007), 1-5
3. Joung-Sig-Kim, Myeong-Soo Lee, Joung-Min Jung, Han-Geul Choi, Sang-Hoon Jeong, and Chang-Yong Kang, Effects of Si on the Characteristics of FCA Multi-Layer Weld Metal with 460MPa Yield Strength Grade Steels for Ships and Marine Structures, *Korean J. Met. Mater.*, 56 (7) (2018), 499-504
<https://doi.org/10.3365/KJMM.2018.56.7.499>
4. Joon Sik Park, Bo Young Jung, Gyu Beak An, Jong Bong Lee, Crack arrest Toughness of Thickness Steel Plate Welds for Ship Building, *Journal of KWJS*, 25 (4) (2007), 347-352
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2007.25.4.009>
5. Jeong Ung Park, Gyu Beak An, Fracture Toughness of Thick Steel Plate for Ship Building, *Journal of KWJS*, 25 (4) (2007), 353-357
6. IACS UR S33, Requirement for use of Extremely Thick Steel Plates, (2013)
7. Gyubaek An, Illwook Han, Jeongung Park, Wan Chuck Woo, A Basic Study on Brittle Crack Propagation Path with Ultra Large Steel Plate Weld Joints, *Journal of Welding and Joining*, 35 (6) (2017), 15-20
<https://doi.org/10.5781/JWJ.2017.35.6.3>
8. An Gyu Beak, Ryu Kang Mook, Park Joon Sik, Jeong Bo Young, Kim Tea Su, Lee Jong Sub, Brittle Crack Arrestability of Thick Steel Plates for Shipbuilding, *Journal of KWJS*, 28 (1) (2010), 47-53
<https://doi.org/10.5781/KWJS.2010.28.1.047>
9. Jose A. Alvarez, Carlos Gallo, Diego Ferreno, Federico Gutierrez-Solana, New Improvements in Crack Arrest Characterization Based on Intermediate Scale Tests and Their Application to Structural Steels, (2010)
10. Korea Resister, Rules for Classification of Steel Ship, *KR rule*, (2017)
11. Jonh A. Newman., The Effects of Load Ratio on Threshold Fatigue Crack Growth of Aluminum Alloys, *Doctor Dissertation*. Virginia Tech, (2000)
12. Yoshiya Yamaguchi, Hiroshi Yajima, Shuichi Aihara, Hitoshi Yoshinari, Kazuhiro Hirota, Masanobu Toyoda, Takaaki Kiyosue, Shigeru Tanaka, Taku Okabe, Ko Kageyama, Yuji Funatsu, Tsunehisa Handa, Tomoya Kawabata, Tokutaka Tani, Development of Guidelines on Brittle Crack Arrest Design- Brittle Crack Arrest Design for Large Container Ships, *Class NK TECHNICAL BULLETIN* (2010), 53-62
13. G. C. Sih, N. E. Ryan, R. Jones, Fracture Mechanics Technology Applied to Material Evaluation and Structure Design, (1982), 97-99
14. Dong Pil Cho, A Study on Structural Integrity According to the Defect Type for High Heat Input Weld, *In PNU, Thesis of master course*, (2012)