

ECA 기법을 이용한 해양구조물의 결함 평가

강범준¹·김유일^{1,†}·류철호²·기혁근³·박성건³·오영태³
인하대학교 공과대학 조선해양공학과¹
인하공업 전문대학 조선해양과²
대우조선해양 중앙연구소³

Flaw Assessment on an Offshore Structure using Engineering Criticality Analysis

Beom-Jun Kang¹·Yooil Kim^{1,†}·Cheol-Ho Ryu²·Hyeok-Geun Ki³·Sung-Gun Park³·Yeong-Tae Oh³
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, College of Engineering, INHA University¹
Department of Naval Architecture and Ocean Engineering, College of Engineering, INHA Technical College²
DSME R&D Institute, Daewoo Shipbuilding and Marine Engineering, Co., Ltd.³

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Offshore structure may be considerably vulnerable to fatigue failure while initial flaw propagates under cyclic loading, so crack propagation analysis/fracture/yield assessments about initial flaw detected by NDT are necessarily required. In this paper, case studies have been conducted by flaw assessment program using engineering criticality analysis (ECA) approach. Variables such as flaw geometry, flaw size, structure geometry, dynamic stress, static stress, toughness, crack growth rate, stress concentration factor (SCF) affected by weld are considered as analysis conditions. As a result, the safety of structure was examined during fatigue loading life. Also, critical initial flaw size was calculated by sensitivity module in the developed program. The flaw assessments analysis using ECA approach can be very useful in offshore industries owing to the increasing demand on the engineering criticality analysis of potential initial flaws.

Keywords : Flaw assessment(결함평가), Fracture mechanics(파괴역학), Crack propagation analysis(균열진전해석), Initial flaw(초기 결함), BS7910(영국표준7910)

1. 서론

조선해양산업의 차세대 성장동력으로서 해양플랜트가 주목 받고 있다. 심해 자원을 채굴하는 해양플랜트산업은 이전보다 고도의 기술력이 요구되며 심해 자원의 경제성이 완전히 소모될 때까지 해양플랜트 설비가 안정적으로 운영되어야 하는 특성이 있다. 해양구조물의 극후판으로 구성되는 구조부재의 경우 용접으로 연결되어 있기 때문에 미세한 초기결함이 존재할 가능성이 크다. 비파괴 검사 과정 중에 구조부재에 초기결함이 발견 된다면 지속적인 파랑하중으로 유기되는 반복 하중을 받아 초기결함이 진전 하면서 해양구조물은 피로파괴에 상당히 취약할 수 있다. 따라서 주어진 피로 하중 수명 동안 해양 구조물이 구조적으로 안전한 지에 대한 평가 해석이 필요하며 이를 테면 용접 부나 구조적 취약부에 존재하는 초기결함의 정보를 이용한 파괴역학 기반의 결함 평가 해석이 수행되어야 한다.

파괴역학 기법을 이용한 피로 수명 예측 및 구조 안전성 평가를 위한 연구가 국내에서 활발히 이루어졌다. Noh, et al. (1993)는 독립형 LNG탱크의 총체적인 구조안전성 평가과정을 다뤘다. 파랑 응력의 장기분포 해석을 수행하여 S-N선도를 이용한 피로 강도 평가를 실시하였고 LBF(Leak Before Failure)이론을 바탕으로 관통균열의 진전해석을 수행하여 급속 취성파괴에 대한 안전성을 검증하였다. Yim and Byun (1993)은 BSI PD 6493의 3단계 평가방법에 균열 성장 효과를 고려한 건전성 평가 방법과 균열의 안정성장을 엄밀히 고려할 수 있는 안정성 평가방법 (Stability Assessment Method: SAM)과 더불어 소성붕괴를 평가하는 극한 하중해석을 고려한 건전성 평가방법을 정식화 하였다. Jeon, et al. (2001)은 선체 구조에서 피로손상을 받기 쉬운 용접 부위인 T형 이음부 및 호퍼 너클 이음부 모델의 피로실험 및 선형탄성 파괴역학을 이용한 피로균열 진전해석을 수행하여 피로 균열 진전 수명을 정확히 예측하였다. Kim, et al. (2002)은 구조

물에 있는 균열 길이와 K(stress intensity factor)값의 관계를 이용하여 등가분포응력을 구하고 Dugdale 모델을 기초로 한 피로 수명평가 프로그램에 입력하여 균열 전파 수명을 추정하는 방법의 유효성을 살펴보았다. Kim, et al. (2008)은 피로균열진전해석 프로그램인 AFGROW를 이용하여 용접 잔류응력을 고려한 피로 균열진전해석을 수행하였다. 용접에 의한 잔류응력을 평가하기 위하여 열 탄 소성 해석을 수행하였고 계산된 결과와 Kim, et al. (2008)에서 제안한 S-N 선도를 이용하여 전체피로수명을 예측하였다. Yoon and Kim (2013)은 AI-5083와 9%니켈강으로 이루어진 독립형 탱크에 대하여 구조해석을 실시하였고 이를 바탕으로 응력 집중 부에 대하여 균열 진전 해석 및 균열에 대한 구조 안전성을 평가하였다. 또한 상용 결함 평가 프로그램인 CRAKWSE와 자체 개발한 스프레드 시트의 결과를 비교하여 정확성을 입증하였다.

본 연구에서는 ECA용 결함 평가 해석 프로그램을 개발하여 해양구조물의 구조적 취약부에 위치한 초기결함에 대하여 다양한 결함 평가 해석을 수행하였다. 개발된 프로그램은 TW사의 상용 결함 평가 프로그램인 CRAKWSE와 동일하게 영국표준 (BSI, 2005)에 명시된 결함 평가 절차를 따르고 있으며 사용자의 편의성을 위해서 CRAKWSE의 파괴/항복 평가에서만 가능했던 기능인 민감도 해석 모듈을 추가 개발하여 균열진전해석과 균열진전해석/파괴/항복 평가에서도 수행 가능토록 적용시켰다. 본문에서는 개발된 프로그램을 이용하여 초기결함이 존재하고 있는 해양 구조물에 대한 ECA를 실시하였다. 해석 조건으로 결함 형상, 결함 크기, 구조부재의 형상, 구조부재의 재료 상수, 결함이 위치한 구조부재의 구조적 불 일치, 용접부 영향에 의한 응력집중계수, 동 하중, 정 하중, 파괴인성, 균열의 진전속도 등을 고려하였다. 앞서 언급된 해석 조건을 바탕으로 기본적인 결함 평가 해석인 균열진전해석, 파괴/항복평가, 균열진전해석/파괴/항복 평가를 실시하였고 또한 사용자의 편의성을 위해 개발된 민감도 해석을 실시하여 다양한 인자들에 대한 불 확실성을 검토해보았다. 특히 개발된 프로그램에 내재된 임계치 해석 모듈을 이용하여 주어진 동 하중, 정 하중 기간 동안에 허용 가능한 최대 초기결함 크기들을 구해보았다. 만약 비 파괴 검사 과정 중에 계측된 초기결함 크기와 임계치 해석으로 구한 결함 크기들을 비교해 보았을 때 허용 가능하다고 판단된다면 피로강도 개선을 위한 용접 후 열처리를 안 해도 되므로 경제성 측면에서 유지보수 비용을 절감 할 수 있을 것으로 예상된다. 최근 들어 선급 및 선주에서 허용 가능한 최대 초기결함 크기를 요구하는 사례가 늘고 있어 본 프로그램의 ECA기법을 이용한 결함 평가 해석이 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

2. 이론적 배경

2.1 결함 평가 해석 절차

파괴/항복 평가는 구조부재의 형상, 결함 형상과 크기, 일차응력(primary stress), 이차응력(secondary stress), 응력집중계수를

토대로 구해진 참조응력과 응력확대계수를 이용하여 항복 비(Lr)와 파괴 비(Kr)를 구하고 failure assessment diagram(FAD)를 통해 파손 여부를 평가한다. Fig. 1은 파괴/항복평가 절차를 보여주는 그림으로서 정적 응력과 결함 형상이 주어지면 참조응력 및 응력확대계수를 계산하고 해당구조부재의 재료 상수인 인장강도와 파괴인성을 가지고 파단과 항복에 대한 판단을 내리는 절차를 나타낸다.

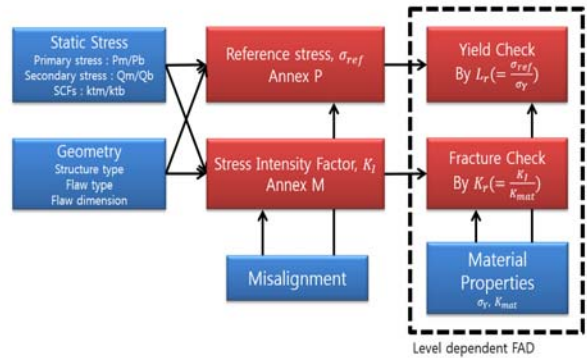


Fig. 1 Fracture/yield assessment procedure

결함의 파괴/항복 여부는 Fig. 2에 보인 FAD를 통해 알 수 있다. 실제 구조물의 파손은 일반적으로 취성파괴와 소성붕괴의 조합으로 나타나기 때문에 Fig. 2에서 FAD의 가로 축은 소성붕괴의 판단 기준이 되고 세로 축은 취성파괴의 판단 기준이 된다. 안전 영역과 파손 영역 사이의 경계선은 파괴역학적 이론으로부터 구축된 파손 임계 선을 나타낸다. 이때, 구조물이 가진 결함의 현재 상태는 FAD 상에서 하나의 점으로 표시 될 수 있다. 만약 이 점이 FAD 안쪽에 위치한다면 해당 결함은 허용가능한 것으로 판단할 수 있다.

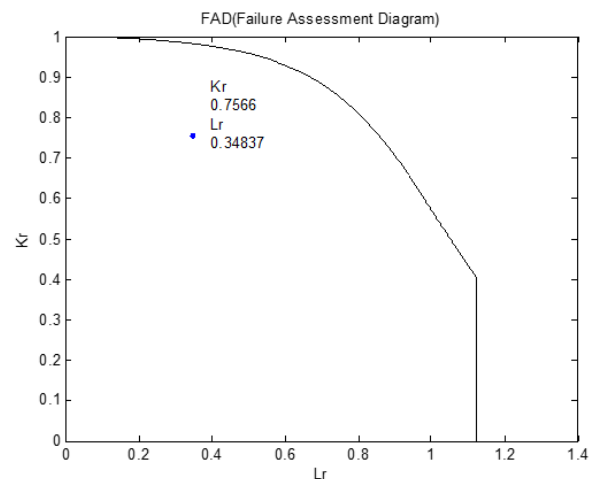


Fig. 2 Failure assessment diagram (FAD)

균열진전해석은 우선 막(membrane) 및 굽힘(bending) 응력으로 구성되는 일차응력 스펙트럼과 결함 형상, 크기, 응력집중계수 등의 조건을 통해 계산된 응력확대계수를 Paris 공식에 대입

하여 수행한다. 진전된 균열을 기준으로 다시 응력확대계수를 재 계산하여 반복 계산을 수행하는 과정을 거친다. Fig. 3은 균열진 전해석 절차를 나타내는 그림으로서 동적 응력 스펙트럼과 결함 형상이 주어지면 Paris의 공식을 수치 적분하여 균열의 진전을 계산하는 절차를 보여준다.

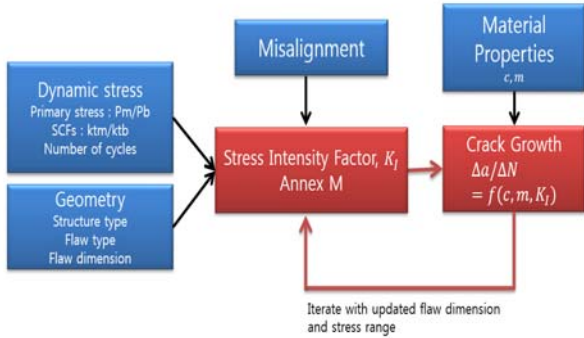


Fig. 3 Fatigue assessment procedure

균열진전해석/파괴/항복 평가는 균열진전해석과 파괴/항복 평가를 동시에 수행하는 과정이다. 균열이 성장하는 동안에 파괴/항복여부를 지속적으로 점검하여 결함의 영향을 종합적으로 평가할 수 있다. Fig. 4는 균열진전해석/파괴/항복 평가 절차를 보여준다.

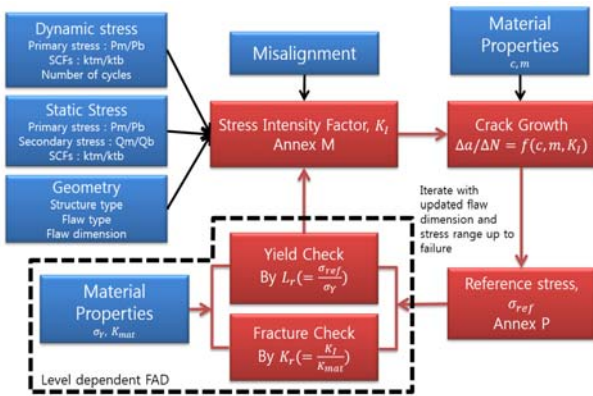


Fig. 4 Fatigue/fracture/yield assessment procedure

2.2 응력확대계수(Stress intensity factor)

응력확대계수는 결함이 진전하는데 큰 영향을 미치는 값으로 파괴/항복 평가의 경우 사용되는 계산 식은 식 (1)의 형태로 주어진다.

$$K_I = (Y\sigma) \sqrt{\pi a} \quad (1)$$

식 (1)에서 σ 는 작용 응력이고, a 는 균열의 크기이다. Y 는 결함 형상, 구조부재 형상, 응력집중계수, 용접부 영향, 구조부재 불일치(misalignment) 등과 같은 응력확대계수 계산 시 필요한 모든 조건들을 고려한 보정계수를 의미한다. 균열진전해석의 경우 동 하중을 받기 때문에 식(2)와 같은 형태로 주어진다.

$$\Delta K_I = (Y\Delta\sigma) \sqrt{\pi a} \quad (2)$$

균열진전해석과 파괴/항복 평가에 따라 식 (1)의 $Y\sigma$ 와 식 (2)의 $Y\Delta\sigma$ 에 대한 계산식이 다르게 정의 되며 이 식은 구조부재와 결함의 형상에 대한 계수와 응력집중계수 이외에 다양한 보정계수들의 곱으로 계산된다. 균열진전해석의 경우에는 작용응력으로 일차 응력만이 고려되며 이때 $Y\Delta\sigma$ 의 계산식은 다음 식 (3)과 같다.

$$(Y\Delta\sigma)_p = Mf_w [k_{tm}M_{km}M_m\Delta\sigma_m + k_{tb}M_{kb}M_b\Delta\sigma_b + (k_m - 1)\Delta\sigma_m] \quad (3)$$

식 (3)을 보면 동적 응력인 일차 막 응력($\Delta\sigma_m$)과 일차 굽힘 응력($\Delta\sigma_b$)뿐만 아니라 다양한 보정계수들이 계산식에 포함되어 있다. M, f_w, M_m, M_b 는 결함의 형상과 결함이 구조부재에 위치한 배열 형태에 관한 정보를 가지고 있으며 M_{km}, M_{kb} 는 국부적인 용접부 영향을 고려한 계수이다. K_{tm}, K_{tb} 는 구조적 불연속 부로 인한 응력집중계수를 의미하며 K_m 은 하중을 전달하는 구조부재들의 축 방향 혹은 각 불일치에 대한 정보를 포함하고 있다. 파괴/항복 평가의 경우 FAD를 통해 결함의 현재 상태를 평가할 수 있는데 영국표준7910에 따르면 평가 수준마다 적용되는 FAD가 상이하다. 수준이 높아 질수록 재료의 거동에 대한 보다 상세한 정보들이 요구되며 그에 따라 예측의 정확도가 점진적으로 상승하는 특징이 있다. 평가 수준 1의 경우 $Y\sigma$ 의 계산은 식 (4)에 보인 바와 같이 최대응력(σ_{max})개념이 도입된다.

$$Y\sigma = Mf_w M_m \sigma_{max} \quad (4)$$

최대응력은 응력집중계수, 구조부재 불 일치 계수, 일차응력과 용접에 의한 잔류응력으로 가정이 된 이차응력(Q)이 고려되며 다음 식 (5)로 구할 수 있다.

$$\sigma_{max} = k_{tm}P_m + k_{tb}[P_b + (K_m - 1)P_m] + Q \quad (5)$$

평가 수준 2와 3의 경우 정적 응력인 일차 막 응력(P_m), 일차 굽힘 응력(P_b)을 이용하여 계산한 식(6)과 이차 막 응력(Q_m), 이차 굽힘 응력(Q_b)을 이용하여 계산한 식(7)을 모두 더한 식 (8)으로 $Y\sigma$ 를 계산할 수 있다.

$$(Y\sigma)_p = Mf \left[k_{tm}M_{km}M_mP_m + K_{tb}M_{kb}M_b\{P_b + (K_m - 1)P_m\} \right] \quad (6)$$

$$(Y\sigma)_s = M_m Q_m + M_b Q_b \quad (7)$$

$$Y\sigma = (Y\sigma)_p + (Y\sigma)_s \quad (8)$$

2.3 참조 응력(reference stress)

참조응력은 파괴/항복평가에 필요한 항복 비를 계산하는데 필요하며 결함형상마다 다른 식으로 정의 된다. Fig. 5는 평판 표면 결함(surface crack) 의 형상을 나타낸다.

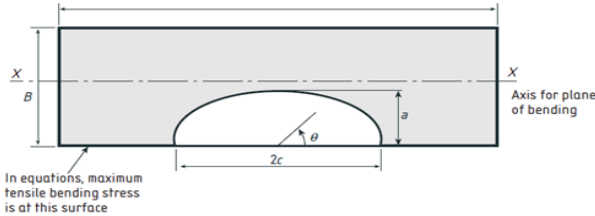


Fig. 5 Geometry of flat surface crack

평판에 있는 표면 결함의 참조응력은 일차 막 응력과 일차 굽힘 응력으로 계산되며 결함 형상이 반 타원형이므로 굽힘 저항률 유무에 따라 계산식이 다르다. 식 (9)의 경우는 굽힘 저항을 고려하였을 때이다.

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + \{P_b^2 + 9P_m^2(1 - \alpha'')^2\}^{0.5}}{3(1 - \alpha'')^2} \quad (9)$$

식(9)에서 P_b 는 일차 굽힘 응력이고, P_m 은 일차 막 응력을 의미한다. α'' 는 구조부재에서 균열을 제외한 남은 면적에 대한 항복응력을 계산하기 위한 보정계수이며 결함 깊이와 결함길이, 구조부재의 폭과 깊이 값으로 계산된다. 굽힘 저항을 고려하지 않았을 경우 계산식 (10)은 다음과 같다.

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + 3P_m\alpha'' + \{(P_b + 3P_m\alpha'')^2 + 9P_m^2(1 - \alpha'')^2\}^{0.5}}{3(1 - \alpha'')^2} \quad (10)$$

Fig. 6은 평판 관통결함 형상이며 직선형이므로 굽힘 저항은 생기지 않는다. 참조응력 계산식 (11)은 다음과 같다.

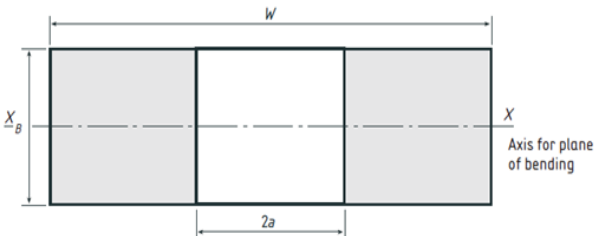


Fig. 6 Geometry of flat through thickness crack

$$\sigma_{ref} = \frac{P_b + (P_b^2 + 9P_m^2)^{0.5}}{3\left\{1 - \left(\frac{2a}{W}\right)\right\}} \quad (11)$$

식 (11)에서 W 는 구조부재의 폭이고 a 는 관통 결함 길이의 절반 값이다.

2.4 균열진전해석

$$\frac{da}{dN} = A(\Delta K)^m \quad (12)$$

균열 진전 율은 Paris 공식을 따르며 식 (12)와 같다. 여기서 A 와 m 은 재료상수이며 N 은 작용응력 사이클이고 ΔK 는 식 (2)로부터 계산된 응력확대계수 값을 사용하였다. 영국표준7910 에 따르면 재료상수는 해당 구조부재의 재질과 응력 비, 외부 조건에 따라 그 값이 결정된다. 본 연구에서는 응력 비를 1로 지정하였고 구조부재의 재질로 오스테나이트계 스테인리스 강을 결함 평가 해석 조건으로 사용하였다. 식 (12)는 1계 미분 방정식으로서 본 프로그램에서는 Runge-Kutta 4차법을 이용하여 수치적분하였다.

2.5 파괴/항복 평가

파괴/항복 평가에 필요한 인자들인 파괴 비와 항복 비의 계산식은 평가 수준마다 다르다. 평가 수준 1의 경우 파괴 비는 응력 확대계수와 파괴 인성으로 계산되며 다음 식 (13)과 같다.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} \quad (13)$$

항복 비는 참조응력을 흐름강도(flow strength)로 나누어 계산되고 이때, 흐름강도는 항복응력과 인장강도의 산술기하평균이다. 항복 비 계산은 다음 식 (14)를 따른다.

$$S_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_f} \quad (14)$$

평가 수준 2와 3의 경우 파괴 비 계산은 다음 식 (15)와 같으며 식 (13)에서 보정계수 ρ 가 더해진다.

$$K_r = \frac{K_I}{K_{mat}} + \rho \quad (15)$$

보정 계수의 계산식은 일차응력과 이차응력 각각의 응력확대계수와 항복 비로부터 계산된 인자(χ)에 관한 식 (16)으로 표현된다. 인자를 계산하는 식은 식 (17)과 같고 항복 비는 참조응력과 항복응력으로 계산되며 식 (18)과 같다.

$$\rho = 0.1\chi^{0.714} - 0.007\chi^2 + 3 \times 10^{-5}\chi^5 \quad (16)$$

$$\chi = \frac{K_I^S L_r}{K_I^P} \quad (17)$$

$$L_r = \frac{\sigma_{ref}}{\sigma_Y} \quad (18)$$

3. 결함 평가 해석

3.1 결함 평가 해석 조건

해석 대상으로 선택한 구조물은 FPSO의 mooring anchor pile 로 중앙 평행부의 반경은 5.5 m이며 두께는 100 mm이다. 구조물에 작용하는 동 하중은 파일을 지반에 침투시키기 위한 해머링 하중으로 축 방향 면내 하중만 존재하며 정 하중은 FPSO의 운영 조건에서 최대 하중이다. 앵커 파일은 맞대기 이음 용접으로 제작이 되어 있으며 본 해석에서는 용접 토우 부에 결함이 존재하는 경우 파일링 시의 균열의 안전성 여부를 평가하였다. Fig. 7 은 균열이 존재하는 무어링 앵커 파일 형상이다.

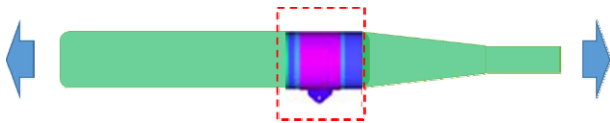


Fig. 7 Mooring anchor pile

해석 대상 결함의 최종 진전 길이를 파이프 직경으로 나눈 값이 매우 작아 평판으로 가정하여도 근사적으로 파이프 내부의 결함을 잘 표현할 수 있다. 결함 평가 대상 체의 형상은 폭(W)이 10000 mm, 두께(B)가 100 mm인 평판이고 결함의 길이(2c)는 11.5 mm, 깊이(a)는 7 mm, 용접이음길이(L)는 85 mm이다. Fig. 8은 구조부재와 결함 형상, 용접부에 관한 조건 값을 프로그램에 입력한 화면이다.

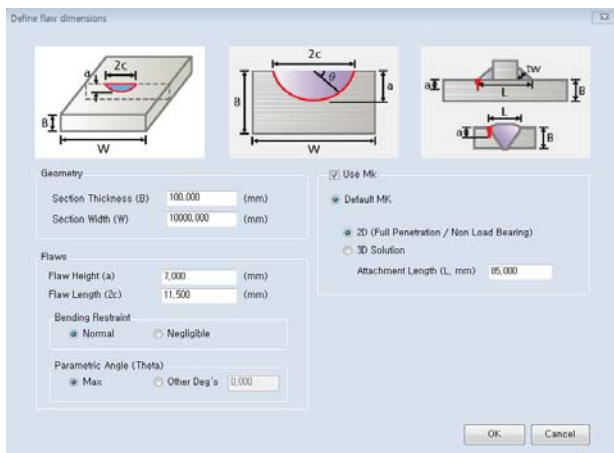


Fig. 8 Define flaw dimension

일반적으로 용접된 구조물은 하중을 전달하는 판의 중심축이 일치하지 않는 축 방향 혹은 각 불일치가 존재하며 이는 추가적인 응력집중을 유발하여 피로강도에 부정적인 영향을 미친다. 어긋난 구조부재의 투영 길이(l1, l2)는 각각 2000 mm 이고, 어긋난 높이(e)는 4 mm, 구조부재 두께(B)는 100 mm 이다. 구속된 이음은 0 mm 이므로, 영국표준7910에 따라 구속 계수(kappa)는 6으로 지정하였다. Fig. 9는 구조부재의 불 일치에 관한 조건 값을 프로그램에 입력한 화면이다.

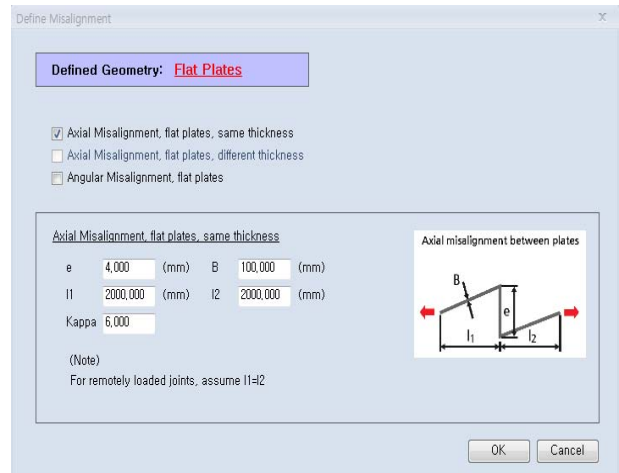


Fig. 9 Define axial misalignment

파괴/항복 평가 시 사용된 일차 막 응력(Pm)은 138 MPa, 일차 굽힘 응력(Pb)은 0 MPa, 이차 막 응력(Qm)은 414 MPa 이차 굽힘 응력(Qb)은 0 MPa다. Paris 상수는 영국표준7910에 명시된 용접부에 있는 결함에 대한 값들을 사용하였다. 기울기가 두 단계로 구분되는 피로 균열 성장을 선도를 적용하였고 이때, 응력확대계수 하 한계점(ΔK_{th})은 $63 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 이고 천이 되는 점은 $144 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 다. 각 단계마다 사용되는 재료상수 값 들은 Table 1과 같다. 재료 물성치인 인장강도, 항복강도, 영 계수, 포 아송 비, CTOD 값은 Table 2의 값을 사용했다. 작용한 동적 응력 스펙트럼은 Table 3과 같다.

Table 1 Paris constants

Material	A	m	$\Delta K(N/mm^{3/2})$
Steel, including austenitic	2.1e-17	5.1	63
	1.29e-12	2.88	144

Table 2 Tensile properties

Yield strength	Tensile strength	Young's modulus	Poisson's ratio	CTOD
414 MPa	517 MPa	2.06e5 MPa	0.3	0.2 mm

Table 3 Dynamic stress spectrum

Cycles(N)	$\Delta\sigma_m$ (MPa)	$\Delta\sigma_b$ (MPa)
265.5	275	0
796.5	250	0
265.5	200	0
265.5	175	0
265.5	150	0
796.5	125	0
1858.5	100	0
11151	50	0
79915	25	0

3.2 결함 평가 해석 결과

상기에 명시된 조건을 토대로 결함의 안전성을 알아보기 위해 균열진전해석, 파괴/항복 평가, 균열진전해석/파괴/항복평가, 그리고 다양한 민감도 해석들을 실시하였다.

첫 번째로, 초기결함이 동적 응력 스펙트럼을 받는 동안 진전하는 양상을 알 수 있는 균열진전해석을 실시하였다. Fig. 10은 균열진전해석 결과로서 초기균열이 점진적으로 성장하는 모습을 보여주고 있는 균열진전선도이다.

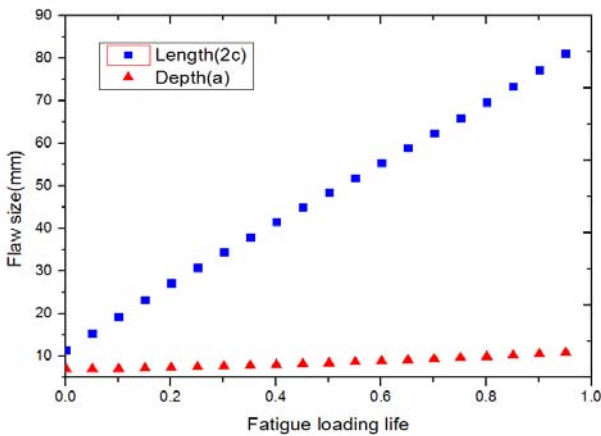


Fig. 10 Flaw size chart of fatigue assessment

Fig. 10에 보인 바와 같이 초기균열 길이가 11.5 mm, 깊이가 7 mm고 주어진 피로 하중을 받은 후에 최종균열길이는 85.17 mm 깊이는 11.23 mm로 균열이 진전됨을 알 수 있었다. 또한 구조부재의 치수를 고려해 봤을 때 최종균열길이와 깊이가 구조부재의 폭(10000 mm)과 두께(100 mm)보다 작으므로 균열이 성장하면서 구조부재를 관통하지 않은 것을 알 수 있었다.

두 번째로, 최대 응력 하에서의 정적 파단 여부를 판단하기 위해 파괴/항복 평가를 실시하였다. 평가 수준은 20이며 마찬가지로 3.1절의 해석 조건에 명시된 조건 값들을 사용하였다. Fig. 11은 FAD를 통해 수행된 파괴/항복 평가 결과를 보여준다.

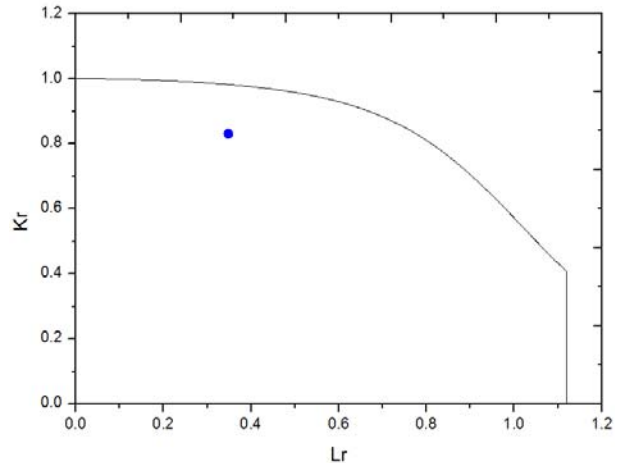


Fig. 11 FAD chart of fracture/yield assessment

Fig. 11에 보인 바와 같이 점검 점의 가로 축의 좌표를 의미하는 항복 비 값이 0.348, 세로 축의 좌표인 파괴 비 값이 0.831이다. 점검 점이 FAD 안쪽에 위치하므로 항복 및 파괴에 대해 안전함을 알 수 있었다. 균열진전해석의 경우와 달리 파괴/항복에 대한 균열의 안전성 평가에서는 외력으로 정적 응력인 일차응력과 이차 응력 성분들이 고려되었다.

세 번째로, 균열진전해석과 동시에 파괴/항복 평가를 수행하는 균열진전해석/파괴/항복 평가 해석을 실시하였다. 균열진전해석 결과는 첫 번째 결함 평가 해석인 균열진전해석과 동일한 동적 응력 스펙트럼을 사용했기 때문에 Fig. 10과 동일하다. Fig. 12는 균열진전해석과 동시에 FAD를 통해 수행된 파괴/항복 평가 결과를 보여준다.

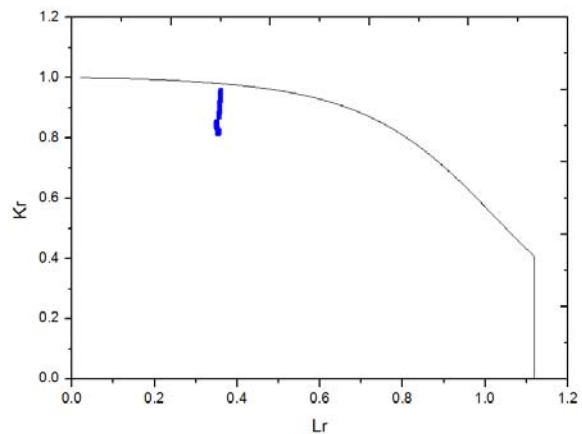


Fig. 12 FAD chart of fatigue/fracture/yield assessment

Fig. 12에 보인 바와 같이 현재의 상태를 나타내는 점검 점들이 모두 FAD 안쪽에 위치하므로 피로 하중 수명 기간 동안 항복 및 파괴에 대해 안전함을 알 수 있었다. 상기의 결과들은 해석 조건으로 주어진 결함 및 하중의 크기, 파괴의 기준이 되는 파괴 인성 값들이 결정론적으로 결정된 경우의 결과로서 해석 조건에 내재된 필연적인 불확실성에 대한 고려가 되지 않는 단점을 가지고 있다. 따라서, 해석 조건들의 불확실성에 대한 검토를 위해 다양한 해석 인자들에 대한 민감도 해석을 실시하였으며, 또한

임계 균열의 크기를 도출할 수 있는 임계치 해석을 추가적으로 수행하였다.

먼저, 초기 균열의 길이를 변화시켜 가며 균열진전해석에 관한 민감도 해석을 실시하였다. 사용된 민감도 인자는 결함의 표면 길이이며 최소값은 10 mm 최대값은 20 mm로 정했고 분할 개수는 5개로 설정하였다. 초기결함 깊이는 앞서 3.1절에서 명시된 결함 깊이인 7 mm로 고정하였다. Fig. 13은 결함 길이에 대한 균열진전해석의 민감도 해석 결과를 보여준다. 예상된 바와 같이 초기 균열의 길이가 커질수록 최종 균열의 길이 또한 커짐을 확인할 수 있었으며 상대적으로 균열의 깊이의 변화는 작게 나타남을 알 수 있었다.

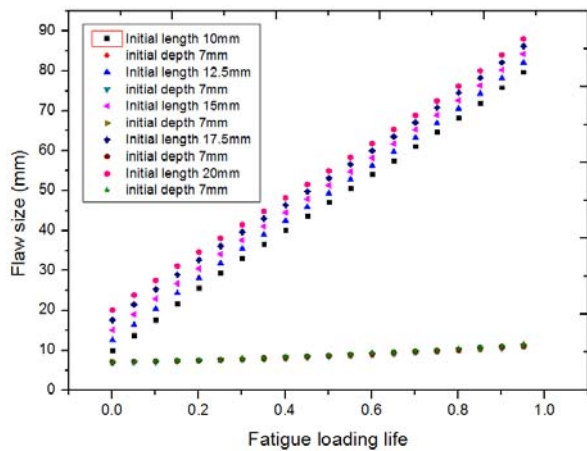


Fig. 13 Flaw size chart of fatigue sensitivity assessment

일차 막 응력에 대한 불확실성을 평가하기 위해 파괴/항복 평가에 관한 민감도 해석을 실시하였다. 사용된 민감도 인자는 일차 막 응력이고 최소값은 150 MPa, 최대값은 350 MPa로 설정하였으며 분할 개수는 5개로 하였다. 다른 해석 조건들은 앞서 3.1절에 명시된 조건을 사용하였다. Fig. 14는 파괴/항복 평가에 관한 민감도 해석 결과를 보여준다. Fig. 14에 보인 바와 같이 일차 막 응력이 200 MPa 이상 일 때부터 점검 점들이 FAD 밖으로 위치하면서 파괴 및 항복에 대해 불안전함을 알 수 있었다.

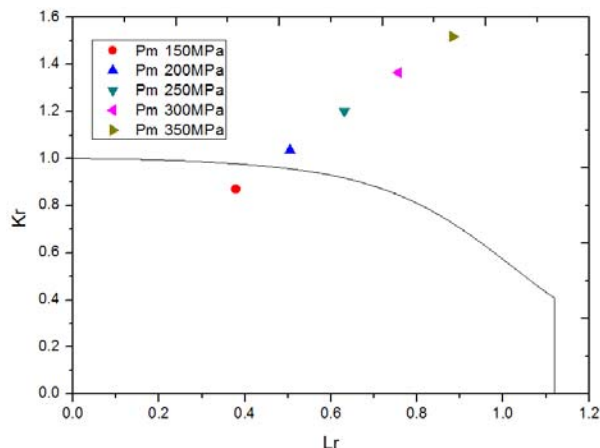


Fig. 14 FAD chart of fracture/yield sensitivity assessment

일차 막 응력의 영향에 대한 심도 있는 평가를 위해 균열진전 해석/파괴/항복 평가해석에 관한 민감도 해석을 실시해보았다. 사용된 민감도 인자는 일차 막 응력이고, 최소값은 50 MPa, 최대값은 150 MPa, 분할 개수는 5개로 설정하였다. Fig. 15는 균열진전해석/파괴/항복 평가에 관한 민감도 해석 결과를 보여준다. Fig. 15에 보인 바와 같이 일차 막 응력이 150 MPa 일 때 점검 점이 평가 선도에 닿으면서 파괴 및 항복에 불안전함을 알 수 있었다. 나머지 일차 막 응력이 150 MPa 보다 작은 4가지의 경우는 점검 점들이 모두 FAD 안 쪽에 위치하므로 파괴 및 항복에 대해 안전함을 알 수 있었다.

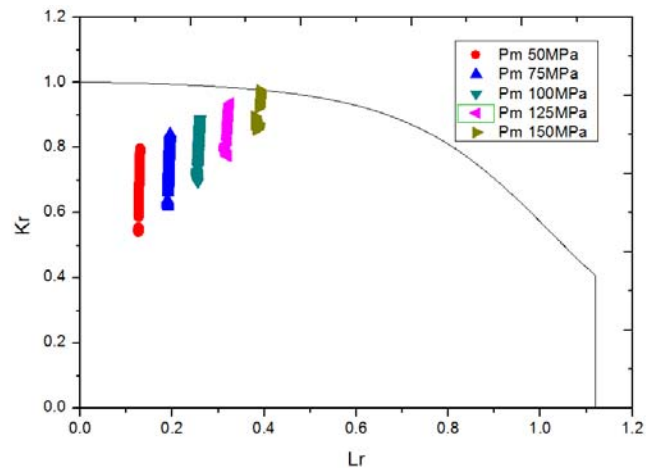


Fig. 15 FAD chart of fatigue/fracture/yield sensitivity assessment

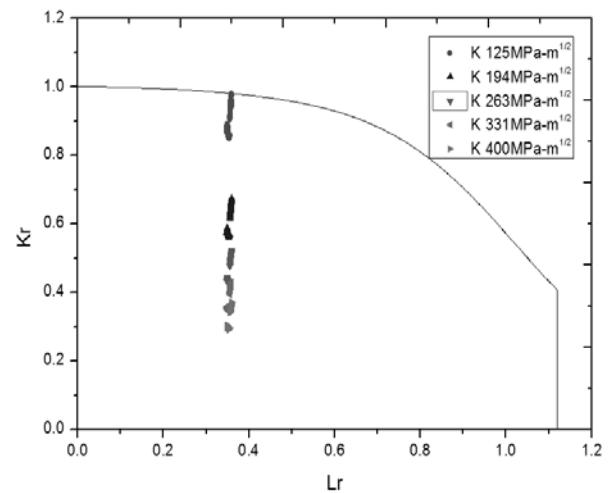


Fig. 16 FAD chart of fatigue/fracture/yield sensitivity assessment

균열의 파단을 유발하는 파괴인성에 대한 민감도를 파악하기 위해서 3.1절에 명시된 조건인 CTOD 값 대신에 파괴인성(K) 값을 민감도 인자로 사용하여 민감도 해석을 실시하였다. 최소값은 $125 \text{ MPa} \sqrt{m}$, 최대값은 $400 \text{ MPa} \sqrt{m}$, 분할 개수는 5개로 고정하였다. Fig. 16은 균열진전해석/파괴/항복 평가에 관한 민감도 해석 결과를 보여준다. Fig. 16에 보인 바와 같이 파괴인성

(K) 값이 $125 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 일 때 점검 점이 FAD에 닿아 파괴 및 항복에 불안전함을 알 수 있었다. 파괴인성 값이 $125 \text{ MPa} \sqrt{m}$ 보다 큰 나머지 경우에는 점검 점들이 모두 FAD 안쪽에 위치하므로 파괴 및 항복에 안전함을 알 수 있었다.

마지막으로 주어진 조건에서 초기 임계 균열 길이(2c) 및 깊이 (a)의 조합을 찾기 위해 임계치 해석을 수행하였다. 임계 균열 길이를 찾기 위해서는 사용자가 균열 길이에 대한 조건을, 임계 균열 깊이를 찾기 위해서는 사용자가 균열의 깊이에 대한 조건을 명시하도록 되어 있으며 본 계산의 경우 균열의 길이(2c)를 10 mm~50 mm 사이에서 변화하도록 지정하였다. 임계 균열의 크기를 결정하기 위해서는 균열의 길이 및 깊이의 수많은 조합에 대한 균열진전 해석/파괴/항복 평가를 반복적으로 수행하여야 하므로 계산 시간에 대한 부담이 발생하게 된다. 본 연구에서는 임계치 해석의 효율화를 위해서 종횡비가 1인 경우에 대한 해석을 먼저 수행하여 임계치를 찾은 후 균열의 길이 및 깊이를 각각 감소 및 증가시켜 가면서 임계치를 찾는 방법을 택하였다. Fig. 17은 허용가능한 최대 초기 결함을 찾기 위해서 실시한 임계치 해석 결과를 보여준다.

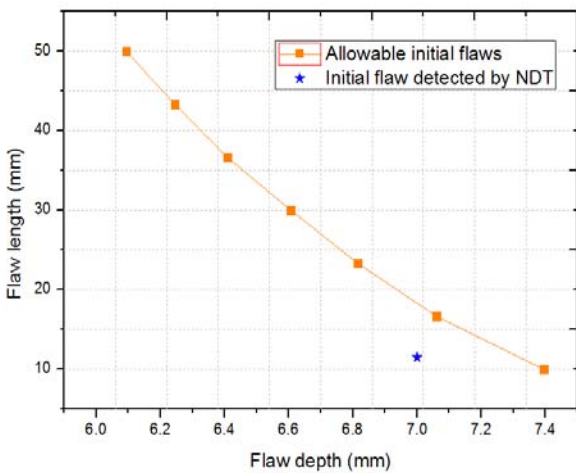


Fig. 17 Allowable flaw size chart of critical flaw size assessment

Fig. 17에 보인 바와 같이 사용자가 정해진 균열 길이 마다 허용 가능한 최대 초기 균열 깊이가 계산되었다. 민감도 해석에 입력된 분할개수가 7개 이므로 7급 쌍의 균열 크기가 도출되었으며 자세한 균열 크기들은 아래 Table 4와 같다.

Table 4 Allowable flaw size results

Count	Depth(mm)	Length(mm)
1	6.094	50.000
2	6.245	43.333
3	6.409	36.667
4	6.607	30.000
5	6.815	23.333
6	7.061	16.667
7	7.395	10.000

4. 결론

본 논문에서는 BS7910의 절차에 따라 결함을 평가할 수 있는 ECA용 결함 평가 프로그램을 개발하고 이를 이용하여 해양구조물의 구조부재에 존재하는 초기결함에 대한 결함 평가 해석을 실시하였다. 균열진전해석, 파괴/항복 평가, 균열진전해석/파괴/항복 평가 해석뿐만 아니라 추가적으로 각 평가마다 민감도 해석을 실시하여 사용된 인자에 대한 불확실성을 검토해보았다. 주어진 해석 조건에 따라 수행된 해양구조물의 결함 평가 결과, 균열의 안전성을 나타내는 점검 점들이 모두 FAD 안쪽에 위치함을 확인하였으며 이를 토대로 해당 결함은 피로 하중 수명 기간 동안 파괴 및 항복에 대해 안전하다고 평가 할 수 있다.

균열의 안전성에 영향을 미치는 다양한 인자들에 대한 불확실성을 고려하기 위해 입력 변수들에 대한 민감도 해석을 수행하였다. 민감도 해석 결과를 보면 구조물에 작용하는 일차 막 응력 및 파괴인성 등에 따른 균열의 안전도는 매우 민감하게 변화함을 확인할 수 있었으며 해당 변수에 대한 불확실성을 합리적으로 평가할 필요가 있음을 확인할 수 있었다. 또한, 비 파괴 검사로 얻어진 균열의 크기를 토대로 균열의 안전성에 대한 판단을 쉽게 내리기 위해 주어진 조건 하에서의 임계 균열 크기에 대한 임계치 해석을 수행하였으며 그 결과로 다양한 균열의 길이 및 깊이에 대한 임계치를 도출하였다.

비 파괴 검사 과정을 통해 측정되는 초기 결함 크기는 내재된 불확실성으로 인해 특정 확률 분포를 따른다고 가정할 수 있다. 초기결함 크기가 결함 평가 해석에 미치는 영향이 매우 크므로 향후에는 주어진 하중 조건 하에 파손 될 확률을 도출 해 낼 수 있는 신뢰성 기반의 해석 모형을 추가로 개발할 예정이다.

후기

본 연구는 (주)대우조선해양의 지원으로 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며 산업통상자원부 해양플랜트 특성화 대학의 지원을 받아 수행되었습니다. 연구비 지원에 감사드립니다.

References

British Standard Institution (BSI), 2005. *Guide to methods for assessing the acceptability of flaws in metallic structures*. BS7910.

Jeon, Y.C. Kim, Y.I. Kang, J.K. & Han, J.M., 2001. A Study on Fatigue Life Prediction of Welded Joints through Fatigue Test and Crack Propagation Analysis. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), pp.93-106.

Kim, C.W. Nho, I.S. & Do, K.S., 2002. A Study on

the Fatigue Crack Propagation Analysis Using Equivalent Stress Distribution. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 39(2), pp.61-68.

Kim, K.S. Shim, C.S. Kwon, Y.B. Ko, H.S. Ki, H.G. & Viswanathan, K.K., 2008. A Study of Crack Propagation and Fatigue Life Prediction on Welded Joints of Ship Structure (II). *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 45(6), pp.679-687.

Nho, I.S. Nam, Y.Y & Lee, H.S., 1993. Structural Safety Assessment of Independent Spherical LNG tank(2nd report) -Fatigue Crack Propagation Analysis Based on the LBF Theory-. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 30(4), pp.74-82.

Yim, S.J. & Byun, T.U., 1993. The Integrity Assessment Method of Initially Cracked Structural Component by Reliability Analysis. *Transactions of the Society of Naval Architects of Korea*, 30(2), pp.161-176.

Yoon, K.J & Kim, M.H., 2013. Engineering critical assessment of material for IMO independent tank Type-B LNG tank structure. *The Annual Autumn Conference*, Ulsan, 7-8 November 2013, pp. 800-804.



강범준



김유일



류철호



기혁근



박성건



오영태