



THEME

05

선박 및 해양구조물의 신뢰성기반 설계 소개

김성민 | 부산대학교 조선해양공학과, 박사과정 | e-mail : marukhan@pusan.ac.kr

김명현 | 부산대학교 조선해양공학과, 교수 | e-mail : kimm@pusan.ac.kr

이 글에서는 선박 및 해양구조물 분야에서 신뢰성 기반 관련 내용을 정리하고, 특히 최종한계상태(Ultimate Limit State) 및 피로한계상태(Fatigue Limit State) 설계에 관해 이루어지고 있는 최근 연구결과를 요약 정리하였다.

선박이나 해양구조물과 같은 대형구조물에 하중이 작용할 때 반응하는 양식은 작용하중의 종류와 크기, 구조물의 강성과 강도에 의해 결정된다. 하중이 작용할 때 구조물의 성능만족 여부는 구조물 붕괴, 손상발생 여부 혹은 과도한 변형 등으로 발생하는 한계상태를 초과하는가에 따라 판단된다.

전통적으로 선박이나 해양구조물은 경험에 기초한 선급규칙 등에 의하여 구조물의 안전성을 보장하는 방식으로 건조되어 왔다. 특히 역학적 원칙을 바탕으로 한 기초적 구조해석 결과에 따라 구조물의 건조를 위한 선급규칙이 제정되어 왔으며, 따라서 하중과 구조물의 모델, 파손 모드 및 허용기준 등에 대한 명확한 절차가 적용되지 못하여 다소 경험에 의존하여 정립되어 왔다. 반면 신뢰성 기반 설계방법은 하중 및 강도 평가에 있어서 존재하는 각종 불확실성을 보다 합리적이고 투명하게 산정할 수 있는 장점이 있다. 이러한 관점에서 보다 투명하고 합리적인 절차를 도출하기 위하여 선급기관들은 직접계산법에 기초한 신뢰성 기반 설계를 도입하고 있다.

이 글에서는 선박 및 해양구조물에 있어서 신뢰성 기반에 관련된 내용을 정리하고, 특히 최종한계상태(Ultimate Limit State) 및 피로한계상태(Fatigue Limit

State) 설계에 관해 이루어지고 있는 최근 연구결과를 요약 정리하였다. 이를 위하여 설계코드의 절차, 신뢰성 해석 방법 및 코드검정(code calibration) 절차 등을 포함하여 기술하였다. 또한 하중 및 하중의 효과와 함께 그에 수반되는 각종 불확실성과 하중이 작용할 때 구조물의 저항과 관련된 각종 불확실성에 대하여도 기술하였다. 신뢰성 기반 해석절차의 가장 중요한 요소는 각종 불확실성에 대한 적절한 통계적 기술의 적용에 있으므로 이에 따른 설계절차에 대하여 주안점을 두었다.

선박 및 해양구조물 신뢰성 연구 현황

최근 선박 및 해양구조물 신뢰성 분야 연구로는 하중 및 하중효과 산정 및 강도 산정에 관한 연구가 ISSC(International Ship and Offshore Structures Congress)를 중심으로, 다양한 변수들에 대한 확률론적 기술 및 신뢰성 기반 설계의 체계 확립에 대한 연구가 주로 이루어져 왔다. 선급 및 대학을 중심으로 선박에 신뢰성 기반 설계를 적용하기 위해 1964년 ISSC를 시작으로 지속적인 연구가 이루어져 왔으며, 특히 직접설계에 대한 적용 관점에서 많은 연구가 이루어

져 왔다. 최근에는 신뢰성 분석체계 및 허용기준 (Allowance criteria)에 관한 활발한 연구와 함께 코드 적용에 수반되는 코드교정(Code calibration)과 관련된 연구가 활발하게 이루어지고 있다.

선박 및 해양구조물의 신뢰성 해석 절차

선박이나 해양구조물이 설계수명 동안 수반되는 각종 위험에 대한 평가는 관련된 위험요소나 파손모드를 고려하여 결정되어야 한다. 일반적으로 위험도 평가(Quantitative Risk Analysis) 방법을 기반으로 설계수명 동안의 위험도 평가절차를 수립할 수 있다. 위험도 평가에서는 구조물의 노후화, 부식 및 수리·보수 체계 등을 고려하여 체계적인 절차가 수립되어야 한다. 하지만 일반적으로 위험도 평가 절차에서 자연재앙이나 인위적인 사고를 제외한 경우에 있어서는 구조신뢰성해석 절차를 적용한다. 원칙적으로 신뢰성 기반 설계는 목표파손확률을 결정하고, 정의된 한계상태에 따른 파손확률이 이보다 낮도록 설계하지만, 일반적으로 아래와 같은 요소를 고려하여 준확률론적 방법에 따라 코드검정을 바탕으로 신뢰성 해석절차를 확립한다.

한계상태의 정의

일반적으로 한계상태(Limit state)는 사용한계상태 및 최종한계상태의 두 가지로 구분된다(ISO 2394-1, 1998). 선박 및 해양구조물 분야에서는 한계상태를 사용한계상태(SLS: Serviceability Limit State), 최종한계상태(ULS: Ultimate Limit State), 피로한계상태 (FLS: Fatigue Limit State) 및 사고한계상태(ALS: Accidental Limit State)로 구분지어 사용하고 있다(ISO19900, 2002). 이 글에서는 이 중 최종한계상태(ULS) 및 피로한계상태(FLS)를 중심으로 기술하였다.

최종한계상태는 좁은 의미에서는 구조물에 극한하

중이 작용하여 붕괴하는 현상을 정의한다. 전통적으로 선체구조설계는 주로 항복기준을 바탕으로 이루어져 왔다. 하지만 주요사고 및 위험요소는 항복기준보다 최종강도기준과 밀접한 관계가 있다. 따라서 위험도평가 기반 ULS 평가절차가 선급규칙 정립에 매우 중요한 역할을 하고 있다. 항복기준으로부터 최종강도한계 상태로의 이행은 동일한 안전수준(safety level)을 유지하기 위해 설계에 사용되는 하중이 보다 낮은 발생빈도를 가지는 한편, 안전계수는 보다 높게 책정되어야 하므로 구조물의 하중지탱능력은 항복기준보다 높은 최종강도기준으로 책정되어야 한다. 일반적으로 최종한계상태는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$g() = R - \sum S_i \quad (1)$$

여기서, R 은 구조물의 하중지탱능력이고 S_i 는 i 번째 하중을 뜻한다.

피로한계상태는 일반적으로 육안으로 관측 가능한 피로균열의 발생 혹은 관통균열이 발생하는 경우로 정의된다. 선박이나 해양구조물의 최종파괴는 현저한 피로균열의 전파 이후 발생가능하다. 전통적으로 선박의 피로설계기준으로 사용되는 피로수명은 20년으로 선정되었으나 최근 JTP 및 JBP에서는 25년으로 선정하고 있으며, 시험편에 따라 피로시험을 바탕으로 구해진 S-N선도를 바탕으로 Miner-Palmgren 규칙에 의거하여 피로손상을 계산하고 있다. 피로한계상태는 식 (2)와 같이 정의된다.

$$g() = D_{lim} - D_a \quad (2)$$

여기서, D_{lim} 은 피로손상 파손기준이며 D_a 는 현재 상태에서의 피로손상을 나타낸다.

한편 다양한 균열성장특성을 고려하거나 구조물 잔여수명 평가 등이 필요한 경우에는 파괴역학적인

절차를 바탕으로 피로한계상태 설계를 수행한다. 파괴역학절차를 적용하는 경우에는 균열의 전파특성측정 데이터 등을 바탕으로 유지·보수절차를 확립할 수 있다. 균열전파특성은 식 (3)의 Paris의 법칙을 이용하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{da}{dN} = \begin{cases} C(\Delta K)^m & \text{for } \Delta K > \Delta K_{th} \\ 0 & \text{for } \Delta K \leq \Delta K_{th} \end{cases} \quad (3)$$

여기서, a 는 균열길이, N 은 하중반복횟수, C 는 균열전파상수, m 은 균열전파특성곡선의 기울기, ΔK 는 응력확대계수 및 ΔK_{th} 는 응력확대계수의 임계값을 나타낸다. 이 때 한계상태식은 식 (4)와 같다.

$$g() = a_f - a = a_f - \int_{a_0}^a da \quad (4)$$

여기서, a_f 는 최종 균열길이를 나타낸다.

파손확률의 정의

잘 알려진 바와 같이 구조물의 신뢰성은 주어진 기간 동안 정의된 한계상태(ULS 혹은 FLS)를 초과하지 않을 확률로 정의될 수 있다. 이와 보완된 개념으로 파손확률을 정의할 수 있으며 이는 식 (5)로 표시된다.

$$P_f = P[R \leq S] \quad (5)$$

목표신뢰성 및 기준기간의 정의

신뢰성 해석절차를 바탕으로 계산된 파손확률 P_f 는 허용할 수 있는 목표파손확률 P_{fj} 와 비교하여 고려된 한계상태 중 가장 가혹한 한계상태를 기준으로 구조물의 신뢰성을 결정하게 된다. 또한 목표신뢰성은 기준기간, 즉 1년 혹은 사용한계상태 기간 동안의 신뢰성 확보를 바탕으로 정의된다.

표 1 파손결과의 분류

| 파손결과 분류 | 집재적 결과 ¹⁾ | | |
|---------|----------------------|------|--------|
| | 인명손실 | 환경오염 | 경제적 손실 |
| 고 | H | S | VH |
| 중 | Me | Me | H |
| 저 | Mi | Mi | Mi |

1) Mi: Minor, Me: Medium, H: High, S: Significant, VH: Very High

파손결과(Failure consequence)

원칙적으로 목표신뢰성은 인명손상 혹은 부상, 환경파괴 및 경제적 손실 등을 바탕으로 파손결과를 산정하여 결정되며, 일반적으로 사용되는 파손결과예를 표 1에 정리하여 나타내었다.

하중 및 하중효과에 대한 확률론적 기술

선박 및 해양구조물에 작용하는 하중 산정 때 고려해야 할 불확실성은 정수하중, 파랑하중, 운항조건 및 피로하중 산정과 관련된 요소들이 있다. 정수하중에 관한 확률론적 모델은 이론적 방법 혹은 운항 중 관측 데이터를 바탕으로 산정한다. 하지만, 선박의 다양한 적하상태 및 밸러스트 상태를 고려한 정수하중 산정은 매우 불확실하여 실질적인 설계에 적용하기 위해서는 많은 어려움이 따른다. 한편 파랑하중 산정 시에는 해상환경 및 운항조건, 유체동역학적 해석에 사용된 방법의 종류 및 구조해석과 관련된 불확실성을 고려하여 산정한다. 또한 슬래밍 및 슬로싱 등 국부하중에 대한 불확실성에 대한 정확한 기술을 위하여 선급규칙에 의해 산정된 결과와 직접해석에 의해 산정된 국부하중의 교정에 관한 연구가 많이 이루어지고 있다. 특히 피로하중을 고려할 때는 특히 선박의 횡요중에 작용하는 피로하중에 관한 불확실성에 관한 연구결과가 최근 보고되고 있다.

한계상태 정의에 대한 확률론적 기술

한계상태에 대한 엄밀한 정의는 설계 및 신뢰성 분석에 있어 중요한 근간을 이룬다. 최종한계상태와 관련된 불확실성으로는 판과 보강재가 부착된 판의 좌굴강도 및 경계조건 선정에 따른 다양한 불확실성이 존재하며 또한 선체거더 최종강도에 대한 별도의 고려가 필요하다. 일반적으로 비선형 유한요소해석을 바탕으로 최종강도를 산정하며 실험결과와의 비교를 통해 검증을 수행한다. 하지만 초기변형이나 잔류응력 및 부식의 효과를 고려한 불확실성 산정에 관한 추가적인 연구는 진행 중이다. 피로한계상태 정의와 연관된 불확실성으로는 핫스팟 응력(Hot spot stress) 산정 방법, 적하상태에 따라 발생하는 평균응력 효과, 응력범위를 기술하는 Weibull distribution의 파라미터 선정 등에 따라 발생하는 불확실성에 대한 엄밀한 기술이 필요하다. 또한 피로시험에서 도출된 S-N선도와 실제 구조물에서의 피로파손에 사용되는 피로파손 기

준의 불일치에 따른 불확실성이 존재한다. 신뢰성 해석을 바탕으로 한 구조물의 검사 주기에 관련된 연구도 활발히 이루어지고 있다.

맺음말

이 글에서는 선박 및 해양구조물 분야 IMO Goal-based Standard와 IACS (International Association of Classification Societies) 선급공통규칙 관점에서 합리적인 설계를 위한 신뢰성 기반 설계에 대해 간략히 소개하였다. 신뢰성 기반 설계에 가장 큰 장애물은 하중 및 한계상태에 대하여 불확실성을 고려한 확률론적 기술에 있다. 따라서 최종한계상태 및 피로한계상태의 주안점을 두고 하중산정 및 한계상태 산정에 수반되는 각종 불확실성에 대하여 신뢰성 향상을 위한 연구동향에 대하여 소개하였다. 향후에는 인간에 의해 발생하는 인간 신뢰도 분석(Human Reliability Analysis)에 대한 많은 연구가 이루어질 것으로 판단된다.



기계 용어해설

와이센베르크 효과(Weissenberg Effect)

비커에 점성 액체를 담고 막대기를 밑바닥 중심축에 고정하여 비커를 회전시키면 액체가 막대기에 감기듯이 솟구쳐 오르는 현상.

웰드 본드법(Weld Bonding)

저항 스폿 용접과 본드 접착의 2가지 독립된 접합기술의 장점을 살려, 접합부분에 접착제를 발라 가접을 한 후 스폿 용접으로 접합하는 방법.

우물용 펌프(Well Pump)

얕은 우물에는 원심 펌프, 재생 펌프 등, 깊은 우물에는 수직형 사류다단 펌프, 유정용으로 왕복 펌프식과 기포 펌프 등 우물에 사용하는 펌프.

습식공기 펌프(Wet Air Pump)

저도(低度)의 진공을 만드는 경우, 기계 내부에 물을 봉입한 후 날개차로 회전시켜 원심력효과로 공기를 흡출하는 작용을 하는 진공 펌프.

용접전류(鎔接電流; Welding Current)

용접작업에 적합한 전류값으로, 용접을 시작하기 전에 먼저 회로에 장치되어 있는 전류계로 용접전류의 크기를 정함.

충격용접(衝擊鎔接; Percussive Welding)

합하고자 하는 2개 용접선의 맞댄 부분에 순간적으로 아크를 발생시켜 인접부분이 용융상태가 되는 동시에 양쪽 모재를 충격으로 압착시키는 방법.