

## SLA(안전수준접근법) 기반 IMO GBS 체제에서 선체구조의 구조신뢰성 해석 및 평가

박재홍, 정정호 (한국선급)

### 1. 서론

IMO는 2002년부터 조선 및 해운산업의 새로운 기준이 되는 GBS(Goal-Based new ship Standards)의 개발을 진행해 오고 있으며, 유럽을 중심으로 관련 연구 및 개발 작업들이 꾸준히 진행되어 오고 있다. 이는 국내 조선 및 해운산업에 많은 영향을 끼칠 수 있는 중대한 사항으로, 향후 정립될 GBS를 보다 국내 산업에 유리하도록 유도하여 불필요한 불이익을 받지 않기 위해서는 적극적인 연구와 참여를 통한 능동적인 사전 대응이 시급하다고 할 수 있다

IMO GBS는 규정론적 방법과 확률론적 방법의 두 가지를 병행하여 개발을 진행하고 있다. 규정론적 방법은 목표(goal)를 제시하고, 이를 달성하기 위한 기능 요건(functional requirements)을 선정하는 다음, 이를 만족시키는 하위 규정/규칙을 개발하고, 이들 규칙이 기능요건에 적합한 지를 절차에 따라 평가한다. 이와는 달리 SLA(Safety Level Approach) 기반의 GBS라고도 하는 확률론적 방법은 포괄적이고 총체적인 위험도 모델을 개발하고, 이에 따른 목표안전수준을 결정한 후, 확률론적 방법들을 사용하여 규정/규칙들이 이러한 목표 안전수준을 만족하도록 개발되고 있다.

이러한 GBS 절차와 개념으로 개발되는 규칙은 포괄적인 선박의 안전을 담보하며, 새로운 개념의 선박 개발이나 새로운 기술의 적용을 용이하게 하여 선박의 안전과 기술의 발전 두 가지를 모두 추구하고 있다. 그러나 특히 SLA 기반의 GBS 개발은 선박 설계에 적용된 예가 없는 새로운 개념이므로 IMO에서의 논의는 중·장기적 과제로 진행될 것으로 보이나, 조선 및 해운산업에 미치는 영향이 매우 클 것으로 예상된다.

SLA 기반 IMO GBS는 위험도 해석(risk analysis)에 그 기술적인 기반을 두고 있다. 절차상의 방법론으로써 대표적으로 공식안전평가(FSA, Formal Safety Assessment)가 있다. 위험도 해석은 다시 정성적(qualitative)인 것과 정량적(quantitative)인 것으로 나뉜다. 정성적인 해석의 방법으로는 HAZID, HAZOP, What-If 해석, FMEA 등 여러 방법들이 개발되어 있다. 정량적인 위험도 평가는 목적에 맞는 이론적/수치적/실험적인 연구 및 계산을 통해 수행될 수 있으며, 구조 강도 측면에서 활용될 수 있는 중요한 도구로는 구조신뢰성

해석(structural reliability analysis)을 들 수 있다.

선체구조의 신뢰성 해석은 구조물의 구성요소 또는 전체 구조물의 강도적 기능 요건에 대한 신뢰성을 정량적으로 해석하고 평가하여 구조물의 안전도 수준을 제시하는 것이다. 여러 설계 요소에 대한 불확실성을 통계적인 분석을 통해 표현하고 구조신뢰성 해석을 수행하여 파괴확률(probability of failure) 또는 신뢰도지수(reliability index)로 안전도를 구하여 허용안전수준과 비교, 평가함으로써 구조물의 합리적인 안전 설계를 추구한다. 허용안전수준은 통상 과거 사고 사례, 사회적 통념 및 전문가의 경험과 판단에 의하여 결정될 수 있다.

본 해설에서는 SLA 기반 IMO GBS 체제(Framework)에서의 구조신뢰성 기법의 내용과 그 적용 방안에 대해 알아본다.

### 2. SLA GBS와 구조신뢰성

#### 2.1 SLA 기반 IMO GBS 체제(Framework)

IMO에서는 규정론적 방법에 기반한 GBS의 개발은 2011년 현재 거의 완료(IMO MSC 86/5/2)되었고, 확률론적 방법에 기반한, 즉 SLA 기반 GBS의 개발에 대하여 논의가 진행 중이다. 덴마크 등과 일본이 IMO MSC에 제출한 문서(MSC 81/6/2, MSC 82/5/8 등)에 전반적인 내용이 잘 언급되어 있으며, 전체적인 체제를 간략히 표현하면 그림 1 및 표 1과 같다.

SLA 방법은 IMO 에서 신뢰성 있는 방법으로 직접 위험도 수준을 제어할 수 있는 안전도 열쇠(safety knob)를 제공하는 것이다. 그림 2는 SLA 기반 IMO GBS 체제를 바탕으로 하는 포괄적인 위험도 모델의 한 예이다. 우선 고위 수준 안전도 목표(top-level safety objective)를 승객, 선원, 환경 등 대상에 따라 분류하고, 각각에 대한 안전도 수준을 설정한다(Tier I). Tier II에서는 Tier I에서 설정된 목표를 달성하기 위한 기능 요건을 정의한다.

고위 수준 목표(top-level goal)는 역사적 통계 자료, 다른 산업 분야와의 비교, 전문가의 해석과 사회적 혹은 정치적인 요구에 의해 결정된다. 안전도의 측도가 되는 ALARP(As Low As Reasonably Practicable) 경계는 공식안전평가의 요소이며, 안전도 열쇠는 이 요소들을 제어하는 것이다. 안전도의

측도는 일반적으로 CAF(Cost of Averting a Fatality)나 CAT(Cost of Averting ton of Oil Spill) 등을 고려하여 IMO 등의 승인 기관에서 결정하게 된다.

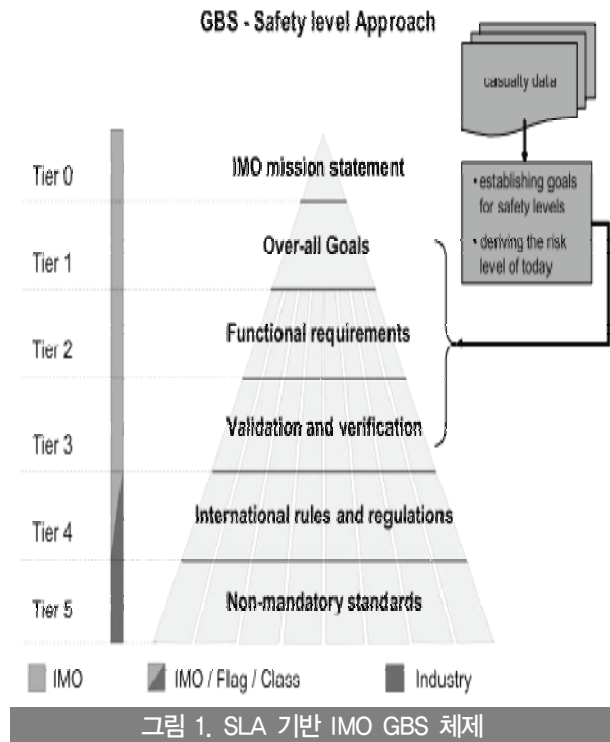
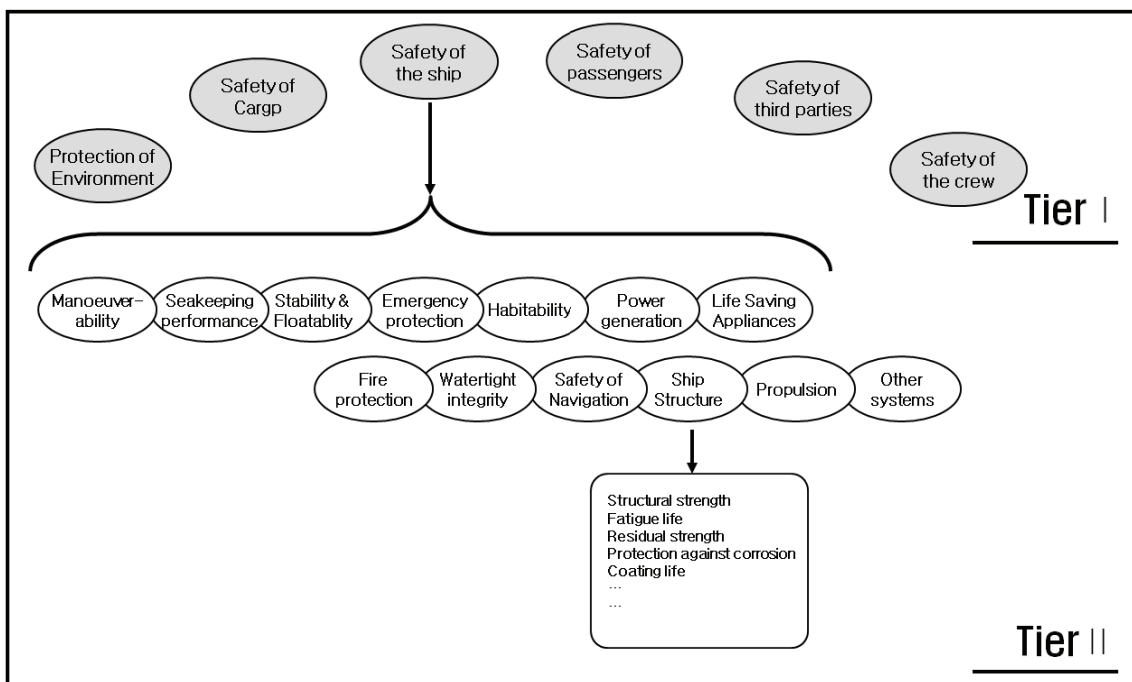


표 1. SLA 기반 IMO GBS 체제	
Tier I (목표)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- GBS의 목표 개발 절차는 다음과 같다. 우선 목표/대상을 정의한다. 이 과정에서 위험 종류 별 (개인별 위험도, 사회적 위험 및 환경 위험 조건) 허용 위험도 수준을 결정한다. 이를 위하여 현재 작업 환경에 따른 위험도 수준을 조사한다. ALARP 원칙을 적용하여 허용 위험도 수준의 목표를 결정한다.</li> <li>- 목표 안전도 수준은 IMO에서 결정한다. 안전도 목적은 몇몇의 하부 범주로 나뉘는데, 하부 범주는 승객, 선원, 환경 그리고 선박 및 화물의 안전도 등으로 분류된다. 즉 총체적인 허용 위험도 수준 또는 사상자 형태 별로 개별적인 위험도 수준을 결정한다.</li> <li>- 총괄적인 목표 안전 수준은 기능 요건에 따라 분류된다.</li> </ul>
Tier II (기능요건)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 목표 기능 및 시스템을 구성하는 위험도 모델을 개발하고, 이 목표 수준을 만족시키기 위한 기능 요건을 결정한다. 이를 위하여 적절한 해양 사고 시나리오를 작성하고 목표 위험도 모델을 개발한다. 이 시나리오를 포함하고 있으며 적절히 제어할 수 있는 기존의 규정을 조사하고 제시된 목표를 실현하기 위한 기본적 기능요건을 도출한다. FSA등의 규칙 개발 방법을 사용한다.</li> </ul>
Tier IV (선박규정)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- 국제 규정, IMO 강제 규정, 선급 및 국제 기준 그리고 정부 법규 등이 목표를 성취할 수 있도록 개발 및 적용되어야 한다.</li> </ul>



## 2.2 IMO GBS 체계에서의 구조신뢰성(SRA)

구조강도에 대한 확률론적 접근법은 모델, 하중, 제원, 물성치, 구조 모델 등이 가지고 있는 여러 불확실성을 고려하여 구조물의 파괴확률을 구하는 방법이다. 가장 간단한 형태의 예로, 구조물의 저항능력을  $R$ , 구조물에 작용하는 하중을  $L$  이라 하고, 이들을 임의의 확률변수로 가정하면, 한계상태식은  $g(R, L)=R-L$ 과 같이 정의될 수 있다. 이 때, 한계상태식이 음이 되는 영역( $g \leq 0$ )에서 구조물은 파괴된다고 할 수 있으며, 이 때의 확률을 계산하여 파괴확률을 얻을 수 있다. 이러한 기법의 가장 대표적인 것으로 구조신뢰성 해석(SRA, Structural Reliability Analysis)을 들 수 있다.

구조신뢰성 해석 기법은 토목 및 해양구조물 분야에서 1960년대 이후 다양한 형태로 적용되어 왔다. 선체구조의 경우에는 여전히 경험과 이론을 바탕으로 하는 규범적인 방법에 의해 주로 설계 및 평가가 수행되고 있지만, 1970년대 이후부터 보다 합리적인 구조강도 평가를 위한 확률론적 방법에 대하여 부분적으로 연구가 진행되어 왔다. 대표적으로는 선체 종강도, 보강판의 최종강도 그리고 구조물의 피로강도에 대한 구조신뢰성 해석 기법을 적용한 연구 결과가 있다. 그러나 이러한 연구 결과가 아직까지는 선체구조의 설계 및 평가에 본격적으로 활용되지는 못하고 있는 실정이며, 다만 규범적 설계 규칙 제정 및 개정에 일부 결과가 반영되고 있을 뿐이다.

향후 완성될 SLA 기반 IMO GBS 체제를 고려할 때, 선체 구조 강도에 대한 정량적 위험도 해석 및 평가는 반드시 수행해야 할 필수 사항이라 예상된다. 구조신뢰성 해석 기법은 이러한 정량적 위험도 평가를 위한 실제적이고 가능한 도구가 될 수 있을 것이다. 그러나 아직까지 선체구조의 설계 및 평가에 구체적으로 적용될 수 있는 방법이 확립되어 있지 않고, 실제 적용 사례를 찾아보기가 어렵다.

## 2.3 SLA 기반 선체구조설계규칙

SLA 기반의 구조설계규칙은 위험도의 허용 기준, 즉 목표 신뢰성수준을 설정하고, 설계안전수준이 이를 넘지 않으면 대상 설계를 승인하는 절차를 정의한 것이 될 것이다.

목표안전수준(Target Safety Level)은 선박구조가 만족하여야 할 최소한의 안전수준을 의미하며, 이는 IMO 등 승인 기관에서 제시하게 된다. 목표안전수준은 선체구조가 파괴할 때 입게 되는 피해범위와 파괴의 진전 양상에 따라 목표신뢰성 수준을 표 2 (MSC 79/INF.5)와 같이 구분하여 설정한다. 또한, 구조물이 모든 구조적 위험 요소를 고려하여 안전성이 확보되어야 한다는 관점에서 모든 파괴 모드에 대한 목표신뢰성 수준이 설정된다.

설계안전수준은 적절한 신뢰성 해석 기법으로 계산된 대상 구조물의 신뢰성 수준으로 목표안전수준을 만족하여야 한다. 일관되고 타당성을 갖는 신뢰성 해석을 위하여, 각 파괴모드 및 대상 구조물에 따른 한계상태식의 정의 그리고 확률 변수의 선정 및 그 특성치 등이 규칙에 포함되어 규정된다.

다루어야 하는 확률변수는 다음과 같이 분류하여 정의하면 편리하다. 즉 하중, 재료, 생산 및 구조안전성 평가 모델의 4가지 영역으로 분류한다(MSC 88/5/2).

SLA 기반의 선체구조규칙의 적용 시 설계자가 담당하여야 하는 일과 승인자가 각각 담당하여야 하는 일의 범위를 정하고 이를 바탕으로 구조신뢰성 관련 규칙이 개발되는 것이 효과적이다. 하나의 제안으로서 이에 관한 내용을 소개한다.

(MSC 88/5/2). 규칙의 개발 당사자로서 승인자는 1) 목표 신뢰성 수준을 제시하고, 2) 한계상태식을 설정하고, 3) 확률 변수를 정의하고 4) 확률변수의 특성치를 산정하는 방법을 제시한다. 한편, 설계자는 1) SRA 기법을 입증하고, 2) 확률변수 특성치를 입증하고, 3) 계산된 설계안전수준을 제시한다.

SLA 기반의 선체구조설계규칙은 장기적 과제로 진행될 것이며, 현재 논의의 중심은 SLA 기반 GBS의 체계 구축과 목표안전수준의 제시에 있다.

표 2. 목표파괴확률 및 신뢰도 지수

Target annual failure probabilities and corresponding reliability indices			
Failure development	Failure consequences		
	Not serious	Serious	Very serious
Ductile failure with reserve strength capacity	$P_f = 10^{-3}$ $\beta = 3.09$	$P_f = 10^{-4}$ , $\beta = 3.71$	$P_f = 10^{-5}$ , $\beta = 4.26$
Ductile failure with no reserve capacity	$P_f = 10^{-4}$ , $\beta = 3.71$	$P_f = 10^{-5}$ , $\beta = 4.26$	$P_f = 10^{-6}$ , $\beta = 4.75$
Brittle behavior in terms of fracture of instability	$P_f = 10^{-5}$ , $\beta = 4.26$	$P_f = 10^{-6}$ , $\beta = 4.75$	$P_f = 10^{-7}$ , $\beta = 5.20$

$\beta = -\Phi^{-1}(P_f)$ , where  $\Phi$  is the standard normal distribution

## 3. 구조신뢰성 해석

### 3.1 구조신뢰성 해석 이론

구조신뢰성 해석은 구조물의 파괴가능성을 정량적인 파괴 확률(Probability of failure)로 산정하고 표현한다. 이는 공학 문제에 내재된 불확실성을 안전계수를 사용하여 정성적으로 나타내는 기존의 방법보다는 합리적이다.

신뢰성 해석의 정식화는 대상물의 파괴를 판단할 수 있는 설계기준  $G$ 를 하중요소  $Q$ 과 저항요소  $R$ 로 표현한다.  $G=R-Q$ . 이 식은 보통 구조물의 파괴양상에 따라 유도한 것이다.  $Q$ 와  $R$ 를 확률밀도함수로 정의하면 대상물의 파괴확률(상한값)은 그림 3의 빗금 친 부분이 되며, 이는 설계변수의 대표값(평균)뿐만 아니라 분산특성도 고려하게 된다.

신뢰도 공학에서 구조물의 안전성을 확률적으로 평가하는 방법 중 대표적인 것으로 Crude Monte-Carlo 추출법과 신뢰도지수를 계산하여 파괴확률을 근사적으로 추정하는 일계 이차 모멘트법을 사용한다.

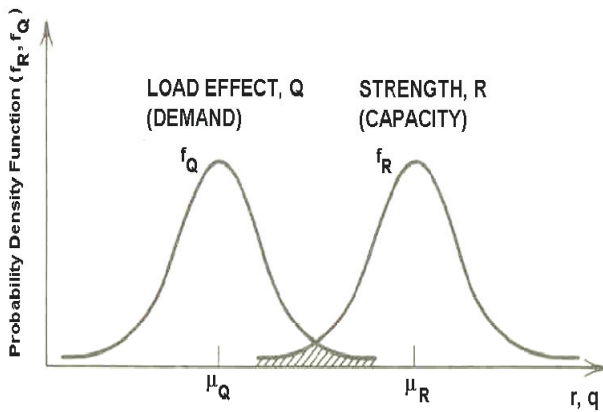


그림 3. 파괴확률

CMC 추출법은 각 확률변수의 분포특성이 반영된 난수(random number)를 추출하여 충분한 수의 확률변수의 표본 집단을 생성한 다음 각 확률변수 값을 한계상태식에 대입하여 파괴상태를 판단한다. 이 방법은 한계상태식을 변형하지 않고 파괴확률을 구할 수 있다는 장점이 있으며, 적정 규모의 난수 발생에 따른 계산량은 컴퓨터의 발달에 힘입어 효율적으로 처리할 수 있다.

일계 이차 모멘트법은 확률변수를 평균과 분산(표준편차)만의 통계적 특성으로 결정되는 정규분포로 가정하여 파괴확률의 간접적인 지표인 신뢰성 지표를 계산하는 방법이다. 한계상태식을 확률변수의 (근사된) 선형함으로 정의하고, 이를 구성하는 확률변수의 확률분포를 정규분포로 변환한다. 통계적으로 서로 독립인 정규분포 확률변수를 평균 0, 표준편차가 1인 표준정규분포 확률변수로 변환하여 한계상태식을 재구성하고, 새로운 확률변수의 공간에서 원점에서 한계상태식까지의 최단거리를 최적화 기법을 도입하여 구하고 이를 신뢰도지수로 취하여 파괴확률을 구한다(양영순, 1999).

### 3.2 선체구조의 피로강도 신뢰성해석 예

선체구조의 설계에 있어서 피로강도 해석과 평가는 매우 중요한 고려 사항이다. 현재 피로강도 평가는 결정론적 접근법, 즉 규범적인 설계식 또는 방법론에 의하여 피로수명을 산출하는 방식으로 수행되고 있다. 그러나 기술적인 단순 기계적 계산으로 정의되는 피로수명은 불완전하며, 그 자체로 많은 불확실성을 포함하고 있다. 따라서 피로수명을 기계적으로 정의하기보다는 설계수명 동안의 피로에 의한 파괴 발생 가능성, 즉 피로 파괴확률을 정의하는 것이 더욱 합리적일 것이다. 피로에 의한 파괴확률을 산출하기 위해서는 기존의 결정론적 접근법이 아닌 확률론적 접근법이 필요하다.

구조물의 피로강도를 평가하기 위한 방법으로 응력-수명 접근법(Stress-life approach)은 응력과 변형률이 모두 탄성범위에 있다는 가정 하에서 일정 반복하중에 의해 파괴가 일어날 때까지의 응력과 반복횟수 간의 관계로부터 피로수명을 계산하는 방법으로, 피로 균열과 전진 단계를 구분하지 않는다. S-N 선도와 Palmgren-Miner의 선형누적손상이론에 근거하여 피로강도를 계산하는 것으로 흔히 S-N 방법이라 한다.

누적피로손상도를 구하는 방법으로 간이계산법과 직접계산법이 사용된다. 이는 설계수명 동안 작용하는 응력의 이력을 구하는 방법에 따라 구분된다. 즉, 간이계산법에서는 응력진폭의 확률밀도함수를 장기해상상태에 대하여 확률분포(주로 Weibull 분포)로 가정하고 누적피로손상도를 구하는 방법이다. 직접계산법은 응력진폭을 단기해상상태에 대하여 확률분포(Rayleigh 분포)로 가정하여 계산한 후, 각 단기해상상태에서 구한 누적피로손상도를 계산한 후, 대상 해역의 파랑빈도 자료를 이용하여 통계분석하여 장기해상상태에서의 누적피로손상도를 구하는 방법이다. 이때 단기해상상태의 확률분포의 인자는 선체하중의 직접계산법에 의해 구한 응력스펙트럼(모멘트 값)을 이용하여 구하게 된다(한국선급 강선규칙, 2009).

피로강도 신뢰성해석을 위한 한계상태식은 여러 가지가 적용될 수 있으며, 간이계산법과 직접계산법에 의한 한계상태식의 형태가 크게 달라진다. 선급 등에서 제시하는 설계식을 참조하여 설계변수(확률변수)들을 정의하면, 1) Miner 법칙 자체가 가지는 불확실성으로 누적임계허용치의 확률변수, 2) 응력 모델링 자체의 불확실성, 3) S-N 선도의 불확실성 등을 들 수 있으나, 한계상태식의 정의에 따라 고려하는 확률변수도 달라질 것이다. 해석 결과 현재의 대형 컨테이너선 선측 중늑골 연결 구조는 피로강도 측면에서 대략  $10^{-3} \sim 10^{-4}$  정도의 파괴확률을 가지는 안전 수준으로 설계되었음을 확인할 수 있었다(정정호, 2010).

### 3.3 선체 종강도 신뢰성 해석 예

선체 종강도 신뢰성 해석에서 하중은 그 임의성과 추정 방법의 부정확성 때문에 높은 불확실성을 갖는다. 정적인 하중 효과는 종방향으로 분포된 중량과 하중조건에 의해 결정되며, 임의성은 선박이 일생동안 경험하는 여러 하중 조건을 통계처리하여 해석할 수 있다. 파랑하중은 장기해석에 의한 극값에 대한 확률 변수를 정의하거나, 직접구조해석 방법에 근거하여 확률변수를 정의한다. 정수 굽힘모멘트와 파랑 굽힘모멘트의 조합이 구조 파괴에 기여하는 확률을 정의하고 이를 신뢰성해석에서 구한 파괴확률에 곱하여 최종적인 파괴확률을 구한다.

선체의 최종굽힘모멘트는 보강판의 공칭압축강도 및 공칭항복응력 그리고 선체 단면의 계수로 정의될 수 있다. 신뢰성 해석을 위한 설계변수의 불확실성 모델링은 1) 단면의 기하학적 형상, 2) 재료 상수, 3) 보강판의 공칭압축강도, 4) 선체 단면의 최종굽힘모멘트 등을 고려한다.

탱크선과 산적화물선에 대해 신뢰성 계산을 수행한 결과 중앙단면의 종강도에 대한 신뢰성지수가 각각 3.1과 3.4 수준에서 얻어졌다(이종갑, 2011).

## 4. 결론

현재 진행되고 있는 SLA 기반 IMO GBS가 향후 세계 조선 및 해운산업에 직간접적으로 많은 변화와 영향을 끼칠 것은 분명하다. 세계 최고 수준의 경쟁력을 자랑하고 있는 국내 조선산업이 이러한 국제사회의 움직임에 수동적으로 대처하는 것은 더 이상 바람직하지 않을 것이다. 앞으로 대한민국 조선산업이 현재의 경쟁력을 보다 향상시키고 후발국과의 격차를 더 벌리기 위해서는, 그리고 세계 조선 및 해운산업을 주도적으로 이끌어 나가기 위해서는 IMO GBS와 같은 국제사회의 새로운 움직임 및 경향에 보다 능동적이고 적극적으로 참여하는 것이 매우 중요하리라 여겨진다.

SLA 기반 IMO GBS 체제가 선체 구조강도 및 구조설계와 관련하여 적용된다면, 구조신뢰성 해석 기법은 효과적으로 사용될 수 있는 매우 중요한 도구라 할 수 있다. 그러나 구조신뢰성 해석 기법은 아직까지 선체 구조와 관련하여 실용적으로 사용된 사례가 거의 없는 상황이다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위해 현 시점에서 가장 시급한 것은 구조신뢰성 해석 기법이 선체 구조에 대하여 어떻게 적용될 수 있는지를 확인하는 것이라 생각한다.

예로서 구조신뢰성 해석을 수행함으로써, 현존하는 선체구조, 특히 컨테이너선의 선측 종능골 연결부의 피로강도 설계가 어느 정도의 안전 수준을 확보하고 있는지, 또한 중앙단면의 종강도 설계식의 신뢰성수준이 얼마나 되는 지 시범적으로 확인할 수 있었다. 이러한 방식으로 현존 구조부재의 안전 수준을 체계적으로 계산하고 정리하면, 현재의 구조규칙 및 구조설계가 가지고 있는 안전 수준을 보다 논리적으로 파악할 수 있고, 이는 SLA 기반 IMO GBS 체제의 기본적이고 핵심이 되는 목표 안전 수준(target safety level)의 정의를 위한 기반이 될 수 있을 것이다. 또한, 더 나아가 SLA 기반 IMO GBS 체제에 부합하도록 구조규칙을 제정 및 개정하는 과정에 있어, 본 기고에서 소개한 구조신뢰성 해석의 적용 방법은 합리적인 근거가 될 수 있을 것이다.

## 참고 문헌

- 양영순, 서용석, 이재욱, 구조 신뢰성 공학, 서울대학교 출판부, 1999.
- 한국선급 강선규칙 (2009), 제3편 선체구조, 부록 3-3 선체 구조의 피로강도평가 지침.
- 정정호, 박재홍, 하태범, "Fatigue Safety Assessment of Ship Structure Using Risk-Based Approach", PRADS 2010, 2010.
- 이종갑 외, "위험도 기반 선박안전설계 핵심기술개발" 연구 보고서, 지식경제부, 2011.



박재홍

■ 1962년생  
 ■ 2007년 University of Southampton(UK) 대학원 졸업  
 ■ 현 재 : 한국선급 해사연구팀 수석연구원  
 ■ 관심분야 : 위험도 평가, 구조신뢰성  
 ■ 연락처 : 042-869-9210  
 ■ E-mail : jaehpark@krs.co.kr



정정호

■ 1973년생  
 ■ 2001년 서울대학교 조선해양공학과 대학원 졸업  
 ■ 현 재 : 한국선급 해사연구팀 책임연구원  
 ■ 관심분야 : 위험도 평가, 구조신뢰성  
 ■ 연락처 : 042-869-9217  
 ■ E-mail : chchung@krs.co.kr