

Current Status of the 2nd Generation of Intact Stability: Investigation of the Pure Loss of Stability and Parametric Roll Mode

Jaeho Chung¹, Dong Min Shin², Won-Don Kim³ and Byung Young Moon⁴

¹Research Professor, Security Convergence Institute, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), Daejeon, Korea

²Research Professor, Shipbuilding & Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan National University, Gunsan, Korea

³President, Marine Tech-In Co., Ltd, Busan, Korea

⁴Professor, Shipbuilding & Ocean Equipment Industry Empowerment Center, Kunsan National University, Gunsan, Korea

2세대 복원성 연구 현황, 순수복원성 손실모드와 Parametric Roll mode를 중심으로

정재호¹ · 신동민² · 김원돈³ · 문병영⁴

¹한국과학기술원(KAIST) 안보융합연구원 연구교수

²군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터 연구교수

³마린테크인(MTI) 사장

⁴군산대학교 조선해양기자재 역량강화센터 교수

KEY WORDS: Parametric roll 파라메트릭 롤, Pure loss of stability 순수복원성 손실, Direct stability assessment(DSA) 직접 복원성 평가, 2nd generation of second generation intact stability criteria 2세대 복원성 기준, International Maritime Organization(IMO) 국제해사기구

ABSTRACT: A review of the 2nd generation of intact stability by the International Maritime Organization is performed. The main issues with the new stability criteria are reviewed. In particular, the physical background and related mathematical formulations of the pure loss of stability and parametric roll are summarized. Based on a literature review, benchmark calculation results for 17 different types of ships are discussed, and the final results are in excellent agreement with our physical expectations. Some relatively serious design problems are found in the application of the new stability criteria to sample ships built in Korea, and possible technical solutions are proposed, which have to be improved in the coming years.

1. 서 론

1.1 연구의 배경

파랑 중의 선박의 거동은 선박의 안전에 관련된 매우 중요한 문제로, 국제해사기구(IMO, International Maritime Organization)는 선박의 안전 운항을 위한 복원성 기준을 마련하여 이를 모든 선박에 적용함으로써 더욱 안전한 해상운동을 보장하기 위하여 노력하고 있다. 이러한 노력의 하나로, 국제해사기구 IMO는 2세대 복원성 기준(SGISC, Second generation intact stability criteria)을 마련하여 이를 모든 선박에 적용하기 위한 준비 작업을 지난 10여 년간 진행하였고, 2020년 이후에 이를 시행하는 것으로 목표로 새로운 복원성 기준 개발의 최종 작업을 진행 중인 것으로 알려져 있다(Belenky et al., 2011; Peters et al., 2011; Chouliaras, 2014).

최초의 국제 복원성 기준은 2008년에 IMO의 해상안전위원회(MSC, Maritime safety committee)에 의하여 비손상 복원력(Intact stability(IS

Received 28 May 2019, revised 13 February 2020, accepted 14 February 2020

Corresponding author Byung Young Moon: +82-62-469-1854, moonby@kunsan.ac.kr

© 2020, The Korean Society of Ocean Engineers

This is an open access article distributed under the terms of the creative commons attribution non-commercial license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.



Fig. 1 Accident APLChina, 1998

stability(IS) code 2008)로 도입되었고, 2010년에 발효되었는데, 이 ‘소위 1세대 비손상 복원성 기준’은 Rahola(1939)의 작업에 기초한 것이고, 이는 1950년대에 이르러 기후조건(Weather criterion)을 추가함으로써 오늘날까지 이르고 있다. 제2세대 복원성 기준은 2002년 IMO 산하 선박적재선 및 어선안전 위원회(SLF, Stability and load lines and on fishing vessels safety)에서 시작되었지만, 실무의 시작은 2005년에 이루어졌다.

새로운 복원성 기준이 개발되는 가장 근본적인 이유는 기존의 복원성 기준을 만족하는 선박에서도 사고가 발생한다는 점이다. Fig. 1에 나타난 1998년 APL(American President Lines) China 사고의 예는 그 대표적인 것이다. 이러한 해난사고에 대한 대책들(ABS, 2004)이 IMO 2세대 복원성 기준 논의 이전에도 개별적으로 논의되고 있었다. 그러나 이러한 사고는 자주 일어나는 것이 아니므로 경험으로 사고의 원인과 대처방안을 개발하는 것은 불가능해 보이고, 보다 정량적이고 체계적인 대처방안을 생각하는 것이 합리적으로 보인다. 특히, 급변하는 해운 산업의 환경에 따라 이전에는 존재하지 않았던 크기의 선박들이 건조되기 시작하면서, 경험적으로는 해결할 수 없는 문제들이 발생하게 되었다. 이러한 이유로, 국제해사기구는 세계 각국의 전문가 그룹을 형성하여 새로운 복원성 기준을 개발하기로 하여 지난 10여 년 동안 많은 논의가 진행됐다.

새로운 복원성 기준이 시행될 경우, 신조 선박의 경우 새로운 설계 기준을 적용하여 기존 선박보다 적재 화물량이 감소할 소지가 매우 많다. 기존 운항선의 경우도, 화물적재량의 감소 또는 운항속도 감소를 강제할 소지가 많아서 향후 선박 운항에 큰 영향을 미칠 것으로 예상된다. 조선 산업은 국내에서 비중이 매우 큰 산업이고, 한국의 조선 산업이 세계 조선 산업에서 차지하는 비율이 매우 크기 때문에, 새로운 복원성 기준이 발효될 경우 발생할 설계 변동사항 등에 대하여 주목할 필요가 있으나, 현재까지는 국내에서의 본격적인 연구 동향은 보이지 않는 실정이다. 안전성이 더욱 강조되는 새로운 복원성 기준이 발효될 경우, 현재의 선박 기준보다 속도 및 하중 조건에서 제한을 받는 형태로 나타날 것으로 예상하는데, 이는 현재보다 더 많은 선박을 건조해야 한다는 것을 의미하므로, 국내 조선 산업에 매우 부정적인 요소로 작용할 것으로 보인다. 특히, 대형선박 중에서 복원성 기준의 강화로 인하여 가장 크게 영향을 받는 선박의 종류는 현재에도 무게 중심이 상대적으로 높은 컨테이너 선박, RoRo 선, RoPax 및 크루즈 선박 등으로 생각할 수 있다. 국내 조선사의 입장에서 보면 현실적으로는 국내 조선사들이 국제적으로 경쟁력을 확보한 제품인 초대형 컨테이너선에 대한 설계 변경 여부에 관하여 더욱 세심한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

본 논문에서는 IMO에 의해서 개발 중인 2세대 복원성 기준을 소개하고, 이의 수학적 모델링과 이의 해를 구하는 방법들을 제시하였다. 또한, 실제로 선박에 적용했을 때 발생하는 기술적 제한사항 등의 새로운 설계환경 또는 설계 방안에 대하여 논의하였다. 마지막으로, 새로운 기준에 따른 기술적 논의의 실재를 보기 위해서 국내에서 실제 건조된 중소형 컨테이너 선박에 새로운 복원성 기준을 적용하여, 기존 선박의 운항 제한 조건 및 설계변경 가능성 등에 대하여 논의하였다.

1.2 IMO 2세대 복원성 기준 연구 현황

Uzunoglu(2011), Peters et al.(2011), Umeda(2013), Krüger et al.(2013), Grinnaert(2017) 등에서 보는 바와 같이, 지금까지 논의되는 2세대 복원성 기준은 Fig. 2에 나타난 바와 같이 총 3단계의 검증

법과 다른 하나의 운항 가이드(Operation guide)로 구성되어 있다. 이 검증법은 현재 시행 중인 선박복원성 기준(IS 2008)에 더하여 적용될 것으로 예정되어 있어서, 이를 통과하지 못하는 선박은 운항이 불가할 것으로 알려져 있다. 따라서 선박의 운항을 위해서는 이 새로운 복원성 기준을 만족할 필요가 있다.

2세대 복원성 기준이 다단계의 검증법으로 이루어져 있는 이유는 기준을 적용하기 위한 계산에 필요한 소요비용을 최소화하기 위한 목적이다. 현재 개발 중인 2세대 복원성 기준의 적용 범위는 24m의 길이를 가지는 이상을 선박을 대상으로 하고 있어서 대상 선박의 수가 매우 많아, 이 많은 선박을 대상으로 매우 자세한 계산을 해야 하는 기준을 마련할 경우, 기준적용을 위한 계산 수행이 실용적 시간 내에서는 불가능할 것으로 예상하기 때문에 간단한 계산을 통하여 복원성의 여유가 확인된 경우는 다시는 자세한 계산을 수행하지 않는 방식을 사용함으로써, 기준적용을 위한 계산 수고를 현실적으로 축소하려는 방안으로 다단계 적용 기준을 도입하였다.

현재 진행되는 SGISC의 3+1 단계 구조의 처음 두 단계는 소위 ‘취약성 평가(Vulnerability assessment)’단계로, 이 단계의 복원력 판정 기준은 간단한 형태의 경험식에 기반을 둔 것이다. 이 단계에서의 취약성 판정은 확정적인 것이 아니라, 선박이 해당 해상상태에서 복원

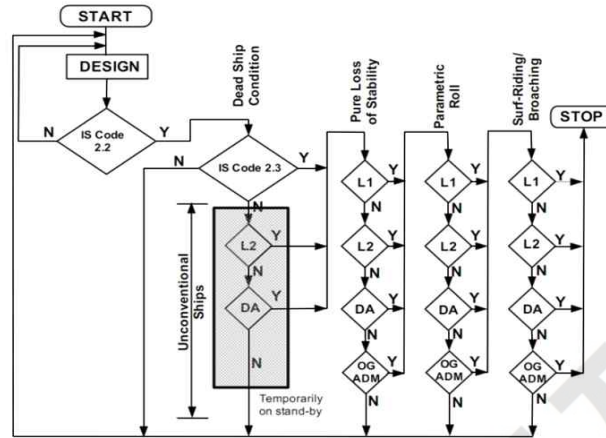


Fig. 2 Second Generation Intact Stability Criteria (SGISC) diagram

성을 상실할 확률이 높다는 의미이고, 해당 해상에서 복원성이 취약한 상태에 있다는 의미이다. 실제로, 복원성 기준 설정의 가장 큰 논리적 어려움은 복원성과 관련된 선박 사고가 드물게 발생한다는 사실(Problem of rarity)에 있는데, 이는 복원성 판정 기준이 확률론적으로 접근되어야 하는 타당한 근거에 해당한다고 생각된다. Fig. 2에서 보는 바와 같이 2세대 복원성 기준의 시행은 기존의 복원성 기준 IS 2008 2.3을 폐기하는 것이 아니라, 기존의 복원성 기준에 추가적인 기준을 부가하는 개념이어서 기존의 복원성 기준이 사라지는 것은 아니다. 따라서 기존의 복원성 계산 관련된 모든 자료는 앞으로도 유의미하며, 폐기의 대상은 아니다. 복원성 기준에서 새롭게 추가되는 부분은 각각의 독립적인 검사 모드에 대하여 다층적인 기준을 적용하여 각각의 모드에서의 기준을 통과한 경우에 그 선박의 복원성을 인증하는 구조로 이루어져 있다.

이러한 기존의 방법은 논리적으로 모순되는 결과를 가져오는 경우가 종종 보고되어 이를 해결하기 위한 노력이 지속되고 있다. 예를 들어, Level-1의 기준을 만족한다는 의미는 Level-2 기준도 만족한다는 의미이지만, 실제의 계산을 통한 검증의 사례에서 이와 상반되는 결과가 도출되는 경우가 있기 때문에, 이 논리적 모순을 해결하기 위한 현실적 방안을 찾아내기 위한 노력이 지속되고 있다. 지금까지 복원성 관련한 연구 및 논의의 대부분은 Level-1과 2의 수준에 집중된 상태이고, 이의 기준에 대해서는 상당한 정도로 의견의 접근이 이루어져서 2020년에 기준안을 확정하는 것을 목표로 최종적인 작업을 진행 중이다. 가장 복잡한 수준의 검증 단계는 Level-3에 해당하는 수준으로써, 가장 복잡한 수준에서 복원성 계산을 수행하는 단계에 해당한다. 이를 소위 ‘직접 안정성 평가 (DSA, Direct stability assessment)’라고 하며, 이는 또한 선박 고유의 ‘운영 지침(Operational guidance)’ 개발과도 밀접하게 관련되어 있다.

DSA 부분에서 모형실험을 수행하는 것은 매우 비용이 큰 작업으로, 일반적으로는 이를 수행하는 것이 현실적이지 않을 것으로 예상하는 바, 전산 시뮬레이션에 의한 직접 복원성 평가에 대한 수요가 증가할 것으로 예상하여 이에 대한 구체적 실현방안에 대한 적극적 대응이 필요하다고 판단된다.

2세대 복원성 기준에 관한 IMO의 확정 기준이 정해진 것이 아니므로 본 연구에서 논의된 기준은 최종 확정된 규정이 아니고, 추후 변경될 수 있으며, 이에 따라 본 연구에서 논의된 결론도 다르게 나타날 수 있다. 다만, 지금까지의 논의를 살펴보면, 복원성 기준은 물리적 현상을 기반으로 하여, 수학적 모델링과 합리적인 간략화를 통하여 진행 중이므로, 그 근본 구조가 바뀔 것으로 보이지 않고, 특정 기준 값을 변화시킴으로써 기준의 강화 또는 완화를 이룰 것으로 보인다. 또한, 비록 취약성 기준의 낮은 단계의 규정이 비합리적이거나 하더라도 높은 단계의 직접 평가법을 수행할 경우, 간략화된 기준식의 적용에서 발생할 수 있는 오류를 수정할 수 있으므로, 현재의 기준안 구조는 유지될 것으로 판단된다.

2. 복원성 상실 취약 모드

선체를 강체(Rigid body)로 가정하는 경우, 선체의 운동은 6가지의 자유도를 가지는데, 일반적인 형상의 선박에서는 대부분의 운동 변위가 선체의 길이에 비하여 매우 작은 값을 나타내지만, 횡요(Roll)의 경우는 그 값을 작게 평가할 수 없다. 대부분은 파랑중의 선박의 전복 원인도 큰 횡요에 의하여 발생하는 것으로, 선박의 운동과 관련하여 안전에 가장 큰 선박 운동 요소는 횡요이다. 따라서 선박 복원성 평가의 대부분도 횡요를 계산하는 것에 집중되고 있다. 국제해사기구는 지금까지의 전문가들의 논의를 통하여 다음의 5가지 모드에 대하여 복원성 취약 상태를 정의하였으며, 각 모드의 Level-1과 Level-2는 Table 1에 정의되어 있다.

2세대 복원성 기준 개발을 위한 위원회의 활동이 10년 이상 지속되었고, 각국의 이해가 반영되는 특성상, 어느 특정한 현상들을 새로운 복원성 기준에 포함할 것인가에 대한 논의가 지속되었다. 초안에 포함되었던 순수복원성 손실, 파라메트릭 롤, 서프-라이딩/브로칭 모드에 더하여 과도한 가속도, 데드십 모드가 나중에 추가되었다. 개개의 모드의 기준에 대하여서도 각 전문가의 입장에 따라 기준 마련을 위한 전제조건, 특히 입사파의 정의에 대하여 많은 대립적인 논의가 있었고, 이는 지금까지도 부분적으로 통일되지 않고, 병행하여 적용 가능한 옵션 사항으로 남아 있으며, 이는 혼란의 소지가 있는 부분이다. 하나의 기준에 대하여서도 취약성 판정을 위한 기준값이

Table 1 SGISC reference documents

	Pure loss of stability	Parametric roll	Broaching	Dead ship condition	Excessive acceleration
Definition of criteria (L-1, 2)	SDC 2/WP.4 Annex 1	SDC 2/WP.4 Annex 2	SDC 2/WP.4 Annex 3	SDC 2/WP.5 Annex 1	SDC 2/WP.5 Annex 2
Explanatory notes	SDC 2/WP.5 Annex 3	SDC 2/WP.5 Annex 4	SDC 2/WP.5 Annex 5	SDC 2/WP.5 Annex 6	SDC 2/WP.5 Annex 7

변경되는 예도 있었기 때문에, 이에 대한 적절한 주의가 필요하다. 특히, 참고문헌에 나타난 기준도 시간의 경과에 따라 변하여 왔고, 적용 기준 자체도 변경되거나 삭제될 수가 있어서 문헌 조사에 세심한 주의가 필요하다. IMO(2009a) IMO(2009b), IMO(2012), IMO(2013), IMO(2016a), IMO(2016b) 등의 문헌에서 지난 기간의 규정의 논의의 이력을 확인할 수 있고, 본 연구도 이 문헌에 규정된 기준으로 수행되었다.

현재까지 포함된 복원성 취약 모드 중에서 국내의 조선 산업에 영향을 미치는 대형선에 직접 관계되는 취약성 모드는 순수 복원성 손실, 파라메트릭 롤이 대표적인 것이다. 나머지 3가지 복원성 취약 모드는 대형선의 경우는 적용대상에서 배제되거나, 그 해당 사항이 한국 조선업계와 직접적인 관련성이 매우 희박한 사항들이어서 이 부분의 논의는 생략하고, 본 논문에서는 이 2가지의 주요 복원성 취약 모드에 관하여 논의하기로 한다.

2.1 순수복원성 손실(Pure loss of stability)

순수복원성 손실 현상은 운항 중의 선박이 선박의 길이와 비슷한 파장의 파를 만난 경우, 선체의 중심점(Midship) 위치가 파장과 같은 경우, 선체의 복원력이 정수중인 경우보다 매우 급격하게 감소하는데, 이러한 호깅(Hogging) 상황에서의 복원력 감소를 순수 복원력 상실이란다. 파의 이동 때문에 파장의 위치가 이동하여 선체 중심이 파저에 위치하는 세깅(Sagging)에서는 복원력이 급격하게 증가하지만, 호깅 상태의 복원력이 감소한 상황이 반복적으로 오랫동안 지속될 경우, 선체는 복원력이 취약한 상황에 이르게 된다.

현대적인 선형들, 특히 컨테이너선과 크루즈 선형 등에는 선수부에도 많은 컨테이너를 적재하거나 객실을 확보하기 위하여 선수부 갑판 면적을 넓게 해야 하는 설계 조건을 가지고 있어서, 높이에 따른 수선면의 변화가 매우 크기 때문에 파의 위치에 따른 수선면의 형상도 크게 변화하고, 이는 순수 복원성 손실의 원인이 된다.

2.1.1 순수복원성 손실 취약성 기준(Level-1)

순수복원성 손실 모드의 위험을 계산하는 방법은 2가지가 허용되고 있는데, 가장 기본적인 방법은, 선체가 선체와 길이가 같은 파장을 가지는 가파른 파와 만났을 경우의 Metacentric height(GM)값을 계산하는 방법이다. 이를 위하여 파장 $\lambda = L_{pp}$ 와 $h = \lambda \cdot S_w$ ($S_w = 0.0334$)의 값을 가지는 파가 선체 중앙 점에서 전후로 10개의 위치에 있을 경우의 GM값을 계산하여 이의 최소 GM값이 기준값 (R_{PLA}) 이상인 경우에 안전하다고 판단하는 방법이 사용된다.

$$GM_{MIN} > R_{PLA} \quad (1)$$

여기서, R_{PLA} 값은 Level-1을 만족시키는 기준이 되는 GM의 최소값으로 IMO 규정(IMO, 2016b)에서는 0.05(m)로 정의한다. 다음으로, 위의 방법이 각각의 파의 위치에 따른 GM값을 구하고, 그 상태에서의 트립 및 침하를 고려해야 하는 복잡성을 피하고자 제시된 방법으로, 파랑중의 선체의 GM값의 변화와 정수중의 GM값과의 비율을 계산함으로써 이루어지는데 각각의 파의 위치에서의 흘수만 고려하면 되기 때문에 복잡성을 피할 수 있다. Level-1에서는 간단한 선체의 기하학적 계산을 통하여 GM값의 변화를 계산한다.

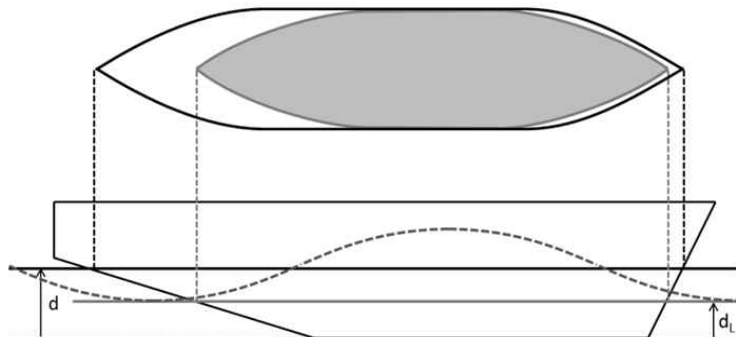


Fig. 3 Definition of drafts for pure loss of stability criteria (d : draft amidship corresponding to the loading condition under consideration, d_L : $d - \delta d_L$)

$$\frac{GM_a}{GM_0} \geq 0.12, GM_a = \frac{I_{up} - I_{low}}{2V} \quad (2)$$

여기서, Fig. 3에서 수면을 기준으로 정의된 수면 위 임의의 지점 d 에서의 관성모멘트를 I_{up} , 수면 아래 지점(d_L)에서의 관성모멘트를 I_{low} 라 정의한다.

여기에 필요한 함수는 다음 Fig. 3과 같이 정의된다.

2.1.2 순수복원성 손실 취약성 기준 (Level-2)

다른 모드에서와 동일하게 Level-2는 Level-1 기준을 만족하지 못할 경우에만 실행하는 계산으로, 계산의 내용은 더욱 현실적인 계산이 이루어지며, 계산의 복잡성은 증가한다. 평가의 접근 방법으로는 여러 가지 성분의 파도에서의 확률적 위험도의 합을 최종적인 취약성의 정도로 결정한다. 현재까지 기존 연구의 결과로 Level-2를 계산하는 방법은 2가지(Option A, Option B)가 있으며, Option A는 복원력 회복각(Loll angles) ϕ_s 을 사용하는 것이고, Option B는 원력 소실각(Angle of vanishing stability) ϕ_v 을 사용하는 것이다. Option B의 경우 계산의 복잡성으로 인해 사용빈도가 Option A에 비해 작은 이유로, 본 논문에서는 Option A를 사용하였다.

Option A의 경우, 판단 기준을 $CR1$, $CR2$ 로 나타내며, 2가지 기준으로 계산한 위험도의 값이 모두 기준 값 0.06 이하인 경우에 안전하다고 판단하는 방식이 사용된다. 이를 식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\max(CR1, CR2) < 0.06$$

$$CR1 = \sum_{i=1}^N W_i C1_i \quad C1 = \begin{cases} 0 (\phi_v > 30^\circ) \\ 1 (\phi_v < 30^\circ) \end{cases} \quad (3)$$

$$CR2 = \sum_{i=1}^N W_i C2_i \quad C2 = \begin{cases} 0 (\phi_s > 25^\circ \text{ or } 15^\circ) \\ 1 (\phi_s < 25^\circ \text{ or } 15^\circ) \end{cases} \quad (4)$$

여기서, W_i 는 유의파고(H_s)와 파도 주기(T_z)에 따른 가중 요소로 IMO 규정(IMO, 2016b)에서 제공한다.

순수복원성 모드의 Level-2에서의 판단기준은 공통적으로, 확률적으로 발생 가능한 각 해양파 성분에서의 선체의 위험도를 1 또는 0의 인덱스로 산정하고, 각각의 성분에서의 위험 인자를 해당 파의 확률값을 곱함으로써 최종적인 위험도를 $CR1$, $CR2$ 로 나타내어 이의 크기가 특정 값 이상이면 위험한 것으로 판정하는 방법이다.

$$C2_i = \begin{cases} 1 & \phi_s > R_{PL2a} = 15^\circ \text{ or } \phi_{loil} > R_{PL2b} = 25^\circ \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \quad (5)$$

이 확률적 평가법에는 필연적으로 파의 분포에 관한 정의가 필요한데, 이는 International Association of Classification Societies(IACS)에 의해 권장된 16개의 주기와 17개의 파고를 대상으로 하고, 실제로 발생 가능한 197개의 파에서의 복원성 손실 위험도를 판단하여 안정성 기준을 판단한다. 이에 대한 정보는 IMO(2009a)에 자세히 정의되어 있다.

Belenky et al.(2011) 등은 17가지의 대표적인 선형에 대하여 위의 순수복원력 손실 취약성 기준을 적용한 결과를 다음과 같이 발표하였다. 이를 Table 2와 Fig. 4 및 Fig. 5에 나타내었다.

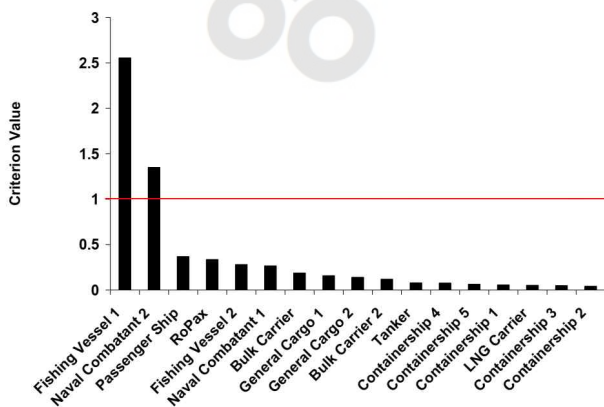


Fig. 4 Calculation result, pure loss of stability ($CR1$, Level-1)

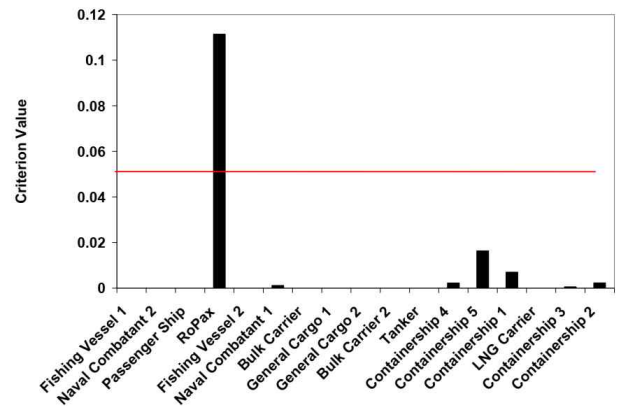


Fig. 5 Calculation result, pure loss of stability ($CR2$, Level-2)

Table 2 Example of Calculating Vulnerability of Representative Vessels for Pure loss of stability (S: Satisfied, U: Unsatisfied)

Type	L	GM	V_s	$CR1$	Vulnerability (CR1)	$CR2$	Vulnerability (CR2)
Fishing vessel 1 (ITTC A2)	34.5	1.97	15	2.56	U	0.00	-
Naval combatant 2 (ONR TH)	150	1.16	15	1.35	U	0.00	-
Passenger ship	276.4	3.42	15	0.37	S	0.00	-
RoPax	137	0.36	15	0.34	S	0.11	U
Fishing vessel 2	21.56	0.51	15	0.28	S	0.00	-
Naval combatant 1 (ONR FL)	150	0.20	15	0.27	S	0.00	S
Bulk carrier	275	4.19	15	0.19	S	0.00	-
General cargo 1 (S60)	121.9	0.15	15	0.16	S	0.00	-
General cargo 2 (C4)	161.2	0.15	15	0.14	S	0.00	-
Bulk carrier 2	145	0.15	15	0.12	S	0.00	-
Tanker	320	1.72	15	0.08	S	0.00	-
Containership 4	283.2	0.15	15	0.08	S	0.00	S
Containership 5 (C11)	262	0.15	15	0.06	S	0.02	S
Containership 1	322.6	0.15	15	0.06	S	0.01	S
LNG carrier	267.8	0.15	15	0.05	S	0.00	-
Containership 3	330	0.15	15	0.05	S	0.00	S
Containership 2	376	0.15	15	0.04	S	0.00	S

이 결과에 의하면, 두 개의 인자 $CR1$ 과 $CR2$ 는 각 대상 선박에 따라 크게 값이 바뀌는 것을 확인할 수 있고, 이에 따라 해당 모드에서의 취약성 판정을 명확한 기준에 따라 내릴 수 있다. 어선(Fishing vessel 1)과 특수선의 일종인 전투함을 제외하면, 일반적인 상선에서의 $CR1$ 값은 고른 값으로 분산되어 있어 변별력이 크지 않으며, $CR2$ 를 비교하면 그 분포가 매우 2분법적이어서 기준 만족 여부를 확연하게 보여 주고 있다. 또한, 그 결과도 일반적인 예상과 일치하게도 RoPax와 컨테이너선박 등의 위험도가 다른 선박에 비하여 높은 것으로 표시되는 것을 알 수 있다.

2.2. 파라메트릭 롤 (Parametric roll)

파라메트릭 진동 현상은 하나의 진동 주기 동안에 2번의 기진력이 가해졌을 경우에 발생하는 진동현상을 이르는 개념으로, 그네타기 등에서 볼 수 있듯이, 우리가 일상생활에서 흔하게 경험할 수 있는 현상이다. 선박의 파라메트릭 롤(Parametric roll)은 선체에 입사하는 파의 주기가 일반적인 횡요의 공진 주기의 1/2인 경우에 발생하는 공진현상으로, 일반적인 횡요 공진과 구별된다. 선박이 횡파(Beam sea) 중에 발생하는 횡요와 다르게, 향파(Longitudinal wave) 중에서도 횡요 공진 주기의 1/2배에 해당하는 파를 만났을 경우, 파라메트릭 롤이 발생할 수 있다는 사실에 유의하여야 한다.

횡파의 공진 주파수는 파기울기(Wave steepness)와 무관하게 특정한 주파수에서 발생하지만, 그 횡요각의 크기는 파기울기에 따라 변하는 값을 가지고, 이의 2배에 해당하는 주파수에서 파라메트릭 롤이 발생할 수 있다. 파라메트릭 롤의 주파수는 파의 횡요 공진 주파수의 2배의 값을 가지지만, 횡요 공진과 동일하게 파 기울기에도 영향을 받는다. 특히, 높은 파고에 의해 파라메트릭 롤이 발생 가능한 주파수가 넓어지는 경향이 있는데, 이러한 점이 높은 파고가 해상에서의 파라메트릭 롤의 발생 가능성을 증가 시키는 요소라는 사실을 잘 알려 주고 있다.

특히 최근 들어, 선박의 대형화에 따라 횡요 공진 주기가 증가하는 것이 일반적인데, 파라메트릭 롤이 중요한 이유는 대형 선박은 매우 드문 공진주기파에 도달하지 않더라도 공진주기의 반에 해당하는 주기를 가지는 파를 만났을 경우에도 큰 공진현상이 발생할 수 있다는 점이다. 실제로, 1998년 10월 8000TEU급의 컨테이너 선박인 APL China호는 파라메트릭 롤에 의해 대부분의 컨테이너를 손실하는 사고가 발생하였는데, 이 사고 이후 파라메트릭 롤 현상에 관한 폭넓은 연구가 진행되었으며, 파라메트릭 롤의 징후를 사전에 감지하는 방안 등에 관한 연구도 광범위하게 진행되었다 (ABS, 2004).

횡요에 대한 운동방정식은 일반적으로는 다른 운동 모드와 연성 되어 복잡하지만, 현재 파라메트릭 롤에 대해 IMO에서 권장하는 바는 횡요만을 고려하는 1자유도 운동을 해석하는 것으로 결정하였다. 선체의 횡요 방정식에는 롤 각도(ϕ)에 대한 선체의 회전관성모멘트(I_x)와 해당 부가질량(A_{44}), 감쇄계수(B_{44}) 및 운동 시 발생하는 복원력(W)을 포함하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$(I_x + A_{44})\ddot{\phi} + B_{44}\dot{\phi} + W \cdot GZ(\phi, t) = 0 \quad (6)$$

이 운동방정식을 적절한 가정을 통하여 다음과 같은 물 운동방정식으로 나타낼 수 있다. 이에 대한 수학적 전개과정은 Uzunoglu (2011), Umeda (2013)에 자세하게 설명되어 있다.

$$\ddot{\phi} + 2\delta\dot{\phi} + (\omega_m^2 + \omega_a^2 \cos(\omega_c t)) \cdot \phi = 0 \quad (7)$$

$$\omega_m = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_m}{I_x + A_{44}}}; \omega_a = \sqrt{\frac{\Delta \cdot GM_a}{I_x + A_{44}}}; \delta = \frac{1}{2} \frac{B_{44}}{I_x + A_{44}} \quad (8)$$

여기서 식 (7)의 ω_c 는 조우주파수 ω_m , ω_a , δ 는 식 (8)과 같이 정의되고 식 (8)에서 Δ 는 선체의 배수량, GM_m 은 GM 값들의 평균, GM_a 는 파랑 중 GM 변화의 진폭에 해당한다.

형요 운동방정식은 잘 알려진 다음 모양의 Mathieu 방정식으로 치환하여 나타낼 수 있다.

$$\frac{d^2 x}{d\tau^2} + (p + q \cos(\tau)) \cdot x = 0 \quad (9)$$

$$p = (\overline{w_m^2} - \mu^2); q = \overline{w_m^2} \quad (10)$$

이 비선형 방정식의 해의 거동은 잘 알려진 바 있는데, 파라미터와 q 의 값에 따라 발산하는 경우와 수렴하는 경우가 매우 비선형적으로 나타나는데, 작은 파라미터의 변화에도 해의 거동이 크게 달라진다. 이를 Fig. 6에 도식적으로 나타내었다. 그림은 Ince-Strutt diagram을 도시한 것으로 파라미터의 값에 따라 발산하는 영역과 발산하지 않는 영역을 나타낸 것인데, 그 발산의 영역을 예측하기가 쉽지 않다. 실제의 형요 계산에서는 형요 각도가 주어진 파라미터에 따라 발산하는 경우가 발생하는데, 물리적으로는 이러한 상황이 파라메트릭 롤이 발생하여 큰 롤 운동이 발생하는 상황에 해당한다.

파라메트릭 롤의 예측에서 또 다른 어려운 점은 감쇠의 영향이다. 롤은 여러 가지 원인에 의하여 감쇠(Damping)가 일어나는데, 이 각각의 요소들을 정확하게 예측하는 것이 매우 어려운 실정이다. Ikeda(2004)는 형요 감쇠의 원인을 체계적으로 분석하고 이의 정량적 크기를 수학적으로 표현하기 위한 연구를 계속하여 상당한 부분에서 성과를 이루어 개략적인 계산을 위한 실용적 계산식을 산출하였다.

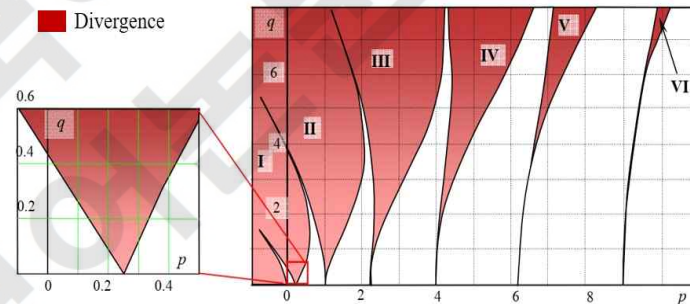


Fig. 6 Ince-Strutt diagram

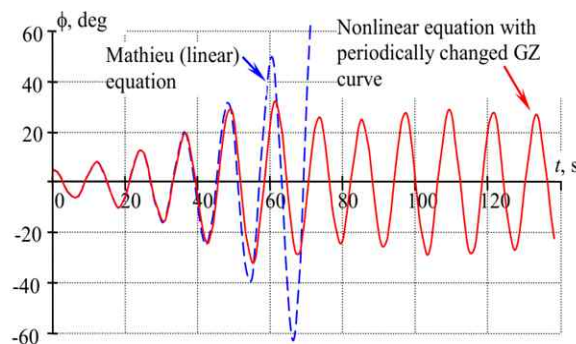


Fig. 7 Effect of nonlinearity on the solution (—: Nonlinear equation, ---: Mathieu (linear) equation)

Fig. 7에는 감쇄를 고려한 경우와 감쇄를 고려하지 않은 상태의 횡요가 다르게 나타나는 경우의 예를 나타내었다. 여기서 시사하는 바는, 선형화된 방정식의 해에서는 발산하는 때도 비선형의 감쇄를 고려하여 해를 구할 때 발산하지 않고 안정적인 거동을 보여주는 경우가 있다. 이러한 사실에서도 알 수 있는 것은, 간략화된 모델은 더욱 많은 설계 마진을 가지고 있어서, 횡요에 대한 평가가 보다 보수적으로 이루어지는 경향이 있으며, 더욱 현실적인 모델을 적용하면 비록 그 수학적 모델의 구축이 복잡할지라도 그 해의 거동을 보다 정확하게 추정할 수 있어서, 설계 마진을 줄일 수 있다는 점인데, 이는 실제 설계에서도 보다 최적화된 해를 구할 수 있다는 것을 유추할 수 있다.

2.2.1 파라메트릭 롤 안정성 판정식 Level-1

Belenky et al.(2011)는 위의 방정식의 거동에 대한 몇 가지 가정을 통하여, 다음과 같은 간편한 판정식을 제시하였다.

$$\frac{\Delta GM}{GM} \leq R_{PR} \quad (11)$$

$$\Delta GM = \frac{I_H - I_L}{2V}, \text{ only if } \frac{V_D - V}{A_w(D-d)} \geq 1.0 \quad (12)$$

여기서, 각 선박의 형상에 대한 R_{PR} 의 크기에 대한 여러 가지 제한이 있는데, 주로 중앙단면계수(C_m)에 따른 값으로 정의된다. I 는 관성모멘트, V_D 는 용적, A_w 는 수선면적, d 는 흘수에 해당한다. 구체적인 정의는 Table 3-4 및 IMO 규정(IMO, 2016b)를 참고하였다.

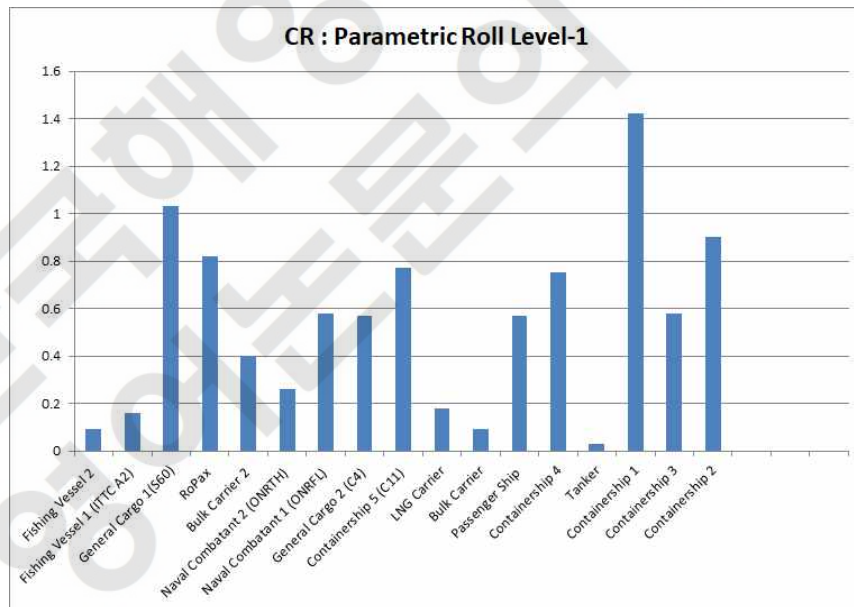
파라메트릭 롤에 대한 Level-1단계의 계산결과를 Fig. 8에 나타내었다. 판정을 위한 기준값 0.49로 설정하였을 경우, 10개의 선형이 취약 판정을 받게 되어 상당히 높은 비율로 Level-1 기준을 통과하지 못하는 것으로 나타났는데, 여기에 해당하는 선박의 공통적인 특징은 선속이 높다는 점으로, 대부분의 취약 판정 선박의 경우, 9.26m/s 이상의 선속을 가지고 있다. 예외적으로, 8.23m/s 속도의 일반 화물선이 취약 판정을 받은 것은 무게 중심의 높이에 의한 효과로 판단되고, 9.26m/s의 상대적으로 고속의 선속을 가진 Liquefied natural gas(LNG) 수송선의 경우는 화물의 특성상, 무게 중심이 낮은 요인으로 인하여 안정 판정을 받은 것으로 생각된다.

Table 3 Principle dimension of sample ships

Dimensions		Unit	1000 TEU	1040 TEU	22000 RoPax
LengthOverall: Abt.		m	146.3	143.9	160
LengthBetweenPerpendiculars:		m	136.1	134.7	148
Breadth(Mld.):		m	22.6	22.6	24.8
Depth (Mld.) :		m	11.2	11.2	14
Draft (D.L.W.L,Mld.):		m	7.4	7.4	5.8
Draft (S.L.W.L,Mld.):		m	8.2	8.2	
Complements:		p	20	20	48
Full load displacement:		t	17,773.1	17,981.8	12,422.6
Light ship weight:		t	4,838	4,543	8,621
Gross tonnage (international): Abt.		t	-	9,930	22,000
AK : B. Keel area		m ²	13.9	13.9	60
LWL		m	136.1	134.7	148
B (ext)		m	22.6	22.6	24.8
Btm shell thick =		m	0.014	0.014	0.014
Speed	max	m/s			
Speed	service	m/s	9.26	9.26	10.29
Power	MCR	kW	8280	8280	13920
Power	NCR	kW	7452		
Dia of propeller	m	m	5.6	5.4	4.3
L_a	m	m	2.55	2.725	3
h_s	m	m	0.2	0.2	0.05

Table 4 1040 TEU CV pure loss of stability and parametric roll (Level-1)

	Draft	5.238	5.029	4.860	8.214	8.115	8.134	8.214	8.157	8.134
	only if, $(V_D-V)/A_W(D-d) \geq 1.0$	1.17	1.18	1.19	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06	1.06
V_D	Displacement volume (m^3)	25501	25501	25501	25501	25501	25501	25501	25501	25501
A_W	Area of water plane (m^2)	2238.0	2213.0	2194.0	2675.7	2661.7	2664.5	2675.7	2667.9	2664.5
I_L	Second Moment of the water plane at the draft d_L (m^4)	62284	61146	59961	82869	82364	82574	82794	82596	82501
KB	Center of buoyancy in height direction	2.827	2.707	2.819	4.497	4.439	4.451	4.497	4.464	4.451
GM_{min}	$=KB+(I_L/V)-VCG$	3.292	3.451	3.684	-0.044	-0.021	0.015	-0.059	0.013	-0.001
	$=KB+(I_L/(C_b \times L_{pp} \times B \times d))-VCG$									
$criteria R_{PLA}$	$R_{PLA}=[\min(1.83d(Fn)^2, 0.05)]m$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	$1.83d(Fn)^2=$	0.622	0.597	0.577	0.975	0.963	0.966	0.975	0.968	0.966
$GM_{min} > R_{PLA}$	Result (Pure loss of stability L-1)	Safe	Safe	Safe	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger
	$\Delta GM/GM$ is calculated as follows:	5.514	5.463	5.379	0.991	0.982	0.998	0.98	1.022	0.987
	$\Delta GM=(I_{tr}-I_L)/(2V)$									
	$=(I_{tr}-I_L)/(2 \times C_b \times L_{pp} \times B \times d)$	1.676	1.732	1.796	0.923	0.938	0.932	0.925	0.931	0.934
	$\Delta GM/GM=$		0.317	0.334	0.931	0.956	0.934	0.944	0.911	0.947
	Result (Parametric Roll L-1)		Safe	Safe	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger

**Fig. 8** Parametric roll (Level-1)

2.2.2 파라메트릭 롤 안정성 판정식 Level-2

순수복원성 손실 모드와 같이 파라메트릭 롤의 취약성 판정 방법도 동일하게 확률적 접근법에 의한 것이고, 그 개개의 계산 내용은 Level-1에서와 다르지 않다. 다만, 파라메트릭 롤의 Level-2에서는 매우 세밀한 계산을 요구하는데, 이는 과도한 보수성에 의해 발생하는 큰 설계마진을 방지하기 위한 목적이다. 여기서 매우 주의할 점은, 파라메트릭 롤의 평가방법에 대한 전문가들의 상이한 의견들에 의하여 2가지의 방법이 병용되고 있는데, 이를 Level-2A, Level-2B로 나타낸다. 이 2가지의 방법 중에서 하나를 통과하면 안전성 기준을 통과하는 것이 현재까지의 기준이기 때문에, Level-2A를 실패한 경우에만 Level-2B를 실행하게 된다. 이에 따라 실제적으로는 Level-2 내부에 다시 2개의 Level을 설정한 것과 동일한 효과를 나타내게 되었다.

Level-2A에서는, Level-1에서와 동일한 의미의 계산을 수행하지만, 주어진 해상의 각각의 파에 대한 위험의 정도를 계산하고 이를 파의 가중치와 곱하여 최종적인 취약정도 C1을 계산하여 이 값이 기준 값 넘지 않는 것을 안정한 것으로 판정한다.

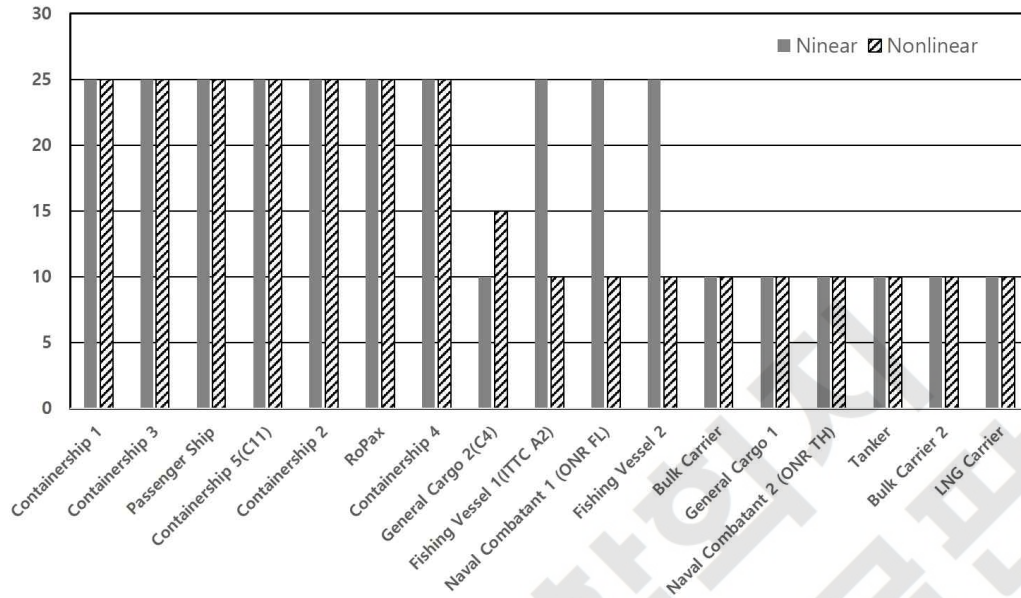


Fig. 9 Parametric roll angle (Level-2)

$$C1 = \sum_{i=1}^n W_i C_i \leq R_{PR0} \quad (13)$$

$$GM(H_i, \lambda_i) > 0, \quad \frac{\Delta GM(H_i, \lambda_i)}{GM(H_i, \lambda_i)} < R_{PR} \quad (14)$$

파라메트릭 롤의 Level-2B 판정법은 파의 방향에 따르는 위험 요소를 고려하는데 각 7개의 방향에 따른 값을 평균하여 위험도를 평가하는 방법이다.

$$C2 = \left[\sum_{i=1}^3 C2(Fn_i, \beta_h) + C2(0, \beta_h) + \sum_{i=1}^3 C2(Fn_i, \beta_f) \right] / 7 \quad (15)$$

이에 해당하는 파의 정보는 미리 정의된다. 이에 대한 정보는 IMO(2009a)에 자세하게 정의되어 있다.

본 연구에서는, Korea Maritime Services(KMS)에서 설계 건조한 선박의 주요치수를 Table 3에 나타내었고 대상 선박에 대하여 파라메트릭 롤의 계산 결과를 Table 4, Table 5 및 Table 6에 나타내었다. 본 계산 결과를 도식화(Fig. 9)하면 취약성 평가 결과를 확연하게 알 수 있다. Level-2B의 방식에 따를 경우, 미분방정식의 적분 과정을 필수적으로 수행하는데, 이 과정에서 비선형 항을 고려하는가에 따라 다른 결과가 나타나는 경우가 보고되어 있어, 본 연구에서는 2가지의 방법을 적용했을 때의 각각의 결과를 나타내어 이를 비교하였다.

계산의 결과는 비선형 항을 고려한 결과가 항상 평가된 횡요각의 크기가 작다는 점인데, 이러한 결과는 더욱 세밀한 계산이 과도한 보수성을 제거할 수 있는 수단이라는 점을 알려 주고 있다. 계산된 선형/비선형의 결과를 보면, 일반적인 경향이, 컨테이너선과 RoPax, 여객선 등의 고속으로 운항하는 무게 중심이 높은 선종이 파라메트릭 롤에 현저하게 취약하다는 사실을 알 수 있다.

Level-1과 Level-2를 통하여, 전체적으로 파라메트릭 롤에 대한 취약성 정도가 순수복원성 손실에 대한 취약성에 비하여 더 큰 것으로 나타나고 있음에 유의하여야 한다. 이에 따라 조선사의 입장에서는 설계 시 가장 중점적으로 점검해야 하는 모드가 파라메트릭 롤이라는 사실을 잘 인식해야 할 것으로 생각된다. 동시에, 해운사 등의 선박운항 관계자의 입장에서는 새로운 복원성 기준에 따르면, 파라메트릭 롤 취약성 때문에, 새로운 선박에서는 현재의 선박에 비하여 선박의 운항속도를 감소시키거나 무게중심을 낮게 만들기 위해 적재 화물의 용량을 감소시켜야 하는 사실을 인식할 필요가 있다.

3. 국내선박 복원성 취약 모드 계산 예

2세대 복원성에 관한 세계적인 연구자들의 결과는 매우 방대하지만, 선박의 종류가 매우 다양하고, 그 크기도 매우 넓은 범위에 걸쳐 있어서, 이러한 결과를 국내 조선 관계자들이 이용하는 것에는 한계가 있다. 2세대 복원성에 관한 국내 실적선의 결과를 살펴보는 것이 국내 관계자에게는 실질적으로 도움이 될 것으로 생각한다.

순수복원성 손실 모드와 파라메트릭 롤 모드에 대한 Level-1 계산결과를 Table 4, Table 5 및 Table 6에 나타내었다. 컨테이너선의 특성

상, 많은 하중조건이 존재하는데, 여기서는 대표적인 하중조건에 대하여 조사하였다. 특히, 선체의 운항에 따른 흘수변화까지 포함하여 출항 시와 입항시의 무게 차이를 고려하여 흘수를 계산하였다. 본 조사에 따르면, 하중이 증가하여 흘수가 증가한 조건에서 Level-1 단계에서 순수복원성 취약 판정이 발생하는 것으로 나타났다. 각 선형 파라미터들은 선형화된 보간법을 사용하여 추정된 값이지만, 이 결과는 매우 타당한 결과를 보여주고 있다. 컨테이너선의 경우 선수 선형의 상하 방향의 변화가 크고, 수선면의 형상이 흘수에 따라 현저하게 변화하기 때문에 순수복원성 손실이 발생할 여지가 크다. 이러한 계산을 근거로 순수복원성 손실 모드의 취약성을 개선하려는 방법으로는 선체의 설계 관점에서는 선박의 운항속도를 줄이는 방법과 Froude 수를 감소시키는 방법을 생각할 수 있다. Froude 수를 줄이기 위해서 선체의 길이를 증가시키는 방법을 적용할 경우, 1040TEU 선박의 길이를 134.7m에서 153.5m로 늘이고, 속도를 9.26m/s로 고정하여 생각하면, Froude 수가 0.255에서 0.239로 낮아져서 Level-1 단계에서 취약성 검증을 통과하지만, 선체의 길이를 늘이는 것은 매우 비현실적이라 생각된다. 이에 반하여, Froude 수를 줄이기 위하여 선박의 운항속도를 줄이는 방법을 생각해보면 원래 선체의 길이 134.7m를 고정할 경우, 선속을 9.26m/s에서 8.23m/s로 감소시키면 Froude 수를 원하는 수준으로 감소시킬 수 있어서 보다 현실적인 대안으로 생각할 수 있다. 운항 측면에서의 해결책으로는 무게중심을 10cm 정도 내리는 방법을 생각할 수 있는데, 이를 위해서 가능한 조치는 컨테이너 적재량을 감소시키는 방법이고, 원하는 정도의 무게중심 이동을 고려하면 컨테이너 적재 층수 1단을 희생해야 할 것으로 판단된다. 컨테이너 적재량을 감소시키는 것은 선주의 입장에서 대단히 중요한 문제이기 때문에, 컨테이너 적재량을 감소시키지 않는 해결책을 생각해 보면, 빈 컨테이너는 모두 상부에 적재하는 방식으로 무게중심을 하방 이동시키는 방법을 생각할 수 있고, 이는 하역 순서 등에 큰 영향을 미치는 요소로 작용하기 때문에 매우 조심스럽게 고려해야 할 것으로 판단된다. 마지막으로 선저 평형수를 통하여 무게중심을 하방으로 이동시킬 수 있는데, 이 방법 또한 전체 컨테이너 적재량과 연동될 수밖에 없는 문제이기 때문에 세심한 계산이 필요하고, 무게중심을 움직일 수 있는 거리가 제한적이기 때문에 부차적인 해결책으로 고려될 수준으로 판단된다.

파라메트릭 롤의 경우에도, 3선박의 경우에 공통으로 파라메트릭 롤에 취약한 것으로 나타났는데, 이는 어느 정도 예상한 사항이다. 컨테이너 및 RoPax 선형의 경우, 상갑판 위에 화물 또는 선실 등의 구조물이 있기 때문에 무게 중심이 상당히 높은 것을 피할 수 없고, 선중의 특성상 무게중심을 극단적으로 낮게 만들 경우 횡요 가속도의 증가로 화물의 손상이나 승선원들에게 미치는 건강상의 악영향이 예상되어 무게중심의 이동이 제한적일 수밖에 없는 것이 현실이다. 파라메트릭 롤에서의 취약성을 개선하기 위한 방안으로는 선체 설계의 관점에서는 흘수의 변화에 따른 수선면의 형상 변화가 적게 하여 수선면의 관성모멘트의 차이($I_H - I_L$)를 줄이는 방법이 기본적인 지만, 저항/추진 성능을 고려하여 생성된 선형의 경우에는 이러한 실린더형의 선형을 도입하는 것은 매우 어려운 일이다. 국부적으로는 빌지킬의 면적 증가를 생각할 수 있는데, 빌지킬을 설치할 수 있는 공간이 제한되는 점 때문에 빌지킬의 면적 변화는 제한적인 해결책으로 생각된다.

Table 5 1000 TEU CV pure loss of stability and parametric roll (Level-1)

	Draft	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9	13.9
	only if, $(V_D - V)/A_W(D-d) \geq 1.0$	1.17	1.18	1.18	1.05	1.06	1.05	1.05	1.06	1.05
V_D	Displacement volume (m^3)	25851.1	25851.1	25851.1	25851.1	25851.1	25851.1	25851.1	25851.1	25851.1
A_W	Area of water plane (m^2)	2273.0	2260.4	2250.1	2706.8	2704.4	2705.2	2706.9	2703.4	2707.9
I_L	Second Moment of the water plane at the draft d_L (m^4)	63354	62929	62465	84260	84275	84245	84120	84150	84393
KB	Center of buoyancy in height direction	2.842	2.783	2.732	4.490	4.479	4.483	4.491	4.475	4.494
	$=KB + (I_L/V) - VCG$									
GM_{min}	$=KB + (I_L/(C_b \times L_{pp} \times B \times d)) - VCG$	2.806	2.997	3.118	-0.007	0.106	0.162	0.090	0.206	0.319
$criteria R_{PLA}$	$R_{PLA} = [\min(1.83d(Fn)^2, 0.05)]m$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
	$1.83d(Fn)^2 =$	0.621	0.608	0.597	0.965	0.963	0.963	0.965	0.962	0.965
$GM_{min} > R_{PLA}$	Result (Pure loss of stability L-1)	Safe	Safe	Safe	Danger	Safe	Safe	Safe	Safe	Safe
	$\Delta GM/GM$ is calculated as follows:	5.292	5.309	5.285	0.943	1.038	1.094	0.797	1.131	1.223
	$\Delta GM = (I_H - I_L)/(2V)$									
	$= (I_H - I_L)/(2 \times C_b \times L_{pp} \times B \times d)$	1.673	1.694	1.717	0.911	0.911	0.912	0.915	0.915	0.907
	$\Delta GM/GM =$	0.316	0.319	0.325	0.966	0.878	0.833	1.148	0.809	0.742
	Result (Parametric Roll L-1)	Safe	Safe	Safe	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger

Table 6 GT 22,000 Ton class RoPax pure loss of stability and parametric roll (Level-1)

	Draft	1.26	1.28	1.29	1.13	1.17	1.17	1.26	1.28	1.28
	only if, $(V_D - V)/A_W(D-d) \geq 1.0$	41043.9	41043.9	41043.9	41043.9	41043.9	41043.9	41043.9	41043.9	41043.9
V_D	Displacement volume (m^3)	2723.9	2676.4	2631.2	3079.2	2966.5	2966.5	2720.7	2667.2	2667.2
A_W	Area of water plane (m^2)	74837.88	73570.96	71293.18	88414.44	87548.38	87548.38	77499.16	76183.94	76183.94
I_L	Second Moment of the water plane at the draft d_L (m^4)	2.834	2.730	2.624	3.240	3.128	3.128	2.826	2.708	2.708
KB	Center of buoyancy in height direction	-0.430	-0.610	-0.895	-0.379	-0.523	-0.604	-0.374	-0.560	-0.657
GM_{min}	$= KB + (I_L/V) - VCG$ $= KB + (I_L/(C_b \times L_{pp} \times B \times d)) - VCG$	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
$criteria R_{PLA}$	$R_{PLA} = [\min(1.83d(Fn)^2, 0.05)]m$	0.672	0.648	0.623	0.762	0.738	0.738	0.670	0.643	0.643
	$1.83d(Fn)^2 =$	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger
$GM_{min} > R_{PLA}$	Result (Pure loss of stability L-1)	Safe	Safe	Safe	Danger	Safe	Safe	Safe	Safe	Safe
$\Delta GM/GM$ is calculated as follows:		3.245	3.107	2.915	3.074	2.969	2.888	3.121	3.01	2.868
$\Delta GM = (I_H - I_L)/(2V)$ $= (I_H - I_L)/(2 \times C_b \times L_{pp} \times B \times d)$		3.807	3.992	4.247	2.829	2.950	2.950	3.685	3.883	3.883
$\Delta GM/GM =$		1.173	1.285	1.457	0.920	0.994	1.021	1.181	1.290	1.354
Result (Parametric Roll L-1)		Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger	Danger

본 논문에서는 Level-1에 따른 기준을 적용하여 취약성을 평가하여 대부분 부정적인 결과를 얻었지만, 이는 Level-2를 통하여 보다 자세한 조사가 필요하다는 결론이며, Level-2의 조사에서는 보다 현실적인 평가가 나올 수 있을 것으로 예상할 수 있다. 다만, 파라메트릭 롤의 경우는 3가지 선형 모두에 대하여 대폭적인 변화를 요구하는 것으로 보여 3단계 직접 평가 범을 포함하여 더욱 세심한 계산이 필요 한 것으로 판단된다.

4. 요약 및 결론

본 연구에서는 2세대 복원성 기준에 대하여 현재의 국제적 연구 동향을 살펴보고, 각각의 모드의 물리적 배경과 수학적 모델링의 절차를 간략하게 정리하였다. 특히, 국내 조선사의 주된 건조선박의 크기가 상대적으로 대형임을 고려하여, 대형 선박에서 발생할 확률이 매우 낮거나 규정 자체에서 이미 계산의 대상에서 제외될 모드들은 제외하고, 국내 조선사와 매우 밀접한 관계에 있는 순수복원성 손실 모드와 파라메트릭 롤 모드에 대하여 논의하였다.

순수복원성 손실 모드의 경우, 해당하는 선박은 현재의 기준으로 설계를 진행하더라도 크게 문제 될 것이 없는 경우가 많지만, 파라메트릭 롤의 경우에는 하중 조건에 따라 취약성 기준에 미달하는 경우가 종종 발생할 수 있음을 나타내었다. 특히, 국내 조선 산업의 중요한 선종의 하나인 컨테이너선의 경우, 하중조건에 따라 파라메트릭 롤 모드의 취약성 기준에 미달하는 경우가 자주 발생하는 것이 조사되었는데, 이에 대한 적절한 대책이 요구된다고 판단된다. 이상의 내용을 요약하여 나타내면 다음과 같다.

(1) 각종 해난사고의 발생으로 인한 인명과 화물의 손실을 방지하기 위하여 국제해사기구는 선박의 안정성 향상을 위한 제2 복원성 기준을 개발 중이며, 그 기준은 선박이 파랑 중에서도 충분한 복원성을 확보하는 것이다. 새로운 복원성 기준은 기존의 복원성 기준에 추가로 부가되는 것으로, 기존의 복원성 기준은 새로운 복원성 기준 발효 이후에도 유효하다.

(2) 파랑 중에서의 복원성 관련하여 5가지 모드에서의 기준을 개발하고 있는데, 그 검사 진행 구조는 복원성 기준 충족 여부를 검증하기 위한 계산 작업을 최소화하기 위하여 다층구조로 이루어져 있다. 낮은 Level에서는 간단한 계산으로 기준을 검증하고, Level이 높아질수록 복잡하고 자세한 검증을 수행하는데, 낮은 Level에서 기준을 충족할 경우, 다음의 Level에 대한 계산을 수행하지 않는 방식으로 기준 검증을 위한 계산을 최소화하였다. 일반적으로 단계가 낮은 경우에 설계 마진이 많이 포함되어 있어서, 그 취약성의 판정이 보수적으로 나타나기 때문에 최적화의 입장에서는 불리한 결과가 도출된다.

(3) 가장 낮은 Level-1에서는 매우 간단한 식으로 복원성 확보 여부를 검증하지만, Level-2에서는 보다 복잡한 방식을 도입하여 확률적인 취약성을 판단함으로써 복원성 충족 여부를 판단한다.

(4) Level-3에서는 직접 시뮬레이션을 수행함으로써 매우 자세한 계산을 수행하지만, 이에 높은 수준의 계산프로그램이 필요하며, 이 계산프로그램이 가져야 할 사양에 대하여 논의 중이다. 다만, 일반적인 입장에서 합리적인 컴퓨터 프로그램의 경우 계산시간이 상대적으로 긴 것으로 판단되어, 실용적인 시간 안에서 해당 선박의 복원성을 판정하는 기법을 개발하는 것이 요구되는 것으로 판단된다.

(5) 여러 가지 경우의 국내 설계 실적선에 대하여 2세대 복원성 기준을 적용하여 그 결과를 검토한 결과, 현재의 기준으로 건조된 선박의 경우, 많은 경우에 복원성 기준을 만족하지 못할 것으로 보이고, 선속 또는 재화중량 등이 제한된 상태로 운항할 수밖에 없을 것으로 판명되는바, 적절한 설계변경을 통하여 새로운 복원성 기준을 만족하게 하는 작업이 필요할 것으로 생각된다.

후 기

이 논문은 2019년 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(선박 안정성 향상을 위한 IMO 2세대 복원성 검증기술 개발 20180318)

References

- American Bureau of Shipping (ABS). (2004). Guide for the Assessment of Parametric Roll Resonance in the Design Of Container Carriers. Houston, USA; American Bureau of Shipping.
- Belenky, V., Bassler, C.G., & Spyrou, K.J. (2011). Development of Second Generation Intact Stability Criteria (NSWCCD-50-TR-2011/065). Naval Surface Warfare Center Carderock Division, US Navy.
- Chouliaras, S. (2014). Evaluation of IMO'S Second Generation Intact Stability Criteria (M.S. Thesis). National Technical University of Athens, Athens, Greece.
- Grinnaert, F. (2017). Analysis and Implementation of Second Generation Criteria in a Stability Computer Code (Ph.D. Thesis). Université de Bretagne Occidentale (UBO), Brest, France.
- Ikedo, Y. (2004). Prediction Methods of Roll Damping of Ships and Their Application to Determine Optimum Stabilization Devices. Marine Technology, 41(2), 89-93.
- International Maritime Organization (IMO). (2009a). International Code of Intact Stability. Development of Second Generation Intact Stability Criteria, London.
- International Maritime Organization (IMO). (2009b). Information Collected by the Intersessional Correspondence Group on Intact Stability. SLF 52/INF.2, Submitted by USA, London, England.
- International Maritime Organization (IMO). (2012). Proposal of Revision of Updated Draft Vulnerability Criteria of Levels 1 and 2 for the Failure Modes of Pure Loss of Stability and Parametric RII. SLF ISCG 54/19, Submitted by Japan, London, England.
- International Maritime Organization (IMO). (2013). Information Collected by the Correspondence Group on Intact Stability Regarding the Second Generation Intact Stability Criteria Development, SDC 1/INF.8, Submitted by Japan, London, England.
- International Maritime Organization (IMO). (2016a). Finalization of Second Generation Intact Stability Criteria, Amendments to Part B of the 2008 IS Code on Towing, Lifting and Anchor Handling Operations. SDC 3/WP.5, 3rd Session.
- International Maritime Organization (IMO). (2016b). Observations Regarding the Feasibility of the Current Version of the Level 2 Criterion for Parametric roll in the Second Generation Intact Stability Criteria. Submitted by Sweden, London England.
- Krüger S., Hatecke H., Billerbeck H., Bruns A., & Kluwe F. (2013). Investigation of the 2nd Generation of Intact Stability Criteria for Ships Vulnerable to Parametric Rolling in Following Seas. Proceedings of ASME 2013 32nd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, Nantes France, 10353-10363. <https://doi.org/10.1115/OMAE2013-10353>
- Peters, W., Belenky, V., Bassler, C., Spyrou, K.J., Umeda, N., Bulian, G., & Altmayer, B. (2011). The Second Generation Intact Stability Criteria: An Overview of Development. Proceedings of SNAME Annual Meeting and Expo - Society of Naval Architects and Marine Engineers, Houston, USA.
- Rahola, J. (1939). The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability Especially Considering the Vessels Navigating Finnish Water (Ph.D. Thesis). Technical University of Finland, Helsinki Finland.
- Umeda, N. (2013). Current Status of Second Generation Intact Stability Criteria Development and Some Recent Efforts. Proceedings of the 13th International Ship Stability Workshop, Brest, France, 138-157.
- Uzunoglu, C.E. (2011). Numerical and Experimental Study of Parametric Rolling of a Container Ship in Waves (M.S. Thesis). Technical University of Lisbon, Lisbon, Portugal.

Author ORCIDs and Contributions

Author name	ORCID	Contributions
Chung, Jaeho	0000-0003-1975-3435	①②③④⑤
Shin, Dong Min	0000-0002-9287-9803	③④
Kim, Won-Don	0000-0002-8892-064X	②
Moon, Byung Young	0000-0002-3935-504X	⑤

- ① Conceived of the presented idea or developed the theory
- ② Carried out the experiment or collected the data
- ③ Performed the analytic calculations or numerical simulations
- ④ Wrote the manuscript
- ⑤ Supervised the findings of this study