

## 선박 운항자 지원 시스템용 선박 복원성능 지수 개발

임남균\* · 황수진\*\* · 최훈\*\*\*\*

\*, \*\*\*, \*\* Mokpo National Maritime University, \*\* 한국해양수산개발원

## Development of Stability Index for Vessel Operators Support System

Nam-Kyun IM\* · SooJin HWANG\*\* · Hun CHOE\*\*\*\*

\*, \*\*\*, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

\*\* Korea Maritime Institute, Busan 49111, Korea

**요 약** : 선박의 안전 확보를 위해 준수해야 하는 IMO 복원성 규칙에는 복원성 곡선(GZ Curve) 등에 관한 내용이 다양하게 규정되어 있다. 이 IMO 복원성 규정에는 다양한 항목의 만족 기준이 제시되고 있으나, 선박을 운항하는 선장에게 선박의 복원성능을 종합적이며, 간편하게 제공할 수 있는 방법은 부재한 상황이다. 이를 위해 본 연구에서는 복원성을 하나의 값으로 표현할 수 있는 지수를 개발하였다. IMO에서 규정한 선박의 6가지 복원성 항목과 대상선박의 적재상황에 따른 복원성 계산결과를 바탕으로 지수산정식이 도출되었다. 또한 개발된 지수산정식을 적용하여 다양한 화물 적재 상황별 복원성 지수(Stability Index)를 계산하였으며, 복원성능의 전반적인 정도를 수치적으로 적절하게 설명할 수 있음을 검증하였다. 이는 선박의 선장에게 복원성 평가하고 판단하는데 도움을 줄 것으로 판단된다.

**핵심용어** : IMO 규정, 복원성능 지수, 복원성능평가, 복원성 곡선, 화물적재상황

**Abstract** : All ships should ensure stability in accordance with IMO regulations. However, GM is only used to determine ship stability because it takes a lot of time to validate all regulations. This is a problem given that the safety of vessels cannot be guaranteed, potentially leading to accidents. There is a need for a more intuitive and comprehensive method of confirming the stability of ships. This study developed a stability index that expresses ship stability in one value. An index equation is defined based on the 6 stability criteria for ships prescribed by IMO and the result of calculating the ship stability of a model ship. A stability index has been derived for each loading condition by applying the index equation to the same ship. It can clearly be seen that this stability index appropriately explains the criteria. In other words, it is possible to assess ship stability with one value and confirm whether the ship stability satisfies IMO regulations. This index will help masters and officers more easily and accurately check ship stability.

**Key Words** : IMO Regulations, Stability Index, Evaluation of Stability, GZ Curve, Loading Condition

## 1. 서 론

국제해사기구 IMO(International Maritime Organization)에서는 1985년 Resolution A.562 협약에서 복원성에 대한 규정을 마련하였으며, 1993년과 2008년에 Resolution A.749(18)과 Resolution MSC.267(85)(이하 2008 IS CODE)을 통해 관련 규정을 개정하였다(IMO, 1985; 1993; 2008). 국내에서는 2008 IS CODE를 토대로 고시(선박복원성기준)를 제정하여 국내 선

박이 IMO 규정을 준수하도록 하고 있다.

복원성 관련 연구를 살펴보면 선체구조와 외란을 고려한 복원성능 향상에 대한 내용이 주를 이루고 있다. Jeong et al.(2013)과 Kim(2014)은 선형변화에 따른 복원성과 승선감 향상에 대한 내용을 세일링 카라마란 요트 등의 선종을 이용하여 수행하였다. Kim(2016)과 Ham et al.(2011)은 선박의 상부구조물 형상변화가 복원안정성에 미치는 영향 및 어선에 대한 복원성 계산과 구조적 문제 개선 연구를 각각 수행하였다. 또한 Jeong and Ahn(2014)은 집어등의 소재를 바꾼 어선들을 대상으로 복원성능을 정량적으로 비교·분석하였다.

\* First Author : namkyun.im@mmu.ac.kr

† Corresponding Author : chagape1@naver.com

외란을 고려한 복원성 연구로서, Kang and Moon(2015)과 Lee et al.(2009)는 돛을 단 레저선박에 풍하중이 작용하였을 때 선박의 복원력을 평가하고 수조실험을 통해 횡동요 특성을 각각 분석하고 복원성 기준과 비교하였다. 또한 Jo et al.(2014)는 트롤선의 복원성 문제로서, 횡경사가 심한 상황에서의 위험도를 분석하였으며, Yong et al.(2013)은 해양 파력과 선박 횡동요 발생 시 선박 전복 가능성을 각각 예측하는 연구를 수행하였다.

외국 및 기타 연구로서 Bulian(2010)과 Neves and Rodriguez(2007)는 추파·장파에 대한 복원 성능, 파에 의한 횡동요에 의한 복원성능에 관한 연구를, Choe(2016)는 GM 변화에 따른 선박 조종성능의 변화 경향 및 관계를 모형선 시험을 통해 정량적 분석을 수행하였다. 기존의 연구의 복원성 동향을 요약하면, 선체 구조적 개선을 통한 IMO 규정 기반의 복원성 향상 문제, 외란하에서 선박 전복의 확률 및 위험성 평가 등이 주된 선박 복원성 연구의 흐름이라 볼 수 있다.

하지만 선박의 복원성을 지수화된 하나의 수치로 종합하여 선박의 복원성능을 간편히 직관적으로 판단하는 방법에 대한 연구는 드물다. 특히 선박을 항해하는 선장 입장에서 보면 기존의 IMO 규정의 복원성 점검 규정은 그 항목 숫자가 많고 계산이 복잡하여 각 복원성 항목을 직접 계산하여 IMO 기준값과 비교 분석하는 작업을 수행하기가 쉽지 않다. 따라서 선박에 탑재된 화물용 Loading Program을 이용하여 IMO 복원성능 만족 여부를 판단하거나, GM 값만을 이용하여 간편히 복원성능 여부를 판별하는 것이 현실이다.

이러한 현실을 감안하여, 이 연구에서는 선장이나 항해사에게 선박의 복원성능 정도를 종합적으로 간편히 파악할 수 있는 지수를 제공하는 것을 그 목적으로 하여, 선박의 복원성능을 하나의 수치로 표현하는 복원성 지수를 개발하였다. 이를 위하여, IMO 복원성 규정에서 설정된 각종 규정 및 항목을 분석하고, 각 항목간의 상관관계를 분석하여 복원성 지수 산정식을 제안하였다. 제안된 산정식을 이용하여 대상 선박 모델의 다양한 적재상태에 따른 복원성 지수값을 계산하였다. 제안된 복원성 지수값의 유효성을 검증하기 위해 선박의 복원성능 계산결과와 복원성 지수값을 비교·검토한 결과 개발된 복원성 지수값이 종합적인 선박의 복원성능 정도를 적절하게 표현하고 있음을 확인하였다.

## 2. IMO 복원성 규정

2008 IS CODE는 선박의 안전운항과 선박, 본선의 인원 및 환경에 대한 위험을 최소화하기 위해 IMO에서 만든 규정으로, 선박의 복원성과 관련된 기준을 제시하고 있다. 이 CODE는 주로 길이가 24미터 이상인 선박 및 기타 해상운송

수단을 대상으로 하고 있다. 본 연구에서 제안한 복원성 지수 개발 산정식에 고려할 항목으로 기본적인 IMO 복원성 규정의 GoM 및 복원성 곡선(GZ Curve)과 관련된 면적값을 우선 대상으로 선정하였다. 이 값들은 선박의 복원성능을 평가할 때 기초적으로 사용되는 항목이며, 그 내용은 아래의 Table 1과 같이 각 항목 의미와 IMO 규정 기준값을 표시하였다.

Table 1. Stability Criteria under GZ Curve

Items	Criteria
Area (0 to 30) < Area under GZ curve between 0° and 30° >	0.055 m-rad
Area (0 to 40) < Area under GZ curve between 0° and 40° ( or $\varphi_f$ ) >	0.090 m-rad
Area (30 to 40) < Area under GZ curve between 30° and 40° ( or $\varphi_f$ ) >	0.030 m-rad
GZ at 30deg < GZ at a heeling angle of 30° or more >	0.200 m
Angle of Max GZ < heel angle corresponding to maximum GZ >	25 deg
GoM < initial metacentric height (GoM) >	0.150 m

Table 1의 IMO 복원성 기준을 개략적으로 살펴보면 다음과 같다. 선박의 복원성능은 GoM 값의 영향을 받으며, 복원정(GZ)은  $GM \times \sin\theta$ ( $\theta$ =경사각)이기 때문에 복원정 곡선을 이용하여 복원성능을 평가한다. 2008 IS CODE에서는 횡측과 GZ Curve 아래의 면적 값으로 복원성에 대한 기준을 설정하고 있다. 횡경사각(Angle of heel) 0°에서 30°까지의 면적은 0.055 m-rad 이상이어야 하며, 0°에서 40°(또는 해수유입각( $\varphi_f$ )이 40° 미만인 경우에는  $\varphi_f$ 를 적용)까지의 면적은 0.090 m-rad 이상이어야 한다. 횡경사각 30°부터 40°(또는  $\varphi_f$ 이 40° 미만인 경우에는  $\varphi_f$ 를 적용)까지의 면적이 0.030 m-rad 이상이어야 하며, 이 면적은 선박이 특정 각도까지 기울어지는데 필요한 일의 양인 선박의 동적복원력을 의미한다.

또한, 30° 이상의 횡경사각에서 복원정은 0.2m 이상이어야 하며, 최대복원정은 25° 이상의 횡경사각에서 나타나야 한다. 자유표면효과에 의하여 수정된 초기 메타센터높이 GoM은 0.15 m 이상이어야 한다.

### 3. 평가항목 분석

이 장에서는 복원성 지수개발용 지수 산정식 제안을 위하여 모델 선박을 대상으로 다양한 화물적재상태를 구현하고 각 상황별 복원성능을 계산하였다. 이를 통하여 각 복원성 규정 항목별 상관 관계를 살펴보고, 복원성 지수 산정식 제안을 위한 기초 자료로 활용하였다.

#### 3.1 대상선박 선정

대상선박은 17,000 ton 급의 컨테이너 선박이며, Table 2는 선박의 주요제원을, Fig. 1은 선박의 화물적재 상태 화면을 나타내고 있다.

Table 2. Particular of Model ship

Ship type	Container ship
L × B	146 × 22 m
Displacement	17105.6 ton
Loading condition	Full
Eqv. Draught	8.124 m

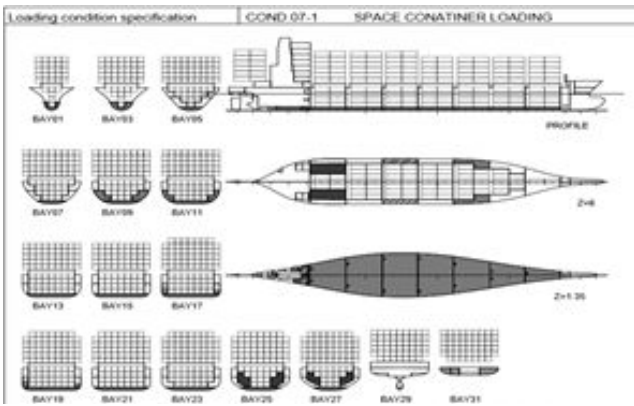


Fig. 1. Loading condition specification.

#### 3.2 복원성능 계산 및 평가항목 분석

대상 선박의 복원성능 계산하고, IMO 복원성 규정 각 항목간의 관계를 살펴보기 위하여 다양한 화물 적재 상황을 가상하여 설정하였다. 다양한 화물 적재 상황은 완성복원성 계산서(Stability booklet) 상에 명시된 표준적재상태를 화물 적재 상황을 우선 고려하였다. 또한 선박의 배수량이 100%인 상황에서 화물의 위치를 수직 이동함으로써 적재상황에 변화를 주어 다양한 화물 적재 상황을 산정하였다. 산정된

화물적재상황의 시나리오 개수는 총 20가지이며, 이때 GoM 값의 범위는 0.06 ~ 1.91 m, 고려한 IMO 복원성 항목 규정은 6가지(Table 1) 등이다. 계산 수행에 사용된 선박 화물 적재 상황의 시나리오 요약은 Table 3과 같다.

Table 3. Scenario of Stability Calculation

Number of Case	20 Cases
Metacentric height (GoM)	0.06 ~ 1.91 m
Number of Criteria	6 (Table 1)
Displacement	100 % (Full Disp.)

총 20가지 선박 적하 상태에 대하여, 6가지 IMO 복원성능 기준 항목(Table 1)에 대한 계산이 이루어 졌으며, 계산에 사용된 각 항목의 수식은 2008 IS CODE 및 국내 선박복원성 기준에 규정된 각 항목의 계산식을 채용하였다.

Fig. 2와 Fig. 3은 계산된 6가지 기준 항목들을 GoM의 변화에 따라 각각 나타낸 그래프이다. Fig. 2은 횡경사각이 0°~30°, 0°~40°(또는  $\varphi_f$ ), 30°~40°(또는  $\varphi_f$ )일 때 GZ Curve 아래의 면적을 나타낸 그래프이며, Fig. 3은 30°에서의 복원정과 최대복원정에서 발생하는 횡경사각을 나타낸 그래프이다. 두 그래프 모두 GoM이 증가함에 따라 각 항목의 계산결과도 증가하는 경향을 보이고 있다. 그러나 그 증가변화율은 각기 항목별로 차이가 있음을 알 수 있다.

즉 선장이나 항해사들은 GoM이 증가하면 전체적인 복원성능이 개선된다고 알고 있고, 따라서 GoM 값을 선박 복원성능 평가에 절대적인 기준으로 삼고 있다. 하지만, 그림에서 보는 바와 같이 선박의 복원성능을 평가하는데 사용되는 IMO 복원성 규정 항목들은 GoM 증가에 따라 그 증가폭이 각기 다르기 때문에 GoM 만을 복원성 평가 기준으로 삼는 것은 바람직하지 않음을 알 수 있다. 또한 GoM이 IMO 기준 값을 만족하더라도 다른 항목은 각자의 기준값에 미달할 수 있으며, IMO 규정 항목들이 모두 기준값을 초과하더라도 복원성능의 그 정도는 GoM 뿐 아니라 전체 IMO 규정 항목을 종합적으로 평가하여 판단하는 것이 바람직하다고 평가 할 수 있다.

본 연구에서 선정하여 계산한 IMO 복원성능 지표 6가지 항목간의 자세한 상관관계 및 변화 추이를 분석하기 위하여, GoM 값의 증가에 따른 다른 항목의 실제 값들을 계산하여 정리하여 보았다. Table 4는 그 계산 결과이다. 도표에서 보는 바와 같이 총 20가지 선박 화물적재 상황별로 계산되었으며, GoM은 0.06 m~1.91 m의 값 범위로 분포하고 있다.

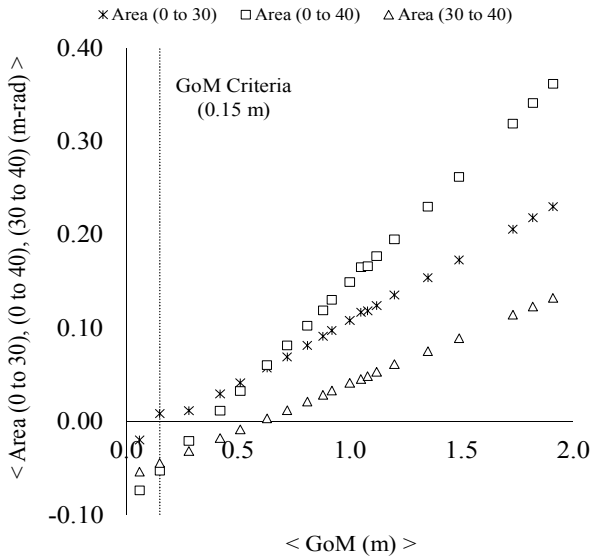


Fig. 2. Relationship between GoM and Area under GZ curve.

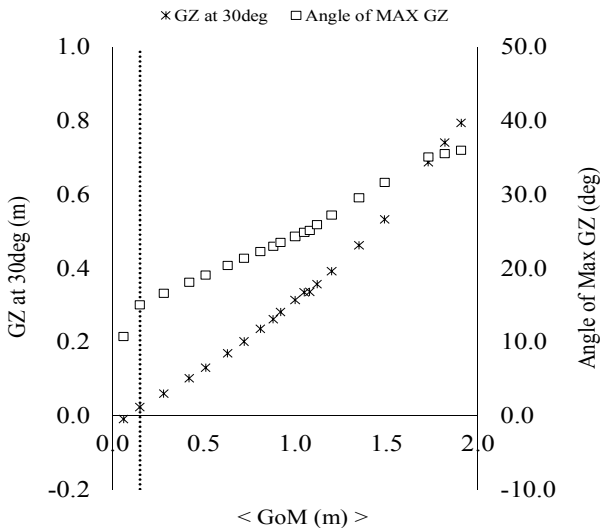


Fig. 3. Relationship between GoM and GZ at 30deg/Angle of Max GZ.

Table 4에서 보는 바와 같이 항목별로 IMO 규정의 기준값을 만족하는 화물 적재 상황이 각기 상이 함을 알 수 있다. 즉 GoM의 경우 복원성이 비교적 악화된 Case 2에서 기준값 0.15 m를 만족하고 있음에 반하여, Area(0° to 30°) 항목의 경우 GoM이 0.63 m로 증가한 case 6에서 기준값 0.055 m-rad을 만족하고 있다. 특히 Angle of Max GZ 항목의 경우, GoM이 1.08 m로 많이 증가한 case 13에 이르러 겨우 그 규정값 25°를 초과 만족하고 있음을 나타내고 있다.

이러한 항목간의 계산값의 변화 추이를 볼 때 선장이나

항해사들이 GoM이 일정 정도 증가하여 복원성능이 일정 정도 확보되었다고 생각할 수 있으나, 다른 IMO 복원성 규정 항목은 아직 규정에 미달하는 상황이 자주 발생할 수 있음을 알 수 있다. 도표에서 GoM이 0.092 m~1.05 m인 case 10~12의 경우도 GoM이 1 m 부근이라, GoM만으로 복원성능을 평가한다면 어느 정도 안정화되었다 오해할 수 있으나, 다른 항목들이 IMO 규정에 미달하고 있는 상황이다.

즉 평가 항목별로 IMO 규정을 만족하는 시점이 각기 다르게 발생하는 것을 확인 할 수 있다. 이러한 점은 항해사들이 복원성 평가를 할 때 GoM에만 의지하는 것이 얼마나 위험한 것인가를 간접적으로 보여주고 있다.

Table 4. Result of Stability Calculation

Case	GoM (m)	Area (0°to30°) (m-rad)	Area (0°to40°) (m-rad)	Area (30°to40°) (m-rad)	GZ of 30deg (m)	Angle of Max GZ (deg)
1	0.06	-0.020	-0.074	-0.054	-0.010	10.71
2	<b>0.15</b>	0.008	-0.053	-0.045	0.023	15.04
3	0.28	0.011	-0.021	-0.032	0.060	16.58
4	0.42	0.029	0.011	-0.018	0.101	18.10
5	0.51	0.041	0.032	-0.009	0.130	19.09
6	0.63	<b>0.057</b>	0.060	0.003	0.169	20.36
7	0.72	0.069	0.081	0.012	<b>0.201</b>	21.32
8	0.81	0.081	<b>0.102</b>	0.021	0.235	22.27
9	0.88	0.091	0.119	0.028	0.262	23.00
10	0.92	0.097	0.130	<b>0.033</b>	0.281	23.49
11	1.00	0.108	0.149	0.041	0.314	24.32
12	1.05	0.117	0.165	0.045	0.335	24.90
13	1.08	0.118	0.166	0.048	0.336	<b>25.10</b>
14	1.12	0.124	0.177	0.053	0.357	25.90
15	1.20	0.135	0.195	0.061	0.392	27.21
16	1.35	0.154	0.230	0.075	0.462	29.58
17	1.49	0.173	0.262	0.089	0.532	31.67
18	1.73	0.206	0.319	0.114	0.688	35.09
19	1.82	0.218	0.341	0.123	0.741	35.56
20	1.91	0.230	0.362	0.132	0.794	36.03

현재 선박의 실무에서는 화물용 Loading Program 등을 이용하여 도표 4와 같이 고려할 복원성 IMO 항목을 구분하고, 모든 항목이 IMO 규정값을 초과 만족할 경우에 복원성능 안전으로 판단하고 있으며, 한 항목이라도 규정치에 미달하면 복원성능 미달로 판정하고 있다. 하지만 도표에서 보는 바와 같이, 복원성이 미달하는 경우도 과연 규정대비 몇 % 미달하고 있는지, 복원성이 만족되는 경우도 규정대비 어느 정도 우수하게 만족하고 있는지를 제공하는 수치적 성격의 수치화된 복원성 지수가 제공된다면 선장 및 항해사에게 많은 도움을 줄 것으로 생각된다.

#### 4. 지수산정식 개발 및 적용

이 장에서는 평가항목의 분석결과를 토대로 복원성능 지수 제안을 위한 산정식을 개발하였다. 제안된 지수 산정식을 대상 선박에 적용하여 복원성 지수를 도출하고 그 값이 선박의 종합적인 복원성능 상황을 잘 나타내고 있는지 검증하였다.

##### 4.1 복원성 지수 산정식

복원성 지수( $SI_{IMO}$ )를 계산할 수 있는 복원성 지수 산정식을 제안하였다. 개발될 복원성 지수는 해당 선박의 복원성능이 IMO 복원성 규정 전반적인 항목을 고려할 때 어느 정도의 복원성능을 지니고 있는지 그 정도를 하나의 지수값으로 나타낼 수 있도록 설계하였다. 제안된 복원성 지수는 제안된 산정식에 의해 계산되며, 그 값의 범위는 Table 5와 같이 0.0~2.0 또는 2.0 이상의 값을 갖는다. 이 값은 선장이 복원성을 종합적으로 판단할 때 활용할 수 있게 된다.

Table 5. Stability Index

Range	Satisfaction of IMO Reg. (Assessment of Ship Stability)
$0.0 \leq SI_{IMO} < 0.5$	most of items are below normal (Several Risk)
$0.5 \leq SI_{IMO} < 1.0$	a few items are below normal (Danger)
$1.0 \leq SI_{IMO} < 1.2$	Satisfied (Advice for Stability Improvement)
$1.2 \leq SI_{IMO} < 2.0$	Satisfied (Normal Safety Condition)
$2.0 \leq SI_{IMO}$	quite satisfied (Considerably Safe)

각 구간별 복원성 지수값의 의미 및 선장에 대한 항해 지침은 다음과 같이 설계되었다.

(1)  $0.0 \leq SI_{IMO} < 0.5$

고려 대상인 복원성 평가 대상 6항목 대부분이 IMO 규정에 현저히 미달하고 있어, 상당히 위험한 상태이며, 선장은 긴급한 조치를 통하여 복원성을 향상시켜야 한다.

(2)  $0.5 \leq SI_{IMO} < 1.0$

복원성 평가 대상 항목의 일부가 IMO 규정에 미달하고 있어 선박은 IMO 복원성 규정에 미달하고 있다. 선장은 필요 조치를 통하여 복원성 지수를 1.0 이상으로 우선 향상시켜야 한다.

(3)  $1.0 \leq SI_{IMO} < 1.2$

복원성 평가 대상의 전체가 IMO 규정을 만족하고 있다. 하지만 충분히 안전한 정도는 아니며, 보다 안전한 선박 항

해를 위해서 선장은 복원성 지수를 1.2 이상으로 유지하여 항해하는 것이 바람직하다.

(4)  $1.2 \leq SI_{IMO} < 2.0$

복원성 평가 대상의 전체가 IMO 규정을 어느 정도 여유를 갖고 만족하고 있고 항해에 안전한 상태이다. 하지만 복원성 지수 2.0인 상태인 평상시 복원성이 좋은 상황보다는 다소 복원성이 저하되어 있다. 선장은 복원성지수를 최소한 지금 범위를 유지하는 것이 바람직하다.

(5)  $2.0 \leq SI_{IMO}$

복원성 평가 항목 전체가 IMO 규정을 많은 여유를 갖고 만족하고 있다. 선박은 복원성이 우수하며, 선장은 복원성지수를 2.0이하로 떨어지지 않도록 유지하는 것이 바람직하다.

복원성 지수값이 1.0인 경우는 복원성 평가 대상 전체 항목이 IMO 규정을 만족하는 시점을 의미한다. 따라서 복원성 지수 1.0 이상이 IMO 규정을 만족한다고 평가할 수 있다. 또한 안전 Margin을 20% 감안하여 안전한 복원성 지수를 1.2로 산정하였다. 또한 2.0의 경우는 IMO 복원성 규정에서 설정하고 있는 완성복원성계산서 상에 나타난 만재출항상태 (Full loading condition) 조건시의 복원성 지수를 의미한다. 따라서 복원성 지수 2.0이라면 만재상태에서 출항상태로 상당히 안전한 선박 상황이라 평가 할 수 있다. 따라서 복원성 지수 2.0인 평상시 안전한 상태에서의 복원성 지수라 평가할 수 있다. 공학적으로 사용되는 각종 지수값은 0~1.0 사이의 범위를 갖지만, 본 연구에서는 각 평가항목의 IMO 규정의 만족 여부를 쉽게 판단 할 수 있게 하기 위하여, 1.0 값을 도입하였고, 이로 인하여 복원성 지수값의 범위가 0 ~ 2.0으로 설정되었다.

상기와 같은 의미를 갖는 복원성 지수값의 범위를 제안하고, 이 복원성 지수 도출을 위한 복원성 지수 산정식을 식 (1)~(2)와 같이 개발하였다.

$$SI_{IMO} = \sum \frac{SI_{ai}}{n} \tag{1}$$

$$SI_{ai} = k \times \frac{a_i}{a_i - Margin} \quad (0 < a_i < a_i - Margin)$$

$$= k + (1 - k) \times \frac{a_i - a_i - Margin}{a_i - SL - a_i - Margin} \quad (a_i - Margin \leq a_i < a_i - SL)$$

$$= 1 + \frac{a_i - a_i - SL}{a_i - Normal - a_i - SL} \quad (a_i - SL \leq a_i < a_i - Normal)$$

$$= 2 + \frac{a_i - a_i - Normal}{a_i - Normal} \quad (a_i - Normal \leq a_i) \tag{2}$$

여기서,

$SI_{IMO}$ : 복원성지수,  $SI_{ii}$ : i 번째 평가 항목 복원성 지수, n: 복원성평가 항목 개수(6개), k: 각 항목 IMO 규정 만족값 설정 계수이며, 본 연구에서는 0.5로 초기 설정됨,  $a_i$ : i 번째 평가 항목 복원성능 계산값.  $a_{i-Margin}$ : i 번째 평가 항목 IMO criteria,  $a_{i-SL}$ : 전 평가항목이 IMO criteria를 만족하는 시점에서의 i 번째 평가 항목 값,  $a_{i-Normal}$ : 표준적하상태의 Full loading condition 의 조건하에서 i 번째 평가 항목 값

식에서 보는 바와 같이 선박의 복원성 지수( $SI_{IMO}$ )는 각 IMO 복원성 항목별 복원성 지수( $SI_{ii}$ )를 이용하여 최종 계산된다. 또한 각 항목별 복원성 지수는 그 항목별 계산값( $a_i$ )의 범위에 따라 수식 (2)를 활용하여 결정됨을 알 수 있다.

#### 4.2 지수산정식 적용 및 결과

제안된 복원성 지수 산정식을 이용하여 복원성 지수값을 계산하고, 그 결과 값이 선박의 복원성을 적절하게 설명하는지 검증하였다. 본 연구의 대상 모델 선박에 대하여 Table 4와 같은 총 20가지 화물 적재 상태에 대한 복원성 지수값을 계산하여 그 유효성을 살펴보았다.

계산된 총 20가지 시나리오에 대한 복원성 지수값과 각각의 복원성 평가 항목 값은 Table 6에서 자세히 나타내고 있다. 이때 대상 모델 선박의 복원성 지수 제안식의 계수 항목인  $a_{i-SL}$ 은 Angle of Max GZ가 IMO 최소규정 25deg를 초과하는 시점인 GoM이 1.08부근 경우로 파악되었으며, 또다른 계수 항목인  $a_{i-Margin}$ 은 해당 선박의 stability booklet에서 제공하는 표준적하상태의 Full loading 출항 상태에서의 GoM = 1.49m일 때를 기준인 상태로 설정되어 이 값들이 복원성 지수 제안식에 사용되어 최종 복원성 지수값을 도출하는 과정을 거쳤다.

Table 6에서 나타난 바와 같이, GoM 값이 0.06 m에서 최대 1.91 m까지 서서히 증가함에 따라, GoM 값이 가장 이른 시점에서 IMO 규정(GoM=0.15 m)을 만족하고 있으며, 복원성 평가 항목 전체가 IMO 규정을 모두 만족하는 시점은 GoM이 1.08 m로 증가하고 있는 경우로 나타났다.

복원성 지수값의 경우 GoM 값 1.08 m 시점에서 1.0값을 나타내고 있어 복원성 평가 전 항목이 IMO 규정을 만족하고 있는 시점을 잘 나타내고 있다.

또한 모든 항목이 IMO 규정을 만족한 후 GoM 값이 1.49 m 도달 한 시점에 복원성 지수값이 2.0인 값을 도출하고 있어, 표준적하상태의 Full loading condition 조건의 상황임을 잘 보여주고 있다. 또한 모든 항목이 IMO 규정을 만족한 후 GoM 값이 서서히 증가하여, 표준적하상태의 Full loading condition

Table 6. Stability Index of Model Ship

GoM	Satisfaction with regulation						Stability Index
	GoM	GZ of 30°	Angle of Max GZ	0° to 30°	0° to 40°	30° to 40°	
0.06	×	×	×	×	×	×	0.0468
<b>0.15</b>	○	×	×	×	×	×	0.0996
0.28	○	×	×	×	×	×	0.1488
0.42	○	×	×	×	×	×	0.2343
0.51	○	×	×	×	×	×	0.3010
0.63	○	×	×	○	×	×	0.3959
0.72	○	○	×	○	×	×	<b>0.4853</b>
0.81	○	○	×	○	○	×	<b>0.5841</b>
0.88	○	○	×	○	○	×	0.6642
0.92	○	○	×	○	○	○	0.7238
1.00	○	○	×	○	○	○	0.8337
1.05	○	○	×	○	○	○	<b>0.9052</b>
1.08	○	○	○	○	○	○	<b>1.0171</b>
1.12	○	○	○	○	○	○	1.1272
1.20	○	○	○	○	○	○	1.3165
1.35	○	○	○	○	○	○	1.6663
1.49	○	○	○	○	○	○	<b>2.0000</b>
1.73	○	○	○	○	○	○	2.2086
1.82	○	○	○	○	○	○	2.2801
1.91	○	○	○	○	○	○	2.3511

(○: Regulation Satisfied, ×: Regulation Not Satisfied)

조건의 상황에 이르자, 복원성 지수값이 2.0으로 나타나고 있다.

즉 복원력이 가장 열악한 상황인 복원성 지수값 0.046에서 출발하여 복원성이 서서히 증가하며 결국 전 항목이 IMO 규정을 만족한 시점인 GoM=1.08 m 상황에 이르자, 복원성 지수값은 1.0을 잘 나타내고 있다. 그리고 GoM 값이 더 증가하여 복원성이 양호한 표준적하상태의 Full loading condition 조건까지 선박 상황이 변화하자 복원성 지수값은 2.0을 표시하고 있어, 복원성 지수값이 복원성 지수 제안식에서 설계한 의미를 잘 반영하여 계산되고 있음을 보여주고 있다.

Table 6에서 나타난 6가지 IMO 복원성 평가 항목 계산값과 이들 요소 항목의 전체를 평가한 종합 복원성 지수값( $SI_{IMO}$ )을 분석하기 위하여 Fig. 4~ Fig. 6에 도식하였다. 그림에서 보는 바와 같이 GoM 증가에 따라, Fig. 4에서는 GZ 곡선의 면적에 해당하는 3가지 IMO 복원성 평가 항목의 계산값과 종합 복원성 지수값을, Fig. 5에서는 GZ at 30deg 항목의 계산값과 종합 복원성 지수값을, Fig. 6에서는 Angle of Max GZ 항목의 계산값과 종합 복원성 지수값을 각각 도식하였다.

## 선박 운항자 지원 시스템용 선박 복원성능 지수 개발

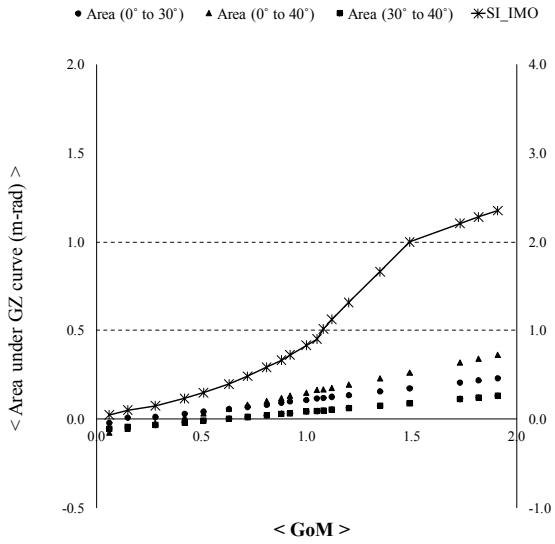


Fig. 4. Comparison of  $SI_{IMO}$  and Area under GZ Curve.

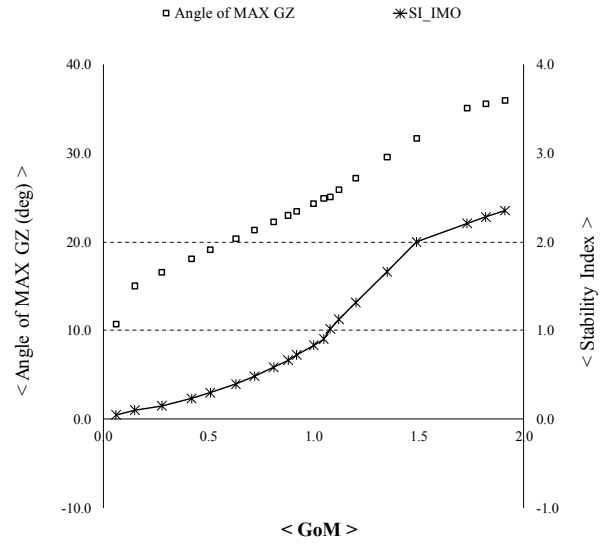


Fig. 6. Comparison of  $SI_{IMO}$  and Angle of Max GZ.

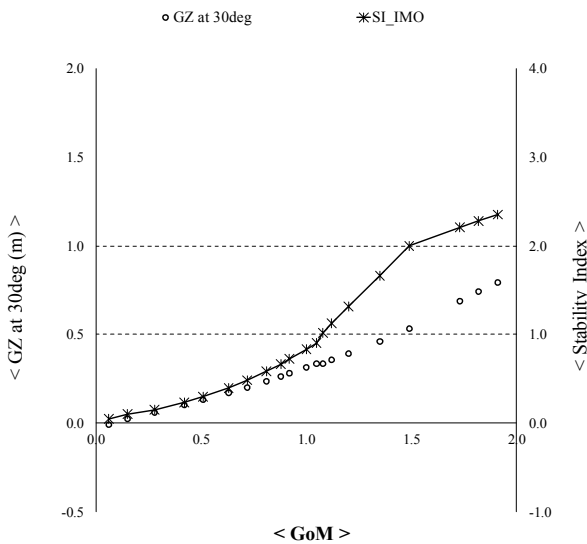


Fig. 5. Comparison of  $SI_{IMO}$  and GZ at 30deg.

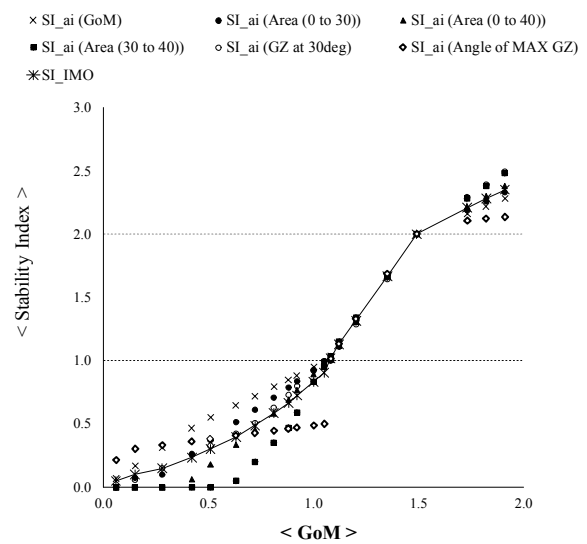


Fig. 7. Tendency of Stability Index.

Fig. 6에서 나타난 것과 같이, 종합 복원성 지수는 GoM이 증가함에 따라 IMO 복원성 규정 항목 전체가 Criteria 값을 충족하는 종합 복원성 지수값 1.0 지점까지 서서히 증가하다가, 그 이후 증가율이 다소 높아지며 평상시 만재 출항 상태인 복원성 지수값 2.0 지점까지 증가율이 다소 확대되고 있음을 알 수 있다. 이와 관련하여 다른 IMO 복원성 규정 항목의 값들도 각 항목별로 다른 증가 추세를 잘 보여주고 있다.

이러한 결과를 보다 자세히 분석하기 위하여, 6가지 IMO 복원성 평가 항목의 각 지수값과 종합 복원성 지수값을 동시에 도식하여 각각의 추이를 비교 분석하였다. 그 결과는 Fig. 7과 같다.

그림에서 보듯이 실선으로 연결된 종합 복원성 지수값이 GoM 증가에 따라 천천히 증가함에 따라 다른 IMO 복원성 평가 항목 증가하고 있다. 다만, 그 항목별 증가 추이는 모두 다양하게 보이고 있는 것을 알 수 있다. 종합 복원성 지수값이 1.0 이 되어 모든 IMO 복원성 평가 항목이 규정을 만족하는 시점에서 전 항목의 복원성 지수가 1.0으로 수렴되고 있음을 보여주고, 그 이후 GoM 값이 증가하여 점점 복원성이 점점 더 개선되자, 각 항목의 지수값도 종합 복원성 지수값의 증가와 비슷하게 증가되다가, 종합 복원성 지수값이 2.0에 접근하자 각 복원성 평가 항목의 지수값이 다소 증가 변화가 각 항목별로 다양해 짐을 보여주고 있다. 종합 복원

성 지수값이 선박의 다양한 화물 적재 상황에 따라 복원성 변화를 잘 반영하고 있음을 알 수 있다.

선박을 운항하는 선장의 입장에서는 복원성 지수값 1.0을 기준으로 IMO 복원성 규정의 만족도 여부를 판단하면 되며, 1.2 이상 초과 여부로 본선의 복원성능의 위험도 여부를, 지수값 2.0을 기준으로 평상시 복원성이 우수한 상황 대비 얼마정도의 복원성능을 나타내고 있는지 직관적으로 쉽게 판단 할 수 있는 도구로 사용할 수 있을 것으로 판단된다.

본 연구는 복원성 지수 개발을 위한 기초 연구로서 시도되었기 때문에 그 대상 선박을 컨테이너 선종에 한정시켜 실시되었다. 따라서 보다 발전된 복원성 지수 개발을 위하여서는 다양한 선종 및 다양한 환경을 고려하지 못한 한계점이 있다. 이러한 문제는 향후 추가 연구에 고려해야 할 것으로 판단된다.

## 5. 결론

본 논문에서 수행한 연구 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 복원성 관련 IMO 규정에 대한 검토를 수행하였으며, 복원성능지수( $SI_{IMO}$ )의 개발을 위해 IMO 복원성 규정의 6가지 항목을 대상으로 삼았다.
- 2) 17,000ton 급의 컨테이너 선박을 이용, IMO 복원성 규정 항목을 계산하였으며, 총 20cases의 화물 적재 상태에 대한 IMO 복원성 규정 각 항목간의 관계를 비교 분석하였다.
- 3) 복원성 지수개발을 위한 복원성 지수 산정식을 제안하였으며, 이를 통하여 선박의 복원성 상태를 종합적이며 간편히 파악할 수 있는 지수값을 제안하였다.
- 4) 제안된 복원성 지수 산정식을 모델 선박에 적용, 총 20case 적재 상황에 대한 복원성 평가를 수행하였고, 복원성 지수값을 통하여 각 IMO 복원성 평가 항목의 규정 만족도 여부 및 평상시 선박의 복원성 대비하여 복원성의 우수성 여부를 간편히 파악 할 수 있음을 검증하였다.

본 연구를 통하여 복원성능을 하나의 값으로 표현할 수 있었다. 이를 통하여 항해사에게 선박의 복원성능을 좀 더 직관적이고 종합적으로 판단할 수 있는 도구를 제공할수 있다고 판단되며, 선박에 탑승하는 사람에게 선박의 상태를 쉽게 안내해주는 정보 제공의 측면에서 유용하게 사용할 수 있을 것으로 보인다. 향후 다양한 선종에 대한 복원성을 검토하고 배수량, 화물적재 등 다양한 상황을 고려하여 관련 연구를 보완하고자 한다.

## Acknowledgments

This research was a part of the project titled “Development of Ship-handling and Passenger Evacuation Support System” funded by the Ministry of Oceans and Fisheries (MOF).

## References

- [1] Bulian, G.(2010), Checking vulnerability to pure loss of stability in long crested following waves, Ocean Engineer, pp. 1007-1026.
- [2] Choe, B. R.(2016), A Study on the Relationship between Ship Stability and Maneuverability Using Free Running Model Experiments, J. Navig. Port Res. 40(6), pp. 353-359.
- [3] Ham, S. J., I. K. Kang, H. S. Kim, H. J. Jo and J. C. Kim(2011), Stability of the offshore large purseiner in Korea, The Korean Society of Fisheries Technology, 47(3), pp. 241-247.
- [4] IMO(1985), Recommendation On a Severe Wind and Rolling Criterion (Weather Criterion) For the Intact Stability of Passenger and Cargo Ship of 24 metres in Length and over, Resolution A.562(14).
- [5] IMO(1993), Code On Intact Satability For All Types of Ships covered by IMO Instruments, Resolution A.749(18).
- [6] IMO(2008), Adoption of the International Code on Intact Stability (2008 IS CODE), Resolution MSC.267(85).
- [7] Jeong, J. H., S. J. Lee and B. Y. Moon(2013), Evaluation of Stability and Roll Damping Effect according to Change the Hull Form of Fishing Boat, The KSFM Journal of Fluid Machinery, 16(2), pp. 5-9.
- [8] Jeong, S. J. and H. C. An(2014), Stability of fishing vessel according to the LED luring lamp installation, The Korean Society of Fisheries Technology, 50(4), pp. 623-632.
- [9] Jo, H. J., I. K. Kang, B. G. Kwon, S. J. Ham, C. W. Park(2014), The stability of the side trawler operating in East Sea of Korea, The Korean Society of Fisheries Technology, 50(3), pp. 378-384.
- [10] Kang, G. J. and B. Y. Moon(2015), Restoring Characteristics of Windy Leisure Boat Associated to Sailing Angle of Attack and Effect of Side Force, J. Korean Soc. of Marine Engineering. 39(1), pp. 13-18.
- [11] Kim, D. Y., C. W. Lee, D. K. Lee and D. K. Oh(2014), Characteristics of a CFRP Cruiser’s Windage Area by Stability Assessment, J. Korean Soc. Mar. Environ. Saf.



20(6), pp. 774-780.

- [12] Kim, H. G.(2014), A Study on Hull Structure Analysis for Improving Stability of Sailing Catamaran Yachts, Chonnam National University, Masters dissertation.
- [13] Lee, A. R., I. K. Kang and H. J. Jo(2009), A Study on the stability of a crab trap fishing boat with water tank experiment, J. Kor. Soc. Fish. Tech. 45(4), pp. 267-275.
- [14] Long, Z. J., J. H. Jeong and B. Y. Moon(2013), Probability Prediction of Stability of Ship by Risk Based Approach, The KSFM journal of fluid machinery. 16(2), pp. 42-47.
- [15] Neves, M. A. S. and C. A. Rodriguez(2007), Influence of non-linearities on the limits of stability of ships rolling in head seas, Ocean Engineering, pp. 1618-1630.

---

Received : 2017. 09. 18.

Revised : 2017. 11. 30. (1st)

: 2018. 01. 09. (2nd)

Accepted : 2018. 02. 26.