

선박의 운항 상태를 고려한 선종별 안정적인 GM 운용에 관한 연구

김홍범* · 김종관** · † 이윤석

*한국해양수산연수원 교관, **한국해양수산연수원 교수, † 한국해양대학교 선박운항과 교수

A Study on Securing a Stable GM for Each Ship Type Considering the Ship's Operating Status

Hong-Beom Kim* · Jong-Kwan Kim** · † Yun-Sok Lee

*Instructor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 4911, Korea

**Professor, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 4911, Korea

† Professor, Department of Ship Operation, Korea Maritime & Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약 : 최근 선박의 전복사고는 무게중심의 부적절한 관리, 기상악화 또는 과도한 조타사용 등으로 인한 선체운동이 발생하면서 화물 또는 중량물이 이동하여 복원력 저하 또는 상실 등이 주된 원인으로 분석되고 있다. 따라서 전복사고를 예방하기 위해서는 위험한 횡경사가 발생하더라도 직립 상태로 되돌아오려는 복원성 확보가 이루어져야 한다. GM은 복원성을 판단하는 중요한 평가요소이며, 항해사는 GM을 복원성 검토에 좋은 척도로 활용한다. 본 연구에서는 5년간 운항 중인 선박으로부터 수집한 복원성 자료를 바탕으로 운항 상태에 따른 선종별 GM을 선박 길이, 폭, 총톤수 등 선박제원으로 분석하였다. 선박 길이에 따른 GM 분포의 특징을 확인하였고, 선박 폭과 GM의 상관분석을 수행한 후 선평대비 GM의 비율을 산출한 후 과거의 비율과 비교하여 최근 경향을 검토하였다. 또한 선박 대형화 추세를 반영하기 위하여 총톤수(GT)/선평(B)을 이용하여 GM을 회귀분석하여 선종별 GM 추정을 위한 간이근사식 및 최소 GM을 제안하였다. 연구의 결과는 선박에서 항해사가 안정적인 GM 확보의 검토를 위한 자료로 이용될 것 기대된다.

핵심용어 : 전복사고, 복원성, GM, 적화상태, 선종

Abstract : Recently, the occurrence of a ship capsizing was analyzed as the main cause of the lack of stability or loss because of the improper management of the center of gravity, the movement of cargo or heavy weight when excessive steering occurs or when navigating during bad weather. Thus, to prevent a ship from capsizing, it is necessary to secure stability to enable the ship's return to its upright position, even if a dangerous heel occurs. The GM is a crucial evaluation factor regarding stability, which the navigation officer uses to preserve stability. In this study, based on the stability data collected from the operating of ships for five years, the GM by ship's type according to the operating status was analyzed specifically such as a ship's length, breadth, and gross tonnage. The feature of the GM distribution according to a ship's length was confirmed, and after performing the correlation analysis between the breadth and the GM, the ratio of the GM to breadth was calculated, and the result was compared with the previous ratio. Additionally, a simple approximation formula and minimum GM for the estimation of the GM by ship type were proposed by the regression analysis of the GM using the gross tonnage (GT)/breadth (B) to reflect the trend of larger ships being built. The results of this study are expected to be used as data for the review of securing a stable GM on ships.

Key words : capsizing accident, stability, GM, loading condition, type of ship

1. 서 론

최근 선박에서 발생하는 전복사고(Capsizing accident)는 화물의 과적이나 무리한 배치로 인한 무게중심의 부적절한 관리와 기상악화 또는 과도한 조타사용 등으로 발생하는 횡경사로 인한 화물 또는 중량물의 이동으로 복원성 저하 또는 상실

등이 주된 원인으로 분석되고 있다. 2014년 세월호 침몰사고와 2019년 골든 레이호 전복사고 등의 사고사례에서 알 수 있듯이 선박의 전복은 많은 인명과 재산상의 손실이 발생하기 때문에 사고가 발생하면 국민적인 관심을 일으킨다.

이러한 전복사고를 예방하기 위해서는 횡경사가 발생하더라도 직립상태로 되돌아오려는 복원성이 충분히 확보되어야

† Corresponding author : 종신회원, lys@kmou.ac.kr 051)410-5098

* 종신회원, hbkim@seaman.or.kr 051)620-5774

** 종신회원, jkkim@seaman.or.kr 051)620-5794

(주) 이 논문은 “운항상태에 따른 선종별 복원성에 관한 연구”란 제목으로 “2020 춘계공동학술대회 한국해양학회논문집(부산 BEXCO, 2020.7.22-23, pp.13-14)”에 발표되었음.

한다. GM은 항해사가 충분한 복원성의 확보 유무를 판단하는 중요한 요소이며, 관성 반경과 선폭을 이용하여 횡요(Rolling) 추정 등에 사용된다. 전복과 관련하여 다른 정보를 얻을 수 없는 경우 GM에 대한 세심한 검토와 주의가 수반된다면 견련과 더불어 복원성 확보에 대한 좋은 척도로 활용될 수 있다.

1940년 이전에는 최소 GM을 제안하거나 복원정과의 관계 등에 대한 연구가 주를 이루었다. 1746년 Piere Bouguer에 의하여 메타센터 반경이 정의되고, 복원정(Righting lever; GZ)과 GM의 관계를 밝혀냈다. 1923년 Anderson은 GM을 구하기 위한 식을 제안하였고, 1939년 Rahola는 경하상태에서 이중저 구조를 갖지 않은 선박의 최소 GM은 0.152m(6inches) 이상을 확보하도록 제안하였다(Rahola, 1939; Bird and Odabasi, 1975).

근래에는 IMO 복원성 성능기준에 대한 취약성 발견과 성능기준의 추가 개발 및 개선을 위한 연구가 이루어지고 있다. Peters et al.(2011)은 복원성 손실, 횡요의 파라메트릭, 브로칭 현상에 대한 IMO 복원성 성능기준의 취약성을 검토하였다. Tompuri et al.(2017)은 개발 중인 2세대 복원성 성능기준의 1단계와 2단계의 취약성의 차이를 복원성 손실, 횡요의 파라메트릭, 과도한 가속도 관점에서 분석하였다. Kobylinski(2019)는 복원성 성능기준 대안 개발의 방법론과 인적오류 등을 고려한 위험성 평가 방법을 제안하였다. 2008년에 IMO 복원성 성능 기준이 제시되었지만, 2010년 복원성, 만재흘수선, 여선전문위원회(현재 선박 설계 및 건조 전문위원회) 52차 회의 이후로 새로운 세대 복원성 성능기준(New generation intact stability criteria)라는 작업이 진행되고 있다.

최근에는 IMO 복원성 성능기준 개발에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있으나, 실제 선박을 운항하는 선장이나 항해사의 관점에서 복원성에 대한 검토 및 운용에 대한 연구는 상대적으로 부족하다. 또한 선장과 항해사의 입장에서 IMO 복원성 기준은 복잡한 계산식으로 이루어져 있어서 직접 계산이 어렵기 때문에 Loading computer를 이용하거나 GM 값만으로 복원성을 판별하고 있다(Im et al., 2018).

이에 본 연구에서는 5년간 운항 중인 선박의 복원성 자료를 수집하여 GM 운용 추세를 통계적으로 분석하였다. 운항 상태에 따라 공선 상태(Ballast condition)와 만재 상태(Full loading condition)로 분류하고, 최근 선박은 화물 운송 목적에 따라 전용선화 되었기에 선종별로 재분류하였다. 분류된 자료를 바탕으로 운항 중인 선박의 GM 운용 현황을 분석하기 위하여 운항 상태별 선박 길이(Length between perpendicular; LBP)에 대한 GM 분포를 검토하였고, 선폭(Breadth; B)과 GM의 상관관계를 확인 후, GM/선폭(B) 비율을 분석하여 과거의 통계적 수치와 비교하였다. 또한, 항해사가 손쉽게 GM을 추정할 수 있도록 총톤수(Gross tonnage; GT)/선폭(B) 비율과 GM을 회귀분석하여 간이근사식을 제안하였고, 복원성이 취약한 선종에 대하여 최소 GM을 제시하였다.

2. 대상 선박 및 GM 계산

2.1 대상 선박

5년간 운항 중인 선박 159척에 근무했던 항해사로부터 출항 시점에 계산된 복원성 자료를 수집했으며, 선종별로 분류하면 벌크선(Bulk carrier; BC) 30척, 자동차운반선(Car carrier; CC) 34척, 컨테이너선(Container ship; CS) 31척, 가스운반선(Liquid gas tanker; LGT) 21척, 기름·화학제품운반(Oil-Chemical tanker; OCT) 43척이다. 현재 운항 중인 선박의 선종별 운항 상태에 따른 GM 상황을 분석하고자 화물의 적재 상태 이외에 Table 1과 같이 선종, 총톤수, 길이, 선폭 등도 추가로 조사하여 상관관계 분석에 활용하였다.

Table 1 Specifications of collected vessel

No.	Type	GT(ton)	LBP(m)	B(m)	Draft(m) B/L
1	BC	75,275	259.0	43.0	7.684/15.164
2	BC	92,080	282.2	45.0	7.691/18.270
.
30	BC	151,596	328.0	55.0	9.986/21.401
1	CC	47,367	170.0	32.2	7.098/ 8.478
2	CC	65,697	191.0	35.4	7.773/ 9.264
.
34	CC	44,818	174.0	30.6	7.385/ 8.750
1	CS	28,467	213.0	30.0	5.040/11.170
2	CS	141,868	349.5	48.4	7.740/14.020
.
31	CS	9,990	132	24.8	6.712/ 8.097
1	LGT	47,454	220.0	36.6	7.094/11.411
2	LGT	95,381	266.0	43.4	9.645/12.006
.
21	LGT	103,764	253.26	47.2	8.984/11.333
1	OCT	154,133	322.0	60.0	10.780/20.737
2	OCT	30,027	173.9	32.2	7.690/10.625
.
43	OCT	8,294	120.0	20.0	4.048/ 8.386

* B : Ballast condition, L : Full loading condition

운항 중인 선박의 자료 수집 한계상 선종별 척수가 다소 상이하여 선종별 일반적인 주요 제원에 대한 평균값, 최대값, 최소값 등을 분석하면 Fig. 1과 같다. Fig. 1의 좌측 Y축에는 선박 길이와 폭을 중복해서 표시했고, 우측에는 총톤수를 나타내어 상호 비교가 가능하도록 작성했다.

대상 선박의 선종별 선박 길이의 평균은 194.2~246.4m이며, 선폭의 평균은 32.9~40.5m, 총톤수의 평균은 46,052.7~82,724.4ton의 범위로 나타났다. 벌크선과 기름·화학제품운반선의 경우 최대값과 최소값을 통하여 수집된 선박 길이, 선폭, 총톤수의 범위가 넓게 나타난 반면, 자동차운반선의 경우 타 선종에 비하여 제원의 범위가 가장 작게 나타났다. 벌크선은

재화중량톤수 180,000톤급 광탄석운반선부터 8,000톤급 시멘트운반선까지, 기름·화학제품운반선은 VLCC급 유조선부터 중소형 기름·화학제품운반선까지 대상 선박으로 포함되어 있다.

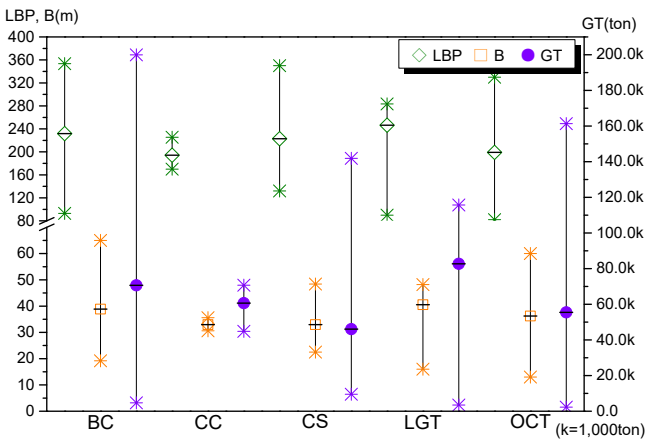


Fig. 1 Comparison of particular by ship's type

2.2 복원정 계산

복원성은 배수량과 복원정에 의해 계산되며, 복원정은 중력과 부력의 작용선간의 수평거리이다. 횡경사를 일으키는 경사우력과 직립상태로 되돌아오려는 복원성은 배수량이 동시에 적용되기 때문에 복원성은 복원성을 판단하는 중요한 요소이며, 일반적으로 GM과 KN 값을 이용하여 계산한다. 복원정 계산을 위한 변수를 나타낸 그림은 Fig 2와 같다. 횡경사각(θ)으로 경사졌을 때, 경심(M), 무게중심(G), 부심(B), 경사에 따른 새로운 부심(B'), KN 을 그림으로 나타냈다.

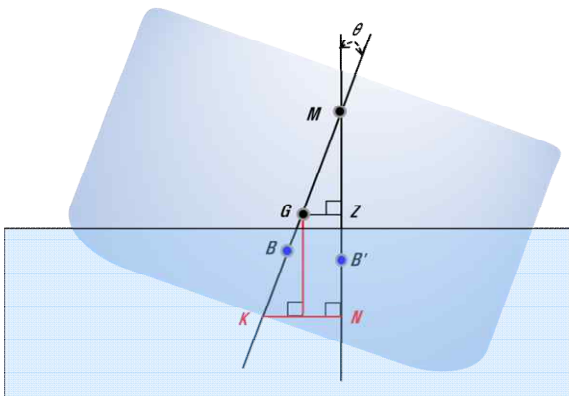


Fig. 2 Variable of transverse stability calculation

가. 복원정 계산 방법

초기 복원성(Initial transverse stability)은 횡경사각이 작은 초기단계에서 GM을 이용하여 정성적으로 추정할 수 있다 (Lee et. al, 2016). 운항중인 선박의 GM 계산은 KM(기선에서 Metacenter까지의 거리)과 KG(기선에서 무게중심까지의 거리)를 이용하여 계산하며 식 (1)과 같고, GM을 이용한 초기 복원성 계산은 식 (2)와 같다.

$$GM = KM - KG \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Initial transverse stability} &= \Delta \times GoZ \\ &= \Delta \times GoM \times \sin\theta \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서 θ 는 횡경사각, Δ 는 배수량, GoZ 는 액체의 자유표면에 의한 영향을 고려한 복원정, GoM 은 액체의 자유표면에 의한 영향을 포함한 GM을 의미한다.

선박의 대각도 횡경사각의 복원정 계산은 Stability booklet에 제시된 KN 표를 이용하여 홀수와 횡경사각에 따른 KN 값을 구한다. KN 값을 이용한 복원정 계산은 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{Transverse stability} &= \Delta \times GoZ \\ &= \Delta \times KN - KG \sin\theta \end{aligned} \quad (3)$$

여기에서 KN 은 기선에서 횡경사각별 부력의 작용선간의 수평거리, KG 은 액체의 자유표면에 의한 영향을 포함한 기선에서 무게중심까지의 거리를 의미한다.

나. Loading computer

적화지침기(Stability instrument)는 2008 IS Code(International Code on Intact Stability, 2008)에 관련 규정이 명시되어 있으며, Stability booklet에 제시된 모든 복원성 요건을 다루어야 하고, 모든 운항 상의 적화상태에서 복원성 만족 여부를 확인할 수 있어야 한다(IMO, 2008). 실무에서는 주로 Loading computer라고 하며, 현재 한국선급에 형식 승인된 Loading computer는 TSB Supercargo, Ship Manager-88 등 7개의 제품이 있다(Korean Register, 2020). Loading computer에 화물, 평형수, 연료, 청수 등의 값을 입력하면 GM, GZ curve, 날씨 기준(Weather criterion) 등의 계산 결과를 그래프와 표로 나타내며 그 예는 Fig. 3과 같다.

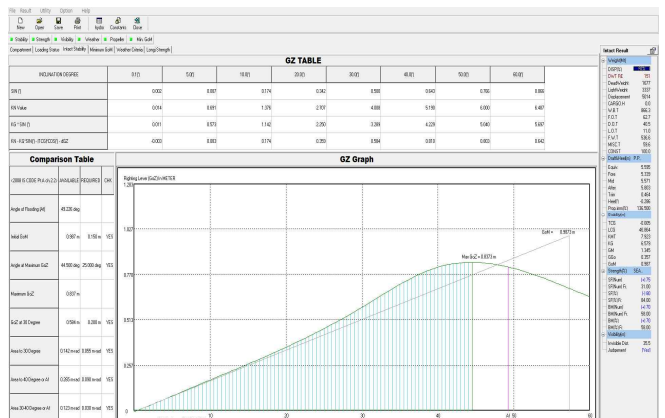


Fig. 3 Examination of ship stability using Loading computer

국제항해에 종사하는 선박은 통상적으로 Loading computer를 갖추고 있으며, 항해사는 이를 이용하여 복원성을 편리하게 계산한다. GM 계산은 식 (1)과 같이 수행하며, 횡경사각에 따른 복원정 계산은 KN 표를 이용하고, 횡방향 무게중심(TCG) 요소를 추가하여 계산이 이루어진다. 복원정 계산은 식

(4)와 같다(A Co, 2017).

$$GoZ = KN - (KG_0 \times \sin\theta) - (|TCG| \times \cos\theta) \quad (4)$$

선박의 운항 현장에서 사용되는 Loading computer는 선박 건조 과정에서 최종 확정된 Stability booklet을 기반으로 복원성을 평가하고 있다. 각 화물창에 대한 적부 상태를 센서에 의해 자동으로 입력되거나 필요시 수동으로 추가 입력 또는 Stowage plan 등을 입력하면 해당 상태에서의 정적·동적 복원성 기준에 대한 판별 이외에도 Propeller immersion, Structural strength 등도 정량적인 수치로 확인된다. 이에 본 연구에서는 운항 상태에 따른 선종별 복원성 분석은 Loading computer를 활용하여 산출된 GM 결과를 활용하였다.

3. 운항 상태별 복원성 분석

운항 중인 선박 159척을 대상으로 출항시점에 계산된 GM 자료를 운항 상태에 따라 151척의 공선 상태와 159척의 만재 상태로 분류하였다. 본 장에서는 운항 중인 선박의 복원성 확보를 검토하기 위하여 화물의 적부 상태, 선박 길이, 선폭에 대하여 GM을 선종별로 분석하였다.

3.1 적부 상태별 GM 비교분석

적부 상태에 따른 GM을 비교분석하기 위하여 공선 상태와 만재 상태로 분류하여 비교·분석하였다. 공선 상태는 화물 선적 또는 입거(Dock)를 위하여 화물을 선적하지 않고 가능한 평형수를 최대한 적재(Full ballast)하여 운항하는 상태이며, 만재 상태는 만재흘수선 규정을 지키며, 적재능력의 한도 내에서 화물을 선적한 상태이다.

Fig. 4는 적부 상태에 따른 선종별 GoM의 평균을 비교한 그래프이다. Fig. 4에서 Y축은 GoM을 나타내고 있으며, 박스 그래프에서 백색 원점은 평균값을, 박스의 고점과 저점은 평균값에 대한 표준편차를 의미한다. 또한 박스에 상하 연장선은 GoM의 최대값과 최소값을 나타냈으며, 이를 통하여 선종별 대상 선박의 GoM 밀집도를 확인할 수 있다.

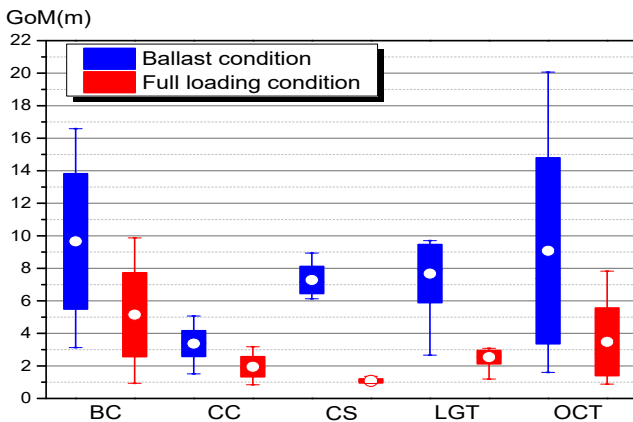


Fig. 4 Average GoM by ship type

공선 상태일 때 151척의 평균 GoM은 7.413m이며, 만재 상태일 때 159척의 평균 GoM은 2.840m로 나타났다. 공선 상태로 운항할 때 항해사는 선박의 안전성 확보, 운항성능 향상, 기상악화 대비 등을 위하여 평형수를 최대한 적재한다. 또한, 평형수 탱크와 연료 탱크는 선박 구조상 선저 부근의 비교적 낮은 곳에 위치하기 때문에 공선 상태가 만재 상태보다 높은 GoM을 형성하게 된다.

컨테이너선(CS)의 적부 상태에 따른 평균 GoM 차이는 6.205m로 가장 크게 나타났으며, 자동차운반선(CC)의 평균 GoM 차이는 1.424m로 타 선종에 비하여 가장 작게 분석되었다. 컨테이너선은 공선 상태에서 평균 7.284m의 GoM을 갖고 있지만, 화물 적재 시 상갑판에 많은 컨테이너를 선적하기 때문에 만재 상태일 때 평균 1.078m의 낮은 GoM으로 운항하는 것으로 나타났으며, 타 선종에 비하여 적부 상태에 따른 GoM의 차이가 크다는 특징이 있었다. 자동차운반선은 구조적 특성상 상갑판 위로 높은 상부 구조물을 갖고 있기 때문에 공선 상태에서 평균 3.374m로 타 선종에 비하여 낮은 GoM을 갖고 있었다. 화물 적재 시 상갑판 위로 자동차와 Car deck가 위치하기 때문에 평균 GoM은 1.949m로 나타나면서 적부 상태별 평균 GoM의 차이가 작은 것으로 분석되었다.

3.2 선박 길이별 GM 분석

공선 상태와 만재 상태에서 선박 길이에 대한 GoM의 확보 범위를 살펴보기 위하여 선박 길이를 X축에, GoM을 Y축으로 설정한 분포도는 Fig. 5와 Fig. 6과 같다. 대상 선박은 선종별 기호로 표시하였다.

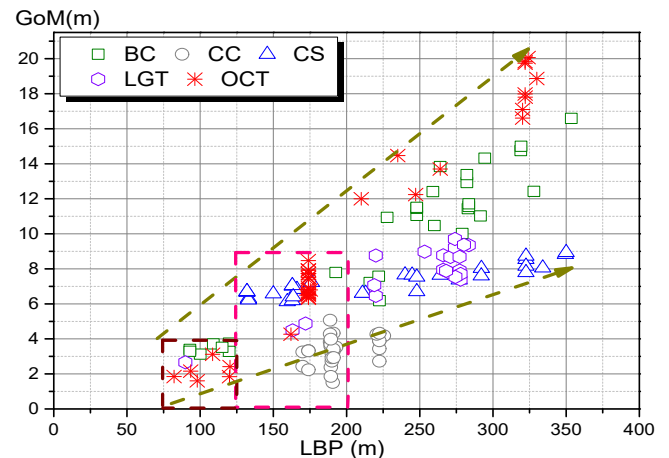


Fig. 5 GoM distribution by LBP in ballast condition

공선 상태일 때 길이 75~120m 선박의 GoM은 1.61~3.71m이며, 시멘트운반선, LPG운반선, 기름·화학제품운반선(Product oil/Chemical carrier)가 차지하고 있었다. 길이 120~200m 선박의 GoM은 1.51~8.47m로 나타났으며, 이 영역에서는 자동차운반선, 컨테이너선, 기름·화학제품운반선이 주로 나타났다. 또한 자동차운반선을 제외한 전 대상 선박의 GoM 분포는 선박 길이에 비례하여 증가하는 경향이 나타났다.

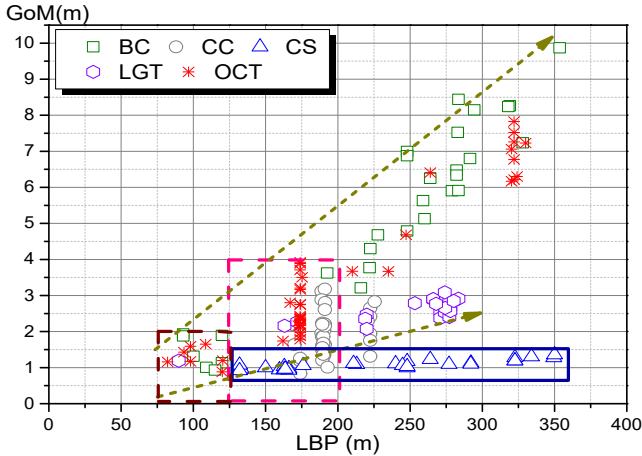


Fig. 6 GoM distribution by LBP in full loading condition

만재 상태일 때 길이 75~120m 선박의 GoM은 0.93~1.93m, 길이 120~200m 선박의 GoM은 0.96~3.92m의 범위로 나타났다. 벌크선, 가스운반선, 기름·화학제품운반선은 길이 증가에 따라 GoM도 증가하는 경향이 나타난 반면, 컨테이너선은 길이가 증가하더라도 GoM 약 1m 대역을 형성하고 있었다.

공선 상태에서 대상 선박의 길이에 따른 GoM의 증가 추세를 확인이 가능하지만, 만재 상태의 경우 화물 적부 형태에 따라 선종별 특징이 있기 때문에 벌크선, 가스운반선, 기름·화학제품운반선에서만 길이별 GoM의 증가 추세를 확인하였다.

3.3 선박 폭별 GM 분석

가. 선박 폭별 GM 상관 분석

운항 상태에 따른 선종별 선폭에 대한 GoM의 상관 분석 결과는 Fig. 7과 Fig. 8과 같다. 선폭을 X축에, GoM을 Y축으로 나타냈으며, 선종별 상관계수는 범례에 표시하였다.

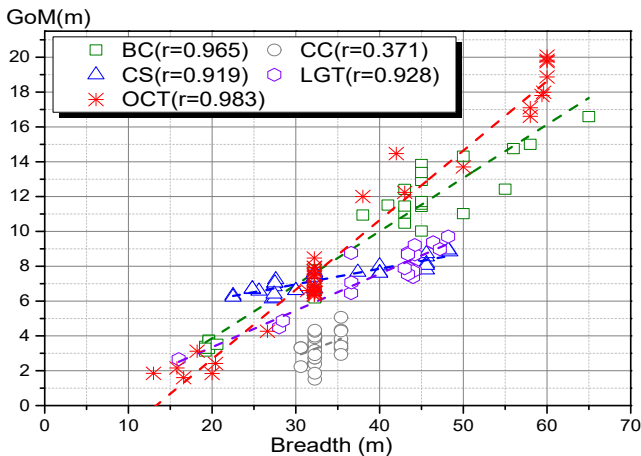


Fig. 7 GoM distribution by breadth in ballast condition

공선 상태에서 벌크선의 선폭과 GoM간의 상관계수(r)는 0.965(p<0.001)로 건화물선(Dry cargo ship) 중 가장 높게 분

석되었으며, 컨테이너선의 상관계수는 0.919(p<0.001)로 선폭과 GoM간의 상관관계가 높게 나타났다. 자동차운반선의 상관계수는 0.371(p<0.05)로 선폭과 GM과의 상관관계가 타 선종에 비하여 가장 낮은 것으로 분석되었다. 이는 자동차운반선의 연구대상들이 유사한 선폭을 가지고 있으며, 평형수 선적양에 따라 GoM의 값이 선박마다 약간 다르게 나타나기 때문에 상관관계가 낮은 것으로 판단된다. 액화화물선(Liquid cargo tanker)의 선종인 가스운반선의 상관계수는 0.928(p<0.001), 기름·화학제품운반선은 0.983(p<0.001)으로 선폭과 GM간의 상관관계가 높게 분석되었다.

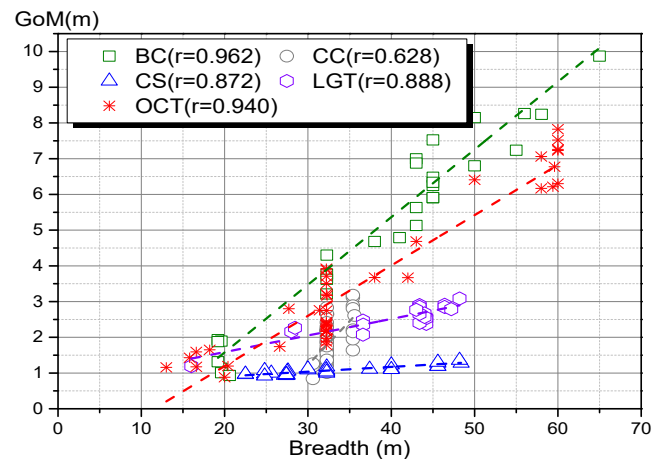


Fig. 8 GoM distribution by breadth in full loading condition

만재 상태에서 벌크선과 컨테이너선의 선폭과 GM간의 상관계수는 0.962(p<0.001), 0.872(p<0.001)로 선폭과 GM간의 상관관계가 통계적으로 높게 나타났다. 자동차운반선은 선폭과 GM과의 상관관계(r=0.628 p<0.001)가 벌크선과 컨테이너선 보다 낮게 나타났으며, 만재 상태가 공선 상태보다 상관관계가 높은 것으로 분석되었다. 가스운반선의 상관계수는 0.888(p<0.001), 기름·화학제품운반선은 0.940(p<0.001)으로 선폭과 GM간의 상관관계가 높게 분석되었다.

만재 상태일 때, 자동차운반선을 제외한 모든 선박이 선폭과 GoM의 상관계수는 공선 상태보다 비교적 낮은 것으로 분석되었으며, 대상 선박의 전 선종에 있어서 선폭과 GoM의 상관관계는 통계적으로 유의미한 것으로 판단된다.

나. 선박 폭 기준 적정 GM 분석

선폭에 대한 GoM을 비교하기 위하여 GoM/선폭(B)의 평균 비율을 분석하였으며, 운항 상태에 따른 선종별 GoM/B 계산한 평균값은 Table 2와 같다.

Table 2 Comparison of GoM/B

(Unit : %)					
Condition	BC	CC	CS	LGT	OCT
Ballast	23.8	10.2	22.5	18.8	22.9
Loading	12.3	5.9	3.4	6.4	9.1

Table 2에서 보는 바와 같이, 벌크선은 타 선종에 비하여 모든 운항 상태에서 GoM/B 비율이 공선 상태에서 23.8%, 만재 상태에서 12.3%로 가장 높게 분석되었다. 공선 상태에서 자동차운반선이 10.2%로, 만재 상태에서 컨테이너선이 3.4%로 가장 낮게 나타났다. 만재 상태에서는 선종에 따라 GoM/B 비율이 다양하게 나타난 반면, 공선 상태의 경우 자동차운반선을 제외하고, GoM/B의 비율은 약 20% 내외로 나타났다.

Yang and Kim(2014)는 과거 선박의 통계를 통하여 만재 시 이상적인 GM을 일반화물선은 선폭의 약 5%, 유조선은 약 8%로 제시하고 있으며, 본 연구와의 비교분석한 결과를 Fig. 9에 나타냈다. Fig. 9에서 실선은 건화물선과 액화화물선의 평균 GoM/B, 점선은 과거 연구에서 제시된 일반화물선과 유조선의 GM/B의 수치를 의미한다.

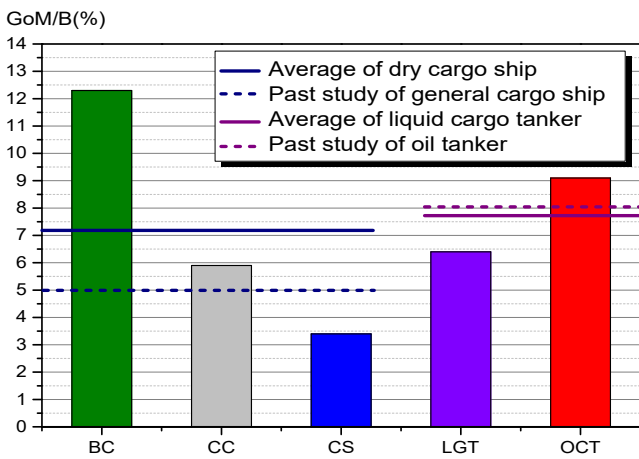


Fig. 9 Comparison of GoM/B in this study and past study

벌크선은 12.3%, 자동차운반선은 5.9%의 수치로 일반화물선보다 더 높은 GM을 확보하는 것으로 분석되었다. 컨테이너선의 경우 일반화물선보다 3.4%로 비교적 낮은 GM을 확보하는 것으로 검토되었다. 건화물선 95척의 평균 GoM/B는 7.2%로 나타났으며, 일반화물선의 이상적 GM 약 5%와 비교하면 선폭에 GoM의 비가 2.1% 높게 분석되었다. 액화화물선 64척의 GoM/B는 평균 7.8%로 나타났으며, 기름·화학제품운반선의 GoM/B는 9.1%로, 유조선의 이상적인 GM 약 8%에 비교하면 1.1% 높게 분석되었다.

이는 과거 연구에 이용된 데이터 종류, 운항지역, 선박의 발전 등 시대적 변화가 일부 반영된 것으로 추정되며, 특히 최근 선박의 대형화, 고속화됨에 따라 전복사고에 대비하여 항해사가 복원성 확보 비율을 높이려는 노력으로 판단된다.

4. 안정적인 복원성 GM 제시

선박이 화물 적부 형태에 따라 전용선화, 대형화 되면서 선박을 운항하는 항해사 입장에서 복원성 확보를 위한 적정 GM의 검토가 필요하다. 따라서 대상 선박의 제원과 GM을 통계분석하여 선종별 GM 추정을 위한 근사식을 도출하고 적정

GM을 검토하였다. 만재 상태에서 GM이 선박 길이에 비례하고 선폭에 상관관계가 높은 벌크선, 가스운반선, 기름·화학제품운반선으로 A그룹으로 형성하고 GM 추정을 위한 간이근사식을 도출하였다. 또한 타 선종에 비하여 무게중심이 높게 형성되고, 전복사고 우려가 높은 자동차운반선과 컨테이너선을 B그룹으로 형성하여 적정 GM을 검토하였다.

4.1 GM 추정을 위한 간이근사식

만재 상태에서 GM 간이근사식 추정을 위한 A그룹의 대상은 벌크선 31척, 가스운반선 21척, 기름·화학제품운반선 43척이다. 선박이 대형화 경향을 반영하고, 선박 길이와 상관관계가 있는 총톤수(GT)를 선정하였고(Lee and Ahn, 2013), GM과 상관관계를 이룬 선폭을 이용하여 GT/B를 독립변수로 설정하였다. GM을 종속변수로 회귀분석을 수행한 그래프는 Fig. 10과 같다. 선종별 구분은 색깔과 기호로 표현하였으며, 최소자승법에 의한 회귀분석 결과는 점선으로 표시하였다.

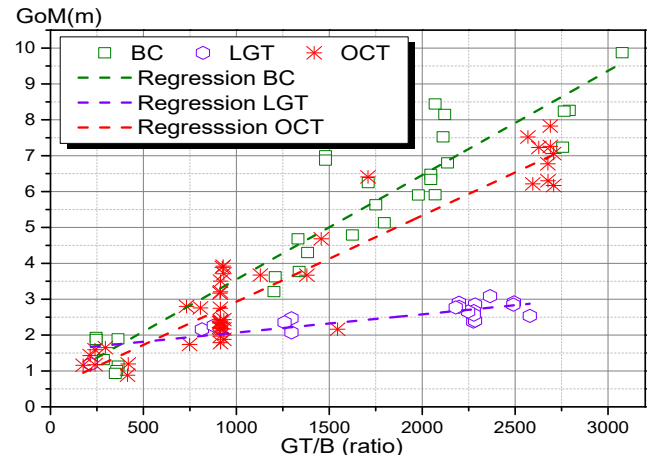


Fig. 10 GoM regression by GT/B in full loading condition

회귀분석 결과 벌크선의 조정된 결정계수는 0.882, 가스운반선은 0.667, 기름·화학제품운반선은 0.877로 나타났다. GT/B에 대한 GM의 선종별 상관계수는 벌크선은 0.941, 가스운반선은 0.827, 기름·화학제품운반선은 0.938로 분석되었다. 만재 상태에서 GoM을 추정하기 위한 간이근사식은 식(5)와 같다.

$$GoM_i = a_i x + b_i \quad (5)$$

여기에서 a_i 는 선형의 기울기, b_i 는 y절편, i 는 선종($i=BC, LGT, OCT$), x 는 GT/B를 의미하며, 간이근사식에 입력될 선종별 변수는 Table 3과 같다.

Table 3 Coefficient of approximate formulation in full loading condition

Coefficient \ i	BC	LGT	OCT
a_i	0.0029	0.0005	0.0024
b_i	0.6449	1.5620	0.5259

기름·화학제품운반선 중 GoM이 가장 작은 선박 A호를 대상으로 간이근사식을 이용하여 GM을 추정하였다. A호의 총톤수는 8,294톤 선폭 20m를 갖고 있으며, 간이근사식을 통한 GoM은 0.879m로 계산되었다. 운항자료에 의한 GoM은 0.881m로 간이근사식에 의한 추정값과 0.002m의 차이로 나타났다.

자동차운반선과 컨테이너선의 경우 화물 적부의 특성상 회귀분석에 따른 결정계수의 신뢰성이 확보되지 않아 간이근사식 제안을 대신해서 평균적인 GM을 다음 절에 제시한다.

4.2 자동차운반선과 컨테이너 선박의 적정 GM 제시

자동차운반선과 컨테이너 선박의 특성상 화물의 적부에 따른 무게중심의 변동량이 전체 복원성에 크게 영향을 미치기 때문에 상관관계를 특정하기가 곤란하다. 따라서 자동차운반선 34척과 컨테이너선 31척에 대한 실질적인 운항 중인 GM 자료를 분석한 결과는 Fig. 11과 같고, Y축은 GoM이며, 빨간색 기호는 최대값 및 최소값, 선은 선종별 평균값을 의미한다.

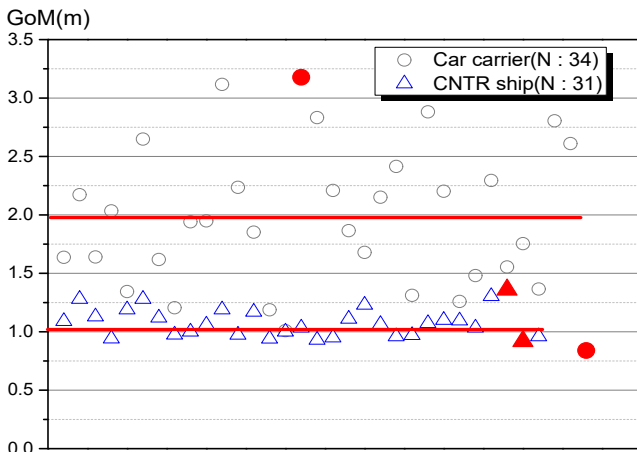


Fig. 11 GoM distribution of car carrier and container ship

만재상태에서 자동차운반선 34척의 평균 GoM은 1.949m(S.D 0.615), 컨테이너선 31척 평균 GM은 1.078m(S.D 0.123)로 운항되고 있었다. 컨테이너선은 약 1m 대역을 유지하는 반면 자동차운반선의 GoM 영역이 1~3m 대역을 나타내고 있다. 선박의 제원 및 화물 적부 상태에 따라 차이는 발생할 수 있지만, 운항자료를 바탕으로 평균값에 표준편차를 반영하여 적정 GoM을 2.6m와 컨테이너선 1.2m로 검토하였다.

자동차운반선의 적정 GoM은 2.6m, 컨테이너선은 1.2m 이상의 GoM을 확보하여 운항한다면 현실적으로 복원성 측면에서의 문제는 발생하지 않을 것으로 사료된다.

5. 결 론

본 연구에서는 5년간 159척의 운항 중인 선박의 복원성 자료를 바탕으로 운항 상태에 따른 선종별 GM의 운용 경향을 확인하였다. 선박 길이에 따른 GM 분포를 분석하였고, 선폭

과의 GM의 상관관계를 분석하고, 선폭 대비 GM의 비율을 산출하여 과거의 이상적 GM과 비교하였다. 또한 선박의 대형화를 반영하여 GT/B를 이용한 GM 추정을 위한 간이근사식을 제안하였고, 자동차운반선과 컨테이너 선박의 적정 GM을 제시하였다. 본 연구의 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 운항 형태에 따른 GoM 비율을 분석한 결과 공선 상태보다 만재 상태일 때 낮은 GoM으로 운항하는 경향을 확인하였다.
- 2) 선박의 폭과 GoM의 상관관계는 자동차운반선을 제외한 전 선종에서 상관계수가 0.8 이상으로 높게 분석되었으며, 대상선박의 전 선종에서 통계적으로 유의미하게 나타났다. 만재 상태일 때, GoM/B 비율은 벌크선은 12.3%, 자동차운반선은 5.9%, 컨테이너선은 3.4%, 가스운반선은 6.4%, 기름·화학제품운반선은 9.1%로 분석되었다. 또한 과거에 검토된 이상적 GM과 비교하였을 때, 벌크선은 7.3%, 자동차운반선은 0.9%, 기름·화학제품운반선은 1.1% 높은 GoM/B로 운항하는 것으로 나타났다.
- 3) 벌크선, 가스운반선, 기름·화학제품운반선의 운항 중인 GoM 자료를 회귀분석하여 GT/B로 GoM 추정 근사식을 제안하였으며, 자동차운반선과 컨테이너선은 평균값에 표준편차를 반영하여 자동차 운반선은 2.6m, 컨테이너 운반선은 1.2m의 적정 GoM을 검토하였다.

본 연구는 운항하는 선박의 GM값을 수집하여 통계적인 평균 운항 상황을 대변하고 있으며, 평균적인 운항 선박의 GM의 경향을 파악한다는 점에서 의미가 있었다. 본 연구에서 제시하고 있는 근사식은 통계적으로 근사적인 접근이기에 반드시 선종별 모든 선박에서 안정적인 GM 확보를 안내하기에 어려운 한계가 있다. 최근 선박은 선종이 다양해지고, 대형화 및 고속화로 인하여 선박 운항중 발생할 수 있는 위험회경사로부터 전복사고 예방을 위한 적절한 복원성 확보가 중요하다. 선박을 운항하는 항해사의 운용적 관점에서 복원성 계산은 입력되는 변수가 다양하고, 유체정역학표에서 GZ Curve를 도출해야 되는 등의 현실적 어려움을 갖고 있다. 본 연구 결과는 항해사가 운항 상태에 따른 선종별 GM 확보 검토를 위한 자료로 이용될 수 있다. 향후 선박의 제원이나 운항 상태에서 쉽게 얻을 수 있는 자료를 통하여 복원성 확보를 위한 지수 또는 모델링 개발이 이루어진다면 선박을 운항하는 항해사 입장에서 상당한 도움이 될 것으로 사료된다.

References

[1] A Co.(2017), S-User's Manual. p. 77.
 [2] Bird, H. and Odabasi, A. Y.(1975), "State of art: Past, Present and Future", Proceeding of the International Conference on Stability of Ships and Ocean Vehicles, pp. 1-24.

- [3] Im, N. K. et al.(2018), "Development of Stability Index for Vessel Operators Support System", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 1, pp. 1-9.
- [4] IMO(2008), Resolution. MSC.267(85), Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008, pp. 35-39.
- [5] Kobylinski. L.(2019), "Alternative Stability Criteria for ship", Proceeding of the International Ship Stability Workshop, pp. 7-13.
- [6] Korean Register(2020), Type of Approval list for Loading Instrument Program, <http://e-mesis.krs.co.kr>
- [7] Lee, K. Y. et al.(2016), Naval Architecture Calculation, Text Books, pp. 78-88.
- [8] Lee, Y. S. and Ahn, Y. J.(2013), "A Study on the Standard Ship's Length of Domestic Trade Port", Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 19, No. 2, pp. 164-170.
- [9] Peters W. et al.(2011), "The Second Generation of Intact Stability Criteria: An Overview of Development", Transactions-The Society of Naval Architectures and Marine Engineers. Vol. 119, pp. 225-264.
- [10] Rahola. J.(1939), The Judging of the Stability of Ships and the Determination of the Minimum Amount of Stability, Helsinki, pp. 22-36.
- [11] Tompuri. M. et al.(2017), "On the consistency of the level 1 and 2 vulnerability criteria in the Second Generation Intact Stability", Proceeding of the International Ship Stability Workshop, pp. 3-8.
- [12] Yang, S. G. and Kim, S. K.(2014), Ship's Cargo Loading, Hein Press, pp. 185-207.

Received 12 May 2020

Revised 27 May 2020

Accepted 26 June 2020