

자동차운반선 선회 중 최대 횡경사각 추정에 관한 연구

주혁범* · 김득봉**†

* 국립목포해양대학교 승선실습과정부 교수, ** 국립목포해양대학교 항해정보시스템학부 교수

Estimation of Maximum Outward Heel Angle
During Turning of Pure Car and Truck Carriers

Hyeok-beom Ju* · Deug-bong Kim**†

* Professor, Division of Cadet Training, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

** Professor, Division of Navigation Information System, Mokpo National Maritime University, Mokpo 58628, Korea

요 약 : 초대형 자동차운반선(LCTC)의 높이는 선저에서 조타실까지 약 44~46m에 이르며, 자동차운반선이 대형화될수록 상부 무게가 하부 무게보다 무거운 중두선의 특징을 가진다. 이 연구는 선회 중 전도한 자동차운반선 골든 레이호(G호)의 최대 외방경사각을 추정하여 사고 원인 규명과 유사사고 방지에 목적이 있다. 이론식으로 계산된 최대 외방경사각은 GM이 +3.0m 이상 상황에서 7.5°(19kn, 타각 35°), GM이 +1.85m인 상황에서 16.7°였다. 실험에 의한 수정식으로 계산한 최대 외방경사각은 GM이 +3.0m 이상 상황에서 10.5°(19kn, 타각 35°), GM이 +1.85m인 상황에서 23.3°를 보였다. G호는 전도사고 당시 도선사의 지시에 따라 속력 13kn, 우현 타각(10°→20°)을 사용하여 침로 038°(T)에서 105°(T)로 변침 중이었다. 이 때 최대 외방경사각은 좌현으로 7.8° 내지 10.9°로 추정된다. 평상 시 외방경사각보다 2.2배 높은 수치이다. 화물선의 최소 GoM은 IS coded에서 +0.15m 이상을 요구하고 있다. 전도된 G호도 +1.72m GoM을 확보하고 있었다. GoM에 대한 기준 미달이 전도의 원인이 아니라, 선회 중 횡경사 모멘트에 대응할 수 있는 충분한 GoM을 확보하지 않아 전도된 것이다. 이 연구는 중앙해양안전심판원과 USCG의 사고 조사 결과를 뒷받침한다.

핵심용어 : 전복사고, 자동차운반선, 최대 외방경사각, 골든 레이호, 선박 복원성, IS code

Abstract : The height of large car and truck carriers from the keel to the wheel house is 44 ~ 46 m, and as the car-carriers increases in size, it exhibits the 'top heavy' characteristic, where the upper section is heavier than the lower section. This study aims to estimate the maximum outward heel angle of the Golden Ray car-carrier (G-ship) during turning maneuvers for accident investigation and the prevention of similar accidents. The theoretically calculated maximum outward heel is 7.5° (at 19 kn, rudder angle 35°) with a GM of +3.0 m or higher, and 16.7° with a GM of +1.85 m. Meanwhile the experimentally modified maximum outward heel is 10.5° (at 19 kn, rudder angle 35°) with a GM of +3.0 m or higher, and 23.3° with a GM of +1.85 m. The G-ship is maneuvered during an accident at a speed of 13 kn, at starboard rudder angle of 10° to 20°, it changes course from 038°(T) to 105°(T) based on the instructions of the on-board pilot. At this time, the maximum outward heel is estimated to be between 7.8° and 10.9° at the port side, which is 2.2 times higher than the normal outward heel. In the IS code, cargo ships are required to exhibit a minimum GoM of +0.15 m or more. The maneuvered G-ship exhibits a GoM of +1.72 m. It is not maneuvered because it fails to satisfy the international GoM criteria and because its GoM is insufficient to counteract the heeling moment during the maneuver. This study is performed based on accident-investigation results from the Korea Maritime Safety Tribunal and the USCG.

Key Words : Capsizing accident, Pure car and truck carriers, Maximum outward heel angle, M/V Golden Ray, Ship stability, IS code* First Author : hyukboem@mmu.ac.kr, 061-240-7411† Corresponding Author : kdb@mmu.ac.kr, 061-240-7197

1. 서론

PCC(Pure Car Carrier) 또는 PCTC(Pure Car and Truck Carrier) 자동차운반선은 승용차나 트럭, 중장비 기계 등을 수송하기 위해 설계된 선박을 말하며, 보통 4,00~7,000대(RT43 소형 승용차 기준)의 차량을 한 번에 실어 나를 수 있다. 전 세계적으로 830여 척이 운항 중으로 보고되고 있다. 최근에는 8,500대를 실을 수 있는 자동차운반선이 등장하였으며, 2~3년 후 9,100대를 실을 수 있는 초대형 자동차운반선(LCTC, Large Car and Truck Carrier)이 건조될 예정이다(Market.us, 2023).

자동차운반선은 차량 적재가 용이하도록 여러 개의 고정식·이동식 갑판으로 구성되어 있으며, 선박 내에서 차량의 원활한 이동을 위해 횡격벽 수를 최소화하거나 횡격벽을 두지 않는 구조를 가지고 있다(Guajardo Camps, 2020). 2019년 전도(capsizing)된 골든 레이호와 같이 7,400대를 실을 수 있는 선박의 경우, 차량 선적을 위해 12개 차량갑판(car deck)이 설치되어 있으며, 선저(keel)에서 조타실(wheel house)까지 높이가 약 42m이다(HMD, 2017b). 8,500대나 9,100대를 실을 수 있는 초대형 자동차운반선은 1~2개 차량갑판이 추가되어 높이가 약 44~46m에 이를 것으로 예상된다.

차량갑판 수가 증가하면 선박 무게중심(G) 또한 높아진다. 자동차운반선이 대형화 될수록 중두선(tender ship, top heavy)에 가까운 복원성을 가진다. 중두선은 선회 중 횡경사에 취약하다(KMST, 2024). 2019년 골든 레이호 전도사고, 2016년 모던 익스프레스호 전도사고, 2015년 호그 오사카호 전도사고가 이와 무관하지 않다. 본 연구는 선회 중 전도한 자동차운반선의 최대 외방경사각을 계산하고, 이를 통해 골든 레이호의 사고 원인 규명과 유사 사고 방지에 목적이 있다.

2. 이론적 배경 및 선행연구 고찰

2.1 선회 중 횡경사 발생 원인

선박이 타각(rudder angle) 0°에서 직진하다가 다른 타각(10°, 20°, 35° 등)을 주면, Fig. 1과 같이 일시적으로 내방경사(inward heel)가 발생했다가 외방경사(outward heel)로 바뀌게 된다. 외방경사는 선박의 관성과 회두모멘트 때문에 최대를 보였다가 서서히 일정한 경사각을 보이게 된다. 이와 같이 최대를 기울어진 시점의 경사각을 최대 외방경사각(max. outward heel)이라 하며, 최대 외방경사각 발생 이후 선체에 작용하는 모든 힘이 일정하게 되는 단계(정상 선회 운동, steady turning motion)에서 보이는 경사각을 횡경사각(normal heel)이라 한다(Yoon, 2015; Lee et al., 2002; Kang et al., 2020).

일반적으로 내방경사보다 외방경사가 더 크다. 내방경사는 타판의 압력에 의해 일시적으로 나타나는 현상이며, 외

방경사는 선박이 원운동 시 원심력이 바깥쪽으로 작용하여 선체가 타각을 준 반대방향으로 기우는 현상이다. 일반적으로 타판 면적과 수면하 선체 종방향 단면적의 비율은 약 1/60~1/70(상선 기준)에 불과하기 때문에 내방경사는 무시할 정도로 작으나 외방경사는 상대적으로 크다. 외방경사는 선박 속력과 선박 무게중심과 관계가 깊다.

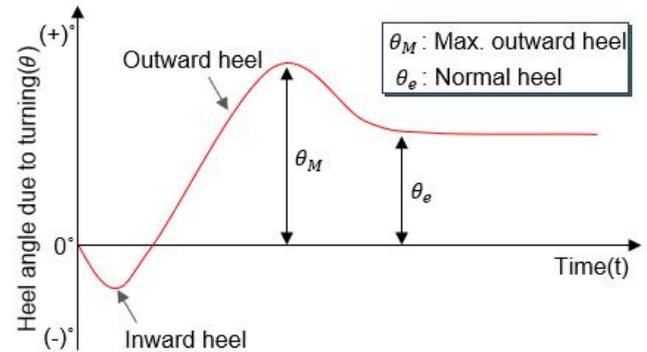


Fig. 1. Heel angle due to ship turning.

2.2 선회 중 횡경사 계산식

1) IMO

IMO 복원성 성능기준에 제시된 횡경사 모멘트 계산식은 식(1)과 같다(IMO, 2008).

$$M_R = 0.200 \times \frac{V_o^2}{LWL} \times \Delta \times \left(KG - \frac{d}{2} \right) \quad (1)$$

여기서, M_R 은 횡경사모멘트(kNm), V_o 선박의 서비스 속력(m/s), LWL (Length on Load Water Line)은 수선장(m), Δ 은 선박의 배수톤수(ton), KG 는 선저(keel)에서 무게중심(G)까지의 수직거리(m), d 는 평균흘수(m), 0.200는 계수이다.

2) Rhodes. M. A

Fig. 2와 같이 타를 사용하면 타판에 직압력(normal force)이 작용하여 선회가 발생한다. 선박 무게중심(G) 위치에서 원심력이 발생하고, 부심(B) 위치에서 구심력(centripetal force)이 발생한다. 이러한 원리를 이용하여 Rhodes. M. A은 식(2)와 같이 선박 외방경사각을 계산하였다(Rhodes, 2003).

$$\tan \theta = \frac{V^2 \times BG}{g \times R \times G_o M} \quad (2)$$

여기서, V 는 정상 선회 중 선속(m/s), R 은 정상 선회 중 선회 반경(m), BG 는 부심(B)부터 무게중심(G)까지 수직거리(m), g 는 중력가속도(9.81 m/s^2)를 의미한다.

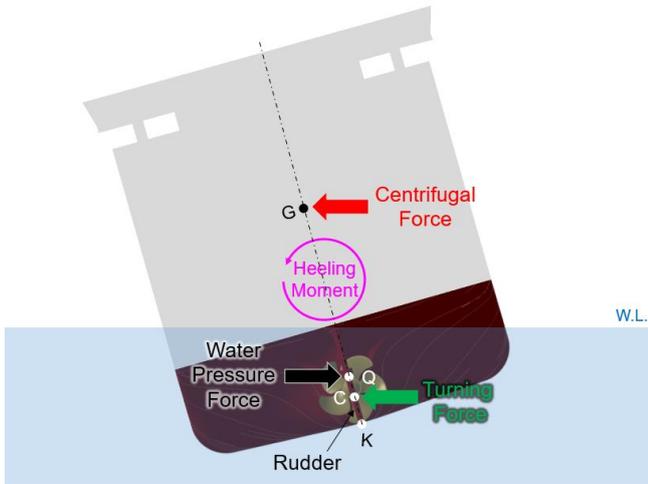


Fig. 2. The center of action of centrifugal and centripetal forces during ship turning.

3) Kinzo. I.

“선회 중 발생하는 외방경사 모멘트는 복원 모멘트와 같다”라는 이론과 “선회 중에 선수미선의 이동방향과 무게중심 이동방향의 차에 의해 편각(drift angle)이 발생한다”는 원리를 이용하여 Kinzo. I는 식(3)으로 외방경사각을 계산하였다(Kinzo, 2013).

$$\sin\theta = \frac{V^2 \times \cos\beta}{g \times R \times GM} GC \quad (3)$$

여기서, V는 정상 선회 중 선속(m/s), R은 정상 선회 중 선회 반경(m), β 는 선회 중 발생하는 편각($^\circ$), GC는 타의 중심(C)부터 무게중심(G)까지의 수직거리(m), g는 중력가속도(9.81 m/s^2)를 의미한다.

4) Kim et al.(2018)

Kim et al.(2018)은 여객선 선형을 가진 2척의 선박을 대상으로 선회 중 횡경사각을 실선 실험하였고, 위 식(1), 식(2), 식(3)에 의한 계산값과 실험값을 비교 분석하였다. 실험결과, 계산값과 실험값에 다소 차이가 있음을 밝혔다. 특히 식(1)에 의한 경사각은 실험값보다 약 4° 가 적었다. 식(2)와 식(3)은 식(1)에 비해 오차 범위는 작았으나(최소 0.3° , 최대 2.0°), 식(2)와 식(3)을 사용하는 경우, 우 선회 시 1.4배, 좌 선회 시 1.1배를 해야 실험값과 일치함을 보였다.

$$\sin\theta(\text{stb'd turning}) = \text{Formula (2 or 3)} \times 1.4 \quad (4)$$

$$\sin\theta(\text{port turning}) = \text{Formula (2 or 3)} \times 1.1 \quad (5)$$

2.3 선회 중 전도사고 사례

IMO 해양사고조사보고서에 의하면 2001년부터 2023년까지 자동차운반선의 전도사고(전복사고 포함)는 총 7건이 발생하였다. 2002년 트라이컬러호(Tricolor)와 2004년 현대 105호(Hyundai No. 105), 2012년 발틱 에이스호(Baltic Ace) 사고는 충돌 후 복원성을 잃고 전복된 사고이며, 2006년 쿠가 에이스호(Cougar Ace)와 2016년 모던 익스프레스호(Modern Express) 사고는 황천 향해 중 차량 선적과 차량 고박 문제로 전도된 사고였다. 2015년 호그 오사카호(Hoegh Osaka)와 2019년 골든 레이호(Golden Ray) 사고는 선회 중 발생한 횡경사 모멘트에 의한 전도사고였다(BMA, 2002; BMA, 2012; PMA, 2016; MAIB, 2016; NTS, 2021).

1) 호그 오사카호

2015년 1월 3일, 자동차운반선 호그 오사카호(이하 H호)는 영국의 사우샘프턴(Southampton)항을 출항하여 독일의 브레머하벤(Bremer haven)으로 항해하던 중, 영국 솔렌트(Solent) 해협의 웨스트 브람블(West Bramble) 부근에서 변침 과정에서 우현으로 40° 이상 경사되는 사고가 발생하였다. 선체경사와 함께 차량 일부가 한쪽으로 밀렸고, 미끄러진 차량이 선체와 부딪치면서 선체에 파공이 생겨 침수로 이어졌다(UK MAIB, 2015). 사고 선박의 선원은 영국 해안경비대(HMCG)에 의해 모두 구조되었고, 사고 선박은 3주에 걸친 구난작업을 통해 모래톱에서 이조할 수 있었다.

영국 해양사고조사국(MAIB, Marine Accident Investigation)은 H호가 부족한 복원성(GM +1.29m 추정)을 가지고 사우샘프턴항을 출항하였고, 출항 후 선회 과정에서 급격한 선체경사 발생으로 복원성을 상실했다고 평가하였다.

2) 골든 레이호

2019년 9월 8일, 골든 레이호(이하 G호)는 미국 브런즈윅(Brunswick) 항을 출항하여, 시몬스 채널 부근에서 우현 변침 중 급격한 선체경사가 발생하면서 전도되었다. 사고 직후 선원 19명과 미국 도선사 1명은 미국 해안경비대(USCG)에 의해 구조되었고, 기관실에 고립된 선원 4명은 사고 다음 날 구조되었다.

미연방교통안전위원회(National Transportation Safety Board, NTSB)는 선박 복원성 계산 프로그램(loading computer)에 선박 평형수 양을 잘못 입력하였고, 잘못 계산된 선박 복원성만을 믿고 항해하다가 시몬스 해협 부근에서 우현 변침 과정에서 횡경사 모멘트를 이기지 못해 전도된 것으로 평가하였다.

3) 전도 선박의 복원성 비교

위 2척의 전도사고 선박은 모두 동일한 자동차운반선으로

로 Table 1과 같이 +0.15m 이상의 GoM을 확보하고 있었다. H의 GoM은 +0.7m, G호의 GoM은 +1.72m였다. H호와 G호 모두 12kn와 13kn의 반속(half) 속력에서 타각 10° ~ 20°로 변침하는 과정에 전도되었다.

Table 1. Specifications of the accident vessel and stability at the time of capsizing voyage

Items	Hoegh Osaka	Golden Ray
Ship's type	PCTC	PCTC
LOA(m)	179.9	199.95
Breadth(m)	32.0	35.4
Gross ton(ton)	51,770	71,178
Deadweight(ton)	16,886	42,428
Lightship(ton)	15,532	21,433
CEU	5,400	7,742
Speed(kn)	12.0	13.0
Mean draft(m)	8.62	9.29
KG(m)	16.32	18.21
GM(m)	+1.29	+1.85
G ₀ M(m)	+0.70	+1.72

Remarks;

- 1) CEU: Car Equivalent Units(Based on RT43)
- 2) KG: Vertical distance from keel(K) to center of gravity(G)
- 3) G₀M: Vertical distance from the center of gravity(G) to the metacenter(M) considering the free surface effect

3. 선회 중 최대 외방경사각 추정

3.1 시뮬레이션 방법

본 장에서 Kim et al.(2018)의 연구결과를 바탕으로 식(3)과 식(4)를 이용하여 7,400 CEU급 자동차운반선 G호의 최대 외방경사각을 추정하고자 한다. 시뮬레이션 시나리오는 Table 2와 같이 시나리오 1(SN01)은 선적 화물이 없는 상태(ballasting condition)를, 시나리오 2(SN02)와 시나리오 3(SN03)은 G호 전도사고 발생 이전 항차와 가장 유사한 상황을 가정한 것이며, 시나리오 4(SN04)는 G호 전도사고 당시 복원성 상황이다. 여기서, 시나리오 1~3에 대한 선박 복원성 데이터는 골든 레이호의 복원성 자료(Trim and Stability Booklet)를 참고하였으며, 시나리오 4(G호 전도사고 항차)는 미국 NTSB의 사고조사보고서를 활용하였다. 최대 외방경사각 추정을 위한 선회반경, 편각 등에 대한 요소는 자동차운반선 해상 시운전 결과보고서(Result of sea trial, 7,400 CEU PCTC)를 참조하였다(HMD, 2017a; HDSH, 2017).

Table 2. Simulation scenario

Items	Unit	SN01	SN02	SN03	SN04
Cargo		0	6703	7267	8541.7
Water ballast		4112.7	3868.7	3117.9	2932.97
Deadweight	ton	5178.8	11637.8	11451	13452
Lightweight	(M/T)	21433	21433	21433	21433
Displacement		26611.8	33070.8	32884	34885
Draft(mean)		7.67	8.85	8.84	9.29
KG		15.77	17.04	16.84	18.21
GM		+4.19	+3.6	+3.77	+1.85
GoM	m	+4.03	+3.42	+3.64	+1.72
RC		4.27	4.27	4.27	4.27
GC		11.5	12.77	12.57	13.93
BG		11.94	12.62	12.42	13.56

Remarks;

- 1) RC: Vertical distance from keel(K) to rudder center(C)
- 2) GC: Vertical distance from the rudder center(C) to the ship's center of gravity(G)
- 3) BG: Vertical distance from the center of buoyancy(B) to the center of gravity(G)

3.2 최대 외방경사각 추정을 위한 요소 값

선회 중 외방경사에 영향을 주는 요소로는 선속(V)과 선회 중 편각(β), GC(타판의 작용점에서 무게중심까지 수직 거리), 중력가속도(g), 선회반경(R), GM이 있다.

1) 선회 반경(steady turning radius, Radius)

G호의 선회종거(advance), 선회경(tactical diameter), 선회 반경(radius) 값은 Table 3과 같다. G호의 선회 반경은 우 선회 시 전속(19.0kn)에서 257m, 반속(13.1kn)에서 191m를 보였다. Fig. 3은 반속(13.1kn) 속력에서 타각별(10°, 20°, 35°) 선회권을 시뮬레이션한 결과(사용 소프트웨어: STR-Sim 2014)이다. 해상 시운전 결과와 시뮬레이션 결과를 바탕으로 타각별, 속력별 선회 반경을 계산하면 Table 4와 같다.

2) 편각(drift angle, β)

G호의 해상 시운전 결과(result of sea trial)에서 정상 선회 중 편각(drift angle)은 22.0°였다(HDSH, 2017).

3) GC

선박의 타판 작용점(C)에서 선박 무게중심(G)의 수직거리는 Table 2와 같다. 선박 무게중심(G)이 높을수록 GC 값도 증가한다. 시나리오 4(SN04)에서 GC는 13.93m로 다른 시나리오에 비해 +1.2m~+2.4m 높은 수치이다

Table 3. Steady turning radius during sea trials of PCTC

Unit: m			
Items	Port turning	Stb'd turning	
Rudder angle	35°		
Load condition: Full loading			
13 kn	Advance	476(2.5 LBP)	486(2.5 LBP)
	Tactical dia.	490(2.6 LBP)	512(2.7 LBP)
	Radius	164	191
19 kn	Advance	505(2.6 LBP)	529(2.8 LBP)
	Tactical dia.	512(2.7 LBP)	625(3.3 LBP)
	Radius	201	257

Table 4. Turning radius based on speed and rudder angle

Unit: m								
Items	R/A	13.1kn		16.0kn		19.0kn		
		port	stb'd	port	stb'd	port	stb'd	
Advance	35°	476	486	490	508	505	529	
	20°	661	689	681	719	701	749	
	10°	912	972	940	1,015	967	1,058	
Tactical dia.	35°	490	512	501	569	512	625	
	20°	686	717	688	780	691	844	
	10°	882	909	902	1,009	921	1,110	
Radius	35°	163	190	182	224	201	257	
	20°	221	257	246	302	271	347	
	10°	294	338	328	397	361	456	

Remarks;

- 1) Port: Port turning
- 2) Stb'd: Starboard turning
- 3) R/A: Rudder angle

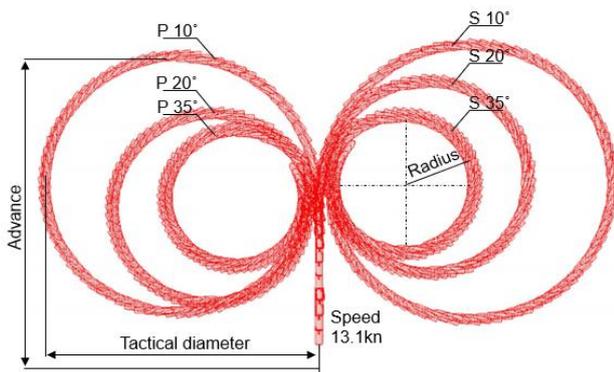


Fig. 3. Turning circle of PCTC by rudder angle of 13.1kn.

4) GM

G호의 시나리오별 GM은 Table 2와 같다. 시나리오 1~3 상황에서 선박 GM은 +3.6m 이상을 보이고 있다. 다만, 전도사고 당시(SN04)의 GM은 +1.85m였다(NTS, 2021). 사고 당시 선

박평형수의 량도 정상 시 적재량보다 적었으며, 중장비 차량과 같은 중량 화물이 이 날 다수 선적되었다. 중장비 차량은 표준화된 차량이 아니므로 선박 복원성 계산 프로그램 상에서 데이터 입력이 어렵다. 실제값을 입력하는 것이 아니라 유사한 차량을 찾아 입력하는 실정이다.

Fig. 4는 시나리오 3과 4의 KG, BG, GM의 높이를 비교한 것이다. G호 전도사고 당시 무게중심(G)은 시나리오 3보다 1.37m 높았으며, 동시에 GM은 1.92m 작았다.

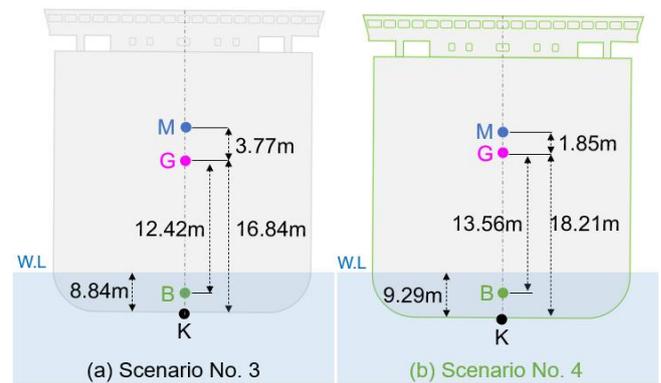


Fig. 4. PCTC Stability (SN03 and SN04).

3.3 선회 중 최대 횡경사각 결과

Table 5는 식(3)으로 계산한 최대 외방경사각이며 Table 6은 식(4)로 계산한 값이다. 식(3)에 의한 최대 외방경사각은 GM이 +3.0m 이상 확보된 상황(SN01, SN02, SN03)에서 최대 7.5°(19kn, 타각 35°)를 초과하지 않았으나, GM이 +1.85m인 상황(SN04)에서는 16.7°로 큰 차이를 보였다.

식(4)에 의한 최대 외방경사각은 GM이 +3.0m 이상인 상황에서 10.5°(19kn, 타각 35°), GM이 +1.85m에서 23.3°로 GM이 작을수록 큰 외방경사각을 보였다.

G호는 전도사고 당시, 도선사의 지시에 따라 속력 13kn, 타각 (Stb'd 10° → Stb'd 20°)을 사용하여 침로 038°(T)에서 105°(T)로 변침 중이었다. GM이 +3.0m 이상 확보된 상황이었다면 최대 외방경사각은 3.3° ~ 3.5°(식3) 또는 4.6° ~ 4.9°(식4)로 추정되나, 전도사고가 발생한 날은 좌현으로 7.8°(식3) 내지 10.9°(식4)로, 정상 시 외방경사각보다 2.2배 높은 수치를 보였을 것으로 판단된다. G호 항해자료기록장치(Voyage Data Recorder, VDR) 분석 자료에 의하면, 2019년 9월 8일 1시 36분 58초(현지시각) 시점에 조타실에 있는 선장과 항해사, 조타수, 도선사가 놀래는 소리가 녹음되어 있다. 이는 평소보다 큰 외방경사각을 보였기 때문에 선원과 도선사가 놀란 것으로 추정된다.

Fig. 5 ~ Fig. 7은 식(4)에 의한 최대 외방경사각을 타각별로 나타낸 것이다. 시나리오 1~3에 비해 시나리오 4의 외방경사각이 2.2배 높음을 알 수 있다.

3.4 연구 결과의 시사점

Table 7은 G호의 출항 컨디션이 IS code(2008) 기준에 충족하고 있는지를 보이는 결과이다. G호는 이날 8가지 평가 항목에서 2가지 항목에서 미달한 값을 보였다. 복원정 곡선(GZ curve)에서 30°에서 40°까지 면적이 0.030m·radian 이상이어야 하나, 0.011m·radian에 불과했고, A₁과 A₂의 면적 비율(area ration)이 1 이상이어야 하나, 0이었다. A₁의 면적(선박 복원모멘트)이 A₂의 면적(횡방향 바람에 의한 경사모멘트)보다 커야 전복 가능성 낮다.

Fig. 8은 G호의 전도사고 항차의 GZ곡선(붉은 실선)과 SN03의 GZ곡선(회색 실선)을 비교한 것이다. 시나리오 3(SN03)과 같이 A₁의 면적은 0.280, A₂의 면적은 0.140으로 A₁/A₂의 값은 2이다. 이러한 경우는 전복 가능성이 매우 낮다. 그러나 G호 전도사고 당시 A₁의 면적 값은 0이었다. GZ 값이 '1.5×경사우력정(wind heeling lever) 값'을 상회하는 값이 있어야 A₁의 면적이 계산되나, 모두 '1.5×경사우력정 값'보다 작다. 본 연구에서 추정한 최대 외방경사각이 G호의 전복 가능성을 뒷받침하고 있다.

Table 5. Max. outward heel by formula (3)

Unit: degree (°)

Rudder angle	Speed (kn)	SN01	SN02	SN03	SN04
S10°	13	2.1	2.7	2.5	5.9
	16	2.7	3.4	3.2	7.6
	19	4.6	5.9	5.5	13.1
S20°	13	2.7	3.5	3.3	7.8
	16	3.5	4.5	4.2	10.1
	19	4.3	5.5	5.2	12.3
S35°	13	3.7	4.7	4.4	10.5
	16	4.7	6.1	5.7	13.6
	19	5.8	7.5	7.0	16.7

Table 6. Max. outward heel by formula (4)

Unit: degree(°)

Rudder angle	Speed (kn)	SN01	SN02	SN03	SN04
S10°	13	2.9	3.7	3.5	8.3
	16	3.7	4.8	4.5	10.7
	19	4.6	5.9	5.5	13.1
S20°	13	3.8	4.9	4.6	10.9
	16	4.9	6.3	5.9	14.1
	19	6.0	7.7	7.3	17.3
S35°	13	5.1	6.6	6.2	14.8
	16	6.6	8.5	8.0	19.0
	19	8.1	10.5	9.8	23.3

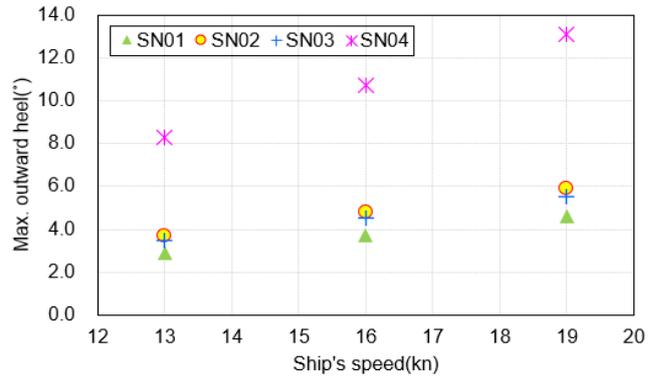


Fig. 5. Max. outward heel at a rudder angle of stb'd 10°.

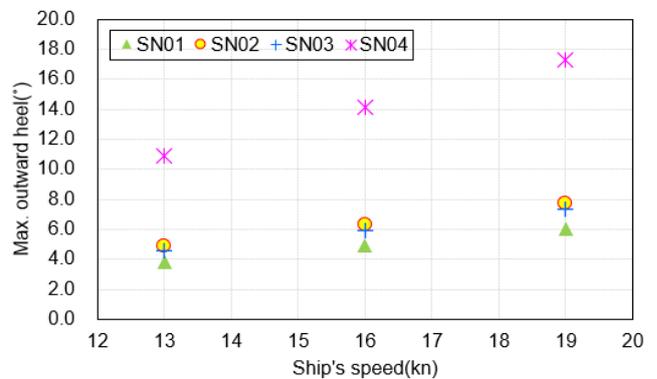


Fig. 6. Max. outward heel at a rudder angle of stb'd 20°.

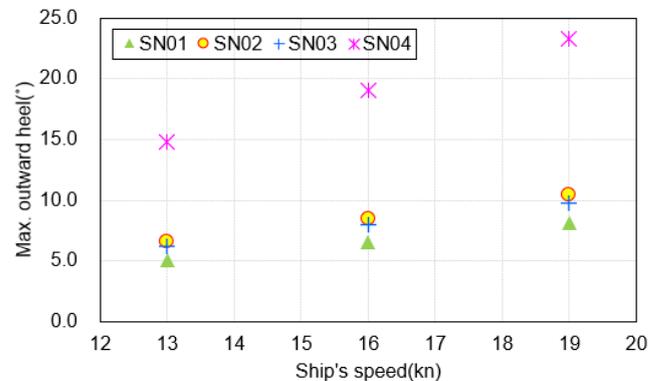


Fig. 7. Max. outward heel at a rudder angle of stb'd 35°.

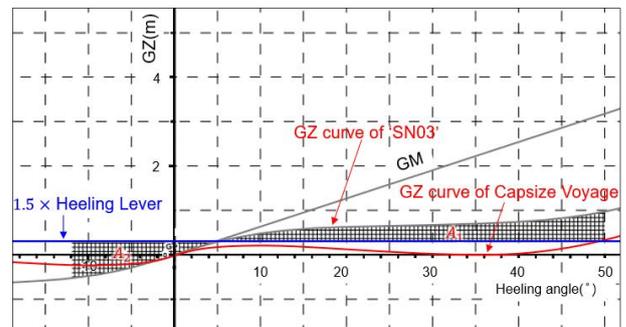


Fig. 8. Comparing the GZ curves of Golden Ray and SN03.

Table 7. Result of the assessment of the mandatory requirements of the 2008 IS Code

Items	Units	Stability of Golden ray (Sept. 8 th 2019)	Required value (IS Code, 2008)
Part A. Section 2.2 - Criteria regarding righting arm curve properties			
Area to 30°	m · radian	0.084 (pass)	At least 0.055 m · radian
Area to 40° / down flooding	m · radian	0.095 (pass)	At least 0.090 m · radian
Area between 30° and 40° / down flooding	m · radian	0.011 (fail)	At least 0.030 m · radian
Max. GZ at 30° or greater	m	4.056 (pass)	At least 0.2m
Angle of maximum GZ	degree	80.4 (pass)	At least 25 degree
Initial GM	m	1.84 (pass)	At least 0.15m
Part A. Section 2.3 - Severe wind and rolling criteria			
Angle of static heel (ϕ_0)	degree	6.2 (pass)	Not to exceed 16 degree or angle for 80% of angle to deck edge immersion
Area ration (A_1 / A_2)	m · radian	0 (fail, $A_1=0$)	Greater than 1

4. 결론

화물선에 대한 최소 GoM은 +0.15m 이상을 요구하고 있다. 전도된 G호도 +1.72m GoM을 확보하고 있었다. GoM 미달이 사고의 원인이 아니라 선회 중 발생한 경사모멘트에 대응할 수 있는 충분한 GoM을 확보하지 않아 발생한 사고였다. 중앙해양안전심판원 특별조사부와 미연방교통안전위원회(NTSB)의 사고 원인 조사와 같은 결과이다.

자동차운반선은 다른 선박과 달리 선박 무게중심(G)이 매우 높은 위치에 있다. 만재상태에서 7,400 CEU급 자동차운반선의 무게중심은 수면 위 약 8~9m에 있다. 무게중심이 높다고 평가되는 컨테이너운반선(만재상태, 10,000 TEU급)도 수면 위 약 4~6m에 불과하다. 탱커선이나 산적화물선은 화물을 적재하면 할수록 선박 무게중심은 수면 아래로 내려간다. 선박 무게중심(G)이 수면 아래에 있으면 풍압력과 횡경사모멘트에 강해진다. 선박 주변의 물이 선박을 잡아주는 역할을 하기 때문이다.

선박 무게중심이 높으면 파랑 등 외력의 영향이나 대각도 조타의 경우 전복의 우려가 크다. 특히 선박의 횡요주기와 파주기가 같거나, 선내에 이동물이나 유동수가 있는 경우에는 위험성이 매우 높아진다.

선박 하부 무게가 상부 무게보다 상대적으로 무거운 선박을 경두선(stiff ship, bottom heavy)이라 하며, 반대로 상부 무게가 하부 무게보다 무거운 선박을 중두선(tender ship, top heavy)이라 한다. 자동차운반선이 대형화될수록 중두선에 가까운 복원성을 가진다. 대형화된다는 것은 차량갑판의 수가 증가한다는 것을 의미하며, 이 차량갑판에 차량(화물)이 선적될수록 무게중심은 높아진다.

7,400 CEU급 자동차운반선이 16도 이상의 경사각을 넘지 않기 위해서는 최소 2.4m 이상의 GoM 확보해야 한다. 해양수산부 고시 「선박복원성기준」에 따라 국제항해에 종사하는 화물선의 한계 경사각은 16도를 넘지 않아야 한다. 「화물적재고박 등에 관한 기준」에 따라 차량 고박장치는 횡경사각 25도 이내에서 정상적인 고박강도를 가진다. 여객선 세월호 전복사고에서도 횡경사각이 12도~17도였을 때 차량 쏠림이 발생하였다.

이 연구에서는 최대 외방경사각 계산을 위해 식(3)과 식(4)을 이용하였다. 식(3)과 식(4)은 G호와 같은 자동차운반선의 선형을 가진 선박을 대상으로 만들어진 계산식이 아니므로 실제와 다를 수 있다. 다만, 이 연구에서 수행한 G호에 대한 최대 외방경사각은 G호의 사고원인 규명과 유사 사고 방지에 도움이 될 것으로 기대된다.

References

- [1] BMA(2002), Report of the Investigation into the Collision Between Kariba and Tricolor Near the North East Bound Dover Traffic Separation Scheme on 14th Dec. 2002, pp. 7-32.
- [2] BMA(2012), Report of the Investigation into the Loss of M/V Baltic Ace Following a Collision with M/V Corvus J at the North Hinder Junction Precautionary Area on the 5th, pp. 28-52.
- [3] Guajardo Camps, A.(2020), Car Carrier Operational Guide and Proposal for an Optimization System, Bachelor's Thesis, Universitat Politècnica de Catalunya, pp. 10-33.

- [4] HDSH(2017), Maneuvering Simulations for 7,400 Unit Roll-on Roll-off Car Carrier, DWG No. 8G-7000-007.
- [5] HMD(2017a), Final Trim and Stability Booklet M/V Golden Ray, DWG No. 4A00B012, pp. 245-400.
- [6] HMD(2017b), General Arrangement M/V Golden Ray, DWG No. 1G-7000-201-F.
- [7] IMO(2008), Adoption of the International Code on Intact Stability(2008 IS Code), Resolution. MSC.267(85), pp. 6-16.
- [8] Kang, B. S., C. H. Jung, and D. B. Kim(2020), A Study on Lashing Standards for Car Ferry Ships Sailing in Smooth Sea Areas, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 26, No. 1, pp. 1-7.
- [9] Kinzo, I.(2013), Theory and Practice of Ship Handling, 1st Edition. Sang Hak Dang, pp. 82-88.
- [10] Kim, H. B., Y. H. Lee, Y. S. Park, and G. Y. Gong(2018), A Study of Real Ship Experiments to Estimate the Heeling Angle of Passenger Type Ship when Turning, Journal of the Korean Society of Marine Environment & Safety, Vol. 24, No. 5, pp. 497-503.
- [11] KMST(2024), Ship Restoration Practical Work, www.kmst.go.kr, pp. 30-45.
- [12] Lee, Y. S., C. S. Kim, and S. M. Lee(2002), A study on the Stability of a Low Freeboard Coastwise Tanker Capsized in Turning(2) - Experimental Examination of the Outward Heel Moment Induced by Flooding of Seawater onto the Deck, The Journal of Navigation and Port Research, Vol. 27, No. 5, pp. 465-471.
- [13] MAIB(2016), Report on the Investigation into the Listing, Flooding and Grounding of Hoegh Osaka, Report No. 6-2016, pp. 68-70.
- [14] Market.us(2023), Global Car Carrier Market 2023-2027, TechNavio, pp. 71-150.
- [15] NTS(2021), Capsizing of Roll-on/Roll-off Vehicle Carrier Golden Ray, PB2021-100930, pp. 40-46.
- [16] PMA(2016), Report on the Investigation of Listing and Abandoned Ship M/V “Modern Express”, R-11-2016/DIAM, pp. 52-53.
- [17] Rhodes, M. A.(2003), Ship Stability for Mates/Masters, 1st Edition, Seamanship International Ltd.: Scotland, pp. 219-294.
- [18] Yoon, J. D.(2015), Understanding and Practical Application of Ship Handling, Sejong, pp. 29-77.

Received : 2024. 03. 25.

Revised : 2024. 04. 29.

Accepted : 2024. 06. 27.