

여객선 세월호의 전복 요인 분석

김정창 · 강일권* · 함상준¹ · 박치완¹

부경대학교 해양생산시스템관리학부, ¹부경대학교 대학원

Analysis the factors on the capsizing of passenger vessel Sewol

Jung-Chang KIM, Il-Kwon KANG*, Sang-Jun HAM¹ and Chi-Wan PARK¹

Div. of Marine Production System management, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

¹Dep. of Fisheries Physics, Graduate school, Pukyong National University, Busan 608-737, Korea

A historical tragic disaster happened by capsizing the passenger ship Sewol at South Western Sea of Korea in 16, April 2014. The ship which left Incheon harbour to bound for Jeju port passed Maengol strait and reached to approach of Byung Pung island, and then capsized and sank with a sudden inclination to the portside in the mean time of starboard the helm. In this time, the ship which has very poor stability without sufficient ballast waters and with over loading cargo listed port side caused by the centrifugal force acting to the outside of turning. A lot of cargoes not fastened moved to the port side consequently, and the ship came to beam end to capsize and sank in the end. No crews including especially captain would offer their own duties in a such extremely urgent time, as a result, enormous number of victims broke out including a lot of student. In this report, author carried out some calculation on the factors which influenced on the stability of the ship, i.e. the ship's speed, the rudder angle, the weight of cargoes and distance of movement, the surface effect of liquid in the tank. We found out that the most causes of capsizing were the poor stability with heavy cargoes and insufficient amount of ballast water against the rule, and the cargoes unfastened moved one side to add the inclination as well. Above all, the owner be blamable because of the illegally operating the ship without keeping the rule.

Keywords : Tragic disaster, Ballast water, Heavy cargoes, Inclination, Poor stability

서론

세월호는 인천항과 제주항을 운항하는 여객선으로서, 2014년 4월 15일 저녁 9시 인천을 출항하여 제주항으로 항해 중 4월 16일 10시 30분에 진도군 병풍도 북방 3.5 마일 해상에서 전복되었고, 12시 57분 병풍도 북동 3.1 마일 해상에서 침몰하였다. 사고 당시 바람은 남서풍 4 ~ 7 m/sec., 파고는 0.5 m, 시정은 양호했고, 사고 해역

의 조류는 북쪽으로 0.4~1.9 노트로 흐르고 있었다.

당시 당직 항해사인 3등항해사는 맹골수도를 통과하고, 병풍도 동쪽 해상을 지나면서 당직 조타수에게 침로를 135°에서 140°로 변침하고자 우현 변침을 지시하였다. 1차 변침이 완료된 후 항해사는 다시 우현으로 5° 더 변침하고자 2차 변침을 지시하였으나 선수가 정침되지 않고, 우현으로 급속히 회두하자 타를 좌현으로

*Corresponding author: ikkang@pknu.ac.kr, Tel: 82-51-629-5895, Fax: 82-51-629-5885

사용할 것을 지시하였다. 그러나 세월호는 계속 빠르게 우선회하면서 좌현으로 외방경사를 일으켰고, 이로 인하여 고박상태가 불량한 화물 등이 한쪽으로 쏠리면서 선체는 좌현으로 급격히 경사가 가중되었다. 세월호는 좌현으로 계속 기울어지면서 선체 현측 개구부 틈을 통해 해수가 유입되었고, 결국 좌현으로 전복 침몰되었다.

세월호가 우현 변침하기 위해 우전타하여 선회 중 과소한 GM으로 좌현 8도 정도의 외방경사를 일으킨 상태에서 조타수는 조타기에 이상이 있었다는 언급을 했지만, 사고 발생 때까지 조타기, 주기관, 전원 등에 이상이 있었다는 징후나 증언은 없었다.

따라서 이 사고는 선박 도입 후 증축 등 개조에 따라 복원성이 약화된 상태에서 선박검사기관이 권고한 복원성 승인 조건보다 선박평형수를 너무 적게 실은 대신에 화물을 과다하게 적재하여 복원성 기준을 만족하지 못했고, 적재된 화물을 적절하게 고박하지 않은 것이 주요한 원인으로 지적되었다.

세월호 사고는 사고 직후 구조를 할 수 있는 시간이 충분히 있었음에도 불구하고 아무 조치도 취하지 않은 선박 직원의 무책임한 행동으로 수많은 희생자를 낸 전대미문의 사고로 기록되었다.

세월호 전복 사고에서 보듯이 여객선의 전복 사고는 수많은 인명의 희생을 가져오므로, 본 연구에서는 이와 같은 사고의 재발을 방지하기 위한 차원에서 선회시 대각도 변침과 부실한 고박, 그리고 권고를 무시한 부족한 선박평형수 등이 이 선박의 전복에 어떠한 영향을 미쳤는지를 파악하고자 한다.

따라서 여기서는 전타시 선속에 따른 경사각의 변화, 적재된 화물의 횡이동에 따른 경사각의 변동, 선박평형수 탱크의 자유수 효과 등 역학적인 전복 요인을 분석하였다.

재료 및 방법

선박의 제원

Fig. 1은 세월호의 일반배치도이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 세월호는 최상층으로부터 하방으로 컴퍼스갑판, 선교갑판, A갑판, B갑판, C갑판, D갑판, E갑판 그리고 선저외판이 위치하고 있으며, A갑판과 B갑판에는 여객실이 있고, 선미부의 B갑판과 C갑판 사이에는 승용차 적재 공간인 2층갑판(twin deck)이 있으며, C갑판은 전통갑판으로서 계선설비, 화

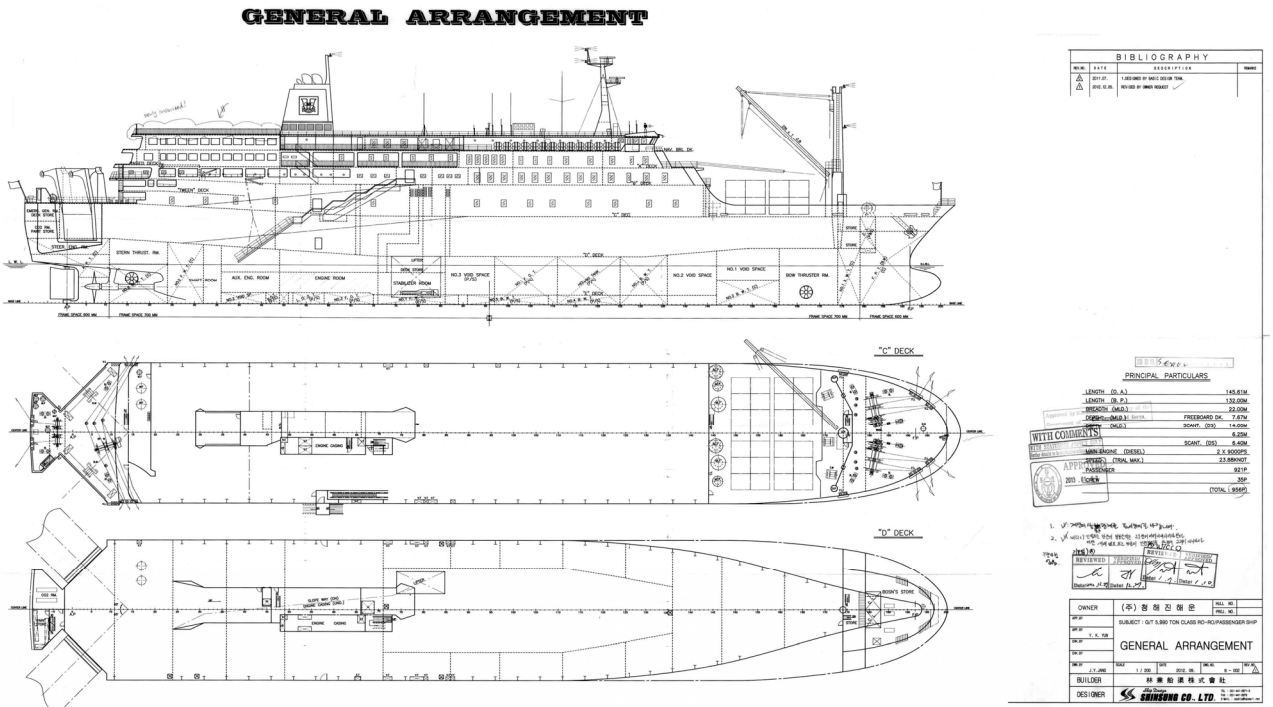


Fig. 1. General Arrangement of passenger ship Sewol.

물적재구역, 화물창과 선미갑판이 있다. D갑판에는 선수창고, 화물창, 선미창고가 있으며, 이 갑판의 하부로 선박평형수탱크, 횡방향추진기, 연료유탱크, 기관실, 청수탱크, 타기실 등이 위치하고 있다. E갑판에는 화물창이 있고, 그 아래로 또 다른 평형수탱크, 청수탱크, 연료유탱크 등이 있다. 이와같이 세월호는 상부 3개 층에는 여객을 수용하는 객실로, 중간 2개 층에는 차량이나 화물 등을 실을 수 있는 공간으로, 그리고 그 하부로는 각종 탱크 등이 위치하는 구조를 가진 RO-RO 여객선이다.

Table 1은 세월호의 제원이다.

세월호는 1994년 일본에서 건조된 선박으로써, 2012년에 국내에 도입되어 여객실의 증설로 인한 개조가 이루어졌고, 그 결과 개조 전에 비해 총톤수와 승선 정원은 각각 239 ton과 116 명 증가되었고, 무게중심은 51 cm 상승하였으며, 화물적재량은 1,450 ton 감소하였고, 선박평형수는 1,333 ton 증가하는 것으로 하여 선급의 승인을 받았다.

Table 1. Particulars of Sewol at capsizing

Description	Principal particulars
Gross tonnage (ton)	6,825
Full load displacement (ton)	9,719
Light weight (ton)	6,213
Dead weight tonnage (ton)	3,506
Cargo weight (ton)	2,143
Ballast water (ton)	744
Length (B.P) (m)	132
Breadth (MLD) (m)	22
Depth (MLD) upper deck (m)	14
Draft FP (m)	5.6
AP (m)	6.6
Maximum/Designed speed (kts)	23.5/22.0
Cb	0.75
M.T.C (ton.m)	174.1
T.P.C (ton)	24.0
L.C.F (m)	-11.8
L.C.B (m)	-6.1
L.C.G (m)	-6.1
V.C.B (m)	3.5
G_oM (m)	0.8
KMT (m)	11.3
KG (m)	10.5
Complement	956

세월호의 최대승선인원은 956명이며, 최대 적재 화물량은 987 ton, 선박평형수 의 권고량은 1,703 ton이다.

Table 1에 있는 일부 자료는 여객선 세월호 전복 사고 특별 조사보고서(KMST, 2014)의 [[표 12] 인천항 출항 당시 복원성 계산 자료] 중 ‘선박 평형수 자연소실분을 반영’ 한 것을 참고로 하였다. 이 때의 세월호의 배수량은 9,719 ton, G_oM 은 0.8 m이다.

이론

Fig. 2는 전타 선회시 선체에 일어나는 힘의 작용도이며, 이 때 선박의 선회반지름과 외방경사각은 식 (1)과 (2)로 구한다(Yoon, 2013).

$$r = C \cdot \frac{\overline{GB'}}{\sin 2\theta(GC - \overline{GB'})} \quad (1)$$

$$\tan \phi = \frac{v^2(\overline{BM} - \overline{GM})}{g \cdot r \cdot \overline{GM}} \quad (2)$$

여기서, C 는 유효마찰계수, $\overline{GB'}$ 은 선체 중심에서 합성저항이 작용하는 점까지의 거리, \overline{GC} 는 선체중심에서 타압의 중심점까지의 거리, α 는 편각이다.

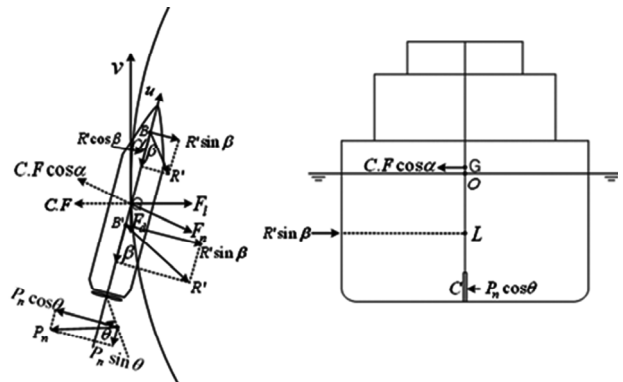


Fig. 2. A schematic diagram of heel moment acting on a vessel in turning.

결과 및 고찰

전타에 따른 외방경사각의 변화

Table 2는 타각에 따른 선회반경이다.

세월호의 Froud Number는 0.25로서, 선속이 선회경에 영향을 주지 않는 범위에 있으므로 (Yoon, 2013), 선속은 고려하지 않아도 되나 여기서는 당시의 선속인

9 m/sec.를 적용한 것이다. 유효마찰계수 C 는 일반적으로 0.2~0.4으로 추정하나, 여기서는 0.3을, α 는 보통 5°~15°이나 그 중간인 10°를 적용하고, GB' 는 추정치를 이용하였다.

Table 2. Radius of turning circle of Sewol according to the rudder angle

Rudder angle (°)	radius of turning circle (m)	remark
5°	1,303	
10°	662	similar to real condition
15°	453	
20°	352	
25°	295	

Table 2에 나타난 바와 같이 타각을 10°와 15° 사용했을 때 세월호의 선회반경은 각각 662m와 453m를 보였다.

Fig. 3은 타각과 선속에 따른 선회시 외방 경사각을 나타낸 것이다. 사고 당시 전타각은 5°~10° 정도로 짐작되나, 명확하지 않아 5°~25°를 취했고, 선속은 17.5 kt (9 m/sec.)였으므로, 그 범위를 7~9 m/sec.로 취하였다. 단, BM 은 이 선박의 형태가 상선(箱船)과 세모꼴의 중간으로 생각하여 $\frac{B^2}{9d}$ 로 계산하면, 8.8 m이다.

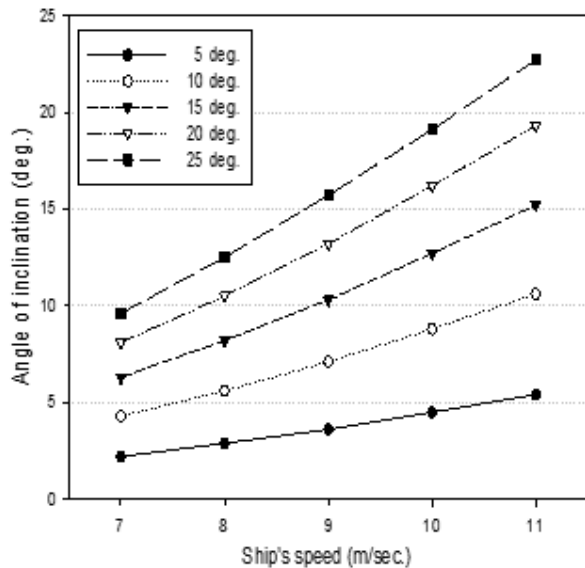


Fig. 3. Angle of inclination outside due to the ship's speed and rudder angle.

이 값은 수면하 선박의 부심 위치는 0.44d~0.49d와 같다는 Morrish's formula의 범위에 들며 (Barras, 2006), 또한 $BM = \frac{I_{xx}}{V}$ 을 적용하여도 같은 값이 산출되기 때문에 이 값을 사용하였다.

이 그림에서 보는 바와 같이 타각이 클수록, 선속이 빠를수록 외방 경사각과 그 증가 폭이 커진다. 타각 5°와 15° 사이는 다른 타각에 비하여 횡경사각의 변동 폭이 크며, 특히 5°와 10° 사이에서 심하다. 그것은 선회반경의 차이에 기인하는 것으로 보인다. 즉, 타각 5°와 10°의 선회반경은 641 m의 차이가 있으며, 10°와 15°의 선회반경의 차이는 209 m로, 타각이 커질수록 선회반경의 차이가 줄어들기 때문이다.

세월호가 병풍도 북동 3.1 마일 해상에서 우선회시 속력 9.0m/sec.일 때, 타각을 5°를 사용했다면 외방 경사각이 3.6°일 것이나, 타각을 10°, 15°를 사용했다면 외방 경사각은 각각 7.1°, 10.3°가 된다. 따라서 이 구간에서는 타각을 5° 더 사용할 때 마다 외방 경사각은 거의 2배씩 증가하므로, 전타 선회 시 타각의 사용에 보다 신중을 기해야 한다.

전타에 따른 선박 평형수의 자유수 영향

전타 선회에 따른 외방 경사로 인하여 가장 먼저 유동수인 선박평형수, 연료유, 그리고 청수가 선회의 반대쪽으로 움직였을 것으로 예상된다. 선박평형수의 적재 상태에 대한 자세한 자료는 있으나, 연료유와 청수에 대한 것은 적재량만 기록되어 있을뿐 유동수로 볼 수 있는 근거는 없다. 따라서 여기서는 선박평형수의 자유수 효과에 따른 외방 경사각을 살펴본다.

Table 3은 선박평형수 탱크와 다른 탱크의 적재 상태를 나타낸 것이다.

이 표에서 보는 바와 같이 세월호의 선박평형수 탱크는 8개가 있으며, 3번(좌·우현)과 6번 탱크는 비워두었다. 그 외는 선수와 선미 탱크가 있으나 모두 비워두었다. 따라서 이들 탱크에는 자유수가 없고, heeling 탱크만 자유수의 영향을 일으킬 수 있을 것으로 판단한다. Heeling 탱크에는 해수를 실은 것으로 하고, 탱크의 길이는 25 m, 폭은 18 m이며, 선체 중중심선에 의해 양분되어 있는 것으로 가정하며, 좌·우현 탱크에 자유수가 각각 25 %씩 들어 있는 것으로 한다. 자유수에 의한 무게중심, G_1 의 상승량은 식 (3)으로 산출한다.

$$G_0 G_1 = \frac{LB^3}{12} \times \frac{\rho}{W} \times \frac{1}{n^2} \quad (3)$$

Heeling tank의 자유수에 의한 G_0 의 상승량은 0.31 m로써, $G_1 M$ 은 0.49 m가 되었다. 따라서 이 수치는 매우 큰 것으로 세월호는 자유수의 영향을 크게 받는다는 것을 알 수 있다.

Table 3. Loading condition of the water ballast tanks and other tanks of Sewol

Tanks	Capacity (MT)	Quantity (MT)	Loading ratio (%)	Remarks
F.P. Tank	246.2	0	0.0	empty
No.1 B.W.Tank (C)	90.6	82.0	90.5	
No.2 B.W.Tank (C)	206.3	200.1	97.0	
No.3 B.W.Tank (P&S)	444.5	0	0.0	empty
No.4 B.W.Tank (C)	147.5	143.2	97.1	
No.5 B.W.Tank (P)	110.9	107.6	97.0	
No.5 B.W.Tank (S)	112.0	108.6	97.0	
No.6 B.W.Tank (C)	207.9	0	0.0	empty
A.P. Tank	472.1	0	0.0	empty
Heeling Tank (P&S)	463.8	102.6	22.1	
Total	1,783.5	744.1	500.7	

Fig. 4는 세월호가 전타 선회중 선박평형수에 의해 $G_1 M$ 이 0.49 m로 감소된 상황에서의 외방 경사각을 다시 그린 것이다.

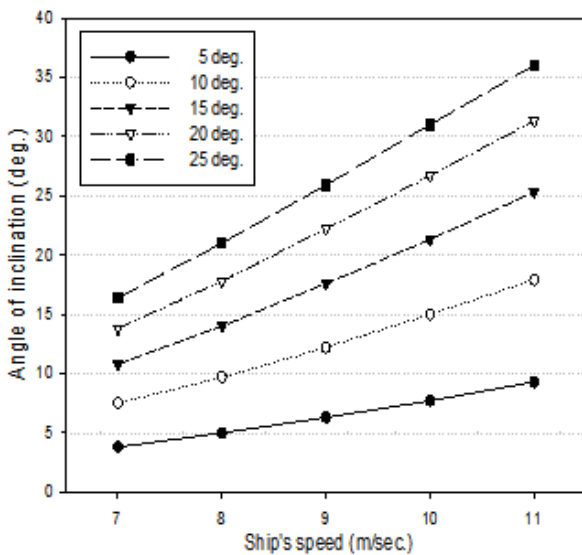


Fig. 4. Angle of inclination due to the surface effect of ballast water.

이 그림에서 보는 바와 같이 속력 9.0m/sec., 타각 5°에서 외방 경사각은 6.3°이고, 타각 10°와 15°에서 외방 경사각은 각각 12.2°와 17.6°가 되었다. 이것은 자유수에 의해 외방 경사각이 각각 3.6°에서 6.3°, 7.1°에서 12.2°, 10.3°에서 17.6°가 된 것으로, 외방 경사각이 1.7~1.8배 증가한 것이다. 따라서 자유수의 영향이 얼마나 큰지를 알 수 있다.

화물의 횡이동에 따른 누적 횡경사

선박에 적재된 컨테이너는 보통 11.3~21.8°의 경사에서 미끄러지는 것으로 보며, 이 선박에서는 과거에 파도에 의하여 선체가 약 16° 가량 횡동요할 때 컨테이너가 옆으로 미끄러지고 새시가 움직인 적이 있었다고 보고하고 있다 (KMST, 2114. 이하 보고서라고 한다). 실제로 세월호에서는 타각과 자유수의 영향으로 화물창 내의 화물이 한쪽으로 쏠리면서 ‘쿵’하는 소리와 함께 선수 갑판의 컨테이너가 바다로 추락하는 현상이 발생하였다. 따라서 타각에 의한 횡경사와 자유수에 따른 추가적인 횡경사가 합쳐진 시점에서 화물과 차량이 연쇄적으로 횡방향으로 이동했을 가능성이 매우 크다.

세월호가 선적한 화물 2,143 ton에서 일반화물은 657 ton이며, 차량이 1,485 ton이다. 여기서는 단순히 일반 화물과 차량을 분리하지 않고 같은 화물로 취급하며, 이 화물의 1/3이 횡으로 1~3 m 이동할 때를 가정하여 횡경사각을 계산하되, 선적된 화물과 차량은 C갑판에 주로 선적되었기 때문에 전체 무게가 C갑판의 중앙에 집중된 것으로 추정하여 계산한다.

Fig. 5는 화물의 이동에 따른 횡경사각을 계산하고, 여기에 선회시 타각에 따른 경사각과 자유수의 효과에 따른 경사각을 더하여 전체의 횡경사각을 나타낸 것이다. 선속은 전타 선회시의 속력인 9m/sec로 한정하였다.

이 그림에서 보는 바와 같이 속력 9.0m/sec.에서 타각을 10° 사용하고, 화물이 2 m 이동했다면, 누적 횡경사각은 37.1°이다. 또한 타각 15° 사용 시, 화물이 2 m 이동했을 때, 누적 횡경사각은 45.7°이다.

여기서는 전체 화물의 1/3이 이동했을 때를 가정했고, 실제 상황은 추정하기가 쉽지 않으나, 이 정도의 대각도 횡경사는 여객선인 세월호의 안전에 치명적으로 작용했을 가능성이 매우 크다.

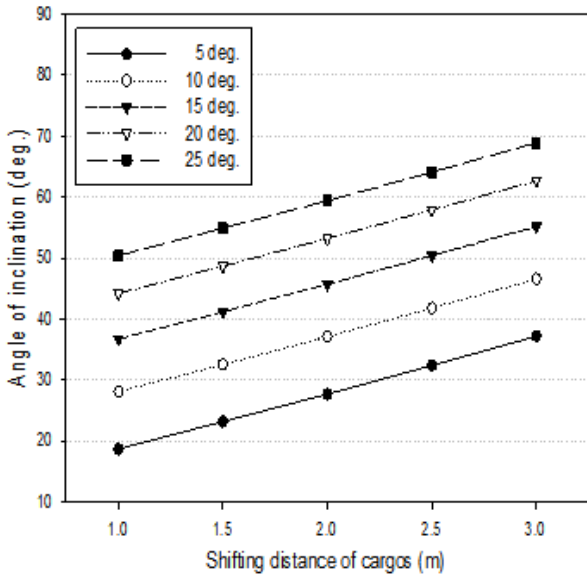


Fig. 5. Cumulative inclination angle due to the shifting cargos, effect of free waters, rudder angle in turning in speed 9 m/sec..

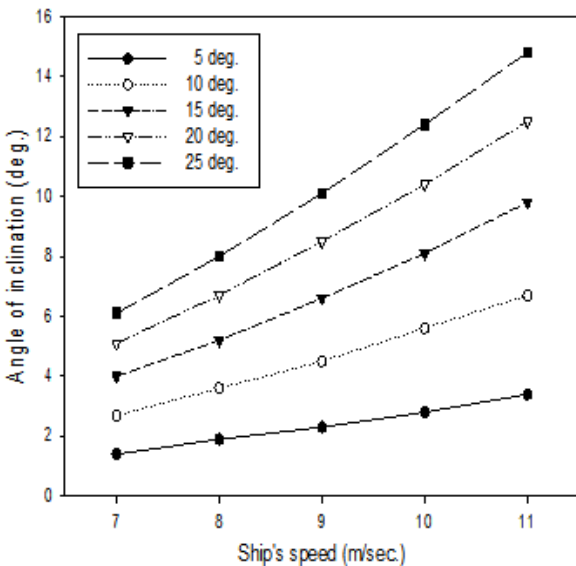


Fig. 6. Inclination angle according to the rudder angle at full load of No.3 ballast water tank additionally.

이중저 탱크에 선박평형수를 만재했을 때의 선체 횡경사 세월호의 8개의 선박평형수 탱크 중 3번 좌우현 탱크, 6번 중앙 탱크, 그리고 선수 탱크와 선미 탱크는 비워있었다. 세월호는 평형수 1,703 ton을 실어야 하지만, 761 ton 밖에 실지 않았다. 여기서는 일반 화물을 그대로 둔 상태에서 선수 탱크를 제외한 빈 탱크에 선박평

형수를 채웠을 때를 가정하여 전타 선회시 횡경사각을 계산한다. 단, 만재 상태는 탱크 용량의 97%로 보며, 모든 평형수 탱크의 중심 높이는 1 m로 한다.

3번 탱크를 만재했을 때

Fig. 6은 3번 탱크에 선박평형수를 만재했을 때(432 ton)의 횡경사각을 나타낸 것이다. 이 때는 무게 중심이 0.4 m 하강하며, 따라서 G_1M 이 1.2 m가 된다.

이 그림에서 보는 바와 같이 선속 9 m/sec.에서 타를 5°, 10° 그리고 15°를 사용했을 때 횡경사각은 각각 2.3°, 4.5°, 6.6°이다. 타를 25° 사용했다고 해도 횡경사각은 10.1°이다. 이 정도의 횡경사는 선박 안전에 큰 문제를 일으키지 않는다. 따라서 선박평형수를 3번 탱크에 추가로 만재하고, 그 무게만큼 일반화물을 덜 실은 상태에서 운항했다면 위험 상황으로 확대되지는 않았을 것이다.

3번 탱크와 선미 탱크를 만재했을 때

3번 탱크(432 ton)와 선미 탱크(458 ton)를 추가로 만재하면 전체 선박평형수는 1,650 ton으로써 선급의 권장량과 거의 비슷한 무게가 된다. 3번과 선미 탱크를 만재했을 때는 무게 중심이 0.9 m 하강하며, 따라서 G_1M 이 1.7 m가 된다. 그리고 추가로 적재되는 선박평형수 890 ton으로 흘수는 34.0 cm 증가한다. 그러나 이 정도의 흘수 증가는 안전에 큰 영향을 미치지 않는다.

Fig. 7은 3번 탱크와 선미 탱크를 만재했을 때의 횡경사각을 나타낸 것이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 선속 9 m/sec.에서 타를 5°, 10° 그리고 15°를 사용했을 때 횡경사각은 각각 1.6°, 3.2°, 4.7°이다. 타를 25° 사용하여도 횡경사는 7.2°에 불과하다. 이 때는 매우 안정된 상태로 선박 안전에 전혀 문제가 없다. 따라서 선박평형수를 3번과 선미 탱크에 추가하고, 그 무게만큼 일반화물을 덜 실은 상태에 운항했다면 전복의 위험 상황은 전혀 없었을 것이다.

3번 탱크와 6번 탱크를 만재했을 때

선박의 상황에 따라 선미 탱크에 선박평형수를 실지 못하는 경우가 있을 수가 있을 것이다. 이 때는 3번 탱크(432 ton)와 6번 탱크(202 ton)를 사용한다고 가정하

여 횡경사각을 구한다. 이 때 KG는 0.6 m 하강하고, 흘수는 27.2 cm 증가하나, 이 정도의 흘수 증가는 안전에 별 영향을 주지 않는다.

Fig. 8은 3번 탱크와 6번 탱크를 만재했을 때의 횡경사각을 나타낸 것이다.

이 그림에서 보는 바와 같이 선속 9 m/sec.에서 타를 5°, 10° 그리고 15°를 사용했을 때 횡경사각은 각각 1.9°, 3.8° 그리고 5.5°이다.

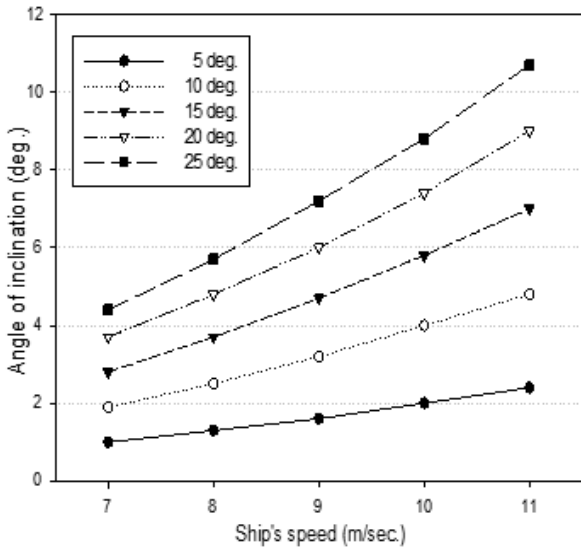


Fig. 7. Inclination angle according to the rudder angle at full load of No.3 ballast water and after peak tank additionally.

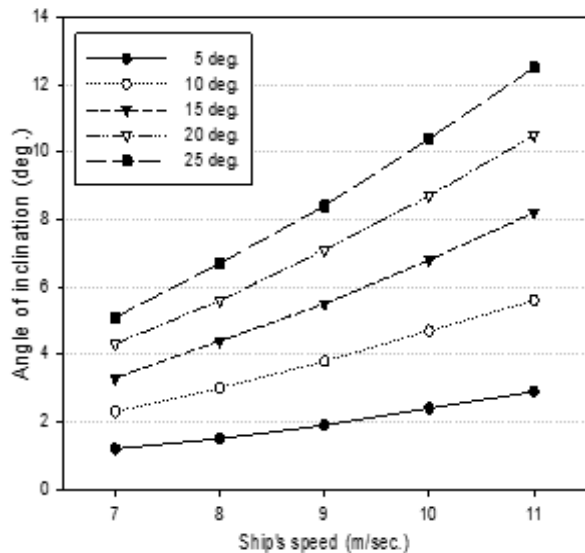


Fig. 8. Inclination angle according to the rudder angle at full load of No.3 and No.6 ballast water tank additionally.

타를 25° 사용하더라도 횡경사는 8.4°이며, 이 정도의 횡경사는 선박 안전에 별 문제를 일으키지 않는다. 따라서 선박평형수를 3번과 6번 탱크에 추가로 만재하여 운항했다면 위험 상황은 없었을 것이다.

이상 살펴 본 바와 같이 선박평형수 탱크 중 3번 탱크와 선미 탱크, 혹은 3번 탱크와 6번 탱크를 만재하였다면 세월호의 안전에 문제가 전혀 없었을 것이고, 적어도 3번 탱크만이라도 추가적으로 만재하고, 그 무게만큼 일반화물을 덜 실은 상태에서 운항했다면 전복 사고는 발생하지 않았을 것이다.

화물과 선박평형수를 규정에 맞게 선적했을 경우

세월호는 선박의 안전을 위해 규정상 987 ton의 화물과 1,703 ton의 선박평형수를 실어야 하지만, 이 규정을 무시하고 각각 2,143 ton의 화물과 761 ton의 선박평형수를 싣고 출항하였다. 즉, 화물은 1,156 ton을 초과 적재했고, 선박평형수는 942 ton을 덜 실었다. 세월호가 화물과 선박평형수의 적재 규정을 지켰을 경우에 전타 선회시의 횡경사 정도를 알아본다. 화물 과적분의 감량과 선박평형수의 증량에 따른 흘수의 증가는 8.9 cm 이나 무시하도록 한다.

화물은 C갑판과 D갑판에 주로 적재되어 있었고, 화물의 평균 높이는 약 11 m, 선박평형수의 중심 높이는

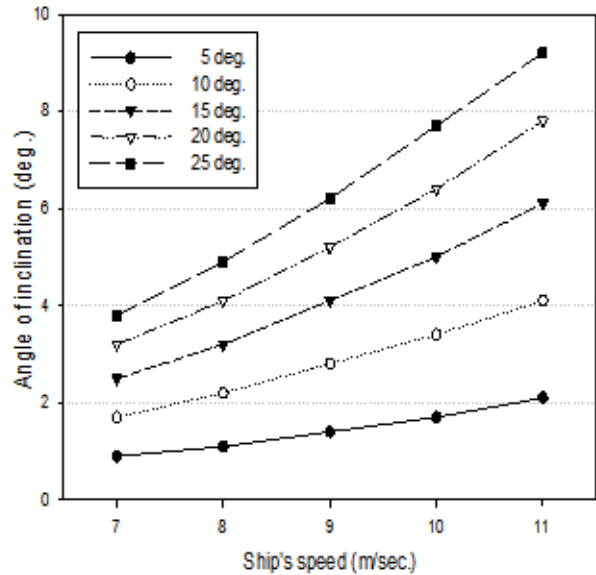


Fig. 9. Inclination angle according to the rudder angle at loading condition required by K.R register on the ballast water and cargos.

Fig. 9는 선급의 권장량에 맞게 화물과 선박평형수를 선적했을 경우의 횡경사각을 나타낸 것이다.

1.5 m로 추정한다. 이 때 KG_1 은 9.5 m되어 GM 이 1.0 m 증가하게 된다.

이 그림에서 보는 바와 같이 선속 9 m/sec.에서 타를 5°, 10° 그리고 15°를 사용했을 때 횡경사각은 각각 1.4°, 2.8° 그리고 4.1°이다. 혹시 타를 35°를 사용했다고 해도 횡경사각은 7.6°였다. 이 정도의 횡경사는 극히 안정된 선박에서의 수치이다. 따라서 규정에 맞추어 운항했다면 타를 대각도로 사용했어도 전혀 문제가 없었을 것이다.

정상적인 선박은 전속으로 항해하면서 전전타를 했을 때 전복되지 않아야 하는 것이다. Fig. 9를 보면, 세월호의 전복 원인은 조류가 강한 해역에서 대각도 타각 혹은 미숙한 타를 사용해서가 아니라, 복원성의 부족 문제라는 것을 알 수 있다.

세월호의 전복의 가장 큰 원인은 이와같이 복원성이 부족한 선박을 운항하면서 규정을 무시한 과적과 선박평형수 부족 등의 위험 상황을 사전에 적절하지 못한 명백한 인적인 과실에 있다.

결론

본 연구는 세월호 전복 사고의 원인을 역학적인 부분으로 한정하여 고찰하였으며, 결론은 다음과 같다. 세월호의 전타시 횡경사각은 타각의 크기에 따라 달라지나, 동일한 타각의 변화일 때는 소각도일 때의 횡경사각의 변화가 대각도일 때보다 크다. 세월호가 병풍도 북동 해상에서 우현 전타했을 때, 전타와 선박평형수의 자유수 영향으로 횡경사가 크게 일어났으며, 그 영향이 연쇄적으로 작용하여 화물의 횡이동을 일으켰다. 자유수는 선박의 무게 중심을 상승시켰으며, 그 영향은 커서 횡경사각을 1.7~1.8배 증가시켰다. 또한 화물의 이동으로 인한 횡경사는 약 10°~30°로써, 이것이 전타

선회와 자유수에 의한 횡경사각에 누적되어 심한 횡경사각을 발생하였다. 즉, 이때는 당시의 항해 속력에서 10°의 타각을 사용하면 약 40°의 누적 횡경사각이 발생하기 때문에 이것이 전복의 결정적인 원인으로 작용했을 가능성이 매우 크다. 그러나 적어도 비어있었던 3번 탱크만이라도 선박평형수를 만재했다면, 25°의 타각을 사용하더라도 횡경사각은 10° 정도로서 선박 안전에 큰 문제를 일으키지 않았을 것이고, 선급의 권장량에 맞게 화물과 선박평형수를 선적했다면 타각 15°에서 횡경사각은 5° 이내이며, 타를 전전타했다고 해도 횡경사각은 10°를 넘지 않기 때문에 안전에 전혀 문제가 없었을 것이다. 따라서 세월호 전복의 중요한 역학적 원인은 규정을 무시한 화물의 과적과 선박평형수의 부족이며, 거기에 화물의 고박을 철저히 하지 않은 것도 또 다른 원인이다. 전타에 대한 것은 세월호가 정상적인 복원성을 가진 선박이 아니었기에 작은 원인이 될 수 있었으나, 그것 자체가 원인은 아니다.

사사

이 논문은 부경대학교 자율창의기술연구비(2015년)에 의하여 연구되었음

References

- Barras CB and Derrett DR. 2006. ship stability. ISBN 13:987-0-7506-6784-5. 103-104.
- Korean Maritime Safety Tribunal(KMST). 2014. Safety investigation report of passenger vessel Sewol at capsizing. pp 91.
- Yoon JD. 2013. Theory and practice of ship manoeuvring. publishing company Sejong 44, 48-50, 61, 63.

2015. 8. 27 Received

2015. 11. 12 Revised

2015. 11. 12 Accepted