

# 선회중 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 연구 (1)

孔吉永\* · 金喆承\*\* · 定兼 廣行\*\*

\*한국해양대학교 운항시스템공학부, \*\*고베상선대학 상선학부 해사시스템과학전공

## A Study on the Stability of a Low Freeboard Coastwise Tanker Capsized in Turning (1)

Gil-Young Kong\* · Chol-Seong Kim\*\* · Hiroyuki Sadakane\*\*

\*Division of Ship Operation Systems Engineering, College of Maritime Sciences, Korea Maritime University.

\*\*Department of Maritime Science, Faculty of Mercantile Marine Science, Kobe University of Mercantile Marine.

**요 약** : 전복한 저건현 내항 탱커의 사고 원인을 조사하기 위하여 복원성에 영향을 미치는 자유표면영향과 저건현 선박에서 발생하는 해수 침입, 침수침하 현상에 대하여 알아보았다. 그리고 선회시에 발생하는 경사 모멘트를 계산하고 사고 선박의 경사 모멘트를 추정하였다. 이상의 결과로부터 사고 선박의 복원성 상실에 의한 전복 원인을 고찰하였다.

**핵심용어** : 선박, 복원성, 자유표면영향, 선수침하, 외측경사모멘트

**Abstract** : A coastwise chemical tanker sailing at full speed has capsized in calm water and while turing. We investigate reasons of the accident and demonstrate that a proper correction for the free surface effect of the liquid cargo has not been practiced in the initial design stage and that the bow-sinkage induced in sailing has weakened the form stability of the ship. It is also shown that the liquid cargo shift occurring in turning generated a significant outward heel moment.

**Key words** : Ship, Stability, Free Surface Effect, Bow-Sinkage, Outward Heel Moment

### 1. 서 론

석유 및 화학약품을 적재하고 비교적 정온한 해상을 항해하던 내항 탱커의 전복 사고가 종종 보고되고 있다. 이러한 전복 사고의 일반적인 원인은 내항 탱커의 복원성과 관련한 특성에서 찾을 수 있다. 예를 들면, 내항 탱커의 액체화물은 자유표면영향에 의해 선체 중심의 상승을 초래하고, 이러한 영향은 화물의 비중이 큰 액체의 경우 보다 현저하게 나타난다. 뿐만 아니라, 내항 탱커의 대부분이 다른 선형에서는 찾아보기 어려울 정도로 건현이 낮은 저건현 선박이라는 것이다. 저건현 선박은 항해중 갑판상에 해수가 쉽게 침입하고, 이러한 현상은 특히 선박의 급격한 선회시에 쉽게 발생한다. 그리고 항해 중에 발생하는 선체 침하와 이로 인하여 생기는 선체 트림의 변화 때문에 복원력이 더욱 감소하여 전복의 위험성은 크게 된다. 이와 같이 저건현 탱커는 복원성이 열악해지기 쉬운 심질을 가지고 있기 때문에 급격한 선회로 인한 경사 모멘트가 발생하는

것에 의해서도 전복의 위험성은 더욱 증가한다.

따라서, 본 연구에서는 먼저 전복한 저건현 내항 탱커의 사고 원인을 조사하기 위하여 복원성에 영향을 미치는 자유표면영향과 저건현 선박에서 발생하는 해수 침입, 침수침하 현상에 대하여 알아보았다. 특히 항행중 선체 침하에 관하여는 수조 모형실험을 통하여 사고 선박의 복원정 곡선을 산출하였다. 다음으로 선회시에 발생하는 경사 모멘트를 계산하고 사고 선박의 경사 모멘트를 추정하였다. 이상의 결과로부터 사고 선박의 복원성 상실에 의한 전복 원인을 고찰하였다.

### 2. 전복선박의 개요

사고 선박은 통상의 내항 화학약품 운반 탱커(Chemical Tanker)이고, 사고 당시 화물 적재상태는 거의 만재상태였다. 선체의 주요목과 개략적인 선형은 Table 1, Fig. 1과 같다. 사고 당시의 적재상태는 Table 2에 나타낸 바와 같고, Cargo Tank의 치수와 적재량은 Table 3과 같다. 적체화물은 비중 1.25의 액체화물이었다.

출항 시 선박은 0.2m 선미 트림상태였고, 우현으로 약 1~2° 정도 경사한 상태였다.

\* 정희원, gykong@kmaritime.ac.kr, 051)410-4273

\*\* 정희원, cskim@cc.kshosen.ac.jp, 051)410-4273

정희원, sadakane@cc.kshosen.ac.jp, 051)410-4273

Table 1 Principal Dimension

$L_{pp}$ (m)	B (m)	D (m)
44.00	8.00	3.50

Table 2 Load Condition (full load)

W (ton)	Fore draft $d_f$ (m)	Aft draft $d_a$ (m)	KG (m)	GM (m)
778.5	3.00	3.20	2.22	0.69

Table 3 Cargo tank and loaded liquid cargo

	Cargo tank (port, Starboard)		
	No.1	No.2	No.3
Length (m)	7.70	8.80	9.35
Breadth(m)	3.10	4.00	4.00
Depth (m)	2.70	2.70	2.70
$d_t$ (m)	1.958	1.809	1.599
$\Upsilon$	1.25	1.25	1.25

Where,  $d_t$  : depth of liquid cargo,  $\Upsilon$  : specific weight of liquid cargo

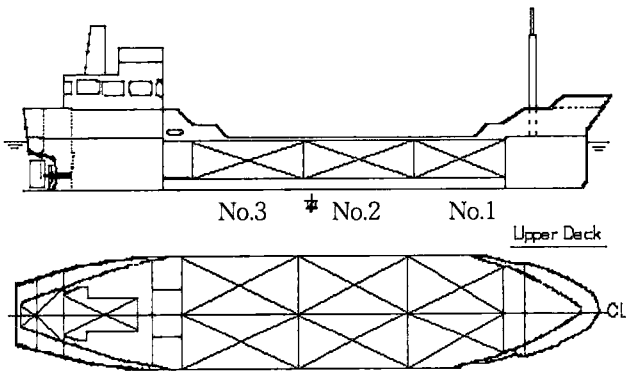


Fig. 1 Outline of the coastwise tanker

### 3. 복원성에 영향을 미치는 제 요소

#### 3.1 자유표면영향

자유표면영향에 의한 선체 중심의 상승을 계산하는 방법으로는 탱크 (Tank) 직립시에 액면의 2차 모멘트를 기준으로 하는 방법 (액면 2차 모멘트법)과 실제 액체 유동에 기인한 경사 모멘트를 기준으로 하는 방법 (경사 모멘트법)이 있다.

##### 3.1.1 액면 2차 모멘트법

선체 직립상태에서 탱크 액면의 2차 모멘트를 기준으로, 선체의 중심 상승량  $GG_0$ 는 식 (1)로부터 계산할 수 있다.

$$GG_0 = i \cdot \Upsilon / W \quad (1)$$

여기서,  $i$ 는 액면의 2차 모멘트,  $\Upsilon$ 는 액체의 비중량,  $W$ 는 선체중량

이 중심상승에 의한 선체 복원팔 (Righting Arm)의 감소량  $\Delta GZ_1$ 는 횡 경사각  $\phi$  에 따라 식 (2)로부터 구할 수 있다.

$$\Delta GZ_1 = GG_0 \cdot \sin \phi \quad (2)$$

식 (2)에 의한 계산 결과를 Fig. 2의 실선으로 표시하였다.

##### 3.1.2 경사 모멘트법

탱크내 액체의 경사를 기준으로 실제 모멘트로부터 선체 복원팔의 감소량  $\Delta GZ_2$ 를 구하는 방법은 3.1.1에 소개한 액면 2차 모멘트법보다 합리적이지만 계산 과정이 복잡하다<sup>1)</sup>.

$$\Delta GZ_2 = w \cdot gz / W \quad (3)$$

여기서,  $w$ 는 탱크 액체의 전 중량,  $gz$ 는 탱크내 액체 중심의 수평방향 이동량

$\Delta GZ_2$ 의 계산 결과를 Fig. 2에 나타내었다. 탱크의 용적률을 각각 10%씩 변화를 주어 계산하였다. Fig. 2에서 20%와 80% 용적률의  $\Delta GZ_2$ 는 같은 값을 나타내고 있는 것을 알 수 있으며, 또한 이 계산결과로부터 50% 용적률의 경우가 복원팔의 손실에 있어서 최대가 되는 것을 알 수 있다.

상기의 방법은 탱크 깊이  $d$ , 횡폭  $b$  및 액면의 높이  $h$ 에 따라서  $\Delta GZ_2$ 가 복잡하게 변화하므로 계산이 번잡하게 된다. 이 때문에 IMO의 A167에서는  $\Delta GZ_2$ 가 최대가 되는  $d/h = 0.5$ 를 기준으로 비교적 간단하게 자유표면영향에 의한 수정량이 산출되어 질 수 있도록 정하고 있다. 이것은 엄격한 자유표면영향의 수정을 부가하고 있음을 나타낸다.

##### 3.1.3 액체 비중

원유 탱커의 적재 액체 비중은 1 이하이지만, Chemical Tanker가 수송하는 액체는, 예를 들면 갈리세린은 1.25, 당밀은 1.4 정도로 원유와 청수에 비해서 상당히 무거운 경우가 있다.

Tank 액체의 자유표면영향은 이러한 액체의 비중에 비례해서 증가한다.

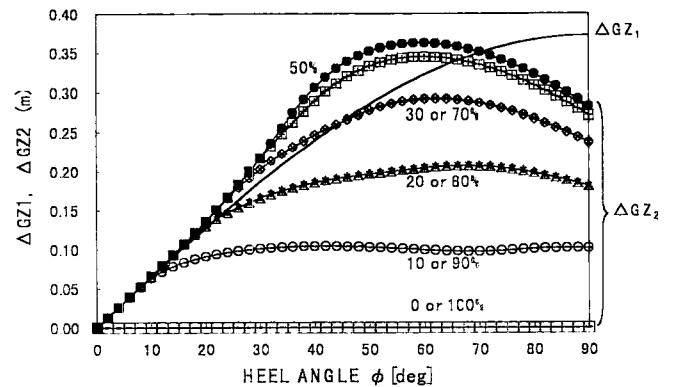


Fig. 2 Examples calculated the free water effect using eq. (2) and eq.(3)

### 3.2 저건현

#### 3.2.1 저건현 선박의 복원정 곡선

내항 탱커는 저건현 선박이지만, IMO 등의 복원성능 요건을 만족시키기 위하여 선수루와 선미루가 복원성에 기여하도록 설계되어 있다. 전복 당시 사고 선박의 복원정 곡선은 Fig. 3에 나타낸 바와 같다. Fig. 3의  $GZ_0$  (실선)는 자유표면영향이 없는 경우의 복원정 곡선이고,  $GZ_1$  (○표시)는 조선소가 제시한 자유표면영향을 수정한 복원정 곡선,  $GZ_2$  (□표시)는 식 2의 액면 2차 모멘트법으로 자유표면영향을 수정한 복원정 곡선,  $GZ_3$  (△표시)는 식 3의 액체 경사 모멘트법으로 자유표면영향을 수정한 복원정 곡선이다.

$GZ_0$ 는 상갑판 현단이 수면에 몰수되기까지는 비교적 GM이 크기 때문에 양호한 복원성능을 가지고 있는 것으로 보여진다. 그러나 자유표면영향을 수정한 복원정 곡선과 비교하면, 경사 각 40~50° 부근에서 나타나는 최대 복원정  $GZ_{Max}$ 는 상당한 차이가 발생하여,  $GZ_1$ 에서는 복원성 규칙을 만족시키지만,  $GZ_2$ 와  $GZ_3$ 에서는 복원성 규칙을 만족시키지 못하는 결과로 되는 것을 알 수 있다. 이상의 분석 결과로부터 사고 선박은 자유표면영향에 대한 적절한 수정을 실시하지 않은 것을 알 수 있다.

#### 3.2.2 갑판상의 해수 침입

저건현 선박은 풍랑에 의한 상갑판 해수 침입 가능성 뿐 아니라, 정온한 수역에서도 자선 또는 타선에 의해서 발생한 항주파에 의해서도 갑판상 해수 침입이 발생하기 때문에 주의할 필요가 있다. 이러한 해수 침입에 의한 갑판상 해수 체류는 자유수 영향에 의해서 선체의 횡 안정성을 감소시키고, 해수의 하중에 의해 더욱 건현을 감소시킨다. 또한, 상갑판상의 해수는 선체의 항행중 트림에 의해서 이동하고, 트림을 확대시키기 때문에 선박의 최소 건현은 더 낮게 된다<sup>2)</sup>. 위와 같은 문제는 배

$GZ_0$  : Not corrected the free water effect  
 $GZ_1$  : Prepared by designer  
 $GZ_2$  : Corrected by eq.(2)  $\Delta GZ_1$   
 $GZ_3$  : Corrected by eq.(2)  $\Delta GZ_2$

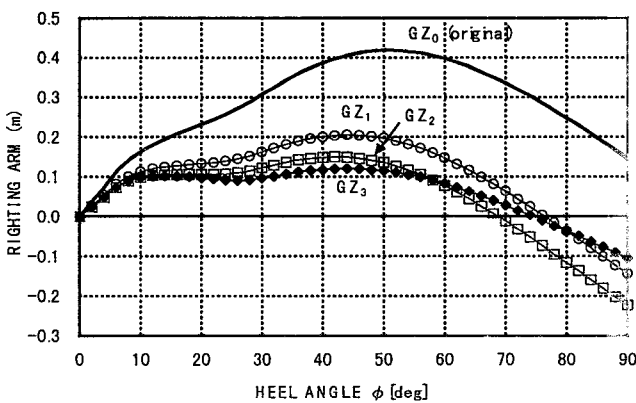


Fig. 3 Righting Arm  $GZ$  corrected the free water effect by 3 kinds of method

수가 좋지 않은 선박에서 현저하게 발생한다.

#### 3.2.3 항행중에 발생하는 선수침하 현상

항행중에 선박의 건현과 트림이 변화하는 또 다른 원인으로 전진중 선수 및 선미가 추가 침하하는 것이다. 배루누이 정리에 따르면 항행중의 트림은 정박중과는 달리, 선수측의 침하가 크게 발생하여 선체는 선수 트림으로 되고, 고속으로 항해할수록 이러한 변화가 현저하게 나타난다. 이러한 현상에 대해서는 특히 복원성이 약한 저건현 선박은 주의를 할 필요가 있다<sup>3)</sup>.

또한, 갑판상에 해수가 침입하면 건현이 큰 선박의 복원력에는 그다지 영향을 미치지 않지만, 저건현 선박에 있어서는 갑판과 해면의 거리가 가깝기 때문에 작은 선체침하에 의해서도 대량의 해수가 갑판상에 침입할 가능성이 있기 때문에, 선체침하에 대한 복원성의 변화에 대해서도 고려할 필요가 있다.

인항시 선수 및 선미침하에 관해서는 많은 실험이 행해져 왔다. Fig. 4는 대형선의 선속에 따른 선수침하 및 트림의 변화에 대해서 나타낸 것이다<sup>4)</sup>. 횡축은 선속 ( $F_n = \text{Froude Number}$ ) 이고, 횡축은 선박의 길이 ( $L_{pp}$ )에 대한 트림 및 선수 침하량의 백분율을 표시하고 있다. Fig. 4에서 선박이 고속으로 될수록 트림 및 선수침하량이 증가하는 것을 알 수 있다.

본 연구에서 다루고 있는 사고 선박의 전복시 선속은 10 Knots ( $F_n = 0.25$ )이므로, Fig. 4에서는 전복시의 정확한 트림 및 선수 침하량을 추정하는 것이 곤란하다. 따라서, 4장에서는 전복 선박에 대한 선수 및 선미 침하량을 수조 모형실험을 통하여 계측하고, 선수침하가 복원성에 미치는 영향을 조사하였다. 본 연구에서는 종래 행해져 왔던 인항시의 선체 침하량을 조사함과 동시에 자항시의 침하량에 대해서도 계측을 하였다.

## 4. 항행중 선체침하에 관한 수조 모형실험

### 4.1 수조 모형실험

#### 4.1.1 실험장치 및 계측기구

선체침하에 관한 실험은 예인수조 (길이 60m×폭 6m×깊이 2m)에서 실시하였다. 실험은 인항시와 자항시의 두 상태에 대해서 각각 선체 침하량을 계측하였다. 모형선을 직진시키기 위

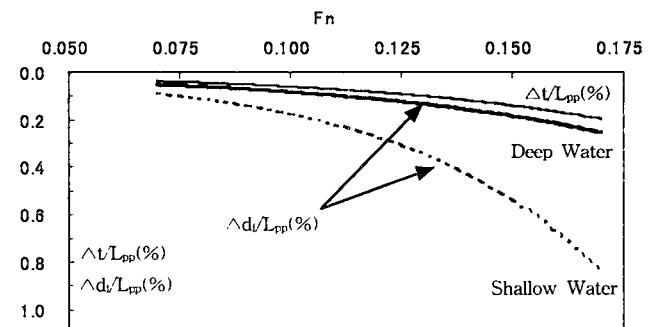


Fig. 4 Bow-sinkage and trim changing with sailing speed  $F_n < 0.175$

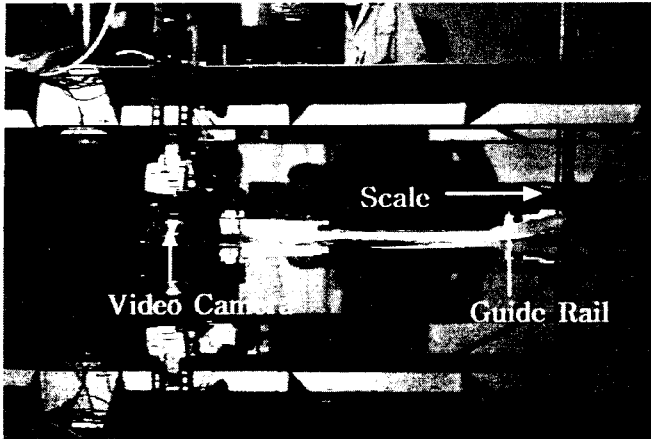


Photo. 1 Ship model and experimental apparatus of the bow and stern sinkage

해서 가이드 레일을 사용하였고, 인항시에는 모형선에 부착한 예인사 (길이 2.74m)이 수면 근방에 설치되도록 예인 진차에 고정하였다. 선체의 침하량은 선수미에 설치한 눈금자를 읽을 수 있도록 비디오 카메라를 설치하여 촬영·기록하였다. 전체적인 실험장치 및 계측기구의 배치를 Photo.1에 나타낸다.

실험에 사용된 모형선 ( $L_{pp} \times B \times d = 110\text{cm} \times 20\text{cm} \times 8.75\text{cm}$ ,  $C_b = 0.69$ )은, 내항 저건현 탱커의 1/40 스케일의 모형으로 실제로 Tank를 가지고 액체를 적재할 수 있도록 제작하였다. FRP 자항모형은 무선에 의해서 조종이 가능한 무선조종방식으로 동력은 모터를 사용하였다. 또한 모터를 회전시키기 위한 전원은 배터리를 사용하였고 선내에 탑재하였다.

4.1.2 실험 및 해석방법

(1) 인항 상태

예인 진차에 연결한 모형선을  $F_n = 0.25, 0.3$ 의 선속으로 각각 2회 인항하였고, 선수미의 침하 상태를 촬영·기록한 비디오 카메라의 영상으로부터 침하량을 읽고 각각의 평균치를 사용하여 해석을 하였다.

(2) 자항 상태

예인 진차의 속도를  $F_n = 0.15, 0.2, 0.25, 0.3, 0.35$ 의 모형선 선속에 일치시키고, 모형선이 예인 진차를 추종할 수 있도록 항주시켜 각각 3회씩 실험을 행하였다. 침하량은 예항 상태와 같은 방법으로 비디오 카메라로 촬영·기록한 영상으로부터 해석하였다.

4.2 실험결과

선체 침하량과 트림의 변화에 대한 실험 결과를 Fig. 5와 Fig. 6에 표시하였다. 횡축은 선속을  $F_n$ 로 표시하였고, 종축은 Fig. 5에서는  $L_{pp}$ 에 대한 선수 및 선미 침하량의 백분율을, Fig. 6에서는  $L_{pp}$ 에 대한 트림 변화량 ( $d_a - d_f$ )의 백분율을 나타내고 있다.

Fig. 5에서 ▲표시와 △표시는 각각 자항시와 인항시에 있어

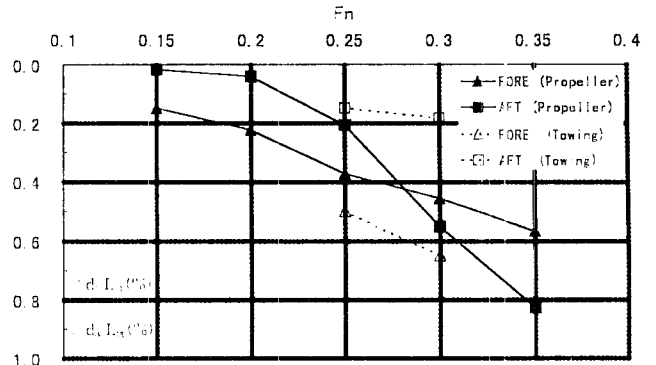


Fig. 5 Bow and stern sinkage of the chemical tanker changing with sailing speed

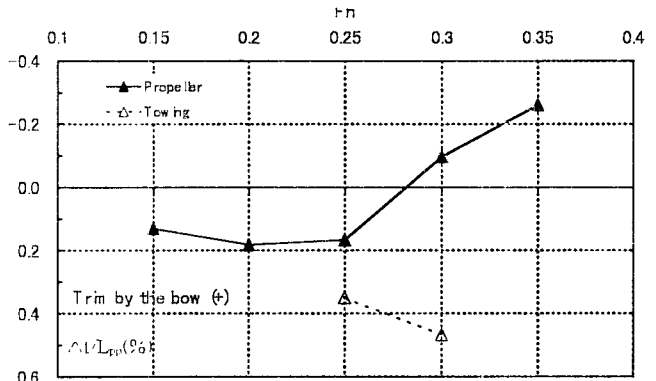


Fig. 6 Inclination of the trim of the chemical tanker changing with sailing speed

서 선수의 침하량을 표시하고 있고, ■표시와 □표시는 각각 자항시와 인항시에 있어서 선미의 침하량을 표시하고 있다. 실험결과로부터 선수·선미 모두 선속이 증가함에 따라 침하량도 커지는 경향을 알 수 있다. 또한, 선수 침하량은 자항시의 경우가 인항시보다 적게 발생하지만, 선미 침하량은 이와는 반대의 경향을 보이고 있다. 특히, 자항시의 경우를 살펴보면, 선속  $F_n = 0.3$  이상에서는 선미 침하량이 급격하게 증가하여 선수 침하량보다 크게 되는 특징을 보이고 있다. 전복 당시의 선속  $F_n = 0.25$ 의 경우에 자항시의 선수 침하량  $\Delta d_f$ 는 실선 스케일로 약 0.16m, 선미 침하량  $\Delta d_a$ 는 약 0.09m 정도가 발생하였다.

Fig. 6에서 인항시의 트림의 변화 경향 (△표시)은, 계측점은 적지만 선속이 증가함에 따라서 선수 트림이 크게 되는 것을 알 수 있다. 이러한 결과는 과거의 실험치와 비슷한 경향을 보이고 있다. 그러나, 자항시의 트림의 변화 경향 (▲표시)은  $F_n = 0.3$  직전까지는 선수 트림으로 되지만, 이 선속을 경계로 선미 트림으로 되었다. 또한, 자항 상태에서의 트림 변화량은 인항 상태보다 적게 나타나는 경향을 보이고 있고,  $F_n = 0.25$ 의 경우에 양자의 차이는 약 0.2%에 달하고 있다.

이상의 선체침하에 관한 실험결과를 종합해 보면, 전복 당시

의 선속  $V_n=0.25$ 의 경우에는 인항시와 자항시의 침하량은 다르고, 자항시의 선속 침하량은 인항시에 비해서 작은 반면에 선미 침하량은 크게 발생하므로, 선속 트림은 인항시에 비해서 상당히 작게 되는 결과가 얻어졌다. 특히, 선속의 증가와 더불어 자항시의 선미 침하량의 증가량은 인항시와는 큰 차이가 나타나고 있다. 또한, 이 정도의 선속에서는 선체는 상승하지 않고 침하하는 경향이 계속해서 나타나는 것을 알 수 있다.

4.3 선체침하의 영향을 고려한 복원정 곡선

본 연구에서 다루고 있는 사고 선박의 선속은  $V_n=0.25$ 였고, 앞의 실험결과에서 자항시의 선속 침하량과 트림의 변화량을 추정하면, 각각  $\Delta d_f=0.16m$ ,  $\Delta t=0.09m$ 가 구해진다. 이들 값을 고려하고, 경사 모멘트법에 의한 자유수면영향을 실시한 복원정 곡선  $GZ_4$ 을 Fig. 7에 ▲표시로 나타낸다.  $GZ_3$ 는 정지시의 복원정 곡선을 나타낸다.

Fig. 7로부터 전진 중에 발생하는 트림과 선속침하로 인하여 복원팔  $GZ$ 가 크게 열악해지는 것을 알 수 있다. 또한, 이 경우의 복원정 곡선의 특징은 경사각  $7^\circ$ 부근에 나타나는  $GZ$ 를 초과하는 외력 경사모멘트가 작용하면, 선박은 일거에 전복될 수 있을 것으로 판단된다.

5. 선회시에 발생하는 경사 모멘트

선박이 전진 중에 전타하면 초기에 내측 경사 모멘트가 작용하고, 일정 타각을 계속 유지하면 선회 운동이 점점 발달하여 일정한 횡 이동 속도와 회두 각속도를 가진 정상 선회상태에 도달하여 선박에 외측 경사 모멘트를 발생시킨다. 최근의 내항 탱커는 이·접안시의 조선을 용이하게 하기 위하여 조타 성능이 좋도록 건조하지만, 이것은 조타에 의한 큰 경사 모멘트의 발생을 유발할 가능성이 있다.

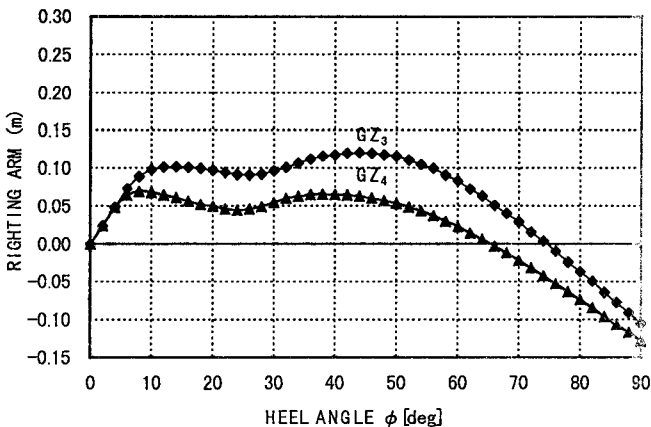


Fig. 7 Influence of bow sinkage and trim induced in sailing on righting arm

5.1 정상 선회시의 외측 경사 모멘트의 추정

통상 선회 시에 발생하는 내측 경사 모멘트는 선회 원심력에 의해서 발생하는 외측 경사 모멘트에 비해서 선체의 횡 경사에 미치는 영향은 적은 것으로 알려져 있다. 또한, 사고 내항 탱커는 외측으로 전복하였기 때문에 여기서는 외측 경사 모멘트만을 다루기로 한다.

외측 경사 모멘트  $M_{U1}$ 은 식 (4)를 사용하여 개략적으로 계산할 수 있다<sup>3)</sup>.

$$M_{U1} = \frac{W \cdot V_T}{g \cdot R} (OG + h) \tag{4}$$

여기서,  $W$  : 선박의 배수량,  $V_T$  : 선회시의 선속,  $OG$  : 수면상 선체 중심까지의 높이,  $h$  : 수면으로부터 횡 저항 중심까지의 깊이,  $g$  : 중력가속도,  $R$  : 선회 반경

복원팔  $GZ$ 에 대응하는 경사 모멘트의 레버  $n_1$  (경사 우력정)은 식 (5)의 경사 모멘트  $M_{U1}$ 를 배수량  $W$ 로 나누면 구할 수 있다.

$$n_1 = M_{U1}/W \tag{5}$$

[사고 내항 탱커에 대한 계산 예]

식 (4)에 내항 Tanker의  $W=778.5$  (ton),  $V_T=6$  (Kts)=3.08 (m/s),  $OG=-0.88$  (m),  $h=1.55$  (m)=0.5d,  $R=35$  (m), 그리고  $g=9.80$  (m/s<sup>2</sup>)를 대입하면  $M_{U1}=14.4$  (ton·m)가 구해진다. 여기에 식 (5)을 적용하면 외측 경사 모멘트의 레버  $n_1=0.019$  (m)로 된다.

5.2 선창내 액면 경사각에 의한 외력 경사 모멘트

선회시에 원심력 작용에 의해서 적재된 액체가 외측으로 이동하여 실질적으로 액면 경사가 발생하고, 이러한 액체에 의하여 Fig. 8에 나타낸 바와 같이 경사 모멘트가 증가한다.

이 액면 경사각  $\Phi_2$ 는 식 (6)을 이용하여 개략적으로 계산할 수 있다.

$$\Phi_2 = \tan^{-1}\{(V_T^2/R)/g\} \tag{6}$$

또한, 액면 경사각  $\Phi_2$ 에 의해서 발생하는 경사 모멘트  $M_{U2}$ 는 식 (7)을 이용하여 구할 수 있다.

$$M_{U2} = (b^3 \cdot \gamma \cdot l/6) \cdot \{V_T^2/(g \cdot R)\} \tag{7}$$

여기서,  $b$  : Cargo hold의 횡폭,  $\gamma$  : 액체의 비중량,  $l$  : Cargo hold의 길이,  $V_T$  : 선속

복원팔  $GZ$ 에 대응하는 경사 모멘트의 레버  $n_2$ 는 식 (8)에 의해 구할 수 있다.

$$n_2 = M_{U2}/W \tag{8}$$

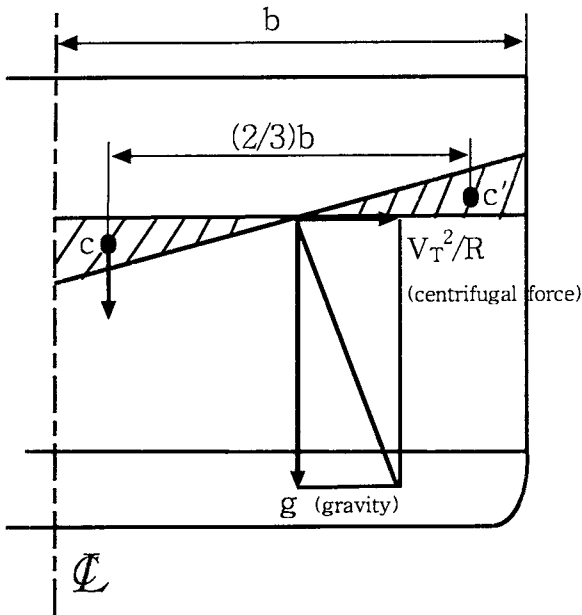


Fig. 8 Liquid cargo inclination induced by centrifugal force in turning and Heel moment due to the inclination

[내항 탱커에 대한 계산 예]

식 7에 내항 Tanker의  $b=4.0$  (m),  $V_T=6$  (Kts)=3.08 (m/s),  $\gamma=1.25$  (ton/m<sup>3</sup>),  $l=25.9$  (m)를 대입하면  $M_{l2}=9.55$  (ton·m)가 구해진다. 여기에 식 (8)을 적용하면 경사 모멘트의 레버  $n_{l2}=0.012$  (m)로 된다.

## 6. 사고원인 고찰

사고 선박의 전복 원인에 대한 고찰은 자유표면영향과 저건현으로 인하여 열악하게 된 정복원력이 선회에 의해서 발생하는 외력 경사 모멘트를 견딜 수 있는가 없는가에 초점을 두고 평가하였다.

### 6.1 선창내 액체화물의 자유표면영향

자유표면영향의 수정방법에 의해서 GZ의 손실량이 현저하게 달라진다. 복원성이 열악한 선박에서 이러한 차이가 선박의 안전성에 미치는 영향은 매우 중대하다. 본 연구에서는 Fig. 3에 나타난 신뢰성이 높은 경사 모멘트법에 근거하여 자유표면영향을 고려한 정적 복원팔  $GZ_3$ 를 채용한다.

### 6.2 저건현이 복원성에 미치는 영향

항행중 선수침하로 인하여 건현이 상당히 감소하고, 이것은 갑판상의 해수 침입을 초래하여 선수부에 해수가 채류하면 선수부의 건현을 감소시킨다. 이것은 과거에는 고려되지 않았던 것이지만, 선박의 전진에 의해서 선수침하가 유발되어 정적 복원력이 변화한다. 특히, 저건현 선박에서는 이러한 변화가 현저

한 복원력 손실을 가져온다. 이 점을 고려한 복원정 곡선은 Fig. 7의  $GZ_4$ 로 된다.

또한, 저건현의 영향은 갑판상 해수 침입을 용이하게 하고, 이것이 GZ 손실을 야기시키지만, 이 손실은 아직 불명확한 것이므로 여기서는 고려하지 않았다.

### 6.3 선회시 외력 경사 모멘트 레버 $N_T$

여기서는 정상 선회시의 외측 경사 모멘트와 선회시의 액면 경사로 인한 외력 경사 모멘트를 고려하였다. 두 경사 모멘트 레버의 합계  $N_T$ 는 다음과 같다.

$$N_T = n_1 + n_2 = 0.019 + 0.012 = 0.031 \text{ (m)}$$

이 경사 모멘트 레버  $N_T$ 와 6.1절과 6.2절에서 고려한 정복원력 아암  $GZ_4$ 의  $GZ_{Max}$ 를 단순히 비교하면, 선박은 간신히 복원력을 유지하는 것을 알 수 있다.

그러나, 선박이 선회하면 상기의 모멘트 이외에 경사로 인해 발생하는 갑판상 해수 침입 등으로 인하여 외력 경사 모멘트의 부가가 예상된다.

## 7. 결론

선회중에 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 본 연구의 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 액체화물을 수송하는 선박의 복원성에 대한 자유표면영향은 계산방법에 의해서 차이가 현저하게 발생하므로 이 점에 대해서는 주의할 필요가 있다. 전복 선박에 대한 설계자의 계산 방법은 이 점에 대한 신중함이 결여되어 있음을 알 수 있다.
- (2) 항행중 발생하는 트림과 선수 침하가 정복원력 손실을 초래하고, 이 전복사고의 또 다른 요인임을 알 수 있었다.
- (3) 선박의 안전을 확보하기 위해서는 선회시 외력 경사 모멘트로서 선체에 작용하는 외측 경사 모멘트 이외에 액체 화물의 외측 이동으로 인한 경사 모멘트의 작용도 고려해야 할 것이다.
- (4) 선박 운항자의 부주의로, 타선을 피하기 위해서 대각도의 조타를 행한 점과 위험을 인지하면서도 선미 트림(사고선박의 경우 통상 0.5m)을 만들지 않았던 점이 전복사고의 원인이었음을 지적할 수 있다.

본 연구를 바탕으로 선박의 선회시 액체 화물의 이동이 복원성에 미치는 영향 및 현단 물수 상태에서 선회하는 선체에 작용하는 외측 경사 모멘트 등에 관한 연구가 계속되어야 할 것으로 사료된다.

## 참 고 문 헌

- [1] 森田知治, "船舶復原力", 海文堂, p.84, 1998.
- [2] B.Buchner, On the Impact of Green Water Loading on Ship and Offshore Unit Design, PRADS 95, pp.430-443, 1995
- [3] 高木又男·新井信一, 船舶·海洋構造物の耐波理論, 成山堂書店, pp.285-296, 1996.1
- [4] Kobe University of Mercantile Marine, "Studies on ship sinkage in Seto Inland Sea", Kansai Society of Naval Architectures, Japan, Zousen-setsukei-binran 4th edit, pp.450-451, 1983.
- [5] 이진택, 연안 여객선의 복원성능해석 및 안전성 연구, 한국기계연구원, pp.39-47, 1994. 4.

---

원고접수일 : 2001년 12월 12일

원고채택일 : 2002년 03월 18일