

## 선회중 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 연구 (2)

- 갑판상 해수 침입이 경사 모멘트에 미치는 영향에 대한 실험적 조사 -

이 윤 석\* · 김 철 승\*\* · 이 상 민\*\*\*

\* 한국해양대학교 연구원, \*\* 목포해양대학교 해상운송시스템학부 교수  
\*\* 한국해양대학교 강사

### 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-

Yun-Sok Lee\* · Chol-Seong Kim\*\* · Sang-Min Lee\*\*\*

\*Researcher of Korea Maritime university, Busan 606-791, Korea  
\*\*Division of Maritime Transportation System, Mokpo National Maritime university, Mokpo 503-729, Korea  
\*\*\*Division of Ship Operation Systems Engineering, Korea Maritime university, Busan 606-791, Korea

**요 약 :** 내항 탱커가 비교적 정온한 해역에서 타선을 피하기 위해 대각도 조타를 행한 결과, 선회 중에 전복하는 사고가 발생하였다. 저자들은 전 논문에서 비중량이 큰 액체화물의 자유표면영향에 의한 중심상승과 전진 항해 중에 발생하는 선체 침하와 이로 인하여 생기는 선체 트림의 변화 때문에 발생하는 복원력 감소를 고려하여 사고선박의 복원력 곡선을 계산하였다. 본 논문에서는, 먼저 전복사고를 당한 선박의 모형 선을 제작하여 자항 선회실험을 실시하고 전복선박의 정상 선회시의 선회반경, 편류각 및 선속을 계측한다. 그리고 자항 선회실험을 통하여 얻은 선회반경, 선속 및 횡 편류각을 기초로 하여 각 경사각에 따른 측 압력과 경사 모멘트에 관한 실험을 실시하고, 갑판상 해수 침입이 측 압력과 경사 모멘트에 미치는 영향에 대해서 파악한다. 마지막으로 선회시 해수 침입으로 인해 발생하는 외측 경사 모멘트와 측압 중심의 변화를 조사함으로써 전복사고가 발생한 저건현 내항 탱커의 복원성에 대하여 검토를 하였다.

**핵심용어 :** 내항 탱커, 선회반경, 복원력 곡선, 측 압력, 경사 모멘트, 해수침입

**Abstract :** A coastwise chemical tanker sailing at full speed has capsized during turning in calm water. In the previous paper, we investigated the reasons of the accident by demonstrating the proper correction for the free surface effect of the liquid cargo and the bow-sinkage effect. In this paper, we also carry out model experiments of a transverse pressure under the seawater and an outward heel moment according to the heel angle and rudder angle, on the basis of radius of turning circle, ship's speed and drift angle of model ship occurring in turning. It is also shown that the flooding of seawater onto the deck occurring in turning generated a significant outward heel moment and increased the vertical distance between the center of gravity of the ship and the center of lateral water drag.

**Key words :** coastwise tanker, radius of turning circle, transverse pressure, heel moment, flooding of seawater

## 1. 서 론

최근의 내항 탱커는 이·접안시의 조선을 쉽게 하기 위해 조타 성능을 크게 향상시키고 있지만, 역으로 조타에 의한 큰 경사 모멘트를 발생시킬 가능성이 있다. 이러한 내항 탱커가 비교적 정온한 해역에서 타선을 피하기 위해 대각도 조타를 행한 결과, 선회 중에 전복하는 사고가 발생하였다. 전복사고의 원인으로서는 내항 탱커가 가지고 있는 특징적인 성질을 들 수 있다. 저자들은 전 논문(윤, 2002)에서 비중량이 큰 액체화물의 자유표면영향에 의한 중심상승과 전진 항해 중에 발생하

는 선체 침하와 이로 인하여 생기는 선체 트림의 변화 때문에 발생하는 복원력 감소를 고려하여 사고선박의 복원력 곡선을 계산하였다. 그리고 상기의 복원력 곡선으로부터 구한  $GZ_{Max}$ 와 정상 선회시의 외측 경사 모멘트 및 선회시의 액면 경사로 인한 외력 경사 모멘트를 계산하여 산출한 선회시 외력 경사 모멘트 레버를 비교한 결과, 사고선박은 간신히 복원력을 유지하는 것을 알 수 있었다.

한편, 내항 탱커의 또 다른 특수성으로서 이들 선박의 대부분이 다른 선형에서는 일례를 찾기 어려운 정도로 건현이 낮은 저건현 선박이라는 점을 들 수 있다. 저건현 선박은 풍랑에

\* 대표저자 : 이윤석(정회원), lys@bada.hhu.ac.kr, 051) 410-4863  
\*\* 정회원 : cskimu@mail.mmu.ac.kr, 061)240-7307  
\*\*\* 정회원 : oasyslee@yahoo.co.kr, 051)410-4868

의해서 상갑판에 해수가 침입할 가능성이 높을 뿐만 아니라, 비교적 정온한 해역에서도 자선 또는 타선에 의해서 발생한 항주파(本田, 1990; 定兼, 1990; 定兼, 1994)와 급격한 선회시의 선박 경사에 의해서도 갑판상 해수 침입이 발생하기 때문에 조선에 각별한 주의가 요구된다. 이러한 해수 침입에 의한 갑판상 해수 체류는 자유수 영향에 의해서 선체의 횡 안정성을 감소시키고, 해수의 하중에 의해 선박의 겉보기 중심이 상승하여 GM을 더욱 감소시킨다(日本海事協會, 1986). 또한, 상갑판상의 해수는 선박의 항행중 트림에 의해서 이동하고, 트림을 확대시키기 때문에 선박의 최소 건현은 더욱 낮게 된다. 위와 같은 문제는 배수가 좋지 않은 선박에서 현저하게 발생한다. 이와 같이 저건현 내항 탱커는 급격한 선회시 갑판상 해수 침입으로 인하여 경사 모멘트가 발생하는 것에 의해서도 복원성이 열악해지기 쉬운 성질을 가지고 있기 때문에 전복할 위험성이 증가할 것으로 예상되어진다. 그러나, 지금까지 파랑중의 갑판상 해수 침입과 선박의 전복 현상에 대해서는(山宮, 1969) 등의 실험에 의해서 그 관련성이 연구되었지만, 위와 같은 많은 문제점이 있음에도 불구하고 평수 중을 항행하는 저건현 선박에 있어서 선회시의 해수 침입과 전복문제의 관련성에 대해서는 조사가 거의 이루어지지 않았다.

따라서 본 논문에서는, 먼저 전복사고를 당한 선박의 모형선을 제작하여 자항 선회실험을 실시하고 전복선박의 정상 선회시의 선회반경, 편류각 및 선속을 계측한다. 그리고 자항 선회실험을 통하여 얻은 선회경, 선속 및 편류각을 기초로 하여 각 경사각에 따른 측 압력과 경사 모멘트에 관한 실험을 실시하고, 갑판상 해수 침입이 측 압력과 경사 모멘트에 미치는 영향에 대해서 파악한다. 마지막으로 선회시 해수 침입으로 인해 발생하는 외측 경사 모멘트와 측압 중심의 변화를 조사함으로써 전복사고가 발생한 저건현 내항 탱커의 복원성에 대하여 검토를 하였다.

## 2. 수조 모형실험

수조실험은 예인수조 (길이 60m x 폭 6m x 깊이 2m)에서 실시하였다. 먼저, 실험은 자항 선회실험을 실시하여 전복선박의 정상 선회시의 선회반경, 편류각 및 선속을 계측한다. 그리고 자항 선회실험을 통하여 얻은 데이터를 기초로 측 압력과 경사 모멘트에 관한 실험을 실시하여 갑판상 해수 침입이 외측 경사 모멘트에 미치는 영향에 대해서 조사한다.

### 2.1 모형선의 개요

실험에 사용된 모형선은, 내항 저건현 탱커의 1/40 스케일의 모형으로 실험의 목적에 따라서 2쌍을 제작하였다. 한 척은 자항 선회실험을 실시하기 위하여 제작된 모형선으로 실제 탱크 (Tank)를 가지고 액체를 적재할 수 있도록 제작하였다. 다른 한 척은 측 압력과 경사 모멘트에 관한 실험을 실시하기 위하여 자항 장치와 탱크를 가지지 않고 선체만으로 제작된 탱커 모형선이다. 모형선의 선체는 FRP로 제작하였으며, 자항

모형선은 무선에 의해서 조종이 가능한 무선조종방식으로 동력은 모터를 사용하였다. 또한 모터를 회전시키기 위한 전원은 배터리를 사용하였고 모형선 내에 탑재하였다. Fig. 1에 실험에 사용한 모형선을 나타낸다.

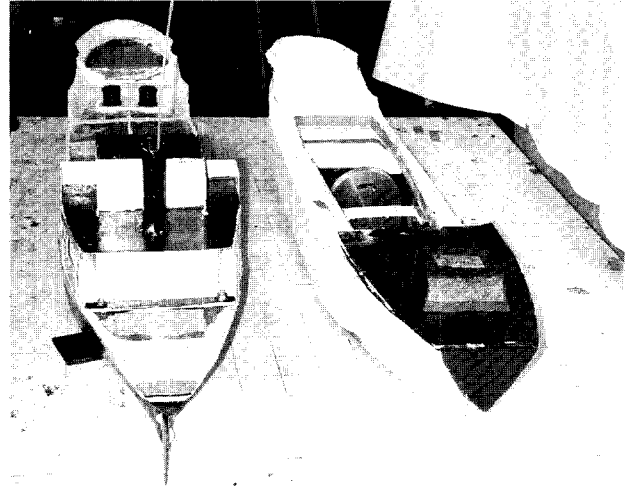


Fig. 1 Ship models of the coastwise Tanker

### 2.2 자항 선회실험

사고선박은 통상의 내항 Chemical Tanker이고, 화물의 적재상태는 거의 만재상태였다. 선체의 주요 제원과 사고 당시의 적재상태를 Table 1에, 또한 Cargo Tank의 치수와 적재량을 Table 2에 표시한다. 적재화물은 비중량 1.25의 액체 화물이었다. 자항 선회실험은 예인 전차의 속도를 사고 당시의 선속 10 Knots ( $F_n=0.25$ )의 모형선 선속에 일치시키고, 모형선이 예인 전차를 추종할 수 있도록 항주시킨 후에, 다음 3상태의 타각  $\delta=15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$  을 가지고 선회실험을 실시하였다. 선회운동은 예인 수조 상부에 설치한 비디오카메라로 촬영·기록하였고, 각 타각에 있어서 정상 선회시의 선회반경, 편류각 및 선속은 비디오카메라로 촬영한 영상을 재생하여 해석을 하였다.

Table 1 Principal Particulars and Load Condition(Full load) Model Scale (1/40)

Items	Ship	Model
$L_{DD}$ (m)	44.00	1.10
B (m)	8.00	0.20
D (m)	3.50	0.088
W (ton, Kg)	778.50	12.170
Fore draft $d_f$ (m, cm)	3.00	7.5
Aft draft $d_a$ (m, cm)	3.20	8.0
KG (m, cm)	2.22	5.94
GM (m, cm)	0.69	1.55

Table 2 Cargo tank and loaded liquid cargo (Ship scale)

	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

2.3 측 압력과 경사 모멘트 계측실험

측 압력과 경사 모멘트는 Fig. 2에 나타내듯이 3분력계를 높이 방향에 관해서는 자항 모형선의 중심과 같은 높이로 일치시키고, 전후 방향에 관해서는 선체 중앙에 위치하도록 모형선 내의 검력계용 지지대에 고정시켜 계측을 하였다. 측 압력과 경사 모멘트의 계측 실험장치의 개략적인 모양은 Fig. 3에

나타낸다. 선체는 6자유도 운동 중에 종 운동과 상하 운동을 자유로 하고, 이외의 운동은 구속하였다. 모형선의 배치는 2.2 절의 자항 선회실험으로 구해진 타각  $\delta=15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$  에 있어서 정상 선회시의 편류각을 기초로 하여 선수각을 설정하였고, 또한 각각의 선회시의 선속을 사용하여 측 압력과 경사 모멘트를 계측하였다.

일반적으로 선박이 전진 중에 전타하면 초기에 내측으로 경사하여 내측 경사 모멘트가 작용한다. 이 상태에서 일정 타각을 계속 유지하면 선회 운동이 점점 발달하여 일정한 횡 이동 속도와 회두 각속도를 가진 정상 선회상태에 도달하여 선박은 외측으로 경사하고 외측 경사 모멘트를 발생시킨다. 통상 선회 시에 발생하는 내측 경사 모멘트는 선회 원심력에 의해서 발생하는 외측 경사 모멘트에 비해서 선체의 횡 경사에 미치는 영향은 적은 것으로 알려져 있다. 그리고 내항 Tanker는 외측으로 전복하였기 때문에, 여기서는 외측 경사 모멘트만을 다루기로 한다. 또한, 전복선박의 적재상태는 약 1~2° 정도 횡 경사 한 상태로 출항하였고, 이러한 경우에 선박은 경사각이 없는 상태의 선박이 전타에 의해서 외측으로 경사 하는 것이므로 경사 할 가능성이 있을 것으로 예상되어진다.

따라서, 모형선을 계측장치에 고정시킬 때 외측 경사각은 경사각이 없는 상태를 포함하여 다음의 4종류( $\Phi=0, 2.5^\circ, 5.0^\circ, 7.2^\circ$ )를 설정하였다. 여기서,  $\Phi=7.2^\circ$ 는 타각  $35^\circ$ 의 경우에만 계측을 하였다. 선체의 외측 경사는 선체 내부의 경사용 추를 이동시켜 설정하였고, 이 때 초기 경사에 의한 경사 모멘트가 발생하지 않도록 주의를 하였다.

3. 자항 선회실험 결과

선속  $Fn=0.25$  (Model ship=0.813 m/s)로 직진 중에 타각을 각각  $\delta=15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$ 로 전타하였을 경우, 비디오 영상으로부터 해석한 선회원 (◆표시)을 Fig. 4, 5, 6에 나타낸다. 그림 중에는 선체 중심선상 선체중앙으로부터 선수·미 방향으로 각각 20cm 떨어진 지점을 원점으로 하여 선수 측의 선회 궤적 (○표시)과 선미 측의 선회 궤적 (□표시)도 나타내고 있다. 각 점의 해석 시간 간격은 0.5 sec이다.

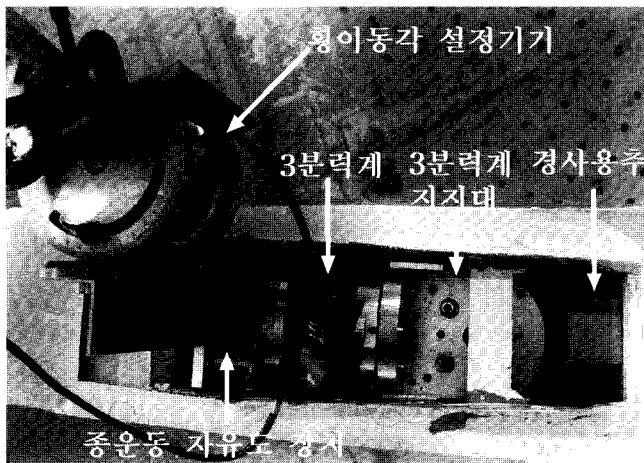


Fig. 2 Set-up of the dynamometer to the model ship

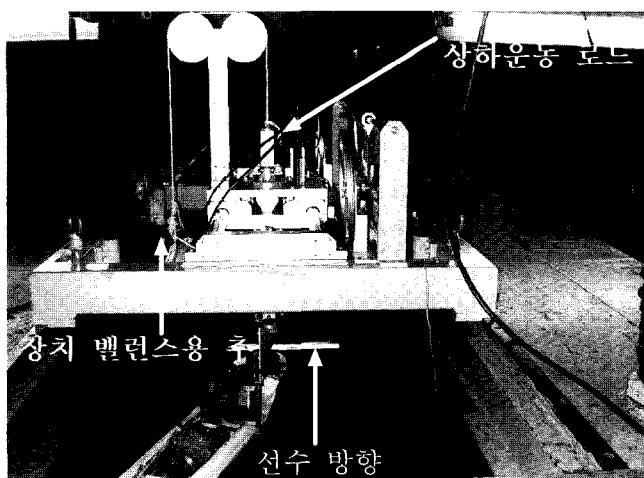


Fig. 3 Experimental apparatus for the transverse force and heel moment

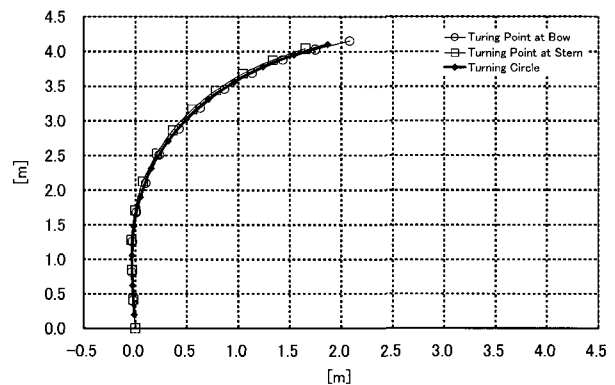


Fig. 4 Turning circle with rudder angle  $\delta=15^\circ$  at initial ship speed 0.813 (m/s) [Model Scale]

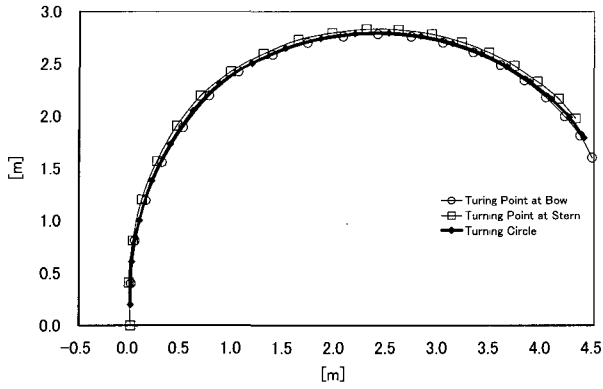


Fig. 5 Turning circle with rudder angle  $\delta=25^\circ$  at initial ship speed 0.813 (m/s) [Model Scale]

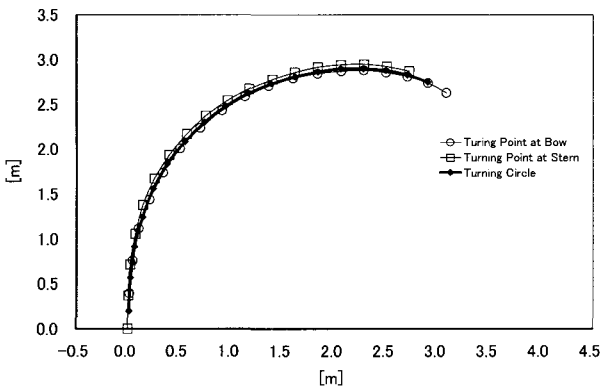


Fig. 6 Turning circle with rudder angle  $\delta=35^\circ$  at initial ship speed 0.813 (m/s) [Model Scale]

Table 3 Radius of circle, ship speed and drift angle with rudder angle  $\delta=15^\circ$  (Model scale)

Time (sec)	Ship course (deg.)	Drift angle $\beta$ (deg.)	Angular velocity $\omega$ (deg./sec)	Ship speed $V_T$ (m/s)	Radius of turning circle R (m)
0	-2.82	0			
0.5	-1.88	0.81		0.84	
1.0	0.88	2.59	1.96	0.86	
1.5	7.42	8.32	1.62	0.86	25.17
2.0	14.82	9.68	12.05	0.86	30.34
2.5	23.09	12.74	10.42	0.85	4.08
3.0	31.27	12.59	16.69	0.84	4.66
3.5	39.78	15.29	11.62	0.73	3.51
4.0	46.84	14.40	15.89	0.72	2.71
4.5	54.77	15.11	14.44	0.71	2.56
5.0	62.34	14.99	15.38	0.71	2.82
5.5	70.11	14.66	16.19	0.70	2.65
6.0	76.22	13.70	14.15	0.72	2.52

Table 4 Radius of circle, ship speed and drift angle with rudder angle  $\delta=25^\circ$  (Model scale)

Time (sec)	Ship course (deg.)	Drift angle $\beta$ (deg.)	Angular velocity $\omega$ (deg./sec)	Ship speed $V_T$ (m/s)	Radius of turning circle R (m)
0	0.94				
0.5	8.31	10.02		0.82	
1.0	18.13	12.57	14.74	0.81	
1.5	28.97	16.83	13.14	0.80	3.13
2.0	38.42	16.38	19.81	0.79	3.46
2.5	47.87	18.33	15.00	0.78	2.27
3.0	57.95	18.75	19.32	0.74	2.89
3.5	67.89	16.33	24.73	0.74	2.19
4.0	76.32	15.29	18.93	0.72	1.70
4.5	85.84	17.05	15.51	0.72	2.18
5.0	91.52	12.87	19.74	0.67	2.58
5.5	99.30	15.43	10.44	0.66	2.68
6.0	106.01	15.21	13.84	0.63	2.53
6.5	113.49	16.00	13.37	0.66	2.65
7.0	120.01	15.36	14.33	0.60	2.68
7.5	127.24	16.59	12.00	0.57	2.34
8.0	134.39	17.42	12.64	0.55	2.68
8.5	141.76	18.32	12.94	0.55	2.50
9.0	149.21	20.20	11.14	0.53	2.38

Table 5 Radius of circle, ship speed and drift angle with rudder angle  $\delta=35^\circ$  (Model scale)

Time (sec)	Ship course (deg.)	Drift angle $\beta$ (deg.)	Angular velocity $\omega$ (deg./sec)	Ship speed $V_T$ (m/s)	Radius of turning circle R (m)
0	1.91				
0.5	6.65	6.65		0.73	
1.0	12.03	8.79	6.48	0.70	
1.5	19.90	11.16	11.01	0.69	6.12
2.0	28.61	15.96	7.81	0.66	3.51
2.5	36.69	15.99	16.09	0.63	4.72
3.0	45.00	16.19	16.23	0.60	2.19
3.5	52.43	16.59	14.05	0.58	2.09
4.0	60.36	18.27	12.50	0.55	2.30
4.5	67.71	16.81	17.63	0.54	2.49
5.0	74.52	16.53	14.18	0.49	1.78
5.5	81.51	16.71	13.61	0.49	2.0
6.0	88.34	18.32	10.44	0.46	2.01
6.5	94.21	19.03	10.31	0.46	2.03
7.0	100.98	17.69	10.23	0.45	2.03
7.5	107.90	19.59	10.05	0.45	2.13
8.0	114.66	17.95	10.79	0.45	2.04
8.5	123.93	20.30	13.83	0.45	2.22

이하 측 압력과 경사 모멘트의 계측 실험을 하기 위한 전제 조건으로서, 타각  $\delta=15^\circ, 25^\circ, 35^\circ$ 의 경우에 있어서 편류각 및 선속의 조건은 이상의 자항 선회실험 결과를 사용하고, Table 6에 각각의 타각에 있어서 정상 선회시의 편류각과 선속의 조건을 각각 R-1, R-2, R-3로 표시한다.

Table 6 Ship speed and drift angle with various rudder angle in steady turning [Model scale]

Conditions	Rudder angle $\delta$ (deg.)	Ship speed $V_T$ (m/s)	Drift angle $\beta$ (deg.)
R-1	15	0.713	14.57
R-2	25	0.556	17.45
R-3	35	0.452	19.0

#### 4. 측 압력과 경사 모멘트의 계측실험 결과

##### 4.1 편류각, 선속 및 경사각에 따른 측 압력의 변화

Table 6의 3 조건 (R-1 : ●표시, R-2 : ■표시, R-3 : ▲표시)에 있어서 각 경사각에 따른 측 압력의 계측 결과를 Fig. 7에 나타낸다.

그림에서 측 압력은 선회경이 가장 크고 편류각이 작지만 선속이 빠른 R-1의 조건에서 최대로 되고, 이와는 반대로 선회경이 가장 작고 편류각이 크지만 선속이 느린 R-3의 조건에서 최소로 되는 것을 알 수 있다. 또한, 어느 실험 조건에 있어서도 측 압력은 경사각에 의해서 그다지 차이가 발생하지 않는 것을 알 수 있다.

한편, 측 압력을 선박의 길이  $L_{pp}$ , 흘수  $d$  및 선속의 횡 방향 성분  $V_{Ty}$ 을 이용하여 무차원화 하여 Fig. 8에 나타내었다. 무차원 측 압력의 경우에 있어서도 각 실험 조건에 따라 차이가 있고, 여전히 측 압력은 R-1의 조건에서 최대로, R-3의 조건에서 최소로 되는 것을 알 수 있다.

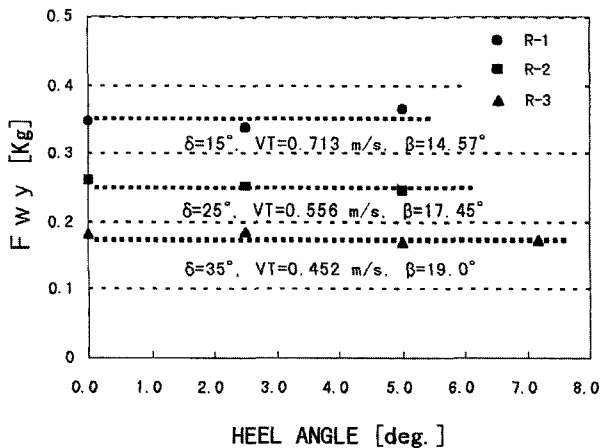


Fig. 7 Lateral drag force according to the heel angle with 3 cases of rudder angle in steady turning [Model Scale]

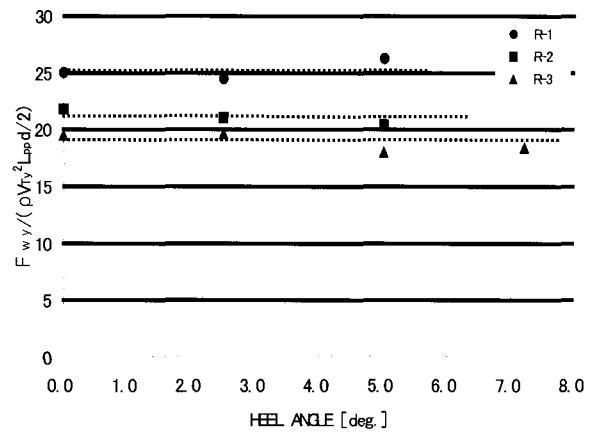


Fig. 8 Non-dimensional lateral drag force according to the heel angle with 3 cases of rudder angle in steady turning [Model Scale]

##### 4.2 편류각, 선속 및 경사각에 따른 경사 모멘트의 변화

3개의 실험조건에 있어서 각 경사각에 따른 경사 모멘트의 계측 결과를 Fig. 9에 나타낸다. 그림에서 경사 모멘트는 측 압력과 같이 각 경사각에 있어서 R-1의 실험조건에서 최대로, R-3에서 최소로 되는 것을 알 수 있다. 그러나 경사 모멘트는 어느 실험조건에 있어서도 경사각이 크게 될수록 그림 중에 점선으로 표시한 바와 같이 점점 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 수면이 상갑판의 현단을 넘어서 갑판상에 해수가 침입하는 경사각 (R-1 : 경사각  $5^\circ$ , R-3 : 경사각  $7.2^\circ$ )에 있어서 경사 모멘트는 급격하게 크게 되는 것을 알 수 있다. 이상의 실험결과로부터 갑판상에 해수가 침입하여도 측 압력에는 그다지 영향을 미치지 않지만, 경사 모멘트에는 그 영향이 매우 현저하게 나타나는 것을 알 수 있다.

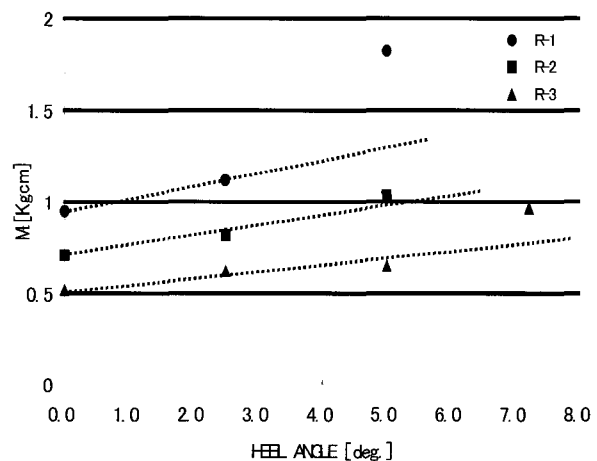


Fig. 9 Heel moment according to the heel angle with 3 cases of rudder angle in steady turning [Model Scale]

##### 4.3 측압 중심의 변화

여기서는 측 압력과 경사 모멘트의 계측 결과를 사용하여

각 경사각에 따른 측압 중심 (착력점)의 변화에 대해서 조사한다.

선체 중심으로부터 측압 중심까지의 거리  $l_y$ 는 (1)식으로부터 구할 수 있다.

$$l_y = M_t / F_{wy} \quad (1)$$

Fig. 10에 식 (1)의 계산 결과를 나타낸다. 모든 실험조건에 있어서 경사각이 크게 됨에 따라 선체 중심으로부터 측압 중심까지의 거리는 점점 증가하는 경향을 보이고 있다. 특히, 수면이 갑판 현단을 초과하는 경우에는 그 거리가 급격하게 커지는 것을 알 수 있다. 한편, 측 압력과 경사 모멘트는 실험 조건에 의해서 그 차이가 분명하게 나타났지만, 측압 중심은 실험조건에 따라 그다지 변화가 없는 것을 알 수 있다.

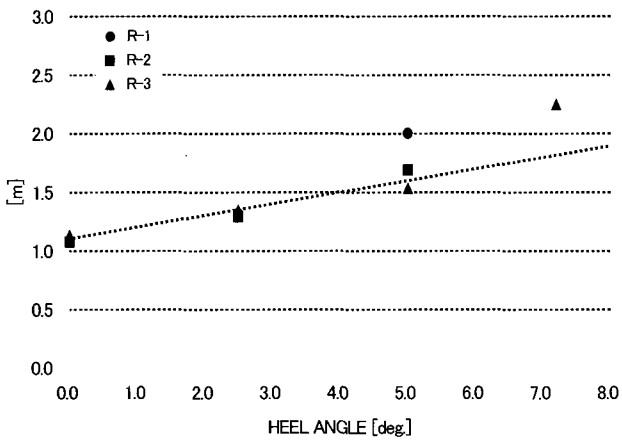


Fig. 10 The vertical distance between the center of gravity of the ship and the center of lateral water drag according to the heel angle and rudder angle in steady turning [Ship Scale]

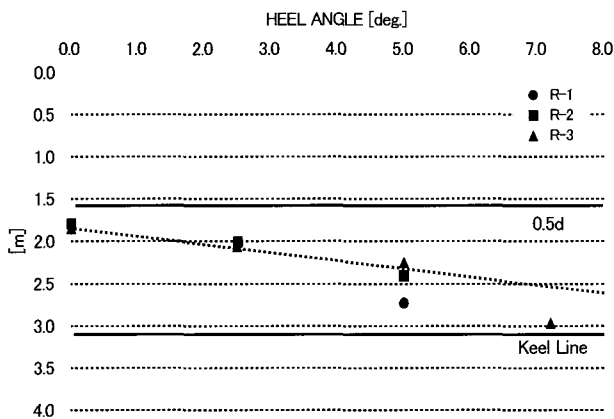


Fig. 11 The vertical distance between the water surface and the center of lateral water drag according to the heel angle and rudder angle in steady turning [Ship Scale]

한편, 측압 중심의 변화를 수면으로부터의 거리로 조사한 것이 Fig. 11이다. 그림 중에 굵은 실선들이 각각 선체 중앙에 있어서의 반 흘수 (0.5d)와 흘수 (Keel Line)을 나타내고 있다.

일반적으로 횡 이동하는 선박의 측압 중심은 반 흘수 정도에 있다고 알려져 있다. 그림에서 편류각을 어느 정도 가지고 경사각이 없는 상태에서는 측압 중심은 반 흘수보다 조금 하부에 위치하고 있지만, 경사각이 커질수록 편류각에 관계없이 측압 중심은 점점 하부로 이동하는 것을 알 수 있다. 특히, 갑판상에 해수가 침입하는 상태에서는 측압 중심은 거의 선저 근방에까지 급격하게 내려가는 것을 알 수 있다.

## 5. 고찰

Fig. 12에 나타내듯이 전 논문(金, 2002)에서는 경사 모멘트 법에 의한 자유수면영향을 고려한 복원력 곡선  $GZ_3$ 에, 수조 모형실험을 통하여 전진 중에 발생하는 선수 침하량과 트림의 변화량을 추정하여, 이들 값의 영향을 고려한 내항 탱커의 복원력 곡선  $GZ_4$ 를 계산하였다. 이 경우 복원력 곡선의 특징은 경사각  $7^\circ$  부근에 나타나는  $GZ$ 를 초과하는 외력 경사 모멘트가 작용하면, 선박은 일거에 전복할 수 있음을 시사하고 있다. 또한, 정상 선회시의 외측 경사 모멘트와 선회시의 액면 경사로 인한 외력 경사 모멘트를 계산하여 산출한 두 경사 모멘트 레버의 합계 ( $N_T=0.031m$ )와 정적 복원팔  $GZ_4$ 의  $GZ_{max}$ 를 단순히 비교하면 전복선박은 간신히 복원력을 유지하는 것을 알 수 있었다. 한편, 선박이 선회하면 상기의 두 경사 모멘트 이외에 선박이 사행하는 것과 경사로 인해 발생하는 갑판상 해수 침입 등으로 인하여 외력 경사 모멘트의 부가가 예상되며, 저건현 선박의 복원성능을 검토할 경우에는 갑판상 해수 침입으로 기인하는 경사 모멘트도 고려할 필요가 있다.

본 연구의 측압력과 경사 모멘트의 계측실험에서 측압력은 경사각의 증가와 갑판상 해수 침입의 경우에도 그다지 영향을 받지 않았지만, 경사 모멘트는 경사각이 크게 될수록 점점 증가하는 경향을 보였다. 특히, R-2의 실험조건에서는 갑판상에 해수가 침입하는 상태의 계측은 되지 않았지만, R-1의 경사각

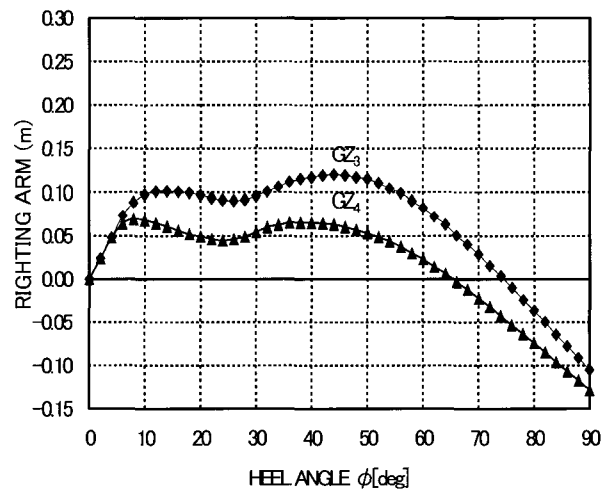


Fig. 12 Influence of bow-sinkage and trim induced in sailing on righting arm

5°와 R-3의 경사각 7.2°에 있어서 수면이 상갑판의 현단을 넘어 갑판상에 해수가 침입하였고, 갑판 현단이 수몰되는 상태에서는 경사 모멘트가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다. IMO 결의 A.167에는 외측 경사 모멘트에 기인하는 경사각을 해석적으로 구하는 식이 제안되어 있으며, 이 식에 의해서 계산된 경사각은 10°를 초과해서는 안 된다고 규정되어 있다. 그러나, 저건현을 가진 대상선박이 타각  $\delta=35^\circ$ 를 가지고 급격한 선회를 할 경우에는 경사각이 약 7°에 달하면 갑판상 현단을 넘는 해수 침입이 발생하고, 이로 인하여 경사 모멘트가 급격하게 증가하여 선박의 복원성을 악화시키는 결과로 되었다. 선속  $F_n=0.25$ 를 가진 모형선의 선회실험에서는 타각  $\delta=15^\circ, 25^\circ$ 의 경우에 갑판 현단이 수몰될 정도로 경사각은 발생하지 않았고, 모형선이 전복되는 사례는 일어나지 않았다. 그러나, 타각  $\delta=35^\circ$  경우에는 갑판상에 해수가 침입하였으며, 모형선이 전복하는 사례가 발생하였다. 이러한 실험 결과를 고려하면 저건현 내항 탱커의 복원성에 있어서 갑판상 해수 침입에 기인한 외측 경사 모멘트가 중요한 인자가 되는 것을 알 수 있다.

일반적으로 선박이 횡 이동하는 경우에 착력점은 흘수  $d$ 의 약 1/2 위치에 있다고 알려져 있다. 따라서 전 논문에서는 선체를 선회 중심과 반대 방향으로 경사시키려는 모멘트 즉, 외측 경사 모멘트는 착력점이 0.5d에 있다고 가정하여 계산을 하였다. 그러나, 본 실험의 편류각을 가진 상태에서의 착력점 즉, 수면에서부터의 경사 모멘트 레버의 작용점은 선박이 경사하고 있지 않을 때에는 0.5d보다 조금 하부에 위치하고 있지만, 경사각이 커질수록 편류각에 관계없이 착력점은 점점 하부로 이동하였고, 갑판상에 해수가 침입하는 상태에서는 거의 선저 근방에까지 급격하게 내려가는 것을 알 수 있다. 이러한 것으로부터 갑판 현단이 수몰되어도 측압력에는 그다지 영향을 미치지 못하지만 그 작용점이 선체 중심으로부터 멀어지는 것에 의해서 외측 경사 모멘트가 증가하는 것을 예상할 수 있다. 예를 들면, R-3의 경사각 7.2°에서의 착력점을 사용하면 선회 원심력에 의한 외측 경사 모멘트는 약 2배 정도 증가하여 간신히 복원력을 유지하고 있는 선박에게는 치명적인 복원력 손실을 야기해 선박이 전복에 달하는 중요한 인자로 작용하는 것을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 연구에서 밝혀진 주요한 내용은 다음과 같다.

- (1) 측압력과 경사 모멘트의 계측실험에서 측압력은 경사각의 증가와 갑판상 해수 침입이 발생하는 경우에도 그 변화량이 미소하지만, 경사 모멘트는 경사각이 크게 될수록 점점 경향을 나타냈으며, 갑판 현단이 수몰되는 상태에서는 경사 모멘트가 급격하게 증가하는 것을 알 수 있었다.
- (2) 측 압력과 경사 모멘트의 계측 결과를 사용하여 측압 중심의 변화에 대해 조사한 결과, 경사각이 크게 됨에 따라 수면으로부터 측압 중심까지의 거리는 점점 증가하였고, 갑판 상에 해수가 침입하는 상태에서는 측압 중심은 거의 선저 근방에까지 급격하게 내려가는 것을 알 수 있었다.
- (3) 상기의 결과로서 선회하는 선체에 작용하는 외측 경사 모멘트는 현단 몰수 상태에서 급격하게 증가하고, 이것은 탱크 내의 자유표면영향과 선수 침하 현상으로 복원력이 열악해진 저건현 선박에게는 치명적인 복원력 손실을 야기해 전복사고의 원인으로 되는 것을 지적할 수 있다.

## 참 고 문 헌

- [1] 金哲承·孔吉永·定兼廣行(2002), 선회중 전복한 저건현 내항 탱커의 복원성에 관한 연구(1), 한국항해학회지, 제26권 제1호, pp.1-7.
- [2] 本田·定兼(1990), 航走波中における小型船の動揺と横轉に關する水槽實驗, 日本航海學會論文集, 第88号, pp.169-176.
- [3] 定兼(1990), 航走波中による小型船の最大横傾斜角計算の試み, 日本航海學會誌 [航海], 第106号, pp.27-29.
- [4] 定兼·西代·湯田(1994), 航走波を受ける小型船の動揺に關する實驗的研究, 日本航海學會論文集, 第91号, pp.79-88.
- [5] 日本海事協會(1986), 船舶の復原性に關する指針”, pp.16-29.
- [6] 田宮·渡辺(1969), 轉覆に關する實驗, 日本造船學會論文集, 第125号, pp.89-97.

원고접수일 : 2003년 9월 30일

원고채택일 : 2003년 12월 5일