

## 여객선형의 선회 중 횡경사 추정에 관한 실선 실험 연구

김홍범\* · 이윤형\*\* · 박용선\*\* · 공길영\*\*\*†

\*, \*\* 한국해양수산연수원, \*\*\* 한국조선해양기자재연구원

## A Study of Real Ship Experiments to Estimate the Heeling Angle of Passenger Type Ship when Turning

Hongbeom Kim\* · Yunhyung Lee\*\* · Youngsun Park\*\* · Gilyoung Kong\*\*\*†

\*, \*\* Korea Institute of Maritime and Fisheries Technology, Busan 49111, Korea

\*\*\* Korea Marine Equipment Research Institute, Busan 49111, Korea

**요 약** : 여객선과 실습선은 많은 인원이 승선한다는 점에서 서로 공통적인 특성을 갖고 있다. 이러한 이유로 여객선형 선박의 안전한 운항이 대단히 중요하다. 정상적인 항해 중, 선박은 다양한 형태의 타각을 사용하여 변침하고, 위험 물표와의 충돌 회피를 위해 선회하기도 한다. 선박이 선회하면 횡경사가 발생하고, 운항 당시 여건이 불리할 경우 위험횡경사가 발생하거나 전복사고로 이어질 수 있다. 본 연구에서는 여객선과 유사한 두 척의 실습선을 대상으로 실선 선회 실험을 통해 횡경사를 계측하였고, 이를 선회 중 횡경사 이론식과 비교 분석하였다. 그 결과, IMO 복원성 성능기준에 제시된 선회 중 횡경사 계산식을 이용한 최대횡경사 예측의 한계점을 확인하였다. 또한, 선회 중 횡경사 이론식에 전타 당시 선속을 반영하고, 계산된 결과값에 우 선회시 1.4배, 좌 선회시 1.1배를 적용하면 최대횡경사 예측이 가능함을 확인하였다. 본 연구는 선회 중 위험횡경사 예방에 관한 안전운항기준을 마련하는데 기초 자료로 활용될 것으로 기대된다.

**핵심용어** : 여객선, 실습선, 복원성, 선회 중 횡경사, 실선 선회 실험

**Abstract** : Passenger ships and training ships have a common feature in that they serve many passengers. Thus, safe navigation is very important. During normal sailing, a ship may turn using various types of steering, including maneuvers to avoid collisions with dangerous target. When a ship turns, a heeling angle occurs. If trouble arises during sailing, a dangerous heeling angle may result or a capsizing accident. In this study, the heeling angle during turning was measured through experimentation with two training ships similar to passenger ships. These findings were compared with theoretical formulas for heeling angle when turning. We confirmed that the limit of the maximum heeling angle estimation using heeling angle formula when turning presented in IMO stability criteria. In addition, it was confirmed that the maximum estimated heeling angle can be reached by applying the result calculated in the theoretical formula 1.4 times when turning right and 1.1 times when turning left to reflect sailing speed when of rudder hard over. It is expected that this study will provide basis data for establishing safe operation standards for the prevention of dangerous heeling angles when turning.

**Key Words** : Passenger ship, Training ship, Ship stability, Angle of heel in turning, Real ship experiments in turning

## 1. 서 론

일반적으로 여객선은 화물선 또는 어선에 비하여 많은 여객과 승무원이 승선한다. 이와 같은 이유로 만약 여객선에 해양사고가 발생하면 큰 인명피해로 이어지고, 커다란 사회적 관심사로 떠오르게 된다. 실습선 역시 STCW 국제협약에 따른 교육·훈련을 위해 100여명 이상의 학생들이 승선하고

있으며, 여객선과 유사한 선형과 구조 설비를 갖추고 있어 무엇보다도 안전한 운항이 최우선적으로 담보되어야 한다.

선박은 해상에서 다른 선박, 어망 및 기타 부유 장애물과의 충돌 회피, 그리고 항해계획에 따른 변침점 도착 시, 당시 상황과 환경에 따라 적절한 타각을 사용해야 한다. 만약 무게중심이 높은 선박이 고속으로 운항시에 부적절한 타각 사용으로 선회를 지속하면 위험횡경사를 발생시키고, 충분한 복원성을 확보하지 못하면 전복사고로 이어질 수도 있다. 이는 선박이 선회 중 횡경사가 안전운항에 있어서 매우 중요한 부분이라는 것을 의미한다.

\* First Author : hbkim@seaman.or.kr, 051-620-5774

† Corresponding Author : kong@komeri.re.kr, 051-400-5003

선회 중 횡경사와 관련된 선행연구로는 다음과 같다. Son and Kim(2003)은 4자유도 조종운동의 수학 모델을 검토 및 분석하고, 조종운동 시뮬레이션과 수치계산을 이용한 수학 모델을 개발하였다. Kim et al.(2013)은 수선면 상부 구조물의 크기가 큰 크루즈선의 특성을 고려한 바람 하중에 의한 횡경사를 추정할 수 있는 수치기법을 제안하였다. Jung et al.(2008)은 실습선 한바다호의 선박조종성능 예측시스템을 이용하여 수차례 실선 실험을 수행하고, 충돌 회피를 위한 조선 방법을 제안하였다. 그러나 선회 중 횡경사는 선박의 조종성과 복원성이 밀접한 연관이 있음에도 불구하고, 선행 연구는 실선 실험을 수행하지 않았거나 각각의 성능별로만 연구가 수행된 한계점을 가지고 있다.

따라서 본 연구에서는 여객선과 유사한 선형을 갖고 있는 실습선 한우리호와 한바다호를 대상으로 실선 선회 실험을 수행하고, 그 결과를 바탕으로 선회 중 횡경사 이론식의 계산 결과와 비교분석하고자 한다. 이를 통해 IMO 복원성 성능기준에 제시된 선회 중 횡경사 계산식에 대한 한계점을 확인하고, 선박이 선회 중 발생할 수 있는 위험횡경사 예측 방안을 제시하고자 한다.

## 2. 선회 중 횡경사 이론식

### 2.1 IMO 선회 중 횡경사 계산식

선박이 선회 중 수반되는 횡경사를 추정할 수 있는 대표적인 계산식은 IMO 복원성 성능기준에 제시된 선회 중 경사 우력정 계산식이며(IMO, 2008), 식(1)과 같다. 선회 중 발생하는 경사우력정과 복원정( $GZ$ )의 크기는 같으므로 횡경사각을 계산할 수 있다.

$$\sin\theta = 0.02 \times \frac{V^2}{LWL \times GM} \times \left( KG - \frac{Deq}{2} \right) \quad (1)$$

여기서  $V$ 는 정상 선회 중 선속,  $Deq$ 는 기선으로부터 상당흘수,  $LWL$ 은 흘수선 전장,  $GM$ 은 무게중심부터 경사중심(Metacenter)까지 거리이다.  $KG$ 는 기선으로부터 무게중심까지의 거리이며, 0.02는 선회성 계수이다. 또한, IMO 복원성 성능기준에서 여객선은 선회 중 횡경사각에 대하여  $10^\circ$ 를 초과할 수 없음을 명시하고 있다.

### 2.2 정상 선회 중 외방경사 이론식

선박에서 타를 사용하면 타판에 직압력(Normal force)이 작용하여 선회가 발생한다. 선박의 무게중심에는 원심력(Centrifugal force)이 발생하고, 부심에는 구심력(Centripetal force)이 작용하여 횡경사 모멘트가 발생한다. 정상 선회 중

발생하는 횡경사 모멘트와 복원 모멘트에 의해 외방경사가 발생한다는 이론적 계산식(Rhodes, 2003)은 식(2)와 같다.

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

여기서  $V$ 는 정상 선회 중 선속,  $R$ 은 선회반경,  $BG$ 는 부심부터 무게중심까지의 수직 거리이며,  $g$ 는 중력가속도를 의미한다.

### 2.3 편각을 고려한 선회 중 외방경사 이론식

선박은 선회 중에 선수미선의 이동방향과 무게중심 이동방향의 차에 의해 편각(Drift angle)이 발생한다. 원심력은 편각이 고려되어 선체의 무게중심에 작용하고, 구심력은 수압의 작용점(Q), 양력은 타판의 작용점(C)에서 발생한다. 선회가 진행됨에 따라 수압의 작용점과 양력의 작용점이 거의 같아지며, 이 때 원심력이 증가하여 외방경사를 일으킨다(Kinzo, 2013). Fig. 1은 이에 대한 자유물체도를 나타낸 것이다.

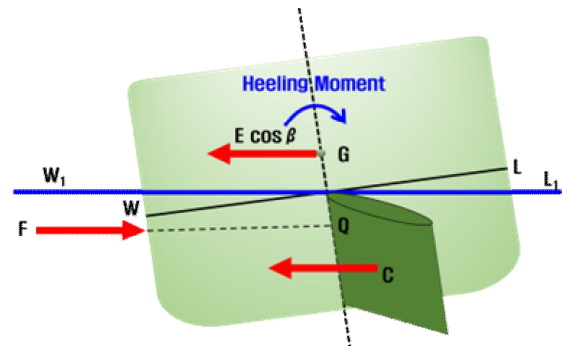


Fig. 1. Heeling angle of outward.

선회 중 발생하는 외방경사 모멘트는 복원 모멘트와 같다는 평행이동방정식으로 계산할 수 있으며, 식(3)과 같다.

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

여기서  $V$ 는 정상 선회 중 선속,  $R$ 은 선회반경,  $\beta$ 는 선회 중 발생하는 편각이다.  $GC$ 는 타의 중심부터 무게중심까지의 수직 거리,  $g$ 는 중력가속도이다.

### 2.4 IMO 선회 중 횡경사 변형 계산식

IMO 선박 조종성 표준에서 선회경(Tactical diameter)을 최대 5.0L 미만으로 규정하고 있다. 식(1)의 선회성 계수 0.02에 대하여 고찰한 결과, 선회경의 값은 선박길이의 10배를 적용

하고 있음을 확인할 수 있다(SDC, 2014; SDC, 2015).

IMO 복원성 성능기준에 제시된 선회 중 횡경사 계산식은 원심력의 계산식에서 유도되었으며, 선회반경이 계산 요소로 포함이 된다. IMO 선박 조종성 표준에 제시된 선회경 5 L 미만의 기준을 고려한 선회반경의 최대값인 2.5 L을 적용하면 식(4)를 유도할 수 있다.

$$\sin\theta = \frac{V^2}{g \times 2.5 \times LWL \times GM} \times \left( KGo - \frac{Deq}{2} \right) \quad (4)$$

$$= 0.04 \times \frac{V^2}{LWL \times GM} \times \left( KGo - \frac{Deq}{2} \right)$$

여기서 변수의 의미는 식(1)에 사용된 것과 동일하다.

Table 1은 지금까지 설명한 식(1)~(4)에 포함된 변수에 대한 비교를 나타낸 것이다.

Table 1. Comparison of theory formulas

Equation	Speed	Radius	GM	Coefficient	Vertical (G to B)	Drift angle
(1)	○	X	○	○	X	X
(2)	○	○	○	X	○	X
(3)	○	○	○	X	X	○
(4)	○	X	○	○	X	X

### 3. 선회 중 실선 실험

#### 3.1 실습선 한우리호

한국해양수산연수원 실습선 한우리호는 해사고등학교와 한국해양수산연수원의 초급해기사양성 승선실습 교육 등의 목적으로 운영되고 있으며, 최대 144명의 실습생의 승선실습 및 교육이 가능하다. 한우리호는 총톤수 4,108톤으로 주기관 출력이 3,091 kW이고, 가변피치 프로펠러를 장착하고 있다. 자세한 선박 제원은 Table 2와 같다.

Table 2. General description of Hanwoori

Ship's Name	Hanwoori
Type of Ship	Training ship
Gross Tonnage	4,108 ton
LOA / LBP	87.55 m / 80.00 m
Breadth (MLD.)	16.00 m
Displacement at Full Loaded Draft	3,113.3 ton
Speed (MAX.)	17.0 knots
Cadet / Crew & Instructor	144 / 36 Person

#### 3.1.1 실험 개요

2014년 6월 6일 한우리호는 남해안 갈도 부근에서 실선 실험을 수행하였다. 실험을 위해 항해전진전속상태에서 우좌현 타각 35°를 지시하였을 때의 선회 중 횡경사를 측정하였다. 횡경사 측정은 선교에 비치된 아날로그 형태의 경사계(Heeling clinometer)와 추가로 설치된 추에 줄을 연결한 진자(Pendulum)를 사용하였다. 또한, 타각 지시 후 정상 선회경을 그리는 시점을 기준으로 그 이전에는 약 12초 주기로, 그 이후에는 약 18초 주기로 관측하여 수기로 기록하였다. 당시 선박 및 해상 상태는 Table 3과 같다.

Table 3. Ship and sea state of experimental condition of Hanwoori

Date	2014. 6. 6	Position	5' off SW from Gal-do
Weather	Sea	True Wind Dir./Speed	Depth
Bc	Calm sea	SE / 6 (kts)	50 (m)
Item	Value	Explanation	
Displacement (Δ)	3,150.786 MT		
Deq	4.614 m		
KGo	6.080 m		
GoM	1.940 m		
BG	3.413 m		
GC	3.920 m	Rudder height : 4.00 m Baseline to keel : 0.16 m	
LBP (L)	80.000 m		

#### 3.1.2 실험 결과

한우리호의 타 우현 35°를 지시할 때, 당시 선속은 7.5 m/s였으며, Fig. 2와 같이 선회반경은 ECDIS상에 나타난 항적을 통하여 129.6 m로 측정되었다. 타를 좌현 35° 지시할 때, 선속은 7.4 m/s였으며, 선회반경은 99.0 m로 측정되었다.

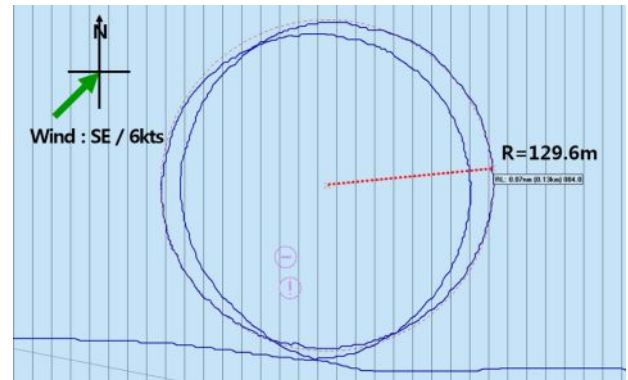


Fig. 2. Turning circle of Hanwoori in case of STBD 35°.

Fig. 3은 실선 실험 결과를 나타낸 것으로 (a)와 (b)는 각각 타를 우현 35°, 좌현 35°로 지시한 경우이며, 취득된 횡경사

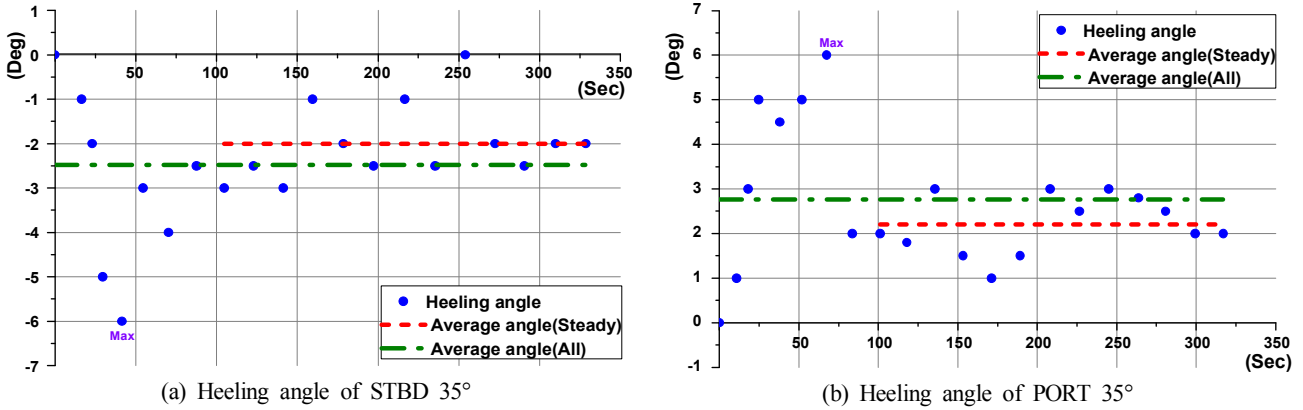


Fig. 3. Experimental results of Hanwoori in case of STBD 35° and PORT 35°.

데이터를 시간대별로 나타낸 것이다.

타 우현 35°를 지시할 때, Fig. 3(a)과 같이 최대외방경사는 좌현 6.0°로 측정되었다. 정상 선회 중 평균횡경사는 선회경을 그리는 시점부터 관측된 횡경사를 평균한 값으로 좌현 2.0°로 측정되었다. 또한, 타 좌현 35°를 지시할 때, Fig. 3(b)에서 최대외방경사에서 우현 6.0°, 정상 선회 중 평균횡경사는 앞에서와 동일한 방법으로 측정된 결과 우현 2.2°로 나타났다.

항해진전진속상태에서 우·좌현 35°로 전타를 사용하여도 IMO 복원성 성능기준 선회 중 횡경사각 10° 미만에 비추어 볼 때 기준을 충족하고 있음을 확인하였다.

### 3.2 실습선 한바다호

한국해양대학교 실습선 한바다호는 동양 최대 규모의 실습선으로서 204명의 학생을 동시에 수용 및 교육이 가능하다(Lee et al., 2015). 한바다호는 총톤수 6,686톤, 주기관 출력이 5,970 kW이며, 자세한 선박 제원은 Table 4와 같다.

Table 4. General description of Hanbada

Ship's Name	Hanbada
Type of Ship	Training ship
Gross Tonnage	6,686 ton
LOA / LBP	117.200 m / 104.000 m
Breadth (MLD.)	117.80 m
Displacement at Full Loaded Draft	6,434.3 ton
Speed (MAX.)	19.08 knots
Cadet / Crew & Instructor	204 / 42 Person

#### 3.2.1 실험 개요

2015년 11월 30일, 한바다호는 부산 남항 부근에서 실험을 위해 전진전속상태에서 우·좌현 타각 35°를 지시하였을 때

의 선회 중 횡경사의 변화를 측정하였다. 횡경사 계측은 선교에 설치된 디지털 경사계(EI-1 Electronic Inclinometer)를 사용하였으며, 5초 간격으로 데이터가 자동기록 되었다. 당시 선박 및 해상 상태는 Table 5와 같다.

Table 5. Ship and sea state of experimental condition of Hanbada

Date	2015.11.30	Position	Near Busan port
Weather	Sea	True Wind Dir./Speed	Depth
Bc	Calm sea	NE / 5~7 (kts)	100 (m)
Item	Value	Explanation	
Displacement ( $\Delta$ )	5544.900 MT		
Deq	5.268 m		
KGo	7.665 m		
GoM	1.169 m		
BG	4.665 m		
GC	4.465 m	Rudder height : 4.90 m Baseline to keel : 0.40 m	
LBP (L)	104.000 m		

#### 3.2.2 실험 결과

한바다호의 실험 결과는 Fig. 4와 같다. 그림에서 (a)와 (b)는 각각 타를 우현 35°, 좌현 35°로 지시한 경우이며, 타 사용에 따른 횡경사 데이터를 시간대별로 나타낸 그래프이다.

타 우현 35°로 지시할 때, 선속은 7.6 m/s였으며, ECDIS상의 항적으로 측정된 선회반경은 249.8 m이다. 최대외방경사는 좌현 7.0°로, 정상 선회 중 평균횡경사는 한우리호와 동일한 방법을 적용했으며, 좌현 2.7°로 측정되었다. 타 좌현 35°로 지시할 때, 선속은 6.2 m/s였으며, 선회반경은 221.7 m로 측정하였다. 최대외방경사는 우현 3.3°, 정상 선회 중 평균횡경사는 우현 1.6°로 측정되었다.

한바다호 역시 전진전속상태에서 우·좌현 35°로 전타를

여객선형의 선회 중 횡경사 추정에 관한 실선 실험 연구

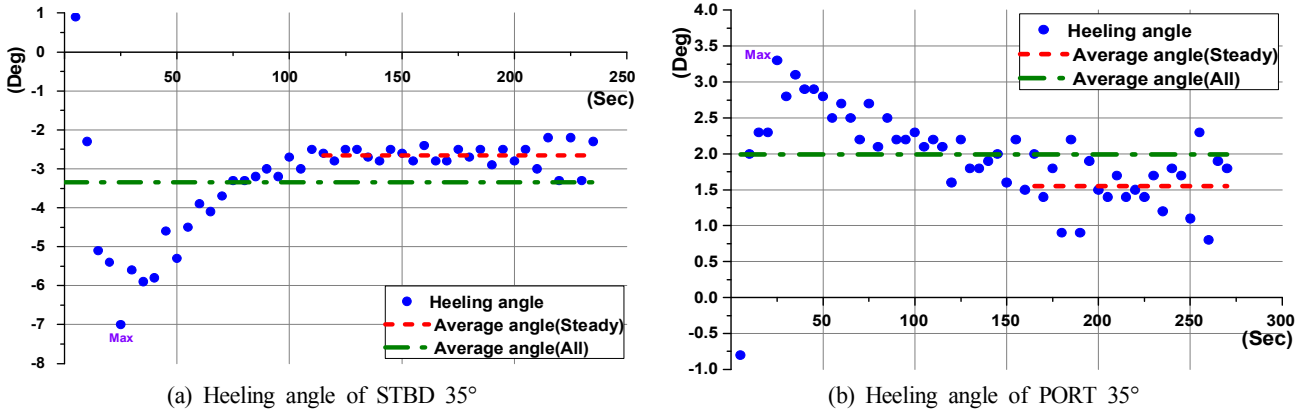


Fig. 4. Experimental results of Hanbada in case of STBD 35° and PORT 35°.

사용하여도 IMO 복원성 성능기준에 제시된 선회 중 횡경사 각 10° 미만 기준을 충족하였다.

#### 4. 실선실험 횡경사 비교분석

##### 4.1 실습선 한우리호 실험 횡경사 비교분석

한우리호 실험에서 측정된 횡경사와 선회 중 횡경사 이론식 계산 결과를 비교분석하기 위한 자료는 Table 6과 같다. 편각은 선박의 선수방향(Heading)과 대지침로(Course over ground)의 차로 선회 중 측정된 편각을 평균하여 계산하였다.

Table 6. Data for calculation of additional experimental condition of Hanwoori in turning (rudder order)

Item	STBD 35	PORT 35
Radius (R, m)	129.6	99.0
Drift Angle ( $\beta$ , Deg)	9.398	12.346
Initial Speed ( $V_i$ , m/s)	7.511	7.408
Steady Speed ( $V_s$ , m/s)	3.593	3.170
Average Speed ( $V_A$ , m/s)	4.564	4.215

전타 당시 선속( $V_i$ )은 선회 초기 즉, 횡경사가 불안정한 상태(Unsteady)에서 나타나는 최대외방경사의 값을 계산하기 위한 속도이다. 정상 선회 중 선속( $V_s$ )은 선박이 선회경을 그리면서 일정한 범위(Steady)의 속력을 갖으며, 선회 중 횡경사 이론식에서 제시된 변수이다. 평균 선속( $V_A$ )은 전타시점부터 선회권 형성까지 평균 선속이다. 한우리호의 측정된 선속( $V_i$  와  $V_s$ )을 비교하면 전타 당시 선속은 정상 선회 중 선속보다 약 2.1~2.3배의 값을 갖고 있다.

Fig. 5는 한우리호의 실험 결과와 식(1)~(4)의 계산 결과

를 함께 정리한 것이다. 선회 초기에 나타나는 최대횡경사, 정상 선회 중 횡경사의 평균값 등은 실선으로 표현하였으며, 선회 상태는 실선의 색깔로 구분하였다. 또한, 식(1)~(4)의 계산 결과를 모형으로 표시하였다. X축에는 선회 중 상태에 따른 우·좌현 타각 지시를 나타내며, Y축은 X축에 따른 횡경사각을 보여준다.

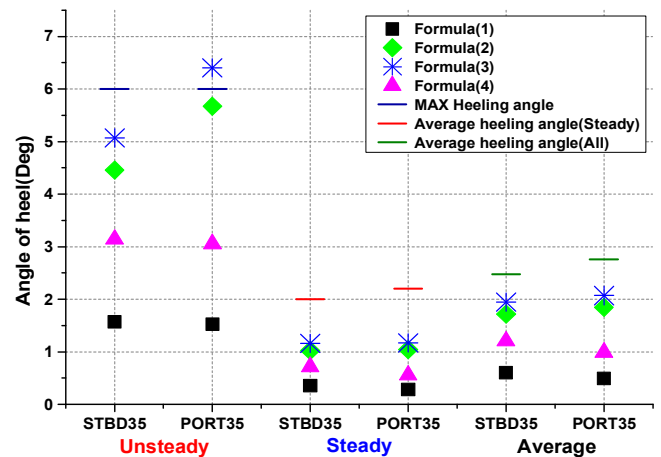


Fig. 5. Analysis of turning heel angle of Hanwoori.

##### 1) 전타 초기 상태에서 비교분석

전타 초기인 불안정한 상태에서 우현 35°의 경우, 최대횡경사는 좌현 6.0°로 최소오차는 식(3)에서 0.9°, 최대오차는 식(1)에서 4.4°로 나타났다. 좌현 35°의 경우, 최대횡경사는 우현 6.0°로 최소오차는 식(2)에서 0.3°, 최대오차는 식(1)에서 4.5°로 나타났다.

Fig. 5에서 보는 바와 같이 식(2)와 식(3)의 계산값(오차 0.3~1.5°)은 식(1)(오차 4.4°)과 식(4)(오차 2.9°)에 비하여 실선 실험에 의한 최대횡경사와 근접하게 나타났다.

실선 실험에 의한 최대횡경사 값을 충족하기 위해서는 식

(2)와 식(3)의 계산 결과값에 우현은 1.2배 좌현은 1.1배의 적용 배율이 필요한 것으로 분석되었다.

**2) 선속에 따른 횡경사 비교분석**

실선 실험에 의해 측정된 최대횡경사를 기준으로 전타 당시 선속과 정상 선회 중 선속을 비교분석하였다. 실험에서 측정된 최대횡경사를 충족하기 위해서는 전타 당시 선속을 적용한 식(2)와 식(3)의 계산 결과값에 1.1~1.2배의 적용 배율이 필요하다. 또한, 정상 선회 중 선속을 반영할 경우, 식(2)와 식(3)의 계산 결과값에 5.1~5.9배를 적용 시 실선 실험에서 측정된 최대횡경사를 만족하는 것으로 나타났다.

**3) 선회반경에 따른 횡경사 분석**

전타 초기상태에서 비교분석한 바와 같이 식(2)와 식(3)의 계산값에 비하여 식(1)과 식(4)의 계산값은 비교적 큰 오차를 갖고 있다. Table 1을 참조하면, 식(1)과 식(4)는 실제 선회반경의 값이 반영되지 않고, 선회성 계수와 선박의 길이가 변수로 포함된다. 식(1)과 식(4)의 선회성 계수와 한우리호의 선박길이(L=80m)를 계산하면 선회반경이 각각 400m, 200m로 계산된다. 따라서 실선 실험의 최대횡경사와 비교하면 식(1)과는 4배, 식(4)와는 2배의 차이가 발생한 것으로 분석되었다.

실험 당시 측정된 한우리호의 R/2.5L의 비는 0.647~0.495이었으며, 선회성 계수 0.02(R/2.5L=2)를 제시한 식(1)과 선회성 계수 0.04(R/2.5L=1)를 제시한 식(4)는 실제 선회반경의 값을 사용한 식(2)와 식(3)에 비하여 오차범위가 큼을 확인하였다.

**4.2 실습선 한바다호 실험 횡경사 비교분석**

한바다호 실험에서 측정된 횡경사와 선회 중 횡경사 이론식 계산결과를 비교분석하기 위한 자료는 Table 7과 같다.

Table 7. Data for calculation of additional experimental condition of Hanbada in turning (rudder order)

Item	STBD 35	PORT 35
Radius (R, m)	249.8	221.7
Drift Angle ( $\beta$ , Deg)	5.997	6.760
Initial Speed ( $V_i$ , m/s)	7.562	6.122
Steady Speed ( $V_s$ , m/s)	4.519	2.850
Average Speed ( $V_A$ , m/s)	5.064	4.032

한바다호의 측정된 선속( $V_i$ 와  $V_s$ )을 비교하면 전타 당시 선속은 정상 선회 중 선속보다 약 1.7~2.1배의 값을 갖고 있다.

한바다호의 실험 결과와 Table 7을 참고하여 식(1)~(4)의 계산 결과를 함께 정리한 것을 Fig. 6에 나타내었다.

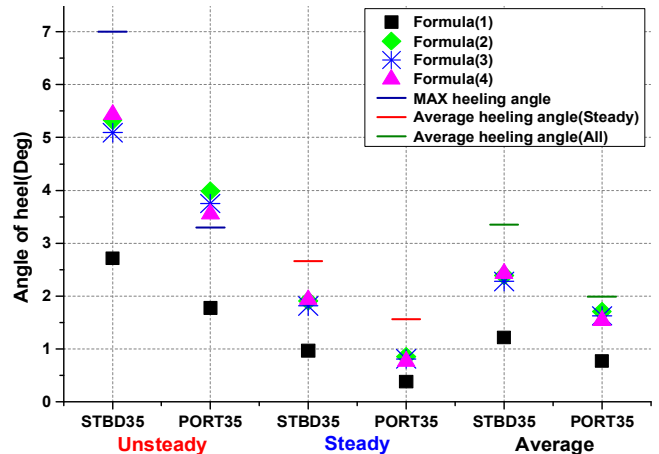


Fig. 6. Analysis of turning heel angle of Hanbada.

**1) 전타 초기 상태에서 비교분석**

전타 초기인 불안정한 상태에서 우현 35°의 경우, 최대횡경사는 좌현 7.0°로 최소오차는 식(4)에서 1.6°, 최대오차는 식(1)에서 4.3°로 나타났다. 좌현 35°의 경우, 최대횡경사는 우현 3.3°로 최소오차는 식(4)에서 0.3°, 최대오차는 식(1)에서 1.4°로 나타났다.

Fig. 6에서 보는 바와 같이 식(2)~식(4)의 계산값은 서로 유사하고, 식(1)의 계산값과 다소 차이가 있음을 알 수 있다. 식(2)~식(4)의 계산 결과와 측정된 최대횡경사의 오차는 우현 35°의 경우 1.5~2.0°, 좌현 35°의 경우 0.2~0.7°로 나타났다. 또한, 식(2)~식(4)의 계산된 결과값이 최대횡경사를 충족하기 위해서는 우현 35°의 경우 1.1~1.4배, 좌현 35°의 경우 0.8~0.9배의 적용 배율이 필요한 것으로 분석되었다.

**2) 선속에 따른 횡경사 분석**

실선 실험에 의해 측정된 최대횡경사를 충족하기 위해서는 전타 당시 선속을 적용한 식(2)~(4)의 계산 결과값에 0.8~1.4배의 적용 배율이 필요하다. 정상 선회 중 선속을 반영할 경우, 식(2)~식(4)의 계산 결과값에 3.6~4.3배를 적용 시 실선 실험에서 측정된 최대횡경사를 만족하는 것으로 나타났다.

선속에 따른 두 선박의 최대횡경사를 충족하는 적용 배율을 비교분석한 결과 전타 당시 선속은 한우리호는 1.1~1.2배, 한바다호는 0.8~1.4배가 필요한 것으로 나타났다. 정상 선회 중 선속은 한우리호는 5.1~5.9배, 한바다호는 3.6~4.3배가 필요한 것으로 나타났다. 두 선박간의 적용 배율의 차이를 비교하면 전타 당시 선속의 적용 배율이 정상 선회 중 선속보다 작게 나타났다.

### 3) 선회반경에 따른 횡경사 분석

전타 초기에 식(2)~식(4)의 각각의 계산값과 실선 실험값의 차이를 비교하면 최대 0.3~0.4°의 오차를 갖는다. 한우리호와는 달리 한바다호는 추가로 식(4)를 이용하여 횡경사를 추정하는데 이용가능함을 보여준다. 이는 한바다호에서 측정된 R/2.5L의 비는 0.96~0.85로 나타났고, 한우리호보다 비교적 R/2.5L의 비가 1에 가까우므로 선회성 계수 0.04를 제시한 식(4)의 이용 가능함을 확인하였다.

한우리호와 한바다호는 선회반경은 공통적으로 우 선회가 좌 선회보다 크게 측정되었다. 두 선박의 시운전시험(Sea trial test) 결과에서도 우 선회경(314.7m/407.0m)은 좌 선회경(301.4m/374.6m)보다 크게 나타났다. 실험결과와 시운전시험 결과로 나타났듯이 두 선박의 선회반경은 우 선회가 좌 선회보다 큰 특성을 갖고 있음을 확인하였다. 이는 최대횡경사 충격을 위한 선회 중 횡경사 이론식 계산 결과값의 적용 배율에도 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

## 5. 결론

여객선의 선회 중 횡경사를 추정하기 위하여 여객선과 유사한 선형을 갖춘 실습선 두 척으로 실선 실험을 수행하였다. 실선 실험 당시 측정된 횡경사를 바탕으로 선회 중 횡경사 이론식 결과값을 비교분석하였다. 그 결과를 바탕으로 최대횡경사 예측 시 기존의 선회 중 횡경사 이론식 적용의 한계점을 확인하였고, 최대횡경사 예측 방법을 제안하였다. 본 연구의 결과를 요약 정리하면 다음과 같다.

- (1) 선회 중 횡경사 이론식에서 선속은 정상 선회 중 선속을 의미한다. 그러나 본 연구를 통하여 선회 중 최대횡경사를 예측할 때에는 정상 선회 중 선속보다는 전타 당시의 선속을 적용하는 것이 더 정확한 예측이 가능함을 확인하였다.
- (2) IMO 선회 중 횡경사 계산식의 선회성 계수는 선회경에 선박길이 10배가 반영되어 있다. 따라서 계산값은 실제 최대횡경사보다 작게 나타날 수 있음을 확인하였다.
- (3) 선회반경과 선박 길이의 2.5배의 비가 1에 가까운 선박일 수록 IMO 선회 중 횡경사 변형 계산식으로 최대횡경사 예측이 가능함을 확인하였다.
- (4) 선박의 선회 중 최대횡경사를 예측하기 위해서는 타 사용 시점의 선속과 선회반경을 고려하여 정상 선회 중 외방경사 이론식, 편각을 고려한 외방경사 이론식, IMO 선회 중 횡경사 변형 계산식으로 계산된 값 중 큰 값을 사용해야 한다. 그리고 그 값에 우 선회시 1.4배(범위 1.1~1.4배 중 큰 값), 좌 선회시 1.1배(범위 0.8~1.1배 중 큰 값)의 적용을 제안한다.

본 연구 결과가 선박의 특성을 고려하여 선회 중 위험횡경사를 예방하기 위한 안전운항기준을 마련하는데 기초 자료로 활용될 수 있기를 기대한다. 또한, 향후 선회 중 선속의 변화가 선회반경에 미치는 영향, 선회 중 각속도가 선회반경에 미치는 영향 등의 선회 중 횡경사 이론식의 변수에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

## References

- [1] IMO(2008), Resolution. MSC.267(85), Adoption of the International Code on Intact Stability, 2008, pp. 1-14.
- [2] Jung, C. H., H. K. Lee and G. Y. Kong(2008), A Study on the Ship's Performance of T.S HANBADA(III), The Journal of Navigation and Port Research, Vol. 32, No. 6, pp. 439-445.
- [3] Kim, J. H., Y. H. Kim and Y. S. Kim(2013), Study on Prediction and Control of Wind-Induced Heel Motion of Cruise Ship, Journal of Society of Naval Architects of Korea, Vol. 50, No. 4, pp. 206-216.
- [4] Kinzo, I.(2013), Theory and Practice of Ship Handling, 1st Edition. Sang Hak Dang, pp. 82-88.
- [5] Lee, W. J., J. H. Choi and K. H. Cho(2015), Experimental Study on Reduction of Emissions for Marine Diesel Engines with a Double Post Injection, The Journal of Korean Society of Marine Engineering, Vol. 39, No. 4, p. 419.
- [6] Rhodes, M. A.(2003), Ship Stability for Mates/Masters, 1st Edition, Seamanship International Ltd.: Scotland, pp. 219-294.
- [7] SDC(2014), IMO Sub-Committee in Ship Design and Construction, Amendments to the Criterion for Maximum Angle of Heel in Turns of the 2008 IS Code, Sub-Committee in Ship Design and Construction, p. 2.
- [8] SDC(2015), IMO Sub-Committee in Ship Design and Construction, Report to the Maritime Safety Committee 2nd session Agenda item 25, Sub-Committee in Ship Design and Construction, pp. 17-18.
- [9] Son, K. H. and Y. M. Kim(2003), A Study on New Mathematical Model of Ship Manoeuvring Motion Taking Coupling Effect of Roll into Consideration, The Journal of Navigation and Port Research, Vol. 27, No. 5, pp. 451-458.

Received : 2018. 05. 08.

Revised : 2018. 07. 09. (1st)

: 2018. 07. 16. (2nd)

Accepted : 2018. 08. 28.