

# GM 및 종경사 변경에 따른 선박의 조종성능변화에 관한 실험적 연구

윤근항<sup>†</sup>·김동진·여동진  
한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소

## An Experimental Study on the Manoeuvrability of a Ship in Different GM and Trim Conditions

Kunhang Yun<sup>†</sup>·Dong Jin Kim·Dong Jin Yeo  
Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

The aim of this study was to investigate the manoeuvrability of a ship in different Center of Gravity (CG) conditions. Free Running Model Tests (FRMT), such as 35°turning circle tests, 20/20 zigzag manoeuvring tests, and 10/10 zigzag manoeuvring tests, were conducted in three GM and three trim conditions with 1/65.83 scaled KRISO Container Ship (KCS). The test results indicated that KCS in the lower GM condition and the trim by bow condition showed reduced advance and tactical diameter in turning circle tests and increased overshoot angles in zigzag tests, and those manoeuvring indices were strongly related with roll angle. In addition, sensitivity indices for three-axis CG position were suggested with prior research, and it showed that y-axis CG position significantly affected manoeuvrability of KCS due to the low GM. Therefore, in the case of KCS, it is evident that the roll angle during manoeuvre is closely related with manoeuvring indices.

**Keywords** : Trim condition(종경사), GM(메타센터높이), Manoeuvrability(조종성능), KCS(KCS), FRMT(자유항주모형시험)

## 1. 서론

선박 내 화물의 이동, 침수 등에 의해 발생 가능한 선박의 운항 조건 변화는 선박의 무게중심 및 자세에 변화를 가져오게 되고, 이는 예기치 않은 운항성능 변화를 가져오게 된다. 특히 예상하지 못한 선박의 무게중심 변화는 선박의 안정성과 조종성능 변화에 커다란 영향을 미치고, 이는 해양사고와 직결되기도 한다(KMST, 2014). 또한 해양안전심판원의 사고원인 분석서인 재결서 등에서도 어선의 무게중심 상승 및 화물의 이동 등에 의한 전복사고의 다양한 예와 그 전개과정을 확인할 수 있다(KMST, 2020). 따라서, 이러한 조건에서 운항되는 선박의 거동특성을 운항자 관점에서 빠르게 이해하는 것은, 추가적으로 발생가능한 해양사고의 예방을 위해 매우 중요하다.

무게중심 변화에 따른 선박의 조종성능 변화에 관한 선행 연구로는, KCS 선형에 대하여 횡경사에 의한 조종성능 변화를 실험적으로 규명한 바 있고 (Yun & Yeo, 2019), Choe & Im (2016)은 KVLCC1 선형에 대하여 높은 무게중심 조건 시 선회성능과 횡동요각 변화를 자유항주모형시험을 통하여 연구하였다. Fukui et al. (2015)은 1/105 축척비 KCS 선형에 대하여 GM 변경 조건에 따른 자유항주모형시험과 4자유도 시뮬레이션을 수행하여, 직진안정성과 조종성능 변화를 비교 연구하였다. Kim et al. (2011) 역시 KCS 선형에 대하여 3자유도 및 4자유도 시뮬레이션을 수행하고 횡동요각을 고려한 4자유도 시뮬레이션의 중요성을 확인한 바 있다. 또한 흘수 및 트림 변화에 따른 선박의 조종성능 변화를 모형시험과 실선시운전 결과를 바탕으로 연구한 바 있다 (Im et al., 2005).

본 논문은 KCS 선형의 무게중심 변화에 따른 조종성능 변화에 관한 후속 연구로, 상하방향 및 종방향 무게중심 변경에 따른 선박의 조종성능 변화를 실험을 통하여 추가 규명하고, 선행 연구들과 다르게 세 가지 방향의 무게중심 변화에 따른 조종성능 변화를 종합적으로 분석하고자 하였다.

이를 위하여 KCS 선형에 대하여 자유항주모형시험을 수행하였다. KCS 모형선의 무게중심을 상하방향으로 이동시킨 세 가지 GM 조건과 앞뒤방향으로 이동시킨 세 가지 종경사 조건에 대하여 선회시험 및 지그재그시험을 수행하였다. 선회시험과 지그재그시험의 결과로부터 두가지 무게중심 변경이 선박의 조종성능 지표에 미치는 영향을 살펴보고, 이를 횡경사와 연관지어 그 이유를 분석하였다. 또한, 비교검증용 데이터로 사용할 수 있도록 조종성능지표와 모형선의 상태변수를 정량적으로 제시하였다. 마지막으로 세 가지 방향의 무게중심 변경에 따른 KCS 선형의 조종성능지표를 민감도 지수로 분석하여, 무게중심 이동거리에 따른 조종성능 변화를 수치로 제시하였다.

## 2. 자유항주모형시험

GM 및 종경사 조건에 따른 선박의 변화된 조종성능을 추정하기 위하여 자유항주모형시험을 수행하였다. 선행 연구 (Yun & Yeo, 2019)에서 사용한 동일한 KCS 모형선(1/65.83 축척비)에 대하여, 24노트에 해당하는 대응속도로 35도 좌우현 선회시험과 20/20, 10/10 지그재그시험을 상하 및 종방향 무게중심 변경 조건에서 수행하였다.

### 2.1 KCS 모형선

KCS 선형은 Table 1에서와 같이 GM 값이 0.60m로, 다른 선형에 비하여 무게중심 위치 변경에 따른 자세변화가 상대적으로 크게 나타난다. 시험속도는 실선 운항속도 24노트의 모형선 대응속도인 1.522m/s로 결정되었다. 표의 왼쪽 실선 값은 설계상 값이고, 오른쪽 모형선 값 중, GM, Kzz, Kxx는 시험 준비상태에서 계측된 값과 기준 대비 오차를 의미한다. 모형선의 GM 값과 종경사 상태를 변경하기 위하여, Fig. 1과 같이 모형선 상부에 설치된 무게추를 위아래/앞뒤 방향으로 이동하여, 무게중심 위치를 Fig. 2와 같이 상하/종 방향으로 변경하였다.

모형선의 상태를 계측하기 위한 장비는 선행 연구에서 사용된 시험장비를 동일하게 사용하였으며, 위치와 속도를 계측하기 위해서 GPS 장비, 원거리 통신을 위하여 지향성 안테나를 갖춘 1:1 통신용 모뎀을 추가로 사용하였다.

Table 1 Principal dimensions of KCS

Item	Full-scale	Model-scale
Scale	1	1/65.833
Lpp(m)	230.0	3.494
GM(m)	0.60	0.009(0.6%)
Kzz(L)	0.25	0.20(-18.1%)
Kxx(B)	0.40	0.43(8.0%)

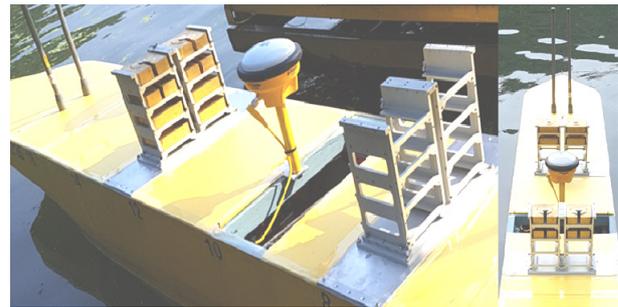


Fig. 1 Weights configuration on KCS model ship

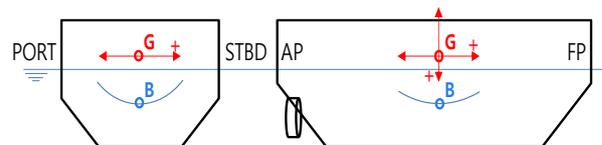


Fig. 2 Relation of center of gravity and center of buoyancy for 3 directions

### 2.2 시험항목

선박의 조종성능을 확인하기 위한 일반적인 표준시험항목 (IMO, 2002) 중, Table 2와 같은 항목에 대하여 자유항주모형시험을 수행하였다.

Table 2 Free running model test cases

Item	Details	Trim angle ( $\Delta$ LCG)	GM
Turning circle test	+35° STBD turning -35° PORT turning	0°	0.30m 0.60m 0.92m
		-0.38° (+2.7m) 0°	0.60m
		+0.38° (-2.7m)	
Zigzag manoeuvring test	+20/20 STBD zigzag -20/20 PORT zigzag	0°	0.30m 0.60m 0.92m
		-0.38° (+2.7m) 0°	0.60m
		+0.38° (-2.7m)	
	+10/10 STBD zigzag -10/10 PORT zigzag	0°	0.30m 0.60m 0.92m

## 3. 시험 결과 및 고찰

세 가지 GM 및 종경사 조건에 대하여 KCS 선형의 선회, 지그재그 자유항주모형시험을 Fig. 3과 같은 좌표계로 수행하였다. 그림에서와 같이 타각의 회전방향은 선체와 반대방향을 양의 부호로 설정하였고, 선미트림의 경우 양의 값을 갖는다.

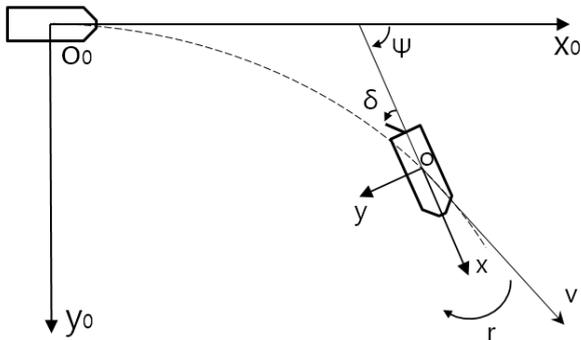


Fig. 3 Coordinate systems for FRMT

### 3.1 선회시험 및 지그재그시험 결과

세 가지 GM 및 종경사 조건에서 KCS 모형선의 좌우현 선회 시험 및 지그재그시험 결과는 Table 3-12와 같다. 선회궤적은 모형선의 길이로 무차원화 되었고, 운항데이터는 모두 모형선 축척비 그대로 표현하였다. 단, 광자이로에 취득한 선수동요각속도 및 선수동요각 데이터는 이전 연구결과 (Yun et al., 2018)에서 추가적으로 지구자전 효과를 고려하여 보정하였고, 선회궤적 결과는 세 바퀴 이상의 선회궤적을 이용하여 외력의 영향을 보정하였다 (Kim et al., 2001).

Table 3 +35° STBD turning indices with GM

GM(m)		0.30	0.60	0.92
Index	Advance(L)	2.88	2.99	3.00
	Time to reach Ad(s)	9.04	9.32	9.52
	Tactical diameter(L)	2.41	2.83	2.94
	Time to reach TD(s)	17.80	17.84	18.48
	Maximum yaw rate(°/s)	14.48	14.33	13.02
	Final yaw rate(°/s)	9.77	10.06	9.47
	Maximum roll angle(°)	-25.20	-16.00	-10.52
	Final roll angle(°)	-10.87	-5.80	-3.53
	Final speed(m/s)	0.71	0.80	0.78

Table 4 -35° PORT turning indices with GM

GM(m)		0.30	0.60	0.92
Index	Advance(L)	2.76	2.99	2.95
	Time to reach Ad(s)	8.88	9.44	9.32
	Tactical diameter(L)	2.45	2.75	2.78
	Time to reach TD(s)	17.44	18.00	18.08
	Maximum yaw rate(°/s)	-14.48	-14.31	-12.95
	Final yaw rate(°/s)	-9.92	-9.74	-9.64
	Maximum roll angle(°)	24.19	13.95	9.60
	Final roll angle(°)	6.82	4.04	2.79
	Final speed(m/s)	0.69	0.71	0.72

Table 5 +20/20 STBD zigzag indices with GM

GM(m)		0.30	0.60	0.92
Index	First overshoot angle(°)	29.70	23.05	20.36
	Time to reach first OA(s)	9.04	7.96	7.92
	Second overshoot angle(°)	27.85	19.92	19.62
	Time to reach second OA(s)	22.44	20.16	19.84

Table 6 -20/20 PORT zigzag indices with GM

GM(m)		0.30	0.60	0.92
Index	First overshoot angle(°)	32.52	23.19	20.68
	Time to reach first OA(s)	9.68	8.00	7.84
	Second overshoot angle(°)	28.34	21.67	20.10
	Time to reach second OA(s)	24.00	20.80	20.16

Table 7 +10/10 STBD zigzag indices with GM

GM(m)		0.30	0.60	0.92
Index	First overshoot angle(°)	13.90	12.46	10.82
	Time to reach first OA(s)	8.36	8.12	7.44
	Second overshoot angle(°)	25.61	19.95	16.91
	Time to reach second OA(s)	21.80	20.80	19.72

Table 8 +35° STBD turning indices with trim

Trim angle(°)		-0.38	0.0	+0.38
Index	Advance(L)	2.84	2.99	2.92
	Time to reach Ad(s)	8.96	9.32	9.64
	Tactical diameter(L)	2.59	2.83	3.03
	Time to reach TD(s)	17.96	17.84	18.60
	Maximum yaw rate(°/s)	14.48	14.33	12.92
	Final yaw rate(°/s)	9.42	10.06	9.56
	Maximum roll angle(°)	-17.98	-16.00	-13.87
	Final roll angle(°)	-5.78	-5.80	-4.52
	Final speed(m/s)	0.72	0.80	0.79

Table 9 -35° PORT turning indices with trim

Trim angle(°)		-0.38	0.0	+0.38
Index	Advance(L)	2.86	2.99	3.02
	Time to reach Ad(s)	8.72	9.44	9.68
	Tactical diameter(L)	2.35	2.75	2.79
	Time to reach TD(s)	17.32	18.00	18.76
	Maximum yaw rate(°/s)	-15.65	-14.31	-12.82
	Final yaw rate(°/s)	-9.68	-9.74	-9.41
	Maximum roll angle(°)	19.66	13.95	13.23
	Final roll angle(°)	4.84	4.04	3.13
	Final speed(m/s)	0.67	0.71	0.72

Table 10 +20/20 STBD zigzag indices with trim

Trim angle(°)		-0.38	0.0	+0.38
Index	First overshoot angle(°)	28.86	23.05	19.09
	Time to reach first OA(s)	9.32	7.96	7.80
	Second overshoot angle(°)	27.47	19.92	18.94
	Time to reach second OA(s)	22.80	20.16	19.28

Table 11 -20/20 PORT zigzag indices with trim

Trim angle(°)		-0.38	0.0	+0.38
Index	First overshoot angle(°)	31.41	23.19	20.37
	Time to reach first OA(s)	9.40	8.00	7.80
	Second overshoot angle(°)	31.22	21.67	18.86
	Time to reach second OA(s)	23.72	20.80	19.88

Table 12 -10/10 PORT zigzag indices with GM

GM(m)		0.30	0.60	0.92
Index	First overshoot angle(°)	13.30	13.01	11.33
	Time to reach first OA(s)	8.12	7.68	7.60
	Second overshoot angle(°)	32.99	20.08	16.94
	Time to reach second OA(s)	22.80	20.96	20.20

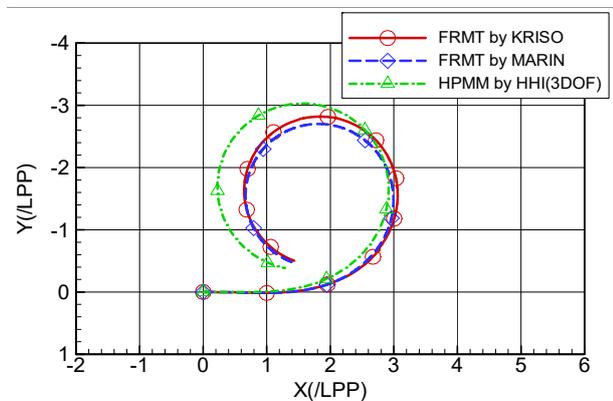


Fig. 4 Comparison of PORT turning circle tests

자유항주모형시험 결과 중, 기준 정상 조건에 대한 좌현 선회 시험 결과를 Fig. 4와 같이 타기관 의 시험 및 시뮬레이션 결과와 비교하여 그 타당성을 먼저 검토하였다. 좌현 선회시험 결과를 서로 비교해보면, 본 연구에서 취득한 데이터의 선회 경향과 그 크기의 유사함을 확인할 수 있다.

또한, Table 3-12의 조종성능지표 중 좌우현 결과를 서로 비교하면, 우현 선회시험에서 전술직경이 조금 더 크게 나타나고, 우현 지그재그시험에서 첫 번째 오버슈트각이 조금 더 작게 나타난 것을 확인할 수 있다. 이와 같은 결과는 Fig. 4에서 활용한 KCS 선형의 가상구속모형시험 결과 (Sung & Park, 2015) 중 선회시뮬레이션 비교결과와 SIMMAN (SIMMAN, 2020) 선회시험

공개결과에서도 동일하게 확인할 수 있다.

### 3.2 시험 결과 고찰

Fig. 6과 Fig. 7은 GM 변경 및 종경사 변경에 따른 35도 선회 성능지표 결과이다. 먼저 GM 변경에 따른 선회성능 변화를 단순히 살펴보면, GM 값이 커질수록 선회 중 횡경사 및 최대 선수동요각속도가 작아지는 것을 모두 볼 수 있고, 결과적으로 전진거리 및 전술직경이 커지는 것을 각각 확인할 수 있다. 이러한 경향은 Fukui et al. (2015)가 제시한 선회시험 궤적의 결과와 동일하다. 또한 종경사 변경에 따른 선회성능의 경우, 선미트림의 경우 전진거리 및 전술직경이 커지고, 선수트림의 경우 전진거리 및 전술직경이 작아지는 것을 볼 수 있다.

GM 및 종경사 조건 변경에 따른 선회성능 결과는 유사한 양상을 보여주고 있는데, 전술직경이 전진거리보다 조건 변경에 영향을 더 받은 것을 그래프의 기울기에서 모두 확인할 수 있다. 이는 모형선의 선수동요각속도 증가 및 전진속도 감소에 따른 누적량이 그 선회궤적으로 표현되는 점을 고려할 때, 선수동요각 180도에서의 성능지표인 전술직경에서 영향을 더 받은 것으로 확인되고, 이는 횡경사각에 따른 조종성능변화에 대한 연구 (Yun et al., 2019) 결과와 동일한 양상을 보여준다. 또한, 선회성능지표 그래프가 선형으로 나타나지 않고 있는데, GM이 작거나 선수트림과 같이 불안정한 영역에서 선회 조종성능지표의 변화가 더 크게 나타난 것을 확인할 수 있다. 시험 조건 중 전술직경이 최대로 감소한 경우, GM 0.30m 조건에서 그 값이 기준 정상 조건 대비 약 87%로 감소하였음을 알 수 있다.

시험 조건에서 구현된 종경사의 변화량이 0.38도의 미소각임을 감안할 때 종경사 각도에 의한 선회성능의 변화는 상대적으로 큰 것으로 판단된다. 이와 같은 결과는 Fig. 5에서 보듯이 KCS 선형의 경우 작은 선수트림에 의해서도 선미 수선면 면적이 크게 줄어들어 선박의 직진 안정성이 나빠진 점과, Table 13과 같이 종경사 변화에 의해 새롭게 계산된 메타센터 값이 변화된 점이 복합적으로 작용하여 발생한 것으로 판단된다.

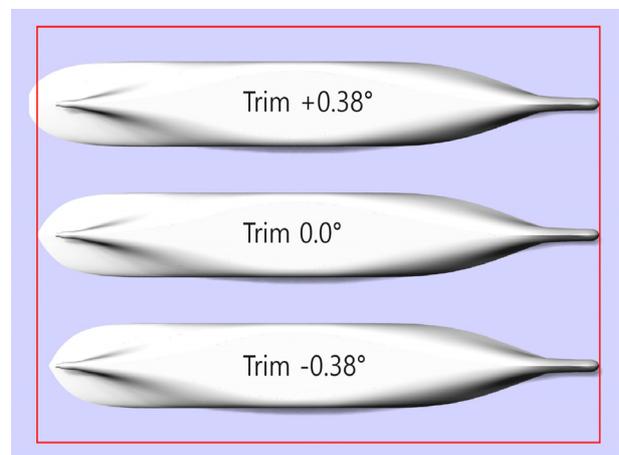


Fig. 5 Waterplanes of KCS in trim conditions

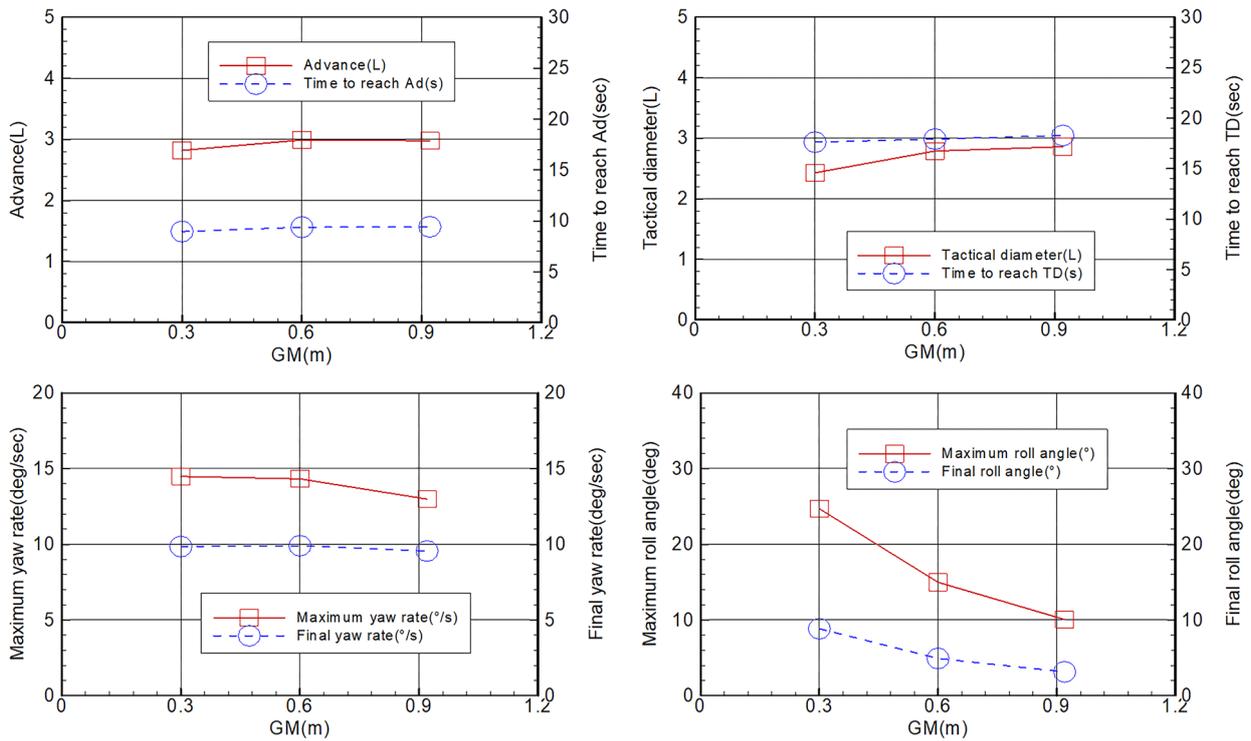


Fig. 6 35° turning tests indices(GM)

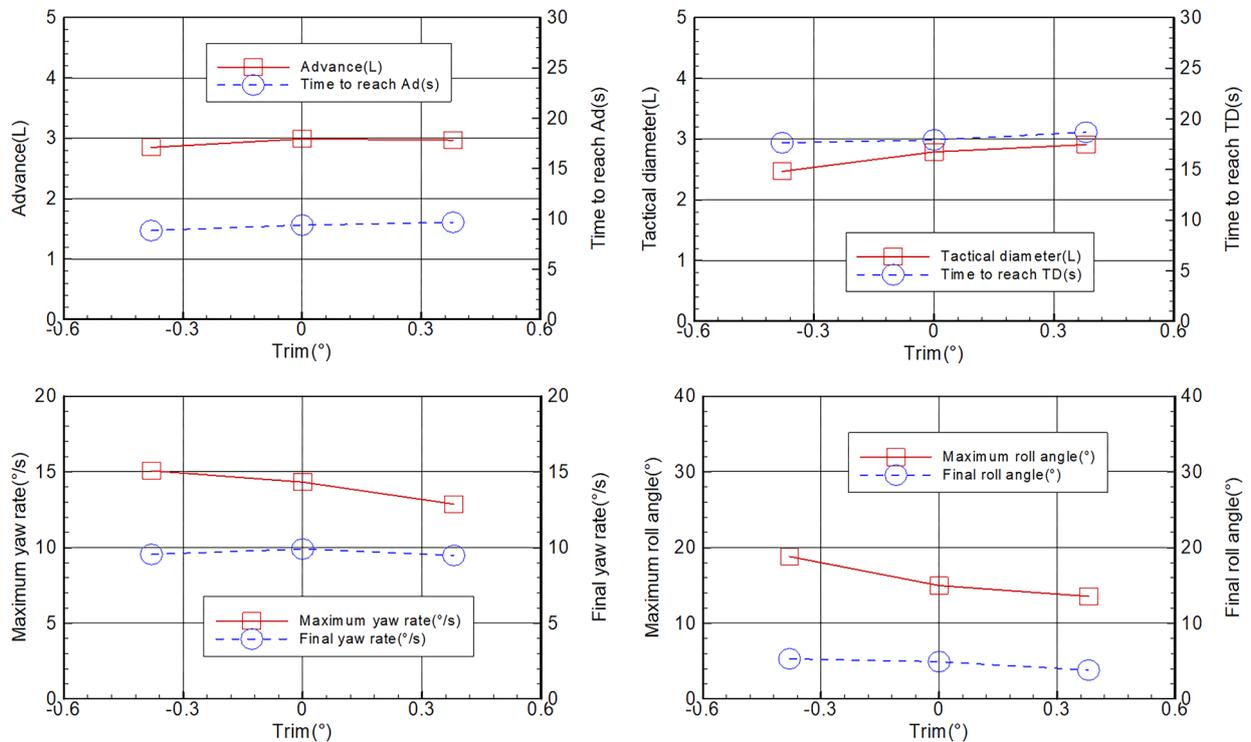


Fig. 7 35° turning tests indices(trim)

Table 13 GM values with trim conditions

Trim angle(°)	-0.38	0	0.38
GM(m)	0.349	0.60	0.883
Waterplane area(m <sup>2</sup> )	1.389	1.419	1.448

이와 같은 조종성능 변화는 Fig. 8과 Fig. 9의 선수동요각속도 및 횡동요각 결과에서 다시 한번 확인할 수 있다. 시험 조건별 횡동요각을 살펴보면, GM 값이 가장 작은 GM 0.30m 시험 조건에서 최대 횡동요각이 나타나고, 최종 횡동요각의 크기가 가장

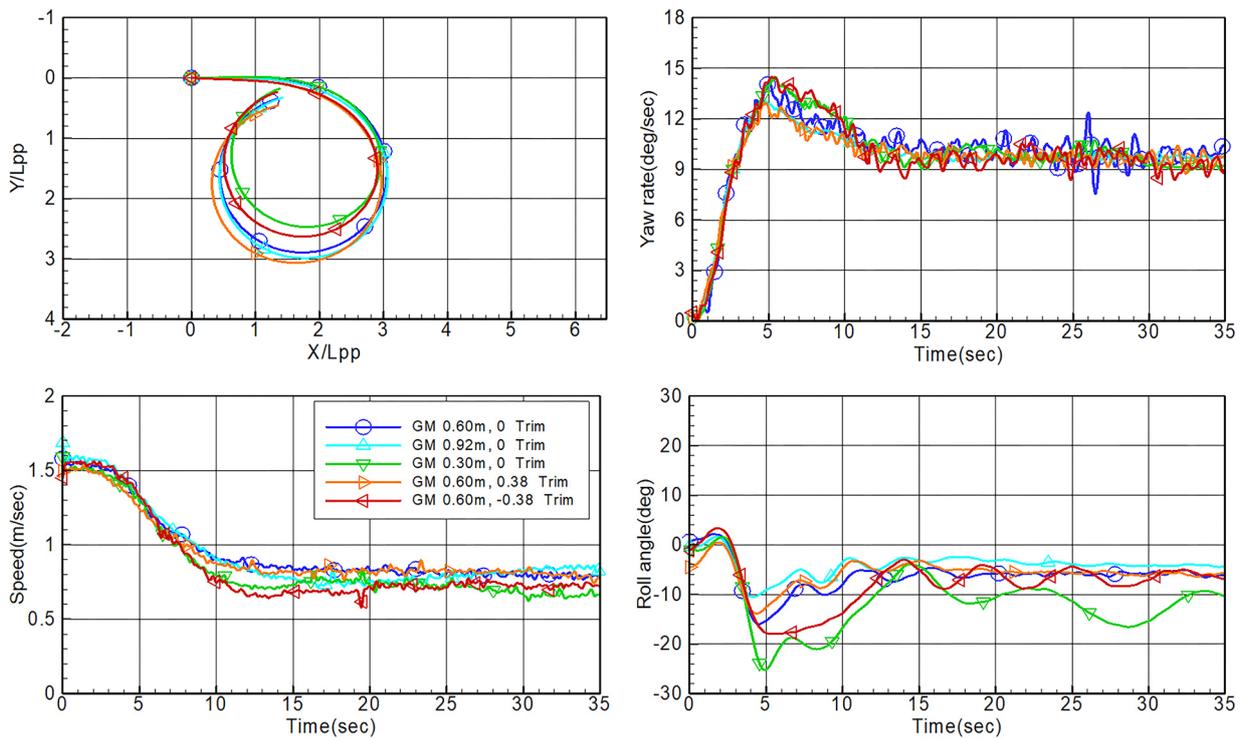


Fig. 8 +35° STBD turning tests data(GM & trim)

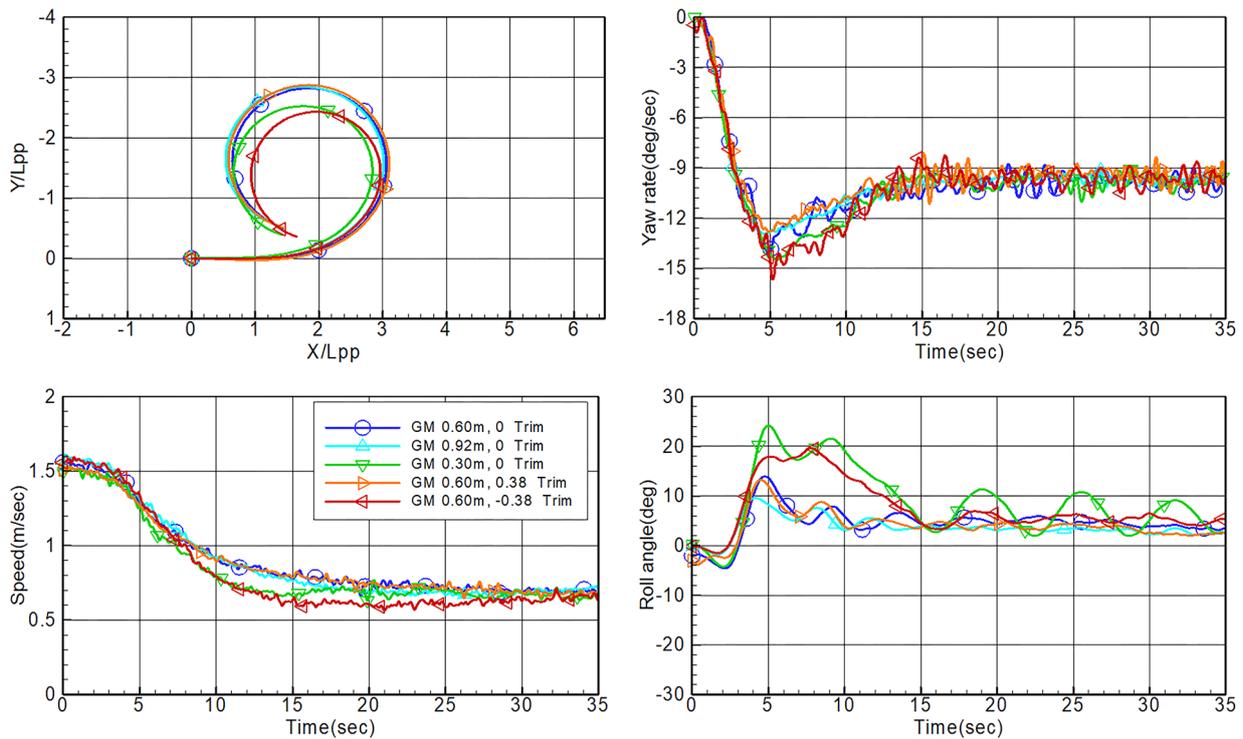


Fig. 9 -35° PORT turning tests data(GM & trim)

큰 것을 볼 수 있다. 반면 선수동요각속도의 경우, GM 0.30m 조건에서 최종 선수동요각속도의 크기가 가장 큰 것을 볼 수 있지만, 최대 선수동요각속도는 선수트림 조건에서 나타난다. 이는 선수트림 조건에서의 나빠진 직진 안정성이 선회 초기 시에 나타나는 최대 선수동요각속도에 영향을 준 것으로 판단할 수 있다.

Figs. 10~12는 GM 변경 및 종경사 변경에 따른 지그재그성은 지표 결과이다. GM 값이 커질수록 지그재그 중 횡경사 및 최대 선수동요각속도가 작아지는 것을 모두 볼 수 있고, 결과적으로 1차, 2차 오버슈트각이 작아지는 것을 각각 확인할 수 있다. 선미트림의 경우 오버슈트각이 작아지고, 선수트림의 경우 오버슈트

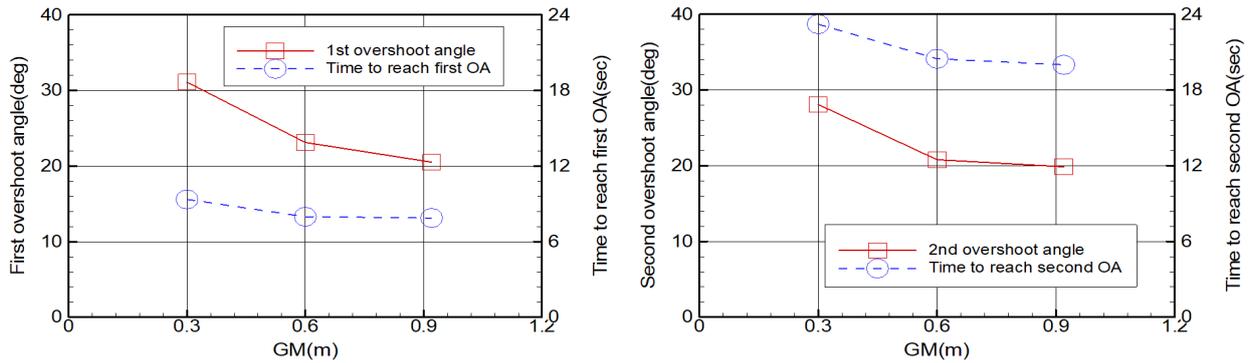


Fig. 10 20/20 zigzag tests indices(GM)

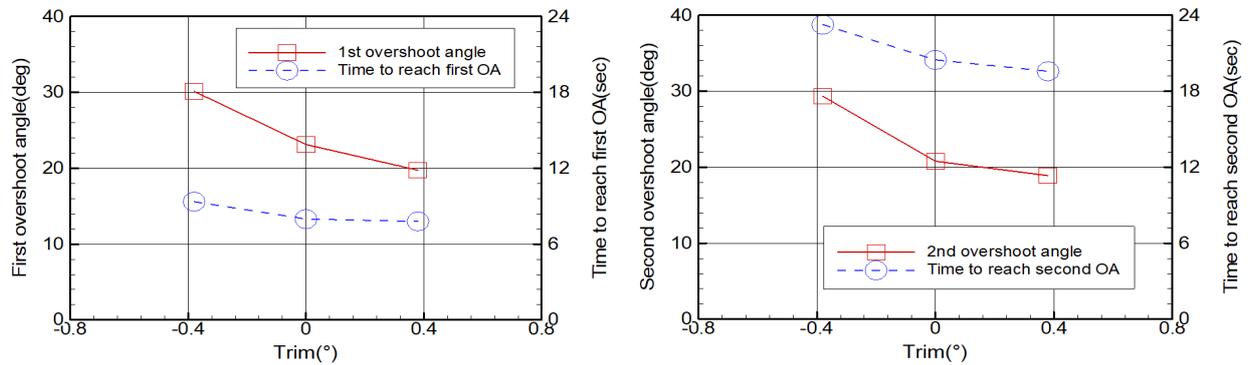


Fig. 11 20/20 zigzag tests indices(trim)

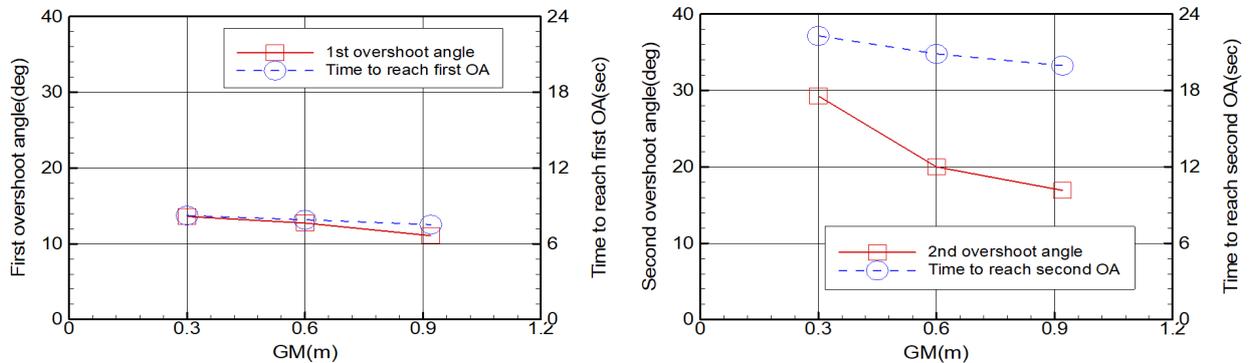


Fig. 12 10/10 zigzag tests indices(GM)

각이 커지는 것을 1차, 2차 오버슈트각 변화에서 확인할 수 있다. 또한, 1차 및 2차 오버슈트각의 기울기를 살펴보면 선회시험과 동일하게 GM이 작거나 선수트림과 같이 불안정한 영역에서 오버슈트각 크기의 변화가 더 큰 것을 확인할 수 있다. 시험 조건 중 1차 오버슈트각이 최대로 증가한 경우, GM 0.30m 조건에서 그 값이 기준 정상 조건 대비 약 135%로 증가하였음을 알 수 있다.

GM 변경에 따른 10/10 지그재그성능지표 결과를 Fig. 12에서 살펴보면, 2차 오버슈트각은 Fig. 10의 20/20 지그재그성능지표 결과와 유사하게 나타났지만, 1차 오버슈트각은 GM 변경에 따라 상대적으로 크게 변하지 않았다. 이를 위해 해당 시험의 횡동요각 결과(Fig. 15, 16)를 살펴보면, 초기 10도의 미소타각에는 횡동요각이 15도 내외로 발생하였고, 두 번째 반대타각을 사용하면서 20도 내외의 큰 횡동요각이 발생한 점을 확인할 수 있다. 20/20

재그재그시험에서의 첫 번째 두 번째 타각사용에 따른 횡동요각이 20도 내외임을 고려해보면(Fig. 13, 14) 횡동요가 선박의 변침 성능에 미치는 영향이 상당히 큰 것을 확인할 수 있다.

특히 이와 같은 결과는 해양사고 발생과 관련하여 생각해볼 때, 선박 운항자에게 매우 중요한 의미를 갖는다. 즉 GM 값이 작은 불안정한 선박의 경우, 10도 내외의 미소타각 사용에 대하여 선박의 초기 변침성능에 문제가 없다는 오해를 불러일으킬 수 있다는 것이다. 그러나 본 시험결과에서 확인할 수 있듯이, GM 값이 작으면, 미소타각 사용에도 2차 오버슈트각은 크게 증가할 수 있고, 횡동요각이 크게 증가할 수 있다. 따라서, 선박 운항자는 GM 값이 작아 횡동요각이 크게 발생할 수 있는 선박에 대해서는 이러한 조종성능 변화 가능성을 충분히 이해하고 인지해야 할 필요가 있다.

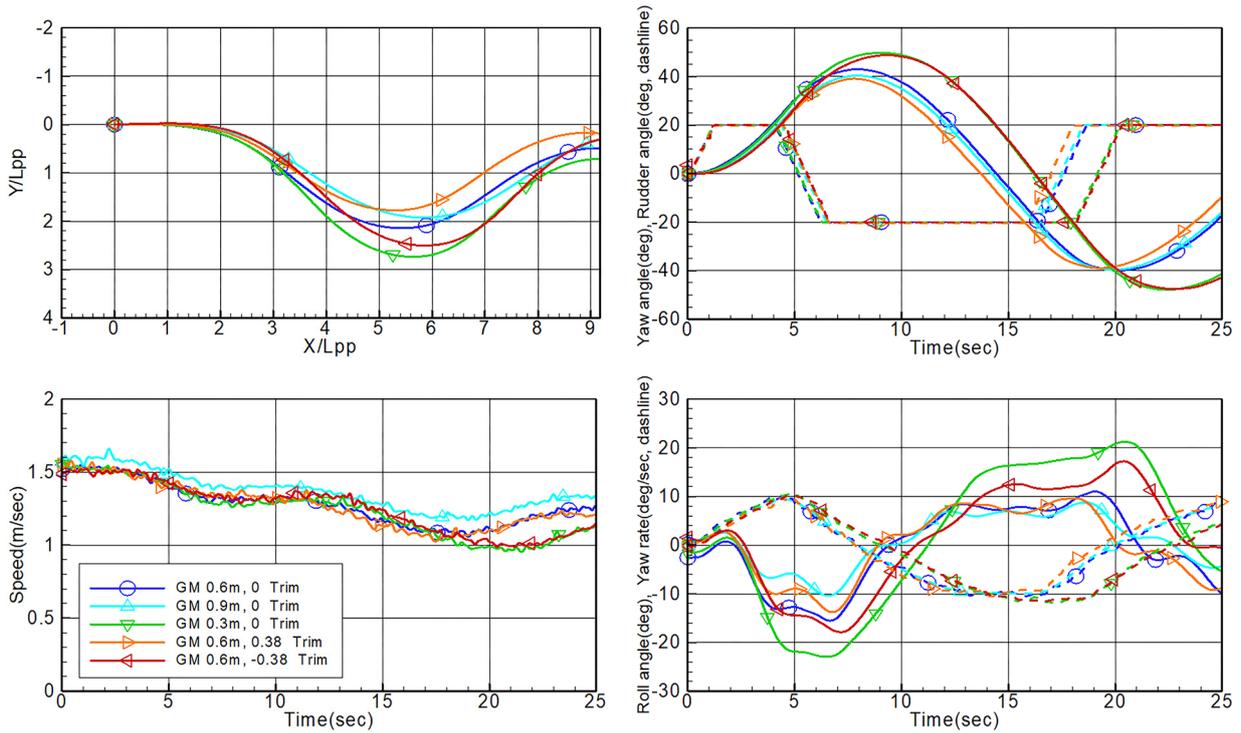


Fig. 13 +20/20 STBD zigzag tests data(GM & trim)

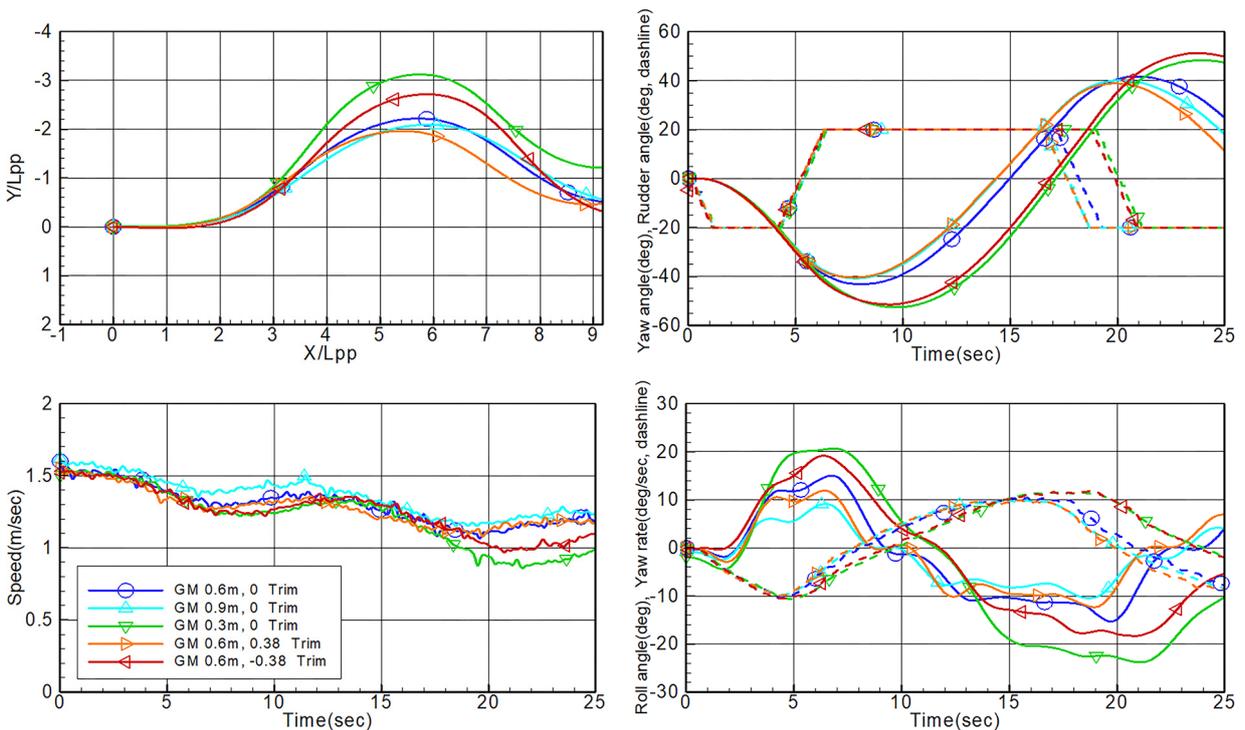


Fig. 14 -20/20 PORT zigzag tests data(GM & trim)

### 3.4 무게중심 변경에 대한 조종성능지표 민감도 고찰

KCS 선형의 무게중심 위치와 그에 따른 조종성능 변화 관계성을 확인하기 위하여 세 가지 방향 무게중심 변경과 그에 따른 35도 선회성능지표, 20/20 지그재그성능지표 변화를 계산하였

다. X축 및 Z축 방향 무게중심 위치 변경에 따른 조종성능지표는 좌우현 평균값을 계산에 활용하였다(Fig. 17, 18).

선형 연구 (Yun & Yeo, 2019)에서 제시한 Y축 방향 무게중심 위치 변경에 따른 조종성능지표는 그 영향이 크게 나타난 우현방향 시험 결과값을 계산에 활용하였다.

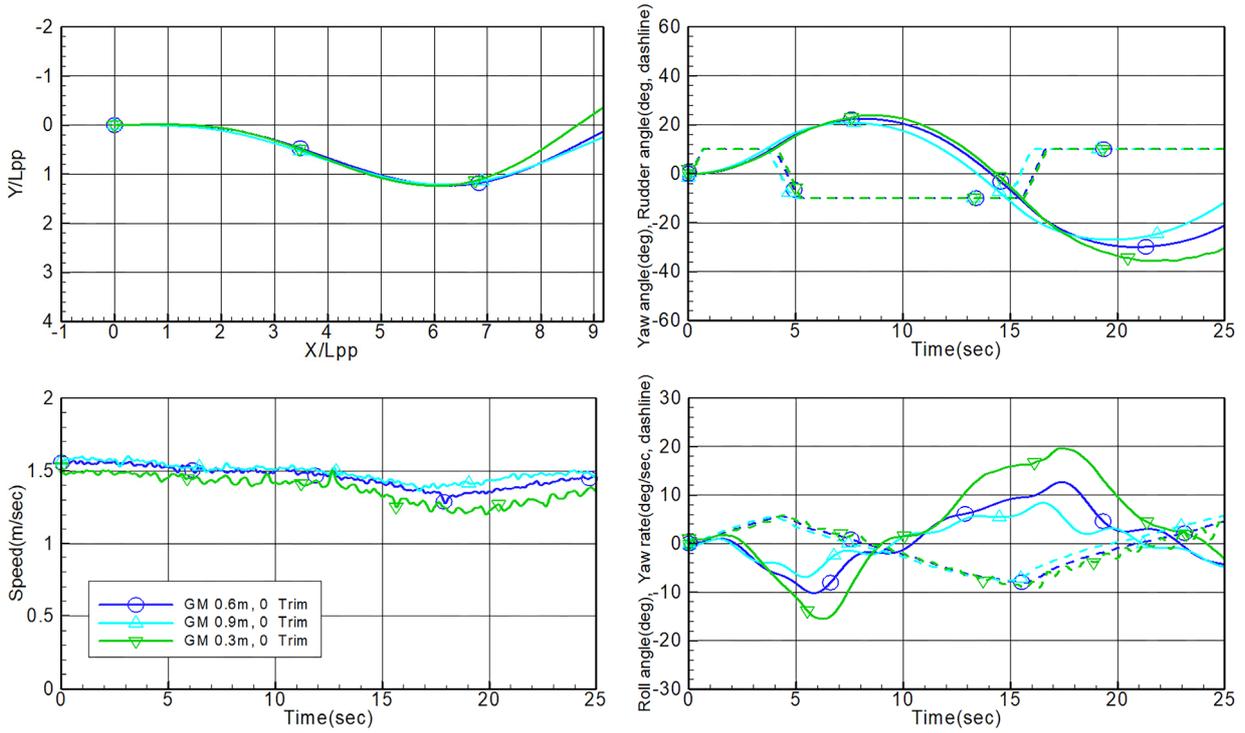


Fig. 15 +10/10 STBD zigzag tests data(GM)

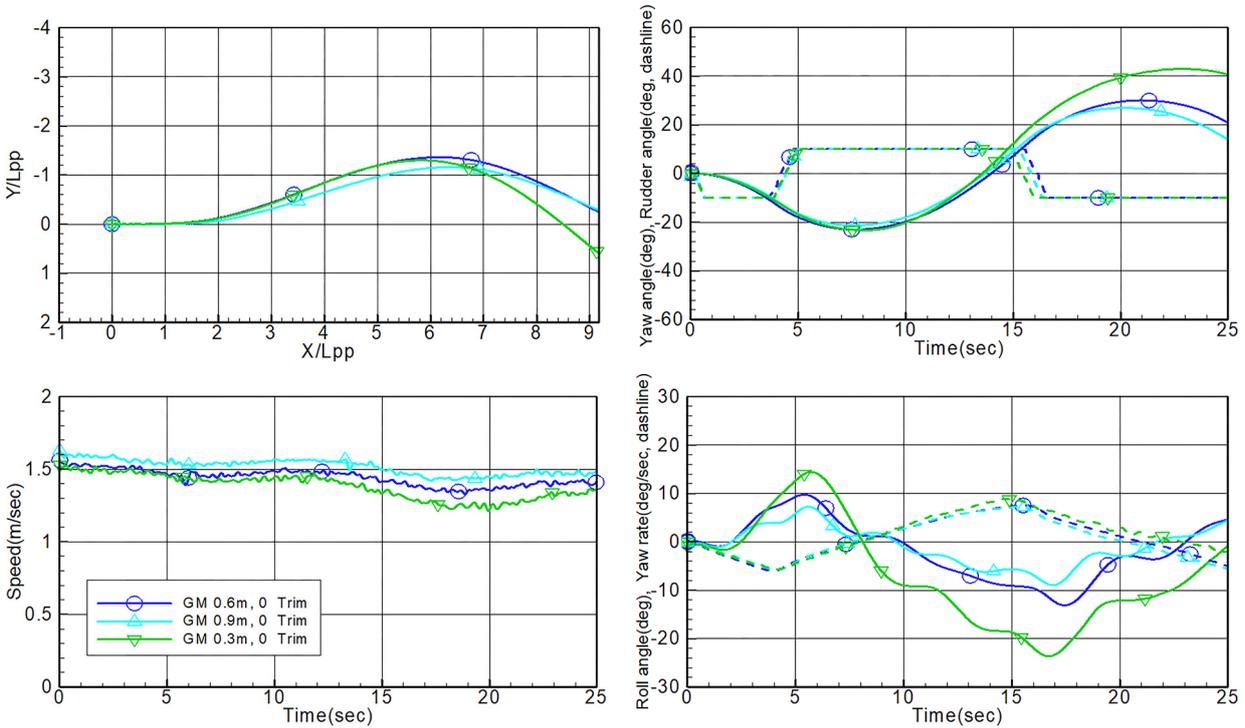


Fig. 16 -10/10 PORT zigzag tests data(GM)

좌표계 방향(Fig. 2)에 따라 무게중심 변경량은 기준대비 떨어진 거리를 모형선 길이로 무차원화하였고, 선회성능 및 20/20 지그재그 성능지표는 각각 모형선 길이로 무차원화하거나, 라디안 단위로 표기하였다.

Table 14 Sensitivity indices of CG positions for KCS

MI		Ad	TD	1 <sup>st</sup> OA	2 <sup>nd</sup> OA
SI	SI <sub>CGx</sub>	-5.08	-18.64	7.71	7.71
	SI <sub>CGy</sub> (STBD)	392.76	930.93	-293.82	192.05
	SI <sub>CGz</sub>	58.62	158.30	-68.23	-52.59

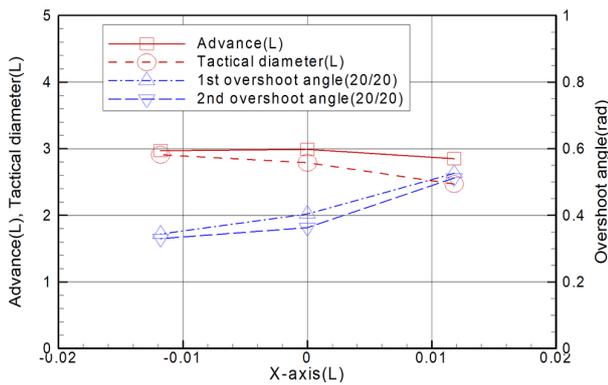


Fig. 17 X-axis CG variation

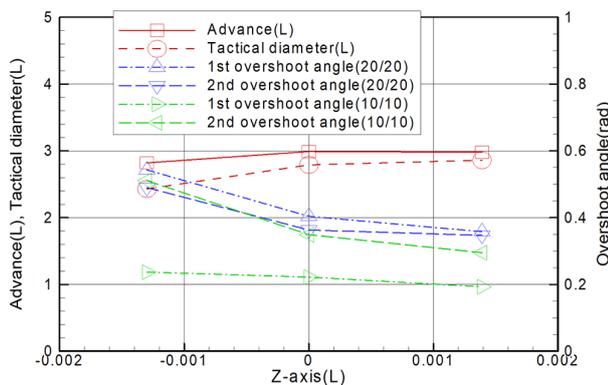


Fig. 18 Z-axis CG variation

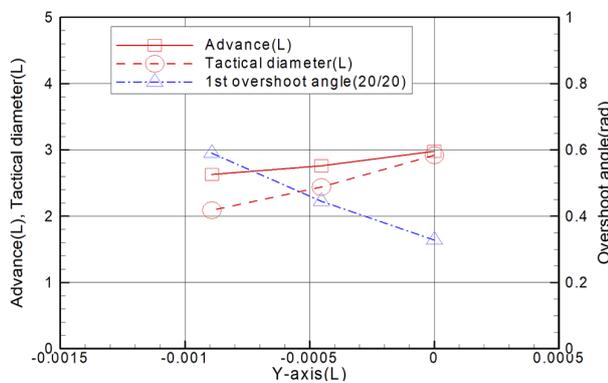


Fig. 19 Y-axis CG variation(STBD, 20knots)

민감도 지수는 무게중심 위치 변경량이 최종적으로 조종성능 지표에 전파되어 나타난다고 판단하고, 이를 식 (1)과 같이 1차 선형계수로 나타내었다.

$$SI_{CG_{xyz}} = \frac{\partial(MI_{xyz} - MI_O)}{\partial(CG_{xyz} - CG_O)} \quad (1)$$

여기서,  $SI_{CG}$ 는 무게중심 위치 변경에 따른 조종성능지표의 민감도지수이고,  $MI$ 는 조종성능지표,  $CG$ 는 무게중심위치, 하첨자  $xyz$ 는 축, 하첨자  $O$ 는 기준 정상 조건을 의미한다. 시험수행 조건인  $CG_{xyz}$ 의 수가 해당 축에서 3개 이상인 경우, 최소제곱법을 이용하여 1차 선형화하였다.

각 축방향의 무게중심 위치 변경에 따른 선형화된 민감도지수는 Table 14와 같다.

표에서 확인할 수 있듯이, KCS 선형의 경우 세 가지 방향에 대한 무게중심 위치 변경 대비 조종성능 변화 민감도 지수는 Y축 횡방향 지수가 가장 크게 나타났다. KCS 선형의 경우, 기준 GM 값이 실선기준 0.6m로 매우 작기 때문에 작은 횡방향 무게중심 위치변화에도 초기 횡경사각이 크게 발생하기 때문인 것으로 판단된다. 따라서, GM 값이 작은 선박의 경우, 횡방향, 상하방향, 종방향 순으로 무게중심의 위치변화에 따른 선박의 조종성능 변화 정도를 다르게 이해할 필요가 있다. 또한 KCS 선형과 같이 횡방향 민감도지수가 크다면, 종방향 및 상하방향 무게중심 변경에 따라 운항 중 발생가능한 선박의 동적인 횡동요각 변화 역시 선박의 조종성능에 추가적으로 영향을 미치고 있음을 유추할 수 있다.

## 4. 결론

본 논문에서는 KCS 모형선에 대하여 상하방향(GM) 및 종방향(트림) 무게중심 변화 조건에서 자유항주모형시험을 수행하고 그 결과를 분석하여, 세 가지 무게중심 변화에 따른 선박의 조종성능 변화를 종합적으로 확인하였다.

그 결과, 선박의 GM 값이 작아지거나 선수트림이 발생한 경우, 선회시 전진거리 및 전술직경이 감소하고, 변침시 오버슈트 각이 증가하는 것을 확인하였고, 이러한 불안정한 영역에서 선회 및 지그재그성능지표의 변화가 더 크게 나타난 것을 확인하였다. 특히 GM 변경에 따른 10/10 지그재그시험의 1차, 2차 오버슈트 각 결과로부터 미소타각 사용에 대한 선박의 조종성능 변화를 운항자 관점에서 살펴보았다.

또한, 무게중심의 각 축방향 변경에 따른 조종성능 변화의 민감도 지수를 확인하고 비교하여, 설계 GM 값이 작은 KCS 선형의 경우 선형 연구에서 수행된 횡방향 무게중심 변화가 조종성능에 가장 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다. 이를 통하여 운항 중 발생가능한 선박의 횡동요가 조종성능에 큰 영향을 미치는 것을 확인하였다.

계산된 민감도 지수는, 비록 큰 무게중심 변화량을 기준으로 계산되었지만, 자유항주모형시험의 불확실성 해석 과정 중 모델 셋업과 관련된 해석에 필요한 기초자료로 활용될 수 있을 것으로 판단된다. 특히, 본 연구에서는 KCS 선형에 대하여 24노트 대응 속도에서의 자유항주모형시험을 통하여 정량적인 조종성능지표를 획득하고 제시하였다. 이러한 정량적 수치는 시뮬레이션 결과 검증 등에 필요한 비교 자료로 사용될 수 있다.

향후 연구사항으로, 쌍축선에 대한 횡방향 무게중심 변화 조종시험을 통하여 프로펠러 비대칭력에 의해 추가적으로 발생할 수 있는 조종성능 변화에 대한 후속 연구를 수행할 것이다. 또한 자유항주모형시험의 중요한 불확실성 요소 중 하나인, 시험과정 중 발생 가능한 요인들에 대하여 불확실성 해석을 수행할 예정이다.

## 후 기

본 논문은 선박해양플랜트연구소의 주요사업인 “해양사고 재현 및 분석 시뮬레이션 핵심기술 개발 - 2단계(3/3)”, “첨단운송체의 항내 운항성능향상을 위한 축척효과를 고려한 운항제어원천기술 개발(2/5)”에 의해 수행되었습니다(PES3100, PES3410).

## References

Choe, B.R. & Im, N.K., 2016. A study on the relationship between ship stability and maneuverability using free running model experiments. *Journal of navigation and port research*, 40(6), pp.353-360.

Fukui, Y., Yoshimura, Y., Yano H. & Kondo, M., 2015. Investigation of effect of roll motion on manoeuvrability using 4-DOF mathematical model. *Proceedings of the International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation*, Newcastle, UK, 8-11 September 2015.

Im, N., Kweon, S. & Kim, S.E., 2005. The study on the effect of loading condition on ship manoeuvrability. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 42(2), pp.105-112.

Korean Maritime Safety Tribunal, 2014. *Safety investigation report*. KMST Report.

Korean Maritime Safety Tribunal, 2020, *Statistics*, URL: <https://www.kmst.go.kr> [Accessed 24 April 2020].

Kim, H.S., Park, K.I. & Ha, M.K., 2001. Computerized measurement system of ship speed and maneuvering performance in sea trial. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 38(3), pp.54-61.

Kim, Y.G., Yeo, D.J., Son, N.S., Kim, S.Y., Yun, K. & Oh, B.I., 2011. Prediction of mManeuverability of KCS with 4 degrees of freedom. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 48(3), pp.267-274.

SIMMAN, 2020, *Instructions to participants*, URL: <http://www.simman2020.kr> [Accessed 31 March 2020].

Standards for ship manoeuvrability, IMO Resolution MSC.137(76) (adopted on 4 December 2002).

Sung, Y.J. & Park, S.H., 2015. Prediction of ship manoeuvring performance based on virtual captive model tests. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 52(5), pp.407-417.

Yun, K. & Yeo, D.J., 2019. An experimental study on the manoeuvrability of a ship in heeled condition. *Journal of the Society of Naval Architects of Korea*, 56(3), pp.273-280.

Yun, K., Yeo, D.J. & Kim, D.J., 2018. An experimental study on the turning characteristics of KCS with CG variations. *Proceedings of the International Conference on Ship Manoeuvrability and Maritime Simulation*, Halifax, Canada, 12-16 August 2018.

