

구속모형실험을 통한 부선의 조종성능 추정

† 윤근항 · 김연규*

† 한국해양과학기술원 선박해양플랜트연구소 선임연구원, * 책임연구원

Study on the Maneuverability of Barge by Captive Model Test

† Kun-Hang Yun · Yeon-Gyu Kim*

†,* Korea Institute of Ocean Science & Technology, Daejeon 305-343, Korea

요 약 : 부선이 선미 예인되는 상황에서의 예부선 통합시뮬레이션을 수행하기 위하여, 본 연구에서는 부선 단독 조종성능 추정을 위한 구속모형실험을 수행하였다. 구속모형실험결과로부터 부선 실선의 저항성능을 추정하였고, 도출된 유체력 미계수를 이용하여 선회시뮬레이션을 수행하였다. 부선의 선회시뮬레이션을 위해 부선에 작용하는 예인력의 힘과 방향을 단순히 모델링하고, 예인줄 방향각 변화에 따른 선회시뮬레이션 결과 비교와 실선시운전시험결과와의 선회직경 비교를 통하여 수학모델을 검증하였다. 그 결과 예인줄 방향각이 커질수록 선회직경이 작아지는 정성적인 경향을 확인하였고, 실선시운전결과와 비교 시 배수량 차이 등에 의하여 선회직경이 작게 추정되는 결과를 확인하였다.

핵심용어 : 부선, 예부선, 구속모형실험, 저항, 조종

Abstract : For the tug-barge simulation, captive model test(Horizontal Planar Motion Mechanism) of the barge model is carried out. From the result of HPMM test, a resistance coefficient, maneuvering coefficients of the barge are obtained. A mathematical model of the barge is validated by turning simulations with different angle of towing line applied a simple towing line model and the tactical diameter compared to sea trial data. As a result, the tactical diameter of the barge is smaller as the angle of towing line is bigger. The tactical diameter from simulations is smaller than that from sea trial data, may be caused by increased displacement of the barge.

Key words : Barge, Tug-Barge, HPMM, Resistance, Maneuverability

1. 서 론

부선은 자력항행능력이 없어 일반적으로 접현예인, 압항예인, 선미예인 방식으로 운항된다. 이중 선미예인 방식으로 운항되는 부선은 예선의 예인력을 예인줄을 통하여 간접적으로 전달받기 때문에 부선 자체의 조종성능은 예선의 조종성능과 더불어 예부선의 안전한 운항과 밀접한 관련이 있다. 즉, 예부선의 안전한 운항성능을 확보하기 위해서는 예선, 부선, 예인줄의 3가지 요소를 동시에 고려하여 연구해야 하며, (여 등, 2009) 이를 위해서는 예부선 각각의 단독 운항특성을 먼저 확인하는 것이 필요하다.

부선의 단독 운항특성과 관련된 연구로, 이(2010)는 부선에 작용하는 저항을 추정하기 위하여 모형선을 이용하여 저항실험 및 수치해석을 수행하였고, 안(2010)은 파랑 중 부선에 작용하는 저항을 수치해석을 통하여 계산하고 실험결과와 비교하였다. 또한 유(2011)는 선미예인 시 부선의 회두운동을 최소화하기 위하여 예인줄의 체결방식에 따른 부선의 운항특성을 모형실험을 통하여 확인하였다.

본 연구에서는 정수 중에서의 부선의 저항성능 추정뿐만 아니라 조종성능 추정을 위하여 구속모형실험을 수행하였다. 구속모형실험결과에서 도출된 유체력 미계수로 부터 선회시뮬레이션을 수행하여 그 결과를 검토하였다.

2. 부선의 구속모형실험

부선의 구속모형실험은 부선의 하부선형 및 운동을 고려하여 횡동요(Roll), 종동요(Pitch), 상하동요(Heave)의 운동을 제외한 전후동요(Surge), 좌우동요(Sway), 선수동요(Yaw)의 3 자유도 운동에 대하여 수행되었다.

2.1 부선모델

구속모형실험에 사용된 부선모형은 실선박의 1/9크기 모델로 상세제원은 Table 1과 같으며, 만재상태 조건에 해당된다. 또한 선미에는 2개의 부가물(skeg)이 부착되어 있다.

† 교신저자 : 연희원, khyun@kiost.ac 042)866-3650

* 종신회원, ygkim@kiost.ac 042)866-3642

Table 1 Principal particulars of barge, barge model

	실선	모형선(1/9)
Displacement(ton)	1737.8	2.384
Length(m)	45	5
Breath(m)	15	1.667
Draft(m)	2.7	0.3
Operation Speed	5(knots)	0.857(m/s)

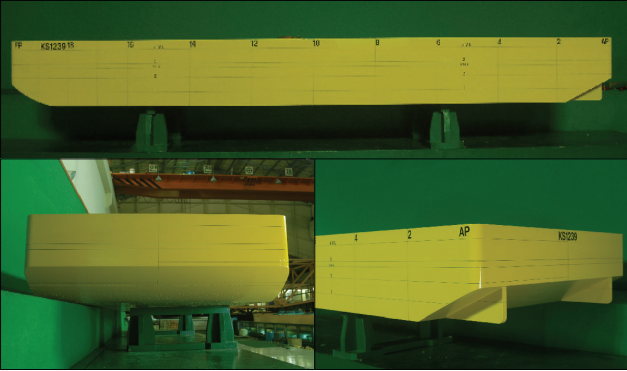


Fig. 1 Figure of barge model

2.2 수학적모형

Fig. 2와 같은 선체고정좌표계에서 3자유도 운동에 대한 부선의 수학적모형은 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned}
 m(\dot{u}-rv-x_G\dot{\psi}^2) &= X_H+X_{TL} & (1) \\
 m(\dot{v}+ru+x_G\dot{\psi}^2) &= Y_H+Y_{TL} \\
 I_{ZZ}\dot{r}+mx_G(\dot{v}+ru) &= N_H+N_{TL}
 \end{aligned}$$

여기서 하첨자 H 는 선체에 의한 유체력을 나타내고, TL 은 예인줄에 의한 힘을 나타낸다. m, x_G, u, v, r, ψ ,은 각각 선박의 질량, x방향 무게중심위치, 전후방향속도, 좌우방향속도, 선수동요각속도, 선수동요각을 의미한다.

선체에 작용하는 힘과 모멘트는 식 (2)와 같으며, $X(u)$ 는 직진 시 선체의 저항을 의미한다.

$$\begin{aligned}
 X_H &= X_u\dot{u}+X_{vr}vr+X_{vv}v^2+X_{rr}r^2+X(u) & (2) \\
 Y_H &= Y_v\dot{v}+Y_r\dot{r}+Y_vv+Y_{|v|}v|v|+Y_rr+Y_{r|r}r|r \\
 &\quad +Y_{vr}vr^2+Y_{rvv}rv^2 \\
 N_H &= N_v\dot{v}+N_r\dot{r}+N_vv+N_{|v|}v|v|+N_rr+N_{r|r}r|r \\
 &\quad +N_{vr}vr^2+N_{rvv}rv^2
 \end{aligned}$$

시뮬레이션에 사용된 단순 예인줄 모델은 식 (3)과 같으며, u_c 는 초기 기준속도, β 는 편류각, γ 은 예인줄 방향각, $\dot{\gamma}$ 는 예인줄 방향각 변화 각속도를 의미한다.

$$\begin{aligned}
 X_{TL} &= -X(u_c)\times\cos(\gamma+\beta) & (3) \\
 Y_{TL} &= -X(u_c)\times\sin(\gamma+\beta) \\
 N_{TL} &= Y_{TL}\times\frac{L}{2} \\
 \gamma_{i+1} &= \gamma_i+\dot{\gamma}\Delta t, \quad (\gamma_{i+1}\leq\gamma_{MAX})
 \end{aligned}$$

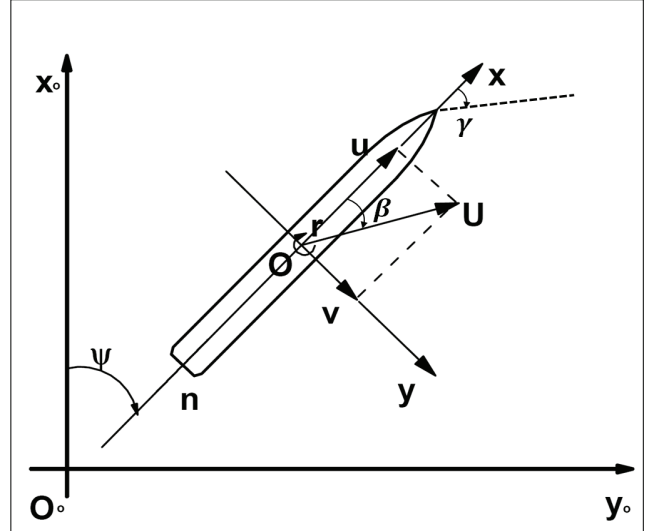


Fig. 2 Coordinates system

2.3 실험 시나리오

부선모형의 구속모형실험은 Table 2와 같이 실선박의 5knots에 해당되는 속도(0.857m/s)를 기준으로 저항실험 및 정적/동적실험이 수행되었으며, 실험에 사용된 HPMM (Horizontal Planar Motion Mechanism) 구속모형실험 장비는 Fig. 3과 같다.

Table 2 HPMM test scenario, barge model

실험	조건
Resistance	$U = 0.514, \mathbf{0.857}, 1.200, 1.543$ m/s
Static Drift	$\beta = 0^\circ, \pm 2^\circ, \pm 4^\circ, \pm 6^\circ, \pm 10^\circ, \pm 15^\circ, \pm 20^\circ$
Pure Sway	$\dot{v}' = -0.04, -0.08, -0.12, -0.16$
Pure Yaw	$r' = 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70$
Yaw with Drift	$\beta = 4^\circ, 8^\circ, 12^\circ, 16^\circ$ $r' = 0.15, 0.20, 0.30, 0.40, 0.50, 0.60, 0.70$

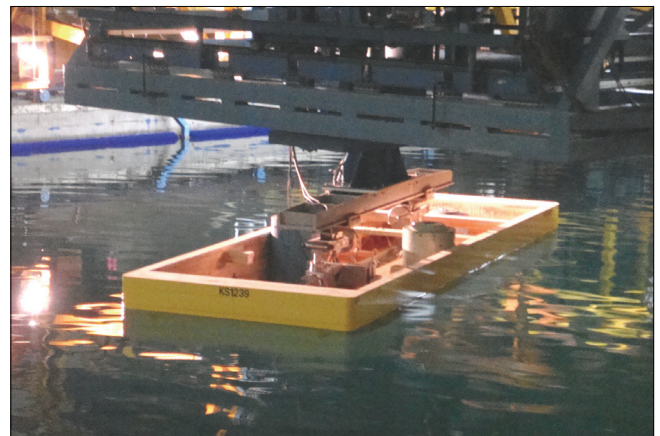


Fig. 3 Figure of HPMM test

2.4 실험 결과

Table 2와 같이 4가지 속도에 대한 저항실험을 수행하였으며, 그 결과는 Fig. 4와 같다. 여기서 선체의 마찰저항은 ITTC 1957 모형선-실선 상관곡선으로 추정된 결과이다.

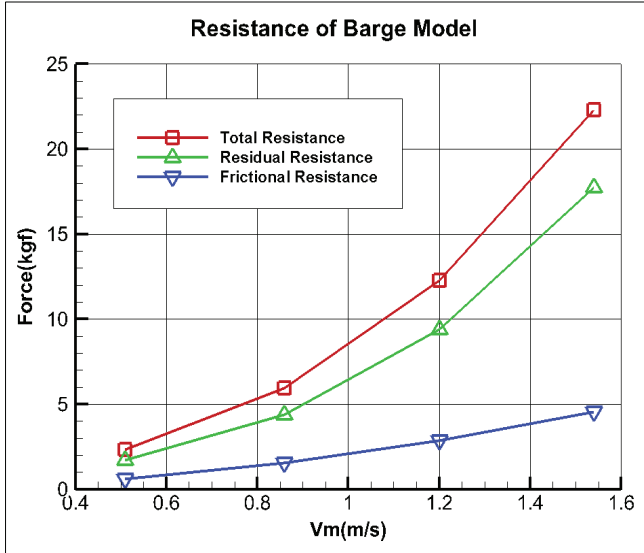


Fig. 4 Resistance result of barge model

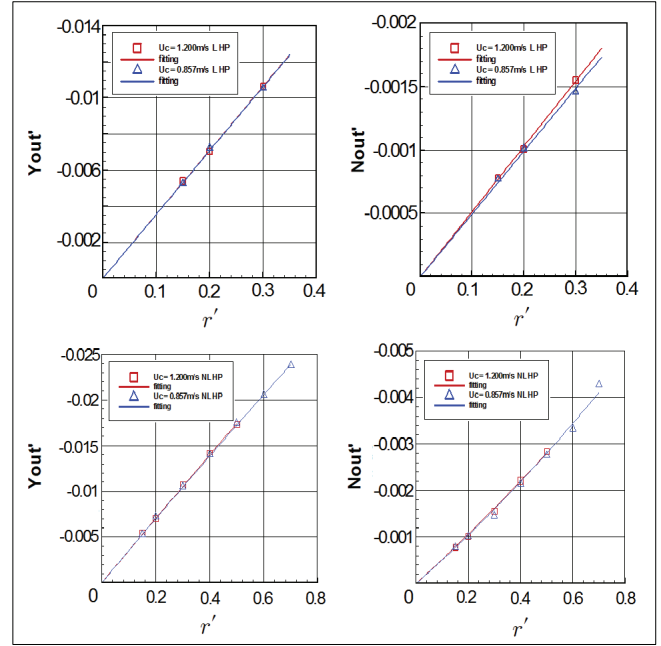


Fig. 6 Pure yaw result of barge model

구속모형실험 결과해석을 통하여, 제시한 수학적모형에 대해 도출한 부선모형의 유체력 미계수는 Table 3과 같다.

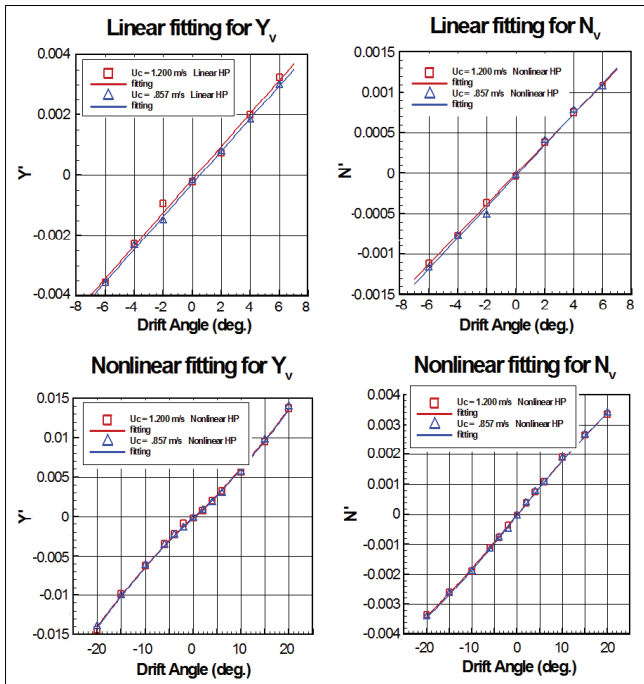


Fig. 5 Static drift result of barge model

Fig. 5와 Fig. 6은 구속모형실험 중 정적편류각시험 및 순수 선수동요시험 결과로, 여기서의 계측된 힘과 모멘트는 식 (4)를 이용하여 무차원화된 값을 사용하였다.

$$F' = \frac{Force}{0.5\rho U^2 L^2}, \quad M' = \frac{Moment}{0.5\rho U^2 L^3} \quad (4)$$

Table 3 Maneuvering coefficients of barge model

유체력 미계수	값	유체력 미계수	값	유체력 미계수	값
X'_{vv}	-0.010657	Y'_v	-0.016145	N'_v	-0.000179
X'_{rr}	0.001995	Y'_r	-0.002386	N'_r	-0.000359
X'_{vr}	0.004794	Y'_v	-0.031089	N'_v	-0.010991
		$Y'_{ v }$	-0.0273288	$N'_{ v }$	0.0028689
		Y'_r	0.003038	N'_r	-0.004951
		$Y'_{r v }$	0.002091	$N'_{r v }$	-0.001551
		Y'_{vrr}	-0.023402	N'_{vrr}	-0.005647
		Y'_{rvv}	-0.002705	N'_{rvv}	-0.018334

3. 부선의 저항/조종 성능

3.1 저항성능

저항실험에서 계측된 전저항을 마찰저항, 잉여저항으로 구분하고 이를 무차원화(0.5ρSV²)하면 Fig. 7과 같다.

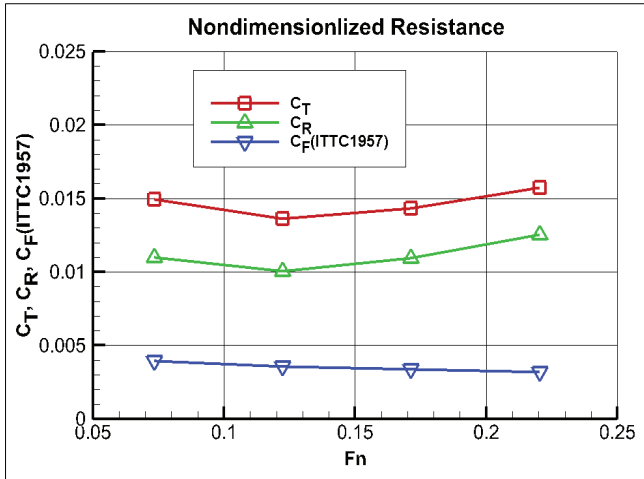


Fig. 7 C_T , C_F , C_R curve of barge model

Table 4와 같이 4개 속도 구간에 대한 C_T 의 평균값은 약 0.0146인데, 이는 이(2010)가 실험한 비슷한 선형의 선박(KNU-001, Fullload)의 C_T 값(0.014~0.016)과 상당히 비슷한 것을 확인할 수 있다.

Table 4 C_T of barge model

속도(m/s)	0.514	0.857	1.200	1.543
C_T	0.0149	0.0136	0.0143	0.0157

모델에서 예측된 선박의 저항을 C_F , C_R 을 이용하여 실선으로 확장하면 Table 5와 같다.

Table 5 Resistance of barge (estimated)

속도(knot)	3	5	7	9
저항(tonf)	1.576	4.009	8.381	15.441

3.2 조종성능 - 선회시뮬레이션

부선은 자력항해능력이 없기 때문에 방향타가 부착된 일반적인 상선에서 수행되는 조종시뮬레이션을 적용하기에 어려움이 있다. 따라서 본 시뮬레이션에서는 Table 6과 같은 조건에서 방향타 대신 예인줄의 예인력 방향 변화를 통하여 선회시뮬레이션을 수행하였고, 예인력의 크기는 부선의 상태와 관계없이 부선의 저항과 동일한 것으로 가정하였다. 예인줄 방향각은 Fig. 12에서와 같이 실선계측 좌표와 동일하게 가상의 예인지점과 부선모델의 선수방향이 이루는 각으로 정의하였고, 방향에 따른 예인력 계산 시 식 (3)에서와 같이 부선의 편류각으로 보정한 후 시뮬레이션에 사용하였다.

예인줄 방향각 조건변화 중 10도, 20도 2가지의 선회에 대한 부선의 선회시뮬레이션 궤적결과는 Fig. 8, Fig. 10과 같고,

시간에 따른 상태변수는 Fig. 9, Fig. 11과 같다. 3가지 선회시뮬레이션의 선회직경결과는 Table 7과 같다. 부선과 예인줄이 이루는 각이 커질수록 선회직경이 작아지는 것을 확인할 수 있다.

Table 6 Simulation condition of barge model

L×B×T(m)	5.0×1.667×0.3
질량(kg)	2384
속도(m/s)	0.857(실선 5knots)
예인줄 장력(N)	59.779
예인줄 방향각(°)	10, 20, 30
예인줄 방향각 변화각속도(°/s)	2

Table 7 Simulation result of barge model

	10도 선회	20도 선회	30도 선회
선회 직경	5.7 L	4.4 L	3.6 L

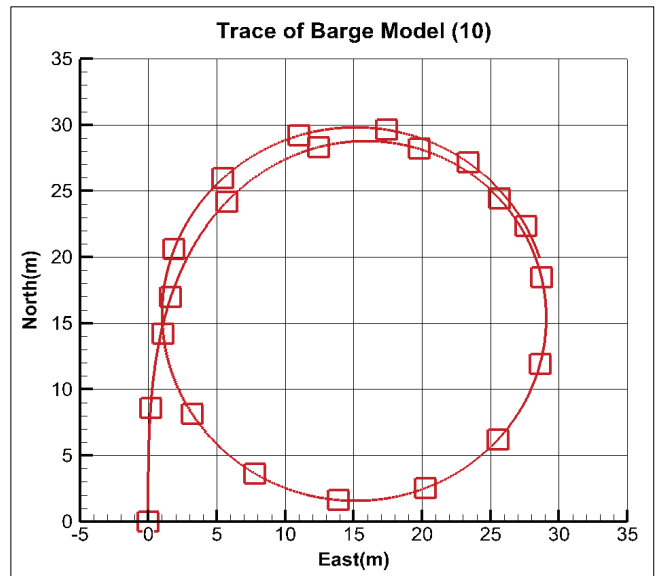


Fig. 8 Trajectory of barge model - 10°

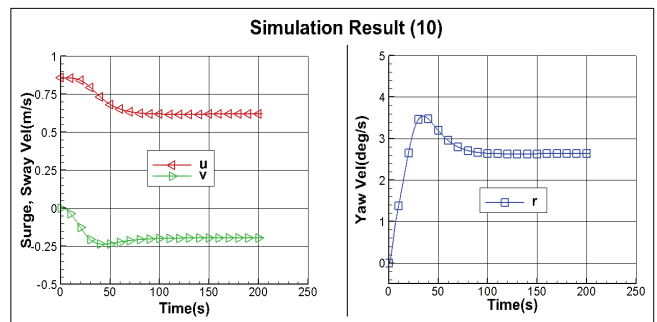


Fig. 9 Simulation results of barge model - 10°

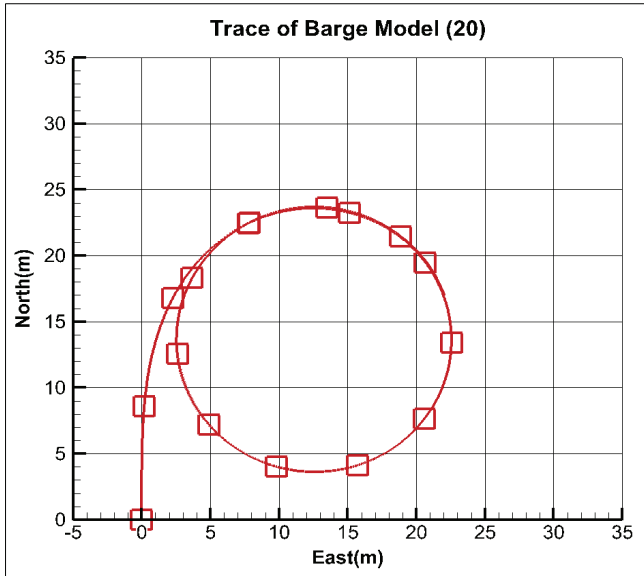


Fig. 10 Trajectory of barge model - 20°

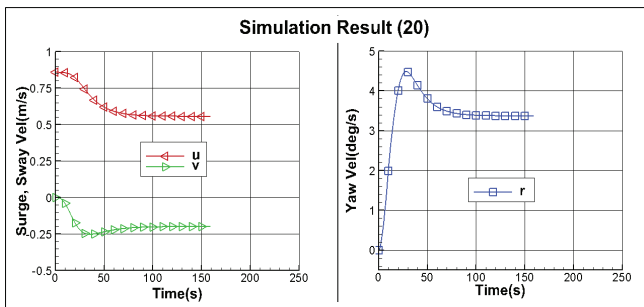


Fig. 11 Simulation results of barge model - 20°

선회궤적 및 상태변수를 살펴보면 선회가 진행되면서 정상 상태에 도달하고 있는 것을 확인할 수 있으며, 예인줄 방향각이 클수록 전진속도 감소량 및 선수동요각속도가 커진 것을 확인할 수 있다.

3.3 선회시뮬레이션 결과 비교

2010년 예부선 실선을 대상으로 수행된 실선시운전시험에서의 선회결과(6knots)를(윤 등, 2012) 속도, 예인줄 방향각 등 동일한 조건에서의 시뮬레이션 결과와 비교해보았다. 실선시운전시험에서 예인줄의 각도는 측정하지 않았기 때문에 GPS에서 측정된 예선 및 부선의 위치와 자이로 센서로 측정된 부선의 선수동요각의 차이를 이용하여 부선에서의 예인줄 각도를 추정하였다. 측정된 예선과 부선의 위치는 GPS 안테나가 설치된 위치이므로 예인줄이 묶여 있는 예선의 선미 및 부선의 선수위치로 보정하여 사용하였다.

Fig. 12, Fig. 13에서 보는 것과 같이 추정되는 부선의 예인줄 각도가 평균 -50도일 때의 선회직경은 부선 길이의 약 4배로 확인된다. 같은 조건에서의 선회시뮬레이션 시 부선모델의 선회직경은 길이의 약 2.9배로 실선의 선회직경보다 작게 추정되었다.

이와 같은 결과의 차이는 다음과 같은 이유에 의한 것으로 추정된다.

- 실선시운전시험의 경우, 발라스트상태에서 시험이 수행되었기 때문에 만재상태인 구축모형실험 및 시뮬레이션 조건과 다르다. 일반적으로 배수량이 감소하고 트림이 발생하게 되면 선회반경이 증가하는 것으로 알려져 있다. (임 등, 2005)

- 시뮬레이션의 경우, 예인줄을 모사하는 모델을 단순하게 처리하였기 때문에 부선에 작용하는 예인력의 크기 및 방향이 일정하지만 실선의 경우 예선과 부선의 상대적 거리에 따라 예인력의 크기 및 방향이 변화한다. 특히 운항 중 예인줄의 길이보다 선박간의 거리가 가까우면 작용하는 예인력의 크기가 작아질 것이다.

따라서 예선과 부선을 연결하는 예인줄 수학적모델의 정확도 향상을 통한 시뮬레이션 결과 비교, 실선과 구축모형실험의 하중 조건 동일화를 통한 시뮬레이션 결과 비교 등 추가적인 연구가 필요할 것으로 판단된다.

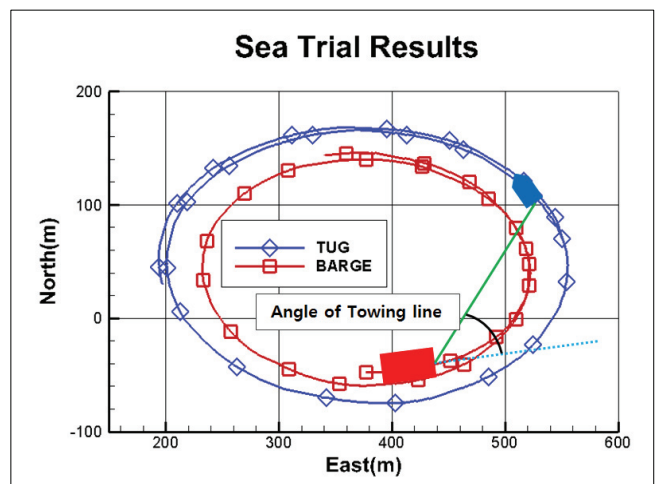


Fig. 12 Trajectory of sea trial test

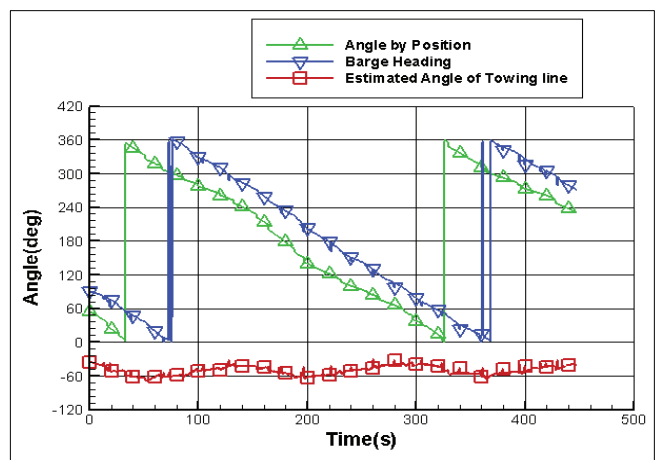


Fig. 13 Sea trial data

4. 결 론

본 연구에서는 예부선의 통합시물레이션을 구성하기 위한 예선, 부선, 예인줄의 3요소 중 부선에 대한 연구로, 부선의 저항 및 조종특성을 확인하기 위하여 구속모형실험을 수행하였고, 그 실험결과를 이용하여 선회시물레이션을 수행하였다.

부선의 조종수학모델의 유효성을 검증하기 위하여 부선에 작용하는 예인력을 단순히 모델링하고, 예인줄 방향각 변화에 따른 선회시물레이션결과를 서로 비교하여 예인줄 방향각이 커질수록 선회직경이 작아지는 정성적인 선회특성을 확인하였다. 또한 특정 조건에서의 실선시운전시험결과와 선회시물레이션결과를 비교하여 정량적인 측면에서 선회직경의 차이와 그 이유에 대해 살펴보았다.

추후 연구사항으로는 보다 정확한 예부선의 운항시물레이션을 위해 예인줄 수학모델의 정확도 향상이 필요한 것을 확인할 수 있었다.

후 기

본 논문의 내용은 한국해양과학기술원의 주요사업 “예부선의 사고분석 및 예방기술 개발(3/3)[PES141C]”, “제한수역에서의 선박 운항 시물레이션 기술 고도화(1/3)[PES149F]”의 지원을 받았으며, 그 연구내용을 일부 정리한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] 안병길, 이상민(2010), “부선의 파랑중 저항 증가에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제34권, 제10호, pp. 741-746.
- [2] 여동진, 한성환, 김동진, 김연규(2009), “예부선의 동역학 모델링 및 조종 성능 추정법 개발”, 한국항해항만학회 추계학술대회논문집, pp. 40-41.
- [3] 유철, 이상민(2011), “예인삭 및 브라이들이 부선의 회두운동에 미치는 영향”, 한국항해항만학회지, 제35권, 제6호, pp. 483-488.
- [4] 윤근항, 김연규, 여동진(2012), “실선시운전시험을 통한 예부선의 조종 특성 연구”, 한국항해항만학회지, 제36권, 제1호, pp. 15-20.
- [5] 이상민, 정우철, 김현수(2010), “정수중 부선 주위의 유동 특성에 관한 연구”, 한국항해항만학회지, 제34권, 제6호, pp. 417-422.
- [6] 임남균, 권석암, 김세은(2005), “흘수변화가 선박 조종 성능에 미치는 영향에 관한 연구”, 대한조선학회논문집, 제42권, 제2호, pp. 105-112.

원고접수일 : 2012년 7월 3일
심사완료일 : 2012년 9월 24일
원고채택일 : 2012년 9월 24일