

# 수치 모형선에 의한 제한수역에서의 조종성능 측정

박병수\* · 김종화\*\* · 김척수\*\*\*

\* 경상대학교 해양경찰시스템학과(해양산업연구소), \*\* 부경대학교 실습선, \*\*\* 광양해운(주)

## Measurement of Maneuverability in the Restricted Area by Numerical Model Ship

Byung-Soo Park\* · Jong-Hwa Kim\*\* · Cheog-Su Kim\*\*\*

\* Dept. of Maritime Police & Production System, Gyeongsang National University, Tongyeong, Gyeongnam, 650-160, Korea

\*\* Training Vessel, Pukyong National University, Busan, 608-737, Korea

\*\*\* Wide Ocean Shipping Co., Ltd., Busan, 600-010, Korea

**요 약** : 제한수역에서는 Bank cushion과 Squat의 작용으로 인하여 선체의 운동특성이 변한다. 실선을 통한 제한수역에서의 조종성능의 측정은 선박의 안전 때문에 어려운 실정이다. 본 연구에서 제한수역에서의 측벽효과와 Squat에 관한 정보를 얻기 위해 수치모형을 이용하여 선박의 운동을 모사하였다. 선박과 안벽의 거리가 좁을수록 선수방위는 많이 변하였다. 선수방위의 최대 변화치는 선폭에 대한 이안거리의 비(D/B)=0.2에서 22.37°를 나타내었다. Squat는 속력이 빠를수록 홀수가 작을수록 커졌다. Squat의 최대치는 홀수에 대한 수심(H/d)=1.25, 속력 8knot일 때 0.29m였다. 선박의 안전운항을 위하여 제한수역에서는 감속이 가장 중요한 요소인 것으로 나타났다.

**핵심용어** : 조종성능, 선박조종시뮬레이션 모델, 천수영향, 측벽영향, 선체운동

**Abstract** : *The ship maneuverability is changed by the effects of the bank cushion and the squat in the restricted water area. It is difficult to test the ship maneuverability by the real ship in the restricted water area because of ship's safety. In this study, a numerical model ship was used to simulate the ship's motion and to get information about the bank cushion and the squat in the restricted water area. The less apart from the quay the ship ran, the more ship's heading changed. The greatest change of ship's heading was 22.37° when a ratio of the length between ship and quay to ship's breadth(=D/B) was 0.2. The squat of the ship was greater in shallower water and at faster speed. The greatest squat was 0.29m when a ratio of water depth to ship's draft(H/d) was 1.25 and ship's speed was 8 knots. the reduced speed was found to be the most important factor in the shallow water area for safety of the ship.*

**Key Words** : *Maneuverability, Ship handling model, Squat, Bank cushion, Ship's motion*

### 1. 서 론

제한수역에서는 bank cushion과 squat의 작용으로 인하여 선체의 운동특성이 변화한다. 수로의 측벽에 접근하여 항해하면, 선체의 종방향에 따른 유속의 차가 생겨 이곳의 압력 분포가 변한다. 이때 적절히 보침을 하지 않으면 선박은 한쪽으로 압류되고 심한 경우에는 충돌사고가 발생하게 된다. 또한, 천수역에서 선체주위의 수압분포가 변하면, 그 수압에 대응하여 선체가 침하하게 되는데, 그 현상은 정지 시보다 고속시 더욱 심해지고 선체전후의 침하상태도 달라져 항주중의 트림이 변한다. bank cushion에서의 heading의 변화와 squat에서의 홀수변화의 양상은 안전항해를 위해 항해자가

필수적으로 알아야 할 사항이지만, 시운전성적에도 포함되지 않고 실선을 통한 실험도 어려운 실정이다. 조종성능의 추정 에 관한 연구는 김(1988), 이 등(1997), 김 등(1998), 김 등(2002)이 있고, 조종성능의 선종 별 특성연구에는 이 등(1998), 김 등(2004)이 있다. 그리고 제한수역에서의 선박운동 특성에 관한 연구는 Hooff(1973), Yosimura(1988)가 있다. 본 연구에서는 선박체적에 기초한 squat 모형을 이용한 수치실험을 통하여 수심과 수로폭이 제한된 상황에서 선박의 조종성의 변화를 측정하고자 하였다.

### 2. 재료 및 방법

#### 2.1 Model의 구성

##### 1) 선체운동 방정식

\* 대표저자 : 정희원, bspark@gnu.ac.kr, 055-640-3090

수중운동체의 3자유도 조종운동방정식은 식(1)과 같고, 좌표계와 부호규약은 Fig. 1과 같다.

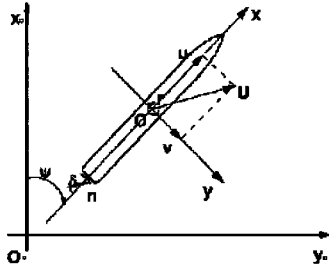


Fig. 1. Coordinates system.

$$m\dot{V} + m\dot{\omega} \times r_G + m\omega \times V + m\omega \times \omega \times r_G = F$$

$$I\dot{\omega} - m\dot{V} \times r_G + \omega \times I\omega - m(\omega \times V) \times r_G = M \quad (1)$$

여기서,  $m$ 은 물체의 질량,  $r_G = (x_G, y_G, z_G)$ 는 중심의 위치,  $V = (u, v, w)$ 는 선속도벡터,  $\omega = (p, q, r)$ 는 각속도 벡터,  $F = (X, Y, Z)$ 는 모든 외력의 합벡터이고,  $M = (K, M, N)$ 은 모든 모멘트의 합벡터이다.  $I$ 는 물체 관성의 텐서를 나타내는 행렬이다.

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & -I_{xy} & -I_{xz} \\ -I_{xy} & I_{yy} & -I_{yz} \\ -I_{xz} & -I_{yz} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2)$$

오른손 좌표계에서 방정식은 다음과 같이 확장된다.

$$m(\dot{u} - vr + wq - x_G(\dot{q}^2 + r^2) + y_G(pq - \dot{r}) + z_G(pr + \dot{q})) = X$$

$$m(\dot{v} - \phi + ur - y_G(r^2 + p^2) + z_G(qr - \dot{p}) + x_G(qp + \dot{r})) = Y$$

$$m(\dot{w} - uq + vp - z_G(p^2 + q^2) + x_G(rp - \dot{q}) + y_G(rq + \dot{p})) = Z \quad (3)$$

$$I_{xx}\dot{p} + (I_{zz} - I_{yy})qr + my_G(w + vp - uq) - mz_G(\dot{v} - \phi + ur) - I_{xz}(\dot{r} + qp) + I_{yz}(r^2 - q^2) + I_{xy}(pr - \dot{q}) = K$$

$$I_{yy}\dot{q} + (I_{xx} - I_{zz})rp + mz_G(u + wq - vr) - mx_G(\dot{w} - uq + vp) - I_{xy}(\dot{p} + qr) + I_{xz}(p^2 - r^2) + I_{yz}(qp - \dot{r}) = M$$

$$I_{zz}\dot{r} + (I_{yy} - I_{xx})pq + mx_G(\dot{v} + ur - \phi) - my_G(\dot{w} - vr + uq) - I_{yz}(\dot{q} + rp) + I_{xy}(q^2 - p^2) + I_{xz}(rq - \dot{p}) = N \quad (4)$$

선박의 특정 경우의 방정식의 실행에서

$$I_{xy} = I_{yz} = I_{xz} = 0 \quad (5)$$

방정식 (3)과 (4)의 좌변은 가속도와 관성력 그리고 모멘트를 나타내고, 우변은 모든 외력과 모멘트의 합이다. 이 방정식을 완성하기 위해서는 미분방정식의 다른 하위계를 고려하여야 한다. 즉, 기관, 보조 스티어링 역학, 기관회전조정기나 자동조타장치, 계류사 상태방정식 등 개별 선박에 따른

장치 등이다. 그러나 여기에서는 프로펠러와 타에 의한 유체력이 가장 크고 중요하므로 이들만 고려하였다.

### 2) 프로펠러와 타에 의한 유체력

본 model에서 프로펠러와 타는  $X_p$ 와  $Y_R$ 이 함께 작용하는 하나의 장치로 간주하였으며, 힘과 모멘트(Moment)는 아래와 같이 계산하였다.

$$X_p = \frac{1}{2} \rho D^2 (v_R^2 + n_p^2 DP) \overline{K_x}$$

$$Y_R = \frac{1}{2} \rho D^2 (v_R^2 + n_p^2 DP) \overline{K_y}$$

$$M_{RZ} = x_R Y_R - y_R X_R \quad (6)$$

프로펠러 토크(Torque)  $Q_P$ 는 다음 식으로 계산하였다.

$$Q_P = \frac{1}{2} \rho D^3 (v_R^2 + n_p^2 P^2) \overline{K_Q} \quad (7)$$

여기서,  $D$ 는 프로펠러 직경,  $P$ 는 프로펠러 피치,  $\overline{K}$ 는 프로펠러와 타의 수정된 계수이다.

### 3) Squat

선박이 물을 밀면서 전진하게 되면, 선수에서 밀린 물은 외곽을 따라 흐르거나 선저로 내려가서 되돌아오면서 그 흐름은 빨라진다. 이에 따라 squat가 발생하며, squat에 영향을 미치는 요소는 선속  $v$ 와 수심  $H$ 이다. 이 모델에서 squat 현상에 따른 흘수의 변화  $\Delta T$ 와 트림의 변화  $\Delta \tau$ 는 다음 식으로 계산된다.

$$\Delta T = L_{pp} \Delta \bar{T}(Fr, H/T), \quad \Delta \tau = L_{pp} \Delta \bar{\tau}(Fr_V, H/T) \quad (8)$$

여기에서,  $Fr_V = u / \sqrt{g V^{1/3}}$ 은 체적에 기초한 Froude 수이고, 계수  $\Delta \bar{T}$ 와  $\Delta \bar{\tau}$ 는 각각의 선박모델 데이터베이스의 한 부분이다.

### 4) Bank effect

Bank effect는 종적인 힘  $Y_B$ 와 모멘트  $M_{BZ}$ 의 함으로 계산한다.

$$Y_B = m g Fr^2 C_{BY}$$

$$M_{BZ} = m g L Fr^2 C_{BMZ} \quad (9)$$

여기서, 무차원계수  $C_{BY}$ 와  $C_{BMZ}$ 는 안벽에서 배까지의 거리  $d_B$ , 수심  $H$ , 안벽아래의 수심  $H_B$  그리고 안벽과의 각도  $\phi$ 에 지배된다.

### 2.2 Model ship의 제원

1,000 GT급 트롤러선을 model ship으로 사용하였으며 초기조건은 Table 1과 같다.

Table 1. Initial condition of the model ship

Item	Specification
LOA	70.57 m
LBP	60.60 m
Breadth	12.30 m
GT(National)	999 ton
Draft	4.0m
Displacement	1,681ton
GM	0.7m
Cb	0.61
Main engine speed	3,300HP 14Kts

2.3 자료의 검증

모형선의 재현성을 검증하기 위하여 모형선과 실선에 대해 선회전시험과 Z-test를 실시하여 비교하였다. Fig. 2와 Fig. 3은 각각의 선회전과 Z20-test의 결과이다. Fig. 2와 Fig. 3에서 보는 바와 같이 실선과 모형선의 결과는 유사하여 모형선이 실선의 조종성능에 근사하는 것을 알 수 있었다.

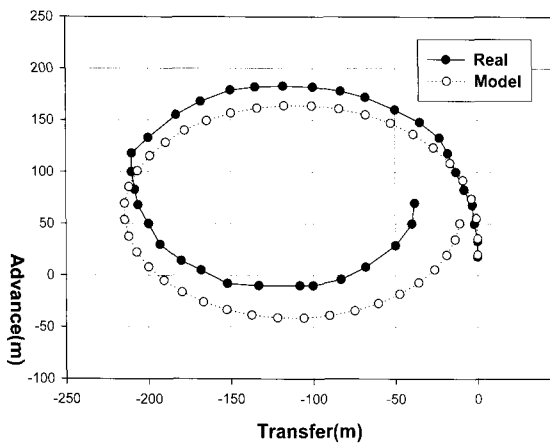


Fig. 2. The results of turning circle of the real and model ship.

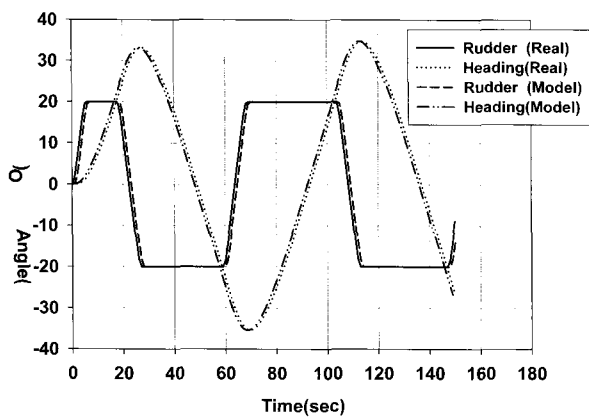


Fig. 3. The result of Z-test of the real and model ship.

3. 결과 및 고찰

3.1 Bank cushion

Fig. 4는 측벽 좌측에 선박을 배치하여 시간에 따라 측정한 heading의 변화를 나타낸 것이다.

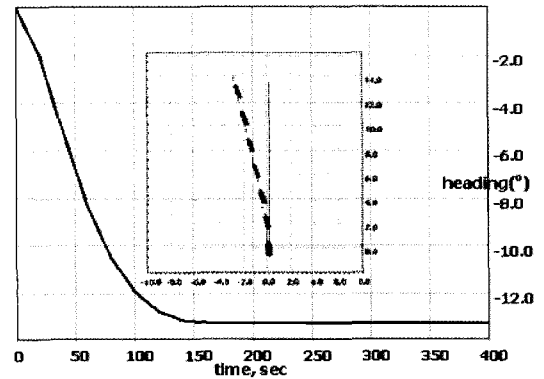


Fig. 4. The processing of the bank cushion.

측벽에 접근하여 항주할 때에는 선수부는 측벽으로부터 반발력을 받아 바다쪽으로 밀게된다. 선폭(B)에 대한 이안거리(D)의 비(D/B)를 변화시켜 항주하면서 선수방위와 속력의 변화를 측정한 결과를 Table 2와 Fig. 5에 나타내었다. 항주 속력은 model의 slow ahead 속력인 4.41 knot를 기준으로 하였으며 D/B가 작을수록 속력의 감소량이 많았으며 heading의 변화도 커졌다. Heading과 속력의 변화는 선박항주 120초 후의 수치이며 그 후에는 heading의 변화가 없었다.

Table 2. Heading and speed changes by bank cushion according to changes of D/B

D / B	0.2	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	3.5	4.0	4.5	5.0
heading (deg.)	22.3	19.0	13.2	9.5	6.8	4.7	2.8	1.4	0.5	0.2	0.1
speed (knot)	4.31	4.32	4.33	4.34	4.35	4.36	4.37	4.38	4.40	4.41	4.41

D/B가 4.0 이상일 때는 heading과 속력의 변화가 거의 없어 bank effect의 영향을 받지않는 것으로 나타났다. D/B 3.0 일 때 heading의 변화는 2.8°였고, 속력이 4.37knot로 측벽효과가 나타나기 시작하였으며, D/B 2.0에서 heading의 변화는 6.8°, 속력은 4.35knot로 느려지며 측벽효과가 커지기 시작하였다. D/B 1.0에서 13.2°의 heading의 변화가 있었고, D/B 0.5에서 19.0°로 효과는 크게 증대하였다. D/B 0.2에서 22.3°로 측벽 효과가 최대였고, 속력은 4.31knot로 감소하였다.

3.2 Squat

실험의 초기조건은 Table 1과 같으며, 흘수(d)에 대한 수심(H)의 비(H/d)를 1.25-2.00으로 변화시켜 속력에 따른 선체 침하량을 측정하였다. Fig. 6과 같이 속력증가에 따라 선수, 선미가 침하하였으며 선수의 침하량이 선미보다 크게 나타났다.

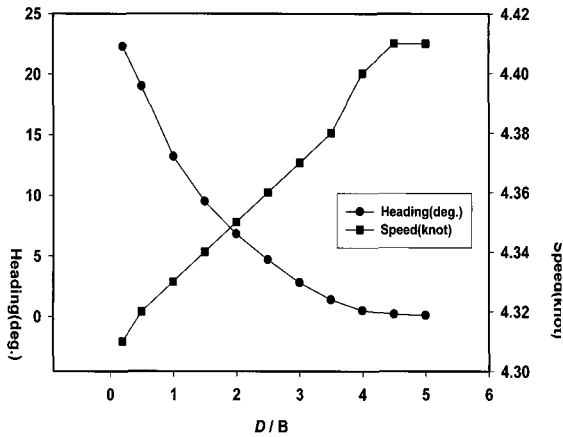


Fig. 5. Result of the bank cushion.

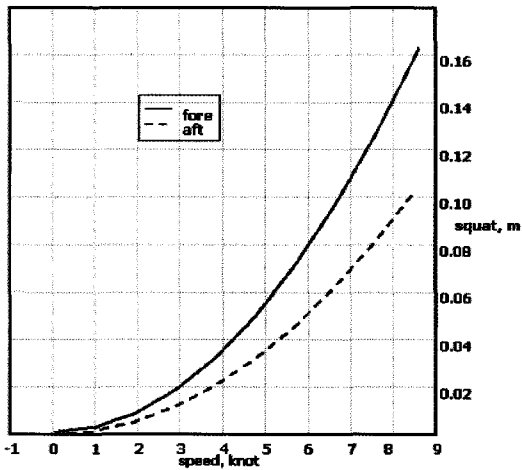


Fig. 6. The processing of the squat.

천수역에서의 항해 시 압력의 변화로 선체주위의 수위가 낮아지고 수심이 얕을수록 그 현상은 커진다. 항주중의 트림 변화는 알아지는 만큼 선수트림에서 선미트림으로 이행된다. Froude 수(Fn)에 대한 선수침하량의 변화를 Fig. 7에 나타내었다. 수심에 따른 침하량은 큰 차이가 없었고 선속이 빨라지면 침하량은 급격히 커지는 것으로 나타났다. Fn 0.05부근에서 선체침하현상이 나타나기 시작하였으며 속력이 빠를수록 침하량은 커졌고 Fn 0.08일 때 H/d 2.00에서 0.02m, H/d 1.25에서는 0.07m의 선수침하량을 나타내었다. Fn 0.10일 때 H/d 2.00과 1.25에서 각각 0.05m, 0.12m를 보여 선수침하가 커졌으며, Fn 0.14일 때 H/d 2.00과 1.25에서 각각 0.10m, 0.22m의 선수침하가 나타났다. Fn 0.16일 때 H/d 1.25에서 침하량이 0.30m로 최대가 되었다. 속력증가에 따른 침하량의 증가를 선형근사하면 결정계수  $R^2 = 0.9791$ 에서 (선수침하량)  $S = 2F_n$ 의 근사식을 나타내었다. Fn이 0.01증가하면 침하량은 약 2cm 증가하였는데, 이것은 속력 1knot 증가에 침하량 4cm 증가를 의미한다.

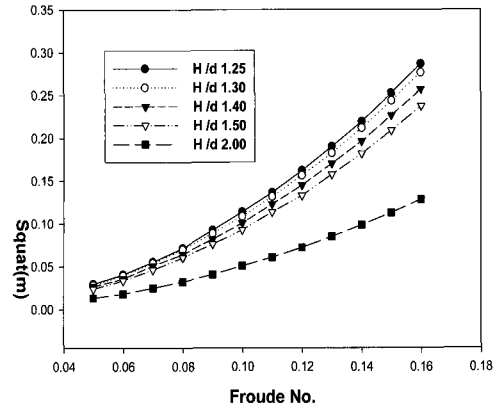


Fig. 7. Squat by Froude number(Fn).

### 3.3 Turning circle

천수역에서는 선저면의 저항이 증가하여 선회권이 커진다. 우현전타(35°)때 배의 궤적은 Fig. 8과 같다. 홀수에 대한 수심의 비(H/d)를 1.25-2.00으로 변화하여 선회권을 측정 한 결과는 table 3과 같다. H/d가 2.00에서 1.25로 변화하면 중거(Advance)는 150.40m에서 168.55m로 증가하였고, 횡거(Transfer)는 195.94m에서 218.35m로 증가하여 각각 12.0%와 11.4%의 증가율을 보였다. 속력의 감소는 크게 나타나, 선회 전의 속력 9.130kt에서 최소 6.479kt로 감소되어 감속율이 29.1%에 달하였다.

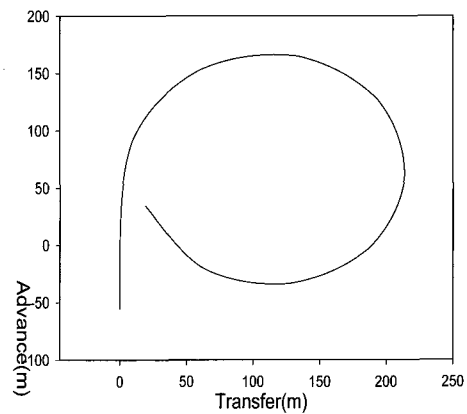


Fig. 8. Trajectory of the turning circle.

Table 3. Changes of the turning circle according to the draft

H/d	advance(m)	transfer(m)	reduced speed(kt)	reduced rate(%)
2.00	150.40	195.94	7.637	0.164
1.60	154.06	199.09	7.418	0.188
1.50	157.69	204.64	7.185	0.213
1.40	161.64	210.01	6.927	0.241
1.30	164.88	214.09	6.718	0.264
1.25	168.55	218.35	6.479	0.291

#### 4. 결 론

1. bank cushion에 의한 선박선수의 안벽에 대한 반발은 이안거리가 가까울수록 커져 선폭에 대한 이안거리(D/B) 0.2에서 항주 120초 후에 최대 22.37°의 heading의 변화를 보였다. 이안거리가 멀어지면 heading의 변화는 작아지고 선폭의 3배 거리에서 약 2.8°의 변화를 보였고, 선폭의 4배 거리에서는 변화가 거의 없었다. bank cushion은 slow ahead(4.41 knot)의 속력에서 선폭의 3배이하로 접근하여야 발생하는 것으로 나타났다. 또한 bank cushion에 의한 속력의 변화는 0.1 knot 이하로 미미하게 나타났다.

2. squat는  $F_n$  0.2 이하에서 선미보다 선수 쪽이 컸으며 흘수에 대한 수심(H/d)가 작을수록 또한, 속력이 빠를수록 큰 것으로 나타났다. H/d가 1.25이고  $F_n$  0.16(약 8knot)일 때 최대 0.29m의 선수침하를 보였다. 속력이 느려지면 선수침하는 급격히 감소하여 4 knot의 속력에서 0.08 m이하를 보여 천수역에서 선속감소가 선박안전에 중요한 요소임을 알 수 있었다. 선수침하량  $S = 2F_n$ 으로 근사되었다.

3. 흘수에 대한 수심(H/d)가 2.00에서 1.25로 변화하면 종거(Advance)는 150.40m에서 168.55m로 증가하였고, 횡거(Transfer)는 195.94m에서 218.35m로 증가하여 각각 12.0 %와 11.4 %의 증가율을 보였다. 선회 시의 감속율은 최대 29.1%에 달하였다.

#### 참 고 문 헌

- [1] 김선영(1988), “조종성능 추정기법 개발”, 한국기계연구소 보고서, pp. 337-1082.
- [2] 김선영, 김연규, 이석원, 박광동(2002), “대형 컨테이너선의 조종성능 추정을 위한 4자유도 HPMM시험기법(1)”, 대한조선학회 추계 학술대회 논문집, pp. 233-236.
- [3] 김연규, 김선영, 공인영, 조용만(1998), “2축 2다선의 조종성능 추정을 위한 조종수학 모형”, 선박해양기술, 제27호, pp. 73-76.
- [4] 김연규, 김선영, 유병석, 이석원(2004), “쌍축 컨테이너선의 조종성능 특성연구”, 대한조선학회 추계학술대회 논문집, pp. 37-43.
- [5] 이호영, 염덕준, 신상성, 이태일(1997), “PMM 모형시험에 의한 조종성능 추정”, 대한조선학회논문집, 제34권 제2호, pp.48-55.
- [6] 이호영, 신상성, 염덕준(1998), “초기설계단계에서 선박조종성능 추정에 대한 정도향상 연구”, 대한조선학회논문집, 제35권 제1호, pp.95-103.
- [7] Hooft J. P.(1973) Maneuvering large ship in shallow water-1. Journal of navigation, 26(2), pp.89-93.
- [8] Yoshimura, Y.(1988), Mathematical model for the maneuvering ship in shallow water- mathematical

model at slow forward speed. Journal of Kansai society of naval architects of Japan, 210, pp.77-84.

원고접수일 : 2009년 09월 30일

원고수정일 : 2009년 10월 15일 (1차)

: 2009년 11월 20일 (2차)

게재확정일 : 2009년 12월 24일