

# 유동제어구조물에 의한 내만의 해수순환 모델링

김종규\* · 강태순\*\* · 김헌태\*

\*부경대학교 해양공학과, \*\*(주)지오시스템리서치 부설 수환경연구소

## Hydraulic and Numerical Modeling of Seawater Circulation of Semi-enclosed Bay with the Flow-control Structures

JONG-KYU KIM\*, TAE-SOON KANG\*\* AND HEON-TAE KIM\*

\*Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

\*\*HydroEnvironment Research Institute, GeoSystem Research Corp., Kyungido 431-062, Korea

**KEY WORDS:** Flow-control structures 유동제어구조물, Seawater circulation 해수순환, Hydraulic modeling 수리모델링, Numerical modeling 수치모델링

**ABSTRACT:** Using the hydraulic and numerical model of semi-enclosed bay (Chinhae Bay), the efficiencies of flow-control structures on the seawater-circulation in the inner bay were investigated. Especially, this study was confirmed the effectiveness of the flow-control structures at the mouth and narrow channel of Chinhae Bay through the experiments. The system of flow-control structures could enhance the water exchange improvement appropriately. The results of this study can be used as the long-term and integrated environmental impact assessment model in the inner bay.

### 1. 서 론

우리 나라는 선진국으로의 도약을 위한 5차에 걸친 경제개발 수행과정에 있어서 연안해역에서의 사회, 경제적 활동 증가에 따라 임해공업단지 및 발전소 건설, 간척·매립사업 추진, 연안어장시설 증대 등 많은 연안역 개발이 가속화되었다. 특히, 이러한 연안해역공간 이용은 외해로 개방된 해역에 비하여 해역환경이 비교적 정온한 내해역이나 폐쇄성 내만과 같은 곳에 대부분 집중되어 개발되어져 왔다. 이에 따라 내해역이나 폐쇄성 내만에서는 해역환경용량을 상회하는 오염부하에 의하여 그 자정능력을 상실하고 있으며 연안해양오염이 가중되어 생태계 파괴, 수산자원 상실, 자연경관 훼손 등으로 사회적, 경제적 및 환경적 문제가 대두됨에 따라 연안환경제어(개선) 기술의 필요성이 증대되고 있는 실정이다.

연안환경제어기법으로는 해수유동을 촉진시키는 방법, 소파제에 의한 파랑제어방법 및 준설, 객토 등에 의한 저질개량공법 등이 있다. 이중 해수유동을 촉진시키는 공법으로서는 Murakami(1988), 上嶋 等(1989), 村上(1991), 堺 等(1991)에 의해 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 주로 조류, 수위차, 해류 및 파랑에너지 등의 외력을 이용하는 방법이다. 조류를 이용하는 유동제어기술의 구체적인 방법으로는 만구지형 개량공법, 해저지형 개량공법, 유동제어구조물 설치공법 및 수로 설치공법 등이 있다.

연구대상해역인 진해만 해역(Fig. 1)의 가덕수로는 폭이 넓으며 최고수심이 약 45 m 정도이고, 견내량 수로는 폭이 대단히 좁으며 최고수심이 약 8 m 정도이다. 대조기시 가덕수로를 통하는 해수교환량은  $471 \times 10^6 \sim 507 \times 10^6$ (김, 1984)로서 진해만 전체 해수교환의 86~90%를 차지하고 있으며, 조석형태수는 0.11~0.12(한국해양연구소, 1983)로서 반일주조가 탁월하다. 한편, 장 등(1993)은 진해만 해역의 유동장을 수리모형실험으로 재현하였으며, 김(1995)은 진해만 서부해역 및 북신만에서 유동제어에 의한 환경개선기법에 관하여 수치모형실험으로 검토한 바 있다.

최근, 진해만 해역의 수질환경개선에 대한 많은 연구들이 진행되고 있으나 장기적이고 구체적인 뚜렷한 수질개선방안들은 강구되지 못하고 있는 실정이므로 많은 관심과 연구가 계속되고 있다.

반폐쇄성 해역인 진해만은 지형이 매우 복잡하고 조류가 탁월하며 가덕수로와 견내량수로를 통하여 해수교환이 발생되므로, 해역의 수질환경을 개선하기 위해서는 조석이나 조류 등의 자연에너지를 이용하여 해수유동을 촉진시키는 방법이 가장 효과적인 것으로 사료된다. 특히, 진해만 내측이나 마산만에서는 지형적으로 조석 등의 자연에너지가 해수교환에 충분한 역할을 수행하지 못하고 있어 지형의 부분적 개조나 구조물 배치를 통하여 조석에너지를 변화시켜 해수유동을 촉진시키는 것이 바람직하다고 사료된다.

본 연구에서는 내만의 수질환경개선을 위한 유동제어구조물

개발을 위한 기초단계의 연구로서 구조물의 규모 및 배치에 따른 조류의 만내 유출입 특성을 수리모형실험 및 수치모형실험을 통하여 검토하였다.

## 2. 진해만의 해수순환 모델링

진해만의 해수순환 특성을 살펴보면, 만의 입구에서 유속이 빠르고 만내로 유입된 외해수가 만의 끝까지 충분히 도달하지 못하며 해수유동의 양상이 주로 왕복성 운동을 한다. 따라서, 본 연구에서는 반폐쇄성 내만에 있어서 조류의 자연에너지 이용에 유용한 유동제어구조물인 도류제(training wall), 잠제식 도류제(submerged training wall) 및 부유식 도류제(floating training wall) 등을 이용하여 진해만 해역을 대상으로 수리모형실험과 수치모형실험을 수행하였다.

이러한 구조물의 형식 및 배치안은 해역의 유동 단면적을 변화시켜 흐름의 일방향 유속을 증대시키는 효과를 가져오며, 만입구의 조랑계수를 조류행정(tidal excursion)에 따라 변화시켜 결과적으로 만내의 수평순환류를 강화시키는 기능이 있다 (한국기계연구원, 1998).

### 2.1 수리모형실험

#### 2.1.1 실험장치 및 상사법칙

연구대상해역은 34° 44' ~ 35° 09' N, 128° 24' ~ 128° 45' E로서 실험장치의 평면배치 및 검증점들은 Fig. 1에 나타내었다. 원형의 모든 외력을 모형에 재현한다는 것은 거의 불가능하기 때문에 몇가지 특정 외력에 주목하여 그 상사법칙을 구한다.

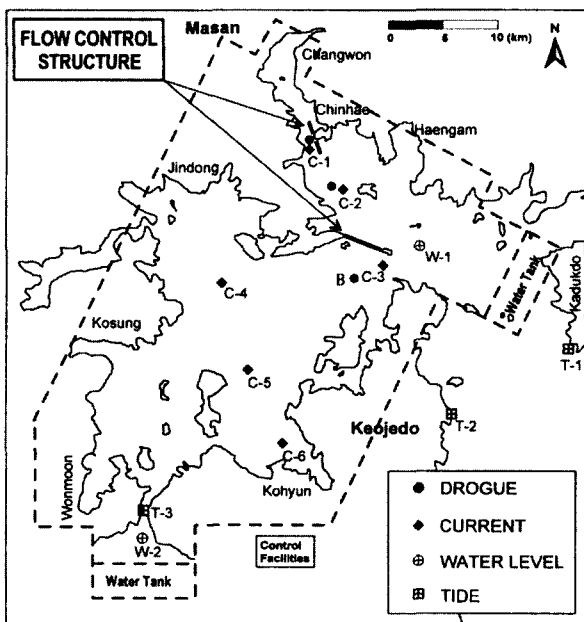


Fig. 1 Hydraulic model domain and verification points in the Chinhae Bay

따라서, 본 연구에서는 조류와 확산현상의 상사법칙을 얻기 위하여 조류장에 대한 Froude 상사법칙과 Richardson의 상대화

산이론에 의한 확산계수의 상사법칙을 만족시키기 위해 수평축척에 대한 연직축척비를 구하고, 이로부터 제반 물리적 인자 인 시간, 유속, 마찰계수 및 유량에 관한 축척비를 다음과 같이 구하였다.

$$h_r = x_r^{2/3}, t_r = x_r^{2/3}, u_r = v_r = x_r^{1/3}, c_r = x_r^{-1/3}, Q_r = x_r^2 \quad (1)$$

여기서,  $h_r$  : 연직축척,  $x_r$  : 수평축척,  $t_r$  : 시간축척,  $u_r = v_r$  : 유속축척,  $Q_r$  : 유량축척,  $c_r$  : 저면마찰계수 축척이다. 따라서, 수평축척이 결정되면 식(1)로부터 연직거리, 시간, 유속, 유량 및 마찰계수에 관한 축척이 결정된다.

한편, 본 수리실험의 연구대상해역 및 유동제어구조물의 각 변수들에 대한 원형과 모형사이의 축척비는 Table 1과 Table 2와 같다.

Table 1 Scale of prototype and model

Factor	Scale	Prototype	Model
Distance (m)	1/2,000	48 × 24 km <sup>2</sup>	24 × 12 m <sup>2</sup>
Water depth (m)	1/159	50 m	31.5 cm
Tidal range (m)	1/159	2 m	1.26 cm
Tidal period (hrs)	1/159	12 <sup>h</sup> 25 <sup>m</sup>	4 <sup>m</sup> 41 <sup>s</sup>
Velocity (m/sec)	1/12.6	1.25 knot	5 cm/s
Discharge (m <sup>3</sup> /sec)	1/(4 × 10 <sup>6</sup> )	100 m <sup>3</sup> /s	0.0025 m <sup>3</sup> /s
Bottom friction	0.08		

Table 2 Scale of prototype and model in the flowcontrol structures

Structures	Scale Distance (Depth)	Prototype	Model
Training wall	1/2,000	300m × 4km	0.15m × 2m
(Jetty)	(1/159)	(25m)	(0.16m)
Submerged training wall	1/2,000 (1/159)	300m × 4km (15m)	0.15m × 2m (0.09m)
Floating training wall	1/2,000 (1/159)	300m × 1.2km (5m)	0.15m × 0.6m (0.03m)

#### 2.1.2 실험내용 및 방법

진해만은 가덕수로와 견내량수로를 통해 해수교환이 이루어지고 있기 때문에 이들 두 지점에 수위계(W-1, W-2)를 설치하였으며, 기초방법은 전자자동제어방법에 의해 펌프로 물을 순환시켜 흐름을 발생시키는 pump flow type을 이용하였다. 진해만 조류수리모형수조는 전술한 수리모형 상사법칙에 따른 수평축척 1/2,000, 연직축척 1/159인 왜곡모형(distorted model)으로 제작되어져 있으며, 모형수조의 크기는 24 m × 12 m이고 원형과 모형사이의 각 물리적 인자들의 축척비는 Table 1과 같다.

진해만은 반일주조가 탁월하기 때문에 조석은 한국해양연구소(1983)가 관측한 Fig. 1의 T-1, T-2 및 T-3지점에서의 조화상

수중 평균대조( $M_2+S_2$ )와 평균소조( $M_2-S_2$ )를 택하였다. Table 3 은 수리모형실험에 사용되었던 조석조화상수를 나타낸 것으로 가덕수로에서 평균대조의 진폭은 86.5 cm, 평균소조의 진폭은 21.7 cm를 취하고, 견내량수로에서 평균대조의 진폭은 108.4 cm, 평균소조의 진폭은 27.9 cm를 취하였다.

**Table 3** Tidal harmonic constants to be used in hydraulic model

St.	Type	Spring tide ( $M_2+S_2$ )			Neap tide ( $M_2-S_2$ )		
		Amp. (mm)	Period (s)	Phase lag( $^\circ$ )	Amp. (mm)	Period (s)	Phase lag( $^\circ$ )
T-1	Proto	862.0	44,700	243.7	214.0	44,700	243.7
	Model	5.4	281	243.7	1.3	281	243.7
T-2	Proto	868.0	44,700	244.5	220.0	44,700	244.5
	Model	5.5	281	244.5	1.4	281	244.5
T-3	Proto	1084.0	44,700	253.4	279.0	44,700	253.4
	Model	6.8	281	253.4	1.8	281	253.4

**2.2 수치모형실험**

**2.2.1 수치모형의 개요**

본 연구에서 사용된 해수유동모형은 2차원 수심적분모형으로서 수심이 비교적 얇은 연안해역의 유동장을 계산하는데 주로 사용된다. 모형에서 사용하고 있는 기본방정식은 2차원 연속방정식과 Navier-Stokes 방정식을 연직면( $-h \leq z \leq \zeta$ )에 대해 평균하고, 외력으로 지구자전에 의한 영향, 바닥의 마찰력 및 중력을 포함시켰다. 뿐만 아니라 만내에서의 표층의 흐름은 바람에 의한 영향이 크므로(김 등, 1994) 바람응력을 포함하여 다음과 같은 방정식을 수립하였다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta + h)U] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta + h)V] = 0 \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} - fV + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} + U \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} \\ - \rho_a \gamma_s^2 \frac{W_x \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho(h + \zeta)} - A_h \left( \frac{\partial^2 U}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 U}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + fU + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + V \frac{\sqrt{U^2 + V^2}}{C^2(\zeta + h)} \\ - \rho_a \gamma_s^2 \frac{W_y \sqrt{W_x^2 + W_y^2}}{\rho(h + \zeta)} - A_h \left( \frac{\partial^2 V}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 V}{\partial y^2} \right) = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

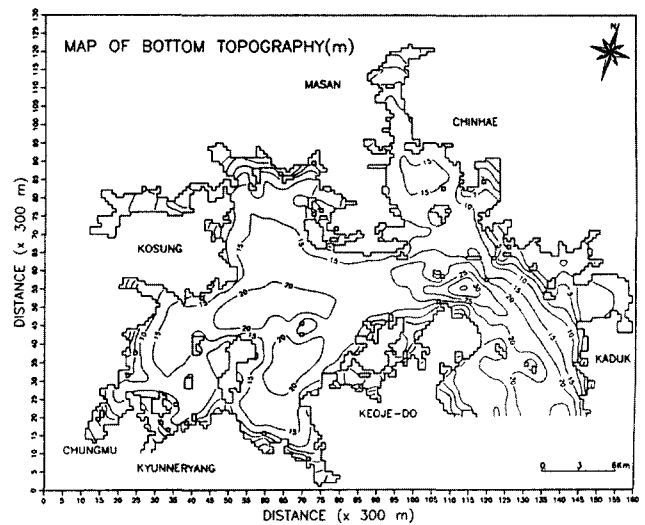
여기서  $U, V$  : 수심평균한  $x, y$  방향의 유속,  $f$  : Coriolis 계수 ( $= 2\omega \sin \varphi$ ,  $\varphi$  는 위도),  $g$  : 중력가속도,  $\zeta$  : 수면변위,  $h$  : 평균수면하의 수심,  $C$  : Chezy의 조도계수,  $W_x, W_y$  : 각각  $x, y$  방향에서의 풍속,  $\rho$  : 해수밀도( $= 1.025 \text{ g/cm}^3$ ),  $\rho_a$  : 대기밀도( $= 0.00123 \text{ g/cm}^3$ ),  $\gamma_s^2$  : 해면에서 바람에 의한 마찰계수( $= 1.2 \times 10^{-3}$ ),  $A_h$  : 수평와동점성계수이다.

본 모형에서는 수치계산을 위해서 Leendertse(1971)에 의해 조류·확산 계산에 응용되어 현재 널리 이용되고 있는 ADI법(Alternating Direction Implicit method)을 사용하였다. ADI법은 양해법(explicit method)과 음해법(implicit method)을 동시에 사

용하여 계산하는 방식으로 해의 수렴성과 계산시간의 경제성 등에서 아주 뛰어난 장점을 갖고 있다.

**2.2.2 수치모형의 구성 및 입력조건**

본 연구를 위한 계산격자망은 Fig. 2와 같이 동쪽경계에는 가덕도가 있으며 만내측으로는 마산만, 고흥만 등이 있으며 남쪽경계로 거제도(가 포함된 진해만 전역을 격자로 구성하였다. 격자간격은 대상 영역의 지형을 잘 재현하고 계산영역의 크기 및 계산시간 효율에 적합하다고 사료되는 300 m 등격자( $\Delta x = \Delta y$ )를 취하였다. 계산영역은 x방향으로 160개의 격자와 y방향으로 130개의 격자로 구성된다. 대상해역의 수심도는 1995년 3월 수로국에서 발행한 해도 No. 206을 이용하여 작성하였다(Fig. 3). 실제 계산 수행시의 수심은 이 자료에 평균해면(M.S.L.) 값을 더하여 수심을 보정하였다.



**Fig. 2** Map of bottom topography and computational grid system

한편, 수치모형의 계산시간간격( $\Delta t$ )은 계산의 안정도를 고려하여 15 sec로 설정하고, 한조석주기 약 17일동안 수치계산을 수행하였다. 본 수치계산에 있어서 바람의 영향은 무시하였으며 상세한 수치계산조건은 Table 4와 같다.

**Table 4** Computation conditions

Item	Computation condition
Study Area	Chinhae Bay(included Masan Bay) (Fig. 2)
Grid size	160×130 ( $\Delta S=300 \text{ m}$ )
Depth ( $h$ )	Obtained from Nautical Chart No. 206 (unit : m)
Time step	15 sec
Coriolis coef. ( $f$ )	$f = 2\omega \sin \varphi$ , $\varphi = 34.92^\circ N$
Bottom Roughness coef. ( $C$ )	$C = 19.4 \ln(0.9\bar{h})$
Initial values ( $t=0$ )	$u=v=\eta=0$

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1 수리모형실험에 의한 해수순환 특성

진해만 조류수리모형수조의 수위제어에 관한 검증결과는 Fig. 3과 같으며, 조류제어장치내의 설정값과 실험결과값을 비교분석한 결과, 수리실험 초기에 수위계 제어 전기신호의 노이즈에 의하여 다소 불안정한 해수면 진동이 나타나지만 수리모형수조는 전자자동수위제어를 통해 진해만 해역의 조류장을 양호하게 재현하였다.

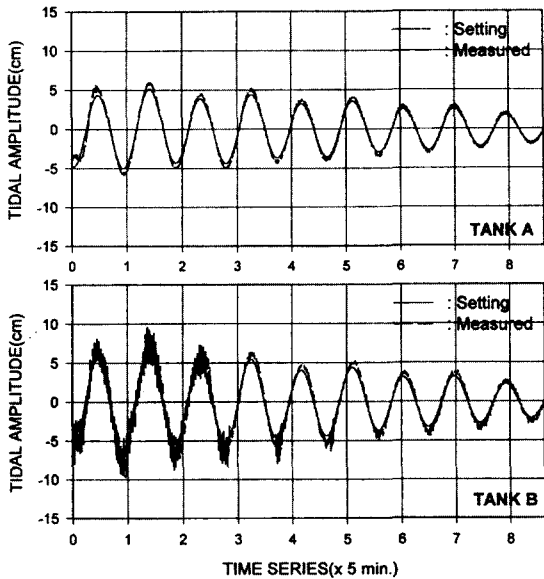


Fig. 3 Verification of tidal elevation on the open boundary

한편, 관측지점(C-1~C-3)에서 유동제어구조물 설치 전·후의 대조기-소조기 동안 전자 정밀유속계를 사용하여 조류를 연속 측정하였으며, C-1지점에서의 유속은 소조기에서 대조기로 이행함에 따라 유속이 증가하며 유향은 동서방향이 탁월하게 나타났다. C-2지점에서 유속은 대조기 창조류시는 북북동방향으로, 낙조류시는 남방향으로 흐른다. 소조기의 경우는 대조기와 유사한 흐름형태이나 유속은 조금 느린 편이며, 낙조류시보다 창조류시에 더 큰 유속을 나타낸다. C-3지점에서의 유속은 대·소조기 공히 창조류시는 북서방향으로, 낙조류시는 남동방향으로 흐르며 대조기시에는 낙조류보다 창조류가, 소조기에는 창조류시보다 낙조류의 흐름이 탁월하였다.

각 정점에서 대·소조기의 창·낙조류의 최강유속시에 대한 부표추적실험의 결과를 Fig. 4와 Table 5에 각각 나타내었다. C-1지점에서는 소조기 창·낙조류시 남서방향류가 탁월하게 나타났으며, C-2지점에서의 대조기 창·낙조류시 부표추적 실험결과에서는 창조류시에 동북동방향으로, 낙조류시에는 남향으로 표류하였다. 부표추적 실험결과에 의하면 대조기에는 창·낙조류의 유속이 거의 비슷하게 나타났지만 소조기에는 낙조류가 창조류보다 크게 나타남을 알 수 있다. B지점에서의 부표추적 실험결과는 대·소조기 공히 창조류시는 남서방향으로 낙조류시에는 북동방향으로 표류하였다.

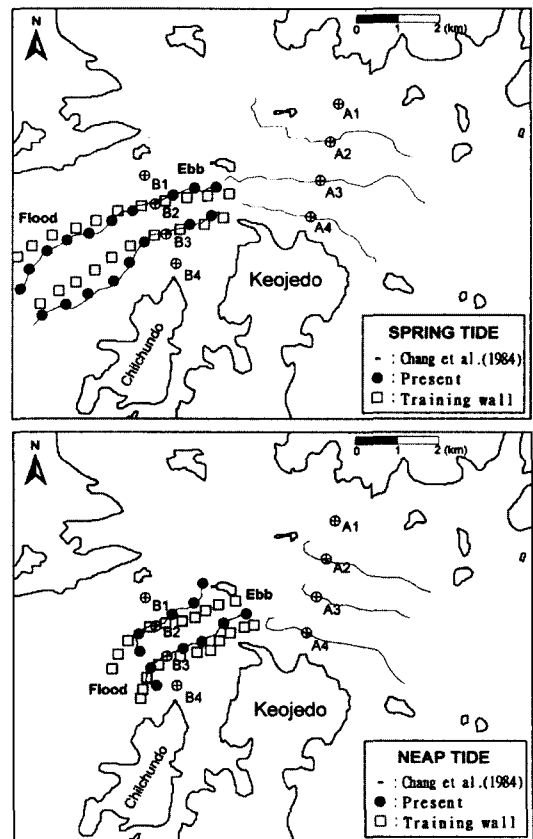


Fig. 4 The results of drogue tracking experiments

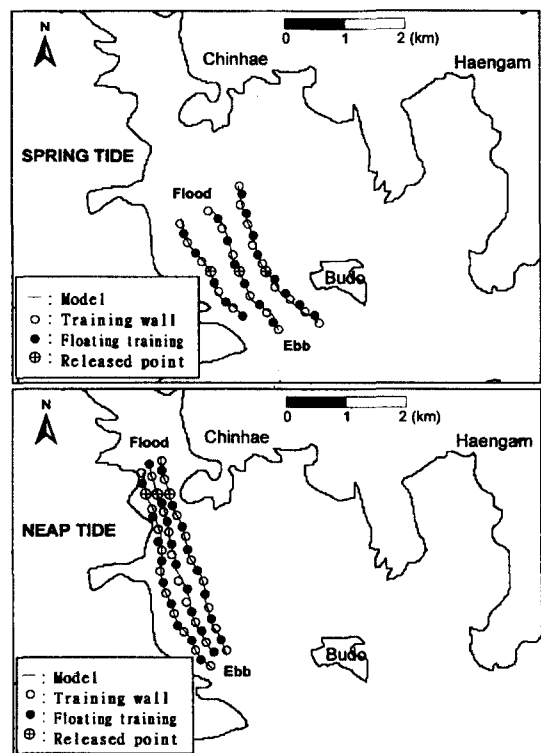


Fig. 4 continued

**Table 5** Comparisons of the maximum current between the prototype, hydraulic model and flow-control experiments

St.	Tide	Prototype		Hydraulic model		Training wall		Submerged training wall	
		Dir. (°)	Curr. (cm/s)	Dir. (°)	Curr. (cm/s)	Dir. (°)	Curr. (cm/s)	Dir. (°)	Curr. (cm/s)
C-1	S: Spring								
	N: Neap								
C-1	Flood	75	31.5	345	34.0	348	34.5	347	35.5
	Ebb	144	30.0	178	32.0	175	32.0	178	32.5
C-2	Flood	85	36.5	335	18.0	340	19.0	330	18.5
	Ebb	235	32.5	215	21.5	220	21.5	210	22.5
C-2	Flood	299	38.0	325	36.5	340	37.0	330	36.0
	Ebb	152	32.0	160	30.0	165	30.7	160	30.0
C-3	Flood	358	15.0	345	16.5	350	17.0	345	16.0
	Ebb	202	22.0	190	21.0	178	21.0	188	21.0
C-3	Flood	260	70.0	95	65.5	290	81.5	270	80.0
	Ebb	85	84.5	270	80.0	85	70.0	95	66.5
C-3	Flood	240	72.0	90	70.0	275	64.0	260	86.0
	Ebb	80	35.0	260	33.0	75	68.5	70	68.5

이상의 수리모형실험결과로부터 유동제어구조물의 설치에 의한 진해만 순환류 변화는 구조물 설치 인근해역에서 국지적으로 나타남을 알 수 있었다. 그러나, 10조석주기간 수위변위의 미소한 변화는 장기적으로 수역의 해수교환율을 변화시킬 수 있는 점을 감안할 때, 유동제어구조물 설치로 인한 진해만 전역에서의 해수교환량 변화를 정확히 파악하기는 어렵지만 오염문제가 심각한 만내에서는 유동제어구조물 설치 등의 해수교환 촉진공법을 고려하여 구조물의 규모 및 배치 등을 결정할 수 있을 것이라 사료된다.

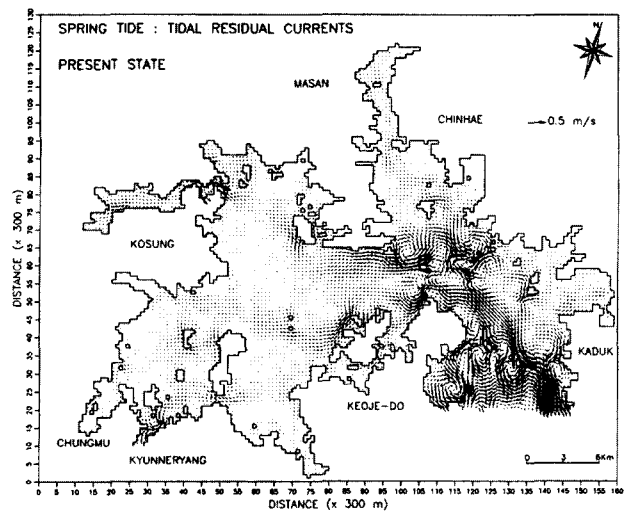
**3.2 수치모형실험에 의한 해수유동 특성**

수리모형실험에 의한 진해만 해수순환 특성의 연구결과를 기초로 하여 진해만의 수질환경을 개선하기 위한 유동제어구조물의 효과를 검토하였다. 수치실험의 내용은 구조물 설치전(현상태), 단상제어구조물 및 혼상제어구조물을 설치하여 해수유동 변화특성을 파악하였다(Table 6).

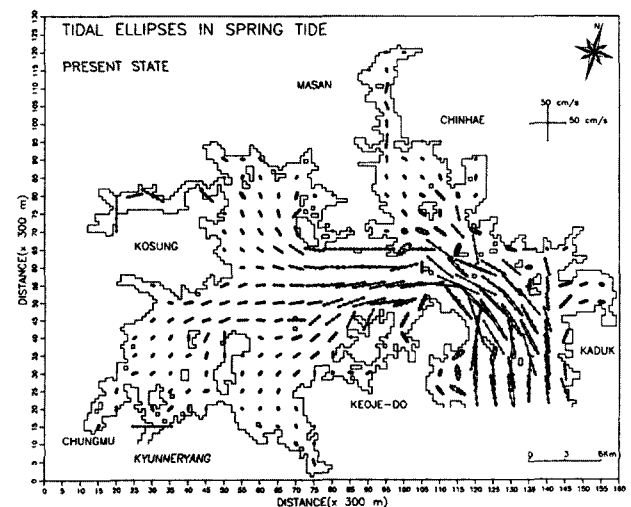
**Table 6** Cases of the numerical model experiment

Case	Structure type	Remark
CASE 0	Present state	
CASE 1	Submerged training wall at CS	Table 2
CASE 2	Training wall at CS	CS: Central Channel
CASE 3	Training wall at CS, MB	
CASE 4	Training wall at MB	MB: Masan Bay
CASE 5	Submerged training wall at CS, Training wall at MB	

구조물 설치전(현상태) 대조기시의 해수유동 수치모형실험 결과를 진해만 전역에 대하여 대조기 조석잔차류도(Fig. 5)와 조류타원도(Fig. 6)를 제시하였으며, 주요 정점에 대한 조류벡터도(Fig. 7)를 나타내었다. 가덕수로와 진해만의 중앙수로 부근에서는 복잡한 해안지형 및 크고 작은 도서들에 의하여 지형적인 여러 개의 강한 와류가 형성되고 있는 것으로 나타났으며, 진해만 내측이나 마산만 내에 있어서의 조석잔차류의 크기는 작게 나타났다. 전반적인 조류의 크기와 흐름양상을 알 수 있는 공간적인 조류타원도 분포를 살펴보면, 가덕수로를 통한 최강 창·낙조류의 크기는 약 50~70 cm/s 정도이며, 마산만 입구에서는 약 20~25 cm/s 정도로 유·출입하는 왕복성 조류의 특성을 나타내었다.



**Fig. 5** Flow diagram of tidal residual currents in spring tide (CASE 0)



**Fig. 6** Tidal ellipses of Chinhae Bay in spring tide (CASE 0)

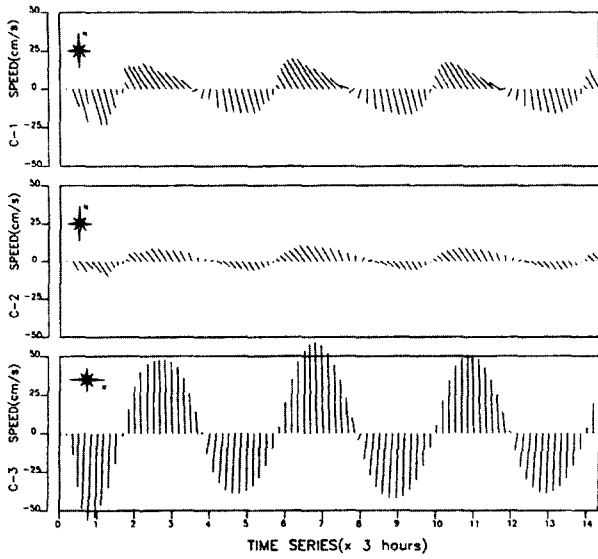


Fig. 7 Stick diagram of the stations in Chinhae Bay (CASE 0)

한편, 정점 C-1에서 조류의 크기는 최대 약 25 cm/s 정도이며, 북서 및 남남동방향으로 왕복하고, C-2에서는 최대 약 15 cm/s 정도의 유속을 나타내며, 북서 및 남동방향을 주축으로 하는 왕복운동을 하고 있다. 진해만의 중앙수로 부근에 위치한 C-3의 유속은 C-1과 C-2에 비하여 매우 빠르며 최대 약 55 cm/s 정도로서 동-서를 주축으로 하는 왕복운동을 하는 것으로 나타났다.

유동제어구조물 설치 및 배치에 따른 대조기시의 해수유동 특성을 5가지 유형의 수치모형실험으로부터 검토한 결과는 다음과 같다(Table 6). 잠제식 도류제 설치(CASE 1)에 따른 해수유동 특성을 파악하기 위하여 잠제식 도류제는 기준수준면하 5 m에 설치하여 구조물 설치전·후의 대조기 최강창조시와 최강낙조시의 유동변화를 Fig. 8과 Fig. 9에 각각 나타내었다.

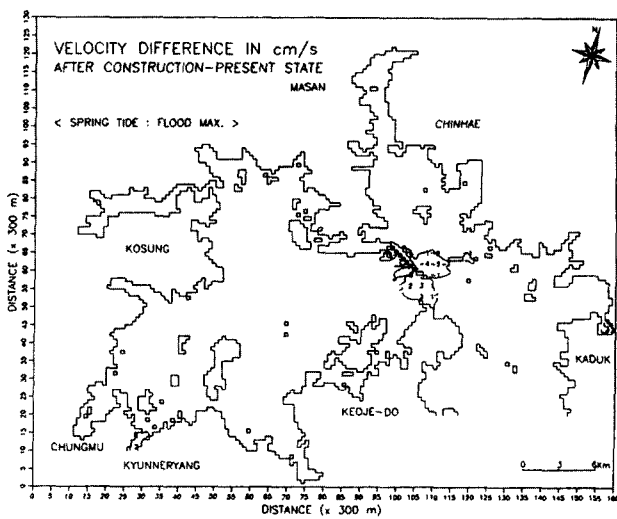


Fig. 8 Velocity differences of the maximum flood flow after construction (CASE 1)

최강창조시 중앙수로에서는 구조물로 인하여 진해만 내측으로 약 1~3 cm/s 정도의 유속증가가, 구조물 동측으로는 약 1~4 cm/s 정도의 유속감소가 나타났다. 최강낙조시 중앙수로부근에서는 유속증가가 약 1~2 cm/s 정도, 구조물 동쪽 복단에서는 1~2 cm/s로 나타났으며, 남단에서는 1~5 cm/s의 유속감소가 나타났다. 한편, 잠제식 도류제에 의한 해수유동변화는 전반적으로 미소한 것으로 나타났다.

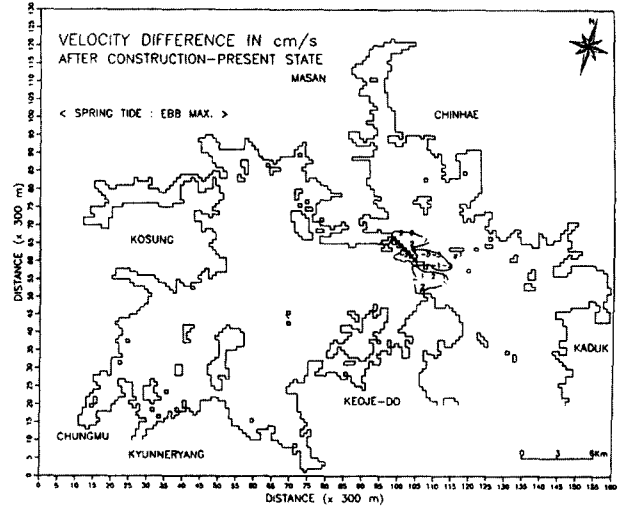


Fig. 9 Velocity differences of the maximum ebb flow after construction (CASE 1)

중앙수로에 설치한 도류제(CASE 2)로 인하여 수로폭의 감소(약 45%인 약 1.8 km)에 따른 대조기 최강창조시 및 최강낙조시의 해수유동양상은 진해만 내측으로는 유속의 분포가 급격히 빨라지는 경향이 나타났으며 구조물 동쪽으로는 유속이 감소하는 경향을 보였다(Fig. 10; Fig. 11). 유동변화범위는 1 cm/s를 기준으로 하였을 때 반경 약 12 km 정도로 나타나 도류제 설치에 따른 해수유동변화가 크게 나타났다.

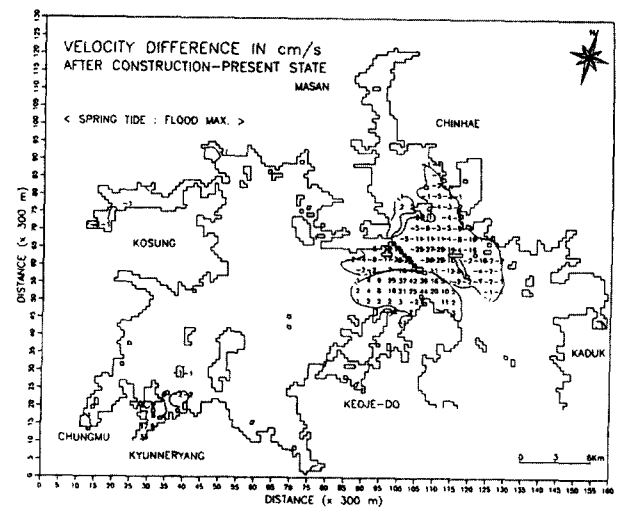


Fig. 10 Velocity differences of the maximum flood flow after construction (CASE 2)

중앙수로와 마산만 내측에 도류제를 설치한 경우(CASE 3)의 해수유동변화의 특성을 살펴본 결과(Fig. 12; Fig. 13), 최강창·낙조시 중앙수로에서 최대 약 50 cm/s에 달하는 유속변화가 나타났으며, 마산만 내측 도류제 부근에서도 최대 8 cm/s 정도의 유속변화가 나타났다.

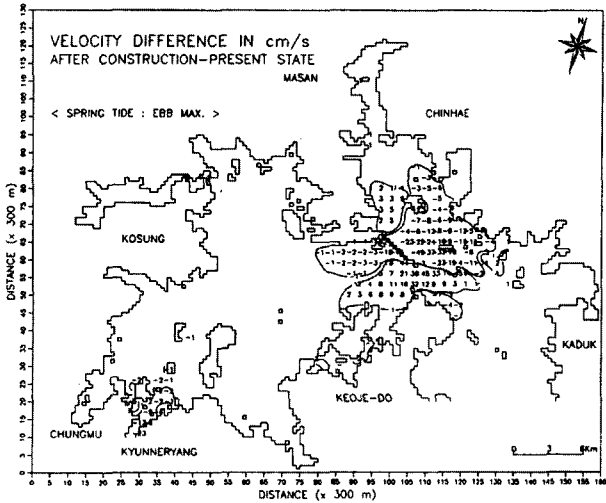


Fig. 11 Velocity differences of the maximum ebb flow after construction (CASE 2)

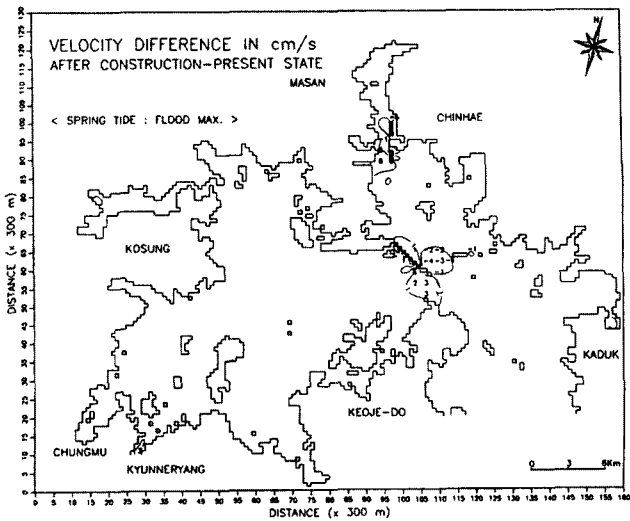


Fig. 12 Velocity differences of the maximum flood flow after construction (CASE 3)

마산만 내측에 도류제 설치(CASE 4)하여 대조기 최강창·낙조시에 대하여 해수유동변화를 비교해 본 결과(Fig. 14; Fig. 15), 구조물 인근에서 최대 7 cm/s 정도까지 유속변화가 나타났으며, 유동변화범위는 1 cm/s를 기준으로 하였을 때 반경 약 3 km 정도로 나타났다. 1 cm/s 미만의 유동변화를 포함한다면 이 구조물에 의한 마산만 내의 해수유동변화 분포범위는 크게 나타났다.

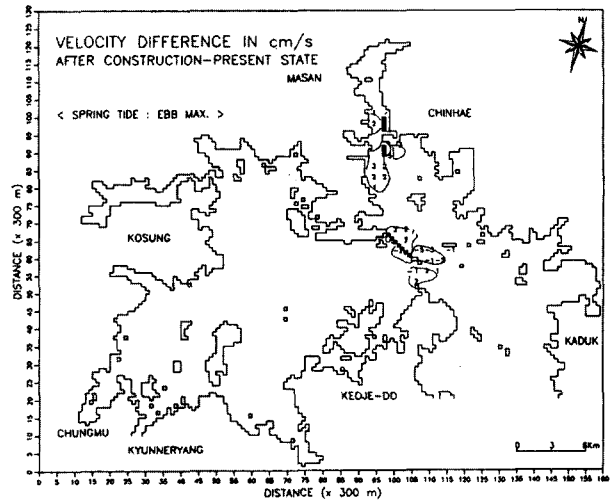


Fig. 13 Velocity differences of the maximum ebb flow after construction (CASE 3)

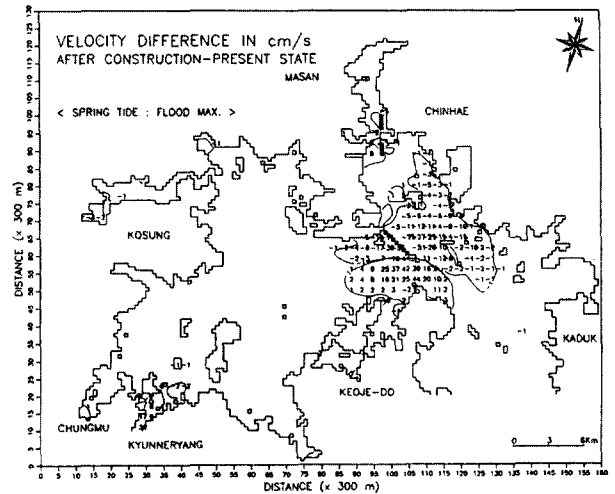


Fig. 14 Velocity differences of the maximum flood flow after construction (CASE 4)

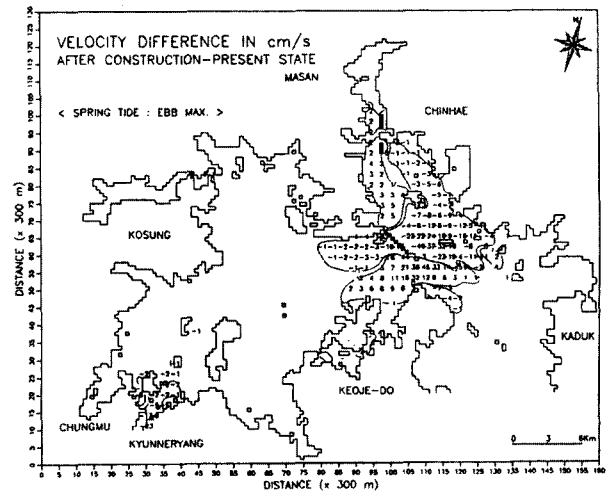


Fig. 15 Velocity differences of the maximum ebb flow after construction (CASE 4)

중앙수로에 잠제식 도류제와 마산만 내측에 도류제를 각각 설치(CASE 5)하여 최강창조시와 최강낙조시의 해수유동변화를 조사한 결과, 중앙수로 부근에서는 약 1~5 cm/s 정도의 유속변화가 나타났으며 마산만 내측에 설치된 도류제 부근에서는 설치 전면부에서 최대 7 cm/s 정도의 유속변화가 나타났다(Fig. 16; Fig. 17). 중앙수로에 설치된 잠제식 도류제에 의한 변화는 CASE 1에서 예상했던 바와 같이 미미하게 나타났으나 마산만 내측에 설치된 도류제는 그 규모가 작음에도 불구하고 수로 주변의 해수유동에 큰 변화를 야기시키는 것으로 나타났다.

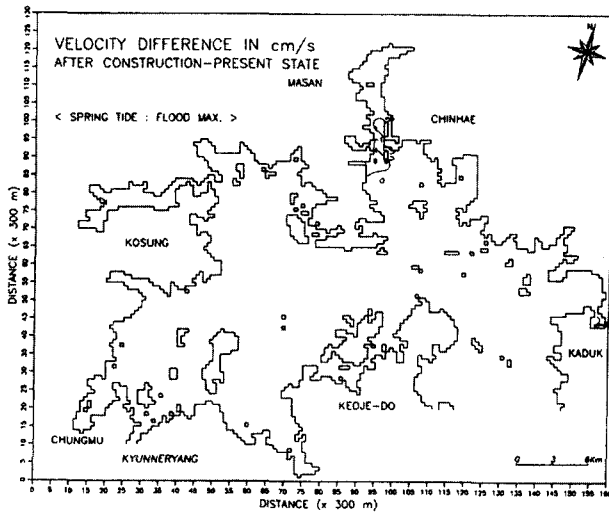


Fig. 16 Velocity differences of the maximum flood flow after construction (CASE 5)

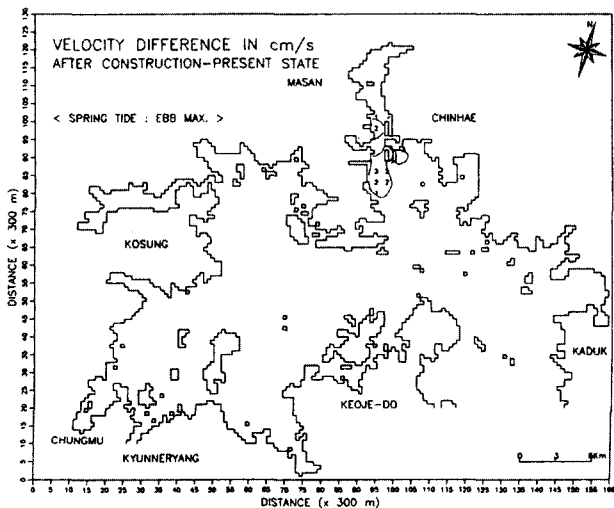


Fig. 17 Velocity differences of the maximum ebb flow after construction (CASE 5)

이상의 수치모형실험결과로부터 유동제어구조물 설치 및 배치에 따른 진해만 해수유동특성은 도류제 설치시 해수유동의

변동범위가 가장 크게 나타남을 확인하였다. 따라서 유동제어 구조물 설치 및 배치에 따른 진해만 전역에서의 최강유속변동 및 유동변화의 변동범위 등의 해수유동 특성 파악은 만내에서의 효율적인 해수교환촉진공법을 결정하는 데 기초자료로서 활용할 수 있으리라 사료된다.

#### 4. 요약 및 결론

진해만내의 해수교환을 촉진시키기 위한 유동제어구조물의 형식 및 배치에 따른 해수순환양상을 수리모형실험과 수치모형실험을 통하여 파악하였으며, 그 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 수리모형실험에서는 구조물로 인한 흐름변동 영향범위가 구조물 설치 인근해역에 국한되어 나타나 지역적 변동양상만을 파악할 수 있었다.
- (2) 수치모형실험에서는 구조물 설치로 인한 흐름변동양상이 만내 전역에서 파악되었으며, 유동제어구조물이 만내의 해수교환에 전반적인 영향을 미침을 알 수 있었다.
- (3) 잠제식 도류제보다는 직접적으로 만내 유동단면적 변화를 야기시키는 도류제에 의한 유동제어구조물이 진해만과 같은 폐쇄성 해역에서 효과적인 해수교환 촉진공법임을 확인하였다.

한편, 해수교환 촉진을 위한 유동제어구조물의 적용시 대상해역의 지형특성 및 유동특성에 따른 구조물의 규모 및 배치의 파악은 필수적이며 특히, 구조물 설치 주변해역에서 보다 정밀한 실험 및 현장조사가 수행되어진다면 유동제어구조물의 설치에 따른 해수교환촉진 효과의 정량적 파악이 가능하리라 생각된다. 연구결과의 신뢰성과 효과 향상을 위해서 수리실험 방법면에서는 추적실험에서의 부표간의 결합, 유속계간의 상호 간섭, 측정장치의 성능 및 3차원적 유동구조 파악 등의 문제점 개선이 요구되며, 수치실험 방법면에서는 3차원 해수유동수치모형의 도입에 의한 유동제어구조물의 배치로 인한 3차원 순환구조의 파악이 요구되는 바이다. 따라서, 이러한 문제점들을 개선한 후에는 보다 정확하게 진해만의 해수유동특성을 파악하고 해수순환을 촉진시켜 해역환경을 개선할 수 있는 방안을 강구할 수 있으리라 기대된다.

#### 후 기

본 연구는 한국해양연구소가 환경부 및 과학기술처의 환경기술연구개발사업의 부분 지원으로 수행된 결과입니다.

#### 참 고 문 헌

김종화(1984). “진해만의 해수교환”, 부산수산대학교 석사학위 논문, pp 36.  
 김차겸(1995). “연안어장에서 유동제어에 의한 환경개선기법”, 대한토목학회지, 15(5), pp 1429~1440.  
 김차겸, 장선덕, 이종섭(1994). “진해만 조류의 2차원 수리 및 수치모델링”, 한국해양학회지, 29(2), pp 83~94.  
 류청로, 김종화, 박종화(1990). “어항의 정온도 향상과 수질개



- 선을 위한 기초적 연구”, 한국어업기술학회지, 26(4), pp 341~352.
- 이석우(1996). “해양·항만조사법 - 해상편”, 집문당, pp 260.
- 이중우, 이명권, 신승호(1997). “환경창조를 지향하는 21세기 해양개발”, 기문당, pp 384.
- 장선덕, 김차겸, 이종섭(1993). “진해만 조류의 현장관측 및 수리모형실험”, 한국수산학회지, 26(4), pp 346~352.
- 한국해양연구소(1983). “적조 및 오염모니터링연구”, BSPE 00048-80-7, pp 222.
- 한국기계연구원(1998). “대형부유구조물 기술지침”, pp 185~187.
- Leendertse, J. J.(1971). “A water-quality simulation model for well-mixed estuaries and coastal seas”, Vol. 2, The Rand Corporation, Santa Monica, California, pp 71~75.
- Murakami, K.(1988). “Hydraulic Model Experiments on Water Exchange for Enclosed Inner Bay”, Int'l Symp. on Scale Modelling, Tokyo, pp 301~307.
- 上嶋英機, 橋本英資, 田邊弘道, 寶田盛康, 山崎宗廣(1989). “大阪灣停滯性水域の流況改善技術する實驗的研究”, 海岸工學論文集, 第36卷, pp 839~843.
- 村上和男(1991). “海水交換における水平・鉛直循環流の効果”, 海岸工學論文集, 第38卷, pp 851~855.
- 堺 茂樹, 小野敏行, 小林貴史, 平山健一, 佐伯 浩(1991). “漁場造成も目的とする消波循環流の水理學的效果”, 海岸工學論文集, 第38卷, pp 846~850.

---

1999년 12월 30일 원고 접수

2000년 7월 27일 수정본 채택