

◎ 論 文

명지·녹산 해역 매립후의 해수 유동에 관한 연구⁺

한 건 모* · 김 기 철* · 김 재 중*

(1993년 2월 9일 접수)

A Study on the Flow Patterns on the Myunggi-Noksan Region due to Reclamation

Kun-mo Han* · Ki-Cheol Kim* · Jae-Joong Kim*

Key Words : Reclamation(매립), Flow Pattern(유동 양상), Turbulent Mixing(난류혼합), Wave Transformation(파랑 변형)

Abstract

Studies on the flow pattern due to reclamation in the Myunggi-Noksan region are carried out based on field observations and numerical experiments. Serial time series measurement of current, temperature and salinity were conducted for 1 tidal period at intervals of 1 hour from surface to bottom on station located at 128° 54' 44" E, 35° 01' 04" N in April and June 1992. Surface current opposite to the subsurface current causes turbulent mixing to make homogeneous salinity pattern in vertical section. Reclamation has little effect on the wave pattern and flow patterns are also nearly similar except on the nearby region of reclamation where flow speed somewhat weakened.

1. 서 론

연안에 방파제를 건설하거나 매립공사를 실시하는 경우 오랫동안 평형상태의 해양환경이 평형을 상실하여 새로운 역학평형을 이루려는 방향으로 변화가 일어난다. 즉, 새로운 육지경계로 인한 파랑의 반사, 굴절, 회절의 변화와 조류의 흐름변화를 필연적으로 야기시키며 이러한 변화는 토사

및 부유물질의 이동에도 물론 직접적으로 작용하여 퇴적기작과 해양환경의 변화를 초래하는 것이다.¹⁾ 이러한 변화는 지금까지 곳곳에 나타나고 있다. 예를 들어 방파제를 축조하여 인근 해수욕장의 퇴적역학이 변화하여 해변의 모래가 유실되고 대신 빨이 퇴적되어 해수욕장으로서의 기능을 상실한다든가 혹은 매립지의 위치선정을 잘못하여 인근해역의 흐름이 차단되고 오염을 가중시켜 환경을 파괴하는 경우가 많다. 그러므로 연안에

+ 본 연구는 교육부 '92년도 지역개발에 관한 학술연구구성비의 지원에 의한 것임

* 동아대학교 해양공학과

서의 공사시에는 공사전에 면밀하고도 장기적인 해양조사를 실시하여 해당 해역의 역학평형을 이루고 있는 요인들을 분석하고 이 요인들로 인해 야기되는 여러 현상들을 파악하며 동시에 수치실험 혹은 수리모형실험 등을 통하여 공사후 예상되는 변화과정 및 결과를 예측하여 공사의 타당성을 결정하는 것은 환경보호적인 측면에서 매우 중요한 일이다.

본 연구는 현재 계획 진행중인 명지녹산해역 매립 후의 해수유동의 변화에 관하여 연구를 하고자 한다. 해수유동은 파랑과 흐름의 형태로 나타나는데 매립공사 계획등에 있어 매립고 산정을 위해서 파랑변화가 중요하며, 주변 해역의 생태계와 환경의 변화 예측을 위해서는 흐름의 변화를 파악하여야 한다. 먼저 현장관측을 통하여 특징적인 해수유동 양상 및 물성의 특성을 파악하였고 수치실험을 행하여 매립전과 매립후의 파랑 및 흐름의 변화를 파악하고자 하였다.

2. 자 료

2-1. 현장관측

명지녹산 매립해역은 낙동강 하구부에 속해 있다. 낙동강 하구 지역은 담수와 해수가 만나 혼합하여 변화가 많고 복잡한 순환 양상을 보이는 곳이다. 이부근 해역은 낙동강 하구언이 건설된 후 항상 유출되던 담수가 낙조시에만 수문을 통하여 방출되어 이에 따라 담수와 해수의 혼합 양상이 바뀌게 되었고 해수유동 양상 또한 바뀌어 새로운 역학평형으로의 변화과정을 거치고 있다. 새롭게 생기는 삼각주와 기존 삼각주의 형태변화 등은 새로운 평형상태로의 전이과정을 보여주는 예이다.²⁾

현장해역을 Fig. 1에 표시하였다. 등심선은 대략 동서방향이며 수심은 삼각주 부근에서 대략 5 m 이내이며 담수의 유출수로를 따라 4~5m 정도의 골이 형성되어 있다. 이 해역의 해수유동을 파악하기 위하여 Fig. 1에 표시된 정점(정점 A-128° 54' 44"E, 35° 01' 04"N)에서 1992년 4월 4일과 1992년 6월 13일의 2차에 걸쳐 1조석 주기

동안의 정선관측을 실시하였다. 관측은 표층에서 저층까지 1m 간격으로 1조석 주기동안 1시간마다 실시하였고 유속, 수온, 염분을 측정하였다. 유속측정은 Marsh-McBirney사의 유속계를 사용하였고 수온 및 염분은 Hydro-Bios 사의 수온염분 측정기를 사용하여 측정하였다.

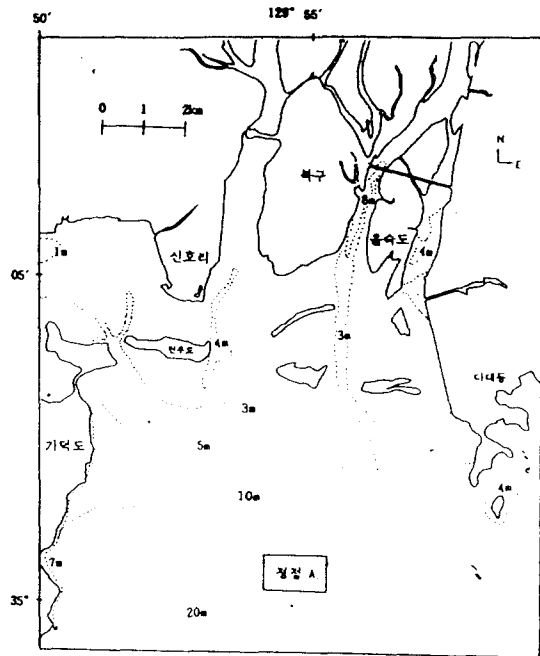


Figure 1. Map showing study area and bathymetry. Station A is the point where 1 tidal observation of current, temperature, salinity was conducted

2-2. 분석

관측정점은 낙동강 하구중 비교적 외해와 인접한 곳으로 하구언을 통해 방출되는 담수의 영향이 조시에 따라 상당히 다를 것이라 예상되는 정점이다. 또한 1차(1992. 4. 4) 및 2차(1992. 6. 13)의 관측은 같은 정점에서 실시하였지만 관측전과 관측동안의 일기는 상당히 달라 이에 의한 변화도 클 것이라 예상된다. 즉 1차 관측시에는 상당한 비바람이 불어 표층에서 저층까지 혼합이 잘 될 수 있는 환경이었고 2차 관측시는 보통의 환

경이었다.

Fig. 2a(1차), 2b(2차)는 0, 5, 10, 15m층의 시간에 따른 염분의 변화를 나타낸 것이다. 이 Fig. 들은 위 2가지 사항 즉, 조시에 따른 담수의 영향 변화와 일기에 따른 혼합환경의 변화를 잘 보여 주고 있다. 여기서 y좌표의 값은 관측값을 평균에서 뺀 값이다. Fig. 2a를 보면 표층의 염분은 다른 층에 비해 담수의 영향으로 2~5% 정도 낮으며 13시에서 14시 사이에 전체적으로 염분이 갑자기 높아진다. 이 자료에서 담수의 흐름을 대

략 알 수 있다. 담수는 낙조동안 하구언에서 방출되지만 창조시에는 수문이 막혀 공급이 중단된다. 낙조동안 방출된 담수는 조류의 흐름에 의한 이류 및 주변해수와 밀도차에 의한 밀도류의 형태로 주변해수와 일종의 밀도전선을 형성하며 퍼져나간다. 특히 창조시에는 담수공급이 끊기므로 낙조동안 방출된 담수는 patch 형태를 이루어 움직이며 정선관측시 담수 patch가 지나가는 동안에는 낮은 염분을 나타내다 담수 patch가 지나가면 갑자기 염분이 높아지게 되는 것이다.

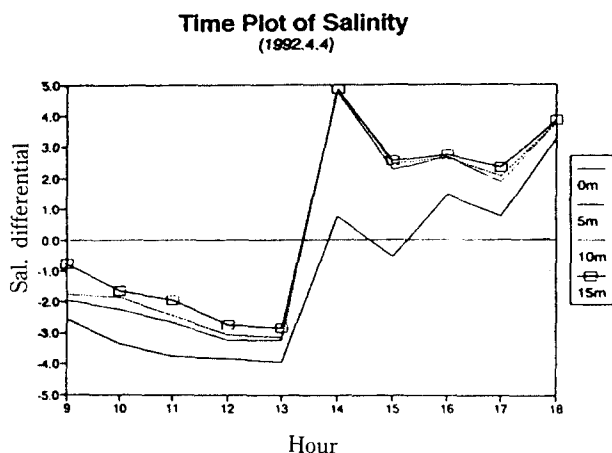


Figure 2a. Time plot of salinity differential in April 1992.

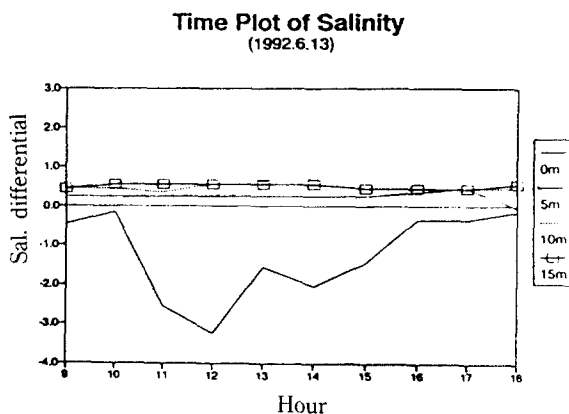


Figure 2b. Time plot of salinity differential in June 1992.

1차 관측시의 염분 변화를 보면 표층에서 저층까지 비슷하게 변하고 있지만 (Fig. 2a 참조) Fig. 2b의 2차 관측시 염분변화는 표층만 시간에 따른 변화를 보일뿐 나머지 층에서는 거의 변화가 없다. 1차 관측시는 관측해역의 수직혼합이 활발하게 일어나 표층에서 저층까지 비슷한 양상으로 변화하지만 2차 관측시는 수직혼합이 일어나지 못하고 표층만 담수의 영향으로 시간적 변화를 보이는 것이다. 즉, 바람이 지속적으로 불어 수직혼합이 일어날 수 있는 환경이 되면 관측해역에서는 표층에서 저층까지 잘 반응을 하여 수직혼합이 활발히 일어나지만 평상시에는 담수는 1~2 m 정도의 렌즈 형태로 해수와 층을 이루어 움직인다.

1차, 2차 관측유속의 시간적 변화를 Fig. 3a, 3b에 표시하였다. 표층의 유속은 대체로 남서 방향이 우세하고 밀층들에서는 낙조시에는 동남동 방향, 창조시에는 서북서 방향의 왕복성 조류를 나타낸다. 그러므로 낙조시에는 표층과 밀층의 흐름방향이 서로 반대가 되고 창조시에는 거의 같은 방향이 된다. 이러한 흐름 양상은 2가지 효과를 나타내며 자료에서도 잘 보여준다.

첫째, 낙조시에는 창조시보다 흐름의 방향과 세기가 수직적으로 일정하지 않으며 창조류가 낙조류보다 전반적으로 강하게 흐르며 지속시간도 길어진다. 이는 낙조시에는 표층과 밀층의 흐름이 달라 원래의 흐름을 방해하는 방향으로 운동량이 전달되므로 생기는 현상이다. 창조시에는 상하의

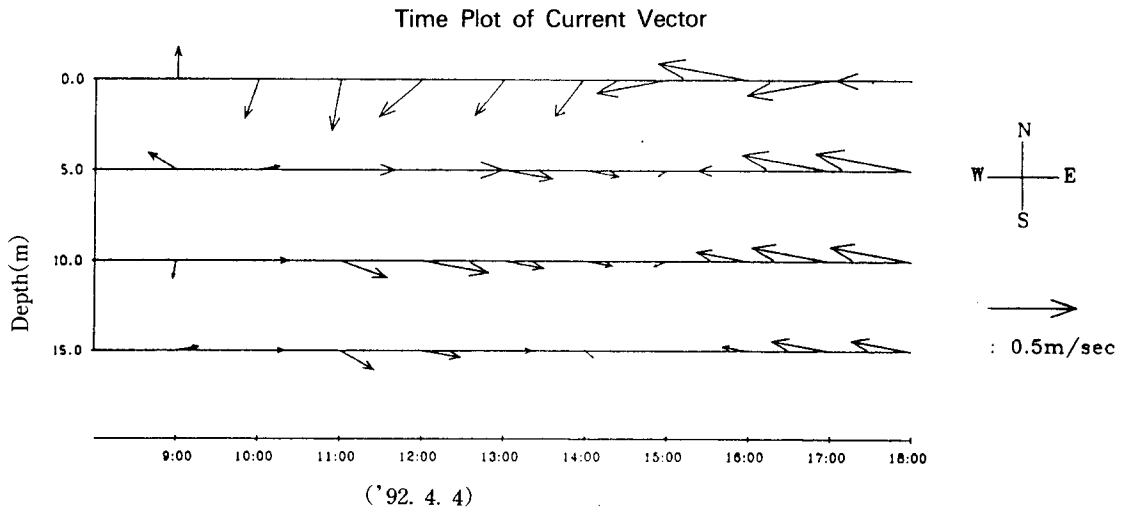


Figure 3a. Time plot of current vector in April 1992.

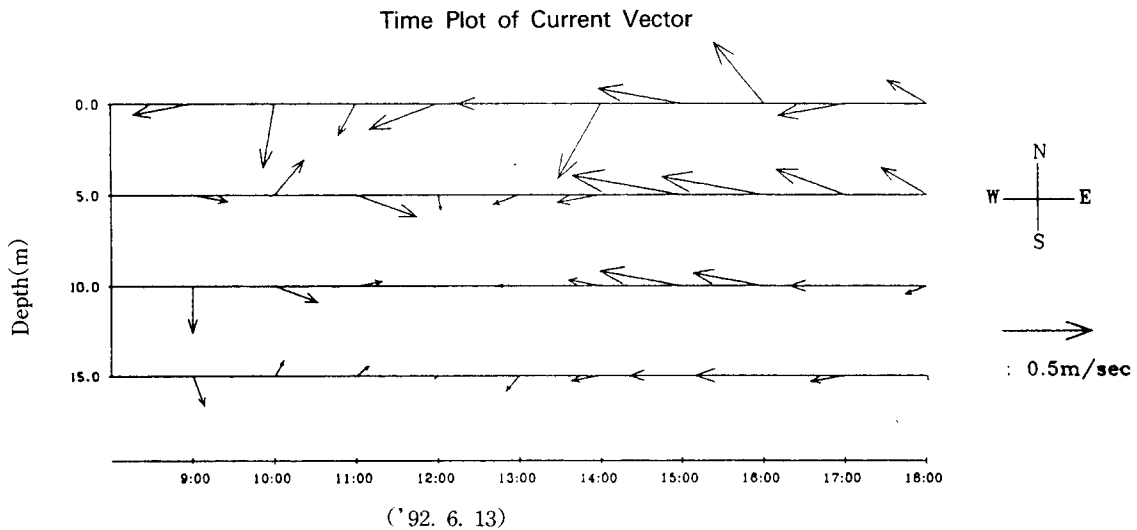


Figure 3b. Time plot of current vector in June 1992.

흐름방향이 거의 비슷하므로 상층에서 하층까지 일정한 흐름 양상을 보여주고 흐름의 세기도 낙조시 보다 커지게 된다.

둘째, 상하층 반대방향의 흐름에 의해 담수와 해수의 수직 혼합이 활발하게 되어 표층과 밑층의 염분차이가 거의 없이 된다. Fig. 4a, 4b에 1차 및 2차 관측에서 최대낙조류시 측정된 흐름과 염분의 수직분포를 나타내었다. 밑층에서 동남동

방향의 낙조류가 흐름에도 불구하고 표층에서는 남서방향으로 담수의 흐름이 나타나고 있다. 염분분포에 나타난 염분값은 측정치에서 가장 최소 염분값을 뺀 값이다. 표층과 흐름방향이 다른 2m 층의 값은 차이를 보이지 않고 있어 수직 혼합이 잘 되어 있음을 보여 준다. Fig. 4c, 4d에 담수의 흐름방향과 같은 창조류시의 흐름과 염분을 수직 구조를 나타내었다. 표층과 밑층의 흐름방향은

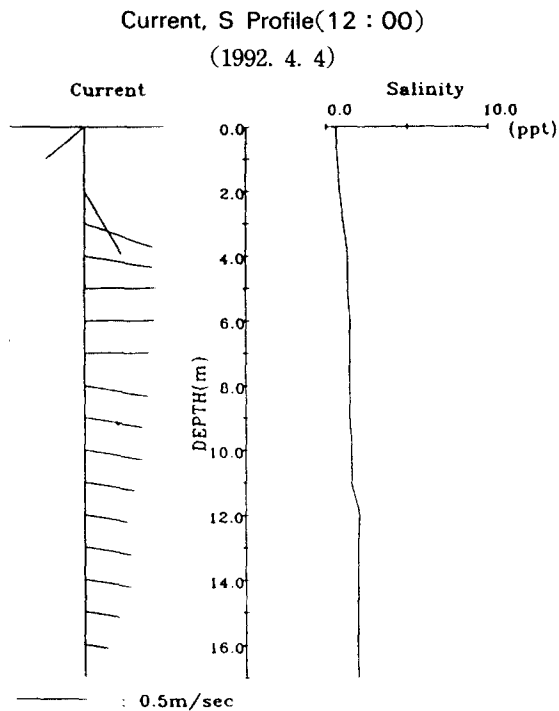


Figure 4a. Depth profile of current and salinity at 12 : 00 in April 1992.

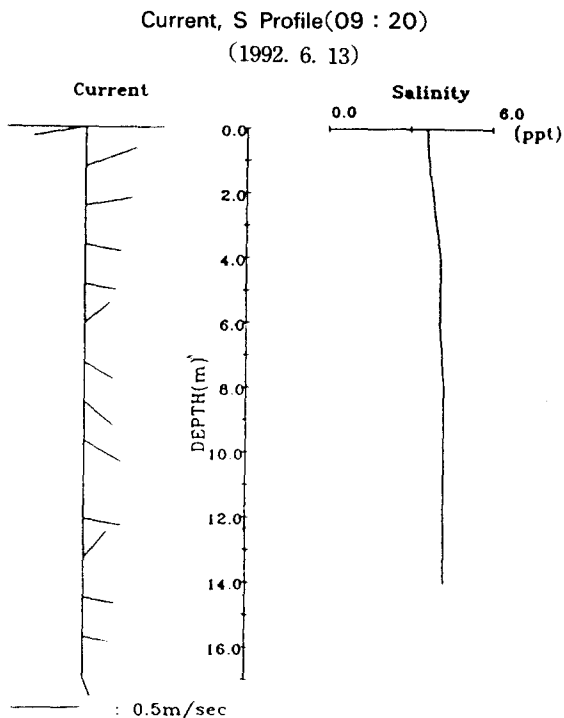


Figure 4b. Depth profile of current and salinity at 09 : 20 in June 1992.

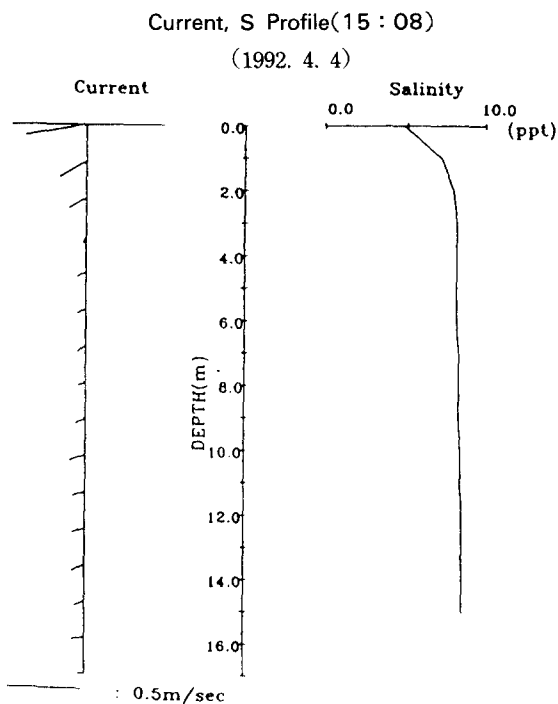


Figure 4c. Depth profile of current and salinity at 15 : 08 in April 1992.

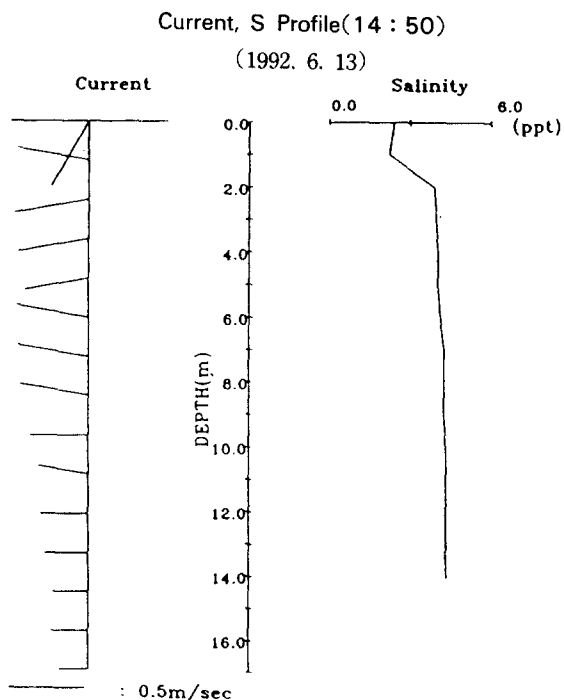


Figure 4d. Depth profile of current and salinity at 14 : 50 in June 1992.

일치하지만 염분은 상하층을 이루고 있음을 알 수 있다. 이로서 관측해역은 조시에 따라 수직혼합이 달라지며 따라서 성층상태도 달라진다는 것을 알 수 있다.

3. 수치모델

3-1. 파 랑

연구대상해역인 명지·녹산해역은 해저지형이 대단히 복잡하고 해역내에 가덕도, 진우도, 백합등, 대마등과 같은 섬들이 많기 때문에 파랑의 굴절 회절현상들이 복잡하게 나타난다. 따라서, 본 연구에서는 파랑변형계산을 위해 파랑의 회절과 굴절을 동시에 고려한 타원형 환경사 방정식²⁾을 사용하였다.

파랑변형 모델의 지배방정식은 Eiconal 방정식과 Energy flux 방정식으로 구성되며 각각 식 (1), 식 (2) 와 같다.

$$\frac{1}{a} \left[\nabla^2 a + \frac{1}{CC_g} (\nabla a \nabla CC_g) \right] + k^2 - |\nabla S_0|^2 = 0 \dots\dots\dots (1)$$

$$\nabla \cdot (a^2 CC_g \nabla S_0) = 0 \dots\dots\dots (2)$$

- 여기서, a : 진폭
- CC_g : 군속도
- k : 파수
- S₀ : 위상함수

(1)식과 (2)식의 파랑변형 지배방정식을 차분화 하기 위하여 연안을 따른 방향을 y축, 안층방향을 x축으로 정의하고 파랑진행방향으로는 전방차분, 직각방향으로는 중앙차분을 하였다.

심해방향의 초기 가정치는 Snell's law로 부터 구하였으며, 파고의 결정은 천수계수와 굴절계수, 회절계수를 고려하였다. 연구대상해역의 연안역은 수심이 낮아서 대체로 쇄파대내에 속하게 되며, 따라서 쇄파대내에서의 파랑추적이 필요하다. 쇄파대 내에서의 파고계산은 바닥 경사와 주기가 고려된 Weggel³⁾의 식을 사용하였으며 쇄파대 내에서의 회절효과는 무시하였다.

경계조건은 y방향(횡방향)의 경계는 중앙차분 형태로 implicit하게 표현되어 있어 횡단위의 횡방향 iteration에 의하여 구한다. 그러므로 각 행 끝에서 경계조건은 임의의 함수 F에 대하여 $\partial F / \partial y = 0$ 이다. 즉, j=n과 j=1 격자에서의 모든 변수 값은 j=n-1과 j=2에서의 값과 같아야 한다.

파랑의 진행방향으로는 수치계산이 row-by-row forward marching 형태이며 외해에서의 입사조건으로는 파고, 파향, 주기를 준다.

파랑변형계산의 초기값인 수심자료는 수로국 발행 해도(1985년 발행)를 이용하였으며 심해파의 제원으로는 부산항자료⁴⁾를 분석하여 사용하였다. 격자간격 $\Delta x, \Delta y$ 를 각각 250m로 하여 총 격자수는 51×56이다. 이상의 입력자료를 요약하면 Table 1과 같다. 입력자료로부터 얻은 파랑변형계산의 매립전후의 결과는 Fig. 5a, Fig. 5b와 같으며 결과치는 무차원화 된 파고의 등수심선을 나타낸 것이다. 매립경계는 현재 진행되고 있는 매립사업의 확정 계획선을 채택 하였다. 쇄파대 밖의 파랑변형 계산에서는 회절과 굴절을 동시에 고려하여 계산하였다.

Table 1. Input data of wave transform model

Wave Height	9.0m
Wave Period(T _{1/3})	15.0sec
Direction	S 10°W
Grid : Δx	250m
Δy	250m

매립전과 매립후의 파랑계산을 나타낸 Fig. 5a, Fig. 5b를 비교분석해 보면, 매립후 파랑변형계산에서 매립경계 주변으로 다소 파가 집중되는 현상을 보이는데, 이는 수치계산에서의 경계처리 과정에서 발생한 것이라고 판단되고 전체적인 계산영역에서 매립으로 인한 파랑변화는 거의 없음을 알 수 있다.

3-2. 흐 름

연구해역에서의 해수유동은 전체적으로 조류에 의해 주도가 되므로 Flather와 Heaps⁶⁾에 의한 조류모델을 사용하여 매립전과 매립후의 조류분포

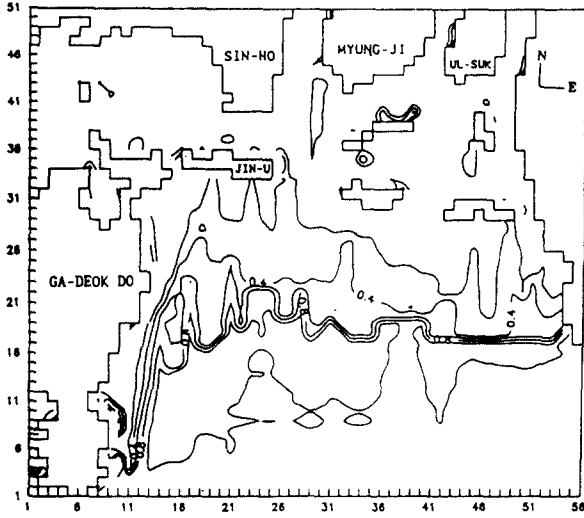


Figure 5a. Wave height distribution before reclamation

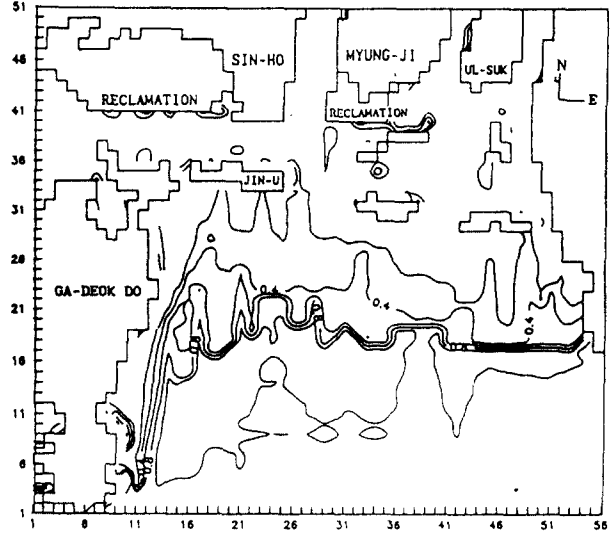


Figure 5b. Wave height distribution after reclamation

를 비교 분석하였다. 모델의 기본방정식은 수심 적분된 2차원 연속방정식과 운동방정식이며 다음과 같다.

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial(HU)}{\partial x} + \frac{\partial(HV)}{\partial y} = 0$$

$$\frac{\partial U}{\partial t} + U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - fV + \frac{kU\sqrt{U^2+V^2}}{H} + A_h \nabla^2 H U = 0$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + U \frac{\partial V}{\partial x} + V \frac{\partial V}{\partial y} + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} + fU + \frac{kV\sqrt{U^2+V^2}}{H} + A_h \nabla^2 H V = 0$$

여기서 변수들은 다음과 같다.
 ζ : 평균해면에서의 해수면 상승
 U, V : 수심평균 유속 즉,

$$U = \frac{1}{H} \int_h^\zeta u \, dz, \quad V = \frac{1}{H} \int_h^\zeta v \, dz$$

H : 총 수심($h + \zeta$)
 f : Coriolis parameter

g : 중력가속도
 A_h : 수평 난류확산계수
 k : 해저 마찰 계수

위 식들의 해는 유한차분식을 사용하여 구하였고 자세한 과정은 Kim(1991)⁷⁾에 언급되어 있다. 격자 간격은 $\Delta x = \Delta y = 250m$ 로 하였고 격자수는 x, y 방향으로 각각 $i=56, j=51$ 로 하였다. 계산 간격은 다음과 같은 CFL 안정조건을⁸⁾ 만족시키며 6초로 하였다.

$$\sqrt{3gH} \frac{\Delta t}{\Delta s} \leq 1$$

여기서 H 는 가장 깊은 수심을 나타낸다. 외해의 개방경계에서 조석의 상승하강을 주었고 이때 사용된 조석은 M_2 와 S_2 분조이며 조화상수 값은 다대포와 가덕도에서의 값(Table 2)⁹⁾을 사용하였다. 명지 녹산지역의 매립전과 매립후 2가지 경우에 대해 계산을 하여 비교하였는데 Fig. 6에 계산영역 및 격자와 2경우의 계산에 대한 결과 비교를 위해 선정한 2점을 나타내었다. 계산은 2조석주기가 지난 후 안정되었으며 8조석주기 동안 수행하여 마지막 1조석주기의 값을 출력하여 분석하였다.

Tbale. 2 Harmonic constants used in the circulation model

Location	Amplitude(H) phase lag(g)	Tidel constituents	
		M ₂	S ₂
Ga-deok Is.	H(cm)	56.0	28.0
	g(°)	240.0	268.0
Da-dae-po	H(cm)	46.0	22.2
	g(°)	235.0	261.7

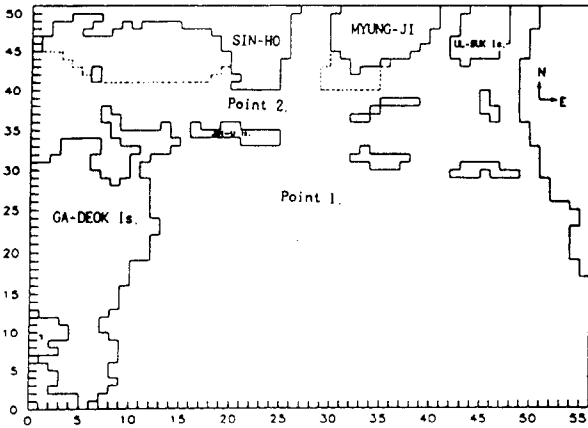


Figure 6. Map showing grid and comparison point 1, 2

Fig. 7a, 7b에 명지 녹산지역의 매립전에 대한 계산결과 최강 낙조류(Fig. 7a)와 최강 창조류(Fig. 7b)를 나타내었다. 가덕도 남단 부근에서는 최강 낙조류시 북서방향으로 60~70cm/sec의 흐름을, 최강 창조류시는 약 1m/sec의 남서류를 나타내었고, 진우도와 장자등 사이, 장자등과 백합등 사이에서는 낙조류시는 남하류, 창조류시는 북상류의 왕복성 조류형태를 보였다. 신호와 진우도 사이에서는 낙조시 동향, 창조시는 서향의 흐름을 나타내었다. 전반적으로 창조류시가 낙조류시 보다 흐름의 세기가 커지고 오래 지속되었으며 정선관측 결과와의 비교에서도 비교적 잘 일치하였다.

Fig. 8a, 8b는 명지 녹산지역의 매립후 계산된 최강 낙조류와 최강 창조류를 나타낸 그림이다. 흐름 양상은 매립전과 비교하여 전반적으로 비슷하지만 매립지역 부근에서는 흐름의 세기가 약간

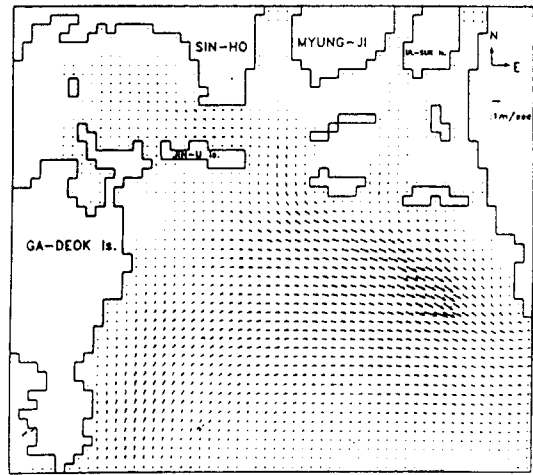


Figure 7a. Maximum ebb current before reclamation

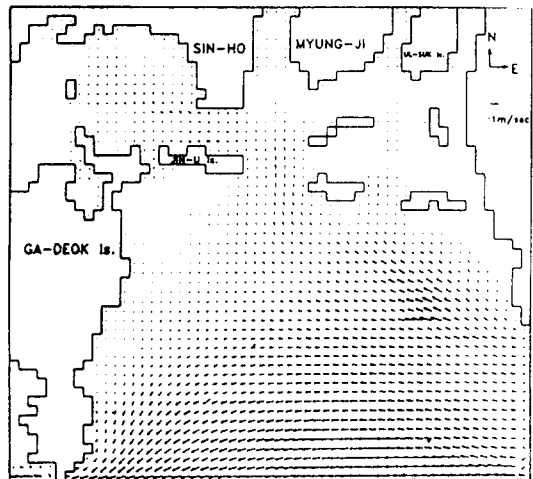


Figure 7b. Maximum flood current before reclamation

씩 감소함을 알 수 있다. Fig. 6에 표시된 비교점(point 1, point 2)에서의 해수면 상승과 하강(Fig. 9a, 9b) 및 흐름의 변화(Fig. 10a, 10b)를 보면 point 1에서는 거의 변화를 보이지 않지만 녹산 매립지역 부근인 point 2에서는 약간 감소함을 보여 주어 결국 매립후의 유동은 매립지역 부근에서 흐름의 세기를 약간 감소시키는 정도의 변화를 보일 것으로 예상된다.

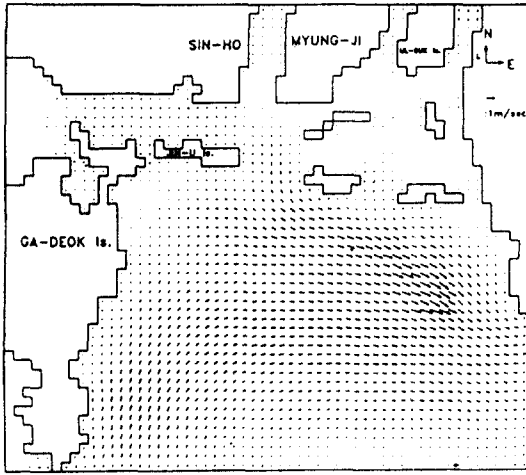


Figure 8a. Maximum ebb current after reclamation

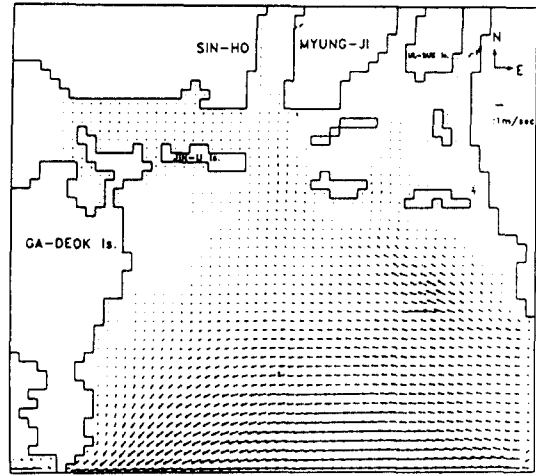


Figure 8b. Maximum flood current after reclamation

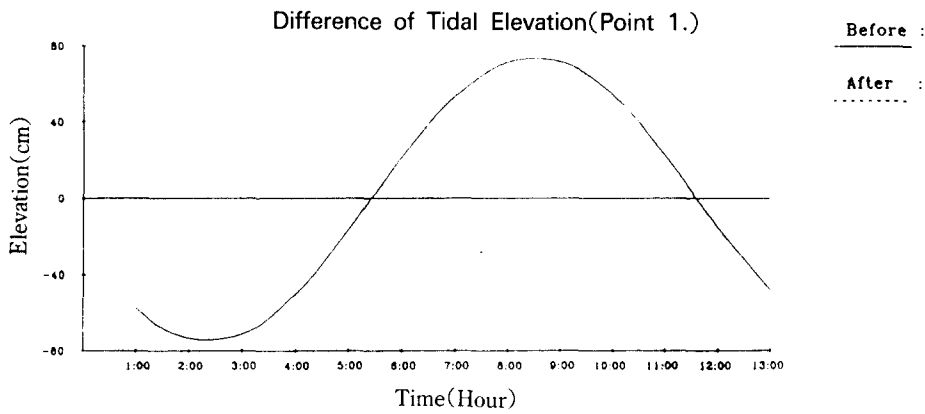


Figure 9a. Difference of tidal elevation(Point 1.)

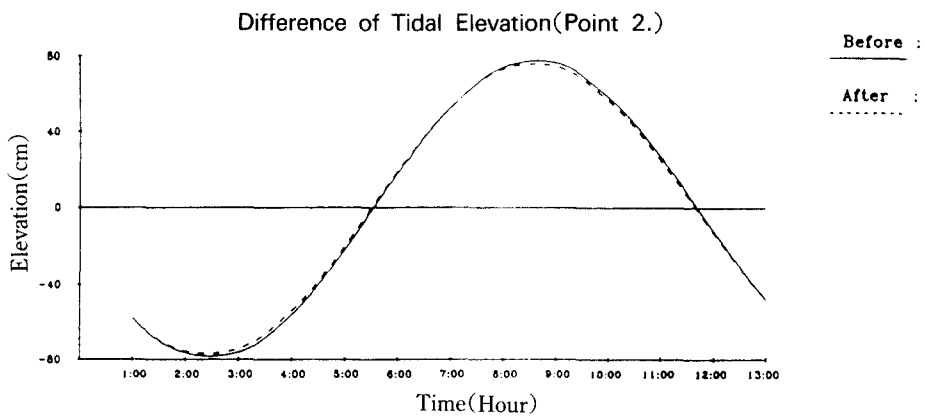


Figure 9b. Difference of tidal elevation(point 2.)

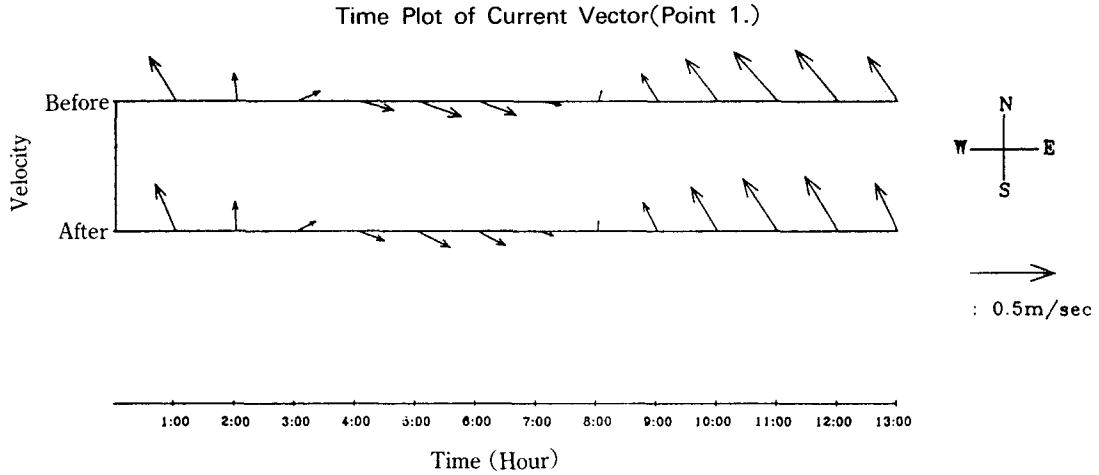


Figure 10a. Time plot of current vector before and after reclamation at point 1

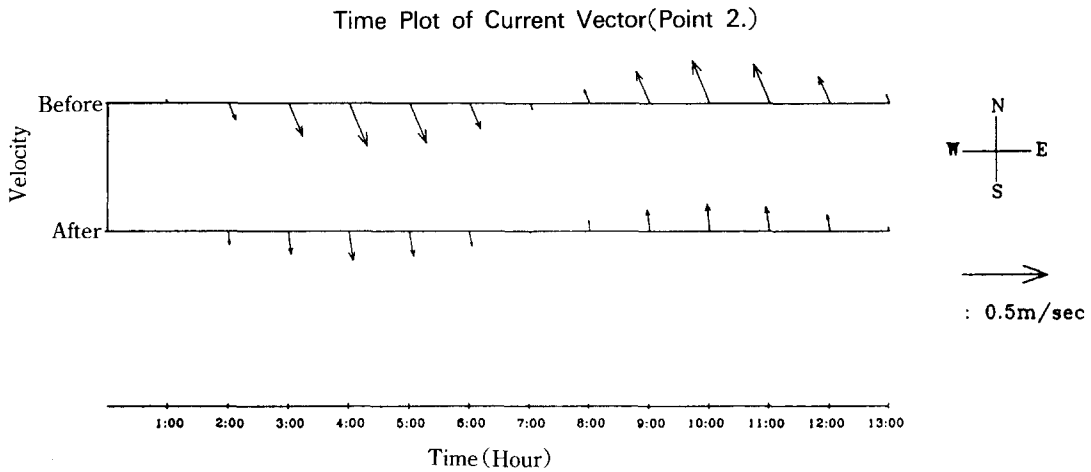


Figure 10b. Time plot of current vector before and after reclamation at point 2

5. 결 론

명지 녹산해역의 매립후의 해수유동을 파악하기 위해 정선관측에 의해 낙동강 하구부의 유동특성을 분석하였고 파랑과 흐름의 수치모델에 의해 매립전과 매립후의 유동을 비교하였고 그 결과는 다음과 같다.

- 1) 낙조동안 방출되는 담수는 주변해수와 혼합되며 주변해수의 흐름 및 밀도차에 의한 밀도류에 따라 군(patch)을 이루어 이동하여 이에

따라 주변해역은 결국 시간에 따라 염분변화를 나타낸다.

- 2) 수직혼합을 잘 일으킬 수 있는 환경이 되면 관측해역 부근은 전체 수심에서 잘 반응을 하여 표층에서 저층까지의 변화 양상이 비슷하지만 평상시는 표층과 약 1~2m의 층을 이루어 수직혼합은 잘 일어나지 않는다.
- 3) 낙조시 담수의 흐름과 밀층의 흐름이 반대가 되면 수직적으로 흐름의 양상이 불규칙해지며 흐름의 세기도 약해지지만 창조시 흐름의 방

- 향이 일치하면 표층에서 저층까지 흐름의 양상이 비슷하고 흐름의 세기도 커지며 창조의 지속시간도 길어진다.
- 4) 담수의 흐름과 밀층의 흐름이 반대가 되면 표층과 밀층의 수직혼합이 활발해서 염분의 차이를 없애지만 흐름이 일치가 되면 표층과 밀층의 염분차가 커진다.
 - 5) 회절과 굴절을 동시에 고려한 파랑변형계산의 결과, 매립으로 인한 해역내에서의 파랑변형은 거의 없다고 판단된다.
 - 6) 흐름모델의 결과 매립전과 매립후의 흐름의 양상은 비슷하지만 매립해역 부근에서는 전반적으로 흐름의 세기가 작아진다.

참 고 문 헌

1. 김영의, “낙동강 하구언 일대의 수문학적 조사”, 환경연구노트 제1호, pp.77~86, 1992.
2. Berkhoff, J. C. W., “Computation of combined refraction-diffraction”, Proc. 13th International Conf. on Coastal Eng., ASCE, 1972.
3. Ebersole, B. A., Regional coastal process numerical modelling system, Tech. Rep. CERE-86-4, US Army Eng. Waterways Exp. Station, Vicksburg, Miss., 1986.
4. Weggel, J. R., “Maximum breaker height”, Journal of waterways, Harbors, and Coastal Eng. Div., Vol. 78, No. WW4, 1972.
5. 부산지방 해운항만청 부산항 건설 사무소, “부산항 파랑관측 보고서”, 항만청 1985, 1986, 1987.
6. Flather, R. A. and Heaps, N. S., “Tidal computations for Morecomb Bay”, Geophys. J. R. Astr. Soc., Vol. 42, pp.489-517, 1974.
7. Kim, K. C., “Advective-diffusion model for the coastal waters”, DEPRI, Vol. 14(2), pp. 55~72, 1991.
8. Richtmer, T. D. and Morton, K. W., Difference methods for initial-value problems, John wiley and Sons, New York, 1967.
9. Choi, B. H., “A tidal model of the Yellow Sea and the Eastern China Sea”, KORDI, BSPI000 19(3)-36-2, 1980.