

부산항의 개발단계별 수질환경변동특성에 관한 연구

고영찬 · 김종인* · 류청로**

한국항만기술단, *동아대학교 토목공학과, **부경대학교 해양공학과

On the Characteristics of the Water Quality Changes due to the Development Phases of Pusan Port

YEONG-CHAN KO, JONG-IN KIM* AND CHEONG-RO RYU**

Korea Port Engineering Corporation, Dept. of Civil Engineering, *Donga university, Busan 604-714, Korea

**Dept. of Ocean Engineering, Pukyong National University, Busan 608-739, Korea

KEY WORDS: Development of Pusan Port 부산항개발, Numerical experiments 수치실험, Lagrangian particle tracking model 라그랑
쥐 입자추적모델, Water quality changes 수질변화, Water exchange rate 해수교환율

ABSTRACT: This study aims to examine the characteristics of the water quality variation in relation to the change of water exchange rate with respect to the development phases of the Pusan port. To clarify the characteristics, water exchange caused by the variations of coastline shape and water surface area was examined by the numerical experiments using the Lagrangian particle tracking model based on 2-D shallow water equation. As the results of numerical experiments, it was proved that the water exchange in the Pusan port was decreased mainly due to the port development and the breakwaters construction. During the port development phases from 1875 to 1998, 35 % of the sea-space in the port had decreased to make hinterland spaces. This resulted in the loss of wet-land and coastline change as well as decrease of the water exchange rate at the sea side. The city population in that period had rapidly increased from several thousands to 4 millions, resulting in the large discharge of sewages into the port area. Under the these environmental conditions, it can be clearly said that the water quality in the Pusan port is sensitively affected by the discharge of urban sewages decrease of the water exchange rate in relation to port and urban developments. In the study, the temporal changes of water quality were discussed with respect to the port development phases. It was clear that the water quality was controlled by the exchange rate change under the port development as well as the input impact into the port from the urbanized city area. To make clean sea of the Pusan port, it is suggested that the sewage control, the water exchange and coastline control should be systematically checked under the concept of eco-friendly development and environmental management.

1. 서 론

부산항은 우리나라 최대 규모의 상항(商港)인 동시에 가장 오랜 역사를 지닌 항으로 1876년 개항과 함께 해상교역량이 점차 증가하여 1945년 해방 전까지 근대항으로 변모하는 과정에서 대규모 해안매립사업이 시작되었다. 1911년 부산축항 제 1기 공사를 시작으로, 1917년 부산축항 제 2기 공사, 1927년 남방파제 축조공사, 부산축항 제 3기 공사(1936년~1940년)를 통하여 북 방파제가 건설된 후에야 비로소 오늘날의 부산 북내항이 탄생하게 되었다. 이로 인하여 항내의 자연 해안선은 거의 사라지고, 공유수면의 면적도 적지 않게 감소되었다. 또한 1945년 해방 후 1960년대 제 1, 2차 경제개발 5개년 계획의 획기적인 성공으로 해상화물의 물동량이 급증함에 따라(전국 수출입 화물의 40%) 부산항개발의 필요성이 대두되어 항만시설 확충이 불가피해졌다. 이미 기존의 항만시설이 한계점에 도달한 부산 북내항은 1974년 부산항개발 제 1단계 사업과 1979

년 부산항개발 제 2단계 사업 후에는 더 이상 개발의 여지가 없어짐에 따라 부산 북외항 개발의 필요성이 절실하게 대두되었다. 1985년 부산항개발 제 3단계 사업을 시작으로 1989년에는 조도방파제, 1991년에 오륙도 방파제가 건설되면서 현재의 부산 북외항이 완성되었다. 더불어 1997년 부산항 제 4단계 개발사업을 거치면서 부산항내의 해안선 길이와 형상은 크게 변화하였으며, 항내의 공유수면도 적지 않게 감소되고 자연 해안선 또한 대부분 사라지게 되었다(부산시, 1998; 부산지방해운항만청, 1982, 1990, 1991).

따라서 본 연구에서는 1876년 개항이후 1998년까지 연대별 해안선의 연장 및 형상 변화와 자연 해안선 및 인공 해안선의 구성비를 조사하고, 개항이후 현재까지 부산항의 변모과정에서 감소된 항내의 지형 및 공유수면적 변화가 부산항내의 해수유동 및 해수교환율에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2차원 조류모델을 이용하여 부산항내의 해수유동을 재현하고, 재현된 유동장 아래에서 Lagrangian적 입자추적실험을 실시하였다. 또

한, 실측된 부산항내의 수질자료와 비교·분석하여 부산항 개발에 따른 수질환경변동특성과의 관련성을 규명하였다.

2. 부산항 개발현황

2.1 공유수면 매립공사

부산항은 1876년 부산포란 명칭으로 개항한 이래 교역량 증가로 항만시설을 확충하기 위하여 1898년 용두산(구 부산시청사)을 깎아 갯벌과 바다를 매운 사업이 부산항 매립공사의 효시가 되었다. 그 후 1911년 부산축항 제 1기 공사, 1919년 부산축항 제 2기 공사, 1936년 부산축항 제 3기 공사를 거치면서 현재의 제 1~4 부두 및 중앙부두가 건설되었다. 한편, 민영사업으로는 1902년 부산매축공사에 의해 현 중앙동에 첫 매립사업이 시행된 후 조선기업사에 의해 1913년부터 부산진에 476,656 m^2 의 공유수면이 매립되었고, 이 매립지와 인접하여 부산진 매축회사에 의해 1926년부터 지금의 우암동 일대까지 1,035,508 m^2 에 이르는 해안매립사업이 시행되었다. 1945년까지 부산항 개발 전 및 개발 후의 지형은 각각 Fig. 1과 Fig. 2에 나타난 바와 같다.

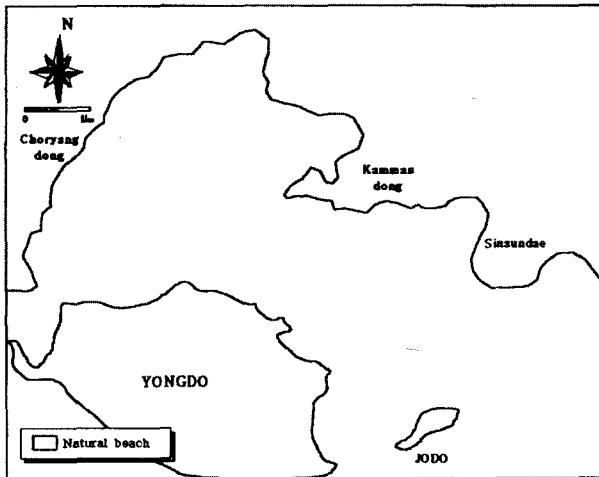


Fig. 1 The natural coastline of Pusan port on 1875

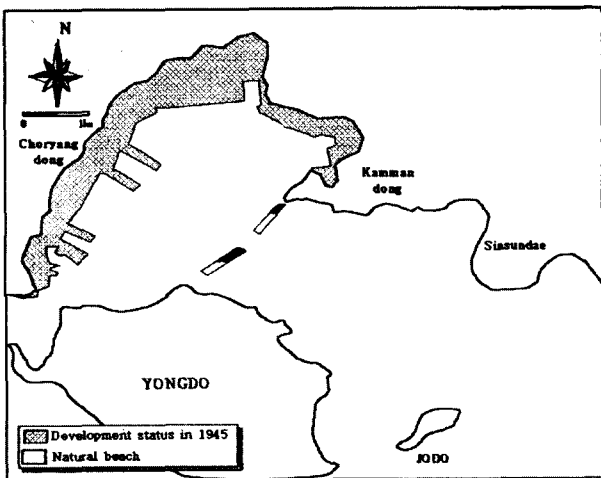


Fig. 2 Development status of Pusan port on 1945

1960년대 제 1, 2차 경제개발 5 개년 계획이 성공을 거둬에 따라 해상물동량 증가로 인하여 기존시설을 이용함이 한계에 달하여 항만시설물 확충이 불가피해졌다. 따라서 부산항은 1974년 부산항개발 제 1단계사업을 시작으로 제 4단계사업을 거치면서 현대적인 항만으로 변모하였다. 1946년부터 1998년까지 매립에 의하여 변화된 부산항의 평면도는 Fig. 3~Fig. 4에 나타난 바와 같다(대우건설, 1998).

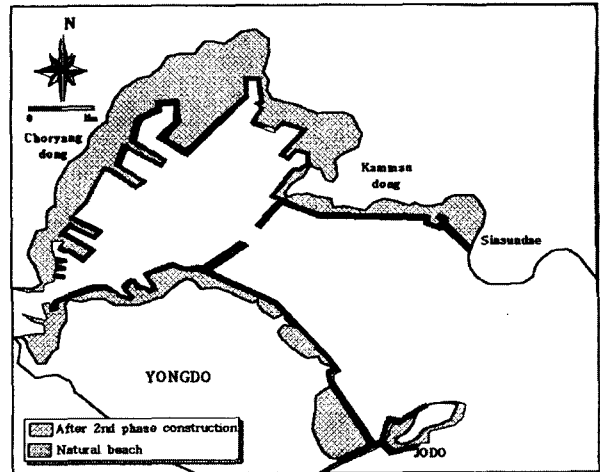


Fig. 3 Coastline changes by 1st & 2nd phase construction of Pusan port

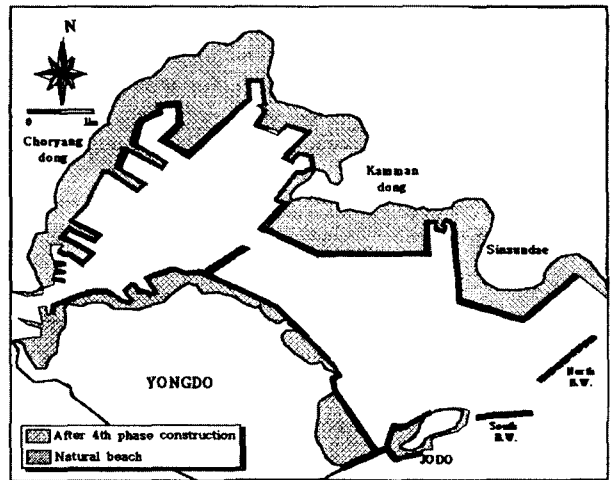


Fig. 4 Coastline changes by 3rd & 4th phase construction of Pusan port

2.2 부산항의 해안선 변화

부산항개발과 공유수면매립공사가 연차적으로 진행됨에 따라 해안선의 연장 및 자연해안선과 인공해안선의 점유비율변화를 파악하기 위하여 부산항을 내항역(영도대교~북내항 방파제), 외항역(북내항 방파제~외항 방파제) 및 항내의 전역으로 구분하여 나타낸 것이 Fig. 5~Fig. 7 이다.

Fig. 5는 부산 북내항의 해안선변화를 나타낸 것으로, 해안선

의 연장은 1875년에 13.3 km 이었던 것이 1905년을 제외하고는 꾸준히 증가하여, 1972년에는 20.9 km로서 최대가 된 후 1995년에 18.5 km 로 감소하였다. 해안선의 연장이 가장 길었던 1972년에는 1875년보다 7.6 km나 증가하였는데, 이는 1970년대 해상물동량 증가에 대비하기 위하여 항만시설 확충사업이 활발히 전개되었기 때문이다.

1875년 당시 자연해안선의 연장은 13.3 km 이었으나, 1905년에는 10.3 km, 1936년에는 2.5 km로 감소하였다. 그 후 1943년에는 자연해안선은 사라지고 인공해안선만 15.2 km로서 해안선연장은 1875년 보다 1.9 km 증가하였음을 알 수 있다.

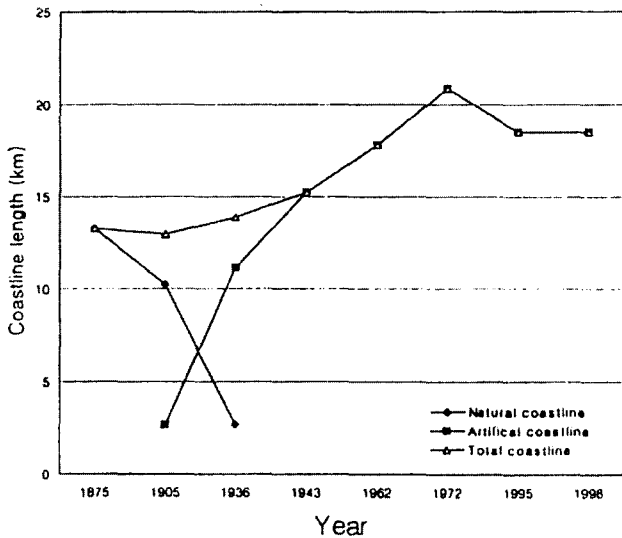


Fig. 5 The coastline length variation in the Pusan north inner-port

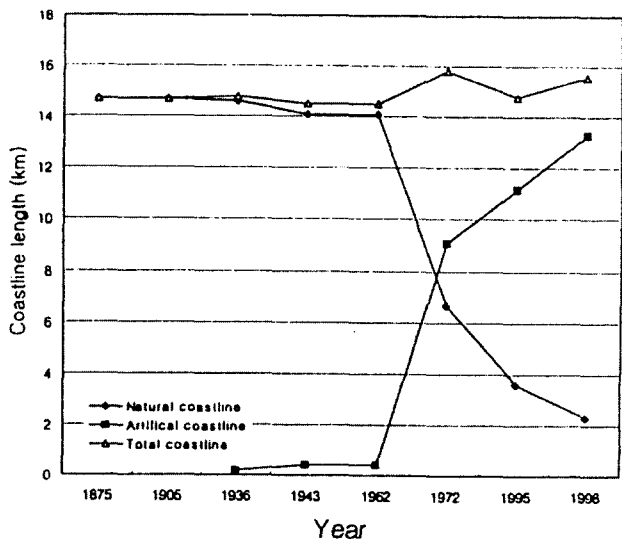


Fig. 6 The coastline length variation in the Pusan north outer-port

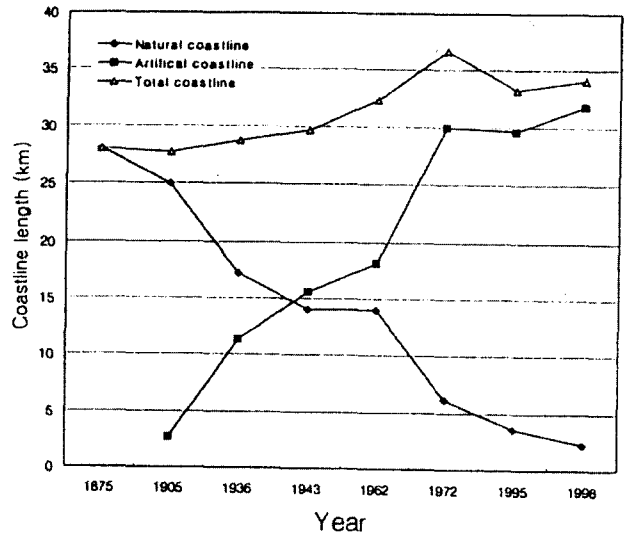


Fig. 7 The coastline length variation in the Pusan north port

반면, 1875년으로부터 1962년까지의 부산 북외항의 해안선 연장은 14.7 km로서 모두 자연해안선이었다. 1972년 해안선 연장은 15.8 km로 다소 증가한 후 1995년에는 15.6 km로 감소하였다. 1972년에 이르러 자연해안선이 6.7 km로 감소한 반면, 인공해안선은 증가하여 9.1 km가 되었다. 1998년(Fig. 6)에는 자연해안선은 2.3 km로 감소하였으며, 인공해안선은 13.3 km로 증가하였다.

부산 북항의 해안선연장은 1875년에 28 km 이었으나, 1905년을 제외하고는 꾸준히 증가하여 1972년에 36.7 km, 1998년에는 다시 34.1 km로 감소하였다. 1972년의 해안선연장은 1875년보다 8.7 km나 증가되었다. 자연해안선의 연장은 1875년에 28 km이었으나 점차 감소하여 1998년(Fig. 7)에는 2.3 km만이 자연해안으로 남아 있다(해운항만협회, 1998).

2.3 부산항의 공유수면적 변화

1876년 개항과 함께 항만시설부지 확충을 위해 공유수면매립공사가 지속적으로 시행되어 온 결과 항내의 공유수면적은 점점 감소하게 되었다.

Fig. 8 및 Fig. 9는 항별, 연대별 공유수면적 변화를 나타낸 것으로, 부산 북내항의 경우 1875년 10.98 km² 이었던 공유수면적은 계속적인 매립으로 인하여 점차 감소하여 1943년에는 7.98 km², 1998년에는 6.0 km²로 감소되었다. 부산 북외항의 공유수면적은 1875년에 13.80 km²이었으나, 1962년까지는 대규모 매립사업이 시행되지 않아 13.74 km²의 공유수면적이 유지되었다. 그 후부터 점차 감소하여 1972년에 12.60 km², 1998년에 10.16 km²로 감소하였다. 이로부터 1980년대에 들어서 부산 북외항의 개발사업이 활발히 진행되었음을 알 수 있다. 부산 북항의 총 공유수면적은 1875년에 24.78 km²이었으나 점차 감소하여 1998년에는 16.16 km²로서 35%나 감소되었음을 알 수 있다(한국항만협회, 1998).

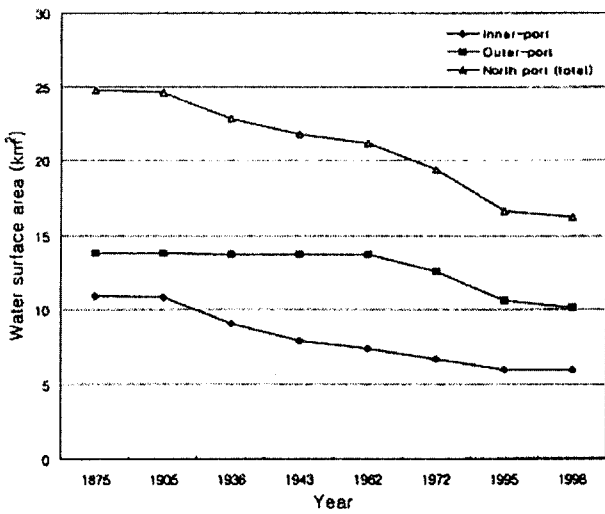


Fig. 8 The variation of water surface area in the Pusan north port

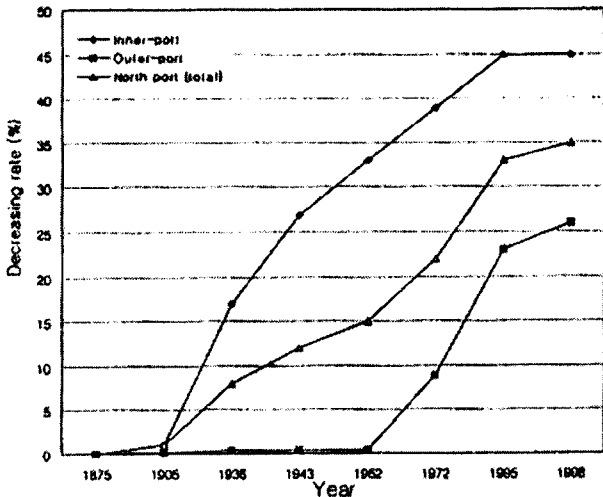


Fig. 9 Decreasing rate of the natural coastline in the Pusan north port

2.4 부산항 방파제연장과 정온수역의 면적

Table 1은 부산주변 항만의 방파제연장에 대한 정온수역 면적과의 관계를 나타낸 것으로, 항별 방파제연장과 방파제 단위길이 당 차지하는 정온수역 면적과의 관계를 비교해 보면 다음과 같은 사실을 알 수 있다.

항별 방파제의 연장은 부산 북외항이 1,704 m로서 가장 길고, 감천항이 1,150 m, 부산 북내항이 1,065 m, 부산 남항이 528 m이다. 항별 정온수역면적은 1998년 현재 부산 북외항이 10.61 km², 감천항이 4.22 km², 부산남항이 0.93 km²임을 알 수 있다. 1998년 부산 북외항 방파제의 단위길이 당 정온수역면적은 6,226 m²/m, 부산 북내항이 5,634 m²/m, 감천항이 3,665 m²/m, 부산 남항이 1,761 m²/m이다. 이상으로부터 알 수 있는 바와 같이, 최소의 방파제연장으로 최대의 정온수역을 확보한다는 측면에서 본다면, 부산 북항이 감천항이나 부산남

항에 비하여 더 좋은 지형조건을 가지고 있다고 할 수 있다. 부산 북내항의 경우 방파제 단위길이 당 정온수역면적은 방파제 설치전인 1995년에는 5,634 m²/m로서 1905년의 10,188 m²/m 보다 45 % 정도가 감소되었고, 부산 북외항 방파제 설치 후(1995년)에는 방파제 설치 전(1972년) 7,394 m²/m에서 6,226 m²/m로서 약 16 % 정도가 감소되었는데, 이는 부두시설 등의 부지를 확보하기 위한 매립에 의한 것이다(한국항만협회, 1998).

Table 1 The ratio between breakwaters extension and calm water surface area classified by port

Area	Name of Break-water	Length (m)	Total length (m)	Calm water surface area(km ²)		Water surface area/length (m ² /m)	
				Before const.	After const.	Before const.	After const.
North inner-port	South	711.5	1,065	10.85	6.00	10,188	5,634
	North	353.5		(1905)	(1995)	(1905)	(1995)
North outer-port	Jodo	700	1,704	12.60	10.61	7,394	6,226
	Olyuk-Do	1,004		(1972)	(1995)	(1972)	(1995)
Kamcheon port	East	500	1,105	-	4.22	-	3,665
	West	600					
South port	East	134	528	-	0.93	-	1,761
	South	394					

2.5 요약 및 고찰

1875년 당시 부산 북내항의 해안선(13.3 km)은 자연해안선이었으나, 1943년에는 이미 자연해안선은 대부분 사라져 1995년에 인공해안선만 15.2 km가 되었다. 1875년 부산 북외항의 해안선도 14.7 km가 자연해안선이었으나, 1998년에는 자연해안선 2.3, 인공해안선 13.3 km로 변화하였다. 부산 북항의 해안선연장은 1875년 28 km에서 1998년 34.1 km로 증가하였으며, 이중 자연해안선 2.3 km, 인공해안선 31.8 km로 변화하였다. 이와 같이 부산 북항의 자연해안선은 항만개발과 더불어 점점 감소하는 추세이며 현재 남아있는 자연해안선은 2.3 km에 불과한 실정이다.

부산항 개항 이후 매립사업에 의해서 조성된 토지면적은 1945년에 2,772,134 m², 1995년에 7,413,029 m²이다. 따라서 공유수면의 감소면적은 1943년에 3,060,000 m², 1998년에 8,620,000 m²에 달하였다. 따라서 부산항의 공유수면적은 1876년 개항 전에 비해서 1998년 부산 북내항이 45 %, 부산 북외항이 26 % 감소하였으며, 북항 전체에 대해서는 35 % 감소하여 부산항내의 해수유동 환경 변화에 커다란 영향을 미칠 것으로 예상된다.

3. 부산항의 해수유동수치실험

수심이 비교적 얇은 연안역의 유동을 시뮬레이션하기 위한 기초방정식은 식 (1)~식 (3)과 같이 수심방향으로 평균한 2차

원 연속방정식과 운동량방정식을 사용하였다. 수직면 ($-h \leq z \leq \zeta$)에 대해 평균하고, 외력으로 지구자전에 의한 영향, 바닥의 마찰력 및 중력을 포함시키고, 표층에서 바람에 의한 응력을 무시하면 기초방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다(金子安雄, 1975).

$$\frac{\partial \zeta}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} [(\zeta+h)u] + \frac{\partial}{\partial y} [(\zeta+h)v] = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + u \frac{\partial u}{\partial x} + v \frac{\partial u}{\partial y} - fv + g \frac{\partial \zeta}{\partial x} - A_h \left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2} \right) \\ + \frac{g u \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + u \frac{\partial v}{\partial x} + v \frac{\partial v}{\partial y} + fu + g \frac{\partial \zeta}{\partial y} - A_h \left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2} \right) \\ + \frac{g v \sqrt{u^2 + v^2}}{(\zeta+h)C^2} = 0 \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, u, v 는 $-h \leq z < \zeta$ 에서 수심평균 한 x, y 방향의 유속성분, f 는 Coriolis 계수 ($=2\omega \cdot \sin \phi$, ϕ 는 위도), ρ 는 해수밀도, ζ 는 수면변위, g 는 중력가속도, h 는 평균 수면하의 수심, t 는 시간, A_h 는 수평확산계수, C 는 Chezy 의 조도계수이다.

본 모델은 유한차분법을 이용하여 기초방정식인 식(1)~식(3)을 이산화하여 수치해를 구하였으며, 계산에 사용한 수치해법은 양해법과 음해법을 교대로 사용하여 계산하는 방식으로, 해의 수렴성과 계산시간의 경제성이 탁월한 ADI 법(金子安雄, 1975)을 사용하였다.

3.1 수치실험의 개요

부산항 개발로 인한 부산항내의 유동환경변화 특성을 규명하기 위하여 수치계산에서 대상으로 하는 영역은 Fig. 10에 나타난 바와 같이 부산항을 중심으로 한 해역으로 설정하였으며, C1은 계산결과를 검증하기 위하여 설정한 조위 및 유속 관측 정점을 나타낸다. 수평방향의 격자간격은 125 m의 등 간격으로 분할하였으며, 계산시간간격 (Δt)은 계산의 안정성 및 수렴성을 고려하여 10 sec로 설정하였다. 부산항 주변해역에서는 반일주조성분의 조석이 탁월하므로 개방경계에서의 경계조건으로는 반일주조성분(M2 +S2)만을 고려하여 평균대조차를 대조기의 조석진폭으로 하고, 그 주기를 12시간 25분으로 하는 정현곡선을 입력하였다.

3.2 수치모델의 타당성 검증

본 연구에서 구축된 수치모델의 현지에 대한 적용성을 검토하기 위하여 대조기 중 정점 C1(Fig. 10)에서 자기기록식 유속계(ACM-8M)를 이용하여 25시간 연속관측 한 유속자료와 수치실험 한 계산치를 조화분해하여 조류타원도로 그려 비교하였다(Fig. 11). 계산치의 조류타원은 관측치의 것과 다소 차이를

보이고 있는데 이는 계산에서 대상으로 하는 외력조건을 반일주조성(M2+S2) 조석만을 대상으로 하고 있어, 그 이외성분의 조석과 해류의 효과 등을 고려하지 않음으로서 발생하는 오차에 기인하는 것으로 볼 수 있다. 따라서 본 수치모델은 부산항 주변해역의 유동장을 비교적 양호하게 재현하고 있다고 할 수 있다.

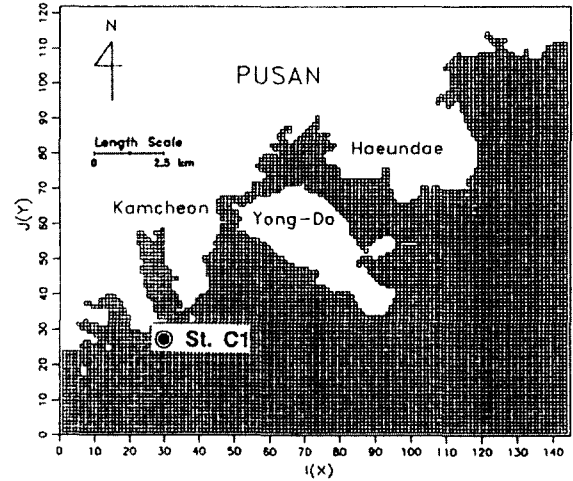


Fig. 10 Horizontal grid system in computation domain, and current observation station

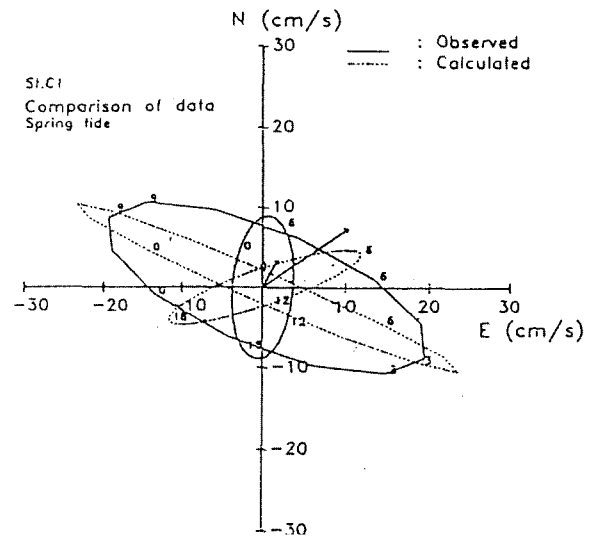


Fig. 11 The current ellipse comparison of the computed and the observed (St. C1)

3.3 부산항 개발에 따른 해수교환율 산정

부산항 개발과 매립에 따른 해안선변화에 의한 항내 해수교환율 변화를 파악하기 위하여 부산항내에 수치입자를 투입하여 시간경과에 따라 입자를 추적하는 Lagrangian적 입자추적실험(류 등, 1992)을 실시하여 해수교환율을 산정하였다.

실제 입자의 이동을 결정하는 표층에서의 이류속도에 의해 단위시간(Δt)동안 한 입자의 이동거리는 다음과 같은 방법으

로 계산한다. 시간 t_0 일 때 $\vec{x}_0 = (x_0, y_0)$ 에 위치하던 입자가 시간 t 일 때의 새로운 위치 $\vec{x} = \vec{x}_0 + \Delta\vec{x}$ 로서 움직였다면, 입자의 Lagrangian 평균속도 $\overline{V}_L(\vec{x}(\vec{x}, t), t)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\overline{V}_L(\vec{x}(\vec{x}, t), t) = \overline{V}(\vec{x}, t) + \Delta\vec{x} \cdot \nabla \overline{V}(\vec{x}_0, t) \quad (4)$$

$$\Delta\vec{x} = \int_{t_0}^t \overline{V}(\vec{x}, t) dt \quad (5)$$

식 (5)를 시간간격 $\Delta t = (t - t_0)$ 에 대해서 적분하면, 식 (6)과 같은 새로운 위치 $\vec{x}(\vec{x}_0, t)$ 에 대한 식을 얻을 수 있다.

$$\vec{x}(\vec{x}_0, t) = \vec{x}_0 + \int_0^t \overline{V}(\vec{x}, t) dt + \int_{t_0}^t \overline{V}(\vec{x}_0, t') dt' \cdot \nabla \overline{V}(\vec{x}_0, t) \quad (6)$$

본 연구에서는 부산항을 개발단계에 따라 4 단계로 구분하고, 각 단계별로 입자를 투입한 후 Lagrangian적 개념을 사용하여 입자추적실험(박 등, 1998)을 실시한 결과를 이용하여 부산항 개발에 따른 해수교환율의 변화특성을 고찰하였다.

3.3.1 해수교환율의 정의

대상해역의 해수교환율을 이상에서 수립한 입자추적에 의한 해수유출율 변화에 근거한 오염물질의 항내 체류시간(교체시간)을 지표로 검토해 보고자 한다. 계산영역은 부산북항 전체를 대상으로 설정하였으며, 재현된 유동장에서 해수유출율 및 체류시간의 추정은 Lagrangian 적 입자추적실험(정, 1992)을 통하여 입자의 유출율의 경시변화를 이용하여 추정한다.

실측결과와 수치실험결과를 이용하여 해수교환 정도를 논의하기 위하여 다수의 해수교환율에 대한 정의 및 평가방법이 제안되어 있으나, 본 논문에서는 전술한 임의시간에 있어서의 입자추적실험에 의한 유출율을 해수교환율(E_w)로 정의하여 사용하고자 한다.

$$E_w = 1 - N_{p_i} / N_{p_o} \quad (7)$$

여기서, E_w : 해수교환율, N_{p_i} : 항내에 잔류하는 입자수, N_{p_o} : 초기에 투입한 입자수를 나타낸다.

3.3.2 부산항 개발에 따른 해수교환율 변화특성

입자추적실험은 Fig. 12~Fig. 15와 같이 부산항 개발단계에 따른 각각의 계산영역에 입자를 투입한 후 10조석 후의 입자의 분포를 나타내었다.

Fig. 12는 1875년 자연해안선인 경우, Fig. 13은 1945년 부산항개발 후, Fig. 14는 부산항 1, 2 단계 개발 후, Fig. 15는 부산항 3, 4단계 개발 후의 입자추적실험 결과로서 부산항내의 해수교환은 매립과 방파제 건설과는 무관하게 영도 북서해협과 조도 및 영도사이를 통하여 유입하고 부산항 북방파제 북측수로를 통하여 이루어지고 있음을 알 수 있다.

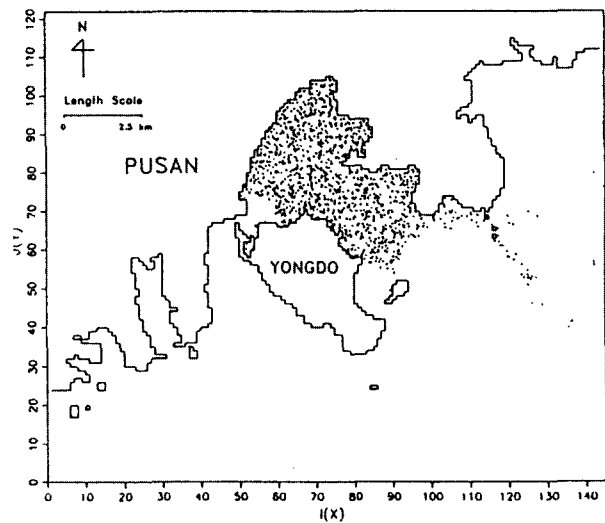


Fig. 12 Spreading patterns of particles after ten tidal periods (natural coastline, 1875)

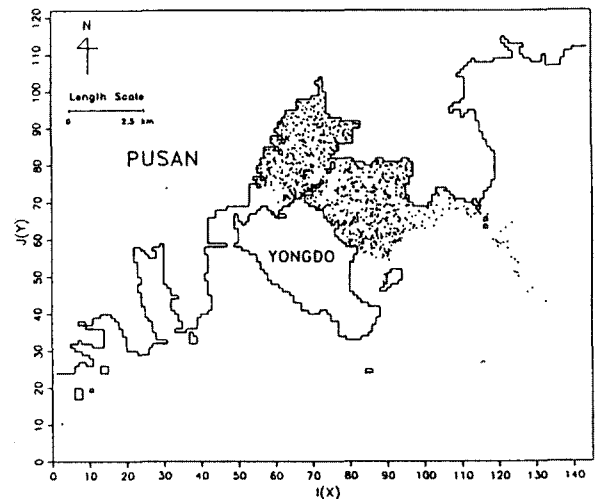


Fig. 13 Spreading patterns of particles after ten tidal periods (in 1945)

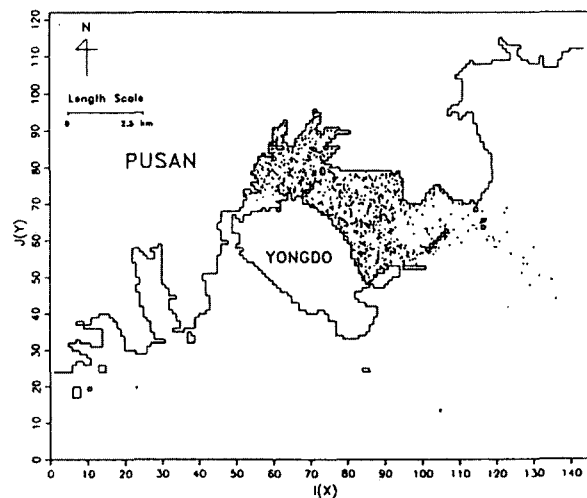


Fig. 14 Spreading patterns of particles after ten tidal periods (after 1st and 2nd phase development)

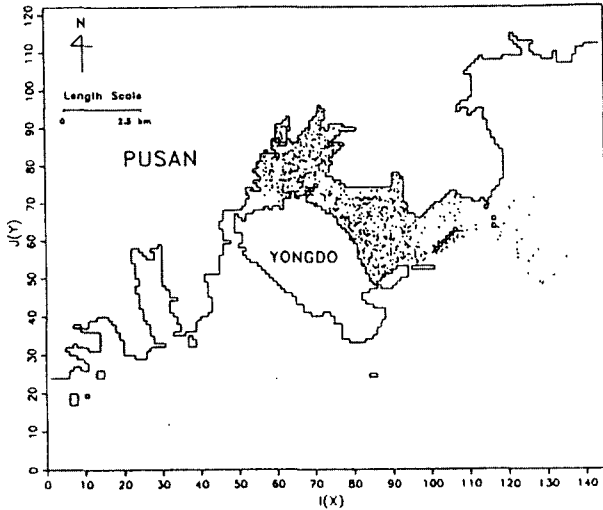


Fig. 15 Spreading patterns of particles after ten tidal periods(after 3rd and 4th phase development)

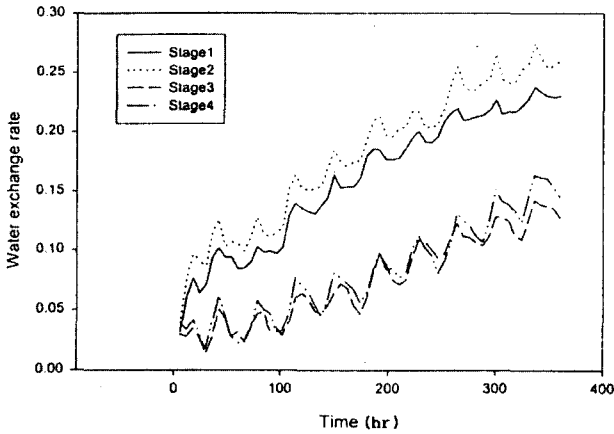


Fig. 16 Seawater exchange rates variation diagram according to development phases

Fig. 16은 부산항 개발단계별의 10 조석동안의 해수교환율 변화를 나타낸 것으로, 부산항 3, 4단계 개발 후의 해수교환율은 16 %로써 1875년의 자연해 안선인 경우의 해수교환율 24 %에 비하여 약 8 % 감소하고 있음을 알 수 있다.

Table 3은 이상의 입자추적실험 결과를 이용하여 공유수면적 변화에 따른 해수교환특성을 정량적으로 규명하기 위하여 체류시간을 추정한 결과로, 여기서, y 는 수치입자의 유출율, x 는 시간을 나타내며, 체류시간은 $y=1$, 즉 항내의 입자군이 항외로 완전히 유출되는데 걸리는 시간을 의미한다. 1875년 자연해안선인 경우의 체류시간은 1,787 day 이며 이는 1945년 부산항개발 후의 체류시간 1,647 day에 비하여 140 day 증가하고 있음을 알 수 있다. 또한 부산항 1, 2 단계 개발 후 체류시간은 2,886 day로써 부산항 3, 4 단계 개발 후의 체류시간 2,631 day에 비하여 255 day 증가하고 있음을 알 수 있다.

Table 3 Resident time according to the variation of water surface area

Classification	Eq. for estimating resident time (y : discharge rate, x : time(hr.))	Estimated resident time(day)
Natural coastline (1875)	$y = 0.00052324256738x + 0.0646966102$	1,787
After 1945 development	$y = 0.00055847920719x + 0.0797316384$	1,647
After 1st and 2nd development	$y = 0.00037415485783x + 0.0152463277$	2,886
After 3rd and 4th development	$y = 0.00034165045846x + 0.0139779661$	2,631

이상의 입자추적 실험결과로부터 알 수 있는 바와 같이 부산항내의 매립에 의한 지형변동에 의한 유동환경변화로 인하여 부산항내의 해수교환은 외항 방파제, 영도와 조도사이의 매립에 의하여 억제되고 있으며, 해수교환특성 역시 크게 변화함을 알 수 있다. 이와 같이 개발이 진행됨에 따라 부산항내의 유속이 감소함으로 체류시간은 증가할 것으로 예상되었으나, 이와는 반대로 항구 폭이 동일한 경우에는 부산항내의 매립에 의한 유역면적감소로 인하여 오히려 체류시간은 감소하고 있음을 알 수 있었다.

4. 부산항내의 수질환경특성

부산항내의 연중 수질변동특성을 파악하기 위하여 1998년 1월~1998년 12월 중 수소이온농도(pH), 수온, 용존산소량(DO), 염분, 화학적 산소요구량(COD), 부유물질(SS), 유기인, 총 질소(T-N), 총 인(T-P) 등의 수질조사를 실시하였다. 부산항내의 해양수질조사 정점은 Fig. 17에 나타난 바와 같이 부산항내에 총 4개 지점을 선정하여 표층, 중층에서 채수하여 분석하였다. 수질분석항목 중 화학적 산소요구량 (COD)의 분포를 나타낸 것이 Fig. 18로서 각 조사정점에 나타난 화학적 산소요구량은 0.9~4.7 mg/l 이었으며, 지점별로는 부산항의 내만측에 위치한 동천(부산대, 1993)이 유입하여 합류하는 W-1 과 보수천 및 영도 생활하수가 유입하는 W-4 지점에서 가장 높은 농도를 나타내고 있음을 알 수 있다(부산시, 1992). 반면, 항만 외측해역에 위치한 정점 W-2와 정점 W-3에서는 부산항의 내만측에 비하여 최고 3 mg/l 낮은 값을 나타내고 있음을 알 수 있었다. 이로부터 항만 내측의 화학적 산소요구량이 높게 나는 것은 부산항에 유입하는 보수천과 동천으로부터의 생활하수유입 때문으로 판단된다. 반면, Fig. 19에서 볼 수 있는 바와 같이 부유물질(SS) 농도는 1.0~19.1 mg/l의 분포를 보이고 있으며, 정점

별로는 항내측의 정점 W-1과 W-4 지점에서 큰 값을 나타내고 있으며, 그 변동폭도 매우 크게 나타났다. 이는 조사시점의 주변지역 준설작업 및 하천수 유입에 의한 결과로 판단된다.

Fig. 20은 총 질소(T-N)의 연중 분포를 나타낸 것으로 각 조사지점에서의 총 질소농도는 0.07~0.97 mg/l의 범위에 분포하며, 정점별로는 항만 내측인 W-1과 W-4의 농도가 높았으며 만 외측의 정점에서는 농도가 감소하고 있음을 알 수 있다. 또한, 총 인(T-P)의 농도는 0.005~0.093 mg/l의 범위에 분포하며, 정점별로는 항만 내측에 위치한 정점 W-1과 W-4의 총 인(T-P)의 농도가 항만외측의 정점 W-2와 W-3의 농도보다 높게 나타났다(Fig. 21). 이처럼 부산항 내만에 위치한 정점에서의 총 질소(T-N) 및 총 인(T-P)의 농도가 만 외측정점의 값에 비하여 높게 나타나는 것은 총 인과 총 질소의 오염원은 일반적으로 가정하수가 대부분이므로 만 내측으로 유입하는 보수천과 동천의 하수유입이 총 인의 농도상승을 가져온 것으로 판단된다(한국콘테이너관리공단, 1998).

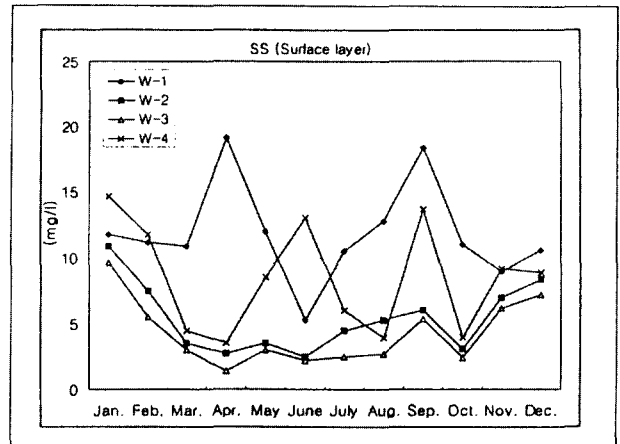


Fig. 19 The distribution of SS concentration in Pusan port on 1998

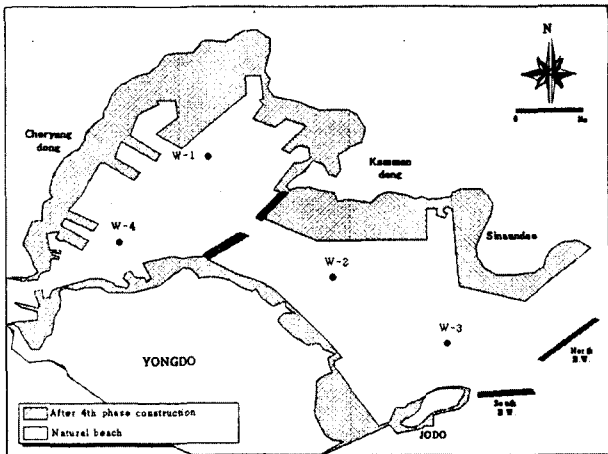


Fig. 17 Location map of water quality measuring point

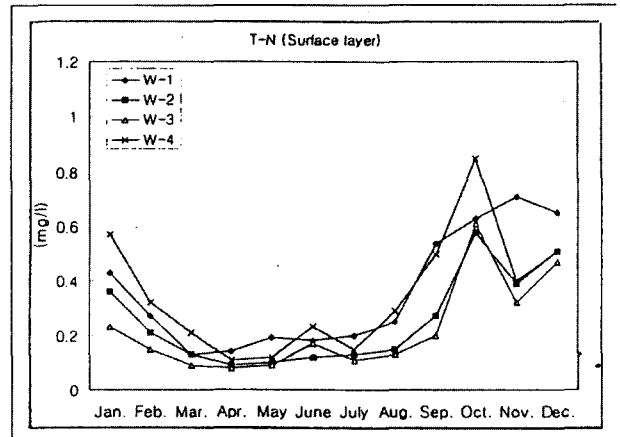


Fig. 20 The distribution of T-N concentration in Pusan port on 1998

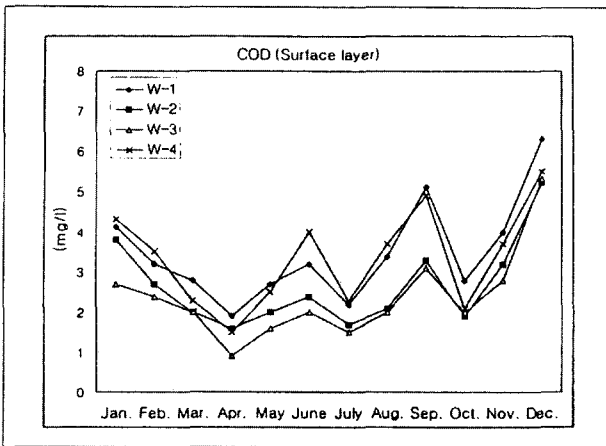


Fig. 18 The distribution of COD concentration at surface in Pusan port on 1998

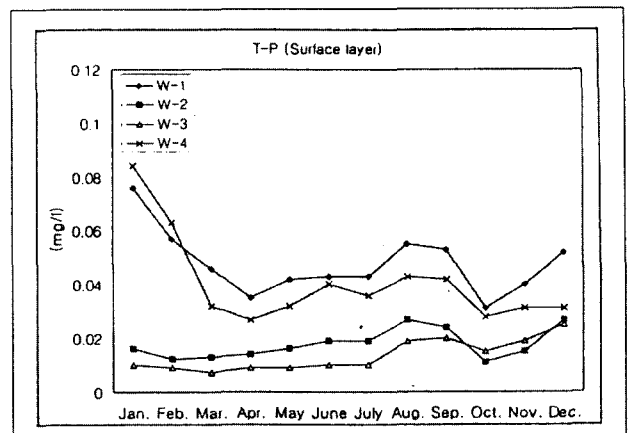


Fig. 21 The distribution of T-P concentration in Pusan port on 1998

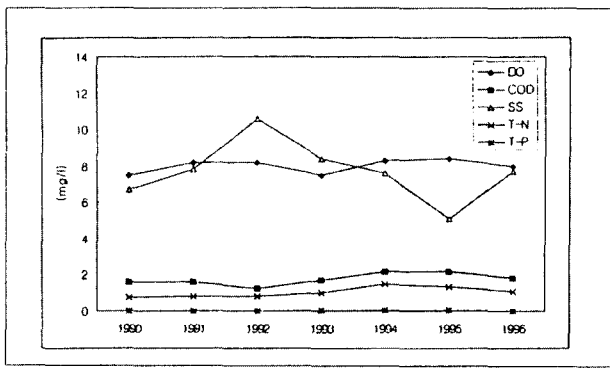


Fig. 22 The change of pollution level in Pusan

Fig. 22는 1990년~1996년까지의 각 수질항목의 연 평균치를 나타낸 것으로, COD의 경우 1990년 이래로 1.7~2.0 mg/l의 농도를 나타내어 증가 추세에 있으며, 총 질소는 0.769 mg/l에서 최대 1.501 mg/l, 총 인은 0.005 mg/l에서 0.034 mg/l로 상당히 악화되는 추세에 있다는 것을 알 수 있다(부산시, 1993, 1995~1998; 한국컨테이너 관리공단, 1998).

5. 요약 및 결론

본 연구에서는 1876년 개항이후부터 1998년까지 개발 단계별 부산항내의 해안선연장 및 형상, 공유수면적의 변화를 조사·검토하였다. 또한, 부산항 개발에 따른 해안지형변화가 부산항내의 해수유동 및 해수교환에 미치는 영향과 부산항내의 수질환경과의 관련성을 규명하기 위하여 2차원 수심적분 모델을 이용하여 개발단계별 부산항 주변해역의 해수유동을 재현하여 비교하고, 재현된 유동장 아래에서 Lagrangian 입자추적실험을 실시하여 해수교환변화특성을 규명하였다. 또한 부산항내의 수질자료를 비교·검토하여 부산항 개발이 부산항내의 수질환경에 미치는 영향을 논의하였다. 이상의 과정을 통하여 얻어진 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 부산 북항의 자연해안선은 항만개발과 더불어 점점 감소하여 현재 남아있는 자연해안선은 전체 해안선 34.1 km 중 2.3 km에 불과하며, 공유수면적 또한 1875년 24.78 km²에서 1998년에는 16.16 km²로 35%나 감소하였다.
- (2) 부산항개발에 따라 부산항내의 유속은 점차 감소하였으며, 이는 방파제 건설로 만구 폭 감소에 의한 것으로 판단된다.
- (3) 부산항의 단계적 개발 후, 유역면적의 감소에 의한 해수교환율이 증가한다는 수질환경변화에 대한 긍정적인 변화양상을 볼 수 있었으나, 방파제가 건설됨으로서 부산항내의 해수교환율은 현저히 감소하였다.
- (4) 부산항 내의 수질은 외항보다 내항의 수질이 악화되어 있으며, 이는 하천으로부터 유입되는 오염물질과 부산항 개발, 특히 방파제 건설로 인한 해수 교환을 저하가 주요인이라고 생각된다. 하천으로 유입되는 생활오수의 상당량이 미처리 상태로 하천내에 유입되고 있는 점과 항만개발로 인한 자연해안·습지의 감소에 의한 자정능력 감소 등의 환경인자를 고려

해 볼 때 가정과 업소의 정화조 설치를 권장하고, 소규모 하수처리장의 효율적인 설치 방안 등이 강구되어야 할 것이다.

이상의 결과로부터 앞으로 도시 생활하수를 포함한 항내 유입 하천수의 확산을 고려할 수 있는 연구가 지속적으로 이루어져야 할 것이다.

그리고 차후 항만 건설시에는 방파제 건설로 인한 해수교환을 저해하는 요인을 제거 할 수 있고, 항내정온도를 향상시킬 수 있는 환경 친화적 항만을 건설하기 위해서 항내 시설물 건설 및 자연해안선 감소로 인한 자정능력 저감인자의 개념을 고려할 수 있는 종합적인 검토 및 기본개념수립이 필요할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

대우건설 (1998). 釜山港 4段階 컨테이너터미널 築造工事工事誌 柳青魯·朴鍾和·李和云 (1992). 沿岸域油類汚染物質の舉動の simulation model, 海岸工學會論文集, 第39號, pp 930-933.

박명수·류청로·김종화 (1998). 입자추적모형에 의한 내만에 서의 해수 교환, 한국어업기술학회지, 34(4), pp 410-418.

釜山大學校 生産技術研究所 (1993). 釜山港 컨테이너背後輸送 高架車道建設工事中 東川 水理模型實驗 報告書, pp 8~50.

釜山市 (1992). 寶水川, 草梁川, 釜山川, 南川 河川整備基本計劃 報告書, pp 25~105.

釜山市 (1993). 下水道 整備基本計劃 變更 報告書, II-61~II-65.

釜山市 (1998). 市政白書, pp 796~797.

釜山市 (1995). 環境白書, pp 58~204.

釜山市 (1996). 環境白書, pp 52~212.

釜山市 (1997). 環境白書, pp 145~319.

釜山市 (1998). 環境白書, pp 146~348.

釜山市 (1998). 釜山廣域市 下水道 整備基本計劃 變更 流量 및 水質調査, pp 185~219.

釜山地方海運港灣廳 (1990). 釜山港白書, pp 15~204.

釜山地方海運港灣廳 (1991). 釜山港史, 현대, pp 41~636.

釜山地方海運港灣廳 (1982). 釜山港開發(第1段階)建設誌, 고려문 화사, pp 18~21.

海運港灣廳 (1986). 釜山港開發(第2段階) 工事誌, 19~25.

釜山地方海運港灣廳 (1992). 釜山港 3段階開發事業 工事誌, 23~25.

정우진 (1992). Lagrangian method에 의한 유출유의 이류 - 확산 모델, 인하대학교 석사학위논문.

韓國컨테이너埠頭公團 (1997). 釜山港 戡蠻埠頭 擴張區域築造 工事環境影響評價書, 110~234.

韓國컨테이너埠頭公團 (1998). 釜山港 戡蠻埠頭 擴張區域築造 工事事後 環境影響調査 結果報告書, 18~34.

韓國港灣協會 (1998). 港灣, 52~71.

金子安雄·堀江毅(1975). ADI法による潮流 汚染擴散の數値計 算, 港灣技術研究所報告, 第 14卷, 第1號, 3-61.

2000년 4월 12일 원고 접수

2000년 7월 10일 수정본 채택