

낙동강 하구역의 퇴적특성에 관한 연구

류승우 · 김종인 · 류청로
부경대학교 해양공학과

A Study on the Characteristics of Deposition in Nakdong Estuary

Seung-Woo Ryu, Jong-In Kim, Cheong-Ro Ryu

School of Ocean Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-739, Korea

KEY WORDS: Nakdong estuary 낙동강하구, Deposition 퇴적, Settling velocity 침강속도, Numerical model 수치모델

ABSTRACT: Nakdong estuary is located at south-eastern coast of the Korea. A lot of sediment from upper river was deposited at this area. It has caused many problems such as changes in topography and tidal current.

In this paper, field observation data on tidal currents and sediments were investigated as well as historical topographic changes by dredging and reclamation of the foreshore. Then, the numerical model considered the settling velocity of the suspended solids according to the particle size was applied to examine the characteristic of deposition.

The results are as follows :

1. Changes of characteristics of deposition were caused by topographic changes of Nakdong estuary
2. Characteristics of deposition were influenced by river plume and tidal currents.
3. Numerical model which considers settling velocity reappeared distribution of deposition by particle-size.
4. Used model is only reasonable for discussion in the quality, so, it is strongly suggested that the new model development is needed including the quatitative deposition processes.

1. 서 론

하구역은 육상환경과 해양환경이 인접하는 곳으로 담수와 해수의 영향을 동시에 받아 대단히 복잡한 유동 및 퇴적환경을 나타내는 지역으로, 하구역에서의 퇴적환경은 담수와 해수의 물리적, 화학적, 생물학적인 복잡한 작용에 의해서 나타난다. 이는 주변 환경의 기후, 강수량, 하천유량 등에 따라서 육지로부터 공급되는 퇴적물의 양이 변동할 뿐만 아니라, 주기적인 조석작용, 파랑, 하구의 지형적 특성 및 하구내의 흐름 등에 따라 다양한 물질순환특성을 가진다. 이러한 하구역 자체의 독특한 퇴적특성은 한반도 주변하구역에서 쉽게 찾을 수 있으며, 부유퇴적물 및 퇴적물의 분포특성에 관하여 비교적 많은 연구가 수행되었다.

그 중 우리나라의 대표적인 감소하천인 낙동강의 경우 대규모의 하구언 공사, 인근 연안역의 간척 및 매립공사로 인하여 하구지형의 변화, 하구에서의 수질오염 및 저질오염 등과 같은 문제를 야기하게 되었다. 또한, 낙동강 하구주변의 연안역은 가덕도 신항만 개발, 택지조성 등 각종 산업시설 및 주거시설이 건설중이거나 예정되어 있어, 연안 환경에 커다란 변화가 예상되는 지역이다. 실제로 낙동강 하구일대의 지형은 1934년 녹산수문의 건설과 1987년 하구둑 완성으로 인하여 하구역의

해수유동현상 뿐만 아니라, 하구의 퇴적환경이 크게 변화하였다.

특히, 하구둑 건설후, 담수 유출을 수문조작에 의하여 조절함으로써 해수 유입에너지와 담수 유출에너지의 평형상태 파괴와 아울러 퇴적환경 변화가 지속적으로 일어나고 있다.

따라서, 본 연구에서는 특징적인 퇴적환경의 변화를 나타내고 있는 낙동강 하구주변에 대한 과거의 퇴적물에 대한 입도 자료 및 지형도를 바탕으로 하구둑에 의한 퇴적환경특성의 기원 및 원인에 대해 고찰한다. 또한 하구주변의 연안개발에 따른 지형변화로 인하여 발생하는 해수유동을 재현하여, 하구언 건설 및 연안역 개발에 따른 유동환경변화 특성과 재현된 유동장하에서 침강속도를 고려한 Lagrangian 입자추적모델을 개발하여 하구역에서의 퇴적환경변화를 예측하고자 한다.

2. 낙동강 하구역의 지형특성

Fig. 1 에서 보는바와 같이 낙동강 하구역은 크게 하중도군과 사주군으로 구분된다. 상류부는 하중도군이 하류부는 사주군이 분포하고 있으며, 이들 사이에는 갯벌이 분포한다. 이와 같은 삼각주 말단의 사주 배열은 상류에서 운반된 토사가 연안류와 조류의 영향으로 점차 말단부로 퇴적되어온 결과물의 의

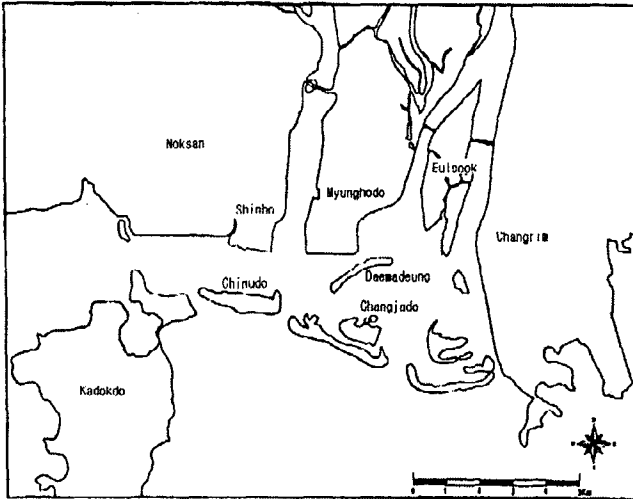


Fig. 1. Study area.

미하며, 갯벌은 낙동강 삼각주의 하중도 및 사주 형성과정과 밀접한 관계가 있음을 알 수 있다.

따라서, 본 연구에서는 낙동강 하구역에서의 유동변화에 가장 큰 영향을 미친 하구둑 건설을 중심으로 하여, 하구역에서 지형의 변화에 따른 퇴적특성을 시·공간적으로 평가하기 위하여 기존의 문헌 및 지형도, 항공사진 등을 바탕으로 하구둑 건설 전·후의 지형변화를 시대별로 정리하였다.

2.1 낙동강 하구둑 건설전의 하구지형

하구둑 건설전, 낙동강 하구역의 가장 큰 변화는 1934년 서낙동강쪽의 흐름이 차단되었다는 것이다. 이러한 흐름변화로 인하여 해안선과 평행하게 형성되던 사주의 발달이 점차 낙동강 동측의 하구역에서 활발이 진행되었다.

Fig. 2는 1916년경의 낙동강 하구역의 지형을 나타낸 것으로, 이 시기에는 을숙도와 대마등, 진우도만이 그 형태를 조금 갖추고 있으며, 명호도와 대마등 사이의 갯벌은 중간부분이 안쪽으로 훌쩍하게 들어가 면적이 좁고 대마등 앞쪽에는 아직까지 갯벌의 형성이 미미한 상태이다.

Fig. 3은 1954년경의 낙동강 하구역의 지형을 나타낸 것으로, 1916년경에 비해 규모가 상대적으로 큰 갯고랑이 형성되면서 갯벌이 확대되어 가는 현상이 뚜렷이 나타나고 있음을 알 수 있다.

Fig. 4는 1970년경의 낙동강 하구역의 지형을 나타낸 것으로, 장자도 남단과 을숙도 남단에 새로운 사주인 새등과 백합등이 형성되고 있으며, 진우도는 1954년에 비해 규모가 조금 확대되었다.

Fig. 5는 1973년경의 낙동강 하구역의 지형을 나타낸 것으로, 갯고랑의 폭이 넓어지면서 갯벌은 상대적으로 면적이 감소되었다. 즉 장자도의 성장방향은 파랑의 진행방향과 갯고랑의 형태에 의한 영향을 받고 있으며, 장자도의 중간부분을 갯고랑이 통과하면서 양분되었고, 분리된 서쪽 부분은 남동방향으로 갯고랑을 따라 성장하고 있다. 또한, 새등 남쪽에 2개의 작은 사주가 새롭게 형성되고 있음을 알 수 있다

2.2 낙동강 하구둑 조성기간

낙동강 하구둑은 1983년 9월 착공하여 1987년 11월에 완공되었으며, 이 기간에 하구둑 조성을 위한 물막이 공사와 이에 따른 영향으로 하상준설도가 하구밖으로 방출되면서 삼각주 발달의 지형형성기구에 큰 변화를 가져왔다.

1984년에는 백합등 남쪽에 새로운 사주인 나무싯등이 형성되고 있으며, 명호도 남쪽에 복잡한 형태를 가진 갯고랑은 매몰되었고, 다시 남쪽으로 새로운 갯고랑이 형성되었는데, 이것은 갯고랑을 중심으로 갯벌이 확대되었다는 것을 의미한다.

그리고, 대마등의 남쪽에서 서낙동강 수로로 연장되었던 갯고랑이 매몰되었고 장자도 동쪽끝이 북쪽을 향하여 성장하고 있으며 장자도와 새등이 합성되어 그 내측의 거대한 갯고랑은 미사의 퇴적으로 저습지 상태로 노출되고 있다.

Fig. 6은 매립, 준설로 인한 지형변화로 인하여 하구의 유동변화에 가장 큰 영향을 미친 하구둑 건설 전·후의 지형을 비교한 것으로, 낙동강의 주흐름이 서측수로 흐르고 있으나 준설을 통하여 동측수로 직선화 하였다.

Photo. 1은 하구둑 물막이 공사가 거의 완공된 1987년의 지형으로 1986의 지형과 비교하여 을숙도 남동단에서 발달한 초승달 모양의 사주등이 형성되어 있다.

그러나, 이와 같은 새로운 사주를 제외하고는 낙동강 삼각주 발달은 지형적인 변화가 뚜렷하지 않다.

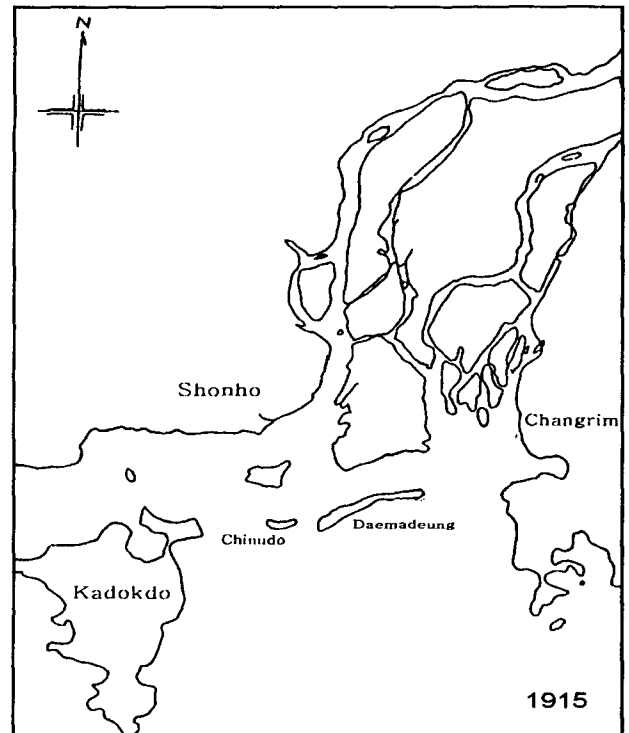


Fig. 2. Topography of the Nakdong estuary in 1915.

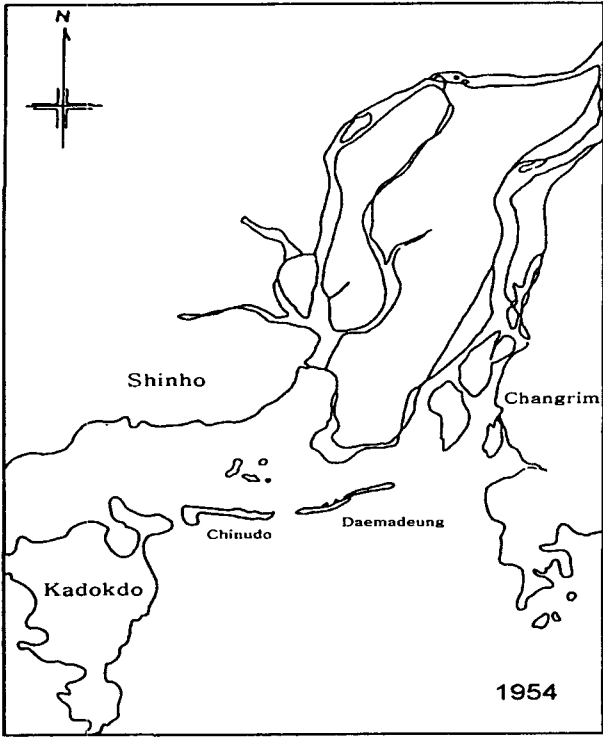


Fig. 3. Topography of the Nakdong estuary in 1954.

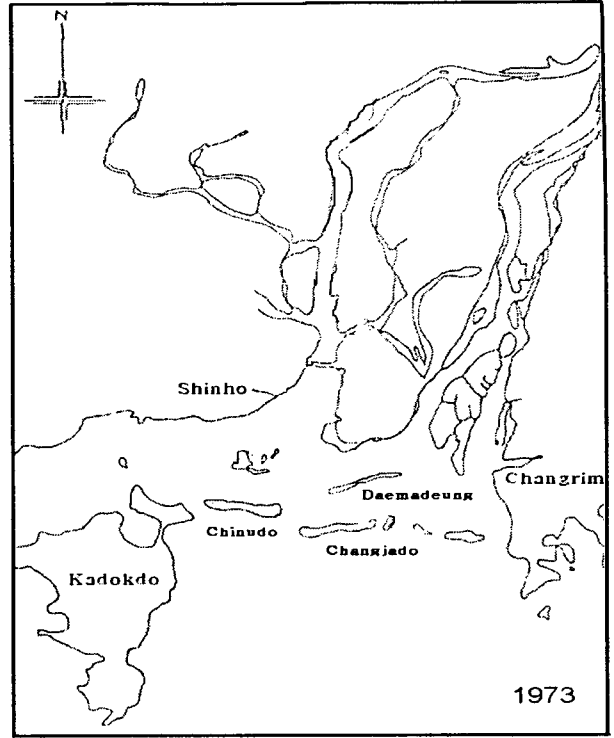


Fig. 5. Topography of the Nakdong estuary in 1973.

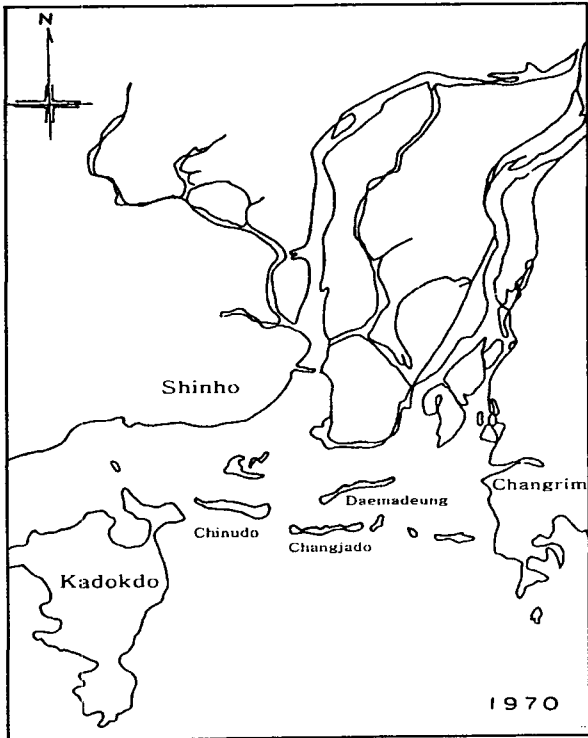


Fig. 4. Topography of the Nakdong estuary in 1970.

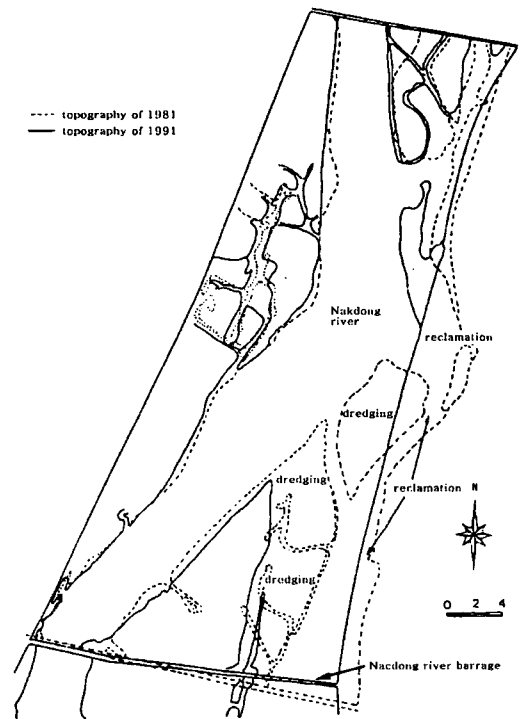


Fig. 6. The change of topography by reclamation and dredging.

2.3 낙동강 하구둑 건설후의 하구지형

1988년의 지형은 명호도와 을숙도의 남단에 1987년에 형성되었던 각종 사주의 형태가 크게 변화되어 있으며, 1989년에 들어와서는 1988년에 형성되었던 하중도군과 제3사주군 사이에 소규모의 다양한 신사주가 소멸되었고, 대신에 진우도 남단에 2개, 새등 남단에 1개, 나무싯등 남단에 1개 그리고 다대포 서단에 1개 등 새로운 사주가 외해에 형성되고 있는 것이 특징이다.

한편, 1990년의 지형변화는 진우도 남단의 신사주가 진우도와 연결되었고, 새등의 서단에 뚜렷한 분기사주가 등장되었으며, 나무싯등 남단의 신사주가 확대된 것이 특징이다. 그리고 다대포 서단에는 대마등과 3개의 소규모 신사주가 형성되어 있다.

Photo. 2는 1991년의 지형으로 1990년의 형상과는 그다지 커다란 변화는 나타나고 있지않으나, 대마등과 장자도의 사이에 7개의 신사주가 형성되어 있고, 새등의 동남단의 신사주가 새등에 합성되면서 소멸되었으며, 백합등과 그리고 도요등은 그 형태가 바뀌었다.

1992년에 들어와서는 하구둑건설 이전과 비슷한 지형형성 과정을 거치면서 사주와 사주, 그리고 사주와 갯벌 등이 재차 조정되는 변화를 보이면서 전체적으로 삼각주 말단이 외해로 향해 서서히 전진, 확대되어가고 있다.

Photo. 3은 1996년의 지형으로서, 현재의 지형과는 큰 차이가 없으며, 도요등과 백합등 사이에 형성되었던 신사주의 동쪽에 보다 작은 규모의 사주가 생성되고있다.

이상에서 낙동강 하구 일대의 삼각주 말단은 해안선에 평행하여 하중도군과 그 전면에 4열의 사주군이 외해를 향해 차례로 배열되어 있고, 하중도와 하중도 사이, 하중도와 사주사이, 사주와 사주사이에 각각 갯벌이 발달하는 퇴적 지형으로 구성되어 있다.

2.4 낙동강 하구역의 퇴적특성

연구대상 지역의 지형형성 특성에 가장 많은 영향을 미치고 있는 낙동강의 연간 유출량은 $63 \times 10^9 m^3$ 이며, 그 중 71.4% ($45 \times 10^9 m^3$)는 홍수기에 해당하는 6월~9월에 집중되고 있다. 대상영역의 퇴적지형을 이루고 있는 퇴적물의 평균입경이 Fig. 7에 나타내고 있는 바와같이 사주에서는 $\phi=1.45 \sim 2.65$ 범위의 세사(fine sand)-중사(medium sand)로 구성되어 있고, 갯벌은 $\phi=1.50 \sim 3.12$ 의 미세사(very fine sand)-중사로 구성되어 있으나, 장소에 따라 변화하는 경향을 보이고 있다.

또한 갯벌에 형성되어 있는 갯골과 그 주변은 중사가 대부분을 차지하고 있는데 반해 갯벌의 중앙부로 갈수록 입경이 작아지면서 세사에서 미세사로 바뀌고 있다. 이는 갯벌을 구성하는 퇴적물의 입경이 조류에너지의 강약에 좌우되고 있다는 것을 의미한다. 즉 갯골에서 갯벌의 중앙부로 향해 퇴적물이 조립에서 세립으로 변화하는 현상은 조류에너지가 갯골에서 갯벌의 중앙부로 갈수록 점차 감소하는 결과에 비롯되었음을 알 수 있다. 이러한 사실은 이 지역의 갯벌 퇴적물이 낙동강으로부터 운반되는 토사에 기원을 두고 있음을 의미한다.



Photo. 1. Topography of the Nakdong estuary in 1987.



Photo. 2. Topography of the Nakdong estuary in 1991.

3. 수치실험 및 결과



Photo. 3. Topography of the Nakdong estuary in 1996.

Table 1. Computation conditions of tidal current model.

Parameters	Computation conditions
Mesh size	$\Delta x = \Delta y = 125 \text{ m}$
Water depth (h)	2-30 m
Time interval (Δt)	5 sec
Bottom friction coeff.	$19.4 \ln(0.9 h)$
River discharge	$6,500 \text{ m}^3/\text{sec}$
Tide	M_2, S_2
Coriolis coefficient	$f = 2\omega \sin \varphi, \omega = 2\pi / (24 \times 60 \times 60), \varphi = 35^\circ 03'N$

Table 1에서와 같은 경계조건을 바탕으로 계산된 대상해역에서의 수치모델의 결과는 대상해역의 실측치(국립해양조사원, 1997)와는 다소의 차이가 있으나, 전체적인 유동 흐름장의 재현에서는 크게 문제가 되지 않는 것으로 사료되므로, 이 해수유동모델을 토대로 유입토사의 입경에 따른 퇴적특성을 예측하기 위한 입자추적모델의 기초자료로 사용하였다.

하천으로부터 유입되어 들어오는 유사량의 거동을 파악하고 그 이동양상을 정성적으로 파악하기 위해 수치적 입자를 낙동강 하구부에 투하하여 그 거동을 시간에 따라 추적하였다. 실제 입자의 이동을 결정하는 표층에서의 이류속도에 의해 단위 시간 (Δt) 동안 한 입자의 이동거리를 계산하였다.

토사입경에 따른 침강속도(金(1997))를 고려하여, 입자의 침강거리를 구하고, 이것을 입자의 이동위치에 따라 계산하였다.

입자의 침강거리는 다음과 같이 산정하였다.

$$s(m, n) = s_0(m, n-1) + V \times dt$$

여기서, $s(m, n)$: m번째 입자의 n번째 시간 step에서의 입자의 침강거리

$s_0(m, n-1)$: m번째 입자의 n-1번째 시간 step에서

입자의 침강거리

V : 입자의 침강속도

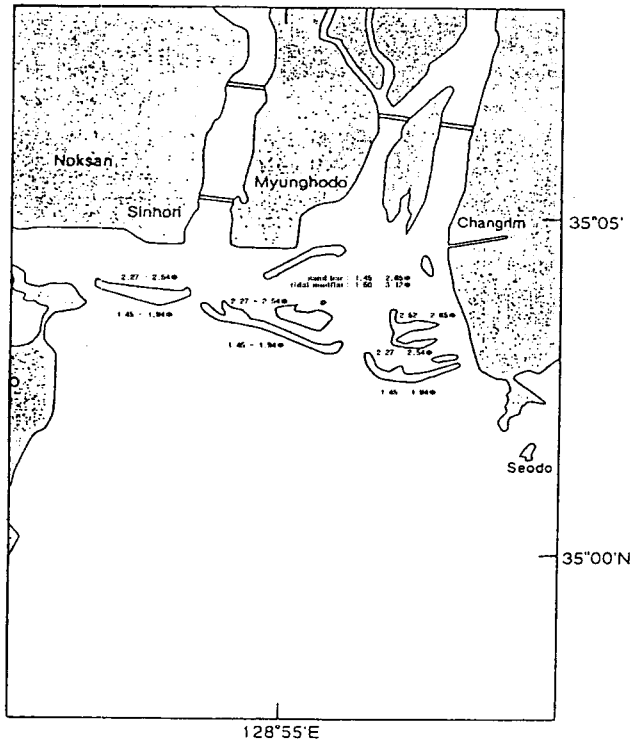


Fig. 7. Particle-size distribution around sand bars.

Fig. 8과 Fig. 9는 입경이 0.087mm 인 부유토사입자를 낙동강 하구연의 수문으로부터 방류 한 후 1시간, 10시간 후의 입자의 분포를 타나낸 것이다. 하구연에서 방출된 퇴적토사는 그 입경에 따라 대략 4~7 시간경과 후에 유속이 약한 등의 배후에서 현저한 퇴적이 이루어지고 있음을 알 수 있다. 특히, 주수로로 통하여 내려온 토사는 주수로의 빠른 흐름에 의하여 보다 먼 곳까지 이동되고 있음을 알 수 있다.

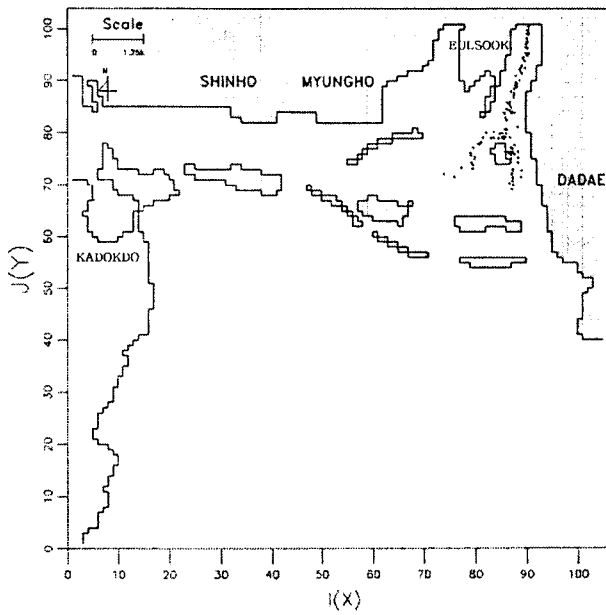


Fig. 8. Sedimentation characteristics of the $\Phi=0.087\text{ mm}$ (after 1 hours).

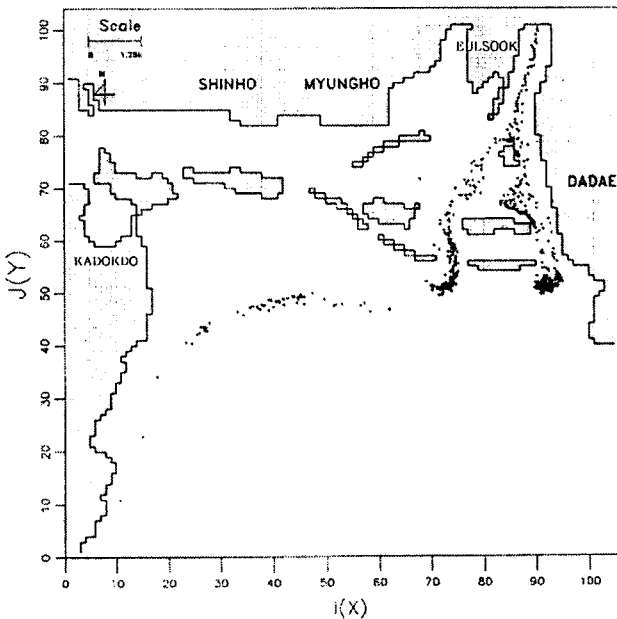


Fig. 9. Sedimentation characteristics of the $\Phi=0.087\text{ mm}$ (after 10 hours).

4. 결 론

본 연구는 현재 활발한 퇴적활동이 진행중인 낙동강하구역을 대상으로 기존자료를 이용하여 하구역의 토사입경 분포 및

하구지형의 변화를 고찰하였으며, 또한 하구지형 변화가 유동 환경변화에 미치는 영향을 파악하기 위하여 2차원 수치모델을 이용하여 유동을 재현하였으며, 재현된 유동변화에 따른 퇴적 환경의 변화특성을 규명하기 위하여 입자의 침강속도를 고려한 Lagrangian 입자추적실험을 실시하였다.

이상에서 얻어진 결과를 요약하면 다음과 같다.

- (1) 낙동강 하구언 건설 및 매립 등에 의한 하구주변 연안의 지형변화가 낙동강 하구역의 퇴적특성에 커다란 영향을 미치고 있었다.
- (2) 낙동강에서 유입되는 유사량에 의한 퇴적특성은 주로 하천수 유입, 즉 주수로의 흐름과 조류에 의하여 좌우되는 것으로 나타났다.
- (3) 침강속도를 고려한 Lagrangian 입자추적 실험결과, 수치 입자의 입경별 퇴적분포는 퇴적토사의 입경분포를 비교적 양호하게 재현하였다.

낙동강 하구역은 대량의 하천수가 유입되고 입사파랑과 퇴적토사에 의한 지형변화로 인한 유속변화 패턴에 의해 그 퇴적 양상의 변화가 심하게 나타나는 영역이므로 향후 이러한 파랑작용, 해저지형 변화 및 하천수 유입에 따른 밀도류의 연직방향 유동구조등을 고려하여 정성적 및 정량적으로 정도 높게 평가할 수 있는 모델개발이 필요하다.

참 고 문 헌

김기철, 양한섭, 김차검, 문창호, 장성태, 1999. 수문개폐에 따른 낙동강 하구둑 하류부의 해양물리환경변화, *Journal of the Korean Society for Marine Environmental Engineering*, Vol.2, No.2: 49-59.

김원형, 이형호, 1980. 낙동강 하구역의 퇴적물 운반 및 퇴적에 대한 고찰, *지질학회지*, 16: 180-188.

오건환, 1992. 낙동강 삼각주의 형성과정, *부산지리*, 1: 1-16.

유홍선, 이준, 강효진, 간신영, 최경식, 김재수, 1993. 낙동강하구에서의 하천수 플룸의 횡방향퍼짐과 부유퇴적물의 수송, *The Journal of the Korean Society of Coastal and Ocean Engineers*, Vol. 5, No. 4: 296-301.

한건모, 김기철, 김재중, 1993. 명지·녹산 해역 매립후의 해수 유동에 관한 연구, *해양공학회지*, 제7권, 제1호: 81-91.

Kim, H. M., 1988. Assessment of tectonic and depositional environments of Nackdong delta, Korea. *J. Korean Ear. Sci. Soc.*, 9: 45-69.

Lee, Y. D. and C. W. Kim, 1990. A Study of sedimentary environment in the estuary of Nackdong River : sedimentation processes and heavy metal distributions. *Oceanol. Soc. Korea*, 25: 182-188.

金種仁, 1997. 大阪湾における河川からの流入土砂の輸送・堆積機構に関する研究, *大阪大學*: 90-134.