

낙동강 하구와 주변 연안역의 표층 퇴적상 및 퇴적환경 변화

김석윤* · 하정수
부경대학교 해양학과/해양과학공동연구소

Sedimentary Facies and Environmental Changes of the Nakdong River Estuary and Adjacent Coastal Area

Seok-Yun KIM and Jeong-Su HA

Department of Oceanography, Pukyong National University and Korea Inter-University Institute of Ocean Science, Pusan 608-737, Korea

To investigate sedimentary facies and environmental changes of the Nakdong River Estuary and its adjacent coastal area, the grain size analysis and measurement of organic matter, calcium carbonate, clay mineral and metallic elements were carried out for forty surface sediment samples. Based on regional distribution pattern and characteristics of the surface sediments, sedimentary facies in the study area can be divided into sand facies (TYPE I), mud facies (TYPE II) and sand-mud mixed facies (TYPE III). TYPE III is the transition of TYPE I and TYPE II in every aspects of sediment characteristics. It suggests that TYPE III may have been formed by the mixture of two different source of sediment: one derived from Nakdong River and the other resuspended fine-grained sediments from the Jinhae Bay by winnowing action during floods or storms. Among many aspects of environmental change after the construction of the Nakdong Barrage, the most significant is the increase of sand content off the sand barrier region. It could be explained by several reasons including decreased input of fine-grained sediment from river, increased hydrodynamic energy level off the sand barrier region and artificial effects such as dredging and dumping.

Key words: Sedimentary facies, Environmental changes, Nakdong River Estuary, Sand barrier

서 론

육지환경과 해양환경을 연결하는 전이지역 (transition zone)인 하구역 및 연안역은 담수와 해수와의 상호작용에 의해 영향을 받고 있는 복잡한 환경이다. 이러한 하구역 및 연안역은 주변 육지의 기후, 강수량, 하천 유량 등에 따라 육지로부터 유입되는 퇴적물의 양이 달라지고, 하구내로 유입된 퇴적물은 지형적 특성, 주기적인 조석작용, 파랑 그리고 하구내의 흐름에 따라 다양한 순환양상을 갖는다 (Meade, 1969; Castaing and Allen, 1981). 우리 나라 대부분의 하구에서는 방조제 축조, 하구둑 공사, 간척 및 매립 사업 등과 같은 주변 환경변화를 일으키는 일련의 공사가 거행되었고 이러한 인위적인 건설 사업으로 인하여 나타난 하구지형의 변화, 수질오염 및 저질오염 등이 심각한 문제점으로 인식되어 왔다 (Chang and Oh, 1991; Choi et al., 1995; Kim et al., 1996).

낙동강 하구 및 인근 연안역 역시 녹산 공단 조성, 하구둑 건설 등으로 해안선의 많은 변화가 있었으며 가덕 신항만 개발, 택지 조성 등 여러 산업시설 및 주거시설이 건설중이거나 예정되어 있어 앞으로도 연안환경의 변화가 예상되는 해역이다. 실제로 1987년 11월 낙동강 하구둑이 준공됨으로써 이전의 자유롭게 육수와 해수의 교환이 이루어졌던 시기와는 그 환경이 많이 달라졌고 지형 및 퇴적상의 급격한 변화와 같은 퇴적환경의 변화가 야기되고 있다. 이러한 이유로 낙동강 하구역에 대해서 이전부터 비교적 많

은 연구가 수행되어 왔다 (Kim and Lee, 1980; Kim and Park, 1980; Kim, 1988; Lee and Kim, 1990; Lee, 1993).

인위적인 개발 공사에 따른 낙동강의 수력학적 특성 변화는 낙동강 하구는 물론 인접한 진해만까지 영향을 미칠 것으로 예상되고, 결과적으로 퇴적환경에 상당한 변화가 초래될 것으로 예상된다. 즉 본 연구지역이 타지역에 비하여 퇴적환경 변화가 활발하게 진행되고 있어 지속적인 퇴적학적 연구가 필요하므로, 본 연구에서는 다양한 퇴적환경이 존재하는 낙동강 하구 및 주변 해역에 분포하는 표층 퇴적물에 대해 일련의 퇴적학적 연구를 실시하여 표층 퇴적물의 특징적인 퇴적상 및 특성을 파악하고, 연구지역의 일부인 낙동강 하구역의 퇴적환경 변화에 대하여 살펴보았다.

남해안의 동남부에 위치한 본 연구지역은 낙동강 하구, 가덕도와 다대포 사이의 연안역 및 가덕도 서쪽 진해만 입구 지역을 포함하고 있다 (Fig. 1). 낙동강 하구는 한반도에서 삼각주와 사주의 발달이 양호한 곳으로 하구 전면에는 낙동강 본류의 두 개 수로와 서낙동강의 수로를 통해 유입되는 토사가 퇴적되어 하천의 유하작용과 간만작용에 의해 형성된 다양한 크기의 사주들이 하천 유수의 직각방향 (동-서 방향)으로 발달되어 있고, 이들 사주들은 파랑과 조류, 그리고 낙동강의 범람, 태풍 등에 의해서 끊임없이 그 형태가 변하고 있다 (Ban, 1986). 연구지역은 조류 및 파랑운동 (wave action)에 의한 영향을 매우 강하게 받는 지역으로 침식과 퇴적작용이 복합적으로 일어난다. 낙동강 하구의 해저지형은 남향하면서 일률적으로 수심이 깊어져 전형적인 해저 삼각주 지형이 발달해 있는 반면, 가덕도와 거제도 사이의 지역은 진해만으로 갈수록 지형이 상당히 불규칙적이며 수심 20~30 m 정도의 가덕수도가 존재한다 (Fig. 2).

* Corresponding author: yunk@mail.pknu.ac.kr

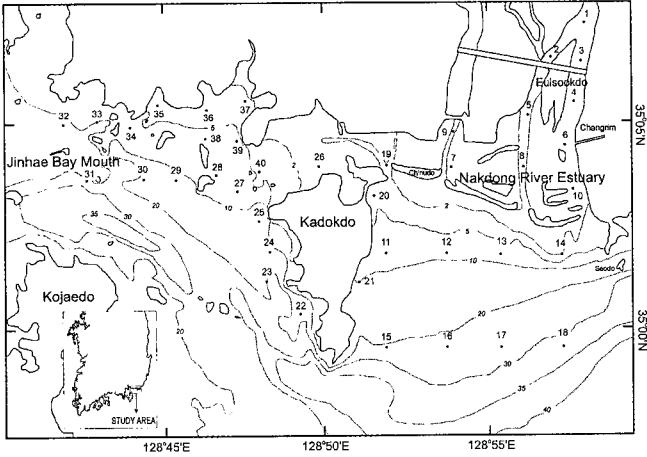


Fig. 1. Map showing study area and sampling sites (bathymetry in meters).

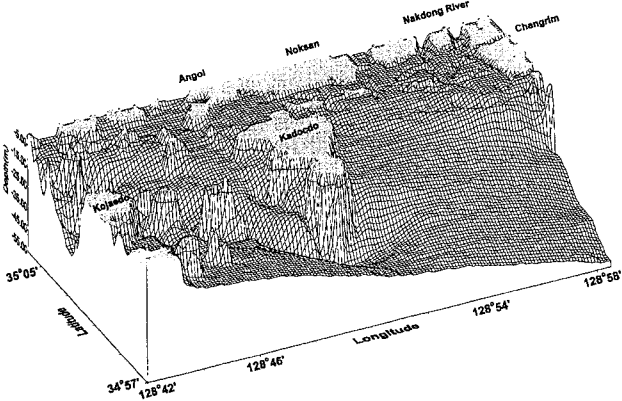


Fig. 2. Three-dimensional topography of the study area.

연구지역의 조석은 1일 2회조의 반일주조형이고 조석주기에 따라 왕복성의 조류가 흐르며, 창조류 보다 낙조류가 조금 더 크며 지형의 영향을 받고 있는 가덕수도에서 유속이 가장 강하고, 가덕도 북쪽 지역에서는 유속이 가장 약하다 (Korea Hydrographic Office, 1982). 조류의 방향은 낙동강 하구에서는 해안선에 거의 평행하고 가덕도와 거제도 사이에서는 북서-남동 방향이며 외해에서는 북동-남서 방향이다 (Fig. 3).

자료 및 방법

본 연구를 위하여 사용된 시료 채취는 1998년 2월부터 1999년 9월까지 소형선박을 이용하여 낙동강 하구둑 내, 하구 및 인근 진해만 입구에 이르는 해역에서 행하였고 총 40개 정점에서 Grab sampler와 Box corer를 이용하여 표층 퇴적물을 채취하였다 (Fig. 1).

퇴적물의 입도분석은 표준분석방법에 따라 처리한 후, 사질부는

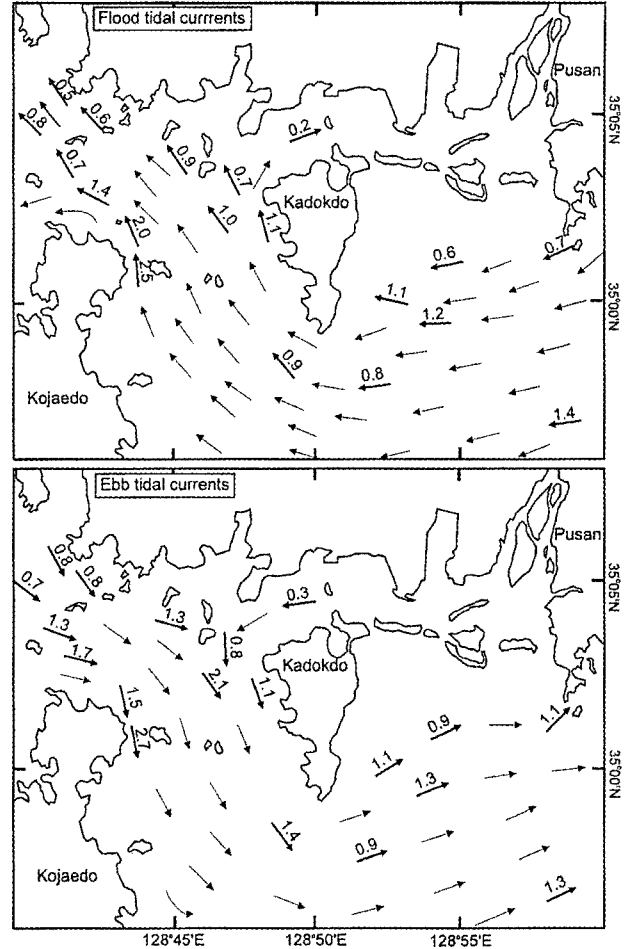


Fig. 3. Maximum velocity (in knots) and direction of flood and ebb tidal currents during spring tide (Korea Hydrographic Office, 1982).

체질분석을 통해 니질부는 피펫방법으로 실시하였고 결과는 Folk and Ward (1957)의 방법에 의하여 구하였다. 퇴적물의 유기물 및 탄산염 함량 측정은 염분이 제거된 시료를 110°C에서 8시간 건조한 후 200 mesh 체를 통과할 수 있도록 막자사발 (agate mortar)을 이용하여 분말 상태로 만든 후 측정하였다. 유기물 함량분석은 시료 약 4g을 550°C의 전기로에서 3시간 동안 연소시킨 후 중량 손실량을 구하여 %로 환산하였으며, 탄산염 함량 분석은 시료 약 2g에 염산 (0.1 N HCl)을 첨가하여 반응시킨 후 세척, 건조하여, 염산 처리 전후의 중량 손실량을 %로 환산하였다. 점토광물 분석은 연구지역에서 채취된 표층 퇴적물 중 sand 함량이 80% 이상으로 높게 나타나는 정점을 제외한 18개의 시료를 선택하여, Biscaye (1965)의 방법에 따라 처리한 후 X-선 회절분석기 (Rigaku 모델 D/Max-2400)를 이용하여 X-선 회절도 (diffractogram)를 구하여 면적비에 의한 반정량분석을 통하여 계산하였다. 금속 원소 분석은 점토광물 분석 정점과 같은 정점을 대상으로 왕수처리에 의한 방법 (Johansson, 1975)에 따라 처리한 후 Flame AAS (Varim Spectr AA : 250 plus)로 분석하였다.

결 과

표층퇴적물의 입도분포

낙동강 하구에서 진해만 입구에 이르는 지역의 표층퇴적물 분포 양상은 Folk (1954)의 분류법에 따라 총 5개의 퇴적상으로 구분되었으며, 지역적인 특성 및 에너지 조건에 따라 그 분포 특징을 달리한다 (Fig. 4(a)). 니질 퇴적물은 가덕도 서쪽부터 진해만 입구 지역까지 넓게 분포하고 있으며 사질 퇴적물은 낙동강 하구 사주를 중심으로 상대적으로 수심이 깊은 사주 바깥쪽 지역에 우세하게 분포하고 있다. 그 외 퇴적물 (사니질, 니사질, 실트사질)은 낙동강 하구둑 안쪽에서부터 수심이 2~5m로 얕은 사주 안쪽 지역 및 가덕도 북쪽 지역과 비교적 수심이 깊은 가덕도 동쪽 지역까지 넓게 분포하고 있다.

평균입도는 지형적인 특성에 따라 큰 차이를 보이는데, 2.29~8.61 ϕ 의 다소 넓은 범위로 나타났다 (Fig. 4(b)). 낙동강 하구지

역은 장림 지역과 인접한 수로에서 비교적 세립하나 사주를 지나 외해쪽으로 갈수록 모래 함량이 90% 이상으로 증가하여 조립해진다. 그러나 낙동강 하구에서 가덕도 북쪽 지역을 지나 진해만 입구 지역으로 갈수록 점차적으로 세립해지는 경향을 보인다. 그러므로 가덕도를 중심으로 낙동강 하구지역은 주로 조립질 퇴적물이 분포하고 진해만 입구지역은 세립질 퇴적물이 분포하여 서로 다른 차이를 보이고 있다.

연구지역의 니질 (silt+clay) 함량은 진해만 입구 지역이 95% 이상으로 높게 나타난 반면, 낙동강 하구 사주 바깥쪽 지역은 10% 이하로 낮게 나타났다 (Fig. 4(c)). 특히 을숙도 양쪽 수로로부터 연안사주 지역을 거쳐 외해로 갈수록 남서쪽 방향의 점진적인 감소를 보이지만 연안사주 지역에서 가덕도 북쪽 지역을 거쳐 진해만 입구 지역으로 향할수록 그 함량이 증가한다.

Folk (1954)의 분류법에 의해 분류된 연구지역의 표층퇴적물을 크게 3개의 퇴적상, 즉 사질 퇴적상 (sand facies; TYPE I) 분포

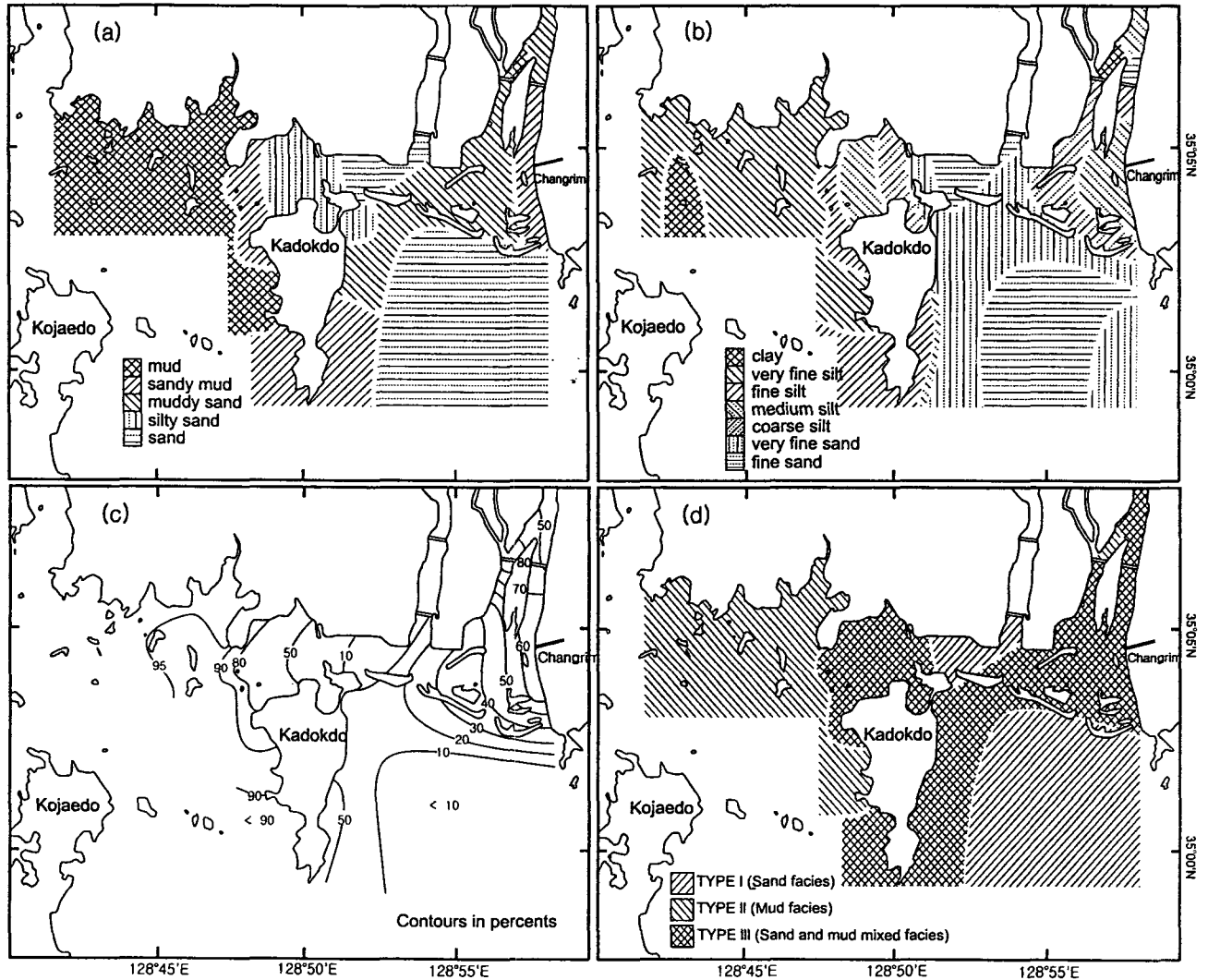


Fig. 4. Distribution of sediment type (a), mean grain size (b), mud contents (c) and sedimentary facies (d) in the surface sediments.

역, 니질 퇴적상 (mud facies; TYPEII) 분포역, 그리고 사니질 혼합 퇴적상 (sand and mud mixed facies; TYPEIII) 분포역으로 분류하였다 (Fig. 4(d)). TYPE I 은 낙동강 하구 사주 바깥지역에 주로 분포하며 일부 진수도 북쪽 일부 지역에 분포하고 TYPEII 는 가덕도 서쪽 진해만 입구 지역에 주로 분포하며 낙동강 하구둑 안쪽지역에 일부 분포한다. 니사질, 사니질, 실트사질 퇴적물로 구성된 TYPEIII 는 육지와 인접한 수심이 얇은 낙동강 하구 지역과 가덕도 부근에 분포한다.

유기물 및 탄산염 함량

연구지역 표층 퇴적물 중 유기물 함량은 0.82~11.61% (평균 5.80%)의 범위로 지역에 따라 다양한 분포양상을 보여준다 (Fig. 5(a)). 낙동강 하구 지역에서는 장림 부근지역에서 5% 이상으로 다소 높은 값을 보이고 사주를 지나 외해쪽으로 갈수록 감소하는 경향을 보이며 가덕도 서쪽 지역에서는 진해만 입구 지역으로 갈수록 10% 이상으로 증가하는 경향이 나타났다. 퇴적상에 따른 분포 양상을 보면 니질 퇴적상을 나타내는 진해만 입구 지역에서의 유기물 함량은 7% 이상으로 높은 함량이 나타났으며 사니질, 니사질, 실트사질 퇴적상을 나타내는 낙동강 하구 사주 안쪽 지역 및 가덕도 인근 지역은 1~7%로 나타났다. 그러나 낙동강 하구의 사주를 중심으로 상대적으로 수심이 깊은 바깥쪽 지역에 형성된 사질 퇴적상 지역에는 2% 이하로 낮은 함량을 보였다. 탄산염 함량은 2.05~17.72% (평균 7.81%)의 범위로 유기물 함량 분포와 유사한 경향을 나타냈다 (Fig. 5(b)).

평균입도와 유기물 및 탄산염 함량과의 관계는 평균입도가 세립할수록 증가하여 선형의 상관관계 ($r^2=0.80$, $r^2=0.55$)를 보여준다 (Fig. 6). 그러므로 실트와 점토가 많은 니질 퇴적상에서 유기물 및 탄산염 함량이 높게 나타났고 사질 퇴적상에서 낮은 함량 분포를 보여 이들 함량이 입도에 따라 좌우되는 경향을 보였다. 낙동강 하구 지역보다는 진해만 입구 지역 퇴적물에서 유기물 및 탄산염 함량이 더 높게 나타나는 것은 이러한 입도의 영향도 있지만, 가덕도 북쪽 지역과 서쪽 지역에 많은 패류 양식장이 위치

하고 있기 때문에 유기물 함량이 높게 나타나는 것으로 보인다. 반면에 낙동강 하구 지역에서 이들 함량이 낮게 나타나는 것은 육지로부터 많은 퇴적물의 유입과 조류에 의한 혼합과 같은 유기물 및 탄산염의 집적을 방해하는 요인에 의해 낮게 나타나는 것으로 보인다.

점토광물

연구지역 18개 정점의 시료를 반 정량 분석한 각 점토광물의 상대 함량은 일라이트가 평균 58.2%로 가장 높은 상대 함량을 보였고, 녹니석과 고령석이 각각 평균 20.5%와 20.1%로서 거의 1:1 함량비를 나타냈으며, 스멕타이트는 평균 1.3%로 가장 낮은 상대 함량을 보였다.

일라이트의 함량은 51.4~70.5% (평균 58.2%)의 범위를 보이며, 낙동강 하구 지역의 사주 부근 (정점 10)에서 가장 높은 함량을 보인다 (Fig. 7). 낙동강 하구둑 안쪽에서 사주부근으로 갈수록 일라이트 함량은 증가하지만 가덕도 북쪽 지역에서 진해만 입구 지역으로 갈수록 감소하여 정점 34에서 가장 낮은 함량을 보인다.

고령석의 함량은 13.4~25.1% (평균 20.1%)의 범위를 보이며, 낙동강 하구둑 안쪽 정점인 정점 2에서 최대값을 나타내고 사주 지역인 정점 10에서 최소값을 보여 낙동강 하구 지역에서는 하구둑에서 사주 지역으로 갈수록 감소하는 분포 경향을 보이고 낙동강 하구 지역에서 가덕도 서쪽 진해만 입구 지역으로 갈수록 증가하는 경향을 보여 일라이트와 다소 대조적인 분포경향을 보인다 (Fig. 7). 점토광물 중 고령석의 함량은 외해역보다 육지에 근접하는 연안역에서 높은 것으로 보고되어 있고 (Griffin et al., 1968; Aoki et al., 1974) 연구지역에서도 낙동강과 인접한 지역에서 높은 함량을 보인다.

녹니석의 함량은 14.1~25.3% (평균 20.5%)의 범위로 고령석의 함량보다 다소 높게 나타났고 고령석의 분포 패턴과 유사한 경향이 나타났다 (Fig. 7). 즉, 낙동강 하구둑 안쪽 지역과 진해만 입구지역에서 20% 이상으로 높은 함량을 보이나, 사주 부근 지역과 가덕도 주위 지역에서는 20% 이하로 낮은 함량을 보인다.

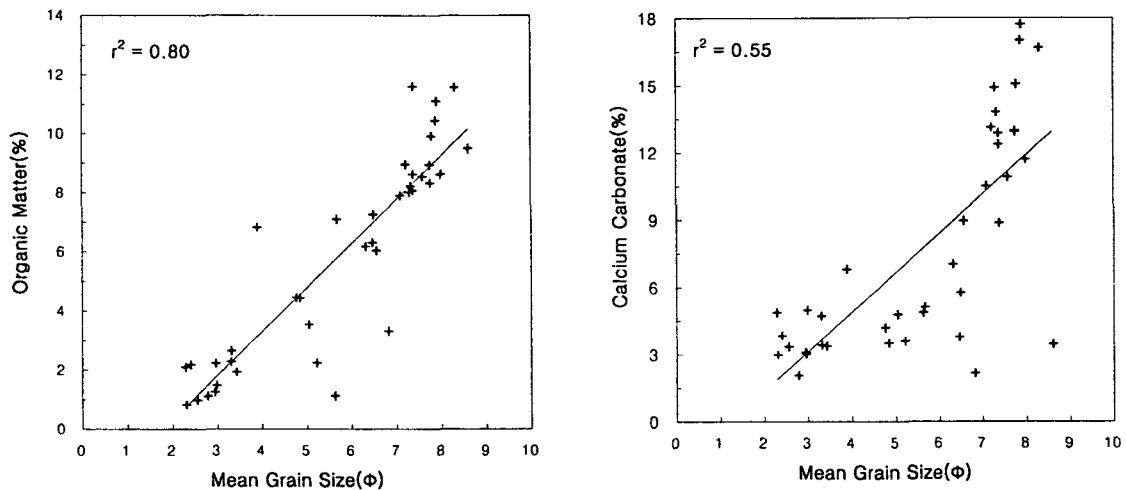


Fig. 5. Distribution of organic matter (a) and CaCO₃ (b) contents (%) in the surface sediments.

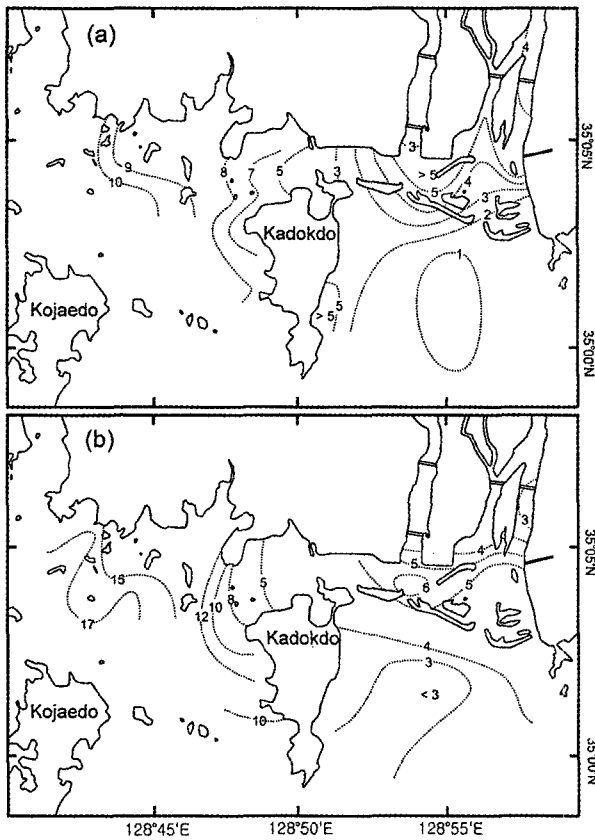


Fig. 6. Pair diagrams relating the organic matter and CaCO₃ contents (%) with mean grain size (ϕ) of surface sediments.

스멕타이트의 함량은 0~2.8% (평균 1.3%)의 범위로 전체적으로 매우 낮다. 스멕타이트는 특징적인 분포 패턴을 보이지 않으며 거의 균일한 함량 분포를 나타낸다. 특히 낙동강 하구둑 내의 하상 퇴적물에서는 발견되지 않으며 대부분의 해역에서 2% 이하로 나타났다.

금속원소 분포

짐토광물 분석 정점과 같은 정점을 대상으로 실시한 결과, Al, Fe, Mn의 농도는 연안에 인접한 낙동강 하구지역 (정점 5)에서 가장 나타났고, 진해만 입구지역에서 높게 나타난 반면 Cu와 Zn은 낙동강 하구둑 안쪽 지역 (정점 1)에서 높은 농도를 보였다 (Fig. 8).

표층퇴적물 중 Al의 농도는 1.15~3.49% (평균 2.52%)의 범위로 세립 퇴적물이 우세한 진해만 입구 지역에서 3% 이상으로 높은 값을 보이며 비교적 조립한 퇴적물이 분포하는 울속도 서쪽 수로를 따라 2% 이하로 낮게 나타났다. 그러나 낙동강 하구둑 안쪽 지역 (정점 2)과 장림과 인접한 지역 (정점 6)에서는 2% 이상으로 비교적 높게 나타났다. 뚜렷한 분포경향을 보이지는 않지만 전체적으로 낙동강 하구지역에서는 하구둑 상류에서 사주지역으로 갈수록 감소하지만, 가덕도 북쪽지역에서 진해만 입구지역으로 갈수록 증가하는 경향을 보였다.

Fe의 농도는 1.60~4.02% (평균 3.16%)의 범위로 Al의 농도보다 높게 나타났고 진해만 입구 지역에서 3% 이상으로 높은 농도를 보이는 반면 낙동강 하구 지역에서는 2% 이하로 낮은 농도를 보여, 전반적으로 Al의 농도분포와 유사하게 나타났다.

Mn의 농도는 271.8~1,073.8 ppm (평균 584.0 ppm)의 범위로

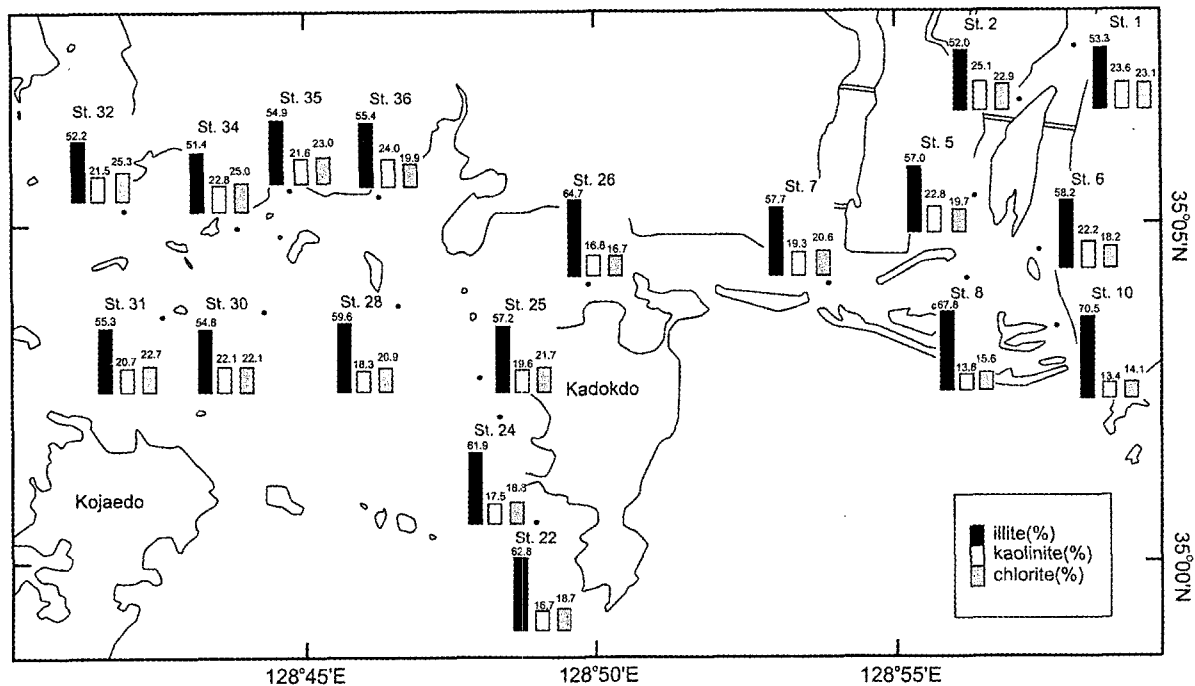


Fig. 7. Compositions of major clay mineral at each station in the study area.

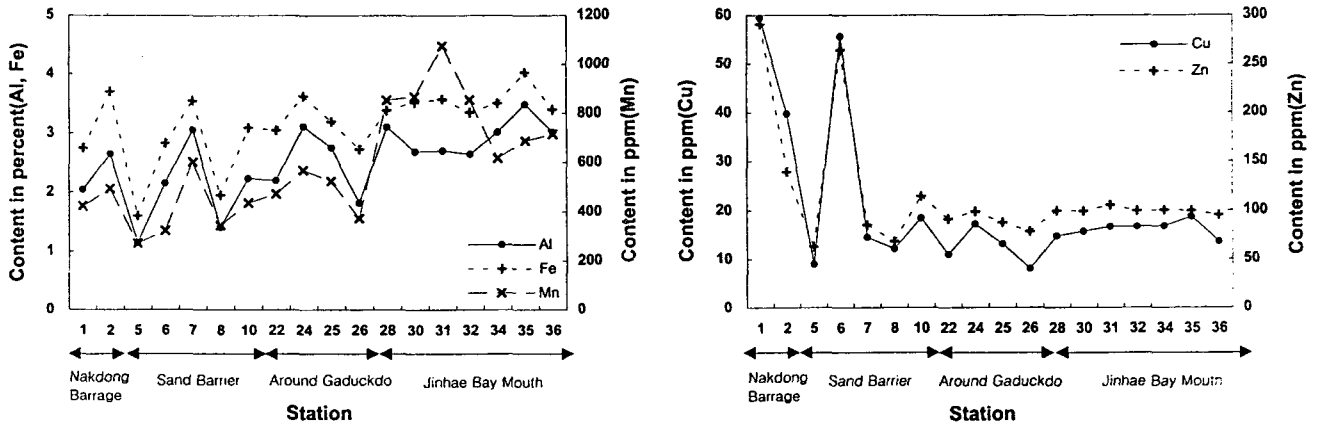


Fig. 8. Variations of metallic element concentration at each station in the study area.

진해만 입구 지역에서 가덕도 북쪽 지역으로의 감소경향이 다른 금속원소에 비해 뚜렷하게 나타나 동-서 방향의 농도 변화가 심하다. 특히 진해만 입구 지역인 정점 31에서는 1,000 ppm 이상으로 높은 농도를 보였다.

Cu와 Zn의 농도는 각각 8.0~59.4 ppm (평균 20.6 ppm), 62.8~290.4 ppm (평균 115.4 ppm)의 범위로, 가덕도를 중심으로 낙동강 하구지역과 진해만 입구지역의 농도에 뚜렷한 차이가 나타났다. 이들의 농도분포는 다른 금속원소와는 달리 하구둑 상류에서 연안사주 지역으로의 감소경향이 뚜렷하게 나타났고 주변 하천의 유입이 있는 을숙도 동쪽 수로에서 높은 농도를 보였다.

Al, Fe, Mn의 평균입도와와 상관관계 (Table 1)는 양호한 것으로 나타났고 ($r=0.59\sim0.68$), Cu와 Zn는 평균입도와 관련성이 없는 것으로 나타났다 ($r=-0.11, r=-0.09$). 일반적으로 퇴적물내의 금속원소 함량은 입도에 따라 크게 변하는 것으로 알려져 있으며 한반도 주변의 퇴적물에 대해서도 이와 같은 관련성에 대해 보고되었다 (Lee et al., 1991). Al, Fe, Mn은 유기물 및 탄산염 함량과의 상관관계가 높은 것으로 보아 ($r=0.59\sim0.92$), 유기물 및 탄산염 함량 역시 이들 금속원소의 농도 분포에 영향을 미치는 것으로 보여진다. Cu와 Zn은 평균입도, 유기물 및 탄산염 함량과 관련성이 뚜렷하지 않고 다른 금속원소와도 관련성이 없다. 그러나 Cu와 Zn 사이에는 높은 상관성을 보여 ($r=0.97$), 연구지역에서 이 두 원소는 공급원 및 지구화학적 거동이 유사함을 알 수 있다.

Table 1. Correlation between mean grain size, organic matter, calcium carbonate and metallic elements

	Mz	Organic M.	CaCO ₃	Al	Fe	Mn	Cu	Zn
Mz	1.00							
Organic M.	0.77	1.00						
CaCO ₃	0.68	0.77	1.00					
Al	0.59	0.62	0.64	1.00				
Fe	0.66	0.64	0.59	0.94	1.00			
Mn	0.68	0.79	0.92	0.66	0.67	1.00		
Cu	-0.11	-0.13	-0.35	-0.07	0.02	-0.25	1.00	
Zn	-0.09	-0.19	-0.29	-0.09	-0.02	-0.23	0.97	1.00

고찰

퇴적상별 특성 및 퇴적기작

퇴적환경을 평가하는데 중요한 척도로 알려진 조직 특성치, 유기물 및 탄산염 함량, 금속원소와 점토광물 함량은 연구지역의 세 가지 TYPE의 퇴적상에서 분명한 차이를 보인다 (Table 2). 조직 특성치와 유기물 및 탄산염 함량은 TYPE I과 TYPE II에서 서로 대조적인 경향이 나타나지만 TYPE III는 다른 두 TYPE의 중간적인 특성을 나타내고 있다. 그러나 금속원소 함량은 다른 특성이 나타나는데 Al, Fe, Mn의 함량은 세립 퇴적물인 TYPE II가 비교적 조립한 TYPE III 보다 높게 나타나는 반면, Cu와 Zn은 TYPE III가 TYPE II 보다 높게 나타났다. Al, Fe, Mn의 함량이 TYPE II에서 높게 나타나는 것은 입도와 이들 금속원소들과의 상관관계 (Table 1)가 양호하여 세립질 퇴적물이 우세한 TYPE II에서 높게

Table 2. Textural parameters, organic matter, calcium carbonate, clay mineral and metallic elements contents of major sedimentary facies in the study area

	TYPE I		TYPE II		TYPE III	
	Range	Mean	Range	Mean	Range	Mean
Mean (ϕ)	2.29~3.43	2.72	7.10~8.61	7.67	2.96~6.83	5.16
Sorting (ϕ)	0.45~0.88	0.60	1.65~2.42	2.09	0.92~3.08	2.39
Skewness (ϕ)	0.03~0.35	0.16	-0.22~0.14	0.02	-0.27~0.79	0.40
Organic M. (%)	0.82~2.18	1.48	7.91~11.61	9.27	1.13~7.26	4.40
CaCO ₃ (%)	2.05~4.97	3.56	3.46~17.72	12.79	2.15~8.94	4.77
Al (%)	-	-	2.64~3.49	2.93	1.15~3.05	2.09
Fe (%)	-	-	3.35~4.02	3.56	1.60~3.55	2.75
Mn (ppm)	-	-	495~1,074	748	272~602	420
Cu (ppm)	-	-	13.6~39.7	18.8	8.0~59.4	22.3
Zn (ppm)	-	-	95.3~139.3	104.0	62.8~290.4	126.8
Illite (%)	-	-	51.4~61.9	55.3	53.3~70.5	60.5
Kaolinite (%)	-	-	17.5~25.1	21.5	13.4~23.6	18.9
Chlorite (%)	-	-	18.8~25.3	22.3	14.1~23.1	19.2
Smectite (%)	-	-	ND~1.8	0.9	ND~2.8	1.6

TYPE I : Sand facies, TYPE II : Mud facies, TYPE III : Sand and mud mixed facies.

나타나지만, Cu와 Zn이 TYPEIII에서 높게 나타나는 것은 근원지로부터의 거리나 혹은 오염물질의 유입 등으로 인한 공간적 변화가 입도에 의한 영향보다 크게 작용한 결과라고 생각된다.

일반적으로 해저 퇴적물의 입도분포 곡선은 퇴적과정 및 퇴적 환경에 따라 차이를 나타내는 것으로 알려져 있다 (Passegga, 1964; Friedman, 1967; Visher, 1969). 연구지역의 표층 퇴적물에 대한 입도분포를 세 가지 TYPE의 퇴적상에 대해 분류하면, TYPE I은 사질 계층에서 최빈값을 갖는 단모드 모래형 (unimodal sand), TYPE II는 니질 계층에서 최빈값을 갖는 단모드 펄형 (unimodal mud), TYPE III는 사질 및 니질 계층에서 최빈값을 갖는 복모드형 (bimodal sand and mud)으로 나타났다 (Fig. 9(a)). 이러한 복모드 형은 에너지 수준이 상이한 퇴적환경에서 모드가 혼합되어

형성된 것이므로 서로 다른 두 퇴적상의 경계에 위치한 TYPE III 퇴적상은 자기 다른 기원의 퇴적물이 혼합된 것으로 해석된다. 각각의 퇴적상에 대해 퇴적물의 운반형태 및 퇴적기작을 추정하기 위해 Passegga (1964)가 제시한 C-M diagram 상에 plot 해 본 결과, 각 TYPE에 따라 서로 다른 퇴적기작이 작용하고 있음을 알 수 있다 (Fig. 9(b)). TYPE I은 M값이 100 μm 이상, C값이 200 μm 이상으로 주로 점이적 부유 (graded suspension)가 퇴적기작의 주요한 역할을 하고 있는 반면, TYPE II는 M값이 10 μm 이하로 주로 지속적 부유기작 (uniform suspension)에 의해 퇴적물이 이동, 퇴적된다. 그러나 TYPE III는 그 구분이 명확하지는 않으나 점이적 부유와 지속적 부유의 혼합형태가 퇴적기작의 주요한 요소로 작용하고 있음을 알 수 있다. 그러므로 사니질 혼합 퇴적상인 TYPE

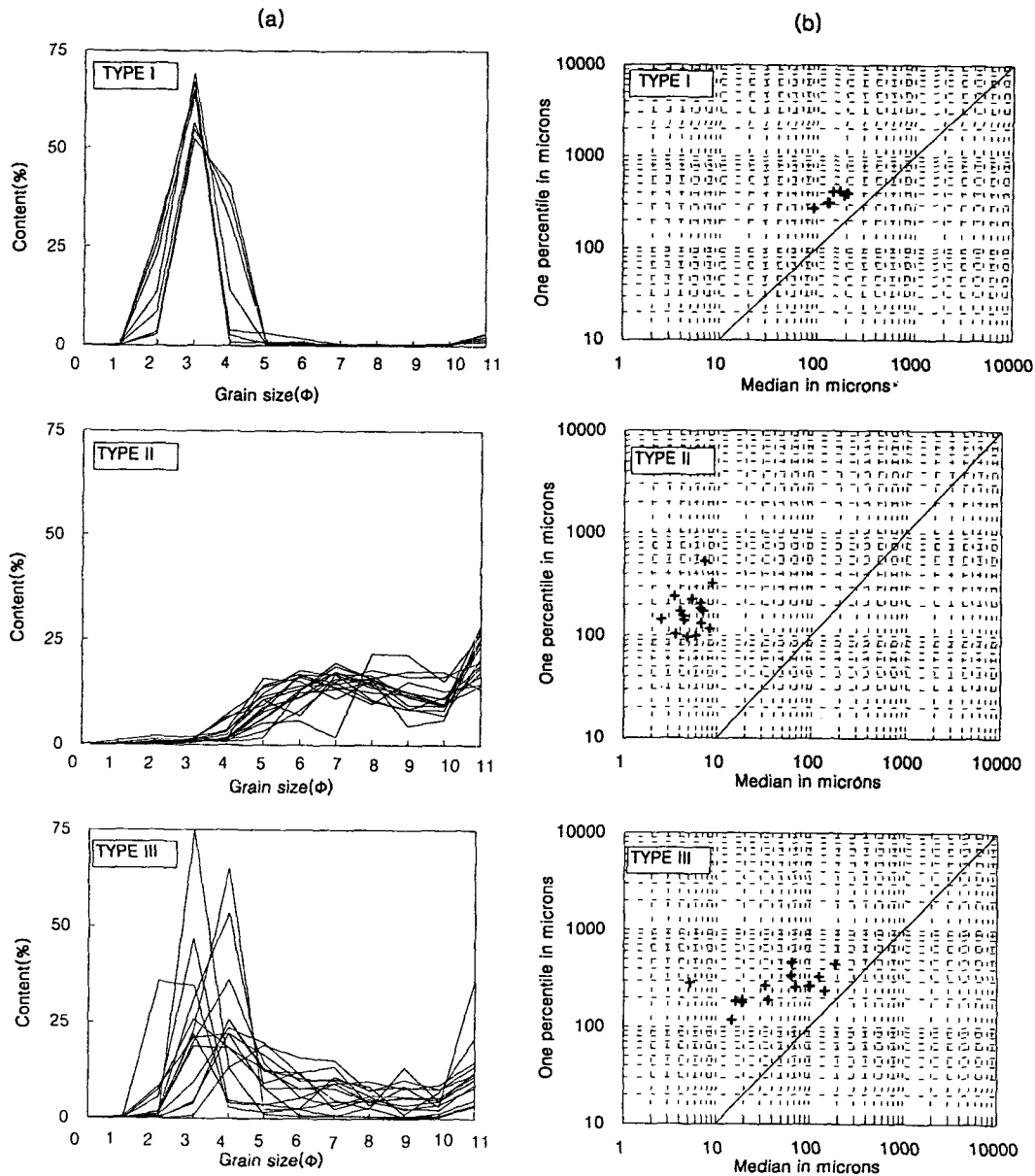


Fig. 9. Size-frequency distribution (a) and CM-patterns (b) of major sedimentary facies.

III는 두 퇴적상의 중간적인 특성으로 서로 다른 퇴적기작에 의해 에너지 수준이 상이한 퇴적환경에 형성된 것으로 나타났다.

세립 퇴적물의 이동

연안에서 세립 퇴적물에 관한 연구는 그 지역의 퇴적환경 규명과 더불어 퇴적물의 기원 및 이동을 연구하는데 많이 이용되어 왔다 (Biscaye, 1965; Chough, 1985; Park et al., 1986; Park and Khim, 1990). 퇴적물중 금속원소에 대한 연구는 퇴적물 이동 및 퇴적과정의 역사에 따른 변화를 반영하고 (Lee et al., 1991), 점토 광물에 대한 연구는 세립 퇴적물의 기원, 이동 경로 및 방향 등 퇴적기작을 이해하는데 중요한 역할을 하므로 (Griffin et al., 1968) 연구지역에 분포하는 이들의 함량 분포를 통해 세립질 퇴적물의 이동과 퇴적현상에 관한 정보를 얻을 수 있다.

연구지역의 니질 (silt+clay) 함량분포 (Fig. 4(c))와 점토광물

의 함량 분포 (Fig. 7)로부터 고령석과 녹니석의 고농도는 TYPE II와 같은 세립질 퇴적물에서 풍부한 것을 알 수 있다. 즉, 고령석과 녹니석의 분포 경향은 니질 함량분포와 유사한 경향을 보인다. 또한 금속원소 중 Al, Fe, Mn의 고농도 역시 세립질 퇴적물인 TYPEII에서 나타났고 (Table 2), 역시 니질 분포 경향과 유사하다. 그러므로 고령석 및 녹니석과 금속원소의 분포 경향은 근원암과 풍화과정에 의해 영향을 받는 세립질 퇴적물의 분포 경향과 밀접한 관련이 있는 것으로 생각되며, 이러한 분포 경향을 통해서 진해만 입구지역의 세립질 퇴적물은 가덕도 북쪽 및 서쪽으로 이동되는 것으로 판단된다. 진해만 입구지역에 분포하는 세립질 퇴적물은 근본적으로 낙동강으로부터의 공급에 의해 형성된 것으로 생각되지만, Park and Lee (1996)가 진해만 지역에서 보고한 결과들과 비교해 보면, 이들 세립퇴적물이 진해만으로부터 일부 유입된 것으로 사료된다 (Fig. 10). 즉, 진해만 표층 퇴적물은 연구

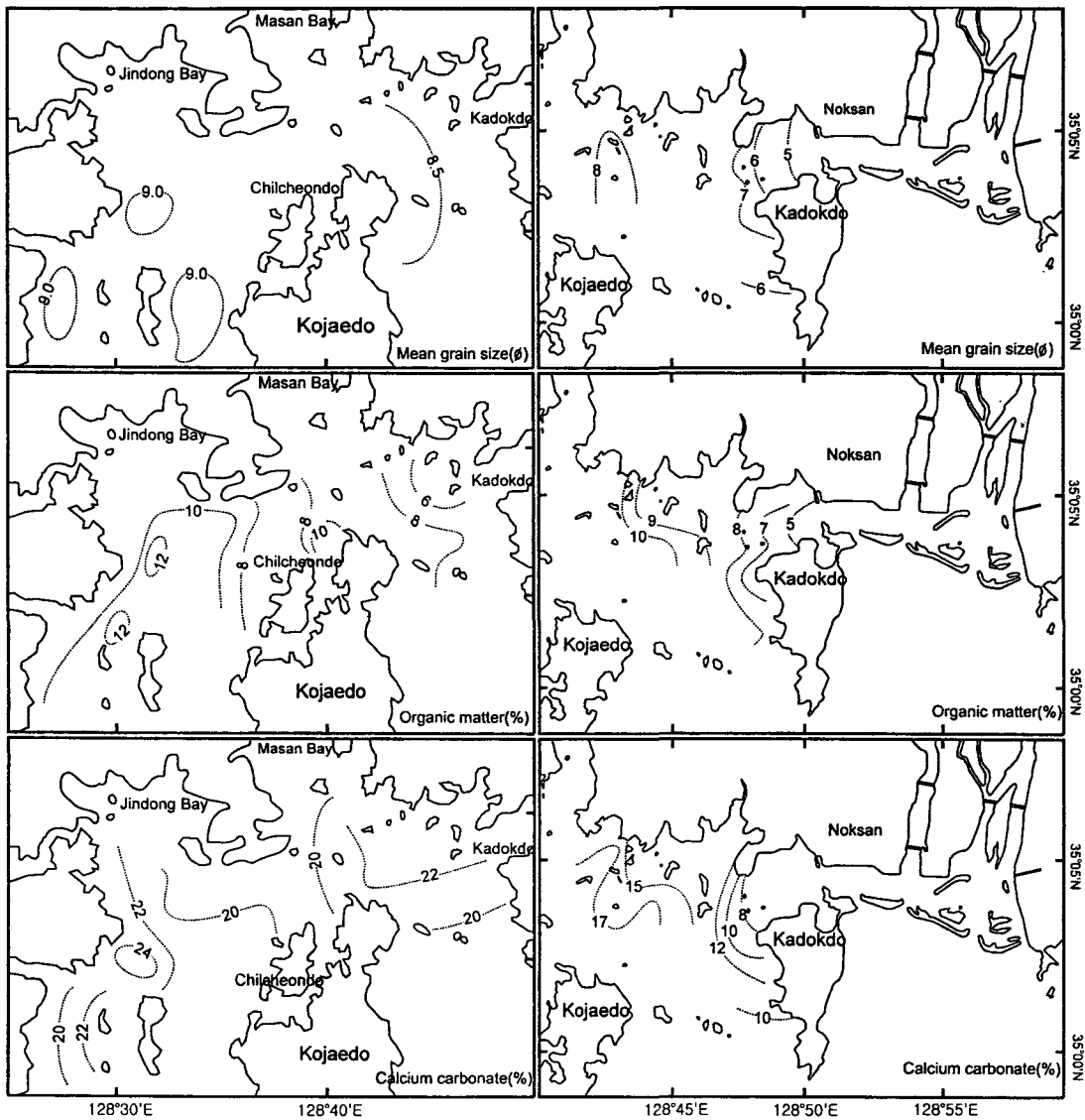


Fig. 10. Comparison of mean grain size, organic matter and CaCO₃ distribution in the surface sediment between Jinhae Bay (Park and Lee, 1996) and Jinhae Bay Mouth (this study).

지역 중 진해만 입구지역 보다 세립질이고 또한 유기물 및 탄산염 함량도 높게 나타나므로, 진해만 지역의 세립질 퇴적물이 폭풍이나 홍수시 재부유되어 조류에 의해 진해만 입구지역으로 이동하고, 이동된 퇴적물은 진해만 입구지역을 거쳐 가덕도 북쪽 지역으로 이동되는 것으로 생각된다.

낙동강 하구역의 퇴적환경 변화

낙동강 하구둑이 건설된 1987년 이후 낙동강 하구지역은 이전의 자유롭게 담수와 해수의 교환이 이루어졌던 시기와는 그 환경이 많이 변하여, 삼각주 발달에 발달하던 연안 사주군의 형태가 크게 변하였고 이 지역에 분포하는 표층 퇴적물의 퇴적상도 변하였다. 낙동강 하구지역의 퇴적환경 변화를 살펴보기 위해 본 연구 자료와 낙동강 하구둑 건설전인 Kim and Lee (1980)의 자료 및 하구둑 건설 직후인 Park (1992)의 자료를 비교하였다. 각 자료의 비교는 입도 자료 중 낙동강 하구 일대의 해저지형 변화를 일으키는 중요한 원인으로 생각되는 사질 함량 (sand contents)을 중심으로 비교하였다 (Fig. 11).

낙동강 하구둑이 건설되기 전인 1980년의 낙동강 하구지역 사질함량은 을숙도 상류지역과 연안 사주를 중심으로 90% 이상의 높은 함량이 나타났으나 사주에서 남쪽 방향으로 수심이 깊은 외해로 갈수록 그 함량은 30% 이하로 감소하는 경향을 보였다. 낙동강 하구둑이 건설되고 난 후 1992년의 사질함량은 1980년에 비하여 사주 부근 지역에서는 감소하였으나 사주 남쪽 지역의 사질함량은 오히려 증가하였다. 특히 을숙도 부근의 사질함량은 하구둑 건설전에 비하여 급격히 감소 (30% 이하)하여 세립질 퇴적물이 증가하였음을 알 수 있다. 그러나 현재의 연구결과인 1999년의 사질함량은 이 전의 결과와 상당한 차이를 보인다. 사주 부근의 사질함량은 1980년과 1992년에 비해 감소하였으나 사주 남쪽의 수심이 깊은 지역에서는 이 전보다 오히려 증가 (90% 이상)하였

다. 그러므로 하구둑이 건설된 이후부터 현재까지 사질함량은 연안 사주지역에서 벗어난 지역까지 계속해서 증가되었음을 알 수 있다. 이 지역에서의 사질함량 증가는 낙동강 하구 지역의 지속적인 퇴적환경 변화에 의해 발생된 것으로 보인다. 이러한 퇴적환경 변화의 주요 요인에는 낙동강 상류로부터 니질 퇴적물 유입량의 감소, 하구 지역의 수력학적 에너지 변화, 그리고 하구 지역 주변에서 실시된 인위적인 작업에 의한 환경 변화의 세 가지 가능성을 생각 할 수 있다.

하구둑 건설 후 담수 유출 에너지보다 해수 유입의 에너지가 상대적으로 더 우세하게 작용하여, 해수와 담수 사이의 수력학적 에너지 변화가 발생하였고, 이러한 변화로 인해 파랑과 연안류의 우세한 작용으로 사주지역의 침식이 발생할 수 있으며, 이러한 사실이 이동하여 사주지역에서 벗어난 곳까지 사질함량이 증가한 것으로 생각된다. 일반적으로 파랑의 영향이 하천의 영향보다 우세한 하구에서는 해안에 평행한 방향의 사주가 발달하고, 특히 수심이 얇은 곳에서는 파랑에 의한 퇴적물의 재동이 쉽다 (Coleman, 1976). 낙동강 하구는 해안에 평행한 방향의 사주가 발달해 있으므로 파랑의 영향이 우세한 환경이고, 사주 부근의 수심이 얇으므로 파랑 및 연안류에 의해 사주지역의 침식이 발생할 수 있다. 실제로 녹산 수문이 건설되고 난 후 낙동강이 운반해온 토사가 수문 밖으로 운반되지 못하고 이 일대에 작용하는 연안류의 영향으로 퇴적작용이 침식작용으로 전환되어 이 지역 일대가 점차로 침식되고 있다 (Oh, 1988). 낙동강 하구둑 건설 전과 비교하여 건설 후 나타난 가장 큰 변화는 담수 유출량의 감소이다. 담수 유출량의 감소로 나타난 낙동강으로부터의 니질 퇴적물 유입량 감소는 상대적으로 사질함량의 증가 현상을 일으킬 수 있다. 그러나 이러한 원인들에 대해서는 수력학적인 관측과 같은 더욱 자세한 연구가 수행되어야 할 것으로 보인다. 낙동강 하구지역에서의 퇴적환경 변화는 이 지역 주변에서 거행된 간척, 해안매립 및 수로 준설작

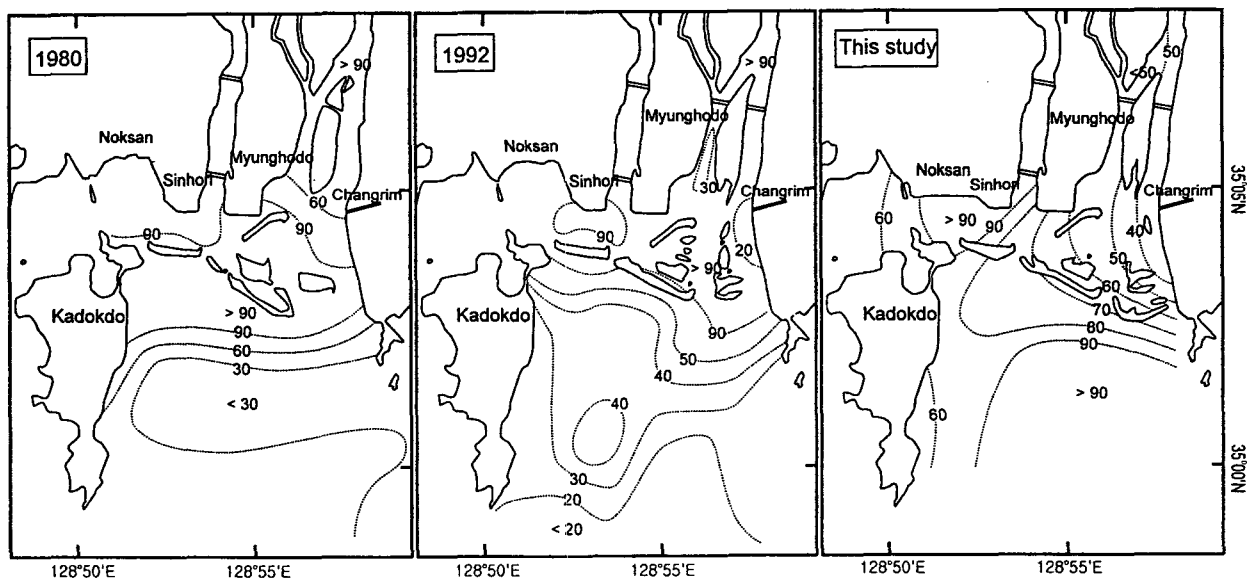


Fig. 11. Distribution of sand contents (%) in the Nakdong River Estuary (Kim and Lee, 1980; Park, 1992; this study).

업과 패류 양식장에서의 인위적인 모래를 이용한 객토 작업에 의해 발생하였을 가능성도 있다. 즉, 이러한 인위적인 작업에 의해 낙동강 하구 지역 퇴적물은 재부유 되어 사질 퇴적물의 재분포에 영향을 미친 것으로 보이고 사주를 벗어난 지역의 사질함량이 크게 증가한 것으로 생각된다. 섬진강 하구지역에서도 수로준설과 같은 인위적인 환경변화에 의해 사주지역이 확장되었다 (Kim et al., 1996).

결 론

낙동강 하구 및 주변 연안역에 분포하는 표층 퇴적물에 대해 실시한 퇴적학적인 실험들을 통해 연구지역 표층 퇴적물의 퇴적상은 낙동강 하구 사주 바깥지역에 우세하게 분포하는 사질 퇴적상 분포역 (TYPE I), 가덕도 서쪽 진해만 입구 지역에 우세하게 분포하는 니질 퇴적상 분포역 (TYPE II), 그리고 육지와 인접한 수심이 얇은 낙동강 하구 지역과 가덕도 부근에 분포하며 두 퇴적상의 중간적인 특성을 보이는 사니질 혼합 퇴적상 분포역 (TYPE III)으로 분류할 수 있다. 이러한 두 퇴적상의 경계에 위치하는 TYPE III 퇴적상은 퇴적물의 특성으로 보아 낙동강으로부터의 직접적인 공급뿐만 아니라 홍수나 폭풍시 진해만에서 재부유된 부유성 세립 퇴적물의 공급에 의해 형성된 복합기원의 퇴적상으로 해석된다.

낙동강 하구지역의 사질 함량은 하구둑이 건설되기 이전과 비교했을 때, 하구둑이 건설된 후 10년이 지난 지금까지 연안 사주 지역을 벗어난 지역까지 증가하였다. 이러한 사질 함량의 증가는 하구둑 건설로 인해 발생하는 여러 현상들 때문에 증가한 것으로 해석된다. 즉, 낙동강 상류로부터의 니질 퇴적물 유입량 감소에 의한 상대적인 사질 함량의 증가, 담수 유출량의 현격한 감소로 하구지역의 수력학적 에너지 변화가 발생하여 연안 사주지역 부근의 연안류에 의한 사질 퇴적물의 이동, 그리고 이 지역 주변에서 실시된 인위적인 여러 작업에 의해 발생한 것으로 보인다. 이러한 낙동강 하구지역에서의 수력학적 변화, 지형변화 및 퇴적환경의 변화는 타지역에 비해 앞으로 활발히 진행될 것으로 예상되므로 그 변화의 방향 및 규모를 예측하기 위한 지속적인 연구가 필요하다.

요 약

다양한 퇴적환경이 존재하는 낙동강 하구 및 주변 연안역에서 총 40개의 정점을 선정하여 채취한 표층 퇴적물 시료에 대해 입도분석, 유기물, 탄산염, 점토광물 및 금속원소 함량 분석을 실시하여 표층 퇴적물의 특징적인 퇴적상 및 특성을 파악하고 하구둑 건설이후 활발히 진행되고 있는 낙동강 하구역의 퇴적환경 변화를 살펴보았다. 연구지역 표층 퇴적물의 퇴적상은 퇴적물의 지역적 분포특성 및 퇴적물 특성에 따라 사질 퇴적상 분포역 (TYPE I), 니질 퇴적상 분포역 (TYPE II), 그리고 이 두 퇴적상의 중간적인 특성을 나타내는 사니질 혼합 퇴적상 분포역 (TYPE III)의 세 가지

형태로 분류된다. 이러한 두 퇴적상의 경계에 위치하는 사니질 혼합 퇴적상은 퇴적물의 특성으로 보아 낙동강으로부터의 직접적인 공급뿐만 아니라 홍수나 폭풍시 진해만에서의 재부유된 부유성 세립 퇴적물의 공급에 의해 형성된 복합기원의 퇴적상으로 판단된다. 낙동강 하구둑이 완공된 이후 연안사주를 벗어난 지역까지 계속해서 사질 함량이 증가한 것으로 나타난 하구 지역의 퇴적환경 변화는 낙동강 상류로부터의 니질 퇴적물 유입량 감소, 하구지역의 수력학적 에너지 변화, 그리고 이 지역 주변에서 실시된 인위적인 작업에 의한 영향 등의 요인 때문에 발생한 것으로 생각된다.

감사의 글

본 논문은 1997년도 학술진흥재단의 학술 연구비 지원 (과제번호 97-022-H0022)으로 연구되었습니다.

참 고 문 헌

- Aoki, S., K. Oinuma and T. Sudo. 1974. The distribution of clay minerals in the recent sediments of Japan Sea. *Deep-Sea Res.*, 21, 299~310.
- Ban, Y.B. 1986. Analysis of the landforms and surface sediments in the Nakdong delta. Ph. D. Thesis. Kyunghee Univ., 115pp (in Korean).
- Biscaye, P.E. 1965. Mineralogy and sedimentation of recent deep-sea clay in the Atlantic Ocean and adjacent seas and oceans. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 76, 803~832.
- Castaing, P. and G.P. Allen. 1981. Mechanisms controlling seaward escape of suspended sediment from the Gironde: a macrotidal estuary in France. *Mar. Geol.*, 40, 101~118.
- Chang, H.D. and J.K. Oh. 1991. Depositional sedimentary environments in the Han river estuary and around the Kyunggi bay posterior to the Han river's developments. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 26, 13~23 (in Korean).
- Choi, J.Y., H.Y. Choi and M.S. Seo. 1995. Physical and sedimentological changes in the Keum estuary after the gate-close of Keum river weir. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 30, 262~270 (in Korean).
- Chough, S.K. 1985. Further evidence of fine-grained sediment dispersal in the southeastern Yellow Sea. *Sed. Geol.*, 41, 159~172.
- Coleman, J.M. 1976. Deltas: processes of deposition & models for exploration. Continuing Education Publication Com., Inc. U.S.A., 102pp.
- Folk, R.L. 1954. The distribution between grain size and mineral composition in sedimentary rock nomenclatures. *J. Geol.*, 62, 334~359.
- Folk, R.L. and W.C. Ward. 1957. Brazos river. A study in significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrol.*, 27, 3~27.
- Friedman, G.M. 1967. Dynamic processes and statistical parameters for size frequency distribution of beach and river sands. *J. Sed. Petrol.*, 37, 327~359.
- Griffin, J.J., H. Windom and E.D. Goldberg. 1968. The distribution of clay minerals in the world ocean. *Deep-Sea Res.*, 15, 433~459.
- Johansson, C.G. 1975. Manual of methods in aquatic environment

- research. FAO Technical paper No. 137.
- Kim, H.M. 1988. Assessment of tectonic and depositional environments of Nakdong delta, Korea. *J. Korean Ear. Sci. Soc.*, 9, 45~69.
- Kim, S.J., D.C. Kim, H.I. Yi and I.C. Shin. 1996. Changes in sedimentary process and distribution of benthic foraminifera in the eastern Kwangyang bay, south sea of Korea. *J. Korean Soc. Oceanogr.*, 1, 32~45 (in Korean).
- Kim, W.H. and H.H. Lee. 1980. Sediment transport and deposition in the Nagdong estuary, Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, 16, 180~188 (in Korean).
- Kim, W.H. and Y.A. Park. 1980. Microbiogenic sediments in the Nagdong estuary, Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 15, 34~48.
- Korea Hydrographic Office. 1982. Tidal current chart, Busan to Yeosu, 20pp.
- Lee, C.B., Y.A. Park, H.J. Kang and D.C. Kim. 1991. Geochemical characteristics of the continental shelf and slope sediments off the southeastern coast of Korea. *Korean J. Quat. Res.*, 5, 15~32.
- Lee, Y.D. 1993. A study on the characteristics of submarine geology in Pusan Bay: sedimentation processes in the Nakdong river estuary, Korea. *J. Korean Ear. Sci. Soc.*, 14, 67~74.
- Lee, Y.D. and C.W. Kim. 1990. A study of sedimentary environment in the estuary of Nakdong river: sedimentation processes and heavy metal distributions. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 25, 182~188.
- Meade, R.H. 1969. Landward transport of bottom sediments in estuaries of the Atlantic Coastal plain. *J. Sed. Petrol.*, 39, 222~234.
- Oh, K.H. 1988. Morphological changes of deltaic tip by construction of barrage in the Nakdong river estuary. *Nakdong River*, 7, 38~47 (in Korean).
- Park, J.O. 1992. Recent sedimentation processes in the Nakdong river estuary, Korea. M. S. Thesis, Pusan National Univ., 84pp.
- Park, S.C. and K.W. Lee. 1996. Modern sedimentary environment of Jinhae bay, SE Korea. *J. Oceanol. Soc. Korea*, 31, 43~54.
- Park, Y.A. and B.K. Khim. 1990. Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. *Cont. Shelf Res.*, 10, 1179~1191.
- Park, Y.A., S.C. Kim and J.H. Choi. 1986. The distribution and transportation of fine-grained sediments on the inner continental shelf off the Keum river estuary, Korea. *Cont. Shelf Res.*, 5, 499~519.
- Passega, R. 1964. Grain size representation by CM patterns as a geological tool. *J. Sed. Petrol.*, 34, 830~847.
- Visher, G.S. 1969. Grain size distributions and depositional processes. *J. Sed. Petrol.*, 39, 1074~1106.

2000년 12월 27일 접수

2001년 5월 10일 수리