「The Sea」 Jóurnal of the Korean Society of Oceanography
Vol. 5, No. 4, pp. 335 — 345, November 2000

황해 남동부 니질대의 물리적 성질: 동해 및 남해 니질대와의 비교

김길영* · 김대철 · 김신정[1] · 서영교[2] · 정자헌[2] · 김양은[2]
부경대학교 탐사공학과
[1]한국해양연구소 해양환경 · 기후연구본부
[2]부경대학교 응용지질학과

Physical properties of Southeastern Yellow Sea Mud (SEYSM): Comparison with the East Sea and the South Sea mudbelts of Korea

GIL YOUNG KIM*, DAE CHOUL KIM, SHIN JEONG KIM[1], YOUNG KYO SEO[2], JA HUN JUNG[2] AND YANG EUN KIM[2]
Department of Exploration Engineering, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea
[1]Marine Environment and Climate Change Laboratory, Korea Ocean Research and Development Institute, Ansan P.O. Box 29, Seoul 425-600, Korea
[2]Department of Applied Geology, Pukyong National University, Pusan 608-737, Korea

황해 남동부 니질대(mudbelt) 퇴적물의 물리적 성질을 연구하기 위하여 총 10개 정점에서 해저 퇴적물을 채취하였다. 그 자료는 동해(남동 내대륙붕) 및 남해니질대 자료와 비교하였다. 시추퇴적물들의 대부분은 실트질이 우세하며, 그 외 사질니 및 니로 구성되어 있다. 연구지역 표층퇴적물은 주로 금강에서 유입된 세립질 퇴적물이 연안류에 의해 남쪽으로 이동하여 분급화되면서 평균입도, 속도 및 습윤전밀도값은 점진적으로 감소하고 공극율은 증가하는 경향을 잘 보인다. 평균입도가 물성 및 음파전달속도를 결정하는데 주요한 변수로 나타났고, 수직적인 변화도 다져짐작용이나 고화작용에 의한 영향보다는 퇴적물 조직(주로 실트함량)의 변화 경향을 잘 반영하는 것으로 나타났다. 조직 및 물성간의 상관관계를 보면 비교모델로 사용한 남해 및 동해역 퇴적물과 가벼운 편차는 있으나 전반적인 경향은 유사하다. 다만 가벼운 편차가 나타나는 것은 실트함량의 차이, 퇴적환경, 광물조성의 차이 및 가스의 함량 등 복합적인 결과로 보인다.

Physical and acoustic properties of the Southeastern Yellow Sea Mud (SEYSM) of Korea were studied by using 10 piston cores. The data were also compared with mudbelt sediments in the South Sea and the East Sea (southeastern inner shelf) of Korea. The sediments were mainly composed of homogeneous silt. Sandy mud and mud were minor components. The major source of sediment in the study area is probably the Keum River. Fine-grained sediments discharged from the river are transported southward by coastal current, resulting in a gradual southward increase in porosity and a decrease in wet bulk density and sound velocity. The mean grain size especially appears to be the most important variable to determine the physical properties and velocity. The variations of physical properties with burial depth are dependent more strongly on sediment texture (especially, silt content) than compaction and/or consolidation. Correlations between the physical properties and the sediment texture show slight deviations from those of the East Sea and the South Sea of Korea in spite of similar pattern within the limiting values. This is probably due to the differences in silt contents, sedimentary environments, mineral compositions, and gas contents.

서 론

한반도 주변에 분포하는 홀로세 니질퇴적물은 크게 세 지역으로 나눌 수 있다. 동해에 위치하는 니질대(mudbelt)는 낙동강을 주 공급원으로 하고 있고 부산연안에서부터 북쪽해안을 따라 포항부근까지 대상으로 발달하고 있는 남동해역 니질대이며(박 등, 1987; 최와 박, 1993; 최 등, 1997; Park *et al.*, 1999), 남해지역은 섬진강 및 낙동강의 영향을 받는 지역으로 부산연안에서부터 남서쪽으로 확장하여 고흥 앞바다까지 분포하는 남해니질대(최와 박, 1993), 그리고 황해남동부 지역에 분포하는 소위 황해남동부니질대(Southeastern Yellow Sea Mud: SEYSM)는 주로 금강 및 영산강에 의해 이토가 공급되는 것으로 알려져 있다(이, 1999; 최와 박, 1993; Lee and Chough, 1989; Alexander *et al.*, 1991; Khim and Park, 1992; Jin and Chough, 1998). 이러한 니질대에 대한 연구

*Corresponding author: kimgy@woongbi.pknu.ac.kr

는 지난 마지막 최대 빙하기(Last Glacial Maximum) 이후 해수면과 관련하여 퇴적기원, 기작 및 분포 등 퇴적학적인 연구를 바탕으로 비교적 많은 편이다. 특히 황해의 경우 최대빙하기 이후 해수면이 상승 및 하강하면서 퇴적과정에 영향을 주어 현재 분포되어 있는 모래사퇴 및 니질대가 우세한 해저지형을 형성하게 된 것으로 판단된다(Jin and Chough, 1998).

해양 퇴적물의 물성 및 음향학적 특성 연구는 기존에 알려진 암상이나 퇴적층을 대비하거나 또한 퇴적물의 기원지, 침식과정, 퇴적과정, 퇴적시의 해양 및 기후조건, 고화작용 등과 같은 퇴적후의 속성작용에 의해 변화될 수 있는 퇴적물 조성의 지시자(Mayer, 1991; Bassinot, 1993)로서 이용될 수 있는 순수한 학문적인 측면뿐만 아니라 사면안정성, 부지조사, 파이프라인 및 해저케이블 건설 등과 같은 지질공학적인 면에서의 활용과 수중음향학 등 군사과학적 필요에 의하여 수행되고 있다. 한반도 주변 퇴적물의 물성 및 음향에 관한 실험실 연구는 1980년대 후반부터 시추코어를 이용한 직접측정 방식(김, 1989)이 도입되면서 만 및 연안 지역에서 주로 연구(김과 김, 1991; 김 등, 1994, 1996)가 진행되다가 1990년대 후반부터 울릉분지를 중심으로 한 반원양성 심해지역퇴적물까지 연구지역이 확대되었다(Kim and Kim 1998; Kim *et al.*, 1999). 특히 한반도에 분포하는 현생니질대 퇴적물에 대한 물성 및 음향학적인 연구는 남해니질대(Kim *et al.*, 1992) 및 남동해역니질대(김 등, 1999)에 대한 결과가 있으나 황해 지역에 대한 연구는 거의 전무하며, 특히 이 연구지역인 황해 남동부 지역의 니질퇴적물의 경우는 지질공학적인 결과(Lee *et al.*, 1987)가 있기는 하지만 음향특성에 따른 연구는 없다. 따라서 이 연구는 황해 남동부니질대 퇴적물의 조직, 물리적 성질 및 음파전달속도에 대한 자료를 제시하고, 이 결과를 기존의 남해니질대(Kim *et al.*, 1992) 및 동해의 일부인 남동해역니질대(김 등, 1999)의 자료와 비교함으로서 각 니질대 퇴적물의 근원지, 퇴적과정 및 퇴적물 특성과 관련하여 한반도 주변 니질대 퇴적물의 물성에 대한 전반적인 상관관계를 해석하는데 그 목적이 있다.

연구지역 개관

이 연구의 주 대상이 되는 지역으로 제주도 북서지역에서 군산 남쪽까지 분포하는 황해 남동부니질대(Figs. 1 및 2)가 선정되었으며, 비교를 위하여 주로 한반도로부터 기원하며 유사한 퇴적물의 조직특성을 갖는 지역으로 동해지역은 남동해역니질대(김 등, 1999), 남해지역은 남해니질대(Kim *et al.*, 1992)가 선정되었다. 황해는 빙하의 발달과 후퇴에 따른 해수면의 상하운동에 의하여 형성된 대표적인 천해의 반폐쇄적 주변해(epicontinental sea)로 북쪽으로는 발해(Bohai Sea)만과 남쪽으로는 동중국해(East China Sea)로 연결된다. 황해 대륙붕 퇴적물은 대부분 중국의 황하강 및 양자강으로부터 각각 년간 약 1.0×10^9 ton과 0.5×10^9 ton에 달하는 많은 양의 육상기원 퇴적물 형태로 공급된 것이며, 또한 한반도의 여러 강이나 하천으로부터 공급된 양도 년간 약 50×10^6 ton에 달한다(Schubel *et al.*, 1984). 양자강 기원 퇴적물의 대부분은 중국 연안을 따라 중국해로 운반되며, 황하기원 퇴적물의 90%이상은 발해만 내에 집적되어 약 10% 가량의 퇴적물만이 직접 황해분지로 공급되는 것으로 보고되어 있다(박 등, 1994).

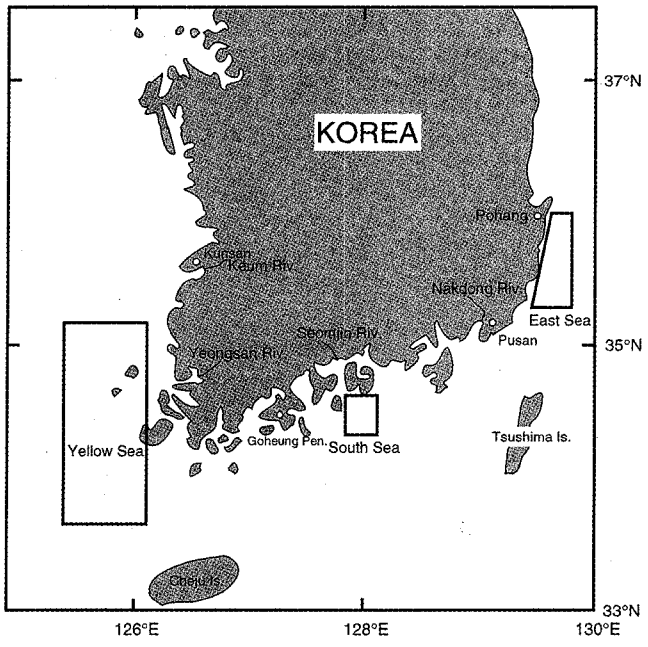

Fig. 1. Map showing three selected mudbelt areas around Korean Peninsula used for this study. Data of the East Sea and the South Sea are quoted for this study (Kim *et al.*, 1992, 1999).

한반도측 황해 연안역에서의 퇴적작용은 겨울에 남서방향, 여름에는 북동방향으로 작용하는 몬순기후의 영향에 따른 계절적 해양순환에 영향을 받으며(Lee *et al.*, 1987; 최, 1993), 황해 연안역에서는 대조차 환경으로서 이러한 조석전선의 영향이 퇴적작용에 큰 영향을 미친다(최와 박, 1998). 연구지역을 포함하는 황해 남동부 지역은 금강과 영산강으로부터 유입되는 세립질 퇴적물이 겨울철 시계방향의 확산운동으로 대상니질대에 퇴적되는 것으로 알려져 있고 이러한 퇴적작용이 황해 남동부의 연안을 따라 형성되는 황해남동부니질대의 원인이 된다(최와 박, 1993). 금강에서 유입되는 부유물의 약 80%는 주로 하계에 집중되며 동계에는 퇴적물의 공급은 적은 반면, 바람이 우세하여 해저퇴적물을 재부유시켜 남쪽방향으로 운반되는 것으로 알려져 있다(최, 1993).

황해지역에 분포하는 사질퇴적물 및 세립질퇴적물에 대한 기원은 아직까지 논란이 많으나 황해와 중국해의 외대륙붕을 따라 대상으로 분포하는 사질퇴적물은 최대빙하기의 해수면이 하강하였던 동안 집적된 잔류퇴적물이며, 황해서부의 세립질퇴적물은 황하와 양자강을 통해 공급된 현생퇴적물이고 이 연구지역을 포함하는 황해 남동부에 분포하는 세립질 퇴적물의 대부분은 주로 한반도 기원(주로 금강)의 현생퇴적물로 해석하고 있다(Park and Khim, 1990; Khim and Park, 1992)

재료 및 방법

이토대 퇴적물의 물리적 및 음향학적 성질에 관한 연구를 위하여 1997년 5월 부경대학교 탐사선 탐양호를 이용하여 총 10개 지점에서 피스톤 시추기를 이용하여 코어시료를 채취하였다(Fig. 2). 채취된 코어의 길이는 142~357 cm(평균 257 cm)이다. 채취된 코

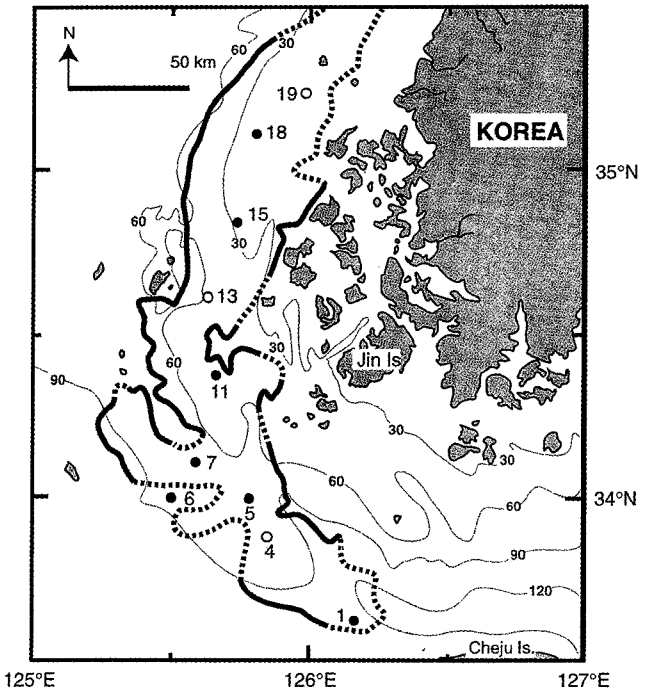

Fig. 2. Bathymetry of the study area and ten piston core locations. Open circles indicate the stations discussed for vertical variations of sediment physical properties. Heavy solid and dotted lines represent the distribution of the mud deposits (SEYSM) (Modified from Lee (1999) and Jin and Chough (1998). Contours in meters.

어시료는 실험실로 옮긴 후 퇴적물의 조직, 음파전달속도, 물리적 성질 등을 일정한 깊이별(10~30 cm 간격)로 측정하였다.

퇴적물조직 측정을 위하여 Folk(1968) 및 Galehouse(1971)의 방법에 따라 체질분석과 피펫방법을 병행하였고, Folk and Ward (1957)의 모멘트 방법에 따라 조직값을 구하였다.

물리적 성질(습윤전밀도, 함수율, 공극율)은 밀도측정기(Micromeritics: Pycnometer 1350)를 이용하여 측정하였다. 밀도측정기에 사용된 가스는 널리 이용되는 헬륨가스를 사용하였고, 압력은 21 psi를 유지하였다. 시료의 건조무게 및 염분보정은 일반적으로 사용하는 방법(Boyce, 1976)에 따라 실시하였다.

퇴적물의 음파전달속도는 수은기둥 방법(김, 1989)을 사용하여 측정하였고, 각 시료별로 수평성분과 수직성분 속도를 측정하여 평균값을 택하였다. 비배수전단응력(undrained shear strength)은 자동응력측정장치(Geotest Model 23500)를 사용하여 측정하였다.

결 과

황해 남동부니질대에 위치한 10개 정점(Fig. 2)에서 채취한 코어퇴적물에 대해 퇴적물의 조직, 물리적 성질 및 음파전달속도를 일정한 깊이간격(10~30 cm)에 따라 측정하여 각각의 코어에 대해 평균값으로 표시하여 Table 1에 제시하였다. 또한 이 연구지역 퇴적물의 조직, 물리적 성질 및 음파전달속도를 알아보기 위해서 분포도, 단면도 및 상관관계 그래프를 작성하였다.

깊이에 따른 조직, 물리적 성질 및 음파전달속도

이 연구에 사용된 코어퇴적물 중 코어의 길이와 위치 등을 고려하여 전 연구지역을 대표 할 수 있을 것으로 생각되는 3개 정점(정점 4, 13, 19; Fig. 2)을 택하여 퇴적물의 조직 및 물성에 대한 각각의 단면도를 작성하였다. 정점 4번은 수심 62 m이고 연구지역의 남단부에 위치한다(Fig. 2). 코어의 길이는 302 cm이고 아주 균질한 니질로 구성(Fig. 3)되어 있다(이, 1999). 수직적인 조직구성도 큰 변화가 없어 모래, 실트 및 점토의 함량변화 폭이 크지 않으며 실트의 함량이 가장 높게 나타난다(Fig. 4). 평균입도 변화 역시 깊이에 따라 큰 변화없이 7.0 ϕ에서 7.5 ϕ사이의 값(평균 7.52 ϕ; Table 1)을 보인다. 습윤전밀도도 깊이에 따른 변화가 미미하고 평균값은 1.59 g/cm^3(Table 1)이며, 입자밀도도 약간의 변화양상을 보여주나 크지는 않다(평균 2.74 g/cm^3; Table 1). 함수율(평균 44.9%)과 공극율(평균 71.1%)은 코어깊이 50 cm 및 300 cm에서 최대이고 200 cm에서 최소값은 가지나 깊이에 따른 큰 변화가 없다. 음파전달속도(평균 1536 m/s; Table 1)는 표층의 약 1530 m/s에서부터 코어깊이 260 cm에서 1550 m/s까지 비교적 점진적으로 증가한다. 전단응력은 평균 5.94 kPa(Table 1)이고 깊이에 따른 변화가 심하며 코어 하부에서 보다 상부에서 더 높다(Fig. 4).

정점 13은 수심 54 m로 연구지역의 중심부에 해당한다(Fig. 2). 코어의 길이는 342 cm로 특정깊이에서 패각들이 관찰되지만 전반적으로는 균질한 실트로 구성되어 있다(Fig. 3). 깊이에 따른 조직변화를 보면 코어의 상부 60 cm와 하부 320 cm에서 실트의 함량이 높게 나타난다(Fig. 5). 평균입도 역시 실트의 함량이 높은 지

Table 1. Average values of sediment textures, physical properties and velocity for all the cores.

Station	Water depth (m)	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean size(%)	Porosity (%)	Water content (%)	Wet bulk density (g/cm^3)	Grain density (g/cm^3)	Shear strength (kPa)	Velocity (m/s)
1	104	65.16	30.13	30.47	3.51	53.0	28.9	1.89	2.76	-	1765
4	62	1.54	64.79	33.67	7.52	71.1	44.9	1.59	2.74	5.94	1536
5	71	0.63	64.04	37.64	7.35	69.6	43.5	1.60	2.70	9.30	1540
6	66	43.29	34.28	22.42	5.37	58.6	32.6	1.75	2.62	2.39	1609
7	72	3.11	67.29	29.59	7.04	66.6	39.9	1.67	2.76	7.01	1544
11	49	4.60	64.39	31.01	7.03	70.3	43.8	1.61	2.76	6.31	1529
13	54	3.94	72.26	23.80	6.38	64.8	39.4	1.68	2.64	4.01	1569
15	25	2.42	78.33	19.25	6.20	64.8	39.4	1.68	2.64	2.59	1606
18	17	2.03	76.75	21.22	6.18	63.6	38.4	1.66	2.62	2.24	1623
19	15	12.88	63.35	23.75	6.19	66.6	40.7	1.64	2.66	1.24	1597
Average	54	11.10	61.56	27.28	6.28	64.9	39.2	1.67	2.69	4.56	1592

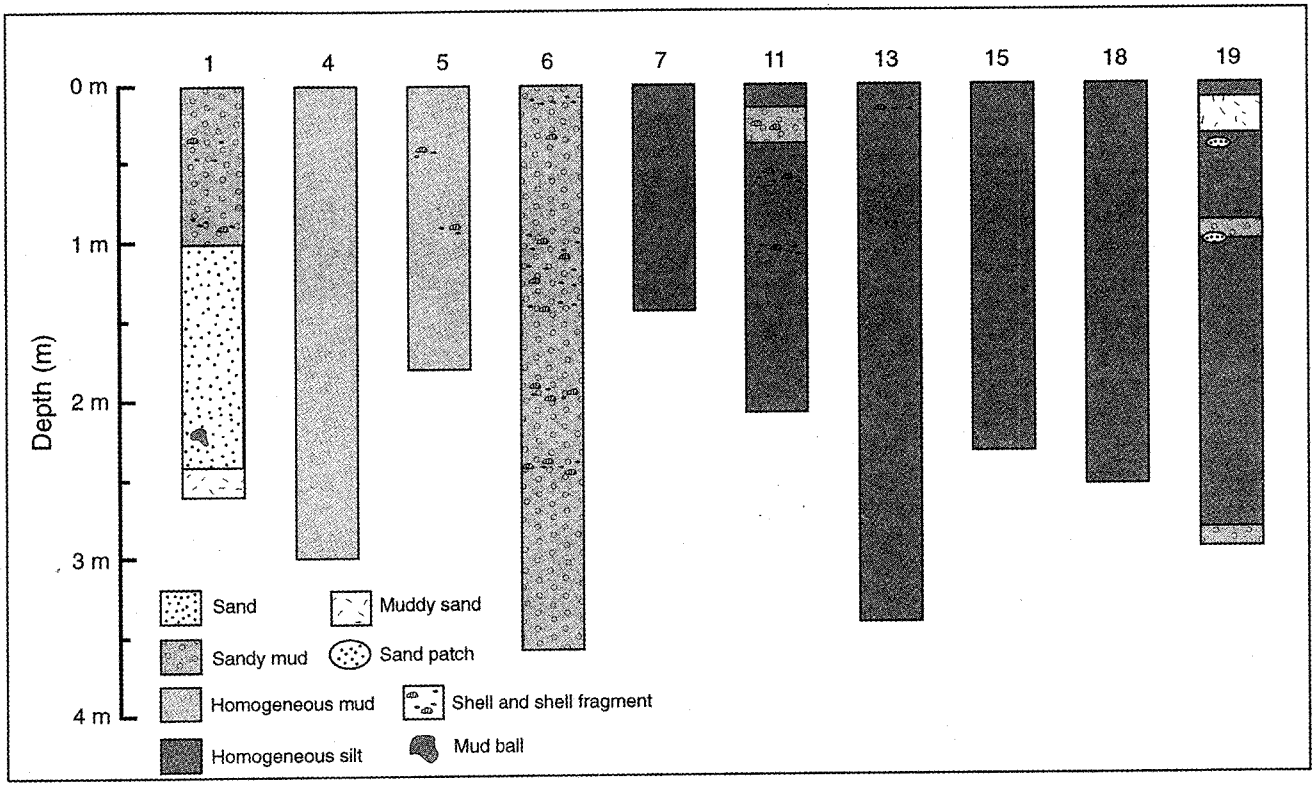

Fig. 3. Lithology of the ten cores. Note the cores are mainly composed of homogeneous silt and mud (Modified from Lee (1999)).

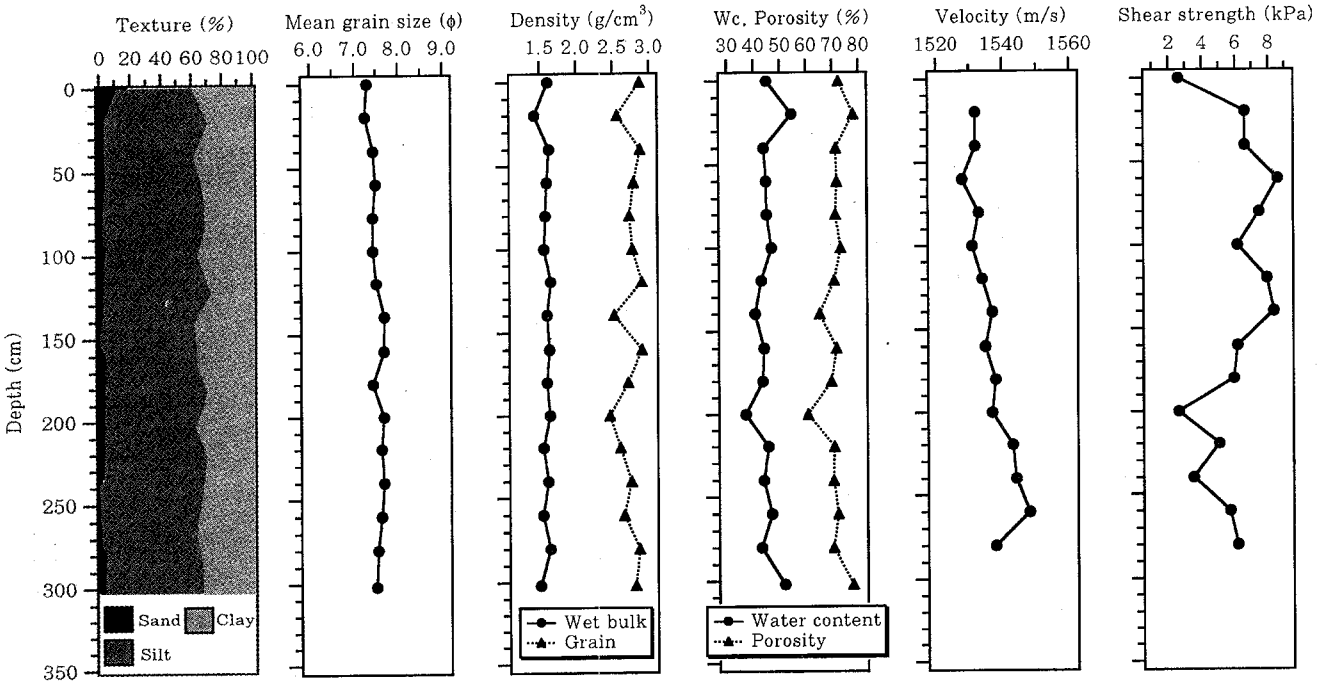

Fig. 4. Profiles of sediment texture, physical properties (densities, water content, porosity, and shear strength) and velocity at Station 4. Refer to Fig. 2 for the location.

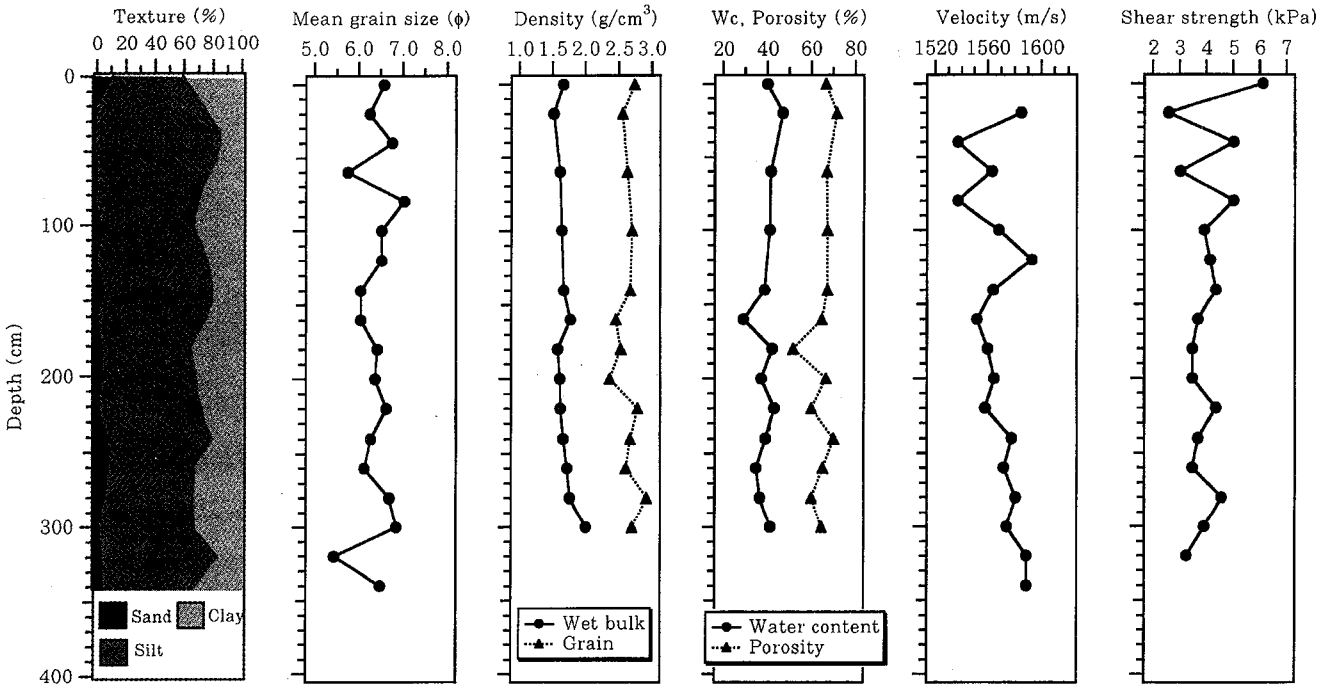

Fig. 5. Profiles of sediment texture, physical properties (densities, water content, porosity, and shear strength) and velocity at Station 13. Refer to Fig. 2 for the location.

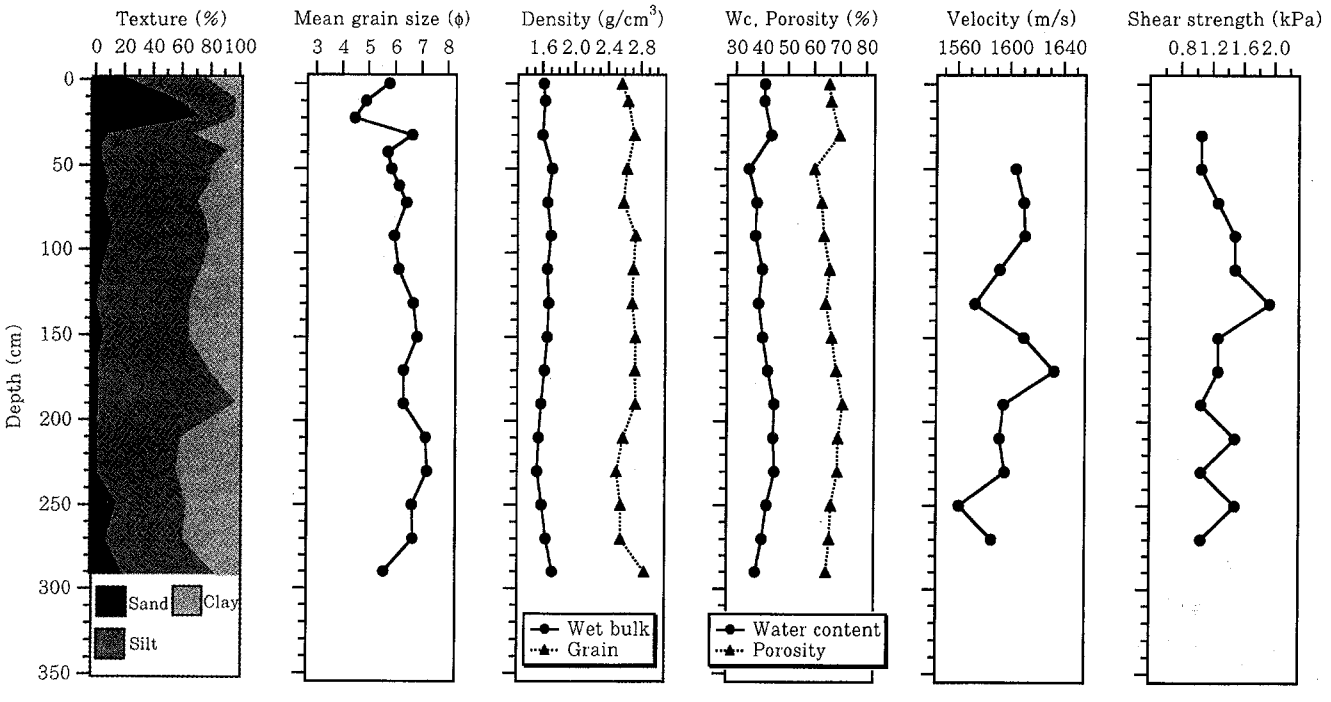

Fig. 6. Profiles of sediment texture, physical properties (densities, water content, porosity, and shear strength) and velocity at Station 19. Refer to Fig. 2 for the location.

점에서 5.5 ϕ로 조립질이며 평균은 6.4 ϕ이다. 입자밀도는 평균 2.64 g/cm^{3}이며 하부에서 변화가 심하지만 전반적인 값의 증감은 별로 없다. 반면 습윤전밀도는 하부로 갈수록 미미하기는 하지만 약 1.5 g/cm^{3}에서 1.9 g/cm^3(평균 1.68 g/cm^3)까지 점진적으로 증가하는 현상을 보인다. 함수율은 평균 39.4%이며 코어깊이 160 cm에서 약 30%의 최소값을 보이며 깊이에 따라 큰 변화가 없다. 공

극율은 180 cm에서 약 50%의 최소값을 보이며 함수율의 변화와 마찬가지로 변화가 적고 평균은 64.8%이다. 음파전달속도는 평균 1569 m/s이고 코어의 상부 약 150 cm까지 변화가 심하며, 그 이하 깊이에서는 1550 m/s에서 1600 m/s까지 지속적으로 증가한다. 전단응력은 코어상부 약 100 cm까지 2 kPa에서 6 kPa까지 변한다. 그러나 그 이하 깊이에서는 4 kPa에서 5 kPa사이로 큰 변화가 없고 평균 4 kPa이다(Fig. 5; Table 1).

정점 19는 연구지역의 최북단에 위치하며 수심은 15 m로 가장 얕다(Fig. 2). 코어의 길이는 289 cm이며 대부분이 균질한 실트로 구성되어 있다(Fig. 3). 코어깊이별 모래, 실트 및 점토함량 변화를 보면, 약 20 cm 깊이에서 모래의 함량이 80%까지 높은 함량을 보이고, 그 이하 깊이에서는 10% 내외로 감소한다(Fig. 6). 평균입도 역시 모래, 실트 및 점토함량 변화와 유사하며 평균은 6.19 ϕ를 보인다. 입자밀도 및 습윤전밀도는 깊이에 따른 변화가 적고 평균은 각각 2.66 g/cm^3 및 1.64 g/cm^{3}이다(Table 1). 함수율과 공극율은 조직의 분포특성과 유사한 형태로 변하며, 평균값은 각각 40.7% 및 66.6%이다(Table 1). 음파전달속도는 코어깊이 170 cm에서 약 1670 m/s로 높은 값을 보이고 깊이에 따른 변화가 크며(Fig. 6) 평균값은 1597 m/s이다(Table 1). 전단응력은 표층에서 130 cm 까지는 점진적으로 증가하다 그 이하 깊이에서는 감소 및 증가를 반복한다(Fig. 6).

상부퇴적물의 조직, 물리적 성질 및 음파전달속도의 정점별 선상분포

연구지역 퇴적물의 조직 및 물성의 정점별 선상분포 경향을 알아보기 위하여 코어 깊이 50 cm까지의 측정값을 평균하여 정점별로 상부퇴적물의 평균입도, 습윤전밀도, 공극율, 입자밀도 및 음파전달속도 등의 분포 경향을 남북방향으로 도시하였다(Fig. 7). 평균입도는 연구지역 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 정점 6번을 제외하면 5.5 ϕ에서 7 ϕ까지 전반적으로 세립해지는 것을 볼 수 있다. 특히 정점 6번(Fig. 7)은 5.5 ϕ이하로 조립질이 우세한데, 이 정점은 연구지역인 황해니질대에서 서쪽으로 벗어난 정점(Fig. 2)으로 니질사가 우세하게 분포하는 지역(Park and Khim, 1990; Jin and Chough, 1998)에 해당되어 평균입도가 큰 것으로 보인다.

습윤전밀도는 북쪽지역의 1.64 g/cm^{3}에서부터 최남단부 정점 1에서 1.57 g/cm^{3}로 점진적으로 감소한다. 그러나 정점 6에서는 조직값의 영향으로 인해 1.76 g/cm^{3}으로 정점 중 가장 높은 값을 보인다. 공극율 분포 역시 정점 6에서의 62%의 낮은 값을 나타낸다. 정점 7번은 유사한 조직의 다른 정점에 비해 높은 전밀도값과 낮은 공극율 보인다. 그러나 전반적으로는 연구지역 최북단인 정점 19에서(65%)에서 최남단인 정점 1(71%)까지 대체적으로 증가하는 현상을 보인다. 음파전달속도 역시 정점 6번을 제외하고는 남쪽방향으로 감소하는 현상이 비교적 명확하여 정점 19에서는 1604 m/s이고 정점 1에서는 1522 m/s이다. 이런 물성값의 분포경향은 평균입도의 변화양상과 관계가 있음을 알 수 있다. 그러나 입자밀도는 평균입도나 다른 물성값과는 상관성을 보이지 않는다(Fig. 7).

지역별 퇴적물의 조직 및 물성값의 비교

연구지역인 황해 니질대의 자료와 한반도 주변지역 니질대에서 측정된 기존자료와의 비교를 위하여 동해지역으로는 낙동강의 영향을 받고 있는 한국 남동해역의 물성자료(김 등, 1999), 남해지역으로는 섬진강의 영향을 받고 있는 남해도 앞 니질대의 물성 자료(Kim *et al.*, 1992)를 이용하여 평균값 및 상관그래프를 이용하여 서로 비교하였다.

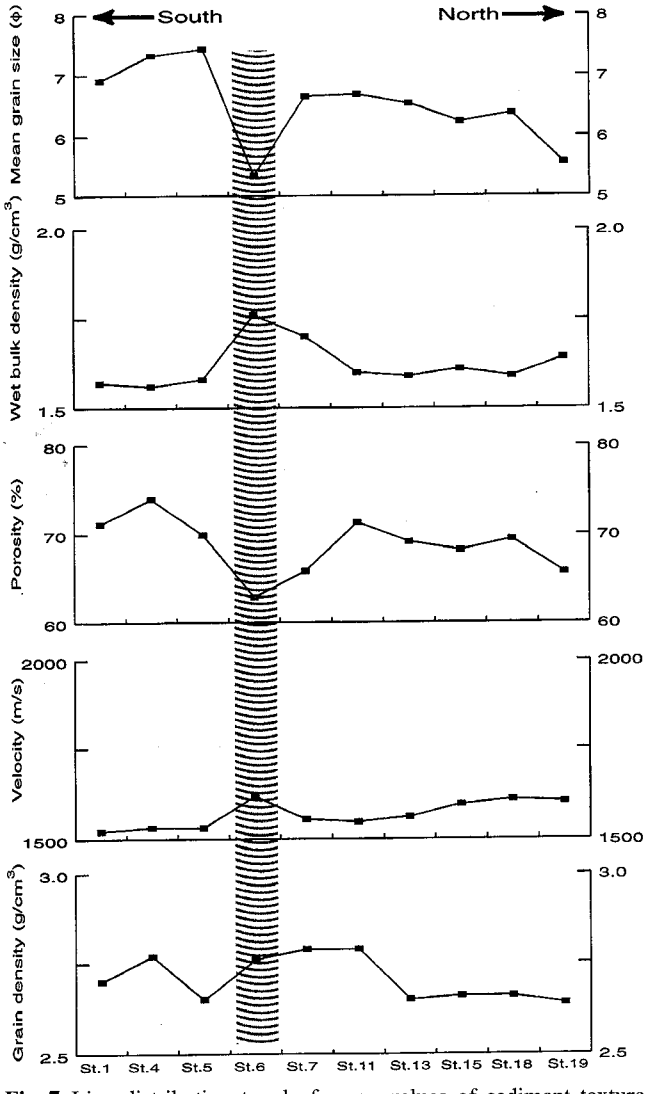

Fig. 7. Line distribution trend of mean values of sediment texture and physical properties. Note the gradual change from south to north. Hatched area coincides with the station (St. 6) that goes beyond the boundary of SEYSM.

지역별 조직 및 물성의 평균값 비교

퇴적물의 조직 중 모래, 실트 및 점토의 함량을 보면 모래의 경우 황해와 동해 지역의 량이 약 11%로 유사하며 남해의 경우 모래함량이 거의 존재하지 않는 특징을 보인다. 점토의 경우는 남해와 동해에서 유사하고 황해는 낮은 함량을 보이는 반면, 실트는 황해지역이 다른 두 지역에 비해 높은량을 보이면서 황해-남해-동해순으로 감소한다(Fig. 8a, Table 2).

물성 중 공극율과 함수율은 황해-남해-동해 순으로 증가함을 알 수 있다(Fig. 8b, Table 2). 이런 분포경향은 퇴적물의 조직 중 실

Table 2. Average values of sediment texture, physical properties and velocity for for the three mudbelt sediments of Korea.

Regions	Sand (%)	Silt (%)	Clay (%)	Mean size (ϕ)	Porosity (%)	Water content (%)	Wet bulk density (g/cm^3)	Shear strength (kPa)	Velocity (m/s)	Remarks
Yellow Sea	11.1	61.6	27.3	6.28	64.9	39.2	1.67	4.56	1592	This study
South Sea	0.2	53.9	45.8	7.91	72.8	48.9	1.50	3.40	1542	Kim *et al.*(1992)
East Sea	11.9	43.3	44.8	7.20	75.0	53.0	1.47	3.34	1585	Kim *et al.*(1999)

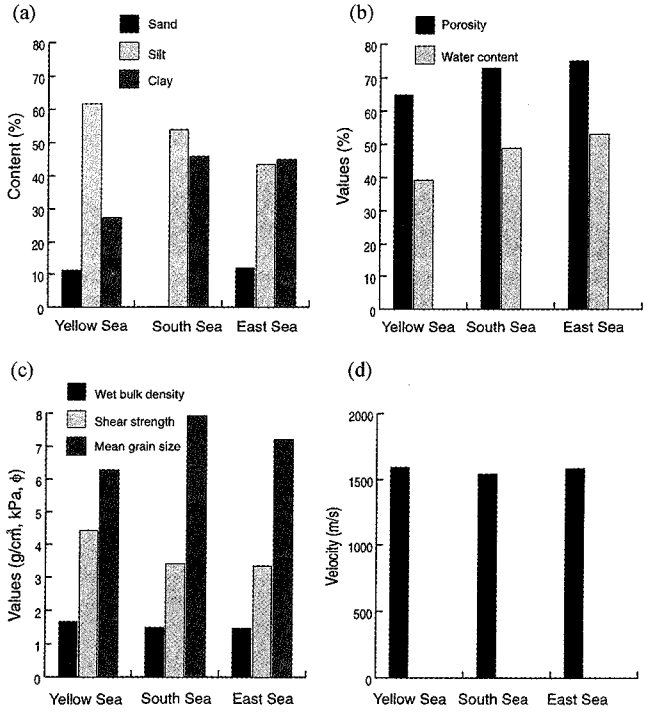

Fig. 8. Histograms showing sediment textures, physical properties and velocity of the three mudbelt areas.

트함량의 감소현상과 유사하여 실트함량이 물성에 큰 영향을 주고 있음을 알 수 있다. 그러나 평균입도는 황해-동해-남해 순으로 감소하여 실트함량 보다는 물성에 적은 영향을 끼치는 것으로 보인다. 습윤전밀도도 황해-남해-동해 순으로 그 값이 감소하여 실트함량, 함수율 및 공극율의 변화와 유관함을 알 수 있다. 전단응력값도 실트함량 변화와 유사하게 황해지역이 다른 두 지역 보다 더 높은 값을 보이고 있다(Fig. 8c, Table 2). 음파전달속도는 황해가 가장 높고 남해가 가장 낮다(Fig. 8d, Table 2).

조직 및 물성간의 상관관계

지금까지 조직 및 물성간의 상관관계는 주로 Hamilton(1970)이 지음향모델(geoacoustic model)로 제시한 북태평양의 대륙붕 및 사면퇴적물의 자료와 비교하여 해석하여 왔다. 이러한 모델이 한반도 주변해역에 적용가능한지를 조사한 일부 결과를 보면 절대값의 차이는 있으나 내대륙붕의 세립질 퇴적물에서는 비교적 Hamilton(1970)의 모델과 유사한 경향을 보이는 것으로 보고된 바 있다(김과 김, 1991; Kim *et al.*, 1992; 김 등, 1994, 1999; Kim and Kim, 1998). 따라서 이러한 자료 중 Hamilton(1970)모델 대신에 남해 및 동해의 자료를 선택하여 이번 결과와 동시에 도시하여 그 상관성을 비교하였다.

해양퇴적물의 공극율은 음파전달속도에 영향을 미칠 수 있는 각종계수 중 가장 적은 오차로 속도를 예측할 수 있다(Hamilton, 1970; Anderson, 1974; Hamilton and Bachman, 1982). 일반적으로는 공극율은 입도가 감소할수록 증가하고 공극율이 증가할 수록 속도는 감소하나 높은 공극율(약 75%)을 가지는 경우는 오히려 75%를 최저점으로 공극율이 증가함에 따라 속도가 증가하는 것이 일반적인 현상이다(Wood, 1941; Laughton, 1954; Nafe and Drake, 1963; Schreiber, 1968; Hamilton, 1970; Kim *et al.*, 1992; 김 등, 1994, 1999). 이 연구지역의 속도와 공극율과의 관계를 보면 공극율 약 70%를 최저점으로하여 공극율이 감소할 수록 속도가 빠르게 증가하는 경향을 보인다. 또한 비교모델로 사용한 남해 및 동해 지역은 연구지역보다 더 높은 공극율에서 최저점을 보이나 전체적인 경향은 유사하다(Fig. 9).

퇴적물의 입도는 공극율과 밀도변화를 좌우하기 때문에 속도에 영향을 주며 평균입도는 속도결정에 중요한 변수로 알려져 있다(Horn *et al.*, 1968). 이 연구지역에서의 속도값과 평균입도값과의 상관관계를 보면(Fig. 10), 평균입도가 조립할 수록 속도값이 증가하는 일반적인 경향과 잘 일치한다. 세지역의 상관관계는 평균입도값이 5ϕ에서 8ϕ사이에 비교적 잘 일치하며 조립질로 향할수록 편차가 심하게 나타난다. 특히 다른 지역에 비해 동해지역은 상관관계가 극히 미약하다.

습윤전밀도는 속도에 영향을 미치는 변수중의 하나로 단지 밀도만 증가할 경우 속도가 감소하게 되지만 전밀도가 증가함에 따라 동시에 체적탄성율도 증가하기 때문에 속도도 증가하게 된다(Hamilton, 1970; Hamilton and Bachman, 1982). 연구지역의 속

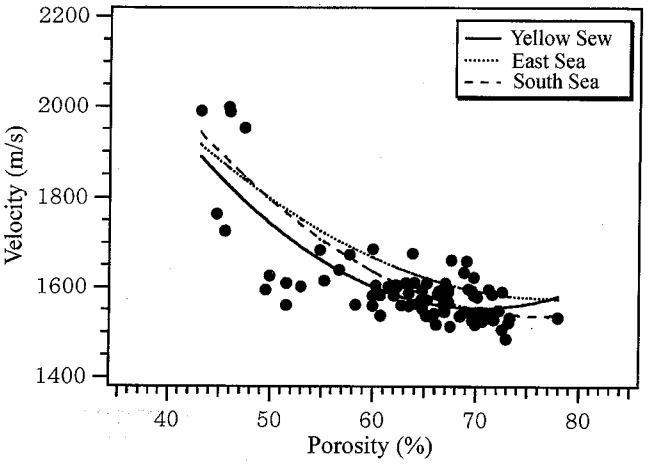

Fig. 9. Velocity versus porosity. For comparison, regressions of the East Sea (Kim *et al.*, 1999) and the South Sea (Kim *et al.*, 1992) sediments are displayed simultaneously.

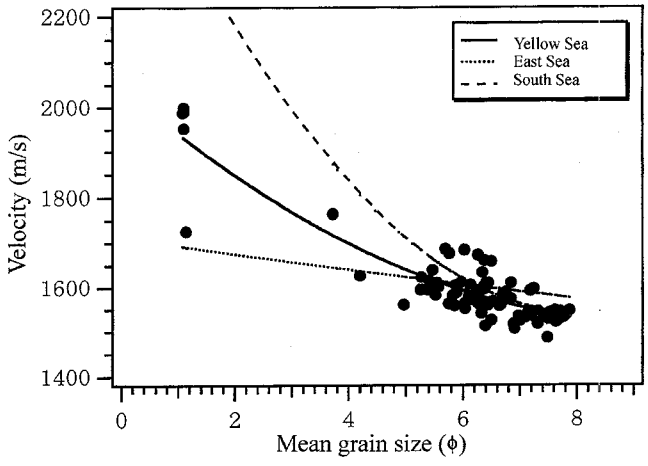

Fig. 10. Velocity versus mean grain size. Symbol and regressions are the same as Fig. 9.

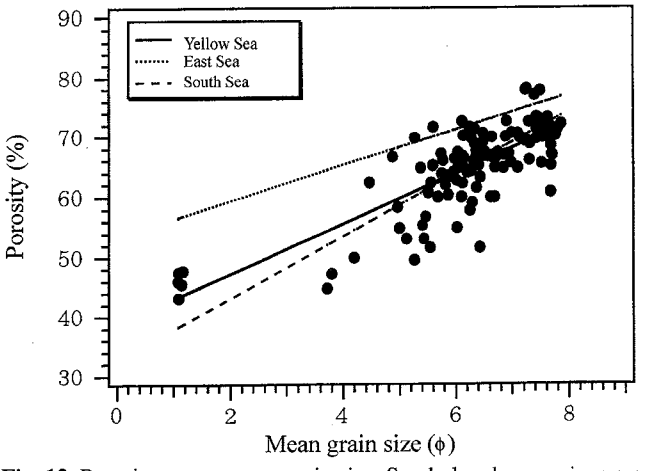

Fig. 12. Porosity versus mean grain size. Symbol and regressions are the same as Fig. 9.

도와 습윤전밀도의 상관관계도 습윤전밀도가 증가할 수록 속도값이 증가하며, 특히 전밀도값이 1.7 g/cm^{3}을 기점으로 빠르게 증가함을 볼 수 있고 세지역에서의 상관관계도 유사한 경향을 보인다(Fig. 11).

공극율과 평균입도는 서로 밀접한 관계를 가지는데 일반적으로 입도가 감소할 수록 공극율은 증가하지만 같은 입도라도 점토함량에 따라 공극율의 차이가 있다. 이것은 점토광물의 독특한 구조 때문이다(Hamilton, 1970; Hamilton and Bachman, 1982). 연구지역의 경우도 평균입도가 감소할 수록 공극율이 크게 증가하며 동해지역보다는 황해 및 남해지역의 값이 더 유사한 경향을 보인다(Fig. 12).

전밀도는 퇴적물의 광물조성에 좌우되며 육성기원일 경우 중광물의 함량에 원양성일 경우는 생물기원 퇴적물에 의해 많은 영향을 받게된다. 일반적으로 전밀도는 입도가 감소할수록 감소한다. 이 연구지역의 습윤전밀도와 평균입도의 상관관계도 이러한 일반적인 경향을 잘 따르고 있다(Fig. 13). 또한 비교 모델로 선택한 두 지역들과 상관성이 아주 뚜렷하게 나타난다.

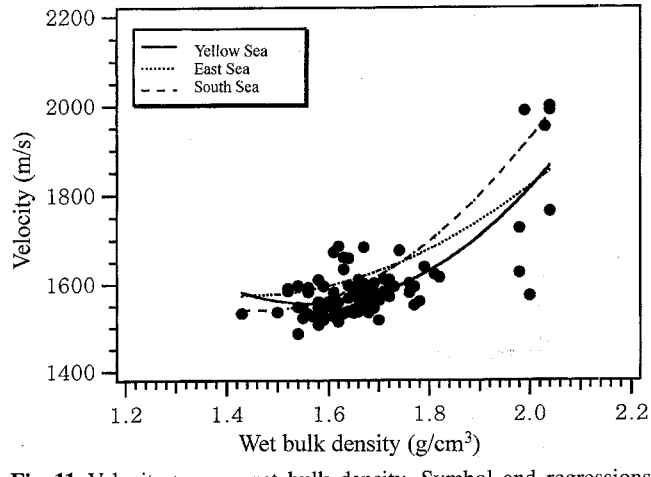

Fig. 11. Velocity versus wet bulk density. Symbol and regressions are the same as Fig. 9.

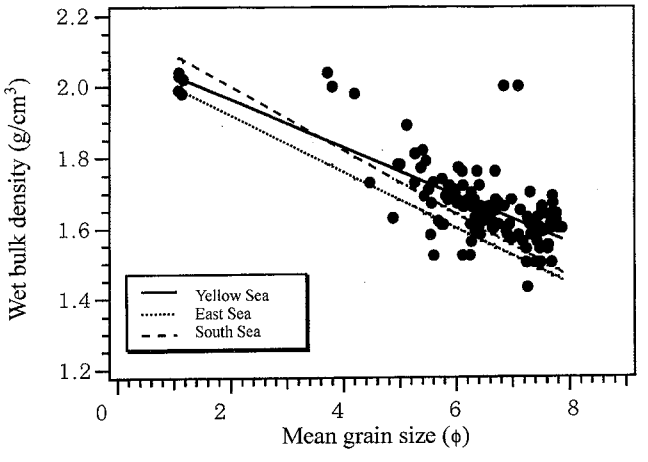

Fig. 13. Wet bulk density versus mean grain size. Symbol and regressions are the same as Fig. 9.

고 찰

이 연구지역의 퇴적물은 남해 및 동해지역의 니질대(mudbelt) 퇴적물에 비해 실트의 함량이 우세하게 포함되어 있어(Figs. 3 and 8) 평균입도 값이 다른 지역보다 약 1 ϕ 정도 낮은 조립한 값을 가진다. 황해지역이 다른 지역에 비해 실트함량이 높은 것은 고에너지 상태의 퇴적환경을 의미하며, 수심이 얕아 파도나 조류, 폭풍 등에 의해 세립질 퇴적물이 재부유되기 때문으로 보인다(Alexander *et al.*, 1991; Jin and Chough, 1998). 이런 실트함량의 차이가 퇴적물의 물성에 영향을 주고 있는 것으로 나타났다.

우선 깊이에 따른 조직 및 물성의 수직적 변화는 조직값의 변화양상과 유사한 형태로 변하는 것으로 나타났다(Figs. 4, 5, and 6). 한반도 주변지역 니질퇴적물의 다른 연구(김과 김, 1991; Kim *et al.*, 1992; 김 등, 1994, 1996, 1999; Kim and Kim, 1998)에서도 코어의 길이가 짧은 현생 니질퇴적물의 경우에는 조직값이 물리적 성질 및 음향학적 성질에 직접적인 영향을 주는 것으로 밝혀진 바 있다. 일반적으로 퇴적층 하부로 갈수록 퇴적물의 다져짐

작용과 고화작용으로 인해 함수율과 공극율은 감소되고, 밀도, 속도 및 전단응력은 증가한다. 그러나 홀로세 동안에 퇴적된 현생퇴적물은 낮은 퇴적률로 인해 저서생물들에 의한 생흔작용(bioturbation)이 활발하여 정상적인 다져짐 작용 및 고화작용을 보여주지 않는 것으로 나타났다(Mosher *et al.*, 1994; Kim *et al.*, 1992; 김 등, 1994, 1999). 연구지역도 이런 영향을 받고 있는 것으로 보이며, 다른 니질대와는 달리 얕은 수심으로 조류, 파랑, 파도 및 폭풍 등에 의한 영향을 쉽게 받을 수 있는 고에너지 퇴적환경으로 재부유나 재동작용이 활발하여 정상적인 다져짐작용을 받기 어려웠던 것으로 판단된다. 특히 대부분의 정점에서 전단응력값이 유사한 조직값에도 불구하고 깊이에 따른 변화가 불규칙하여 퇴적후의 속성작용의 영향은 크지 않았던 것으로 보인다.

입자밀도는 평균 2.69 g/cm^{3}로서 모든 정점에서 큰 값의 차이가 없고 조직 및 다른 물성들과는 상관성을 보이지 않으며 한반도 주변에서 측정된 값들과 비교하면 김등(1996)의 대한해협 사질 퇴적물에서 측정한 값(약 2.85 g/cm^3)보다 낮고, Kim *et al.*(1999)의 울릉분지 평원지역의 값(2.54 g/cm^3)보다는 높다. 결과적으로 입자밀도는 퇴적물의 조성광물을 반영하는데, 특히 탄산염퇴적물(2.75 g/cm^3)과 규산염 퇴적물(2.0 g/cm^{3}이하)의 경우 그 값의 차이가 크다(Johnson and Olhoeft, 1984; Keller and Bennett, 1970). 일반적인 육성퇴적물은 2.67 g/cm^3(Keller and Bennett, 1970)로 이 연구지역 퇴적물의 값과 유사한 것으로 보아 대부분이 육성기원의 광물들로 이루어져 있음을 알 수 있다.

연구지역 표층퇴적물의 조직, 물리적 성질 및 속도의 선상분포를 보면 조립질의 함량이 높은 북쪽지역으로부터 세립질 함량이 증가하는 남쪽방향으로 갈수록 속도 및 습윤전밀도는 감소하고 공극율 및 함수율은 증가하는 양상을 보여주고 있다(Fig. 7). 이런 분포특성은 연구지역 퇴적물의 근원지가 북쪽임을 암시하며 연안류에 의해 남쪽으로 이동 퇴적되면서 분급화 및 세립화 되어, 그 결과 물리적 성질 및 속도 분포에도 영향을 주고 있다는 것을 알 수 있다. 단지 정점 6에서의 조직 및 물성값이 다른 정점과 상이한 값을 보이는 것은 본 정점이 황해니질대에서 서쪽으로 약간 벗어난 니질사가 분포하는 지역(Jin and Chough, 1998)에 포함되어(Fig. 2) 이런 퇴적물의 조직의 차이에 의한 결과로 물성값이 다른 정점과 상이한 값을 보이는 것으로 보인다. 또한 정점 7의 경우 공극율과 습윤전밀도값이 유사한 조직의 다른 정점에 비해 비교적 높은데 이 정점에서의 전단응력값이(Table 1) 역시 높은 것으로 미루어 보아 퇴적후의 속성작용에 의한 영향으로 보인다.

기존 연구들에 의해 밝혀진 황해지역에 분포하는 대부분의 세립질 퇴적물은 중국에 위치한 강으로부터 유입되며, 대부분은 황해의 서쪽과 중앙부에 퇴적되고 일부는 황해의 동쪽에 퇴적되는 것으로 알려져 있다(Miliman *et al.*, 1985, Lee and Chough, 1989; Alexander *et al.*, 1991; Khim and Park, 1992, Jin and Chough, 1998). 또한 황해남동부 퇴적물의 기원이 주로 금강이라는 주장과(Khim and Park, 1992), 금강에 의한 single source가 아닌 다른 지역에서 유입된 퇴적물도 있다는 이른 바 multi-source에 의해 영향을 받는다는 설도 있다(Alexander *et al.*, 1991). 상기의 여러 연구결과들을 종합하면 황해남동부니질대의 이동경로는 북쪽에서부터 시작되어 남쪽으로 이동되고 있다는 것은 분명한 것으로 보이며, 이 연구에 의한 조직 및 물성의 분포도 이러한 결론을 잘 뒷받침하고 있다.

각 조직 및 물성간의 상관관계를 보면 비교자료로 사용한 동해(김 등, 1999) 및 남해 내대륙붕의 퇴적물의 값(Kim *et al.*, 1992)과 절대값의 차이를 보이고 있으며, 특히 이 연구지역의 자료가 동해 및 남해 자료와 상이한 값을 보인다. 황해지역은 퇴적환경의 차이로 인해 남해 및 동해 지역에 비해 높은 실트함량이 퇴적물의 조직 및 물성에 영향을 준 것으로 보인다. 또한 광물성분 및 퇴적환경의 차이에서 기인하는 요인도 있을 것으로 보인다. 그외 고려해야할 사항으로 한반도 주변 니질대는 계절에 따라 음향혼탁층이 빈번히 나타나는 지역이며(최 등, 1997; Park *et al.*, 1999), 특히 이런 음향혼탁층은 주로 온도에 의존하는 가스의 용해도 때문에 계절별로 연직적인 이동(Richardson, 1995)을 하는 것으로 알려져 있어 시추퇴적물을 채취한 계절에 따라서도 물성에 영향을 줄 것으로 보인다.

일반적으로 음향혼탁층이 나타나는 지역에서의 속도값은 분기공(gas bubbles)에 의한 에너지의 손실로 인해 속도가 감소하나(Wilkens and Richardson, 1998), 분기공들이 빠져나갈 경우는 공극비의 감소로 인해 전단응력값이 증가되고 따라서 속도값이 증가될 수도 있다(Briggs and Richardson, 1996). 김 등(1999)은 동해지역인 남동해역의 속도값이 유사한 조직의 다른 지역에 비해 높은 이유로 후자의 경우로 생각하였다. 이 연구지역을 포함한 동해 및 남해 지역에서 음향혼탁층이 거의 해저면까지 올라온 지역도 많이 있으나(최 등, 1997; 이, 1999; Park *et al.*, 1999) 코어 시추지점과 비교하여 연관성을 밝힌 결과는 아쉽게도 없다. 따라서 이 연구지역을 포함한 한반도 주변 니질대의 경우도 그럴 가능성은 충분하며, 특히 니질퇴적물의 경우는 분기공의 존재유무가 퇴적물의 물성 및 음향에 결정적인 영향을 미치는 것으로 알려져 있기 때문에 음향혼탁층에 대한 물성값의 변화와 일반 니질퇴적층 내의 물성값의 변화에 대한 구체적인 차이를 밝히는 것에 더 많은 연구조사가 필요하다.

결 론

황해 남동부 해역 니질대에 대한 퇴적물의 조직 및 물성에 대한 연구결과 대부분이 실트질이 우세한 퇴적물이었으며, 퇴적물 조직의 수직적인 변화는 주로 실트와 점토의 함량비에 의해 결정되었다. 물성 및 음파전달속도의 수직적인 변화는 주로 조직의 변화 양상을 잘 반영하며, 퇴적후의 다져짐 작용이나 고화작용과 같은 속성작용에 의한 영향은 크게 나타나지 않았다. 상부퇴적물의 평균입도 및 물성의 정점별 선상분포 변화를 보면 연구지역의 북쪽에서 남쪽으로 갈수록 점진적으로 변하는 경향을 보여, 연구지역 북쪽에서 유입된 퇴적물이 남쪽으로 이동하면서 퇴적물의 분급현상이 일어나고 있음을 암시한다. 한반도 주변 니질대인 남해 및 남동해역의 물성값과 비교한 결과 비교적 상이한 값을 보였는데, 원인은 세 지역이 모두 니질대에 속하는 지역이지만 특히 황해지역의 경우 상대적으로 실트 함량이 높고 점토의 함량이 낮기 때문인 것으로 보인다. 조직 및 물성간의 상관관계를 보면 비교모델로 사용한 남해 및 동해역 퇴적물과 절대값의 차이는 있으나 전반적인 경향은 유사하여 한반도 주변에 퇴적된 니질대의 퇴적물 특성은 크게 다르지 않는 것으로 보인다. 다만 절대값의 차이가

나타나는 것은 퇴적물의 조직, 기원에 기인한 광물조성, 퇴적환경의 차이로 보이며, 특히 이 연구지역을 비롯한 니질대에서 흔히 관찰되는 음향혼탁층에 의한 가스의 존재도 고려해야할 것으로 생각된다.

사 사

이 연구는 한국과학재단지원 인턴연구원 프로그램(2000년)에 의해 수행되었음을 알립니다. 또한 자료분석의 일부는 서울대학교 수중음향특화연구센터(UARL)의 지원에 의한 것임을 밝힙니다. 시료채취에 도움을 주신 탐양호 승무원과 시료채취 및 일부 실험실 분석에 도움을 주신 충남대학교 한혁수군과 이현희양에게도 감사를 드립니다. 이 논문을 심사하고 수정하여 주신 심사위원님께도 사의를 표합니다.

참고문헌

김길영, 성준영, 김대철, 김정창, 1994. 여수해만 주변해역퇴적물의 물리적 및 음향학적 성질. 한국수산학회지, **27**: 434－444.

김길영, 김대철, 박수철, 유동근, 최진혁, 김정창, 1996. 한국 남동해역 사질퇴적물의 물리적 성질. 한국수산학회지, **29**: 663－676.

김길영, 김대철, 서영교, 박수철, 최진혁, 김정창, 1999. 한국 남동해역 내대륙붕 이토대 퇴적물의 물리적 성질. 한국해양학회지, **4**: 338－348.

김대철, 1989. 미고결 퇴적물의 음파전달속도측정에 관한 연구. 한국수산학회지, **22**: 147－153.

김대철, 김길영, 1991. 광양만 미고결퇴적물의 물리적 및 음향학적 성질: 북태평양 대륙붕 및 사면자료와의 비교. 한국수산학회지, **24**: 289－302.

박용안, 김경렬, 박수철, 박상윤, 1987. 한국 대한해협 대륙붕 표층퇴적물의 특성과 세립퇴적물의 지구화학적 특성. 한국해양학회지, **22**: 43－56.

박용안, 최진용, 이창복, 김대철, 최강원, 1994. 한국서해 중부해역 대륙붕 퇴적물의 분포와 퇴적작용. 한국해양학회지, **29**: 357－365.

이현희, 1999. 황해남동 해역에 분포하는 니질퇴적체의 음향특성 및 퇴적작용. 충남대학교 석사학위논문, 67 pp.

최동림, 오재경, 이치원, 우한준, 1997. 한국 남동 내대륙붕해역의 홀로세 뻘질 퇴적층의 고해상도 탄성파 특성. 한국해양학회지, **2**: 8－13.

최진용, 1993. 금강하구 및 인근해역에서 부유퇴적물의 계절적 변동에 관한 연구. 한국해양학회지, **28**: 272－280.

최진용, 박용안, 1993. 한반도 대륙붕 퇴적물의 분포와 조직특성. 한국해양학회지, **28**: 259－271.

최진용, 박용안, 1998. 하계동안 한국 서해 태안반도 연근해에서 부유퇴적물의 운반양상. 한국해양학회지, **3**: 45－52.

Alexander, C.R., D.J. DeMaster and C.A. Nittrouer, 1991. Sediment accumulation in a modern epicontinental-shelf setting: the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, **98**: 51－72.

Anderson, R.S., 1974. Statistical correlation of physical properties and sound velocity in sediments. In: Physics of Sound in Marine Sediment, edited by Hampton, L. Plenum, New York, 481－517.

Bassinot, F.C., 1993. Sonostratigraphy of tropical Indian Ocean giant piston cores: Toward a rapid and high-resolution tool for tracking dissolution cycles in Pleistocene sediments. *Earth Planet. Sci. Lett.*, **120**: 327－344.

Boyce, R.E., 1976. Definition and laboratory techniques of compressional sound velocity parameter and wet-water, wet bulk density, and porosity parameter by gravimetric and gamma ray attenuation techniques. Initial Reports of the Deep Sea Drilling Project, **33**: 931－958.

Briggs, K.B. and M.D. Richardson, 1996. Variability in in situ shear strength of gassy muds. *Geo-Mar. Lett.*, **16**: 189－195.

Folk, R.L., 1968. Petrology of Sedimentary Rocks. Hemphill's Austin, Texas, 170 pp.

Folk, R.L. and W.C. Ward, 1957. Brazos River. A study in significance of grain-size parameters. *J. Sed. Petrol.*, **25**: 3－27.

Galehouse, J.S., 1971. Sedimentation analysis. In: Procedures in Sedimentary Petrology, edited by Carver, R.E., Wiley-Interscience, 69－74.

Hamilton, E.L. 1970. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Geophys. Res.*, **75**: 4423－4446.

Hamilton, E.L. and R.T. Bachman, 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *J. Acoust. Soc. Am.*, **72**: 1891－1904.

Horn, D.R., B.M. Horn and M.N. Delach, 1968. Correlation between acoustical and other physical properties of deep sea cores. *J. Geophys. Res.*, **73**: 1939－1957.

Jin, J.H. and S.K. Chough, 1998. Partitioning of transgressive deposits in the southeastern Yellow Sea: a sequence stratigraphic interpretation. *Mar. Geol.*, **149**: 79－92.

Johnson, G.R. and G.R. Olhoeft, 1984. Density of rocks and minerals. In: CRC Handbook of Physical Properties of Rocks (Vol. 3), edited by Carmichael, R.S., Boca Raton, FL (CRC Press Inc.), pp. 1－38.

Keller, G.H. and R.H. Bennett, 1970. Variations in the mass physical properties of selected submarine sediments, *Mar. Geol.*, **9**: 215－223.

Khim, B.K. and Y.A. Park. 1992. Smectite as a possible source-indicative clay mineral in the Yellow Sea. *Geo-Mar. Lett*, **12**: 228－231.

Kim, D.C., Y.A. Park and C.B. Lee, 1992. Sedimentation and physical properties of inner shelf sediment, South Sea of Korea. *J. Geol. Soc. Korea*, **28**: 604－614.

Kim, G.Y. and D.C. Kim, 1998. Correlations between sound velocity and related properties of marine sediment from the Ulleung Basin, East Sea, *Marine Nature*, **6**: 25－36.

Kim, G.Y., D.C. Kim, S.C. Park and G.H. Lee. 1999. Chirp (2－7 kHz) echo characters and geotechnical properties of surface sediments in the Ulleung Basin, the East Sea. *Geosci. J.*, **3**: 213－224.

Laughton, A.S., 1954. Laboratory measurements of seismic velocities in ocean sediments. Proc. Roy. Soc. London, A, **222**: 336－341.

Lee, H.J., S.K. Chough, K.S. Jeong and S.J. Han, 1987. Geotechnical properties of the sediment cores from the southeastern Yellow Sea: Effects of depositional processes. *Mar. Geotechnol.*, **7**: 37－52.

Lee, H.J. and S.K. Chough, 1989. Sediment distribution, dispersal and budget in the Yellow Sea. *Mar. Geol.*, **87**: 195－205.

Mayer, L.A., 1991. Extraction of high-resolution carbonate data for paleoclimate reconstruction. *Nature*, **352**: 148−150.

Milliman, J.D., H.T. Shen, Z.S. Yang and R.H. Meade, 1985. Transport and deposition of river sediment in the Changjiang estuary and adjacent continental shelf. *Cont. Shelf Res.*, **4**: 37−45.

Mosher, D.C., K. Moran and R.N. Hiscott, 1994. Late Quaternary sediment, sediment mass flow processes and slope stability on the Scotian Slope, Canada. *Sedimentol.*, **41**: 1039−1061.

Nafe, J.E. and C.L. Drake, 1963. Physical properties of marine sediments in the sea. edited by Hill, M.N., Interscience, New York, 794−815.

Park, S.C., D.G. Yoo, K.W. Lee and H.H. Lee, 1999. Accumulation of recent muds associated with coastal circulations, southeastern Korea Sea(Korea Strait). *Cont. Shelf Res.*, **19**: 589−608.

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.

Richardson, M.D., 1995. Coastal benthic boundary layer special research program: A review of the second year, Stennis Space Center, 272 pp.

Schreiber, B.C., 1968. Sound velocity in deep-sea sediments. *J. Geophys. Res.*, **73**: 1259−1268.

Schubel, J.R., H.T. Shen and M.J. Park, 1984. A comparison of some characteristics sedimentation processes of estuaries entering the Yellow Sea. In: Marine Geology and Physical Processes of the Yellow Sea, edited by Park, Y.A., O.H. Pilkey, and S.W. Kim, 286−308.

Wilkens, R.H. and M.D. Richardson, 1998. The influence of gas bubbles on sediment acoustic properties: *in situ*, laboratory, and theoretical results from Eckernforde Bay, Baltic Sea. *Cont. Shelf Res.*, **18**: 1859−1892.

Wood, A.B., 1941. A Textbook of Sound. G. Bell, London, 578 pp.

2000년 8월 4일 원고접수
2000년 10월 17일 수정본 채택
담당편집위원: 김기현

Appendix

Regression equations for this study (Y), the East Sea (E: Kim *et al.*, 1999), and the South Sea (S: Kim *et al.*, 1992) are listed. The limiting values in the equations are as follows: porosity, 40 ~80%; wet bulk density, 1.35~2.00 g/cm^3 and mean grain size, 4~9 ϕ.

1) Velocity (Vp) versus porosity (η), Fig. 9.
   (Y) $Vp = 3815.5 - 64.4\eta + 0.458\eta^2$
   (E) $Vp = 3288.2 - 43.9\eta + 0.281\eta^2$
   (S) $Vp = 3687.9 - 56.3\eta + 0.368\eta^2$
2) Velocity (Vp) versus mean grain size (ϕ), Fig. 10.
   (Y) $Vp = 2041.3 - 107.6\phi + 5.47\phi^2$
   (E) $Vp = 1711.4 - 18.53\phi + 0.17\phi^2$
   (S) $Vp = 2649.6 - 270.0\phi + 16.40\phi^2$
3) Velocity (Vp) versus wet bulk density (ρ), Fig. 11.
   (Y) $Vp = 4941.6 - 4322.7\rho + 1379.5\rho^2$
   (E) $Vp = 3075.1 - 2108.7\rho + 740.3\rho^2$
   (S) $Vp = 4162.5 - 3635.0\rho + 1258\rho^2$
4) Porosity (η) versus mean grain size (ϕ), Fig. 12.
   (Y) $\eta = 32.73 + 5.18\phi$
   (E) $\eta = 53.44 + 2.95\phi$
   (S) $\eta = 32.74 + 5.18\phi$
5) Wet bulk density (ρ) versus mean grain size (ϕ), Fig. 13.
   (Y) $\rho = 2.18 - 0.09\phi$
   (E) $\rho = 2.08 - 0.08\phi$
   (S) $\rho = 2.18 - 0.09\phi$