

## 영종도 비고화 퇴적물의 점토광물 조성 및 기원에 관한 연구

문지원\* · 문희수\* · 송운구\*\* · 이규호\*

### Clay Mineral Assemblage and Their Origin of Unconsolidated Sediments of Youngjong Island, Western Part of Korea

Ji-Won Moon\*, Hi-Soo Moon\*, Yungoo Song\*\* and Gyoo Ho Lee\*

**ABSTRACT** : Unconsolidated sediments of Youngjong Island were investigated to consider the vertical distribution of clay minerals and their origin. At least three sedimentation units can be recognized by color, magnetic susceptibility, and pH. X-ray diffraction analysis of clay size fraction reveals that illite is the most abundant phase (52.06%), and chlorite (27.16%), kaolinite (16.92%), smectite (3.86%) occur next to it. Detailed XRD study suggests that illitic materials contain fairly large amount of ordinary muscovite derived from the mica schist in Youngjong Island and adjacent area. The relative amount of kaolinite and chlorite is less than those of samples from estuary mouth of several rivers that flow to Yellow Sea and South Sea. Especially smectite content of the present sample is much higher than those of estuary sediments. These indicate that the unconsolidated sediments of tidal-flat deposit in Youngjong Island are largely affected by marine influence and partly affected by sediment influx from China. However, some degree of source of this unconsolidated sediments is inland origin from adjacent estuary sediment and in situ or nearby weathered materials.

#### 서 언

오늘날 대부분의 대륙붕은 제4기 동안의 빙하작용과 이로 인한 해수면 변동에 크게 영향받고 있으며 (Bloom, Park, 1985), 세립질 퇴적물인 점토광물의 공간적 분포는 지형적인 요인, 퇴적물의 유입량 및 그것을 분산시키는 수리동력학적인 해양조건의 상호작용에 의해 결정된다. 또한 해양에서의 퇴적기작을 통한 점토광물의 공간적인 분포를 설명하기 위해 해수와 육상으로부터 운반되어온 점토광물이 평형에 도달하기 위한 화학적 변질, 염도변화에 따른 응집효과의 차로 인한 침전속도 변화로써 공간적 분포를 야기하게되는 차등응집 (Edzwald, O'Melia, 1975)과 입도에 따른 퇴적물의 물리적인 분급이 이루어진다는 입도분리/선택적 분급퇴적 (Chamley, 1989) 등이 제기되고 있다.

기존의 대륙붕에 관한 연구는 표층퇴적물의 분포양상을 파악하고, 대륙붕 해수의 현세 해침 이후의 일련의 변화를 주는 퇴적 특성을 밝히기 위해 수행되어져 왔으나

최근, 세립질 퇴적물질인 점토광물에 대한 연구는 입자의 퇴적 위치 및 기원, 퇴적경로의 이해에 유용한 결과를 제시하고자 수행되고 있다 (Naidu, Mowatt, 1983; Hume, Nelson, 1986; Chamley, 1989). 국내에서는 점토광물을 통한 인접해역에 대한 연구가 1980년대 이후 시작되어 인근 강으로부터 기원된 서해 세립질 퇴적물의 이동 및 퇴적과정에 관한 많은 연구가 실시되었으며, 특히 스멕타이트는 해양과 육상기원에 따른 함량비가 큰 차이를 보이는 점토광물이므로, 서해에 분포하는 이토퇴적물의 기원을 밝히는 중요한 지표광물로 인정되었다 (Khim, 1988; Park, Khim, 1990).

그러나 해양에서의 시추시료에 대한 연구는 석유탐사를 제외하고는 경제적인 지원의 어려움으로 많은 연구가 수행되지 않았다. 그러나, 표층추상퇴적물 (최대 3m)에 대한 연구결과는 비교적 여러번 보고된 바가 있다 (Kim, 1980; Choi, 1981; Park, Khim, 1990). 영종도는 지리적 특성상 한강 하구에 위치하므로 육상의 풍화퇴적물을 쉽게 공급받을 수 있는 해역이며, 또한 도서지역이므로 해양에서의 영향을 받는 해역이기도하다. 따라서 이 해역에서의 시추시료에 대한 점토광물의 분포특성을 심도별로 비교 검토함으로써, 해양 및 육상근원의 퇴적물의 공급량

\* 연세대학교 지구시스템과학과 (Department of Earth System Sciences, Yonsei University, Seoul 120-749, Korea)

\*\* Macaulay Land Use Research Institute, U.K.

을 상대적으로 비교하고, 영종도 조간대 공급물의 특성을 밝히고자 한다.

## 주변 지질

인근 김포, 인천 지역에는 경기변성복합체와 대동층군 퇴적암이 주로 분포하고 있으며, 소규모의 화산암류가 발달한다 (Fig. 1; 최위찬 등, 1995b). 김포지역은 특히 해수면 가까운 곳에 고도의 충적층이 특징적이다. 선캠브리아기의 변성암류는 흑운모편마암, 안구상편마암, 석영편암, 규암, 석회암, 화강편마암 등이며, 쥐라기의 퇴적암류로는 대동층군이 존재한다. 쥐라기 흑운모화강암은 도둑의 동남부에 넓게 분포하고 있으며, 이외에 섬장암, 섬록암, 홍색장석화강암 등이 관입한다. 백악기 화산암류로는 용결응회암이 분포하며 유문암이 이를 관입한다. 그 외에 응회암, 유문암, 화산쇄설성 퇴적암 및 안산암이 해안 및 강화해협 근처의 소도들에 주로 분포한다. 백악기 화성암류는 화강반암 및 맥암류 등이 발달한다 (최위찬 등, 1995a).

영종도의 전역은 주로 선캠브리아의 운모편암과 이에 협재되어 발달하는 석영편암으로 구성되어 있으며, 일부 쥐라기의 흑운모화강암이 백운산과 중산동 일대에서 산출된다. 영종도의 흑운모편마암은 북서단의 예단포에서 전반적으로 미약한 소습곡 구조와 높은 흑운모의 함량을 가진다. 영종도의 운모편암류의 운모는 입자가 비교적 큰 편이며, 운모편암 내의 석회암은 예단포에서 운모편암의 상부와 석영편암의 하부에 협재한다 (최위찬 등, 1995a). 영종도에서 넓게 분포하는 석영편암은 상부에 운모편암

이 분포하며 이의 상부에는 박층의 석영편암이 반복되어 나타난다. 해변노두의 석영편암은 흑운모화강암 혹은 페그마타이트 암맥에 의해 관입당하며, 운모편암이 수 m 규모로 협재되기도 한다. 백운산 정상에서는 소규모 규암층을 협재하기도 한다. 석영편암 및 석회암층을 소암주상으로 관입한 흑운모화강암은 K-Ar 절대연령측정결과 162 Ma (김옥준, 1971)와 162~148±7 Ma (서규식, 박희인, 1985) 로 보고된 바 있다.

백악기 화성암류로는 인천지역에 분포하는 계양산 및 철마산 용결응회암, 유문암, 김포유문암, 화산쇄설성 퇴적암, 김포응회암 및 안산암류 등이며 그 외에 섬록암과 화강반암이 있다.

## 시료 및 연구 방법

표준관입시험법을 이용, 각 구간 중 최상부에서 상부 15 cm와 하부 15 cm로 분리회수하는 방법으로 시료를 채취하였다. 현재 해발 2~5 m 지점에서 시추를 시작한 것이므로 해양에서 직접 채취한 시료에 비해 현생까지의 제 4기층서를 모두 가지고 있다고 볼 수 없으며, 또한 교란시료이다. Y-IV-3공 (37°26'55"N, 126°28'11"E)은 해발 2.2 m에서, Y-III-2공은 해발 4.7 m에서 1~1.5 m 간격으로 각각 36.5 m 및 41 m까지 시추되었다. 두 시추공은 직선거리로 약 65 m 떨어져 있다.

채취시료는 분셀색도 (Munsell color chart)를 이용한 색상대비 후 상온건조시켜 대자율 측정을 실시하였다. 대자율 측정은 고토양과 화산성기원 퇴적물의 존재 가능성을 확인하기 위해 전체시료에 대해 측정되었으며, Ba-

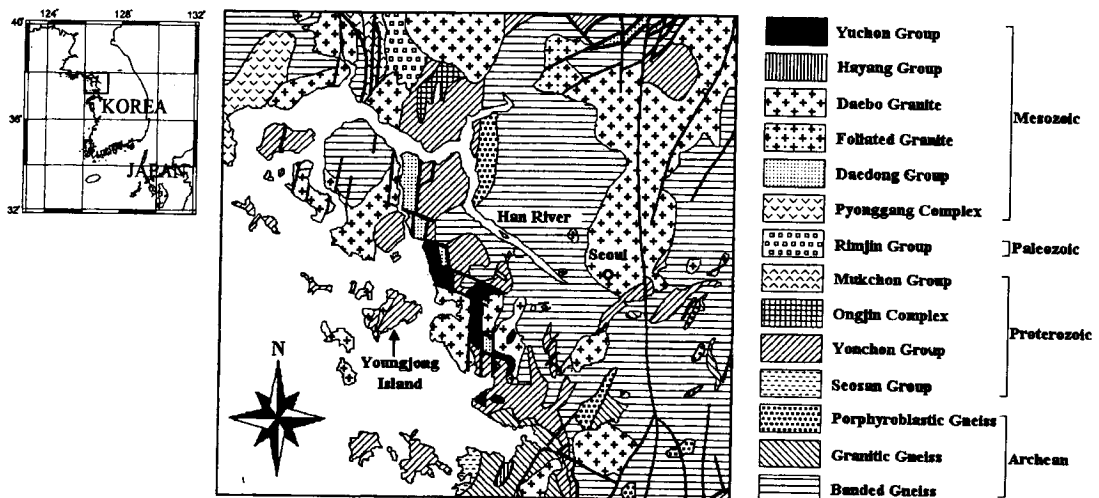


Fig. 1. Simplified geological map of the Youngjong island and around area (Chwae *et al.*, 1995b).

rington MS 2 probe를 사용하였다. 측정시 내경이 36 mm인 홀컵에 3회씩 올려 각각 3회 반복 측정하여 평균치를 구하였다. 두 시추시료들은 색상대비 실험 및 대자율 측정결과 유사한 양상을 보여, 이 후의 기타 실험들은 Y-IV-3 시추공 시료에 한하여 실시되었다. 퇴적물의 조직 분석을 위하여 구간별 원시료 중 상부 15 cm의 시료들에 대해 퇴적법으로 입도분석을 실시하였다. 자갈의 경우, 최상부의 준설패립토양에서 조개과편, 풍화토에서는 약 5 cm의 석영규암과편과 1 cm 내외의 장석반정도 산출된다. 그외의 시료는 2 mm체로 체질하였으나, 모래입도 이상의 시료는 발견되지 않았다.

퇴적환경변화를 지시해주는 퇴적물의 pH측정은 일반 토양을 대상으로 하는 ASTM 방법 (시료 : 탈이온화수=1:1)으로 실시하였다.

각 구간별 수직적인 점토광물의 분포와 퇴적물 공급원의 변화를 알아보기 위해 분리된 점토입도를 대상으로 유기물과 염분을 제거한 후 X-선회절분석을 통해 각 점토광물 함량에 대한 정량분석을 실시하였다. 이를 위하여 점토입도 시료들의 현탁액으로부터 삼투막 필터를 이용한 정방위 시료를 제작하였다. 정방위 시편의 시료밀도가 15 mg/cm<sup>2</sup>을 넘으면 시료의 두께에 따른 X-선 투과깊이의 차이에 의한 회절선의 변화를 무시할 수 있으므로 동일질량의 시료로 제작하였다. 각 시료들은 에틸렌글리콜 처리와 550°C에서 1시간 열처리 전후 각기 X-선회절분석을 실시하였다. 또한 원시료의 정량분석을 위하여 상온건조 후 분말화시킨 후 부정방위시료로서 X-선회절분석을 실시하였다. X-선회절분석에는 MAC MXP-3 XRD system이 사용되었다. 분석은 Ni-filtered Cu-k $\alpha$  (1.54052Å) X-선으로, 40 kV/30 mA의 가속전압 및 전류, 1 mm의 발산 및 산란 슬릿, 0.6 mm의 수광슬릿 조건하에서 이루어졌으며, 측정은 FT방법으로 0.02° 2 $\theta$ 당 전암시료의 경우 1.5초, 방향성 시료에 대해서는 2초씩 행하였다. 분석의 정확도를 위해 석영을 표준시료로 하여 회절선의 좌우 편차를 보정하였다.

이들 주상시료에 대해 Ahn (1992)의 방법에 따라 에틸렌글리콜 처리시료의 결과를 이용, 점토광물에 대한 반정량분석을 실시하였다. 정량분석시 강도보정인자 (MIF)는 전구간에서 다량으로 산출되는 일라이트를 기준으로 계산하였다. 피크강도는 Sonneveld 방법 (Sonneveld, Visser, 1975)을 이용하여 배경치를 제거한 후 피크높이 (cps)만을 이용하여 측정하였다. 이는 회절피크는 일반적으로 저각도쪽으로 비대칭이며, 안부를 갖기 때문에 반치폭을 이용한 면적법은 오히려 오차를 더 발생시킬 수 있기 때문이다.

## 연구결과

### 색상대비, 대자율 및 pH 측정

문셀색도를 이용한 색상 대비는 획득한 두 공의 시료간의 차이를 확인하기 위해 실시하였다 (Table 1). Y-IV-3 및 Y-III-2 시료는 시추고도가 2.2 m와 4.7 m로서 시추심도가 약 2 m가 다르지만, 시추심도에 따른 전체적인 색상의 변화순서는 동일하다. 준설패립토양층인 사질표층 2 m 구간과 산화-환원상태 내지는 유입퇴적물질의 차이 등으로 사료되는 7, 8~14 m구간에서의 색상의 변화, 31.5 m (Y-IV-3공)와 36.5 m (Y-III-2공) 하부에서 관찰되는 풍화토의 색상은 Table 1에 기재한 바와 같이 매우 유사하다.

대자율 측정결과 (Table 1)는 대부분 쇄설성 퇴적물로서 1~2 $\times 10^7$  SI unit의 매우 낮은 측정치를 보이나 전반적으로는 두 번의 정형유회 (sinusoidal cycle)를 나타낸다. 한 주기 내에서는 기반암 상위의 풍화토와 부정합인 퇴적층 최하부로부터 상부로 갈수록 대자율값이 완만히 증가하여 최고점을 이루고, 그 이후로는 급격히 감소한다. 이와는 달리 구간 중 3, 7~8m 구간에서 두 번의 현저히 높은 피크를 보여준다 (Fig. 2 (a)).

Y-IV-3공 시료에 대해서 퇴적환경 유추의 지시자가 될 수 있는 pH 측정결과 (Table 1과 Fig. 2 (a)), 4 m, 8 m와 29 m에서 산성피크가, 20 m에서는 염기성측으로의 피크가 관찰되었다. 대자율 측정결과와 비교해 볼 때, 대자율 측정치의 피크와 산성측으로의 피크는 전반적으로 일치하며, 다만 20 m 구간에서는 반대로 나타난다.

### 퇴적조직 분석

Y-IV-3공에 대한 입도분석결과, 깊이에 따른 퇴적조직의 변화는 Table 1과 Fig. 2 (b)와 같이 나타난다. 31.5 m 이하의 풍화토에서는 본 역의 모암인 선캠브리아기의 운모편암에 협재되어 발달하는 석영편암의 자갈이 산출되며, 5 cm 내외의 것도 있다. 모래는 준설패립토양 1~2 m에서 우세하며, 이후로 풍화토까지 모래의 함량은 4~6 m, 12~14 m, 20 m심도에서 현저히 높고 3번의 증감곡선을 나타낸다. 특히 14, 20 m의 심도에서는 80%까지 점한다. 그 외의 구간에서 모래는 10% 미만으로 산출된다. 거의 전 구간에서 걸쳐 실트가 가장 우세하나, 모래가 우세한 구간에서는 10% 미만으로 산출된다. 점토입도의 경우, 최대 22.5%까지 산출되며, 실트와 마찬가지로 모래가 우세한 구간에서는 현저히 감소한다.

**Table 1.** Description of core samples from Youngjong Island.

Y-IV-3							Y-III-2		
Depth	M.C.	M.S.	pH	Size fractions (%)			Depth	M.C.	M.S.
				Sand	Silt	Clay			
1 m	10Y 5/2	1.61	8.44	95.5	3.3	1.3	1 m	10Y 5/2	1.33
2 m	10Y 5/2	2.21	8.35	95.3	4.2	0.6	2 m	10Y 5/2	1.79
3 m	5Y 3/2	2.37	6.97	15.4	77.4	7.2	3 m	5Y 4/2	2.79
4 m	5Y 4/2	1.98	4.13	29.0	66.1	4.9	4 m	5Y 4/2	1.97
5 m	5Y 4/2	1.67	7.64	49.9	44.5	5.6	5 m	7.5Y 5/2	1.76
6 m	5Y 6/2	1.87	7.96	25.4	68.7	6.0	6 m	7.5Y 5/2	1.58
7 m	5Y 4/2	2.01	7.23	2.5	77.6	20.3	7 m	7.5Y 5/2	1.53
8 m	2.5Y 5/4	4.47	5.41	3.6	79.4	17.0	8 m	2.5Y 5/4	4.62
9 m	2.5Y 7/4	1.84	6.51	4.8	72.8	22.5	9 m	2.5Y 4/4	4.45
10 m	2.5Y 7/4	1.13	7.16	9.7	75.2	15.1	10 m	2.5Y 6/4	1.12
11 m	2.5Y 5/4	1.21	7.05	11.1	68.2	20.8	11 m	2.5Y 6/4	0.85
12 m	2.5Y 5/4	0.74	6.44	35.2	55.8	9.0	12 m	7.5Y 6/2	0.75
13 m	2.5Y 6/4	0.62	6.56	60.9	34.3	4.8	13 m	5Y 7/2	0.65
14 m	2.5Y 6/6	0.66	6.63	85.2	12.0	2.9	14 m	5Y 5/4	0.63
15 m	10YR 6/8	1.02	6.91	3.2	76.3	20.5	15 m	2.5Y 4/6	1.05
16 m	5Y 6/2	1.20	6.96	2.3	82.8	14.9	16 m	2.5Y 4/4	1.52
17 m	5Y 4/2	1.47	7.24	1.0	85.7	13.3	17 m	5Y 4/2	1.60
18 m	5Y 6/2	1.76	6.92	1.1	77.9	21.0	18 m	5Y 4/2	1.71
19 m	5Y 4/2	2.31	7.30	1.0	79.5	19.5	19 m	5Y 4/2	1.80
20 m	5Y 5/2	1.42	8.14	77.3	18.7	4.0	20 m	5Y 4/2	1.77
21.5 m	5Y 4/2	1.53	6.59	1.2	85.7	13.1	21.5 m	5Y 4/2	1.61
23 m	5Y 5/4	0.80	7.10	2.1	90.5	7.4	23 m	5Y 4/2	1.43
24.5 m	10Y 5/2	1.05	7.24	1.3	85.8	12.9	24.5 m	10Y 6/2	0.92
26 m	5Y 4/2	1.43	7.18	4.7	87.6	7.7	26 m	7.5Y 6/2	0.82
27.5 m	5Y 5/2	0.76	7.19	3.8	88.3	7.9	27.5 m	5Y 6/4	1.41
29 m	7.5Y 4/2	0.99	3.10	8.4	75.1	16.5	29 m	2.5Y 5/2	0.65
30.5 m	7.5Y 5/2	1.06	5.76	10.2	76.4	13.5	30.5 m	2.5Y 6/4	0.62
31.5 m	10Y 8.5/1	0.14	7.25	91.8	6.4	1.8	32 m	2.5Y 6/6	0.22
33 m	5Y 6/2	0.04	7.11	89.1	4.9	6.1	33.5 m	5Y 7/2	0.27
35 m	10YR 6/10	0.67	6.76	26.4	52.7	20.9	35 m	5Y 8/2	0.30
36.5 m	2.5Y 7/6	0.44	7.36	85.1	8.4	6.6	36.5 m	10YR 6/2	0.03
							38 m	2.5Y 7/6	0.39
							39.5 m	10YR 5/10	1.66
							41 m	10YR 5/8	0.80

Abbreviations: M.C.; Munsell color chart, M.S.; Magnetic susceptibility (E-7, SI unit).

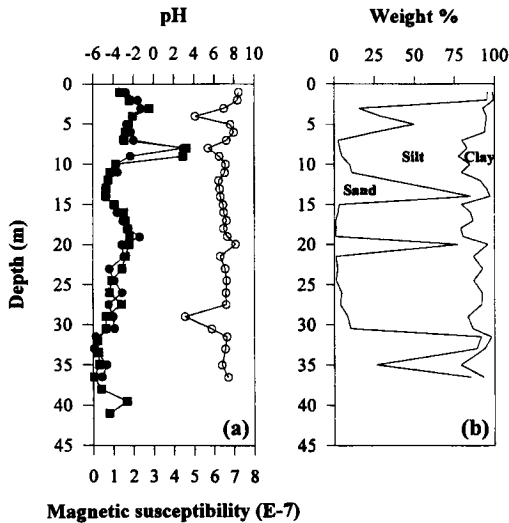
이들 입도분포를 USDA의 토양조직계통표에 도시하면, 모래가 우세한 경우에는 사양토~사토, 실트가 우세한 경우에는 미사질양토~미사토 영역에 도시된다. 대부분의 시료에서 모래와 실트의 함량이 우세하다.

#### 점토광물 분석

전구간의 점토입도 시료에 대해 X-선회절분석을 실시하였으며, 대표시료인 29 m 시료에 대한 회절분석 결과는 Fig. 3과 같다. 추상시료는 풍화토를 제외한 전 구간에 걸쳐 함량의 차이만 있을 뿐 일라이트, 스멕타이트, 카올리나이트, 녹니석의 점토광물조합을 가진다. 본 시료의 정량

분석시 사용된 각 점토광물의 화학조성 및 회절선 등은 Ahn (1992)의 자료 (Table 2)를 이용하였다.

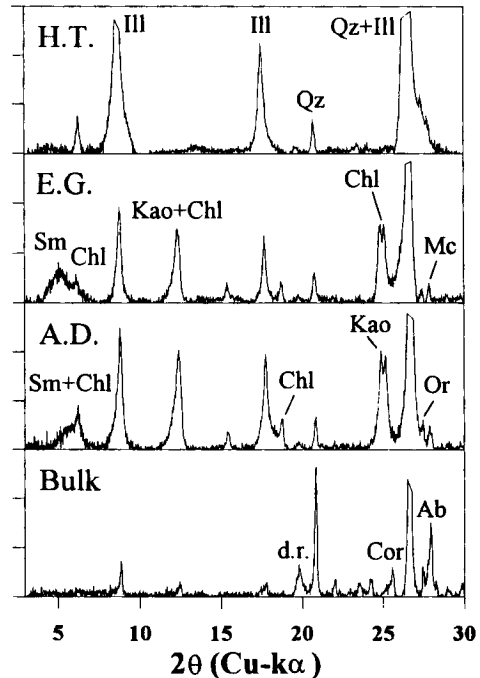
해양시료에 대한 기존연구 결과들은 스멕타이트 (17Å), 일라이트 (10Å), 카올리나이트+녹니석 (7Å)의 피크면적에 일정한 중량비를 곱한 값을 이용하는 것이었다. 카올리나이트의 상대함량 측정에는 카올리나이트의 3.57Å (002) 피크와 녹니석의 3.52Å (004) 피크를 이용, 상대적인 피크 높이로 각각 나누어 카올리나이트와 녹니석의 상대함량을 구하는 Biscaye (1965)의 방법이 주로 이용되었다. 이용된 중량비는 연구자마다 다소 차이가 있는데, Biscaye (1965)의 경우 1:4:2 비율, Aoki *et al.* (1974)의 경우 1:3.6:3.6 비율, Park, Han (1985)의 경우



**Fig. 2.** Comparison of magnetic susceptibility and soil pH measured by ASTM method with depth. Solid circle and open circle; magnetic susceptibility and soil pH of Y-IV-3, Solid square; magnetic susceptibility of Y-III-2. (b) Size distribution of Y-IV-3 (total weight % was recalculated to 100%).

1:3:2 비를 각각 이용하였다. 본 연구의 정량분석 결과를 기존의 결과 (Biscaye, 1965; Aoki *et al.*, 1974; Park, Han, 1985)와 함께 Fig. 4에 도시하였다.

이번 연구에 사용된 시료들의 결과를 보면, 스멕타이트, 일라이트, 녹니석, 카올리나이트의 4개 광물의 함량비를 100%로 가정하고, 준설패립토양 및 기반암 상위부부터 부정합면까지의 풍화토를 제외한 조건대 퇴적시료 25개에 대한 평균함량으로 볼 때, 일라이트 (52.06%)가 전 구간에 걸쳐 가장 우세한 점토광물종이며, 녹니석 (27.16%), 카올리나이트 (16.92%), 스멕타이트 (3.86%) 순으로 산출된다. 주구성광물인 일라이트의 함량변화는 원시료 중 점토입도의 함량변화와 유사하게 변화되는 경향을 보인다. 스멕타이트는 8~9 m의 구간을 제외하고는 모두 산출되나 가장 적은 함량을 보인다. 녹니석의 경우 두 번의 하향 증감변화를 보이며, 10~14 m 구간에서 다소 낮은 값



**Fig. 3.** X-ray diffraction pattern of representative sample at 29m in depth.. Intensity of bulk sample was magnified by 2.5 times than other patterns. Abbreviations: Ab; albite, A.D.; air-dried, Chl; chlorite, Cor; corundum as a internal standard, E. G.; ethylene-glycol treated, H.T.; heated at 550°C for 1 hour, Ill; illite, Kao; kaolinite, Mc; microcline, Qz; quartz, Sm; smectite, d.r.; dioctahedral (0, 2, 11) reflection.

을, 풍화토인 31.5 m보다 하부 구간에서는 산출되지 않는다. 카올리나이트는 이들 구간에서 거의 일정하게 산출되는 특징을 가지면서, 최하부의 풍화토에서는 일반적인 토양에서와 같이 가장 우세한 점토광물종으로 나타난다.

**정량분석의 검증**

점토입도의 정량분석 결과의 신뢰도를 알아보기 위하여 NEWMOD2를 이용하여 검토해 보았다. 일반적으로 점토

**Table 2.** Selected diffraction peaks and parameters of model structures of clays.

Clays	Peak	Interlayer	VI sheet	Measured intensity	Molecular weight	Corrected intensity	MIF	References
Smectite	(001)	Na <sub>0.4</sub>	Fe <sub>0.6</sub> Al <sub>1.4</sub>	2330	495	1845	4.1	Heins <i>et al.</i> (1979)
Illite	(001)	K <sub>0.6</sub>	Fe <sub>0.6</sub> Al <sub>1.4</sub>	452	392	452	1.0	Ahn, Peacor (1986)
Kaolinite	(002)		Al <sub>2.0</sub>	920	258	1398	3.1	Ideal composition
Chlorite	(004)	Fe <sub>1.55</sub> Al <sub>1.45</sub>	Fe <sub>0.6</sub> Al <sub>1.4</sub>	6907	659	361	0.8	Ahn, Peacor (1985)

All data from Ahn (1992)

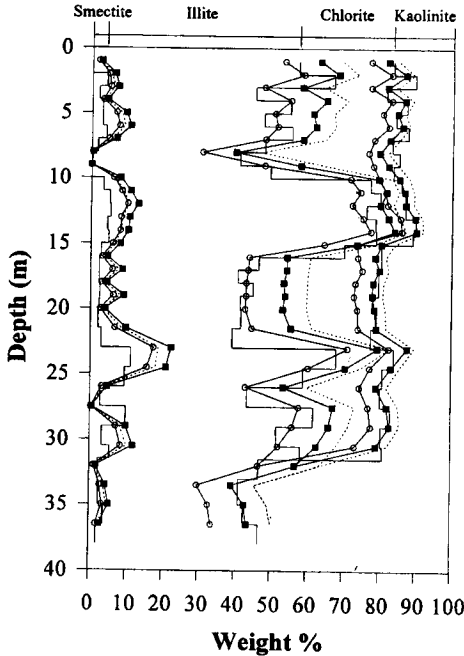


Fig. 4. Relative weight percentage of clay minerals under 2  $\mu\text{m}$  using Ahn's method (1992, histogram) in comparison with Bscay (1965, dotted line), Aoki *et al.* (1974, open circle), and Park, Han (1985, solid square).

광물의 정량분석은 점토광물이 주구성광물인 경우 각 구성 성분 함량의  $\pm 10\%$ , 그 구성비가 20% 이하인 경우에는  $\pm 20\%$  오차도 양호한 것으로 간주된다 (Moore, Reynolds, 1989). 정량화된 절대값의 정확도를 알아보기 위해 녹니석의 경우, Fe값을 0~3까지 변화시켜 NEWMOD2로 각각의 회절도형을 구한 다음, (004)/(003) 회절강도비와 팔면체 판의 Fe 함량과의 함수관계를 구하여 보았다. 녹니석이 산출되는 27개 시료의 (004)/(003) 회절강도비를 위에서 구한 경험식 Fe content (VI) =  $((c_{ps(004)} / c_{ps(003)}) - 0.859) / 1.112$ 에 대입하여 Fe (IV) 값을 구하여 보면, 2개의 이상치를 제외하고, 1.25~1.93의 범위로 비교적 편차가 크나, 산술평균값은 1.52 ( $\sigma=0.20$ )로 처음에 인용한 Ahn, Peacor (1985)의 1.55와 매우 근사하다.

일라이트의 경우에도 같은 방법으로 층간의 K함량은 사용한 기준치 0.6을 중심으로 0.3~0.9, 팔면체판의 Fe는 0.6를 중심으로 0.1~1.2로 변화시켜 얻은 회절도형으로부터 (001)/(002) 회절강도비를 구하여 제작된 정방위 시편의 것과 비교하여 보았다. 정방위 시료의 일라이트중 풍화토인 최하부의 고토양의 두 값을 제외한 시료에서의 (001)/(002) 회절강도비는 1.01~2.06의 범위로 나타나며, 산술평균값이 1.37 ( $\sigma=0.28$ )로 모델링 결과중 최하값

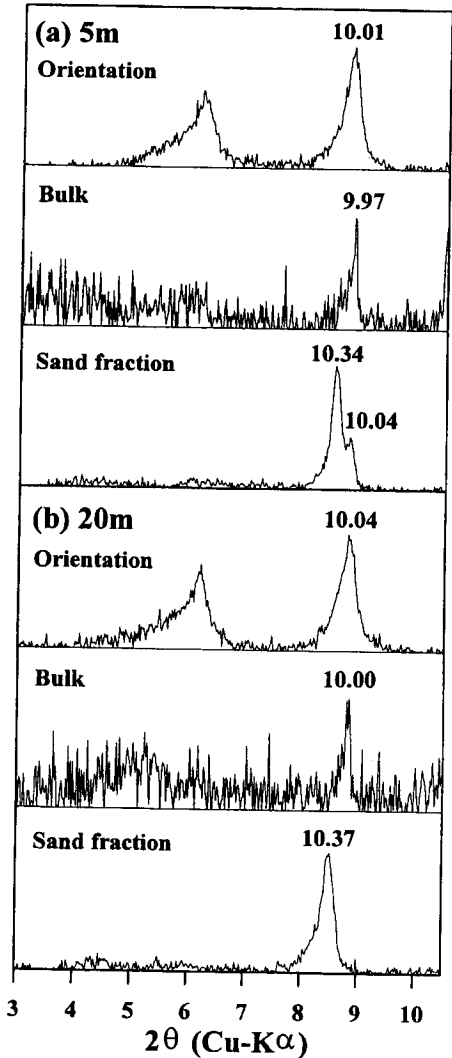


Fig. 5. XRD patterns of orientation, bulk, and sand fraction samples respectively for representative samples to compare 10Å mica peaks.

인 1.88에 크게 못미치는 값이다.

모델링 결과와 불일치는 다른 증거는 모래입도의 운모류이다. 이는 입도분리 결과 얻어진 모래입도를 여파지를 이용해 분리, 보다 순수한 운모를 얻어 X-선회절 분석한 결과 (Fig. 5), 공히 전체시료 및 점토입도시료에서는 일라이트로 관찰되던 것이 분리된 모래입도에서 추출한 운모를 분석한 경우, 백운모와 일라이트가 중첩된 피크, 또는 일라이트가 사라진 백운모만의 피크로 나타난다.

구성광물 분석

**Table 3.** Reference intensities by counting.

Minerals	RIR(I/Ic)	Peak(Å)	PDF	Reference
Corundum	1.0	2.09	42-1468	
Quartz	3.6	3.34	33-1161	
Albite	2.1	3.19	9-466	
Microcline	1.7	3.24	22-687	Chipera, Bish (1995)
Orthoclase	1.7	3.31	31-966	Chipera, Bish (1995)
Illite	0.7	9.98	29-1496	Ahn, Peacor (1986)

전체 조암광물의 분석은 기질효과와 무관하게 각 광물의 피크강도와 구성분율의 관계, 비정질물질의 함량을 효과적으로 나타내 줄 수 있는 Chung의 방법 (Chung, 1974a, 1974b)을 이용하였다 (Table 3). 내부표준물질인 분석등급의 강옥 (중량비 5%)은 원시료와 균질하게 혼합하여 동일량을 취하였다. 정량분석 값은 모든 시료에서 산출되고, 피크 중첩이 일어나지 않는 일라이트, 석영, 알바이트, 미사장석 및 정장석에 대하여, PDF와 Chipera, Bish (1995)의 표준강도 (I/I<sub>c</sub>) 값을 소수점 첫째자리까지 취하여 계산하였다. 전체 점토광물에 대한 정량은 원시료에서는 동정 및 분리확인이 어려우므로, MIF를 이용한 점토입도에 대한 분석결과 중의 일라이트 함량비를 이용하여 전체 점토광물의 함량비를 구하고, 계산된 강옥분율을 더한 최종값에 대한 분율을 다시 구하였다 (Fig. 6).

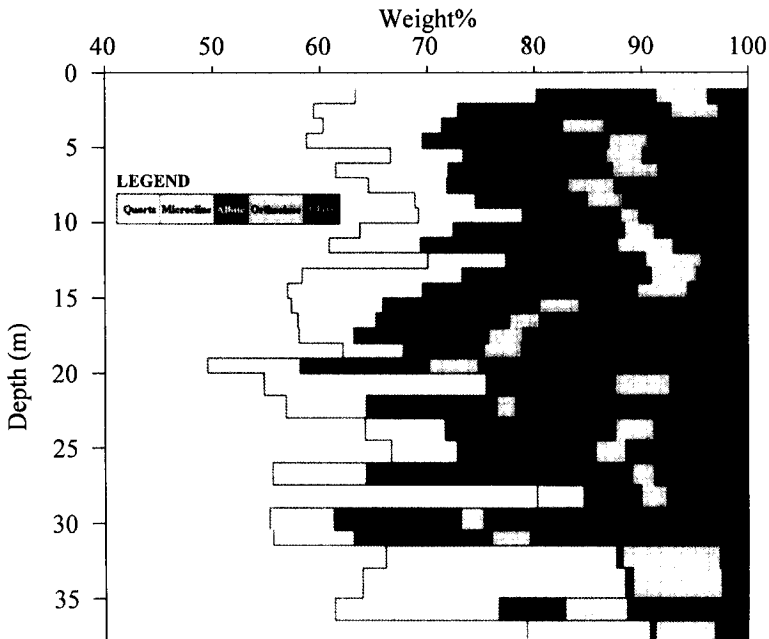
분석한 석영, 미사장석, 알바이트, 정장석 및 점토 총량에 대한 각 분율의 상관관계를 Fig. 7에 도시하였다. 조립질 퇴

적물인 석영, 미사장석, 정장석과 세립질의 점토광물 총량 및 변질산물인 알바이트는 부의 상관관계를 보인다. 그러나 점토총량과 알바이트는 뚜렷한 관계를 보여주지 못한다.

## 토 의

### 반정량방법의 문제점

X-선회절분석결과를 이용하여 여러학자들이 제시한 다른 중량비 (Biscaye, 1965; Aoki *et al.*, 1974; Park, Han, 1985)를 이용하여 계산한 값과 본 연구에서 Ahn (1992)의 방법으로부터 계산된 결과를 종합하여 비교해 보았다 (Fig. 5). 가장 특징적인 것은 이상적인 화학조성이나 거의 그에 준하는 화학조성을 갖는 카올리나이트는 함량비의 차에도 불구하고 방법에 따른 변화폭이 적은 반면, 조성의 변화가 심한 그 외의 광물들은 상대함량비 뿐만 아니라 매 방법마다 시료의 함량 변화 폭도 크다는 것이다. 풍화도 상부의 퇴적층시료의 함량비만을 살펴보면 Ahn (1992)의 방법으로 구한 경우, 스멕타이트 3.86%, 일라이트 52.06%, 녹니석 27.16%, 카올리나이트 16.92%인 것이 Biscaye (1965)의 방법으로는 스멕타이트 6.67%, 일라이트 60.52%, 녹니석 13.21%, 카올리나이트 19.60%로 나타난다. Ahn (1992)의 방법으로 구한 경우, 일반적으로 스멕타이트, 일라이트, 카올리나이트는 적게, 녹니석은 많게



**Fig. 6.** Relative amount of mineral assemblage composed of quartz, microcline, orthoclase, albite, and clays.

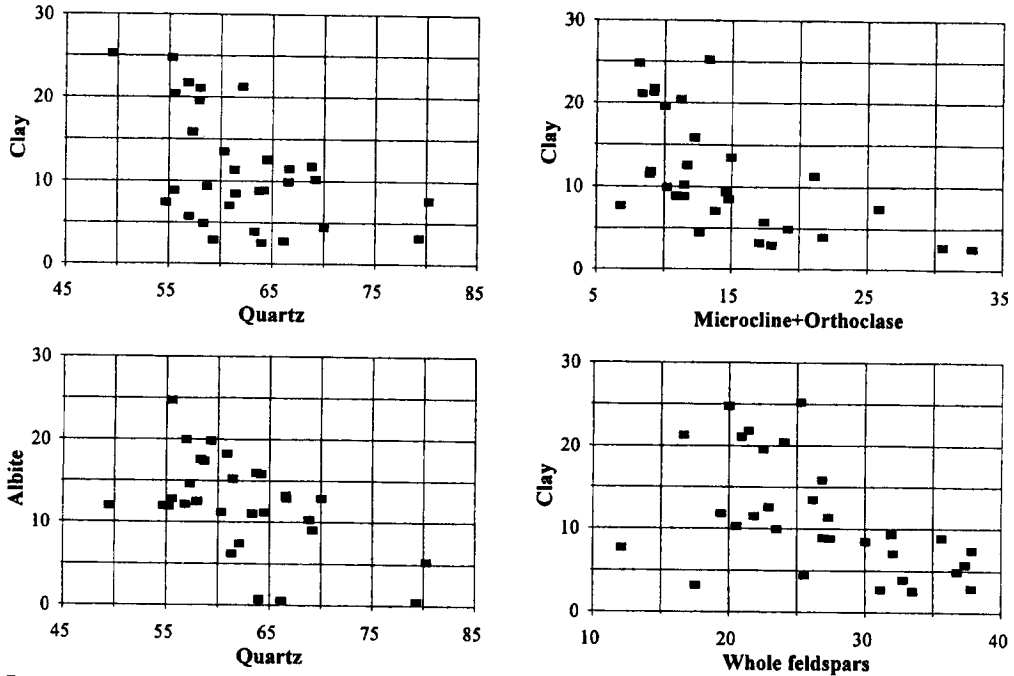


Fig. 7. Variation diagram of major mineral constituents for samples from the Y-IV-3 borehole in Youngjung Island.

계산된다. 이렇게 방법에 따라 다르게 나타나는 것은 화학조성뿐만 아니라 그 지역에서 산출되는 광물들의 결정도 및 입도와도 관계된다. 따라서 우리나라의 해변에서 적용될 수 있는 최적의 비를 구하는 연구가 선행되어야 할 것이다. 그렇지 않은 경우 최소한 한가지 반정량법을 이용한 결과만이 상대적인 비교에 이용될 수 있을 것이며, 실제로 국내에서는 Biscaye법을 많이 사용하고 있다. 다른 문제는 비록 소량이나 일라이트로 판별되는 광물이 순수한 일라이트 ( $K < 0.7$  in half unit cell)가 아닌 영종도의 기반암인 운모편마암의 풍화쇄설물인 백운모를 포함한 경우도 있어 입도에 따른 정량화시 모두 일라이트로 해석하는데 문제가 있음을 보여준다 (Fig. 5).

### 점토광물의 분포 특성

측정된 초기대자율 값은 주로 자성광물의 종류와 입도에 따라 다양한 값을 나타낼 수 있는데, 본 연구에서도 입도변화분포 (Fig. 2 (b))와 연관지어 볼 때, 상부구간 (10 m 이하의 심도)과 20 m 심도에서 입도에 의한 영향을 받을 수 있었다. 최저점에서 입도에 대한 의존성을 일부 보여준다. 또한 전체 경향에서 벗어나는 상부구간의 두 번의 큰 이상치는 pH에서도 매우 산성임을 알 수 있다. 반면에 29 m 심도에서의 pH의 이상치는 대자율에

반영되지 않는바, 본 역의 대자율 값은 화산성퇴적물의 기원의 차로 기인된 것으로 사료된다. 이러한 사실은 다음의 현생퇴적물의 연구결과로부터 추정할 수 있다. Porter (1997)는 하와이의 후기 플라이스토세의 풍성퇴적층에서 사구퇴적물과 현세토양층 사이에 협재된 화산회 및 암설을 가지고 있는 층에서 높은 대자율을 나타내고 있음을 보고한 바 있다. 또한 pedogenesis에 의한 영향으로도 대자율 값은 증가할 수도 있으나 본 연구에서는 tidal plate에 퇴적된 퇴적물의 기원의 차이가 큰 영향을 미쳤을 것으로 사료된다.

이 시료들의 점토입도에서는 일라이트, 녹니석, 카올리나이트 및 스멕타이트가 심도에 따른 변화는 있지만 공통적인 구성광물로 함유된다. 일라이트는 가장 광범위하게 분포하는 운모점토광물로 풍화를 받는 동안 생성된 변질 산물보다는 주로 기원지에서 기계적으로 쇄설되어 형성된 1차 광물 (Hurley *et al.*, 1963; Griffin *et al.*, 1968)로 점토입도에 대한 정량분석결과 가장 우세한 광물종 (52.06%)임이 확인되었다. 또한 녹니석은 고위도 해역의 특징적인 점토광물로서 육상 퇴적암, 변성암 등의 물리적 풍화작용에 의해 주로 형성되는 1차광물이며, 영종도의 경우 일라이트 다음으로 우세한 광물종 (27.16%)이다. 반면, 카올리나이트는 강한 화학적 풍화작용을 받는 지역에서 토양 형성중에 생기는 1:1 유형의 점토광물로서 하부



풍화토에서는 가장 우세한 광물종이나 상부 퇴적층내에서는 녹니석 다음으로 산출량이 많은 점토광물종 (16.92%)이다. 스멕타이트는 주로 화산기원물질로부터 흔하게 생성되는 2차광물로 알려지고 있는데, 이 지역에서는 가장 적게 (3.86%) 산출된다.

### 퇴적물의 근원지 해석

한반도 주변 해역 퇴적물의 점토광물에 관한 기존의 연구는 주로 광물 조성 및 상대적 함량의 지역적인 분포양상으로 퇴적물의 근원지를 해석하는데 중점을 두었다. 따라서 본 연구에서는 영종도 조간대에서의 심도에 따른 점토광물의 산출상태와 시간에 따른 해양성 및 내륙성 쇄설성 퇴적물의 공급량의 차이를 알아보려고 하였다. 기존의 황해 영종도 인근지역 (YSDP)과 주요하천에서 Biscaye의 방법으로 얻어진 기존의 결과를 전체심도에 대한 평균값으로 구하여 종합해 보면 Table 4와 같다. 비교를 위해 한반도 주변 해역의 연구에 많이 사용되는 Biscaye 방법에 의해 점토광물의 조성을 살펴보면, 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트의 순으로 우세하게 분포한다. 또한 하천에서는 극소량으로 관찰되던 스멕타이트의 경우 영종도에서는 최대 10%이상 산출되는 것은 육상과 근접한 영종도의 경우 퇴적물의 상당 부분이 해양에 의한 퇴적물에 기원되었음을 지시한다.

그러나 연구된 주상시료의 산출심도는 곧 황해의 해침과 해퇴에 따른 해수면의 변동과 관련된 지질학적 시간과의 연계가 필요하다. 따라서 우선 전체심도에 대한 평균 함량으로 전체적인 특성을 알아보고, 함량비의 변화가 뚜렷한 구간별 특징을 살펴보고자 한다.

전체적 특징을 우선 살펴보면, 일반적으로 일라이트는 한반도 주변지역의 분포를 볼 때, 연안에서 외해로 나갈

수록 증가하는 경향을 보이는데 (Aoki *et al.*, 1974; Park *et al.*, 1976; Kim, 1980; Park, Han, 1985; Park *et al.*, 1986), 이는 기존의 일라이트의 기원에 관한 연구결과인 하천유입물의 조류나 해류에 의한 재부유 및 이동 (Chough, 1985; Park *et al.*, 1986), 중국대륙으로부터의 유입 (Hurley *et al.*, 1963), 동지나해의 점토광물이 쿠오시오 해류와 그 지류인 대마난류에 의해 한반도 주변으로 이동 (Park, Han, 1985) 등을 종합해 볼 때, 지역적으로 한강으로부터 유입되는 쇄설성퇴적물의 양도 적지않았음을 지시한다. 또한 최근 연구에서 (Chough, 1985; Khim, 1988) 황해 남동부에서의 높은 일라이트의 분포는 대마난류의 영향이라기보다 주로 한반도 서해안의 금강과 영산강으로부터 공급되어 연안류에 의해 연중 수송이 이루어진 결과로 해석된 바 있다.

기존의 연구결과, 녹니석의 경우, 육지 인접 지역에서 15% 이상으로 높은 함량을 보이거나 외해쪽으로 갈수록 점차 감소하며, 카올리나이트는 황해 중앙부에서 상대함량이 6~10%였던 것이 한반도 서남해안으로 접근함에 따라 점차 증가하는 경향을 보인다. 이러한 분포경향은 녹니석과 유사하고 일라이트와 대조적인 경향으로 카올리나이트도 인접한 육상에서 기원되었음을 지시한다. 본 연구에서 녹니석과 카올리나이트의 상대함량은 방법에 따라 큰 차이를 보이며, Biscaye의 방법으로 구한 경우, 하천입구에서 채취된 시료들에 비해 녹니석은 다소 낮게, 카올리나이트는 다소 높게 나타나며, 또한 우세광물종의 순서도 일라이트, 카올리나이트, 녹니석, 스멕타이트 순으로 바뀐다. 따라서 이는 녹니석과 카올리나이트의 주된 기원물질인 육상퇴적물의 차이에 의한 것으로 사료된다.

스멕타이트의 경우, 제3기말부터 제4기초까지 활발한 화산활동에 의해 형성된 제주도 인근 지역에서의 화산성 풍화산물로 산출되나, 한반도 주변 해역에서는 가장 소량

**Table 4.** Clay mineral contents of the surface sediments on Korean continental shelves, its adjacent sea and major rivers.

Site	Type	Smectite	Illite	Chlorite	Kaolinite	References
Han River	S	0.7	70	16.8	12.5	Park, Khim (1990)
Keum River	S	0.1	63.7	19.3	17	Choi (1981)
Yeongsan River	S	0.1	63.9	16.8	19.2	Kim (1980)
Seomjin River	S	0.1	45.7	26.5	30	Park, Khim (1990)
Nakdong River	S	0.1	58.6	18.8	22.5	Park, Khim (1990)
YSDP-102	C	6.28	65.16	15.01	13.55	Chang <i>et al.</i> (1996)
YSDP-103	C	6.63	64.45	14.71	14.21	Chang <i>et al.</i> (1996)
YSDP-104	C	8.75	62.81	15.39	13.05	Chang <i>et al.</i> (1996)
YSDP-105	C	9.79	64.23	13.34	12.62	Chang <i>et al.</i> (1996)
Y-IV-3 (Ahn's method)	C	3.86	52.06	27.16	16.92	This study
Y-IV-3 (Biscaye's method)	C	6.67	60.52	13.21	19.60	This study

\*Abbreviation: S; surface sediment, C; average value of sampled core sediments

으로 산출된다 (윤정수 등, 1992; Porter, 1997). 그러나 본 역에서 스멕타이트는 높은 대자율값을 보이는 구간에서 오히려 그 함량이 감소하므로, 스멕타이트의 기원을 인근 주변의 화산활동 결과와 함께 해양학적 요인, 즉 높은 스멕타이트 함량을 가지는 황해강과 고향하강으로부터 공급된 세립질 퇴적물의 영향이 큰 것으로 사료된다. 이는 황해의 경우, 황해중앙이토 (CYSM)는 일라이트 67%, 녹니석 12%, 카올리나이트 10%, 스멕타이트 13%의 평균함량을 보이는 반면, 서남해안의 황해남동부이토 (SEYSM)는 일라이트 70%, 녹니석 17%, 카올리나이트 13%, 스멕타이트 2% 미만의 함량을 보여 황해중앙이토가 중국근원으로서, 황해남동부이토가 한국근원임을 밝힌 Khim (1988)의 연구결과와 비교해 볼 때, 큰 해양기원 가능성을 지시해 준다.

또한 본 주상시료를 점토광물의 함량비로 볼때도 본 역의 퇴적물은 해양성퇴적물을 다량으로 가지고 있다는 것을 지시한다. 반면 육상까지의 근거리에 위치한 관계로 녹니석과 카올리나이트의 함량비도 높다. 또한 본 연구지와 인접한 YSDP-105공의 경우, 상부 퇴적물은 탄성과 탐사 결과 (장정해 등, 1996) 한강하구에서 발달되는 2개의 등성이 형태의 퇴적체와 매우 비슷한 음향상을 보여주는 데, 한강하구에서 발달하는 이러한 음향상의 퇴적체는 한강에서 유입되는 퇴적물이 조류의 영향을 강하게 받으면서 퇴적되어 형성된 조석우세델타 (tide-dominated delta)에서 형성되는 하나의 조석설형 퇴적체 (tidal tongue)으로 해석된 연구결과가 있다 (Min *et al.*, 1996). 따라서 본 영종도는 황해중부 퇴적물과 동일한 기원의 해양기원과 다량의 근거리 인접육상기원의 퇴적물이 유입된 특성을 띠고 있는 것으로 사료된다.

## 결 론

본 연구에 사용된 주상시료의 교란 및 불연속성에도 불구하고 색상 대비, pH, 대자율 분석결과 최소한 3개 이상의 퇴적단위로 나눌 수 있었다. 모래, 실트, 점토로 대부분 입도분리 결과 대부분의 구간에서 실트질이 우세하였다.

입도분리된 점토입도에 대해서는 X-선 회절분석결과를 이용, Ahn (1992)의 방법으로 정량분석을 실시하였으며, 그 결과 일라이트, 녹니석, 카올리나이트, 스멕타이트 순의 상대함량을 가지고 있음이 밝혀졌다. 원시료에 대해서는 Chung (1974a, b)의 방법을 이용하였으며, 각 구성광물의 함량변화를 비교해 보면, 석영, 미사장석, 정장석과 알바이트, 점토총량과는 부의 관계를 가진다.

또한 NEWMOD2 프로그램을 이용한 점토광물의 동정

결과 및 모래입도의 분리된 시료에 대한 X-선회절분석 결과, 원시료분석시 소량의 백운모도 혼합되어 있음을 알 수 있었으며, 이는 육상의 암상의 풍화퇴적산물임을 지시한다. 점토입도의 상대적 함량비를 보면, 육상기원물질로 알려진 카올리나이트와 녹니석의 경우, 황해 및 남해와 연결된 하천의 입구에서 채취된 표층퇴적물에 다소 못 미치며, 반면에 황해에서 채취된 주상시료의 스멕타이트 함량에 훨씬 못미친다.

이러한 결과들을 종합해 볼 때, 영종도 비고화퇴적물의 기원은 주로 근거리에 위치한 육상기원의 퇴적특성으로 해석할 수 있으며, 세립질 퇴적물 특히 스멕타이트의 함량으로 볼 때 해양적 요인 즉 중국으로부터 기원된 퇴적물의 해양을 통한 유입에 대한 영향을 받고 있는 것으로 해석된다.

## 사 사

본 연구는 과학재단 지원 전략광물자원연구센터의 연구비 보조로 이루어졌음을 밝히며, 이에 감사드립니다. 또한 이번 연구에 사용된 시료를 제공해주신 신공항건설공단 신승철씨와 본 논문을 검토해 주신 이운수, 김남수 박사님, 연구 초기에 인공위성 사진을 제공해 주신 연세대학교 지구시스템학과와 원종선 교수님께 감사드립니다.

## 참고문헌

- 김옥준 (1971) 남한의 신기 화강암류의 관입시기와 지각변동. 광산지질, 4권, p. 1-10.
- 김원형, 이형호 (1980) 낙동강 하구지역의 퇴적물운반 및 퇴적에 대한 고찰. 지질학회지, 16권, p. 180-188.
- 서규식, 박희인 (1985) 부평지역의 중생대 화성암류. 광산지질, 19권, p. 179-192.
- 윤정수, 김성복, 고기원 (1992) 제주도 서남해역의 해저 퇴적물의 특성 및 퇴적환경. 한국해양학회지, 24권, p. 132-147.
- 장정해, 이치원, 진재화, 김성필, 박영수, 신원철, 김원식, 김정기, 봉필윤, 이호영, 최성자, 박용안, 박수철, 윤혜수 (1996) 황해 제4기 지층 시추 프로그램 (YSDP-102, YSDP-103, YSDP-104, YSDP-105 시추코어 연구). 제1. 2차년도 최종보고서, KR-96 (T)-18, 한국자원연구소, 과학기술처, 595p.
- 최위찬, 김규봉, 최성자, 윤옥, 진명식 (1995a) 김포-인천도폭 지질조사보고서. 한국자원연구소, 34p.
- 최위찬, 김규봉, 홍승호, 이병주, 황재하, 박기화, 황상기, 최범영, 송교영, 진명식 (1995b) 한국지질도 (1:1,000,000), 한국자원연구소.
- Ahn, J.H. (1992) Application of an XRD-pattern calculation method to quantitative analysis of clay minerals. J. Miner. Soc. Korea, v. 5, p. 32-41.
- Ahn, J.H. and Peacor, D.R. (1985) Transmission electron microscopic study of diagenetic chlorite in Gulf Coast

- argillaceous sediments. *Clays Clay Miner.*, v. 33, p. 228-236.
- Ahn, J.H. and Peacor, D.R. (1986) Transmission and analytical electron microscopy of the smectite-to-illite transition. *Clays Clay Miner.*, v. 34, p. 165-179.
- Aoki, S., Oinuma, K. and Sudo, T. (1974) The distribution of clay minerals in the recent sediments of the Japan Sea. *Deep Sea. Res.*, v. 21, p. 299-310.
- 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.*, v. 76, p. 803-832.
- Bloom, A.L. and Park, Y.A. (1985) Holocene sea-level history and tectonic movements, Republic of Korea. *Quaternary Research (Daeyonki)*, v. 24, p. 77-84.
- Chamley, H. (1989) *Clay sedimentology*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, 620p.
- Chipera, S.J. and Bish, D.L. (1995) Multireflection RIR and intensity normalization for quantitative analyses: Applications to feldspars and zeolites. *Powder Diffraction*, v. 10, p. 47-55.
- Choi, J.H. (1981) Recent clay minerals in the Kunsan estuary and the adjacent continental shelf. M.S. thesis, Seoul National University, 52p.
- Chough, S.K. (1985) Further evidence of fine-grained sediment dispersal in the Southeastern Yellow Sea. *Sedimentary Geology*, v. 41, p. 159-172.
- Chung, F.H. (1974a) Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. I. Matrix flushing method for quantitative multicomponent analysis. *J. Appl. Cryst.*, v. 7, p. 519-525.
- Chung, F.H. (1974b) Quantitative interpretation of X-ray diffraction patterns of mixtures. II. Adiabatic principle of X-ray diffraction analysis of mixture. *J. Appl. Cryst.*, v. 7, p. 526-531.
- Edzwald, J.K. and O'Melia, C.R. (1975) Clay distribution in recent estuarine sediments. *Clays Clay Miner.*, v. 23, p. 39-44.
- Griffin, J.J., Windom, H., and Goldberg, E.D. (1968) The distribution of clay minerals in the world ocean. *Deep Sea Research*, v. 15, p. 433-459.
- Hume, T.M. and Nelson, S.C. (1986) Distribution and origin of clay minerals in surficial shelf sediments, Western North Island, New Zealand. *Marine Geology*, v. 69, p. 289-308.
- Hurley, P.M., Heezen, B.C., Pinson, W.H., and Fairbairn, H.W. (1963) K-Ar age values in pelagic shelf sediments of the North Atlantic. *Geochim. Cosmochim. Acta.*, v. 27, p. 393-399.
- Khim, B.K. (1988) Sedimentological study of the muddy deposits in the Yellow Sea. M.S. thesis, Seoul National University, 106p.
- Kim, D.C. (1980) Recent clay minerals of the Yeongsan estuary and the adjacent continental shelf. M.S. thesis, Seoul national University, 63p.
- Min, G.H., Lee, C.W., Park, S.C., and Shin, W.C. (1996) Seismic characteristics of the Holocene Han river delta. Korea-China international seminar on Holocene and late Pleistocene environments in the Yellow sea basin. p. 56-63 (abstract).
- Moore, D.M. and Reynolds, R.C., Jr. (1989) *X-ray diffraction and the identification and analysis of the clay minerals*. Oxford University Press.
- Naidu, A.S. and Mowatt, T.C. (1983) Sources and disposal patterns of clay minerals in surface sediments from the continental shelf areas of Alaska. *Geol. Soc. Am. Bull.*, v. 94, p. 841-854.
- Park, B.K., Han, S.J., and Lee, J.W. (1976) Clay mineralogy of bottom sediment in the Jinhae Bay, Korea. *Jour. Oceanogr. Soc. Jpn.*, v. 32, p. 219-227.
- Park, B.K. and Han, S.J. (1985) The distribution of clay minerals in recent sediments of the Korea Strait. *Sedimentary Geology*, v. 41, p. 173-184.
- Park, Y.A. and Khim, B.K. (1990) Clay minerals of the recent fine-grained sediments on the Korean continental shelves. *Continental Shelf Research*, v. 10, p. 1179-1191.
- Park, Y.A., Kim, S.C., and Choi, J.Y. (1986) The distribution and transport of fine-grained sediments on the inner continental shelf off the Keum River estuary, Korea. *Continental Shelf Research*, v. 5, p. 499-519.
- Porter, S.C. (1997) Late Pleistocene eolian sediments related to pyroclastic eruptions of mauna Kea Volcano, Hawaii. *Quaternary Research*, v. 47, p. 261-276.
- Sonneveld, E.J. and Visser, J.W. (1975) Automatic collection of powder data from photographs. *J. Appl. Cryst.*, v. 8, p. 1-7.