

Correlation analysis between Engineering properties and mineralogy of clay sediments in New Busan Port area of the estuary of the Nakdong River

¹⁾, Sonkap Lee, ²⁾, Jim-Yun Hwang,, ³⁾, Seong-Gyo Chung, ⁴⁾, Sung-Wook Kim,

1, 4) , Geo-Information Research Group Co., Ltd.

2) , Professor, Dept. of Geology, Busan National Univ.

3) , Professor, Dept. of Civil Engineering, Dong-A Univ

SYNOPSIS : Nakdong River Plain and its adjoining sea are unusually covered by very thick soft clay sediments which were called Pusan clays, sometimes reaching 40-70m. Since early 1990s a large number of geotechnical investigations have been carried out for land reclamation works in the area, including Busan city and its neighboring cities. Nevertheless, geotechnical engineers have paid little attention to studying geological characteristics on the clays, except some researches related to mineralogy, geo-chemistry, benthic foraminiferal fauna etc. The purpose of reserach is the knowledge of the correlation between engineering properties and mineralogy of clay sediments. The correlation analysis carry out multiple regression that have independent variables (Engineering properties) and dependent variables (mineralogy, geochemistry). Engineering properties of clay are correlated with the mineral compositions and geochemical characteristics. The result of the analysis is $W_n = -0.6F_{\text{eldspar}} + 1.1pH + 0.01TDS + 27.5$, $I_p = 0.36Clay + 1.44Vermiculite + 0.94clay\ mineral - 22.88$, $PL = 0.005TDS - 0.31F_{\text{eldspar}} + 22.43$, $eo = 0.02Vermiculite - 0.01Quartz + TDS + 0.93$, $vt = 0.009Quartz - 0.06Conductivity + 1.67$, $E_{50} = 1.94Vermiculite - 0.96Kaolinite - 0.53silt + 49.64$, $SR = -0.25Kaolinite + 1.5pH - 2.3Conductivity$, $C_c = 0.03pH + TDS - 0.2$, $LL = 0.5Clay + 1.3Vermiculite + 5.5Conductivity + 0.8Caly\ mineral - 20.48$

Key words : soft clay sediments, engineering properties, mineralogy of clay sediments, multiple regression, geochemical characteristics.

1. 서 론

연구지역은 낙동강 하구에 해당하며 녹산국가공단 및 부산 신항만을 조성하기 위한 건설공사가 시행된 지역이다. 지층은 상부로부터 최대 70여m까지 쇄설성의 미고결 퇴적물이 분포하며, 퇴적물 중 점토의 구성비가 대단히 높아 연약지반에 해당한다 (그림 1).

낙동강 하구 퇴적층은 육지로부터 공급되는 담수의 영향과 함께 지난 수 천년에 걸쳐 상승한 해수의 영향(조화룡, 1987)을 동시에 기록된 지층으로 이러한 지층에 대한 광물학적, 지화학적인 연구는 퇴적환경의 변화를 이해하는 자료로 활용되며, 한편으로 미고결 퇴적층에서 관찰되는 상이한 공학적 특성을 해석하는 중요한 정보를 제공할 수 있다.

해양퇴적물에 대한 연구는 토질공학적인 연구에 집중되었으며, 점토층의 형성에 대한 근본적인 연구가 이루어져야 할 것으로 인식되고 있다. 최근들어 점토퇴적물의 광물학과 지화학적인 요소와 결부된 연구가 활발히 이루어지고 있다(이선갑 외, 2003, Ohtsubo et al, 1995, Ohtsubo et al, 1991).

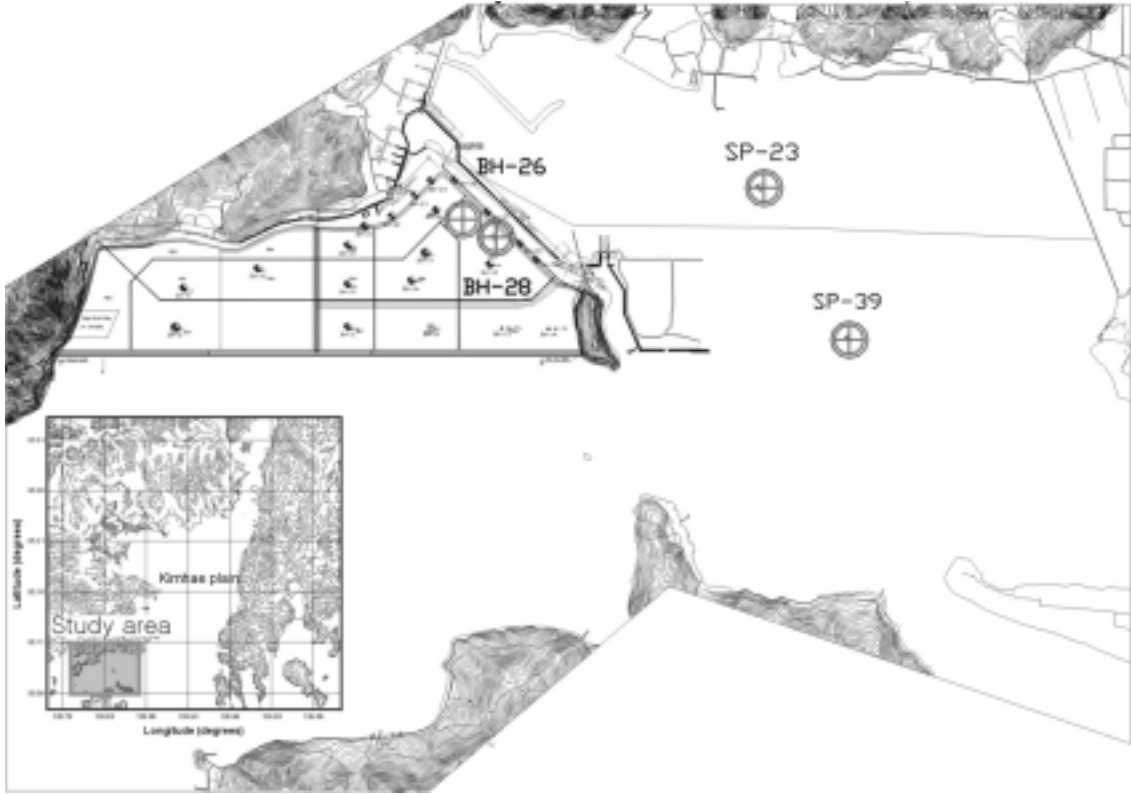


그림 1. 연구지역의 위치

2. 연구방법

낙동강 하구 조간대에 속하는 지역의 연구를 위해 녹산국가공단조성지역과 부산신항만조성지역을 선별 각각 시험을 실시하였다. 녹산국가공단조성지역에서 2개의 시추코아 (Sp-23, Sp-39)에서 2m 간격으로 29개의 시료를 채취하였고, 부산신항만조성지역에서 2개의 시추코아 (BH-26, BH-28)에서 2m 간격으로 52개의 시료를 채취하였다 (그림 2).

해안 조간대 퇴적물에 대한 광물학, 지구화학 및 토질 공학적인 분석을 실시하였다. 퇴적물의 주구성 광물과 점토광물 함량, 그리고 지화학적 특징을 규명하기 위해 X-선 회절분석(XRD)과 현탁액의 pH와 염류량 측정, 시추코아에 대한 전기비저항과 대자율 측정, 유기물 함량을 측정하였다. 동일한 시료를 대상으로 비중, 입도, 함수비, 연경도, 압밀지수, 압축강도와 같은 물성 및 역학시험을 실시하였다. 이와 같이 수행된 실험 결과의 상관성 분석은 지구통계학적인 방법을 이용하여 분석하였다.

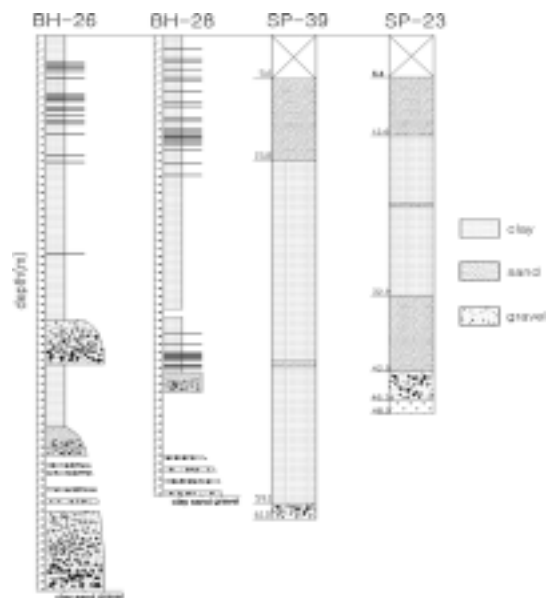
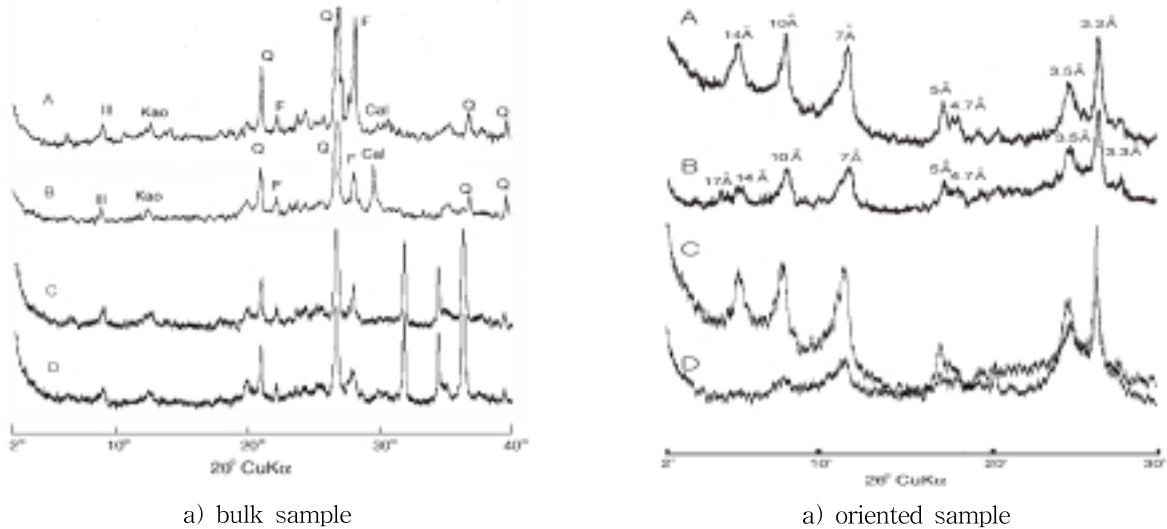


그림 2. 시추공의 주상도

3. 연구결과

낙동강 하구 조간대의 점토 퇴적물에 대한 X-선 회절분석 결과, 분말시료에서는 결정광물로 석영과 장석 및 방해석으로 구성되며, 점토광물은 일라이트와 카올린으로 구성된다. 또한 정방위시료에 대한 점토광물은 일라이트, 카올린, 녹니석, 질석으로 구성된다 (그림 3).



III : 일라이트, Kao : 카올린, Q : 석영, F : 장석, Cal : 방해석

a) A:Sp-39, 13.8m, B:Sp-39, 31.8m, C:BH-26, 13.5m, D:BH-26, 31.5m

b) A:Sp-39, 13.8m non treated, B:Sp-39, 13.8m treated ethelen-glicol, C:BH-26, 13.5m non treated, D:BH-26, 13.5m treated ethelen-glicol

그림 3. 점토 퇴적물의 X-선회절분석 결과

연구지역 점토 퇴적물의 광물조성은 표 1과 같다. 녹산지역과 신항배후부지 조성지역의 광물함량은 비슷한 함량분포를 보이며, 녹산지역의 경우 점토광물의 함량이 다소 높고 상대적으로 석영 및 장석의 광물 구성비가 낮게 나타난다. 녹산공단지역의 점토광물들의 구성비는 일라이트 17~40%, 카올리나이트 7~27%, 녹니석 3~27%, 질석 0.1~20%의 범위로 함유되어 있으며, 신항배후부지 조성지역은 일라이트 13~45%, 카올리나이트 5~21%, 녹니석 3~24%, 질석 0.5~12%의 범위로 함유한다. 이러한 점토광물의 함유율은 구성광물의 주 공급원인 낙동강과 연관이 있을 것으로 생각된다.

표 1. 점토퇴적물의 광물조성

조사지역	구성광물	점토광물	석영	장석	방해석
녹산공단지역	구성비	48~76%	12~28%	7~25%	3% 이하
부산신항조성지역		18~80%	12~51%	3~40%	6% 이하

낙동강 하구 조간대의 물리·화학적특성은 표 2과 같다. 두 지역의 화학적 특성은 유사한 범위를 나타내며, 녹산지역의 경우 강산성의 산도를 보이는 구간이 분포하는 특성을 나타낸다. 이는 퇴적환경의 변화에 의한 것으로 판단된다. pH는 녹산은 3~9의 범위로, 부산신항은 6~9의 범위로 분포한다. 전기전도도는 녹산에서는 1.5~4.2 mv, 부산신항에서는 0.6~3.8 mv의 범위를 보였으며, 유기물함량은 1~11%의 함량을 나타냈다(그림 5).

광물조성과 지화학분석 자료에 의한 조간대 퇴적물의 특성은 심도 30~40m 상하로 변화가 인지되고 있다. 점토광물의 함량과 pH, 전기전도도는 30m 이하에서 하부로 갈수록 감소되어가고, kaolinite는 심

도가 증가함에 따라 차차 감소하는 특성을 나타낸다. 이러한 심도 30~40m 사이 구간을 경계로 그 특성이 차이가 나고 다른 변화를 보이는 것은 퇴적물의 주 공급원인 낙동강과 더불어 최후빙하기를 경계로 해수면의 하강과 상승과 관련된 본 조사지역의 퇴적환경변화에 그 원인을 찾아야 할 것이다.

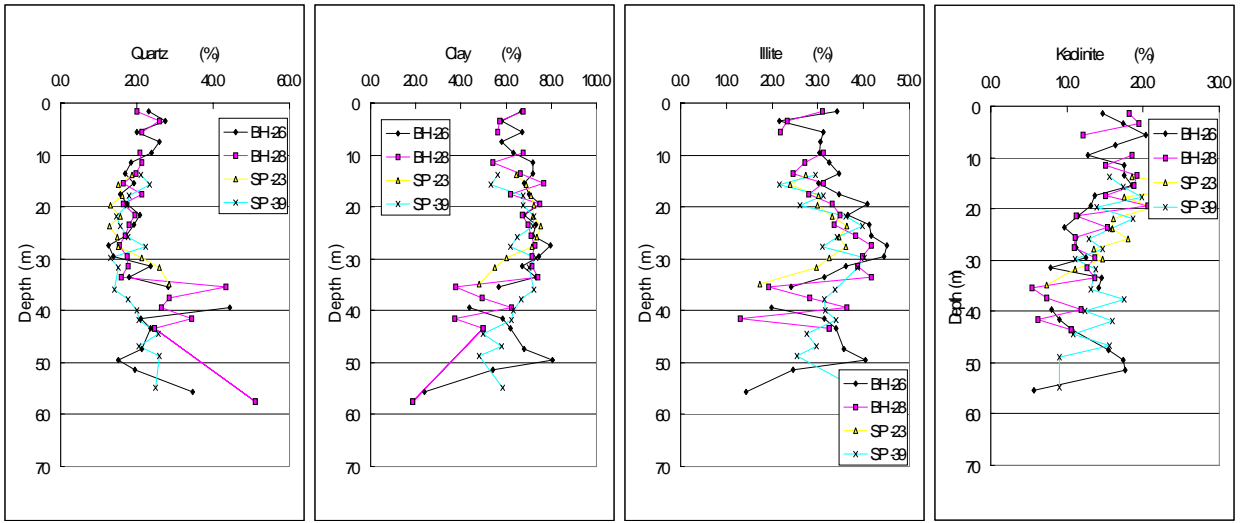


그림 4. 점토 퇴적물의 광물분석

표 2. 점토퇴적물의 물리·화학특성

조사지역	구성광물	pH	전기전도도(mv)	유기물함량	대사율
낙산국가조상단지	구성비	3.4~9.0	1.5~4.2	-	-
부산신항만조상단지		6.3~9.2	0.6~3.8	1~11%	0.1~1.5

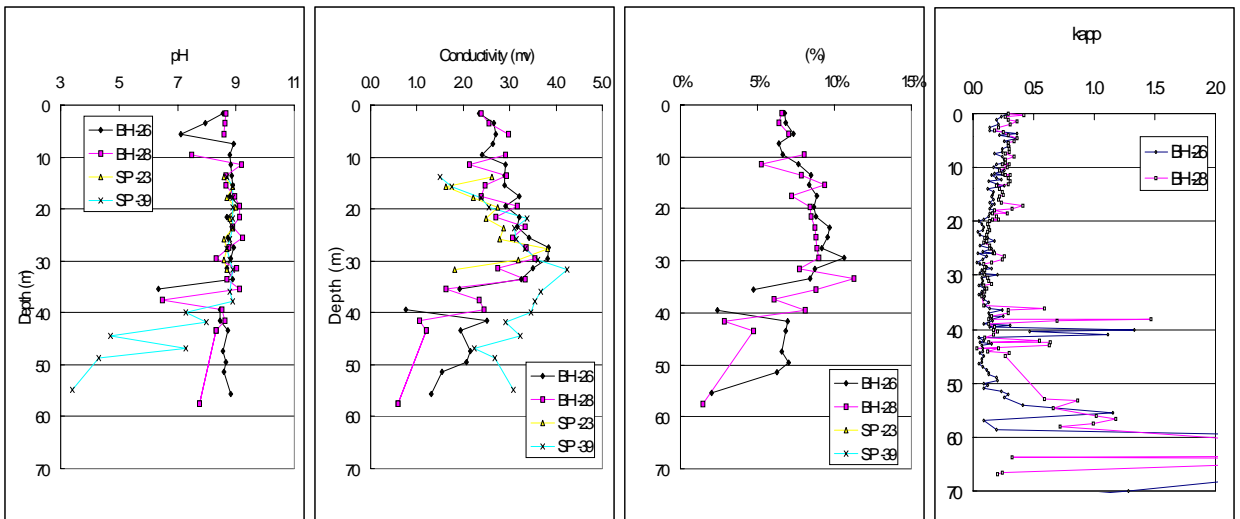


그림 5. 점토 퇴적물의 물리·화학적 특성

이러한 변화를 보이는 연구지역내의 점토퇴적물에 대해 토질시험을 함께 병행하여 실시하였는데, 그 결과는 그림 6과 그림 7에서 잘 보여주고 있다. 자연함수비, 액성한계 및 소성지수의 심도별 변화가 상

기 조사된 광물, 화학적 자료와 잘 대비되는 변화를 보인다(그림 6).

입도분포별 심도별 변화를 관찰하면, 30~40m를 경계로 하여 그 특성 및 변화가 달라진다. 포화도 및 압축지수의 경우도 역시 비슷한 양상을 나타낸다. 각 토질시험값은 점토층에 해당하는 10~40m에서 높은 값을 띠며, 30~40m를 정점으로 상승하다가 감소하는 특성을 나타낸다.(그림 6, 7). 이러한 지질함수와 토질함수간의 관계는 유사한 심도별 변화를 보이며, 두 함수간의 상관관계를 좀더 자세히 알기 위해 단순회귀분석을 실시하였다.

단순회귀분석은 가장 대표적인 자료만을 도시하였으며, 이는 단순회귀분석을 통해 그 결과를 평가하기에는 두 함수간의 관계가 좀더 복합적인 역할을 할 것이기 때문이다. 실제로 단순회귀분석 결과, 그림 8과 같은 결과를 제외하고는 분산된 상관관계를 나타낸다. 습윤단위중량과 석영, 간극비와 TDS(총용존고형물질)과는 정의 관계를 띠며, 자연함수비와 장석, 액성한계와 석영은 부의 관계가 있다(그림 8). 이러한 단순상관분석을 더 확대하여 두 함수간의 상관관계를 자세히 살펴보기 위해 다중회귀분석을 실시하였다.

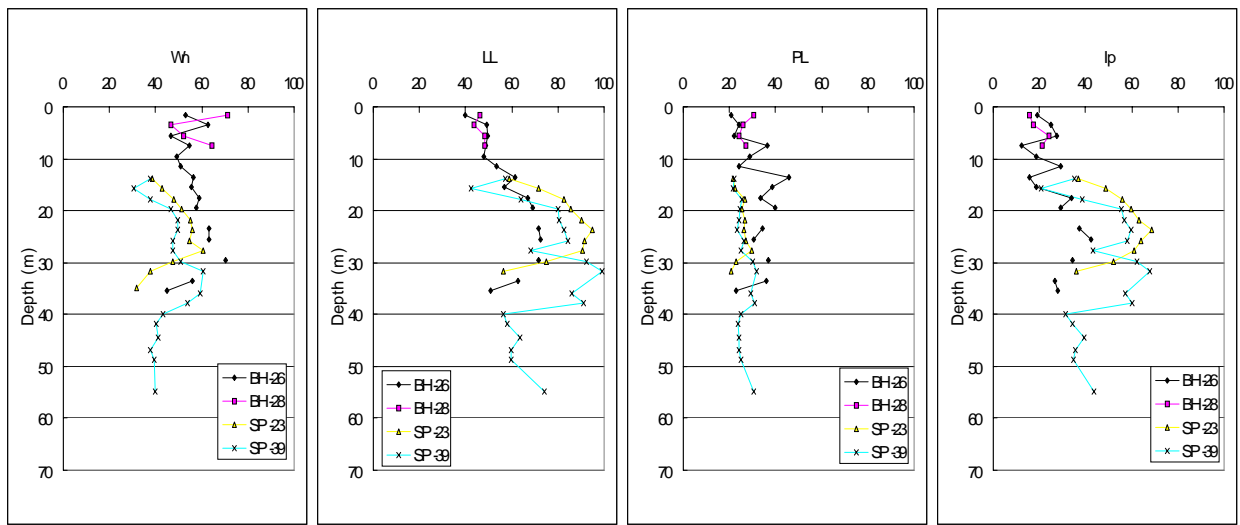


그림 6. 점토 퇴적물의 자연함수비, 액·소성한계 및 소성지수

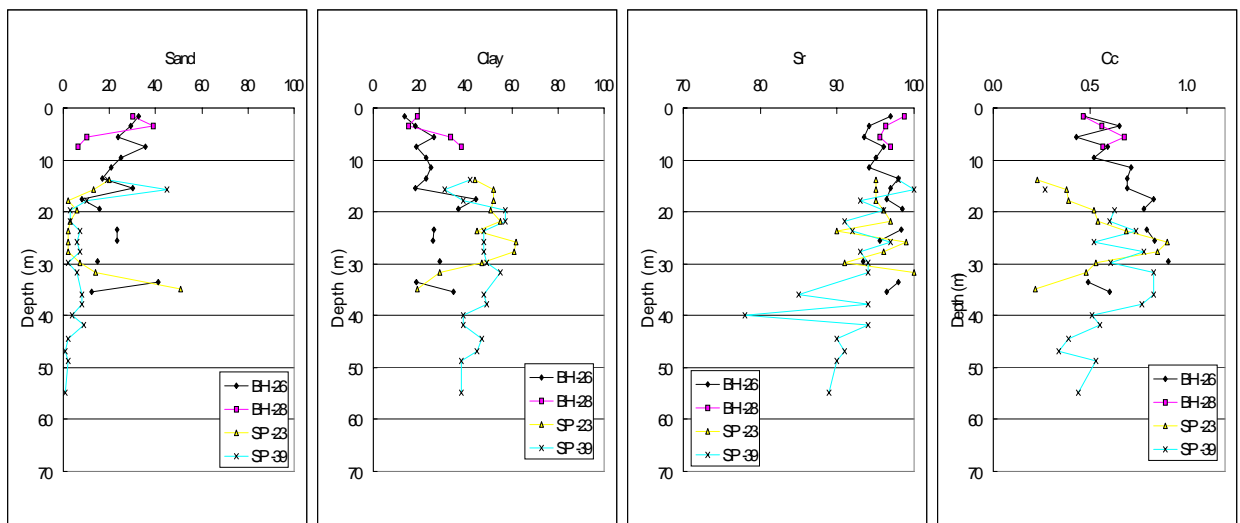


그림 7. 점토 퇴적물의 압축지수, 함수비, 액성한계 및 소성지수

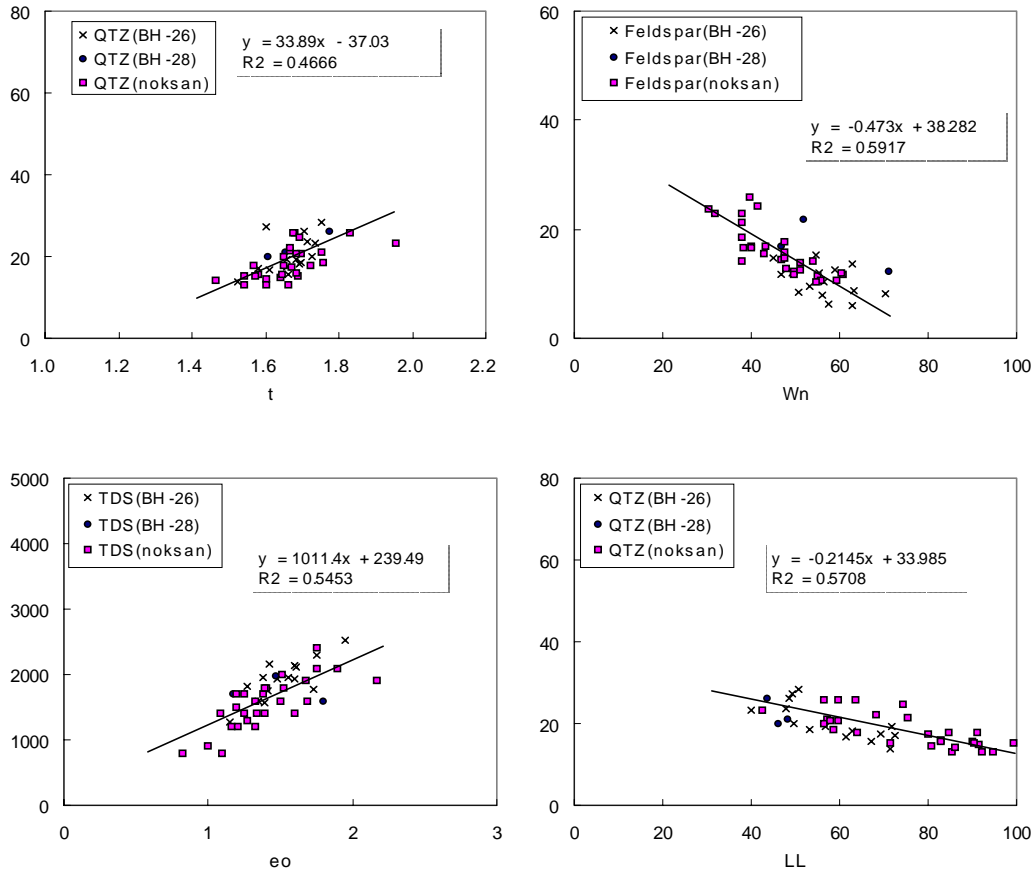


그림 8. 점토 퇴적물의 지질함수와 토질함수간의 단순회귀분석 결과

표 3. 다중회귀분석을 통한 통계분석 결과

종속함수	독립함수	F-value
습윤단위중량(γ_t)	0.009 석영 - 0.06 전기전도도 + 1.67	31.16
자연함수비(W_n)	-0.6 장석 + 1.1 pH + 0.01 TDS + 27.50	59.73
간극비(ϵ_0)	-0.01 석영 + 0.02 질석 + TDS + 0.93	41.81
압축지수(C_c)	0.03 pH + TDS - 0.2	44.68
소성지수(I_p)	0.36 점토광물 + 1.44 질석 + 0.94 점토 - 22.88	71.60
액성한계(L_L)	0.5 점토광물 + 1.3 질석 + 5.5 전기전도도 + 0.8 점토 - 20.48	59.95

다중회귀분석 결과는 표 3과 같은 식을 산출하였다. 위의 관계식은 토질함수값이 단순한 값이 아니라 복합적인 지질함수값을 내포하고 있음을 알 수 있다. 이러한 상기식 중 Ohtsubo et al.(1995)에 의한 Ariake 만의 해양퇴적물에 대한 결과와 비교하여 액성한계가 유사하게 나타났다. 습윤단위중량은 석영이 증가하고 전기전도도가 감소할수록 값이 커진다. 이는 일반 결정광물이 많을수록 단위중량은 높아질 것이며, 점토광물의 양이 많아지면 점토광물표면에 음이온을 띠는 특성으로 인해 전기전도도가 높아지

기 때문이다. 자연함수비 및 압축지수는 pH와 TDS가 높을수록 커진다는 것을 나타내며, 이는 알카리성의 해수에서의 점토광물의 침전이 가속화되는 특징에 기인한다. 토질정수값들은 광물 및 화학적인 값들과 좋은 상관관계가 있으며, 입도분포, 총용존 고형물질(TDS) 등의 값들과도 상관관계를 가진다.

4. 토의 및 결론

낙동강 하구 조간대 퇴적물을 이루는 점토퇴적물 특성은 구성하는 광물과 화학적 특성, 입자들간의 관계 등 지질적인 요소에 의해 좌우되며, 이러한 특성은 토질공학적인 특성으로 반영된다. 점토퇴적물의 지질함수와 토질함수의 특성은 퇴적환경에 좌우되어 그 특성을 달리 할 것이다. 따라서 지질학적인 퇴적환경에 대한 해석은 토질 공학적 특성을 근본적으로 이해하는 수단이 될 수 있다. 퇴적환경의 이해가 된 후 토질적 특성을 대변하는 지질학적 함수와의 관계를 상관지어 볼 수 있다.

이 연구는 낙동강 하구 조간대에 해당하는 녹산국가공단과 신항만 건설 부지내 분포하는 조간대 퇴적층에서 심도별로 시료를 채취하고 각 시료의 광물조성과 화학적 특성을 분석하여 공학적인 토질특성과 대비하기 위해 실시되었다. 광물감정과 지화학적인 특성의 상이성을 근거로 할 때, 퇴적층의 형성은 상부 (0~30m), 중부(30~40m), 하부 (40m 이하)구간으로 구분된다. 심도에 따라 서로 다른 광물조성은 퇴적 당시 환경의 변화와 속성작용과 같이 퇴적 후 지층형성과정의 차이에 기인되는 것으로 되는 것으로 낙동강 하구 조간대 퇴적층이 형성되는 동안 퇴적환경의 변화가 수반되었음을 알 수 있다.

퇴적환경에 대한 선행연구와 연구자료를 종합하면 심도 40m를 전후로 하여 퇴적환경에 급격한 변화가 있었으며, 하부 구간 (40m 이하)의 지층은 해침 이전 하성퇴적층으로 판단되며, 상부 및 중부 구간 (0~40m)의 지층은 해침 기간동안 형성된 퇴적층에 해당한다. 약 3,000~4,000년 전 사이에 해퇴와 해침이 반복되었던 것으로 알려진 연구 (조화룡, 1987)와 부합하며, 한편 일본의 해수면 변동의 시기와의 일치한다 (Tooly et al., 1987). 즉 최상부구간 (지표면~15m)의 지층은 비교적 짧은 기간 동안 해퇴와 해침이 반복되어 염수와 담수의 영향이 공존하는 퇴적환경의 형성된 것으로 이해될 수 있다.

한반도 근해 해저퇴적물에서 조사된 점토광물함량 (박수철, 1989; 1993; Park et al., 1990; 문지원, 1997; Khim, 1988; 박용안 등, 1992; 박정기 등, 1991; Windom, 1976).과 이 연구의 결과를 비교하면 동남해 일원의 자료로 유사하다. 카올린과 녹니석의 높은 구성비는 지층 구성물이 낙동강에서 유입된 쇄설성 퇴적물로 이루어졌음을 의미한다.

지질함수와 토질함수간의 단순회귀분석에서 광물조성과 토질공학적 특성 사이에는 상관관계가 있는 것으로 나타났으나, 이러한 토질정수 값은 입도분포, 지질 및 화학적 값의 복합적 함수이므로 다중회귀분석으로 실시하였다. 분석결과 토질정수는 광물, 입도분포특성, TDS 및 pH 등 복합적으로 관계되어지는 것으로 나타난다. 이러한 분석은 철산화물 및 교환성양이온과 같은 화학성분의 특성과 비표면적 특성 및 동위원소를 통한 연대분석 등 보다 심도 깊은 연구가 더 진행되어야 할 것이다. 이러한 연구는 지질환경의 변화와 지질공학적인 특성을 더욱 상세히 밝혀 줄 것이라 생각된다.

5. 참고문헌

1. 문지원, 문희수, 송윤구, 이규호(1997), "영종도 미고화 퇴적물의 점토광물 조성 및 기원에 관한 연구", 자원환경지질, 제 30권, 6호, pp.531-541.
2. 박수철(1989), "한국 연근해역 퇴적속도 연구", 한국과학재단, pp.52.
3. 박용안, 조성권, 박수철, 이창복(1992), "천해저(한국주변)의 광물자원과 심해저(태평양) 광물 자원에 관한 지질학적, 지화학적 및 탄성과 층서 연구", 한국과학재단, pp.377.
4. 박정기, 오재경(1991), "한강하구 및 경기만에서의 점토광물에 대한 연구", 한국해양학회지, 제 26권, 4호, pp.313-323.
5. 이선갑, 김성욱, 황진연, 정성교(2003), "녹산국가공단지역 점토 퇴적물의 광물조성과 토질공학적 특성" 한국지구과학회 2003년도 춘계학술발표회 논문집, p. 45-50.

6. 조화룡(1987), "한국의 층적평야", 교학연구사, pp.9-14, 31-39, 69-75, 102-105.
7. Khim, B.K.(1988), "Sedimentological study of the muddy deposits in the Yellow Sea", M.S. thesis, Seoul National University, pp.106.
8. Ohtsubo, M., Egashira, K. and Kashima, K., 1995, Depositional and post-depositiona geochemistry and its correlation with the geotechnical promerties of marine clays in Ariaka Bay, Japan, Geotechnique, Vol. 45, No. 3, p.509-423.
9. Ohtsubo, M., Yoshimura, A., Wada, S. and Young, R.N., 1991, Particle interaction and rheology of illite-iron oxide complex, Clays Clay Miner., Vol. 39, p.347-354.
10. 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, pp.1179-1191.
11. Tooly, M.J. and Shennan, S., 1987, Sea-level Changes, The institute of British Geographers, Special Publication Series, p.182-224.
12. Windom H.L.(1976), "Lithogenous material in marine sediments", Chemical oceanography, Academic press, pp.103-135.