

1. 서론

최근 에너지 위기에 따라 에너지 자원 개발을 위하여 많은 해저 자원 탐사가 시행되고 있으며 이에 따라 해저 심해토의 특성 분석을 위한 연구 역시 다양하게 진행되고 있다. 해저 지반의 특성은 기후, 화산 활동 등을 포함하는 퇴적 환경 및 생물학적 환경에 영향을 받는다. 현재까지 이러한 해저 지반의 토질 공학적 특성은 해저 자원 탐사, 해안 개발 및 해저 사면 파괴 등으로 인한 재해 위험 평가를 위해 연구되고 있다(Keller 1982; Baraza et al. 1992; Buchan and Smith 1999; Lee and Baraza 1999; Grupe et al. 2001).

국내의 경우 70년대 후반부터 석유 탐사의 일환으로 동해 지역의 해저 지반 탐사가 시작되었다. 또한 90년대 들어 천연가스의 발견과 가스 하이드레이트 매장 가능성 탐사로 동해 해저 지반 탐사가 가속화되고 있다. 기존의 울릉 분지에 대한 연구는 층서, 퇴적 환경, 화학 조성, 그리고 미생물 특성 등의 연구가 진행되었다(Lee et al. 1993; Hillier et al. 1996; Lee et al. 1996; Bahk et al. 2000; Kim and Kim 2001; Lee and Kim 2002; Park et al. 2003; Ryu et al. 2005; Cha et al. 2007; Park et al. 2007). 그러나, 울릉 분지 해저 심해토의 지반공학적 관점의 연구는 미약하였다.

본 연구에서는 2007년 동해 울릉분지에서 수행된 가스하이드레이트 심부시추사업(Ulleung Basin Gas Hydrate Expedition 1)에서 획득된 압력 코어 중 감압 실험 후 압력보존 용기에서 회수된 4개의 시료를 이용하여 광물학적 특성, 화학 조성, 그리고 미세구조를 파악하였다. 또한 다양한 기본 토질 특성, 압밀 특성, 강도특성을 분석하여 기존의 결과와 비교하였다. XRD 및 SEM을 통하여 점토 광물 및 미세 구조 파악을 실시하였으며, 압밀실험과 병행하여 수직응력에 따른 전단파 속도 V_s , 전기비저항 ζ , 유전율 κ^* 을 측정하였다. 또한 직접전단실험을 통하여 강도 특성을 분석하였다.

2. 동해 및 울릉 분지

동해는 반폐쇄형 바다로 좁고 깊은 4개의 해협을 통해 태평양, 오호츠크해, 그리고 동중국해와 연결되어 있다. 쿠로시오 난류의 지류인 쓰시마 난류가 대한 해협을 통해 동해로 유입되며, 러시아와 북한의 동쪽 해면을 따라 리마 해류의 지류인 북한 한류가 동해로 유입된다. 따라

서 동해는 난류 및 한류의 복잡한 흐름과 심층수의 수직적 순환이 일어나는 독특한 해류 흐름을 가지고 있다.

동해는 Japan 분지, Yamato 분지, 울릉 분지 등 3개의 분지를 포함하고 있다. 이중 울릉 분지는 사발형태의 back-arc 분지로 서쪽으로는 한국 반도와 북쪽으로는 한국 대지(Korea Plateau)와 접해 있으며, 동쪽과 남쪽은 각각 Yamato Ridge와 Oki Bank로 연결되어 있다(그림 1). 울릉 분지는 심층수의 심해 통로인 울릉 Interplain Gap으로 Japan분지와 연결된다.

태백산맥의 지형적 영향으로 인하여 동해로 흘러들어가는 주요 하천이 없어 울릉 분지의 생성은 대륙붕 및 사면 파괴에 인한 침전물의 유입, 해류를 통한 부유물의 유입, 그리고 소하천을 통한 육성 물질의 유입 등으로 추정된다(Chough et al. 1985; Kwon and Bark 2008).

3. 기본 토질 특성

표 1에 시료의 획득 깊이, 코어 길이, 그리고 실험 방법을 포함한 대표적 실험 결과를 요약하였다.

3.1 비중 G_s

흙의 비중은 동일한 부피의 물 무게에 대한 흙 입자의 무게 비로써 물질의 구성 성분에 매우 의존적이다. ASTM D854에 의해 구한 시료의 비중은 2.57~2.64로 선행 연구에 의해 보고된 울릉 분지 심해토의 비중 2.56~2.61과 비슷한 결과를 보였다(Lee et al. 1993). 대표적

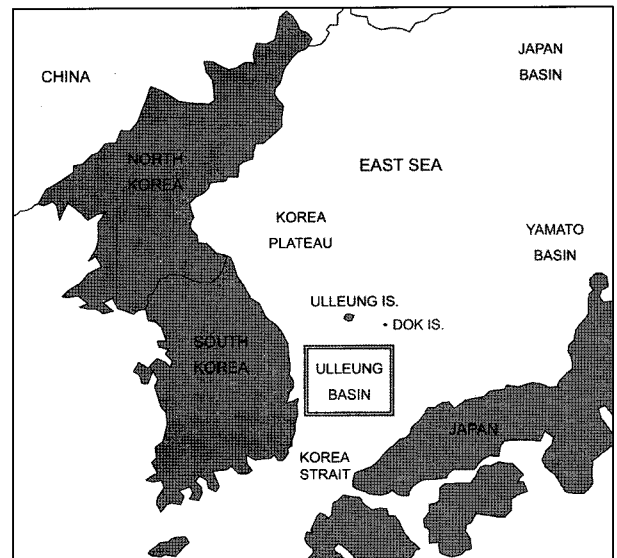


그림 1. 울릉분지

표 1. 울릉 분지 심해토의 획득 깊이, 특성 및 실험법

Properties	Pressure Core ID				Device/Technique
	9C-7R	10B-12P	10B-14R	10B-17P	
Water depth* [m]	2102	2080	2080	2080	
Core depth* [mbsf]	96	108	118	136	
Core length* [cm]	96.5	28	96.3	82.2	
Specific gravity, G_s	2.59	2.61	2.64	2.57	ASTM D854
Specific surface, S_a [m^2/g]	20.9	26.7	31.5	30.9	N_2 adsorption
pH	-	-	7.5	8.5	Non-bleeding pH strip (± 0.25)
Clay fraction [%]	32.5	18.5	38.0	12.1	Less than $2 \mu m$
Silt fraction [%]	67.5	81.5	62	87.9	$2 \sim 74 \mu m$
Liquid limit [%]	89.7	78.3	66.9	115.0	ASTM D4318-05
Plastic limit [%]	52.4	40.4	33.8	64.9	
D_{50} [μm]	2.279	2.759	2.281	3.041	Dynamic light scattering (UPA-150)
Unified soil classification	OH or MH	OH or MH	OH or MH	OH or MH	

* From published field report of Ulleung Basin Gas Hydrate Expedition 1

diatomaceous 점토인 아리아케 점토(Ariake clay)의 경우 $G_s=2.60 \sim 2.66$ 으로 울릉 분지 시료보다 약간 큰 값을 가진다(Shiwakoti et al. 2002).

3.2 비표면적 S_a

흙의 비표면적은 입자 무계에 따른 표면적의 비로 정의된다. 비표면적을 구하기 위한 방법으로는 가스 흡착법, 용해제의 분자 흡착법, 그리고 입자 크기 및 공극 크기를 이용한 계산법 등이 있다. 측정 방법에 따라 얻어진 비표면적은 서로 다르며 일반적으로 대표적인 용해제의 분자 흡착법인 methylene blue 방법에 의해 구해진 비표면적이 가장 큰 값을 가지는 것으로 알려져 있다(Santamarina et al. 2001). $70^\circ C$ 에서 시료를 오븐 건조한 후, 질소 가스 흡착법으로 비표면적을 측정하였다(Micromeritics Inc., ASAP 2010). 측정된 비표면적은 시료에 따라 $20.9 \sim 31.5 m^2/g$ 의 범위를 보였다.

비표면적은 점토 광물 분석의 지표로 사용된다. 순수 Diatom의 경우 $S_a=10 \sim 20 m^2/g$ (Locat and Tanaka 2001), 카오리나이트의 경우 $S_a=10 \sim 20 m^2/g$, 그리고 일라이트의 경우 $S_a=80 \sim 100 m^2/g$ 정도의 범위를 가진다(Santamarina et al. 2001; Mitchell and Soga 2005). 대표적인 하이드레이트 bearing sediment인 멕시코만 심해토의 경우 $62 \sim 143 m^2/g$ (Yun et al. 2006) 그리고 인도양 심해토는 $S_a=87 \sim 94 m^2/g$ (Yun et al. 2008a)로 비표면적에 의한 점토 광물은 일라이트 및 몬모릴로라이트로 보고되었다(methylene blue 방법). 또한 상당한 양의 diatom을 포함하고 있는 것으로 알

려진 오사카만 점토(Osaka Bay clay)의 methylene blue 방법으로 구한 비표면적은 $83 \sim 201 m^2/g$ 로 보고되었으며, XRD에 의한 점토 광물은 스멕타이트(smectite), 크로라이트, 그리고 일라이트로 보고되었다(Tanaka and Locat 1999).

3.3 입도분포

입도분석을 위하여 dynamic light scattering 방법(Microtrac, UPA-150 particle size analyzer)을 이용하였다. 미세 입자의 응집을 방지하기 위하여, 분산제로 헥사메타인산 나트륨($NaPO_3$)₆을 $40 g/l$ 의 농도로 사용하였다. 대표적인 하이드레이트 bearing sediment의 입도분포곡선과 울릉 분지 시료의 입도분포곡선을 그림 2에 나타내었다. 울릉 분지 시료는 다른 심해 퇴적물에 비해 균등하며,

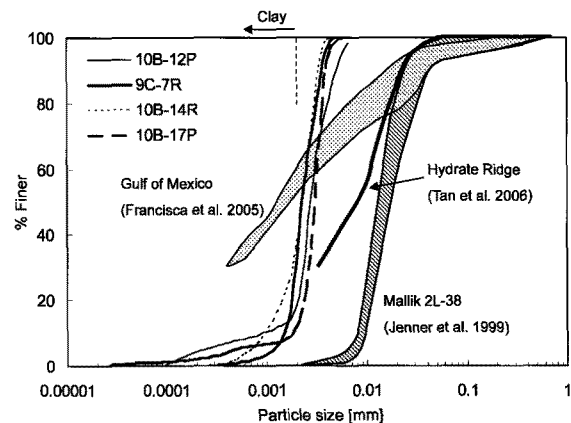


그림 2. 대표적 하이드레이트 bearing sediments 및 울릉 분지 심해토의 입도분포곡선

평균입경 $D_{50}=2.279\sim 3.041\mu\text{m}$ 의 범위를 보였다. 선행 연구에 따른 울릉 분지 지역 시료의 평균 입경은 $1.59\sim 2.41\mu\text{m}$ (Lee et al. 1993) 그리고 $1.70\sim 3.91\mu\text{m}$ (Kim and Kim 2001)로 유사한 범위의 평균입경을 보고하였다.

입도분포로부터 추정한 점토 및 실트 함유량을 표 1에 나타내었다. 10B-12P 및 10B-17P 두 시료는 낮은 점토 함유량(12.1~18.5%)을, 9C-7R 및 10B-14R의 두 시료는 상대적으로 높은 점토 함유량(32.5~38.0%)을 보인다. 실트 함유량의 경우 62.0~87.9%로 선행 연구와 비교하여 약간 높은 값을 보인다(15.5~32.9% - Lee et al. 1993; 25.2~

41.0% - Kim and Kim 2001). 멕시코만과 아리아케(Ariake) 지역의 시료는 ~50%의 점토 함유량을 보였으며(Tanaka et al. 2001; Francisca et al. 2005), 오사카만 점토는 19~46%의 점토함유량이 보고되었다(Tanaka and Locat 1999).

3.4 Atterberg Limit

액성한계 및 소성한계는 흙의 분류에 사용되며, 비표면적, 점토 광물, 그리고 간극수에 따른 흙 구조에 영향을 받는다. 울릉 분지 심해토의 액성한계는 67~115%, 소성한계는 34~65%의 범위를 보였다. 액소성한계로 추정된 점토 광물은 일라이트, 카오리나이트, 그리고 크로라이트로 예상된다(Mitchell and Soga 2005). 소성지수와 액성한계의 관계를 그림 3과 같이 소성도표에 도시하였다. 그림 3과 같이 모든 시료의 소성지수는 A-line 아래에 위치하며 선행 연구(Lee et al. 1993)와 동일하게 OH(organic clay of medium to high plasticity) 또는 MH(diatomaceous silty clay)로 분류되었다.

3.5 pH

non-bleeding pH strip을 이용하여 코어 시료의 중앙 표

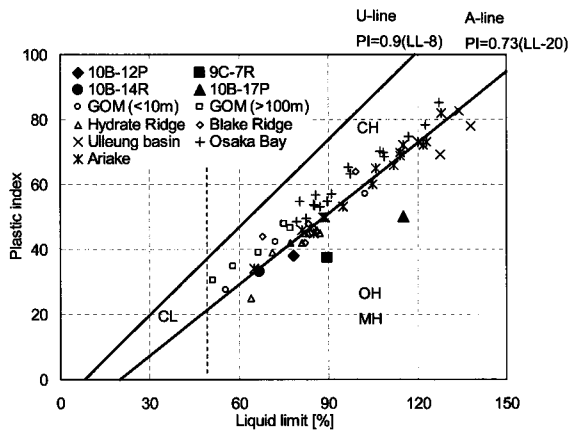
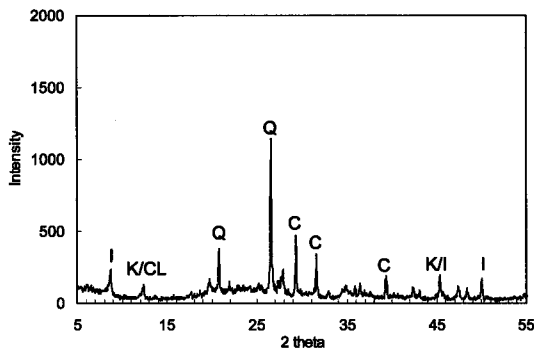
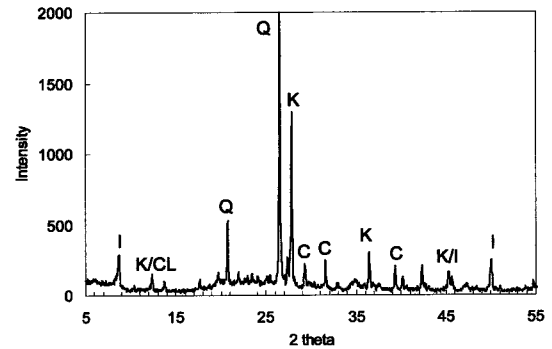


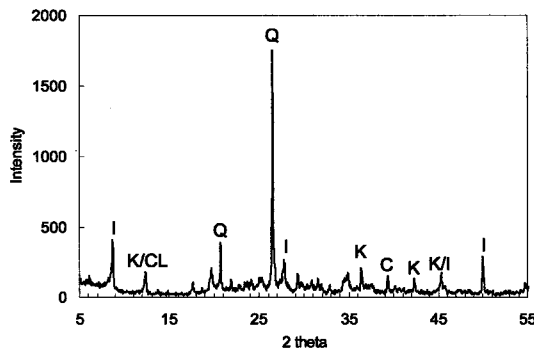
그림 3. 소성도표



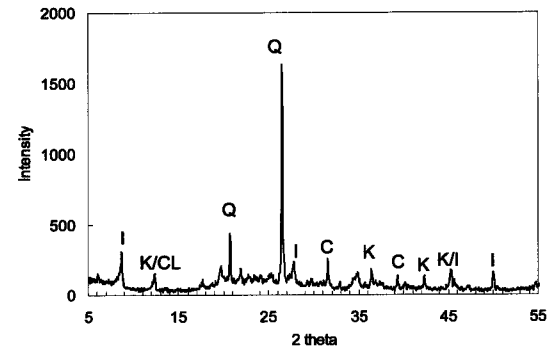
(a)



(b)



(c)



(d)

그림 4. X-ray 분석: (a) 10B-12P; (b) 9C-7R; (c) 10B-14R; (d) 10B-17P. Q=Quartz; K=Kaolinite; I=Illite; C=Calcite; CL=Chlorite

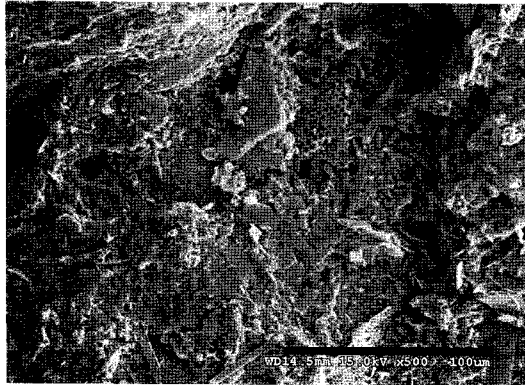
면의 pH를 측정하였다. 10B-14R의 경우 7.5, 10B-17P의 경우 8.5의 pH값을 보였다. 이는 멕시코만과 인도양 시료의 pH와 유사하다(Francisca et al. 2005; Yun et al. 2008a).

4. 광물 특성 및 미세구조 관찰

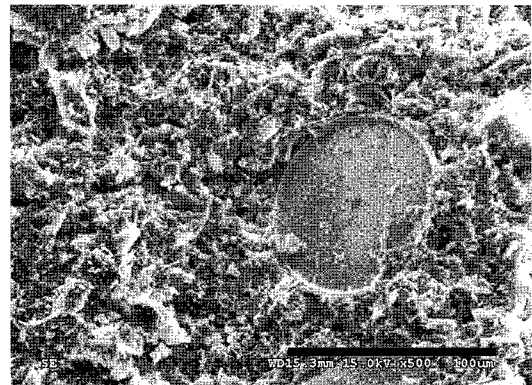
4.1 X-ray 회절(X-ray Diffraction)

시료의 성분 분석을 위하여 XRD 실험을 실시하였다

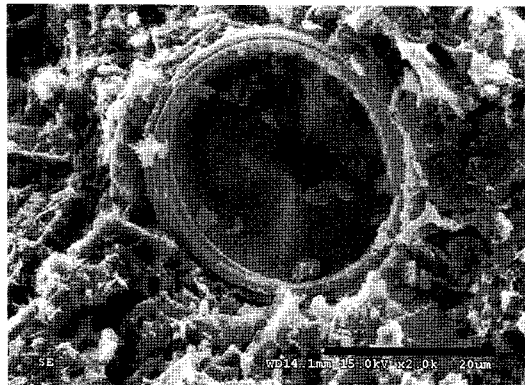
(XPRT MPD, Philips, maximum radiation; 3kW). 0.04°/sec (2θ/sec)의 속도로 5~80°(2θ)까지 실험을 수행하였다. 공기 건조 및 550°C 오븐 건조 분말 시료를 사용하였으며 XRD 실험 결과는 그림 4와 같다. 공기 건조 및 오븐 건조 시료 모두 유사한 결과를 보였다. 그림 4와 같이 모든 시료의 성분 분석 결과는 유사하며, 다량의 점토 광물 및 석영이 주요 구성 물질로 분석되었다. 대표 점토 광물로는 카오리나이트, 일라이트, 크로라이트, 그리



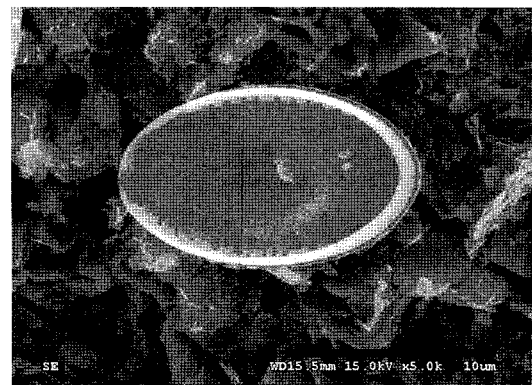
(a) 10B-17P



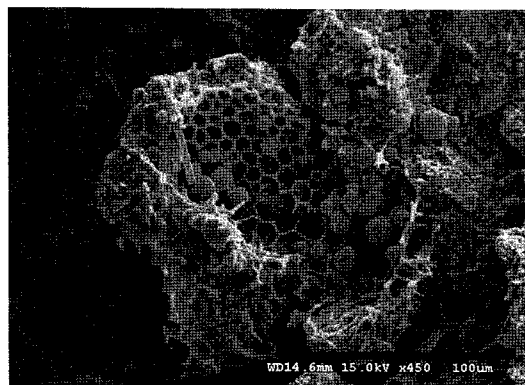
(b) 10B-14R



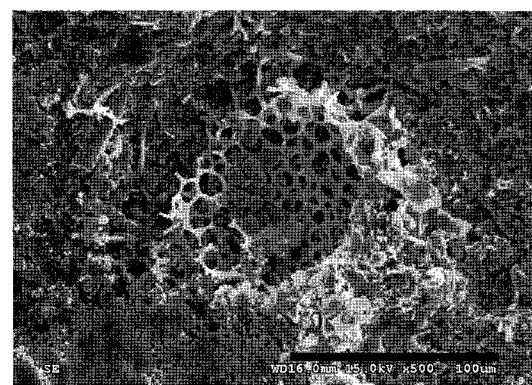
(c) 9C-7R



(d) 10B-12P



(e) 10B-12P



(f) 10B-14R

그림 5. 울릉 분지 심해토의 SEM 이미지: (a) 10B-17P-포괄적인 관찰면 이미지; (b) 10B-14R-Diatom 조각과 완전한 모양의 centric diatom $D \approx 100\mu\text{m}$; (c) 9C-7R-완전한 모양의 centric diatom $D \approx 20\mu\text{m}$; (d) 10B-12P-완전한 모양의 centric diatom $D \approx 10\mu\text{m}$; (e) 10B-12P-Diatom 내부에 자라고 있는 Pyrite crystal; (f) 10B-14R-Diatom 내부에 자라고 있는 Pyrite crystal

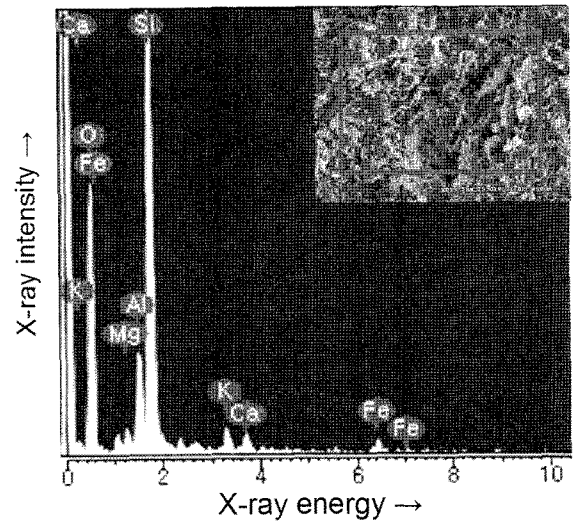
고 켈사이트로 나타났으며, 석영 및 켈사이트 성분은 다량의 microfossil 때문으로 판단된다(Tanaka and Locat 1999). 선행 연구에 의하면 울릉 분지의 이암 및 사암 시료의 점토광물은 일라이트-스멕타이트(illite-smectite), 일라이트 그리고 카오리나이트로 분석 되었으나(Hiller et al. 1996), 본 연구에서는 스멕타이트 성분은 관찰되지 않았다. 대표적 diatomaceous clay인 아리아케 및 오사카만 점토의 주요 점토 광물은 스멕타이트, 크로라이트, 카오리나이트, 그리고 일라이트로 보고되었다(Tanaka and Locat 1999; Tanaka et al. 2001).

4.2 Scanning Electron Microscope(SEM)

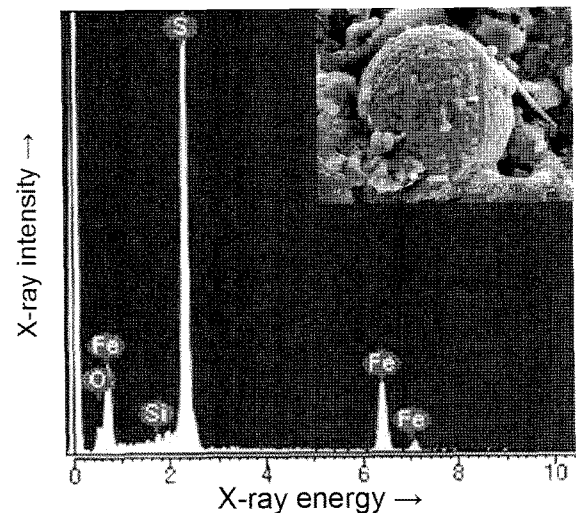
SEM 이미지를 이용하여 시료의 미세구조 및 시료 내 microfossil을 관찰하였다(Hitachi S-4300). 시료는 70℃에서 노건조하였으며, 해상도 증진 및 시료 표면의 전기전도도를 위하여 전도성물질로 시료 표면을 코팅하였다(Mitchell and Soga 2005).

총 36개의 시편을 관찰하였으며, 대표 이미지는 그림 5와 같다. 관찰한 모든 시료 표면의 80%이상이 microfossil로 덮혀 있으며, 부서진 fossil 조각과 점토 광물이 응집되어 시료의 미세구조를 형성하고 있다(그림 5(a) 및 5(b)). 모든 시료에서 다양하고 완벽한 모양의 centric diatom이 관찰되며(그림 5(b), 5(c), 5(d)), centric diatom의 크기는 10~100μm를 보이며 diatom의 크기는 10~150μm로 다양하다. 10~150μm의 크기는 입자 및 공극 크기 분포에 영향을 줄 수 있다. Pyrite crystal 역시 모든 시료에서 관찰되며 그림 5(e) 및 5(f)와 같이 diatom 내부에서 자라기도 한다. Pyrite의 존재는 해저 침전물의 기원을 밝히는 미생물 활동(Rajasekaran 2006)과 관련 있으며, 이 지역의 혐기성 퇴적환경을 암시한다(Kim et al. 2003). Pyrite는 자연스러운 흙의 퇴적구조를 방해하며, 더욱 응집된 조직을 형성한다.

SEM 장비에 부착된 X-ray Energy Dispersive Spectroscopy(EDS-Horiba EX-200 with resolution of 138eV and 10mm²)를 이용하여 선택된 시료의 화학 성분을 분석하여 그림 6에 나타내었다. 그림 6(a)에서와 같이 전체적으로 칼슘(Ca), 칼륨(K), 산소(O), 철(Fe), 마그네슘(Mg), 알루미늄(Al), 그리고 실리카(Si)가 관찰되었다. 높은 에너지의 실리카, 알루미늄, 그리고 산소는 흙 입자에 대한 화학 성분의 결과이며, 철 성분은 pyrite의 존재, 그리고 칼슘(Ca)의 존재는 calcareous fossil, 조개 조각, 그리



(a)



(b)

그림 6. EDS와 SEM 이미지: (a) 시료 9C-7R; (b) 시료10B-14R (framboidal pyrite)

고 점토 입자와 diatom 조각의 약한 고결화를 암시한다. 그림 6(b)에 나타난 바와 같이, Framboidal pyrite의 경우 높은 황(S) 그리고 철(Fe) 성분이 관찰된다. Pyrite 표면에 붙은 흙 입자로 인해 작은 양의 실리카(Si)와 산소(O)가 관찰된다. EDS에 의한 철 및 황의 고함유 역시 혐기성 퇴적환경을 뒷받침한다(Kim et al., 2003).

5. 압밀 특성

5.1 실험 장치 및 과정

그림 7과 같이 1차원 압밀 실험을 실시하여 압축성을 분석하였다. 트리밍 및 시료 추출에 따른 추가적인 시료

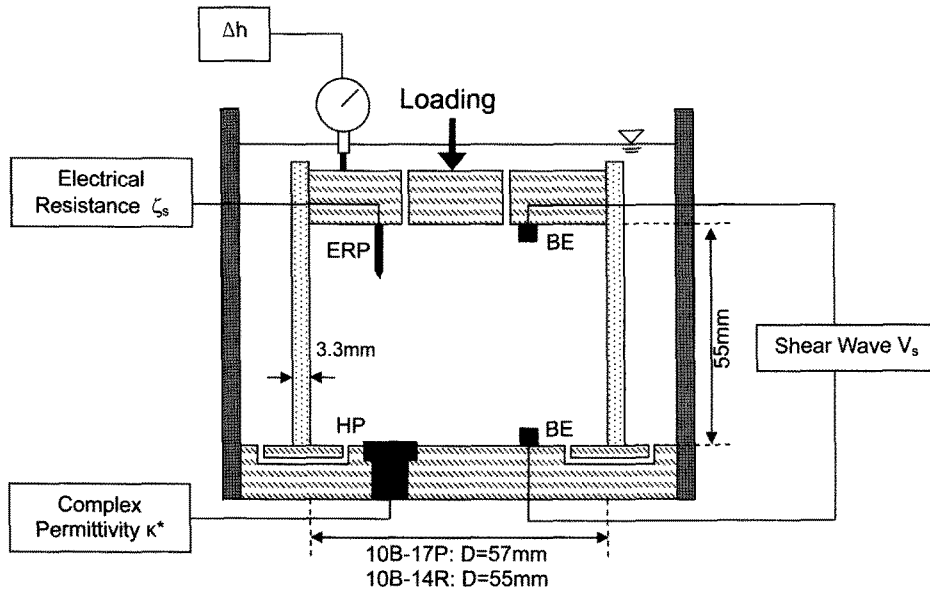


그림 7. Instrumented 압밀셀. 그림 내 ERP, BE, 그리고 HP는 각각 전기비저항 탐침, 벤더 엘리먼트, 그리고 유전율 프로브를 의미함.

교란을 최소화하기 위하여 심해 시료 채취에 사용한 코어 라이너(core liner)를 압밀셀로 사용하였다. 시료의 초기 높이는 55mm로 고정하였다. 두 가지 크기의 코어 라이너의 사용으로 인하여 10B-17P 시료 및 10B-14R 시료의 직경은 각각 57mm, 50mm이다. 시료를 압밀셀에 설치한 후, 간극수의 전기전도도 3.19S/m와 동일한 전기전도도의 전해질 용액으로 포화시켰다. 각 하중 단계는 과잉간극수압의 소산을 위하여 24시간동안 지속하였다. 최대 수직유효응력은 현장 응력 수준을 고려하여 10B-17P의 경우 2.1MPa, 10B-14R의 경우 2.7MPa까지 가하였다.

응력에 따른 전단파 속도 V_s , 전기비저항 ζ , 그리고 유전율 κ^* 측정을 위하여 그림 7과 같이 압밀셀에 벤더 엘리먼트, 전기비저항 탐침, 그리고 유전율 프로브를 설치하였다. 전기비저항 탐침과 유전율 프로브는 국부 전기비저항 및 유전율을 측정하며, 벤더 엘리먼트는 시료 전체의 전단파 속도를 측정한다. 시료의 부피 변화를 관찰하기 위하여 0.001mm 정밀도의 LVDT를 이용하여 침하량을 측정하였다. 침하량은 표준압밀시험(ASTM D2435-04) 시간 간격에 따라 측정하였다. 침하량 측정 후 즉시 전단파 속도, 전기 저항, 그리고 유전율을 측정하였다.

전단파의 발생과 감지를 위하여 토질 실험에 널리 사용되는 벤더 엘리먼트를 사용하였다(Piezo systems PSI5H4E T226-H4-Y). 사용된 벤더 엘리먼트의 크기는 길이 11mm, 너비 5mm, 그리고 두께 0.38mm이며, 시료 내부로 돌출

된 길이는 5mm이다. 신호발생기(Agilent 33220A)를 이용하여 10V_{pp}(preak-to-peak)의 단일정현파를 입력신호로 사용하였다. 수신 벤더 엘리먼트에서 획득된 신호는 전기 신호로 전환된 후, 신호 필터-증폭기(Krohn-Hite 3364)를 거쳐 오실로스코프(Agilent 54624A)를 이용하여 저장하였다. 또한 임의의 부정확한 잡음(random and uncorrected noise)을 제거하기 위하여 1024개의 신호를 평균하였다.

시료의 전기 저항은 동축케이블 형태의 전기비저항 탐침을 이용하여 측정하였다(Cho et al. 2004; Lee et al. 2008). 외부전도체(stainless tube, type 316)와 내부전도체(stainless steel wire)의 직경은 각각 2.108mm, 0.6mm이다. 이중 썸기모양으로 끝단을 연마하였으며, 시료 내부로 관입된 전기비저항 탐침의 길이는 12.5mm이다. LCR metr(INSTEK, LCR-819)를 이용하여 100kHz, 1.275V 조건에서 전기비저항을 측정하였다.

하부 다공판에 설치된 유전율 프로브(Agilent, 85070E dielectric probe kit) 및 high frequency network analyzer(Agilent, E5061A)를 이용하여 시료의 유전율을 측정하였다. 프로브의 직경은 19mm이며 측정 주파수 영역은 200MHz~20GHz이며, 본 연구에서는 high frequency network analyzer의 측정 범위를 고려하여 200MHz~1.5GHz까지의 유전율 스펙트럼을 측정하였다.

5.2 압축성

10B-17P 및 10B-14 두 시료의 수직유효응력에 따른 간

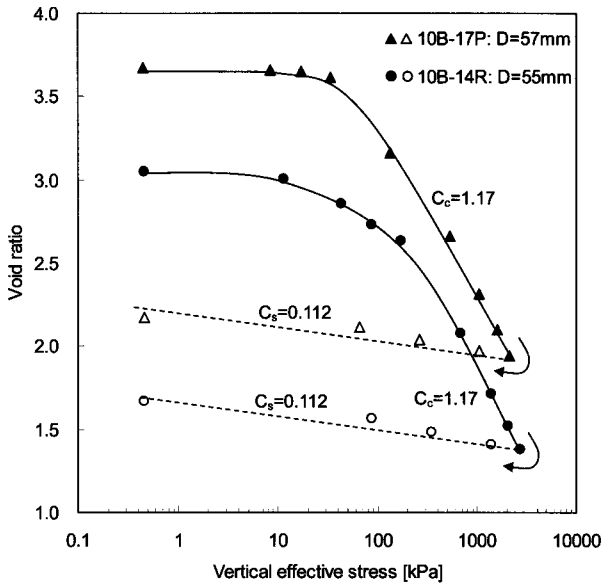


그림 8. 간극비-유효응력 관계

극비의 거동을 그림 8에 나타내었다. 10B-17P 및 10B-14 두 시료는 각각 3.67, 3.05의 높은 초기 간극비를 보이는데 이는 높은 하이드레이트 포화도($S_h = V_h/V_v = V_h/n \cdot V_{specimen}$; 여기서 V_h 는 하이드레이트의 부피, V_v 는 간극의 부피, 그리고 n 은 간극률) 때문으로 판단된다. 수직된 가스의 부피로 추정된 하이드레이트 포화도는 각각 10B-17P의 경우 17.3%, 10B-14R의 경우 11.3%이다(Yun et al. 2008b). 가스생산 실험으로 인해 시료는 정규압밀상태가 되며, 응력-간극비 곡선에서 추정된 항복응력은 10B-17P의 경우 ~80kPa, 10B-14R의 경우 ~180kPa이다. 현장 수직 유효응력이 1MPa이상이며(표 1 참조), diatom 입자의 경우 수직 응력 2.0MPa까지 부서지지 않으므로(Tanaka and Locat 1999; Hong et al. 2006), 추정된 항복응력은 시료의 구조변화에 따른 것으로 판단된다. 압축지수(C_c)는 1.17로 선행 연구 결과 $C_c=1.11 \sim 1.86$ 와 유사한 값을 보이며(Lee et al. 1993), 팽창지수(C_s)는 0.112로 추정되었다. 압밀실험 결과, 현장 유효 상재하중이 1MPa이상 일지라도 심해 시료의 압축성은 상당히 큼을 알 수 있다.

5.3 전기비저항과 전기전도도

전기전도도 ζ 는 전기비저항과 반비례한다. 포화된 흙의 전기전도도 ζ_{mix} 는 간극수의 전기전도도 ζ_{el} , 흙의 간극비 n , 그리고 흙 입자의 표면전도도 λ_{ddl} 의 함수이다. 그러나 바닷물과 같이 높은 전기전도도의 전해질 용액으로 포화된 흙의 입자 표면전도도는 무시 가능하다

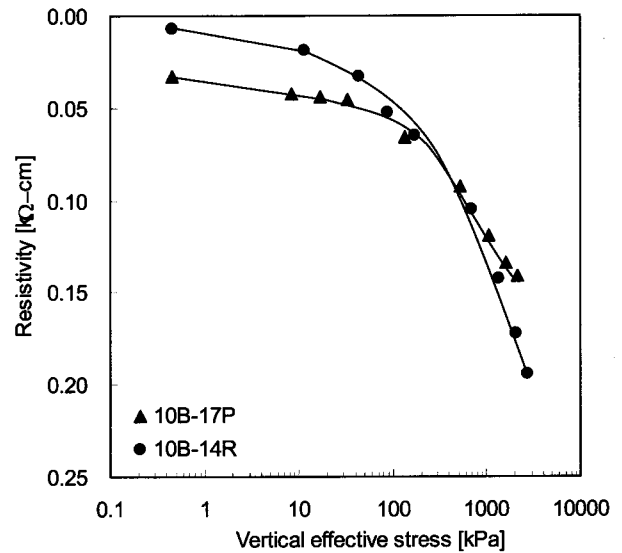


그림 9. 수직 유효 응력에 따른 전기비저항

(Klein and Santamarina 2005). 따라서, 포화된 해저 퇴적토의 전기전도도는 Archie's law(1942)와 같이 표현할 수 있다.

$$\zeta_{mix} = A \cdot \zeta_{el} \cdot n^m \quad (1)$$

여기서, A 와 m 은 상수이다.

수직유효응력이 증가함에 따라 간극비 또는 간극률은 감소하며(그림 8), 식 (1)에서와 같이 전기전도도는 감소하며 반대로 전기비저항은 그림 9와 같이 증가한다. 측정된 전기비저항은 $e\text{-log}(\sigma_v)$ 관계와 유사하게 수직유효응력에 따라 이중 선형관계를 보인다.

5.4 유전율

유전율은 간극비, 함수비, 간극수의 특성, 입자의 비표면적, 광물학적 특성, 그리고 흙 구조를 반영한다. Microwave 주파수(MHz~GHz)에서 포화된 흙의 유전율 실수 부분 κ' 는 물 분자의 극화(polarizability)에 지배 받으며, 허수 부분 κ'' 은 함수비에 영향을 받는다(Santamarina et al. 2001). 허수 유전율 κ'' 은 극화(polarization)와 전도(conduction)로 인한 손실(loss)를 반영하며, 전기전도도는 허수부로부터 $\zeta_{eff} = \kappa'' \epsilon_0 \omega$ 와 같이 계산할 수 있다. 여기서 ϵ_0 는 자유공간(free space)의 유전율($8.85 \times 10^{-12} C^2 N^{-1} m^{-2}$), ω 는 각속도($=2\pi f$)이다.

각 하중 단계별 유전율 스펙트럼을 그림 10에 나타내었다. 동일한 응력 수준에서 자유 물분자(free water)의

극화로 인하여 주파수에 따라 실수 유전율은 감소하며, 전기전도도는 증가한다. 그림 11에 재하 및 제하동안 1GHz 주파수에서의 유효응력에 따른 실수 유전율 및

전기전도도의 변화를 나타내었다. 시료별로 다른 하이 드레이트 포화도(10B-17P: 17.3%; 10B-14R: 11.3%)로 인하여 서로 다른 초기 유전율 및 전기전도도 값을 보인

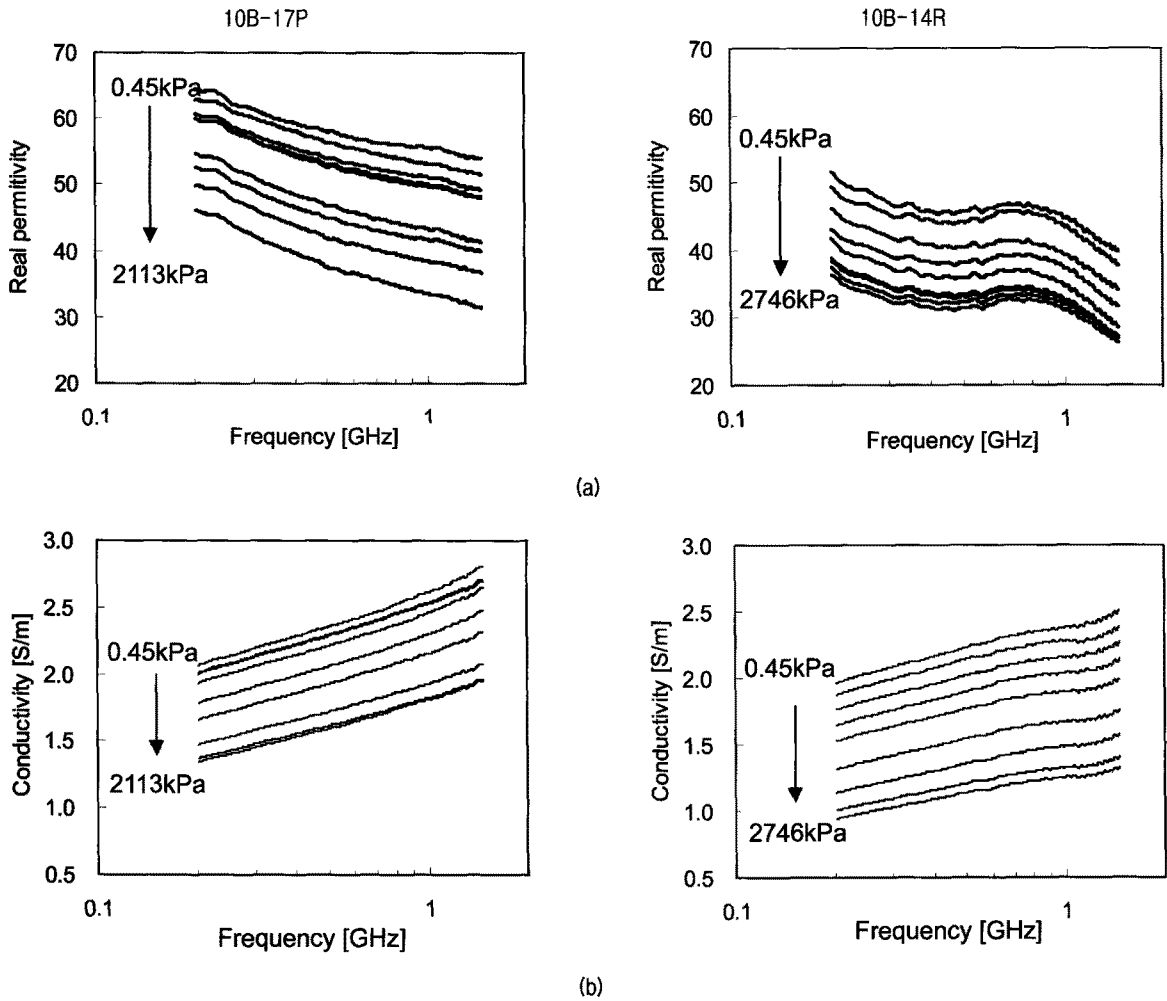


그림 10. 재하과정동안 유전율 스펙트럼 변화: (a) 실수 유전율; (b) 전기전도도

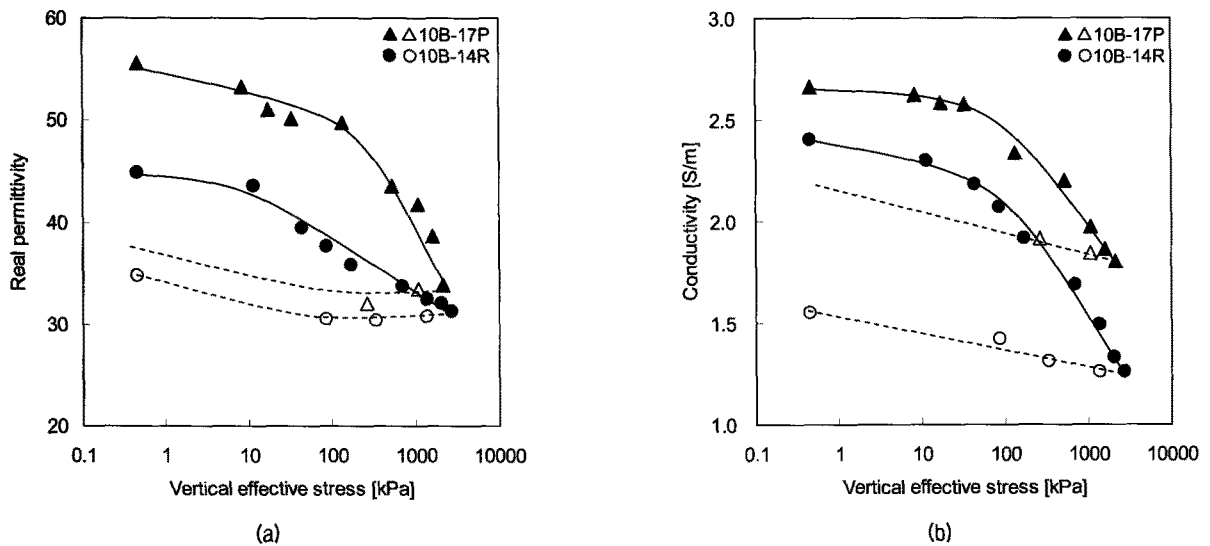


그림 11. 재하 및 제하동안 1GHz에서의 수직 유효 응력에 따른 실수 유전율 및 전기전도도: (a) 실수 유전율; (b) 전기전도도

다. 10B-17P의 높은 초기 실수 유전율은 높은 하이드레이트 포화도에 따른 큰 간극비 또는 간극률 때문이다. 수직유효응력이 증가함에 따라 간극률 감소, 이에 따라 자유 물분자의 체적이 감소하여 실수 유전율 및 전기전도도는 감소한다. $\kappa' \cdot \log \sigma'_v$ 및 $\zeta_{eff} \cdot \log \sigma'_v$ 의 경향은 $e \cdot \log \sigma'_v$ 의 관계와 유사한 경향을 보이며, 실수 유전율 및 전기전도도의 감소량은 수직유효응력이 항복응력을 넘어서면 더 커진다.

5.5 전단파 속도 및 전단탄성계수

비고결화된 흙의 전단파 속도는 유효응력에 따른 강성의 지배를 받으며 전단파 속도와 유효응력 사이의 관계는 거듭제곱형태로 다음과 같이 표현할 수 있다(Hardin and Richart 1963; Santamarina et al. 2001)

$$V_s = \alpha \left(\frac{\sigma'_o}{kPa} \right)^\beta \quad (2)$$

여기서, σ'_o =평균유효응력, α 및 β 는 실험적으로 결정되는 상수이다. α 계수는 1kPa에서의 전단파 속도, β 지수는 유효응력의 변화에 따른 전단파 속도의 민감도를 의미한다.

측정된 전단파 신호로부터 계산한 전단파 속도를 수직유효응력에 따라 그림 12(a)에 나타내었다. 전단파 속도는 수직유효응력의 증가에 따라 증가하였으며, 항복 이후 β 지수는 10B-17P의 경우 0.41, 10B-14R의 경우 0.35로 나타났다. 점토의 경우 소성지수가 클수록 높은

β 지수를 가진다. 횡방향 응력 구속현상으로 인하여 제하시 전단파 속도는 재하과정보다 더 높은 값을 보인다. 전단파 속도-수직유효응력 관계의 기울기는 post-yield 구간보다 pre-yield 구간에서 더 작으며, 두 구간은 선형 압밀하중 또는 항복응력으로 구분된다(Lee et al. 2008). 전단파 속도-수직유효응력 관계의 기울기로부터 구한 항복응력은 10B-17P의 경우 약 40kPa, 10B-14R의 경우 약 110kPa로 $e \cdot \log \sigma'_v$ 의 관계로부터 추정된 항복응력보다 작은 값이 얻어졌다. 이와 같은 이유는 전단파는 압밀 과정동안 발생하는 입자 미끄러짐과 회전 등으로 인한 흙 구조의 변화 및 접촉 특성을 반영하기 때문이다. 전단탄성계수의 변화는 접촉 특성 뿐만 아니라 흙 구조의 변화 역시 반영한다. 그림 12(b)는 수직유효응력에 따른 전단탄성계수의 변화를 표시하였다. 재하과정동안 전단탄성계수는 수직유효응력의 증가에 따라 증가하였으며, $e \cdot \log \sigma'_v$ 의 관계와 유사하게 이중선형거동을 보였다.

6. 강도특성

직접전단실험을 이용하여 10B-17 시료의 강도 특성을 평가하였다. 코어 라이너로부터 시료를 추출하여 전단상자에 위치 시킨 후, 전해질 용액으로 24시간동안 포화시켰다. 현장유효응력을 고려하여 수직응력을 정하고 가한 수직응력이 유효응력으로의 전환을 위하여 24시간동안 압밀시켰다. 수평 변형율은 1mm/min을 적용하였으며, 횡방향 변형을 최대 17%까지 실험하였다.

직접전단실험에서 얻은 횡방향 변형에 따른 전단응

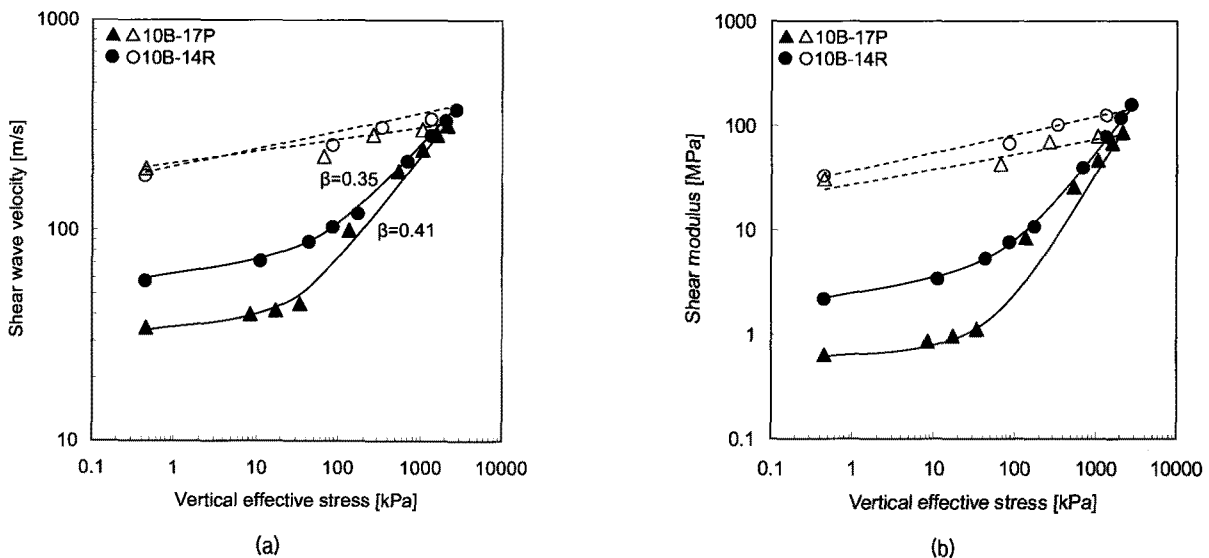


그림 12. 수직 유효응력에 따른 전단파 속도 및 전단탄성계수: (a) 전단파 속도; (b) 전단탄성계수

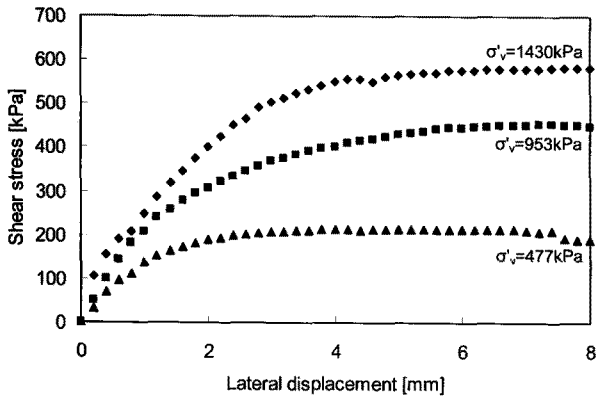


그림 13. 횡방향변형에 따른 전단응력

력을 그림 13에 나타내었다. 모든 수직응력수준에서 전단응력은 최대값에 도달한 후 변형을 경화현상(strain hardening)을 보였다. 실험결과로부터 계산된 마찰각은 약 21°로 삼축실험으로부터 얻은 선행연구결과 18~23°와 비슷하였다(Lee et al. 1993).

7. Microfossil에 따른 심해토의 지반공학특성

일반적으로 흙 구조는 입자 배열, 입자 그룹(group), 그리고 공극의 크기 등에 의해 영향을 받는다. 흙 구조는 크기에 따라 microfabric, minifabric, 그리고 macrofabric으로 구분할 수 있으며, 흙의 거동 및 특성은 이러한 흙 구조에 따라 달라진다(Mitchell and Soga 2005).

일반적으로 fossiliferous soil은 inter-aggregate, intra-aggregate, skeletal, 그리고 intra-skeletal의 공극을 가진다(Tanaka and Locat 1999). 울릉 분지의 시료 역시 SEM에 의한 미세구조 관찰에서 벌집 구조의 모양 입자와 큰 내부 공극으로 확인할 수 있으며, 잘 발달된 inter-또는 intra-aggregated 공극을 확인할 수 있었다. Diatom은 이러한 큰 내부 공극으로 인한 큰 수분 함유 능력과 특이한 모양으로 인하여 액소성 한계와 압축성에 영향을 미친다. 특히 diatom은 미세구조 내부에 상당한 양의 물을 포함할 수 있어 함수비와 연관이 있는 다양한 기본 토성에 영향을 준다. 예를 들어, 순수한 diatom은 비소성(non-plastic) 물질임에도 불구하고 시료 내부의 diatom 함유량이 증가할수록 액소성 한계와 소성한계는 증가한다(Tanaka and Locat 1999).

Diatom의 함유는 토질점수의 추정을 위해 잘 알려진 경험식의 사용 역시 어렵게 한다. 두 시료에 대하여 측정된 압축지수 및 팽창지수는 각각 1.17 및 0.112이다. 두 시료는 서로 다른 액소성 한계를 가지며, Terzaghi

및 Peck(1967)에 의해 제안된 $C_c=0.009(LL-10)$, 또는 Sridharan 및 Nagaraj(2000)에 의해 제안된 $C_c=a(LL-b)$, $0.0046<a<0.009$, $8<b<12$ 두 경험식에 의해 추정된 압축지수는 0.4~0.95의 범위로 측정된 값과 상당한 차이를 보인다. 또한, Terzaghi and Peck(1967)이 제안한 $C_s=0.0463(LL/100)G_s$ 및 순수한 점토에 대해 Kulhawy and Mayne(1990)이 제안한 $C_s=PI/385$ 의 경험식으로 추정된 팽창지수 역시 0.082~0.088(10B-14R), 0.13~0.169(10B-17P)로 측정값과 차이를 보인다. 측정된 압축지수의 경우 경험식으로 추정한 값의 상한값보다 더 큰 값을 보였으며, 팽창지수의 경우 경험식의 하한값을 보였다. Diatom으로 인한 상대적으로 큰 액소성 한계 및 소성한계와 작은 입자 크기 및 비표면적은 흙의 분류 및 점토의 활성도 판단을 어렵게 한다. 일반적으로 Diatom의 크기는 실트 크기를 가지며, 비표면적으로는 카오리나이트로 추정된다. 그러나 압축지수로 유추한 점토광물은 일라이트($0.50<C_c<1.10$)로 추정된다. 따라서, diatom이 함유된 해저 지반 시료에 대하여 각종 토질 특성 파악을 위하여 일반적인 경험식의 사용은 상당한 주의를 요한다.

Diatom이 전단파 속도에 미치는 영향은 아직 불명확한 것으로 알려져 있다. diatom의 존재가 자유 물분자의 함량과 상당한 영향 관계를 가지므로 시료의 유전율에는 상당한 영향을 미칠 것으로 판단된다.

8. 요약 및 결론

동해, 울릉 분지 해수면 2100m, 해저 110m 깊이에서 획득된 압력 코어 중 감압 실험 후 압력보존 용기에서 회수된 4개의 시료를 이용하여 지반공학특성 파악을 위한 실내 토성실험, 광물학적 특성 및 미세 구조 파악을 위한 X-ray 분석 및 SEM을 실시하였다. 또한 압밀 특성 파악을 위하여 2개의 코어 시료에 대하여 압밀 실험을 실시하였다. 여러가지 센서가 설치된 압밀셀을 이용하여 압밀실험동안 수직 유효응력에 따른 전단파 속도, 전기비저항, 그리고 유전율을 측정하였다. 또한 직접전단실험을 실시하여 강도특성을 조사하였다.

시료는 액소성한계에 따라 MH 또는 OH로 분류되었으며, 약 21~31m²/g의 비표면적을 보였다. XRD 실험 결과, 주요 점토 광물은 일라이트, 카오리나이트, 크로라이트, 그리고 켈사이트로 나타났으며, SEM 결과 관찰된 시료 표면의 약 80%이상이 diatom으로 덮혀 있음을 알 수 있었다. 관찰된 diatom의 크기는 입자 및 공극 크

기에 영향을 미칠 수 있을 정도로 판단되었다. 가스생산 실험에 따른 하이드레이트의 소산으로 인하여 상당히 큰 초기 간극비를 가지는 것으로 나타났다. 수직유효응력의 증가에 따라 전단파 속도, 전기비저항은 증가하는 반면에 실수 유전율 및 전기전도도는 감소하였다. 전단파 속도와 전기비저항, 유전율, 그리고 전기전도도는 간극비의 거동과 유사하게 수직유효응력에 따라 이중선형관계를 보였다. 직접전단실험으로 얻은 마찰각은 약 21°로 계산되었다.

Diatom 내·외부의 잘 발달된 공극 내부의 물은 액소성한계 등의 함수비와 관련된 토질 특성 및 압축성에 영향을 미친다. 또한 다양한 토질 정수 추정을 위한 경험식의 적용 역시 어렵게 만든다. 최근 석유, 천연가스, 하이드레이트 등의 에너지 탐사를 위해 증가하고 있는 해저 탐사 및 새로운 지반 공학적 영역의 확대를 위하여 상당량의 diatom이 포함된 해저 심해토의 거동에 대한 새로운 이해가 필요할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2008년도 한국지질자원연구원의 가스하이드레이트 연구개발 사업(NP2008-003)의 리하이대학교에 대한 연구지원과 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국학술진흥재단의 지원을 받아 수행된 연구(KRF-2008-357-D00271)임을 밝히며 깊이 감사 드립니다.

참 고 문 헌

1. Archie, G. E. (1942), "The electrical resistance log as an aid in determining some reservoir characteristics", *Transactions of the American Institute of Mining, Metallurgical, and Petroleum Engineers*, 146, 54-62.
2. Bahk, J. J., Chough, S. K. and Han, S. J. (2000), "Origins and paleoceanographic significance of laminated muds from the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)", *Marine Geology*, 162, 459-477.
3. Baraza, J., Ercilla, G., and Lee, H. J. (1992), "Geotechnical properties and preliminary assessment of sediment stability on the continental slope of the northwestern Alboran Sea", *Geo-Marine Letter*, 12, 150-156.
4. Buchan, S. and Smith D. T. (1999), "Deep-sea sediment compression curves: some controlling factors, spurious overconsolidation, predictions, and geophysical reproduction", *Marine Georesources and Geotechnology*, 17, 65-81.
5. Cha, H. J., Choi, M. S., Lee, C. B., and Shin, D. H. (2007), "Geochemistry of surface sediments in the southwestern East/Japan Sea", *Journal of Asian Sciences*, 29, 685-697.
6. Cho, G. C., Lee, J. S., and Santamarina, J. C. (2004), "Spatial variability in soils: High resolution assessment with electrical needle probe", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, ASCE, 130(8), 843-850.
7. Chough, S. K., Jeong, K. S., and Honza, E. (1985), "Zoned facies of mass-flow deposits in the Ulleung (Tsushima) Basin, East Sea (Sea of Japan)", *Marine Geology*, 65, 113-135.
8. Francisca, F., Yun, T. S., Ruppel, C., and Santamarina, J. C. (2005), "Geophysical and geotechnical properties of near-seafloor sediments in the northern Gulf of Mexico gas hydrate province", *Earth and Planetary Science Letters*, 237, 924-939.
9. Grupe, B., Becker, H., and Oebius, H. U. (2001), "Geotechnical and sedimentological investigations of deep-sea sediments from a manganese nodule field of the Peru Basin", *Deep-Sea Research II*, 48, 3593-3608.
10. Hardin, B.O. and Richart, F. E. (1963), "Elastic wave velocities in granular soils", *Journal of Mechanical and Foundation Division*, 89(1), 33-65.
11. Hillier, S., Son, B. K., and Velde, B. (1996), "Effects of hydrothermal activity on clay mineral diagenesis in Miocene shales and sandstones from the Ulleung (Tsushima) back-arc basin, East Sea (Sea of Japan), Korea", *Clay Minerals*, 31, 113-126.
12. Hong, Z., Tateishi, Y. and Han, J. (2006), "Experimental study of macro- and microbehavior of natural diatomite", *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 132(5), 603-610.
13. Keller, G. H. (1982), "Organic matter and geotechnical properties of submarine sediments", *Geo-Marine Letter*, 2, 191-198.
14. Kim G. Y. and Kim D. C. (2001), "Comparison and correlation of physical properties from the plain and slope sediments in the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)", *Journal of Asian Earth Sciences*, 19, 669-681.
15. Kim, I. S., Park, M. H., Lee, Y., Ryu, B. J., and Yu, K. M. (2003), "Geological and geochemical studies on the late quaternary sedimentary environment of the southwestern Ulleung Basin, East Sea", *Economic and Environmental Geology*, 36(1), 9-15.
16. Klein, K. and Santamarina, J. C. (2005), "Behavior of very soft sediments: Wave-based monitoring", *International Journal of Geomechanics*, ASCE, 5(2), 147-157.
17. Kulhawy, F. H. and Mayne, P. W. (1990), Manual on estimating soil properties for foundation design, final Report, Project 1493-6, EL-6800, Electric Power Research Institute, Palo Alto, CA.
18. Kwon, Y. K. and Bahk, J. J. (2008), Mass failure and mass flow deposits in the Ulleung Basin and Korea Plateau, East Sea: a Brief Review.
19. Lee, C., Lee, J. S., Lee, W., and Cho, T. H. (2008), "Experiment setup for shear wave and electrical resistance measurements in an oedometer", *Geotechnical Testing Journal*, 31(2), 149-156.
20. Lee, G. H. and Kim, B. (2002), "Infill history of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan) and implications on source rocks and hydrocarbons", *Marine and Petroleum Geology*, 19, 829-845.
21. Lee, H. and Baraza, J. (1999), "Geotechnical characteristics and slope stability in the Gulf of Cadiz", *Marine Geology*, 155, 173-190.
22. Lee, H. J., Chun, S. S., Yoon, S. H., and Kim, S. R. (1993), "Slope stability and geotechnical properties of sediment of the southern margin of Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)", *Marine Geology*, 110, 31-45.
23. Lee, H. J., Chough, S. K., and Yoon, S. H. (1996), "Slope-stability change from late Pleistocene to Holocene in the Ulleung Basin,

- East Sea (Japan Sea)", *Sedimentary Geology*, 104, 39-51.
24. Locat, J. and Tanaka, H. (2001), "A new class of soils: Fossiliferous soils?" Proceedings of the 15th International Conference on Soil Mechanics & Geotechnical Eng., Istanbul, Turkey. pp.2295-2300
 25. Mitchell, J. K. and Soga, K. (2005), Fundamentals of soil behavior. John Wiley and Sons. New Jersey.
 26. Park, M. H., Kim, I. S., and Shin, J. B. (2003), "Characteristics of the late Quaternary tephra layers in the East/Japan Sea and their new occurrences in western Ulleung Basin sediments", *Marine Geology*, 202, 135-142.
 27. Park, M. H., Kim, J. H., and Kil, Y. W. (2007), "Identification of the late Quaternary tephra layers in the Ulleung Basin of the East Sea using geochemical and statistical methods", *Marine Geology*, 244, 196-208.
 28. Rajasekaran, G. (2006), "Influence of microfossils and pyrites on the behavior of oceanbed sediments", *Ocean Engineering*, 33, 517-529.
 29. Ryu, E., Yi, S., and Lee, S. J. (2005), "Late Pleistocene-Holocene palenvironmental changes inferred from the diatom record of the Ulleung Basin, East Sea (Sea of Japan)", *Marine Micropaleontology*, 55, 157-182.
 30. Santamarina, J. C., Klein, K. A., and Fam, M. A. (2001), Soils and Waves - Particulate Materials Behavior, Characterization and Process Monitoring. John Wiley and Sons, New York.
 31. Shiwakoti, D. R., Tanaka, H., Tanaka, M., and Locat, J. (2002), "Influence of diatom microfossils on engineering properties of soils", *Soils and Foundations*, 42(3), 1-17.
 32. Sridharan, A. and Nagaraj, H.B. (2000), "Compressibility behaviour of remoulded, finegrained soils and correlation with index properties", *Canadian Geotechnical Journal*, 37(3), 712-722.
 33. Tanaka, H. and Locat, J. (1999), "A microstructural investigation of Osaka Bay clay: the impact of microfossils on its mechanical behavior", *Canadian Geotechnical Journal*, 36, 493-508.
 34. Tanaka, H., Locat, J., Shibuya S., Soon, T. T., and Shiwakoti, D. R. (2001), "Characterization of Singapore, Bangkok, and Ariake calys", *Canadian Geotechnical Journal*, 38, 378-400.
 35. Terzaghi, K. and Peck, R. B. (1967), Soil mechanics in engineering practice. John Wiley and Sons.
 36. Yun, T. S., Narsilio, G. A., and Santamarina, J. C. (2006), "Physical characterization of core samples recovered from Gulf of Mexico", *Marine and Petroleum Geology*, 23, 893-900.
 37. Yun, T. S., Fratta, D., and Santamarina, J. C. (2008a), "Hydrate bearing sediments from the Krishna-Godavari Basin: physical characterization of pressure cores and production test", *Marine geology* (submitted).
 38. Yun, T. S., Santamarina, J. C., Lee, J. S., and Lee, C. (2008b), "Physical characterization of hydrate bearing sediments from Korea UBGH01 expedition", Final Report, Lehigh University.

(접수일자 2009. 1. 29, 심사완료일 2009. 6. 11)